



关于钨合金屏蔽件专业、最热门问题 Q&A

第一部分 关于钨合金屏蔽件常见的专业问题

1. 什么是钨合金屏蔽件？
2. 钨合金为什么可以屏蔽 X 射线和 γ 射线？
3. 钨合金可以屏蔽哪些类型的辐射？
4. 钨合金屏蔽件的密度是多少？
5. 钨合金和铅哪个屏蔽效果更好？
6. 钨合金可以替代铅做辐射屏蔽吗？
7. 钨合金屏蔽件需要多厚？
8. 如何计算钨合金屏蔽厚度？
9. 什么是 HVL 和 TVL？
10. 90W、93W、95W、97W 钨合金屏蔽性能有什么区别？
11. 钨合金屏蔽件可以用于 X 射线设备吗？
12. 钨合金可以用于 CT 设备吗？
13. 钨合金准直器有什么作用？
14. 钨合金可以用于直线加速器 MLC 吗？
15. 钨合金注射器屏蔽套有什么作用？
16. 钨合金屏蔽环是什么？
17. 钨合金可以用于放射源容器吗？
18. 钨合金可以用于工业 γ 射线探伤吗？
19. 钨合金屏蔽件可以按照图纸定制吗？
20. 钨合金屏蔽件需要提供哪些检测报告？

第二部分 钨合金屏蔽件最常见的问题

1. 什么是钨合金屏蔽件？
2. 钨合金为什么适合用于辐射屏蔽？
3. 钨合金屏蔽件主要屏蔽哪些射线？
4. 钨合金和铅相比，哪一种屏蔽材料更好？
5. 钨合金屏蔽件的密度是多少？
6. 钨合金屏蔽件的屏蔽性能如何计算？
7. 钨合金屏蔽件能屏蔽 X 射线和 γ 射线吗？
8. 钨合金屏蔽件可以用于 CT、X 射线设备和医疗器械吗？
9. 钨合金屏蔽件可以用于核工业和核医学领域吗？
10. 钨合金屏蔽件有哪些常见的牌号和成分？
11. 钨合金屏蔽件通常采用哪些加工工艺？
12. 钨合金屏蔽件可以加工成复杂形状吗？
13. 钨合金屏蔽件的尺寸精度和表面粗糙度能达到多少？
14. 钨合金屏蔽件的硬度、强度和耐磨性怎么样？
15. 钨合金屏蔽件在高温环境下还能保持良好的屏蔽性能吗？
16. 钨合金屏蔽件的使用寿命一般有多长？



17. 钨合金屏蔽件如何选择合适的钨含量？
18. 钨合金屏蔽件的价格受哪些因素影响？
19. 如何定制钨合金屏蔽件？
20. 购买钨合金屏蔽件时应该重点关注哪些技术参数？



第一部分 关于钨合金屏蔽件常见的专业问题

1. 什么是钨合金屏蔽件？

钨合金屏蔽件，是以钨重合金为主要材料，通过粉末冶金、烧结致密化以及车削、磨削、铣削、钻孔、抛光等精密加工工艺制造，用于衰减和阻挡 X 射线、 γ 射线等电离辐射的功能性金属部件。其核心作用在于利用钨较高的原子序数（74）和高密度特性，使入射光子在材料内部发生光电效应、康普顿散射等相互作用，从而降低穿透屏蔽件后的辐射强度。

常见钨合金屏蔽件主要采用 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 等钨重合金体系，钨含量通常约为 90%~97% 或更高，实际密度一般约为 17~18.8 g/cm³。钨含量、材料致密度及合金组织均会影响辐射衰减能力。通常而言，在其他条件相近时，较高的钨含量和较高的材料密度有利于在有限空间内获得更高的屏蔽效果。

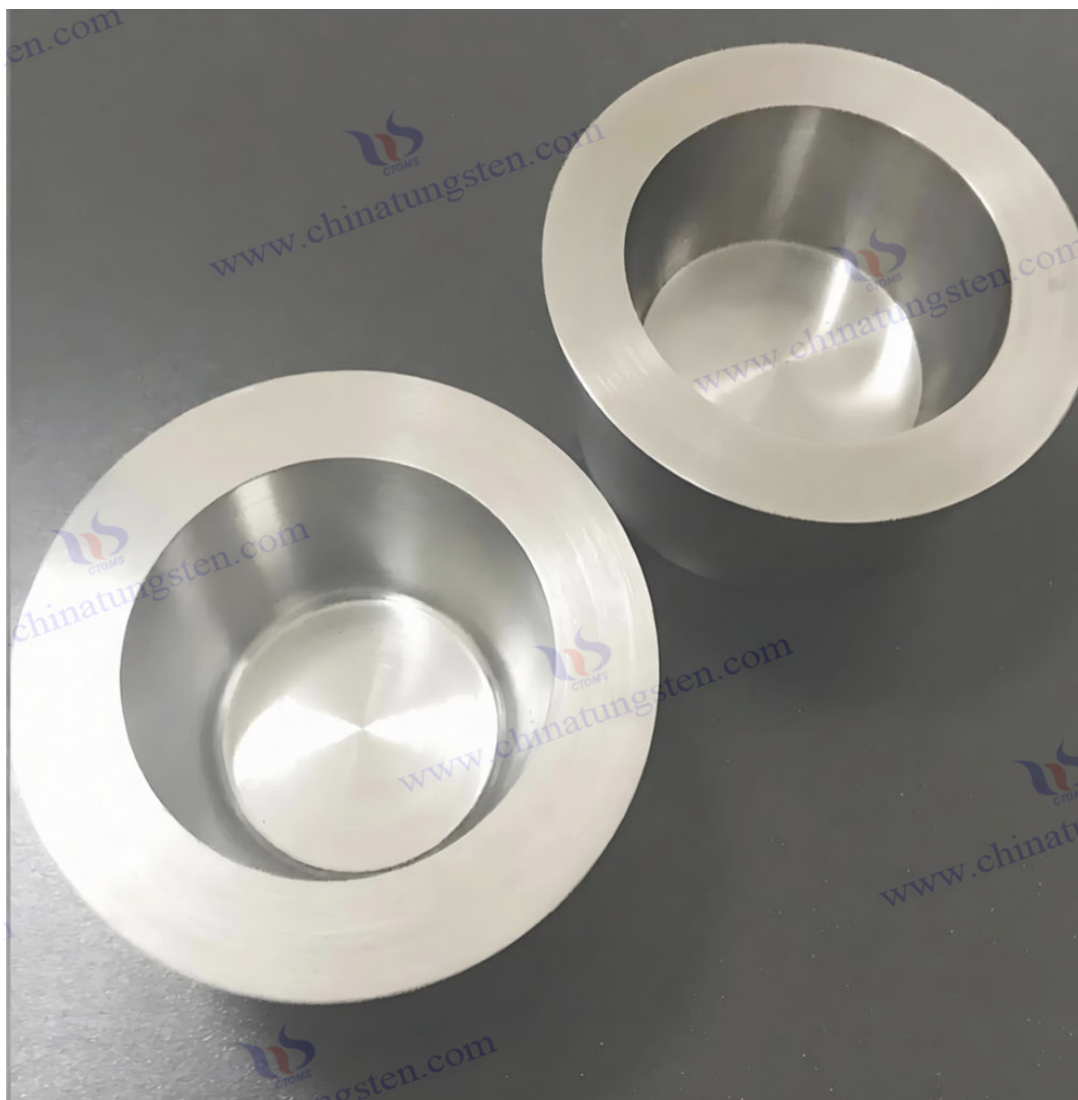
与普通钨板、钨棒等材料产品相比，钨合金屏蔽件通常属于经过结构设计和精密加工后的功能零件，可以制造成屏蔽块、屏蔽环、屏蔽套、准直器、放射源容器、注射器屏蔽套，以及各种带孔、槽、锥孔和复杂曲面的异形件。因此，它不仅承担辐射衰减功能，还可以同时承担定位、支撑、准直、密封和机械防护等作用。

钨合金屏蔽件广泛应用于医疗 X 射线和 CT 设备、放射治疗设备、核医学、放射性药物操



作、工业 γ 射线探伤、科研仪器及核工业等领域。与传统铅屏蔽材料相比，钨合金具有密度高、机械强度较高、耐磨性好、耐高温性能优良等特点，并能够通过机械加工制成尺寸紧凑、结构复杂和精度较高的屏蔽组件，因此尤其适合空间受限、机械载荷较高以及对尺寸精度有严格要求的应用场景。

钨合金屏蔽件的实际屏蔽能力不能单独以钨含量或密度作为判断依据，而应结合辐射类型、光子能量、屏蔽厚度、材料密度、射线入射方向以及目标衰减率进行综合设计。例如，医用 X 射线设备的能谱与 Cs-137、Co-60 等放射性同位素产生的 γ 射线存在明显差异，相应的屏蔽厚度和结构设计也会不同。专业屏蔽件通常需要根据具体工况确定 HVL（半值层）、TVL（十分之一值层）、透射率、衰减倍数或铅当量等关键参数。





2. 钨合金为什么可以屏蔽 X 射线和 γ 射线？

钨合金之所以能够有效屏蔽 X 射线和 γ 射线，本质上是因为它同时具备高原子序数、高密度和较高电子数密度等特点。当高能光子进入钨合金后，会与材料中的原子和电子发生光电吸收、康普顿散射以及电子对效应等相互作用，使光子发生吸收、偏转或能量转移，从而降低穿透材料后的光子通量和辐射剂量。NIST 的 XCOM 数据库正是通过计算光电吸收、康普顿散射、电子对产生及总衰减截面，对 1 keV 至 100 GeV 范围内不同材料的光子衰减行为进行定量描述。

（1）高原子序数是钨具有优良光子屏蔽能力的重要原因

钨的原子序数 $Z=74$ ，远高于铁 $Z=26$ 、铜 $Z=29$ ，也高于铅 $Z=82$ 附近的屏蔽体系所依赖的高 Z 特性。对于 X 射线和较低能量 γ 射线，光电效应是非常重要的能量沉积机制。光子将能量传递给原子内层电子，使电子逸出，同时产生特征 X 射线和俄歇电子；这些二次粒子又可能在材料内部进一步沉积能量。

光电效应对原子序数具有非常强的依赖性，其概率在一定能区内通常可近似表现为随 Z 的较高次幂快速增加。因此，高 Z 材料在低能及中低能 X 射线屏蔽领域通常具有明显优势。不过，不能简单地理解为 Z 越高，在所有能量范围内屏蔽能力就一定越强，因为实际衰减还受到光子能量、材料密度、吸收边以及不同相互作用机制共同影响。NIST 的质量衰减系数数据库明确显示，光子能量从 1 keV 到 20 MeV 时，不同元素的衰减系数存在明显的能量依赖性和吸收边结构。

（2）高密度使钨合金能够在较小厚度内形成较大的衰减能力

对于工程屏蔽而言，仅仅考察原子序数是不够的，更重要的指标是线性衰减系数 μ 。光子穿过均匀材料后的理想窄束衰减关系可以表示为：

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

其中 I_0 为入射光子强度， I 为穿透后的光子强度， μ 为线性衰减系数，单位通常为 cm^{-1} ， x 为屏蔽材料厚度。常见高密度钨重合金的密度大约可达到 $17 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ ，具体取决于钨含量、粘结相组成和烧结致密度。对于相同材料组成及相同光子能量而言，材料密度越高，单位厚度内所包含的原子和电子数量越多，光子发生相互作用的概率越大。因此，高密度钨合金可以通过较小的几何厚度获得较高的光子衰减能力。这也是钨合金特别适合医疗设备、工业探伤设备、核医学设备以及空间受限的精密屏蔽组件的重要原因。

（3）X 射线和 γ 射线进入钨合金后，并不是简单地被一次性吸收

专业上更准确的说法应该是光子被材料衰减，而不是所有 X 射线或 γ 射线被一次性吸收。主要机制包括：

相互作用机制	主要特征	对屏蔽的作用
光电效应	光子被原子吸收并释放电子	强吸收、降低初级光子通量
康普顿散射	光子与电子碰撞后改变方向并降低能量	降低原光子能量，同时产生散射辐射
电子对产生	高能光子转化为电子—正电子对	在 高能 γ 射线区逐渐重要
相干散射	光子改变传播方向但能量变化较小	对低能光子有一定贡献



因此, 钨合金屏蔽件实际上是通过多种相互作用共同降低辐射穿透率。

(4) 为什么高能 γ 射线不能只靠高 Z 解释?

这是钨合金屏蔽设计中非常重要的一点。

随着光子能量提高, 光电效应的相对贡献逐渐下降, 康普顿散射在中等能区变得重要; 当能量达到电子对产生阈值以上, 即 1.022 MeV, 电子对产生开始成为可能, 并在更高能区逐渐增强。因此, 对于 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{192}Ir 等放射源产生的 γ 射线, 不能只依据钨的原子序数判断屏蔽效果, 而必须根据实际光子能谱计算材料的质量衰减系数、线性衰减系数、HVL、TVL 以及最终的透射率。NIST XCOM 可以针对具体光子能量计算光电吸收、康普顿散射、电子对产生以及总衰减系数, 因此是工程屏蔽计算的重要基础数据来源。

(5) 钨合金的高密度和高 Z 需要同时考虑

钨合金屏蔽性能实际上可以理解为两个核心因素的共同作用:

高 Z $\rightarrow$ 提供较强的光子相互作用能力; 高密度 $\rightarrow$ 在单位厚度内提供更多的原子和电子。因此, 工程设计不能单纯用钨含量来判断屏蔽能力。例如 90W、93W、95W、97W 等不同钨含量的钨重合金, 其密度和基体组成不同, 最终的 μ/ρ 、 μ 、HVL 和 TVL 也会有所差异。

对于同一能量的 γ 射线, HVL 可以表示为: $\text{HVL} = \frac{\ln 2}{\mu}$, 而 TVL 为: $\text{TVL} = \frac{\ln 10}{\mu}$ 。所以,

只要确定具体材料在目标光子能量下的线性衰减系数 μ , 就可以进一步计算达到 50% 或 90% 衰减所需的理论材料厚度。

(6) 为什么钨合金适合制造精密屏蔽件, 而不仅仅是屏蔽板?

钨合金真正具有工程价值的地方, 并不只是它能够衰减 X 射线和 γ 射线, 而是它能够同时承担屏蔽、结构支撑和精密定位功能。传统铅具有较高密度和良好的光子屏蔽能力, 但其机械强度和耐高温性能有限, 在精密准直器、屏蔽环、屏蔽套、准直孔、医疗设备内部结构件以及工业射线源组件中, 往往需要更加坚固、耐磨并能够进行精密加工的材料。

钨重合金则可以兼顾约 17~19 g/cm³ 级别的高密度与较好的机械强度、尺寸稳定性及可加工性, 因此可以制造小型化、复杂孔道和高精度几何结构。例如医疗核医学中的注射器屏蔽套、放射源屏蔽容器、准直器、屏蔽环, 以及工业 γ 射线探伤设备中的源容器和准直组件, 都属于典型应用。

(7) 为什么不能说钨合金比铅的屏蔽能力高多少倍?

这是专业技术交流中最容易产生误解的问题。钨合金与铅的屏蔽性能比较必须同时确定光子能量、材料密度、材料成分、屏蔽厚度、几何结构、散射条件以及目标衰减率。对于不同能量区间, 光电效应、康普顿散射和电子对产生所占比例不同, 因此两种材料之间不存在一个适用于所有 X 射线和 γ 射线能区的固定倍数关系。对于实际产品设计, 更合理的指标应该是即直接计算目标材料、目标能量和目标厚度下的透射率 T, 然后进一步确定 HVL、TVL、铅当量或所需屏蔽厚度。

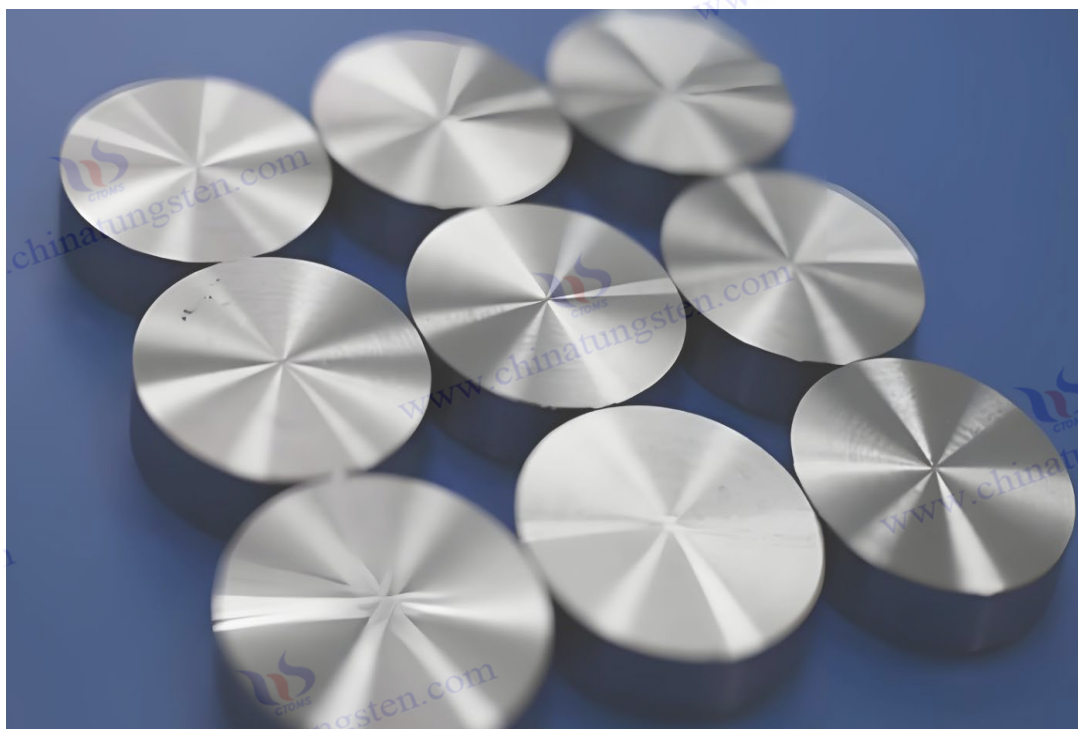


(8) 对钨合金屏蔽件设计而言，真正需要客户提供什么？

如果委托中钨智造这类专业钨合金屏蔽件定制，客户最好不要只提供一句需要多少毫米厚的钨合金，而应至少提供射线类型、设备或放射源型号、光子能量或能谱、源强/活度/剂量率、目标衰减率或允许剂量、源与屏蔽件及人员之间的距离、屏蔽件允许尺寸、工作温度、真空或空气环境，以及屏蔽件的结构图纸。

对于医学 X 射线，还应尽可能提供管电压 kVp、管电流 mA、过滤条件及设备类型；对于核医学和工业探伤，则应提供具体放射性核素，例如 Cs-137、Co-60、Ir-192、Se-75 等。因此，钨合金屏蔽件不是简单的材料采购，而是一个典型的材料—辐射—结构耦合设计问题。NIST 已提供覆盖 1 keV~20 MeV 的质量衰减系数数据，而 XCOM 的计算范围进一步扩展至 100 GeV，可用于建立具体材料和能量条件下的光子衰减基础数据。

从工程角度看，钨合金之所以能够有效屏蔽 X 射线和 γ 射线，可以归纳为：高 Z 带来的较强光子相互作用能力、高密度带来的较大线性衰减系数，以及良好的机械性能使其能够制造高密度、小型化、复杂结构和高精度屏蔽组件。真正专业的屏蔽设计，则必须从具体光子能量和目标剂量出发，通过质量衰减系数、线性衰减系数、HVL、TVL 及必要的蒙特卡洛模拟或实测验证确定最终结构，而不能仅凭材料名称或钨含量直接确定屏蔽厚度。





3. 钨合金可以屏蔽哪些类型的辐射？

钨合金属于典型的高密度、高原子序数屏蔽材料，最成熟、最主要的应用对象是 X 射线和 γ 射线。其核心作用不是简单地将辐射完全阻挡，而是利用高密度和高原子序数材料与辐射粒子之间的相互作用，使入射辐射发生吸收、散射、能量转移或次级粒子产生，从而降低穿透屏蔽体后的辐射强度。

但钨合金并不是一种对所有辐射都同样有效的通用屏蔽材料。不同辐射的物理机制差别很大，因此在设计钨合金屏蔽件时，必须首先明确辐射类型、能量范围、源强、目标衰减率和使用几何条件。对于 X 射线、 γ 射线、 β 粒子、中子、 α 粒子以及高能电子、质子等辐射，钨合金的适用性和设计方法并不相同。

(1) X 射线 钨合金最典型的应用领域之一

钨合金对 X 射线具有良好的衰减能力，特别适合用于高能量密度、空间受限以及要求机械强度的屏蔽结构。X 射线本质上是光子辐射，其能量通常从 keV 级延伸至更高能区。在较低和中等能量范围内，光电效应具有重要作用；随着能量升高，康普顿散射的贡献逐渐增加。因此，钨合金的高原子序数和高密度能够有效降低 X 射线的穿透强度。

医疗领域中常见的应用包括 X 射线机、CT、数字影像设备、介入设备及其他诊断设备中的局部屏蔽件、准直器、探测器周边屏蔽组件等。对于 X 射线屏蔽，不能简单使用一个固定厚度。例如 60 kVp、100 kVp、120 kVp 和 150 kVp X 射线设备的能谱不同，即使设备名称相同，其实际屏蔽需求也可能存在较大差异。工程设计通常应根据管电压、过滤条件、工作距离、剂量率和目标透射率进行计算。

(2) γ 射线 钨合金的重要应用方向

γ 射线同样属于高能光子辐射，但与普通诊断 X 射线相比，其能量通常更高，因此屏蔽设计更加依赖具体放射源的能谱。常见工业和医疗放射源包括：

放射源	典型 γ 射线能量特征	典型应用
Cs-137	约 662 keV	工业、校准、核医学等
Co-60	约 1.17、1.33 MeV	工业探伤、辐照、科研
Ir-192	多条 γ 射线，约数百 keV 级	工业无损检测
Se-75	数十至数百 keV 级多能谱	工业探伤
F-18 等核医学核素	511 keV 湮没光子	PET 及相关设备

对于这些放射源，钨合金可以制造放射源容器、屏蔽套、屏蔽环、准直器、源组件及局部防护结构。对于 γ 射线，设计时通常需要计算线性衰减系数 μ ，并根据计算不同厚度下的理论透射率。如果要求达到特定衰减倍数，还可以使用半值层 HVL 和十分之一值层 TVL 进行工程设计，但实际厚度设计还需要考虑散射辐射、建筑结构、源的几何形状以及宽束条件，不能直接用理想窄束公式替代最终安全设计。

(3) β 射线 可以屏蔽，但设计原则与 X/ γ 射线不同

β 射线主要由高速电子或正电子构成，与 X 射线和 γ 射线不同，它属于带电粒子辐射。



钨合金本身可以阻挡和减弱 β 粒子, 但由于钨具有较高原子序数, β 粒子在高速减速过程中可能产生较强的制动辐射。因此, 如果直接使用厚钨材料屏蔽高能 β 射线, 可能产生新的 X 射线制动辐射。这意味着 β 射线屏蔽通常不能简单理解为钨合金越厚越好, 而需要根据 β 粒子的最大能量、平均能量以及材料原子序数合理设计。在某些工程场景中, 更合理的结构可能采用低 Z 材料作为一级 β 粒子屏蔽, 再配合高 Z 材料吸收后续产生的制动辐射。因此, 对于 β 射线, 钨合金可以使用, 但通常需要进行多层材料组合设计, 而不是单独依赖钨合金。

(4) α 射线 理论上可以屏蔽, 但通常没有必要使用钨合金

α 粒子主要是氦-4 原子核, 具有较大的质量和 +2 电荷, 与物质相互作用非常强, 在空气中的射程通常较短。因此, α 粒子的穿透能力远低于 X 射线和 γ 射线, 一般很薄的材料、空气层甚至普通防护层即可有效阻挡。从工程经济性来看, 没有必要为了阻挡 α 粒子而专门使用高密度钨合金。对于含 α 放射性物质的防护, 真正需要关注的往往是放射性污染、粉尘吸入、表面污染以及 α 粒子产生的次级辐射等问题。所以可以说, 钨合金能够阻挡 α 粒子, 但这并不是钨合金屏蔽材料的主要应用价值。

(5) 中子辐射 钨合金不是理想的单一屏蔽材料

这是钨合金屏蔽应用中尤其需要区分的一类。中子不带电, 与材料的相互作用主要依靠核反应和核散射, 而不是光电效应或康普顿散射。

因此, 适用于 X/ γ 射线的高 Z、高密度设计原则, 并不能直接用于中子屏蔽。中子屏蔽通常需要考虑快中子减速、热中子吸收以及次级 γ 射线控制。工程上常采用富氢材料进行快中子减速, 再利用含硼、锂等元素的材料吸收慢化后的中子, 并根据具体场景增加高 Z 材料控制俘获 γ 射线。因此, 如果客户提出钨合金用于中子屏蔽, 应进一步确认中子能谱、通量、剂量率以及是否同时存在 γ 射线, 而不能直接按照 X 射线或 γ 射线的屏蔽厚度进行设计。

(6) 高能电子 钨合金可以产生明显衰减, 但需要考虑制动辐射

对于高能电子束, 钨合金能够通过电子与原子核、电子之间的相互作用使电子快速损失能量。

但是, 与 β 射线类似, 高 Z 钨材料会使高能电子产生明显的制动辐射。因此, 在电子束、电子加速器和高能电子设备中, 屏蔽设计通常必须同时考虑电子本身的能量损失、制动辐射、次级光子以及材料厚度。这类场景往往需要通过蒙特卡洛方法进行详细模拟, 而不能单纯根据材料密度估算。

(7) 质子和其他带电粒子 可以参与屏蔽, 但不是常规首选方案

对于高能质子、重离子等带电粒子, 钨合金同样能够产生能量损失和粒子散射。但是, 这类辐射的屏蔽机制涉及电离损失、核碰撞、次级粒子产生等复杂过程。特别是在高能加速器、质子治疗和空间辐射环境中, 高 Z 材料可能产生大量次级辐射。因此, 在质子、重离子和宇宙射线屏蔽中, 通常需要根据具体粒子能量、通量和次级粒子谱进行专门材料组合和数值模拟, 不能简单理解为高密度钨合金一定是最佳材料。



(8) 不同辐射类型与钨合金适用性的综合判断

辐射类型	钨合金适用性	主要屏蔽机制	工程应用建议
X 射线	★★★★★	光电效应、康普顿散射等	非常适合
γ 射线	★★★★★	康普顿散射、光电效应、电子对产生	非常适合
β 射线	★★★	电子能量损失、制动辐射	需考虑次级 X 射线
α 射线	★	强电离、短射程	通常无需使用钨合金
中子	★	核散射、核反应	不建议单独使用
高能电子	★★★	电离损失、制动辐射	需专门设计
质子	★★~★★★★	电离、核相互作用	需根据能量模拟
重离子/宇宙辐射	★★	核相互作用、次级粒子	通常采用复合屏蔽

因此, 如果从实际工业和医疗市场来看, 钨合金屏蔽件最成熟的目标辐射仍然是 X 射线和 γ 射线。其中, X 射线主要对应医疗影像、CT 及相关设备, γ 射线则主要对应核医学、放射源、工业无损检测和科研设备。

(9) 钨合金能否同时屏蔽多种辐射?

可以, 这是复合辐射场屏蔽问题。例如一个核医学设备可能同时存在 γ 射线和 β 粒子; 工业探伤设备可能存在 γ 射线以及由高能电子或散射过程产生的次级光子; 加速器环境则可能同时存在 X 射线、γ 射线、中子、电子和其他次级粒子。这种情况下不能简单地指定一个钨合金厚度, 而应建立完整的辐射场模型。例如: 实际设计需要分别计算不同辐射成分的贡献, 再确定材料组合和几何结构。对于同时存在中子和 γ 射线的环境, 常见思路是采用慢化材料、吸收材料与高 Z 屏蔽材料组合, 而不是单独增加钨合金厚度。

(10) 钨合金屏蔽能力不能只看钨含量

实际采购钨合金屏蔽件时, 一个常见误区是认为钨含量越高, 屏蔽性能就一定按照比例提高。

实际上, 屏蔽效果至少同时受到材料密度、钨含量、合金组成、致密度、光子能量、屏蔽厚度和几何条件影响。例如常见 90W、93W、95W、97W 钨重合金虽然均属于高密度钨合金, 但它们的密度、粘结相组成和质量衰减特性存在差异。

对于实际屏蔽设计, 更应该关注具体能量下的质量衰减系数 μ/ρ 和线性衰减系数 μ , 而不是单独比较钨含量。因此, 专业的钨合金屏蔽件询价应至少提供以下参数: 辐射类型、射线源或设备型号、光子能量/能谱、源强或剂量率、目标衰减率、允许透射剂量、源与屏蔽件之间的距离、屏蔽件空间限制、工作温度以及结构图纸。

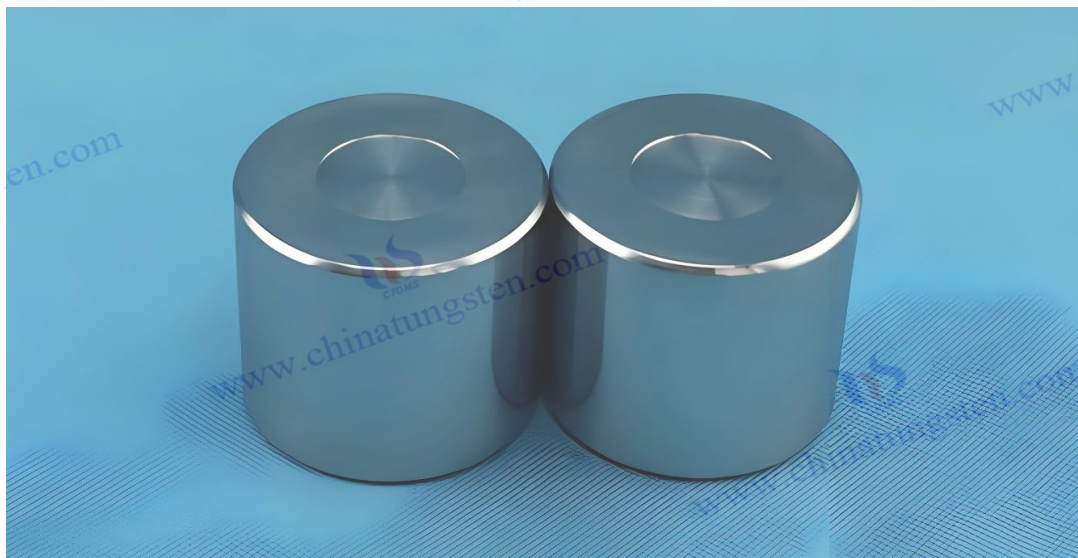
对于 X 射线设备, 还应尽可能提供 kVp、mA、过滤条件和曝光工况; 对于 γ 射线, 应提供 Cs-137、Co-60、Ir-192、Se-75 等具体核素; 对于中子, 则应提供中子能谱和通量等数据。

总的来说, 钨合金最适合用于 X 射线和 γ 射线屏蔽, 其核心优势来自高原子序数与高密度形成的较高光子衰减能力, 同时兼具较高机械强度、耐磨性、尺寸稳定性和精密加工能力, 因此特别适合制造准直器、屏蔽环、屏蔽套、放射源容器、探测器屏蔽件及其他空间受限的高精度屏蔽组件。而对于 β 射线、高能电子、中子、质子和重离子等辐射, 钨合金并非不能使用, 而是必须根据具体辐射机制重新进行设计。尤其是中子屏蔽, 通常需要



采用富氢材料、含硼材料以及高 Z 材料的组合结构；对于高能电子和 β 射线，则必须重点考虑高 Z 材料产生的制动辐射。

从专业工程角度看，钨合金不是简单的万能辐射屏蔽材料，而是非常优秀的高密度光子屏蔽材料。对中钨智造（CTIA GROUP）而言，真正具有技术和采购价值的是进一步建立不同 X/ γ 射线能量下的钨合金屏蔽厚度、HVL、TVL、铅当量、90W/93W/95W/97W 性能对比数据库，并结合客户实际源强和目标衰减率进行屏蔽件结构设计。



4. 钨合金屏蔽件的密度是多少？

钨合金屏蔽件的密度并不是一个固定值，而是由钨含量、粘结相组成、粉末冶金工艺以及最终致密度共同决定。对于目前工程应用最广泛的钨重合金（Tungsten Heavy Alloy, WHA）而言，其核心优势之一就是接近纯钨的高密度，同时兼具较好的韧性、机械加工性能和抗冲击能力，因此特别适合制作 X 射线、 γ 射线屏蔽件、准直器、屏蔽套、屏蔽环及放射源容器等高密度防护结构。

（1）钨合金屏蔽件的典型密度范围

常见钨重合金主要采用 W-Ni-Fe 或 W-Ni-Cu 体系，通过提高钨含量获得高密度特性。工程上常见的钨含量约为 90~97 wt.% W，对应理论密度通常约为 17~19 g/cm³。

钨含量	典型密度范围	工程特点	常见应用
90% W	约 16.8~17.2 g/cm ³	成本较低、韧性和加工性较好	一般配重、普通屏蔽件
92.5% W	约 17.3~17.7 g/cm ³	密度与加工性能平衡	医疗屏蔽、工业防护
95% W	约 17.8~18.2 g/cm ³	高密度、综合性能较好	准直器、屏蔽套、精密防护
97% W	约 18.3~18.7 g/cm ³	更高面密度和屏蔽能力	高端医疗、核工业、精密屏蔽
97.5~98% W 及以上	可接近 19 g/cm ³	高密度、高屏蔽能力	特殊高端屏蔽及配重

上述数值属于工程上常见的典型范围，而不是所有产品的统一标准。不同制造商采用的 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 配方不同，Ni、Fe、Cu 等粘结相比比例不同，烧结致密度不同，最终实



测密度也会存在差异。

（2）为什么钨含量越高，密度通常越高？

钨的理论密度约为 19.25 g/cm^3 ，明显高于镍、铁、铜等多数钨重合金粘结相。因此，在其他条件基本相同的情况下，提高合金中的钨质量分数，通常能够提高材料整体密度。例如，90W 钨重合金的密度一般约为 17 g/cm^3 ，而 95W 产品可以达到约 18 g/cm^3 ，97W 产品则可进一步接近 $18.5 \sim 19 \text{ g/cm}^3$ 。这种差异对于辐射屏蔽具有直接意义。

屏蔽设计真正重要的并不是材料的体积密度本身，而是单位面积上的材料质量，即面密度：

$$\rho_s = \rho \cdot t$$

其中， ρ_s 为面密度，单位通常为 g/cm^2 ； ρ 为材料密度，单位为 g/cm^3 ； t 为屏蔽厚度，单位为 cm 。例如，同样采用 10 mm 厚的屏蔽件：90W 材料、 $\rho = 17.1 \text{ g/cm}^3$ 时，其面密度约为：

$$\rho_s = 17.1 \times 1.0 = 17.1 \text{ g/cm}^2$$

而 97W 材料、 $\rho = 18.5 \text{ g/cm}^3$ 时： $\rho_s = 18.5 \times 1.0 = 18.5 \text{ g/cm}^2$

在材料厚度相同的情况下，97W 产品能够提供更高的单位面积材料质量，这通常有利于提高光子辐射衰减能力。

（3）钨合金密度与纯钨有什么区别？

纯钨的理论密度约为 19.25 g/cm^3 ，因此从绝对密度来看，绝大多数钨重合金都低于纯钨。但是，屏蔽件并不一定采用纯钨。原因在于纯钨虽然具有非常高的密度和优良的高温性能，但其室温塑韧性、加工难度以及复杂零件制造能力存在一定限制。W-Ni-Fe 等钨重合金通过引入延性粘结相，使材料具有更好的韧性和抗冲击性能，同时可以采用粉末冶金、机加工等工艺制造复杂结构。因此，在实际工程中，钨重合金往往能够在高密度、机械强度、韧性和可加工性之间取得更好的平衡。从典型数值来看：

材料	理论或典型密度
钢	约 7.8 g/cm^3
铅	约 11.34 g/cm^3
90W 钨重合金	约 17 g/cm^3
95W 钨重合金	约 18 g/cm^3
97W 钨重合金	约 $18.3 \sim 18.7 \text{ g/cm}^3$
纯钨	约 19.25 g/cm^3

因此，钨合金的密度通常约为钢的 2.2~2.4 倍、铅的 1.5~1.7 倍，这也是其能够在较小体积内获得较高屏蔽能力的重要原因。

（4）密度越高，钨合金屏蔽性能一定越好吗？



对于 X 射线和 γ 射线这类高能光子，材料密度确实是影响衰减能力的重要参数，但实际屏蔽性能还取决于光子能量、材料组成、屏蔽厚度、原子序数以及几何结构等因素。在理想窄束条件下，可以使用指数衰减关系描述： $I = I_0 e^{-\mu t}$

其中， I_0 是入射光子强度， I 是透射光子强度， μ 是线性衰减系数， t 是材料厚度。而线性衰减系数 μ 与质量衰减系数 μ_m 之间存在： $\mu = \mu_m \cdot \rho$

其中， ρ 为材料密度。因此，提高密度通常能够提高线性衰减能力。但是，质量衰减系数 μ_m 又受到光子能量和材料元素组成影响。因此，不能仅凭 17.0 g/cm^3 和 18.5 g/cm^3 两个密度数值，就直接得出一个固定的屏蔽倍数。特别是在不同能量范围内，光电吸收、康普顿散射以及电子对效应的相对贡献不同，钨基材料与铅等材料的屏蔽性能差异也会随能量发生变化。

(5) 为什么屏蔽件特别关注密度均匀性？

对于真正的医疗、核工业和工业射线防护零件，平均密度只是第一项指标，密度均匀性同样重要。钨合金屏蔽件通常采用粉末冶金工艺制造，包括粉末混合、压制、烧结以及后续机械加工。在大尺寸零件或者复杂结构零件中，如果烧结过程中存在孔隙、密度梯度、局部组织异常等问题，即使产品平均密度达到 18 g/cm^3 以上，局部区域仍可能形成屏蔽薄弱点。对于准直器、放射源屏蔽容器、CT/X 射线防护组件等产品，这一点尤其重要。因为实际屏蔽效果取决于射线穿过的最小有效材料厚度，而不是简单的产品平均密度。因此，高端钨合金屏蔽件通常需要关注材料实际密度、密度均匀性、孔隙率、钨含量、合金元素比例、内部缺陷以及批次稳定性。

(6) 如何检测钨合金屏蔽件的密度？

工业生产中通常可以采用阿基米德排水法测定表观密度，其基本关系为： $\rho = \frac{m}{V}$ ，其中，

m 为试样在空气中的质量， V 为试样排开水的体积（即试样表观体积）。对于高密度钨

合金，还可以根据产品形状采用几何尺寸与质量计算密度： $\rho = \frac{m}{V}$ 。如果是规则圆柱形钨

合金棒： $V = \pi r^2 h = \frac{\pi d^2}{4} h$ ，因此： $\rho = \frac{m}{\pi r^2 h} = \frac{4m}{\pi d^2 h}$ ，式中， d 为圆柱直径， h 为圆柱

高度（或长度）， m 为质量。对于医疗屏蔽件、准直器等复杂 CNC 加工零件，仅依靠外形尺寸计算可能存在误差，还需要结合实际质量、体积测量以及必要的材料检测进行确认。对于高要求产品，客户还可能要求提供材料检测报告、密度检测记录、化学成分报告、硬度报告、金相组织以及无损检测资料，以验证材料不仅达到规定密度，而且具有稳定的内部质量。



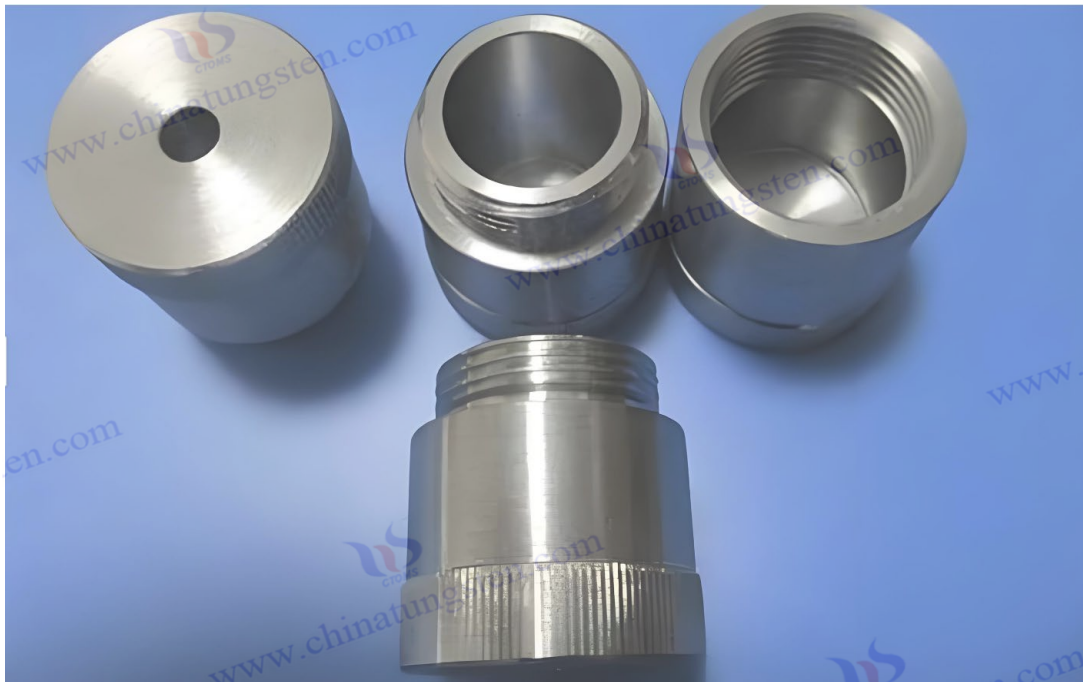
(7) 钨合金屏蔽件采购时应该要求多少密度?

不能脱离具体牌号和用途直接指定一个统一数值。如果是普通工业屏蔽件, 可以根据空间限制、射线能量和成本要求选择 90W~95W 等级; 如果空间非常有限, 要求更高面密度, 则可以考虑 95W~97W 甚至更高钨含量体系。对于专业采购而言, 更合理的技术要求通常不是单独写成密度 $\geq 18 \text{ g/cm}^3$, 而是同时规定材料牌号或钨含量、密度范围、密度均匀性、尺寸公差、内部缺陷要求、表面质量以及必要的检测项目。例如, 可以提出类似: W-Ni-Fe 钨重合金, W 含量 95 wt.% nominal, 密度 $\geq 17.8 \text{ g/cm}^3$, 具体性能按照双方确认的材料技术规范执行。这样比单纯要求高密度更加专业, 因为材料密度最终必须与合金成分、机械性能、加工性能和实际屏蔽设计相匹配。

(8) 密度对于钨合金屏蔽件设计究竟意味着什么?

从工程设计角度来看, 钨合金高密度的核心价值并不是简单地让材料更重, 而是在有限空间内获得更高的面密度。例如, 医疗设备、核医学设备、工业探伤设备和精密仪器内部通常存在严格的空间限制。如果采用低密度材料实现相同衰减水平, 可能需要增加屏蔽厚度, 从而导致设备体积、重量和结构尺寸增加。钨合金则可以利用约 $17 \sim 19 \text{ g/cm}^3$ 的高密度, 在较小体积内实现较高的辐射衰减能力, 同时保持良好的机械强度和加工能力。因此, 它特别适合制造钨合金准直器、钨合金屏蔽环、钨合金注射器屏蔽套、放射源屏蔽容器、探伤设备屏蔽件以及医疗设备局部防护组件。

钨合金屏蔽件的设计不能简单依据材料密度确定厚度。专业设计应至少综合考虑射线种类、光子能量或 X 射线管电压、源强或剂量率、目标透射率、HVL/TVL、屏蔽距离、散射辐射、几何结构、材料实际密度以及允许尺寸等参数。因此, $17 \sim 19 \text{ g/cm}^3$ 可以作为钨重合金屏蔽材料的典型密度区间, 但真正决定一个屏蔽件是否合格的, 是材料密度与射线能量、厚度、结构设计及检测验证之间的完整匹配, 而不是单独追求一个尽可能高的密度数值。



5. 钨合金和铅哪个屏蔽效果更好？

钨合金与铅都属于高密度、高原子序数材料，因此都具有优良的 X 射线和 γ 射线屏蔽能力。但不能简单地说哪一种材料在所有条件下都更好。真正的比较必须同时考虑光子能量、材料密度、屏蔽厚度、目标衰减率、几何结构以及机械和环境要求。

（1）从材料本身看，铅的屏蔽效率非常高

铅的原子序数为 $Z=82$ 、密度约 11.34 g/cm^3 ；典型钨重合金的密度约为 $17.0 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ ，钨本身的原子序数为 $Z=74$ 。因此，铅在低能 X 射线范围内具有非常强的光电吸收能力，而钨合金则依靠更高的材料密度和较大的面密度，在实际工程结构中形成很强的射线衰减能力。

对于光子屏蔽而言，不能单纯按照原子序数判断性能。其基本关系可以表示为： $I = I_0 e^{-\mu x}$

其中 I_0 为入射强度， I 为穿透后的强度， μ 为材料的线性衰减系数， x 为屏蔽厚度。

因此，同一种材料在不同光子能量下，其屏蔽能力会发生显著变化。尤其对于 γ 射线，随着能量由几十 keV 提升至数百 keV、MeV 级，光电效应的重要性下降，而康普顿散射逐渐占据主导地位，此时材料密度和电子密度对实际屏蔽效果的影响更加突出。

（2）如果只比较 X 射线低能区，铅通常具有非常强的经济性

在医用诊断 X 射线、工业低能 X 射线等相对较低能量范围内，铅已形成非常成熟的屏蔽体系，例如铅板、铅玻璃、铅橡胶和铅砖等。铅最大的优势并非单纯屏蔽性能，而是价格低、加工容易、供应成熟。因此，对于建筑墙体、X 射线机房、固定式防护屏等对重量和尺寸要求不特别苛刻的场合，铅仍然是极具竞争力的选择。但铅的密度只有约 11.34 g/cm^3 ，当屏蔽结构需要在非常有限的空间内实现高衰减率时，材料厚度和总体积会逐渐



成为限制因素。

（3）钨合金最大的优势是高密度与机械性能兼具

典型高密度钨重合金密度可以达到约 $17\sim 18.8\text{ g/cm}^3$ ，明显高于铅。对于相同体积的屏蔽件，钨合金可以提供更高的面密度，从而特别适合小型化、局部屏蔽和复杂精密屏蔽结构。例如，医疗设备中的准直器、放射性药物注射器屏蔽套、屏蔽环、屏蔽座、放射源屏蔽组件，以及工业探伤设备中的射线源准直器等，往往不能简单地使用大体积铅块解决问题。此时钨合金的高密度、机械强度、尺寸稳定性和可加工性就具有明显优势。

项目	钨重合金	铅
典型密度	约 $17\sim 18.8\text{ g/cm}^3$	约 11.34 g/cm^3
原子序数	W: 74	Pb: 82
低能 X 射线屏蔽	优良	非常优良
γ 射线屏蔽	优良	优良
单位体积质量	高	较低
机械强度	明显高于铅	较低
耐高温性能	优异	较差
尺寸稳定性	较好	相对较差
精密 CNC 加工	可加工复杂结构	相对容易，但材料较软
小型化屏蔽件	非常适合	受体积和结构限制
成本	较高	较低
环境与职业健康	不具有铅的典型毒性问题	存在铅毒性管理要求

（4）如果比较高能 γ 射线，则必须采用 HVL、TVL 等工程参数

对于 γ 射线屏蔽，最专业的比较方式不是简单地说“钨合金优于铅”，而是比较特定能量下的半值层（HVL）、十分之一值层（TVL）、线性衰减系数 μ 、质量衰减系数 μ/ρ ，以及所需屏蔽厚度。HVL 是使射线强度降低到原来的 50% 所需要的材料厚度，其与线性衰减系数的关系为：
$$\text{HVL} = \frac{\ln 2}{\mu}$$
，TVL 则是使射线强度降低至原来的 10% 所需要的厚度，

其表达式为：
$$\text{TVL} = \frac{\ln 10}{\mu}$$
。对于 Cs-137 的 662 keV γ 射线、Co-60 的约 1.17 MeV 和 1.33

MeV γ 射线，以及 Ir-192 的多能谱 γ 射线，其屏蔽设计结果均不同。因此，客户如果询问钨合金能否替代某厚度铅板，不能简单按照密度比例进行换算。例如不能直接认为 10 mm 铅等效于 $10 \times 11.34 / 18\text{ mm}$ 的钨合金。实际铅当量必须根据具体射线能量和衰减要求，通过 μ 、HVL、TVL 或经验证的屏蔽数据库进行计算。



（5）钨合金在机械结构方面通常明显优于铅

这是钨合金在专业屏蔽件领域非常重要、甚至比单纯射线衰减性能更有价值的优势。铅比较软，容易发生划伤、压痕、塑性变形和长期蠕变。当屏蔽件需要承受装配压力、反复运动、冲击、振动或者精密定位时，铅的机械性能会成为限制因素。钨重合金则具有更高的硬度、强度和刚性，可以制造带有内孔、阶梯、槽、螺纹、准直孔和复杂曲面的精密屏蔽零件。因此，在医疗影像设备、放疗设备、核医学设备、工业探伤设备和科研仪器中，钨合金往往不是简单作为一块屏蔽板，而是作为具有结构功能的精密工程部件。

（6）高温环境下，钨合金的优势更加明显

铅熔点约为 327.5 °C，因此其使用温度受到明显限制。而钨熔点达到约 3422 °C，钨基高密度合金也具有远高于铅的高温稳定性。对于高温射线源、真空设备、等离子设备、核工业装备以及需要同时承受热负荷和辐射的特殊结构而言，钨合金显然更加合适。尤其当屏蔽件同时承担支撑、定位、准直和耐热功能时，铅通常很难满足要求。

（7）钨合金并不意味着在所有射线能量下都绝对优于铅

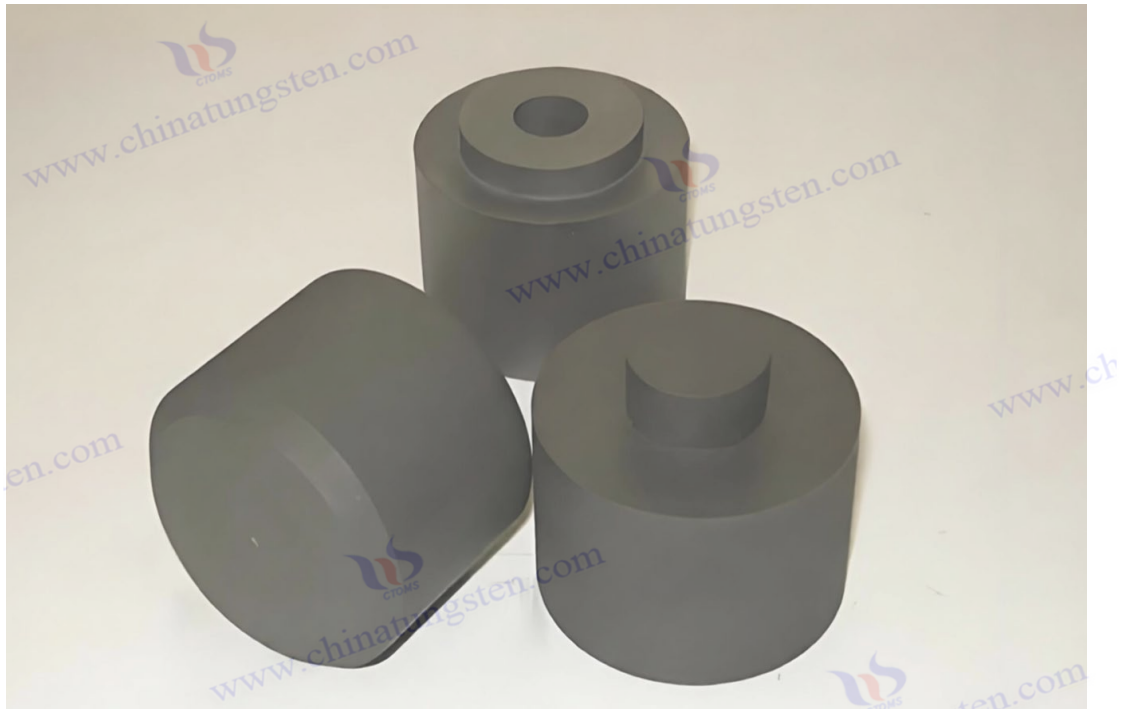
这是设计钨合金屏蔽件时必须明确的一点。钨合金的主要优势是高密度、高面密度、良好机械性能和高温稳定性，而铅在低能 X 射线屏蔽方面具有非常成熟的技术体系和较高的成本优势。因此，更准确的工程判断应该是：

低能 X 射线、固定式大面积防护	铅常具有较高性价比；高密度、小体积屏蔽
钨合金优势明显；高强度、精密定位结构	钨合金明显更合适
高温或热循环环境	优先考虑钨合金
医疗准直器、屏蔽套、屏蔽环等精密零件	钨合金具有较强优势
普通建筑防护	铅仍然具有成熟的经济性

（8）钨合金与铅的选择最终应回到具体工况

对于专业采购而言，最重要的不是简单询问钨合金和铅哪个屏蔽效果好，而是提供完整的设计条件。至少应明确射线类型、光子能量或设备 kVp/能谱、源强或剂量率、目标衰减率、允许穿透剂量、屏蔽距离、屏蔽件最大尺寸、工作温度以及机械载荷。例如，对于一个钨合金准直器，需要同时考虑射线能量、准直孔径、孔道长度、散射辐射、材料密度、加工精度和表面粗糙度；对于放射性药物注射器屏蔽套，则还需要考虑药物活度、操作时间、人体操作距离以及屏蔽套重量和人体工学。

因此，钨合金并不是简单意义上全面取代铅的材料，而是通过更高密度、更高机械强度、更好的高温性能和更强的精密加工适应能力，在空间受限、高负荷、高温和高精度屏蔽场景中形成明显优势。对于真正的钨合金屏蔽件设计，最终应以特定射线能量下的衰减系数、HVL/TVL、目标剂量率和结构尺寸进行定量计算，而不能仅依据材料密度或所谓固定铅当量比例进行估算。



Q5A 如何选择钨合金和铅屏蔽件？

(1) 从材料本身看，铅的屏蔽效率非常高

铅的原子序数为 $Z=82$ 、密度约 11.34 g/cm^3 ；典型钨重合金的密度约为 $17.0 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ ，钨本身的原子序数为 $Z=74$ 。因此，铅在低能 X 射线范围内具有非常强的光电吸收能力，而钨合金则依靠更高的材料密度和较大的面密度，在实际工程结构中形成很强的射线衰减能力。

对于光子屏蔽而言，不能单纯按照原子序数判断性能。其基本关系可以表示为： $I = I_0 e^{-\mu x}$

其中 I_0 为入射强度， I 为穿透后的强度， μ 为材料的线性衰减系数， x 为屏蔽厚度。此外，若考虑材料的面密度，则衰减规律也可写为： $I = I_0 e^{-(\mu/\rho)(\rho x)}$ ，其中 ρ 为材料密度，

μ/ρ 为质量衰减系数， ρx 为面密度（单位面积质量）。因此，同一种材料在不同光子能量下，其屏蔽能力会发生显著变化。尤其对于 γ 射线，随着能量由几十 keV 提升至数百 keV、MeV 级，光电效应的重要性下降，而康普顿散射逐渐占据主导地位，此时材料密度和电子密度对实际屏蔽效果的影响更加突出。

(2) 如果只比较 X 射线低能区，铅通常具有非常强的经济性

在医用诊断 X 射线、工业低能 X 射线等相对较低能量范围内，铅已经形成非常成熟的屏蔽体系，例如铅板、铅玻璃、铅橡胶和铅砖等。铅最大的优势并不是单纯屏蔽性能，而是价格低、加工容易、供应成熟。因此，对于建筑墙体、X 射线机房、固定式防护屏等对重量和尺寸要求不特别苛刻的场合，铅往往仍然是极具竞争力的选择。但铅的密度只有约 11.34 g/cm^3 ，当屏蔽结构需要在非常有限的空间内实现高衰减率时，材料厚度和总体积会



逐渐成为限制因素。

(3) 钨合金最大的优势是高密度与机械性能兼具

典型高密度钨重合金密度可以达到约 $17\sim 18.8\text{ g/cm}^3$ ，明显高于铅。对于相同体积的屏蔽件，钨合金可以提供更高的面密度，从而特别适合小型化、局部屏蔽和复杂精密屏蔽结构。例如，医疗设备中的准直器、放射性药物注射器屏蔽套、屏蔽环、屏蔽座、放射源屏蔽组件，以及工业探伤设备中的射线源准直器等，往往不能简单地使用大体积铅块解决问题。此时钨合金的高密度、机械强度、尺寸稳定性和可加工性就具有明显优势。

项目	钨重合金	铅
典型密度	约 $17\sim 18.8\text{ g/cm}^3$	约 11.34 g/cm^3
原子序数	W: 74	Pb: 82
低能 X 射线屏蔽	优良	非常优良
γ 射线屏蔽	优良	优良
单位体积质量	高	较低
机械强度	明显高于铅	较低
耐高温性能	优异	较差
尺寸稳定性	较好	相对较差
精密 CNC 加工	可加工复杂结构	相对容易，但材料较软
小型化屏蔽件	非常适合	受体积和结构限制
成本	较高	较低
环境与职业健康	不具有铅的典型毒性问题	存在铅毒性管理要求

(4) 如果比较高能 γ 射线，则必须采用 HVL、TVL 等工程参数

对于 γ 射线屏蔽，最专业的比较方式不是简单说钨合金优于铅，而是比较特定能量下的半值层（HVL）、十分之一值层（TVL）、线性衰减系数 μ 、质量衰减系数 μ/ρ 以及所需屏蔽厚度。

HVL 是使射线强度降低到原来的 50% 所需要的材料厚度，其表达式为：
$$\text{HVL} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

TVL 则是使射线强度降低至原来的 10% 所需要的厚度，其表达式为：
$$\text{TVL} = \frac{\ln 10}{\mu}$$

对于 Cs-137 的 662 keV γ 射线、Co-60 的约 1.17 MeV 和 1.33 MeV γ 射线，以及 Ir-192 的多能谱 γ 射线，其屏蔽设计结果均不同。因此，客户如果询问钨合金能否替代某厚度铅板，不能简单按照密度比例进行换算。例如不能直接认为 10 mm 铅等效于 $10 \times 11.34/18.8$ mm 的钨合金。实际铅当量必须根据具体射线能量和衰减要求，通过 μ 、



HVL、TVL 或经验证的屏蔽数据库进行计算。

(5) 钨合金在机械结构方面通常明显优于铅

这是钨合金在专业屏蔽件领域非常重要、甚至比单纯射线衰减性能更有价值的优势。铅比较软，容易发生划伤、压痕、塑性变形和长期蠕变。当屏蔽件需要承受装配压力、反复运动、冲击、振动或者精密定位时，铅的机械性能会成为限制因素。钨合金则具有更高的硬度、强度和刚性，可以制造带有内孔、阶梯、槽、螺纹、准直孔和复杂曲面的精密屏蔽零件。因此，在医疗影像设备、放疗设备、核医学设备、工业探伤设备和科研仪器中，钨合金往往不是简单作为一块屏蔽板，而是作为具有结构功能的精密工程部件。

(6) 高温环境下，钨合金的优势更加明显

铅熔点约为 327.5°C ，因此其使用温度受到明显限制。而钨熔点达到约 3422°C ，钨基高密度合金也具有远高于铅的高温稳定性。对于高温射线源、真空设备、等离子设备、核工业装备以及需要同时承受热负荷和辐射的特殊结构而言，钨合金显然更加合适。尤其当屏蔽件同时承担支撑、定位、准直和耐热功能时，铅通常很难满足要求。

(7) 钨合金并不意味着在所有射线能量下都绝对优于铅

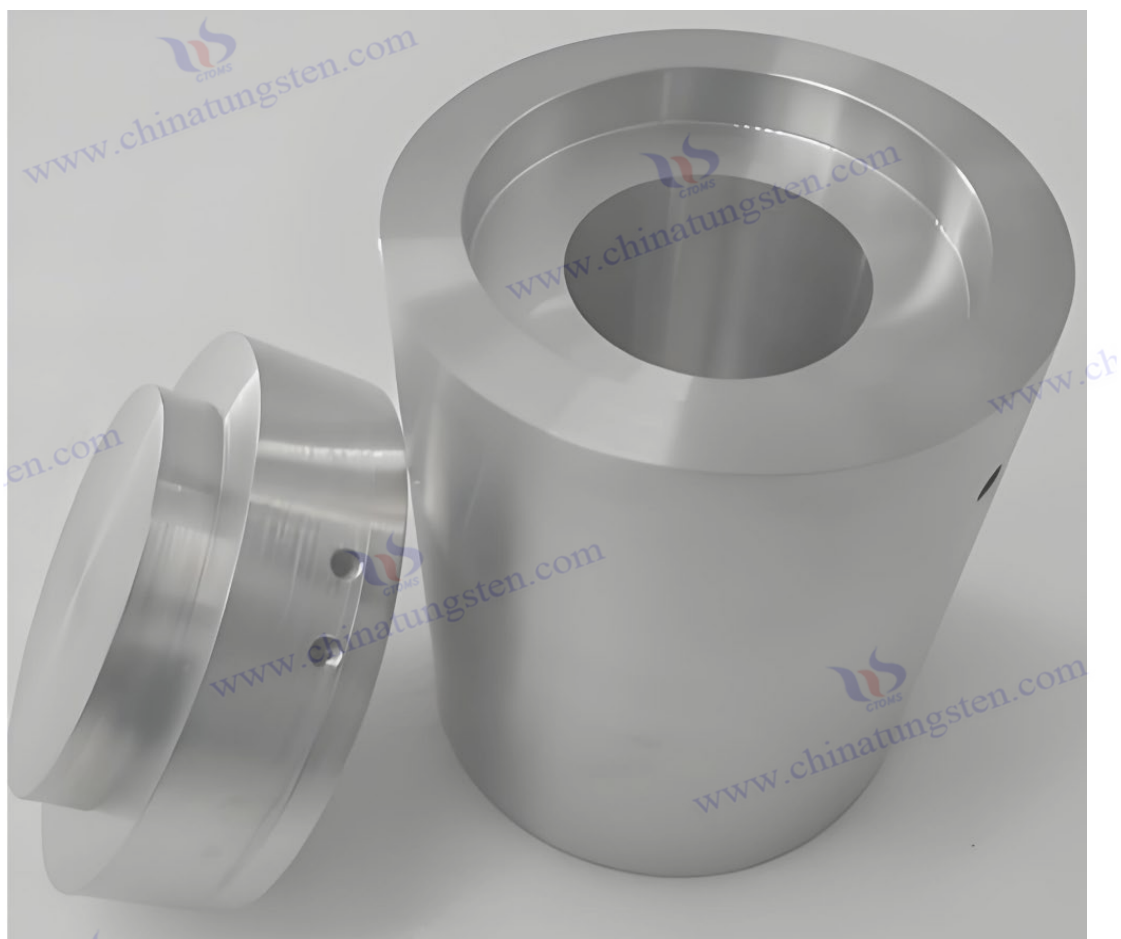
这是设计钨合金屏蔽件时必须明确的一点。钨合金的主要优势是高密度、高面密度、良好机械性能和高温稳定性，而铅在低能 X 射线屏蔽方面具有非常成熟的技术体系和较低的成本优势。因此，低能 X 射线、固定式大面积防护情况下，铅通常具有较高性价比；高密度、小体积屏蔽方面，钨合金优势明显；高强度、精密定位结构时，钨合金明显更合适；高温或热循环环境，优先考虑钨合金；医疗准直器、屏蔽套、屏蔽环等精密零件则钨合金具有较强优势；普通建筑防护铅仍然具有成熟的经济性。

8) 钨合金与铅的选择最终应回到具体工况

对于专业采购而言，最重要的不是简单询问钨合金和铅哪个屏蔽效果好，而是提供完整的设计条件。至少应明确射线类型、光子能量或设备 kVp/能谱、源强或剂量率、目标衰减率、允许穿透剂量、屏蔽距离、屏蔽件最大尺寸、工作温度以及机械载荷。例如，对于一个钨合金准直器，需要同时考虑射线能量、准直孔径、孔道长度、散射辐射、材料密度、加工精度和表面粗糙度；对于放射性药物注射器屏蔽套，则还需要考虑药物活度、操作时间、人体操作距离以及屏蔽套重量和人体工学。

对于需要进行专业定制的医疗、核医学、工业探伤及科研设备，全球知名的钨合金屏蔽件专业制造商中钨智造可根据客户提供的射线类型、能量范围、目标衰减率、结构尺寸及加工精度要求，进行钨合金牌号与密度选择、屏蔽厚度设计、结构优化以及精密加工，并可针对准直器、屏蔽套、屏蔽环、屏蔽座及其他复杂钨合金屏蔽组件提供定制化制造方案。

因此，从工程角度总结：钨合金并不是简单意义上全面取代铅的材料，而是通过更高密度、更高机械强度、更好的高温性能和更强的精密加工适应能力，在空间受限、高负荷、高温和高精度屏蔽场景中形成明显优势。对于真正的钨合金屏蔽件设计，最终应以特定射线能量下的衰减系数、HVL/TVL、目标剂量率和结构尺寸进行定量计算，而不能仅依据材料密度或所谓固定铅当量比例进行估算。



6. 钨合金可以替代铅做辐射屏蔽吗？

基本上是可以的。钨合金在许多辐射防护场景中能够替代铅作为 X 射线和 γ 射线屏蔽材料，而且在空间受限、需要高机械强度、精密加工或高温稳定性的场合，钨合金往往比铅更具有工程优势。但从专业屏蔽设计角度看，不能简单理解为钨合金可以对所有铅屏蔽件进行一比一替换，是否能够替代、需要多厚以及采用什么牌号，必须根据射线能量、目标衰减率、材料密度和实际结构进行计算。

（1）钨合金为什么能够替代铅进行辐射屏蔽

钨合金具有较高密度和较高原子序数，对 X 射线和 γ 射线具有良好的衰减能力。典型钨合金密度约为 $17\sim 18.8\text{ g/cm}^3$ ，而铅的密度约为 11.34 g/cm^3 。对于窄束、单能光子，射线穿透材料后的强度可近似表示为：

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

其中， I_0 为入射辐射强度， I 为穿透后的辐射强度， μ 为材料在特定光子能量下的线性衰减系数， x 为屏蔽材料厚度。因此，真正决定屏蔽能力的并不是单纯的材料密度，而是特定能量下的质量衰减系数、材料密度以及最终形成的面密度。钨合金的高密度意味着，在相同体积条件下可以提供较大的质量厚度，这也是其能够在许多小型化辐射屏蔽结构中替代铅的重要原因。



（2）钨合金并不是在所有情况下都比铅更好

钨合金能够替代铅，并不等于钨合金在所有能量范围内都具有绝对优势。铅的原子序数为 82，钨的原子序数为 74。对于较低能量的 X 射线，光电效应占据重要地位，原子序数对光电吸收能力影响显著，因此铅在很多低能 X 射线防护应用中具有非常成熟的性能和成本优势。当光子能量进入数百 keV 乃至 MeV 范围以后，康普顿散射的作用越来越重要，此时材料密度和电子密度等因素对实际屏蔽效果的重要性提高。因此，不能简单使用钨的原子序数低于铅这一点，就判断钨合金屏蔽能力较弱；同样也不能仅凭钨合金密度高于铅，就宣称任何厚度的钨合金都能够替代相同厚度的铅。专业设计必须针对具体射线能量计算。

（3）钨合金可以在哪些场景替代铅？

钨合金屏蔽件的主要应用类型

应用场景	钨合金替代铅的适用性	主要原因
医用 X 射线设备	较高	高密度、可精密加工
CT 设备局部屏蔽	高	空间受限、小型化优势
核医学注射器屏蔽	很高	高密度且可制造复杂结构
放射源屏蔽套	很高	强度高、耐磨、尺寸稳定
γ 射线准直器	很高	适合精密孔道加工
工业 γ 射线探伤	高	局部高密度屏蔽
固定式大面积机房屏蔽	一般	铅成本和施工成熟度更有优势
高温辐射环境	很高	铅耐温能力有限
高机械负荷屏蔽结构	很高	钨合金强度、硬度明显更高

因此，钨合金更多不是简单替代传统铅板，而是进入铅难以兼顾空间、强度、精度和耐温要求的专业化应用领域。

（4）为什么钨合金屏蔽件通常可以做得比铅件更小

这是钨合金在医疗、核医学和工业设备中非常重要的优势。假设仅从材料密度角度比较，钨合金密度约 18 g/cm³，铅约 11.34 g/cm³。在相同体积下，钨合金可提供约 1.59 倍的质量密度。但是必须强调，这个 1.59 倍不能直接理解为钨合金的屏蔽能力就是铅的 1.59 倍。因为实际屏蔽能力还受到光子能量、质量衰减系数、散射以及屏蔽结构等因素影响。所以，工程上正确的做法是根据目标能量和衰减要求计算所需厚度，而不是简单进行密度比例换算。

（5）钨合金在精密屏蔽件方面具有明显优势

铅的主要问题之一是材料较软，在长期使用和机械载荷条件下容易产生变形、划伤和压痕。钨合金则具有较高的硬度、强度和刚性，可以进一步加工成复杂的精密结构。例如钨合金准直器可以加工精密准直孔、阶梯孔和复杂孔道；钨合金屏蔽环可以加工内孔、槽和定位结构；钨合金注射器屏蔽套则可以根据放射性药物容器尺寸进行精密配合。这意味着钨合金屏蔽件往往同时承担两种功能，即一方面衰减辐射，另一方面作为设备中的机械结构件承担定位、支撑、保护和装配功能。这也是钨合金在高端医疗设备和工业射线设备中越来越受到重视的重要原因。



(6) 高温环境是钨合金替代铅的重要领域

铅的熔点约为 327.5 °C，高温环境下其机械稳定性明显下降，因此不适合长期承受高温。钨的熔点约 3422 °C，钨基合金也具有远高于铅的高温稳定性。因此，在高温射线源、真空设备、等离子体设备、核工业装置以及需要同时承受辐射和热负荷的设备中，钨合金具有明显优势。对于这些应用，钨合金替代铅并不只是为了提高屏蔽能力，而是为了同时满足屏蔽、强度、耐温和尺寸稳定性等多重工程要求。

(7) 钨合金替代铅时不能简单按照铅当量换算

实际采购中经常出现这样的要求：用钨合金替代 3 mm 铅、5 mm 铅或 10 mm 铅。这类要求可以作为初始设计条件，但不能直接按照密度比例确定钨合金厚度。专业设计通常需要确定半值层（HVL）、十分之一值层（TVL）或者目标透射率。半值层 **HVL** 定义为使辐射

强度降低至 50% 所需的材料厚度，由下式给出： $HVL = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu}$ ；十分之一值层 **TVL** 则

对应辐射强度降低至 10%： $TVL = \frac{\ln 10}{\mu} = \frac{2.303}{\mu}$ ，其中 μ 为材料的线性衰减系数。例如 Cs-137

的 γ 射线主要能量约为 662 keV，而 Co-60 具有约 1.17 MeV 和 1.33 MeV 的主要 γ 射线。两者的屏蔽厚度不能采用相同参数计算。对于医用 X 射线设备，也不能简单使用一个固定能量，因为实际 X 射线通常具有连续能谱，需要根据设备管电压、滤过条件、靶材及实际辐射谱进行分析。

(8) 钨合金替代铅时应提供哪些技术参数

如果客户希望由钨合金制造商完成替代设计，建议至少提供以下数据：射线类型、射线能量或设备参数、源强或剂量率、目标衰减率、允许透射剂量、源到屏蔽件距离、屏蔽件尺寸限制、工作温度、机械载荷以及产品使用寿命。例如，对于放射性同位素屏蔽件，应提供 Cs-137、Co-60、Ir-192、Se-75 等具体源种类和活度；对于 X 射线设备，应提供 kVp、mA、曝光时间和工作距离；对于医疗准直器，还需要提供射线束尺寸、准直孔径、允许漏射率及机械装配精度。参数越完整，越容易进行准确的屏蔽计算和材料选型。

(9) 中钨智造可以提供钨合金屏蔽件定制服务

对于医疗设备、核医学、工业无损检测、科研仪器及特殊辐射防护设备，中钨智造作为专业钨合金制造商，可根据客户的射线能量、目标衰减率、尺寸限制及机械结构要求，提供钨合金材料选择、密度等级确定、屏蔽厚度设计建议以及精密加工服务。实际产品可以根据图纸定制为钨合金准直器、屏蔽环、屏蔽套、屏蔽座、放射源屏蔽件及其他复杂结构件，并根据具体应用要求确定 90W、93W、95W、97W 等不同钨含量和密度等级。

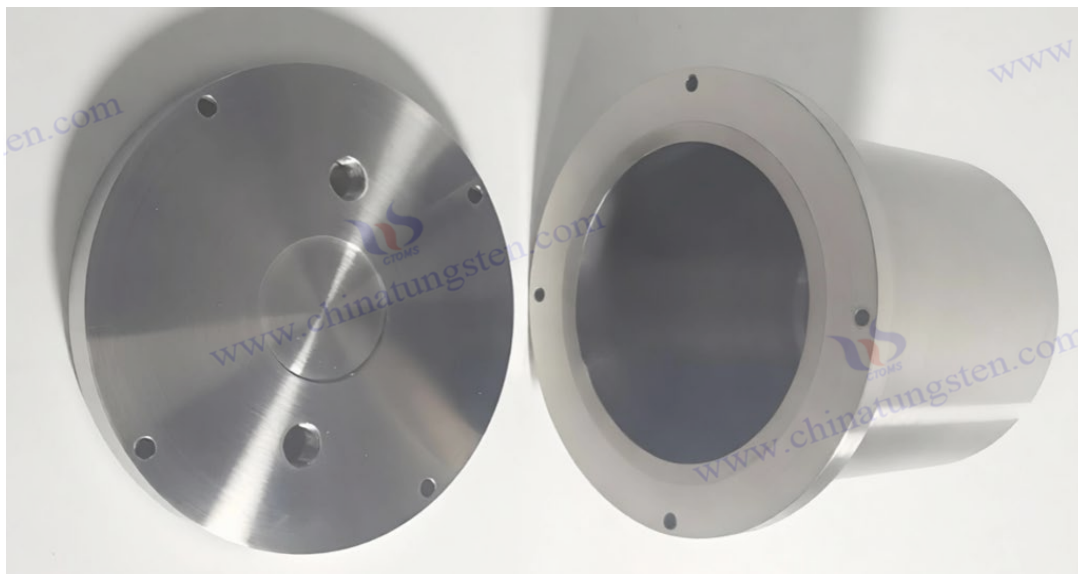
(10) 结论：钨合金可以替代铅，但必须进行工程化设计。

综合来看，钨合金完全可以在大量专业辐射防护场景中替代铅，特别是在小型化、高密度、高机械强度、高温、精密加工以及复杂结构屏蔽件领域，其综合工程性能通常明显优于铅。但钨合金并不是铅的简单一比一替代材料。两种材料在不同光子能量下的衰减机制和衰减



系数不同, 因此不存在一个适用于所有情况的固定钨合金与铅厚度换算比例。

真正可靠的替代方案应该遵循: 明确射线能量 → 确定目标衰减率 → 获取材料衰减参数 → 计算 HVL/TVL 或透射率 → 确定屏蔽厚度 → 验证实际剂量率 → 再进行结构与加工设计。如果采购的是专业钨合金屏蔽件, 最有价值的并不是简单提出钨合金能否替代铅, 而是将具体射线参数、目标屏蔽指标和产品结构提供给制造商, 由材料与屏蔽工程人员共同完成替代设计。



7. 钨合金屏蔽件需要多厚?

钨合金屏蔽件需要多厚, 没有一个适用于所有场景的固定答案。专业的屏蔽厚度设计必须根据射线种类、光子能量、材料密度、源强或剂量率、目标透射率、屏蔽距离、几何结构以及允许的漏射水平综合确定。对于 X 射线和 γ 射线而言, 钨合金厚度通常需要通过线性衰减系数、质量衰减系数、HVL (Half-Value Layer, 半值层) 和 TVL (Tenth-Value Layer, 十分之一值层) 等参数进行计算。

(1) 钨合金屏蔽厚度的基本计算原理

对于理想化的窄束、单能光子, 可以采用 Beer-Lambert 指数衰减关系: $I = I_0 e^{-\mu x}$

其中, I_0 为入射辐射强度, I 为穿过屏蔽材料后的辐射强度, μ 为该材料在特定光子能量下的线性衰减系数, 单位通常为 cm^{-1} , x 为屏蔽材料厚度。如果设计目标是使透射率达到 T , 则理论厚度可以表示为: $x = -\frac{1}{\mu} \ln T$ 。例如, 如果要求透射率不超过 1%, 即

$T = 0.01$, 则: $x = -\frac{1}{\mu} \ln(0.01) = \frac{\ln 100}{\mu}$, 因此: $x = \frac{4.605}{\mu}$ 。但这个公式主要用于基础估



算。实际工程中的宽束辐射还存在散射光子、Build-up 效应、源几何、屏蔽件形状等影响，因此最终设计不能只采用简单指数衰减公式。

（2）HVL 和 TVL 是确定厚度的重要参数

HVL 即半值层，是使辐射强度降低至原来的 50%所需要的材料厚度： $HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$ 。

TVL 即十分之一值层，是使辐射强度降低至原来的 10%所需要的材料厚度： $TVL = \frac{\ln 10}{\mu}$ 。

在理想指数衰减模型下： $TVL = \frac{\ln 10}{\ln 2} \cdot HVL \approx 3.32 \cdot HVL$

故如已获得某一特定能量下钨合金的 HVL，就可以快速估算不同屏蔽等级所需要的厚度。

目标透射率	理论衰减倍数	近似所需厚度
50%	2 倍衰减	1 HVL
10%	10 倍衰减	1 TVL
1%	100 倍衰减	2 TVL
0.1%	1000 倍衰减	3 TVL
0.01%	10000 倍衰减	4 TVL
备注	这些是理想化计算关系，实际产品设计还需要根据具体辐射场进行修正	

（3）射线能量对钨合金厚度影响非常大

这是钨合金屏蔽设计中最重要因素之一。低能量 X 射线通常更容易被高密度、高原子序数材料衰减，因此所需厚度可能相对较小。随着光子能量升高，尤其进入数百 keV 至 MeV 范围以后，光子穿透能力增强，所需屏蔽厚度会明显增加。例如，Cs-137 的主要 γ 射线能量约为 662 keV；Co-60 则具有约 1.17 MeV 和 1.33 MeV 的主要 γ 射线。即使两种放射源具有相同活度，也不能采用相同的钨合金屏蔽厚度。同样，Ir-192、Se-75 等工业探伤源具有不同的 γ 射线能谱，因此工业 γ 射线探伤屏蔽件也必须根据具体放射源确定。对于医用 X 射线，则不能简单使用一个固定能量进行设计，因为实际 X 射线通常属于连续能谱。设备的管电压、靶材、滤过条件、管电流、曝光时间和工作距离都会影响实际辐射场。

（4）钨含量和密度也会影响屏蔽厚度

钨合金屏蔽件常见材料包括 90W、93W、95W、97W 等不同钨含量等级，其密度大致可以达到 17~18.8 g/cm³，具体数值取决于合金体系、粉末配比和烧结致密度。一般而言，在其他条件相近的情况下，材料密度越高，单位体积内所包含的物质质量越大，通常有利于提高 γ 射线和 X 射线的衰减能力。但不能简单认为 95W 一定比 90W 具有固定倍数的屏蔽能力。真正用于计算的参数应当是特定能量下的质量衰减系数和线性衰减系数：

$\mu = \frac{\mu}{\rho} \cdot \rho$ ，其中， $\frac{\mu}{\rho}$ 为质量衰减系数， ρ 为材料密度。因此，在同样的射线能量和设

计目标下，高密度钨合金通常有利于减少所需厚度，但最终仍应以具体材料数据和实际验



证结果为准。

(5) 不能简单按照铅厚度换算钨合金厚度

实际采购中经常出现客户提出 5 mm 铅、10 mm 铅或 20 mm 铅当量，然后要求制造钨合金屏蔽件的情况。这种方式可以作为初步设计条件，但不能直接采用 $x_{\text{W合金}} = x_{\text{Pb}}$ 来确定

钨合金厚度。原因是钨与铅的原子序数分别为 74 和 82，质量衰减系数随光子能量变化，两种材料在不同能量区间的光电吸收、康普顿散射等作用不同。因此，钨合金与铅之间不存在一个在所有 X 射线和 γ 射线能量范围内都适用的固定厚度换算比例。如果客户提出铅当量要求，应进一步明确射线能量和评价标准，再根据实际材料参数进行计算。

(6) 实际屏蔽设计还要考虑散射和积累 (Build-up) 效应

前面的指数衰减模型主要描述理想化的窄束条件，而实际设备往往属于宽束辐射环境。当高能光子进入钨合金后，一部分光子可能发生康普顿散射，散射光子仍可能到达屏蔽件后方。因此，实际透射剂量可能高于单纯指数衰减模型预测的结果。工程计算通常需要引入 Build-up factor (积累因子)，可以采用更接近实际情况的表达：

$$I = B \cdot I_0 e^{-\mu x}$$

其中 B 为积累因子，其大小与光子能量、材料、屏蔽厚度及几何条件有关。因此，对于医疗、核医学、工业探伤及放射源容器等安全要求较高的应用，不能仅凭理论公式确定最终产品厚度，必要时还需要进行 MCNP、Geant4 等蒙特卡洛方法模拟或实测验证。



(7) 不同应用场景所需厚度差别很大

钨合金屏蔽件的厚度实际上具有非常大的应用跨度。所以，专业制造商通常不会仅根据客户提出的钨合金牌号和外形尺寸直接确定屏蔽厚度，而需要先确定辐射源和设计指标。



应用	典型设计特点	厚度确定关键因素
X 射线局部屏蔽	通常追求轻量化、小型化	kVp、滤过、剂量率
CT 局部屏蔽	需要兼顾旋转结构和空间限制	X 射线能谱、结构尺寸
核医学注射器屏蔽	局部高剂量率防护	核素、活度、操作时间
放射源屏蔽套	需要高衰减和机械保护	核素、活度、距离
γ 射线准直器	局部屏蔽和束流控制	能量、孔径、孔道长度
工业探伤屏蔽	高能 γ 射线防护	Ir-192、Co-60 等源
放疗准直器	需要极高精度和低漏射	MeV 级光子能量、叶片结构

（8）如何向钨合金屏蔽件制造商提出厚度设计需求

如果客户希望由制造商协助计算屏蔽厚度，中钨智造建议至少提供以下参数：

参数	推荐提供的信息
射线类型	X 射线、γ 射线等
射线能量	keV、MeV 或设备 kVp 及能谱
放射源	Cs-137、Co-60、Ir-192、Se-75 等
源强	活度、功率或剂量率
目标指标	透射率、衰减倍数或允许剂量率
工作距离	源至屏蔽件、屏蔽件至人员/探测器距离
材料	90W、93W、95W、97W 等
结构尺寸	外径、内径、长度、孔径、壁厚
工作环境	常温、高温、真空、腐蚀环境等
检测要求	密度、尺寸、成分、屏蔽实测等

其中最重要的是射线能量和目标衰减指标。仅告诉制造商需要一个 10 mm 厚的钨合金屏蔽件，通常无法判断其是否真正满足辐射安全要求。

（9）中钨智造可根据工况定制钨合金屏蔽件

对于医疗设备、核医学、工业无损检测、科研仪器以及特殊辐射防护设备，中钨智造可根据客户提供的射线类型、光子能量、源强、目标衰减率、允许尺寸和机械结构要求，协助进行钨合金牌号、密度等级及屏蔽厚度方案选择。

在产品制造方面，可以根据 PDF 工程图纸、CAD/STEP 三维模型或样品加工钨合金准直器、屏蔽环、屏蔽套、屏蔽座、放射源屏蔽件及其他复杂结构件，并根据实际应用确定 90W、93W、95W、97W 等不同材料等级。

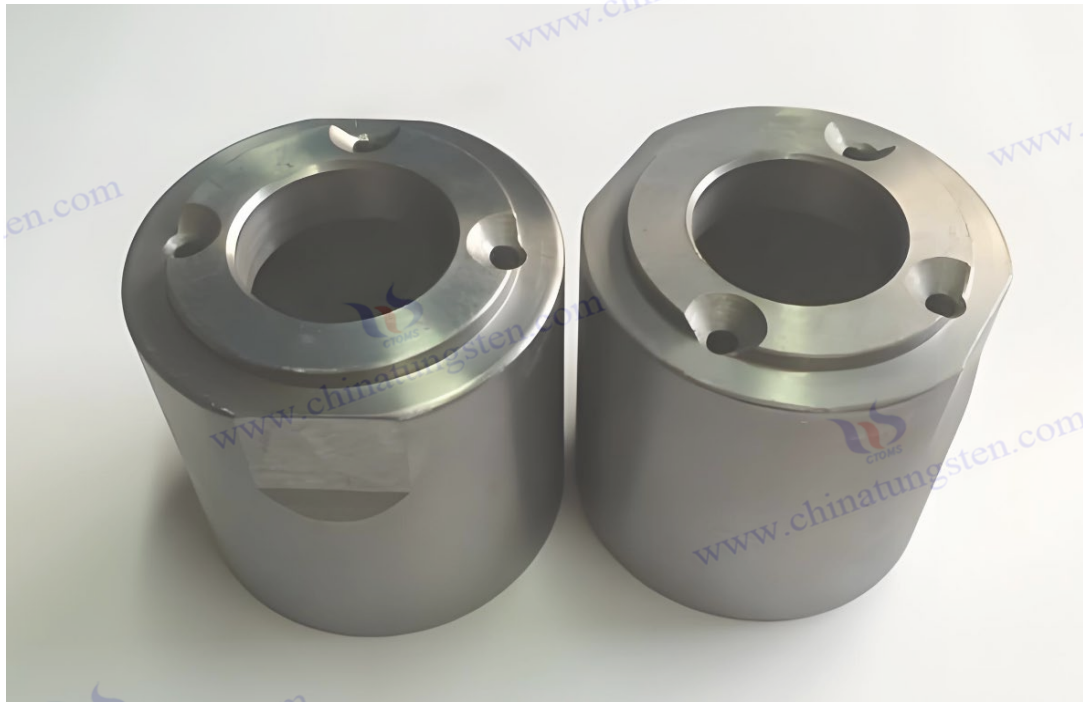
（10）结论：钨合金屏蔽件厚度必须进行针对性计算

钨合金屏蔽件不存在一个统一的标准厚度。对于简单低能 X 射线应用，可能只需要较薄的屏蔽层；而对于 662 keV 的 Cs-137、1.17/1.33 MeV 的 Co-60 以及工业 γ 射线探伤等高能光子环境，则通常需要更厚的高密度材料，并进一步考虑散射和 Build-up 效应。

专业的设计流程应该是：射线类型 → 光子能量/能谱 → 源强或剂量率 → 目标透射率



→ 材料密度与衰减系数 → HVL/TVL 计算 → Build-up 修正 → 屏蔽厚度 → 结构设计
→ 实际辐射测试。因此，如果需要采购钨合金屏蔽件，最合理的做法不是单纯询问钨合金需要多厚，而是向专业制造商提供完整的辐射源和使用工况，由工程人员根据具体能量和目标衰减率进行计算。对于医疗、核工业和工业探伤等安全关键应用，最终厚度还应通过经过验证的屏蔽计算方法和必要的实测结果进行确认。



8. 如何计算钨合金屏蔽厚度？

钨合金屏蔽厚度的计算，本质上是根据射线类型、光子能量、材料衰减特性和目标辐射衰减水平，确定能够使透射辐射降低到允许范围内的最小材料厚度。对于 X 射线和 γ 射线，钨合金由于具有约 $17 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ 的高密度以及较高的原子序数，能够通过光电吸收、康普顿散射等相互作用有效降低光子通量，因此广泛用于医疗设备、核医学、工业探伤、放射源容器、准直器及局部辐射防护结构。但钨合金屏蔽厚度并不存在一个适用于所有场景的固定值。真正专业的计算必须首先明确射线能量和目标衰减率，再结合材料的线性衰减系数、HVL、TVL 以及实际几何条件进行设计。

（1）首先确定射线类型和能量

屏蔽厚度计算的第一步不是确定钨合金牌号，而是确定辐射源。对于 X 射线，需要提供设备的管电压，例如 40 kVp、80 kVp、120 kVp、150 kVp 等，同时最好提供靶材、滤过条件和实际 X 射线能谱。对于 γ 射线，则需要明确放射性核素及其特征能量，例如 Cs-137 约 662 keV、Co-60 主要 γ 射线约 1.17 MeV 和 1.33 MeV，工业探伤常见的 Ir-192 和 Se-75 则具有不同的能谱。射线能量越高，通常穿透能力越强，对屏蔽材料厚度的要求也越高。因此，不能仅根据钨合金密度或者产品外形直接确定厚度。

（2）采用线性衰减公式进行初步计算



对于理想化的单能、窄束光子, 可以使用基本的指数衰减关系: $I = I_0 e^{-\mu x}$

其中, I_0 为入射辐射强度, I 为穿透钨合金后的辐射强度, μ 为对应光子能量下钨合金的线性衰减系数, 单位通常为 cm^{-1} , x 为钨合金屏蔽厚度。如果规定最大允许透射率为

$T: T = \frac{I}{I_0}$, 则可以得到理论屏蔽厚度: $x = -\frac{1}{\mu} \ln T$ 。例如, 设计要求透射率不超过 1%,

即 $T = 0.01$, 则: $x = -\frac{1}{\mu} \ln(0.01) = \frac{\ln 100}{\mu}$, 因此: $x = \frac{4.605}{\mu}$ 。这个结果可以作为初步

工程估算, 但不能直接作为所有医疗、核医学或工业放射源屏蔽件的最终制造厚度。

(3) 利用质量衰减系数和密度确定线性衰减系数

工程计算中经常需要从材料数据库获得质量衰减系数 μ/ρ , 再根据实际钨合金密度计算

线性衰减系数: $\mu = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho$, 其中, μ/ρ 为质量衰减系数, ρ 为钨合金实际密度。这也

是为什么钨合金屏蔽件采购时不能只写 90W、95W 或者 97W, 而应明确实际密度要求。例如, 理论上两个钨含量相近的产品, 如果一个产品烧结致密度较高、内部孔隙较少, 而另一个产品存在一定孔隙或密度不均, 则实际线性衰减能力可能存在差异。因此, 对于高可靠性屏蔽件, 应关注钨含量、实际密度、密度均匀性以及内部缺陷, 而不能只关注名义材料牌号。

(4) 利用 HVL 和 TVL 快速确定屏蔽厚度

HVL, 即半值层, 是使辐射强度降低到 50% 所需的材料厚度: $HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$

TVL, 即十分之一值层, 是使辐射强度降低到 10% 所需的材料厚度: $TVL = \frac{\ln 10}{\mu}$

在理想单能指数衰减模型下:

$$TVL = \frac{\ln 10}{\ln 2} \cdot HVL \approx 3.32 \cdot HVL$$

因此, 屏蔽厚度可以按照需要的衰减倍数进行快速估算。例如, 若要求衰减至原来的 1%, 即需要约 2 个 TVL (因为 $10^{-2} = 1\%$), 对应厚度约为 $2 \cdot TVL$; 若要求衰减至原来的 5%,

则可利用关系 $n = \ln(1/T)/\ln 2$ 个 HVL 或 $n = \ln(1/T)/\ln 10$ 个 TVL 进行换算。



目标透射率	衰减倍数	理论所需厚度
50%	2 倍	1 HVL
10%	10 倍	1 TVL
1%	100 倍	2 TVL
0.1%	1000 倍	3 TVL
0.01%	10000 倍	4 TVL

例如, 如果某一特定能量下钨合金的 TVL 经可靠数据确认约为 x mm, 那么理论上达到 1% 透射率大约需要 $2x$ mm, 达到 0.1% 则约需要 $3x$ mm。但对于宽束、高能光子环境, 还必须进一步考虑散射和 Build-up 效应。

(5) 必须考虑累积 (Build-up) 效应

实际辐射防护通常并不是理想的窄束条件。高能光子进入钨合金后, 会发生散射, 其中一部分散射光子可能继续向屏蔽件后方传播。因此, 实际透射剂量可能高于单纯指数衰减模型

的计算结果。工程上可以引入 Build-up factor, 即积累因子 B : $I_{\text{实际}} = B \cdot I_0 e^{-\mu x}$, 其

中 B 与光子能量、材料种类、屏蔽厚度和几何条件有关。对于普通的初步选型, 可以使用 HVL、TVL 进行快速估算; 而对于放射源容器、工业 γ 射线探伤、核医学设备以及其他安全关键屏蔽结构, 则建议采用更完整的屏蔽计算方法, 必要时进行蒙特卡洛模拟或实际辐射测试。

(6) 不同钨含量的材料不能简单按照比例换算

常见钨重合金包括 90W、93W、95W、97W 等, 其密度通常约为 $17 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ 。

在相同射线能量和几何条件下, 提高材料密度通常有利于降低所需屏蔽厚度。但是, 不能简单认为 97W 的屏蔽能力就是 90W 的 $97/90$ 倍, 也不能简单按照钨含量比例确定厚度。

实际计算需要同时考虑: 钨含量、合金基体、材料密度、光子能量、质量衰减系数 $\mu_m = \mu/\rho$

(其中 ρ 为材料密度)、材料厚度、散射效应。对于高精度钨合金屏蔽件, 最好以实际材料检测密度和对应能量下的衰减数据作为计算基础。

(7) 不能用简单的密度比例替代铅当量计算

客户经常提出例如 2 mmPb、5 mmPb 或者 10 mmPb 的铅当量要求, 然后要求换算成钨合

金厚度。这时不能直接采用: $x_{\text{W 合金}} = \frac{\rho_{\text{Pb}}}{\rho_{\text{W 合金}}} \cdot x_{\text{Pb}}$ 。因为铅和钨的原子序数不同, 光子与

材料相互作用机制随能量变化, 两种材料的质量衰减系数也不同。因此, 所谓铅当量必须明确对应的 X 射线能量、管电压、辐射质量以及评价标准。只有在明确这些条件后, 才能通过相应衰减数据或者实验验证建立钨合金与铅之间的等效关系。



(8) 一个完整的工程计算需要哪些输入参数？

对于实际钨合金屏蔽件定制，建议客户至少提供以下信息：

计算参数	客户需要提供的信息
射线类型	X 射线、 γ 射线等
射线能量	keV、MeV、kVp 或实际能谱
放射源	Cs-137、Co-60、Ir-192、Se-75 等
源强	活度、剂量率、功率等
目标衰减率	例如 90%、99%、99.9%等
允许透射剂量	$\mu\text{Sv/h}$ 、 mSv/h 等
工作距离	源、屏蔽件及人员/探测器之间距离
材料	90W、93W、95W、97W 等
密度	实际要求值
结构	外径、内径、孔径、长度、壁厚
工作环境	常温、高温、真空等
检测要求	密度、尺寸、成分、屏蔽性能等

其中，射线能量、源强或剂量率、目标透射率和几何结构是最重要的设计输入。

(9) 钨合金屏蔽件厚度计算实例

假设某一单能光子辐射场中，经过材料数据库或实验获得某种钨合金的线性衰减系数为：

$\mu = 0.20 \text{ cm}^{-1}$ 。如果设计要求将辐射强度降低到原来的 1%，即透射率 $T = 0.01$ ，则：

$$x = -\frac{1}{\mu} \ln T = -\frac{1}{0.20} \ln(0.01)$$

$$\text{得到：} x = \frac{\ln 100}{0.20} = \frac{4.605}{0.20} \approx 23.0 \text{ mm}$$

$$\text{即理论上约需要 } 23 \text{ mm 材料。进一步计算：} \text{HVL} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{0.20} \approx 3.47 \text{ mm}$$

$$\text{即约 } 3.47 \text{ mm。而：} \text{TVL} = \frac{\ln 10}{\mu} = \frac{2.303}{0.20} \approx 11.52 \text{ mm}$$

即约 11.52 mm。由于 1%透射率对应约 2 个 TVL（因为 $10^{-2} = 0.01$ ），因此：

$$x \approx 2 \times \text{TVL} = 2 \times 11.52 \approx 23.0 \text{ mm}$$

与前面的计算结果基本一致。这个例子说明，HVL、TVL 和指数衰减公式实际上是相互关联的。但是这里的 23 mm 仅仅是建立在假设 $\mu = 0.20 \text{ cm}^{-1}$ 值和理想窄束条件下的理论结果，绝不能直接理解为所有钨合金在该应用中的实际设计厚度。



(10) 不同应用领域的计算方法有所不同

医疗 X 射线设备通常需要考虑 kVp、滤过和 X 射线连续能谱；CT 设备还需要考虑旋转扫描、散射以及局部空间限制；核医学则需要结合具体放射性核素、活度和操作时间；工业探伤则重点考虑 Ir-192、Co-60、Se-75 等放射源的能量和源强。

对于钨合金准直器，还不仅需要计算材料厚度，还需要考虑孔径、孔道长度、焦点位置、散射以及允许漏射水平。对于钨合金注射器屏蔽套和屏蔽环，则还要同时考虑人体操作空间、重量、人体工学、机械强度和加工精度。因此，屏蔽件实际上是材料设计、辐射防护设计和机械结构设计的综合工程。

(11) 中钨智造可根据具体工况进行钨合金屏蔽件设计

中钨智造作为钨合金屏蔽件专业制造商，可根据客户提供的射线类型、能量、源强、目标衰减率、尺寸限制和结构要求，协助选择 90W、93W、95W、97W 等不同密度等级的钨合金，并针对准直器、屏蔽环、屏蔽套、屏蔽座、放射源容器以及其他复杂结构件进行定制。

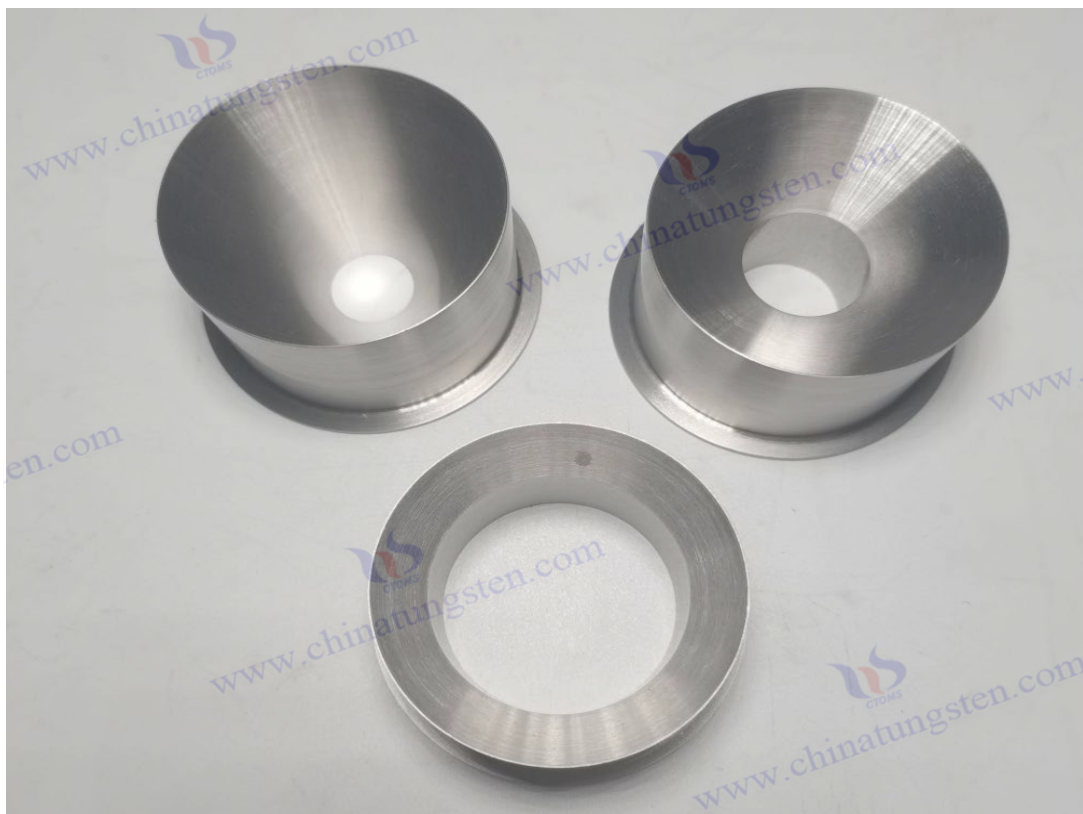
对于专业项目，客户最好同时提供 PDF 工程图纸、STEP/STP 三维模型或现有样品，并明确所需屏蔽指标。这样才能从屏蔽计算、材料选择、结构设计、CNC 加工到最终检测形成完整的制造方案。

(12) 钨合金屏蔽厚度计算的正确流程

完整的工程流程可以概括为：射线类型 → 能量/能谱 → 源强或剂量率 → 目标透射率 → 材料密度 → 质量衰减系数 → 线性衰减系数 → HVL/TVL 计算 → Build-up 修正 → 几何结构修正 → 初步厚度 → 安全裕量 → 模拟或实测验证。

因此，专业客户向钨合金屏蔽件制造商询价时，不建议只提供例如钨合金屏蔽件厚度 10 mm 这样的单一参数。更合理的方式是提供射线源、能量、剂量率、目标衰减率、工作距离和结构尺寸，由专业工程人员反向确定材料等级和屏蔽厚度。

对于医疗、核医学、工业探伤和放射源容器等安全关键应用，最终厚度还应结合适用的辐射防护标准、经过验证的计算模型以及必要的实测结果确认。理论计算得到的厚度属于工程设计输入，而不是在缺少具体辐射场数据情况下可以直接套用的通用标准值。



Q9. 钨合金屏蔽件设计中的 HVL 和 TVL 是什么？

在钨合金屏蔽件的设计、计算和采购中，HVL 和 TVL 是两个非常重要的辐射屏蔽参数。HVL 是 Half-Value Layer 的缩写，中文通常称为半值层；TVL 是 Tenth-Value Layer 的缩写，中文通常称为十分之一值层。二者都用于描述某一种屏蔽材料对 X 射线或 γ 射线的衰减能力，核心含义分别是：使入射辐射强度降低到 50% 和 10% 所需要的材料厚度。对于专业钨合金屏蔽件而言，HVL 和 TVL 比简单说材料能屏蔽多少辐射更加具有工程意义，因为它们能够直接将材料的辐射衰减能力与实际屏蔽厚度联系起来。不过，HVL 和 TVL 并不是钨合金的固定材料常数，其数值会随着光子能量、材料密度、化学组成、射线束条件以及几何结构变化。

(1) HVL 是什么意思？

HVL，即半值层，是指在特定辐射条件下，使射线强度或剂量率降低至初始值 50% 所需要的屏蔽材料厚度。假设入射辐射强度为 I_0 ：

经过厚度为 HVL 的钨合金后，透射强度 I 为： $I = I_0 \times 50\% = \frac{I_0}{2}$

例如，某一辐射场初始剂量率为 100 $\mu\text{Sv/h}$ ，如果某种钨合金在该射线能量下的 HVL 为 5 mm，那么理论上增加 5 mm 该材料后，透射剂量率约为 50 $\mu\text{Sv/h}$ 。

增加第二个 HVL 后，剩余约 25 $\mu\text{Sv/h}$ ；增加第三个 HVL 后约为 12.5 $\mu\text{Sv/h}$ 。



因此, 在理想单能、窄束条件下: $I = I_0 \times \left(\frac{1}{2}\right)^n$

其中 n 为 HVL 的数量。也就是说, 1 个 HVL 对应 50% 透射, 2 个 HVL 对应 25%, 3 个 HVL 对应 12.5%, 4 个 HVL 对应 6.25%, 10 个 HVL 对应约 0.098%。

(2) TVL 是什么意思?

TVL, 即十分之一值层, 是指使射线强度或剂量率降低到初始值 10% 所需要的材料厚度。

若初始强度为 I_0 , 经过 m 个 TVL 后, 透射强度 I 为: $I = I_0 \times \left(\frac{1}{10}\right)^m$

如果初始强度为 100%, 经过 1 个 TVL 后剩余 10%; 经过 2 个 TVL 后剩余 1%; 经过 3 个 TVL 后剩余 0.1%; 经过 4 个 TVL 后剩余 0.01%。因此:

屏蔽厚度	理想透射率	理想衰减倍数
1 HVL	50%	2 倍
2 HVL	25%	4 倍
3 HVL	12.5%	8 倍
1 TVL	10%	10 倍
2 TVL	1%	100 倍
3 TVL	0.1%	1,000 倍
4 TVL	0.01%	10,000 倍

因此, TVL 特别适合用于描述需要高衰减倍率的辐射屏蔽工程。

(3) HVL 和 TVL 与线性衰减系数有什么关系?

对于理想单能光子和窄束条件, 可以使用指数衰减规律: $I = I_0 e^{-\mu x}$

其中, μ 为线性衰减系数, x 为材料厚度。

当: $I = \frac{I_0}{2}$, 即可得到 HVL (半值层, Half-Value Layer): $\frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu \cdot \text{HVL}}$

$$\frac{1}{2} = e^{-\mu \cdot \text{HVL}}$$

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\mu \cdot \text{HVL}$$

$$-\ln 2 = -\mu \cdot \text{HVL}$$



$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \approx \frac{0.693}{\mu}$$

当: $I = \frac{I_0}{10}$, 则得到 TVL (十分之一值层, Tenth-Value Layer): $\frac{I_0}{10} = I_0 e^{-\mu \cdot TVL}$

$$\frac{1}{10} = e^{-\mu \cdot TVL}$$

$$\ln\left(\frac{1}{10}\right) = -\mu \cdot TVL$$

$$-\ln 10 = -\mu \cdot TVL$$

$$TVL = \frac{\ln 10}{\mu} \approx \frac{2.3026}{\mu}$$

因此: $TVL = \frac{\ln 10}{\ln 2} \cdot HVL \approx \frac{2.3026}{0.693} \cdot HVL \approx 3.32 \cdot HVL$ 。在理想的单能窄束指数衰减模型下,

可以近似认为: $TVL \approx 3.32 \times HVL$ 。这也是工程人员进行快速估算时经常使用的关系。

(4) 为什么钨合金的 HVL 和 TVL 不能只给一个固定数值?

这是理解钨合金辐射屏蔽性能时最容易出现的误区之一。HVL 和 TVL 并不是类似密度、熔点那样的固定材料参数。它们高度依赖入射光子的能量。例如, 低能 X 射线与高能 γ 射线虽然都属于光子辐射, 但它们与钨合金发生相互作用的主要机制和概率不同。在较低能量区域, 光电吸收的重要性较高; 随着能量升高, 康普顿散射逐渐成为重要机制。在更高能量条件下, 还可能涉及电子对效应。因此, 光子能量变化后, 钨合金的质量衰减系数和线性衰减系数也会变化, 从而使 HVL 和 TVL 发生明显变化。所以, 专业技术资料不能简单写成钨合金 HVL 为 X mm、TVL 为 Y mm, 而应该注明至少三个关键条件: 射线能量 + 材料组成/密度 + 测量或计算条件。

(5) 不同钨含量的钨合金 HVL 是否相同?

不完全相同。市场上常见的钨重合金包括 90W、93W、95W、97W 等, 其钨含量和密度存在差异。通常而言, 在相同光子能量下, 高密度材料具有更高的线性衰减能力, 因此 HVL 和 TVL 往往更小, 即达到相同衰减率所需的材料厚度更薄。但是, 不能简单按照钨含量比例进行换算。例如, 不能直接认为 97W 的 HVL 一定等于 90W 的 90/97, 也不能认为 97W 只需要 90W 约 92.8% 的厚度。实际结果需要根据具体合金组成、实际密度以及对应能量下的质量衰减系数计算。因此, 采购钨合金屏蔽件时, 如果客户提出 HVL 或 TVL 指标, 应同时明确材料牌号、钨含量和最低密度要求。



(6) HVL 和 TVL 如何用于计算钨合金屏蔽厚度?

如果已经获得某种钨合金在目标射线能量下的半值层 (HVL) 或十分之一值层 (TVL),

就可以快速估算理论厚度。其基本关系式为: $I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$

式中, I_0 为入射射线强度, I 为穿过厚度 x 后的射线强度, μ 为线性衰减系数。半值层

(HVL) 与线性衰减系数的关系为: $HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$

十分之一值层 (TVL) 与线性衰减系数的关系为: $TVL = \frac{\ln 10}{\mu}$

且二者关系为: $TVL = \frac{\ln 10}{\ln 2} \cdot HVL \approx 3.322 \cdot HVL$

透射率 T (即 I/I_0) 与以 HVL 计数的厚度 n 的关系为: $T = \left(\frac{1}{2}\right)^n$

其中: $n = \frac{x}{HVL}$

透射率 T 与以 TVL 计数的厚度 m 的关系为: $T = \left(\frac{1}{10}\right)^m$

其中: $m = \frac{x}{TVL}$

例如, 假设某种钨合金在特定 γ 射线能量下, 其 $HVL \approx 4$ mm。那么理论上:

2 个 HVL: 厚度 $x = 2 \times 4 = 8$ mm, 透射率 $T = (1/2)^2 = 1/4 = 25\%$;

4 个 HVL: 厚度 $x = 4 \times 4 = 16$ mm, 透射率 $T = (1/2)^4 = 1/16 = 6.25\%$;

约 6.64 个 HVL: 厚度 $x = 6.64 \times 4 = 26.56 \approx 26.6$ mm, 透射率 $T = (1/2)^{6.64} \approx 1\%$ 。

如果直接采用 TVL 计算更加方便。假设该钨合金的 $TVL \approx 13.3$ mm (由 $4 \times 3.322 \approx 13.3$ mm)。

那么:

1 TVL: 厚度 $x = 13.3$ mm, 透射率 $T = (1/10)^1 = 10\%$;

2 TVL: 厚度 $x = 2 \times 13.3 = 26.6$ mm, 透射率 $T = (1/10)^2 = 1\%$;



3 TVL: 厚度 $x = 3 \times 13.3 = 39.9\text{mm}$, 透射率 $T = (1/10)^3 = 0.1\%$ 。

这说明, TVL 特别适合用于高衰减要求的屏蔽设计。

(7) HVL、TVL 与铅当量有什么区别?

HVL 和 TVL 描述的是某一种具体材料在特定辐射条件下的衰减能力, 而铅当量则是一种材料等效性能表达方式。例如, 医疗 X 射线防护中经常出现:

铅当量 (mm Pb) = 某屏蔽材料在指定射线条件和测试布置下, 达到与厚度 t_{Pb} (mm)

纯铅相同衰减效果时, 该材料的厚度 $t_{\text{材料}}$ 所对应的等效铅厚度。

其含义不是简单地说明屏蔽材料厚度为 2 mm, 而是表示该屏蔽结构在规定射线质量和测试条件下具有相当于 2 mm 铅的衰减效果。因此, 钨合金屏蔽件不能单按照密度比例直接换算成铅当量。准确的铅当量比较需要考虑: 射线能量、管电压及滤过条件、钨合金实际密度、材料厚度、射线束几何条件、测试方法。对于医疗防护、CT、核医学等应用, 铅当量最好通过相应标准规定的方法进行验证, 而不是仅依据理论密度进行推算。若已知某材

料在相同条件下的线性衰减系数 $\mu_{\text{材料}}$ 和纯铅的线性衰减系数 μ_{Pb} , 则在同一射线质量和

几何条件下, 厚度为 $t_{\text{材料}}$ 的材料对应的铅当量 $t_{\text{Pb, eq}}$ 可由下式近似求得 (基于指数衰减):

$$e^{-\mu_{\text{材料}} t_{\text{材料}}} = e^{-\mu_{\text{Pb}} t_{\text{Pb, eq}}}$$

$$\text{两边取对数得: } t_{\text{Pb, eq}} = \frac{\mu_{\text{材料}}}{\mu_{\text{Pb}}} \cdot t_{\text{材料}}$$

但需注意: 该公式仅在窄束、单能射线且两种材料均满足指数衰减规律时成立; 对于宽束、多能谱或散射较强的实际情况, 该线性比值关系不成立, 必须通过实测或标准方法验证。

(8) 实际工程中为什么不能只依靠 HVL 和 TVL?

HVL 和 TVL 非常适合用于材料筛选和初步厚度估算, 但实际工程屏蔽设计还需要考虑散射和 Build-up 效应。理想窄束条件可以表示为: $I = I_0 e^{-\mu x}$

其中, I_0 为入射光子强度, μ 为线性衰减系数, x 为屏蔽层厚度。

而实际宽束条件下, 散射光子可能进入探测区域, 因此可以进一步表示为: $I = B \cdot I_0 e^{-\mu x}$

其中, B 为 Build-up factor, 即积累因子 ($B \geq 1$, 与光子能量、屏蔽材料、几何条件及探测响应有关)。此外, 还需要考虑源强、源到屏蔽件距离、屏蔽件到人员或探测器距离、



屏蔽结构形状、接口和接缝、孔洞、准直孔以及复杂结构中的散射路径。因此, 医疗直线加速器、工业 γ 射线探伤、放射源容器等安全关键产品, 不能只根据 HVL 或 TVL 简单确定最终厚度。

(9) 钨合金屏蔽件制造商需要客户提供哪些 HVL/TVL 计算条件?

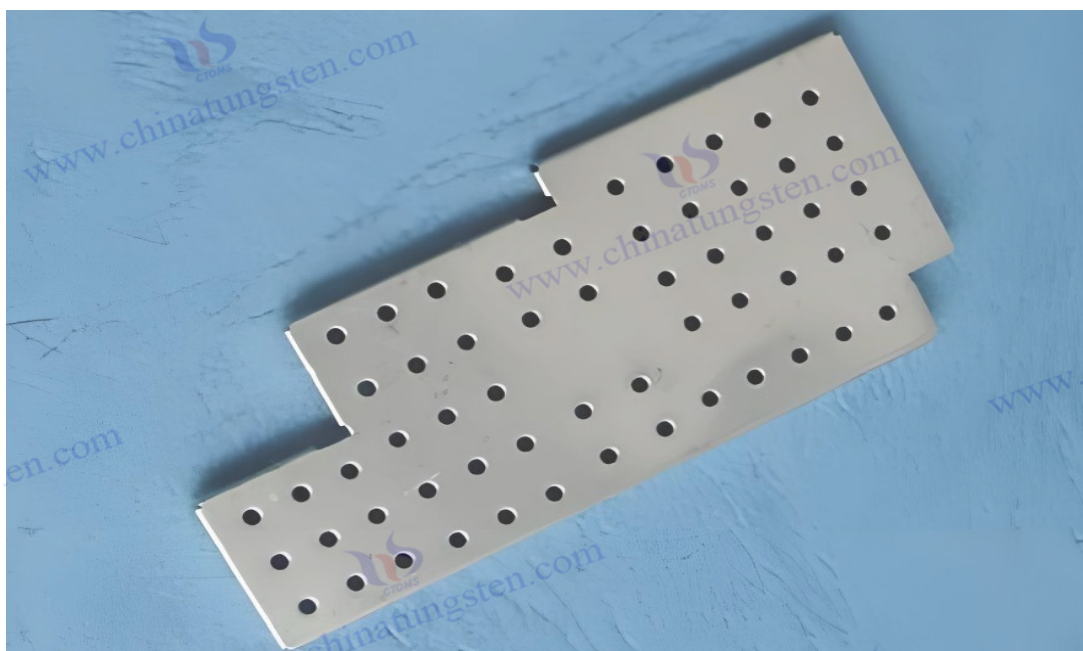
如果客户希望专业制造商根据实际工况设计钨合金屏蔽件, 建议至少提供射线类型、放射源或设备型号、光子能量或 X 射线管电压、源强或剂量率、目标透射率、允许剂量率、工作距离、屏蔽件空间限制、材料密度要求以及最终检测标准。例如, 客户如果只提出需要一个 10 mm 厚的 95W 钨合金屏蔽件, 制造商实际上无法判断 10 mm 是否足够。只有知道是 80 kVp X 射线、662 keV Cs-137 还是 Co-60 高能 γ 射线, 以及要求降低到原剂量的 10%、1% 还是 0.1%, 才能判断这个厚度是否合理。

对于中钨智造等专业钨合金屏蔽件制造企业而言, HVL 和 TVL 通常是从辐射防护计算进入材料设计和结构制造的重要接口。客户提供完整工况后, 可以进一步确定 90W、93W、95W、97W 等不同密度等级材料, 并结合屏蔽厚度、孔径、结构尺寸和加工精度进行综合设计。

(10) HVL 和 TVL 在钨合金屏蔽件采购中有什么实际意义?

对于普通用户而言, HVL 和 TVL 可以帮助理解钨合金的屏蔽能力; 对于专业采购人员而言, 它们则可以成为供应商技术能力评价的重要依据。如果供应商只说明钨合金密度达到 18 g/cm³, 却无法说明目标射线能量、衰减系数或者 HVL/TVL 数据, 那么这些信息实际上不足以完成专业屏蔽设计。比较规范的技术询价方式应当是: 射线类型 → 光子能量 → 材料牌号及密度 → HVL/TVL 或衰减系数 → 目标衰减率 → 屏蔽厚度 → 实际辐射测试。

最终对于医疗、核医学、工业无损检测以及放射源屏蔽等应用, 建议把 HVL/TVL 理论计算与实际辐射测试结合起来。理论值用于确定初始结构和材料方案, 实验数据则用于验证最终产品是否满足实际屏蔽要求。这样才能避免仅凭材料密度或单一厚度判断钨合金屏蔽性能。



10. 90W、93W、95W、97W 钨合金屏蔽性能有什么区别？

90W、93W、95W、97W 通常是以钨质量分数进行区分的钨重合金体系，其中 W 含量分别约为 90%、93%、95% 和 97%。随着钨含量提高，合金密度通常由约 17 g/cm³ 逐渐提高至接近 19 g/cm³，因此在相同射线能量、相同几何条件和相同目标衰减率下，高钨含量材料通常可以实现更高的单位厚度衰减能力，或者在达到相同屏蔽效果时采用更薄的结构。

但从专业辐射防护角度看，不能简单理解为 97W 一定比 90W 强多少，也不能按照钨含量百分比直接计算屏蔽能力。真正决定屏蔽效果的是光子能量、材料密度、质量衰减系数、实际厚度、散射条件以及结构设计。因此，90W、93W、95W、97W 的选择实际上是屏蔽性能、尺寸、机械性能、加工性能、成本和使用环境之间的综合平衡。

（1）90W、93W、95W、97W 的基本区别

典型钨重合金的钨含量与密度大致可以按照下表理解：

材料体系	名义钨含量	典型密度范围*	屏蔽能力趋势	典型应用倾向
90W	≥90 wt. %	约 16.8~17.2 g/cm ³	基准	一般辐射屏蔽、配重、结构件
93W	≥93 wt. %	约 17.3~17.7 g/cm ³	较 90W 提高	医疗屏蔽、工业防护、准直结构
95W	≥95 wt. %	约 17.8~18.2 g/cm ³	较高	医疗、核医学、精密屏蔽件
97W	≥97 wt. %	约 18.3~18.8 g/cm ³	高	高密度、空间受限及高端屏蔽组件
备注	实际密度取决于 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 等合金体系、粉末粒度、烧结工艺和致密度，具体不能仅根据牌号确定密度			

这里最值得关注的是：钨含量增加通常伴随密度增加，而对于 X 射线和 γ 射线屏蔽而言，

密度直接影响线性衰减系数： $\mu = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho$ ，其中： μ 为线性衰减系数（单位：cm⁻¹）， μ/ρ

为质量衰减系数（单位：cm²/g）， ρ 为材料密度（单位：g/cm³）。因此，在相同光子能



量下（即 μ/ρ 基本相同时），密度较高的 97W 通常具有更高的线性衰减能力（ μ 更大）。

（2）为什么钨含量越高，通常屏蔽性能越好？

这里最值得关注的是：钨含量增加通常伴随密度增加，而对于 X 射线和 γ 射线屏蔽而言，

密度直接影响线性衰减系数： $\mu = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho$ ，其中： μ 为线性衰减系数（单位： cm^{-1} ）， μ/ρ

为质量衰减系数（单位： cm^2/g ）， ρ 为材料密度（单位： g/cm^3 ）。因此，在相同光子能

量下（即 μ/ρ 基本相同时），密度较高的 97W 通常具有更高的线性衰减能力（ μ 更大）。

X 射线和 γ 射线进入钨合金后，会与材料中的原子发生光电吸收、康普顿散射以及在更高能量下的电子对效应等相互作用。在相同能量条件下，材料的单位体积质量越高，单位厚度内参与光子相互作用的原子数量通常越多，因此具有更强的辐射衰减能力。对于理想单

能窄束条件，可以采用指数衰减规律： $I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$ ，或改写为： $x = \frac{\ln(I_0/I)}{\mu}$ ，其中： I_0 为

入射光子强度， I 为透射光子强度， μ 为线性衰减系数（单位： cm^{-1} ）， x 为屏蔽厚度（单位： cm ）。

因此，如果 97W 的实际线性衰减系数高于 90W，那么达到同一透射率（即相同的 I/I_0 ）

所需要的理论厚度就可能更小。例如，某一特定光子能量下，假设 90W 需要 20 mm 才能达到目标衰减率，而 97W 通过材料数据计算得到的相应设计厚度为 18 mm，那么 97W 可以在较小空间内实现同等屏蔽效果。但是这个 18 mm 不能脱离具体射线能量独立成立。换一种能量，二者的半值层（HVL）、十分之一值层（TVL）和所需厚度都可能发生变化。

（3）90W 与 93W 有什么区别？

90W 属于比较典型的高密度钨重合金，能够在成本、密度、机械性能和加工性能之间取得较好的平衡。93W 相较于 90W 具有更高的钨含量和通常更高的密度，因此在空间受限的屏蔽结构中具有一定优势。例如，在医疗设备局部屏蔽、工业探伤装置以及需要一定机械强度的屏蔽组件中，93W 可以作为较为均衡的材料选择。如果设备空间充足、屏蔽厚度不是主要限制因素，90W 可能已经能够满足要求；如果希望进一步降低屏蔽壁厚，93W 则具有更大的设计余量。因此，90W 并不意味着屏蔽性能不足，而是代表一种更加注重综合成本和结构性能的材料方案。

（4）93W 与 95W 有什么区别？

95W 进一步提高了钨含量和密度，因此在相同几何条件下通常可以获得更高的单位厚度辐射衰减能力。这类材料特别适合对空间和重量有较高要求的设备。例如，医疗准直器、放射性药物注射器屏蔽套、屏蔽环、放射源局部屏蔽件等，都可能采用 95W 级别的钨重



合金。

与此同时，95W 并不一定在所有方面都优于 93W。随着钨相比例提高，材料的组织、加工特性、韧性和成本也会发生变化。对于存在复杂内孔、薄壁结构、细小槽孔或复杂曲面的零件，制造商需要综合考虑材料可加工性和最终结构强度。因此，如果 93W 已经能够满足目标屏蔽率，而产品又需要大量 CNC 加工，那么为了追求更高密度而直接选择 95W 未必是最经济的方案。

(5) 95W 与 97W 有什么区别？

97W 属于更高钨含量的钨重合金，典型密度可以达到 $18.3 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ 甚至接近 19 g/cm^3 ，因此特别适合对单位体积屏蔽能力要求较高的场景。其核心优势是空间效率。例如，某个医疗设备内部只能允许有限的屏蔽壁厚，如果 90W 或 93W 无法在允许尺寸内达到目标衰减率，那么提高到 95W 或 97W 可能成为解决方案。97W 尤其适合高密度屏蔽块、局部准直结构、精密屏蔽环以及空间极其有限的设备组件。不过，97W 通常也意味着更高的材料成本、更高的加工要求以及更严格的烧结和组织控制。因此，不能简单认为所有屏蔽件都应该选择 97W。

(6) 四种材料的 HVL 和 TVL 是否存在固定对应值？

不存在。这是实际采购过程中非常重要的一点。HVL 和 TVL 与射线能量高度相关：

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu}, TVL = \frac{\ln 10}{\mu}, \text{ 而: } \mu = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho。 \text{ 因此, HVL 和 TVL 不仅取决于 90W、93W、95W、}$$

97W 的实际密度 (ρ)，还取决于目标光子能量下的质量衰减系数 (μ/ρ)。例如，Cs-137 的主要 γ 射线能量约为 662 keV；Co-60 则主要为约 1.17 MeV 和 1.33 MeV。二者的光子能量不同，因此即使采用完全相同的 97W 材料，其 HVL 和 TVL 也不会相同。同样，80 kVp、120 kVp 和 150 kVp 的 X 射线具有不同的连续能谱，其屏蔽设计也不能简单使用一个固定 HVL 值。所以，专业技术文件应该写成：**某牌号钨合金 + 实际密度 + 特定射线能量/能谱 + 对应 HVL/TVL**，而不能只写 97W 的 HVL 是多少。

(7) 四种材料的实际屏蔽能力能否按照密度直接比较？

可以进行趋势判断，但不能仅凭密度进行最终设计。在同一光子能量和近似相同材料组成条件下，可以利用线性衰减系数理解四者之间的关系。假设其他条件完全一致，密度从 17.0 g/cm^3 提高到 18.7 g/cm^3 ，理论上线性衰减系数也会随密度提高。但这里存在一个重要问题：90W、93W、95W、97W 不仅仅是密度不同，其合金体系、W 相体积分、Ni-Fe 或 Ni-Cu 粘结相比例以及显微组织也可能不同。因此，更准确的工程比较应该采用：**实际密度 + 对应能量下的质量衰减系数 + 实际厚度**。而不是简单采用：**钨含量百分比 = 屏蔽能力百分比**。

(8) 如果屏蔽厚度相同，四种材料谁的屏蔽能力更强？

在其他条件相同的情况下，通常可以认为： $\mu = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho$ 。即随着钨含量和密度提高，单

位厚度的光子衰减能力通常增强。但这只是一个工程趋势，而不是可以用于所有能量范围的



固定倍率关系。例如，在相同厚度下，97W 通常比 90W 能够实现更高的衰减；反过来，如果要求四种材料达到相同的衰减率，则 97W 通常可以采用更薄的屏蔽层。这也是高钨含量钨合金在空间受限医疗设备和精密仪器中具有价值的主要原因。

(9) 如果屏蔽性能相同，哪一种材料可以做得最薄？

一般而言，97W 具有最大的潜力，其次为 95W、93W 和 90W。

可以用面密度进一步理解这一问题： $m_A = \rho \cdot x$

其中 m_A 为单位面积质量， ρ 为材料密度， x 为屏蔽厚度。高密度材料的优势并不仅仅是厚度降低，还可能在同一屏蔽能力下改变整个设备的重量分布和结构尺寸。不过，对于航空航天和便携式医疗设备，不能简单认为越薄越好，因为钨合金本身密度极高。设计人员还必须综合考虑总重量、重心、结构刚度以及人体工学。

(10) 90W、93W、95W、97W 应该如何选择？

可以从实际应用角度进行初步判断：

使用需求	推荐考虑
一般工业辐射屏蔽	90W、93W
对成本较敏感	90W、93W
医疗设备局部屏蔽	93W、95W
核医学屏蔽件	95W、97W
空间高度受限	95W、97W
高密度准直器	95W、97W
复杂精密加工结构	根据加工难度综合选择
极高衰减要求	优先评估 95W、97W
大批量普通屏蔽结构	90W、93W 通常更具经济性

这只是材料选型的初步参考，最终仍然应该根据实际辐射能量和目标衰减率进行计算。

(11) 钨含量高是否意味着机械性能一定更好？

不一定。钨合金的机械性能不仅由钨含量决定，还与粘结相组成、钨颗粒尺寸、晶粒结构、烧结温度、烧结气氛以及后处理状态有关。因此，97W 虽然密度通常高于 90W，但并不意味着其在所有机械性能指标上都一定优于 90W。对于钨合金屏蔽件而言，尤其要关注抗拉强度、硬度、断裂韧性、抗冲击性能、尺寸稳定性和加工后的边缘完整性。对于存在细长结构、薄壁结构和深孔的屏蔽件，还需要重点考虑材料在 CNC 加工过程中是否容易产生崩边、裂纹或尺寸变形。

(12) 为什么高钨含量材料通常价格更高？

主要原因包括钨原料成本、粉末冶金成本、烧结成本以及精密加工成本。以 90W 和 97W 为例，后者不仅含有更多高价值钨原料，而且为了实现更高密度，生产过程对粉末粒度、压制、烧结和组织均匀性往往具有更高要求。如果最终产品还需要进行磨削、抛光、精密



内孔加工或复杂三维结构加工, 那么材料成本只是总成本的一部分, 后续加工成本也可能明显增加。

因此, 采购钨合金屏蔽件时不应简单按照每公斤价格判断哪种材料最合适, 而应比较单位屏蔽性能对应的综合成本。

(13) 中钨智造如何根据屏蔽要求选择材料?

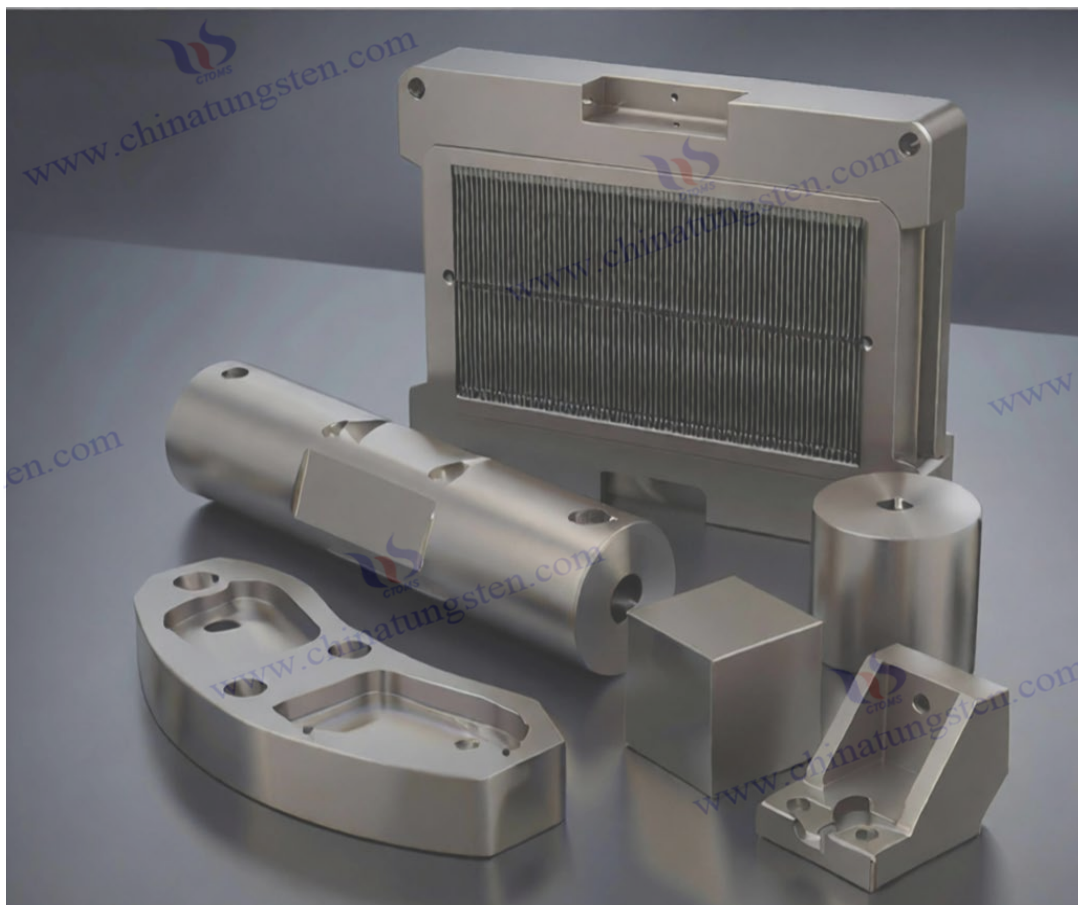
对于专业钨合金屏蔽件, 材料选择通常应该按照: 射线类型 → 光子能量 → 目标衰减率 → 空间限制 → 密度要求 → 机械性能 → 加工复杂程度 → 成本这一流程确定。

中钨智造可以根据客户的 X 射线或 γ 射线能量、源强、目标透射率、允许厚度以及零件结构, 协助评估 90W、93W、95W 和 97W 等材料, 并进一步加工成钨合金准直器、屏蔽环、屏蔽套、屏蔽块、屏蔽座、放射源容器等精密零件。对于医疗、核医学、工业无损检测等应用, 客户最好提供设备参数、射线源类型、能量范围、目标屏蔽率和工程图纸, 而不是只提出例如 95W、10 mm 厚度这样的单一要求。

(14) 90W、93W、95W、97W 并不是简单的高低等级关系

综合来看, 四种材料更适合被理解为不同的工程设计等级, 而不是简单的好与坏。90W 强调综合经济性和结构性能; 93W 在密度、成本和加工性能之间取得进一步平衡; 95W 适合对屏蔽能力和空间效率要求较高的医疗、核医学及精密设备; 97W 则更加适合空间极其有限、要求高面密度和高单位厚度衰减能力的高端屏蔽结构。因此, 真正专业的钨合金屏蔽件选型不是追求最高钨含量, 而是在满足目标屏蔽性能的前提下, 选择最合理的材料密度和制造工艺。

对于实际项目而言, 最合理的技术路线是先确定射线能量和目标衰减率, 再计算 HVL、TVL 或线性衰减系数, 随后比较 90W、93W、95W、97W 所需的理论厚度、重量、机械性能和加工成本, 最后通过实际屏蔽测试验证设计。这样才能真正确定哪一种钨合金最适合具体的辐射屏蔽件, 而不是单纯依据钨含量越高越好来选择材料。



11. 钨合金屏蔽件可以用于 X 射线设备吗？

钨合金是 X 射线设备中非常重要的高密度屏蔽材料之一，尤其适用于空间受限、需要高局部衰减能力、同时要求较高机械强度和尺寸精度的部件。与传统铅屏蔽材料相比，钨合金的核心优势并不是在所有 X 射线能量下都具有绝对更高的屏蔽能力，而是在高密度、高强度、耐磨性、尺寸稳定性以及精密加工能力之间具有较好的综合性能。目前，钨合金屏蔽件可以应用于医用 X 射线机、CT 设备、数字 X 射线成像系统、介入设备、牙科 X 射线设备、工业 X 射线检测设备、X 射线荧光分析仪器以及部分科研成像装置等。其典型形式包括钨合金屏蔽块、屏蔽套、屏蔽环、准直器、限束器、局部防护件以及 X 射线源附近的高密度结构件。

（1）为什么 X 射线设备需要钨合金屏蔽件？

X 射线本质上属于高能电磁辐射。X 射线管工作时，电子在高电压作用下高速运动并撞击靶材，其中只有一小部分电子能量最终转化为 X 射线，大量能量转化为热量。X 射线设备的屏蔽设计主要有两个目的：一是限制不需要的散射和泄漏辐射，二是控制 X 射线束的方向和几何范围。对于医疗设备而言，这一点尤其重要。X 射线必须按照预定方向照射患者和探测器，而不能让大量非目标射线进入设备内部其他区域。因此，很多部件不仅需要具备屏蔽功能，还需要同时具备准直、定位和结构支撑功能。

钨合金正适合这种多功能需求。



(2) 钨合金为什么能够屏蔽 X 射线?

钨合金具有较高密度和较高平均原子序数。对于 X 射线光子而言, 进入钨合金后会发生光电吸收、康普顿散射等相互作用, 使入射光子强度不断降低。在理想窄束条件下, 可以使用指数衰减关系:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

其中: I_0 为入射 X 射线强度, I 为透射强度, μ 为材料的线性衰减系数 (单位: cm^{-1}), x 为屏蔽材料厚度 (单位: cm)。

而:

$$\mu = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho$$

其中: μ/ρ 为质量衰减系数 (单位: cm^2/g), ρ 为材料密度 (单位: g/cm^3)。

因此, 材料密度 ρ 越高, 在相同光子能量下 (即 μ/ρ 基本相同时) 通常能够获得更高的单位厚度衰减能力 (即 μ 更大)。常见钨重合金密度大致处于 $17 \sim 18.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ 范围, 高于铅的约 $11.34 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。这使钨合金特别适合需要高面密度或小体积高衰减能力的结构。

(3) 钨合金可以用于哪些 X 射线设备?

其应用范围比较广泛。医用 X 射线摄影设备中, 可以用于 X 射线源组件、限束器、局部屏蔽结构等; CT 设备中, 可用于 X 射线管周围局部屏蔽以及准直结构; 介入 X 射线设备中, 可以用于需要高密度和高机械强度的局部防护部件; 牙科 X 射线设备由于设备尺寸较小, 对高密度、紧凑型屏蔽结构具有较高需求。在工业领域, 钨合金还可用于工业 X 射线探伤设备、X 射线检测系统、X 射线荧光分析仪、材料分析设备以及科研用 X 射线源装置。尤其对于便携式设备而言, 结构空间通常非常有限, 因此高密度钨合金具有明显的工程价值。

(4) 钨合金在 X 射线设备中最重要的应用之一是准直器

准直器的作用不是简单阻挡 X 射线, 而是控制 X 射线束的方向、尺寸和几何形状。例如, 在 X 射线成像设备中, 需要让 X 射线尽可能集中在有效成像区域。如果射线束过宽, 就会增加无效辐射和散射, 同时降低成像质量。钨合金可以加工成具有精密孔径、狭缝、锥形孔以及复杂内部通道的准直结构。因此, 钨合金准直器通常需要同时满足: 高密度、低透射率、孔径精度高、内孔同轴度高、表面质量稳定、机械强度高以及长期尺寸稳定性好。这也是钨合金相对于传统软质屏蔽材料的重要优势之一。

(5) 钨合金可以用于 X 射线限束器吗?

可以。X 射线限束器用于限制 X 射线束的照射范围, 其设计需要兼顾辐射衰减和机械运动性能。如果采用传统铅材料, 虽然铅具有良好的 X 射线屏蔽能力, 但其硬度较低、机械强度有限, 在需要频繁运动、精确定位或长期保持几何精度的组件中存在一定局限。钨合金具有更高的机械强度和硬度, 因此适用于需要精密定位的局部屏蔽组件。不过, 具体选择



仍取决于设备结构、X 射线能谱和运动机构要求。

(6) 不同 X 射线管电压下, 钨合金屏蔽厚度是否一样?

不一样。这是 X 射线屏蔽设计中非常重要的问题。

例如, 80 kVp、100 kVp、120 kVp 和 150 kVp X 射线设备产生的光子能谱不同。即使 X 射线管的峰值电压相同, 实际 X 射线能谱还会受到靶材、滤过、管电流以及设备结构等因素影响。

随着 X 射线能量提高, 光子穿透能力通常增强, 因此达到相同衰减率所需的钨合金厚度也可能增加。所以不能简单地说: 120 kVp 设备采用 2 mm 钨合金就一定足够。正确的工程设计应该根据实际 X 射线能谱、剂量率和目标透射率进行计算或测试。

(7) X 射线设备中如何计算钨合金屏蔽厚度?

初步设计可以使用窄束单能射线指数衰减公式:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

其中: I_0 为入射射线强度, I 为穿过屏蔽层后的射线强度, μ 为屏蔽材料的线性衰减系数

(cm^{-1}), x 为屏蔽厚度 (cm)。

如果目标是降低到原始强度的 1%, 即:

$$\frac{I}{I_0} = 1\% = 0.01$$

则代入公式可得: $0.01 = e^{-\mu x}$, 两边取自然对数, 解得所需屏蔽厚度 x :

$$x = -\frac{\ln(0.01)}{\mu} = \frac{\ln(100)}{\mu} \approx \frac{4.605}{\mu}。 \text{ 因此: } x \approx \frac{4.605}{\mu}$$

如果采用半值层 (HVL) 表示, 半值层定义为使射线强度减弱一半所需的屏蔽厚度, 即:

$$= I_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n, \text{ 其中 } n = x/\text{HVL} \text{ 为半值层个数。要使强度降至 } 1\%, \text{ 则: } \left(\frac{1}{2}\right)^n = 0.01$$

$$\text{解得: } n = \frac{\ln(0.01)}{\ln(0.5)} = \frac{\ln(100)}{\ln(2)} \approx \frac{4.605}{0.693} \approx 6.64$$

在理想单能窄束条件下, 这意味着约 6.64 个 HVL 可以将强度降低至约 1%。但是实际 X 射线设备属于宽能谱辐射, 存在散射和 Build-up (累积) 效应, 因此不能直接把这个公式作为最终安全屏蔽厚度。正式设计还需要结合实际设备参数和相关辐射防护标准。

(8) 钨合金和铅用于 X 射线设备, 哪个更好?



不能简单回答谁绝对更好。如果主要考虑单位厚度屏蔽性能,二者必须按照具体 X 射线能谱进行比较;如果考虑综合工程性能,钨合金在很多精密设备中具有优势。

对比项目	钨合金	铅
密度	约 17~18.8 g/cm ³	约 11.34 g/cm ³
机械强度	高	较低
硬度	较高	较低
尺寸稳定性	较好	相对较弱
精密加工	可以进行 CNC、磨削等	较容易变形
高温性能	较好	较差
X 射线屏蔽	优秀	优秀
空间受限应用	优势明显	受厚度限制
成本	较高	通常较低
柔性大面积防护	不占优势	优势明显

因此,铅仍然适用于机房墙体、防护门、防护屏等大面积、低成本屏蔽结构;钨合金则更加适合小型化、精密化、局部高密度屏蔽以及同时承担机械功能的零部件。

(9) 为什么医疗 X 射线设备特别适合采用钨合金精密屏蔽件?

医疗设备通常存在几个典型特点:设备体积受限、零件结构复杂、辐射场精确控制要求高、设备需要长期稳定工作,并且部分组件需要反复运动。钨合金可以将屏蔽和机械结构结合起来。例如一个钨合金准直器既可以降低非目标方向 X 射线透射,又可以通过精密内孔控制束流;钨合金屏蔽环既可以提供局部辐射防护,又可以作为设备内部的定位结构。这种结构集成能力是高密度钨合金的重要价值。

(10) 钨合金屏蔽件可以加工多复杂?

根据材料牌号、尺寸和结构不同,可以进行车削、铣削、磨削、钻孔、内孔加工以及精密 CNC 加工。但是钨合金属于高密度、高硬度材料,加工难度明显高于普通钢材。因此,复杂结构设计必须考虑刀具磨损、加工余量、薄壁变形、深孔加工、尖角崩裂以及表面粗糙度等问题。对于准直器和精密屏蔽环,除了材料密度之外,还应重点控制:孔径尺寸、孔位精度、同轴度、平行度、垂直度、壁厚、表面粗糙度和批次一致性。如果结构包含极细孔道或者复杂曲面,则应在设计阶段就考虑钨合金的加工可行性。

(11) 钨合金 X 射线屏蔽件采购时需要提供哪些参数?

专业采购不建议仅提供钨合金牌号和零件尺寸。至少应提供 X 射线设备类型、管电压 kVp、管电流 mA、靶材类型、滤过条件、工作距离、目标区域剂量率、允许透射率、屏蔽厚度限制以及零件图纸。如果是准直器,还应进一步提供孔径、孔深、束流角度、准直几何结构以及与探测器之间的位置关系。如果是医疗或安全关键应用,还需要明确所依据的辐射防护标准和最终检测要求。

(12) 中钨智造可以提供 X 射线用钨合金屏蔽件吗?

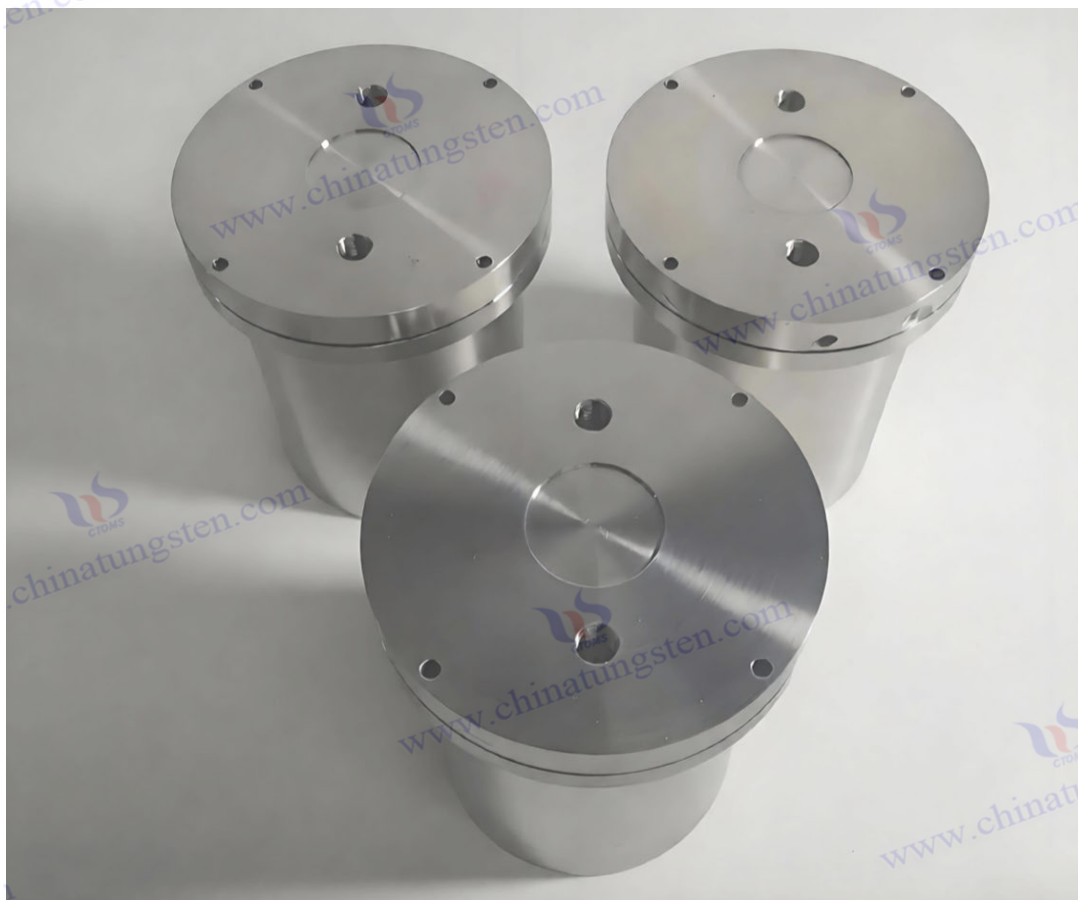
可以。中钨智造是钨合金屏蔽件及高密度钨材料精密零部件的专业制造企业,可根据客户的 X 射线能量、设备结构和屏蔽目标,对 90W、93W、95W、97W 等不同钨含量钨合金



金进行材料选型, 并进一步制造钨合金屏蔽块、屏蔽环、屏蔽套、准直器、限束结构及其他异形屏蔽件。对于专业项目, 更合理的流程是由 X 射线设备参数确定辐射屏蔽要求, 再根据目标衰减率计算理论厚度, 随后结合零件尺寸、机械载荷、加工精度和成本选择合适的钨合金牌号。

最终产品还应通过实际辐射测试验证其屏蔽性能, 而不能仅凭钨含量或材料密度判断是否符合要求。

钨合金完全可以用于 X 射线设备, 而且其优势主要集中在高密度、小型化、精密加工、高机械强度和尺寸稳定性等方面。对于大型机房墙体等大面积固定屏蔽, 铅和混凝土仍具有明显经济优势; 而对于 X 射线源附近、准直器、局部屏蔽环以及空间受限的精密组件, 钨合金往往具有更高的工程价值。



12. 钨合金可以用于 CT 设备吗?

钨合金是 CT 设备中具有重要工程价值的高密度屏蔽材料, 尤其适合用于 X 射线管组件、准直器、探测器周边局部屏蔽、射线束限制结构以及其他空间受限的精密辐射防护部件。CT 设备与普通 X 射线摄影设备相比, 其辐射屏蔽要求更加复杂。CT 机架内部的 X 射线管和探测器需要围绕患者高速旋转, X 射线束经过准直后形成扇形束或锥形束, 并在旋转过程中持续产生散射和泄漏辐射。因此, CT 内部屏蔽件不仅需要具有较高的 X 射线衰减能力, 还必须满足高速旋转、机械载荷、尺寸稳定性、热环境和精密定位等综合要求。钨合金恰好能够将高密度屏蔽性能与较高机械强度结合起来。



(1) 为什么 CT 设备需要高密度钨合金屏蔽件？

CT 设备的核心 X 射线源是 X 射线管。典型医用 CT 系统的管电压通常处于约 80~140 kVp 范围，高端系统还可能采用更高管电压；实际 X 射线能谱则受到管电压、靶材、滤过、阳极结构等多种因素影响。X 射线管产生的射线并不是全部都用于形成有效图像。除主射线束之外，还存在不同方向的泄漏辐射和散射辐射。因此，CT 机架内部需要通过局部屏蔽和准直结构限制非目标方向的 X 射线。钨合金的典型密度约为 17~18.8 g/cm³，明显高于铅的约 11.34 g/cm³。在空间有限的 CT 机架内部，高密度材料能够通过较小的结构尺寸获得较高的单位厚度衰减能力。因此，钨合金的主要价值并不是简单替代 CT 设备中的所有铅，而是在有限空间内实现高效局部屏蔽。

(2) 钨合金可以用于 CT 设备哪些部件？

CT 设备中的钨合金应用可以按照功能划分为几大类。最重要的是 X 射线管附近的局部屏蔽结构，其主要作用是降低非目标方向的 X 射线泄漏；其次是准直器及限束结构，用于控制 X 射线束的几何范围；此外还可以用于探测器附近的局部屏蔽件、屏蔽环、屏蔽块、屏蔽座以及其他高密度精密结构件。对于某些特殊 CT 系统，还可能需要设计具有狭缝、孔道、锥孔或复杂曲面的钨合金屏蔽结构，以控制特定方向的辐射。因此，CT 用钨合金零件并不一定都是简单的厚板或圆柱体，而往往是根据设备内部空间和射线传播路径定制的精密异形件。

(3) CT 准直器为什么适合采用钨合金？

准直器是 CT 系统中的关键部件之一，其基本功能是限制 X 射线束的空间范围，使射线尽可能按照设计方向到达目标区域和探测器。准直器通常需要同时满足辐射衰减和几何精度要求。钨合金具有较高密度，因此可以在相对有限的厚度内获得较高 X 射线衰减；同时，其硬度和机械强度明显高于铅，能够更好地维持孔径、狭缝和边缘结构的几何稳定性。对于 CT 设备而言，这一点尤其重要，因为准直结构的尺寸和位置变化可能影响有效束宽、散射控制以及成像几何。因此，钨合金在 CT 准直器中的价值可以概括为：高密度屏蔽 + 精密加工 + 机械稳定 + 小型化设计。

(4) CT 设备中的钨合金屏蔽厚度是多少？

这里最值得关注的是：没有一个适用于所有 CT 设备的固定厚度。CT 使用的是连续能谱 X 射线，而不是单一能量的 γ 射线。即使两台设备的管电压都为 120 kVp，其实际 X 射线能谱也可能因靶材、滤过和工作参数不同而产生差异。理论计算可以使用：

$$I = I_0 \int_0^{E_{\max}} S(E) e^{-\mu(E) \cdot t} dE$$

其中： I 为透射后的 X 射线强度， I_0 为入射 X 射线强度， $S(E)$ 为归一化能谱分布函数（表示能量为 E 的光子所占权重）， $\mu(E)$ 为材料在能量 E 下的线性衰减系数（随能量变化）， t 为屏蔽层厚度， $E_{\max}$ 为 X 射线能谱的最大能量（对应管电压）。因此：



$$T(t) = \frac{I}{I_0} = \int_0^{E_{\max}} S(E) e^{-\mu(E) \cdot t} dE$$

即透射率 $T(t)$ 是厚度 t 的函数, 需在连续能谱下进行积分计算。但对于实际 CT 设备, 最终设计还必须考虑宽能谱、散射辐射、Build-up 效应、结构几何以及实际工作状态。因此, 工程上不能简单规定所有 CT 设备都使用例如 2 mm、3 mm 或 5 mm 钨合金。更准确的方法是根据 CT 设备的管电压、X 射线能谱、源强、屏蔽位置以及目标透射率计算, 并通过实测进行验证。

(5) CT 用钨合金的 HVL 和 TVL 是多少?

这里最值得关注的是: HVL, 即半值层, 是将特定辐射强度降低到原来 50% 所需的材料厚度; TVL, 即十分之一值层, 是将辐射强度降低到 10% 所需的材料厚度。理想单能窄束条件下: $I = I_0 e^{-\mu t}$, 其中: I 为透射后的辐射强度, I_0 为入射辐射强度, μ 为线性衰减系数,

$$t \text{ 为材料厚度。因此: } HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \approx \frac{0.693}{\mu}$$

$$TVL = \frac{\ln 10}{\mu} \approx \frac{2.303}{\mu}$$

即半值层和十分之一值层与线性衰减系数成反比, 且二者满足关系: $TVL \approx 3.32 \times HVL$

但是 CT 设备产生的是连续 X 射线谱, 因此不能给出一个脱离管电压、靶材、滤过条件和钨合金密度的固定 HVL 或 TVL。例如, 80 kVp、100 kVp、120 kVp 和 140 kVp 条件下的 X 射线穿透能力不同, 因此对应的钨合金屏蔽参数也会发生变化。专业 CT 屏蔽设计应采用实际能谱或者经过验证的等效能量进行计算, 而不是直接套用某一个固定 HVL。

(6) 90W、93W、95W、97W 哪种更适合 CT?

不能简单指定一种牌号适用于所有 CT 设备。

材料	典型密度	CT 应用特点
90W	约 17.0 g/cm ³	成本和综合机械性能较均衡
93W	约 17.5 g/cm ³	屏蔽能力与成本之间较平衡
95W	约 18.0 g/cm ³	适合空间受限的高密度屏蔽
97W	约 18.5~18.8 g/cm ³	适合高衰减、小体积精密屏蔽结构

如果 CT 机架内部空间比较宽裕, 90W 或 93W 可能已经能够满足设计要求; 如果空间非常有限, 95W 或 97W 可能更有优势。最终选择应比较材料厚度、重量、加工难度、机械强度以及总成本, 而不能单纯追求最高钨含量。

(7) 钨合金密度越高, CT 屏蔽效果一定越好吗?

在相同射线能量、相同材料体系和相同厚度条件下, 密度提高通常有利于提高线性衰减能力。



因为：其中 ρ 为材料密度。但是 90W、93W、95W、97W 不仅仅是密度不同，合金中的 W 相比比例、粘结相组成以及显微组织也可能不同。因此，最终设计不能只比较材料密度。更加可靠的工程数据应该包括材料实际密度、对应 X 射线能量下的质量衰减系数、实际屏蔽厚度以及实际测试透射率。

(8) 为什么 CT 设备不全部使用纯钨？

纯钨的密度约 19.25 g/cm^3 ，理论上具有非常优秀的高密度辐射屏蔽能力。但是纯钨也存在明显的工程限制，包括脆性较高、加工难度大、复杂结构加工成本高以及某些结构条件下抗冲击能力有限。钨重合金通过引入 Ni-Fe、Ni-Cu 等粘结相，可以在保持较高密度的同时改善韧性、机械加工性能和结构可靠性。因此，对于 CT 这类包含复杂精密结构的设备而言，钨重合金往往比单纯追求最高密度的纯钨更容易实现综合工程优化。

(9) CT 设备高速旋转对钨合金屏蔽件有什么要求？

这是 CT 应用区别于许多固定式 X 射线设备的重要因素。CT 机架内部的 X 射线管、准直器、探测器等组件需要高速旋转，屏蔽件因此会受到离心载荷和机械振动影响。钨合金密度非常高，因此相同体积下质量较大。设计人员必须特别关注：零件质量、重心位置、动平衡、安装强度、尺寸公差、旋转载荷以及长期疲劳寿命。对于高速旋转组件而言，屏蔽性能并不是唯一指标。一个密度很高但重量分布不合理的屏蔽件，反而可能增加机架动平衡设计难度。所以 CT 用钨合金零件通常需要同时进行辐射设计和机械结构设计。

(10) CT 用钨合金屏蔽件对加工精度有什么要求？

CT 内部精密屏蔽件往往需要控制尺寸、孔位、同轴度、平行度、垂直度以及表面粗糙度。如果零件具有准直孔或狭缝，则孔径误差可能直接影响 X 射线束几何；如果零件需要与其他旋转部件配合，则安装尺寸和同轴度也会影响整机性能。因此，专业采购时不能只规定：95W 钨合金，直径×长度。

还应该明确：材料牌号、实际密度、尺寸公差、孔径公差、位置度、同轴度、表面粗糙度、内部缺陷要求以及检测方法。对于医疗设备，最好同时明确材料证明和批次一致性要求。

(11) CT 钨合金屏蔽件如何进行质量检测？

根据零件用途不同，可以进行材料和尺寸两个层面的检测。材料方面通常关注钨含量、合金元素含量、密度、硬度、显微组织以及内部缺陷；尺寸方面则包括外径、长度、孔径、孔位、壁厚、同轴度、平面度、垂直度等。对于高端 CT 设备，还可以根据客户要求提供 CMM 三坐标尺寸检测、金相检测、无损检测以及材料批次追溯文件。最重要的是，材料检测和辐射屏蔽检测并不是同一件事。材料密度达到 18.5 g/cm^3 ，并不能自动证明一个复杂准直器已经满足指定 X 射线透射率。最终的屏蔽性能仍需要根据具体设备参数进行验证。

(12) 钨合金和铅在 CT 设备中如何选择？

两者并不是完全竞争关系。铅的优势是成本低、加工容易、屏蔽性能成熟，特别适合大面积固定式防护结构，例如 CT 机房墙体、防护门和部分防护屏。钨合金则更适合 CT 机架内部的小型、高密度、精密屏蔽结构。



对比项目	钨合金	铅
密度	约 17~18.8 g/cm ³	约 11.34 g/cm ³
局部高密度屏蔽	优势明显	较好
机械强度	高	较低
尺寸稳定性	较好	相对较差
精密 CNC 加工	可实现	较容易加工但机械性能有限
高温稳定性	优秀	较差
CT 旋转结构适应性	较好	需要结构优化
材料成本	较高	较低
大面积固定防护	成本较高	更经济

因此, CT 设备内部可以优先考虑钨合金, 而 CT 机房整体防护仍主要采用铅、混凝土等传统材料。

(13) 钨合金可以用于 CT 探测器周边吗?

可以, 但需要根据 CT 探测器结构进行具体设计。探测器周围的屏蔽结构主要用于降低非目标方向散射和杂散 X 射线对探测器信号的影响。钨合金能够加工成薄壁屏蔽件、环形结构、局部屏蔽块等, 有利于在有限空间内控制辐射传播路径。不过, CT 探测器对几何位置非常敏感, 因此屏蔽件不能简单增加厚度。材料尺寸、重量、安装位置以及对探测器视场的影响都必须纳入设计。

(14) CT 设备采购钨合金屏蔽件时应该提供哪些资料?

如果由专业制造商定制, 建议至少提供以下信息:

项目	建议提供的信息
设备类型	CT、工业 CT、锥束 CT 等
管电压	例如 80、100、120、140 kVp
X 射线源	靶材、焦点尺寸等
工作参数	管电流、曝光时间、工作周期
屏蔽位置	X 射线管、准直器、探测器等
目标指标	透射率、衰减率或剂量限制
材料要求	90W、93W、95W、97W 或由制造商推荐
尺寸	外形尺寸、厚度、孔径等
精度	尺寸、同轴度、位置度等
图纸	PDF、STEP、STP 等
检测要求	密度、成分、尺寸、内部质量、屏蔽测试等

如果客户无法确定钨合金牌号, 可以直接提供 CT 设备参数、零件用途、射线源条件以及产品图纸, 由制造商根据目标屏蔽性能进行材料选型。

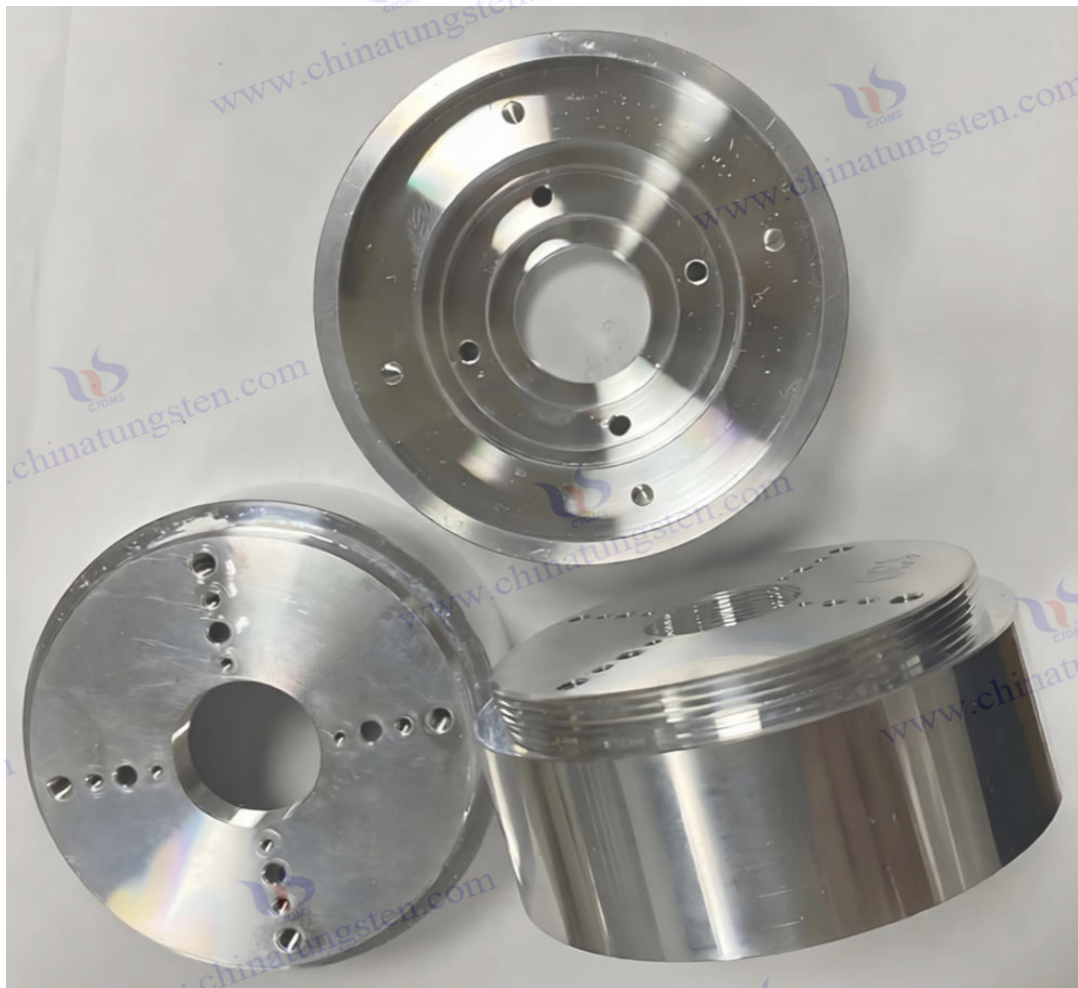
(15) 中钨智造可以定制 CT 用钨合金屏蔽件吗?

可以。中钨智造是专业钨合金材料及高密度钨合金精密零部件制造企业, 可根据 CT 设备



的具体结构和 X 射线屏蔽要求, 提供 90W、93W、95W、97W 等不同钨含量材料的选型和定制加工, 并可制造钨合金准直器、屏蔽环、屏蔽块、屏蔽套、局部防护件以及复杂异形屏蔽组件。对于 CT 项目, 推荐采用从射线参数到零件结构的逆向设计流程: 先确定管电压和实际 X 射线能谱, 再确定目标衰减率及允许透射率, 然后计算屏蔽厚度, 最后结合零件重量、旋转平衡、加工精度和装配要求确定具体钨合金牌号。

钨合金非常适合 CT 设备中的局部、精密和空间受限型 X 射线屏蔽, 但并非意味着 CT 整机或 CT 机房都应该采用钨合金。其真正的工程优势在于高密度、小型化、机械强度和精密加工能力的结合。对于 CT 内部的准直器、X 射线管周边屏蔽、探测器局部防护和复杂屏蔽结构, 钨合金往往比传统铅材料更具结构集成优势; 而对于大面积机房防护, 铅和混凝土等材料仍然具有更好的经济性。因此, CT 用钨合金屏蔽件的设计重点并不是单纯追求最高钨含量, 而是根据具体 X 射线能谱、目标衰减率、空间限制和机械条件, 在 90W、93W、95W、97W 等材料之间进行工程优化。





13. 钨合金准直器有什么作用？

钨合金准直器（Tungsten Alloy Collimator）是利用钨合金高密度、高原子序数以及良好的机械加工性能，对 X 射线、 γ 射线或其他高能光子束进行空间限制、方向控制和杂散辐射抑制的精密功能部件。其核心作用并不是简单地把射线完全挡住，而是通过特定的孔径、狭缝、通道、锥孔或多孔结构，使允许通过的射线形成预定的束流几何，从而提高射线利用率、空间分辨率和测量精度，同时降低非目标方向的辐射泄漏。

对于需要高密度、小体积和复杂几何结构的设备而言，钨合金准直器尤其具有优势。中钨智造（CTIA GROUP）长期从事钨及钨合金材料与精密钨制品制造，可根据射线能量、束流尺寸、安装空间、孔径和屏蔽要求，为医疗、核医学、工业无损检测及科研设备提供定制化钨合金准直部件。

（1）控制射线传播方向

X 射线和 γ 射线具有较强的穿透能力，如果没有准直结构，射线会向多个方向传播，容易形成散射和非目标辐射。钨合金准直器通过高密度材料形成对射线的强吸收区域，仅允许特定方向的射线通过。例如，在准直器中设计一个圆柱孔或锥形孔，射线只有沿孔道允许的几何角度才能有效穿过，而偏离设计方向的光子则被周围钨合金材料显著衰减。因此，准直器可以将发散射线束限制在规定的立体角范围内。对于点状或近似点状放射源，可以通过孔径与孔道长度控制束流发散角。简单几何条件下，孔径越小、有效孔道越长，准直角通常越小，射线束的方向选择性越强。

（2）降低散射辐射和本底信号

在 CT、核医学、 γ 射线探测、工业探伤等系统中，真正需要测量的往往是目标方向的有效射线，而不是设备内部、人体组织、工件或周围结构产生的散射光子。钨合金具有约 $17 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ 的高密度，典型高钨重合金的有效屏蔽能力明显高于普通钢材。在相同几何尺寸下，可以通过较薄的钨合金壁实现较高的面密度，从而有效削弱非目标方向的光子通量。因此，准直器实际上兼具两个功能：一方面允许目标射线通过，另一方面尽可能阻挡非目标射线。对于探测器系统而言，这能够降低背景计数和散射信号，提高信噪比（SNR）。

（3）提高成像和测量的空间分辨率

准直器的孔径、孔道长度和几何形状会直接影响射线束的空间分布。在核医学成像、SPECT、 γ 相机、X 射线检测以及部分科研探测设备中，准直器相当于射线系统中的空间选择器。通过精确设计孔径、孔距、隔板厚度和通道方向，可以限制只有来自特定方向的光子进入探测器。以平行孔准直器为例，大量相互平行的微孔形成规则通道。光子只有在满足特定入射方向条件时才能穿过孔道，因此能够实现空间定位。孔径越小通常有利于提高空间分辨能力，但同时会降低射线通过率；孔径增大则可以提高灵敏度，却可能降低空间分辨率。因此，准直器设计实际上需要在空间分辨率、灵敏度和屏蔽能力之间进行优化，而不是单纯追求最小孔径。

（4）形成特定的射线束形状

钨合金准直器不仅可以控制射线方向，还可以根据设备要求形成不同的射线束几何。常见结构包括圆孔准直器、锥孔准直器、狭缝准直器、矩形孔准直器、多孔准直器以及特



殊异形通道等。通过改变孔径、孔道长度、锥角和孔道排列,可以形成点束、扇束、锥束或狭缝状射线束。因此,在医疗放疗、核医学、工业探伤以及科研实验装置中,准直器往往是决定射线束形状的重要部件。

(5) 用于医疗放疗设备中的射线束控制

在医用直线加速器、放射治疗设备及相关高能辐射系统中,准直结构承担着限制射线束范围和控制剂量分布的重要作用。对于高能 X 射线或电子束相关系统,准直器需要在高剂量率、高能光子和长期辐照条件下保持尺寸稳定性。钨合金具有较高密度和良好的机械强度,可以用于某些固定式准直部件、局部屏蔽件及高密度射线束限制结构。对于多叶准直器 (MLC) 等复杂结构,还需要进一步考虑叶片材料的密度、厚度、叶片间泄漏、穿透率、机械运动精度及长期尺寸稳定性。实际设计不能仅依据材料密度判断,而需要通过蒙特卡罗模拟、实验测量以及设备剂量学验证确定最终结构。

(6) 用于核医学放射源和放射性药物系统

核医学是钨合金准直器非常典型的应用领域。

例如, SPECT 系统利用准直器限制 γ 光子的入射方向,使探测器能够根据光子传播方向进行空间定位。常见设计包括平行孔、针孔、发散孔和会聚孔等不同结构。钨合金也可以用于放射性药物注射器屏蔽套、注射器屏蔽环、放射源容器、源组件局部屏蔽和操作工具等。此类零件通常需要同时满足屏蔽、定位、装配和人体工学要求,因此对材料和加工精度的要求往往高于普通块状屏蔽体。

(7) 用于工业 γ 射线探伤和无损检测

工业无损检测中常见的 γ 射线源包括 Ir-192、Co-60、Se-75 等,不同放射源的主要光子能量和能谱不同,因此准直器不能采用统一的结构参数。例如, Ir-192 具有多个特征 γ 射线能量,平均能量约为 0.38 MeV; Co-60 则具有约 1.17 MeV 和 1.33 MeV 的主要 γ 射线,因此后者通常需要更高的屏蔽厚度和更严格的泄漏控制。工业准直器通常需要在较小体积内实现较高的射线衰减,同时承受现场环境中的机械冲击、磨损及温度变化。钨合金可以通过 CNC 加工制造复杂孔道、锥孔和定位结构,因此非常适合小型化、高密度工业射线准直组件。

(8) 钨合金准直器为什么通常采用高钨含量材料?

准直器的核心性能之一是单位厚度的射线衰减能力。

钨含量和最终密度越高,通常越有利于在有限厚度内获得较高的光子衰减能力。常见钨合金可以按照约 90W、93W、95W、97W 等不同钨含量进行设计。一般而言,随着钨含量增加,密度也会提高,例如典型产品的密度可以从约 17 g/cm³逐步提高至接近 19 g/cm³。但实际选择不能简单理解为钨含量越高越好。准直器还需要综合考虑韧性、抗冲击性能、加工性能、孔道完整性、尺寸稳定性和成本。对于具有微孔、薄壁或复杂内腔结构的准直器,过度追求密度可能会增加加工难度和制造成本,因此需要根据实际射线能量和几何结构优化材料牌号。

(9) 钨合金准直器的孔径为什么非常重要?

孔径直接影响射线束的几何尺寸、发散角、灵敏度和空间分辨率。

对于简单圆孔结构,可以通过孔径、孔道长度和源—准直器距离估算射线束的几何扩展。



孔径越小, 通常可以获得更窄的射线束, 但有效光子通量也会降低; 孔径越大, 则射线通过率提高, 但方向选择性下降。因此, 专业准直器设计通常需要同时确定孔径、孔长、孔壁厚度、锥角以及目标束流尺寸, 而不是只给出一个孔径参数。

(10) 钨合金准直器需要多厚?

没有一个适用于所有设备的固定厚度。

准直器的壁厚必须依据射线类型、光子能量、源强、目标泄漏率、允许剂量率、几何结构以及安全标准计算。对于 γ 射线, 可以根据线性衰减系数 μ 使用指数衰减模型进行初步估算:

其中, I_0 为入射强度, I 为穿过屏蔽材料后的强度, μ 为材料在特定光子能量下的线性衰减系数, x 为材料厚度。实际工程中还需要考虑散射、Build-up Factor、复杂几何结构以及多次散射效应, 因此不能仅使用理想窄束条件下的简单指数公式确定最终产品尺寸。医疗、核工业及工业射线源设备还应结合实际剂量学测试或专业辐射屏蔽计算进行验证。

(11) 钨合金准直器制造为什么对加工精度要求很高?

准直器与普通屏蔽块最大的区别之一, 就是其内部通常存在精密孔道、狭缝或复杂曲面。孔径误差、孔道偏心、孔壁粗糙度以及装配误差, 都可能改变射线束的实际几何分布。因此, 专业钨合金准直器通常需要控制外形尺寸、孔径、孔距、同轴度、垂直度、位置度、直线度及表面粗糙度等指标。对于多孔准直器, 还需要保证不同孔道之间具有高度一致的几何参数。

此外, 钨重合金属于高硬度、高密度粉末冶金材料, 加工过程中存在刀具磨损、崩边和尺寸回弹等问题, 因此精密 CNC 加工、磨削和抛光工艺对于最终质量非常关键。

(12) 钨合金准直器采购时需要提供哪些参数?

如果客户向中钨智造 (CTIA GROUP) 定制钨合金准直器, 仅提供准直器名称通常不足以进行准确报价和工程设计。建议至少提供射线类型、射线源或设备型号、主要光子能量或管电压、源强/剂量率、目标衰减率、允许泄漏水平、束流尺寸、孔径、孔道长度、外形尺寸、安装方式、工作温度及真空/空气环境等信息。

如果产品用于医疗、核医学或工业辐射设备, 还应提供相应的安全标准、检测要求和最终用途。最好同时提供 PDF 工程图、STEP/STP 三维模型或现有样品。对于复杂准直器, CTIA GROUP 可以根据客户提供的射线参数和结构要求, 对钨含量、密度等级、孔道结构、加工工艺以及检测项目进行综合匹配, 从而避免单纯依据材料牌号进行采购所产生的设计风险。

钨合金准直器的真正价值在于将高密度屏蔽材料与精密几何结构结合起来, 实现射线的定向传输、空间选择和杂散辐射控制。其性能评价不能只看钨含量或密度, 而应综合考虑光子能量、线性衰减系数、HVL/TVL、目标衰减率、孔径、孔道长度、泄漏率、机械精度以及实际设备工况。对于医疗、核医学和工业无损检测等高端应用而言, 准直器实际上是材料、辐射物理、机械设计和精密制造的综合产品。



14. 钨合金可以用于医用直线加速器 MLC 吗？

钨合金可以用于医用直线加速器（Medical Linear Accelerator, LINAC）的多叶准直器（Multi-Leaf Collimator, MLC）叶片及相关高密度屏蔽结构，而且从材料性能来看，钨合金是高能放射治疗准直系统中具有较高工程价值的候选材料之一。

但是，MLC 并不是简单的钨合金屏蔽块。它是一套需要同时满足高能光子衰减、叶片运动精度、叶片间泄漏控制、机械寿命、加工精度和剂量学性能的精密机电系统。因此，判断钨合金是否适合 MLC，不能只比较材料密度，而必须综合考虑光子能量、叶片厚度、叶片几何结构、材料密度、衰减率、穿透率、机械运动以及治疗计划系统的剂量学要求。

（1）MLC 在直线加速器中的主要作用

直线加速器产生的高能电子束经过靶材转换后形成高能 X 射线，典型医用 LINAC 光子能量通常覆盖约 4~25 MV 范围。MLC 位于射线束整形系统中，由大量可以独立移动的叶片组成，通过叶片运动改变射野形状。传统固定准直器主要形成矩形或规则射野，而 MLC 能够根据肿瘤靶区的三维形状动态调整射野，从而实现：靶区适形、正常组织剂量降低、调强放疗（IMRT）、容积旋转调强放疗（VMAT）以及复杂治疗计划的动态射束控制。因此，MLC 叶片本质上是一种可以运动的高密度射线屏蔽体。

（2）为什么钨合金适合 MLC 叶片？

钨具有 74 的原子序数，钨合金密度通常可以达到约 17~19 g/cm³，相比钢材具有明显更高的密度。在高能光子屏蔽结构中，高密度意味着在有限的几何空间内可以获得较大的面密度。

这对于 MLC 尤其重要。直线加速器机头空间有限，叶片不能无限增厚。如果使用高密度



钨合金，可以在有限叶片厚度内获得较高的射线衰减能力，从而降低叶片穿透和叶片间泄漏。

与此同时，钨重合金相比纯钨具有更好的韧性和机械加工适应性，可以通过镍、铁、铜等粘结相体系进行材料设计，因此更适合制造需要长期往复运动的复杂叶片结构。

（3）MLC 最关键的指标之一是叶片穿透率

对于 MLC 而言，材料的屏蔽能力最终需要转化为剂量学指标，其中一个重要参数就是叶片透射率（Leaf Transmission）。理想情况下，当 MLC 叶片完全关闭时，主射线应该被充分衰减。然而，实际高能 X 射线仍然可能通过叶片本体、相邻叶片之间的间隙以及叶片端部结构产生一定剂量泄漏。

因此，MLC 设计通常需要控制：叶片本体透射、叶片间泄漏、叶片端部泄漏、叶片侧向泄漏以及动态运动状态下的剂量变化。钨合金的高密度有利于降低叶片本体的光子穿透，但最终透射率并不是单纯由密度决定，而是由材料、叶片厚度、光子能谱和结构设计共同决定。

（4）钨合金叶片厚度不能简单按照材料密度确定

这是 MLC 设计中非常重要的一点。对于高能 X 射线，屏蔽过程涉及光电效应、康普顿散射和电子对效应等多种相互作用机制。在医用 LINAC 的 MeV 级光子能区，康普顿散射和电子对效应的重要性明显提高，因此不能直接采用低能 X 射线屏蔽材料的简单经验公式。工程设计通常需要结合质量衰减系数、线性衰减系数、HVL/TVL、Build-up Factor 以及实际 MLC 几何结构进行计算。基本的窄束衰减关系可以表示为：其中， μ 为特定光子能量下的线性衰减系数， x 为材料厚度。但 MLC 属于复杂宽束和多次散射环境，实际剂量学设计还需要考虑散射电子、叶片端部效应、叶片间隙以及治疗机头内部其他结构。因此，最终厚度必须通过蒙特卡罗模拟、实验剂量测量和设备验证确定。

（5）钨合金叶片的机械精度同样重要

MLC 与固定屏蔽件最大的区别在于叶片需要频繁运动。叶片通常需要在非常小的空间内实现高重复定位精度。对于现代 IMRT 和 VMAT 设备而言，叶片位置误差会直接影响实际射野形状，并进一步影响治疗计划剂量与实际输出剂量之间的一致性。因此，钨合金 MLC 叶片不仅要具有高密度，还需要控制：尺寸公差、叶片直线度、平行度、端部轮廓、表面粗糙度、相邻叶片配合间隙以及长期运动后的尺寸稳定性。尤其是叶片端部形状，它会影响射线束的半影（penumbra）和剂量梯度。简单地将普通钨合金块加工成叶片，并不能直接满足医用 MLC 要求。

（6）钨含量越高，MLC 性能一定越好吗？

不一定。常见钨重合金可以设计为约 90W、93W、95W、97W 等不同钨含量等级。通常随着钨含量提高，材料密度提高，有利于增加单位厚度的射线衰减能力。但是，MLC 叶片是运动部件，需要同时满足密度、强度、韧性、加工性能、抗冲击能力和尺寸稳定性。如果单纯追求最高钨含量，可能造成材料成本增加、加工难度提高，同时未必能够带来与成本相匹配的剂量学收益。因此，MLC 材料通常需要根据目标光子能量、叶片厚度、允许透射率和机械结构进行综合优化。



材料方案	主要优势	MLC 应用考虑
90W 左右钨合金	成本和加工性能较平衡	适合对密度要求相对适中的结构
93W 左右钨合金	密度与加工性能较均衡	可作为综合性能方案
95W 左右钨合金	高密度、屏蔽能力较强	适合高屏蔽要求
97W 左右钨合金	密度接近 19 g/cm^3	适合空间受限及高屏蔽需求，但加工要求更高
纯钨	密度高、耐高温	脆性和加工难度需要重点考虑

上述范围属于材料设计参考，实际 MLC 不能仅根据钨含量确定最终方案。

(7) 钨合金 MLC 还需要考虑叶片之间的泄漏

MLC 叶片不是完全独立的实体屏蔽块，相邻叶片之间必须保持运动间隙，因此叶片之间可能产生一定的辐射泄漏。这也是 MLC 设计的核心技术问题之一。叶片侧面通常需要经过特殊几何设计，使射线无法沿叶片之间的最短路径直接穿透。例如，可以采用特定的互锁结构、倾斜侧面或其他专门的叶片接口设计降低泄漏。因此，MLC 实际性能应同时评价叶片本体透射率和叶片间泄漏率。

(8) 钨合金可以用于高能放疗 MLC 吗？

从材料工程角度可以，但必须根据具体能量范围进行设计验证。

现代 LINAC 常见光子能量以 MeV 级为主，随着能量提高，光子与材料的相互作用机制发生变化。特别是在较高能量下，电子对产生及次级电子输运等过程不能忽略。因此，对于例如 6 MV、10 MV、15 MV 等不同能量等级的 LINAC，不能简单采用同一套钨合金叶片厚度和结构。对于高能设备，还需要考虑次级电子、散射辐射和机头结构对剂量分布的影响。

(9) 钨合金 MLC 与钨合金准直器有什么区别？

二者虽然都利用钨合金的高密度特性进行射线束控制，但工程要求明显不同。

钨合金准直器通常强调固定或特定几何结构下的射线方向控制、束流限制和屏蔽；MLC 则属于多叶片动态系统，需要在运动过程中不断改变射野形状。因此，MLC 对机械精度、叶片运动速度、重复定位精度、叶片间隙、动态泄漏和长期寿命的要求更高。从制造角度而言，MLC 叶片通常属于高精密钨合金功能件，而不是普通屏蔽件。

(10) 钨合金 MLC 制造需要哪些检测？

如果面向医疗设备制造商，质量控制不能只提供材料密度证明。专业采购通常需要建立材料、加工和剂量学三层质量体系。材料层面可以检测钨含量、Ni/Fe/Cu 等合金元素、密度、硬度、金相组织和内部缺陷；机械加工层面需要检测外形尺寸、叶片轮廓、直线度、平行度、端部几何尺寸、表面粗糙度及关键装配尺寸；最终设备层面则需要进行透射率、叶片间泄漏、半影特性、重复定位精度和剂量学性能验证。因此，钨合金 MLC 叶片的质量控制实际上是材料检测、精密机械加工和放射剂量学验证的综合体系。

(11) 定制钨合金 MLC 叶片需要向中钨智造（CTIA GROUP）提供什么资料？

如果直线加速器制造商或医疗设备企业计划定制钨合金 MLC 叶片，建议至少提供 LINAC



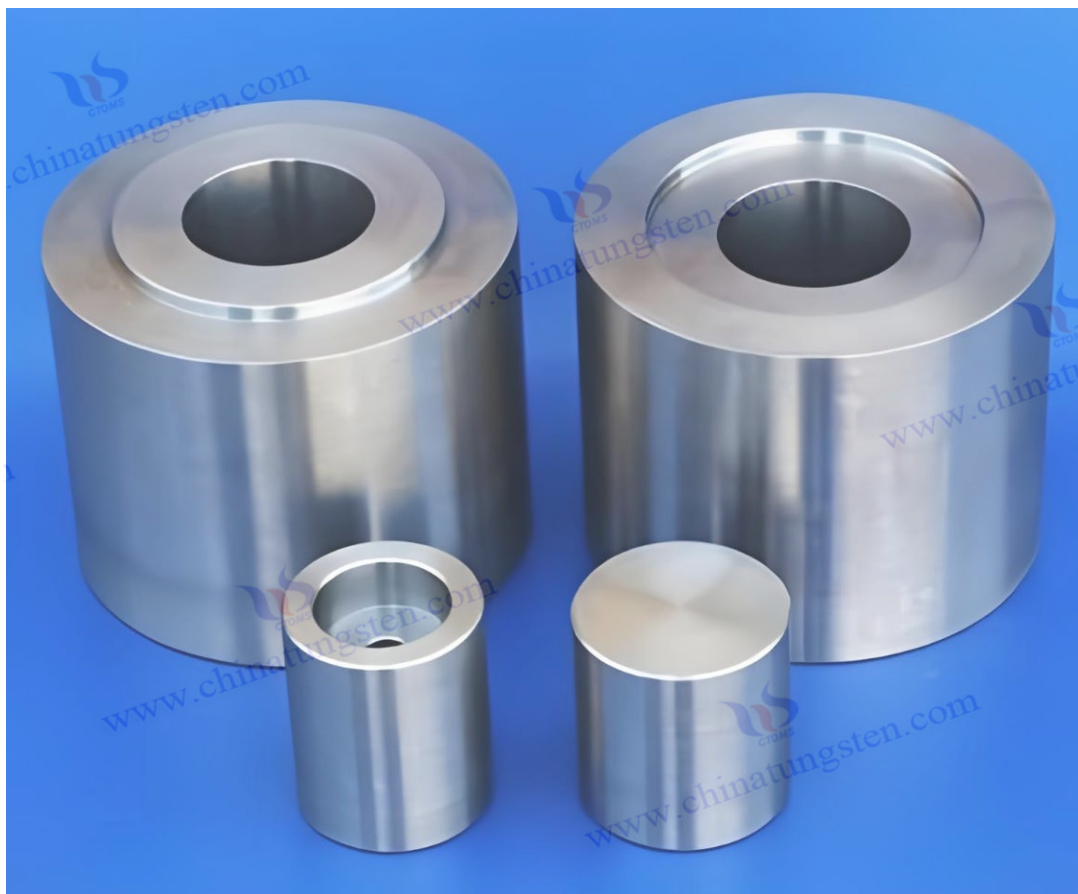
型号、光子能量范围、叶片数量、叶片最大厚度和长度、叶片运动方式、目标透射率、允许叶片间泄漏率、叶片定位精度以及治疗系统的剂量学要求。同时最好提供 PDF 二维工程图和 STEP/STP 三维模型, 并注明材料密度或钨含量要求、硬度、表面粗糙度、热处理要求、检测标准及批次一致性要求。对于尚处于研发阶段的设备, 如果客户还没有确定最终材料牌号, 也可以提供光子能量、目标透射率、叶片尺寸和设备空间限制, 由 CTIA GROUP 根据材料密度、加工性能和结构要求协助进行材料方案筛选。

(12) 总评

钨合金可以用于医用直线加速器 MLC, 而且其高密度、高强度以及良好的精密加工适应性, 使其在高能放射治疗射线束整形领域具有较高的工程价值。但是, MLC 对材料的要求远高于普通钨合金屏蔽件。

真正合格的钨合金 MLC 叶片, 需要同时解决高能光子衰减、叶片本体透射、叶片间泄漏、端部半影、机械运动精度、长期耐久性和批次一致性问题。因此, 不能简单认为 95W 或 97W 材料密度足够高就一定适合 MLC, 最终方案必须根据具体 LINAC 能量、叶片结构和剂量学指标进行设计与验证。

对于 CTIA GROUP 等专业钨合金制造企业而言, MLC 属于典型的高附加值精密钨合金应用。其采购重点也应从单纯的材料价格转向材料牌号、密度、几何精度、内部质量、运动配合以及最终辐射性能的综合评价。对于医疗设备制造商而言, 只有把材料工程、精密加工和放射剂量学三者结合起来, 才能真正实现高性能钨合金 MLC 叶片的工程化应用。





15. 钨合金注射器屏蔽套有什么作用？

钨合金注射器屏蔽套（Tungsten Alloy Syringe Shield）主要用于核医学、放射性药物制备及放射性同位素操作过程中，对装有放射性药物的注射器进行局部辐射防护。其核心作用不是阻止所有辐射，而是在满足操作、观察和注射要求的前提下，尽可能降低操作人员手部、手指及身体局部受到的 X 射线或 γ 射线剂量。对于 CTIA GROUP 等专业钨合金屏蔽件制造企业而言，注射器屏蔽套属于典型的小型、高密度、精密加工屏蔽组件，其设计重点不仅是材料密度，还包括射线能量、药物活度、屏蔽厚度、开口结构、重量、人体工学和加工精度等。

（1）降低放射性药物操作过程中的局部辐射剂量

核医学诊疗过程中，医护人员需要对放射性药物进行抽取、转移、测量和注射。例如 PET 检查常使用 ^{18}F -FDG，SPECT 及其他核医学应用则可能涉及 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{123}I 、 ^{131}I 等放射性核素。放射性药物在注射器内部持续产生 γ 射线或其他电离辐射。工作人员虽然通常不会长时间直接接触放射源，但在抽药、转运和注射过程中，手部与注射器之间的距离可能非常近。辐射防护遵循时间、距离和屏蔽三项基本原则。注射器屏蔽套通过增加操作人员与放射源之间的有效屏蔽层，降低到达手部和身体局部的辐射强度。因此，钨合金注射器屏蔽套的首要功能就是降低职业人员在放射性药物操作过程中的局部剂量。

（2）为什么使用钨合金，而不是普通钢材？

钨合金最大的优势是高密度。常见高密度钨重合金的密度大约可以达到 $17\sim 18.8\text{ g/cm}^3$ ，明显高于钢材，也显著高于铝、铜等常规结构材料。在相同体积和厚度条件下，高密度材料通常可以提供更大的光子衰减能力。这对于注射器屏蔽套尤其重要，因为它属于典型的受限空间产品。屏蔽套不能无限增厚，否则会导致外径增大、重量增加、握持困难，并影响医护人员正常操作。因此，钨合金能够利用较高的密度，在较小的结构尺寸内实现较高的面密度，使屏蔽套兼顾屏蔽效果和便携性。

（3）钨合金注射器屏蔽套主要屏蔽什么辐射？

主要针对 X 射线和 γ 射线。但具体屏蔽能力必须根据放射性核素的光子能量进行设计，不能简单用一个固定的百分比或者固定厚度评价所有产品。例如， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的主要 γ 射线能量约为 140 keV ， ^{131}I 具有约 364 keV 的主要 γ 射线， ^{18}F 在正电子湮灭过程中产生 511 keV 光子。不同能量的光子在钨合金中的质量衰减系数和线性衰减系数不同，因此相同厚度的钨合金屏蔽套对于不同放射性核素产生的衰减效果也不同。这意味着专业产品设计必须先确定核素和主要光子能量，再根据目标衰减率确定材料和厚度。

（4）为什么注射器屏蔽套不能只看厚度？

屏蔽设计通常可以用指数衰减关系进行初步分析：其中， I_0 为入射辐射强度， I 为透过屏蔽材料后的辐射强度， μ 为材料在相应能量下的线性衰减系数， x 为屏蔽层厚度。但实际注射器屏蔽套属于复杂几何结构，并非理想的窄束条件。注射器针头出口、活塞位置、观察窗口、套筒开口以及端部结构都会影响实际辐射泄漏。因此，工程设计通常需要同时考虑材料密度、钨含量、屏蔽厚度、射线能量、结构开口、散射辐射和目标剂量率等因素。

（5）注射器屏蔽套还承担机械保护作用



除了辐射防护,屏蔽套还可以为注射器提供一定的机械保护。核医学操作环境要求医护人员频繁移动、握持和操作注射器。如果仅采用薄壁铅套,可能存在变形、凹陷、表面损伤等问题,而钨合金具有较高的强度和刚性,可以制造成具有较稳定几何形状的保护壳体。因此,钨合金注射器屏蔽套实际上兼具:辐射屏蔽、注射器保护、操作定位和结构支撑等多种功能。

(6) 钨合金注射器屏蔽套为什么需要精密加工?

注射器屏蔽套不是简单的圆柱形金属管。为了保证注射器能够顺利插入和取出,同时避免晃动,需要严格控制内径、圆度、同轴度和长度。此外,还需要根据具体注射器型号设计:内孔尺寸、外径、端部结构、针头通道、观察区域、手指操作区域、锁紧结构以及与其他附件的连接尺寸。如果内孔过小,注射器无法顺利安装;如果内孔过大,则会产生晃动,影响操作稳定性。因此,这类零件通常需要 CNC 车削、铣削、钻孔、内孔加工和精密磨削等工艺。

(7) 钨合金注射器屏蔽套是否越厚越好?

不是。屏蔽厚度增加通常能够提高辐射衰减能力,但同时也会增加重量和尺寸。对于手持式医疗器械而言,重量是非常重要的工程指标。如果屏蔽套过重,会增加医护人员操作负担,影响注射动作的稳定性。因此,实际设计通常是在目标剂量降低要求和人体工学之间寻找合理平衡。例如,在同样的屏蔽目标下,提高材料密度可以在一定程度上减少所需厚度,从而帮助控制产品体积。因此,真正合理的设计目标不是最大厚度,而是满足规定辐射防护指标条件下的最优重量和尺寸。

(8) 不同钨含量会影响注射器屏蔽套性能吗?

不同钨含量会影响注射器屏蔽套性能。例如 90W、93W、95W 和 97W 钨重合金具有不同的密度范围。通常钨含量越高,密度越高,在相同几何厚度下具有更高的单位面积质量,从而有利于获得更强的光子衰减能力。但高钨含量并不意味着所有性能都绝对更好。钨合金的机械加工性能、韧性、强度、成本和密度需要综合考虑。对于医疗屏蔽件,可以根据核素能量、允许重量、产品尺寸和目标衰减率选择合适的钨合金体系,而不是单纯追求最高钨含量。





（9）钨合金与铅制注射器屏蔽套有什么区别？

铅具有较高的原子序数和良好的低能光子屏蔽能力，且材料成本相对较低，因此长期以来广泛应用于辐射防护。但钨合金具有更高的密度和更好的机械强度，同时尺寸稳定性、耐磨性以及高温性能更好。对于需要小型化、精密加工和较高机械强度的注射器屏蔽套而言，钨合金具有明显的工程优势。

对比项目	钨合金	铅
密度	约 17~18.8 g/cm ³	约 11.34 g/cm ³
空间利用率	高	较低
机械强度	较高	较低、较软
尺寸稳定性	较好	易发生机械变形
精密加工	可进行 CNC 精密加工	材料较软
高温性能	较好	较差
医疗手持屏蔽	适合小型精密结构	传统应用广泛
材料成本	较高	相对较低

不过，不能简单认为钨合金在所有光子能量下都比铅具有固定倍数的屏蔽能力。实际设计必须根据具体核素、光子能量、厚度和目标剂量率进行计算和验证。

（10）钨合金注射器屏蔽套需要哪些质量检测？

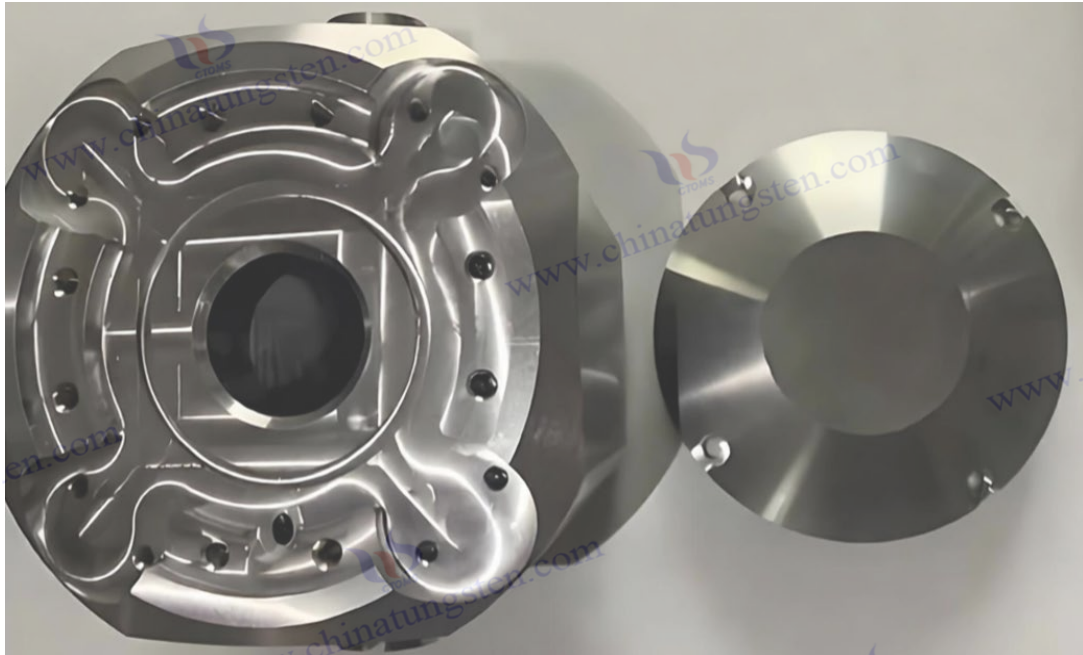
专业医疗屏蔽件的检测通常包括材料检测、尺寸检测和辐射防护性能检测。材料方面，可以检测钨含量、合金元素组成、密度、硬度、金相组织及内部缺陷；尺寸方面，需要重点检测内径、外径、长度、圆度、同轴度、关键孔位和表面粗糙度；功能方面，则应根据实际核素和设计要求进行辐射衰减性能或泄漏剂量测试。如果产品用于医疗器械，还应根据最终设备的法规和质量体系要求，建立材料批次追溯、尺寸检测记录和性能验证文件。

（11）定制钨合金注射器屏蔽套需要提供哪些参数？

对于医疗设备企业或核医学耗材制造商，定制时最好提供注射器型号、规格、外径、长度、针头位置、放射性核素、主要 γ 射线能量、最大活度、目标剂量降低比例、允许最大重量、屏蔽套外形尺寸以及使用方式。如果产品需要与自动注射系统或其他医疗设备连接，还应提供接口尺寸、定位方式、安装公差及三维模型。对于中钨智造（CTIA GROUP）这类专业钨合金屏蔽件制造商而言，客户最好同时提供 PDF 二维图纸和 STEP/STP 三维模型。若尚无完整工程图，也可以提供样品、照片、注射器型号和使用工况，由中钨智造的专业工程团队进一步完成材料、结构和加工方案设计，由双方共同确认。

（12）总结

钨合金注射器屏蔽套的核心作用，是利用钨合金高密度和高原子序数的材料特性，对放射性药物产生的 X 射线或 γ 射线进行有效衰减，从而降低核医学工作人员在药物抽取、转移和注射过程中的局部辐射暴露。它同时又是一个精密机械部件，因此设计不能仅关注材料本身，还必须综合考虑放射性核素、光子能量、屏蔽厚度、目标衰减率、产品重量、内外径尺寸、加工公差以及辐射泄漏测试等因素。对于专业采购而言，最有价值的技术资料并不是简单的钨含量或材料密度，而是完整的材料证明、密度数据、尺寸检测记录和针对特定核素与能量条件进行的屏蔽性能验证。对于医疗、核医学及放射性药物操作设备制造商，这也是评价钨合金注射器屏蔽套是否真正达到工程应用要求的关键。



16. 钨合金屏蔽环是什么？

钨合金屏蔽环（Tungsten Alloy Shielding Ring）是一类以高密度钨合金为主体材料，通过环形、套筒形或带台阶结构设计，用于对 X 射线、 γ 射线等电离辐射实施局部衰减、方向性屏蔽和辐射泄漏控制的精密屏蔽部件。它通常不是单独使用，而是作为医疗设备、核医学设备、放射源组件、工业无损检测设备、射线准直系统及科研仪器中的功能性结构件，与射线源、探测器、准直器、屏蔽套或设备壳体配合使用。与简单的钨合金屏蔽板相比，屏蔽环的特点是将辐射屏蔽与机械定位、结构连接和局部密封等功能结合在一起，因此对材料性能和加工精度通常有更高要求。

（1）钨合金屏蔽环的核心作用是什么？

钨合金屏蔽环最基本的作用是减少特定方向上的辐射泄漏。

对于 X 射线和 γ 射线而言，钨合金依靠较高的密度和较高的原子序数，对光子产生光电吸收、康普顿散射以及其他相互作用，从而降低穿过材料后的光子强度。在实际设备中，射线并不一定需要在所有方向完全屏蔽。例如，射线源可能只允许沿一个特定方向输出，而其他方向需要尽可能降低泄漏。这时可以利用环形结构包围射线源或探测器周边区域，使屏蔽材料集中布置在容易产生旁向泄漏的位置。因此，屏蔽环通常具有局部屏蔽、环向屏蔽、端部屏蔽以及防止旁路泄漏等作用。

（2）为什么使用钨合金制造屏蔽环？

钨合金的最大优势之一是高密度。

常见高密度钨合金密度约为 $17\sim 18.8\text{ g/cm}^3$ ，具体取决于钨含量、粘结相组成和烧结致密度。较高的密度能够在有限空间内形成较高的面密度，因此特别适合医疗设备和精密仪器中的小型化屏蔽结构。例如，在设备内部空间有限的情况下，如果采用密度约 11.34 g/cm^3 的铅，需要通过增加厚度才能获得所需的质量厚度；采用高密度钨合金，则可以在较小的径向尺寸内获得较高的面密度。此外，钨合金具有较好的强度和刚性，不像铅那样容易发



生明显塑性变形，因此更适合制造需要长期保持圆度、同轴度和安装位置的精密屏蔽环。

（3）钨合金屏蔽环主要用于哪些设备？

应用范围非常广，尤其集中在空间受限、要求精密定位或存在局部辐射泄漏控制需求的设备中。医疗领域包括核医学设备、X 射线设备、CT 系统、放疗设备、放射性药物操作设备、γ 射线探测设备等；工业领域包括 γ 射线探伤机、工业 CT、X 射线检测设备、射线源组件及无损检测系统；科研领域则可用于辐射探测器、实验室射线源、核技术实验装置和高能物理相关设备。此外，钨合金屏蔽环还可以用于放射性同位素源的局部屏蔽、探测器周边屏蔽以及需要降低散射辐射的精密仪器。

（4）钨合金屏蔽环与普通钨合金套筒有什么区别？

二者在外观上可能非常接近，但工程用途并不完全相同。

普通套筒通常主要承担机械保护、连接或定位功能，而钨合金屏蔽环除了承担机械功能之外，还必须满足特定的辐射屏蔽要求。因此，屏蔽环的设计需要同时考虑射线能量、屏蔽厚度、环形结构、开口尺寸、射线入射方向以及设备内部的空间关系。特别是在存在孔、槽、台阶或装配间隙时，还需要避免形成辐射泄漏通道。所以，真正意义上的钨合金屏蔽环属于辐射防护功能件，而不仅仅是一个普通金属环。

（5）钨合金屏蔽环为什么需要精密加工？

这是钨合金屏蔽环与普通屏蔽板的重要区别之一。

屏蔽环往往需要直接安装在射线源、探测器、注射器、准直器或其他精密组件周围，因此内径、外径、壁厚、长度、同轴度、圆度以及定位台阶都会影响最终装配质量。例如，如果屏蔽环内孔与射线源组件之间存在较大的装配间隙，虽然材料本身具有很好的屏蔽能力，但间隙可能形成旁路泄漏；如果同轴度不足，则可能导致射线束与准直孔之间发生偏移，影响设备工作精度。因此，钨合金屏蔽环经常采用 CNC 车削、铣削、钻孔、内孔加工、磨削以及必要的精密抛光等工艺。

（6）钨合金屏蔽环需要多厚？

最值得关注的是：没有适用于所有应用的固定厚度。

屏蔽厚度首先取决于射线类型和能量。例如，低能 X 射线与数百 keV 甚至 MeV 级 γ 射线的屏蔽要求存在明显差异。其次还受到目标衰减率、源强、距离、材料密度以及结构几何条件影响。对于理想化的窄束光子屏蔽，可以采用： $I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$ ，其中： I_0 为入射强度，

I 为透射强度， μ 为材料的线性衰减系数（与射线能量和屏蔽材料有关）， x 为屏蔽厚度。

如果目标是将辐射强度降低至原来的某一比例（例如 $I/I_0 = 1/n$ ），则可以根据相应能

量下的衰减系数计算理论厚度： $x = -\frac{\ln(I/I_0)}{\mu} = \frac{\ln(n)}{\mu}$ ，其中 $n = I_0/I$ 为衰减倍数。但真实

的屏蔽环境存在散射、开孔、装配间隙和复杂几何结构，因此工程设计不能只依赖理论公式，还应结合实际结构进行辐射学验证。



（7）钨合金屏蔽环可以按照铅当量设计吗？

可以，但必须明确具体的射线能量和测试条件。

铅当量（Lead Equivalent）并不是材料固有的固定数值，而是特定厚度材料在规定辐射条件下与某一厚度铅产生等效衰减效果的比较。因此，不能简单地认为 1mm 钨合金固定等于多少毫米铅。不同光子能量下，钨合金与铅的质量衰减系数、散射贡献和实际结构都会发生变化。对于医疗设备，最好明确核素或 X 射线管电压、滤过条件、目标衰减率及测试方法，再确定对应的铅当量或屏蔽性能指标。

（8）不同钨含量的屏蔽环有什么区别？

常见钨重合金可以按照 90W、93W、95W、97W 等不同钨含量进行选择。

一般而言，钨含量提高通常会带来密度增加，从而有利于提高单位厚度的光子衰减能力。但材料选择不能只看钨含量，还需要综合考虑加工性能、强度、韧性、尺寸稳定性、成本以及产品结构复杂程度。对于需要大量精密孔、内螺纹、薄壁结构的屏蔽环，有时综合加工性能比单纯提高钨含量更重要。

（9）钨合金屏蔽环需要检测哪些指标？

专业产品通常需要从材料、尺寸和屏蔽性能三个层面进行质量控制。

检测类别	主要项目
材料性能	钨含量、合金成分、密度、硬度
内部质量	孔隙、裂纹、组织均匀性、内部缺陷
尺寸精度	内径、外径、长度、壁厚
几何精度	圆度、同轴度、垂直度、位置度
表面质量	表面粗糙度、划痕、毛刺、加工缺陷
屏蔽性能	特定能量下的衰减率、透射剂量率或铅当量
质量文件	材料证明、尺寸报告、检测报告、批次追溯

对于医疗、核工业以及高端科研设备，客户还可能要求提供完整的材料批次证明、化学成分分析、密度检测、金相组织、尺寸全检以及辐射屏蔽验证数据。

（10）钨合金屏蔽环可以定制吗？

可以。钨合金屏蔽环本身就是非常典型的定制化产品。

客户可以根据设备结构指定外径、内径、长度、壁厚、台阶、槽、孔、倒角、螺纹、定位结构以及表面粗糙度等参数，也可以按照完整的二维工程图和三维模型进行加工。对于 CTIA GROUP 等专业钨合金屏蔽件制造商，客户最好提供 PDF 图纸，同时提供 STEP、STP 等三维模型，并说明实际使用的放射源、光子能量、最大活度或剂量率、目标衰减率以及工作环境。这样才能从材料牌号、钨含量、结构设计和加工工艺几个方面进行综合优化。

（11）钨合金屏蔽环设计最容易忽略什么？

实际工程中最容易忽略的是屏蔽结构中的非材料泄漏。

即使屏蔽环本体具有很高的密度，如果端面存在过大的间隙、孔位设计不合理、环与其他组件之间存在直通通道，仍可能产生明显的辐射泄漏。因此，屏蔽设计必须从完整的设备几何结构出发，而不能只计算材料本体的衰减能力。对于复杂设备，还应考虑散射辐射、二次辐射、射线源方向、探测器位置以及人员实际操作区域。



(12) 总结

钨合金屏蔽环是一种将高密度辐射屏蔽功能与精密机械结构结合起来的的功能性零件。它利用约 $17\sim 18.8\text{ g/cm}^3$ 级高密度钨合金对 X 射线和 γ 射线进行衰减, 同时通过环形、套筒、台阶或局部包覆结构控制特定方向的辐射泄漏。相比传统铅屏蔽件, 钨合金屏蔽环最大的工程优势在于能够在较小空间内实现较高的屏蔽质量, 同时具备更好的机械强度、尺寸稳定性和精密加工能力。

因此, 它特别适用于医疗设备、核医学、工业无损检测、射线源组件和高端科研仪器。对于实际采购而言, 不能仅提出钨合金屏蔽环这一产品名称, 而应尽可能提供射线类型、能量、源强或剂量率、目标衰减率、外形尺寸、装配关系、材料密度要求及加工公差。只有将辐射防护指标与机械结构要求结合起来, 才能真正确定合理的钨合金牌号、屏蔽厚度和加工方案。



17. 钨合金可以用于放射源容器吗?

可以。钨合金可以用于制造放射源容器、放射源屏蔽罐、源仓、源套、源托、源塞以及局部屏蔽组件, 是高密度金属辐射屏蔽材料的重要应用之一。尤其对于 X 射线、 γ 射线等光子辐射源, 钨合金凭借高密度、高原子序数、较高机械强度和良好的尺寸稳定性, 可以在有限体积内提供较高的辐射衰减能力。不过, 放射源容器属于具有较高安全要求的专用设备, 不能简单理解为在金属容器外面增加一层钨合金即可。实际产品需要同时满足辐射屏蔽、源体固定、机械防护、密封、防误操作以及运输和监管等要求。对于具体放射源, 还必须按照相应法规、标准和经验证的屏蔽设计进行制造和检测。



(1) 钨合金为什么适合制造放射源容器？

钨合金最突出的优势是高密度。常见高密度钨重合金密度约为 $17\sim 18.8\text{ g/cm}^3$ ，远高于钢材，也明显高于铅的约 11.34 g/cm^3 。对于相同的几何尺寸，较高密度意味着更高的面密度，有利于降低 γ 射线和 X 射线的透射强度。因此，当设备要求屏蔽结构尽可能紧凑时，钨合金具有明显优势。此外，钨重合金具有较好的机械强度和刚性。与较软的铅相比，钨合金更适合制造具有精密内孔、定位台阶、螺纹、锁紧结构和复杂几何形状的源容器。因此，钨合金在放射源容器中的价值不仅是屏蔽材料，同时也是一种能够承担结构功能的工程材料。

(2) 钨合金可以屏蔽哪些放射源？

主要适用于产生 X 射线和 γ 射线的放射源及相关设备。

例如，工业无损检测中可能涉及 Ir-192、Se-75、Co-60 等 γ 射线源；核医学中涉及不同放射性核素产生的 γ 射线；科研和实验设备中也可能使用密封放射源。但不同核素的光子能量差异很大，因此不能用一个固定的钨合金厚度覆盖所有放射源。例如，Ir-192 具有多条不同能量的 γ 射线，而 Co-60 的主要 γ 射线能量约为 1.17 MeV 和 1.33 MeV。对于高能 γ 射线，屏蔽设计与低能 X 射线设备存在明显区别，通常需要更厚的屏蔽层以及更加严格的结构分析。因此，放射源容器的设计必须首先明确源的种类、活度、主要光子能量以及使用条件。

(3) 钨合金放射源容器的基本结构是什么？

典型结构通常包括屏蔽主体、源腔、源定位结构、端部屏蔽、源塞或屏蔽盖以及机械锁定结构。钨合金主体承担主要屏蔽任务，内部源腔用于容纳放射源。根据设备结构，还可能增加台阶式迷宫结构、偏置孔道或多层屏蔽结构，以降低射线沿直线通道泄漏的可能性。对于某些特殊设备，还需要设计源体定位、远程操作接口或与准直器连接的结构。因此，放射源容器实际上是一个集辐射屏蔽和机械安全于一体的复杂功能组件。

(4) 为什么放射源容器不能只计算钨合金壁厚？

这里最值得关注的是：这是放射源屏蔽设计中非常关键的问题。

理论上，可以使用光子衰减关系进行初步计算： $I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$ ，其中： I_0 是入射辐射强度，

I 是透射强度， μ 是对应光子能量下的线性衰减系数， x 是屏蔽厚度。在理想窄束条件下，

若已知目标透射比 I/I_0 ，则所需理论厚度可表示为： $x = -\frac{\ln(I/I_0)}{\mu}$ 。但实际放射源容器并

不是理想的窄束屏蔽结构。源腔、开口、端盖、接缝、观察孔、操作孔以及与其他组件之间的连接位置，都可能形成辐射泄漏路径。此外，还需要考虑散射辐射和宽束条件下的累积效应（通常引入累积因子 B 进行修正，宽束条件下的透射强度可近似表示为

$I = B \cdot I_0 \cdot e^{-\mu x}$ ，其中 $B > 1$ 取决于能量、材料和几何条件）。因此，专业设计通常需要

综合考虑材料本体衰减、几何结构、散射辐射、源位置和人员工作区域，而不是简单根据材料厚度判断安全性。



(5) 钨合金放射源容器是否越厚越好？

钨合金放射源容器不是越厚越好。增加屏蔽厚度通常有利于降低透射辐射，但同时会显著增加容器重量和尺寸。例如，高密度钨合金密度接近 18 g/cm^3 时，一个体积仅为 100 cm^3 的钨合金结构，其质量就可能接近 1.8 kg 。因此，对于大型放射源容器，盲目增加壁厚会迅速导致重量增加。工程设计需要在屏蔽性能、重量、尺寸、机械强度、操作方式和成本之间取得平衡。对于需要移动或远程操作的放射源容器，这一点尤其重要。

(6) 钨合金与铅制造放射源容器有什么区别？

铅具有成本低、易加工和良好光子屏蔽性能等优势，因此传统放射源屏蔽设备中应用非常广泛。钨合金则更加适合空间受限、机械负荷较高和要求精密加工的场合。

项目	钨合金	铅
典型密度	约 $17 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$	约 11.34 g/cm^3
屏蔽空间利用率	高	较低
机械强度	高	较低
尺寸稳定性	较好	较易变形
精密加工能力	较好	相对容易但结构强度较低
耐磨性	较好	较低
成本	较高	较低
小型精密源容器	很适合	适合部分传统结构
大型固定屏蔽	需综合评估	成本优势明显

需要强调的是，不能简单认为钨合金在所有光子能量下都比铅具有固定倍数的屏蔽能力。最终比较应以具体能量、材料厚度、几何结构和实测数据为依据。

(7) 放射源容器为什么特别重视源腔尺寸？

源腔并不是越大越好。源腔尺寸过大，会增加源体与屏蔽材料之间的距离，同时可能形成不必要的空腔；源腔过小，则可能导致放射源安装困难，甚至产生机械损伤风险。因此，需要根据实际放射源胶囊、源组件或源托架的尺寸进行精确设计，使放射源能够可靠定位，同时保证周围具有足够且均匀的屏蔽厚度。对于高精度设备，还需要控制源腔与外部准直孔之间的同轴度和位置度。

(8) 钨合金放射源容器为什么需要精密加工？

因为它通常不仅是屏蔽体，还承担源体定位和设备连接功能。

常见加工要求包括内孔、台阶孔、螺纹、定位槽、端面、准直孔、连接孔和锁紧结构等。对于这些结构，需要控制尺寸公差、同轴度、圆度、位置度以及表面粗糙度。特别是涉及准直功能的源容器，如果准直孔轴线出现明显偏移，可能导致射线束方向发生变化，从而影响设备工作精度。因此，钨合金放射源容器通常需要采用 CNC 车削、铣削、钻孔、内孔加工和精密磨削等工艺。

(9) 钨合金放射源容器需要检测什么？



专业产品通常需要进行材料、尺寸、内部质量和辐射性能等多方面检测。

检测类别	典型检测项目
材料	W 含量、Ni/Fe/Cu 等合金元素、密度
机械性能	硬度、必要时的强度指标
内部质量	裂纹、孔隙、组织均匀性
尺寸	外径、内径、壁厚、长度、源腔尺寸
几何精度	同轴度、圆度、位置度、垂直度
表面	粗糙度、毛刺、加工缺陷
屏蔽性能	透射剂量率、衰减率等
文件	材料证明、检测报告、批次追溯资料

对于医疗、核工业、工业探伤等专业应用，还需要根据具体法规和客户标准确定最终检验项目。

（10）放射源容器的安全设计还需要考虑什么？

除了屏蔽性能，还需要考虑源体的机械安全。

例如，容器应避免在正常搬运、振动、冲击和设备运行过程中发生源体移位；对于需要频繁开启的结构，还应考虑防误开启和可靠锁定；对于需要远程操作的设备，则应考虑远程开启、关闭和状态确认。如果放射源属于法规监管范围，产品设计和使用时还必须符合所在国家或地区关于放射源生产、使用、运输、储存和废弃处置的要求。因此，钨合金只是放射源容器的核心材料之一，并不能替代完整的辐射安全设计。

（11）中钨智造（CTIA GROUP）可以为客户定制钨合金放射源容器吗？

可以。对于医疗、工业检测、科研仪器等领域，CTIA 可根据客户图纸、样品及具体工况进行钨合金屏蔽件和精密结构件的材料与制造方案设计。定制时建议客户提供放射源类型、主要光子能量、最大活度或剂量率、目标屏蔽指标、源体尺寸、源腔尺寸、容器外形尺寸、安装方式、准直方向、允许重量以及工作环境等信息。

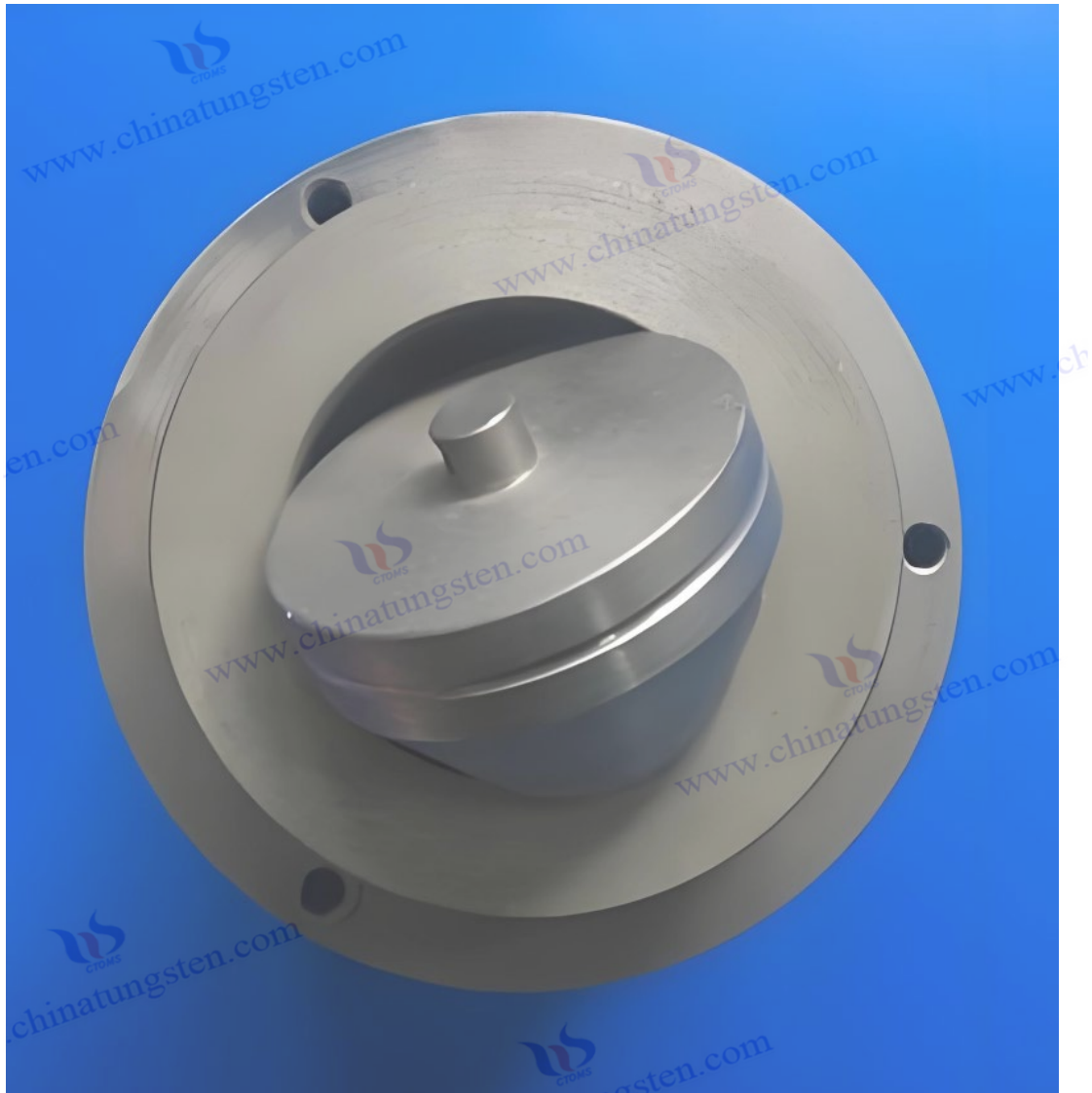
如果已经有工程图，最好同时提供 PDF 二维图纸和 STEP/STP 三维模型；如果尚处于产品开发阶段，也可以先提供放射源型号、使用场景和结构草图，由工程人员根据实际需求进一步确定材料牌号、密度等级、屏蔽结构和加工方案。

（12）总结

钨合金可以用于放射源容器，而且特别适合小型化、高密度、精密加工以及对机械强度有较高要求的放射源屏蔽组件。其核心优势是能够利用约 $17\sim 18.8\text{ g/cm}^3$ 级的高密度，在有限空间内获得较高的光子辐射衰减能力，同时保持较好的机械强度和尺寸稳定性。

但是，放射源容器属于安全关键部件，不能简单按照材料密度或固定壁厚进行设计。真正可靠的方案必须结合放射源类型、光子能量、活度、目标剂量率、屏蔽距离、结构几何、散射辐射和人员工作区域进行综合计算，并通过符合适用标准的检测和验证确认其屏蔽性能。

对于专业采购方而言，最重要的是向制造商提供完整的源参数和工程结构要求，而不是仅提出钨合金放射源容器这一产品名称。通过材料、辐射防



18. 钨合金可以用于工业 γ 射线探伤吗？

可以。钨合金可以用于工业 γ 射线探伤（Industrial Gamma Radiography / Gamma Radiographic Testing, RT）中的射线源屏蔽体、源容器、准直器、屏蔽套、屏蔽环、源导向组件及局部防护结构，是工业无损检测领域具有较高工程价值的高密度屏蔽材料。

工业 γ 射线探伤利用放射性同位素产生的 γ 射线穿透工件，通过探测器、胶片或数字成像系统获得内部缺陷信息。由于 γ 射线具有较强穿透能力，射线源在储存、运输和非曝光状态下必须受到可靠屏蔽；在曝光状态下，又需要通过准直结构控制射线束方向。钨合金正是在这些环节中发挥重要作用。

对于工业探伤设备而言，钨合金的价值并不只是高密度屏蔽，更重要的是它能够与高辐射衰减能力与高强度、耐磨性、尺寸稳定性和精密加工能力结合起来，因此特别适合制造小型化、复杂结构和高可靠性的射线源组件。



(1) 工业 γ 射线探伤为什么需要高密度屏蔽材料？

工业 γ 射线探伤常使用具有较强穿透能力的放射性同位素，例如 Ir-192、Se-75 和 Co-60。不同放射源的 γ 射线能量不同，因此屏蔽设计也不同。典型情况下，Ir-192 主要涉及数百 keV 范围的 γ 射线，Se-75 的有效能区相对较低，而 Co-60 的主要 γ 射线能量约为 1.17 MeV 和 1.33 MeV。对于这些高穿透能力光子，仅依靠普通钢材进行局部屏蔽往往需要较大的厚度。钨合金密度通常约为 17~18.8 g/cm³，可以在较小体积内提供较高的面密度，从而有利于设备小型化。

(2) 钨合金在工业 γ 射线探伤设备中主要用于什么部件？

钨合金可以应用于多个关键部位，具体取决于设备结构和放射源类型。常见部件包括射线源屏蔽容器、源仓、屏蔽套、源塞、准直器、屏蔽环、源导向件、局部防护块以及探伤设备内部的高密度屏蔽结构。其中，屏蔽容器主要负责非曝光状态下的辐射防护；准直器负责限制 γ 射线的输出方向和束流几何；屏蔽环和屏蔽套则主要解决局部区域的辐射泄漏问题。因此，钨合金并不是简单作为一块厚板使用，而是可以加工成具有内孔、台阶、准直孔、槽和复杂曲面的功能性屏蔽零件。

(3) 钨合金准直器在工业 γ 射线探伤中有什么作用？

准直器的主要功能是限制射线束的传播方向，使 γ 射线集中照射被检测工件，而不是向设备周围无序扩散。理想情况下， γ 射线应主要沿设计方向输出。但由于射线源本身具有一定的空间辐射特征，如果没有有效准直结构，可能产生较大的旁向辐射。钨合金具有高密度和较好的机械加工能力，可以制造圆孔、狭缝、锥形孔、阶梯孔以及特殊角度孔道，从而形成符合设备要求的射线束出口。对于需要控制射线束尺寸和方向的工业探伤系统，准直孔的直径、长度、锥角以及轴线精度都可能直接影响实际曝光区域。

(4) 工业 γ 射线探伤用钨合金需要多厚？

不存在统一的固定厚度。屏蔽厚度至少需要根据放射源种类、 γ 射线能量、源活度、目标剂量率、屏蔽距离、材料密度和结构几何进行计算。在理想窄束条件下，可以使用光子衰减关系进行初步估算： $I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$ ，其中： I_0 为入射强度， I 为透射强度， μ 为对应光子能量下的线性衰减系数， x 为材料厚度。

也可以使用半值层（HVL）和十分之一值层（TVL）进行工程设计：

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \approx \frac{0.693}{\mu}$$

$$TVL = \frac{\ln 10}{\mu} \approx \frac{2.303}{\mu}$$

其中：HVL 表示将辐射强度降低至 50% 所需要的材料厚度，TVL 表示将辐射强度降低至 10% 所需要的厚度。对于多层或复合屏蔽，总透射率可近似表示为各层衰减的乘积（窄束条件下）：

$$I = I_0 \cdot e^{-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \dots)}$$



但工业 γ 射线探伤设备属于典型的复杂几何屏蔽结构, 存在源腔、端盖、准直孔、接缝和散射路径, 因此实际设计不能只采用理想公式, 而应进行完整的辐射屏蔽计算和必要的实测验证。

(5) Ir-192、Se-75 和 Co-60 对钨合金屏蔽设计有什么影响?

影响非常明显。以工业探伤常见的三类 γ 射线源为例:

放射源	典型特点	屏蔽设计关注点
Ir-192	γ 射线能量处于数百 keV 范围, 工业探伤应用广泛	屏蔽厚度、准直和设备尺寸
Se-75	平均光子能量相对较低	设备重量和紧凑结构
Co-60	主要 γ 射线约 1.17 和 1.33 MeV, 穿透能力强	更高屏蔽厚度和散射控制

因此, 同样是钨合金屏蔽件, 如果分别用于 Ir-192 和 Co-60, 其设计参数不能直接套用。对于制造商而言, 客户在询价时最好明确放射源型号, 而不是只写工业 γ 射线探伤。

(6) 钨合金与铅用于工业 γ 射线探伤有什么区别?

铅具有较高的光子屏蔽效率、价格较低且容易加工, 因此在大型固定式防护结构中仍然具有明显优势。钨合金则更适合空间受限和需要机械强度的结构。钨合金密度约 $17\sim 18.8\text{ g/cm}^3$, 而铅约 11.34 g/cm^3 。因此, 在相同体积条件下, 钨合金能够提供更高的质量厚度。同时, 钨合金的硬度、刚性和耐磨性能明显优于铅, 可以更好地保持准直孔、源腔和定位结构的尺寸稳定性。所以, 钨合金并非在所有情况下都取代铅, 而是在小型化、精密化和机械性能要求较高的工业探伤设备中具有更明显的优势。

(7) 为什么工业探伤用钨合金准直器需要高精度加工?

准直器不仅承担屏蔽作用, 还决定射线束的几何方向。如果准直孔中心线与射线源中心存在偏差, 或者孔径、孔长和锥角出现较大误差, 就可能造成实际射线束与设计束流不一致。因此, 需要控制内孔尺寸、孔轴线、同轴度、位置度、端面垂直度以及表面粗糙度。对于复杂准直结构, 还需要考虑孔道拐角、台阶和内部散射路径。这也是钨合金在工业 γ 射线探伤领域具有优势的原因之一: 它不仅能够提供高密度屏蔽, 还可以通过 CNC 车削、铣削、钻孔、磨削等工艺制造复杂的三维屏蔽结构。

(8) 工业 γ 射线探伤中的钨合金屏蔽件需要检测哪些指标?

专业产品通常需要同时控制材料性能、尺寸精度和辐射屏蔽性能。材料方面主要检测钨含量、合金元素组成、密度、硬度以及内部组织均匀性; 加工方面重点检测外形尺寸、壁厚、源腔尺寸、准直孔尺寸、同轴度、位置度和表面粗糙度; 必要时还需要进行内部缺陷检测。对于高可靠性探伤设备, 还应关注屏蔽结构实际透射剂量率, 而不能只提供材料密度证明。因此, 完整的质量文件可以包括材料证明、化学成分报告、密度检测报告、尺寸检测报告、硬度数据、金相组织资料以及根据客户要求提供的屏蔽性能验证报告。

(9) 工业 γ 射线探伤用钨合金可以承受冲击和磨损吗?

这是钨合金相对于铅的重要优势之一。工业探伤设备经常需要现场搬运、安装和重复使用, 屏蔽容器可能承受机械碰撞、振动和长期装配磨损。如果使用较软的屏蔽材料, 长期使用后可能发生局部变形, 从而影响源仓、准直孔或锁紧机构的精度。钨合金具有较高密度



和较好的机械强度,可以更好地维持结构稳定性。不过,钨合金属于高密度粉末冶金材料,其具体强度、韧性和加工性能取决于钨含量、粘结相体系和制造工艺。因此,对于需要频繁冲击或复杂机械运动的部件,应根据具体工况选择合适牌号,而不能仅根据密度选择材料。

(10) 钨合金可以用于工业 γ 射线源容器吗?

可以,而且是较典型的应用。源容器需要在放射源关闭、储存和运输状态下提供可靠屏蔽,同时还需要确保放射源不会因为振动、碰撞或机械操作发生异常位移。钨合金可以制造源仓主体、源塞、屏蔽盖、定位件和准直结构,使屏蔽和机械功能集成在一个紧凑结构中。对于此类安全关键部件,设计还必须符合相关国家或地区的放射源安全、运输和职业辐射防护法规,不能仅依据材料性能进行产品判定。

(11) 钨合金工业探伤屏蔽件可以按照客户图纸定制吗?

可以。工业 γ 射线探伤设备中的屏蔽件通常具有明显的定制化特点。客户可以根据实际设备提供外形尺寸、源仓尺寸、准直孔规格、连接方式、安装位置以及允许重量等要求。对于已经完成设计的项目,最好同时提供 PDF 二维工程图和 STEP/STP 三维模型。如果尚未完成最终设计,也可以提供放射源类型、活度、 γ 射线能量、目标剂量率、探伤设备结构和使用环境,由专业制造商协助确定钨合金密度等级、屏蔽厚度、准直结构和加工方案。中钨智造 (CTIA GROUP) 作为钨合金屏蔽件及精密钨合金零部件专业制造企业,可根据工业探伤、医疗设备、核技术和科研仪器等不同应用需求提供材料选择、结构制造和精密加工方案。

(12) 总结

钨合金可以广泛应用于工业 γ 射线探伤,尤其适合制造射线源屏蔽容器、准直器、屏蔽套、屏蔽环、源仓和局部防护结构。其约 $17\sim 18.8\text{ g/cm}^3$ 的高密度能够在有限空间内形成较高面密度,同时兼具较好的机械强度、耐磨性和尺寸稳定性,因此特别适合小型化、精密化的 γ 射线探伤设备。但工业 γ 射线屏蔽不能简单按照钨合金密度或固定壁厚进行设计。Ir-192、Se-75、Co-60 等不同放射源的光子能谱、活度和穿透能力不同,最终屏蔽厚度还受到源距离、目标剂量率、散射辐射和设备几何结构影响。

因此,专业的工业 γ 射线探伤钨合金屏蔽件,应当同时完成辐射屏蔽设计、机械结构设计、精密加工和性能验证。对于采购企业而言,提供完整的放射源参数、目标屏蔽指标和工程图纸,是获得准确材料方案、屏蔽厚度和制造报价的关键。



19. 钨合金屏蔽件可以按照图纸定制吗？

可以。钨合金屏蔽件本身就是一种非常适合按照客户图纸进行定制加工的高密度功能结构件，尤其适用于医疗影像、核医学、工业无损检测、放射源屏蔽、射线准直、科研仪器以及高端检测设备等对屏蔽性能、尺寸精度和结构集成度要求较高的场合。与铅板、铅砖等传统屏蔽材料相比，钨合金不仅承担辐射衰减功能，还可以同时承担定位、支撑、旋转、导向、密封和机械防护等结构功能，因此实际产品往往不是简单的块状材料，而是具有内孔、台阶、槽、螺纹、锥孔、狭缝、弧面或复杂通道的精密零件。

（1）钨合金屏蔽件通常可以按照哪些图纸加工？

专业制造商通常可以根据 PDF 二维工程图、DXF/DWG 二维 CAD 图纸、STEP/STP 三维模型、SolidWorks 等三维模型进行制造。对于尚未形成正式工程图的产品，也可以根据实物样品、照片、尺寸草图或设备安装结构进行逆向设计和工艺确认。对于医疗、核工业和工业射线设备，建议客户尽可能提供完整的二维工程图，因为二维图纸能够明确表达尺寸、公差、基准、形位公差、表面粗糙度、倒角、螺纹以及关键功能尺寸。三维模型则适合用于确认整体结构、空间干涉和装配关系。对于复杂准直器、屏蔽环和多孔结构，最好同时提供二维工程图和 STEP/STP 三维模型。



（2）钨合金屏蔽件可以加工哪些复杂结构？

根据材料牌号、尺寸、结构复杂程度以及加工工艺，钨合金可以加工成多种精密结构。例如常见的圆柱形屏蔽套、环形屏蔽件、圆盘、屏蔽块、准直器、源仓、屏蔽座、屏蔽盖以及具有内孔和狭缝的异形零件。对于复杂产品，还可以设计加工阶梯孔、盲孔、通孔、精密内孔、环形槽、定位槽、螺纹孔、锥形孔以及特定角度的射线通道。准直器尤其依赖孔道几何形状控制射线束方向，因此孔径、孔深、孔轴线位置以及孔道之间的相对位置都可能成为关键质量参数。需要注意的是，钨合金密度通常约为 $17\sim 18.8\text{ g/cm}^3$ ，明显高于钢材和多数铜合金，因此其切削和磨削难度也明显高于普通金属。对于高钨含量材料，通常需要根据零件结构选择硬质合金刀具、金刚石工具、磨削、EDM 等适当加工技术，而不能简单按照普通钢件的加工参数进行生产。

（3）钨合金屏蔽件可以达到什么尺寸精度？

尺寸精度并不存在一个适用于所有钨合金零件的固定数值，而是取决于材料状态、零件尺寸、几何结构、加工方法以及最终检测要求。普通烧结黑皮件主要作为后续加工坯料，尺寸精度相对有限；车削、磨削后的精加工件可以获得更高的尺寸精度；对于医疗准直器、精密屏蔽环、源仓等产品，则通常需要针对关键尺寸进行精密加工和全尺寸检测。

例如，普通结构尺寸可以按照常规机械加工公差控制，而对于精密内孔、定位孔、同轴结构或狭缝，则应在图纸中明确给出尺寸公差和形位公差。对于高精度产品，不仅要控制直径，还需要控制圆度、圆柱度、同轴度、平面度、垂直度和位置度等参数。因此，客户如果要求精密制造，不建议仅写精密加工，而应直接在图纸中标明具体公差。例如 $\Phi 10\text{ mm}$ 内孔要求 $\pm 0.01\text{ mm}$ ，或者明确给出 H7 等标准公差等级。这样制造商才能准确评估设备、刀具、加工路线和检测成本。

（4）钨合金屏蔽件能否进行内孔加工？

可以，而且内孔往往是钨合金屏蔽件的重要功能结构之一。

例如，钨合金准直器需要通过精密孔道限制射线传播方向；钨合金注射器屏蔽套需要形成与注射器尺寸相匹配的内部空间；放射源屏蔽容器则需要加工源仓、定位孔和导向结构；屏蔽环则可能需要同时控制内径、外径和同轴度。对于深孔、小孔、盲孔以及复杂孔道，需要根据孔径与深度比、材料牌号以及允许公差选择钻削、铰削、磨削、放电加工等工艺。对于特别小的准直孔，还需要重点评估加工后孔壁质量、孔轴线偏差和射线通道几何精度。

（5）钨合金屏蔽件能否进行磨削和抛光？

可以。磨削是钨合金精密加工中非常重要的工艺之一，尤其适合控制最终尺寸、圆度、平面度以及表面粗糙度。对于需要较高表面质量的医疗屏蔽件、精密屏蔽环和仪器零件，还可以根据产品要求进一步进行精加工和抛光。不过，钨合金硬度较高，磨削过程中容易产生较大的加工热，因此需要合理控制砂轮、磨削速度、进给量和冷却条件，避免产生微裂纹、烧伤或局部尺寸变化。如果产品用于高精度装配，建议客户在图纸中同时注明尺寸公差和表面粗糙度，例如 $Ra\ 0.8\ \mu\text{m}$ 、 $Ra\ 0.4\ \mu\text{m}$ 等，而不是只提出表面光洁的笼统要求。

（6）定制钨合金屏蔽件需要提供哪些技术资料？

对于正式项目，建议客户至少提供射线类型、射线能量或设备参数、目标衰减率、屏蔽厚度或铅当量要求、零件尺寸、尺寸公差、表面要求以及使用环境。如果属于医疗或工业射



线源屏蔽项目，还应尽可能提供源类型、最大剂量率、源到屏蔽件的距离、允许泄漏剂量以及屏蔽结构的安装方式。例如工业 γ 射线探伤可能涉及 Ir-192、Co-60、Se-75 等不同射线源，它们的光子能谱不同，因此不能仅依据零件名称确定屏蔽厚度。

对于已经确定材料的客户，还应注明 90W、93W、95W、97W 等目标钨含量或密度要求。如果客户并不确定应该选择哪一种材料，则可以直接提供射线参数和使用条件，由制造商根据屏蔽性能、密度、机械强度、加工性能和成本进行综合选型。

(7) 定制钨合金屏蔽件需要检测哪些项目？

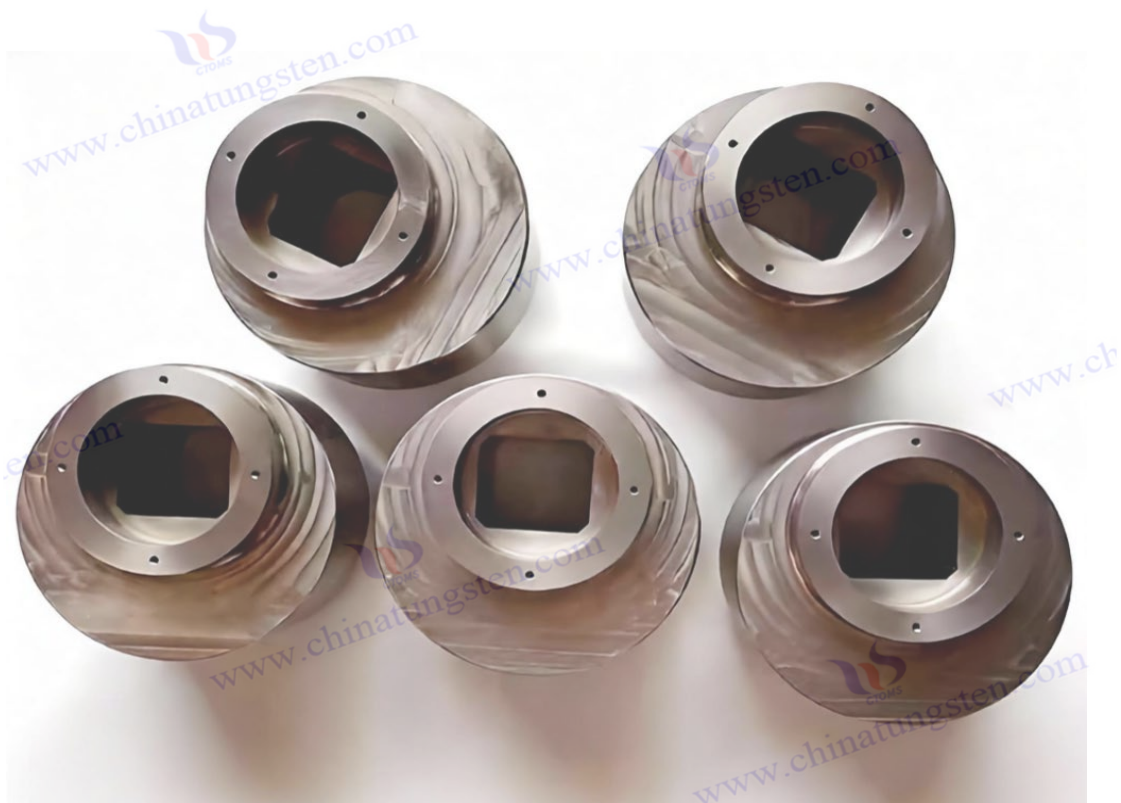
常规产品可以检测外观、尺寸、密度和材料成分；高端产品则可以进一步增加硬度、金相组织、内部缺陷、关键尺寸全检以及必要的无损检测。对于医疗、核工业和航空航天等高可靠性应用，建议建立批次质量追溯体系，并根据客户标准提供材料证明、化学成分报告、密度检测报告、尺寸检测报告以及其他指定检验文件。对于屏蔽件而言，密度均匀性尤其重要。因为理论屏蔽能力与材料的线性衰减系数有关，而线性衰减系数又受到材料组成和密度影响。如果零件存在明显内部孔隙、密度梯度或结构缺陷，即使平均密度达到设计要求，也可能影响局部屏蔽性能。

(8) 专业钨合金屏蔽件制造商如何根据图纸报价？

正规的定制报价通常不会只按照重量计算，而是综合考虑材料牌号和密度、产品尺寸、材料利用率、烧结工艺、加工余量、CNC 加工难度、磨削和抛光要求、检测项目、采购数量以及交货周期等因素。例如，同样重量的两个钨合金屏蔽件，如果一个为简单圆柱体，另一个包含深孔、狭缝、多个定位孔和复杂曲面，后者的加工工时、材料损耗和检测成本可能明显更高，因此报价也会存在较大差异。对于批量采购，模具和工艺开发费用可以进行分摊，单位成本通常会下降；而小批量甚至单件定制产品，由于需要承担较高的工艺准备和加工成本，单位价格往往更高。

(9) 中钨智造可以定制钨合金屏蔽件吗？

可以。中钨智造（CTIA GROUP）长期从事钨及钨合金材料、精密钨制品和高密度钨合金功能件的设计与制造，可根据客户提供的 PDF 工程图、CAD 文件、STEP/STP 三维模型或样品资料进行定制，并根据具体应用对材料牌号、钨含量、密度、加工工艺和检测方案进行技术评估。对于钨合金屏蔽件，真正决定产品是否合格的并不仅仅是材料密度，而是材料性能、屏蔽设计、结构尺寸、加工精度和质量检测之间的综合匹配。尤其对于 X 射线、 γ 射线屏蔽产品，应先明确射线能量和目标衰减要求，再确定材料和结构，而不是先确定一个固定厚度后再反推屏蔽能力。因此，客户在向中钨智造询价时，最好一次性提供产品图纸、三维模型、材料要求、数量、射线类型及能量、目标屏蔽指标、尺寸公差、表面粗糙度和检测要求。对于尚处于设计阶段的项目，也可以仅提供设备用途、射线源参数和结构尺寸，由工程人员协助进行材料选择和制造方案评估。



20. 钨合金屏蔽件需要提供哪些检测报告？

钨合金屏蔽件属于典型的功能性精密金属部件，其质量评价不能仅依据钨含量或密度一个指标。对于医疗设备、核医学、工业无损检测、科研装置以及其他涉及 X 射线、 γ 射线的应用，客户通常需要同时确认材料成分、密度、内部质量、机械性能、尺寸精度和屏蔽性能。尤其对于按照图纸定制的钨合金准直器、屏蔽环、屏蔽套、放射源容器及复杂异形屏蔽件，检测报告实际上是证明材料和产品满足设计要求的重要质量文件。对于由中钨智造（CTIA GROUP）等专业制造商生产的钨合金屏蔽件，建议根据产品用途和客户技术规范建立分级检测体系，而不是所有产品机械地执行完全相同的检测项目。

（1）材质证明书和化学成分报告

这是钨合金屏蔽件最基础的质量文件，主要用于确认产品实际采用的材料牌号及合金组成。报告通常应包括 W、Ni、Fe、Cu 等主要元素，以及客户指定的其他合金元素。对于常见 W-Ni-Fe 或 W-Ni-Cu 钨重合金，报告至少应明确钨含量及主要粘结相元素比例。例如 90W、93W、95W、97W 等材料，其钨含量直接影响最终密度和辐射衰减能力，因此不能只写钨合金，而应明确实际化学成分范围。对于医疗、半导体及核工业等高端应用，还可以根据客户要求增加 O、C、N 以及 Fe、Ni、Cu 等杂质元素控制数据，以确认材料纯度和批次一致性。

（2）密度检测报告

密度是钨合金屏蔽件最重要的基础性能指标之一，因为 γ 射线和 X 射线的屏蔽能力与材料密度具有直接关系。常见钨重合金理论密度大致处于 $17\sim 18.8\text{ g/cm}^3$ 范围，具体取决于钨



含量、合金体系和烧结致密度。一般而言，90W 材料密度约 17 g/cm^3 左右，93W 约 $17.5 \sim 17.7 \text{ g/cm}^3$ ，95W 约 18.0 g/cm^3 左右，97W 可接近 19 g/cm^3 ，但实际产品应以具体材料牌号和制造标准为准。检测报告应明确检测方法、实际密度值、允许偏差及检测批次。对于大型屏蔽件，还应关注不同位置之间的密度均匀性，因为局部孔隙或密度梯度可能造成实际屏蔽能力低于理论设计值。

(3) 尺寸检测报告

对于精密钨合金屏蔽件，尺寸检测通常比普通材料检测更加重要。报告可以包括外径、内径、长度、壁厚、孔径、孔距、槽宽、槽深、锥度、同轴度、垂直度、平面度及位置度等关键参数。例如一个钨合金准直器，即使材料密度完全符合要求，如果准直孔的孔径、圆柱度或轴线位置存在较大偏差，也可能导致射线束流角度和剂量分布发生变化。因此，屏蔽件的机械尺寸实际上会直接影响最终设备性能。对于医疗设备及高精度科研设备，建议采用 CMM 三坐标测量机、影像测量仪、精密内径测量仪或其他适合的计量设备进行检测，并根据客户图纸提供关键尺寸检测记录。

(4) 硬度检测报告

钨合金属于高密度、高硬度材料，硬度检测主要用于验证材料批次稳定性以及判断其机械加工和服役性能。常见检测方法包括维氏硬度 HV、洛氏硬度 HR 等。对于精密钨合金屏蔽件，维氏硬度通常更加适合材料质量评价，因为其能够较好地反映烧结组织和粘结相状态。硬度数据还可以与密度、金相组织及机械性能结合分析。如果同一牌号产品不同批次之间硬度出现异常变化，需要进一步检查粉末组成、烧结工艺以及组织均匀性。

(5) 金相组织检测报告

对于高端钨合金屏蔽件，金相组织检测具有较高参考价值。通过金相显微镜观察，可以分析钨颗粒尺寸、粘结相分布、孔隙、偏析以及组织均匀性。对于粉末冶金制造的钨合金，理想组织通常要求钨相分布均匀、粘结相连续且不存在明显的大尺寸孔洞、裂纹及严重偏析。如果产品用于医疗准直器、精密屏蔽环、放射源容器等关键部件，金相组织报告可以作为材料内部质量和工艺稳定性的辅助证据。

(6) 内部缺陷及无损检测报告

对于较厚、大尺寸或高可靠性要求的钨合金屏蔽件，需要进一步确认内部是否存在裂纹、孔洞、夹杂、未致密区域等缺陷。根据产品尺寸和结构，可以采用工业 CT、X 射线检测、超声检测等方法进行内部质量评价。其中，工业 CT 尤其适合具有复杂内部孔道、阶梯孔、准直孔或异形结构的钨合金零件，可以同时观察内部结构和局部缺陷。对于放射源屏蔽容器等安全相关部件，内部完整性检测的重要性更高。

(7) 表面质量和表面粗糙度报告

如果产品采用车削、磨削、抛光或精密研磨加工，还应根据图纸要求检测表面粗糙度和外观质量。常见技术指标包括 $Ra 1.6 \mu\text{m}$ 、 $Ra 0.8 \mu\text{m}$ 、 $Ra 0.4 \mu\text{m}$ 甚至更低等级，具体取决于产品的密封、装配、运动或洁净要求。对于屏蔽套、屏蔽环及医疗设备部件，还需要检查划伤、崩边、毛刺、裂纹、加工刀痕以及锐边等缺陷。

(8) 机械性能检测报告



如果钨合金屏蔽件同时承担结构载荷,例如航空航天屏蔽件、工业探伤设备结构件或大型放射源容器,则可能需要提供抗拉强度、屈服强度、延伸率、抗压强度等机械性能数据。但对于单纯用于局部辐射衰减的小型屏蔽套或屏蔽块,机械性能并不一定需要作为每批产品的强制检测项目,应根据客户技术规范确定。

(9) 辐射屏蔽性能检测报告

对于真正具有功能性屏蔽要求的产品,这是最能够直接证明产品使用性能的检测项目。屏蔽性能不能简单用一个固定数值表示,而必须明确射线种类、能量、材料厚度和目标衰减率。例如 X 射线设备通常涉及不同管电压及复杂能谱,而 γ 射线则可能来自 Cs-137、Co-60、Ir-192、Se-75 等不同放射源。因此,专业的屏蔽性能报告应尽可能注明射线源类型或光子能量、测试厚度、测试几何条件、入射剂量率、透射剂量率以及计算得到的衰减倍数或透射率。

如果客户要求按照 HVL、TVL 或者铅当量进行设计,也应在相应测试条件下给出数据,而不能直接套用一个与实际工况无关的固定厚度。

(10) 铅当量或等效屏蔽能力报告

医疗辐射防护领域有时会要求以铅当量表示屏蔽能力,例如 Pb equivalent thickness。对于钨合金产品,可以根据特定 X 射线能谱、管电压及测试标准,对其与规定厚度铅材料进行比较。但是,铅当量不是钨合金固有的固定参数。相同厚度的钨合金,在不同光子能量下对应的铅当量可能不同。因此,正式报告必须注明测试能量或设备条件、材料厚度以及测试方法。

(11) 尺寸与材料批次一致性报告

对于批量采购而言,客户通常不仅关心单件是否合格,还需要确认整个批次的一致性。因此,可以建立批次号、炉批号、原材料批号、生产日期、检测日期以及产品序列号之间的对应关系,使每一个钨合金屏蔽件能够追溯到具体原料和制造过程。对于医疗、核工业和航空航天客户,这类批次追溯文件的重要性往往不低于单项性能检测数据。

(12) 不同应用场景的推荐检测文件

应用领域	建议提供的核心检测文件
普通工业屏蔽件	材质证明、密度、尺寸、外观
工业 γ 射线探伤	材质、密度、尺寸、内部质量、屏蔽性能
X 射线设备	材质、密度、尺寸、屏蔽性能、铅当量或等效衰减数据
CT 设备	材质、密度、尺寸、内部缺陷、屏蔽性能、加工精度
核医学设备	材质、密度、尺寸、内部质量、屏蔽性能、批次追溯
放射源容器	材质、密度、尺寸、机械性能、内部质量、屏蔽性能、批次追溯
精密准直器	材质、密度、金相组织、尺寸、孔位精度、表面粗糙度、屏蔽性能
医疗及高可靠性产品	完整材质、尺寸、性能、无损检测及质量追溯文件

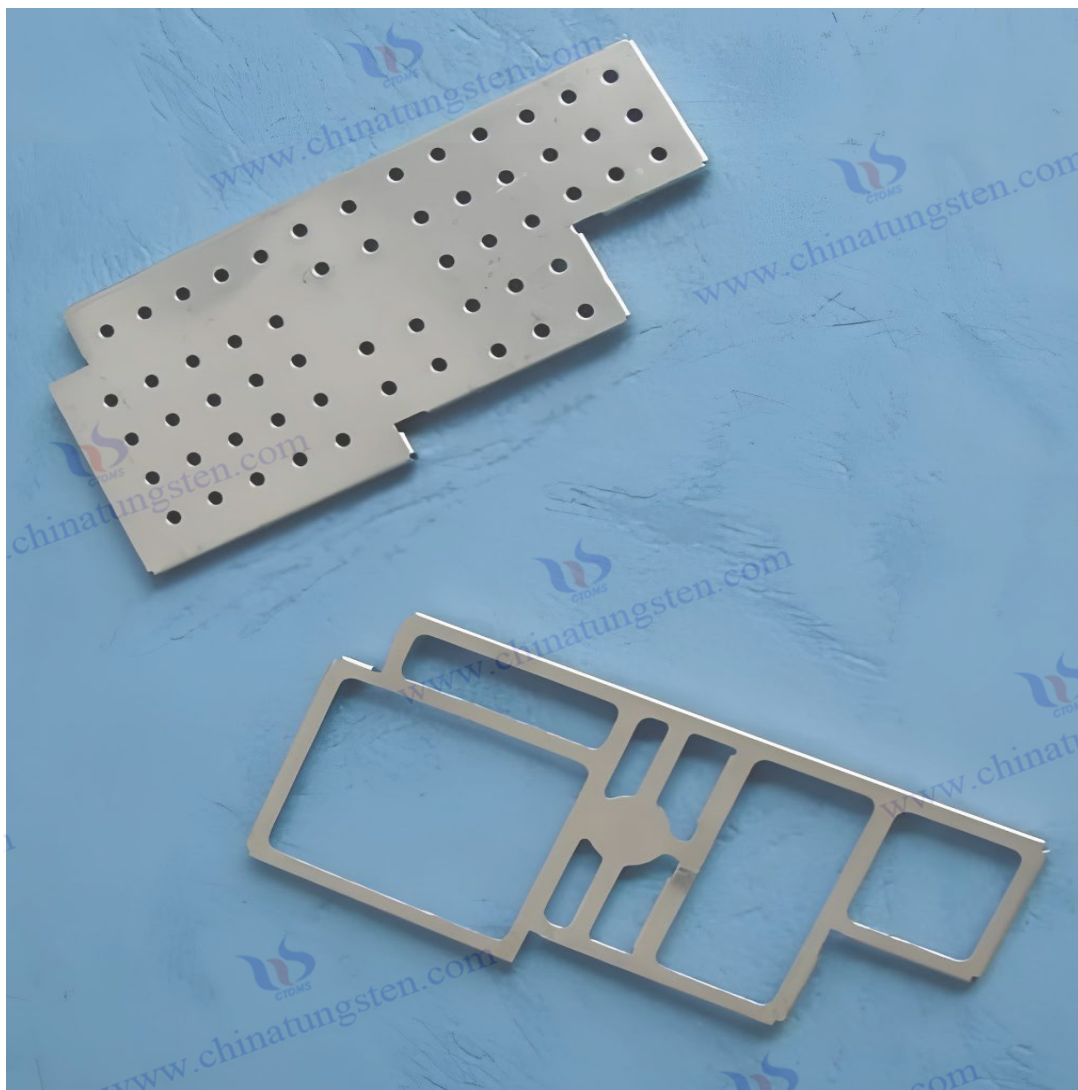
对于实际采购而言,并不是检测项目越多越好,而是应该建立与风险等级相匹配的质量文件体系。普通工业屏蔽块可能只需要材质、密度和尺寸报告;而用于放射源容器、医疗准



直器和高精度核医学设备的产品,则需要更完整的材料证明、尺寸检测、内部质量、屏蔽性能及批次追溯资料。

因此,在向专业钨合金屏蔽件制造商如中钨智造 (CTIA GROUP) 询价时,建议客户在图纸之外明确说明射线类型、能量范围、目标衰减率、材料牌号或密度、尺寸公差、表面粗糙度、检测标准以及需要的质量文件。这样制造商才能根据实际应用选择 90W、93W、95W、97W 或其他钨合金体系,并确定合理的烧结、机加工及最终检测方案。

对于出口至欧美市场的医疗、工业及科研设备,还可能需要进一步结合 ISO 质量体系、客户内部质量规范、第三方实验室检测或所在国家的辐射安全法规进行文件配置。特别是涉及辐射防护的产品,材料检测报告只能证明材料和制造质量,不能替代整机设备所需要的法规认证、辐射安全验证或最终设备型式试验。





第二部分 关于钨合金屏蔽件最常见的问题

1. 什么是钨合金屏蔽件？
2. 钨合金为什么适合用于辐射屏蔽？
3. 钨合金屏蔽件主要屏蔽哪些射线？
4. 钨合金和铅相比，哪一种屏蔽材料更好？
5. 钨合金屏蔽件的密度是多少？
6. 钨合金屏蔽件的屏蔽性能如何计算？
7. 钨合金屏蔽件能屏蔽 X 射线和 γ 射线吗？
8. 钨合金屏蔽件可以用于 CT、X 射线设备和医疗器械吗？
9. 钨合金屏蔽件可以用于核工业和核医学领域吗？
10. 钨合金屏蔽件有哪些常见的牌号和成分？
11. 钨合金屏蔽件通常采用哪些加工工艺？
12. 钨合金屏蔽件可以加工成复杂形状吗？
13. 钨合金屏蔽件的尺寸精度和表面粗糙度能达到多少？
14. 钨合金屏蔽件的硬度、强度和耐磨性怎么样？
15. 钨合金屏蔽件在高温环境下还能保持良好的屏蔽性能吗？
16. 钨合金屏蔽件的使用寿命一般有多长？
17. 钨合金屏蔽件如何选择合适的钨含量？
18. 钨合金屏蔽件的价格受哪些因素影响？
19. 如何定制钨合金屏蔽件？
20. 购买钨合金屏蔽件时应该重点关注哪些技术参数？



Q1. 什么是钨合金屏蔽件？

钨合金屏蔽件，是以高密度钨合金为主要材料，通过机加工、压制、烧结或其他成形工艺制造，用于降低射线辐射强度、保护人员和设备的一类功能性金属部件。钨合金通常以钨为主要成分，并加入镍、铁、铜等元素形成合金。其最突出的特点是密度高，一般可达到约 $17\sim 19.3\text{ g/cm}^3$ ，因此在相同体积或相近屏蔽效果下，可以设计得比许多传统屏蔽材料更加紧凑。

钨合金屏蔽件主要用于什么屏蔽用途？

钨合金对高能光子具有较好的衰减能力，因此常用于 X 射线、 γ 射线等电离辐射的屏蔽。典型产品包括钨合金屏蔽块、屏蔽罩、屏蔽套、准直器、屏蔽环、屏蔽容器、射线源防护件以及各种异形定制屏蔽件。在医疗领域，它可用于 X 射线机、CT、放射治疗及核医学设备；在工业领域，可用于工业无损检测、射线探伤设备和相关辐射防护系统；在科研、核工业等领域，也可根据辐射源类型、能量和空间结构进行定制。

为什么使用钨合金做屏蔽件？

核心原因是高密度和较高的原子序数。钨的原子序数为 74，具有较强的射线衰减能力。通过增加屏蔽材料厚度，可以进一步降低穿透屏蔽层后的辐射强度。与传统铅屏蔽相比，钨合金还有几个明显特点：密度高、体积小、机械强度高、耐磨性较好、尺寸稳定性较好，而且不需要像铅那样使用较软的材料结构。因此，在设备内部空间有限、需要高强度结构或者需要制造精密异形部件的场景中，钨合金往往更有优势。

钨合金屏蔽效果并不只由材料密度决定。实际设计还需要综合考虑射线种类、能量、钨含量、屏蔽厚度、几何结构、允许的透射剂量率及使用环境等因素。因此不能简单地用固定



的厚度判断所有钨合金屏蔽件的效果。钨合金屏蔽件就是把高密度钨合金加工成特定形状，用它的高密度和射线衰减能力，在有限空间内实现 X 射线、 γ 射线等辐射的有效屏蔽。

Q2. 钨合金为什么适合用于辐射屏蔽？

钨合金之所以适合用于辐射屏蔽，主要是因为它具有高密度、高原子序数、良好的机械性能以及较高的结构稳定性，能够在相对有限的空间内实现较好的射线衰减效果。

1. 高密度带来良好的屏蔽能力

钨的密度约为 19.3 g/cm^3 ，钨合金通常也具有很高的密度，常见高密度钨合金约为 $17\sim 19 \text{ g/cm}^3$ 。材料密度越高，单位厚度内参与射线相互作用的原子数量通常越多，因此有利于降低 X 射线和 γ 射线的透射强度。对于需要较高屏蔽能力、但设备内部空间有限的场合，高密度钨合金尤其具有优势。

2. 钨具有较高的原子序数

钨的原子序数为 74。对于 X 射线和较低至中等能量的 γ 射线，光电效应和康普顿散射等相互作用会影响射线的衰减，其中高原子序数材料在光电吸收方面通常具有明显优势。因此，钨不仅依靠高密度提供屏蔽能力，其元素本身的高原子序数也使其成为重要的辐射屏蔽材料。

3. 可以在较小体积内实现屏蔽

铅同样是一种常见的辐射屏蔽材料，但铅比较柔软，机械强度和耐磨性相对有限。钨合金具有更高的强度和硬度，可以制造成结构复杂、尺寸精确的屏蔽零件。因此，在医疗设备、工业探伤设备、核医学设备以及实验室仪器中，如果设备内部空间比较紧凑，钨合金可以通过较小的结构尺寸实现所需的屏蔽效果。

4. 机械性能优于传统软质屏蔽材料

钨合金不仅用于屏蔽，还可以作为具有承载功能的结构件。其强度、硬度和耐磨性能较好，在受到机械冲击、振动或长期使用的情况下，能够保持较好的结构完整性。这对于准直器、屏蔽套、屏蔽块、屏蔽环等需要同时承担机械功能的零件尤其重要。

5. 适合制造精密和复杂屏蔽结构

钨合金可以根据实际应用进行切削、磨削、钻孔、螺纹加工等精密加工，也可以制造成不同形状和尺寸的定制屏蔽件。例如，可以设计成带有孔道、狭缝、阶梯结构或特定角度的准直和屏蔽组件，使屏蔽材料不仅负责降低辐射，还能够控制射线的传播方向。

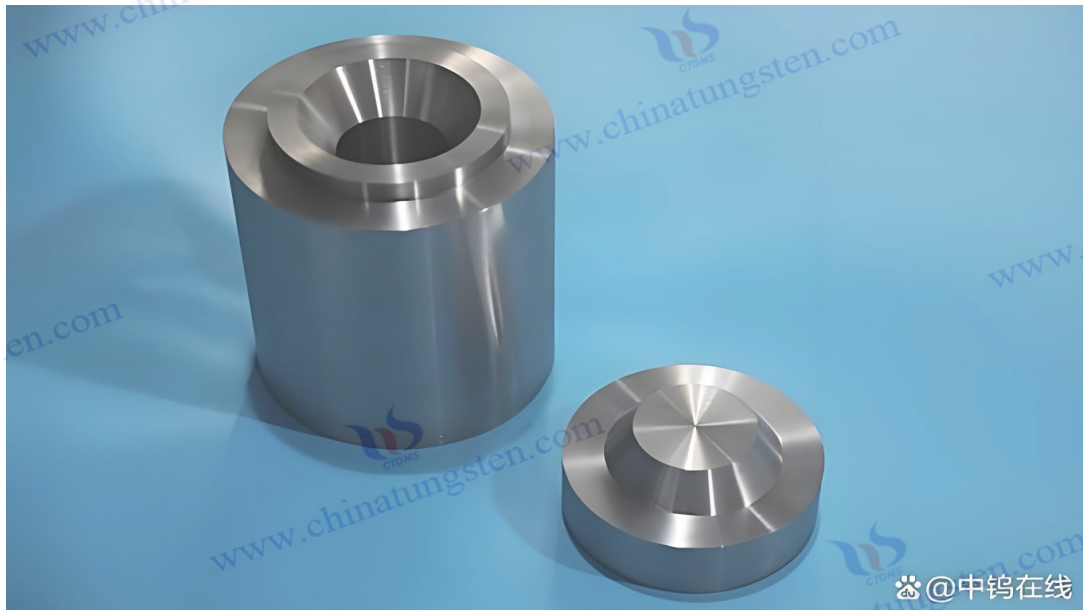
6. 不同钨含量可以满足不同需求

钨合金并不是单一材料。通过调整钨含量以及镍、铁、铜等结合相的比例，可以获得不同密度、硬度、强度和加工性能的材料。因此，在设计辐射屏蔽件时，可以根据射线能量、目标屏蔽厚度、零件尺寸、机械强度和加工要求选择合适的钨合金牌号。

总体来说，钨合金适合辐射屏蔽的核心原因可以概括为：高密度提供较强的射线衰减能力，



高原子序数有利于吸收高能光子，同时又具有较好的机械强度和加工性能。因此，它特别适合用于空间受限、需要高屏蔽性能以及需要精密结构设计的辐射防护设备。



Q3. 钨合金屏蔽件主要屏蔽哪些射线？

钨合金屏蔽件主要用于屏蔽 X 射线和 γ 射线等高能光子辐射，在特定应用中也可以用于降低其他类型电离辐射的影响。不过，不同射线与钨合金之间的相互作用机制不同，因此不能简单地认为钨合金对所有射线都有相同的屏蔽效果。

1. X 射线

X 射线是钨合金屏蔽件最常见的应用对象之一。X 射线广泛存在于医疗影像设备、工业无损检测、安检设备和科研仪器中。钨具有较高的原子序数和密度，可以通过光电吸收、康普顿散射等作用降低 X 射线的能量和强度。因此，钨合金常被加工成屏蔽罩、屏蔽块、准直器、屏蔽环以及其他精密防护部件。

2. γ 射线

钨合金同样适用于 γ 射线屏蔽，尤其是在核医学、放射源防护、工业探伤和核工业等领域。

γ 射线具有较强的穿透能力，因此屏蔽设计通常需要根据射线能量、源强、允许透射剂量以及屏蔽距离等参数确定材料厚度。对于不同能量的 γ 射线，所需要的钨合金厚度也会有所不同。

3. 电子束

对于电子束辐射，钨及钨合金也具有一定的屏蔽能力，但其屏蔽机制与 X 射线、 γ 射线有所不同。高速电子进入高原子序数材料后，会发生散射，并可能产生韧致辐射。因此，在高能电子束屏蔽设计中，不能只考虑钨合金本身的厚度，还需要综合考虑二次辐射问题，并根据具体能量和设备结构进行设计。



4. 中子辐射

钨合金并不是理想的单独中子屏蔽材料。中子与物质的相互作用机制不同于 X 射线和 γ 射线。对于中子屏蔽，通常需要富含氢元素的材料、硼材料等进行慢化和吸收，例如聚乙烯、含硼材料等。在同时存在 γ 射线和中子辐射的环境中，可以采用钨合金与其他中子屏蔽材料组成复合屏蔽结构，而不是单纯依靠钨合金。

5. α 射线和 β 射线

钨合金也可以对 α 、 β 辐射形成一定的阻挡，但通常不是这两类辐射的首选屏蔽材料。 α 粒子的穿透能力非常弱，一般较薄的材料就能够阻挡。 β 粒子虽然穿透能力比 α 粒子强，但使用高原子序数材料直接屏蔽高速 β 粒子可能产生较明显的韧致辐射，因此实际设计需要根据 β 粒子的能量选择合适的屏蔽材料和结构。

钨合金屏蔽件最常见的应用场景

射线类型	钨合金适用性	典型应用
X 射线	很适合	医疗、工业检测、安检
γ 射线	很适合	核医学、放射源、工业探伤
电子束	可以使用，但需考虑二次辐射	加速器、科研设备
中子	不适合作为单独的主要屏蔽材料	通常与其他材料组合
β 射线	可以屏蔽，但并非首选	特定辐射防护场景
α 射线	可以阻挡，但通常没有必要使用高密度钨合金	特殊防护场景

因此，如果从钨合金屏蔽件的实际商业应用来看，最核心的两类对象就是 X 射线和 γ 射线。特别是在需要高密度、较小体积和精密结构的情况下，钨合金具有比较明显的应用价值。





Q4. 钨合金和铅相比，哪一种屏蔽材料更好？

钨合金和铅都是常用的辐射屏蔽材料，但不能简单地说哪一种绝对更好。实际选择主要取决于射线类型、射线能量、所需屏蔽厚度、设备空间、机械强度以及成本等因素。如果重点考虑 X 射线和 γ 射线屏蔽，钨合金通常更适合对体积、强度和精密结构有较高要求的场景；铅则具有成本低、加工容易、屏蔽性能成熟等优势。

钨合金与铅的主要区别

对比项目	钨合金	铅
密度	约 17~19 g/cm ³	约 11.34 g/cm ³
原子序数	钨为 74	铅为 82
X 射线屏蔽	优良	优良
γ 射线屏蔽	优良	优良
机械强度	高	较低
硬度	较高	较低、较软
耐磨性	较好	较差
结构稳定性	较好	相对较差
精密加工	适合精密结构件	适合板材、片材等简单结构
单位材料成本	通常较高	通常较低
环境与使用限制	相对容易管理	铅具有一定毒性，使用时需要考虑职业健康和环保要求

1. 如果追求更小的屏蔽结构，钨合金更有优势

钨合金的密度明显高于铅，因此可以在有限空间内获得较高的面密度。这对于医疗设备、核医学设备、工业探伤设备等尤其重要。例如设备内部空间非常有限，需要在一个很小的区域内设置屏蔽结构时，钨合金通常比厚重的铅结构更容易实现紧凑化设计。实际屏蔽厚度不能仅根据密度直接换算。不同射线能量下，材料的质量衰减系数和线性衰减系数不同，因此最终厚度需要根据具体辐射参数进行计算。

2. 如果需要高强度和复杂结构，钨合金更合适

铅的优点是柔软、容易加工，但这同时也是它的局限性。铅不适合承担较大的机械载荷，也不适合制造一些需要长期保持尺寸精度的复杂结构件。钨合金则具有较高的强度、硬度和耐磨性，可以加工成屏蔽块、屏蔽套、准直器、屏蔽环以及带孔、槽和复杂内腔的精密零件。

因此，如果屏蔽件同时承担机械结构功能，钨合金通常更具有优势。

3. 如果主要考虑成本，铅通常更有优势

铅是一种成熟且价格相对低廉的屏蔽材料，尤其适合大面积、厚度较大的固定式屏蔽结构，例如铅板、铅砖以及建筑辐射防护层。钨合金的制造成本通常明显高于铅，因此如果设备空间充足、结构简单，同时对材料强度和尺寸精度没有特别高的要求，铅往往具有更高的经济性。



4. 钨合金并不意味着屏蔽效果一定比铅强

这一点非常重要。钨的原子序数为 74，而铅为 82，因此不能仅仅因为钨合金密度更高，就认为钨合金在所有 X 射线和 γ 射线能量下都一定比铅具有更好的单位厚度屏蔽能力。实际屏蔽效果需要结合射线能量、材料密度、质量衰减系数、屏蔽厚度以及几何条件进行计算。

所以更准确的说法是：钨合金最大的优势并不是在所有情况下都具有绝对更强的屏蔽能力，而是在高密度、小体积、高强度和精密结构这些综合需求下具有明显优势。

怎么选择？

如果是大型固定式辐射防护墙、铅房、铅板等，应优先考虑铅，原因是成本较低、技术成熟。

如果是医疗设备内部的精密屏蔽件、 γ 射线源屏蔽件、工业探伤设备屏蔽件、准直器或者空间非常有限的屏蔽结构，钨合金通常更加合适。因此，可以把两者的选择概括为：铅更偏向经济型、大面积屏蔽；钨合金更偏向高密度、紧凑型、精密结构和高强度屏蔽。

如果用于钨合金屏蔽件的产品介绍或 SEO 内容，这一问题最适合进一步延伸成一个更专业的主题：钨合金与铅的屏蔽性能、重量、厚度、成本和应用场景全面对比，这样比单纯回答哪种材料更好更有技术含量。



Q5. 钨合金屏蔽件的密度是多少？

钨合金屏蔽件的密度通常取决于钨含量、合金体系以及具体牌号。常见高密度钨合金的密度大约在 $17 \sim 19.3 \text{ g/cm}^3$ 之间。其中，纯钨的理论密度约为 $19.25 \sim 19.30 \text{ g/cm}^3$ ，而常见钨镍铁、钨镍铜等重钨合金由于加入了镍、铁、铜等结合相，其密度通常低于纯钨。



常见钨合金密度范围

钨含量	常见密度范围
80% W	约 17.0 g/cm ³
85% W	约 17.0~17.5 g/cm ³
90% W	约 17.0~17.2 g/cm ³
93% W	约 17.5~17.8 g/cm ³
95% W	约 18.0~18.3 g/cm ³
97% W	约 18.3~18.7 g/cm ³
98% W	约 18.5~18.8 g/cm ³
纯钨	约 19.3 g/cm ³

实际产品的密度会受到烧结工艺、孔隙率、合金配比和生产工艺的影响，因此同一钨含量的材料，不同厂家给出的实际密度可能存在一定差异。

为什么钨合金需要较高密度？

对于 X 射线和 γ 射线屏蔽而言，材料密度是非常重要的参数。高密度意味着单位体积内具有更多的物质，可以增加射线与材料发生相互作用的机会，有利于降低射线透射强度。钨合金通常采用较高的钨含量，以获得较高的密度和良好的屏蔽性能。钨合金屏蔽件的屏蔽能力需要结合射线能量、屏蔽厚度、材料组成、几何结构及允许辐射透射率等因素综合确定。如用于常规钨合金屏蔽件，17~19 g/cm³ 通常可作为一个比较典型的密度范围；如果产品要求接近纯钨的高密度，则可以选择高钨含量牌号，密度最高可接近 19.3 g/cm³。





Q6. 钨合金屏蔽件的屏蔽性能如何计算?

钨合金屏蔽件的屏蔽性能计算, 核心是确定射线经过一定厚度的钨合金后, 辐射强度能够降低到什么程度。对于 X 射线和 γ 射线, 最基本的计算方法是利用射线的指数衰减规律, 再结合实际材料的衰减系数、射线能量和几何条件进行修正。

1. 最基本的计算公式

对于单一能量的窄束 X 射线或 γ 射线, 可以使用: $I = I_0 e^{-\mu x}$, 其中: I_0 是入射辐射强度,

I 是穿过屏蔽材料后的辐射强度, μ 是钨合金对该射线能量对应的线性衰减系数, x 是

屏蔽件厚度。因此, 透射率可以表示为: $T = \frac{I}{I_0} = e^{-\mu x}$, 例如, 如果要求透射率不超过 1%,

也就是: $\frac{I}{I_0} \leq 0.01$ 。那么理论所需厚度可以计算为: $x \geq \frac{-\ln(0.01)}{\mu} = \frac{4.605}{\mu}$, 这就是最基本

的钨合金屏蔽厚度计算方法。

2. 半值层 HVL 和十分之一值层 TVL

工程设计中, 还经常使用半值层 HVL 和十分之一值层 TVL 来描述屏蔽性能。半值层 HVL

是使辐射强度降低到原来的 50% 所需要的材料厚度: $HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$

十分之一值层 TVL 则是使辐射强度降低到原来的 10%: $TVL = \frac{\ln 10}{\mu}$

如果已知需要降低多少倍, 就可以通过 HVL 或 TVL 快速估算屏蔽厚度。例如需要将辐

射强度降低到原来的千分之一: $\frac{I}{I_0} = 10^{-3}$, 理论上需要约 3 个 TVL。

3. 钨合金的密度如何参与计算?

如果手头获得的是质量衰减系数, 而不是线性衰减系数, 可以使用: $\mu = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho$, 其中,

μ/ρ 是质量衰减系数, 单位通常为 cm^2/g , ρ 是钨合金密度, 单位为 g/cm^3 。因此:

$T = e^{-(\mu/\rho) \cdot \rho \cdot x}$ 。这也是为什么钨合金的密度对于辐射屏蔽设计非常重要。但应注意不能

简单地认为密度越高, 任何能量下的屏蔽性能就一定按照相同比例提高。实际情况还与材料组成和射线能量有关。



4. 实际 X 射线屏蔽不能只使用单一能量公式

实际 X 射线通常不是单一能量，而是具有一定能谱范围。例如医疗 X 射线设备产生的是连续能谱，同时还可能存在特征 X 射线。因此，工程设计通常需要根据设备的管电压、过滤条件、射线能谱、工作负荷和屏蔽目标进行计算。对于连续能谱的 X 射线，单能指数衰减公式应扩展为能谱积分形式：

$$I = I_0 \int_0^{E_{\max}} S(E) e^{-\mu(E)x} dE$$

$$T = \frac{I}{I_0} = \int_0^{E_{\max}} S(E) e^{-\mu(E)x} dE$$

其中 $S(E)$ 为归一化能谱分布函数， $\mu(E)$ 为随能量变化的线性衰减系数， $E_{\max}$ 为最大光子能量。对于这种情况，单能指数衰减公式只能作为初步估算，不能直接作为设计依据。

5. γ 射线还需要考虑散射

对于 γ 射线，除了直接穿过屏蔽层的初级光子之外，还可能存在散射光子。因此工程计算中经常引入积累因子（Buildup Factor）： $I = I_0 \cdot B(E \cdot x) \cdot e^{-\mu x}$ ，即：

$$T = \frac{I}{I_0} = B(E \cdot x) \cdot e^{-\mu x}$$

其中 $B(E \cdot x)$ 与射线能量、材料、屏蔽厚度以及几何条件有关。这意味着实际屏蔽效果可能与单纯使用 $e^{-\mu x}$ 得到的理论结果存在差异，特别是在厚屏蔽层和宽束几何条件下。

6. 实际设计通常需要考虑哪些参数？

如果要准确计算一个钨合金屏蔽件，需要至少明确以下参数：射线类型、射线能量或 X 射线管电压、辐射源强度、源到屏蔽件的距离、钨合金牌号及密度、屏蔽件厚度、屏蔽几何结构、允许的透射剂量率以及工作时间或工作负荷。对于医疗和工业辐射防护，还需要根据相应的安全标准和设计目标确定允许的剂量率，而不是仅仅计算材料的理论透射率。

一个简单的计算示例

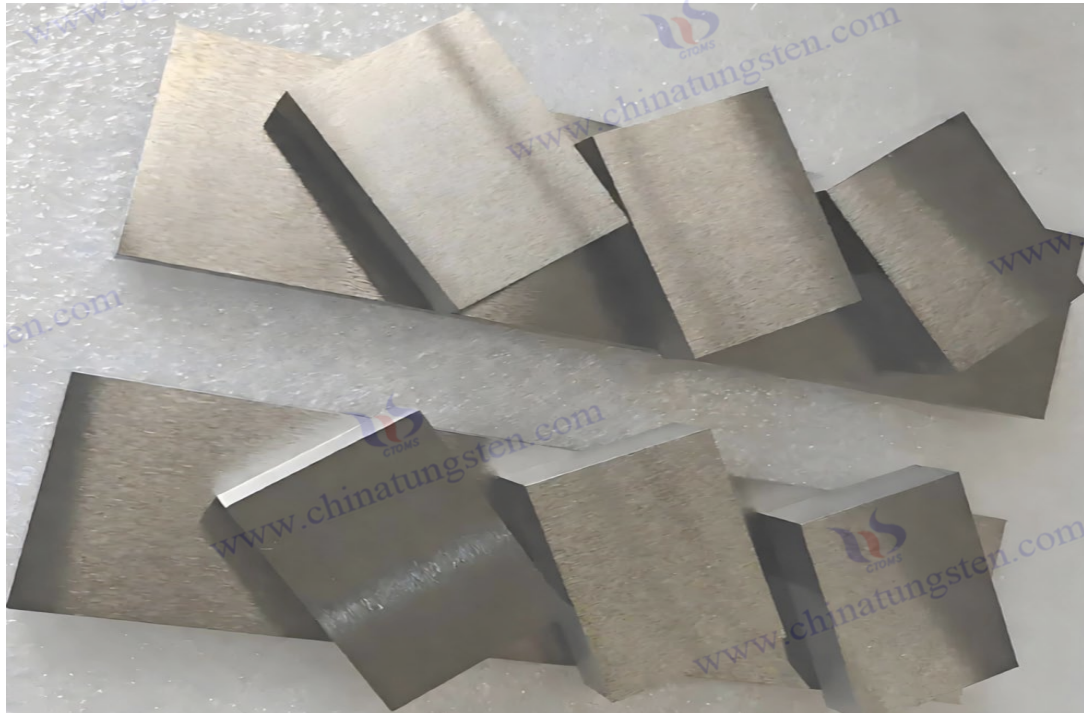
假设某种钨合金在特定 γ 射线能量下的线性衰减系数为： $\mu = 1.0 \text{ cm}^{-1}$ 。如果屏蔽件厚度为： $x = 3 \text{ cm}$ ，则：

$$\frac{I}{I_0} = e^{-1.0 \times 3} = e^{-3} \approx 0.0498$$

透射率约为 4.98%，辐射强度降低约 95%。如果希望进一步降低到 0.1%，则需要重新根据目标透射率计算所需厚度，而不能简单按照固定厚度判断。因此，钨合金屏蔽件的屏蔽性能计算可以概括为：射线能量 → 获取对应的质量衰减系数 → 结合钨合金密度得到线性衰减系数 → 根据屏蔽厚度计算透射率 → 在实际工程中进一步考虑散射、积累因子和几何条件。



对于实际产品设计，最关键的并不是单纯追求更高的钨含量，而是根据具体射线能量和允许透射水平确定合适的材料牌号与屏蔽厚度。



Q7. 钨合金屏蔽件能屏蔽 X 射线和 γ 射线吗？

可以，钨合金屏蔽件能屏蔽 X 射线和 γ 射线，能够有效降低 X 射线和 γ 射线的辐射强度，因此广泛应用于医疗设备、核医学、工业无损检测、放射源防护以及科研设备等领域。

1. 钨合金可以屏蔽 X 射线

X 射线属于高能电磁辐射，具有较强的穿透能力。钨合金具有高密度和较高的原子序数，X 射线进入材料后会通过光电效应、康普顿散射等相互作用逐渐衰减，从而降低透射辐射强度。

因此，钨合金经常被加工成 X 射线设备中的屏蔽块、屏蔽罩、准直器、屏蔽环以及其他精密防护部件。对于 X 射线，实际需要多厚的钨合金，不能只根据材料密度判断，还需要考虑 X 射线的能量。一般来说，射线能量越高，穿透能力越强，对屏蔽厚度的要求也越高。

2. 钨合金可以屏蔽 γ 射线

钨合金同样可以用于 γ 射线屏蔽。

γ 射线通常具有较强的穿透能力，因此在核医学、工业探伤、放射源储存和核工业等应用中，需要使用高密度材料降低辐射剂量。钨合金可以通过光电效应、康普顿散射和在更高能量条件下可能发生的电子对产生等相互作用，使 γ 射线逐渐衰减。对于 γ 射线屏蔽，通常需要根据具体的 γ 射线能量、源强、屏蔽距离和允许剂量率计算屏蔽厚度。



3. X 射线和 γ 射线的屏蔽方式并不完全相同

虽然两者都属于电磁辐射，但实际屏蔽设计不能完全采用相同参数。X 射线通常由 X 射线管等设备产生，其能谱与管电压、靶材和过滤条件有关； γ 射线通常来自放射性核素，具有与核素相关的特定能量或能谱。因此，同样厚度的钨合金，对于不同能量的 X 射线和 γ 射线，其实际衰减效果可能存在明显差异。

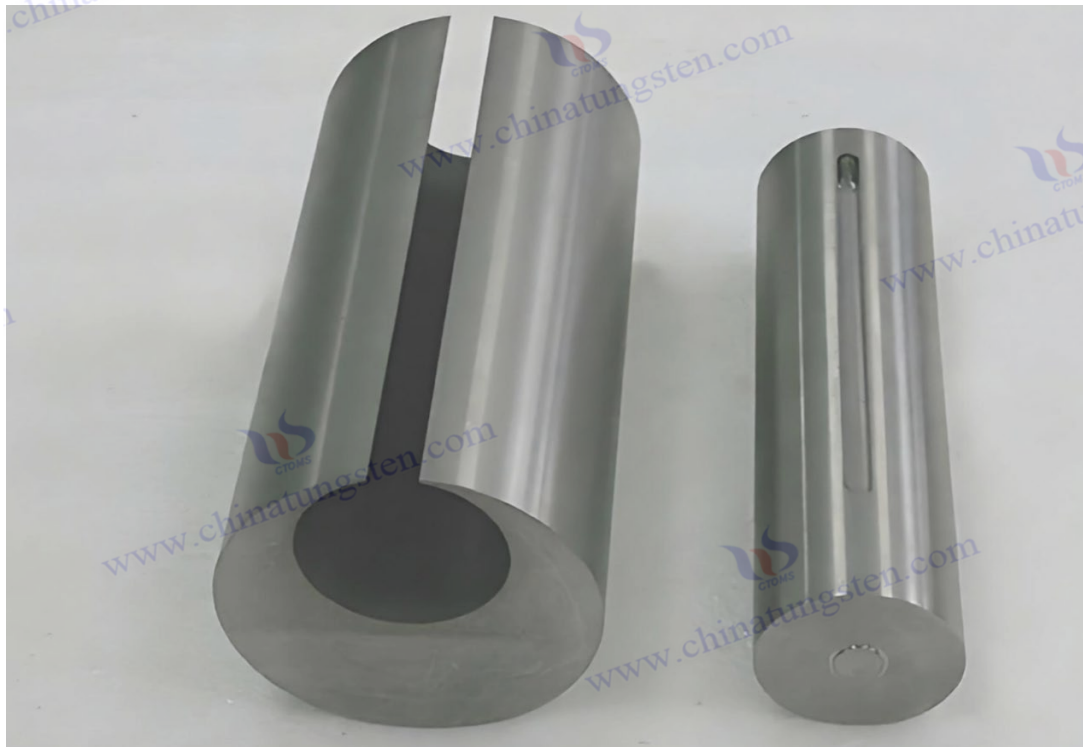
4. 屏蔽效果如何判断？

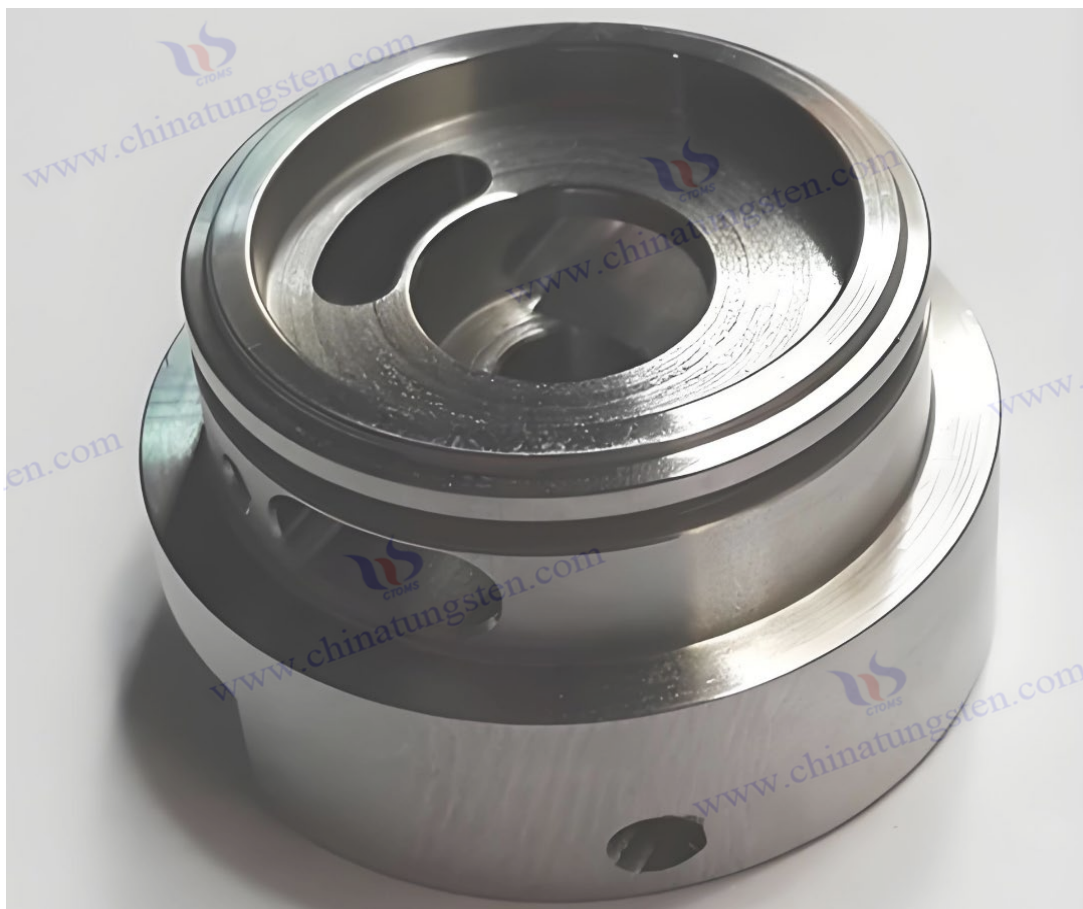
最基本的理论模型可以表示为： $I = I_0 e^{-\mu x}$

其中： I_0 是入射辐射强度， I 是穿过屏蔽材料后的辐射强度， μ 是钨合金对该射线能量对应的线性衰减系数， x 是屏蔽件厚度。入射辐射强度， I 是穿过钨合金后的辐射强度， μ 是对应射线能量下的线性衰减系数， x 是钨合金厚度。这意味着，钨合金屏蔽件的效果与三个核心因素密切相关：射线能量、材料特性以及屏蔽厚度。实际工程中还需要进一步考虑散射辐射、束流几何、积累因子以及设备工作条件等因素，因此产品设计通常不能仅依据简单的理论公式确定最终厚度。

5. 钨合金为什么适合制作精密屏蔽件？

与铅相比，钨合金不仅具有较高密度，而且具有更好的机械强度、硬度和耐磨性。因此，当屏蔽件需要同时承担结构功能，或者需要加工成小型、复杂、精密的形状时，钨合金具有明显优势。例如，医疗设备和核医学设备中的准直器、屏蔽套、屏蔽环，以及工业探伤设备中的定制屏蔽组件，都可以采用钨合金制造。因此，答案是肯定的：钨合金能够用于 X 射线和 γ 射线屏蔽，而且这正是钨合金屏蔽件最主要的应用领域之一。但具体能屏蔽到什么程度，以及需要多厚的材料，必须根据射线能量和实际辐射防护要求进行计算。





Q8. 钨合金屏蔽件可以用于 CT、X 射线设备和医疗器械吗？

钨合金屏蔽件可用于 CT、X 射线设备、医疗器械及多种医疗器械，而且其高密度、小体积、高强度和可精密加工等特点，使其特别适合用于医疗设备内部的局部辐射屏蔽和射线准直。

1. 用于 CT 设备

CT 设备在工作过程中会产生 X 射线，需要通过屏蔽结构减少不必要的辐射泄漏和散射。钨合金可以加工成屏蔽块、屏蔽罩、屏蔽环、准直器等部件，用于设备内部特定区域的辐射防护。尤其是在 CT 设备内部空间有限的情况下，高密度钨合金可以在较小体积内提供较好的射线衰减能力。不过，CT 整体机房的墙体、门窗等大面积防护结构通常不会全部采用钨合金，而是根据建筑防护要求采用铅、混凝土等更加经济的材料。钨合金更适合设备内部的局部精密屏蔽。

2. 用于 X 射线设备

这是钨合金屏蔽件非常典型的应用领域。在医用 X 射线机、数字 X 射线设备、透视设备等系统中，钨合金可以用于：X 射线准直器、射线源周围屏蔽件、探测器附近的屏蔽结构、局部屏蔽块、屏蔽环和屏蔽套、定制异形屏蔽件。其中，准直器是一个非常典型的应用。它不仅需要降低不必要的射线泄漏，还需要通过精密结构控制 X 射线束的形状和照射范围，因此对材料的密度、机械强度和加工精度都有较高要求。



3. 用于核医学设备

钨合金在核医学领域也具有较高的应用价值。例如 SPECT、PET 以及其他涉及放射性示踪剂的设备，需要对 γ 射线进行局部屏蔽和方向控制。钨合金可以加工成屏蔽块、准直器、屏蔽容器和其他精密部件。特别是准直器，需要大量精确排列的小孔或复杂通道，材料既要具有良好的 γ 射线衰减能力，又要具备足够的机械强度和尺寸稳定性，这也是钨合金的重要优势之一。

4. 为什么医疗设备喜欢使用钨合金？

主要是因为医疗设备内部往往存在空间和重量限制。钨合金密度通常约为 $17\sim 19\text{ g/cm}^3$ ，可以在有限空间内实现较高的面密度。同时，它的机械强度和硬度明显优于铅，适合加工成具有孔道、狭缝、内腔和复杂轮廓的精密部件。因此，对于设备内部需要同时满足屏蔽、结构支撑和精密加工要求的部件，钨合金往往比传统软质铅材料更加合适。

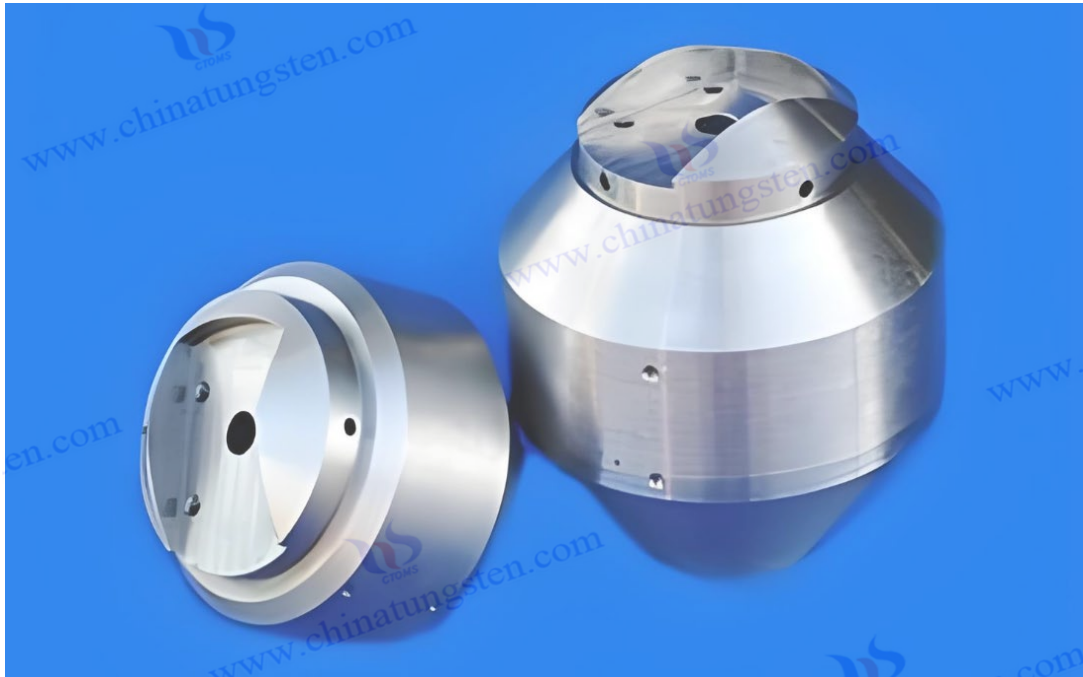
5. 钨合金并不能替代所有医疗设备屏蔽材料

虽然钨合金适用于医疗设备，但并不意味着所有医疗辐射防护都应该使用钨合金。例如大型 X 射线机房的墙体、地面、天花板以及防护门等属于大面积建筑屏蔽结构，通常会根据具体设计采用铅、混凝土或其他屏蔽材料。钨合金的成本较高，更适合小体积、高性能和精密结构的局部屏蔽。此外，具体医疗设备中的屏蔽件需要根据 X 射线能量、管电压、辐射方向、允许泄漏水平、设备空间和机械结构等参数进行设计，不能仅根据材料密度确定。

钨合金屏蔽件完全可以用于 CT、X 射线设备和医疗器械，尤其适合设备内部的局部辐射屏蔽、射线准直和复杂精密结构。其典型优势可以概括为：

高密度	较小体积即可实现较好的射线衰减
高强度	不容易像铅那样发生明显变形
可精密加工	适合准直器、屏蔽块、屏蔽环等复杂零件
结构稳定	适合长期安装在医疗设备内部
定制	可以根据设备内部空间和射线传播路径加工成异形屏蔽件

因此，在医疗 X 射线和 γ 射线设备中，钨合金更适合承担高性能、紧凑型、精密化的局部屏蔽任务，而不是简单替代传统的建筑铅屏蔽。



Q9. 钨合金屏蔽件可以用于核工业和核医学领域吗？

可以。钨合金屏蔽件可以广泛用于核工业和核医学领域，尤其适用于需要屏蔽 γ 射线、控制射线传播方向，或者在有限空间内实现高密度屏蔽的场合。与普通铅屏蔽材料相比，钨合金具有高密度、高强度、耐磨性好和可精密加工等特点，因此特别适合制造小型、复杂和高精度的辐射屏蔽部件。

1. 钨合金在核医学中的应用

核医学设备和放射性药物会产生 γ 射线，因此需要对放射源、探测器以及相关操作区域进行辐射防护。钨合金常见的应用包括放射源屏蔽件、注射器屏蔽套、药物容器屏蔽件、屏蔽罐、屏蔽盒、准直器以及其他局部防护部件。例如，在放射性药物操作过程中，钨合金可以用于制造注射器屏蔽套。由于钨合金密度较高，可以在保持较小外形尺寸的情况下提供较好的 γ 射线衰减效果，同时具有较好的机械强度，适合反复使用。

2. SPECT 和 PET 等核医学设备

在 SPECT 等 γ 射线成像设备中，准直器是非常重要的部件。准直器通过特定的孔道结构限制 γ 光子的传播方向，使探测器能够获得所需要的空间信息。钨合金具有较高的密度和较好的机械性能，可以加工成具有大量精密孔道的准直结构。在 PET 等设备中，也存在对高能 γ 光子进行屏蔽和控制的需求。具体采用什么材料和结构，需要根据设备设计、 γ 射线能量以及探测器系统进行选择。

3. 钨合金在核工业中的应用

核工业涉及的辐射环境更加复杂，钨合金可以用于部分局部屏蔽和设备防护结构。例如，可以根据具体需求制造放射源屏蔽组件、检测设备屏蔽件、探测器周围屏蔽结构、准直器、屏蔽容器以及其他定制化辐射防护部件。在工业射线检测和放射源相关设备中，



钨合金也可以发挥高密度屏蔽材料的优势。

4. 为什么核工业和核医学会选择钨合金？

首先是高密度。常见钨合金密度约为 $17\sim19\text{ g/cm}^3$ ，可以在有限空间内提供较高的单位面积质量。其次是高强度。钨合金的机械性能明显优于铅，适合制造需要承受机械载荷、振动或反复操作的屏蔽部件。第三是尺寸稳定性。对于准直器、屏蔽环和精密屏蔽块等部件，尺寸精度和长期稳定性非常重要。第四是可加工性。钨合金可以根据设备结构加工成孔状、槽状、环状、套筒状以及其他复杂几何形状，使屏蔽件能够与具体设备结构相匹配。

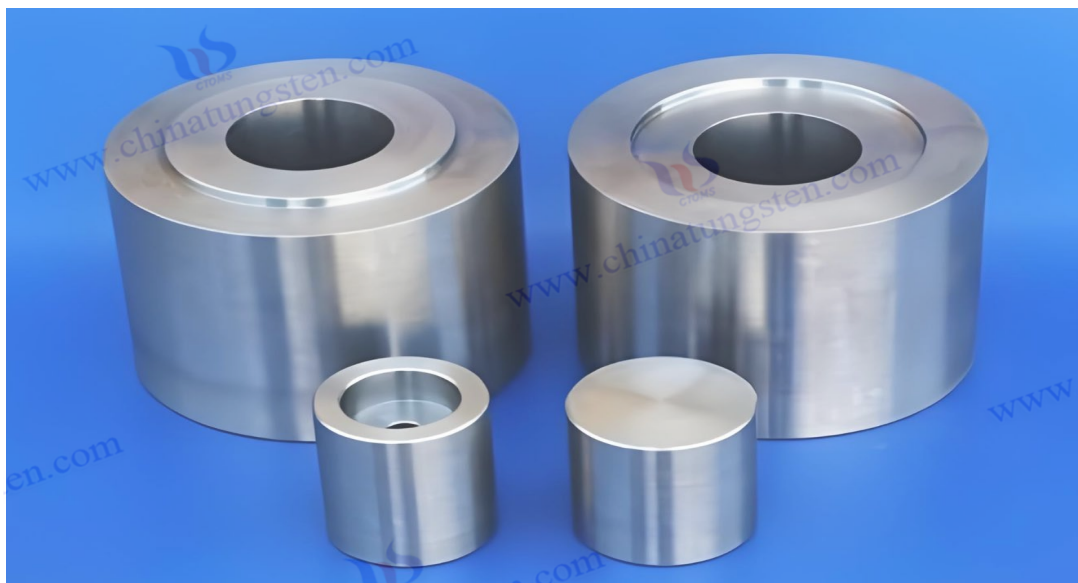
5. 钨合金并不是所有核辐射的最佳屏蔽材料

核工业中的辐射环境可能同时包含 γ 射线、中子以及其他类型的辐射。钨合金尤其适合 γ 射线等高能光子辐射的屏蔽，但对于中子辐射，通常需要采用含氢材料、含硼材料等进行慢化和吸收。因此，如果面对的是中子与 γ 射线混合辐射环境，往往需要设计多层或复合屏蔽结构，而不能单纯依靠钨合金。此外，实际核工业屏蔽设计还需要考虑辐射源能量、源强、屏蔽距离、允许剂量率、散射辐射、设备几何结构以及相关安全规范。

6. 核医学和核工业中的典型应用对比

应用领域	钨合金屏蔽件典型用途
核医学	放射性药物屏蔽、注射器屏蔽套、屏蔽罐
SPECT	γ 射线准直器、局部屏蔽件
PET	探测器及相关结构的局部辐射屏蔽
工业探伤	放射源屏蔽、准直器、屏蔽组件
核工业	放射源相关设备、检测设备局部屏蔽
科研设备	γ 射线屏蔽、探测器屏蔽、实验装置屏蔽

钨合金在核工业和核医学领域的核心价值，是利用高密度材料在有限空间内实现高效的光子辐射衰减，同时利用其高强度和可加工性制造传统铅材料较难实现的精密屏蔽结构。如果从产品应用角度来看，核医学更突出钨合金在小型化、便携式和精密屏蔽件方面的优势，而核工业则更多关注高强度、耐用性以及针对特定辐射源和设备结构的定制化屏蔽。



Q10. 钨合金屏蔽件有哪些常见的牌号和成分？

钨合金屏蔽件并没有一个全球统一的单一牌号体系。实际市场中，最常见的是以钨含量、结合相体系和密度来区分材料。用于辐射屏蔽的高密度钨合金，主要可以分为钨镍铁（W-Ni-Fe）和钨镍铜（W-Ni-Cu）两大体系。

1. 常见的钨镍铁合金

钨镍铁是工业上非常常见的重钨合金体系，主要由钨、镍和铁组成。典型成分可以表示为：W：约 90%~97%、Ni：约 2%~7%、Fe：约 1%~3%。常见牌号或规格通常按照钨含量进行区分，例如 90W、93W、95W、97W 等。不同厂家对具体牌号的命名方式可能有所不同，因此采购时不能只看牌号名称，还需要确认实际化学成分、密度和机械性能。这类材料具有较高密度、较高强度和较好的机械加工性能，因此经常用于制造 X 射线和 γ 射线屏蔽件。

2. 常见的钨镍铜合金

另一种常见体系是钨镍铜（W-Ni-Cu）。典型组成主要为：W：约 90%~97%、Ni：约 2%~7%、Cu：约 1%~5%。与钨镍铁相比，钨镍铜通常具有较好的耐腐蚀性能和一定的导热性能，在一些特殊结构和电子、医疗设备领域具有应用价值。同样地，具体比例会根据材料牌号和制造商的配方有所变化。

3. 按钨含量划分的常见规格

对于钨合金屏蔽件而言，可以用一个比较直观的方式理解材料等级：

常见规格	钨含量	典型特点
90W	约 90%	密度较高、加工性能较好
93W	约 93%	密度与机械性能较均衡
95W	约 95%	更高密度，常用于高性能屏蔽
97W	约 97%	密度接近纯钨，屏蔽结构更紧凑
纯钨	≥99% W，具体取决于牌号	密度最高，但加工难度和成本较高



这些百分比主要表示钨的质量分数，并不是说所有厂家生产的 90W、93W、95W、97W 都具有完全相同的成分和性能。

4. 为什么屏蔽件通常采用 90%~97% 钨合金？

纯钨虽然密度高，但硬度高、脆性较大，加工难度和制造成本也比较高。加入镍、铁或铜之后，可以形成具有金属结合相的钨合金，使材料在保持高密度的同时获得更好的韧性、强度和加工性能。因此，对于需要加工成复杂形状的屏蔽块、屏蔽套、准直器、屏蔽环等产品，钨合金通常比纯钨更加实用。

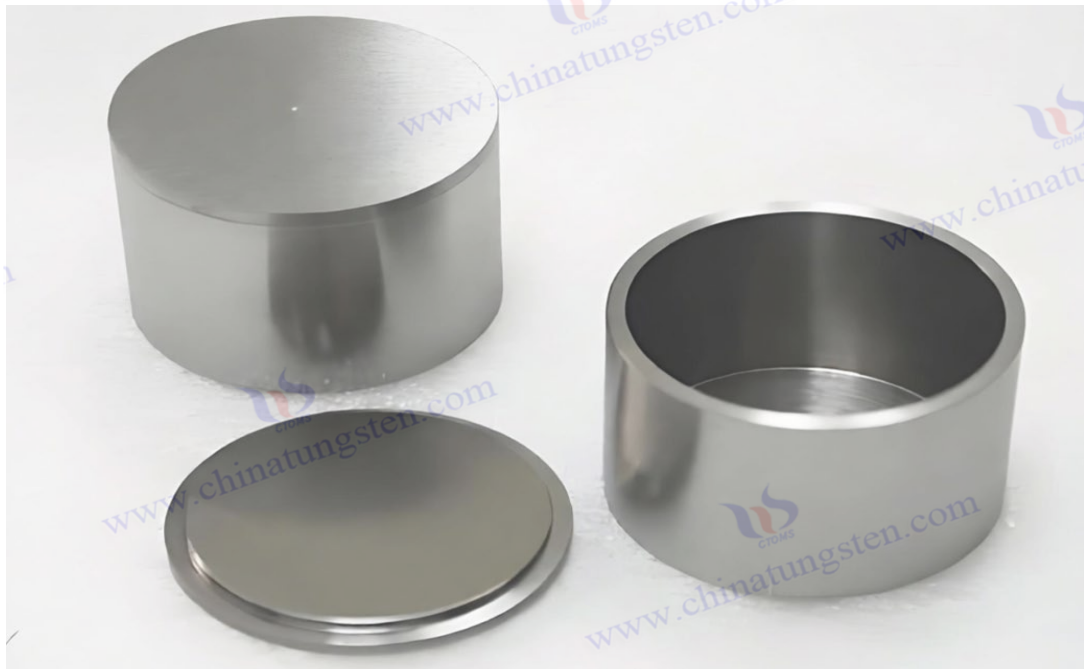
5. 不同钨含量对屏蔽件有什么影响？

一般而言，提高钨含量可以提高材料密度，从而有利于在相同体积下获得更高的面密度。例如，90W 和 97W 虽然都属于高密度钨合金，但 97W 通常具有更高的密度，更适合空间非常有限、需要较高单位体积屏蔽能力的场景。但钨含量越高并不意味着所有性能都会同步提高。随着钨含量增加，材料的加工特性、延性、成本等也可能发生变化。因此，实际选材需要在密度、屏蔽性能、机械性能、加工难度和成本之间进行平衡。

6. 采购钨合金屏蔽件时不要只看牌号

如果是实际工程采购，建议重点确认材料的：钨含量、化学成分、实际密度、硬度、抗拉强度、延伸率、加工状态、尺寸公差以及相关材料标准。尤其是屏蔽件，不能只要求厂家提供 95W 或 97W 这样的名称，而应该要求提供具体的材料规格和检测数据。

钨合金屏蔽件最常见的材料体系是 W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu，常见钨含量约为 90%~97%。其中 90W、93W、95W 和 97W 是市场上比较常见的规格。对于具体的 X 射线或 γ 射线屏蔽应用，应根据射线能量、屏蔽厚度、零件尺寸和机械要求选择合适的材料，而不是单纯追求最高钨含量。





Q11. 钨合金屏蔽件通常采用哪些加工工艺?

钨合金屏蔽件通常采用粉末冶金作为基础制造工艺, 再结合机加工、磨削、钻孔、线切割等精密加工方式完成最终成形。由于钨合金密度高、硬度较高, 且钨含量越高通常加工难度越大, 因此其加工工艺与普通钢材、铝合金等材料存在明显区别。

1. 粉末冶金

粉末冶金是制造钨合金屏蔽件最常见的基础工艺之一。首先将钨粉与镍、铁、铜等金属粉末按照配方比例混合, 然后经过压制成形和液相烧结, 使钨颗粒与金属结合相形成致密的钨合金坯料。这种工艺特别适合生产高密度钨合金, 因为可以获得较高的材料致密度, 并且能够根据产品形状设计近净成形坯料。对于大批量生产的屏蔽块、屏蔽环、屏蔽套等产品, 粉末冶金具有较好的经济性。

2. 模压成形

对于形状比较规则的钨合金屏蔽件, 可以采用模具压制。将混合好的钨合金粉末装入模具, 通过一定压力压制成所需要的预制坯, 再进行烧结。这种方法适合批量生产尺寸相对固定的产品, 可以减少后续机械加工量。不过, 如果产品结构复杂、内部孔道较多或者尺寸精度要求较高, 通常还需要结合后续精密加工。

3. 液相烧结

压制后的钨合金坯料通常需要进行高温烧结, 使钨颗粒之间形成稳定的组织结构, 并使材料获得较高的密度和机械性能。W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 等重钨合金通常采用液相烧结工艺。烧结过程对最终产品的密度、尺寸变化、组织均匀性和机械性能都有较大影响, 因此是钨合金制造过程中的关键环节。

4. CNC 精密加工

对于需要较高尺寸精度的钨合金屏蔽件, 烧结之后通常还需要进行 CNC 车削、铣削等机械加工。例如屏蔽套、屏蔽环、准直器以及复杂异形屏蔽件, 都可能需要通过 CNC 加工实现精确的外形尺寸、孔径和装配尺寸。但是钨合金硬度较高, 因此刀具选择、切削速度、进给量和冷却方式都需要针对材料进行优化。

5. 钻孔和深孔加工

很多钨合金屏蔽件并不是简单的实体块, 而是需要加工孔道。例如准直器可能包含大量精密小孔, 屏蔽套可能需要中心孔、安装孔或阶梯孔。对于这些产品, 可以采用硬质合金刀具、金刚石工具或者其他适合高硬度材料的加工方案。如果孔径非常小、孔深较大, 还需要特别控制孔的直线度、圆度和位置精度。

6. 磨削加工

磨削是钨合金精密加工中非常重要的一种工艺。由于钨合金硬度较高, 普通切削很难获得特别高的尺寸精度和表面质量, 因此在精加工阶段经常使用金刚石砂轮等工具进行磨削。磨削可以用于控制外径、内径、平面度、平行度以及表面粗糙度, 尤其适合精密屏蔽件的最终尺寸加工。



7. 电火花和线切割

对于一些复杂轮廓或者普通刀具难以加工的钨合金结构, 可以考虑电火花加工或线切割。这类工艺特别适合加工复杂槽口、窄缝和特殊轮廓。不过具体是否适用, 需要结合钨合金的牌号、导电性能、尺寸以及最终精度要求确定。

8. 表面处理和后处理

根据使用环境, 部分钨合金屏蔽件还可能需要进行表面处理或后续处理, 例如清洗、去毛刺、表面研磨、防腐处理以及尺寸检测。如果屏蔽件用于医疗设备、核医学设备等对清洁度要求较高的场合, 产品还需要按照具体应用要求进行清洁和质量控制。

一个典型的制造流程

一个常见的钨合金屏蔽件, 可以按照这样的流程生产: 原材料配比 → 粉末混合 → 模压成形 → 脱脂/预处理 → 液相烧结 → 坯料检测 → CNC 粗加工 → 钻孔/铣削 → 磨削精加工 → 去毛刺和清洗 → 尺寸及密度检测 → 成品检验。

对于结构比较简单、批量较大的产品, 会更加重视粉末冶金和模压成形, 以降低后续加工成本; 对于小批量、高精度、复杂结构的屏蔽件, 则通常更加依赖 CNC、磨削、钻孔以及特种加工。因此, 钨合金屏蔽件并不是简单地把一块钨合金切出来, 而通常是粉末冶金近净成形与精密机械加工相结合。最终采用哪种工艺, 主要取决于钨含量、产品尺寸、结构复杂程度、尺寸公差、表面粗糙度、批量以及成本要求。



Q12. 钨合金屏蔽件可以加工成复杂形状吗?

钨合金屏蔽件可以加工成复杂形状, 这也是钨合金相较于传统铅屏蔽材料比较突出的优势之一。不过, 由于钨合金具有高密度、高硬度和较高的耐磨性, 复杂结构的加工难度和成本通常也高于普通金属材料。



1. 可以加工哪些复杂结构？

钨合金可以根据设备结构和屏蔽要求加工成多种复杂几何形状，例如环形、套筒形、异形块、阶梯结构、带孔结构、带槽结构以及具有复杂内部通道的零件。在实际辐射屏蔽设备中，还可以加工成准直器、屏蔽罩、屏蔽环、屏蔽套、屏蔽模块等。对于一些需要控制射线传播方向的零件，还可以在钨合金内部设计精密孔道、狭缝或特定角度的通道。

2. 为什么钨合金能够加工复杂形状？

钨合金通常以 W-Ni-Fe 或 W-Ni-Cu 等重钨合金为主。与纯钨相比，这类材料具有一定的韧性和可加工性，可以通过机械加工等方式获得复杂结构。常见加工方式包括 CNC 车削、CNC 铣削、钻孔、磨削、线切割以及其他适合高硬度材料的加工方法。对于批量生产的产品，还可以通过粉末冶金模压成形，使坯料在烧结前就接近最终形状，从而减少后续切削加工量。

3. 准直器就是典型的复杂钨合金部件

准直器是钨合金复杂结构应用中非常典型的产品。例如用于 γ 射线成像的准直器，需要在较小的材料体积中加工大量精密孔道。这些孔道的直径、长度、间距、方向和位置精度都会影响射线传播和成像效果。因此，这类产品不仅要求钨合金具有良好的屏蔽能力，还要求材料具备稳定的机械性能和较高的加工精度。

4. 加工复杂形状有哪些难点？

最大的挑战来自材料本身。钨合金密度高、硬度较高，而且钨颗粒与金属结合相形成特殊的复合组织，因此在切削过程中可能产生较大的刀具磨损。如果加工小孔、深孔、窄槽或薄壁结构，还需要控制加工应力、尺寸变形、孔壁质量和边缘完整性。因此，复杂钨合金屏蔽件通常需要合理安排粗加工和精加工工序，并根据材料牌号选择合适的刀具、切削参数和加工方式。

5. 粉末冶金可以降低复杂结构的加工难度

对于一些批量较大的复杂产品，可以通过模具直接压制接近最终形状的钨合金坯料。这种近净成形方式可以减少大量材料切削，降低加工成本，同时提高材料利用率。不过，烧结过程中可能产生尺寸收缩，因此在设计模具和确定最终尺寸时，需要充分考虑烧结收缩率。

6. 复杂形状并不意味着可以无限制加工

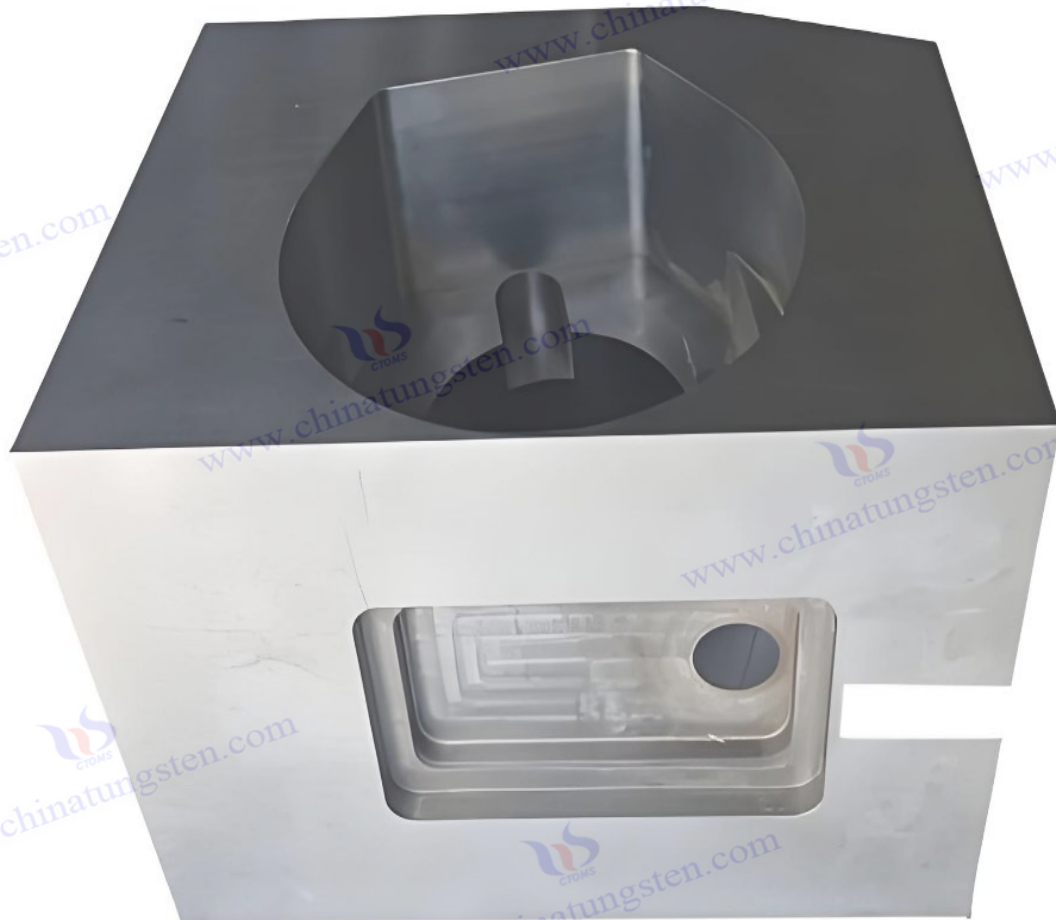
虽然钨合金具有较好的加工适应性，但复杂程度越高，加工成本和制造周期通常也会增加。例如一个简单的钨合金屏蔽块，只需要进行平面加工和少量钻孔；而一个具有大量微小孔道、深孔、薄壁和复杂内腔的准直器，其加工难度就会明显增加。因此，在设计钨合金屏蔽件时，最好从屏蔽功能、结构强度和加工可行性三个方面同时考虑，尽量避免没有实际功能的过度复杂结构。

7. 定制钨合金屏蔽件通常需要提供什么？

如果需要定制复杂形状的钨合金屏蔽件，通常需要提供产品图纸或三维模型，以及材料要求、钨含量、密度、尺寸公差、孔径和位置精度、表面粗糙度等技术参数。如果产品承担辐射屏蔽功能，还应明确射线类型、射线能量、目标屏蔽水平以及屏蔽区域，这样才能同时确定材料规格和结构尺寸。



钨合金可以加工成复杂形状, 尤其适合制造高密度、精密、小型化的辐射屏蔽部件。对于简单结构, 可以采用常规 CNC 加工; 对于复杂结构, 则可以结合粉末冶金近净成形、CNC 精加工、磨削、钻孔以及特种加工等工艺, 实现定制化制造。



Q13. 钨合金屏蔽件的尺寸精度和表面粗糙度能达到多少?

可以达到较高的尺寸精度和表面质量, 但具体数值取决于钨合金牌号、零件尺寸、结构复杂程度、加工工艺以及检测要求。对于钨合金屏蔽件, 通常不能只给出一个固定的精度或粗糙度数值。

1. 常规 CNC 加工精度

对于经过烧结后的钨合金坯料, 采用 CNC 车削、铣削、钻孔等精密加工, 常规尺寸公差通常可以做到约 $\pm 0.02 \sim \pm 0.05 \text{ mm}$ 。对于结构简单、尺寸稳定且工艺控制较好的产品, 部分关键尺寸可以进一步提高到 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 左右。例如外径、内径、台阶尺寸、安装孔位置等, 都可以根据图纸要求进行精密加工。

2. 磨削加工可以获得更高精度

如果屏蔽件对尺寸精度、平面度、圆度或平行度有更高要求, 可以在 CNC 粗加工之后增



加精密磨削。对于适合磨削的尺寸和结构，精密加工后的关键尺寸公差可以达到约 $\pm 0.005 \sim \pm 0.01 \text{ mm}$ ，部分特定尺寸甚至可以进一步提高。不过，这种精度通常需要特定的加工设备、刀具和检测条件，并不能作为所有钨合金屏蔽件的通用标准。

3. 表面粗糙度可以达到多少？

钨合金屏蔽件的表面粗糙度同样取决于加工工艺。常规 CNC 加工后，表面粗糙度通常可以控制在： $Ra 0.8 \sim 3.2 \mu\text{m}$ ，经过精加工后，可以进一步达到： $Ra 0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ ，如果采用精密磨削、研磨等工艺，对于部分要求较高的表面，可以达到： $Ra \leq 0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 。因此，如果客户要求的是高精度配合面、密封面或准直器关键表面，就需要在图纸中明确指定对应的 Ra 值，而不是只写精密加工。

4. 不同加工工艺的大致范围

加工方式	典型尺寸精度	常见表面粗糙度
粗加工	$\pm 0.05 \sim \pm 0.10 \text{ mm}$	$Ra 3.2 \sim 6.3 \mu\text{m}$
CNC 精加工	$\pm 0.01 \sim \pm 0.05 \text{ mm}$	$Ra 0.8 \sim 3.2 \mu\text{m}$
精密 CNC	约 $\pm 0.01 \sim \pm 0.02 \text{ mm}$	$Ra 0.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$
精密磨削	约 $\pm 0.005 \sim \pm 0.01 \text{ mm}$	$Ra 0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$
研磨/超精加工	视结构而定	Ra 可低于 $0.2 \mu\text{m}$

这些属于常见工程加工范围，实际能够达到的水平需要结合具体零件验证。

5. 为什么钨合金加工精度比较难控制？

钨合金属于高密度、高硬度材料，其加工难度明显高于铝合金、铜合金等常规金属。尤其是高钨含量材料，在加工过程中会出现刀具磨损较快、切削力较大以及局部崩边等问题。如果零件具有深孔、薄壁、小孔或复杂内腔结构，对加工工艺的要求会进一步提高。此外，钨合金通常需要经过粉末压制和烧结，烧结过程本身会产生一定的尺寸变化。因此，高精度零件通常需要预留后续加工余量，通过 CNC、磨削等工序获得最终尺寸。

6. 对屏蔽件来说，哪些精度最重要？

并不是所有尺寸都需要达到 $\pm 0.005 \text{ mm}$ 。对于普通屏蔽块，外形尺寸达到图纸要求即可，重点可能是整体尺寸、安装孔和装配面。对于准直器，则可能更加关注孔径、孔的位置精度、孔轴线方向、孔间距、平面度以及内壁表面质量，因为这些参数可能直接影响射线束的方向和设备性能。对于屏蔽套、屏蔽环等旋转类零件，则通常更加关注内外径、同轴度、圆度和配合公差。因此，合理的做法是根据功能对关键尺寸进行重点控制，而不是让整个零件所有尺寸都采用最高精度。

钨合金屏蔽件通过 CNC、精密磨削和研磨等工艺，可以实现较高的尺寸精度和表面质量。常规精密加工可以达到约 $\pm 0.01 \sim \pm 0.05 \text{ mm}$ 的尺寸公差，关键尺寸通过精密磨削可以进一步达到 $\pm 0.005 \sim \pm 0.01 \text{ mm}$ 左右；表面粗糙度通常可做到 $Ra 0.8 \sim 3.2 \mu\text{m}$ ，经过精磨或研磨后，部分关键表面可以达到 $Ra 0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 甚至更低。对于实际采购或定制，最可靠的方式仍然是根据具体图纸确认尺寸公差、形位公差和 Ra 要求，因为零件尺寸、结构和加工工艺会直接决定最终能够达到的精度水平。



Q14. 钨合金屏蔽件的硬度、强度和耐磨性怎么样？

钨合金屏蔽件的硬度、强度和耐磨性总体较好，这也是它适合制造精密辐射屏蔽件的重要原因之一。与铅等较软的屏蔽材料相比，钨合金不仅承担辐射屏蔽功能，还可以同时承担一定的结构和机械功能。

1. 硬度较高

常见钨合金的硬度通常在约 20~35 HRC 范围内，具体数值取决于钨含量、镍铁或镍铜结合相比例、烧结工艺以及热处理状态。高钨含量材料通常具有较高的硬度和耐磨性，但同时也可能增加加工难度。如果与铅进行比较，两者差异非常明显。铅质地柔软，容易发生划伤、压痕和变形，而钨合金具有更好的抗压痕和抗变形能力，因此更适合制造需要长期保持尺寸精度的屏蔽零件。

2. 具有较好的机械强度

钨合金的抗拉强度通常可以达到约 700~1000 MPa，部分材料体系和特定制造状态下可以达到更高水平。这种强度使钨合金能够用于制造不仅需要屏蔽辐射，还需要承受机械载荷的零部件。例如屏蔽套、屏蔽环、准直器、屏蔽块以及设备内部的结构性屏蔽件，在受到装配力、振动或机械冲击时，钨合金通常能够保持较好的结构稳定性。不过，钨合金的机械性能并不是一个固定数值。具体抗拉强度、屈服强度和延伸率需要以实际牌号和材料供应商的数据表为准。

3. 耐磨性较好

钨合金的高密度钨颗粒构成了材料的重要骨架，因此具有较好的耐磨性能。在存在反复接



触、摩擦或机械运动的应用环境中，钨合金通常比铅具有明显优势。例如需要反复装卸的屏蔽套、屏蔽容器以及具有机械配合面的精密屏蔽件，采用钨合金可以减少长期使用过程中由于磨损造成的尺寸变化。对于需要长期保持孔径、间隙和配合尺寸的准直器等精密部件，这一点尤其重要。

4. 高硬度也会带来加工难度

钨合金硬度和耐磨性较好，但这同时意味着它并不是一种容易加工的材料。在 CNC 车削、铣削和钻孔过程中，刀具磨损通常比加工普通钢材更加明显。因此，钨合金加工通常采用适合高硬度材料的刀具和合理的切削参数。对于高精度零件，还可能采用金刚石工具、磨削或其他精密加工工艺。因此，钨合金屏蔽件的材料性能可以简单理解为：成品耐磨，但加工难度较高。

5. 钨含量会影响机械性能

钨合金并不是一种固定成分的材料。例如 90W、93W、95W、97W 等不同钨含量的材料，其密度、硬度、强度、延伸率和加工性能都会有所差异。一般来说，提高钨含量可以提高密度和硬度，但并不意味着所有机械性能都会简单地随钨含量线性增加。因此，实际选择材料时需要综合考虑屏蔽性能、机械强度和加工性能。

6. 与铅相比有什么区别？

性能	钨合金	铅
硬度	较高	很低
抗压痕能力	较好	较差
抗拉强度	较高	较低
耐磨性	较好	较差
尺寸稳定性	较好	较差
加工难度	较高	很低
适合精密结构	较适合	一般
适合重复机械接触	较适合	不理想

所以，如果只是制作固定式的大面积屏蔽层，铅的柔软性和低成本反而是优势；如果需要制造小型、精密、耐磨并且具有一定机械承载能力的屏蔽件，钨合金通常更有优势。

钨合金屏蔽件具有较好的硬度、机械强度和耐磨性，可以在长期使用、反复装配和机械接触环境下保持较好的尺寸稳定性。其优势不仅体现在辐射屏蔽方面，也体现在结构强度和耐久性方面。但具体性能需要根据钨含量、W-Ni-Fe 或 W-Ni-Cu 材料体系以及制造工艺确定。对于实际采购，建议同时要求供应商提供密度、硬度、抗拉强度、屈服强度、延伸率等材料检测数据，而不要仅依据钨含量判断最终性能。



Q15. 钨合金屏蔽件在高温环境下还能保持良好的屏蔽性能吗？

可以，但需要区分钨合金的材料耐温性能和屏蔽件在实际高温环境下的综合稳定性。钨合金具有较好的高温稳定性，在温度升高后，其基本的高密度特征并不会突然消失，因此对于 X 射线和 γ 射线而言，在一定高温范围内仍然能够保持有效的辐射衰减能力。

1. 高温下屏蔽能力不会突然失效

钨本身的熔点约为 3422°C ，属于熔点非常高的金属。因此，与铅等低熔点屏蔽材料相比，钨及钨合金具有明显更高的耐高温能力。在正常的中高温使用环境下，钨合金不会因为温度升高就失去对 X 射线和 γ 射线的基本屏蔽能力。从基本屏蔽规律来看： $I = I_0 e^{-\mu x}$

其中： I 为透射后的射线强度， I_0 为入射射线强度， μ 为材料的线性衰减系数， x 为屏蔽层厚度。屏蔽能力主要取决于材料密度、射线能量、屏蔽厚度以及对应的衰减系数。温度变化通常不会使钨合金的屏蔽能力发生类似低熔点材料那样的剧烈变化。

2. 高温会导致材料发生热膨胀

虽然钨合金耐高温，但温度升高后仍然会产生热膨胀。对于普通屏蔽块而言，少量尺寸变化可能不会产生明显影响；但对于准直器、精密屏蔽套、屏蔽环等高精度部件，热膨胀可能改变孔径、间隙、位置关系和装配尺寸。因此，如果屏蔽件工作在较高温度下，需要同时考虑：

热膨胀、尺寸稳定性、材料强度变化、热循环产生的应力以及与其他材料之间的热膨胀差异。

3. 高温可能影响钨合金的机械性能

钨合金的高温性能并不是无限的。随着温度升高，材料的强度、硬度以及塑性等机械性能



会发生变化。具体变化程度与钨含量、镍铁或镍铜结合相组成、烧结组织以及实际工作温度有关。因此,如果屏蔽件同时承担机械载荷,就不能只关注它还能不能屏蔽射线,还需要验证高温状态下的机械性能。

4. 真空和高温环境需要特别考虑

在真空、高温环境中,钨合金与普通空气环境下的表现可能有所不同。钨本身在高温下容易受到氧化环境影响,因此如果工作温度较高且处于空气或含氧环境,需要考虑氧化问题。在真空、高温设备中,则需要根据具体材料体系考虑挥发、结合相稳定性、热循环以及与其他零件的材料兼容性。因此,不能简单地认为钨合金可以在接近纯钨熔点的温度下长期使用。钨合金屏蔽件的实际工作温度上限通常由合金组成、结合相、结构设计、环境气氛和机械负荷共同决定。

5. 高温辐射环境中的另一个重要因素是辐射源能量

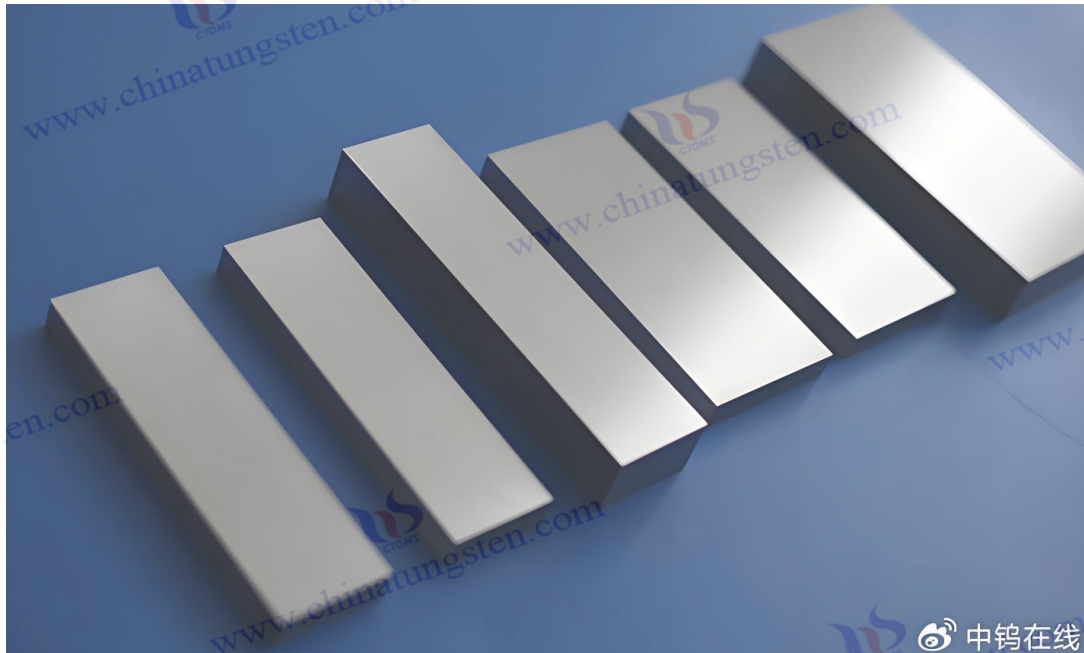
屏蔽性能主要还是由射线能量和材料参数决定。例如,同样一块钨合金屏蔽件,在不同能量的 γ 射线下,其衰减能力并不相同。因此进行高温辐射防护设计时,需要同时考虑温度和射线参数,而不能只看材料的耐热温度。

6. 与铅相比,钨合金更适合高温环境

对比项目	钨合金	铅
熔点	非常高	约 327°C
高温结构稳定性	较好	较差
高温屏蔽应用	较适合	受温度限制明显
耐磨性	较好	较差
高温机械强度	相对较好	很低
高温精密结构	较适合	一般不适合

因此,如果设备同时存在高温和 X 射线或 γ 射线辐射,钨合金通常比铅更适合作为局部屏蔽结构材料。

钨合金屏蔽件在高温环境下仍然可以保持良好的 X 射线和 γ 射线屏蔽能力,这是钨合金相比铅等低熔点材料的重要优势之一。但实际高温应用不能只关注屏蔽效果,还需要综合评估材料的热膨胀、机械强度变化、氧化、热循环以及合金结合相的高温稳定性。如果是普通中高温环境,钨合金通常具有较好的适应性;如果涉及数百摄氏度以上的长期连续工作,尤其是真空、高温、强辐射或高机械载荷环境,则应根据具体钨合金牌号和工作条件进行专项材料验证,而不能直接按照纯钨的 3422°C 熔点作为使用温度上限。



Q16. 钨合金屏蔽件的使用寿命一般有多长？

钨合金屏蔽件通常具有较长的使用寿命，但很难给出一个适用于所有产品的固定年限。与普通机械零件不同，钨合金屏蔽件本身并没有明确的统一寿命标准，其实际寿命主要取决于使用温度、辐射强度、机械载荷、磨损情况、腐蚀环境以及安装和维护条件。在正常使用和合理维护的情况下，钨合金屏蔽件使用 10~20 年甚至更长时间是比较常见的；对于固定安装、没有明显机械磨损的屏蔽块或屏蔽结构，其实际使用周期可能与设备本身的寿命相当。

1. 钨合金本身具有较好的耐久性

钨合金具有较高的硬度、强度和耐磨性，在正常环境下不容易发生明显的塑性变形。因此，对于固定式屏蔽块、屏蔽罩、屏蔽环等产品，如果没有明显的机械磨损、腐蚀或高温损伤，材料本身通常不会因为长期使用而快速失效。这也是钨合金适合用于长期运行设备的重要原因。

2. 辐射本身通常不是主要寿命因素

对于常见的 X 射线和 γ 射线屏蔽应用，钨合金并不会像某些电子元件那样因为持续接受辐射就迅速失去基本的屏蔽功能。在实际设备中，更需要关注的是长期机械使用和环境因素，例如屏蔽件是否发生磨损、碰撞、变形、腐蚀或者尺寸变化。因此，很多情况下，钨合金屏蔽件的寿命实际上取决于机械和环境条件，而不是简单由累计辐射时间决定。

3. 活动部件的寿命会明显不同

如果钨合金屏蔽件长期处于运动、滑动或反复装配状态，其寿命会受到磨损影响。例如：固定式钨合金屏蔽块通常磨损很小；屏蔽套和屏蔽环如果频繁拆装，可能出现配合面磨损；



带有滑动结构的屏蔽件, 需要考虑长期摩擦; 准直器中的精密孔道如果长期处于复杂工作环境, 则需要定期检查尺寸和结构状态。因此, 不能单纯按照材料本身的寿命来判断一个复杂屏蔽组件的使用寿命。

4. 高温环境会影响使用寿命

如果钨合金屏蔽件长期工作在高温环境中, 材料的机械性能和尺寸稳定性可能逐渐发生变化。尤其是高温循环环境, 反复的升温和降温可能产生热应力, 长期累积后可能影响零件的尺寸稳定性和结构完整性。因此, 高温设备中的钨合金屏蔽件通常需要根据实际工作温度、升降温频率和持续工作时间进行寿命评估。

5. 腐蚀和氧化也需要考虑

钨合金虽然具有较好的耐久性, 但并不是在所有环境下都完全不受影响。在高温、潮湿、腐蚀性介质或特定化学环境中, 材料表面和结合相可能受到影响。如果屏蔽件用于医疗、核工业、化工或其他特殊环境, 需要根据实际环境选择合适的材料体系和表面处理方式。

6. 如何判断屏蔽件是否需要更换?

实际使用中, 与其单纯按照年限更换, 不如根据状态进行检查。通常可以关注以下几个方面: 外观是否出现明显裂纹、崩边或腐蚀, 关键尺寸是否发生变化, 孔径和间隙是否超出设计范围, 安装结构是否松动, 以及实际辐射泄漏或透射水平是否满足设备要求。对于承担重要辐射防护功能的设备, 还应按照设备维护规范定期进行辐射防护检测。

7. 不同应用的寿命差异

使用场景	典型寿命特点
固定式屏蔽块	通常寿命很长, 可能达到 10~20 年以上
医疗设备内部屏蔽件	通常可与设备生命周期匹配
核医学屏蔽组件	取决于使用频率和机械磨损
高频拆装屏蔽件	寿命主要受磨损和装配影响
高温屏蔽件	需要根据温度和热循环专项评估
腐蚀性环境	需要根据材料和环境进行寿命评估

这里的 10~20 年更多是工程上的常见寿命范围, 而不是钨合金屏蔽件的统一标准寿命。实际产品可能短于这个范围, 也可能远高于这个范围。

钨合金屏蔽件本身具有较高的强度、硬度和耐磨性, 在正常使用条件下可以长期保持稳定的屏蔽性能。对于固定安装、温度适中且没有明显机械磨损的产品, 使用 10~20 年甚至更长时间是可以实现的。但对于高温、频繁运动、反复拆装、强腐蚀或高机械载荷环境, 不能简单按照年限判断寿命。更可靠的方法是结合材料牌号、工作温度、辐射条件、机械载荷和实际检测结果进行寿命评估。



Q17. 钨合金屏蔽件如何选择合适的钨含量？

钨合金屏蔽件的钨含量选择，不能简单理解为钨含量越高越好。实际选型需要同时考虑射线类型、射线能量、屏蔽厚度、零件尺寸、机械性能、加工难度和成本。对于常见的 X 射线和 γ 射线屏蔽件，市场上比较常见的钨含量大约为 90%~97%，其中 90W、93W、95W 和 97W 是较常见的规格。

1. 首先根据屏蔽要求确定材料等级

钨含量越高，通常材料密度也越高。在相同体积和相同厚度条件下，高钨含量材料通常能够提供更高的单位面积质量。

钨含量	典型密度范围	主要特点
90% W	约 17.0~17.2 g/cm ³	综合性能较均衡、成本相对较低
93% W	约 17.5~17.8 g/cm ³	密度较高、适用范围广
95% W	约 18.0~18.3 g/cm ³	高密度、适合紧凑型屏蔽
97% W	约 18.3~18.7 g/cm ³	密度更高、适合空间受限场景

具体密度会因 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 配方和制造工艺不同而变化，因此表中的数值只能作为选材参考。

2. 空间越有限，越应该考虑高钨含量

如果设备内部空间比较充足，可以采用 90W 或 93W 等材料，通过增加屏蔽厚度达到目标效果。如果设备内部空间非常有限，例如医疗设备内部、核医学设备、精密探测设备等，就可以考虑 95W 或 97W。原因很简单：高钨含量通常意味着更高密度，可以在不明显增加零件体积的情况下提高面密度。不过，这并不意味着 97W 在任何情况下都比 90W 更适合，因为实际屏蔽能力还与射线能量和材料的衰减系数有关。

3. 需要复杂加工时，不一定选择最高钨含量



这是实际选材中非常重要的一点。钨含量提高以后, 材料的密度通常提高, 但材料的加工难度、刀具磨损以及制造成本也可能增加。如果产品需要大量小孔、深孔、窄槽、复杂曲面或高精度内腔, 例如复杂准直器, 那么过度追求最高钨含量可能会增加制造难度。这种情况下, 93W 或 95W 有时反而是更合理的选择。

4. 如果产品需要较高机械强度, 也要综合考虑

钨合金并不是单纯的屏蔽材料, 它还可能承担机械结构功能。例如屏蔽套、屏蔽环、准直器以及设备内部结构件, 都可能同时受到装配力、振动或机械载荷。因此, 选择材料时需要同时查看抗拉强度、屈服强度、硬度和延伸率, 而不能只看钨含量。不同钨含量以及不同结合相体系的机械性能并不完全相同。

5. 射线能量比钨含量更加重要

这是进行专业选型时必须强调的一点。钨合金屏蔽效果并不是简单由钨含量决定的。例如, 同一种 95W 钨合金面对不同能量的 X 射线或 γ 射线, 其衰减效果会明显不同。因此, 实际设计通常需要先确定: 射线类型 $\rightarrow$ 射线能量 $\rightarrow$ 允许透射水平 $\rightarrow$ 所需屏蔽厚度 $\rightarrow$ 材料密度和牌号。也就是说, 不应该先决定使用 97W, 然后再考虑屏蔽厚度; 更合理的方式是先确定辐射防护要求, 再选择能够满足要求的材料。

6. 可以根据应用场景进行初步选择

如果是普通 X 射线设备的局部屏蔽, 可以优先考虑 90W~93W, 在成本和性能之间取得平衡。如果是医疗设备、工业探伤设备等对体积有一定要求的产品, 可以考虑 93W~95W。如果是空间极其有限、需要高密度屏蔽的精密部件, 则可以考虑 95W~97W。如果需要制造复杂准直器或高精度异形件, 则应该综合比较 93W、95W 和 97W 的加工性能, 而不是直接选择最高钨含量。

7. 一个简单的选材逻辑

可以按照以下思路进行:

如果空间充足、成本敏感 $\rightarrow$ 90W~93W;

如果屏蔽性能和成本需要平衡 $\rightarrow$ 93W~95W;

如果空间有限、需要更高密度 $\rightarrow$ 95W~97W;

如果结构复杂、加工精度高 $\rightarrow$ 根据实际加工能力在 93W~97W 中选择;

如果属于高温、强机械载荷或特殊环境 $\rightarrow$ 需要结合具体合金体系和材料性能单独评估。

钨合金屏蔽件选择钨含量时, 最重要的不是追求最高钨含量, 而是找到屏蔽性能、尺寸、机械性能、加工性能和成本之间的平衡。对于大多数常规 X 射线和 γ 射线屏蔽应用, 90%~97% W 是比较常见的选择范围。90W 和 93W 更强调综合性价比, 95W 更适合高密度和紧凑型设计, 而 97W 则更适合对空间和单位体积屏蔽能力要求较高的场景。如果是实际项目选型, 最好先提供射线类型、能量、目标屏蔽厚度或允许透射剂量、零件尺寸以及加工精度, 再确定具体钨含量和牌号。



Q18. 钨合金屏蔽件的价格受哪些因素影响？

钨合金屏蔽件的价格受多种因素共同影响，不能只按照钨合金每公斤多少钱来判断。对于定制型屏蔽件而言，材料成本、产品重量、钨含量、加工难度、精度要求和订单数量通常是影响最终报价的主要因素。

1. 钨含量是重要因素

钨是钨合金中成本占比最高的主要原材料之一，因此钨含量通常会直接影响材料成本。例如，90W、93W、95W 和 97W 的原材料成本通常会逐步增加。高钨含量意味着更高的钨粉用量，也可能对烧结和后续加工提出更高要求。因此，在屏蔽性能满足要求的前提下，并不是钨含量越高越经济。

2. 原材料钨价波动

钨合金价格还会受到钨原料市场价格变化的影响。钨粉、氧化钨、APT 等上游原材料价格发生变化后，通常会逐步传导到钨合金坯料和最终屏蔽件价格。因此，钨合金产品报价往往具有一定的原材料价格敏感性。

3. 产品重量

对于很多钨合金屏蔽件，材料成本与产品重量有直接关系。可以简单理解为：

产品材料成本 $\approx$ 钨合金单位重量价格 $\times$ 产品重量

但实际报价并不会只按照这个公式计算，因为还需要加入烧结损耗、加工余量、机加工费用、检测费用和其他制造成本。对于大型、厚壁或高密度屏蔽件，材料重量可能成为报价中的主要成本。

4. 产品结构复杂程度

这是定制钨合金屏蔽件价格差异非常大的一个因素。一个简单的钨合金屏蔽块可能只需要进行切割、铣削和少量钻孔；而一个带有大量精密孔道、深孔、窄槽和复杂内腔的准直器，制造成本就会明显提高。加工工序越多、加工时间越长，最终价格通常越高。

5. 尺寸精度要求

普通屏蔽块可能只需要满足一般尺寸公差，而医疗设备、核医学设备中的精密屏蔽件可能要求严格的尺寸公差、同轴度、圆度、平面度和位置精度。例如，从普通 CNC 加工提升到精密磨削、研磨甚至更高精度的加工，设备、刀具、工时和检测成本都会增加。因此， $\pm 0.05 \text{ mm}$ 和 $\pm 0.005 \text{ mm}$ 的产品，其加工成本可能存在明显差异。

6. 表面粗糙度要求

如果产品只要求普通加工表面，通常不需要增加太多后处理。如果要求 $Ra 0.4 \mu\text{m}$ 、 $Ra 0.2 \mu\text{m}$ 甚至更低，就可能需要精密磨削、研磨或其他精加工工艺。因此，表面质量要求越高，制造成本通常也越高。

7. 加工方式

钨合金加工难度高于普通金属，因此加工工艺对价格影响比较明显。常规 CNC 加工成本相对容易控制，而深孔加工、微孔加工、精密磨削、线切割以及复杂异形加工，都可能明



显增加制造时间。特别是高钨含量材料，刀具磨损和加工效率也可能成为成本因素。

8. 订单数量

订单数量对单件价格影响非常明显。小批量甚至单件定制时，需要承担模具、编程、工装、调试和检测等固定成本，因此单件价格通常较高。如果是批量生产，可以摊薄这些固定成本，同时粉末冶金模压成形也可以提高生产效率，因此单件价格通常会明显下降。

9. 模具和烧结工艺

如果产品适合粉末冶金近净成形，需要设计和制造专用模具。对于大批量产品，模具成本可以分摊到大量产品中，因此单位成本较低；对于少量定制产品，如果专门开模，模具费用可能成为报价中的重要部分。同时，复杂形状的烧结工艺也会增加制造难度。

10. 检测和质量要求

医疗、核医学、核工业等应用通常对产品质量和材料一致性有更高要求。如果客户需要提供材料成分、密度、硬度、尺寸、无损检测或其他质量证明文件，就可能增加检测和质量成本管理成本。如果产品用于普通工业场景，检测要求相对简单，价格通常也会更低。

11. 包装、运输和交货周期

钨合金密度非常高，同样体积的产品重量可能远高于普通金属。因此，大型钨合金屏蔽件的包装和运输成本也需要考虑。此外，如果客户要求快速交货，制造商可能需要安排加急生产、调整生产计划，这也可能影响最终报价。

12. 一个简单的价格构成

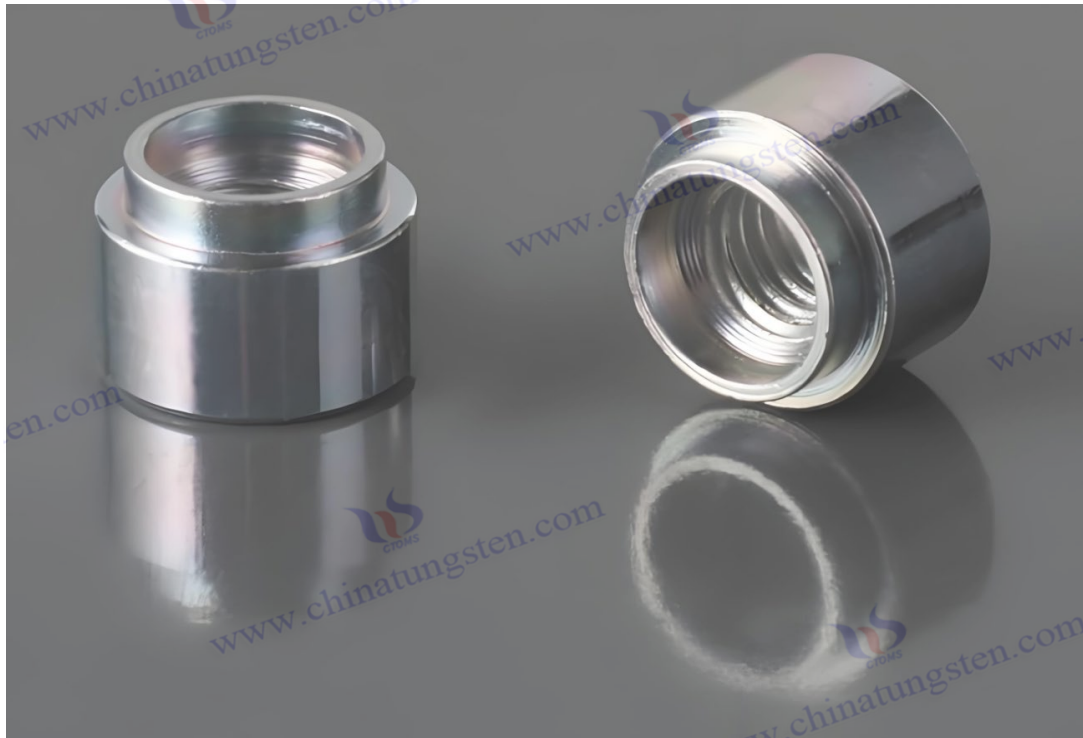
钨合金屏蔽件的最终报价通常可以理解为：

原材料成本 + 粉末冶金成本 + 模具/工装成本 + CNC 加工成本 + 精密加工成本 + 表面处理 + 检测费用 + 包装运输 + 企业利润。其中，对于简单、大批量产品，材料成本可能占比较高；对于复杂、小批量、高精度产品，加工成本和工程成本可能反而成为主要部分。

如何降低钨合金屏蔽件成本？

如果屏蔽性能已经满足要求，可以避免盲目选择过高的钨含量；产品设计时尽量减少没有实际功能的复杂结构；合理设置尺寸公差和表面粗糙度；对于大批量产品优先考虑粉末冶金近净成形；对于小批量产品则可以评估是否适合直接加工标准钨合金坯料。

钨合金屏蔽件的价格主要取决于钨含量、材料重量、原材料价格、产品结构、加工难度、尺寸精度、表面要求和订单数量。如果是向供应商询价，最好一次提供产品图纸、材料牌号或钨含量、数量、尺寸公差、表面粗糙度以及应用要求。这样供应商才能给出比较准确的报价，而不是仅根据钨合金每公斤价格进行估算。



Q19. 如何定制钨合金屏蔽件？

定制钨合金屏蔽件通常需要从辐射要求、材料选择、结构设计、加工工艺到质量检测进行完整规划。与普通钨合金零件相比，屏蔽件不仅要满足尺寸和机械性能要求，还必须达到相应的辐射屏蔽目标。

1. 首先确定屏蔽用途

定制前首先要明确钨合金屏蔽件用于什么设备和什么辐射环境。例如是 X 射线设备、CT、核医学设备、工业探伤设备、 γ 射线源还是其他辐射装置。同时需要明确是用于整体屏蔽、局部屏蔽、射线准直还是放射源防护。这些信息会直接影响材料牌号、屏蔽厚度和产品结构。

2. 提供射线参数

这是定制钨合金屏蔽件非常重要的一步。至少应尽可能明确射线类型、射线能量、辐射源强度或剂量率、工作距离、允许透射水平以及工作时间。对于 X 射线设备，还需要根据具体情况提供管电压、管电流、过滤条件等参数。对于 γ 射线，则通常需要明确放射性核素及其对应的 γ 射线能量。有了这些数据，才能合理计算屏蔽厚度，而不是单纯按照经验确定材料厚度。

3. 确定钨合金材料

常见钨合金主要包括 W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 等体系。根据空间限制、屏蔽要求、机械性能和成本，可以选择不同钨含量的材料，例如 90W、93W、95W 或 97W。如果空间非常有限，可以考虑高密度、高钨含量材料；如果产品结构复杂、加工量较大，则需要在密度



和加工性能之间进行平衡。

4. 提供二维图纸或三维模型

如果是定制产品, 最好提供完整的 CAD 图纸或 3D 模型。图纸中应明确: 产品外形尺寸、孔径和孔位置、壁厚、安装结构、尺寸公差、形位公差、表面粗糙度以及其他特殊要求。对于准直器等复杂屏蔽件, 还需要明确孔道数量、孔径、孔距、孔轴线方向以及内部结构。如果没有现成图纸, 也可以提供设备安装空间、功能要求和样品, 由制造商协助进行结构设计。

5. 进行屏蔽厚度设计

确定射线参数和材料后, 需要计算合理的屏蔽厚度。基础理论可以使用:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

其中 I_0 是入射辐射强度, I 是透射强度, μ 是材料的线性衰减系数, x 是屏蔽厚度。

实际工程设计还需要考虑散射辐射、束流几何、积累因子以及允许剂量率等因素。因此, 最终屏蔽厚度应根据具体应用进行计算和验证。

6. 选择合适的制造工艺

钨合金屏蔽件通常采用粉末冶金与精密机械加工相结合的方式制造。对于结构规则、批量较大的产品, 可以采用模压成形加液相烧结, 减少后续加工量。对于小批量或复杂定制产品, 可以先制造钨合金烧结坯料, 再通过 CNC 车削、铣削、钻孔、磨削等工艺加工到最终尺寸。

对于微孔、深孔、窄槽等特殊结构, 则需要根据具体材料和结构选择适合的精密加工方法。

7. 确定尺寸和表面要求

定制时不要只注明精密加工, 而应该明确具体的公差要求。例如关键尺寸可以指定 ± 0.01 mm, 配合尺寸可以根据实际装配要求设置相应公差, 表面粗糙度则可以明确 Ra 0.8 μ m、Ra 0.4 μ m 等指标。如果是准直器, 还需要重点控制孔径、孔距、孔轴线方向、同轴度和位置精度。

合理设置公差非常重要。并不是所有尺寸都需要做到最高精度, 过高的精度要求会明显增加制造成本。

8. 样品验证和批量生产

对于首次定制的钨合金屏蔽件, 建议先进行样品生产。样品需要重点验证尺寸、密度、材料成分、机械性能以及实际屏蔽效果。如果用于医疗、核医学或其他高要求辐射环境, 还应按照项目要求进行相应的辐射防护验证。样品确认合格后, 再进入批量生产, 可以降低批量产品出现结构或尺寸问题的风险。

9. 最终质量检测

成品通常需要根据产品要求进行尺寸检测、密度检测、材料成分检测、外观检查以及必要的机械性能检测。对于重要的辐射屏蔽件, 还需要根据实际应用进行屏蔽性能验证。如果产品需要用于医疗设备、核工业等高要求领域, 还应提前确定需要哪些材料证明、检验报告和质量文件。



一个完整的定制流程

实际项目通常可以按照: 客户提供应用需求 → 确定射线参数 → 屏蔽计算 → 选择钨合金牌号 → 产品结构设计 → 确定尺寸公差 → 制定加工工艺 → 样品制造 → 尺寸和材料检测 → 屏蔽性能验证 → 批量生产 → 最终检验。

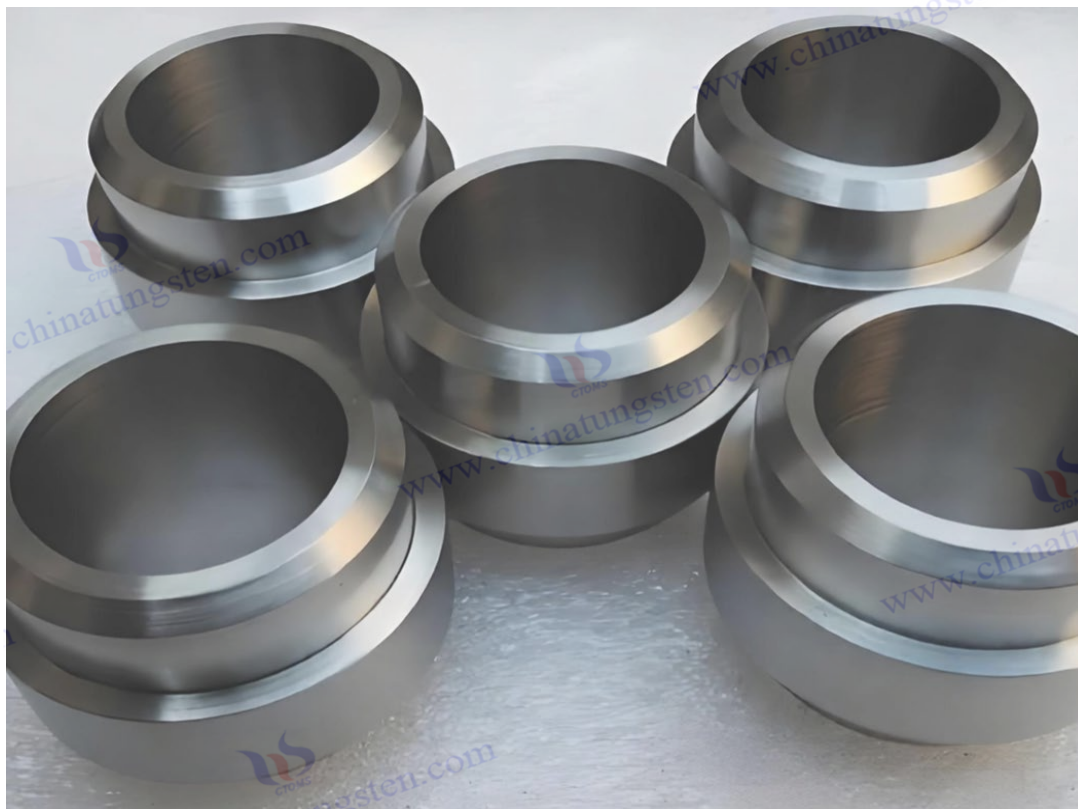
定制时最好向厂家提供哪些信息?

如果准备向钨合金制造商询价或定制, 建议一次性提供以下信息:

(1) 产品图纸或 3D 模型、产品数量、钨含量或材料牌号、射线类型、射线能量、目标屏蔽水平、产品尺寸、关键尺寸公差、表面粗糙度、工作温度、使用环境以及交货要求。

(2) 如果没有完整图纸, 也可以先提供产品用途、安装空间、射线参数和需要达到的屏蔽效果, 由专业厂家根据这些信息进行材料和结构设计。

钨合金屏蔽件定制不是简单地按照尺寸加工一块高密度钨合金, 而是一个从辐射参数、材料选择、屏蔽计算到精密加工和性能验证的完整工程过程。对于 X 射线、 γ 射线等应用, 最关键的是先确定实际屏蔽需求, 再反向确定钨合金牌号和屏蔽件厚度, 这样才能在屏蔽效果、产品尺寸和制造成本之间取得合理平衡。





Q20. 购买钨合金屏蔽件时应该重点关注哪些技术参数？

购买钨合金屏蔽件，不能只看钨含量和价格。真正决定产品是否合格的，是材料性能、辐射屏蔽能力、尺寸精度、机械性能及使用环境之间是否匹配。可以重点关注以下几个方面。

1. 钨含量

钨含量是最直观的材料参数之一，常见钨合金屏蔽件通常采用约 90%~97% W 的材料。但不能简单认为钨含量越高越好。需要结合屏蔽要求、产品体积、加工难度和成本进行选择。采购时最好要求供应商提供实际化学成分，而不仅仅是标注 95W、97W 等牌号。

2. 材料密度

密度直接关系到钨合金的高密度特性，也是判断材料质量的重要参数。常见钨合金屏蔽材料的密度大约在 17~19 g/cm³。对于同一类材料，如果实际密度明显偏低，可能意味着材料存在较高孔隙率或成分、烧结质量存在问题。因此，采购时可以要求提供实际密度检测数据。

3. 射线类型和能量

这是购买屏蔽件时最重要的技术参数之一。需要明确产品主要用于：X 射线、γ 射线，还是其他类型的辐射。同时需要知道射线能量，因为相同厚度的钨合金面对不同能量的射线，其衰减效果并不相同。对于 X 射线设备，可以提供管电压、管电流等相关参数；对于 γ 射线，则应明确放射性核素及对应能量。

4. 屏蔽厚度

屏蔽件厚度需要根据射线能量、材料密度和目标屏蔽水平确定。不能简单认为 5 mm、10 mm 或 20 mm 的钨合金就一定能够满足某种辐射防护要求。如果供应商只告诉你产品厚度，却无法说明对应的射线参数和屏蔽性能，就很难判断产品是否真正满足使用需求。

5. 屏蔽性能或透射率

如产品用于重要辐射防护场合，须明确要求产品达到什么屏蔽指标。如可根据项目要求关注透射率、衰减倍数、半值层 HVL、十分之一值层 TVL，或者最终允许的剂量率。对于高要求应用，最好要求供应商提供相应的屏蔽计算依据或测试数据，而不是只提供材料参数。

6. 尺寸精度

对于普通屏蔽块，尺寸精度可能不是特别复杂；但对于准直器、屏蔽套、屏蔽环等精密部件，尺寸精度可能直接影响设备性能。采购时应明确：外形尺寸公差、孔径公差、孔位置精度、同轴度、圆度、平面度、平行度以及其他关键形位公差。尤其是复杂准直器，不能只关注整体尺寸。

7. 表面粗糙度

如果屏蔽件需要与其他部件精密配合，还应明确表面粗糙度，例如 Ra 0.8 μm、Ra 0.4 μm 等。对于普通非配合表面，没有必要追求过高的表面质量，否则会增加不必要的加工成本。

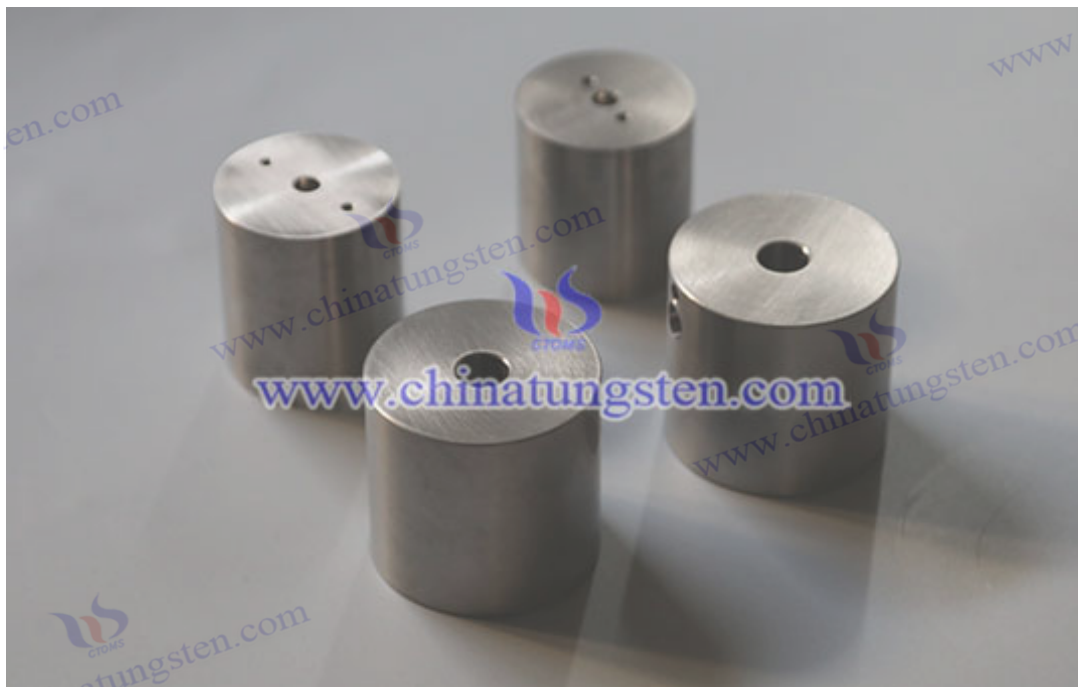


8. 硬度和机械强度

如果屏蔽件同时承担结构功能, 应关注硬度、抗拉强度、屈服强度和延伸率。例如医疗设备内部的屏蔽套、屏蔽环或者需要反复装配的零件, 就不能只考虑辐射屏蔽能力, 还需要保证长期使用过程中不会明显变形或磨损。

9. 加工质量

钨合金较难加工, 故需关注产品是否存在崩边、裂纹、毛刺、孔壁缺陷及加工变形等问题。对于带孔、深孔和薄壁结构, 还应特别检查孔径、孔深、孔轴线和壁厚是否符合图纸要求。



10. 烧结质量和内部缺陷

钨合金通常采用粉末冶金和液相烧结工艺制造, 因此烧结质量非常重要。如果存在明显孔隙、裂纹或组织不均匀, 不仅可能影响机械性能, 也可能影响产品的密度和长期稳定性。对于重要产品, 可以根据应用要求考虑内部缺陷检测或相关材料质量证明。

11. 工作温度

如果屏蔽件用于高温设备, 需要明确长期工作温度和最高工作温度。高温环境下需要考虑材料强度变化、热膨胀、氧化以及与其他零部件之间的热膨胀差异。尤其是精密准直器和具有严格装配公差的屏蔽件, 热膨胀可能影响最终使用效果。

12. 使用环境

除温度, 还需考虑湿度、腐蚀性气体、真空、机械振动及频繁拆装等因素。如果产品用于核医学、医疗设备、工业探伤或科研设备, 还应明确是否存在特殊清洁度、表面处理和质量管理文件要求。

13. 材料证明和检测报告

对于重要应用, 建议供应商提供相应的材料和质量证明, 例如化学成分、密度、硬度、机



械性能以及尺寸检测报告。如果是用于医疗、核工业等对辐射防护要求较高的设备，还应根据项目要求确认是否需要屏蔽性能测试、无损检测或其他第三方检验。

14. 采购钨合金屏蔽件的最重要参数

采购钨合金屏蔽件的最重要参数

技术参数	重点关注内容
钨含量	90W、93W、95W、97W 等实际成分
密度	实测密度及材料致密度
射线类型	X 射线、 γ 射线等
射线能量	keV、MeV 或 X 射线管电压
屏蔽厚度	根据实际辐射要求确定
屏蔽性能	透射率、衰减倍数或允许剂量率
尺寸公差	关键尺寸及形位公差
表面粗糙度	Ra 要求
硬度/强度	根据机械使用条件确定
工作温度	长期工作温度及最高温度
内部质量	孔隙、裂纹及烧结质量
检测文件	材料证明、尺寸报告、性能测试等

中钨智造根据多年为客户定制钨合金屏蔽件的有经验总结的专业实用采购原则

- （1）如果是普通钨合金屏蔽块，重点关注钨含量、密度、尺寸和屏蔽厚度即可。
- （2）如果是医疗设备或核医学设备中的精密屏蔽件，则应该进一步关注射线能量、实际屏蔽指标、尺寸公差、孔径、位置精度、表面粗糙度以及材料检测报告。
- （3）如果是核工业、工业探伤等高要求应用，则还需要进一步考虑工作温度、机械载荷、辐射环境、内部缺陷和长期稳定性。

综上，购买钨合金屏蔽件时最核心的判断逻辑是：材料是否真实可靠 → 密度和成分是否符合要求 → 屏蔽性能是否满足实际射线条件 → 尺寸和加工精度是否满足装配要求 → 机械和环境性能是否满足长期使用要求。

如果供应商只能提供钨含量和每公斤价格，却无法提供密度、尺寸检测以及与实际射线条件对应的屏蔽性能数据，那么对于高要求屏蔽件而言，通常还不足以完成可靠的技术验收。

