

2026年度陕西高等学校科学技术研究优秀成果公示材料

一、成果基本情况

成果名称	镁合金原位高韧耐蚀微弧氧化膜层制备、修复关键技术及应用
主要完成人	陈永楠、赵秦阳、王楠、占海飞、陈宏、许西庆、张勇、徐义库、张凤英、姜超平
主要完成单位	长安大学、浙江大学
申报等级	一级及以上
联系人及电话	王楠 15609295052

二、成果简介

面向国家能源安全与高端装备自主可控的重大战略需求，本项目围绕镁合金氧化锆（ ZrO_2 ）增韧微弧氧化膜层存在增强相团聚、重载工况易失效、局部损伤难以有效修复、专用装备与评价方法匮乏等核心难题，系统开展从“原位合成+梯度结构+便携修复+韧性评价”四位一体系统解决方案，在《Advanced Functional Materials》《International Journal of Plasticity》等国际顶刊发表论文 34 篇，授权国家发明专利 11 件，转化 6 件，取得了以下原创性成果：

1. 研究内容

（1） ZrO_2 原位合成与 ZrO_2/MgO 双界面协同强韧化机理研究：探明了电参数与电解液组成调控 ZrO_2 原位生成的规律，发展了微弧氧化中 ZrO_2/MgO 协同共生理论；阐明了应力诱导相变增韧与双半共格界面位错强化的协同机制，揭示了相变能耗散与界面阻碍裂纹扩展的微观物理本质。

（2）晶态/非晶态梯度膜层构建及跨尺度双级增韧机制研究：提出了梯度设计与原位合成一体化新方法，制备出 ZrO_2/MgO 纳米晶/非晶梯度膜层；明确了重载工况下纳米晶/非晶的界面结构稳定性的主控因素，阐明了微观 ZrO_2 增强相与宏观梯度结构协同抑制裂纹萌生与扩展的作用规律。

（3）膜层局部修复过渡区构建及修复机理研究：明确了 ZrO_2/MgO 结构不匹配是膜层局部修复二次失效的根本诱因；提出了基于电解液浓度梯度调控原位构建功能过渡区的新方法，实现了过渡区的微观结构向修复区的连续渐变，揭示了过渡区内半共格界面位错密度与晶格失配沿修复方向梯度分布的规律。

（4）局部修复技术、配套装备与韧性评价方法研究：通过建立放电参数与膜层组织性能的映射关系，开发了智能脉冲电源与便携式局部可视修复装备（12 kg）及配套工艺包，实现了大型结构件局部损伤区域膜层精准再生长；发明了基于动载的韧性评价方法和复杂结构件的韧性测试装置，实现了膜层制备、修复和评价装备全流程自主研发。

2. 科学发现点

（1）原位合成协同增韧理论：提出了膜层与 t- ZrO_2 原位协调生长的动力学调控新方法，阐明了应力诱导相变增韧与双半共格界面位错强化的协同理论，揭示了相变能耗散与界面阻碍裂纹扩展的微观物理本质。

（2）跨尺度双级增韧机制：揭示了传统晶态/晶态界面失稳是裂纹萌生与扩展的关键根源，阐明了 ZrO_2/MgO 纳米晶/非晶界面对局部应力协调、原子重排和能量耗散的作用机制，提出了双级增韧新策略。

（3）功能过渡区原位修复理论：揭示了镁合金表面 ZrO_2/MgO 局部修复膜层微观结构不匹配是诱发膜层失效的根本原因，提出了利用微弧氧化局部修复原位构建功能过渡区的新方

法，阐明了功能过渡区微观结构协同驱动连通裂纹向孤立弥散裂纹转化的微观机制。

(4) 原位评价与便携修复装备: 发明了动载韧性评价方法和复杂结构件韧性测试装置(评价准确度 $\geq 95\%$)；研发了集成智能脉冲电源便携式可视局部修复装备(性能恢复率 $\geq 90\%$)。

3. 科学价值

(1) 理论创新: 建立的微弧氧化膜层与增强相协调生长动力学调控理论，为轻金属表面原位合成复合膜层的微观结构设计提供了新范式；提出的双界面协同增韧理论，为陶瓷基复合膜层韧化设计提供了新思路，推动了表面工程增韧机制的学术发展。

(2) 策略创新: 跨尺度双级增韧策略揭示了仿生梯度结构与纳米晶/非晶界面协同调控应力传递、原子重排及能量耗散的内在规律，显著提升了微弧氧化膜层的服役可靠性。

(3) 局部修复理论突破: 提出了“功能过渡区协调微观结构匹配实现长效修复”的新理论依据，丰富了异质界面力学匹配与腐蚀阻断科学认知。

4. 同行引用及评价

学术影响力: 近 5 年 7 篇代表作发表于《Advanced Functional Materials》《International Journal of Plasticity》等顶级期刊，共被他引 114 次。主要完成人在国内外学术会议上做特邀报告 8 次，并担任《Rare Metals》《Corrosion Communications》等期刊编委。

权威评价: 中国工程院院士周玉教授、中国科学院院士赖远明教授、中国香港工程科学院院士 Paul K. Chu 教授、美国国家发明家科学院院士 Paras N. Prasad 教授等国内外权威学者，在《Nature Communications》《Acta Materialia》《International Journal of Plasticity》等期刊上多次正面引用，认为该技术“有效解决了陶瓷材料韧性差难题”，相关成果被评价为“增强相结构设计和调控新范式”。

项目验收与成果鉴定: 国家自然科学基金和陕西省科技重大专项等项目验收认为“研究目标清晰，应用前景广阔”。相关研究成果被评价为“技术创新性强、指标先进、工程化程度高，整体达到国际先进水平，其中，原位合成技术、膜层局部修复技术达到了国际领先水平，具有广阔应用前景和重要行业价值”。

5. 社会价值与应用情况

工程应用: 成果在塔里木、大港油气田等国家重点能源工程中可溶性镁合金输油管道、堵口螺丝等、航空飞行器 XX 金属组件增韧涂层中规模化应用，截至 2025 年 12 月，累计产生经济效益超 2 亿元，新增利润 4747.5 万元，推广应用价值显著。

社会价值: 项目自主研发了微弧氧化便携式修复电源、成套工艺包及韧性评价装置，形成完整自主技术体系，打破对国外技术和装备的依赖，提升了我国轻合金表面防护领域的国际竞争力，拓展了镁合金在石油化工、航空航天、新能源汽车等装备制造领域的应用。

三、主要知识产权（标准、规范）目录

序号	知识产权类别	知识产权名称	国家(地区)	授权号(批准号)	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	专利	一种用于评价裸露动结构件表面膜层的抗落石击打设备及方法	中国	ZL202111322843.X	2023年10月27日	6434964	长安大学	陈永楠、钱伟峰、王楠、张震、杨泽慧、李景、姜超平、赵秦阳、李宏战、郝建民
2	专利	一种镁合金上的ZrO ₂ /MgO耐磨膜层及其制备方法（已转化）	中国	ZL202110336594.3	2022年5月31日	5194475	长安大学	陈永楠、张震、王楠、杨泽慧、钱伟峰、徐义库、赵秦阳、陈宏、郝建民、孙志平
3	专利	一种导视装置表面二次微弧氧化处理方法（已转化）	中国	ZL202011029741.4	2023年12月19日	6567712	长安大学	陈宏、丁健

四、代表性论文专著目录

序号	论文专著名称	刊名	发表时间	年卷页码 (xx年xx卷xx页)	作者	通讯作者 (含共同作者)	第一作者 (含共同作者)	国内作者 (中文名)	他引总次数	检索数据库	参与人(成果完成人)	知识产权是否归国内所有
1	Hierarchically structured ceramic coatings Based on zirconia and magnesium oxide with high Toughness	Advanced Functional Materials	2024.11.09	2024年 35卷 2418312页	Weifeng Qian, Bingkun Ning, Shuang Wang, Tianxiang Xie, Yongnan Chen, Qinyang Zhao, Nan Wang, Shaopeng Wang, and Haifei Zhan	Yongnan Chen, Nan Wang	Weifeng Qian	钱伟峰, 宁炳坤, 王爽, 谢天祥, 陈永楠, 赵秦阳, 王楠, 王少鹏, 占海飞	5	Web of Science	陈永楠, 赵秦阳, 王楠, 占海飞	是
2	Enhancing the toughness of nano-composite coating for light alloys by the plastic phase transformation of zirconia	International Journal of Plasticity	2023.02.10	2023年 163卷 103555页	Weifeng Qian, Zhen Zhang, Shuang Wang, Ziwei Guo, Yongnan Chen, Md Ariful Islam, Qinyang Zhao, Hongzhan Li, Yang Liu, Haifei Zhan	Yongnan Chen, Qinyang Zhao, Haifei Zhan	Weifeng Qian	钱伟峰, 张震, 王爽, 郭紫薇, 陈永楠, 赵秦阳, 李宏战, 刘洋, 占海飞	34	Web of Science	陈永楠, 赵秦阳, 占海飞	是
3	Nanostructured amorphous Al ₂ O ₃ -ZrO ₂ (La ₂ O ₃) ceramics with plastic deformation via interface inducing hierarchical shear bands	International Journal of Plasticity	2024.08.21	2024年 181卷 104103页	Jianglin Wang, Shuhuai Wang, Yongkang Yang, Shuai Wang, Jie Li, Ziqi Jia, Binghui Ge, Xinghua Su, Anran Guo, Jiachen Liu, Shuxin Niu, Xiqing Xu	Xiqing Xu	Jianglin Wang	王江林, 王竖淮, 杨永康, 王帅, 李杰, 贾子祺, 葛炳辉, 苏兴华, 郭安然, 刘家臣, 牛书鑫, 许西庆	9	Web of Science	许西庆	是
4	Enhancing corrosion resistance of AZ91D alloy through yttria-stabilized	Corrosion Science	2023.11.03	2023年 225卷 111634页	Shuang Wang, Zhen Zhang, Weifeng Qian, Yichen Yu, Yongnan Chen, Qinyang Zhao,	Yongnan Chen, Qinyang Zhao,	Shuang Wang	王爽, 张震, 钱伟峰, 于艺晨, 陈永楠, 赵秦阳, 张	11	Web of Science	陈永楠, 赵秦阳, 张勇	是

	tetragonal zirconia (YSTZ)/MgO repaired ceramic coating with improved embrittlement cracking				Yong Zhang, Hongzhan Li, Yongqing Zhao	Yongqing Zhao		勇, 李宏战, 赵永庆				
5	Achieving enhanced toughness of a nanocomposite coating by lattice distortion at the variable metallic oxide interface	Materials & Design	2022.10.27	2022 年 224 卷 111316 页	Zhen Zhang, Zehui Yang, Weifeng Qian, Yongnan Chen, Yiku Xu, Xiqing Xu, Qinyang Zhao, Hongzhan Li, Yongqing Zhao, Haifei Zhan	Yongnan Chen, Qinyang Zhao, Haifei Zhan	Zhen Zhang	张震, 杨泽慧, 钱伟峰, 陈永楠, 徐义库, 许西庆, 赵秦阳, 李宏战, 赵永庆, 占海飞	23	Web of Science	陈永楠, 徐义库, 许西庆, 赵秦阳, 占海飞	是
6	The phase stability of t-ZrO ₂ realized by grain size at cryogenic temperature in ZrO ₂ /TiO ₂ composite	Materials & Design	2024.02.12	2024 年 239 卷 112741 页	Huan Li, Weifeng Qian, Zhen Zhang, Shuang Wang, Yongnan Chen, Fengying Zhang, Zhimin Hou, Guangrui Gao, Qinyang Zhao, Haifei Zhan	Yongnan Chen, Qinyang Zhao, Haifei Zhan	Huan Li	李欢, 钱伟峰, 王爽, 陈永楠, 张凤英, 侯志敏, 高广睿, 赵秦阳, 占海飞	10	Web of Science	陈永楠, 张凤英, 赵秦阳, 占海飞	是
7	Improved corrosion resistance of ZrO ₂ /MgO coating for magnesium alloys by manipulating the pore structure	Journal of Materials Research and Technology	2023.03.24	2023 年 24 卷 2403 页	Jing Li, Zhen Zhang, Ziwei Guo, Zehui Yang, Weifeng Qian, Yongnan Chen, Hongzhan Li, Qinyang Zhao, Yazhe Xing, Yongqing Zhao	Yongnan Chen, Qinyang Zhao, Yongqing Zhao	Jing Li	李景, 张震, 郭紫薇, 杨泽慧, 钱伟峰, 陈永楠, 李宏战, 赵秦阳, 邢亚哲, 赵永庆	22	Web of Science	陈永楠, 赵秦阳	是

五、完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作关系人及排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	共同知识产权	陈永楠/1、王楠/3、姜超平/10、赵秦阳/2	2014.01.01-2024.11.09	发明专利：《一种用于评价裸露动结构件表面膜层的抗落石击打设备及方法：ZL202111322843.X》	附件 1
2	共同知识产权	陈永楠/1、徐义库/8、赵秦阳/2、陈宏/5	2014.01.01-2024.11.09	发明专利：《一种镁合金上的ZrO ₂ /MgO 耐磨膜层及其制备方法：ZL202110336594.3》	附件 2
3	论文合著	陈永楠/1、王楠/3、赵秦阳/2、占海飞/4	2016.01.01-2024.11.09	论文：《Hierarchically structured ceramic coatings based on zirconia and magnesium oxide with High Toughness》	附件 4
4	论文合著	陈永楠/1、赵秦阳/2、占海飞/4	2016.01.01-2024.11.09	论文：《Enhancing the toughness of nano-composite coating for light alloys by the plastic phase》	附件 5
5	论文合著	陈永楠/1、赵秦阳/2、张勇/7	2018.01.01-2024.11.09	论文：《Enhancing corrosion resistance of AZ91D alloy through yttria-stabilized tetragonal zirconia (YSTZ)/MgO repaired ceramic coating with improved embrittlement cracking》	附件 7
6	论文合著	陈永楠/1、徐义库/8、许西庆/6、赵秦阳/2、占海飞/4	2018.01.01-2024.11.09	论文：《Achieving enhanced toughness of a nanocomposite coating by lattice distortion at the variable metallic oxide interface》	附件 8
7	论文合著	陈永楠/1、张凤英/9、赵秦阳/2、占海飞/4	2016.01.01-2024.11.09	论文：《The phase stability of t-ZrO ₂ realized by grain size at cryogenic temperature in ZrO ₂ /TiO ₂ composite》	附件 9
8	论文合著	陈永楠/1、赵秦阳/2	2020.01.01-2024.11.09	论文：《Improved corrosion resistance of ZrO ₂ /MgO coating for magnesium alloys by manipulating the pore structure》	附件 10