

本文参考文献引用格式:张铁浩,张贺. 6005A-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头微观组织及耐应力腐蚀性能[J]. 电焊机, 2019, 49(06):45-49.

6005A-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头 微观组织及耐应力腐蚀性能

张铁浩, 张 贺

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111)

摘要:利用光学显微镜、透射电镜以及四点弯曲应力腐蚀方法研究 6005A-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头的微观组织及其应力腐蚀性能。结果表明,6005A-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头硬度分布呈“W”型,其中热影响区的硬度最低,焊核区的硬度有所升高,母材硬度最高;铝合金母材的主要强化相为含铜 Q' 相,而焊核区大部分强化相消失,存在大量位错,主要强化机制为细晶强化、位错强化和固溶强化;搅拌摩擦焊接头表现出良好的抗应力腐蚀性能,但仍出现点蚀现象,其中热影响区为接头耐蚀性的薄弱部位。

关键词:6005A-T6 铝合金;搅拌摩擦焊;析出相;微观组织;应力腐蚀

中图分类号: TG453+.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-2303(2019)06-0045-05

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2019.06.09

Microstructure and stress corrosion resistance of 6005A-T6 aluminum alloy joints by friction stir welding

ZHANG Tiehao, ZHANG He

(CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China)

Abstract: The microstructure and stress corrosion resistance of 6005A-T6 aluminum alloy joints by friction stir welding were studied using optical microscope, scanning electron microscope and four points bending stress corrosion methods. The results show that the hardness distribution of the joint is W-shape, the lowest hardness appears at the heat affected zone, and the hardness is improved at the weld nugget zone, and the highest hardness appears at the base metal. The main strengthening phase of the base metal is Q' phase, most of which is disappeared at the weld nugget zone, and where exists lots of dislocation and the main strengthening mechanism is fine grain strengthening, dislocation strengthening and solid solution strengthening. Friction stir welded joint shows good stress corrosion resistance, however corrosive pitting is also happened, and the weakest part of the welded joint is in the heat affected zone.

Key words: 6005A-T6 aluminium alloy; friction stir welding; precipitated phase; microstructure; stress corrosion

0 前言

6005A 铝合金为 Al-Mg-Si 系高强铝合金,通过时效热处理,因具有较高的强度、良好的耐蚀性以及成型性良好等特点,广泛应用于轨道交通、汽车等领域^[1-4]。这类铝合金的强化是固溶后再人工时效,通过

获得细小弥散分布的 β'' 相来增强^[5-6]。采用传统的熔焊方法,不但容易形成气孔及夹杂等缺陷,而且由于是一个熔焊过程,焊缝组织在经历了熔化结晶后,原来人工时效获得的强化相将在焊接热循环过程中重溶,失去了增强效果,如果不重新采用人工时效进行热处理,焊接接头的强度将大幅下降。

搅拌摩擦焊是通过高速旋转的搅拌头与被焊材料表面间产生的摩擦热在压力作用下实现的固相连接。与传统熔焊方法相比,搅拌摩擦焊接过程

收稿日期: 2019-04-02

作者简介: 张铁浩(1977—),男,教授级高级工程师,本科,主要从事高速列车及地铁车体焊接制造工艺研究工作。E-mail: csqingdao@126.com。

温度低,对氧化等不敏感,可有效避免各种熔焊的缺陷。因此搅拌摩擦焊已被广泛用于焊接时效处理的铝合金^[7-8]。

本文主要研究 6005A-T6 铝合金搅拌摩擦焊接后的焊缝性能和组织变化,分析焊接接头强化相的变化,同时测试了焊接接头的应力腐蚀性能。

1 试验材料及方法

试验材料为厚度 4 mm 的 6005A-T6 铝合金型材,化学成分如表 1 所示。焊接接头为对接形式,如图 1 所示。

表 1 铝合金母材的化学成分 %

$w(\text{Si})$	$w(\text{Fe})$	$w(\text{Cu})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Mg})$
0.55~0.85	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.40	0.45~0.65
$w(\text{Cr})$	$w(\text{Zn})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{Mn}+\text{Cr})$	$w(\text{Pb})$
≤ 0.30	≤ 0.20	≤ 0.10	0.12~0.50	≤ 0.01

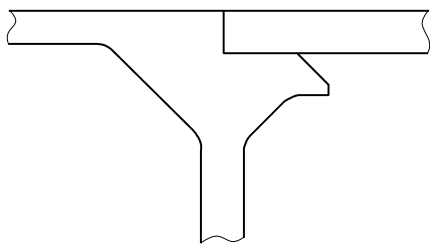


图 1 对接接头形式

焊接设备采用国产动龙门式数控搅拌摩擦焊机,基本参数为:转速 1 400 r/min,焊接速度 600 mm/min,倾角 2.5°,轴肩下压量 0.2 mm。

利用线切割在垂直焊缝方向上取样,依据金相标准制备金相试样,经机械抛光后用凯勒试剂(2.5% HNO_3 +1.5% HCl +1% HF +95% H_2O)腐蚀 30 s后,在 VHX-500F KEYENCE 型数字金相显微镜下观察金相组织。在 DHV-1000 型数显显微硬度计上分别测量焊缝横截面中间部位及垂直部位的维氏硬度,所用载荷 100 g,保压时间 15 s,每间隔 0.5 mm 测一个点。用高分辨透射电镜分析焊缝的析出相,先用金刚刀切取焊缝,减薄一定程度后用双喷减薄制备透射电镜试样,用 Topcon EM-002B 透射电镜进行观察,加速电压为 120 kV。从焊缝厚度中心处截取 3 块应力腐蚀试样,试样规格为 150 mm×20 mm×2 mm。试验方法参照 JIS H 8711-2000《铝合的应力腐蚀裂纹试样方法》,采用恒载荷拉伸应力腐蚀裂纹试验,通过 4 点弯曲的方式加载应力,加载应力为 203 MPa,变形量为 4.4 mm。

2 试验结果及分析

典型焊接接头的宏观形貌如图 2 所示,其中搅拌摩擦焊特有的 S 线特征清晰可见。焊接热影响区和焊核区的微观组织如图 3 所示,热影响区的晶粒更为粗大,而焊核区的晶粒较为细小。热影响区与焊核区的晶粒尺寸分布统计如图 4 所示。焊核区的晶粒尺寸集中在 6~10 μm ,热影响的晶粒尺寸集中在 18 μm 。

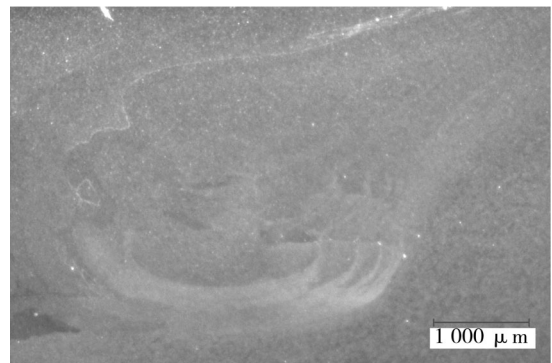


图 2 搅拌摩擦焊接头的宏观形貌

焊接接头硬度分布如图 5 所示,其中硬度测试位置见图 5a。由图 5b 可知,焊接接头横向硬度分布呈“W”型,母材硬度最高,至热影响区硬度开始下降,在焊核区硬度又有所回升。沿着垂直方向的硬度分布也是不均匀的,焊核区的底部硬度最低(见图 5c),这与焊核区沿垂直方向的散热不均匀有关,即顶部散热最快,而底部散热最慢。在搅拌摩擦焊接头厚度方向上,依次为焊核区、热机影响区(搅拌针尖热机影响区)、热影响区、母材区。焊缝上表面除了搅拌针的摩擦产热外,还受到搅拌头轴肩摩擦作用,相对往下的焊核区产热更多,温度相对较高,晶粒相对下面较大,因此硬度较低;再往下的焊核区以固溶强化和位错强化为主,由于搅拌针为锥形结构,越往下局部搅拌摩擦产热越多,同时焊核区散热慢、高温停留时间长,因此硬度逐渐下降。到焊缝底部的热机影响区和热影响区,强化方式依靠第二相析出强化,由于经历了热循环且高温停留时间长,有部分第二相粗化或消溶,造成硬度下降明显,硬度最低。随着远离焊核区,热循环作用减弱,硬度逐渐上升到接近母材水平。

图 6a 为 6005A-T6 母材的透射电镜明场像,其中白亮的析出物为主要强化相。由于 6005A 合金中含铜较高,析出物中因 Cu 的存在而与基体显示出更高的衬度,低倍率下表现为亮白,基本结构是

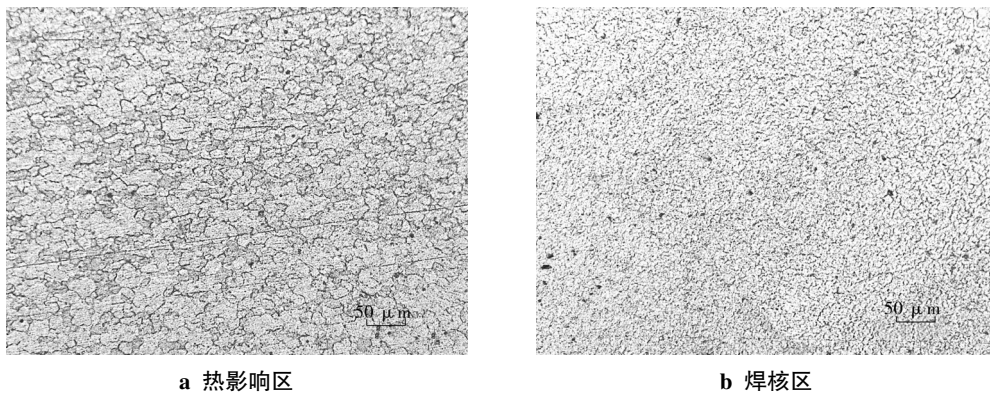


图3 搅拌摩擦焊接头的微观组织

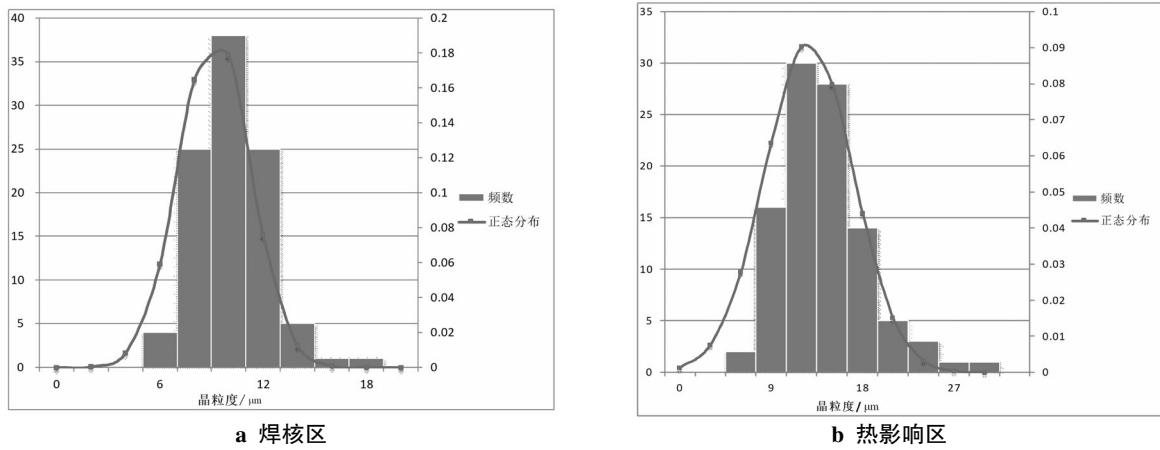
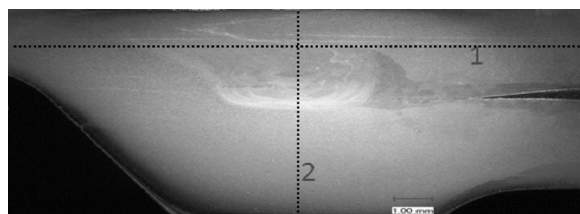


图4 晶粒度分布



a 测试位置

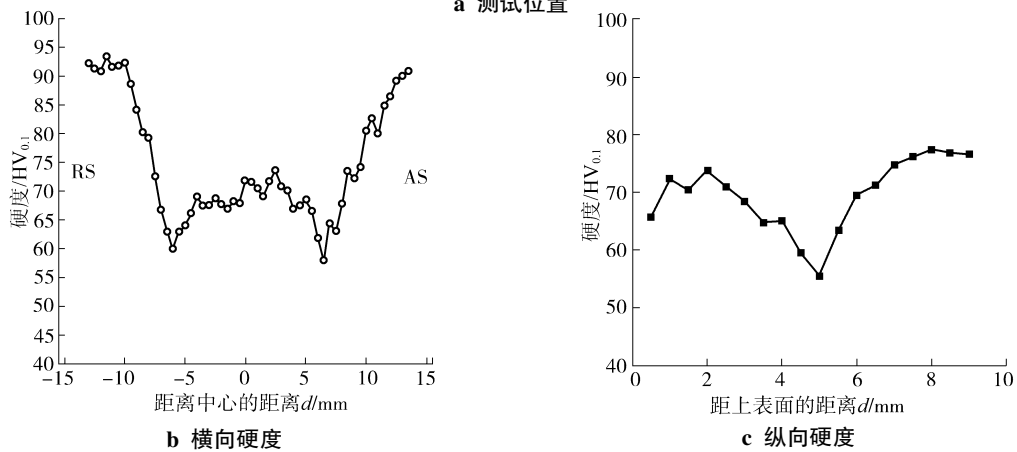


图5 搅拌摩擦焊接头硬度分布

在 β'' 基础上发展起来的 Q' 相。图 6b 为搅拌摩擦焊接头焊核区的透射电镜明场像。可以看出,焊核区存在大量位错,夹杂少量大尺寸的析出相或夹杂物存在,如图中的箭头所指部分。继续加大倍率后,基本观察不到 β'' 或 Q' 相,这意味着搅拌摩擦焊的温升足以改变时效析出相的存在状态,尽管最高温度远低于铝合金的熔点,但足以超过了析出相重新溶解的温度(相关的文献报道最高温度可达到 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 以上),大部分析出相在高温作用下重新固溶回铝基体,少量则长大为平衡相 β 相,此时焊核区的主要强化方式是细晶强化、位错强化和固溶强化,而析出强化的效果已被大大减弱^[9]。通过图 5 的硬度

曲线可以看出,焊核区并非硬度最低部位,热影响区在经历热循环后,晶粒粗化、部分析出相长大或重溶,缺少焊核区的细晶强化及位错强化效果,同时析出强化效果减弱,因此表现为强度最低。

应力腐蚀试验 28 天后的照片如图 7 所示,可以看出无裂纹等产生,整体上应力腐蚀性能良好。但是对于焊接接头不同的区域,可以明显看出热影响区比母材及焊核区的点蚀更多,意味着该部分的点蚀性能较差。其原因是:该部分受热循环的影响,存在晶粒和析出相的粗化,而析出相的粗化加剧了析出相和铝基体之间的电位差,更容易形成电偶腐蚀而形成点蚀坑。

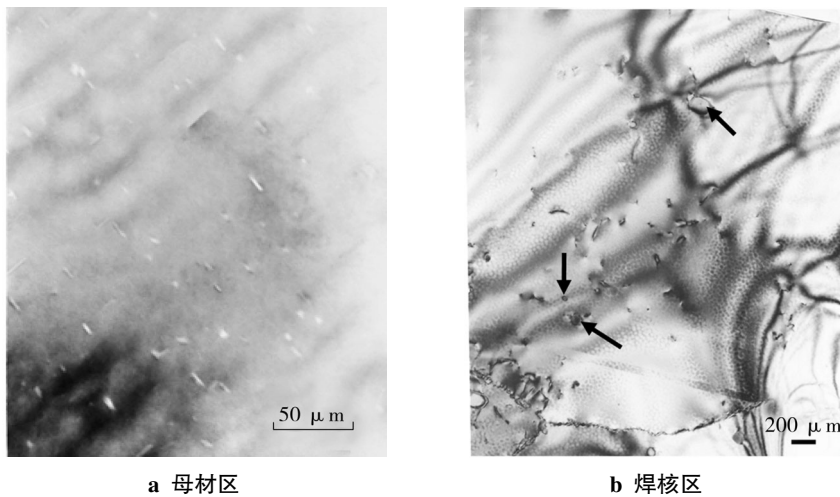


图 6 透射电镜明场像

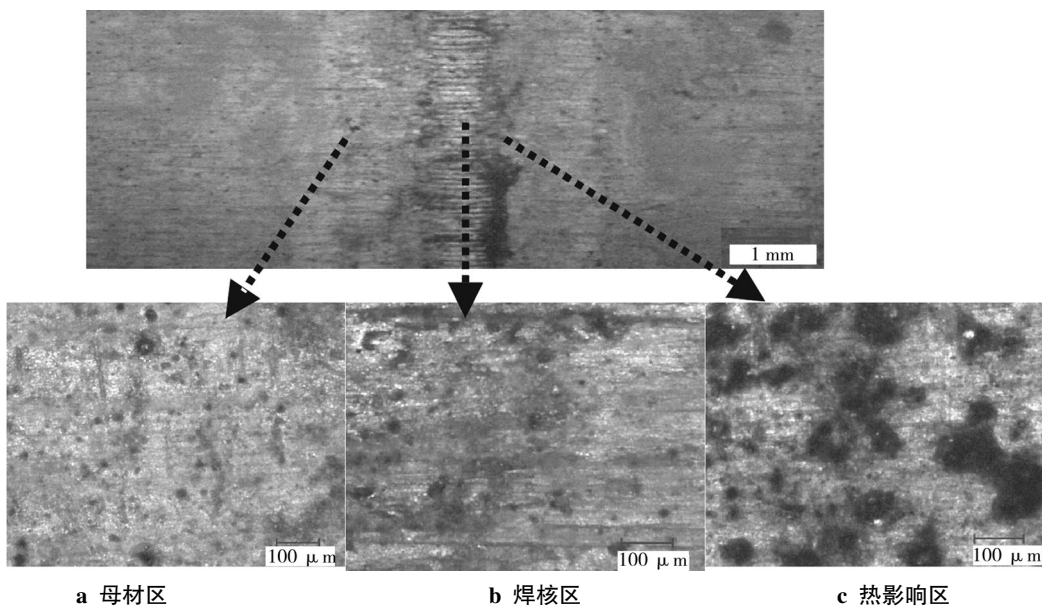


图 7 应力腐蚀试验 28 d 后试样表面宏观形貌

4 结论

(1)6005A-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头硬度呈“W”型分布特征,其中热影响区的硬度最低,焊核区的硬度有所回升,而母材的硬度最高。

(2)6005A-T6 母材强化机制为析出强化,主要强化相为含铜 Q' 相;焊核区主要强化机制为细晶强化、位错强化和固溶强化。

(3)6005A-T6 搅拌摩擦焊接头具有良好的抗应力腐蚀性能,但接头仍出现点蚀现象,其中热影响区为接头耐蚀性最为薄弱的部位。

参考文献:

- [1] 吕晓春,雷振,张健,等. 高速列车 6005A-T6 铝合金焊接接头软化分析[J]. 焊接学报,2014,35(8):25-29.
- [2] 盛晓非,杨文超,夏承东,等. T6 时效和 T616 时效对 6005A 铝合金微观组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2012(05):1276-1282.
- [3] 王旭友,雷振,张健,等. 高速列车 6005A-T6 铝合金型材

- 激光-双丝 MIG 复合焊[J]. 焊接学报,2012(07):9-12.
- [4] 李新梅,杜宝帅,张忠文,等. 搅拌摩擦焊 6061-T6 铝合金焊接接头的组织与性能[J]. 热加工工艺,2013,42(11):196-198,201.
- [5] M. Murayama,K. Hono,M. Saga,*et al.* Atom probe studies on the early stages of precipitation in Al-Mg-Si alloys[J]. Materials Science and Engineering A—Structural Materials Properties Microstructure and Processing,1998,250(1):127-132.
- [6] J. Nakamura,K. Matsuda,T. Kawabata,*et al.* Effect of Silver Addition on the β Phase in Al-Mg-Si-Ag Alloy[J]. Materials Transactions,2010,51(2):310-316.
- [7] 鲁二敬,赵丽玲,郁志凯,等. 轨道车辆用 6082 铝合金搅拌摩擦焊工艺技术研究[J]. 焊接技术,2017(3):39-42.
- [8] 张文毓. 铝合金焊接技术研究进展[J]. 轻金属,2010(4):53-56.
- [9] 刘向前. 铝合金型材高速搅拌摩擦焊接头结构设计与组织性能研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2016.

Page 44

线处焊缝组织中存在的液化裂纹在外力与内应力作用下,将沿着热影响区晶界扩展,最终导致断裂。

在车间生产或项目建造上,产品的焊接往往追求速度,焊工一般倾向于采用大直径焊条、较大的焊接电流电压进行焊接,在工期要求下,自然不会控制焊缝的层间温度,尤其是平焊和立焊。虽然在焊接工艺上执行了小线能量,但较大的电弧热辐射范围及较长的高温停留时间导致焊缝产生热裂纹,严重降低焊接接头的塑性。

3 结论

(1)在线能量相当且较小的情况下,两种焊接工艺参数的焊缝组织均为奥氏体和析出相,采用较大焊接电流电压及不控制层间温度的焊缝中出现了液化裂纹,热影响区组织为板条马氏体与粒状贝氏体及少量铁素体,且热影响区宽度显著增加;采用较小焊接电流电压工艺的热影响区组织为板条马氏体。

(2)两种焊接工艺参数下,焊接接头拉伸、冲击、硬度试验结果均合格。采用较大焊接电流电压及

不控制层间温度工艺,其焊接接头的冲击值略低,热影响区的硬度值较低,接头塑性较差,在外力作用下裂纹沿着热影响区扩展导致弯曲断裂。采用小电流电压值焊接接头的塑性良好,弯曲试验合格。

参考文献:

- [1] Takahiro Kimura,AkinOhmori,Osamu Tanigawa. Properties of high toughness 9%Ni heavy sextion steel plate and its applicability to 200000kl LNG storage tanks[J]. Kawasaki Steel Technical Report,1999,40(5):72-79.
- [2] Keun Yoon,Jae Hoon Kin,Kyu Taek Shim. Mechanical characteristics of 9%Ni steel welded joint for LNG storagetank attcryogenic[J]. WorldScientific,2012(6):355-360.
- [3] 崔志圻,覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社,2007:253.
- [4] 江伯鸿,李鹏兴,马逸伟,等. 低碳低合金钢中粒状贝氏体的断裂特性[J]. 上海冶金,1980,2(1):43-47.
- [5] 孟根巴根,马成勇,彭云,等. 热输入对 9Ni 钢焊接接头组织及低温冲击性的影响[J]. 焊接学报,2010,31(6):71.
- [6] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册第2卷[M]. 北京:机械工业出版社,2007:133-134.