

厚板铝合金搅拌摩擦焊匙孔补焊接头组织与性能

Microstructures and Properties of Thickness
Aluminium Alloy Eleocellarium Repairing
Welding Joint by Friction Stir Welding

刘 杰¹, 杨景宏¹, 韩凤武¹, 宫文彪²

(1 中国北车集团 长春轨道客车股份有限公司, 长春 130062;

2 长春工业大学 先进结构材料教育部重点实验室, 长春 130012)

LIU Jie¹, YANG Jing-hong¹, HAN Feng-wu¹, GONG Wen-biao²

(1 CNR Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China;

2 Key Laboratory of Advanced Structural Materials(Ministry of Education),
Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

摘要: 研究了 35mm 厚板铝合金搅拌摩擦焊匙孔补焊工艺, 应用光学显微镜、扫描电镜、显微硬度仪及电子拉伸试验机对接头的组织与性能进行了研究。结果表明, 采用铝合金块材填充匙孔后进行 FSW 焊接, 获得成型良好、表面光滑的焊缝; 未加填充材料的匙孔位置, 焊缝表面出现沟槽缺陷。FSW 焊接一次接头的前进侧焊核区与热力影响区之间存在“吻接”缺陷; FSW 焊接二次和三次接头的前进侧和后退侧过渡区均连接良好, 二者组织无明显差别; FSW 焊接一次和二次接头显微硬度分布呈 W 型, 硬度最低值均出现在前进侧热影响区分别为 56HV 和 60HV; 采用搅拌头旋转速率为 720r/min, 焊接速率为 180mm/min 焊接工艺条件下, FSW 焊接一次、二次和三次接头抗拉强度分别达到 173、210 和 205MPa。

关键词: 铝合金; 搅拌摩擦焊; 焊接工艺; 组织; 性能

中图分类号: TG456.98 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)07-0029-05

Abstract: The welding technology of 35mm thickness aluminium alloy eleocellarium repairing welding was investigated. Microstructures and properties of the welding joint have been studied by using optical microscope, scanning electron microscope, energy spectrum analysis, micro-hardness tester and electron tensile testing machine. Experimental results show that the formation of weld is good and there are no defects of tunnel, hole and groove defect by FSW after filling eleocellarium with aluminium alloy block, and there are groove defects by FSW without filling eleocellarium. The visible clear kiss defect was formed between weld nugget zone and thermal-mechanical affected zone in advancing side when welding with FSW once; The transition zone of advancing and retreating side were formed well between weld nugget zone and thermal-mechanical affected zone in advancing side when welding with FSW twice and thrice. The microhardness of once and twice welding distributing was W model and reached 56HV and 60HV in heat affected zone of advancing side. The joint tensile strength of welding once, twice and thrice reached 173, 210MPa and 205MPa at rotation speed of 720r/min and welding speed of 180mm/min.

Key words: aluminum alloy; friction stir welding; welding technology; microstructure; property

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)是一项固相连接技术。该技术依靠高速旋转的搅拌头与两焊件接触产生摩擦热, 使接缝处金属产生塑性软化区, 旋转的搅拌头周围塑性软化金属受到搅拌挤压, 并随搅拌针的旋转沿焊缝前进侧向后退侧方向流动, 塑性金

属待搅拌针离开冷却后形成焊缝, 实现了固相连接^[1-3]。

目前铝合金是最适合搅拌摩擦焊接的材料之一, 轨道车辆铝合金车体具有重量轻、耐腐蚀、外观平整度好和易于制造复杂美观曲面车体而受到世界各城市交

通公司和铁道运输部门的欢迎^[4]。采用搅拌摩擦焊技术制造轨道客车铝合金车体已成为国内外发展趋势,加快研究铝合金搅拌摩擦焊接头的行为至关重要。

对铝合金搅拌摩擦焊工艺及接头行为的研究较多^[5-7],而有关实际生产过程中铝合金搅拌摩擦焊焊缝末端闪缝及匙孔补焊等问题的研究较少。本工作选用高速列车铝合金车体用 35mm 厚板铝型材,重点研究匙孔位置接头组织与性能,为加快铝合金车体搅拌摩擦焊应用于生产提供理论依据。

1 实验材料与方法

实验用铝合金为 35mm 厚的 6005A-T6 铝合金型材,化学成分见表 1。焊接型材尺寸规格为 3100mm×453mm×35mm。

表 1 铝合金化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of aluminium alloy
(mass fraction/%)

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Ti	Zn	Al
0.50	0.53	0.35	0.30	0.50	0.30	0.10	0.20	Bal

焊接实验在型号为 FSW-LM-5025 的搅拌摩擦焊设备上,采用螺旋锥形搅拌头。焊接工艺流程为:反装组对→反装段焊→反装焊接→翻转工件→正装焊接→焊后修补。段焊方法为从起焊位置每隔 200mm 距离段焊 200mm,段焊实验所用搅拌头的轴肩直径为 32mm,搅拌针根部直径为 14.4mm,长度为 18mm。旋转速度为 720r/min;主轴前倾角为 2.5°;预热时间为 10s;焊接速率为 180mm/min。为防止实际焊接过程中焊接末端闪缝,采用 FSW 焊段焊工艺,段焊后长度为 3100mm 的部件照片,如图 1 所示。段焊留下的匙孔,采用以下 2 种方式预先处理:(1)未加填充材料,如图 2 所示;(2)用铝合金块材(与母材同质)填充到匙孔处并压实,如图 3 所示。匙孔处理后正式焊接工艺与以上段焊工艺参数一致,分别进行 FSW 一次焊、二次焊和三次焊实验;对 FSW 焊方法修复未填充匙孔位置时造成表面沟槽缺陷,采用 MIG 焊进行焊后修补。

焊接实验完成后,依据标准 ISO15614—2005^[8]分别在匙孔位置制取金相低、高倍试样,拉伸试样和弯曲试样。应用 S-3400N 型扫描电镜和 EDAX 能谱对样品组织和成分进行分析。拉伸和弯曲实验在室温条件下,在 CSS251DL-500 型电子万能试验机上进行实验,加载速率 10mm/min。实验后对断口进行形貌分析。

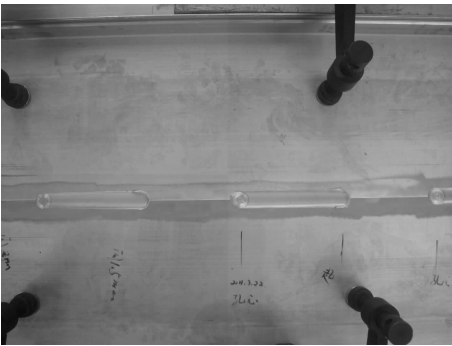


图 1 FSW 焊段焊后的 3100mm 的部件照片
Fig.1 Picture of the FSW gap welding sample

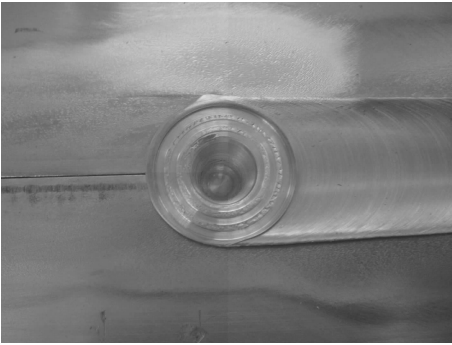


图 2 FSW 焊段焊后匙孔照片
Fig.2 Picture of the eleocellarium after FSW gap welding

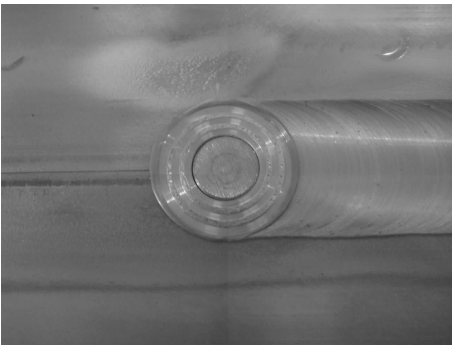


图 3 匙孔填充后照片
Fig.3 Picture of the filled eleocellarium

2 实验结果与分析

2.1 接头微观组织

2.1.1 匙孔(未填充)FSW 焊接头形貌及组织

在上述工艺条件下,对段焊后的 35mm 厚 6005A-T6 铝合金部件进行搅拌摩擦焊接。实验结果表明,采用铝合金块材填充 FSW 焊接后,获得成型良好、表面光滑的焊缝;未加填充材料的匙孔位置,焊缝表面出现了沟槽缺陷,如图 4 所示。图 5 是对表面沟槽缺陷采用 MIG 熔化焊补焊后的接头组织。由图可见,热影响

区内晶粒明显粗化;熔合区靠基材一侧组织呈等轴晶组织;靠焊缝一侧晶粒沿散热方向呈柱状晶;焊缝区为典型的树枝状晶铸造组织。

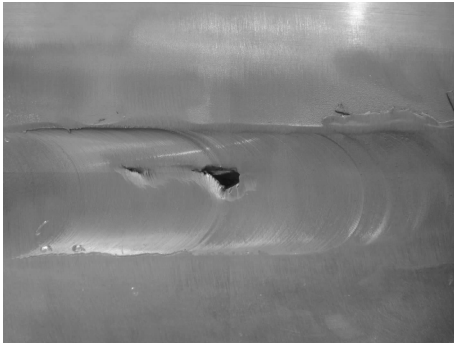


图 4 匙孔(未填充)FSW 焊缝形貌

Fig. 4 Image of the FSW weld (unfilled eleocellarium)

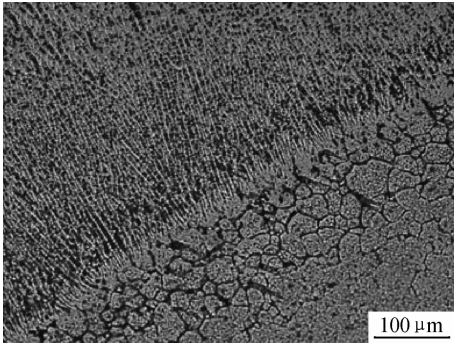


图 5 MIG 焊修补接头组织

Fig. 5 Microstructures of MIG repair welding joint

2.1.2 匙孔(填充)FSW 焊接头组织

图 6 是进行 FSW 二次焊实验焊缝低倍组织形貌。由图可见,焊缝区成哑铃型,双面焊接的重合区近 1mm。焊缝低倍组织视场存在明暗差异,图中 A 区为前进侧,B 区为后退侧。

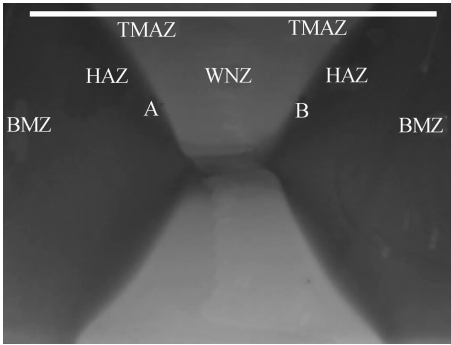


图 6 焊缝低倍组织形貌

Fig. 6 Image of the FSW weld joint

焊接接头分为 4 个区:焊缝中心部分为焊核区(Weld nugget zone 简称 WNZ);焊核区两侧为热-力影响区(Thermal-mechanical affected zone, TMAZ);热-力影响区以外只受焊接过程热影响的区域称为热影响区(Heat affected zone 简称 HAZ);未发生组织和性能变化部分为母材区(Base metal zone, BMZ)^[9]。FSW 二次焊后前进侧热力影响区与热影响区过渡区(A)交和后退侧过渡区(B)交界线均模糊不清;FSW 三次焊后焊缝低倍组织形貌与焊接二次的组织相似。

图 7 是 FSW 焊接一次的焊缝前进侧(焊核区和热力影响区之间)过渡区、后退侧过渡区的微观组织。焊接过程中,前进侧首先受到搅拌针的作用,焊接速率恒定,材料塑性流动不充分,焊核区(填充块)与热力影响区之间存在清晰的白色线,如图 7(a)所示;经局部放大观察和结合能谱分析可知,白色结合线位置局部存在“吻接”缺陷,如图 8 所示。填充的铝合金块部分未发生变化,前进侧为接头的薄弱区域;后退侧过渡区受到搅拌头强烈的搅拌作用及剧烈摩擦产生局部高温作用,可见明显的螺旋纹,较前进侧塑性金属流动充分,白色区域组织发生动态再结晶,组织为细小等轴

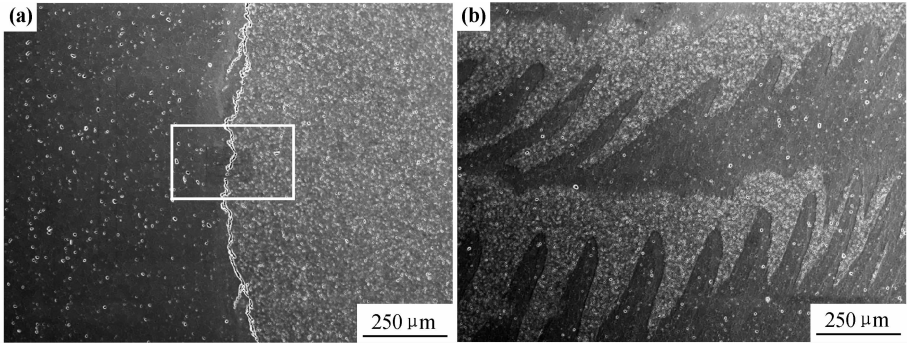


图 7 FSW 焊接一次(匙孔位置)的接头组织

(a)前进侧;(b)后退侧

Fig. 7 Microstructures of FSW welded joint

(a)advancing side;(b)retreating side

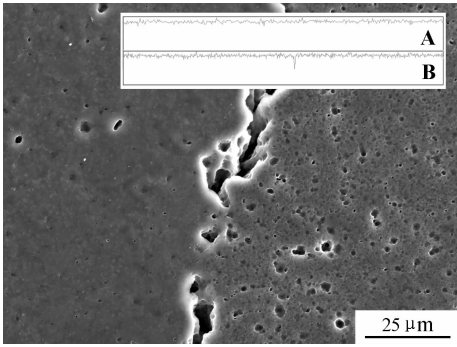


图 8 局部放大照片(图 7(a))

Fig. 8 Macro photograph of the FSW gap welding sample(in fig. 7(a))

晶,晶粒度为 7 级;深灰色区域金属也发生了塑性流动,未发生再结晶,如图 7(b) 所示。

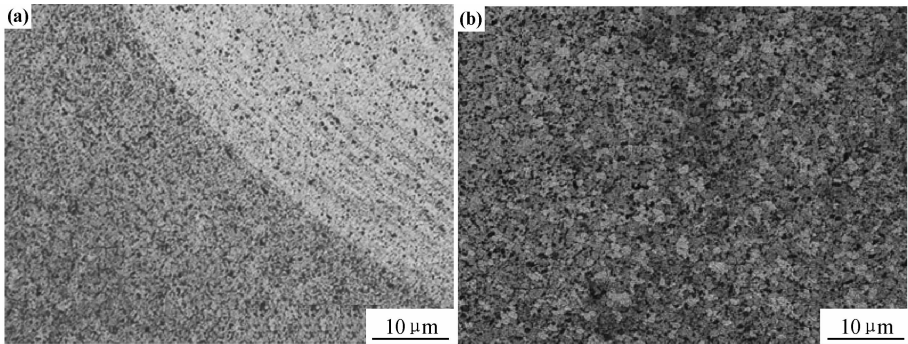


图 9 FSW 焊接二次的接头组织

(a)前进侧;(b)后退侧

Fig. 9 Microstructures of FSW welded Joint

(a)advancing side;(b)retreating side

2.2 FSW 焊接头显微硬度

图 10 为 FSW 焊接头显微硬度分布,分别给出焊接一次和二次的焊缝上部显微硬度曲线(图中 0 点为焊缝中心位置,具体位置见图 6 所示)。由图可以看出,接头硬度分布呈 W 型,焊接一次和二次硬度最低值均出现在前进侧热影响区,分别为 56HV 和 60HV。从前进侧热影响区开始,随着距焊缝中心距离的减小,硬度逐渐增大,直到后退侧的热影响区再次降低,最后恢复到母材硬度 95HV。焊接二次的接头硬度与焊接一次接头硬度相比,前进侧硬度与后退侧硬度值无明显差别,后退侧的硬度值降低,进一步验证前进侧热影响区是焊接接头的薄弱区域,同时焊接次数对后退侧接头硬度影响较大。

2.3 FSW 焊接次数对接头性能的影响

在搅拌头旋转速率为 720r/min,焊接速率为 180mm/min 焊接工艺条件下,匙孔位置焊接一次的接头抗拉强度为 173MPa,断裂位置起始于焊缝前进侧(反装)的热影响区,扩展至双面焊接重合区时,沿着焊缝后退侧(正装)热影响区直至断裂,如图 11(a)所示。

图 9 是 FSW 焊接二次的焊缝前进侧过渡区、后退侧过渡区的微观组织。在接近焊核区的热力影响区,即靠近搅拌针边缘外侧,该区搅拌头的搅拌作用不充分,母材组织未完全破碎,在搅拌头旋转力和进给力双重作用下,受热剪切发生较大的晶粒变形,晶粒被明显拉长,表明该区域的金属承受了较大拉伸变形;热影响区受热循环作用组织粗化,但未发生塑性变形,如图 9(a)所示;后退侧未见螺旋纹,焊核区、热力影响区和热影响区无明显分界,晶粒尺寸变化梯度比前进侧小,后退侧过渡区较前进侧宽,如图 9(b)所示;焊接三次的焊缝前进侧过渡区、后退侧过渡区的微观组织与焊接二次的焊缝组织相似,前进侧未见明显的螺旋纹,与后退侧的组织几乎没有差异。

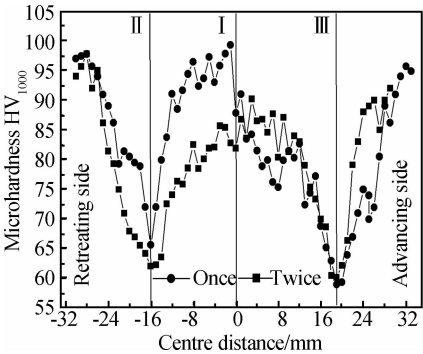


图 10 35mm 厚的 FSW 焊接头显微硬度分布

Fig. 10 Microhardness distribution of 35mm-thick welded joint by friction stir welding

示。焊接试样经 180°侧弯试验后,焊缝在热力影响区出现长度 3mm 的裂纹;FSW 焊接二次的接头抗拉强度为 210MPa,断裂位置起始于焊缝前进侧(反装)的热影响区,扩展至双面焊接重合区时,沿着焊缝后退侧(正装)热影响区直至断裂,如图 11(b)所示。焊接试样侧弯试验后,焊缝位置未出现裂纹;焊接三次的接头抗拉强度为 205MPa,断裂位置与焊接二次一致,侧弯

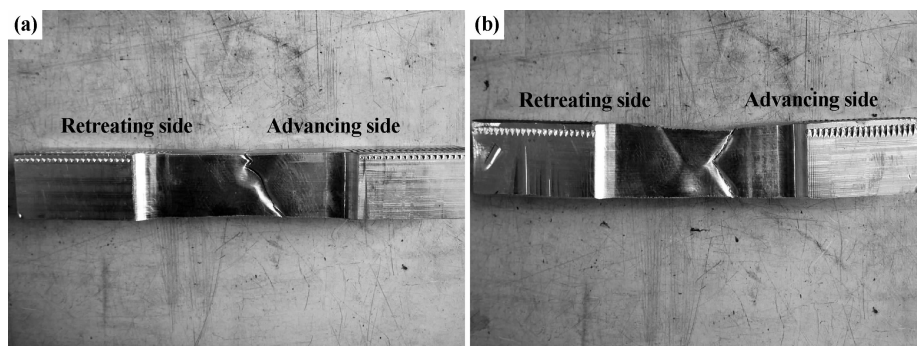


图 11 拉伸实验断裂位置

(a)FSW 焊接一次;(b)FSW 焊接二次

Fig. 11 Different of fracture location of tensile samples

(a)once-welding;(b)twice-welding

试验后,焊缝位置未出现裂纹。性能测试结果与微观组织分析结果一致。

3 结论

(1)采用铝合金块材填充匙孔后进行 FSW 焊接,获得成型良好、表面光滑的焊缝;未加填充材料的匙孔位置,焊缝表面出现沟槽缺陷。

(2)FSW 焊接一次接头的前进侧焊核区与热力影响区之间存在局部“吻接”缺陷;FSW 焊接二次和三次接头的前进侧过渡区和后退侧过渡区连接良好。

(3)FSW 焊接一次和二次的焊缝显微硬度分布呈 W 型,硬度最低值均出现在前进侧热影响区,分别为 56HV 和 60HV;焊接二次的接头硬度与焊接一次接头硬度相比,前进侧硬度与后退侧硬度值相当,后退侧的硬度值降低。

(4)在搅拌头旋转速率为 720r/min,焊接速率为 180mm/min 焊接工艺条件下,FSW 焊接一次接头抗拉强度为 173MPa,断裂位置起始于焊缝前进侧(反装)的热力影响区;FSW 焊接二次和三次接头抗拉强度分别为 210MPa 和 205MPa,断裂位置起始于焊缝前进侧(反装)的热影响区。

参考文献

[1] RAJAKUMAR S, MURALIDHARAN C, BALASUBRAMANIAN V. Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints

[J]. Materials and Design, 2011, 32: 535—549.

[2] CHEN Z W, PASANG T, QI Y. Shear flow and formation of Nugget zone during friction stir welding of aluminium alloy 5083-O[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 474: 312—316.

[3] BARCELLONA A, BUFFA G, FRATINI L, et al. On microstructural phenomena occurring in friction stir welding of aluminium alloys[J]. Journal of Material Process Technology, 2006, 177: 340—343.

[4] 王炎金. 铝合金车体焊接工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[5] KRISHNAN K N. On the formation of onion rings in friction stir welds [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 327: 246—251.

[6] 柯黎明, 潘际奎, 邢丽, 等. 铝合金搅拌摩擦焊缝形成的物理机制[J]. 材料工程, 2008, (4): 33—37.

[7] 刘杰, 王炎金, 宫文彪, 等. 35mm 厚板铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能研究[J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 27—32.

[8] ISO15614-2005, 金属材料焊接工艺规范及资格评定[S].

[9] TYNSKA L L, BRAUN R, STANIEK G, et al. TEM study of the microstructure evolution in a friction stir-welded AlCuMgAg alloy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 81 (3): 293—295.

基金项目: 基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20100362); 长春轨道客车股份有限公司技术开发项目(J0000000018K).

收稿日期: 2011-07-26; 修订日期: 2012-04-06

作者简介: 刘杰(1979—), 女, 博士, 研究方向为新材料连接, 联系地址: 长春市青荫路 435 号长春轨道客车股份有限公司工业化部(130062), E-mail: liujie_a@cccar.com.cn