



摄影：李昊涵

正在敲门的超材料

中国金属矿业经济研究院（五矿产业金融研究院） 李昊涵

在工程领域中，韧性和硬度是两项最为关键的材料性能指标。前者反映材料通过塑性变形吸收能量的能力，后者则反映材料抵抗变形的能力。一般而言，这两种性能存在相互制约的关系：韧性优良的材料往往硬度偏低，而硬度较高的材料通常难以承受较大变形，比如多数陶瓷虽然很硬，但非常脆（韧性差），而多数金属虽然有着很好的韧性，但硬度不如陶瓷。两个性能存在典型

的权衡关系，难以同时达到最优，严重制约了工业刀具材料的发展，影响刀具使用寿命和加工能力。工业刀具的发展边界，又制约了现代工业的发展。

超材料（Metamaterial）是一类通过人工结构设计而获得特殊物理性质的人造复合材料，其性能往往超越自然界中现有材料。其中，如何将韧性与硬度这两种相互排斥的性能有机结合，始终是超材料研究领域的重要攻关方向；而选用何种强化途径以优化材料性能，也是学术界与工程界持续探索的重点课题。

一、最新研究进展：让金刚石再硬两倍的“魔法”

细化晶粒是提升材料机械性能的主要手段。传统晶粒细化虽可提高硬度，但往往伴随材料脆性增加，且在晶粒尺寸降至临界值以下时，会出现材料的软化。近年来，纳米孪晶结构的引入为突破这一瓶颈提供了新途径。纳米孪晶是指在晶粒内部含有高密度纳米级对称生长界面的结构，该类界面不仅具有比普通晶界更低的过剩能，且能有效阻碍位错运动，从而实现机械性能的跨越式提升。对于金刚石、立方氮化硼等超硬材料，通过引入纳米孪晶结构，其维氏硬度可达 200 吉帕斯卡（ $1\text{GPa}=10^9$ 帕斯卡，压强单位），是硬度最高的物质——金刚石的两倍，远超现有的硬质合金材料。

目前，研究者已成功合成出平均孪晶厚度低至 3.8-5 纳米的块材纳米孪晶金刚石及立方氮化硼，实验室制备的块材直径已达

到 10-12 毫米，并证实该类材料可被加工为机器部件或切削刀具等任意形状的工业机械零件。

二、高压高温下的奇迹：纳米孪晶材料是如何炼成的

以纳米孪晶金刚石为例，其主要原料为洋葱碳前驱体。该类颗粒由同心球形壳层构成，具有高密度层错和褶皱结构，为相变过程中的孪晶形核提供了理想位点。

超硬纳米孪晶材料的制备主要采用高压高温（HPHT）直接转化工艺。其核心流程始于高活性前驱体的精密筛选，例如具备丰富褶皱原子层和高密度堆垛层错的“洋葱状”纳米颗粒（洋葱碳或洋葱状氮化硼，由石墨电极通过水下电弧放电法制成），以及超顺排多壁碳纳米管，利用其特殊几何结构作为孪晶形核的天然模板。在极端物理环境下（压力通常设定为 12-25 吉帕斯卡，温度范围为 1600-2000° C），原子层在高核产生率条件下重组为高密度纳米孪晶结构。该工艺最终在块体材料内部构建出超细孪晶网络（平均厚度可低至 3.8-5 纳米），从而使材料获得远超传统硬质合金的硬度、断裂韧性及热稳定性。

三、未来前景与现实挑战

（一）未来前景

一旦纳米孪晶材料实现了产业化，必将对现有的工业体系造成巨大影响：一是对现有工业刀具材料的迭代替代，凭借其超高的硬度与韧性协同优势，纳米孪晶刀具将大幅提升难加工材料的切削效率与刀具服役寿命，有效解决钛合金、镍基高温合金等部

件的加工瓶颈；二是倒逼并支撑工业产品体系标准的全面升级，更极致的加工精度与表面质量为产品设计冗余的压缩和性能极限的突破创造了条件，从而推动下游航空航天、精密模具等行业建立更高的工艺规范。

（二）现实挑战

1. 技术问题仍需解决

纳米孪晶材料正处于从实验室制备向工业化应用过渡的关键阶段。然而，尽管毫米级样品的制备技术日趋成熟，在大尺寸块材中实现微观组织的高度均匀性（如一致的孪晶密度与层级结构）仍面临较大技术挑战。尤其是性能更为优越的层级纳米孪晶结构，其制备工艺尚处于起步阶段，如何实现对内在结构参数的精确量化控制，依然是制约其产业化的关键瓶颈。

2. 成本问题可能成为产业化制约因素

极端的生产条件与复杂的加工工艺构成了纳米孪晶材料产业化的主要经济壁垒。在合成环节，这种材料所需压力高达 12-25 吉帕斯卡，已显著超出工业界大规模合成金刚石常用设备的量程范围，必须依赖 1000 吨级双级大腔体多砧压机系统，设备投资和维护成本高昂。同时，作为关键原料的“洋葱状”前驱体需借助化学气相沉积或撞击流等专门工艺制备，这进一步推高了上游原材料成本。在后处理阶段，由于纳米孪晶材料具有极高的硬度，其切割、研磨和抛光等精密加工过程极为困难且耗时，对加工设备和工艺水平提出专门化要求，从而显著增加了终端制造成本。

综合来看，尽管该材料在力学性能上远优于传统硬质合金，但在短期内，其产业化应用预计仍将主要集中在超精密加工、深地钻探等对性能要求极端且对成本敏感度较低的高端制造领域。

综合来看，新型超材料的实现可以为能源革命、先进制造和电子信息等多个核心领域提供颠覆性的材料解决方案。虽然产业化之路仍有挑战，但其引发连锁变革的潜力是真实且巨大的。