

2024 年度拟提名山西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

面向复杂工况的轻合金强韧化机制及腐蚀机理研究

二、提名者及提名意见

提名者：晋中学院

提名意见：

我国在航空航天、海洋开发、核能、高端制造等重点科技领域加速发展，对高可靠性和高安全性的轻合金及其改性技术的需求极为迫切。

该项目在 1 个山西省应用基础研究项目、1 个中国博士后科学基金项目及四川轻化工大学开放课题的资助下，采用多途径改性、强化面向复杂工况的轻合金。采用添加造孔剂的粉末冶金法制备了生物医用多孔 Ti-Nb-Ta-Zr (TNTZ)合金，解决了粉末冶金多孔钛合金中孔隙分布不均匀性问题，有效缓解了生物医用钛合金应力屏蔽效应。揭示了多孔 Ti-Nb-Ta-Zr 钛合金的失效破坏机理，实现了 Ti-Ta-Nb-Zr 钛合金模量和伪弹性的综合控制，优化了多孔 β 钛合金的生物力学性能。采用超声波辅助微弧氧化表面改性技术，揭示了超声波对于 TC4 耐腐蚀性和磨损性能的影响规律，解决了耐磨损性能提升及耐蚀性评价的技术难题，确保 TC4 合金的工作表面具有增强的表面性能，适用于石油和天然气开采应用；发明了“表面结构+表面涂层技术”复合处理新工艺，构建了 Ti6Al4V 合金表面强化复合体系，实现了 Ti6Al4V 合金结构件的“成分-组织结构-加工制备-服役性能”的综合调控。采用球化处理+热挤压相结合的方法制备出 14H LPSO 增强的 Mg₉₄Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn₁ 合金，构建了 Mg₉₄Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn₁ 合金的协同强化机制，实现了 Mg₉₄Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn₁ 合金强度和塑性的有效调控；采用热挤压制备了低稀土高强耐热 Mg-4Er-2Nd-0.6Zn-0.2Zr 合金，揭示了低稀土低成本合金挤压形成的具有优异的高温性能、强度-塑性协同作用的强化机制。为解决医用、油田环境及航空航天等复杂工况下轻合金的强化改性提出了新见解和新思路。

该项目 5 篇代表性论文被国内外 SCI 收录期刊他引 187 次。在本学科领域重要国内国际会议上进行学术交流 10 次，其中会议报告 8 次。项目面向国家重大需求和行业发展技术痛点，研究成果得到了学术界的广泛认可和引用，产生了重要影响，推动了我国金属材料服役行为与表面工程领域的发展，促进了生物医学工程、材料加工与制备、金属材料表面改性等方向的交叉融合。该项目部分成果在生物医学工程、石油管材、武器装备、航空航天等领域的关键重要部件得到应用。该项目成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合山西省自然科学奖提名条件。

三、项目简介

我国在航空航天、海洋开发、核能、高端制造等重点科技领域加速发展，对高可靠性和高安全性的轻合金及其改性技术的需求极为迫切。开展复杂工况下服役轻合金强韧化机制及腐蚀机理研究，对于促进我国复杂环境服役材料的制备、加工、应用等方面的研究和创新，打破国外在关键高端材料及核心制备加工技术的封锁，提升重大工程装备和关键零部件的自主保障能力具有重大意义。工程领域中普遍存在复杂极端工况环境下因强韧性差、腐蚀或磨损导致的材料损伤，如当钛合金和镁合金等材料在人体环境、石油开采环境、航空航天领域等环境中均表现出性能不足的问题。为了进一步提高两种代表性轻合金的性能，并拓展其应

用,本项目通过合理强韧设计以及粉末冶金法、表面织构、表面涂层技术和热挤压方法等多途径优化轻合金性能。主要发现点如下:

(1)提出添加球形 PMMA 造孔剂的粉末冶金法,制备了生物医用多孔 TNTZ 合金,研究了多孔钛合金的结构均匀性、压缩性能、弹性模量、伪弹性和模拟体液中的耐蚀性等特性,解决了粉末冶金多孔钛合金中孔隙分布不均匀性问题,有效缓解了生物医用钛合金应力屏蔽效应。揭示了多孔 TNTZ 钛合金的失效破坏机理,实现了 TNTZ 钛合金模量和伪弹性的综合控制,优化了多孔 β 钛合金的生物力学性能。(代表作[1])

(2)提出超声波辅助微弧氧化表面改性技术,揭示了超声波对于 Ti6Al4V (TC4)耐腐蚀性和磨损性能的影响规律,解决了耐磨损性能提升及耐蚀性评价的技术难题,确保 Ti6Al4V 合金的工作表面具有增强的表面性能,适用于石油和天然气开采应用。发明了“表面织构+表面涂层技术”复合处理新工艺,构建了 Ti6Al4V 合金表面强化复合体系,实现了 Ti6Al4V 合金结构件的“成分-组织结构-加工制备-服役性能”的综合调控。(代表作[2]、[3])

(3)提出球化处理+热挤压相结合的方法,制备出 14H LPSO 增强的 $Mg_{94}Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn_1$ 合金,揭示出 14H LPSO 对 $Mg_{94}Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn_1$ 合金微观组织和力学性能的影响,构建了 $Mg_{94}Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn_1$ 合金的协同强化机制,实现了 $Mg_{94}Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn_1$ 合金强度和塑性的有效调控;采用半连续铸造方法制备低稀土高强耐热 Mg-4Er-2Nd-0.6Zn-0.2Zr 合金,研究该合金的高温性能形成机制,揭示低稀土低成本合金挤压形成的具有优异的高温性能、强度-塑性协同作用的强化机制。(代表作[4]、[5])

四、客观评价

该项目在轻合金强韧化机制及腐蚀机理研究方面取得突破性进展,部分成果引领了国际前沿。5 篇代表作被国内外 SCI 收录期刊他引 187 次,获得高度评价。

1.对发现点 1 的客观评价

北京航空航天大学李岩教授团队充分肯定了通过将 Ti-Zr-Nb-Ta 合金加工成多孔材料的方法使其模量降低至 0.8 GPa,接近自然骨(小梁骨 0.01-3 GPa),有利于消除应力屏蔽效应。在此发现点的基础上,采用微弧氧化(MAO)在 Ti-20Zr-10Nb-4Ta 合金表面制备了一种新型的层状多孔涂层。该涂层具有较好的细胞粘附和扩散能力,为 β 钛合金在牙科和骨科领域的应用提供新的思路。波兰华沙理工大学 D. Kuczyńska-Zemła 研究团队充分认可并引用了申请者发现的新型 β 钛合金具有优异的生物相容性、较高的耐腐蚀性和较低的弹性模量。采用 10 ns 脉冲宽度的 Nd: YAG (1064 nm)通过直接激光干涉图形(DLIP)修饰 Ti-29Nb-13Ta-4.6 Zr (TNTZ)合金,拓展了 TNTZ 合金的功能性和应用领域。土耳其卡拉姆鲁大学 B. Tuncay 研究团队采用机械合金化法制备 Ti-Zr-Mo (TZM)合金,引用申请者揭示的腐蚀机理解释低 Ti 含量的 TZM 合金耐腐蚀性较低的原因,再一次证明在晶界处和穿过晶界处形成的孔隙降低了合金的耐蚀性。

2.对发现点 2 的客观评价

国家基础研究重大项目首席科学家,中南大学张福勤教授研究团队在此理论上应用微弧氧化技术在选择性激光熔化形成的 Ti6Al4V 合金表面创建具有生物活性亚微米孔的涂层。在四硼酸盐 ($Na_2B_4O_7$) /硅酸盐 (Na_2SiO_3) 电解质中获得的涂层对细胞增殖的促进作用最强。知名金属材料专家,澳大利亚埃迪斯科文大学终身教授、先进材料与制备中心主任、机械工程学科负责人、德国“洪

堡”学者、全球高被引科学家、先进材料“桂冠奖”获得者张来昌等进行了超声辅助微弧氧化和水热联合修饰 Ti-6Al-4V 表面的生物活性研究。采用超声辅助微弧氧化(MAO)和水热处理(HT)相结合的方法,在微弧氧化膜上制备了致密、均匀的羟基磷灰石(HA)晶体。Ti-6Al-4V 表面呈现更高的 MG63 细胞数量和碱性磷酸酶活性。申请人获得的控制理论与方法为医用环境下钛合金性能的改善也提供了新的理论基础。华中科技大学翟文正教授充分肯定了表面涂层作为一种效率高、易操作的改性方法,在改善材料表面性能方面有重大潜力。同时,表明表面织构化在改善接触表面的接触,降低粘附磨损程度的作用机理。并指出织构化可以提高材料的硬度,高度肯定了该方法在摩擦学领域的积极作用。申请人所提出的织构化钛合金表面梯度涂层体系的控制理论与方法为苛刻服役环境下钛合金摩擦运动部件的长寿命安全使用和高可靠稳定运转提供了的重要保障。

3. 对发现点 3 的客观评价

中南大学轻合金研究院黄元春教授团队在此理论上研究了挤压前热处理对 Mg-Zn-Y-Zn-Zr 合金动态再结晶行为、织构和力学性能的影响,表明晶粒内层片状 LPSO 相可以有效抑制再结晶过程,增强织构和提高合金的力学性能。高度肯定了层片状 LPSO 相对镁合金微观组织和力学性能的影响,从而为高强镁合金的设计和制备奠定了基础。重庆大学国家杰出青年陈先华教授团队在 SCI 一区 Top 刊 Journal of Materials Science & Technology 上的“Annealing hardening effect aroused by solute segregation in gradient ultrafine-grained Mg-Gd-Zr alloy”文章,通过滑动摩擦处理(SFT)制备的梯度超细晶粒(UFG) Mg-0.32Gd-0.11Zr (at.%) 合金板检测到了显著的退火硬化效应理论分析部分充分引用了本项目相关理论。中南大学刘楚明教授团队在 Journal of Alloys and Compounds 期刊上发表的“Effects of dynamic recrystallization mechanisms on texture evolution in Mg-Gd-Y-Zr-Ag alloy during hot compression”通过研究 Mg-7.5Gd-1.5Y-0.4Zr-0.5Ag (wt%) 合金流动行为和微观结构演变引用了本项目相关理论。

五、代表性论文专著目录

- [1] Boqiong Li*, Ruizhen Xie, Xing Lu. Microstructure, mechanical property and corrosion behavior of porous Ti-Ta-Nb-Zr[J]. Bioactive Materials, 5 (2020)564-568.
- [2] Ruizhen Xie, Naiming Lin*, Peng Zhou, Jiaojuan Zou*, Pengju Han, Zhihua Wang, Bin Tang. Surface damage mitigation of TC4 alloy via micro arc oxidation for oil and gas exploitation application: Characterizations of microstructure and evaluations on surface performance[J]. Applied Surface Science, 436 (2018) 467-476.
- [3] Shuo Yuan, Naiming Lin*, Jiaojuan Zou, Xiuzhou Lin, Zhiqi Liu, Yuan Yu, Zhenxia Wang, Qunfeng Zeng, Wengang Chen, Linhai Tian, Lin Qin, Ruizhen Xie, Boqiong Li, Hongxia Zhang, Zhihua Wang, Bin Tang, Yucheng Wu*. In-situ fabrication of gradient titanium oxide ceramic coating on laser surface textured Ti6Al4V alloy with improved mechanical property and wear performance[J]. Vacuum, 176 (2020) 1-16.
- [4] Jianqiang Hao*, Jinshan Zhang, Boqiong Li, Ruizhen Xie. Effects of 14H LPSO phase on the dynamic recrystallization and work hardening behaviors of an extruded Mg-Zn-Y-Mn alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 804

(2021)1-6.

- [5] Deping Zhang, Jinhui Zhang*, Yaqin Zhang, Dongdong Zhang*, Tao Xu, Boqiong Li, Yali Zhao, Jian Meng. Superior high-temperature strength in a low RE containing Mg extrusion alloy with nano-spaced stacking faults[J]. *Materials Science & Engineering A*, 854 (2022) 1-7.

六、主要完成人情况

姓名	排名	技术职务	工作单位	完成单位	对本项目贡献
李伯琼	1	教授	晋中学院	晋中学院	整体设计，提出通过添加造孔剂的粉末冶金法，解决粉末冶金多孔钛合金中孔隙分布不均匀性问题，有效缓解了生物医用钛合金应力屏蔽效应；通过球化处理+热挤压、解决 $Mg_{94}Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn_1$ 合金和 $Mg-4Er-2Nd-0.6Zn-0.2Zr$ 合金强韧性差，高温性能差和易发生脆性断裂的问题；通过超声波辅助微弧氧化和“表面织构+表面涂层技术”表面改性技术，解决 Ti6Al4V 耐磨损性能提升及耐蚀性评价的技术难题。并采用添加造孔剂的粉末冶金法制备了生物医用多孔 Ti-Nb-Ta-Zr (TNTZ)合金，阐明孔隙形成机理。建立孔隙、相结构与力学性能的关系，揭示强化机制、塑性变形机理及其在模拟体液中的耐蚀性，实现了 Ti-Ta-Nb-Zr 钛合金模量和伪弹性的综合控制，为优异生物力学性能医用多孔钛合金的应用奠定基础。对应“三、项目详细内容 3 主要发现点”中所列第 1 项发现点。支撑证明材料，代表作[1]。
谢瑞珍	2	副教授	晋中学院	太原理工大学	揭示了超声波对于 TC4 耐腐蚀性和磨损性能的影响规律，解决了耐磨损性能提升及耐蚀性评价的技术难题。确保 TC4 合金的工作表面具有增强的表面性能，适用于石油和天然气开采应用。对应“三、项目详细内容 3 主要发现点”中所列第 2 项发现点。支撑证明材料，代表作[2]。
邹娇娟	3	讲师	太原理工大学	太原理工大学	参与揭示了超声波对于 TC4 耐腐蚀性和磨损性能的影响规律，解决了耐磨损性能提升及耐蚀性评价的技术难题。参与发明了“表面织构+表面涂层技术”复合处理新工艺，构建了 Ti6Al4V 合金表面强化复合体系，通过探索表面织构几何参数和排列分布的合理匹配，明晰激光表面织构化对双辉等离子表面合金化，及热氧化行为的影响规律，实现了 Ti6Al4V 合金结构件的“成分-组织结构-加工制备-服役性能”的综合调控。对应“三、项目详细内容 3 主要发现点”中所列第 2 项发现点。支撑证明材料，代表作[2][3]。
郝建强	4	副教授	晋中学院	晋中学院	在面对复杂工况镁合金材料，采用球化处理+热挤压相结合的方法制备出 14H LPSO 增强的 $Mg_{94}Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn_1$ 合金，揭示出 14H LPSO 对 $Mg_{94}Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn_1$ 合金微观组织和力学性能的影响，构建了 $Mg_{94}Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn_1$ 合金的协同强化机制，实现了 $Mg_{94}Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn_1$ 合金强度和塑性的有效调控。这项工作对于高强镁合金的制备具有重要的指导意义。对应“三、项目详细内容 3 主要发现点”中所列第 3 项发现点。支撑证明材料，代表作[4]。

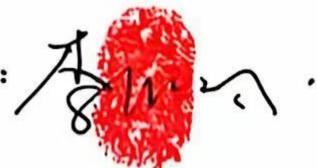
姓名	排名	技术职务	工作单位	完成单位	对本项目贡献
张德平	5	副教授	晋中学院	晋中学院	在面对复杂工况镁合金材料，采用半连续铸造方法制备低稀土高强耐热 Mg-4Er-2Nd-0.6Zn-0.2Zr 合金，研究该合金的高温性能形成机制，揭示低稀土低成本合金挤压形成的具有优异的高温性能、强度-塑性协同作用的强化机制。这项工作为本项目提供了理论基础指导。对应“三、项目详细内容 3 主要发现点”中所列第 3 项发现点。支撑证明材料，代表作[5]。

完成人合作关系说明

“面向复杂工况的轻合金强韧化机制及腐蚀机理研究”是在晋中学院主体完成的，是项目完成人李伯琼、谢瑞珍、邹娟娟、郝建强、张德平密切合作的科研成果。第一完成人李伯琼教授是本项目的负责人，负责项目的整体设计，提出通过添加造孔剂的粉末冶金法，解决粉末冶金多孔钛合金中孔隙分布不均匀性问题，有效缓解了生物医用钛合金应力屏蔽效应；通过超声波辅助微弧氧化和“表面织构+表面涂层技术”表面改性技术，解决 Ti6Al4V 耐磨损性能提升及耐蚀性评价的技术难题；通过球化处理+热挤压法，解决 Mg₉₄Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn₁ 合金和 Mg-4Er-2Nd-0.6Zn-0.2Zr 合金强韧性差，高温性能差和易发生脆性断裂的问题。第一完成人是发现点 1 的重要完成者，是代表作[1]的第一作者兼通讯作者，参与了代表作[2]、[3]、[4]、[5]的相关研究。第二完成人谢瑞珍副教授以太原理工大学硕士研究生和晋中学院教师的身份参加了本项目的研究工作，特别是超声波对于 TC4 耐腐蚀性和磨损性能的影响规律等，对本项目重要科学发现均有创造性贡献，是发现点 2 的重要完成者，是代表作[2]的第一作者，并参与了代表作[1]、[3]、[4]的研究内容。第三完成人邹娟娟讲师以太原理工大学博士研究生身份参与本项目，主要负责钛合金表面改性及人体模拟液中钛合金的耐蚀性研究，是发现点 2 的重要完成者，是代表作[2]的通讯作者之一，并参与了代表作[2]、[3]的核心研究内容。第四完成人郝建强副教授负责采用球化处理+热挤压相结合的方法制备 14H LPSO 增强的 Mg₉₄Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn₁ 合金，是发现点 3 的重要完成者，是代表作[4]的第一作者兼通讯作者。第五完成人张德平副教授负责采用半连续铸造方法制备低稀土高强耐热 Mg-4Er-2Nd-0.6Zn-0.2Zr 合金，是发现点 3 的重要完成者，是代表作[5]的第一作者。此外，谢瑞珍、郝建强、张德平均为李伯琼教授负责的山西省高等教育“1331 工程”提质增效建设计划轻质材料改性应用协同创新中心建设项目组成员。

承诺：本人作为项目第一完成人，对本项目完成人合作关系及上述内容的真实性负责。如有不实，自愿退出本年度评审并承担相应责任。

第一完成人签名：



知情同意证明

本人已知晓并同意项目“面向复杂工况的轻合金强韧化机制及腐蚀机理研究”在申报2024年度自然科学奖使用到《Applied Surface Science》, 2018, 436: 467-476 论文“Surface damage mitigation of TC4 alloy via micro arc oxidation for oil and gas exploitation application: Characterizations of microstructure and evaluations on surface performance”和《Vacuum》, 2020, 176: 109327.论文“In-situ fabrication of gradient titanium oxide ceramic coating on laser surface textured Ti6Al4V alloy with improved mechanical property and wear performance”的内容。并已知晓获奖项目所用论文专著不得再次用于申报山西省自然科学奖、未获奖项目所用论文专著不得连续两年使用。（Naiming, Lin#, E-mail:linnaiming@tyut.edu.cn, College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology）

本人签字：



日期：2024.11.25

知情同意证明

本人已知晓并同意项目“面向复杂工况的轻合金强韧化机制及腐蚀机理研究”在申报2024年度自然科学奖使用到《Vacuum》, 2020, 176: 109327.论文“In-situ fabrication of gradient titanium oxide ceramic coating on laser surface textured Ti6Al4V alloy with improved mechanical property and wear performance”的内容。并已知晓获奖项目所用论文专著不得再次用于申报山西省自然科学奖、未获奖项目所用论文专著不得连续两年使用。（Yucheng Wu#, E-mail: wyc@tyut.edu.cn, College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology）

本人签字：



日期：2024.11.25

知情同意证明

本人已知晓并同意项目“面向复杂工况的轻合金强韧化机制及腐蚀机理研究”在申报2024年度自然科学奖使用到《Vacuum》，2020, 176: 109327.论文“In-situ fabrication of gradient titanium oxide ceramic coating on laser surface textured Ti6Al4V alloy with improved mechanical property and wear performance”的内容。并已知晓获奖项目所用论文专著不得再次用于申报山西省自然科学奖、未获奖项目所用论文专著不得连续两年使用。（Shuo Yuan#, E-mail: 1003609826@qq.com, College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology）

本人签字：



日期：2024.11.25

知情同意证明

本人已知晓并同意项目“面向复杂工况的轻合金强韧化机制及腐蚀机理研究”在申报2024年度自然科学奖使用到《Materials Science & Engineering A》，2022, 854:143791. 论文“Superior high-temperature strength in a low RE containing Mg extrusion alloy with nano-spaced stacking faults”的内容。并已知晓获奖项目所用论文专著不得再次用于申报山西省自然科学奖、未获奖项目所用论文专著不得连续两年使用。（Dongdong Zhang#, E-mail: zhangdd 0418@163.com, Key Laboratory of Superlight Materials & Surface Technology, Ministry of Education, Harbin Engineering University）

本人签字：



日期：2024.11.25

知情同意证明

本人已知晓并同意项目“面向复杂工况的轻合金强韧化机制及腐蚀机理研究”在申报2024年度自然科学奖使用到《Materials Science & Engineering A》, 2022, 854:143791. 论文“Superior high-temperature strength in a low RE containing Mg extrusion alloy with nano-spaced stacking faults”的内容。并已知晓获奖项目所用论文专著不得再次用于申报山西省自然科学奖、未获奖项目所用论文专著不得连续两年使用。（Jinhui Zhang #, E-mail: tao.xu@kashui.com, Department of Materials Science and Engineering, Jinzhong University）

本人签字: 

日期: 2024.11.25