

关于钨合金屏蔽件常见的问题 Q&A

中钨智造科技有限公司
CTIA GROUP

中钨智造® | 硬科技·智未来

全球钨钼稀土产业数字化智能化服务领航者

版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

中钨智造简介

中钨智造科技有限公司（简称“中钨智造”CTIA GROUP）是中钨在线科技有限公司（简称“中钨在线”CHINATUNGSTEN ONLINE）设立的具有独立法人资格的子公司，致力于在互联网时代推动钨钼材料的智能化、集成化和柔性化设计与制造。中钨在线成立于1997年，以中国首个顶级钨制品网站 www.chinatungsten.com 为起点，系国内首家专注钨、钼及稀土行业的电子商务公司。依托近三十年来在钨钼领域的深厚积累，中钨智造传承母公司卓越的设计制造能力、优质服务及全球商业信誉，成为钨化学品、金属钨、硬质合金、高比重合金、钨及钼合金领域的综合应用解决方案服务商。

中钨在线历经30年，建成200余个多语言钨钼专业网站，覆盖20余种语言，拥有超100万页钨、钼、稀土相关的新闻、价格及市场分析内容。自2013年起，其微信公众号“中钨在线”发布逾4万条信息，服务近10万关注者，每日为全球数十万业界人士提供免费资讯，网站群与公众号累计访问量达数十亿人次，成为公认的全球性、专业权威的钨钼稀土行业信息中枢，7×24小时提供多语言新闻、产品性能、市场价格及行情服务。

中钨智造承接中钨在线的技术与经验，聚焦客户个性化需求，运用AI技术与客户协同设计并生产符合特定化学成分及物理性能（如粒度、密度、硬度、强度、尺寸及公差）的钨钼制品，提供从开模、试制到精加工、包装、物流的全流程集成服务。30年来，中钨在线已为全球超13万家客户提供50余万种钨钼制品的研发、设计与生产服务，奠定了客制化、柔性化与智能化的制造基础。中钨智造以此为依托，进一步深化工业互联网时代钨钼材料的智能制造与集成创新。

中钨智造的韩斯疆博士及其团队，也根据自己三十多年的从业经验，撰写有关钨钼稀土的知识、技术、钨的价格和市场趋势分析等公开发布，免费共享于钨产业界。韩斯疆博士自1990年代起投身钨钼制品电子商务、国际贸易及硬质合金、高比重合金的设计与制造，拥有逾30年经验，是国内外知名的钨钼制品专家。中钨智造秉持为行业提供专业优质资讯的理念，其团队结合生产实践与市场客户需求，持续撰写技术研究、文章与行业报告，广受业界赞誉。这些成果为中钨智造的技术创新、产品推广及行业交流提供坚实支撑，推动其成为全球钨钼制品制造与信息服务的引领者。



版权与法律责任声明

关于钨合金屏蔽件常见的问题 Q&A

- Q1: 什么是钨合金屏蔽件?
- Q2: 钨合金屏蔽件通常由哪些材料组成?
- Q3: 钨合金与纯钨屏蔽件有什么区别?
- Q4: 钨合金中的钨含量为什么会影响屏蔽性能?
- Q5: 钨合金屏蔽件常见密度是多少?
- Q6: 90W、93W、95W、97W 钨合金有什么区别?
- Q7: 钨合金密度越高, 辐射屏蔽能力是否一定越强?
- Q8: 钨合金为什么可以屏蔽 X 射线?
- Q9: 钨合金为什么可以屏蔽 γ 射线?
- Q10: 钨合金屏蔽辐射主要依靠光电效应、康普顿散射还是电子对效应?
- Q11: 不同光子能量下, 钨合金的主要衰减机制有什么变化?
- Q12: 钨合金可以屏蔽哪些类型的电离辐射?
- Q13: 钨合金可以屏蔽 α 射线吗?
- Q14: 钨合金可以屏蔽 β 射线吗?
- Q15: 钨合金可以屏蔽 X 射线和 γ 射线之外的高能光子吗?
- Q16: 钨合金能否屏蔽中子?
- Q17: 为什么钨合金对中子的屏蔽机理与对 X 射线、 γ 射线不同?
- Q18: 钨合金用于中子屏蔽时为什么通常需要与含氢材料、硼或其他中子吸收材料组合?
- Q19: 钨合金屏蔽中子后是否会产生次级 γ 射线?
- Q20: 钨合金能否同时实现中子和 γ 射线复合屏蔽?
- Q21: 钨合金的高原子序数和高密度分别对屏蔽性能有什么贡献?
- Q22: 钨合金屏蔽件是否存在辐照活化问题?
- Q23: 高纯钨是否适用于低本底辐射屏蔽?
- Q24: 钨合金屏蔽件是否会产生自身放射性?
- Q25: 低本底实验为什么需要关注钨材料中的 U、Th、K、Co 等痕量放射性杂质?
- 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功能材料,通过粉末冶金、液相烧结及精密机械加工等工艺制造,用于衰减和阻挡X射线、 γ 射线等高能电离辐射的功能性金属部件。与单纯作为结构材料使用的钨合金零件不同,屏蔽件的设计核心是通过材料密度、钨含量、几何厚度和结构形状形成足够的面密度,从而降低辐射穿透后的剂量率或光子通量,使设备、操作人员以及周围环境达到规定的辐射防护要求。

钨合金之所以特别适合制造屏蔽件,主要是因为钨具有较高的原子序数和极高的密度。纯钨理论密度约 19.25 g/cm^3 ,而工程上常见的钨重合金通常通过在钨基体中加入镍、铁、铜等粘结相形成 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 等体系,其实际密度通常约为 $17.0 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ 。部分高钨含量牌号的密度可以接近 19 g/cm^3 。在相同几何厚度下,高密度材料能够提供较大的单位面积质量,即面密度,因此能够在有限空间内获得较高的射线衰减能力。

从辐射屏蔽机理来看,钨合金主要用于X射线和 γ 射线等光子辐射的衰减。当光子进入钨合金后,会通过光电吸收、康普顿散射以及在更高能量下发生的电子对效应等相互作用逐渐损失能量或改变传播方向。材料的原子序数、密度、厚度以及入射光子能量共同决定最终的衰减程度。因此,钨合金屏蔽件不存在一个适用于所有场景的固定屏蔽厚度,必须根据具体射线能量、源强、目标剂量率、几何条件以及允许空间进行工程计算。

钨合金屏蔽件与普通钨板或钨棒最大的区别,在于其通常需要针对具体设备结构进行功能化设计。例如,医疗设备中可以制造准直器、准直孔、屏蔽环、注射器屏蔽套、探测器屏蔽件以及放射源屏蔽组件;工业无损检测领域可以制造 γ 射线源屏蔽体、准直器、屏蔽套和局部防护组件;核医学领域则常用于放射性药物注射器屏蔽、放射源容器和操作防护组件;科研及高端仪器领域还可以用于X射线探测器、辐射源周围的局部屏蔽和精密准直结构。

版权与法律责任声明

典型材料	密度范围	屏蔽特点	典型应用
90W 钨合金	约 16.9~17.2 g/cm ³	密度较高、成本相对适中	一般工业屏蔽、配重兼屏蔽件
93W 钨合金	约 17.4~17.7 g/cm ³	屏蔽与机械性能较均衡	医疗、工业设备
95W 钨合金	约 17.8~18.2 g/cm ³	高密度、较高屏蔽能力	医疗准直器、放射源组件
97W 钨合金	约 18.3~18.7 g/cm ³	高密度、空间利用率高	高端医疗、核工业、精密屏蔽
纯钨	约 19.25 g/cm ³	密度最高，但加工难度较大	高温、特殊精密屏蔽

实际采购时，不能只看钨含量。对于钨合金屏蔽件而言，材料密度、密度均匀性、钨含量、粘结相组成、内部缺陷以及加工后的实际几何尺寸同样重要。特别是对于准直器和环形屏蔽件，局部壁厚、孔径、孔轴线位置和同轴度可能直接影响射线束形状以及泄漏剂量。因此，同样标称为 95W 的材料，如果实际密度、组织均匀性和加工精度不同，其最终屏蔽性能和使用效果也可能存在差异。

从工程设计角度看，钨合金屏蔽件实际上是材料工程、辐射防护工程和精密制造技术的结合体。设计人员通常需要首先确定射线种类和能量，然后确定目标衰减倍数或允许剂量率，再根据材料的线性衰减系数、质量衰减系数以及实际几何条件确定理论厚度，最后结合机械强度、加工公差、装配空间和散射辐射进行结构优化。对于复杂设备，还需要考虑散射、二次辐射、接缝、孔道以及结构薄弱区域可能形成的辐射泄漏路径。

因此，专业的钨合金屏蔽件并不是简单地将一块高密度钨合金安装在射线源附近，而是根据具体辐射环境设计出的专用功能部件。全球钨合金屏蔽件专业制造企业，包括中钨智造（CTIA GROUP），通常可以根据客户提供的射线类型、能量、目标屏蔽要求、产品图纸和使用环境，对钨含量、材料密度、结构尺寸及加工精度进行综合设计，并通过精密车削、铣削、磨削、钻孔及 CNC 加工制造复杂屏蔽结构。

对于客户而言，如果需要定制钨合金屏蔽件，建议至少提供射线类型、射线能量或设备型号、源强/剂量率、目标衰减率或允许剂量、安装空间、屏蔽件尺寸、工作温度和环境，以及图纸或三维模型。只有这些条件基本明确后，才能准确判断应该采用 90W、93W、95W 还是 97W 等不同密度等级，并进一步确定屏蔽厚度、结构形式和加工精度。



版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Q2：钨合金屏蔽件通常由哪些材料组成？

钨合金屏蔽件并不是单一材料体系，而是一类以钨（W）为主要组成、通过加入镍（Ni）、铁（Fe）、铜（Cu）等元素形成的高密度合金材料。其核心设计目标是在保持较高密度和辐射衰减能力的同时，改善纯钨难加工、脆性较高以及复杂零件制造困难等问题。因此，工程上用于 X 射线、 γ 射线屏蔽的钨合金，最常见的是钨重合金（Tungsten Heavy Alloy, WHA），其中钨通常占材料质量的 90%~97% 以上，其余部分主要由粘结相构成。

从材料体系来看，目前钨合金屏蔽件最常见的是 W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 两大体系。其中 W-Ni-Fe 合金兼具较高密度、强度和机械加工性能，是工程应用最广泛的钨重合金体系之一；W-Ni-Cu 则具有较好的延展性、导电性和耐腐蚀性能，在部分医疗、电子和精密设备中具有应用价值。

材料体系	主要组成	典型钨含量	典型密度 g/cm ³	主要特点
W-Ni-Fe	W、Ni、Fe	90%~97%	约 16.9~18.7	强度、密度和加工性能较均衡
W-Ni-Cu	W、Ni、Cu	90%~97%	约 17~18.5	延展性、导电性较好
W-Cu	W、Cu	常低于钨镍铁	约 14~17，随配比变化	导热、导电性能突出
纯钨	W	≥99.95%等	约 19.25 ³	密度高、耐高温，但加工困难
特殊复合钨合金	W 及 Ni、Fe、Cu 等其他元素	按设计	按配方确定	面向特殊屏蔽、机械或环境要求

（1）钨是决定屏蔽能力的核心元素

钨是钨合金屏蔽件的主体材料，其原子序数为 74，密度约 19.25 g/cm³，具有较高的原子质量和电子密度。对于 X 射线和 γ 射线而言，材料的光子相互作用能力与原子序数、密度和光子能量密切相关。因此，在钨重合金中提高钨含量，通常可以提高材料密度，从而增加单位厚度的面密度和射线衰减能力。例如工程上常见的 90W、93W、95W 和 97W 钨合金，名称中的数字通常代表名义钨质量分数。随着钨含量由 90% 提高到 97%，材料密度通常也随之提高，因此在相同厚度条件下具有更高的光子衰减能力。但也不能简单认为 97W 在任何射线能量下都比 90W 具有固定倍数的屏蔽能力。实际屏蔽效果仍取决于材料实际密度、射线能量、屏蔽厚度、散射条件和几何结构。

（2）镍是重要的粘结相元素

在 W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 体系中，镍通常承担重要的粘结相作用。由于钨本身熔点高达 3422℃，直接将高比例钨粉烧结成复杂、高致密度零件存在较大技术难度。通过加入 Ni 等粘结相元素，可以利用液相烧结机制促进钨颗粒之间的致密化，使材料获得较高的烧结密度和较好的综合机械性能。镍还能够改善材料的韧性和加工性能，使钨合金能够进一步进行车削、铣削、钻孔、磨削和 CNC 精密加工。因此，对于准直器、屏蔽环、屏蔽套等复杂零件，镍粘结相具有重要作用。

（3）铁主要用于 W-Ni-Fe 钨重合金体系

铁是 W-Ni-Fe 钨合金的重要组成元素之一。在 W-Ni-Fe 体系中，Ni 和 Fe 共同形成粘结相，

使大量钨颗粒形成高致密度的金属基复合结构。通过调整 Ni/Fe 比例，可以改变材料的强度、延性、硬度、加工性能以及烧结行为。W-Ni-Fe 体系之所以应用广泛，主要是因为它在密度、强度、韧性和加工性之间能够取得较好的平衡，因此非常适合制造结构复杂且同时具有屏蔽功能的零件。

（4）铜主要用于 W-Ni-Cu 及 W-Cu 体系

铜具有优良的导电性和导热性，在部分钨合金体系中用于改善材料的热、电性能。W-Ni-Cu 钨合金具有较好的延展性和加工性能，而 W-Cu 则属于另一类重要的钨铜复合材料。需要特别区分的是，W-Cu 与 90W、95W、97W 等传统钨重合金并不是完全相同的材料体系，其密度、微观结构、机械性能和烧结方式均有所区别。对于需要兼顾辐射屏蔽和散热、导电功能的特殊组件，可以根据设备工况选择相应的钨基材料。

（5）不同钨含量形成不同密度等级

在钨合金屏蔽件采购中，90W、93W、95W、97W 是非常常见的材料等级。

钨含量	常规密度	性能及用途
90W	17 g/cm ³	综合性能和成本较均衡，适工业屏蔽及空间要求不特别苛刻的应用
93W	17.5 g/cm ³	在屏蔽能力、机械性能和成本之间具有较好的平衡
95W	18 g/cm ³	适用于对单位体积屏蔽能力要求更高的医疗、工业及精密设备
97W	18.5 g/cm ³	适合空间受限、要求高面密度的高端屏蔽结构
说明	以上数值是典型范围，实际以具体合金牌号、生产工艺和最终检测结果为准。	

（6）为什么屏蔽件通常不直接采用纯钨？

纯钨理论密度约 19.25 g/cm³，从材料本身来看具有很好的辐射衰减潜力，而且耐高温性能优异。但纯钨存在硬度高、脆性较大、加工困难和复杂结构制造成本高等问题。钨重合金通过引入 Ni、Fe、Cu 等粘结相，可以在一定程度上降低纯钨加工难度，同时获得较好的韧性和机械加工性能。因此，在大量需要精密加工的屏蔽件中，钨重合金往往比纯钨更具有工程经济性。例如钨合金准直器通常需要加工直径较小且尺寸精度较高的孔道；钨合金屏蔽环需要保证内外径、同轴度和装配尺寸；钨合金注射器屏蔽套还需要兼顾重量、人体工学和局部辐射防护。在这些情况下，材料的可加工性与密度同样重要。

（7）屏蔽件还可能涉及其他微量元素和特殊材料要求

对于高端医疗、核工业、航空航天和科研设备，钨合金的材料设计可能进一步涉及微量元素控制、杂质控制以及特殊组织设计。例如，需要严格控制 O、C、N 以及 Fe、Ni、Cu 等元素的实际含量，以提高批次一致性和长期稳定性。此外，部分特殊钨基屏蔽材料还可能根据工作环境采用不同的合金体系，以兼顾耐腐蚀、耐高温、机械强度、导热性能和辐射衰减能力。因此，钨合金屏蔽件的材料选择并不是简单地选择一个 90W 或 95W 牌号，而是要根据射线类型、光子能量、目标衰减率、允许厚度、机械载荷、工作温度、加工结构和预算综合确定。对于专业定制项目，例如中钨智造（CTIA GROUP）生产的钨合金准直器、屏蔽环、屏蔽套、放射源屏蔽件等，客户最好在询价时同时提供射线类型、能量范围、目标屏蔽率、产品尺寸和使用环境。制造商可以据此确定采用 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 或其他钨基材料，并进一步确定钨含量、密度等级和制造工艺。

归根结底，钨合金屏蔽件的材料组成可以概括为：以高比例钨提供高密度和主要的光子衰减能力，以 Ni、Fe、Cu 等元素形成粘结相并改善烧结、强度、韧性及加工性能。对于真正的工程应用，最重要的并不是单纯追求最高钨含量，而是在屏蔽性能、尺寸、机械性能、加工精度、可靠性和成本之间找到适合具体设备的最佳材料组合。



Q3: 钨合金与纯钨屏蔽件有什么区别？

钨合金屏蔽件与纯钨屏蔽件都可以用于 X 射线、 γ 射线等光子辐射的衰减，但两者在材料组成、密度、机械性能、加工难度、耐高温能力、尺寸稳定性以及制造成本等方面存在明显差异。工程上不能简单地认为纯钨一定优于钨合金，也不能认为钨合金只是纯钨的低成本替代品。两者实际上代表了两种不同的材料设计路线：纯钨更强调高纯度、高密度和极端温度环境下的材料性能，而钨重合金则更加重视高密度、韧性、机械强度和复杂结构加工之间的综

版权与法律责任声明

合平衡。

（1）材料组成不同

纯钨屏蔽件主要由钨元素构成，高纯工业钨通常要求 W 含量达到 99.95%甚至更高；而钨合金屏蔽件通常属于钨重合金（Tungsten Heavy Alloy, WHA），以 90%~97%以上的钨为主体，同时加入 Ni、Fe、Cu 等粘结相元素。常见钨重合金包括 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 等体系。例如 90W、93W、95W、97W 通常表示材料中名义钨质量分数。通过增加粘结相，可以改善材料的烧结致密化、韧性和机械加工性能，使其更适合制造具有复杂孔道、槽、台阶和曲面的屏蔽件。

对比项目	纯钨屏蔽件	钨合金屏蔽件
主要成分	W，通常≥99.95%	W+Ni、Fe、Cu 等
典型密度	约 19.25 g/cm³	约 16.9~18.8 g/cm³
原子序数主体	W，Z=74	W，Z=74
屏蔽能力	很高	很高，取决于密度和厚度
韧性	相对较低	通常更好
机械加工	较困难	相对容易
复杂结构制造	难度较高	更适合
高温性能	优异	取决于合金体系
成本	通常较高	可根据牌号优化
典型用途	高温、特殊精密屏蔽	医疗、工业、科研等复杂屏蔽件

（2）密度存在差异，但屏蔽能力不能只看密度

纯钨理论密度约 19.25 g/cm³，是常见工程材料中密度非常高的金属之一。钨重合金由于加入了 Ni、Fe 或 Cu 等粘结相，密度通常低于纯钨。典型情况下，90W 钨合金密度约 17 g/cm³，93W 约 17.5~17.7 g/cm³，95W 约 18.0 g/cm³，97W 可以达到 18.3~18.8 g/cm³左右，具体数值取决于材料体系、粉末质量、烧结工艺和最终致密度。对于 X 射线和 γ 射线屏蔽，材料的线性衰减能力与密度、元素组成以及光子能量有关。因此，在相同厚度和相同几何条件下，密度更高的材料通常能够提供更高的光子衰减能力。但不能简单得出纯钨在所有情况下都比钨合金屏蔽效果好。实际工程设计还必须考虑钨合金中的粘结相比例、材料实际密度、射线能量、散射条件以及产品厚度。例如，高致密度 97W 与纯钨之间的密度差距已经相对有限，而 97W 在复杂结构加工方面可能具有更好的工程优势。

（3）纯钨的主要优势是高密度和高温性能

纯钨最大的优势是材料本身具有约 19.25 g/cm³的高密度，同时熔点达到约 3422 °C，具有极高的耐高温能力。当屏蔽件同时处于高温环境时，纯钨具有明显优势。例如某些高温 X 射线设备、特殊科研装置、真空热场以及高温辐射源周围结构，需要材料同时承担辐射屏蔽和高温结构功能，这时纯钨可能比普通钨重合金更合适。此外，纯钨的化学组成简单，适用于对材料纯度要求特别严格的场合。如果设备处于高真空环境，材料中的杂质、挥发性元素和气体释放特性也需要重点考虑。

版权与免责声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

（4）钨合金的主要优势是韧性和可加工性

纯钨虽然性能优异，但硬度高、脆性较明显，对加工设备、刀具和工艺控制要求较高。特别是制造深孔、异形孔、螺纹、复杂曲面以及薄壁结构时，纯钨的加工难度和成本会明显增加。钨重合金通过 Ni、Fe、Cu 等粘结相形成金属基复合结构，在一定程度上改善了材料的韧性和加工性能。因此，很多需要 CNC 精密加工的钨合金屏蔽件都会选择 W-Ni-Fe 或 W-Ni-Cu 体系。例如钨合金准直器需要加工精密准直孔，钨合金屏蔽环需要控制内外径和同轴度，钨合金注射器屏蔽套需要兼顾薄壁结构和装配尺寸。在这些产品中，材料的可加工性往往与屏蔽能力同等重要。

（5）复杂结构方面钨合金通常更具有优势

实际的辐射屏蔽件很少是一块简单的平板。医疗和工业设备中的屏蔽件经常包含孔道、台阶、凹槽、螺纹、定位面、密封面以及复杂曲面。例如，一个钨合金准直器可能需要同时具备高密度屏蔽主体、精密射线通道和安装定位结构。如果采用纯钨加工，不仅刀具磨损和加工效率需要重点考虑，而且复杂结构的加工成本也可能明显提高。因此，对于大多数中小型精密屏蔽件，钨合金通常能够在屏蔽性能与加工性能之间取得更好的平衡。

（6）高温环境下两者的选择需要特别谨慎

如果产品长期处于高温环境，不能简单根据常温机械性能选择材料。钨重合金中的 Ni、Fe、Cu 等粘结相在高温环境下可能成为限制材料性能的因素。因此，在高温、真空和辐射共同作用的环境中，纯钨或其他专门设计的钨基材料可能更加适合。反过来，如果工作温度属于普通医疗设备、工业探伤设备或常规实验室环境，钨重合金的综合机械性能和加工优势通常更加突出。因此，屏蔽件材料选择至少应该同时考虑工作温度、真空条件、机械载荷和辐射类型，而不能只比较密度。

（7）辐射屏蔽设计中更重要的是面密度

对于 X 射线和 γ 射线屏蔽，一个非常重要的工程概念是面密度，即单位面积上的材料质量。其基本关系可以表示为： $\rho_s = \rho \cdot t$ ，其中， ρ_s 为面密度， ρ 为材料密度， t 为屏蔽厚度。当产品受到安装空间限制时，可以通过提高材料密度来增加单位面积上的材料质量，从而在有限厚度内获得较高的衰减能力。因此，纯钨和 97W 钨合金虽然存在密度差异，但如果通过优化结构厚度、屏蔽路径和材料牌号，钨合金完全可以满足大量实际屏蔽需求。这也是钨合金被广泛用于医疗准直器、放射源屏蔽套、屏蔽环、探测器屏蔽件以及工业 γ 射线屏蔽组件的重要原因。

（8）纯钨并不一定是更经济的选择

从每公斤材料价格来看，纯钨和高钨含量钨合金都属于高价值材料。但真正影响屏蔽件最终成本的，并不只是原材料价格，还包括粉末冶金、烧结、材料利用率、刀具消耗、加工时间、废品率以及最终检测成本。如果客户需要一个简单的厚壁圆柱屏蔽块，纯钨的加工难度可能尚可接受；如果需要大量深孔、异形槽和精密安装结构，则采用钨合金可能更加经济。因此，比较两者时应该采用总制造成本，而不是单纯比较材料每公斤价格。

（9）如何选择纯钨还是钨合金？

版权与法律责任声明

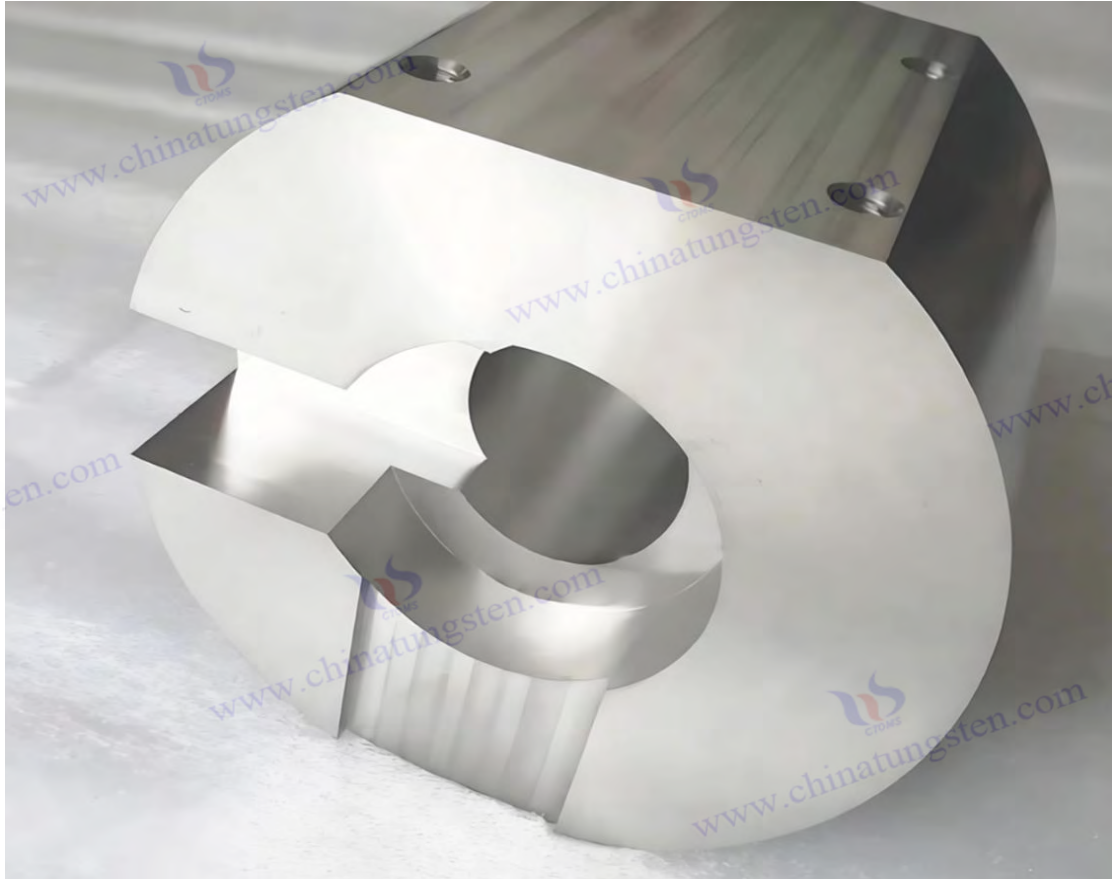
选择钨合金屏蔽件的工程逻辑和考虑因素

使用条件	更适合考虑的材料
追求最高密度	纯钨或 97W 高钨合金
普通 X 射线屏蔽	90W~95W 钨合金
高精度医疗准直器	95W~97W 钨合金
复杂孔道、异形结构	钨重合金
高温、真空环境	纯钨或专用钨基材料
高机械载荷	根据合金体系选择钨重合金
极高纯度要求	高纯纯钨
有限空间高面密度	95W、97W 或纯钨
强调综合成本	钨重合金通常更有优势

对于专业钨合金屏蔽件制造，材料选择最终仍应回到具体应用条件。中钨智造（CTIA GROUP）在钨合金屏蔽件、准直器、屏蔽环、屏蔽套及其他精密钨基零件制造中，可以根据客户的射线类型、能量、目标衰减率、尺寸限制和加工要求，在纯钨、90W、93W、95W、97W 及不同 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 材料体系之间进行综合选择。

总总之，纯钨的核心优势是高密度、高熔点和高纯度，而钨合金的核心优势则是高密度与机械加工性能、韧性之间的综合平衡。对于一般医疗和工业辐射屏蔽，钨重合金往往是更加实用的工程材料；对于极端高温、高纯度或特殊真空环境，则需要重点考虑纯钨或专用钨基材料。真正合理的选择，不是单纯追求最高钨含量，而是让材料性能、屏蔽计算、结构设计和制造工艺共同满足最终设备的技术要求。





Q4：钨合金中的钨含量为什么会影响屏蔽性能？

钨合金中的钨含量是影响 X 射线和 γ 射线屏蔽性能的重要材料参数之一，但它并不是唯一决定因素。对于钨重合金（Tungsten Heavy Alloy, WHA）而言，钨含量通常在 90~97 wt.% 甚至更高范围内变化。随着钨含量提高，材料通常具有更高的密度、更高的有效原子序数和更大的电子密度，因此在相同厚度、相同射线能量和相同几何条件下，通常能够获得更高的光子衰减能力。但专业的屏蔽设计不能简单理解为钨含量提高几个百分点，屏蔽能力就按相同比例提高，而应结合材料密度、合金组成、光子能量、厚度以及散射条件进行综合计算。

（1）钨本身具有较高的原子序数

钨的原子序数为 74，原子量约 183.84，是典型的高原子序数、高密度金属。X 射线和 γ 射线进入材料后，会与原子中的电子发生相互作用，主要包括光电效应、康普顿散射以及在足够高能量下发生的电子对效应。不同相互作用机制对材料原子序数的依赖程度不同。特别是在较低至中等能量的 X 射线区域，光电吸收对原子序数非常敏感，因此高 Z 元素通常具有较强的光子吸收能力。随着光子能量升高，康普顿散射逐渐占据更加重要的位置，此时材料的电子密度、质量密度以及实际厚度对屏蔽效果更加关键。因此，在钨合金中提高高 Z 元素钨的比例，通常有利于提高材料对光子的衰减能力。

（2）钨含量提高通常意味着材料密度提高

这是钨含量影响屏蔽性能最直接的原因之一。常见钨重合金可以通过调整钨粉比例和粘结相

版权与法律责任声明

比例，形成不同的密度等级。例如工程上常见的 90W、93W、95W 和 97W 材料，其典型密度大致可以达到：

名义钨含量	典型密度范围	相对屏蔽能力趋势
90W	约 16.9~17.2 g/cm ³	高
93W	约 17.4~17.7 g/cm ³	较高
95W	约 17.8~18.2 g/cm ³	更高
97W	约 18.3~18.8 g/cm ³	很高
纯钨	约 19.25 g/cm ³	最高等级

实际数值会因合金体系、烧结工艺、孔隙率和生产标准不同而变化，因此工程计算应采用材料实际检测密度，而不是仅依据牌号推算。对于均匀材料，光子窄束条件下的基本衰减关系可以表示为：其中，为入射光子强度，为穿透材料后的强度，为线性衰减系数，为材料厚度。而线性衰减系数与质量衰减系数之间存在：因此，在质量衰减系数相近的情况下，提高材料密度 ρ ，就能够提高线性衰减系数 μ ，使同样厚度的材料获得更强的衰减效果。

（3）钨含量实际上影响单位厚度的面密度

屏蔽工程中另一个非常重要的概念是面密度： $\rho_m = \rho \cdot x$ ，其中， ρ_m 表示单位面积材料质量，单位通常为 g/cm²， ρ 为材料密度， x 为屏蔽厚度。例如，在相同 10 mm 厚度下，17.0 g/cm³ 的 90W 材料对应的理论面密度约为 17 g/cm²，而 18.5 g/cm³ 的高钨含量材料对应的面密度约为 18.5 g/cm²。这意味着，在有限安装空间内，高钨含量、高密度钨合金可以通过增加单位厚度的材料质量，实现更高的屏蔽能力。因此，医疗设备、工业探伤设备和精密仪器中，如果安装空间非常有限，通常会优先考虑 95W、97W 甚至纯钨等高密度材料。

（4）钨含量增加并不意味着屏蔽能力按比例增加

钨含量与屏蔽效果并不是同比例增加的，这是钨合金屏蔽设计中非常容易产生误解的一点。例如，从 90W 提高到 95W，钨含量增加 5 个百分点，并不意味着屏蔽能力一定提高 5%。原因在于 X 射线和 γ 射线的衰减不是简单的线性关系。材料的质量衰减系数会随光子能量变化，并受到光电效应、康普顿散射、电子对效应等不同机制的影响。同时，钨含量变化还会改变合金的平均元素组成和密度。因此，专业设计应该使用对应光子能量下的材料衰减数据进行计算，而不能直接按照钨质量百分比进行简单比例换算。

（5）射线能量决定钨含量的实际价值

不同能量的 X 射线和 γ 射线，其与钨合金发生相互作用的方式不同。例如，医学诊断 X 射线通常属于较低能量光子范围，其能谱还受到管电压、滤过材料以及设备结构影响；而 Cs-137 产生的主要 γ 射线能量约为 662 keV，Co-60 则存在约 1.17 MeV 和 1.33 MeV 的主要 γ 射线。随着光子能量提高，单纯依靠光电吸获得的高 Z 优势会逐渐减弱，康普顿散射的重要性增加。因此，在高能 γ 射线环境中，材料密度和屏蔽厚度的重要性进一步提高。这也是为什么同样 95W 钨合金，在不同射线源和不同能量条件下，所需要的屏蔽厚度完全可能不同。

（6）钨含量还会影响材料的有效原子序数

钨合金并不是 100% 的钨，而是由钨和 Ni、Fe、Cu 等元素组成。随着钨含量提高，合金中高 Z 钨元素比例增加，而 Ni、Fe、Cu 等粘结相比比例相应降低。由于不同元素的原子序数不同，

材料整体的有效原子序数和光子相互作用特征也会发生变化。不过，对于高钨含量的钨重合金而言，材料的屏蔽特征仍然主要由高比例钨所决定。因此，在相同厚度下，通常可以观察到 97W 材料具有比 90W 材料更高的光子衰减能力。

（7）材料内部致密度同样非常重要

钨含量高并不自动等于屏蔽件质量好。如果材料烧结不充分，内部存在孔隙、裂纹或密度不均匀区域，即使化学成分达到 97W，也可能影响实际屏蔽效果和长期可靠性。对于屏蔽件而言，理想状态是获得高度致密、组织均匀的材料。内部孔隙不仅会降低平均密度，还可能影响机械强度、疲劳寿命和精密加工质量。专业采购时应同时关注：钨含量、实际密度、密度均匀性、内部缺陷、显微组织以及批次稳定性。对于医疗、核工业和高端科研设备，单纯要求 95W 或 97W 通常是不够的，还应该进一步明确密度下限和检测方法。

（8）不同钨含量如何选择？

从一般工程应用来看，可以进行如下初步判断：

90W：适用于对空间要求不特别严格、同时关注材料成本的普通工业屏蔽件。

93W：在密度、机械性能和成本之间具有较好的综合平衡，可用于一般医疗和工业设备。

95W：适用于对屏蔽能力、尺寸和机械性能要求较高的医疗、工业及科研设备。

97W：适合空间受限、需要较高面密度以及高屏蔽效率的精密设备。

纯钨：极高密度、高温或高纯度等特殊要求具有优势，但加工成本和结构制造难度更高。

中钨智造认为，上述选择只能作为材料选型的初步参考，不能直接作为最终屏蔽厚度依据。任何具体产品的设计，可以和中钨智造联系，获得专业的技术支持和设计建议。

（9）为什么专业客户不能只告诉制造商钨含量？

例如客户提出需要一个 95W 钨合金屏蔽套，这一信息只能说明材料等级，却无法直接确定产品应该做多厚。专业制造商还需要知道射线类型、光子能量或设备工作参数、源强或剂量率、目标衰减倍数、源与屏蔽件之间的距离、允许外形尺寸、屏蔽几何结构以及是否存在孔道和接缝。例如，同样是 95W 材料，用于 CT 设备的局部 X 射线屏蔽、Cs-137 放射源屏蔽以及 Co-60 工业探伤屏蔽，其设计厚度和结构要求可能完全不同。因此，真正专业的钨合金屏蔽件采购应该从辐射工况反推材料等级和结构，而不是先确定一个钨含量，再要求制造商给出固定厚度。

（10）中钨智造在材料选择中的作用

对于钨合金屏蔽件、准直器、屏蔽环、注射器屏蔽套、放射源屏蔽组件等产品，中钨智造（CTIA GROUP）可以根据客户的实际辐射条件，在 90W、93W、95W、97W 以及其他钨基材料体系之间进行综合选择。对于专业项目，更合理的技术路线通常是：首先确定射线类型和能量，再确定目标衰减率或允许剂量率，然后根据材料衰减参数计算理论厚度，最后综合考虑结构空间、机械强度、加工精度、重量和成本确定最终材料牌号。

总之，钨含量影响钨合金屏蔽性能的核心逻辑可以概括为：钨具有高原子序数和高密度，提高钨含量通常能够提高材料密度、面密度和高 Z 元素比例，从而增强对 X 射线和 γ 射线的衰减能力。但实际屏蔽性能并不是钨含量的简单函数，而是材料组成、实际密度、光子能量、屏蔽厚度和结构几何共同作用的结果。对于高性能钨合金屏蔽件，真正应该追求的是材料性能与屏蔽设计的匹配，而不是单纯追求最高钨含量。

版权与法律责任声明



Q5: 钨合金屏蔽件常见密度是多少？

钨合金屏蔽件通常采用钨重合金（Tungsten Heavy Alloy, WHA）制造，其最大特点之一就是高密度。与铅、钢、铜等传统屏蔽材料相比，钨合金能够在较小体积和有限安装空间内提供较高的单位厚度质量和较强的 X 射线、 γ 射线衰减能力，因此广泛用于医疗影像设备、核医学、工业无损检测、放射源屏蔽、准直器以及精密辐射防护组件。工程上常见的钨重合金屏蔽材料密度大约为 $17.0 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ ，具体数值取决于钨含量、合金体系、粉末粒度、烧结工艺、致密化程度以及最终加工状态。高质量钨合金通常要求具有较高的实际密度和良好的密度均匀性。

（1）常见钨合金屏蔽件密度范围

钨合金通常通过提高钨粉比例来获得不同的密度等级。市场上较常见的 90W、93W、95W 和 97W 等牌号，其典型密度可以参考下表：

钨合金牌号	名义钨含量	典型密度范围	典型应用
90W	约 90 wt.%	$16.9 \sim 17.2 \text{ g/cm}^3$	一般屏蔽件、配重件
92W/93W	约 92~93 wt.%	$17.3 \sim 17.7 \text{ g/cm}^3$	医疗、工业屏蔽件
95W	约 95 wt.%	$17.8 \sim 18.2 \text{ g/cm}^3$	高性能医疗及工业屏蔽
97W	约 97 wt.%	$18.3 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$	高密度精密屏蔽件
纯钨	$\geq 99.9 \text{ wt.}\% \text{ W}$	约 19.25 g/cm^3	特殊高密度、高温应用

上述数据属于工程常用参考范围，实际产品密度应以供应商材料标准和出厂检测结果为准。不同制造商采用的 Ni-Fe、Ni-Cu 等粘结相体系不同，即使名义钨含量相同，最终密度也可能存在一定差异。

（2）为什么钨合金能够达到 17~19 g/cm³ 的高密度？

钨的理论密度约为 19.25 g/cm³，是工业金属中密度最高的材料之一。钨重合金通常采用粉末冶金路线，将高纯钨粉与 Ni-Fe、Ni-Cu 等粘结相粉末进行混合、压制和液相烧结，使大量高密度钨颗粒形成连续的金属基体。因此，钨合金的密度主要取决于两个方面：一是合金中钨的质量分数，二是材料最终的致密化程度。在其他条件基本相同的情况下，钨含量越高，材料理论密度通常越高。例如 90W 材料的典型密度约为 17 g/cm³，而 97W 可以接近 18.5 g/cm³，进一步接近纯钨的 19.25 g/cm³。

（3）密度为什么对辐射屏蔽特别重要？

对于 X 射线和 γ 射线屏蔽，密度是非常关键的材料参数之一。

在窄束近似条件下，光子穿过均匀材料后的强度可以表示为： $I = I_0 e^{-\mu x}$ ，其中， I_0 为入射强度， I 为透射强度， μ 为线性衰减系数， x 为材料厚度。线性衰减系数与质量衰减系数之间存在： $\mu = \mu_m \cdot \rho$ ，其中， μ_m 是质量衰减系数， ρ 是材料密度。在相同光子能量和材料体系下，提高材料密度通常能够提高单位厚度的线性衰减能力。因此，高密度钨合金能够在较小厚度下实现较高的辐射衰减。这也是钨合金屏蔽件能够实现小型化、薄壁化的重要材料基础。

（4）密度越高，屏蔽性能一定越好吗？

高密度可以实现更好的屏蔽效果但也不能简单地理解为密度越高，屏蔽效果越好。对于相同组成体系、相同厚度和相同辐射能量而言，提高密度通常有利于增强屏蔽效果。但实际屏蔽性能还取决于光子能量、材料元素组成、屏蔽厚度以及结构几何。例如，90W 和 97W 虽然都属于钨重合金，但两者的钨含量、密度以及粘结相比比例不同。在某一特定能量下，97W 通常具有更高的线性衰减能力，但实际工程中是否值得采用 97W，还需要考虑加工难度、机械性能、成本和重量等因素。因此，不能单纯按照密度大小规律替代完整的屏蔽计算。

（5）密度与面密度有什么区别？

在辐射防护设计中，不能只看材料密度，还要看面密度。

面密度通常定义为： $m_A = \rho \cdot x$ ，其中， m_A 为单位面积材料质量，单位通常为 g/cm²； ρ 为材料密度（g/cm³）； x 为屏蔽层厚度（cm）。例如，一块厚度 10 mm 的钨合金：

如果密度为 17.0 g/cm³，则面密度约为： $m_A = 17.0 \text{ g/cm}^3 \times 1.0 \text{ cm} = 17.0 \text{ g/cm}^2$

如果密度为 18.5 g/cm³，则面密度约为： $m_A = 18.5 \text{ g/cm}^3 \times 1.0 \text{ cm} = 18.5 \text{ g/cm}^2$

在相同厚度下，18.5 g/cm³ 材料具有更高的面密度，因此通常能够提供更强的单位厚度屏蔽能力。这对于 CT、X 射线探测器、核医学设备以及工业射线源准直器尤其重要，因为这些设备往往受到内部空间限制。

（6）实际钨合金屏蔽件的密度为什么可能低于理论值？

理论密度和实际产品密度并不完全相同。钨重合金采用粉末冶金工艺制造，在压制、烧结和冷却过程中可能产生极少量孔隙。如果烧结工艺控制不理想，还可能出现局部密度差异。

因此，对于高端屏蔽件，材料的实际密度检测非常重要。例如，一种名义 97W 的材料，如果设计要求达到 18.5 g/cm³ 以上，就应该在采购技术条件中明确最低密度要求，并通过阿基米德法等方法进行检测，而不能仅仅写明 97W 就认为产品一定具有某一个固定密度。对于大型屏蔽块、厚壁准直器和复杂结构件，还应特别关注内部密度均匀性。

(7) 钨合金屏蔽件通常采用哪些密度等级？

从实际采购角度，可以按照使用需求进行初步划分。

普通工业防护和一般配重应用，可以选择约 17 g/cm³ 级别的 90W 材料；对于常规医疗和工业辐射屏蔽，可以考虑 17.5~18.0 g/cm³ 级别的 93W~95W 材料；对于空间高度受限、要求较高屏蔽效率的精密设备，可以考虑 18.3 g/cm³ 以上的 97W 材料。如果产品还要求极高温度稳定性、高纯度或特殊机械性能，则可能需要进一步考虑纯钨或者其他钨基材料，而不是简单提高钨含量。

(8) 钨合金密度与铅的比较

铅的密度约为 11.34 g/cm³，而常见钨重合金密度约为 17~18.8 g/cm³，纯钨约 19.25 g/cm³。因此，从材料密度角度来看，钨合金明显高于铅。以 18.5 g/cm³ 的钨合金与 11.34 g/cm³ 的铅进行比较，在相同厚度下，钨合金的单位面积质量约为铅的 1.63 倍。但这并不意味着钨合金的屏蔽效果在所有 X 射线和 γ 射线能量下都是铅的 1.63 倍。实际屏蔽能力必须结合质量衰减系数、光子能量和具体厚度进行计算。因此，专业的钨合金替铅设计应采用具体能量下的衰减数据，而不能仅根据密度进行一比一换算。

(9) 为什么医疗和精密设备特别关注钨合金密度？

钨合金最大的工程优势之一，是能够将高屏蔽能力与高机械强度、尺寸稳定性结合起来。例如，在医疗准直器、X 射线设备局部屏蔽、放射性药物注射器屏蔽套以及钨合金屏蔽环中，产品通常需要安装在非常有限的空间内。如果采用低密度材料，为达到相同衰减目标，就可能需要增加厚度，从而影响设备尺寸、运动机构和内部空间布局。高密度钨合金则可以在有限空间内提供较高的面密度，同时具备明显优于铅的机械强度和耐磨性能，因此非常适合制造精密结构型屏蔽件。

(10) 采购钨合金屏蔽件时应该如何规定密度？

对于普通产品，可以规定材料牌号，例如 90W、93W、95W 或 97W，并要求提供实际密度检测结果。对于医疗、核工业、工业探伤和高端科研设备，建议进一步明确最低密度、密度检测方法、尺寸公差、内部缺陷要求、化学成分、硬度以及必要的金相和无损检测要求。

例如技术要求可以写成：

材料：95W 钨重合金；

钨含量：≥95 wt.%；

密度：≥17.8 g/cm³；

尺寸：按照客户图纸；

内部质量：不得存在影响使用性能的裂纹、孔洞等缺陷；

检测：提供化学成分、密度、尺寸及必要的无损检测报告。

对于复杂的钨合金准直器、屏蔽环、屏蔽套及放射源容器，还应同时规定屏蔽厚度、孔道尺寸、装配精度以及最终辐射衰减性能。针对上述辐射衰减性能，通常采用窄束 γ 射线或 X 射线测量方法，其衰减规律满足指数衰减公式： $I = I_0 e^{-\mu t}$

其中， I 为透过屏蔽体后的射线强度， I_0 为入射射线强度， μ 为材料的线衰减系数 (cm⁻¹)， t 为屏蔽厚度 (cm)。为便于工程验收，可将该公式转换为半值层厚度 (HVL) 或十分之一

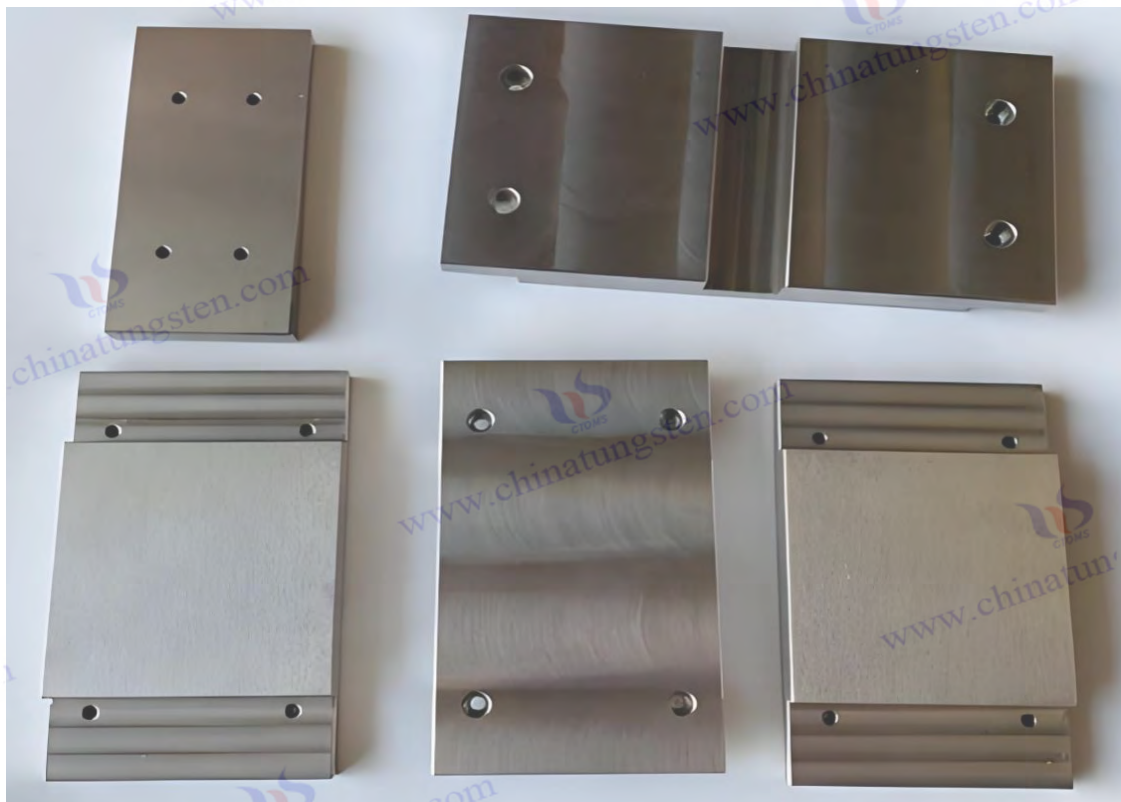
值层厚度 (TVL) 形式： $HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$, $TVL = \frac{\ln 10}{\mu}$

对于多能量或宽谱射线，应使用等效衰减系数 μ_{eff} ，并通过实测透射率 $T = I/I_0$ 反算实际屏蔽厚度裕度：若产品为组合体（如带孔道或阶梯结构），需按射线路径分段计算总衰减，总透射率为各段透射率之积： $T_{total} = \prod_{i=1}^n T_i = \exp(-\sum_{i=1}^n \mu_i t_i)$ ，其中， μ_i 和 t_i 分别为第 i 段材料的线衰减系数和该段射线路径长度。验收时，应在设计图纸上标明关键路径的最小累积厚度 t_{min} ，并规定在指定射线能量（如 ^{137}Cs , 662 keV 或 ^{60}Co , 1.25 MeV）下的实测透射率 $T_{measured}$ 不得超过设计允许值 T_{allow} ，即满足：

$$T_{measured} \leq T_{allow}, \text{ 其中 } T_{allow} = \exp(-\mu_{design} \cdot t_{design})$$

μ_{design} 为设计采用的标称线衰减系数， t_{design} 为设计标称屏蔽厚度。同时，对于含有多个孔道或窗口的异形件，还应逐孔道测量并计算各孔道方向的衰减比，确保所有方向上的辐射泄漏均低于安全限值。最终，所有辐射性能检测结果应附于产品随行文件中，并与前述化学成分、密度、尺寸及无损检测报告一并提交，作为产品合格判定的完整依据。

简言之，钨合金屏蔽件的常见密度约为 $17 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ ，90W、93W、95W 和 97W 是较常见的密度等级，而纯钨理论密度约为 19.25 g/cm^3 。密度越高通常意味着单位厚度能够获得更高的材料面密度和更强的光子衰减能力，但最终屏蔽性能必须结合射线能量、材料组成、厚度和结构进行计算。对于专业屏蔽件，实际检测密度比单纯标注一个材料牌号更具有工程意义。



Q6: 90W、93W、95W、97W 钨合金有什么区别？

90W、93W、95W 和 97W 通常是钨重合金中按照名义钨质量分数进行区分的典型材料等级，分别表示约 90%、93%、95% 和 97% (wt.%) 的钨含量。它们并不是简单的高低等级关系，而是在密度、屏蔽能力、机械性能、加工性能、成本以及应用场景之间形成不同的工程平衡。

版权与法律声明

对于钨合金屏蔽件而言，选择哪一种材料不能只看钨含量，还必须结合射线类型、能量、目标衰减率、零件尺寸和加工要求综合确定。

(1) 90W、93W、95W、97W 的基本材料差异

典型钨重合金通常以钨为硬质相，以 Ni-Fe 或 Ni-Cu 等作为粘结相，通过粉末冶金、压制、烧结以及后续机械加工制备。随着钨含量由 90%提高至 97%，材料整体密度通常随之提高，同时钨相比比例增加、粘结相比比例下降。

规格	钨含量	密度范围	主要特点	典型应用
90W	90 wt.%	16.8-17.2 g/cm³	综合性能、加工性和成本较均衡	一般配重、工业屏蔽
93W	≈93 wt.%	17.1-17.7 g/cm³	密度进一步提高，综合性能较好	医疗屏蔽、工业配重
95W	≈95 wt.%	17.8-18.2 g/cm³	高密度、较好的屏蔽能力	医疗准直器、放射源屏蔽、精密配重
97W	≈97 wt.%	18.3-18.7 g/cm³	极高密度、空间利用率高	高端医疗、核工业、航空航天及精密屏蔽
备注	实际密度取决于合金体系、粉末纯度、烧结致密度、制造工艺及检测标准，不能仅依据牌号确定。			

因此，90W 到 97W 的核心变化可以概括为：钨含量提高 → 密度提高 → 单位厚度的质量厚度增加 → 对多数光子辐射的屏蔽能力提高，但与此同时材料成本、加工难度和部分机械性能之间的平衡也会发生变化。

(2) 钨含量提高为什么会增强屏蔽能力？

X 射线和 γ 射线属于高能光子，其在材料中的衰减主要涉及光电吸收、康普顿散射以及在更高能量下的电子对效应。材料的线性衰减能力通常可以表示为： $I = I_0 e^{-\mu x}$

其中， I_0 为入射强度、 I 为穿透后的强度、 μ 为线性衰减系数、 x 为屏蔽厚度。对于同一种辐射能量，材料密度越高，通常能够提供更大的单位厚度质量面密度，因此在相同几何厚度下能够获得更高的衰减能力。90W、93W、95W 和 97W 虽然都属于高密度钨合金，但 97W 具有更高的钨质量分数和更高的理论密度，因此在空间尺寸受到严格限制的屏蔽件中通常具有优势。但这并不意味着 97W 在所有射线能量下都必然比 90W 具有固定倍数的屏蔽能力。实际屏蔽性能仍取决于光子能量、材料实际密度、合金组成、厚度以及几何结构。故此，工程设计应采用具体材料的质量衰减系数或经过验证的实验数据进行计算。

(3) 90W 适合什么场景？

90W 属于较高密度的钨重合金，同时具有相对较高的粘结相比比例，因此通常具有较好的综合加工性能和成本优势。对于大型屏蔽块、一般工业射线防护、设备配重以及对极限尺寸要求不高的结构件，90W 往往已经能够满足要求。如果设计空间允许适当增加屏蔽厚度，采用 90W 可以通过材料成本和加工成本的降低获得较好的经济性。因此，90W 并不是低端材料，而更适合强调性价比、结构强度和加工便利性的工程应用。

(4) 93W 有什么特点？

93W 处于 90W 和 95W 之间，是一种比较典型的中高密度选择。其密度高于 90W，同时通常能够保持较好的综合机械性能和加工性能。对于医疗设备、工业探伤、一般 γ 射线屏蔽以及精密配重件，如果设备对尺寸和重量存在一定限制，但又不要求极限密度，93W 可以成为一种较为均衡的方案。从采购角度看，93W 还具有一个实际优势，即可以在屏蔽性能和材料成本之间形成较好的平衡。因此，在没有特殊极限要求的情况下，不一定需要直接选择 97W。

（5）95W 为什么应用非常广泛？

95W 是钨重合金屏蔽件中非常常见的高密度材料之一，其典型密度约为 18 g/cm^3 。它在密度、机械强度、韧性、加工性能和成本之间具有较好的综合平衡。因此，95W 经常用于医疗放射防护件、 γ 射线源屏蔽件、准直器、核医学设备部件、工业探伤设备以及高密度配重件等。特别是在医疗设备中，零件通常不仅需要屏蔽射线，还需要满足复杂的结构设计、精密孔道、定位结构和装配公差。过度提高钨含量虽然可以进一步增加密度，但也可能增加材料和加工成本。因此，95W 在很多工程项目中具有较高的实用价值。

（6）97W 有什么优势？

97W 代表更高钨含量的钨重合金，典型密度可达到 $18.3 \sim 18.7 \text{ g/cm}^3$ 左右。在相同厚度下，它可以提供较高的质量面密度，因此特别适合空间非常有限、但又要求较高辐射衰减能力的应用。例如，在某些医疗准直器、放射源屏蔽结构、精密核医学设备以及高端科研装置中，设备内部空间可能只有有限的几毫米至几十毫米。如果单纯增加屏蔽厚度会影响设备尺寸、运动机构或射线束几何，那么提高材料密度就具有明显的工程意义。不过，97W 并非所有项目的最佳选择。如果空间充足，90W 或 93W 可能已经能够达到目标屏蔽要求；如果零件需要大量复杂加工，97W 的加工成本也可能明显增加。

（7）四种材料的屏蔽性能能否简单按照钨含量排序？

从相同射线能量、相同几何厚度以及材料实际密度相近且制造质量合格的条件来看，一般可以认为：97W > 95W > 93W > 90W。但这个排序主要反映的是高密度材料在单位几何厚度下的潜在屏蔽优势，并不意味着实际工程中的屏蔽厚度可以直接按照 90%、93%、95%、97% 的比例换算。例如，不能简单认为 97W 比 90W 多 7.8% 的钨，因此屏蔽能力就一定提高 7.8%。因为光子与物质相互作用取决于光子能量、元素组成、材料密度以及不同相互作用机制，实际衰减应通过相应能量下的衰减系数进行计算。

（8）90W 到 97W，除了密度以外还有哪些区别？

实际采购时，除了密度值标以外，中钨智造建议还应关注以下指标：

性能指标	90W	93W	95W	97W
密度	较高	高	很高	极高
单位厚度屏蔽能力	较好	较高	高	很高
材料成本	相对较低	中等	较高	高
加工难度	相对较低	中等	较高	较高
空间利用效率	较好	较高	高	很高
适合精密屏蔽	可以	较适合	很适合	很适合
综合经济性	较好	很好	较好	取决于工况

其中，机械性能不能仅依据钨含量判断。钨重合金的强度、延伸率、硬度和断裂行为还与 Ni-Fe、Ni-Cu 粘结相比例、晶粒尺寸、钨颗粒形貌、烧结制度以及热处理状态有关。因此，如果客户有抗拉强度、硬度或抗冲击性能要求，应以供应商提供的实际材料检测数据为准。

(9) 不同钨含量的屏蔽件应该如何选择？

如果是普通工业屏蔽、配重或者尺寸空间比较宽裕的结构件，可以优先考虑 90W 或 93W；如果是医疗设备、工业 γ 射线探伤、核医学等对密度和尺寸具有较高要求的产品，95W 通常是较为均衡的选择；如果设备空间极度受限，或者需要在较小体积内获得较高的射线衰减能力，则可以考虑 97W。对于医疗准直器、放射源屏蔽容器、钨合金屏蔽环、注射器屏蔽套等精密部件，还需要同时考虑孔径、壁厚、装配公差、表面粗糙度、内部缺陷和密度均匀性，不能单纯按照钨含量进行选材。

(10) 选择 90W、93W、95W 还是 97W，采购时应该提供什么参数？

专业的钨合金屏蔽件设计通常至少需要明确射线种类、光子能量或放射源型号、源强或剂量率、目标衰减率、允许屏蔽厚度、零件最大外形尺寸、工作温度、机械载荷、表面处理以及尺寸公差。例如，客户如果提出使用 Cs-137、Co-60、Ir-192 等放射源，就应进一步提供源强和目标屏蔽要求；如果用于 X 射线或 CT 设备，则应提供 kVp、滤过条件、射线束方向及设计剂量指标。只有这些参数明确后，才能确定 90W、93W、95W 还是 97W 更加合理。

对于需要精密定制钨合金屏蔽件的客户，CTIA GROUP 可根据具体射线类型、能量、结构尺寸和屏蔽指标协助进行材料选择，并结合 95W、97W 等不同密度等级进行结构和加工方案评估。对于医疗准直器、放射源屏蔽件、钨合金屏蔽环、屏蔽套等产品，还应进一步结合材料密度、内部质量和加工精度进行综合验证。

90W、93W、95W 和 97W 并不存在绝对的优劣之分，而是对应不同的工程优化目标。90W 强调综合性价比，93W 强调性能与成本平衡，95W 兼顾高密度和加工性能，97W 则更适合空间受限和高屏蔽要求场景。对于真正的辐射屏蔽设计，最合理的方法不是单纯选择钨含量最高的材料，而是在目标射线能量、HVL/TVL、允许厚度、机械性能、加工精度和项目成本之间进行系统优化。



Q7：钨合金密度越高，辐射屏蔽能力是否一定越强？

不一定。对于钨合金屏蔽件而言，提高材料密度通常有利于增强对 X 射线和 γ 射线的衰减能力，但不能简单理解为密度越高，屏蔽性能就一定按比例提高。真正决定屏蔽效果的是材料的线性衰减系数、质量衰减系数、材料组成、光子能量、屏蔽厚度、几何结构以及实际制造质量等因素。对于工程设计而言，更准确的判断方法是比较特定射线能量下的线性衰减系数，并结合所需 HVL、TVL、目标透射率和实际结构进行计算。

（1）密度为什么通常有利于提高屏蔽能力？

X 射线和 γ 射线穿过钨合金时，会发生光电吸收、康普顿散射以及在更高能量下的电子对效应等相互作用。对于单一均匀材料，窄束条件下光子强度通常可以用指数衰减关系描述： $I = I_0 e^{-\mu x}$ ，其中， I_0 为入射光子强度， I 为透射光子强度， x 为屏蔽厚度， μ 为线性衰减系数。而线性衰减系数与材料密度之间存在基本关系： $\mu = \mu_m \cdot \rho$ 。其中， μ_m 为质量衰减系数， ρ 为材料密度。因此，在材料化学组成和光子能量基本相同的情况下，提高密度会提高单位厚度内的物质数量，使光子发生相互作用的概率增加，从而提高单位厚度的屏蔽能力。这也是为什么高密度钨合金通常非常适合空间受限的辐射屏蔽结构。例如常见钨重合金密度大约在 $17 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ 范围内，而铅的密度约为 11.34 g/cm^3 。对于某些医疗、核医学和工业射线屏蔽结构，高密度钨合金能够在较小体积内获得较大的面密度，从而减少设备尺寸和重量分配上的空间压力。面密度（单位面积上的质量）可表示为： $\rho_A = \rho \cdot t$ ，其中， ρ 为材料密度， t 为屏蔽厚度。在相同几何厚度下，高密度钨合金的面密度显著高于铅，因此在同等屏蔽要求下可大幅缩减所需厚度。此外，给定质量下的材料体积可由密度公式计算： $\rho = \frac{m}{V}$ ，即： $V =$

$\frac{m}{\rho}$ 。例如，若某屏蔽件质量为 12 kg ，密度为 2.4 kg/L ，则其体积为： $V = \frac{12 \text{ kg}}{2.4 \text{ kg/L}} = 5 \text{ L}$ 。同理，若采用更高密度的钨合金，在相同质量下体积更小，或在相同体积下质量更大，从而提供更高的面密度和更好的衰减效果。因此，在空间和重量同时受限的工程场景中，高密度钨合金凭借其密度优势成为替代传统铅屏蔽材料的优选方案。

（2）但密度不是唯一决定因素

密度提高并不意味着材料的质量衰减系数也一定提高。质量衰减系数主要与材料的元素组成和光子能量有关，而不是单纯由材料密度决定。例如，钨的原子序数为 74，铅的原子序数为 82。两者虽然都是高原子序数、高密度材料，但在不同 X 射线或 γ 射线能量范围内，其光子相互作用机制和衰减特征并不完全相同。因此，不能仅根据 17.0 、 18.0 或 18.5 g/cm^3 这样的密度数据，就直接判断一种钨合金在所有能量范围内都一定优于另一种材料。对于实际屏蔽设计，更合理的指标包括：

参数	工程意义
密度 ρ	决定单位体积材料质量及线性衰减能力的重要因素
质量衰减系数 μ/ρ	反映材料单位质量对特定能量光子的衰减能力
线性衰减系数 μ	综合反映材料单位厚度的衰减能力
HVL	将辐射强度降低至 50% 所需的材料厚度
TVL	将辐射强度降低至 10% 所需的材料厚度

版权与法律声明

参数	工程意义
面密度	单位面积上的材料质量，是屏蔽结构的重要工程指标
透射率	屏蔽设计最终需要控制的核心指标之一

因此，采购钨合金屏蔽件时，仅要求一个密度指标通常是不充分的。

（3）不同钨含量的钨合金，密度与屏蔽能力存在关联

以常见钨重合金为例，随着钨含量增加，材料密度通常提高。例如 90W、93W、95W 和 97W 等牌号，其典型密度总体呈递增趋势。

典型牌号	钨含量	典型密度范围	一般特点
90W	约 90%	约 16.9~17.2 g/cm³	成本较低、综合性能较好
93W	约 93%	约 17.3~17.7 g/cm³	屏蔽与加工性能较均衡
95W	约 95%	约 17.8~18.2 g/cm³	高密度屏蔽应用较常见
97W	约 97%	约 18.3~18.7 g/cm³	高密度、空间受限应用

实际数值会因 W-Ni-Fe、W-Ni-Cu 等合金体系、粉末粒度、烧结工艺、孔隙率以及生产标准不同而发生变化，因此表中数据更适合作为工程选型参考，而不能代替具体材料的检测值。一般而言，在相同射线能量、相同几何条件和相同厚度下，密度较高的钨合金通常具有更高的线性衰减能力。但是，如果为了追求极高密度而牺牲了加工精度、内部致密性、尺寸稳定性或结构可靠性，那么最终屏蔽件的综合性能未必更好。

（4）材料密度还必须结合屏蔽厚度考虑

屏蔽设计真正关注的不是单纯的材料密度，而是材料在实际厚度下能够达到多少衰减。例如，一块密度 18.5 g/cm³ 的钨合金，如果设计厚度不足，仍然可能无法满足目标屏蔽率；而密度略低的材料，如果能够采用更合理的结构和足够的厚度，也可能达到同样的屏蔽效果。因此，在工程实践中经常需要综合考虑面密度： $\rho_A = \rho \cdot t$ ，其中 ρ_A 为单位面积质量（面密度）， ρ 为材料密度， t 为屏蔽厚度。这意味着高密度材料的一个重要价值，是在达到相同屏蔽要求时，可以潜在地减少所需厚度，从而降低屏蔽组件的体积。这一点对于 CT、X 射线设备、核医学设备、工业探伤设备以及空间高度受限的准直器尤为重要。但是，面密度是评价屏蔽能力的重要中间参量，但并非唯一判据。对于给定辐射能量，达到相同衰减效果所需的面密度通常随光子能量变化而不同。在低能区（如 <100 keV），光电吸收占主导，原子序数的影响显著，高钨含量的材料在较小面密度下即可实现高效衰减；在中能区（约 100 keV~几 MeV），康普顿散射成为主要过程，此时屏蔽能力几乎只与面密度相关，材料组分差异的影响大为减弱；在高能区（>1.022 MeV），电子对效应开始贡献，屏蔽能力又与原子序数的平方近似成正比。因此，面密度适用于同能量下不同材料或厚度的横向比较，但在跨能量段或宽能谱条件下，仍需依赖质量衰减系数 μ/ρ 的积分计算，并以实测数据作为最终验证依据。工程设计应结合具体射线能谱、允许体积与重量约束，综合选取最优材料与厚度方案。

（5）高密度并不等于所有能量下的屏蔽性能都更优

X 射线和 γ 射线的能量跨度非常大。例如医学诊断 X 射线通常涉及几十至数百 keV 范围，而工业和核医学领域可能涉及数百 keV 至 MeV 级 γ 射线。在不同能量区间，光电效应、康普顿散射和电子对效应所占的相对作用不同。因此，材料的衰减规律也会发生变化。特别是在

较高能量区域，不能简单依据材料的原子序数或密度判断屏蔽效果，而应当使用对应能量下的材料衰减数据进行计算。对于复杂设备，还需要考虑散射辐射、宽束效应、二次辐射以及屏蔽件之间的接缝和孔洞等因素。因此，专业的钨合金屏蔽件设计通常不是先确定一个固定厚度，再寻找材料，而是反过来根据射线源、能量、源强、目标剂量率和结构空间确定材料与厚度组合。

（6）对于钨合金屏蔽件，密度均匀性同样重要

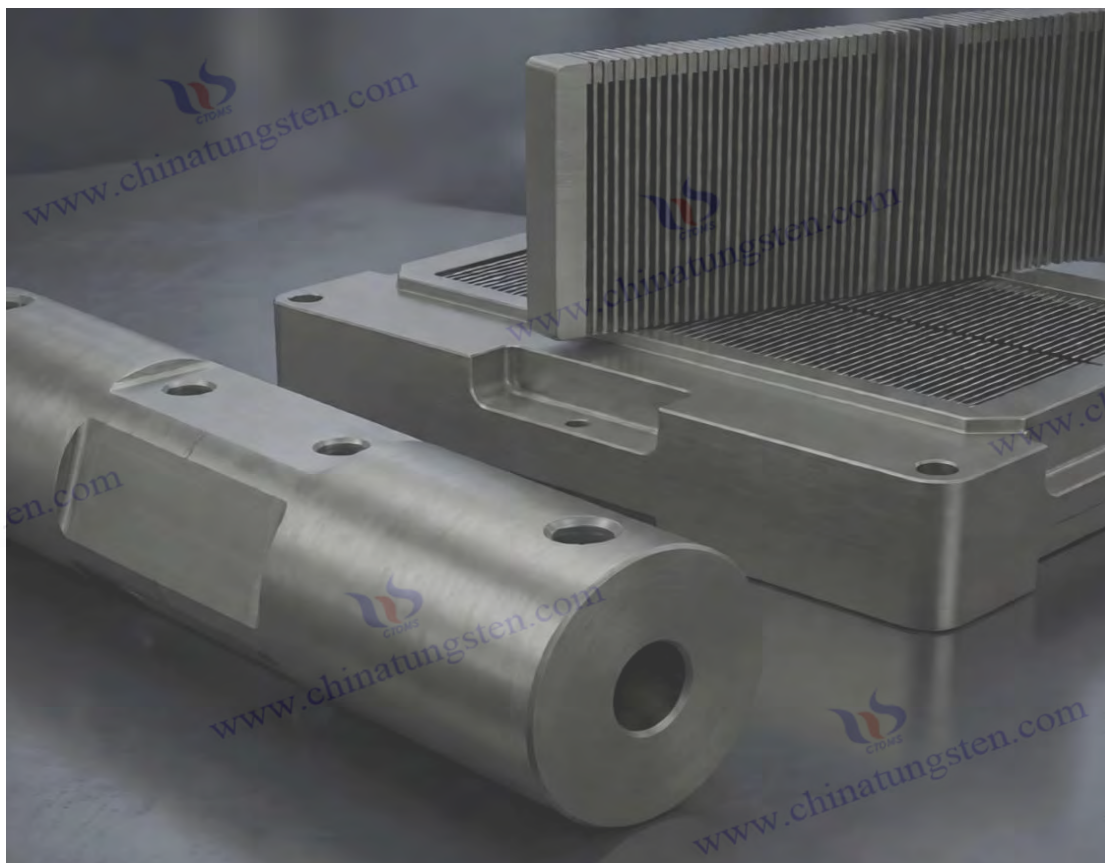
实际制造过程中，材料标称密度与整个零件的实际密度均匀性并不是完全相同的概念。如果钨合金内部存在孔隙、夹杂、局部密度偏低区域，即使材料平均密度达到 18 g/cm^3 以上，也可能形成局部屏蔽薄弱区。对于准直器、屏蔽环、放射源容器等关键零件，这种局部缺陷可能比平均密度略低所造成的影响更加值得关注。因此，高端钨合金屏蔽件应关注平均密度、密度一致性、内部致密性、化学成分、显微组织以及尺寸精度，而不能只看材料牌号。

（7）实际采购时应该如何判断钨合金屏蔽性能？

如果客户正在采购钨合金屏蔽件，建议不要简单提出钨含量越高越好或密度越高越好，而应向制造商提供具体的辐射参数，包括射线类型、光子能量或放射源型号、源强或剂量率、目标透射率、HVL/TVL 要求、屏蔽距离、允许外形尺寸、屏蔽件厚度限制以及工作温度和机械载荷等。全球专业钨合金屏蔽件制造商如中钨智造（CTIA GROUP），在实际定制过程中也应根据上述参数综合进行材料牌号、密度等级、结构尺寸和加工精度选择，而不是单纯以最高钨含量作为选材标准。

可以把这个问题概括为：密度越高，通常越有利于提高钨合金单位厚度的辐射衰减能力，但密度并不是屏蔽性能的唯一决定因素。真正具有工程意义的是特定射线能量下的线性衰减系数、HVL/TVL、实际厚度、面密度、材料均匀性和最终结构设计。对于专业钨合金屏蔽件，最优方案往往不是选择密度最高的材料，而是在屏蔽性能、尺寸、重量、机械强度、加工精度、成本和使用寿命之间取得合理平衡。





Q8：钨合金为什么可以屏蔽 X 射线？

钨合金之所以具有优异的 X 射线屏蔽能力，核心原因是其具有很高的密度、较高的平均原子序数以及较强的光子相互作用能力。对于 X 射线而言，屏蔽并不是简单依靠材料把射线完全挡住，而是通过光电效应、康普顿散射以及在更高能量条件下的电子对效应等物理过程，使入射光子发生吸收或改变传播方向，从而降低穿透屏蔽材料后的辐射强度。对于工程应用而言，钨合金的优势尤其明显：它能够在较小的几何尺寸内获得较高的面密度和较大的射线衰减能力，同时兼具较高的机械强度、尺寸稳定性和可加工性，因此被广泛用于 X 射线设备、CT 设备、放射治疗设备、核医学设备、工业无损检测设备以及科研辐射装置中的准直器、屏蔽环、屏蔽套、探测器防护件和局部屏蔽结构。

（1）高密度是钨合金实现 X 射线屏蔽的基础

X 射线和 γ 射线属于高能光子，其在材料中的衰减主要涉及光电吸收、康普顿散射以及在更高能量下的电子对效应。材料的线性衰减能力通常可以表示为： $I = I_0 e^{-\mu x}$ 。其中， I_0 为入射强度、 I 为穿透后的强度、 μ 为线性衰减系数、 x 为屏蔽厚度。对于同一种辐射能量，材料密度越高，通常能够提供更大的单位厚度质量面密度，因此在相同几何厚度下能够获得更高的衰减能力。90W、93W、95W 和 97W 虽然都属于高密度钨合金，但 97W 具有更高的钨质量分数和更高的理论密度，因此在空间尺寸受到严格限制的屏蔽件中通常具有优势。但这并不意味着 97W 在所有射线能量下都必然比 90W 具有固定倍数的屏蔽能力。实际屏蔽性能仍取决于光子能量、材料实际密度、合金组成、厚度以及几何结构。因此，工程设计应采用具体材料的质量衰减系数或经过验证的实验数据进行计算。

版权与法律声明

我们知道，钨的理论密度约为 19.25 g/cm^3 ，常用钨重合金由于加入镍、铁、铜等粘结相，其实际密度通常约为 $17 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ ，具体取决于钨含量、合金体系和烧结致密度。X 射线穿过材料时，其衰减程度与材料单位体积内能够参与相互作用的原子数量密切相关。密度越高，在相同厚度下单位面积所包含的材料质量越大，也就是面密度越高，因此通常能够提供更大的衰减能力。工程上可以用面密度表示这种关系： $\rho_s = \rho \cdot t$ ，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 5 mm 厚度的材料， 18.0 g/cm^3 的钨合金对应的面密度约为： $\rho_s = 18.0 \text{ g/cm}^3 \times 0.5 \text{ cm} = 9.0 \text{ g/cm}^2$ 因此在相同厚度条件下，高密度钨合金能够提供较大的单位面积材料质量。因此，对于设备内部空间非常有限的 X 射线防护结构，钨合金具有明显的体积效率优势。

（2）钨具有较高的原子序数，有利于 X 射线光子相互作用

钨的原子序数为 74，远高于铁的 26、铜的 29 以及铝的 13。高原子序数意味着钨原子具有更多电子和更强的电磁相互作用能力，因此对 X 射线光子的吸收和散射能力较强。尤其是在较低至中等能量的 X 射线范围内，光电吸收具有非常重要的作用。光电效应的概率对原子序数具有非常强的依赖关系，虽然实际衰减系数还受到光子能量、吸收边以及材料组成等因素影响，但高 Z 元素通常具有更强的光电吸收能力。这也是钨、铅等高 Z 材料成为 X 射线屏蔽材料的重要物理基础。需要注意的是，不能简单理解为原子序数越高，任何能量下屏蔽能力都按照固定比例提高。实际材料的质量衰减系数和线性衰减系数均随 X 射线能量变化，而且在钨的特征吸收边附近还会出现明显的能量响应变化。

（3）光电效应能够直接吸收入射 X 射线光子

在较低能量 X 射线条件下，光电效应是重要的能量沉积机制。当 X 射线光子进入钨合金后，如果其能量满足相应条件，可以将能量传递给原子内层电子，使电子脱离原子形成光电子。原来的 X 射线光子因此被吸收。随后，原子内层电子空位会通过外层电子跃迁进行填补，并可能产生特征 X 射线或俄歇电子。这些次级粒子又会在材料内部发生进一步相互作用。因此，从宏观效果来看，入射 X 射线的能量被逐步转化并沉积在屏蔽材料内部，而不是完整地穿透材料。钨具有较高的原子序数，因此在适当的 X 射线能量范围内具有较强的光电吸收能力。

（4）康普顿散射使 X 射线改变传播方向并损失能量

随着 X 射线能量升高，康普顿散射的重要性逐渐增加。康普顿散射是入射光子与材料中的电子发生非弹性碰撞，光子将一部分能量传递给电子，同时改变传播方向。散射后的光子能量低于入射光子，并可能继续在材料内部发生多次散射、吸收。因此，钨合金屏蔽件并不是单纯依靠一次相互作用完成屏蔽，而是通过大量光子与电子之间的连续相互作用，使 X 射线强度不断降低。这也是为什么实际设计中必须考虑屏蔽件厚度、材料密度、X 射线能谱以及散射环境，而不能只根据钨含量判断最终防护效果。

（5）X 射线能量不同，钨合金的屏蔽机制和屏蔽效率也不同

这是设计钨合金 X 射线屏蔽件时最重要的因素之一。医学诊断 X 射线设备通常通过管电压 kVp 描述设备输出条件，例如 60 kVp、80 kVp、100 kVp、120 kVp、140 kVp 等，但 kVp 并不等于所有光子的实际能量。实际 X 射线束具有连续能谱，并叠加靶材产生的特征 X 射线。

版权与法律责任声明

因此，不能简单地说明某一种钨合金具有固定的 X 射线屏蔽厚度。例如，同样是 120 kVp 设备，在不同靶材、滤过条件、束质和几何结构下，其有效能量可能不同，相应的钨合金衰减能力也会发生变化。对于工程计算，更合理的方法是获取实际 X 射线能谱，或者至少获得设备的管电压、滤过条件、束质指标、源到屏蔽件距离以及目标剂量率等参数，再进行屏蔽设计。

（6）钨合金的高密度与高 Z 特性共同决定其较高的线性衰减能力

X 射线在均匀材料中的理想化衰减通常可以表示为： $I = I_0 e^{-\mu x}$ ，其中， I_0 为入射辐射强度， I 为穿透屏蔽材料后的辐射强度， μ 为线性衰减系数， x 为材料厚度。而线性衰减系数可以进一步表示为： $\mu = \mu_m \cdot \rho$ ，其中， μ_m 为质量衰减系数，主要与材料组成和光子能量有关； ρ 为材料密度。这个关系很好地解释了为什么钨合金适合作为高性能 X 射线屏蔽材料：一方面，钨具有较高的质量衰减能力；另一方面，钨合金具有很高的密度，两者共同作用形成较高的线性衰减能力。因此，在相同材料厚度下，通常可以获得较高的 X 射线衰减率。

（7）钨合金不仅屏蔽能力强，而且适合制造复杂精密结构

相比单纯的铅板，钨合金的工程优势并不仅仅是辐射衰减能力。钨合金通常具有较高的强度、硬度和尺寸稳定性，可以加工成薄壁结构、环形结构、孔道、狭缝、锥形准直孔以及复杂三维零件。这一点对于医疗设备和精密检测设备尤其重要。例如，钨合金可以制造 X 射线准直器，使射线束限制在规定区域；也可以制造探测器周围的局部屏蔽件、CT 设备中的局部防护结构以及核医学设备中的放射源屏蔽组件。因此，钨合金的实际价值并不是单纯的材料屏蔽系数，而是高密度、高 Z、机械强度和精密加工能力的综合。

（8）为什么钨合金特别适合空间受限的 X 射线屏蔽？

对于设备设计人员而言，一个非常重要的指标不是单纯的材料密度，而是单位空间能够获得多少辐射衰减能力。钨合金密度通常可达到约 17~18.8 g/cm³，而铅密度约为 11.34 g/cm³。由此，在相同厚度下，钨合金能够提供明显更高的面密度。例如：

材料	典型密度	5 mm 厚度对应面密度
铅	≈11.34 g/cm ³	≈5.67 g/cm ²
钨重合金	≈17~18.8 g/cm ³	≈8.5~9.4 g/cm ²
纯钨	≈19.25 g/cm ³	≈9.63 g/cm ²

这意味着在设备内部空间有限的情况下，钨合金有机会通过较小的几何厚度实现较高的辐射衰减，同时保持结构强度。因此，在机器人设备、CT、放疗、核医学、工业探伤以及高端科研设备中，钨合金往往比单纯增加铅层厚度更加具有工程吸引力。

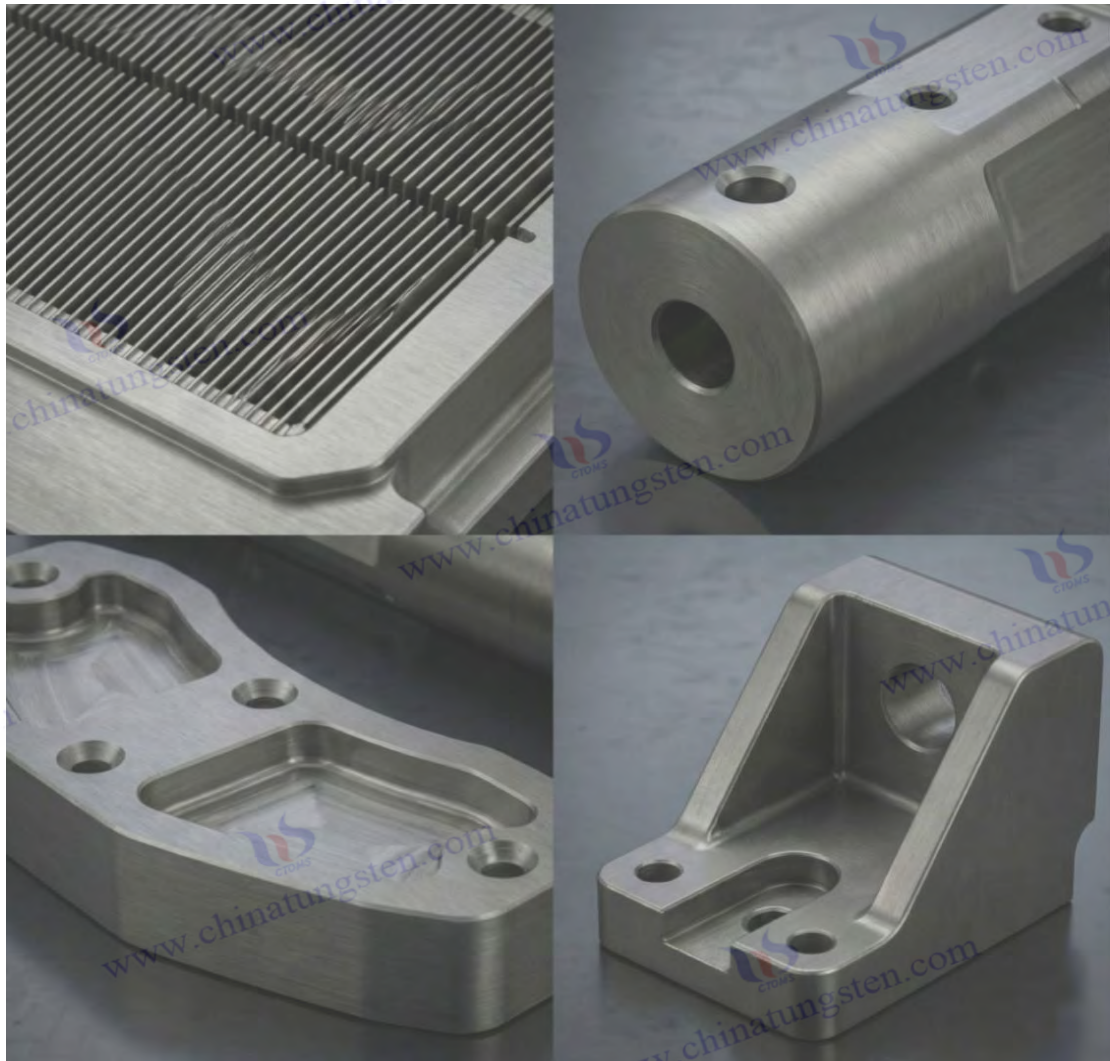
（9）为什么不能简单用钨含量判断 X 射线屏蔽能力？

90W、93W、95W、97W 等不同钨含量钨合金，其密度存在差异，因此在其他条件相近时，高钨含量材料通常具有更高的线性衰减能力。但是，实际屏蔽性能不能只看钨含量，还必须综合考虑材料密度、孔隙率、合金元素、X 射线能量、厚度、几何结构以及加工质量。例如，一块标称 97W 但存在较明显内部孔隙和密度不均匀的材料，并不一定能够在实际应用中优于组织均匀、致密度高的 95W 材料。对于高端屏蔽件，更重要的是实际材料的密度、均匀性和批次一致性，而不仅仅是牌号。

（10）钨合金 X 射线屏蔽件应如何进行专业设计？

真正的工程设计通常需要客户提供以下基础数据：X 射线设备类型、最大管电压 kVp、管电流 mA、滤过条件、射线束方向、源与屏蔽件距离、目标剂量率或目标衰减率、允许的最大外形尺寸、工作温度、机械载荷以及安装方式。对于要求较高的医疗、工业和科研设备，还应进一步明确 HVL、TVL、铅当量、透射率或设计剂量限值等指标。因此，钨合金屏蔽件的设计流程通常应当是：材料选择 → 确定 X 射线能谱 → 获取质量衰减/线性衰减参数 → 计算 HVL/TVL → 确定目标衰减率 → 计算理论厚度 → 考虑散射与结构因素 → 加入工程安全裕量 → 进行样件验证和检测。对于需要进行材料选择、屏蔽厚度设计和复杂结构加工的客户，全球专业钨合金制造商 CTIA GROUP 可根据具体 X 射线能量、钨合金牌号、密度、尺寸及加工要求，提供钨合金屏蔽件的材料选型、结构加工和定制制造方案。

钨合金能够屏蔽 X 射线，本质上是高密度、高原子序数材料与 X 射线发生光电吸收、康普顿散射等相互作用的结果。其真正的工程优势则在于能够将较强的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。对于专业应用而言，判断钨合金屏蔽性能不能只看材料名称或钨含量，而应建立在具体 X 射线能谱、材料密度、屏蔽厚度和目标衰减率基础之上。



版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Q9：钨合金为什么可以屏蔽 γ 射线？

钨合金能够有效屏蔽 γ 射线，根本原因在于其具有非常高的密度和较高的有效原子序数，能够显著增加 γ 光子在材料中的相互作用概率，并通过光电吸收、康普顿散射和电子对效应等物理机制，使 γ 射线能量不断衰减。对于实际工程应用而言，钨合金的屏蔽能力并不是简单由钨含量决定，而是由 γ 射线能量、材料密度、屏蔽厚度、材料组成、几何结构以及目标剂量衰减率共同决定。

(1) γ 射线是什么，为什么难以屏蔽？

γ 射线本质上是高能电磁辐射，通常来源于放射性核素的核跃迁，也可以产生于核反应及高能粒子过程。与普通低能 X 射线相比， γ 射线通常具有更高、更明确的特征能量，例如 Cs-137 主要产生约 662 keV 的 γ 光子，Co-60 则主要产生约 1.173 MeV 和 1.333 MeV 的 γ 光子，Ir-192 则具有较为复杂的多能谱 γ 辐射。 γ 光子不带电、静止质量为零，因此不会像 α 粒子、 β 粒子那样通过与物质发生连续电离而迅速停止。它可以穿透较厚的材料，只有在与材料中的电子或原子核发生相互作用后才会发生能量转移。因此， γ 射线屏蔽通常需要采用高密度、高原子序数材料，并通过足够的材料厚度增加光子发生相互作用的机会。这是钨合金、铅、纯钨等高密度材料广泛用于 γ 射线屏蔽的物理基础。

(2) 钨合金的高密度是 γ 射线屏蔽的重要基础

钨的理论密度约为 19.25 g/cm³，常见钨重合金由于加入 Ni、Fe、Cu 等金属粘结相，其实际密度通常约为 17~18.8 g/cm³，具体取决于钨含量、合金体系和烧结致密度。例如，90W、93W、95W 和 97W 等不同等级钨合金的密度通常随钨含量提高而增加。对于相同几何厚度而言，密度较高的材料通常具有更大的单位面积质量，也就是更高的面密度。面密度可以简单表示为： $\rho_A = \rho \cdot t$ ，其中， ρ_A 为单位面积质量，单位通常为 g/cm²， ρ 为材料密度， t 为屏蔽厚度。在 γ 射线屏蔽设计中，面密度是非常重要的工程参数。假设两种材料具有相近的质量衰减能力，在相同屏蔽目标下，高密度材料可以通过减少几何厚度实现相同或接近的屏蔽效果。因此，钨合金特别适合医疗设备、核医学设备、工业探伤设备等空间受限的场景。

(3) 高原子序数有利于提高 γ 光子相互作用概率

钨的原子序数为 74，明显高于铁、铜等普通结构材料，因此具有较强的光子相互作用能力。 γ 射线进入钨合金后，主要通过三类机制发生能量转移，即光电效应、康普顿散射以及电子对效应。其中，不同机制所占的比例高度依赖于 γ 光子的能量以及材料的原子序数。低能区域光电效应更加重要，中等能区通常以康普顿散射占主要地位，而当光子能量超过 1.022 MeV 以后，电子对效应开始成为可能，并且随着能量继续提高，其贡献逐渐增加。因此，不能简单地认为钨合金在所有 γ 射线能量下都依靠同一种机制进行屏蔽。

(4) 光电效应能够使 γ 光子发生强烈吸收

在相对较低的 γ/X 射线能量范围内，光电效应是高原子序数材料的重要相互作用机制。当 γ 光子与钨原子内层电子发生作用时，光子可以将全部能量转移给电子，使电子脱离原子形成光电子。随后原子内层电子空位会通过特征 X 射线或俄歇电子等方式进行弛豫。对于高原子序数材料而言，光电效应概率对原子序数非常敏感，因此钨在较低能量光子屏蔽方面具有明显优势。这也是为什么钨合金非常适合用于某些医疗 X 射线设备、核医学局部防护组件以及

精密准直器等结构。

(5) 康普顿散射是中等能量 γ 射线屏蔽的重要机制

当 γ 光子能量进入数百 keV 至 MeV 级别时，康普顿散射通常成为非常重要的相互作用过程。在康普顿散射过程中，入射 γ 光子将部分能量传递给电子，同时改变传播方向。散射后的光子能量降低，但并不一定立即消失。因此，在实际 γ 射线屏蔽结构中，除了考虑初级 γ 光子的衰减，还需要考虑散射光子的贡献。这也是工程屏蔽设计不能只依据材料密度简单判断的原因。复杂设备中还涉及散射、几何结构、屏蔽层厚度、源与探测器距离以及屏蔽件之间的接缝和孔道等因素。例如，对于 Cs-137 的 662 keV γ 射线，康普顿散射具有重要作用。因此，不能简单套用低能 X 射线的屏蔽厚度经验。

(6) 高能 γ 射线还会产生电子对效应

当 γ 光子能量达到或超过 1.022 MeV 时，在原子核附近可能发生电子对产生：1.022 MeV 来自电子和正电子静止质量能量之和。对于 Co-60 的 1.173 MeV 和 1.333 MeV γ 射线而言，电子对效应已经成为可以考虑的相互作用机制之一。随着 γ 光子能量继续升高，电子对产生的重要性进一步增加。电子和正电子随后还会通过电离、激发以及其他辐射过程继续损失能量。因此，高能 γ 射线在密度材料中的能量衰减实际上是一个多级相互作用过程，而不是简单的单次吸收。

(7) γ 射线屏蔽通常遵循指数衰减规律

对于较理想的窄束条件， γ 射线穿过均匀材料后的强度可以近似表示为： $I = I_0 e^{-\mu x}$ ，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。线性衰减系数与材料密度密切相关，可以表示为： $\mu = \mu_m \cdot \rho$ ，其中， μ_m 为质量衰减系数， ρ 为材料密度。由此可以看出，材料密度越高，在其他条件相同的情况下，通常可以获得更大的线性衰减系数，从而通过较小的几何厚度实现较强的辐射衰减。不过，上述公式主要适用于理想化的窄束条件。实际医疗、核工业和工业探伤设备中通常存在散射辐射，因此工程设计往往需要进一步采用宽束修正、积累因子或基于蒙特卡洛方法进行模拟。

(8) HVL 和 TVL 可以更加直观地描述钨合金的 γ 射线屏蔽能力

工程上常用半值层 HVL (Half Value Layer) 和十分之一值层 TVL (Tenth Value Layer) 描述材料对辐射强度的衰减能力。HVL 表示使辐射强度降低到原来的 50% 所需要的材料厚度： $I =$

$$I_0 e^{-\mu \cdot \text{HVL}} = \frac{1}{2} I_0 \Rightarrow \text{HVL} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

TVL 表示使辐射强度降低到原来的 10% 所需要的材料厚度： $I = I_0 e^{-\mu \cdot \text{TVL}} = \frac{1}{10} I_0 \Rightarrow \text{TVL} =$

$$\frac{\ln 10}{\mu}$$

在理想窄束条件下，二者大致存在： $\text{TVL} \approx 3.32 \times \text{HVL}$ (因为 $\frac{\ln 10}{\ln 2} \approx 3.32$)

HVL 和 TVL 并不是钨合金固定不变的材料常数。对于同一种钨合金，随着 γ 射线能量变化，其质量衰减系数和线性衰减系数都会发生变化，因此 HVL 和 TVL 也会发生变化。因此，专业钨合金屏蔽件设计不能简单写成某种钨合金固定对应多少毫米 HVL，而必须明确射线能量

或放射源类型。

（9）为什么钨合金特别适合制作精密 γ 射线屏蔽件？

与铅相比，钨合金的突出优势不仅在于辐射屏蔽能力，还在于其机械性能和尺寸稳定性。铅的密度约为 11.34 g/cm^3 ，钨重合金则通常达到约 $17 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$ 。因此，在相同体积下，钨合金能够提供更高的面密度。同时，钨重合金具有明显高于铅的硬度和机械强度，更适合制造准直孔、屏蔽环、屏蔽套、屏蔽座以及复杂三维结构。对于医疗设备和工业探伤设备而言，屏蔽件往往并不是一块简单的平板，而可能需要同时承担定位、装配、旋转、耐磨和机械支撑功能。因此，钨合金在小型化、精密化屏蔽结构中具有明显工程价值。

（10）钨合金并不是对所有 γ 射线都具有固定的屏蔽倍率

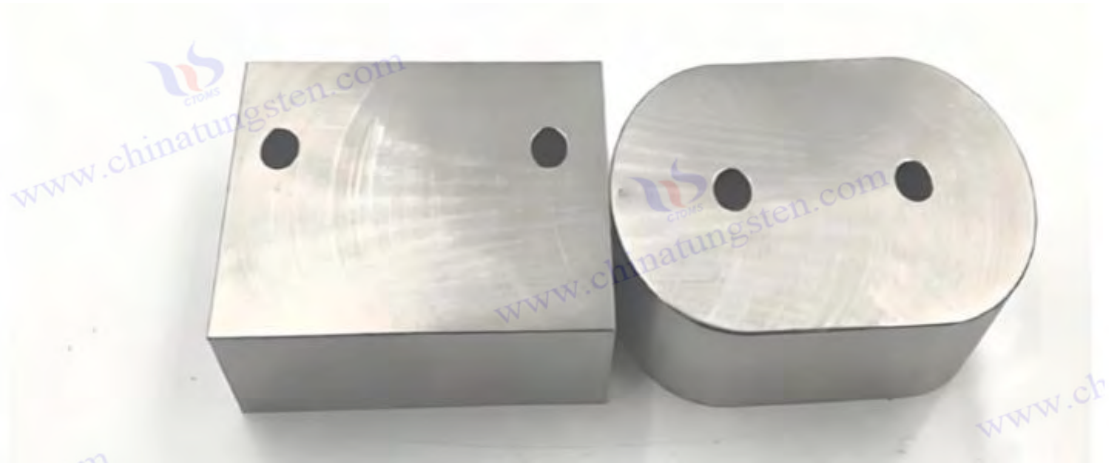
这是实际采购和工程设计中非常重要的一点。不能简单地说钨合金的屏蔽能力是铅的多少倍，也不能认为 95W 材料只要厚度达到某一个固定数值，就能够屏蔽所有 γ 射线。例如 Cs-137、Co-60、Ir-192 和 Se-75 具有不同的能谱特征；即使同一种放射源，其屏蔽效果也会受到屏蔽距离、源强、几何结构、散射条件和目标剂量率等因素影响。专业设计通常至少需要确定以下参数：射线类型、放射源或设备型号、主要光子能量、源活度或剂量率、源到屏蔽件距离、允许泄漏剂量率、目标衰减倍数、屏蔽件最大外形尺寸以及是否存在准直孔、通道和接缝。对于高要求医疗和核工业应用，还需要进一步开展辐射输运计算和实验验证。

（11）钨合金屏蔽件的实际性能还取决于制造质量

理论密度并不等于实际屏蔽性能。钨合金屏蔽件必须具有较高的烧结致密度、均匀的内部组织以及良好的批次一致性。如果内部存在孔隙、裂纹、密度梯度或局部组织异常，实际屏蔽效果可能低于理论计算结果。对于复杂准直器而言，孔道几何误差同样会影响射线束流分布。因此，专业制造商通常需要关注密度检测、化学成分、尺寸公差、内部缺陷、硬度、金相组织以及必要的无损检测。对于医疗、核工业和高端工业探伤产品，还可能需要根据客户标准提供材料证明、尺寸检测报告和辐射屏蔽性能验证资料。以钨合金屏蔽件的专业制造而言，CTIA GROUP 长期从事钨及钨合金材料和精密钨制品的设计、制造与定制，可根据客户提供的射线能量、屏蔽目标、结构图纸和尺寸限制，对钨含量、材料密度、屏蔽厚度及加工方案进行综合设计，而不是单纯按照材料牌号进行供货。

（12）钨合金为什么能够有效屏蔽 γ 射线？

归根结底，钨合金的 γ 射线屏蔽能力来自几个因素的共同作用：较高的密度能够提高单位厚度内的物质数量和光子相互作用概率；钨的高原子序数使其在光电效应等过程中具有较强的相互作用能力；在数百 keV 至 MeV 能区，康普顿散射是重要的能量转移机制；在更高能量下，电子对效应的重要性逐渐增加；而钨合金优良的机械强度和尺寸稳定性，又使其能够被加工成小型、精密、复杂的工程屏蔽结构。因此，钨合金并不是单纯依靠高密度实现 γ 射线屏蔽，而是通过材料成分、密度、厚度和辐射相互作用机制共同实现能量衰减。对于实际应用，真正具有参考价值的不是简单比较哪一种材料更强，而是根据具体 γ 射线能量、HVL/TVL、目标衰减率、几何结构和允许空间进行定量设计。



Q10: 钨合金屏蔽辐射主要依靠光电效应、康普顿散射还是电子对效应?

钨合金屏蔽 X 射线和 γ 射线并不是单纯依靠某一种物理机制,而是由光电效应(Photoelectric Effect)、康普顿散射(Compton Scattering)和电子对效应(Pair Production)等多种光子与物质相互作用共同完成。三种机制所占的主导地位主要取决于入射光子的能量、材料原子序数以及材料密度。对于钨合金而言,由于钨的原子序数较高($Z=74$),密度通常达到约 $17\sim 18.8\text{ g/cm}^3$,因此在较宽的 X 射线和 γ 射线能区都具有良好的衰减能力。但不能简单地说钨合金主要依靠光电效应,或者主要依靠康普顿散射;专业判断必须结合具体射线能量。

(1) 低能 X 射线: 光电效应占据重要地位

在较低光子能量范围内,光电效应通常是高原子序数材料最重要的相互作用机制之一。当入射 X 射线或低能 γ 光子与钨原子的内层电子发生相互作用时,光子可以将几乎全部能量转移给电子,使其逸出形成光电子。随后原子内部电子层重新排列,并伴随特征 X 射线或俄歇电子释放。光电效应的概率对原子序数非常敏感,通常可近似理解为随原子序数增加而快速提高,并且随着光子能量升高而显著下降。因此,钨及钨合金在较低能量 X 射线屏蔽方面具有明显优势。例如医疗诊断 X 射线设备常涉及几十 keV 至数百 keV 范围的光子能谱,在这一范围内,钨合金能够利用高原子序数和高密度实现较强衰减。因此,钨合金经常用于 X 射线准直器、局部屏蔽件、探测器周围屏蔽结构等。

(2) 中等能量 X 射线和 γ 射线: 康普顿散射非常重要

当光子能量进入数百 keV 至 MeV 级范围后,康普顿散射的重要性明显增加。康普顿散射是指入射光子与近似自由电子发生相互作用,将部分能量传递给电子,同时自身改变传播方向并降低能量。散射后的光子仍然存在,因此不会在一次相互作用中完全消失,而是可能继续在屏蔽材料内部发生下一次相互作用。因此,对于 Cs-137 的 662 keV γ 射线等典型中能 γ 射线,康普顿散射是屏蔽分析中必须重点考虑的机制。这也是为什么不能仅使用低能 X 射线的经验数据设计 γ 射线屏蔽。例如,医疗 X 射线设备、Cs-137 工业放射源和 Co-60 工业放射源虽然都属于光子辐射,但其能量差异很大,对应的衰减系数、HVL、TVL 和所需屏蔽厚度也会明显不同。

(3) 高能 γ 射线: 电子对效应的重要性逐渐增加

版权与法律声明

当 γ 光子能量达到 1.022 MeV 以上时，在原子核附近可以发生电子对产 1.022 MeV 对应电子和正电子静止质量能量之和。因此，对于 Co-60 的 1.173 MeV 和 1.333 MeV γ 射线，电子对效应已经成为可以考虑的重要相互作用机制之一。随着光子能量进一步升高，电子对效应的重要程度还会继续增加。产生的电子和正电子不会简单地停留在原地，而会继续通过电离、激发以及辐射过程损失能量；正电子最终还会与电子发生湮没并产生新的光子。因此，高能 γ 射线在钨合金中的衰减实际上是一个连续的级联过程。

（4）三种机制并不是彼此独立的屏蔽方式

在真实的钨合金屏蔽件中，这三种机制往往同时存在，只是相对贡献不同。可以用下表理解其基本关系：

光子能量区域	主要相互作用	钨合金的主要作用	典型应用
低能 X 射线	光电效应	强吸收、快速衰减	X 射线设备、准直器
数十~数百 keV	光电效应+康普顿散射	吸收与散射共同作用	医疗 X 射线、核医学
数百 keV~MeV	康普顿散射占重要地位	降低光子能量并改变传播方向	Cs-137 等 γ 射线屏蔽
>1.022 MeV	康普顿散射+电子对效应	光子能量转移至电子/正电子	Co-60、高能 γ 射线
更高能量	电子对效应等逐渐重要	能量级联衰减	高能放疗、科研装置

上表是工程上的概念性划分，而不是严格的能量分界线。实际占主导地位的机制需要根据材料的质量衰减系数、能量转移系数和具体光子能谱计算确定。

（5）为什么钨合金在三种机制下都具有较好的工程价值？

钨合金最大的特点是高密度与高原子序数相结合。钨的原子序数为 74，纯钨理论密度约 19.25 g/cm³，常见钨重合金密度约 17~18.8 g/cm³。较高的密度意味着单位厚度内具有更多的原子和电子，从而增加光子发生相互作用的机会。因此，屏蔽能力可以从线性衰减系数角度理解： $\mu = \mu_m \cdot \rho$ ，其中， μ 为线性衰减系数， μ_m 为质量衰减系数（取决于光子能量和材料组成）， ρ 为材料密度。这意味着，即使两种材料的质量衰减系数接近，密度更高的材料通常也具有更大的线性衰减系数，可以用更小的几何厚度获得相同程度的辐射衰减。这正是钨合金适合制作小型化、薄壁化和精密化屏蔽件的重要原因。

（6）为什么不能说钨合金主要靠光电效应屏蔽 γ 射线？

这是实际应用中非常容易产生的误解。对于低能 X 射线，可以强调光电效应；但是对于 662 keV 的 Cs-137、1.173 MeV 和 1.333 MeV 的 Co-60 等 γ 射线，康普顿散射以及电子对效应的贡献必须纳入分析。因此，如果有人直接给出钨合金固定的屏蔽倍率，例如宣称钨合金在所有 γ 射线能量下都是铅的固定倍数，这种说法缺乏严格的工程依据。专业屏蔽设计至少应明确射线类型、光子能量或能谱、源活度或剂量率、源与屏蔽件距离、目标剂量率、允许泄漏量以及屏蔽结构。对于复杂准直器和局部屏蔽结构，还需要考虑散射辐射和几何因素。

（7）HVL 和 TVL 实际上综合反映了这些相互作用的结果

工程设计中通常不会直接根据光电效应、康普顿散射或电子对效应单独确定厚度，而是最终通过线性衰减系数、HVL、TVL 等参数评价材料的综合屏蔽能力。理想窄束条件下：

半值层： $HVL = \ln 2 / \mu \approx 0.693 / \mu$ （其中 μ 为线性衰减系数），十分之一值层： $TVL = \ln 10 / \mu \approx 2.3026 / \mu$ 。因此，HVL 和 TVL 实际上已经综合反映了特定材料在特定光子能量下各种相互

作用机制产生的总体衰减效果。对于实际设备，宽束条件下还需要考虑散射辐射和积累因子，因此不能直接将窄束公式作为所有工程场景的最终设计依据。

(8) 不同应用对应的主导机制并不相同

对于医疗诊断 X 射线设备，通常需要重点关注较低能量光子，因此光电效应具有重要作用；对于核医学中的 Cs-137、Co-60 等 γ 射线源，康普顿散射通常是核心考虑因素；对于高能放疗设备和高能 γ 射线环境，则需要进一步考虑电子对产生及其后续级联过程。因此，钨合金准直器、放射源容器、医疗注射器屏蔽套、工业 γ 探伤屏蔽件以及高能放疗屏蔽结构，虽然都使用钨合金，但不能采用完全相同的设计方法。对于 CTIA GROUP 等专业钨合金屏蔽件制造商而言，真正的定制设计通常不是先确定一个材料厚度，而是先确定射线参数和屏蔽目标，再反向计算材料牌号、钨含量、密度、厚度及结构尺寸。

(9) 到底是哪一种机制最重要？

低能 X 射线屏蔽主要关注光电效应；中等能量 X 射线和 γ 射线屏蔽重点考虑康普顿散射；当 γ 射线能量达到 1.022 MeV 以上并进一步升高时，电子对效应的重要性逐渐增加。但在实际钨合金屏蔽件中，三种机制通常同时存在，其相对贡献随光子能量和材料组成不断变化。因此，钨合金真正的屏蔽优势不是依赖单一的光电效应、康普顿散射或电子对效应，而是依靠钨的高原子序数、高密度以及良好的工程结构性能，使入射光子在材料内部发生足够多的相互作用，最终降低穿透辐射强度。中钨智造认为，对于专业钨合金屏蔽件设计，最可靠的评价方法仍然是针对具体射线能量或能谱获得质量衰减系数、线性衰减系数、HVL/TVL，并结合目标衰减率和实际几何条件进行屏蔽厚度计算，而不是简单依据钨含量或材料密度判断屏蔽效果。



版权与法律责任声明

Q11: 不同光子能量下, 钨合金的主要衰减机制有什么变化?

钨合金对 X 射线和 γ 射线的屏蔽并不是由单一物理机制决定, 而是光子与材料原子发生相互作用的综合结果。对于钨合金屏蔽件而言, 主要涉及光电效应 (Photoelectric Effect)、康普顿散射 (Compton Scattering) 和电子对产生 (Pair Production) 三种机制。三者所占主导地位与入射光子能量、材料原子序数 Z 以及材料密度密切相关。由于钨的原子序数为 74, 具有较高的电子密度和较强的高能光子相互作用能力, 因此钨合金特别适用于需要高面密度、有限空间内实现较强衰减的 X 射线和 γ 射线屏蔽结构。但在工程设计中, 不能简单认为钨合金在所有能量范围内都依靠同一种机制进行屏蔽, 而应根据具体能谱计算线性衰减系数、质量衰减系数、HVL 和 TVL。

(1) 低能 X 射线区域: 光电效应占主导地位

在较低光子能量范围内, 光电效应通常是钨及钨合金最重要的光子衰减机制。光子被材料中的束缚电子完全吸收, 并将能量传递给电子, 使电子逸出, 同时产生特征 X 射线或俄歇电子。光电效应具有非常明显的原子序数依赖性, 其截面通常可近似表示为: $\tau \propto \frac{Z^n}{E^3}$

其中, Z 为原子序数, E 为光子能量, n 通常约为 4~5, 具体取决于能量区域和元素。这意味着在低能区域, 材料原子序数对屏蔽能力的影响非常显著。钨的 $Z=74$, 因此对低能 X 射线具有较强的吸收能力。例如, 在医疗诊断 X 射线领域, 管电压可能覆盖约 40~150 kVp, 对应的实际光子能谱通常低于峰值管电压, 并受到滤过材料、靶材和设备结构的影响。因此, 对于诊断 X 射线屏蔽, 不能仅根据管电压直接采用单一衰减系数, 而应根据实际 X 射线能谱进行设计。这一能区也是钨合金相对于低原子序数材料具有明显优势的区域。特别是在医疗准直器、X 射线探测器周边屏蔽、精密局部屏蔽件等应用中, 高密度钨合金能够在较小的几何尺寸内获得较高的辐射衰减。

(2) 中等能量区域: 康普顿散射逐渐成为重要机制

随着光子能量提高, 光电效应的概率迅速下降, 而康普顿散射的重要性逐渐增加。康普顿散射是光子与近似自由电子发生非弹性碰撞的过程。入射光子将部分能量传递给电子, 同时自身改变传播方向并降低能量, 形成散射光子。这一机制具有较弱的原子序数依赖性, 其主要与单位质量中的电子数量有关。因此, 在中等能量范围内, 单纯比较材料的原子序数已经不足以准确判断屏蔽效果, 材料密度、电子密度以及实际厚度变得更加重要。对于钨合金屏蔽件而言, 这也是高密度优势开始充分体现的区域。假设两种材料具有相近的质量衰减能力, 则密度更高的材料能够获得更大的线性衰减系数: $\mu = (\mu/\rho) \times \rho$, 其中, μ 为线性衰减系数, 单位通常为 cm^{-1} ; μ/ρ 为质量衰减系数, 单位通常为 cm^2/g ; ρ 为材料密度, 单位为 g/cm^3 。因此, 钨合金通常具有较高的线性衰减能力。常见 90W、93W、95W、97W 等钨重合金密度大致处于约 17~19 g/cm^3 范围, 相比铝、钢等普通结构材料具有明显更高的质量密度, 这使其特别适合空间受限的屏蔽设计。但在康普顿散射占比较高的能区, 不能简单地以钨含量越高就一定获得同比例的屏蔽性能提升。实际性能还取决于合金密度、组成、加工状态、厚度以及光子能量。

(3) 高能 γ 射线区域: 电子对产生的重要性显著增加

当光子能量超过电子对产生的理论阈值 1.022 MeV 后, 电子对产生开始成为可能。

版权与法律声明

在电子对产生过程中，高能光子在原子核附近转化为一个电子和一个正电子，其中 1.022 MeV 用于形成电子和正电子的静止质量，超过这一能量的部分则转化为粒子的动能。电子对产生的概率随着光子能量增加而提高，同时对高原子序数材料更加有利。因此，在数 MeV 乃至更高能量的 γ 射线和高能光子环境中，钨这种高 Z 材料具有较好的屏蔽潜力。对于医疗放疗直线加速器、工业高能辐射装置以及部分科研设备而言，光子能量可能达到 MeV 级甚至更高，因此设计钨合金准直器、MLC 叶片或高能 γ 射线屏蔽结构时，需要采用相应能区的衰减数据，而不能使用低能 X 射线的经验数据直接外推。

(4) 三种机制并不是严格按照某一个能量点突然切换

实际情况比简单的低能、中能、高能划分更加复杂。光电效应、康普顿散射和电子对产生在很宽的能量范围内可能同时存在，只是在不同能量区域具有不同的相对贡献。可以用下表概括其基本趋势：

光子能量区域	主要相互作用机制	钨材料的主要优势	典型应用
低能 X 射线	光电效应占主导	高 Z、高电子结合能力	医疗 X 射线、局部屏蔽
中等能量	康普顿散射重要	高密度、高面密度	医疗设备、工业检测
MeV 级高能 γ /X 射线	康普顿散射与电子对产生共同作用	高 Z、高密度	放疗、工业 γ 射线、科研设备
更高能量	电子对产生作用增强，并伴随其他高能过程	高 Z、高密度	高能加速器、特殊核工业环境

上述分区只是工程理解上的近似分类，实际主导机制的边界并不存在一个适用于所有材料和所有能谱的固定能量值。对于具体钨合金屏蔽件，应使用 NIST 等权威数据库提供的光子相互作用数据，结合实际材料组成和密度进行计算。

(5) 钨合金屏蔽性能实际上由 μ 、HVL、TVL 和材料厚度共同决定

工程设计真正关注的并不是某一种相互作用机制本身，而是最终能够使多少比例的光子穿透屏蔽材料。对于窄束、单能光子条件，理想化情况下可以采用指数衰减关系： $I = I_0 \cdot e^{-(\mu x)}$ 其中 I_0 为入射强度， I 为穿过厚度 x 后的强度， μ 为线性衰减系数。由此可得到半值层： $HVL = \ln 2 / \mu \approx 0.693 / \mu$ ，以及十分之一值层： $TVL = \ln 10 / \mu \approx 2.3026 / \mu$

因此，在材料密度和组成确定之后，光子能量变化会直接影响 μ ，进而影响 HVL 和 TVL。对于实际医疗 X 射线和 γ 射线屏蔽，还必须考虑散射辐射、宽束效应、建筑结构、源距离、照射方向以及连续能谱等因素，因此不能仅使用理想化窄束公式作为最终工程设计依据。

(6) 为什么不能简单用钨含量判断屏蔽能力

对于 90W、93W、95W、97W 等钨重合金，随着钨含量提高，通常密度也会提高，因此在其条件相近时，线性衰减能力通常会增强。但是，钨含量并不是唯一决定因素。例如，两个钨合金产品即使都标称 95W，如果实际密度、孔隙率、合金体系、内部均匀性和加工质量不同，其实际屏蔽性能也可能存在差异。因此，对于专业屏蔽件，材料验收不能只检测名义钨含量，还应关注实际密度、成分、内部质量和尺寸。对于医疗、核工业、工业探伤和高端科研设备而言，建议供应商能够提供材料牌号、钨含量、实测密度、化学成分以及必要的质量检测报告。对于高要求产品，还可以根据具体射线源和能量进行屏蔽性能验证。

(7) 不同应用场景需要采用不同的能谱进行设计

这是钨合金屏蔽件设计中非常关键的一点。例如，普通诊断 X 射线设备与 Cs-137 γ 射线源的

设计方法不能混用。Cs-137 的主要 γ 射线能量约为 662 keV; Co-60 则主要产生约 1.17 MeV 和 1.33 MeV 的 γ 射线; Ir-192 则具有多个特征 γ 射线能量, 实际屏蔽计算需要考虑其完整能谱。医疗直线加速器则可能产生从 MeV 级到更高能量范围的 X 射线。因此, 客户向专业制造商采购钨合金屏蔽件时, 最好提供射线类型、最大及主要光子能量、源强或剂量率、目标衰减倍数、HVL/TVL 要求、源到屏蔽件距离以及允许的最大尺寸。全球专业钨合金屏蔽件制造商 CTIA GROUP 在进行定制屏蔽件设计时, 同样需要结合客户的射线类型、能量范围、结构尺寸和机械安装条件确定材料牌号、密度等级、屏蔽厚度及加工方案, 而不是仅根据客户提出的一个固定厚度直接生产。

钨合金对不同能量光子的屏蔽机制可以概括为: 低能区域以光电吸收为主, 中等能量区域康普顿散射作用增强, 进入 MeV 级高能区域后电子对产生的重要性逐步提高。与此同时, 三种机制在实际能区存在明显重叠, 并受到材料组成和能量的共同影响。因此, 专业的钨合金屏蔽设计不能简单回答某一种材料能屏蔽多少, 而应该建立在光子能谱、材料密度、线性衰减系数、HVL/TVL、屏蔽厚度及目标剂量率等参数基础上。对于高端医疗、工业探伤、核医学、放射源防护和加速器设备, 采用基于具体能谱的工程计算和实测验证, 才是确定钨合金屏蔽性能最可靠的方法。



Q12: 钨合金可以屏蔽哪些类型的电离辐射?

钨合金最主要用于屏蔽具有较强穿透能力的光子辐射,尤其是 X 射线和 γ 射线。由于钨具有很高的原子序数和密度,钨合金能够在较小体积内有效衰减这类辐射,因此广泛应用于医疗影像、核医学、工业探伤、科研设备和核工业等领域。

1. X 射线

钨合金对 X 射线具有良好的屏蔽能力,是其最常见的应用之一。在 X 射线穿过材料时,钨的高原子序数和高密度有助于提高光电吸收和散射作用,从而降低透过材料的射线强度。具体需要多厚的钨合金,则取决于 X 射线的能量、设备工作参数以及目标防护水平。常见应用包括 CT 设备、X 射线检测设备、工业探伤设备以及各类医疗和科研仪器中的局部屏蔽部件。

2. γ 射线

钨合金同样适合用于 γ 射线屏蔽,尤其适用于空间有限、需要高密度屏蔽材料的场合。 γ 射线的能量范围可能较高,因此屏蔽设计需要根据具体放射性核素及其射线能量确定材料厚度。对于高能 γ 射线,即使采用钨合金,也通常需要足够的屏蔽厚度才能达到目标剂量率或透射率要求。钨合金常用于放射源容器、核医学设备、 γ 射线探测装置和局部高密度屏蔽结构。

3. β 射线

钨合金可以对 β 射线产生一定的阻挡作用,但通常不是 β 射线屏蔽的首选材料。这是因为 β 射线本质上是高速电子或正电子。当高能电子进入高原子序数材料,例如钨时,可能产生较明显的轫致辐射,从而形成新的 X 射线成分。因此,在 β 辐射防护中,通常优先采用低原子序数材料,例如塑料、亚克力或其他适合的轻元素材料来降低轫致辐射,然后再根据需要在外层增加高密度材料吸收产生的次级光子辐射。具体结构需要根据 β 粒子能量进行设计。

4. α 射线

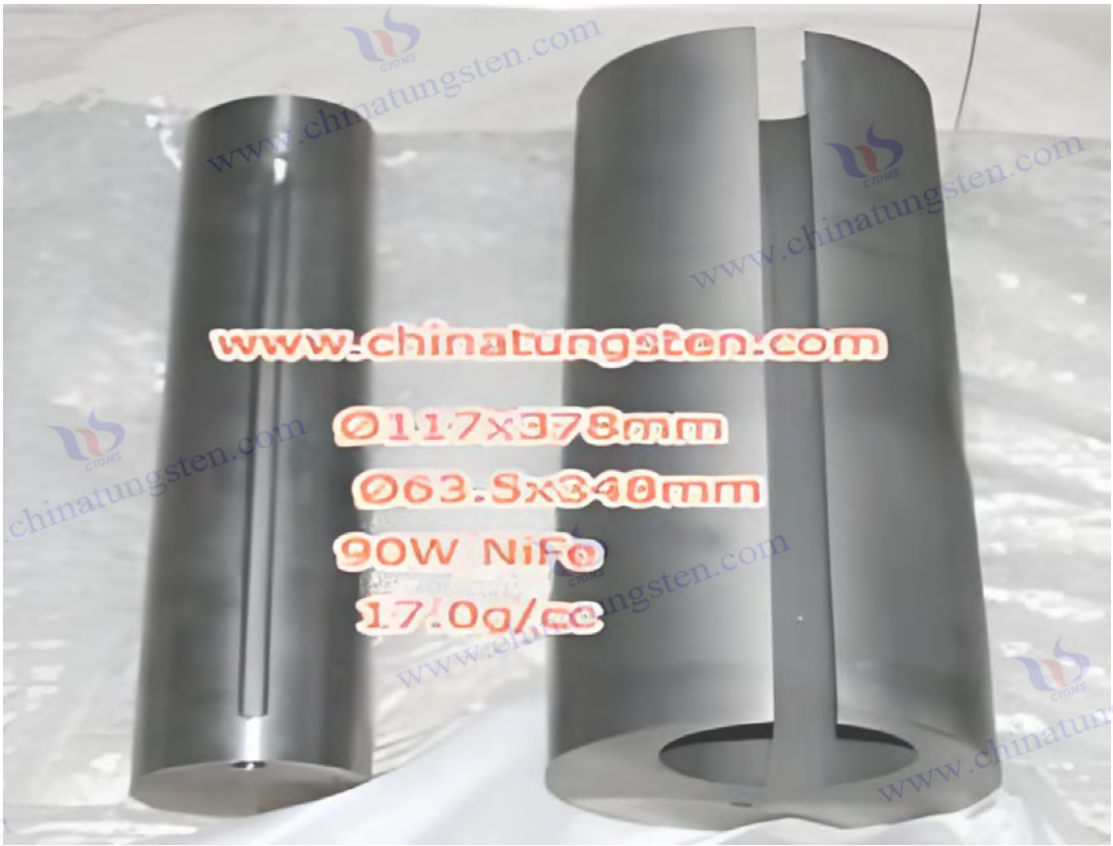
钨合金当然能够阻挡 α 粒子,但从实际应用角度来看,通常没有必要专门使用钨合金进行 α 射线屏蔽。 α 粒子的穿透能力较弱,空气、纸张、普通塑料或较薄的材料通常就能够提供有效阻挡。因此,使用高密度、高成本的钨合金进行 α 射线屏蔽通常不经济。不过,如果钨合金屏蔽件本身已经用于其他辐射类型,它自然也能够阻挡 α 粒子。

5. 中子辐射

单纯依靠钨合金并不是中子屏蔽的理想方案。中子不带电,其与物质的相互作用机制与 X 射线、 γ 射线不同。对于中子辐射,通常需要采用富氢材料进行慢化,例如聚乙烯等材料,并根据中子能量和设计要求配合含硼材料等吸收剂。钨合金在中子屏蔽系统中可以作为复合屏蔽结构的一部分,例如用于屏蔽伴随产生的 γ 射线,但一般不能替代专门的中子慢化和吸收材料。

辐射类型	钨合金的适用性	主要特点
X 射线	非常适合	高密度、高原子序数，屏蔽效率高
γ 射线	非常适合	适合空间受限的高密度屏蔽
β 射线	可以阻挡，但通常不是首选	需注意韧致辐射
α 射线	可以轻易阻挡，但没有必要专门使用	普通材料通常即可满足要求
中子	不适合作为主要屏蔽材料	通常需要富氢和中子吸收材料

钨合金最擅长屏蔽的是 X 射线和 γ 射线，这也是钨合金屏蔽件最主要的应用方向。对于 α 射线和 β 射线，钨合金虽然具有阻挡能力，但从辐射防护设计和成本角度来看，通常存在更合适的材料；对于中子辐射，则需要采用专门的慢化和吸收材料。因此，在实际设计钨合金屏蔽件时，首先应确定辐射类型和能量，再选择合适的材料组合和屏蔽厚度。对于复杂辐射场，往往需要采用多层复合屏蔽结构，而不是单独依靠一种材料解决所有辐射防护问题。



Q13: 钨合金可以屏蔽 α 射线吗?

钨合金可以阻挡 α 射线, 而且从物理屏蔽能力来看, 其效果非常强。不过, 在实际辐射防护中, 通常没有必要专门使用钨合金来屏蔽 α 射线, 因为 α 粒子的穿透能力本身较弱。

α 射线为什么容易被屏蔽?

α 射线本质上是高速运动的氦原子核, 带有较大的电荷和质量。在穿过物质时, 它会与周围原子发生频繁相互作用, 很快损失能量, 因此穿透距离较短。一般来说, α 粒子在空气中的射程有限, 而一张纸、人体皮肤表层或较薄的塑料材料通常就能够阻挡大多数外部 α 射线。相比之下, 钨合金具有非常高的密度, 因此 α 粒子进入钨合金后会在极短距离内被阻挡。

为什么实际中很少用钨合金专门屏蔽 α 射线?

主要原因是性能过剩。钨合金属于高密度、高价值材料, 主要优势在于屏蔽 X 射线和 γ 射线等穿透能力较强的光子辐射。对于穿透能力较弱的 α 射线, 使用普通材料通常已经足够。从成本和工程设计角度来看, 专门为了阻挡 α 射线而使用钨合金并不经济。例如, 普通的塑料、橡胶、玻璃或金属薄板, 在适当厚度下都可以作为 α 射线的有效屏障。

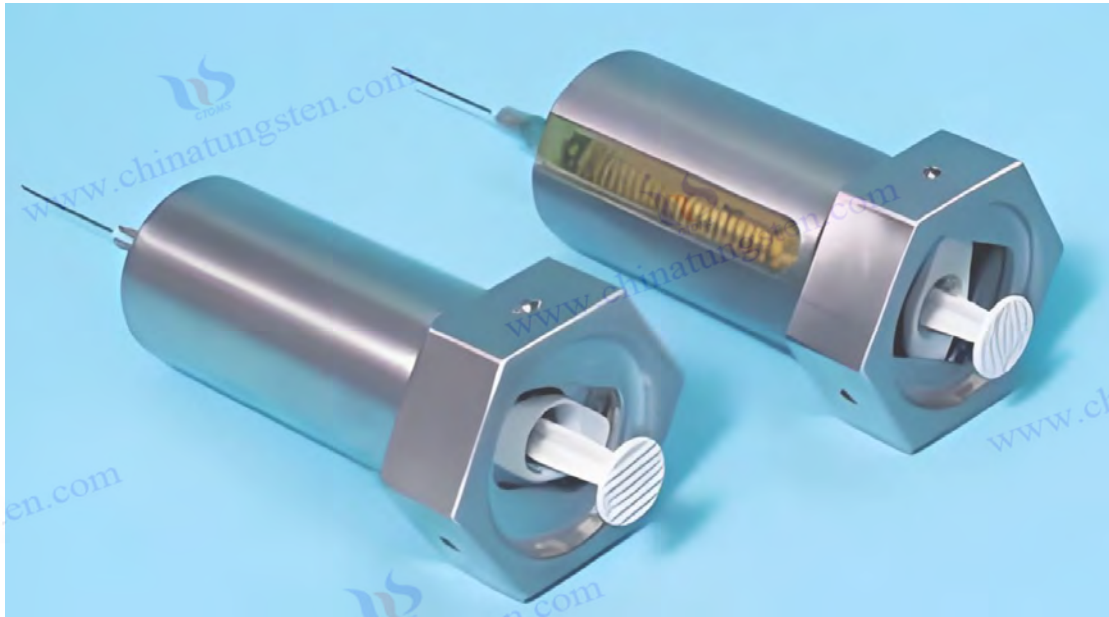
α 射线防护的重点不仅是材料屏蔽

虽然 α 射线对外照射风险相对有限, 但如果 α 放射性物质通过吸入、摄入或伤口进入人体, 其危害可能明显增加。因此, α 辐射防护的重点通常不仅是增加屏蔽材料厚度, 还包括防止放射性物质扩散和进入人体, 例如采用密封容器、局部通风、污染控制和适当的个人防护措施。

钨合金在 α 辐射环境中有什么作用?

如果一个设备同时存在 α 射线以及 X 射线或 γ 射线, 钨合金屏蔽件可以作为整体屏蔽结构的一部分。在这种情况下, 它能够同时阻挡 α 粒子, 但其主要价值通常仍然体现在对高穿透性光子辐射的屏蔽上。

钨合金可以有效屏蔽 α 射线, 而且所需材料厚度通常很小。但由于 α 射线本身容易被普通材料阻挡, 钨合金通常不是专门用于 α 射线防护的经济选择。简单来说: 钨合金能屏蔽 α 射线, 但属于性能远超实际需求。对于单纯的 α 射线防护, 选择更轻、更便宜且适合污染控制要求的材料通常更加合理; 钨合金的真正优势主要体现在 X 射线和 γ 射线等高穿透性辐射的紧凑型屏蔽应用中。



Q14: 钨合金可以屏蔽 β 射线吗?

可以,但钨合金通常不是屏蔽 β 射线的首选材料。钨合金能够有效阻挡高速 β 粒子,但由于其属于高原子序数、高密度材料, β 粒子进入钨合金后可能产生较强的韧致辐射,因此实际辐射防护设计需要谨慎选择材料组合。

1. 什么是 β 射线?

β 射线主要由高速电子或正电子组成,其穿透能力通常强于 α 射线,但弱于高能 X 射线和 γ 射线。 β 粒子在穿过材料时会不断与原子发生相互作用并损失能量,因此可以通过一定厚度的材料进行阻挡。

2. 钨合金能够阻挡 β 射线

钨合金密度高,对带电粒子具有较强的阻挡能力。 β 粒子进入钨合金后会迅速损失能量,因此从单纯阻挡 β 粒子的角度来看,钨合金确实具有良好的屏蔽能力。不过,辐射防护不能只看 β 粒子是否被停止,还需要考虑停止过程中产生的次级辐射。

3. 为什么钨合金不是 β 射线屏蔽的首选?

当高速电子进入钨、铅等高原子序数材料时,会受到原子核强烈的电场作用而发生减速,从而产生韧致辐射。韧致辐射属于连续能谱的 X 射线。如果直接使用钨合金作为 β 射线的第一层屏蔽材料,虽然 β 粒子被阻挡,但可能同时产生需要进一步防护的次级 X 射线。因此,对于较高能量的 β 射线,单纯采用高 Z 材料直接屏蔽通常不是最理想的设计方案。

4. β 射线通常采用什么材料屏蔽?

实际应用中,通常优先采用低原子序数材料作为第一层屏蔽,例如塑料、有机玻璃或其他富含轻元素的材料。这些材料可以逐步降低 β 粒子的能量,并减少韧致辐射的产生。如果 β 粒子能量较高,或者需要进一步屏蔽产生的 X 射线,则可以在低 Z 材料外侧增加钨、铅等高 Z 材料,用于吸收剩余的光子辐射。因此,一种常见的设计思路是:低 Z 材料减速和吸

版权与免责声明

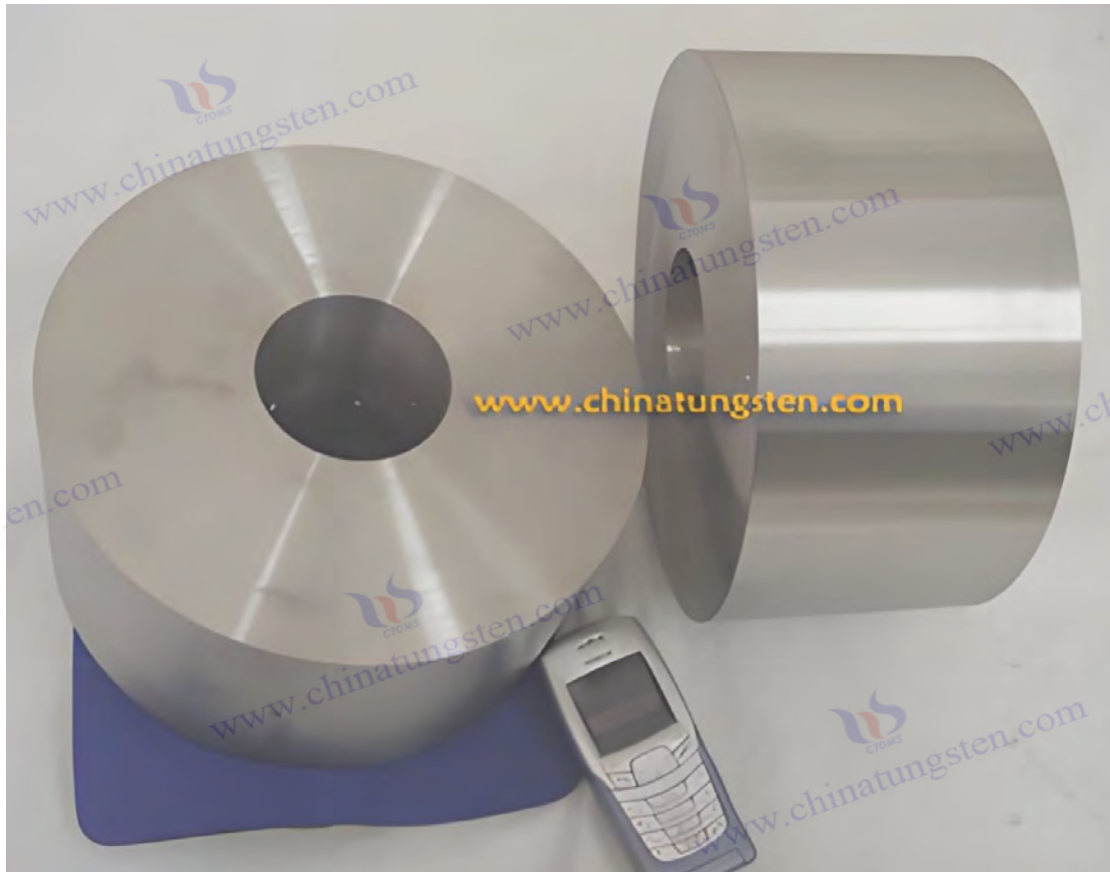
收 β 粒子 $\rightarrow$ 高 Z 材料吸收可能产生的韧致辐射和其他光子辐射。

5. 钨合金什么时候适合用于 β 辐射环境？

如果设备空间有限，同时存在 β 射线和 X 射线或 γ 射线，钨合金可以作为复合屏蔽结构的一部分。例如，内部使用适当的低 Z 材料吸收 β 粒子，外部使用钨合金进行 X 射线或 γ 射线屏蔽。这种组合可以充分发挥不同材料的优势。此外，如果 β 射线能量较低，且系统本身已经采用钨合金作为主要结构或屏蔽材料，也可以根据实际辐射评估结果确定是否需要额外的低 Z 层。

钨合金可以屏蔽 β 射线，但通常不是单独屏蔽 β 射线的最佳选择。其主要问题不是无法阻挡 β 粒子，而是高原子序数材料可能在减速高速电子时产生韧致辐射。因此，对于单纯的 β 射线防护，通常优先使用塑料、有机玻璃等低原子序数材料；对于复杂辐射环境，则可以采用低 Z 材料与钨合金相结合的多层复合屏蔽结构。简单来说，钨合金能够阻挡 β 射线，但在专业辐射防护设计中，更重要的是控制整个辐射场，包括 β 粒子本身及其可能产生的次级辐射。





Q15: 钨合金可以屏蔽 X 射线和 γ 射线之外的高能光子吗?

可以，但需要先理解一个基本概念：X 射线和 γ 射线本身就是电磁辐射中的高能光子。两者主要按照产生方式区分，而不是按照屏蔽材料需要面对的光子种类进行绝对划分。因此，从辐射屏蔽的角度来看，钨合金能够衰减各种具有相应能量范围的高能电磁光子。

1. 高能光子的屏蔽能力主要取决于能量

钨合金对光子的屏蔽效果并不是简单按照 X 射线、 γ 射线等名称来决定，而主要取决于光子的能量。光子穿过钨合金时，可能发生光电效应、康普顿散射和电子对产生等相互作用。不同能量范围内，占主导地位的相互作用机制不同，因此材料的衰减能力也会发生变化。一般来说，钨具有较高的原子序数和密度，因此在需要有限空间内实现较高光子衰减能力的场合具有明显优势。

2. 钨合金也可以用于其他来源的高能光子

除了常规医疗或工业 X 射线以及放射性核素产生的 γ 射线之外，高能光子还可能来自粒子加速器、同步辐射装置、空间辐射环境以及某些高能物理实验。在这些场景中，钨合金同样可以作为屏蔽材料或局部屏蔽材料使用，特别适合设备空间有限、需要高密度材料的区域。不过，光子能量越高，通常需要越大的屏蔽厚度或更加复杂的复合屏蔽结构。

3. 对极高能光子，不能只依靠一小块钨合金

对于能量非常高的光子，例如来自高能加速器或其他特殊装置的辐射，单纯依靠较薄的钨合

版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

金可能无法满足整体防护要求。高能光子可能产生级联粒子和次级辐射，因此工程设计中通常需结合混凝土、钢、聚乙烯等不同材料，形成多层或大体积的复合屏蔽系统。钨合金在这种系统中的优势，更多体现在局部高密度屏蔽、束流准直、设备内部空间受限区域以及特定方向的辐射防护。

4. 屏蔽不是完全阻止，而是降低到目标水平

对于高能光子，通常不能简单理解为某种材料能够完全屏蔽。

实际设计关注的是将辐射强度或剂量率降低到允许范围。例如，可以根据线性衰减规律进行初步计算： $I = I_0 \cdot e^{(-\mu x)}$ ，其中， I_0 是入射光子强度， I 是经过材料后的透射强度， μ 是与材料和光子能量有关的线性衰减系数， x 是屏蔽厚度。对于实际工程，还需要进一步考虑散射、宽束几何条件、次级辐射和积累因子等因素。

5. 钨合金的优势在于高密度和紧凑设计

与许多常规屏蔽材料相比，钨合金最大的优势之一是能够在较小体积内提供较高的质量厚度。因此，在医疗设备、探测器、航空航天仪器、高能物理设备等空间有限的场合，钨合金可以帮助减少屏蔽结构体积。但对于大面积、超高能或大型辐射设施，钨合金的成本和重量可能限制其大规模使用，这时往往需要选择成本更低、更适合大体积建设的屏蔽材料。

钨合金不仅能够屏蔽常见的 X 射线和 γ 射线，从物理本质上来说，也能够衰减来自其他来源的高能光子。真正决定屏蔽设计的关键因素是光子能量、辐射强度、照射几何条件以及允许的透射或剂量水平。对于中低至较高能量的光子，钨合金非常适合用于空间受限的局部高密度屏蔽；对于极高能光子或复杂辐射场，则通常需要将钨合金与其他材料结合，形成更完整的复合屏蔽系统。



版权与法律声明

Q16: 钨合金能否屏蔽中子?

钨合金可以与中子发生相互作用,也能够对部分中子产生一定程度的衰减,但通常不适合作为中子辐射的主要屏蔽材料。中子屏蔽与 X 射线、 γ 射线屏蔽的原理不同,因此不能因为钨合金密度高,就认为它一定适合屏蔽所有类型的辐射。

1. 为什么钨合金不是理想的中子屏蔽材料?

中子不带电,不会像 α 粒子或 β 粒子那样通过电荷作用快速损失能量。中子的屏蔽通常需要经过两个主要过程:首先降低中子的能量,也就是慢化;然后通过具有较高中子吸收能力的材料将其吸收。对于快中子来说,富含氢元素的材料通常具有良好的慢化效果,因为中子与质量接近自身的氢原子发生碰撞时,可以更有效地损失能量。钨属于高原子序数、高密度金属,但并不具备富氢材料那种高效慢化快中子的特性。因此,单独使用钨合金通常不是经济或高效的中子屏蔽方案。

2. 中子屏蔽通常使用哪些材料?

针对不同能量的中子,工程上通常采用不同类型的材料。对于快中子,常见思路是使用聚乙烯、水或其他富氢材料进行慢化;在中子能量降低后,再使用具有较好中子吸收能力的材料进行吸收,例如含硼材料。因此,实际中子屏蔽结构通常不是单一材料,而是由慢化层和吸收层共同组成。

3. 钨合金在中子屏蔽系统中有什么作用?

虽然钨合金通常不作为主要中子慢化材料,但它可以在复合屏蔽结构中发挥辅助作用。例如,某些中子与材料发生相互作用后可能产生次级 γ 射线。在这种情况下,可以采用适当的高密度材料对伴随的光子辐射进行衰减,钨合金便可能适合作为局部 γ 射线屏蔽层。此外,在空间有限或设备结构需要高密度材料的区域,钨合金也可能承担局部屏蔽或结构功能。

4. 中子照射还需要考虑材料活化

在中子辐射环境中,材料可能发生中子活化并产生放射性核素。因此,如果钨合金用于中子场附近,还需要评估材料活化、放射性衰减时间以及维护和退役要求。这也是中子屏蔽设计不能只根据材料密度进行选择的原因之一。

5. 一个常见的复合屏蔽思路

对于同时存在中子和 γ 射线的复杂辐射场,可以根据实际情况采用复合结构,例如:
富氢材料用于慢化快中子 $\rightarrow$ 含硼材料吸收慢化后的中子 $\rightarrow$ 高密度材料衰减 γ 射线
具体材料顺序和厚度需要根据中子能谱、 γ 射线能量、辐射源结构和空间条件进行计算,因为不同布置方式会影响次级辐射和整体屏蔽效果。

钨合金能够与中子发生相互作用,但通常不能作为中子屏蔽的主要材料。它最大的优势仍然是对 X 射线和 γ 射线等高穿透性光子辐射进行高密度屏蔽。对于中子防护,更常见的方案是采用富氢材料进行慢化,再使用适合的吸收材料捕获中子,并根据需要增加钨合金等高密度材料来屏蔽伴随产生的 γ 射线。因此,如果应用场景涉及中子辐射,最合理的思路通常不是单独选择钨合金,而是根据具体中子能量和整个辐射场设计多材料复合屏蔽结构。



Q17: 为什么钨合金对中子的屏蔽机理与对 X 射线、γ 射线不同?

因为中子和 X 射线、γ 射线的物理本质不同，进入钨合金后与材料发生作用的机制也完全不同。简单来说，钨合金屏蔽 X 射线、γ 射线主要依靠光子与物质发生相互作用而降低光子强度；而中子屏蔽主要依靠中子与原子核发生碰撞、慢化和吸收。因此，不能用同一套材料选择逻辑来设计两种屏蔽。

1. X 射线和 γ 射线是光子

X 射线和 γ 射线都属于电磁辐射，本质上是高能光子，不带电荷。光子进入钨合金后，主要通过光电效应、康普顿散射和电子对产生等过程与材料发生相互作用。对于一定能量的光子，高原子序数材料具有较强的相互作用能力，而钨的原子序数为 74，同时密度很高，因此非常适合用于高密度光子屏蔽。因此，对于 X 射线和 γ 射线，增加钨合金的有效屏蔽厚度，通常可以显著降低透射光子强度。在理想窄束条件下，这种衰减关系可表示为 $I = I_0 \cdot e^{(-\mu x)}$ ，其中 I_0 为入射光子强度， I 为透射光子强度， x 为材料厚度， μ 为线性衰减系数。

2. 中子是不带电的粒子

中子与光子最大的区别之一，就是中子具有静质量并且不带电。中子进入钨合金后，主要通过原子核发生弹性散射、非弹性散射以及核反应等过程发生相互作用。因此，中子屏蔽不是简单地依靠材料密度来吸收能量，而是一个能量逐步降低、最终被吸收的过程。特别是快中子，首先需要通过碰撞把能量降下来，这个过程称为慢化。

3. 为什么氢材料特别适合慢化中子？

这是理解中子屏蔽的关键。中子与原子核发生弹性碰撞时，碰撞对象的质量越接近中子本身，中子一次碰撞能够损失的能量通常越多。氢原子的原子核就是质子，其质量与中子非常接近，因此快中子与氢核碰撞时能够有效损失能量。所以聚乙烯、水等富氢材料经常用于快中子慢化。钨虽然密度很高，但钨原子核非常重，中子与钨核碰撞时，单次弹性碰撞的能量损失效率通常不如氢，因此钨合金并不是高效的快中子慢化材料。

4. 中子屏蔽还需要吸收

仅仅让快中子慢下来还不够。慢化之后的中子还需要通过核反应被吸收。工程上经常使用含硼材料等具有较高中子吸收能力的材料。因此，一个典型的中子屏蔽过程可以理解为：快中子 → 与轻核碰撞 → 能量降低 → 热中子或低能中子 → 被吸收 → 完成屏蔽。而 X 射线、γ 射线的过程更接近：高能光子 → 光电效应、康普顿散射、电子对产生等 → 光子能量和数量降低 → 透射辐射降低。

5. 钨合金为什么更擅长屏蔽 X 射线和 γ 射线？

钨同时具备两个重要特征：高原子序数和高密度。高原子序数有利于提高光子与材料发生相互作用的概率，而高密度意味着单位厚度内包含更多的原子，因此能够在有限空间内提供较高的光子衰减能力。这正是钨合金非常适合医疗 X 射线设备、γ 射线设备、核医学设备和工业探伤设备的原因。而对于中子来说，高密度并不能直接等价于高效屏蔽，因为中子主要关注的是中子与特定原子核之间的相互作用截面、能量变化以及吸收反应。

6. 中子和光子的屏蔽材料选择逻辑不同

项目	X 射线、γ 射线	中子
辐射本质	高能光子	中性粒子
是否带电	不带电	不带电
主要相互作用	光电效应、康普顿散射、电子对产生	弹性散射、非弹性散射、核反应
屏蔽重点	衰减光子强度	慢化并吸收中子
典型高效材料	钨、铅等高 Z 材料	富氢材料、含硼材料等
钨合金的作用	主要屏蔽材料	通常为辅助屏蔽材料

7. 为什么复杂辐射场往往采用复合屏蔽？

实际核工业、加速器和部分科研设备中，可能同时存在中子、γ 射线以及其他次级辐射。这时候单一材料往往很难同时实现最佳屏蔽效果。例如，可以利用富氢材料降低快中子能量，再利用含硼材料吸收低能中子，同时利用钨合金等高密度材料降低伴随产生的 γ 射线。所以，复合屏蔽的核心思想不是寻找一种万能材料，而是让不同材料分别处理不同类型的辐射。

钨合金对 X 射线、γ 射线和中子的屏蔽机理不同，根本原因在于三者与物质的相互作用方式不同。对于 X 射线和 γ 射线，钨合金主要依靠高原子序数和高密度提高光子相互作用和衰减能力；对于中子，则主要涉及中子与原子核的散射和核反应，需要先慢化、再吸收。因此，钨合金是优秀的高密度光子屏蔽材料，但不能仅凭其高密度就把它视为理想的中子屏蔽

材料。对于同时存在中子和 γ 射线的环境，更合理的方案通常是采用富氢材料、含硼材料和高密度材料组成的复合屏蔽系统。



Q18: 钨合金用于中子屏蔽时为什么通常需要与含氢材料、硼或其他中子吸收材料组合？

主要原因是钨合金在中子防护体系中更适合承担高密度屏蔽和次级 γ 射线屏蔽作用，而快中子的有效防护通常需要经历慢化和吸收两个过程。含氢材料和含硼材料恰好分别承担这两个关键环节。可以把完整过程理解为：快中子 $\rightarrow$ 含氢材料慢化 $\rightarrow$ 低能中子 $\rightarrow$ 硼等材料吸收 $\rightarrow$ 次级 γ 射线 $\rightarrow$ 钨合金进一步屏蔽。

含氢材料负责慢化快中子

中子不带电，不能像带电粒子一样通过电离作用快速损失能量。对于能量较高的快中子，需要首先让它不断与原子核发生碰撞，使其能量逐渐降低。氢是非常理想的中子慢化元素，因为氢核，也就是质子的质量与中子非常接近。两者发生弹性碰撞时，中子可以有效地把能量传递给氢核。因此，聚乙烯、水、含氢聚合物等材料经常用于快中子慢化。钨的原子核质量远大于中子，快中子与钨核碰撞时，单次碰撞能够转移的能量通常较少，因此钨合金并不是高效的快中子慢化材料。

硼负责吸收慢化后的中子

经过含氢材料慢化以后，中子的能量已经大幅下降。

但慢化并不意味着中子已经消失。低能中子仍然可能继续穿透屏蔽层，因此还需要进一步进行吸收。硼，尤其是含有较高比例硼-10的材料，对低能中子具有较好的吸收能力。

版权与法律责任声明

典型的反应可以表示为： $^{10}\text{B} + \text{n} \rightarrow ^7\text{Li} + \alpha$ ，也就是说，中子被硼-10吸收后会发生核反应，从而将中子从辐射场中移除。因此，含硼聚乙烯、硼酸盐材料等常被用于中子屏蔽结构。

钨合金主要处理什么？

钨合金的优势主要体现在高密度和高原子序数。在中子屏蔽系统中，中子与屏蔽材料发生相互作用后可能产生次级 γ 射线。因此，即使已经完成了中子的慢化和吸收，也可能需要进一步处理这些伴随产生的光子辐射。这时候钨合金的高密度特性就能够发挥作用。因此，三类材料可以形成比较明确的分工：

材料	主要作用
聚乙烯、水等含氢材料	慢化快中子
硼、含硼聚乙烯等	吸收低能中子
钨合金	局部高密度屏蔽、衰减次级 γ 射线

为什么不能只使用钨合金？

假设一个高能中子直接进入钨合金。钨合金当然会与中子发生相互作用，但它并不能像富氢材料那样高效地让快中子迅速降低能量，也不能像含硼材料那样针对性地吸收大量低能中子。因此，只增加钨合金厚度，并不一定能够以最经济、最高效的方式解决中子防护问题。这也是为什么中子屏蔽设计通常强调材料组合，而不是单纯追求高密度。

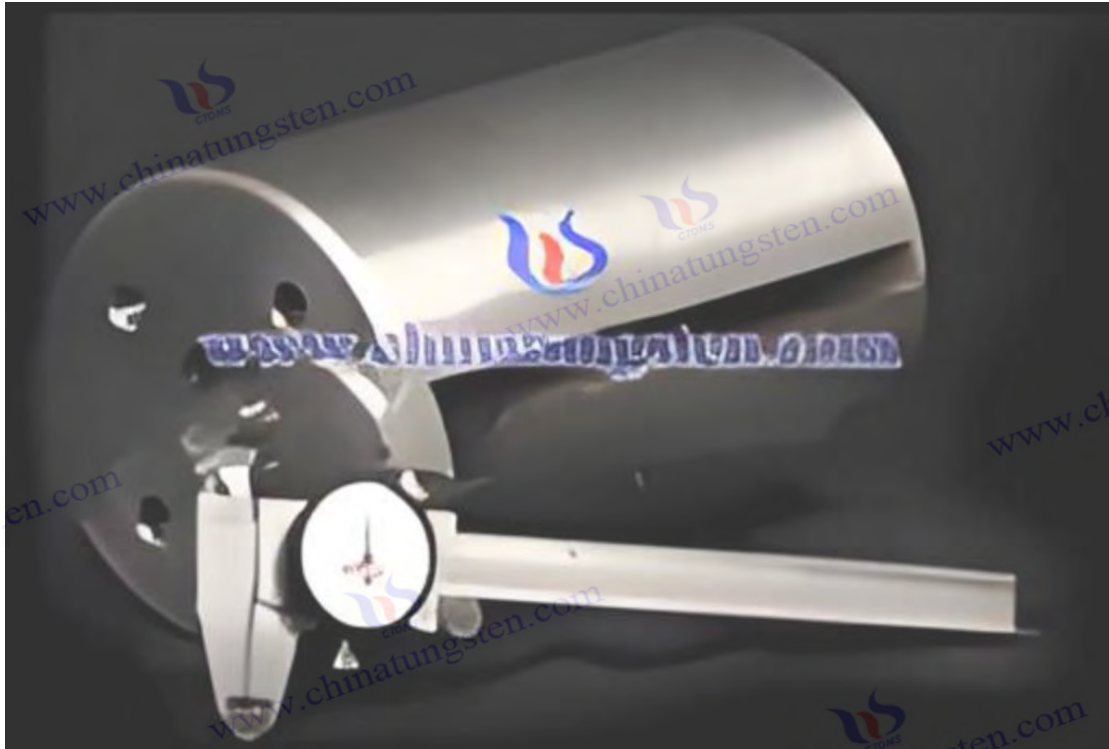
为什么复合屏蔽通常比单一材料更合理？

因为中子能量会随着传播过程发生变化。刚进入屏蔽系统时可能是快中子，经过多次碰撞后变成较低能量的中子，最终可能成为热中子。不同能量阶段对应的最佳屏蔽机制并不相同。因此，可以让不同材料分别负责不同阶段：第一阶段使用含氢材料降低快中子能量；第二阶段使用硼等材料吸收慢化后的中子；第三阶段使用钨合金或其他高 Z 材料降低伴随产生的 γ 射线。这种设计比单独使用一种材料更加符合中子运输的物理过程。

实际结构不一定只有三层

实际工程中并不是简单地做成三层材料。中子源的能谱、入射方向、辐射强度、几何结构、允许剂量率以及次级 γ 射线水平都会影响最终设计。有些系统可能采用含硼聚乙烯作为主要中子屏蔽材料，再增加钢、钨合金或其他高密度材料；有些系统则可能采用多层复合结构。因此，材料排列顺序和厚度需要通过具体的中子运输计算和辐射防护设计确定。

钨合金与含氢材料、硼等材料组合使用，本质上是因为它们解决的是中子防护过程中的不同问题：含氢材料负责让快中子慢下来，硼等吸收材料负责把慢化后的中子吸收掉，钨合金则可以利用高密度优势进一步降低伴随产生的 γ 射线，并在空间有限的位置提供高效的局部屏蔽。所以，对于同时存在中子和 γ 射线的辐射环境，复合屏蔽往往比单独使用钨合金更加合理。最终材料组合和厚度仍应根据中子能谱、剂量要求和实际几何条件进行专门设计。



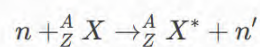
Q19: 钨合金屏蔽中子后是否会产生次级 γ 射线?

在一定的中子能量和材料条件下,钨合金受到中子照射后可能发生核反应、非弹性散射等过程,并产生次级 γ 射线。因此,在中子屏蔽设计中,不能只考虑中子本身的衰减,还需要评估由屏蔽材料产生的次级光子辐射。不过,是否产生明显的次级 γ 射线,以及产生多少,与中子能量、钨合金具体成分、材料厚度和中子通量等因素密切相关。

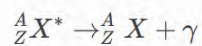
次级 γ 射线是怎么产生的?

当中子进入钨合金后,会与钨以及合金中的其他元素发生相互作用。其中一种重要机制是非弹性散射。高能中子与原子核作用后,原子核可能处于激发状态,随后通过释放 γ 光子的方式回到较低能级。

可以简化表示为:

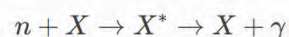


随后:



这里的 γ 就属于中子与材料相互作用过程中产生的次级 γ 射线。

此外,在某些中子能量范围内,还可能发生俘获反应。中子被原子核吸收后,形成激发态复合核,随后释放 γ 射线:



因此,中子进入钨合金后,并不意味着所有能量都会简单地变成材料内部的热量,其中一部分可能通过核反应转化为次级光子。

版权与法律责任声明

为什么这对钨合金屏蔽设计很重要？

钨合金本身对 γ 射线具有很好的屏蔽能力，但如果中子能量较高、通量较大，屏蔽材料内部产生的次级 γ 射线也可能成为需要控制的辐射成分。因此，一个完整的中子屏蔽系统通常需要同时回答两个问题：第一，中子能不能有效降低和吸收？第二，中子与屏蔽材料作用后产生的 γ 射线能不能进一步降低到允许水平？这也是复合屏蔽设计的重要原因。

为什么通常需要含氢材料和含硼材料？

典型的设计思路是先利用含氢材料对快中子进行慢化，再利用硼等材料吸收慢化后的中子。例如：快中子 $\rightarrow$ 富氢材料慢化 $\rightarrow$ 低能中子 $\rightarrow$ 含硼材料吸收 $\rightarrow$ 控制中子通量。但中子吸收和其他核反应仍可能产生 γ 射线，因此后面还可能设置适当的高密度光子屏蔽层。钨合金在这里就可以发挥作用。

钨合金可以用来处理这些次级 γ 射线吗？

可以，而且这是钨合金在复杂中子屏蔽系统中的一个重要优势。钨具有高原子序数和高密度，对 γ 射线具有较好的衰减能力，因此可以作为次级 γ 射线的局部高密度屏蔽材料。不过，实际设计不能简单理解为钨合金越厚越好。需要根据次级 γ 射线的能谱、剂量率和几何条件计算所需厚度。

钨合金自身还可能发生中子活化

除了次级 γ 射线之外，中子照射还需要考虑材料活化问题。某些钨合金成分在中子场中可能发生核反应并形成放射性同位素。其活化程度与中子能谱、通量、照射时间以及材料具体成分有关。因此，如果钨合金用于反应堆、加速器或其他强中子环境，还需要进行活化分析，尤其要考虑设备停机后的维护、检修和人员剂量问题。

不能简单认为所有中子都会产生大量 γ 射线

这一点也很重要。钨合金受到中子照射并不意味着一定会产生大量次级 γ 射线。产生强度取决于具体核反应截面和中子能谱。例如，低能中子、高能快中子和更高能中子与材料发生作用的机制可能不同。因此，不能仅凭钨合金的密度或钨含量直接判断次级 γ 射线水平。对于实际工程项目，通常需要使用相应的中子-光子输运计算程序，根据具体中子源能谱和屏蔽结构进行评估。

一个典型的复合屏蔽思路

对于同时存在快中子和 γ 射线的环境，可以采用类似这样的设计逻辑：含氢材料 $\rightarrow$ 慢化快中子，含硼材料 $\rightarrow$ 吸收慢化后的中子，高密度材料 $\rightarrow$ 衰减剩余及次级 γ 射线。其中钨合金可以承担最后一部分的高密度光子屏蔽功能。实际结构可能根据设备空间、重量限制、热环境和辐射水平进行调整，并不一定严格按照上述顺序排列。

钨合金屏蔽中子后确实可能产生次级 γ 射线，主要与中子引起的非弹性散射、俘获反应等核过程有关。因此，中子屏蔽设计不能只看中子衰减，还需要评估次级 γ 射线以及材料活化问题。这也是为什么复杂中子屏蔽系统通常采用复合材料结构：含氢材料负责慢化、含硼材料负责吸收，而钨合金等高密度材料负责进一步降低 γ 射线。对于实际工程，最终是否

需要钨合金以及需要多厚，应根据中子能谱、 γ 射线能谱、中子通量和目标剂量率进行专门的中子-光子耦合屏蔽计算。



Q20: 钨合金能否同时实现中子和 γ 射线复合屏蔽?

可以，但需要准确理解这里的同时实现。钨合金本身可以对 γ 射线提供很好的屏蔽，同时也能与中子发生相互作用；但对于中子辐射，单独依靠钨合金通常难以达到理想的综合屏蔽效果。因此，在实际工程中，更合理的做法是将钨合金作为复合屏蔽体系中的高密度 γ 射线屏蔽材料，再与含氢材料、含硼材料等组合，从而同时控制中子和 γ 射线。

1. 钨合金对 γ 射线具有明显优势

钨合金具有高原子序数和高密度，在有限空间内可以提供较高的 γ 射线衰减能力。因此，当中子屏蔽过程中产生次级 γ 射线，或者辐射源本身同时释放中子和 γ 射线时，钨合金可以承担重要的光子屏蔽作用。这也是钨合金用于核医学、核工业、探测器以及部分高能辐射设备的重要原因。

2. 钨合金对中子的作用有限

钨合金并不是理想的快中子慢化材料。快中子进入材料后，需要通过大量碰撞逐渐降低能量。富氢材料中的氢核质量与中子接近，因此具有较好的能量转移效率。而钨原子核质量很大，快中子与钨核发生弹性碰撞时，单次碰撞的能量损失通常相对有限。因此，如果目标是高效降低快中子能量，聚乙烯等含氢材料通常比钨合金更加合适。

3. 为什么还需要硼等中子吸收材料?

慢化之后的中子仍然存在，还需要进一步吸收。含硼材料中的硼-10 具有较好的热中子吸收能力，可以通过核反应将中子从辐射场中移除。因此，典型的复合屏蔽体系可以形成这样的分工：快中子 $\rightarrow$ 含氢材料慢化 $\rightarrow$ 低能中子 $\rightarrow$ 含硼材料吸收 $\rightarrow$ 次级 γ 射线 $\rightarrow$ 钨合

金衰减。这比单纯增加钨合金厚度更加符合中子和光子的物理屏蔽机制。

4. 钨合金在复合屏蔽中主要承担什么角色？

可以把钨合金理解为复合屏蔽体系中的高密度光子屏蔽层。它主要负责：降低原有 γ 射线的透射强度、吸收或衰减中子相互作用过程中产生的部分次级 γ 射线、在有限空间内提供较高的单位厚度屏蔽能力。而中子慢化和吸收则主要交给含氢和含硼材料完成。

5. 是否可以只用钨合金实现双重屏蔽？

理论上，钨合金当然能够同时与中子和 γ 射线发生相互作用，因此不能说它对中子完全没有屏蔽作用。但从工程设计角度来看，如果辐射场中同时存在大量快中子和 γ 射线，单独使用钨合金通常不是最经济、最有效的方案。原因在于钨合金对 γ 射线非常有效，但对快中子的慢化效率有限；同时，中子与钨合金相互作用还可能产生次级 γ 射线。因此，仅依靠钨合金可能导致材料用量、重量和成本增加，同时仍然需要处理中子输运问题。

6. 典型复合屏蔽结构

实际结构需要根据中子能谱、 γ 射线能量和设备几何条件确定，但基本思路通常是：

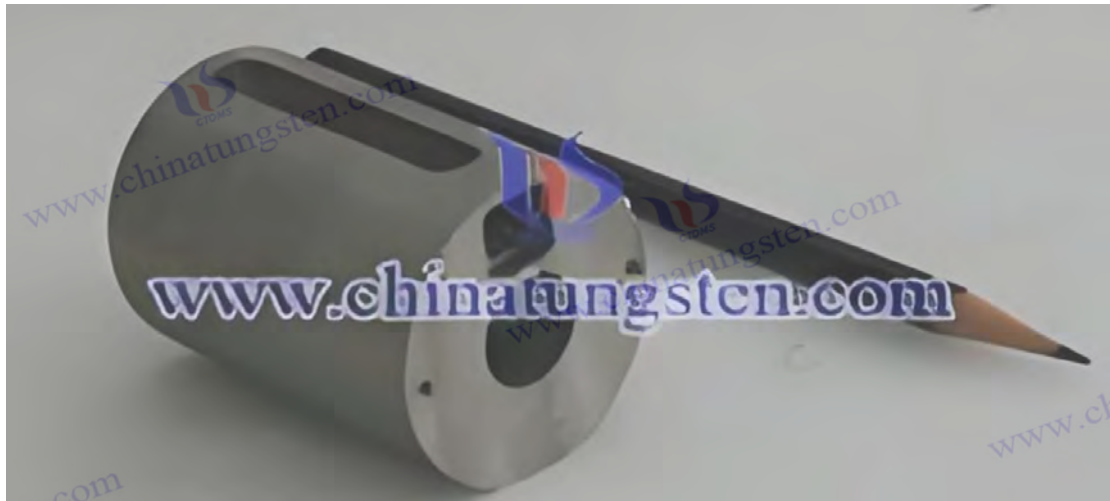
屏蔽材料	主要功能
聚乙烯、水等富氢材料	慢化快中子
含硼聚乙烯等	吸收慢化后的中子
钨合金	高密度屏蔽 γ 射线及部分次级光子
钢、混凝土等	大体积综合屏蔽，可根据需要配置

有些情况下会采用含硼聚乙烯与钨合金组合，有些情况下则需要更多层次的复合结构。材料的排列顺序也不能完全凭经验确定，因为不同位置可能产生不同的次级辐射。对于高强度辐射场，需要通过专业的中子-光子输运计算确定。

7. 一个容易混淆的问题

中子和 γ 射线复合屏蔽并不意味着一块钨合金同时具有与专用中子屏蔽材料相同的效果。真正意义上的复合屏蔽，是让不同材料针对不同辐射过程发挥优势。钨合金负责高效处理光子辐射，含氢材料负责降低快中子能量，含硼材料负责吸收慢化后的中子。三者组合后，才能形成更完整的中子- γ 射线防护体系。

钨合金可以参与中子和 γ 射线的复合屏蔽，但不建议把钨合金作为唯一的中子屏蔽材料。对于同时存在中子和 γ 射线的辐射环境，更合理的方案通常是：高 Z、高密度的钨合金 → 重点负责 γ 射线屏蔽；含氢材料 → 负责快中子慢化；含硼或其他中子吸收材料 → 负责低能中子吸收。因此，钨合金完全可以成为中子- γ 复合屏蔽系统的重要组成部分，尤其适合空间有限、需要高密度 γ 射线屏蔽的区域。但具体材料组合、厚度和排列方式，应根据中子能谱、 γ 射线能量、辐射强度和目标剂量率进行专业计算，而不能仅根据材料密度确定。



Q21: 钨合金的高原子序数和高密度分别对屏蔽性能有什么贡献？

钨合金适合用于 X 射线和 γ 射线屏蔽，主要得益于两个重要特性：高原子序数和高密度。两者作用不同，但又相互配合。可以简单理解为：高原子序数 $\rightarrow$ 提高光子与材料发生相互作用的能力；高密度 $\rightarrow$ 在相同厚度内提供更多的原子和更大的质量厚度。因此，钨合金能够在较小的体积和厚度内实现较好的光子屏蔽效果。

高原子序数主要提高光子相互作用概率

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，光子进入材料后可能发生光电效应和康普顿散射等相互作用。尤其在光电效应占比较高的能区，原子序数较高的元素通常具有更强的光子吸收能力。因此，钨的高原子序数有助于提高单位质量材料对光子的相互作用能力。不过，这种优势并不是在所有光子能量下都以完全相同的程度存在。随着光子能量升高，康普顿散射、电子对产生等机制的重要性会发生变化，因此不能简单理解为原子序数越高，任何能量下的屏蔽效果都按同一比例增加。

高密度主要增加单位厚度的屏蔽能力

钨的密度约为 19.3 g/cm^3 ，钨合金通常也具有非常高的密度，常见牌号大约在 $17 \sim 19 \text{ g/cm}^3$ 范围。密度计算公式为： $\rho = m/V$ ，其中 m 为质量， V 为体积。高密度意味着，在相同体积下，钨合金包含更多的物质；在相同几何厚度下，射线需要穿过更多的材料质量。因此，对于需要控制设备尺寸的场景，高密度非常有价值。例如，如果设备内部空间只有有限的几毫米或几厘米，使用高密度钨合金可以在较小的结构厚度内获得较高的衰减效果。

两者结合才是钨合金的真正优势

如果只有高原子序数而密度很低，单位厚度内参与相互作用的原子数量会受到限制。反过来，如果材料密度很高但原子序数较低，对某些能区的光子相互作用能力又可能不如高 Z 材料。钨恰好同时具备高 Z 和高密度，因此特别适合制造紧凑型辐射屏蔽件。从工程角度可以理解为：高 Z 决定材料与光子发生相互作用的能力；高密度决定单位厚度内有多少材料可以参与这种相互作用。可以用线性衰减系数理解两者的综合作用光子穿过材料时，常用下面的关系描述其衰减： $I = I_0 \cdot e^{-(\mu x)}$ ，其中 I_0 是入射强度， I 是透射强度， x 是材料厚度， μ

版权与法律声明

是线性衰减系数。而线性衰减系数与质量衰减系数和材料密度有关： $\mu = (\mu/\rho) \cdot \rho$ 。这里的 μ/ρ 与材料的元素组成以及光子能量有关，而 ρ 就是材料密度。因此，钨合金的高原子序数主要影响材料与光子的相互作用特性，而高密度则直接提高单位长度内的衰减能力。

为什么高密度对空间受限设备特别重要？

这是钨合金相比很多传统屏蔽材料的重要优势。例如，在 CT、X 射线设备、核医学设备、探测器和工业检测设备内部，屏蔽件往往没有很大的安装空间。如果采用较低密度材料，要达到同样的屏蔽目标，可能需要增加厚度和体积。钨合金则可以通过更高的密度，在较小空间内获得较高的面密度，因此非常适合制作屏蔽环、屏蔽套、准直器、屏蔽块等精密部件。高原子序数也不是越高越好需要避免一个常见误区：不能简单认为只要选择最高 Z 材料，就一定能够获得最佳屏蔽效果。实际屏蔽效果还受到光子能量、材料密度、屏蔽厚度、几何条件以及散射辐射等因素影响。例如，在某些高能光子环境中，电子对产生的重要性明显增加，屏蔽设计就不能只依据原子序数进行判断。因此，实际工程设计通常使用具体能量下的质量衰减系数、线性衰减系数以及相关输运计算来确定材料和厚度。高 Z 和高密度的作用可以这样区分

特性	对屏蔽性能的主要贡献
高原子序数 Z=74	增强光子与材料的相互作用能力
高密度	增加单位厚度内的物质量，提高线性衰减能力
两者结合	在较小体积内实现较高的 X 射线、 γ 射线衰减能力

钨合金的高原子序数和高密度是相互配合的。

高原子序数使钨对 X 射线和 γ 射线具有较强的光子相互作用能力，高密度则让单位厚度内包含更多的材料，从而提高实际的线性衰减能力。因此，钨合金真正突出的优势并不是单纯的高 Z 或单纯的高密度，而是高原子序数与高密度同时存在，使其能够在有限空间内实现较高的光子屏蔽效果。这也是钨合金广泛用于精密、小型化 X 射线和 γ 射线屏蔽件的重要原因。



Q22: 钨合金屏蔽件是否存在辐照活化问题?

存在，但需要区分具体辐射类型和使用环境。钨合金并不是完全不会发生辐照活化的材料，尤其是在高通量中子环境下，钨及其合金元素可能发生核反应，生成具有放射性的活化产物。对于普通 X 射线和 γ 射线屏蔽应用，辐照活化通常不是主要问题；而在反应堆、聚变装置、加速器等强中子环境中，则需要认真进行活化分析。

什么是辐照活化?

辐照活化是指稳定材料受到中子等高能粒子照射后，原子核发生核反应，转变成放射性核素。简单表示为： ${}^A_ZX + n \rightarrow {}^A'_Z'X' + \gamma$ （通用示意，实际反应因靶核而异），更一般地可写为：

靶核 + 入射粒子 → 生成核 + 出射粒子。

生成的核素如果具有放射性，那么即使外部中子源停止照射，材料本身仍可能在一段时间内具有放射性。因此，中子屏蔽件存在一个特殊问题：中子不仅需要被屏蔽，还可能改变屏蔽材料本身的核素组成。

X 射线和 γ 射线环境通常不是主要问题

对于普通医疗 X 射线设备、CT、工业 X 射线检测等场景，钨合金主要受到 X 射线照射。在这些常规应用条件下，钨合金发生明显放射性活化通常不是主要寿命或安全问题。 γ 射线同样主要通过材料发生光子相互作用而被衰减，一般不会像高通量中子那样成为材料活化的主要来源。所以，如果钨合金只是用于普通 X 射线或 γ 射线屏蔽，通常不需要把辐照活化作为首要选材因素。

中子环境下需要重点关注

如果钨合金长期处于高通量中子环境，例如核反应堆、聚变装置、强流加速器等，就需要重点考虑材料活化。钨本身可以通过不同的中子核反应形成放射性同位素。此外，钨合金并不是纯钨，通常还含有 Ni、Fe、Cu 等结合相元素，这些元素也可能发生中子诱导核反应。因此，实际活化水平不仅取决于钨含量，还取决于：中子能谱、中子通量、照射时间、钨合金具体成分、杂质元素以及材料使用位置。

为什么合金成分非常重要?

假设两种钨合金的钨含量相同，但一种采用 W-Ni-Fe，另一种采用 W-Ni-Cu，它们在中子环境中的活化行为可能并不完全相同。原因是合金中的 Ni、Fe、Cu 等元素也可能参与核反应。因此，在普通 X 射线屏蔽件采购中，材料成分主要影响密度、机械性能和加工性能；而在强中子环境中，材料成分还会直接关系到放射性活化和后续维护问题。

活化会带来哪些影响?

最直接的影响是停机后材料可能仍具有一定放射性。这会影响：设备维护、人员接近、拆卸、更换、运输、废物处理以及设备退役。对于高通量中子装置来说，即使屏蔽件本身没有机械损坏，也可能因为活化水平较高而增加维护难度。因此，在这类应用中，材料选择不能只比较密度和屏蔽性能，还需要比较活化特性和衰变时间。

钨合金是不是因此不适合中子环境？

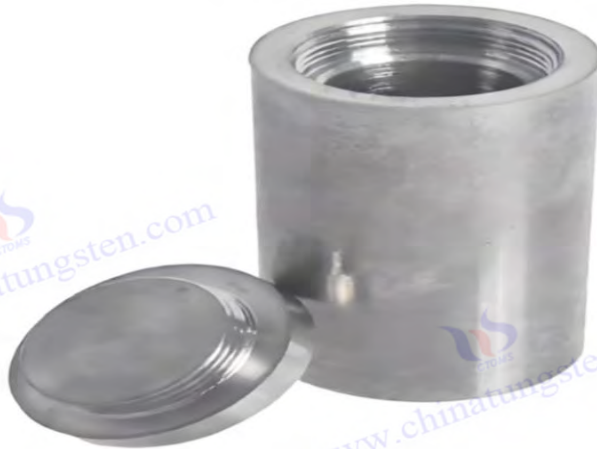
不能简单这样判断。钨及钨合金在核工业、聚变和高能物理等领域仍然具有重要应用价值。问题在于，如果应用环境存在强中子辐射，就必须把活化作为设计指标之一。实际工程中通常会通过材料成分优化、杂质控制、几何位置优化以及辐射输运和活化计算等方式降低长期放射性影响。也就是说，钨合金可以用于中子相关设备，但需要进行针对性的核安全和材料活化评估。

应用环境	辐照活化关注程度
普通 X 射线设备	较低
CT、医疗影像设备	通常较低
普通 γ 射线屏蔽	通常较低
核医学设备	取决于具体辐射场
工业探伤	通常不是主要问题，但需看射线源
加速器设备	需要重点评估
核反应堆	高度关注
聚变装置	高度关注
高通量中子实验装置	高度关注

采购时应该关注什么？

如果钨合金屏蔽件用于普通 X 射线或 γ 射线设备，通常重点关注密度、钨含量、屏蔽性能和加工精度即可。如果用于强中子环境，则建议进一步要求供应商提供完整的材料成分和杂质控制信息，并根据具体中子能谱和通量进行活化计算。尤其需要关注 Ni、Fe、Cu 等结合相以及其他微量杂质，因为少量元素在某些中子能谱下也可能对活化水平产生影响。如有问题，可联系具有几十年定制生产钨合金屏蔽件的专业公司中钨智造科技有限公司获取帮助。

钨合金屏蔽件确实存在辐照活化问题，但其重要程度高度依赖使用环境。对于普通 X 射线、CT 和常规 γ 射线设备，活化通常不是主要问题；对于高通量中子环境，钨合金及其中的 Ni、Fe、Cu 等元素可能发生中子诱导核反应，从而产生放射性活化。因此，在核反应堆、聚变装置和高能加速器等场景中，钨合金的选型不能只看密度和中子屏蔽能力，还需要同时考虑材料成分、中子能谱、通量、照射时间、活化产物及停机后的维护和退役要求。



版权与免责声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Q23: 高纯钨是否适用于低本底辐射屏蔽?

可以，而且在对材料本身放射性本底要求很高的场合，高纯钨具有一定优势。但是否真正适合低本底辐射屏蔽，关键不只是看钨的纯度，还要看杂质元素、材料来源、加工过程以及实际测得的放射性水平。对于低本底实验室、稀有事件探测、低本底 γ 能谱测量等应用，材料的天然放射性和宇宙成因放射性往往比普通辐射屏蔽设备更加重要。

1. 为什么低本底环境需要关注高纯钨?

普通钨合金虽然具有很高的密度和良好的 γ 射线屏蔽能力，但其中通常含有 Ni、Fe、Cu 等结合相以及微量杂质。这些元素本身或者其中的痕量杂质，可能含有 U、Th、K 等天然放射性核素，或者在特定环境下形成其他放射性核素。对于普通辐射防护而言，这些本底通常可以忽略；但对于低本底实验，屏蔽材料自身发出的微弱 γ 射线可能成为探测器背景的一部分。因此，低本底应用对材料纯度和放射性本底的要求明显高于普通屏蔽应用。

2. 高纯钨的优势是什么?

高纯钨具有很高的钨含量，同时减少了其他元素和杂质的引入。这意味着可以在保持高密度、高原子序数光子屏蔽能力的同时，降低某些潜在放射性杂质来源。尤其是在低本底 γ 射线探测器周围，高纯钨可以作为一种高密度屏蔽材料使用。但这里需要特别强调，高纯度 $\neq$ 低放射性。即使材料标称 99.95%、99.99% 或更高纯度，也不能仅凭这个数字判断它是否适合低本底实验。真正重要的是实际的放射性核素含量和材料本底测试结果。

3. 低本底应用最关注哪些核素?

实际低本底 γ 能谱测量中，通常特别关注天然放射性系列中的核素，例如铀系、钍系以及钾-40。此外，还可能关注材料中的宇宙成因核素和特定生产、加工过程中引入的放射性核

素。因此，采购低本底钨材料时，最好不要只要求化学成分报告，而应要求相应的 γ 能谱本底检测数据。

4. 为什么高纯钨不一定比钨合金屏蔽效果好很多？

这里需要区分材料纯度和屏蔽性能。高纯钨密度接近纯钨的理论密度，具有非常高的光子衰减能力。但某些高钨含量合金的密度也已经达到很高水平。因此，在相同厚度下，高纯钨并不一定会产生远高于所有钨合金的屏蔽效果。高纯钨真正突出的优势，在低本底应用中更多体现在材料组成简单、杂质容易控制，以及可以针对放射性本底进行筛选。

5. 高纯钨适合哪些低本底场景？

比较典型的应用包括低本底 γ 能谱仪屏蔽、核探测器局部屏蔽、稀有事件实验、低放射性材料测试以及部分地下实验设施。这类场景通常不是单纯追求屏蔽厚度，而是希望降低外部环境 γ 射线 $\rightarrow$ 降低探测器本底 $\rightarrow$ 提高对微弱辐射信号的探测能力。因此，材料自身的放射性水平就变得非常重要。

6. 高纯钨也可能存在宇宙成因活化

即使使用高纯钨，也不能完全排除材料本身存在活化问题。材料在生产、运输、储存过程中可能受到宇宙射线影响，从而产生少量宇宙成因放射性核素。对于普通工业应用，这通常不是问题；但对于极低本底实验，甚至需要考虑材料的生产地点、运输历史和地下储存时间。因此，真正严格的低本底材料采购往往不仅关注化学纯度，还关注材料的来源和历史。

7. 高纯钨与低本底铅如何比较？

低本底屏蔽中经常会比较高纯钨和低本底铅。钨的优势是密度高、机械强度高、体积小，而且不容易像铅那样发生明显的蠕变和变形。铅则具有较好的 γ 射线屏蔽能力，同时成本通常低于高纯钨，但普通铅材料可能存在天然放射性杂质，因此低本底应用通常需要选择经过筛选的低本底铅。实际工程中，有时会根据能量范围、成本和空间条件采用钨、低本底铅、铜等材料组成多层屏蔽结构。

8. 低本底钨材料采购时应该看什么？

如果产品用于普通 X 射线屏蔽，只需要关注材料成分、密度和屏蔽性能等常规指标。如果用于低本底实验，则建议重点要求材料纯度、U/Th/K 等天然放射性核素含量、 γ 能谱本底测试、材料密度、尺寸稳定性以及材料来源和生产历史。其中，最重要的是实际放射性测量结果，而不是单纯的化学纯度标签。

高纯钨可以用于低本底辐射屏蔽，而且由于高密度、高原子序数以及较容易控制材料组成等特点，在低本底 γ 射线屏蔽中具有应用价值。但低本底应用不能简单理解为钨纯度越高越好。真正决定其是否适合的关键，是 U、Th、K 等天然放射性杂质以及其他潜在放射性核素的实际含量和测量结果。因此，如果用于普通辐射防护，可以重点关注钨含量、密度和屏蔽厚度；如果用于低本底探测，则应该把材料自身的 γ 放射性本底测试放在与屏蔽性能同等重要的位置。

Q24：钨合金屏蔽件是否会产生自身放射性？

版权与法律声明

一般情况下，正常使用的钨合金屏蔽件不会因为屏蔽 X 射线或 γ 射线而变成明显的放射性材料。但在高强度中子辐照环境下，钨合金可能发生辐照活化，从而在材料内部产生一定的放射性。因此，需要区分两种完全不同的情况：材料原本就含有的天然放射性，以及受到中子照射后产生的人工放射性。

1. 普通钨合金本身会不会有放射性？

钨合金并不是通常意义上的放射性材料。用于工业和医疗设备的钨合金主要由钨以及 Ni、Fe、Cu 等合金元素组成。正常合格材料的天然放射性通常很低，一般不会因为材料本身而成为普通辐射防护中的主要辐射源。但是，材料中可能存在极微量的 U、Th、K 等天然放射性杂质。因此，普通钨合金与低本底专用钨材料之间的区别，不仅在于钨含量，还在于杂质控制和实际放射性检测水平。

2. X 射线和 γ 射线会不会让钨合金变成放射性材料？

对于通常的 X 射线和 γ 射线屏蔽应用，一般不会。这是因为普通 X 射线和 γ 射线屏蔽主要是光子与材料发生光电效应、康普顿散射等相互作用，并不意味着钨合金会因此持续产生放射性。例如，医疗 X 射线设备停止曝光以后，钨合金屏蔽件通常不会因为刚才受到 X 射线照射，就变成一个持续发射辐射的放射源。这与中子辐照导致的核反应和材料活化是不同的物理过程。

3. 中子照射可能导致钨合金产生放射性

如果钨合金长期处于较强的中子辐射环境中，情况就不同了。中子可以与钨原子核以及合金中的其他元素发生核反应，使原本稳定的核素转变成放射性核素。可以简单表示为：
稳定核素 + $n \rightarrow$ 放射性核素 + 其他粒子。这个过程称为辐照活化。因此，在核反应堆、聚变装置、高能加速器和强中子实验设备等环境中，钨合金屏蔽件确实可能在使用一段时间后具有一定的剩余放射性。

4. 合金中的其他元素也需要考虑

钨合金通常不是 100% 的纯钨。例如，一些重钨合金采用 W-Ni-Fe 或 W-Ni-Cu 体系。中子照射不仅会作用于钨，也可能与 Ni、Fe、Cu 以及其他微量杂质发生核反应。所以，在强中子环境下，不能只看钨的含量，还需要分析完整的材料化学成分和杂质水平。这也是为什么核设施和高能物理装置在选择屏蔽材料时，通常需要进行专门的材料活化分析。

5. 材料活化后会有什么影响？

活化后的钨合金可能在中子源停止后仍然产生一定的 γ 射线等辐射。这会影响设备停机后的：人员接近、检修维护、部件更换、运输、储存以及最终退役处理。对于普通医疗 X 射线设备，这通常不是主要问题；但对于高通量中子环境，可能成为设备维护和辐射防护设计的重要指标。

6. 高纯钨是不是完全没有自身放射性？

也不能这样理解。高纯钨可以通过减少杂质元素来降低潜在的放射性本底，但高纯度并不等于绝对零放射性。如果用于低本底实验，例如低本底 γ 能谱测量或稀有事件探测，更重要的是查看实际的放射性核素分析和 γ 能谱测试结果，而不是只看材料标称纯度。尤其需要

关注 U、Th、K 等天然放射性元素以及材料生产、运输和储存过程中可能形成的活化核素。

7. 不同应用的情况差异很大

使用环境	钨合金自身放射性关注程度
普通 X 射线设备	很低
CT 设备	很低
常规工业 X 射线设备	通常较低
γ 射线屏蔽设备	通常较低
低本底探测设备	需要关注材料本底
加速器附近	需要进行活化评估
强中子环境	需要重点评估
反应堆、聚变装置	需要进行系统的活化分析

8. 一个容易混淆的概念

钨合金屏蔽件在使用过程中存在辐射，并不代表钨合金本身就是放射源。例如，X 射线设备工作时，射线照射到钨合金屏蔽件，钨合金的作用是吸收和散射光子。设备关闭后，这种由 X 射线照射产生的辐射场会消失，钨合金通常不会像放射性核素那样持续自行发射强辐射。真正需要重点关注的是中子诱导的辐照活化。

钨合金屏蔽件通常不会因为屏蔽 X 射线和 γ 射线而产生明显的自身放射性。对于普通医疗、工业 X 射线和 γ 射线设备，可以把钨合金看作非放射性屏蔽材料使用。但在强中子环境下，钨及钨合金中的其他元素可能发生中子诱导核反应，从而产生放射性活化。因此，核反应堆、聚变装置、加速器等场合需要同时考虑材料成分、杂质水平、中子能谱、通量和照射时间。如果应用属于低本底探测领域，则还要进一步区分天然放射性本底与辐照活化：前者主要取决于材料和杂质本身，后者则主要与中子照射历史有关。



版权与法律责任声明

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Q25: 低本底实验为什么需要关注钨材料中的 U、Th、K、Co 等痕量放射性杂质?

因为在低本底实验中，探测目标往往非常微弱，屏蔽材料虽然能够阻挡外部辐射，但材料自身如果含有微量放射性核素，也可能持续产生 γ 射线或其他次级辐射，最终成为探测器无法忽略的背景。普通辐射防护追求的是把外部辐射挡住，而低本底实验还必须解决一个更苛刻的问题：屏蔽材料本身不能成为新的辐射源。

1. U、Th 为什么特别值得关注?

U、Th 通常指铀系和钍系天然放射性元素。它们的重要性不只是母核素本身，而是它们会形成一系列具有放射性的子体。例如，天然铀和钍衰变链中会产生多种 α 、 β 和 γ 放射性核素，其中部分子体能够产生特征 γ 射线。因此，即使钨材料中只有极低浓度的 U、Th，在低本底 γ 能谱测量中，也可能形成可以被探测器记录的 γ 射线峰。特别是在屏蔽材料紧贴探测器的情况下，材料自身产生的辐射更容易进入探测器。

2. K 主要关注什么?

这里的 K 主要指天然钾中的放射性同位素 ^{40}K 。天然钾中只有很小一部分是 ^{40}K ，但由于钾普遍存在于矿物、陶瓷、玻璃、某些加工材料 and 环境污染物中，因此在低本底实验中经常需要检查。 ^{40}K 衰变会产生特征 γ 射线，因此如果屏蔽材料或其周围结构含有一定量的钾，也可能贡献可测量的 γ 本底。所以低本底材料检测通常会把 ^{40}K 与 U、Th 系列一起作为重要指标。

3. Co 为什么需要特别关注?

Co 的情况与 U、Th、K 有所不同。低本底材料中关注的 Co 通常特别涉及 ^{60}Co ，它并不是普通天然钴中的主要放射性来源，而更需要考虑材料在中子环境中的活化问题。 ^{60}Co 会产生具有较高能量的 γ 射线，因此如果含钴材料受到中子照射，就可能产生需要关注的放射性活化。对于普通钨材料，Co 未必是主要杂质；但对于曾经处于中子辐照环境中的材料，或者含有相关元素的合金、结构件， ^{60}Co 等活化产物就可能成为重要的 γ 本底来源。因此，低本底实验室不仅需要关注材料原始的 U、Th、K，还可能需要了解材料是否经历过中子照射以及是否存在 Co 等潜在活化来源。

4. 为什么这么微量的杂质也会影响实验?

关键在于低本底实验的探测灵敏度非常高。普通工业环境中，材料产生的微弱 γ 射线可能完全淹没在环境本底中，因此没有实际影响。但在低本底实验中，研究人员会通过地下实验室、厚重屏蔽、多层屏蔽和主动/被动本底控制等方法，尽可能降低外部辐射。当环境本底已经被压得很低以后，屏蔽材料自身产生的辐射就可能从次要因素变成主要因素。可以简单理解为：外部辐射 $\downarrow\downarrow\downarrow$ ，材料自身本底 $\rightarrow$ 逐渐成为主要限制因素。所以，材料纯度和放射性本底控制会变得非常重要。

5. 钨材料为什么尤其需要做放射性筛选?

钨具有很高的密度和原子序数，因此非常适合制作紧凑型 γ 射线屏蔽件。但低本底实验恰恰需要大量使用屏蔽材料，并且屏蔽材料通常距离探测器非常近。这意味着即使单位质量的放射性很低，只要使用的钨材料质量很大，总放射性活度仍然可能达到需要考虑的程度。因此，低本底应用通常不会只问供应商钨含量是多少，还会进一步要求材料的放射性检测数据。

6. 不能只看 U、Th、K

U、Th、K 是低本底材料中非常典型的指标，但并不意味着检测这三个指标就足够了。根据具体实验和材料来源，还可能需要注意： ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{54}Mn 等人工或活化放射性核素，以及材料加工、焊接、运输和储存过程中可能引入的其他放射性污染。尤其是曾经长期处于高能中子环境中的材料，其放射性组成可能与普通新材料完全不同。

7. 最可靠的判断方式是什么？

不能仅凭材料的化学纯度判断其是否属于低本底材料。例如，高纯钨 $\neq$ 必然低本底钨，99.99% 钨也不意味着剩余的 0.01% 杂质一定没有放射性。真正用于低本底实验时，更可靠的方法是进行 γ 能谱测量，通过高纯锗探测器等手段测量材料本身的放射性活度。通常可以得到类似 Bq/kg 的活度指标，并进一步分析 U、Th 系列、 ^{40}K 、 ^{60}Co 等核素。

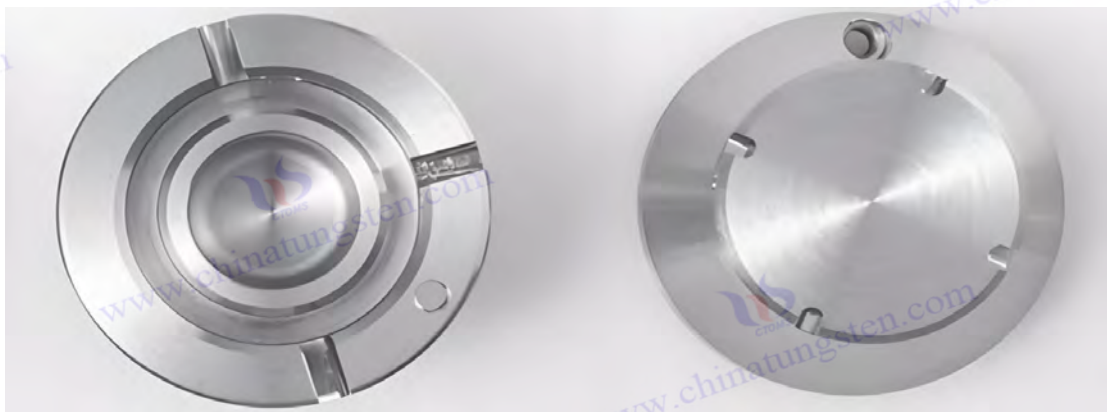
8. 对屏蔽件而言，位置也很重要

同样一种材料，如果距离探测器不同，其对实验本底的影响也可能不同。例如，靠近探测器的钨屏蔽层，其自身 γ 射线更容易直接进入探测器；而距离较远的材料，其贡献可能受到其他屏蔽层的进一步衰减。因此，低本底设计不仅是材料问题，还涉及材料放射性水平、材料用量、屏蔽层结构、材料与探测器之间的距离以及各层材料的排列方式。

9. 为什么低本底屏蔽经常采用多层结构？

这就是材料本底与屏蔽性能需要同时考虑的结果。例如，外层可以采用经过筛选的高密度材料降低环境 γ 射线，中间设置其他低本底材料进一步衰减，最靠近探测器的位置则使用经过严格放射性筛选的低本底材料。不同材料分别承担外部辐射屏蔽、次级辐射控制和材料本底控制等功能。因此，低本底屏蔽并不是单纯追求材料密度越高越好。

低本底实验关注钨材料中的 U、Th、K、Co 等痕量元素，核心原因是这些元素或其放射性同位素可能成为屏蔽材料自身的辐射源。U、Th 主要关系到天然放射性衰变链，K 主要关注天然存在的 ^{40}K ，而 Co 尤其需要关注中子环境下可能形成的 ^{60}Co 等活化产物。对于普通 X 射线和 γ 射线屏蔽，这些微量放射性通常不是主要问题；但对于低本底 γ 能谱、稀有事件探测等高灵敏度实验，材料本身的放射性可能直接决定最终探测本底。因此，低本底钨材料的选型不能只看钨纯度、密度和屏蔽性能，更应该关注 U/Th 系列、 ^{40}K 、 ^{60}Co 等核素的实际活度，并以实测 γ 能谱数据作为材料是否合格的重要依据。



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 $17\sim 19\text{g/cm}^3$ 。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 $Ra\ 0.8\ \mu\text{m}$ 、 $Ra\ 0.4\ \mu\text{m}$ 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

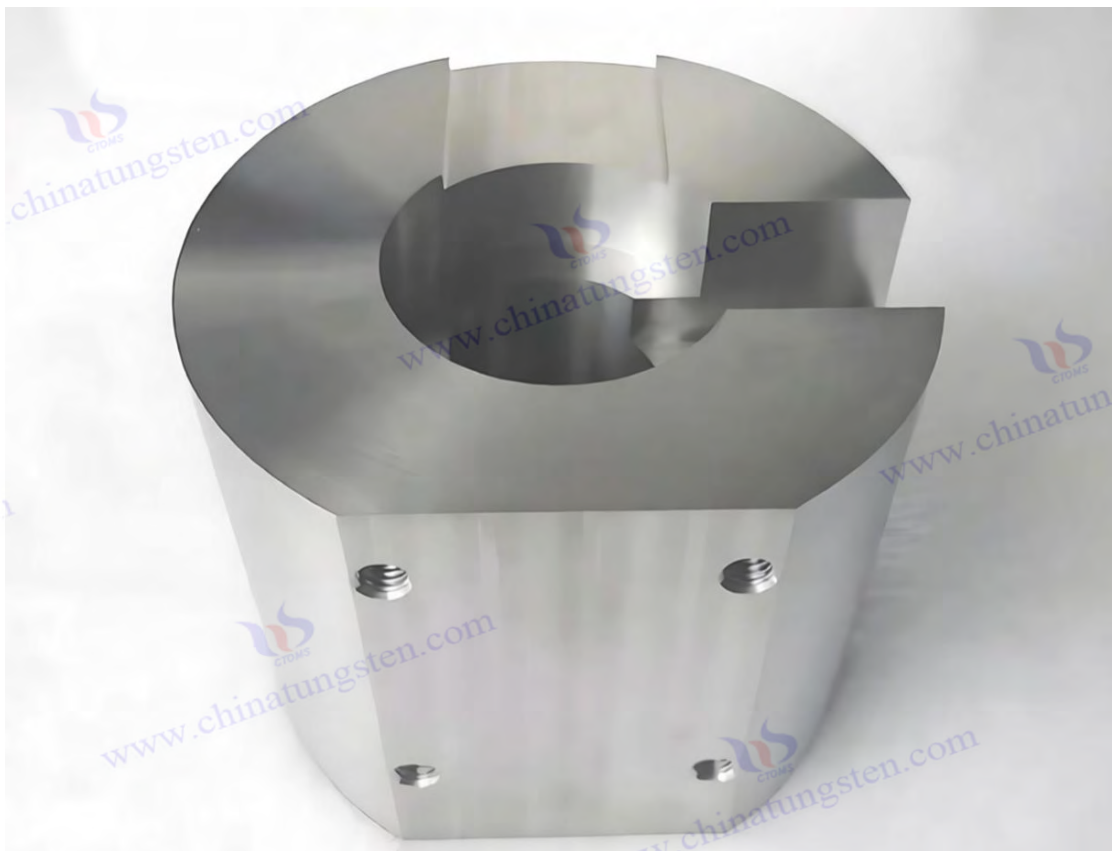
技术参数	重点关注内容
硬度/强度	根据机械使用条件确定
工作温度	长期工作温度及最高温度
内部质量	孔隙、裂纹及烧结质量
检测文件	材料证明、尺寸报告、性能测试等

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。



版权与免责声明