



亮点介绍

超细的显微结构使超硬材料变得更硬

金刚石和立方氮化硼作为先进工具材料,在现代加工业中发挥着至关重要的作用.然而这两种材料都存在各自的缺点:例如金刚石的热稳定性较差,立方氮化硼的硬度和韧性偏低.同时提高这些材料的综合力学性能(硬度和韧性)及热稳定性是科学界和产业界长期以来的共同目标.此外,寻找硬度超过天然金刚石的人工材料也一直是人类的梦想.然而,多年的努力使人们对能否实现这一梦想持悲观态度,比如剑桥大学卡文迪许实验室的 Chaudrhi 等人认为比金刚石更硬只是个幻想(*Nat Mater*, 2005, 4: 4).

针对上述难题,燕山大学田永君教授领导的团队开展了系统性的研究.首先从理论入手,建立了极性共价材料的多晶硬度理论模型(*Int J Refract Met Hard Mater*, 2012, 33: 93),研究发现:在纳米尺度,由于霍尔-佩奇效应及量子限域效应的双重贡献,共价材料的硬度可以随着显微结构特征尺寸的减小而持续增加.然而,前人的大量尝试都表明,获得小于 10 nm 的显微结构特征尺寸一直是个技术上的挑战.田永君团队与合作者选择了洋葱结构的前驱体,通过高压下的结构相变,相继成功地合成出纳米孪晶结构的立方氮化硼块材^[1]和金刚石块材^[2],孪晶的平均厚度分别降至 3.8 nm 和 5 nm.纳米孪晶结构立方氮化硼块材的维氏硬度值达到 108 GPa,超过了人造金刚石单晶;韧性为 $12.7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$,约为立方氮化硼单晶的 4.5 倍.纳米孪晶金刚石在空气中的起始氧化温度比天然金刚石高出 200℃ 以上;维氏硬度可达 200 GPa,约为天然金刚石的两倍(见图 1),将幻想变成了现实.纳米孪晶立方氮化硼和金刚石的成功合成实现了工具材料硬度、韧性和稳定性三大性能指标的同时提高,也验证了他们提出的多晶硬度理论模

型,为发展高性能超硬材料及工具探索出一条崭新的原理和实现的技术途径.这类极硬材料的工业应用将使机械加工效率、加工方式和装备技术有可能进入到一个崭新的发展阶段.

值得注意的是,他们阐明了测试比金刚石更硬材料硬度的基本原理.通过分析压痕形成过程中金刚石压头及被测样品的受力模式,给出了材料压痕硬度可靠测量的有效判据^[2, 3]:只要被测样品的剪切强度小于金刚石压头的压缩强度,被测样品的硬度就能够被可靠测量,更正了超硬材料硬度测量的一个错误认识(*Nat Mater*, 2004, 3: 576).

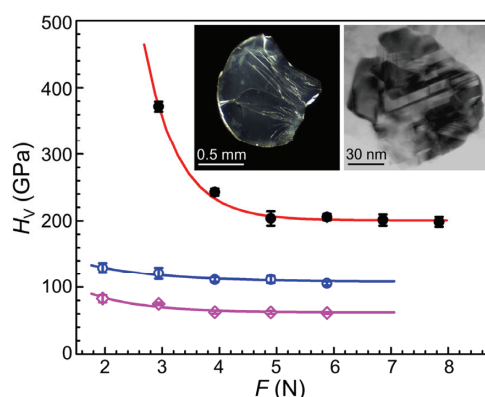


图 1 纳米孪晶金刚石(红线)和天然金刚石(蓝线: {110}面;粉线: {111}面)维氏硬度 H_V 与载荷 F 的关系. 左插图: 20 GPa 和 2000℃ 合成的透明纳米孪晶金刚石样品, 右插图: 纳米孪晶金刚石的典型透射电子显微镜照片(由燕山大学 Bo Xu, Wentao Hu, Quan Huang 提供)

邹广田

(吉林大学超硬材料国家重点实验室)

参考文献

- 1 Tian Y, Xu B, Yu D, Ma Y, Wang Y, Jiang Y, Hu W, Tang C, Gao Y, Luo K, Zhao Z, Wang L-M, Wen B, He J, Liu Z. Ultrahard nanotwinned cubic boron nitride. *Nature*, 2013, 493: 385–388
- 2 Huang Q, Yu D, Xu B, Hu W, Ma Y, Wang Y, Zhao Z, Wen B, He J, Liu Z, Tian Y. Nanotwinned diamond with unprecedented hardness and stability. *Nature*, 2014, 510: 250–253
- 3 Tian Y, Xu B, Yu D, Ma Y, Wang Y, Jiang Y, Hu W, Tang C, Gao Y, Luo K, Zhao Z, Wang L-M, Wen B, He J, Liu Z. Controversy about ultrahard nanotwinned cBN reply. *Nature*, 2013, 502: E2–3