

2524 同质铝合金回填式搅拌摩擦点焊耐蚀性研究

姜楠¹, 李京龙¹, 熊江涛¹, 石俊秒¹, 豆建新^{1,2}, 柴鹏²

(1. 西北工业大学 材料学院 凝固技术国家重点实验室 陕西省摩擦焊接技术重点实验室, 西安 710072; 2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

摘要: **目的** 研究 2524 铝合金回填式搅拌摩擦点焊接头不同焊接区域的耐腐蚀性能。**方法** 采用晶间腐蚀实验结合电子扫描显微镜 (SEM) 及能谱仪 (EDS) 技术, 分析了焊缝处不同区域的微观形貌、腐蚀形貌及腐蚀深度, 并对腐蚀机理进行了讨论。**结果** 搅拌区内的晶粒最为细小, 热影响区的晶粒尺寸最大。搅拌区主要为点蚀, 最大腐蚀坑深度为 2.45 μm ; 热影响区则发生剥落腐蚀, 最大腐蚀深度为 45.65 μm 。**结论** 热影响区的耐蚀性最差, 腐蚀程度最为严重。

关键词: 2524 铝合金; 回填式搅拌摩擦点焊; 腐蚀

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.06.009

中图分类号: TG456.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)06-0053-06

Corrosion Resistance of 2524 Similar Aluminum Alloy Welded by Refilling Friction Stir Spot Welding

JIANG Nan¹, LI Jing-long¹, XIONG Jiang-tao¹, SHI Jun-miao¹, DOU Jian-xin^{1,2}, CHAI Peng²

(1. Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, State Key Laboratory of Solidification Processing, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the corrosion resistance of 2524 aluminum alloy refilling friction stir spot welding joints in different welding regions. Combined with scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS) techniques, the microstructure, corrosion morphology and corrosion depth of different weld regions of the joint were analyzed, and the corrosion mechanism was discussed. The results showed that the grain size in the stirring zone (SZ) was the smallest, while that in the heat-affected zone (HAZ) was the largest. In the SZ, the corrosion was pits, and the maximum depth of the pit was 2.45 μm . Severe exfoliation corrosion occurred in the HAZ. The maximum corrosion depth was 45.65 μm . The HAZ exhibits the worst corrosion resistance and the most severe corrosion.

KEY WORDS: 2524 aluminum alloy; refilling friction stir spot welding; corrosion

面对全世界环境污染和资源短缺等问题, 合金的轻量化已经成为全球制造业亟待解决的问题。铝合金因其较高的强度、较低的密度和良好的抗腐蚀性等优点, 被广泛应用于航空航天和汽车制造等领域中。但是传统的连接技术在焊接铝合金时都存在着很多的缺点, 如铆接会增加结构重量, 同时会产生较大的应

力集中, 而电阻点焊, 不仅会消耗大量的能量同时焊缝处更易形成缺陷, 这在航空航天和汽车制造的工程应用中是十分不利的。搅拌摩擦点焊技术 (Friction Stir Spot Welding, FSSW) 是一种固相连接技术, 以节能、减重等优点适用于铝合金结构件的连接。但是 FSSW 会在焊点中心留下退出孔, 即匙孔, 这不仅在

收稿日期: 2019-08-29

作者简介: 姜楠 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为搅拌摩擦点焊的腐蚀与防护。

通讯作者: 李京龙 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为先进材料的摩擦焊、扩散焊、钎焊等固相焊接方向基础理论与应用技术。

很大程度上减小有效焊点面积,而且会在接头受力时造成严重的应力集中现象,从而降低接头性能^[1-3]。回填式搅拌摩擦点焊(Refilling Friction Stir Spot Welding, RFSSW)技术是德国 GKSS 中心于 2002 年发明的一种新的点焊技术,通过搅拌针与搅拌套的复合运动,可消除匙孔缺陷^[4-9]。

在实际工程应用中,热处理铝合金(如 2×××和 7×××铝合金)焊接接头不同区域的微观组织结构的变化会导致不同腐蚀行为的发生,并且可能对焊件的服役可靠性产生不良影响,所以不仅要考虑接头的组织和力学性能,接头的耐腐蚀性能也应该是考虑的重点。总结了国内外关于 RFSSW 的研究,大多数是针对 RFSSW 的组织及力学性能并且取得了丰富的成果^[10-15],关于 RFSSW 接头腐蚀行为的研究则未见报道,因此有必要对 RFSSW 接头的腐蚀机理进行研究,为 RFSSW 接头的工程应用提供指导。文中针对 2524 铝合金 RFSSW 接头,通过晶间腐蚀的实验方法,结合扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)对 RFSSW 接头不同区域的耐腐蚀性能进行了研究,并对腐蚀机理进行了初步探讨。

1 实验

1.1 材料

材料为 2 mm 厚的 2524 铝合金板材,其化学成分见表 1。回填式搅拌摩擦点焊试样在由北京赛福斯特技术有限公司提供的搅拌摩擦点焊设备上焊接。焊接参数为:扎入深度为 2.6 mm,旋转速度为 2600 r/min,持续时间为 6 s。

表 1 2524 铝合金主要化学成分

Tab.1 Chemical composition of 2524 aluminum alloy

元素	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Si	Ti
质量 分数/%	4.5	1.5	0.64	0.2	0.19	0.11	0.03

1.2 显微形貌

试样尺寸为 20 mm×20 mm×4 mm,将试样经粗磨、精磨及抛光后,采用 Keller (1 mL HF+1.5 mL HCl+2.5 mL HNO₃+95 mL H₂O)试剂浸蚀后用电子扫描显微镜观察试样显微组织。

1.3 晶间腐蚀实验

晶间腐蚀试验依据 GB/T 7998—2005 进行,试验前取掉包铝层预处理,用丙酮擦洗试样表面油污,在室温下质量分数为 10%的氢氧化钠溶液中腐蚀 8 min,用去离子水将试样洗净,然后在质量分数为 30%的工业纯硝酸溶液中浸亮,再用去离子水洗净,冷风吹干。腐蚀介质为 IGC (57 g NaCl+1 L H₂O+10 mL H₂O₂)溶液,试验温度为(35±2)℃,浸泡 6 h。试验结束后,用去离子水冲洗试样,冷风吹干,进行宏观检查,显微观测,并制备成相应的金相试样进行腐蚀深度检测。

2 结果和分析

2.1 显微形貌

图 1 为 2524 铝合金 RFSSW 接头上表面被腐蚀

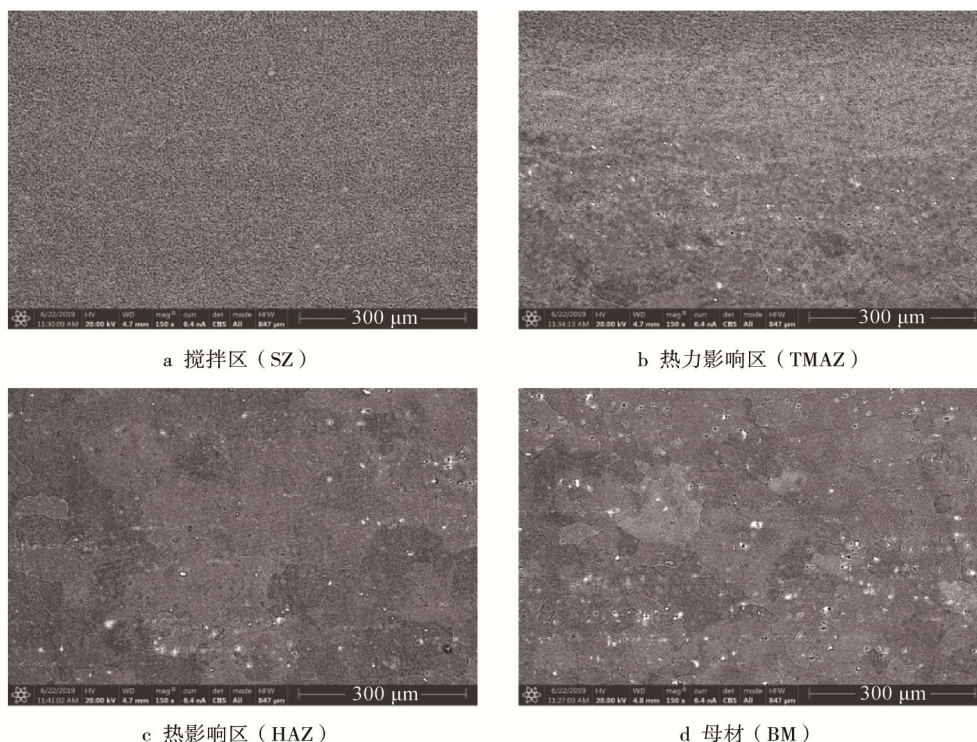


图 1 接头上表面不同区域的 SEM 图像

Fig.1 SEM images of different regions for the upper surface of joint

前不同焊接区域的 SEM 图像。图 1a 为搅拌区的微观组织形貌, 由于受到搅拌针的机械搅拌作用, 搅拌区经历了塑性流动和动态再结晶过程, 组织转变为细小的等轴晶。图 1b 为热力影响区, 只经历了塑性流动过程, 其组织呈流线状分布, 方向与搅拌针旋转方向相同。图 1c 为热影响区, 由于热循环的作用, 晶粒发生粗化, 较母材相比, 热影响区的晶粒尺寸变大。图 1d 为母材区的微观组织形貌, 由于板材经过轧制变形处理, 母材晶粒呈现出不规则形状, 且尺寸较大。

2.2 晶间腐蚀

2.2.1 腐蚀形貌

图 2 为 2524 铝合金回填式搅拌摩擦点焊腐蚀后的宏观形貌。中心绿色区域为搅拌区, 周围白色环状为热影响区/热力影响区, 边缘为母材区。搅拌区的腐蚀情况与母材区类似, 而热影响区/热力影响区的腐蚀情况则明显不同。

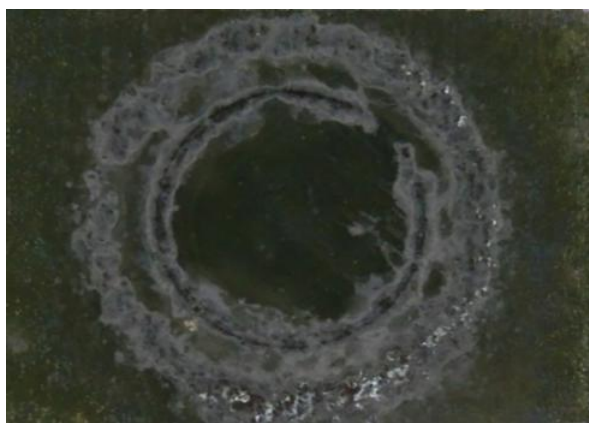


图 2 宏观腐蚀形貌

Fig.2 Macroscopic corrosion morphology

图 3 为搅拌区的腐蚀形貌。可以发现, 搅拌区发生的主要腐蚀行为为点蚀, 在大量点蚀发生聚集的位置发生了晶间腐蚀, 晶界显露明显。通过对蚀坑中心存在的白色细小颗粒状物质进行能谱分析, 发现其主要成分为 Al 和 Cu, 且比例接近 2:1, 可以认为在蚀坑中心内的白色细小颗粒状为沉淀相 Al_2Cu 。

图 4 为热力影响区腐蚀形貌。通过图 4 可以发现, 热力影响区发生了轻微腐蚀, 仅局部范围内发生了腐蚀, 且主要仍为点蚀。同时热力影响区内少量点蚀较为严重, 蚀坑较大且发生晶间腐蚀。从图 4 可以明显观察到, 较大的蚀坑中沉淀相尺寸远大于周围存在的细小沉淀相。与搅拌区不同的是, 在热力影响区内存在少量因发生晶间腐蚀而显露出的晶界, 但是沿着显露的晶界周边并未存在如搅拌区沿着晶界点蚀聚集的现象。

图 5 为热影响区的腐蚀形貌。热影响区腐蚀最为严重, 其腐蚀行为以晶间腐蚀为主, 晶界显露较深, 腐蚀严重的局部区域, 组织已经从基体上脱落, 发生

了剥落腐蚀, 表面破坏严重。当发生剥落腐蚀后, 留下的区域继续被腐蚀, 腐蚀行为主要为点蚀和少量晶间腐蚀, 腐蚀较轻, 点蚀蚀坑面积较小, 晶间腐蚀晶界显露不明显。在未发生剥落的区域内, 主要腐蚀行为为点蚀, 但是面积较大的蚀坑数量较多, 也存在显露明显的晶界。

图 6 为母材区的腐蚀形貌。从图 6 可以观察到, 母材区发生的点蚀大部分蚀坑很小, 存在少量蚀坑较

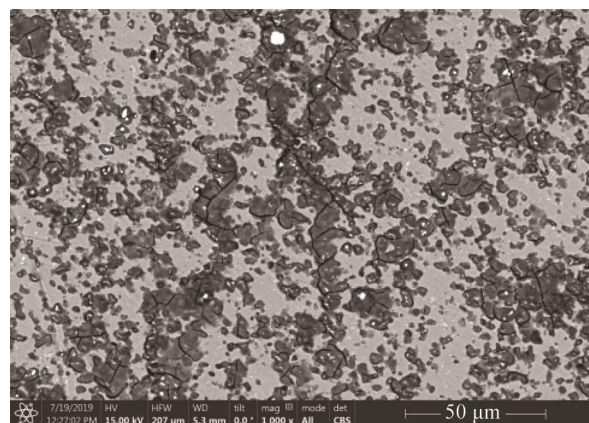


图 3 SZ 腐蚀形貌

Fig.3 Corrosion morphology of SZ

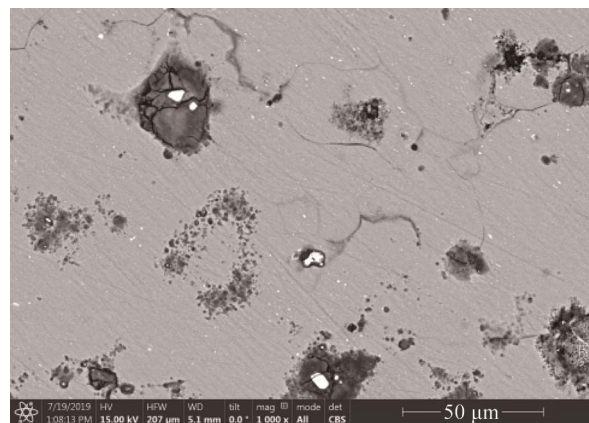


图 4 TMAZ 腐蚀形貌

Fig.4 Corrosion morphology of TMAZ

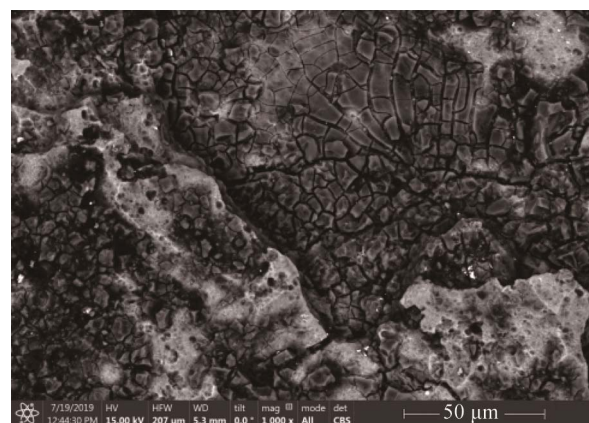


图 5 HAZ 腐蚀形貌

Fig.5 Corrosion morphology of HAZ

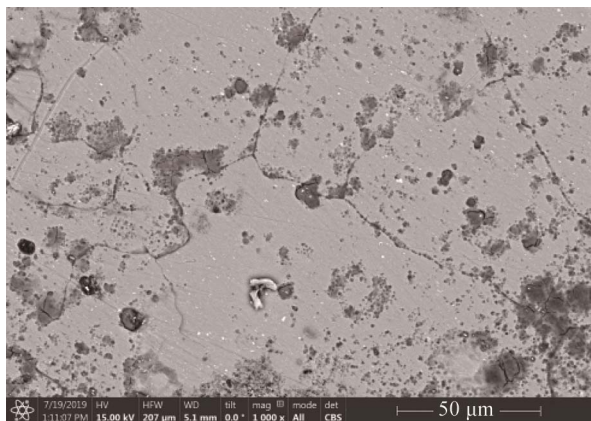


图6 BM腐蚀形貌

Fig.6 Corrosion morphology of BM

大的点蚀且蚀坑中心沉淀相的尺寸也较大。此外，母材区也发生晶间腐蚀，晶界显露明显的区域都在点蚀蚀坑的聚集处，且晶界延伸较长，互相连接在一起。

2.2.2 表面破坏程度

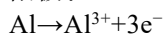
图7为对腐蚀产物进行清洗后的RFSSW接头横截面的微观形貌。从图7可以看出，在试样表面，搅拌区及热力影响区受到了轻微程度上的破坏，其中搅拌区最大腐蚀坑深度为2.45 μm，热力影响区的最大腐蚀坑深度为1.33 μm。而在热影响区发生了比较严重的剥落腐蚀，其表面腐蚀严重，大量基体组织脱落形成腐蚀坑，破坏程度最大，最大腐蚀坑深度为45.65 μm。

3 讨论

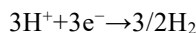
腐蚀的发生是由于阳极和阴极存在的电位差较大，导致发生了电化学反应，且电位差越大腐蚀的程度越加严重。在原电池中，阳极的材料较阴极更加活跃，发生氧化反应，而阴极则发生还原反应，被保护起来。

铝合金在水溶液中发生的基本电化学反应为^[16]：

阳极：



阴极：



在搅拌过程中，搅拌区内的铝铜合金在热处理过程中会沿着晶界析出大量的沉淀相 Al_2Cu ^[17]，这会导致贫铜区沿着晶界分布，此时晶界的点蚀电位较低，这种贫铜区的分布形式容易导致晶间腐蚀的发生^[18]。由于经历了搅拌摩擦焊接过程，搅拌区内发生动态再结晶，形成细小的等轴晶。与此同时，搅拌区内的沉淀相在搅拌过程中被打碎，且细小均匀的分布在搅拌区内，使得搅拌区内的成分更加均匀，电化学差异变小，使得搅拌区内腐蚀电位升高，耐蚀性增强^[19]。

热影响区的晶粒和沉淀相受热循环的影响发生粗化，沉淀相分布不均匀且与基体成分差异较大，耐蚀性最差，腐蚀最为严重。腐蚀坑一般以环状沟槽形式出现在沉淀相团簇的周围，腐蚀主要发生在基体上^[20]。部分沉淀相团簇脱落，形成较大腐蚀坑。图8a为焊点上表面热影响区的蚀坑，对其进行EDS

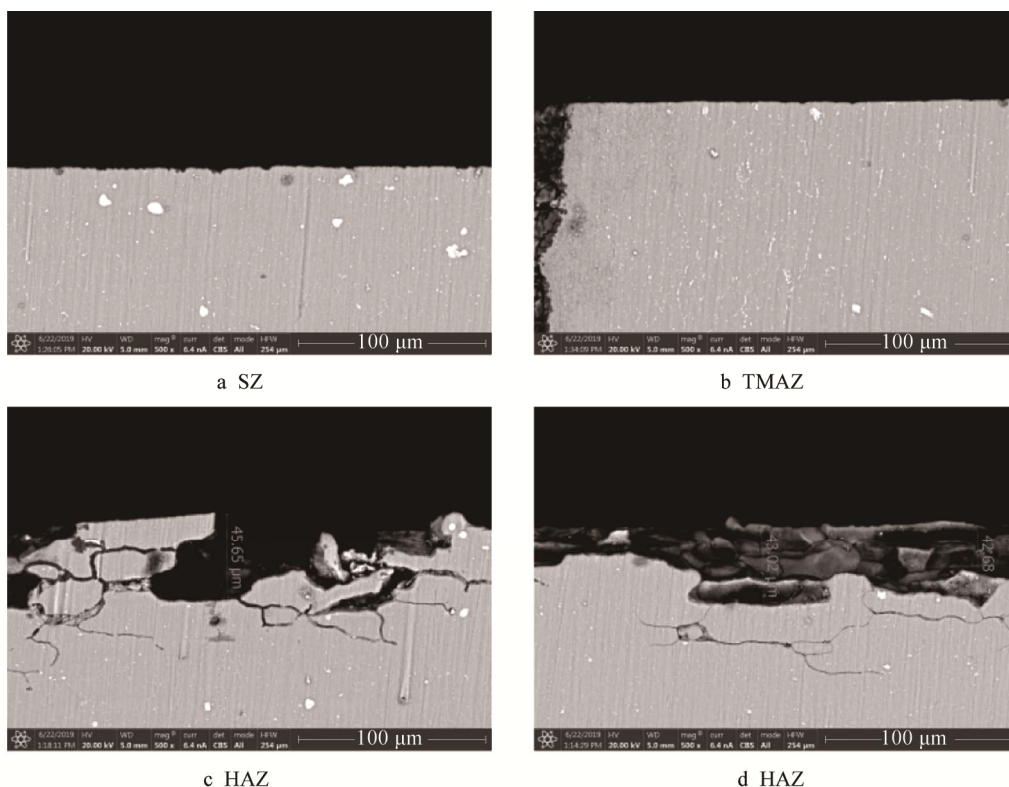


图7 横截面腐蚀形貌

Fig.7 Cross-section corrosion morphology

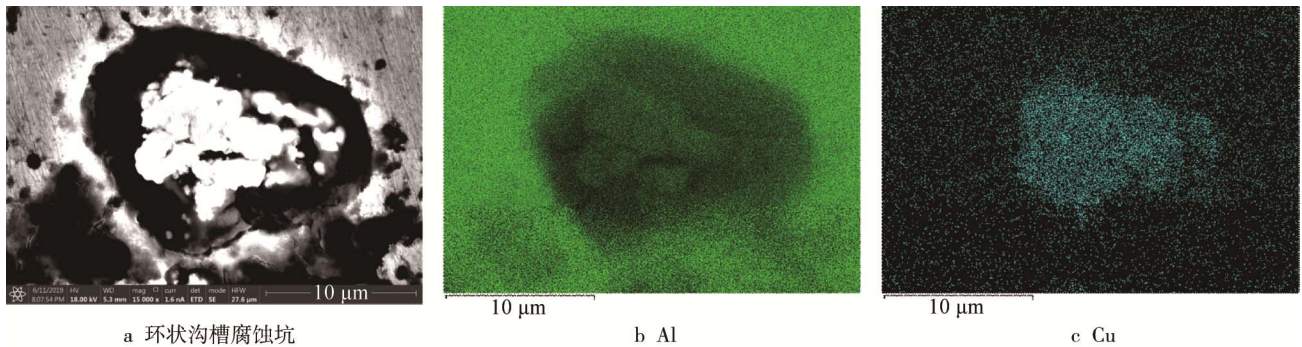


图 8 环状腐蚀坑 SEM 及 EDS 图像
Fig.8 SEM and EDS images for ring pits

分析, 结果如图 8b 和 8c 所示, 中心区域铜元素发生聚集, 而环状沟槽区域显示铝元素显著缺失。

4 结论

1) 搅拌区的晶粒组织为细小的等轴晶, 热力影响区的晶粒尺寸略大于搅拌区, 热影响区的晶粒最为粗大。

2) 热影响区发生的严重的剥落腐蚀, 最大腐蚀坑深度为 45.65 μm ; 搅拌区最大腐蚀坑深度为 2.45 μm 。热影响区的耐蚀性最差, 腐蚀程度最为严重。

参考文献:

- [1] DONG Hong-gang, CHEN Su, SONG Yang, et al. Re-filled Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloy to Galvanized Steel Sheets[J]. Materials and Design, 2016, 94: 457—466.
- [2] TIER M D, ROSENDO T S, MAZZAFERRO J A, et al. The Weld Interface for Friction Spot Welded 5052 Aluminium Alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90: 267—276.
- [3] SUHUDDIN U F H, FISCHER V, DOS S J F, et al. The Thermal Cycle during the Dissimilar Friction Spot Welding of Aluminum and Magnesium Alloy[J]. Scripta Materialia, 2013, 68: 87—90.
- [4] REIMANN M, GARTNER T, SUHUDDI N U, et al. Keyhole Closure Using Friction Spot Welding in Aluminum Alloy 6061-T6[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 237: 12—18.
- [5] KUBIT Andrzej, KLUZ Rafał, TRZEPIECINSKI Tomasz, et al. Analysis of the Mechanical Properties and of Micrographs of Refill Friction Stir Spot Welded 7075-T6 Aluminium Sheets[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18: 235—244.
- [6] SHI Yao, YUE Yu-mei, ZHANG Li-guo, et al. Refill Friction Stir Spot Welding of 2198-T8 Aluminum Alloy[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2017, 71(1): 139—145.
- [7] SUHUDDIN U F H, FISCHER V, KOSTKA A, et al. Microstructure Evolution in Refill Friction Stir Spot Weld of a Dissimilar Al-Mg Alloy to Zn-coated Steel[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2017, 22(8): 658—665.
- [8] CAO J Y, WANG M, KONG L, et al. Hook Formation and Mechanical Properties of Friction Spot Welding in Alloy 6061-T6[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 230: 254—262.
- [9] XU Zhi-wu, LI Zheng-wei, JI Shu-de, et al. Refill Friction Stir Spot Welding of 5083-O Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2018, 34: 878—885.
- [10] REIMANN Martin, GOEBEL Jannik, SANTOS F, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Keyhole Repair Welds in AA7075-T651 Using Refill Friction Stir Spot Welding[J]. Materials and Design, 2017, 132: 283—294.
- [11] SHEN Z, DING Y O, GOPKAL O, et al. Effects of Tool Design on the Microstructure and Mechanical Properties of Refill Friction Stir Spot Welding of Dissimilar Al Alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 751—759.
- [12] LI Zheng-wei, GAO Shuang-sheng, JI Shu-de, et al. Effect of Rotational Speed on Microstructure and Mechanical Properties of Refill Friction Stir Spot Welded 2024 Al Alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(4): 1673—1682.
- [13] ROSENDO T, TIER M, MAZZAFERRO J, et al. Mechanical Performance of AA6181 Refill Friction Spot Welds Under Lap Shear Tensile Loading[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2015, 38(12): 1443—1445.
- [14] CAO J Y, WANG M, KONG L, et al. Microstructure, Texture and Mechanical Properties during Refill Friction Stir Spot Welding of 6061-T6 Alloy[J]. Materials Characterization, 2017, 128: 54—62.

- [15] SHEN Z, CHEN Y, HOU J S C, et al. Influence of Processing Parameters on Microstructure and Mechanical Performance of Refill Friction Stir Spot Welded 7075-T6 Aluminium Alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2015, 20(1): 48—57
- [16] SINHMAR Sunil, DWIVEDI Kumar, DHEERENDRA. A Study on Corrosion Behavior of Friction Stir Welded and Tungsten Inert Gas Welded AA2014 Aluminium Alloy[J]. Corrosion Science, 2018, 133: 25—35.
- [17] MULLER I L, GALVELE J R. Pitting Potential of High Purity Binary Aluminium Alloys-I, Al-Cu Alloys, Pitting and Intergranular Corrosion[J]. Corrosion Science, 1997, 17: 179—193.
- [18] XU W F, LIU J, ZHU H, et al. Pitting Corrosion of Friction Stir Welded Aluminum Alloy Thick Plate in Alkaline Chloride Solution[J]. Electrochimica Acta, 2010, 55(8): 2918—2923.
- [19] HUGHES A E, BIRBILIS N, MOL J M C, et al. High-strength Al-alloys: Microstructure, Corrosion and Principles of Protection[J]. Recent Trends in Processing and Degradation of Aluminium Alloys, 2011, 10: 223—262.
- [20] 张华, 庄欠玉, 张贺, 等. 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头晶间腐蚀分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(8): 79—82.
- ZHANG Hua, ZHUANG Qian-yu, ZHANG He, et al. Analysis of Intergranular Corrosion of 2219 Aluminum Alloy Friction Stir Welded Joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(8): 79—82.