

高速列车 6N01 铝合金型材激光 - MIG 复合填丝焊接技术

雷振^{1,2}, 常云峰¹, 徐富家¹, 徐良¹, 王旭友¹

(1. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨 150028; 2. 机械科学研究总院青岛分院有限公司, 山东 青岛 266301)

摘要: 针对高速列车侧墙 6N01 铝合金型材, 主要从焊缝成形、焊缝气孔率、接头强度、焊接变形、焊接效率、金相组织等方面研究了激光 - MIG 复合填丝焊方法的焊接特性, 并与激光 - MIG 复合焊进行了综合对比。试验结果表明, 相同试验条件下, 两种焊接接头的表面成形相当, 焊缝气孔率均在 0.6% 以下, 接头强度均达到母材的 75% 以上, 焊接变形均在 1 mm 以内, 与激光 - MIG 复合焊相比, 激光 - MIG 复合填丝焊在不增加热输入的条件下焊接效率提高了 23%。

关键词: 高速列车; 铝合金; 激光; MIG; 复合填丝

中图分类号: TG456.7

0 前言

铝合金由于密度低、强度高、耐腐蚀性好及易于加工等优点, 成为高速列车结构轻量化设计的首选材料, 目前国内高速列车铝合金车体型材的主要焊接方法为单丝 MIG 焊和双丝 MIG 焊^[1]。但是铝合金热导率高, 为实现良好的熔合及熔透, 需要开设较大的坡口, 导致焊接过程中必须采用较低的焊接速度及较大的焊接热输入来保证焊缝成形和焊缝的熔合可靠性^[2-3], 较大的焊接热输入导致铝合金焊接接头残余应力较大、接头软化问题突出, 这就降低了焊接接头的疲劳强度, 从而直接影响高速列车服役过程中的安全性和可靠性^[4]。

铝合金因其比热容大、电导率高、热导率大等特性, 决定了其焊接时宜采用能量集中的热源^[5]。与一般弧焊相比, 激光焊具有明显的技术优势, 如能量密度高、焊接速度快、热输入低、变形小等优点^[6]。但铝合金的化学成分、物理特性及激光焊的工艺特性决定了铝合金激光焊缝成形差、气孔率较高、裂纹倾向较大、接头元素烧损严重等一系列焊接问题^[7]。

激光 - 电弧复合焊充分利用了激光和电弧的优势, 避免单一热源焊接的一些不足, 提高了焊接过程的稳定性、接头质量及焊接效率, 降低了工件加工装配要求^[8-9], 通过合适的焊接工艺可以有效地解决气孔问

题^[10-11]。激光 - MIG 复合焊具有高速稳定焊接的技术优势^[12-14], 但常常在焊接过程中熔敷效率无法与高速焊接特性相匹配, 致使其高速焊接的技术优势无法充分发挥。激光 - MIG 复合填丝焊方法是一种基于激光 - MIG 复合焊的新型焊接工艺, 通过额外加入一根焊丝, 在不增加热输入的情况下增加了焊缝的熔敷量, 有助于解决激光 - MIG 复合焊熔敷效率与高速焊接的矛盾问题。文中主要研究分析了激光 - MIG 复合填丝焊的焊缝成形、焊缝气孔率、接头强度、焊接变形、焊接效率和金相组织等特性。

1 试验材料与方法

试验所用铝合金型材为高速铝合金列车用 6N01 型材, 型材状态为 T5, 规格尺寸分别为 500 mm × 300 mm × 3 mm 和 500 mm × 300 mm × 4 mm, 两面采用相同坡口, 如图 1 所示, 填充焊丝为直径 $\phi 1.2$ mm 的 ER5356, 母材及焊丝化学成分见表 1。图 2 为试验装置示意图, 两种焊接方法采用同一个焊接装置, 当进行

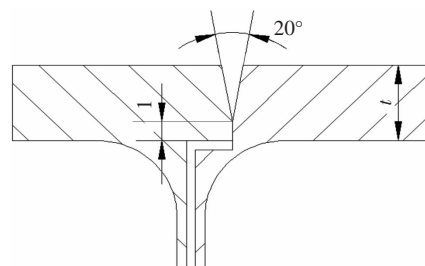


图 1 焊接坡口示意图

收稿日期: 2018 - 09 - 05

doi:10.12073/j.hj.20180905002

表1 母材及焊丝的化学成分(质量分数,%)

类别	Mg	Fe	Si	Zn	Ti	Mn	Cu	Cr	Al
6N01	0.62	0.14	0.53	0.049	0.03	0.2	0.02	0.15	余量
ER5356	5.0	0.4	0.25	0.25	0.15	0.1	0.1	0.03	余量

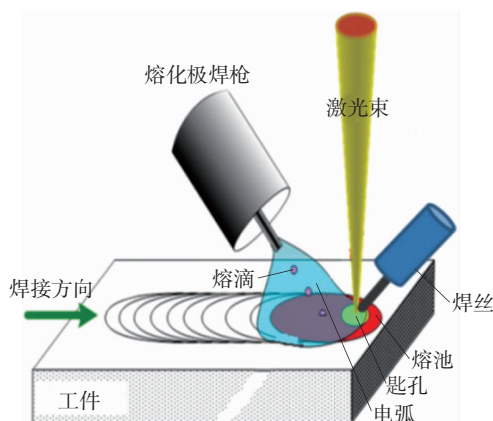


图2 激光-MIG复合填丝焊接示意图

激光-MIG复合焊接试验时,填丝速度设为0 m/min,即不填丝。试验系统所用设备包括IPG YLR-6000光纤激光器,Fronius TPS4000CMT焊机,松下5000TIG焊机的配套送丝机,KUKA机器人以及自行研制的工作台和卡具等。

2 试验结果与分析

2.1 焊缝成形

如图3所示,为试验条件下高速列车铝合金型材3

mm侧和4 mm侧的焊缝成形特征,焊接工艺参数见表2。由图3可知,在相同试验热输入条件下,对于高铁侧墙铝合金型材3 mm侧和4 mm侧,激光-MIG复合填丝焊与激光-MIG复合焊均能实现良好的表面成形和良好的底部熔合,未出现咬边、未熔合等缺陷。

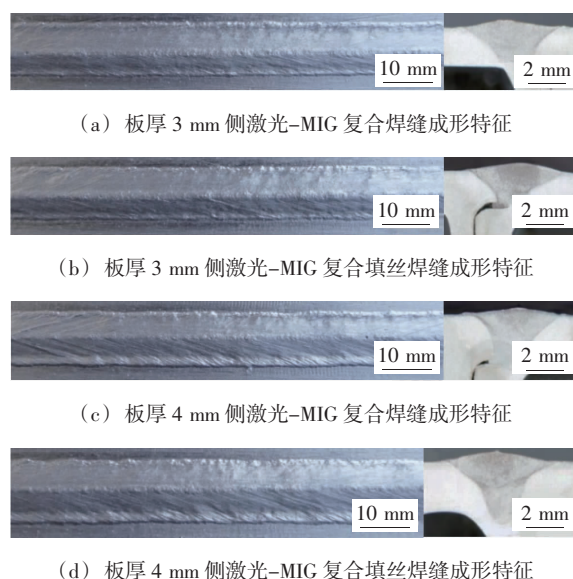


图3 典型焊缝成形特征

表2 焊接试验参数

厚度 t/mm	焊接方式	焊接速度 $v/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	激光功率 P/kW	焊接电流 I/A	填丝速度 $v_f/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$
3	复合焊	3	5.6	170	0
3	复合填丝焊	3	5.6	170	4
4	复合焊	3	5.8	190	0
4	复合填丝焊	3	5.8	190	4

2.2 焊缝气孔率

如图4所示,为相同试验热输入条件下,高速列车侧墙铝合金型材3 mm侧和4 mm侧激光-MIG复合焊和激光-MIG复合填丝焊的X射线探伤照片。由图4可知,试验条件下,四种焊缝气孔尺寸较小,数量较少,其中,3 mm侧的焊缝几乎无气孔,其气孔数量均明显低于4 mm侧。

焊缝气孔率测量结果如图5所示,由图可知,对于高速列车铝合金型材3 mm侧,两种焊接方法的焊缝气孔率均低于0.1%,几乎为0;对于高速列车铝合金型材4 mm侧,激光-MIG复合填丝焊的焊缝气孔率略高于激光-MIG复合焊,但其焊缝气孔仍很少,其焊缝气孔率低于0.6%,即对于高速列车铝合金型材,通过激光-MIG复合填丝焊可以得到低气孔甚至无气孔的焊接接头。

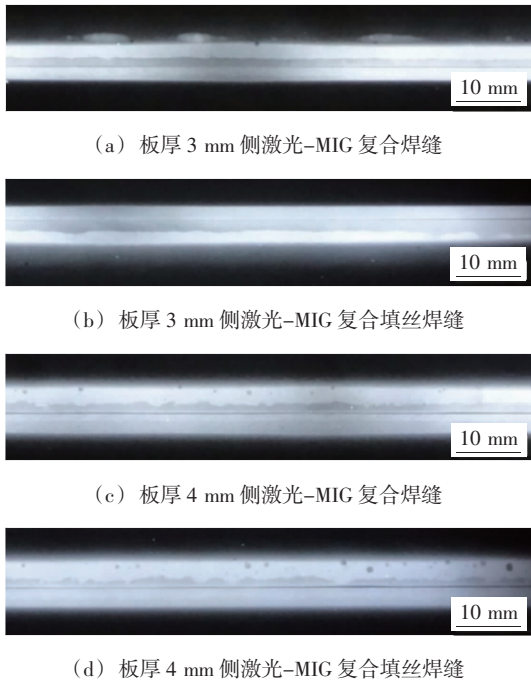


图4 焊缝X射线探伤照片

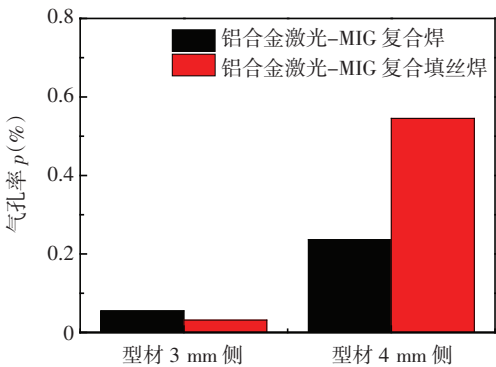


图5 焊缝气孔率测量结果

2.3 接头抗拉强度

分别在高速列车铝合金型材3 mm侧和4 mm侧的激光-MIG复合焊接头、激光-MIG复合填丝焊接头以及母材上各截取2个横向拉伸试样,去除余高后进行拉伸试验,试验结果见表3。

由表3可知,试验条件下,无论对于3 mm侧还是4 mm侧,与激光-MIG复合焊相比,激光-MIG复合填

表3 拉伸试验结果

试样编号	试板厚度 t/mm	类别	断裂位置	抗拉强度 R_m/MPa	强度系数
1	3	母材	—	257	1.00
2	4	母材	—	257	1.00
3	3	复合焊	熔合线	199	0.77
4	3	复合焊	熔合线	212	0.82
5	3	复合填丝焊	熔合线	196	0.76
6	3	复合填丝焊	熔合线	199	0.77
7	4	复合焊	熔合线	211	0.82
8	4	复合焊	熔合线	210	0.82
9	4	复合填丝焊	熔合线	209	0.81
10	4	复合填丝焊	熔合线	197	0.77

丝焊的接头抗拉强度略有下降,但其接头强度系数仍较高,均大于0.75,即激光-MIG复合填丝焊的焊接接头也具有优良的抗拉强度。

2.4 焊接变形

焊接变形试验采用无拘束条件下测量标记点焊接前后相对工作台的高度变化,如图6所示为焊接变形测量标记点位置示意图,测量结果见表4。

由表4可知,针对高速列车铝合金型材,相同试验热输入条件下,激光-MIG复合焊的焊缝变形量约为0.65~0.85 mm,激光-MIG复合填丝焊的焊缝变形量为0.60~0.70 mm,略小于激光-MIG复合焊。两种

焊接试样变形量均很小,这主要是由于两种焊接工艺方法的焊接速度快,其热输入均较小,所以焊后焊接变形较小。在其他焊接参数相同的条件下,激光-MIG复合填丝焊的焊接变形略小于激光-MIG复合焊,这主要是因为相同的焊接热输入条件下,激光-MIG

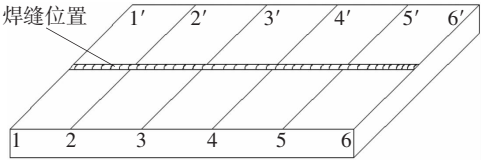


图6 焊接变形标记点示意图

表4 焊接变形测量结果

焊接方式	点1	点2	点3	点4	点5	点6
激光-MIG复合焊	0.70	0.75	0.65	0.75	0.75	0.85
激光-MIG复合填丝焊	0.60	0.60	0.65	0.70	0.70	0.65

填丝焊额外填充了一根冷丝,焊接过程中有部分热量用于铝合金焊丝的熔化,致使焊接热输入能量作用到母材上的热量有所降低,焊接接头的残余应力有所降低,焊接变形略微减小。

2.5 焊接效率

为对比激光-MIG复合焊与激光-MIG复合填丝焊两种方法焊接铝合金型材的焊接效率,分别针对铝合金型材3 mm侧和4 mm侧,在保证底部熔合良好和表面无凹陷、咬边等缺陷的条件下,增大焊接速度,其余参数保持不变,直至出现底部熔合不良或者表面凹陷、咬边等缺陷为止,最后通过对比两种方法完成整个铝合金型材焊接所需要的时间来比较两种焊接方法的焊接效率。

试验结果如图7所示,相同试验热输入条件下,对于高速列车铝合金型材3 mm侧,当焊接速度达到4.2 m/min时,激光-MIG复合焊缝仍可以实现良好焊缝成形和底部熔合,但表面几乎无余高,焊接速度达到极限;而对于激光-MIG复合填丝焊,直到焊接速度达到5.5 m/min时,仍能实现良好的焊缝成形和底部熔合,但焊缝表面也几乎无余高,焊接速度达到极限。对于高速列车铝合金型材4 mm侧,相同试验热输入条件下,激光-MIG复合焊极限速度为3.5 m/min,而激光

-MIG复合填丝焊极限速度为4.5 m/min。总的来说,对于单位长度的铝合金型材,激光-MIG复合焊方法焊接完正反两面共需要耗费31.2 s的时间,而激光-MIG复合填丝焊方法只需要24.0 s的时间,相对于激光-MIG复合焊,焊接效率提高了23%。

2.6 接头金相组织

如图8~10所示分别为高速列车6N01铝合金型材及其激光-MIG复合焊接头和激光-MIG复合填丝

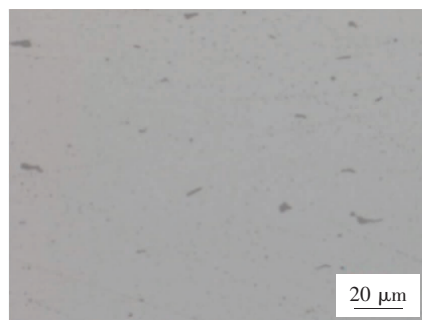
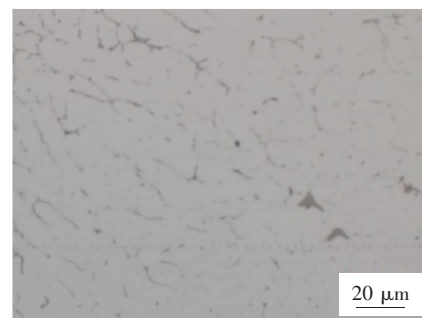


图8 6N01铝合金型材金相组织



(a) 熔合区

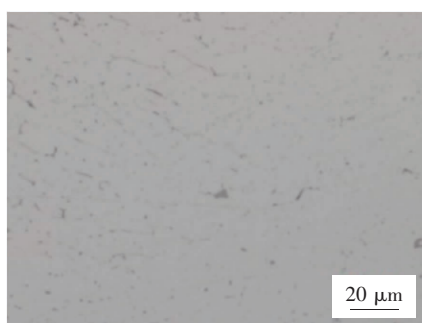


(b) 焊缝中心

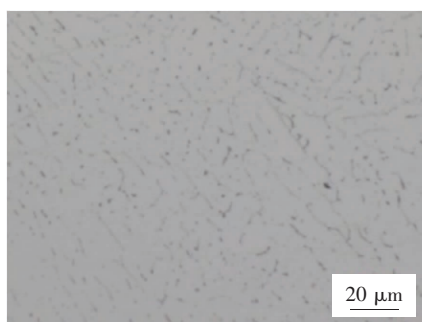
(a) 板厚3 mm侧激光-MIG复合焊缝成形特征($v=4.2$ m/min)(b) 板厚3 mm侧激光-MIG复合填丝焊缝成形特征($v=5.5$ m/min)(c) 板厚4 mm侧激光-MIG复合焊缝成形特征($v=3.5$ m/min)(d) 板厚4 mm侧激光-MIG复合填丝焊缝成形特征($v=4.5$ m/min)

图7 焊接效率试验中焊缝成形特征

图9 激光-MIG复合焊接接头金相组织



(a) 熔合区



(b) 焊缝中心

图 10 激光 - MIG 复合填丝焊接接头金相组织

焊接头不同区域的金相组织照片。

图 8 为母材的组织照片,由图可知,母材组织具有典型的轧制铝合金组织特征,晶粒呈现一定的方向性,沿轧制方向被拉长,并且存在大量的强化相颗粒 β 相,其弥散分布于 α 相基体中;图 9a 激光 - MIG 复合焊接头熔合线附近组织,由图可知,组织从母材到焊缝逐步由取向一致的柱状晶变为没有特定取向的等轴枝晶;图 9b 激光 - MIG 复合焊接头焊缝中心组织,主要为没有特定取向的等轴枝晶,这与铝合金的非平衡凝固和成分过冷有关。

由图 10 可知,激光 - MIG 复合填丝焊的接头各区域组织与激光 - MIG 复合填丝焊基本相同,但通过对比发现,铝合金激光 - MIG 复合填丝焊的接头晶粒尺寸略小于激光 - MIG 复合焊。

3 结论

(1) 试验条件下,高速列车铝合金型材激光 - MIG 复合填丝焊表面成形美观,焊缝熔合良好,焊接变形较小,焊缝气孔率低于 0.6%,接头抗拉强度达到母材的 75% 以上。

(2) 与传统激光 - MIG 复合焊相比,在试验条件下,激光 - MIG 复合填丝焊在不增大热输入的条件下焊接效率提高了 23%。

(3) 试验条件下,与传统激光 - MIG 复合焊相比,激光 - MIG 复合填丝焊的焊接变形量略有减小,焊缝气孔率基本相当,接头抗拉强度略有降低,接头组织基本相同。

参考文献

- [1] 杨修荣. 综合性能优异的激光复合焊[J]. 航空制造技术, 2005(1): 114 - 115.
- [2] 乔及森, 周清林, 朱亮. 铝合金焊接接头的力学性能测试[J]. 焊接学报, 2006, 27(11): 41 - 44, 49.
- [3] 张力, 张振宇. MIG 焊接法在铝及铝合金焊接生产中的应用[J]. 城市车辆, 2009(6): 42 - 43.
- [4] 王小朋, 李小宇, 滕彬, 等. 高速列车 6N01 铝合金型材焊接接头疲劳性能[J]. 焊接, 2016(9): 25 - 30.
- [5] 肖荣诗, 陈铠, 左铁钊. 高强铝合金激光焊接新进展[J]. 应用激光, 2002, 22(2): 206 - 208.
- [6] 吴圣川, 朱宗涛. 铝合金的激光焊接及性能评价[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [7] Xu L, Tian Z, Peng Y, et al. Microstructure and mechanical properties of high strength aluminum alloy laser welds[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(3): 456 - 461.
- [8] 丁灏, 马云霞, 白培康, 等. 铝合金激光焊新技术[J]. 热加工工艺, 2012, 41(3): 111 - 113.
- [9] 雷正龙, 陈彦宾, 李颖, 等. 铝合金 CO_2 激光 - TIG 电弧复合焊接试验研究[J]. 航天制造技术, 2012, 8(4): 35 - 37.
- [10] 周立涛, 王旭友, 王威, 等. 激光扫描焊接工艺对铝合金焊接气孔率的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35(10): 65 - 68.
- [11] 张甫, 王威, 王旭友, 等. TC4 钛合金激光扫描焊接工艺参数对气孔的影响[J]. 焊接, 2016(2): 35 - 39.
- [12] 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, 61.
- [13] 王旭友, 王威, 林尚扬. 焊接参数对铝合金激光 - MIG 电弧复合焊缝熔深的影响[J]. 焊接学报, 2008, 29(6): 13 - 16.
- [14] 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, 7(33): 9 - 12.

第一作者简介: 雷振, 1981 年出生, 博士研究生, 高级工程师; 主要从事激光焊及激光 - 电弧复合焊接技术、焊接自动化及智能化装备开发等方面研究工作; 已发表论文 45 篇。