

铝合金与高强钢摩擦塞铆焊接头连接性能

Lyu Shuqiang¹, Kim Jihoon², Cho Haeyong¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk, 361-763, Korea;

2. Sunil Dyfas Co., Ltd., Jincheon-Gun, Chungbuk, 365-830, Korea)

摘要: 为了解决铝合金与高强钢材料之间连接困难的问题, 保证铝合金与高强钢之间的连接质量, 采用摩擦塞铆焊工艺实现了 6061-T6 铝合金和 DP1470 高强钢的连接, 并通过对接头宏观形貌和微观组织特征的观察、接头力学性能的测试以及接头失效形式的对比, 研究了摩擦塞铆焊所获接头连接性能的变化规律。结果表明, 转速是影响焊接质量的重要因素。在焊接试验过程中, 转速控制范围为 5 000 ~ 8 000 r/min, 接头的抗拉强度随转速的增加先升高后降低, 当转速达到 7 000 r/min 时, 接头所承受的剪切载荷最大, 可以达到 6.3 kN, 此时得到的接头表面平整, 无明显孔洞、裂纹等缺陷。铝合金板材在接头处发生断裂失效时, 接头所能承受载荷相对较大, 焊接质量较高。因此, 铝合金和高强钢能够通过摩擦塞铆焊工艺实现高质量连接。

创新点: (1) 采用新型焊接工艺摩擦塞铆焊实现了铝合金和高强钢之间的连接。

(2) 通过试验对比分析, 具体研究了摩擦塞铆焊连接性能的变化规律。

(3) 摩擦塞铆焊工艺接头结合具有机械结合和冶金结合双重结合的特点。

关键词: 铝合金; 高强钢; 摩擦塞铆焊; 力学性能; 失效形式

中图分类号: TG 456.9

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20210310002

0 序言

随着能源节约和环境保护的需求不断提高, 汽车行业中车体轻量化已经成为了重要的发展趋势, 通过大量使用轻质、高强材料实现车体大幅减重已经成为车体轻量化中最为主要的手段。这些材料主要分为两类: 一类是高强钢材料, 用高强钢板替代普通钢板, 在保证车体强度和安全性能的基础上, 减少车体构件厚度, 从而达到减轻汽车的质量目的; 另一类是铝合金等低密度轻金属合金材料。这种材料因为其密度低、比强度高, 在达到减轻汽车的质量同时, 仍然能够保持车体强度的要求。但是, 车体在应用多种材料的同时, 也面临着异种材料之间的连接问题^[1]。由于铝合金和钢具有不同的金属组织和热物理属性, 如熔点、热膨胀系数、热导率, 所获得的接头容易产生裂纹、气孔和密封性差等缺点, 并且焊接时容易产生的较脆金属间化合物

(intermetallic compound, IMC), 进而降低焊接接头强度, 影响焊接质量^[2]。因此, 对于异种材料之间高质量连接方式的研究, 特别是铝合金与高强钢的高质量连接也成为了实现车体轻量化的关键。

为实现钢铝异种材料连接, 常用连接方法主要有自穿孔铆接 (self-piercing riveting, SPR)^[3]、旋转攻丝铆接 (flow drill screw, FDS)^[4]、电阻点焊 (resistance spot welding, RSW)^[5] 和搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW)^[6] 等, 不过由于高强钢的焊接性较差、塑性变形较小, 通过现有的技术实现铝合金与高强钢的异种材料之间连接依然具有一定的难度。目前, 针对铝合金与高强钢的连接技术的研究, 已经得到了国内外学者的广泛关注。Taban 等人^[7] 利用惯性摩擦焊技术在顶锻力作用下完成了 6061-T6 铝合金与 AISI 1018 钢材的异种金属连接, 对焊接接头的组织形貌、力学性能进行了研究, 结果表明, 惯性摩擦焊接头连接强度能够达到 250 MPa, 接头的铝合金板材处产生了断裂失效。王希靖等人^[8] 利用无匙孔搅拌摩擦点焊工艺完成了 6061 铝合金和 DP600 镀锌钢的异种金属连接, 得到的接头平整美观, 兼具铆接和冶金结合的双重连

收稿日期: 2021-03-10

基金项目: Carbon Industry Foundation Creation Projects of Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (10083614)

接作用. Kimapong 等人^[9]利用搅拌摩擦搭接焊技术, 将 A5083 铝合金和 SS400 钢进行了连接, 分析了焊接参数的变化对搭接接头性能的影响. Xian 等人^[10]利用自冲旋铆技术将预制铆钉从单边旋入预制的异种金属板材中, 利用旋转摩擦产生的热量塑化上方板材, 从而使得铆钉与板材接合处形成良好的冶金结合. 黄体方等人^[11]采用铆接辅助搅拌摩擦焊技术, 进行了铝/钢外源铆接搅拌摩擦焊接头连接机制的研究, 结果表明, 焊接接头实现了机械连接和冶金结合的双重结合, 铆接连接机构的使用, 不仅提高了接头的抗拉强度, 也具备了更好的密封性能. 由此可见, 铝钢异种金属连接技术已经得到了广泛关注, 但是对于铝合金与高强钢材料之间连接技术的研究还需进一步的探讨.

结合现有的铝钢异种金属连接技术的优势, 克服铝合金与高强钢材料之间连接困难的问题, 实现铝合金与高强钢之间的高质量连接, 采用新型焊接工艺摩擦塞铆焊实现了 6061-T6 铝合金和 6061-T6 铝合金和 DP1470 之间的连接, 并通过试验方法对不同转速下所获接头的组织形貌、力学性能以及接头失效形式的变化规律进行研究, 为该方法在铝合金与高强钢焊接的实际应用和可行性提供参考.

1 摩擦塞铆焊接头结合机理

摩擦塞铆焊 (friction element welding, FEW) 工艺是一种采用铝合金等轻质合金在上、钢板在下, 利用高速旋转的钢质铆钉, 穿透上层轻质合金板材, 并利用铆钉和下层板材的旋转摩擦生热, 熔化下层板材上表面, 并在一定压力的作用下, 完成铆钉与下层板材的焊接, 最终实现铝合金与高强钢稳固连接的技术, 是一种摩擦搅拌焊接与自冲铆接相结合的工艺. 摩擦塞铆焊工艺主要包括铆钉定位、穿透上板、持续加热和夹头撤回 4 个步骤, 具体工艺原理如图 1 所示.

利用专门的驱动装置, 驱动装置所提供的驱动力用 F 表示, 将专门的钢质铆钉装卡在夹头上, 放置在预先设置好的铝合金板材和高强钢板材的待连接位置, 铆钉在夹头的带动下做高速旋转运动, 并在一定下压速度下持续下压. 当钢质铆钉与上层铝合金板材接触时, 铝合金板材在高速旋转铆钉的摩擦作用下快速达到热塑性状态, 使铆钉持续穿过铝合金板材. 当铆钉穿透铝合金板材, 与下层高强

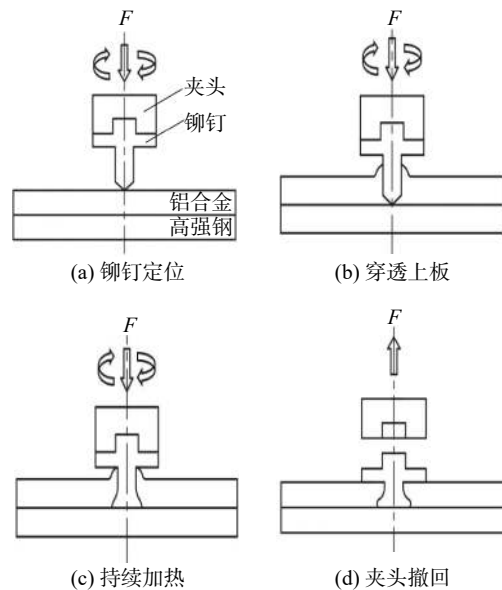


图 1 摩擦塞铆焊工艺原理

Fig. 1 Principle of friction element welding. (a) rivet position; (b) penetrate the upper plate; (c) continuous heating; (d) clamp retraction

钢板材接触时, 继续对旋转的铆钉施加压力, 持续摩擦加热一定时间, 由于高强度钢的熔点较高, 不易产生热塑性变化. 因此, 铆钉会首先产生热塑性变形, 随着高速旋转的铆钉与高强钢的持续摩擦, 塑化的铆钉与高强钢在压力的作用下, 在 高强钢的接触上表面形成摩擦焊接. 最后, 驱动装置停止转动并撤回夹头, 连接处塑化的材料与铆钉自然冷却后形成铆焊接头, 进而实现铝合金与高强钢的连接. 铝合金板材与高强钢板实现机械结合的同时, 也形成了一定程度的冶金结合.

2 试验方法

试验材料选用 6061-T6 铝合金和 DP1470 高强钢, 尺寸均为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$. 铆钉材料为 Q235 钢, 为了与夹具装置进行配合, 对其几何尺寸进行相应设计, 试验所用设备如图 2 所示. 首先, 将专用铆钉装夹工具头上, 将铝合金板置于高强钢板上方, 高强钢板下方放有垫板, 并通过紧固件将焊接工件进行固定. 焊接试验前, 预先打磨焊接板材表面, 并选定待焊位置, 当铆钉与铝合金板材在预先选定的位置接触, 通过持续高速旋转摩擦作用, 穿透铝合金板材, 并软化高强钢板材上表面, 持续摩擦加热一定的时间, 实现摩擦焊接结合, 最后控制工具头上升, 使其与铆钉脱离, 完成焊接过程.

在焊接试验过程中, 通过设备的控制面板对焊

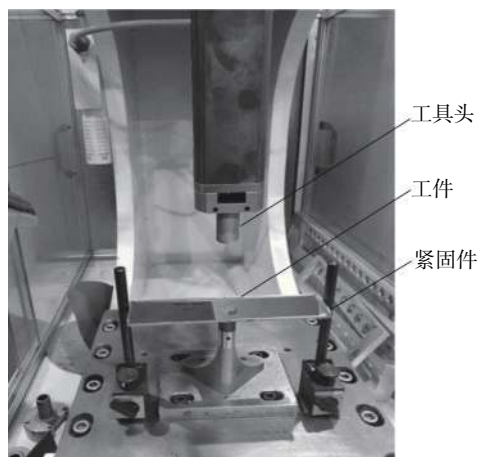


图 2 试验设备

Fig. 2 Testing equipment

接工艺的参数进行设定. 在设备的许用参数范围, 进行预先试验, 并参照前期学者关于摩擦塞铆焊接试验的研究结果^[12-13], 对比实际试验结果, 通过对焊接质量的比较来选定试验所需要的工艺参数. 结果显示, 在铝合金和高强钢的焊接过程中, 当转速低于 5 000 r/min 时, 焊接工件之间处于未熔合状态; 而当转速高于 7 000 r/min 时, 在高速摩擦挤压作用下, 铝合金板材塑性变形明显, 冷却后接头处有明显飞边产生, 往往很难得到成形质量较好的试样. 因此, 结合预试验结果, 在考虑焊接质量的基础上, 将转速的范围控制为 5 000 ~ 8 000 r/min. 在进行焊接试验时, 铆钉的下压速度为 120 mm/min, 持续加热时间恒定设置为 2 s, 工具头转速分别设定为 5 000, 6 000, 7 000 和 8 000 r/min 进行对比分析.

在试验结束后, 将得到的工件试样沿焊接位置横切接头, 对接头横截面进行打磨、抛光后, 分别使用 Olympus SZ-CTV 型立体显微镜和 Olympus BH-2 型金相显微镜对接头的宏观形貌和微观组织特征

进行观察分析, 使用 Instron 8801 型材料性能试验机对接头的力学性能进行测试, 并对接头的失效形式进行比较和分析.

3 试验结果与分析

3.1 接头的宏观形貌

试验结束后, 对不同焊接工艺参数下的接头成形进行观察, 并选取具有代表性的焊接工件试样对接头的宏观形貌和微观组织特征进行观察分析, 如图 3 所示. 图 3a 为转速 7 000 r/min 时所获接头的宏观形貌, 可以发现, 焊接接头表面平整, 无明显孔洞、裂纹等缺陷产生, 铆钉与焊接工件紧密结合, 密封性好. 铝合金板材在铆钉的摩擦挤压作用下产生了充分的塑性变形, 从而被铆钉穿透, 随着高速旋转的铆钉与高强钢的持续摩擦, 塑化的铆钉与高强钢在压力的作用下, 和高强钢的接触上表面形成摩擦焊接, 在形成机械结合的同时, 上下板材之间也形成了较好的冶金结合^[14]. 图 3b 和图 3c 分别为转速 8 000 和 6 000 r/min 时所获接头的宏观形貌. 可以发现, 焊接接头成形也较为理想, 并无明显孔洞、裂纹等缺陷产生, 焊接质量也相对较高. 图 3d 为转速 5 000 r/min 时所获接头的宏观形貌, 与前 3 种工艺参数下所获宏观形貌相比较, 可以发现, 此时在铝合金板材与铆钉的铆肩接合处有较为明显孔洞缺陷出现. 这是由于在焊接过程中, 在相同的持续加热时间下, 转速相对较低, 造成焊接热输入不足, 产生的热量不足以使铝合金板材达到充分的热塑性变形, 铆肩接合部未能及时补充流动的铝合金材料, 从而使得铆钉未能与焊接工件充分紧密结合, 因此对于转速的控制是获得高质量焊接接头成形的关键.

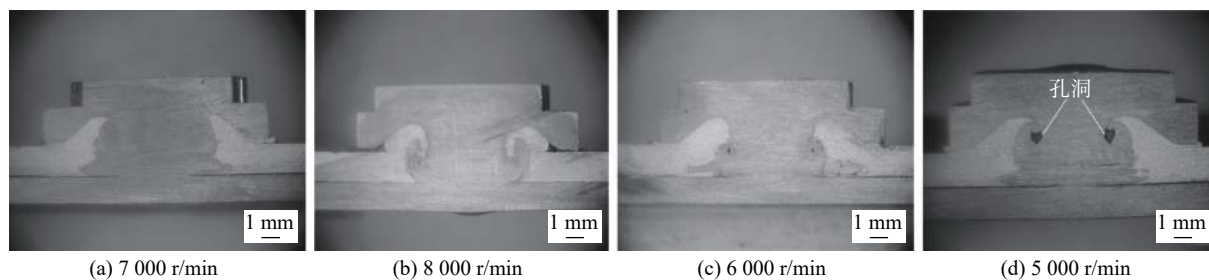


图 3 接头的宏观形貌

Fig. 3 Macro morphology of the joints. (a) 7 000 r/min; (b) 8 000 r/min; (c) 6 000 r/min; (d) 5 000 r/min

3.2 接头的微观组织特征

选取焊接成形质量最好的 7 000 r/min 转速时所获接头进行微观组织观察, 可以将焊接接头的微

观组织特征从焊接中心区域向外分为 4 个区域: 焊核区 (nugget zone, NZ)、热力影响区 (thermo-mechanically affected zone, TMAZ)、热影响区 (heat aff-

ected zone, HAZ) 和母材区 (base metal, BM), 如图 4 所示^[15]. NZ 区域和 TMAZ 区域如图 4a 所示, 其中, 焊缝间隙侧为 NZ 区域, 铆钉和高强钢板材之间已融为一体, 无明显分界, 这是因为铆钉在高速旋转的摩擦挤压作用下, 在 NZ 处与高强钢板材充分接合, 产生了足够的热塑性变形, 铆钉和高强钢板材之间的金属组织发生了动态再结晶, 能够形成了很好的冶金结合. 而焊核区域的大小也往往决定了焊接质量的高低. TMAZ 区域受到摩擦挤压和热循环作用要小于 NZ 区域, 部分组织能够发生动态再结晶, 但是组织之间依然连接致密均匀, 此时焊

缝的大小随着远离焊核区也愈发明显. HAZ 区域 (图 4b) 不再受到铆钉塑性变形的影响, 但依然会受到热传递所带来的影响, 铝合金板材会发生金属塑性流动, 所产生的金属化合物会附着到高强钢板材上, 起到了一定的连接作用. 而 BM 区域 (图 4c) 没有受到热变形和热量的影响, 因此材料之间没有发生塑性流动, 组织也没有发生明显的变化, 铝合金板材与高强钢板材之间间隙明显, 相互之间没有连接产生. 因此, 通过对接头的微观组织特征的变化分析可知, 在合适的焊接工艺参数下, 上下板材能够形成高质量的冶金结合.

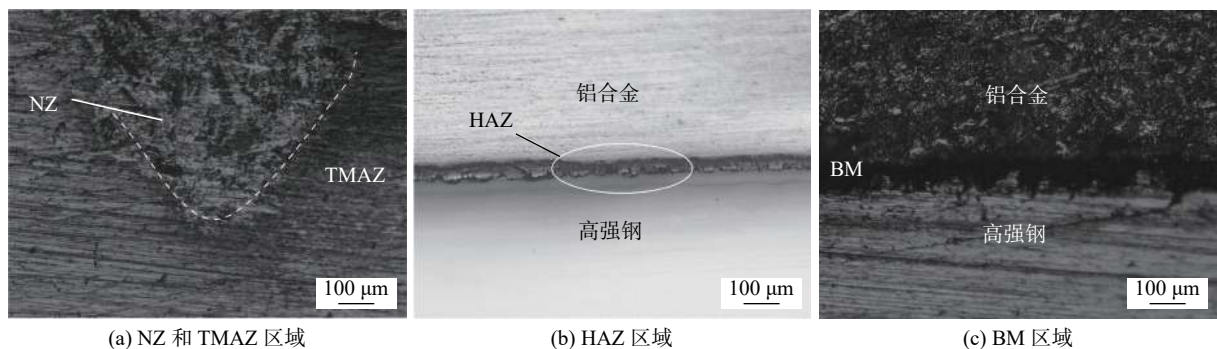


图 4 接头的微观组织

Fig. 4 Microstructure of the joints. (a) NZ and TMAZ; (b) HAZ; (c) BM

3.3 接头的力学性能

为了测试铝合金和高强钢摩擦塞铆焊接头的力学性能, 在 Instron 8801 材料性能试验机上进行摩擦塞铆焊接头连接强度试验, 测试过程中焊接工件试样的两端通过垫块夹紧确保剪切载荷作用于试样接头的切线方向, 同时为了得到准确的试验结果, 将试验所获得的每种焊接工件试样各重复 3 次剪切试验, 将试验结果取平均值, 得到剪切试验时的最大剪切载荷值, 不同工艺参数下接头的剪切载荷分布如图 5 所示.

在一定的持续加热时间下, 转速提高的同时,

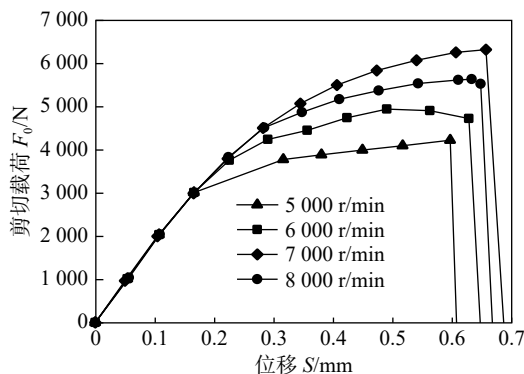


图 5 剪切载荷-位移曲线

Fig. 5 Shear load-displacement curve

接头所能承受的剪切载荷也相应地增加. 当转速相对较低时, 所能产生的焊接热量较少, 使得接头处的材料难以充分塑化, 易出现孔洞等焊接缺陷, 剪切试验中裂纹首先在焊接不足处发生, 导致接头所能承受的剪切载荷较低. 当转速相对较高时, 在一定的加热时间下, 所产生的焊接热量增加, 足以使得接头处的材料充分塑化, 铆钉与焊接工件能够紧密结合, 焊接质量较高, 接头所能承受的剪切载荷也越高. 在该试验中, 当转速为 5000 r/min 时, 所获接头平均最大剪切载荷值最低为 4211 N; 当转速达到 6000 r/min 时, 所获接头的平均最大剪切载荷值为 4936 N; 当转速达到 7000 r/min 时, 所获接头平均最大剪切载荷值最高为 6318 N. 而当转速达到 8000 r/min 时, 所获接头平均最大剪切载荷值最高为 5456 N, 这是因为转速相对过高时, 铆钉在穿透铝合金板材的过程中, 接头处材料塑化程度过高, 在铆钉与铝合金板材连接处有大量飞边产生, 焊接缺陷明显, 铆钉与铝合金板材之间不能充分紧密结合, 接头的抗拉强度反而有所下降, 此时焊接试验过程中接头成形如图 6 所示.

3.4 接头失效形式

在进行摩擦塞铆焊接头连接强度试验时, 接头

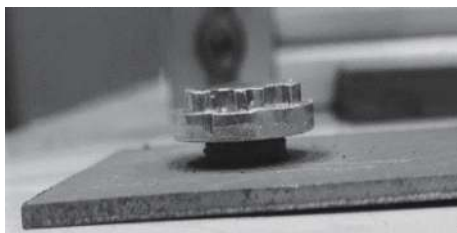


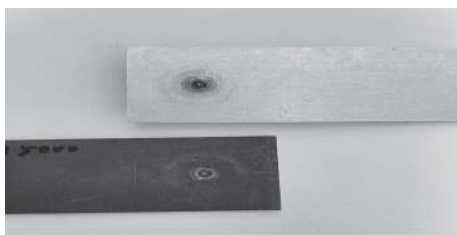
图 6 转速 8000 r/min 时接头形貌

Fig. 6 Joint forming appearance of rotation speed 8000 r/min

处的断裂失效主要包括两种形式,分别为铝合金板材在接头处的断裂失效和焊接结合处的直接断裂失效,如图 7 所示.图 7a 所示的失效形式在所有的剪切试验接头中最为常见,主要为转速 6000, 7000 和 8000 r/min 时所获的焊接工件试样.接头的失效形式是铝合金板材在接头处的断裂失效.铝合金板材在接头处首先产生裂纹,裂纹沿剪切载荷方向在接头两端处不断扩展,随着剪切试验的进行,裂纹受剪切力作用被不断被拉长,最终铝合金板材发生断裂.由此可见,铆钉与高强钢之间形成了较好的冶金结合,连接强度高于铝合金板材本身.高速旋转摩擦可以产生足够的热量,使得塑化的铆钉在高强钢板材的上表面形成摩擦焊接,这种失效形式是较为理想的失效形式,接头抗拉强度高,焊接质量好.图 7b 为转速 5000 r/min 时所获焊接工件试样在剪切试验接头中的失效形式.由图 7b 可知,铆钉产生塑性变形并且可以穿透铝合金板材,但是高强钢板材表面基本没有变化,铆钉在发生塑性变形后



(a) 常见失效形式



(b) 低质量失效形式

图 7 接头失效形式

Fig. 7 Failure form of the joints. (a) general failure form; (b) low quality of failure form

在剪切试验中,工件试样在焊接结合处直接断开,这是因为旋转摩擦产生的热量使得铆钉能够穿透上层铝合金板材,同时在下压力的作用下发生塑性变形,但产生的热量不足以使得铆钉与下层高强钢板材充分接合,下层高强钢板材基本上没有塑性变形产生.在后续剪切试验过程中,塑化的铆钉从焊接结合处直接抽出,没有起到连接铝合金板材与高强钢板材之间连接的作用.未充分接合的区域发生在焊接区底部,其产生原因是焊接时热量输入不足,焊接结合处材料再结晶程度较低使得焊接区材料之间没有充分结合^[16],这种焊接缺陷往往会降低接头力学性能,同时改变接头剪切试验时的失效形式^[17].

4 结论

(1) 在 6061-T6 铝合金和 DP1470 高强钢的焊接试验过程中,通过对接头处形貌特征的分析,在合适的工艺参数下,能够得到高质量的焊接接头成形,焊接结合处无明显的焊接缺陷;同时,通过对 7000 r/min 转速时的微观组织观察发现,接头连接处的金属组织发生了动态再结晶,接头的连接方式同时实现了机械结合和冶金结合,试验结果符合预期.

(2) 通过拉伸剪切试验,测试了铝合金和高强钢板摩擦塞铆焊接头的力学性能.随着转速的提高,接头所能承受的剪切载荷先增加后减小.当转速达到 8000 r/min 时,因为材料塑化程度过高,铆钉与铝合金板材连接处有大量飞边产生,接头的抗拉强度反而有所下降.

(3) 当接头处失效形式是铝合金板材在接头处的断裂失效时,焊接质量较高,这说明接头处形成了较好的冶金结合,接头处连接强度高于铝合金材料本身.

参考文献

- [1] 马潇天, 闫德俊, 孟祥晨, 等. 铝/钢搅拌摩擦焊金属间化合物调控研究进展 [J]. 焊接学报, 2020, 41(7): 1-11.
Ma Xiaotian, Yan Dejun, Meng Xiangchen, et al. Progress on the control of intermetallic compounds in aluminum/steel friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(7): 1-11.

- [2] 黄健康, 何翠翠, 石珏, 等. 铝/钢异种金属焊接接头界面 Al-Fe 金属间化合物生成及其热力学分析 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(4): 1037 – 1041.
- Huang Jiankang, He Cuicui, Shi Yu, *et al.* Thermodynamic analysis of Al-Fe intermetallic compounds formed by dissimilar joining of aluminum and galvanized steel[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, 44(4): 1037 – 1041.
- [3] Booth G, Olivier C, Westgate S, *et al.* Self-piercing riveted joints and resistance spot welded joints in steel and aluminium[C]//International Body Engineering Conference & Exposition. SAE Technical Paper, 2000: 268.
- [4] Sønstabø J K, Holmstrøm P H, Morin D, *et al.* Macroscopic strength and failure properties of flow drill screw connections[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 1 – 12.
- [5] 贺地求, 刘杭琪, 赖瑞林. MS1400/DP980 钢的电阻点焊的工艺性能分析 [J]. 焊接学报, 2018, 39(4): 104 – 108.
- He Diqu, Liu Hangqi, Lai Ruilin. Analysis on resistance spot welding process performance of MS1400 and DP980[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(4): 104 – 108.
- [6] Gibson B T, Lammlein D H, Prater T J, *et al.* Friction stir welding: Process, automation, and control[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16(1): 56 – 73.
- [7] Taban E, Gould J E, Lippold J C. Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel: Properties and microstructural characterization[J]. Materials and Design, 2010, 31(5): 2305 – 2311.
- [8] 王希靖, 张亚州, 李经纬, 等. 铝/镀锌钢搅拌摩擦铆焊接头组织与力学性能 [J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(2): 103 – 108.
- Wang Xijing, Zhang Yazhou, Li Jingwei, *et al.* Microstructure and mechanical properties of friction stir rivet welding joint between aluminum and galvanized steel[J]. Materials Science and Technology, 2015, 23(2): 103 – 108.
- [9] Kimapong K, Watanabe T. Lap joint of A5083 aluminum alloy and SS400 steel by friction stir welding[J]. Materials Transactions, 2005, 46(4): 835 – 841.
- [10] Xian Xirui, Ma Yunwu, Shan He, *et al.* Single-sided joining of aluminum alloys using friction self-piercing riveting (F-SPR) process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 38: 319 – 327.
- [11] 黄体方. 铝/钢铆接辅助搅拌摩擦焊接头界面行为及承载特性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- Huang Tifang. Interfacial behavior and mechanical properties analysis of Al/steel joint by riveting assisted friction stir welding [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [12] Skovron J D, Ruszkiewicz B J, Mears L, *et al.* Investigation of the cleaning and welding steps from the friction element welding process[C]//International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2017, 50725: 1–14.
- [13] Oliveira J P, Ponder K, Brizes E, *et al.* Combining resistance spot welding and friction element welding for dissimilar joining of aluminum to high strength steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 273: 116192.
- [14] 林健, 赵海峰, 雷永平, 等. 钢铝搅拌摩擦焊搭接接头的机械结合与冶金结合方式 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(16): 106 – 112.
- Lin Jian, Zhao Haifeng, Lei Yongping, *et al.* Mechanical and metallurgical bonding in friction stir welding joint of steel-aluminum dissimilar materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(16): 106 – 112.
- [15] Khodir S A, Shibayanagi T, Naka M. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA2024-T3 aluminum alloy[J]. Materials Transactions, 2006, 47(1): 185 – 193.
- [16] Cederqvist L, Reynolds A P. Factors affecting the properties of friction stir welded aluminum lap joints[J]. Welding Journal, 2001, 80(12): 281 – 287.
- [17] 江超, 陈辉, 车小莉, 等. 高速列车 A6005A 铝合金焊接接头断裂韧性研究 [J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(2): 55 – 60.
- Jiang Chao, Chen Hui, Che Xiaoli, *et al.* Fracture toughness of welded joints of A6005A aluminum alloy for high speed train[J]. Materials Science & Technology, 2013, 21(2): 55 – 60.

第一作者: Lyu Shuqiang, 博士研究生; 主要从事摩擦焊接方面的研究工作; Email: 1130281931@qq.com.

通信作者: Cho Haeyong, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: hycho@chungbuk.ac.kr.

(编辑: 戴红)