

6005A 铝合金激光-TIG 复合热源填丝焊接技术

杨大伟¹, 陈树海¹, 黄继华¹, 封小松², 路 浩³

(1. 北京科技大学 材料科学与工程学院,北京 100083;
2. 上海航天设备制造总厂,上海 200245; 3. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司,青岛 266111)

摘 要:采用激光-TIG 复合热源填丝焊接新方法焊接高速列车用 6005A 铝合金,对复合焊接工艺、接头微观组织、力学性能、断口形貌及焊接热裂纹进行了研究. 结果表明,激光功率为 2 000~3 000 W、TIG 电流为 150~195 A、焊接速度为 0.4~0.8 m/min 时焊接过程比较稳定,熔合比合适,可以获得优良的焊缝成形. 焊缝区由焊缝边缘的柱状晶和焊缝中心的等轴晶组成. 熔合比 γ 控制在 0.54~0.7 范围内时,接头的平均抗拉强度约为 193.39 MPa;接头抗拉强度随熔合比的增大而增大,并且 $\gamma=0.7$ 时,抗拉强度最大,约为 205 MPa,占母材强度的 70%.

关键词:6005A 铝合金;激光-TIG 复合焊接;微观组织;力学性能

中图分类号:TG 401 **文献标识码:**A **doi:**10.12073/j.hjxb.20151216001

0 序 言

车体轻量化是提速、减时、节能减耗的重要手段^[1]. 铝合金因为具有比重轻、无低温脆性转变、耐腐蚀等优点,在高速轨道列车车体制造中得到广泛应用. 6005A 铝合金为 Al-Mg-Si 系可热处理强化铝合金,具有中等强度、较好的挤压成形性等优点,是当前国内制造高速铝合金列车车体使用的主要铝合金型材^[2-3].

6005A 铝合金焊接过程中具有较大热裂倾向^[4],在实际的焊接生产应用过程中应给予足够的关注. 激光-电弧复合焊接技术是一种高效率、高冶金质量、低热输入、低变形、大熔深的焊接技术,在焊接热处理强化铝合金时具有明显的技术优势^[5]. 目前,国内外许多学者已经开展了高速列车车体型材的激光-MIG 复合热源焊接研究,但是在某些条件下

仍然存在着一定的热裂问题^[6]. 考虑到 TIG 焊接铝合金具有较高的冶金质量,文中提出了采用激光-TIG 复合热源的方法焊接 6005A 铝合金,在研究工艺参数对激光-TIG 复合热源焊接 6005A 铝合金型材焊接特性的影响的基础上,对抗热裂性能进行深入的分析.

1 试验方法

试验材料为 6005A-T6 铝合金型材(规格为 150 mm×50 mm×3.5 mm),填充金属为 ER5356 铝镁合金焊丝(直径 1.2 mm),化学成分如表 1 所示. 试验设备主要有 HS-40 高功率轴快流 CO₂ 激光器(Lance-4000)、Fronius 送丝机(KD-4010)和直流变极性 TIG 焊机(WGIE). 图 1 为激光-TIG 复合焊接示意图,光丝间距 2.5 mm,钨极高度 5 mm.

表 1 6005A 铝合金和 ER5356 焊丝的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Composition of 6005A aluminum ally and ER5356 filler wire

材料	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
6005A-T6	0.40	0.53	0.13	0.035	0.20	0.15	0.09	0.024	余量
ER5356	4.5~5.5	≤0.25	≤0.4	≤0.1	0.05~0.2	0.05~0.2	≤0.1	0.06~0.2	余量

依据高速列车型材原有坡口形状及尺寸^[1],试验母材加工成 70° V 形坡口,焊前严格清理坡口附

近的氧化皮,并用丙酮清洗污染物,施焊时背部采用强制成形措施来模拟实际生产工况.

采用 Zeiss Auriga 聚焦离子束场发射扫描双束电镜对试样进行背散射电子衍射(EBSD). 焊接接头拉伸测试在 INSTRON-5569 型材料拉伸试验机上

收稿日期: 2015-12-16
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475040);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-15-004A3)

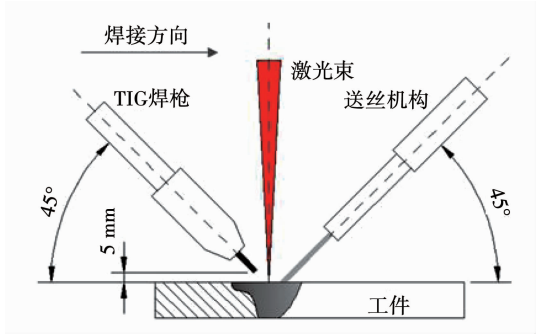


图 1 激光-TIG 电弧复合热源焊接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser-TIG arc hybrid welding

进行,试样为标准尺寸,拉伸速率 1 mm/min. 拉伸试样的断口采用 LEO-1450 扫描电镜 (SEM) 观察分析.

2 结果与分析

2.1 工艺参数对熔合比的影响

6005A 铝合金型材具有较大的焊接热裂纹敏感性,一般可以从焊缝冶金角度,通过调控熔合比来改善焊缝组织、抑制裂纹的产生. 文中深入研究了工艺参数对熔合比的影响,得到的典型焊接接头宏观形貌如图 2 所示(焊前坡口边界如图 2 实线所示,熔合比 $\gamma = (S_1 + S_2) / (S_1 + S_2 + S_3 + S_4)$).

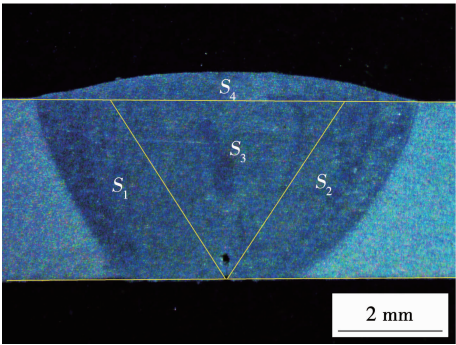


图 2 焊接接头宏观形貌

Fig. 2 Macro morphology of welded joint

当 TIG 焊焊接电流 $I = 150\text{ A}$, 送丝速度 $v_s = 4\text{ m/min}$, 焊接速度 $v_h = 0.5\text{ m/min}$ 时,激光功率对熔合比的影响如图 3 所示. 随激光功率增加,母材熔化量增加,熔合比增大. 当激光功率为 2 000 ~ 3 000 W 时,复合作用较为稳定,焊缝无裂纹、气孔等明显缺陷.

激光功率 2 000 W, TIG 焊焊接电流 210 A, 焊接速度 v_h 为 0.5 ~ 1.0 m/min, 送丝速度 v_s 为 3.2 ~

8 m/min 时,随焊接速度增大,单位时间内焊缝热输入量减少,单位长度焊缝中母材熔化量减少,而填充金属熔化量变化并不大,因此熔合比减小. 焊接速度在 0.4 ~ 0.8 m/min 时,线能量适中,熔合比合适,焊缝成形较好.

激光功率 $P = 2\text{ 000 W}$, 送丝速度 $v_s = 4\text{ m/min}$, 焊接速度 $v_h = 0.5\text{ m/min}$ 时,随 TIG 焊电流增大,母材的熔化量增多,而填充金属的熔敷量基本不变,所以熔合比增大. TIG 电流为 150 ~ 195 A 时,焊接过程比较稳定,可以获得较为优良的焊缝成形.

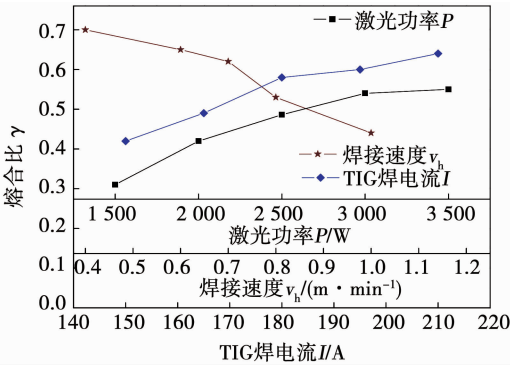


图 3 焊接工艺参数对熔合比的影响

Fig. 3 Effect of welding parameter on penetration ratio

2.2 母材与焊接接头 EBSD 分析

母材区的 EBSD 反极图 (IPF 着色图) 如图 4a 所示,母材区的大部分晶粒呈轧制状态,主要由变形的等轴晶组成,多沿 $\{111\}$, $\{001\}$ 方向. 焊缝中心区的 EBSD 反极图 (IPF 着色图) 如图 4b 所示,焊缝中心区域主要由等轴晶组成,但与母材的晶粒尺寸相比,焊缝中心区晶粒明显较大. 熔合线附近区域的 EBSD 反极图 (IPF 着色图) 如图 4c 所示,熔合线附近靠近母材的区域与母材区类似,而在熔合线附近的焊缝边缘的柱状晶区则存在较为明显的择优取向关系,多沿 $\{111\}$ 方向,晶粒呈板条状,方向指向焊缝中心.

2.3 熔合比对接头力学性能的影响

熔合比对抗拉强度的影响如图 5 所示,接头的断裂位置均发生在焊缝. 熔合比 $\gamma < 0.54$ 时,接头的抗拉强度明显较低,这主要是因为焊接能量过低,铝合金板材不能被熔透,焊缝未完全熔合,所以抗拉强度较低且无明显规律. 熔合比在 $0.54 \leq \gamma < 0.7$ 范围内时,随着熔合比的增大,母材金属熔化量变多,抗拉强度更多地受到母材金属力学性能的影响,同时复合焊缝并无热裂纹产生,因此接头的抗拉强度随着熔合比的增大而增大,接头的平均抗拉强度可达 193.39 MPa,并且出现最大值,约为 205 MPa,

达母材强度的 70%。

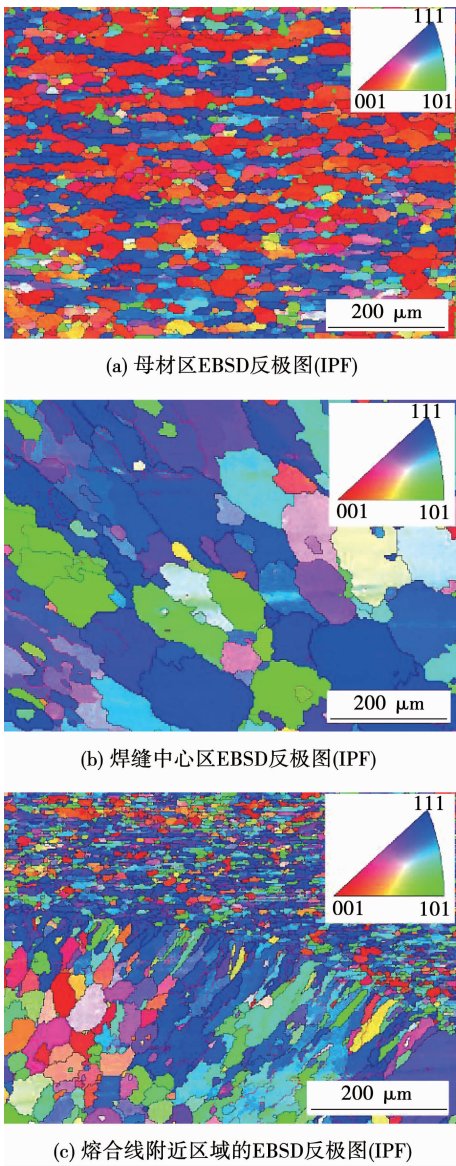


图 4 母材与焊缝区域的 EBSD 反极图 (IPF)
Fig. 4 EBSD inverse pole-figure (IPF) map of base metal and weld

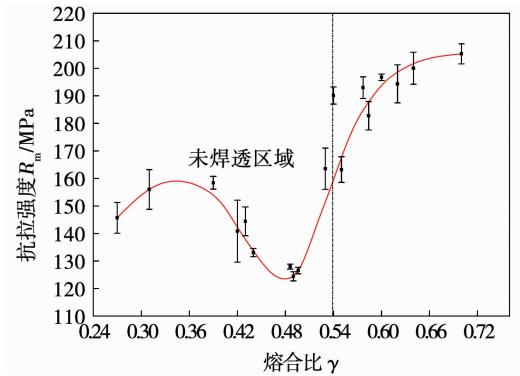


图 5 熔合比对抗拉强度的影响
Fig. 5 Effect of penetration ratio on tensile strength

2.4 断口形貌

6005A-T6 铝合金焊接接头拉伸试样断口形貌如图 6 所示. 图 6a 中复合接头的宏观断口较为粗糙,呈暗灰色,无明显的焊接缺陷,断口上部边缘存在剪切唇. 由图 6b 可知,A 区域呈典型的韧窝结构,韧窝细小均匀,并且较深,结合图 6a 可知,占断口面积 60% 以上的绝大部分区域为韧性断裂,这表明接头塑性较好. 由图 6a 和图 6c 可知,B 区域为脆性断裂,断口的下部光滑平整,撕裂棱明显. 可见,接头的断口以韧性断裂形式,以脆性断裂为辅.

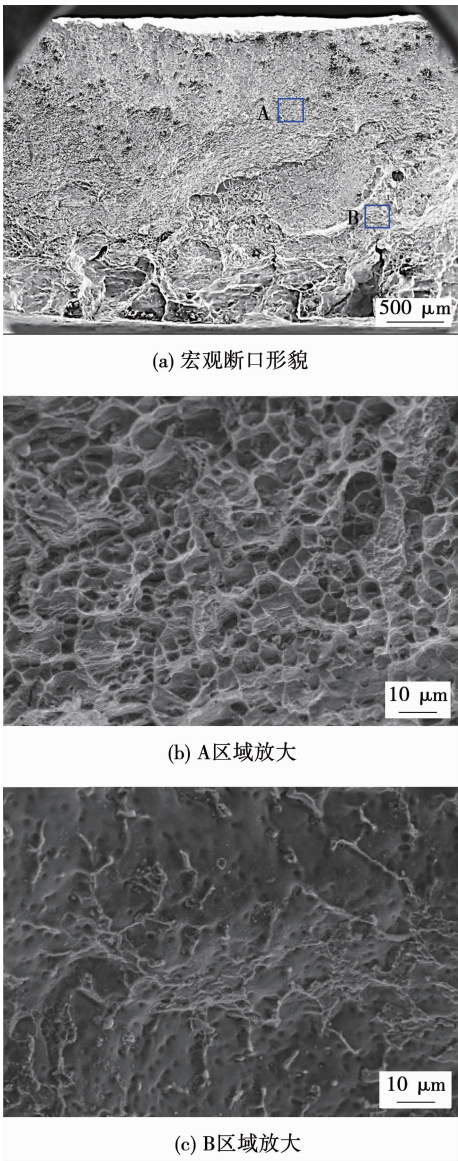


图 6 接头拉伸试样断口形貌组织
Fig. 6 Tensile fracture micrographs of welded joint

3 讨 论

文中对 6005A 铝合金焊接热裂纹实现了有效

的抑制,这得益于焊丝中合金元素的有益影响. Si, Mg 元素含量对铝合金焊接的热裂纹敏感性影响如图 7^[7]所示. 6005A 铝合金母材的 Si, Mg 元素含量分别约为 0.53% 和 0.40%, 焊丝的 Si, Mg 元素含量分别约为 0.25% 和 5%. 由此可知,复合焊缝金属中的 Si 元素和 Mg 元素含量分别为 $[0.53\gamma + 0.25 \cdot (1 - \gamma)]\%$ 和 $[0.4\gamma + 5 \cdot (1 - \gamma)]\%$. 结合图 3 可知熔合比 γ 的变化范围约为 0.3 ~ 0.7. 因此,焊缝金属中的 Si 元素含量约为 0.33% ~ 0.45%, 在 Si 元素含量-裂纹倾向曲线最大值的左侧并且含量低于母材,且随熔合比的增大 Si 元素的含量增大. Mg 元素的含量约为 1.78% ~ 3.62%, 在 Mg 元素含量-裂纹倾向曲线最大值的右侧,且随熔合比的增大 Mg 元素的含量减小. γ 较小时 Si 元素含量较低、Mg 元素含量较高, Si, Mg 元素均偏离热裂纹倾向大的区域; γ 较大时,虽然 Si, Mg 元素含量靠近热裂纹倾向大的区域,但由于采用 70° V 形坡口,坡口角度较大,需要的填充金属较多,熔池较大,熔化的母材与填充金属在焊接过程中不能混合均匀,使得熔池中心母材所占的比例降低,所以熔池中心的 Si, Mg 元素含量也均偏离热裂纹倾向较大的区域. 熔池结晶的初始阶段,液相比比例较大,已凝固的晶粒之间不发生接触且金属可自由流动,即使有拉伸应力存在,被拉开的缝隙能及时被液态合金填充,因此焊缝边缘的热裂倾向很小,熔池中心凝固时 Si, Mg 元素含量偏离热裂纹倾向大的区域,热裂纹倾向也较小.

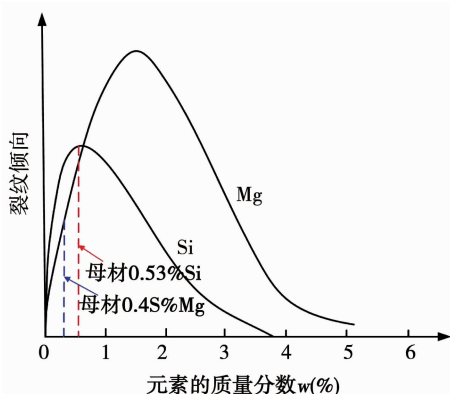


图 7 Si, Mg 元素含量与热裂纹倾向的关系

Fig. 7 Effect of Si, Mg on hot cracking tendency

4 结 论

(1) 激光功率为 2 000 ~ 3 000 W、TIG 焊电流为 150 ~ 195 A、焊接速度为 0.4 ~ 0.8 m/min 时,熔合比合适,可以获得较为优良的焊缝成形.

(2) 采用 70° V 形坡口,添加 ER 5356 Al-Mg 焊丝, Si, Mg 等元素共同作用使复合焊缝热裂纹倾向较低. 焊缝区由存在较为明显择优取向的焊缝边缘的柱状晶和焊缝中心晶粒较大的等轴晶组成.

(3) 当熔合比 γ 控制在 0.54 ~ 0.7 范围时,接头的抗拉强度随熔合比的增大而增大,当 $\gamma = 0.7$ 时,抗拉强度最大,约为 205 MPa,达母材强度的 70%. 接头断口以韧性断裂形式为主,以脆性断裂为辅.

参考文献:

- [1] 张 健, 雷 振, 王旭友. 高速列车 6005A 铝合金型材焊接热裂纹分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(8): 60 - 64.
Zhang Jian, Lei Zhen, Wang Xuyou. Weld hot crack analysis of 6005A aluminum alloy profile for high-speed train[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(8): 60 - 64.
- [2] Dong P, Li H, Sun D, *et al.* Effects of welding speed on the microstructure and hardness in friction stir welding joints of 6005A-T6 aluminum alloy[J]. Materials and Design, 2013(45): 524 - 531.
- [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, 33(7): 9 - 12.
Wang Xuyou, Lei Zhen, Zhang Jian, *et al.* Laser-tandem MIG hybrid welding for 6005A-T6 aluminum alloy profile of high-speed train[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(7): 9 - 12.
- [4] 杨成功, 单际国, 熊 伟. 车辆用 6005A 铝合金焊接技术研究现状[J]. 焊接, 2009(10): 13 - 18.
Yang Chenggong, Shan Jiguo, Xiong Wei. Current status of research on welding technology of 6005A aluminum alloy for vehicle[J]. Welding & Joining, 2009(10): 13 - 18.
- [5] 王 威, 王旭友, 秦国梁, 等. 铝合金激光-小功率脉冲 MIG 电弧复合热源焊接特性分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(8): 37 - 40.
Wang Wei, Wang Xuyou, Qin Guoliang, *et al.* Welding characteristics of laser-low power pulse MIG hybrid welding aluminium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(8): 37 - 40.
- [6] Katayama S, Uchiumi S, Mizutani M, *et al.* Penetration and porosity prevention mechanism in YAG laser-MIG hybrid welding[J]. Welding International, 2007, 21(1): 25 - 31.
- [7] 王炎金. 铝合金车体焊接工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

作者简介: 杨大伟,男,1989 年出生,硕士研究生. 主要从事熔钎焊方面的科研工作. Email: ustbyangdawei@163.com

通讯作者: 陈树海,男,副教授. Email: shchen@mater. ustb. edu. cn