

陕西省自然科学奖公示

一、项目名称：

多元合金微弧氧化层形成理论及其防护机理

二、提名者及提名意见：

中共陕西省委军民融合发展委员会办公室：

该项目针对微弧氧化层形成机制尚不明晰和镁表面微弧氧化层防腐局限性，围绕微弧氧化过程中溶质离子作用机理、高熵合金的多主元竞争氧化机制及微弧氧化+静电喷粉复合涂层抗腐蚀机理展开系统深入研究，取得一系列具有重要科学意义和国际影响的原创性成果，为丰富和完善微弧氧化层形成理论、进一步提高镁合金的抗腐蚀性能提供了契机。以形成氧化物的标准生成焓绝对值大小作为多主元元素在微弧氧化过程中的竞争氧化优先判据，揭示了该氧化层的形成机制，并利用预制氧化物层实现了难熔高熵合金的高温抗氧化性能显著提升；阐明了镁、钛合金表面自封孔微弧氧化层的形成机理，实现了微弧氧化层耐蚀性的改善；开发了微弧氧化+静电喷粉复合处理新工艺，彻底解决了镁合金的防腐问题，揭示了所制备复合涂层的抗划伤腐蚀机理。5篇代表性论文发表在材料科学领域权威期刊上，他引369次，单篇最高他引136次。本项目实现了从基础理论突破、应用技术创新到产业化推广应用的全链条覆盖，有重要的学术引领作用和工程应用价值，对提升我国本领域的国际学术地位具有显著促进作用。同时，在交通、军工、航空航天、海洋装备等领域也具有广阔的应用前景和推广价值。

成果材料属实、齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件。提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。

三、项目简介

本项目属电化学与材料科学基础交叉研究领域。

镁合金、钛合金、高熵合金及其表面防护是材料科学与工程领域的重要课题，也是推动轻量化装备制造和国防装备发展的关键技术支撑。传统镁合金、钛合金微弧氧化过程中由于放电击穿形成的微孔特征，使得所制备涂层在应对严苛服役环境时已难以满足综合防护需求。有别于传统镁合金、钛合金，多主元、结构简单高熵合金是近年来出现的一种新型金属材料，其多主元特点导致微弧氧化层形成机制更加复杂，国际上尚未看到在该领域的相关研究报道。因此，深入研究高熵合金微弧氧化层形成新机制、传统镁、钛合金微弧氧化自封孔机理以及微弧氧化+静电喷粉复合涂层抗划伤腐蚀机理，开发出高性能防护涂层，在交通、军工、航空航天及海洋装备等领域的极端服役条件下也具有广阔的应用前景。在国家自然科学基金面上项目等支持下，本项目经过10余年的积累，发现了高熵合金多

主元在微弧氧化过程中优先氧化判据，揭示了该氧化层的形成机制，并利用预制氧化物层实现了难熔高熵合金的高温抗氧化性能显著提升；发现了溶质离子参与微弧放电的规律，阐明了镁、钛合金表面自封孔微弧氧化层的形成机理；开发出微弧氧化+静电喷粉复合处理新工艺，揭示了所制备复合涂层的抗划伤腐蚀机理。同时，本项目实现了从基础理论突破、应用技术创新到产业化推广应用的全链条覆盖，研发出的微弧氧化层和微弧氧化+静电喷粉复合涂层等已在交通、军工、航空航天、海洋装备等领域得到应用与推广。项目主要科学发现如下：

（1）**高熵合金多主元竞争氧化机制**。国际上率先开展了高熵合金多主元竞争氧化机制研究，发现高熵合金多主元元素形成氧化物的标准生成焓绝对值大小是制约优先氧化的关键因素，氧化物的标准生成焓绝对值越大，微弧放电越优先氧化，实现了难熔高熵合金表面预制氧化物层的可控制备，可有效抑制 V、Mo 等难熔元素形成易挥发氧化物，解决了难熔高熵合金高温抗氧化性能差的国际难题，微弧氧化处理 $\text{AlTiNbMo}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{Zr}$ 高熵合金的氧化增重减小为 8.6 mg/cm^2 ，较未经微弧氧化处理高熵合金减少 32.8%。

以多主元合金元素竞争氧化机制为指导，实现了高熵合金预制氧化物层高温抗氧化性能的大幅提升，填补了该领域研究空白。国内最早开展微弧氧化研究的北京师范大学薛文斌教授，微弧氧化领域的引领者之一哈尔滨工业大学王亚明教授，国际先进材料协会会士、香港城市大学杨勇教授团队，伊斯坦布尔理工大学 Cimenoglu 教授团队，巴西国家科学技术发展委员会一级研究学者、国际生物材料科学与工程学会联合会会士、圣保罗州立大学 C.R. Grandini 教授，中南大学粉末冶金研究院副院长、高温结构材料研究所所长刘彬教授团队等百余位著名学者正面评价了高熵合金多主元竞争氧化机制及其对高温抗氧化性能提升作用，大篇幅引用了申请人关于“难熔高熵合金元素的竞争氧化机制”、“难熔高熵合金表面制备微弧氧化层在 800°C 下抗氧化性增强是由于抑制了钼的挥发”等研究观点。

（2）**镁、钛合金微弧氧化自封孔机理**。发现电解液中添加 K_2TiF_6 或 K_2ZrF_6 可实现对微弧放电击穿形成的氧化层表面微孔封闭，阐明了此溶质离子在自封孔微弧氧化层形成过程中的作用机理；同时创新提出了溶质离子参与成膜并以其单质金属存在于氧化层中，利用光散射原理实现氧化层着色的新方法。所制备自封孔微弧氧化层耐蚀性和抗磨损性能得以显著提升，突破了镁合金、钛合金等轻金属工程应用防护性能的局限性。

本工作深入分析了溶质离子对镁合金、钛合金表面自封孔微弧氧化层形成的作用机理，实现了自封孔氧化层防护性能和着色功能的兼顾，具有重要的工程应用价值。中国工程院院士、重庆大学潘复生教授和德国亥姆霍兹赫伦中心表面科学研究所所长 Mikhail Zheludkevich 教授，上海有色金属学会副理事长、上海理工大学刘平教授等国际权威学者对该发现点进行了大篇幅报道并正面评价，认为“硅酸盐基电解液中 AZ80 合金上 MAO 涂层的颜色随着 K_2TiF_6 浓度的增加而从白色变为灰色”，并且“加快涂层生长速率”，有助于实现涂层性能改善。基于高性能自封孔微弧氧化层的高质量制备，成功应用于大尺寸轻合金部件表面强化与高

质量防护。

(3) **微弧氧化+静电喷粉复合涂层抗划伤腐蚀机理**。开展了微弧氧化+静电喷粉复合涂层抗划伤腐蚀机理研究,通过对腐蚀微区分析并结合结合力评价结果,并以耐酸腐蚀试验评价复合涂层的抗划伤性能,阐明了复合涂层抗划伤腐蚀机理,彻底解决了镁合金耐蚀性差制约其工程应用的国际难题。

本工作提出的微弧氧化+静电喷粉复合处理工艺彻底解决了镁合金易腐蚀的国际难题,开辟了镁合金防腐技术的新方向。教育部新世纪优秀人才卫英慧教授、国际先进材料协会会士曾荣昌教授、常州大学材料科学与工程学院腐蚀与防护研究所所长宋仁国教授等对本研究成果进行了高度评价,认为“采用微弧氧化法结合静电粉末喷涂技术在 AZ31 表面制备了复合涂层,显著提高了涂层的耐腐蚀性和结合强度”。以本工作为支撑,获陕西省自然科学优秀学术论文奖。

本项目得到了国家自然科学基金面上项目、陕西省重点研发计划等项目支持,5 篇代表性论文合计他引 369 次,单篇最高引用 136 次。研究成果得到来自美国、德国、巴西等 23 个国家和地区,包括中国材料研究学会副理事长、中国工程院院士潘复生教授团队,巴西国家科学技术发展委员会一级研究学者、国际生物材料科学与工程学会联合会会士 C.R. Grandini 教授,国际先进材料协会会士、国务院政府特殊津贴专家、山东科技大学曾荣昌教授,国内微弧氧化技术研究领域的先驱之一、北京师范大学薛文斌教授,国际先进材料协会会士、香港城市大学杨勇教授,教育部新世纪优秀人才、北京市科技新星、北京工业大学季凌飞教授等百余位著名学者的广泛引用和正面评价。授权发明专利 5 项,研究成果在日照微弧技术有限公司、西安优立金属表面处理技术有限公司、西安华科沅京表面处理有限公司等企业获得应用,新增产值超 6300 万元;通过本项目的研究培养了陕西省中青年科技创新领军人才和陕西省高校科协青年托举人才等高水平青年人才。

四、客观评价:

本项目的 5 篇代表性论文发表在材料科学领域权威期刊上,合计他引 369 次,单篇他引最高 136 次,5 篇代表性论文得到 23 个国家和地区,百余位国内外院士、教授等著名学者的广泛引用和积极评价。

1、教育部新世纪优秀人才、山西省高等学校青年学术带头人、全国热处理学会青年工作委员会副主任、山西省腐蚀与防护学会副理事长、山西省机械工程学会常务理事太原理工大学卫英慧教授在代表性引文 1(*Journal of Power Sources*, 2022, 542: 231755)中对本研究成果(代表作 1)进行了高度评价,“陈组还采用微弧氧化法结合静电粉末喷涂技术在 AZ31 表面制备了复合涂层,显著提高了涂层的耐腐蚀性和结合强度 (Chen Group also used a micro-arc oxidation method coupled with electrostatic powder coating technology to prepare a double-layer composite coating on the AZ31 surface, which significantly improved the corrosion resistance and bonding strength of the coating.)”。

2、国际先进材料协会会士、国务院政府特殊津贴专家、中国腐蚀与防护学

会医用金属材料腐蚀控制专业委员会首届主任委员、常务理事、兼任山东省腐蚀与防护学会副理事长、山东科技大学曾荣昌教授在代表性引文 2 (Bioactive Materials, 2020, 5: 153-163) 中本研究成果 (代表作 1) 进行了大篇幅报道和评价, “杨等人表明 **AZ31** 基材上微弧氧化陶瓷涂层的临界载荷约为 **13N**, 高于获得的 **II 涂层** (Yang et al. showed that the critical load of micro arc oxidation ceramic coating on AZ31 substrates was about 13 N, which is higher than the obtained **II coating**.) ”。

3、德国洪堡基金研究奖学金、日本科技厅研究奖学金获得者、常州大学材料科学与工程学院腐蚀与防护研究所所长宋仁国教授在代表性引文 3 (Applied Surface Science, 2019, 497: 143703) 中对本研究成果 (代表作 1) 大篇幅报道并正面评价 “杨等人采用 **MAO 加静电粉末喷涂 (EPS)** 技术在 **AZ31** 镁合金表面成功制备了双层复合涂层体系。结果表明, 具有优异结合力的 **MAO+EPS 复合涂层**显著提高了 **AZ31** 镁合金的耐腐蚀性 (Yang et al. successfully prepared a double layer composite coating system on the surface of AZ31 magnesium alloy by MAO plus electrostatic powder spraying (EPS) technique. The results indicated that the corrosion resistance of AZ31 Mg alloy was significantly improved by MAO+EPS composite coating with the excellent binding force) ”。

4、中国工程院院士、重庆大学潘复生教授和德国亥姆霍兹赫伦中心表面科学研究所所长 Mikhail Zheludkevich 教授在代表性引文 4 (Journal of Materials Science & Technology, 2022, 118: 158-180) 中对本研究成果 (代表作 2) 大篇幅报道并正面评价本项目发现的微弧氧化着色新机理 “**硅酸盐基电解液中 AZ80 合金上 MAO 涂层的颜色随着 K_2TiF_6 浓度的增加而从白色变为灰色** (The color of MAO coatings changes from white to grey with increasing K_2TiF_6 concentration on AZ80 alloys in silicate-based electrolyte) ”。

5、国务院政府津贴获得者、中国热处理学会副理事长、中国仪表功能材料学会常务理事、中国热处理学会有色金属热处理技术委员会主任、上海机械工程学会副理事长、上海有色金属学会副理事长、上海理工大学刘平教授在代表性引文 5 (Journal of Alloys and Compounds, 2023, 948: 169773) 中认为本项目 (代表作 3) 提出的“**硅酸盐电解液中添加 K_2TiF_6 可以加快涂层生长速率** (Increased coating growth rate) ”。

6、国内微弧氧化技术研究领域的先驱之一、全国热处理学会常务理事、北京师范大学核科学与技术学院学术委员会主任薛文斌教授在代表性引文 6 (Ceramics International, 2025, 51: 62648-62657) 中高度评价本项目 (代表作 4) 发现的“**程等在 $AlTiNbMo_{0.5}Ta_{0.5}Zr$ 难熔高熵合金表面制备了有封闭孔的等离子体氧化层, 发现其在 $800^{\circ}C$ 下抗氧化性能增强是由于抑制了钼的挥发** (Cheng et al. developed a PEO coating with enclosed holes on $AlTiNbMo_{0.5}Ta_{0.5}Zr$ RHEA, finding enhanced oxidation resistance at $800^{\circ}C$ due to the suppression of Mo volatilization.) ”。

7、中南大学粉末冶金研究院副院长、高温结构材料研究所所长、中国金属学会增材制造分会委员、粉末冶金分会委员、中国核学会核材料分会理事刘彬教授在代表性引文 7（Ceramics International, 2023, 49: 18114-18124）中对本研究成果（代表作 4）高度评价，认为“程等人发现对 $\text{AlTiNbMo}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{Zr}$ 高熵合金进行微弧氧化处理可以形成主要由 SiO_2 、 Ta_2O_5 和 TaO_x 组成的氧化物层，并提升高温抗氧化性能（Cheng et al. found that the MAO treatment of $\text{AlTiNbMo}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{Zr}$ HEA could lead to the formation of an oxide layer mainly composed of SiO_2 , Ta_2O_5 and TaO_x as well as improved high temperature oxidation resistance）”。

8、国际先进材料协会会士、香港工程科学院创院青年院士、香港城市大学机械工程系主任、讲席教授杨勇教授在代表性引文 8（Current Opinion in Solid State & Materials Science, 2026, 41: 101255）中引用了本研究成果（代表作 5）“石等通过微弧氧化（MAO）工艺在 AlTiCrVZr RCCA 表面制备了主要由 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 和 SiO_2 组成的保护性氧化物涂层，进一步提高了 800°C 下的抗氧化性（Shi et al. fabricated a protective oxide coating mainly composed of Al_2O_3 , Cr_2O_3 , and SiO_2 on the surface of AlTiCrVZr RCCA via the micro- arc oxidation (MAO) process, which further improved the oxidation resistance at 800°C 。）”。

五、代表性论文专著目录：

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷 页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表 时间 (年 月 日)	通讯 作者 (含 共 同)	第一 作者 (含 共 同)	国内 作者	他 引 总 次 数	知识 产权 是否 归国 内所 有
1	Microstructure and corrosion resistance of micro arc oxidation plus electrostatic powder spraying composite coating on magnesium alloy	Corrosion Science	Yang Wei, Xu Daping, Wang Jianli, Yao Xiaofei, Chen Jian	2018 年 136 卷 174-179	2018 年 5 月 15 日	Chen Jian	Yang Wei	杨巍, 徐 大 鹏, 王 建 利, 姚 小 飞, 陈 建	136	是

2	Characterization and formation mechanism of grey micro-arc oxidation coatings on magnesium alloy	Surface & Coatings Technology	Yang Wei, Wang Jianli, Xu Daping, Li Jinhua, Chen Tao	2015 年 283 卷 281-285	2015 年 12 月 15 号	Yang Wei, Chen Tao	Yang Wei	杨巍, 王建利, 徐大鹏, 李金华, 陈涛	58	是
3	Influence of electrolyte composition on microstructure and properties of coatings formed on pure Ti substrate by micro arc oxidation	Surface & Coatings Technology	Yang Wei, Xu Daping, Guo Qiaolin, Chen Tao, Chen Jian	2018 年 349 卷 522-528	2018 年 9 月 15 号	Chen Tao, Chen Jian	Yang Wei	杨巍, 徐大鹏, 郭巧琴, 陈涛, 陈建	72	是
4	Improvement of high temperature oxidation resistance of micro arc oxidation coated AlTiNbMo0.5Ta0.5Zr high entropy alloy	Materials Letters	Chen g Zhao hui, Yang Wei, Xu Daping, Wu Shan gkun, Yao Xiaofei, Lv Yukun, Chen Jian	2020 年 262 卷 127192	2020 年 3 月 1 日	Yang Wei, Chen Jian	Chen g Zhao hui	程赵辉, 杨巍, 徐大鹏, 武上焜, 姚小飞, 吕煜坤, 陈建	46	是

5	Influence of micro arc oxidation on high temperature oxidation resistance of AlTiCrVZr refractory high entropy alloy	International Journal of Refractory Metals and Hard Materials	Shi Xiaoqian, Yang Wei, Cheng Zhao hui, Shao Wenti ng, Xu Dape ng, Zhan g Yong, Chen Jian	2021 年 98 卷 10556 2	2021 年 8 月 1 日	Yang Wei, Chen Jian	Shi Xiaoqian	石小倩,杨巍,程赵辉,邵文婷,徐大鹏,张勇,陈建	57	是
合计									369	/

六、主要完成人情况:

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目主要学术贡献
杨巍	1	副院长	教授	西安工业大学	西安工业大学	本项目的负责人,提出本项目的学术思想,制定整体研究方案,负责完成本项目研究工作的学术指导以及研究论文的撰写和修改,代表作 1, 2, 3 的第一作者, 4, 5 第一通讯作者。1、揭示了高熵合金多主元竞争氧化机制(发现点 1、代表作[4]、[5]); 2、提出了镁合金、钛合金表面微弧氧化原位自封孔新方法(发现点 2、代表作[2]、[3])。3、阐明了微弧氧化+静电喷粉复合涂层抗划伤腐蚀机理(发现点 3、代表作[1])。
徐大	2	无	副教	西安工	西安工	1、共同发现了高熵合金表

鹏			授	业大学	业大学	面通过微弧放电实现预制氧化物层的制备的新方法（发现点 1、代表作[4]、[5]）；2、表征了自封孔微弧氧化层的微观结构，发现了利用光散射原理实现氧化层着色的新方法（发现点 2、代表作[2]、[3]）。3、开发了微弧氧化+静电喷粉复合处理新工艺，并在镁合金表面成功制备（发现点 3、代表作[1]）。
程赵辉	3	无	无	西安工业大学	西安工业大学	开展了高熵合金表面微弧氧化层的制备与性能表征，构建了高熵合金多主元竞争氧化的成膜机理模型（发现点 1、代表作[4]、[5]，其他附件）。
姚小飞	4	无	副教授	西安工业大学	西安工业大学	1、协助开展了高熵合金表面微弧放电的机理研究（发现点 1、代表作[4]）；2、阐明了微弧氧化+静电喷粉复合涂层的界面结合机理，并构建了复合涂层的酸腐蚀失效模型（发现点 3、代表作[1]）。
吕煜坤	5	无	副教授	西安工业大学	西安工业大学	采用微弧氧化方法在 $\text{AlTiNbMo}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{Zr}$ 高熵合金表面预制了氧化物层，发现其氧化增重减小为 8.6 mg/cm^2 ，较未处理高熵合金减少 32.8%，解决了难熔高熵合金高温抗氧化性能差的难题（发现点 1，代表作[4]）。

七、主要完成单位情况：

西安工业大学作为本项目的完成单位，为项目的顺利完成做出了重要贡献，是代表作 1-5 学术思想的提出单位和完成单位，主要学术贡献包括：构建了难熔高熵合金微弧氧化层的形成机理模型，开拓性提出了多主元竞争氧化机制，发现了高熵合金表面制备致密氧化层，可有效抑制 Mo 挥发，隔绝氧扩散，并进一步阐明了难熔高熵合金高温防护机理；阐明了镁表面微弧氧化层自封孔机理及利用溶质离子形成的单质金属光散射原理实现微弧氧化层着色的新机制，揭示了微弧氧化层自封孔效应对放电通道填充致密化程度的依赖机制，以及高温高压微区诱

导硬质相原位生成增强摩擦学性能的机理；基于微弧氧化+静电喷粉复合涂层的增韧机制和机械互锁效应，阐明了复合涂层的强界面结合内在机理，建立了“聚合物致密层物理隔离+氧化层多孔机械锚固+氧化层致密内层二次屏障”协同防腐的控制策略。

作为本项目完成单位，在本项目中承担了国家自然科学基金面上项目、陕西省重点研发计划等项目。本项目取得的所有成果均在西安工业大学完成，所有权归属西安工业大学。

八、完成人合作情况说明：

- 1、杨巍、徐大鹏为代表作 1-5 的署名作者；
- 2、杨巍、程赵辉为代表作 4、5 的署名作者；
- 3、杨巍、姚小飞为代表作 1、4 的署名作者；
- 4、杨巍、吕煜坤为代表作 4 的署名作者。

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	证明材料
1	论文合著	杨巍、徐大鹏 /1、2	2015 年至今	Microstructure and corrosion resistance of micro arc oxidation plus electrostatic powder spraying composite coating on magnesium alloy / Characterization and formation mechanism of grey micro-arc oxidation coatings on magnesium alloy / Influence of electrolyte composition on microstructure and properties of coatings formed on pure Ti substrate by	代表性论文 1-5

				micro arc oxidation / Improvement of high temperature oxidation resistance of micro arc oxidation coated AlTiNbMo_{0.5}Ta_{0.5} Zr high entropy alloy / Influence of micro arc oxidation on high temperature oxidation resistance of AlTiCrVZr refractory high entropy alloy	
2	论文合著	杨巍、程赵辉 /1、3	2018 年至今	Improvement of high temperature oxidation resistance of micro arc oxidation coated AlTiNbMo_{0.5}Ta_{0.5} Zr high entropy alloy / Influence of micro arc oxidation on high temperature oxidation resistance of AlTiCrVZr refractory high entropy alloy	代表性论文 4、5
3	论文合著	杨巍、姚小飞 /1、4	2015 年至今	Microstructure and corrosion resistance of micro arc oxidation plus electrostatic	代表性论文 1、4

				powder spraying composite coating on magnesium alloy / Improvement of high temperature oxidation resistance of micro arc oxidation coated AlTiNbMo _{0.5} Ta _{0.5} Zr high entropy alloy	
4	论文合著	杨巍、吕煜坤 /1、5	2015 年至今	Improvement of high temperature oxidation resistance of micro arc oxidation coated AlTiNbMo _{0.5} Ta _{0.5} Zr high entropy alloy	代表性论文 4