

● 综述 ●

铝合金搅拌摩擦焊接技术的现状与展望

侯艳喜, 徐荣正, 李 慧, 崔盛林, 国旭明

(沈阳航空航天大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要:搅拌摩擦焊作为一种新型固相连接技术,具有优质、高效、节能、环境友好等优点,近年来在铝合金的焊接领域得到了成功的应用。综述了目前可实现铝合金搅拌摩擦焊接的主要结构形式,分析了各结构的工艺特征、微观组织、焊接缺陷以及力学性能等。研究现状表明,通过焊接工艺参数的优化,可以获得高质量的具有对接属性(对接、环焊缝等)的焊接接头,然而在具有搭接属性结构的焊接(搭接、对-搭接结构、角接及T型结构等)中,很难消除接头中由于搭接面的存在而引起的钩状缺陷和冷搭接缺陷等,因此仍有待于进一步的深入研究。此外,对未来铝合金搅拌摩擦焊的研究方向进行了展望。

关键词:铝合金; 搅拌摩擦焊; 焊接缺陷

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2019.05.001

中图分类号: TG453^{+.9}

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2019)05-0001-05

Research Status and Prospect of Friction Stir Welding Technology of Al Alloy

HOU Yanxi, XU Rongzheng, LI Hui, CUI Shenglin, GUO Xuming

(College of Material Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: Friction stir welding (FSW) is a new solid-state joining process, which has the advantages of high quality, high efficiency, environment friendly and energy saving. In recent years, it has been successfully used in the welding of Al alloy. The main structure forms of FSW of Al alloy were summarized, and the process characteristic, microstructure, welding defect and mechanical properties of each structure were analyzed. The research status shows that high-quality FSW joints with butt attributes (butt, circumferential weld, etc.) can be obtained by optimizing the welding process parameters. However, in FSW joints structure with lapped attributes (lapped, butt-lapped, fillet and T-joint structure etc.), the defects such as hook and cold lapped defects are difficult to eliminate because of the existence of the lapped surface. So it remains to be studied further. In addition, the future research direction of Al alloy FSW technology was prospected.

Key words: Al alloy; friction stir welding; welding defects

铝合金作为一种轻质合金结构材料,以其质量轻、耐腐蚀性好以及可回收利用等优点,近年来在汽车、航空以及航天等领域得到了广泛的应用,在推进结构轻量化的过程中发挥了不可替代的作用^[1-2]。在铝合金产业化的过程中,必然离不开焊接技术在其中发挥的关键作用^[3]。其中,搅拌摩擦焊接(FSW)作为一种新型固相焊接技术,具有焊接变形小、接头质量高等诸多优点,是一种理想的铝合金焊接技术^[4]。

近年来随着FSW技术在铝合金焊接领域应用与研究的不断系统与深入,目前已经成功实现了多种类型以及多种结构形式的铝合金焊接。

1 不同连接结构形式的铝合金FSW研究

焊接作为一种重要的大型复杂结构的制备技术,在其应用过程中不可避免地涉及到不同结构形式的连接。目前,对于铝合金的FSW而言,涉及到的焊接结构形式主要有对接、搭接、对-搭接、角接、T型以及环形连接等。

1.1 对接结构

对接结构是铝合金FSW中一种最常见的结构形式,其基本结构形式如图1(a)所示。针对铝合金FSW对接焊接(FSBW)的研究开展的最早,也最为系统和深入。目前,通过采用FSBW技术已经可以

收稿日期:2018-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51601121);辽宁省自然科学基金项目(201602570);辽宁省教育厅资助项目(L201624)

作者简介:侯艳喜(1994-),男,辽宁营口市,硕士研究生,主要从事轻质合金焊接技术的研究;电话:13190029388;

E-mail:1731204249@qq.com

通讯作者:徐荣正(1981-),男,辽宁大连人,讲师,博士,主要从事轻质合金焊接技术的研究;电话:18940127665;

E-mail:rzxu@imr.ac.cn

成功实现多种系列同种铝合金以及异种铝合金的焊接^[5-7]。研究发现,如果焊接参数控制不当,接头中会出现飞边、毛刺、沟槽等表面缺陷,以及孔洞、未焊透和 Z 型线等内部缺陷^[8]。而通过转速、焊接速度以及下压量等关键参数的匹配与优化能够有效避免缺陷的产生,获得高质量的焊接接头。

FSBW 接头的组织主要由焊核区(NZ)、热机影响区(TMAZ)、热影响区(HAZ)以及母材(BZ)四个区域构成,如图 1(b)所示^[9]。对于 NZ 而言,该区中的材料由于经受了搅拌头的直接搅拌作用,从而引起了剧烈的塑性变形,同时伴随着高温的作用,因而会发生动态再结晶,形成细小、等轴的再结晶组织^[10]。除了晶粒尺寸的变化外,内部还会发生织构或第二相富集等复杂的组织变化^[11]。TMAZ 位于 NZ 的外围两侧,该区材料由于没有受到搅拌头的直接搅拌,经历了比 NZ 较低的塑性变形和热作用,从而形成了由 NZ 外沿下方拉长的晶粒组织,并且 TMAZ 也会存在一些强化相^[12]。TMAZ 与 BM 之间的区域为 HAZ,该区材料没有发生塑性变形,只经受了热循环的作用。与 BM 相比,在热作用下 HAZ 的晶粒发生长大,同时该区域中的强化相容易发生粗化,并会产生部分溶解的现象^[13]。最终,在接头的各个区域形成了具有不同特征的微观组织。

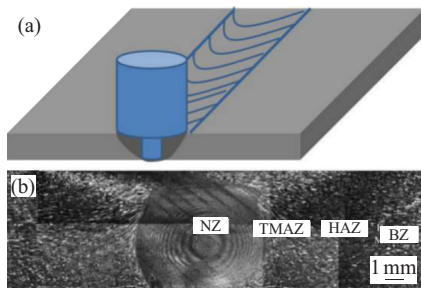


图 1 对接结构示意图及对接接头截面形貌^[9]
Fig.1 Schematic diagram of butt structure and cross-sectional morphology of butt joint^[9]

FSBW 过程会引起接头中不同区域出现组织的差异,从而导致铝合金 FSBW 接头中不同区域的性能发生变化。对于时效强化的铝合金而言,接头的抗拉强度可达 BM 的 70%以上,伸长率可达 BM 的 60%以上,且大部分的断裂都发生在硬度最低的 HAZ^[14-15]。目前对 FSBW 接头疲劳性能的研究还主要集中在高周疲劳行为的研究方面,研究表明,FSBW 接头的疲劳值要远高于普通电弧焊接头,例如应力比在 0.1 时,10 mm 厚的 5083-O 铝合金

FSBW 接头的疲劳强度将近可达到电弧焊接头的 10 倍^[16]。

由上述分析可见,对于铝合金对接结构的焊接,无论从工艺、组织以及性能等方面均进行了系统而深入的研究,得到了满意的焊接质量。

1.2 搭接结构

搭接结构也是一种重要的结构连接形式,其基本结构如图 2(a)所示。目前已经在航空、航天制造和汽车工业等领域得到了广泛的应用,如飞机机身蒙皮、机翼框架及地面甲板、运载火箭整流罩、汽车轮毂、底盘以及支撑架等部位^[17]。研究发现,通过 FSW 技术可以实现多个系列的同种、异种铝合金的搅拌摩擦搭接焊接(FSLW)^[18-19]。对 FSLW 接头而言,除了会产生与对接接头类似的缺陷外,还会产生由于搭接界面处材料的曲面流动而产生的固有缺陷^[20],主要包括钩状(Hook)缺陷(出现于前进侧)和冷搭接缺陷(出现于后退侧),如图 2(b)所示。这种固有缺陷一方面会作为接头受力过程中的裂纹源,另一方面会显著降低接头的有效连接面积,均会对接头性能产生极为不利的影响,需要引起足够的重视。

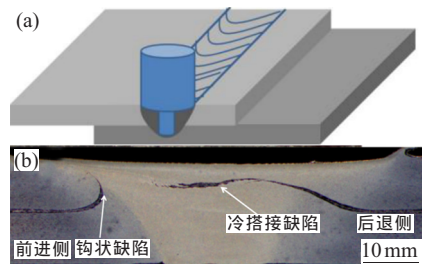


图 2 搭接结构示意图及搭接接头的截面形貌^[20]
Fig.2 Schematic diagram of lapped structure and cross-sectional morphology of lapped joint^[20]

针对工艺参数(主要包括转速、焊速)对 FSLW 接头性能影响的研究发现,较高的转速可以增加热输入、增强材料的流动性以及搅拌针的破碎作用,从而可以改变搭接接头中的 HAZ 尺寸、降低 HAZ 的硬度、细化 NZ 晶粒,同时会使 Hook 缺陷的高度增加。而这些因素中,既有增加搭接接头强度的因素(比如细化晶粒),又有减弱搭接接头强度的因素(比如降低硬度、减小有效板厚)^[21-22],因此对接头性能的影响比较复杂。此外,焊接速度也容易引起 Hook 缺陷的高度发生变化,从而影响接头的有效板厚^[23],促使接头的性能发生变化。

此外,搅拌头的形状也是影响接头组织,尤其是

Hook 缺陷和冷搭接缺陷的重要因素。例如,轴肩的类型、尺寸以及搅拌针形状等均会在一定程度上影响 Hook 缺陷和冷搭接缺陷的尺寸以及分布,从而影响接头的性能^[24-25]。为了进一步提高接头的性能,双轴肩、定轴肩以及双头焊等新型焊接方式也逐渐被应用到铝合金的 FSW 中,可使接头的抗拉强度、屈服强度等性能大幅提高。但是,目前的工艺均难以避免冷搭接和 Hook 缺陷的产生,因此相关问题,仍有待于进一步研究,才能加以解决^[26]。

1.3 对-搭接结构

近年来随着高铁以及轻轨等列车技术的高速发展,在铝合金车厢,尤其是侧墙等部位的 FSW 中,出现了一种新型的对-搭接焊接结构形式^[27],其基本结构如图 3(a)所示。这种对-搭接结构同时具备对接和搭接两种结构特性,会产生与对接和搭接接头相似的缺陷,如 Z 型线、Hook 缺陷和冷搭接缺陷等,从而降低接头质量。

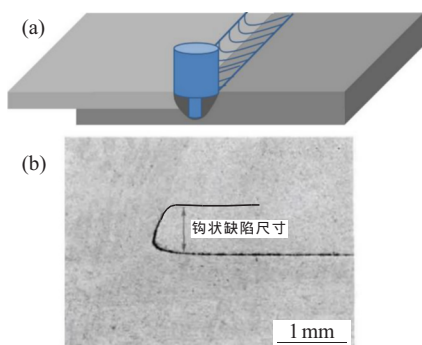


图 3 对-搭接结构示意图和搭接接头的截面形貌^[28]
Fig.3 Schematic diagram of butt-lapped structure and cross-sectional morphology of butt-lapped joint^[28]

研究发现,搅拌针长度对这种对-搭接结构的 FSW 影响较大。若针长较短,未接触到搭接界面结合处,会出现类似对接结构焊接中出现的未焊合缺陷^[29];若针长过长,超过搭接界面结合处,则会形成类似搭接结构焊接中出现的接头缺陷,例如将搭接面一侧作为前进侧,就会在接头中出现 Hook 缺陷,如图 3(b)所示^[30]。这种类似搭接接头中的 Hook 缺陷是影响接头断裂的最主要因素^[31]。研究表明,相同工艺参数焊接时,搭接界面位于后退侧时,接头的力学性能比位于前进侧高^[28]。此外,焊接工艺参数也会对这种对-搭接结构的 FSW 产生影响,不适当的搅拌头旋转速度会降低对-搭接接头的抗拉强度,较高的转速会导致严重的焊缝缺陷,影响接头质量^[32]。

实验表明,这种对-搭接 FSW 的接头平均抗拉

强度可达 BM 的 80%左右,主要断裂在后退侧 HAZ。弯曲性能良好,疲劳强度极限可达 150MPa 以上^[33]。此外,针对沟槽、孔洞及未焊合等缺陷,可通过补焊的方式,来减少甚至避免接头缺陷的产生,在一定程度上提高了接头的综合性能^[34]。

目前,有关对-搭接结构 FSW 方面的研究还处于起步阶段。虽然一些缺陷,如 Z 型缺陷,Hook 缺陷和冷搭接缺陷,会在一定程度影响接头的性能,但随着研究的不断深入,这些问题将逐渐被解决,并能够广泛应用到车体等其他对-搭接结构部件的 FSW 中,从而提升车体质量,降低制造成本。

1.4 其他结构的焊接(角接、T 型以及环形连接)

角接结构是一种常用的 FSW 结构形式,其基本结构如图 4(a)所示。其中 1 和 5 为待焊件,2 和 4 为工艺辅助垫块,3 为搅拌头。其中 1 和 5 为待焊件,2 和 4 为工艺辅助垫块,3 为搅拌头。工程上一些焊接结构常需要通过角接的方式连接,然而由于 FSW 焊接特征的限制,不宜直接进行角接焊接,往往需采用在角接头外侧镶拼辅助工艺垫块的方法来实现任意角度的角接焊^[35]。实验表明,通过改变轴肩直径、旋转频率和焊接速度可获得性能良好的角接接头。其焊缝截面的微观组织与 FSW 接头类似,也可分为 NZ(WNZ)、TMAZ、HAZ 以及 BM,如图 4(b)所示。TMAZ 产生了晶粒变形,同时 HAZ 受热循环作用,组织较 BM 发生粗化,NZ 力学性能下降很多,其中硬度下降了约 40%^[36]。可见,通过镶拼辅助垫块的方式并采用合理的工艺参数和搅拌头形状能够成功实现这种外侧角接形式的焊接,获得满意的接头质量。

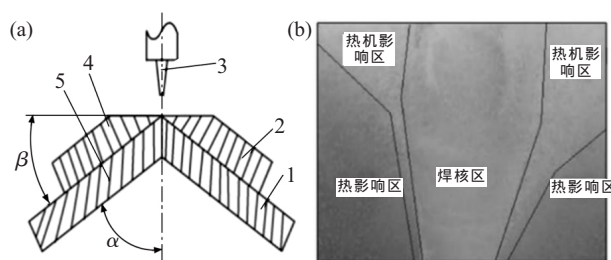


图 4 FSW 中角接外侧焊工作原理图
与焊缝宏观横截面形貌^[36]

Fig.4 Working principle of fillet welding during FSW and cross-sectional morphology of welding seam^[36]

T 型结构也是铝合金薄板的一种重要 FSW 结构形式,在航空航天、高速客车和船舶建造等制造领域有广泛应用,其基本结构如图 5(a)所示^[37]。接头中除了 NZ、TMAZ、HAZ、BM 等四个区域以外,还

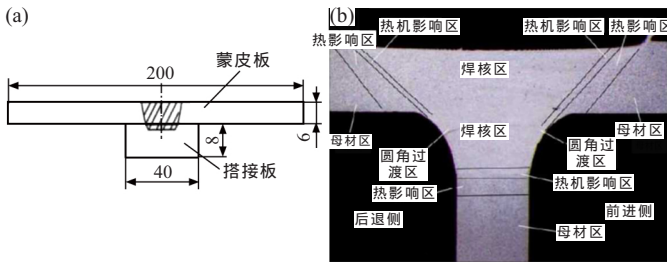


图5 T型接头示意图^[37]及T型接头的宏观形貌^[38]
Fig.5 Schematic of T-joint^[37] and its cross-sectional morphology^[38]

多了两个圆角过渡区域(FZ),如图5(b)所示,各区域呈现不同的晶粒形态。其中,隧道缺陷和冷搭接缺陷极易在该结构的接头中出现,且不同组合形式的T型接头分布特征也有所差异^[38]。研究发现,焊接工艺参数会影响接头的组织与性能,控制焊接热输入及改变搅拌头等方式,均可提高接头的质量,但不能避免冷搭接缺陷的产生。此外,T型接头的组合形式(如T-对接型,T-搭接型以及T对-搭接型)及其圆角过渡区半径也会对接头的组织与性能产生重要的影响。另外,研究还发现,采用螺纹开槽搅拌针或引入超声波辅助均可提升接头整体的强度,但都不能消除冷搭接缺陷^[39]。

环形连接也是一种重要的FSW结构形式,目前主要应用于油缸储罐等大型工程机械方面的焊接,其焊缝表面如图6(a)所示,这种环形结构本质上与对接接头类似,因此会出现与FSBW接头类似的表面缺陷,如飞边、毛刺等;同时,接头截面中HAZ外侧轮廓为上宽下窄的倒立梯形状,如图6(b)所示。前进侧的TMAZ较窄,夹在HAZ和NZ之间,金属塑性流动线条明显,返回侧的TMAZ稍宽,过渡线条明显。抗拉强度可达到BM的66%左右,伸长率为BM的60%,接头硬度呈“W”形分布,NZ的硬度基本达到了BM的硬度,HAZ的硬度明显下降^[40]。可见,环型结构作为FSW中的一种焊接结构与对接

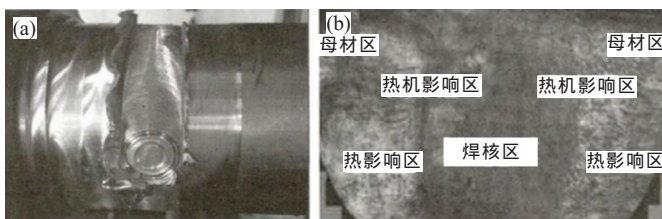


图6 液压油缸的FSW焊缝表面及焊接接头横截面的宏观形貌^[40]

Fig.6 Welding seam surface of hydraulic cylinder by FSW and macro cross-sectional morphology of welded joint^[40]

类似,通过选择合理的工艺参数能形成质量较高、成形良好的焊接接头。

随着FSW技术在铝合金焊接领域应用的不断扩展与深入,越来越多的结构形式将可以通过FSW焊接技术加以实现,从而进一步推动FSW技术在铝合金产业化过程中发挥更为广泛与重要的作用。

2 结语

近年来,随着对铝合金FSW技术研究的不断深入,出现了多种结构形式的焊接,主要包括对接、搭接、对-搭接、角接、T型连接以及环形连接等,对于具有对接结构特征的FSW而言,可通过焊接工艺参数的优化获得高质量的FSW接头;然而在具有搭接属性结构的FSW中,接头中的Hook缺陷、冷搭接缺陷还很难完全消除,仍有待于进一步探究。此外,随着对各焊接结构在工艺、组织与性能等方面研究的系统与深入,必将促进铝合金FSW技术在交通运输、航空以及航天等领域的广泛应用,同时也可以为生产实践提供重要的理论基础,创造更好的经济效益和社会价值。

参考文献:

- [1] Dezecot S, Maurel V, Buffiere J Y, et al. 3D characterization and modeling of low cycle fatigue damage mechanisms at high temperature in a cast aluminum alloy [J]. Acta Materialia, 2017, 123: 24-34.
- [2] 刘明辉. 铝合金中刃型位错与合金元素相互作用的分子动力学模拟研究[D]. 北京:北京有色金属研究总院, 2015.
- [3] 许飞,陈刚,何恩光,等. 2024-T4 铝合金光纤激光填丝焊缝成形与组织性能的相关性[J]. 材料工程, 2017, 45(11): 90-95.
- [4] Navaser M, Atapour M. Effect of friction stir processing on pitting corrosion and intergranular attack of 7075 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2017(2): 155-165.
- [5] Cai B, Zheng Z Q, He D Q, et al. Friction stir weld of 2060 Al-Cu-Li alloy: microstructure and mechanical properties [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 649: 19-27.
- [6] Mroczka K, Wójcicka A, Pietras A. Characteristics of dissimilar FSW of aluminum alloys 2017A and 7075 based on multiple layer research [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(9): 2698-2705.
- [7] Jolu T L, Morgeneyer T F, Denquin A, et al. Fatigue lifetime and tearing resistance of AA2198 Al-Cu-Li alloy friction stir welds: effect of defects [J]. International Journal of Fatigue, 2015, 70: 463-472.
- [8] 曹丽杰. 铝合金搅拌摩擦焊接缺陷的研究进展 [J]. 表面技术, 2009, 38(3): 68-71.

- [9] Genevois C, Deschamps A, Denquin A, et al. Quantitative investigation of precipitation and mechanical behavior for AA2024 friction stir welds[J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(8): 2447-2458.
- [10] Hao H L, Ni D R, Zhang Z, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Er sheets jointed by friction stir welding [J]. *Materials and Design*, 2013, 52(12): 706-712.
- [11] Jin H, Saimoto S, Ball M, et al. Characterisation of microstructure and texture in friction stir welded joints of 5754 and 5182 aluminium alloy sheets[J]. *Metal Science Journal*, 2013, 17(12): 1605-1614.
- [12] Fonda R W, Bingert J F. Microstructural evolution in the heat-affected zone of a friction stir weld [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, 35(5): 1487-1499.
- [13] Heinz B, Skrotzki B. Characterization of a friction-stir-welded aluminum alloy 6013[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2002, 33(3): 489-498.
- [14] Feng A H, Chen D L, Ma Z Y. Microstructure and low-cycle fatigue of a friction-stir-welded 6061 aluminum alloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2010, 41(10): 2626-2641.
- [15] Ren S R, Ma Z Y, Chen L Q. Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Mg-Si alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2007, 56(1): 69-72.
- [16] Zhou C, Yang X, Luan G. Fatigue properties of friction stir welds in Al 5083 alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2005, 53(10): 1187-1191.
- [17] 王国庆, 赵衍华, 杜岩峰, 等. 铝合金搭接结构的搅拌摩擦焊接技术[J]. *航空制造技术*, 2017, 529(10): 91-98.
- [18] 黄凌骄, 孟立春, 曲文卿. 7N01 铝合金厚板搭接搅拌摩擦焊接头力学性能研究[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(3): 189-191.
- [19] 岳玉梅, 周振鲁, 姬书得, 等. 半螺纹搅拌针对 2024 铝合金搅拌摩擦搭接焊力学性能影响 [J]. *焊接学报*, 2016, 37(10): 69-72.
- [20] Liu H, Zhao Y, Hu Y, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of friction stir lap welding joint of Al clad 7B04-T74 aluminum alloy [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(9-12): 1415-1425.
- [21] Shirazi H, Kheirandish S, Safarkhanian M A. Effect of process parameters on the macrostructure and defect formation in friction stir lap welding of AA5456 aluminum alloy[J]. *Measurement*, 2015, 76: 62-69.
- [22] Fadaeifard F, Matori K A, Toozandehjani M, et al. Influence of rotational speed on mechanical properties of friction stir lap welded 6061-T6 Al alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(4): 1004-1011.
- [23] Yazdani S, Chen Z W, Littlefair G. Effects of friction stir lap welding parameters on weld features on advancing side and fracture strength of AA6060-T5 welds [J]. *Journal of Materials Science*, 2012, 47(3): 1251-1261.
- [24] Ramachandran K K, Murugan N, Kumar S S. Effect of tool axis offset and geometry of tool pin profile on the characteristics of friction stir welded dissimilar joints of aluminum alloy AA5052 and HSLA steel[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, 639: 219-233.
- [25] Salari E, Jahazi M, Khodabandeh A, et al. Influence of tool geometry and rotational speed on mechanical properties and defect formation in friction stir lap welded 5456 aluminum alloy sheets [J]. *Materials and Design*, 2014, 58(6): 381-389.
- [26] Yu H. Welding parameters, distortion and mechanical properties of AA7075 lap joints in SSFSW [D]. Columbia: University of South Carolina, 2013.
- [27] 胡文浩, 刘春宁, 王广英. 高速动车组铝合金车体大型材关键焊接技术研究[J]. *焊接技术*, 2013, 42(5): 32-36.
- [28] 吴志明, 吴坚定, 马正斌, 等. 铝合金搅拌摩擦焊对接接头 Hook 缺陷研究[J]. *航空制造技术*, 2014, 460(16): 57-60.
- [29] 张欣盟, 何广忠, 张行, 等. 6005A 铝合金型材搅拌摩擦焊未焊合缺陷的搅拌摩擦补焊研究[J]. *焊接*, 2016(11): 37-40.
- [30] 李红. 城轨铝合金车体侧墙搅拌摩擦焊接技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [31] 宋友宝, 杨新岐, 崔雷, 等. 异种高强铝合金搅拌摩擦焊搭接接头的缺陷和拉伸性能[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(5): 1167-1174.
- [32] 李博, 黎海洋, 沈以赴. 异种铝合金单层板与双层板对接搅拌摩擦焊[J]. *电焊机*, 2011, 41(10): 48-51.
- [33] 王卫兵, 李光, 栾国红. 6005A-T6 侧墙板搅拌摩擦焊接头性能研究[J]. *焊接*, 2011(5): 20-24.
- [34] 姚俊歌, 贺地求, 赖瑞林, 等. 采用 FSW 与 MIG 工艺补焊 6005A-T6 铝合金的接头力学性能 [J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(3): 589-594.
- [35] 贺地求, 邓航, 周鹏展, 等. 一种搅拌摩擦角接外侧焊焊接方法: 1810433. A[P]. 2006.
- [36] 马慧坤, 贺地求, 刘金书. 2519 铝合金角接结构的搅拌摩擦焊[J]. *焊接学报*, 2011, 32(8): 73-76.
- [37] 范开春, 郭辉荣, 李宝华, 等. 焊接方式对铝合金搅拌摩擦焊 T 型接头性能的影响[J]. *宇航材料工艺*, 2013, 43(3): 81-83.
- [38] 侯晓鹏, 杨新岐, 崔雷, 等. 6061-T4 铝合金 T 型接头搅拌摩擦焊工艺[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(11): 3048-3055.
- [39] 蒋圣. 6061-T6 铝合金 T 型接头搅拌摩擦焊焊接工艺及组织性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2016.
- [40] 李然, 贺地求, 王海军. 7A09 铝合金搅拌摩擦环焊接头组织与性能[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(13): 27-29. 