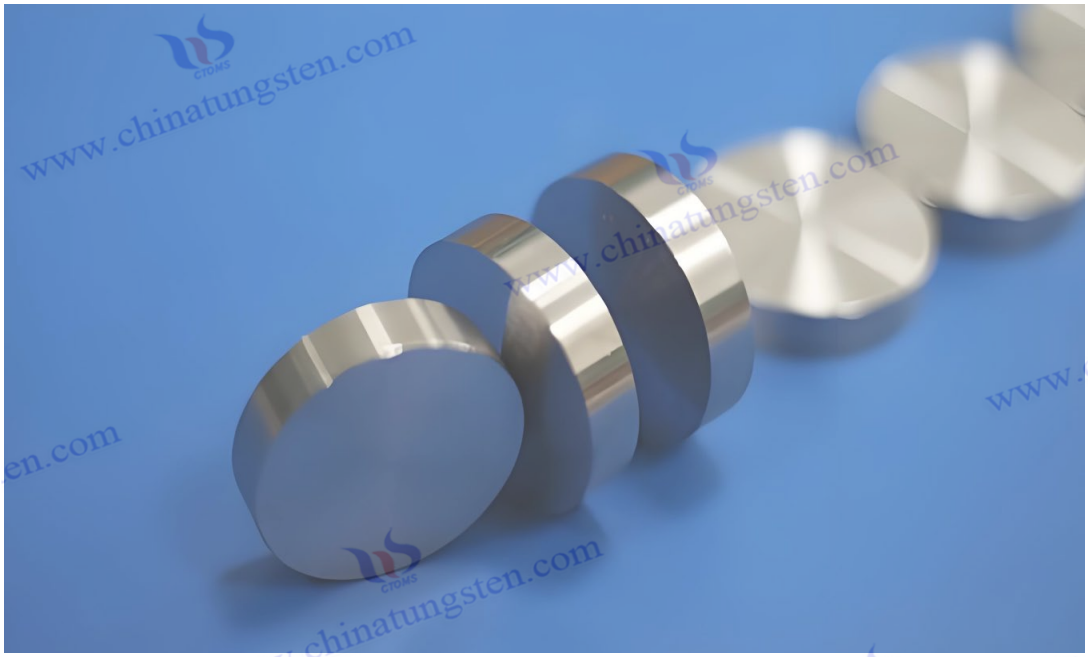


钨合金配重核心 Q&A 50 题

一、基础认知与核心搜索词

Q1 什么是钨合金配重？
Q2 钨合金配重主要用于哪些领域？
Q3 为什么钨合金适合制作配重？
Q4 钨合金配重的密度通常是多少？
Q5 钨合金配重为什么可以缩小体积？
Q6 钨合金配重与钢配重有什么区别？
Q7 钨合金配重与铅配重有什么区别？
Q8 钨合金配重与纯钨相比有哪些优势？

二、密度、重量与计算

Q9 钨合金配重的密度如何计算？
Q10 钨合金配重的重量如何计算？
Q11 已知密度和体积如何计算钨合金配重重量？
Q12 10 克钨合金配重需要多大体积？
Q13 100 克钨合金配重需要多大体积？
Q14 1 公斤钨合金配重需要多大体积？
Q15 17.5 g/cm³和 18.0 g/cm³钨合金有什么区别？
Q16 18.0 g/cm³和 18.5 g/cm³钨合金有什么区别？

三、材料选择

Q17 钨合金配重通常由哪些元素组成？
Q18 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）是什么材料？
Q19 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）是什么材料？

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Q20 W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 有什么区别？
Q21 钨含量对钨合金配重有什么影响？
Q22 高密度钨合金配重一定更好吗？

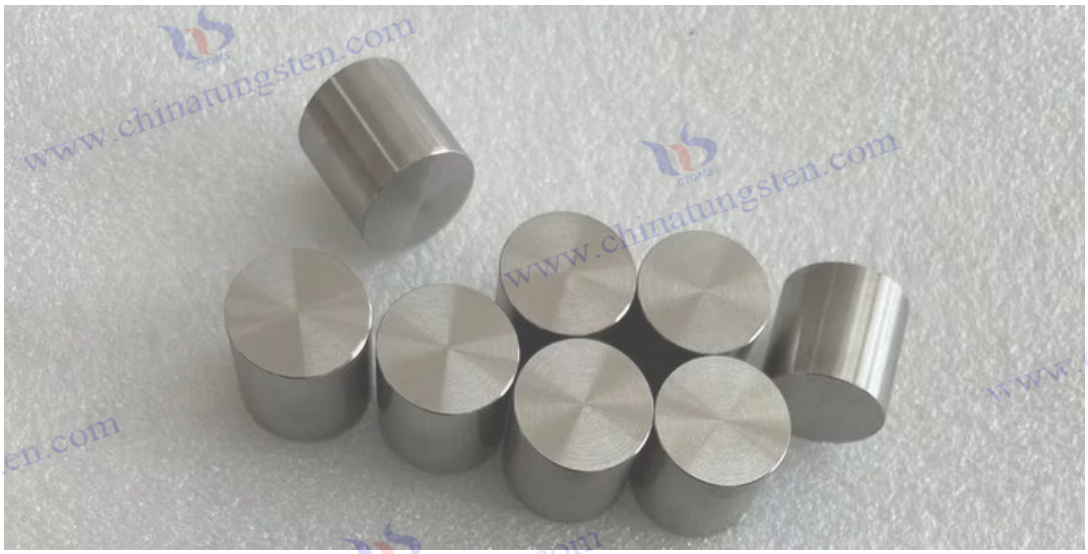
四、价格、采购与定制
Q23 钨合金配重多少钱一公斤？
Q24 钨合金配重为什么价格高于钢配重？
Q25 钨合金配重价格主要受哪些因素影响？
Q26 钨合金配重密度越高价格越高吗？
Q27 小批量钨合金配重为什么单价较高？
Q28 大批量采购钨合金配重如何降低成本？
Q29 钨合金配重定制需要提供哪些图纸信息？
Q30 钨合金配重询价需要提供哪些技术参数？
Q31 钨合金配重如何比较不同供应商报价？
Q32 如何选择钨合金配重 OEM（Original Equipment Manufacturer，原始设备制

五、加工与制造
Q33 钨合金配重是如何制造出来的？
Q34 钨合金配重为什么通常采用粉末冶金？
Q35 钨合金配重可以车削吗？
Q36 钨合金配重可以铣削吗？
Q37 钨合金配重可以钻孔吗？
Q38 钨合金配重可以攻螺纹吗？
Q39 钨合金配重为什么容易磨损刀具？
Q40 钨合金配重加工如何控制尺寸公差？

六、汽车、航空与旋转机械
Q41 汽车为什么使用钨合金配重？
Q42 钨合金曲轴配重有什么作用？
Q43 赛车为什么使用钨合金配重？
Q44 飞机为什么使用钨合金配重？
Q45 飞机控制面为什么需要钨合金配重？
Q46 无人机为什么使用钨合金配重？
Q47 钨合金配重如何用于工业转子？
Q48 钨合金配重如何进行动态平衡测试？

七、消费电子、体育与民用
Q49 手机为什么使用钨合金振动配重？
Q50 高尔夫球杆为什么使用钨合金配重？

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



钨合金配重高流量核心 Q&A 50 题

一、关于高密度钨合金配重的基础认知

1. 什么是高密度钨合金配重

高密度钨合金配重，是以钨（W，Tungsten）为主要组成元素，通过加入镍（Ni，Nickel）、铁（Fe，Iron）、铜（Cu，Copper）等金属形成的钨基重合金，用于向机械系统、电子设备、交通工具、航空航天装备及精密仪器提供经过计算和控制的质量。它与普通意义上的金属块并不完全相同。配重件的核心任务并不是单纯增加设备重量，而是把一定质量放置在指定位置，使整个系统的质量分布达到设计要求。因此，配重设计通常同时涉及质量、重心、力矩、转动惯量、动态平衡以及安装空间等参数。高密度钨合金的优势恰恰在于能够用较小的体积获得较大的质量。公开资料显示，工程应用中的高密度钨合金通常可以达到约 16.5～19.0 g/cm³，不同材料体系、钨含量和制造工艺会造成实际密度差异。

从产品形态来看，高密度钨合金配重可以加工成圆柱、圆盘、环形件、块状件、板状件、异形件、带孔配重、带螺纹配重以及嵌入式配重等。实际形状通常不是由材料本身决定，而是由设备的安装空间和质量分布要求决定。

2. 为什么钨合金特别适合做配重

高密度钨合金用于配重，最核心的优势可以概括为高密度、小体积和可精密加工。普通钢的密度通常约为 7.8 g/cm³，而高密度钨合金可以达到约 17～18.5 g/cm³甚至更高。因此，在相同质量条件下，钨合金配重的体积可以显著缩小。例如，一个质量为 1 kg 的配重，如果材料密度为 18 g/cm³，其理论体积约为：

$$V = m/\rho = 1000/18 \approx 55.6\ cm^3$$

如果采用密度约 7.85 g/cm³ 的钢材，则：

$$V \approx 1000/7.85 \approx 127.4\ cm^3$$

两者实现相同质量时，体积相差超过一倍。这就是钨合金配重最重要的工程价值：当设备内部空间有限时，不需要为了获得足够质量而增加一个很大的钢制配重块。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

3. 高密度到底意味着什么

密度是理解钨合金配重的第一基础参数。密度 ρ（Density，密度）定义为单位体积材料所具有的质量，其基本关系式为 ρ=m/V，其中 m（Mass，质量）表示配重质量，V（Volume，体积）。对于配重设计而言，可以进一步得到：

$$m=\rho V$$

也就是说，在体积已经确定的情况下，提高材料密度就能够增加配重质量；反过来，在目标质量确定的情况下，提高密度就可以减少所需体积。例如：

10 g 钨合金配重，在 18 g/cm³ 密度下体积约为 0.556 cm³；

100 g 配重体积约为 5.56 cm³；

1 kg 配重体积约为 55.6 cm³。

这类计算对于产品设计非常重要，因为工程师通常不是先决定一个配重块多大，而是先知道需要增加多少质量，然后反向计算材料体积，再根据设备空间设计最终结构。

4. 高密度钨合金与纯钨不是同一种材料

很多初次接触钨配重的人容易把纯钨和钨合金混为一谈。纯钨（W，Tungsten）具有非常高的熔点、密度和高温稳定性，但纯钨材料存在较高的加工难度和脆性问题。因此，工业配重领域大量采用钨重合金，而不是直接使用纯钨。钨重合金通过钨颗粒与粘结相金属形成复合材料体系，使材料在保持高密度的同时，获得更适合工程制造的机械性能和加工性能。目前常见的配重材料体系主要包括：

W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）；

W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）。

公开产品资料显示，这两类材料均被用于振动电机、手机、电动牙刷、按摩设备、高尔夫、渔具、车辆等配重场景。

5. W-Ni-Fe 配重有什么特点

W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）是高密度钨合金配重中非常常见的一类材料。其基本结构可以理解为高比例钨颗粒构成主要质量基础，而镍、铁形成粘结相。通过粉末冶金（PM，Powder Metallurgy）及液相烧结等工艺，可以形成具有较高密度和较好综合机械性能的材料。W-Ni-Fe 通常适合对强度、韧性以及机械加工性能具有一定要求的配重结构，例如汽车配重、航空配重、工业转子平衡件、精密机械配重等。此外，W-Ni-Fe 通常具有一定磁性，因此如果配重安装在磁传感器、磁罗盘或磁场高度敏感的设备附近，就不能只考虑密度，还需要评估材料磁性能。

6. W-Ni-Cu 配重有什么特点

W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）则采用镍、铜作为主要粘结相。与 W-Ni-Fe 相比，W-Ni-Cu 的重要特点之一是通常具有较低的磁响应或近似非磁特征，因此在某些对磁场干扰敏感的设备中更有价值。公开技术资料也将其用于陀螺仪、磁敏感设备等场景。因此，W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 并不是简单的谁更好，而是根据应用环境进行选择。如果主要考虑机械强度、韧性、成本和常规结构配重，W-Ni-Fe 往往是重要候选材料；如果设备对磁性能有严格要求，则 W-Ni-Cu 可能更加合适。

7. 密度越高是不是越好

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

高密度确实可以进一步缩小配重体积，但随着钨含量提高，材料的机械性能、加工难度、成本以及烧结工艺要求也会发生变化。例如，在设备内部只有极小空间时，18.0～18.5 g/cm³ 的材料可能具有明显价值；但如果安装空间足够，那么为了从 17.5 g/cm³ 提升到 18.5 g/cm³ 而承担更高材料和加工成本，未必具有同等的工程收益。因此，高密度配重真正需要优化的是：

目标质量、安装空间、材料密度、结构尺寸、机械强度、加工精度、磁性能、表面处理、成本以及使用环境。换句话说，合理的配重设计通常是寻找满足全部工程要求的材料，而不是单纯追求最高密度。

8. 钨合金配重与钢配重有什么区别

钢配重最大的优势通常是价格低、供应成熟、加工方便。但钢的密度明显低于高密度钨合金。当设备空间受到限制时，如果采用钢材达到相同质量，就可能需要更大的配重体积。钨合金的主要优势则是能够在有限空间内集中更多质量。这对于汽车发动机、旋转机械、航空控制面、无人机、机器人关节以及精密仪器尤其重要，因为很多系统并不是简单地需要一个重量，而是要求这个重量必须安装在一个特定的小空间内。航空航天领域的资料也明确强调了钨重合金在控制面配重、旋转系统平衡以及空间受限质量分配中的价值。



9. 钨合金配重与铅配重有什么区别

铅（Pb，Lead）同样是一种传统高密度配重材料，但钨合金的密度通常明显高于铅。因此，同样质量条件下，钨合金能够进一步减少体积。另外，在现代工程设计中，还需要综合考虑材料环保、安全、机械性能以及使用环境。部分汽车配重领域正在寻找铅替代方案，高密度钨合金因此成为其中一种材料选择。汽车应用资料指出，钨合金可以在有限空间内实现较大的质量，并用于轮毂平衡、发动机曲轴和传动系统等场景。不过，铅并不是在所

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

有应用中都会被钨合金完全替代。对于普通、低成本且空间不敏感的配重产品，材料价格仍然是重要因素。

10. 配重真正控制的是重心，而不是单纯重量

这是理解高密度钨合金配重最重要的概念之一。如果一个机械系统本身已经具有一定质量，那么额外增加一个配重块的目的通常不是简单让它变重，而是改变整个系统的质量分布。

最基本的重心关系可以理解为：$x_c = \Sigma m_i x_i / \Sigma m_i$

其中 x_c 表示系统重心位置，m_i 表示第 i 个质量单元的质量，x_i 表示该质量单元相对于参考位置的坐标。因此，同样是增加 100 g 配重，把它安装在不同位置，产生的重心变化完全不同。这也是为什么钨合金配重经常采用小型圆柱、薄片、环形件或局部嵌入式结构，而不是简单制作成一个大铁块。

11. 配重还涉及力矩

在旋转系统中，仅仅知道配重质量还不够，还必须考虑配重距离旋转轴的位置。力矩可以表示为：M=F×r。其中 M（Moment，力矩）表示旋转作用效果，F（Force，力）表示作用力，r（Radius，力臂）表示质量或作用力到旋转中心的距离。在某些配重系统中，较小的钨合金质量只需要安装在距离旋转轴较远的位置，就可以产生较大的平衡作用；如果空间要求将配重安装在靠近轴心的位置，则需要更高密度的材料来提供足够质量。这就是高密度材料与精密旋转机械之间的重要联系。

12. 动态平衡为什么会使用钨合金

旋转部件的质量如果分布不均匀，高速旋转时会产生周期性的离心力。汽车曲轴、传动轴、工业转子、机床主轴、风机转子、航空发动机部件以及陀螺仪转子，都可能存在类似问题。钨合金配重可以安装在设计好的位置，通过增加或调整局部质量，使旋转系统的质量分布更加均匀，从而降低振动。例如汽车发动机曲轴在高速旋转时，如果配重不足或位置不正确，就可能产生明显振动，并进一步影响轴承、发动机机体和其他相关部件。相关汽车应用资料将钨合金配重用于曲轴、传动轴、轮毂平衡以及高性能车辆的质量分配。

13. 为什么工业转子特别适合采用高密度配重

工业转子通常存在两个特点：转速高、安装空间有限。当转速提高以后，即使很小的质量偏差也可能形成明显的动态不平衡。因此，配重件不仅要具有准确质量，还需要具有准确的位置和几何尺寸。对于高速主轴、工业机器人关节、离心机、泵、风机、压缩机等旋转系统，钨合金环、圆柱配重和偏心配重均可以成为设计方案。钨合金环形平衡件还可以通过改变旋转部件的质量分布和转动惯量来进行动态平衡。

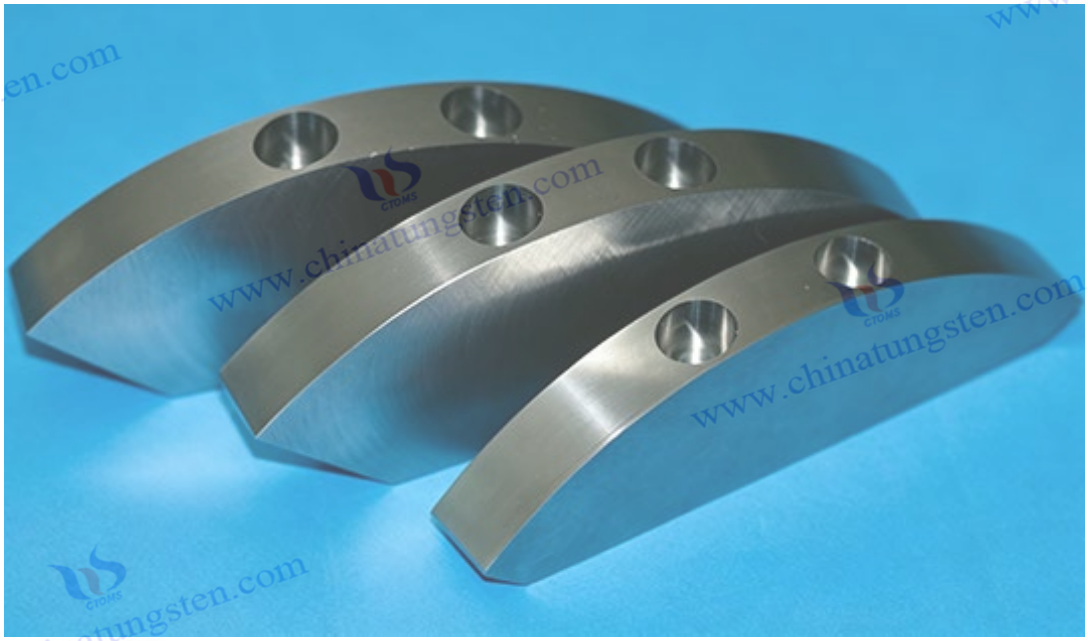
14. 航空航天为什么特别重视钨合金配重

航空航天设备对于重量分布和空间利用率非常敏感。飞机的升降舵、副翼、方向舵、襟翼等控制面都需要考虑气动平衡和质量分布。如果配重体积过大，不仅影响结构布局，还可能增加系统重量和空间占用。钨合金能够在有限空间内提供较大的质量，因此可以用于飞机控制面配重、直升机旋翼平衡、发动机旋转部件以及航天器质量分布调节等。相关航空航天资料显示，高密度钨合金的应用重点包括控制面配重、燃气涡轮转子平衡、航天器姿态控制以及惯性系统等。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

15. 汽车领域为什么大量关注钨合金配重

汽车领域的配重并不仅限于传统轮胎平衡块。高密度钨合金可以用于发动机曲轴配重、传动轴配重、轮毂平衡件、赛车底盘配重、悬架质量调节以及部分摄像头、雷达和激光雷达（LiDAR，Light Detection and Ranging，激光雷达）设备的减振结构。对于赛车而言，配重还涉及前后轴载荷分配和车辆重心位置。对于高速旋转部件而言，配重则更多承担动态平衡功能。对于车载传感器而言，配重可能用于改变系统惯量、抑制振动，从而帮助保持传感器的工作稳定性。相关汽车资料也将高密度钨合金描述为适用于曲轴、传动轴、轮毂平衡和传感器减振等场景。



16. 无人机为什么需要高密度配重

无人机的特点是结构紧凑、质量敏感、旋转部件多。在无人机系统中，配重可能用于：调整飞行器重心、平衡旋翼系统、稳定云台、调节摄像设备惯量、减少结构振动以及补偿局部质量差异。尤其是云台系统，摄像头本身的质量、镜头位置以及旋转轴之间存在复杂的力矩关系。如果需要增加配重而又不希望显著扩大结构尺寸，高密度钨合金就具有明显优势。

17. 手机和微型振动设备为什么使用钨合金配重

在手机、电动牙刷、按摩设备、振动电机等微型设备中，配重尺寸通常受到非常严格的限制。振动电机中的偏心质量块需要产生一定的离心力，同时又不能占用太多内部空间。对于旋转式振动结构，可以简单理解为：

$$F = m\omega^2 r$$

其中 F（Centrifugal Force，离心力）与质量 m（Mass，质量）、角速度 ω（Angular Velocity，角速度）以及偏心半径 r（Radius，半径）有关。在结构尺寸不能继续增大的情况下，提高配重材料密度，就可以在有限体积内获得更大的质量。这也是高密度钨合金被用于手机、振动电机、电动牙刷和按摩设备等微型产品的重要原因。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

18. 高尔夫球杆为什么使用钨合金配重

高尔夫球杆属于比较典型的消费级高密度配重应用。球杆设计人员可以把钨合金配重安装到杆头特定位置，通过改变质量分布来调整球杆的重心和惯量特性。由于钨合金密度高，所以可以在非常有限的结构空间内加入较大的质量。公开应用资料显示，钨合金被用于高尔夫球杆杆头配重，以调整重心位置和质量分布。



19. 高密度钨合金配重是怎样制造出来的

高密度钨合金通常不是像普通钢材一样直接熔炼后浇铸成最终产品，而大量采用粉末冶金路线。典型流程可以概括为：钨粉及其他合金粉末准备 → 配料 → 混合 → 压制成形 →

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

脱脂或预处理 → 液相烧结 → 毛坯检验 → 机械加工 → 表面处理 → 尺寸及重量检测 → 最终检验。粉末冶金路线特别适合高钨含量材料，因为钨本身熔点极高，传统熔铸工艺难以直接获得理想的成分和组织。部分资料也指出，钨合金可通过液相烧结等粉末冶金工艺获得较好的尺寸稳定性和机械性能，然后再进行精密机械加工。

20. 为什么烧结之后还需要机械加工

烧结可以形成配重的基本形状，但很多精密配重并不能只依靠烧结达到最终尺寸。例如产品可能要求：孔径精度、外径精度、厚度公差、平面度、同轴度、螺纹、倒角、槽位、安装台阶以及特定表面粗糙度。因此，烧结后的钨合金毛坯通常还需要进行车削、铣削、钻孔、磨削、螺纹加工等后续工艺。公开产品资料显示，钨合金配重可以在烧结后采用车削、铣削、钻孔和螺纹加工，并根据需要进行镀镍、镀锌或涂装等表面处理。

21. 为什么钨合金加工难度比较高

虽然钨合金比纯钨更容易加工，但它依然属于高密度、高硬度的工程材料。加工时主要面临刀具磨损、切削力较大、加工参数窗口较窄、热量集中以及尺寸稳定性控制等问题。因此，加工设备刚性、刀具材料、刀具几何参数、切削速度、进给量和冷却方式都会影响最终质量。

对于精密配重而言，加工难度还不仅是把尺寸加工出来，而是要确保每个批次的质量和尺寸保持一致。

22. 配重为什么需要控制重量公差

对于普通静态配重，重量误差可能并不敏感。但对于高速旋转部件，重量误差会直接影响动态平衡。例如一个转子需要多个配重件共同完成平衡，如果每一个配重件存在较明显的质量偏差，最终的合成质量分布就可能偏离设计值。所以工程采购中除了要求材料密度，还可能要求单件实际重量、重量公差、批次一致性以及动态平衡检测数据。对于高精度配重，最终评价标准并不是单纯看材料名称，而是看成品是否真正满足设备的质量分布要求。



Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

23. 为什么配重图纸非常重要

钨合金配重通常属于定制件。一张完整的工程图纸至少应尽可能明确材料牌号或材料体系、目标密度、外形尺寸、孔位、螺纹、尺寸公差、形位公差、表面粗糙度、表面处理以及重量要求。如果配重用于旋转系统，还应进一步明确安装基准、旋转轴、平衡要求以及允许的不平衡量。对于采购人员而言，仅仅告诉供应商需要一个 100 g 的钨合金配重，通常不足以进行准确报价。因为相同重量可以设计成圆柱、环形件、块状件、偏心件等完全不同的结构，而不同结构的模具、烧结和机加工成本可能差异明显。

24. 如何理解钨合金配重的成本

钨合金配重的价格通常高于普通钢配重，主要原因来自材料成本和制造成本。影响最终价格的因素包括：钨含量、材料密度、W-Ni-Fe 或 W-Ni-Cu 材料体系、原材料价格、产品尺寸、单件重量、模具成本、烧结工艺、机械加工量、尺寸公差、表面处理、检测要求、订单数量以及包装运输等。特别是小批量定制产品，即使产品本身重量很小，也可能需要承担模具、工艺开发、编程、夹具和检测等固定成本。因此，钨合金配重不能简单按照每公斤材料价格来判断最终产品价格。

25. 如何选择合适的高密度钨合金配重

实际项目中可以按照以下逻辑进行材料选择：首先确定需要增加多少质量，然后确定安装空间；根据空间反推所需要的材料密度，再确定 W-Ni-Fe 或 W-Ni-Cu 材料体系；随后确定结构形式、安装方式和加工精度，最后综合评估成本、表面处理和批量。如果空间非常有限，应重点关注密度；如果需要承受机械载荷，应重点关注强度和韧性；如果附近存在磁敏感元件，应重点关注磁性能；如果产品需要大量机加工，应重点关注加工性能和加工成本；如果用于高速旋转系统，则需要特别关注重量公差、同轴度、形位精度和动态平衡。这种选择方法比单纯比较 17.5 g/cm³、18.0 g/cm³和 18.5 g/cm³更加合理。

26. 高密度钨合金配重的核心价值可以归纳为一个工程逻辑

从整个材料体系和应用场景来看，高密度钨合金配重实际上解决的是一个很具体的问题：在有限的空间里，如何准确地放置所需要的质量。因此，它的价值可以进一步拆解为：高密度解决体积问题、小型化结构解决空间问题、精密加工解决尺寸问题、精确重量控制解决质量问题、合理安装位置解决重心问题、动态平衡解决旋转振动问题。航空航天、汽车、赛车、工业转子、无人机、手机振动电机、高尔夫球杆等应用虽然看起来差异很大，但底层工程逻辑基本一致，即通过高密度材料实现紧凑的质量配置，并根据设备运动状态和结构要求精确控制质量分布。

如果把高密度钨合金配重进一步做成产品知识体系，后续可以沿着材料体系、密度计算、结构设计、重心与力矩、动态平衡、粉末冶金制造、CNC（Computer Numerical Control，计算机数控）加工、表面处理、汽车配重、航空航天配重、无人机配重、微型振动配重、价格与采购这几个方向继续展开，这样能够形成一套完整的高密度钨合金配重技术百科框架。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q1 什么是钨合金配重？

钨合金配重，是以钨（W，Tungsten）为主要组成元素、通过加入镍（Ni，Nickel）、铁（Fe，Iron）、铜（Cu，Copper）等金属形成的高密度钨基重合金（Tungsten Heavy Alloy，钨重合金），按照特定的质量、尺寸、重心、惯量和安装要求制造，用于调整设备或结构的质量分布、重心位置、转动惯量或动态平衡状态的一类功能性金属零部件。与普通意义上的金属块不同，钨合金配重的核心并不是单纯增加设备重量，而是在有限空间内，将规定质量精确地配置到指定位置。因此，钨合金配重同时属于材料工程、机械设计、精密加工和质量平衡控制交叉领域的功能性零件。

一、高密度是钨合金配重最基本的材料特征

钨合金配重最突出的特点是密度高。常见工程级高密度钨合金的密度通常约为 16.5～19.0 g/cm³，具体数值取决于钨含量、粘结相组成、粉末特性以及烧结工艺。部分常用配重材料的密度可以达到约 17.0～18.5 g/cm³。密度 ρ（Density，密度）、质量 m（Mass，质量）和体积 V（Volume，体积）的基本关系为 ρ=m/V，也可以写成 m=ρV 和 V=m/ρ。这意味着，在目标质量相同的情况下，材料密度越高，所需要占用的体积越小。例如，设计一个 1 kg 的配重：如果采用密度 18.0 g/cm³ 的钨合金，其理论体积约为：V=1000/18.0≈55.6 cm³ 如果采用密度约 7.85 g/cm³ 的普通钢，其体积约为：V=1000/7.85≈127.4 cm³。也就是说，实现相同的 1 kg 配重质量时，高密度钨合金所需要的空间明显小于普通钢材。这正是钨合金配重最重要的工程价值之一：在设备内部空间有限的情况下，用更小的结构尺寸获得所需要的质量。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

二、钨合金配重并不等于纯钨配重

从材料名称来看，钨合金配重和纯钨配重存在明显区别。纯钨（W，Tungsten）本身具有很高的密度、熔点和高温性能，但其材料加工和成形难度较高。工程领域通常通过加入镍、铁、铜等金属形成钨重合金，在保持高密度特性的同时改善材料的综合机械性能、烧结性能和加工适应性。目前用于配重领域较常见的材料体系包括 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）。W-Ni-Fe 通常具有较好的强度、韧性和综合机械性能，因此常用于汽车、航空航天、工业机械、旋转部件和一般精密配重。W-Ni-Cu 则采用镍和铜作为主要粘结相，在某些对磁性能、导电性能或特定加工方式有要求的应用中具有优势。所以，钨合金配重实际上是一个材料体系，而不是单一固定牌号的材料。

三、钨合金配重的真正作用是调整质量分布

配重设计最基本的工程目的，是改变一个系统的质量分布。例如，一台机械设备的某个部件由于结构不对称导致重心偏移，可以在指定位置增加钨合金配重，使整体重心回到设计位置。

系统重心位置可以用：$x_c=\Sigma m_i x_i/\Sigma m_i$ 表示，其中 x_c 为系统重心坐标，m_i 为第 i 个质量单元的质量，x_i 为该质量单元相对于参考坐标的位置。这意味着同样质量的钨合金配重，如果安装在不同位置，对整个系统产生的效果也不同。例如，同样是 100 g 配重：安装在靠近旋转轴的位置，产生的质量分布变化相对较小；安装在远离旋转轴的位置，则能够产生更明显的质量和惯量调整作用。因此，钨合金配重的设计不能只给出一个重量值，还必须确定配重的位置、安装方向以及与基准面的关系。

四、在旋转机械中，钨合金配重还承担平衡作用

对于曲轴、转子、主轴、风机、泵、压缩机、离心机以及其他高速旋转部件，钨合金配重经常用于改善动态平衡。旋转系统存在质量偏心时，随着转速升高，不平衡产生的周期性离心力会迅速增加。理想化情况下，离心力可以表示为：$F=m\omega^2 r$，其中 F（Centrifugal Force，离心力）表示旋转产生的离心作用，m（Mass，质量）表示偏心质量，ω（Angular Velocity，角速度）表示旋转角速度，r（Radius，半径）表示偏心质量到旋转轴的距离。由于离心力与角速度的平方成正比，所以高速旋转设备对于配重质量、安装位置和加工精度非常敏感。

这也是钨合金特别适合高速旋转配重的原因之一：利用其高密度特性，可以在较小空间内配置所需要的质量，同时通过精密加工控制配重的实际尺寸和位置。

五、钨合金配重为什么适合空间受限的设备

这是钨合金配重区别于普通钢配重的核心优势之一。假设某设备需要增加 500 g 质量，但内部只能提供大约 30 cm^3 的安装空间。采用密度 18 g/cm^3 的钨合金时：$V=500/18\approx27.8$ cm^3

理论上可以满足空间要求。如果采用密度 7.85 g/cm^3 的钢材：$V=500/7.85\approx63.7$ cm^3

此时即使重量完全相同，钢配重的体积也可能超过设备所提供的安装空间。因此，在手机振动电机、无人机云台、汽车旋转部件、航空控制面、精密仪器以及微型执行机构等产品中，高密度钨合金具有明显的空间利用优势。

六、钨合金配重的典型结构形式

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

钨合金配重并不存在一种固定外形，而是根据具体设备结构进行设计。常见形式包括圆柱形配重、圆盘形配重、环形配重、块状配重、板状配重、球形或近球形配重、偏心配重、带孔配重、带螺纹配重、嵌入式配重以及复杂异形配重。其中，环形配重特别适合旋转系统，可以安装在轴、转子、飞轮或其他旋转组件附近，通过改变质量分布来实现平衡或惯量调整。

块状和板状配重则常用于航空航天、汽车和大型机械。微型圆柱、圆盘或偏心块则常用于手机、电动牙刷、按摩设备和其他微型振动机构。

七、钨合金配重通常如何制造

高密度钨合金通常采用粉末冶金（PM，Powder Metallurgy）工艺制造，而不是普通钢材常见的简单熔炼浇铸路线。典型生产过程可以概括为：钨粉及其他金属粉末准备 → 配料 → 混合 → 压制成形 → 脱脂或预处理 → 液相烧结 → 毛坯检验 → 机械加工 → 表面处理 → 尺寸与重量检测 → 成品检验。粉末冶金路线适合制造高钨含量材料，因为钨具有极高的熔点，直接采用普通熔铸工艺制造高钨含量合金存在较大困难。烧结后的钨合金毛坯通常还需要进一步加工。根据产品结构，可以采用车削、铣削、钻孔、磨削、螺纹加工等方法。

对于复杂结构，还可能采用电火花加工（EDM，Electrical Discharge Machining）等特殊加工方式。

八、为什么钨合金配重需要精密加工

配重并不是只要达到目标重量就可以。例如一个用于高速转子的钨合金配重，即使质量完全正确，如果孔位偏移、安装面倾斜、外径与旋转轴不同心，仍然可能产生新的不平衡。因此，配重产品通常需要同时控制：质量公差、外形尺寸公差、孔径公差、孔位精度、同轴度、圆跳动、平面度、垂直度、表面粗糙度以及安装基准。对于高精度旋转部件，还可能需要进行单面平衡、双面平衡或动态平衡检测。这说明钨合金配重实际上是一个典型的精密功能零件，而不仅仅是一块高密度金属。

九、钨合金配重的应用领域

由于钨合金具有高密度和较好的尺寸可设计性，因此应用领域非常广泛。航空航天领域可以用于飞机控制面配重、旋翼平衡、发动机转子配重、惯性系统以及航天器质量分布调整。汽车和赛车领域可以用于曲轴、传动轴、轮毂平衡、赛车质量分配以及部分传感器减振结构。

工业机械领域可以用于高速主轴、工业转子、离心机、风机、泵、压缩机和机器人关节等。消费电子领域可以用于手机振动电机、电动牙刷、按摩设备等微型偏心振动机构。体育领域可以用于高尔夫球杆、钓具以及其他需要集中质量的小型器材。精密仪器领域则可以用于陀螺仪、惯性系统、精密运动机构和部分需要质量补偿的仪器。

十、为什么高密度钨合金配重不是密度越高越好

虽然高密度能够进一步缩小体积，但工程选材不能只看密度。例如，一个设备需要 1 kg 配重，并且有 100 cm³ 的安装空间，那么采用 17.5 g/cm³、18.0 g/cm³或 18.5 g/cm³材料，在空间方面可能都能够满足要求。此时，继续提高密度带来的空间收益可能有限，但材料成本、加工成本和制造难度可能增加。反过来，如果设备只有 50 cm³ 的安装空间，那么 17.5 g/cm³ 的材料可能已经难以满足目标质量，而 18.5 g/cm³ 材料就可能具有明显价值。因此，

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

真正合理的选材逻辑是：目标质量 → 可用空间 → 所需密度 → 材料体系 → 机械性能 → 加工要求 → 平衡精度 → 成本。而不是简单地选择密度最高的材料。

十一、钨合金配重与钢、铅等传统配重材料的本质区别

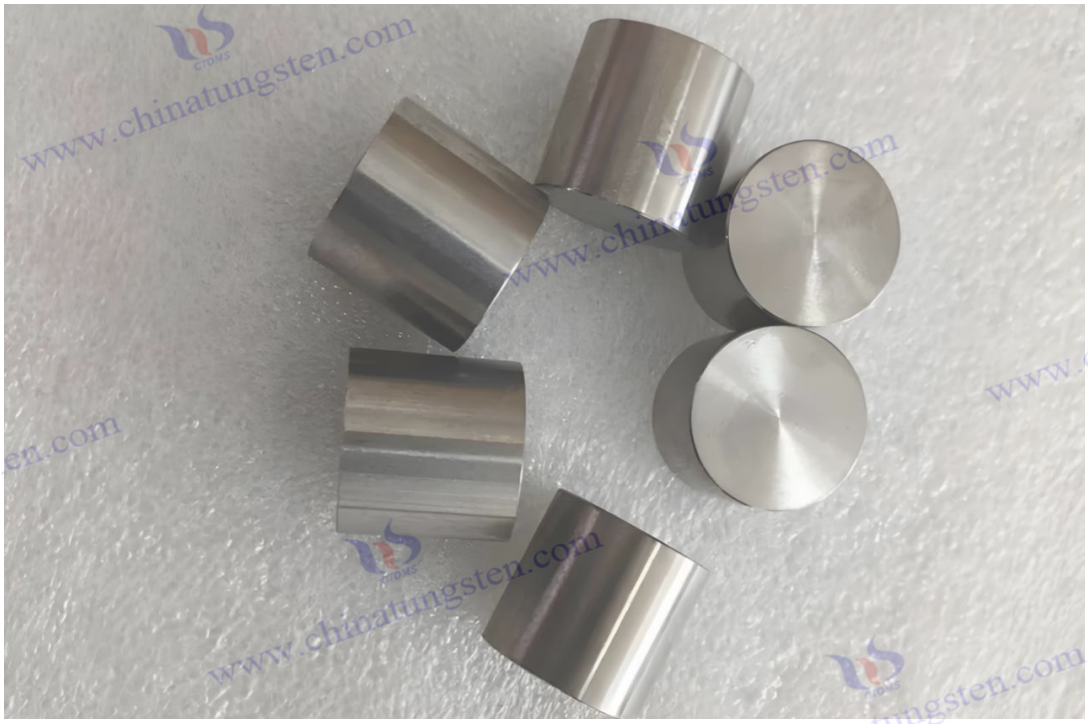
从工程角度看，可以将几种材料的特点理解为不同的性能组合。钢配重的优势通常是价格较低、材料供应成熟、加工方便，但密度较低。铅（Pb，Lead）具有较高密度和良好的成形能力，但现代工程应用需要进一步考虑环保、安全以及机械性能等因素。钨合金的主要优势则集中在高密度、小体积以及较强的工程可设计性上，特别适合空间受限、高质量集中以及精密平衡场景。所以，钨合金并不是在所有配重应用中都必须替代钢或铅，而是在空间、质量、平衡和性能要求达到一定程度时体现其材料价值。

十二、从产品定义来看，钨合金配重实际上是一个综合设计结果

一个真正意义上的高密度钨合金配重，最终需要同时回答几个问题：需要多少质量？需要多大的安装空间？配重安装在哪里？需要改变的是静态重心还是动态平衡？是否涉及旋转惯量？材料需要 W-Ni-Fe 还是 W-Ni-Cu？需要达到什么密度？尺寸公差是多少？是否需要孔、槽、螺纹或安装台阶？是否需要表面处理？最终需要进行什么样的重量和平衡检测？所以，钨合金配重的本质可以概括为：高密度钨基材料 + 精确质量 + 指定空间位置 + 精密几何结构 + 质量分布控制。也正因为如此，高密度钨合金配重通常属于按应用需求设计的功能性零部件，而不是单纯按照重量销售的普通金属材料。从工程应用角度看，中钨智造（CTIA GROUP）等钨合金制造企业通常会围绕材料牌号、目标密度、产品结构、烧结工艺、精密机加工和最终检测进行配重件开发，这种从材料到成品的一体化能力，对于航空航天、汽车、工业转子和精密仪器等定制型配重项目尤其重要。



Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q2 钨合金配重主要用于哪些领域？

钨合金配重的应用核心，可以概括为一句话：在有限安装空间内提供较大的集中质量，并通过精确控制配重的位置、重量和几何尺寸，实现重心调整、质量平衡、转动惯量控制、动态平衡、振动抑制或惯性调节。高密度钨合金通常采用 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）等材料体系，工程应用密度常见于约 17～18.5 g/cm³，也有更高或更低密度等级。由于其单位体积质量远高于钢材，因此特别适合航空航天、汽车赛车、工业旋转机械、精密仪器、无人机、消费电子、体育器材以及海洋和能源装备等对空间、质量分布或平衡精度有要求的场景。公开工程资料也将航空航天、汽车、工业机械、体育器材、油气装备等列为钨重合金配重的重要应用方向。

1. 航空航天领域

航空航天是高密度钨合金配重最典型的应用领域之一。飞机在飞行过程中需要严格控制质量分布、重心位置以及飞行控制面的气动平衡。副翼、升降舵、方向舵、襟翼以及其他控制面都可能需要安装平衡配重。由于这些结构内部空间有限，如果使用密度较低的材料，可能需要更大的配重体积，从而增加结构设计难度。钨合金可以在较小空间内提供较大的质量，因此可用于飞机控制面静态配重和动态平衡配重，也可用于直升机旋翼、螺旋桨及其他旋转部件的质量平衡。航空航天技术资料还将钨重合金应用扩展到发动机燃气涡轮转子平衡、振动控制以及航天器反作用轮和动量轮等系统。航空航天配重的特点不是单纯追求重量，而是要求在规定位置提供非常精确的质量。例如飞机控制面上的配重需要同时考虑配重质量、安装位置、旋转轴线、结构连接方式以及飞行状态下的载荷。对于这类产品，通常还需要考虑材料批次稳定性、尺寸公差、重量公差、腐蚀防护、连接可靠性和环境适应性。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

2. 汽车及赛车领域

汽车是钨合金配重的另一个重要应用领域。传统汽车和高性能汽车中的配重需求主要包括曲轴平衡、传动系统平衡、轮毂平衡以及局部质量分布调整。赛车对配重的要求更加严格，因为车辆总质量、前后轴载荷分配、左右质量分布以及重心位置都会影响车辆的动态特性。高密度钨合金可以用于曲轴配重、底盘配重、赛车压载块以及部分旋转机构的平衡部件。相关材料资料显示，钨重合金的典型应用包括赛车曲轴和底盘配重。例如赛车需要增加一定质量时，如果采用普通钢块，可能占用较大的底盘空间；采用高密度钨合金，则可以在更小的体积内配置相同质量。对于曲轴等高速旋转部件，钨合金配重还承担动态平衡作用。其设计需要综合考虑旋转半径、配重质量、曲轴转速、安装位置和允许的不平衡量。

3. 工业旋转机械领域

工业旋转机械是非常适合钨合金配重发挥高密度优势的领域。典型设备包括：工业电机转子、机床主轴、风机转子、泵、压缩机、离心机、涡轮转子、飞轮以及各种高速旋转执行机构。

旋转部件如果存在质量偏心，高速运行时会产生周期性离心力。理想化情况下，离心力可表示为 $F=m\omega^2r$，其中 F（Centrifugal Force，离心力）表示不平衡产生的离心作用，m（Mass，质量）表示偏心质量，ω（Angular Velocity，角速度）表示旋转角速度，r（Radius，半径）表示偏心距离。由于离心力与角速度平方相关，设备转速越高，对质量分布的敏感程度通常越高。因此，工业转子配重不仅要关注材料密度，还要控制配重的实际重量、安装位置、孔位、同轴度、圆跳动和动态平衡精度。

4. 精密仪器和惯性系统

高密度钨合金还广泛用于对质量分布和惯量高度敏感的精密设备。例如陀螺仪、惯性测量单元、惯性导航系统、精密旋转机构、测量仪器和部分光学设备。对于陀螺仪或其他惯性元件而言，质量的位置会影响转动惯量。转动惯量 I（Moment of Inertia，转动惯量）与质量分布有关，因此同样的总质量，如果分布在不同半径位置，系统的惯性特性也可能不同。钨合金的高密度特征使设计人员能够在有限空间内配置较大的质量，从而实现惯量调整，同时避免配重结构过度扩大。相关资料将钨重合金用于陀螺仪、惯性导航系统以及精密仪器等场景。

5. 无人机及航空机器人

无人机配重属于近年来比较典型的高密度小型化应用。无人机本身需要严格控制质量，但部分设备又需要进行局部质量补偿。例如：无人机云台、摄像头组件、镜头模组、旋翼系统、飞行控制机构以及特殊任务载荷。尤其是云台结构，摄像头和镜头的质量中心可能偏离旋转轴，需要通过配重改善重心位置，使电机承担的补偿力矩降低。如果使用普通钢材达到相同质量，配重尺寸可能过大；使用高密度钨合金则可以将质量集中在很小的结构区域。因此，无人机配重通常体现的是小型化、高质量密度和精确质量分布三个特点。

6. 手机及消费电子产品

这是普通消费者比较容易接触到的一类钨合金配重应用。一些手机、振动电机、电动牙刷、按摩器等产品需要通过偏心旋转质量产生振动。例如偏心振动机构中，配重块与旋转轴之间存在偏心距离。当电机旋转时，偏心质量产生周期性离心作用。对于这种结构，配重越小并不意味着效果越好，因为需要在很小的空间内同时满足质量、偏心距离和转速要求。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

因此，高密度钨合金可以让振动机构在有限体积内获得所需的偏心质量。公开产品资料将钨合金配重直接应用于振动电机、手机、电动牙刷和按摩设备。

7. 高尔夫及体育器材领域

体育器材也是钨合金配重的重要应用方向。最典型的是高尔夫球杆。高尔夫球杆头可以通过增加局部钨合金质量来改变整体重心位置、摆动重量以及惯量特性。由于钨合金密度高，可以在球杆头有限空间内加入较大的质量。除了高尔夫球杆，钨合金还可以用于飞镖、钓具等产品。钨合金在飞镖中的价值同样来自高密度，即在保持较高质量的情况下，可以减少飞镖主体直径。公开资料也将钨合金配重用于高尔夫球杆、飞镖及其他体育器材。

8. 钓鱼及水下装备

钨合金的高密度特征使其也适合需要小体积高质量的水下配重。例如钓鱼配重、人工饵配重以及部分水下设备的压载件。对于钓鱼装备来说，同样质量下钨配重可以比铅等传统材料做得更小，从而减少对鱼饵外形和运动状态的影响。在专业水下装备中，配重则更多承担姿态调整、重心控制和稳定作用。此外，油气行业的井下工具、测井工具也存在配重和惯性质量需求，部分高密度钨合金供应商将其用于井下工具和下井设备。

9. 海洋工程和船舶领域

大型船舶和海洋装备中的配重与小型电子产品的原理相同，但尺度不同。典型用途包括：船舶压载、海洋设备重心调整、深海仪器稳定、水下机器人配重以及海底设备姿态控制。钨合金具有很高的密度，因此可以在有限空间内增加较大的质量。不过，在大型船舶常规压载场景中，钢、铁矿石、水压载等低成本方案往往更具有经济性。钨合金真正具有价值的情况通常是空间受限、需要局部集中质量或要求精确调整重心的特殊装备。

10. 石油、天然气和井下工具

油气井下工具是一个相对专业、但很有代表性的钨合金配重应用。井下设备通常面临空间狭小、压力高、环境复杂以及需要精确控制工具姿态等问题。例如测井工具、随钻工具以及其他井下仪器可能需要高密度质量块，用于重心控制、工具稳定和局部惯性调节。高密度钨合金可以在不明显扩大工具外径的情况下提供较大质量，因此适合井下工具这种典型的空间受限结构。相关钨重合金应用资料也将 downhole logging sinker bars，即井下测井沉降杆或配重件，列为应用方向。

11. 医疗设备和精密运动设备

医疗领域中的钨合金更广为人知的是辐射屏蔽，但在部分医疗设备中也存在配重和质量平衡需求。例如医疗成像设备、放射治疗设备以及精密运动机构中，可能需要通过高密度材料进行局部质量调整。不过，这里需要区分两类用途：钨合金作为配重，是利用其高密度调整质量分布；钨合金作为屏蔽件，则主要利用其对 X 射线和 γ（Gamma，伽马）射线的衰减能力。两者虽然都使用高密度钨合金，但工程目的并不相同。医疗设备中的具体零件需要根据设备设计分别确定材料等级和结构。

12. 机器人及自动化设备

工业机器人、协作机器人以及精密自动化机构也存在配重需求。机器人关节、末端执行器和运动机构在运动过程中会产生不同方向的惯性载荷。如果质量分布不合理，就可能增加

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

驱动电机和减速机构的负荷。通过在适当位置配置高密度钨合金，可以调整机构的重心和转动惯量，使质量分布更加符合机械设计要求。特别是机械臂关节、精密旋转平台以及小型高速执行机构，往往需要在非常有限的安装空间内实现质量调整，这正是高密度钨合金比较适合的场景。

13. 不同应用领域实际上对应不同的配重功能

如果从工程功能而不是行业名称进行分类，钨合金配重主要承担以下几类任务：航空航天中主要是控制面平衡、重心调整和惯性控制；汽车赛车中主要是曲轴平衡、底盘质量分配和局部压载；工业机械中主要是转子动态平衡和振动控制；无人机中主要是云台、旋翼和载荷重心调整；消费电子中主要是偏心振动；精密仪器中主要是惯量调整和质量补偿；体育器材中主要是重心和摆动特性调整；海洋及油气设备中主要是压载、姿态稳定和重心控制。所以，虽然这些产品最终都叫钨合金配重，但实际设计目的并不完全相同。

14. 为什么这些领域都倾向于采用钨合金

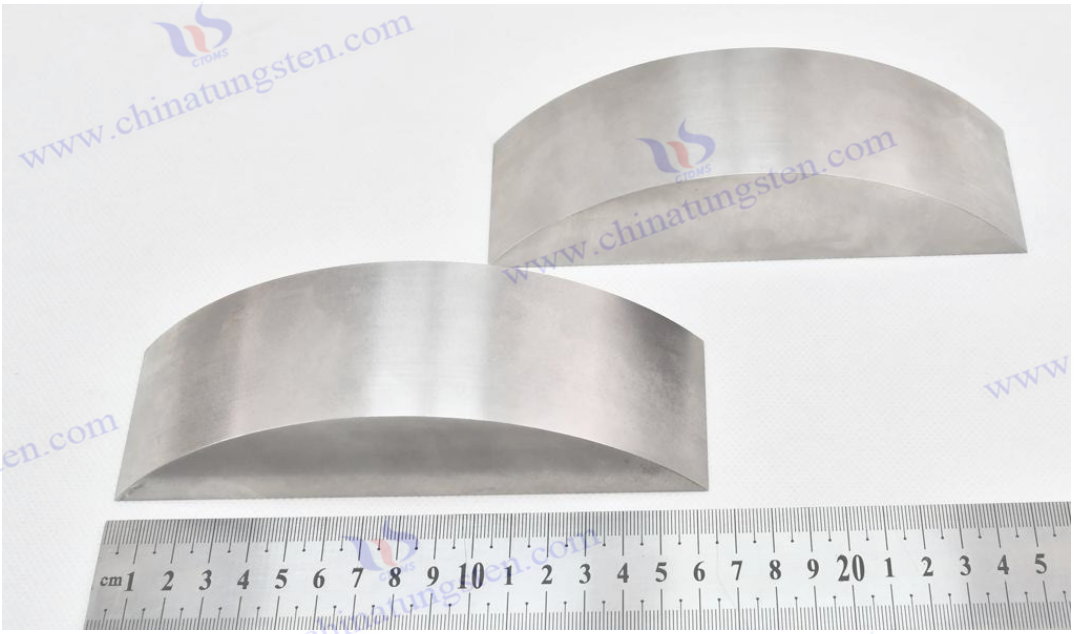
这些行业看似没有直接联系，但它们普遍存在一个共同工程问题：既希望获得较大的质量，又不希望配重占用过大的空间。钨合金恰好能够解决这一矛盾。例如，同样需要 1 kg 配重时，18 g/cm³ 钨合金的理论体积约为 55.6 cm³，而 7.85 g/cm³ 钢材约需要 127.4 cm³。对于大型设备而言，这种体积差异有时并不重要；但对于飞机控制面、无人机云台、手机振动机构、高速转子以及精密仪器而言，可能直接影响产品结构能否实现。这也是钨重合金被广泛用于高密度配重和惯性质量的根本原因。

15. 从应用角度如何判断是否适合使用钨合金配重

一个产品是否适合采用钨合金，可以从几个问题判断。如果设备安装空间非常有限，同时又需要较大的质量，那么钨合金具有明显优势；如果配重需要安装在距离旋转轴很近的位置，需要通过较小体积获得较大的质量，则钨合金通常值得优先评估；如果设备需要精确调整重心、转动惯量或动态平衡，也适合考虑高密度钨合金。相反，如果设备空间非常充裕、质量要求不高、精度要求较低，而且产品对成本高度敏感，那么钢等低成本材料可能已经能够满足需求，此时采用钨合金的必要性就会降低。因此，钨合金配重并不是所有配重产品的通用替代材料，而是一种主要针对高密度、小体积、精确质量分布和高性能应用的工程材料。

钨合金配重的主要应用领域可以形成一个比较清晰的产业链：航空航天 → 汽车与赛车 → 工业旋转机械 → 精密仪器与惯性系统 → 无人机与机器人 → 消费电子 → 体育器材 → 海洋及油气装备 → 特殊医疗及精密设备。不同领域虽然产品形态差异很大，但核心需求始终围绕高密度质量配置、重心控制、惯量调整、动态平衡和空间优化展开。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q3 为什么钨合金适合制作配重？

钨合金（Tungsten Alloy，钨基重合金）适合制作配重，核心原因并不只是密度高，而是它能够在有限空间内提供较大的质量，同时通过合金成分、密度等级、几何尺寸和精密加工，对质量分布、重心位置、转动惯量及动态平衡进行较精确的控制。对于汽车曲轴、工业转子、航空控制面、无人机、振动机构等对空间和质量分布敏感的部件，这些特点尤其重要。

1. 高密度可以在很小体积内获得较大质量

这是钨合金作为配重材料最直接的优势。常见钨合金配重通常采用 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）体系，工程产品的密度通常约为 17～18.5 g/cm³，更宽泛的钨重合金密度范围可达到约 16.5～19.0 g/cm³，具体取决于钨含量、粘结相组成及制造工艺。不同供应商和牌号的实际范围并不完全相同。密度与质量、体积之间的关系为：$\rho = \frac{m}{v}$

其中，ρ 为材料密度、m 为质量、V 为体积。因此，在质量相同的情况下，密度越高，所需要的体积越小。例如，一个质量为 1 kg、密度为 18.0 g/cm³ 的钨合金配重，其理论体积约为：$V = \frac{1000}{18.0} \approx 55.6\ cm^3$

而同样 1 kg 的钢材，若按约 7.85 g/cm³计算，体积约为 127.4 cm³。也就是说，在相同质量条件下，18.0 g/cm³钨合金的理论体积只有普通钢材的约 44%。这对于发动机内部、航空机构、精密转子、手机振动组件等安装空间受限制的结构非常重要。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

2. 可以用更小的配重实现重心调整

配重的作用并不是简单地增加重量，更重要的是把质量放到正确的位置。一个系统的重心位置可以表示为：$x_c = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}$

其中，x_c 为系统重心位置、m_i 为各质量单元的质量、x_i 为相应质量单元的位置。钨合金密度高，同样质量可以做得更小，所以设计人员可以把配重安装到更加狭窄、更加靠近目标位置的区域，从而减少对周围结构的干涉。例如航空舵面需要进行质量平衡时，如果采用低密度材料，需要增加较大的配重体积；使用高密度钨合金，则可以在较小安装空间内获得所需质量，有利于保持外形尺寸和气动结构设计。

3. 对旋转部件的动态平衡特别有价值

在曲轴、转子、主轴、离心机构、风机、泵、压缩机等高速旋转部件中，配重还承担动态平衡作用。旋转质量产生的离心力可以近似表示为：$F = m\omega^2 r$

其中，F 为离心力、m 为质量、ω 为角速度、r 为质量质心到旋转轴线的距离。当转速升高以后，ω²项会使质量分布误差产生显著影响。因此，高速旋转设备不仅需要控制配重质量，还需要控制配重的位置、偏心量、安装角度、同轴度和径向跳动。钨合金能够在较小体积内提供较大的质量，使配重设计具有较大的质量布置自由度。例如在汽车曲轴和赛车部件中，可以利用高密度钨合金在受限空间内完成质量补偿和动态平衡。钨合金也被用于高速主轴、转子、离心机以及航空惯性系统等对平衡要求较高的场合。

4. 可以调整转动惯量

对于高速旋转或摆动系统，配重不仅影响重心，还会改变转动惯量。简化情况下：

$$I = \sum m_i r_i^2$$

其中，I 为转动惯量、m_i 为质量、r_i 为质量单元到旋转轴的距离。这意味着，同样是增加 100 g 配重，把质量放在距离旋转轴较远的位置，与放在靠近轴心的位置，对系统动态特性的影响并不相同。钨合金密度高，可以将较大的质量集中在尺寸较小的结构中，使设计人员能够更加精确地控制质量集中区域。例如惯性轮、陀螺机构、平衡环、转子以及某些执行机构，都可能利用这一特性。

5. 合金成分可以根据使用需求进行调整

钨合金并不是单一材料。实际配重产品可以通过调整钨含量、粘结相组成和制造工艺获得不同的密度及机械性能。W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）体系具有较成熟的高密度重合金应用基础；W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）体系则可根据具体结构、加工和环境要求进行选择。所以实际设计时并不是简单追求最高密度，而是需要综合考虑密度、强度、延性、磁性能、加工方式、尺寸精度、使用环境和成本。

6. 粉末冶金适合制造复杂的小型配重

钨合金配重通常采用粉末冶金（Powder Metallurgy，粉末冶金）路线，通过混粉、压制、预处理或脱脂、液相烧结、后续机械加工和检测等工序形成最终产品。这种制造路线特别

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

适合高密度、小体积、批量化配重产品。对于规则产品，可以通过模压获得接近最终形状的坯体；对于带孔、槽、台阶、螺纹、偏心结构或安装定位结构的产品，则可以进一步通过车削、铣削、钻孔、磨削等机械加工完成。这使钨合金能够从简单圆柱形配重扩展到环形配重、盘状配重、块状配重、偏心配重、嵌入式配重和异形配重等结构。

7. 能够满足小型电子设备的高质量配重需求

手机、振动马达、电动牙刷、按摩设备以及其他微型机电设备，对配重提出了一个特殊要求：质量要足够大，但占用空间必须很小。因此，高密度钨合金非常适合制作微型偏心配重。例如振动机构中，偏心质量块的质量、偏心距和转速共同决定振动特性。钨合金可以在较小尺寸下提供所需质量，有利于缩小整个振动组件的体积。相关产品资料也显示，钨合金配重已应用于振动电机、手机、电动牙刷和按摩设备等微型产品。

8. 适合航空航天等对空间和质量控制敏感的场合

航空航天设备通常非常重视质量分布、重心位置和结构空间。高密度钨合金配重可以用于飞行控制面平衡块、配平重量、抗颤振配重、惯性系统配重以及其他需要集中质量的结构。其工程逻辑是：在不明显扩大配重外形的情况下增加规定质量，同时通过精密加工控制质量中心和安装位置。航空航天领域的钨合金应用资料中也包括飞行控制面、配平、抗颤振和惯性系统等配重用途。

9. 机械性能能够满足很多结构性配重需求

现代钨合金并不是简单的高密度填充材料。通过 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）等体系的材料设计，可以获得适合结构配重使用的强度、延性和韧性组合。这对于需要通过螺钉、压配、镶嵌、夹持或其他方式固定的配重尤其重要，因为配重不仅承受自身重力，还可能承受振动、冲击、离心载荷和周期性载荷。

10. 精密加工能够进一步控制配重的质量和位置

对于普通静态配重，质量控制可能主要集中在重量和尺寸；对于高速动态系统，还需要进一步控制尺寸公差、孔位、同轴度、圆跳动、端面跳动、平面度、表面粗糙度以及配重安装角度。钨合金的高密度特性与精密机械加工结合以后，可以形成质量稳定、尺寸一致的精密配重件。对于批量产品，还可以通过称重分组选配、尺寸检测和动平衡检测进一步降低产品离散性。中钨智造（CTIA GROUP）长期从事钨合金及高密度钨基重合金产品的设计、制造与应用服务，可根据配重的密度、质量、尺寸、孔位、形状及使用环境进行定制化设计。

钨合金适合制作配重，本质上是因为它同时具备高密度、小体积、质量分布可设计、转动惯量可调、材料体系可选择以及较好的精密加工适应性。对于普通配重来说，最大的价值通常是用更小体积获得规定质量；对于高速旋转设备来说，更重要的是通过质量、半径和安装角度的精确控制实现平衡；对于航空、电子和微型设备来说，则主要体现为在有限空间内集中布置较大质量。所以，选择钨合金并不是简单地追求密度越高越好，而是要根据目标质量、安装空间、重心位置、转速、动态平衡要求、机械载荷、加工精度和成本共同确定合适的钨合金牌号和结构。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q4 钨合金配重的密度通常是多少？

钨合金配重的密度没有一个完全统一的固定值，它取决于钨含量、镍铁或镍铜粘结相比例、粉末冶金（Powder Metallurgy，粉末冶金）工艺以及具体材料牌号。就实际工程应用而言，常见高密度钨合金配重的密度大多集中在约 17.0～18.5 g/cm³；如果把不同钨含量等级以及更宽范围的钨重合金产品纳入统计，约 13.5～19.0 g/cm³ 都可能出现。

常见密度范围如何理解？

可以把实际产品大致分成几个密度区间来看。13.5～16.0 g/cm³通常属于较低密度的钨合金配重，通过降低钨含量来获得较低成本或特定机械性能；16.0～17.0 g/cm³属于中高密度等级；17.0～18.5 g/cm³则是工程配重中非常常见的高密度范围，尤其适合航空、汽车、工业转子、精密机构等对体积和质量分布要求较高的场合；18.5 g/cm³以上属于更高密度等级，通常需要较高钨含量以及较好的烧结致密化控制，具体能达到多少则取决于材料体系和制造商的牌号设计。例如，部分 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）平衡配重产品给出的典型密度为 17.0～18.5 g/cm³；一些高密度钨合金产品则标称最高可达到 18.5 g/cm³。也有供应商针对普通 W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）配重给出 13.5～18.2 g/cm³ 的产品范围，这说明不能看到钨合金配重就直接认为其密度一定是 18.0 g/cm³左右。

为什么钨合金密度可以达到这么高？

钨本身的理论密度约为 19.25 g/cm³，而钨合金是在钨颗粒基础上加入镍、铁、铜等粘结

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

相形成的多相材料。随着钨含量提高，材料整体密度通常会提高；但最终密度还受到孔隙率、烧结致密度、成分均匀性以及具体制造工艺的影响。因此，钨合金配重的实际密度可以理解为材料组成和制造质量共同决定的工程参数，而不是简单等于纯钨密度。对于采用 W-Ni-Fe 或 W-Ni-Cu 的高密度配重，可以用：$\rho = \frac{m}{V}$ 计算实际平均密度，其中 ρ 为密度、m 为配重实际质量、V 为配重实际体积。对于规则圆柱、圆盘、方块等产品，可以通过尺寸测量得到体积，再结合精密称重计算实际密度；复杂异形件则通常需要结合三维尺寸测量、排水法或其他密度检测方法进行验证。

18.0 g/cm³意味着什么？

如果一个钨合金配重的密度为 18.0 g/cm³，那么理论上：$1\ cm^3 \times 18.0\ g/cm^3 = 18.0\ g$

所以 1 cm³材料约有 18 g 质量，100 g 配重的理论体积约为 5.56 cm³，500 g 约为 27.78 cm³，1 kg 约为 55.56 cm³。这正是高密度钨合金适合配重的主要原因之一。相比密度约 7.85 g/cm³的钢，同样制造 1 kg 配重时，18.0 g/cm³钨合金所需要的理论材料体积只有钢的约 43.6%。

如果用于手机振动机构、航空控制面、汽车曲轴或高速转子等空间受限结构，这种体积优势会直接转化为设计自由度。

密度越高是不是越好？

不一定。配重设计首先需要满足目标质量、安装空间和质量分布要求，而不是单纯追求最高密度。例如设计要求某个零件质量为 150 g，如果采用 18.5 g/cm³材料以后体积过小，导致安装、固定或加工困难，那么选择 17.5～18.0 g/cm³等级可能反而更加合理。此外，还需要同时考虑强度、延伸率、韧性、磁性能、加工性能、耐腐蚀性能、烧结收缩、尺寸公差和成本。特别是在动态平衡应用中，配重最终效果不仅取决于密度，还取决于质量中心位置、安装半径和安装角度。对于旋转系统而言，即使两个配重具有完全相同的质量，不同的安装位置也会产生不同的转动惯量。

不同密度对应的体积差异

以 1 kg 配重为例，可以直观看到不同密度产生的体积变化：

钨合金密度	1 kg 理论体积
13.5 g/cm³	74.07 cm³
15.0 g/cm³	66.67 cm³
16.5 g/cm³	60.61 cm³
17.0 g/cm³	58.82 cm³
17.5 g/cm³	57.14 cm³
18.0 g/cm³	55.56 cm³
18.5 g/cm³	54.05 cm³
19.0 g/cm³	52.63 cm³

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

可以看到，从 17.0 g/cm³提高到 18.5 g/cm³，1 kg 配重的理论体积只从约 58.82 cm³降低到约 54.05 cm³。因此，当产品已经达到较高密度后，继续提高密度带来的体积缩减并不是线性产生巨大收益，是否值得为更高密度付出材料和制造成本，需要结合实际结构进行判断。

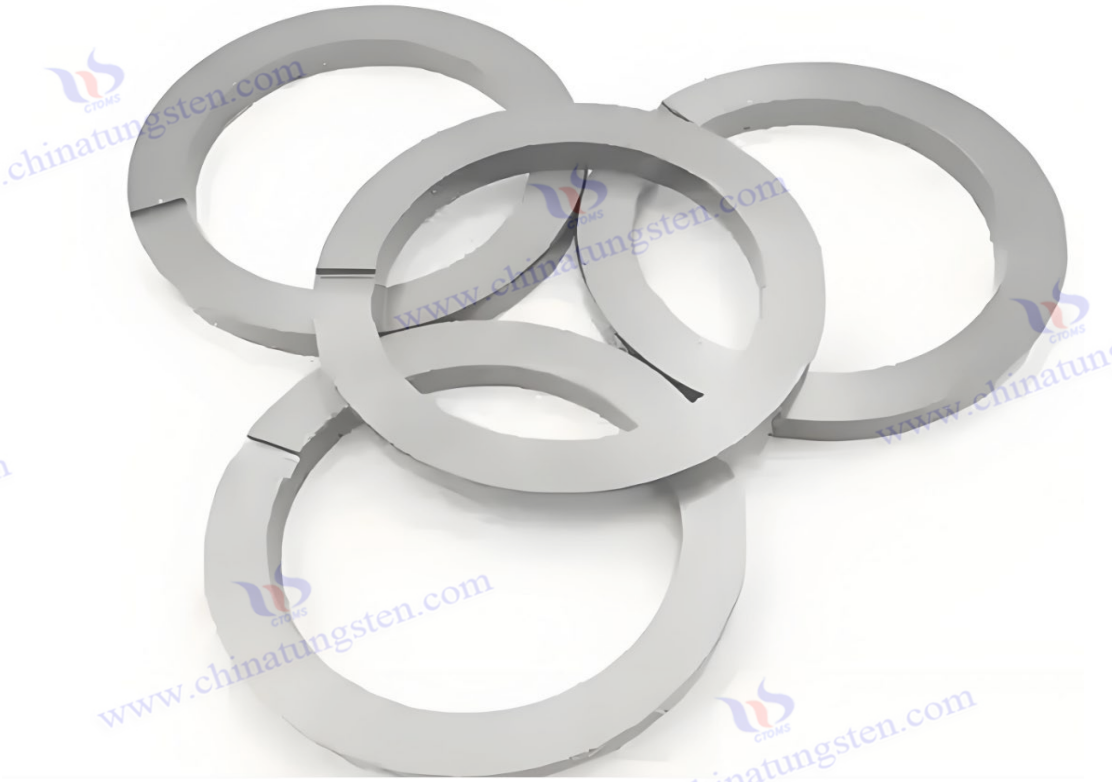
不同应用对密度的要求也不同

航空平衡件通常会采用约 17～18.5 g/cm³的 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）等级；部分航空旋翼平衡配重的公开规格约为 17.5～18.2 g/cm³，而针对航天惯性系统的部分产品规格可以达到约 17.8～18.5 g/cm³。对于手机振动马达、高尔夫、渔具以及普通工业配重，则可以根据体积限制、目标质量和成本选择更宽范围的 W-Ni-Fe 或 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）材料。

实际采购时应该看哪个密度？

如果是普通工程询价，不建议只写高密度钨合金，而应明确提出目标密度，例如 17.5±0.2 g/cm³、18.0±0.2 g/cm³或 18.5 g/cm³等级，同时明确材料体系、尺寸、公差、单件重量、表面处理和检测要求。如果是高精度动态配重，还应进一步规定重量公差、重心位置、同轴度、圆跳动、平衡等级等参数，因为材料密度合格并不代表最终配重件的动态平衡性能一定合格。

综合来看，如果用户问钨合金配重通常是多少密度，用于一般工程和产品介绍时可以采用约 17～18.5 g/cm³作为最具代表性的范围；如果需要描述整个钨合金配重产品体系，则可说明不同牌号约 13.5～19.0 g/cm³，具体数值必须以实际合金成分、牌号和烧结状态为准。



Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q5 钨合金配重为什么可以缩小体积？

钨合金配重之所以能够缩小体积，最根本的原因是钨合金具有很高的密度。在配重所需要的质量一定时，材料密度越高，实现相同质量所需要的材料体积就越小。钨合金的这一特性，使其特别适合安装空间有限、又要求较大配重质量的航空航天、汽车、工业转子、无人机、精密仪器和微型电子设备。密度越高，同样重量所需要的体积越小质量、密度和体积之间的基本关系为：$\rho = \frac{m}{v}$

也可以变换为：$V = \frac{m}{\rho}$

其中，V 为配重体积、m 为目标质量、ρ 为材料密度。当配重质量 m 已经确定时，体积 V 与密度 ρ 成反比。也就是说，同样需要增加 1 kg 质量，采用密度较高的材料，就可以使用更小的实体体积。常见高密度钨合金配重的密度大约为 17～18.5 g/cm³，而普通碳钢密度约为 7.85 g/cm³。以 18.0 g/cm³钨合金和 7.85 g/cm³钢为例：

$$V_{钨合金} = \frac{1000}{18.0} \approx 55.6\ cm^3$$

$$V_{钢} = \frac{1000}{7.85} \approx 127.4\ cm^3$$

因此，同样制造 1 kg 配重时，18.0 g/cm³钨合金理论上只需要约 55.6 cm³，而钢需要约 127.4 cm³。钨合金所需体积约为钢的 43.6%，体积可以减少约 56.4%。这就是所谓高密度带来的体积缩减效应。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

为什么钨合金的密度特别高？

钨（W，Tungsten，钨）的理论密度约为 19.25 g/cm³，是常用工程金属中密度非常高的一类材料。钨合金通常以大量钨作为主要组成部分，再加入镍、铁、铜等粘结相形成 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）体系。虽然加入粘结相以后，钨合金密度会低于纯钨，但高钨含量仍然使其能够达到约 17～18.5 g/cm³甚至更高的密度等级。所以，钨合金配重缩小体积并不是因为加工方式把材料压缩了，而是因为单位体积内包含了更多质量。

体积缩小对配重设计有什么实际意义？

真正有价值的地方，是它能够解决很多配重结构中的空间限制问题。例如一个设备内部需要增加 1 kg 配重。如果采用钢材，需要大约 127 cm³的材料空间；采用 18 g/cm³钨合金，只需要约 56 cm³。这样可以把配重设计成更薄的块、更小的圆柱、更窄的环或者更加紧凑的异形件。对于已经高度集成的设备而言，减少配重体积意味着可以减少对周围零件的干涉，同时为其他零部件留下更多安装空间。对旋转部件来说，小体积还意味着质量可以更加集中

钨合金配重不仅用于增加质量，还经常用于控制质量分布。例如汽车曲轴、工业转子、高速主轴、离心机、风机和泵等旋转部件，都需要控制质量中心的位置。旋转系统中的惯性特性可以用：$I = \sum m_i r_i^2$

表示，其中 I 为转动惯量、m_i 为质量单元、r_i 为该质量单元到旋转轴的距离。由于钨合金能够在很小空间内集中较大的质量，工程人员可以把配重布置在指定区域，从而更加精确地调整重心和转动惯量。例如某个转子需要增加 200 g 质量，而且安装位置只有一个狭窄凹槽。如果采用低密度材料，可能无法在规定空间内放入足够质量；使用高密度钨合金，则可以在相同凹槽中实现所需质量。因此，钨合金的价值不仅是让配重变小，还可以让配重的质量分布更加容易控制。

钨合金配重对航空航天设备尤其重要

航空器、航天器和无人机对结构空间和质量分布非常敏感。配重可能需要安装在机翼控制面、舵面、旋翼、执行机构或者惯性系统内部。如果配重体积过大，就可能增加结构尺寸、影响气动外形、占用其他设备安装空间，甚至迫使设计人员改变原有结构。采用高密度钨合金以后，可以在较小的结构包络内获得所需质量，因此常被用于飞行控制面配重、配平重量、抗颤振配重以及惯性系统等应用。相关钨重合金资料也将航空控制面、配平和惯性系统列为典型应用。

微型电子设备中的效果更加明显

手机振动组件、微型电机、电动牙刷、按摩设备等产品内部空间非常有限，但偏心振动配重又必须具有一定质量。假设振动机构需要 10 g 偏心质量：

采用 7.85 g/cm³钢材：$V = \frac{10}{7.85} \approx 1.27\ \text{cm}^3$

采用 18.0 g/cm³钨合金：$V = \frac{10}{18.0} \approx 0.56\ \text{cm}^3$

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

体积可以减少一半以上。对于微型电机而言，这种差异可能直接影响整个振动组件能否进一步缩小。因此，钨合金配重已经被用于振动电机、手机、电动牙刷和按摩设备等产品。

不是所有情况下都需要追求最高密度

虽然提高密度可以缩小体积，但工程设计不能简单理解为密度越高越好。例如设备要求安装 100 g 配重，而设计空间本身已经足够大，那么使用 17.0 g/cm³材料可能已经完全满足要求，没有必要为了进一步缩小几立方厘米而选择更高密度、更高成本的材料。同时还需要考虑材料的强度、韧性、磁性能、加工性能、耐腐蚀性能、烧结收缩、尺寸公差以及采购成本。

特别是精密动态平衡件，最终性能还取决于配重的质量、重心位置、安装半径、安装角度以及加工精度，而不仅仅是材料密度。

可以用一个简单比例快速判断

如果两个材料分别具有密度 ρ_1和 ρ_2，在配重质量相同的情况下：$\frac{V_1}{V_2}=\frac{\rho_2}{\rho_1}$

例如钢为 7.85 g/cm³、钨合金为 18.0 g/cm³，那么：$\frac{V_{钨合金}}{V_{钢}}=\frac{7.85}{18.0}\approx 0.436$

也就是说，同样质量下，18.0 g/cm³钨合金理论体积约为钢的 43.6%，这也是高密度钨合金能够显著缩小配重体积的数学依据。从工程角度看，钨合金配重的核心优势可以概括为：在质量要求不变的情况下，提高材料密度可以减少所需体积；体积减少以后，可以进一步改善有限空间内的安装自由度、质量集中程度以及重心和惯量调节能力。因此，钨合金真正适合做小型高质量配重的原因，是高密度与精密结构设计结合后，可以在更小的空间内实现相同的质量和更可控的质量分布。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2025 版



Q6 钨合金配重与钢配重有什么区别？

钨合金配重与钢配重最核心的区别在于材料密度不同，由此进一步影响配重的体积、质量集中能力、结构尺寸、动态平衡设计、加工方式和成本。对于同样质量的配重，钨合金可以做得明显更小；钢的优势则主要体现在材料成本低、供应广泛、加工成熟、制造经济性较好。因此，两者并不是简单的谁更好，而是适用于不同的空间条件、性能要求和成本目标。

钨合金配重与钢配重最明显的区别是密度

钨合金配重通常采用 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）体系，常见工程配重密度约为 17～18.5 g/cm³；钢的密度通常约为 7.85 g/cm³。质量、密度和体积的关系为：$V = \frac{m}{\rho}$

其中 V 为体积、m 为质量、ρ 为密度。假设都需要制造 1 kg 配重：

材料	典型密度	1 kg 理论体积
钨合金	18.0 g/cm³	55.6 cm³
钢	7.85 g/cm³	127.4 cm³

因此，同样是 1 kg 配重，18.0 g/cm³钨合金的理论体积只有钢的约 43.6%，也就是可以减少约 56.4%的材料体积。这也是钨合金在空间受限配重中的最大优势。公开产品资料显示，部分钨合金配重的密度可以达到约 17～18.5 g/cm³，而钢材通常维持在约 7.85 g/cm³左右。

钨合金配重与钢配重的体积差异会直接影响结构设计

如果设备内部有足够空间，钢配重通常可以满足要求；但如果配重必须安装在狭窄凹槽、薄壁结构、转子内部或者微型机构中，钢的低密度可能成为限制因素。例如某个机械结构

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

需要增加 500 g 质量，如果使用钢材，理论体积约为：$V_{钢} = \frac{500}{7.85} \approx 63.7\ cm^3$

如果使用 18.0 g/cm³钨合金：$V_{钨合金} = \frac{500}{18.0} \approx 27.8\ cm^3$

两者相差约 35.9 cm³。在大型设备中，这个差异可能并不重要；但在航空执行机构、汽车曲轴、无人机、手机振动机构以及高速转子中，几十立方厘米的空间差异可能直接影响结构设计。

钨合金更适合高质量、小体积配重

配重设计经常需要在固定位置增加一定质量，而安装空间又受到限制。钨合金能够在较小体积内集中较大的质量，因此适合：汽车曲轴配重、赛车配重、航空控制面配重、无人机配重、高速转子平衡块、精密仪器配重、手机振动配重、惯性系统配重等。相关资料显示，高密度钨合金已经用于汽车曲轴和传动系统动态平衡、轮毂平衡以及航空和惯性系统等应用。钢配重则更适合安装空间较充裕、对体积要求不高、同时需要控制制造成本的场合。

对动态平衡而言，钨合金配重与钢配重都可以使用

不能简单理解为钨合金可以做动态平衡，而钢不能。实际上，钢同样广泛用于各种平衡块和配重件。真正影响动态平衡的是质量分布，而不是材料名称。旋转系统中的离心力可以近似表示为：$F = m\omega^2 r$

其中 F 为离心力、m 为质量、ω 为角速度、r 为质量质心到旋转轴的距离。在质量 m、转速 ω 和安装半径 r 相同的情况下，钨合金与钢产生的理论离心力并不会因为材料不同而自动改变。区别在于：钨合金能够用更小的几何尺寸获得相同质量，因此在结构空间受限的情况下，可以把规定质量布置到钢配重难以进入的位置。对于转动惯量：

$$I = \sum m_i r_i^2$$

钨合金较小的体积也有利于将质量集中在特定位置，从而获得更加灵活的惯量设计。

钨合金配重与钢配重比较，钢的成本优势通常更加明显

这是钨合金与钢在实际采购中的重要区别。钢属于成熟的大宗工程材料，原材料来源广、供应链成熟、标准牌号丰富，因此普通钢配重通常具有较低的材料成本。钨合金则含有较高比例的钨，钨属于高价值金属，同时其粉末冶金制造、烧结、后续精密加工也会增加生产成本。因此，在安装空间充足、质量要求不高、产品对体积不敏感的情况下，钢配重往往具有明显的经济性。而当结构空间受到严格限制时，钨合金较高的材料成本可能通过减少体积、减少结构改动以及提高系统集成度来体现其工程价值。

钨合金配重与钢配重加工方式也有所不同

钢材具有成熟的车削、铣削、钻孔、磨削和攻螺纹工艺，大量机械加工企业都能够处理，因此钢配重的加工成本和供应难度通常较低。钨合金虽然可以进行车削、铣削、钻孔、磨

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

削等加工，但由于高钨含量、多相组织以及较高密度等特点，其加工工艺需要针对具体牌号进行优化。刀具材料、切削参数、冷却方式和加工余量都会影响刀具寿命和尺寸稳定性。对于大批量、小型、结构重复的钨合金配重，粉末冶金可以通过模压和烧结获得接近最终尺寸的坯体，再进行必要的精加工，从而减少大量切削加工。

钨合金和钢的材料性能也不同

对比项目	钨合金配重	钢配重
密度	约 17～18.5 g/cm³常见	约 7.85 g/cm³
同质量体积	小	大
小型化能力	强	一般
材料成本	较高	通常较低
供应普及度	相对较低	很高
机械加工	可以加工，但工艺要求较高	工艺成熟
粉末冶金适应性	很适合	通常不是首选
高质量集中	很适合	需要更大体积
空间受限配重	优势明显	可能受到体积限制
普通大型配重	可以	通常经济性较好
高速动态配重	可以	同样可以
微型振动配重	特别适合	容易受到体积限制

磁性能也可能成为选择因素

钢配重并不是一个单一材料体系，不同钢种的磁性能差异很大。碳钢和部分铁磁性钢材通常具有明显的磁响应；而 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）钨合金也可能表现出一定磁响应，具体取决于镍、铁比例及微观组织；W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）通常具有不同于铁基钢材的磁特性。如果配重附近存在磁传感器、霍尔元件、陀螺仪或其他磁敏感设备，就不能只根据密度选择材料，而应提出具体磁导率或磁响应要求，并以实际牌号检测数据为准。

耐腐蚀性不能简单地认为钨合金一定优于钢

钢的耐腐蚀能力高度取决于具体钢种以及表面处理。例如不锈钢与普通碳钢在腐蚀性能方面存在明显差异。钨合金中的 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）体系也需要根据使用环境选择表面处理和防护措施。如果用于汽车底盘、船舶、户外设备或者潮湿环境，应综合考虑盐雾、湿热、介质腐蚀和电偶腐蚀，而不能仅凭材料名称判断耐腐蚀能力。

什么时候更适合选择钨合金？

如果需求是高质量、小体积，或者配重必须安装在狭窄空间内，钨合金通常更容易满足结构要求。例如同样 1 kg 质量，18.0 g/cm³钨合金只需要约 55.6 cm³，而钢需要约 127.4 cm³。如果需求是大型、普通、成本敏感型配重，同时设备内部有足够安装空间，那么钢可以提供更成熟的供应链和更低的材料成本。如果用于高速转子或精密平衡系统，则还需要进一步比较质量公差、重心位置、同轴度、圆跳动、安装方式以及动平衡等级，不能仅依据密度决定材料。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

钨合金配重与钢配重的根本差异，可以概括为：钢的优势更多体现在低成本、易采购和成熟加工，而钨合金的核心优势则是高密度带来的小体积和高质量集中能力。所以，钨合金并不是用来全面取代钢配重，而是在空间受限、高质量集中、精密平衡以及微型化等需求下，通过更高的材料密度解决钢材体积过大的问题。



Q7 钨合金配重与铅配重有什么区别？

钨合金配重与铅配重都属于高密度配重材料，基本用途都是在有限或特定位置增加质量、调整重心、平衡载荷或改变惯性参数，但两者在密度、体积、机械强度、可加工性、环保与安全性、耐久性、成本以及应用场景方面存在明显差异。最直观的区别是：铅（Pb，Lead，铅）的密度约为 11.34 g/cm³，而常见高密度钨合金配重通常约为 17～18.5 g/cm³，部分钨重合金产品范围可达到约 16.5～19.0 g/cm³。因此，在相同质量下，钨合金需要的体积明显小于铅。

（1）密度不同，决定了配重体积不同

配重的体积可以通过下式计算：$V = \frac{m}{\rho}$

其中，V 为配重体积、m 为配重质量、ρ 为材料密度。假设都需要制造 1 kg 配重：

材料	典型密度	1 kg 理论体积
钨合金	18.0 g/cm³	55.6 cm³
铅	11.34 g/cm³	88.2 cm³
钢	7.85 g/cm³	127.4 cm³

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

因此，18.0 g/cm³钨合金实现相同质量时，理论体积约为铅的 63%，也就是说可以减少约37%的材料体积。这也是钨合金相对于铅配重最直接的结构优势。部分钨合金配重产品的公开规格为 13.5～18.2 g/cm³，而高密度钨合金产品可以达到约 18.5 g/cm³。对于汽车轮毂、航空控制面、无人机、精密仪器、手机振动组件等安装空间有限的部件，这种差异会更加明显。

（2）钨合金更容易实现小体积、大质量

铅已经属于常见的高密度工程材料，但钨合金的密度更高，因此在相同质量要求下能够进一步缩小尺寸。例如一个设备内部需要安装 500 g 配重：

铅：$V_{Pb} = \frac{500}{11.34} \approx 44.1\ cm^3$

18.0 g/cm³钨合金：$V_{WHA} = \frac{500}{18.0} \approx 27.8\ cm^3$

其中 WHA（Tungsten Heavy Alloy，钨重合金）通常指以钨为主要成分、以镍铁或镍铜等作为粘结相的高密度合金。因此，钨合金只需要约 63%的铅体积即可获得相同质量。对于大型船舶压载来说，这种体积优势可能没有那么突出，因为结构空间通常比较充裕；但对于飞机、汽车、机器人关节、高速转子以及微型电子设备来说，体积缩减可能直接影响产品结构。

（3）钨合金机械强度明显高于铅

这是两种材料非常重要的区别。铅属于典型的软质金属，硬度低、强度较低，受到较大机械载荷或长期振动时容易发生塑性变形。钨重合金则通过钨颗粒与镍、铁、铜等粘结相形成复合组织，具有明显高于铅的强度和耐磨能力。部分钨合金产品公开资料给出的抗拉强度可以达到数百 MPa 甚至更高，而铅的机械强度明显较低。这意味着如果配重需要承受：高速旋转、持续振动、冲击载荷、夹紧力、螺纹连接、压配载荷或长期机械摩擦，钨合金通常具有更好的结构稳定性。铅则更适合低机械载荷、固定式或可以通过外壳保护的配重结构。

（4）钨合金不容易像铅那样发生明显塑性变形

这一点与机械强度直接相关。如果采用铅块作为精密配重，长期受到夹紧、碰撞、振动或者安装压力后，配重形状可能发生变化。一旦质量中心的位置发生变化，就可能影响原来的平衡状态。钨合金的强度和硬度明显更高，在正常设计载荷范围内能够更好地保持几何尺寸。

对于高速转子而言，这一点尤其重要，因为配重一旦发生位移或变形，可能导致旋转系统重新产生不平衡。

（5）钨合金更适合精密动态平衡

配重并不只是静态增加质量。在汽车曲轴、传动轴、高速主轴、离心机、风机、泵、压缩机以及航空旋转部件中，配重需要参与动态平衡。旋转质量产生的离心力可以近似表示为：

$$F = m\omega^2 r$$

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

其中，F 为离心力、m 为配重质量、ω 为角速度、r 为质量质心到旋转轴的距离。如果配重的位置发生变化，r 就可能发生变化，从而影响动态平衡。钨合金具有较高的机械稳定性，可以加工成圆柱、圆盘、环形、块状、偏心结构以及带孔配重等精密零件，并通过尺寸控制和后续动平衡检测实现质量位置控制。因此，钨合金目前广泛用于高速转子、汽车平衡系统、航空配重以及精密机械等场景。

（6）铅的柔软性有时反而是优势

不能简单认为铅的机械性能较低就是缺点。铅非常柔软、容易切割、压制和成形，因此对于一些结构简单、低成本、无需承受明显机械载荷的配重，铅仍然具有加工方便的特点。例如某些传统配重可以通过铅块冲压、浇铸或简单机械成形完成。但是，如果产品要求严格控制尺寸、长期保持形状、承受高速旋转或机械振动，那么铅的柔软性就可能成为限制因素。

（7）钨合金的环保与职业安全属性更有优势

铅最大的特殊问题在于其毒性。铅及其化合物具有明确的健康危害，因此在制造、加工、使用和废弃处理过程中需要采取相应的职业卫生和环境管理措施。钨合金并不能简单概括为在所有环境下都绝对无风险，但以 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）为代表的钨重合金通常不具有铅材料所涉及的同类铅毒性问题，因此在许多对铅使用有限制的场景中具有材料替代价值。部分公开资料也将钨合金作为传统铅配重的替代方案。实际产品是否满足某一地区的环保法规，则仍应根据具体合金成分、表面处理、生产过程以及目标市场法规进行确认。

（8）耐腐蚀和长期尺寸稳定性存在差异

铅本身具有一定耐腐蚀能力，但在不同介质、湿度、盐雾和长期服役环境下仍可能产生表面腐蚀或形成腐蚀产物。钨合金的耐腐蚀性能则与具体体系密切相关，W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 不能完全等同看待，还需要结合粘结相、表面状态以及使用介质评价。如果用于汽车、船舶、户外设备或者海洋环境，通常还需要考虑镀镍、镀锌、涂层或其他防护方案，而不能仅凭材料名称判断最终耐腐蚀性能。

（9）钨合金和铅的磁性能也不同

铅基本属于非磁性材料，因此在对磁场敏感的设备中具有一定优势。钨合金则需要进一步区分材料体系。W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）可能具有一定磁响应，其具体磁性能受到铁、镍比例和微观组织影响；W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）通常表现为非磁性或非常低的磁响应，因此更适合某些磁敏感设备。所以，如果配重安装在磁传感器、电子罗盘、磁编码器或其他磁敏感部件附近，不能只比较密度，还应明确磁导率或磁响应指标。

（10）加工方式存在明显差异

铅非常软，加工和成形相对容易，但这并不意味着它适合所有精密加工场景。由于材料容易产生变形，加工后的尺寸稳定性和表面质量控制需要结合具体工艺。钨合金则通常采用粉末冶金（Powder Metallurgy，粉末冶金）制造，再根据最终要求进行车削、铣削、钻孔、攻螺纹、磨削等加工。由于钨含量高，加工参数、刀具选择和冷却方式需要针对材料牌号进行优化。部分钨合金配重供应商也提供烧结后机械加工和螺纹加工。因此，两种材

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

料的制造逻辑并不是简单的同一种加工工艺换一种材料。

（11）成本方面，铅通常更有优势

如果只比较材料价格和普通配重制造成本，铅通常比高密度钨合金更经济。钨合金含有较高比例的钨，而钨属于高价值金属；同时，钨合金通常需要经过粉末冶金、烧结以及必要的精密加工。因此，其材料和制造成本通常明显高于普通铅配重。但是，实际项目不能只比较每公斤材料价格。如果采用铅以后需要增加配重安装空间、修改结构、增加保护外壳，或者无法满足重量集中和动态平衡要求，那么钨合金的较高材料成本可能通过结构优化得到部分抵消。因此，更合理的比较方式是比较整个配重系统的综合成本，而不仅是材料单价。

（12）两种材料的典型应用重点不同

铅由于密度较高、价格相对低、易成形，过去广泛用于车辆平衡块、船舶压载、工业配重以及辐射防护等场景。随着环保法规、职业健康要求和设备小型化需求提高，部分应用开始寻找铅的替代材料。钨合金凭借更高密度、更高机械强度以及较好的尺寸稳定性，在航空、汽车、工业平衡、电子产品、医疗设备等领域具有较强的应用价值。例如汽车领域的资料显示，高密度钨合金可用于曲轴、传动轴和车轮动态平衡，在空间有限的情况下以较小体积提供规定质量。

（13）钨合金与铅配重综合对比

对比项目	钨合金配重	铅配重
典型密度	约 17～18.5 g/cm³	约 11.34 g/cm³
相同质量体积	小	较大
机械强度	高	低
硬度	较高	很低
抗变形能力	较好	较差
高速旋转适应性	较好	受到机械性能限制
精密动态平衡	适合	需视结构而定
加工难度	较高	较低
材料成本	较高	通常较低
磁性能	取决于 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 等体系	基本非磁性
环境与职业健康	通常不存在铅的同类毒性问题	需要重点考虑铅暴露和废弃管理
小型化能力	很强	一般
长期尺寸稳定性	较好	容易发生塑性变形
典型优势	高密度、小体积、高强度、精密配重	低成本、易成形、密度较高

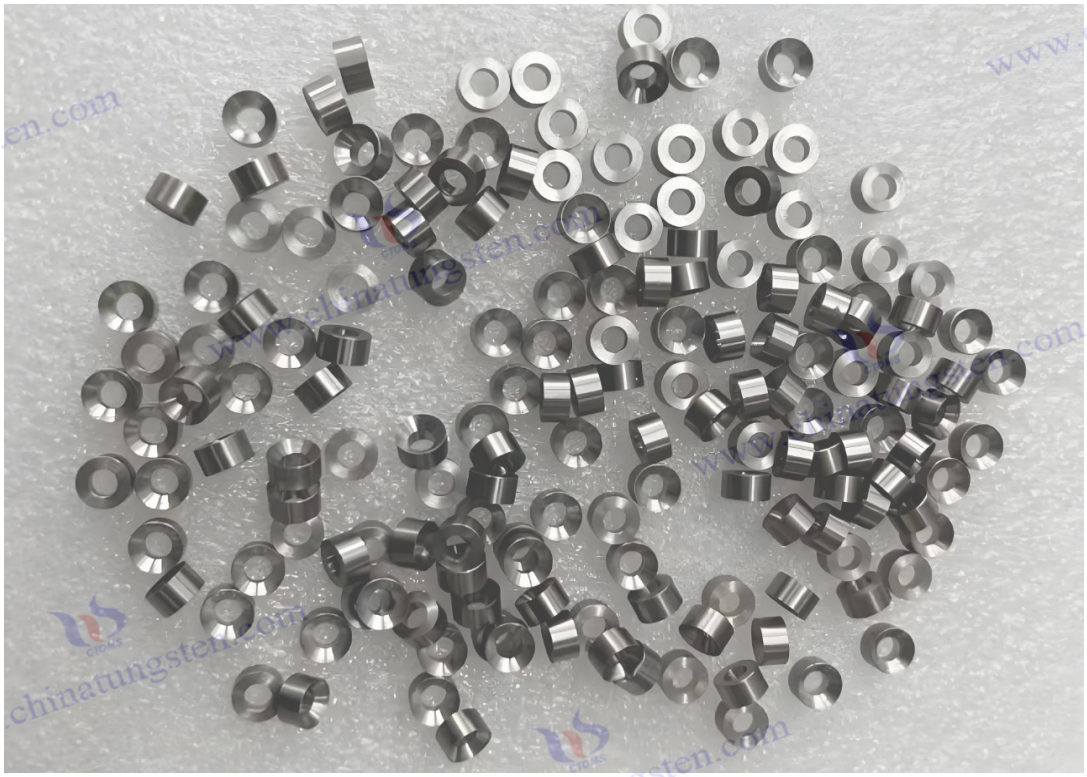
（14）到底应该选择钨合金还是铅？

如果主要目标是低成本、结构空间充足、机械载荷较低，并且所在市场和应用环境允许使用铅，那么铅仍然可以满足一些传统配重需求。如果要求在非常有限的空间内获得较大质量，同时配重需要承受振动、冲击、高速旋转或者长期机械载荷，钨合金的优势会更加明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

显。对于航空、赛车、高速转子、精密仪器、微型电子设备等领域，这种高密度与高强度组合尤其有价值。如果还涉及环保限制、职业健康要求或者铅材料使用受限的市场，钨合金也可以作为重要的替代材料进行评估。

钨合金与铅配重的区别可以概括为：铅的主要优势是成本低、密度较高且容易成形；钨合金则进一步提高了密度，使相同质量的配重体积显著缩小，同时具有更高的机械强度和更好的尺寸稳定性。对于空间受限和高精度动态平衡场景，钨合金的工程价值更加突出；对于普通、低成本、大空间配重，铅仍可能具有成本方面的优势。



Q8 钨合金配重与纯钨相比有哪些优势？

钨合金配重与纯钨（Pure Tungsten，纯钨）都具有很高的密度，但用于实际配重零件时，两者的设计取向并不完全相同。纯钨的主要优势是钨含量高、密度接近理论最高值、熔点极高，并具有优异的高温性能；钨合金配重则是在保持较高密度的基础上，通过加入镍、铁、铜等粘结相，改善延性、韧性、加工性能和综合制造经济性。因此，对于大多数需要钻孔、攻螺纹、车削、铣削、异形加工以及长期承受振动的精密配重件，钨合金通常具有更好的工程适应性。公开材料数据显示，纯钨密度约为 19.3 g/cm³，而常见钨重合金密度约为 17～18.5 g/cm³，部分牌号可达到约 18.5～18.8 g/cm³。

（1）钨合金在保持高密度的同时，获得更好的综合性能

纯钨的最大特点是高密度。钨（W，Tungsten，钨）的理论密度约为 19.25 g/cm³，实际高纯钨产品通常约为 19.3 g/cm³。钨重合金（Tungsten Heavy Alloy，钨重合金）则通常由约 90%～97%质量分数的钨，以及镍铁或镍铜粘结相组成。由于加入了密度低于钨的粘结相，其密度通常低于纯钨，但仍然可以保持约 17～18.5 g/cm³的高密度水平。例如日本钨业株

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

式会社（Nippon Tungsten Co., Ltd.）公开的部分重合金牌号中，97W-2Ni-1Cu 密度为 18.5 g/cm³、97W-2Ni-1Fe 密度为 18.4 g/cm³，已经非常接近纯钨的密度。所以，从配重角度看，钨合金并没有牺牲大量密度来换取加工性能，而是在密度略低的情况下获得更加均衡的综合性能。

（2）钨合金的延性通常优于纯钨

这是两者最重要的区别之一。纯钨虽然强度高、熔点极高，但在室温条件下延性较低，受到缺口、冲击、局部应力集中或者不合理加工时，更容易发生脆性断裂。W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）等钨重合金通过金属粘结相将钨颗粒结合起来，使材料形成钨颗粒与韧性金属基体组成的复合组织，从而提高整体延性和断裂抗力。相关材料研究和工程资料均指出，钨重合金相比纯钨具有更好的延性和韧性。这对于配重尤其重要，因为实际配重不仅要承受使用载荷，还可能经历运输、装配、夹紧、螺纹连接、振动和冲击。

（3）钨合金更适合制造带孔、螺纹和复杂结构的配重

纯钨的脆性使复杂机械加工更加困难。对于简单块状或者圆柱状纯钨零件，这种问题可能尚可控制，但如果需要加工深孔、薄壁、槽、内螺纹、外螺纹、台阶、偏心结构等，就需要更加谨慎地设计工艺。钨重合金由于具有金属粘结相，通常具有更好的机械加工适应性，可以采用车削、铣削、钻孔、攻螺纹、磨削以及电火花加工（Electrical Discharge Machining，电火花加工）等方法完成复杂结构。对于配重产品而言，这一点非常重要，因为实际产品很少只是一个没有任何安装结构的实心块。例如一个汽车转子配重可能需要定位孔、安装孔和固定螺纹；一个无人机配重可能需要台阶和安装槽；一个精密仪器配重可能需要偏心孔或精密定位面。钨合金在这些结构上的制造适应性通常优于纯钨。

（4）钨合金更适合批量精密加工

纯钨的加工难度不仅影响单件制造，也会影响批量生产的加工节拍、刀具寿命、加工成本和尺寸一致性。钨合金通常采用粉末冶金（Powder Metallurgy，粉末冶金）制造，通过压制、烧结等工艺先获得接近最终形状的高密度坯体，再进行必要的精加工。这种工艺路线特别适合配重产品，因为配重往往具有大量重复的标准结构。通过模具成形和后续少量机械加工，可以减少完全依靠切削从整块材料中去除大量材料的需求。因此，对于大批量的圆柱、圆盘、环形、块状以及异形钨合金配重，材料利用率和生产效率通常比直接加工纯钨更加有利。

（5）钨合金的制造成本通常低于纯钨

纯钨的高纯度要求、高熔点以及较复杂的加工制造过程，使其成为成本较高的工程材料。钨重合金虽然仍然含有大量钨，但通过加入镍、铁或铜粘结相降低了纯钨比例，同时改善了烧结和后续机械加工条件。相关材料供应商也明确将较低成本和更好的加工性能列为钨重合金相对于纯钨的重要优势。因此，如果目标只是获得一个高密度配重，而没有纯钨所具有的极端高温性能要求，那么使用纯钨可能属于性能过剩。对于大批量配重而言，钨合金通常能够在材料性能和制造成本之间取得更合理的平衡。

（6）钨合金的密度虽然略低，但对普通配重影响有限

从纯粹的密度角度看，纯钨确实优于钨合金。假设纯钨密度为 19.3 g/cm³，钨合金密度为

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

18.0 g/cm³，那么制造 1 kg 配重时：

$$V_{纯钨} = \frac{1000}{19.3} \approx 51.8\ cm^3$$

$$V_{钨合金} = \frac{1000}{18.0} \approx 55.6\ cm^3$$

两者只相差约 3.8 cm³。虽然纯钨密度更高，但在很多实际配重设计中，18.0 g/cm³左右的钨合金已经能够提供非常接近纯钨的质量集中能力。如果设计空间本身允许多出几立方厘米，那么为了获得纯钨额外约 7%的密度优势而承担更高的加工难度，并不一定具有实际价值。

（7）钨合金的机械可靠性更适合振动环境

配重经常工作在振动环境中，例如汽车发动机、赛车、高速转子、无人机、工业电机和精密运动机构。如果材料本身存在较明显的脆性，配重中的孔、槽、螺纹根部以及尖角位置就可能成为应力集中区域。钨重合金的粘结相可以提供一定的塑性变形能力和断裂缓冲能力，因此在机械振动和冲击条件下通常具有更加宽容的结构设计窗口。W-Ni-Fe 重合金的两相组织中，钨颗粒嵌入具有一定塑性的镍铁基体，这也是其综合机械性能的重要来源。这并不意味着钨合金不会断裂，而是其材料体系通常比室温下的纯钨更加适合承受实际机械结构中的复杂载荷。

（8）钨合金可以通过不同粘结相实现性能调整

纯钨基本上就是以钨本身的材料特性为核心，而钨合金可以通过改变粘结相体系和钨含量来调整材料性能。例如：W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）通常侧重强度、延性和综合机械性能；W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）则可以用于对磁性能等有特殊要求的场合。因此，配重设计不必局限于一个固定密度和固定性能，而可以根据质量、尺寸、强度、磁性能和加工要求选择相应牌号。这对于精密仪器、航空配重、汽车平衡件和电子设备尤其重要。

（9）钨合金更适合精密配重的后续加工

很多配重并不是烧结完成以后直接使用，而需要进行尺寸修正。例如：外径需要达到 ±0.02 mm；安装孔需要控制孔径；配重两端需要保证平行度；旋转件需要控制同轴度和圆跳动；螺纹需要满足规定的配合等级。钨重合金通常能够通过机械加工实现这些后续尺寸控制。对于纯钨，则需要针对其脆性和加工特性采用更加谨慎的工艺方案。相关工程资料显示，钨重合金可以进行 CNC（Computer Numerical Control，计算机数控）车削、铣削、钻孔和螺纹加工，并用于精密配重和动态平衡件。

（10）钨合金更适合大多数实际配重应用

纯钨最突出的优势是高纯度、高熔点、高密度和高温稳定性，因此更适合高温炉部件、加热元件、真空部件、某些 X 射线（X-ray，X 射线）靶材等对高温性能有特殊要求的场景。钨合金则更偏向高密度结构件，包括配重、平衡块、减振部件、辐射屏蔽件以及其他需要高密度和机械加工性能兼顾的产品。对于普通配重来说，通常并不需要 3422 ℃左右的纯钨熔点，也不需要纯钨的极端高温性能。因此，把一部分纯钨替换为粘结相，换取更好的

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

机械加工性能和韧性，往往更加符合实际需求。

（11）为什么配重通常更倾向于钨合金而不是纯钨？

配重真正需要的通常不是最高纯度的钨，而是高密度与机械性能、加工性能和成本之间的综合平衡。例如一个 1 kg 航空配重，如果纯钨需要约 51.8 cm³，而 18.0 g/cm³钨合金需要约 55.6 cm³，那么两者只相差约 3.8 cm³。如果使用钨合金能够明显降低加工难度、提高结构韧性并降低制造成本，那么这几立方厘米的体积差异通常是可以接受的。这也是钨重合金被广泛用于配重和平衡件的重要原因。相关行业资料明确将其高密度、较好的延性和可加工性作为相对于纯钨的主要工程优势。

（12）钨合金与纯钨的核心性能对比

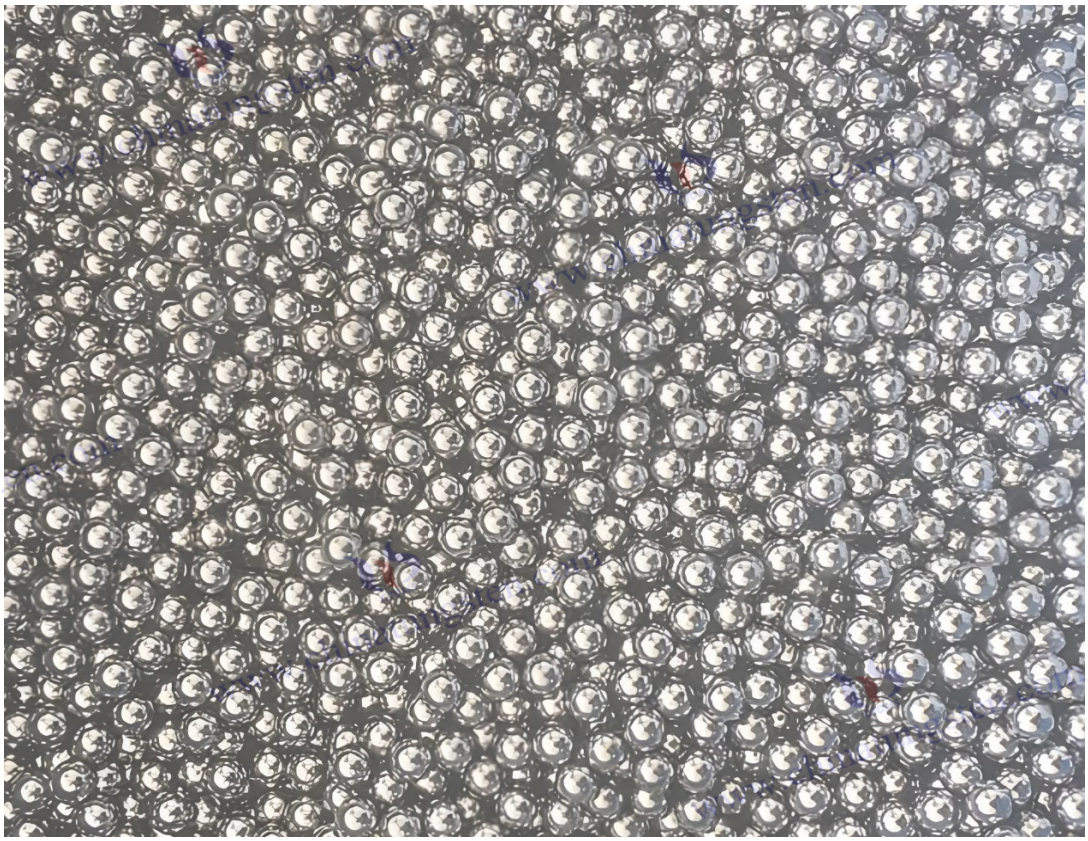
对比项目	钨合金配重	纯钨配重
典型密度	约 17～18.5 g/cm³	约 19.3 g/cm³
钨含量	通常约 90%～97%	通常≥99.95%高纯等级
体积小型化	很强	最强
室温延性	通常较好	较低
韧性	通常优于纯钨	相对较低
机械加工	相对容易	较困难
钻孔、攻螺纹	较适合	工艺要求高
复杂异形结构	较适合	难度较高
批量制造	粉末冶金适应性好	制造难度较高
材料成本	通常低于纯钨	通常较高
高温性能	较好，但受粘结相限制	极高
配重应用	非常适合	可以，但可能性能过剩
极端高温应用	有限	优势明显

（13）什么情况下反而应该选择纯钨？

如果配重同时承担极端高温环境下的结构或功能作用，例如长期接近纯钨高温性能优势的应用，那么纯钨仍然具有不可替代的价值。另外，如果结构空间极端受限，必须在每一个立方厘米中获得尽可能大的质量，并且产品能够接受纯钨更高的加工成本，那么纯钨约 19.3 g/cm³的密度优势也可能成为选择依据。因此，不能简单认为钨合金全面优于纯钨。两者的合理选择取决于具体工况。

钨合金配重相对于纯钨最大的优势，可以概括为在密度略有下降的情况下，换取更好的延性、韧性、加工性能、结构适应性和制造经济性。纯钨的优势主要是最高密度、高纯度和极高温性能；钨合金则更强调高密度与实际制造能力之间的平衡。对于需要钻孔、攻螺纹、车削、铣削、复杂异形加工以及长期承受振动的配重件，W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）通常具有更高的工程实用性。简单来说，纯钨追求的是更接近材料本身的极限密度和高温性能，而钨合金追求的是高密度、可加工性、韧性和成本之间的综合平衡。对于绝大多数常规高密度配重，这种综合平衡往往比单纯追求最高密度更有实际意义。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



二、关于钨合金配重的密度、重量与计算问题

钨合金配重的密度、重量与体积之间存在直接的数学关系，也是进行配重选型、尺寸设计、重量核算和供应商技术确认时最基础的一组参数。对于常见高密度钨合金配重，实际密度通常约为 17.0～18.5 g/cm³，具体取值取决于钨（W，Tungsten，钨）含量、镍（Ni，Nickel，镍）和铁（Fe，Iron，铁）或铜（Cu，Copper，铜）等粘结相组成以及具体材料牌号。

密度、质量与体积的基本关系

密度的基本公式为 ρ=m/V，其中 ρ 为密度、m 为质量、V 为体积。由此可以得到 m=ρV，以及 V=m/ρ。实际计算钨合金配重时，只要已知其中两个参数，就可以求出第三个参数。例如，一块密度为 18.0 g/cm³、体积为 10 cm³ 的钨合金配重，其质量为 m=18.0×10=180 g；如果已经确定需要制作 500 g 的 18.0 g/cm³ 钨合金配重，则所需体积为 V=500/18.0≈27.78 cm³。

常见密度对应的重量和体积

以 1 kg 钨合金配重为例，不同密度对应的理论体积大致为：

密度	1 kg 所需体积
17.0 g/cm³	58.82 cm³
17.5 g/cm³	57.14 cm³
18.0 g/cm³	55.56 cm³
18.5 g/cm³	54.05 cm³

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

由此可以看出，在重量相同的情况下，密度越高，所需体积越小。比如 1 kg、18.0 g/cm³ 的钨合金体积约为 55.56 cm³，而同样质量的钢（Steel，钢）按照约 7.85 g/cm³ 计算，体积约为 127.39 cm³，前者体积约减少 56.4%。

已知尺寸如何计算钨合金配重重量

如果配重是规则形状，可以先计算几何体积，再通过 m=ρV 计算重量。矩形配重的体积为 V=LWH，其中 L 为长度、W 为宽度、H 为高度；圆柱形配重的体积为 $V=\pi d^2h/4$，其中 d 为直径、h 为高度；圆环形配重的体积为 $V=\pi h(D^2-d^2)/4$，其中 D 为外径、d 为内径、h 为高度。例如，一个尺寸为 20 mm×20 mm×10 mm 的钨合金配重，其体积为 4 cm³。如果材料实际密度为 18.0 g/cm³，则重量约为 72 g。

不同密度对配重尺寸的影响

假设产品要求重量固定为 100 g，那么采用 17.5 g/cm³ 材料时，体积约为 5.71 cm³；采用 18.0 g/cm³ 时约为 5.56 cm³；采用 18.5 g/cm³ 时约为 5.41 cm³。因此，高密度材料的主要价值之一并不是单纯让配重变重，而是在目标重量不变的情况下，把配重做得更加紧凑。这对于汽车曲轴、航空器控制面、工业转子、无人机、手机振动结构以及高尔夫球杆等空间受限部件尤其重要。

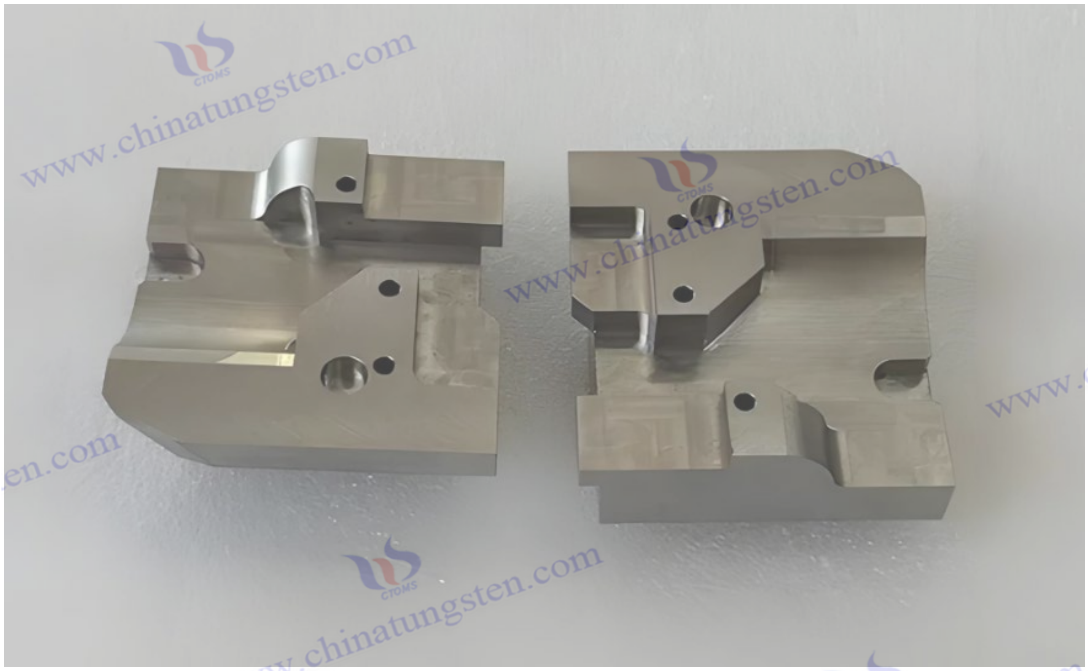
实际产品为什么不能只按照理论密度计算

工程计算时需要区分理论密度、实际烧结密度和成品重量。钨合金属于多相材料，其实际密度受到材料成分、粉末状态、成形条件、烧结工艺以及内部孔隙等因素影响。因此，图纸上如果要求 18.0 g/cm³，不能简单理解为所有批次都天然等于 18.000 g/cm³。对于精密配重，更重要的是最终成品的实际质量、尺寸、重心（CG，Center of Gravity，重心）以及必要时的动平衡性能。特别是旋转零件，即使总体重量准确，如果质量分布位置存在偏差，也可能产生明显的不平衡力。在实际钨合金配重生产中，中钨智造（CTIA GROUP）这类具备粉末冶金、烧结和精密机械加工能力的供应商，通常需要结合材料密度、目标重量、尺寸公差和最终使用工况进行综合控制，而不是只控制一个密度数值。

配重计算中常见的几个换算

如果设计人员已经确定目标重量，可以直接使用 V=m/ρ。比如 10 g、18.0 g/cm³ 的钨合金体积约为 0.556 cm³；100 g 约为 5.56 cm³；500 g 约为 27.78 cm³；1 kg 约为 55.56 cm³。如果已经确定体积，则使用 m=ρV。例如 20 cm³ 的 18.0 g/cm³ 钨合金重量约为 360 g；50 cm³ 则约为 900 g。如果还需要进行质量分布设计，则仅计算重量是不够的。例如配重产生的质量力矩可表示为 M=mr，其中 m 为质量、r 为质量到参考轴线的距离；旋转部件中的离心力可表示为 $F=m\omega^2r$，其中 ω 为角速度。由此可见，同样 100 g 的钨合金配重，安装位置不同，对整体平衡和惯性特性的影响也可能明显不同。从工程应用角度看，钨合金配重的密度计算实际上是整个设计链条的起点，后续还需要结合重量公差、尺寸公差、重心位置、安装方式、动态平衡要求以及材料牌号进行综合计算。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q9 钨合金配重的密度如何计算？

钨合金配重的密度计算方法并不复杂，最基本的计算公式是：$\rho = \frac{m}{v}$ ，其中，ρ 为材料密度、m 为配重质量、V 为配重实际体积。对于已经加工完成的钨合金配重，通常通过精密称重获得质量，再通过尺寸测量或其他方法确定体积，最后计算出实际密度。工程上常用单位为 g/cm³，也可以使用 kg/m³，两者之间的换算关系为 1 g/cm³ = 1000 kg/m³。

（1）最基本的密度计算公式

如果一个钨合金配重质量为 180 g，实际体积为 10 cm³，那么：$\rho = \frac{180}{10} = 18.0\ \mathrm{g/cm^3}$。因此，该配重的实测密度为 18.0 g/cm³。对于钨合金配重来说，这个计算结果通常需要与材料牌号规定的理论密度或供应商提供的密度范围进行比较，以判断材料的致密程度和生产一致性。常见高密度钨合金配重的密度大约在 17～18.5 g/cm³范围内，不同 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）、W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）牌号会有所不同。

（2）规则圆柱形钨合金配重如何计算密度

如果配重是圆柱体，可以先通过直径和高度计算体积。圆柱体体积公式为：$V = \frac{\pi d^2 h}{4}$，其中，d 为圆柱直径、h 为圆柱高度。例如，一个钨合金圆柱配重的直径为 20 mm，高度为 35 mm，质量为 197.9 g。首先统一单位：

$d = 2.0\ \mathrm{cm}$

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

$h = 3.5$ cm

所以：$V = \frac{\pi \times 2.0^2 \times 3.5}{4} \approx 10.996\ \text{cm}^3$

然后计算密度：$\rho = \frac{197.9}{10.996} \approx 18.0\ \text{g/cm}^3$

由此可以判断该样品的实际密度约为 18.0 g/cm³。

（3）方形或矩形配重的密度如何计算

如果钨合金配重为规则的长方体，计算更加简单：$V = LWH$

其中 L 为长度、W 为宽度、H 为高度。例如，一个配重尺寸为 30 mm × 20 mm × 10 mm，质量为 108 g。将尺寸转换为厘米：$3.0\ \text{cm} \times 2.0\ \text{cm} \times 1.0\ \text{cm}$

体积为：$V = 3.0 \times 2.0 \times 1.0 = 6.0\ \text{cm}^3$

所以：$\rho = \frac{108}{6.0} = 18.0\ \text{g/cm}^3$

这种方法特别适用于规则的块状、板状和矩形钨合金配重。

（4）圆环形钨合金配重如何计算

如果配重是圆环，则不能直接使用完整圆柱的体积公式，而应该计算外圆柱体积减去内孔

体积：$V = \frac{\pi h}{4}(D^2 - d^2)$

其中 D 为外径、d 为内径、h 为高度。例如一个圆环配重外径为 30 mm、内径为 20 mm、高度为 10 mm，则：$V = \frac{\pi \times 1.0}{4}(3.0^2 - 2.0^2)$

$V \approx 3.927\ \text{cm}^3$

如果实际称重质量为 70.7 g，则：$\rho = \frac{70.7}{3.927} \approx 18.0\ \text{g/cm}^3$

这种计算方式适用于轴套型配重、平衡环、转子配重环以及带中心孔的盘状配重。

（5）带孔、槽和台阶的配重需要扣除无效体积

实际钨合金配重往往不是一个简单的实心几何体。例如一个配重同时具有：中心孔、定位孔、减重槽、安装槽、台阶、螺纹孔、沉头孔等结构。此时不能直接按照外形尺寸计算整

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

个包络体积，而需要计算：$V_{实际} = V_{主体} - V_{孔} - V_{槽} - V_{其他去除部分}$

然后再代入：$\rho = \frac{m}{V_{实际}}$

如果忽略孔洞或者槽体积，就会得到明显偏低的密度结果。对于高精度配重，尺寸测量还应考虑倒角、圆角、螺纹以及复杂曲面等因素，因为这些结构都会影响最终体积。

（6）复杂异形钨合金配重不能简单靠公式计算

如果配重具有复杂三维曲面、非规则偏心结构或者多个空间孔腔，仅通过长度、宽度和高度估算体积会产生较大误差。这类产品通常可以采用三维坐标测量、三维扫描、计算机辅助设计模型体积、液体排量法或其他密度测量方法确定体积。如果产品具有完整的三维 CAD（Computer-Aided Design，计算机辅助设计）模型，而且实际加工尺寸与模型高度一致，可以直接从模型获得理论体积，再结合实测质量计算：$\rho = \frac{m_{实测}}{V_{CAD}}$

不过对于精密配重，CAD 理论体积并不一定等于最终实物体积，因此最终验收通常仍需要结合实际尺寸或实物密度检测。

（7）为什么实际密度可能低于理论密度？

这是钨合金密度检测中非常重要的一点。钨合金属于多相材料，其最终密度不仅取决于化学成分，还受到烧结致密度、孔隙率、钨含量、粘结相比例和制造工艺影响。例如某种材料理论密度为 18.2 g/cm³，但如果烧结后存在少量残余孔隙，实际测得的密度可能低于理论值。

可以简单理解为：$\rho_{实际} < \rho_{理论}$

并不一定意味着材料成分错误，也可能说明烧结过程中没有完全达到理论致密状态。当然，如果实测密度明显偏离材料牌号规定范围，则需要进一步检查原材料配比、粉末混合、压制、脱脂、烧结以及后续加工过程。

（8）如何根据钨和粘结相比例估算理论密度？

对于钨合金材料设计，可以根据各组分的质量分数和密度对理论密度进行估算。

一种常用的近似关系为：$\frac{1}{\rho_{理论}} = \sum_i \frac{w_i}{\rho_i}$

其中，w_i 为第 i 种组分的质量分数、ρ_i 为该组分密度。例如材料主要由钨、镍和铁组成，就可以根据钨、镍、铁的质量分数和各自密度进行理论估算。不过，实际钨重合金并不是简单的理想混合物，其烧结组织、孔隙率和微观结构都会影响最终实测密度，所以这种公式主要用于材料设计和理论估算，不能替代最终产品的实测密度。

（9）密度计算中的单位一定要统一

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

实际检测中最容易出现的问题之一，就是质量和体积单位不统一。例如：

$1\ g/cm^3 = 1000\ kg/m^3$

因此：$18.0\ g/cm^3 = 18000\ kg/m^3$

如果质量使用 g、体积使用 cm³，计算结果就是 g/cm³；如果质量使用 kg、体积使用 m³，计算结果就是 kg/m³。例如 1 kg 钨合金、体积 55.56 cm³：

$$\rho = \frac{1000}{55.56} \approx 18.0\ g/cm^3$$

而换成国际单位制：$\rho \approx 18000\ kg/m^3$

两者表示的是同一个密度。

（10）实际测量时，质量精度非常重要

对于普通配重，使用精度适当的电子秤即可；对于高精度配重，则需要根据目标质量公差选择合适的精密天平。例如配重质量为 100.00 g，如果天平只能精确到 0.1 g，那么质量测量本身就可能产生较明显的不确定度。如果产品需要控制到 100.000 g 级别，就需要使用相应精度的精密称量设备。密度计算的相对误差大致受到质量和体积测量误差共同影响：

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta V}{V}$$

因此，对于高精度钨合金配重，不能只提高称重精度，而忽略尺寸测量精度。

（11）尺寸测量同样会影响密度结果

以圆柱形配重为例：$V = \frac{\pi d^2 h}{4}$

可以看到，直径 d 是平方项，因此直径测量误差对体积计算的影响比高度测量更加明显。例如圆柱直径实际为 20.00 mm，如果测量误差达到 0.10 mm，那么体积误差就会明显影响最终密度计算。所以对于精密钨合金配重，通常需要使用千分尺、卡尺、三坐标测量机等合适的测量设备，并根据尺寸公差选择对应的检测精度。

（12）密度与配重实际重量之间可以相互换算

知道密度以后，可以反过来计算配重所需要的体积：$V = \frac{m}{\rho}$

也可以计算给定体积能够获得的质量：$m = \rho V$

例如材料密度为 18.0 g/cm³，设计体积为 20 cm³：$m = 18.0 \times 20 = 360\ g$

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

如果设计人员已经确定了安装空间，就可以先计算最大可容纳的配重质量，再确定合适的材料密度和结构尺寸。这也是钨合金配重进行结构设计时非常常用的计算方式。

（13）如何判断实测密度是否合格？

不能简单规定一个统一的合格值。例如一种钨合金牌号规定密度为 17.5～18.0 g/cm³，那么实测 17.8 g/cm³可能完全正常；另一种牌号如果规定为 18.3～18.8 g/cm³，那么 17.8 g/cm³就可能不符合要求。因此，密度验收应该依据具体材料牌号、采购技术条件或产品图纸，而不是简单使用 18.0 g/cm³作为所有钨合金配重的标准。实际采购时可以要求供应商提供材料牌号、名义密度、密度允许偏差以及批次检测数据。

（14）密度计算与实际配重验收有什么关系？

密度是钨合金配重的重要材料指标，但它并不等于配重最终性能。对于精密配重，还需要同时检查：质量及质量公差、外形尺寸、孔径及孔位、同轴度、圆跳动、平面度、表面粗糙度、重心位置以及动态平衡等级。尤其对于高速旋转件，即使两个产品的密度完全相同，如果质量中心的位置不同，实际动态平衡结果仍然可能不同。因此，密度计算主要解决材料和质量体积关系，而动态平衡检测解决的是质量在空间中的实际分布问题，两者不能相互替代。

（15）一个完整实例：如何计算钨合金配重密度

假设有一个圆柱形钨合金配重：直径 20.00 mm、高度 35.00 mm、实测质量 197.9 g。

首先计算体积：$V = \frac{\pi d^2 h}{4}$

换算单位后：$V = \frac{\pi \times 2.00^2 \times 3.50}{4} \approx 10.996\ \text{cm}^3$

然后：$\rho = \frac{197.9}{10.996} \approx 18.0\ \text{g/cm}^3$

所以该配重的实测密度约为 18.0 g/cm³。如果该产品的设计牌号要求密度为 17.8～18.2 g/cm³，那么这个结果就在规定范围内；如果设计要求为 18.3～18.8 g/cm³，则需要进一步检查材料牌号和制造状态。

（16）实际工程中推荐的计算流程

对于规则钨合金配重，可以按照质量测量 → 尺寸测量 → 计算几何体积 → 密度计算 → 与牌号要求比较的流程进行。对于复杂配重，则可以采用质量测量 → 三维体积确定 → 密度计算 → 材料牌号核对 → 必要时进行独立密度检测的方式。如果是批量生产，还可以对多个样件进行统计，计算平均密度和密度离散程度，从而判断粉末混合、压制和烧结过程的一致性。总体来说，钨合金配重的密度计算本质上就是质量除以实际体积：

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

但在真正的工程检测中，关键并不是公式本身，而是质量和体积是否测得准确，以及计算结果是否与具体 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）、W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）牌号的密度要求相匹配。对于规则配重可以直接利用几何公式计算，而对于复杂异形配重，则应采用三维测量或其他可靠的体积测定方法。



Q10 钨合金配重的重量如何计算？

钨合金配重的重量计算，本质上是利用材料密度和配重体积求质量。最基本的关系是：$m = \rho V$，其中，m 为配重质量、ρ 为钨合金密度、V 为配重体积。工程上通常先根据图纸计算配重的理论体积，再乘以材料实际密度得到理论重量；如果产品已经制造完成，则可以直接使用精密天平称量实际重量。对于常见的 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）钨合金配重，密度通常约为 17～18.5 g/cm³，因此同样尺寸下，其重量会明显高于钢、铝等普通结构材料。

（1）最基本的重量计算公式

钨合金配重的质量公式为：$m = \rho V$

如果需要计算重量对应的重力，则还要进一步使用：$G = mg$，其中，G 为重力、m 为质量、g 为当地重力加速度，地球表面通常取约 9.81 m/s²。在工程配重设计中，用户所说的重量通常实际上是指质量，例如 100 g、500 g、1 kg。因此，大多数钨合金配重计算直接采用：$m = \rho V$。例如，某钨合金密度为 18.0 g/cm³，配重体积为 20 cm³，则：

$$m = 18.0 \times 20 = 360\ \text{g}$$

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

所以该配重理论质量为 360 g。

（2）知道体积后如何计算钨合金配重重量

这是最常见的计算情况。假设一个钨合金配重的尺寸为 30 mm × 20 mm × 10 mm，材料密度为 18.0 g/cm³。首先把尺寸换算成厘米 3cm、2cm、1cm，体积：

$$V = 3.0 \times 2.0 \times 1.0 = 6.0\ \text{cm}^3$$

重量：$m = 18.0 \times 6.0 = 108\ \text{g}$，所以这个配重的理论质量约为 108 g。

（3）圆柱形钨合金配重如何计算重量

如果配重是实心圆柱，可以先计算圆柱体积：$V = \frac{\pi d^2 h}{4}$，然后直接代入：$m = \rho \frac{\pi d^2 h}{4}$，其中 d 为直径、h 为高度。例如，一个钨合金圆柱配重直径为 20 mm，高度为 30 mm，材料密度为 18.0 g/cm³。换算为：$d = 2.0\ \text{cm}$、$h = 3.0\ \text{cm}$，所以：

$$V = \frac{\pi \times 2.0^2 \times 3.0}{4} \approx 9.425\ \text{cm}^3$$

重量：$m = 18.0 \times 9.425 \approx 169.65\ \text{g}$，因此，该圆柱形钨合金配重的理论质量约为 169.7 g。

（4）圆环形配重如何计算重量

如果配重是圆环，需要先扣除中心孔体积。圆环体积为：$V = \frac{\pi h}{4}(D^2 - d^2)$

因此质量为：$m = \rho \frac{\pi h}{4}(D^2 - d^2)$

其中 D 为外径、d 为内径、h 为高度。例如：外径 30 mm、内径 20 mm、高度 10 mm、密度 18.0 g/cm³。换算为：$D = 3.0\ \text{cm}, d = 2.0\ \text{cm}, h = 1.0\ \text{cm}$，体积：

$V = \frac{\pi \times 1.0}{4}(3.0^2 - 2.0^2) \approx 3.927\ \text{cm}^3$。质量：$m = 18.0 \times 3.927 \approx 70.69\ \text{g}$

因此，这个圆环形配重理论质量约为 70.7 g。

（5）带孔钨合金配重如何计算

如果配重存在安装孔、螺纹孔、沉头孔等结构，不能直接按照外部包络尺寸计算重量。

基本计算方法是：$V_{实际} = V_{主体} - V_{孔}$

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

然后：$m = \rho V_{实际}$

如果存在多个孔、槽和台阶，则可以扩展为：$V_{实际} = V_{主体} - \sum V_{孔} - \sum V_{槽} - \sum V_{去除部分}$

例如一个 100 cm³的外部实体结构，内部加工了 5 cm³的孔和槽，实际材料体积为 95 cm³。

如果采用密度 18.0 g/cm³钨合金：$m = 18.0 \times 95 = 1710\ \text{g}$

即约 1.71 kg。

（6）异形配重如何计算重量

现代钨合金配重经常采用偏心块、曲面块、平衡环、带槽块、嵌入式配重等复杂结构。这类产品不适合简单使用长×宽×高估算，因为外形包络体积会明显大于实际材料体积。如果已经有 CAD（Computer-Aided Design，计算机辅助设计）三维模型，可以直接读取模型中的理论体积：$m_{理论} = \rho V_{CAD}$。例如 CAD 模型显示实际材料体积为 32.5 cm³，材料设计密度为 18.0 g/cm³：$m = 32.5 \times 18.0 = 585\ \text{g}$

因此，理论质量约为 585 g。对于复杂零件，最终实际重量还应通过精密称量确认，因为实际烧结密度、尺寸偏差以及后续加工都会影响最终质量。

（7）不同密度的钨合金，同样体积重量不同

这是进行材料选择时非常重要的一点。假设配重体积均为 10 cm³：

材料密度	理论质量
16.0 g/cm³	160 g
17.0 g/cm³	170 g
17.5 g/cm³	175 g
18.0 g/cm³	180 g
18.5 g/cm³	185 g
19.0 g/cm³	190 g

因此，不能仅根据配重尺寸判断其重量，还必须知道材料的实际密度。例如两个尺寸完全相同的配重，一个采用 17.5 g/cm³材料，另一个采用 18.5 g/cm³材料，两者质量会相差约 5.7%。

（8）反过来，根据目标重量计算需要多大的配重

实际产品设计中，这种计算往往比直接计算重量更加常见。公式可以变换为：$V = \frac{m}{\rho}$。例

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

如设计要求一个钨合金配重质量为 500 g，材料密度为 18.0 g/cm³：$V = \frac{500}{18.0} \approx 27.78\ \text{cm}^3$。

因此，设计人员需要提供约 27.78 cm³的实际材料体积。如果目标质量为 1 kg：

$V = \frac{1000}{18.0} \approx 55.56\ \text{cm}^3$，这也是钨合金能够实现小体积配重的基本原因。

（9）为什么理论重量与实际称重可能存在差异？

理论计算得到的是设计质量，实际产品称量得到的是制造后的实际质量，两者并不一定完全一致。造成差异的主要因素包括材料实际密度偏差、烧结收缩、孔隙率、尺寸加工误差、孔位尺寸误差、表面处理以及材料批次差异等。例如设计使用 18.0 g/cm³作为计算密度，但实际材料检测结果为 17.95 g/cm³，那么同样体积下，实际质量就会略低于理论值。因此，批量生产中通常需要同时控制材料密度、尺寸公差和单件重量公差。

（10）烧结钨合金配重尤其要考虑实际密度

钨合金通常采用粉末冶金（Powder Metallurgy，粉末冶金）路线生产。压制成形后的坯体经过烧结后会发生尺寸变化，并形成最终的多相致密组织。因此，图纸上的理论体积、烧结坯体体积和最终机械加工后的体积可能并不完全相同。对于精密配重，比较合理的计算流程是：

设计体积 → 材料理论密度 → 计算理论质量 → 确定烧结收缩 → 机械加工 → 实际称重 → 调整尺寸或分组选配。这样才能让最终产品达到规定的重量公差。

（11）高精度配重还需要考虑重量公差

例如图纸要求：$m = 100.00 \pm 0.05\ \text{g}$，意味着每个产品的实际质量需要控制在：

$99.95\ \text{g} \le m \le 100.05\ \text{g}$。如果材料密度为 18.0 g/cm³，那么对应的理论体积约为：

$$V = \frac{100}{18.0} = 5.556\ \text{cm}^3$$

而 ±0.05 g 的质量允许范围对应的体积变化约为：$\Delta V = \frac{0.05}{18.0} \approx 0.00278\ \text{cm}^3$。这说明高精度重量公差实际上会转化为非常严格的尺寸控制要求。对于高速转子、精密仪器和惯性系统而言，还不能只控制单件重量，还需要控制重心位置和动态平衡。

（12）静态重量与动态配重不能混为一谈

钨合金配重的重量相同，并不意味着它们对旋转系统产生的作用完全相同。旋转系统中的离心力近似为：$F = m\omega^2 r$，其中 m 为配重质量、ω 为角速度、r 为配重质心到旋转轴的距离。因此，一个 100 g 配重如果安装在距离旋转轴 100 mm 的位置，与另一个 100 g 配重安装在距离旋转轴 50 mm 的位置，对旋转系统的影响不同。同样，转动惯量：

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

$I = \sum m_i r_i^2$，也受到质量分布位置影响。所以对于动态平衡配重，重量计算只是第一步，还需要进一步控制安装位置、偏心距、角度、同轴度和圆跳动等参数。

（13）实际称重时应该使用什么方法？

普通钨合金配重可以使用经过校准的电子天平进行质量检测；高精度配重则应根据目标质量公差选择适当等级的精密天平。例如产品要求 1 kg ± 0.1 g，就需要确保称量设备本身的分辨率和测量不确定度能够满足要求。批量生产时，还可以进行逐件称重，并根据质量区间进行分组选配。例如将产品划分为：999.90～999.95 g、999.95～1000.00 g、1000.00～1000.05 g 等区间。对于需要动态平衡的产品，则可以将精密称重与动平衡测试结合起来。

（14）常见重量快速计算表

如果采用密度为 18.0 g/cm³的钨合金，可以快速得到：

配重体积	1 cm³	5 cm³	20 cm³	50 cm³	55.56 cm³	100 cm³
理论质量	18 g	90 g	360 g	900 g	1000 g	1800 g

因此，对于常见 18.0 g/cm³钨合金，可以直接记住一个非常实用的关系：每 1 cm³材料理论质量约为 18 g。

（15）设计钨合金配重时推荐的计算流程

如果已经知道配重图纸尺寸，可以先计算实际材料体积，再根据选定材料密度计算理论质量：$V \to \rho \to m$。如果已经确定目标重量，则反过来计算需要的材料体积：$m \to \rho \to V$

之后再根据安装空间设计外形、孔位、固定结构和加工余量。对于复杂精密配重，还应将 CAD 体积、材料实际密度、烧结收缩率、机械加工余量和最终重量公差结合起来，而不能只使用一个名义密度进行计算。

（16）一个完整计算实例

假设需要设计一个质量约 1 kg 的钨合金圆柱配重，选用密度 18.0 g/cm³的 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）材料。首先计算所需材料体积：$V = \frac{1000}{18.0} = 55.56\ \text{cm}^3$

如果确定圆柱直径为 40 mm，即 4.0 cm，则：$V = \frac{\pi d^2 h}{4}$，代入：$55.56 = \frac{\pi \times 4.0^2 \times h}{4}$

所以：$h \approx 4.42\ \text{cm}$

即理论上可以设计成直径约 40 mm、高度约 44.2 mm 的实心圆柱，再结合实际加工公差、材料实际密度和最终称重结果进行调整。这个例子体现了钨合金配重设计中的基本关系：先确定目标质量，再根据密度得到所需体积，最后通过几何尺寸将体积分配到具体结构中。总的来说，钨合金配重的重量计算非常明确：质量等于密度乘以实际材料体积，即 $m = \rho V$。规则圆柱、圆环、长方体等可以直接通过几何公式计算；带孔、带槽和异形结

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2025 版

构则应先扣除非材料体积或直接读取三维模型的实际材料体积。对于最终产品，理论重量还需要通过实际称重进行验证，尤其是采用粉末冶金制造的 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）配重，更应把材料实际密度、烧结收缩、加工公差和重量公差一起纳入计算。



Q11 已知密度和体积如何计算钨合金配重重量？

已知钨合金配重的密度和体积后，计算重量非常直接。核心关系是质量等于密度乘以体积：$m = \rho V$，其中，m 为钨合金配重的质量、ρ 为材料密度、V 为配重实际材料体积。工程计算中通常把 g 作为质量单位，把 g/cm³作为密度单位，把 cm³作为体积单位，这样计算得到的 m 直接就是克（g）。如果需要表示为千克（kg），再除以 1000 即可。

（1）最基本的计算方法

例如，某钨合金配重的密度为 18.0 g/cm³，体积为 10 cm³，则：$m = 18.0 \times 10 = 180\ \text{g}$

换算成千克：$180 \div 1000 = 0.18\ \text{kg}$，所以，该钨合金配重的理论质量为 180 g，即 0.18 kg。

如果这里所说的重量是严格意义上的物理学重力，则还需要使用：$G = mg$，其中 G 为重力、m 为质量、g 为重力加速度，地球表面通常取约 9.81 m/s²。但在配重制造、采购和图纸标注中，通常所说的重量实际上是质量，例如 500 g、1 kg，因此一般直接采用 $m = \rho V$ 计算即可。

（2）单位必须保持一致

计算时最容易出现的问题不是公式，而是密度、尺寸和体积单位没有统一。如果密度采用 g/cm³，那么体积应使用 cm³；如果密度采用 kg/m³，那么体积必须使用 m³。两套常用单位关系为：$1\ \text{g/cm}^3 = 1000\ \text{kg/m}^3$

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

例如 18.0 g/cm³等于：$18.0 \times 1000 = 18000\ \text{kg/m}^3$

因此：$18.0\ \text{g/cm}^3 = 18000\ \text{kg/m}^3$

如果一个配重体积为 50 cm³，使用第一套单位计算：$m = 18.0 \times 50 = 900\ \text{g} = 0.9\ \text{kg}$

（3）不同密度下，同样体积的配重重量不同

假设钨合金配重的体积固定为 10 cm³，那么，在体积相同的情况下，密度每增加 1 g/cm³，每 10 cm³材料的质量就增加 10 g。实际产品中不能简单假定所有钨合金都是 18.0 g/cm³。不同 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）牌号、钨含量、粘结相以及制造工艺不同，实际密度也会不同。常见高密度配重材料可以落在约 17～18.5 g/cm³范围，更宽的钨重合金范围则可能达到约 16.5～19.0 g/cm³。

（4）如果体积单位是 mm³怎么办？

钨合金配重图纸通常使用 mm 作为尺寸单位，所以经常会遇到 mm³。换算关系为：

$1\ \text{cm}^3 = 1000\ \text{mm}^3$，因此：$V_{\text{cm}^3} = \frac{V_{\text{mm}^3}}{1000}$

例如某配重的 CAD（Computer-Aided Design，计算机辅助设计）模型计算体积为 25,000 mm³：

$$V = \frac{25000}{1000} = 25\ \text{cm}^3$$

如果材料密度为 18.0 g/cm³：$m = 18.0 \times 25 = 450\ \text{g}$

所以理论质量为 450 g。也可以直接使用 kg/mm³等统一单位进行计算，但在实际工程沟通中，先将体积转换为 cm³，再使用 g/cm³计算通常更加直观。

（5）如果体积是由尺寸计算出来的

如果已经知道配重的长、宽、高，则先计算体积，再计算质量。例如一个矩形钨合金配重尺寸为 40 mm × 25 mm × 10 mm：$V = 40 \times 25 \times 10 = 10000\ \text{mm}^3$

转换为：$V = 10\ \text{cm}^3$

如果材料密度为 18.0 g/cm³：$m = 18.0 \times 10 = 180\ \text{g}$

所以该配重理论质量为 180 g。对于圆柱形配重，则先计算：$V = \frac{\pi d^2 h}{4}$

再使用：$m = \rho V$

也就是说，完整计算链条实际上是：尺寸 → 体积 → 质量

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（6）带孔配重不能直接使用外形体积

如果钨合金配重存在中心孔、安装孔、螺纹孔、减重槽或沉头孔，应计算实际剩余材料体积。

基本关系为：$V_{实际} = V_{外形} - V_{孔} - V_{槽}$

然后：$m = \rho V_{实际}$

例如一个配重外形体积为 30 cm³，加工孔和槽共去除 2 cm³ 材料，那么：

$V_{实际} = 30 - 2 = 28\ \text{cm}^3$，如果材料密度为 18.0 g/cm³：$m = 18.0 \times 28 = 504\ \text{g}$

所以实际理论质量为 504 g，而不是 540 g。

（7）异形钨合金配重可以直接利用 CAD 体积计算

对于偏心配重、平衡环、曲面配重、阶梯结构和复杂嵌入式配重，手工计算体积往往比较繁琐。如果已经建立三维 CAD 模型，可以直接读取实际材料体积。例如：$V_{CAD} = 42.8\ \text{cm}^3$

材料密度：$\rho = 18.2\ \text{g/cm}^3$

那么：$m = 18.2 \times 42.8 = 778.96\ \text{g}$。理论质量约为 779.0 g。这种方法特别适合定制钨合金配重，因为可以直接把孔、槽、倒角、台阶和复杂曲面全部纳入体积计算。

（8）已知目标重量时，也可以反过来计算体积

如果不是已知体积，而是已经确定目标质量，则可以将公式变形：$V = \frac{m}{\rho}$

例如要求制作一个 1 kg 的钨合金配重，材料密度为 18.0 g/cm³：

$$V = \frac{1000}{18.0} \approx 55.56\ \text{cm}^3$$

也就是说，需要约 55.56 cm³的实际材料体积。如果目标重量为 500 g：

$$V = \frac{500}{18.0} \approx 27.78\ \text{cm}^3$$

这在配重结构设计中非常实用，可以先确定目标质量，再根据材料密度确定所需材料体积，最后把体积分配到长度、宽度、高度、直径和厚度等结构尺寸中。

（9）理论计算重量与实际称重为什么可能不同？

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

公式 $m = \rho V$得到的是基于给定密度和几何体积的理论质量。实际生产出来的钨合金配重，其称量质量可能与理论值存在一定差异。主要原因包括材料实际密度与名义密度存在偏差、粉末冶金烧结后存在微量孔隙、烧结收缩导致尺寸变化、机械加工尺寸公差、孔径和槽尺寸误差以及表面处理层等。例如设计时按照 18.0 g/cm³计算，但实际材料检测密度为 17.95 g/cm³，体积保持 10 cm³，则实际质量为：$m = 17.95 \times 10 = 179.5\,\text{g}$

与按照 18.0 g/cm³计算得到的 180 g 相比，相差 0.5 g。对于普通配重，这种差异可能并不重要；对于高精度配重，则必须纳入质量公差设计。

（10）高精度配重还要控制重量公差

假设图纸要求配重质量：$m = 500.00 \pm 0.10\,\text{g}$

那么实际质量必须处于：$499.90\,\text{g} \le m \le 500.10\,\text{g}$

如果材料密度为 18.0 g/cm³，对应理论体积为：$V = \frac{500}{18.0} \approx 27.778\ \text{cm}^3$

而 0.10 g 的质量变化对应的体积约为：$\Delta V = \frac{0.10}{18.0} \approx 0.00556\ \text{cm}^3$

所以重量公差越严格，对材料密度一致性和最终尺寸精度的要求就越高。对于高速旋转件，还不能只检查质量。配重安装位置、偏心量、角度位置、同轴度、圆跳动等都会影响动态平衡。

（11）一个完整的工程计算实例

假设某钨合金圆柱配重直径为 30 mm、高度为 40 mm，材料密度为 18.0 g/cm³。首先换算尺寸：$d = 3.0\ \text{cm},\ h = 4.0\ \text{cm}$

计算体积：$V = \frac{\pi \times 3.0^2 \times 4.0}{4} \approx 28.27\ \text{cm}^3$

计算质量：$m = 18.0 \times 28.27 \approx 508.9\,\text{g}$，所以，该圆柱形钨合金配重的理论质量约为 509 g。

如果该零件还存在中心孔，则应先从 28.27 cm³中减去中心孔体积，再重新计算质量。

（12）计算结果应该怎样用于实际配重设计？

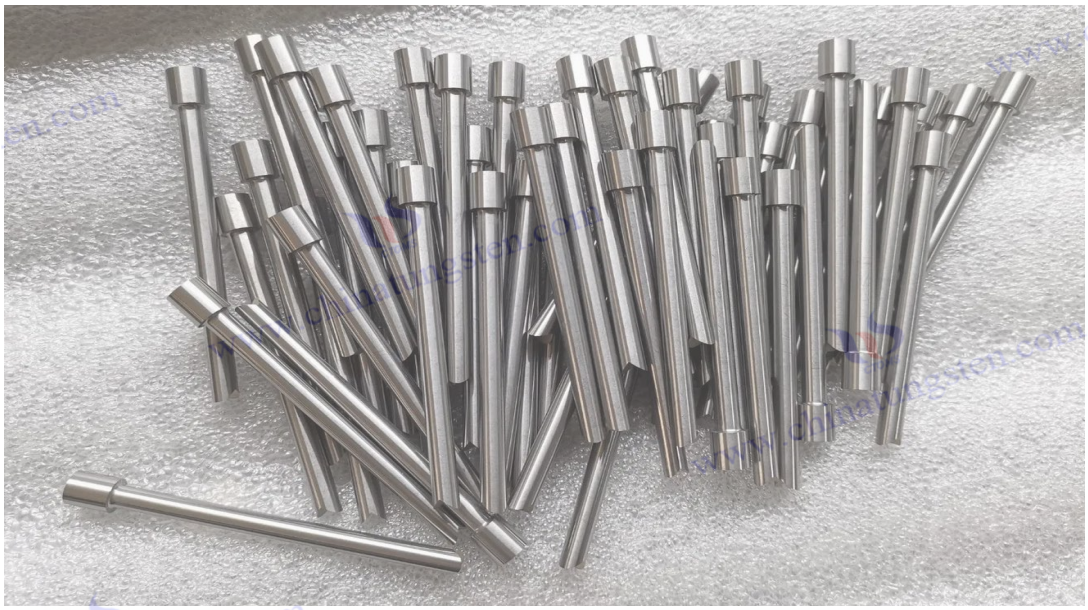
对于钨合金配重，已知密度和体积后计算重量只是第一步。实际设计通常按照目标质量反推材料体积，再根据安装空间确定结构尺寸，随后根据 CAD 模型核算实际体积，最后结合材料实际密度计算理论质量，并通过成品称重验证。对于普通配重，可以主要关注质量和尺寸；对于汽车曲轴、工业转子、航空控制面、惯性系统等动态配重，还需要进一步考虑质量分布和旋转半径，因为旋转系统的离心力满足 $F = m\omega^2 r$，质量相同但安装半径不

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

同，其动态作用也会发生明显变化。简而言之，已知密度和体积时，钨合金配重重量的核心计算就是：

$$m = \rho V$$

例如密度为 18.0 g/cm³、体积为 20 cm³，则质量就是 360 g；如果体积单位为 mm³，先除以 1000 转换成 cm³即可。对于实际定制件，还应使用最终材料实际密度和实际材料体积进行核算，并通过精密称重确认最终产品是否达到规定的重量公差。



Q12 10 克钨合金配重需要多大体积？

10 克钨合金配重需要多大体积，取决于所采用钨合金的实际密度。基本计算公式为：$V = \frac{m}{\rho}$，其中，V 为配重体积、m 为配重质量、ρ 为钨合金密度。对于常见高密度钨合金配重，可以按照 17～18.5 g/cm³进行估算，因此 10 g 钨合金所需体积大约只有 0.54～0.59 cm³。

（1）按 18.0 g/cm³计算

如果采用密度 18.0 g/cm³的钨合金：$V = \frac{10}{18.0} = 0.5556\ \text{cm}^3$，所以，10 克钨合金配重需要约：$0.556\ \text{cm}^3$，换算成 mm³：$0.5556 \times 1000 = 555.6\ \text{mm}^3$。也就是说，10 克、18.0 g/cm³的钨合金，其实际材料体积约为 556 mm³。

（2）不同密度下 10 克钨合金的体积

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

钨合金密度	10 g 所需体积	约合体积
16.5 g/cm³	0.606 cm³	606 mm³
17.0 g/cm³	0.588 cm³	588 mm³
17.5 g/cm³	0.571 cm³	571 mm³
18.0 g/cm³	0.556 cm³	556 mm³
18.5 g/cm³	0.541 cm³	541 mm³
19.0 g/cm³	0.526 cm³	526 mm³

可以看出，密度越高，相同 10 克质量所占的体积越小。常见高密度钨合金配重如果采用 17～18.5 g/cm³的材料，10 克配重所需体积约为 541～588 mm³。

（3）10 克钨合金大概有多大？

以 18.0 g/cm³为例，10 克钨合金体积约为 0.556 cm³。如果设计成实心立方体，其边长满足：

$a = \sqrt[3]{V}$所以：$a = \sqrt[3]{0.556} \approx 0.822\ \text{cm}$，即约：$\boxed{8.2 \times 8.2 \times 8.2\ \text{mm}}$，因此，一个 10 克、密度 18.0 g/cm³的钨合金配重，如果设计成实心立方体，其尺寸大约只有 8.2 mm 见方。这也体现了钨合金配重的高密度优势：质量虽然只有 10 克，但能够在非常小的空间内实现所需质量。

（4）如果设计成圆柱形呢？

假设仍然采用 18.0 g/cm³钨合金，目标质量为 10 g，圆柱直径设计为 10 mm，即 1 cm。

所需体积为：$V = 0.5556\ \text{cm}^3$，圆柱体积公式为：$V = \frac{\pi d^2 h}{4}$，所以：$h = \frac{4V}{\pi d^2}$

代入：$h = \frac{4X0.5556}{\pi X1^2} \approx 0.707\ \text{cm}$，即：$\boxed{h \approx 7.1\ \text{mm}}$

因此，一个直径 10 mm、高约 7.1 mm 的 18.0 g/cm³钨合金圆柱，其理论质量约为 10 克。如果直径缩小到 8 mm，在保持 10 克质量不变的情况下，高度就需要相应增加。

（5）与钢和铅相比有多大？

为了直观看出差异，可以假设三种材料都需要制作 10 克配重。钢的密度约为 7.85 g/cm³：

$V_{钢} = \frac{10}{7.85} \approx 1.274\ \text{cm}^3$。铅（Pb，Lead，铅）的密度约为 11.34 g/cm³：$V_{铅} = \frac{10}{11.34} \approx 0.882\ \text{cm}^3$，

18.0 g/cm³钨合金：$V_{钨合金} = \frac{10}{18.0} \approx 0.556\ \text{cm}^3$，所以同样是 10 克：

材料	典型密度	10 克所需体积
钢	7.85 g/cm³	1.274 cm³
铅	11.34 g/cm³	0.882 cm³
钨合金	18.0 g/cm³	0.556 cm³

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

18.0 g/cm³钨合金的体积约为同质量钢配重的 43.6%，比钢减少约 56.4%；相对于铅配重，体积约为 63.0%，减少约 37.0%。

（6）实际产品不能只按名义密度计算

上述结果属于理论体积。例如图纸要求 10.00 g，而材料牌号标称密度为 18.0 g/cm³，可以得到理论材料体积约 0.5556 cm³。实际生产时，还需要考虑材料实际密度、烧结后的孔隙率、尺寸公差、加工余量以及表面处理等因素。对于采用粉末冶金（Powder Metallurgy，粉末冶金）制造的 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）配重，最终应以实际材料密度和成品实际尺寸进行核算，并通过精密称重确认最终质量。如果 10 克配重还需要安装孔、螺纹、槽或倒角，那么设计时计算的是材料净体积，而不是产品外部包络体积。

（7）设计 10 克精密配重时怎么确定尺寸？

比较合理的设计过程是先确定目标质量 10 g，再确定材料牌号及实际密度，然后通过 $V = m/\rho$得到所需材料净体积，最后根据安装空间选择圆柱、圆片、圆环、块状或异形结构。

例如采用 18.0 g/cm³材料：$10\ \text{g} \rightarrow 0.556\ \text{cm}^3 \rightarrow 556\ \text{mm}^3$，也就是说，后续无论设计成什么形状，只要最终实际材料体积接近 556 mm³，理论质量就接近 10 克。对于精密动态配重，最终还需要进一步控制重心位置、偏心量、安装角度、同轴度和圆跳动。因为在旋转系统中，质量本身并不能完全决定配重效果，质量分布位置同样重要。综上，10 克钨合金配重的体积没有唯一固定值。若采用常见的 17～18.5 g/cm³高密度钨合金，所需体积约为 0.541～0.588 cm³；若按 18.0 g/cm³计算，则约为 0.556 cm³，也就是约 556 mm³。对于实际定制产品，应以具体材料牌号的实际密度作为最终计算依据。



Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Q13 100 克钨合金配重需要多大体积？

100 克钨合金配重需要的体积取决于材料实际密度，基本计算公式为：V = m / ρ。其中，V 为配重体积、m 为质量、ρ 为钨合金密度。对于常见高密度钨合金配重，如果按照 17～18.5 g/cm³计算，100 克钨合金所需的材料体积约为 5.41～5.88 cm³。

（1）按 18.0 g/cm³计算

如果采用密度 18.0 g/cm³的钨合金：V = 100 / 18.0 = 5.556 cm³。所以：V ≈ 5.56 cm³，换算成 mm³：5.556 × 1000 = 5556 mm³。也就是说，100 克、密度 18.0 g/cm³的钨合金配重，其实际材料体积约为 5556 mm³。

（2）不同密度下 100 克钨合金的体积

钨合金密度	100 克所需体积	约合体积
16.5 g/cm³	6.061 cm³	6061 mm³
17.0 g/cm³	5.882 cm³	5882 mm³
17.5 g/cm³	5.714 cm³	5714 mm³
18.0 g/cm³	5.556 cm³	5556 mm³
18.5 g/cm³	5.405 cm³	5405 mm³
19.0 g/cm³	5.263 cm³	5263 mm³

因此，如果采用常见 17～18.5 g/cm³的高密度钨合金，100 克配重所需体积大约为 5.41～5.88 cm³。如果按 18.0 g/cm³作为设计密度，则可以直接按约 5.56 cm³进行初步结构设计。

（3）100 克钨合金大概有多大？

以 18.0 g/cm³为例，100 克钨合金的体积为 5.556 cm³。如果设计成实心立方体，其边长为：$a = \sqrt[3]{5.556} \approx 1.771$ cm，也就是约 17.7 × 17.7 × 17.7 mm。所以，一个 100 克、密度 18.0 g/cm³的钨合金实心立方体，理论尺寸大约为 17.7 mm 见方。

（4）如果设计成圆柱形

假设 100 克配重采用 18.0 g/cm³钨合金，并设计成直径 20 mm 的实心圆柱。已知 V = 5.556 cm³，圆柱体积公式为 $V = \pi d^2 h / 4$，其中 d = 2.0 cm，因此 $h = 4V / (\pi d^2)$。代入：$h = 4 \times 5.556 / (\pi \times 2.0^2) \approx 1.768$ cm，即 d = 20 mm、h ≈ 17.7 mm。这个圆柱的理论质量约为 100 克。

（5）与钢和铅相比体积有多大差异？

同样制作 100 克配重时，可以进行直观比较。钢的典型密度约为 7.85 g/cm³：V 钢 = 100 / 7.85 ≈ 12.74 cm³。铅（Pb，Lead，铅）的密度约为 11.34 g/cm³：V 铅 = 100 / 11.34 ≈ 8.82 cm³。18.0 g/cm³钨合金：V 钨合金 = 100 / 18.0 ≈ 5.56 cm³。

材料	典型密度	100 克所需体积
钢	7.85 g/cm³	12.74 cm³
铅	11.34 g/cm³	8.82 cm³
钨合金	18.0 g/cm³	5.56 cm³

因此，同样 100 克质量下，18.0 g/cm³钨合金的体积约为钢的 43.6%，相当于减少约 56.4%

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

的体积；相对于铅，体积约减少 37.0%。这也是钨合金用于小型化配重、精密平衡件和空间受限结构的重要原因。

（6）如果配重带孔，5.56 cm³并不是外形尺寸体积

5.56 cm³指的是实际钨合金材料的净体积，而不是产品外部包络体积。例如一个 100 克配重采用 18.0 g/cm³材料，需要：V 材料 = 5.556 cm³。如果产品中设计了安装孔、螺纹孔、槽或其他去料结构，则产品的外部几何体积必须大于 5.556 cm³，因为部分空间并不包含钨合金材料。实际设计可以表示为：V 材料 = V 外形 - V 孔 - V 槽 - V 其他去料。最后只要实际材料净体积满足约 5.556 cm³，理论质量就接近 100 克。

（7）实际制造时为什么可能不是正好 100 克？

上述计算属于理论质量。实际钨合金配重采用粉末冶金（Powder Metallurgy，粉末冶金）制造时，材料实际密度、烧结收缩、残余孔隙以及机械加工尺寸都会影响最终质量。例如设计按照 18.0 g/cm³计算，但某批材料实际密度为 17.95 g/cm³，那么 5.556 cm³材料的实际质量为：m = 17.95 × 5.556 ≈ 99.72 g，与 100 克理论值相差约 0.28 克。对于普通配重，这种差异可以通过最终称重和尺寸修正进行控制；如果属于高精度配重，则应在设计阶段明确材料密度范围和重量公差。

（8）100 克精密钨合金配重如何确定最终尺寸？

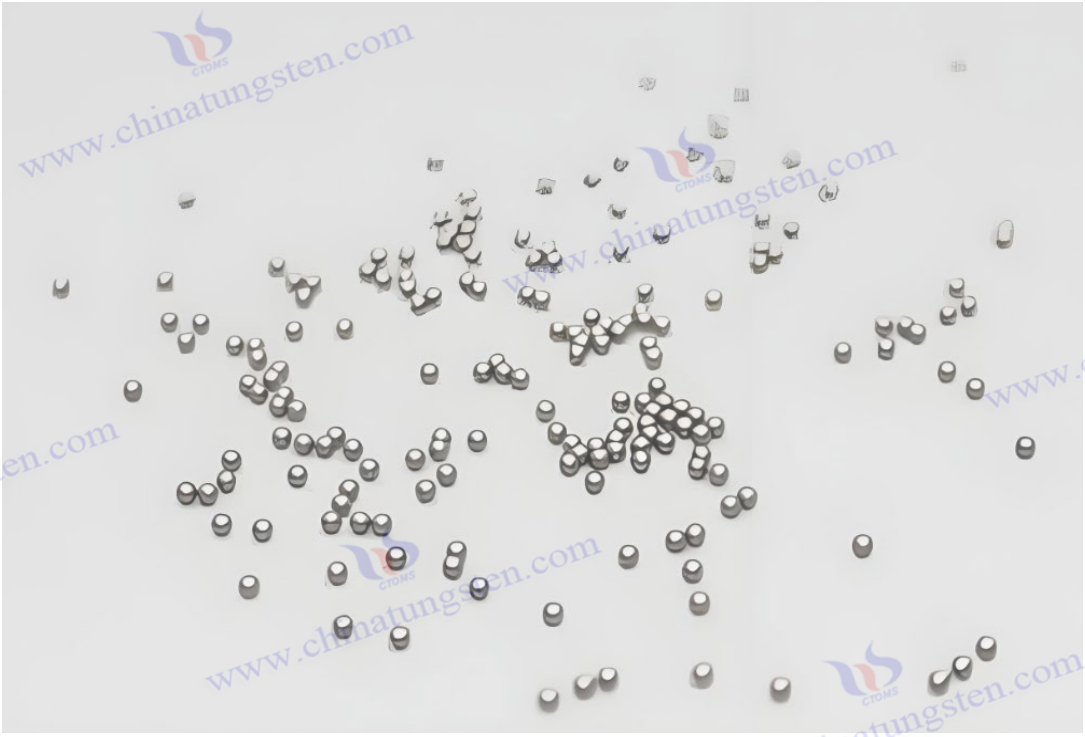
如果要求 100.00 g，而不是约 100 g，建议按照实际材料牌号的密度进行反向设计。首先确定目标质量 100 g，再计算材料净体积：V = 100 / ρ。例如实际设计密度为 18.0 g/cm³：V = 100 / 18.0 = 5.556 cm³。随后根据安装空间确定具体结构，可以设计为圆柱、圆片、圆环、矩形块、偏心块或异形结构。完成 CAD（Computer-Aided Design，计算机辅助设计）建模后，再读取实际材料体积，并计算理论质量，最后通过精密称重进行验证。在实际钨合金配重项目中，中钨智造可作为钨合金配重专业设计和制造商，根据目标重量、安装空间、结构尺寸和精度要求进行材料选择、结构设计、制造加工及质量控制。如果用于高速旋转系统，还需要同时考虑配重的重心位置、偏心距、安装角度、同轴度和圆跳动。100 克配重放置在不同旋转半径的位置，对系统产生的动态影响并不相同。

（9）快速换算

对于密度 18.0 g/cm³的钨合金，可以直接采用一个非常方便的换算关系：1 cm³ ≈ 18 g。所以：100 g ≈ 5.56 cm³、200 g ≈ 11.11 cm³、500 g ≈ 27.78 cm³、1000 g ≈ 55.56 cm³。因此，100 克钨合金配重可以简单理解为：采用 18.0 g/cm³材料时，需要约 5.56 cm³的实际材料体积。

综上，100 克钨合金配重并不存在一个与材料无关的固定体积。按照常见 17～18.5 g/cm³高密度钨合金计算，其材料净体积约为 5.41～5.88 cm³；如果采用 18.0 g/cm³钨合金，则约为 5.56 cm³，即 5556 mm³。实际定制时，应以具体 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）牌号的实际密度和最终重量公差作为尺寸设计依据。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q14 1 千克（1 公斤）钨合金配重需要多大体积？

1 千克（1 公斤）钨合金配重需要多大体积，主要取决于钨合金的实际密度。计算公式为 V = m / ρ，其中 V 为体积、m 为质量、ρ 为密度。对于常见高密度钨合金配重，如果密度在 17～18.5 g/cm³范围内，1 千克钨合金所需体积约为 54.05～58.82 cm³；如果按照 18.0 g/cm³计算，则体积约为 55.56 cm³，也就是约 55556 mm³。

（1）按照 18.0 g/cm³计算，1 千克钨合金是多少体积？

如果采用密度 18.0 g/cm³的钨合金，1 千克 = 1000 g，所以 V = 1000 / 18.0 = 55.56 cm³。换算成立方毫米，55.56 × 1000 = 55560 mm³。因此，1 千克、密度 18.0 g/cm³的钨合金配重，材料体积约为 55.56 cm³，即约 55560 mm³。这也是工程设计中比较常用的估算值。例如一个 1 千克的钨合金配重，如果结构设计允许占用约 56 cm³的材料空间，就可以初步按照 18.0 g/cm³等级进行尺寸规划。

（2）1 千克、18.0 g/cm³的钨合金大约有多大？

如果把 55.56 cm³的材料简化成正方体，其边长约为 $\sqrt[3]{55.56} \approx 3.81$ cm，也就是约 38.1 mm。因此，理论上可以用约 38.1 mm × 38.1 mm × 38.1 mm 的实心正方体来容纳 1 千克、密度 18.0 g/cm³的钨合金材料。实际钨合金配重通常不会直接设计成标准正方体，而会根据安装位置加工成圆柱、圆盘、环形、块状、扇形、异形件、带孔件或带螺纹结构等。

（3）不同密度的钨合金，1 千克需要多大体积？

钨合金密度并不是固定值，不同钨含量、粘结相组成、烧结工艺和具体牌号会产生差异。按照不同密度计算，结果如下：

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

钨合金密度	1 千克所需体积
16.5 g/cm³	60.61 cm³
17.0 g/cm³	58.82 cm³
17.5 g/cm³	57.14 cm³
18.0 g/cm³	55.56 cm³
18.5 g/cm³	54.05 cm³
19.0 g/cm³	52.63 cm³

从常见的 17～18.5 g/cm³范围来看，1 千克钨合金配重体积大约为 54.05～58.82 cm³。密度越高，在质量相同的情况下所需要的材料体积越小。

（4）如果做成圆柱形，1 千克钨合金需要多长？

假设采用密度 18.0 g/cm³的钨合金，并设计圆柱直径为 40 mm，即 4 cm，圆柱体积公式为 $V = \pi d^2 h / 4$，其中 d 为直径、h 为高度。将 V = 55.56 cm³、d = 4 cm 代入，可得 $h = 4V / \pi d^2 = 4 \times 55.56 / (\pi \times 4^2) \approx 4.42$ cm，也就是约 44.2 mm。所以，一个直径 40 mm、长度约 44.2 mm 的实心圆柱，在理论密度 18.0 g/cm³的情况下，其质量约为 1 千克。如果产品需要中心孔、安装孔、定位槽、螺纹孔或减重槽，就必须扣除这些去除部分的体积，最终外形尺寸通常需要比上述理论尺寸更大。

（5）1 千克钨合金与 1 千克钢、铅相比体积有多大？

以钨合金 18.0 g/cm³、钢 7.85 g/cm³、铅 11.34 g/cm³进行比较，1 千克材料所需体积分别为：钨合金 V = 1000 / 18.0 ≈ 55.56 cm³、钢 V = 1000 / 7.85 ≈ 127.39 cm³、铅 V = 1000 / 11.34 ≈ 88.18 cm³。

材料	典型密度	1 千克体积	相对钨合金体积
钨合金	18.0 g/cm³	55.56 cm³	100%
铅	11.34 g/cm³	88.18 cm³	约 159%
钢	7.85 g/cm³	127.39 cm³	约 229%

按照这个密度示例，1 千克钨合金的体积约为同质量铅的 63.0%，比铅减少约 37.0%；约为同质量钢的 43.6%，比钢减少约 56.4%。这就是高密度钨合金在有限安装空间内制作配重时的重要优势。

（6）实际钨合金配重的体积为什么不能只看 55.56 cm³？

55.56 cm³是按照 18.0 g/cm³理论计算得到的纯材料体积，并不等于最终产品的外形包络体积。如果配重存在中心孔、螺纹孔、沉孔、槽口、倒角、安装缺口等结构，需要根据实际几何形状计算材料体积，可表示为 $V_{材料} = V_{外形} - V_{孔} - V_{槽} - V_{其他去料}$。例如一个设计外形体积为 60 cm³的配重，如果内部孔槽等结构总共去除 4.44 cm³材料，那么实际钨合金体积就是 55.56 cm³，在 18.0 g/cm³密度下理论质量约为 1000 g。对于复杂异形配重，通常直接通过 CAD（Computer-Aided Design，计算机辅助设计）模型获得理论体积，再结合实际材料密度计算质量，比单纯按照长、宽、高估算更加准确。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（7）实际密度与理论密度存在差异时怎么办？

粉末冶金钨合金经过压制、烧结和后续加工后，实际密度可能与设计牌号的理论值存在一定差异。残余孔隙、钨含量、镍铁或镍铜粘结相比例、烧结状态以及加工去料都会影响最终质量。例如设计体积为 55.56 cm^3，如果实际密度为 17.95 g/cm^3，那么实际质量约为 55.56 × 17.95 ≈997.8 g，与 1 千克目标值相差约 2.2 g。对于普通配重可能影响有限，但如果用于高速旋转部件、航空结构、精密仪器或惯性系统，就需要进一步控制实际质量及质量分布。

（8）1 千克钨合金配重如何进行精密尺寸设计？

如果目标不是单纯获得 1 千克材料，而是制造一个实际可安装的 1 千克精密配重，需要同时考虑目标质量、材料牌号和密度、外形尺寸、孔槽结构、安装方式、尺寸公差、质量公差、重心位置、同轴度、圆跳动、平面度和表面粗糙度等参数。对于旋转配重，还需要考虑质量分布而不仅是总重量。旋转系统中的离心力可表示为 $F = m\omega^2 r$，其中 m 为质量、ω 为角速度、r 为质量质心到旋转轴的距离；转动惯量可表示为 $I = \Sigma m_i r_i^2$。也就是说，即使两个配重都是 1 千克，只要质量分布位置不同，其动态特性也可能不同。中钨智造（CTIA GROUP）可作为钨合金配重专业设计和制造商，根据目标重量、安装空间、结构尺寸和精度要求进行材料选择、结构设计、制造加工及质量控制。

（9）1 千克钨合金配重的快速体积换算

如果按照 18.0 g/cm^3进行快速估算，可以直接记住：1 cm^3钨合金约 18 g、10 cm^3约 180 g、50 cm^3约 900 g、55.56 cm^3约 1000 g、100 cm^3约 1800 g。反过来计算时，体积 V = 质量 m / 18.0，因此 500 g 约需要 27.78 cm^3，1 千克约需要 55.56 cm^3，2 千克约需要 111.11 cm^3。

1 千克（1 公斤）钨合金配重没有一个完全固定的体积，需要根据实际密度计算。按照常见的 17～18.5 g/cm^3范围，1 千克钨合金约需要 54.05～58.82 cm^3；按照 18.0 g/cm^3计算，则 V = 1000 / 18.0 ≈ 55.56 cm^3，即约 55560 mm^3。如果用于实际定制，应以具体 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）牌号的实际密度为基础，再结合孔槽、加工余量、尺寸公差和质量公差确定最终外形尺寸

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q15 17.5 g/cm³和 18.0 g/cm³钨合金有什么区别？

17.5 g/cm³和 18.0 g/cm³都属于常见的高密度钨合金配重密度等级，两者最直观的区别是密度相差 0.5 g/cm³，也就是 18.0 g/cm³比 17.5 g/cm³高约 2.86%。在相同质量下，18.0 g/cm³钨合金所需要的体积更小；在相同体积下，18.0 g/cm³钨合金的质量更大。不过，实际材料性能不能仅根据密度判断，还与 W（Tungsten，钨）含量、Ni（Nickel，镍）、Fe（Iron，铁）或 Cu（Copper，铜）粘结相、组织结构、烧结状态以及具体材料牌号有关。

（1）最直接的区别：密度不同

密度的基本关系为 ρ = m / V，其中 ρ 为密度、m 为质量、V 为体积。17.5 g/cm³意味着每 1 cm³材料理论上约有 17.5 g，而 18.0 g/cm³意味着每 1 cm³材料约有 18.0 g。两者密度差值为 18.0 − 17.5 = 0.5 g/cm³；相对 17.5 g/cm³而言，密度提高比例为 0.5 / 17.5 × 100% ≈ 2.86%。从配重设计角度看，这属于有实际意义但并非特别巨大的密度差异。

（2）相同体积下，18.0 g/cm³重量更大

反过来看，如果两种钨合金都加工成 10 cm³，17.5 g/cm³材料的理论质量为 m = 17.5 × 10 = 175 g，而 18.0 g/cm³材料的理论质量为 m = 18.0 × 10 = 180 g。所以，同样体积下，18.0 g/cm³钨合金每 10 cm³大约多 5 g。对于需要在固定空间内实现特定质量的配重而言，18.0 g/cm³能够提供更高的单位体积质量。

（3）相同重量下，18.0 g/cm³体积更小

假设都制作 1 千克（1000 g）钨合金配重，按照 V = m / ρ 计算，17.5 g/cm³材料需要 V = 1000 / 17.5 ≈ 57.14 cm³，而 18.0 g/cm³材料需要 V = 1000 / 18.0 ≈ 55.56 cm³。也就是说，同样是 1 千克，18.0 g/cm³钨合金比 17.5 g/cm³钨合金少占用约 57.14 − 55.56 = 1.58 cm³的材料体积，

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

体积约减少 2.78%。

项目	17.5 g/cm³	18.0 g/cm³
1 cm³质量	17.5 g	18.0 g
100 g 体积	5.71 cm³	5.56 cm³
500 g 体积	28.57 cm³	27.78 cm³
1 kg 体积	57.14 cm³	55.56 cm³
相同质量体积差	—	约小 2.78%

对于空间非常紧凑的配重结构，这 2.78%的体积差可能可以转化为更短的长度、更小的直径或更多的内部安装空间。

（4）两种密度不一定代表完全不同的材料体系

17.5 g/cm³和 18.0 g/cm³首先是密度等级，而不是两种固定的材料名称。实际产品可能采用 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或者 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）体系，通过调整 W 含量、粘结相比例和工艺参数获得不同密度。一般来说，提高 W 含量有利于提高材料密度，因为 W（钨）的理论密度约为 19.25 g/cm³，而 Ni（镍）、Fe（铁）和 Cu（铜）的密度明显低于 W。但最终实际密度还受到孔隙率、烧结致密度、成分均匀性等因素影响，所以不能简单理解为密度 18.0 g/cm³就一定意味着 W 含量比 17.5 g/cm³高某一个固定百分比。

（5）机械性能不能只通过 17.5 和 18.0 判断

很多情况下，用户会把密度直接与强度、硬度、韧性或者加工性能联系起来，但这种判断并不准确。17.5 g/cm³和 18.0 g/cm³之间的密度差异本身，并不能直接确定抗拉强度、屈服强度、延伸率、硬度或断裂韧性。具体性能需要查看对应材料牌号和检测数据。例如两个密度接近的钨合金，如果一个采用 W-Ni-Fe 体系、另一个采用 W-Ni-Cu 体系，其磁性能、延性、加工特性和力学性能都可能存在明显差异。对于配重产品，材料选择通常应该同时看密度、机械性能、加工方式、使用温度、磁性要求、耐腐蚀要求和成本，而不是只看 17.5 或者 18.0 这个数字。

（6）对精密配重而言，0.5 g/cm³意味着什么？

对于普通固定配重，17.5 和 18.0 g/cm³的差异通常不会成为决定性因素，因为两者都能够提供较高的单位体积质量。但对于航空航天、精密旋转机构、机器人关节、陀螺系统、发动机部件以及空间高度受限的配重结构，密度差异可能直接影响结构尺寸。例如目标质量固定为 1 kg 时，17.5 g/cm³需要约 57.14 cm³，而 18.0 g/cm³只需要约 55.56 cm³。如果安装空间只有约 56 cm³，那么 18.0 g/cm³已经基本达到材料体积要求，而 17.5 g/cm³可能需要重新调整结构尺寸。如果配重安装在旋转部件上，还要考虑质量分布。离心力可以表示为 $F = m\omega^2 r$，其中 m 为质量、ω 为角速度、r 为质量质心到旋转轴的距离；转动惯量则与质量及其到旋转轴的距离有关。因此，配重设计不能只比较总质量和密度，还要控制重心、偏心量、同轴度和圆跳动等参数。

（7）17.5 g/cm³和 18.0 g/cm³哪个更适合配重？

不能单纯根据密度高低判断哪一种更适合，而应根据产品的设计约束选择。如果安装空间有限、要求在尽可能小的体积内获得目标质量，那么 18.0 g/cm³可以提供更高的质量体积

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

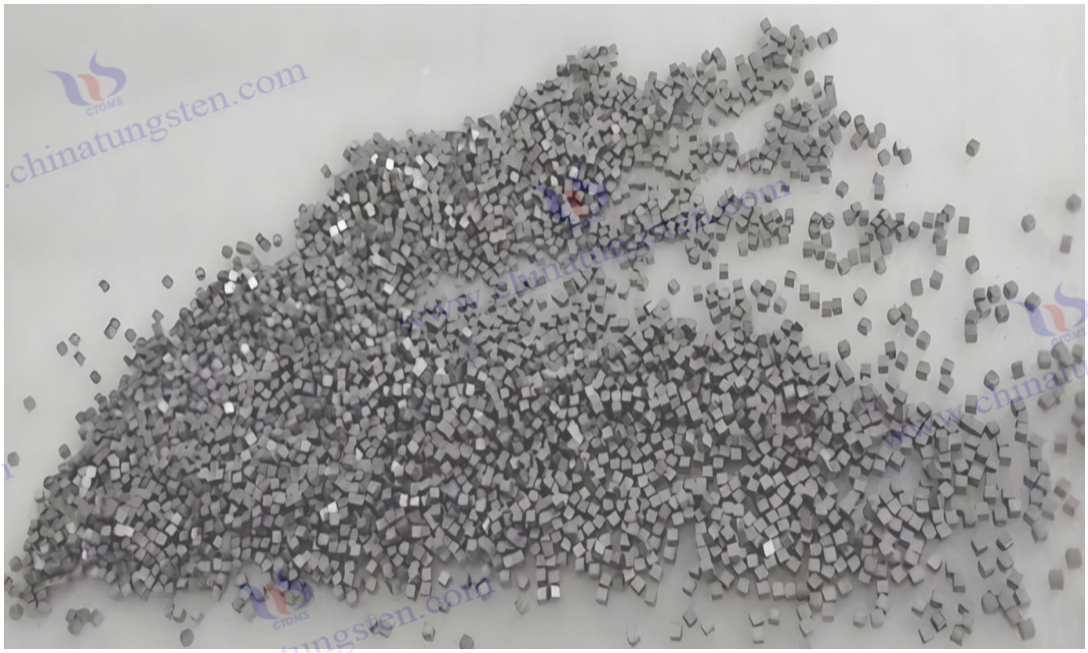
比。如果结构空间相对充足，而 17.5 g/cm³材料在机械性能、加工工艺、供应稳定性或成本方面更符合具体要求，那么 17.5 g/cm³同样可以作为合适的材料等级。对于需要精确控制质量的产品，还应该比较实际密度公差和最终质量公差，而不能只比较名义密度。

（8）实际采购时应该如何区分 17.5 和 18.0？

采购钨合金配重时，建议不要只提出 17.5 g/cm³或 18.0 g/cm³，而应同时提供目标重量、密度要求、材料体系、尺寸、公差、孔位、表面处理和使用环境等信息。例如同样要求 1 kg 配重，如果指定 18.0 g/cm³，可以先按照 55.56 cm³进行材料体积设计；如果指定 17.5 g/cm³，则按照 57.14 cm³进行设计。随后再结合孔槽结构、加工余量和实际密度确定最终外形尺寸。中钨智造（CTIA GROUP）可根据配重的目标质量、安装空间和精度要求，进行钨合金材料选择、结构设计、加工及质量控制，适用于对体积和质量分布有明确要求的定制配重。

（9）17.5 g/cm³和 18.0 g/cm³的核心区别总结

从纯密度角度看，18.0 g/cm³比 17.5 g/cm³高 0.5 g/cm³、约高 2.86%；制作相同质量的配重时，18.0 g/cm³所需体积约小 2.78%。例如 1 千克配重，17.5 g/cm³约需要 57.14 cm³，18.0 g/cm³约需要 55.56 cm³，两者只相差约 1.58 cm³。如果产品对体积没有特别严格的限制，两种密度等级的差别通常不是特别大；如果属于小型化、高质量体积比、空间受限或者精密动态配重应用，则 0.5 g/cm³的差异可能具有实际设计价值。最终应以具体 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）材料牌号及实际检测密度作为选材依据。



Q16 18.0 g/cm³和 18.5 g/cm³钨合金有什么区别？

18.0 g/cm³和 18.5 g/cm³都属于高密度钨合金配重中常见的密度等级，两者相差 0.5 g/cm³。18.5 g/cm³相对于 18.0 g/cm³的密度提高约 2.78%，主要体现为相同质量下体积更小、相同体积下质量更大。但密度并不能代表材料的全部性能，实际差异还与 W（Tungsten，钨）

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

含量、Ni（Nickel，镍）、Fe（Iron，铁）或 Cu（Copper，铜）粘结相、烧结致密度、组织结构及具体牌号有关。

（1）最基本的区别：18.5 g/cm³密度更高

密度计算关系为 ρ = m / V，其中 ρ 为密度、m 为质量、V 为体积。18.0 g/cm³表示每 1 cm³材料理论质量约 18.0 g，而 18.5 g/cm³表示每 1 cm³材料理论质量约 18.5 g。两者密度差为 18.5 − 18.0 = 0.5 g/cm³；相对于 18.0 g/cm³，18.5 g/cm³提高了 0.5 / 18.0 × 100% ≈ 2.78%。这个差异并不意味着两种材料在所有性能上都有 2.78%的对应变化，而主要影响单位体积能够提供的质量。

（2）相同体积下，18.5 g/cm³质量更大

如果两种材料都加工成 10 cm³，18.0 g/cm³钨合金的理论质量为 m = 18.0 × 10 = 180 g，而 18.5 g/cm³钨合金的理论质量为 m = 18.5 × 10 = 185 g。也就是说，相同外形尺寸下，每 10 cm³材料相差约 5 g。对于需要在固定安装空间内增加配重质量的结构，这种差异具有一定设计价值。

例如一个固定体积为 50 cm³的配重块，采用 18.0 g/cm³材料时理论质量约为 900 g，而采用 18.5 g/cm³材料时理论质量约为 925 g，相差约 25 g。

（3）相同重量下，18.5 g/cm³占用体积更小

假设分别采用 18.0 g/cm³和 18.5 g/cm³钨合金制作 1 千克（1000 g）配重，根据 V = m / ρ 计算，18.0 g/cm³材料需要 V = 1000 / 18.0 ≈ 55.56 cm³，而 18.5 g/cm³材料需要 V = 1000 / 18.5 ≈ 54.05 cm³。也就是说，相同质量下，18.5 g/cm³钨合金比 18.0 g/cm³钨合金少占用约 1.50 cm³，体积约减少 2.70%。

项目	18.0 g/cm³	18.5 g/cm³
1 cm³质量	18.0 g	18.5 g
100 g 体积	5.56 cm³	5.41 cm³
500 g 体积	27.78 cm³	27.03 cm³
1 kg 体积	55.56 cm³	54.05 cm³
相同质量体积差	—	约减少 2.70%

对于安装空间非常有限的配重，18.5 g/cm³可以在相同质量要求下进一步缩小材料体积。

（4）18.5 g/cm³通常意味着更高的钨含量或更高的致密度

高密度钨合金通常以 W（Tungsten，钨）作为主要重元素，并通过 Ni-Fe（Nickel-Iron，镍-铁）或 Ni-Cu（Nickel-Copper，镍-铜）等粘结相形成烧结重合金。一般情况下，提高 W 含量有利于提高材料密度，因为钨的理论密度约为 19.25 g/cm³，而 Ni（镍）、Fe（铁）和 Cu（铜）的密度低于钨。不过，18.0 g/cm³与 18.5 g/cm³并不能简单对应某两个固定的 W 含量，因为实际密度还会受到粘结相比例、孔隙率、烧结工艺以及材料组织的影响。所以，不能仅凭 18.5 g/cm³这个数字就判断某种钨合金一定具有某个固定的 W 含量，实际采购仍应以具体材料牌号和供应商技术数据为准。

（5）两者的机械性能不能仅靠密度判断

18.5 g/cm³比 18.0 g/cm³密度高，并不代表其抗拉强度、硬度、延伸率、韧性或者耐磨性能

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

一定按照同样比例提高。例如，不同粘结体系的钨合金，即使密度相近，也可能表现出不同的机械性能和加工特性。W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）在磁性能、延性、加工行为等方面就可能存在差异。对于配重产品，密度主要解决单位体积质量问题，而机械性能则关系到产品在冲击、振动、装配和长期使用过程中的可靠性，两者应分别评价。

（6）18.5 g/cm³对精密配重有什么实际价值？

如果只是普通固定配重，18.0 和 18.5 g/cm³的差异通常不算特别大。但对于航空航天、汽车竞赛、精密旋转设备、机器人关节、陀螺系统、惯性系统以及微型电子设备等空间受限场景，较高密度可以带来更大的设计自由度。例如目标质量为 1 kg 时，18.0 g/cm³需要约 55.56 cm³材料，而 18.5 g/cm³只需要约 54.05 cm³。对于一个已经接近空间极限的配重结构，这约 1.50 cm³的差异可能用于缩短轴向长度、减小外径，或者给安装孔、定位结构和其他零部件留出空间。如果配重用于高速旋转系统，还需要关注质量分布。旋转系统的离心力可表示为 $F = m\omega^2 r$，其中 m 为质量、ω 为角速度、r 为质量质心到旋转轴的距离；转动惯量与质量及其到旋转轴的距离有关。因此，18.5 g/cm³并不会自动带来更好的动态平衡，最终仍取决于配重的实际质量分布、偏心量、安装位置、同轴度和圆跳动等。

（7）18.0 g/cm³和 18.5 g/cm³如何选择？

如果结构空间比较充足，两种密度的体积差异只有几个百分点，18.0 g/cm³已经能够满足大量配重应用。如果产品强调小型化、单位体积质量或者安装空间非常紧张，18.5 g/cm³能够进一步减少所需材料体积。如果产品对成本、加工性能或者特定机械性能更加敏感，则不能只因为 18.5 g/cm³密度更高就直接选择 18.5 g/cm³。材料牌号、加工难度、尺寸公差、质量公差、供应稳定性和批量成本同样需要纳入考虑。换句话说，18.5 g/cm³的主要优势是更高的质量体积比，而不是在所有工程指标上都优于 18.0 g/cm³。

（8）实际定制时需要特别关注什么？

对于钨合金配重，18.0 g/cm³或 18.5 g/cm³通常属于材料密度指标，而最终产品还需要确定目标重量、外形尺寸、孔槽结构、安装方式、尺寸公差、质量公差、表面处理以及使用环境。

例如要求制作 1 kg 配重，按照 18.0 g/cm³可以先按 55.56 cm³材料体积进行设计，按照 18.5 g/cm³则可以按 54.05 cm³进行估算。如果产品具有中心孔、螺纹孔、沉孔或槽口，就需要按照实际材料体积重新计算，不能直接把 55.56 cm³或 54.05 cm³当作最终外形包络体积。针对 18.0 g/cm³与 18.5 g/cm³两种密度等级的配重需求，中钨智造（CTIA GROUP）可结合目标重量和安装空间，对不同密度材料的体积占用进行设计评估，并进一步完成配重结构尺寸、孔槽位置、质量公差及加工方案的匹配，使材料密度选择与实际产品结构要求相协调。

（9）18.0 和 18.5 g/cm³的核心区别

从密度本身来看，18.5 g/cm³比 18.0 g/cm³高 0.5 g/cm³，约高 2.78%。以 1 千克配重为例，18.0 g/cm³需要约 55.56 cm³，而 18.5 g/cm³需要约 54.05 cm³，18.5 g/cm³可使材料体积减少约 1.50 cm³、约 2.70%。所以，两者最核心的区别可以概括为：18.0 g/cm³具有较高的高密度配重能力，18.5 g/cm³则在此基础上进一步提高单位体积质量，更适合对配重体积有较严格限制的场景。但实际材料性能、加工性能和使用效果不能仅通过密度判断，应结合具体

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）牌号的成分、性能和实际检测数据综合确定。



三、钨合金配重不同应用的材料选择

钨合金配重不同应用的材料选择

钨合金配重并不是密度越高就越适合所有应用。实际选材通常需要同时考虑密度、目标重量、体积限制、强度与韧性、磁性能、加工性能、耐腐蚀性、工作温度以及成本。常见材料体系主要包括 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜），其中钨（W，Tungsten，钨）提供主要的高密度特性，镍（Ni，Nickel，镍）与铁（Fe，Iron，铁）或铜（Cu，Copper，铜）构成粘结相。

W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 怎么选择

W-Ni-Fe 通常具有较好的综合机械性能和较高的强度，适用于汽车、航空、工业转子等对结构可靠性要求较高的配重。由于含有铁（Fe，Iron，铁），其磁响应通常比 W-Ni-Cu 更明显，所以靠近磁传感器、电子罗盘等设备时，需要把磁性能作为设计参数进行确认。W-Ni-Cu 采用铜（Cu，Copper，铜）作为主要粘结相之一，通常具有较低的磁响应特征，因此在部分电子设备、精密仪器和对磁环境较敏感的结构中具有应用价值。不过，是否适合具体产品仍需要根据实际磁导率、工作温度、机械载荷和加工要求进行验证，不能简单地把某一种材料定义为绝对无磁。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

根据密度选择材料

如果主要目标是缩小配重体积，可以优先考虑较高密度等级。例如设计要求为 500 g，采用 18.0 g/cm³ 钨合金时，理论体积约为 27.78 cm³；如果采用 17.0 g/cm³，则约为 29.41 cm³。对于空间极其有限的配重安装位置，提高材料密度能够进一步压缩尺寸。但密度提高并不意味着所有性能同步提高。钨含量提高通常有利于提高密度，但也可能改变硬度、韧性、加工难度以及材料成本。因此，应根据实际功能确定目标密度，而不是单纯追求最高密度。

不同应用对应的材料选择

应用领域	常用材料体系	主要选材考虑
汽车曲轴、转子配重	W-Ni-Fe	高密度、强度、抗振动、加工性能
汽车轮毂及局部配重	W-Ni-Fe、W-Ni-Cu	体积限制、质量控制、耐环境性能
赛车配重	高密度 W-Ni-Fe	小体积实现较大质量、可靠固定
飞机控制面配重	W-Ni-Fe、W-Ni-Cu	密度、质量公差、重心位置、可靠性
无人机配重	W-Ni-Fe、W-Ni-Cu	小型化、重心调节、磁环境要求
工业电机、发电机转子	W-Ni-Fe	密度、机械强度、动态平衡
高速转子	高密度 W-Ni-Fe	高速旋转下的结构完整性和平衡稳定性
手机振动配重	W-Ni-Fe、W-Ni-Cu	小尺寸、高质量、质量一致性
高尔夫球杆配重	W-Ni-Fe、W-Ni-Cu	密度、重心调节、加工和装配
精密仪器配重	根据磁性和空间要求选择	重量精度、磁性能、尺寸稳定性
水下及户外配重	W-Ni-Fe、W-Ni-Cu	密度、耐腐蚀、环境适应性

根据旋转速度选择材料

对于曲轴、转子、飞轮及其他高速旋转部件，材料选择不能只看密度，还要考虑抗离心载荷能力和动态平衡性能。旋转配重产生的离心力可以表示为 $F=m\omega^2r$，其中 m 为配重质量、ω 为角速度、r 为配重质心到旋转轴的距离。转速越高，质量或安装半径越大，对固定结构和材料性能的要求越高。这类应用通常更关注 W-Ni-Fe 等具有较好综合机械性能的高密度钨合金，同时需要控制成品质量、尺寸、重心、同轴度、跳动和安装可靠性。最终是否能够用于高速旋转，还需要结合具体转速、结构设计和安全系数进行验证。

根据磁性能选择材料

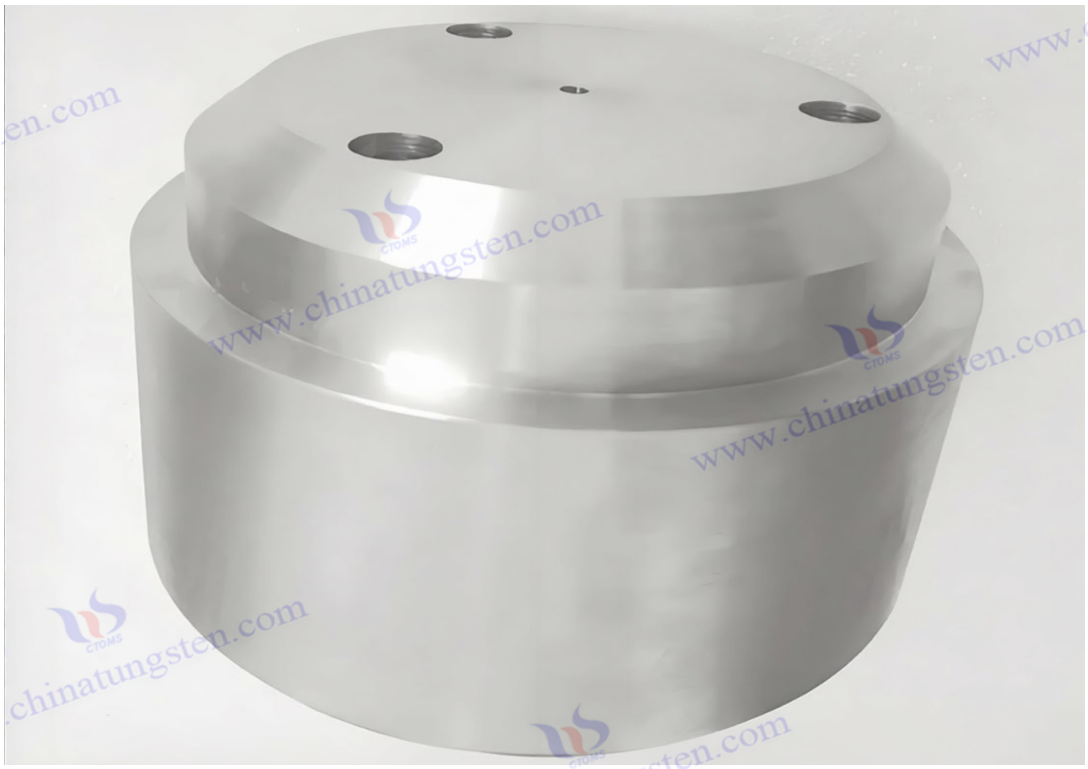
当钨合金配重靠近磁传感器、电机磁路、电子罗盘或其他磁敏感元件时，材料的磁响应就成为重要因素。W-Ni-Fe 中的铁会带来一定磁响应，而 W-Ni-Cu 通常更适合需要降低磁干扰的部分场景。不过，实际产品的磁性能不仅与材料体系有关，还与钨含量、粘结相比例、加工状态以及具体牌号有关。如果产品对磁性能有明确要求，最好在技术条件中直接规定磁导率、磁化强度或实际测试指标，而不是只写 W-Ni-Fe 或 W-Ni-Cu。

根据加工方式选择材料

钨合金通常采用粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）路线生产，再根据图纸要求进行车削、铣削、钻孔、攻螺纹、磨削等精密加工。材料硬度、组织结构和钨含量都会影响刀具磨损和加工效率。对于结构简单、数量较大的配重，可以通过模压和烧结获得

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

接近最终形状的毛坯，以减少后续加工量；对于小批量或结构复杂的产品，则可以采用烧结毛坯结合数控加工，以获得更加灵活的尺寸和结构控制。总体而言，汽车和高速旋转机械通常重点考虑 W-Ni-Fe 的综合机械性能、密度和动态平衡；电子设备和磁敏感结构则需要重点比较 W-Ni-Fe 与 W-Ni-Cu 的磁性能；航空及无人机配重需要同时关注密度、重量公差、重心和可靠性；高尔夫球杆等运动器材则更多围绕局部质量分布、重心和转动惯量（MOI，Moment of Inertia，转动惯量）进行选材。最终材料选择可以概括为：先确定目标质量和安装空间，再确定所需密度，随后根据磁性能、机械载荷、工作环境、加工方式和成本进行材料体系筛选，而不是单纯按照钨含量或密度高低进行选择。



Q17 钨合金配重通常由哪些元素组成？

钨合金配重是一类以 W（Tungsten，钨）为主要重元素、加入一种或多种粘结相元素制成的高密度合金材料。工业上最常见的体系是 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜），其中钨提供主要的高密度特性，Ni（Nickel，镍）、Fe（Iron，铁）和 Cu（Copper，铜）主要用于形成金属粘结相，改善材料的烧结性能、韧性、延性和加工性能。不同用途还可能通过调整元素比例和添加少量其他元素，对密度、力学性能、磁性能、耐腐蚀性能及加工性能进行优化。

（1）钨 W 是钨合金配重的主要元素

W（Tungsten，钨）是钨合金配重中最核心的元素，也是产品能够实现高密度、小体积的重要原因。纯钨理论密度约为 19.25 g/cm³，因此在钨合金中提高钨的质量分数，通常有利于提高材料整体密度。常见高密度钨合金的 W 含量通常处于较高水平，工程产品可根据目标密度和性能要求采用不同配比。例如一些高密度等级可以达到 90%以上的钨含量。对于配重而言，W 含量越高通常意味着更高的密度，但并不是钨含量越高就一定越适合所

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

有应用。随着 W 含量、粘结相比例和组织结构变化，材料的强度、延性、韧性、加工性能以及制造成本也会发生变化。

（2）镍 Ni 主要用于形成粘结相

Ni（Nickel，镍）是钨重合金中非常常见的粘结相元素之一。钨本身熔点极高，直接制造致密、具有良好综合机械性能的复杂配重件存在一定难度，因此通常通过液相烧结等粉末冶金工艺，使镍等元素形成金属粘结相，将钨颗粒连接起来。镍的加入可以改善钨合金的组织结合和综合机械性能，同时有助于获得更加均匀、致密的烧结组织。在 W-Ni-Fe 体系中，Ni 与 Fe 共同构成粘结相；在 W-Ni-Cu 体系中，则主要由 Ni 与 Cu 构成粘结相。两种体系虽然都以钨为主要成分，但最终材料性能和加工特性并不完全相同。

（3）铁 Fe 常用于 W-Ni-Fe 钨合金

Fe（Iron，铁）是 W-Ni-Fe 钨合金中的重要粘结相元素。W-Ni-Fe 是高密度钨合金配重非常常见的一种材料体系，具有较高的密度和较好的综合机械性能，因此广泛用于需要高质量体积比、较高强度和精密加工的配重产品。W-Ni-Fe 体系中的钨颗粒构成主要的高密度相，Ni-Fe 形成粘结相。通过调整 W、Ni 和 Fe 之间的比例，可以获得不同的密度和性能等级。这类材料尤其适合结构强度要求较高的配重，例如机械平衡件、汽车及赛车配重、航空航天配重、旋转部件配重和精密仪器配重等。

（4）铜 Cu 主要用于 W-Ni-Cu 钨合金

Cu（Copper，铜）是另一种常见的钨合金配重粘结相元素。W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）体系以钨为主要重元素，通过 Ni-Cu 粘结相改善材料的烧结和加工特性。W-Ni-Cu 与 W-Ni-Fe 虽然都可以制造高密度配重，但两者在磁性能、机械性能、延性、加工行为以及具体使用环境方面可能存在差异。例如，当产品对磁响应有较严格要求时，W-Ni-Cu 通常值得重点评估；而对于需要较高强度和综合机械性能的结构配重，W-Ni-Fe 则是常见选择。实际表现仍取决于具体成分比例、制造工艺和材料牌号，不能只根据体系名称判断。

（5）为什么不是 100%使用钨制造配重？

从密度角度看，纯钨约 19.25 g/cm³，确实比大多数钨重合金密度更高。但配重材料并不是只追求密度，还需要考虑加工性、韧性、制造复杂程度、成本以及批量生产稳定性。纯钨具有高熔点、高硬度等特点，加工和制造复杂结构的难度较高。通过加入 Ni（镍）、Fe（铁）或 Cu（铜）等粘结相，可以在保持较高密度的同时改善材料的综合工程性能，使其更适合制造具有孔、槽、螺纹、台阶、异形结构的精密配重。例如 1 kg 纯钨理论体积约为 1000 / 19.25 ≈ 51.95 cm³，而 18.0 g/cm³钨合金约为 55.56 cm³，两者只相差约 3.61 cm³。对于很多配重应用而言，为了获得更好的综合制造性能，牺牲少量体积换取更好的加工和结构适应性是具有工程价值的。

（6）钨合金中不同元素分别起什么作用？

可以把常见钨合金配重的元素作用简单理解为：W（钨）主要负责高密度和质量体积比，Ni（镍）主要参与形成粘结相并改善组织结合，Fe（铁）主要用于 W-Ni-Fe 体系的粘结相调节，Cu（铜）则主要用于 W-Ni-Cu 体系并影响材料的延性、加工特性和磁性能等。

元素	中文名称	在钨合金中的主要作用

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

元素	中文名称	在钨合金中的主要作用
W	钨	提供高密度、高质量体积比
Ni	镍	形成粘结相、改善组织结合和综合性能
Fe	铁	调节 W-Ni-Fe 粘结相及机械性能
Cu	铜	构成 W-Ni-Cu 粘结相，影响加工、延性及磁性能

这里的作用是工程上的概括，并不是说某一种元素只承担单一功能。最终材料性能来自整体成分、相组成、钨颗粒尺寸、烧结工艺和微观组织的共同作用。

（7）不同元素比例为什么会影响钨合金配重密度？

钨的密度远高于 Ni、Fe 和 Cu，所以改变 W 与粘结相之间的比例，会影响最终材料的理论密度。例如在其他条件相近的情况下，提高 W 比例通常能够提高整体密度。不过实际烧结钨合金的密度并不是简单按照元素密度进行线性计算。粉末粒度、压制密度、液相烧结状态、残余孔隙以及成分均匀性都会影响最终实测密度。对于工程配重，真正重要的是最终产品实测密度和质量公差。例如名义密度为 18.0 g/cm³的材料，最终产品还需要通过密度检测和称重确认是否达到设计要求。

（8）元素组成还会影响钨合金配重的磁性能

材料元素组成不仅影响密度，也会影响磁性能。W（钨）本身不是典型铁磁性材料，但 W-Ni-Fe 体系由于含有 Fe（铁）等元素，可能表现出明显的磁响应；W-Ni-Cu 体系通常具有较低的磁响应，更适合部分对磁环境敏感的应用。所以，如果钨合金配重安装在陀螺仪、精密传感器、电子设备、磁场环境或者惯性系统附近，仅仅提出 18.0 g/cm³或 18.5 g/cm³的密度要求可能还不够，还需要明确磁导率、磁响应等相关要求，并根据具体材料牌号进行验证。

（9）钨合金配重是否还会加入其他元素？

常规钨合金配重主要围绕 W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 体系进行设计，并不意味着所有产品都只包含这三种元素。在特定材料体系和制造工艺中，还可能通过微量元素或工艺控制来改善烧结行为、组织稳定性、机械性能或其他特殊性能。不过，对于普通高密度钨合金配重，没有必要为了追求复杂成分而加入大量元素。配重材料的核心仍然是根据目标密度、机械性能、加工要求、磁性能、耐腐蚀要求和使用环境建立合理的成分体系。中钨智造（CTIA GROUP）在钨合金配重定制中，可根据目标密度、质量要求、结构尺寸及具体应用环境匹配 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 等材料体系，并结合配重用途进行材料成分和制造工艺设计。

（10）W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 是最常见的两类体系

从实际工程应用来看，可以将常见钨合金配重材料大致分为两条路线：W-Ni-Fe 主要强调高密度、强度和综合机械性能，适合结构型和高可靠性配重；W-Ni-Cu 则具有不同的粘结相特征，在部分对磁性能、加工性能或特定环境有要求的配重中具有应用价值。两者都可以通过粉末冶金制造成圆柱、圆盘、环形、块状、板状以及各种异形配重，并通过后续车削、铣削、钻孔、磨削等工艺达到所需尺寸精度。

钨合金配重通常不是单一元素材料，而是以 W（Tungsten，钨）为主要高密度元素，并加入 Ni（Nickel，镍）、Fe（Iron，铁）或 Cu（Copper，铜）等形成粘结相。最常见的材

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

料体系是 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）。

其中，W 主要决定高密度和小体积配重能力，Ni、Fe、Cu 则通过粘结相和成分比例影响材料的烧结致密性、机械性能、加工性能及磁性能。实际选择材料时，不能只看钨含量或者名义密度，还应结合具体牌号的成分、实测密度、机械性能、磁性能和加工要求进行确定。



Q18 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）是什么材料？

W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）是一种以 W（Tungsten，钨）为主要组成相、Ni（Nickel，镍）和 Fe（Iron，铁）作为粘结相的高密度钨重合金（Tungsten Heavy Alloy，钨重合金）。它通常采用粉末冶金工艺制造，通过压制成形、烧结等过程形成具有较高密度、较好强度和韧性的金属材料。由于兼具高密度和相对良好的综合机械性能，W-Ni-Fe 广泛用于钨合金配重、平衡块、惯性部件、辐射屏蔽件以及航空航天、汽车和精密机械等领域。

（1）W-Ni-Fe 具体是什么材料？

W-Ni-Fe 本质上是一种钨基重合金，其中 W 构成主要的高密度相，Ni 和 Fe 形成连续或半连续的金属粘结相，将大量钨颗粒结合在一起。与纯钨不同，W-Ni-Fe 并不是通过把钨完全熔化后直接铸造成型，而通常采用粉末冶金路线制造。钨粉、镍粉、铁粉按照设计比例混合后进行压制成形，再经过液相烧结，使材料获得较高的致密度和稳定的组织结构。这种材料体系的核心思路可以概括为：利用 W 提供高密度，通过 Ni-Fe 粘结相改善钨颗粒之间的结合以及材料的综合机械性能。

（2）W-Ni-Fe 通常含有多少钨？

W-Ni-Fe 属于高钨含量材料，实际 W 含量会根据目标密度、力学性能、加工性能和具体牌

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

号进行调整，工程上常见的是约 90%～97% W 的高密度钨合金体系。随着 W 含量提高，材料整体密度通常会增加，因为 W（钨）的理论密度约为 19.25 g/cm³，而 Ni 和 Fe 的密度明显低于 W。例如，部分高密度 W-Ni-Fe 材料可以达到 18 g/cm³以上，甚至接近 18.5 g/cm³。不同供应商和不同牌号的具体成分、密度及机械性能可能存在差异，所以不能单纯通过 W-Ni-Fe 这个名称确定某一个固定密度。

（3）W、Ni、Fe 在材料中分别起什么作用？

W（Tungsten，钨）主要承担高密度、高质量体积比和耐高温等特性，是 W-Ni-Fe 实现高密度的基础；Ni（Nickel，镍）主要参与形成粘结相，有助于改善钨颗粒之间的结合以及材料的综合性能；Fe（Iron，铁）与 Ni 共同构成粘结相，并用于调节材料的组织、强度、延性和烧结行为。所以，W-Ni-Fe 并不是简单地把三种金属混合在一起，而是在烧结后形成具有特定组织结构的复合型金属材料。钨颗粒与 Ni-Fe 粘结相之间的比例、分布状态和界面结合质量都会影响最终性能。

（4）W-Ni-Fe 为什么适合制作钨合金配重？

W-Ni-Fe 最大的优势之一是高密度。普通钢的密度约为 7.85 g/cm³，而高密度 W-Ni-Fe 可以达到约 17～18.5 g/cm³甚至更高的特定等级。因此，在相同质量要求下，W-Ni-Fe 所需要的体积明显小于钢。例如 1 kg 配重，如果采用 18.0 g/cm³的 W-Ni-Fe，理论材料体积约为 $V = 1000 / 18.0 \approx 55.56$ cm³；如果采用 7.85 g/cm³钢材，则约需要 $1000 / 7.85 \approx 127.39$ cm³。两者相差约 71.83 cm³。对于航空航天、汽车、赛车、机器人、精密旋转设备以及空间受限的电子设备而言，这种高质量体积比可以帮助设计人员在有限空间内获得所需配重质量。

（5）W-Ni-Fe 与纯钨有什么区别？

纯钨的理论密度约为 19.25 g/cm³，而 W-Ni-Fe 通常低于纯钨，因此单纯从密度来看，纯钨具有更高的质量体积比。但 W-Ni-Fe 的工程优势并不只是密度。通过 Ni-Fe 粘结相，可以改善材料的韧性、延性和综合机械性能，并且更适合通过粉末冶金与后续机械加工制造复杂形状。

例如 1 kg 纯钨理论体积约为 $1000 / 19.25 \approx 51.95$ cm³，而 18.0 g/cm³ W-Ni-Fe 约为 55.56 cm³，两者只相差约 3.61 cm³。对于很多配重应用而言，用少量体积差换取更好的综合加工和结构适应性具有实际价值。

（6）W-Ni-Fe 有哪些主要性能特点？

W-Ni-Fe 通常具有高密度、较高强度、较好的韧性、较好的抗冲击能力以及良好的尺寸稳定性。其材料性能受到 W 含量、Ni/Fe 比例、钨粉粒度、烧结温度、烧结时间以及最终组织结构等多种因素影响。与纯钨相比，W-Ni-Fe 通常具有更好的塑性和韧性；与普通钢相比，其密度明显更高，可以在较小体积内提供较大的质量。不过，W-Ni-Fe 并不能简单理解为一种在所有性能指标上都优于钢或纯钨的材料。它的价值主要在于高密度与综合性能之间的平衡。

（7）W-Ni-Fe 的磁性能有什么特点？

W-Ni-Fe 中含有 Fe（铁）和 Ni（镍），因此通常具有一定磁响应，其具体磁性能取决于材料成分、组织结构和加工状态。这一点对于某些精密配重尤其重要。例如配重如果安装在磁传感器、陀螺仪、惯性测量装置或其他对磁场敏感的系统附近，就不能只考虑密度，还

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

应根据具体应用要求评估磁导率和磁响应。如果产品对低磁或非磁性能要求较高，可以进一步考虑 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）等材料体系，并根据实际材料数据进行选择。

（8）W-Ni-Fe 是如何制造出来的？

W-Ni-Fe 通常采用粉末冶金工艺。基本过程包括钨粉、镍粉和铁粉配料与混合、压制成形、预处理或脱脂、液相烧结、必要的热处理及后续机械加工，最终再进行尺寸、密度、质量和外观检测。其中液相烧结是形成高致密度 W-Ni-Fe 组织的重要环节。在烧结过程中，粘结相发生液相化并促进钨颗粒重新排列、润湿和致密化，最终形成以钨颗粒为主要硬质相、Ni-Fe 为粘结相的组织。对于精密配重，还可能在烧结后进行车削、铣削、钻孔、磨削、螺纹加工等，以达到图纸规定的尺寸和公差。

（9）W-Ni-Fe 可以加工成哪些钨合金配重？

W-Ni-Fe 具有较好的工程加工适应性，可以根据产品结构制造成圆柱形配重、圆盘配重、环形配重、块状配重、板状配重、偏心配重以及带孔、带槽、带螺纹的异形配重。对于旋转部件，还可以通过精密加工控制配重的质量分布、安装位置和几何精度。例如旋转系统中的离心力可表示为 $F = m\omega^2 r$，其中 m 为质量、ω 为角速度、r 为质量质心到旋转轴的距离；当配重安装位置发生微小偏差时，高速旋转状态下也可能产生明显的动态影响。所以 W-Ni-Fe 配重的最终质量、尺寸、孔位、同轴度、圆跳动和重心位置都可能成为重要的质量控制指标。

（10）W-Ni-Fe 主要应用在哪些领域？

W-Ni-Fe 的典型应用包括航空航天配重、飞机控制面配重、汽车和赛车平衡件、发动机及旋转部件配重、工业转子平衡件、机器人关节配重、精密仪器惯性部件、医疗设备配重以及部分辐射屏蔽结构。在配重应用中，它的核心价值主要来自高密度和良好的综合机械性能，可以在有限空间内实现较大的质量，同时能够通过粉末冶金和精密机械加工制造不同结构。

（11）W-Ni-Fe 与 W-Ni-Cu 有什么区别？

W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）与 W-Ni-Fe 同属于常见钨重合金体系，主要区别在于粘结相不同。W-Ni-Fe 采用 Ni-Fe 粘结相，而 W-Ni-Cu 采用 Ni-Cu 粘结相。两者都可以实现高密度，但在磁性能、延性、机械性能、加工行为和具体使用环境方面可能有所不同。W-Ni-Fe 由于含 Fe，通常具有更明显的磁响应；W-Ni-Cu 则通常具有较低的磁响应。所以在选择钨合金配重时，如果主要要求是高强度和综合机械性能，可以重点评估 W-Ni-Fe；如果应用对磁响应具有特殊要求，则可以进一步评估 W-Ni-Cu。最终仍应以具体材料牌号和检测数据为依据。

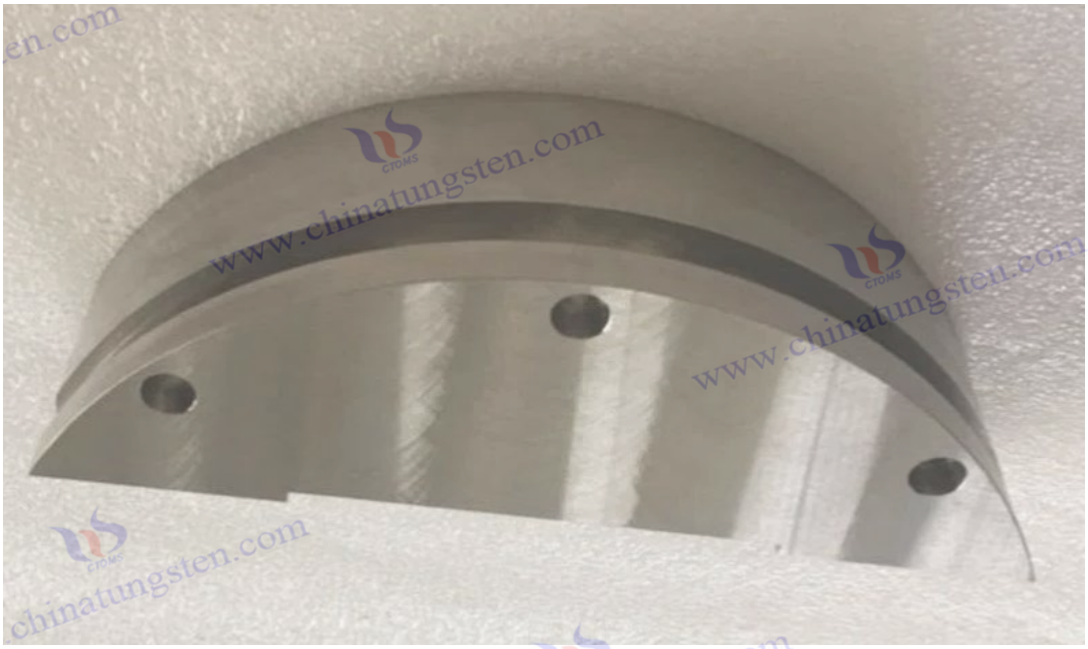
（12）W-Ni-Fe 适合哪些类型的配重设计？

W-Ni-Fe 尤其适用于高密度、小体积和较高机械可靠性要求的配重设计。例如在有限空间内需要增加质量、调整重心或者改变转动惯量时，可以利用 W-Ni-Fe 较高的密度实现紧凑结构。对于质量固定的配重，体积可以按照 $V = m / \rho$ 进行初步计算；例如目标质量为 500 g、材料密度为 18.0 g/cm³，则材料体积约为 500 / 18.0 = 27.78 cm³。实际设计还需要扣除孔槽体积，并考虑加工余量、密度公差和最终质量公差。对于中小型精密配重，可以通过

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

改变外形尺寸、安装位置和质量分布，实现重心或转动惯量的精确调节。

W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）是一种以 W（Tungsten，钨）为主要高密度相、Ni（Nickel，镍）和 Fe（Iron，铁）作为粘结相的钨重合金，通常采用粉末冶金和液相烧结工艺制造。其典型特点是密度高、强度和韧性较好、综合机械性能较为均衡，并且能够通过后续机械加工制造各种精密结构。对于钨合金配重而言，W-Ni-Fe 能够在有限空间内提供较大的质量，同时兼顾结构强度、加工和长期使用可靠性，因此被广泛用于航空航天、汽车赛车、工业旋转设备、精密仪器和其他高密度配重场景。具体选材时，应根据目标密度、质量公差、机械性能、磁性能、结构尺寸和加工要求选择合适的 W-Ni-Fe 牌号，而不能仅根据 W-Ni-Fe 这一材料名称判断最终性能。



Q19 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）是什么材料？

W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）是一种以 W（Tungsten，钨）为主要高密度相、Ni（Nickel，镍）和 Cu（Copper，铜）作为粘结相组成的钨重合金（Tungsten Heavy Alloy，钨重合金）。它通常采用粉末冶金工艺制造，通过配料、混合、压制成形和液相烧结等工艺形成高致密度材料。W-Ni-Cu 兼具钨的高密度与金属粘结相带来的韧性、延性和加工适应性，因此常用于钨合金配重、平衡块、惯性部件、减振部件以及部分对磁性能有特殊要求的精密结构。

（1）W-Ni-Cu 具体是什么材料？

W-Ni-Cu 是一种钨基重合金，其主体是高比例 W（钨）颗粒，Ni（镍）和 Cu（铜）构成粘结相。与纯钨不同，W-Ni-Cu 并不是单纯使用钨材料，而是利用钨颗粒提供高密度，再通过 Ni-Cu 粘结相改善钨颗粒之间的结合，使材料获得较好的综合机械性能和制造适应性。其典型制造路线为钨粉、镍粉、铜粉按照设计比例进行配料和混合，然后压制成形，再通过液相烧结获得高致密度钨重合金。烧结完成后，还可以通过车削、铣削、钻孔、磨削等机械加工制造精密配重。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（2）W-Ni-Cu 通常含有多少钨？

W-Ni-Cu 属于高钨含量材料，具体 W 含量取决于目标密度、机械性能、磁性能和产品用途。工程上常见的钨重合金通常具有较高的 W 质量分数，例如约 90%～97% W 的材料体系。W 含量提高通常有利于提高整体密度，因为 W 的理论密度约为 19.25 g/cm³，而 Ni 和 Cu 的密度低于 W。但实际产品密度还受到粉末粒度、压制状态、烧结致密度和残余孔隙等因素影响。因此，不能仅凭 W-Ni-Cu 这个名称确定材料一定是 18.0 g/cm³、18.5 g/cm³或者其他固定密度，实际密度应以具体材料牌号和检测结果为准。

（3）W、Ni、Cu 在材料中分别起什么作用？

W（Tungsten，钨）主要负责提供高密度、高质量体积比和较高的耐高温能力，是 W-Ni-Cu 实现高密度的核心元素。Ni（Nickel，镍）主要参与形成粘结相，并有助于改善钨颗粒之间的结合以及烧结组织的稳定性。Cu（Copper，铜）与 Ni 共同构成粘结相，并对材料的延性、加工性能、导热性能及磁响应等产生影响。三种元素并不是各自独立发挥单一作用，最终材料性能取决于元素比例、钨颗粒尺寸、粘结相分布以及烧结工艺等因素。

（4）W-Ni-Cu 为什么适合制作钨合金配重？

W-Ni-Cu 最重要的优势之一是高密度，可以在有限体积内实现较大的配重质量。例如采用 18.0 g/cm³的 W-Ni-Cu 制造 1 kg 配重，理论材料体积为 $V = 1000 / 18.0 \approx 55.56$ cm³；如果采用 7.85 g/cm³钢材，则需要约 $1000 / 7.85 \approx 127.39$ cm³。相同质量下，钨合金所需材料体积约为钢材的 43.6%，体积减少约 56.4%。对于汽车、航空航天、机器人、精密机械以及电子设备中的空间受限配重结构，这种高质量体积比具有明显的设计价值。

（5）W-Ni-Cu 与纯钨有什么区别？

纯钨的理论密度约 19.25 g/cm³，高于多数 W-Ni-Cu 钨重合金，所以单纯比较密度时，纯钨具有更高的质量体积比。但是纯钨加工难度较高，特别是复杂孔槽、螺纹、异形结构以及批量精密加工。W-Ni-Cu 通过 Ni-Cu 粘结相改善材料的综合制造性能，在保持较高密度的同时，可以更适合制造复杂形状的配重。例如 1 kg 纯钨理论体积约为 $1000 / 19.25 \approx 51.95$ cm³，而 18.0 g/cm³ W-Ni-Cu 约为 55.56 cm³，两者只相差约 3.61 cm³。对于很多配重产品而言，这种有限的体积差异可以换取更好的加工和结构适应性。

（6）W-Ni-Cu 有哪些主要性能特点？

W-Ni-Cu 通常具有高密度、较好的延性、一定的韧性和较好的加工适应性。其具体性能与 W 含量、Ni/Cu 比例、钨颗粒尺寸、烧结温度和组织结构密切相关。与纯钨相比，W-Ni-Cu 通常更适合进行机械加工和复杂结构制造；与普通钢相比，它具有明显更高的密度，可以在更小空间内实现相同质量。另外，Ni-Cu 粘结相也会影响材料的热传导、电导和磁响应，因此 W-Ni-Cu 并不仅仅是一种单纯追求高密度的配重材料。

（7）W-Ni-Cu 的磁性能有什么特点？

W-Ni-Cu 在部分应用中受到关注的一个原因是其通常具有较低的磁响应。与含 Fe（Iron，铁）的 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）相比，W-Ni-Cu 不含 Fe，因此通常更适合需要控制磁响应的某些精密结构。但低磁响应并不意味着所有 W-Ni-Cu 产品都具有完全相同的非磁性能。具体磁导率和磁响应仍会受到材料成分、杂质、组织结构和制造工艺影

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

响。如果配重用于磁传感器、精密电子设备、陀螺仪、惯性测量单元或其他磁敏感环境，应直接提出磁性能指标，并要求供应商提供对应材料的检测数据。

（8）W-Ni-Cu 是如何制造出来的？

W-Ni-Cu 通常采用粉末冶金工艺制造。首先根据目标密度和材料性能确定 W、Ni、Cu 的配比，然后进行粉末混合、压制成形，再通过液相烧结获得高致密度钨重合金。烧结过程中，Ni-Cu 粘结相形成液相并润湿钨颗粒，促进颗粒重新排列和材料致密化，最终形成钨颗粒与金属粘结相组成的复合组织。对于精密配重，烧结后通常还需要进行机械加工，例如车削、铣削、钻孔、磨削和螺纹加工等，再通过密度检测、尺寸检测、称重和外观检测确认产品是否符合设计要求。

（9）W-Ni-Cu 可以加工成哪些配重？

W-Ni-Cu 可以根据结构需求制造成圆柱配重、圆盘配重、环形配重、块状配重、板状配重、球形或异形配重，也可以加工中心孔、安装孔、沉孔、螺纹孔和定位槽等结构。对于旋转设备，还可以通过精密加工控制质量分布和安装位置。旋转系统中的离心力可以表示为 $F = m\omega^2 r$，其中 m 为质量、ω 为角速度、r 为质量质心到旋转轴的距离。因此，对于高速旋转配重，仅仅保证总重量达到要求还不够，还需要控制偏心量、同轴度、圆跳动、安装位置以及质量分布。

（10）W-Ni-Cu 与 W-Ni-Fe 有什么区别？

W-Ni-Cu 和 W-Ni-Fe 都属于常见的钨重合金体系，最大的区别在于粘结相组成不同。W-Ni-Cu 采用 Ni-Cu 粘结相，而 W-Ni-Fe 采用 Ni-Fe 粘结相。

对比项目	W-Ni-Cu	W-Ni-Fe
主要高密度元素	W（钨）	W（钨）
粘结相	Ni-Cu	Ni-Fe
高密度能力	高	高
磁响应	通常较低	通常更明显
延性与加工特性	较好	较好，但取决于牌号
典型用途	配重、精密结构、部分低磁应用	配重、结构件、航空航天、汽车等

实际材料性能不能仅根据材料体系名称判断，还应查看具体牌号的密度、抗拉强度、延伸率、硬度、磁性能和加工性能。

（11）W-Ni-Cu 适合哪些配重应用？

W-Ni-Cu 适用于需要高密度、小体积和较低磁响应的部分配重场景，例如精密仪器配重、电子设备配重、惯性部件、振动配重、部分航空航天结构以及高密度机械平衡件。如果配重安装在固定空间内，可以利用高密度材料增加单位体积质量；如果用于旋转系统，则可以利用精密加工调整质量分布，从而满足动态平衡要求。例如设计 500 g 配重，如果材料密度为 18.0 g/cm³，则理论材料体积为 500 / 18.0 ≈ 27.78 cm³。实际产品如果存在安装孔和槽口，则应按照去除后的净材料体积重新计算。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

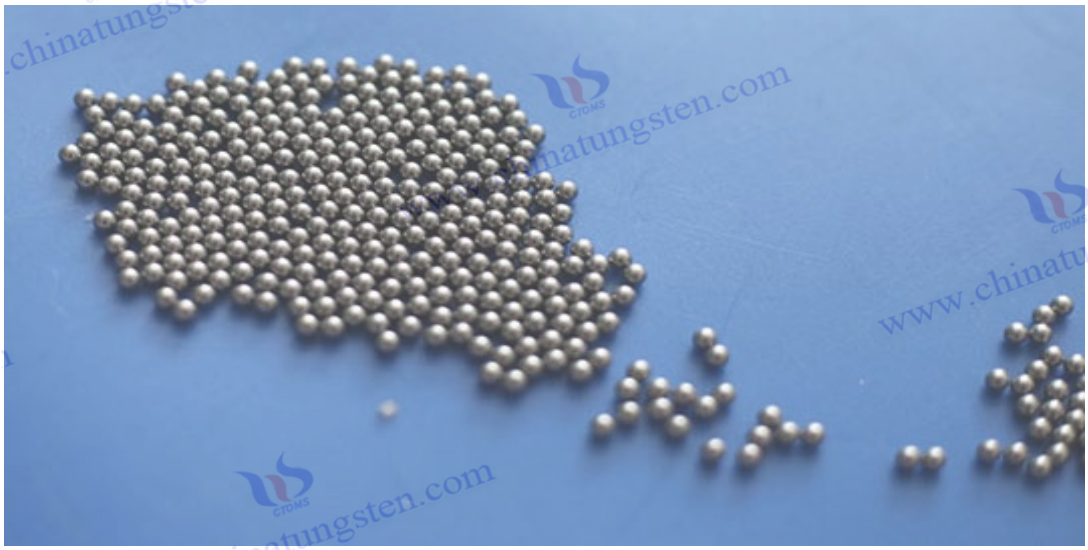
（12）W-Ni-Cu 为什么可以用于精密小型配重？

高密度是 W-Ni-Cu 用于小型配重的重要原因。对于质量固定的产品，体积与密度成反比，即 V = m / ρ。在目标质量不变时，提高材料密度可以减少所需材料体积。例如 100 g 配重采用 18.0 g/cm³材料时，理论体积约为 100 / 18.0 = 5.56 cm³；如果采用 18.5 g/cm³材料，则约为 100 / 18.5 = 5.41 cm³。这种体积差异在大型配重中可能并不突出，但在微型电机、振动机构、精密仪器和空间非常有限的电子设备中，可能直接影响产品能否在有限安装空间内实现目标质量。

（13）实际选择 W-Ni-Cu 时应该关注哪些参数？

选择 W-Ni-Cu 钨合金配重时，不能只提出 W-Ni-Cu 材料名称，还应明确目标密度、目标质量、尺寸、公差、结构形式、磁性能、机械性能、表面处理和使用环境。如果产品用于高速旋转部件，还应进一步提出质量公差、偏心量、同轴度、圆跳动和动态平衡要求；如果用于磁敏感设备，则应明确磁导率或磁响应要求。对于定制配重，最终质量应通过实际称重验证，实际密度也应通过相应检测确认。名义密度只能用于前期结构设计，不能完全替代最终产品检测。

W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）是一种以 W（Tungsten，钨）为主要高密度相、Ni（Nickel，镍）和 Cu（Copper，铜）形成粘结相的钨重合金，通常采用粉末冶金和液相烧结工艺制造。它的主要特点是高密度、较好的综合机械性能、较好的加工适应性以及通常较低的磁响应，适合用于钨合金配重、精密平衡件、惯性部件和部分空间受限的精密结构。与 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）相比，W-Ni-Cu 的粘结相由 Ni-Cu 组成，在部分低磁响应应用中具有优势；与纯钨相比，它虽然密度略低，但通常具有更好的综合制造适应性。实际选材仍应根据具体牌号的密度、机械性能、磁性能、加工要求和最终使用环境确定。



Q20 W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 有什么区别？

W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）都是常见的钨重合金（Tungsten Heavy Alloy，钨重合金），都以 W（Tungsten，钨）作为主要高密度元素，区别主要在于粘结相组成：W-Ni-Fe 采用 Ni（Nickel，镍）-Fe（Iron，

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

铁）粘结相，W-Ni-Cu 采用 Ni（镍）-Cu（Copper，铜）粘结相。两者都可以用于高密度钨合金配重，但在磁性能、机械性能、延性、加工特性、热学特性和具体应用方向上存在差异。实际选择时，不能简单理解为某一种材料全面优于另一种，而应根据配重的质量、体积、磁环境、机械载荷和加工要求进行匹配。

（1）最核心的区别：粘结相不同

W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 都采用高比例 W 颗粒作为主要高密度相，但粘结相不同。W-Ni-Fe 中主要由 Ni-Fe 构成粘结相，W 颗粒分布在 Ni-Fe 粘结相中；W-Ni-Cu 则主要由 Ni-Cu 构成粘结相，形成不同于 W-Ni-Fe 的微观组织。这种差异会进一步影响材料的磁性能、延性、机械性能、加工行为和热学性能。

项目	W-Ni-Fe	W-Ni-Cu
主要元素	W、Ni、Fe	W、Ni、Cu
高密度相	W（钨）	W（钨）
主要粘结相	Ni-Fe	Ni-Cu
密度	通常可达高密度等级	通常可达高密度等级
磁响应	通常较明显	通常较低
综合机械性能	较好	较好
延性	较好，取决于牌号	较好，取决于牌号
典型优势	强度、综合性能	低磁响应、特定加工和热学需求
常见用途	结构配重、航空航天、汽车等	精密配重、低磁环境、电子及仪器等

（2）为什么两种材料都具有很高的密度？

两种材料的高密度主要来自 W（Tungsten，钨）。钨的理论密度约为 19.25 g/cm³，因此当材料中含有较高比例的钨时，可以获得明显高于钢和铅的整体密度。常见高密度钨合金可以达到约 17～18.5 g/cm³，不同材料牌号还可能具有更宽的密度范围。具体密度取决于 W 含量、粘结相比例、粉末粒度、烧结致密度和最终组织结构。因此，W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 虽然粘结相不同，但都能够用于制造小体积、高质量的配重。

（3）相同质量下，两者的体积差异通常没有材料体系名称那么大

如果 W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 采用相近的密度等级，那么在相同质量下，两者所占体积通常非常接近。例如都按照 18.0 g/cm³计算，1 kg 配重的理论材料体积均为 $V = 1000 / 18.0 \approx 55.56$ cm³。

如果一个具体 W-Ni-Fe 牌号密度为 18.0 g/cm³，而一个具体 W-Ni-Cu 牌号密度为 17.5 g/cm³，那么 1 kg 所需体积分别为 55.56 cm³和 57.14 cm³，差异主要来自实际密度，而不是简单来自 Fe 和 Cu 这两个元素名称。所以在配重设计中，应比较具体牌号的实际密度，而不能仅凭 W-Ni-Fe 或 W-Ni-Cu 判断体积大小。

（4）磁性能是两者非常重要的区别之一

W-Ni-Fe 含有 Fe（Iron，铁），因此通常具有比 W-Ni-Cu 更明显的磁响应。具体磁性能还受到 Ni（镍）含量、组织结构、加工状态等因素影响。W-Ni-Cu 不含 Fe，通常具有较低的磁响应，因此在部分磁敏感环境中具有应用价值。例如配重安装在磁传感器、陀螺仪、惯

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2025 版

性测量单元、精密仪器或其他对磁场比较敏感的设备附近时，W-Ni-Cu 可能更值得优先进行磁性能评估。但低磁响应并不等于所有 W-Ni-Cu 产品都具有完全相同的磁性能。对于有严格磁导率要求的产品，应直接规定磁性能指标，并以具体材料检测数据为准。

（5）机械性能方面，两者有什么区别？

W-Ni-Fe 通常具有较好的强度、韧性和综合机械性能，适合承受一定机械载荷、冲击和振动的结构型配重。W-Ni-Cu 同样可以具有较好的延性和韧性，但其具体机械性能与 Ni-Cu 粘结相比例、W 含量、钨颗粒尺寸和烧结工艺密切相关。所以不能简单地说 W-Ni-Fe 一定比 W-Ni-Cu 强，或者 W-Ni-Cu 一定比 W-Ni-Fe 软。真正比较时，应直接查看具体牌号的抗拉强度、屈服强度、延伸率、硬度和断裂韧性等数据。对于普通固定配重，机械性能可能不是主要限制因素；对于高速旋转件、汽车部件、航空航天结构和承受冲击振动的配重，机械性能的重要性会明显提高。

（6）加工性能有什么不同？

两种材料都可以采用粉末冶金制造，然后通过车削、铣削、钻孔、磨削、螺纹加工等工艺制造成精密配重。W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 由于粘结相不同，在切削过程中可能表现出不同的刀具磨损、切削参数适应性、表面质量和加工效率。具体差异还受到 W 含量、钨颗粒尺寸、烧结组织以及加工设备的影响。因此，如果产品具有大量精密孔、深孔、螺纹或复杂异形结构，材料选型时应将加工工艺一起评估，而不能只根据密度选择材料。

（7）热学性能也是一个区别点

W（钨）本身具有较高的熔点和良好的高温性能，但 W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 的整体热学性能还受到粘结相的影响。Cu（Copper，铜）的导热性能较高，因此 Ni-Cu 粘结相会使 W-Ni-Cu 表现出不同于 W-Ni-Fe 的热传导特性。如果钨合金配重安装在具有明显热源或温度梯度的设备中，例如某些发动机、电子设备、精密仪器或热管理结构，就需要同时考察热膨胀系数、热导率和工作温度，而不能只比较密度。

（8）在配重应用中应该怎么选择？

如果主要要求是高密度、结构强度和综合机械性能，W-Ni-Fe 通常是值得重点评估的材料体系，尤其适合汽车、赛车、航空航天、机械旋转部件和结构型配重。如果产品对磁响应控制、特定热学性能或精密仪器应用更加敏感，则可以重点评估 W-Ni-Cu。例如一个 1 kg 配重，如果安装空间只有约 55 cm^3，那么 18.0 g/cm^3等级的材料基本可以满足体积要求；如果同时安装在磁敏感设备附近，则材料选型就不能只考虑密度，还需要进一步比较 W-Ni-Fe 与 W-Ni-Cu 的磁性能。

（9）对动态配重而言，两种材料都可以实现精密平衡

W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 都能够制造成圆柱、圆盘、环形、块状、异形以及带孔配重，并通过机械加工控制尺寸和质量分布。对于旋转部件，配重的总质量只是一个指标。旋转系统中的离心力可以表示为 $F = m\omega^2 r$，其中 m 为质量、ω 为角速度、r 为质量质心到旋转轴的距离；转动惯量则与质量及其到旋转轴的距离有关。所以，无论采用 W-Ni-Fe 还是 W-Ni-Cu，都需要控制配重的质量公差、重心位置、偏心量、安装位置、同轴度和圆跳动。材料体系不同并不会改变动态平衡的基本设计原则。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（10）实际采购时不能只写 W-Ni-Fe 或 W-Ni-Cu

如果需要定制钨合金配重，仅提出 W-Ni-Fe 或者 W-Ni-Cu 通常还不够。技术要求最好进一步明确目标密度、W 含量或材料牌号、目标重量、尺寸、公差、孔位、表面处理、机械性能以及磁性能要求。例如可以明确要求某一密度等级的 W-Ni-Fe，用于高速旋转配重，并规定质量公差、同轴度和圆跳动；如果采用 W-Ni-Cu，则可以进一步规定低磁响应要求以及对应的检测标准。中钨智造（CTIA GROUP）在 W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 钨合金配重的选型中，可结合具体应用对密度、磁性能、结构尺寸和加工要求进行匹配，并根据不同材料体系设计相应的配重结构和制造方案。

（11）W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 的区别可以这样理解

如果把钨合金配重看成由高密度骨架和金属粘结相共同构成的材料，那么两者的高密度来源都是 W（钨），区别主要来自粘结相：W-Ni-Fe 采用 Ni-Fe，W-Ni-Cu 采用 Ni-Cu。W-Ni-Fe 更常用于强调结构强度、综合机械性能和高密度的配重；W-Ni-Cu 则在部分低磁响应、热学性能或精密仪器应用中具有优势。两者都可以通过粉末冶金和后续精密加工制造高密度配重。

W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）最大的区别是粘结相不同：前者采用 Ni-Fe 粘结相，后者采用 Ni-Cu 粘结相。两者都以 W（Tungsten，钨）作为主要高密度元素，都可以达到较高的密度并用于制造紧凑型钨合金配重。从应用角度看，W-Ni-Fe 通常适合对强度、韧性和综合机械性能要求较高的结构型配重；W-Ni-Cu 通常更适合需要较低磁响应或具有特定热学、加工要求的部分精密配重。但这只是材料体系层面的典型特征，具体产品仍应根据实际牌号的密度、成分、机械性能、磁性能和加工数据进行选择



Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Q21 钨含量对钨合金配重有什么影响？

钨含量是影响钨合金配重性能和使用效果的重要材料参数之一。对于以 W（Tungsten，钨）为主要高密度相的钨合金而言，W 含量变化会直接影响材料密度，并进一步影响配重体积、质量分配、尺寸设计、机械性能、加工性能以及成本。不过，钨含量越高并不意味着配重在所有应用中都越好。实际产品需要在密度、体积、强度、韧性、加工性能和成本之间进行匹配。

（1）钨含量越高，通常密度越高

W（钨）的理论密度约为 19.25 g/cm³，而 Ni（Nickel，镍）、Fe（Iron，铁）、Cu（Copper，铜）等粘结相金属的密度低于钨。因此，在其他条件相近时，提高钨在钨合金中的质量分数，通常会提高最终材料的密度。常见高密度钨合金配重的密度大约集中在 17～18.5 g/cm³，不同材料牌号还可能覆盖更宽范围。实际密度除了受到 W 含量影响，还与 Ni-Fe 或 Ni-Cu 粘结相比例、粉末粒度、孔隙率和烧结工艺有关。所以，W 含量与密度通常具有明显相关性，但不能简单按照 W 含量直接推算最终产品密度。

（2）钨含量提高，可以进一步缩小配重体积

配重的基本关系为 $V = m / \rho$，其中 V 为体积、m 为质量、ρ 为材料密度。在质量相同的情况下，密度越高，需要的材料体积越小。例如制造 1000 g 钨合金配重，如果材料密度为 17.0 g/cm³，则 $V = 1000 / 17.0 \approx 58.82$ cm³；如果密度提高到 18.5 g/cm³，则 $V = 1000 / 18.5 \approx 54.05$ cm³，两者相差约 4.77 cm³。对于空间非常有限的配重结构，这种体积差异可能直接影响产品是否能够安装到指定位置。

（3）相同体积下，高钨含量材料可以获得更大的质量

如果配重外形尺寸已经确定，那么提高材料密度就可以在相同体积内获得更大的质量。例如一个有效材料体积为 10 cm³的配重，密度 17.0 g/cm³时质量为 $m = 17.0 \times 10 = 170$ g；密度 18.5 g/cm³时质量为 $m = 18.5 \times 10 = 185$ g，相差 15 g。对于空间固定、需要通过材料本身实现质量调节的产品，这一点尤其重要，例如小型执行机构配重、精密仪器配重、旋转部件平衡块以及部分航空航天结构配重。

（4）钨含量会影响配重的质量分布设计

钨合金配重并不是单纯追求总质量，还经常需要控制质量在特定空间中的分布。对于旋转系统，离心力可以表示为 $F = m\omega^2 r$，其中 m 为质量、ω 为角速度、r 为质量质心到旋转轴的距离。相同质量下，如果采用更高密度材料，可以在更小的结构体积内完成质量布置，从而给结构设计留下更多空间。转动惯量可表示为 $I = \Sigma m_i r_i^2$，其中 m_i 为各质量单元、r_i 为其到旋转轴的距离。对于需要调节转动惯量的产品，提高钨含量、提高材料密度，可以改变质量在空间中的布置方式，从而为惯量设计提供更多余量。这也是高密度钨合金经常用于高速旋转部件、惯性元件和精密平衡配重的原因之一。

（5）钨含量提高不一定意味着机械性能全面提高

钨含量增加后，材料中的钨颗粒比例提高，而粘结相比例相应降低。虽然高钨含量通常有利于获得更高密度，但材料的强度、延性、韧性和断裂行为并不会简单地随着 W 含量同步增加。钨合金属于典型的两相或多相材料，其性能与 W 颗粒尺寸、颗粒形貌、粘结相

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

组成、界面结合、孔隙率以及烧结组织密切相关。例如两个材料都具有 18.0 g/cm³左右的密度，如果一个采用 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）体系，另一个采用 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）体系，其机械性能和磁性能仍然可能存在明显区别。所以，不能只根据 W 含量判断一个钨合金配重是否具有更高的强度或更好的可靠性。

（6）钨含量会影响延性和韧性

钨本身具有高密度、高熔点和较高硬度，但在常温下并不是以高延性金属的形式使用。钨合金通过 Ni-Fe 或 Ni-Cu 粘结相将大量钨颗粒结合起来，使材料能够兼顾高密度和一定的塑韧性。当 W 含量继续提高时，粘结相比例减少，材料的塑性变形空间可能受到影响。如果 W 颗粒之间的结合和组织控制不理想，还可能增加脆性失效风险。对于承受冲击、振动或循环载荷的配重，例如汽车、赛车、航空航天以及高速旋转部件，不能为了追求最高密度而无限提高 W 含量，而需要综合考虑材料的韧性和疲劳可靠性。

（7）钨含量也会影响加工性能

W 含量较高意味着加工过程中需要处理更多高密度钨相，因此材料的切削阻力、刀具磨损和加工效率可能发生变化。钨合金配重通常可以进行车削、铣削、钻孔、磨削和螺纹加工，但具体加工难度取决于 W 含量、钨颗粒尺寸、粘结相组成、烧结组织以及加工状态。对于结构简单的圆柱、圆盘和块状配重，提高 W 含量带来的加工影响可能比较容易控制；对于具有深孔、细螺纹、薄壁、复杂曲面和高尺寸精度要求的产品，则需要在材料选型阶段同步考虑加工工艺。

（8）钨含量会影响材料成本

W（钨）属于高价值金属，因此在其他条件相近时，提高 W 含量通常会增加材料成本。例如同样生产 1 kg 配重，材料密度从 17.5 g/cm³提高到 18.5 g/cm³，虽然可以减少所需体积，但单位材料成本、粉末成本以及烧结和加工成本也可能发生变化。所以，对于不受安装空间限制的大型配重，提高 W 含量带来的体积优势未必能够抵消材料成本增加；而对于小型、高价值、空间高度受限的精密配重，高密度材料的空间价值可能更加重要。

（9）不同钨含量适合不同的配重设计

可以把钨含量对配重的影响理解为一种设计平衡。较高 W 含量通常有利于提高密度、减少体积、提高单位体积质量；中等或较低 W 含量的材料则可能在成本、加工适应性和某些机械性能之间取得不同平衡。例如，在空间极其有限的微型配重中，可以重点考虑较高密度等级；对于尺寸较大的工业配重，如果安装空间充足，则不一定需要追求最高 W 含量；对于高速旋转配重，则应同时考察密度、机械性能、尺寸精度和动态平衡性能。

（10）钨含量与最终密度不能完全画等号

实际生产中，即使两个产品的 W 含量相同，最终密度也可能存在差异。这是因为实际钨合金密度还受到粘结相成分、粉末混合均匀性、压制密度、液相烧结过程、残余孔隙以及最终组织结构等因素影响。例如理论上可以通过各组分质量分数和理论密度进行估算：$1/\rho_{理论} = \Sigma(w_i / \rho_i)$，其中 w_i 为各组分质量分数、ρ_i 为对应组分密度。但这种计算主要用于材料设计阶段，实际钨合金配重仍应通过成品质量和有效体积测量获得实际密度。

（11）对于精密配重，不能只看钨含量

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

如果产品用于动态平衡，W 含量只是材料参数之一。实际配重还需要控制质量公差、外形尺寸、孔槽位置、同轴度、圆跳动、偏心量和质心位置。例如一个 18.5 g/cm³的配重，如果加工后存在明显偏心，其动态平衡效果可能仍然不理想；反过来，一个密度稍低但质量分布和加工精度控制良好的配重，也可能满足具体设备的平衡要求。针对不同钨含量等级的配重需求，中钨智造（CTIA GROUP）可根据目标质量、安装空间和结构精度，对材料密度与 W 含量进行匹配，同时结合配重的受力状态、加工难度和质量公差确定合适的材料及制造方案。

（12）如何根据实际需求选择钨含量？

如果设计重点是最小体积和最大单位体积质量，可以优先考虑高 W 含量、高密度材料；如果产品空间比较充足，则可以综合比较材料成本和加工性能；如果配重承受高速旋转、冲击或周期性载荷，则还需要重点考察韧性、强度、疲劳性能和组织稳定性。对于 W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 两类常见体系，还应该进一步明确粘结相类型、具体 W 含量、目标密度以及机械和磁性能要求。不能仅提出高钨合金，而应该明确实际材料牌号或技术指标。

钨含量对钨合金配重最直接的影响是密度。通常在其他条件相近时，W（Tungsten，钨）含量越高，材料密度越高，同质量配重所需体积越小，同体积配重所能获得的质量越大。同时，提高 W 含量还会影响粘结相比例、机械性能、延性、韧性、加工性能和材料成本。对于精密配重而言，最高 W 含量并不一定就是最合适的方案，真正合理的材料选择应同时考虑密度、体积限制、质量要求、机械载荷、加工精度、磁性能和成本等因素。



Q22 高密度钨合金配重一定更好吗？

不一定。高密度钨合金配重最大的优势是能够在相同质量下占用更小的体积，但密度越高并不代表综合性能一定越好。对于实际配重而言，合适的材料应该同时满足质量、体积、

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

机械性能、加工精度、动态平衡、磁性能、成本以及使用环境等要求。常见高密度钨合金配重的密度大约在 17～18.5 g/cm³，不同材料体系和牌号还可能覆盖更宽范围。判断一种钨合金配重是否合适，关键不是单纯追求最高密度，而是看其密度是否与产品结构和功能需求相匹配。

（1）高密度最直接的优势是缩小配重体积

配重的质量、密度和体积之间遵循 V = m / ρ，其中 V 为体积、m 为质量、ρ 为密度。在质量相同的情况下，密度越高，需要的材料体积越小。例如制造 1 kg 配重，采用 17.5 g/cm³ 材料时，V = 1000 / 17.5 ≈ 57.14 cm³；采用 18.5 g/cm³材料时，V = 1000 / 18.5 ≈ 54.05 cm³，相差约 3.09 cm³。如果设备内部安装空间非常有限，这几立方厘米的差异就可能具有实际意义。

（2）空间受限时，高密度材料的价值更加明显

对于航空航天设备、无人机、精密仪器、电子设备以及微型机械等产品，配重经常受到安装空间限制。例如设计一个 100 g 配重，密度 17.0 g/cm³时需要 V = 100 / 17.0 ≈ 5.88 cm³，而 18.5 g/cm³时只需要约 5.41 cm³。如果配重安装在狭窄腔体、薄壁结构或复杂机构内部，高密度材料能够减少配重占用的空间，为其他零件、线路和运动机构留下更多设计余量。

（3）但是，如果空间充足，继续提高密度的意义可能降低

如果设备内部已经有足够大的安装空间，那么从 17.5 g/cm³提高到 18.5 g/cm³所带来的体积减少可能并不是主要矛盾。例如一个大型机械配重只需要占用 100 cm³以内的空间，而结构允许安装 120 cm³，那么继续追求最高密度未必能够带来明显的产品收益。此时可以进一步比较材料成本、加工性能、机械性能、供货稳定性以及制造周期，而不是单纯追求最高密度。

（4）高密度不等于机械性能一定更好

钨合金的密度主要受到 W（Tungsten，钨）含量以及粘结相组成等因素影响，但材料的强度、韧性和延性并不是由密度单独决定的。钨合金通常由大量 W 颗粒和 Ni（Nickel，镍）-Fe（Iron，铁）或 Ni-Cu（Copper，铜）粘结相组成。提高 W 含量通常有利于提高密度，但同时也会改变粘结相比例和材料微观组织。对于承受冲击、振动或者周期载荷的配重，如果一味追求高 W 含量和最高密度，而忽略材料韧性和组织质量，反而可能不利于长期可靠性。

（5）高密度材料可能带来更高的材料成本

W（钨）是高价值金属，提高钨含量通常意味着更高的原材料价值。例如 17.5 g/cm³和 18.5 g/cm³两种材料都能满足某个产品的安装空间要求，那么 18.5 g/cm³材料虽然可以进一步缩小体积，但如果产品对体积并没有严格限制，其额外材料成本可能需要重新评估。对于大批量工业配重，这种差异尤其值得关注，因为单个产品增加的材料成本经过大批量采购后会被放大。

（6）高密度可能增加加工方面的考虑

钨合金中的 W 颗粒比例较高，材料的加工行为会受到 W 含量、颗粒尺寸、粘结相组成和烧结组织影响。对于简单的圆柱、圆盘和块状配重，加工通常相对容易控制；但对于深孔、

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

细孔、螺纹、薄壁、复杂曲面等结构，高密度材料的具体加工特性就需要重点评估。尤其是在需要大量机械加工的产品中，材料成本并不是唯一成本，还包括刀具消耗、加工时间、设备负荷、尺寸控制以及后续检测等因素。

（7）动态配重不能只看密度

对于旋转配重而言，高密度只是材料层面的优势，真正决定动态平衡效果的是质量及其空间分布。旋转系统中的离心力可以表示为 $F = m\omega^2 r$，其中 m 为质量、ω 为角速度、r 为质量质心到旋转轴的距离。转动惯量则可以表示为 $I = \Sigma m_i r_i^2$，其中 m_i 为质量单元、r_i 为其到旋转轴的距离。因此，一个 18.5 g/cm³的配重即使密度更高，如果存在明显偏心、孔位误差、安装位置误差或圆跳动问题，也不一定能够获得理想的动态平衡效果。对于高速转子、发动机部件、赛车部件和精密旋转机构，质量分布和加工精度往往与密度同样重要。

（8）高密度并不能直接决定磁性能

不同钨合金体系即使密度相近，磁性能也可能不同。W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）含有 Fe，通常具有比 W-Ni-Cu 更明显的磁响应；W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）通常具有较低的磁响应。所以，如果配重安装在磁传感器、陀螺仪、惯性测量单元或其他磁敏感设备附近，仅提高密度并不能解决磁性能问题，还必须针对具体材料牌号检测和控制磁性能。

（9）高密度材料也不一定适用于所有结构

配重设计还受到尺寸、公差、连接方式和安装位置限制。例如某个配重需要通过螺纹固定，如果材料虽然密度很高，但结构设计要求细小螺纹、薄壁和复杂孔槽，就必须同时考虑材料的加工适应性和结构强度。相反，对于简单嵌入式配重块，结构比较厚实、加工特征较少，则可以更加充分地利用高密度材料缩小体积的优势。

（10）真正应该追求的是合适的密度，而不是最高密度

钨合金配重可以理解为存在一个实际应用中的适配区间。如果安装空间非常有限，可以优先考虑 18.0～18.5 g/cm³甚至更高密度等级；如果空间要求一般，可以在 17～18 g/cm³范围内综合比较材料成本和性能；如果产品对质量分布、机械强度或加工性能更加敏感，则应该优先选择能够满足整体技术要求的材料牌号。也就是说，设计目标应该是满足产品要求的最合适密度，而不是简单追求最大密度。

（11）高密度配重与普通密度配重的选择逻辑

可以从几个典型场景理解：对于空间极端受限的微型设备，高密度通常具有明显价值，因为体积减少直接关系到产品能否安装；对于高速旋转部件，应重点关注密度、质量分布、同轴度、圆跳动和动态平衡；对于承受冲击或振动的结构，应重点关注强度、韧性和疲劳性能；对于大尺寸工业配重，则可以更多考虑材料成本、加工效率和供应稳定性。针对不同密度等级的钨合金配重，中钨智造（CTIA GROUP）可结合目标质量、安装空间和结构受力情况，对密度等级、材料体系及配重尺寸进行匹配，在满足配重功能的前提下避免单纯为了追求最高密度而增加不必要的材料和加工成本。

（12）实际选型时应该比较哪些参数？

如果要判断某一种高密度钨合金配重是否适合具体项目，建议同时比较密度、W 含量、

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

粘结相类型、抗拉强度、延伸率、硬度、磁性能、加工性能、尺寸公差、质量公差、表面处理、材料成本以及交付能力。对于动态配重，还应增加偏心量、同轴度、圆跳动、质心位置和动态平衡等级等指标。这样比较出来的结果才具有工程意义，因为配重最终要解决的是质量和空间、质量分布和运动状态、材料性能和制造成本之间的综合匹配问题。

高密度钨合金配重并不是密度越高就一定越好。提高密度最明显的优势是相同质量下可以进一步缩小体积，这对于航空航天、无人机、电子设备、精密仪器和微型机械等空间受限应用尤其有价值。但密度提高同时可能伴随材料成本、加工难度以及材料组织和机械性能方面的变化。对于实际产品，更合理的思路是根据安装空间、目标质量、机械载荷、动态平衡、磁性能、加工精度和成本要求选择合适的密度等级，而不是单纯追求最高密度。



四、钨合金配重的价格、采购与定制

钨合金配重的价格、采购与定制主要考虑的影响因素有哪些

钨合金配重的价格并不是简单按照每公斤钨材料价格计算，而是由材料体系、钨含量、密度、产品重量、尺寸结构、加工难度、精度要求、采购数量、模具及工装、检测要求、表面处理和交付条件等共同决定。对于定制配重而言，最终报价通常是材料成本、制造成本和订单固定成本的综合结果。本文根据中钨智造科技有限公司三十年的钨合金制品设计定制加工经验总结如下。

材料与密度是基础因素

钨合金中钨（W，Tungsten，钨）的含量直接影响材料密度和原材料成本。常见高密度钨合金配重的密度大致处于 17～18.5 g/cm³范围，但具体牌号可能存在差异。在相同尺寸下，密度越高，产品重量越大；在相同重量下，密度越高，所需材料体积越小。例如 1 kg、18.0 g/cm³ 的钨合金体积约为 55.56 cm³，而 17.0 g/cm³ 时约为 58.82 cm³。对于空间受限的产品，提高密度可能具有明显的工程价值，但价格也通常会受到钨含量和材料牌号影响。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

常见材料体系包括 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）。两者在磁性能、机械性能、加工性能和成本方面可能存在差异，因此采购时不能只比较密度。

产品尺寸和结构复杂程度

同样重量的钨合金配重，如果一个是简单圆柱体，另一个包含台阶、孔、槽、斜面和复杂曲面，制造成本可能相差很大。简单的块状、圆柱状、环状配重通常比较容易通过粉末冶金成形；复杂结构可能需要烧结后进行更多数控加工。孔位越多、结构越复杂、加工面越多，通常意味着加工时间、刀具消耗和检测成本增加。如果产品需要内螺纹、精密孔、定位槽或复杂装配面，还需要把相应的加工工艺纳入报价。

尺寸公差和重量公差

精度要求是影响定制价格的重要因素之一。例如普通结构件可能只要求一般尺寸精度，而精密配重可能同时要求尺寸公差、重量公差、孔位公差、同轴度、圆跳动以及重心位置控制。

如果是旋转机械配重，还可能涉及动态平衡。此时供应商不仅要保证产品尺寸和重量，还需要进行动平衡测试，并根据测试结果调整配重质量和安装位置，制造和检测成本自然会提高。

因此，询价时最好明确重量公差，例如目标重量 100.00 g、允许范围 ±0.05 g，而不是只写 100 g。

采购数量影响单价

小批量和大批量的成本结构明显不同。小批量订单需要承担模具设计、工装准备、设备调试、烧结炉排产、首件检测等固定成本，如果只有几十件或几百件，这些固定成本会分摊到每件产品上，使单价明显提高。批量增加以后，模具和工装费用可以摊薄，同时粉末混料、压制、烧结、加工和检测流程更加稳定，材料利用率和生产效率也可能提高，因此单件成本通常会下降。所以采购时不能只询问单件价格，还应该同时比较 100 件、500 件、1000 件、5000 件等不同数量下的阶梯报价。

模具和工装费用

采用粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）生产时，如果产品结构适合模压成形，可能需要专用模具。模具费用通常属于前期固定成本。如果产品数量较大，模具成本可以分摊到大量产品中；如果只是开发样品或小批量生产，模具成本对单件价格的影响就会比较明显。因此，采购时应明确报价中的模具费是否单独计算、模具所有权归谁、后续订单是否继续收取模具费用，以及产品修改后是否需要重新制作模具。

后加工方式

钨合金烧结后通常可以进行车削、铣削、钻孔、攻螺纹、磨削等加工，但由于钨合金具有较高硬度以及多相组织，加工刀具磨损通常高于普通钢材。如果产品只需要烧结成形，后加工成本相对较低；如果需要大量精密车削、铣削和磨削，加工成本会明显增加。尤其是小孔、深孔、精密内孔、精密螺纹和复杂曲面，通常需要更长加工时间和更严格的工艺控制。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

材料利用率与产品重量

钨合金原材料价值较高，所以材料利用率也会影响最终报价。例如一个结构简单、接近烧结最终形状的配重，可以减少切削余量；如果产品需要从较大的烧结毛坯中大量去除材料，则会产生更多加工时间和材料损耗。对于大批量产品，供应商通常会通过模压结构优化、近净成形以及加工余量优化来降低综合成本。

检测和质量文件

如果配重用于普通消费产品，可能只需要尺寸和重量检查；如果用于汽车、航空、医疗设备或高精度旋转机械，则可能要求更加完整的质量控制。常见检测内容包括密度、重量、尺寸、硬度、材料成分、外观、孔位、同轴度、圆跳动、表面粗糙度以及动态平衡等。部分项目还可能要求材质证明、检验报告、批次追溯、首件检验报告等文件。检测项目越多、精度要求越高，最终采购成本通常也会增加。

表面处理与环境要求

部分钨合金配重需要进行镀镍、涂层、抛光或其他表面处理，以满足外观、耐腐蚀、装配或环境适应性要求。如果产品用于潮湿环境、海洋环境、汽车底盘或户外设备，还需要结合实际工况评估腐蚀防护要求。表面处理不仅影响价格，也可能影响最终尺寸和重量，因此精密配重需要把表面处理厚度纳入设计公差。

采购时应该重点比较什么

采购钨合金配重时，最有效的方法不是单纯比较供应商报出的每公斤价格，而是把报价条件统一。例如同时确认材料体系、钨含量、目标密度、单件重量及公差、尺寸及公差、加工方式、表面处理、检测项目、包装、模具费用、运输费用、交货周期和报价有效期。如果两个供应商一个报价 300 元/kg、另一个报价 350 元/kg，但前者不包含精密加工和动平衡，后者已经包含全部检测和加工，那么直接比较 300 和 350 元/kg 并不能真实反映采购成本。

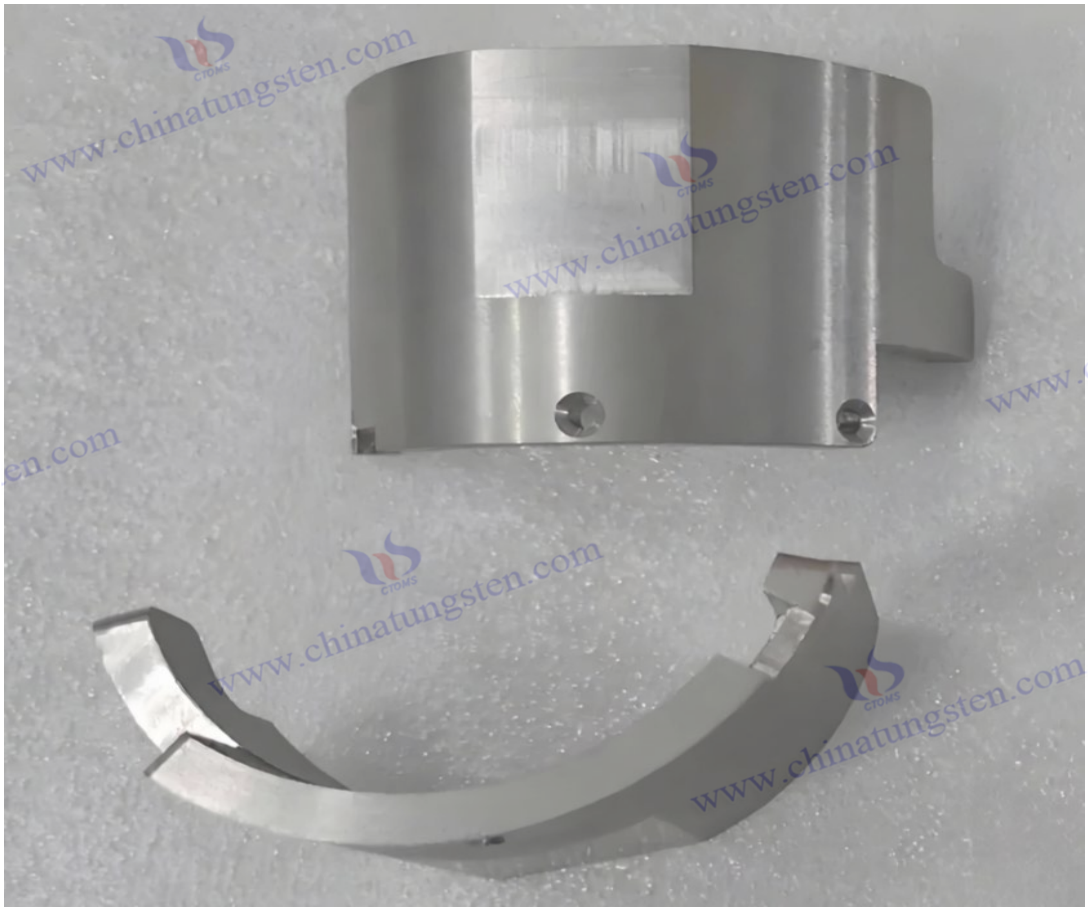
对于定制项目，还应该要求供应商明确报价是按原材料重量、烧结毛坯重量还是最终成品重量计算，因为三者可能存在明显差异。

定制询价时提供的信息越完整，报价越准确

如果需要向钨合金供应商进行 OEM（Original Equipment Manufacturer，原始设备制造商）定制询价，建议至少提供 2D 工程图、3D CAD（Computer-Aided Design，计算机辅助设计）模型、材料体系或目标密度、单件重量、重量公差、尺寸公差、孔和螺纹要求、表面粗糙度、表面处理、使用环境、动平衡要求、样品数量、量产数量和预计年度需求。如果暂时没有完整图纸，也可以先提供产品用途、目标重量、最大外形尺寸、安装方式和采购数量，让供应商先判断材料体系和制造工艺，再进一步进行 DFM（Design for Manufacturing，可制造性设计）优化。

对于钨合金配重而言，最终价格实际上可以理解为：材料成本 + 成形成本 + 加工成本 + 模具及工装成本 + 检测成本 + 表面处理成本 + 包装运输成本，再结合订单数量和生产良率进行综合核算。采购时把这些条件统一以后，才能真正比较不同供应商的有效报价。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q23 钨合金配重多少钱一公斤？

钨合金配重没有一个统一固定的每公斤价格。按照 2026 年近期公开报价来看，普通钨重合金（Tungsten Heavy Alloy，钨重合金）材料或配重产品的公开报价大致可以看到约 50～100 美元/kg、30～150 美元/kg 等区间；针对已经加工成特定配重零件的产品，公开报价还可能达到 100～200 美元/kg。不同供应商的报价口径并不完全相同，有些是原材料或标准件价格，有些则已经包含烧结、机加工、表面处理和定制费用，因此不能直接把这些数字视为统一的市场成交价。例如，公开的钨合金曲轴配重报价约为 60～85 美元/kg，MOQ（Minimum Order Quantity，最小订购量）为 10 kg；另一家钨合金平衡配重公开报价为 30～150 美元/kg，材料为 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜），密度 17～18.5 g/cm³。

（1）为什么钨合金配重价格差异这么大？

钨合金配重的价格并不只是由钨金属本身的价格决定，而是由材料体系、W（Tungsten，钨）含量、密度等级、产品尺寸、加工复杂程度、质量公差、采购数量和表面处理等共同决定。

例如同样是 1 kg 的钨合金，如果只是采购标准烧结块，价格通常低于已经完成车削、钻孔、攻螺纹、磨削和精密检测的成品配重。如果产品还要求高尺寸精度、严格质量公差、动态平衡、特殊表面处理或者复杂异形结构，单位公斤价格还会继续提高。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（2）材料密度越高，价格一定越高吗？

通常存在一定相关性，但不能简单理解为密度越高，每公斤价格就一定按照固定比例上涨。公开产品资料显示，不同 W 含量的 W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 可以形成不同密度等级。例如部分汽车配重产品列出了 90W、93W、95W、97W 等材料等级，对应密度大约从 16.85～18.85 g/cm³变化。W 含量提高通常意味着材料成本增加，但实际报价还受到粉末成本、烧结工艺、加工余量、成品率以及采购规模影响。所以询价时最好直接指定目标密度或材料牌号，而不是只要求高密度钨合金。

（3）W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 的价格有什么区别？

W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 都属于常见钨重合金体系，价格通常不会仅仅因为 Fe（Iron，铁）或 Cu（Copper，铜）不同就产生固定价差。真正影响价格的是 W 含量、密度、材料牌号、加工状态和订单规模。例如 90W、93W、95W、97W 等不同 W 含量等级，其材料成本和密度会有所不同。对于 W-Ni-Cu，如果产品要求低磁响应，还可能需要进一步控制材料成分和生产工艺。因此，采购时比较两家供应商报价，应该比较相同 W 含量、相同密度、相同尺寸、相同公差和相同加工状态下的价格，而不是只比较 W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 这两个名称。

（4）为什么成品配重比钨合金原材料贵？

因为成品价格中包含的不只是材料本身，还包括制造过程。典型钨合金配重通常经过粉末混合、压制成形、脱脂或预处理、液相烧结、尺寸加工、钻孔或铣削、磨削、表面处理和最终检测等环节。尤其是钨合金配重的材料利用率和加工效率会受到结构影响。例如一个简单圆柱形配重可能只需要少量车削，而带有多个孔、槽、螺纹和复杂曲面的产品需要更多加工时间。所以采购时不能单纯拿每公斤原材料价格与每公斤成品价格进行比较。

（5）小批量定制为什么价格特别高？

小批量产品通常存在固定成本分摊问题。例如制作 100 件和制作 10000 件相同配重，都可能需要进行模具准备、工艺调试、设备设定、首件检测和质量确认。如果只有 100 件，这些固定成本只能分摊到很少的产品上。此外，小批量订单通常无法充分利用粉末冶金模具、烧结炉和加工设备的产能，材料采购也难以获得大批量价格。所以同样的钨合金配重，小批量订单的单公斤价格可能明显高于批量采购。

（6）复杂结构会明显影响每公斤价格

假设两个产品都重 1 kg：A 产品是简单圆柱形，没有孔槽，普通尺寸公差；B 产品同样重 1 kg，但需要多个精密孔、螺纹、定位槽、异形曲面以及严格的同轴度和圆跳动控制。虽然两者重量相同，但 B 产品的加工时间、刀具消耗、检测成本和报废风险可能明显增加，所以最终报价也可能明显更高。这也是为什么钨合金配重不能只按照每公斤材料价格估算。

（7）公开报价只能作为预算参考

目前公开网页上的报价差异比较明显。例如有供应商公布钨重合金约 50～100 美元/kg，也有钨合金平衡配重公布 30～150 美元/kg；某些精密加工 W-Ni-Fe/W-Ni-Cu 零件公开报价甚至达到 100～200 美元/kg。另有公开平台上的标准钨重合金圆柱、球体等产品报价大约为 57～90 美元/kg。这些价格应理解为供应商公开报价区间，而不是统一市场基准。不同

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

网页的报价时间、规格、贸易条款、加工状态和 MOQ（Minimum Order Quantity，最小订购量）不同，不能直接横向比较。

（8）钨合金配重多少钱一公斤，可以先按什么范围估算？

如果只是进行前期项目预算，可以暂时把普通钨合金配重的公开报价理解为几十美元/kg 到一百多美元/kg 的范围。对于标准材料、简单结构和批量采购，可以参考较低区间；对于高密度、精密加工、复杂结构和小批量定制，则应考虑更高区间。例如公开的 W-Ni-Fe/W-Ni-Cu 平衡配重有 30～150 美元/kg 的报价，精密加工钨合金零件则出现 100～200 美元/kg 的公开报价。这只是预算范围，不应直接作为最终采购价格。

（9）1 公斤和 100 克钨合金配重，不能简单按照同一个报价理解

如果供应商报价为 80 美元/kg，那么从数学上看，100 g 材料对应的材料基准成本约为 8 美元。但实际 100 g 成品并不一定就是 8 美元，因为小规格产品可能存在更高的单位加工成本、最低订单量、模具成本和检测成本。所以小型精密钨合金配重经常出现按件报价明显高于单纯按重量折算的情况。

（10）原材料价格变化也会影响钨合金配重报价

钨合金成本对钨原料市场比较敏感。2026 年的公开市场资料显示，钨原料及钨制品价格在年内存在明显波动，部分钨合金棒材的公开报价也随材料组成、尺寸精度和表面处理而变化。

所以如果采购数量较大，供应商通常需要根据询价时的原材料价格、订单数量和交货周期重新核算，而不是长期固定一个每公斤价格。

（11）中钨智造（CTIA GROUP）的报价应如何理解？

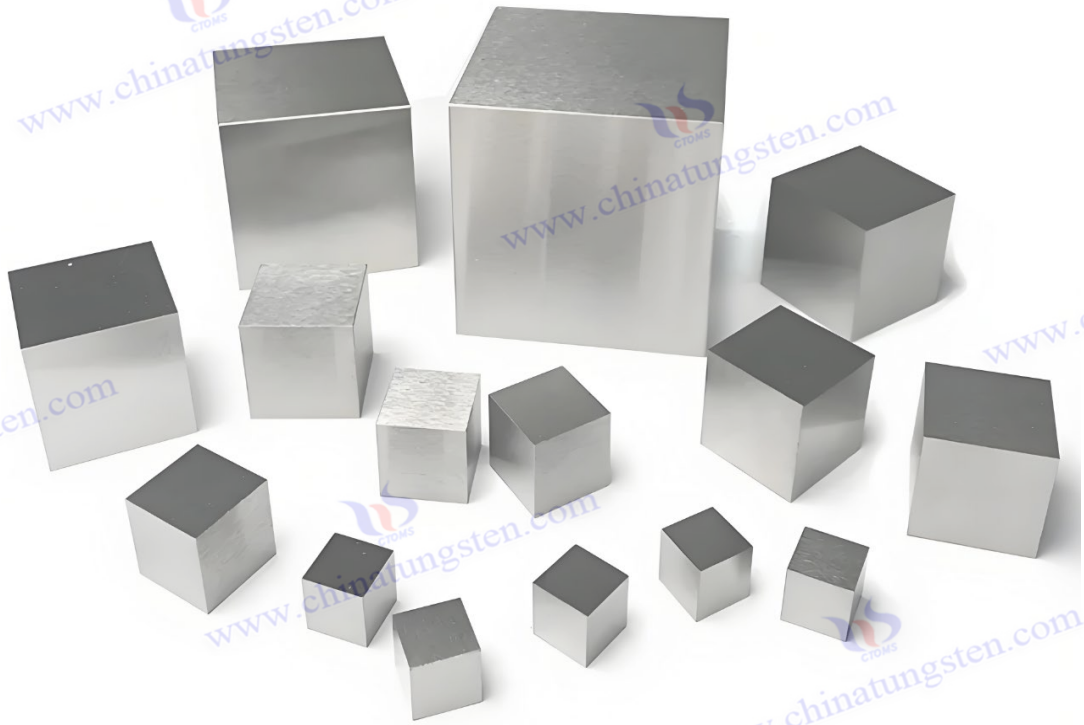
对于钨合金配重定制，中钨智造（CTIA GROUP）可根据具体配重的目标重量、密度等级、W-Ni-Fe 或 W-Ni-Cu 材料体系、结构尺寸、加工公差和采购数量进行成本核算，将材料成本、成形制造、精密加工及质量检测等因素结合起来确定具体报价，而不是简单按照一个固定的每公斤价格计算。

（12）询价时提供这些参数，才能得到更准确的每公斤价格

如果需要向钨合金配重厂家询价，最好同时提供材料体系、目标密度、W 含量或材料牌号、单件重量、产品尺寸、数量、图纸、公差、孔槽和螺纹要求、表面处理、包装方式以及交货要求。例如可以写成：W-Ni-Fe，18.0 g/cm³，单件 100 g，尺寸按图纸，重量公差±0.1 g，数量 5000 件，需要钻孔和表面处理。有了这些信息，供应商才能区分这是材料采购、标准配重还是精密定制成品，并给出更有意义的报价。

钨合金配重目前没有统一的固定公斤价。根据 2026 年近期公开报价，普通钨重合金材料或配重产品可以看到约 30～150 美元/kg、50～100 美元/kg 等公开区间，部分精密加工产品公开报价可达到 100～200 美元/kg。对于实际采购而言，更合理的做法不是问钨合金配重统一多少钱一公斤，而是明确 W-Ni-Fe 或 W-Ni-Cu 体系、W 含量、密度、单件重量、尺寸公差、加工内容和采购数量，再获得对应的定制报价。这样得到的价格才具有实际采购参考价值。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q24 钨合金配重为什么价格高于钢配重？

钨合金配重的价格通常高于钢配重，核心原因在于原材料价值、钨含量、制造工艺、加工成本和质量控制要求不同。钨合金配重主要利用 W（Tungsten，钨）的高密度特性，在较小体积内获得较大的质量，而钢配重主要依靠低成本钢材实现质量配置。从产品经济性来看，钨合金并不是单纯为了替代钢材，而是在安装空间有限、质量集中度要求高、动态平衡精度高或特殊性能要求明显的场景中，通过更高的材料成本换取更高的单位体积质量和结构设计自由度。

（1）最主要原因是钨原材料本身价值更高

钢是大规模工业应用材料，铁（Fe，Iron）及钢铁原料供应成熟、产量巨大，普通碳钢和合金钢具有非常成熟的产业链。钨合金则含有较高比例的 W（Tungsten，钨）。常见高密度钨合金体系通常含有约 90%～97%的 W，其余部分主要为 Ni（Nickel，镍）、Fe（Iron，铁）或 Cu（Copper，铜）等粘结相。由于钨本身属于高价值金属，所以即使两种配重最终重量相同，钨合金的材料成本通常也会明显高于普通钢材。

（2）钨合金需要更多专业制造工艺

钢配重可以通过铸造、锻造、车削、冲压、焊接等成熟工艺进行生产，很多结构甚至可以直接采用标准钢材加工。钨合金则通常采用粉末冶金（Powder Metallurgy，粉末冶金）路线制造，典型过程包括粉末配料、混合、压制成形、脱脂或预处理、液相烧结、精密加工和最终检测。对于高密度钨合金而言，烧结过程中的温度控制、收缩控制、组织均匀性和尺寸稳定性都会影响最终产品质量，所以制造成本通常高于普通钢配重。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（3）钨合金的加工成本通常更高

钢材的车削、铣削、钻孔和攻螺纹技术已经非常成熟，刀具和加工参数也比较容易获得。钨合金中含有大量硬质钨相，加工过程中可能产生较明显的刀具磨损，加工参数也需要根据具体 W 含量、粘结相、烧结组织和产品结构进行调整。如果钨合金配重需要精密孔、螺纹、槽、异形曲面或较高尺寸精度，其加工成本可能明显高于结构类似的钢配重。

（4）钨合金虽然贵，但可以减少配重体积

钨合金价格高并不意味着使用成本一定更高，因为它能够通过高密度减少产品体积。配重体积可以用 $V = m / \rho$ 计算，其中 V 为体积、m 为质量、ρ 为密度。例如制造 1 kg 配重，钢材按照 7.85 g/cm³计算，需要 $V = 1000 / 7.85 \approx 127.39$ cm³；如果采用 18.0 g/cm³钨合金，则 $V = 1000 / 18.0 \approx 55.56$ cm³。也就是说，同样 1 kg 质量，钨合金所需材料体积只有钢配重的大约 43.6%，体积减少约 56.4%。如果设备内部空间有限，这种体积优势可能抵消部分材料价格差异。

（5）对于微型配重，体积价值可能比材料单价更重要

例如一个小型电子设备需要 100 g 配重，如果采用 7.85 g/cm³钢材，理论材料体积约为 12.74 cm³；采用 18.0 g/cm³钨合金，则只需要约 5.56 cm³。如果设备内部只有 6～7 cm³的可用安装空间，钢配重可能无法满足结构要求，而钨合金能够在相同质量下实现更紧凑的设计。所以，对于手机振动组件、精密仪器、无人机、机器人执行机构以及某些航空航天部件，采购方关注的可能并不是单纯的每公斤价格，而是单位空间能够获得多少质量。

（6）钨合金的高钨含量也增加了材料成本

钨含量通常与钨合金密度存在较明显的相关性。在其他条件相近时，提高 W 含量通常能够提高密度，但同时也意味着使用更多高价值钨原料。例如 17.5 g/cm³和 18.5 g/cm³的钨合金配重，18.5 g/cm³材料能够进一步减少同质量产品的体积，但其材料组成、制造成本和最终报价也可能有所不同。所以钨合金配重并不是只有高密度和低密度两种选择，而是可以根据安装空间和性能要求选择合适的密度等级。

（7）精密钨合金配重的质量控制成本更高

普通钢配重有时只需要控制外形尺寸和总重量，而精密钨合金配重可能需要同时控制质量公差、尺寸公差、孔位、同轴度、圆跳动、平面度、表面粗糙度和质心位置。对于旋转配重，还可能需要进行动平衡检测。高速旋转系统中的离心力可以表示为 $F = m\omega^2 r$，其中 m 为质量、ω 为角速度、r 为质心到旋转轴的距离。因此，即使配重总重量完全正确，如果存在偏心或安装位置误差，仍然可能产生明显的不平衡力。这些额外的检测和加工要求都会进入最终产品成本。

（8）复杂结构会进一步放大钨合金与钢配重的价格差异

如果两个配重都是简单矩形块，钢配重的加工成本可能非常低。但如果产品需要加工多个精密孔、螺纹孔、定位槽、沉孔、异形曲面或特殊安装结构，钨合金的加工成本会更加明显。

例如一个汽车或航空航天配重可能同时要求固定孔位置精度、质量公差和动态平衡等级，此时最终价格已经不再是简单的材料价格比较，而是材料、成形、加工、检测和质量保证的综合成本。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（9）钨合金的高价格换来的是什么？

钨合金相对于钢材最直接的价值，是高密度带来的高质量体积比。如果以 18.0 g/cm³钨合金与 7.85 g/cm³钢材比较，同样 1 kg 质量，钨合金可以减少约 56.4%的理论材料体积。对于空间充足的大型设备，这个优势可能并不重要；对于空间受限、需要把大量质量集中在很小区域的设备，这个优势则可能成为材料选型的重要原因。

（10）并不是所有配重都适合使用钨合金

如果产品安装空间充足、重量较大、精度要求一般，而且成本是主要约束，那么钢配重往往能够满足基本功能。例如大型机械底座配重、普通工业设备配重以及部分低速机构配重，并不一定需要钨合金的高密度特性。相反，如果产品要求小体积、大质量、精密质量分布或特殊安装空间，那么钨合金的高材料成本可能具有实际工程价值。

（11）中钨智造（CTIA GROUP）的成本评估可以结合具体配重结构进行

对于钨合金配重与钢配重的成本比较，中钨智造（CTIA GROUP）可根据目标重量和安装空间，对钨合金与钢材所需的材料体积进行计算，再结合材料牌号、结构复杂度、加工公差、表面处理和采购数量评估实际制造成本，使材料价格与配重实际占用空间及性能要求进行综合匹配。

（12）比较两种配重不能只比较每公斤价格

如果只比较材料单价，钨合金几乎必然处于不利位置；但如果比较完整的产品设计成本，就应该同时考虑配重体积、安装空间、结构修改成本、加工成本、使用寿命和性能要求。例如：

比较项目	钨合金配重	钢配重
材料成本	通常较高	通常较低
密度	通常约 17～18.5 g/cm³	普通钢约 7.85 g/cm³
相同质量体积	小	大
加工成本	通常较高	通常较低
材料供应	相对专业	非常成熟
高质量/小体积能力	强	较弱
精密配重适应性	较好	取决于结构和精度
大型普通配重经济性	未必占优	通常更有成本优势
空间受限配重	具有明显价值	可能受到体积限制

钨合金配重价格通常高于钢配重，主要是因为其含有高比例 W（Tungsten，钨），原材料价值更高，同时还涉及粉末冶金、液相烧结、精密加工和质量检测等成本。但钨合金的优势并不在于低价格，而在于高密度。以 18.0 g/cm³钨合金和 7.85 g/cm³钢材计算，制造相同 1 kg 配重时，钨合金理论体积约 55.56 cm³，钢材约 127.39 cm³，钨合金可以将理论材料体积减少约 56.4%。所以，钨合金是否值得使用，不能只看每公斤价格。对于空间受限、高质量集中、精密平衡和小型化要求明显的产品，高密度带来的体积优势可能具有较高工程价值；对于空间充足、结构简单、成本敏感的普通配重，钢材则可能更符合经济性要求。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q25 钨合金配重价格主要受哪些因素影响？

钨合金配重的价格并不是简单按照每公斤材料价格计算，而是由材料成本、钨含量、密度等级、产品重量和尺寸、结构复杂程度、加工精度、采购数量、表面处理、检测要求以及交货条件等多项因素共同决定。对于定制钨合金配重而言，即使两个产品重量相同，如果材料牌号、密度、尺寸、公差、加工内容和采购数量不同，最终报价也可能存在较大差异。

（1）钨含量是影响价格的核心材料因素之一

钨合金配重通常含有较高比例的 W（Tungsten，钨），常见高密度体系的 W 含量可以达到约 90%～97%，其余主要由 Ni（Nickel，镍）、Fe（Iron，铁）或 Cu（Copper，铜）等组成。

在其他条件相近时，W 含量越高，通常意味着钨原料占比越大，材料成本也会相应增加。同时，W 含量提高通常有利于提高密度，使相同重量的配重体积进一步缩小。所以 W 含量实际上同时影响材料成本和产品体积，是报价中的重要参数。

（2）材料密度等级会影响价格

钨合金配重常见密度可以达到约 17～18.5 g/cm³，不同材料体系和牌号还可能具有更宽的密度范围。密度越高，通常意味着需要更高的 W 含量或者不同的粘结相比例。例如 18.5 g/cm³材料相比 17.5 g/cm³材料，在相同重量下需要的体积更小，但材料组成和制造成本也可能不同。例如 1 kg 配重采用 17.5 g/cm³材料，需要 V = 1000 / 17.5 ≈ 57.14 cm³；采用 18.5 g/cm³材料，则需要 V = 1000 / 18.5 ≈ 54.05 cm³。所以采购时不能只要求高密度，而应明确具体密度等级。

（3）W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 材料体系会影响报价

W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）都是常见钨重合金（Tungsten Heavy Alloy，钨重合金）。两种材料的粘结相不同，

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

材料组成、粉末成本、烧结工艺以及最终性能要求也可能不同。如果产品要求特定磁性能，例如低磁响应，就可能需要采用特定的 W-Ni-Cu 材料体系；如果更关注结构强度和综合机械性能，则可能选择 W-Ni-Fe。不同材料体系都会反映到最终报价中。

（4）单件重量和产品尺寸会直接影响材料用量

配重重量越大，所需钨合金材料越多，材料成本自然会上升。不过，钨合金产品不能只按照重量简单计算，因为产品外形尺寸也会影响制造方式。例如同样是 500 g 配重，简单圆柱形产品可能可以通过较简单的成形和车削完成；如果 500 g 产品采用薄壁、异形或多孔结构，材料利用率和加工成本都可能明显不同。

（5）产品结构复杂程度会明显影响价格

结构复杂程度是定制钨合金配重报价中的重要因素。简单的圆柱、圆盘、方块、环形件通常加工工序较少；如果增加沉孔、通孔、螺纹、键槽、定位槽、异形曲面、偏心结构或复杂安装接口，生产成本就会增加。例如一个配重需要同时进行车削、铣削、钻孔、攻螺纹和磨削，其价格通常不能再按照单纯的材料公斤价计算。

（6）尺寸公差越严格，加工成本通常越高

普通配重可能只需要控制外形尺寸和重量，而精密配重可能要求严格的尺寸公差、孔径公差、孔位精度、同轴度、圆跳动和平面度。钨合金本身采用粉末冶金工艺制造，烧结过程会产生尺寸收缩，因此高精度产品往往还需要增加后续精密加工。例如一个普通配重要求 ±0.1 mm，而另一个配重要求±0.01 mm，两者即使重量完全相同，后者也可能需要更复杂的加工和检测工艺。

（7）质量公差会影响制造和检测成本

如果客户要求单件重量精确到较小范围，就需要更严格地控制材料密度、烧结收缩、加工余量和最终尺寸。例如 100 g 配重要求±1 g，与要求 100.00±0.05 g 相比，后者对材料一致性、加工精度和称量检测的要求明显更高。对于批量产品，还需要控制不同批次之间的质量一致性，这也会增加生产和质量管理成本。

（8）是否需要动态平衡检测，会影响最终价格

如果钨合金配重用于高速旋转设备，仅控制总重量通常还不够。旋转系统中的离心力可以表示为 $F = m\omega^2 r$，其中 m 为质量、ω 为角速度、r 为质量质心到旋转轴的距离。配重的偏心量、安装位置、同轴度和圆跳动都会影响动态平衡。如果客户要求进行动平衡检测，就需要增加专用检测设备、测试工序以及相应的质量判定标准，所以这部分检测成本也会进入产品报价。

（9）表面处理会增加额外成本

部分钨合金配重需要进行表面处理，例如镀镍、镀铜、钝化、精磨或者其他保护性处理。表面处理的目的可能包括改善耐腐蚀性能、表面外观、尺寸稳定性、装配性能或与其他零件的接触性能。如果产品对表面粗糙度也有要求，例如需要达到较低 Ra（Arithmetic Average Roughness，算术平均粗糙度）值，就可能增加磨削、抛光等工序。

（10）采购数量对单价影响非常明显

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

MOQ（Minimum Order Quantity，最小订购量）和实际采购数量是影响钨合金配重单价的重要因素。小批量生产时，模具准备、工艺调试、设备设定、首件检测和质量确认等固定成本需要由较少数量的产品承担。批量增加后，这些固定成本可以分摊到更多产品上，同时粉末材料采购、烧结和机械加工也更容易形成规模效应，所以单件成本通常会下降。例如同样的配重，100 件、1000 件和 10000 件的报价通常不会简单按照数量等比例变化。

（11）模具成本会影响粉末冶金配重报价

对于采用粉末冶金压制成形的钨合金配重，复杂结构可能需要专用模具。如果产品只是简单圆柱或方块，模具结构相对简单；如果产品具有台阶、孔槽、特殊曲面或复杂截面，模具设计和制造成本可能明显增加。对于首次定制的小批量产品，还需要考虑模具费用如何分摊到产品单价中。

（12）材料利用率也会影响实际成本

钨合金属于高价值材料，所以材料利用率对成本比较敏感。如果产品能够通过接近最终形状的粉末冶金成形减少后续切削余量，就可以降低材料浪费和加工时间；如果产品需要从较大烧结坯料中大量切削出最终形状，则材料利用率可能降低。对于复杂异形配重，优化成形尺寸和加工余量有时能够明显改善成本结构。

（13）加工方式会影响报价

不同加工工艺的成本差异较大。车削适用于圆柱、圆盘和环形结构；铣削适用于平面、槽和复杂轮廓；钻孔适用于安装孔；磨削适用于高尺寸精度和表面粗糙度要求；对于某些复杂结构，还可能需要采用 EDM（Electrical Discharge Machining，电火花加工）等特殊加工方法。加工工序越多、设备要求越高、加工时间越长，最终报价通常越高。

（14）检测项目越多，质量成本越高

普通配重可能只检测重量和主要尺寸，而高精度产品可能需要检测密度、尺寸、质量、孔位、同轴度、圆跳动、表面粗糙度、硬度、机械性能甚至磁性能。如果产品用于航空航天、汽车、医疗或精密仪器等对一致性要求较高的领域，还可能需要完整的检验报告、材料证明和批次追溯。这些质量保证成本同样属于产品制造成本的一部分。

（15）供应商的生产能力和订单模式也会影响价格

同一种钨合金配重，不同厂家的报价可能不同，因为各家的粉末制备能力、模具能力、烧结设备、加工设备、检测设备和产能利用率存在差异。如果供应商拥有完整的材料、成形、烧结、加工和检测能力，部分工序可以内部完成；如果需要大量外协，则报价结构可能不同。

对于定制产品，还应比较供应商是否能够稳定控制密度、重量公差和尺寸一致性，而不能只比较一个最低报价。

（16）交货周期和订单紧急程度也可能影响报价

正常生产周期通常可以按照标准工艺安排，如果客户要求加急交付，供应商可能需要调整生产计划、增加设备工时或者安排加急加工。特别是需要新开模具或者重新进行烧结工艺验证的产品，压缩交期可能带来额外制造成本。所以询价时最好同时明确正常交期还是加急交期。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（17）运输和贸易条件也会进入最终采购成本

钨合金密度很高，同样体积下重量较大，因此运输成本需要根据实际重量、包装方式和运输距离计算。如果是国际采购，还可能涉及包装、保险、报关、关税、汇率以及贸易条款等因素。供应商报价中的 EXW（Ex Works，工厂交货）、FOB（Free On Board，装运港船上交货）和 CIF（Cost, Insurance and Freight，成本加保险费加运费）等条件不同，最终采购成本也不能直接横向比较。

（18）可以把钨合金配重价格理解成一个综合成本

从成本构成来看，可以将钨合金配重报价简化理解为：最终价格 ≈ 原材料成本 + 成形成本 + 烧结成本 + 机械加工成本 + 表面处理成本 + 检测成本 + 模具及工装分摊 + 包装运输及其他费用。其中原材料成本主要受 W 含量、材料体系和原料市场价格影响；制造成本则主要受结构、尺寸、公差、加工工序和订单数量影响。这个关系并不是固定的数学报价公式，而是帮助采购方理解价格形成机制的成本框架。

（19）中钨智造（CTIA GROUP）可以针对具体规格进行成本匹配

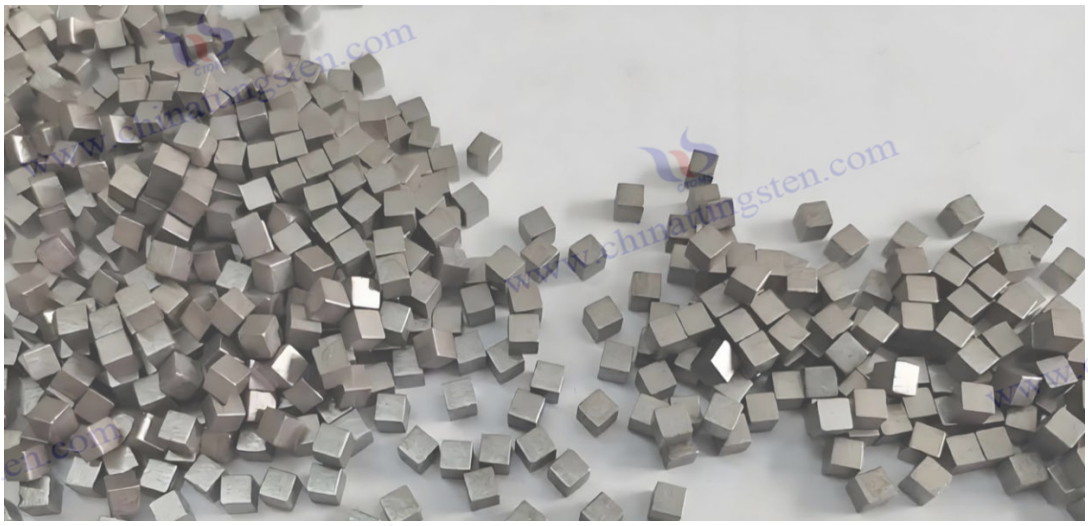
针对不同结构、密度和精度要求的钨合金配重，中钨智造（CTIA GROUP）可根据目标重量、W 含量、材料体系、结构复杂度和采购数量，对材料用量、成形方式、烧结工艺和后续精密加工进行综合评估，从而匹配相应的制造方案和报价结构。

（20）询价时提供的信息越完整，报价越准确

如果希望获得准确的钨合金配重报价，最好一次性提供材料体系、目标密度、W 含量或材料牌号、单件重量、外形尺寸、产品图纸、尺寸公差、重量公差、孔槽和螺纹要求、表面处理、检测要求、采购数量和交货周期。例如仅提供钨合金配重，供应商很难准确报价；如果明确为 W-Ni-Fe、18.0 g/cm³、单件 100 g、5000 件、尺寸按图纸、重量公差±0.1 g、需要钻孔和镀镍，那么报价就会具有更高的准确性和可比性。

钨合金配重价格主要受到 W（Tungsten，钨）含量、材料体系、密度等级、产品重量和尺寸、结构复杂程度、加工方式、尺寸公差、质量公差、表面处理、检测要求、采购数量、模具成本、材料利用率、交货周期以及运输条件等因素影响。其中，材料端主要看钨含量、材料牌号和密度；制造端主要看结构复杂程度、加工工序和精度要求；采购端主要看数量、交期和贸易条件。所以判断钨合金配重价格是否合理时，不能只比较多少钱一公斤，而应该在相同材料体系、相同密度、相同重量、相同尺寸公差、相同加工内容和相同采购数量的基础上进行综合比较。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q26 钨合金配重密度越高价格越高吗？

不一定，但在材料体系、加工条件和采购数量相近的情况下，钨合金配重的密度越高，通常意味着 W（Tungsten，钨）含量更高或高密度相比例更大，材料成本往往也会增加。不过，钨合金配重的最终价格并不是由密度单独决定的。产品结构、单件重量、尺寸公差、加工工序、采购数量、模具费用和检测要求等，都可能使低密度产品的最终单价高于高密度产品。

所以更准确的理解是：高密度通常增加材料端成本，但不一定导致成品报价按照密度同比上涨。

（1）为什么密度提高通常会增加材料成本？

钨合金配重的高密度主要来自 W（Tungsten，钨）。常见高密度钨合金通常含有较高比例的 W，其余为 Ni（Nickel，镍）、Fe（Iron，铁）或 Cu（Copper，铜）等粘结相。在材料体系和制造工艺相近的情况下，提高 W 含量通常能够提高材料密度，但同时也意味着使用更多钨原料。因此，从材料成本角度看，17.5 g/cm³、18.0 g/cm³和 18.5 g/cm³等不同密度等级之间，通常存在一定成本差异。

（2）高密度材料需要的体积更小

密度提高虽然可能增加材料单价，但可以减少同质量配重所需要的体积。体积可以按照 V = m / ρ 计算，其中 V 为体积、m 为质量、ρ 为密度。例如制造 1 kg 配重，17.5 g/cm³材料需要 V = 1000 / 17.5 ≈ 57.14 cm³；18.0 g/cm³材料需要约 55.56 cm³；18.5 g/cm³材料需要约 54.05 cm³。

所以密度从 17.5 提高到 18.5 g/cm³后，同样 1 kg 配重的理论材料体积可以减少约 3.09 cm³。对于空间受限产品，这种体积减少可能具有较高工程价值。

（3）密度越高，并不意味着每公斤价格按比例增加

假设一种 17.5 g/cm³钨合金报价为 A 美元/kg，另一种 18.5 g/cm³材料报价为 B 美元/kg，不能简单认为 B 一定等于 A × 18.5 / 17.5。因为材料价格还受到 W 含量、Ni-Fe 或 Ni-Cu 比例、粉末成本、生产工艺、材料牌号和供应商成本结构影响。有些不同密度等级可能采用相近

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

的生产路线，而有些高密度材料则需要更高的 W 含量和更严格的烧结控制，成本变化幅度并不相同。

（4）真正影响最终报价的是单位产品成本

对于采购方而言，更有意义的是比较一件完整配重的成本，而不是单纯比较每公斤价格。例如：A 方案：18.5 g/cm³、100 g/件、10 美元/kg；B 方案：17.5 g/cm³、100 g/件、8 美元/kg。如果 A 方案能够满足非常严格的安装空间要求，而 B 方案无法装入设备，那么虽然 A 的公斤价格更高，它仍然可能是唯一满足结构要求的方案。反过来，如果两种材料都能满足空间要求，而且产品数量很大，那么较低密度材料的成本优势就可能更加明显。

（5）产品重量不同，密度对总材料成本的影响也不同

对于大型配重，材料价格差异会被放大。例如同样采购 10 kg 产品，如果材料每公斤价格相差 20 美元，那么材料本身就会产生约 200 美元的价格差异。而对于只有 10 g 或 20 g 的微型配重，单件材料价值差异可能很小，但模具、加工和检测成本反而可能成为更重要的价格组成部分。所以密度因素对总报价的影响，需要结合产品重量一起判断。

（6）小型精密配重不一定是高密度更贵

对于微型钨合金配重，产品价格中可能包含较高比例的加工和检测成本。例如一个 10 g 配重，需要加工微孔、细槽或特殊安装结构，即使采用 18.5 g/cm³材料，材料本身只占最终成本的一部分。如果另一个 20 g 配重采用 17.5 g/cm³材料，但结构非常复杂，需要更多加工工序，那么它的最终单件价格完全可能高于前者。这说明密度只是报价因素之一。

（7）结构复杂程度有时比密度差异更重要

假设两个 1 kg 配重分别采用 17.5 g/cm³和 18.5 g/cm³材料。如果 17.5 g/cm³产品是简单圆柱，而 18.5 g/cm³产品需要多个精密孔、螺纹、沉孔、异形曲面和格公差，那么后者的加工成本可能明显高于前者。最终报价中，高密度材料增加的成本只是其中一部分，而复杂加工带来的成本增加可能更加明显。

（8）采购数量会改变密度与价格之间的关系

小批量采购时，模具、工艺调试、设备准备和首件检测等固定费用占比比较高。大批量采购时，材料采购、烧结、机械加工和检测可以形成规模效应，单位成本通常会下降。例如 18.5 g/cm³材料理论上材料成本较高，但如果供应商对该规格已经形成稳定批量生产，而 17.5 g/cm³材料需要重新开模和调整工艺，那么最终报价并不一定由密度高低直接决定。

（9）高密度材料的价值主要体现在空间利用率

判断高密度是否值得，并不能只看材料价格。

如果一个 1 kg 配重必须安装在约 55 cm³以内的空间中，18.0 g/cm³材料理论体积约 55.56 cm³，18.5 g/cm³材料约 54.05 cm³，此时密度差异可能直接关系到产品能否满足结构空间要求。如果安装空间有 100 cm³，那么 17.5 g/cm³材料约 57.14 cm³也完全可以满足要求，此时为了减少约 3.09 cm³而采用更高密度材料，就需要重新比较成本和收益。

（10）动态配重还需要考虑质量分布，而不是只看密度

对于旋转配重，密度越高只是意味着相同质量可以采用更小体积完成，并不会自动带来更

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

好的动态平衡效果。旋转系统的离心力可以表示为 $F = m\omega^2 r$，其中 m 为质量、ω 为角速度、r 为质心到旋转轴的距离。转动惯量可以表示为 $I = \Sigma m_i r_i^2$，其中 m_i 为质量单元、r_i 为其到旋转轴的距离。因此，高密度配重仍然需要控制偏心量、质心位置、同轴度、圆跳动以及安装位置。

（11）不同材料体系也会影响价格

相同密度并不代表价格完全相同。例如 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）都可以制造高密度配重，但两者的粘结相、材料组成、制造工艺和性能特点不同。如果产品同时要求低磁响应、高强度、特定加工性能或者特殊热学性能，那么材料体系的选择可能比 0.5 g/cm³的密度差异更能影响最终价格。

（12）中钨智造（CTIA GROUP）可根据密度与结构要求进行成本匹配

针对不同密度等级的钨合金配重，中钨智造（CTIA GROUP）可根据目标重量、安装空间和结构尺寸，对 17.5 g/cm³、18.0 g/cm³、18.5 g/cm³等密度等级进行体积与材料用量比较，再结合 W 含量、成形工艺、加工公差和订单数量评估综合成本，避免单纯为了追求更高密度而增加不必要的采购费用。

（13）采购时应该比较单位产品成本，而不是只比较公斤价

如果要比较两种不同密度的钨合金配重，可以按照以下逻辑计算：

产品材料成本 = 单件重量 × 材料单价；

单位产品综合成本 = 材料成本 + 成形成本 + 加工成本 + 表面处理成本 + 检测成本 + 模具分摊等。然后再判断高密度材料减少的体积是否能够解决安装空间问题。例如 18.5 g/cm³材料每公斤价格高于 17.5 g/cm³，但如果 18.5 g/cm³能够让产品缩小尺寸、减少加工材料或者避免重新设计周边结构，那么其综合经济性可能与单纯的公斤价格完全不同。

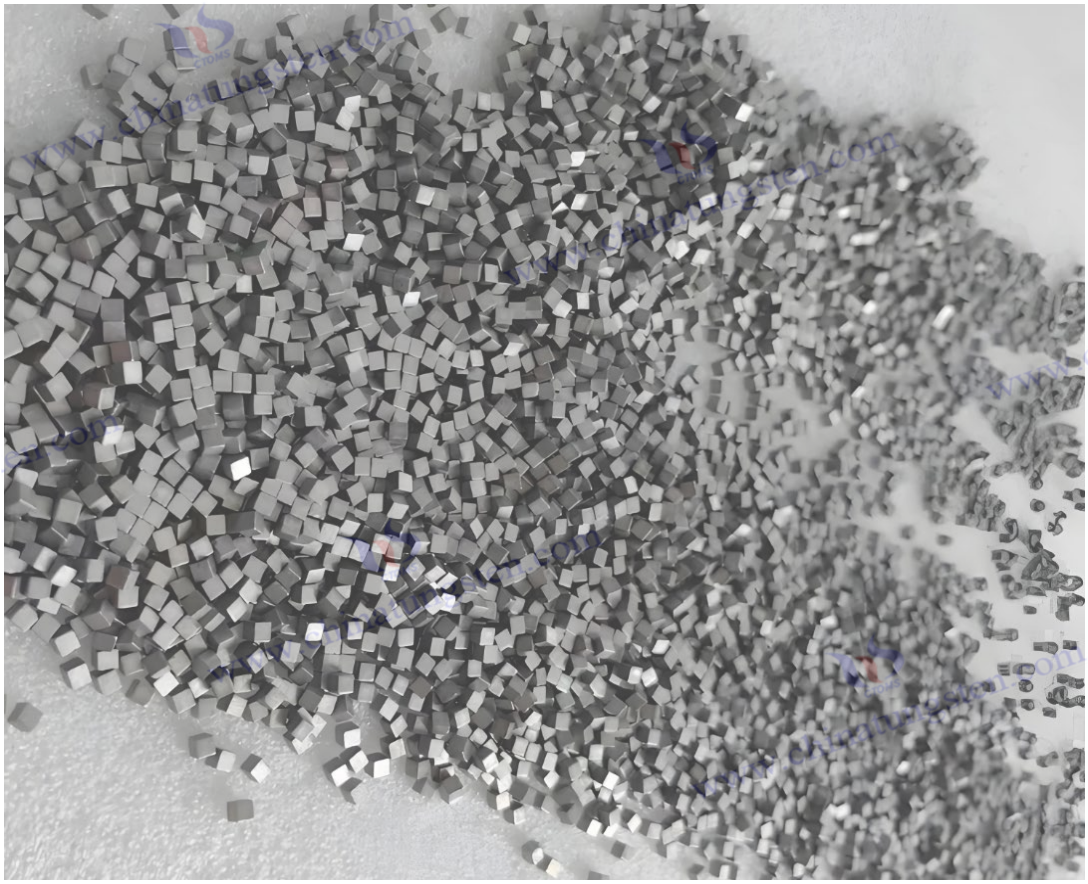
（14）什么情况下应该优先考虑高密度？

如果产品存在严格的空间限制、需要在很小体积内集中较大质量、需要缩短配重尺寸，或者需要将质量布置在距离旋转轴较远或特定空间位置，那么高密度材料通常具有明显价值。如果产品安装空间充足、重量较大、结构简单，而且成本控制是主要目标，则没有必要为了追求最高密度而选择成本更高的材料。

钨合金配重并不是密度越高，价格就一定越高。更准确地说，在材料体系、工艺和其他条件相近的情况下，密度提高通常意味着更高的 W（Tungsten，钨）含量和更高的材料成本，但最终成品价格还受到产品重量、结构复杂度、加工精度、采购数量、模具、检测和交货条件等因素影响。

高密度钨合金真正的价值在于用更小的体积获得相同质量。例如 1 kg 配重采用 17.5 g/cm³材料需要约 57.14 cm³，而 18.5 g/cm³材料只需要约 54.05 cm³。是否值得为这部分体积减少支付更高材料成本，应根据安装空间和整体产品成本判断。所以，选择钨合金配重时，更合理的原则不是单纯追求最高密度，而是在满足质量和空间要求的基础上，选择综合成本和性能都适合的密度等级。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q27 小批量钨合金配重为什么单价较高？

小批量钨合金配重的单价通常高于大批量采购，主要原因并不是单纯的材料价格，而是模具、成形、烧结、设备调试、机械加工、检测等固定成本无法通过较大的订单数量进行摊薄。对于高密度钨合金配重而言，钨（W，Tungsten，钨）原材料本身价值较高，同时产品又经常涉及较高的尺寸精度和质量精度，所以小批量生产时单位成本会更加明显。

（1）固定成本需要由较少数量分摊

钨合金配重采用粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）制造时，通常需要经历粉末准备、混合、压制、脱脂或预处理、液相烧结、后续加工和检测等环节。即使只生产几十件或几百件，也可能需要进行设备准备、工艺参数设定、模具安装、炉次安排和首件确认。

可以把小批量产品的单位成本简化理解为：单位成本 ≈ 单件变动成本 + 固定成本 ÷ 订单数量。假设某批产品存在 3000 元的模具、调机和检测等固定费用，单件材料及加工等变动成本为 20 元，那么生产 100 件时，固定成本摊销为 30 元/件，总成本约 50 元/件；生产 1000 件时，固定成本摊销则只有 3 元/件，总成本约 23 元/件。这个例子只是用于说明成本摊薄规律，并不代表实际市场报价。

（2）模具和成形准备费用占比较高

对于结构规则、数量较大的钨合金配重，粉末压制成形可以提高生产效率，但往往需要专

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

用模具。模具设计、制造、试模和设备调试属于一次性或低频发生的成本，小批量订单无法充分摊销这些费用。如果产品数量非常少，有时直接采用机加工方式反而更加合理，因为可以减少专用模具投入；但这种方式可能增加材料去除量、加工时间和刀具消耗，所以并不是所有小批量产品都一定适合直接机加工。

（3）钨合金原材料本身成本较高

高密度钨合金常含有较高比例的钨（W，钨），常见材料体系包括钨-镍-铁（W-Ni-Fe，Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和钨-镍-铜（W-Ni-Cu，Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）。即使产品数量较少，供应商仍然需要准备相应的钨合金粉末或坯料。小批量采购原材料时，通常缺少大宗采购带来的价格摊薄，而且材料准备、余料和库存占用也可能进入成本。例如同样生产 100 克配重，如果材料实际密度为 18.0 g/cm³，则理论材料体积约为 5.56 cm³。配重本身虽然很小，但由于材料密度高、钨含量高，其单位质量材料价值可能明显高于普通钢材。

（4）烧结炉次和生产排程难以充分利用

钨合金通常需要高温烧结，而烧结设备具有一定的炉膛容量和固定运行成本。无论一次烧结几十件还是几千件，都需要完成装炉、升温、保温、冷却和设备运行等基本流程。如果订单数量很少，而炉膛没有被充分利用，那么单件产品所承担的炉次成本就会增加。尤其是特殊密度、特殊材料体系或特殊尺寸的产品，无法简单地与其他产品混炉生产时，这种影响可能更加明显。

（5）小批量机加工的准备时间比例更高

钨合金具有高密度、高硬度和特殊的组织结构，加工时通常需要针对材料牌号、钨含量和微观组织选择合适的刀具、切削参数和加工方式。如果一批产品只有几十件，程序编制、装夹定位、刀具准备、试切和首件确认等准备时间需要由很少的产品共同承担。即使真正切削几十件产品只需要几个小时，前期准备工作也可能占据相当大的单位成本比例。如果产品还有孔、槽、螺纹、台阶、曲面等复杂结构，加工时间和刀具消耗进一步增加，小批量情况下的单位加工费用通常更加明显。

（6）尺寸公差和质量检测也会推高小批量成本

配重产品有时不仅要求重量达到目标值，还要求尺寸、孔位、同轴度、圆跳动、平面度、表面粗糙度（Ra，Arithmetic Average Roughness）以及动态平衡性能达到规定要求。例如普通静态配重可能主要控制重量和外形尺寸，而高速旋转部件使用的钨合金配重，还可能需要进行动平衡检测。检测设备准备、夹具定位、首件检测、过程检测和最终检验等费用，在大批量生产中可以分摊到大量产品，而小批量生产时单位产品承担的检测成本明显更高。

（7）材料利用率和加工余量也会影响单价

对于规则的圆柱、圆盘或块状配重，粉末压制可以比较接近最终形状，材料利用率通常较好。但如果小批量产品采用整块钨合金坯料进行数控加工，可能需要从较大的毛坯中去除大量材料。假设最终零件只有 30 克，而加工前需要准备 50 克甚至更多的毛坯，那么实际采购和加工成本并不能只按照最终 30 克计算。材料利用率越低，单位成品承担的材料成本就越高。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（8）小批量并不意味着所有成本都会按数量同比例下降

可将钨合金配重成本大致分为材料、成形、成本、机加工、模具及工装成本、检测成本、表面处理成本、包装运输成本等。其中材料和部分加工费用具有较明显的变动成本属性，而模具、调机、程序、检测准备和炉次等属于相对固定或半固定成本。所以订单从 100 件增加到 1000 件时，成本通常不会简单地增加 10 倍，单位成本反而可能明显下降。

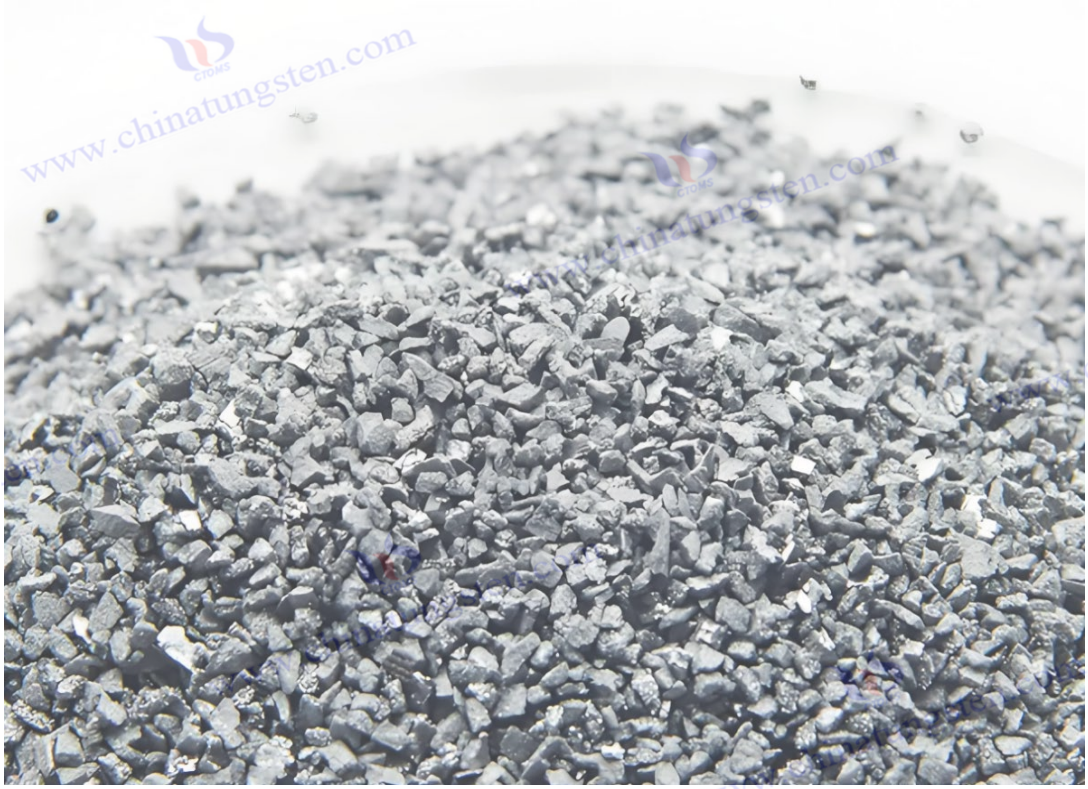
（9）如何判断小批量报价是否合理

比较小批量钨合金配重报价时，不宜只看每公斤价格。更合理的方式是比较相同条件下的单件总成本，包括材料密度、W 含量、产品重量、尺寸、公差、结构复杂程度、加工方式、表面处理、检测要求、模具费用、包装运输以及订单数量。尤其需要确认供应商报价中的模具费是否已经包含在单价中。有的报价会将模具费单独列出，有的则会直接摊入产品单价，两种报价形式看起来可能差异很大，但实际首批采购总成本未必有同样程度的差别。对于小批量订单，中钨智造（CTIA GROUP）可以根据产品数量、结构复杂程度和精度要求评估采用粉末冶金成形、已有模具生产还是直接机加工更加合适，并结合材料利用率、加工工时和检测要求制定相应的制造方案。

（10）怎样降低小批量钨合金配重的单位成本

如果主要目标是降低小批量采购成本，可以从设计和采购两个方面入手。设计方面尽量减少没有实际功能要求的超高精度公差、复杂曲面、特殊孔槽和特殊表面处理；采购方面可以适当合并数量、采用供应商已有材料牌号或成熟模具、将模具费用与产品单价分开核算，并在满足功能的前提下接受合理的交货周期。如果后续确定会进入批量生产，还可以采用样件阶段与量产阶段分开的策略：前期几十件采用机加工验证结构，设计定型后再通过粉末冶金模压和批量烧结降低单位成本。总体来看，小批量钨合金配重单价较高的核心原因是固定成本摊薄不足，同时受到高价值钨原材料、烧结炉次、加工准备、刀具消耗和精密检测等因素影响。订单数量增加后，模具、调机、程序、炉次和检测等成本可以分摊到更多产品上，单位价格通常会下降；但具体下降幅度取决于产品结构、密度、材料体系、精度和制造工艺，而不是简单按照数量同比例下降。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q28 大批量采购钨合金配重如何降低成本？

大批量采购钨合金配重时，降低成本的核心并不是单纯压低供应商的每公斤报价，而是通过材料规格标准化、批量采购、工艺优化、模具摊销、加工效率提升和供应链管理，降低整个产品生命周期中的单位综合成本。对于高密度钨合金配重而言，材料本身价值较高，合理优化材料用量和制造方式往往比单纯议价更有效。

（1）首先确定合适的密度等级

钨合金密度越高，并不意味着单位产品综合成本一定越低。对于相同质量的配重，体积计算公式为 V=m/ρ，其中 V 为体积、m 为质量、ρ 为密度。例如 1 kg 配重采用 17.5 g/cm³材料时，理论体积约 57.14 cm³；采用 18.5 g/cm³材料时约 54.05 cm³，只减少约 3.09 cm³。如果安装空间本身足够，那么为了这部分体积缩减而选择更高密度材料，未必能够抵消材料成本增加。

批量采购时，应先根据安装空间确定最低满足要求的密度等级，再进行供应商报价比较。

（2）通过统一材料牌号降低采购成本

如果同一项目中存在大量不同密度、不同成分的材料规格，会增加粉末采购、库存、生产切换和质量管理成本。例如产品可以统一采用某一种成熟的钨-镍-铁（W-Ni-Fe，Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或钨-镍-铜（W-Ni-Cu，Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）材料体系，并在满足设计要求的前提下减少不必要的牌号数量，这通常有利于形成更稳定的采购批量。

（3）增加订单数量，让固定成本充分摊薄

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

大批量最直接的成本优势来自固定成本摊销。单位成本可以近似表示为：单位成本 = 单件变动成本 + 固定成本 ÷ 批量。假设某套模具、工装、程序开发和首件检测等固定成本为 30000 元，如果生产 1000 件，每件承担 30 元；如果生产 10000 件，每件只承担 3 元。对于钨合金配重而言，批量越大，模具、工装、设备调试、工艺验证和检测准备等成本越容易被摊薄。

（4）尽量采用适合批量生产的粉末冶金工艺

对于数量较大的规则配重，粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）通常比完全依赖数控机械加工更加适合。通过模压成形，可以使产品在烧结前就接近最终形状，从而减少后续材料去除量。尤其是圆柱、圆盘、块状、环形以及具有重复孔位的产品，批量生产时更容易发挥模具和成形工艺的效率优势。对于数量很大的产品，即使前期需要投入专用模具，模具费用也可以随着产量增加而快速摊薄。

（5）优化产品结构，减少不必要的加工

钨合金配重最终价格不仅取决于重量，还取决于加工时间。例如一个简单圆柱配重与一个具有多级台阶、多个异形槽和复杂曲面的配重，即使两者重量相同，制造成本也可能存在明显差异。批量采购时，可以在设计阶段优化孔槽数量、倒角、圆角、台阶和加工基准，将能够通过压制成形实现的结构尽量前置到成形工艺中，从而减少车削、铣削、钻孔等后续加工。

（6）控制公差，不要无必要地追求过高精度

尺寸公差越严格，加工和检测要求通常越高。如果某个配重只需要控制质量和基本安装尺寸，就没有必要对所有尺寸都采用非常严格的精密公差。对于高速旋转配重，则应重点控制与平衡性能直接相关的尺寸、同轴度、圆跳动、安装基准和质量分布，而不是把所有尺寸统一提高到同样的精度等级。这种功能导向的公差设计，可以直接减少机加工和检测成本。

（7）提高材料利用率

钨合金价格较高时，材料利用率对批量采购总成本的影响尤其明显。例如最终产品质量为 100 g，如果采用接近最终形状的粉末压制坯料，材料利用率可能优于从较大坯料中大量切削。如果采用机加工，则应尽量优化毛坯尺寸和加工余量。对于大批量产品，可以进一步通过排料优化、坯料规格标准化以及减少切削余量来降低材料损耗。

（8）将模具成本与产品单价分开核算

批量采购时，建议要求供应商分别列出材料、模具、成形、烧结、机加工、检测和表面处理等成本项目。这样可以判断产品单价下降究竟来自真正的规模效应，还是仅仅把部分固定费用转移到了其他报价项目中。尤其对于预计采购数万件甚至更大的项目，可以要求供应商提供不同年度或不同数量区间的阶梯报价，从而分析 1000 件、5000 件、10000 件和更大批量下的单位成本变化。

（9）通过年度采购协议稳定价格

如果产品属于持续消耗型配重，而不是一次性项目，可以考虑年度框架采购或分批交付。例如一次确定年度需求量 50000 件，再按照每月或每季度实际需求分批交付。这样既可

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

以让供应商根据较大的年度需求量安排材料和生产计划，又可以避免采购方一次性承担全部库存压力。具体能否获得价格优惠，需要根据材料价格、产能、付款条件和供应商库存策略协商确定。

（10）减少频繁换模和换规格

大批量生产最怕产品规格过于分散。假设总需求量为 20000 件，但包含 20 种不同尺寸，每种只有 1000 件，那么生产过程中可能频繁进行模具更换、设备调整和工艺切换。如果能够通过产品系列化将其压缩为 5 种主要规格，每种达到 4000 件，生产效率通常更容易提高。

所以批量采购的降本重点不仅是总数量，还包括单一规格的连续生产数量。

（11）把检测要求分成首件、过程和最终检验

高密度钨合金配重可能需要检测密度、尺寸、质量、硬度、表面状态以及动态平衡等指标。如果每一个产品都采用与首件相同的全尺寸检测方式，批量生产的检测成本可能较高。可以根据质量控制方案，将项目划分为首件确认、过程抽检和最终检验，同时对关键质量特性设置必要的全检项目。例如质量公差非常严格的配重，可以对质量进行较高比例甚至全数检测，而对部分不影响功能的尺寸采用抽检。具体检验比例应依据产品质量协议和应用风险确定。

（12）选择适合批量订单的供应商制造模式

大批量采购时，供应商的实际制造能力比单纯的报价更重要。应重点考察其粉末冶金设备、烧结炉能力、模具制造能力、机加工能力、质量检测能力和批量交付稳定性。中钨智造（CTIA GROUP）可针对大批量钨合金配重，根据年度需求量、单批数量、材料体系、目标密度、结构尺寸和质量公差，对粉末冶金成形、烧结、后续机加工和检测流程进行批量化优化，以减少重复调机和工艺切换带来的成本。

（13）不要只比较每公斤价格

这是大批量采购中特别重要的一点。例如供应商 A 报价 60 元/kg，供应商 B 报价 65 元/kg，看起来 A 更便宜，但如果 A 的产品需要更多后续机加工、材料利用率较低、尺寸公差不稳定，或者包装运输和检测费用较高，那么最终到货成本可能并没有明显优势。更合理的比较方式是计算单位产品综合成本，即总采购成本 ÷ 合格产品数量。其中总采购成本应包括材料、成形、烧结、机加工、模具摊销、检测、表面处理、包装、运输以及必要的售后质量成本。

（14）建立批量采购的降本模型

如果采购量较大，可以建立一个简单的成本模型：

总成本 ≈ 材料成本 + 成形成本 + 烧结成本 + 机加工成本 + 检测成本 + 模具及工装成本 + 表面处理成本 + 包装运输成本。进一步计算单位成本：单位成本 ≈ 总成本 ÷ 合格产品数量。其中合格产品数量非常重要，因为如果某种制造方案虽然单件生产成本低，但批量合格率较低，最终摊到每一个合格产品上的成本仍然可能较高。

（15）批量降本可以从这几个环节同时进行

如果采购数量已经达到较大规模，可以按照材料、设计、成形、烧结、加工、检测和供应

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

链几个环节同时优化。材料方面统一牌号、集中采购；设计方面减少不必要的复杂结构和超高公差；制造方面采用适合批量生产的模具和粉末冶金工艺；加工方面减少切削量和换刀次数；检测方面建立合理的首件、过程和最终检验方案；供应链方面通过年度需求预测、阶梯报价和稳定交付计划降低综合成本。

大批量采购钨合金配重的降本逻辑可以概括为：提高采购规模 → 摊薄模具和工艺固定成本 → 提高材料利用率 → 提高成形和烧结效率 → 减少后续机加工 → 优化检测 → 降低供应链和库存成本。真正有效的批量降本并不是简单要求供应商降低报价，而是让同一种规格能够稳定、连续、高合格率地生产。对于高密度钨合金配重，材料价格通常只是成本结构的一部分，设计标准化、模具摊销和生产效率同样会显著影响最终的单位采购成本。



Q29 钨合金配重定制需要提供哪些图纸信息？

定制钨合金配重时，图纸信息越完整，供应商越容易准确判断材料、成形方式、加工工艺、质量控制和报价。对于简单的圆柱、圆盘类配重，一张完整的二维工程图通常已经可以满足基本生产要求；对于异形配重、高精度配重或需要动态平衡的产品，则建议同时提供二维工程图和三维模型。

（1）产品基本尺寸

图纸首先应明确配重的整体外形尺寸，包括长度、宽度、高度、直径、厚度、台阶尺寸等。例如圆柱形配重至少应标注外径和高度；圆盘形配重需要标注外径、厚度以及中心孔尺寸；矩形配重则需要标注长、宽、高。如果产品存在多个台阶或不同直径区域，应分别标明各段尺寸，避免仅提供一个最大外形尺寸。

（2）材料和密度要求

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

图纸或技术要求中应明确材料体系，例如钨-镍-铁（W-Ni-Fe，Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或钨-镍-铜（W-Ni-Cu，Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜），同时注明目标密度或材料牌号。

例如可以规定目标密度为 18.0 g/cm³，或者直接指定供应商认可的材料牌号。如果只写高密度钨合金而没有明确密度等级，供应商可能根据自身材料体系选择不同配方，从而导致最终重量、体积和报价存在差异。

（3）产品目标重量及重量公差

对于配重件而言，重量往往是核心技术参数之一。图纸最好明确目标质量以及允许偏差，例如 100.00 g ± 0.10 g，而不是只标注产品名称为 100 g 配重。质量公差越严格，对材料一致性、加工去除量和最终检测的要求通常越高，因此会直接影响制造成本。如果产品用于动态平衡，还应进一步明确质量分布和不平衡量要求，而不能只控制总重量。

（4）孔、槽和安装结构

如果配重需要安装到其他零件上，应详细标明所有安装特征，包括中心孔、螺纹孔、沉孔、通孔、定位孔、键槽、安装槽、螺钉孔以及其他定位结构。例如一个环形钨合金配重，除了外径和内径，还应明确孔数量、孔径、孔距圆直径、孔位角度以及孔的位置基准。对于圆周均布孔，可以标注孔数量和角度关系，例如 6×Φ5 孔均布于某一指定节圆上。

（5）尺寸公差

不能只提供基本尺寸，还应明确关键尺寸允许偏差。例如外径 Φ20 mm，如果要求 Φ20.00 ± 0.02 mm，就与普通 Φ20 mm 尺寸要求完全不同。对于钨合金配重，建议重点标注真正影响装配和功能的尺寸公差，包括外径、内径、厚度、安装孔、定位面、轴孔等，而不是把所有尺寸都设置成非常严格的公差。这样既有利于保证产品功能，也可以避免不必要地增加加工成本。

（6）形位公差

如果配重用于高速旋转部件，形位公差往往比普通尺寸公差更加重要。可以根据实际需求标注同轴度、圆跳动、端面跳动、平面度、垂直度、位置度等要求。例如旋转配重的中心孔与外圆之间如果存在较大的同轴度误差，即使总重量完全正确，安装到旋转轴上后仍可能产生明显的不平衡。

（7）表面粗糙度和表面处理

图纸应注明关键加工表面的表面粗糙度，例如 Ra（Arithmetic Average Roughness，算术平均粗糙度）1.6 μm、3.2 μm 等。如果产品需要表面处理，也应在图纸或技术文件中注明，例如防腐处理、镀层、涂层、抛光或其他特殊表面要求。如果没有特殊要求，也可以明确注明基于正常加工状态交付，避免供应商按照更高等级的表面处理方案报价。

（8）倒角、圆角和毛刺要求

配重的边缘通常需要进行倒角或圆角处理。例如图纸可以明确 C0.5、R0.5 等尺寸，同时注明是否需要去除加工毛刺。对于需要人工装配的配重，合理的倒角可以改善装配安全性；对于高速旋转件，则应避免存在可能影响平衡或产生脱落风险的毛刺。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（9）配重中心和重心要求

如果产品属于普通静态配重，通常只需要控制质量和安装位置；如果用于旋转系统，则建议明确重心位置。例如可以规定配重的质量中心必须位于指定轴线上，或者规定某个基准面到重心的距离。对于不规则形状的配重，最好在三维模型中明确质量中心或设计基准，这对于后续动态平衡设计尤其重要。

（10）动态平衡要求

如果钨合金配重用于电机转子、发动机旋转部件、工业转子、高速主轴等设备，应在图纸中明确动态平衡要求。除了总质量之外，还可能需要规定残余不平衡量、平衡等级、转速、校正面数量以及测试条件。动态系统中的离心力可以表示为 $F=m\omega^2r$，其中 F 为离心力、m 为质量、ω 为角速度、r 为质量偏心距离。因此，同样质量的配重，如果安装位置或质量分布不同，其实际平衡效果也可能不同。

（11）加工基准和装配基准

工程图最好明确主要基准面、基准轴和定位面。例如可以将中心孔轴线作为基准 A，将端面作为基准 B，再以某个侧面作为基准 C。这样供应商在车削、铣削、钻孔和最终检测过程中，可以按照统一基准控制产品精度。对于高精度钨合金配重，基准定义不清可能导致不同工序之间出现尺寸累积误差。

（12）二维工程图和三维模型最好同时提供

如果结构比较简单，二维工程图通常可以作为主要生产依据。如果产品具有复杂曲面、偏心结构、多孔结构或空间安装特征，建议同时提供三维 CAD（Computer-Aided Design，计算机辅助设计）模型。三维模型可以帮助供应商理解产品整体结构，而二维工程图负责定义尺寸、公差、基准和技术要求。两者存在差异时，应明确以哪一个文件作为最终生产依据。

（13）技术要求和检验要求

图纸最后还应说明特殊技术要求，例如密度范围、质量公差、硬度、材料成分、内部缺陷要求、表面状态、尺寸检验、质量检验以及动态平衡检测等。如果产品属于关键功能件，还可以要求供应商提供材料证明、尺寸检测报告、重量检测记录或其他质量文件。

（14）一张完整的钨合金配重图纸可以包含哪些信息

实际向供应商提交图纸时，可以按照以下逻辑组织：产品名称、零件编号、材料体系、目标密度、目标重量及重量公差、整体尺寸、孔槽尺寸、螺纹规格、尺寸公差、形位公差、表面粗糙度、倒角圆角、加工基准、安装基准、重心要求、动态平衡要求、表面处理、检验要求以及包装或特殊交付要求。其中最核心的信息通常是材料体系、密度、重量、外形尺寸、安装尺寸、公差和数量。如果这些参数已经明确，供应商通常就能够进行初步工艺分析和报价。

对于钨合金配重定制，中钨智造（CTIA GROUP）可以根据二维工程图、三维 CAD 模型以及目标重量、密度、尺寸公差和应用要求，对材料选择、粉末冶金成形、烧结、机械加工和最终检测方案进行匹配。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

一张好的钨合金配重图纸并不是尺寸标得越多越好，而是要把真正影响材料选择、制造工艺、装配性能和最终质量的参数定义清楚。对于普通配重，重点是重量、尺寸和安装结构；对于精密配重，还应增加形位公差、重心和质量分布要求；对于高速旋转配重，则应进一步明确动态平衡、同轴度和跳动等关键指标。



30 钨合金配重询价需要提供哪些技术参数？

钨合金配重询价时，提供的信息越完整，供应商越容易准确判断材料成本、成形方式、加工难度、检测要求和交货周期，也能减少反复确认导致的报价偏差。对于简单的标准配重，提供重量、尺寸、密度和数量通常可以进行初步报价；对于精密配重或批量定制产品，则最好同时提供完整工程图、三维模型和技术要求。

（1）产品名称和使用用途

首先应说明配重具体用于什么产品，例如汽车零部件、工业转子、航空航天设备、无人机、电机、精密仪器、电子设备等。用途会影响材料体系、密度等级、机械性能、磁性能、加工精度以及是否需要动态平衡检测。例如普通固定配重与高速旋转配重的技术要求可能完全不同。

（2）材料体系

应明确希望采用哪一种材料体系，例如钨-镍-铁（W-Ni-Fe，Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或钨-镍-铜（W-Ni-Cu，Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）。如果对具体材料牌号没有要求，也可以注明由供应商根据目标密度、机械性能、磁性能和加工要求推荐材料。

（3）目标密度

目标密度是钨合金配重询价的重要参数之一，例如 17.5、18.0、18.5 g/cm³。同样重量下，密度越高，所需体积越小，基本关系为 V=m/ρ，其中 V 为配重体积、m 为质量、ρ 为材

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

料密度。例如 1 kg 配重采用 18.0 g/cm³材料时，理论体积约 55.56 cm³；采用 17.5 g/cm³材料时约 57.14 cm³。如果安装空间有限，应明确最低密度要求，而不是简单写高密度钨合金。

（4）单件重量和重量公差

应提供目标重量，例如 10 g、100 g、500 g、1 kg，并明确允许偏差。例如 100.00 g ± 0.10 g 与 100 g ± 2 g 属于完全不同的质量控制要求。重量公差越严格，材料一致性、加工去除量和最终检测要求通常越高，报价也可能相应增加。

（5）产品尺寸

至少应提供长度、宽度、高度、外径、内径、厚度等主要尺寸。如果是圆柱、圆盘、环形或矩形配重，可以直接提供基本外形尺寸；如果是异形产品，建议提供完整二维工程图和三维 CAD（Computer-Aided Design，计算机辅助设计）模型。

（6）安装结构

需要明确配重如何安装，包括中心孔、螺纹孔、定位孔、沉孔、通孔、键槽、安装槽、螺钉孔以及其他连接结构。例如一个环形配重，最好同时提供外径、内径、厚度、孔径、孔数量、孔距圆直径和孔位角度。安装结构越复杂，机加工成本通常越高。

（7）尺寸公差

询价时不能只提供基本尺寸，还应说明关键尺寸公差。例如 Φ20 mm 与 Φ20.00 ± 0.02 mm 在制造成本上可能存在明显差别。建议重点标出真正影响装配和使用性能的关键尺寸，而不是对所有尺寸都提出过高精度要求。

（8）形位公差和基准要求

如果产品需要高精度装配，应提供同轴度、圆跳动、端面跳动、平面度、位置度、垂直度等要求，并明确加工基准。尤其是安装在旋转轴上的钨合金配重，如果中心孔与外圆之间存在较大的同轴度误差，即使产品总重量正确，也可能造成旋转系统的不平衡。

（9）动态平衡参数

如果配重用于高速旋转设备，询价时应明确是否需要动态平衡。可以提供工作转速、平衡等级、允许残余不平衡量、校正面数量以及测试方式等参数。旋转系统中的离心力可以表示为 $F=m\omega^2r$，其中 F 为离心力、m 为质量、ω 为角速度、r 为偏心距离。因此，高速旋转配重的报价不能只根据重量计算，还需要考虑质量分布和加工精度。

（10）表面粗糙度和表面处理

如果存在特殊表面要求，应明确表面粗糙度，例如 Ra（Arithmetic Average Roughness，算术平均粗糙度）1.6 μm、3.2 μm 等。同时注明是否需要抛光、镀层、涂层、防腐处理或其他特殊表面处理。没有特殊要求时，也可以明确采用正常加工表面状态，以避免供应商按照更高等级的表面要求进行成本核算。

（11）数量和采购批量

数量对报价影响非常大，因此至少需要提供试制数量、首批数量和预计年需求量。例如询

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

价时同时说明首批 100 件、后续每月 1000 件、预计年需求 12000 件，供应商就可以根据长期需求评估模具、粉末冶金成形和批量加工方案。同一种产品采购 10 件、1000 件和 100000 件，单位成本通常不会相同。

（12）制造工艺要求

如果采购方已经指定工艺，应明确要求采用粉末冶金、模压烧结、机加工或其他制造方式。如果没有指定工艺，则可以只提出产品性能和尺寸要求，让供应商根据批量和结构选择更经济的制造方案。对于大批量规则配重，粉末冶金成形通常具有较好的规模化生产潜力；对于少量复杂产品，直接机加工有时更加合适。

（13）材料性能要求

如果产品不仅要求高密度，还对性能有要求，应明确相应指标，例如硬度、抗拉强度、延伸率、磁性能、热性能等。其中磁性能尤其值得单独说明。含铁的 W-Ni-Fe 体系通常具有更明显的磁响应，而 W-Ni-Cu 体系通常具有较低的磁响应，但具体结果仍取决于材料成分、杂质和制造工艺。如果产品靠近磁传感器、精密仪器或其他敏感设备，建议在询价阶段就提出磁性能要求。

（14）检验和质量文件

需要明确是否要求供应商提供材料证明、密度检测报告、尺寸检测报告、重量检测报告、硬度检测报告或动态平衡报告。如果属于航空航天、医疗设备或其他质量管理要求较高的产品，还应提前说明质量体系、批次追溯和文件要求。

（15）图纸和三维模型

如果已经有正式工程图，询价时最好直接提供 PDF 格式二维工程图以及 STEP、IGES 等格式的三维模型。二维图主要用于确定尺寸、公差、材料和技术要求，三维模型则有利于供应商理解复杂结构和计算材料用量。对于异形配重，仅凭文字描述通常难以准确判断加工成本。

（16）交货和包装要求

询价时还应提供期望交期、交货批次、包装要求以及运输方式等信息。如果产品表面容易磕碰、尺寸精度较高或者属于小型精密配重，应说明是否需要独立包装、防碰撞包装或特殊防护。

（17）询价时可以直接整理成一份参数表

实际发送询价时，可以按照以下顺序提供：产品名称及用途、材料体系、目标密度、单件重量、重量公差、产品尺寸、安装结构、尺寸公差、形位公差、表面粗糙度、表面处理、动态平衡要求、材料性能要求、检测要求、单批数量、年度需求量、工程图、三维模型、目标交期以及包装要求。其中最核心的参数通常是：材料体系、密度、单件重量、重量公差、外形尺寸、安装结构、关键尺寸公差和采购数量。对于高速旋转配重，则必须进一步提供转速、平衡等级或允许残余不平衡量等信息。

中钨智造（CTIA GROUP）在钨合金配重询价和定制过程中，可以根据客户提供的重量、密度、尺寸、数量、材料体系及精度要求，对粉末冶金成形、烧结、机加工和检测方案进

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

行综合评估，并据此确定材料用量和制造成本。一份有效的钨合金配重询价资料应当回答几个核心问题：用什么材料、需要多大密度、每件多重、尺寸多大、精度要求多高、如何安装、是否需要动态平衡、需要多少件、什么时候交货。信息越接近完整工程技术条件，供应商报价通常就越准确，也越容易进行不同供应商之间的同条件成本比较。





Q31 钨合金配重如何比较不同供应商报价？

比较不同供应商的钨合金配重报价，不能简单按照每公斤价格或单件价格判断。钨合金配重的最终成本同时受到材料密度、钨（W，Tungsten，钨）含量、材料体系、产品重量、结构复杂程度、加工精度、模具费用、检测要求、采购数量以及交货条件等影响。最合理的方法是先把所有供应商的报价转换成相同技术条件下的综合采购成本，再比较材料、制造、质量和交付条件。

（1）先确认是不是在比较同一种材料

不同供应商报价时，第一步应确认材料体系是否一致。例如都是钨-镍-铁（W-Ni-Fe，Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁），还需要进一步确认钨含量、目标密度和材料牌号；如果一家采用 W-Ni-Fe，另一家采用钨-镍-铜（W-Ni-Cu，Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜），即使两者密度接近，也不能直接按照每公斤价格进行比较。材料体系不同可能带来密度、磁性能、机械性能、热性能、加工性能和成本方面的差异。

（2）确认密度是否一致

密度直接影响同等重量下的材料体积。例如同样生产 1 kg 配重，17.5 g/cm³材料需要约 57.14 cm³，而 18.5 g/cm³材料只需要约 54.05 cm³。因此，如果供应商 A 报价较低，但采用 17.5 g/cm³材料，而供应商 B 报价较高但采用 18.5 g/cm³材料，那么单纯比较元/kg 并不能完整反映两种方案的实际价值。如果产品安装空间没有限制，可以重点关注综合成本；如果空间非常有限，则需要把体积占用纳入技术和成本分析。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（3）不要只看每公斤价格

钨合金配重最好同时比较：材料单价、单件价格、模具费用、机加工费用、检测费用、表面处理费用、包装费用、运输费用以及其他一次性费用。例如供应商 A 报价 80 元/kg，但需要另外支付 10000 元模具费；供应商 B 报价 85 元/kg，已经包含成熟模具和部分检测费用。两者不能直接根据 80 和 85 元/kg 判断。特别是大批量采购时，模具费用摊薄后对单件成本的影响会发生明显变化。

（4）计算真正的单件综合成本

可以使用一个比较实用的公式：单件综合成本 = 产品采购金额 + 模具及工装费用分摊 + 检测费用 + 包装运输费用 + 其他相关费用 ÷ 合格产品数量。如果不同供应商的报价条件完全一致，也可以进一步简化为单件价格进行比较；但实际询价中经常存在某些费用单独报价的情况，所以最好先进行成本结构还原。例如供应商 A 的产品单价较低，但需要采购方承担较高模具费和运输费，那么最终到厂成本可能与供应商 B 接近。

（5）比较相同的重量和重量公差

配重产品必须确认目标重量是否一致。例如供应商 A 提供 100 g ± 1 g，供应商 B 提供 100 g ± 0.1 g，两者虽然目标重量相同，但质量控制要求并不相同。如果实际应用只需要±1 g，那么采购更严格的±0.1 g 产品可能增加不必要的成本；反过来，如果设备要求±0.1 g，那么低精度产品即使报价更低，也不能作为等效方案比较。

（6）比较关键尺寸和公差

同样一个 Φ20 mm 的钨合金配重，如果一家供应商按照普通尺寸公差加工，另一家按照高精度公差加工，制造成本可能存在明显差异。因此应确保供应商使用同一份工程图、同一版本图纸和相同的技术要求报价。特别要检查外径、内径、厚度、安装孔、孔位、同轴度、圆跳动、平面度等关键参数是否完全一致。

（7）比较模具费用如何处理

对于粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）产品，模具费用可能是报价差异的重要来源。供应商报价时可能出现三种情况：模具费单独收取、模具费已经摊入产品单价、供应商使用现有模具而不再收取新模具费用。因此比较报价时，应把模具费用统一折算到预计采购数量中。例如预计采购 10000 件，那么 10000 元模具费用相当于 1 元/件；如果只采购 100 件，则相当于 100 元/件。相同的模具费用，在不同采购数量下对最终价格的影响完全不同。

（8）比较制造工艺是否相同

同一种产品可以采用不同的制造路线。例如可以采用粉末压制、烧结后精加工，也可以采用钨合金坯料直接车削、铣削或钻孔。不同工艺的材料利用率、生产效率、模具成本和加工成本不同。对于小批量复杂产品，直接机加工可能减少模具投入；对于大批量规则产品，粉末冶金成形则可能更容易降低单位制造成本。所以供应商报价中最好要求说明基本制造工艺。

（9）比较材料利用率

钨合金材料价值较高，因此材料利用率值得单独关注。如果供应商 A 需要使用较大的钨

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

合金毛坯进行大量切削，而供应商 B 能够通过近净成形减少加工余量，即使两者原材料单价相同，最终产品成本也可能不同。可以进一步比较单位合格产品实际消耗多少材料，而不是只比较材料采购单价。

（10）比较加工和检测范围

报价中应明确是否包含车削、铣削、钻孔、攻螺纹、磨削等机械加工，以及是否包含尺寸检测、重量检测、密度检测和动态平衡测试。对于高速旋转配重，还应确认动态平衡测试是否包含在报价内，因为动态平衡涉及质量分布，而不是单纯测量产品重量。如果供应商 A 的报价包含完整动态平衡检测，而供应商 B 只提供尺寸和重量检测，两者实际上不是同一服务范围。

（11）比较质量标准和合格率

价格较低并不一定意味着综合采购成本较低。如果某供应商的批量产品尺寸一致性较差，需要采购方增加来料检验、返工或筛选，那么低报价可能被后续质量成本抵消。大批量采购尤其应该关注批次稳定性、过程控制能力、质量追溯和不良品处理机制。可以要求供应商说明检验标准、关键尺寸检测方法以及不合格品处理方式。

（12）比较交货周期和产能

如果两个供应商价格接近，还应比较实际产能和交货能力。例如一个供应商能够稳定每月交付 10000 件，另一个只能每月交付 2000 件，那么即使后者报价稍低，也可能增加采购方库存、停线和计划管理方面的成本。对于长期项目，还应了解供应商是否能够持续供应相同材料牌号和密度等级。

（13）比较报价的有效期和原材料价格机制

钨合金原材料成本受到钨原料、粉末和其他合金元素价格影响，因此长期订单不一定适合简单采用永久固定价格。如果项目周期较长，应确认报价有效期、原材料价格调整机制、汇率影响以及后续批次价格调整方式。这样可以避免首批报价看起来较低，但后续批次价格发生较大变化。

（14）建议制作统一的供应商报价比较表

实际采购时，可以按照以下维度进行同条件核对：

比较项目	供应商 A	供应商 B	供应商 C
材料体系	W-Ni-Fe	W-Ni-Fe	W-Ni-Cu
目标密度	18.0 g/cm³	18.0 g/cm³	18.0 g/cm³
单件重量	相同	相同	相同
重量公差	相同	相同	相同
尺寸公差	相同	相同	相同
单件价格	—	—	—
模具费用	—	—	—
机加工费用	—	—	—
检测费用	—	—	—

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

比较项目	供应商 A	供应商 B	供应商 C
表面处理	—	—	—
包装运输	—	—	—
交货周期	—	—	—
预计不良率	—	—	—
年度综合成本	—	—	—

这张表的关键作用是把不同供应商的报价统一到同一个技术和商务条件下。

（15）还要计算不同采购数量下的价格

同一个供应商的报价也应该按照采购数量进行比较。例如分别询价 100 件、1000 件、10000 件和 100000 件，可以观察模具摊销、材料采购和生产效率带来的规模效应。如果供应商提供阶梯价格，还可以计算每一个数量区间的单位综合成本，而不是只看最高采购量对应的最低单价。

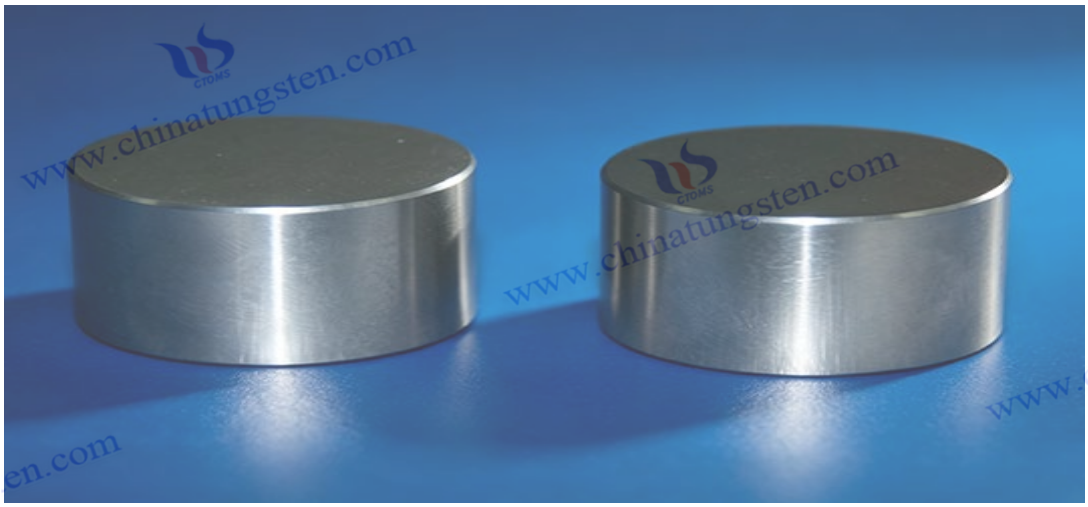
（16）中钨智造可以作为报价比较中的技术基准

中钨智造（CTIA GROUP）可根据钨合金配重的材料体系、目标密度、产品重量、尺寸公差、采购数量和加工要求，对材料用量、成形工艺、烧结、机械加工和检测方案进行综合评估。在进行多家供应商比价时，这类技术参数可以作为统一询价条件，减少因为材料等级或制造工艺不同造成的报价失真。

（17）最终应比较的是总拥有成本

如果采购量较大，最好不要只计算一次采购价格，而要进一步考虑整个使用周期的成本。可以理解为：总拥有成本 = 产品采购成本 + 模具及工装 + 运输仓储 + 来料检测 + 返工筛选 + 不良品损失 + 质量问题处理成本。例如供应商 A 单件价格低 5%，但产品批次一致性较差，需要额外进行大量筛选；供应商 B 价格稍高，但尺寸稳定、检测数据完整、交付稳定，那么两者的实际采购成本差异可能与报价表上的单价差异并不相同。因此，比较钨合金配重供应商报价时，最重要的是做到三个统一：统一材料体系和密度、统一图纸和质量要求、统一数量和交付条件。在此基础上，再比较单件价格、模具摊销、加工费用、检测费用、运输费用和质量成本，才能得到具有实际参考价值的供应商报价比较结果。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q32 如何选择钨合金配重 OEM（Original Equipment Manufacturer）供应商？

选择钨合金配重 OEM（Original Equipment Manufacturer，原始设备制造商）供应商时，不能只看报价高低，而应重点判断供应商是否真正具备材料设计、粉末冶金成形、烧结、精密加工、检测和批量交付能力。对于普通配重，重点是成本和交期；对于高精度、高速旋转或航空航天类配重，还需要进一步考察尺寸稳定性、质量一致性、动态平衡和批次追溯能力。

（1）首先确认是否具备钨合金专业制造能力

真正适合钨合金配重 OEM 项目的供应商，应当能够说明所采用的材料体系、密度范围、钨含量以及主要制造工艺，而不仅仅是从其他厂家采购成品后进行简单加工。常见材料体系包括钨-镍-铁（W-Ni-Fe，Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和钨-镍-铜（W-Ni-Cu，Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）。供应商至少应能够根据产品重量、安装空间、磁性能和机械性能要求选择合适材料。

（2）考察材料密度控制能力

钨合金配重最核心的材料指标之一就是密度。例如目标密度为 18.0 g/cm³时，1 kg 材料理论体积约 55.56 cm³。实际产品的质量不仅取决于理论密度，还与孔隙率、烧结状态和最终加工尺寸有关。因此，询价时可以要求供应商提供密度检测方法、典型密度范围和批次稳定性，而不能只看产品宣传中的最高密度。

（3）确认是否具备粉末冶金和烧结能力

对于批量钨合金配重，粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）通常是重要制造路线。完整能力通常包括粉末配比、混合、压制成形、脱脂或预处理、液相烧结以及烧结后加工。如果供应商能够覆盖主要生产环节，对材料一致性和交付稳定性的控制通常更加直接。

对于复杂配重，还需要进一步了解其是否具备专用模具设计和制造能力。

（4）确认机加工能力

钨合金配重经常需要进行车削、铣削、钻孔、攻螺纹、磨削等后续加工。供应商应根据钨

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

合金材料特性制定合理的刀具和加工参数，并能够稳定控制关键尺寸。如果产品存在大量孔槽、螺纹、台阶或高精度安装面，应重点了解供应商是否具备相应的数控加工设备以及批量加工经验。

（5）重点考察尺寸和质量公差控制

配重产品不能只关注材料密度。例如一个 100 g 配重，如果要求±0.1 g，那么质量控制要求明显高于 100 g ±2 g；如果还要求外径、中心孔、同轴度和圆跳动达到较高精度，制造和检测难度会进一步增加。因此可以要求供应商提供类似产品的尺寸检测报告、重量检测记录或典型质量控制方案。

（6）高速旋转产品要考察动态平衡能力

如果钨合金配重用于电机转子、发动机曲轴、工业转子、高速主轴等旋转设备，必须重点考察动态平衡能力。旋转系统中的离心力可以表示为 $F=m\omega^2r$，其中 F 为离心力、m 为质量、ω 为角速度、r 为偏心距离。因此，同样的产品重量，如果重心位置、同轴度或质量分布不同，实际运行状态可能存在明显差异。供应商是否具备动平衡机、专用夹具以及相应检测标准，是选择这类 OEM 供应商的重要依据。

（7）检查是否能够提供完整质量文件

不同项目对质量文件的要求不同。普通产品可能只需要出货检验报告；高要求项目则可能需要材料证明、密度报告、尺寸报告、重量报告、硬度报告、动态平衡报告以及批次追溯记录。

如果产品用于航空航天、医疗设备、精密仪器等领域，还应提前确认供应商是否能够满足项目规定的质量体系和文件管理要求。

（8）考察批量生产能力

OEM 项目与普通小批量采购不同，不能只看供应商能不能做出一个样件，还要看能否长期稳定生产。可以重点询问：单月产能是多少、现有设备负荷如何、是否有备用设备、模具寿命如何、关键工序是否存在产能瓶颈、正常批次不良率如何、是否能够满足连续交货。对于预计年采购量较大的项目，最好让供应商按照实际需求提供产能计划。

（9）比较小批量试制和大批量量产之间的衔接能力

优秀的 OEM 供应商不仅应该能够制作样件，还应该能够将样件工艺转化为稳定的批量生产工艺。比较合理的流程通常是：图纸评审 → 材料确认 → 工艺设计 → 样件制造 → 尺寸及性能验证 → 小批量试产 → 工艺优化 → 批量生产 → 批次质量控制。如果样件阶段采用一种特殊的临时工艺，而量产阶段又完全更换工艺，那么样件数据对量产的参考价值可能有限。

（10）不要忽略模具和工装能力

对于粉末冶金配重，模具设计会直接影响产品尺寸、材料利用率和生产效率。需要确认模具费用由谁承担、模具产权归谁、模具寿命是多少、模具维修由谁负责，以及项目终止后如何处理。如果预计采购量很大，还应考虑模具寿命和备模方案，避免量产过程中因模具损耗影响交货。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（11）考察设计和工艺优化能力

优秀的 OEM 供应商不应该只是按照图纸加工，还应该能够发现设计与制造之间的问题。例如某个孔槽结构可能导致压制困难、某个极小圆角可能增加刀具磨损、某个过严公差可能没有实际功能价值。供应商如果能够在正式生产前提出这些问题，并给出 DFM（Design for Manufacturability，可制造性设计）方面的优化建议，可以减少后续试制和量产风险。

（12）比较报价时要统一技术条件

选择 OEM 供应商时，至少应该让所有供应商使用同一份工程图、同一个材料要求、同一密度等级、同一重量公差、同一数量和相同检测标准进行报价。否则一家供应商报价的是 18.0 g/cm³、±0.1 g 产品，另一家报价的是 17.5 g/cm³、±1 g 产品，两者的价格没有直接可比性。

比较时还应将模具费、加工费、检测费、包装运输费等统一纳入。

（13）考察交期和供应链稳定性

对于长期 OEM 项目，供应稳定性有时比一次报价差异更加重要。需要了解供应商的原材料采购渠道、库存策略、生产周期、正常交期、紧急订单处理能力以及是否存在关键原材料单一来源。如果产品属于生产线上的关键配重，一旦供应中断，造成的损失可能远高于产品本身的采购价格差异。

（14）确认知识产权和图纸保密机制

OEM 项目通常涉及客户自己的产品结构和工程图纸，因此应确认供应商是否具有明确的图纸保密制度。如果产品属于专有结构，还可以通过保密协议明确图纸、三维模型、材料配方、工艺参数以及产品数据的使用范围。对于已经投入模具费用的项目，还应提前约定模具和专用工装的所有权。

（15）通过样件和小批量验证供应商

如果项目重要，不建议仅凭报价单选择供应商。可以先进行样件或小批量试制，通过实际产品验证材料密度、重量公差、尺寸精度、表面质量、安装配合以及动态平衡性能。对于批量项目，可以进一步观察供应商连续几个批次的质量一致性。单个样件合格并不能完全证明其批量生产能力。

（16）中钨智造可以作为综合能力型 OEM 供应商进行评估

具有三十年钨合金配重设计定制加工成功经验的中钨智造（CTIA GROUP）可根据钨合金配重项目的材料体系、目标密度、产品结构、质量公差和采购数量，提供从材料选择、粉末冶金成形、烧结到机械加工和质量检测的配套制造方案。对于需要定制配重的项目，可以结合工程图和三维模型评估产品的可制造性及批量生产方案。

（17）可以建立一套供应商评价框架

实际选择时，可以从几个维度进行综合考察：材料能力、粉末冶金能力、烧结能力、机械加工能力、模具能力、尺寸控制能力、重量控制能力、动态平衡能力、检测能力、批量产能、质量体系、交付稳定性、报价结构、技术支持和知识产权保护。不建议简单采用一个总分来机械决定供应商，而应根据产品用途确定关键指标。例如普通固定配重可以更加关注材料成本、尺寸和交期；高速旋转配重则应重点核查动态平衡、同轴度和质量分布；高

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

精度仪器配重则应重点确认尺寸稳定性、质量公差和磁性能。

选择钨合金配重 OEM（Original Equipment Manufacturer，原始设备制造商）供应商，可以按照制造能力、材料能力、精密加工能力、检测能力、批量交付能力、质量稳定性和综合成本几个方面逐层核查。真正需要比较的不是谁的报价最低，而是谁能够在明确的技术条件下持续、稳定地制造出符合重量、密度、尺寸和功能要求的产品，并在后续批量生产中保持一致性。



五、钨合金配重的加工与制造

钨合金配重使如何定制、加工与制造的？

钨合金配重并不是简单地把钨粉压成一个具有一定重量的零件，而是一个从材料设计、粉末制备、配方控制、成形、烧结致密化、机械加工、表面处理到最终检测的完整制造体系。公开资料显示，中钨在线自 1997 年开始从事钨制品研发、生产和电子商务贸易，并持续积累钨钼材料领域的设计与制造经验；其制造平台中钨智造则进一步面向高比重合金等钨钼材料开展定制化设计与制造。对于钨合金配重而言，真正决定产品质量的不是某一个单独工序，而是整个制造链条能否实现材料成分、密度、组织、尺寸、重量和质量分布的一致控制。本文就合金配重制造分为原材料准备、混合、成形、烧结、机械加工、表面处理和质量检测等几个阶段作为完整制造路线加以介绍。

一、为什么钨合金配重通常采用粉末冶金制造

钨（W，Tungsten，钨）的熔点约为 3422 ℃，如果采用普通金属材料常见的熔炼、铸造

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

路线制造高钨含量合金，需要面对极高的熔炼温度、设备要求以及成分和组织控制难题。因此，高比重钨合金通常采用粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）路线，通过粉末混合、压制成形和烧结实现致密化。相关公开技术资料也明确指出，钨及钨合金的工业制备主要依赖粉末冶金路线。其基本制造逻辑可以概括为：钨粉及粘结相粉末 → 配料 → 混合 → 成形 → 脱脂或预处理 → 液相烧结 → 烧结毛坯 → 精密机械加工 → 表面处理 → 尺寸、重量和性能检测。对于 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）等典型高比重合金，这种工艺路线尤其适合制造高密度、小体积和具有复杂质量分布要求的配重件。

二、第一步是材料体系设计，而不是直接开模生产

钨合金配重制造首先需要确定材料体系。通常以钨作为主要高密度相，再通过镍、铁或铜等粘结相构成具有一定强度和韧性的复合组织。材料设计需要根据产品最终用途确定目标密度、机械性能、磁性能、加工性能以及环境适应性。例如，普通工业配重可能重点考虑密度和成本；汽车曲轴配重需要关注强度、抗振动和加工性能；高速转子配重则更加重视材料均匀性、机械可靠性和动态平衡；靠近磁传感器的电子设备配重，则需要额外考虑磁响应。因此，客户提出 18.0 g/cm³ 并不意味着制造工作已经完成了材料选择。真正的工程设计还需要确定具体合金体系、粉末规格、粘结相比例和烧结工艺窗口。

三、原材料质量直接影响最终配重性能

高质量钨合金配重需要从粉末开始进行控制。典型原料体系包括钨粉以及镍、铁、铜等合金元素粉末。部分工业路线则由仲钨酸铵（APT，Ammonium Paratungstate，仲钨酸铵）经氧化钨（WO_3，Tungsten Trioxide，三氧化钨）再还原制备钨粉。粉末的粒度、纯度、形貌、氧含量以及批次一致性都会影响后续压制性能、烧结收缩、最终密度和显微组织。对于配重而言，尤其需要控制不同批次材料之间的密度稳定性。如果同一批产品存在明显的材料密度波动，即使外形尺寸完全相同，最终重量也可能产生偏差。

四、配料和混合决定材料组成是否均匀

确定材料配方以后，需要按照质量比例准确称量各组分，然后进行充分混合。这个过程看起来简单，实际上是钨合金制造中的重要环节。如果钨粉与粘结相混合不均匀，烧结后可能出现局部成分差异，进一步造成密度、硬度、强度和加工性能的不一致。工业生产通常会结合混料、球磨等方式改善粉末均匀性，但混合强度和时间也需要根据材料体系进行控制。过度机械作用可能改变粉末形貌，甚至引入污染；混合不足则可能导致成分偏析。因此，配料控制的核心并不是单纯把各种粉末混在一起，而是建立稳定、可重复的粉体体系。

五、成形决定配重毛坯的基本尺寸和结构

混合好的粉末需要通过成形工艺获得具有一定强度的生坯。常见方式包括单轴压制、冷等静压（CIP，Cold Isostatic Pressing，冷等静压）以及粉末注射成形（MIM，Metal Injection Molding，金属注射成形）等。公开资料也将单轴压制、冷等静压和注射成形列为钨合金配重的重要成形方式。对于圆柱、方块、圆环等规则配重，大批量生产可以优先考虑模压成形，通过模具直接获得接近最终形状的毛坯。对于结构复杂、小尺寸或具有多个细小特征的产品，则可能需要更加灵活的成形方案。这里有一个非常重要的概念：烧结前的生坯尺寸并不等于最终成品尺寸。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

六、烧结是钨合金配重制造的核心环节

成形后的生坯内部仍然存在大量孔隙，需要通过烧结实现致密化。对于高比重钨合金，液相烧结是非常重要的工艺路线。烧结过程中，粘结相在一定温度条件下形成液相，并促进钨颗粒重新排列、溶解与析出，使材料逐步致密化。最终产品的密度、显微组织、孔隙率、钨颗粒分布以及力学性能，都与烧结过程密切相关。因此，烧结温度、保温时间、升降温制度、炉内气氛、装炉方式以及烧结批次管理都需要进行控制。尤其对于精密配重，烧结收缩必须提前纳入模具和工艺设计。设计人员需要根据材料体系和历史工艺数据预测烧结收缩率，然后反向设计生坯尺寸。也就是说，最终要求成品直径 20 mm，并不代表模具简单地按照 20 mm 制造，而是需要考虑烧结后的尺寸收缩。

七、烧结后的钨合金为什么还需要机械加工

粉末冶金可以获得接近最终形状的烧结毛坯，但对于精密钨合金配重而言，通常仍需要进行机械加工。常见加工方式包括车削、铣削、钻孔、攻螺纹、磨削以及局部精整。例如一个简单的圆柱形配重，如果烧结尺寸已经满足要求，可能只需要少量精加工；但如果产品具有安装孔、螺纹、定位槽、台阶、斜面或者精密配合面，则通常需要进一步加工。这种烧结加精加工的组合方式能够兼顾材料利用率和尺寸精度，也是钨合金配重定制生产中非常实用的制造模式。

八、钨合金加工为什么比普通钢材更难

钨合金虽然不是硬质合金，但由于具有高钨含量、多相组织以及较高硬度，其加工过程对刀具和设备的要求通常高于普通钢材。车削和铣削过程中，需要综合控制刀具材料、切削参数、机床刚性、夹具刚性、冷却润滑和排屑条件。加工时不能简单套用普通钢材的参数。切削参数过高可能造成刀具快速磨损、崩刃和尺寸漂移；参数过低则可能造成加工效率下降。因此，实际生产通常需要根据具体钨合金牌号、密度、硬度以及加工特征制定工艺参数。对于关键尺寸，粗加工与精加工也通常需要分开考虑，避免一次加工过量造成尺寸失控。

九、孔、槽和螺纹是定制配重加工中的重点

很多钨合金配重并不是简单的实体块，而是需要安装到机械结构中，因此孔、槽和螺纹非常常见。例如汽车配重可能需要安装孔，转子配重可能需要定位孔或螺纹结构，电子设备配重可能需要微型安装特征。对于简单孔，可以在烧结后进行钻削；对于高精度孔，还可能需要扩孔、铰孔或磨削等后续加工。内螺纹同样可以通过攻螺纹、螺纹铣削等方式实现。具体工艺需要根据螺纹尺寸、材料牌号、孔深以及精度要求确定，而不能把某一个通用攻丝参数直接套用到所有钨合金产品。

十、尺寸精度不是唯一的质量指标

钨合金配重与普通结构件存在一个明显区别：它最终承担的是质量分布功能。因此，产品即使尺寸全部合格，如果重量不符合要求，仍然不能作为合格配重使用。例如一个设计要求 100.00 g 的配重，如果最终实际重量偏差较大，会直接影响系统的质量分布。对于旋转机械，还需要进一步控制：重量、外形尺寸、孔位、同轴度、圆跳动、重心位置、安装位置以及动态平衡。这也是为什么汽车曲轴、工业转子、无人机旋翼组件和精密惯性部件的配重制造，比普通静态配重更加复杂。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

十一、动态平衡产品需要把制造和测试结合起来

如果钨合金配重安装在高速旋转组件上，就不能只测试单个配重的重量。完整旋转组件需要在规定转速下进行动态平衡测试，测量不平衡量及其相位，然后确定修正质量和修正角度。

旋转配重产生的离心力可以表示为 $F=m\omega^2r$，其中 F 为离心力、m 为配重质量、ω 为角速度、r 为质量质心到旋转轴的距离。这个关系解释了为什么高速设备对配重质量和安装位置非常敏感：转速提高以后，离心力会按角速度的平方增长。因此，工业转子类产品通常需要经历初始平衡测试、配重安装、再次测试和残余不平衡量确认等过程。

十二、表面处理属于产品制造的后段工艺

部分钨合金配重在烧结和机械加工后还需要进行表面处理。表面处理可能用于改善外观、耐腐蚀性能、表面粗糙度或者装配性能。具体方法需要根据使用环境和材料体系选择。如果产品具有严格尺寸要求，表面处理厚度还必须纳入尺寸公差设计。例如精密孔、轴孔和螺纹不能在完成表面处理以后才考虑最终尺寸，而应该从加工余量阶段就进行整体规划。

十三、质量检测实际上贯穿整个制造过程

专业的钨合金配重制造不是最后拿卡尺测一下尺寸就结束。从原材料开始，就需要进行粉末质量和批次控制；成形阶段关注生坯重量和尺寸；烧结阶段关注烧结收缩、密度和组织；加工阶段关注尺寸和表面质量；最终产品则根据应用要求进行综合检测。常见检测项目包括密度、重量、尺寸、硬度、化学成分、金相组织、表面粗糙度以及必要的无损检测。公开的钨合金配重技术资料也将密度、力学性能、金相组织、化学成分、表面质量以及无损检测列为质量评价的重要内容。对于旋转配重，还需要增加同轴度、圆跳动、重心和动态平衡等检测项目。

十四、为什么同样是 18 g/cm³的配重，制造难度可能完全不同

假设两个产品都要求密度约 18.0 g/cm³。A 产品是一个简单圆柱体，只要求重量和外径；B 产品同样要求 18.0 g/cm³，但同时具有多个安装孔、精密螺纹、定位台阶，并要求 ±0.01 mm 级别的关键尺寸和高速动态平衡。两者虽然材料密度相同，但制造成本和工艺复杂程度完全不同。A 产品可以更多利用粉末冶金近净成形优势；B 产品则需要在材料、烧结、加工、检测和动态平衡之间建立完整的工艺链。所以，钨合金配重的制造价格不能简单按照钨合金每公斤价格乘以产品重量来计算。

十五、中钨智造三十多年经验体现

中钨在线成立于 1997 年，长期从事钨制品研发、生产和行业服务；中钨智造则依托这一长期钨钼产业积累，进一步开展高比重合金等产品的设计、研发和制造。对于钨合金配重而言，这类长期经验的价值并不仅仅体现在拥有某一种生产设备，而更多体现在材料体系选择、粉末控制、模具设计、烧结收缩经验、加工参数积累、产品结构优化以及不同应用场景之间的工艺匹配。例如客户提出需要 1 kg 配重时，专业制造企业首先需要判断的是安装空间、目标密度、形状、固定方式、使用温度、振动环境和是否旋转，而不是直接开始计算需要多少钨粉。如果是高速转子，则需要进一步判断质量中心和动态平衡要求；如果是航空控制面，则需要考虑安装位置和质量矩；如果是手机振动结构，则需要考虑尺寸、质量一致性和转动惯量（MOI，Moment of Inertia，转动惯量）；如果是高尔夫球杆，则需要考虑重心（CG，Center of Gravity，重心）和整体质量分布。同时也要考虑客户的用

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

途对于强度、磁性等要求。这就是从材料供应向工程制造转变的核心。

十六、从客户图纸到最终钨合金配重，大致经历什么流程

一个完整的定制项目通常可以按照以下工程逻辑展开：客户提供图纸或产品需求 → 确定材料体系和目标密度 → 进行可制造性分析 → 确定成形方式 → 设计模具或工装 → 粉末配料与混合 → 压制成形 → 烧结致密化 → 获得烧结毛坯 → CNC（Computer Numerical Control，计算机数控）机械加工 → 表面处理 → 重量和尺寸检测 → 必要时进行动态平衡 → 最终检验 → 包装和交付。其中任何一个环节出现偏差，都可能影响最终配重性能。例如粉末批次变化可能影响密度，成形压力变化可能影响生坯一致性，烧结制度变化可能影响收缩率和组织，加工参数变化可能影响尺寸和表面质量，而最终重量或安装位置偏差又可能影响整机平衡。因此，钨合金配重真正的制造技术，本质上是一套材料、工艺、加工和检测相互耦合的系统工程。

十七、如何理解钨合金配重的加工制造水平

可以把一个钨合金配重的制造能力分成三个层次来理解。

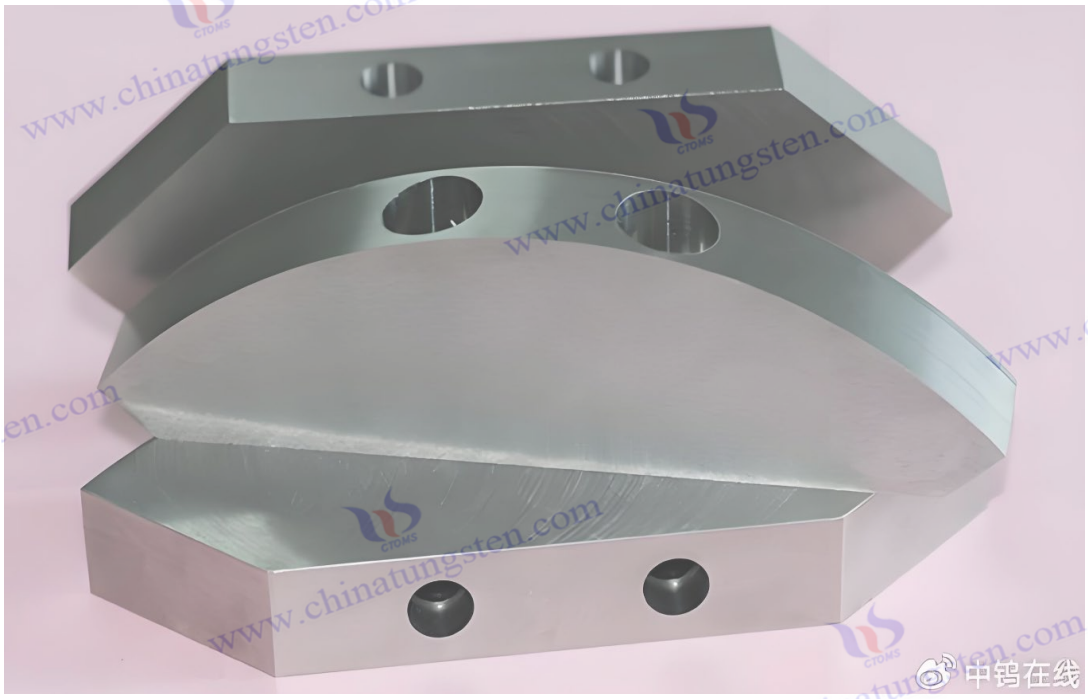
第一层是能把钨合金做出来，即实现基本的材料配方、压制和烧结。

第二层是能稳定地做出符合图纸要求的产品，包括密度、重量、尺寸、公差、孔位和表面质量。

第三层则是能够根据具体应用进行工程优化，例如在满足目标重量的情况下缩小体积、优化安装结构、控制重心、降低加工成本，并针对高速旋转、航空、汽车、电子和精密仪器等不同应用制定相应的质量控制方案。

对于真正的定制项目，第三层能力往往比单纯拥有某台加工设备更加重要。综合来看，钨合金配重的制造核心可以浓缩为一句话：先通过材料设计获得所需的密度和综合性能，再通过粉末冶金实现稳定致密化，最后通过精密机械加工和质量检测实现尺寸、重量和质量分布的准确控制。中钨在线和中钨智造公开资料所展示的高比重合金业务，也正是围绕材料、设计、研发、制造和定制化应用这一完整链条展开。如果把钨合金配重看成一个最终产品，那么粉末不是终点、烧结不是终点、加工也不是终点；真正的终点是让成品在规定的尺寸、重量、密度、重心、强度和使用环境下稳定实现设计功能。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q33 钨合金配重是如何制造出来的？

钨合金配重通常采用粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）路线制造，典型流程是钨粉及粘结相粉末配制 → 混合 → 压制成形 → 脱脂或预处理 → 高温液相烧结 → 烧结后机械加工 → 表面处理 → 尺寸、重量和性能检测。对于结构简单、数量较少的产品，也可以采用钨合金烧结坯料直接机械加工；对于大批量、结构规则的配重，则通常更适合采用成形与烧结相结合的工艺。

（1）首先确定材料体系和目标密度

制造开始前，需要根据配重的重量、安装空间、机械性能、磁性能和使用环境确定材料体系。

常见的是钨-镍-铁（W-Ni-Fe，Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和钨-镍-铜（W-Ni-Cu，Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）。钨（W，Tungsten，钨）提供主要的高密度特性，镍（Ni，Nickel，镍）以及铁（Fe，Iron，铁）或铜（Cu，Copper，铜）构成粘结相。目标密度确定后，才能进一步确定粉末配比、压制参数和烧结工艺。

（2）准备和配制钨合金粉末

生产首先需要准备符合粒度、纯度和成分要求的钨粉以及粘结相粉末。不同材料体系的粉末组成不同。高密度钨合金通常具有较高的钨含量，但实际密度并不只由钨含量决定，还受到粘结相比例、粉末粒度、压坯密度、烧结收缩和最终孔隙率等因素影响。因此，不能简单认为某一个钨含量就必然对应某一个实际密度。

（3）粉末混合

按照设计配方称量后，需要将钨粉、镍粉、铁粉或铜粉进行充分混合，使不同粉末均匀分

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

布。
混合均匀性会直接影响后续烧结组织和最终产品性能。如果混合不充分，可能造成局部成分差异，从而影响密度、尺寸稳定性和机械性能。对于批量生产，还需要控制不同批次粉末的一致性。

（4）压制成形
混合后的粉末进入模具，通过压制形成接近产品外形的生坯。例如圆柱形、圆盘形、环形和矩形配重，可以通过相应模具直接形成基本轮廓。复杂产品也可以设计带有孔位、台阶或其他特征的成形结构，从而减少后续机械加工量。但烧结过程中会发生收缩，因此模具尺寸不能简单等于最终产品尺寸，需要根据材料体系和工艺数据进行补偿设计。

（5）脱脂或预处理
部分制造路线需要在烧结前进行脱脂、预烧或其他预处理，使压坯中的成形辅助物质得到去除，并为后续高温烧结创造稳定条件。这一阶段的升温速度、气氛和温度控制都比较重要。如果预处理不合理，可能导致压坯开裂、变形或内部缺陷。

（6）高温液相烧结
这是钨合金配重制造过程中非常关键的环节。烧结时，钨颗粒逐渐形成致密的骨架结构，粘结相在高温条件下形成液相并促进钨颗粒重新排列、溶解和再析出，从而使材料逐渐致密化。
烧结完成后，产品的密度、微观组织、尺寸变化和机械性能基本形成。烧结温度、保温时间、升降温速度和炉内气氛等参数必须根据具体材料体系和产品结构进行控制。

（7）烧结收缩需要提前计算
压制后的生坯通常比最终产品尺寸大，因为烧结过程中会发生一定程度的收缩。例如设计最终外径为 20 mm，模具并不能简单按照 20 mm 制造，而需要根据材料配方和实际烧结收缩率进行尺寸补偿。这也是为什么钨合金粉末冶金产品的模具设计需要结合材料和实际烧结数据，而不能只按照最终二维图纸尺寸直接加工模具。

（8）烧结后进行机械加工
烧结完成后，产品通常已经接近最终形状，但关键尺寸可能仍需要进一步加工。常见工序包括车削、铣削、钻孔、攻螺纹、磨削和精加工等。对于圆柱形配重，可以重点加工外径、端面和中心孔；对于复杂配重，则可能需要加工多个孔槽、台阶和安装面。由于钨合金具有较高密度和特殊的组织结构，机械加工参数、刀具材料、切削速度和冷却方式需要根据具体材料牌号进行选择。

（9）复杂结构可能采用烧结加精加工的组合方式
并不是所有尺寸都必须通过模具直接成形。实际生产中经常采用近净成形加后续精加工的方式：先利用模具形成大致轮廓，再通过机械加工获得最终尺寸。这样可以在模具成本、材料利用率和加工精度之间取得平衡。对于小批量复杂产品，也可能直接从钨合金烧结坯料进行数控加工，以避免制造专用模具。

（10）根据用途进行表面处理

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

如果产品对外观、防腐或表面性能有特殊要求，可以在加工完成后进行相应表面处理。如果没有特殊要求，钨合金配重通常可以按照规定的机械加工状态直接交付。表面处理并不是所有配重的必需工序，是否采用应根据实际工作环境和装配要求确定。

（11）进行尺寸和重量检测

加工完成后，需要对产品进行最终检验。基础项目通常包括外形尺寸、孔径、厚度、重量和外观；精密产品还可能需要检测同轴度、圆跳动、平面度、位置度和表面粗糙度 Ra（Arithmetic Average Roughness，算术平均粗糙度）。重量检测尤其重要，因为配重的核心功能就是提供准确的质量。

（12）高速旋转配重还需要动态平衡检测

如果产品安装在高速旋转系统中，仅检测重量是不够的。例如两个完全相同重量的配重，如果一个产品的重心偏离旋转轴线，而另一个产品的质量分布更加均匀，实际运行状态会存在差异。旋转系统的离心力可以表示为 $F=m\omega^2r$，其中 F 为离心力、m 为质量、ω 为角速度、r 为偏心距离。因此高速转子、发动机、电机等应用通常还需要根据设计要求进行动平衡检测。

（13）批量生产时还需要进行过程质量控制

大批量钨合金配重制造不能只检测最终产品，还需要控制整个生产过程。通常需要关注粉末成分、粉末混合均匀性、压制密度、烧结温度、烧结收缩、烧结后密度、加工尺寸和最终重量等关键参数。如果某一批次的烧结收缩发生变化，即使后续加工尺寸仍能调整到合格范围，也可能造成材料利用率和加工余量发生变化，因此批次工艺稳定性非常重要。

（14）不同批量适合不同制造方式

小批量几十件或几百件的产品，如果结构复杂，可以考虑烧结坯料直接机加工，以减少专用模具投入。中等批量产品可以采用简单模具成形，再进行关键尺寸精加工。大批量规则产品则更适合充分利用粉末冶金成形，通过专用模具提高材料利用率和生产效率，再将机械加工集中在关键尺寸上。因此，同一种钨合金配重，并不存在唯一固定的制造方法，最佳工艺取决于产品结构、数量、精度和成本目标。

（15）中钨智造可以提供完整制造流程

中钨智造（CTIA GROUP）可根据钨合金配重的目标密度、材料体系、产品结构和采购数量，对粉末配制、压制成形、烧结、机械加工和质量检测进行工艺匹配，并根据最终重量、尺寸公差和应用环境确定相应的制造方案。总体来说，钨合金配重的制造核心可以概括为：材料配方决定基础性能，粉末混合保证成分均匀，压制成形确定基本轮廓，高温液相烧结实现致密化，机械加工获得最终尺寸，检测环节保证重量和精度。

对于简单的大批量配重，粉末冶金成形加烧结具有明显的规模化优势；对于小批量或复杂结构，则可以更多依靠烧结坯料机械加工。最终选择哪一种工艺，应同时考虑密度、重量、结构、精度、数量、材料利用率和综合成本。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q34 钨合金配重为什么通常采用粉末冶金？

钨合金配重通常采用粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金），主要是因为钨（W，Tungsten，钨）熔点非常高，传统熔炼和铸造成形难度较大，而粉末冶金能够绕开直接熔化大量钨的困难，通过粉末混合、压制成形和高温烧结获得高密度钨合金坯料，再配合机械加工得到最终配重。对于高密度、小体积、批量化生产的配重件，这种工艺在材料利用率、成形效率、密度控制和产品一致性方面具有较好的适应性。

（1）钨的熔点非常高，传统熔炼难度大

纯钨的熔点约 3422 ℃，远高于普通钢铁材料。因此，如果按照普通金属铸造思路直接熔化钨并进行浇注，对设备、炉体、坩埚、保护气氛和工艺控制都有很高要求。钨合金配重通常不是直接把大量钨完全熔化，而是利用钨粉末作为主要高密度相，再通过粘结相和烧结过程形成致密材料。这也是粉末冶金成为钨合金重要制造路线的基础原因之一。

（2）可以直接利用钨粉制造高密度材料

钨合金配重需要的核心性能就是高密度。通过粉末冶金，可以将高比例钨粉与镍（Ni，Nickel，镍）、铁（Fe，Iron，铁）或铜（Cu，Copper，铜）等粘结相材料进行精确配比，再通过压制和烧结形成高密度合金。常见材料体系包括钨-镍-铁（W-Ni-Fe，Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和钨-镍-铜（W-Ni-Cu，Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）。材料配比、压坯密度和烧结工艺共同决定最终产品的实际密度。

（3）容易制造接近最终形状的配重坯料

钨合金配重常见形状包括圆柱、圆盘、环形、矩形块以及带孔、槽、台阶的异形结构。通过压制模具，可以在烧结之前形成接近最终产品的几何形状，使烧结后只需要对关键尺寸

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

进行少量机械加工。例如一个简单的圆柱形配重，可以通过模压直接获得外圆和端面的大致轮廓，而不需要完全从一块较大的钨合金材料中切削出来。

（4）能够减少昂贵材料的机械去除量

钨合金的材料价值较高，如果完全采用机械加工制造配重，需要先准备较大的烧结坯料，再通过车削、铣削等方式去除大量材料。这种方式不仅浪费材料，还会增加加工时间和刀具消耗。粉末冶金则可以通过近净成形（Near-Net Shape，近净成形）使坯料接近最终尺寸，从源头上减少材料去除量。对于大批量配重，这种优势尤其明显。

（5）适合批量生产

粉末冶金的另一个重要优势是容易实现重复成形。模具确定后，可以按照相同的压制参数连续生产大量生坯，再通过稳定的烧结工艺获得批量产品。如果一套模具用于生产数千件甚至数万件配重，模具制造和设备调试等固定成本可以摊薄到更多产品上，从而降低单位制造成本。这也是为什么粉末冶金特别适合大批量钨合金配重。

（6）有利于控制产品密度

钨合金配重经常按照 17.0、17.5、18.0、18.5 g/cm³等不同密度等级进行设计。对于给定质量，配重体积满足 V=m/ρ，其中 V 为体积、m 为质量、ρ 为密度。例如 1 kg、18.0 g/cm³ 的钨合金理论体积约 55.56 cm³。粉末配方、压制密度、烧结过程和最终孔隙率都会影响实际密度，因此通过稳定的粉末冶金工艺，可以对密度和批次一致性进行较系统的控制。

（7）能够兼顾高密度和一定的韧性

纯钨虽然密度约 19.25 g/cm³，但材料本身较硬、较脆，加工和复杂结构制造存在一定困难。钨合金通过加入镍、铁或铜等粘结相，在保持高密度的同时，可以改善材料的韧性、加工适应性和整体力学性能。因此，配重不一定需要追求纯钨的最高密度，而是可以通过粉末冶金调整材料体系，在密度、强度、韧性、磁性能和加工性能之间进行平衡。

（8）复杂结构可以采用成形加精加工的方式

粉末冶金并不意味着产品压制完成后就完全不需要加工。实际生产中常采用压制成形、烧结、精密机械加工的组合工艺。大部分外形通过模具获得，中心孔、螺纹、安装面、精密外圆以及其他关键尺寸则在烧结后进行加工。这种方式能够兼顾生产效率和尺寸精度。

（9）能够降低大批量产品的综合成本

对于大批量钨合金配重，综合成本可以理解为：总成本 ≈ 材料成本 + 成形成本 + 烧结成本 + 机械加工成本 + 模具及工装成本 + 检测成本。粉末冶金前期需要投入模具和工艺开发费用，但随着生产数量增加，模具和工艺成本能够被大量产品分摊。同时，成形后机械加工量减少，也有助于降低单位产品成本。因此，粉末冶金的优势尤其适合中、大批量钨合金配重。

（10）有利于保持批次一致性

配重产品不仅要求密度高，还经常要求重量一致。如果用于多个相同设备或者批量安装，单件之间的质量差异会直接影响装配和调试效率。稳定的粉末配方、压制参数和烧结工艺可以减少不同批次之间的材料和尺寸波动。对于高速旋转配重，还需要进一步控制质量中

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

心、同轴度和圆跳动等参数。

（11）为什么不是所有钨合金配重都必须采用粉末冶金？

粉末冶金虽然适合大量钨合金配重，但并不是所有产品都必须采用这种工艺。如果只有几件或几十件样品，而且结构非常复杂，专门制作压制模具可能并不经济。此时可以采用已经烧结好的钨合金坯料进行数控加工。如果产品数量很少，直接机加工虽然材料利用率可能较低，但可以省去专用模具开发费用和部分工艺准备时间。因此，制造工艺通常可以按照产品数量进行选择：小批量复杂件可以考虑烧结坯料直接加工，中等批量可以采用简单模具加后续精加工，大批量规则件则更适合采用粉末冶金近净成形。

（12）中钨智造的工艺匹配

中钨智造（CTIA GROUP）可根据钨合金配重的材料体系、目标密度、结构尺寸、采购数量和精度要求，评估粉末配制、模压成形、烧结以及后续机械加工的组合方案。对于批量较大的规则配重，可以通过近净成形减少后续材料去除量；对于小批量或复杂结构，则可以结合烧结坯料加工方案进行成本和工艺比较。

钨合金配重采用粉末冶金的根本原因，是它能够很好地适应钨材料高熔点、高密度和高价值的特点。它不需要按照传统铸造方式大量熔化钨，而是通过粉末配比、压制和烧结实现材料致密化，再通过精加工获得最终尺寸。因此，对于高密度、体积受限、结构规则且需求量较大的钨合金配重，粉末冶金通常能够在材料利用率、成形效率、密度控制、尺寸一致性和批量成本之间取得较好的平衡；而对于少量复杂产品，则应将模具成本与机械加工成本一起比较后再确定制造路线。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q35 钨合金配重可以车削吗？

钨合金配重可以进行车削加工，而且车削是烧结后钨合金配重常用的机械加工方式之一，特别适合圆柱、圆盘、环形、轴套和带阶梯结构的配重件。只是钨合金与普通钢材相比密度高、硬度较高、钨颗粒含量高，车削时对刀具材料、刀具几何参数、切削参数、装夹方式和冷却条件要求更高。

（1）哪些钨合金配重适合车削？

车削主要适用于具有旋转对称特征的产品，例如圆柱形配重、圆盘配重、环形配重、带中心孔的配重、阶梯轴状配重以及外圆和内孔需要精加工的产品。例如一个外径 20 mm、厚度 10 mm 的圆柱形钨合金配重，可以通过车削加工外圆和端面；如果中间存在安装孔，还可以进一步进行内孔加工。对于矩形块、复杂曲面或大量非圆周孔槽结构，则通常需要结合铣削、钻削或其他加工方式。

（2）为什么钨合金车削比钢材困难？

钨合金中通常含有较高比例的钨（W，Tungsten，钨）。钨本身硬度较高，而且烧结后的材料具有特殊的两相组织结构。车削过程中，刀具需要不断切削高硬度钨颗粒，同时还会受到粘结相组织的影响。因此容易出现刀具磨损、切削刃崩损、表面粗糙度恶化以及尺寸

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

逐渐漂移等问题。这也是为什么不能简单照搬普通碳钢的车削参数。

（3）刀具材料需要根据钨合金牌号选择

钨合金车削通常需要采用耐磨性较好的刀具，并根据具体材料密度、钨含量、烧结状态和加工余量进行选择。实际加工中可能采用硬质合金刀具、涂层刀具或其他适合高耐磨材料的刀具体系。对于高密度、高钨含量材料，刀具选择尤其重要。具体刀具不能仅根据产品名称确定，而应结合实际材料牌号和供应商提供的材料性能进行试切验证。

（4）切削参数不能简单照搬普通钢材

钨合金车削时需要综合考虑切削速度、进给量、切削深度、刀具几何角度和冷却方式。通常应避免盲目追求过高切削速度，因为过高的切削速度可能加快刀具磨损和切削刃温升。加工过程中可以根据材料和刀具状态逐步优化参数。对于批量生产，更重要的是找到能够稳定维持尺寸和刀具寿命的参数组合，而不是单纯追求某一道工序的最高切削效率。

（5）粗加工和精加工应该区别对待

如果烧结坯料存在较大的加工余量，可以先进行粗车，快速去除多余材料，然后再进行精车。

粗加工主要关注材料去除效率和刀具承受能力；精加工则更加关注尺寸公差、圆度、同轴度、表面粗糙度和最终重量。对于高精度配重，不建议通过一次车削直接获得所有最终尺寸。

（6）车削可以控制配重重量

钨合金配重的重量可以通过尺寸和密度共同控制。基本关系为 $m=\rho V$，其中 m 为质量、ρ 为材料密度、V 为体积。因此车削外径、厚度或其他结构尺寸时，实际上也会改变产品质量。

例如 18.0 g/cm³的钨合金，如果加工过程中去除 0.01 cm³材料，对应质量变化约 0.18 g。对于重量公差较宽的普通配重，这种变化可能并不明显；但对于高精度小型配重，就需要将加工余量和最终称重控制结合起来。

（7）中心孔和外圆的同轴度非常重要

如果配重需要安装在旋转轴上，仅仅把外径车到规定尺寸是不够的。中心孔、外圆和端面之间的同轴度、圆跳动以及垂直关系都会影响最终安装状态。例如中心孔与外圆存在偏心，即使配重总重量完全符合要求，安装到高速旋转系统后仍可能产生额外的不平衡。所以高精度旋转配重通常需要在统一基准下完成车削，并配合专用夹具和最终检测。

（8）车削后是否需要磨削？

不一定。如果车削已经能够满足图纸规定的尺寸公差和表面粗糙度，可以直接作为最终加工工序。如果要求更严格的外径、圆度、同轴度或表面粗糙度，则可能需要进一步采用磨削或其他精加工工艺。具体是否需要磨削，应根据工程图要求决定，而不是因为钨合金材料本身就必须磨削。

（9）冷却和排屑也很重要

车削钨合金时需要控制切削区域温度，并及时排出切屑。合理的冷却和润滑可以帮助稳定切削状态、降低刀具温升，并减少切屑对加工表面的二次划伤。同时应保持机床、夹具和

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

刀具区域清洁，避免钨合金切屑影响精密定位和后续装夹。

（10）装夹方式会影响最终精度

钨合金密度高，同体积产品的重量明显高于钢材，因此装夹时需要考虑工件质量和夹紧稳定性。对于薄壁环形件或薄盘状配重，夹紧力过大可能造成局部变形；对于高精度圆柱件，如果重复装夹，还可能造成基准偏移。因此批量生产时通常需要设计稳定的专用夹具，减少重复装夹造成的尺寸和同轴度波动。

（11）烧结坯料和精加工尺寸需要配合

钨合金配重如果采用粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）制造，烧结后通常已经接近最终形状，但仍会保留一定加工余量。车削加工需要根据烧结尺寸偏差合理安排余量。

如果烧结余量太小，可能无法完全消除尺寸偏差；如果余量过大，又会增加材料去除量、加工时间和刀具消耗。所以模具尺寸、烧结收缩和后续车削余量应作为一个整体进行设计。

（12）批量生产时可以优化刀具寿命

对于数千件甚至数万件的钨合金配重，刀具寿命会直接影响单位成本。可以通过统一材料牌号、稳定烧结组织、减少不必要的加工余量、优化切削参数以及合理安排刀具更换周期来提高生产效率。对于重复性较高的产品，还可以根据实际加工数据建立刀具寿命记录，在达到规定磨损程度之前进行预防性更换，避免因刀具突然失效造成批量尺寸超差。

（13）车削并不意味着只能加工简单产品

对于较复杂的钨合金配重，可以将车削作为主要工序，再结合钻孔、铣削、攻螺纹等工艺。例如一个圆柱形配重可以先车削外圆和端面，再钻中心孔，最后进行螺纹加工；如果外圆上存在定位槽，则还可以增加铣削工序。因此，实际制造路线通常是车削与其他机械加工工艺组合，而不是单独依靠车削完成整个产品。

（14）中钨智造可以根据结构确定车削方案

中钨智造（CTIA GROUP）可根据钨合金配重的材料体系、目标密度、烧结状态、产品尺寸和精度要求，评估粗车、精车、磨削等加工工序，并结合中心孔、外圆、同轴度和重量公差确定合理的加工余量及检测方案。

（15）什么情况下车削特别有优势？

如果配重具有明显的旋转对称结构，并且外圆、内孔、端面或阶梯尺寸较多，车削通常具有较好的加工效率。如果产品数量较少，采用烧结坯料直接车削还可以减少专用模具投入；如果产品数量很大，则可以先通过粉末冶金近净成形减少毛坯加工量，再通过车削完成关键尺寸。

钨合金配重完全可以车削，而且圆柱、圆盘、环形和轴套类配重尤其适合采用车削加工。真正的难点不是能不能车，而是如何在材料高密度、高硬度和特殊烧结组织条件下，实现稳定的刀具寿命、尺寸精度、表面质量和重量控制。对于普通尺寸配重，合理的车削工艺即可满足要求；对于高精度旋转配重，则应进一步结合装夹基准、同轴度、圆跳动、重量公差和动态平衡进行整体工艺设计。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q36 钨合金配重可以铣削和磨削吗？

可以。钨合金配重不仅可以铣削和磨削，而且对于具有复杂安装结构、高精度尺寸、精密孔槽以及较高表面质量要求的配重件，铣削和磨削往往是重要的后续加工工序。不过，钨合金属于高密度、高硬度材料，尤其是高钨含量牌号，机械加工时对刀具、砂轮、机床刚性和冷却条件的要求明显高于普通钢材。

（1）钨合金配重可以进行铣削

铣削主要用于加工平面、台阶、槽、孔位周边、安装缺口以及复杂外形。对于块状、板状、异形或带安装结构的钨合金配重，可以使用数控铣床或加工中心进行加工。常见的铣削内容包括外轮廓加工、平面加工、定位槽加工、螺栓安装槽加工、减重槽加工以及异形曲面加工。对于需要与其他零部件精密配合的配重，铣削还可以用于建立基准面和安装定位面。钨合金铣削时最大的特点是刀具磨损比较明显。钨（W，Tungsten，钨）硬质相具有较高硬度和耐磨性，会对切削刃产生较强的磨蚀作用。如果设备刚性不足、刀具选择不合理或者切削参数过激，可能出现刀具磨损加快、崩刃、振动以及尺寸逐渐偏离等问题。

（2）钨合金配重也可以进行磨削

磨削特别适合用于加工对尺寸精度、形位精度和表面粗糙度要求较高的部位。例如外圆、内孔、端面以及精密配合面，都可以在车削或铣削之后采用磨削进一步修整。磨削与铣削的主要区别在于材料去除方式不同。铣削主要依靠刀具切削刃去除较多材料，而磨削利用砂轮磨粒进行微量切削和磨削，因此更适合精加工。对于已经接近最终尺寸的钨合金配重，可以通过磨削控制最终尺寸和表面质量。对于高钨含量钨合金，砂轮的磨料类型、粒度、结合剂、修整方式以及冷却条件都需要根据具体材料确定。不能简单认为某一种砂轮适用于所有钨合金牌号。

（3）为什么钨合金通常采用先铣削、后磨削？

如果配重最终尺寸要求较高，通常不会直接依靠磨削完成全部材料去除，而是采用粗加工、半精加工、精加工的工艺思路。例如，一块烧结钨合金配重首先通过铣削去除较大的加工

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

余量，同时加工出基准面和基本轮廓；随后进行精铣，将尺寸控制到接近最终要求；对于关键安装面或配合面，再采用磨削去除少量余量，从而获得更好的尺寸精度和表面质量。这种工艺可以减少砂轮负担，提高整体加工效率，同时降低过度磨削造成的热影响和尺寸控制难度。

（4）铣削和磨削需要关注哪些加工因素？

钨合金配重加工时，需要综合考虑材料体系、钨含量、密度、硬度、烧结状态、工件尺寸以及最终精度要求。常见材料包括 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜），虽然两者都属于钨基高密度合金，但具体加工表现仍会受到钨含量、粘结相比例和烧结组织影响。铣削过程中重点关注刀具耐磨性、主轴和夹具刚性、切削参数、排屑和冷却；磨削过程中则重点关注砂轮选择、砂轮修整、磨削余量、进给方式、冷却和工件温升。对于薄壁、细长或带孔槽结构的配重，还需要避免因装夹变形或加工振动导致最终尺寸偏差。

（5）表面粗糙度和尺寸精度如何控制？

如果只是普通结构尺寸，经过合理的铣削或车削即可达到要求；如果安装面需要较低的表面粗糙度或者较高的平面度、平行度，则可以增加磨削工序。对于精密配重，不能只规定一个表面粗糙度 Ra（Arithmetic Average Roughness，算术平均粗糙度）数值，还需要同时明确尺寸公差、平面度、垂直度、同轴度、圆跳动等要求。例如旋转配重的安装孔和外圆之间，如果同轴度不足，即使单独测量外圆和孔径都合格，装配后仍可能产生质量偏心。

（6）铣削和磨削与配重性能有什么关系？

钨合金配重的最终性能不仅由材料密度决定，也与加工后的质量分布有关。对于静态配重，需要保证目标质量和重心位置；对于高速旋转配重，还需要控制安装基准、质量偏心、圆跳动和动平衡。旋转系统中的离心力可表示为 $F=m\omega^2r$，其中 m 为质量、ω 为角速度、r 为质量偏心距。即使配重总质量完全符合要求，如果加工造成的偏心距较大，高速运行时仍可能产生明显的振动。因此，对于转子配重、平衡环等零件，铣削和磨削后的精度控制与最终动平衡测试通常需要结合起来考虑。

（7）不同生产批量的工艺选择也有所不同

小批量或样品阶段，可以采用烧结坯料直接进行铣削、车削和磨削，工艺调整比较灵活；中批量生产可以采用粉末冶金近净成形，再对关键位置进行铣削和磨削；大批量生产则通常尽量通过模具成形减少材料去除量，只把机械加工集中在安装面、孔位、基准面和高精度区域。

对于钨合金配重定制，中钨智造（CTIA GROUP）可根据材料牌号、目标密度、结构复杂程度、批量以及尺寸和表面质量要求，对铣削、车削、磨削等工序进行组合设计，使前期成形与后续精加工相互匹配。

钨合金配重完全可以铣削和磨削。铣削更适合外形、平面、槽和复杂结构加工，磨削更适合高精度尺寸、配合面和较低表面粗糙度加工。对于高密度钨合金，合理的工艺通常不是单纯依赖某一种加工方法，而是采用粉末冶金近净成形、铣削或车削粗精加工、磨削精加工以及最终尺寸和质量检测相结合的方式。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q37 钨合金配重件的空可以在轧制时成型也可以钻孔吗？

可以，但需要区分轧制成型和后续钻孔两种工艺。钨合金配重件上的孔、通孔、安装孔和定位孔，可以根据零件结构、材料状态、孔径精度、批量以及孔的位置要求，采用成形工艺获得，也可以在烧结或轧制后的坯料上通过钻孔加工获得。对于常见的高密度钨合金配重而言，后续机械钻孔通常更加灵活，而在成形阶段直接形成孔结构则更适合特定结构和批量生产。

（1）轧制过程中可以形成孔吗？

从工艺原理上看，钨合金可以采用轧制等塑性成形方法加工成板材、带材或特定截面材料，但不能简单理解为普通轧制就能够像冲压一样随意形成精确安装孔。轧制主要通过轧辊压力使材料发生塑性变形，从而改变厚度、截面和组织；如果需要在成形阶段形成贯穿孔或特定孔型，通常需要配合特殊轧制工具、预制孔结构或其他成形工艺。对于高密度钨合金配重，如果孔的位置、孔径和形状要求较高，直接依靠轧制形成最终孔尺寸往往不如后续机械加工容易控制。特别是孔与外圆、安装基准之间存在严格位置度要求时，通常需要在后续加工阶段进行精确定位和加工。

（2）钨合金配重可以钻孔吗？

可以，而且钻孔是钨合金配重比较常见的机械加工方式之一。烧结后的钨合金坯料可以通过钻床、数控加工中心等设备加工通孔、盲孔、螺纹底孔、定位孔以及安装孔。例如，一个圆柱形钨合金配重需要中心通孔，可以先完成外圆车削，再通过钻孔加工中心孔；如果孔径精度较高，还可以进一步采用扩孔、铰孔、磨孔等工艺进行精加工。对于具有多个安装孔的块状配重，则可以利用 CNC（Computer Numerical Control，计算机数控）加工中心一次装夹完成多个孔位，从而提高孔之间的位置精度。

（3）为什么钨合金钻孔比普通钢材更困难？

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

主要原因在于钨合金中的钨（W，Tungsten，钨）硬质相具有较高硬度和耐磨性。以常见的 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）为例，材料内部含有较高比例的钨相，钻削过程中容易产生明显的刀具磨损。如果钻头选择不合适、切削参数不合理或者机床刚性不足，可能出现钻头磨损、刃口崩损、孔径扩大、孔壁粗糙、孔位置偏移等问题。因此，钻孔时需要根据具体材料牌号和烧结状态选择合适的钻削工具，并保持稳定的装夹和冷却条件。

（4）已经烧结的钨合金能不能直接钻孔？

可以，而且这是实际生产中比较常见的路线。典型工艺可以采用粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）压制成形、烧结获得接近最终尺寸的坯料，然后再通过车削、铣削、钻孔和磨削等工序完成精密加工。如果孔结构比较简单，可以在压制阶段预留孔位，烧结后只进行少量修整；如果孔径较小、位置精度较高或者属于复杂异形结构，则通常保留一定加工余量，烧结后再通过钻孔或其他精密加工完成。这种方式的优势在于可以同时利用成形工艺减少材料去除量，又利用机械加工保证孔的最终尺寸和位置精度。

（5）孔可以直接在压制或成形阶段做出来吗？

对于粉末冶金制造的钨合金配重，模具可以通过芯杆等结构在压制阶段预制孔、台阶孔或者部分内部结构。对于规则的大批量配重，这种方式能够减少后续钻孔产生的材料损耗和加工时间。但成形孔并不一定等于最终精密孔。钨合金烧结过程中会发生尺寸收缩，因此模具设计时必须考虑烧结收缩率。如果最终要求较高的孔径精度、圆度、同轴度或位置度，通常仍需要烧结后进行精加工。可以简单理解为：成形阶段负责尽可能接近最终结构，机械加工负责把关键尺寸和精度做到最终要求。

（6）孔的位置精度比孔径本身更加重要吗？

对于配重件来说，两者都重要，但具体优先级取决于用途。如果孔只是普通安装孔，孔径公差可能是主要控制项目；如果配重安装在旋转轴、转子或高速运动机构上，那么孔的位置、同轴度和安装基准之间的关系往往更加关键。例如旋转配重的安装孔如果相对于外圆存在偏心，即使孔径完全符合要求，安装以后仍可能导致质量分布偏移。旋转系统中的离心力可表示为 $F=m\omega^2r$，其中 m 为质量、ω 为角速度、r 为质量偏心距。因此，对于高速旋转配重，需要同时控制孔径、孔位置、同轴度、圆跳动以及最终动平衡。

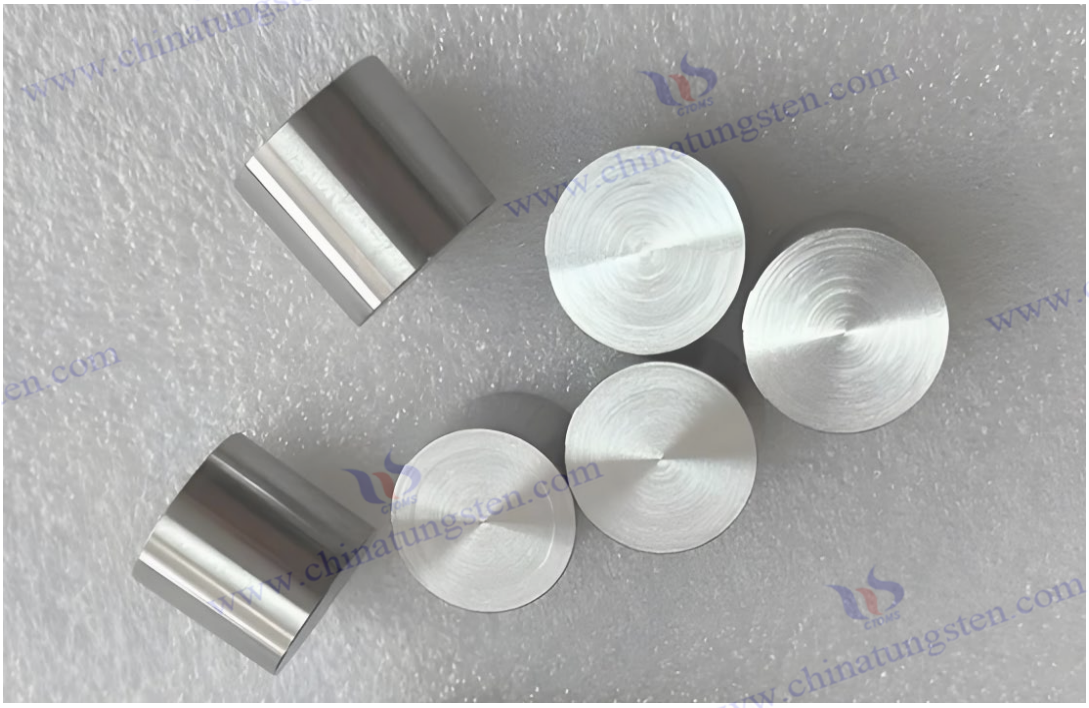
（7）轧制成形和钻孔加工应该如何选择？

如果产品是板状、带状或长尺寸材料，轧制可以用于获得基础材料形状和尺寸；如果需要在材料上形成高精度安装孔，则通常在后续加工阶段采用钻孔、铣孔、扩孔、铰孔或磨孔等方法。如果产品属于规则的大批量钨合金配重，则更常见的思路是通过粉末冶金压制和烧结预制孔结构，再对关键孔进行精加工；如果是小批量、异形配重或者孔位复杂的定制件，则可以直接使用烧结坯料，通过 CNC（Computer Numerical Control，计算机数控）加工中心完成钻孔和其他机械加工。

对于钨合金配重件，中钨智造（CTIA GROUP）可以根据材料体系、孔径、孔深、孔位精度、产品批量及最终质量要求，对成形预制孔和烧结后钻孔等工艺进行组合设计。钨合金配重件的孔既可以在成形过程中预制，也可以在烧结后的坯料上钻孔，但两者的适用场景不同。对于高精度孔，通常不建议单纯依靠轧制或压制直接获得最终尺寸，而是采用成形

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

预留、烧结收缩控制，再通过钻孔、铰孔、磨孔等后续工序保证最终精度。对于旋转配重，还应进一步把孔位精度与同轴度、圆跳动及动平衡要求结合起来考虑。



Q38 钨合金配重可以攻螺纹吗？

可以。钨合金配重可以进行攻螺纹加工，也可以通过车削螺纹、螺纹铣削等方式加工内螺纹，从而满足螺栓固定、螺杆连接、定位安装和可拆卸配重等结构需求。不过，与普通钢材相比，钨合金具有高密度、高硬度以及较强的耐磨性，攻螺纹时对丝锥、底孔尺寸、加工设备刚性和切削参数的要求更高。

（1）钨合金为什么可以攻螺纹？

常见钨合金配重通常采用 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）等材料体系。虽然其中钨（W，Tungsten，钨）的比例较高，但镍（Ni，Nickel，镍）、铁（Fe，Iron，铁）或铜（Cu，Copper，铜）等粘结相使材料并非纯钨，因此经过适当工艺处理后可以进行机械加工。攻螺纹的基本过程是先加工符合要求的底孔，再利用丝锥切削出螺纹牙型。对于精度要求较高的配重件，也可以采用螺纹铣削或者车削螺纹，以获得更好的尺寸和位置控制。

（2）攻螺纹时最大的难点是什么？

最主要的问题是刀具磨损和崩刃。高钨含量材料中的钨硬质相会对丝锥产生明显的磨蚀作用，而螺纹加工本身又属于较容易产生卡屑和局部受力集中的加工过程。如果底孔过小，丝锥受到的切削负荷会明显增加；如果底孔过大，则会导致螺纹牙型不完整、有效啮合深度不足。加工过程中还可能出现丝锥扭矩升高、螺纹表面粗糙、牙型损伤甚至丝锥断裂等情况。

所以钨合金攻螺纹不能简单按照普通碳钢的参数直接加工，而应根据具体材料牌号、钨含量、螺纹规格和加工深度进行工艺调整。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（3）底孔尺寸非常重要

攻螺纹前首先需要确定合适的底孔尺寸。以公制普通螺纹为例，常用经验关系可以近似表示为底孔直径≈螺纹公称直径−螺距，但实际生产不能只依靠这个近似公式，还需要根据螺纹标准、材料、丝锥类型以及要求的螺纹啮合率确定最终尺寸。例如 M6×1（Metric Thread，公制螺纹，公称直径 6 mm、螺距 1 mm）通常会采用约 5 mm 左右的底孔，但对于钨合金这种较难加工材料，实际底孔尺寸应结合目标螺纹等级、丝锥制造商推荐值和具体材料状态进行确认。对于盲孔，还必须额外考虑孔深、有效螺纹深度以及丝锥前端无效牙长度，避免实际有效螺纹长度不足。

（4）什么情况下适合直接攻螺纹？

对于中等直径、结构规则、螺纹深度适中的安装孔，烧结后的钨合金配重可以直接进行攻螺纹。比较典型的应用包括配重块安装孔、设备固定孔、调整螺杆孔以及可拆卸配重的连接孔。

如果螺纹较小、较深，或者材料密度和钨含量较高，则需要更加谨慎。对于特别小的螺纹，丝锥本身尺寸较小，抗扭能力有限，钨合金的切削阻力和材料磨蚀可能进一步增加断丝锥风险。

（5）螺纹铣削有时比传统攻丝更灵活

对于数控加工中心生产的钨合金配重，螺纹铣削也是一种可考虑的方案。螺纹铣削使用旋转刀具沿螺旋轨迹逐渐形成螺纹，与一次性切削整个螺纹相比，在某些复杂或高价值零件上具有较好的工艺灵活性。其优势之一是刀具发生磨损后更容易通过加工参数和刀具补偿进行调整，而且加工过程对单个孔的独立控制能力较强。对于高精度、多规格螺纹或者不适合普通丝锥加工的结构，可以考虑螺纹铣削。

（6）螺纹加工完成后还需要检查什么？

不能只检查螺栓能否旋入。对于精密钨合金配重，还需要根据图纸要求检查螺纹通止、螺纹有效深度、孔径、螺纹位置以及与安装基准之间的位置关系。如果配重用于高速旋转部件，还要重点控制螺纹孔相对于旋转轴线的位置精度。因为螺纹孔如果存在明显偏心，安装螺栓或其他连接件后可能改变整体质量分布。对于旋转配重，最终还应结合质量、重心、同轴度、圆跳动以及动平衡进行综合评价。

（7）制造工艺如何安排比较合理？

对于粉末冶金制造的钨合金配重，可以在压制阶段预留安装孔位置，烧结后再加工底孔和螺纹；对于要求较高的螺纹精度，则可以适当增加孔的精加工工序，再进行攻丝。比较典型的路线可以是：粉末冶金压制成形→烧结→车削或铣削基准面→钻底孔→必要时扩孔或精加工→攻螺纹→去毛刺→螺纹检测→尺寸和质量检测。对于大批量产品，可以通过模具直接预制孔位，以减少钻孔材料去除量；对于小批量或复杂定制件，则可以采用烧结坯料后 CNC（Computer Numerical Control，计算机数控）加工，更容易调整孔位和螺纹尺寸。

中钨智造（CTIA GROUP）可根据钨合金配重的材料体系、螺纹规格、孔径、螺纹深度、精度等级和生产批量，选择攻丝、螺纹铣削或其他组合加工方案，并结合后续螺纹检测和配重质量控制进行工艺设计。总之，钨合金配重可以攻螺纹，而且能够满足多种螺纹连接

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

结构，但加工难度高于普通钢材。实际生产中，底孔尺寸、丝锥选择、机床刚性、冷却润滑、螺纹深度以及刀具磨损控制都是关键因素。对于高精度或高价值配重件，还可以根据具体情况采用螺纹铣削，并在加工完成后对螺纹尺寸、位置精度和整体质量分布进行检测。



Q39 钨合金配重为什么容易磨损刀具？

钨合金配重在车削、铣削、钻孔、攻螺纹等机械加工过程中比较容易产生刀具磨损，核心原因是材料内部含有较高比例的钨（W，Tungsten，钨）硬质相。钨本身具有很高的硬度、强度和耐磨性，钨合金又通常采用钨颗粒与镍（Ni，Nickel，镍）、铁（Fe，Iron，铁）或铜（Cu，Copper，铜）等粘结相形成的复合组织，所以加工时刀具会持续受到硬质颗粒的磨蚀和较大的机械负荷。

（1）高钨含量带来的强烈磨蚀作用

常见高密度钨合金的钨含量可以达到约 90%～97%，大量钨相分布在粘结相中。切削刀具接触材料时，并不是在切削一种均匀、柔软的金属，而是在不断切削和挤压大量高硬度钨相。

这种加工条件容易造成刀具刃口的磨粒磨损。随着切削时间增加，刃口逐渐变钝，切削力升高，最终可能出现尺寸精度下降、表面粗糙度恶化甚至刃口崩损。

（2）钨合金的硬度和耐磨性本身就是它的优势

钨合金配重之所以能够在较小体积内提供较大质量，与钨的高密度和材料体系有关；同时，其较好的耐磨性能也是许多工程应用选择钨合金的重要原因。但材料在服役环境中的耐磨性与刀具加工时的可切削性是两个不同概念。材料越耐磨，并不意味着越容易加工。钨合金在使用过程中不容易被磨损，恰恰意味着加工刀具在切削它时需要承受更高的磨损负荷。因此，钨合金适合作为耐磨、高密度配重材料，与它是否容易机械加工并不是同一个评价维度。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（3）钨合金是多相组织，也会增加刀具冲击

以 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）为例，材料通常由钨富集相和粘结相组成。切削过程中，刀具会不断经历不同组织区域。

如果材料内部组织不均匀、钨颗粒尺寸较大或者局部硬质相分布发生变化，刀具受到的切削负荷可能出现波动。对于铣削、断续切削以及孔加工，这种负荷变化尤其容易造成刃口微崩。

（4）刀具磨损会进一步影响配重尺寸

刀具磨损并不仅仅意味着刀具寿命缩短，它还会直接影响钨合金配重的最终尺寸。例如外圆车削时，刀具逐渐磨损会使实际加工尺寸发生变化；铣削槽宽时，刀具磨损可能导致槽尺寸偏离图纸要求；钻孔时，钻头磨损可能造成孔径变化、孔壁质量下降或者孔的位置精度受到影响。对于精密配重，这些尺寸变化最终还可能影响质量分布和重心位置。因此，加工过程中需要建立刀具磨损监控和尺寸补偿机制，而不能只在加工完成后进行一次最终检查。

（5）切削速度过高会加剧刀具磨损

钨合金加工时并不是切削速度越高效率就越高。过高的切削速度会增加切削区域的温度和摩擦，同时加速刀具磨损。实际参数需要根据钨合金牌号、钨含量、硬度、刀具材料和刀具几何结构确定。对于不同材料和刀具，适合的切削速度、进给量以及切削深度可能存在明显差异，因此通常应以材料供应商和刀具制造商提供的推荐参数作为起始依据，再通过试切进行优化。

（6）刀具材料和几何参数非常关键

加工钨合金不能简单照搬普通钢材的刀具方案。实际生产中可以根据工序和材料状态选择硬质合金（Cemented Carbide，硬质合金）、PCD（Polycrystalline Diamond，多晶金刚石）或 CBN（Cubic Boron Nitride，立方氮化硼）等刀具体系。同时，刀具刃口状态、前角、后角、刀尖圆弧、槽型以及刀具涂层都会影响实际加工表现。对于高钨含量材料，通常更加重视刃口强度、耐磨性和加工稳定性，而不是单纯追求极高的切削效率。

（7）机床刚性和装夹也会影响刀具寿命

钨合金密度很高，加工时切削力可能比较大。如果工件装夹不牢、刀杆悬伸过长或者机床刚性不足，就容易出现振动。振动会使刀具承受周期性冲击，尤其在铣削、断续切削和薄壁结构加工中，可能导致刀具微崩甚至突然断裂。所以加工钨合金配重时，需要尽可能缩短刀具悬伸、提高工件装夹刚性，并保证机床主轴和刀具系统具有足够的稳定性。

（8）冷却和排屑同样不能忽视

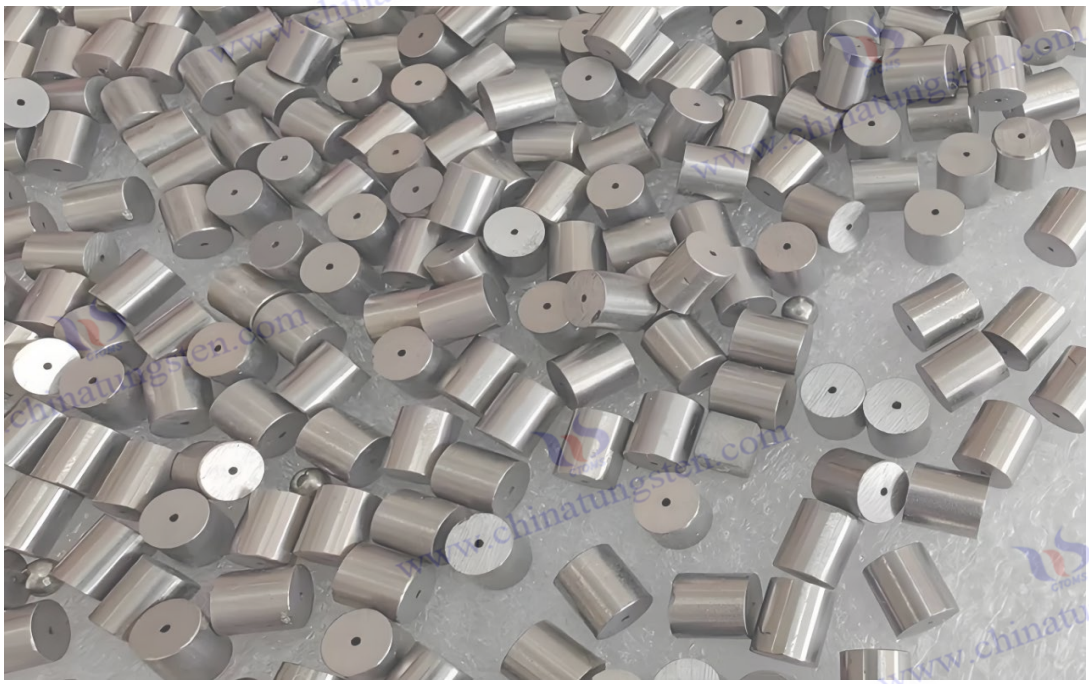
合理的冷却可以帮助控制切削区域温度，并及时带走切屑。如果切屑滞留在加工区域，可能造成二次摩擦和重复切削，从而进一步加速刀具磨损。对于钻孔、深槽和深孔加工，排屑尤其重要。具体采用何种冷却方式，应结合刀具材料、机床条件、加工深度和钨合金牌号确定，不能简单套用普通钢材的冷却方案。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（9）如何降低刀具磨损？

比较有效的思路是从材料、刀具、设备和工艺四个方面同时优化：选择组织均匀的钨合金坯料、根据 W（Tungsten，钨）含量选择耐磨刀具、保持机床和工件具有足够刚性、采用合理的切削参数和冷却方式，同时建立刀具寿命管理和尺寸补偿制度。对于批量生产，还可以通过粉末冶金近净成形减少机械加工余量。需要去除的材料越少，刀具实际切削时间通常越短，也有利于降低单位产品的刀具消耗和加工成本。中钨智造（CTIA GROUP）在钨合金配重加工中，可以根据 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 等材料体系以及零件结构、加工余量和精度要求，对车削、铣削、钻孔、攻螺纹和磨削工序进行匹配，并针对刀具磨损和尺寸稳定性制定相应的加工方案。

钨合金配重容易磨损刀具，并不是因为材料单纯的密度高，而主要是因为高比例钨硬质相带来的高硬度、强耐磨性以及多相组织特征。加工时如果再叠加刀具选择不合理、切削速度过高、装夹刚性不足或冷却排屑不充分，就会进一步加剧磨损。因此，钨合金配重的加工重点并非单纯提高切削速度，而是通过合适的刀具、稳定的设备、合理的参数和近净成形工艺，在加工效率、刀具寿命和尺寸精度之间取得平衡。



Q40 钨合金配重加工如何控制尺寸公差？

钨合金配重加工时，尺寸公差控制通常需要从材料、烧结、加工基准、刀具、切削参数、测量补偿以及最终检验多个环节同时控制。尤其是采用粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）制造的钨合金配重，烧结过程中存在收缩，后续车削、铣削、钻孔和磨削又会产生加工尺寸变化，所以不能只依靠最后一道加工工序控制公差，而应建立从成形到精加工的全过程尺寸控制体系。

（1）首先控制烧结后的坯料尺寸

钨合金配重常采用粉末冶金压制和烧结成形。压制时的生坯尺寸并不等于最终产品尺寸，

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

烧结过程中会发生明显的体积收缩，因此模具尺寸必须根据材料配方、压制密度和实际烧结收缩率进行补偿。如果烧结收缩控制不稳定，即使后续 CNC（Computer Numerical Control，计算机数控）加工精度很高，也会增加加工余量波动。因此，大批量生产时需要重点控制粉末粒度、混料均匀性、压制密度、烧结温度、烧结时间和炉内工艺一致性。

（2）建立稳定的加工基准

精密钨合金配重加工时，需要明确统一的加工基准。例如圆柱形配重可以以中心轴线和端面作为主要基准，块状配重则可以以基准底面、侧面和端面建立坐标体系。如果每道工序使用不同的定位基准，即使每个尺寸单独测量都合格，也可能出现孔位偏移、同轴度不足、平面之间位置关系错误等问题。因此，对于多工序配重件，应尽可能减少重新装夹，并让车削、铣削、钻孔和磨削共享稳定的基准体系。

（3）粗加工和精加工要分开

对于尺寸要求较高的配重件，不宜一次加工到最终尺寸。通常可以先进行粗加工，去除主要余量，再进行半精加工，最后通过精车、精铣或磨削达到最终尺寸。这样做可以减少粗加工产生的切削力、热量和装夹应力对最终尺寸的影响。特别是薄壁、细长或结构复杂的钨合金配重，粗加工后适当稳定，再进行精加工，尺寸控制通常更加可靠。

（4）刀具磨损必须纳入公差控制

钨合金中的高比例钨（W，Tungsten，钨）硬质相会造成明显的刀具磨损。刀具刚开始加工和使用一段时间后的实际切削尺寸可能不同，如果不进行补偿，就可能出现首件合格、后续批量产品逐渐超差的情况。例如外圆车削时，可以通过定期测量外径变化来建立刀具磨损补偿；铣削槽和钻孔时，也需要监控刀具直径及刃口状态。对于大批量生产，可以根据实际刀具寿命设定换刀周期，而不是等到加工尺寸已经超差后才更换刀具。

（5）切削参数需要保持稳定

切削速度、进给量和切削深度变化都会影响切削力、温度和刀具磨损，从而影响最终尺寸。钨合金不能简单按照普通钢材的加工参数进行生产。实际参数应根据 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）、W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）等具体材料体系、钨含量、硬度以及刀具类型进行试切和优化。批量生产后应尽量固定成熟的工艺参数，避免操作人员随意调整造成尺寸波动。

（6）高精度尺寸可以采用磨削控制

如果配重的关键尺寸要求较高，仅依靠车削或铣削可能不够，可以将关键表面留出少量磨削余量，最后通过磨削进行精加工。例如轴孔、外圆、精密安装面等部位，可以采用车削或铣削完成大部分材料去除，再通过磨削控制最终尺寸、圆度和表面粗糙度。对于需要较低 Ra（Arithmetic Average Roughness，算术平均粗糙度）的表面，磨削也更容易达到相应要求。

（7）测量要贯穿整个加工过程

尺寸公差控制不能只依靠最终检验。比较合理的方式是建立首件检测、过程检测和最终检测。

首件加工完成后，需要确认关键尺寸和基准关系；批量加工过程中定期抽检外径、内径、

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

长度、孔径、槽宽等关键尺寸，并根据测量结果调整刀具补偿；最终产品则进行完整尺寸检验。
对于高精度配重，还可以根据图纸要求检测圆度、平面度、垂直度、同轴度、位置度以及圆跳动等几何公差。

（8）质量公差和尺寸公差需要同时控制

钨合金配重与普通机械零件有一个特殊要求，就是除了尺寸以外，还必须控制最终质量。配重质量可以表示为 $m=\rho V$，其中 m 为质量、ρ 为实际材料密度、V 为实际材料体积。如果尺寸全部合格，但实际材料密度存在波动，最终重量仍可能出现偏差。所以高精度配重通常需要同时控制材料密度、零件体积和单件质量。对于同一批产品，还应关注密度一致性，避免通过单纯修改外形尺寸来补偿材料密度异常。

（9）旋转配重还要控制形位公差和质量分布

如果钨合金配重安装在转子、曲轴、飞轮或其他高速旋转部件上，仅控制长度、直径和孔径是不够的。旋转系统中的离心力可以表示为 $F=m\omega^2r$，其中 m 为质量、ω 为角速度、r 为质量偏心距。因此，需要重点控制安装孔与旋转轴线之间的位置关系、同轴度、圆跳动以及配重实际重心位置。对于这类产品，加工完成后通常还需要进行动平衡检测，根据测试结果进行微量去重、修正或重新加工。

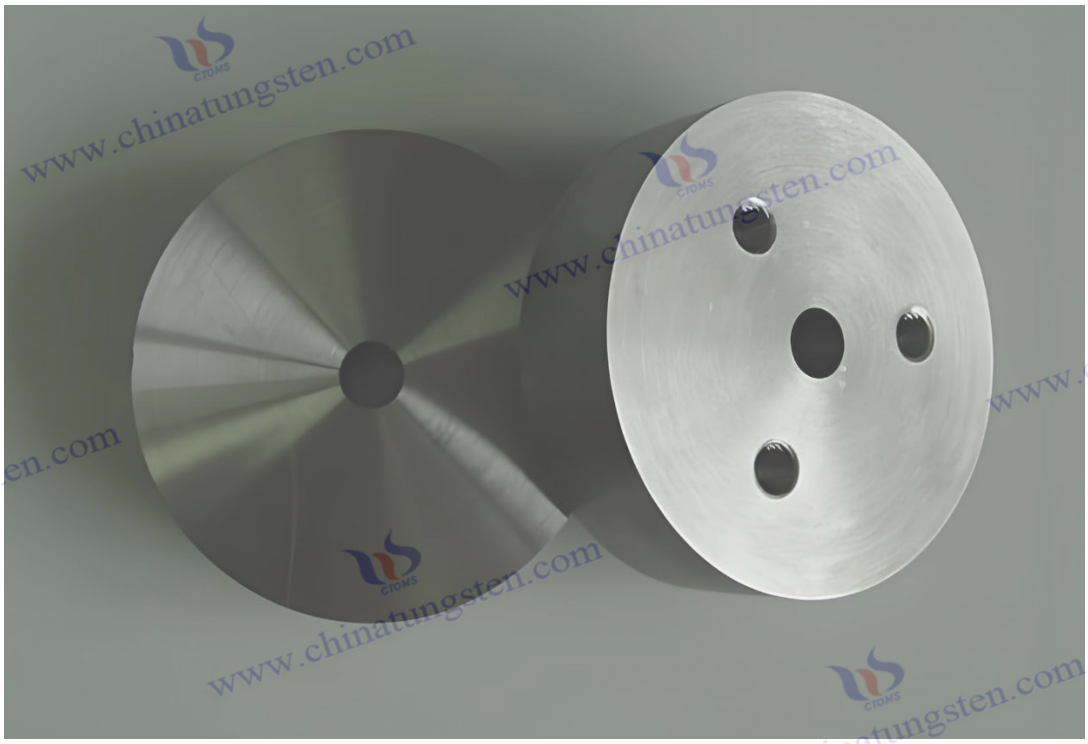
（10）不同批量采用不同的公差控制策略

小批量钨合金配重可以更多依靠 CNC 加工和逐件检测，通过精密车削、铣削和磨削实现尺寸控制；中批量产品可以采用粉末冶金近净成形，再通过机械加工控制关键尺寸；大批量产品则需要重点建立稳定的模具尺寸、烧结收缩、加工余量和刀具寿命数据库。对于批量产品，还可以使用 SPC（Statistical Process Control，统计过程控制）监控关键尺寸的平均值和波动趋势，在尺寸接近公差边界之前进行刀具补偿或工艺调整，而不是等产品已经超差后再处理。

中钨智造（CTIA GROUP）在钨合金配重定制中，可以根据材料牌号、目标密度、产品结构和尺寸公差要求，对粉末冶金成形、烧结收缩控制、CNC 加工、磨削及最终尺寸和质量检测进行工艺匹配，并针对关键尺寸建立相应的过程控制方案。

钨合金配重的尺寸公差控制是一个全过程问题，可以概括为：稳定材料和烧结工艺、合理设计成形余量、建立统一加工基准、粗精加工分离、控制刀具磨损、稳定切削参数、必要时采用磨削精加工，再通过过程测量和最终检验进行闭环控制。对于普通配重，控制主要尺寸和重量即可；对于高精度及高速旋转配重，则还需要进一步控制同轴度、圆跳动、孔位精度、质量公差和动态平衡。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



六、汽车、航空与旋转机械领域的钨合金配重有哪些？

汽车、航空与旋转机械领域的钨合金配重，主要围绕质量平衡、重心调整、惯量控制以及有限空间内的高密度配重展开。三类领域虽然应用对象不同，但共同特点都是需要在特定位置精确增加质量，而钨合金能够利用较高密度实现小体积配重。

汽车领域

汽车中的钨合金配重主要应用于对质量分布和旋转平衡要求较高的部件。发动机曲轴配重是比较典型的应用。曲轴高速旋转时，需要通过合理的质量分布平衡曲柄机构产生的旋转和往复惯性载荷。钨合金密度高，可以在曲轴空间受限的位置集中布置较大的质量。对于 1 kg、密度 18.0 g/cm³的钨合金，其理论体积约 55.56 cm³，而密度 7.85 g/cm³的钢材约需要 127.39 cm³。传动轴、半轴以及其他旋转组件也可能采用局部高密度配重，通过动平衡测试确定配重质量和安装角度。旋转部件的不平衡力可近似表示为 $F=m\omega^2r$，其中 m 为不平衡质量、ω 为角速度、r 为偏心半径。随着转速提高，质量分布误差产生的影响会明显增加。汽车轮毂、车轮和悬架系统中的特殊配重也可能采用钨合金，尤其适用于安装空间有限、需要较大局部质量或者对质量布局有特殊要求的高性能车辆和赛车。赛车还可能利用高密度配重调整前后、左右质量分配以及局部重心位置。此外，在汽车毫米波雷达、摄像头、LiDAR（Light Detection and Ranging，激光雷达）和云台式传感器等设备中，高密度配重也可用于调整小型运动机构的惯量和重心。

航空领域

航空领域对配重的要求更加严格，主要应用包括控制面质量平衡、配平配重、旋翼和螺旋桨平衡以及惯性系统配重。飞机升降舵、副翼、方向舵等控制面可能设置质量平衡配重。其主要目的是调整控制面的质量中心和惯性特性，使其满足气动弹性和颤振（Flutter，颤

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

振）设计要求。钨合金可以在控制面内部有限空间内提供较大的质量，因此适合布置在前缘或铰链附近等特定位置。飞机的配平系统也可能使用高密度钨合金配重。当需要在某一特定位置增加质量以调整飞机重心（CG，Center of Gravity，重心）时，高密度材料可以减少配重体积。质量矩可以表示为 M=mr，其中 m 为配重质量、r 为配重质心到参考轴的距离，因此配重位置与配重质量同样重要。螺旋桨、旋翼和其他高速旋转航空部件则更加关注动平衡。通过动平衡设备测量不平衡量和相位角后，可以在指定校正平面安装钨合金配重，或者根据设计采用去重方式进行修正。无人机同样存在类似应用，包括机体重心调整、云台配重、旋翼系统平衡和任务载荷配重。对于小型无人机而言，高密度带来的体积优势尤其明显。

旋转机械领域

旋转机械是钨合金配重应用中与动态平衡关系最直接的领域之一，典型设备包括电机、发电机、工业风机、压缩机、泵、离心机、高速主轴和部分精密转子。电机和发电机转子在高速旋转时，如果质量分布相对于旋转轴不均匀，就会产生周期性振动。通过动平衡测试，可以确定不平衡量所在的角度和校正平面，再利用钨合金配重进行局部加重。对于细长转子，通常需要考虑两个校正平面。单平面配重主要适合较简单的平衡问题，而双平面配重可以同时修正静不平衡和偶不平衡。最终需要通过再次动平衡测试确认剩余不平衡量是否达到规定要求。风机、泵和压缩机叶轮同样可能需要局部配重。特别是在叶轮尺寸受到限制、配重安装空间狭窄的情况下，钨合金能够通过较小体积提供较大的质量修正。高速主轴和精密离心机构对配重质量、安装角度、同轴度、跳动以及配重固定可靠性要求较高。对于高速旋转件，配重并非简单地越重越好，而需要根据测试结果精确确定质量和位置。

三类领域的典型配重可以这样理解

应用领域	典型钨合金配重	主要作用
汽车	曲轴配重、传动轴配重、轮毂配重、赛车配重	旋转平衡、质量分配、重心调整
航空	控制面质量平衡块、配平配重、旋翼配重、螺旋桨配重、无人机配重	质量平衡、重心控制、颤振相关设计、旋转平衡
旋转机械	电机转子配重、发电机转子配重、风机配重、泵叶轮配重、压缩机配重、高速主轴配重	动平衡、降低振动、控制不平衡量

为什么这三个领域都重视钨合金

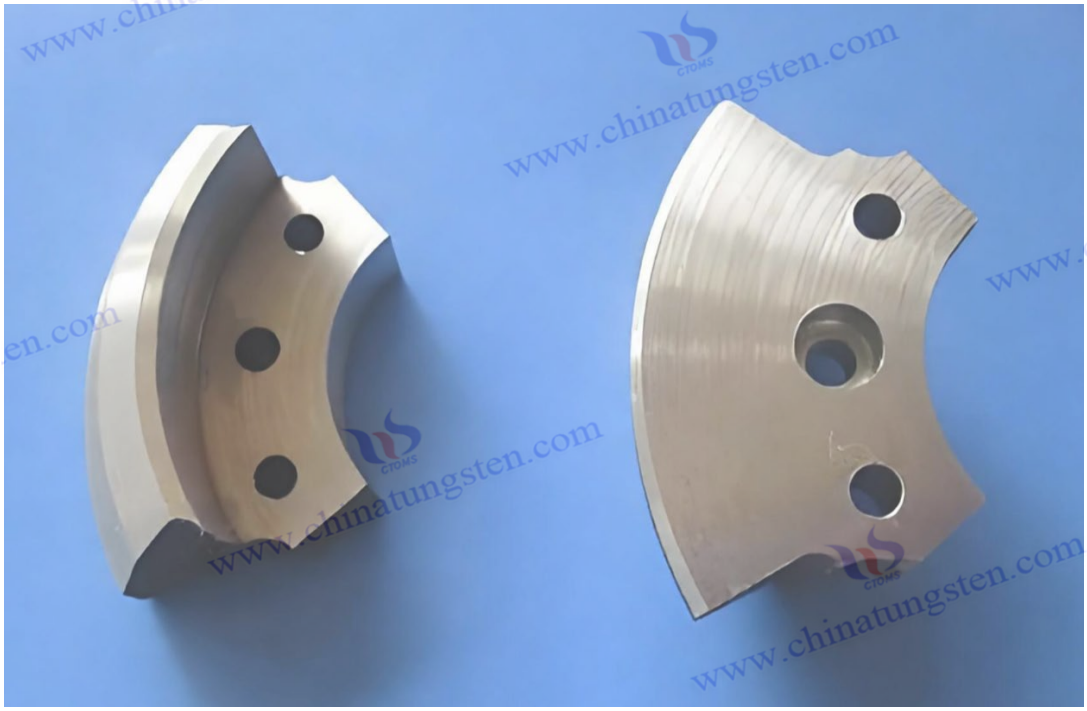
最直接的原因是密度。常见高密度钨合金密度约 17～18.5 g/cm³，明显高于普通钢材。相同质量条件下，密度越高，所需体积越小，可以将配重集中布置在有限空间内。第二个优势是质量布局自由度。配重真正影响的是质量分布，而不是单纯的总质量。对于质心、质量矩和转动惯量等参数，配重的位置非常重要。转动惯量可以表示为 $I=\Sigma m_i r_i^2$，因此把质量放在距离旋转轴更远的位置，通常会对惯量产生更明显的影响。第三个优势是可以根据不同结构进行定制。钨合金可以加工成块状、圆柱、圆盘、环形、弧形、螺钉式以及各种异形配重，并通过粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）和后续车削、铣削、钻孔、攻螺纹、磨削等工艺满足不同结构要求。

中钨智造（CTIA GROUP）可针对汽车旋转部件、航空控制面和旋翼配重、工业转子及高速机械平衡件，根据目标质量、密度、安装空间、配重位置和精度要求进行钨合金配重定制。

总体而言，汽车领域更加侧重发动机和传动系统的质量平衡以及车辆质量布局，航空领域

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

更加关注控制面质量平衡、重心和高速旋转部件平衡，而旋转机械则重点关注转子动平衡和高速运行振动控制。三者共同利用钨合金高密度、小体积的特点，实现传统低密度材料难以完成的局部质量集中和精确平衡。



Q41 汽车为什么使用钨合金配重？

汽车使用钨合金配重，核心原因是钨（W，Tungsten，钨）合金具有很高的密度，可以在有限安装空间内获得较大的配重质量，同时具备较好的强度、耐磨性和尺寸稳定性。对于发动机、传动系统、车轮、悬架以及赛车等对质量分布和空间尺寸比较敏感的部位，钨合金能够提供普通钢配重难以实现的高质量密度。

（1）最直接的优势是体积小、单位体积质量大

常见高密度钨合金配重的密度大约为 17～18.5 g/cm³，而普通钢的密度约为 7.85 g/cm³。同样需要 1 kg 配重时，密度 18.0 g/cm³的钨合金体积约为 55.56 cm³，而钢约为 127.39 cm³，钨合金所需体积约减少 56%。对于汽车而言，这一点非常重要，因为发动机舱、轮毂、悬架和传动机构内部的安装空间通常有限。如果使用钢配重需要较大的尺寸，而钨合金可以在保持相同质量的情况下明显缩小零件体积。

（2）可以更方便地进行质量分布设计

汽车很多系统不仅需要增加一定质量，还需要把质量放置在特定位置。例如曲轴需要进行旋转质量平衡，传动轴需要进行动平衡，车轮需要进行质量补偿，悬架系统也可能需要在有限空间内布置额外质量。钨合金配重可以通过缩小体积，将需要的质量集中布置在指定区域。对于旋转部件而言，质量分布尤其重要，因为离心力可以表示为 $F=m\omega^2r$，其中 m 为质量、ω 为角速度、r 为质量相对于旋转轴线的距离。因此，配重的位置、质量以及偏心距需要结合整个旋转系统进行设计。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

（3）汽车发动机中可以用于曲轴配重

发动机曲轴在高速旋转过程中，需要与活塞、连杆等运动部件形成合理的质量平衡。如果原有结构受到空间、转速或轻量化设计限制，传统配重可能需要较大的尺寸。钨合金由于密度高，可以在相对较小的空间内提供较大的质量，因此可以用于部分高性能发动机和赛车发动机的曲轴配重设计。通过合理布置配重质量，可以帮助调整旋转系统的质量分布和惯性特性。

（4）传动系统也可能使用钨合金配重

传动轴、驱动轴、飞轮以及其他高速旋转零件在制造和装配后可能存在质量不均匀、几何偏心或质量分布偏差，需要通过配重进行平衡修正。对于安装空间受限的传动部件，钨合金配重可以采用较小的块状、环状或异形结构，通过螺栓、焊接、压装或其他方式固定在指定位置。这样可以减少配重本身对周围零件空间的占用。

（5）车轮和悬架系统也存在空间优势

汽车车轮需要进行动平衡时，传统方式通常使用体积相对较小的配重块。如果进一步要求减少配重体积、提高单位体积质量，钨合金具有一定优势。在悬架系统中，配重还可能用于调整质量分布、改善运动部件的惯性特性或满足特定结构设计要求。尤其是赛车和高性能车辆，由于结构空间紧凑，对配重的尺寸和安装位置更加敏感。

（6）赛车更加重视钨合金配重的高密度特点

赛车使用钨合金配重的一个典型原因，是需要在非常有限的空间内调整车辆质量分布。在赛车设计中，配重并不只是简单增加重量，还涉及前后轴质量分配、左右质量分布以及整车重心位置。钨合金可以将较大的质量集中在较小体积内，使工程师更容易把配重布置到指定位置，同时减少配重对其他机械结构和空气动力学部件的空间干扰。例如需要增加一定质量并尽量靠近车辆底部时，高密度钨合金可以采用薄块、条块或定制异形件进行布置，从而兼顾质量、尺寸和安装空间。

（7）钨合金还具有较好的耐磨和尺寸稳定性

汽车配重在长期振动、冲击和温度变化环境下工作，因此材料不能只考虑密度，还需要考虑机械强度、耐磨性以及长期尺寸稳定性。钨合金通常由钨硬质相与镍（Ni，Nickel，镍）、铁（Fe，Iron，铁）或铜（Cu，Copper，铜）等粘结相组成。常见的 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）材料可以根据具体用途进行选择。不过，具体机械性能、磁性能和加工性能需要以实际材料牌号和制造工艺为准，不能仅根据密度判断。

（8）并不是所有汽车配重都需要钨合金

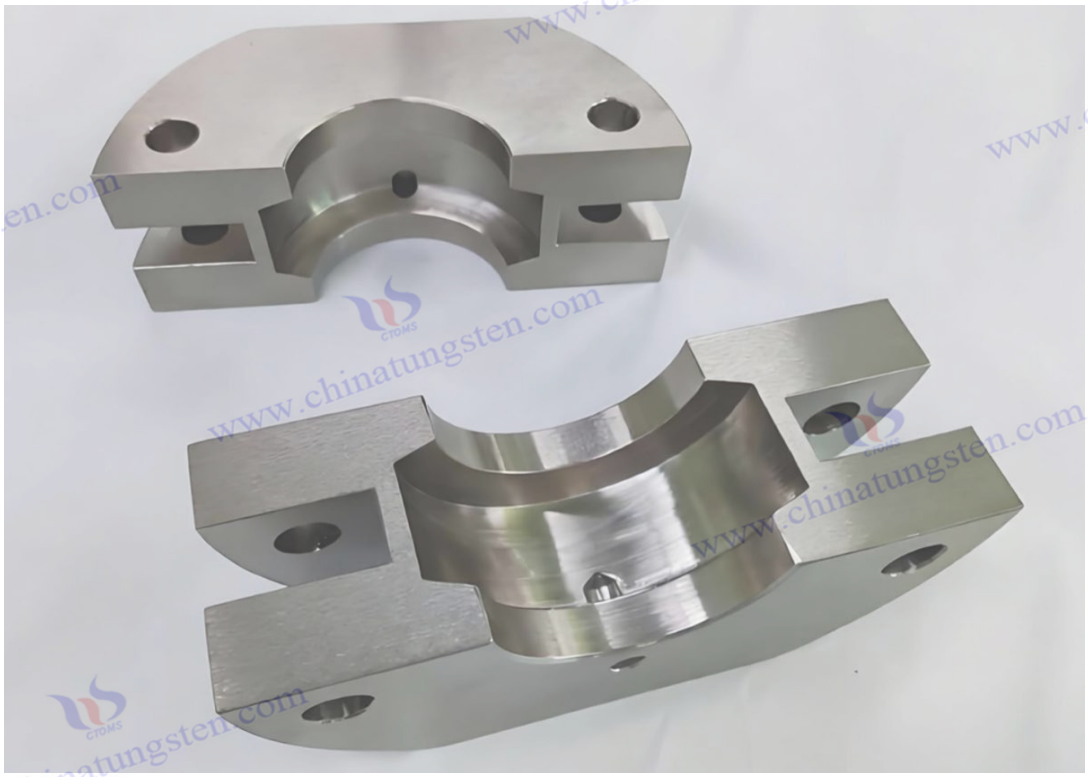
钨合金的优势主要体现在高密度和小体积。如果汽车某个部位有充足空间，而且对配重尺寸没有严格限制，那么钢、铸铁等材料可能已经能够满足要求，使用钨合金未必具有经济优势。

所以汽车配重材料选择通常需要综合考虑目标质量、安装空间、重心位置、转速、动平衡要求、材料成本、加工成本和批量，而不是单纯追求最高密度。中钨智造（CTIA GROUP）在汽车及赛车钨合金配重定制中，可以根据曲轴、传动系统、车轮、悬架等不同应用的目标质量、安装空间、结构尺寸和精度要求，匹配 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 等材料体系，并结合

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

车削、铣削、钻孔、磨削及动平衡检测进行配重件设计与制造。

汽车采用钨合金配重最核心的价值可以概括为高密度带来的小体积和灵活的质量分布设计。对于曲轴、传动轴、车轮、悬架以及赛车等空间紧凑、质量分布要求较高的应用，这种材料优势尤其明显；而对于空间充足、成本敏感的普通汽车配重，则需要根据实际结构需求判断是否值得采用钨合金。



Q42 钨合金曲轴配重有什么作用？

钨合金曲轴配重主要用于调整发动机曲轴的质量分布和旋转惯量，帮助曲轴系统实现更合理的平衡状态。由于钨（W，Tungsten，钨）合金密度很高，在需要增加较大配重质量而安装空间有限的情况下，可以用较小尺寸的钨合金配重实现目标质量，因此在高性能发动机、赛车发动机以及部分空间受限的曲轴设计中具有应用价值。

（1）补偿曲轴系统中的质量分布

发动机工作时，活塞和连杆会产生往复运动，同时曲轴本身进行高速旋转。由于各运动部件的质量、几何位置和运动轨迹不同，曲轴系统很难天然达到理想的质量平衡。曲轴配重的基本作用就是通过增加特定位置的质量，对曲柄机构中的不平衡质量进行补偿，使旋转系统的质量分布更加合理。对于钨合金而言，其主要优势在于能够在较小体积内提供较大的质量。例如密度为 18.0 g/cm³的钨合金，1 kg 材料只需要约 55.56 cm³；如果采用密度约 7.85 g/cm³的钢，则需要约 127.39 cm³。对于曲轴周围空间有限的结构，这种体积差异比较明显。

（2）帮助降低曲轴旋转系统的不平衡

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

曲轴高速旋转时，如果质量分布存在偏差，会产生周期性的离心力。其基本关系可以表示为 $F=m\omega^2r$，其中 m 为不平衡质量、ω 为角速度、r 为该质量相对于旋转轴线的距离。随着发动机转速提高，ω 以平方关系影响离心力，因此即使较小的质量偏差，在高转速下也可能产生较明显的振动。合理设计曲轴配重，可以调整不平衡质量的大小和位置，使曲轴旋转时的质量分布更加接近设计目标。

（3）可以在有限空间内增加较大配重质量

这是钨合金曲轴配重区别于普通钢配重的重要特点。假设需要增加 500 g 配重，密度 18.0 g/cm³的钨合金体积约为 27.78 cm³，而钢约为 63.69 cm³。两者质量相同，但钨合金所占空间明显更小。因此，如果曲轴附近存在轴承、缸体、油底壳、连杆或其他结构限制，无法安装较大的钢配重，就可以通过高密度钨合金在有限空间内获得所需质量。

（4）可以调整曲轴的旋转惯量

曲轴配重不仅影响总质量，也会影响转动惯量。离旋转轴线越远的质量，对转动惯量的贡献越明显，可以用 $I=\Sigma m_i r_i^2$表示，其中 I 为转动惯量、m_i 为各质量单元的质量、r_i 为其到旋转轴线的距离。因此，设计曲轴配重时不能只看配重有多少克，还要考虑配重安装在什么位置。

钨合金密度高，可以在较小几何尺寸下获得较大的质量，使工程师能够在一定程度上更加灵活地调整配重的质量和空间位置。不过，具体的惯量变化必须结合完整曲轴组件进行计算，不能仅根据材料密度判断。

（5）有助于控制发动机振动

曲轴配重合理与否，会影响发动机旋转系统的振动水平。如果曲轴质量分布不合理，可能产生较大的旋转不平衡力，并通过曲轴、轴承和发动机机体传递。通过合理配置曲轴配重，可以降低由质量不平衡引起的周期性激励，从而改善发动机运行过程中的振动状态。但需要区分旋转不平衡与往复惯性力。曲轴配重主要解决的是旋转系统质量分布问题，不能简单认为增加配重就可以消除发动机所有振动。实际发动机平衡还涉及活塞质量、连杆质量、曲柄半径、气缸排列、点火顺序以及平衡轴等多个因素。

（6）赛车发动机对钨合金配重的需求更加明显

在赛车发动机中，发动机转速通常较高，同时曲轴结构需要兼顾强度、刚度、质量和空间布局。如果采用普通钢配重达到目标质量，可能需要更大的几何尺寸。钨合金可以利用高密度特点缩小配重体积，使配重更容易布置在曲柄附近。对于已经经过轻量化设计的曲轴，这种高质量密度材料可以提供较大的设计自由度。不过，赛车曲轴最终仍然需要根据发动机转速、曲轴结构、连杆和活塞质量以及目标平衡方案进行整体设计，不能单独以钨合金配重的重量作为判断依据。

（7）钨合金配重并不意味着配重越重越好

曲轴配重需要达到的是合理的平衡状态，而不是尽可能增加质量。如果配重过大，可能增加曲轴总质量和转动惯量，并改变发动机原有的动力学特性。因此，实际设计需要计算目标平衡质量、配重半径、配重位置以及曲轴整体质量分布。钨合金的优势主要在于高密度，而不是允许无限增加配重质量。例如，同样需要 1 kg 配重时，密度 17.5 g/cm³约需要 57.14 cm³，18.0 g/cm³约需要 55.56 cm³，18.5 g/cm³约需要 54.05 cm³。密度提高主要带来体积缩

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

小，并不意味着曲轴需要增加更多配重。

（8）钨合金曲轴配重如何制造和安装？

曲轴配重可以根据结构采用块状、弧形、扇形或其他定制结构。常见钨合金材料包括 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜），再根据曲轴的安装方式加工安装孔、定位面、螺纹孔或其他连接结构。制造过程通常可以采用粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）成形和烧结，再通过车削、铣削、钻孔、磨削等机械加工获得最终尺寸。对于小批量或复杂结构，也可以采用烧结坯料后进行 CNC（Computer Numerical Control，计算机数控）精密加工。安装方式则取决于曲轴结构，可以采用机械固定、压装或其他经过工程验证的连接方式。高速旋转环境下，配重连接可靠性尤其重要。中钨智造（CTIA GROUP）可以根据曲轴的目标平衡质量、配重安装空间、曲轴转速、配重半径及质量公差，选择适合的钨合金材料体系，并进行配重结构设计、机械加工和质量检测。

（9）最终需要进行平衡检测

钨合金曲轴配重加工完成后，不能仅通过称重判断是否合格。对于发动机曲轴，需要结合整体曲轴组件进行静平衡或动平衡检测，并根据测试结果进行微量去重或调整。检测时通常需要关注配重质量、质心位置、安装孔位置、同轴度、圆跳动以及最终不平衡量。尤其对于高转速发动机，微小的质量偏心经过 ω^2放大后，也可能形成较大的动态激励。因此，钨合金曲轴配重真正发挥作用的关键不是单纯采用高密度材料，而是将高密度材料与准确的质量计算、合理的配重位置、可靠的结构连接以及最终动平衡检测结合起来。

钨合金曲轴配重的主要作用是通过高密度材料在有限空间内提供所需配重质量，从而调整曲轴系统的质量分布、旋转惯量和动态平衡状态，并帮助控制高速旋转产生的不平衡激励。它尤其适合空间受限、高转速和对质量分布要求较高的发动机及赛车曲轴，但实际设计仍应以整个曲轴组件的动力学计算和平衡检测结果为依据。



Q43 赛车为什么使用钨合金配重？

赛车使用钨合金配重，主要是利用钨（W，Tungsten，钨）合金高密度、小体积的特点，在有限安装空间内精确增加或调整质量，并进一步控制车辆的质量分布、重心位置以及旋转部件的平衡状态。与普通钢制配重相比，钨合金并不是单纯为了增加重量，而是为了在

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

空间、质量和布局之间获得更大的设计自由度。

（1）高密度可以显著缩小配重体积

常见高密度钨合金配重密度约为 17～18.5 g/cm³，而钢约为 7.85 g/cm³。以 18.0 g/cm³钨合金计算，1 kg 配重只需要约 55.56 cm³；钢则需要约 127.39 cm³，钨合金的理论体积约减少 56%。

赛车内部空间十分有限，尤其是发动机舱、悬架、传动系统和车身低部区域。相同质量的配重采用钨合金后，可以使用更小的结构尺寸，从而更容易安装到指定位置。

（2）便于精确调整赛车质量分布

赛车调校不仅关注整车总质量，还关注前后轴载荷、左右侧质量分布以及重心位置。配重可以安装在特定位置，用于改变车辆的质量分布。钨合金的高密度意味着较大的质量可以集中在很小的体积内。例如需要增加 500 g 质量时，18.0 g/cm³钨合金仅需要约 27.78 cm³。工程师可以根据底盘结构，在有限空间内布置相应质量，而不必使用尺寸更大的钢制配重。

（3）有利于重心位置设计

车辆重心高度会受到各个零部件质量和安装位置影响。配重布置的位置不同，对整车重心产生的影响也不同。如果需要在特定区域增加质量，钨合金可以通过较小的体积集中布置在目标位置。例如在底盘较低位置设置配重，可以在不占用大量空间的情况下增加指定质量。

不过，钨合金本身并不会自动降低整车重心，最终效果取决于配重的实际安装位置和质量分布。

（4）发动机和传动系统中的旋转平衡也很重要

赛车发动机通常具有较高转速，曲轴、飞轮、传动轴、离合器以及其他旋转部件需要进行精确的质量平衡。旋转系统中的离心力可以表示为 $F=m\omega^2r$，其中 m 为不平衡质量、ω 为角速度、r 为质量偏心距。转速越高，质量偏心对振动的影响越明显。钨合金可以用于特定旋转部件的配重，通过较小体积提供目标质量，从而帮助设计人员调整旋转质量分布。不过，实际平衡效果取决于质量和位置，而不是材料密度本身。

（5）可以用于赛车发动机曲轴配重

曲轴配重需要在有限的曲柄空间内提供足够质量。使用高密度钨合金后，可以在较小空间内实现目标配重质量。例如相同质量下，钨合金配重的体积明显小于钢配重，这可以减少与连杆、缸体、油底壳等周围结构发生空间干涉的可能性。对于高转速发动机，还需要结合曲轴强度、刚度、旋转惯量以及整体平衡方案进行设计，并不是简单地把钢配重替换成钨合金即可。

（6）可以用于赛车的其他精密配重

除了曲轴之外，钨合金还可能用于传动系统配重、车轮及轮毂相关配重、悬架系统质量调整以及其他需要局部增加质量的结构。对于高速旋转部件，通常需要同时控制配重质量、安装位置、同轴度、圆跳动和最终动平衡；对于非旋转结构，则更加关注质量、重心和安装可靠性。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

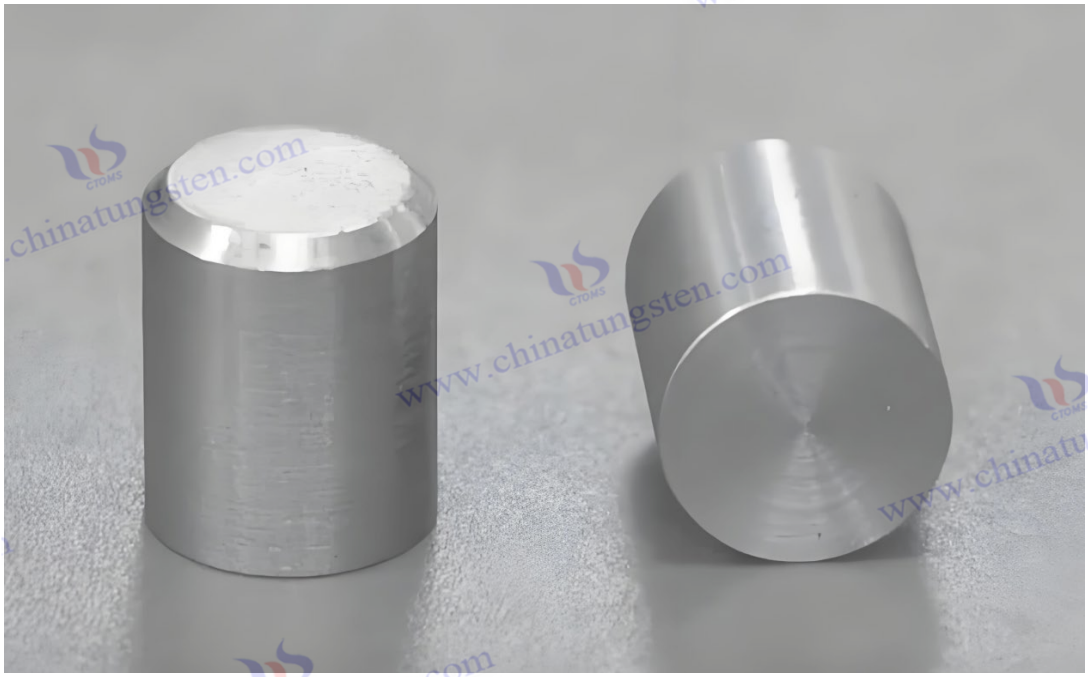
（7）钨合金的机械性能也适合严苛工作环境

赛车长期处于高振动、高冲击和温度变化环境，配重除了需要高密度，还需要具有足够的机械强度和结构稳定性。常见材料包括 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）等钨基重合金。不同材料体系的机械性能、磁响应和加工性能存在差异，因此需要根据具体应用进行选择。

（8）钨合金并不是赛车配重的唯一选择

如果安装空间充足，钢、铸铁等材料也可以用于配重。钨合金的价值主要在于高密度带来的空间优势，以及对质量位置进行精细布置的能力。同时，钨合金材料和加工成本通常高于普通钢材。因此，如果一个配重位置并不存在明显的空间限制，就没有必要仅仅因为追求更高密度而采用钨合金。赛车配重材料的选择通常需要综合考虑目标质量、安装空间、重心位置、旋转速度、平衡要求、结构强度、加工成本和可靠性。

中钨智造（CTIA GROUP）可根据赛车曲轴、传动系统、悬架及其他配重部位的目标质量、安装空间和精度要求，选择 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 等钨合金材料体系，并结合车削、铣削、钻孔、磨削和动平衡检测完成定制化配重件制造。赛车采用钨合金配重的核心原因可以概括为高密度带来的小体积和较高的质量布置自由度。它可以帮助赛车在有限空间内实现精确的质量调整，并用于曲轴、传动系统等旋转部件的平衡设计。真正决定配重效果的仍然是质量、位置、重心和质量分布，而不是单纯追求更高的材料密度。



44 飞机为什么使用钨合金配重？

飞机使用钨合金配重，核心原因并不是单纯为了增加飞机重量，而是在飞机对质量分布、重心（CG，Center of Gravity，重心）位置、旋转平衡和结构空间都有严格要求的情况下，利用钨合金高密度的特点，在较小体积内获得所需质量。航空领域常见的高密度钨合金配重密度约为 17～18.5 g/cm³，部分材料体系还可达到更高或更低的特定范围。以 18.0 g/cm³

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

计算，1 kg 钨合金配重体积约为 55.56 cm³，而相同质量的钢材约为 127.39 cm³，体积可以减少约 56.4%。

1. 控制面质量平衡是重要应用

飞机的升降舵、副翼、方向舵等操纵面在高速气流中工作，如果操纵面的质量分布不合理，会增加铰链处载荷，并可能提高发生颤振（Flutter）的风险。因此，部分控制面会配置质量平衡块，使控制面的质量中心相对于铰链轴处于设计要求的位置。钨合金的优势在于可以用较小尺寸提供较大的质量。例如需要安装 1 kg 质量时，如果使用 18.0 g/cm³钨合金，只需要约 55.56 cm³的材料体积，这对于机翼、尾翼和控制面内部空间有限的结构非常有价值。配重可以布置在靠近铰链轴、控制面前缘等设计位置，同时尽量减少对气动外形和内部结构空间的影响。这里的作用是降低和控制颤振相关的风险，而不是依靠配重单独消除颤振；实际效果还取决于控制面结构刚度、铰链特性、气动特性和整机设计。

2. 用于飞机重心和配平调整

飞机的重心位置会直接影响纵向稳定性、操纵特性和飞行配平。飞机设计和改装过程中，有时需要在特定位置增加或调整一定质量，这类配重通常称为配平配重或压舱配重。钨合金在这类应用中的价值是质量高度集中。例如在有限的结构舱位中需要布置几百克至数千克质量时，采用高密度材料能够减少配重占用空间，使配重更容易安装在设计位置。不过，钨合金本身并不会自动让飞机重心降低或改善配平效果，真正决定作用的是配重的质量和安装位置。对于距离参考点为 r 的位置，配重产生的质量矩可表示为 M=mr，其中 m 为配重质量，因此同样质量安装在不同位置产生的配平效果可能完全不同。

3. 用于螺旋桨、旋翼和高速旋转部件的平衡

飞机上的螺旋桨、旋翼、传动轴以及部分高速旋转组件，都需要控制质量分布。如果旋转部件存在偏心质量，在高速旋转时会产生周期性离心力，其基本关系可表示为 $F=m\omega^2r$，其中 F 为离心力、m 为不平衡质量、ω 为角速度、r 为质量偏离旋转轴的距离。由于离心力与角速度的平方成正比，高速旋转部件对微小质量偏差也可能非常敏感。因此，钨合金配重可以用于对特定位置进行局部质量修正，在空间有限的情况下实现较大的质量调整，同时减少配重尺寸。这类应用并不是简单地追求配重越重越好，而是根据旋转部件的剩余不平衡量、配重安装半径、允许残余不平衡量等参数确定所需质量。

4. 高密度有利于航空结构的小型化

航空结构通常同时受到重量、空间、气动外形和结构布局的约束。对于普通钢配重而言，如果需要较大的质量，就可能需要更大的体积；而钨合金可以在较小空间内实现相同质量。如：

材料	参考密度	1 kg 所需体积
钢	约 7.85 g/cm³	约 127.39 cm³
钨合金	18.0 g/cm³	约 55.56 cm³
纯钨	约 19.25 g/cm³	约 51.95 cm³

钨合金与钢相比的主要优势并不是减轻单个配重件的质量，而是让同样的配重质量占用更小的空间。对于控制面前缘、旋翼组件、狭窄安装腔以及其他空间受限位置，这一点尤其重要。

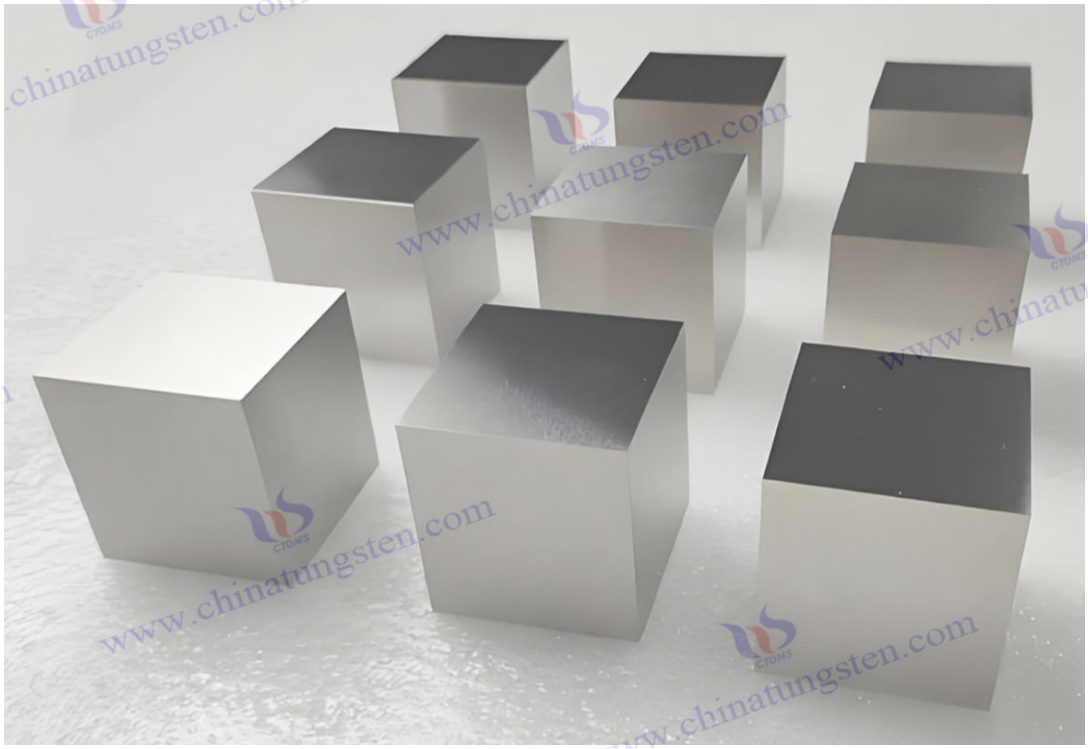
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

5. 钨合金还能提供较好的结构适应性

航空配重并不一定是简单的矩形块。根据安装位置不同，可以设计成圆柱、圆盘、环形件、弧形件、薄板、异形块、带孔配重以及带螺纹安装结构等形式。常见的钨合金体系包括 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）。两者都以 W（Tungsten，钨）作为主要高密度相，通过 Ni（Nickel，镍）以及 Fe（Iron，铁）或 Cu（Copper，铜）形成粘结相。具体选材需要结合密度、强度、韧性、磁性能、加工性能以及使用环境确定。

6. 航空配重对加工精度要求较高

飞机配重真正困难的地方往往不只是把材料做成指定重量，而是同时保证尺寸、质量和安装位置精度。对于控制面配重，需要关注安装孔位置、配重质量、重心位置以及与铰链轴之间的几何关系；对于旋转部件，则还需要控制同轴度、圆跳动、质量分布和动平衡。钨合金通常采用粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）工艺制造毛坯，再根据最终要求进行车削、铣削、钻孔、攻螺纹、磨削等精加工。由于钨合金硬质钨相含量较高，加工过程中刀具磨损通常比普通钢材更加明显，因此航空配重的批量制造需要对刀具寿命、加工基准、尺寸补偿和过程检测进行控制。对于航空领域的定制配重，中钨智造（CTIA GROUP）这类钨合金制造企业可以根据控制面配重、配平配重、旋翼平衡配重等不同用途，对密度、质量、尺寸、安装孔、重心位置和公差要求进行针对性设计与加工。飞机采用钨合金配重的核心逻辑可以概括为：在必须配置特定质量的位置上，利用高密度实现小体积质量集中，再通过精确的质量分布和安装位置控制飞机控制面平衡、旋转部件平衡以及重心和配平要求。它尤其适合空间受限、质量位置要求严格、需要精确局部配重的航空部件，但并不意味着所有飞机配重都必须采用钨合金；如果空间充足、成本敏感，钢等其他材料同样可能满足设计要求。



Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2025 版

Q45 飞机控制面为什么需要钨合金配重？

飞机控制面之所以会采用钨合金配重，核心目的不是增加飞机重量，而是通过在控制面上布置精确质量，使其质量分布满足气动稳定性、操纵载荷和颤振控制要求。典型控制面包括升降舵、副翼、方向舵以及部分其他可动气动面。在这些部件中，配重通常属于质量平衡设计的一部分。

1. 最重要的作用是控制控制面质量平衡

飞机控制面通过铰链安装在机翼或尾翼结构上，在气流作用下高速运动。如果控制面的重心位置、质量分布与设计要求不匹配，控制面在飞行过程中可能产生较大的惯性载荷和气动耦合作用。质量平衡配重的基本思路，是把一部分质量布置到铰链轴附近或铰链轴前方，使控制面的质量中心移动到设计规定的位置。对于某一配重产生的质量矩，可以用 M=mr 表示，其中 M 为质量矩、m 为配重质量、r 为配重质心到参考轴的距离。相同质量放在不同位置，产生的质量矩并不相同。所以飞机控制面配重并不是简单地追求更大的质量，而是要求质量、位置和几何尺寸同时满足设计要求。

2. 有助于降低控制面发生颤振的风险

颤振（Flutter）是一种气动、结构和惯性相互耦合形成的自激振动现象。对于高速飞机而言，控制面属于容易受到气动弹性影响的重要部件之一。如果控制面质量分布不合理，其惯性效应可能与气动力、结构弹性和铰链运动相互耦合，从而提高颤振风险。质量平衡配重可以改变控制面的质量中心和惯性特性，使其满足设计规定的质量平衡条件，从而降低相关颤振风险。这里的配重只是整个颤振设计的一部分，不能理解为安装钨合金配重后就可以单独解决颤振问题。控制面刚度、铰链间隙、气动布局、结构模态以及飞行速度范围等因素同样非常重要。

3. 为什么特别适合使用高密度钨合金

飞机控制面内部空间通常比较有限，而质量平衡又可能要求在距离铰链轴较远的位置集中布置一定质量。如果使用低密度材料，为获得相同质量就需要更大的体积。以 18.0 g/cm³ 的钨合金为例，1 kg 配重体积约为 55.56 cm³；如果采用密度约 7.85 g/cm³的钢材，同样 1 kg 需要约 127.39 cm³。因此，在相同质量要求下，钨合金配重体积可以减少约 56.4%。这使钨合金特别适合安装在控制面前缘、狭窄腔体或局部结构空间内。配重尺寸减小后，也更容易与控制面内部结构、蒙皮和气动外形进行协调。

4. 小体积还有利于保持控制面气动外形

控制面外形通常不能因为安装配重而出现明显的气动外形变化。如果配重体积过大，就可能增加结构设计难度，甚至影响控制面内部空间布局。钨合金能够把较大的质量集中在较小体积内，因此可以设计成圆柱、块状、板状、弧形、带孔或其他异形结构，并嵌入控制面内部。对于一些前缘空间有限的控制面，高密度材料尤其具有结构布局优势。

5. 配重质量和安装位置需要同时精确控制

控制面质量平衡不是单纯控制配重件重量。假设需要产生一定质量矩，如果配重质量为 m、安装位置距离铰链轴为 r，则 M=mr。也就是说，配重的质量和安装距离共同决定最终效果。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

实际制造中通常需要控制配重质量公差、外形尺寸、安装孔位置、安装基准、重心位置以及与铰链轴之间的几何关系。如果控制面属于高速运动部件，还需要进一步检查装配后的质量分布和运动状态。因此，一件看起来只有几百克甚至几十克的控制面配重，其制造精度要求可能远高于普通机械配重。

6. 钨合金配重并不是越重越好

飞机控制面需要的是设计规定的质量平衡，而不是最大化配重质量。配重过轻可能无法达到规定的质量矩，配重过重则会增加结构载荷和飞机整体质量，并可能改变控制面的惯性参数。

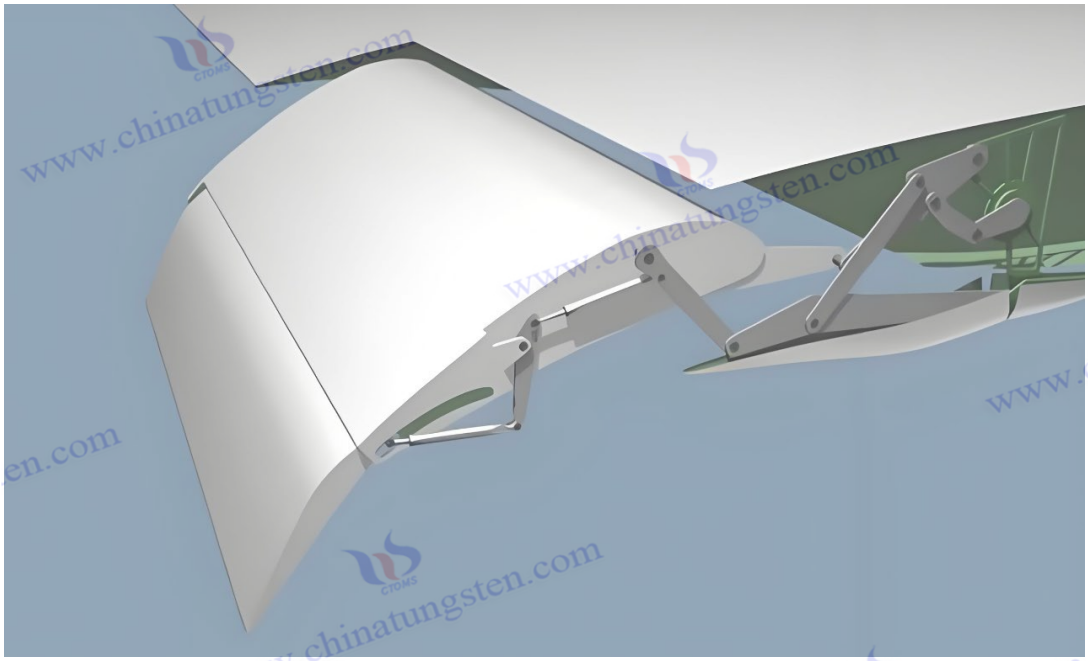
所以实际设计通常需要综合计算控制面质量、重心位置、惯性矩、铰链位置和气动载荷，而不是单独按照材料密度选择配重。对于旋转部件，还会涉及转动惯量 $I=\Sigma m_i r_i^2$，其中 m_i 表示各质量单元的质量、r_i 表示其到旋转轴的距离。这说明质量距离参考轴的位置同样重要。

7. 制造时通常采用高密度毛坯加精加工

钨合金控制面配重通常可以通过粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）形成近净成形毛坯，再进行车削、铣削、钻孔、攻螺纹和磨削等精加工。对于结构简单的配重，可以通过模压成形减少后续材料去除量；对于复杂异形件，则可以先获得合适的烧结毛坯，再通过机械加工获得最终尺寸。加工阶段需要重点控制尺寸公差、孔位精度、表面质量和配重实际质量。对于航空用途，还需要根据具体项目要求进行材料批次追溯、尺寸检验、质量检验以及相关技术文件管理。

中钨智造（CTIA GROUP）可针对飞机控制面质量平衡配重，根据设计要求匹配钨合金密度、质量、尺寸、安装孔、重心位置及公差，并结合粉末冶金和精密机械加工满足定制配重件的制造需求。因此，飞机控制面使用钨合金配重可以理解为一种空间受限条件下的精确质量平衡方案：通过钨合金高密度特性，在较小体积内获得规定质量，再将这部分质量准确布置到设计位置，以满足控制面质量平衡、惯性特性和颤振设计要求。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Q46 无人机为什么使用钨合金配重？

无人机使用钨合金配重，主要是为了在有限的机体空间内实现精确的质量分配和重心控制。无人机的机身、机臂、云台、电池、飞控、相机以及推进系统通常都需要尽可能紧凑地布置，因此在需要增加或调整一定质量时，高密度钨合金可以用较小体积实现较大的配重质量。

对于 18.0 g/cm³的钨合金，1 kg 材料的理论体积约为 55.56 cm³，而密度约 7.85 g/cm³的钢材需要约 127.39 cm³，相同质量下钨合金体积可以减少约 56.4%。对于小型无人机和高集成度航空平台，这种体积优势比较明显。

1. 用于调整无人机重心

无人机的重心（CG，Center of Gravity，重心）位置直接影响飞行姿态、操纵响应和稳定性。电池、相机、云台、通信设备等部件的位置发生变化后，整机重心也会随之改变。这时可以利用钨合金配重进行局部质量补偿。例如配重安装在距离参考位置 r 处时，其产生的质量矩可以表示为 $M=mr$，其中 m 为配重质量。通过改变配重质量或者安装位置，可以对无人机前后、左右方向的质量分布进行调整。对于多旋翼无人机，如果左右两侧载荷存在差异，配重还可以用于辅助修正横向质量分布，使飞控系统不需要长期通过较大的姿态控制量来抵消结构上的质量偏置。

2. 云台和相机系统尤其需要精确配重

无人机经常搭载光电吊舱、相机、测绘设备、红外设备或其他任务载荷。这些设备可能安装在机体前部、底部或云台上，从而改变整机重心和局部惯量。在云台系统中，配重的作用不仅是调整总重心，还可能用于平衡镜头、传感器和电机之间的质量分布。高密度钨合金可以在不明显增加结构体积的情况下提供所需质量，使云台内部更容易实现紧凑布局。对于需要快速姿态响应的云台，配重位置还会影响转动惯量。转动惯量可以表示为 $I=\Sigma m_i r_i^2$，其中 m_i 为质量单元、r_i 为该质量单元到旋转轴的距离。因此，配重安装在哪里，

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

与配重本身有多重同样重要。

3. 可用于旋翼和旋转部件的平衡

无人机推进系统中的电机、螺旋桨以及部分高速旋转部件，对质量分布非常敏感。如果旋转部件存在偏心质量，高速旋转时会产生离心力，其基本关系为 $F=m\omega^2r$，其中 F 为离心力、m 为不平衡质量、ω 为角速度、r 为质量偏离旋转轴的距离。由于离心力与转速的平方相关，转速越高，对微小质量不平衡越敏感。因此，在特定旋转部件中可以使用高密度配重进行局部质量修正，使配重尺寸尽可能小，同时满足规定的质量调整量。这类应用需要根据实际动平衡测试结果确定配重质量和位置，而不能简单理解为安装越重的钨合金越好。

4. 小型无人机特别看重体积优势

对于大型航空器，配重空间有时相对充裕；对于小型无人机，内部空间往往非常紧张。电池、电调、飞控、GPS（Global Positioning System，全球定位系统）、通信模块和任务载荷已经占据大量空间，因此配重件通常希望做到小型化。例如需要配置 100 g 质量时，18.0 g/cm³钨合金只需要约 5.56 cm³。如果采用 7.85 g/cm³钢材，则需要约 12.74 cm³。对于体积很小的机体而言，这种差异可能直接影响结构布局。

5. 对无人机而言，配重并不是单纯增加重量

无人机本身具有较高的载荷重量敏感性。配重每增加 1 g，都可能增加电机持续推力需求和能耗。因此，使用钨合金并不是为了让无人机变重，而是在设计已经确定需要增加某个质量的情况下，让这部分质量尽可能集中、紧凑和准确。例如无人机为了平衡前端相机，需要增加 100 g 配重，那么设计目标通常是用尽可能小的空间实现这 100 g，而不是增加到 150 g 或 200 g。材料选择最终还需要综合考虑配重质量、安装位置、空间、成本和飞行时间。

6. 钨合金适合制作不同形式的无人机配重

根据无人机结构，可以把钨合金加工成圆柱、圆盘、块状、环形、薄板、弧形以及带孔配重等形式。对于机身内部，可以采用小型块状或柱状配重；对于云台，可以设计成环形或弧形配重；对于旋转部件，则可能采用局部安装块、平衡环等结构。常见材料体系包括 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）。W-Ni-Fe 通常具有较明显的磁响应，而 W-Ni-Cu 通常具有较低的磁响应，具体选择还要根据无人机上的传感器、电机、磁罗盘以及结构环境确定。

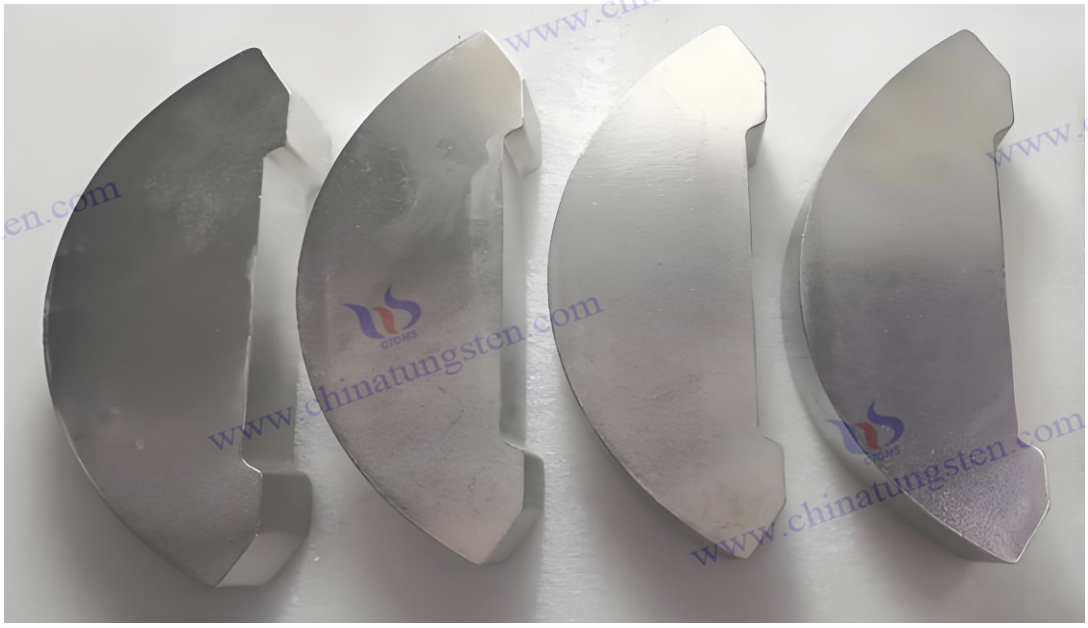
7. 配重精度会直接影响无人机实际性能

无人机配重不能只看标称重量。实际制造时还需要关注质量公差、尺寸公差、安装孔位置、重心位置以及装配后的质量分布。如果是云台配重，还需要关注旋转轴与配重质心之间的关系；如果是旋翼或电机相关部件，则需要关注同轴度、跳动和动平衡；如果是整机配重，则需要关注安装后对整机重心坐标的影响。制造过程中通常可以采用粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）获得高密度钨合金毛坯，再通过车削、铣削、钻孔、攻螺纹或磨削等工艺获得最终尺寸。对于批量较大的无人机配重，近净成形能够减少后续加工量，提高材料利用率。中钨智造（CTIA GROUP）可根据无人机机身配重、云台配重、旋翼平衡配重以及任务载荷配重等不同用途，对材料密度、质量、外形尺寸、安装方式和

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

公差进行定制。

无人机采用钨合金配重的主要价值可以概括为：在已经确定需要配置一定质量的情况下，用更小的体积实现精确质量分配，同时控制整机重心、云台惯量以及旋转部件质量平衡。尤其对于小型化、高集成度、高转速和高精度姿态控制的无人机系统，高密度钨合金的空间利用优势更加明显。



Q47 钨合金配重如何用于工业转子？

钨合金配重在工业转子中的核心用途，是通过在特定角度和半径位置增加精确质量，修正转子质量分布不均造成的不平衡，从而降低高速旋转过程中的振动、轴承载荷和噪声。常见应用包括电机转子、发电机转子、压缩机转子、泵叶轮、风机、离心机、高速主轴以及其他高速旋转组件。

1. 首先通过动平衡测试确定不平衡位置

工业转子安装完成后，需要通过动平衡设备测量转子的剩余不平衡量。测试系统通常会给出不平衡量以及对应的角度位置，然后根据结果确定应该在什么位置增加配重，或者从什么位置去除材料。对于集中在某个半径 r 处的配重，其产生的质量矩可以近似表示为 $M=mr$，其中 m 为配重质量，r 为配重质心到旋转轴的距离。若转子转速较高，不平衡质量产生的离心力可表示为 $F=m\omega^2r$，其中 ω 为角速度。因此，即使配重质量不大，只要转速很高，也可能产生明显的动态影响。

2. 钨合金特别适合空间有限的转子

工业转子通常存在尺寸限制，尤其是高速电机、航空电机、离心机和精密主轴等设备。配重如果体积过大，就可能与转子本体、轴承、壳体或其他运动部件发生空间冲突。钨合金的高密度能够在较小体积内提供较大的质量。例如采用 18.0 g/cm³钨合金制作 1 kg 配重时，理论体积约为 55.56 cm³；相同质量的钢材约需要 127.39 cm³。因此，在相同配重质量下，钨合金可以明显减少配重占用空间。这对于转子上可用安装空间非常有限的场合尤其有价

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

值。

3. 可以通过增加局部质量修正不平衡

工业转子动平衡通常有两种基本思路：去重和加重。去重是从质量偏大的位置去除材料，加重则是在质量偏小的位置安装配重。钨合金主要适合加重修正。例如转子某一角度存在质量不足，可以在该位置安装小型钨合金块、圆柱销、螺钉式配重、弧形配重或环形配重，通过增加局部质量改变转子的质量分布。对于结构已经加工完成、不希望破坏主体材料的转子，加重方案尤其具有实际意义。

4. 配重位置比单纯配重重量更加重要

同样是 100 g 配重，安装在距离旋转轴 10 mm 和 100 mm 的位置，其产生的质量矩分别为 1 g·m 和 10 g·m，差异达到 10 倍。因此，工业转子配重设计通常需要同时确定质量、角度和半径三个关键参数。实际生产中还要考虑配重安装孔的位置公差、配重自身尺寸公差、安装间隙以及装配后的实际重心位置。如果转子属于高速精密设备，仅仅控制配重件的重量并不能保证最终平衡精度。

5. 对高速转子而言，钨合金配重可以减小局部结构尺寸

在某些设计中，配重需要安装在转子外缘、端部或特定平衡槽内。使用高密度钨合金后，可以采用更小的配重体积获得相同质量，从而降低对转子外径、平衡槽尺寸和周围空间的影响。

例如采用 18.0 g/cm³钨合金时，100 g 配重只需要约 5.56 cm³。如果采用 7.85 g/cm³钢材，则需要约 12.74 cm³。对于毫米级空间限制的转子结构，这种体积差异可能直接影响配重方案。

6. 可以用于单平面和双平面动平衡

对于细长转子，单纯在一个平面进行修正可能无法同时解决静不平衡和偶不平衡。因此，高速工业转子经常采用双平面甚至多平面平衡。例如一个转子在 A、B 两个校正平面分别安装钨合金配重，通过同时调整两个平面的质量和角度，可以修正不同类型的不平衡。实际配重质量需要由动平衡测试数据和转子几何参数计算得到，而不是直接按照经验确定。

7. 钨合金配重需要可靠固定

工业转子高速运行时，配重承受的离心载荷可能非常大，因此配重固定方式是设计中的关键环节。常见方式包括螺钉固定、压入、燕尾槽或专用平衡槽安装、销钉固定以及与转子结构配合的机械锁紧结构。具体方式取决于转速、配重质量、安装半径、转子材料和设备安全要求。对于高速旋转部件，不能仅依靠普通胶黏剂承担主要离心载荷，尤其不能在没有经过强度和可靠性验证的情况下直接采用粘接式配重。

8. 材料和加工精度同样重要

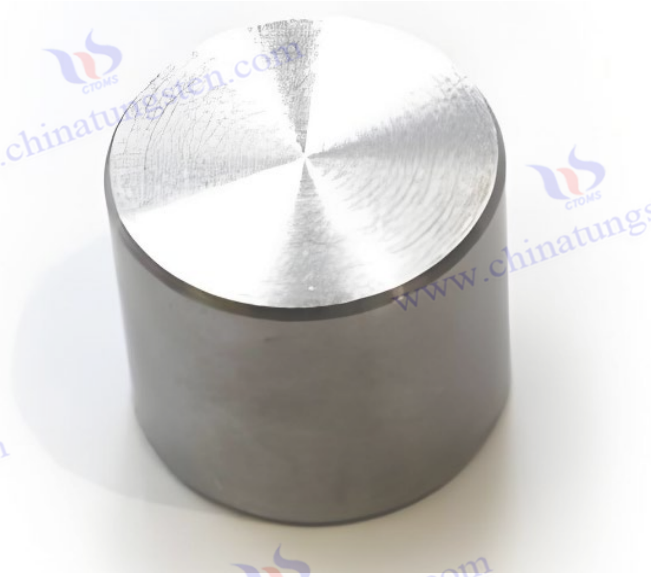
工业转子配重常采用 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）等钨合金体系。材料选择需要结合密度、机械性能、磁响应、加工性能以及工作环境确定。钨合金配重通常可以采用粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）形成毛坯，再进行车削、铣削、钻孔、攻螺纹或磨削加工。对于精密转子配重，需要重点控制配重质量、尺寸、孔位、重心以及装配后的同轴度和跳动。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

中钨智造（CTIA GROUP）可根据工业电机、风机、压缩机、泵、离心机和高速主轴等转子的实际平衡要求，定制不同密度、形状、质量和安装结构的钨合金配重件。

9. 最终必须验证装配后的动平衡状态

钨合金配重加工合格，并不意味着转子装配后一定达到平衡要求。最终应将配重安装到实际转子上重新进行动平衡测试，检查剩余不平衡量、校正角度和两个或多个校正平面的平衡状态。对于高速转子，还需要综合考虑轴承、联轴器、轴的挠曲、装配偏心以及热态运行造成的变化。必要时需要进行不同转速下的平衡验证。因此，钨合金配重用于工业转子的完整逻辑可以概括为：先通过动平衡检测确定不平衡量和角度，再根据质量矩关系确定配重质量、半径和安装角度，利用钨合金高密度实现小体积加重，最后通过可靠机械固定和再次动平衡测试验证效果。其真正价值不是单纯增加转子重量，而是在有限空间内实现高精度、可控的局部质量修正。



Q48 钨合金配重如何进行动态平衡测试？

钨合金配重本身是否需要进行动态平衡测试，要看它最终应用于什么部件。对于单独使用的静态配重块，通常重点检查质量、尺寸和重心位置；对于安装在电机转子、工业转子、主轴、风机、泵、离心机或其他高速旋转组件上的钨合金配重，则通常需要对装配后的旋转总成进行动平衡（Dynamic Balancing，动态平衡）测试。动态平衡的基本目标，是检测旋转体的质量分布是否相对于旋转轴线合理，并通过增加或去除一定质量，将剩余不平衡量控制在规定范围内。

1. 先明确转子的平衡要求

测试之前，需要确定转子的质量、工作转速、旋转直径、允许剩余不平衡量、校正平面数量以及平衡等级等参数。对于低速、短而厚的旋转件，有时静平衡已经能够满足要求；对于细长转子、高速主轴、电机转子、压缩机转子等，则通常需要进行双平面动平衡。动平衡与静平衡的区别在于，动平衡不仅关注整体重心是否偏离旋转轴，还需要考虑不同轴向位置上的质量分布。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

2. 将转子安装到动平衡机

实际测试时，将装有钨合金配重的转子安装到动平衡机上，并通过支撑系统、驱动系统和传感器获得旋转过程中的振动信号。设备通常会测量转子的振动幅值和相位，通过相位信息判断不平衡质量所在的角度位置，再计算需要增加或去除多少质量。测试时安装状态必须与实际使用状态尽可能一致，因为轴、联轴器、叶轮、配重以及其他零件之间的装配偏心都会影响最终结果。

3. 让转子达到规定测试转速

启动设备，使转子达到规定的测试转速。旋转过程中，不平衡质量会产生周期性离心力，其基本关系为 $F=m\omega^2r$，其中 F 为离心力、m 为不平衡质量、ω 为角速度、r 为不平衡质量到旋转轴的距离。由于离心力与角速度的平方成正比，转速越高，相同的不平衡质量产生的影响越明显。因此，高速转子通常对配重质量、安装角度和安装半径具有更严格的要求。测试转速不一定等于设备最终工作转速，具体应根据转子结构、设备能力和相应的平衡工艺确定。

4. 测量不平衡量和相位角

动平衡机一般会输出两个非常重要的数据：不平衡量和不平衡角度。例如测试结果可能表明某一校正平面存在一定的不平衡量，并要求在某个角度位置增加一定质量。工程人员根据这个结果确定钨合金配重的实际质量和安装位置。如果配重安装半径已经确定，可以利用质量矩关系进行换算，即 $m_1r_1=m_2r_2$，其中 m_1为理论需要的校正质量、r_1为理论校正半径，m_2和 r_2为实际采用的配重质量和安装半径。这意味着通过改变配重安装半径，可以调整所需要的实际配重质量。

5. 安装钨合金配重进行第一次修正

如果采用加重法进行平衡修正，可以根据测试结果在指定位置安装钨合金配重。例如转子需要增加 100 g 质量，而安装空间非常有限，此时可以采用高密度钨合金制作小体积配重。若钨合金密度为 18.0 g/cm³，100 g 配重理论体积约为 5.56 cm³。钨合金的价值就在这里体现出来：它能够在较小空间内提供较大的校正质量。配重可以设计成螺钉式、圆柱销式、弧形块、平衡块、环形件或其他与转子结构相匹配的形式。

6. 再次旋转测试并进行迭代修正

第一次配重安装后，不能直接认为平衡已经完成。通常需要重新启动动平衡设备进行第二次测试。如果剩余不平衡量仍超过规定值，就根据新的测量结果进一步调整配重。实际工艺可能需要进行一次或多次修正，直到达到规定的剩余不平衡量。对于双平面平衡，需要分别计算两个校正平面的配重质量和角度，使静不平衡和偶不平衡同时得到控制。

7. 配重本身也需要控制质量精度

动平衡测试虽然主要针对整个转子，但钨合金配重本身的质量精度同样重要。假设设计要求安装 100.00 g 配重，如果实际加工成 99.5 g 或 100.5 g，在低精度应用中可能影响不大，但对于高速精密转子，这种质量误差可能直接改变最终的不平衡状态。因此，在正式装配前通常需要检查配重实际质量、尺寸、安装孔位置以及配重质心位置。对于高精度产品，还应建立配重质量与动平衡测试结果之间的对应关系。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

8. 重点检查安装后的跳动和同轴度

动平衡不能完全替代几何精度检测。转子即使质量分布经过调整，如果存在明显的轴弯曲、安装偏心、同轴度误差或跳动问题，仍然可能产生运行振动。因此，对于精密转子，通常需要综合检查尺寸、同轴度、圆跳动、端面跳动、配重安装位置以及最终动平衡状态。尤其是钨合金配重采用螺纹、销孔或槽式结构安装时，安装结构自身的定位精度也可能影响最终平衡结果。

9. 高速转子还需要关注配重固定安全性

钨合金配重安装在高速旋转部件上时，配重固定结构必须能够承受运行过程中产生的离心载荷。例如 100 g 配重安装在半径 50 mm 的位置，以 10000 rpm（Revolutions Per Minute，每分钟转数）旋转时，其理论离心力已经达到约 5.48 kN（Kilonewton，千牛），所以配重固定方式不能只考虑静态重量。实际设计还应考虑最高转速、材料强度、安装结构、疲劳载荷、安全系数以及可能的超速工况。中钨智造（CTIA GROUP）可以根据工业转子、电机转子、风机、泵和高速主轴等不同应用，对钨合金配重的质量、密度、尺寸、安装结构进行定制，并配合质量检测和动平衡要求进行加工。

10. 一个完整的测试流程

实际工程中，可以把钨合金转子配重的动态平衡过程概括为：转子初始检测 → 安装到动平衡设备 → 按规定条件旋转 → 测量振动幅值和相位 → 计算不平衡量 → 确定配重质量及角度 → 安装钨合金配重 → 再次测试 → 必要时继续修正 → 最终确认剩余不平衡量。

最终验收的重点不是钨合金配重本身有多重，而是安装钨合金配重之后，整个旋转总成是否达到规定的剩余不平衡量和运行要求。

对于工业转子而言，最关键的关系可以归纳为质量、半径和角速度三者共同决定不平衡效应：$F=m\omega^2r$。因此，高密度钨合金的主要优势是能够在有限安装空间内实现较大的质量修正，但最终平衡精度仍然取决于配重质量、安装角度、安装半径、几何精度以及整个转子的实际质量分布。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



七、钨合金配重在消费电子、体育与民用领域的应有有哪些？

钨合金配重在消费电子、体育与民用领域的应用，核心逻辑都是利用其高密度、小体积以及质量分布可控的特点，在有限空间内实现配重、平衡、惯量调节和重心调整。与单纯追求高密度不同，这些产品更关注配重件的体积、质量精度、安装方式、手感、振动特性以及批量一致性。

消费电子领域

在消费电子产品中，钨合金配重主要用于需要振动、惯量、重心或手感调整的微型机构。手机振动马达是较典型的应用。对于偏心旋转质量结构，配重随转子高速旋转时产生惯性力，其基本关系为 $F=m\omega^2r$，其中 F 为离心力、m 为运动质量、ω 为角速度、r 为配重质心到旋转轴的距离。钨合金密度高，可以在有限的马达尺寸内获得较大的运动质量，从而有利于振动模块的小型化。

除了手机，智能手表、智能手环、便携式按摩设备、电动牙刷以及其他微型振动产品也可能采用高密度钨合金配重。对于这些产品而言，配重件往往只有几克甚至更小，但质量公差、偏心距离和装配位置仍可能影响最终振感。

在摄像设备和云台中，钨合金还可以用于调整局部重心和转动惯量。例如摄像头、镜头和稳定器内部空间有限，可以通过小体积高密度配重改变整体重心位置，使执行机构在特定姿态下获得更合理的质量分布。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

游戏手柄、控制器以及部分便携式设备则可能通过局部配重改变握持手感和质量分布。这里更关注的是人体工学和惯量特性，而不是单纯增加重量。

对于消费电子而言，钨合金通常需要加工成非常小的圆柱、圆盘、弧形块、环形件或异形件，并控制质量、尺寸、同心度和表面质量。W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）是常见材料体系，具体选择还需要结合磁性能、密度、加工性能和成本。

体育用品领域

体育用品是钨合金配重应用非常典型的民用市场，其主要作用是通过改变质量分布调整器材的重心和惯性特性。

高尔夫球杆是最具代表性的产品之一。钨合金通常被布置在杆头底部、后部、趾部或周边，通过集中质量改变杆头重心位置、重心深度以及惯性矩（MOI，Moment of Inertia，转动惯量）。转动惯量可表示为 $I=\Sigma m_i r_i^2$，其中 m_i 为质量单元、r_i 为其到旋转轴的距离。由于钨合金密度远高于钢材，可以在不明显扩大杆头尺寸的情况下布置较大的局部质量。

对于球杆设计而言，同样 20 g 配重，如果安装位置不同，其对杆头重心和惯性矩的影响也不同。因此钨合金真正提供的是质量布局自由度，而不是简单增加杆头重量。

在网球、羽毛球、棒球、垒球以及其他挥动类运动器材中，高密度配重也可以用于调整器材的质量平衡和挥动惯量。例如球拍可以通过手柄、拍框或特定区域的配重改变平衡点和挥拍感觉；棒球棒等器材也可以通过质量分布调整挥动特性。不过不同产品的配重设计差异较大，并非所有产品都会采用钨合金。

钓鱼装备同样是钨合金配重的重要应用场景。钨合金鱼坠、钨合金铅坠替代件和软饵内部配重，可以利用高密度特点在较小体积内获得较大的下沉质量。与传统铅坠相比，钨合金可以在相同重量下缩小体积，因此在需要小型化钓组、提高穿透能力或改变软饵质量分布的情况下具有优势。

在赛车、模型运动和竞速类民用装备中，钨合金配重也可用于调整车辆或模型的局部质量分布。例如模型赛车可以通过小型高密度配重调整前后配重比例、左右质量分布和局部重心位置。对于高速旋转部件，则还可以利用钨合金进行局部质量修正。

民用机械与个人装备领域

在普通民用机械中，钨合金配重主要用于需要精确质量调整或者空间受限的机构。

精密机械和小型旋转机构可以使用钨合金配重进行质量平衡。例如高速电机、微型风扇、离心机构和小型转子，在存在局部质量偏差时，可以通过安装小型高密度配重进行修正。

机械钟表也是典型应用之一。高密度钨合金可以用于微型配重和惯性质量调整，在有限空间内实现较大的质量变化。对于精密机构来说，配重的质量、质心位置和尺寸公差需要同时控制。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

运动器械和健身设备也可以使用钨合金进行局部质量调整。例如某些小型训练器械、手持运动设备和精密运动组件，需要在有限空间内增加一定质量时，高密度配重可以减少体积占用。

在摄影器材中，钨合金可以作为相机、镜头、稳定器和云台内部的平衡配重。摄影设备经常需要在保持整体便携性的同时，让设备在安装不同镜头或附件后仍保持合理的重心位置。此时使用小体积配重，可以减少对设备外形和内部空间的影响。

民用汽车与改装装备

在汽车和汽车改装领域，钨合金配重主要用于特殊质量布局和空间受限的场景。例如部分高性能车辆、赛车和改装车辆可以在发动机旋转组件、传动组件、车轮、悬架或其他需要局部质量调整的位置使用高密度配重。对于旋转组件，配重需要结合动平衡结果确定安装质量和角度。

赛车尤其强调质量分布，因为配重的位置不仅影响总质量，还会影响车辆重心和前后、左右质量分配。钨合金能够在较小体积内提供较大质量，因此适合安装空间有限的局部区域。

不过对于普通民用汽车而言，钢、铸铁以及其他常规材料通常已经能够满足大部分配重需求。钨合金成本较高，只有当体积、安装位置或质量集中度具有明确要求时，其优势才更加明显。

钨合金配重为什么能够覆盖这么多民用产品

从消费电子到高尔夫球杆，再到钓鱼装备和精密机械，这些产品看似差异很大，但对配重材料的需求存在共同点：需要在有限空间内获得确定质量，并且希望准确控制质量分布。

可以把钨合金配重的作用概括成四种基本形式：一是增加局部质量，例如高尔夫球杆杆头配重；二是调整重心，例如摄影云台和运动器材；三是改变惯性特性，例如球拍、球杆和旋转机构；四是修正质量不平衡，例如微型转子、电机和竞速装备。其中，高密度是钨合金最突出的材料优势。假设钨合金密度为 18.0 g/cm³，100 g 配重的理论体积约为 5.56 cm³；同样质量的钢材约需要 12.74 cm³。因此，当产品内部空间紧张时，钨合金能够把原本较大的配重压缩成更小的结构。

不同应用对钨合金配重的要求并不相同

消费电子通常更关注微型化、质量一致性、磁性能、振动特性和批量制造能力；体育用品更加关注重心、惯性矩、手感和质量分布；民用机械则更加关注尺寸精度、安装可靠性、耐久性以及动态平衡。因此，不能简单按照钨含量或密度越高越好来选择材料。W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 的材料特性存在差异，同一密度下不同材料体系的机械、磁性和加工表现也可能不同。

实际选型应根据目标质量、空间限制、安装方式、工作转速、重心要求以及成本综合确定。从产业链角度看，中钨智造（CTIA GROUP）可针对手机振动配重、高尔夫球杆配重、钓鱼坠、摄影云台配重、微型转子配重以及其他民用高密度配重件，根据产品结构提供不同

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

密度、尺寸、形状和安装方式的钨合金定制。

综上，钨合金配重在消费电子、体育和民用领域的共同价值，是利用高密度实现小体积质量集中，再通过精确的质量和位置控制改变产品的重心、惯性、振动或平衡状态。随着消费电子小型化、体育器材精细化以及民用机械高性能化，这类小型高密度配重的应用范围还会继续向微型执行机构、智能设备、摄影设备、运动器材和精密民用装备等方向延伸。



Q49 手机为什么使用钨合金振动配重？

手机使用钨合金振动配重，主要是因为高密度钨合金能够在非常有限的内部空间内提供较大的惯性质量，使振动马达在较小体积下产生足够的振动效果。尤其是在智能手机内部空间高度集成的情况下，电池、摄像头、主板、扬声器和散热结构已经占据大量空间，因此振动组件通常希望在保证振感的同时尽可能小型化。

1. 钨合金可以在小体积内提供较大质量

手机振动马达中的配重本质上是一个运动质量。质量越大，在相同运动条件下产生的惯性力通常越明显，而手机内部又没有太多空间容纳大体积配重。例如密度为 18.0 g/cm³的钨合金，1 g 材料体积约为 0.0556 cm³，10 g 材料体积约为 0.556 cm³。相比密度约 7.85 g/cm³的钢材，同样 10 g 质量需要约 1.27 cm³，钨合金可以显著缩小配重体积。因此，钨合金特别适合手机这种厚度和内部空间都受到严格限制的产品。

2. 配重质量决定振动系统的惯性效应

手机常用的振动执行机构包括偏心旋转质量结构和线性振动结构。对于偏心旋转质量，配重旋转时产生的离心力可以用 $F=m\omega^2r$ 表示，其中 F 为离心力、m 为运动质量、ω 为角速度、r 为配重质心到旋转轴的距离。这说明振动效果与质量 m、转速 ω 以及偏心半径 r 有

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

关。在电机尺寸和转速已经受到设计限制的情况下，提高配重密度可以在有限空间内获得较大的运动质量。不过，振动强度并不是单纯由配重重量决定的，还与电机输出能力、偏心量、转速、安装刚度、手机结构以及控制算法有关。

3. 高密度有利于手机振动模块小型化

手机内部空间通常呈现高度立体化布局，振动马达可能需要布置在主板、电池、摄像头模组或机身中框附近。配重尺寸过大不仅会占用内部空间，还可能与其他零部件发生干涉。钨合金可以把较大的质量集中到很小的体积中，因此能够帮助振动模块实现薄型化、小型化设计。例如同样为 5 g 配重，18.0 g/cm³钨合金只需要约 0.278 cm³，而 7.85 g/cm³钢材需要约 0.637 cm³。对于毫米级厚度限制的手机结构而言，这种差异具有实际意义。

4. 配重的质量分布同样影响振动效果

手机振动配重不是一个单纯的高密度金属块。配重的质心位置、偏心距离、形状和安装方向都会影响振动系统的运动状态。对于旋转偏心质量，除了质量 m 之外，偏心半径 r 也非常重要。如果在不增加配重质量的情况下改变其质心距离旋转轴的位置，产生的离心力也会发生变化。对于某些结构，还需要考虑转动惯量 $I=\Sigma m_i r_i^2$，其中 m_i 为质量单元、r_i 为该质量单元到旋转轴的距离。因此，配重设计通常需要同时考虑密度、质量、外形和质心，而不是只看材料密度。

5. 钨合金能够适应复杂的小型结构

手机振动配重的尺寸通常比较小，而且可能需要与电机转子、转轴或其他结构精确配合，因此产品形状并不一定是简单圆柱体。钨合金可以通过粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）实现小型近净成形，再通过精密加工获得所需的孔位、槽位、外径和配合尺寸。根据结构不同，可以制造成圆盘、扇形、弧形、环形以及其他异形配重。对于大批量手机零部件，近净成形能够减少机械加工量，提高材料利用率，同时有利于保持批次之间的质量一致性。

6. 手机配重对质量一致性要求较高

手机振动组件通常采用批量生产，因此配重件不能只满足单件设计尺寸，还需要保持较高的批次一致性。如果同一批配重质量差异较大，就可能导致不同手机之间的振感出现差异。因此制造过程中需要控制粉末原料、压制密度、烧结收缩、加工尺寸以及最终质量。对于高精度振动组件，还需要关注配重的质心位置、圆跳动、同心度以及与转子之间的装配精度。

7. 钨合金材料体系需要根据手机结构选择

手机振动配重常可以采用 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）和 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）等高密度钨合金体系。如果产品附近存在磁传感器、磁罗盘或其他对磁环境敏感的电子元件，就需要考虑材料的磁响应。W-Ni-Fe 由于含 Fe（Iron，铁），通常比 W-Ni-Cu 具有更明显的磁响应，而 W-Ni-Cu 通常具有较低的磁响应，但具体性能仍取决于材料成分和制造工艺。因此，手机振动配重选材不能只看密度，还需要综合考虑磁性能、机械性能、加工性能和成本。

8. 为什么不用纯钨？

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

纯钨（W，Tungsten，钨）的密度约为 19.25 g/cm³，比许多钨合金更高，从理论上看可以进一步缩小配重体积，但纯钨具有硬度高、脆性较明显、加工难度较高等特点。钨合金通过加入 Ni（Nickel，镍）、Fe（Iron，铁）或 Cu（Copper，铜）等粘结相，可以在保持较高密度的同时改善韧性和加工适应性，因此在需要批量制造、复杂结构和精密尺寸控制的手机振动配重中，高密度钨合金往往更容易实现综合性能要求。

9. 中钨智造可用于小型钨合金振动配重定制

中钨智造（CTIA GROUP）可以针对手机、智能穿戴设备、电动牙刷、按摩设备等小型振动组件，根据配重质量、密度、外形、偏心距离、安装孔以及尺寸公差进行钨合金配重定制，并通过粉末冶金和后续精密加工满足批量零部件的制造要求。

由此可见，手机采用钨合金振动配重的核心原因可以概括为：在极小的内部空间内获得足够的运动质量，通过合理的偏心结构和高速运动产生所需振动，同时保持振动模块的小型化和批量一致性。钨合金的主要价值在于高密度带来的体积优势，而最终振感还取决于配重质量、偏心半径、转速、振动机构和整机结构等多个因素。



Q50 高尔夫球杆为什么使用钨合金配重？

高尔夫球杆使用钨合金配重，主要是利用钨合金高密度、小体积的特点，在不明显增加杆头体积的情况下，将一定质量集中布置到杆头底部、后部、周边或特定位置，从而调整球杆的重心位置、重心深度、惯性矩（MOI，Moment of Inertia，转动惯量）以及击球时的质量分布。与普通钢材相比，钨合金最大的优势不是让球杆整体变得更重，而是在球杆头部有限的空间内实现更灵活的质量配置。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

1. 高密度可以在小体积内增加配重

钨合金的密度通常远高于钢材。以 18.0 g/cm³钨合金为例，10 g 配重所需体积约为 0.556 cm³；如果使用密度约 7.85 g/cm³的钢材，同样 10 g 质量需要约 1.27 cm³。因此，设计人员可以将一定质量集中在非常小的区域，而不需要明显扩大杆头尺寸。对于高尔夫球杆而言，这一点很重要，因为杆头的外形、尺寸和空气动力学设计都有一定限制。

2. 可以调整球杆重心位置

高尔夫球杆的击球特性与杆头重心位置密切相关。通过在杆头不同位置配置钨合金，可以改变整体质量分布。例如，将较高密度的配重布置在杆头底部，可以使整体重心向较低位置移动；将配重布置在杆头后部，则可以改变重心深度；如果把质量布置在杆头周边，则可以改变质量相对于击球面的分布。其基本关系可以用质心公式表示：$r_CG=\Sigma m_i r_i/\Sigma m_i$，其中 r_CG 为系统重心位置、m_i 为各质量单元、r_i 为对应质量的位置。因此，同样重量的钨合金配重，安装位置不同，最终产生的效果也不同。

3. 可以提高杆头的惯性矩

高尔夫球杆在击球过程中并不总能让球完全击中甜蜜点。如果击球位置偏离杆头中心，杆头会产生绕自身重心的旋转趋势。这时，杆头绕相关旋转轴的惯性矩（MOI，Moment of Inertia，转动惯量）会影响其对这种旋转的抵抗能力。基本关系可以表示为 $I=\Sigma m_i r_i^2$，其中 I 为转动惯量、m_i 为质量、r_i 为质量单元到旋转轴的距离。钨合金密度高，因此可以在杆头周边或远离旋转轴的位置集中布置质量，在不增加过多体积的情况下改变质量分布。但这里并不是简单地说钨合金越多越好，因为杆头总质量、重心位置、惯性矩和挥杆特性需要整体协调。

4. 有利于控制杆头的重心深度

对于某些球杆设计，设计人员希望调整重心距离击球面的前后位置。高密度钨合金可以作为局部质量调节材料，使更多质量集中到杆头后部。例如，在杆头内部空间有限的情况下，如果使用低密度材料，需要更大的配重体积才能达到相同质量；使用钨合金后，可以在较小结构空间内实现后移质量。这也是钨合金常被设计成后配重块、底部配重块或周边配重的原因之一。

5. 底部配重可以帮助实现低重心设计

对于部分球杆，设计人员会将钨合金布置在杆头底部，通过降低质量中心位置来改变杆头的整体重心。例如一个原本质量分布较均匀的杆头，如果在底部增加一定质量，整体重心会向下移动。其效果可以从质量矩的角度理解：配重距离原重心越远，对整体重心位置产生的影响通常越明显。因此，钨合金配重可以帮助设计人员在不大幅改变杆头外形的情况下实现低重心结构。

6. 配重还可以用于调节挥重

高尔夫球杆的挥重（Swing Weight，挥杆重量平衡）与杆头、杆身、握把以及各部分质量分布有关。在杆头加入一定质量，会改变球杆整体的质量分布和挥重参数。通过使用不同质量的钨合金配重，可以在一定范围内调整球杆的质量平衡，使不同规格球杆达到设计要求。不过，挥重并不等于整支球杆的实际重量，它反映的是球杆质量相对于特定参考点的分布状态。因此，增加相同质量的配重，如果安装位置不同，对挥重产生的影响也会不同。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

7. 为什么不用钢材代替钨合金？

钢材并不是不能用于高尔夫球杆配重，而是钨合金能够提供更高的质量密度。例如 18.0 g/cm³钨合金的密度约为普通钢材的 2.29 倍。如果设计需要 20 g 局部配重，钨合金只需要约 1.11 cm³，而钢材需要约 2.55 cm³。当球杆头已经接近设计体积上限时，这种差异就比较有价值。设计人员可以利用节省出来的空间优化其他结构，例如调整配重位置、增加空腔或者重新设计杆头质量分布。

8. 钨合金配重可以做成多种结构

高尔夫球杆中的钨合金配重并不一定是简单的块状结构，可以根据杆头设计加工成圆柱、圆盘、条状、弧形、螺钉式、嵌入式或异形配重。部分产品采用可更换配重结构，通过不同质量规格的配重实现杆头质量和质量分布的调整。对于这种结构，配重件的质量公差、螺纹尺寸、安装深度和定位精度都会直接影响最终产品的一致性。

9. 钨合金材料也需要考虑加工和性能

高尔夫球杆配重通常可以采用 W-Ni-Fe（Tungsten-Nickel-Iron，钨-镍-铁）或 W-Ni-Cu（Tungsten-Nickel-Copper，钨-镍-铜）等高密度钨合金。具体选材需要结合目标密度、机械性能、加工方式和成本确定。钨合金通常通过粉末冶金（PM，Powder Metallurgy，粉末冶金）获得毛坯，再根据结构进行车削、铣削、钻孔、攻螺纹或磨削。对于小型高尔夫球杆配重，尺寸和重量的一致性尤其重要，因为配重质量的变化会直接影响杆头最终质量和质量分布。中钨智造（CTIA GROUP）可针对高尔夫球杆底部配重、后部配重、周边配重以及可更换式配重件，根据目标质量、密度、尺寸、安装结构和公差进行钨合金配重定制。

10. 核心并不是钨合金越重越好

高尔夫球杆使用钨合金配重的真正目的，是利用高密度材料进行精确的质量布局，而不是单纯追求更高的杆头重量。例如同样增加 20 g 质量，将其安装在杆头底部、后部、趾部或靠近击球面的位置，会产生不同的重心和惯性矩变化。因此，实际设计需要综合考虑杆头总质量、重心高度、重心深度、惯性矩、配重位置以及球杆整体挥重。

概括来说，钨合金在高尔夫球杆中的主要价值可以归纳为：高密度让配重体积更小，设计人员可以把更多质量集中到指定位置，从而灵活调整杆头重心、重心深度、惯性矩和质量分布，同时避免配重件过度占用杆头内部空间。这也是钨合金成为高端高尔夫球杆局部配重材料的重要原因。

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved