本文参考文献引用格式:钮旭晶,侯振国,董鹏,等.CR400BF型高速动车组双轴肩搅拌摩擦焊部件质量提升[J].电焊机,2021,51(10):24-30.

CR400BF 型高速动车组双轴肩 搅拌摩擦焊部件质量提升

钮旭晶¹,侯振国¹,董 鹏²,郁志凯¹,鲁二敬¹,张艳辉¹

(1. 中车唐山机车车辆有限公司,河北 唐山 064000;2. 太原理工大学,山西太原 030024)

摘要:采用双轴肩搅拌摩擦焊工艺对中国标准化动车组铝合金车体前端底板进行焊接。在前端底板生产中,焊接一次合格率(相控阵超声检测)低于50%,严重影响焊接质量及交车进度。针对上述问题对焊接缺陷进行研究,使用 ABAQUS 模拟孔洞型缺陷的形成机理,发现在合适的工艺参数下可以避免孔洞型缺陷的产生。采用光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)对正常断裂和异常断裂的"之"形线进行研究,探讨了两类断裂中"之"形线的来源以及形成机理。通过将原有"三棱锥"形状的搅拌针及为"正反双螺旋"形状的搅拌针,并系统改进焊接工艺,焊接一次合格率达到了100%。 关键词:6005A 铝合金;双轴肩搅拌摩擦焊;"之"形线;异常断裂;搅拌针形状

中图分类号:TG457.14 文献标志码:A 文章编号:1001-2003(2021)10-0024-07 DOI:10.7512/j.issn.1001-2303.2021.10.05

0 前言

在高速列车制造中,铝合金的焊接直接关系到 车辆的质量和运行的安全可靠性。相较于熔化焊方 法,FSW 在焊接效率、接头质量、制造成本和作业 环境等方面具有明显优势,已经取代熔化焊技术成 为铝合金车体的主导连接方法^[1-2]。

在搅拌摩擦焊接过程中,无论是单轴肩还是双 轴肩,焊核区域都会出现"之"形线。在双轴肩搅拌 摩擦焊(BTFSW)焊接中"之"形线处曾发生异常断 裂的情况,引起人们的广泛关注。Chen等人^[3]认为 "之"形线是对接表面氧化层在被搅拌针搅碎后无 法与母材合成一体而形成的;Sato等人^[4]认为"之" 形线的形成与焊缝塑化金属的流动行为有关。南 昌大学冀海贵等人^[5]发现当焊接参数选择不当时, 会在"之"形线处发生异常断裂。Warsinski等^[6]研 究了S特征的"之"形线,沿S特征破裂的样品的 氧含量约为在焊核区破裂的样品的2倍,这证明 了"之"形线是接合表面上的氧化物未分解而形成 的。Schneider等^[7]发现对接焊缝的焊缝间距较大 时,抗拉强度有所降低。由此指出,接合线残余物 是导致力学性能降低的原因,而且工艺参数可能在 降低力学性能方面也起到一定作用。

中国标准化动车组铝合金车体部分部件采用 搅拌摩擦焊进行焊接,其中前端底板采用双轴肩搅 拌摩擦焊工艺。每列车需要14块前端底板,用量 较大。根据中车唐山公司TCF00000125724《搅拌摩 擦焊焊接的铝型材部件—F版》技术条件要求,需 要对双轴肩搅拌摩擦焊部件的所有焊缝进行100% 相控阵超声检测,结果发现,焊接一次合格率不足 50%,严重影响焊接质量及交车进度。而且双轴肩 搅拌摩擦焊焊缝不允许采用熔化焊进行返修,造成 大量型材报废,生产成本大幅提升。针对上述问题,

收稿日期:2021-07-15;修回日期:2021-09-14

基金项目:工信部智能专项高速动车组车体智能制造(PA1906)

作者简介:钮旭晶(1987—),男,硕士,高级工程师,主要从事轨道交通先进焊接技术研究。E-mail:niuxujing.ts@crrcge.cc。

文中从铝合金车体前端底板双轴肩搅拌摩擦焊在 "之"形线处的异常断裂入手,研究 6005A-T6 铝合 金正常断裂与异常断裂情况下"之"形线的本质区 别及形成机理,进而提出避免异常断裂的措施。

1 试验材料及方法

选用4mm厚的6005A-T6车体前端底板型材作为母材,其供货状态为固溶处理+人工时效。6005A 铝合金的化学成分(质量分数)为w(Mg)=0.46%,w(Si)=0.63%,w(Cu)=0.17%,w(Fe)=0.24%,w(Mn)=0.2%,余量为Al。采用FOOK-FSW150型搅拌摩擦焊设备对铝合金型材进行双轴肩搅拌摩擦焊接。选用轴肩直径16mm、搅拌针直径6mm、长度3.9mm的"三棱锥形"(见图1d)和"正反双螺旋形"(见图1b)两种类型搅拌针。焊前用酒精擦拭对接面以去除油污,组对时保证无对接间隙存在。焊接过程中搅拌头上下轴肩的压入量均为0.05mm,搅拌头倾斜角为0°。

按 GB/T 228-2002 要求使用线切割沿垂直于 焊缝方向截取拉伸试样,并使焊缝位于拉伸试样 中心。每组工艺参数选 3 个试样,室温条件下在 MTS810 拉伸试验机上进行拉伸试验,拉伸速率为 $5 \times 10^{-3}/s_{\odot}$

对金相试样进行打磨、抛光后使用 keller 试剂 (90 mL H₂O+2 mL HNO₃+4 mL HF+4 mL HCl)腐蚀。 采用 LEICA DM2700M 型光学显微镜观察金相组织。 使用扫描电子显微镜(SEM, JSM-6700F)观察"之" 形线的差异。电子背散射衍射(EBSD, JEOL JSM-7800F)用于表征双轴肩搅拌摩擦焊接头不同区域 的微观组织。

2 试验结果

2.1 微观组织与力学性能

不同于常规单轴肩拌摩擦焊接头,无论是"正 反双螺旋形"(见图 1a)还是"三棱锥形"(见图 1c) 搅拌头形成的双轴肩搅拌摩擦焊接头均呈"哑铃 形"形貌,焊接质量较好,无隧道型孔洞等缺陷,在 焊核区可以清晰地看到"之"形线。图 1e~1g分别 为转速 600 r/min、焊接速度 120 mm/min 下接头的 EBSD 形貌,在图 1c 黑色方框中的热影响区和母材 与热机械影响区过渡区截取EBSD 试样。母材晶粒 呈现典型的纤维状特征(见图 1e);焊核区为细小的 等轴晶粒(见图 1f),平均晶粒尺寸约为 6 μm;热机 械影响区晶粒同时受到热和力的作用,呈弯曲变形



(a)"正反双螺旋形"搅拌针形成的焊接接头光学形貌;(b)"正反双螺旋形"搅拌针形貌;(c)"三棱锥形"搅拌针形成的焊接接 头的光学形貌;(d)"三棱锥形"搅拌针形貌;(e)图c中虚线框对应的EBSD结果;(f)焊核区及热机械影响区;(g)对应的变形解 析;(h)含孔洞缺陷的焊接接头宏观形貌

图 1 接头微观组织 Fig.1 Joint microstructure

晶粒特征。图 1g为对应的晶粒变形解析,图中蓝色 区域为发生再结晶区域,红色为变形晶粒区,黄色 为亚晶粒。可以明显看出,焊核区的等轴晶主要是 焊接过程中动态再结晶的结果,存在少量变形晶粒; 热机械影响区主要由变形晶粒和部分亚晶构成。

图 2a 为转速 600 r/min、焊接速度 120 mm/min 下得到的优质焊接接头的拉伸曲线。使用"三棱锥 形"和"正反双螺旋形"搅拌针形成的焊接头抗拉 强度均可以达到母材的 80% 以上(母材抗拉强度 约为 245 MPa)。"正反双螺旋形"的抗拉强度约为 218 MPa,略高于"三棱锥形"的焊接接头(抗拉强 度约为 205 MPa)。此时两者的拉伸断裂位置均位 于前进侧的热影响区附近,并且断口附近出现典型 的缩颈,属于韧性断裂(见图 2b)。在焊核区可以清 晰看到完整的"之"形线,证明"之"形线不是拉伸 断裂的薄弱区。



雪理機



当焊接参数选用不当时,"三棱锥形"以及"正 反双螺旋形"搅拌头形成的焊接接头焊合区前进 侧的中部均会出现孔洞型缺陷,图1h为"三棱锥 形"搅拌针产生的孔洞缺陷,这类缺陷对材料的力 学性能会产生不利影响。当接头中存在较大的孔洞 缺陷时,对拉伸性能的影响较大,抗拉强度仅约为 母材的 55%;孔洞较小时,对拉伸性能影响减弱,抗 拉强度较高,甚至可达到母材的70%以上,此时在 焊核中心仍能清晰地看到"之"形线,说明与孔洞 缺陷相比,"之"形线不是力学性能的薄弱区,如图 2a 中含缺陷焊接接头的拉伸曲线所示。孔洞缺陷对 于接头的静载强度而言不属于致命缺陷,但对于动 载强度,特别是在疲劳加载过程中,裂纹会在孔洞 处优先萌生,从而大幅降低疲劳寿命。即使孔洞缺 陷对静载强度影响较小,但从焊接接头的工程应用 角度来看,必须选用合理的参数来避免孔洞缺陷, 使静载强度和动载强度均能满足工程应用的要求。

然而在"三棱锥形"工艺参数中还存在较为特殊的一种断裂方式,即在焊核区未出现孔洞缺陷的情况下,"之"形线处发生了脆性断裂,抗拉强度仅为母材的 30% 左右,此时"之"形线成为了力学性能的薄弱区,断口形貌如图 2c 所示,与之前对"之"形线不是力学性能薄弱区的认识不符。因此,研究此类异常断裂对于保障双轴肩搅拌摩擦焊接头质量尤为关键。

2.2 孔洞型缺陷及"之"形线缺陷形成机理 2.2.1 孔洞型缺陷

焊缝内部孔洞处的金属流动速度矢量图如图 3 所示。图 3a 为出现孔洞前一步的金属流动速度场, 在预计出现孔洞的区域,金属流动非常弱,该处在 前进侧最边缘处,因此返回侧的金属流动性欠佳很 容易引起该处填充不良,从而形成孔洞缺陷。图 3b 为孔洞缺陷形成,图 3c 为焊接过程俯视母材观察 到的孔洞,在孔洞形成时,该区域由于没有金属流

第 51 卷

• 26 • Electric Welding Machine

入,因此不存在速度场,此时返回侧大量金属流入 前进侧,但没有任何金属进入孔洞区域,说明孔洞 缺陷的形成既有焊接工艺的影响,又受到搅拌针形 貌的影响,造成局部金属的流动偏差,大部分区域 金属流动良好,但某处金属很难流入从而形成孔洞 缺陷。





2.2.2 "之"形线缺陷

使用"三棱锥形"搅拌针施焊得到的焊接接 头正常断裂与异常断裂金相试样在不同倍数下的 "之"形线光学形貌如图 4 所示。可以看出,在低倍 下两种"之"形线的形态和衬度几乎没有差异;但 在高倍下,异常断裂的"之"形线有微裂纹的特征, 而正常断裂为不连续的孔洞,仅通过高倍金相组织 观察很难对其进行严格的区分。

考虑到金相腐蚀的原理是电化学腐蚀,其结果 是将低电位的组织腐蚀掉,即两类"之"形线上看 到的微裂纹也有可能是金相腐蚀造成的,故必须尽 量排除腐蚀液带来的影响。因此,对腐蚀后的样品标记出"之"形线的位置后,再次进行精磨和长时间的机械抛光,以达到清除表面腐蚀层的目的,在电镜下重新观察"之"形线,如图5所示。其中图5a、5b是正常断裂时的"之"形线,图5c、5d为异常断裂时的"之"形线。

分析图 5a、5b 可以得出,正常断裂时"之"形 线上基本上是 Al₂O₃和 AlSi 两类颗粒聚集的结果。 其中 AlSi 是铝合金熔炼过程中无法避免的结晶相, 其分布无特定的规律,呈弥散分布,热力学上很稳 定,BTFSW 过程仅可能发生结晶相的形貌改变。而



图 4 "三棱锥形"搅拌针焊接接头形貌 Fig.4 "Triangular pyramid" stirring needle welding joint morphology





で非常研究。この改取物形就 図5 电镜观察"三棱锥形"搅拌针焊接接头 Sig 5 Electron microscope observation of "triangular nyramid" stirring needle welded io

Fig.5 Electron microscope observation of "triangular pyramid" stirring needle welded joint

Al₂O₃颗粒的来源可能有两种情况:一是焊接过程 中Al与O的反应;二是试板上的氧化膜,包括试板 对接面和表面。从图中还可以看出,焊核区Al₂O₃颗 粒的分布状态即为Al₂O₃形线的基本形态。而异常 断裂时的"之"形线为微裂纹(见图 5c、5d),由此可 见,金相腐蚀后观察到的两种相似的"之"形线的 本质完全不同。

未连接很有可能是焊接过程中对接间隙超标 造成的。虽然在焊前可以保证对接间隙满足施焊的 要求,但在进行长距离焊接过程中,搅拌头前方的 未焊材料受搅拌头的作用存在较大的横向拉伸应 力,在工装侧顶力不足的情况下,会造成实际间隙 超标,这是在大规模焊接过程中不可预见以及无法 避免的。因此在保证严格的工艺装配条件下,选择 对接间隙允许量更大的搅拌头能够有效减少异常 断裂情况出现的几率。

2.3 工艺试验

在了解"三棱锥形"以及"正反双螺旋形"搅 拌针焊接后存在的缺陷后进行大量的工艺试验来对 比两者的优缺点。"三棱锥形"搅拌针焊接的底板型 材截面及焊缝示意如图6所示,前端底板由5块铝 合金型材组成,正反共8条焊缝,只要其中一条焊 缝出现问题,就会导致整板报废。底板合格品统计 表(节选)如图7所示,可以看出,使用"三棱锥形" 搅拌针生产的41块板有22块合格,19块不合格, 合格率仅为53.6%。

"正反双螺旋形"搅拌针焊接统计结果如图 8 所示。可以看出,采用"正反双螺旋形"搅拌针进行 焊接使底板一次合格达到 100%,避免因返修及报 废造成的材料及人力物力的浪费。每列车节省材料 费 3 500 × 8=28 000 元;每列车节省人工工时费及 后续调修费 8 × 3 h × 4(人) × 15=1 440 元;每列车节 省附料(气体、打磨片、清洗剂)费用等约 200 元;总 共每列车节省约 3 万元。本方案同样适用于标动其 他双轴肩部件(平顶、高压箱底板、隔墙等)的焊接 生产,按中车唐山公司往年订单,每年可节省至少 100 万元以上。

使用"正反双螺旋形"的搅拌针焊接后形成优质接头的重要原因是对对接间隙有较大的允许值。 图 9a 中上下轴肩压入量均为 0.05 mm,焊接前预置 0.2 mm 的对接间隙,焊接参数选用转速 700 r/min、焊速 120 mm/min,得到了优质的焊接接头。图 9b 增



图6 标动底板型材截面及焊缝示意

Fig.6 Schematic diagram of profile section and weld of standard moving base plate

26	금문	Louis at La sol		距記惶占距	blab 17 ab		101/- 1-01 4 /		BTTM
大块	小块	相控阵检测	缺陷位置	富	缺陷长度	是省可加上避让	1例行试验结果	调修结果	是否可用
00010	Q0001-1	合格	1			1		平面度不合格	不可用
	Q0001-2	合格	1			1	合格	平面度不合格	不可用
	Q0001-3	合格	1			1		平面度不合格	不可用
	Q0002-1	合格	1			1			可用
0002Q	Q0002-2	不合格	第8道缝	2615	40	可以	合格		可用
	Q0002-3	合格	1			1		1 0	可用
0003Q	Q0003-1	合格	1			1			可用
	Q0003-2	合格	1			1	合格	-	可用
	Q0003-3	合格	1			1			可用
0004Q	Q0004-1	不合格	第3道缝	535	120	不可以		2 2	不可用
	Q0004-2	合格	1			1	合格		可用
	Q0004-3	不合格	第4道缝	3640	20	可以			可用
0005Q	Q0005-1	合格	1			1		2	不可用
	Q0005-2	合格	1			1	不合格		不可用
	Q0005-3	不合格	第8道缝	1280	130	不可以		2	不可用
0006Q	Q0006-1	合格	1			1			可用
	Q0006-2	合格	1			1	合格	1	可用
	Q0006-3	不合格	第4道鋒	4450	70	可以	1		可用
0007Q	Q0007-1	合格	1			1			不可用
	Q0007-2	合格	1			1	不合格		不可用
	Q0007-3	不合格	1			1		-	不可用
	00008-1	合格	1			1	合格		可用
00080	Q0008-2	合格	1			1		平面度不合格	不可用
	Q0008-3	合格	1			1			可用
	Q0009-1	合格	1			1	-	1	可用
00090	Q0009-2	不合格	第5道缝断刀]		不可以	合格	·	不可用
	Q0009-3	不合格	第5道缝	3810	25	可以	1000 C	1	可用
	Q0010-1	不合格	第2道缉	720	55	可以		1	可用
0010Q	Q0010-2	合格	1			1	合格	1	可用
	Q0010-3	合格	1			1	CONSTR.	3	可用
0011Q	Q0011-1	合格	1			1			不可用
	Q0011-2	合格	1			1	合格	1	不可用
	Q0011-3	不合格	第1道缉	4110	60	1			不可用
	Q0012-1	不合格	第1道緯	1240	300	不可以			不可用
00120	Q0012-2	合格	1			1	合故		可用
00120	Q0012-3	不合格	第4道緯	3544	75	नाभ	디머	1	त्रम
			第5道缝	3777	20	PIEA		1	-175
0013Q	Q0013-1	合格	1			/	A 11		可用
	Q0013-2	合格	1			1	合格		不可用
	Q0013-3	合格	1			/	1		不可用
0014Q	Q0014-1	合格	1			/		-	可用
	Q0014-2	不合格	第5道鑽	1730	40	不可以	合格		不可用



大了上轴肩压入量,达0.2 mm,焊接参数选用转速500 r/min、焊速160 mm/min,在较高的轴肩下压量下,仍然获得了无缺陷的焊接接头。由于螺纹形搅拌针的设计极大增加了焊缝区金属的流动性,"正反双螺旋形"搅拌针在解决弱连接问题的同时,有效解决了孔洞缺陷的产生,拓宽了焊接工艺窗口。

3 结论

(1) 正常断裂"之"形线实质是铝合金型材对 接面上的氧化膜在搅拌头作用下破碎后偏聚的结 果,"之"形线上还存在少量 AlSi 结晶相;力学性能 结果表明,"之"形线不是力学性能的薄弱区;当接 头不存在孔洞缺陷时,断裂出现在前进侧靠近焊核



26	1 2			新記憶古新		-			-	早不愈重近
大块	小块	相控阵检测	缺陷位置	EREPT MAL	缺陷长度	是否可加工避让	例行试验结果	调修结果	是否可用	化日期天应
0019Q	00019-1	合格	1			1			可用	
	00019-2	合格	1			1	合格		可用	
	00019-3	合格	1			1			可田	
0020Q	00020-1	合格	1			1	合格	2	可用	
	00020-2	全核	1			1			可田	
	00020-3	会格	,			1			可田	
0021Q	00021-1	会故	1			1	合格		可田	
	00021-2	会校	1			1			可田	
	00021-3	会校				1			可用	-
00220	00022-1	日18 会校	1			1	合格		可用	
	000022-2	- 白田				1			可用	
	00022-3	会校		<u> </u>		1			可用	
6	00022-1	- 118				1			可用	-
00239	000000-0	- 日間 - 合投				1	合格		可用	
	00023-2	- 白田 - 合校		-		1			可用	
	00023-3	合投				1			지면	
0024Q	00024-1	白檜		-		1	合格		可用	-
	00024-2	- 11일 - 소산		-					파田	
	Q0024-3								피면	
0025Q	90025-1						合格		파田	
	Q0025-2	白檜							미用	
	Q0025-3	百倍							미用	-
00269	90026-1	百倍		<u> </u>			合格		민用	
	Q0026-2	言僚							四用	
-	Q0026-3	言怜							四用	
	Q0027-1	百倍					合格		四用	
0027Q	Q0027-2	言格				- /			四用	
1.000	Q0027-3	合格	/			- /			回用	
11/5/226	<u>90028-1</u>	合格					合格		回用	
0028Q	Q0028-2	首格		-		- /			回用	
	Q0028-3	合格		-		- /		š	回用	
100033322	Q0029-1	合格				1	合格		回用	
0029Q	Q0029-2	首格		-				1	回用	
	90029-3	合格							回用	
0030Q	90030-1	合格					合格		可用	
	Q0030-2	合格				1			可用	
	Q0030-3	合格							可用	
0031Q	Q0031-1	合格	1			/	合格		可用	
	Q0031-2	合格	1			1		2	可用	
	00031-3	合格	/			/			可用	
0032Q	Q0032-1	合格	/			1			可用	
	90032-2	合格	1			1	合格		可用	
	Q0032-3	合格				1			可用	
00339	Q0033-1	合格	1			1	合格		可用	-
	Q0033-2	合格	1			1		à la companya de la c	可用	
	Q0033-3	合格	/			/			可用	

图8 前端底板合格品统计(节选)

Fig.8 Statistics of qualified products of front-end base plate (excerpt)



图 9 不同参数的"正反双螺旋"形状的搅拌针施焊效果 Fig.9 Welding effect of stirring needle with "positive and negative double helix" shape

外的热影响区,抗拉强度超过 200 MPa;当接头存在 孔洞缺陷时,接头性能由缺陷的尺寸和形态决定。

(2)造成异常断裂的根本原因是"之"形线上 出现虚接,其抗拉强度仅为母材的30%左右,这是 因为在长距离的焊接过程中,搅拌头前方的未焊材 料受搅拌头的作用存在较大的横向拉伸应力,在工 装侧顶力不足的情况下,会造成实际间隙超标。

(3)相较于"三棱锥"搅拌针,采用"正反双螺旋"搅拌针极大增强了焊缝区域金属的流动性,充分解决了因搅拌不充分导致的"孔洞"缺陷,同时解

决了弱连接的问题,使底板一次合格率达到100%, 避免因返修及报废造成的材料及人力物力的浪费。

参考文献:

- MISHRAA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing
 [J]. Materials Science and Engineering, 2005, 50(1):1–78.
- [2] 盛建辉,彭家仁,李光,等.搅拌摩擦焊工艺及其在地铁 铝合金车体上的应用[J].电力机车与城轨车辆,2009(3): 31-34.
- [3] CHEN H B, YAN K, LIN T, *et al.* The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds
 [J]. Materials Science & Engineering A (Structural Materials : Properties, Microstructure and Processing), 2006, 433(1–2): 64–69.
- [4] SATO Y S, TAKAUCHI H, PARK S H C, et al. Characteristics of the kissing–bond in friction stir welded Al alloy 1050[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 405(1–2): 333–338.
- [5] 冀海贵. 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊搅拌头设计、接头组 织和性能研究[D]. 江西:南昌航空大学, 2017.
- [6] Warsinski K, West M, Freeman J, et al. Investigation of lazy s feature in self-reacting tool friction stir welds[C]. Friction stir welding and processing VI, 2011:171–176.
- [7] Schneider J, Space M. Origins of line defects in selfreacting friction stir welds and their impact on weld Quality[C]. NASA– Final Rep, 1–15.