

# 2025 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

## 一、项目名称

轻合金搅拌摩擦焊接形性协同调控理论与方法

## 二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

搅拌摩擦焊接技术在航空航天、轨道交通、新能源汽车等领域金属构件连接中具有重要应用需求，但由于其存在焊缝热力耦合流动行为与成形机理不清、结合机制认识不足、接头强塑性协同提升受限、各向异性力学性能评价方法缺失等相关基础科学问题，在关重构件中的推广应用遇到瓶颈。该项目在国家自然科学基金、国家级重点课题、教育部新世纪人才计划等 30 余项项目的持续支持下，历经十余年系统攻关，取得了一系列具有原创性的理论与方法突破：揭示了搅拌摩擦焊接过程中极端非平衡热力耦合条件下材料流动行为及焊接界面结合机理，发现了动态再结晶是实现界面高质量固相结合的核心机制，提出了接头分区梯度热管理的强塑性调控新策略，建立了搅拌摩擦焊接头各向异性力学性能的评价方法。

该项目发展了摩擦焊接固相结合理论，研究创新性强，科学意义显著，工程实用价值突出。该项目成果在搅拌摩擦焊接领域处于国际领先地位，5 篇代表性论文发表在 *Int J Mach Tool Manuf*、*Acta Mater*、*J Mater Sci Technol* 等重要期刊，获得了国内外同行的广泛引用与跟踪研究。同时，该项目成果已在多家民企获得应用。培养了包括 1 名国家级领军人才与 2 名国家级青年人才在内的一批优秀人才，产生了显著的军事、经济和社会效益。

成果材料齐全、规范，经完成单位公示，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖推荐条件。

提名该项目为陕西省自然科学奖一等奖。

## 三、项目简介

该项目属于机械工程学科的机械制造工艺与设备技术领域的焊接方向。

搅拌摩擦焊接作为一种高效高质的固相焊接技术，可有效避免传统熔焊中常见的气孔、裂纹、元素烧损等固有缺陷，进而显著提升铝、镁等轻合金的焊接质量，目前已逐步在航空航天、新能源汽车、轨道交通等领域发挥出重要作用。然而，长期以来搅拌摩擦焊接理论研究面临四大难题：① 对于搅拌摩擦焊接过程中材料流动行为及缺陷调控机制的认识明显不足，缺乏对快速强烈热力耦合作用下产热机制的深入理解；② 强烈热力耦合作用下焊缝形成过程无法实时观测，导致接头成形机制与界面结合机理长期不明；③ 焊缝成形理论缺失导致接头强塑性无法有效调控；④ 焊缝附近极端非均匀组织与性能给接头力学性能准确评

价带来巨大挑战,这些已成为限制该技术在航空航天等领域关重构件中推广应用的瓶颈。因此,揭示搅拌摩擦焊接头温度场演变、流场分布特征与缺陷形成机制,明确焊接热输入与热耗散的匹配规律,阐明焊接界面组织演变与结合机理,是实现接头成形调控的关键科学问题。

基于上述迫切需求与关键问题,该项目在多层次科研计划的持续资助下稳步推进,国家层面,依托国家自然科学基金、国家重点课题和预研项目等重大任务;省部级层面,获得教育部新世纪优秀人才计划和陕西省自然科学基金等的支持;企业合作层面,联合中国航天 211 厂、中国人民解放军 5702 厂及北京赛福斯特技术有限公司等重要民企,形成产学研相结合的研究格局,围绕铝、镁等轻合金搅拌摩擦焊接成形机理与界面结合行为、接头质量与变形控制、力学性能评价方法等共性基础问题开展了深入理论与应用研究,取得了一系列重大突破,体现在以下四方面:

(1) 创建了基于耦合欧拉-拉格朗日法(CEL)的搅拌摩擦焊接完全热力耦合三维计算模型,实现了接头温度场演变与变形行为的有效预测,通过引入粒子追踪技术阐明了接头内部缺陷的形成机制及影响因素,实现了接头缺陷的控制。

(2) 发现了动态再结晶是搅拌摩擦焊接固相结合的核心机制,创新性提出了基于焊缝温度控制的细晶组织调控方法,建立了“热输入-动态再结晶-细晶演化”的精准映射关系,实现了从经验试错向理论指导的范式转变。

(3) 提出了分区热管理的搅拌摩擦焊接头温度场梯度冷却调控新方法,实现了接头不同区域热需求的精确匹配,在现有优化工艺参数基础上进一步协同提升抗拉强度 10%和延伸率 50%以上,突破了材料“强度-塑性悖论”。

(4) 构建了搅拌摩擦焊接头分区力学本构模型与各向异性屈服本构模型,揭示了接头不同区域局部变形行为的不均匀性,阐明了多轴载荷下搅拌摩擦焊接头的各向异性屈服行为,为高可靠性焊接结构设计提供了普适性评估框架。

经过 10 余年的研究与实践,该项目成果形成了铝、镁等轻合金搅拌摩擦焊接形性一体化调控理论,具有极其重要的学术价值,该项目成果在本领域高水平期刊 Int J Mach Tool Manuf、Acta Mater、J Mater Sci Technol 等发表论文 200 余篇,其中 SCI 收录 150 余篇,5 篇代表性论文被他引 315 次,授权相关发明专利 13 件,研究成果完善并丰富了摩擦焊接基础理论,获得了国内外同行广泛引用与跟踪研究,被包括 Prog Mater Sci 等期刊在内的多篇论文大篇幅正面评价,产生了重要的学术影响。如国际知名搅拌摩擦焊接专家中科院金属研究所马宗义团队与美国 R.S.Mishra 团队等合作在 Prog Mater Sci 发文正面评价指出“完全热力耦合的三维有限元模型可以较好的复现搅拌摩擦焊接过程”,验证了焊缝金属材料的典型流动行为;国际知名焊接专家北京工业大学陈树君团队在(Add Manuf, 2023)发文评价,指出“采用数值模拟分析了搅拌摩擦焊接过程中材料流动行为,获得了焊接过程中缺陷形成机制”;国际知名焊接专家上海交通大学李永兵团队在 Int J Mach Tool Manuf 发文正面评价“开发了基于欧拉-拉格朗日法的搅拌摩擦焊接三维热力耦合模型,揭示了热力耦合下焊缝再结晶机理,为后续工艺参数

优化和接头结构设计提供了极具价值的理论依据”；国际知名搅拌摩擦焊接专家山东大学武传松团队在 Chin J Mech Eng 发文正面评价“影响搅拌摩擦焊缝组织的重要参数有搅拌工具转速、焊接速度、轴向力、工具形貌与倾角，这些都是影响界面热输入量的重要参数，从而显著影响细晶组织演变”；国际知名焊接专家大连理工大学刘黎明团队在 J Mater Proc Technol 发文引用该项目局部不均匀力学性能的成果解释氩弧焊 6061-T6 铝合金的软化区的力学行为。项目通过了中国机械工程学会成果鉴定，认为“整体技术达到国际先进水平，其中协同双面搅拌摩擦焊技术居国际领先”。

该项目成果打破国外技术壁垒，与首都航天机械有限公司合作在国内率先构建了可支撑铝合金筒类纵/环缝、壁板类对接缝工程应用的搅拌摩擦焊接技术体系，显著提升了相关行业的技术水平及焊接质量与效率，解决了多种型号筒类、壁板类等铝合金构件的焊接难题，2219 铝合金接头强度从原来氩弧焊约 290MPa 提升到约 335MPa，在国内首次实现大尺寸弱刚度运载火箭贮箱系列化应用，保障了重点型号研制。成果还指导了中车长春轨道客车股份有限公司在高铁铝合金车体结构的生产制造过程，成功解决了中空型腔高铁车体侧墙、机组平台等铝合金构件的焊接难题。并与敏实汽车技术研发有限公司合作在新能源汽车电池托盘等结构的高效、高质量焊接中实现规模化应用，接头抗拉强度达到母材的 90%，实现单道焊缝焊接速度较传统工艺提升 60%，产品一次性合格率从 87%提升至 99.2%，产生了重要的军事、经济及社会效益。

该项目执行期间，李文亚受邀担任 Weld Int 与 Weld World 国际焊接期刊副主编，Chin J Mech Eng 副编辑，Sci Technol Weld Join、Add Manuf、J Mater Sci Technol、焊接学报等编委，国际焊接学会压力焊专委会摩擦焊分会主席以及固相增材分会共同主席、中国机械工程学会焊接分会常委、压力焊专委会主任、陕西省机械工程学会焊接分会主任、中国有色金属学会先进焊接与连接专委会副主任等，引领了固相焊接学科发展。该项目培养了一支在固相焊接领域有国际影响力的人才队伍，包括国家级领军人才 1 名、国家级青年人才 2 名、省级青年人才 5 名、研究生 120 余名、博士后 5 名，多数毕业生成长为企业骨干。该项目获 2025 年度陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等奖。

## 四、客观评价

该项目围绕搅拌摩擦焊接界面流动与结合行为及成形机理、接头力学性能调控与评价等基础理论问题开展创新研究，发展了搅拌摩擦焊接形性一体化调控理论。该项目成果在本领域高水平期刊 Int J Mach Tool Manuf、Acta Mater、J Mater Sci Technol 等发表论文 200 余篇，其中 SCI 收录 150 余篇，5 篇代表性论文被他引 291 次，授权相关发明专利 13 件，研究成果完善并丰富了摩擦焊接基础理论，获得了国内外同行广泛引用与跟踪研究，被包括 Prog Mater Sci 等期刊在内的多篇论文大篇幅正面评价，产生了重要的学术影响，主要评价如下：

**针对发现点 1：**关于焊缝金属流动行为及缺陷预测与控制，国际知名搅拌摩擦焊接专家中科院金属研究所马宗义团队与美国 R.S.Mishra 等合作在 Prog Mater

Sci 发文（代表性引文 1）正面评价指出“完全热力耦合的三维有限元模型可以较好的复现搅拌摩擦焊接过程”（代表性论文 1），验证了焊缝金属材料的典型流动行为。国际知名焊接专家北京工业大学陈树君团队在（Add Manuf, 2023）发文（代表性引文 6）评价，指出“采用数值模拟分析了搅拌摩擦焊接过程中材料流动行为，获得了焊接过程中缺陷形成机制”（代表性论文 1）。国际知名搅拌摩擦焊接专家哈尔滨工业大学黄永宪团队在 J Mater Process Tech 期刊发文（代表性引文 5），评价指出“焊接工具的设计可以有效地促进接头界面材料的均匀混合，确保提高接头强度”（代表性论文 1）。上述评价表明本发现点已成为国际公认的搅拌摩擦焊接成形机理研究核心成果。

**针对发现点 2：**关于搅拌摩擦焊接再结晶结合机理的成果，中科院金属研究所马宗义团队在 Prog Mater Sci 期刊发文（代表性引文 1）正面评价“轴肩下方的金属流动将影响其再结晶结合过程”（代表性论文 4）。国际知名焊接专家上海交通大学李永兵团队在 Int J Mach Tool Manuf 发文（代表性引文 2）正面评价“开发了基于欧拉-拉格朗日法的搅拌摩擦焊接三维热力耦合模型，揭示了热力耦合下焊缝再结晶机理，为后续工艺参数优化和接头结构设计提供了极具价值的理论依据”（代表性论文 1）。

**针对发现点 3：**关于分区热管理调控搅拌摩擦焊接头组织性能的成果，中科院金属研究所马宗义团队在 Prog Mater Sci 期刊发文（代表性引文 1）正面指出“不同垫板条件下高强铝合金析出相行为不同，不同热耗散导致不同的软化行为与硬度分布”（代表性论文 4）。国际知名搅拌摩擦焊接专家山东大学武传松团队在 Chin J Mech Eng 发文（代表性引文 8）正面评价“影响搅拌摩擦焊缝组织的重要参数有搅拌工具转速、焊接速度、轴向力、工具形貌与倾角，这些都是影响界面热输入量的重要参数，从而显著影响细晶组织演变”（代表性论文 4）。国际知名搅拌摩擦焊接专家伊朗霍梅尼国际大学 Razaghian 教授在 J Mater Res Technol（代表性引文 7）上发文对项目关于静止轴肩搅拌摩擦加工的成果给予正面评价：“通过铜垫板散热对 AZ31B 镁合金进行静止轴肩搅拌摩擦加工，搅拌区获得平均晶粒尺寸小于 2 $\mu\text{m}$  的细晶组织，使其硬度和抗拉强度分别提高了 80% 和 24%”（代表性论文 3）。

**针对发现点 4：**关于搅拌摩擦焊接头非均匀性及各向异性力学性能评价成果，国际知名焊接专家大连理工大学刘黎明团队在 J Mater Proc Technol 发文（代表性引文 3）引用该项目局部不均匀力学性能的成果（代表性论文 5）解释氩弧焊 6061-T6 铝合金的软化区的力学行为，国际知名搅拌摩擦焊接专家山东大学武传松团队在 J Manuf Process 期刊发文（代表性引文 4）正面指出“2024 铝合金（Al-Cu 系）搅拌摩擦焊接头的机械性能在很大程度上取决于铝基体中的 Al-Cu 沉淀相”，该评价方法具有一定的普适性。

#### **国内外重要学术影响：**

该项目通过了中国机械工程学会成果鉴定，认为“整体技术达到国际先进水平，其中协同双面搅拌摩擦焊技术居国际领先”。该项目成果受邀在国内外学术

会议上做邀请报告 40 余次。李文亚受邀担任 Weld Int 与 Weld World 国际焊接期刊副主编，Chin J Mech Eng 副编辑，Sci Technol Weld Join、Add Manuf、J Mater Sci Technol、焊接学报等编委，国际焊接学会压力焊专委会摩擦焊分会主席以及固相增材分会共同主席、中国机械工程学会焊接分会常委、中国机械工程学会焊接分会压力焊专委会主任、陕西省机械工程学会焊接分会主任、中国有色金属学会先进焊接与连接专委会副主任等，引领了固相焊接学科发展。项目培养了国家级领军人才 1 名、国家级青年人才 2 名、省级青年人才 5 名、研究生 120 余名、博士后 5 名，多数毕业生成长为企业骨干。

## 五、代表性论文专著目录（不超过 8 条，其中代表性论文不超过 5 篇，代表性专著不超过 3 部）

（按照表格所示栏目填写支撑本项目重要科学发现的代表性论文专著详细情况，不超过 8 篇，按重要程度排序。所列论文专著应公开发表 2 年以上即 2023 年 8 月 1 日以前公开发表。所列代表作及论文应以省内单位或个人为主要完成单位，署名第一单位（标号为 1 的单位）应为国内单位。

“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”、“第一作者（含共同第一作者）”和“国内作者”，均应基于论文的全部作者进行填写，不得只填写本项目完成人或少填漏填。

其中，“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”和“第一作者（含共同第一作者）”的姓名表述应与论文原文的署名保持一致，“国内作者”填写作者的中文姓名。

该表所列论文专著的知识产权归国内所有且无争议，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年省部级（政府）科学技术奖励项目和本年度其他陕西省科学技术奖提名项目中作为支撑材料出现。用于提名陕西省科学技术奖的情况，已征得未列入项目主要完成人和主要完成单位的作者的同意，其中，未列入项目主要完成人的第一作者、通讯作者（含共同第一作者、共同通讯作者）已出具知情同意书面签字意见，与其他作者的有关知情证明材料均存档备查。）

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	通讯作者	第一作者	国内作者	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	In-depth understanding of material flow behavior and refinement mechanism during bobbin tool friction stir welding	International Journal of Machine Tools and Manufacture	Q. Chu, W.Y. Li, D. Wu, X.C. Liu, S.J. Hao, Y.F. Zou, X.W. Yang, A. Vairis	2021 年 171 卷 103816 页	2021-10-14	Q. Chu, W.Y. Li, X.W. Yang	Q. Chu	褚强，李文亚，吴东，刘西畅，郝思洁，邹阳帆，杨夏炜	56	Web of Science	是

2	Improving weld formability by a novel dual-rotation bobbin tool friction stir welding	Journal of Materials Science & Technology	F.F. Wang, W.Y. Li, J. Shen, Q. Wen, J.F. dos Santos	2018 年 34 卷 135-139 页	2017-11-07	W.Y. Li, J. Shen	F.F. Wang	王非凡, 李文亚, 温泉	48	Web of Science	是
3	Tailoring grain refinement through thickness in magnesium alloy via stationary shoulder friction stir processing and copper backing plate	Materials Science & Engineering A	Vivek Patel, Wenya Li, Xichang Liu, Quan Wen, Yu Su, Junjun Shen, Banglong Fu	2020 年 784 卷 139322 页	2020-04-03	Vivek Patel, Wenya Li	Vivek Patel	李文亚, 刘西畅, 温泉, 苏宇	74	Web of Science	是
4	Microstructure and mechanical optimization of probeless friction stir spot welded joint of an Al-Li alloy	Journal of Materials Science & Technology	Q. Chu, W.Y. Li, X.W. Yang, J.J. Shen, A. Vairis, W.Y. Feng, W.B. Wang	2018 年 34 卷 1739-1746 页	2018-04-11	W.Y. Li	Q. Chu	褚强, 李文亚, 杨夏炜, 冯武渊, 王卫兵	67	Web of Science	是
5	Global anisotropic response of friction stir welded 2024 aluminum sheets	Acta Materialia	Z.H. Zhang, W.Y. Li, Y. Feng, J.L. Li, Y.J. Chao	2015 年 92 卷 117-125 页	2015-04-13	W.Y. Li	Z.H. Zhang	张志函, 李文亚, 丰焱, 李京龙	70	Web of Science	是
合 计									315		

## 六、主要完成人情况（不超过 6 人）

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
李文亚	1	陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室主任	教授	西北工业大学	西北工业大学	在科学发现点 1-4 中均起到主导作用（代表性论文 1-5），创建了基于耦合欧拉-拉格朗日法（CEL）的搅拌摩擦焊接完全热力耦合三维计算模型；提出了分区热管理的搅拌摩擦焊接头温度场梯度冷却调控新方法，实现了接头不同区域热需求的精确匹配，在现有优化工艺参数基础上进一步协同提升抗拉强度 10%和延伸率 50%以上，突破了材料“强度-塑性悖论”；构建了搅拌摩擦焊接头分区力学本构模型与各向异性屈服本构模型，揭示了接头不同区域局部变形行为的不均匀性，阐明了多轴载荷下搅拌摩擦焊接头的各向异性屈服行为，为高可靠性焊接结构设计提供了普适性评估框架。
苏宇	2	无	博士后	西北工业大学	西北工业大学	在科学发现点 2、3 中均起到重要作用（代表性论文 3），发现了动态再结晶是搅拌摩擦焊接固相结合的主要机理，创新性提出了基于焊缝温度控制的细晶组织调控方法，建立了“热输入-动态再结晶-细晶演化”的精准映射关系；提出了分区热管理的搅拌摩擦焊接头温度场梯度冷却调控新方法，实现了接头不同区域热需求的精确匹配，在现有优化工艺参数基础上进一步协同提升抗拉强度 10%和延伸率 50%以上，突破了材料“强度-塑性悖论”。
褚强	3	无	高级工程师	西安航天发动机有限公司	西北工业大学	在科学发现点 1、3 中做出贡献（代表性论文 1、4），创建了基于耦合欧拉-拉格朗日法（CEL）的搅拌摩擦焊接完全热力耦合三维计算模型，实现了接头温度场演变与变形行为的有效预测，通过引入粒子示踪技术阐明了接头内部缺陷的形成



						机制及影响因素，实现了接头缺陷的控制；提出了分区热管理的搅拌摩擦焊接头温度场梯度冷却调控新方法，实现了接头不同区域热需求的精确匹配。
王非凡	4	无	高级工程师	北京宇航系统工程研究所	西北工业大学	在科学发现点 1 中做出贡献（代表性论文 2），发现了动态再结晶是搅拌摩擦焊接固相结合的主要机理，提出了基于焊缝温度控制的细晶组织调控方法，建立了“热输入-动态再结晶-细晶演化”的精准映射关系，实现了从经验试错向理论指导的范式转变。
杨夏炜	5	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	在科学发现点 1、3 中做出贡献（代表性论文 1、4），参与创建了基于耦合欧拉-拉格朗日法（CEL）的搅拌摩擦焊接完全热力耦合三维计算模型；参与提出了分区热管理的搅拌摩擦焊接头温度场梯度冷却调控新方法，实现了接头不同区域热需求的精确匹配。
温泉	6	无	正高级工程师	国营四达机械制造公司	西北工业大学	在科学发现点 1、3 中做出贡献（代表性论文 2、3），参与提出了分区热管理的搅拌摩擦焊接头温度场梯度冷却调控新方法，发现搅拌摩擦焊接过程中的环境热耗散也对接头组织性能影响显著，通过调整工艺参数来控制界面的热输入功率，显著提升了接头抗拉强度。

## 七、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	在科学发现点 1-4 及代表性论文 1-5 中均起到主导作用，具体如下：(1) 创建了基于耦合欧拉-拉格朗日法(CEL)的搅拌摩擦焊接完全热力耦合三维计算模型，实现了接头温度场演变与变形行为的有效预测，通过引入粒子示踪技术阐明了接头内部缺陷的形成机制及影响因素，实现了接头缺陷的控制。(2) 发现了动态再结晶是搅拌摩擦焊接固相结合的核心机制，创新性提出了基于焊缝温度控制的细晶组织调控方法，建立了“热输入-动态再结晶-细晶演化”的精准映射关系，实现了从经验试错向理论指导的范式转变。(3) 提出了分区热管理的搅拌摩擦焊接接头温度场梯度冷却调控新方法，实现了接头不同区域热需求的精确匹配，在现有优化工艺参数基础上进一步协同提升抗拉强度 10%和延伸率 50%以上，突破了材料“强度-塑性悖论”。(4) 构建了搅拌摩擦焊接接头分区力学本构模型与各向异性屈服本构模型，揭示了接头不同区域局部变形行为的不均匀性，阐明了多轴载荷下搅拌摩擦焊接接头的各向异性屈服行为，为高可靠性焊接结构设计提供了普适性评估框架。

## 八、完成人合作关系说明

完成人李文亚、苏宇、褚强、王非凡、杨夏炜、温泉，均为（或曾为）西北工业大学固相焊接研究团队的核心成员，李文亚为团队负责人，苏宇、褚强、王非凡、温泉为李文亚指导的研究生，已进行了长期的合作，共同开展了相关的基础研究，其相互之间合作关系如下：

1. 第一完成人李文亚、第三完成人褚强、第五完成人杨夏炜的合作方式为论文合著，合作时间为 2014.09.01-2021.12.31，期间共同发表代表性论文 1: In-depth understanding of material flow behavior and refinement mechanism during bobbin tool friction stir welding, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 171: 103816。

2. 第一完成人李文亚、第四完成人王非凡、第六完成人温泉的合作方式为论文合著，合作时间为 2016.09.01-2021.06.30，期间共同发表代表性论文 2: Improving weld formability by a novel dual-rotation bobbin tool friction stir welding,

Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34: 135-139。

3. 第一完成人李文亚、第二完成人苏宇、第六完成人温泉的合作方式为论文合著，合作时间为 2016.09.01-2022.06.30，期间共同发表代表性论文 3: Tailoring grain refinement through thickness in magnesium alloy via stationary shoulder friction stir processing and copper backing plate, Materials Science and Engineering A, 2020, 784: 139322。

4. 第一完成人李文亚、第三完成人褚强、第五完成人杨夏炜的合作方式为论文合著，合作时间为 2014.09.01-2021.12.31，期间共同发表代表性论文 4: Microstructure and mechanical optimization of probeless friction stir spot welded joint of an Al-Li alloy, 2018, 34, 1739-1746。