

6061 铝合金焊接接头液化裂纹分析

崔云龙, 汪认, 张世欣, 张仁航

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111)

摘要: 6061 铝合金角接头存在裂纹缺陷, 根据裂纹的分布特征、显微组织及断口形貌判断该裂纹为液化裂纹。分析认为, 该裂纹缺陷有三个重要诱因: 材料晶粒尺寸粗大; 焊接热输入过高; 电弧的磁偏吹导致焊缝形状向上偏离。通过选用晶粒细小的母材、降低焊接热输入、改善焊缝形状, 接头液化裂纹的问题得以解决。

关键词: 6061 铝合金; 液化裂纹; 粗晶; 焊接热输入; 磁偏吹

中图分类号: TG401

0 前言

6xxx 系铝合金为可热处理强化铝合金, 具有中等强度和良好的成形能力, 耐腐蚀性能优异, 在轨道交通车辆铝合金车体的底架、车顶、侧墙等大部件结构上得到了普遍应用^[1-2]。6xxx 系铝合金具有一定的焊接裂纹敏感性, 其焊接接头容易产生热裂纹, 6xxx 系铝合金焊接裂纹的研究对提升接头质量有重要意义^[3-4]。

在地铁车体某结构焊接工艺试验过程中, 4 mm 厚 6061 铝合金角接头发现大量裂纹, 裂纹缺陷对结构的安全可靠性造成了重大隐患。为了解决此问题, 试验针对该焊接接头的金相组织、裂纹断口形貌、焊接工艺等进行研究, 确定裂纹的性质, 分析裂纹产生的机理及影响因素, 提出解决措施。

1 缺陷概况

1.1 试验材料及焊接工艺

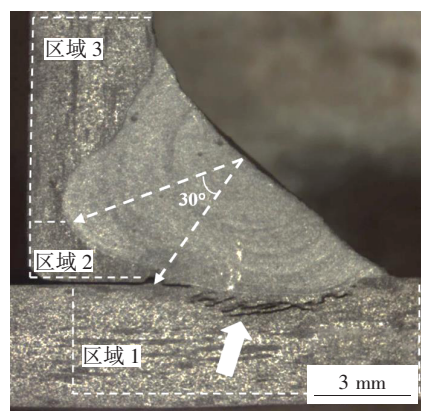
试验材料为 4 mm 厚 6061P-T6 铝合金, 其中“P”表示材料为板材, “T6”表示材料的热处理状态为固溶处理后进行人工时效。焊接方法为 MIG 焊, 所用填充材料为直径 1.2 mm 的 ER5356 焊丝。接头形式为普通角接头, 试板不开坡口、不留间隙, 采用 PB 位置进行焊接, 焊缝单道焊接成形, 焊接参数为: 焊接电流为 140 A, 电弧电压为 21.0 V, 焊接速度为 7 mm/s, 电弧修正系数为 0。

1.2 裂纹缺陷

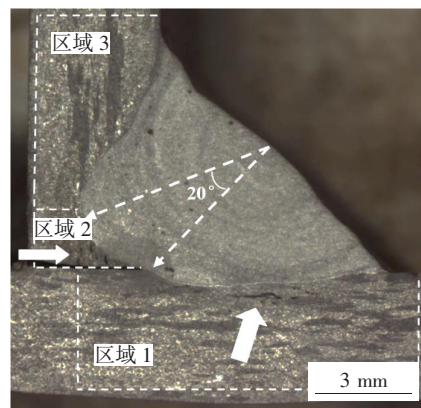
焊后待接头温度冷却至室温, 对接头依次进行外

观检测、渗透探伤和宏观金相检测。接头无损检测结果良好, 焊缝正面成形美观, 没有发现表面缺陷, 但在后续宏观金相检测过程中发现焊接接头存在大量裂纹缺陷。

裂纹的宏观形貌如图 1 所示(见实线箭头)。可见, 裂纹均分布于靠近焊缝的热影响区, 裂纹到熔合线



(a) 区域 1 裂纹



(b) 区域 1 裂纹+区域 2 裂纹

图 1 裂纹的宏观形貌

的距离不超过 0.6 mm。

根据焊缝形状,将接头热影响区划分为 3 个区域,焊缝下侧位于平板的热影响区为区域 1,焊缝左侧位于立板的热影响区为区域 2,焊缝上侧位于立板的热影响区为区域 3。统计发现:95% 的试样在区域 1 发现裂纹,裂纹呈条带状分布,大部分的裂纹肉眼可见,最长的裂纹长度超过 5 mm;10% 的试样在区域 2 发现裂纹,裂纹短小,长度仅 0.2 ~ 0.4 mm;所有的试样在区域 3 都没有发现裂纹。

按照裂纹形成的原因及机理可将裂纹分为:热裂纹、再热裂纹、冷裂纹、层状撕裂和应力腐蚀裂纹^[5]。从原理上讲,铝合金焊接接头可能产生热裂纹和应力腐蚀裂纹,而本试验的焊接接头未在腐蚀介质中长时间存放,因此可以排除应力腐蚀裂纹。宏观金相显示裂纹均位于热影响区,由此可以确定该裂纹缺陷为热裂纹中的液化裂纹。

2 裂纹缺陷分析

2.1 焊接工艺

测量角焊缝尺寸,结果显示焊角 a 值为 5.3 ~ 5.5 mm,远高于该结构的最低尺寸要求 3 mm,焊角尺寸过大说明焊接所用工艺参数偏大,而过高的焊接热输入容易诱发铝合金接头产生热裂纹。试验中机械手控制的焊枪其中心线正对角焊缝根部,但所有的角焊缝中心线均向上偏离(见图 1 虚线箭头),角焊缝中心线与角焊缝根部的夹角为 20° ~ 30°,此现象与电弧的磁偏吹有关。

试验中地线接于平板,根据右手螺旋定则确定磁场方向,电弧周围磁场分布如图 2 所示。焊枪与平板间的磁场相互叠加,磁力线密度明显大于其他区域,电弧磁偏吹规律表现为电磁力把电弧从磁力线密集的一

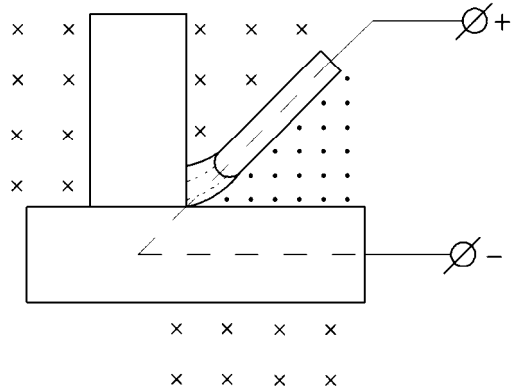
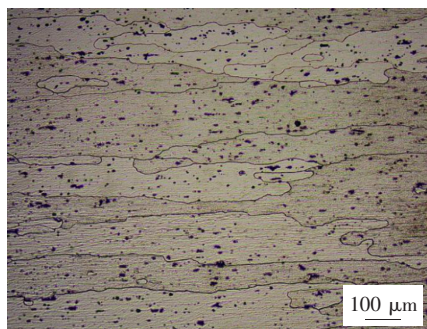


图2 接头的磁场分布

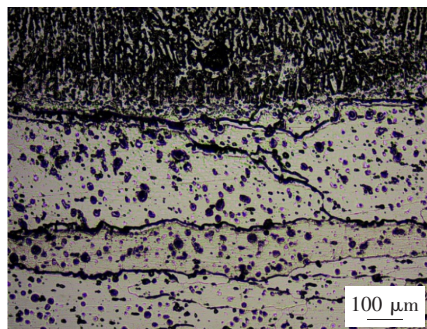
侧推向磁力线稀疏的一侧,导致电弧向上偏吹进而导致角焊缝中心线向上偏离^[6]。

2.2 接头显微组织

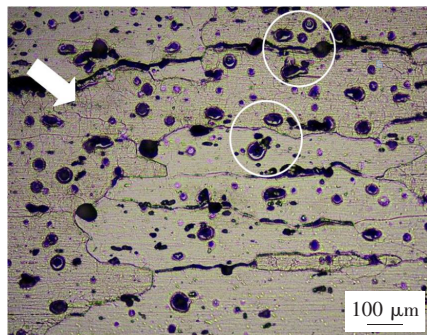
图3为接头的显微组织形貌。图3a为母材的显微组织,母材的晶粒粗大,形状呈长条形,晶粒内弥散分布有大量 Mg_2Si 相颗粒,其尺寸可达 10 ~ 20 μm 。图3b为区域1的显微组织,与母材对比可知热影响区组织受焊接热作用发生晶界液化,距熔合线 0.6 mm 范围内晶界液化显著,裂纹沿晶界分布、扩展,晶粒内 Mg_2Si 相聚集长大。将区域1显微组织进一步放大进行观测,在图3c中可以发现晶粒内存在亚晶(见箭头)和环绕在 $\alpha(Al) + Mg_2Si$ 共晶周围的贫溶质 $\alpha(Al)$ 相(见白色圆圈)。



(a) 母材显微组织



(b) 区域1显微组织



(c) 亚晶和贫溶质 α 相

图3 接头的显微组织

裂纹在热影响区沿晶界分布、扩展,证明此裂纹是液化裂纹。当热影响区组织的温度达到共晶温度 T_E 时, Mg_2Si 相和 $\alpha(Al)$ 相发生共晶反应,生成 $\alpha(Al) + Mg_2Si$ 共晶液相;当温度达到共晶温度 T_E 以上时共晶液相周围的基体 $\alpha(Al)$ 相会进一步发生溶解,生成亚共晶液相。亚共晶成分液相在冷却过程中先析出贫溶质 $\alpha(Al)$ 相再析出共晶相,由此形成图 2c 中 $\alpha(Al) + Mg_2Si$ 共晶外围环绕贫溶质 $\alpha(Al)$ 相的结构^[7]。热影响区晶粒内部及晶界处存在大量贫溶质 $\alpha(Al)$ 相显示热影响区组织受焊接热作用长时间处于共晶温度 T_E 以上,进一步证明该试验所用焊接参数偏大。

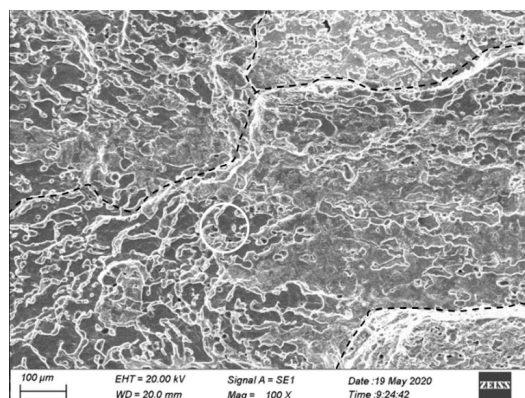
铝合金材料在热加工过程中晶粒沿变形方向伸长,伴随着动态回复晶粒内部会产生大量亚晶结构。在固溶过程中随着无畸变晶粒的成核、长大,亚晶结构会消失于再结晶晶粒中^[8]。热影响区组织包含大量亚晶结构,说明试验所用 6061P-T6 铝合金固溶处理程度不够,固溶温度或固溶时间未达标,导致再结晶过程不完全。受此影响母材组织内仅有少量细小的再结晶晶粒,基本保留了热加工过程结束后所形成的长条状大晶粒,而粗大的晶粒会大幅提高材料的液化裂纹敏感性。固溶处理程度不够也导致 Mg_2Si 相未能完全溶于母材,残存的 Mg_2Si 相在后续的人工时效过程中聚集长大,因此母材中的 Mg_2Si 相颗粒尺寸偏大。

2.3 裂纹的断口形貌

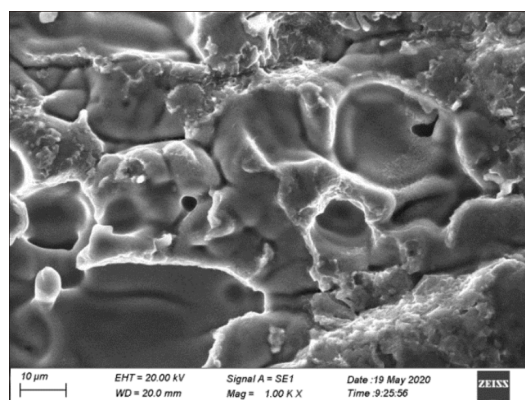
裂纹的断口形貌如图 4 所示。图 4a 为低倍扫描电镜断口形貌,断口呈现沿晶开裂的特征,其表面由多个“台阶”组成(台阶边界由虚线表示)，“台阶”表面较为平坦,其尺寸、形状与图 3 所示的晶粒一致。将圆圈内结构进一步放大进行观测,由图 4b 可知断口表面光滑,不存在滑移、韧窝等韧性断裂特征,也不存在解理、准解理等脆性断裂特征。断口表面覆盖着低熔共晶薄膜,存在明显的“液相桥”特征,薄膜下面的亚晶结构清晰可见^[9]。裂纹断口观测结果与显微组织特征相吻合,进一步验证该缺陷为液化裂纹。

2.4 裂纹产生机理

材料晶粒尺寸越粗大,焊接时越容易在热影响区的晶界形成低熔点元素偏析,进而引发晶界液化,减弱晶粒间的连接。焊接热输入越大,热影响区的晶界液化越显著,同时冷却过程中热影响区组织受到的拉应力越大^[10]。如前所述,试验所用 6061P-T6 铝合金固溶处理程度不够,导致晶粒粗大,而且试验所用



(a) 低倍扫描电镜断口形貌

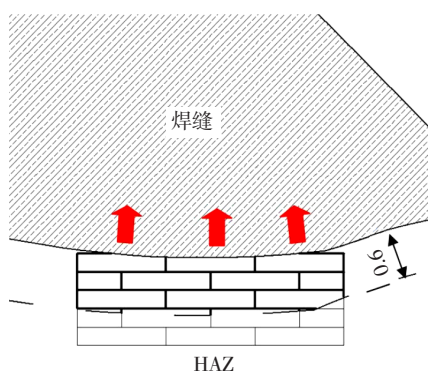


(b) 高倍扫描电镜断口形貌

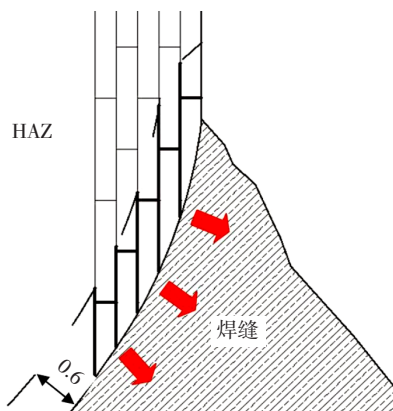
图 4 裂纹的断口形貌

焊接工艺参数过大,焊接热输入过高。以上因素导致热影响区的晶界显著液化,同时承受较大的拉应力,最终在力学因素和冶金因素的共同作用下产生结晶裂纹。

该试验中,区域 1 的液化裂纹多发,而区域 3 未发现液化裂纹,这一现象与焊缝形状、晶粒取向有关。焊接过程中,距熔合线 0.6 mm 范围内的热影响区晶界液化较为显著(参照 2.2 节),于此同时,热影响区晶粒受到焊缝牵拉,拉应力方向近乎与熔合线垂直。晶界液化及晶粒受力情况如图 5 所示,将晶粒简化为长方形,交错排布,液化的晶界以粗实线表示。由图 5a 可知,受电弧磁偏吹影响,区域 1 的熔合线与晶粒长边平行,2~3 层晶粒的晶界完全液化,晶粒长度方向受到拉应力的直接作用;由图 5b 可知,区域 3 的熔合线与晶粒长度方向呈 $30^\circ \sim 60^\circ$ 夹角,晶界完全液化的晶粒层数明显少于区域 1,将拉应力分解,只有部分拉应力垂直作用在晶粒长度方向。与区域 3 相比,区域 1 的微观组织更加敏感,晶粒受拉应力状况更严峻,因此液化裂纹发生率明显更高。



(a) 区域1 晶界液化及晶粒受力情况



(b) 区域3 晶界液化及晶粒受力情况

图5 晶界液化及晶粒受力情况

3 改进措施及效果

为了解决此裂纹缺陷,首先将焊接工艺参数由焊接电流 140 A、电弧电压 21.0 V、焊接速度 7 mm/s 调整为电流 120 A、电压 20.0 V、焊接速度 9 mm/s,经此调整,焊接热输入由 0.42 kJ/mm 减少至 0.27 kJ/mm,焊接热输入显著减少,接头所受拉应力有所下降。其次,针对电弧磁偏吹反向调整焊枪角度,在原有角度基础上将焊枪向平板方向偏转 $8^{\circ} \sim 10^{\circ}$,同时将电弧修正系数由 0 改为 -4,压缩导电嘴到工件的距离 2 ~ 3 mm,经调整,角焊缝中心线与角焊缝根部的夹角控制在 5° 以内,焊缝形状得到优化,区域 1 的熔合线与晶粒长边呈 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 夹角,晶粒的受力状况也得到改善。最根本的措施在于加强对材料质量的管控,试验选用晶粒更细小的 6061P-T6 铝合金进行后续焊接,降低材料的液化裂纹敏感性。

通过调整焊接工艺参数、改善焊缝形状、改换优质材料,新一批试样的宏观金相检测过程中未发现裂纹缺陷,此结构液化裂纹的问题得以解决。

4 结论

(1)对 6061 铝合金裂纹的分布特征、显微组织及断口形貌进行分析,研究结果表明该裂纹为液化裂纹。

(2)该裂纹缺陷存在的三个重要诱因:材料晶粒尺寸粗大;焊接热输入过高;电弧的磁偏吹导致焊缝中心线向上偏离。

(3)通过选用晶粒细小的母材、降低焊接热输入、改善焊缝形状,此结构液化裂纹的问题得以解决。

参考文献

- [1] 王元良,陈辉. 高速列车铝合金车体的焊接技术[M]. 成都:西南交通大学出版社,2012.
- [2] 常艳君,董俊慧,张毅. 6061 铝合金焊接接头组织与性能分析[J]. 焊接,2006(1): 21-26.
- [3] 张明铭,李鹏伟,杨志勇,等. 铝挤压型材表面粗晶对焊接热裂纹的影响[J]. 焊接,2013(12): 43-46.
- [4] 农琪,谢业东,金长义,等. Al-Mg-Si 铝合金氩弧焊结晶裂纹形成机理的研究[J]. 热加工工艺,2013,42(1): 205-207.
- [5] 张文钺. 焊接冶金学[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
- [6] 杨春利,林三宝. 电弧焊基础[M]. 北京:哈尔滨工业大学出版社,2010.
- [7] Sindo Kou. 焊接冶金学[M]. 闫久春,杨建国,张广军,译. 北京:高等教育出版社,2011.
- [8] 韩念梅,张新明,刘胜胆,等. 固溶处理对 7050 铝合金强度和断裂韧性的影响[J]. 中南大学学报,2012,43(3): 855-863.
- [9] 魏祚伟,邓继雄. 超高强度钢焊接热影响区的液化裂纹[J]. 航空材料,1985(5): 38-41.
- [10] 孙承帅,张兆栋,刘黎明. 激光功率对 5356 铝合金激光诱导 MIG 电弧增材制造组织性能的影响[J]. 焊接学报,2018,39(9): 13-18.

第一作者简介: 崔云龙,1989 年出生,硕士,工程师;主要从事高速列车车体焊接技术开发工作。

(编辑:曲畅)