



## 关于钨合金棒的 Q&A

中钨智造科技有限公司

### 目录

#### 一、关于钨合金棒材的基础概念

- Q1: 钨合金棒是什么?
- Q2: 钨合金棒与纯钨棒有什么区别?
- Q3: 钨合金棒的主要牌号有哪些?
- Q4: 为什么叫高比重钨合金?
- Q5: 钨合金棒含钨量越高越好吗?
- Q6: 钨合金棒有辐射吗?
- Q7: 钨合金棒符合 RoHS 环保标准吗?
- Q8: 钨合金棒的外观形态有哪些?

#### 二、钨合金棒材的性能参数

- Q9: 钨合金棒的密度范围是多少?
- Q10: 钨合金棒的熔点有多高?
- Q11: 钨合金棒的硬度是多少?
- Q12: 钨合金棒的抗拉强度如何?
- Q13: 钨合金棒的导电和导热性能怎么样?
- Q14: 钨合金棒的热膨胀系数是多少?
- Q15: 钨合金棒耐腐蚀吗?
- Q16: 不同掺杂剂对性能有何影响?

#### 三、钨合金棒材的生产工艺

- Q17: 钨合金棒的主要生产工艺有哪些?
- Q18: 烧结工艺对钨合金棒质量有多大影响?
- Q19: 什么是旋锻加工? 对钨合金棒性能有何提升?
- Q20: 钨合金棒可以热处理吗?

#### 四、钨合金棒材的产品标准

- Q21: 钨合金棒遵循哪些国际标准?
- Q22: 中国有哪些钨棒国家标准?
- Q23: 钨合金棒的公差要求有多严格?
- Q24: 影响钨合金棒尺寸公差的主要因素有哪些?

#### 五、钨合金棒材的检测方法

- Q24: 如何检测钨合金棒的密度?
- Q25: 如何测试钨合金棒的硬度?
- Q26: 如何检测钨合金棒的内部缺陷?



Q27: 如何分析钨合金棒的化学成分?

Q28: 钨合金棒的晶粒度如何检测?

Q29: 如何评估钨合金棒的高温性能?

## 六、钨合金棒的应用场景

Q30: 钨合金棒在军工领域的主要用途?

Q31: 钨合金棒在电子行业有哪些应用?

Q32: 钨合金棒在高温炉中有什么作用?

Q33: 钨合金棒在医疗领域怎么用?

Q34: 钨合金棒在航空航天中起什么作用?

Q36: 钨合金棒在模具行业如何应用?

Q37: 钨合金棒在汽车工业中用在哪里?

## 七、钨合金棒的使用与安全

Q38: 钨合金棒有毒吗?

Q40: 钨合金棒容易断裂吗?

Q41: 钨合金棒如何储存?

## 八、钨合金棒材的定制与采购

Q42: 钨合金棒的尺寸规格有哪些?

Q43: 钨合金棒的表面状态有哪些可选?

Q44: 如何根据用途选择钨合金棒类型?

Q45: 钨合金棒有定制服务吗?

## 九、关于钨合金棒的常见误区

Q46: 钨合金棒和硬质合金棒是一回事吗?

Q47: 钨合金棒是“上帝之杖”那种武器吗?

Q48: 钨合金棒可以做首饰吗?

Q49: 钨合金棒越重越好吗?

Q50: 钨合金棒价格为什么差异这么大?

## 如何定制采购钨合金棒?

中钨智造科技有限公司 CTIA GROUP LTD.

钨合金棒定制采购需求清单

钨合金棒采购信息简表 -快速询价表

### 中钨智造科技有限公司联系信息

中钨智造科技有限公司 (CTIA GROUP LTD.)

地址: 中国福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

邮编: 361008

电话: +86 592 512 9696 / +86 592 512 9595

邮箱: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

官方网站: [www.ctia.group](http://www.ctia.group) / [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)



## 关于钨合金棒的 Q&A

中钨智造科技有限公司

### 一、关于钨合金棒材的基础概念

#### Q1: 钨合金棒是什么？

钨合金棒，又称钨基重合金棒（Tungsten Heavy Alloy Rod），是一种以难熔金属钨（W）为主要组成相，以镍（Ni）、铁（Fe）、铜（Cu）、钴（Co）等金属作为结合相，通过粉末冶金工艺制备而成的高密度工程材料。与传统纯钨棒相比，钨合金棒不仅保留了钨高密度、高熔点、高弹性模量和优异抗辐照性能等特点，还显著改善了材料的塑性、韧性、可加工性和抗冲击性能，因此成为航空航天、国防军工、医疗、石油、电子、电力、核工业以及高端装备制造等领域的重要结构材料。

工业上常见的钨合金棒钨含量通常为 90%~97%，按照结合相组成可分为 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu、W-Ni-Co 等多个系列。其中，W-Ni-Fe 体系综合性能最好，也是目前应用最广泛的类型；W-Ni-Cu 体系具有无磁性和较好的耐腐蚀性能，适用于电子、医疗及磁场环境；W-Ni-Co 体系则具有更高的强度，但加工难度相对较大。



钨合金棒采用粉末冶金路线制造, 主要包括原料配制、混粉、压制、液相烧结、热处理、锻造或旋锻、校直、车削、磨削及检测等工序。在烧结过程中, 镍、铁等结合相首先熔化形成液相, 将钨颗粒重新排列并实现致密化, 最终形成连续的结合相基体和均匀分布的钨颗粒组织。这种典型的双相组织使材料兼具高密度和较好的塑韧性, 是钨合金优于纯钨的重要原因之一。

钨合金棒最大的特点是密度极高, 典型密度约为  $16.5 \sim 19.3 \text{ g/cm}^3$ , 仅次于金、铂等少数贵金属, 而远高于钢(约  $7.85 \text{ g/cm}^3$ )、铜( $8.96 \text{ g/cm}^3$ )和铅( $11.34 \text{ g/cm}^3$ )。高密度使其具有优异的动能储存能力、惯性性能和射线屏蔽能力, 因此被广泛用于航空配重、陀螺转子、飞轮、高速旋转部件、钻井配重、医疗放射防护、工业射线屏蔽以及核工业屏蔽构件等领域。除高密度外, 钨合金棒还具有较高的机械强度。不同牌号产品抗拉强度一般可达  $700 \sim 1200 \text{ MPa}$ , 经过旋锻、热处理等强化工艺后, 部分高性能产品甚至可超过  $1300 \text{ MPa}$ 。同时, 其弹性模量约为  $320 \sim 380 \text{ GPa}$ , 远高于普通钢材, 因此在承受高载荷时变形较小, 尺寸稳定性优异。钨合金棒还具有良好的耐高温性能。虽然结合相会限制其长期使用温度, 但多数产品仍可在数百摄氏度甚至更高温度下长期工作, 远优于普通重金属材料。此外, 钨本身熔点高达  $3422^\circ\text{C}$ , 因此钨合金在高温环境下仍具有较好的组织稳定性和尺寸稳定性。加工性能也是钨合金棒的重要优势之一。相比纯钨材料较大的脆性, 钨合金可以采用普通数控车削、铣削、钻孔、磨削、攻丝等机械加工方式制造复杂零件, 加工效率明显提高。对于高精度产品, 还可进一步进行线切割、电火花加工(EDM)、抛光及表面处理, 以满足精密装备制造需求。

近年来, 随着新能源、半导体、高端医疗设备、商业航天及核技术产业的发展, 对钨合金棒提出了更高要求, 例如更高密度、更高强度、更好的尺寸一致性、更低磁性、更高纯度以及更优异的疲劳寿命。因此, 现代钨合金制造正在向细晶组织控制、高致密化、数字化粉末冶金和精密近净成形方向持续发展, 不断拓展其在高端制造领域的应用范围。

总体而言, 钨合金棒是一类兼具超高密度、高强度、良好塑性、优异耐磨性和较好加工性能的高性能工程材料, 在许多对重量、惯性、屏蔽能力及尺寸稳定性要求极高的场合, 仍然是其他金属材料难以替代的重要选择。

## Q2: 钨合金棒与纯钨棒有什么区别?

钨合金棒和纯钨棒虽然都以钨为主要成分, 但两者在化学组成、显微组织、制造工艺、力学性能、加工性能及应用领域等方面存在明显差异。二者并不存在简单的优劣之分, 而是分别适用于不同的工程需求。

(1) 从化学成分来看, 纯钨棒通常采用高纯钨粉制备, 钨含量一般不低于  $99.9\%$ , 属于单一金属材料; 而钨合金棒则是在钨中加入约  $3\% \sim 10\%$  的镍、铁、铜或钴等结合相, 钨含量通常为  $90\% \sim 97\%$ 。这些结合相虽然比例较小, 却显著改变了材料的组织结构和综合性能。

(2) 从制造工艺来看, 纯钨棒主要采用粉末冶金烧结后, 再经过锻造、轧制和拉拔等塑性加工制成, 其组织基本为连续钨晶粒; 钨合金棒则采用液相烧结工艺, 在烧结过程中形成液态结合相, 使钨颗粒重新排列并致密化, 最终形成钨颗粒分布于结合相基体中的双相组织。这种组织决定了钨合金兼具高密度和较好的塑韧性。

(3) 密度方面, 纯钨棒理论密度约  $19.25 \text{ g/cm}^3$ , 工业产品通常可达到  $18.9 \sim 19.3 \text{ g/cm}^3$ ; 钨合金棒则根据钨含量不同, 密度一般为  $17.0 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ , 高钨含量产品可接近  $19.0 \text{ g/cm}^3$ 。虽然纯钨密度略高, 但对于大多数工程应用而言, 钨合金仍属于典型的超高密度材料。

(4) 力学性能方面, 两者差异更加明显。纯钨具有较高硬度、较高弹性模量和优异耐高





温性能,但室温塑性较低,容易发生脆性断裂,特别是在低温或应力集中条件下,加工和使用都需要格外注意。钨合金由于结合相的存在,塑性和冲击韧性显著提高,延伸率通常可达 10%~30%,远高于纯钨,因此更适合承受动态载荷和复杂应力环境。

(5) 加工性能方面,纯钨属于典型难加工材料,切削时刀具磨损快,加工裂纹和崩边风险较高;钨合金则具有更好的切削性能,可采用普通数控设备进行车削、铣削、钻孔、攻丝和磨削,加工效率明显提高。这也是许多复杂零件优先选择钨合金的重要原因。

(6) 耐高温性能方面,纯钨更具优势。由于不存在低熔点结合相,纯钨能够长期在更高温度下工作,是高温炉发热体、电子发射阴极、离子源、电真空器件及聚变装置的重要材料。钨合金虽然同样具有良好的耐热性能,但结合相会限制其长期使用温度,因此更多应用于高密度结构件,而不是超高温发热元件。

(7) 在应用领域方面,两种材料也各有侧重。纯钨棒主要用于高温加热元件、电极、真空电子器件、半导体热场、高温炉部件及聚变能源装备等;钨合金棒则广泛用于航空航天配重、导弹配重、陀螺转子、医疗放射屏蔽、工业射线防护、石油钻井工具、高速旋转部件及精密机械零件等。

(8) 此外,两者成本构成也有所不同。纯钨由于加工难度较大,加工成本通常较高;钨合金虽然增加了合金元素,但因机械加工效率更高、成品率更高,在许多复杂零件制造中反而具有更好的综合经济性。

随着现代粉末冶金和材料工程的发展,纯钨和钨合金都在不断升级。纯钨正向超高纯度、超细晶和高温稳定化方向发展,而钨合金则向更高密度、更高强度、更优组织均匀性、更低磁性及更高疲劳寿命方向持续优化。未来,两类材料将在各自优势领域长期并存,并共同满足航空航天、半导体、高端医疗、核工业及先进制造业不断增长的技术需求。

### Q3: 钨合金棒的主要牌号有哪些?

钨合金棒是以钨(W)为基体,通过添加镍、铁、铜、铼、钽、铈、镧等元素形成的一类高性能钨基材料。根据合金体系、强化机制和应用领域的不同,可分为高比重钨合金、钨铜合金、稀土钨合金、钨铼合金等多个系列。其中,高比重钨合金主要用于配重、防护和惯性器件;钨铜合金兼具导电、导热与耐电弧烧蚀性能;稀土钨和钽钨材料主要应用于焊接电极;钨铼合金则广泛用于高温测温、航空航天和核工业等领域。目前工业生产和国际贸易中常见的钨合金棒牌号主要包括以下几大类。

| 合金系列     | 常见牌号                            | 主要特点           | 典型应用                |
|----------|---------------------------------|----------------|---------------------|
| 钨镍铁高比重合金 | 90WNiFe、93WNiFe、95WNiFe、97WNiFe | 密度高、强度高、塑性好    | 配重块、惯性器件、射线屏蔽       |
| 钨铜合金     | WK40、WK50、WK60、WK70、WK80、WK90   | 导热导电性能优良、耐电弧烧蚀 | 电火花电极、电接触材料、真空开关    |
| 钨铈合金     | WCe0.8、WCe1.5、WCe2.0、WCe2.4     | 起弧性能优良、无放射性    | TIG 焊、自动焊接          |
| 钨镧合金     | WLao.6、WLa1.0、WLa1.5、WLa1.7     | 电流承载能力高、寿命长    | 机器人焊接、交流与直流焊接       |
| 钨铼合金     | WRe1、WRe3、WRe5、WRe25、WRe26      | 高温强度高、热电性能优异   | 热电偶、高温结构件、航天器部件     |
| 钨钽合金     | WTh0.7、WTh1.0、WTh2.0、WTh3.3     | 起弧容易、耐烧损       | TIG 焊接(逐步被无放射性电极替代) |

从市场应用来看,高比重钨镍铁合金是需求量最大的钨合金棒产品。其钨含量通常为 90%~97%,其余主要由镍和铁组成,兼具接近纯钨的高密度和远优于纯钨的加工性能,因此广泛用于航空航天配重、导弹平衡块、医疗射线屏蔽、石油测井配重以及高速旋转部件等领域。其中,90WNiFe 塑性最好,适用于需要后续机械加工或冲击载荷较大的场合;95WNiFe 和 97WNiFe 密度更高,更适用于对体积和重量要求严格的精密配重系统。

钨铜合金则属于典型的假合金(Pseudo Alloy),钨与铜几乎互不固溶,通常采用粉末冶



金渗铜工艺制备。随着铜含量增加,材料导电性、导热性不断提高,而硬度和耐高温性能则有所下降。例如,WK40 表示约 40%的铜和 60%的钨,适用于高强度电极;WK80 则因铜含量较高,更适合需要快速散热的电子器件和电接触元件。设计人员通常根据导电性与耐烧蚀性能之间的平衡选择不同牌号。

稀土钨系列主要作为钨极氩弧焊 (GTAW/TIG) 和等离子弧焊 (PAW) 的非熔化电极材料。其中,钨铈电极具有起弧电压低、电弧稳定性好的特点,尤其适用于低电流精密焊接;钨钐电极则兼具交流和直流焊接性能,在自动化焊接生产线上应用越来越广。近年来,随着职业健康和环保要求不断提高,无放射性的钨铈、钨钐和复合稀土钨电极正逐步替代传统钨钍电极,成为国际市场的发展方向。

钨铍合金是另一类高附加值产品。铍能够显著提高钨的高温塑性、抗热震性能和再结晶温度,使材料在 2000 °C 以上仍具有较好的力学性能。WRe3、WRe5 等低铍合金多用于高温结构件;WRe25、WRe26 则广泛用于 B 型、C 型高温热电偶,可长期测量 2000 °C 以上的超高温,因此在航空发动机、核聚变实验装置和高温科研设备中具有不可替代的重要地位。此外,根据特殊用途,还发展出了钨镍铜合金、钨银合金、钨钼合金以及掺杂氧化铜、氧化钇等多种功能化钨合金棒。这些材料在电子封装、半导体装备、真空技术和特种电极等领域发挥着越来越重要的作用。

中钨智造认为,钨合金棒的发展已经从单纯追求高密度、高强度,逐步转向高纯度、高组织均匀性、高尺寸精度和专用化方向。未来,随着半导体、聚变能源、航空航天及先进制造产业的发展,不同钨合金体系将进一步细分,形成更加专业化、定制化的产品系列,以满足不同工况下对于高温性能、导电性能、耐磨性能及加工性能的综合要求。

#### Q4: 为什么叫高比重钨合金?

高比重钨合金 (High Density Tungsten Alloy, 简称 HDTA) 之所以得名,是因为其密度远高于绝大多数工程金属,在常用金属材料中仅次于纯钨和少数贵金属。高比重钨合金的密度可达到 16.5~18.75 g/cm<sup>3</sup>,而普通碳钢的密度约为 7.85 g/cm<sup>3</sup>,不锈钢约为 7.9~8.0 g/cm<sup>3</sup>,铅约为 11.34 g/cm<sup>3</sup>,铝仅为 2.70 g/cm<sup>3</sup>。因此,在相同体积条件下,高比重钨合金能够提供更大的质量,这也是其被称为高比重或高密度钨合金的根本原因。不同材料的密度对比如下:

| 材料     | 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 与普通钢相比      |
|--------|-------------------------|-------------|
| 铝      | 2.70                    | 约 0.34 倍    |
| 钛合金    | 4.50                    | 约 0.57 倍    |
| 普通钢    | 7.85                    | 1 倍         |
| 不锈钢    | 7.90~8.00               | 约 1.02 倍    |
| 铜      | 8.96                    | 约 1.14 倍    |
| 铅      | 11.34                   | 约 1.45 倍    |
| 高比重钨合金 | 16.5~18.75              | 约 2.1~2.4 倍 |
| 纯钨     | 19.25                   | 约 2.45 倍    |

从材料组成来看,高比重钨合金并不是纯钨,而是以 90%~98%的钨为主体,加入少量镍、铁或镍、铜等粘结相,通过液相烧结形成两相组织。其中,钨颗粒构成高密度骨架,镍铁或镍铜基体起到连接和增韧作用,使材料既保持了接近纯钨的高密度,又克服了纯钨室温脆性大、加工困难等缺点。因此,高比重钨合金兼具高密度、高强度和良好的机械加工性能。密度也是高比重钨合金分类的重要依据。例如,90WNiFe 的密度通常约为 17.0 g/cm<sup>3</sup>,



93W<sub>Ni</sub>Fe 约为 17.6 g/cm<sup>3</sup>, 95W<sub>Ni</sub>Fe 约为 18.0 g/cm<sup>3</sup>, 而 97W<sub>Ni</sub>Fe 可达到 18.5 g/cm<sup>3</sup>以上。随着钨含量提高, 材料密度不断增加, 但塑性和加工性能会有所下降, 因此实际应用中需根据性能需求进行综合选择。

高比重钨合金之所以受到航空航天、国防军工、医疗设备等行业青睐, 并不仅仅因为密度高, 更因为它在密度基础上仍保持较高的强度和韧性。典型产品的抗拉强度一般可达到 700~1000 MPa 以上, 延伸率可达 10%~30%, 远优于纯钨材料。这意味着它不仅可以作为静态配重, 还能够承受较大的冲击载荷和动态应力, 因此广泛用于飞机配重块、导弹惯性配重、陀螺转子、高速旋转部件、钻井配重杆等领域。

在核工业和医疗行业, 高比重钨合金还充分利用了其高密度带来的优异射线屏蔽能力。由于钨具有较高的原子序数 (74) 和较大的电子密度, 对 X 射线和 γ 射线具有较强的吸收作用, 因此在相同屏蔽效果下, 钨合金屏蔽件可以比铅制屏蔽件更薄、更小、更环保。目前, CT 设备准直器、放疗准直器、PET 设备屏蔽块以及工业探伤屏蔽组件中, 大量采用高比重钨合金替代传统铅材料。

此外, 高比重钨合金还具有较低的热膨胀系数、较好的耐腐蚀性能和较高的弹性模量, 使其在高温、高真空及长期服役环境下仍能保持较好的尺寸稳定性。这也是其在航天器姿态控制系统、半导体设备及精密仪器中得到广泛应用的重要原因。

中钨智造认为, 高比重钨合金这一名称不仅体现了材料最显著的物理特性, 更反映了其在工程应用中的核心价值。未来, 随着粉末冶金技术、热等静压技术和组织调控技术不断进步, 高比重钨合金将在保持高密度优势的同时, 进一步向高强度、高韧性、高精度和绿色环保方向发展, 在航空航天、高端医疗、先进制造和新能源装备等领域发挥更加重要的作用。

#### Q5: 钨合金棒含钨量越高越好吗?

不一定。钨合金棒并不是含钨量越高性能就越好, 而是需要根据具体使用工况, 在密度、强度、硬度、韧性、加工性能和成本之间取得平衡。工业上常见的高比重钨合金通常属于 W-Ni-Fe 或 W-Ni-Cu 系列, 钨含量一般在 85%~98%之间, 其中 90%、92.5%、95%、97%等牌号应用最为广泛。不同含钨量意味着钨颗粒与黏结相比例发生变化, 因此材料性能也会随之改变。

首先, 从密度来看, 随着钨含量提高, 材料密度会持续增加。纯钨密度约为 19.25 g/cm<sup>3</sup>, 而 90%钨合金密度一般约 17.0~17.3 g/cm<sup>3</sup>, 95%钨合金约 18.0 g/cm<sup>3</sup>, 97%钨合金则可达到 18.5 g/cm<sup>3</sup>以上。因此, 对于要求单位体积质量尽可能大的产品, 如航空航天惯性配重、高端陀螺仪配重、石油测井配重以及动能穿甲弹芯, 高含钨材料具有明显优势。

其次, 从力学性能来看, 高钨含量并不意味着综合性能一定最好。随着钨比例提高, 镍铁或镍铜黏结相减少, 材料整体塑性和韧性下降, 而硬度、弹性模量和耐磨性能则有所提高。换句话说, 高含钨材料更硬、更重, 但抵抗冲击载荷和吸收变形能的能力有所降低; 低含钨材料虽然密度略低, 却具有更好的延伸率、抗冲击性能和机械加工性能。加工性能也是选择含钨量的重要依据。高钨含量材料由于硬度高、切削阻力大, 对刀具磨损较快, 车削、铣削、钻孔等机械加工难度明显增加; 而 90%~92.5%钨合金由于黏结相较多, 切削加工相对容易, 更适合制造形状复杂、尺寸精度要求较高的零件。因此, 在需要大量机加工或复杂异形件时, 并不会一味追求最高含钨量。

此外, 不同应用领域对性能侧重点也完全不同。例如, 在医疗 CT 设备、X 射线设备和放射治疗设备中, 钨合金不仅要求较高密度, 还要求具有良好的加工性能和尺寸稳定性, 因此 95%左右的钨含量通常更为常见; 而在高速旋转设备的平衡配重中, 往往优先考虑密度





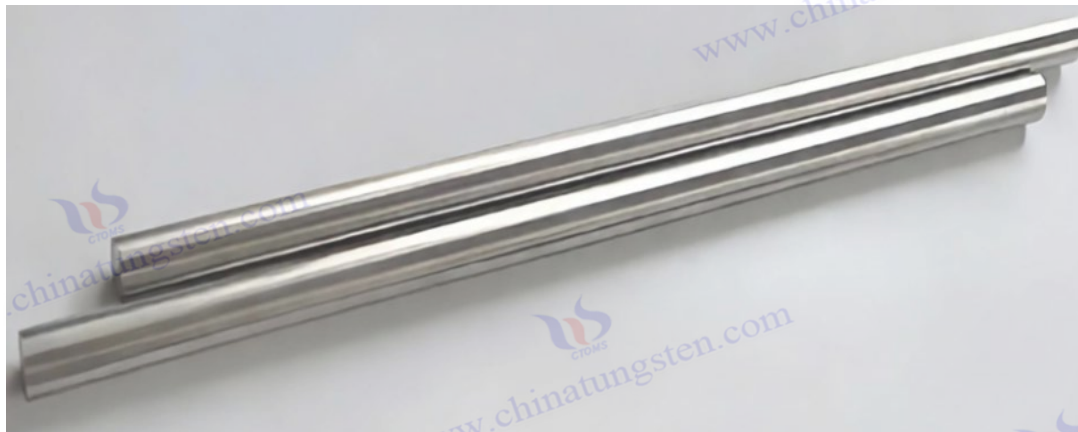
和质量集中性, 因此 97%以上钨含量具有优势。

成本同样是一个重要因素。钨含量越高, 原材料成本通常越高, 加工难度和加工成本也会相应增加。因此, 在满足设计要求的前提下, 工程设计一般会选择综合成本最低、综合性能最优的材料, 而不是简单选择最高含钨量。下表可作为不同钨含量材料性能特点的参考。

| 钨含量 (wt.%) | 密度特点    | 力学特点         | 加工性能   | 典型应用                |
|------------|---------|--------------|--------|---------------------|
| 90%左右      | 密度较高    | 韧性好、塑性较高     | 较容易加工  | 工业配重、医疗配重、复杂机械零件    |
| 92.5%~95%  | 密度与韧性平衡 | 综合性能优良       | 良好     | 航空航天配重、X射线屏蔽、惯性配重   |
| 97%左右      | 密度最高    | 硬度高、强度高、韧性下降 | 加工难度较大 | 穿甲弹芯、高密度惯性部件、特殊军工产品 |

除了含钨量外, 镍铁体系 (W-Ni-Fe) 和镍铜体系 (W-Ni-Cu) 的选择同样会影响性能。前者强度和韧性较高, 适用于承载结构件; 后者无磁性、耐腐蚀性能较好, 更适用于电子、医疗及精密仪器领域。因此, 在实际选材过程中, 应综合考虑化学体系和钨含量, 而不是仅关注其中一个指标。

中钨智造认为, 高比重钨合金不存在含钨量越高越好的绝对规律, 而是不同应用对应不同的最佳配比。现代钨合金设计理念更强调综合性能优化, 即根据密度要求、力学性能、加工工艺、服役环境及经济成本进行系统选材, 使材料性能与产品功能达到最佳匹配。



#### Q6: 钨合金棒有辐射吗?

大多数钨合金棒本身没有放射性, 不会对人体和环境产生辐射危害。但是否具有放射性, 并不取决于钨元素, 而取决于材料中是否添加了具有放射性的元素。因此, 应区分普通钨合金、高比重钨合金以及少数含放射性添加剂的钨材料。

首先, 钨 (W) 本身属于天然稳定元素, 不属于放射性元素。工业上广泛使用的纯钨、高比重钨合金 (W-Ni-Fe、W-Ni-Cu)、钨铜合金、钨银合金以及大多数钨制品, 都不会产生电离辐射, 其放射性水平与普通金属材料基本相同, 可以安全用于航空航天、医疗设备、电子工业、半导体装备以及机械制造等领域。真正需要关注的是含钍材料。钍 (Th) 属于天然放射性元素, 因此掺钍钨材料, 例如传统钍钨电极 (Thoriated Tungsten Electrode), 由于含有约 1%~2%的氧化钍 ( $\text{ThO}_2$ ), 具有较低水平的天然放射性。正常储存、运输和焊接时, 其辐射剂量通常很低, 但在磨削、切削等加工过程中, 如果产生含氧化钍的细微粉尘, 被长期吸入人体, 则可能增加职业暴露风险。因此, 国际焊接行业越来越倾向于采用无放射性的替代产品。

目前广泛推广的替代材料包括铈钨电极 (EWLa)、铈钨电极 (EWCe)、钇钨电极 (EWY)





以及复合稀土钨电极。这些产品在起弧性能、电弧稳定性和使用寿命方面已能够满足绝大多数焊接需求，同时避免了放射性管理问题，因此在欧洲、北美、日本等地区已成为主流产品。高比重钨合金棒与钍钨电极属于两类完全不同的材料。工业配重、医疗屏蔽、航空航天惯性配重等领域所使用的钨合金棒，通常采用镍、铁或铜作为黏结相，不含钍，因此不存在放射性问题。事实上，由于钨具有高密度和高原子序数，它反而常被用于制造 X 射线和  $\gamma$  射线屏蔽材料，其作用是屏蔽辐射，而不是产生辐射。不同钨材料的放射性情况可参考下表。

| 材料类型           | 是否具有放射性  | 主要用途              |
|----------------|----------|-------------------|
| 纯钨棒            | 无        | 高温结构件、电极、半导体、真空设备 |
| W-Ni-Fe 高比重钨合金 | 无        | 配重、航空航天、医疗、军工     |
| W-Ni-Cu 高比重钨合金 | 无        | 无磁配重、电子设备、医疗器械    |
| 钨钨电极（EWLa）     | 无        | TIG 焊、自动焊         |
| 铈钨电极（EWCe）     | 无        | 精密焊接、低电流焊接        |
| 钇钨电极（EWY）      | 无        | 高端焊接领域            |
| 钍钨电极（EWTh）     | 有轻微天然放射性 | 部分传统焊接工艺，使用比例逐步下降 |

对普通用户而言，只要购买的是正规厂家生产的高比重钨合金棒或纯钨制品，一般无需担心辐射问题。如果产品属于含钍钨材料，应按照职业卫生规范进行加工，特别是在磨削过程中配置局部排风系统、高效过滤除尘设备，并佩戴符合要求的防尘防护用品，以减少粉尘吸入。

中钨智造认为，目前全球钨材料的发展方向已经从传统含钍体系逐步转向无放射性稀土钨体系，而高比重钨合金、纯钨材料及大多数工业钨制品均不存在放射性风险。对于需要兼顾安全、环保和职业健康的现代制造业，无放射性钨材料已经成为行业发展的主流趋势。

#### Q7：钨合金棒符合 RoHS 环保标准吗？

符合。目前市场上主流的钨合金棒，包括纯钨棒、掺钨钨棒（La-W）、掺铈钨棒（Ce-W）、钨镍铁重合金棒（W-Ni-Fe）以及部分钨镍铜合金棒（W-Ni-Cu），均可按照欧盟 RoHS（Restriction of Hazardous Substances）指令进行生产，并满足环保要求。对于出口欧盟、北美、日本及其他高端制造市场的产品，RoHS 符合性已经成为基本要求之一，也是电子、电气、医疗器械、半导体及航空航天等行业采购的重要依据。

RoHS 指令主要限制铅（Pb）、镉（Cd）、汞（Hg）、六价铬（Cr<sup>6+</sup>）、多溴联苯（PBB）、多溴二苯醚（PBDE）以及后续新增的邻苯二甲酸酯类等有害物质的含量。由于钨及其常用合金元素本身并不属于 RoHS 限制物质，因此决定产品是否符合 RoHS 的关键，并不在于钨材料本身，而在于整个生产过程中是否使用了受限制的添加剂、镀层、润滑剂、焊料及表面处理材料，以及是否建立了完善的质量控制体系。对于粉末冶金生产的钨合金棒而言，目前主流工艺均采用高纯钨粉及符合环保要求的烧结助剂，掺钨钨和掺铈钨电极材料分别采用氧化镧（La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）和氧化铈（CeO<sub>2</sub>）作为稀土添加剂，这两类氧化物均不属于 RoHS 限制物质，因此能够满足环保法规要求。钨镍铁重合金中的镍和铁同样不属于 RoHS 限制元素，只要控制原材料杂质含量，即可顺利通过 RoHS 检测。需要注意的是，并非所有钨材料都天然符合所有环保法规。例如，传统钍钨合金（Thoriated Tungsten）虽然在 RoHS 指令中并非因重金属超标而受到限制，但由于氧化钍属于天然放射性物质，在职业健康、安全管理以及部分国家和地区的法规中受到严格管控，因此近年来其应用比例不断下降，越来越多被钨钨、铈钨、钇钨及复合稀土钨材料所替代。从绿色制造和职业健康的发展趋



势来看，无放射性钨材料已经成为国际市场的发展方向。对于出口产品，仅有 RoHS 符合性通常还不够。许多客户还会同时要求符合 REACH 法规、无冲突矿产（CMRT）、无卤（Halogen Free）、PFAS 限制要求以及 ISO 14001 环境管理体系等相关要求。因此，高端钨合金生产企业通常会建立完整的原材料追溯体系和第三方检测体系，以确保产品能够满足不同国家和行业的环保要求。下表列出了几种常见钨合金棒材料的环保符合性特点：

| 材料类型   | 主要成分                             | RoHS 符合性                   | 典型应用          |
|--------|----------------------------------|----------------------------|---------------|
| 纯钨棒    | W≥99.95%                         | 符合                         | 半导体、真空设备、高温炉  |
| 掺铈钨棒   | W+La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 符合                         | TIG 焊、电极、自动焊接 |
| 掺铈钨棒   | W+CeO <sub>2</sub>               | 符合                         | 精密焊接、薄板焊接     |
| 钨镍铁合金棒 | W-Ni-Fe                          | 符合                         | 配重、屏蔽、惯性部件    |
| 钨镍铜合金棒 | W-Ni-Cu                          | 符合                         | 电加工、电接触、高密度部件 |
| 钍钨棒    | W+ThO <sub>2</sub>               | 一般可满足 RoHS 检测要求，但存在放射性管理要求 | 特殊工业领域，应用逐渐减少 |

从检测角度来看，RoHS 符合性通常通过第三方实验室采用 XRF 筛查、ICP-OES、ICP-MS 等分析方法进行验证，并出具 RoHS 检测报告或符合性声明（Declaration of Conformity, DoC）。对于长期合作的大型客户，生产企业还会提供材料成分分析报告（Mill Test Certificate, MTC）、批次追溯信息以及环保合规文件，以满足供应链审核要求。

中钨智造认为，RoHS 符合性已经成为现代钨合金棒产品的基础要求，而不是竞争优势。真正体现产品水平的，是在满足 RoHS、REACH 等环保法规的基础上，同时实现高纯度、低杂质、高一致性和长期稳定的质量控制能力。未来，随着全球环保法规不断升级以及绿色制造理念持续推进，高性能、无放射性、可追溯、符合多项国际环保标准的钨合金棒将成为国际市场的主流产品。

#### Q8：钨合金棒的外观形态有哪些？

钨合金棒是钨及钨基合金最常见的产品形态之一，根据制造工艺、截面形状、尺寸规格、表面状态及最终用途的不同，可形成多种外观形式。不同外观不仅影响产品的运输、加工和装配方式，也直接关系到后续机械加工效率、尺寸精度及使用性能。因此，在采购钨合金棒时，除了关注材料牌号外，外观形态也是重要的技术参数之一。

从截面形状来看，圆棒是应用最广泛的类型，占市场需求的大部分。圆棒适用于车削、磨削、锻造、拉拔及各类机械加工，可进一步加工成轴类零件、电极、连接件、热场支撑件及各种异形产品。除圆棒外，还可生产方棒、矩形棒、六角棒及其他特殊截面产品。其中，方棒多用于模具加工、夹具制造及特殊结构件，而六角棒则主要用于需要直接加工螺纹或紧固件的场合。

按照制造工艺，可分为烧结棒、锻造棒、轧制棒和磨光精密棒等类型。烧结棒通常保持粉末冶金烧结后的原始状态，尺寸较大，主要作为后续热加工或机加工毛坯；锻造棒经过高温锻造后，组织更加致密，力学性能明显提高；轧制棒具有较好的尺寸一致性和组织均匀性；精磨棒则经过中心无心磨削或精密磨削加工，可获得较高的尺寸精度和表面质量，适用于高精密设备制造。按照表面状态，钨合金棒通常可分为以下几类：

| 表面状态     | 特点                | 典型用途        |
|----------|-------------------|-------------|
| 黑皮态（烧结态） | 保留烧结或热加工氧化层，表面较粗糙 | 后续锻造、机加工毛坯  |
| 车光面      | 经车削加工，尺寸较准确       | 一般机械加工零件    |
| 磨光面      | 经磨削加工，尺寸精度较高      | 精密轴类、电极、导向件 |

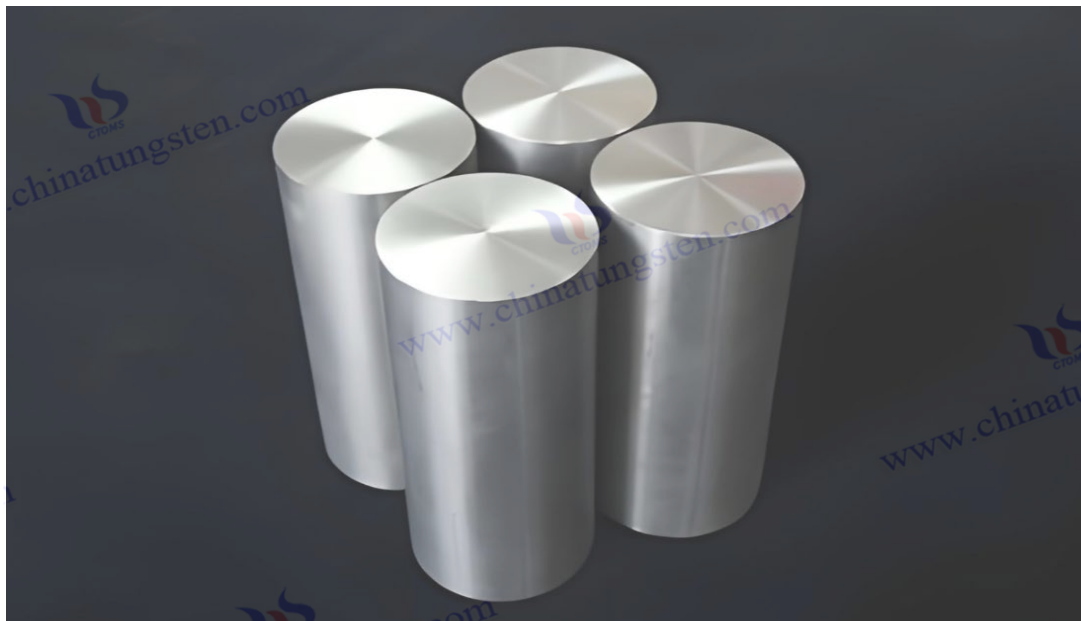


| 表面状态 | 特点             | 典型用途        |
|------|----------------|-------------|
| 抛光面  | 表面光洁度高，可获得镜面效果 | 半导体、医疗、光学设备 |
| 酸洗面  | 去除氧化皮，提高表面洁净度  | 真空设备、后续镀层加工 |

不同产品对应的尺寸精度也有所不同。普通工业用钨棒通常按照直径公差进行控制，而半导体、航空航天及医疗设备用高精度钨棒，则可能采用 h7、h6 甚至更高精度等级，并对圆度、直线度和同轴度提出严格要求。

除了标准棒材外，许多企业还能够生产各种定制外形，例如阶梯棒、带中心孔棒、异形棒、多边形棒以及具有局部加工结构的近净成形棒材。这类产品能够减少后续机械加工余量，提高材料利用率，降低加工成本，在半导体热场、高温炉、电子束设备及聚变装置中应用越来越广泛。对于不同材料体系，外观形态基本相同，但颜色和表面质感略有区别。例如，纯钨棒通常呈现银灰色金属光泽；TZM、MHC 等钼基合金棒颜色略深；钨镍铁重合金因含有结合相，其断口和加工表面也会表现出不同于纯钨的金属组织特征。不过，这些差异主要来自材料组织，并不会影响产品的正常使用。随着精密制造的发展，越来越多客户不仅要求尺寸合格，还要求表面无划伤、无压痕、无裂纹、无氧化斑及无机械损伤。对于出口产品，还常常需要采用防锈包装、真空包装或洁净包装，以满足长距离运输及高洁净度行业的要求。

中钨智造认为，钨合金棒的外观形态不仅体现产品的加工状态，更反映制造工艺水平。现代高端钨棒已经由传统的烧结毛坯逐步发展为高精度、低表面粗糙度、高尺寸一致性的精密棒材，并能够根据客户需求提供不同截面、不同表面状态及近净成形产品，为半导体、航空航天、医疗器械、电子工业及高端装备制造提供更加高效、可靠的材料解决方案。







## 二、钨合金棒材的性能参数

### Q9：钨合金棒的密度范围是多少？

钨合金棒的密度是评价其质量、组织致密程度和性能的重要指标之一。由于钨本身具有极高的原子量（183.84）和体心立方晶体结构，其理论密度可达 19.25 g/cm<sup>3</sup>，是所有常用工程金属中最高的之一，仅次于金、铂等少数贵金属。因此，钨及钨合金广泛应用于高比重配重、辐射屏蔽、高温结构件、航空航天、核工业及半导体装备等领域。

钨合金棒的实际密度并不是一个固定值，而是随着材料体系、化学成分、制造工艺以及致密化程度的不同而发生变化。一般可分为纯钨棒、高比重钨合金棒和掺杂钨棒三大类，其密度范围如下：

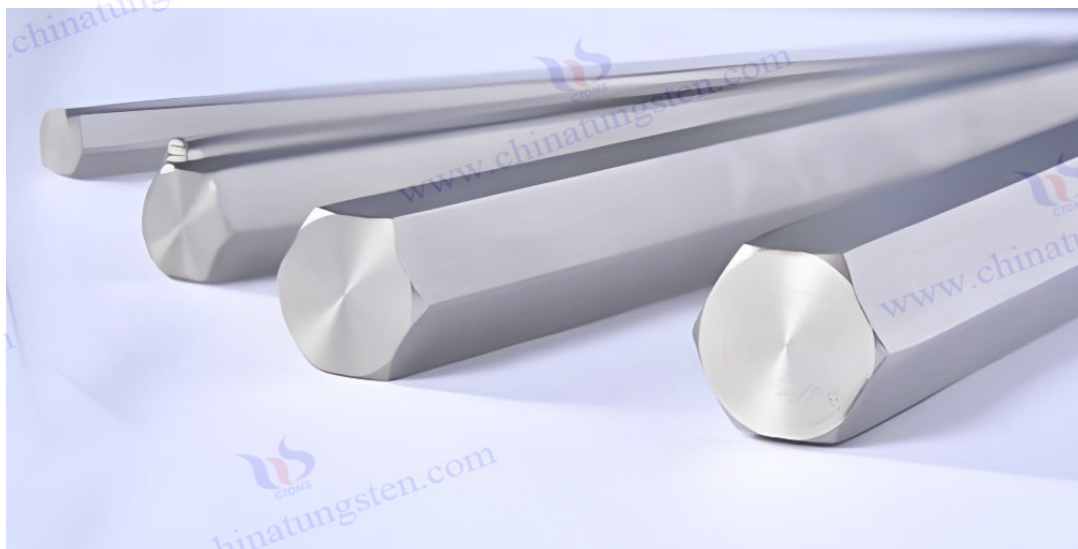
| 材料类型     | 典型组成                                                                                | 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 说明                             |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 纯钨棒      | W≥99.95%                                                                            | 19.20~19.30             | 接近理论密度 19.25 g/cm <sup>3</sup> |
| 掺杂钨棒     | 掺 La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、CeO <sub>2</sub> 、Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 等 | 19.00~19.20             | 掺杂量通常 0.1%~2%，密度略有下降           |
| TZM 钼合金棒 | Mo-Ti-Zr-C                                                                          | 10.0~10.2               | 属于钼基合金，并非钨合金                   |
| 高比重钨合金棒  | W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 等                                                                   | 17.00~18.80             | 根据钨含量不同变化较大                    |



需要特别说明的是,工业上常说的钨合金棒,大多数是指 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 等高比重钨合金,而 TZM 属于钼基高温合金,不属于钨合金,其密度约为  $10.2 \text{ g/cm}^3$ ,与钨材料存在明显区别。对于高比重钨合金而言,密度主要由钨含量决定。例如,90W-7Ni-3Fe 合金的密度通常约  $17.0 \text{ g/cm}^3$ ,93W 系列约  $17.6 \text{ g/cm}^3$ ,95W 系列可达到  $18.0 \text{ g/cm}^3$  以上,而 97W 以上产品可接近  $18.5 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ 。随着钨含量增加,比重提高,但材料塑性通常有所下降,加工难度也相应增加,因此不同应用领域会根据性能要求选择不同密度等级。

制造工艺也是影响密度的重要因素。现代钨合金棒主要采用粉末冶金工艺,通过混粉、压制、液相烧结、热锻、旋锻、热轧等工序制备。烧结后的材料一般能够达到理论密度的 98% 以上,而经过热等静压(HIP)或塑性加工后,材料内部残余孔隙进一步减少,密度可进一步提高,组织更加均匀,力学性能和疲劳寿命也随之改善。在实际生产中,密度不仅反映材料重量,还直接影响以下性能:(1)首先是屏蔽能力。对于 X 射线、 $\gamma$  射线屏蔽材料,密度越高,单位体积内原子数量越多,屏蔽效率通常越高,因此医疗、防护及核工业领域更倾向于选择高密度钨合金。(2)其次是惯性性能。在航空航天配重块、导弹平衡块、陀螺转子等应用中,高密度意味着在相同体积下能够获得更大的质量,从而提高惯性矩和稳定性。(3)组织质量。对于纯钨棒而言,实际密度越接近理论密度,通常说明材料孔隙率越低、烧结质量越高,后续加工性能、高温性能及抗蠕变性能也更加稳定。工业上常采用阿基米德排水法测量密度,并结合金相分析、超声检测等方法综合评价材料内部致密程度。对于高端半导体、航空航天及聚变能源装备所使用的钨材料,通常要求密度达到理论密度的 99% 以上,以保证长期高温服役时具有良好的尺寸稳定性和组织稳定性。

总体来看,纯钨棒的密度约为  $19.25 \text{ g/cm}^3$ ,高比重钨合金棒根据化学成分不同一般为  $17.0 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ ,而各种稀土掺杂钨棒由于加入少量氧化物,其密度通常略低于纯钨,但仍保持在  $19.0 \text{ g/cm}^3$  以上。这种兼顾高密度、高温性能和加工性能的特点,也是钨材料能够长期应用于高端制造领域的重要原因。



#### Q10: 钨合金棒的熔点有多高?

熔点是衡量金属耐高温能力的重要物理性能,也是钨材料能够广泛应用于超高温环境的根本原因。纯钨的熔点约为  $3410 \sim 3422^\circ\text{C}$ ,通常取  $3422^\circ\text{C}$ ,是所有金属元素中最高的熔点,也是所有非合金工程金属中耐高温能力最强的材料之一。相比之下,铁的熔点约  $1538^\circ\text{C}$ 、



镍约 1455 °C、钛约 1668 °C、钼约 2623 °C，而钨比这些常见金属高出数百至上千摄氏度。正因为具有极高的熔点，钨及钨合金能够长期工作在普通高温合金无法承受的极端环境，因此广泛用于真空炉加热元件、电子束设备、半导体热场、聚变装置、火箭喷管、高温模具及航空航天等领域。不同类型钨材料的耐温能力可概括如下：

| 材料             | 熔点或工作温度                             | 特点            |
|----------------|-------------------------------------|---------------|
| 纯钨 (W)         | 3410~3422 °C                        | 熔点最高，耐超高温     |
| 掺铈钨、掺铈钨等稀土钨    | 接近 3422 °C                          | 熔点基本不变，高温塑性改善 |
| W-Ni-Fe 高比重钨合金 | 液相烧结温度约 1450~1520 °C，钨相熔点仍为 3422 °C | 黏结相限制使用温度     |
| W-Ni-Cu 高比重钨合金 | 与 W-Ni-Fe 相近                        | 更适合屏蔽和配重用途    |

需要注意的是，对于高比重钨合金而言，虽然其中钨颗粒本身仍保持 3422 °C 的熔点，但由于加入了 Ni、Fe 或 Cu 等低熔点黏结相，其整体材料并不存在单一的 3422 °C 熔点，而是在液相烧结过程中，当黏结相达到约 1450~1520 °C 时开始形成液相。因此，这类材料的长期使用温度通常远低于纯钨，一般控制在 600~1000 °C 范围内，根据具体合金体系而有所不同。另一方面，熔点与实际工作温度并不能简单画等号。虽然纯钨在 3422 °C 才熔化，但由于高温下会发生再结晶、晶粒粗化、蠕变变形以及氧化等现象，其长期连续使用温度通常低于熔点许多。例如：真空或惰性气氛下，可长期工作于 1600~2200 °C；短时间可承受 2500 °C 以上；在空气中，由于约 400~500 °C 开始明显氧化，因此连续使用温度通常较低，需要保护气氛或真空环境。对于掺杂钨材料，如掺铈钨 (La-W)、掺铈钨 (Ce-W)、掺钇钨 (Y-W) 等，加入的氧化物含量通常不足 2%，几乎不会改变钨的熔点，但能够显著提高高温再结晶温度和抗晶粒粗化能力，使材料在高温条件下保持更好的强度和尺寸稳定性。因此，在电子发射、电极及高温热场等领域，掺杂钨材料往往比纯钨具有更长的使用寿命。

从材料科学角度来看，钨之所以具有如此高的熔点，主要源于其极强的金属键结合能和致密的晶体结构。钨原子之间结合牢固，需要极高能量才能破坏晶格，因此不仅熔点极高，还具有较高的弹性模量、优异的高温强度以及较低的蒸气压。这也是钨能够在电子管灯丝、真空炉发热体和等离子环境中长期稳定工作的基础。随着半导体、大尺寸单晶硅生长、聚变能源和航空航天技术的发展，现代钨材料的研究重点已经不仅是保持 3422 °C 这一高熔点，而是进一步提高材料在 2000 °C 以上长期工作的组织稳定性和抗蠕变性能。通过稀土掺杂、弥散强化、晶界工程和粉末冶金优化等技术，新一代钨材料能够在接近极限工作温度时仍保持较高的力学性能和较低的变形率，从而不断拓展其在极端高温装备中的应用范围。

#### Q11: 钨合金棒的硬度是多少？

钨合金棒的硬度主要取决于材料体系、化学成分、粉末冶金工艺、塑性加工方式以及最终热处理状态，因此并不存在一个固定数值。一般来说，纯钨棒的维氏硬度 (HV) 约为 340~450，掺杂稀土氧化物后的钨棒，如铈钨棒 ( $\text{La}_2\text{O}_3\text{-W}$ )、铈钨棒 ( $\text{CeO}_2\text{-W}$ )、钇钨棒 ( $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-W}$ ) 等，由于晶粒得到细化、再结晶温度提高，硬度通常可达到 400~500 HV。对于高密度钨重合金（如 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu），由于其强化机制不同，硬度一般在 300~400 HV 之间；若经过旋锻、冷加工等强化工艺，部分产品硬度可达到约 40 HRC，折合约 375~410 HV。硬度不仅反映材料抵抗局部塑性变形的能力，也直接影响其耐磨性、抗压能力和后续机械加工性能。对于高温结构件而言，硬度往往还与材料的组织稳定性密切相关，因此在评价钨合金棒性能时，通常需要结合强度、塑性、导热率及高温性能综合分析，而不能单纯比





较硬度数值。

影响钨合金棒硬度的主要因素包括以下几个方面。（1）首先是材料成分。纯钨主要依靠钨本身的高熔点和高弹性模量获得较高硬度，而掺杂少量稀土氧化物后，可有效抑制晶粒长大，使位错运动受到阻碍，因此硬度进一步提高。对于钨重合金，其基体中存在 Ni、Fe 或 Cu 等粘结相，这些金属改善了材料塑性，但同时也会使整体硬度略低于纯钨。（2）其次是晶粒尺寸。根据霍尔-佩奇（Hall-Petch）关系，晶粒越细，晶界数量越多，对位错运动的阻碍作用越明显，因此材料硬度通常越高。采用超细粉末、高温烧结优化及热机械加工工艺制备的细晶钨棒，其硬度通常明显高于普通粗晶产品。（3）第三是塑性加工工艺。经过旋锻、热锻、热轧或冷拔后，材料内部位错密度增加，形成明显的加工硬化效应，使硬度进一步提高。例如，旋锻钨棒不仅表面硬度提高，而且组织更加致密、纤维化程度更高，因此广泛应用于电子束设备、医疗射线屏蔽及航空航天零件。（4）热处理状态也会影响硬度。应力消除退火主要释放残余应力，对硬度影响较小；若退火温度过高，发生再结晶甚至晶粒长大，则硬度会有所下降。因此，高性能钨棒通常采用优化的热处理制度，在保持较高硬度的同时兼顾塑性和韧性。

不同检测方法得到的硬度数值也存在差异。工业中最常采用维氏硬度（HV）测试，因为其适用于高硬度材料，能够较准确反映钨及钨合金的表面硬度；洛氏硬度（HRC）则主要用于经过旋锻或特殊加工后的产品；对于科研和质量控制，也会采用显微维氏硬度评价局部组织变化。下表列出了不同类型钨及钨合金棒的典型硬度范围（实际数值会因生产工艺和产品规格而有所变化）。

| 材料类型                                   | 典型硬度                   |
|----------------------------------------|------------------------|
| 纯钨棒                                    | 340~450 HV             |
| 钨钼棒（La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -W） | 400~500 HV             |
| 钨钽棒（CeO <sub>2</sub> -W）               | 390~480 HV             |
| 钨钇棒（Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -W）  | 400~500 HV             |
| W-Ni-Fe 钨重合金棒                          | 300~380 HV             |
| W-Ni-Cu 钨重合金棒                          | 280~360 HV             |
| 旋锻强化钨棒                                 | 约 40 HRC（约 375~410 HV） |

总体来看，钨合金棒的硬度远高于普通碳钢和不锈钢，接近甚至超过许多工具钢，因此具有优异的耐磨性能和高温尺寸稳定性。但硬度越高，并不意味着综合性能一定越好。对于半导体设备、真空电子器件和航空航天等高端应用，还需要在硬度、塑性、高温强度和抗热疲劳性能之间取得最佳平衡。因此，高端钨合金制造企业通常会通过粉末纯度控制、晶粒细化、稀土弥散强化以及热机械加工等多种技术，实现硬度与综合性能的协同优化。

Q12：钨合金棒的抗拉强度如何？

抗拉强度（Tensile Strength）是衡量钨合金棒承受拉伸载荷能力的重要力学指标，也是评价其结构可靠性的重要依据。由于钨具有极高的熔点（3422 °C）和较高的弹性模量，其抗拉强度明显高于多数常见工程金属。不同类型钨棒因成分、组织及加工工艺不同，其抗拉强度存在较大差异。一般情况下，纯钨棒室温抗拉强度约为 600~1000 MPa；掺杂钼、钽、钇等稀土氧化物后，可提高至 1000~1200 MPa；经过旋锻、热锻及冷加工强化后的高性能钨合金棒，则可达到 1200~1400 MPa，部分超细晶产品甚至能够获得更高强度。钨属于典型的体心立方（BCC）难熔金属，其强度随温度变化规律与普通钢材不同。在室温下，纯钨塑性较低，随着温度升高到脆塑转变温度以上，其塑性显著改善，而在高温环境中仍



能保持较高的强度。因此，钨及钨合金广泛应用于高温炉、航空航天推进系统、聚变装置以及半导体热场等领域。

影响抗拉强度的因素主要包括以下几个方面。（1）首先是材料纯度和化学成分。高纯钨中杂质元素含量较低，可减少脆性相形成，提高组织均匀性。对于掺杂钨材料，少量  $\text{La}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CeO}_2$  或  $\text{Y}_2\text{O}_3$  等稀土氧化物不仅能够提高再结晶温度，还可通过弥散强化和晶粒细化提高抗拉强度，同时改善高温组织稳定性。（2）其次是晶粒尺寸。细晶材料具有更多晶界，可有效阻碍位错运动，因此强度通常高于粗晶材料。现代粉末冶金技术通过采用超细钨粉、优化烧结制度及热机械加工，使晶粒保持在较小尺寸，从而显著提高室温及高温强度。（3）加工强化。旋锻、热轧、冷拔等塑性加工会使晶粒沿加工方向形成纤维状组织，同时增加位错密度，形成明显的加工硬化效应。因此，旋锻钨棒通常比普通烧结棒具有更高的抗拉强度和更好的疲劳性能。（4）烧结致密度也十分重要。如果材料内部残余孔隙较多，在拉伸过程中容易成为裂纹萌生源，从而降低实际强度。因此，高品质钨棒通常采用真空烧结、热等静压（HIP）等工艺，提高材料致密度，使实际抗拉强度接近理论水平。

除了室温性能，高温抗拉性能也是评价钨合金的重要指标。普通结构钢在  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上强度迅速下降，而钨及钨合金在  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上仍能保持较高承载能力，这也是其成为高温结构材料的重要原因。对于掺杂钨和高性能钨合金，其高温强度保持率通常优于纯钨，长期服役稳定性也更好。下表列出了不同类型钨及钨合金棒的典型室温抗拉强度范围。

| 材料类型          | 室温抗拉强度（MPa） |
|---------------|-------------|
| 纯钨棒           | 600~1000    |
| 铜钨棒           | 1000~1200   |
| 铈钨棒           | 950~1150    |
| 钇钨棒           | 1000~1200   |
| 旋锻强化钨棒        | 1200~1400   |
| W-Ni-Fe 钨重合金棒 | 900~1200    |
| W-Ni-Cu 钨重合金棒 | 800~1100    |

抗拉强度越高，通常意味着塑性有所降低，因此在实际设计中应综合考虑屈服强度、延伸率、断面收缩率、断裂韧性以及高温蠕变性能等指标。例如，半导体热场构件更关注长期高温尺寸稳定性，而航空航天结构件则更加重视强度与韧性的匹配。

总之，现代高性能钨合金棒的发展趋势已经从单纯追求更高抗拉强度，转向强度、塑性、高温性能和组织稳定性的综合优化。通过高纯粉末制备、晶粒细化、稀土弥散强化、热机械加工以及先进烧结技术相结合，当前钨合金棒已经能够在极端高温、高真空和高载荷环境下长期稳定工作，并成为高端装备制造不可替代的重要工程材料。

### Q13：钨合金棒的导电和导热性能怎么样？

钨合金棒兼具优良的导电性能和导热性能，是电子、电真空、半导体、航空航天、核工业及高温装备等领域广泛采用的重要工程材料。虽然其导电率和导热率低于铜、银等传统导电金属，但由于钨具有极高的熔点（ $3422\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）、优异的高温强度、低蒸气压及良好的尺寸稳定性，因此在高温、高真空和强热流环境下，钨合金往往具有其他金属无法替代的综合优势。纯钨棒的电导率通常约为 30% IACS（International Annealed Copper Standard，国际退火铜标准），对应电阻率约为  $5.5\times 10^{-8}\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 。在室温条件下，其导电性能约为纯铜的三分之一，但随着温度升高，钨的导电稳定性明显优于许多普通金属，不易因高温软化或氧化而导致导电性能快速下降。因此，在电子束设备、电阻焊电极、高温电极及真空电接触



元件中，钨合金棒仍然是重要的导电材料。

从导热性能来看，纯钨的室温热导率一般约为  $165\sim180\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，工程上通常取约  $170\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。这一数值虽然低于铜（约  $390\sim400\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ）和银（约  $420\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ），但远高于大多数耐热合金和不锈钢。例如，常见奥氏体不锈钢的热导率通常只有  $15\sim20\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，镍基高温合金一般约为  $10\sim30\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，因此钨能够快速传导局部热量，减少热应力集中，提高零件在高温环境下的稳定性。

实际工业中使用的钨合金棒并非全部为纯钨。为了改善高温性能、抗再结晶能力和加工性能，常加入少量钾、铯、镧、铈、钍、钇或其他稀土元素。例如，掺钾钨棒（Non-sag Tungsten）因形成稳定的钾泡结构，具有更高的抗高温蠕变能力，其热导率通常略低于纯钨，约为  $155\sim165\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，但导电率变化较小，在部分情况下甚至因组织更加均匀而略有提高。

钨铍合金由于加入铍元素，塑性和高温延展性显著改善，但电导率和热导率通常略低于纯钨。稀土掺杂钨则更多用于改善电子发射性能和加工性能，其导热能力仍保持在较高水平。钨的导热率会随温度升高而逐渐下降，这是金属材料普遍存在的规律。例如，在室温附近约为  $170\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，当工作温度提高至  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上时，其热导率可能下降至  $100\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  左右，但仍明显优于多数耐热结构材料。因此，在高温真空炉、单晶硅生长炉、聚变装置及航空航天热结构中，钨仍能够有效实现热量扩散和温度均衡。

钨合金棒的导电、导热性能还与材料纯度、晶粒尺寸、烧结致密度及加工工艺密切相关。高纯度、高致密度、细晶组织通常具有更低的电阻率和更高的热导率；若材料中氧、碳、氮等杂质含量较高，或存在较多孔隙和晶界缺陷，则电子和声子的传输会受到阻碍，从而降低导热和导电性能。因此，高端半导体、电子工业及科研设备通常采用高纯钨或高纯 TZM 材料，以获得更加稳定的热物理性能。

典型材料导电率和导热率

| 材料      | 电导率 (%IACS)  | 热导率 $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ | 主要特点      |
|---------|--------------|---------------------------------|-----------|
| 银       | 约 105        | 约 420                           | 导电、导热性能最高 |
| 铜       | 100          | $390\sim400$                    | 优良导电导热材料  |
| 铝       | 约 61         | 约 235                           | 质量轻、导热较好  |
| 纯钨      | 约 30         | $165\sim180$                    | 高温稳定性优异   |
| 掺杂钨     | 约 $28\sim32$ | $155\sim165$                    | 抗蠕变性能更高   |
| TZM 合金  | 约 $25\sim30$ | $125\sim145$                    | 综合高温性能优异  |
| 不锈钢 304 | 约 $2\sim3$   | $15\sim20$                      | 导热较低      |

钨合金棒最大的优势并不是绝对导电率或导热率，而是在极端高温、高真空和长期热循环条件下，仍能保持稳定的导电、导热能力及优异的机械性能。这也是钨及其合金能够长期应用于半导体热场、电子束设备、真空冶金、高温炉、电阻焊电极和核聚变装备等领域的重要原因。

#### Q14: 钨合金棒的热膨胀系数是多少？

热膨胀系数（Coefficient of Thermal Expansion, CTE）是评价材料尺寸稳定性的重要参数，表示材料温度每升高  $1\text{ K}$ （或  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）时单位长度发生的相对变化。对于高温设备、精密仪器、半导体制造装备以及航空航天热结构而言，热膨胀系数直接影响零件的配合精度、热应力水平及长期服役可靠性。钨属于典型的低热膨胀金属，其室温至  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内的线膨胀系数通常约为  $4.3\sim4.7\times10^{-6}/\text{K}$ ，工程设计中一般采用约  $4.5\times10^{-6}/\text{K}$ 。这一数值远低于钢、铜、铝等常用工程材料。例如，普通碳钢约为  $12\times10^{-6}/\text{K}$ ，不锈钢约为  $16\times10^{-6}/\text{K}$ ，铜约为





17×10<sup>-6</sup>/K，铝约为 23×10<sup>-6</sup>/K，因此钨在温度变化过程中尺寸变化极小。

低热膨胀是钨的重要材料优势之一。以一根长度为 1000 mm 的钨棒为例，当温度升高 100 °C 时，其理论伸长量仅约 0.45 mm；而同样长度的铜棒则约伸长 1.7 mm，铝棒约伸长 2.3 mm。对于要求微米级尺寸稳定性的设备而言，这种差异具有决定性意义。

钨合金棒加入少量强化元素后，其热膨胀系数变化通常较小。例如，TZM (Ti-Zr-Mo 合金) 的热膨胀系数一般约为 5.0~5.5×10<sup>-6</sup>/K；钨铼合金因铼元素的加入，热膨胀系数略有提高，但整体仍明显低于普通耐热合金；掺钾钨、铜钨、铈钨等电子材料，其热膨胀系数与纯钨基本接近，因此仍保持优异的尺寸稳定性。热膨胀系数并不是固定不变的常数，而会随着温度升高略有增加。例如，纯钨在室温附近约为 4.5×10<sup>-6</sup>/K，在 1000 °C 以上可能提高至约 5.5~6.0×10<sup>-6</sup>/K，但整体增长幅度较小，因此钨在宽温度范围内仍具有良好的热尺寸稳定性。

低热膨胀带来的工程优势主要体现在以下几个方面。首先，可以降低热应力。当不同材料共同工作时，热膨胀差异越小，界面产生的热应力越低，从而减少开裂、剥离和变形风险。其次，有利于提高定位精度。半导体晶体生长炉、光学系统、电子束设备等需要长期保持精确位置关系，低膨胀材料能够有效减少温度变化造成的尺寸漂移。再次，可提高热循环寿命。在反复加热和冷却过程中，较小的热膨胀幅度意味着更低的循环应力，有助于延长零件使用寿命。不同工程材料热膨胀系数的大致比较如下。

| 材料      | 线膨胀系数 (×10 <sup>-6</sup> /K) | 尺寸稳定性评价 |
|---------|------------------------------|---------|
| 钨       | 约 4.5                        | 极高      |
| TZM     | 约 5.0~5.5                    | 极高      |
| 钼       | 约 5.0                        | 极高      |
| 因瓦合金    | 约 1~2                        | 超低膨胀    |
| 碳钢      | 约 12                         | 中等      |
| 不锈钢 304 | 约 16                         | 一般      |
| 铜       | 约 17                         | 较高膨胀    |
| 铝       | 约 23                         | 膨胀较大    |

在半导体产业中，单晶硅生长炉、蓝宝石晶体生长设备及化合物半导体热场大量采用钨和 TZM 制造支撑杆、连接件、定位件及热场骨架，正是利用了其低热膨胀、高温强度和抗蠕变性能，使设备在长期 1400~1700 °C 环境下仍能保持稳定几何尺寸。航空航天领域则利用这一特点制造喷管部件、高温热结构及电子器件支撑件，以降低温度变化带来的结构变形。

总体而言，钨合金棒的低热膨胀系数与其高熔点、高弹性模量和优异的高温力学性能相结合，使其成为极端环境下最重要的高温结构材料之一。在现代半导体、航空航天、核工业和精密装备制造领域，低热膨胀不仅意味着尺寸变化小，更意味着更高的加工精度、更好的热稳定性和更长的服役寿命。

Q15: 钨合金棒耐腐蚀吗？

钨合金棒通常具有优异的耐腐蚀性能，在高温、真空、化工、电子、半导体及航空航天等领域被广泛应用。其耐腐蚀能力主要来源于钨 (W) 本身极高的化学稳定性。钨的标准电极电位较高，在常温下表面容易形成一层极薄而稳定的氧化膜，这层氧化膜能够有效阻止进一步氧化和腐蚀，因此在多数工业环境中具有良好的抗介质侵蚀能力。

在常温条件下，钨及大多数钨合金几乎不与空气、水及水蒸气发生反应，对稀硫酸、浓硫



酸、盐酸、硝酸以及多数有机酸均具有较高的耐受能力。即使长期暴露于潮湿空气中，其腐蚀速率也非常低。对于海水、弱碱性溶液以及多数中性盐溶液，钨合金同样表现出良好的耐腐蚀性能，因此常用于要求长期稳定工作的高温结构件和精密零部件。

不过，钨合金并非在所有介质中都具有绝对耐腐蚀性。在高温氧化环境下，钨会逐渐氧化生成三氧化钨( $\text{WO}_3$ )。当温度超过约  $400\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  时，氧化速度开始明显增加；超过  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  以后，氧化膜会逐渐增厚并出现挥发现象，导致材料持续损耗。因此，钨合金长期高温工作通常需要置于真空、氢气、氩气等保护气氛中，而不宜直接暴露于空气中。

另外，含氟介质是钨材料需要特别注意的腐蚀环境。氢氟酸、氟气以及某些高温含氟化合物能够与钨发生反应，生成可挥发的氟化钨，因此在这些介质中，钨合金的耐腐蚀能力会明显下降。在高温熔融碱、熔融硝酸盐及部分熔融金属环境中，钨也可能发生一定程度的腐蚀，因此需要根据具体工况进行材料选型。对于常见的高密度钨合金（如 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu）而言，其耐腐蚀性能除受到钨基体影响外，还与粘结相密切相关。镍铁结合相在某些酸性介质中的耐蚀性略低于纯钨，因此高密度钨合金整体耐腐蚀性能通常略低于纯钨或 TZM 等钼基高温合金，但仍明显优于普通碳钢和多数低合金钢。不同类型钨材料的耐腐蚀性能可作如下比较：

| 材料类型           | 常温耐酸性 | 常温耐碱性 | 高温抗氧化性     | 典型应用        |
|----------------|-------|-------|------------|-------------|
| 纯钨             | 优异    | 优异    | 一般（空气中需保护） | 真空炉、电子器件    |
| TZM 钼合金        | 良好    | 良好    | 优于纯钼       | 半导体热场、高温结构件 |
| W-Ni-Fe 高密度钨合金 | 良好    | 良好    | 一般         | 配重、屏蔽件      |
| W-Ni-Cu 高密度钨合金 | 良好    | 良好    | 一般         | 电工、医疗屏蔽     |

影响钨合金耐腐蚀性能的主要因素包括材料纯度、合金成分、晶粒尺寸、烧结致密度以及表面状态。一般而言，纯度越高、孔隙率越低、表面越致密，耐腐蚀性能越好。经过精密磨削、抛光或化学清洗后的钨合金，由于表面缺陷减少，在腐蚀介质中的稳定性通常也会有所提高。

中钨智造根据多年生产和应用经验认为，对于绝大多数工业环境而言，钨合金棒具有十分优异的耐腐蚀能力，其真正需要关注的并不是常温腐蚀，而是高温氧化及特殊化学介质（特别是含氟介质）对材料的影响。因此，在半导体、真空热处理、电子工业和航空航天等应用中，通常会结合真空、保护气氛或表面防护技术，使钨合金长期保持稳定的尺寸、性能和使用寿命。

#### Q16: 不同掺杂剂对性能有何影响？

钨材料的性能不仅取决于钨本身的纯度，还与所添加的微量掺杂元素密切相关。现代高性能钨材料通常采用氧化物或合金元素进行微量掺杂，通过改善晶粒组织、提高电子发射能力、增强高温强度或改善加工性能，使其满足不同工业领域的使用要求。不同掺杂体系具有不同的强化机制，因此形成了多种专用钨材料。目前应用最广泛的掺杂体系包括镧(La)、铈(Ce)、钍(Th)、铼(Re)、钇(Y)以及复合稀土体系等。其中，掺镧钨(WLa)是目前国际上应用最广泛的无放射性钨材料之一。镧元素通常以  $\text{La}_2\text{O}_3$  形式加入，其主要作用是在烧结过程中抑制晶粒长大，提高再结晶温度，同时改善电子发射性能。与纯钨相比，镧钨电极电子发射能力通常可提高约  $30\sim 50\%$ ，起弧更加容易，电弧更加稳定，电极烧损速度更低，因此广泛用于自动化 TIG 焊、机器人焊接及交流、直流焊接设备。(1) 掺铈钨(WCe)采用  $\text{CeO}_2$  作为主要添加剂，具有较低的逸出功和优异的低电流起弧性能。

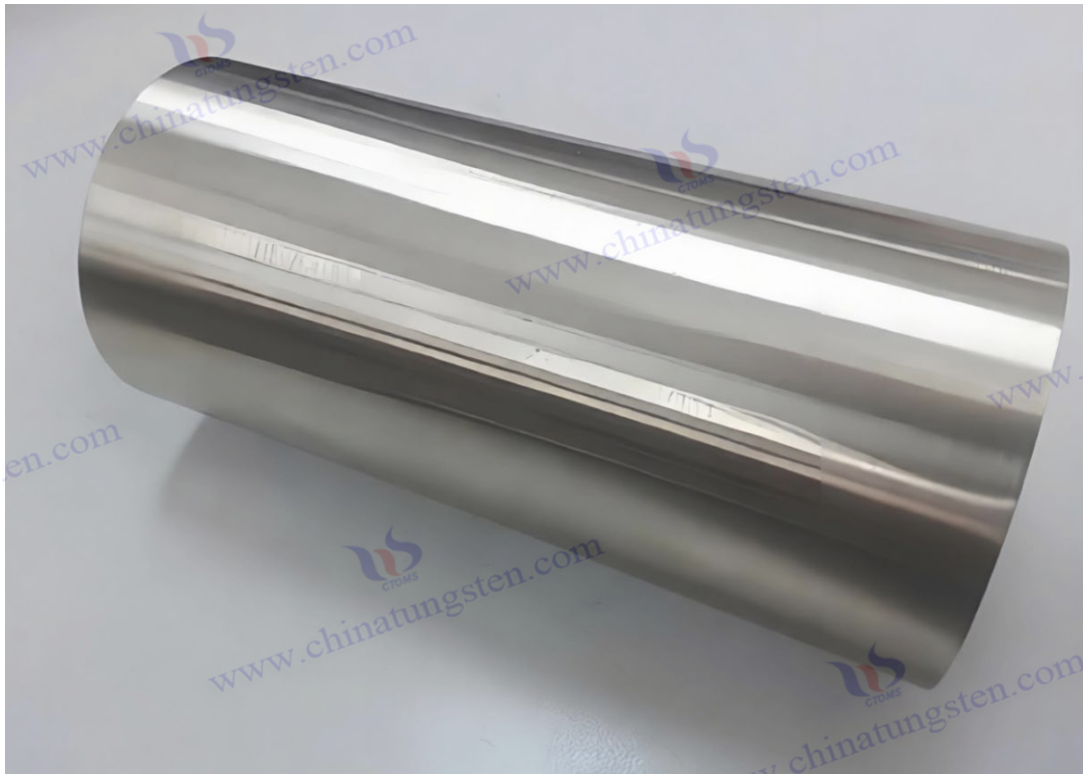


在低电流精密焊接、薄板焊接及自动焊领域表现突出。相比传统钍钨电极，铈钨具有无放射性、安全环保等优势，因此在电子工业、不锈钢焊接及精密制造领域得到广泛应用。（2）掺钍钨（WTh）曾长期被认为是综合性能最好的钨电极材料。ThO<sub>2</sub>能够显著降低电子逸出功，提高电子发射能力，使电弧稳定、承载电流能力强，在高电流直流焊接中表现优异。然而，由于 ThO<sub>2</sub>属于天然放射性物质，在磨削过程中可能产生含钍粉尘，对职业健康提出更高要求。目前欧美、日本及许多现代制造企业已经逐步采用铈钨、铈钨或复合稀土钨电极替代钍钨产品。（3）掺铼钨（WRe）则属于另一类用途完全不同的钨合金。铼能够显著提高钨的高温塑性、韧性和抗热震性能，同时降低脆性转变温度，使材料在高温循环过程中不易开裂。WRe 合金广泛应用于高温热电偶、航空航天发动机、电子束设备及科学实验装置，其中最典型的是 W-5Re/W-26Re 热电偶，可长期测量 2000 °C 以上的超高温。近年来，掺钇钨（WY）和复合稀土钨材料也逐渐发展起来。钇氧化物具有较高的热稳定性，可进一步提高材料的高温组织稳定性；而复合稀土体系则综合利用多种稀土元素的优势，在电子发射性能、寿命及抗烧损能力之间取得更好的平衡。不同掺杂体系的主要特点如下：

| 掺杂体系  | 主要添加物                          | 主要作用           | 典型应用           |
|-------|--------------------------------|----------------|----------------|
| WCe   | CeO <sub>2</sub>               | 起弧性能好、电弧稳定、环保  | TIG 焊、精密焊接     |
| WLa   | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 提高电子发射能力、寿命长   | 自动焊接、机器人焊接     |
| WTh   | ThO <sub>2</sub>               | 高电流性能优异，但具有放射性 | 传统直流焊接（应用逐步减少） |
| WRe   | Re                             | 提高高温强度、韧性和热稳定性 | 热电偶、航空航天、高温测量  |
| WY    | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 提高高温组织稳定性      | 高端电子、科研设备      |
| 复合稀土钨 | 多种稀土氧化物                        | 综合性能均衡         | 高端焊接及特种工业      |

除焊接领域外，掺杂剂还会影响钨材料的再结晶温度、晶粒尺寸、加工性能及使用寿命。例如，适当的稀土氧化物能够有效抑制晶界迁移，使材料在长期高温下仍保持细晶组织；而铼则主要改善材料塑性，使其能够承受更大的热应力和机械应力。中钨智造认为，现代钨材料的发展方向已经由单一掺杂逐步转向复合掺杂和功能化设计。未来，高性能钨材料不仅需要具备优异的电子发射能力，还要兼顾高温稳定性、长寿命、环保及智能制造要求。因此，铈钨、铈钨、复合稀土钨等无放射性材料将继续成为工业主流，而铼钨等特种钨合金则将在航空航天、聚变能源及超高温测量领域发挥越来越重要的作用。





### 三、钨合金棒材的生产工艺

#### Q17: 钨合金棒的主要生产工艺有哪些？

钨合金棒是高密度钨合金、钨镍铁合金、钨镍铜合金以及部分难熔钨基合金最常见的产品形态之一，广泛应用于航空航天、国防军工、医疗屏蔽、石油测井、电加工、电真空及高温装备等领域。由于钨的熔点高达  $3422^{\circ}\text{C}$ ，传统熔炼工艺难以实现工业化生产，因此现代钨合金棒几乎全部采用粉末冶金技术制造，并根据产品尺寸、性能要求及应用领域配合热加工、精密加工等工艺，形成完整的制造流程。

##### （一）粉末冶金法

粉末冶金法是目前生产钨合金棒最成熟、应用最广泛的方法，也是绝大多数高性能钨合金棒的标准制造工艺。其基本流程包括原料配制、混粉、压制成形、液相烧结、热处理及机械加工。生产时首先按照配方将钨粉与镍、铁、铜或其他合金元素粉末均匀混合，然后采用模压或冷等静压制生成坯，再在保护气氛或真空条件下进行液相烧结。烧结过程中，低熔点黏结相首先熔化，使钨颗粒重新排列并逐渐致密化，最终获得接近理论密度的组织。随后根据产品要求，可进一步进行旋锻、热轧、拉拔、车削、磨削等加工，以提高尺寸精度和综合力学性能。该工艺具有组织均匀、密度高、材料利用率高、适合批量生产等优点，是目前钨合金棒生产的主流路线。

##### （二）金属注射成形技术（MIM）

金属注射成形（Metal Injection Molding, MIM）主要用于制造尺寸较小、结构复杂的钨合金零件，而较少直接用于长尺寸棒材。其基本原理是将超细金属粉末与有机粘结剂混合形成喂料，经注射成形获得毛坯，再经过脱脂和烧结得到最终产品。相比传统粉末压制，MIM 能够制造复杂外形和薄壁结构，尺寸重复性较好，适合医疗器械、电子零件、微型配重件等产品。由于长棒材在脱脂和烧结过程中容易产生变形，因此 MIM 通常不用于大



型钨合金棒生产，但对于小直径短棒或异形棒材仍具有一定应用价值。

**（三）熔渗法（渗铜法）**

熔渗法主要用于生产钨铜合金棒（W-Cu Alloy Rod）。其工艺首先制备具有一定孔隙率的多孔钨骨架，再将熔融铜通过毛细作用渗入钨骨架内部，使铜充分填充孔隙，形成连续的钨—铜复合组织。这种工艺既保留了钨优异的耐高温、耐烧蚀性能，又兼具铜良好的导热、导电性能，因此广泛应用于电火花电极、高压电器、电阻焊电极及电子封装领域。需要注意的是，渗铜法属于复合材料制备工艺，与高密度钨镍铁合金棒的液相烧结工艺存在明显区别。

**（四）塑性加工强化工艺**

对于高性能钨合金棒，在烧结完成后通常还需要进行热锻、旋锻、热轧或拉拔等塑性加工。塑性加工能够压实残余微孔，细化组织，提高材料强度、硬度和疲劳性能，同时改善棒材直线度和尺寸一致性。经过较大变形量加工后，材料内部组织更加均匀，其抗拉强度、屈服强度及冲击韧性通常均可得到进一步提升。对于航空航天、高速旋转部件及高可靠性产品，塑性加工往往是不可缺少的重要工序。

**（五）近净成形与增材制造**

近年来，随着增材制造技术的发展，激光选区熔化（SLM）、电子束熔化（EBM）等技术开始应用于钨基材料研究。由于钨具有高熔点、高导热率及较大的热应力，目前大尺寸钨合金棒仍主要采用粉末冶金路线，但增材制造在复杂异形预制件、小批量定制产品等方面具有一定发展潜力。此外，一些高端企业开始采用近净成形（Near Net Shape）工艺，在烧结阶段直接获得接近最终尺寸的毛坯，从而减少后续机械加工，提高材料利用率。

钨合金棒主要生产工艺比较

| 工艺名称        | 主要特点          | 适用产品                |
|-------------|---------------|---------------------|
| 粉末冶金液相烧结    | 工艺成熟、密度高、性能稳定 | 各类高密度钨合金棒、钨镍铁棒、钨镍铜棒 |
| 金属注射成形（MIM） | 适合复杂形状、小尺寸零件  | 小型短棒、复杂异形件          |
| 熔渗法（渗铜法）    | 制备钨铜复合组织      | 钨铜棒、电极材料            |
| 热锻、旋锻、拉拔    | 提高强度、改善组织     | 高性能精密棒材             |
| 增材制造        | 适合复杂结构、小批量制造  | 特种定制产品              |

现代钨合金棒制造已形成以粉末冶金为主体、塑性加工为强化、近净成形和增材制造为补充的发展格局。粉末冶金液相烧结仍然是决定材料质量和工业应用水平的核心技术路线。

**Q18：烧结工艺对钨合金棒质量有多大影响？**

烧结是钨合金棒粉末冶金生产过程中最关键的工序之一，其重要性甚至超过压制成形。烧结不仅决定材料能否实现高致密化，还直接影响晶粒组织、孔隙率、组织均匀性以及最终力学性能。可以说，同样的原料、同样的配方，如果烧结制度不同，最终产品的性能可能存在明显差异。对于采用液相烧结的高密度钨合金而言，烧结质量通常决定着产品质量的上限。

**（一）决定材料致密度**

烧结最重要的作用是提高材料密度。随着温度升高，镍、铁、铜等黏结相逐渐熔化，液相润湿钨颗粒，使颗粒重新排列并逐步填充孔隙，最终形成高致密组织。工业产品通常要求烧结密度达到理论密度的 98%~99% 以上。

如果烧结密度偏低，则说明内部仍存在较多残余孔隙，这不仅降低材料强度，也会影响导热性、导电性及耐腐蚀性能。



（二）影响晶粒尺寸

烧结温度和保温时间共同决定晶粒长大程度。温度过低，扩散不足，组织疏松；温度过高或保温时间过长，则容易发生晶粒粗化。晶粒过大会降低材料的强度和耐疲劳性能，因此现代高端钨合金通常采用优化烧结曲线，在保证充分致密化的同时控制晶粒生长。

（三）影响力学性能

高质量烧结能够获得连续均匀的金属结合组织，使材料具有较高的抗拉强度、屈服强度、延伸率及冲击韧性。若烧结过程中存在孔隙、夹杂或液相分布不均，则容易形成应力集中源，在服役过程中导致裂纹萌生，降低材料可靠性。

（四）影响组织均匀性

烧结不仅决定密度，也决定钨颗粒与黏结相的分布状态。优良烧结组织中，钨颗粒尺寸均匀、分布连续，黏结相能够充分包覆钨颗粒；若烧结控制不当，则可能出现液相偏聚、组织分层或局部粗晶现象，从而导致材料各部位性能不一致。

（五）烧结气氛同样重要

工业生产通常采用真空烧结或氢气保护烧结。真空烧结有利于脱除氧、氮等杂质，提高材料纯净度；氢气保护烧结则能够有效还原氧化物，减少氧污染。若气氛控制不良，材料氧含量增加，不仅降低塑性，还可能影响后续加工性能。

（六）烧结后的后续处理

高性能钨合金棒烧结完成后，通常还需进行热处理、旋锻、热轧、拉拔等工艺，以进一步改善组织和性能。也就是说，烧结决定了材料的基础组织，而后续塑性加工则进一步优化综合性能。

烧结工艺对钨合金棒性能的影响

| 烧结参数  | 控制不当可能产生的问题      | 对最终性能的影响  |
|-------|------------------|-----------|
| 烧结温度  | 温度过低致密不足，过高晶粒粗化  | 强度、韧性下降   |
| 保温时间  | 时间不足烧结不充分，过长组织粗化 | 组织均匀性降低   |
| 烧结气氛  | 氧化、夹杂增加          | 塑性和可靠性下降  |
| 升降温制度 | 热应力增大、组织不稳定      | 尺寸稳定性变差   |
| 致密化程度 | 残余孔隙增加           | 强度、疲劳寿命降低 |

从工程实践来看，烧结工艺实际上决定了钨合金棒的微观组织基础。现代高端制造越来越重视烧结全过程控制，包括温度场均匀性、真空度、保护气氛纯度、升温速率和保温制度等参数的精确调控，并结合数字化烧结控制技术，实现高致密、细晶粒、组织均匀和批次一致性的统一，从而满足航空航天、核工业、医疗和半导体等高端领域对钨合金材料长期可靠性的要求。

Q19: 什么是旋锻加工？对钨合金棒性能有何提升？

旋锻（Rotary Swaging）是一种利用高速径向锤击对棒材、管材或线材进行连续塑性变形的精密锻造工艺，也是高性能钨合金棒材生产过程中最重要的后续加工工艺之一。对于高比重钨合金（如 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 等）而言，烧结后的材料虽然已经具有较高的致密度，但内部晶粒排列仍较为随机，部分残余微孔和组织不均匀现象依然存在。通过旋锻加工，可以进一步改善材料内部组织，提高综合力学性能，因此航空航天、国防工业、医疗屏蔽、配重系统以及高端精密制造领域的大多数高性能钨合金棒材，都会采用旋锻或旋锻结合后续热处理的工艺路线。

旋锻设备通常由数个锤块围绕工件高速旋转，并不断向中心径向冲击。工件在送进机构作





用下缓慢前进，在连续数千次甚至数万次冲击作用下逐渐减小直径、增加长度，实现塑性变形。这种加工方式与传统自由锻或模锻相比，具有变形均匀、尺寸精度高、材料利用率高和加工效率高等特点，特别适用于高硬度、高密度难变形金属材料。

从微观组织来看，旋锻最大的作用是细化组织并改善晶粒取向。烧结后的钨颗粒呈相对随机分布，而经过较大变形量旋锻后，钨颗粒沿轴向发生一定程度的拉长排列，组织更加致密均匀，残余孔隙进一步减少，晶界结合更加牢固。同时，塑性变形会引入大量位错，使材料发生加工硬化，从而明显提高强度和硬度。旋锻后的性能提升主要体现在以下几个方面。

（1）首先是抗拉强度显著提高。普通烧结高比重钨合金的抗拉强度通常约为 900~1100 MPa，而经过较大变形量旋锻后，可提高至 1200~1400 MPa，部分特殊牌号甚至可以达到 1500 MPa 以上。（2）其次是硬度提高。随着加工硬化程度增加，材料硬度通常可提高至 35~40 HRC 左右，一些高强度产品甚至超过 40 HRC。这种硬度提升使材料具有更好的耐磨性能和抗局部塑性变形能力。（3）弹性极限提高。旋锻后的材料在受载过程中更不容易发生永久变形，因此尺寸稳定性更好，这对于高速旋转部件、动平衡配重及精密机构具有重要意义。（4）疲劳性能改善。由于组织更加均匀、孔隙率降低，疲劳裂纹萌生概率明显下降，因此循环寿命通常高于普通烧结状态材料。（5）旋锻还能提高材料的一致性。由于整个棒材沿长度方向经历连续均匀变形，其不同位置之间的组织差异减小，有利于后续数控加工及精密装配。

但是，旋锻变形量并非越大越好。如果变形量过小，强化效果有限；如果变形量过大，则可能使加工硬化过于严重，导致塑性下降，加工难度增加。因此，工业生产通常根据产品用途控制总变形率，并根据需要安排中间退火，以恢复一定塑性，再进行后续旋锻。不同用途产品对旋锻程度也存在差异。例如，高强度穿甲材料通常采用较大的旋锻变形量，以获得最高强度；医疗屏蔽件则更重视尺寸稳定性和加工性能，旋锻程度相对适中；航空航天配重件则通常在旋锻后再进行精密磨削，以兼顾强度、尺寸精度和表面质量。下表概括了旋锻加工对钨合金棒性能的典型影响。

| 性能指标  | 烧结状态           | 旋锻后典型水平       | 改善效果        |
|-------|----------------|---------------|-------------|
| 密度    | 接近理论密度         | 更加均匀          | 内部孔隙进一步减少   |
| 抗拉强度  | 约 900~1100 MPa | 1200~1400 MPa | 提高约 15%~35% |
| 硬度    | 约 28~35 HRC    | 35~40 HRC     | 耐磨性提高       |
| 疲劳性能  | 一般             | 明显改善          | 裂纹萌生减少      |
| 尺寸稳定性 | 较好             | 更高            | 更适合精密加工     |

总体来看，旋锻不仅是一种尺寸成形工艺，更是一种重要的组织强化工艺。它通过塑性变形、组织细化和加工硬化，使钨合金棒获得更高的强度、更好的耐磨性、更优异的疲劳性能和尺寸稳定性，是高性能钨合金制造过程中不可或缺的重要环节。

## Q20：钨合金棒可以热处理吗？

很多人可能会将钨合金与钢材进行类比，认为热处理就是淬火、回火或时效强化。实际上，对于绝大多数粉末冶金钨合金棒而言，这种理解并不适用。由于钨合金的强化机制与钢铁完全不同，其性能主要来源于高熔点钨颗粒、镍铁或镍铜结合相、粉末冶金烧结组织以及后续塑性加工，而不是依赖钢材中的马氏体相变。因此，大多数钨合金棒在出厂前已经完成烧结、致密化以及必要的塑性加工，用户通常无需再进行传统意义上的热处理。

从生产工艺来看，钨合金棒在制造过程中已经经历了多个高温阶段，包括烧结、液相烧结、



真空烧结以及必要的热加工工艺。这些工艺已经形成了稳定的组织结构。如果再次进行高温处理,不但不会进一步提高强度,反而可能导致晶粒长大、结合相重新分布甚至组织退化,从而降低综合性能。不过,这并不意味着钨合金完全不能进行热处理。在某些特殊情况下,热处理仍然具有重要作用,但其目的并不是强化,而是改善组织稳定性、释放残余应力或恢复加工性能。

最常见的是去应力退火。钨合金在电火花加工(EDM)、激光切割、激光打孔、重切削、精密磨削等过程中,表层会形成一定残余应力。如果直接投入使用,在后续服役过程中可能发生轻微变形,影响尺寸精度。因此,对于高精度零件,通常建议进行 600~800 °C 左右的真空去应力退火,使内部应力得到释放,同时保持原有组织基本不发生变化。对于旋锻或冷加工后的材料,还可能采用中间退火。当变形量较大时,加工硬化使塑性明显下降,继续加工容易开裂。这时可采用适当温度退火恢复部分塑性,然后继续旋锻或拉拔。这种退火主要用于制造过程,而不是最终用户使用阶段。

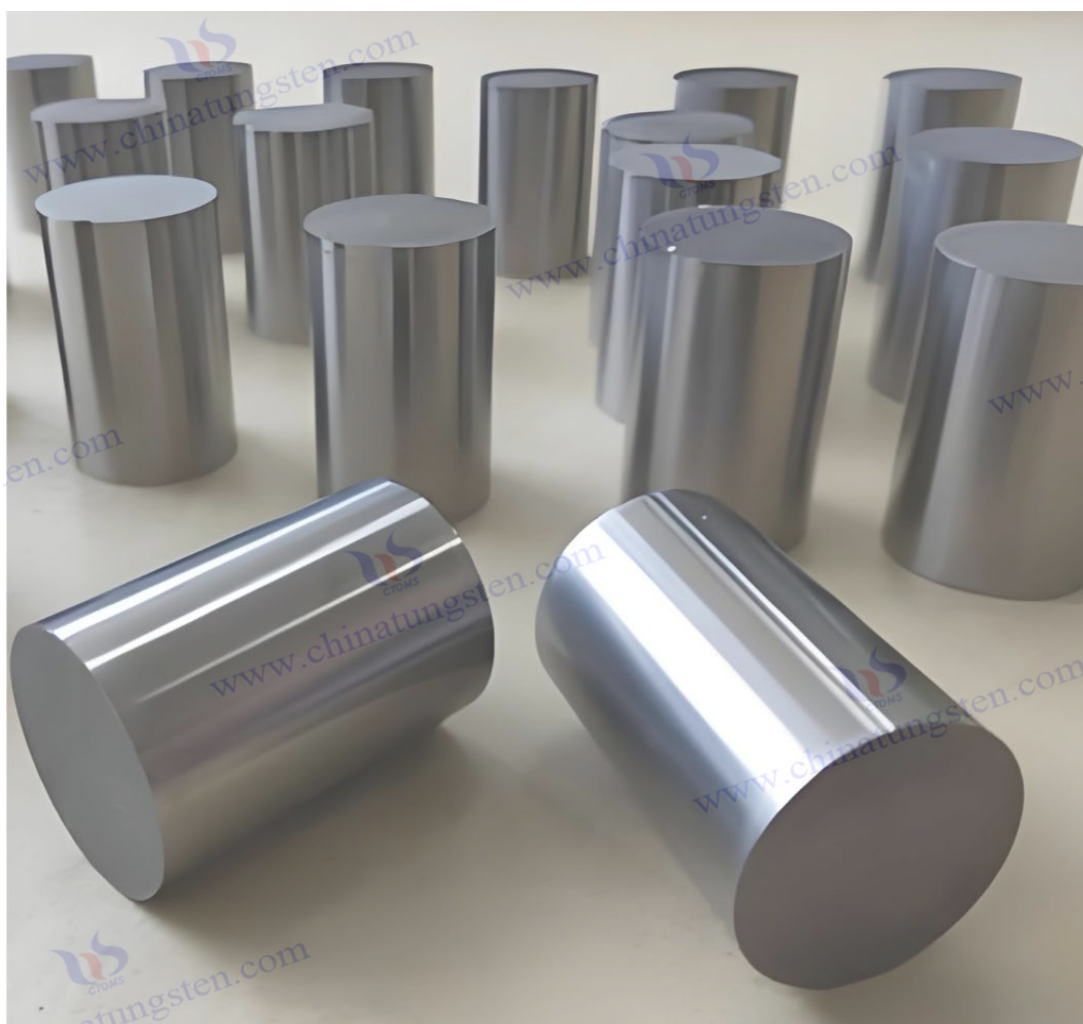
此外,对于真空电子器件、半导体设备以及航空航天零件,还可能进行稳定化热处理。其主要目的是提前释放材料内部微小组织变化,使零件在长期高温工作过程中具有更好的尺寸稳定性。这种热处理通常需要严格控制温度、时间和真空度。

生产实践中,绝对不能将钨合金按照钢材方式进行淬火处理。钢材淬火依赖奥氏体向马氏体相变,而钨合金不存在这种强化机制。快速冷却不仅不能提高硬度,还可能因热应力过大导致裂纹、局部剥落甚至整件报废。特别是大型钨合金棒或复杂异形件,在高温后快速冷却,内部温差会迅速增大,极易造成不可逆损伤。同样,也不建议进行超过推荐温度的长时间高温保温。如果保温温度过高或时间过长,可能导致结合相粗化、晶粒长大、组织均匀性下降,从而降低抗拉强度、冲击韧性和疲劳寿命。不同热处理方式及其作用可参考下表。

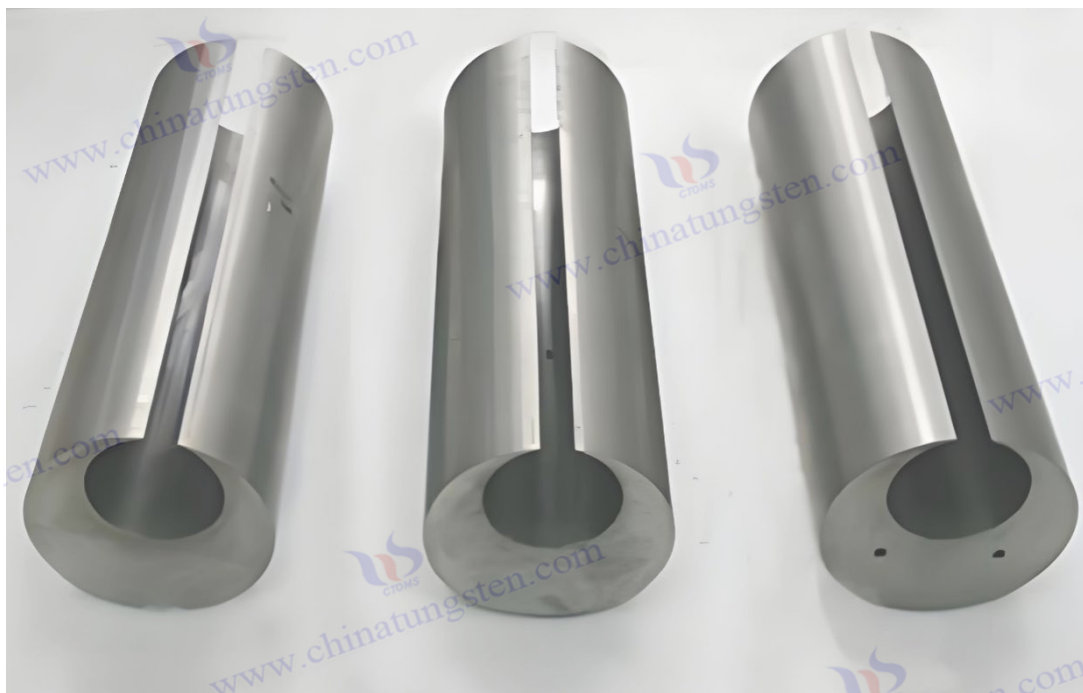
| 热处理方式   | 典型温度       | 主要目的             | 是否推荐    |
|---------|------------|------------------|---------|
| 去应力退火   | 600~800 °C | 消除加工残余应力,提高尺寸稳定性 | 推荐      |
| 中间退火    | 根据加工工艺确定   | 恢复塑性,便于继续加工      | 制造过程中采用 |
| 稳定化热处理  | 根据产品要求确定   | 提高长期尺寸稳定性        | 高端产品采用  |
| 高温长时间保温 | 高于推荐温度     | 易造成组织退化          | 不推荐     |
| 淬火      | 快速冷却       | 无强化作用,易导致开裂      | 严禁      |

对于最终用户而言,大部分标准钨合金棒可以直接投入机械加工和使用,无需额外热处理;只有在经历大量切削、电火花加工、激光加工或需要极高尺寸稳定性的情况下,才建议进行规范的真空去应力退火。

总之,钨合金热处理的核心思想不是强化,而是组织稳定和应力控制。合理的热处理能够提高尺寸稳定性、降低残余应力并延长使用寿命;不合理的高温处理或错误地采用钢材热处理工艺,则可能对材料性能造成不可恢复的损害。因此,在实际应用中,应根据材料牌号、加工状态和最终用途制定相应的热处理方案,而不应简单套用普通钢材的经验。







#### 四、钨合金棒材的产品标准

##### Q21: 钨合金棒遵循哪些国际标准?

钨合金棒广泛应用于航空航天、半导体制造、电子工业、医疗设备、焊接、电真空器件、军工及核工业等领域。由于不同应用场景对材料纯度、化学成分、尺寸公差、力学性能、高温性能及检测方法的要求存在明显差异,因此国际上形成了多个标准体系,包括 ISO 国际标准、ASTM 美国材料与试验协会标准、AWS 美国焊接学会标准、JIS 日本工业标准以及 DIN、EN 等欧洲标准。对于出口产品而言,生产企业通常需要根据客户所在国家或行业要求执行相应标准,有时甚至需要同时满足两种以上标准。ISO 标准主要侧重于产品的通用技术要求和国际贸易一致性。其中,ISO 24370 规定了钨棒及钨制品的一般技术要求,包括尺寸偏差、外观质量、化学成分、检验方法和包装运输等内容,为不同国家之间的产品互认提供了统一依据。对于国际贸易中的普通工业用钨棒,ISO 标准具有较高的参考价值。

AWS 标准主要服务于焊接行业。例如,AWS A5.12 《Specification for Tungsten and Tungsten-Alloy Electrodes for Arc Welding and Cutting》是全球应用最广泛的钨电极标准之一,对纯钨、钍钨、铈钨、镧钨、铈钨、钨钨及复合稀土钨电极的颜色标识、化学成分、性能要求及适用焊接工艺进行了统一规定。对于用于 TIG 焊和等离子弧焊的掺杂钨棒,AWS 标准往往比普通工业标准更加关注起弧性能、载流能力和电极寿命。

ASTM 标准则更加重视材料性能和工程应用。其中,ASTM B777 是国际上高比重钨合金的重要标准,主要适用于钨镍铁、钨镍铜等密度钨合金材料,在航空配重、医疗屏蔽、惯性元件等领域具有广泛影响力。虽然该标准主要针对重钨合金,但其检测方法、尺寸控制和性能评价也常作为相关钨合金产品的重要参考。此外,ASTM 体系中还有针对纯钨、钨丝及粉末冶金钨制品的相关标准。

日本 JIS 标准在尺寸精度和加工质量方面要求较高。例如,JIS Z 3211 主要涉及焊接用钨电极,对产品尺寸、公差、表面质量以及焊接性能提出了较严格要求。日本半导体设备、精



密电子及自动化装备制造企业通常优先采用 JIS 标准，因此出口日本市场的钨棒产品需要特别关注尺寸一致性和外观质量。

除上述标准外，欧洲 DIN、EN 标准以及部分航空航天企业标准也被广泛采用。例如，欧洲高端真空设备和科研机构在采购钨棒时，通常会在执行 ISO 标准的基础上增加更加严格的内部技术规范，包括晶粒尺寸、显微组织、杂质元素含量及超声波探伤等要求。不同标准的侧重点如下表所示：

| 标准         | 适用范围    | 主要特点               |
|------------|---------|--------------------|
| ISO 24370  | 钨棒及钨制品  | 国际通用技术要求，适合国际贸易    |
| AWS A5.12  | 焊接用钨电极  | 重点规范掺杂钨棒、电弧性能及颜色标识 |
| ASTM B777  | 高比重钨合金  | 强调密度、力学性能及工程应用     |
| JIS Z 3211 | 日本焊接用钨棒 | 尺寸公差严格，加工质量要求高     |
| DIN / EN   | 欧洲工业市场  | 注重制造质量、检测及可追溯性     |

随着半导体、核聚变、航空航天等产业的发展，国际标准也在不断更新，越来越重视材料纯度、组织均匀性、批次一致性和环保要求。例如，无放射性稀土钨电极正在逐步替代传统钍钨电极，高纯钨棒对氧、碳、氮等杂质元素的控制也越来越严格。因此，在采购或出口钨合金棒时，除了关注标准编号，还应结合产品最终用途、客户技术协议及检测要求综合确定执行标准。

**Q22：中国有哪些钨棒国家标准？**

我国是全球最大的钨资源拥有国和钨制品生产国，已经建立了较为完整的钨材料标准体系，包括国家标准（GB）、有色金属行业标准（YS）、机械行业标准（JB）以及企业标准等。这些标准覆盖了纯钨、高纯钨、掺杂钨、钨合金及相关加工制品，为钨棒的设计、生产、检验和应用提供了统一依据。目前，纯钨棒和高纯钨棒主要执行 GB/T 4187-2017《钨、钼条和杆》。该标准规定了纯钨及钨棒产品的分类、尺寸、公差、化学成分、表面质量、检验方法、包装、标志和运输要求，适用于电子、电真空、照明、半导体、热场及高温工业等领域。对于高纯钨棒，还进一步限制氧、碳、铁、镍等杂质含量，以保证材料具有优良的高温性能和加工性能。

GB/T 3459-2017《钨及钨合金制品》属于覆盖范围较广的重要国家标准，对多种钨及钨合金产品进行了统一规范，包括纯钨制品、钨合金棒材、板材以及特殊用途产品。虽然其应用范围不仅限于钨棒，但对于航空航天配重件、军工穿甲材料、高温结构件及其他钨合金产品具有重要指导意义。在焊接材料方面，国内主要采用 YS/T 695《钨电极》系列标准。该标准规定了纯钨、钍钨、钨钨、铈钨、钨钨、钨钨及其他稀土复合钨电极的化学成分、尺寸规格、颜色标识、性能要求和检测方法，与 AWS A5.12 基本保持一致，但结合国内制造特点进行了适当补充。目前，大多数国产 TIG 焊钨电极均按照该标准生产。

此外，对于粉末冶金原料、高纯钨粉、碳化钨粉及烧结材料，还有大量 YS 行业标准作为配套。例如，对原料粒度、粉末纯度、烧结密度及组织均匀性均有明确规定，这些标准虽然并非直接针对钨棒，但对最终产品质量具有重要影响。我国钨棒相关标准体系可概括如下：

| 标准编号           | 标准名称    | 主要适用产品       |
|----------------|---------|--------------|
| GB/T 4187-2017 | 钨、钼条和杆  | 纯钨棒、高纯钨棒     |
| GB/T 3459-2017 | 钨及钨合金制品 | 钨及钨合金棒材、结构件等 |



| 标准编号     | 标准名称    | 主要适用产品      |
|----------|---------|-------------|
| YS/T 695 | 钨电极     | 纯钨及各种掺杂钨电极  |
| 相关 YS 标准 | 钨粉、钨加工材 | 粉末冶金原料及配套产品 |

近年来，随着半导体、光伏、新能源和高端装备制造的发展，国内标准也在持续升级，主要体现在以下几个方向：一是提高高纯钨及高性能钨合金的纯度控制要求；二是增加显微组织、晶粒度及无损检测等评价项目；三是加强产品一致性和可追溯性管理；四是逐步与 ISO、ASTM 等国际标准接轨，便于产品出口和国际认证。

中国钨棒标准体系已经覆盖了从原材料、粉末冶金、加工制造到终端产品检测的完整产业链。对于普通工业用途，可按照国家标准执行；对于半导体、航空航天、医疗及核工业等高端应用，则通常需要在国家标准基础上增加企业技术协议或客户专用规范，以满足更高等级的性能和质量要求。

### Q23: 钨合金棒的公差要求有多严格？

钨合金棒（Tungsten Alloy Rod）广泛应用于航空航天、半导体装备、医疗器械、电子真空器件、军工及精密机械等领域，其尺寸精度直接影响后续机械加工效率、装配精度以及产品最终性能。因此，尺寸公差不仅是衡量产品加工水平的重要指标，也是评价制造企业质量控制能力的重要依据。通常情况下，钨合金棒的尺寸公差主要依据产品直径、加工工艺、交货状态及客户要求确定，不同精度等级之间存在明显差异。

一般工业用途的普通级钨合金棒，直径公差通常控制在 $\pm 0.10$  mm 左右。这类产品主要采用烧结、锻造、旋锻及车削加工制造，能够满足一般机械零件、电极材料、配重件及普通结构件的使用要求，同时具有制造成本较低、交货周期较短等特点。

对于精密机械、电子设备及模具制造等行业，则通常要求更高的尺寸精度。精密级钨合金棒的公差一般可控制在 $\pm 0.05$  mm 左右。生产过程中不仅需要采用更高精度的数控车削设备，还需要增加在线检测、矫直及精加工工序，以保证整根材料尺寸均匀一致。

如果采用外圆磨削（Centerless Grinding）或精密无心磨削工艺生产磨光钨棒，其尺寸精度还能进一步提高。目前，直径约 1.0~50 mm 的磨光钨棒，其直径公差通常可以达到 $\pm 0.03 \sim \pm 0.10$  mm，其中直径较小的产品通常可以获得更高的尺寸精度，而较大直径产品则根据尺寸大小适当放宽公差范围。

对于电子工业和半导体行业广泛使用的细直径钨杆，例如直径 0.5~3.0 mm 的矫直钨杆，在经过连续拉拔、精密矫直和无心磨削后，其直径公差通常可以稳定控制在 $\pm 0.03$  mm 以内。这类产品除了要求尺寸精度外，还要求具有良好的直线度和圆度，以满足自动送料、高速加工及精密装配的要求。钨合金棒的公差不仅仅是直径尺寸的控制，还包括圆度、直线度、同轴度以及长度公差等多个几何精度指标。例如，对于自动车床加工材料而言，直线度往往比直径公差更加重要；对于高精度轴类零件，则圆度和同轴度会直接影响旋转精度和轴承配合性能。

影响钨合金棒尺寸公差的因素包括粉末冶金质量、锻造变形均匀性、热处理工艺、机械加工设备精度以及检测能力等。粉末组织越均匀、烧结致密度越高，加工过程中材料变形越稳定，就越容易获得较高的尺寸一致性。同时，高精度数控车床、无心磨床及在线激光测径设备，也是保证尺寸公差的重要条件。下表列出了不同加工状态下钨合金棒常见的尺寸公差范围。

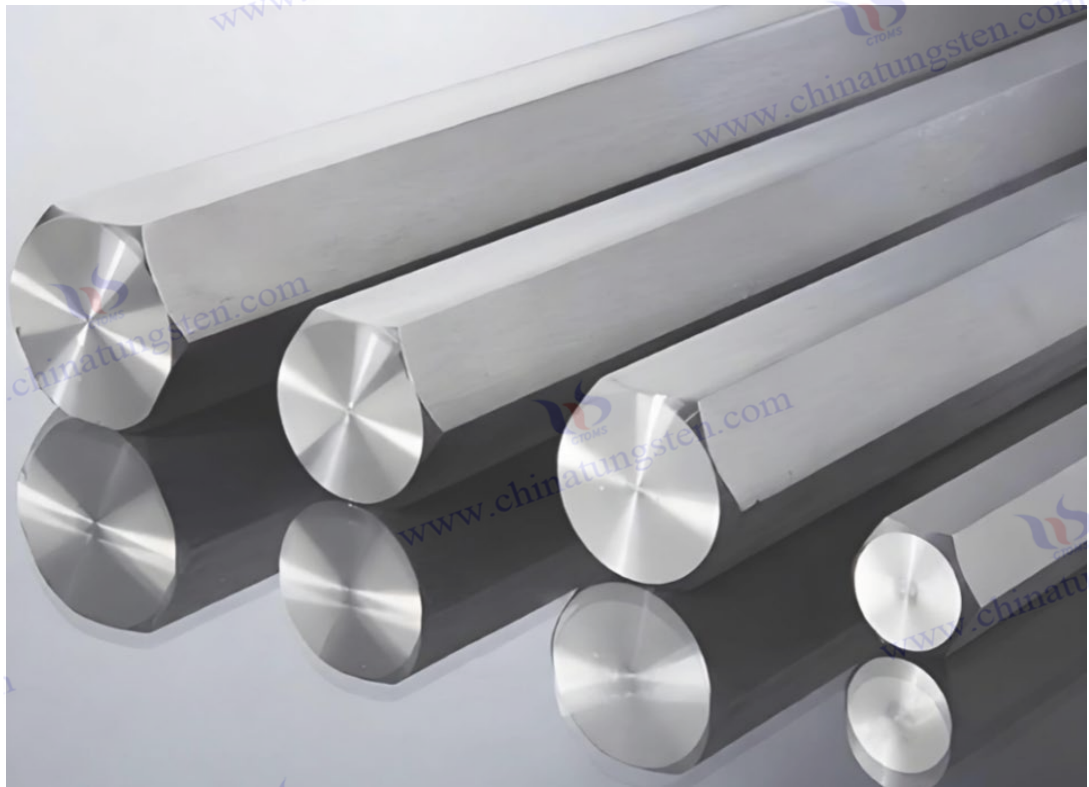




| 产品类型    | 典型直径范围      | 常见直径公差         | 主要加工方式   |
|---------|-------------|----------------|----------|
| 普通级钨合金棒 | Φ3~100 mm   | ±0.10 mm       | 车削、锻造    |
| 精密级钨合金棒 | Φ2~80 mm    | ±0.05 mm       | 精车、精整    |
| 磨光钨棒    | Φ1.0~50 mm  | ±0.03~±0.10 mm | 无心磨削     |
| 矫直钨杆    | Φ0.5~3.0 mm | ±0.03 mm       | 拉拔、矫直、磨削 |

除标准公差外，许多高端应用还会提出特殊要求。例如，半导体设备中的高纯钨棒可能要求直径公差达到 $\pm 0.01 \sim \pm 0.02$  mm，同时配合严格的表面粗糙度控制；医疗射线屏蔽和航空航天零件则更加关注长度一致性和整体尺寸稳定性。一些企业还可根据客户要求生产公差配合等级更高的定制产品，以满足精密仪器和自动化设备的特殊需求。

中钨智造认为，随着高端制造业的发展，钨合金棒的尺寸控制已经从单纯满足标准要求，逐步发展为对尺寸精度、几何精度、一致性和稳定性的综合控制。现代生产企业不仅依靠高精度加工设备，还结合在线测量、统计过程控制（SPC）及全过程质量追溯体系，实现批次间高度一致的尺寸精度，为半导体、航空航天、医疗及高端装备制造提供更加可靠的基础材料。



#### Q24：影响钨合金棒尺寸公差的主要因素有哪些？

钨合金棒的尺寸公差不仅取决于最终加工设备的精度，还受到原材料质量、粉末冶金工艺、热加工过程、机械加工工艺及质量检测能力等多个环节的共同影响。对于高精度钨合金棒而言，每一道工序都会影响最终尺寸稳定性，因此现代生产通常采用全过程质量控制，而不是仅依赖最后一道精加工工序。

首先，粉末原料质量是影响尺寸精度的基础。钨粉粒度分布、纯度及氧含量都会影响烧结后的致密度和组织均匀性。如果粉末粒度分布不均匀，烧结收缩就可能产生局部差异，导



致后续锻造和加工过程中尺寸变化不一致，从而增加公差控制难度。

其次，烧结质量直接决定材料内部组织。烧结温度、保温时间及保护气氛都会影响烧结密度和晶粒组织。烧结体密度越均匀，后续热加工过程中材料流动越稳定，加工后的尺寸一致性也越高。对于高端产品，还会采用热等静压（HIP）进一步消除内部孔隙，提高组织均匀性。热加工工艺同样十分重要。锻造、旋锻及轧制不仅决定材料力学性能，也决定尺寸均匀性。如果变形量不足，材料内部组织可能不均匀；变形量过大，又可能引起残余应力增加，导致后续加工过程中发生尺寸变化。因此，需要合理设计变形工艺和中间退火制度。

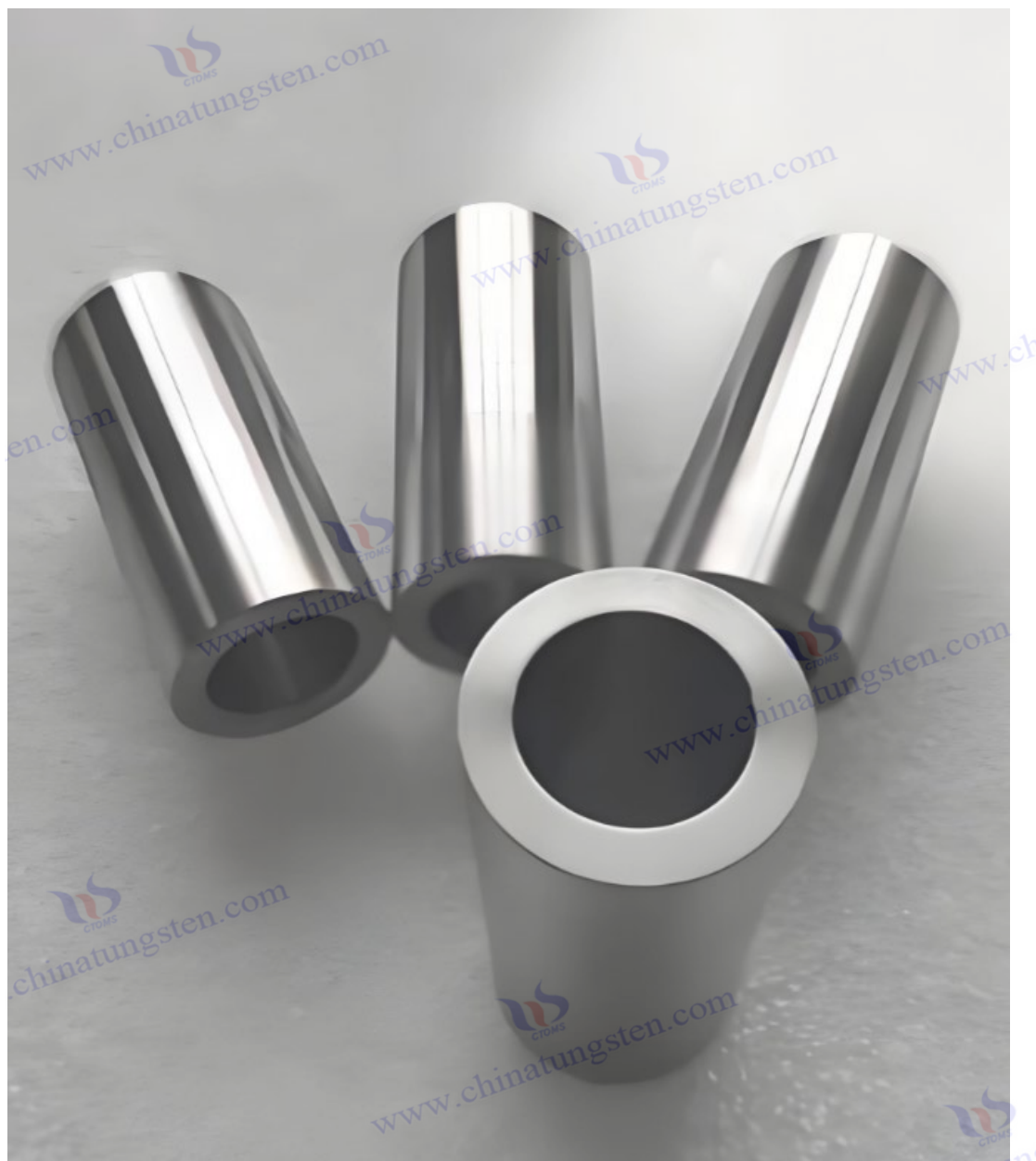
机械加工设备精度是影响最终公差的重要因素。普通车床一般能够满足普通级公差要求，而高精度数控车床、无心磨床及精密磨削设备则能够实现更严格的尺寸控制。此外，刀具磨损也会直接影响加工尺寸，因此生产过程中通常会建立刀具寿命管理制度，并定期进行补偿和更换。温度控制也是一个容易被忽视的重要因素。钨的线膨胀系数虽然较低，但对于高精度产品，在加工和检测过程中仍需保持恒温环境。通常，高精度测量会在  $20\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  的恒温室内进行，以避免温度变化引起测量误差。检测设备和检测方法同样决定了企业能够达到的公差水平。现代企业通常采用激光测径仪、三坐标测量机（CMM）、圆度仪及自动在线检测系统，实现尺寸实时监测，并利用统计过程控制方法及时调整加工参数，从而保证批量产品的一致性。影响钨合金棒尺寸公差的主要因素可归纳如下。

| 影响因素   | 主要影响      | 控制措施          |
|--------|-----------|---------------|
| 钨粉质量   | 烧结收缩均匀性   | 高纯、粒度均匀粉末     |
| 烧结工艺   | 致密度、组织均匀性 | 优化烧结制度、HIP 处理 |
| 热加工工艺  | 尺寸稳定性     | 合理锻造与中间退火     |
| 机械加工设备 | 最终尺寸精度    | 高精度数控设备、无心磨削  |
| 刀具状态   | 加工尺寸一致性   | 定期补偿、更换刀具     |
| 环境温度   | 测量误差      | 恒温加工与检测       |
| 检测能力   | 公差控制水平    | 在线检测、SPC 统计控制 |

此外，不同行业对于公差的关注重点也有所不同。自动化设备更关注棒材直线度和长度一致性；半导体行业更加重视尺寸一致性和表面质量；航空航天则要求尺寸稳定性与组织均匀性兼顾。因此，制造企业通常需要根据最终用途制定不同的制造和检测方案。中钨智造认为，钨合金棒尺寸公差的控制实际上是材料、工艺、设备和检测能力综合水平的体现。随着数字化制造、智能检测及在线质量控制技术的发展，现代钨合金棒生产已从传统的终检控制逐步发展为全过程尺寸控制，实现更高精度、更高一致性和更高可靠性的制造目标，为精密制造和高端装备提供稳定可靠的钨合金基础材料。







## 五、钨合金棒材的检测方法

### Q24: 如何检测钨合金棒的密度?

密度是评价钨合金棒质量的重要指标之一,也是判断材料是否达到设计致密度、烧结质量是否合格以及内部是否存在孔隙、夹杂或疏松缺陷的重要依据。对于高密度钨合金(如 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 等),理论密度通常可达到  $17.0 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ ,不同牌号因钨含量和粘结相比例不同而有所差异。生产过程中,密度检测不仅用于成品质量验收,还贯穿于烧结、热处理、机加工等多个环节,是质量控制体系中的关键检测项目。

目前工业上最常采用的方法是阿基米德排水法(Archimedes Method),其原理基于阿基米德浮力定律:物体浸没在液体中所受到的浮力等于其排开液体的重量。检测时,首先使用精度不低于  $\pm 0.001 \text{ g}$  的电子分析天平测量试样在空气中的质量,然后测量试样完全浸没于去离子水(或规定密度的液体)中的表观质量,根据两者之差计算试样体积,再求得材



料密度。按照 GB/T 1423、ASTM B962、ISO 2738 等标准,测试过程中通常需要对试样进行清洗、脱脂,并采用真空浸水或超声辅助去除表面气泡,以提高测量精度。对于密度要求较高的航空航天、军工和医疗用钨合金产品,阿基米德法测量误差一般可控制在 $\pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ 以内。

对于规则棒材,还可采用尺寸—质量法进行辅助验证。即利用千分尺测量棒材直径和长度,计算几何体积,再结合电子天平测得的质量计算密度。这种方法操作简单,适用于尺寸规则、加工精度较高的棒材,但由于直径公差、圆度误差及端面平整度等因素影响,其精度通常低于阿基米德法,因此多作为生产现场快速检测手段。

随着无损检测技术的发展,X射线密度检测仪、工业 CT (Computed Tomography) 及 X射线数字成像 (DR) 技术逐渐应用于高端钨合金产品检测。X射线密度计能够通过材料对 X射线的吸收能力快速估算局部密度,实现非接触、快速检测;工业 CT 不仅能够分析整体密度分布,还能够发现内部孔隙、裂纹、夹杂和烧结缺陷,特别适用于高价值复杂零件。不过,这类设备投资较高,通常用于科研机构或高端制造企业。

对于粉末冶金钨合金,还会结合金相分析进行综合评价。若密度明显低于设计值,金相组织中往往可以观察到未烧结孔隙、连通孔或局部疏松区域。相反,当材料达到接近理论密度时,组织通常表现为钨颗粒均匀分布,粘结相连续且孔隙极少,能够保证优异的力学性能和抗疲劳性能。不同检测方法各有特点,可根据产品类型和检测目的进行选择。

| 检测方法   | 检测原理    | 优点           | 适用范围       |
|--------|---------|--------------|------------|
| 阿基米德法  | 浮力法测定体积 | 精度高、应用广      | 成品检验、实验室检测 |
| 尺寸—质量法 | 几何体积计算  | 操作简单、效率高     | 规则棒材快速检测   |
| X射线密度计 | X射线吸收分析 | 非接触、速度快      | 在线检测、批量筛查  |
| 工业 CT  | 三维断层扫描  | 可分析内部缺陷和密度分布 | 高端零件、科研分析  |

中钨智造认为,密度不仅是一项物理参数,更是烧结质量、组织完整性和综合性能的重要体现。对于高性能钨合金棒而言,仅满足平均密度要求还远远不够,还应关注密度均匀性和内部致密程度。未来,随着工业 CT、数字射线检测及智能在线检测技术的发展,钨合金密度检测将逐步由传统抽样检测向全尺寸、全生命周期无损检测方向发展,为高端装备制造提供更加可靠的质量保障。

## Q25: 如何测试钨合金棒的硬度?

硬度是评价钨合金棒耐磨性能、抗塑性变形能力及组织状态的重要力学性能指标,也是生产质量控制和材料验收过程中最常检测的项目之一。钨合金具有较高的钨含量和优异的高温性能,其硬度通常明显高于普通结构钢,但又受到钨含量、粘结相组成、烧结工艺、热处理状态以及后续塑性加工等多种因素影响。因此,合理选择硬度测试方法,对于准确评价材料性能具有重要意义。

目前应用最广泛的是维氏硬度 (Vickers Hardness, HV) 测试。该方法采用金刚石四棱锥压头,在规定载荷下压入材料表面,通过测量压痕对角线长度计算硬度值。对于钨合金棒,常用载荷为 10~50 kgf (HV10、HV30、HV50),既能保证测量稳定性,又能避免压痕过大影响测试结果。维氏硬度适用于小直径棒材、薄壁制品以及显微组织研究,其优点是适用范围广、测量精度高、不同载荷之间具有较好的可比性,因此也是国际标准最常采用的方法之一。对于直径较大、截面较厚的钨合金棒,还可采用布氏硬度 (Brinell Hardness, HBW) 测试。该方法使用硬质合金球压头,在 500~3000 kgf 载荷下压入材料表面,通过测量压痕直径计算硬度值。由于布氏压痕面积较大,更能反映材料整体硬度水平,特别适



用于组织较均匀的大规格棒材和锻件。但对于小尺寸试样或表面较薄的产品，则不宜采用布氏硬度法，以免压痕过深影响试样。对于已经完成精加工或成品检测的钨合金棒，有时也采用洛氏硬度（Rockwell Hardness，HRA、HRB、HRC）进行快速检测。由于洛氏法无需测量压痕尺寸，检测效率较高，适合现场质量控制。不过，对于高密度钨合金而言，国际上仍以维氏硬度作为主要评价指标，洛氏硬度更多用于生产过程中的快速比较。

硬度测试前，应保证试样表面平整、无氧化皮、无油污及明显加工刀痕。通常采用磨削或抛光处理，使表面粗糙度达到检测要求，以避免表面缺陷对压痕测量造成影响。同时，压痕之间以及压痕与试样边缘之间应保持足够距离，防止应力场相互干扰，确保测试结果具有代表性。除了常规宏观硬度测试，在材料研发过程中，还经常采用显微维氏硬度（Micro Vickers Hardness）测试，用于分别测定钨颗粒和粘结相的局部硬度，从而分析烧结质量、组织均匀性及强化效果。这对于优化粉末冶金工艺、研究材料失效机理具有重要意义。不同硬度测试方法适用于不同规格和检测目的。

| 硬度测试方法        | 压头类型     | 常用载荷         | 适用对象       | 主要特点      |
|---------------|----------|--------------|------------|-----------|
| 维氏硬度（HV）      | 金刚石四棱锥   | 10~50 kgf    | 小直径棒材、精密制品 | 精度高、适用范围广 |
| 布氏硬度（HBW）     | 硬质合金球    | 500~3000 kgf | 大规格棒材、锻件   | 代表整体硬度    |
| 洛氏硬度（HRA/HRC） | 金刚石圆锥或钢球 | 标准载荷         | 现场快速检测     | 检测效率高     |
| 显微维氏硬度        | 金刚石四棱锥   | 10 g~1 kgf   | 显微组织分析     | 可测局部组织硬度  |

中钨智造认为，硬度不仅反映材料抵抗压入变形的能力，也能够间接反映烧结质量、组织状态和热处理效果。在实际生产中，应根据产品规格、检测目的和执行标准选择合适的测试方法，并结合密度、抗拉强度、显微组织等检测结果进行综合评价。对于高端钨合金棒，仅依赖单一硬度值难以全面反映材料性能，多指标综合评价才是确保产品质量和服役可靠性的有效途径。

## Q26：如何检测钨合金棒的内部缺陷？

钨合金棒广泛应用于航空航天、国防军工、医疗屏蔽、核工业、电子封装及高端模具等领域，其内部质量直接关系到产品的力学性能、加工性能及服役可靠性。由于钨合金密度高、弹性模量大，在烧结、热加工或后续机加工过程中，若工艺控制不当，可能产生气孔、缩孔、夹杂、裂纹、分层及组织不均等缺陷。因此，在产品交付前通常需要采用无损检测（NDT）与金相分析相结合的方法，对内部缺陷进行全面评价。目前工业上常用的检测方法包括超声波探伤、X 射线检测、工业 CT 检测、磁粉探伤（适用于部分磁性钨合金）以及金相组织分析等，不同方法各有适用范围。

### （一）超声波探伤（Ultrasonic Testing, UT）

超声波探伤是检测钨合金棒内部缺陷最常用的方法之一。检测时，由探头向材料内部发射高频超声波，当声波遇到裂纹、气孔、夹杂或分层等缺陷时，会产生反射波，通过分析回波位置、强度及传播时间即可判断缺陷的位置和尺寸。由于钨合金声阻抗较高，工业检测通常采用 5~10 MHz 探头，对于直径较大的棒材，也可根据衰减情况采用 2~5 MHz 较低频率探头，以提高穿透能力。超声检测具有检测速度快、成本低、适合批量生产等优点，对内部裂纹、缩孔、未烧结区域等缺陷具有较高灵敏度，因此已成为钨合金棒材出厂检验的重要手段。

### （二）工业 X 射线检测（Industrial Radiography）

对于超声波不易判断的复杂缺陷，可采用工业 X 射线进行检测。工业 X 射线通常采用 100~300 kV 射线源，对棒材进行透照，不同密度区域对射线吸收能力不同，从而形成灰度差





异, 通过数字成像系统即可识别内部孔洞、夹杂、缩松及局部组织异常。对于厚截面或高密度钨合金, 可采用更高能量的工业 CT 或  $\gamma$  射线进行检测, 以提高穿透能力。相比超声检测, X 射线能够直观显示缺陷形貌, 特别适用于检测体积型缺陷, 但对于极细微裂纹的检测能力通常不及超声波。

### （三）工业 CT 三维检测

近年来, 高端钨合金产品越来越多采用工业 CT (Computed Tomography) 检测。工业 CT 能够获得材料内部三维结构, 不仅能够发现气孔和裂纹, 还可以精确测量缺陷体积、形状及空间分布。对于航空航天、高端医疗及精密电子行业, CT 检测已经成为高可靠性产品的重要质量保证手段。虽然检测成本较高, 但对于复杂异形件、高价值零件及研发样品, 其优势十分明显。

### （四）磁粉探伤 (Magnetic Particle Testing, MT)

磁粉探伤主要适用于具有一定铁磁性的 W-Ni-Fe 重钨合金, 而不适用于纯钨及 TZM 等钼基合金。检测时, 将工件磁化, 在表面撒布磁粉, 当存在表面裂纹或近表面缺陷时, 磁力线发生畸变, 磁粉聚集形成明显指示, 从而发现裂纹位置。磁粉探伤具有灵敏度高、操作简单的特点, 但只能检测表面及近表面缺陷, 无法发现材料深部缺陷, 因此通常作为辅助检测方法。

### （五）金相组织分析

对于质量要求较高的钨合金棒, 还需进行金相检测。通过切取试样, 经磨抛、腐蚀后, 在光学显微镜或扫描电子显微镜 (SEM) 下观察组织, 可以分析: 晶粒尺寸及均匀性、粘结相分布、气孔率、烧结质量、第二相颗粒分布、裂纹扩展情况、金相分析不仅能够验证烧结工艺是否合理, 还可为失效分析提供重要依据。

### （六）缺陷等级评价

实际生产中, 检测不仅关注是否存在缺陷, 还需要依据产品标准评价缺陷等级。评价指标通常包括: 缺陷尺寸、缺陷数量、缺陷分布密度、与受力方向关系、是否影响使用性能、航空航天、医疗及核工业产品通常采用更严格的验收标准, 对内部缺陷尺寸和数量都有明确限制。

钨合金棒内部缺陷常用检测方法对比

| 检测方法        | 可检测缺陷       | 优点               | 局限性              |
|-------------|-------------|------------------|------------------|
| 超声波探伤 (UT)  | 裂纹、气孔、分层、缩孔 | 检测速度快、成本低、适合批量生产 | 对复杂形状和细小体积缺陷识别有限 |
| X 射线检测 (RT) | 气孔、夹杂、缩松    | 图像直观、适合体积型缺陷     | 对微细裂纹灵敏度较低       |
| 工业 CT       | 三维孔洞、裂纹、夹杂  | 可三维定量分析, 精度高     | 成本较高、检测效率较低      |
| 磁粉探伤 (MT)   | 表面裂纹        | 灵敏度高、操作方便        | 仅适用于磁性钨合金        |
| 金相分析        | 晶粒、组织、微裂纹   | 可分析组织演变及失效原因     | 属于破坏性检测          |

中钨智造根据长期生产实践认为, 现代高品质钨合金棒检测已由单一无损检测逐步发展为多技术融合模式。对于普通工业产品, 通常采用超声波探伤结合尺寸检测即可满足要求; 而对于航空航天、医疗、核工业及高端电子行业, 则普遍采用超声波、X 射线、工业 CT 及金相分析等多种检测手段综合评价材料质量。未来, 随着人工智能图像识别、数字化无损检测及在线检测技术的发展, 钨合金棒内部缺陷检测将向更高灵敏度、更高自动化和更高可靠性方向持续发展。

## Q27: 如何分析钨合金棒的化学成分?

化学成分是决定钨合金棒性能的重要基础参数。无论是纯钨棒、重钨合金、TZM 钛锆钼



合金，还是其他钨基高温合金，其密度、强度、导热性能、高温性能及耐腐蚀性能，都与化学成分密切相关。因此，在原材料验收、生产过程控制及成品质量检验过程中，化学成分分析都是必不可少的重要检测项目。根据检测目的不同，目前工业上通常采用 X 射线荧光光谱（XRF）、电感耦合等离子体发射光谱（ICP-AES）、电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）、辉光放电质谱（GD-MS）、惰性气体熔融法以及碳硫分析仪等多种检测技术。

（一）X 射线荧光光谱（XRF）

XRF 是钨合金生产中最常用的快速分析方法之一。仪器利用不同元素受到 X 射线激发后产生特征荧光，通过分析特征峰位置及强度，可快速判断主要元素组成。XRF 具有检测速度快、无需复杂前处理、属于无损检测等优点，特别适用于：来料快速筛查、牌号确认、生产过程控制、成品抽检、不过，对于 ppm 级微量杂质，其检测能力有限。

（二）ICP-AES

ICP-AES 利用高温等离子体激发元素发射特征光谱，可同时分析多种元素。对于钨合金而言，可准确检测：Ni、Fe、Cu、Co、Ti、Zr、Cr、Mn、V、Al 等。检测精度通常可达到 ppm 级，适用于常规质量控制。

（三）ICP-MS

ICP-MS 是在 ICP 基础上的质谱分析方法。相比 ICP-AES，其检测灵敏度更高，可达到 ppb 甚至更低水平，因此特别适用于：高纯钨、半导体级钨材料、核工业材料、超低杂质分析、对于几十种痕量元素，可一次完成定量分析。

（四）GD-MS

GD-MS（辉光放电质谱）目前是国际公认分析高纯钨杂质最有效的方法之一。其特点包括：可直接分析固体样品、无需复杂溶解、检测元素种类多、检测限可达 ppm 甚至更低、对于半导体、高纯靶材及电子级钨材料，GD-MS 已成为主要分析手段。

（五）惰性气体熔融法

氧、氮、碳属于影响钨材料性能的重要间隙元素。检测时，将试样置于高温石墨坩埚中熔融，在惰性气体保护下释放气体，再采用红外检测或热导检测进行分析。该方法主要用于检测：氧（O）、氮（N）、碳（C），对于 TZM 等高温钨合金而言，这些元素含量直接影响再结晶行为、高温强度及塑性，因此控制要求十分严格。

（六）碳硫分析

对于含碳强化钨合金（如 TZM），碳含量直接关系到 TiC、ZrC 强化相的形成。碳过低会导致强化不足；碳过高则可能形成粗大碳化物，降低塑性。因此，生产过程中通常采用专用碳硫分析仪对碳含量进行精确控制。

（七）分析结果评价

化学成分检测不仅需要测定元素含量，还需依据相应标准进行判定。评价内容通常包括：主元素是否符合牌号要求、合金元素是否处于设计范围、有害杂质是否超标、间隙元素是否满足技术规范。对于航空航天、半导体及核工业材料，还需要建立完整的元素分析记录，实现全过程质量追溯。

钨合金棒常用化学成分分析方法对比

| 分析方法    | 检测对象     | 主要特点            | 典型应用      |
|---------|----------|-----------------|-----------|
| XRF     | 主元素、合金元素 | 快速、无损           | 来料筛查、牌号确认 |
| ICP-AES | 常规元素     | 多元素同时分析，ppm 级精度 | 日常质量控制    |
| ICP-MS  | 痕量杂质     | 灵敏度高，可达 ppb 级   | 高纯钨、电子级材料 |
| GD-MS   | 超低杂质     | 固体直接分析、元素覆盖广    | 半导体、高纯钨   |



| 分析方法    | 检测对象  | 主要特点     | 典型应用        |
|---------|-------|----------|-------------|
| 惰性气体熔融法 | O、N、C | 间隙元素专用分析 | 高温钨合金质量控制   |
| 碳硫分析仪   | C、S   | 精确测定碳含量  | TZM 等含碳合金检测 |

中钨智造认为，现代钨合金化学成分分析已经由单一元素检测发展为多技术综合分析体系。XRF 适用于快速筛查，ICP 系列适用于常规定量分析，GD-MS 适用于超高纯材料，而惰性气体熔融法则是控制氧、氮、碳等关键间隙元素不可替代的重要手段。未来，随着高端半导体、聚变能源及航空航天产业的发展，对钨材料纯度和杂质控制的要求将持续提高，化学成分分析技术也将向更高灵敏度、更高自动化和全过程数字化质量追溯方向不断发展。

### Q28：钨合金棒的晶粒度如何检测？

晶粒度（Grain Size）是评价钨合金棒微观组织质量的重要指标之一，直接影响材料的强度、韧性、抗热震性能以及高温服役稳定性。由于钨合金通常采用粉末冶金、烧结、热加工等工艺制造，其最终组织并非简单由化学成分决定，而是受到粉末粒度、烧结温度、保温时间、变形加工量以及热处理制度等多种因素共同影响。因此，对钨合金棒进行晶粒度检测，是控制产品质量和优化制造工艺的重要环节。钨合金棒的晶粒度检测通常需要经过取样、镶嵌、研磨、抛光、腐蚀和显微观察等步骤。由于钨及其合金硬度较高、化学稳定性强，样品制备难度明显高于普通钢铁材料，需要采用专用金刚石磨料进行精细研磨，并通过合适的化学腐蚀剂显示晶界。经过处理后的样品，在显微镜下可以清晰观察晶粒形貌、晶界分布以及晶粒尺寸。

#### （一）金相显微镜法是工业最常用方法

目前，钨合金棒晶粒度检测最常用的方法是光学金相显微镜观察法。其基本原理是利用化学腐蚀使晶界区域产生不同程度的反射差异，从而显现晶粒边界，再通过显微图像分析计算平均晶粒尺寸。典型检测流程如下：

| 检测步骤 | 主要内容         | 目的      |
|------|--------------|---------|
| 取样   | 从棒材横截面或纵截面取样 | 保证代表性   |
| 镶嵌   | 使用树脂固定样品     | 方便制样    |
| 研磨   | 金刚石砂纸逐级研磨    | 去除加工损伤层 |
| 抛光   | 使用金刚石抛光剂获得镜面 | 提高清晰度   |
| 腐蚀   | 化学试剂显示晶界     | 暴露晶粒结构  |
| 显微分析 | 测量晶粒尺寸       | 判断组织状态  |

对于工业级钨合金棒，常见晶粒尺寸通常约为 10~50  $\mu\text{m}$ 。经过优化粉末冶金工艺和热处理控制后，高性能钨合金可以获得更加细小均匀的晶粒结构。晶粒越细，通常意味着晶界数量越多，能够提高材料强度并改善抗裂性能；但如果晶粒过细，也可能影响材料的高温稳定性。因此，实际生产中并不是单纯追求最小晶粒，而是根据应用需求获得最佳晶粒状态。

#### （二）电子显微分析用于高精度研究

对于高性能钨合金，尤其是航空航天、核工业及高温装备使用的材料，仅依靠普通光学显微镜可能无法满足要求，因此会采用扫描电子显微镜（SEM）或电子背散射衍射技术（EBSD）进行更加精确的组织分析。SEM 能够观察更细小的晶粒结构、第二相颗粒分布以及晶界状态，而 EBSD 则可以进一步分析晶粒取向、晶界类型和织构特征。例如，在钨





铜合金、钨镍铁合金以及高性能难熔钨合金中，晶粒取向会影响热导率、塑性变形行为和疲劳性能，因此 EBSD 已经成为先进材料研究的重要工具。

### （三）X 射线衍射法（XRD）测定晶粒尺寸

除了显微观察方法外，X 射线衍射（XRD）也是测量晶粒尺寸的重要手段。XRD 主要通过分析衍射峰宽化程度，利用 Scherrer 公式计算晶粒尺寸： $D = K\lambda / \beta \cos\theta$ ，其中：D 表示晶粒尺寸、K 为常数、 $\lambda$  为 X 射线波长、 $\beta$  为衍射峰半高宽、 $\theta$  为衍射角。该方法特别适用于纳米晶或超细晶材料分析，但需要注意的是，XRD 测得的是晶体尺寸，而金相法测得的是实际可观察晶粒尺寸，两者在某些材料中可能存在差异。

### （四）影响钨合金棒晶粒尺寸的主要因素

钨合金棒最终晶粒大小主要由制造过程决定：

| 影响因素   | 对晶粒的影响         |
|--------|----------------|
| 原始粉末粒度 | 粉末越细，越容易获得细晶组织 |
| 烧结温度   | 温度过高容易导致晶粒快速长大 |
| 保温时间   | 时间越长，晶粒越容易粗化   |
| 热加工变形量 | 合理变形有利于细化晶粒    |
| 热处理制度  | 控制再结晶和晶粒稳定性    |

对于高温应用的钨合金，除了关注初始晶粒尺寸，更重要的是关注晶粒长期稳定性。例如，在 2000 °C 以上环境中工作的热场部件，如果晶粒快速粗化，会导致材料强度下降、抗蠕变能力降低。

### （五）晶粒度检测对产品质量控制的意义

钨合金棒晶粒度检测不仅用于最终产品检验，也用于生产工艺优化。例如：在烧结阶段，通过晶粒检测可以判断烧结温度是否合理；在热加工阶段，可以评价锻造或轧制是否达到细化组织效果；在热处理阶段，可以确认是否发生异常晶粒长大。对于半导体热场、真空炉部件、高温结构件等应用，晶粒度通常需要与密度、纯度、硬度和机械性能共同评价，才能全面反映材料质量。

中钨智造认为，晶粒度检测是钨合金棒质量评价体系中的核心环节。现代高性能钨合金制造已经从单纯控制化学成分，发展到精确控制粉末特性、烧结行为、晶粒尺寸及组织稳定性。通过金相分析、SEM、EBSD 及 XRD 等多种检测手段，可以全面掌握材料微观结构，为高可靠性钨合金产品制造提供技术保障。

## Q29：如何评估钨合金棒的高温性能？

钨合金棒由于具有极高熔点、高温强度和优异的抗热性能，被广泛应用于高温炉结构件、航空航天部件、核工业设备、等离子装置以及半导体热场系统。在实际使用过程中，材料不仅需要承受高温，还需要长期保持强度、尺寸稳定性和抗变形能力。因此，高温性能评价是判断钨合金棒是否满足工程应用要求的重要方法。钨合金棒的高温性能评价通常包括高温拉伸试验、高温蠕变试验、高温硬度测试、热稳定性分析以及组织变化观察等。其中，高温拉伸和蠕变测试是最关键的评价手段。

### （一）高温拉伸试验评价瞬时高温强度

高温拉伸试验主要用于测试材料在特定高温条件下的即时承载能力。测试过程中，将钨合金试样置于真空环境或高纯氩气保护环境中，加热至目标温度，然后施加拉伸载荷，测量材料的抗拉强度、屈服强度和延伸率。典型测试温度范围如表：

| 测试项目 | 典型条件 |
|------|------|
|------|------|



| 测试项目 | 典型条件          |
|------|---------------|
| 温度范围 | 1000~2500 °C  |
| 气氛   | 真空、氩气保护       |
| 测试指标 | 抗拉强度、屈服强度、延伸率 |
| 主要目的 | 评价高温承载能力      |

钨合金在室温下具有较高强度,但随着温度升高,材料会逐渐软化。因此,高温拉伸数据能够直接反映材料在实际工作温度下还能保持多少强度。例如,用于高温炉支撑结构的钨合金棒,必须保证在 1500 °C 甚至更高温度下仍具有足够强度,否则容易发生弯曲、变形或失效。

## （二）蠕变试验评价长期高温稳定性

对于长期高温工作的钨合金部件,仅测试瞬时强度是不够的,还必须评价蠕变性能。蠕变是指材料在长期恒定温度和恒定载荷作用下,随着时间推移产生缓慢塑性变形的现象。典型测试方法如:

| 测试参数 | 常见范围            |
|------|-----------------|
| 温度   | 1200~2000 °C 以上 |
| 载荷   | 例如 100 MPa      |
| 时间   | 100~1000 小时     |
| 测量内容 | 应变变化、蠕变速率、断裂时间  |

蠕变性能越好,说明材料在长期高温环境下越稳定。对于半导体单晶硅炉、真空烧结炉等设备中的钨合金支撑件,长期高温下如果发生蠕变,会导致热场位置变化,影响设备精度。因此,抗蠕变性能往往比短时间高温强度更加重要。

## （三）高温组织稳定性评价

钨合金高温性能不仅取决于力学强度,还与组织稳定性密切相关。长期高温使用过程中,材料可能发生:晶粒长大、第二相颗粒粗化、孔隙变化、元素扩散等现象。因此,高温性能评价通常需要结合:

| 检测方法   | 分析内容    |
|--------|---------|
| 金相分析   | 晶粒变化    |
| SEM 观察 | 第二相颗粒状态 |
| XRD 分析 | 晶体结构变化  |
| 密度检测   | 孔隙变化    |

对于添加稀土元素、碳化物强化的钨合金,还需要重点观察强化相是否能够长期稳定存在。

## （四）热循环性能测试

许多钨合金零件并不是长期保持恒温,而是在升温和降温过程中反复工作。因此,还需要进行热循环测试。测试内容包括:反复加热至工作温度、保持一定时间、冷却至低温,再循环多次,观察材料是否出现裂纹、变形或性能下降。该测试尤其适用于高温炉部件、等离子设备、电极材料以及航空发动机热端结构。

## （五）高温性能评价与实际应用关系

不同应用领域对钨合金棒性能要求不同:

| 应用领域  | 重点评价性能    |
|-------|-----------|
| 半导体热场 | 抗蠕变、尺寸稳定性 |



| 应用领域 | 重点评价性能      |
|------|-------------|
| 航空航天 | 高温强度、热疲劳性能  |
| 核工业  | 辐照稳定性、高温可靠性 |
| 真空炉  | 高温承载能力、洁净性  |
| 电极材料 | 导电性和热稳定性    |

因此，不能仅用单一指标判断钨合金棒性能，而需要结合工作温度、载荷状态和使用寿命进行综合评价。

中钨智造认为，钨合金棒高温性能评价的核心，不仅是测量材料能够承受多高温，更重要的是判断其在长期极端环境中的稳定能力。通过高温拉伸、蠕变测试、热循环实验以及组织稳定性分析，可以全面评价钨合金棒的服役能力，为半导体、高温炉、航空航天及核工业等领域提供可靠的数据支持。





## 六、钨合金棒的应用场景

### Q30: 钨合金棒在军工领域的主要用途?

钨合金棒 (Tungsten Heavy Alloy Rod) 是现代军工装备中重要的高性能金属材料之一, 主要由钨作为基体, 并加入镍、铁、铜等元素形成高密度合金体系。由于钨的密度可达到  $19.3 \text{ g/cm}^3$ , 而钨合金通常可达到  $17.0 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ , 同时兼具较高强度、良好的韧性、优异的耐高温性能和抗冲击能力, 因此被广泛应用于穿甲弹、动能武器、高温结构件及精密惯性部件等领域。与传统钢材料相比, 钨合金最大的优势在于高密度和高强度的结合。高密度能够在相同体积下提供更大的质量, 使弹体获得更高的动能; 高强度和良好的塑韧性则能够保证材料在高速冲击过程中保持完整形态, 提高侵彻效率。因此, 钨合金棒已经成为现代防护装备对抗和先进武器系统中的重要材料。

#### (一) 穿甲弹弹芯: 高密度侵彻材料

穿甲弹弹芯是钨合金棒最具代表性的军工应用之一。现代装甲目标通常采用多层复合装甲、陶瓷装甲和反应装甲等防护结构, 对穿甲材料提出了更高要求。钨合金弹芯利用其高密度、高抗压强度和良好的动态力学性能, 在高速撞击过程中能够保持较高的纵向稳定性, 将高速飞行产生的动能集中于较小面积, 实现深度侵彻。相比传统钢芯弹, 钨合金穿甲弹通常具有更高的穿透能力, 其侵彻深度可提高约  $30\% \sim 40\%$ 。此外, 钨合金具有较高声速和良好的抗压缩能力, 在高速冲击状态下不容易发生严重破碎, 可以形成稳定的侵彻体, 提高对厚装甲目标的有效打击能力。

#### (二) 动能弹和电磁轨道炮弹芯

随着新型动能武器和电磁发射技术的发展, 钨合金因其高密度和高强度优势, 被认为是理想的高速发射材料。在动能弹药中, 弹丸初速度越高, 对材料的强度和抗冲击能力要求越高。钨合金能够承受极高加速度载荷, 在高速飞行和撞击过程中保持结构稳定。对于电磁轨道炮等未来武器系统, 弹丸材料还需要具备一定导电性能和抗烧蚀能力。钨合金具有较高熔点 (钨熔点约  $3422 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 能够降低高速发射过程中产生的热损伤, 提高武器系统连续工作能力。



### （三）火箭发动机和航天高温部件

钨合金棒还用于火箭发动机、高温喷管及航天器耐热结构部件。火箭发动机工作时，燃气温度可能超过 3000 °C，同时伴随高速气流冲刷和强烈热循环。普通金属材料难以长期承受这种环境，而钨合金凭借高熔点、高温强度和抗热冲击性能，可以用于制造：高温喷管内衬、高温支撑件、发动机耐烧蚀部件、航天器热防护结构件等。虽然纯钨具有更高熔点，但钨合金通过添加镍铁等元素，提高了材料韧性和加工性能，更适合制造复杂结构零件。

### （四）惯性导航和精密配重部件

由于钨合金具有高密度、小体积特点，在军工装备中还广泛用于精密配重和惯性部件。例如，在航空航天设备、导弹控制系统和精密机械装置中，需要利用高密度材料实现空间限制条件下的质量调整。相比铅等传统高密度材料，钨合金具有无毒、高强度和耐环境性能优势，因此逐渐成为替代材料。

### （五）防护和屏蔽结构件

钨合金还具有良好的射线屏蔽能力，可用于特殊防护结构。由于钨原子序数高、密度大，对 X 射线、γ 射线等具有较强吸收能力，因此在军用检测设备、核相关装备和特殊防护装置中，可作为高密度屏蔽材料使用。

| 应用领域  | 主要作用      | 钨合金优势          |
|-------|-----------|----------------|
| 穿甲弹弹芯 | 高速侵彻复合装甲  | 高密度、高强度、高动态稳定性 |
| 动能弹药  | 提供高冲击动能   | 抗压缩、抗冲击性能优异    |
| 电磁轨道炮 | 高速发射弹丸    | 导电性、耐烧蚀性较好     |
| 火箭发动机 | 高温耐烧蚀结构   | 高熔点、高温强度       |
| 航天装备  | 精密配重和惯性部件 | 高密度、小体积        |
| 防护设备  | 射线屏蔽      | 高密度、高吸收能力      |

中钨智造认为，钨合金棒在军工领域的核心价值并不仅仅在于高密度，而在于高密度、高强度、高温稳定性和可加工性的综合平衡。随着现代武器装备向高速化、高温化和精密化发展，钨合金材料将在新型穿甲武器、航空航天装备以及先进防护系统中继续发挥重要作用。



### Q31: 钨合金棒在电子行业有哪些应用？

钨合金棒及钨基高密度材料在电子工业中具有重要应用价值，尤其是在高温、高真空、高精度和强辐射环境下工作的电子设备中。虽然电子行业对材料尺寸精度和洁净性的要求通常高于普通工业领域，但钨合金凭借高熔点、高密度、低蒸气压、良好导电性以及优异的尺寸稳定性，成为许多关键零部件的重要材料选择。特别是在半导体制造、真空电子器件、





照明设备、电火花加工以及精密电子装备中，钨合金和钨基材料发挥着不可替代的作用。

**（一）灯丝及高温支撑线材料**

钨合金棒及钨丝材料长期用于传统光源和真空电子器件领域。钨具有极高熔点（3422℃），在高温状态下仍保持良好的机械强度，因此广泛用于：白炽灯灯丝、卤素灯灯丝、电子管阴极支撑结构、氙灯电极等。在这些应用中，材料需要长期承受高温工作环境，同时保持尺寸稳定，避免因热膨胀或蠕变导致失效。相比普通金属材料，钨基材料能够显著提高灯丝寿命和电子器件可靠性。

**（二）半导体溅射靶材**

在半导体制造过程中，钨材料是重要的薄膜沉积材料。钨及钨合金靶材主要通过磁控溅射等工艺，在晶圆表面形成导电层、阻挡层或互连结构。例如，在先进集成电路制造中，钨薄膜常用于：晶体管接触孔填充、金属互连层、扩散阻挡结构等。钨具有较低电阻率、高熔点和良好的化学稳定性，能够满足半导体器件长期可靠运行要求。随着先进制程向更小线宽发展，对钨靶材纯度、晶粒结构和杂质控制提出了更高要求。

**（三）离子注入机准直器和屏蔽部件**

离子注入是半导体制造中的关键工艺之一，需要材料长期承受高速离子轰击。钨合金由于密度高、抗溅射性能强，被用于制造：离子束准直器、离子束屏蔽件、高温定位结构等。相比普通钼材料，钨合金具有更高密度和更好的抗溅射能力，在部分应用条件下，其耐溅射性能可提高约 3 倍，从而延长设备使用寿命，降低维护频率。

**（四）电火花加工电极**

钨合金棒也是精密电火花加工（EDM）中的重要电极材料。由于钨合金具有较好的导电性、高硬度和耐磨性，可以用于制造：微孔加工电极、精密模具电极、复杂轮廓加工电极等。通过精密加工技术，钨合金电极可实现直径低至 0.05 mm 甚至更小的微细加工，满足精密电子零件、微型模具和微机电系统（MEMS）制造需求。

**（五）电子封装和高温连接件**

在高功率电子设备中，材料需要同时满足导电、耐热和尺寸稳定要求。钨基材料因热膨胀系数低，与陶瓷、半导体材料具有较好的匹配性，因此可用于：电子封装基座、高温导电连接件、功率器件支撑件等。特别是在高功率半导体、射频设备和真空电子设备中，钨材料能够有效降低热循环造成的结构失效风险。

| 应用领域   | 典型部件      | 主要性能要求   |
|--------|-----------|----------|
| 照明设备   | 灯丝、电极、支撑线 | 高熔点、高温强度 |
| 半导体制造  | 溅射靶材      | 高纯度、低缺陷  |
| 离子注入设备 | 准直器、屏蔽件   | 抗溅射、耐高温  |
| EDM 加工 | 电极        | 导电性、耐磨性  |
| 高功率电子  | 封装件、连接件   | 热稳定、低膨胀  |

中钨智造认为，钨合金棒在电子行业中的应用核心优势在于能够同时满足高温、真空、导电和尺寸稳定等多重要求。随着半导体设备向更高温度、更高精度和更小尺寸发展，钨合金及钨基复合材料将在先进电子制造领域继续保持重要地位，尤其是在高端半导体装备、精密电子器件和微细加工领域具有广阔的发展空间。

**Q32：钨合金棒在高温炉中有什么作用？**

钨合金棒是高温工业设备中重要的耐热结构材料和热场部件材料之一，广泛应用于真空炉、单晶硅生长炉、蓝宝石生长炉、粉末冶金烧结炉以及其他高温热处理设备中。其主要



作用包括作为加热元件、热场支撑件、电极连接件和高温承载结构件，在极端温度环境下保持稳定工作。

钨合金通常以钨为基体，通过添加镍、铁、铜、钼等元素进行强化，或者根据应用需求采用钨镍铁、钨镍铜等体系。相比普通金属材料，钨合金具有高密度、高熔点、高强度、低热膨胀系数以及良好的高温稳定性。其中，钨的熔点达到 3422 °C，是目前工业金属中熔点最高的材料之一，因此能够满足许多超过 1500 °C 甚至 1800 °C 以上环境的长期使用要求。在真空炉和单晶硅生长炉中，钨合金棒最典型的应用是作为加热元件或加热器支撑结构。高温炉工作时，需要通过电阻加热产生稳定热源，而钨合金棒能够利用自身较高的电阻率和耐高温性能，在通电状态下持续产生热量。同时，由于材料在高温下不会发生明显软化或快速变形，因此能够保持稳定的热场分布。

例如，在单晶硅直拉生长炉（CZ 炉）中，炉内温度通常需要达到 1400 °C 以上，以实现硅料熔化和晶体生长。加热系统需要长期承受高温、真空以及反复升降温循环。如果采用普通金属材料，容易发生氧化、蠕变和尺寸变化，而钨合金棒能够在高温环境中保持较好的机械强度和形状稳定性。目前，高质量钨合金热场部件在 1800 °C 以上惰性气氛环境中的使用寿命可超过 10000 小时。

此外，钨合金棒较低的热膨胀系数也是其用于高温炉的重要原因。高温设备内部结构通常由多个精密部件组成，如果材料在升温过程中发生明显膨胀，会导致热场位置变化、间隙变化甚至设备失效。钨合金热膨胀系数约为  $4 \sim 6 \times 10^{-6}/K$ ，明显低于多数高温合金，因此能够有效保持炉内结构尺寸稳定。

钨合金棒在高温炉中的主要应用

| 应用部位   | 主要作用      | 技术优势          |
|--------|-----------|---------------|
| 加热元件   | 通电产生高温热源  | 耐高温、寿命长、热稳定性好 |
| 加热器支撑杆 | 固定和支撑加热组件 | 高温强度高、不易弯曲    |
| 热场支架   | 保持热场结构位置  | 热膨胀小、尺寸稳定     |
| 电极连接件  | 实现高温导电连接  | 导电性能良好、耐热循环   |
| 烧结炉承载件 | 支撑高温工件    | 高刚性、抗变形能力强    |

除了作为加热相关部件，钨合金棒还用于高温炉内部的支撑结构。例如，在粉末冶金烧结炉中，烧结温度通常超过 1800 °C，炉内承载结构不仅需要承受高温，还需要长期承受工件重量和热循环影响。钨合金棒具有较高弹性模量和抗压强度，可以有效减少高温下的弯曲变形。

在半导体制造领域，随着 300 mm、450 mm 晶圆制造技术的发展，对热场温度均匀性和设备稳定性的要求不断提高。钨合金棒能够减少热场结构变化，提高晶体生长过程中的温度控制精度，从而改善晶体质量、降低缺陷率。不同高温炉应用对钨合金棒的要求并不完全相同。例如，加热元件更关注电阻稳定性和高温寿命，而支撑件更关注强度、刚性和抗蠕变性能。因此，在实际应用中，需要根据工作温度、气氛条件、机械载荷及使用寿命要求选择合适的钨合金牌号和加工状态。

中钨智造认为，钨合金棒作为高温炉核心材料之一，其价值不仅在于能够承受极端温度，更在于能够长期保持稳定的热场结构和尺寸精度。随着半导体、高端真空设备和先进材料制造技术的发展，对钨合金棒的纯度、组织均匀性、加工精度及长期可靠性要求将进一步提高，高性能钨合金材料将在未来高温装备领域继续发挥重要作用。



**Q33: 钨合金棒在医疗领域怎么用？**

钨合金棒凭借高密度、高原子序数、高辐射吸收能力以及良好的机械加工性能，在现代医疗设备中具有重要应用价值，尤其是在放射治疗设备、医用加速器以及精密放射防护部件中。与传统铅材料相比，钨合金具有更高的密度、更好的机械强度和更优异的环境稳定性，因此逐渐成为高端医疗设备中的重要屏蔽和功能材料。

钨合金密度通常可达到  $17\sim19\text{ g/cm}^3$ ，接近纯钨 ( $19.25\text{ g/cm}^3$ )，远高于钢材和铜合金。由于辐射屏蔽能力与材料密度及原子序数密切相关，钨合金能够有效吸收 X 射线和  $\gamma$  射线，在相同屏蔽效果下，可以设计更加紧凑的结构，这对于空间有限的医疗设备尤为重要。在肿瘤放疗领域，钨合金棒最重要的应用之一是制造放疗准直器 (Collimator)。放射治疗设备需要将高能射线精准聚焦到患者肿瘤区域，同时尽量减少对周围健康组织的辐射损伤。因此，准直器材料必须具备极高的射线屏蔽能力和精密加工性能。

例如，在伽马射线放疗设备中，钨合金对  $1.33\text{ MeV}$   $\gamma$  射线具有超过 99.9% 的屏蔽效率，可以有效限制射线方向，提高治疗精度。由于钨合金机械强度高，不易变形，因此能够长期保持准直孔尺寸精度。

钨合金棒还广泛用于医用直线加速器 (Medical Linear Accelerator, LINAC) 的电子靶部件。医用直线加速器通常利用高能电子束轰击金属靶材，通过电子减速产生 X 射线，用于癌症放射治疗。

在这一过程中，靶材料需要承受高能电子束持续冲击，并快速传递热量。钨合金由于具有高密度、高熔点和良好导热性能，能够承受  $6\sim18\text{ MeV}$  电子束产生的高能量输入，是现代医用加速器 X 射线产生系统的重要材料。钨合金棒在医疗领域的主要应用如下：

| 应用领域       | 典型部件   | 主要作用                            |
|------------|--------|---------------------------------|
| 肿瘤放疗       | 放疗准直器  | 精确控制射线方向，提高治疗精度                 |
| 伽马刀设备      | 核心屏蔽组件 | 高效吸收 $\gamma$ 射线，降低辐射泄漏         |
| 直线加速器      | 电子靶    | 产生 $6\sim18\text{ MeV}$ 高能 X 射线 |
| 多叶光栅 (MLC) | 叶片组件   | 实现动态射野调节                        |
| 放射防护设备     | 屏蔽结构件  | 减少工作人员和环境辐射                     |

在多叶光栅 (Multi Leaf Collimator, MLC) 和伽马刀系统中，钨合金棒还承担精密运动和射线控制功能。多叶光栅由大量独立移动的小型屏蔽叶片组成，需要在极高精度下快速调整射线照射区域。钨合金具有良好的机械加工性能，可以加工成复杂形状和微米级精度的零件。

此外，钨合金相比铅材料具有明显环保优势。铅具有一定毒性，在生产、使用和废弃过程中存在环境管理问题，而钨合金化学稳定性更好，不易产生污染，因此越来越受到医疗设备制造商关注。不过，医疗领域对钨合金材料的要求通常高于普通工业应用。例如，放疗设备中的钨合金部件不仅要求高密度，还需要控制材料均匀性、内部缺陷、尺寸精度和表面质量。对于多叶光栅、准直器等精密部件，通常需要经过精密磨削、研磨和表面处理，以保证射线控制精度。

中钨智造认为，钨合金棒在医疗领域的核心价值在于其兼具高效辐射屏蔽能力和精密制造能力。随着精准放疗、重离子治疗、质子治疗以及智能医疗设备的发展，未来医疗装备对高性能钨合金材料的需求将持续增长。特别是在小型化、高精度和高可靠性医疗设备中，钨合金仍将是不可替代的重要材料之一。





#### Q34：钨合金棒在航空航天中起什么作用？

钨合金棒（Tungsten Heavy Alloy Rod）是航空航天领域中一种非常重要的高密度、高强度功能材料。由于钨合金通常以钨作为主要成分，并加入镍、铁、铜等元素进行强化，其密度一般可达到  $16.5 \sim 19.0 \text{ g/cm}^3$ ，接近纯钨水平，是钢铁材料密度的  $2 \sim 2.5$  倍。同时，钨合金具有良好的机械强度、抗冲击性能、耐高温性能以及优异的尺寸稳定性，因此在航空航天装备中主要承担配重平衡、惯性控制、高温防护和极端环境承载等关键功能。与传统钢、铅等高密度材料相比，钨合金最大的优势在于密度高但体积小，同时具有更好的力学性能和环境适应能力。航空航天设备通常对空间利用率、重量分布和可靠性要求极高，因此需要在有限空间内实现精准质量控制，钨合金棒正好满足这一需求。

##### 1. 作为航空器配重与平衡件，提高飞行稳定性

钨合金棒最常见的航空航天应用之一是作为配重材料，用于调节飞机、直升机及航天器的质量分布。在飞机制造过程中，机翼、副翼、升降舵、方向舵等操纵面需要保持精确的重量平衡。如果操纵面的重心位置不合理，会导致飞行过程中振动增加、控制响应降低，甚至影响飞行安全。因此，工程人员通常会在操纵面内部安装小体积、高密度钨合金配重块或钨合金棒。相比传统铅配重，钨合金具有明显优势：

| 对比项目 | 钨合金配重                             | 铅配重                     |
|------|-----------------------------------|-------------------------|
| 密度   | 约 $16.5 \sim 19.0 \text{ g/cm}^3$ | 约 $11.3 \text{ g/cm}^3$ |



| 对比项目  | 钨合金配重      | 铅配重     |
|-------|------------|---------|
| 体积需求  | 更小         | 较大      |
| 力学强度  | 高，不易变形     | 较低      |
| 环境安全性 | 稳定，无明显污染问题 | 存在铅污染风险 |
| 高温适应性 | 优异         | 较差      |

在直升机旋翼系统中，钨合金棒也用于旋翼叶片平衡。旋翼高速旋转时，即使几克质量偏差，也可能产生明显离心力和振动。通过安装精密加工的钨合金平衡件，可以改善旋翼动态平衡，提高飞行舒适性和结构寿命。此外，在航空导航设备、惯性测量单元（IMU）及精密控制系统中，钨合金还用于质量调节和结构平衡，使设备在复杂振动环境下保持稳定运行。

## 2. 用于陀螺转子，提高惯性导航精度

惯性导航系统是航空航天领域的重要设备，其核心部件包括陀螺仪、加速度计和惯性测量组件。陀螺转子的性能直接影响导航精度，转子材料需要同时满足高密度、高强度和高尺寸稳定性要求。钨合金由于密度高，可以在较小体积下提供更大的转动惯量。根据旋转动力学原理：转动惯量越大，陀螺抵抗外部扰动的能力越强，角速度变化越稳定。因此，高密度钨合金转子能够提高惯性稳定性，使导航系统获得更高精度。在航空航天应用中，钨合金陀螺转子具有以下特点：第一，质量集中度高。在有限空间内可以获得更大的惯性矩，有利于小型化设计。第二，尺寸稳定性好。钨合金热膨胀系数较低，在温度变化环境下不易产生尺寸变化。第三，机械强度高。高速旋转时能够承受较大的离心力，降低结构失效风险。因此，钨合金棒经过精密加工后，可用于制造高精度惯性元件，如陀螺转子、平衡环及惯性质量块等。

## 3. 用于火箭发动机喷管喉衬和燃气舵，承受极端高温

航空航天发动机内部环境非常恶劣，特别是火箭发动机喷管区域，燃气温度通常超过 2500°C，部分先进推进系统局部温度甚至接近 3000°C 以上。普通金属在这种环境下会迅速熔化或失去强度，因此需要采用耐超高温材料。钨合金或钨基材料具有极高熔点，其中钨熔点达到 3422°C，是所有金属元素中最高的之一。因此，在高温推进系统中，钨合金棒可用于制造喷管喉衬、燃气舵、高温支撑件、烧蚀环境中的防护结构。喷管喉部是火箭发动机热流密度最高的位置，承受高速、高温燃气冲刷。钨基材料能够依靠高熔点和良好的高温强度保持结构完整，降低烧蚀速度，延长发动机工作时间。燃气舵则需要在高温高速气流中保持机械强度，同时实现姿态控制。钨合金良好的抗冲击性能和高温稳定性，使其成为传统耐热合金之外的重要选择。

## 4. 钨合金棒在航空航天中的综合价值

随着航空航天装备向轻量化、高性能、小型化方向发展，对高密度功能材料的需求不断增加。钨合金棒不仅是一种简单的高密度材料，更是一种兼具结构功能和性能优化价值的先进材料。目前，钨合金棒主要应用方向如下：

| 应用领域  | 典型零件      | 主要作用       |
|-------|-----------|------------|
| 飞机系统  | 操纵面配重、平衡块 | 提高飞行稳定性    |
| 直升机系统 | 旋翼平衡件     | 降低振动，提高可靠性 |
| 导航系统  | 陀螺转子、惯性组件 | 提升惯性精度     |
| 航天发动机 | 喷管喉衬、燃气舵  | 抗高温烧蚀      |
| 航天结构  | 高温承载件     | 保持尺寸稳定     |



中钨智造认为，钨合金棒在航空航天中的核心价值在于利用其高密度、高强度和高温稳定性的综合优势，实现空间优化、性能提升和可靠性增强。随着先进飞行器、深空探测及新型推进系统的发展，高性能钨合金材料将在未来航空航天装备中继续发挥重要作用。

**Q35：钨合金棒用于焊接电极有什么优势？**

钨合金棒及掺杂钨棒是现代高端焊接领域的重要电极材料，尤其广泛应用于钨极氩弧焊（GTAW/TIG）和等离子弧焊（PAW）。由于钨具有极高熔点（3422℃）、低蒸气压以及良好的高温电子发射能力，因此能够在高温电弧环境下保持稳定形态，是制造非熔化电极的理想材料。传统纯钨电极虽然具有较好的耐高温能力，但起弧性能和电弧稳定性相对有限。因此，工业生产中通常通过加入少量稀土氧化物形成掺杂钨电极，例如铈钨（EWCe）、镧钨（EWLa）、钇钨（EWY）等，以进一步提高焊接性能。

**1. 电弧稳定性高，提高焊接质量**

焊接电极最重要的性能之一是保持稳定电弧。在 TIG 焊过程中，电极尖端需要持续释放电子形成电弧。如果电子发射能力不足，会导致起弧困难、电弧漂移以及焊缝质量下降。掺铈钨和掺镧钨通过氧化物添加，提高了电子逸出能力，使电极具有起弧电压低、电弧集中性好、电弧稳定时间长、焊接过程波动小。特别是在精密焊接、不锈钢焊接、航空航天薄壁件焊接等领域，稳定电弧对于控制焊缝成形具有重要意义。

**2. 烧损率低，提高电极使用寿命**

焊接过程中，电极尖端长期处于高温电弧区域。如果材料蒸发速度过快，会造成电极烧损，需要频繁更换。掺杂钨电极由于改善了晶粒结构和电子发射性能，在相同焊接条件下通常具有更低烧损率。相比纯钨电极：

| 性能      | 掺杂钨电极优势 |
|---------|---------|
| 起弧性能    | 更好      |
| 电弧稳定性   | 更高      |
| 电极寿命    | 更长      |
| 焊接效率    | 更高      |
| 焊接质量一致性 | 更稳定     |

对于自动化焊接生产线而言，电极寿命提高意味着设备停机时间减少，生产效率提高。

**3. 无放射性，更安全环保**

传统钍钨电极（Thoriated Tungsten Electrode）由于含有氧化钍（ThO<sub>2</sub>），具有良好的电子发射性能，因此过去长期广泛应用。但是氧化钍属于天然放射性物质，在电极正常使用时风险较低，而在磨削加工过程中可能产生含钍粉尘，需要严格控制职业暴露。相比之下，铈钨、镧钨等稀土钨电极不含放射性元素，在安全性和环保方面具有明显优势。目前，许多国家和地区正在逐步推广无放射性钨电极，以满足现代制造业对职业健康和环保要求。

**4. 适用于自动化和高精度焊接**

现代制造业越来越依赖机器人焊接、自动化焊接以及高精度焊接技术。这些应用要求电极性能长期稳定。掺镧钨电极具有较高耐热性和良好抗烧损性能，适合自动 TIG 焊、航空航天结构焊接、不锈钢精密焊接、真空设备制造、核工业装备制造。掺铈钨电极则具有优良的小电流焊接性能，特别适用于薄板、微型零件和精密电子设备制造。

**5. 不同钨电极材料应用比较**

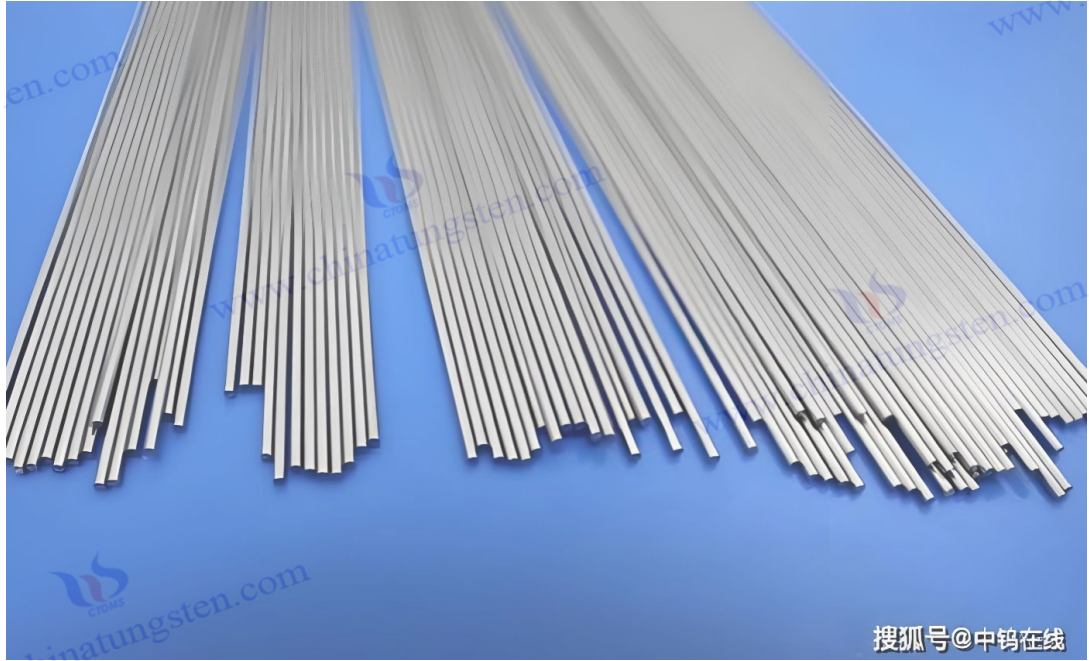
| 电极类型 | 主要添加物 | 特点       | 典型应用  |
|------|-------|----------|-------|
| 纯钨电极 | 无     | 成本低，性能一般 | 普通交流焊 |





| 电极类型 | 主要添加物                          | 特点          | 典型应用   |
|------|--------------------------------|-------------|--------|
| 钍钨电极 | ThO <sub>2</sub>               | 电弧性能好，但有放射性 | 传统工业焊接 |
| 铈钨电极 | CeO <sub>2</sub>               | 起弧容易，小电流性能好 | 精密焊接   |
| 镧钨电极 | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 综合性能优良，无放射性 | 高端自动焊  |
| 钇钨电极 | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 高温稳定性好      | 高负载焊接  |

钨合金棒及稀土掺杂钨电极的发展方向正在由传统高性能向安全环保、高稳定性方向转变。相比钍钨电极，铈钨、镧钨等无放射性电极不仅能够提供稳定电弧和较低烧损率，同时降低职业健康风险，更符合现代航空航天、能源装备、电子制造等高端工业的发展需求。





### Q36: 钨合金棒在模具行业如何应用？

钨合金棒是现代高性能模具制造领域的重要材料之一，尤其适用于承受高温、高压、高磨损和强热循环条件的模具部件。与传统工具钢、硬质合金以及铜合金材料相比，钨合金具有高密度、高硬度、高耐磨性、低热膨胀系数以及良好的导热性能，因此在压铸模具、粉末冶金模具、玻璃成型模具、光纤拉丝模具及精密成型工具中具有独特优势。模具行业最大的挑战之一是长期承受热冲击和机械载荷。例如铝合金压铸模具在生产过程中，模具表面需要反复接触 700 °C 以上的熔融金属，同时经历快速冷却循环。如果材料热疲劳性能不足，容易产生龟裂、变形和尺寸失效。而钨合金凭借稳定的高温性能，可以显著提高模具寿命和生产稳定性。

#### （一）用于压铸模具，提高热疲劳寿命

压铸模具是钨合金应用最成熟的领域之一，其中以高性能钨基合金（例如 Anviloy 1150 等钨合金材料）为代表。传统压铸模具通常采用 H13 热作模具钢，但在长期高速压铸生产中，容易出现热疲劳裂纹、模具表面冲蚀、尺寸变化、冷却循环导致的早期失效。钨合金具有较低的热膨胀系数，通常约为钢材的 1/2~1/3，可以有效减少高温循环过程中产生的热应力。同时，其较高导热率能够快速传递热量，降低模具表面温度梯度。因此，在高温压铸环境下，钨合金模具部件能够减少热裂纹产生、降低模具变形、提高尺寸稳定性、延长模具使用寿命。部分高性能钨合金压铸模具零件的寿命相比普通钢制模具可提高数倍，特殊工况下甚至可达到 10 倍以上的寿命提升。

#### （二）用于粉末冶金模具，提高耐磨性能

粉末冶金成型过程中，模具长期承受粉末压制产生的高压力和摩擦作用，对材料耐磨性要求极高。钨合金棒可用于制造压制模芯、冲头、高压成型套、精密定位件。由于钨合金硬度高、耐磨性优异，在长期循环压制过程中能够保持较好的尺寸精度，减少模具磨损造成的产品尺寸偏差。相比普通硬质合金，钨合金在某些应用中具有更好的韧性和抗冲击能力，能够降低脆性断裂风险，特别适用于大型、高负荷粉末成型模具。

#### （三）用于光纤拉丝及精密成型模具

光纤制造过程中，拉丝塔需要长期保持稳定的几何尺寸和温度环境。模具材料必须具有高尺寸稳定性、良好的热传导能力、抗高温变形能力。钨合金由于热膨胀小，在高温环境下尺寸变化较小，因此能够提高光纤拉丝过程中的尺寸一致性。此外，在玻璃成型、蓝宝石加工及精密陶瓷成型领域，钨合金也可作为高温模具或模具支撑材料使用。

#### （四）用于高温成型及热加工工具

在高温锻造、热挤压以及特殊材料成型过程中，模具不仅需要承受压力，还需要承受高温氧化和热循环。钨合金棒可用于制造热挤压模具芯、高温冲头、模具镶块、热加工定位部件。其高温强度能够保持模具结构稳定，减少由于软化和蠕变造成的尺寸变化。

#### （五）钨合金模具应用优势总结

| 应用领域  | 典型零件       | 主要优势     |
|-------|------------|----------|
| 压铸模具  | 模芯、镶块、热端部件 | 抗热疲劳、寿命长 |
| 粉末冶金  | 冲头、模芯、压制套  | 耐磨、尺寸稳定  |
| 光纤拉丝  | 成型模具、支撑件   | 热膨胀小、精度高 |
| 热加工模具 | 热挤压芯、模具镶件  | 高温强度高    |
| 精密制造  | 定位件、高耐磨零件  | 长期稳定性好   |

中钨智造认为，钨合金棒在模具行业中的核心价值并不是单纯提供高硬度，而是在高温、高压力和高循环环境下保持长期稳定工作。随着新能源汽车、大型压铸件、半导体制造及



先进材料加工的发展，模具行业对高寿命、高精度材料的需求不断提高，钨合金凭借其独特的热物理性能，将继续成为高端模具制造的重要材料。

**Q37：钨合金棒在汽车工业中用在哪里？**

钨合金棒在汽车工业中的应用主要集中于高性能车辆、赛车、精密制造以及特殊功能零部件领域。虽然汽车行业传统上大量使用钢、铝合金和铜合金材料，但随着新能源汽车、高性能赛车以及智能制造的发展，对于高密度、小体积、高稳定性的材料需求不断增加，钨合金逐渐成为部分关键零件的重要选择。钨合金密度通常达到  $17\sim19\text{ g/cm}^3$ ，是钢材的 2 倍以上，同时具有良好的机械强度、耐腐蚀性和尺寸稳定性。因此，在需要精确质量控制、空间受限以及高可靠性的汽车应用中具有明显优势。

**（一）用于高性能赛车配重块，优化车辆动态性能**

赛车对于车辆重心、质量分布和操控稳定性具有极高要求。工程师通常需要通过增加或调整局部质量，使车辆达到最佳重量分布。钨合金由于密度极高，可以在很小空间内增加较大质量，因此特别适合作为赛车底盘配重块、悬挂系统平衡块、车身质量调整块、动态平衡组件。相比普通钢制配重件，钨合金能够在相同重量要求下大幅减少体积，使设计人员拥有更多空间优化车辆结构。例如，在赛车调校过程中，通过精确布置钨合金配重，可以降低车辆重心，提高高速转弯稳定性，改善制动性能和操控响应。

**（二）用于汽车零部件制造中的精密加工部件**

钨合金棒还可作为汽车制造中的精密功能材料，用于制造高耐磨定位件、精密轴套、特殊工装夹具、高负荷机械部件。汽车生产线中的一些工装设备需要长期承受冲击、摩擦和重复定位，普通材料容易磨损导致生产精度下降。钨合金具有较高耐磨性和尺寸稳定性，可提高设备使用寿命。

**（三）用于发动机及动力系统相关部件**

在高性能发动机和特殊动力系统中，部分零件需要较高的质量稳定性和耐高温性能。钨合金可应用于动平衡部件、高速旋转系统配重件、特殊惯性组件。其高密度特点能够提高旋转系统惯性控制精度，同时减少结构尺寸。

**（四）用于新能源汽车领域的特殊应用**

随着新能源汽车的发展，汽车设计越来越重视空间利用率和结构优化。钨合金的小体积高质量特点，使其在某些特殊设计中具有应用潜力。例如：电机系统平衡组件、高精度振动控制部件、电池系统结构优化配重。特别是在高性能电动车和赛车电动车中，车辆质量分布直接影响续航、操控和安全性能，因此高密度材料的重要性不断提升。

**（五）用于汽车制造模具和加工工具**

除直接用于汽车零件外，钨合金棒还可应用于汽车制造过程中的模具和工具。例如冲压模具耐磨件、精密加工定位销、高寿命工装部件。汽车制造具有大批量生产特点，设备长期运行容易产生磨损。采用钨合金耐磨部件，可以减少更换频率，提高生产效率。

**钨合金棒在汽车工业中的典型应用**

| 应用方向   | 主要零件      | 应用价值      |
|--------|-----------|-----------|
| 赛车性能优化 | 配重块、平衡件   | 调整重心，提高操控 |
| 动力系统   | 惯性组件、平衡件  | 提高运行稳定性   |
| 精密制造   | 定位件、耐磨件   | 延长工装寿命    |
| 新能源汽车  | 振动控制组件    | 优化结构性能    |
| 生产装备   | 模具镶件、工具部件 | 提高制造效率    |





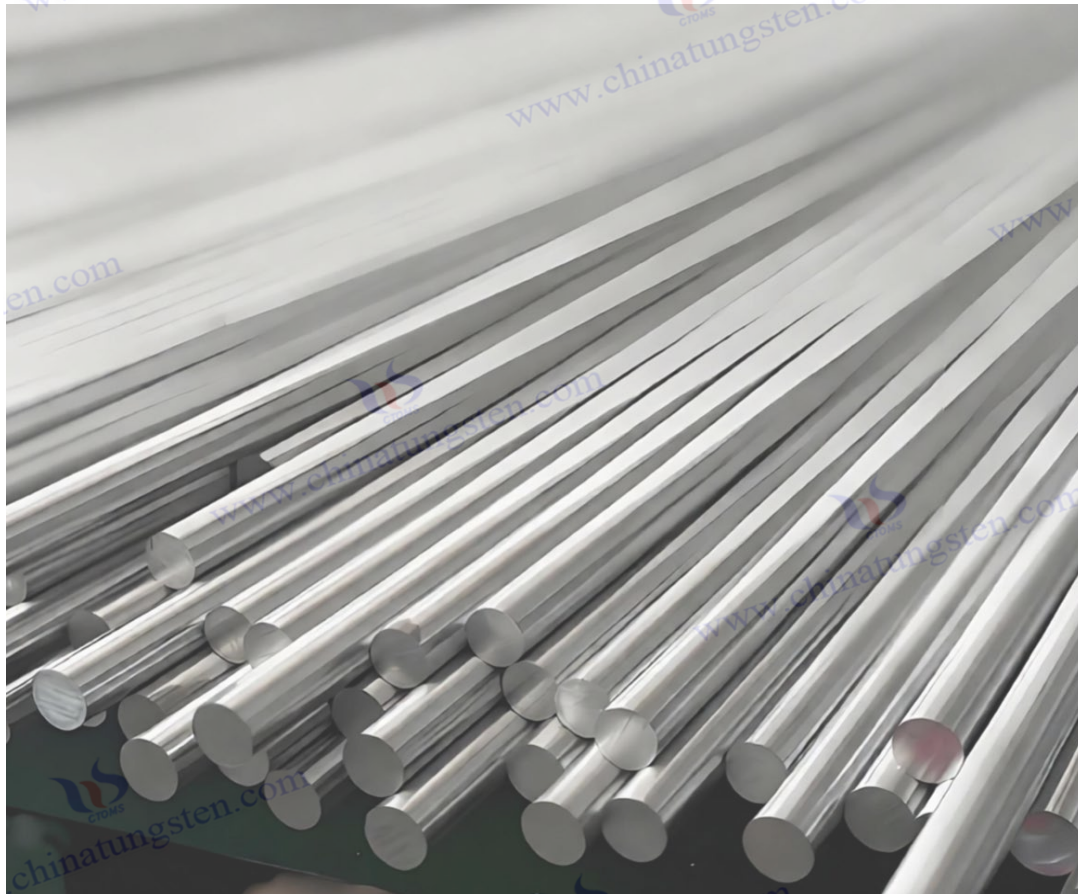
中钨智造（厦门）科技有限公司 CTIA GROUP LTD

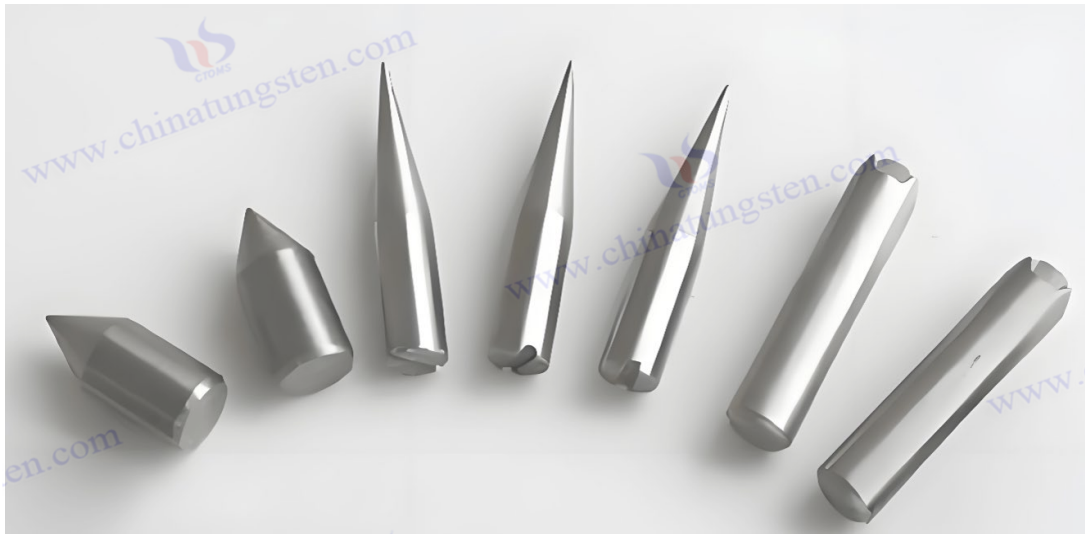
厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼, 361008

[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

中钨智造认为，钨合金棒在汽车工业中的应用重点并不是替代传统汽车材料，而是在高性能、高精度和特殊功能场景中发挥优势。随着赛车技术、新能源汽车、高端制造装备的发展，汽车行业对轻量化设计与精确质量控制提出更高要求，而钨合金凭借高密度、高稳定性和优异耐磨性能，将在汽车性能优化、精密制造和先进装备领域发挥越来越重要的作用。





### 七、钨合金棒的使用与安全

**Q38: 钨合金棒有毒吗？**

钨合金棒（Tungsten Alloy Rod）是一类以钨为主要组成元素，通过加入镍、铁、铜等合金元素制备而成的高密度金属材料，广泛应用于航空航天配重、医疗防护、军工装备、精密制造、汽车工业及高温工业领域。从材料本身性质来看，固态钨合金棒通常不属于有毒材料，在正常使用、储存和运输条件下不会释放有害气体，也不会对人体造成明显毒害风险。

钨元素本身属于高熔点难熔金属，化学性质稳定，在常温环境下不易发生腐蚀和分解。工业应用中的钨合金棒通常以致密金属状态存在，其内部结构稳定，人体接触完整金属表面时，钨元素基本不会通过皮肤进入人体。因此，对于已经加工完成的钨合金棒产品，例如配重块、屏蔽件、结构件等，只要按照正常工业规范使用，一般不存在职业健康方面的特殊风险。

从毒理学角度来看，钨及其合金材料的急性毒性较低。根据相关实验数据，金属钨粉末及相关材料的急性口服毒性 LD50 通常大于 2000 mg/kg，属于低毒或实际无毒类别。目前没有充分证据表明工业级致密钨合金棒具有明确致癌性。因此，钨合金棒在航空航天、医疗设备和高端制造行业能够长期应用，与其良好的安全性和稳定性密切相关。不过，钨合金棒虽然整体安全，但在加工过程中产生的金属粉尘仍需要进行职业防护。特别是在切削、磨削、钻孔、抛光等机械加工环节，由于材料被破碎成微小颗粒，会产生含钨合金元素的粉尘。如果长期、大量吸入高浓度金属粉尘，可能对呼吸系统造成刺激，甚至影响职业健康。因此，钨合金加工企业通常需要配置局部排风、工业吸尘系统以及符合要求的个人防护用品。钨合金棒不同状态下的安全特点如下：

| 状态     | 主要特点        | 安全风险      |
|--------|-------------|-----------|
| 完整钨合金棒 | 致密金属，化学稳定   | 正常使用风险极低  |
| 机械加工碎屑 | 含金属颗粒       | 应避免长期吸入   |
| 磨削粉尘   | 粒径较小，可进入呼吸道 | 需要除尘和呼吸防护 |
| 高温加工状态 | 可能产生氧化物烟尘   | 需要通风控制    |

此外，不同类型的钨材料需要区别对待。例如，普通钨合金棒与钨电极并不完全相同。



钍钨电极是在钨中加入一定比例氧化钍（ $\text{ThO}_2$ ）形成的焊接电极材料，由于氧化钍具有天然放射性，因此其加工粉尘需要更加严格控制。虽然正常使用状态下钍钨电极的辐射风险较低，但在大量磨削、研磨过程中，如果粉尘管理不到位，可能增加放射性物质进入人体的风险。

目前，随着环保法规和职业健康要求不断提高，越来越多焊接行业开始采用铈钨电极（EWCe）、铈钨电极（EWLa）、铈钨电极（EWY）等非放射性稀土钨电极替代传统钍钨电极。这些材料不仅降低了放射性管理要求，同时保持了良好的引弧性能、电弧稳定性和使用寿命。对于普通钨合金棒而言，其安全管理重点主要集中在加工过程，而不是材料本身。例如：第一，应避免长时间暴露于高浓度金属粉尘环境中。加工设备应尽可能采用湿式加工或配备高效过滤除尘系统。第二，操作人员进行磨削和切削加工时，应佩戴防尘口罩、防护眼镜和防护手套，避免粉尘进入呼吸道或刺激眼睛。第三，加工后的钨合金废屑应分类回收。由于钨属于战略金属，具有较高回收价值，规范回收不仅有利于环境保护，也能够降低生产成本。

钨合金棒属于安全性较高的工程材料。完整固态钨合金棒在正常工业应用中不存在明显毒性，其真正需要关注的是加工过程中产生的金属粉尘，以及部分特殊含放射性元素材料的使用管理。通过合理的工程防护措施，钨合金材料可以安全、长期应用于航空航天、医疗、汽车、高端制造等领域。

### Q39：钨合金棒加工时有安全注意事项吗？

钨合金棒具有高密度、高硬度、高强度和优异的耐热性能，因此被广泛应用于航空航天配重件、精密零件、高温结构件以及特殊工业设备中。然而，由于钨合金属于典型难加工材料，其加工过程中会产生较大的切削力、加工热和金属粉尘，因此必须采取规范的安全措施。

与普通钢材相比，钨合金棒硬度更高、韧性较低，加工时容易出现刀具磨损、工件崩裂以及局部过热等问题。因此，在车削、铣削、钻孔、磨削等过程中，不仅需要关注加工质量，也需要严格控制安全风险。

首先，在钨合金棒磨削过程中，必须重点防护金属粉尘。由于磨削会产生大量细微颗粒，其中部分颗粒尺寸可能达到微米级，容易进入人体呼吸系统。如果长期吸入大量金属粉尘，可能造成职业健康影响。因此，磨削钨合金时应采用带吸尘系统的专用设备，并禁止使用压缩空气直接吹扫粉尘，避免造成二次扩散。

操作人员通常应佩戴符合标准的防尘口罩，例如 N95、FFP2 或更高等级防护用品，同时佩戴防护眼镜、防护手套和工作服。加工结束后，应及时清理工作区域，并避免将附着粉尘的工作服带入生活区域。

其次，应严格遵守砂轮机安全操作规范。钨合金硬度较高，对砂轮性能要求较高，通常采用金刚石砂轮进行加工。如果砂轮选择不当、转速过高或存在裂纹，在高速旋转过程中可能发生破裂。因此，加工前必须检查砂轮状态，确认安装牢固，并严格按照设备规定转速运行。钨合金加工安全注意事项如下：

| 加工环节 | 主要风险      | 推荐措施         |
|------|-----------|--------------|
| 磨削加工 | 粉尘、砂轮破裂   | 使用金刚石砂轮、开启除尘 |
| 切削加工 | 刀具断裂、碎屑飞溅 | 采用合理切削参数、防护罩 |
| 钻孔加工 | 高温、断钻     | 控制速度、充分冷却    |
| 焊接应用 | 短路、局部过热   | 保持正确操作距离     |





| 加工环节   | 主要风险    | 推荐措施     |
|--------|---------|----------|
| 特殊电极加工 | 放射性粉尘风险 | 避免钍钨粉尘暴露 |

对于钍钨电极，需要特别注意其放射性问题。钍钨电极含有氧化钍（ $\text{ThO}_2$ ），属于天然放射性材料。虽然完整钍钨电极在正常焊接使用过程中产生的辐射水平较低，但在磨削电极尖端时，会产生含氧化钍粉尘。因此，不建议在普通环境下大量研磨钍钨电极。

目前，许多焊接企业已经逐渐采用铈钨电极、铈钨电极以及复合稀土钨电极替代钍钨电极。这些新型电极不含放射性元素，同时具有良好的引弧性能和电流承载能力，更符合现代制造业对于环保和职业安全的要求。

此外，在使用钨合金棒作为焊接电极或高温导电部件时，应避免钨棒与工件发生非正常短路。短路可能导致局部电流集中，使钨棒尖端温度迅速升高，引起材料损耗、污染焊缝甚至损坏设备。因此，在焊接操作中，应保持正确的电极距离，合理控制焊接电流。

对于自动化加工企业，建议建立完整的钨合金加工安全管理体系，包括设备防护、粉尘监测、人员培训、废料回收以及职业健康检查等措施。特别是在航空航天、半导体、高端装备制造等领域，由于零件价值高、加工精度要求严格，安全生产管理更加重要。

总体而言，钨合金棒加工本身并不存在特殊危险，只要针对其高硬度、高密度以及粉尘特点采取正确措施，即可实现安全、高效加工。加工过程中最重要的原则是控制粉尘、保护人员、规范设备操作，并根据材料类型选择合适工艺。对于含放射性元素的钍钨材料，应优先考虑无放射性稀土钨材料替代，以进一步提高生产安全性和环保水平。

#### Q40：钨合金棒容易断裂吗？

钨合金棒在实际使用和加工过程中是否容易断裂，需要根据材料成分、制造工艺、使用环境以及受力状态综合判断。总体而言，相比纯钨材料，现代钨合金棒的抗断裂性能已经得到明显改善，并不属于容易碎裂的材料。但由于钨合金仍属于高密度、高硬度金属材料，其塑性和韧性与钢、镍基合金等常规结构材料相比仍存在一定差距，因此在不合理加工、冲击载荷或极端低温环境下，仍可能发生开裂或断裂。

纯钨具有极高的熔点（约  $3422^\circ\text{C}$ ）、高弹性模量（约  $410\text{ GPa}$ ）和优异的高温强度，但在室温条件下存在明显脆性。这主要是因为钨属于体心立方结构金属，在低温环境下位错运动困难，塑性变形能力有限。因此，纯钨棒材在受到突然冲击、弯曲载荷或加工应力集中时，容易产生裂纹甚至断裂。而钨合金通过引入镍（Ni）、铁（Fe）、铜（Cu）等延性金属相，对纯钨进行了韧化改性。典型重钨合金通常采用粉末冶金液相烧结工艺制造，使钨颗粒均匀分布在镍铁或镍铜黏结相中。黏结相能够吸收外部载荷、促进裂纹偏转和阻止裂纹快速扩展，因此钨合金相比纯钨具有更高的抗冲击性能和断裂韧性。例如，常见  $93\text{W}\sim 97\text{W}$  高密度钨合金，其密度通常达到  $17\sim 19\text{ g/cm}^3$ ，抗拉强度可达到  $700\sim 1000\text{ MPa}$  以上，延伸率一般可达到  $5\%\sim 20\%$  左右，明显优于未经强化处理的纯钨材料。这使其能够应用于航空航天配重、穿甲弹芯、陀螺转子、医疗屏蔽件以及精密惯性部件等领域。

##### 1. 钨合金断裂风险主要来自哪些因素？

虽然钨合金韧性优于纯钨，但其高硬度和高密度特性也决定了其加工和使用时仍需注意以下问题：

###### （1）加工过程中的应力集中

钨合金硬度较高，机械加工过程中如果刀具磨损、切削参数不合理，容易在零件边缘、孔口、尖角位置形成微裂纹。尤其是细长棒材、小直径棒材或带槽结构，在加工后若存在尖锐转角，更容易成为裂纹起始位置。

###### （2）热处理或焊接产生残余应力



钨合金虽然热稳定性较好，但制造过程中仍可能因烧结冷却、热处理、焊接或激光加工产生内部残余应力。当残余应力超过材料局部承载能力时，可能导致长期存放后发生延迟开裂。

### （3）高速冲击载荷

部分应用环境，如高速旋转部件、穿甲弹芯或冲击结构，对材料瞬间承载能力要求极高。如果材料内部存在孔隙、组织不均匀或缺陷，在高速冲击条件下可能发生断裂。

### （4）极端低温环境

钨合金中的金属黏结相在极低温环境下可能发生塑性下降。因此，在航空航天、深空探测等特殊环境中，需要根据具体温度条件选择适合的合金体系。

## 2. 如何提高钨合金棒的抗断裂能力？

为了提高钨合金棒的可靠性，工业生产通常从材料设计、制造工艺和后处理三个方面进行控制。首先，提高粉末纯度和组织均匀性。高品质钨合金要求钨颗粒尺寸均匀、黏结相分布连续，避免大颗粒聚集和内部缺陷。其次，优化烧结和热处理工艺。合理控制液相烧结温度、保温时间和冷却速度，可以降低孔隙率，提高材料致密度和韧性。再次，优化加工工艺。例如采用合理刀具、降低加工冲击、增加圆角设计，可以减少应力集中，提高零件可靠性。

钨合金棒与纯钨性能对比

| 项目    | 纯钨                       | 钨合金棒                      |
|-------|--------------------------|---------------------------|
| 密度    | 约 19.3 g/cm <sup>3</sup> | 约 17~19 g/cm <sup>3</sup> |
| 室温塑性  | 较低，易脆裂                   | 明显改善                      |
| 抗冲击性能 | 较差                       | 较好                        |
| 加工性能  | 困难                       | 相对改善                      |
| 主要优势  | 超高温性能                    | 高密度、高强度、高韧性综合性能           |
| 典型应用  | 高温炉件、电极                  | 配重、屏蔽、惯性件、结构件             |

中钨智造认为，钨合金棒并不是容易断裂的材料，其断裂风险主要来源于材料本身的高硬度特性以及加工和使用过程中的应力管理不足。通过合理设计合金成分、提高制造质量、优化加工工艺，钨合金能够兼具高密度、高强度和较好的韧性，满足航空航天、军工、医疗、电子及高端装备制造领域的长期可靠使用要求。



#### Q41: 钨合金棒如何储存？

钨合金棒属于化学性质较稳定的高密度金属材料，在常温环境下通常不需要特殊防护即可长期储存。但由于钨合金产品通常用于高精度、高可靠性应用领域，如航空航天配重、半导体设备、医疗屏蔽件、精密机械部件等，因此正确的储存方式仍然非常重要。合理储存不仅能够避免表面氧化、污染和机械损伤，还可以保持材料尺寸精度、表面质量以及后续加工性能。

##### 1. 常温条件下钨合金棒具有良好的稳定性

钨合金主要由钨以及镍铁、镍铜等金属组成，在常温空气环境中具有较好的耐腐蚀能力。与活泼金属相比，钨合金不容易发生明显氧化，也不会像铝、镁等材料一样产生快速腐蚀。因此，普通储存环境下，只需保持干燥、清洁、避免长期接触酸碱介质、防止机械碰撞。一般即可满足长期保存要求。

##### 2. 储存环境要求

虽然钨合金本身稳定，但建议采用规范化仓储条件。推荐环境：

| 储存项目 | 推荐要求          |
|------|---------------|
| 温度   | 常温环境，避免剧烈温度变化 |
| 湿度   | 建议控制在 60% 以下  |
| 环境   | 干燥、无腐蚀性气体     |
| 包装   | 防潮包装或原厂包装     |
| 放置方式 | 分类存放，避免碰撞变形   |

对于高精度加工棒材，尤其是直径较小、长度较长的钨合金棒，应避免随意堆放，以防弯曲变形。

##### 3. 防止表面污染

部分钨合金产品用于半导体设备、真空系统或高温炉部件，对材料洁净度要求较高。因此，在储存过程中应避免油污污染、粉尘附着、手汗长期接触、与其他金属材料发生摩擦污染。对于真空应用零件，通常建议采用洁净包装，例如真空袋、防静电包装或洁净塑料保护套。





#### 4. 加工后的钨合金棒储存注意事项

经过车削、磨削、钻孔等加工后的钨合金棒，其表面状态和内部应力可能发生变化。尤其是精密磨削件、薄壁结构件、高尺寸要求零件、加工后可能存在一定残余应力。如果后续需要进行去应力退火，则热处理过程必须采用真空炉或保护气氛炉，例如高纯氢气环境，以避免高温氧化。钨合金虽然耐高温，但在高温含氧环境下仍可能发生表面氧化，导致表面形成氧化层、尺寸精度变化、表面质量下降、后续加工困难。

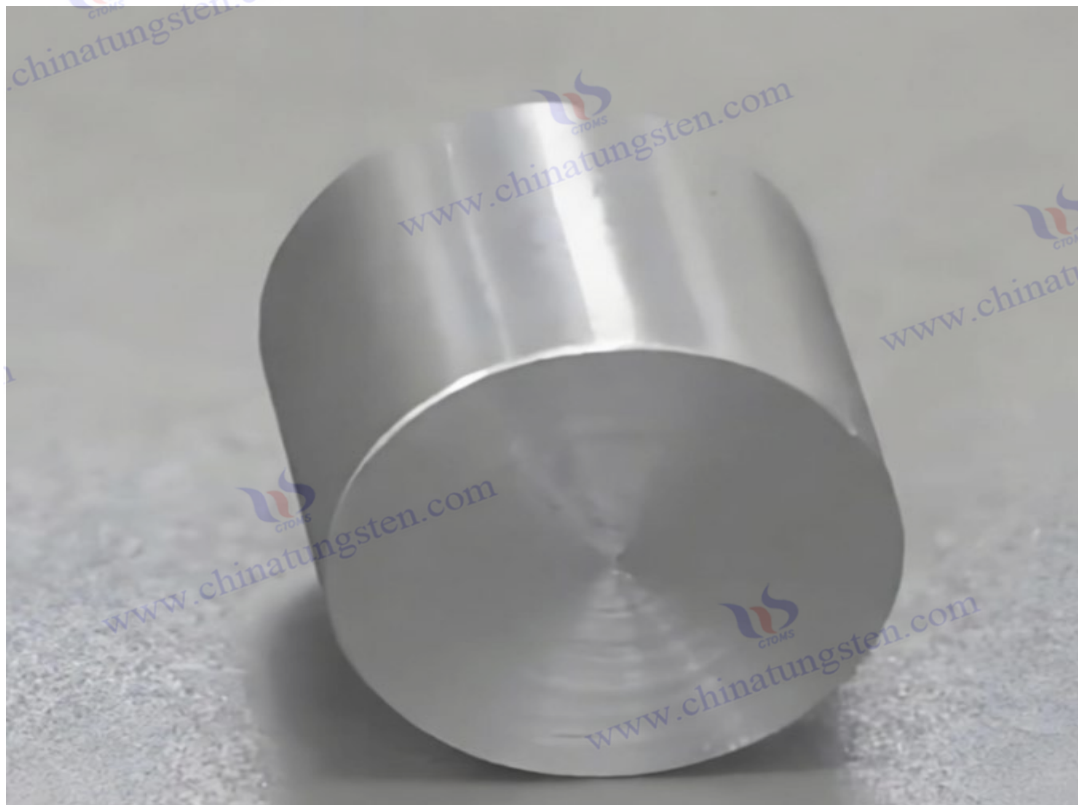
#### 5. 长期储存建议

对于长期库存的钨合金棒，建议定期进行检查，包括包装完整性、表面是否污染、是否存在机械损伤、尺寸是否满足要求。如果储存时间较长，在投入使用前可根据产品用途进行表面清洁和质量复检。

钨合金棒储存与维护建议

| 项目    | 推荐措施     | 目的      |
|-------|----------|---------|
| 常温储存  | 干燥环境保存   | 防止污染和腐蚀 |
| 精密零件  | 洁净包装     | 保持表面质量  |
| 长棒材   | 平放或专用支架  | 防止弯曲    |
| 加工后产品 | 必要时去应力退火 | 提高尺寸稳定性 |
| 热处理过程 | 真空或保护气氛  | 防止氧化    |

中钨智造认为，钨合金棒属于储存稳定性较高的金属材料，普通环境下无需特殊防护，但高端应用领域必须重视洁净储存和加工后的应力控制。对于用于航空航天、半导体、医疗设备及精密装备的钨合金产品，正确的包装、环境控制以及必要的热处理管理，是保证材料长期性能和可靠性的关键措施。随着高端制造业对材料一致性和可靠性的要求不断提高，钨合金储存管理也将逐渐向标准化、洁净化和全过程质量控制方向发展。





## 八、钨合金棒材的定制与采购

### Q42：钨合金棒的尺寸规格有哪些？

钨合金棒（Tungsten Alloy Rod）是以钨为主要成分，通过添加镍、铁、铜等合金元素制备而成的一类高密度金属材料，具有高密度、高强度、良好的机械性能以及优异的尺寸稳定性。由于其密度通常可达到  $17.0 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ ，接近纯钨水平，同时比纯钨具有更好的韧性和加工性能，因此被广泛应用于航空航天配重、医疗屏蔽、军工装备、精密模具、自动化设备、振动减震组件以及高端制造领域。钨合金棒作为最常见的钨合金半成品形式之一，其规格范围通常根据材料牌号、生产工艺、应用领域以及客户需求进行设计。由于钨合金具有较高的材料成本和加工难度，工业生产一般采用标准规格供应，同时支持根据图纸进行定制加工。

#### （一）钨合金棒直径规格

钨合金棒的直径范围较宽，常规工业供应范围通常为：

| 项目       | 常见范围                                              |
|----------|---------------------------------------------------|
| 小直径棒材    | $\Phi 1.0 \text{ mm} \sim \Phi 10 \text{ mm}$     |
| 中等规格棒材   | $\Phi 10 \text{ mm} \sim \Phi 50 \text{ mm}$      |
| 大规格棒材    | $\Phi 50 \text{ mm} \sim \Phi 100 \text{ mm}$ 及以上 |
| 超大规格     | 超大直径和长度可根据需求定制                                    |
| 特殊形状定制规格 | 可根据客户图纸加工                                         |

小直径钨合金棒通常用于精密配重件、电子设备、医疗准直组件以及小型机械结构件；中、大直径棒材则更多用于航空航天配重、军工零件、高温模具以及大型机械平衡部件。对于特殊应用，例如高速旋转设备中的惯性元件、大型航空配重块或特殊防护结构，也可以通过锻造、挤压或机加工方式生产更大尺寸的钨合金棒。

#### （二）钨合金棒长度规格

钨合金棒常规长度一般根据运输、加工和客户使用需求确定。目前市场常见长度包括：标准长度  $100 \sim 1000 \text{ mm}$ 、长尺寸棒材  $1000 \sim 2000 \text{ mm}$ ；特殊长度可根据客户要求定制。



长度越长,对生产工艺要求越高。由于钨合金密度较大,长尺寸棒材在加工和运输过程中容易受到自身重量影响,因此需要严格控制直线度、圆度以及内部组织均匀性。对于精密用途,例如陀螺转子轴、高速旋转平衡件等,不仅要求长度符合要求,还需要控制直线度、同轴度、外径公差、表面粗糙度、内部缺陷。

### （三）钨合金棒供应形式

根据后续使用要求不同,钨合金棒通常采用不同加工状态供应。主要供应形式如下:

| 供应形式 | 特点                   | 典型应用        |
|------|----------------------|-------------|
| 旋锻棒  | 通过旋锻提高密度和机械性能,尺寸精度较高 | 高性能结构件、航空配重 |
| 车光棒  | 经车削加工,表面较平整          | 普通机械加工件     |
| 磨光棒  | 外圆磨削,提高尺寸精度和表面质量     | 精密零件、装配件    |
| 矫直杆  | 经过校直处理,保证直线度         | 长轴类零件       |

其中,旋锻棒是高性能钨合金产品中较常见的一种形式。旋锻过程能够改善材料内部组织,提高致密度和机械性能,使棒材具有更好的抗弯曲能力和尺寸稳定性。

### （四）尺寸公差与精密加工要求

普通钨合金棒材主要满足一般机械加工需求,而用于航空航天、医疗设备及精密仪器领域时,通常需要进行进一步加工。根据加工方式不同,尺寸精度一般可达到普通车加工 $\pm 0.05\text{ mm}$ 左右;精密磨削 $\pm 0.01\sim\pm 0.02\text{ mm}$ ;高精度加工:可达到更高等级要求。对于高速旋转部件或精密平衡件,还需要控制材料的不均匀性和重量偏差,以保证动态平衡性能。

### （五）影响钨合金棒规格选择的因素

客户选择钨合金棒规格时,并不是单纯考虑直径和长度,还需要综合考虑(1)使用空间限制,如钨合金密度高,在满足重量要求的情况下,可以设计更小体积的零件。(2)工作环境,例如航空航天、高温设备或医疗屏蔽领域,对材料稳定性要求不同。(3)加工方式

不同尺寸适合不同加工方法,大规格棒材通常需要更多后续机械加工。(4)性能要求,包括密度、硬度、强度、韧性以及尺寸稳定性等。

中钨智造认为,钨合金棒的规格设计不仅是尺寸问题,更是材料性能、加工能力和应用需求之间的综合平衡。现代高性能钨合金棒材已经从传统标准规格供应,逐渐发展为根据客户应用场景进行材料设计、尺寸优化和精密加工的一体化制造模式。

## Q43: 钨合金棒的表面状态有哪些可选?

钨合金棒由于具有高硬度、高密度以及较高加工难度,其最终表面状态对后续加工、装配精度以及使用性能具有重要影响。根据不同应用需求,钨合金棒可以提供黑皮态、车光、磨光、抛光等多种表面状态。不同表面处理方式不仅影响外观质量,更直接关系到尺寸精度、表面粗糙度、摩擦性能以及零件长期稳定性。因此,在定制钨合金棒时,应根据最终用途合理选择表面状态。

### （一）黑皮态钨合金棒

黑皮态(As-Sintered Surface)是钨合金棒经过烧结或热加工后未经进一步精加工的原始表面状态。其主要特点:保留烧结状态表面、表面颜色通常呈灰黑色、尺寸余量较大、表面粗糙度较高。黑皮态棒材主要适用于后续机械加工,例如车削、铣削、钻孔或磨削。其主要优点有:成本较低、材料利用率较高、适合大批量粗加工;缺点则是尺寸精度较低、表面质量无法直接满足精密装配要求。因此,黑皮态通常作为半成品供应。

### （二）车光钨合金棒





车光（Turning Surface）是通过车床加工去除表面余量，使棒材达到较好的尺寸精度。典型表面粗糙度  $Ra$  约  $3.2\ \mu\text{m}$ 。车光后的钨合金棒具有外径尺寸更加准确、表面更加均匀、便于后续装配或二次加工。车光棒通常用于一般机械结构件、配重组件、非高精度安装件。对于尺寸要求不是特别严格的应用，车光状态已经能够满足使用要求。

### （三）磨光钨合金棒

磨光（Grinding Surface）是通过外圆磨削进一步提高尺寸精度和表面质量。典型表面粗糙度  $Ra$  约  $1.6\sim 3.2\ \mu\text{m}$ 。相比车光，磨光具有更好的圆度、直径一致性、表面光洁度和尺寸稳定性。磨光钨合金棒常用于精密机械零件、高速旋转部件、航空航天配重件、高精度装配结构。对于需要严格控制间隙或配合精度的零件，通常推荐采用磨光状态。

### （四）抛光钨合金棒

抛光（Polishing）属于更高等级表面处理方式，包括机械精密抛光、电解抛光等。主要特点是表面光洁度高、摩擦系数降低、外观质量优异。适用于高精度仪器部件、光学相关设备、特殊电子设备、对表面洁净度要求较高的零件。抛光后的钨合金棒可以进一步降低表面缺陷，提高耐腐蚀性和长期稳定性。

钨合金棒常见表面状态对比

| 表面状态 | 表面粗糙度                             | 特点            | 主要用途   |
|------|-----------------------------------|---------------|--------|
| 黑皮态  | 较高                                | 烧结原始状态，保留加工余量 | 后续粗加工  |
| 车光   | $Ra$ 约 $3.2\ \mu\text{m}$         | 尺寸改善，成本适中     | 普通机械件  |
| 磨光   | $Ra$ 约 $1.6\sim 3.2\ \mu\text{m}$ | 精度高，表面稳定      | 精密零件   |
| 抛光   | 更低，可进一步优化                         | 高光洁度          | 特殊高端应用 |

### （五）表面状态选择建议

实际选择时，应根据零件功能确定：（1）如果产品后续还需要大量加工，建议选择黑皮态；如果用于一般结构件，可选择车光；（2）如果涉及精密装配、高速旋转或航空航天应用，通常选择磨光；（3）如果对表面洁净度、摩擦性能或外观要求极高，则可采用抛光处理。

中钨智造认为，钨合金棒表面处理并不是简单改善外观，而是决定材料能否满足最终应用要求的重要制造环节。通过合理选择黑皮、车光、磨光或抛光状态，可以在成本、加工效率和使用性能之间实现最佳平衡，为航空航天、医疗、电子、军工及精密制造领域提供更加可靠的高密度钨合金解决方案。

## Q44：如何根据用途选择钨合金棒类型？

钨合金棒（Tungsten Alloy Rod）是一类以钨为主要成分，通过添加镍、铁、铜、钼等元素制备而成的高密度功能材料。由于钨合金具有高密度、高强度、良好的耐腐蚀性、优异的高温稳定性以及较好的机械加工性能，因此被广泛应用于航空航天、军工防护、焊接制造、半导体装备、精密配重、高温工业等领域。

不同应用场景对钨合金棒的性能要求存在明显差异。例如，穿甲弹芯更加关注密度、强度和侵彻性能；焊接电极更加关注电子发射能力和高温稳定性；半导体靶材则要求极高纯度和低杂质含量。因此，选择钨合金棒时不能简单依据密度高低，而应综合考虑材料成分、力学性能、工作温度、使用环境以及加工要求。

### 一、根据应用需求选择合适的钨合金体系

目前工业中常见的钨合金棒主要包括高比重钨镍铁合金、高纯钨棒、稀土掺杂钨棒、钨镍铜合金以及特殊耐热钨合金等。典型应用选择如下：



| 应用场景    | 推荐材料类型                     | 主要性能要求        |
|---------|----------------------------|---------------|
| 穿甲弹芯    | 高比重钨镍铁合金（如 97WNiFe）        | 高密度、高强度、高侵彻能力 |
| TIG 焊电极 | 铈钨（WCe）、铈钨（WLa）            | 良好电子发射性能、电弧稳定 |
| 高温炉加热元件 | 稀土掺杂钨棒                     | 高温稳定性、抗下垂性能   |
| 配重块     | 高比重钨合金（90~97WNiFe）         | 高密度、体积小、尺寸稳定  |
| 半导体靶材   | 高纯钨棒（纯度≥99.95%）            | 高纯度、低杂质、真空稳定  |
| 压铸模具    | Anviloy 1150（90W4Ni4Mo2Fe） | 高温强度、耐磨损、抗热疲劳 |
| 电火花电极   | 纯钨棒                        | 高熔点、高耐蚀性、导电稳定 |

**二、军工及航空航天领域：优先选择高比重钨合金**

在穿甲弹芯、动能武器以及航空航天惯性部件中，通常采用 97WNiFe 等高比重钨合金。这类材料钨含量通常达到 90%以上，密度可达到 17~19 g/cm³，远高于钢材。高密度能够在相同体积下提供更大的质量，从而提高动能、惯性或配重效果。高比重钨合金的主要优势包括：第一，高密度优势明显。相比传统钢制材料，钨合金可以在更小尺寸下实现相同重量要求，有利于设备小型化设计。第二，机械性能较好。镍铁粘结相能够改善纯钨脆性，提高材料韧性和抗冲击能力。第三，尺寸稳定性优异。在航空航天精密结构中，材料长期受振动、温度变化影响时，钨合金能够保持较好的几何稳定性。因此，高比重钨合金广泛用于配重块、陀螺转子、惯性导航部件以及防护结构。

**三、焊接领域：选择掺杂钨棒而不是普通钨棒**

TIG 焊（GTAW）和等离子弧焊（PAW）要求电极能够长期承受高温电弧作用，同时保持稳定电子发射。传统纯钨虽然熔点高，但电子发射性能较弱，因此实际工业中通常采用稀土掺杂钨电极。常见类型包括铈钨电极（WCe）：适合低电流和精密焊接，具有良好的起弧性能；铈钨电极（WLa）：综合性能优良，适用于自动焊和高稳定性焊接；钨钨电极（WY）：适合较高电流和特殊焊接环境。相比钍钨电极（WTh），稀土钨电极最大的优势是无放射性，更符合现代制造业对于职业健康和环保要求。

**四、高温炉领域：关注抗高温变形能力**

高温炉加热元件、热场支撑件等应用环境通常超过 2000 °C，材料不仅需要耐高温，还需要长期保持形状稳定。对于这类应用，通常选择稀土掺杂钨棒、高纯钨棒、特殊晶粒强化钨材料。高温环境下，普通钨容易发生再结晶和晶粒长大，导致材料强度下降、产生弯曲变形。通过添加稀土氧化物，可以改善晶粒稳定性，提高抗下垂性能。

**五、半导体行业：优先考虑高纯钨材料**

半导体制造设备对材料纯度要求极高，尤其是在真空、高温环境下，杂质元素可能污染晶圆。因此，半导体靶材、热场零件、电极材料通常采用纯度≥99.95%的高纯钨。主要关注指标包括钨含量、氧、碳、铁、镍等杂质含量、晶粒组织、真空放气性能、表面粗糙度。相比普通钨合金，高纯钨虽然密度和强度优势不突出，但其洁净性能更加适合半导体应用。

**六、压铸模具：选择耐热钨合金**

铝合金压铸模具长期承受高温金属液冲击，需要材料具有耐热疲劳、抗磨损和抗热冲击能力。Anviloy 1150（90W4Ni4Mo2Fe）是一种典型钨基高温合金，具有高温硬度保持能力、优良耐磨性能、较低热膨胀系数、良好的抗热疲劳性能。因此广泛用于压铸模具芯部、热作工具以及高温机械零件。

**七、选择钨合金棒时需要综合考虑的因素**

实际采购过程中，除了应用领域，还需要考虑以下因素：



| 考虑因素 | 影响           |
|------|--------------|
| 密度要求 | 决定是否选择高比重钨合金 |
| 工作温度 | 决定是否采用纯钨或掺杂钨 |
| 强度要求 | 影响合金体系选择     |
| 导电性能 | 影响焊接、电极应用    |
| 纯度要求 | 半导体领域尤其重要    |
| 加工方式 | 影响材料状态和规格选择  |

中钨智造认为，钨合金棒选型的核心不是追求最高钨含量，而是在密度、强度、耐热性、纯度、导电性和加工性能之间寻找最佳平衡。不同应用领域应采用针对性的材料体系，才能充分发挥钨材料优势。

#### Q45：钨合金棒有定制服务吗？

有。钨合金棒具有高度可定制特点，中钨智造可根据客户具体应用需求，对材料牌号、尺寸规格、表面状态、内部组织以及后续加工方式进行定制，以满足航空航天、电子制造、医疗设备、半导体装备、焊接工具及工业模具等不同领域的使用要求。由于钨合金属于高性能难加工材料，其最终性能不仅取决于化学成分，还与粉末冶金工艺、烧结条件、热处理状态以及机械加工方式密切相关。因此，专业钨合金供应商通常需要根据客户工况进行材料设计，而不是简单提供标准棒材。

#### 一、可定制的主要内容

##### 1. 尺寸规格定制

钨合金棒可以根据客户要求定制直径、长度及尺寸公差。常见规格包括圆棒、台阶棒、空心管、精密短棒、异形结构件。直径范围可以覆盖毫米级精密零件到几十毫米甚至更大尺寸的工业部件。对于高精度应用，如陀螺转子、配重件和电子设备零件，通常需要严格控制直径公差、圆度、直线度、同轴度。

##### 二、材料成分可定制

根据使用环境，可以调整钨合金成分。例如：

| 材料类型    | 典型成分    | 主要用途       |
|---------|---------|------------|
| 90WNiFe | W-Ni-Fe | 配重、结构件     |
| 95WNiFe | 高钨含量    | 高密度应用      |
| 97WNiFe | 超高密度    | 军工、航空      |
| WNiCu   | 钨镍铜     | 对磁性能要求较高场合 |
| WCu     | 钨铜复合材料  | 电极、散热材料    |

不同成分会影响密度、硬度、延伸率、导热性能、磁性能、加工性能。

##### 三、表面状态可以定制

根据客户使用需求，可提供不同表面处理黑皮状态、车削加工、无心磨加工、精磨加工、抛光处理。例如，作为精密配重件时，通常需要较高表面精度；作为焊接电极时，则需要保证表面洁净和尺寸一致。

##### 四、特殊机械加工服务

钨合金硬度较高，普通加工方式难度较大，因此专业厂家可提供精密切割、钻孔、倒角、螺纹加工、开槽、异形加工、CNC 精密加工。通过定制加工，可以直接获得接近最终使用状态的零件，减少客户二次加工成本。





## 五、质量检测可按需求提供

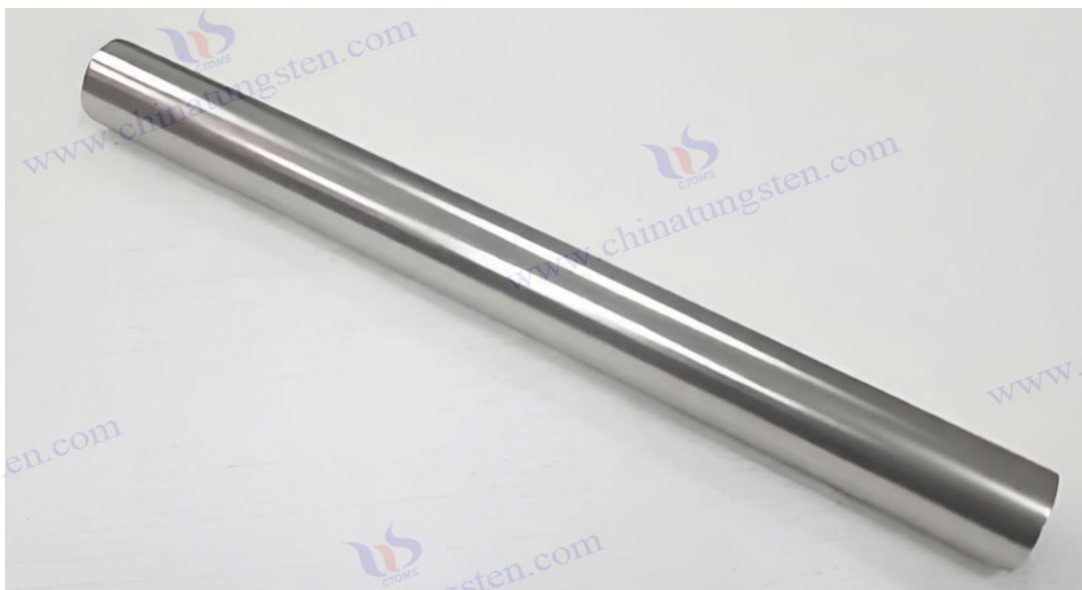
针对高端应用，中钨智造可根据客户要求提供相关检测数据，包括：

| 检测项目   | 作用      |
|--------|---------|
| 化学成分分析 | 确认材料牌号  |
| 密度检测   | 判断材料一致性 |
| 硬度检测   | 评价机械性能  |
| 金相组织分析 | 判断内部结构  |
| 尺寸检测   | 保证装配精度  |
| 超声检测   | 检查内部缺陷  |

## 六、定制钨合金棒需要提供哪些资料？

为了提高报价准确性和缩短沟通时间，客户最好提供全面完整的要求资料，如（1）产品图纸或三维模型；（2）所需材料牌号；（3）尺寸规格和数量；（4）使用环境（温度、压力、真空、腐蚀条件等）；（5）表面及检测要求；（6）交货时间和包装要求。如果客户无法确定具体材料，也可以提供用途和工作条件，由工程人员协助选择合适的钨合金体系。中钨智造认为，钨合金棒定制服务的核心价值在于材料设计与应用匹配。通过合理选择钨含量、合金体系、加工工艺和质量控制方式，可以使产品在密度、强度、耐热性和可靠性之间达到最佳平衡，为航空航天、半导体、能源装备及精密工业提供高性能钨材料解决方案。





## 九、关于钨合金棒的常见误区

### Q46：钨合金棒和硬质合金棒是一回事吗？

不是。钨合金棒（Tungsten Heavy Alloy Rod）和硬质合金棒（Cemented Carbide Rod，也常被称为钨钢棒）虽然名称中都含有“钨”，并且都属于高性能钨基材料，但两者在材料体系、制造工艺、性能特点以及应用领域方面存在本质区别。由于中文市场中“钨棒”“钨钢棒”“钨合金棒”等名称容易混淆，因此在工程采购和材料选型时必须明确区分。钨合金棒主要属于高密度钨基合金，其核心设计目标是利用钨的高密度、高强度和优良的辐射屏蔽能力，同时通过金属黏结相改善材料的韧性和加工性能。典型钨合金体系通常由钨（W）作为主要组成部分，并加入镍（Ni）、铁（Fe）、铜（Cu）等金属作为黏结相。常见牌号的钨含量通常在 90%~97% 之间，密度一般可达到 16.5~19.0 g/cm<sup>3</sup>。例如：

| 材料类型   | 主要成分    | 典型密度                        | 主要特点          |
|--------|---------|-----------------------------|---------------|
| 钨镍铁合金  | W-Ni-Fe | 约 17~18.5 g/cm <sup>3</sup> | 强度高、韧性好、适合结构件 |
| 钨镍铜合金  | W-Ni-Cu | 约 17~18.5 g/cm <sup>3</sup> | 导电性和耐腐蚀性较好    |
| 高比重钨合金 | W 基合金   | 可超过 18 g/cm <sup>3</sup>    | 高密度、高惯性       |

由于钨合金具有接近纯钨的高密度，同时比纯钨具有更好的塑性和抗冲击性能，因此主要应用于需要高质量集中、惯性控制或高能防护的领域。例如航空航天中的配重件、飞机操纵系统平衡块、陀螺转子、发动机振动控制部件等；军事领域中的穿甲弹芯、动能穿透材料；核工业中的辐射屏蔽件；医疗领域中的放射防护组件等。

而硬质合金棒则属于另一类材料体系，其主要组成是碳化钨（WC）硬质相和钴（Co）黏结相。典型成分中，WC 含量通常达到 80%~95%，钴含量约为 5%~20%。硬质合金的核心特点不是高密度，而是极高的硬度、耐磨性和抗压强度。硬质合金棒的典型性能和用途如下：

| 性能指标 | 硬质合金棒典型范围     |
|------|---------------|
| 硬度   | HRA 85~94     |
| 抗压强度 | 约 4000 MPa 以上 |



|      |                                                                  |
|------|------------------------------------------------------------------|
| 性能指标 | 硬质合金棒典型范围                                                        |
| 密度   | 约 14~15.5 g/cm <sup>3</sup>                                      |
| 主要优势 | 高耐磨、高硬度、高红硬性                                                     |
| 用途   | 硬质合金棒主要用于制造切削工具和耐磨零件。如数控刀具、PCB 微钻、整体硬质合金钻头、铣刀、铰刀、冲压模具、拉丝模具、耐磨喷嘴。 |

从制造工艺来看，两者也存在明显区别。钨合金棒通常采用粉末冶金液相烧结工艺制造。首先将钨粉与镍铁、镍铜等金属粉末混合，然后压制成型，在 1400~1500 °C 左右进行液相烧结，使金属黏结相填充钨颗粒之间的孔隙，形成高密度合金结构。硬质合金棒则采用 WC 粉末与钴粉混合，通过压制、烧结形成 WC-Co 硬质合金组织。烧结温度通常约为 1350~1500 °C，其关键在于控制 WC 晶粒尺寸和钴相分布，以获得最佳硬度和韧性平衡。两种材料虽然都含钨，但设计理念完全不同，即钨合金追求的是高密度、高惯性、高抗冲击能力；硬质合金追求的是高硬度、高耐磨性和高温切削能力。简单比较如下：

| 对比项目  | 钨合金棒                      | 硬质合金棒                         |
|-------|---------------------------|-------------------------------|
| 英文名称  | Tungsten Heavy Alloy Rod  | Tungsten Cemented Carbide Rod |
| 主要硬质相 | 钨 W                       | 碳化钨 WC                        |
| 黏结相   | Ni、Fe、Cu 等                | Co 为主                         |
| 核心性能  | 高密度、高韧性                   | 高硬度、高耐磨                       |
| 密度    | 16.5~19 g/cm <sup>3</sup> | 14~15.5 g/cm <sup>3</sup>     |
| 主要用途  | 配重、防护、惯性件                 | 刀具、钻头、模具                      |
| 加工特点  | 可机械加工                     | 需要磨削、电加工                      |

因此，在实际采购过程中，如果客户需要制造飞机平衡块、陀螺转子、辐射屏蔽件或高密度结构件，应选择钨合金棒；如果用于刀具、钻头、模具或耐磨零件，则应选择硬质合金棒。中钨智造认为，钨合金棒和硬质合金棒虽然同属于钨基材料，但属于两个完全不同的材料体系。正确理解两者区别，是保证材料性能发挥和降低制造成本的重要基础。

#### Q47：钨合金棒是“上帝之杖”那种武器吗？

不是。所谓“上帝之杖”（Rods from God，也称天基动能武器、轨道动能打击系统）是一种概念性的未来武器设想，并不是现实工业中通常所说的钨合金棒产品。“上帝之杖”概念来源于利用物理动能进行远程打击的设想，其基本原理是：从太空轨道平台释放高密度金属棒，使其在重力作用下高速进入大气层，并利用高速运动产生的巨大动能撞击目标。由于钨具有极高密度（纯钨约 19.25 g/cm<sup>3</sup>）、高熔点（3422 °C）以及较好的高温稳定性，因此在理论讨论中，钨或钨合金经常被认为是这种概念武器可能采用的材料之一。但是，需要明确的是，现实中的钨合金棒产品与这一概念武器并不存在直接对应关系。工业领域中的钨合金棒，主要是一种高性能工程材料，广泛应用于民用和工业制造领域。如航空航天配重件、飞机和直升机平衡组件、高精度陀螺转子、医疗放射防护组件、核工业屏蔽材料、焊接电极、高温结构件。这些应用关注的是材料的密度、机械性能、耐腐蚀性、尺寸稳定性以及加工性能，而不是作为武器使用。从材料性能角度看，钨合金确实具备一些理论上的优势，主要是：**第一，高密度优势。**钨合金密度通常达到 17~19 g/cm<sup>3</sup>，在相同体积下质量远高于钢、铜等普通金属，因此适合需要质量集中和惯性控制的应用。**第二，高温稳定性。**钨熔点超过 3400 °C，属于熔点最高的金属之一。在高温环境中仍能够保持较好的结构稳定性。**第三，良好的力学性能。**相比纯钨，钨合金通过加入镍、铁、铜等元素，





提高了韧性和抗冲击能力，更适合工程制造。

不过，将这些材料性能简单等同于“上帝之杖”是不准确的。实际工程应用中，材料选择不仅取决于密度，还需要综合考虑制造成本、加工难度、可靠性、环境适应性以及法规要求。例如，在航空航天领域，钨合金更多用于精确质量控制，而不是高速撞击用途；在医疗领域，钨合金利用高密度特性进行射线屏蔽；在焊接行业，钨基材料则利用其高熔点作为电极。钨合金棒常见应用与概念武器的区别如下：

| 项目   | 工业钨合金棒       | “上帝之杖”概念  |
|------|--------------|-----------|
| 性质   | 工程材料产品       | 武器概念设计    |
| 主要用途 | 配重、防护、电极、结构件 | 理论动能打击    |
| 使用领域 | 航空、医疗、工业制造   | 科幻及军事研究概念 |
| 关注性能 | 密度、强度、加工性    | 高速运动动能    |
| 当前状态 | 已广泛商业应用      | 未成为现实装备   |

中钨智造认为，钨合金棒是一种成熟的高性能工程材料，其价值在于利用钨的高密度、高温性能和稳定性解决实际工业问题。虽然钨合金因其物理特性经常出现在“上帝之杖”等概念讨论中，但现实中的钨合金棒主要服务于航空航天、半导体、医疗、能源和高端制造领域，是一种重要的工业材料，而不是某种特殊武器产品。

**Q48：钨合金棒可以做首饰吗？**

可以。钨合金棒，尤其是高密度钨合金材料，在经过适当加工、表面处理和装饰设计后，可以用于制作部分高端首饰产品，例如镀金钨棒、钨金条、钨合金戒指、吊坠、纪念饰品及个性化收藏品等。虽然钨合金并不是传统贵金属首饰材料，但凭借其独特的物理性能，在现代工业风、高科技风以及男性饰品市场中逐渐形成了一定应用空间。钨合金首饰最大的特点并不是贵金属价值，而是材料本身具有极高的硬度、耐磨性和长期稳定性。钨合金密度通常可达到 17~19 g/cm³，接近黄金（约 19.3 g/cm³），因此同样尺寸的钨合金饰品具有明显的重量感和质感，这也是其被称为钨金饰品的重要原因之一。

**（一）高密度带来的独特质感**

钨合金最明显的首饰优势是高密度。传统不锈钢、钛合金等材料制作的饰品通常重量较轻，而钨合金能够提供接近贵金属的沉重手感。例如，一个尺寸相近的戒指：

| 材料  | 密度 (g/cm³) | 特点      |
|-----|------------|---------|
| 铝合金 | 约 2.7      | 轻质      |
| 不锈钢 | 约 7.8      | 常见饰品材料  |
| 铜合金 | 约 8.5      | 加工性好    |
| 钨合金 | 17~19      | 高密度、高质感 |
| 黄金  | 约 19.3     | 贵金属价值高  |

因此，钨合金首饰能够在不使用大量贵金属的情况下，实现类似黄金的重量体验，特别适合追求硬朗、科技感和耐用性的消费群体。

**（二）优异耐磨性，提高长期使用寿命**

钨合金硬度较高，通常远高于普通钢材，因此具有非常好的抗划伤和耐磨损能力。普通贵金属如黄金、纯银虽然具有较高装饰价值，但由于硬度较低，长期佩戴容易出现表面划痕、边缘磨损、形状变化。而钨合金饰品在日常佩戴过程中能够保持较长时间的表面光泽和几何形状，尤其适合作为戒指、手环等经常接触外界环境的饰品。



### （三）良好的耐腐蚀性能

钨合金具有较好的化学稳定性，在正常生活环境中不容易发生氧化、腐蚀或变色。相比部分传统金属饰品，钨合金具有以下优势：不易生锈、不易变色、对汗液、湿气具有较好耐受性、长期保持外观稳定。因此，钨合金首饰适合长期佩戴，不需要频繁维护。

### （四）表面处理赋予更多装饰效果

纯钨合金通常呈灰黑色金属光泽，通过不同表面处理工艺，可以获得丰富的外观效果。常见工艺包括镀金处理，使表面呈现金黄色；镀银、镀铬，提高亮度；抛光处理，获得镜面效果；拉丝处理，形成金属纹理；激光雕刻，实现个性化设计。因此，钨合金不仅可以作为工业材料，也可以通过现代加工技术转化为具有装饰性的消费产品。

### （五）钨合金首饰与黄金首饰的区别

需要注意的是，钨合金虽然密度接近黄金，但两者价值属性完全不同。黄金首饰主要价值来源于贵金属属性、金融价值、稀缺性、传统文化意义。而钨合金首饰主要优势来自高科技材料属性、高耐磨性能、独特重量感、现代设计理念。因此，钨合金更适合作为时尚饰品、纪念品和功能型首饰，而不是传统意义上的投资贵金属。

### （六）钨合金首饰加工需要注意的问题

虽然钨合金性能优异，但其加工难度较高。由于硬度高、韧性有限，加工过程中通常需要采用金刚石刀具、精密磨削、激光加工、电火花加工（EDM）。尤其是在制作复杂结构、小尺寸零件或高精度饰品时，需要专业加工设备和工艺经验。

中钨智造认为，钨合金棒用于首饰制造是一种材料跨界应用，其核心价值并不在于替代黄金，而在于利用钨合金高密度、高硬度和高稳定性的特点，为现代饰品提供新的设计方向。随着个性化消费、高科技材料饰品和功能型首饰市场的发展，钨合金首饰仍具有较好的应用潜力。

## Q49：钨合金棒越重越好吗？

不一定。钨合金棒的重量主要取决于密度，而密度又与钨含量以及合金体系有关。虽然高密度钨合金在许多领域具有明显优势，但并不是所有应用都追求最高密度。实际工程应用中，需要根据具体功能要求，在密度、强度、韧性、加工性能、成本和使用环境之间进行综合平衡。钨合金并不是简单的“越重越好”，而是“适合应用需求的性能组合最重要”。

### （一）高密度钨合金适用于需要极高质量集中的场合

对于某些特殊应用，高密度确实非常重要。例如穿甲弹芯、动能穿透材料、高惯性转子等，需要尽可能提高单位体积质量。高钨含量合金通常具有密度高，可达到  $18\sim 19\text{ g/cm}^3$  以上、动量大、惯性强、体积小但质量集中。在穿甲弹芯应用中，高密度能够提高单位截面积质量，使弹芯具有更强的侵彻能力。类似地，在航空航天陀螺转子、惯性轮等部件中，高密度可以提高转动惯量，使设备在更小体积下获得更高稳定性。

### （二）配重应用并非密度越高越经济

钨合金大量应用于飞机、汽车、机器人和精密设备配重。例如飞机操纵面配重、直升机旋翼平衡块、航天器姿态调整部件、工业机器人平衡块。这些应用需要的是准确质量，而不是无限提高密度。如果材料密度过高，会导致材料成本增加、加工难度提高、结构设计受限。因此，工程设计通常会选择满足空间限制和重量要求的合适密度等级。例如：

| 应用领域 | 关注重点  | 是否追求最高密度 |
|------|-------|----------|
| 穿甲弹芯 | 穿透能力  | 是        |
| 陀螺转子 | 惯性稳定性 | 较高要求     |
| 飞机配重 | 平衡效果  | 适当即可     |



| 应用领域  | 关注重点    | 是否追求最高密度 |
|-------|---------|----------|
| 机器人配重 | 成本与性能平衡 | 不一定      |
| 焊接电极  | 电弧性能    | 否        |

### （三）电极材料更关注综合性能，而非单纯密度

钨电极是一个典型例子。用于 TIG 焊、等离子焊的钨电极，虽然也是钨材料，但评价标准与配重完全不同。电极更加关注电子发射能力、电弧稳定性、烧损速度、热电子逸出性能、使用寿命。因此，钨钨电极、钨钨电极、钨钨电极等材料，并不是通过提高密度来提升性能，而是通过添加稀土氧化物改善电性能。例如钨钨电极具有良好的低电流引弧性能、钨钨电极具有较好的稳定性和寿命、钨钨电极虽然性能优秀，但由于含放射性氧化钍，逐渐被环保型稀土钨电极替代。

### （四）密度提高可能降低部分加工性能

高钨含量通常意味着更高密度，但同时可能带来延展性下降、加工难度增加、成型困难、成本提高。因此，在制造复杂零件时，并非选择最高钨含量材料，而是选择综合性能最佳的合金牌号。例如：

| 钨含量    | 密度特点 | 典型特点      |
|--------|------|-----------|
| 90%左右  | 中高密度 | 加工性能较好    |
| 92~95% | 高密度  | 综合性能平衡    |
| 95%以上  | 超高密度 | 适合特殊高性能应用 |

### （五）合理选择钨合金密度等级

实际采购钨合金棒时，应根据以下因素确定：（1）使用目的：配重、屏蔽、穿透、惯性或加工零件；（2）空间限制：是否需要小体积高质量；（3）强度要求：是否承受冲击或高速运动；（4）加工要求：是否需要车削、钻孔、磨削；（5）成本要求：是否需要最高钨含量。中钨智造认为，钨合金棒的核心价值并不是简单追求最高重量，而是在密度、性能和经济性之间寻找最佳平衡。对于穿甲、惯性控制等特殊领域，高密度钨合金具有不可替代优势；而对于配重、电极及普通工业应用，则应根据实际需求选择合适牌号。先进钨合金制造的发展方向，也已经从单纯提高密度，逐步转向高性能、多功能和应用定制化。







**Q50：钨合金棒价格为什么差异这么大？**

钨合金棒作为一种典型的高密度、高性能金属材料，广泛应用于航空航天配重、汽车曲轴平衡块、医疗准直器、军工装备、精密模具、焊接电极、半导体设备及科研装置等领域。很多用户在采购钨合金棒时会发现，不同供应商提供的报价差异较大，即使名称相同、规格接近，价格也可能相差数十个百分点，甚至更高。造成钨合金棒价格差异的原因，并不仅仅取决于钨原料价格，而是由材料成分、制造工艺、尺寸规格、加工精度、质量等级以及应用要求等多个因素共同决定。钨合金属于典型的高附加值材料，其价格实际上体现的是材料性能和制造难度，而不是单纯的金属重量价格。

**（一）钨含量是影响价格的核心因素**

钨合金棒最主要的价格影响因素是钨含量。通常情况下，钨含量越高，材料密度越大，成本也越高。常见钨合金牌号包括 90W、92.5W、95W、97W 等，其中：

| 钨含量    | 典型密度                     | 主要特点          |
|--------|--------------------------|---------------|
| 90%W   | 约 17 g/cm <sup>3</sup>   | 综合性能较好，成本相对较低 |
| 92.5%W | 约 17.5 g/cm <sup>3</sup> | 常用于配重和工业部件    |
| 95%W   | 约 18 g/cm <sup>3</sup>   | 高密度、高性能应用较多   |
| 97%W   | 接近 19 g/cm <sup>3</sup>  | 用于高端精密领域      |

由于钨元素本身价格较高，随着钨含量提高，不仅原材料成本增加，同时粉末混合、烧结致密化和加工难度也会提高。例如，一根 95%钨合金棒与 90%钨合金棒相比，虽然化学成分只增加几个百分点的钨含量，但其密度、机械性能和应用等级都会发生变化，因此价格差异较明显。对于航空航天、医疗防护和高精度惯性元件等领域，用户通常更关注材料性能，而不是单纯追求低价格，因此高钨含量产品占据较大比例。

**（二）材料纯度影响制造成本和性能等级**

钨合金棒除了钨含量外，原材料纯度也是重要影响因素。高纯钨粉通常要求钨含量 ≥99.95%、低氧含量、低杂质元素、粒度分布稳定。相比普通工业级钨粉，高纯钨粉生产过程需要更加严格的原料控制、氢还原工艺、筛分处理以及质量检测，因此成本更高。特别是在半导体设备、电子工业和航空航天领域，材料中的氧、铁、镍、钼等杂质含量都会影响高温稳定性、真空环境放气率、抗疲劳性能、长期尺寸稳定性。因此，高端应用通常要求更高纯度的钨原料，而普通配重件可能采用工业级材料，两者价格自然存在明显差异。

**（三）合金添加元素影响价格**

钨合金并不是纯钨材料，而是通过加入镍、铁、铜等元素改善加工性能和力学性能。常见体系包括：W-Ni-Fe 钨镍铁合金、W-Ni-Cu 钨镍铜合金、特殊功能钨合金。不同添加体系会影响材料成本和性能。例如 W-Ni-Fe 合金具有较高强度和良好的机械加工性能，广泛用于航空航天和军工领域，W-Ni-Cu 合金具有较好的导电性和耐腐蚀性能，适用于电子和电气领域。此外，部分特殊钨合金棒还会加入稀土元素，例如镧（La）、铈（Ce）、钇（Y）。稀土掺杂钨棒主要用于焊接电极等领域，其制造成本通常高于普通钨棒，因为涉及粉末掺杂、均匀分散和特殊烧结技术。

**（四）加工状态决定最终价格**

钨合金棒通常不是以单一状态销售，而是根据客户需求提供不同加工等级。常见状态包括：

| 加工状态  | 特点            | 成本水平 |
|-------|---------------|------|
| 烧结黑皮棒 | 保留烧结表面，尺寸精度较低 | 较低   |
| 车加工棒  | 具有基本尺寸精度      | 中等   |



| 加工状态  | 特点          | 成本水平 |
|-------|-------------|------|
| 磨光棒   | 表面光洁，尺寸精度高  | 较高   |
| 抛光棒   | 表面质量优秀      | 高    |
| 精密加工件 | 按图加工，满足装配要求 | 最高   |

例如，同样直径 10 mm 的钨合金棒、黑皮状态主要适用于后续加工、磨光状态可直接用于精密装配、镜面抛光状态则可能用于医疗设备、科研仪器等高精度场景。加工步骤越多，材料损耗、设备投入和人工成本越高，因此价格会上升。

（五）尺寸规格影响生产难度

钨合金棒的尺寸也是价格差异的重要因素。一般来说，小规格、标准规格产品容易批量生产，单位成本较低；超长棒、超大直径棒、超细棒或特殊比例产品，制造难度明显增加。主要原因包括粉末压制难度增加、烧结过程中容易产生密度梯度、加工过程中容易产生变形、成品率下降。例如，大尺寸钨合金棒需要更加严格控制烧结温度、气氛和冷却速度，否则容易出现内部缺陷。而超细钨合金棒则要求更高加工精度，否则容易出现弯曲和尺寸偏差。因此，非标准尺寸产品通常需要单独设计工艺，其价格高于常规规格。

（六）检测要求也会影响价格

不同应用领域对检测要求差异较大。普通工业用途可能只需要检测尺寸、密度、外观。而航空航天、医疗和半导体领域通常需要增加化学成分分析、密度测试、硬度检测、金相组织分析、超声检测、无损检测、尺寸全检。检测项目越多，生产周期和质量控制成本越高，因此最终价格也会提高。

（七）采购数量影响单价

钨合金棒属于粉末冶金产品，其生产具有明显的批量效应。大批量采购时，模具成本可以分摊、材料利用率提高、加工效率提高、单件成本降低。而小批量定制产品通常需要重新排产、单独加工，因此单位价格较高。特别是客户提供特殊图纸、特殊尺寸或特殊性能要求时，即使产品重量较小，也可能因为工艺准备成本导致报价较高。

钨合金棒价格主要影响因素总结

| 影响因素 | 对价格影响 | 主要原因         |
|------|-------|--------------|
| 钨含量  | 最大    | 原材料成本和性能等级不同 |
| 材料纯度 | 较大    | 高纯粉末制造成本高    |
| 合金体系 | 较大    | 添加元素和工艺不同    |
| 加工精度 | 明显    | 磨削、抛光增加成本    |
| 产品尺寸 | 明显    | 非标准规格制造难度高   |
| 检测要求 | 中等    | 高端行业质量控制严格   |
| 采购数量 | 中等    | 影响生产效率和成本分摊  |

中钨智造认为，钨合金棒价格差异本质上是材料等级、制造难度和应用要求差异的体现。对于用户而言，不能简单以每公斤价格判断产品优劣，而应综合考虑钨含量、密度、纯度、加工状态、尺寸精度以及实际使用环境。例如，用于航空航天配重的钨合金棒，更关注密度一致性和长期稳定性；用于医疗准直器的产品，更关注尺寸精度和材料均匀性；用于焊接电极的钨棒，则更加重视掺杂元素分布和电弧性能。因此，在采购钨合金棒时，提供完整的技术要求、应用环境和加工需求，才能获得更准确的报价和更适合的材料方案。对于高端应用而言，合理选择材料等级比单纯降低采购价格更加重要。



## 如何定制采购钨合金棒？

中钨智造科技有限公司 CTIA GROUP LTD.

### 钨合金棒定制采购需求清单

为提高钨合金棒定制报价准确性、缩短技术沟通周期，并确保产品满足实际使用要求，请客户尽可能提供以下信息。对于不确定的参数，可根据实际应用填写用途、工况或参考样品，由中钨智造工程师协助确认。

#### 一、客户及项目基本信息

| 项目          | 客户填写内容 |
|-------------|--------|
| 公司名称        |        |
| 联系人         |        |
| 联系方式（邮箱/电话） |        |
| 项目名称或应用领域   |        |
| 预计采购数量      |        |
| 期望交货时间      |        |

#### 二、钨合金棒产品要求

| 项目类别    | 具体要求                             | 客户填写 |
|---------|----------------------------------|------|
| 产品名称    | 钨合金棒 / 钨棒 / 重钨合金棒 / 稀土钨棒等        |      |
| 材料牌号    | 如 WNiFe、WNiCu、纯钨、钨钼、钨钨等（如已指定请填写） |      |
| 钨含量     | 如 90%、93%、95%、97%、99%以上等         |      |
| 合金体系    | W-Ni-Fe、W-Ni-Cu、W-Cu、W-La、W-Ce 等 |      |
| 主要用途    | 配重、屏蔽、焊接电极、耐高温零件、模具、电极材料等        |      |
| 是否有指定标准 | 国标、ASTM、客户标准或其他技术规范              |      |

#### 三、尺寸及加工要求

| 项目类别  | 具体要求                        | 客户填写 |
|-------|-----------------------------|------|
| 棒材规格  | 直径 × 长度（例如 Φ10×200 mm）      |      |
| 数量    | 单件数量及总采购数量                  |      |
| 尺寸公差  | 普通公差、精密公差或按图纸要求             |      |
| 直线度要求 | 是否有特殊直线度要求                  |      |
| 加工状态  | 黑皮棒、车加工、磨光、抛光、精密加工          |      |
| 图纸或样品 | 请提供 PDF 图纸、STEP/STP 模型或实物样品 |      |

#### 四、性能及质量要求

| 项目类别 | 具体要求 | 客户填写 |
|------|------|------|
|------|------|------|





| 项目类别 | 具体要求                                                        | 客户填写 |
|------|-------------------------------------------------------------|------|
| 密度要求 | 如 $\geq 17.0 \text{ g/cm}^3$ 、 $\geq 18.0 \text{ g/cm}^3$ 等 |      |
| 硬度要求 | 如 HV、HRC 等要求                                                |      |
| 机械性能 | 抗拉强度、延伸率、抗压强度等（如需要）                                         |      |
| 成分要求 | W 含量、Ni、Fe、Cu 比例或其他元素要求                                     |      |
| 内部质量 | 是否要求无裂纹、无气孔、组织均匀                                            |      |
| 检测报告 | 是否需要材质证明、检测报告、第三方报告                                         |      |

### 五、使用环境及工况要求

| 项目类别   | 具体要求                 | 客户填写 |
|--------|----------------------|------|
| 工作温度   | 常温、高温（请注明最高温度）       |      |
| 工作环境   | 真空、空气、保护气氛、腐蚀环境等     |      |
| 受力情况   | 静态载荷、冲击、旋转、高速运动等     |      |
| 特殊性能要求 | 耐辐射、耐磨、耐腐蚀、高密度、高稳定性等 |      |
| 使用寿命要求 | 连续工作时间或寿命要求          |      |

### 六、表面处理及包装要求

| 项目类别  | 具体要求             | 客户填写 |
|-------|------------------|------|
| 表面状态  | 黑皮、车光、磨光、镜面抛光等   |      |
| 表面粗糙度 | 如 Ra0.8、Ra0.4 等  |      |
| 倒角要求  | 是否需要端部倒角、圆角处理    |      |
| 包装要求  | 防潮、防震、真空包装、出口包装等 |      |
| 运输要求  | 普通运输、航空运输或特殊要求   |      |

### 七、附件资料

客户可根据实际情况提供：

| 资料类型           | 是否提供                     |
|----------------|--------------------------|
| 产品图纸（PDF/CAD）  | <input type="checkbox"/> |
| 三维模型（STEP/STP） | <input type="checkbox"/> |
| 实物样品或照片        | <input type="checkbox"/> |
| 材料标准或技术规范      | <input type="checkbox"/> |
| 使用环境说明         | <input type="checkbox"/> |
| 其他技术资料         | <input type="checkbox"/> |

### 钨合金棒采购信息简表 （快速询价版）

| 项目       | 客户填写 |
|----------|------|
| 材料牌号/钨含量 |      |



| 项目        | 客户填写 |
|-----------|------|
| 规格（直径×长度） |      |
| 数量        |      |
| 用途        |      |
| 工作温度及环境   |      |
| 精度及表面要求   |      |
| 是否提供图纸/样品 |      |
| 交货时间      |      |

提交方式

请将采购需求清单、产品图纸、技术要求或样品资料发送至：

中钨智造科技有限公司（CTIA GROUP LTD.）

地址：中国福建省厦门市软件园二期望海路 25 号之一 3 楼

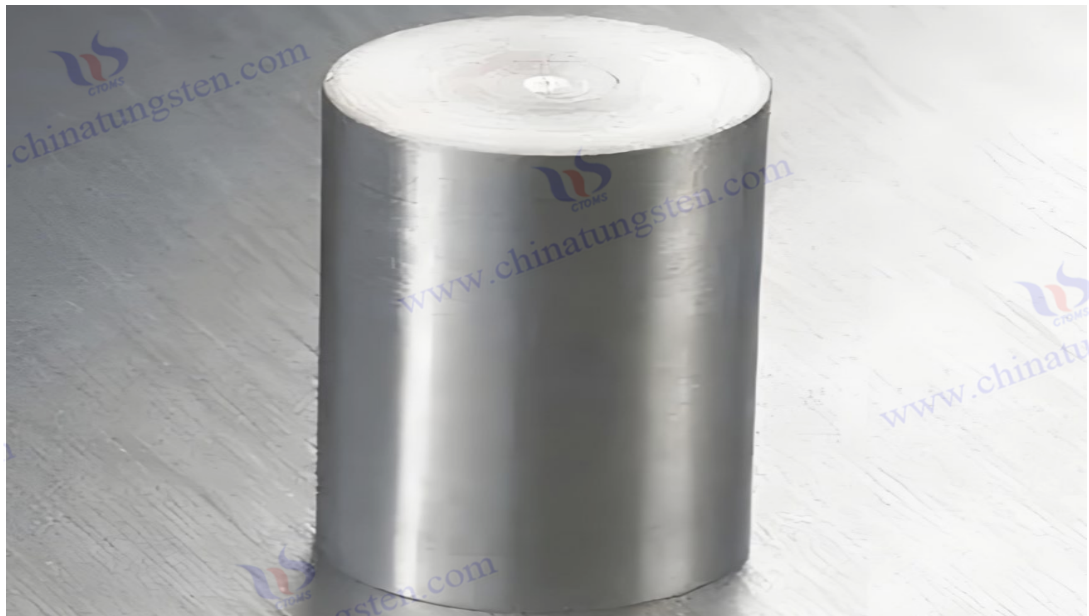
邮编：361008

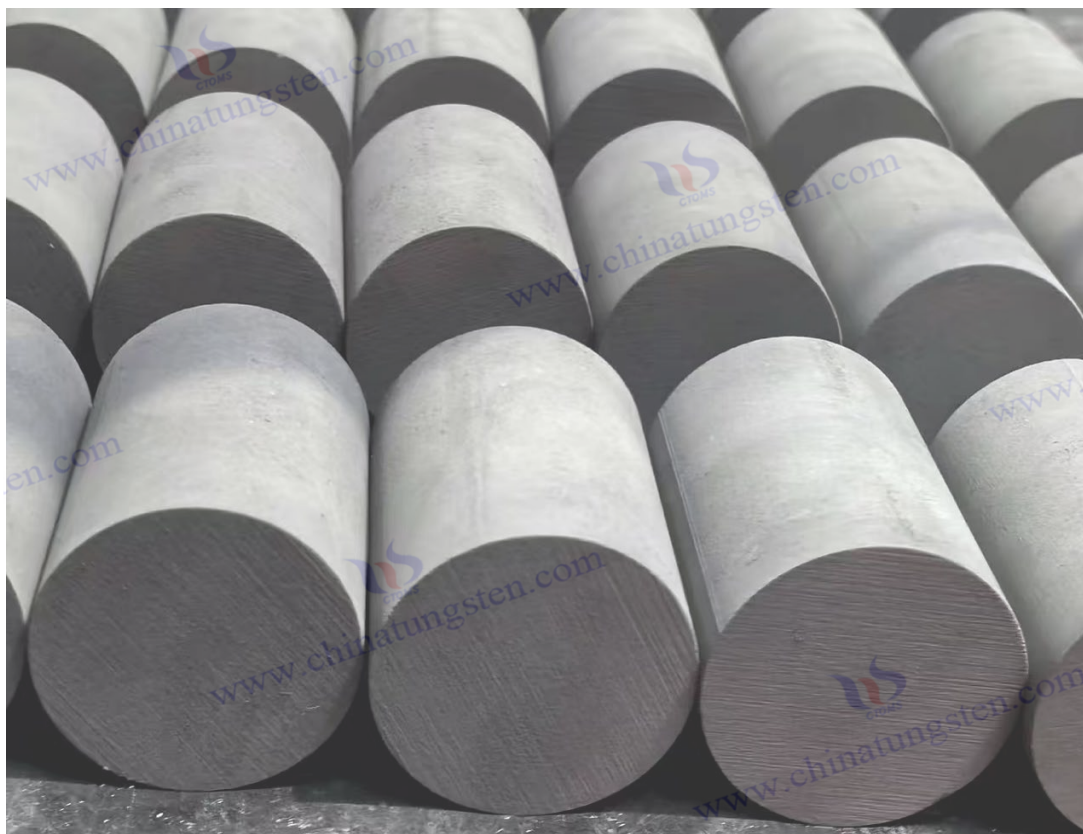
电话：+86 592 512 9696 / +86 592 512 9595

邮箱：[sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

官方网站：[www.ctia.group](http://www.ctia.group) / [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

中钨智造将根据客户提供的信息，提供钨合金材料选型建议、生产工艺方案、质量标准确认及正式报价。对于航空航天、电子制造、核工业、医疗屏蔽、高端装备等特殊应用，可提供针对性的材料设计与定制服务。





  
www.chinatungsten.com

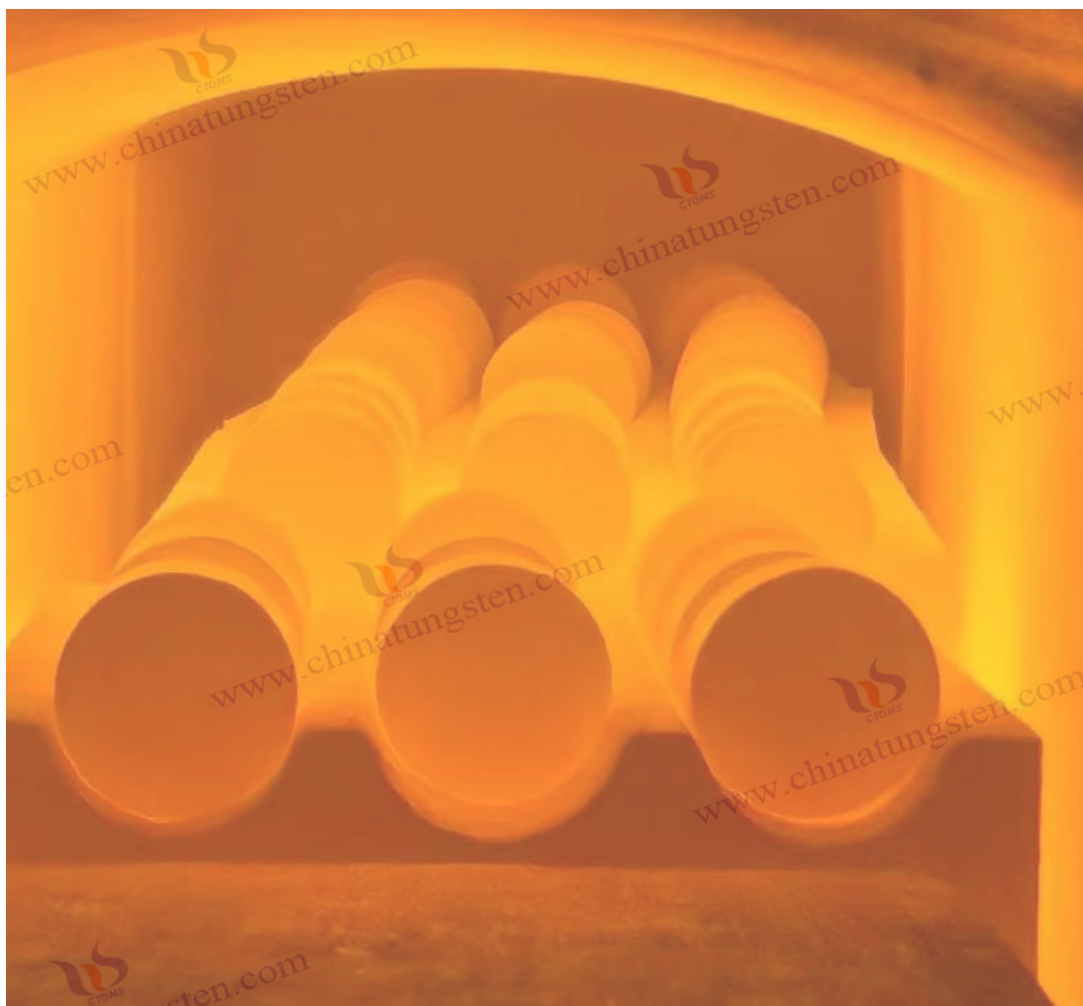
  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com





1