DOI: 10.3901/JME.2020.06.147

轻质异种材料搅拌摩擦点焊技术研究进展*

汤祖阳 王亚强 董红刚

(大连理工大学材料科学与工程学院 大连 116024)

摘要: 由于汽车工业轻量化的要求, 轻质材料复合结构取代单一材料结构的方法受到社会各界的广泛关注。对于异种材料复合结构的连接, 传统焊接方法具有一定的局限性。搅拌摩擦点焊技术作为一种绿色、高效、固相连接技术, 在异种材料连接方面具有很大潜力, 国内外学者针对异种材料搅拌摩擦点焊开展了大量研究。从铝-碳纤维增强热塑性树脂基复合材料、铝-铜和铝-钢三种复合结构搅拌摩擦点焊的研究现状出发, 阐述了国内外科研人员在焊接工艺、微观组织演变以及接头力学性能等方面的研究成果, 并展望了搅拌摩擦点焊技术现阶段亟待解决的热点问题以及发展趋势。

关键词: 搅拌摩擦点焊技术; 轻质材料; 复合结构; 性能

中图分类号: TG453

Progress of the Friction Stir Spot Welding in Lightweight Dissimilar Materials

TANG Zuyang WANG Yaqiang DONG Honggang

(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: With the requirement of automotive industrial lightweight, lightweight composite structures replacing single material structure have attracted broad attentions. For dissimilar materials joining, conventional welding methods have limitations. However, friction stir spot welding, as a green and effective solid-state welding technology, is a promising process to join dissimilar materials. Extensive research on the friction stir spot welding of dissimilar materials is carried out. The research status about the progress of friction stir spot welding for Al-carbon fiber reinforced thermoplastics, Al-Cu and Al-steel composite structures is summarized. The welding process, the evolution of joint microstructure and mechanical properties are discussed in details. Moreover, present challenges and development direction in friction stir spot welding technology are expounded.

Key words: friction stir spot welding; lightweight materials; composite structure; properties

0 前言

据统计, 汽车质量每减轻 100 kg, 油耗可减少约 0.4 L/100 km, 相应 CO₂ 的排放量可减少约 1 kg^[1]。因此, 出于节能减排和燃油经济性的考虑, 民众越来越青睐于轻质、安全、环保的汽车^[2]。汽车制造商正使用新的生产工艺以降低车身重量^[3]。铝合金具有密度低、比强度高、耐蚀性好、易实现循环利用等特点, 是现阶段最具发展前途的轻质材料之一^[4]。此外, 为了更好实现轻量化的目标, 铝合金与其他材料的复合结构, 如: 铝-碳纤维增强热塑性树脂基复合材料 (Carbon fiber reinforced

thermoplastics, CFRP)、铝-铜、铝-钢等, 受到了越来越多的关注。

机械连接、胶接和焊接均可实现异种材料的连接^[5]。然而, 机械连接由于紧固件的引入, 不符合轻量化目标。胶接过程需要较长的处理时间并且对温度和湿度较为敏感, 粘接剂释放的挥发性物质也易产生环境污染^[6]。常规的熔焊方法对于异种材料的连接具有局限性。例如, 异种金属熔焊由于熔点差异、热膨胀系数差异、过厚的金属间化合物 (Intermetallic compounds, IMC) 等客观因素的存在, 不仅易使焊接结构在服役阶段发生失效^[7], 而且也相对制约了接头的力学性能和抗腐蚀性。钎焊工艺虽然适用于异种材料的连接, 但生产效率低, 不能满足工业自动化生产。

为了解决异种材料的连接问题, 实现轻质复合材料的有效结合, 搅拌摩擦点焊 (Friction stir spot

* 国家自然科学基金(51674060, 51374048)和中央高校基本科研业务费专项资金(DUT18LAB01)资助项目。20190815 收到初稿, 20191119 收到修改稿

welding, FSSW)技术得到了越来越多的关注。为了阐明铝合金与不同材料组成的复合结构的连接机制和研究现状,本文综述了铝-CFRP、铝-铜、铝-钢复合结构的研究进展,系统阐述了搅拌摩擦点焊技术在复合结构中的应用、异种材料接头组织与性能等方面的研究成果。

1 搅拌摩擦点焊技术简介

1.1 FSSW 焊接原理及特点

FSSW 是一种高效的固相连接技术。如图 1 所示,其焊接过程可分为三个步骤:① 下压阶段,高速旋转的搅拌头进入试样并到达指定深度;② 搅拌阶段,点焊区域内的金属在摩擦热作用下达到热塑性状态,通过搅拌针和轴肩的搅拌作用产生塑性流动;③ 回抽阶段,搅拌头离开试样,接头冷却实现固相连接。由于搅拌针下压阶段消耗的母材无法在回抽阶段进行补充而形成匙孔。与传统焊接方法相比,搅拌摩擦点焊具有以下优点:FSSW 绿色环保,金属在连接过程中仅达到热塑性状态,能耗低,无焊接飞溅,工作环境好;工艺简单,不需要添加焊材;效率高,焊接周期仅 2~5 s,可实现程序化加工^[8];强烈的搅拌作用,可破坏连接界面的 IMC,实现高强度连接;对焊材的要求小,可应用于非导电材料的连接,应用范围更宽广。

图 1 搅拌摩擦点焊示意图

1.2 FSSW 发展历程及分类

1991 年,英国焊接研究所发明了新型连接技术——搅拌摩擦焊^[9]。FSSW 正是基于搅拌摩擦焊技术而衍生的新型固相连接工艺。2000 年,川崎重工首先提出了 FSSW 工艺^[10]。马自达汽车公司率先将 FSSW 技术应用于 2003 RX-8 型汽车的生产^[11]。目前,FSSW 已实现了车用铝-铝结构和铝-钢结构的连接^[10]。FSSW 技术可分为两类:常规 FSSW 和无匙孔 FSSW。对于常规 FSSW 技术,接头中残留的匙孔是主要的焊接缺陷,部分学者试图采用焊后填充工艺^[12]来消除匙孔。无匙孔 FSSW 通常又可分为无针式 FSSW、伸缩式 FSSW 和回填式 FSSW。

无针式 FSSW 与常规 FSSW 工艺流程相同。一定

程度上可以消除匙孔,但搅拌能力不足,只能连接 1 mm 以下的薄板^[13]。BAKAVOS 等^[8]通过在轴肩端面进行刻槽(图 2)实现了 1 mm 薄板的高强度连接,并获得了较高的连接效率(<1 s)。通过优化沟槽形貌,无针式 FSSW 的接头连接面积和拉伸剪切强度甚至能够高于常规 FSSW^[14]。LI 等^[15]采用无针式 FSSW 和无针式 FSW 复合工艺,不仅消除了 3 mm AA2024 铝合金的 Hook 缺陷,而且使接头剪切失效载荷达到 12 kN。

图 2 无针搅拌头形貌图

伸缩式 FSSW 的搅拌针和肩部相互独立,搅拌针在焊接时伸出,在结束时缩回并使轴肩挤压母材以填充匙孔。伸缩式 FSSW 包含机械连接和溶质扩散连接,接头性能表现优于真空扩散焊^[16]。德国 Kuka 公司和日本 Kawasaki 公司都已成功研发出带可伸缩搅拌头的工业点焊机器人^[17]。伸缩式 FSSW 仅是利用母材填补空洞,但无法彻底消除匙孔缺陷。IBRAHIM 等^[18]通过添加中间层来弥补焊接损失,得到了平整的焊接区,接头剪切性能(4.56 kN)接近 AWS 标准的 2 倍。

回填式 FSSW 是德国 Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG, 前身为 GKSS)在 1999 年提出的新型 FSSW 技术。搅拌头采用分体式结构,外部的压紧环用于固定焊件并防止金属溢出,搅拌套与搅拌针在内部做同轴、高速、独立旋转,依靠搅拌套和搅拌针的相对运动来实现焊缝搅拌与回填过程。根据下压元件的不同,回填式 FSSW 可以分为搅拌针下压和搅拌套下压两个变体^[19],且搅拌套下压的方式能够获得更大的焊接面积^[20]。回填式 FSSW 可自由调控搅拌套与搅拌针的进给量,具有优良的焊接柔性,同时点焊接头具有较好的综合力学性能。

2 铝-CFRP 复合结构

CFRP 是由碳纤维和树脂组成的复合材料。增强纤维主要承载负荷,树脂基体主要传递应力。焊

接过程中, 金属处于热塑性状态, 界面传导的热量使 CFRP 表层融化, 冷却固化形成接头。树脂的熔点约为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但由于搅拌摩擦点焊时间为 $2\sim 8\text{ s}$, 一般认为只要界面温度不大于 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, 就可忽略 CFRP 的热降解^[21]。

2.1 铝-CFRP 复合结构 FSSW 连接机制及工艺

在 FSSW 的焊接过程中, 为避免铝层开裂和纤维损伤, 搅拌针下压量一般只能达到金属层厚度的 40%^[22]。图 3 是铝-CFRP 的界面连接示意图, 连接力主要来源于树脂固化提供的粘结力、宏观连锁(铝基体进入 CFRP 层)和微观连锁(熔融状态的树脂填充铝表层的孔隙和裂缝)^[23]。值得一提的是, 碳纤维被塑性状态的铝包覆也被认为是一种微观连锁^[24]。如图 4 所示, 铝-CFRP 的断口可分为三个区域: 塑性变形区、过渡区、黏结区^[25]。铝-CFRP 的接头承载能力主要由塑性变形区提供, 扩大塑性变形区的关键是充足的树脂流动。为了提高树脂流动性, 一是借助轴向压力使熔融树脂强制流动; 二是利用摩擦热降低树脂黏度。

图 3 铝-CFRP 的连接机制示意图

图 4 铝-CFRP 断口形貌示意图

轴向压力、点焊时间、焊具转速等焊接参数能直接影响接头的强度。GOUSHEGIR 等^[26]采用全因子试验方法研究了点焊参数对 AA2024 铝合金与碳纤维增强聚苯硫醚 (Carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide, CF-PPS) 焊接接头塑性变形区尺寸及力学性能的影响。如图 5 所示, 轴向压力和焊具转速是影响塑性变形区尺寸和接头剪切性能的主要因素, 下压深度仅对接头剪切性能有显著提升。

这是因为轴向压力和焊具转速能够促进熔融树脂向铝层表面缝隙流入, 增强微观连锁, 但增加下压量仅有利于强化宏观连锁。一些学者指出, 焊接参数对铝-CFRP 接头剪切性能的作用表现出一种临界效应。将下压深度从铝层厚度的 40% 提升至 76%, 焊具转速的影响仍处于主导地位, 而轴向压力对接头性能的影响权重降至 12.15%^[27]。这可能是由于过高的轴向压力降低了熔融树脂的厚度。在一定范围内, 焊具转速与接头剪切性能呈现非线性的变化趋势^[28], 这是因为搅拌区温度已经达到了铝合金共晶温度^[29], 搅拌针打滑降低了摩擦热^[30]。由于研究者的试验条件差距较大, 很难做出客观的评价。

图 5 焊接参数对点焊接头的影响

2.2 铝-CFRP 复合结构 FSSW 接头组织与性能

铝-CFRP 复合结构的失效与裂纹扩展有关^[25]。裂纹起始于黏结区外侧, 由于黏结区的连接能力较弱, 致使裂纹迅速扩展至过渡区。进一步加载后, 裂纹在塑性变形区扩展。GOUSHEGIR 等^[31]将点焊接头的断裂过程分为四个步骤: ① 线弹性阶段, 微裂纹在黏结区外侧形核; ② 裂纹扩展, 直至接触过渡区; ③ 裂纹在过渡区、塑性变形区扩展; ④ 快速断裂。图 6 是铝-CFRP 的断口形貌, 黏结区为粘附断裂; 过渡区为粘附失效-内聚失效的混合断裂; 塑性变形区表面附着大量碳纤维和树脂基体, 为内聚失效断裂。对于接头的疲劳强度, 界面失效和 CFRP 内聚断裂是铝-CFRP 疲劳断裂的两种机制, 采用一定的预处理工艺可以增大点焊界面内聚断裂的比例, 进而获得较高的疲劳强度^[32], 如图 7 所示。疲劳裂纹起源于 CFRP 内部相互连接的气孔, 通过延长点焊时间有助于提高接头疲劳强度^[33]。

消除缺陷、强化连锁和新键形成是提高接头力学性能的主要方式。

气孔是铝-CFRP 连接中的常见缺陷, 气孔形成于焊接过程, 与 CFRP 内部的原始空洞无关^[32]。树脂基体在点焊过程中具有一定流动性, 但冷却固化较快, 且交错排布的碳纤维也阻碍了气体流动。ANDRE 等^[34]在 2024 铝合金与 CF-PPS 之间加入聚

苯硫醚(Polyphenylene sulfide, PPS)中间层, 不仅消除了界面气孔, 同时使接头剪切性能提高了 20%~55%, 粘结面积扩大了 25%~65%。进一步试验表明, 较薄的中间层具有更好的强化效果^[35]。

图6 铝-CFRP 接头断口形貌图

图7 不同表面处理试样的疲劳曲线图

铝合金表面孔隙形成的微观连锁是铝-CFRP 的连接机制之一, 而孔隙率受到铝合金塑性的影响。与高强度的 2xxx 和 7xxx 铝合金相比, 变形能力较好的 6xxx 铝合金能够形成高强度铝-CFRP 点焊接头^[27]。采用纯铝镀层处理的铝合金不仅可以形成更多的表面空隙, 而且在焊接时有助于释放界面残余应力^[25]。铝合金表面孔隙数量所反映的是表面粗糙程度, 提高表面粗糙度的常规方法包括: 机械研磨^[36], 激光刻蚀^[37]和阳极氧化处理^[38]等。OGAWA 等^[32]研究了无处理、有机涂层处理和阳极氧化处理的预处理工艺对铝-CFRP 接头强度的影响。结果表明, 表面处理仅能改变接头连接面积和剪切性能, 不能影响构件的断裂机制。值得注意的是, 表面孔隙存在结构差异, 因而具有不同的界面连锁效果。

如图 8 所示, b 结构在拉应力和切应力下都具有连锁效果, a 结构和 c 结构在拉应力下很难保证有效的界面连接^[39]。因此, AA2024/CF-PPS 点焊接头的交叉拉伸载荷仅能达到剪切拉伸载荷的 10%~30%, 且只有喷砂和磷酸阳极氧化的预处理工艺才能同时产生三种表面孔隙^[40]。如图 9 所示, GOUSHEGIR 等^[40]对比了不同预处理工艺对 AA2024/CF-PPS 接头剪切性能的影响。在一定程度上, 表面预处理对接头剪切性能都具有正面作用, 通过磷酸阳极氧化+底漆预处理工艺获得的接头剪切强度约为无预处理工艺的 10 倍。进一步的研究表明, 磷酸阳极氧化+底漆预处理的铝-CFRP 复合结构同时具有较高的剪切失效载荷和良好的疲劳强度^[41]。

图8 三种不规则界面结构

图9 不同预处理工艺下的接头力学性能

机械连锁仅提供有限的连接能力, 冶金反应和键合作用是进一步提高接头强度的有效方式^[40]。铝和树脂基体可以依靠摩擦热形成键合作用^[42]。在 25~800 °C 的温度区间内, Al、C 元素反应(式(1))的吉布斯自由能皆为负值, 具备了发生化学反应的热力学条件^[43]。PABANDI 等^[44]在铝-CFRP 界面上发现了厚度约为 15 μm 的反应层, 其主要成分为 Al、C 和 O。GOUSHEGIR 等^[45]采用 XPS 分析方法, 确定了 AA2024/CF-PPS 点焊界面处 Al-C 和 Zr-C 化学键的产生, 且断口上 Al-C 是主要化学键。

采用特定的技术手段可以检测出铝-CFRP 界面形成的化学键类别, 但对于 CFRP 表面官能团与 Al 进行键合作用的理论分析还比较少, 如何实现铝-CFRP 的高强度连接还有待进一步的研究。

3 铝-铜复合结构

3.1 铝-铜复合结构 FSSW 工艺研究

对于铝-铜 FSSW，接头的力学性能主要与搅拌头的设计(材质、尺寸)和焊接工艺参数(转速、下压深度等)有关。如表 1 所示，通过优化搅拌头形状和焊接工艺参数，铝-铜复合结构可获得较高的接头剪切性能。搅拌头的几何轮廓是接头性能最显著的参数^[46]，而对于相同搅拌头，焊具转速和点焊时间对

微观组织和力学性能具有重要影响^[4]。

铝-铜复合结构 FSSW 的接头力学性能与工艺参数的关系较为复杂，科研人员逐步采用统计方法以建立点焊参数与接头性能的分析模型。COLMENERO 等^[49]将焊具转速和点焊时间作为变量，提出了铝-铜 FSSW 接头剪切失效载荷的经验方程。应用曲面对应法(图 10)，预测得到最优接头剪切性能为 4.96 kN，同参数下的试验值为 4.83 kN，误差仅为 2.6%。对于多变量下的接头性能，SIDDHARTH 等^[47]建立了接头剪切强度与焊具转速、下压深度和点焊时间

表 1 铝-铜 FSSW 工艺参数及接头性能

实验材料	搅拌头参数					工艺参数				最大剪切失效载荷/N
	搅拌头材质	轴肩形状	轴肩直径/mm	搅拌针直径/mm	搅拌针长度/mm	焊具转速/(r/min)	保压时间/s	下压速度/(mm/s)	下压深度/mm	
Al-6061 无氧铜 ^[29]	H13 钢	凹形	10	4	1.83~2.60	1 000~3 000	3~6	2.5	0~0.2	1 855
Al-5052 C27200 ^[47]	H13 钢	平面形	16	6	1	850~1 750	5~30	0.42	0.75~3.00	3 850
Al-1060 T2 铜 ^[48]	SKD61 钢	凹形平面形	14	4.61	2.85	1 500~2 250	5	—	0~0.2	4 304
Al-1050 纯铜 ^[49]	AISI D2 钢	凹形	10	3	4.5	710~1 800	0~10	0.62	0.2	4 800

的经验关系式。通过优化工艺，理论值与试验值的误差控制在 2%以下，但文中并未考虑变量间的联合作用。而对于回填式 FSSW，下压深度的单独作用以及下压深度-焊具转速的联合作用对接头性能具有显著影响^[50]，这可以归因于下压深度提供了较强的机械连锁效果，焊具转速提供了足够的摩擦热。然而，摩擦作用造成的温度提升不宜超过铝-铜的共晶温度，液态共晶影响了轴向压力的施加，使接头产生隧道缺陷，严重削弱了接头的力学性能，如图 11 所示。

图 10 不同焊接参数下的接头强度分布图

图 11 铝-铜界面处的隧道缺陷

3.2 铝-铜复合结构 FSSW 接头组织与性能

铝-铜 FSSW 一般采用“铝上铜下”的连接形式。如图 12 所示，铜层受到搅拌针的挤压作用，部分铜进入铝层产生 Hook 缺陷^[29]。搅拌区内存在大量离散、细小的铜颗粒，且主要聚集于 Hook 尖端一侧^[51]。铜颗粒的存在一方面提高了铝基体的含铜量，形成固溶强化；另一方面，铜颗粒与铝基体具有良好的界面结合，产生弥散强化。大尺寸铜颗粒具有明显的多层结构，其内部为 Al_4Cu_9 相和

Cu(Al)固溶体,外部为 CuAl_2 薄层^[52]。小尺寸的铜颗粒转变为脆硬的 IMC 颗粒,其成分与经历的热循环有关^[53]。一般认为,Hook 缺陷并不利于 FSSW 接头的力学性能^[15]。而在铝-铜 FSSW 中,由 Hook 缺陷形成的 Hook 环有利于接头的机械连锁^[52]。Hook 环形貌受到焊接工艺的影响。合理的焊具转速和下压量可获得良好轮廓的 Hook 环,而过高的转速增加了 Hook 环的破裂倾向。进一步的研究表明,将 Hook 环的高度与宽度的比值作为 Hook 环的特征参数能够有效描述 Hook 环与接头剪切强度的关系,见图 13。但此关系是否同样适用于不规则结构的 Hook 环,仍需进一步的研究。

图 12 铝-铜接头搅拌区的微观组织

图 13 转速与 Hook 环形貌对接头剪切性能的影响

铝-铜 FSSW 的冶金结合既包括 Hook 环与铝的界面连接也包含铝-铜的界面作用。ZHOU 等^[52]通过热力学分析探讨了 Hook 环界面 IMC 层的演化机制。低转速下,Hook 环界面仅有非连续的 Al_2Cu 层;提高转速,Hook 环界面存在 Al_2Cu 、 AlCu 和 Al_4Cu_9 三个 IMC 子层;进一步增大转速,IMC 子层厚度增加并且界面完整性受到破坏。由于 FSSW 属于非平衡传热过程,铝-铜化合物的热力学生长趋势需要考虑到元素浓度的影响,修正后的计算结果表明, Al_2Cu 具有最高的热力学生长趋势而 Al_4Cu_9 的生长趋势最弱,这与实验结果相一致。剪切载荷作用下,裂纹倾向于沿着 Hook 环界面 IMC 层延伸,而当 Hook

环界面处的冶金结合较强时,搅拌区中分散的 IMC 颗粒可以为裂纹扩展提供更便捷的路径。

铝-铜二元体系存在多种金属间化合物,如 Al_4Cu_9 、 Al_3Cu_4 、 Al_2Cu_3 、 AlCu 和 Al_2Cu ^[54],其中受到普遍报导的金属间化合物是 Al_4Cu_9 和 Al_2Cu ^[55]。过厚的连续 IMC 层制约了接头的力学性能,通过在铝-铜界面添加微量的 Ti 元素可以细化组织并降低 IMC 层的厚度^[56]。此外,微量 Ce 的加入不仅能够降低铝-铜接头 IMC 层的厚度,也有助于提高结构的断裂韧性^[54]。由相图可知,Al 和 Cu 都能与 Zn 形成合金,Zn 提供了 Al、Cu 之间高强度连接的可能性^[57]。BOUCHERIT 等^[58]设计了“铜上铝下”的 FSSW 接头形式,以防止融化的 Zn 沿搅拌针溢出。无 Zn 中间层时,Al-Cu 界面存在 Al_2Cu 和 Al_4Cu_9 两种连续分布的 IMC 层;而添加 Zn 中间层时,界面为连续的 $\text{Al}_{4.2}\text{Cu}_{3.2}\text{Zn}_{0.7}$ 层和离散分布的 Al_2Cu 粒子。中间层的加入使接头失效载荷从 $2\,230 \pm 300\text{ N}$ 提高至 $4\,620 \pm 400\text{ N}$ 。Zn 中间层的作用机制可以归结于 $\text{Al}_{4.2}\text{Cu}_{3.2}\text{Zn}_{0.7}$ 相在一定程度上抑制了铝-铜 IMC 的形成^[59]。 $\text{Al}_{4.2}\text{Cu}_{3.2}\text{Zn}_{0.7}$ 的连续析出一方面有利于铝-铜界面连接;另一方面破坏了脆性 IMC 的连续性。值得注意的是,由于 Zn-Al-Cu 共晶体具有较好的流动性,Zn 中间层的厚度对接头性能没有显著影响。

4 铝-钢复合结构

4.1 铝-钢复合结构 FSSW 工艺研究

对于铝-钢 FSSW 复合结构,一般认为点焊时间、焊具转速、下压深度是影响接头性能的主要焊接参数。FEREIDUNI 等^[60]发现搅拌针不穿透铝层时,界面主要连接机制为 IMC 冶金结合和原子扩散;搅拌针穿透铝层时,界面同时存在 IMC 冶金结合和 Hook 机械连锁。从力学性能而言,适当提高搅拌头的下压深度有助于提高铝-钢构件的力学性能^[61]。但过高的下压深度可能会形成较大尺寸的 Hook 环,削弱连接效果。BOZZI 等^[62]研究了点焊时间对接头组织与性能的影响。随着点焊时间的延长,接头剪切失效载荷呈现非线性的增长趋势。这是由于提高点焊时间先一步产生了更大的连接面积,当连接面积到达阈值后,IMC 占主导作用。IMC 的种类逐渐增加,且更趋向于形成高硬度的 IMC。FIGNER 等^[63]发现在较长的点焊时间下,部分生长中的 IMC 颗粒从铝-钢界面脱落并在铝基体中聚集成带状结构,使 IMC 层的相对厚度翻倍。焊具转速是摩擦热和 IMC 层生长的关键因素,FEREIDUNI

等^[64]探讨了焊具转速和点焊时间对 Al-5083/St-12 钢点焊接头剪切性能的影响。由于搅拌针在点焊过程仅与铝层接触, 热输入较低, 界面中心区域形成了非连续的 IMC 层, 边缘区域仅有少量的 IMC 颗粒, 如图 14 所示。相比于 1 100 r/min, 采用 900 r/min 的转速可获得更佳连接效果, 这是因为界面在高速下产生了“旋流层状结构”, 削弱了结合效果。接头强度随点焊时间的提高先增后减, 较低点焊时间无法使界面 IMC 形核长大, 过高的点焊时间使界面产生了连续的脆硬 IMC 层。

图 14 转速 1 100 r/min 和停留时间 10 s 的界面微观形貌

4.2 铝-钢复合结构 FSSW 接头组织与性能

如前所言, IMC 对于铝-钢接头的性能具有至关重要的作用^[17]。铝-铁二元体系具有多种稳定的 IMC, 如 AlFe_3 、 AlFe 、 Al_3Fe_2 、 Al_2Fe 、 Al_5Fe_2 和 Al_3Fe ^[65]。然而在非平衡条件下, 一些 IMC 并不存在^[66]。BOUCHE 等^[67]通过热浸试验在铝-钢界面仅发现了 Al_3Fe 和 Al_5Fe_2 的存在。且 Al_3Fe 呈线性生长, Al_5Fe_2 遵循抛物线的生长规律^[68]。IMC 生长取决于溶质扩散, 而溶质扩散是热激活过程。为降低搅拌作用对溶质扩散的影响, HSIEH 等^[69]采用无针式 FSSW 研究了摩擦热对 IMC 的生长调控。结果表明, 铝-钢界面 IMC 厚度随焊接热循环峰值温度的降低而降低, 并随点焊时间的增加而增加。铝-钢界面存在两种 IMC 层, 分别为 Al_5Fe_2 和 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 。值得注意的是, IMC 层的成分并不随热源距离变化而发生变化。对于常规 FSSW, WATANABE 等^[66]在铝-钢界面发现了均匀、连续的 IMC 层, $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 层分布于铝侧, Al_5Fe_2 层分布于钢侧, IMC 层厚度与保压时间的平方根成正比。同时, 部分长条状的白色组织从钢侧刺入 IMC 层。随着点焊时间的延长, 白色组织逐渐减少而 IMC 层厚度增加。FEREIDUNI 等^[70]通过菊池衍射花样精确表征了 IMC 层的物相结构, 并将白色组织确定为 AlFe 相, 如图 15a 所示。在搅拌作用下, AlFe 、 Al_5Fe_2 和 Al_3Fe 三个 IMC 亚层具有不规则的层间行貌。通过调控焊接工艺可使

IMC 层厚度从 1.7 μm 升至 3 μm , 并使其形貌由不连续变为相对连续。BOZZI 等^[71]借助透射电子显微镜, 在 IMC 层发现了长约 500 nm 的梭形颗粒相, 如图 15b 所示。EDS 和电子衍射图谱表明, IMC 层由 Al_2Fe (菱方结构)、 Al_5Fe_2 (正交结构)和 FeAl_3 (单斜结构)组成, 且 FeAl_3 内含有高密度的孪晶界。

图 15 铝-钢 IMC 层的组织成分

IMC 厚度对接头力学性能的影响具有峰值效应, 过薄的 IMC 层无法提供有效的界面连接, 过厚的 IMC 层易于裂纹扩展产生脆性断裂。一些学者指出, 厚度小于 10 μm 的 IMC 层有利于铝-钢接头的界面连接^[60]。脆硬的 IMC 是裂纹萌生和扩展的重要路径, 超过 30 μm 的 IMC 层具有明显的内部微裂纹^[69]。当 IMC 层厚度约为 8 μm 时, 不仅 IMC 层内部的微裂纹不能诱发断裂, 而且沿 Hook 环界面扩展的宏观裂纹也同样得到了抑制^[71]。但对于铝-钢 FSSW 的 IMC 层厚度调控, 目前还缺乏有效的方法。

对于铝-钢 FSSW 接头的性能, 大部分的研究都集中于接头剪切性能, 而疲劳性能、耐蚀性能的报道较少。表 2 是铝-钢接头在不同连接工艺下的力学性能, 如表所示, FSSW 具有较高的接头强度, 是常规铝-铜点焊的替代方法。大量的研究表明, 适当的表面镀层处理有助于铝-钢复合结构的连接^[72]。DA SILVA 等^[73]探讨了 AA1050 铝合金与 Al-Si 镀层钢 FSSW 的可行性。Al-Si 镀层的存在不仅消除了 IMC 的影响, 而且焊后不规则的 Al-Si 镀层界面表明铝在 Al-Si 镀层中具有良好的扩散能力。通过焊接参数的优化, 接头的最大剪切载荷可达 5.32 kN。DONG 等^[74]采用回填式 FSSW 讨论了铝-镀锌钢连接的可行性, 接头最大拉伸剪切载荷为 4 500 N。随着转速和搅拌套深度的增加, 接头机械结合和点焊均匀性得到了改善, 但是 Zn、O 原子组成的网状结构可能会弱化连接效果。由于回填式 FSSW 的较低热输入, 铝-钢界面的 IMC 层厚度仅 0.68 μm , 且只出现在搅拌套对应的部位。

表 2 不同点焊工艺的接头剪切性能

连接方法	上板材质	下板材质	最大剪切失效载荷/N
回填式 FSSW ^[74]	1.5 mm ST-Al	2.0 mm 镀锌钢	4 500
回填式 FSSW ^[75]	1.6 mm Al-6022	2.0 mm 镀锌钢	6 950
常规 FSSW ^[73]	2.5 mm AA-1050	1.8 mm 22MnB5	5 320
常规 FSSW ^[64]	3.0 mm Al-5083	1.0 mm St-12	4 020
电阻点焊 ^[76]	1.2 mm AA-6022	2.0 mm 镀锌钢	4 210
CMT 点焊 ^[77]	1.0 mm AA-6061	1.2 mm 镀锌钢	4 100

常规的 FSSW 同时涉及铝板和钢板的摩擦产热, 界面 IMC 层具有较高的生长趋势。CHEN 等^[78]提出了一种新型 FSSW 方法, 不仅消除了界面 IMC 层和 IMC 颗粒, 而且仅需较短的焊接时间(<1.1 s)就可获得剪切失效载荷约为 3.5 kN 的焊接接头, 实现了铝-钢结构的高效连接。但接头软化(图 16)和搅拌针磨损是有待解决的问题。CHEN 等^[79]设计了一种匙孔转移 FSSW 工艺, 填充了铝-铜 FSSW 的原有匙孔。由于增大了铝-钢界面的连接面积, 接头剪切失效载荷达到了 6.91 ± 0.27 kN, 且伸长率提高了 81.25%。

图 16 不同移动速度下接头各区域硬度分布

出于安全性的考虑, 铝-钢点焊接头的疲劳性能是非常重要的指标。疲劳裂纹在铝-钢界面处萌生, 并向中心扩展, 经界面孔洞和间隙的诱导最终沿铝层断裂^[63](图 17)。UEMATSU 等^[80]依据疲劳载荷的高低, 将铝-钢 FSSW 的疲劳断裂分为三种模式。高载荷下, 裂纹沿界面扩展发生剪切断裂; 低载荷下, 疲劳裂纹从铝层开始扩展直至断裂; 中等载荷下, 界面剪切断裂和铝层裂纹扩展断裂同时存在。而断裂模式转变机制尚不明确。IBRAHIM 等^[81]指出, 在铝-镀锌钢 FSSW 疲劳断裂中, 界面剪切断裂占主导作用, 且铝层的二次裂纹无法使断裂方式转变为铝层裂纹扩展断裂。此外, 对比铝-镀锌钢和铝-低碳钢的接头性能, 铝-镀锌钢的剪切强度低于铝-低碳钢, 但铝-镀锌钢接头表现出更高的疲劳强度。有

限元分析表明, 低熔点的锌凝固所产生的应力松弛使铝-镀锌钢接头获得了较好的疲劳性能。

图 17 三点振动疲劳试验结果

5 结论和展望

(1) 搅拌摩擦点焊是一种绿色、高效、固相连接技术, 在铝-碳纤维增强热塑性树脂基复合材料、铝-铜和铝-钢等异种材料的连接中具有明显的优势。尤其是新型搅拌摩擦点焊技术可以保证力学性能和连接效率, 对实现结构轻量化具有极大的竞争力。

(2) 铝-碳纤维增强热塑性树脂基复合材料搅拌摩擦点焊主要依靠树脂固化粘结和界面机械连锁实现连接, 铝-铜和铝-钢的搅拌摩擦点焊主要依靠金属间化合物的冶金结合和 Hook 缺陷形成的机械连锁实现连接。通过优化焊接参数、适当的表面处理工艺等方法可强化界面连接效果, 进而获得力学性能优良的接头。

(3) 由于异种材料搅拌摩擦点焊的可变因素较多, 采用有限元数值模拟来分析搅拌针穿透上板所引起的强烈物质混合、搅拌针不穿透上板所引发的界面形变与金属间化合物层的热激活生长、裂纹在脆硬金属间化合物层的扩展等热点问题具有较高的研究价值。而且, 新型匙孔填充技术的研发以及硬质材料搅拌摩擦点焊的搅拌针磨损也是目前迫切需要解决的难题。同时, 考虑到构件的服役要求, 研

究和改善异种材料搅拌摩擦点焊接头的疲劳强度和耐蚀性能将具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 李永兵, 马运五, 楼铭, 等. 轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 1-23.
LI Yongbing, MA Yunwu, LOU Ming, et al. Advances in welding and joining processes of multi-material lightweight car body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 1-23.
- [2] HUANG Y X, MENG X C, XIE Y M, et al. Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites[J]. Composites Part A, 2018, 105: 235-257.
- [3] GULLINO A, MATTEIS P, D'AIUTO F. Review of aluminum-to-steel welding technologies for car-body applications[J]. Metals, 2019, 9(3): 1-28.
- [4] ZHANG Z H, YANG X Q, ZHANG J L, et al. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy[J]. Materials & Design, 2011, 32(8-9): 4461-4470.
- [5] THOPPUL S D, FINEGAN J, GIBSON R F. Mechanics of mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures-a review[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(3-4): 301-329.
- [6] KWEON J H, JUNG J W, KIM T H, et al. Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding[C]//13th International Conference on Composite Structures, 2006, 75(1-4): 192-198.
- [7] BERGMANN J P, PETZOLDT F, SCHURER R, et al. Solid-state welding of aluminum to copper—case studies[J]. Welding in the World, 2013, 57(4): 541-550.
- [8] BAKAVOS D, CHEN Y C, BABOUT L, et al. Material interactions in a novel pinless tool approach to friction stir spot welding thin aluminum sheet[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42A(5): 1266-1282.
- [9] MA Z Y. Friction stir processing technology: a review[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39A(3): 642-658.
- [10] ZHANG G F, ZHANG L J, KANG C W, et al. Development of friction stir spot brazing (FSSB)[J]. Materials & Design, 2016, 94: 502-514.
- [11] BOZZI S, HELBERT-ETTER A L, BAUDIN T, et al. Influence of FSSW parameters on fracture mechanisms of 5182 aluminium welds[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(11): 1429-1435.
- [12] VENUKUMAR S, YALAGI S G, MUTHUKUMARAN S, et al. Static shear strength and fatigue life of refill friction stir spot welded AA 6061-T6 sheets[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014 19(3): 214-223.
- [13] COX C D, GIBSON B T, DELAPP D R, et al. A method for double-sided friction stir spot welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16(2): 241-247.
- [14] YAZDI S R, BEIDOKHTI B, HADDAD-SABZEVAR M. Pinless tool for FSSW of AA 6061-T6 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 267: 44-51.
- [15] LI W, LI J F, ZHANG Z H, et al. Improving mechanical properties of pinless friction stir spot welded joints by eliminating hook defect[J]. Materials & Design, 2014, 62: 247-254.
- [16] LIU X, WANG X J, WANG B S, et al. The role of mechanical connection during friction stir keyholeless spot welding joints of dissimilar materials[J]. Metals, 2017, 7(6): 1-12.
- [17] 相倩, 吕念春, 薛鹏, 等. 铝-钢异种金属搅拌摩擦焊研究现状及展望[J]. 机械工程学报, 2017, 53(20): 28-37.
XIANG Qian, LÜ Nianchun, XUE Peng, et al. Research status and prospect on friction stir welded dissimilar Al-steel joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(20): 28-37.
- [18] IBRAHIM I J, YAPICI G G. Application of a novel friction stir spot welding process on dissimilar aluminum joints[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 282-288.
- [19] ROSENDO T, PARRA B, TIER M A D, et al. Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181-T4 aluminium alloy[J]. Materials & Design, 2011, 32(3): 1094-1100.
- [20] AMANCIO-FILHO S T, CAMILLO A P C, BERGMANN L, et al. Preliminary investigation of the microstructure and mechanical behaviour of 2024 aluminium alloy friction spot welds[J]. Materials Transactions, 2011, 52(5): 985-991.
- [21] AMANCIO-FILHO S T, BUENO C, DOS SANTOS J F, et al. On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures[J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2011, 528(10-11): 3841-3848.
- [22] PRAMANIK A, BASAK A K, DONG Y, et al. Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys-a review[J]. Composites Part A-Applied Science and Manufacturing, 2017, 101: 1-29.
- [23] ANDRE N M, DOS SANTOS J F, AMANCIO-FILHO S T. Evaluation of joint formation and mechanical

- performance of the AA7075-T6/CFRP spot joints produced by frictional heat[J]. *Materials*, 2019, 12(6): 1-14.
- [24] BALLE F, WANGNER G, EIFLER D. Ultrasonic metal welding of aluminium sheets to carbon fibre reinforced thermoplastic composites[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2009, 11(1-2): 35-39.
- [25] GOUSHEGIR S M, DOS SANTOS J F, AMANCIO-FILHO S T. Friction spot joining of aluminum AA2024/carbon-fiber reinforced poly (phenylene sulfide) composite single lap joints: microstructure and mechanical performance[J]. *Materials & Design*, 2014, 54: 196-206.
- [26] GOUSHEGIR S M, DOS SANTOS J F, AMANCIO-FILHO S T. Influence of process parameters on mechanical performance and bonding area of AA2024/carbon-fiber-reinforced poly (phenylene sulfide) friction spot single lap joints[J]. *Materials & Design*, 2015, 83: 431-442.
- [27] ESTEVES J V, GOUSHEGIR S M, DOS SANTOS J F, et al. Friction spot joining of aluminum AA6181-T4 and carbon fiber-reinforced poly (phenylene sulfide): effects of process parameters on the microstructure and mechanical strength[J]. *Materials & Design*, 2015, 66: 437-445.
- [28] SATO Y S, SHIOTA A, KOKAWA H, et al. Effect of interfacial microstructure on lap shear strength of friction stir spot weld of aluminium alloy to magnesium alloy[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, 15(4): 319-324.
- [29] HEIDEMAN R, JOHNSON C, KOU S. Metallurgical analysis of Al/Cu friction stir spot welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, 15(7): 597-604.
- [30] GERLICH A, YAMAMOTO M, NORTH T H. Local melting and tool slippage during friction stir spot welding of Al-alloys[J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43(1): 2-11.
- [31] GOUSHEGIR S M, DOS SANTOS J F, AMANCIO-FILHO S T. Failure and fracture micro-mechanisms in metal-composite single lap joints produced by welding-based joining techniques[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 81: 121-128.
- [32] OGAWA Y, XIONG Y, AKEBONO H, et al. Fatigue properties of friction stir welds of treated Al to carbon fibre-reinforced plastic[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2018, 23(1): 79-86.
- [33] OGAWA Y, AKEBONO H, TANAKA K, et al. Effect of welding time on fatigue properties of friction stir spot welds of Al to carbon fibre-reinforced plastic[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, 24(3): 235-242.
- [34] ANDRE N M, GOUSHEGIR S M, DOS SANTOS J F, et al. Friction spot joining of aluminum alloy 2024-T3 and carbon-fiber-reinforced poly (phenylene sulfide) laminate with additional PPS film interlayer: microstructure, mechanical strength and failure mechanisms[J]. *Composites Part B*, 2016, 94: 197-208.
- [35] ANDRE N M, GOUSHEGIR S M, DOS SANTOS J F, et al. Influence of the interlayer film thickness on the mechanical performance of AA2024-T3/CF-PPS hybrid joints produced by friction spot joining[J]. *Welding International*, 2018, 32(1): 1-10.
- [36] NAGATSUKA K, YOSHIDA S, TSUCHIYA A, et al. Direct joining of carbon-fiber-reinforced plastic to an aluminum alloy using friction lap joining[J]. *Composites Part B*, 2015, 73: 82-88.
- [37] HECKERT A, ZAEH M F. Laser surface pre-treatment of aluminium for hybrid joints with glass fibre reinforced thermoplastics[C]//*Physics Procedia*. Netherlands: Elsevier Science BV, 2014: 1171-1181.
- [38] ZHANG Z, SHEN J G, TAN X H, et al. Effect of anodizing pretreatment on laser joining CFRP to aluminum alloy A6061[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2016, 70: 142-151.
- [39] VAN DER LEEDEN M C, FRENS G. Surface properties of plastic materials in relation to their adhering performance[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2002, 4(5): 280-289.
- [40] GOUSHEGIR S M, DOS SANTOS J F, AMANCIO-FILHO S T. Influence of aluminum surface pre-treatments on the bonding mechanisms and mechanical performance of metal-composite single-lap joints[J]. *Welding in the World*, 2017, 61(6): 1099-1115.
- [41] GOUSHEGIR S M. Friction spot joining (FSpJ) of aluminum-CFRP hybrid structures[J]. *Welding in the World*, 2016, 60(6): 1073-1093.
- [42] KHODABAKHSHI F, HAGHSHEENAS M, CHEN J, et al. Bonding mechanism and interface characterisation during dissimilar friction stir welding of an aluminium/polymer bi-material joint[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2017, 22(3): 182-190.
- [43] 张云鹤. 碳纤维增强铝基复合材料金属 Z-pin 层间强化技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- ZHANG Yunhe. Interlaminar strengthening technology by metal Z-pin of carbon fiber reinforced Al-matrix composites[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [44] PABANDI H K, MOVAHEDI M, KOKABIA H. A new refill friction spot welding process for aluminum/polymer

- composite hybrid structures[J]. *Composite Structures*, 2017, 174: 59-69.
- [45] GOUSHEGIR S M, SCHARNAGL N, DOS SANTOS J F, et al. XPS analysis of the interface between AA2024-T3/CF-PPS friction spot joints[C]//Surface and interface analysis. 7th Symposium of Aluminium Surface Science and Technology (ASST), 2016: 706-711.
- [46] ABBASS M K, HUSSEIN S K, KHUDHAIR A A. Optimization of mechanical properties of friction stir spot welded joints for dissimilar aluminum alloys (AA2024-T3 and AA 5754-H114)[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2016, 41(11): 4563-4572.
- [47] SIDDHARTH S, SENTHILKUMAR T, CHANDRASEKAR M. Development of processing windows for friction stir spot welding of aluminium Al5052 /copper C27200 dissimilar materials[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(6): 1273-1284.
- [48] 周炜璐. 铝/铜搅拌摩擦点焊工艺及机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- ZHOU Weilu. Research on process and mechanism of friction stir spot welding for Al/Cu[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [49] COLMENERO A N, OROZCO M S, MACIAS E J, et al. Optimization of friction stir spot welding process parameters for Al-Cu dissimilar joints using the energy of the vibration signals[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100(9-12): 2795-2802.
- [50] CARDILLO M E B, SHEN J J, DE ALCANTARA N G, et al. Effect of friction spot welding parameters on the joint formation and mechanical properties of Al to Cu[J]. *Welding in the World*, 2019, 63(1): 33-41.
- [51] MUBIAYI M P, AKINLABI E T, MAKHATHA M E, et al., Effect of process parameters on tensile strength and morphology of friction stir spot welds of aluminium and copper[C]//8th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies(ICMIMT), 2017: 48-53.
- [52] ZHOU L, LI G H, ZHANG R X, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of friction stir spot welded dissimilar aluminum-copper joint[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 775: 372-382.
- [53] MUBIAYI M P, AKINLABI E T. Evolving properties of friction stir spot welds between AA1060 and commercially pure copper C11000[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(7): 1852-1862.
- [54] FENG J, XUE S B. Growth behaviors of intermetallic compound layers in Cu/Al joints brazed with Zn-22Al and Zn-22Al-0.05Ce filler metals[J]. *Materials & Design*, 2013, 51: 907-915.
- [55] MEHTA K P, BADHEKA V J. A review on dissimilar friction stir welding of copper to aluminum: process, properties, and variants[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, 31(3): 233-254.
- [56] JI F, XUE S B, DAI W. Effects of Ti on the brazability of Zn-22Al-xTi filler metals as well as properties of Cu/Al brazing joints[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(12): 2453-2457.
- [57] KUANG B, SHEN Y F, CHEN W H, et al. The dissimilar friction stir lap welding of 1A99 Al to pure Cu using Zn as filler metal with “pinless” tool configuration[J]. *Materials & Design*, 2015, 68: 54-62.
- [58] BOUCHERIT A, AVETTAND-FENOEL M N, TAILLARD R. Effect of a Zn interlayer on dissimilar FSSW of Al and Cu[J]. *Materials & Design*, 2017, 124: 87-99.
- [59] XIAO Y, JI H J, LI M Y, et al. Ultrasound-assisted brazing of Cu/Al dissimilar metals using a Zn-3Al filler metal[J]. *Materials & Design*, 2013, 52: 740-747.
- [60] FEREIDUNI E, MOVAHEDI M, KOKABI A H. Dissimilar Al/steel friction stir spot welding: to penetrate into the lower steel sheet or not?[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2016, 21(6): 466-472.
- [61] MIYAGAWA K, TSUBAKI M, YASUI T, et al. Spot welding between aluminium alloy and low-carbon steel by friction stirring[J]. *Welding International*, 2009, 23(8): 559-564.
- [62] BOZZI S, ETTER A L, BAUDIN T, et al. Mechanical behaviour and microstructure of aluminum-steel sheets joined by FSSW[J]. *Textures, Stress and Microstructures*, 2008, 2007: 1-8.
- [63] FIGNER G, VALLANT R, WEINBERGER T, et al. Friction stir spot welds between aluminium and steel automotive sheets: influence of welding parameters on mechanical properties and microstructure[J]. *Welding in the World*, 2009, 53(1-2): 13-23.
- [64] FEREIDUNI E, MOVAHEDI M, KOKABI A H. Aluminum/steel joints made by an alternative friction stir spot welding process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 224: 1-10.
- [65] MEHTA K P. A review on friction-based joining of dissimilar aluminum-steel joints[J]. *Journal of Materials Research*, 2019, 34(1): 78-96.
- [66] WATANABE M, FENG K Y, NAKAMURA Y, et al. Growth manner of intermetallic compound layer produced at welding interface of friction stir spot welded aluminum/steel lap joint[J]. *Materials Transactions*, 2011,

- 52(5): 953-959.
- [67] BOUCHE K, BARBIER F, COULET A. Intermetallic compound layer growth between solid iron and molten aluminium[J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 1998, 249(1-2): 167-175.
- [68] BOUAYAD A, GEROMETTA C, BELKEBIR A, et al. Kinetic interactions between solid iron and molten aluminium[J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2003, 363(1-2): 53-61.
- [69] HSIEH M J, LEE R T, CHIOU Y C. Friction stir spot fusion welding of low-carbon steel to aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 240: 118-125.
- [70] FEREDUNI E, MOVAHEDI M, KOKABI A H, et al. Effect of dwell time on joint interface microstructure and strength of dissimilar friction stir spot-welded Al-5083 and St-12 alloy sheets[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, 48A(4): 1744-1758.
- [71] BOZZI S, HELBERT-ETTER A L, BAUDIN T, et al. Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot welds[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527(16-17): 4505-4509.
- [72] SHEN Z, DING Y, CHEN J, et al. Interfacial bonding mechanism in Al/coated steel dissimilar refill friction stir spot welds[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(6): 1027-1038.
- [73] DA SILVA A A M, ALDDANONDO E, ALVAREZ P, et al. Friction stir spot welding of AA 1050 Al alloy and hot stamped boron steel (22MnB5)[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, 15(8): 682-687.
- [74] DONG H G, CHEN S, SONG Y, et al. Refilled friction stir spot welding of aluminum alloy to galvanized steel sheets[J]. *Materials & Design*, 2016, 94: 457-466.
- [75] SHEN Z, CHEN J, DING Y, et al. Role of interfacial reaction on the mechanical performance of Al/steel dissimilar refill friction stir spot welds[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2018, 23(6): 462-477.
- [76] CHEN N N, WANG M, WANG H P, et al. Microstructural and mechanical evolution of Al/steel interface with Fe₂Al₅ growth in resistance spot welding of aluminum to steel[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 34: 424-434.
- [77] LEI H Y, LI Y B, CARLSON B E, et al. Microstructure and mechanical performance of cold metal transfer spot joints of AA6061-T6 to galvanized DP590 using edge plug welding mode[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2016, 138(7): 1-13.
- [78] CHEN Y C, GHOLINIA A, PRANGNELL P B. Interface structure and bonding in abrasion circle friction stir spot welding: a novel approach for rapid welding aluminium alloy to steel automotive sheet[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2012, 134(1): 459-463.
- [79] CHEN K, LIU X, NI J. Keyhole refilled friction stir spot welding of aluminum alloy to advanced high strength steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249: 452-462.
- [80] UEMATSU Y, TOKAJI K, TOZAKI Y, et al. Fatigue behaviour of dissimilar friction stir spot welds between A6061-T6 and low carbon steel sheets welded by a scroll grooved tool without probe[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2011, 34(8): 581-591.
- [81] IBRAHIM I, UEMATSU Y, KAKIUCHI T, et al. Fatigue behaviour of dissimilar Al alloy/galvanised steel friction stir spot welds fabricated by scroll grooved tool without probe[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, 20(8): 670-678.
-
- 作者简介: 汤祖阳, 男, 1995 年出生。主要研究方向为复合材料与金属的连接工艺。
E-mail: tangzy@mail.dlut.edu.cn
- 董红刚(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为异种材料连接工艺与冶金机理、焊接材料成分设计、焊接热过程数值计算。
E-mail: donghg@dlut.edu.cn