

焊后热处理对 6063-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头 微观组织与力学性能的影响

浦健欣^{1,2}, 孙 巍^{2,3}, 张 辉^{1,2}

(1. 东北大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819 2. 东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819 3. 辽宁忠旺集团有限公司 研究院, 辽宁 辽阳 111003)

摘 要:研究了固溶处理(540 °C×1 h)、时效处理(175 °C×8 h)、固溶+时效处理(540 °C×1 h+175 °C×8 h)对 3 mm 厚 6063-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头微观组织和力学性能的影响。结果表明,焊后接头焊核区平均晶粒尺寸仅为 3.2 μm;固溶处理后接头由于第二相粒子对晶界钉扎效应减弱,部分晶粒晶界发生迁移,出现不同程度异常晶粒长大,并出现尺寸超过 500 μm 的大晶粒;时效处理后接头组织形貌未发生明显改变,焊核区平均晶粒尺寸为 4.5 μm;固溶+时效处理后接头组织形貌与固溶后相似。固溶后接头强度和整体硬度均降低,但伸长率提高;时效及固溶+时效由于析出强化起主要作用,接头强度和整体硬度均提高,但伸长率有所降低。其中,时效后接头抗拉强度最高,为 212.6 MPa;固溶后接头抗拉强度最低,为 138.8 MPa。

关键词:搅拌摩擦焊;6063-T6 铝合金;固溶时效;异常晶粒长大

中图分类号: TG453⁺9; TG113

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2022)04-0270-06

Effects of Postweld Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of 6063-T6 Aluminum Alloy Friction Stir Welding Joints

PU Jianxin^{1,2}, SUN Wei^{2,3}, ZHANG Hui^{1,2}

(1. College of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Material Electromagnetic Process Research, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Research Institute of Liaoning Zhongwang Group Co., Ltd., Liaoyang 111003, China)

Abstract: The effects of solution treatment (540 °C×1 h), aging treatment (175 °C×8 h) and solution+aging treatment (540 °C×1 h+175 °C×8 h) on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6063-T6 aluminum alloy sheet with 3 mm thickness were investigated. The results show that the average grain size of the welded joint is only 3.2 μm. After solution treatment, due to the weak pinning effect of the second phase particles on grain boundaries, some grain boundaries migrate in the joint structure, and abnormal grain growth occurs in different degrees, with some large grains exceeding 500 μm. After aging treatment, the microstructure of the joint does not change significantly, and the average grains size of the welded core zone is 4.5 μm. The microstructure of the joint after solution+aging treatment is similar to that after solution. After solution, the tensile strength and hardness of the joint decrease, but the elongation increases. Due to precipitation strengthening, the strength and hardness of the joint are increased after aging and solution+aging, but the elongation is decreased. The tensile strength of joints after aging is 212.6 MPa, which is the highest. After solution, the tensile strength is the lowest, 138.8 MPa.

Key words: friction stir welding; 6063-T6 aluminum alloy; solution aging; abnormal grain growth

近年来,铝合金材料的搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)工艺发展得十分迅速,其作为一种固相焊接技术,具备熔焊所没有的优势:焊接变形小、

接头质量高、环保无污染等^[1-3]。6000 系铝合金是可热处理强化型铝合金,具有优异的耐蚀性和成形性,广泛应用于航空航天、轨道交通及船舶等装备制造领域^[4-6]。目前,6000 系铝合金也是汽车车体应用量最大的材料之一,如汽车底架的前端多采用 6082-T6 铝合金,地板、边梁及车顶多采用 6005A-T6 铝合金,新能源汽车的散热器多采用 6063-T6 铝合金^[7]。但由于 6063 铝合金具有焊接裂纹敏感性的特点,在实际应用上受到限制。采用 FSW 技术对 6063-T6 铝合金进行焊接,可以改善传统焊接导致的接头变形

收稿日期:2022-03-03

基金项目:国家重点研发计划资助项目(ZX20220038)

作者简介:浦健欣(1996—),硕士生。研究方向:铝合金搅拌摩擦焊。

电话:13002411066, Email:13002411066@163.com

通讯作者:张 辉(1967—),博士。研究方向:新材料的力学性能与变形机制;同步辐射分层扫描方法材料三维变形与断裂研究;强塑性变形材料的变形机制。

电话:15204089609, Email:h Zhang@cpm.neu.edu.cn

大、易产生气孔的情况,但接头仍然存在着软化问题^[8-10]。因此,为了恢复接头强度,且能进一步提高其力学性能,可以采取对接头进行焊后热处理^[11]。

本文采用固溶、时效与固溶+时效 3 种方法,研究焊后不同热处理方式对 6063-T6 铝合金 FSW 接头微观组织及力学性能的影响,为热处理工艺在 FSW 实际应用中的发展提供更多可行性。

1 实验材料与方法

试验以厚度为 3 mm 的 6063-T6 铝合金 FSW 接头为研究对象,其化学成分及强度见表 1。采用的搅拌摩擦焊工艺:旋转速度 900 r/min,行进速度 100 mm/min,搅拌头轴肩直径 16 mm,根部直径 10 mm,端部直径 4 mm,搅拌针针长 2.8 mm,下压力 0.2 mm,倾斜角度 2.5°。焊接后的试样在马弗炉中进行不同热处理,所用热处理工艺参数见表 2。

表1 6063-T6铝合金化学成分及强度 w/%

Tab.1 Chemical composition and strength of 6063-T6 aluminum alloy

Al	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Rm/MPa
余量	0.7	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	242

表 2 热处理工艺参数

Tab.2 Heat treatment process parameters

热处理方式	热处理温度 /℃	保温时间 /h	冷却方式
固溶	540	1	水冷
时效	175	8	空冷
固溶+时效	(540+175)	(1+8)	水冷+空冷

本实验采用线切割机,在垂直于热处理试样焊缝方向上切取金相样品,然后用 600 #~5000 # 砂纸

依次进行水磨,并先后于抛光机和麂皮上进行粗抛与精抛。研磨抛光后的试样,在新配置的溶液(74% 水 +24%无水乙醇 +1%氢氟酸 +1%氟硼酸)中进行阳极覆膜处理,利用型号为 OLYMPUS BX53 的光学显微镜的偏光镜片观察试样。硬度测试采用型号为 MH-500 的半自动显微硬度计,加载载荷 100 g,加载时间 10 s。拉伸试验采用 INSTRON 疲劳试验机,拉伸速率 1 mm/min,拉伸试样截面尺寸如图 1 所示,试样厚度为 3 mm,焊缝位于拉伸试样中部。

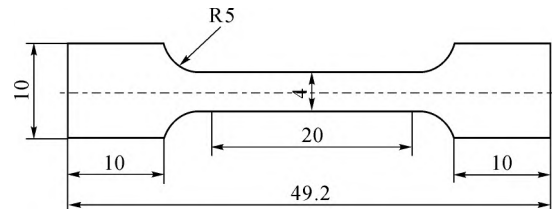


图 1 拉伸试样截面尺寸

Fig.1 Cross section dimension of tensile specimen

2 试验结果及讨论

2.1 接头宏观形貌

图 2 为不同热处理条件下 FSW 接头截面在偏光镜下的宏观组织图,其中试样截面尺寸为 24 mm×3 mm。图 2(a)所示为在未热处理情况下,FSW 接头在经历了热循环和机械力作用后,其截面由中心到两端依次为焊核区 (Nugget zone, NZ)、热机影响区 (Thermo-mechanically affected zone, TMAZ)、热影响区 (Heat affected zone, HAZ) 及母材,且各区域宏观形貌界限明显。此外,在焊核区中下部还发现“洋葱环”状结构。图 2(b)所示为在固溶处理时,接头各区

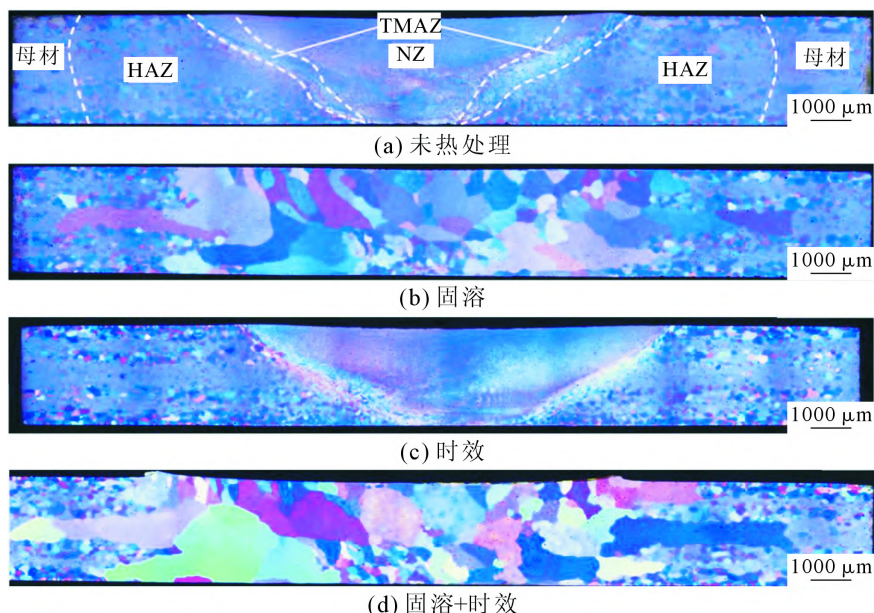


图 2 不同热处理条件下接头截面的宏观组织图

Fig.2 Macrostructures of cross section of the welded joints under conditions of different heat treatment

域局部晶粒组织在较高的固溶温度下并不稳定,出现了不理想的粗晶结构。这种晶粒结构的不稳定性被认为是发生了异常晶粒长大 (Abnormal grain growth, AGG)。AGG 是一些晶粒以牺牲更细的基体晶粒为代价发生异常生长的微观结构现象,通常在正常晶粒生长停止后才发生^[12-13]。AGG 的出现导致接头各区域的界限也消失。图 2(c)所示,在时效处理后,由于时效温度较低,接头各区域仍有明显界限,并未出现 AGG 现象,接头截面宏观形貌较未热处理时相比没有明显差别。图 2(d)所示,在固溶+时效处理后,接头各区域依然存在固溶后出现的 AGG 现象,且接头截面宏观形貌较只有固溶处理时相比未发生明显变化。

2.2 接头微观组织

图 3 为不同热处理条件下 FSW 接头各区域在偏光镜下观察到的组织形貌,图中显示的细小的黑色孔洞为第二相粒子在阳极覆膜后受到腐蚀影响脱落形成。图 3(a1)~(c1)为未热处理时接头各区的显微组织形貌,热影响区仅受热循环影响,部分晶粒二次长大,但晶粒形态较母材相比未发生明显改变^[14-15]。热机影响区在焊接过程中既受热循环作用

又需承受机械力搅拌,晶粒呈现出明显的扭转拉长变形。焊核区在高温和机械力的双重作用下产生剧烈塑性变形,导致焊核区内原有晶粒被破坏,发生动态再结晶,晶粒也由纤维状形态变为细小的等轴晶。图 3(a2)~(c2)为固溶处理后接头各区的显微组织形貌,各个区域局部晶粒在高温下发生异常长大,其尺寸可达几百微米,在高倍下观察不到完整的晶界。图 3(a3)~(c3)为时效处理后接头各区的显微组织形貌,与未热处理时的微观形貌相似,由于时效处理温度较低,接头各区未发生 AGG,焊核区晶粒尺寸细小。图 3(a4)~(c4)为固溶+时效处理后接头各区的显微组织形貌,与固溶处理后的微观形貌相比没有明显改变。

图 4 为不同热处理条件下接头各区平均晶粒尺寸变化情况。焊后接头各区域平均晶粒尺寸由小到大为:焊核区、热机影响区、热影响区。未热处理和时效处理后接头各区的平均晶粒尺寸都较小,其中未热处理和时效后焊核区平均晶粒尺寸仅为 $3.2\ \mu\text{m}$ 和 $4.5\ \mu\text{m}$ 。固溶处理、固溶+时效处理的接头组织在较高固溶温度下并不稳定,出现了不理想的粗大晶粒,从而大大增加了接头各区的平均晶粒尺寸,并出

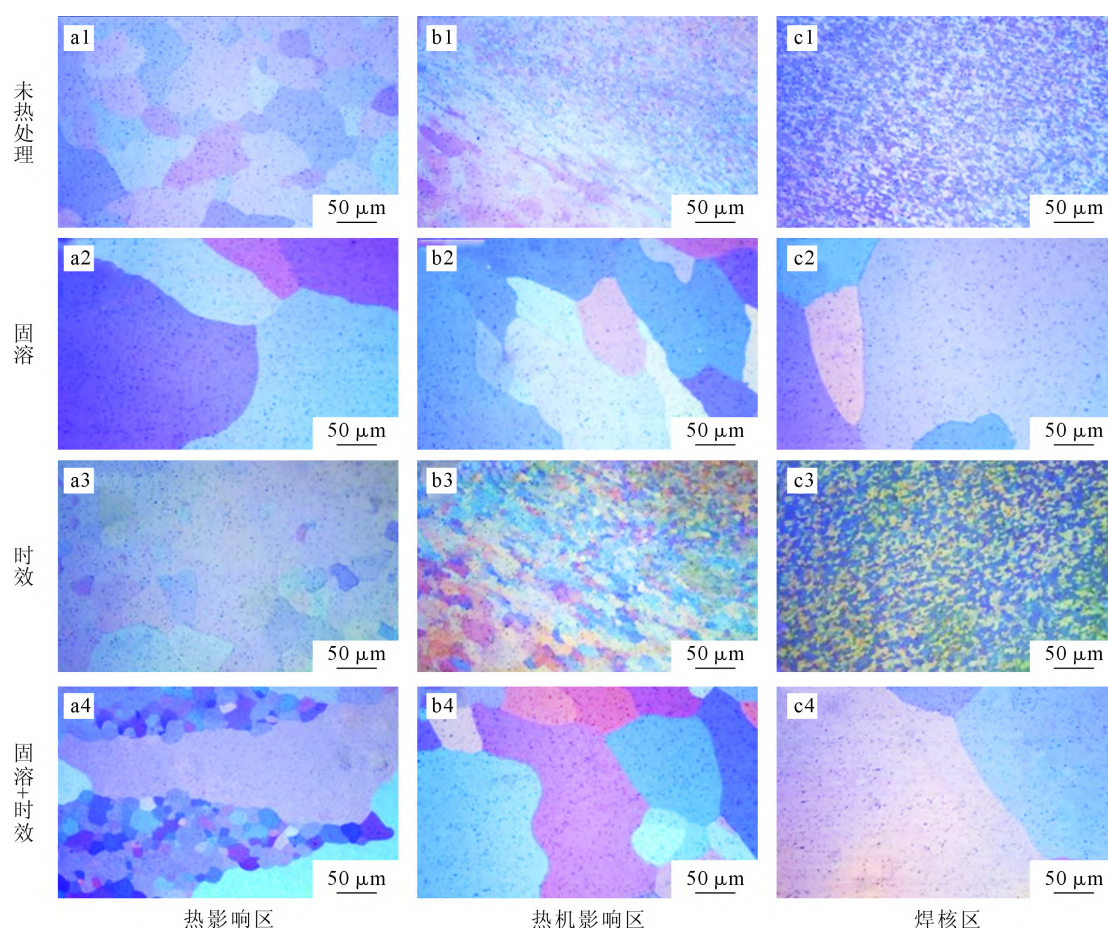


图 3 不同热处理条件下接头截面的微观组织图

Fig.3 Microstructures of cross section of the welded joints under conditions

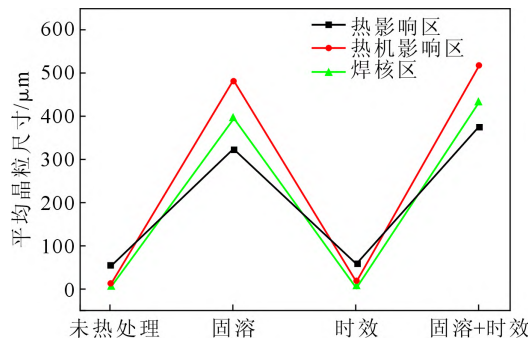


图4 不同热处理条件下接头各区的平均晶粒尺寸变化

Fig.4 Average grain size of each district of the joints under different heat treatment conditions

现尺寸超过 500 μm 的大晶粒。

图5 演示了异常晶粒长大过程。AGG 通常发生在第二相粒子钉扎晶界时,晶粒长大过程中晶界所

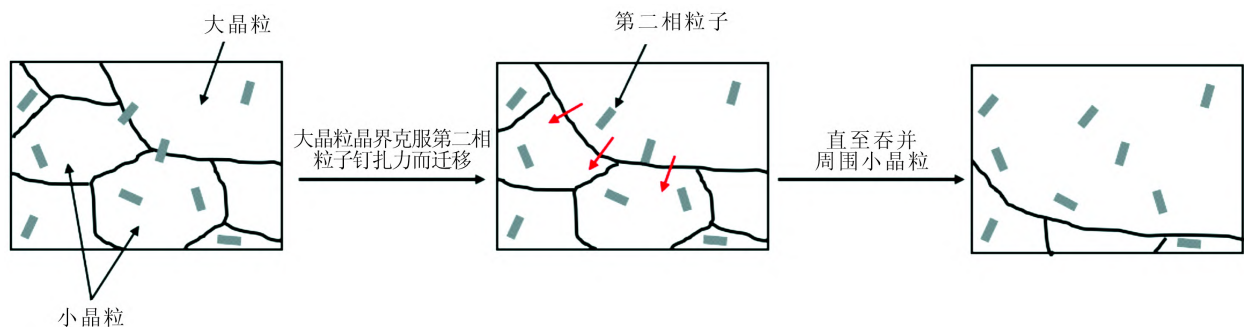


图5 异常晶粒长大过程示意图

Fig.5 Schematic diagram of abnormal grain growth

本保留了微观组织在较高温度下固溶时的形态。

2.3 接头显微硬度

图6 为不同热处理条件下接头的显微硬度分布。未热处理时接头整体硬度分布大致呈现为 W 形,这是由于焊核区晶粒发生动态再结晶,细化了晶粒组织,焊核区硬度提高,而热影响区晶粒由于受热循环作用部分发生长大,且少量第二相粒子溶解,热影响区硬度降低,从而导致焊核区硬度高于热影响区。固溶处理后,接头各区域局部晶粒出现 AGG,伴随着第二相粒子的大量溶解,接头整体硬

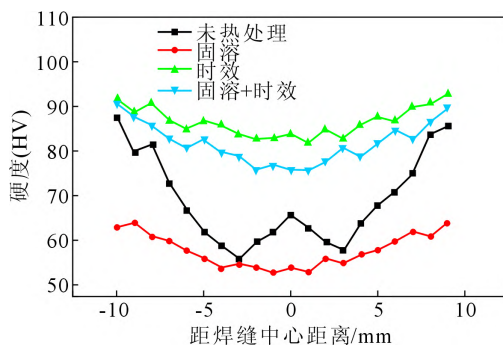


图6 不同热处理条件下接头截面的硬度分布

Fig.6 Hardness distribution of cross section of the joints under different heat treatment conditions

承受的力主要为:一是系统中总晶界面积减少引起相关晶界能下降的驱动力;二是来自弥散分布的第二相粒子的钉扎压力^[16]。当第二相粒子的阻碍作用大于等于晶界所能提供的驱动力时,晶粒长大过程停滞,若组织中局部区域由于粒子溶解产生的钉扎力小于驱动力时,个别晶粒仍能继续长大,发生 AGG。对于单个晶粒,相对于停滞的平均基质晶粒,与周围相邻晶粒有较大的尺寸差异,会获得大于粒子钉扎压力的生长驱动力,发生 AGG^[17]。固溶处理时温度较高,由于第二相粒子的不均匀溶解或分布导致组织中局部区域粒子产生的钉扎压力较小,会有个别晶粒的界面挣脱钉扎力而迁移优先长大,出现 AGG。时效处理时温度较低,且经过长时间保温,第二相粒子分布均匀化,未出现 AGG。固溶+时效处理则是基

度明显降低。时效处理后,在低温下经过长时间保温,第二相粒子在接头各区域分布均匀,接头整体硬度提高。固溶+时效处理后,固溶时大量溶于基体的第二相粒子,经时效后重新均匀析出,接头整体硬度有所提高。

3 种热处理方法都会使接头原有 W 形分布特征在不同程度上减弱,且时效处理后接头整体硬度最高,固溶处理后接头整体硬度最低。

2.4 接头拉伸性能

图7 为不同热处理条件下接头的拉伸性能,表3 为接头的拉伸性能汇总。由拉伸曲线可知,时效处理、固溶+时效处理后接头屈服强度和抗拉强度均有提高,但伸长率有所下降,固溶处理价降低了接头屈服强度和抗拉强度,但提高了伸长率。

未热处理时接头屈服和抗拉强度为 103.6 MPa 和 164.7 MPa,抗拉强度接近母材的 70%,伸长率为 21.8%;固溶处理后接头屈服和抗拉强度分别降低至 60.4 MPa 和 138.8 MPa,伸长率提高至 29.5%;时效处理后接头屈服和抗拉强度分别提高至 176.2 MPa 和 212.6 MPa,伸长率降低至 11.3%;固溶+时效处理后接头屈服和抗拉强度分别提高至 130.7 MPa 和

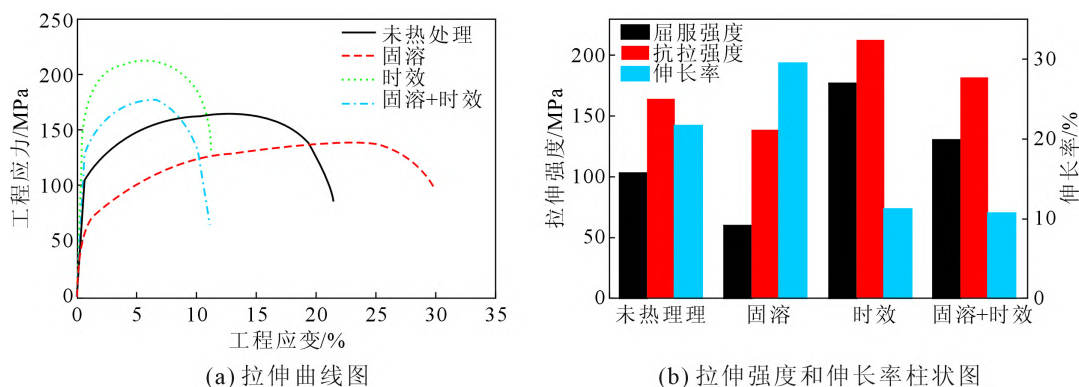


图7 不同热处理条件下接头的拉伸性能
Fig.7 Tensile properties of the joints under different heat treatment conditions

182.1 MPa, 伸长率降低至 10.8%。固溶处理后, 接头各区域局部发生 AGG, 且大量第二相粒子溶于基体, 强化作用减弱, 导致强度降低, 但提高了伸长率。时效处理后, 第二相粒子析出且分布均匀, 产生析出强化, 强度有很大提高, 但伸长率有所降低。固溶+时效处理后, 固溶时大量第二相粒子溶于基体形成过饱和固溶体, 经时效后又重新析出, 尽管接头组织局部出现 AGG, 但均匀分布的析出相起到了真正的强化作用, 产生的析出强化为主要强化机制, 强度有所提高, 但伸长率降低^[18-20]。

时效处理后接头抗拉强度最高, 固溶处理后接头抗拉强度最低, 这与硬度测试结果相符。根据拉伸试验结束后样品的断裂位置可知, 未热处理时接头薄弱区为热影响区, 而经 3 种热处理方式后接头薄弱区为焊核区。

表3 不同热处理条件下接头的拉伸性能
Tab.3 Tensile properties of the joints under different heat treatment conditions

热处理方式	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%	断裂位置
未热处理	103.6	164.7	21.8	热影响区
固溶	60.4	138.8	29.5	焊核区
时效	176.2	212.6	11.3	焊核区
固溶+时效	130.7	182.1	10.8	焊核区

3 结论

(1) 固溶处理及固溶+时效处理后的接头各区域组织不稳定, 局部发生异常晶粒长大, 未热处理与时效处理后接头未出现异常晶粒长大现象。

(2) 焊后接头热影响区晶粒较母材比未发生明显改变; 热机影响区晶粒呈现出扭转拉长变形; 焊核区发生动态再结晶, 形成细小的等轴晶。时效处理后接头组织形貌未发生明显改变, 固溶处理后接头各区域由于第二相粒子对晶界钉扎效应减弱, 部分晶粒晶界挣脱钉扎力而发生迁移, 出现不同程度异

常晶粒长大, 固溶+时效处理后接头组织形貌与固溶后相似。

(3) 采用时效处理、固溶+时效处理可以提高接头整体硬度, 而固溶处理后接头整体硬度降低。

(4) 时效处理、固溶+时效处理由于析出强化起到主要强化作用, 改善了接头软化情况, 时效后接头抗拉强度最高, 为 212.6 MPa, 而固溶后接头抗拉强度最低, 为 138.8 MPa。

参考文献:

- [1] 赵秋颖, 吴志生, 刘翠荣. 铝合金搅拌摩擦焊研究现状[J]. 焊接技术, 2016(1), 1: 1-5.
- [2] 侯艳喜, 徐荣正, 李慧, 等. 铝合金搅拌摩擦焊接技术的现状与展望[J]. 热加工工艺, 2019, 48(5): 1-5.
- [3] 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, 33 (2): 155-165.
- [4] 吕志军, 张昊, 郭跃, 等. 6061 铝合金无倾角搅拌摩擦焊工艺及性能[J]. 精密成形工程, 2018, 10(4): 108-113.
- [5] 张鹏, 刘志敏, 陈琳琳, 等. 白车身铝合金轻量化的应用现状和发展趋势[J]. 汽车工艺与材料, 2019(3): 4-8.
- [6] 侯世忠. 汽车用铝合金的研究与应用[J]. 铝加工, 2019, 6(6): 8-13.
- [7] 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, 2015.
- [8] CHEN Y C, FENG J C, LIU H J. Stability of the grain structure in 2219-O Aluminum alloy friction stir welds during solution treatment[J]. Materials Characterization, 2007, 58(2): 174-178.
- [9] LIU H J, FUJII H, MAEDA M, et al. Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 Aluminum alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142(3): 692-696.
- [10] CHEN K, GAN W, OKAMOTO K, et al. The mechanism of grain coarsening in Friction-stir-welded AA5083 after heat treatment[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(2): 488-507.
- [11] CHARIT, MISHRA R S. Abnormal grain growth in friction stir processed alloys[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(5): 367-371.
- [12] DEVARAJ A, WANG W, VEMURI R, et al. Grain boundary seg-

- regation and intermetallic precipitation in coarsening resistant nanocrystalline aluminum alloys [J]. Acta Materialia, 2019, 165: 698-708.
- [13] Humphreys F J, Hatherly M. Recrystallization and related annealing phenomena[M]. Berlin: Pergamon, 2012.
- [14] 胡尊艳. 焊后时效对 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头组织和性能的影响[D]. 北京:北京交通大学, 2008.
- [15] 王海艳, 戚文军, 农登, 等. 6061 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能研究[J]. 稀有金属, 2010, 34(5): 638-642.
- [16] 赵阳. 定向凝固钴基高温合金 DZ40M 的再结晶行为[D]. 沈阳:东北大学, 2008.
- [17] HASSAN K A A, NORMAN A F, PRICE D A, et al. Stability of nugget zone grain structures in high strength Al-alloy friction stir welds during solution treatment[J]. Acta Materialia, 2003, 51(7): 1923-1936.
- [18] 颜泽刚. 焊后热处理对 6063-T6 铝合金搅拌摩擦焊组织性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(13): 223-226.
- [19] 袁豪峰, 杨峰, 陈亮, 等. 焊后热处理对 6061 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(11): 59-62.
- [20] 赵福城, 郭延凯, 田春雨, 等. 焊后热处理对 6061-T4 铝合金焊接接头组织和性能的影响[J]. 铝加工, 2018, 240: 35-39.