

3D打印热门商品

钼金属因其在高温下的强度而成为许多行业不可缺少的材料。但有些应用需要复杂且不易加工的形状。3D打印是解决复杂部件生产问题的一种方法，但是，当用钼金属生产此类零件时，往往会出现缺陷。采用碳化钛对钼金属进行合金化的新工艺，可能预示着一个转折点。

© U.S. Dept. of Energy, Oak Ridge National Laboratory

摘自《钼世界》2022年第1期

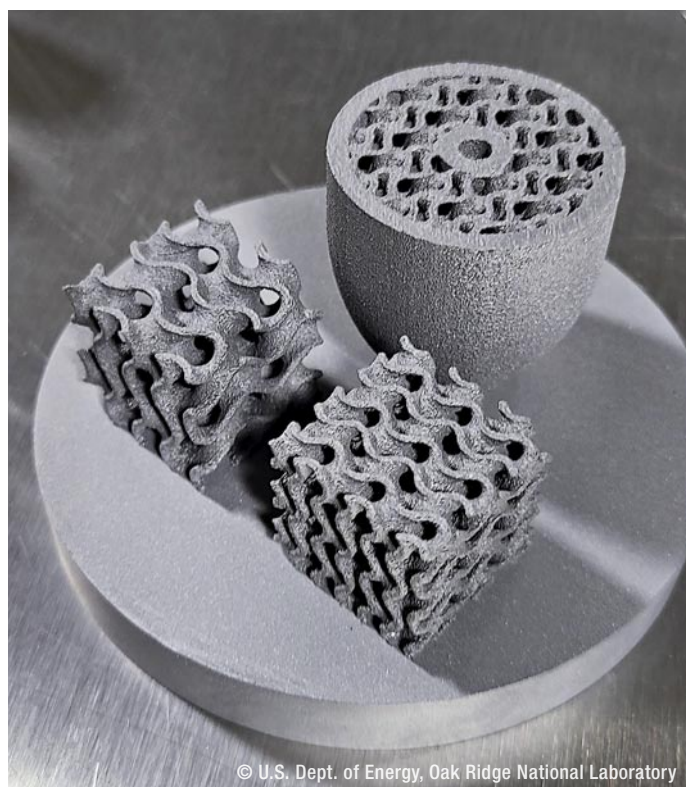
预计30年后，世界对电力的需求量将是目前用电量的两倍。但是，在扩大能源生产的同时，温室气体排放量必须降低到目前的水平以下，以避免气候变化带来的最坏影响。要在不增加排放的情况下增加电力供应，解决方案将是多方面的，它可能涉及提高发电设备内部的工作温度以提高其效率。例如，将核反应堆内部的温度从900℃提高到1000℃，将使生产率提高10%。

尽管这为减少排放和降低成本提供了重要机会，但随着运行温度的进一步提升，面对的是材料科学的难题。只有少数材料可能成为这种极端高温下的候选材料。钼金属和钼基合金所能承受的高温，将使其他材料发生变形或液化，这是因为钼是现有元素中熔点最高的元素之一（2622℃）。最重要的是，钼在高温下仍能保持其形状和强度。其他能够耐受极端温度的金属如铌和锆，天然丰度不如钼，且价格昂贵或存在供应方面的风险。钼金属有时与碳纤维复合材料配合使用，后者在高温下具有更大的稳定性。然而，碳纤维复合材料的设计和制造都极其昂贵和耗时。因此，科学界继续将钼金属视为一种解决方案，但它也带来了挑战。

打印范式转变

高度专业化的工业部件越来越多地通过增材制造（AM）来生产，也被称为3D打印。增材制造技术起源于20世纪80年代中期，用于加速产品原型的开发。该工艺的特点是在微观层面将材料一层层融合在一起。“打印机”参考计算机三维模型，逐层生成一个精确的复制品。与传统的铣削、切削、钻孔和磨削的“减材”制造方法不同，成功的增材制造技术几乎不产生任何浪费。使用增材制造技术来增加零件的复杂程度往往更具成本效益，因为可以在计算机上方便地修改设计方案。一些传统制造难以甚至不可能实现的设计，如与零件外表面没有连接的空心零件，可以通过3D打印来制造。

将钼金属3D打印成航空航天、国防和能源工业所需的复杂形状，拥有这个能力可以提高热效率，这最终意味着用更少的资源产生更多的电能。然而，挑战在于3D打印的钼金属可能会损失机械性能和稳定性，导致其无法使用。这是因为钼金属和钼合金的3D打印在打印条件不适当的情况下容易形成气孔和裂纹等缺陷。但是，通过仔细控制3D打印过程，就可以用钼金属和钼基合金（如碳化钨钼基合金）生产出性能稳定、高



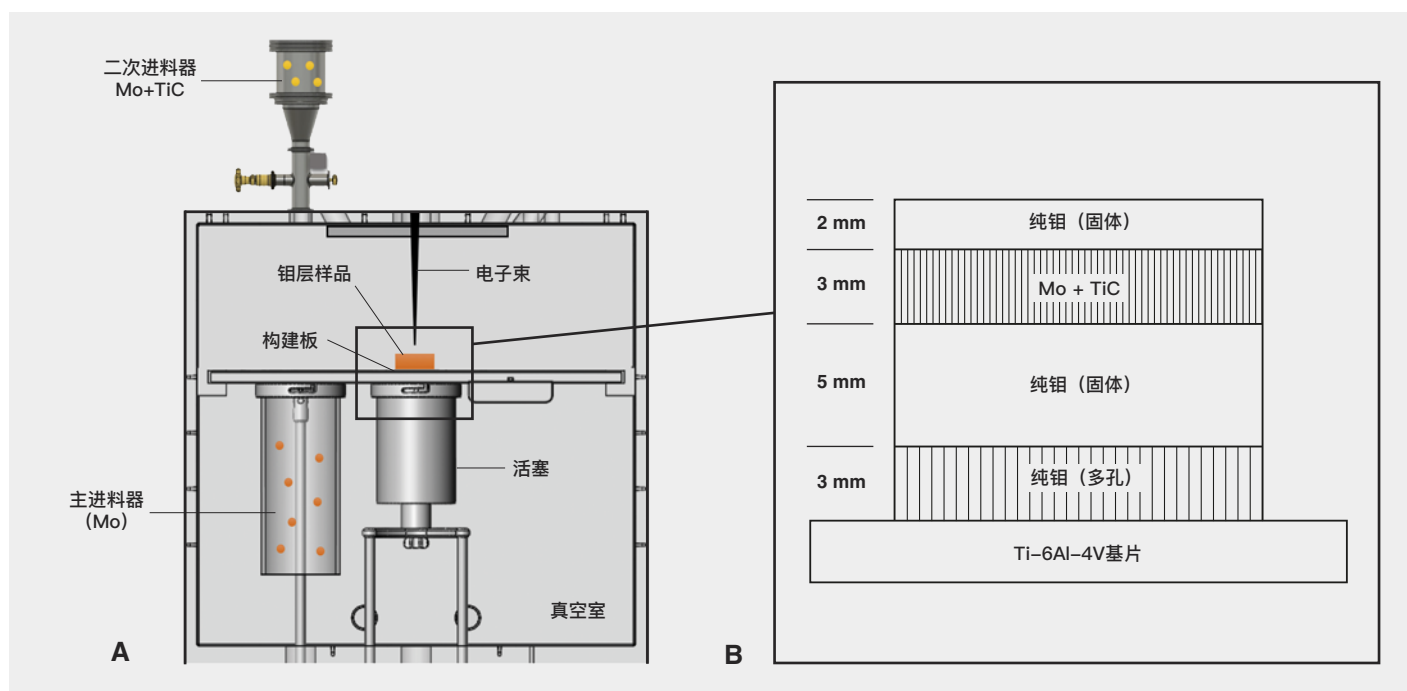
3D打印可以打印出其他方式无法制造的复杂形状。这些是高效Mo-TiC热交换器的原型部件©美国能源部橡树岭国家实验室

质量无裂纹的零件。位于美国东南部的橡树岭国家实验室（ORNL）的科学家正在与外部利益相关者合作，对钼金属和钼基合金物件进行规模试验。

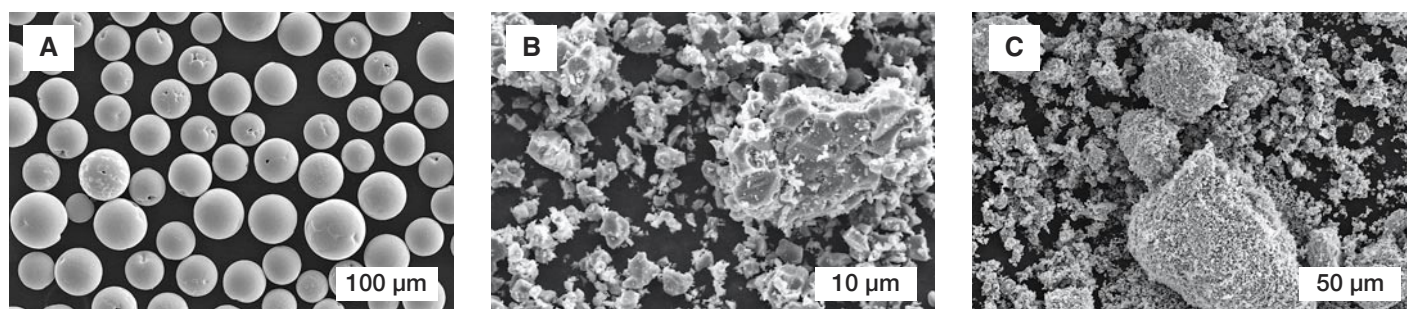
不再从缝隙中溜走

这种制造工艺使用一种称为“粉末床熔融”（PBF）的增材制造方法，将粉末状的原料熔化变成固体。PBF需要激光或电子束来熔化和融合粉末状的成分。研究人员使用了后一种方法，因为在打印过程中对温度变化的控制更好。因为材料在加工过程中容易产生缺陷，钼金属的PBF尚未在工业规模上取得成功，但最近的研究结果表明这种情况很快就会改变。

研究人员展示了打印高质量钼金属的能力，它具有独特的晶粒结构，是传统的钼金属制造工艺无法实现的。PBF加工技术的进步使得钼金属能够成功地被打印制成核热推进系统所用的结构部件。



定制的电子束PBF构建室和二次进料器（A）以及Mo-Mo+TiC-Mo夹心样品（B）的示意图。
资料来源：美国能源部橡树岭国家实验室



钼粉（A），TiC颗粒（B）和两种原料粉末经机械合金化而形成的60%钼/40%TiC粉末（C）
© 美国能源部橡树岭国家实验室

除了钼金属外，研究人员还成功打印出基体钼-碳化钛复合材料。在材料科学术语中，它们叫做金属陶瓷。为了制造金属陶瓷，研究人员对60%钼粉和40%碳化钛的原料粉末进行了机械合金化，并进行了打印。打印之后，没有发现任何缺陷。这类材料的成功生产，对于要求材料在极端环境如超临界二氧化碳条件下运行的能源系统，具有推动其进步的潜力。

其他研究团队也取得了可喜结果。2019年，北京理工大学为航空航天工业的离子推进器开发了3D打印钼金属部件。该研究小组还将钼金属粉末与碳化钛粉末结合，形成了稳定、抗氧化的复合材料。这种复合方法似

乎产生了积极的效果，不仅适用于纯钼金属，也适用于其他含钼合金。新加坡的一个研究团队将二硼化钛纳米颗粒和含钼镍基合金Inconel 625混合，也产生了较好的可打印性。这些进展进一步证明了未来大幅提高3D打印钼金属和含钼合金部件的可行性。这些项目展示了钼的独特性能及其在全球脱碳化进程中日益增长的价值。

提高核反应堆等热电厂的效率取决于更好的材料的开发，特别是那些具有高温强度的材料。钼可以说是这项工作的最佳候选材料。能够用3D将材料打印出工业所需的形状的能力，会对少消耗多发电的目标产生重大影响。(Karlee Williston)