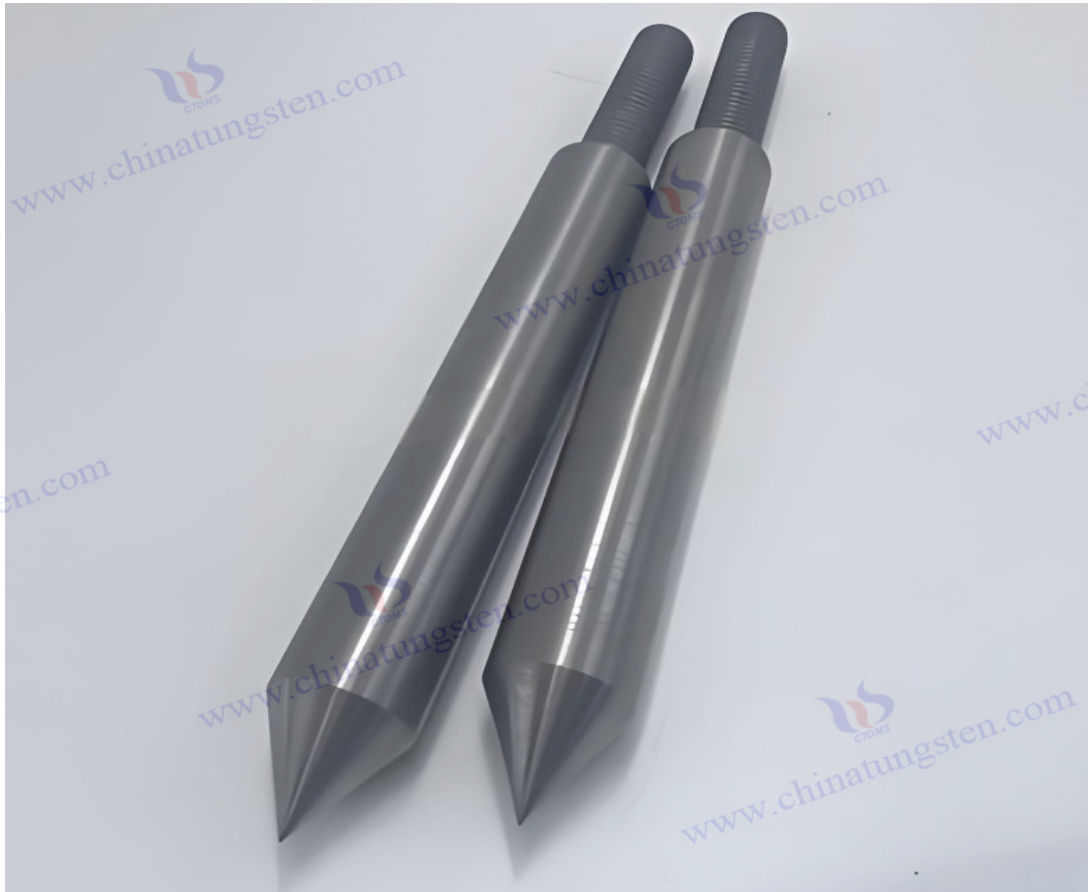




关于钛锆钼合金（TZM）最流行的 Q&A

前言

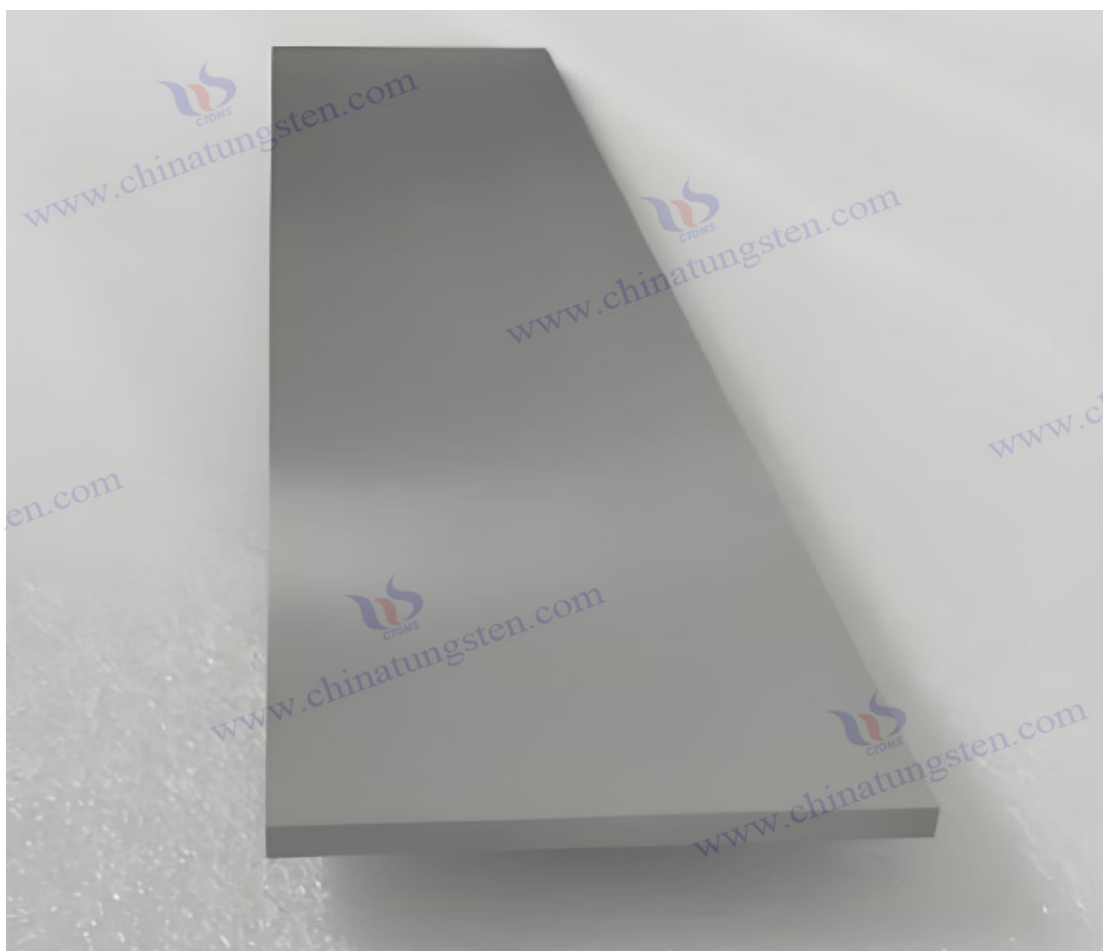
随着半导体、新能源、航空航天、核聚变、真空热处理及高端装备制造产业的快速发展，钛锆钼合金（TZM）作为全球应用最成熟的钼基高温合金之一，受到越来越多工程师、科研人员、采购人员及设备制造企业的关注。

作为长期专注于高性能难熔金属材料研发与生产的专业企业，中钨智造结合多年工程实践和行业经验，策划编写了本系列钛锆钼合金（TZM）热门 Q&A，希望以通俗易懂的问答形式，为读者提供更加专业、系统、实用的技术参考。本系列问题来源于全球搜索引擎、行业论坛、客户咨询、技术交流以及中钨在线多年的数据积累和市场调研，内容涵盖 TZM 基础知识、性能特点、制造工艺、产品规格、质量检测、机械加工、焊接技术、典型应用、行业发展及未来趋势等多个方面，力求全面解答用户最关注的问题。

本系列问答不仅介绍材料参数，更结合工程应用，对材料选型、制造难点、质量评价及产业发展进行分析，帮助读者深入理解 TZM 的技术特点和应用价值。中钨智造结合全球产业发展和最新技术进展，努力打造了关于钛锆钼合金（TZM）系统、专业、具有工程实践价值的知识库，为高性能钼基材料的发展与应用贡献力量。

中钨智造科技有限公司

2026 年 7 月 16 日



Q1 什么是钛锆钼合金（TZM）？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）是一种以钼（Mo）为基体，通过添加少量钛（Ti）、锆（Zr）和碳（C）形成弥散强化相的高性能钼基合金。它是目前全球应用最广泛、产业化最成熟的高温钼合金之一，广泛应用于半导体、真空热处理、航空航天、核工业、医疗设备及高端科研装备等领域。TZM 最早由美国在 20 世纪 60 年代开发，其设计目标是在保持钼高熔点、高导热率和低热膨胀系数等优良特性的基础上，进一步提高材料的高温强度、抗蠕变性能和长期组织稳定性。经过几十年的发展，TZM 已经成为国际公认的工业标准高温钼合金。

TZM 的典型化学成分以钼为主体，通常含有约 0.4%~0.55%的钛、0.06%~0.12%的锆以及 0.01%~0.04%的碳，其余为钼及少量不可避免的杂质元素。在烧结和热加工过程中，钛、锆与碳形成细小、均匀分布的 TiC 和 ZrC 碳化物颗粒，这些弥散强化相能够有效阻碍位错运动和晶界迁移，从而显著提高材料的再结晶温度、高温强度及抗蠕变能力。与纯钼相比，TZM 最大的特点是综合性能更加均衡。它不仅保留了钼约 2623 °C的高熔点、优异的导热性能、较低的热膨胀系数和低蒸气压，还具有更高的高温强度、更好的尺寸稳定性以及更长的高温使用寿命。因此，在 1000~1400 °C长期工作的环境中，TZM 通常能够表现出明显优于纯钼的性能。

目前，TZM 主要采用粉末冶金工艺制造，包括高纯钼粉混料、压制成形、真空烧结、热加工、

热处理和精密机械加工等工序。成熟的制造工艺使 TZM 能够加工成棒材、板材、薄板、管材、坩埚、靶材、热场部件以及各种复杂异形件，满足不同工业领域的需求。由于兼具优异的高温性能、成熟的制造工艺和较高的性价比，TZM 已成为单晶硅生长炉、碳化硅（SiC）晶体生长设备、氮化镓（GaN）外延设备、真空烧结炉、X 射线 CT 旋转阳极、高温模具以及航空航天热端部件的重要材料。

中钨智造认为，TZM 是一种通过 TiC 和 ZrC 弥散强化实现性能提升的高温钼基合金，它在保持钼优异物理性能的基础上，大幅提高了高温力学性能和长期服役稳定性。目前，TZM 仍然是全球高温钼合金应用最广泛、工程经验最丰富、综合性能最均衡的工业标准材料。

Q2 钛锆钼合金（TZM）与纯钼有什么区别？

TZM 和纯钼都属于钼基材料，但两者并不是同一种材料。纯钼属于高纯金属，而 TZM 是在纯钼基础上加入少量钛、锆和碳，通过形成弥散强化相而开发出的高性能钼合金。虽然两者都具有高熔点、优良导热性能和良好的真空适应性，但在组织结构、力学性能、高温性能以及应用领域方面存在明显差异。

最根本的区别在于材料组成。纯钼几乎全部由钼元素组成，通常钼含量达到 99.95%以上；而 TZM 则在钼基体中加入约 0.5%的钛、约 0.08%的锆以及少量碳。这些元素在烧结和热加工过程中形成细小均匀的 TiC 和 ZrC 颗粒，对基体产生弥散强化作用。由于强化机制不同，两者的高温性能差异尤为明显。纯钼虽然具有较高熔点，但随着温度升高，其强度下降较快，再结晶温度相对较低，长期高温工作时容易发生晶粒长大和蠕变变形。而 TZM 通过 TiC 和 ZrC 颗粒有效抑制晶界迁移，提高了再结晶温度，使材料在 1000~1400 °C 范围内仍能保持较高强度和较好的尺寸稳定性。在抗蠕变性能方面，TZM 同样明显优于纯钼。纯钼长期承受高温载荷时容易发生缓慢塑性变形，而 TZM 由于强化相能够阻碍位错运动，其蠕变速率明显降低，更适合长期连续工作的高温设备。

两种材料在导热性能方面都保持较高水平。虽然加入少量合金元素后，TZM 导热率略低于纯钼，但仍然远高于多数耐热合金，完全能够满足半导体热场、高温真空设备等应用对于快速散热的要求。加工性能方面，两者均可采用车削、铣削、磨削、电火花加工等工艺，但由于 TZM 强度更高、硬度更大，其切削难度略高于纯钼。不过，TZM 经过多年工业应用，已经形成成熟的加工工艺，能够稳定制造各种高精度零件。

从应用角度来看，纯钼主要用于一般高温结构件、电极、加热元件、溅射靶材及部分化工设备。而 TZM 更多用于要求更高的高温装备，例如单晶硅生长炉热场部件、SiC 和 GaN 晶体生长设备、真空烧结炉、高温模具、航空航天热端结构件以及医疗 CT 旋转阳极等。

钛锆钼合金（TZM）与纯钼两种材料的主要区别

对比项目	TZM	纯钼
材料类型	钼基合金	高纯金属钼
主要成分	Mo、Ti、Zr、C	Mo
强化机制	TiC、ZrC 弥散强化	无强化相
高温强度	明显更高	较低

对比项目	TZM	纯钼
再结晶温度	更高	较低
抗蠕变性能	优异	一般
导热性能	很高	略高于 TZM
加工难度	略高	相对容易
典型应用	半导体、航空航天、真空炉	电极、加热件、普通高温结构件

中钨智造认为，纯钼和 TZM 并不存在简单的优劣关系，而是适用于不同的应用场景。如果工况温度较低、受力较小且更注重经济性，纯钼通常能够满足要求；如果设备需要长期在高温、高载荷或高真空环境下稳定运行，则 TZM 凭借更高的高温强度、更优异的抗蠕变性能和更好的尺寸稳定性，通常是更加可靠的选择。

Q3 钛锆钼合金（TZM）为什么比纯钼强？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）是在纯钼基础上开发的高性能钼基合金。虽然 TZM 中钛、锆等合金元素的添加量不足 1%，但材料的高温强度、抗蠕变性能和组织稳定性却比纯钼有了显著提升。这种性能提升并不是因为合金元素本身具有更高的强度，而是由于它们在材料内部形成了稳定、高效的强化组织。

TZM 比纯钼强的根本原因，在于弥散强化机制。在粉末冶金烧结及后续热加工过程中，加入的钛、锆和碳会反应生成大量细小且均匀分布的 TiC 和 ZrC 碳化物颗粒。这些碳化物牢固分散在钼基体中，能够有效阻碍位错运动。当材料受到外力时，位错是金属发生塑性变形的主要方式，而 TiC 和 ZrC 颗粒会像一道道障碍物，使位错难以移动，因此材料需要承受更大的应力才会发生变形，高温强度也随之提高。除了提高强度之外，TiC 和 ZrC 颗粒还能显著抑制晶界迁移。纯钼在高温下容易发生再结晶，原有细晶组织逐渐长大，导致材料强度迅速下降。而 TZM 中的强化颗粒能够有效固定晶界位置，延缓甚至阻止晶粒长大，从而显著提高再结晶温度，使材料在长期高温工作条件下仍能保持较高的强度和稳定的组织结构。

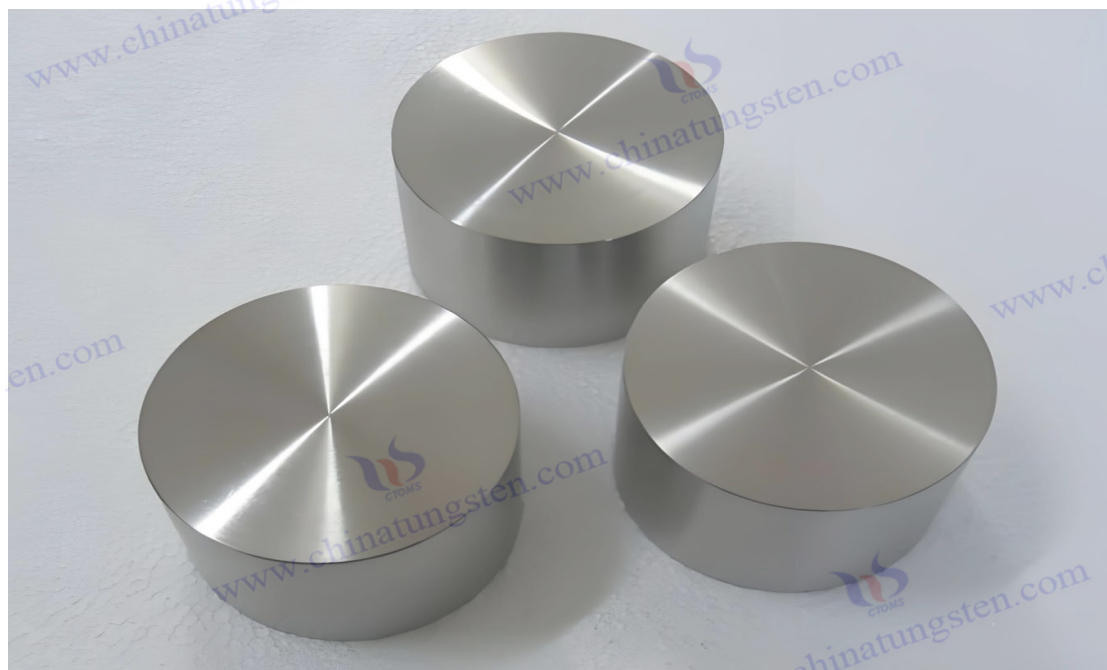
抗蠕变性能的改善，也是 TZM 优于纯钼的重要原因。蠕变是材料在高温和长期载荷作用下缓慢发生塑性变形的现象。由于 TiC 和 ZrC 颗粒能够阻碍位错攀移和晶界滑移，TZM 在 1000~1400 °C 环境中的蠕变速率明显低于纯钼，因此更加适用于长期连续工作的高温设备。

此外，热加工过程对 TZM 性能也有重要影响。锻造、轧制等工艺能够进一步细化晶粒，并使强化颗粒更加均匀地分布于基体中。这种细晶强化与弥散强化共同作用，使 TZM 获得了优异的综合力学性能。TZM 虽然加入了少量合金元素，但并没有明显牺牲钼原有的优良物理性能。它仍然保持了高熔点、较高导热率、低热膨胀系数和低蒸气压等特点，因此能够在提升高温力学性能的同时，继续满足半导体、航空航天及真空设备对热学性能的要求。

从应用角度来看，正是由于这些强化机制的共同作用，TZM 能够长期用于单晶硅生长炉、SiC 晶体生长设备、高温真空炉、航空航天热端部件及 X 射线 CT 旋转阳极等高温装备，而纯钼在这些工况下往往难以满足长期稳定工作的要求。

中钨智造认为，TZM 比纯钼更强，并不是因为加入了更多合金元素，而是因为少量 Ti、Zr 和

C 形成了细小、稳定、均匀分布的 TiC 和 ZrC 弥散强化相。这些强化颗粒能够有效阻碍位错运动、抑制晶粒长大并降低高温蠕变速率，从而使 TZM 在保持钼优异物理性能的同时，大幅提升了高温力学性能和长期服役可靠性。



Q4 钛锆钼合金（TZM）有哪些主要性能优势？

钛锆钼合金（TZM）是目前全球应用最成熟的高温钼基合金之一，其最大的特点是能够在保持纯钼优异物理性能的基础上，显著提升高温力学性能和长期组织稳定性。因此，TZM 广泛应用于半导体、航空航天、真空热处理、医疗设备、核工业及高端科研装备等领域。

TZM 最突出的优势，是优异的高温强度。在 1000~1400 °C 范围内，TZM 仍能够保持较高的承载能力，而纯钼在相同温度下强度下降更加明显。因此，对于长期承受高温载荷的设备，TZM 能够提供更高的安全裕度和更长的使用寿命。

优异的抗蠕变性能也是 TZM 的重要特点。在长期高温工作过程中，材料不可避免会发生缓慢塑性变形，而 TZM 由于 TiC 和 ZrC 弥散强化相的存在，能够有效降低蠕变速率，保持结构尺寸稳定，非常适合高温连续运行设备。

TZM 还具有较高的再结晶温度。由于强化颗粒能够抑制晶界迁移，材料在长期高温环境中不容易发生晶粒粗化，因此能够较长时间保持细晶组织和较高强度。这也是 TZM 能够长期应用于半导体热场和真空炉的重要原因之一。

导热性能优异同样是 TZM 的重要优势。虽然导热率略低于纯钼，但仍远高于多数耐热合金，能够快速传导热量，减少局部过热现象，提高设备温度均匀性。这一特点对于单晶硅、SiC 及 GaN 晶体生长设备尤为重要。

由于钼本身具有较低的热膨胀系数，TZM 同样保持了优异的尺寸稳定性。在频繁加热和冷却

过程中，材料热变形较小，有助于保证高精度设备长期稳定运行。

TZM 还具有很低的蒸气压，即使在高温真空环境下，也不易挥发污染工作环境。因此，它广泛应用于半导体制造、真空热处理及高真空科研设备等洁净度要求极高的领域。

加工性能方面，TZM 优于许多其他高温难熔材料。虽然其硬度高于纯钼，但经过成熟工艺仍可进行锻造、轧制、车削、铣削、磨削、电火花加工及电子束焊接等多种加工方式，便于制造各种复杂结构零件。

此外，TZM 还具有较好的抗热震性能。由于导热率高、热膨胀系数低，在快速冷热循环过程中能够有效降低热应力，因此比许多陶瓷材料具有更好的抗热冲击能力。

钛锆钼合金（TZM）的主要性能优势

性能特点	优势表现
高温强度	长期高温下仍保持较高承载能力
抗蠕变性能	高温长期工作变形小
再结晶温度高	晶粒稳定，不易粗化
导热率高	有利于快速散热和温度均匀
热膨胀系数低	尺寸稳定性优异
蒸气压低	真空环境下洁净、不易挥发
抗热震性能好	耐冷热循环能力强
加工性能成熟	可制造各种复杂高精度零件

中钨智造认为，正是由于这些性能优势，TZM 已经成为高温钼合金领域应用最广、工程经验最丰富的工业标准材料。TZM 最大的优势并非某一项性能特别突出，而是在高温强度、抗蠕变性能、导热性能、尺寸稳定性、真空适应性和加工性能之间实现了优异的综合平衡。这种综合优势，使 TZM 能够长期满足半导体、航空航天、真空热处理及高端科研装备等行业对于高温材料的严格要求，并持续保持其在高温钼合金领域的主导地位。

Q5 钛锆钼合金（TZM）的最高工作温度是多少？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）是一种专门面向高温环境开发的钼基合金，其最高工作温度并不是一个固定数值，而是取决于工作气氛、受力状态、连续工作时间以及对使用寿命的要求。

一般来说，在真空或惰性气氛条件下，TZM 长期推荐工作温度为 1200~1400 °C，短时间工作温度可达到 1600 °C 左右。在部分特殊工况下，瞬时使用温度甚至可以接近 1800 °C，但此时通常属于短时暴露，并不适合作为长期连续运行温度。

TZM 之所以能够在如此高的温度下长期工作，主要得益于其优异的高温组织稳定性。材料中的 TiC 和 ZrC 弥散强化颗粒能够有效抑制晶粒长大，提高再结晶温度，并降低高温蠕变速率，因此即使在 1000 °C 以上长期服役，仍能够保持较高的强度和尺寸稳定性。TZM 的最高工作

温度必须结合工作环境来判断。在高真空环境中，TZM 表现最佳。由于钼具有极低的蒸气压，即使在 1400 °C 以上，也不会产生明显挥发，因此广泛应用于半导体晶体生长设备、真空热处理炉和高真空科研装置。在氩气、氮气等惰性保护气氛下，TZM 同样能够保持优异性能，可长期用于高温烧结、粉末冶金及高温实验设备。如果处于空气环境，则情况完全不同。钼及 TZM 在约 400~500 °C 开始发生氧化，随着温度升高，氧化速度迅速增加，在 600 °C 以上会形成挥发性的三氧化钼（MoO₃），导致材料快速损耗。因此，TZM 并不适合长期在空气中高温使用，除非采取有效的防护涂层或保护气氛。

除了工作气氛，机械载荷也是决定最高工作温度的重要因素。如果材料长期承受较大的载荷，则需要适当降低工作温度，以减少蠕变变形；如果仅作为隔热件、支撑件或非承载结构，则可以适当提高使用温度。不同应用领域对于工作温度的要求也有所不同。例如，半导体热场部件通常长期工作在 1200~1450 °C；SiC 晶体生长设备部分热场区域可达到 1600 °C 左右；真空烧结炉支撑件一般长期工作于 1100~1400 °C；航空航天热端部件则根据具体工况采用短时高温工作模式。

钛钨钼合金（TZM）典型使用温度参考表

工作环境	推荐工作温度
空气环境	不建议超过 500 °C 长期使用
惰性气氛	1200~1400 °C 长期工作
高真空环境	1200~1400 °C 长期工作
短时间高温	可达 1600 °C 左右
瞬时极限工况	可接近 1800 °C（短时）

虽然 TZM 具有约 2623 °C 的熔点，但熔点并不等于可长期使用温度。工程设计通常以材料能够长期保持强度、抗蠕变性能和组织稳定性的温度作为最高工作温度，而不是以熔化温度作为使用依据。中钨智造认为，TZM 最适宜长期工作于 1200~1400 °C 的真空或惰性气氛环境。在这一温度范围内，材料能够充分发挥高温强度、抗蠕变性能和尺寸稳定性的优势，因此成为半导体热场、真空热处理设备及高端科研装备中最成熟、应用最广泛的高温钼合金之一。



Q6 钛锆钼合金（TZM）适用于哪些行业？

钛锆钼合金（TZM）兼具高温强度、高导热率、低热膨胀系数、低蒸气压和优异的真空适应性，因此已经成为全球高温装备制造领域的重要工程材料。经过几十年的产业化应用，TZM 已经广泛应用于半导体、真空热处理、航空航天、核工业、玻璃制造、医疗设备及科研装备等多个行业。

目前，半导体产业是 TZM 最大的应用领域。在单晶硅、碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）晶体生长设备中，TZM 广泛用于热场支撑件、加热系统连接件、导流部件及各种高温结构件。由于能够长期保持尺寸稳定并具备优异的导热性能，TZM 对于提高晶体生长质量和设备寿命具有重要作用。

真空热处理行业也是 TZM 的重要市场。各种真空烧结炉、真空退火炉、钎焊炉和粉末冶金烧结设备内部，大量采用 TZM 制造加热元件支撑件、承载平台、连接件和隔热结构件，以满足长期高温真空工作的要求。

在航空航天领域，TZM 主要用于火箭发动机热端部件、高温喷管、燃烧室结构件、高超声速飞行器热防护系统以及各种高温实验设备。其优异的高温力学性能和低热膨胀特性，使其能够适应严苛的热环境。

核工业及聚变研究同样离不开 TZM。在聚变实验装置、高热流实验平台、真空系统、等离子体设备及中子辐照实验中，TZM 常作为高温支撑件、真空结构件及热管理部件使用，为高温科研装备提供稳定可靠的材料保障。

玻璃工业中，TZM 主要应用于高温玻璃熔炉、玻璃成形设备及玻璃纤维生产设备。由于其高温强度高、耐热变形能力强，能够有效提高设备使用寿命和生产稳定性。

金属加工行业同样广泛采用 TZM。例如压铸模芯、热冲压模具、等温锻造模具及各种高温工装，都能够利用 TZM 优异的耐高温性能，提高模具寿命并改善加工质量。

医疗设备领域，TZM 主要用于 X 射线 CT 旋转阳极、高能电子束设备及部分放射诊断设备。高导热率和良好的高温稳定性，有助于快速散热，提高设备运行可靠性。

此外，在科研装备领域，TZM 还广泛应用于电子束设备、离子注入系统、高温实验炉、高真空实验装置、同步辐射设备及各种材料科学研究平台，是众多高端实验设备的重要基础材料。随着人工智能、高性能计算、新能源汽车和第三代半导体产业的发展，TZM 的应用范围还在不断扩大。尤其是在先进半导体制造、高端真空装备及未来聚变能源领域，市场需求预计将持续增长。

钛锆钼合金（TZM）主要应用行业

行业	典型应用
半导体	单晶硅、SiC、GaN 热场部件、晶体生长设备
真空热处理	真空炉、烧结炉、退火炉、钎焊炉

行业	典型应用
航空航天	火箭发动机、喷管、高超声速飞行器
核工业与聚变	聚变实验装置、等离子体设备、高热流部件
玻璃工业	玻璃熔炉、高温成形设备
金属加工	压铸模芯、热冲压模具、等温锻造模具
医疗设备	CT 旋转阳极、电子束设备
科研装备	高温实验炉、电子束系统、离子注入设备

中钨智造认为，TZM 是一种典型的高端装备基础材料，其应用几乎覆盖所有需要长期高温、真空或高热流密度环境的工业领域。其中，半导体产业已经成为 TZM 最大的市场，未来随着第三代半导体、人工智能芯片、聚变能源及航空航天技术的发展，TZM 将在更多高端装备中发挥更加重要的作用。

Q7 为什么半导体设备大量采用钛锆钼合金（TZM）？

半导体制造是目前对材料性能要求最高的工业领域之一。从单晶硅生长到碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）晶体制备，再到外延、生长退火、离子注入和高温真空热处理，整个制造过程都需要设备长期运行在高温、高真空、高洁净度环境中。钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）凭借优异的综合性能，已经成为半导体设备中应用最广泛的高温结构材料之一。

首先，TZM 具有优异的高温强度。半导体热场设备通常需要长期工作在 1200~1600 °C 甚至更高的温度范围内，普通金属材料容易发生软化和变形，而 TZM 由于 TiC 和 ZrC 弥散强化相的作用，在高温下仍能够保持较高的机械强度，确保热场结构长期稳定运行。

其次，TZM 具有出色的尺寸稳定性。晶体生长过程中，对温度场均匀性要求极高，如果热场部件发生变形，将直接影响晶体质量、位错密度和良率。TZM 热膨胀系数较低，高温蠕变速率小，能够长期保持尺寸精度，有助于稳定晶体生长环境。

导热性能优异也是 TZM 的重要优势。相比多数耐热合金，TZM 具有更高的导热率，可以快速传导热量，降低局部过热现象，使热场温度更加均匀。这对于单晶硅、SiC 及 GaN 晶体生长尤为重要，因为均匀稳定的温度分布直接决定晶体质量。

半导体设备通常工作于高真空环境，因此材料必须具有极低的蒸气压和良好的真空兼容性。TZM 在高温下蒸发极少，不易释放挥发性物质，也不会对晶体和真空系统造成污染，因此能够满足半导体制造对于洁净度的严格要求。

此外，TZM 还具有良好的抗热疲劳性能。半导体设备需要频繁经历升温、保温和冷却循环，材料必须能够承受反复热循环而不产生裂纹或永久变形。TZM 较高的导热率和较低的热膨胀系数，使其能够有效降低热应力，提高设备使用寿命。

从制造角度来看，TZM 已经形成成熟的产业体系。无论是棒材、板材、管材还是各种复杂异形件，都能够通过成熟的粉末冶金和精密加工工艺稳定制造，保证设备制造商获得尺寸精确、

性能稳定的一致性产品。

随着人工智能芯片、高性能计算、新能源汽车和第三代半导体快速发展，全球晶圆厂不断扩建，对高端晶体生长设备和热处理设备的需求持续增加，这也进一步推动了 TZM 在半导体产业中的广泛应用。

中钨智造认为，半导体设备大量采用 TZM，并不是因为其单项性能最好，而是因为它在高温强度、导热性能、尺寸稳定性、真空洁净性、抗热疲劳能力和加工制造成熟度之间实现了最佳平衡。这种综合优势，使 TZM 成为当前半导体热场系统最成熟、最可靠的高温工程材料。

Q8 钛锆钼合金（TZM）在单晶硅生长炉中有哪些应用？

单晶硅是集成电路、功率器件、传感器及光伏产业的重要基础材料，而单晶硅生长炉则是整个晶圆制造产业链中的核心装备。在直拉法（CZ）和区熔法（FZ）单晶硅生长过程中，热场系统需要长期工作于高温真空环境，并保持极高的温度稳定性和结构精度。由于钛锆钼合金（TZM）具有优异的高温性能，因此成为单晶硅生长炉中最重要的高温结构材料之一。

TZM 最主要的应用，是制造热场支撑结构件。热场系统由加热器、隔热屏、导流部件、支撑框架及连接结构组成，这些部件长期承受 1200~1500℃ 高温，并需要保持稳定的几何尺寸。TZM 能够有效抵抗高温蠕变和热变形，保证热场结构长期保持设计精度。

在加热器支撑系统中，TZM 广泛用于支撑杆、连接件、固定架及安装构件。这些零件不仅需要承受高温，还需要承受热场重量和热应力。由于 TZM 高温强度高、尺寸稳定性好，因此能够显著提高整套热场系统的可靠性。

TZM 还用于各种导流部件和热场调节结构。通过合理设计导流板和支撑件，可以优化炉内热流分布，提高温度均匀性，从而改善晶体生长条件，降低位错和缺陷，提高晶圆品质。

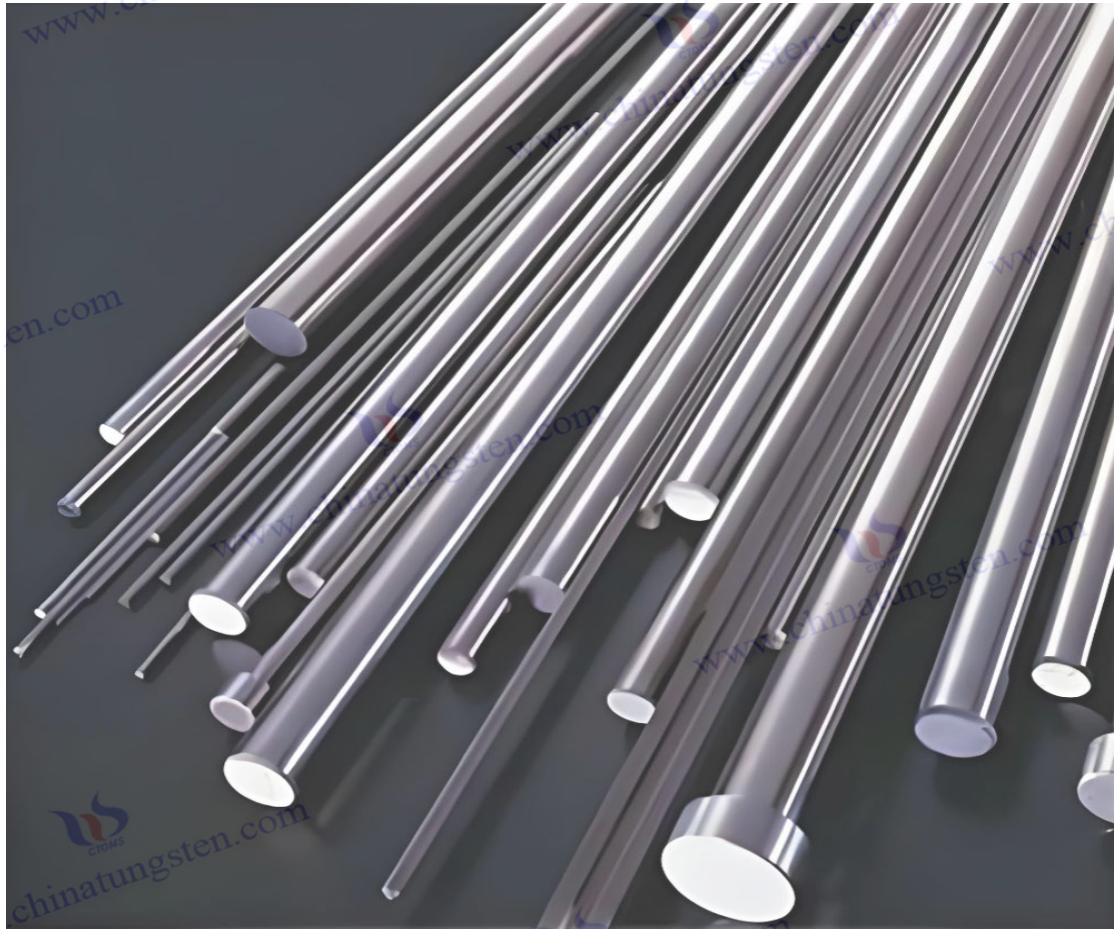
对于大尺寸晶圆生产，TZM 的重要性更加突出。随着 300mm 晶圆成为主流，更大尺寸晶体的发展趋势不断推进，热场系统尺寸越来越大，对材料抗变形能力提出了更高要求。TZM 优异的抗蠕变性能和较低的热膨胀系数，使其能够满足大型热场长期稳定工作的需求。

在单晶硅生长过程中，材料洁净性同样十分重要。TZM 具有极低的蒸气压，在高温真空环境下不会明显挥发，也不会释放大量杂质，因此能够有效避免晶体污染，保证硅单晶纯度。

此外，TZM 优异的导热性能有助于快速传导热量，使热场温度分布更加均匀。这对于控制晶体生长速度、稳定固液界面以及提高晶体完整性具有重要意义。

目前，TZM 在单晶硅生长炉中的典型应用包括热场支撑框架、加热器支撑件、导流板及热流调节件、固定夹具和连接件、高温螺栓及紧固结构、隔热系统支撑件、热场安装底座及其他长期高温结构件。这些部件虽然不是直接接触熔融硅液，但却决定着整个热场系统的稳定性，因此对材料性能要求极高。随着人工智能芯片、高性能计算和先进制造持续推动晶圆需求增长，全球单晶硅设备不断扩建，对高品质 TZM 热场部件的需求也持续增加。未来，大尺寸晶圆、更高效热场设计以及更长设备寿命，将继续推动 TZM 在单晶硅生长炉中的应用升级。

中钨智造认为，TZM 已经成为现代单晶硅生长炉热场系统不可缺少的关键材料。凭借优异的高温强度、尺寸稳定性、导热性能和真空洁净性，TZM 能够有效提高热场稳定性、改善晶体生长环境并延长设备使用寿命，是高品质单晶硅制造的重要材料基础。



Q9 钛锆钼合金（TZM）为什么适用于 SiC 和 GaN 晶体生长？

碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）属于第三代半导体材料，是新能源汽车、光伏逆变器、轨道交通、5G 通信、人工智能服务器和高功率电子器件的重要基础材料。与传统硅晶体相比，SiC 和 GaN 晶体的生长温度更高、工艺更复杂，对设备材料的要求也更加严格。钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）正是目前第三代半导体晶体生长设备中应用最广泛的高温结构材料之一。

首先，SiC 晶体生长属于超高温工艺。物理气相传输法（PVT）生长 SiC 时，炉内温度通常达到 2000~2400 °C，热场外围结构件长期处于 1200~1700 °C 甚至更高的环境中。虽然 TZM 并不直接接触 SiC 升华源，但其作为热场支撑件、连接件和高温结构件，必须在长期高温条件下保持足够的机械强度和尺寸稳定性。

TZM 最大的优势之一，是优异的高温强度和抗蠕变性能。材料中的 TiC 和 ZrC 弥散强化相能够有效抑制晶粒长大和高温变形，使热场系统长期保持稳定几何尺寸，从而维持炉内温度场的稳定性。对于 SiC 晶体而言，温度场哪怕发生微小变化，都可能影响晶体生长速度、缺陷

密度和最终良率。

其次，TZM 具有较高的导热率。SiC 和 GaN 晶体生长需要精确控制热流分布，高导热材料能够更均匀地传递热量，减少局部热点，改善晶体内部温度梯度，提高晶体质量。

低热膨胀系数也是 TZM 的重要优势。在晶体生长过程中，设备需要经历多次升温 and 降温循环。如果热场部件因热膨胀产生较大变形，将导致温度场变化甚至装配精度下降。TZM 热膨胀较小，有助于保持整个热场系统的长期稳定。

此外，TZM 具有极低的蒸气压和良好的真空洁净性。SiC 和 GaN 晶体生长通常在高真空或惰性气氛下进行，材料不能释放挥发性杂质，否则容易污染晶体。TZM 在高温真空环境中蒸发极少，不易污染晶体，因此非常适合作为高纯热场材料。

在 GaN 产业中，虽然外延生长温度低于 SiC，但 GaN 衬底制备、高温退火以及部分晶体生长设备同样需要长期稳定的高温结构材料。TZM 凭借成熟的制造工艺和可靠的高温性能，同样广泛应用于相关设备。

目前，TZM 在 SiC 和 GaN 设备中的典型应用包括热场支撑件、导流板、连接件、固定夹具、高温框架、加热系统支撑结构及各种异形高温部件。这些零件虽然不直接参与晶体形成，但对于维持稳定温度场和提高设备寿命具有决定性作用。

随着新能源汽车、电力电子、人工智能数据中心和高速通信快速发展，第三代半导体产业保持高速增长，SiC 和 GaN 晶体生长设备持续扩产，也将进一步推动高品质 TZM 材料需求不断增加。

中钨智造认为，TZM 适用于 SiC 和 GaN 晶体生长，并不仅仅因为其耐高温，而是因为它能够同时提供优异的高温强度、尺寸稳定性、高导热率、低蒸气压和真空洁净性。这种综合性能能够保证热场系统长期稳定运行，提高晶体质量和设备可靠性，因此成为第三代半导体热场系统的重要基础材料。

Q10 钛锆钼合金（TZM）的高温强度是多少？

高温强度是衡量钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）性能最重要的指标之一，也是 TZM 能够广泛应用于半导体、航空航天、真空热处理和高端科研装备的重要原因。

TZM 的高温强度并不是一个固定数值，而是随着温度、材料状态、加工工艺、试样尺寸以及测试标准的不同而变化。因此，工程应用通常采用典型范围，而不是单一数值。室温下，TZM 的抗拉强度一般可达到 700~900 MPa，经过优化热加工和热处理后，部分产品甚至可以超过 900 MPa，明显高于纯钼。随着温度升高，所有金属材料的强度都会逐渐下降，但 TZM 由于 TiC 和 ZrC 弥散强化相的作用，其下降速度明显慢于纯钼。

典型高温条件下 TZM 抗拉强度

温度	典型抗拉强度
室温	700~900 MPa
800 °C	550~700 MPa
1000 °C	450~600 MPa
1200 °C	300~450 MPa
1400 °C	180~300 MPa

以上数据为典型工程参考值，不同制造工艺、材料纯度及产品规格可能存在一定差异。相比之下，纯钼在 1000 °C 以上强度下降更加明显，而 TZM 仍能够保持较高承载能力，因此更适合长期高温工作。

TZM 高温强度优异，主要来自 TiC 和 ZrC 弥散强化相。这些细小碳化物能够有效阻碍位错运动，并抑制晶界迁移，提高再结晶温度，使材料即使在 1200 °C 以上长期工作，也能够保持稳定组织和较高强度。除了抗拉强度之外，高温屈服强度和抗蠕变能力同样重要。在高温长期服役过程中，材料往往不会立即断裂，而是发生缓慢塑性变形。TZM 较低的蠕变速率，使其在高温载荷条件下能够长期保持结构稳定，因此广泛用于热场支撑件、模具和航空航天热端结构。

高温强度还受到加工状态影响。经过充分锻造、轧制和合理热处理后，TZM 晶粒更加细小，强化颗粒分布更加均匀，因此高温强度通常高于普通烧结态材料。对于工程设计而言，通常不会直接按照材料极限强度进行设计，而是结合长期蠕变性能、安全系数和使用寿命综合确定允许工作应力。因此，高温强度不仅体现材料性能，也决定了设备的长期可靠性。

中钨智造认为，TZM 最大的优势不是室温强度特别高，而是在 1000~1400 °C 长期工作时，仍能够保持较高的承载能力和优异的抗蠕变性能。正是这种长期稳定的高温力学性能，使 TZM 成为半导体热场、高温真空设备、航空航天热端部件及其他高温装备中应用最成熟、最可靠的钼基高温合金之一。

Q11 钛钼钨合金（TZM）的导热率是多少？

导热率是衡量材料传递热量能力的重要指标，也是评价高温结构材料性能的关键参数之一。对于半导体晶体生长设备、真空热处理炉、航空航天热端部件以及 X 射线旋转阳极等应用而言，优异的导热性能不仅能够提高热效率，还能够改善温度均匀性，降低热应力，因此导热率是选择材料的重要依据。

钛钼钨合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）继承了钼优异的导热特性。虽然由于加入了少量钛、钨和碳形成强化相，其导热率略低于纯钼，但仍远高于大多数耐热合金和高温结构材料。室温下，TZM 的导热率通常为 115~140 W/(m·K)，工业产品多数集中在 120~135 W/(m·K) 之间，具体数值会受到材料纯度、制造工艺、晶粒尺寸及测试方法的影响。随着温度升高，TZM 导热率会逐渐降低，但整体变化较为平缓。在 1000 °C 左右，导热率通常仍保持在 90~110 W/(m·K) 范围内，能够满足高温热场设备对于快速导热的要求。

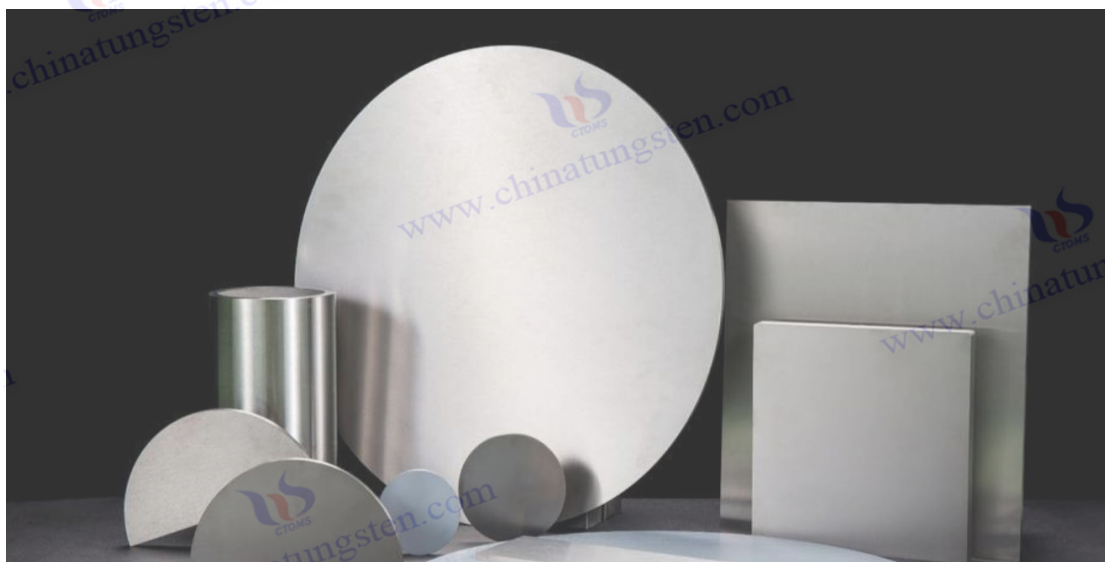
TZM 典型导热率参考表

温度	典型导热率
室温	115~140 W/(m·K)
400 °C	110~130 W/(m·K)
800 °C	100~120 W/(m·K)
1000 °C	90~110 W/(m·K)
1200 °C	80~100 W/(m·K)

相比其他常见高温材料，TZM 导热性能具有明显优势。例如，镍基高温合金导热率通常只有 10-25 W/(m·K)，不锈钢约为 15~25 W/(m·K)，钛合金约为 7-20 W/(m·K)，而 TZM 能够达到上述材料的数倍。因此，在需要快速导热和精确控温的设备中，TZM 具有不可替代的优势。

高导热率带来的直接收益主要体现在几个方面。首先，能够快速传导热量，使设备温度分布更加均匀，减少局部热点。其次，可以降低热应力，提高热场系统的稳定性，减少热疲劳损伤。再次，有利于缩短加热和冷却时间，提高设备工作效率。对于单晶硅、碳化硅（SiC）及氮化镓（GaN）晶体生长设备而言，均匀稳定的热场对于晶体质量具有决定性影响，因此 TZM 成为热场系统的重要材料。虽然加入 Ti、Zr 和 C 后导热率略有下降，但这种轻微损失换来了高温强度、抗蠕变性能和尺寸稳定性的显著提升，因此综合性能远优于纯钼。

中钨智造认为，TZM 兼具高导热率和优异的高温力学性能，是少数能够同时满足快速传热和长期高温稳定工作的工程材料之一。正是这种性能平衡，使 TZM 成为半导体热场、真空炉、高温模具及航空航天热端部件的重要基础材料。



Q12 钛锆钼合金（TZM）容易加工吗？如何进行机械加工？

钛锆钼合金（TZM）属于高强度难熔金属材料，其机械加工难度高于普通钢材、铝合金及纯钼，但远低于许多人想象中的难加工材料。经过合理选择刀具、切削参数及冷却方式，TZM 完全可以实现高精度机械加工，并已经形成成熟的工业加工工艺。TZM 属于可以加工、但需

要采用专用工艺的材料。

TZM 加工难度主要来自三个方面。首先，其硬度和高温强度明显高于纯钼，因此切削阻力更大，刀具磨损速度较快。其次，TZM 导热率较高，虽然有利于工件散热，但切削过程中热量容易传递到刀具，增加刀具热负荷。第三，TZM 室温塑性低于普通金属，加工过程中需要避免产生过大的机械冲击，否则可能导致局部崩边或裂纹。在实际生产中，TZM 通常采用传统机械加工方式，包括车削、铣削、钻孔、镗孔、磨削、攻丝及数控加工等。对于复杂结构，还可配合电火花加工（EDM）、激光加工及电子束加工等特殊工艺。机械加工过程中，应优先采用高刚性数控设备，保持稳定切削，避免振动。刀具通常选择细晶粒硬质合金、涂层硬质合金或聚晶金刚石（PCD）刀具，以提高耐磨性和加工寿命。

切削速度一般不宜过高，应采用中低速切削和较稳定的进给量，以降低刀具磨损和工件表面损伤。加工过程中尽量避免断续切削和剧烈冲击，因为连续稳定切削更有利于获得较好的表面质量。冷却方式同样十分重要。多数粗加工可以采用充足的乳化液或专用切削液进行冷却润滑，以降低切削温度。对于部分高纯 TZM 零件或特殊真空部件，为避免污染，也可采用干式加工或微量润滑加工，并结合后续清洗工艺。

对于高精度零件，通常采用粗加工、半精加工和精加工相结合的工艺路线。粗加工快速去除余量，半精加工释放应力，精加工最终达到尺寸和表面质量要求。如果零件尺寸较大或加工余量较多，还可能安排中间去应力热处理，以减少变形。TZM 加工完成后，常进行去毛刺、超声波清洗、真空脱脂及表面检验，确保满足半导体、真空设备及航空航天等高端应用对于洁净度和尺寸精度的要求。

钛锆钼合金（TZM）的加工特点

加工特点	说明
可车削	可以，高刚性设备效果最佳
可铣削	可以，宜采用硬质合金刀具
可钻孔	可以，需控制切削热
可磨削	可以，适合高精度加工
可攻丝	可以，小尺寸需控制扭矩
可 EDM 加工	可以，适合复杂结构
可激光加工	可以，适合精密轮廓

需要强调的是，TZM 加工经验已经十分成熟。全球大量半导体热场部件、航空航天零件和真空炉结构件，都采用常规数控设备完成加工，只是在刀具、参数和工艺控制方面要求更加严格。中钨智造认为，TZM 并非不能加工，而是属于需要专业工艺支持的高性能材料。通过合理选择刀具材料、优化切削参数、控制加工应力并配合适当冷却方式，可以稳定获得高精度、高质量 TZM 零件。目前，TZM 机械加工技术已经高度成熟，完全能够满足半导体、航空航天及高端真空装备对于复杂精密部件的制造要求。

Q13 钛锆钼合金（TZM）可以焊接吗？有哪些焊接方法？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）可以焊接，但与普通钢材、不锈钢或钛合金相比，其焊接难度更高，对工艺控制要求也更加严格。由于 TZM 属于难熔

金属材料，具有较高的再结晶温度和较低的室温塑性，如果焊接工艺控制不当，容易产生热裂纹、焊接应力集中及晶粒粗化等问题。因此，TZM 焊接通常用于高端装备制造，并优先选择热输入小、保护效果好、焊缝质量高的焊接工艺。

TZM 焊接最大的特点，是必须尽可能避免氧、氮、氢等杂质污染。钼在高温下对氧极为敏感，焊接过程中一旦发生氧化，不仅会降低焊缝塑性，还可能导致焊缝脆化。因此，无论采用何种焊接方法，都应在高真空或高纯惰性气氛保护下进行。目前，TZM 主要采用以下几种焊接工艺。

电子束焊（Electron Beam Welding, EBW） 是应用最广泛、焊接质量最高的方法。电子束焊通常在高真空环境下完成，能够获得较深的熔深和极小的热影响区，焊缝纯净、变形小，非常适合半导体热场部件、航空航天零件及高精真空设备。**激光焊（Laser Beam Welding, LBW）** 同样适用于 TZM。激光焊热输入小、焊接速度快、变形较小，适用于薄壁零件和精密结构件。但由于 TZM 导热率较高，焊接过程中需要合理控制激光功率和焊接速度，以保证稳定熔池。**钨极氩弧焊（GTAW/TIG）** 理论上可以用于 TZM，但应用较少。这是因为电弧焊热输入较大，容易引起晶粒粗化和焊接裂纹，通常只适用于要求不高或尺寸较大的结构件，并需要采用高纯氩气保护和严格的预热、缓冷措施。**等离子焊和微束等离子焊** 在部分特殊零件中也有应用，其特点介于 TIG 焊和激光焊之间，可获得较好的焊缝成形质量。对于部分大型结构件或复杂组件，还可采用扩散焊和真空钎焊等固相连接技术。这类工艺虽然不属于熔焊，但能够避免熔池形成，大幅降低焊接残余应力，因此在高端半导体设备和真空装备中应用越来越广。

不同钛锆钼合金（TZM）焊接工艺特点

焊接方法	适用性	特点
电子束焊（EBW）	★★★★★	真空焊接、焊缝质量最高、热影响区最小
激光焊（LBW）	★★★★☆	精密焊接、变形小、效率高
TIG 焊	★★☆☆☆	可焊接，但热输入较大
等离子焊	★★★★☆	适合部分中厚板结构
扩散焊	★★★★★	固相连接、接头性能优异
真空钎焊	★★★★☆	适合复杂组件装配

为了保证焊接质量，TZM 焊接前通常需要进行精细加工和彻底清洗，去除油污、氧化膜及其他污染物。焊后还可根据需要进行真空退火，以释放残余应力，提高焊缝稳定性。

目前，在半导体晶体生长设备、航空航天高温部件、真空炉结构件及医疗设备中，电子束焊和扩散焊已经成为 TZM 连接的主流工艺。

中钨智造认为，TZM 并非不能焊接，而是需要采用适合难熔金属特点的高品质焊接工艺。其中，电子束焊、激光焊、扩散焊和真空钎焊是目前最成熟、应用最广泛的方法。对于高端半导体和航空航天产品而言，优先采用真空环境下的焊接或固相连接工艺，能够获得最佳的接头质量和长期服役可靠性。

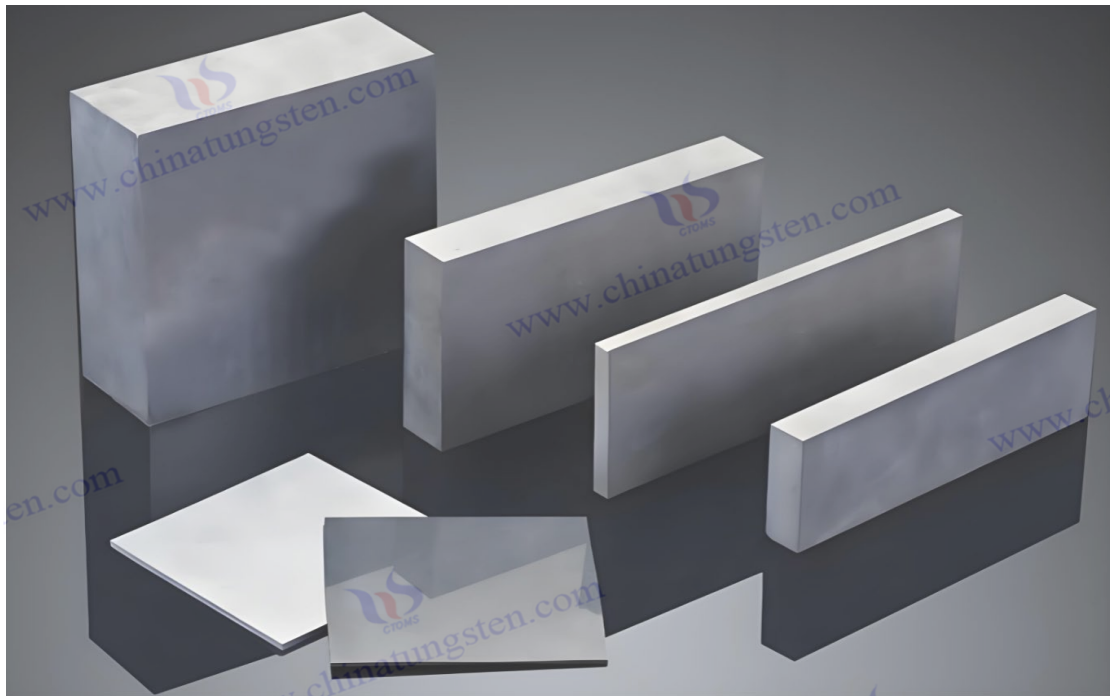
Q14 钛锆钼合金（TZM）可以进行 3D 打印（增材制造）吗？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）可以进行 3D 打印，但目前仍主要处于科研开发和小批量试制阶段，尚未像钛合金、不锈钢或镍基高温合金那样实现广泛工业化应用。随着增材制造技术不断发展，TZM 作为一种高性能钼基合金，已经成为航空航天、聚变能源、半导体和高端科研装备领域的重要研究对象。其主要优势在于能够制造传统加工方法难以完成的复杂内部流道、轻量化结构和一体化零件。目前，TZM 主要采用以下几种增材制造技术。

激光粉末床熔融（Laser Powder Bed Fusion, LPBF）是研究最广泛的方法。通过高能激光逐层熔化 TZM 粉末，可以制造复杂三维结构零件。但由于 TZM 熔点高、导热率大、热应力高，打印过程中容易产生裂纹，因此需要精确控制激光功率、扫描策略和基板预热温度。**电子束粉末床熔融（Electron Beam Powder Bed Fusion, EB-PBF）**同样适用于 TZM。由于电子束加工通常在真空环境下进行，并具有更高的预热能力，因此相比激光打印更有利于降低热应力和裂纹风险，也是未来 TZM 增材制造的重要发展方向。此外，**定向能量沉积（DED）**等工艺也被用于大型 TZM 结构件制造和修复，但目前应用仍然较少。

虽然 TZM 可以实现增材制造，但仍面临几个关键技术挑战。首先是**热裂纹问题**。TZM 导热率高、熔点高，凝固速度快，打印过程中容易形成较大的温度梯度，从而产生热裂纹。这是目前限制 TZM 大规模打印应用的主要难题之一。其次是**粉末质量要求极高**。TZM 打印粉末通常需要具有高球形度、窄粒径分布、高纯度和低氧含量，否则容易影响成形质量和最终性能。第三是**打印后的热处理工艺**。为了消除残余应力、改善组织结构并恢复材料性能，TZM 打印件通常需要进行真空热处理或热等静压（HIP）处理。此外，TZM 增材制造工艺窗口较窄，对设备控制精度要求很高。目前，全球只有少数科研机构 and 高端制造企业能够稳定实现高质量 TZM 打印。尽管如此，增材制造仍具有传统加工无法替代的优势。例如，对于复杂热场结构、内部冷却通道、高集成度零件和小批量定制产品，3D 打印能够显著缩短制造周期、减少材料浪费并提高设计自由度。

未来，随着专用 TZM 打印粉末开发、打印工艺优化以及后处理技术不断成熟，TZM 增材制造有望在聚变能源、航空航天、高端半导体设备和科研装备等领域获得更加广泛的应用。中钨智造认为，TZM 已经具备增材制造能力，但目前仍属于高端制造技术，距离全面产业化还有一定距离。未来的发展重点将集中在高品质打印粉末开发、裂纹控制、组织优化及热处理工艺完善等方面。随着 3D 打印技术不断成熟，TZM 将在复杂高温结构件、一体化热场部件和轻量化设计领域展现越来越大的应用潜力。



Q15 钛锆钼合金（TZM）与 MHC（钼铪碳合金）有什么区别？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy, TZM）和钼铪碳合金（Molybdenum-Hafnium-Carbon Alloy, 简称 MHC）都是高性能钼基高温合金，两者均是在纯钼基础上通过弥散强化提高高温性能。然而，它们采用不同的强化体系，因此在高温强度、加工性能、成本、应用领域及产业成熟度等方面存在明显差异。

两种材料最大的区别在于强化元素不同。TZM 采用钛、锆和碳形成 TiC、ZrC 弥散强化相，而 MHC 则采用铪和碳形成更加稳定的 HfC 强化颗粒。由于 HfC 熔点高达约 3890 °C，热稳定性明显高于 TiC 和 ZrC，因此 MHC 在超高温环境下具有更好的组织稳定性。

从高温性能来看，MHC 通常优于 TZM。在 1400 °C 以上长期工作条件下，MHC 具有更高的抗蠕变能力、更好的晶粒稳定性以及更高的再结晶温度，因此在极端高温环境下能够保持更长的使用寿命。但在 1200~1400 °C 这一工业最常见的工作温度范围内，TZM 已经能够满足绝大多数应用需求，其综合性能非常成熟，因此并不会因为 MHC 性能更高而被全面替代。

加工性能方面，TZM 具有明显优势。由于 TiC 和 ZrC 强化体系更加成熟，TZM 锻造性能、轧制性能及机械加工性能都优于 MHC。MHC 硬度更高，加工难度更大，对刀具磨损更加明显，加工成本也相应增加。

制造工艺成熟度也是两者的重要区别。TZM 经过几十年的工业应用，已经建立了完整稳定的粉末冶金、锻造、轧制及精密加工体系，可稳定生产各种棒材、板材、管材及复杂异形件。而 MHC 产业化时间较短，全球能够稳定批量生产高品质 MHC 的企业数量相对有限。

成本方面，MHC 明显高于 TZM。铪属于稀有金属，价格远高于钛和锆，因此 MHC 原材料成本及制造成本均高于 TZM。这也是目前 TZM 仍然占据主流市场的重要原因之一。

在应用领域方面，两者既有重叠，也有分工。TZM 广泛用于半导体热场、真空热处理设备、航空航天、医疗设备及科研装备，是目前工业应用最成熟的高温钼合金。MHC 则更多用于要求更高温度、更长寿命或极端服役环境的高端装备，例如超高温热场、高热流密度部件及部分航空航天特殊结构件。

钛锆钼合金（TZM）与 MHC（钼铪碳合金）两种材料主要区别

对比项目	TZM	MHC
强化体系	TiC、ZrC	HfC
高温强度	优异	更高
抗蠕变性能	优异	更优
再结晶温度	高	更高
加工性能	较好	较难
制造成熟度	非常成熟	较成熟
成本	较低	较高
应用范围	最广泛	高端特殊领域

因此，MHC 并不是 TZM 的简单升级版，而是针对更高温、更苛刻工况开发的专用钼基合金。中钨智造认为，TZM 和 MHC 并不是竞争关系，而是互补关系。TZM 凭借成熟工艺、良好加工性能和较高性价比，仍然是全球高温钼合金的工业标准；MHC 则依靠更稳定的 HfC 强化体系，在极端高温和超长寿命应用中具有明显优势。未来，两种材料将在不同工况下长期并存，共同满足高端装备制造的发展需求。

Q16 钛锆钼合金（TZM）与钨合金相比有哪些优势？

钛锆钼合金（TZM）和钨合金都属于难熔金属材料，具有高熔点、高温稳定性和优异的真空性能，因此广泛应用于航空航天、半导体、核工业及高端科研装备。不过，两种材料的性能特点并不完全相同，实际工程应用中通常根据具体工况进行选择。钨最大的优势是熔点极高，约 3420℃，明显高于 TZM 所采用的钼基材料，因此在直接承受超高温火焰、高能粒子轰击及等离子体侵蚀等极端工况下，钨具有不可替代的优势。而 TZM 最大的优势，则体现在综合性能更加均衡。

首先，TZM 加工性能明显优于钨合金。钨硬度高、塑性低，加工过程中容易崩边和开裂，加工效率较低。而 TZM 具有更好的塑性和可加工性，可进行车削、铣削、钻孔、磨削、电火花加工及电子束焊接，更容易制造高精度复杂结构件。

其次，TZM 密度更低。TZM 密度约为 10.1g/cm³，而纯钨约为 19.3g/cm³，钨重合金通常也在 17~18.5g/cm³ 之间。因此，在尺寸相同情况下，TZM 重量仅约为钨的一半，对于航空航天及大型半导体设备而言，有利于减轻整体重量。

TZM 导热性能同样具有优势。虽然钨导热率也较高，但 TZM 能够在保持高导热率的同时，提供更好的高温尺寸稳定性和加工制造能力，因此在热场系统中更容易实现复杂结构设计。从热膨胀角度来看，两者都属于低热膨胀材料，但 TZM 较好的高温塑性能够更有效地缓解

热应力，因此在频繁冷热循环条件下，更容易保持结构完整性。

焊接性能方面，TZM 同样优于钨。钨焊接难度较大，而 TZM 可采用电子束焊、激光焊、扩散焊及真空钎焊等成熟工艺，实现高质量连接。

成本方面，TZM 通常低于高性能钨合金。特别是在大型复杂零件制造时，由于 TZM 加工效率更高、材料利用率更好，因此整体制造成本具有一定优势。

在应用领域上，两种材料各有所长。TZM 主要用于半导体热场、单晶硅和 SiC 设备、真空炉、高温模具及航空航天结构件；钨则更多用于聚变偏滤器、X 射线靶材、高能粒子设备、电极及直接承受极端热流密度的部件。

钛锆钼合金（TZM）与钨合金两种材料主要区别

对比项目	TZM	钨合金
熔点	约 2623 °C	约 3420 °C
密度	约 10.1 g/cm³	17~19.3 g/cm³
加工性能	较好	较难
导热性能	很高	很高
焊接性能	较成熟	难度较高
高温塑性	较好	较低
制造成本	较低	较高
典型应用	半导体、真空炉、航空航天	聚变、等离子体、高热流部件

在很多高端装备中，TZM 和钨并不是相互替代，而是共同使用。例如聚变装置中，直接面对等离子体的一侧通常采用钨，而后方支撑结构则可能采用 TZM，从而兼顾耐极端高温能力和结构可靠性。

中钨智造认为，钨拥有更高的熔点和更强的耐极端高温能力，而 TZM 则在加工性能、重量、制造成本、焊接性能及综合工程应用方面具有明显优势。对于大多数 1200~1600 °C 高温设备而言，TZM 已经能够满足使用要求，并能够以更低成本实现复杂结构制造，因此成为半导体、真空热处理及航空航天领域应用最广泛的高温钼基合金。真正需要直接承受超高热流密度或等离子体轰击时，钨仍然是首选材料。



Q17 钛锆钼合金（TZM）为什么价格比纯钼高？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）的市场价格通常高于纯钼，这不仅仅是因为添加了钛、锆等合金元素，更重要的是其制造工艺更加复杂、质量控制要求更高、加工成本更高，因此综合制造成本明显高于纯钼。

首先，TZM 的原材料成本高于纯钼。虽然 TZM 中钛和锆的添加量通常不足 1%，但这些高纯合金元素价格明显高于普通钼粉。同时，为保证高温性能，TZM 对碳含量、氧含量、氮含量等杂质控制要求更加严格，高纯原材料采购成本也随之提高。

其次，TZM 制造工艺更加复杂。纯钼通常采用粉末冶金烧结后即可满足部分应用，而 TZM 不仅需要精确控制 Ti、Zr 和 C 的配比，还需要通过高均匀性混粉、真空烧结、锻造、轧制及热处理等多个关键工序，使 TiC 和 ZrC 弥散强化相均匀分布于钼基体中。任何一个工艺环节控制不当，都可能导致性能下降。

其中，强化相控制是 TZM 生产最核心的技术之一。TiC 和 ZrC 颗粒既不能过粗，也不能过细，更不能发生团聚，否则会影响高温强度和抗蠕变性能。因此，TZM 生产不仅需要先进设备，还依赖丰富的工艺经验。

热加工成本也是 TZM 价格较高的重要原因。为了获得细小均匀的晶粒组织，TZM 通常需要进行多道锻造、轧制和中间退火，每一道工序都需要精确控制温度、变形量和加工速度，以保证最终组织和性能的一致性。

此外，TZM 加工成本明显高于纯钼。由于 TZM 硬度更高、高温强度更大，刀具磨损更快，加工时间更长，加工设备和刀具成本也相应提高。对于半导体热场部件等复杂异形件，加工成本甚至可能占产品总成本的重要比例。

检测成本同样不可忽视。高品质 T₂M 通常需要进行化学成分分析、氧氮杂质检测、密度检测、晶粒尺寸分析、显微组织观察、TiC 颗粒评价、力学性能测试及无损检测等多项质量检验，以确保满足高端装备制造要求。

市场规模也是影响价格的重要因素。纯钼属于成熟的大宗工业材料，而 T₂M 主要应用于半导体、航空航天、核工业和科研装备等高端领域，整体市场规模较小，批量生产效应有限，因此单位制造成本相对较高。

虽然 T₂M 价格高于纯钼，但从全生命周期成本来看，T₂M 往往更加经济。由于其高温寿命更长、设备维护次数更少、停机时间更短，因此在长期使用过程中，综合使用成本反而可能低于纯钼。

影响钛锆钼合金（T₂M）价格的主要因素

影响因素	对价格的影响
高纯原材料	成本增加
Ti、Zr、C 合金化	成本增加
粉末冶金工艺	制造成本增加
热加工与热处理	工艺成本增加
精密机械加工	加工成本增加
严格质量检测	检测成本增加
市场规模较小	单位成本较高

中钨智造认为，T₂M 价格高于纯钼，并非因为加入了少量钛和锆，而是因为其背后包含了更加复杂的粉末冶金工艺、强化相控制技术、热加工工艺、精密加工能力和严格质量检测体系。对于高端装备而言，T₂M 更高的初始采购成本，通常能够通过更长的使用寿命、更稳定的性能和更低的维护成本得到充分回报。

Q18 如何检测钛锆钼合金（T₂M）的质量？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 T₂M）主要应用于半导体、航空航天、真空热处理、核工业及科研装备等高端领域，因此质量控制要求远高于普通工程材料。评价 T₂M 质量，并不能仅凭化学成分或硬度，而需要从化学成分、组织结构、物理性能、力学性能及加工质量等多个方面进行综合检测。

首先，应检测化学成分是否符合标准。通常采用 ICP-OES、ICP-MS、XRF 等分析方法检测钼、钛、锆等主要元素含量，并确认 Ti、Zr 和 C 的配比是否满足产品规范。同时，还需控制铁、镍、铜等杂质元素含量，避免影响高温性能。

氧、氮等间隙元素是影响 T₂M 性能的重要因素。由于钼在高温下容易受到氧污染，因此通常采用惰性气体熔融分析仪检测氧、氮含量。氧含量过高会降低塑性和韧性，也会影响焊接性能和长期服役寿命。

显微组织检测是评价 TzM 质量的重要环节。通过金相显微镜和扫描电子显微镜（SEM）观察晶粒组织，确认是否存在粗晶、组织不均匀或异常再结晶现象。同时，可结合 EDS 分析强化相组成及分布情况。

TiC 和 ZrC 强化颗粒直接决定 TzM 的高温性能，因此通常需要重点检测其尺寸、数量和分布均匀性。强化颗粒过粗、过细或发生团聚，都会影响抗蠕变性能和高温强度。晶粒尺寸检测同样十分重要。一般采用金相法或 EBSD 电子背散射衍射技术测定晶粒尺寸。细小均匀的晶粒组织通常意味着更好的高温力学性能和组织稳定性。

密度检测可以反映材料致密化程度。高品质 TzM 通常采用阿基米德排水法测定密度，致密度越高，说明烧结质量越好，内部孔隙越少。力学性能检测包括室温和高温拉伸试验、屈服强度测试、延伸率测试及硬度测试。对于高端产品，还需进行高温蠕变试验，以评价长期高温服役能力。对于半导体及航空航天产品，还经常进行无损检测，包括超声检测、X 射线检测和工业 CT 检测，用于发现内部裂纹、夹杂、孔隙及其他缺陷。

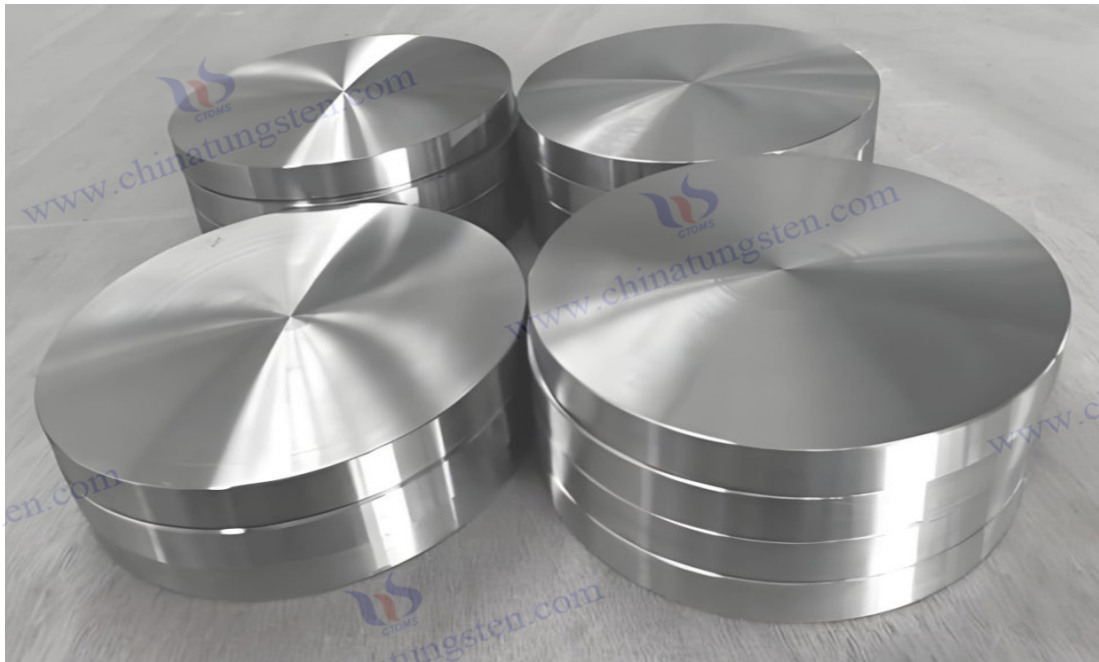
加工尺寸和表面质量同样属于质量评价内容。高精度热场部件通常需要检测尺寸公差、形位公差及表面粗糙度，以确保装配精度和长期稳定运行。

钛锆钼合金（TzM）质量检测内容

检测项目	检测目的
化学成分分析	确认 Ti、Zr、C 及杂质含量
氧氮检测	控制间隙元素含量
密度检测	判断烧结致密度
显微组织观察	检查晶粒及组织均匀性
TiC、ZrC 颗粒分析	评价强化效果
晶粒尺寸检测	判断组织稳定性
硬度测试	评价加工状态
拉伸性能测试	测定强度和塑性
高温蠕变试验	评价长期服役能力
无损检测	检查内部缺陷
尺寸与表面检测	保证加工质量

对于不同应用领域，检测重点也有所不同。半导体行业更加关注洁净度、组织均匀性和尺寸精度；航空航天更加重视高温强度和抗蠕变性能；真空热处理行业则更加关注高温稳定性和长期寿命。

中钨智造认为，TzM 质量评价应坚持综合检测原则，既要关注化学成分是否符合标准，更要重点评价强化颗粒分布、晶粒组织、高温力学性能和加工质量。真正高品质的 TzM，不仅检测数据符合标准，更能够在长期高温服役过程中保持稳定性能和可靠寿命，这也是高端半导体和航空航天装备选择 TzM 的重要原因。



Q19 全球哪些企业能够生产高品质钛锆钼合金（TZM）？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）属于典型的高端钼基高温合金，制造工艺涉及高纯粉末制备、粉末冶金、真空烧结、热加工、组织控制及精密加工等多个关键环节，因此全球能够稳定批量生产高品质 TZM 的企业数量并不多。目前，产业主要集中在 中国、美国、德国、日本 等国家。

欧美企业起步较早，在 TZM 研发和产业化方面具有较长历史，尤其是在航空航天、半导体及科研装备领域积累了丰富的经验。美国的 Plansee USA 依托奥地利普兰西集团的技术体系，在高端钼及钨材料领域具有较强竞争力，能够提供 TZM 棒材、板材、异形件及半导体热场零件。奥地利 Plansee Group 是全球难熔金属行业的重要企业之一，也是 TZM 产业的重要代表，其产品广泛应用于半导体、航空航天、医疗设备及真空工业。美国 H.C. Starck Solutions 长期从事高性能难熔金属材料开发，在 TZM、高纯钼及钼基合金领域具有较高技术水平，其产品主要面向半导体和高端工业市场。日本多家企业也具备 TZM 生产能力，主要服务于本国半导体、电子及精密制造产业，对产品洁净度和加工精度要求较高。

近年来，中国已经成为全球最大的钼材料生产国，也是 TZM 产业发展最快的国家。随着半导体、新能源、航空航天及真空装备产业快速发展，中国企业在 TZM 粉末制备、热加工及精密制造方面取得了明显进步，部分产品已达到国际先进水平，并逐步进入全球高端供应链。国内部分企业已经能够生产 TZM 棒材、板材、管材、坩埚、热场部件、异形件及半导体专用零件，并可根据客户需求提供定制化加工服务。

全球 TZM 主要生产企业

国家	代表企业	主要特点
奥地利	Plansee Group	全球难熔金属龙头，高端 TZM 产品成熟
美国	Plansee USA	半导体及航空航天应用丰富

国家	代表企业	主要特点
美国	H.C. Starck Solutions	高纯 TZM 及钼基材料供应商
日本	多家精密材料企业	服务电子与半导体产业
中国	中钨智造等专业企业	产品体系完善、民用 TZM 合金制造能力快速提升

高品质 TZM 不仅取决于是否能够生产材料，更取决于是否能够稳定控制以下关键技术：高纯钼粉制备技术、Ti 和 Zr 微量元素精确控制技术、TiC 和 ZrC 强化相均匀分布技术、低氧低氮控制技术、粉末冶金烧结工艺、高温锻造与轧制工艺、晶粒尺寸控制技术、精密机械加工能力及完整质量检测体系。真正具备上述全流程能力的企业，全球数量仍然有限。随着第三代半导体、人工智能芯片、聚变能源及航空航天产业持续发展，全球 TZM 市场正在由传统欧美企业主导逐步向多元化竞争格局演变，中国企业在高端 TZM 领域的国际竞争力也正在不断提升。

中钨智造认为，全球真正能够稳定生产高品质 TZM 的企业并不多，核心竞争力不仅体现在材料配方，更体现在粉末冶金、强化相控制、热加工及精密制造等完整产业链能力。未来，随着中国高端制造水平持续提升，中国企业将在全球 TZM 产业中占据越来越重要的位置。

Q20 钛锆钼合金（TZM）未来的发展趋势是什么？

作为目前全球应用最成熟的钼基高温合金之一，钛锆钼合金(TZM)已经广泛应用于半导体、航空航天、真空热处理、核工业、医疗设备及科研装备等多个高端领域。未来，TZM 的发展方向并不是简单提高某一项性能，而是围绕高性能、高可靠性、智能制造及新兴产业需求不断升级。

首先，半导体产业将继续成为 TZM 最大的增长动力。随着人工智能、高性能计算、新能源汽车和先进制造的发展，全球晶圆产能持续扩张，单晶硅、碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）晶体生长设备需求不断增加。作为热场系统的重要结构材料，TZM 将在高纯化、长寿命和大型化方向持续发展，以满足更高质量晶体制造需求。

其次，更高温服役能力将成为重要研发方向。未来 TZM 将进一步优化 TiC 和 ZrC 强化相分布，改善晶粒组织，提高抗蠕变性能和组织稳定性，使材料能够在更高温度和更长服役周期下保持优异性能。

第三，制造工艺将持续升级。未来粉末制备技术将进一步提高粉末纯度和一致性，粉末冶金工艺将更加精细化，热加工和热处理工艺将更加数字化、智能化，从而提高产品稳定性和批次一致性。

第四，增材制造（3D 打印）将成为重要发展方向。虽然目前 TZM 增材制造仍处于发展阶段，但未来随着高品质粉末、打印工艺和后处理技术不断成熟，复杂热场结构、一体化零件及轻量化设计将成为 TZM 新的增长领域。

第五，高端应用领域将不断拓展。未来聚变能源、高超声速飞行器、先进核能、高能束流设备及极端环境科研装备，都需要长期耐高温、高可靠性的难熔金属材料。TZM 凭借成熟的产

业基础，有望继续保持重要地位。

与此同时，材料本身也将不断改进。例如，通过优化强化相种类、调整微量元素配比及控制晶粒组织，进一步提高综合性能；通过表面改性、抗氧化涂层等技术，提高空气环境中的耐高温能力；通过精密加工和智能制造，提高复杂零件制造效率。

TZM 未来也将面临新的竞争。钼铪碳合金（MHC）在超高温性能方面具有一定优势，高熵难熔合金正在快速发展，部分钨基复合材料和陶瓷基复合材料也不断取得突破。但这些新材料目前普遍存在制造成本高、加工困难或产业化程度不足等问题，因此短期内难以全面替代 TZM。未来相当长一段时间内，TZM 仍将凭借成熟制造工艺、稳定性和完善产业链，保持全球高温钼合金主导地位。

未来钛锆钼合金（TZM）的发展重点

发展方向	主要内容
半导体升级	服务 300 mm 以上晶圆、SiC 及 GaN 产业
更高温性能	提高抗蠕变能力和组织稳定性
高纯化	满足先进半导体洁净要求
智能制造	提高产品一致性和加工效率
增材制造	实现复杂结构一体化制造
新能源应用	聚变能源及先进核工业
航空航天	高超声速飞行器及新一代发动机
长寿命设计	提高设备可靠性和使用寿命

中钨智造认为，未来 TZM 的发展不会停留在传统高温材料定位，而是向高纯化、高性能、智能制造和复杂结构制造全面升级。随着半导体、人工智能、聚变能源和航空航天等战略产业快速发展，TZM 不仅不会退出历史舞台，反而将在更多高端装备中发挥关键作用，并继续保持全球高温钼基合金的重要地位。

Q21 AI 芯片为什么会增加钛锆钼合金（TZM）需求？

近年来，人工智能（AI）芯片、高性能 GPU、AI 服务器及高性能计算（HPC）产业快速发展，推动了全球半导体制造能力持续扩张。从表面来看，AI 芯片与钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）并没有直接关系，但实际上，AI 芯片制造能力的提升离不开先进半导体设备，而 TZM 正是这些高端设备中的关键基础材料。因此，AI 产业的发展将间接且持续推动 TZM 需求增长。

首先，AI 芯片制造需要更多高品质硅晶圆。目前，无论是 GPU、AI 加速器还是 CPU，大部分仍以高纯单晶硅晶圆作为基础材料。随着全球 AI 算力需求持续增长，300 mm 单晶硅晶圆产能不断扩大，而单晶硅生产设备中的热场系统大量采用 TZM 制造支撑件、连接件及高温结构件。因此，晶圆产能增加意味着 TZM 需求同步增长。

其次，第三代半导体的发展进一步扩大了 TZM 市场。AI 服务器不仅需要先进逻辑芯片，还

需要高效率电源管理系统。碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）功率器件因具有更高效率、更低损耗和更高开关频率，正在 AI 数据中心和服务器电源中快速普及。而 SiC 和 GaN 晶体生长设备同样大量采用 TZM 热场部件，因此第三代半导体产业的发展进一步提升了 TZM 需求。

AI 芯片制造工艺不断升级，也推动了高端设备投资。先进制程芯片需要更多单晶炉、外延设备、真空热处理设备、离子注入设备和高温退火设备。这些设备普遍工作于高温、高真空环境，对高温结构材料要求极高，而 TZM 正是其中的重要组成部分。

AI 产业带来的晶圆厂建设热潮，也将持续拉动 TZM 消费。近年来，全球主要晶圆制造企业持续扩建先进晶圆厂，新建工厂意味着需要大量新增晶体生长设备、真空设备及热处理设备，每套设备内部都包含数量不等的 TZM 零件，因此整个产业链对 TZM 形成持续需求。此外，AI 芯片更新速度不断加快，推动设备升级周期缩短。随着先进制程不断迭代，设备制造商对于热场稳定性、设备寿命和加工精度提出更高要求，这进一步促进了高品质 TZM 材料的发展。

从产业链角度来看，AI 芯片并不会直接消耗 TZM，而是通过以下路径形成需求增长：AI 芯片需求增加 → 晶圆需求增加 → 单晶硅及 SiC、GaN 产能扩张 → 半导体设备投资增加 → 热场系统需求增长 → TZM 材料需求增加。因此，TZM 属于 AI 产业链中的典型基础材料。

未来，随着人工智能、大模型训练、自动驾驶、高性能计算及云计算持续发展，全球先进半导体设备市场预计仍将保持较快增长，而 TZM 也将长期受益于这一产业趋势。中钨智造认为，AI 芯片不会直接使用 TZM，但 AI 产业的发展将持续推动晶圆制造和半导体设备投资，从而带动 TZM 需求稳定增长。未来，AI 算力竞争、先进制程升级以及第三代半导体快速发展，将成为 TZM 市场增长的重要驱动力之一。

Q22 聚变能源会带来钛锆钼合金（TZM）新的市场机会吗？

聚变能源被认为是未来最具潜力的清洁能源之一。随着国际热核聚变实验堆（ITER）、中国聚变工程实验堆（CFETR）以及欧美多家商业聚变企业不断推进聚变技术研发，高温难熔金属材料迎来了新的发展机遇。作为成熟的钼基高温合金，钛锆钼合金（TZM）有望在聚变产业链中获得新的市场空间。聚变装置最大的特点，是长期处于高温、高真空、高热流密度及强电磁环境中，设备内部大量结构件需要承受极端工况。因此，对于材料的高温强度、尺寸稳定性、导热性能及真空适应性提出了极高要求，而这些正是 TZM 的优势所在。

首先，TZM 适用于聚变装置中的高温真空结构件。聚变实验设备内部拥有大量真空腔体、支撑框架、连接件、热屏及实验平台，这些部件通常需要长期工作于高温真空环境。TZM 具有低蒸气压、高温强度高和抗蠕变性能优异等特点，非常适合作为这些结构件材料。

其次，TZM 适用于高热流实验平台。在聚变材料研究过程中，需要模拟等离子体对材料的热冲击，因此大量高热流测试设备采用 TZM 作为支撑结构或热管理部件，以保证实验稳定性。

TZM 可应用于等离子体诊断设备。聚变装置内部存在大量高温探测器支撑结构、真空窗口固定件及高温测试平台，这些部件通常要求尺寸稳定、导热良好且不污染真空环境，TZM 能够很好地满足这些要求。

聚变材料研发本身也需要大量 TZM。在新型第一壁材料、偏滤器材料及耐辐照材料开发过

程中，TZM 经常作为对比材料、实验基材或高温工装使用，因此科研需求也将持续增长。

当然，需要客观看待 TZM 在聚变领域的定位。对于直接面对等离子体轰击的第一壁和偏滤器，目前国际主流方案仍然以钨材料为主，因为钨熔点更高、抗等离子体侵蚀能力更强。而 TZM 更多用于后方支撑结构、高温连接件、真空部件及实验系统，并不是第一壁材料的直接替代者。

未来商业聚变电站建设，将带来大量高温真空设备需求。即使 TZM 并不直接用于第一壁，其在整个聚变系统中的应用数量仍有望显著增加，包括：高温支撑结构、真空腔体内部构件、热流实验平台、等离子体诊断设备、高温连接件、材料测试装置及科研实验系统等。随着全球聚变产业逐步从实验阶段迈向工程化阶段，TZM 市场有望迎来新的增长点。中钨智造认为，聚变能源不会完全改变 TZM 的应用方向，但将为其带来新的高端市场机会。未来，TZM 不会取代钨成为聚变第一壁材料，而将在高温真空结构、高热流实验设备、等离子体诊断系统及聚变科研装备中发挥越来越重要的作用。随着聚变产业逐步商业化，TZM 有望成为聚变装备产业链的重要高温工程材料之一。

Q23 钛锆钼合金（TZM）未来会被 MHC 替代吗？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）和钼钨碳合金（Molybdenum-Hafnium-Carbon Alloy，简称 MHC）都是高性能钼基高温合金。近年来，随着 MHC 研究不断深入，很多人认为 MHC 将全面取代 TZM。然而，从目前全球产业发展情况来看，这种判断并不符合实际。未来相当长一段时间内，MHC 不会完全替代 TZM，更有可能与 TZM 长期并存，并分别服务于不同的应用领域。

两种材料的设计目标并不相同。TZM 强调综合性能平衡，在保证优异高温性能的同时，兼顾加工性能、制造成本、产品一致性和工程可靠性，因此成为目前全球应用最广泛的钼基高温合金。MHC 则更侧重于极端高温性能。由于采用 HfC 强化体系，其高温组织稳定性、抗蠕变性能和再结晶温度通常优于 TZM，更适合 1400 °C 以上甚至更高温度的特殊工况。因此，两者并不是简单的新旧替代关系，而是面向不同应用需求开发的材料体系。

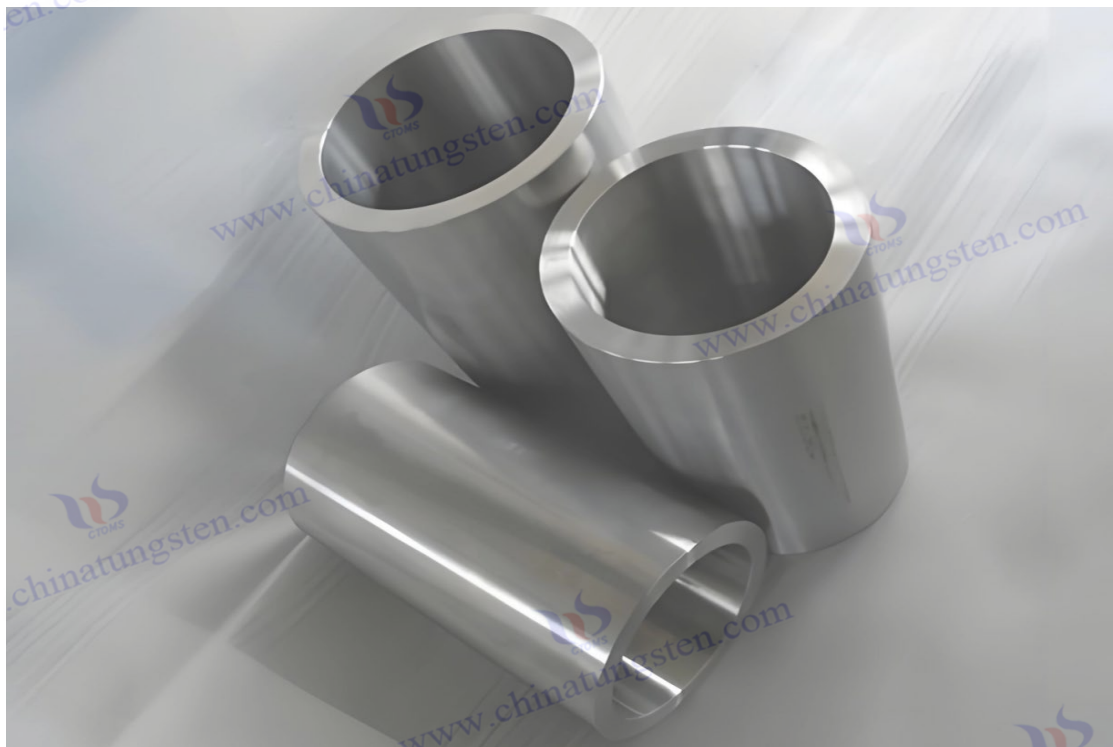
TZM 拥有非常成熟的产业基础。经过数十年的工业应用，TZM 已经建立了完整的粉末冶金、热加工、精密加工及质量控制体系，全球大量半导体设备、真空热处理设备、航空航天部件和科研装备均采用 TZM，拥有丰富的工程经验和长期可靠性数据。相比之下，MHC 虽然性能优异，但产业化规模仍然较小，全球能够稳定批量生产高品质 MHC 的企业数量有限，在制造经验、产品规格及应用案例方面仍不及 TZM 成熟。

加工性能是影响材料替代的重要因素。TZM 具有较好的锻造性能、轧制性能和机械加工性能，可制造各种复杂热场部件和高精度零件。而 MHC 由于强化颗粒更加稳定，材料硬度更高，加工难度更大，加工成本也明显高于 TZM。

成本因素同样十分关键。钨属于稀有金属，其价格远高于钛和锆，因此 MHC 材料成本及制造成本明显高于 TZM。对于大多数工业设备而言，如果 TZM 已经能够满足性能要求，通常没有必要采用成本更高的 MHC。

目前，半导体产业是真正决定 TBM 市场规模的核心行业。绝大多数单晶硅、SiC 和 GaN 设备长期工作温度仍处于 TBM 性能优势区间，因此 TBM 能够充分满足实际需求。只有在部分超高温设备或特殊科研装备中，MHC 才具有更明显的优势。

未来，两种材料更可能形成如下分工：TBM 继续作为工业标准材料，服务于半导体、真空热处理、航空航天及医疗设备等主流市场；MHC 则主要面向极端高温、高热流密度及超长寿命要求更高的高端装备。因此，未来的发展趋势不是 MHC 全面替代 TBM，而是根据不同工况合理选择不同材料。中钨智造研究认为，MHC 未来不会全面取代 TBM。TBM 凭借成熟制造工艺、稳定产品质量、优异加工性能及较高性价比，仍将长期保持全球高温钨基合金的主导地位。未来，两种材料将在不同温度区间和不同应用场景中形成互补，共同推动高端装备制造的发展。



Q24 钛锆钼合金（TBM）未来会被高熵合金替代吗？

近年来，高熵合金（High Entropy Alloys, HEAs）成为材料科学研究热点。特别是以钼、钨、钽、铌、钒等难熔元素组成的难熔高熵合金，由于具有优异的高温强度和潜在的耐极端环境能力，被认为是下一代高温结构材料的重要发展方向。因此，很多人提出，高熵合金是否会取代 TBM。从目前全球研究和产业发展情况来看，高熵合金具有巨大潜力，但在可预见的未来，仍难以全面替代 TBM。

高熵合金目前仍主要处于科研和实验阶段。虽然许多实验室已经开发出具有优异高温性能的难熔高熵合金，但大多数研究仍集中于小尺寸试样和基础性能验证，距离大规模工业应用还有较长距离。相比之下，TBM 已经拥有数十年的产业化经验，在粉末制备、热加工、机械加工、焊接、质量检测及工程应用方面形成了完整成熟的技术体系。

高熵合金制造难度明显更高。难熔高熵合金通常由五种甚至更多高熔点元素组成，不仅熔炼困难，而且容易出现元素偏析、组织不均匀和成分波动等问题。目前，高品质、大尺寸难熔高熵合金稳定制造仍然具有较大挑战。而 TzM 制造工艺已经高度成熟，可以稳定批量生产棒材、板材、管材、坩埚及各种复杂热场零件。

加工性能仍是高熵合金的重要难题。许多难熔高熵合金具有较高硬度和较低塑性，加工难度甚至高于 TzM。目前，其车削、铣削、焊接及大型零件制造技术仍不够成熟，而 TzM 已经形成完善的加工体系。

成本是限制高熵合金产业化的重要因素。难熔高熵合金通常含有钨、钽、铌、钼等多种昂贵元素，原材料成本远高于 TzM，同时制造工艺复杂、成品率较低，因此整体制造成本明显高于 TzM。

高熵合金也具有自身明显优势。部分难熔高熵合金在 1600 °C 以上仍具有优异的高温强度和组织稳定性，在未来聚变能源、高超声速飞行器及极端环境装备中具有较大发展潜力。因此，未来高熵合金更可能首先进入以下领域：超高温航空航天结构件、聚变能源核心部件、极端环境科研装备及部分战略装备。而对于目前占据 TzM 主要市场的半导体热场、真空炉、高温模具及医疗设备等行业，由于 TzM 已经能够满足性能要求，同时具有成熟制造体系和较低成本，因此短期内不会被高熵合金取代。

未来更有可能形成材料协同发展的格局：TzM 继续作为工业主流高温钨基合金，高熵合金则主要用于性能要求更高、成本敏感性较低的新兴领域。中钨智造认为，高熵合金代表着未来高温材料的重要研究方向，但目前距离全面产业化仍有较长距离。未来二三十年内，TzM 仍将凭借成熟的产业体系、稳定可靠的性能和完善的制造工艺，占据半导体、真空装备及高端工业设备的主导地位。高熵合金更可能作为 TzM 的补充材料，而不是全面替代者。

Q25 下一代钼基高温合金的发展方向是什么？

钼基高温合金因具有高熔点、高导热率、低热膨胀系数和优异的高温力学性能，长期以来一直是半导体、航空航天、核工业及高端真空装备的重要基础材料。从纯钼到钨钼合金(TzM)，再到钼钨碳合金(MHC)，钼基高温材料不断发展。未来，随着半导体、聚变能源、高超声速飞行器及先进制造技术的发展，下一代钼基高温合金将朝着更高性能、更高可靠性和更智能制造的方向持续演进。

未来发展的第一方向，是进一步提升高温服役能力。当前 TzM 已经能够满足 1200~1400 °C 长期工作的需求，而下一代钼基高温合金将进一步提高再结晶温度、抗蠕变性能和组织稳定性，使材料能够在 1400~1600 °C 甚至更高温度下长期保持稳定性能。

第二，是开发更加稳定的强化体系。目前 TzM 主要依靠 TiC 和 ZrC 强化，MHC 采用 HfC 强化。未来研究将进一步优化碳化物、硼化物、氧化物等弥散强化相，通过纳米级强化颗粒控制，提高强化效率，同时改善组织均匀性和长期稳定性。

第三个方向，是发展多元微合金化技术。未来不仅局限于 Ti、Zr 和 Hf，还可能加入少量铌(Nb)、钽(Ta)、钒(V)、铼(Re)等元素，在保证加工性能的基础上，进一步优化高

温强度、抗氧化性能及热稳定性，实现更加均衡的综合性能。

第四个方向，是提高抗氧化能力。目前钼基材料最大的短板之一，是空气中高温氧化性能较差。未来将更多采用抗氧化合金化设计和高性能表面涂层技术，例如硅化物涂层、复合陶瓷涂层及多层防护涂层，提高材料在空气环境中的使用能力。

第五个方向，是适应增材制造。未来钼基高温合金将更加注重 3D 打印适应性，通过优化粉末粒度分布、改善凝固组织、降低热裂纹敏感性，使复杂热场结构和轻量化设计能够更加高效地实现。

第六个方向，是智能制造与数字化工艺控制。未来粉末制备、烧结、锻造、轧制、热处理及检测将更加数字化，通过全过程工艺监控和人工智能优化制造参数，提高产品一致性和稳定性。此外，高熵钼基合金和复合材料也将成为重要研究方向。未来可能出现以钼为主体，结合高熵设计理念的新型高温材料，以及钼基复合材料、纳米强化材料等，为聚变能源、航空航天及极端环境装备提供新的解决方案。

钼基高温合金主要发展方向

发展方向	目标
更高工作温度	提高长期高温服役能力
新型强化体系	提高抗蠕变和组织稳定性
多元微合金化	优化综合性能
抗氧化技术	扩大空气环境应用范围
增材制造适配	实现复杂结构制造
智能制造	提高一致性和质量稳定性
高熵与复合材料	面向下一代极端环境装备

未来，高性能钼基材料的发展不会依赖单一技术，而是材料设计、制造工艺、表面工程和数字化制造共同发展的结果。中钨智造长期从事认为，下一代钼基高温合金的发展重点不是简单追求更高强度，而是在高温性能、加工性能、抗氧化能力、制造成本及工程可靠性之间实现新的平衡。未来，TZM、MHC、新型钼基复合材料及难熔高熵合金将共同构成钼基高温材料的发展体系，为半导体、聚变能源和航空航天等战略产业提供更加完善的材料解决方案。

Q26 为什么钛锆钼合金（TZM）仍然是工业标准材料？

自 20 世纪中期成功开发以来，钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）已经成为全球应用最广泛的钼基高温合金。尽管近年来 MHC、高熵合金以及各种新型高温材料不断出现，但 TZM 仍然保持着工业标准材料的地位，其原因不仅在于性能优异，更在于其综合工程价值长期得到全球制造业验证。

（1）TZM 具有极其均衡的综合性能。它不仅拥有优异的高温强度、抗蠕变性能和组织稳定性，还保持了较高导热率、较低热膨胀系数、低蒸气压和良好的真空适应性。这种性能组合能够满足绝大多数高温装备的实际需求，而不仅仅是在某一项性能上表现突出。

(2) **TZM 已经拥有几十年的工程应用经验。**全球半导体设备、单晶硅生长炉、碳化硅热场、真空热处理设备、航空航天部件、医疗设备及科研装备长期采用 TZM，其长期可靠性已经得到大量实际工程验证。这种成熟的应用经验，是任何新材料短时间内难以替代的优势。制造工艺成熟，也是 TZM 保持标准地位的重要原因。从高纯粉末制备、粉末冶金烧结到锻造、轧制、热处理、精密加工及质量检测，TZM 已经形成完整成熟的工业制造体系，能够稳定批量生产各种规格和复杂零件。相比之下，许多新材料虽然实验性能优异，但制造难度大、产品一致性不足，距离大规模工业应用仍有一定距离。

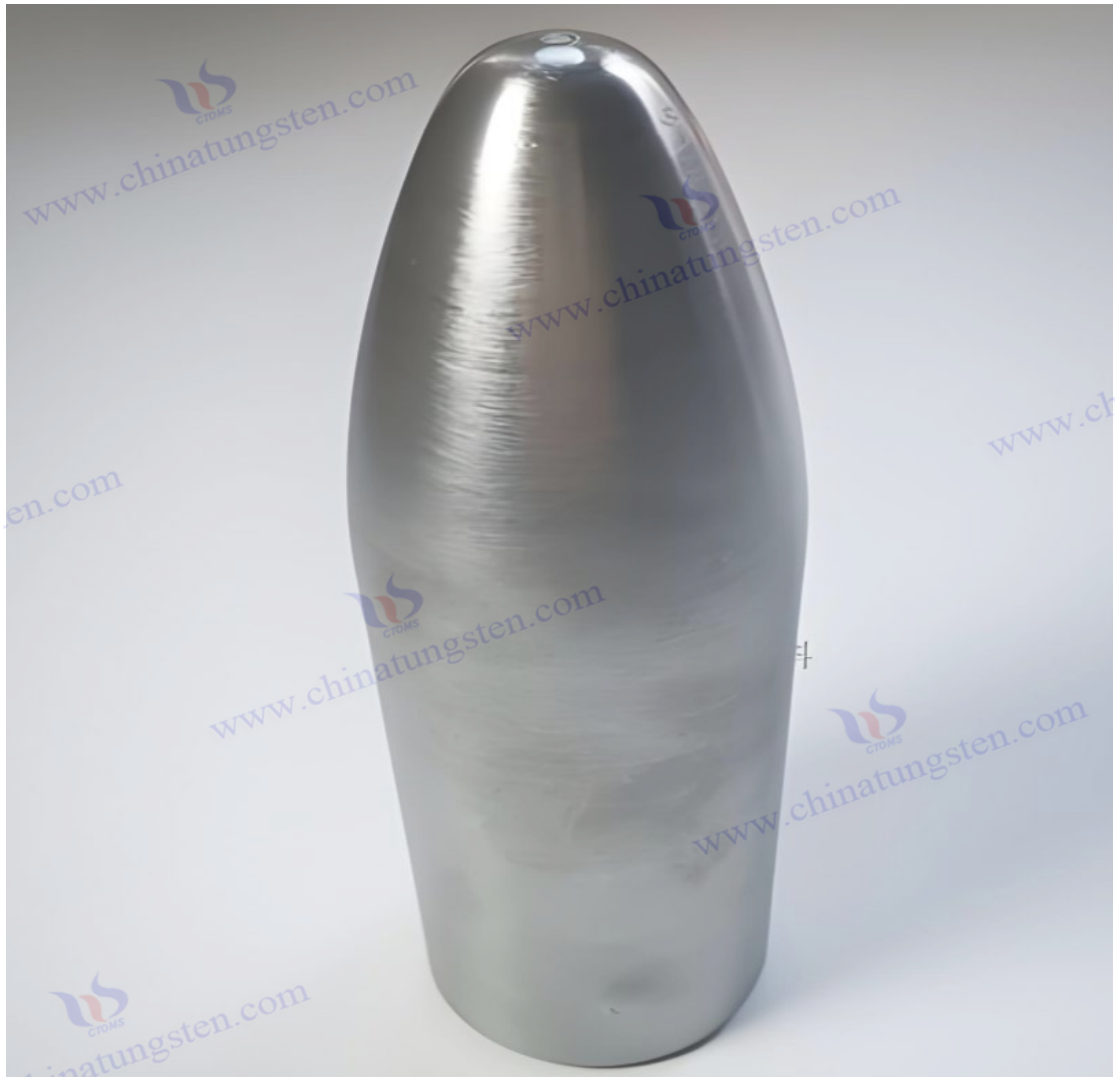
(3) **加工性能是 TZM 的重要优势。**相比 MHC、钨合金及部分难熔高熵合金，TZM 更容易进行机械加工、焊接、扩散焊及真空钎焊，可制造复杂热场结构和高精度零件，大幅降低制造成本。

(4) **TZM 具有良好的经济性。**虽然价格高于纯钼，但相比性能更高的新型钼基材料，TZM 成本更低，加工效率更高，全生命周期成本更具优势，因此更容易被工业用户接受。产业链完善，同样决定了 TZM 的长期竞争力。目前全球已经形成成熟的 TZM 原材料供应体系、标准体系、加工体系和应用体系，从材料生产到最终设备制造，各环节均具有丰富经验和稳定供应能力。更重要的是，大多数工业设备并不需要极限性能，而需要长期稳定运行。TZM 能够满足 1200~1400 °C 长期工作需求，而这一温度范围已经覆盖绝大多数半导体、真空热处理及高端装备应用。因此，对于绝大多数用户而言，没有必要采用成本更高、制造更复杂的新材料。

TZM 保持工业标准材料地位的主要原因

核心优势	说明
综合性能均衡	高温强度、导热率和稳定性兼顾
工程验证充分	数十年工业应用经验
制造工艺成熟	产品一致性高
加工性能较好	易于制造复杂零件
成本合理	全生命周期经济性突出
产业链完善	全球供应稳定
应用范围广	半导体、航空航天、真空设备等多个行业

未来，即使 MHC、高熵合金和新型复合材料不断发展，TZM 仍将凭借成熟可靠、性能均衡和制造完善等优势，继续作为全球钼基高温合金的重要工业标准。中钨智造认为，TZM 能够长期保持工业标准材料地位，并不是因为没有竞争者，而是因为它在性能、制造、加工、成本和工程经验之间实现了最佳平衡。真正的工业标准，不仅需要实验室中的优异性能，更需要长期稳定、可批量制造、可重复应用和可持续供应，而这正是 TZM 几十年来始终保持领先地位的根本原因。



Q27 钛锆钼合金（TZM）最大的技术优势是什么？

钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）自 20 世纪开发以来，已经成为全球应用最广泛的钼基高温合金。几十年来，无论是在半导体热场、航空航天、真空热处理、核工业还是科研装备领域，TZM 始终保持着重要地位。其最大的技术优势，并不是某一项性能达到极限，而是在高温环境下实现了性能、制造和工程应用之间的最佳平衡。

（1）TZM 最核心的技术优势是优异稳定的高温综合性能。

纯钼虽然熔点高，但在 1000 °C 以上容易发生再结晶，强度迅速下降，长期工作时容易产生蠕变变形。而 TZM 通过加入少量钛、锆和碳，在材料内部形成细小均匀的 TiC 和 ZrC 弥散强化颗粒，这些强化相能够有效阻碍位错运动和晶界迁移，大幅提高再结晶温度和抗蠕变能力，使材料在 1200~1400 °C 长期工作时仍保持较高强度和尺寸稳定性。

（2）第二个优势，是高温尺寸稳定性极佳。

对于单晶硅、碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）晶体生长设备而言，热场结构的微小变形都会影响温度场均匀性，进而影响晶体质量。TZM 较低的热膨胀系数和优异的抗蠕变性能，使其能够长期保持几何尺寸稳定，这是其成为半导体热场标准材料的重要原因。

(3) 第三个优势，钛锆钼合金（TZM）优异的导热性能。

TZM 室温导热率通常达到 $115 \sim 140 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，远高于镍基高温合金、不锈钢及钛合金。较高的导热率有助于均匀传递热量，降低热应力，提高热场稳定性和设备效率。

(4) 第四个优势，钛锆钼合金（TZM）良好的真空兼容性。

TZM 具有极低的蒸气压，在高温真空环境下几乎不会挥发，也不会释放大量的杂质，因此广泛应用于半导体、高真空科研设备及真空热处理设备。

(5) 第五个优势，是成熟的产业化能力。

相比许多新型高温材料，TZM 不仅性能稳定，而且已经建立了完整的粉末冶金、锻造、轧制、热处理、精密加工及检测体系，可以稳定批量生产各种规格产品，保证长期一致性。

(6) 第六个优势，是较好的加工性能。

虽然 TZM 属于难熔金属材料，但相比钨合金、MHC 及部分难熔高熵合金，其锻造性能、机械加工性能及焊接适应性更好，更容易制造复杂结构件，因此能够满足现代高端装备制造需求。

正因为这些优势共同作用，TZM 并不是单项性能最强的材料，却成为综合性能最均衡、工程应用最成熟的钼基高温合金。中钨智造认为，TZM 最大的技术优势，在于通过 TiC 和 ZrC 弥散强化，实现了高温强度、抗蠕变性能、导热性能、尺寸稳定性、加工性能和产业化能力之间的最佳平衡。这种综合优势，而非单项指标领先，才是 TZM 能够长期保持工业标准材料地位的根本原因。

Q28 钛锆钼合金（TZM）最大的技术瓶颈是什么？

尽管钛锆钼合金（TZM）已经成为全球应用最成熟的钼基高温合金，但它并不是完美材料。随着半导体、聚变能源、高超声速飞行器和先进制造技术不断发展，TZM 也逐渐暴露出一些技术瓶颈。

(1) 最大的瓶颈并不是高温强度，而是空气环境下的抗氧化能力不足。TZM 属于钼基材料，而钼在空气中约 $400 \sim 500^\circ\text{C}$ 开始明显氧化。当温度继续升高时，会形成挥发性的三氧化钼 (MoO_3)，导致材料快速失重和性能下降。因此，TZM 虽然能够在真空或惰性气氛下长期工作于 $1200 \sim 1400^\circ\text{C}$ ，却不能直接在空气中高温长期使用。这一特点限制了 TZM 在部分高温燃烧环境和开放式高温设备中的应用，也使其在某些领域需要依赖抗氧化涂层或保护气氛。

(2) 第二个技术瓶颈，是超高温性能仍有提升空间。虽然 TZM 已经具备优异的高温性能，但在 1400°C 以上长期工作时，其抗蠕变性能和组织稳定性开始逐渐下降。相比采用 HfC 强化体系的 MHC 或部分难熔高熵合金，TZM 在超高温领域仍存在一定差距。

(3) 第三个瓶颈，是强化相控制难度较高。TZM 性能高度依赖 TiC 和 ZrC 强化颗粒。如果颗粒尺寸过大，会降低强化效果；如果颗粒过细，则可能影响组织稳定性；如果发生团聚，则会造成局部性能下降。因此，强化相尺寸、数量和分布均匀性的精确控制，是 TZM 制造过程中最关键的技术难点之一。

(4) 第四个瓶颈，是增材制造适应性仍有待提高。

TZM 导热率高、熔点高，在激光增材制造过程中容易形成较大的温度梯度和热应力，从而产生裂纹。目前，TZM 增材制造已经取得一定进展，但距离成熟产业化还有较长距离。

(5) 第五个是大型复杂零件制造成本较高的瓶颈。

由于 TZM 属于粉末冶金材料，大尺寸坯料制备、多道热加工和高精度机械加工都会增加制造成本。对于超大型复杂结构件而言，加工效率和材料利用率仍有进一步提升空间。此外，随着半导体设备不断向更高洁净度、更高精度发展，对 TZM 内部组织一致性、氧氮杂质控制及批次稳定性也提出了更高要求，这对制造工艺提出了持续挑战。

未来 TZM 技术突破的重点

技术方向	主要目标
抗氧化能力	提高空气环境使用温度
超高温性能	提高 1400 °C 以上长期稳定性
强化相控制	优化 TiC、ZrC 尺寸和分布
增材制造	降低热裂纹、提升成形质量
制造成本	提高大型复杂零件生产效率
高纯化	满足先进半导体洁净要求

TZM 当前面临的瓶颈更多属于制造技术和应用拓展问题,而不是材料本身已经失去竞争力。中钨智造认为，TZM 最大的技术瓶颈，是在空气中的高温抗氧化能力不足，以及超高温环境下性能仍有进一步提升空间。未来，通过新型强化体系、抗氧化涂层、微合金化设计、增材制造技术和智能制造工艺的发展，TZM 仍有较大的性能提升潜力，并将在未来高端装备制造中继续保持重要地位。

Q29 中国钛锆钼合金（TZM）与国际先进水平还有哪些差距？

近年来，随着中国半导体、航空航天、新能源及高端装备制造产业快速发展，国内钛锆钼合金（Titanium-Zirconium-Molybdenum Alloy，简称 TZM）产业取得了显著进步。从原材料制备、粉末冶金、热加工到精密加工，整体技术水平不断提升，部分产品已经能够满足高端半导体设备和真空装备的使用要求。不过，从全球高端 TZM 产业来看，中国与国际先进水平相比仍然存在一些差距。这些差距并不主要体现在基础性能指标,而更多体现在制造一致性、长期可靠性和高端制造能力方面。

（1）产品一致性仍有提升空间。
国际领先企业经过几十年的产业积累，已经建立了完善的全过程质量控制体系，不同批次产品在化学成分、晶粒组织、高温性能及加工性能方面具有极高的一致性。国内部分企业虽然能够生产性能达到国际水平的 TZM 产品，但在长期稳定批量生产方面，与国际先进企业相比仍有进一步提升空间。

（2）强化相控制技术仍需优化。
TZM 性能主要取决于 TiC 和 ZrC 弥散强化颗粒的尺寸、数量和分布均匀性。国际先进企业对于强化相形成机理、颗粒尺寸控制及热加工组织演化具有长期经验积累，在组织均匀性方面仍具有一定优势。

（3）高纯化水平仍需持续提高。
随着先进半导体设备不断升级，对材料洁净度要求越来越高，特别是氧、氮及其他痕量杂质控制越来越严格。国内企业近年来已取得明显进步，但在极高纯度产品的稳定控制能力方面，

仍有继续提升的空间。

(4) 大尺寸、高精度产品制造能力仍需加强。

随着 300 mm 以上晶圆设备、大型 SiC 热场及聚变装备的发展，市场对于大型 TZM 板材、厚板、复杂异形件及整体热场结构提出了更高要求。国际领先企业在大型复杂结构件制造经验方面积累更加丰富。

(5) 长期服役数据积累不足。

欧美企业部分 TZM 产品已经拥有几十年的工程应用历史，其寿命预测模型、失效分析数据库及长期可靠性评价体系较为完善。而国内高端 TZM 产业起步相对较晚，在长期工程数据库建设方面仍需持续积累。

(6) 高端应用认证周期较长。

航空航天、半导体及国际大型科研项目通常需要较长认证周期。虽然部分国产 TZM 产品性能已经达到国际先进水平，但进入国际高端供应链仍需要时间完成客户验证和应用积累。不过，也必须看到，中国 TZM 产业近年来的发展速度非常快。国内已经形成完整的钼资源供应体系、粉末冶金制造体系及机械加工能力，在材料成本、交付能力及定制化服务方面具有明显优势。部分企业在半导体热场部件、高纯 TZM 材料及复杂异形件制造方面，已经具备较强国际竞争力。

总之，中国 TZM 产业与国际先进水平之间的差距正在不断缩小，未来随着半导体和航空航天产业持续发展，国产 TZM 有望进一步提升全球市场竞争力。中钨智造认为，中国 TZM 已经具备较强的产业基础，部分产品性能达到国际先进水平。未来真正需要突破的，不再是单项性能，而是高端产品的一致性、长期可靠性、超高纯制造能力和国际市场认可度。随着技术持续进步，中国 TZM 产业有望在全球高端难熔金属市场占据更加重要的位置。

Q30 如何选择钛锆钼合金 (TZM) 或 MHC?

钛锆钼合金 (TZM) 和钼钨钨合金 (MHC) 都是目前应用最广泛的钼基高温合金。两种材料都具有优异的高温性能，但强化体系不同，因此在适用工况、制造成本及工程应用方面各有优势。实际选材时，应根据工作温度、服役时间、载荷条件、加工要求和预算综合考虑，而不能简单认为性能越高越好。

首先，应根据工作温度进行选择。

如果设备长期工作温度在 1200~1400 °C 以内，TZM 通常已经能够满足要求。其高温强度、抗蠕变性能和尺寸稳定性经过长期工程验证，是目前半导体、真空热处理及航空航天领域应用最成熟的材料。如果长期工作温度接近或超过 1400 °C，尤其要求长期保持极低蠕变变形时，MHC 通常具有更好的高温稳定性，更适合作为超高温结构材料。

其次，应考虑服役寿命。

对于要求长期连续运行、维修成本极高的设备，如果工作环境极端，MHC 能够提供更长的使用寿命。而对于大多数工业设备，TZM 已经能够实现较长服役周期，其综合经济性更好。

第三，应考虑加工制造难度。

TZM 加工性能较好，可进行锻造、轧制、车削、铣削、钻孔、焊接及复杂异形件加工，更适合制造结构复杂、尺寸精度要求高的零件。MHC 硬度更高，加工难度更大，加工成本也更高，因此通常用于结构相对简单但性能要求极高的零件。

第四，应考虑成本因素。

TZM 采用 Ti、Zr 强化体系，材料成本和制造成本均低于 MHC。MHC 由于含有昂贵的钨元素，整体成本明显更高。因此，如果 TZM 已经能够满足性能要求，一般优先选择 TZM，以获得更好的性价比。

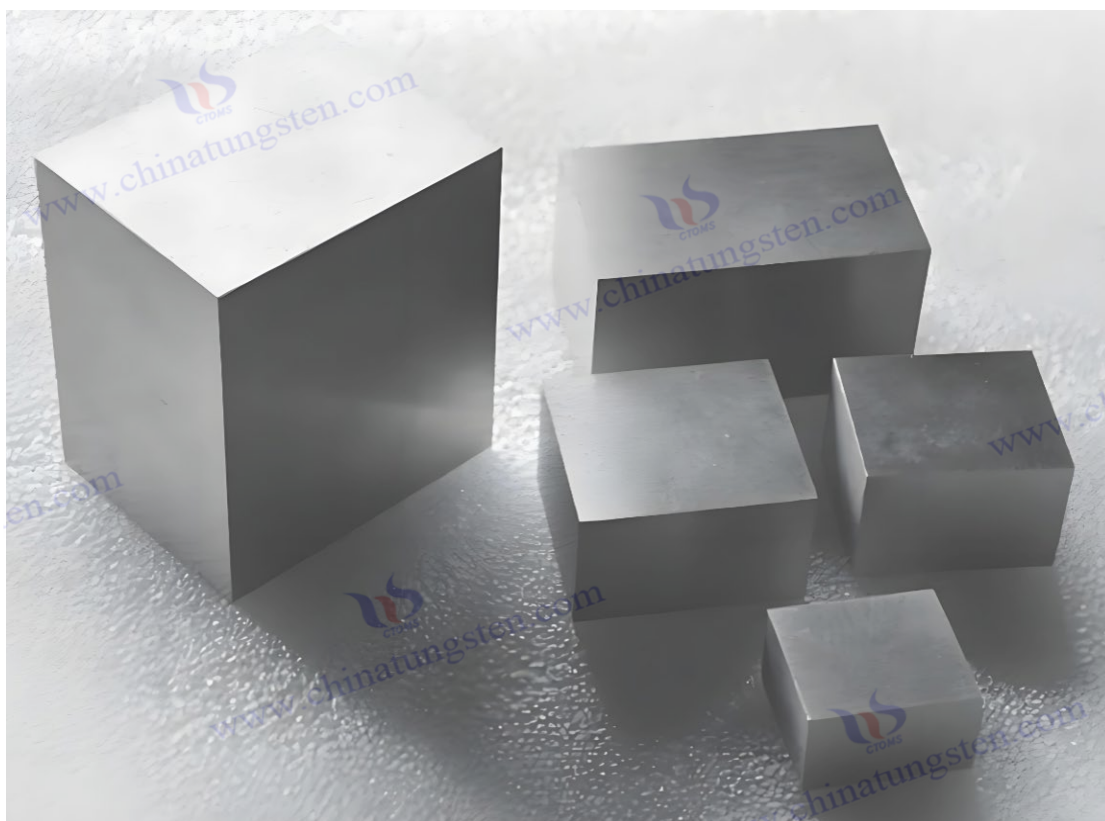
第五，应结合应用行业进行判断。

半导体热场、单晶硅设备、SiC 和 GaN 晶体生长设备、真空炉及高温模具等领域，目前仍以 TZM 为主流材料。聚变能源、超高温科研设备及部分极端航空航天工况，则可能更适合采用 MHC。

钛锆钼合金（TZM）和钨钼碳合金（MHC）两种材料选用原则表

工况	推荐材料	主要原因
1200~1400 °C长期工作	TZM	综合性能成熟、成本合理
超过 1400 °C长期工作	MHC	高温稳定性更好
半导体热场	TZM	工程应用成熟
真空热处理设备	TZM	综合性能优异
极端高温科研设备	MHC	抗蠕变性能更强
复杂精密零件	TZM	加工性能更好
对成本敏感	TZM	性价比更高
极端寿命要求	MHC	更适合长期超高温服役

在许多大型设备中，两种材料往往不是二选一，而是组合使用。例如，高温最严重区域采用 MHC，其余结构采用 TZM，通过合理材料配置，在保证性能的同时控制整体成本。中钨智造认为，TZM 和 MHC 没有绝对优劣，关键在于是否适合具体工况。对于绝大多数工业设备而言，TZM 仍然是最佳选择，因为其综合性能成熟、加工方便、成本合理且工程经验丰富；只有在超高温、超长寿命或极端工况下，MHC 的优势才会更加明显。因此，科学选材的原则不是选择性能最高的材料，而是选择综合效益最优的材料。




www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatun

1


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com