

6082-T6 铝合金薄板双轴肩搅拌摩擦焊温度场

李于朋^{1,2,3}, 孙大千^{1,2}, 宫文彪³

(1. 吉林大学材料科学与工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学汽车材料教育部重点实验室, 长春 130022; 3. 长春工业大学材料科学与工程学院, 长春 130012)

摘要:采用热电偶对4 mm厚6082-T6铝合金薄板双轴肩搅拌摩擦焊不同工艺焊接过程中各特征点的温度进行测定, 绘制各点的热循环曲线, 分析焊接过程中接头各区域温度场分布特征。研究表明:6082-T6铝合金薄板双轴肩搅拌摩擦焊时, 后退侧各点的峰值温度均高于前进侧, 温度差值在20℃左右; 当热影响区温度超过250℃时出现 β'' 相溶解, 硬度开始呈现下降趋势; 焊速不变、转速增大时, 热输入量呈先增大后减小的趋势, 在转速为1000 r/min时各测温点温度均达到最大值, 当转速为1200 r/min时出现下降; 转速不变、焊速增大时, 单位热输入量降低, 前进侧与后退侧的峰值温度差值由小变大, 温度场250℃等温线分布宽度明显缩小。

关键词:金属材料; 6082-T6铝合金; 双轴肩搅拌摩擦焊; 温度场; 热循环曲线

中图分类号: TG456.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2019)03-0836-06

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20180202

Temperature fields in bobbin-tool friction stir welding for 6082-T6 aluminum alloy sheet

LI Yu-peng^{1,2,3}, SUN Da-qian^{1,2}, GONG Wen-biao³

(1. School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Key Laboratory of Automobile Materials, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: In this paper, the thermal cycle curves of different processes of 4 mm 6082-T6 aluminum alloy bobbin-tool friction stir welding were detected using thermocouples measurement technology. Then the distribution characteristics of temperature field in the test area were analyzed. The results show that the maximum temperature of each measuring points at the retreating side of the welding is always higher than the advancing side, and the maximum temperature difference is about 20℃. When the HAZ temperature exceeds 250℃, the β'' begins to dissolve and the hardness begins to decrease. When the welding speed is constant, the heat input increases first and then decreases with the increase in the spindle speed. At 1000 r/min, the measuring point reaches the maximum temperature value, and then decreases at 1200 r/min. When the spindle speed is constant and the welding speed increases, the heat input of unit time decreases, and the difference of peak temperature increases between the advancing side and retreating side, the width of 250℃ isotherm is reduced considerably.

收稿日期: 2018-03-07.

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20140204070GX); 长春市科技创新“双十工程”(17ss024).

作者简介: 李于朋(1982-), 男, 博士研究生. 研究方向: 搅拌摩擦焊工艺. E-mail: lyp.ccut@163.com

Key words: metallic materials; 6082-T6 aluminum alloy; bobbin-tool friction stir welding; temperature field; thermal cycling curve

0 引言

搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)是英国焊接研究所(TWI)于1991年发明的一项新型固相连接技术^[1]。双轴肩搅拌摩擦焊技术(Bobbin-tool friction stir welding, BTFSW)是搅拌摩擦焊领域的拓展技术,在焊接过程中,上、下轴肩与搅拌针共同旋转并与被焊材料表面相互作用摩擦产生热,下轴肩还能起到背部支撑的作用^[2,3],因而在轨道客车中空型材铝合金车体的焊接制造领域得到大力推广^[4,5]。

搅拌摩擦焊接接头的形成主要是摩擦产热作用的结果,因此对焊接过程中的热输入和温度场的研究至关重要,如 Threadgill 等^[6]采用分析模型首次对搅拌摩擦焊搅拌头的热生成量和表面接触温度进行分析, Song 等^[7,8]提出移动坐标系下的 FSW 三维传热模型,并对模拟量和实测值进行了对比验证。Oertelt 等^[9]研究了焊时和焊后热循环对 2195 铝合金搅拌摩擦焊接头各区域微观结构的影响, Hilgert 等^[10]采用热伪机械(Thermal pseudo-mechanical)热源模型,提出了适用于 3 种不同焊接状态的双轴肩搅拌摩擦焊 3D 热模型。Tang 等^[11]最先采用嵌入式热电偶的测温方法对 6.4 mm 厚 6061-T6 铝合金 FSW 接头的温度场进行了测量,并对其温度分布特点进行了研究。Hwang 等^[12]采用热电偶测量了 3.1 mm 厚 6061-T6 铝合金 FSW 过程中的温度分布,对温度分布特征进行了分析,并建立了峰值温度的回归方程。张骁等^[13]采用自适应的热源模型,利用 msc•marc 模拟了 6 mm 厚 2A14 铝合金的双轴肩搅拌摩擦焊温度场,并对热循环曲线和峰值温度进行了测量和验证。Chen 等^[14]采用热电偶对双轴肩搅拌摩擦焊搅拌头与工件之间的温度进行测量,并采用闭环控制及史密斯预测 PID 的方法将温度变化与焊接过程控制结合起来,以提高焊接质量。李敬勇等^[15]采用热电偶测定温度变化曲线的方法,对 6 mm 厚 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊温度场分布特征进行了研究。

本文主要针对用于轨道客车车体侧墙、车底板等部件制造的 6082-T6 铝合金薄板双轴肩搅拌

摩擦焊对接接头,测定了不同转速和不同焊接速度下焊接试板的温度分布曲线,对温度场分布规律进行分析研究,为实际生产和型材设计提供理论依据。

1 试验方法

试验材料选用 4 mm 厚 6082-T6 铝合金板材,试板尺寸为 500 mm×150 mm。试验所使用的焊接设备为 FSW-LM-AM16 型搅拌摩擦焊机,所用的双轴肩搅拌头搅拌针直径为 6 mm,上、下轴肩直径均为 16 mm,轴肩间距为 3.8 mm。测温装置采用 RX4008BJL 多通道无纸记录仪和直径为 1 mm 的 K 型铠装热电偶。焊接工艺参数如下所示:选择焊接速度为 500 mm/min,主轴转速分别为 800、1000 和 1200 r/min,研究不同转速对温度场的影响;选择主轴转速为 800 r/min,焊接速度分别为 300、500 和 700 mm/min,研究不同焊接速度对温度场的影响。

为准确测量焊接接头的温度数据,在焊缝的前进侧(Advancing side, AS)和后退侧(Retreating side, RS)各对称设置 8 个测温点,如图 1 所示。

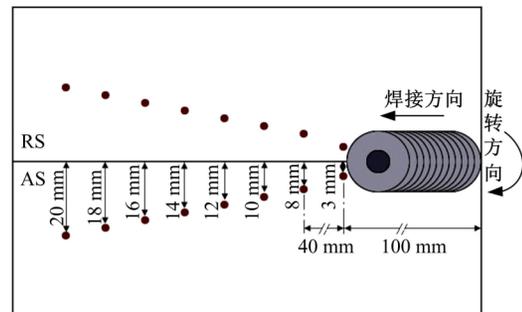


图 1 测温特征点分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of distribution of temperature measurement points

图 1 中,首个测温点距离焊缝起始位置 100 mm,测温点之间的间距为 40 mm。前进侧与后退侧的测温点距离焊缝中心距离分别为 3、8、10、12、14、16、18 和 20 mm,其中第 1 个测温点测温位置为搅拌针边缘,第 2 个测温点测温位置为轴肩外缘正下方。为尽可能保证测温数据精确,各测温点热电偶的安装方法如图 2 所示。

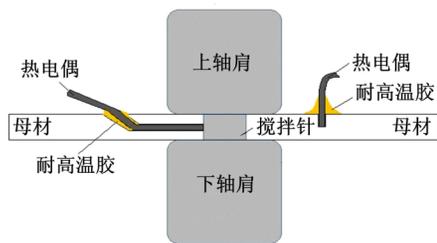


图 2 热电偶安装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of thermocouple installation

2 试验结果及分析

2.1 距焊缝中心不同距离的温度场分布规律

双轴肩搅拌摩擦焊时,搅拌头上、下轴肩直径相同,结构相同,与母材(Base metal, BM)摩擦产生的热量也相同。因试验用板材厚度仅为 4 mm,故可认为在厚度方向上不存在温度梯度。图 3 为主轴转速为 800 r/min,焊接速度为 500 mm/min 时的焊缝前进侧和后退侧的热循环曲线。从图中可以看出:在焊接开始后,靠近起始位置的 3 mm 和 8 mm 测温点的温度值逐渐升高,其他测温点的温度停留在初始温度,当搅拌头接近测温点时,其温度瞬间升高至峰值温度,随着搅拌头远离测温点,温度值逐渐回落。这是因为在双轴肩搅拌

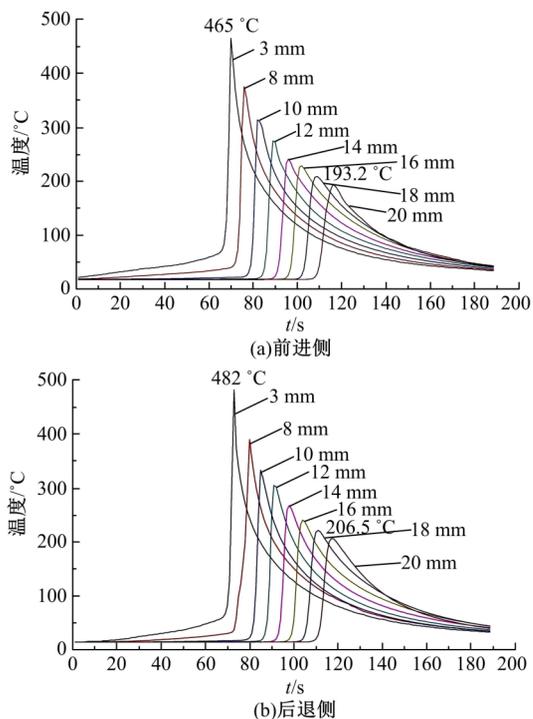


图 3 转速为 800 r/min、焊速为 500 mm/min 时各测温点焊接热循环曲线

Fig. 3 Heat cycle curves of measuring points with 800 r/min and 500 mm/min

摩擦焊焊接初期,为保证有足够的热量使母材达到热塑性状态,搅拌头在达到设定转速后先在焊缝起始位置预热,然后逐渐加速到设定焊接速度,因此距离起始位置较近的前两个测温点会出现温度逐渐升高的趋势。观察图中各测温点的峰值温度,发现距离焊缝中心越近,峰值温度越高,冷却速度也越快,随着测温点远离焊缝中心,其峰值温度逐渐降低,冷却速度也逐渐减慢。当焊接结束后,各测温点的温度逐渐趋于均匀化,由于存在前期的摩擦热源作用,此温度比初始温度略有升高。

2.2 前进侧和后退侧的温度分布规律

图 4 为转速为 800 r/min、焊速为 500 mm/min 时焊缝前进侧和后退侧各测温点峰值温度对比图,从图中可看出,焊接接头中后退侧各测温点的最高温度均高于前进侧温度,温度差值在 20 °C 左右。在搅拌摩擦焊焊接过程中,随着搅拌头的旋转,轴肩和搅拌针不仅摩擦产生热量,还带动试板上下表面和焊核区塑性金属从搅拌头前进侧旋转至后退侧,在塑性金属转移的同时也出现了热量的转移。另外,在搅拌摩擦焊接头的焊核区和热机械影响区,被焊金属发生了剧烈的塑性变形,产生塑性变形热。后退侧金属的变形量和应变速率均高于前进侧,其产生的塑性变形热也高于前进侧,因此焊接接头中后退侧温度高于前进侧的温度。

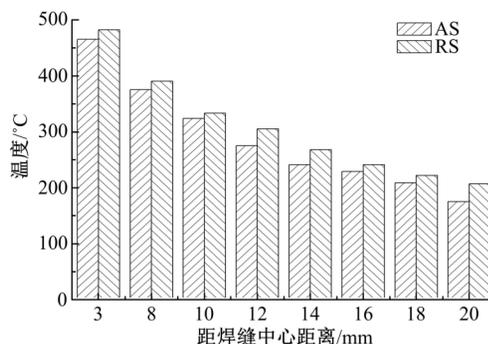


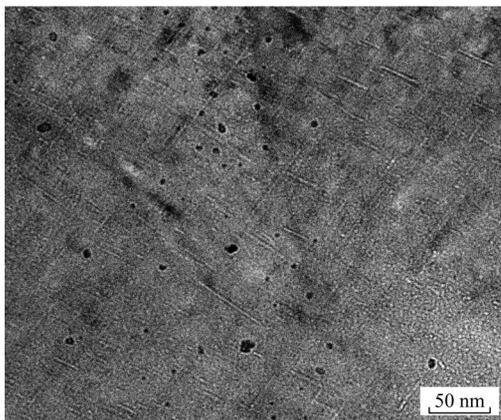
图 4 转速为 800 r/min、焊速为 500 mm/min 时前进侧和后退侧峰值温度对比图

Fig. 4 Peak temperature comparison diagram of AS and RS by 800r/min and 500 mm/min

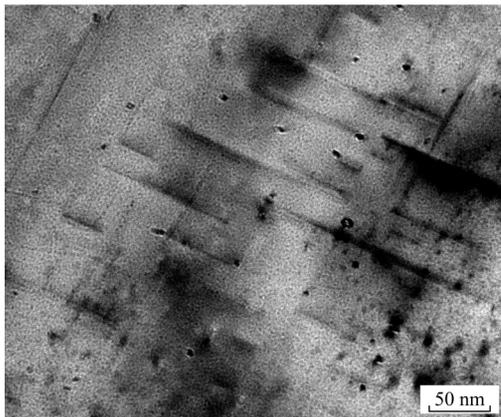
文献[16]对 6082-T6 铝合金的差示扫描量热仪(Differential scanning calorimetry, DSC)分析结果认为 6082-T6 铝合金过渡相 β'' 相的溶解温度为 250~285 °C,即当接头中温度达到 250 °C 以上时,母材中的 β'' 相会发生部分溶解直至完全溶解,使其强化效果明显降低。采用 FEI Talos F2005 高

分辨透射电镜对母材和温度为 250~285 °C 内的热影响区 (Heat-affected zone, HAZ) 做透射电镜 (Transmission electron microscope, TEM) 分析, 结果如图 5 所示, 在图 5(a) 中, 晶粒内部析出大量长度为 20~80 nm 的针状沉淀强化相。根据文献 [17, 18] 对 Al-Mg-Si 系铝合金沉淀相的研究, T6 状态母材的相组成主要为 α -Al 和 β'' 相, 可以肯定这类针状沉淀相为 β'' 相 (Mg_5Si_6 , 单斜结构)。当母材中存在大量 β'' 相时, 沉淀析出相及其引起的应变场阻碍了位错运动的进行, 因此 β'' 相在铝合金母材中具有明显的强化效应, 母材的硬度显著提高。而在焊接过程中, 随着热影响区温度的升高, 原始组织中小于临界尺寸的 β'' 相开始溶解于基体, β' 相 (Mg_2Si_3) 以未溶解的 β'' 相为核心进行异质形核而析出并得以保留, 图 5(b) 即为粗大的棒状组织 β' 相。 β' 相的强化效果低于 β'' 相, 故其热影响区硬度呈现下降趋势。

图 6 为转速为 800 r/min、焊速为 500 mm/min 时焊接接头温度和显微硬度分布图, 图中焊接温



(a)母材



(b)热影响区

图 5 母材和热影响区的 TEM 明场相
Fig. 5 TEM micrograph of BM and HAZ

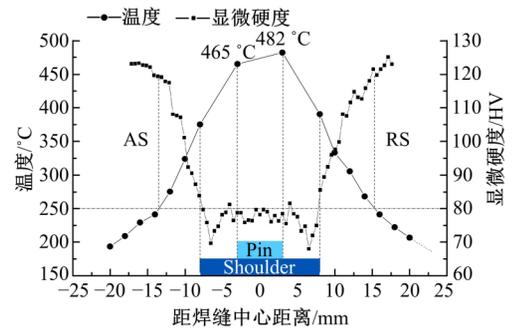


图 6 转速为 800 r/min、焊速为 500 mm/min 时焊接接头温度和显微硬度分布图

Fig. 6 Temperature distribution and microhardness of welding joint by 800r/min and 500 mm/min

度场前进侧和后退侧 250 °C 等温线距离焊缝中心的宽度分别为 13.47 mm 和 15.32 mm, 即 250 °C 等温线宽度为 28.79 mm。对比图中显微硬度值可明显看出: 温度大于 250 °C 的区域正是显微硬度值降低的区域, 因此可认为该工艺参数下 250 °C 等温线宽度为焊接热影响区的宽度。

2.3 不同转速对温度场分布的影响

固定焊接速度为 500 mm/min, 分别采用 800、1000 和 1200 r/min 的主轴转速进行焊接, 对其前进侧和后退侧温度场进行测量, 其各测量点峰值温度如图 7 所示。可以看出, 无论前进侧还

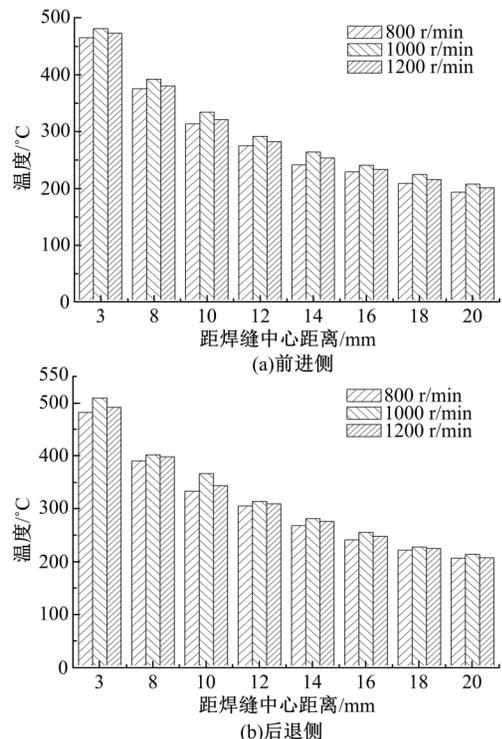


图 7 不同转速各点峰值温度对比图

Fig. 7 Peak temperature comparison of each points by different spindle speed

是后退侧, 主轴转速在 1000 r/min 时的温度均为最高, 焊缝中心后退侧最高温度为 509 °C, 前进侧最高温度为 481 °C; 主轴转速为 1200 r/min 时的温度次之, 后退侧和前进侧温度分别为 491.5 °C 和 473 °C; 主轴转速为 800 r/min 时的温度最低, 后退侧和前进侧的温度分别为 482 °C 和 465 °C。搅拌摩擦焊的主要热量来源为轴肩和搅拌针与母材的摩擦产热, 根据文献[7]的研究, 摩擦产热量 Q 一般认为与摩擦因数 μ 、正应力 σ_y 、搅拌头旋转速度 n 有关, 同时摩擦因数也与正应力 σ_y 密切相关。对于铝合金, 其屈服强度随温度升高而降低, 故 σ_y 值也随温度升高而降低, 相应的 μ 值也出现下降。因此当提高搅拌头的转速 n 时, 虽然会提高产热功率, 使温度升高, 但 σ_y 值和 μ 值会随温度升高而降低, 从而导致产热量 Q 下降。因此, 不同工艺参数的搅拌摩擦焊接都能始终处于固相焊接状态。

图 8 为不同转速时的焊接接头温度分布图, 从图中可以看出: 在 1000 r/min 转速时的接头热影响区宽度最宽, 800 r/min 转速时最窄, 其差别仅在 ± 2 mm 之间, 区别不大。

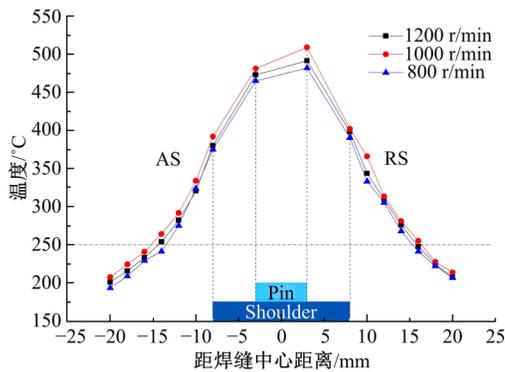


图 8 不同转速焊接接头温度分布图

Fig. 8 Temperature distribution of welding joint by different spindle speed

2.4 不同焊接速度对温度场分布的影响

将主轴转速设定为 800 r/min, 比较焊接速度分别为 300、500 和 700 mm/min 时的温度循环曲线。图 9 为焊接试板各测温点温度分布图。从图 9 中可看出, 当焊接速度为 300 mm/min 时, 所有测温点测量温度为最高, 且距离焊缝中心越远, 与其他工艺参数相比温度差值越大。当焊接速度增大时, 试件加热时间缩短, 导致单位时间里的热输入降低, 焊件各测温点温度值降低, 因此当焊接速度为 700 mm/min 时, 各测温点的温度值均为最

低。比较焊缝中心前进侧和后退侧的最高温度发现, 当焊接速度为 300 mm/min 时, 前进侧和后退侧温度为 484.1 和 493 °C; 焊接速度为 700 mm/min 时的温度分别为 450.2 和 470.5 °C。因为焊接速度不同, 导致焊缝中心处热量分布状态不同, 焊接速度慢时焊缝前进侧和后退侧的温度差值小, 焊接速度快时焊缝前进侧和后退侧的温度差值大。从图中还可发现: 焊接速度不同时, 其温度场等温线分布宽度差异较大, 按照图中温度变化趋势, 焊接速度为 300 mm/min 时的 250 °C 等温线宽度可达 38.35 mm 以上, 焊接速度为 700 mm/min 时等温线宽度仅为 25.72 mm。因此, 当采用较高的热输入量焊接时, 会导致热影响区范围增大, 焊接接头性能降低。

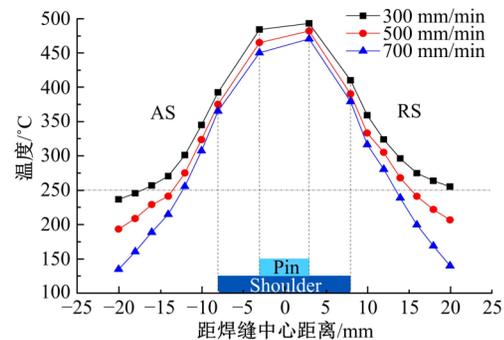


图 9 不同焊接速度焊接接头温度分布图

Fig. 9 Temperature distribution of welding joint by different welding speed

3 结 论

(1) 6082-T6 铝合金薄板双轴肩搅拌摩擦焊时, 后退侧各测温点的最高温度始终高于前进侧温度, 温度差值在 20 °C 左右, 当热影响区温度超过 250 °C 时出现 β'' 相溶解, 硬度开始呈现下降趋势。

(2) 在焊接速度不变时, 随着转速的提高, 热输入量呈先增大后减小的趋势, 在转速为 1000 r/min 时各测温点温度均达到最大值, 后退侧峰值温度为 509 °C, 转速为 1200 r/min 时各测温点温度出现回落。

(3) 在主轴转速不变时, 随焊接速度的增大, 前进侧和后退侧峰值温度差值由小变大, 温度场 250 °C 等温线分布宽度(即热影响区)由 300 mm/min 时的 38.35 mm 以上, 缩小为 700 mm/min 时的 25.72 mm。

参考文献:

- [1] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, et al. Improvements relating of friction welding[P]. PCT/GB1992/002203,1992-11-27.
- [2] 温泉,李文亚,王非凡,等. 双轴肩搅拌摩擦焊接方法研究进展[J]. 航空制造技术,2017(12):16-23.
Wen Quan, Li Wen-ya, Wang Fei-fan, et al. Research progress on bobbin tool friction stir welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(12):16-23.
- [3] Liu H J, Hou J C, Guo H. Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy[J]. Materials & Design, 2013(50):872-878.
- [4] 赵秋颖,吴志生,刘翠荣,等. 铝合金搅拌摩擦焊研究现状[J]. 焊接技术,2016(1):1-5.
Zhao Qiu-ying, Wu Zhi-sheng, Liu Cui-rong, et al. Research status about friction stir welding of aluminum alloy[J]. Welding Technology, 2016(1):1-5.
- [5] 刘杰,邓刚,韩凤武,等. 双轴肩搅拌摩擦焊技术在铝合金车体制造中的应用发展[J]. 焊接,2015(1):17-20.
Liu Jie, Deng Gang, Han Feng-wu, et al. The application and development of the friction stir welding technology in the manufacture of aluminum alloy body [J]. Welding & Joining, 2015(1):17-20.
- [6] Threadgill P L, Leonard A J, Shercliff H R, et al. Friction stir welding of aluminum alloys[J]. International Materials Reviews, 2009, 54(2):49-93.
- [7] Song M, Kovacevic R. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(6):605-615.
- [8] Song M, Kovacevic R. Numerical and experimental study of the heat transfer process in friction stir welding[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2003, 217(1):73-85.
- [9] Oertelt G, Babu S S, Dabid S A, et al. Effect of thermal cycling on friction stir welds of 2195 aluminum alloy[J]. Welding Journal, 2001, 80(3):71-79.
- [10] Hilgert J, Schmidt H N B, Santos J F, et al. Thermal models for bobbin tool friction stir welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(2):197-204.
- [11] Tang W, Guo X, McClure J C, et al. Heat input and temperature distribution in friction stir welding[J]. Journal of Materials Processing and Manufacturing Science, 1998, 7(2):163-172.
- [12] Hwang Y M, Kang Z W, Chiou Y C, et al. Experimental study on temperature distributions within the workpiece during friction stir welding of aluminum alloys[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(7):778-787.
- [13] 张骁,王敏,张会杰,等. 2A14 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊的温度场模拟与测定[J]. 焊接,2015(9):16-19.
Zhang Xiao, Wang Min, Zhang Hui-jie, et al. Simulation and test of bobbin tool friction stir welding temperature field of 2A14 aluminum alloy[J]. Welding & Joining, 2015(9):16-19.
- [14] Chen Shun-jin, Li Hao, Lu Sheng, et al. Temperature measurement and control of bobbin tool friction stir welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(1-4):337-346.
- [15] 李敬勇,周小平,董春林,等. 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊试板温度场研究[J]. 航空材料学报, 2013, 33(5):36-40.
Li Jing-yong, Zhou Xiao-ping, Dong Chun-lin, et al. Temperature fields in 6082 Aluminum alloy samples bobbin-tool friction stir welded[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(5):36-40.
- [16] 王冰. 6082-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头微观组织及力学性能的研究[D]. 长春: 吉林大学材料科学与工程学院, 2015.
Wang Bing. Study on microstructures and mechanical properties of friction stir welding joints of 6082-T6 aluminum alloy[D]. Changchun: College of Materials Science and Engineering, Jilin University, 2015.
- [17] Andersen S J, Zandbergen H W, Jansen J, et al. The crystal structure of the β'' phase in Al-Mg-Si alloys[J]. Acta Materialia, 1998, 46(2):3238-3298.
- [18] Edwards G A, Stiller K, Dunlop G L, et al. The precipitation sequence in Al-Mg-Si alloys[J]. Acta Materialia, 1998, 46(11):3893-3904.