

引文格式:张丽萍,谢吉林,余曦,等.铝/钢异种金属电磁脉冲焊研究新进展[J].航空制造技术,2022,65(21):78-86.

ZHANG Liping, XIE Jilin, YU Xi, et al. Development of electromagnetic pulse welding of Al/Fe dissimilar metals[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(21): 78-86.

铝 / 钢异种金属电磁脉冲焊研究新进展*

张丽萍^{1,2}, 谢吉林³, 余曦², 文金鹏², 尹立孟², 陈玉华³, 张鹤鹤², 张龙²

(1. 北京航空航天大学, 北京 100191;

2. 重庆科技学院, 重庆 401331;

3. 南昌航空大学江西省航空构件成形与连接重点实验室, 南昌 330063)

[摘要] 铝/钢异种金属焊接结构具有比强度高、耐蚀性好、综合力学性能优异等特点,在航空航天、核电能源、轨道交通、电子电器等行业应用广泛。但由于铝/钢异种金属在物理、化学、冶金等方面的性能差异显著,导致二者的优质连接面临极大的挑战。电磁脉冲焊接技术是一种固相焊接方法,能够有效克服异种金属由于性能差异带来的焊接问题,目前被广泛应用于铝/钢等异种金属的焊接。本研究简述了铝/钢异种金属焊接中存在的问题,电磁脉冲焊接技术的焊接原理和工艺参数。从工艺研究、设备优化、接头性能、界面形貌与结合机理、数值模拟和多种焊接方法复合方面对电磁脉冲焊接技术新进展进行了分析,对今后技术发展提出了相应的建议。

关键词: 铝/钢; 异种金属焊接; 电磁脉冲焊(EMPW); 工艺参数; 研究进展

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.21.078



张丽萍

工程师, 博士研究生, 主要研究方向为异种材料先进连接技术。

* 基金项目: 国家自然科学基金(51865035、52105355、52175288); 重庆市自然科学基金面上(cstc2021jcyj-msxmX0337); 江西省科技合作专项(20212BDH81007)。

随着我国航空航天制造技术的发展,新型飞机、火箭对整体式、高精度、轻量化的要求进一步增加^[1-2]。轻量化设计分为结构轻量化和材料轻量化。材料轻量化主要采用强度高、耐蚀性好、耐热性高的轻质铝、镁、钛等合金及复合材料等代替传统钢材。目前我国航天器、大飞机结构重量的55%~85%是轻合金材料,如发动机结构部件、机翼骨架、起落架、机身支撑结构等^[2-4]。材料轻量化已成为航空航天领域先进制造技术的重要发展方向,但仍有很多关键部件采用先进高强钢进行制备,如飞行器起落架、储存流体介质的压力容器、燃料储箱、气瓶、铝/钢传动轴类装配等^[3-5]。因此需要满足铝合金等轻质材料与传统金属材料,即钢及其合金的连接^[6-8]。实现铝/钢等异种金属材料的良好连接对提高产品轻量化、

实现工业化生产具有重要意义,但铝/钢性能差异大^[9],焊接性极差,传统焊接方法很难实现优质连接。电磁脉冲焊接技术(Electromagnetic pulse welding, EMPW)是在电磁成形基础上发展起来的一种新型特种连接技术,集成了高速电磁成形和固相连接技术的优点,尤其适用于异种金属材料的冶金连接^[10-11]。本文简述了铝/钢异种材料焊接技术的发展、原理与工艺,重点介绍了铝/钢电磁脉冲焊接研究的新进展。

1 铝 / 钢焊接相关研究

1.1 铝 / 钢异种金属焊接中存在的主要问题

铝/钢两种金属的物理和化学性能相差非常大^[9,12-13]。图1^[14]为铝/钢二元合金相图。可以看到,钢的熔点在1500℃以上,铝的熔点在

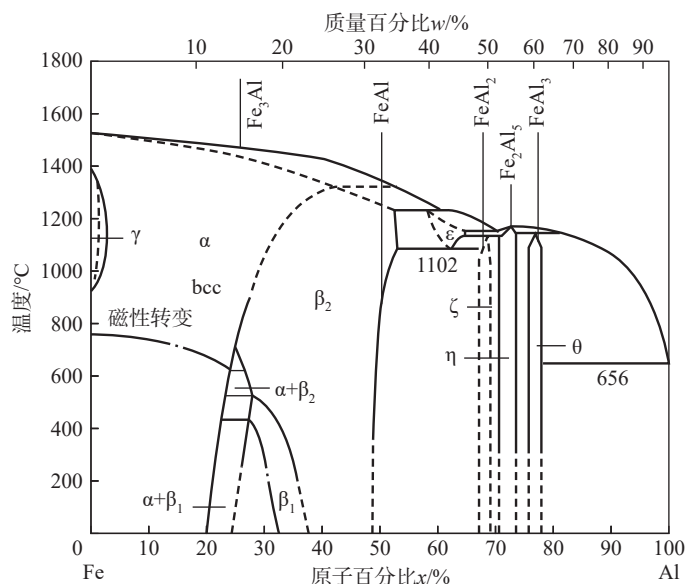


图1 铝/钢二元合金相图^[14]
Fig.1 Binary Al/Fe phase diagram^[14]

660℃左右,熔点相差近840℃,当铝完全熔化时钢还尚未熔化;钢在固态铝中的溶解度非常小,室温下钢基本不溶于铝,当温度介于225~600℃时,固溶极限仅为0.01%~0.022%,二者还会形成一系列的脆而硬的金属间化合物,如FeAl、FeAl₂、FeAl₃、Fe₂Al₅、Fe₂Al₇及Fe₄Al₁₃等。这些脆而硬的金属间化合物会严重降低铝/钢接头的力学性能。同时,钢密度约7.8 g/cm³,铝密度约2.7 g/cm³。铝液由于密度的差异浮于钢液上,导致凝固后接头成分不均匀。此外,钢的导热系数为80 W/(m·K),铝的导热系数237 W/(m·K),焊接过程中二者的膨胀量以及焊后冷却过程中的收缩量差异较大,引起焊接接头变形大,残余应力大,进而易导致接头产生裂纹。同时,高温下铝极易氧化,形成熔点高达2073℃的Al₂O₃氧化膜,阻碍液态铝/钢结合,在焊缝处产生夹杂。因此铝与钢异种金属的焊接性极差。

1.2 铝/钢异种金属常见焊接方法

根据上述分析,铝与钢异种金属的焊接性极差。如何克服铝/钢焊接技术难题,更好利用铝合金质轻而钢材强度大的性能特点一直是焊接

领域的研究热点。近年来,很多学者采用多种方法对铝和钢等异种金属间的连接工艺进行研究,本节对常用的铝/钢异种金属焊接方法进行简要的介绍。

1.2.1 熔焊

铝与钢异种金属熔化焊时易产生金属间化合物,导致焊接接头的力学性能恶化,因此传统的电弧熔化焊很难实现铝与钢异种金属的优质连接。近年来,以激光、电子束等高能束焊接技术为代表的先进焊接技术在铝/钢异种金属的焊接中得到了较多应用,但同样存在金属间化合物的控制难题。

1.2.2 钎焊

钎焊是利用比铝/钢熔点温度低的钎料,将钎料和铝/钢同时加热到超过钎料熔点但低于铝熔点的温度,利用钎料熔化润湿母材填充铝/钢间隙进行连接的一种焊接方法。钎焊的优点是热输入小,焊后变形小,但接头力学性能较低^[15]。

1.2.3 熔钎焊

由于铝/钢的熔点不同,一般钢材是不熔化的,采用熔钎焊使铝/钢焊接接头兼备熔焊和钎焊的特点。将热源置于低熔点的铝一侧,通过熔

化铝润湿高熔点钢发生扩散反应实现连接。铝和钢两种金属材料熔点相差较大,而铝与钎料熔点相差不大,所以焊接过程在铝侧主要是熔焊,在钢侧主要是钎焊。熔钎焊目前主要有电弧熔钎焊、激光熔钎焊、电子束熔钎焊、复合熔钎焊等方法。相比其他焊接方法,熔钎焊可以减少焊缝中钢的熔化量,抑制铝/钢金属间化合物的形成,从而在一定范围内提高接头性能^[15]。

1.2.4 压力焊

压力焊是通过施加压力,使焊件结合面之间发生塑性变形,实现焊件原子间扩散连接的一种方法。目前常用的压力焊有爆炸焊^[10-11]、电阻焊^[13]、扩散焊^[16]、摩擦焊^[12-13,15]、电磁脉冲焊等。以爆炸焊、电磁脉冲焊为代表的压力焊接技术具有焊接效率高、焊接热输入小等优势,在控制异种金属焊接界面脆性相形成、防止焊接接头冶金缺陷产生等方面具有显著优势。

综上,传统熔化焊无法避免铝/钢焊接金属间化合物的问题,钎焊接头力学性能较低,熔钎焊是介于钎焊与熔化焊之间的一种焊接工艺,接头性能提高范围有限。压力焊属于固相焊接的范畴,在控制接头冶金缺陷方面优势明显。特别是近年来快速发展的电磁脉冲焊接技术,由于焊接速度快、能量易精确控制、焊接热输入小、无热影响区、材料不熔化等特点,能够大幅减少金属间化合物、消除因金属熔化产生的应力、显著提高接头强度和耐蚀性能等优点,易于实现机械化和自动化,是目前铝/钢焊接工艺研究的热点之一。

2 电磁脉冲焊原理及工艺参数

2.1 电磁脉冲焊原理

目前,电磁脉冲焊接主要有板件焊接和管件焊接两种类型^[7,17],其基本工作原理如图2所示。交流电通过变压器升压、整流、输出直流电对电容器组进行充电,至一定电压时接

通放电电路,产生高频衰减振荡电流,电流经过线圈产生强磁场,使靠近线圈一侧金属外表面产生涡流。该涡流磁场与原脉冲磁场方向相反,在相斥电磁力作用下,靠近线圈一侧的飞板高速撞击基板,使两种不同的金属紧密结合在一起,实现永久连接^[18-19]。

2.2 电磁脉冲焊接系统及焊接等效电路

电磁脉冲焊接系统主要由脉冲发生器、控制柜(指示灯、指示面板、电源柜)、工作站和远程操作面板等组成^[20],其焊接及控制系统等效电路图分别如图3和4所示。碰撞能量控制着焊接材料的可焊接厚度范围,决定碰撞能量大小的关键部件包括电容组、控制系统、高速开关、成形线圈。电容组为电能的储备部件,要求能在0.1 μs内将储备电能释放出去,形成极速衰减交变电流。控制系统可加设检测装置,测得实际放电波形并得到放电时间、频率等数据。

2.3 电磁脉冲焊主要工艺参数

电磁脉冲焊接技术涉及电磁学、动力学、材料学等多学科交叉,其工艺过程涉及电场、磁场、温度场和结构场等的多场耦合,各场之间相互影响,最终对焊接接头的综合性能产生影响,其关系如图5所示。由于电磁脉冲焊接过程仅在微秒级时间范围内,很难进行其结构场力学、温度场测量与监控,目前多辅以数值模拟及计算分析。焊接相关参数包括设备参数、工艺参数和工件参数,不同类别所含主要参数如图6所示。为获得良好的冶金结合,必须合理选择焊接参数。设备和工件材料确定后,决定电磁脉冲焊接接头质量的主要为焊接工艺参数。目前国内生产的电磁脉冲焊接设备可提供、供调节的焊接工艺参数较少,一般仅为焊接电压、工作间隙,而实际上电流、频率、磁压、空气间隙、冲击速度和冲击角

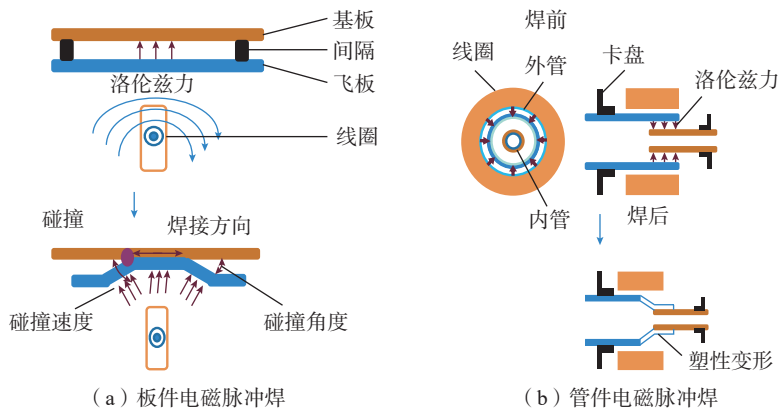


图2 电磁脉冲焊原理示意图

Fig.2 Schematic illustrations of electromagnetic pulse welding

等均对接头综合性能产生影响^[21-24]。

如图4所示,输入电流 I 和放电电压 U 便于输入和控制,工件间隙 d 便于精确测量,相关研究文献较为普遍。焊接电流 I 决定了磁场大小,最终决定了焊接磁压力^[24]。电流 I 值越高,用于加速工件的磁场和磁力就越高,在一定范围内,随着 I 值的提高,焊接接头强度增加;但 I 值过高,导致焊接接头严重变形,无法实现良好焊接;适合的放电电压 U 对于获得良好的接头质量非常重要。随着电压的升高电磁力明显增大^[25]。其他参数不变的情况下,在一定范围内增大放电电压可以增加工件的碰撞动能,提高焊接接头强度。但放电电压过高会导致过渡层增厚,降低焊接接头的可靠性;工件间隙是待焊两工件间保持的距离,存在最佳范围,过小或过大都无法在碰撞时达到最大速度。

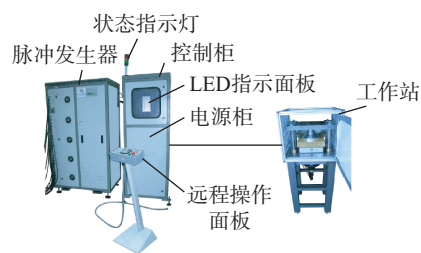


图3 电磁脉冲焊接系统

Fig.3 EMPW system

电磁脉冲焊接一般发生在10~20 μs,焊接频率 f 、磁压 P (4)、碰撞速度 v 、碰撞角度 α 、碰撞温度 T 等工艺参数难以实测或跟踪,目前通常是根据电磁脉冲相关理论及数值模拟进行计算。其中频率 f 对焊接接头的影响十分复杂^[23]。感应电流穿透工件的深度取决于工件材料的电导率和放电脉冲的频率 f ,而频率 f 的获得与工件材质与工件尺寸均有内在相关性,同时频率 f 影响碰撞速度及焊后飞板(图4)的几何形状^[18];

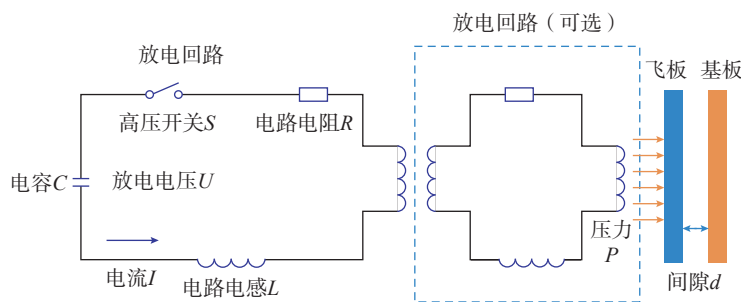


图4 电磁脉冲焊等效电路图

Fig.4 Equivalent circuit diagram of EMPW system

磁压 P 使飞板 / 外管以一定速度加速, 撞击基板以获得冶金结合。不同飞板导电性不同, 获得的磁压力也不同, 只有适合的磁压力才能成功实现焊接^[26]; 碰撞速度 v 和碰撞角度 α 示意如图 7 所示, 高速碰撞在工件的界面处引起塑性变形并起到去除两工件接触表面污染物或氧化物层的作用。当碰撞速度超过声速时, 可获得高质量的焊接^[21]; 较小碰撞角度可获得较高焊缝质量, 在一定范围内碰撞角度随着加速距离的增加而增加, 可获得高质量焊接接头^[23], 目前研究中碰撞角度大多选择 $5^\circ \sim 25^\circ$ 之间^[21, 27]。由于上述参数难以直观测量, 主要依靠大量重复性试验, 借鉴其他焊接方法计算、电磁学基础理论计算及不同手段的模拟研究推测, 缺乏可靠的理论指导与高效的在线监控。

3 铝 / 钢异种金属电磁脉冲焊研究新进展

目前, 国外已将电磁脉冲焊接技术应用在核能工程、汽车制造、航空制造等多个领域^[28]。我国的电磁脉冲焊接技术研究起源于 20 世纪 80 年代, 高等院校和科研机构相继开展了相应研究, 但其工业化应用进展相对较慢。本节归纳分析了近几年国内外铝 / 钢电磁脉冲焊接技术在焊接工艺、焊接设备、焊接界面形貌与结合机理、接头综合力学性能、数值模拟与仿真及多种焊接方法复合等方面的研究新进展。

3.1 工艺研究

影响电磁脉冲焊接接头的因素很多, 包括设备、工艺和材料本身的固有属性。近年来, 上述问题均取得了不同程度的研究进展。

在工艺方面, Geng 等^[29] 采用不同电磁脉冲焊工艺得到铝合金 AA5182 与高强度低合金钢 HC340LA 焊接接头, 揭示了放电能量对焊接接头中间层组织演化的影响。结果

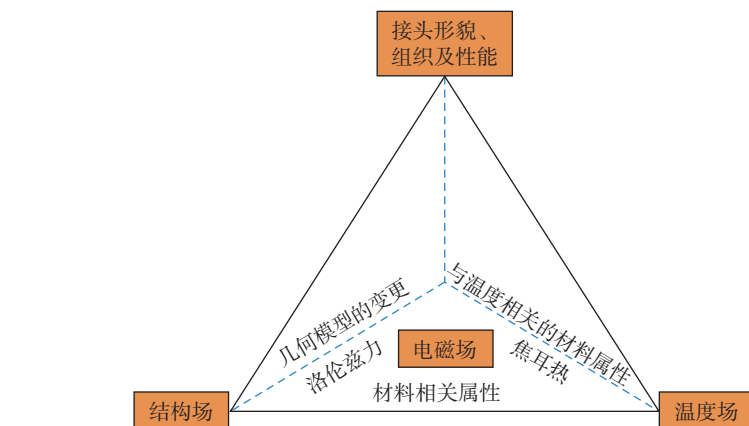


图 5 电磁脉冲焊接过程中各物理场之间的关系
Fig.5 Relationships among physical fields in EMPW

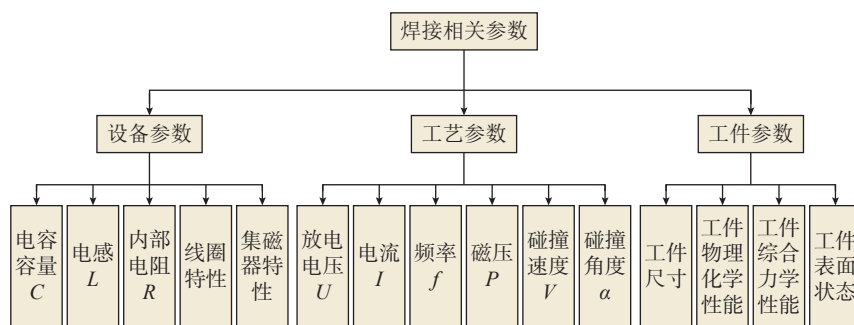


图 6 电磁脉冲焊接相关参数
Fig.6 Relevant parameters of EMPW

表明, 在较高的放电能量下中间层中存在金属间化合物 FeAl_2 和超细晶粒, 原子尺度扩散为铝 / 钢电磁脉冲焊接接头的主要焊接机理。Dang 等^[30] 系统研究了焊后热处理工艺 (PWHT) 对铝 / 钢管磁脉冲焊接接头组织和力学性能的影响。结果表明, PWHT 有效改善了较厚的过渡层 (厚度 $>10 \mu\text{m}$) 中化学成分分布, 原始厚度变化不大, 而原始厚度较薄的过渡层 (厚度 $\leq 10 \mu\text{m}$) 厚度则随温度显著增加; 在 250°C 以下, 过渡层中的微孔、裂纹有不同程度的修复, 当温度超过 250°C 时, 裂纹沿轴向扩展; PWHT 温度 $\leq 250^\circ\text{C}$ 时, 组织和力学性能得到较好的改善。Avettand-Fènoël 等^[31] 应用磁脉冲焊接制备了纯铝与镀锌或无镀层 DP450 钢之间板材接头, 发现对于铝 / 无涂层钢接头, 界面含有 $2.5 \mu\text{m}$

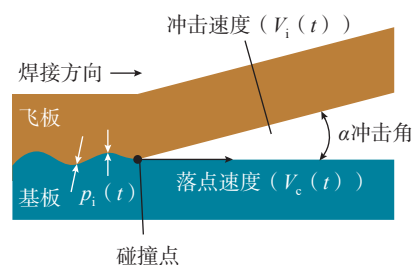


图 7 碰撞速度和碰撞角度对电磁脉冲焊接接头的影响
Fig.7 Impact of speed and angle on EMPW joint

厚的 FeAl_3 金属间化合物; 铝 / 镀锌钢接头界面存在约 10nm 厚 (Al) Zn 固溶体和 (Al+Zn) 双相层; 有无涂层两类焊缝都表现出较好力学性能。Cui 等^[32] 利用电磁脉冲焊接制备了 3A21 铝合金和 20# 钢管接头, 研究了铝 / 钢焊接接头中 20# 钢管的临界可焊厚度。结果表明, 内管的临界厚度随放电电压升高而增

加。为测量焊接碰撞速度,研究人员进行了多次改进, Barker 等^[33]设计了 VISAR (Velocity interferometer system for any reflector) 系统进行测量,该系统价格昂贵,数据收集困难。研究人员采用激光多普勒 PDV (Photon Doppler velocimetry) 对瞬时速度进行测量,取得了一些成果^[7]。Lee 等^[34]采用 16 探针光子多普勒测速仪 PDV 进行优化,实现了电磁脉冲焊接速度的原位分析。无论是高速相机或 PDV 测量设备,价格都比较昂贵,限制了其应用。

综上所述,采用电磁脉冲焊接技术针对性地开展铝/钢工艺研究已经取得了一定进展,对输入电流、放电电压、工件间隙等参数研究比较深入,但对于如磁压力、碰撞角度、碰撞速度工艺参数较难开展深入研究。与其他学科交叉融合,如采用柔性传感器植入测定磁压,通过控制垫片位置计算初始碰撞角度,可获得相应工艺参数,并从中总结经验和规律,弥补在线监控能力的不足。此外,对系列材料焊接工艺窗口构建、接头组织性能预测、电热辅助下可焊接材料厚度范围、焊后热处理等方面相关文献报道较少,可深入开展研究。

3.2 设备研究

设备参数包括电容容量、电感、内部电阻、线圈特性、集磁器特性等多种影响因素,对焊接接头的综合性能也起着至关重要的作用。

Deng 等^[35]提出了一种基于双磁场的电磁脉冲设备及焊接方法。通过背景线圈的辅助来提高焊接区域的磁场强度,进而提高工件的碰撞速度,其双磁场示意如图 8 所示。试验结果表明,背景场的辅助作用可以提高工件碰撞的速度和增加焊接区域。集磁器作为提高焊接效果的有效辅助工作,很多学者对此热点问题开展了研究^[36-39]。陈树君等^[37]研究了集磁器开口间隙对铝/钢电磁脉冲焊接接头连接效果的影响规律,其

开口度示意如图 9 所示。结果表明,集磁器开口间隙减弱了其附近位置外管所受的磁场力,导致在焊接过程中开口间隙附近外管的变形速度小于其他位置,并用 Ansoft Maxwell 模拟和验证了试验结果。Yan 等^[39]研发新型多缝集磁器以提高电磁脉冲焊接的均匀性,并采用数值模拟和试验研究进行验证。结果表明,采用多缝集磁器的电磁脉冲焊接系统可以显著提高 5052 铝/20# 钢焊缝的均匀性。

目前,电磁脉冲焊接设备研究主要以线圈、集磁器为创新重点,如线圈的形状结构、材质、寿命,集磁器的作用、形状等研究取得了一些成果,但对于扩展焊接接头形式相关的改进和试验鲜有报道。目前焊接接头形式以搭接为主,其他结构连接难以实现;国内自主研发设备输入能量较低,国外 80 kJ 以上的电磁脉冲焊接设备对中国禁售^[40]。自主研发设备可焊材料厚度范围受限等问题均制约了其工业化应用发展,应围绕提高铝/钢异种连接尺寸范围,扩展焊

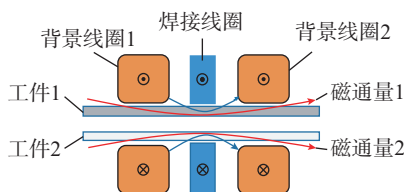


图 8 基于双磁场的电磁脉冲焊接原理^[35]
Fig.8 Principle of EMPW based on double magnetic fields^[35]

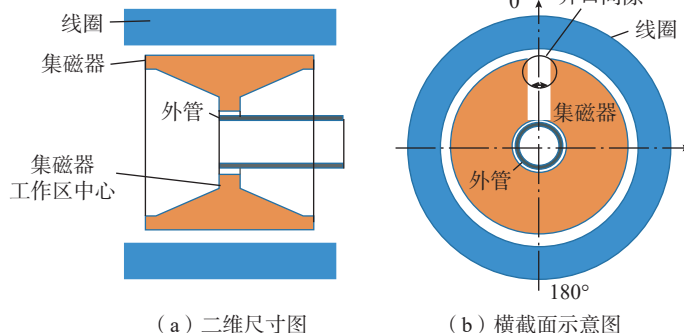


图 9 集磁器开口度示意图^[37]
Fig.9 Schematic diagram of fieldshaper gap opening^[37]

接头结构形式等方面,进一步扩展电磁脉冲焊接技术的应用。如根据电磁脉冲焊接原理和动量守恒定律,改变受力飞板/基板的形状与尺寸,使驱动装置在磁场运动中持续加速,实现板/管(棒)连接或对接接头连接;结合金属射流机理,优化飞板结构以改变焊接环形状与面积;依靠学科交叉研发可靠的低成本焊接过程跟踪监控辅助设备,有助于加快国内电磁脉冲焊接的工业化进程。

3.3 界面形貌与结合机理

铝/钢异种金属间性能差异大,传统焊接时易在界面处产生金属间化合物。目前电磁脉冲焊接界面的形成机理主要包括机械混合 (Mechanical mixing) 效应及金属薄层的快速熔化-凝固机理两种观点^[41-42]。电磁脉冲焊接过程速度快、温度低,因此接头界面是否形成冶金结合和化合物 (IMC) 一直是该领域的研究热点。Fan 等^[43]通过 TEM 技术观察了 1060Al/20# 钢磁脉冲焊接界面的结构特征,如图 10 (a) 所示。结果表明,结合界面仅是一条宽度约 10 nm、原子呈无序结构排列的边界层,钢侧为纳米级长条状的 Fe 晶粒,Al 侧的三角晶界附近发生了无序化反应,生成与 Al 晶粒基体成分一致的非晶相,过渡区复合界面为过渡区熔化后再凝固所形成的固溶体。Li 等^[44]制备 6061 铝合金/AISI1045 冷轧钢棒电磁脉冲焊接接头,如图 10 (b) 所示,在界面处发现金属间化合

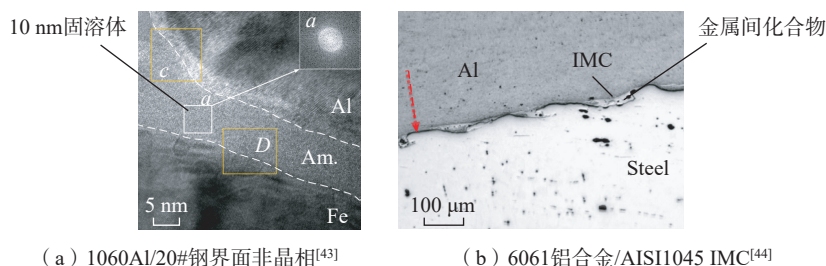


图 10 铝/钢电磁脉冲界面微观形貌

Fig.10 Interface micromorphology of Al/Fe electromagnetic pulse welding

物(IMC),在铝/钢界面附近观察到非晶、高位错密度的细长超细晶粒和超细等轴晶粒,证明界面处铝侧发生了熔化及重结晶。Wang等^[45]研究了6061铝合金/Q355钢电磁脉冲焊接界面微观结构及形成机理,将界面处定义为从中心到外部未焊接区、焊接影响区、次级焊接区、主要焊接区、碰撞影响区5个区域。主要焊接区主焊缝区具有形成扩散或冶金结合的特征。通过TEM检测分析,铝/钢界面形成了非晶、超细晶与Fe超细颗粒的混合组织,未发现IMC结构特征。

铝/钢电磁脉冲焊界面形貌和结合机理一直备受关注,采用先进检测方法观察界面形貌特征,分析其结合机制以及组织结构等研究比较广泛,并形成了一定共识,对于界面处是否熔化和形成金属间化合物,以及形成机理和形成条件仍有争议,有待进一步深入研究。此外,根据电磁脉冲焊原理,焊后铝/钢界面将储存较大残余应力,不同服役条件下界面是否转变,如IMC的衍生及其演变规律等界面相关问题,有待进一步研究。

3.4 接头综合性能

近年来,研究人员在电磁脉冲焊接接头的综合力学性能、疲劳性能、腐蚀性能、界面缺陷等方面开展了初步研究。Fan等^[46]对1060Al/20#钢电磁脉冲焊接界面的力学性能进行了分析,建立了力学性能与界面形貌的关联机制,发现焊管的变形协调性对管接界面结合强度分布有重要

影响,对于界面相对结合强度(对比铝母材剪切强度)达到100%,轴向长度可占到焊接区域长度的50%。铝/钢电磁脉冲焊接接头常伴随空隙、裂纹等缺陷,对界面性能产生影响。Sapanathan等^[47]研究了界面上孔隙的成核和生长,发现孔隙的成核和生长主要由空化现象引起。疲劳失效是航空航天部件失效的主要原因之一,Geng等^[48]研究了AA5052/HC420LA电磁脉冲焊接接头的抗疲劳性能,发现低应力振幅($S_a \leq 20$ MPa)下焊缝处比母材具有更好的抗疲劳性能,在高应力振幅($S_a \geq 26.7$ MPa)下界面发生疲劳失效。

焊接头的综合力学性能一直是异种材料焊接的研究重点,相关研究具有一定的针对性。开展不同服役条件下接头综合性能的变化规律,如高温、低温、应力、疲劳环境下接头的性能,使其接头性能更适于工况使用环境,促进其工业化应用。

3.5 数值模拟与仿真

电磁脉冲焊接涉电磁场、结构场以及温度场等多场耦合作用,理论方程复杂、高度非线性、成形速度快、运用数值解析法和试验研究具有相当大的困难,需结合模拟耦合进行分析。目前电磁脉冲焊模拟所采用的软件包括Ansys、MSC Dytran、Abaqus、Ansoft、Ansys-Ls-dyna、Comsol、Ansoft-Maxwell、Maxwell Circuit Editor等,模拟内容包括结构场、应力场、温度场、碰撞角度、碰撞过程等。李光耀等^[49]结合Ls-dyna

有限元与边界元对铝/钢合金板件磁脉冲焊接进行仿真模拟,发现飞板的感应电流和电磁力出现了双波峰现象,并且感应电流在飞板的搭接区域形成了两个相连的矩形回路。结果与数值模拟相吻合较好,验证了数值模型的可靠性。目前,模拟研究多数局限于焊接过程某一方面的研究,少数实现了结构场和温度场的耦合分析,建模时多以二维方式以减少计算量。对于电磁场及磁场力的理论分析、磁场力理论推导和成形工艺缺陷、温度场等均需要进行数值模拟分析,并用以指导电磁脉冲焊接系统的设计和焊接机理的分析。范志松^[50]模拟了不同碰撞速度下1060铝和20#钢电磁脉冲焊接接头温度,发现不同碰撞速度下温度曲线形状相似,温度范围介于720~1170 K;涡流和界面材料塑性变形共同作用,界面温度瞬时达到接近Al母材的 T_m 点。而Bellmann等^[51]对EN AW-6060铝/C45钢电磁脉冲焊接管接头界面温度模拟,发现焊接中钢表面瞬时温度可至约2750℃,远超Fe的熔点1535℃,两组模拟差异极大。

综上所述,由于电磁脉冲焊接方法的特殊性,数值模拟仿真已经成为其研究的有效方法和手段。通过多场耦合模拟,开展焊接过程中电磁场、结构场、应力场、温度场等综合研究,如界面固溶体/IMC的形核与长大、焊接过程中界面温度场的精确模拟与仿真,并通过工艺试验验证其科学性,能够有效加快研发进程,对电磁脉冲焊技术的发展起到快速推动作用。

3.6 多种焊接方法复合研究

针对电磁脉冲焊薄壁管件应用局限,陈树君等^[52]提出了脉冲电流电阻加热与电磁脉冲复合焊接方法,采用电磁脉冲电源提供脉冲电流,使被焊外管表面产生感应电流,在脉冲磁场作用下高速撞击被焊内管;同时,在被焊外管与内管接触时,采用脉冲电源提供一个可控脉冲电流,利

用管件间的电阻热来加热被焊管件,在电阻热及洛伦兹力的作用下,内外管达到冶金结合。Strizhakov等^[53]提出采用真空预热电磁脉冲焊以提高接头质量,在真空条件下对整个焊接装置进行预热激活待焊表面,并进行了L63/M01和L63/AMg6异种材料焊接试验。此外,还有研究采用电磁脉冲成形和钎焊结合的复合焊接方法并应用于异种金属焊接中^[54]。

电磁脉冲焊接在现有基础和连接理论研究基础上,开展多种焊接方法复合,已经成为研究和发展的重点方向。多种焊接方法复合使用对铝/钢异种金属焊接工艺创新和应用具有一定指导意义。

4 结论

电磁脉冲焊接作为一种较新的固相焊接技术,相较于大多数传统焊接有着明显的优势,特别是在异种材料的焊接领域。电磁脉冲技术在很多国家都受到重视,近年来,大量关于电磁脉冲焊接的研究集中在国外,而国内主要以高校及科研院所研究为主,并未大批量进入市场化应用,在以下方面还需进行深入研究,以实现该工艺的推广应用。

(1) 开展铝/钢电磁脉冲基础理论及工艺控制的深入研究。电磁脉冲焊接涉及电磁学、动力学、材料学等多学科交叉,焊接过程复杂,界面结合机理仍存争议,因此铝/钢电磁脉冲焊接相关基础理论研究、高强度铝/钢系列焊接工艺窗口构建、接头工艺与综合性能内在关系等有待持续深入开展研究。

(2) 加快高效国产化电磁脉冲焊接设备及辅助装置研发。目前国内缺乏大功率的电磁脉冲焊接设备,导致可焊接材料尺寸范围受限。实现高效电磁脉冲焊接设备国产化,同时研发相应辅助工装,扩展焊接接头形式,提高焊接范围,进一步扩大其应用范围。

(3) 实现焊接过程在线跟踪监控。电磁脉冲焊接具备绿色环保、高效、重复性好、易于自动化生产等突出优势。应以企业需求为导向,降低设备及生产成本,实现焊接生产过程在线跟踪监控,加强其在航空航天、能源化工、汽车制造等领域的推广应用和产业化生产。

参考文献

[1] 于海平,范志松,李春峰.电磁成形技术在轻量化结构件成形与连接中的应用[J].锻造与冲压,2015(12):16-19.

[2] YU Haiping, FAN Zhisong, LI Chunfeng. Application of electromagnetic forming technology in forming and connecting of lightweight structural parts[J]. Forging & Metalforming, 2015(12): 16-19.

[3] 罗继业,金英.民机制造环节的重量控制和减重措施研究[J].民用飞机设计与研究,2016(4):24-28,60.

[4] LUO Jiye, JIN Ying. Research of weight control and lightening practice for civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2016(4): 24-28, 60.

[5] ANTHONY L, VELOCEI J R. Venture rife with marketing pitfalls[J]. Aviation Week and Space Technology, 1993, 139(19): 59-61.

[6] 薛承博,孙黎,姜煜霞.电子束焊接技术发展及其在航空航天领域的应用[J].科技展望,2015,25(5):122.

[7] XUE Chengbo, SUN Li, JIANG Yuxia. Development of electron beam welding technology and its application in aerospace[J]. Science and Technology, 2015, 25(5): 122.

[8] 李红,闫维嘉,张禹,等.先进航空材料焊接过程热裂纹研究进展[J].材料工程,2022,50(2):50-61.

[9] LI Hong, YAN Weijia, ZHANG Yu, et al. Research progress of hot crack in fusion welding of advanced aeronautical materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(2): 50-61.

[10] KAPIL A, SHARMA A. Magnetic pulse welding: An efficient and environmentally friendly multi-material joining technique[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 100: 35-58.

[11] PSYK V, RISCH D, KINSEY B L, et al. Electromagnetic forming: A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(5): 787-829.

[12] 崔晓辉,周向龙,杜志浩,等.电磁脉冲成形技术新进展及其在飞机蒙皮件制造中的应用[J].航空制造技术,2020,63(3):22-32.

[13] CUI Xiaohui, ZHOU Xianglong, DU Zhihao, et al. New development of electromagnetic pulse forming technology and its application in aircraft skin parts manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(3): 22-32.

[14] 杨鹏,孟正华,黄尚宇,等.异种金属电磁脉冲焊接研究进展[J].热加工工艺,2015,44(3):5-9.

[15] YANG Peng, MENG Zhenghua, HUANG Shangyu, et al. Research review of magnetic pulse welding for dissimilar metals[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(3): 5-9.

[16] 尹立孟,张丽萍,苏子龙,等.电磁制造技术在航空航天领域的应用[J].电焊机,2020,50(9):202-206.

[17] YIN Limeng, ZHANG Liping, SU Zilong, et al. Application of electromagnetic manufacturing technology in aerospace[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(9): 202-206.

[18] WANG H M, WANG Y L. High-velocity impact welding process: A review[J]. Metals, 2019, 9(2): 144.

[19] 胡美些.我国钢铝异种金属焊接概述[J].装备制造技术,2019(8):4-9.

[20] HU Meixie. Summary of welding of steel and aluminum dissimilar metals[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019(8): 4-9.

[21] 张丽娜,刘敏,蒋继英,等.铝及铝合金与钢的连接技术研究现状[J].航天制造技术,2013(2):5-9.

[22] ZHANG Lina, LIU Min, JIANG Jiying, et al. The development of welding of aluminum alloy and steel[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013(2): 5-9.

[23] 史春元,于启湛.异种金属的焊接[M].北京:机械工业出版社,2012.

[24] SHI Chunyuan, YU Qizhan. Welding of dissimilar metals[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.

[25] 李伦坤,高晓龙,刘晶,等.铝/钢异种金属熔钎焊技术发展现状[J].宝鸡文理学院学报(自然科学版),2019,39(3):49-54.

[26] LI Lunkun, GAO Xiaolong, LIU Jing, et al. Development status of the welding-brazing technology of Al/Fe dissimilar metals[J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2019, 39(3): 49-54.

[27] ISMAIL A, BAHANAN W, BIN

- HUSSAIN P, et al. Diffusion bonding of Al-Fe enhanced by gallium[J]. Processes, 2020, 8(7): 1-9.
- [17] 宋艳芳, 张宏阁. 电磁脉冲焊接技术研究现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2015, 44(11): 13-17.
- SONG Yanfang, ZHANG Hongge. Research status and development trends of electromagnetic pulse welding technique[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(11): 13-17.
- [18] LUEG-ALTHOFF J, BELLMANN J, GIES S, et al. Influence of the flyer kinetics on magnetic pulse welding of tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 262: 189-203.
- [19] RAOELISON R, RACHIK M, BUIRON N, et al. Determination of the welding conditions and weldability window in magnetic pulse welding[C]// 5th International Conference on High Speed Forming. Dortmund, 2012.
- [20] 苏子龙, 徐永庚, 高雷, 等. 电磁脉冲焊接技术研究现状及发展趋势[J]. 焊接技术, 2020, 49(7): 1-7.
- SU Zilong, XU Yonggeng, GAO Lei, et al. Research status and development trend of electromagnetic pulse welding technology[J]. Welding Technology, 2020, 49(7): 1-7.
- [21] SCHUMACHER E, REBENS DORF A, BÖHM S. Influence of the jet velocity on the weld quality of magnetic pulse welded dissimilar sheet joints of aluminum and steel[J]. Materialwiss Werkstofftech, 2019, 50: 965-972.
- [22] REBENS DORF A, BÖHM S. Magnetic pulse welding—investigation on the welding of high-strength aluminum alloys and steels as well as the influence of fluctuations in the production on the welding results for thin metal sheets[J]. Welding in the World, 2018, 62(4): 855-868.
- [23] HAHN M, WEDDELING C, LUEG-ALTHOFF J, et al. Analytical approach for magnetic pulse welding of sheet connections[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 230: 131-142.
- [24] MISHRA S, SHARMA S K, KUMAR S, et al. 40 kJ magnetic pulse welding system for expansion welding of aluminium 6061 tube[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 168-175.
- [25] LAI Z P, CAO Q L, HAN X T, et al. Investigation on plastic deformation behavior of sheet workpiece during radial Lorentz force augmented deep drawing process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 245: 193-206.
- [26] KHAN M R, RAJA, HOSSAIN M M, et al. Distribution of electromagnetic field and pressure of single-turn circular coil for magnetic pulse welding using FEM[C]//Strengthening and Joining by Plastic Deformation. Publisher: Springer Singapore, 2019.
- [27] RAOELISON R, RACHIK M, BUIRON N, et al. Determination of the welding conditions and weldability window in magnetic pulse welding[C]//5th International Conference on High Speed Forming. Dortmund, 2012.
- [28] 常晶舒, 陈健, 冷冰, 等. 国内电磁脉冲焊接技术研究进展与展望[J]. 焊接, 2019(5): 13-17, 65.
- CHANG Jingshu, CHEN Jian, LENG Bing, et al. Research progress on electromagnetic pulse welding[J]. Welding & Joining, 2019(5): 13-17, 65.
- [29] GENG H H, XIA Z H, ZHANG X, et al. Microstructures and mechanical properties of the welded AA5182/HC340LA joint by magnetic pulse welding[J]. Materials Characterization, 2018, 138: 229-237.
- [30] DANG H Q, YU H P. Effect of the post-weld heat treatment temperature on the mechanical properties and microstructure of magnetic pulse welded Al/Fe tubes[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 4554-4563.
- [31] AVETTAND-FÈNOËL M N, KHALIL C, TAILLARD R, et al. Effect of steel galvanization on the microstructure and mechanical performances of planar magnetic pulse welds of aluminum and steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49(7): 2721-2738.
- [32] CUI J J, SUN G Y, XU J R, et al. A study on the critical wall thickness of the inner tube for magnetic pulse welding of tubular Al-Fe parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 227: 138-146.
- [33] BARKER L M, HOLLENBACH R E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface[J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43(11): 4669-4675.
- [34] LEE T, TABER G, VIVEK A, et al. Characterization of high-speed flyer evolution by multi-probe photon doppler velocimetry[C]// International Conference on High Speed Forming. Columbus, 2018.
- [35] DENG F X, CAO Q L, HAN X T, et al. Principle and realization of an electromagnetic pulse welding system with a dual-stage coil[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2018, 57(4): 389-398.
- [36] DENG F X, CAO Q L, HAN X T, et al. Electromagnetic pulse spot welding of aluminum to stainless steel sheets with a field shaper[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(5-8): 1903-1911.
- [37] 陈树君, 阚纯磊, 袁涛, 等. 电磁脉冲焊接外管周向变形研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(9): 195-197, 203.
- CHEN Shujun, KAN Chunlei, YUAN Tao, et al. Study on circumferential deformation of outer tube during magnetic pulse welding[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(9): 195-197, 203.
- [38] 陈树君, 阚纯磊, 袁涛, 等. 电磁脉冲焊接集磁器开口对焊接接头的影响机理[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(12): 1223-1229.
- CHEN Shujun, KAN Chunlei, YUAN Tao, et al. Influence of field shaper gap on joint properties during magnetic pulse welding[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51(12): 1223-1229.
- [39] YAN Z Q, XIAO A, CUI X H, et al. Magnetic pulse welding of aluminum to steel tubes using a field-shaper with multiple seams[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 65: 214-227.
- [40] 迟露鑫, 袁世鑫, 刘超. 铝/不锈钢电磁脉冲焊接界面组织性能分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(1): 129-134.
- CHI Luxin, YUAN Shixin, LIU Chao. Joint interface of organization and properties analysis of electromagnetic pulse welding of aluminum and stainless steel[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2018, 32(1): 129-134.
- [41] KORE S D, IMBERT J, WORSWICK M J, et al. Electromagnetic impact welding of Mg to Al sheets[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(6): 549-553.
- [42] RAOELISON R N, RACINE D, ZHANG Z, et al. Magnetic pulse welding: Interface of Al/Cu joint and investigation of intermetallic formation effect on the weld features[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16(4): 427-434.
- [43] FAN Z S, YU H P, LI C F. Interface and grain-boundary amorphization in the Al/Fe bimetallic system during pulsed-magnetic-driven

impact[J]. Scripta Materialia, 2016, 110: 14–18.

[44] LI J J, YU Q, ZHANG Z J, et al. Formation mechanism for the nanoscale amorphous interface in pulse-welded Al/Fe bimetallic systems[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(20): 201606.

[45] WANG P Q, CHEN D L, YAN Y Q, et al. Hierarchical morphology and formation mechanism of collision surface of Al/steel dissimilar lap joints via electromagnetic pulse welding[J]. Metals, 2021, 11(9): 1468.

[46] FAN Z S, YU H P, LI C F. Plastic deformation behavior of Bi-metal tubes during magnetic pulse cladding: FE analysis and experiments[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 230–243.

[47] SAPANATHAN T, RAOELISON R N, BUIRON N, et al. In situ metallic porous structure formation due to ultra high heating and cooling rates during an electromagnetic pulse welding[J]. Scripta Materialia, 2017, 128: 10–13.

[48] GENG H H, SUN L Q, LI G Y, et al. Fatigue fracture properties of magnetic

pulse welded dissimilar Al–Fe lap joints[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 121: 146–154.

[49] 李光耀, 陈倡倡, 耿辉辉, 等. 5182Al/HC340LA 异种金属件磁脉冲焊接数值模拟与试验验证[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(3): 155–162.

LI Guangyao, CHEN Lülü, GENG Huihui, et al. Numerical simulation and experimental verification of magnetic pulse welding for dissimilar metal parts 5182Al/HC340LA[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(3): 155–162.

[50] 范治松. Al/Fe 双金属管磁脉冲复合变形行为及界面微观结构形成机制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

FAN Zhisong. Deformation behavior of magnetic pulse cladding of Al/Fe Bi-metal tubes and formation mechanism of the interfacial microstructure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[51] BELLMANN J, LUEG-ALTHOFF J, SCHULZE S, et al. Thermal effects in

dissimilar magnetic pulse welding[J]. Metals, 2019, 9(3): 348.

[52] 陈树君, 苏珊, 蒋凡, 等. 一种管件脉冲电流电阻加热与电磁脉冲复合焊接方法: CN106346152A[P]. 2017–01–25.

CHEN Shujun, SU San, JIANG Fan, et al. A combined welding method of pulse current resistance heating and electromagnetic pulse for pipe fittings: CN106346152A[P]. 2017–01–25.

[53] STRIZHAKOV E, NESCOROMNIY S. Combined processes of environmentally friendly technology for magnetic-pulse welding[C]//E3S Web of Conferences. Munich, 2019.

[54] LEI Y, HUANG S Y, LIU W, et al. Dissimilar Cu/Al tube joint by EMF-assisted brazing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(9–12): 4039–4047.

通讯作者: 陈玉华, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为先进焊接与连接技术、增材制造及修复技术等。

Development of Electromagnetic Pulse Welding of Al / Fe Dissimilar Metals

ZHANG Liping^{1,2}, XIE Jilin³, YU Xi², WEN Jinpeng², YIN Limeng², CHEN Yuhua³,
ZHANG Hehe², ZHANG Long²

(1. Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

3. Jiangxi Key Laboratory of Forming and Joining Technology for Aerospace Components, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

[ABSTRACT] Al/Fe dissimilar metals welding has the advantages of lightweight structure and good comprehensive performance, which has a wide application prospect in aerospace, nuclear power energy, automobile, electronic and electrical appliances and other industries. However, due to the difference of physical properties, there are still many problems in joining methods and processes of Al/Fe dissimilar metals. Electromagnetic pulse welding, a solid-state welding technology, which can effectively overcome the welding problems caused by the different properties of dissimilar metals, is widely used in welding of dissimilar metals such as Al/Fe. This paper briefly analyzes the problems existing in Al/Fe dissimilar metal welding, and the welding principle, process, characteristics of electromagnetic pulse welding technology. Then summarizes and analyzes the new progress of electromagnetic pulse welding technology from the aspects of process research, equipment optimization, joint performance, interface morphology and bonding mechanism, numerical simulation, and the combination of various welding methods, and puts forward corresponding suggestions for the future technological development.

Keywords: Al/Fe; Dissimilar metal welding; Electromagnetic pulse welding (EMPW); Process parameters; Research and development

(责编 古东)