



# 非线性力学国家重点实验室

<2014> 第2期(总第211期)

# 简讯

State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

## 目录

### 科研进展

- 通过梯度多层次孪晶结构突破材料的强度与韧性之间的对立.....2
- 力学所纳米结构陶瓷涂层界面粘结性能研究取得进展.....6

### 公众科学开放日

- LNM 积极响应中国科学院力学研究所第十届公众科学开放日活动.....8

### 学术报告.....10

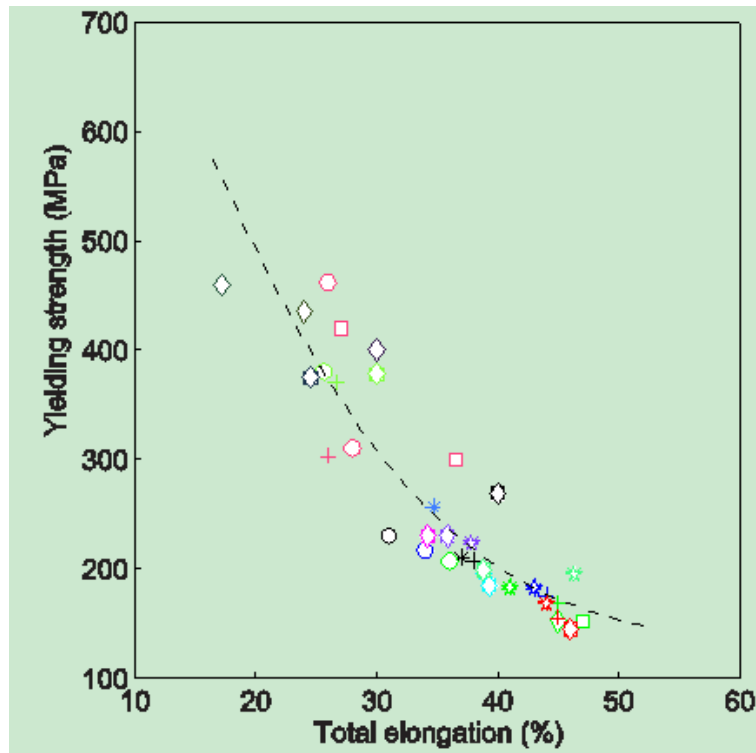
## 科研进展

### 通过梯度多层次孪晶结构突破材料的强度与韧性之间的对立

对钢材而言，强度和韧性是衡量品质的重要标准，但两者却总是鱼与熊掌不可兼得，只能根据需要选取一个折衷方案。力学研究所魏宇杰研究员和他的研究团队探索出有效的材料制备方法，实现了孪晶钢材料变形中的梯度多层次孪晶结构，大幅度提升孪晶钢材料的强度且不损失其拉伸韧性，相关论文发表在最近出版的《自然通讯》上。

当我们用力拉横截面积相同、长度相等的两种材料，比如铁棒和木棒，如果每施加一点力后再将卸载，铁棒和木棒将恢复到它们的原始长度，这一过程为材料的弹性变形阶段。如果逐步增加所施加的力，到一定程度，卸载后铁棒和木棒的长度将不能完全恢复，这一对应状态下的力，如果考虑单位横截面积，对应于铁棒和木棒的强度。再持续增加外力，材料进入我们常说的塑性变形阶段。这时铁棒的不可恢复部分的变形逐渐变多，并最终导致材料断裂，在临破坏前，铁棒的最终长度可能比初始长度增加了 30-50%。与此相对照，临破坏前木棒的最终长度可能只比初始长度增加了百分之几。这一最终可拉伸的长度，即对应于材料的拉伸韧性。在弹性阶段，强度越高我们就可用越少截面积的材料来承担相同大小的力；韧性越好，材料变形过程中所能吸收的能力就越多。一般而言，铁棒比木棒的强度高，塑性变形能力强，拉伸韧性好。这也是人类逐步用钢铁取代木材，使前者成为最广泛使用的工程材料的原因。

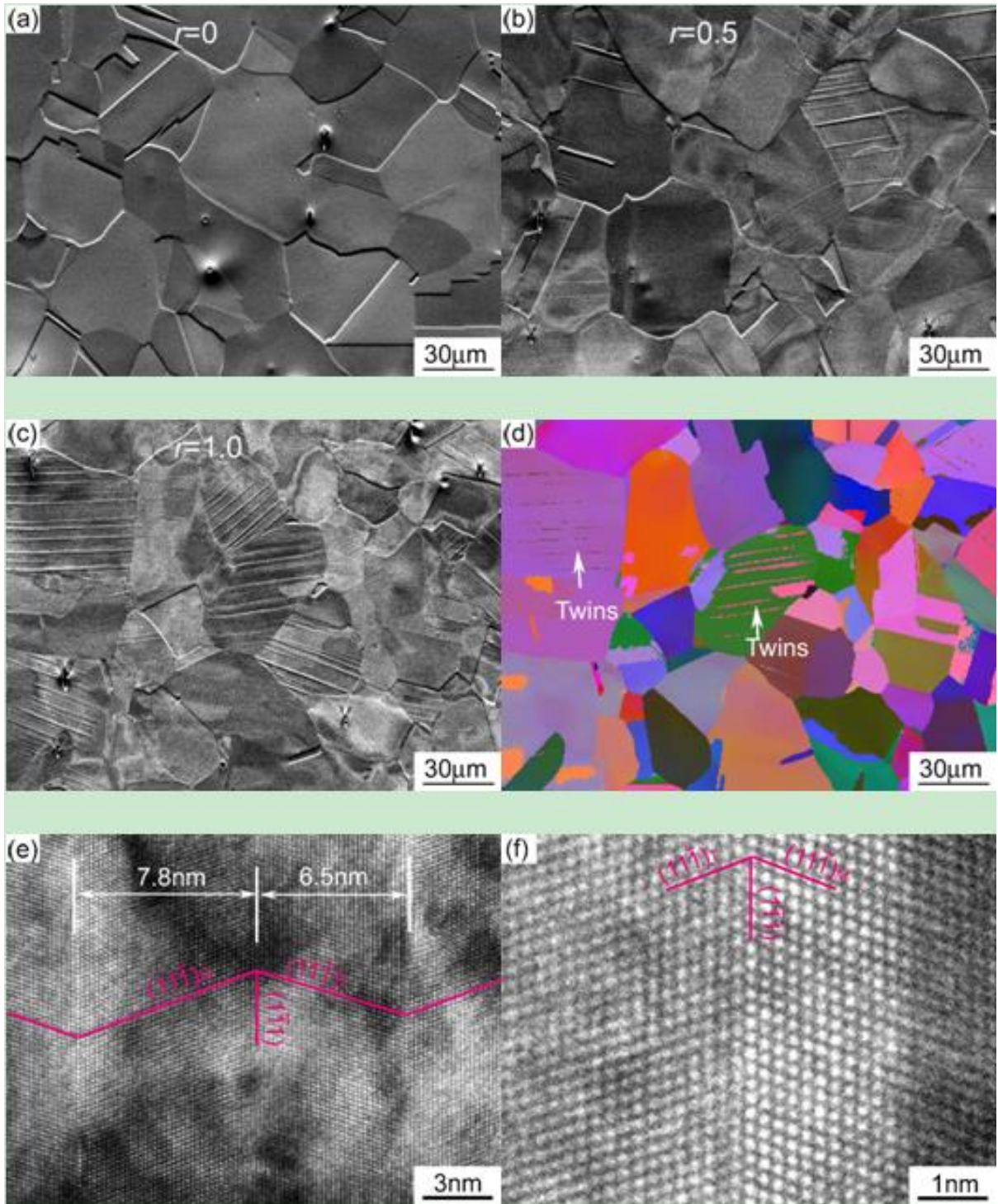
对于同一类材料，尤其是金属材料，它们的强度与韧性之间是对立的，类似于我们常说的熊掌与鱼的关系（见图一）。这一对立关系，是由于材料内在的微观结构和变形机理导致的，如何设计并控制材料微观结构，激活所希望的变形机理，实现强度与韧性两者兼得，是科研人员长期追求的目标。对钢铁而言，考虑到它巨大的使用范围，更是重点研究方向。最近几年出现的孪晶钢（TWIP），由于其韧性好，受到了广泛的关注，尤其是交通行业，因为好的韧性变形能在事故过程中将大量的冲击带来的能量耗散在材料变形过程中，从而提高安全性。其缺点是强度太低，导致疲劳寿命（能承受的循环载荷的次数）低。



图一：典型钢材的韧性随强度增加而降低的趋势。数据来源：美国钢铁公司。

受文献中高速碾磨后具备纳米结构表层的铜金属所展现的优异力学性能的启发，中国科学院力学研究所、上海大学、北京科技大学、浙江大学和布朗大学组成的研究团队探索出有效的材料制备方法，实现了孪晶钢材料变形中的梯度多层次孪晶结构，大幅度提升孪晶钢材料的强度且不损失其拉伸韧性。通过预加的扭转变形，首先在孪晶钢中实现了孪晶密度梯度（如图二所示）。由于孪晶界面是原子在某一个排列方向的镜面对称面，原子高度有序排列，这类具备孪晶密度的钢材在之后的拉伸变形中强度显著提高，而韧性没有变化。更为重要的是，这一材料制备方法简洁有效、不受材料尺寸的限制。这些特点使得这一研究具有很高的实用价值，能广泛应用于需要增强的轴对称结构，如轴承、转子等结构，服务于汽车、高速铁路等行业。

实现大幅度强度提升且不损失材料拉伸韧性的原因在于材料经过预加的扭转变形之后形成的孪晶密度梯度，使得材料由里至外，强度线性增加，这种表面强，内部弱的同类材料复合结构，其强度由各处的体积平均决定。孪晶密度梯度也使得材料在塑性过程中维持较高的硬化（随着材料塑性变形而需要增加载荷以实现进一步变形的现象），这一硬化特点能有效防止变形局部集中导致的材料破坏。

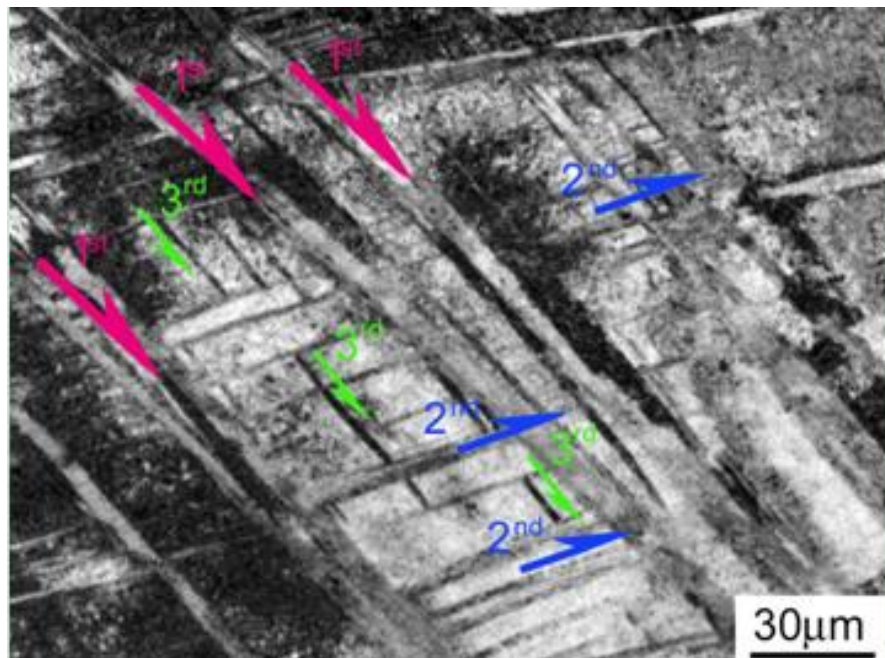


图二：扫描电镜图表明预扭转处理后的材料沿径向形成孪晶梯度。(a)到(c)：从试样的中心位置没有孪晶到试样的表面位置具备高密度孪晶。(d)电子背散射衍射显示的(c)的扫描结果，显示条带状变形为孪晶。(e)孪晶宽度在纳米量级。(f)孪晶界面非常规则。

更为重要的是，由于预处理中孪晶密度梯度的存在，后续的拉伸变形使得材料内部形成梯度多层次孪晶结构（如图三所示）。实验和理论分析表明，在不同的材料处理和变形阶段，晶体内在的不同孪晶与位错系统被激活，使得变形在微观层次趋于均匀分布，同时维持材料宏观上的应变硬化，阻止材料的塑性变形局域化。

该工作在线发表在 4 月 1 日的自然通讯杂志上（魏宇杰，李永强，祝连春，刘焱，雷现奇，王刚，吴彦欣，米振莉，刘嘉斌，王宏涛，高华健. Evading the strength-ductility trade-off dilemma in steel through gradient hierarchical nanotwins, Nature Communications, DOI: 10.1038/ncomms4580, 1 April 2014）。相应的材料处理方法已申请国家专利（专利申请号 CN103290183A）。

该研究工作受到了中国科学院、科技部 973 计划以及国家自然科学基金委等机构的资助。



图三：扫描电镜图表明预扭+拉伸变形后材料内部形成多级孪晶结构。红、蓝、绿箭头分别代表主孪晶、次生孪晶、三层孪晶。

## 力学所纳米结构陶瓷涂层界面粘结性能研究取得进展

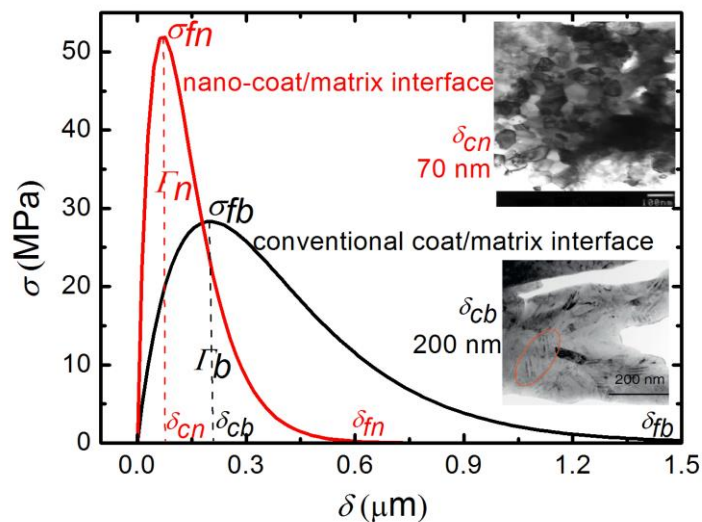
近日，中国科学院力学研究所在纳米结构陶瓷涂层与合金基底的界面粘结性能、纳米结构涂层的导热性能和弹性性能等研究上取得了新进展，揭示了界面粘结性能及相关力学性能的微结构尺度效应及其物理机制。

陶瓷涂层由于具有良好的热绝缘、抗氧化及耐腐蚀等优异性能，在机械工程、化工、生物医疗、电子、航天航海等众多领域都有广泛应用。如航空发动机的叶片由于工作温度高达一千度以上，金属基底上往往要沉积或涂覆上一层几百微米厚的耐高温的陶瓷涂层以保护内部部件，而涂层与基底之间的界面粘结性能则关系到相关结构和部件的可靠性与服役寿命。一旦涂层与基底之间界面开裂，涂层剥落，暴露在高温下的金属基底将很快失效。因此研究涂层与基底之间的界面粘结性能、提高二者之间的界面结合强度一直是工业应用的迫切需求。而纳米结构涂层作为一种新型的结构材料，由于微结构（晶粒）从传统的微米尺度减小到百纳米甚至几十纳米，比表面积急剧增大，展现出很多不同于传统涂层及块体材料的力学性能，如模量增加、导热性降低等，那么它与基底间的界面结合强度怎样呢？对这一问题的理解不仅对指导实际应用，而且对发展微纳尺度力学都具有重要意义。

界面粘聚模型(Interface cohesive model)通常用于描述界面断裂过程中裂纹尖端的力学行为，反映了界面粘聚区原子所受应力( $\sigma$ )及分离位移( $\delta$ )的关系：界面分离应力随位移增加首先增加，当达到最大应力即界面强度后，应力则随位移增加而减小直至消失。该模型是一个宏观唯象模型，有两个关键参数：界面断裂强度( $\sigma_f$ )及界面断裂韧度( $\Gamma$ )，界面韧度(即界面粘聚能)反映了界面断裂所需的功。对实际材料宏观体系的界面结构，界面强度往往是 MPa( $10^6$  帕斯卡)量级，而界面开裂位移( $\delta_f$ )是微米 ( $10^{-6}$  米) 量级；但对双材料界面分离的原子尺度模拟显示，界面强度是 GPa( $10^9$  帕斯卡)量级，而界面分离位移则是埃 ( $10^{-10}$  米) 的量级。这种从微观到宏观的量级差异表明了界面性能的跨尺度现象，如何将界面的微观物理机制及宏观力学性能有机地结合起来一直是界面科学研究的一项挑战。

研究人员根据界面粘聚能的热力学定义（断裂后形成两个新表面的表面自由能之和减去断

裂前两者间的界面自由能之差)、以及界面断裂前后表面、界面自由能及其尺度效应的介观热力学表征,结合实际陶瓷涂层/合金基底体系界面拉伸断裂的实验测量,给出了界面粘结性能尺度效应的力学模型,预测并证实了纳米结构涂层与基底之间提高近两倍的界面强度(比传统的微米结构涂层与同样基底间界面强度而言),指出微结构变化引起的涂层表面能及涂层基底间界面开裂位移的尺度效应,是导致涂层体系宏观界面强度改善的微观物理机制。进一步给出界面粘聚模型中临界位移( $\delta_c$ )的物理意义对应着界面材料的基本微结构尺度。



涂层/基底体系界面粘聚的应力-位移关系,纳米结构涂层与基底间界面强度提高、临界位移(对应微结构尺度)减小

上述研究获得了科技部重大科学研究计划纳米“973”项目和国家自然科学基金委以及非线性力学国家重点实验室开放课题等的支持,由中科院力学所梁立红副研究员、魏悦广研究员以及金属所韦华研究员等合作完成。系列相关成果发表于国际期刊(Liang et al. *Surf. Coat. Tech.* 2013, *Int. J. Heat Mass Tran.* 2013, *J. Appl. Phys.* 2010, *Philos. Mag.* 2013, *J. Nanomater.* 2011)。

## 公众科学开放日

### LNM 积极响应中国科学院力学研究所第十届公众科学开放日活动

2014 年 5 月 17 日, 中国科学院力学研究所与中国力学学会共同举办了以“走进力学所, 共圆科技梦”为主题的第十届公众科学开放日活动。前来参加活动的公众 900 余人, 包括中科院三幼、中关村一、二、三小、育翔小学、农科院附小、海淀实验小学、北航附中、人大附中、清华附中、牛栏山一中、民族中学、清华大学、北京科技大学、北京师范大学、中国地质大学等 50 多所院校的师生, 以及来自企业、科研院所和社会各界公众人士。

本次活动项目包括: 科普讲座、参观体验“趣味力学科普展室”、参观园区、实验室, 力学科普主题展览, 以及动手体验项目等。

趣味力学科普展室在本次活动中首次对外开放, 吸引了众多中小學生参观。科普展室包括展现大师风采区“力学星空”、动手操作区“实践园地”、力学实验演示区“实验观摩”、科普图书展示区“力学阅读”、力学知识检测区“知识测验”五大版块。讲解员生动形象的讲解, 使参观者不仅了解了很多力学家的故事, 而且理解了一些看似复杂的力学实验。“实践园地”是学生们自由参观时最感兴趣的版块, 他们亲自动手操作, 体验了“椎体上滚”、“小球碰撞”等神奇的力学现象, 弄清了其中的力学原理。随着对力学知识掌握的加深, 很多学生在知识测验后取得了很好的成绩。展室为测试结果优秀的学生发放了奖品。同时, 还为参观者们准备了精美的《力学科普小手册》。

随后, 各界人士参观了钱学森办公室、郭永怀办公室、院士墙以及固体力学、流体力学、微重力、激波/管风洞实验室、波浪海流模拟水槽以及强激光效应实验室。各实验室为了给公众提供一个力学与实践的平台, 别出心裁地给参观者准备了力学实验和科普视频。比如 LNM 固体力学实验室播放了一位轻功大师“纸上悬人”的视频, 这让参观者们困惑不已, 一张普通的白纸居然能够承受一个成年人的重量。实验员通过材料试验机给大家做了个力学小实验, 实验测量所得小纸环在均匀受力下所能承受的重量高达 25 公斤。力学原理不仅识破了轻功大师的秘密, 更让大家对力学学科产生了浓厚的兴趣。一名来自民族附中的学生兴奋的说: “我将来也要来这里做科研”!





参观 LNM 固体力学实验室

## 学术报告

形式	日期	报告人	单位	报告题目
学术报告	4月2日	陈斌	高压先进研究中心 上海分中心	压缩科学：物质科学的新机遇
	4月16日	邵颖峰	中国科学院 力学研究所	陶瓷热冲击开裂和残余力学性能研究
	4月21日	张何朋	上海交通大学	Mechanics and statistics of bacterial locomotion
	5月7日	李冬青	加拿大滑铁卢大学	Electrokinetic microfluidics and lab-on-a-chip devices
	5月29日	John J Lewandowski	Case Western Reserve University	Flow and fracture studies on metallic glasses
	6月5日	Michael W Reeks	Newcastle University	Transport, mixing and agglomeration of particles in turbulent flows
	6月19日	Xiangchun Xuan	Clemson University	Diamagnetic particle manipulation in ferrofluid-based microfluidic devices
	6月25日	尹光	清华大学 航天航空学院	湍流场动力模态分析