

7N01 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能分析

王振苏¹, 黄凌骄¹, 柴 鹏¹, 孟立春²

(1. 北京航空制造工程研究所 检测中心,北京 100024; 2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司,青岛 266111)

摘 要:通过 7N01 铝合金板材上下板等厚全平面三层搭接搅拌摩擦焊焊接,试验不同长度的搅拌头对接头的影响. 结果表明,搅拌头的形状与长度直接影响力学性能的稳定性,结构为“锥形”右旋螺旋槽、搅拌头长度为 16 mm 时焊接接头的力学性能性对比较稳定而且较优. 通过对接头断面形貌及硬度进行分析,得出焊核和热力影响区的分界线在前进侧和后退侧明显不同,焊核区是受到热循环和机械作用影响最严重的区域,组织变化程度最大,是合金元素过度饱和区域,晶粒得以细化,材料力学性能得到进一步提高,形成“峰值”硬度.

关键词:7N01 铝合金; 搅拌摩擦焊接; 搅拌头; 剪切性能; 断面形貌

中图分类号:TG 453 **文献标识码:**A **doi:**10.12073/j.hjxb.20151104001

0 序 言

搅拌摩擦焊作为一种经济、高效、高质量的“绿色焊接工艺”受到全世界的广泛关注,与传统的焊接工艺相比具有无可比拟的优势,其生产成本低,接头性能好,安全性好^[1],已广泛应用于宇航制造工业、船舶制造工业、汽车、高速列车等制造业领域. 目前应用搅拌摩擦焊成功连接的材料有铝合金、镁合金、不锈钢、低碳钢等同种或异种材料^[2]. 由此可知,随着焊接设备的发展,搅拌摩擦焊将应用于更多材料的连接. FSW 焊接不需要焊前处理,可以焊接厚度 1.2~50 mm,铝合金常用对接最优厚度达 1.6~10 mm,特殊搭接厚度为 1.2~6.4 mm,如果厚度达 100 mm,则可以进行双面焊接^[3].

针对搅拌摩擦焊技术,众多研究者主要对有关铝合金搅拌摩擦焊的工艺、组织及力学性能进行了研究. 研究表明,除焊接速度、搅拌头旋转速度和搅拌头轴肩压力影响搅拌摩擦焊焊缝质量外,搅拌头形状对于搅拌摩擦焊焊缝的形成起着非常重要的作用,搅拌针形状影响焊缝塑化金属流动的行为,导致焊缝截面形貌发生变化^[4],而且搅拌针的长度对 Al-Li 合金搭接头力学性能存在明显影响,当搅拌针长度从 2.8 mm 变为 2.5 mm 时,所有接头强度和塑性都有了大幅度提高^[5]. Mahoney 通过拉伸试验、断口分析及微观组织分析 7075-T651 搅拌摩擦焊接

接头的性能,纵向和横向拉伸表明,接头最脆弱的区域是离焊缝 7~8 mm 的 HAZ,屈服强度降低 45%,抗拉强度降低 25%. 焊缝区的塑性和强度都会降低,焊后热处理对铝合金不适用,虽然可能提高强度,但会大大降低塑性,这种现象与微观组织结构变化有关. 细小硬相夹杂物的减少和焊缝区的位错均可以导致低的接头强度^[6].

在轨道交通行业,随着列车速度的越来越高,对接头的强度要求会更高,文中针对《动车组枕梁中心板搅拌摩擦焊搭接形式工艺技术研究》项目,用几种不同长度搅拌针的搅拌头,对 7N01 铝合金进行了搅拌摩擦焊试验,通过研究、分析试验结果,确定动车组枕梁中心板搅拌摩擦焊搭接工艺,旨在通过焊接接头的力学性能的稳定性选择合适的搅拌头长度,并且对接头的微观组织和显微硬度进行分析,研究其变化机理.

1 试验方法

试验材料为 7N01 铝合金,7N01 铝合金属 Al-Zn-Mg 系列中等强度铝合金,具有优良的挤压性、焊接性、耐蚀性. 主要用于轨道列车车体的端面梁、车端缓冲器、底座、门槛、侧面构件骨架、车架枕梁等重要部分. 采用的板材规格为 400 mm×150 mm×15 mm,热处理状态为固溶处理后自然时效. 母材的力学性能参数为抗拉强度 400 MPa,规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ 为 260 MPa,表 1 为 7N01 铝合金主要合金元素的成分.

表 1 7N01 铝合金组成元素的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical compositions of alloy 7N01

Zn	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Si	Ti	Zr	Al
3.640	0.910	0.150	0.120	0.400	0.150	0.048	0.030	0.110	余量

所用设备分别为二维定梁龙门式搅拌摩擦焊接设备(型号:FSW-LM2-1020)、MG226 型恒电位 X 射线探伤机、71 型显微硬度计,OLYMPUSBX41 金相显微镜、WDW3100 电子式万能材料试验机. 剪切试验部分参考国家标准 GB/T2651-2008《焊接接头拉伸试验方法》和 GB/T 228-2010《金属材料室温拉伸试验方法》.

2 试验结果

2.1 焊接接头剪切试验结果

焊接接头为 15 mm 与 15 mm 铝合金搭接接头,预选搅拌针长度分别为 16,17,18 mm 的外凸(偏角 2.5°)“锥型”(锥角 18°)螺旋槽 + 三平面搅拌头,采用上下板等厚全平面三层搭接焊接,搅拌头转速 600,450 r/min,焊接速度分别为 120,60 mm/min,焊接过程中压入量恒定为 0.5 mm. 焊缝在铝板上分布如图 1 所示,试样加工尺寸如图 2 所示.



图 1 焊缝位置分布及尺寸(mm)
Fig. 1 Position and size of weld zone



图 2 剪切试样示意图(mm)
Fig. 2 Diagram of shear specimens

由于接头在实际状态下承受剪切应力,确定加工六组剪切试样检测剪切应力,第 1,3,5 组试样对应工艺参数为焊接速度 120 r/min,搅拌头转速 60 mm/min,第 2,4,6 组试样对应工艺参数为焊接速度 60 r/min,搅拌头转速为 450 mm/min,剪切试验结果如表 2 所示.

表 2 剪切应力对比
Table 2 Contrast of shearing stress

编号	最大剪切应力 τ /MPa	平均剪切应力 $\bar{\tau}$ /MPa	搅拌头长度 L /mm
1-1	253.15	265.14	16
1-2	241.35		
1-3	300.00		
2-1	255.90	293.25	16
2-2	303.62		
2-3	320.24		
3-1	334.17	334.31	17
3-2	358.38		
3-3	310.38		
4-1	150.12	153.91	17
4-2	151.43		
4-3	160.19		
5-1	124.81	125.02	18
5-2	118.06		
5-3	132.19		
6-1	309.90	335.39	18
6-2	367.96		
6-3	328.31		

由表 2 可以看出,搅拌头长度为 17 和 18 mm 时,针对两种工艺参数,相同搅拌头长度所获得的焊缝抗剪切性能有较大差异,长度为 17 mm 时,焊接速度 120 r/min,搅拌头转速 60 mm/min 条件下焊接接头获得较高的剪切应力,而另一种工艺下得出的接头剪切应力较差,长度为 18 mm 时情况刚好相反;两种搅拌头的对应最高和最低平均值都相近,该两种尺寸搅拌头在给定的工艺参数组条件下进行焊接所获得焊缝性能不稳定,后续试验中相对较难寻找其最优工艺窗口;相对而言,搅拌头长度为 16 mm 时,两组工艺参数下的焊缝抗剪切应力相近,且明显优于另外两种搅拌头的最差数据组,说明在同样条件下,针对 15 mm 厚 7N01 铝合金搭接接头,16 mm 长度搅拌头表现较为稳定,焊缝抗剪切性能相对较优.

2.2 焊接接头微观金相

对第 2 组试样的焊接接头微观组织进行研究,得到图 3 焊接接头微观金相图,从图中可以明显地看到,焊核和热力影响区的分界线在前进侧和后退侧是明显不同. 如图 3b,c 所示,在前进侧,焊核和热力影响区有明显分界线,并且热力影响区中的塑

性流动痕迹也很清晰;而后退侧两个区域的分界线要模糊一些,有一个较宽的过渡区域. 出现这种情况的原因是在焊接过程中,随着搅拌头的不断前进,后退侧附近的材料会不断地随着搅拌头的外表面逆时针地流向搅拌头的后方;前进侧由于存在明显的楔形挤压和空腔作用,使得焊缝材料塑性流动方向与母材金属塑性流动方向相同或者相反,并且后退侧的材料与前进侧的材料在温度上也有差异,从而在前进侧热力影响区与焊核区之间存在很大的相对变形差和组织上的差异,进而在焊缝的前进侧热影响区与焊核区之间形成明显的分界面;而在后退侧,焊缝材料塑性变形方向与母材金属塑性变形流动方向一致,母材金属平滑地与焊缝材料一起变形,并且此时的温度梯度变化小而平滑,从而后退侧热力影响区与焊核区的分界面并不是很明显,存在一个模糊的过渡区域.

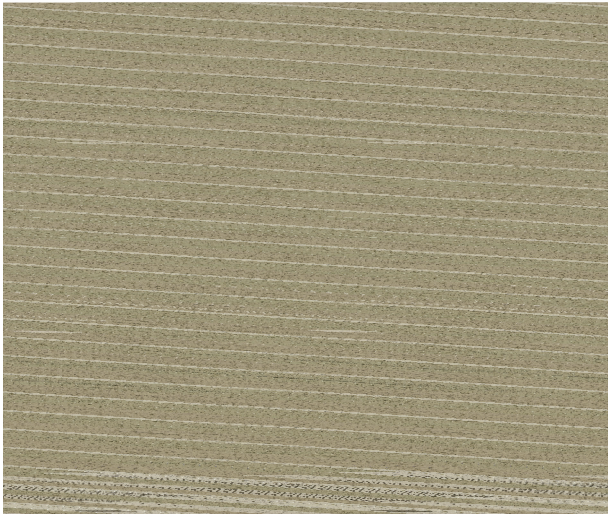


图 3 搅拌摩擦焊接头微观组织

Fig. 3 Structure morphology of FSW joint

焊核区是受到热循环和机械作用影响最严重的区域,组织变化程度最大,是合金元素过度饱和区域,该区域变形晶粒发生沉淀和回复交互作用,晶粒尺寸一般在 10 μm 左右. 在图 3a 中可以看到该区出现高密度分布的细晶沉淀相,从而抑制晶粒发生长大而发生再结晶反应;在理想的动态再结晶过程中,局部积累能的变化导致应变诱发晶界的迁移,这种迁移和塑性流动的不同将导致在初始晶粒的沉淀相周围开始形成链状的新晶粒,这样在焊接过程中不断形成新晶粒层,并从晶粒边界向内部发展一直到每一个初始晶粒均发生再结晶,从图 3a 可以看到该区的再结晶组织形貌基本一致,表现出一种无序、

无方向性的特征. 同时,焊核区的塑性流动是非对称的,这一点从有关前进侧与后退侧表现出明显不同特征可以得到验证. 热力影响区在搅拌头的剧烈搅拌作用引起的塑性态铝的黏附作用下,在接近焊核区的小部分区域发生了局部破碎和黏附长大现象,而其它部分的组织发生了较大程度的弯曲变形,如图 3b,c 所示;另外,如图 3b 所示,该区域的晶粒尺寸比焊核区的要大,这主要是由于在焊接热循环作用下发生回复和动态再结晶造成.

2.3 焊接接头显微硬度

硬度检测区域为图 4 横向划线部位,硬度分布呈“W”形. 由图 3 可以看出:由于母材为 T4 状态,即经过固溶处理,自然时效,基体中有大量细小、弥散强化相,如 θ 相和 T 相析出,故母材的硬度最高;而在焊核区,距离焊核中心 3 mm 的区域硬度值最小,经与图 3 的对比参照可知,最小硬度值出现在热力影响区. 由图 5 还可以看到,前进侧与后退侧的显微硬度分布存在一定的差异,后退侧比前进侧的平均硬度值要大,这也说明 FSW 与其它焊接方法因焊接成形原理不同造成微观特征的不同. 可能是在后退侧材料“塞积”现象较严重,组织致密,晶粒变形大,畸变能增加. 此外,强化相在后退侧的大量聚

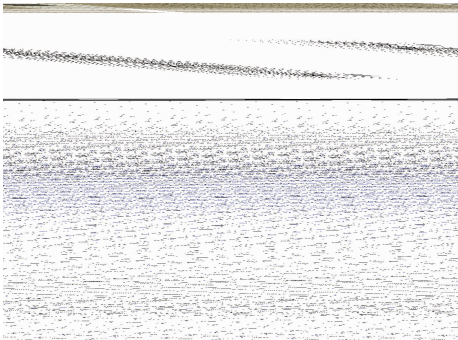


图 4 显微硬度检测区域

Fig. 4 Micro-hardness testing area

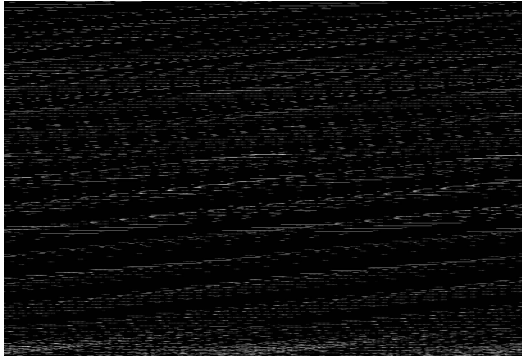


图 5 接头显微硬度分布

Fig. 5 Micro-hardness of joint

集可能也是造成其硬度值相对较大的一个因素。在热影响区内,硬度值明显低于母材。晶粒粗化和强化相的溶解导致硬度显著降低,热影响区受力和热的影响,容易出现大尺寸和不规则晶粒,导致硬度值降低。而在焊核区,硬度相对邻近区域有所提高,并在中心出现一个“峰值”,这与焊核区的形成机理有关,该区经历了搅拌针强烈的机械搅拌作用,晶粒得以细化,材料力学性能得到进一步提高,这是形成“峰值”硬度的主要原因。

3 结 论

- (1) 针对 15 mm 厚 7N01 铝合金搭接接头,在工艺参数分别为(焊接速度 120 r/min,搅拌头转速 60 r/min)以及(焊接速度 60 r/min,搅拌头转速 450 mm/min)时,“锥形”三平面 + 螺旋槽型搅拌头长度为 16 mm 能获得剪切性能较稳定的焊接接头。
- (2) 从微观金相得出焊核和热力影响区的分界线在前进侧和后退侧明显不同,焊核区是受到热循环和机械作用影响最严重的区域,组织变化程度最大。
- (3) 焊核区是合金元素过度饱和区域,晶粒得以细化,材料力学性能得到进一步提高,焊接接头显微硬度呈“W”形分布,在核焊区形成“峰值”硬度。

参考文献:

[1] 张 华,林三宝,吴 林,等. 搅拌摩擦焊研究进展及前景展望[J]. 焊接学报, 2003, 24(3): 91-96.

Zhang Hua, Lin Sanbao, Wu Lin, *et al.* Current progress and prospect of friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(3): 91-96.

[2] 王希靖,申志康,张忠科. 铝和镀锌钢板的搅拌摩擦焊搭接分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(12): 97-100.

Wang Xijing, Shen Zhikang, Zhang Zhongke, Study of friction-stir-welded lap joint of aluminum and zinc-coated steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(12): 97-100.

[3] Sanderson A, Punshon C S. Advanced welding processes for fusion reactor fabrication[J]. Fusion Engineering and Design, 2000, 49: 77-87.

[4] 柯黎明,潘际銮,邢 丽,等. 搅拌针形状对搅拌摩擦焊焊缝截面形貌的影响[J]. 焊接学报, 2007, 28(5): 33-37.

Ke Liming, Pan Jiluan, Xing Li, *et al.* Mechanical Influence of pin shape on weld transverse morphology in friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(5): 33-37.

[5] 张丹丹,曲文卿,尹 娜,等. 工艺参数对铝锂合金搅拌摩擦焊搭接接头力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 84-88.

Zhang Dandan, Qu Wenqing, Yin Na, *et al.* Effect of process parameters on mechanical properties of friction stir welded Al-Li alloy lap joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(2): 84-88.

[6] Mahoney M W, Rhodes C G, Flintoff J G, *et al.* Properties of friction-stir-welded 7075 T651 aluminum[J]. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 1998, 29(7): 1955-1964.

作者简介: 王振苏,女,1966 年出生,硕士,高级工程师. 主要从事力学性能检测工作. Email: 13683593706@126.com