



2015年度浙江大学学术进展

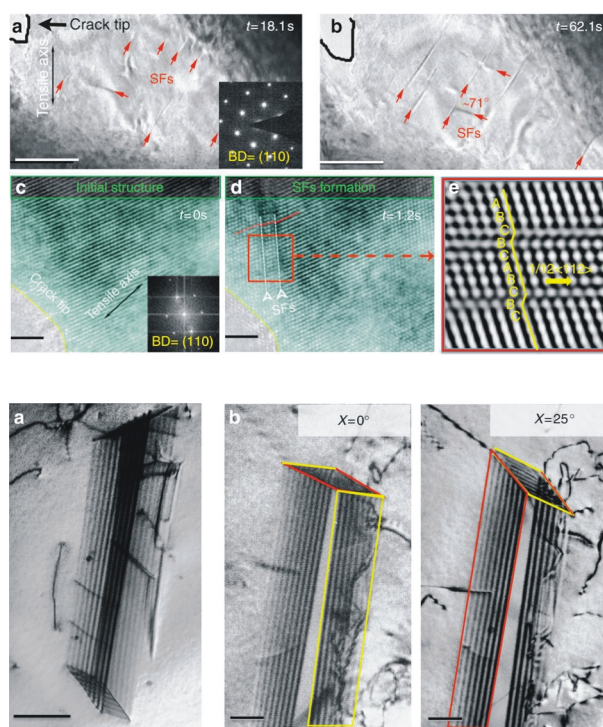
## 超高韧性高熵合金的本征变形机理研究

★★★★★ (入选年度十大学术进展)

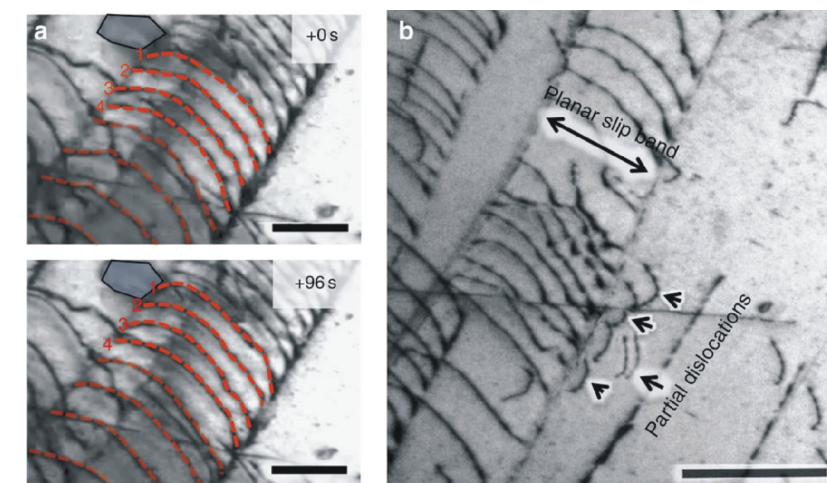
余倩教授领导的团队基于高熵合金的研究提出了一种由内增韧和外增韧机制共同作用的材料固溶增韧的新方法，为改良合金化设计制备高韧性材料提供了新的思路。

项目负责人：余倩

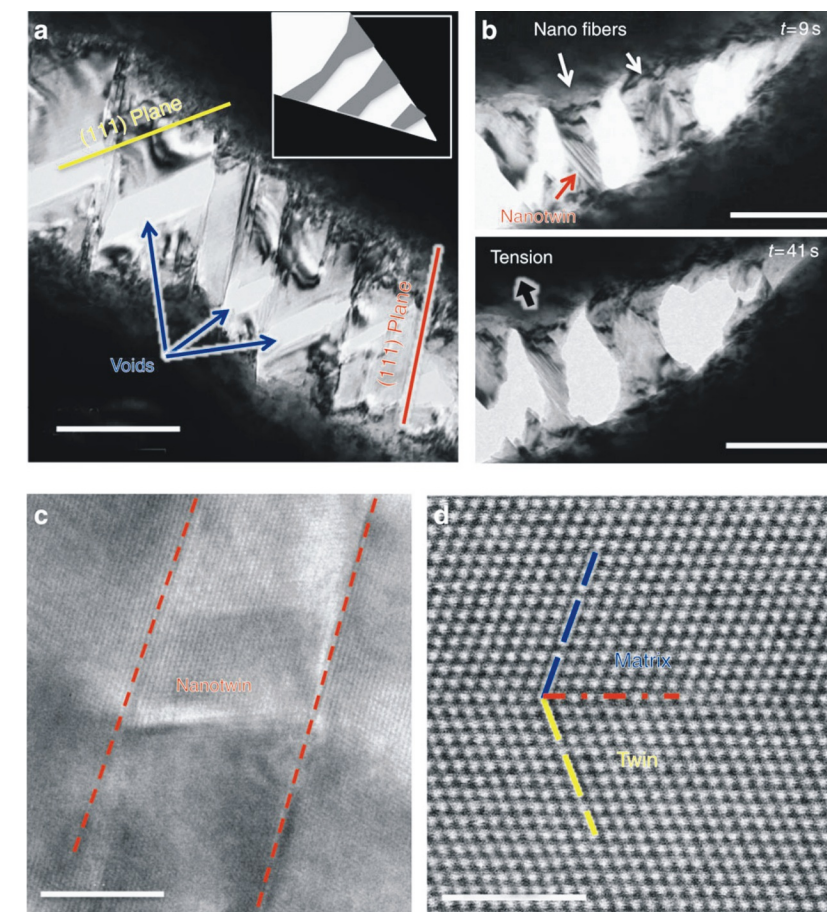
对一种材料而言，韧性是指其在塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力。韧性越好，则发生脆性断裂的可能性越小，材料使用更可靠安全。例如，陶瓷的韧性就很差，很容易碎，用途受到很大限制。金属材料作为一种最重要的结构材料，韧性的好坏在材料性能的评估上起着决定性的作用并长期受到广泛的关注。高韧性一方面需要材料具有很好的塑性来协调变形，另一方面又需要具有高的强度；而这两者在通常的材料中往往是矛盾而不可兼得的。对于大多数材料特别是金属合金，塑性的提高必然导致强度的下降。



有意思的是，近年来发现的CrMnFeCoNi（铬锰铁钴镍）高熵合金可以将强度和塑性完美结合，它的强度可以和最好的低温钢媲美，而韧性超过了所有纯金属和金属合金。其拉伸强度达到了1GPa，延伸率达到了60–70，断裂韧性超过了200 Mpa。然而，这种单相五元合金高韧性的内在原因及其裂纹扩展的过程都是未解之谜。



通过在透射电镜中对这种高熵合金进行原位拉伸研究，观察裂纹扩展的动态过程及其周边塑形变形区的结构变化，我们系统和深入地研究了这种特殊合金材料的本征变形机理，实现了对其高韧性来源的清晰认识。我们发现CrMnFeCoNi高熵合金的断裂韧性由两种机制提供，即内增韧和外增韧。由于该种材料 general stacking fault energy (SFE) 较低，总体不全位错的运动活跃，很好的提供了变形能力；而材料中原子高度无序混合又使得 local SFE 可能很高而导致位错不易分解并以全位错的形式存在。这些全位错滑移相对困难而阻碍了不全位错的运动，引起强化。通过这种内增韧机制，多种塑性变形机制如不全位错、全位错和孪晶先后主导裂纹尖端塑形变形区的塑性变形，提供材料的强度和塑形。此外，在塑性变形末期的裂纹扩展阶段，裂纹前端会形成能够进行孪晶变形从而具有良好强度和塑性的“桥”，通过外增韧的机制很好地阻碍了裂纹的扩展，提供给材料额外的韧性。



这些“桥”就像是骨头里连接微裂纹的胶原纤维。这种现象在金属材料中极为罕见。这种高熵合金高强高韧断裂韧性的优异性能是两种机制先后协同作用的结果。2015年12月，项目主要结果在《自然通讯》发表。