

焊接与连接领域科学基金资助浅析与发展趋势

赖一楠¹, 武传松², 李宏伟¹, 曹健³

(1. 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部, 北京 100085; 2. 山东大学 材料科学与工程学院焊接研究所, 济南 250061; 3. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要:介绍了焊接与连接领域国家自然科学基金 2018 年度的申请情况, 并分析了该领域近三年的资助情况和资助项目成果情况及热点研究方向。对焊接新方法、新技术与新原理、界面冶金行为与调控机制、焊接结构设计与可靠性评估、电弧增材制造形性调控机制等方向的基础科学问题进行了梳理, 探讨了未来重点发展方向。

关键词:焊接与连接; 国家自然科学基金; 申请与资助

中图分类号: TG 47 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.2019400032

0 序 言

焊接与连接是国家自然科学基金委员会机械工程学科的重要领域, 是零部件成形制造的重要工艺方法, 是实现大到巨型结构小到微纳器件轻量化和功能化的主要途径之一, 对实现装备制造绿色环保和节能减排具有重要意义。

作为多学科交叉的技术科学, 焊接与连接涉及机械、冶金、材料、电力电子、力学、控制、工程热物理等学科。随着材料性能的不断提高, 服役环境越来越严苛, 焊接与连接领域的研究仍有大量亟待解决和研究的科学和技术创新问题。为此, 2018 年 11 月 15~16 日, 由国家自然科学基金委员会工程与材料科学部主办、山东大学材料科学与工程学院焊接研究所承办的第三届“轻质材料焊接与连接基础研究”中青年学者论坛在济南召开。会议聚集了国内焊接与连接领域的中国科学院院士、国家杰青、长江学者、优青等 180 余名专家学者, 对国内轻质材料焊接与连接领域的前沿科学问题和未来发展方向进行了广泛而深入的探讨。

文中对机械学科(E05)焊接与连接领域(E050803 和 E0509 涉及焊接与连接的项目)2018 年度项目申请和近三年(2016~2018 年度)项目资助和成果情况进行分析, 并着重对此次论坛研讨的重要成果进行综述, 以期对该领域科学的研究的发展有所助益。

收稿日期: 2019-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51842507)

1 2018 年度申请情况分析

1.1 总体申请情况

2018 年度焊接与连接领域总体申请情况如表 1 所示, 共接收各类项目申请 300 项(E050803 代码 278 项、E0509 代码 22 项), 占机械工程学科(E05)总申请量的比重为 4.61%。其中, 面上项目、青年基金和地区基金三大类项目共 289 项。

表 1 2018 年度焊接与连接方向项目申请情况

Table 1 Applications in welding and joining area in 2018

项目类型	申请项数	学科比重
面上项目	136	4.42%
青年基金	128	4.93%
地区基金	25	5.81%
杰青	3	4.11%
优青	4	3.33%
重点项目	2	2.53%
航天先进制造联合基金	2	4.88%
合计	300	4.61%

1.2 研究方向分布

面对青地三大类项目, 按照研究领域可归纳为焊接结构与可靠性、异种金属连接、焊接电弧与熔池行为、焊接冶金、多能场复合焊接、焊接过程控制、陶瓷/金属连接、摩擦焊、微纳连接、焊接增材、极端环境焊接和焊接无损检测等 12 个研究方向, 其申请量分布如图 1 所示。焊接结构与可靠性、异种金属连接、焊接电弧与熔池行为等方向申请量较多。

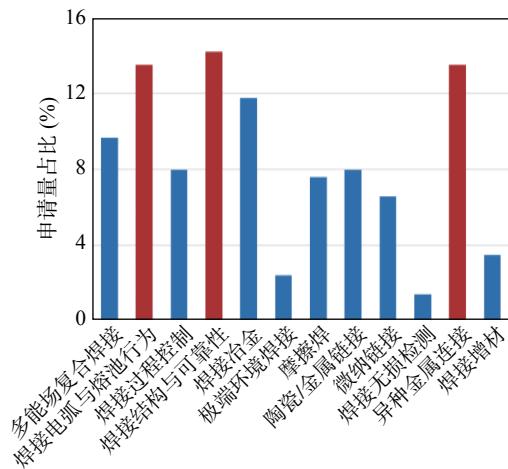


图 1 2018 年度焊接与连接领域项目申请的研究方向分布
Fig. 1 The distribution of research directions of the applications in welding and joining area in 2018

从焊接与连接的工艺方法进行分类, 其申请量分布如图 2 所示. 可见, 激光焊、电弧焊是 2018 年项目申请的热点, 钎焊和搅拌摩擦焊也具有较高申请量, 激光-电弧复合能场焊接发展势头较好.

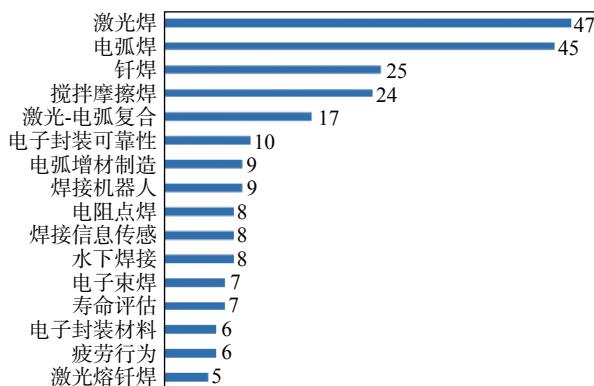


图 2 2018 年度焊接与连接领域项目申请的工艺方法分布
Fig. 2 The distribution of welding methods of the applied projects in welding and joining area in 2018

2 近三年资助情况

2.1 总体情况

近三年的年度资助项目情况如图 3 所示. 资助各项目 192 项 (E050803 代码 187 项、E0509 代码 5 项), 其中面上项目 77 项, 占比 40.1%, 青年基金项目 88 项, 占比 45.83%, 地区项目 16 项, 占比 8.33%. 年度资助项目数在 60 项以上且逐年增长, 共涉及依托单位 80 个, 年度资助项目涉及依托单位数 37~43 个, 其中立项数 10 项以上的依托单位为哈尔滨工业大学和上海交通大学.



图 3 2016~2018 年度焊接与连接领域资助项目数与直接经费
Fig. 3 The number and direct funds of the granted projects from 2016 to 2018

2.2 结题项目成果分析

近三年共结题 171 项 (E050803 代码 163 项、E0509 代码 8 项). 结题项目成果统计如图 4 所示, 主要包括科技奖励、学术论文、学术交流、知识产权等方面成果. 在科研获奖方面, 2016 年结题项目获得国家发明二等奖 2 项、科技进步二等奖 1 项, 2017 年结题项目获得国家发明二等奖 1 项、科技进步二等奖 3 项; 省部级科技奖励每年度在 7~9 项. 总体看来, 获得国家级、省部级科技奖励的数量逐年增加. 在学术论文方面, 近三年结题项目共发表 SCI 论文 974 篇, EI 论文共 921 篇. SCI 论文数与 EI 论文数之比逐年提高, 分别为 0.7, 0.97, 1.73, 反映出学术论文的质量在不断提高. 在学术交流方面, 近三年结题项目国际会议邀请报告的数量分别为 17 人次、11 人次和 7 人次. 在知识产权方面, 国内授权专利较多 (约 100 件/年度), 而国外专利授权均不超过 5 项, 技术创新成果有待更多地走出国门, 得到国际上的认可. 软件著作权数量增

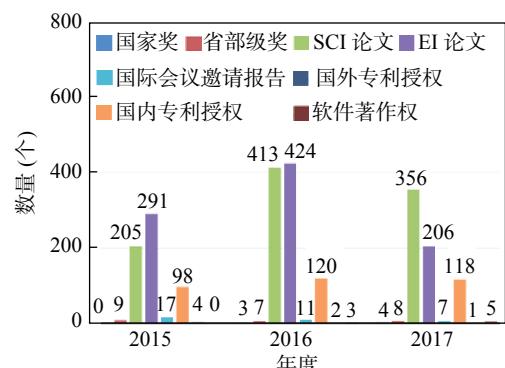


图 4 近三年结题项目成果
Fig. 4 Outcomes of projects finished in 2015, 2016 and 2017

幅明显,表明软件方面的工作得到了越来越多的重视。

2.3 研究热点分析

基于上述对近三年结题项目的分析,焊接与连接领域的热点方向可归纳为以下3个方面。

(1) 异种金属材料界面连接机理。主要关注铝/钢、钛/铝、铝/镁、铝/铜、TiAl/镍基高温合金、异种钛合金等异种金属材料连接的界面行为、强韧化、组织性能、冶金行为等问题。核心聚焦于以下问题:不同焊接工艺条件界面反应产物的生长规律与热力学动力学行为,建立反应产物生长模型;从材料、工艺、结构设计等多方面调控界面反应产物形态、种类与分布;焊接接头工艺-组织-性能的耦合模型,焊接工艺与微观组织性能定量关系的表征方法;反应产物对接头力学性能影响机制,异种金属焊接材料体系拓展,进一步优化异种金属的焊接质量。

(2) 多能场复合焊接熔池行为与控制。主要关注超声-激光、激光-电弧、搅拌摩擦-机械变形等复合能场下的熔池行为、界面形成机理、疲劳性能等问题。重点研究以下问题:可精确调节焊接能量及分布的新型焊接工艺和装备的基础理论研究,提高热过程、冶金过程、力场演变等的影响因素可调控性;宏-微-纳尺度的新型热源特别是复合热源对材料焊接/连接界面冶金行为和焊接效率的影响机制;多能场复合焊接成套技术与装备研发,为优质高效焊接制造提供理论和技术支持。

(3) 智能焊接基础。主要关注视觉感知、信息传感、多源信息融合、焊接机器人等问题。具体包括:焊接过程多元信息的精确感知、获取、实时处理及快速传感;焊接路径、焊接参数的自主规划及多因素影响条件下的实时调整;焊接热输入的精确模拟仿真、焊接变形的实时监控及防止对策;智能控制的焊接柔性制造系统(软件及硬件、多信息传感及融合、数据挖掘、知识建模等);焊接缺陷无损检测过程仿真、结果预测、检测工艺优化、缺陷本征信息快速提取、接头寿命评估;多场耦合非平衡焊接冶金机理、焊接接头组织成分性能模拟预测与调控。重视人工智能、大数据等技术对焊接技术发展的助推作用,特别是与多能场复合焊接结合实现焊接制造的智能化、信息化,为以焊接制造为核心的智能制造提供理论支撑。

3 轻质及异质材料焊接/连接前沿科学问题和未来发展趋势

针对铝合金、镁合金、钛合金、陶瓷材料、复合材料等轻质材料以及以轻质材料为基础的异质材料结构的焊接与连接前沿科学问题,此次中青年学者论坛进行了广泛而深入的研讨,在此基础上归纳了如下四个方向的前沿科学问题和未来发展方向。

3.1 焊接新方法、新技术与新原理

焊接技术的跨越式发展一直是由焊接新热源的开发与应用来直接推动的。自从上世纪90年代以来,以搅拌摩擦焊为代表的机械能连接新方法和以大功率激光及激光-电弧复合热源焊接为代表的复合能场连接方法获得了飞速发展。然而,多热源之间的相互作用及其对焊接过程和焊接质量影响机制尚不明确,急需开展更深入和更全面的焊接基础理论研究,以实现接头组织性能的精确诊控。

3.1.1 机械能连接方法

作为固态焊接/连接工艺,以搅拌摩擦焊、轴向摩擦焊、线性摩擦焊及摩擦铆焊为代表的机械能连接方法具有优质高效、环境友好、能量输入准确可控等优势,是航空航天领域轻质合金和高温合金零部件制造的重要技术。尽管近些年国内机械能连接研究与开发获得了长足发展,但与国际高水平研究相比,仍有一定差距,对高端装备焊接制造的理论支撑和核心技术支持还不够。因此,机械能连接方向需要重点关注以下基础科学问题^[1-2]。

(1) 高/低温-大应变作用下应力应变场-热场-塑性流变场的耦合机理与定量演变规律。

(2) 外加能场对接触界面状态、焊接区域的材料本构、塑性流变行为、组织演变和界面化合物层等的影响机制和作用规律。

3.1.2 热能连接新方法

实现热源精确可控是热能焊接制造技术发展的核心和关键。鉴于电弧焊接固有的能量密度低、可控精度差的缺点,近年来激光-电弧复合焊、多电弧复合焊、超声-电弧复合焊、超声复合钎焊等多能场复合的热能焊接新工艺方法获得了快速发展。为了获得更高质量的焊接接头,在多能场复合焊接基础理论研究需聚焦于以下科学问题^[3-5]。

(1) 电弧物理与熔池行为的数学/数值建模:电弧阴/阳极边界层内动量、能量、质量传递机理的跨尺度(宏-微观)理论体系的研究与完善;电弧-

熔池、熔池-小孔动态行为数学模型的建立与试验验证.

(2) 多热源对焊接过程和焊接区材料的耦合作用机制: 外加辅助能场作用下“电-磁-力-热”多物理场耦合作用机制; 外加能场对焊接过程和焊接区域材料组织演变的影响机制; 辅助热源对主热源的影响机理.

3.2 界面冶金行为与调控机制

焊接接头的冶金行为与界面反应调控决定了接头的组织状态和性能. 不同材料所适用的焊接/连接方法不同, 界面冶金行为差异显著, 其中的科学问题与发展方向也各不相同.

3.2.1 轻质金属

轻质金属在航空航天、轨道交通、汽车等领域具有广泛的应用, 其自身或与异种轻质金属材料的连接技术是进一步扩大工程应用范围的关键. 未来应重点关注以下基础科学问题与关键技术^[6-7].

(1) 摩擦焊接过程的焊接冶金机理、界面行为及其演化规律, 以及界面焊合的热-力学环境特性.

(2) 高能束焊接过程的传热传质行为特征, 熔池与匙孔行为耦合的物理机制、接头组织演变规律、数理模型、质量表征、检测与控制.

(3) 钎焊过程的新型钎剂与钎料研发、氧化膜破除机制、外加能场对破膜、润湿和界面反应的调控机制.

(4) 高温轻质金属材料(金属间化合物)钎焊的高温钎料或中间层成分设计、连接界面冶金行为与组织调控机制等.

3.2.2 陶瓷材料

陶瓷材料包括结构陶瓷和功能陶瓷, 在航空航天、机械、电子、能源等领域广泛用作耐高温、耐磨、特殊功能材料, 其自身及其与金属材料的高质量连接是其扩大工程应用范围亟待突破的瓶颈, 重点应解决以下基础科学问题与关键技术^[8-9].

(1) 针对界面反应控制难题, 研究界面反应产物演化规律与精确表征, 界面反应与接头力学性能的关联关系, 接头连接质量的主控因素和异质陶瓷连接的界面反应机理与连接机理.

(2) 针对残余应力调控难题, 研究基于材料、结构和温度匹配的残余应力调控新理论与新方法, 接头中间层设计准则与复合钎料设计新方法; 表面/界面结构调控对接头残余应力的影响机制与接头结构设计, 新型低温连接方法和应力测试方法.

3.2.3 复合材料

复合材料包括陶瓷基、树脂基、金属基复合材料, 在航空航天、汽车、电子等领域广泛用作耐高温、耐腐蚀、轻质结构材料, 使用中不可避免的会遇到复合材料自身及其与金属材料的连接问题. 近年来, 针对复合材料焊接与连接的研究增多, 但下列基础问题仍需深入探究^[10-11].

(1) 界面原子扩散与反应行为特征, 界面作用过程和机理.

(2) 复合钎料设计准则, 复合钎料或强化相对润湿、界面反应及产物结构的影响机制.

(3) 基于表面金属化、表面活化等低温连接方法, 基于高性能接头目标的界面反应调控.

(4) 残余应力的测试方法、分布及大小及其精准调控.

3.2.4 微纳尺度的材料连接

微纳连接包括微米尺度和纳米尺度的材料连接, 涉及到纳-纳、纳-微、纳-宏、微-微、微-宏、纳-微-宏跨尺度的材料或元器件互连与集成, 是微纳电子元器件及系统、微/纳光机电系统等制造的关键技术之一. 微纳米尺度材料连接的基础科学问题与关键技术主要为以下 5 个方面^[12-13].

(1) 获取定点定位可控微区热源的新方法, 微区热源对微纳材料和微纳连接的作用机理及检测.

(2) 微纳尺度内能量场与材料之间作用的特殊规律, 如纳米尺度内冶金反应、熔体流动、溶解与扩散、熔化与凝固的尺寸效应等.

(3) 微纳尺度连接界面特性、团簇结构演变、元素迁移、物理与力学作用, 微纳尺度连接的异质界面设计、界面形成规律与冶金结合机理及其调控.

(4) 新型高可靠纳米连接材料研制及连接方法, 纳米材料在连接过程的演变规律.

(5) 基于微纳连接的新型功能器件结构设计、制造及其可靠性评估.

综上所述, 轻质材料焊接/连接界面冶金行为及其调控的未来研究方向应集中在以下几点.

(1) 轻质金属及其复合材料近/等母材强度焊接/连接: 焊接/连接/修复新方法新工艺、表面氧化物有效去除、连接材料和界面的设计、界面冶金行为/组织性能调控.

(2) 陶瓷及复合材料的焊接/连接: 新型耐高温焊接材料研制、低温低应力连接方法、陶瓷表面微结构设计及润湿与界面冶金行为、残余应力检测.

(3) 微纳尺度连接:新热源和新理论、纳米尺度定点定位操控、新型纳米连接材料/微纳结构、纳米焊点界面冶金与评测、微纳焊点和器件可靠性评估.

3.3 焊接结构设计与可靠性评估

随着装备向大型化、高参数化、新材料化、长寿命化发展,对焊接结构的性能需求越来越高,对焊接结构的设计方法及其可靠性评估提出了更高的要求.焊接接头作为重大装备结构可靠性最薄弱的环节,正面临长寿命和高可靠性的重大需求和严峻挑战,亟需针对下列共性科学问题进行深入研究.

3.3.1 焊接接头多尺度仿真与性能表征

焊接接头的性能取决于接头的微观组织,焊接工艺决定了焊接接头微观组织的尺寸、面貌和分布等,因此,构建工艺-组织-性能定量关系的多场多尺度耦合模型,以定量表征焊缝微观组织和性能,是实现对焊接接头性能调控的有效手段^[14-15].

(1) 焊接接头微观力学模型:位错与晶粒/第二相粒子作用关系;强化相演变规律及对性能影响规律;晶粒长大及其对焊接接头性能的影响.

(2) 焊接接头性能多场多尺度仿真:焊接接头微观组织演变规律模拟;焊接接头性能微观尺度和介观尺度计算;焊接接头性能晶体塑性计算.

3.3.2 焊接残余应力及变形的精准表征与高效预测

焊接应力及变形模拟涉及多场、多维和多参数的耦合计算,核心是非线性的瞬态热-力耦合数值算法、精确的材料热物性参数、焊接热源的定量表征等^[16-17],关键问题是热源数理模型高精度化和高可靠性、多场与多物理过程的集成.

(1) 焊接动态热源与材料非线性精准数理建模.

(2) 跨尺度及多物理场耦合模拟基本理论与方法.

(3) 复杂结构非线性大梯度应力与变形的精准检测与高效预测.

3.3.3 焊接结构的强度评价与设计理论

在复杂环境中运行的焊接结构承受高温高压、腐蚀、氧化等严酷的环境作用,接头局部性能会发生变化.因此考虑环境损伤(力损伤、热损伤、腐蚀损伤等)及其交互作用,合理评价焊接结构强度将为结构的安全可靠运行提供重要的基础理论^[18-20].

(1) 蠕变/疲劳/氧化/腐蚀作用下焊接接头失效机理:复杂环境交互影响机制;多尺度多维度微观性能表征;复杂环境下焊接接头损伤演变模型.

(2) 复杂环境下焊接接头强度的评价理论:复杂环境交互损伤的评价方法;失效机制与能量变化

定量的关系表征;复杂环境交互损伤接头强度的评价模型.

(3) 基于加速试验的焊接接头长寿命预测验证方法:基于组织演变的加速寿命试验分析模型;复杂环境下加速寿命试验仿真及优化;高可靠焊接接头长寿命预测的验证.

3.3.4 焊接结构可靠性评估与寿命预测理论

焊接结构缺陷检测时很可能发生漏检或微小缺陷无法检测问题,此缺陷在高温环境、疲劳载荷或交变载荷与残余应力共同作用下,是结构破坏的主要部位,因此,在耦合力场作用下焊接结构的可靠性评估与寿命预测研究是提高结构安全性,减少经济损失的主要手段和关键^[21-22].

(1) 耦合力场交互作用下裂纹扩展表征:服役环境-载荷-残余应力交互作用机制;耦合力场交互损伤演变规律;多力场条件下裂尖损伤的解析表征.

(2) 焊接结构可靠性评估与寿命预测的精准化方法:耦合力场对裂纹生长行为的表征;多裂纹交互影响机制;考虑多因素影响的寿命预测模型.

(3) 在役焊接结构材料退化性能微损伤评价方法:微小试样断裂性能测试方法;微小试样性能表征的尺寸效应;微试样与标样之间转化关系解析.

3.3.5 焊接结构制造全流程的模拟仿真技术

材料焊前状态、工件成形、结构装配、焊接生产等因素均会影响焊接结构的焊接变形与服役寿命.因此,开展焊接结构制造全流程的仿真研究对结构长期稳定运行的可靠性具有重要意义.

(1) 多工序多工艺仿真初始状态与约束条件确定方法.

(2) 材料模型与自适应热源模型构建、复杂结构简化方法构建与评价.

(3) 加工历程仿真模型转换与映射算法研究.

3.3.6 焊接制造/监控智能化与全寿命周期设计

在焊接制造过程中建立耦合工艺-组织-性能的焊接接头评价系统,并反馈焊接制造环节,实时调整焊接工艺,保证设计要求,实现精准化设计.

在焊接结构服役运行环节中,实时监控焊接结构运行参数(热、力及环境等参数)和缺陷产生,与完整性评估专家系统实现信息互联,为焊接结构安全可靠性评估提供实时信息,从而在保证安全裕度的前提下,实现焊接结构的精准评估.

3.4 电弧增材制造形性调控机制

电弧增材制造是以电弧作为热源、金属丝材作

为填充材料,在对构件三维模型进行分层切片、路径规划之后,逐层堆积、成形构件的一种新工艺,是从焊接熔敷工艺演化而来的.作为一种金属增材制造手段,电弧增材制造具有成本低、生产效率高、材料质量好的特点,在各行各业的大尺寸金属零件制造中具有广阔应用前景.但国内开展研究的时间短,基础研究薄弱且不系统,仍有大量技术问题和理论问题亟待解决.一方面,在增材模式下,成形金属会经历多次复杂的热循环,热过程与单一的铸、锻、焊加工方式相差很大,具有独特的微观组织演变特点,也增加了对其组织及性能的调控难度;另一方面,多层金属沉积时伴随的非平衡产热、散热动态过程,会影响后续增材熔池的流动与凝固行为,进而降低了单元成形金属的尺寸均匀性.具体的基础科学问题与关键技术主要有以下几点^[23].

(1) 电弧增材制造数理建模:组织凝固行为与组织性能耦合关系的预测与控制,电弧增材过程中多道次高温作用对材料微观组织和性能的影响.

(2) 面向电弧增材制造特性的丝材设计与制备技术.

(3) 复杂空间曲面构件电弧增材制造成形策略及路径规划方法:基于传感器、数据采集和分析、动态建模等的规划、检测和控制系统,构件尺寸与质量在线监控策略与方法.

(4) 异种材料、梯度材料电弧增材制造工艺及其界面结合机理与控制.

(5) 结合增/等/减材工艺优势的复合制造系统:多工艺之间能量流、误差流和应力流的传递机理;精度、效率和性能等多目标约束条件下的融合制造全流程规划方法,工艺参数优化匹配与协同控制新原理与新技术,全流程控制和面向对象的多工艺融合原位制造模式.

除了对电弧增材制造的形-性调控基础问题探索,其所衍生的产品综合质量及应用问题也同样非常值得关注.如电弧增材构件内部的残余应力分布及控制问题,增材结构内部缺陷在线检测、预防及修复问题,面向复杂空间曲面结构的智能轨迹规划策略,可实现大型构件电弧增材制造的高可靠性集成装备以及制定成套的电弧增材制造技术标准与评价体系等.

总体上说,电弧增材制造需要在以下几方面加大研究力度,形成软硬件技术支撑.

(1) 完善增材基础理论,明晰增材制造过程中

的热、质、力传输机制等物理本质问题,建立多场耦合下电弧、熔池与再热金属的全流程仿真模型,揭示组织及缺陷的演变机理.

(2) 发展电弧增材新方法,加强对多能场(电弧、超声、电磁、激光等)增材制造新工艺以及构件形性协调控制的创新设计和基础研究,改善服役构件的微观组织特征与宏观性能表现.

(3) 加强增材过程控制,实现对增材成形全过程的在线监测(热源、熔滴、熔池、构件形态、缺陷等)及一体化控制.

(4) 拓展增材材料体系,加强对异种材料、梯度材料的增材制造工艺、丝材制备及成分调控、沉积层界面结合机理等拓展性研究.

(5) 加快装备研发及标准制定进程,发挥电弧增材技术优势,发展大型构件的电弧增材制造专用集成装备,同时加快制定行业技术标准步伐,建立完整的标准与评价体系.

4 总结与展望

文中浅析了近三年焊接与连接领域国家自然科学基金资助情况,分析了研究热点.梳理了焊接新原理、新方法、新工艺,焊接界面冶金行为及调控,焊接接头结构设计与可靠性评估和电弧增材制造等四个方向前沿科学问题和未来发展方向.希望在焊接与连接领域学者共同努力下,发挥科学基金导向作用,推动轻质及异质材料焊接工艺-装备-材料-结构-设计的协同研究,引领国内焊接与连接领域未来的可持续发展,以满足国家重点行业和重大工程对轻质/异质材料焊接与连接技术的战略需求.

致 谢:感谢山东大学秦国梁教授、陈姬副教授、清华大学邹贵生教授、刘磊副教授、天津大学徐连勇教授、哈尔滨工业大学闫久春教授、田艳红教授、北京工业大学陈树君教授、上海交通大学李永兵教授等在撰写过程中给予的支持.

参考文献:

- [1] Singh K, Singh G, Singh H. Review on friction stir welding of magnesium alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2018, 6: 399–416.
- [2] 马宗义,商 乔,倪丁瑞,等.镁合金搅拌摩擦焊接的研究现状

- 与展望[J]. *金属学报*, 2018, 54(11): 1597–1617.
- Ma Zongyi, Shang Qiao, Ni Dingrui, et al. Friction stir welding of magnesium alloys: a review[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(11): 1597–1617.
- [3] Ni Z L, Ye F X. Ultrasonic spot welding of aluminum alloys: a review[J]. *Journal of Manufacturing Process*, 2018, 35: 580–594.
- [4] 姚燕生, 王园园, 李修宇. 激光复合焊接技术综述[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(9): 16–20, 24.
- Yao Yansheng, Wang Yuanyuan, Li Xiuyu. Review on laser hybrid welding technology[J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(9): 16–20, 24.
- [5] 赵耀邦, 成群林, 徐爱杰, 等. 激光-电弧复合焊接技术的研究进展及应用现状[J]. *航天制造技术*, 2014, 4: 11–14.
- Zhao Yaobang, Cheng Qunlin, Xu Aijie, et al. Recent advances in research and application of laser-arc hybrid welding technology[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2014, 4: 11–14.
- [6] Wan L, Huang Y X. Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys and steels: a review[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 99(5–8): 1781–1811.
- [7] 齐铂金, 范霖康, 刘方军. 脉冲束流电子束焊接技术综述[J]. *航空制造技术*, 2015, 11: 26–30.
- Qi Bojin, Fan Jikang, Liu Fangjun. An overview of pulsed electron beam welding technology[J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2015, 11: 26–30.
- [8] Chen H Y, Cao J, Song X G, et al. Contributions of atomic diffusion and plastic deformation to the plasma surface activation assisted diffusion bonding of zirconium-based bulk metallic glass[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(21): 211602.
- [9] Song X G, Cao J, Chen H Y, et al. Brazing TiAl intermetallics using TiNi-V eutectic brazing alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 551: 133–139.
- [10] Yang Z W, Zhang L X, He P, et al. Interfacial structure and fracture behavior of TiB whisker-reinforced C/SiC composite and tial joints brazed with Ti-Ni-B brazing alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 532: 471–475.
- [11] Xiong H P, Chen B, Pan Y, et al. Joining of Cf/SiC composite with a Cu-Au-Pd-V brazing filler and interfacial reactions[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, 34(6): 1481–1486.
- [12] Zhou Y. 微连接与纳米连接[M]. 田艳红, 王春青, 刘威, 译. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [13] Lin L C, Liu L, Musselman K, et al. Plasmonic-radiation-enhanced metal oxide nanowire heterojunctions for controllable multilevel memory[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(33): 5979–5986.
- [14] Xu J J, Gilles P, Duan Y G. Simulation and validation of welding residual stresses based on non-linear mixed hardening model[J]. *Strain*, 2012, 48(5): 406–414.
- [15] Li S, Ren S D, Zhang Y B, et al. Numerical investigation of formation mechanism of welding residual stress in P92 steel multi-pass joints[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 244: 240–252.
- [16] Zhao L, Xu L Y, Nikbin K. Predicting failure modes in creep and creep-fatigue crack growth using a random grain/grain boundary idealised microstructure meshing system[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 704: 274–286.
- [17] Zhao L, Xu L Y, Gao Z F, et al. Characterization crack growth behavior in creep-fatigue loading conditions through different specimen geometries[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 145: 246–257.
- [18] 王东坡, 龚宝明, 吴世品, 等. 焊接接头与结构疲劳延寿技术研究进展综述[J]. *华东交通大学学报*, 2016, 33(6): 1–14.
- Wang Dongpo, Gong Baoming, Wu Shipin, et al. Research review on fatigue life improvement of welding joint and structure[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2016, 33(6): 1–14.
- [19] Ye Y, Zou G S, Long W M, et al. Diffusion brazing repair of In738 superalloy with crack-like defect: microstructure and tensile properties at high temperatures[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, 24(1): 52–62.
- [20] Li H Z, Jing H Y, Xu L Y, et al. Life, dislocation evolution and fracture mechanism of a 41Fe-25.5Ni-23.5Cr alloy during low cycle fatigue at 700 degrees C[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 119: 20–33.
- [21] Wu D Q, Jing H Y, Xu L Y, et al. Enhanced models of creep crack initiation prediction coupled the stress-regime creep properties and constraint effect[J]. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2019, 74: 145–159.
- [22] Wu D Q, Jing H Y, Xu L Y, et al. Analytical approaches of creep crack initiation prediction coupled with the residual stress and constraint effect[J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2018, 71: 1–15.
- [23] 王凯博, 吕耀辉, 徐滨士, 等. 基于焊接的镍基高温合金增材再制造技术综述[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2016, 30(1): 81–86.
- Wang Kaibo, Lv Yaohui, Xu Binshi, et al. Review of the additive remanufacturing technology of Ni-based superalloy based on welding[J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2016, 30(1): 81–86.

第一作者简介: 赖一楠, 女, 1971年出生, 博士, 教授.

Email: laiyn@nsfc.gov.cn