网络出版时间：2015-03-06 14:49
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1133.TG.20150306.1449.023.html

铝合金激光-MIG 复合焊中两种焊接方向对焊缝的影响

张世欣[1],苗海宾[2],何秀丽[2],甘政涛[2],王高飞[2],李 文[1],武秀媛[1],虞 钢[2]
(1.南车青岛四方机车车辆股份有限公司,山东 青岛 266111;2.中国科学院力学研究所 先进制造工艺力学实验室,北京 100190)

摘 要:以高铁用 6N01 铝合金为试验材料,采用激光-MIG 复合焊接方法,进行了焊接工艺试验,对两种不同的焊接方向进行了对比研究。对比分析了不同焊接方向下,焊缝形貌的变化、焊缝硬度和组织的改变;对两种条件下的焊缝进行了拉伸强度测试;经过 X 射线探伤,讨论了不同的焊接方向对气孔数量和分布的影响。结果表明:不同焊接方向下焊缝的成形、熔合区的晶粒生长取向、气孔分布不同,而硬度和拉伸强度差别不大。

关键词:6N01 铝合金;激光-MIG 复合焊;焊接方向
DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2015.03.023
中图分类号:TG456.7 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-3814(2015)03-0080-03

Influence of Welding Directions on Weld Seam of Aluminium Alloy by Laser-MIG Hybrid Welding

ZHANG Shixin[1], MIAO Haibin[2], HE Xiuli[2], Gan Zhengtao[2], WANG Gaofei[2], LI Wen[1]
WU Xiuyuan[1], YU Gang[2]
(1. CSR Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China; 2. Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: 6N01 aluminium alloy used in high-speed vehicles was welded by laser-MIG hybrid welding. The comparison was performed between two different welding directions. The weld formation alteration was analyzed under different welding directions. The microhardness and microstructure of the welded joints achieved by two welding directions are both comparatively studied. The tensile strength was tested and then compared. The number and distribution of the porosities were observed by X-ray inspection and then discussed. The results show that the weld formation, grain growth direction in fusion zone and porosity distribution are different under different welding directions, while the microhardness and tensile strength do not have much difference.

Key words: 6N01 aluminium alloy; laser-MIG hybrid welding; welding direction

近年来，铝及铝合金材料凭借其一系列的优良特性,已成为世界上最为广泛应用的材料之一,被应用于国民经济中各个领域。其中 6XXX 系铝合金因其适当的强度与良好的耐蚀性，成为结构用材中的常用材料[1]。但是,由于铝合金高热导率、大线膨胀系数、易产生气孔等特点,增大了铝合金焊接的困难[2]。激光-MIG 复合焊是将激光焊与 MIG 焊特点结合起来的一种焊接技术，激光热源与电弧热源协同作用，既发挥了各自的优势，又弥补了各自的不足。它具有高焊接速度、大熔深、好的接头适应性、熔池更稳定、冶金质量更高等特性[3]。

由于激光与电弧是侧轴复合，所以会有两种不同的焊接方向:激光前置与激光后置。激光前置时激光位于电弧前方,利用激光在工件上形成的“热点”牵引电弧，减小电弧引燃的阻力来防止电弧弧根的飘移,实现电弧的高速稳定焊接[4-5]。激光后置时激光利用电弧对工件的预热及电弧-激光热源之间的等离子相互作用来提高激光能量的吸收率，增强激光“匙孔”效应以获得更大的熔深、速度和桥接能力[6]。

文献[7]以 AA5754-H111 铝合金为试验材料，进行了激光-TIG 焊时不同焊接方向下熔深和缺陷的对比研究,得出了激光前置优于激光后置的结论。文献[8]对比了不同焊接方向下铝合金的焊缝表面

收稿日期:2014-11-14
基金项目:国家自然科学基金资助项目(11272316,11272317)
作者简介:张世欣(1973-),男,山东青岛人,高级工程师,从事工艺技术研发工作;E-mail:zhangshixin@cqsf.com
通讯作者:虞钢,研究员;电话:010-82544250;E-mail:gyu@imech.ac.cn

后,为了得到较好的表面质量,选取了激光前置的焊接方向为研究对象。文献[9]研究了激光-MIG 焊接铝合金 5083H116 时，不同的焊接方向对焊缝成形的影响，并分析了不同焊接方向作用的机理。实际上,不同焊接方向下,一方面会影响激光与电弧的相互作用,另外一方面会改变焊枪的焊法配置(激光前置时焊枪为左焊法配置，激光后置时焊枪为右焊法配置)。鉴此,本文从这两方面对不同焊接方向下焊缝形貌、硬度、组织和气孔缺陷进行了试验研究和分析，以加深对不同焊接方向下焊缝性能的认识和机理的探索。

1 试验材料与方法

试验用母材为 T5 状态的 6N01 铝合金板材,尺寸为 200 mm×100 mm×4 mm。焊丝型号为 ER5356,直径 1.2 mm。焊前先用丙酮对工件待焊区域周围进行清洗,然后用不锈钢丝刷打磨,以去除表面油污和氧化膜。

接头形式为加垫板的对接接头,坡口角度为 70°,钝边 1 mm,采用单面焊，背部加垫板强制成形,如图 1 所示。

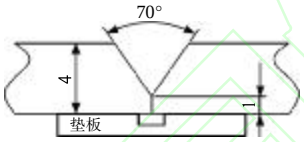


图 1 接头形式

Fig.1 The form of welded joint

试验所用激光器为 YAG 固体激光器，激光经光纤传至工件。焊机为 pulse MIG-500(Ⅲ)逆变式脉冲弧焊机。电弧与激光采取侧轴复合的形式,焊枪旁置于激光头,焊枪的倾角为 22°。试验运动装置为五轴框架机器人,重复定位精度 0.2 mm。复合焊头装配如图 2。焊接保护气由焊枪喷嘴供应,成分为 99.99%氩气。

图 2 焊枪与激光头的装配

Fig.2 Configuration of torch and laser head

焊接过程中仅改变焊接方向，保证其它参数都一样。主要焊接参数如表 1 所示。

焊接后,观察接头的表面形貌及熔透情况;对焊缝表面进行简单处理后,做 X 射线探伤,以观察焊缝气孔数量和分布;对焊缝进行切割打磨处理,观察焊缝的横截面,以对比焊缝的熔深和熔宽;抛光后,测定试样的硬度；使用 0.5%HF 酸溶液对试样进行腐蚀,观察焊缝组织。

表 1 主要焊接参数

Tab.1 Main welding parameters

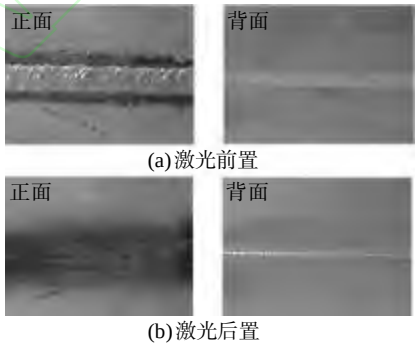
电流 /A	焊接速度 /(mm·s^{-1})	功率 /W	离焦量 /mm	光丝距 /mm	气流量 /(L·min^{-1})
140	10	900	-2	2	20

2 试验结果及讨论

2.1 焊缝宏观形貌

2.1.1 焊缝表面形貌

不同焊接方向下,焊缝的表面形貌如图 3 所示。可以发现,激光前置时,焊缝表面较光洁;激光后置时,焊缝表面附着一层黑色粉末,经分析,这是铝和镁蒸汽氧化后的产物。由于激光后置时,焊枪为右焊法配置,焊枪指向已焊部分,使得铝和镁蒸汽被吹向后方,冷却氧化后形成覆盖焊缝的黑色粉末。



(a)激光前置

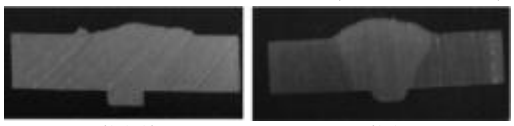
(b)激光后置

图 3 不同焊接方向下焊缝的表面形貌

Fig.3 Weld appearance by different welding directions

2.1.2 焊缝横截面形貌

图 4 为不同焊接方向下焊缝的横截面形貌。可以看出,激光前置时的余高小,熔宽大,激光后置时的余高较大,熔宽较小。原因是激光后置时,焊丝直指熔池,电弧将熔池中的液体金属向后吹,使得熔池向后堆积,造成窄而高的焊缝;而激光前置时,电弧吹力将熔池吹向待焊部位,使得焊缝熔宽较大[10]。同时,对比二者背部成形可以发现,激光前置时,液态



(a)激光前置 (b)激光后置

图 4 不同焊接方向下的焊缝截面

Fig.4 Weld cross section by different welding directions

金属填充到垫板凹槽,背部充分成形;而激光后置时液态金属没有充分填充到垫板凹槽中，说明激光后置时的熔透性不如激光前置。这是由于激光后置时,熔池在电弧力作用下向后堆积,匙孔未能穿透熔池,而激光前置时,激光直接作用于坡口底部,使得底部熔化更充分。

2.2 焊接接头的显微硬度和拉伸强度

激光后置与激光前置下的显微硬度和拉伸强度分别如图 5、6 所示。可见,不论哪种焊接方向下,焊缝区硬度均低于热影响区硬度。这是由于焊缝区经历了从液态凝固为固态的过程，形成了粗大的近铸态组织,硬度较低;热影响区经历的是过时效处理,析出相长大,间距变大,弥散强化效果降低,使得硬度值低于母材，但高于焊缝。由于激光后置时熔池较窄,所以焊缝区较激光前置时更小。

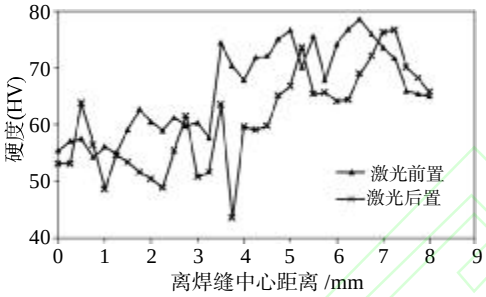


图 5 不同焊接方向下接头硬度分布

Fig.5 Microhardness distribution of weld joint by different welding directions

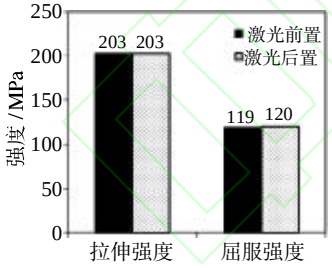


图 6 不同焊接方向下的拉伸强度

Fig.6 Tensile strength by different welding directions

两种焊接方向下，二者的硬度和强度值相差不大,这是由于硬度和强度跟线能量有密切关系,线能量越大,接头软化越严重,硬度值和强度值越低[11]。而不同焊接方向下，影响的只是热源作用于工件的形式，总的热输入相差不大所以两者的硬度值和强度值没有明显差别。

2.3 焊接接头的金相组织

为了分析两种焊接方向下焊缝与母材的熔合情况,对焊缝的熔合区进行分析。如图 7,不同焊接方向下的焊缝熔合边界晶粒均为沿母材晶粒取向的外延生长,在熔化边界之外,因为垂直于熔池边界的方向温度梯度最大、散热最快,晶粒沿此方向生长。由于熔池边界形状不一样，所以两种焊缝下晶粒生长的方向不一样。

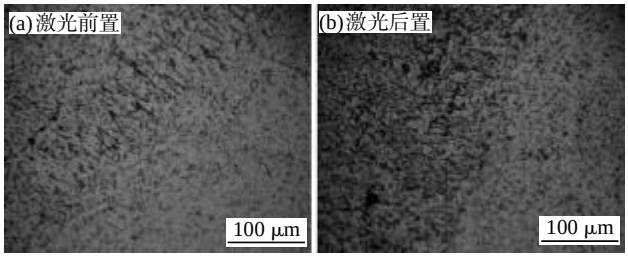


图 7 不同焊接方向下焊缝的熔合区

Fig.7 Fusion zone by different welding directions

2.4 焊缝的气孔分布

不同焊接方向下气孔的分布如图 8 所示。可看出,激光后置比激光前置焊缝的气孔数量要多,且出现了 ϕ2 mm 的大气孔。气孔产生一方面可能是激光前置时,激光作用于熔池前方,匙孔塌陷后形成的气泡有时间逸出；另一方面，激光后置时焊缝熔池较深,气泡不易逸出,造成气孔。虽然试验中未发现气孔对拉伸强度带来明显变化，但是气孔会成为裂纹策源地,降低疲劳强度。

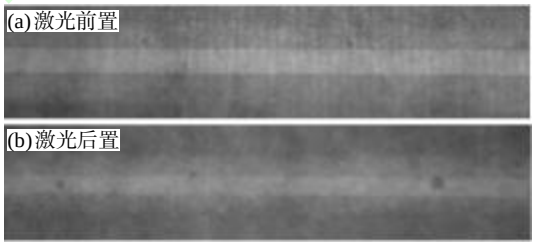


图 8 不同焊接方向下焊缝的气孔分布

Fig.8 Distribution of porosity by different welding directions

3 结论

对比研究了不同焊接方向下焊缝的性能与特点,得到结论如下：

（1）激光后置时,由于焊枪指向已焊部分,表面会形成铝镁氧化物的黑色粉末；电弧将熔池中的液体金属向后吹,使得熔池向后堆积,造成窄而高的焊缝;激光后置时,由于匙孔未能穿透熔池,所以熔透性不如激光前置。

（2）两种焊接方向下，虽然热源的作用形式不同,而实际线能量差别不大,所以焊缝的硬度值和拉伸强度基本一样。 (下转第 86 页)

期不宜过小也不宜过大。本试验研究中脉冲周期范围控制在 10~40 ms 区间内，比较 10、20、40 ms 的焊缝表面成型形貌，10 ms 成型质量最好，因此综合考虑选用 10 ms 的脉冲周期。

经上述分析，得到钛合金蒙皮骨架优化的工艺参数为：功率激光功率 1300 W，脉冲周期 10 ms，焊接速度 1 m/min。采用上述参数得到的蒙皮骨架结构件，经三坐标检测平面度对称度均小于 0.2 mm。

2.4 力学性能

采用优化后的工艺参数完成试样件的焊接，并按照相关的标准制作了拉伸试样，经拉伸测试，焊接接头的拉伸强度达到 800 MPa，剪切强度达到 650 MPa。对接、搭接断口试样如图 8 所示。从图 8 可以看出，试样均断裂在焊缝区域，说明焊缝仍然是整个焊接接头脆性最大的区域。

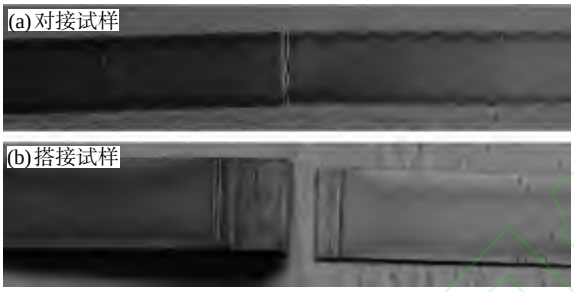


图 8 拉伸试样断口形貌

Fig.8 Fraction morphology of tensile samples

3 结论

（1）光纤激光焊接可以实现钛合金蒙皮骨架结构件高效优质连接。

（2）新型喷嘴式保护气嘴柔性、灵活性、保护效果明显优于传统的托罩式保护气嘴，喷嘴低部距离工件 3 mm，气流量达到 30 L/min 时，保护效果最佳。

（3）钛合金蒙皮骨架优化的工艺参数为：激光功率 1300 W，脉冲周期 10 ms，焊接速度 1 m/min。

（4）焊接接头的拉伸强度达到 800 MPa，剪切强度达到 650 MPa，蒙皮骨架试样件平面度对称度均小于0.2 mm。

参考文献：

[1] 刘佳佳，张艳苓，韩秀全，等. TC4 钛合金激光焊接头组织及超塑性能研究[J]. 热加工工艺，2013，42（21）：46-48.

[2] 邹世坤，汤昱，巩水利. 钛合金薄板激光焊接技术研究[J]. 焊接技术，2003，(5)：16-18.

[3] 张春艳，伍光凤，田中青. TC4 合金热氧化行为的研究[J]. 热加工工艺，2007，36(16)：32-35.

(上接第 82 页)

（3）不同焊接方向下焊缝熔合边界晶粒均为沿母材晶粒取向的外延生长；在熔化边界之外，晶粒垂直于熔池边界的方向生长，因为两种情况下熔池边界不一样，所以生长方向不同。

（4）激光后置比激光前置焊缝的气孔数量要多，且出现了 ϕ2 mm 的大气孔，原因一方面可能是激光前置时，激光作用于熔池前方，匙孔塌陷后形成的气泡有时间逸出；另一方面，激光后置时焊缝熔池较深，气泡不易逸出，造成气孔。

参考文献：

[1] 潘复生，张丁非. 铝合金及应用[M]. 北京：化学工业出版社，2006：59-61.

[2] Tan Bing, Wang Youqil. Study of the laser-MIG hybrid welded Al-Mg alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, S4: 115-119.

[3] Xu P Q, Ren J W, Zhang P L, et al. Analysis of formation and interfacial WC dissolution bBehavior of WC-Co/invar laser-TIG welded Joints [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 22(2): 613-23.

[4] Hu B G, Den Ouden. Laser induced stabilisation of the welding arc [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(1): 76-81.

[5] Mahrle A, Rose S, Schnick M, et al. Stabilisation of plasma welding arcs by low power laser beams [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18(4): 323-328.

[6] 郭亮，王方，张庆茂，等. 激光-MIG 复合焊接 304 不锈钢工艺研究[J]. 激光技术，2013，(6)：781-785.

[7] Casalino G, Campanelli S L, Dal maso U, et al. Arc leading versus laser leading in the hybrid welding of aluminium alloy using a fiber laser [J]. Procedia CIRP, 2013, (12): 151-156.

[8] 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.

[9] 高志国，黄坚，李亚玲，等. 激光-MIG 复合焊中激光与电弧前后位置对焊缝成形的影响[J]. 焊接学报，2008，(12)：69-73.

[10] 高忠民. 熔化极气体保护焊 [M]. 北京：金盾出版社，2013：49.

[11] Wu S C. Porosity, element loss, and strength model on softening behavior of hybrid laser arc welded Al-Zn-Mg-Cu alloy with synchrotron radiation analysis [J]. Welding Research, 2013, 92: 64-70.