

2022

一、项目名称

先进焊接航空整体结构残余应力尺寸效应及疲劳寿命主控曲线方法

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省航空学会

提名意见：该项目针对先进焊接航空整体结构，围绕航空整体焊接结构残余应力完整性分布及其对疲劳损伤的影响机理，开展了基于工艺参数-残余应力-疲劳寿命的整体壁板疲劳寿命主控曲线法研究，取得了一系列重要科学发现：1 发现了焊接航空结构残余应力尺寸效应及其完整力学表征。2.发现了整体焊接航空结构的焊缝微观机理与力学本构响应和残余应力的关联机制，揭示了残余应力分布的微观机理。3.构建了残余应力对断裂主控参数和疲劳损伤行为的表征方法，建立了基于焊接参数-残余应力-强度一体化的航空焊接结构疲劳寿命主控曲线法，为飞机、高铁、船舶等整体焊接结构设计和完整性评估提供了可靠的力学基础、分析方法和技术支撑。这些重要科学发现不但具有重要的科研价值，同时对增强我国工程整体结构的国际竞争力和提高我国飞行器设计能力和水平提供了理论和技术支撑。该项目的相关科研成果已在国内外该领域顶级期刊杂志上发表100多篇，并获得多项国家授权发明专利和软件著作权；同时该项目已成功应用于航空工业各大主机所的多个重点型号飞机的结构设计、完整性分析、强度校核和寿命评估。项目材料齐全，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖的申报条件，提名该项目为陕西省自然科学奖一等奖。

三、项目简介

本项目为航空航天科学技术领域的**飞行器结构力学、固体力学疲劳寿命和材料学科等多学科交叉领域**。随着新工艺、新构型在航空结构中应用快速发展及其服役环境的复杂化，焊接整体航空结构构型、残余应力、断裂模式和疲劳寿命评估亟需研究以确保其服役安全性和可靠性。针对此，**本课题组历经近十五年提出了基于焊接参数-残余应力-强度一体化的航空焊接结构主控曲线疲劳寿命估算方法**。主要研究内容和科学发现点如下：

（1）搅拌摩擦焊接航空结构中残余应力的尺寸效应及其完整力学表征形式研究

基于飞机焊接整体结构研究了焊接工艺参数和边界条件与残余应力场分布关联机制，建立了航空焊接整体壁板构型设计及其几何参数与残余应力分布之间的关联机制；厘清了残余应力分布的方向性、梯度性和完整性影响机理及其表征形式研究；建立了残余应力与结构应力的耦合作用；构建了**焊接工艺参数--残余**

应力完整力学表征刻画，发展了其完整性表征规律及力学机理描述参数；揭示了航空整体壁板的焊接不同区域的晶相取向差角度和极图微细观的分布特征及其与残余应力分布的关联关系。

科学发现点和科学价值：揭示了不同焊缝方向构型的残余应力完整分布规律，发现了焊接航空整体结构残余应力的尺寸效应及其存在的微观机理，构建了焊接参数-残余应力的关联关系。①平行于焊缝的残余应力呈双峰分布，焊缝两侧峰值最大；结构尺寸改变影响整体分布，但不改变残余应力最大值。②垂直于焊缝的残余应力幅值较小，结构尺寸改变不影响整体分布，而最大残余应力值随尺寸的减小而减小。本发现点相关内容在疲劳顶刊 I.J. Fatigue 等著名期刊上发表论文。涂善东院士曾评价：“*Ma et al. once studied the effect of cutting size of specimen on residual stress profiles ..., ... decrease the fatigue crack growth rates*”，同时将本项目结果作为对照进行对比。

（2）航空高强度搅拌摩擦焊接同质和异质接头的微观机理、残余应力与疲劳性能的关联机制研究

研究航空高强度铝合金同质和异质焊接接头不同焊接区域（焊核区、前进侧热力影响区、后退侧热力影响区和母材区）微观组织、残余应力分布与力学参数的关联关系；厘清并刻画了残余应力完整性对于裂尖应力场的主控断裂参数、强度准则、T 应力、疲劳参数、疲劳裂纹行为等影响机理；研究了残余应力场中裂纹转折判据及焊接接头的破坏机制；构建了多模式下残余应力的方向性、梯度性等对裂纹转折影响机制的描述和算法；首次开创性提出了残余应力因子的概念，实现了焊接工艺参数-残余应力-强度的完整力学表征刻画。

科学发现点和科学价值：发现了航空服役不同应力场中异质和同质焊接不同区域微观机理与力学本构响应的关联机制；揭示了残余应力对力学断裂参数、疲劳裂纹行为影响机理研究。①前进侧热机械影响区的晶粒取向差角在较小，焊核取向差角一般在 45°左右；在后退侧热机械影响区，取向差角更接近于随机分布。②前进侧热机械影响区极密度最大，焊核区较小，后退侧热机械影响区极密度最大值沿厚度方向逐渐减小。③探索构建了焊接参数-微观组织-力学性能响应之间的规律关系，揭示了焊缝各区域的动态力学响应规律和破坏模式。本发现点相关内容在 Theor. Appl. Fract. Mech. 等力学著名期刊发表文章。国际焊接学会主席 Jorge F. dos Santos 教授曾引用本发现点：“*the crack source is prone to form ... reduces the antifatigue properties and service life*”，对本项目中焊接区域所导致的疲劳起裂问题重要科学发现进行了直接引用。

（3）虑及残余应力的航空 FSW 焊接结构主控曲线的疲劳寿命估算方法研究

研究残余应力对于航空 FSW 焊接的裂纹扩展曲线的影响机理，并建立了其

表征方法；发展了航空 FSW 焊接的主控曲线法；研究了相关参数确定方法。

科学发现点和科学价值：发现了残余应力对航空 FSW 焊接裂纹扩展曲线的影响机理，创建了虑及残余应力的航空 FSW 焊接整体结构疲劳寿命主控曲线法，完成了焊接元件-焊接部件-焊接整体壁板的“金字塔”疲劳验证，解决了焊接整体结构的完整性分析和寿命预测问题，突破了传统航空结构疲劳寿命预测过于依赖经验系数的“桎梏”。①建立了先进航空 FSW 焊接结构的主控曲线法；②揭示了残余应力对主控曲线法的影响；③基于主控曲线法构建了疲劳寿命评估方法。本发现点相关内容在 I.J.Fatigue 等发表文章。英国机械故障首席专家 **Andrew Ball 教授** 引用本发现点并评价：“*The use of residual K (Kres) approaches for the prediction ... how it changes with crack length ... The master curve approach was used ... were compared with experimental results*”，对本项目所建立的主控曲线法给予高度肯定。

本项目提出的疲劳寿命主控曲线法，在疲劳顶级期刊等发表了 SCI/EI 100 多篇，被华东理工大学涂善东院士、国际焊接学会主席 **Jorge Santos 教授**、西南交通大学长江学者**陈辉教授**、英国航空局（CAA）专家组主席 **Phil Irving 教授**、西南交通大学长江学者**康国政教授**、四川大学**杰青王清远教授**、中科院金属所**杰青马宗义教授**等本领域著名学者高度评价与认可。

该项目应用于 **MA700、水陆两栖飞机、大运**等我国整体飞机结构和船舶、高铁等整体焊接结构的完整性分析和寿命评估，服务于国家重大战略需求。该项目获陕西省航空学会科学技术奖一等奖。同时课题组把最新研究内容更新扩充并完成了《飞行器结构疲劳与断裂》教材，并完成了研究生和博士生的教学工作，为航空工业培养了 80 多名复合型硕士和博士专业领航新型人才和新鲜青春力量。

四、客观评价

（1）同行专家学术评价

该项目发现揭示了残余应力存在的微细观机理，构建了残余应力因子方法，提出了焊接航空整体壁板的疲劳寿命主控曲线法，发表论文 100 多篇，被美国、法国、德国、英国、澳大利亚、中国等该领域顶级学者索引，同时成果应用于我国水陆两栖飞机等多种机型。

① **涂善东院士**团队在疲劳领域顶级期刊 **Int. J. Fatigue** (IF=5.186) 发表“Fatigue life of a dissimilar welded joint considering the weld residual stress: Experimental and finite element simulation”。引用本项目发现点 1 并评价：**Ma 等人研究了搅拌摩擦焊接头残余应力和疲劳裂纹的尺寸效应影响机理，结果表明根部区域会出现较大的残余压应力从而降低了疲劳裂纹扩展速率；并将研究结果进行对比。**【必备附件 1-2-5】

- ② 英国机械故障首席专家 **Andrew Ball** 教授, Fengshou Gu 教授和何晓聪教授在国际材料科学领域顶尖综述期刊 **Prog. Mater. Sci.** (IF=39.580) 发表论文“A review of numerical analysis of friction stir welding”。引用本项目发现点 3 并评价: Ma 等人通过计算残余应力强度因子预测了疲劳裂纹扩展速率; 计算了残余应力强度因子随裂纹路径的变化曲线, 利用局部 K_{res} 计算等效应力强度因子, 构建了预测疲劳裂纹扩展速率的主控曲线法并得到了试验验证。【必备附件 1-2-8】
- ③ 国际焊接学会主席、德国 Helmholtz-Zentrum Geesthacht 研究中心主任 Jorge F. dos Santos 教授和哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室主任黄永宪教授团队在国际材料科学领域顶尖综述期刊 **Prog. Mater. Sci.** (IF=39.580) “Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding” 引用本项目发现点 1 并 高度评价了焊接接头微观组织及残余应力对结构疲劳起裂和服役寿命影响的创新发现。【必备附件 1-2-7】
- ④ 西南交通大学长江学者陈辉教授团队在国际著名期刊 Metall. Mater. Trans. B 发表 “Residual Stress and Fatigue Strength of Hybrid Laser-MIG-Welded A7N01P-T4” 引用本项目发现点 1 并评价: Ma 等人证实了试样尺寸与形状对残余应力和疲劳裂纹扩展速率的影响。【必备附件 1-2-6】
- ⑤ 中科院金属所杰青马宗义教授团队在国际著名期刊 Eng. Fract. Mech. (IF=4.406) 发表 “High-cycle fatigue and fracture behavior of double-side friction stir welded 6082Al ultra-thick plates” 引用本项目发现点 1 和残余应力分布和演化规律并评价: Ma 等人研究了尺寸效应对残余应力分布的影响, 结果表明残余应力的峰值随着试样尺寸的减小而减小。【必备附件 1-2-4】
- ⑥ 西南交通大学长江学者康国政教授团队在疲劳领域顶级期刊 **Int. J. Fatigue** (IF=5.186) 发表论文 “The Kitagawa-Takahashi fatigue diagram to hybrid welded AA7050 joints via synchrotron X-ray tomography” 引用本项目发现点 1 并评价: 对于高强铝合金, 搅拌摩擦焊可以避免熔焊中的热撕裂和材料软化现象。【必备附件 1-2-3】
- ⑦ 四川大学杰青王清远教授团队在国际著名期刊 Mater. Sci. Eng. A (IF=5.234) 发表 “Micro-crack initiation and propagation in a high strength aluminum alloy during very high cycle fatigue” 引用本项目发现点 1 并评价: Ma 等对薄/中厚铝合金搅拌摩擦焊接的疲劳性能评估进行了系统研究并给出了断裂机理。【必备附件 1-2-2】
- ⑧ 澳大利亚 University of Wollongong 焊接领域专家 Li Huijun 教授团队等在国际著名期刊 Mater. Sci. Eng. A (IF=5.234) 发表 “Correlation of microstructure and mechanical properties in friction stir welded 2198-T8 Al-Li alloy” 引用本项目发现点 1 并评价: Ma 等人研究了 FSW 参数对 2198-T8 焊接材料力学性能的影响, 结果表明焊接接头力学性能随着搅拌头转速和行进速度的增加而减小。【必备附件 1-2-1】
- ⑨ 英国航空局(CAA)专家组主席 **Phil Irving** 教授在国际著名期刊 Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. (IF=3.459) 发表 “Recovery of fatigue life using laser peening on

2024 - T351 aluminium sheet containing scratch damage: The role of residual stress” 引用本项目**发现点 2** 并高度认可了本项目提出的**残余应力因子方法**。

⑩ 美国 University of Waterloo 的 Scott Walbridge 教授团队在国际著名期刊 Eng. Fract. Mech. (IF=4.406) 发表“Aluminum friction stir welds: Review of fatigue parameter data and probabilistic fracture mechanics analysis” 引用本项目**发现点 1** 并对本研究 FSW 结构中**残余应力分布规律**的发现及表征进行了肯定。

⑪ 美国 Wichita State University 的 H.M. Lankarani 教授在著名期刊 Results Phys. 引用本项目**发现点 2** 并评价：Guo 等证实了焊接结构断裂面存在二次断裂现象，较浅的韧窝表明塑性变形有限，原因可归结于动态再结晶和等轴二次相的出现。

⑫ 葡萄牙 Castro 教授和德国 M.Windisch 教授在 Theor. Appl. Fract. Mech. 发表文章“Fatigue and fracture behaviour of friction stir welded aluminium-lithium 2195”。引用本项目**发现点 1** 并评价：Ma 研究了搅拌摩擦焊 AA2195-T8 材料的疲劳裂纹扩展行为，结果表明母材的疲劳裂纹扩展行为与本研究结果相似，然而焊接材料的疲劳裂纹扩展速率低于本研究。

(2) 行业评价：

航空工业第一飞机设计研究院评价我们团队项目的应用价值：该项目成功探索建立了焊接整体壁板的损伤容限分析框架。采用了微小试样法得到了焊缝各性能，成功得到了焊接整体壁板的裂纹扩展特性和焊缝对于整体壁板损伤容限的影响机制。为焊接整体壁板在主承力结构上的应用奠定了坚实的基础，并为工程设计人员提供了损伤容限分析的手段和方法。

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）

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	Effect of welding parameters on mechanical and fatigue properties of friction stir welded 2198 T8 aluminum-lithium alloy joints	Engineering Fracture Mechanics	Y.E. Ma, Z.C. Xia, R.R. Jiang, WenYa Li	20113 年 114 卷 1-11 页	2013 年 8 月 8 日	Yu E Ma	Yu E Ma	马玉娥, 夏仲纯, 蒋若蓉, 李文亚	43	Web of Science 核心合集	是
2	Size effects on residual stress and fatigue crack growth in friction stir welded 2195-T8 aluminium - Part I: Experiments	International Journal of Fatigue	Y. E. Ma, P. Staron, T. Fischer, P. E. Irving.	2011 年 33 卷 1417-1425 页	2011 年 5 月 7 日	P.E. Irving	Yu E Ma	马玉娥	38	Web of Science 核心合集	是

3	Mechanical properties and fatigue crack growth rates in friction stir welded nugget of 2198-T8 Al-Li alloy joints.	Materials Science & Engineering A	Y.E. Ma, ZhenQiang Zhao, BaoQi Liu, WenYa Li	2013 年 569 卷 41-47 页	2013 年 2 月 26 日	Yu E Ma	Yu E Ma	马玉娥, 赵振强, 刘宝琪, 李文亚	33	Web of Science 核心合集	是
4	Size effects on residual stress and fatigue crack growth in friction stir welded 2195-T8 aluminium - Part II: Modelling	International Journal of Fatigue	Y. E. Ma, P. Staron, T. Fischer, P. E. Irving.	2011 年 33 卷 1426-1434 页	2011 年 5 月 10 日	P.E. Irving	Yu E Ma	马玉娥	16	Web of Science 核心合集	是
5	Dynamic fracture properties of 2024-T3 and 7075-T6 aluminum friction stir welded joints with different welding parameters	Theoretical and Applied Fracture Mechanics	Yanning Guo, Yu'e Ma, Fei Wang	2019 年 104 卷 102372	2019 年 9 月 24 日	Yu E Ma	Yanning Guo	郭妍宁, 马玉娥, 王	9	Web of Science 核心合集	是

								飞			
6	结构疲劳与断裂	西北工业大学出版社	殷之平	2012 年	2012 年	殷之平	殷之平	殷之平	无	CSSCI 中文社会科学引文索引数据库	是
7											
8											
合 计									139	Web of Science 核心合集	是

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
马玉娥	1	航空结构完整性所所长	教授	西北工业大学	西北工业大学	对科学发现点 1、2、3 做出了创新性贡献，具体包括：发现了焊接航空整体结构残余应力的尺寸效应及其存在的微观机理，构建了焊接参数-残余应力的关联关系；首次开创性提出了残余应力因子的概念，实现了焊接工艺参数-残余应力-强度的完整力学表征刻画。为代表性论 1-4 的第一作者，代表性论文 5 的通讯作者。【附件 1-1-1 至附件 1-1-5，附件 2-1】
殷之平	2	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	对科学发现点 1、2 做出了创新性贡献，具体包括：对本项目中疲劳寿命分析和试验研究等进行了相关技术指导，并建立了航空结构疲劳寿命预测模型。【附件 2-5、2-6、2-10、2-11 和 2-12】
赵振强	3	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	对科学发现点 1、2 做出了创新性贡献，具体包括：研究了残余应力对结构疲劳裂纹扩展性能的影响，构建了残余应力数值分析方法及残余应力强度因子分布规律，同时完成了典型航空结构疲劳寿命方法的相关试验验证。为代表性论文 3 中共同作者。【附件 1-1-3、附件 2-1】
郭妍宁	4	无	讲师	西安建筑科技大学	西北工业大学	对科学发现点 2、3 做出了创新性贡献，具体包括：对搅拌摩擦焊接机身整体壁板结构的重量、静强度、耐久性/损伤容限和维修性

						的技术指标进行了完善与验证。为代表性论文 5 共同作者，【附件 1-1-5，附件 2-1】

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	本项目在两项国家自然科学基金和中航工业各航空研究所合作多项课题资助下，历经近十五年的系统研究，取得了学术上的突破性进展，构建了先进焊接航空整体结构的疲劳寿命评估方法，主要创新点如下： 1.揭示了不同焊缝方向构型的残余应力完整分布规律，发现了焊接航空整体结构残余应力的尺寸效应及其存在的微观机理，构建了焊接参数-残余应力的关联关系。 2.发现了以航空服役不同应力场中异质和同质焊接不同区域微观机理与力学本构响应的关联机制；揭示了残余应力对力学断裂参数、疲劳裂纹行为影响机理研究。 3.创建了虑及残余应力的航空FSW焊接整体结构疲劳寿命主控曲线法，完成了焊接元件-焊接部件-焊接整体壁板的“金字塔”疲劳验证。 本项目提出的疲劳寿命方法，在疲劳顶级期刊等发表了SCI/EI 100多篇，被国内外该领域院士、专家、教授等顶级学者索引 139 余次。同时课题组把最新研究内容更新扩充并完成了《飞行器结构疲劳与断裂》教材，并完成了研究生和博士生的教学工作，为航空工业培养了 80 多名复合型硕士和博士专业领航新型人才和新鲜青春力量。

八、完成人合作关系说明

第二完成人殷之平是本人课题组的骨干成员，一直在焊接飞行器结构强度、疲劳寿命评估方法、多裂纹扩展领域合作研究。

第三完成人赵振强为本人指导研究生，在本人指导下完成了同质和异质航空铝合金FSW接头的力学性能及FCGR对比研究。

第四完成人郭妍宁为本人指导博士生，在本人指导下完成了铝合金搅拌摩擦焊结构残余应力及其力学性能研究。