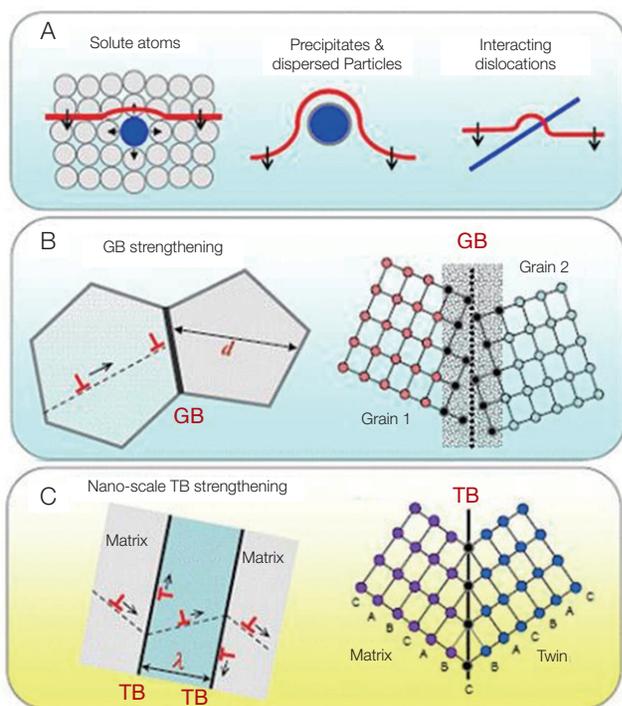
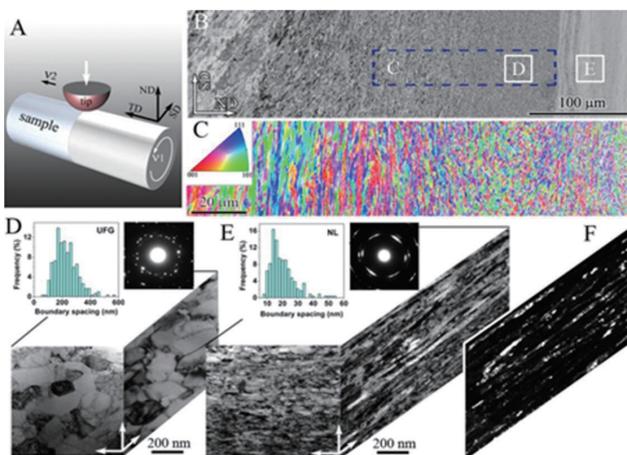


## 16 工程金属材料结构纳米化科学与技术



纳米孪晶结构：A和B分别是材料的传统强化途径示意图。A（自左向右）：固溶强化、第二相弥散或沉淀强化、加工（或应变）强化。B：晶粒细化强化（或晶界强化）。C：新提出的纳米尺度孪晶界强化示意图，右侧为一孪晶界示意图



小角晶界纳米层片结构：A表面机械碾磨装置示意图。B横截面（SD-ND）扫描电镜揭示梯度变形结构。C图（B中虚框对应的背散射电子衍射分析）揭示不同的变形结构。D、E横截面和纵截面（ND-TD）透射电子显微镜观察距离表层110微米深度形成的超细晶结构和D距离表层40—50微米深度形成的纳米层片结构E的明场像。D、E中插入界面间距分布（左）和相应的选取电子衍射谱（右）。F为由纵截面观察的纳米层片结构的暗场像

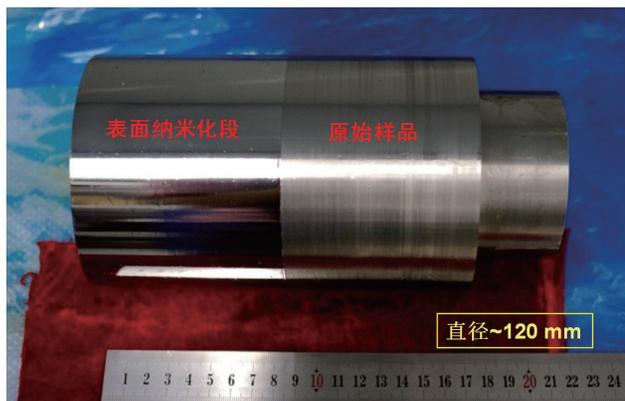
金属材料的强化是材料领域的长期核心研究方向。目前金属材料传统的强化技术均会使材料的塑性、韧性、导电性、热稳定性等显著下降。金属材料强度-塑性/韧性/导电性等“倒置”关系限制了金属材料在更高水平和更广范围的应用，成为制约金属材料发展和应用的主要瓶颈。如何通过调控金属材料的微观组织结构和内部缺陷来提高材料的综合性能已成为材料领域的重要发展方向。中科院金属所卢柯院士团队十余年来持续开展纳米金属材料的制备、力学行为及其机理、应用探索等研究，提出金属材料的纳米孪晶强韧化机制，成为金属材料四大经典强化理论之外又一重要强化理论。目前纳米孪晶材料已成为当今国际材料领域的研究热点。

在国际上首次提出“金属材料表面纳米化”概念，并在多种金属及合金材料上得以成功实现。由于表面纳米化处理后表面层中结构尺度由表及里呈梯度变化，消除了界面结合和表层剥落问题，处理工艺简单、成本低、适用于绝大多数金属材料，表面纳米化技术作为一种全新的材料表面工程技术已成为世界各国的研究热点。2011年卢柯院士团队利用表面机械碾磨处理在纯铜棒材表面成功制备出梯度纳米结构，自表及里晶粒尺寸由十几纳米梯度增大至微米尺度，棒材芯部为粗晶结构，这种梯度纳米结构的厚度可达数百微米。梯度纳米结构层使材料的拉伸屈服强度提高一倍，且其拉伸塑性变形能力优于粗晶铜。这种兼备高强度和高拉伸塑性的优异综合性能为发展高性能工程结构材料开辟了一条全新的道路，相关研究成果发表于 *Science*，被评为2011年度“中国科学十大进展”。目前金属所表面纳米化技术已在宝钢冷轧厂得到成功应用，对拉矫辊表面纳米化处理后，其使用寿命提高2倍，并获得“2013年度产学研合作创新成果奖”。

在金属中发现超硬超高稳定性新型纳米层片结构。2013年卢柯院士团队利用自行研发的新型塑性变形技术

(表面机械碾磨处理)在金属镍表层成功突破了这一晶粒尺寸极限,获得纳米级厚度并具有小角晶界的层片结构,同时发现这种纳米层片结构兼具超高硬度和热稳定性。这种新型超硬超高稳定性金属纳米结构突破了传统金属材料的强度-稳定性倒置关系,为开发新一代高性能纳米金属材料开辟了新途径,相关研究成果发表于 *Science*。

基于金属所在金属纳米材料方面的优势地位,2014年卢柯院士受邀为 *Science* 撰写“梯度纳米材料”展望性文章。卢柯院士团队在金属纳米材料领域在 *Science*、*Nature* 等 *SCI* 刊物上共发表论文 450 余篇,被 *SCI* 论文引用近 20 000 次(90%以上为他引),单篇



金属材料表面纳米化技术在核泵泵轴和机车车轴上的应用

论文引用大于 1 000 次。2014 年,两名学术带头人卢柯、卢磊分别被汤森路透授予“最具国际引文影响力奖”和“高被引科学家奖”。

## 专家点评

该研究项目面向工程金属材料,从实验制备、性能测试、机理分析等多个方面开展深入而全面的研究,取得了令人瞩目的丰硕成果。该项目不仅在技术方面实现了巨大的突破,即自主研发了表面纳米化技术;而且在科学研究方面也取得了具有非常重大意义的进展,即成功地制备了梯度纳米结构、两种片层纳米结构(纳米孪晶和小角晶界纳米层片),并清晰地阐明了这些纳米结构材料的力学性能、变形行为与纳米结构之间的关联。从科学意义上来讲,该项目解决了近几十年来国际材料领域中的两大科学难题:一是如何制备稳定的、具有超细尺寸的纳米结构使得工程金属材料具有优异的综合性能;二是如何表征和阐明纳米结构金属材料中的微观变形机理。这些研究成果具有极大的原始性创新,研发的新技术和取得的新发现均处于国际领先地位。这些成果已经在国际材料、力学、生物、工程和物理等多个科学领域产生了重大而深远的影响:不但丰富和拓宽了人们对纳米尺度材料变形机理的本质认识,而且为发展高性能纳米结构材料及其应用开辟了一条崭新的途径。这些研究成果将会在相关工业应用领域(如电力传输系统、机电装备、微机电系统和超导磁铁技术等)中产生极大的推动作用,并带来非常可观的经济效益。

## 点评专家

**高华健** 固体力学家,美国工程院院士,中科院外籍院士,固体力学领域旗舰期刊 *JMPS* 杂志主编。美国布朗大学 Walter H. Annenberg 冠名教授,曾任美国斯坦福大学教授、德国马普金属研究所所长。获国际力学领域最高

奖——Rodney Hill 固体力学奖(四年仅授予一人),美国工程科学协会的最高奖——William Prager 奖,及美国机械工程师协会的材料类最高奖——Nadai 奖等。