

附件 3

自然科学奖推荐号：

项目名称	金属材料界面与层网多级结构强韧化机制
提名单位	河北省教育厅
项目简介	<p>高强韧金属材料是满足国家重大需求的关键材料。强度-韧（塑）性倒置关系是金属材料领域的核心基础科学问题，也是长期制约金属材料发展的难点问题。基于界面调控的仿生多级结构是高强韧金属材料发展的趋势之一，但是面临界面原子尺度塑韧性机制不明、纳米析出界面耦合效应不清、仿生多级结构强韧化模型匮乏等挑战。本项目揭示原子尺度界面成分结构对强韧性的作用机理，厘清纳米析出界面动态耦合强韧化效应，首次提出层网多级仿生结构强韧化概念，实现了高强韧金属材料设计的原始创新。</p> <p>发现点 1：研究界面元素偏聚和界面共格属性对塑韧性的调控机制，发现界面纳米析出相吸收有害元素以及界面非晶吸收位错提高塑韧性机制。</p> <p>针对界面开裂导致材料塑性下降甚至脆性断裂的现象，本项目研究了金属材料界面元素偏聚和共格属性两大界面本征特性对塑韧性的调控机制，发现晶界有害元素纳米尺度偏聚导致晶界熔点和结合力降低是塑韧性降低的主要原因，提出了多元纳米析出相吸收界面易偏聚有害元素策略，解决了多元合金中的界面脆性问题；发现半共格界面可以促进界面孪生，界面非晶相可以吸收位错，缓解界面应力集中，显著提升材料塑韧性。基于界面结构与成分调控，开发了 1500 MPa 级高强韧双相钛合金。</p> <p>发现点 2：研究纳米析出相调控局部成分和微观塑性变形机制规律，阐明共格纳米析出相强化及其引发的基体局部动态孪生协同强韧化机制。</p> <p>针对纳米析出强化导致塑韧性下降的问题，本项目研究了纳米析出对基体成分影响和析出相与基体界面结构对材料强韧性的作用规律，发现基于纳米析出相成分、尺寸、体积分数的优化，可以调控微区元素分布，改变合金的层错能，从而激活孪生变形，动态产生高密度共格孪晶界，建立了共格纳米析出相与动态孪生协同强韧化机制，制备出超低温强度超过 1.5 GPa，均匀延伸率超过 50%的高熵合金。</p>

发现点 3: 首次提出层网多级仿生结构强韧化概念, 实现层网多级结构金属材料的大规格可控制备, 揭示层网多级结构界面耦合强韧化机制。

针对仿生多级结构调控和大规格制备难的问题, 本项目学习自然界高强韧材料的层状结构, 耦合界面与纳米析出相调控, 首次提出层网多级仿生结构的概念; 利用组坯轧制技术实现了具有层网多级结构高强韧金属材料的大规格制备; 发现层网多级仿生结构中层内纳米析出相和纳米片层结构可以显著提高强度, 层网界面可以大幅提升韧性, 层网多级结构的强背应力耦合作用同时提升强度和塑韧性。相关发现在发展高强韧防护材料方面获得验证, 使 1.0 GPa 级装甲钢的低温冲击韧性提升 1 倍以上。

项目成果发表论文 50 余篇, 5 篇代表作发表在 *Sci. Adv.*、*Acta Mater.*等顶刊 (其中 2 篇为 ESI 高被引论文), 被国内外知名专家在 *Science*、*Nat. Commun.*、*Sci. Adv.*等顶刊正面引用 600 余次。第一完成人入选国家级高层次人才计划、中国科学院“BR 计划”、发表高水平论文 100 余篇, 引用 8000 余次, H-index48, 获得燕赵青年科学家、国家自然科学基金联合基金、面上基金等项目资助。项目组成员获新世纪优秀人才培养计划、中科协青年人才托举等人才计划。

代表性论文专著目录

1. Kaisheng Ming[#], Linlin Li[#], Zhiming Li, Xiaofang Bi*, and Jian Wang*. Grain boundary decohesion by nanoclustering Ni and Cr separately in CrMnFeCoNi high-entropy alloys. *Science Advances* 5(12) (2019): eaay0639.
2. Xiaodong Zheng, Shijian Zheng*, Jian Wang*, Yingjie Ma, Hao Wang, Yangtao Zhou, Xiaohong Shao, Bo Zhang, Jiafeng Lei, Rui Yang, Xiuliang Ma. Twinning and sequential kinking in lamellar Ti-6Al-4V alloy. *Acta Materialia* 181 (2019): 479-490.
3. Ting Xiong, Shijian Zheng*, Jingyu Pang, and Xiuliang Ma. High-strength and high-ductility AlCoCrFeNi_{2.1} eutectic high-entropy alloy achieved via precipitation strengthening in a heterogeneous structure. *Scripta Materialia* 186 (2020): 336-340.
4. Kaisheng Ming, Xiaofang Bi*, and Jian Wang*. Realizing strength-ductility combination of coarse-grained Al_{0.2}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.3} alloy via nano-sized, coherent precipitates. *International Journal of Plasticity* 100 (2018): 177-191.
5. B. X. Liu*, F. X. Yin*, X. L. Dai, J. N. He, W. Fang, C. X. Chen, and Y. C. Dong. The tensile behaviors and fracture characteristics of stainless steel clad plates with different interfacial status. *Materials Science and Engineering: A* 679 (2017): 172-182.

主要完成人情况表（排名、姓名、技术职称、工作单位、对本项目技术创造性贡献、曾获奖励情况）

排名	姓名	技术职称	工作单位	完成单位	贡献	曾获奖励情况
1	郑士建	研究员	河北工业大学	河北工业大学	郑士建研究员是两篇代表性论文的通讯作者，是3个科学发现点的提出者，作为项目负责人主持国家自然科学基金面上项目、河北省军民两用关键技术和产品研发项目，在金属材料强韧化领域提出新思路，并与其它完成单位共同完成本项目的研究。	无
2	明开胜	副教授	河北工业大学	北京航空航天大学	是两篇代表性论文的第一作者，负责金属材料的制备、微观组织表征与强韧化机制研究，对科学发现点1、2、3有突出贡献。	无
3	刘宝玺	副研究员	河北工业大学	河北工业大学	是一篇代表性论文的第一作者和通讯作者，负责构筑层网多级仿生结构，对科学发现点3有突出贡献。	河北省金属学会冶金科学技术进步一等奖（第8完成人）
4	郑晓东	无	香港理工大学	中国科学院金属研究所	是一篇代表性论文的第一作者，参与金属材料界面强韧化理论模型的建立，对科学发现点1、2有突出贡献。	无
5	毕晓昉	教授	北京航空航天大学	北京航空航天大学	是两篇代表性论文的通讯作者，参与金属材料界面设计与强韧化机制的研究，对科学发现点1、2有突出贡献。	无

完成人合作关系说明

在项目执行过程中，完成人郑士建/1 负责全面引领课题研究内容的理论创新工作，对本项目关键理论体系的形成发挥重要作用，负责项目总体组织协调。

完成人郑士建/1、明开胜/2、郑晓东/4 等共同参与完成了原子尺度界面结构对 CuNb 层状金属材料性能调控的原位电镜研究、1500MPa 钛合金多尺度强韧化技术研究项目。

完成人郑士建/1、明开胜/2、毕晓昉/5，提出了界面元素偏聚和界面共格属性对塑韧性的调控机制，发现界面纳米析出相吸收有害元素以及界面非晶吸收位错可以提高塑韧性。

完成人郑士建/1、郑晓东/4，基于界面结构与成分调控，开发了 1500 MPa 级高强韧双相钛合金，发现半共格界面可以促进界面孪

生，界面非晶相可以吸收位错，缓解界面应力集中，显著提升材料塑韧性，建立了孪晶与异质相协同塑性变形的原子尺度微观机制。

完成人郑士建/1、明开胜/2、毕晓昉/5，研究了纳米析出相调控局部成分和微观塑性变形机制规律，发现共格纳米析出相强化及其引发的局部动态孪生协同强韧化机制，制备出超低温强度超过 1.5 GPa，均匀延伸率超过 50%的高熵合金。

完成人郑士建/1、刘宝玺/3，首次提出了层网多级仿生结构强韧化概念，实现层网多级结构金属材料的可控制备，揭示层网多级结构界面耦合强韧化机制，为研发新型高强韧金属结构材料提供了层网界面多级结构模型，在发展高强韧防护材料方面获得验证，使 1.0 GPa 级装甲钢的低温冲击韧性提升 1 倍以上。

主要完成人之间的合作已有近 10 年，其中郑士建研究员是郑晓东博士在中国科学院金属研究所学习和工作期间的导师和团队负责人，期间共同确定了主要研究课题，就金属结构材料界面原子尺度结构及其对材料强塑性的作用机制开展了系统深入研究。双方共同发表与本项目相关的高水平论文 10 余篇。毕晓昉教授是明开胜副教授的博士生导师，在金属材料纳米析出强化、界面元素偏聚调控力学性能方面开展了系统深入研究，双方共同发表与本项目相关的高水平论文 10 余篇。

刘宝玺副研究员和明开胜副教授现为郑士建研究员研究团队的骨干成员。完成人之间共同开展金属材料界面与层网多级结构强韧化机制研究，并分工协作以确保项目的顺利推进。通过多年的协作，完成人共同克服了多个理论和技术难题，共同提出了基于界面调控的层网多级仿生结构的概念及其强韧化理论模型，联合发表了学术论文 50 余篇，共同申请到了国家自然科学基金联合基金项目。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	备注
1	论文	郑士建/1、郑晓东/4	2015年9月-2019年12月	Twinning and sequential kinking in lamellar Ti-6Al-4V alloy	
2	论文	明开胜/2、毕晓昉/5	2013年9月-2020年1月	Grain boundary decohesion by nanoclustering Ni and Cr separately in CrMnFeCoNi high-entropy alloys	
3	论文	明开胜/2、毕晓昉/5	2013年9月-2018年12月	Realizing strength-ductility combination of coarse-grained Al _{0.2} Co _{1.5} CrFeNi _{1.5} Ti _{0.3} alloy via nano-sized, coherent precipitates	
4	项目	郑士建/1、刘宝玺/3	2019年9月-2023年12月	国家自然科学基金联合基金项目，金属材料的层网多级结构强韧化设计与界面作用机理	

注：所填报内容必须与推荐书中提交的完全一致，否则责任自负，可自行调整行间距