

6082-T6铝合金中厚板MIG焊与激光-MIG复合焊工艺和数值模拟对比研究

邓望红¹, 陈顺², 廖宁宁², 林敏², 王艳淼²

1. 中车株洲电力机车有限公司 湖南株洲 412000

2. 株洲国创轨道科技有限公司 湖南株洲 412000

摘要: 通过采用MIG焊与激光-MIG复合焊两种不同的焊接方法, 对6082-T6铝合金中厚板分别进行焊接, 研究两种焊接工艺对焊缝表面形貌、微观组织、显微硬度、拉伸性能以及变形量的影响。结果表明: 相对于MIG焊, 激光-MIG复合焊焊缝熔宽较窄, 焊缝形貌较美观; 激光-MIG复合焊和MIG焊的焊缝熔合区显微组织大部分均为等轴树枝晶, 而MIG焊焊缝热影响区大于激光-MIG复合焊接; 激光-MIG复合焊和MIG焊接头的热影响区硬度最低, 并且激光-MIG复合焊接接头的平均硬度高于MIG焊接接头; MIG焊接工艺和激光-MIG复合焊接工艺的焊缝抗拉强度分别为228.7MPa和256MPa。激光-MIG复合焊焊缝的抗拉强度达到母材的76.4%。通过数值模拟和试验相结合的方式, 得出激光-MIG复合焊比MIG焊的变形量小。

关键词: 6082-T6铝合金; 激光-MIG复合焊; MIG焊接; 显微组织; 力学性能; 数值模拟分析

1 序言

6082-T6铝合金具有良好的物理和化学性能, 其质量轻、耐蚀性好、比强度高、热稳定性好等优点, 广泛应用于汽车制造、航空航天、轨道交通、电子等行业^[1-4]。在轨道交通零部件制造领域, 对于6082-T6铝合金的焊接, 主要是采用多层多道的传统电弧焊接方法, 这种方法焊接效率较低, 加工精度不高, 并且由于热输入量大, 工件被反复加热, 所以使得工件变形较大, 严重影响了焊缝的性能。激光-MIG复合焊是一种新的焊接方法, 它既具有激光高能量密度的优势, 又能发挥电弧高热输入的作用, 最终得到的焊缝熔深较大, 焊接接头的质量较高^[5, 6]。

近年来, 激光-MIG复合焊已经成为了激光焊接领域的一个研究热点。韩晓辉等采用激光-MIG复合焊对6106-T6铝合金进行焊接, 对比了光纤激光-冷金属过渡焊、光纤激光-变极性钨极惰性气体保护焊、光纤激光-熔化极惰性气体保护焊三种复合焊接方法得到的焊缝, 并分析得出三种复合焊接方法得到的焊缝成形良好、无明显缺陷, 但是激光-MIG复

合焊接头的间隙适应性较好^[7]。季卫东等对6005A铝合金采用双层激光-MIG复合焊方法进行焊接, 研究发现激光-MIG复合焊方法得到的焊接接头拉伸性能得到了较大的提升^[8]。张林等采用激光-MIG复合焊对7A52厚板铝合金进行焊接, 并对焊接接头进行显微组织观察和力学性能分析, 结果表明, 相比于传统电弧焊接, 焊缝效率提高了将近两倍, 并且激光和电弧作用区域的不同, 硬度和抗拉强度也有所差异^[9]。STEEN通过对比分析研究也提出了激光-电弧复合焊相比于单激光焊接具有一定的优势^[10]。

本文针对10mm厚6082-T6铝合金, 采用激光-MIG复合焊和MIG焊接工艺, 结合工艺试验和数值模拟, 对比分析两种焊接接头的显微组织、力学性能及变形量。

2 试验材料和研究方法

2.1 试验材料

试验采用10mm厚6082-T6铝合金板材作为母材, 保护气体为纯度99.999%的高纯氩气, 采用 ϕ 1.2mm的ER5087铝合金焊丝, 6082-T6铝合金板材和ER5087焊丝的化学成分见表1。激光-MIG复合

焊采用对接不开坡口，MIG焊采用对接开设135°坡口，焊前使用酒精将工件表面的油污和灰尘清理干净。

本文采用IPG公司生产的6.0kW光纤激光器实施焊接，如图1所示。激光器的最大功率为6.0kW、波长为1.07μm、聚焦得到的光斑直径为0.48mm。采用Fronius公司生产的TPS4000 CMT Advanced焊机，焊接过程中采用的焊接参数来自焊机内置专家数据库，分别将送丝速度、焊接电流、电弧电压作为一元化参数进行调控，以送丝速度作为参数代表，保护气流量为20L/min，焊接参数见表2。

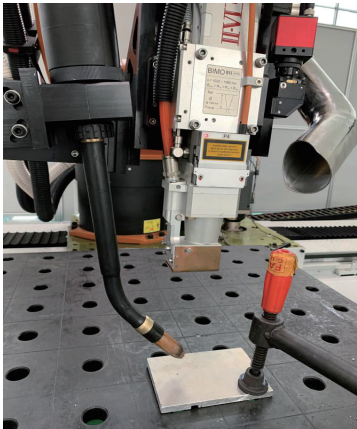


图1 激光-MIG复合焊接试验设备

表1 焊接材料的化学成分（质量分数）（%）

材料	Si	Mg	Cr	Ti	Cu	Zn	Fe	Mn	Al
6082-T6	0.7~1.3	0.6~1.2	0.25	0.10	0.10	0.20	0.50	0.4~1.0	余量
ER5087	0.25	4.5~5.5	0.05~0.20	0.06~0.20	0.10	0.10	0.40	0.05~0.20	余量

表2 焊接参数

焊接方法	激光功率/kW	离焦量/mm	焊接速度/m·min ⁻¹	送丝速度/m·min ⁻¹	焊接电流/A	电弧电压/V
激光-MIG复合焊接	4	-2	0.72	8	178	22
MIG焊接	—	—	0.42	—	288	30

2.2 试验过程

焊后通过金相切割将两种试样切割成10mm×10mm×10mm的样品，分别经过打磨、抛光以及超声波清洗，使用凯勒试剂进行腐蚀，清洗过后使用OLYMPUS DSX110超景深显微镜对横截面的宏观形貌进行观察。采用OLYMPUS GX71金相显微镜对横截面的显微组织进行观察，并通过Q60A维氏硬度计进行硬度检测。拉伸试验按GB/T 228.1—2010标准在电子万能试验机上完成，拉伸试样尺寸如图2所示。

在焊接过程中，变形主要分为挠曲变形和角变形。本文将焊后试板置于5mm厚的基板上，用量尺分别测量边变形的最大值作为挠曲变形结果。

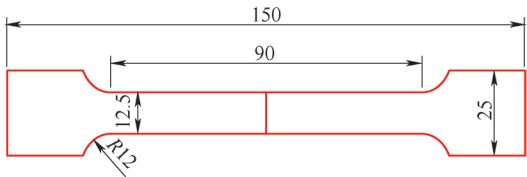
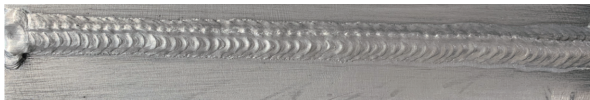


图2 拉伸试样尺寸

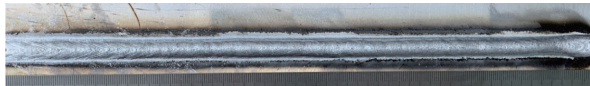
3 试验结果与分析

3.1 焊缝表面形貌

图3分别是MIG焊和激光-MIG复合焊接6082-T6铝合金的焊缝宏观形貌，二者的横截面形貌如图4所示。MIG焊接采用三层四道的方法完成焊接，并且在实施对接焊之前将对接处开设了135°的坡口。从图3a可以看出，MIG焊接的焊缝熔宽较大，表面呈现鱼鳞状。在MIG焊接过程中，由于采用分层多道焊，熔池的熔融金属流动均匀平稳，焊缝表面较为平整，如图4a所示。激光-MIG焊接接头熔宽较窄，焊缝成形饱满，焊缝表面无明显缺陷形成，如图4b



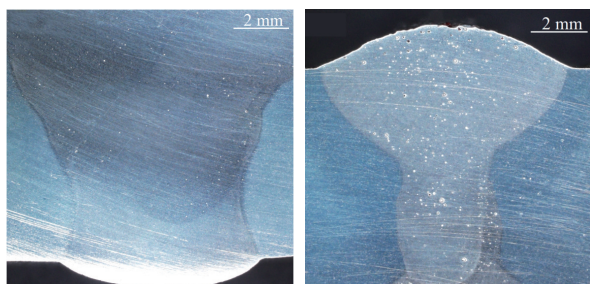
a) MIG焊接



b) 激光-MIG复合焊接

图3 焊缝宏观形貌

所示。但是,相比于MIG焊接,由于激光-MIG复合焊接速度较大,熔池凝固的时间较短,导致气体来不及逸出,从而遗留在焊缝中形成气孔,并且气孔大多集中于焊缝的上表面,如图4b所示。

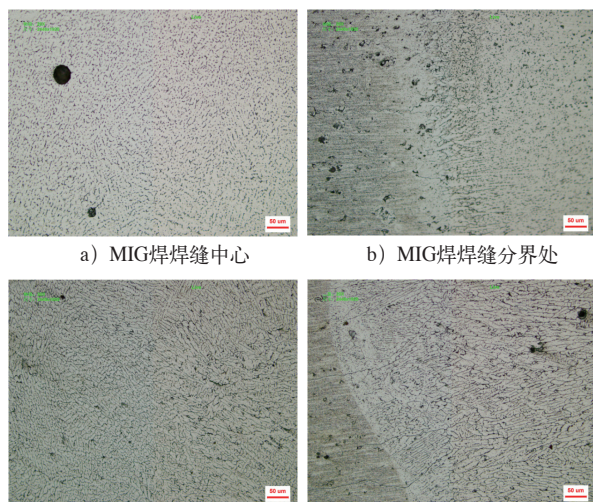


a) MIG焊接 b) 激光-MIG复合焊接

图4 焊缝横截面形貌

3.2 焊缝微观组织

图5为MIG焊与激光-MIG复合焊的焊缝显微组织,从图中可以明显分辨出焊缝处熔合区、热影响区以及母材。MIG焊接接头熔合区的显微组织大部分为等轴晶(见图5a),在焊缝分界处靠近焊缝熔合区一侧的组织主要为粗大的柱状晶,其生长的方向为散热方向(见图5b),并且MIG焊接接头的热影响区大于激光-MIG复合焊,这是为了保证焊缝的形成,因MIG焊接的热输入量大且持续时间较长导致的。特别是在MIG焊接接头的熔合区,有气孔生成。激光-MIG复合焊接接头熔合区的组织也主要分布的是等轴晶(见图5c),从熔合区到熔合线,晶粒形貌由等轴晶转变为柱状晶,晶粒尺寸增大,并且在熔合区,由于焊接过程中熔池中的氢气未能及时逸出,故也形成了少量的小气孔,如图5d所示。



a) MIG焊缝中心 b) MIG焊缝分界处

c) 激光-MIG复合焊缝中心 d) 激光-MIG复合焊缝分界处

图5 焊缝的微观组织

3.3 显微硬度

图6和图7分别是MIG焊和激光-MIG焊焊缝横截面的显微硬度分布情况。由图6可知,MIG焊焊缝熔合区平均显微硬度为76.7HV。熔合区显微硬度高于母材,热影响区的显微硬度最低,这是因为铝合金在焊接时,热影响区出现“软化”问题,并且从显微组织也可以看出,焊缝熔合区的晶粒较细^[11]。从图7可以看出,激光-MIG复合焊焊缝熔合区平均显微硬度为91.6HV,高于MIG焊接接头熔合区的硬度值,这是因激光-MIG复合焊接接头冷却速率高于MIG焊而导致熔合区晶粒比较细小。同样地,热影响区的硬度最低。无论是MIG焊焊缝还是激光-MIG复合焊焊缝,在熔合区,焊缝中心的硬度均低于两侧,这是因为热源中心的热输入量最大,冷却速率低于两侧,因此晶粒尺寸较大,硬度偏低。但是,相比于母材和热影响区,熔合区的硬度均最大,这主要是由于焊丝的补充,从而使得焊缝硬度得到提高。

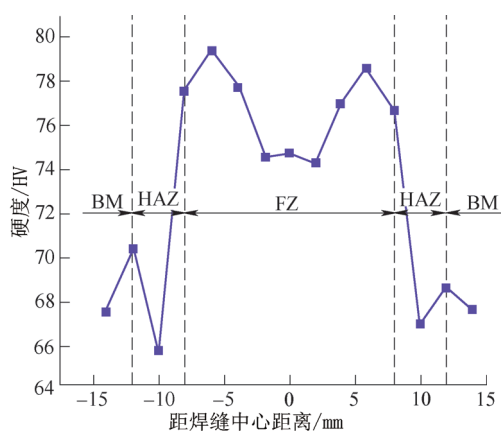


图6 MIG焊接接头的显微硬度

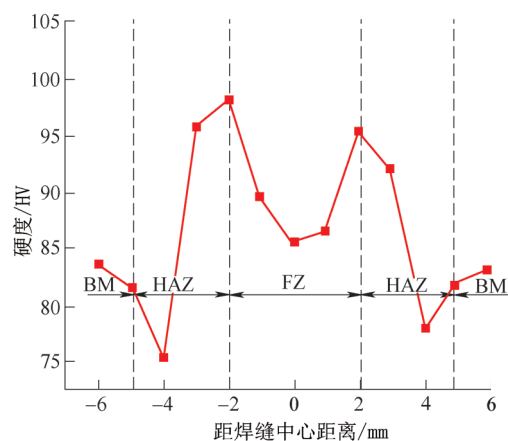


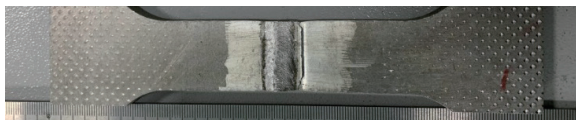
图7 激光-MIG复合焊接接头的显微硬度

3.4 拉伸性能

为了检测焊缝的抗拉强度,采用横向拉伸试验进行测量,试验结果见表3。MIG和激光-MIG复合焊接工艺的平均抗拉强度分别为228.7MPa和256MPa,母材的抗拉强度为335MPa。MIG焊接和激光-MIG复合焊接的焊缝抗拉强度分别达到母材的68.2%和76.4%,激光-MIG复合焊接和MIG焊接试样拉伸断裂的位置均位于热影响区(见图8)。激光-MIG复合焊接接头的抗拉强度大于MIG焊接接头,这主要是MIG焊热输入量较大,镁、锌元素的烧损比较严重,并且由于MIG焊缝内部的气孔孔径较大,从而使得焊缝较易形成裂纹,最终导致接头的抗拉强度降低^[12]。

表3 拉伸试验结果

序号	焊接方法	抗拉强度 /MPa	平均抗拉强度 /MPa	断裂位置
1	激光-MIG复合焊接	256.2	256.0	HAZ
2		253.3		
3		258.4		
4	MIG焊接	231.5	228.7	HAZ
5		228.6		
6		225.8		



a) 激光-MIG复合焊



b) MIG焊

图8 拉伸试件断裂形貌

4 数值模拟

4.1 网格划分

采用多物理场耦合仿真软件COMSOL进行有限元计算,工件的几何尺寸为300mm×150mm×10mm,为了提高计算效率和减小计算成本,将对接面进行对称处理。在网格处理方面,将焊缝和热影响区划分的网格尺寸设置较小,远离焊缝处的网格尺寸适当加大。网格模型如图9所示。

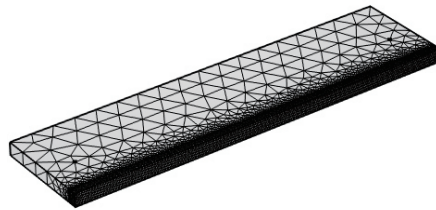


图9 三维网格实体模型

4.2 边界条件

在传热模块中,焊接的初始温度为20℃,焊接过程中,工件与外界存在对流换热和传导热,因此除了工件底部,其他面均为对流热通量边界条件,表面为对外界辐射边界条件。

在固体力学模块中,由于约束边界直接对焊后工件的变形和残余应力影响较大,因此在本次模拟中将工件视为刚体来研究。在工件表面选择4个节点分别进行位移限制,并且4点呈矩形分布,如图10所示。

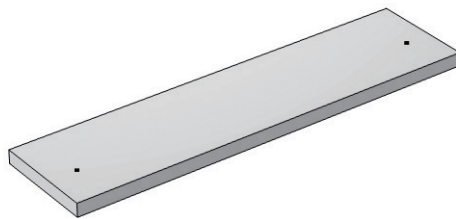
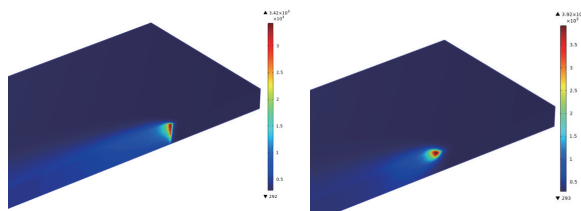


图10 工件固定约束分布

4.3 热源

MIG焊接采用的热源模型为双椭球体热源模型,而激光-MIG复合焊接采用热流峰值指数递增-锥体热源^[13]。激光-MIG复合焊和MIG焊温度场如图11所示。根据热输入量公式(1)可以得出:当激光功率为4.0kW,焊接速度为0.72m/min时,激光-MIG复合焊的热输入量为8.78kJ/mm,MIG焊的热输入量为17.49kJ/mm。

$$Q = \frac{(U \times I \times \eta)}{v} \quad (1)$$



a) 激光-MIG复合焊接

b) MIG焊接

图11 焊接温度场

4.4 变形场模拟结果与实测结果对比

图12为焊接结束后激光-MIG复合焊和MIG焊接的变形位移云图和实测结果。由于在设定边界条件时,表面上4个点为固定约束,因此未被约束的角出现了较大位移。在焊接过程中,MIG焊由于焊接速度慢,热输入量大,因此最大变形为1.98mm,并且焊件主要的变形都集中于焊缝及其附近(见图12a)。从图中可以看出,变形位移云图以焊缝纵向中心对称分布,图12b是MIG焊缝纵向中心位置实际变形情况,经测量变形值为2.2mm;而激光-MIG复合焊的最大变形量仅有1.2mm。从图12c中可以看出,激光-MIG复合焊与MIG焊变形位移场形貌类似,最大位移也出现在焊缝区域及附近,不过Z轴方向的位移大多<1mm,变形较小,而实际测量值约

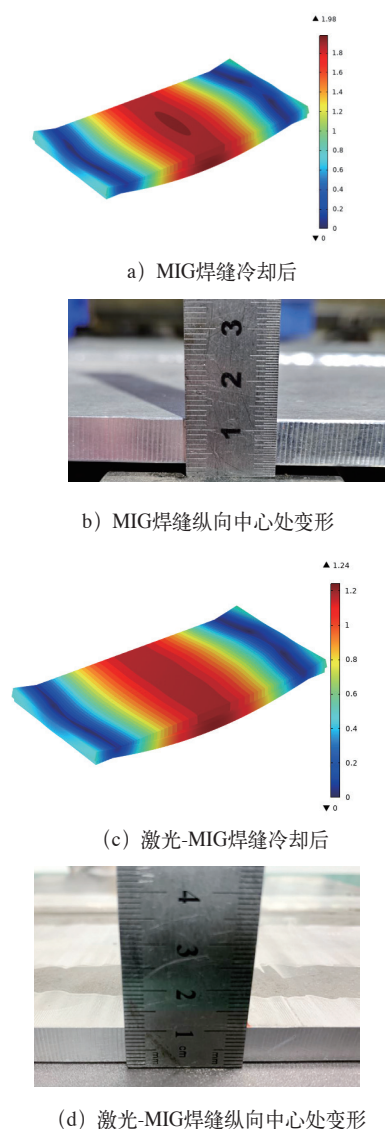
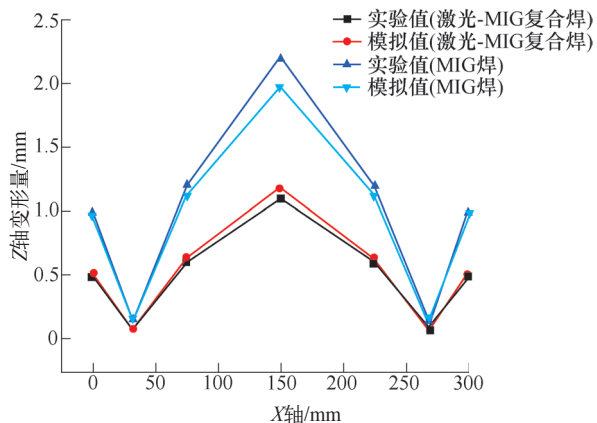


图12 焊接变形模拟与试验测量结果对比

为1.1mm(见图12d)。通过图13也可以看出,模拟结果与实测结果十分相近,并且激光-MIG复合焊比MIG焊变形量小,与实际情况相吻合。



5 结束语

1) 激光-MIG复合焊接接头相对于MIG焊接接头而言,焊缝的熔宽更窄,表面成形较好,热输入量较小。

2) MIG焊接接头的热影响区比激光-MIG复合焊接接头的热影响区大,在激光-MIG焊和MIG焊焊缝的熔合区均大部分分布的是等轴晶,并且从熔合区到熔合线,晶粒形貌由等轴晶转变为柱状晶,晶粒尺寸增大。

3) MIG焊接接头和激光-MIG焊接接头热影响区显微硬度均为最低,并且激光-MIG复合焊接接头熔合区的硬度值比MIG焊接接头大,这是由于激光-MIG复合焊接接头冷却速率高于MIG焊,导致熔合区晶粒比较细小。

4) MIG焊接和激光-MIG复合焊接的焊缝抗拉强度分别为228.7MPa和256MPa,激光-MIG焊接接头的抗拉强度可达基体的76.4%。

5) 结合数值模拟和试验测量的方法,对两种焊接方法的变形量进行了对比,模拟结果与实测结果十分相近,并且激光-MIG复合焊比MIG焊变形量小。

参考文献:

- [1] 冉国伟,宋永伦,闫思博,等.2219 铝合金复合热源焊接工艺及接头性能[J].焊接学报,2011,32(9):25-29.
- [2] 鲁二敬,钮旭晶,侯振国,等.6082-T6铝合金大厚

超声波振动锤击法消减焊接残余应力的应用

倪春华, 叶俊豹

上海振华重工(集团)股份有限公司 上海 200123

摘要: 主要介绍焊接残余应力和超声波振动锤击法消减焊接残余应力的原理及应用, 并结合实际生产介绍超声波振动锤击法消减残余应力在厚板焊接中的作用。

关键词: 超声波振动锤击法; 焊接残余应力; 厚板焊接

1 序言

我国是钢结构焊接生产大国, 随着焊接技术的不断进步, 对钢结构的焊接质量要求越来越严格, 为此焊后对消除或降低焊接残余应力的工艺需求也同步提高。超声波振动锤击工艺是一种近年来新发展起来的焊后处理消应力技术, 具有能耗低、效率高特点。在大厚板的施焊中, 因为构件刚性较大, 所以在构件内部会产生很大的焊接残余应力。

由于构件内部焊接残余应力的存在, 随着时间及环境变化等因素的影响, 会直接影响到结构件的静载、动载、疲劳和压曲强度, 以及断裂柔韧性、尺寸稳定性及抗腐蚀能力等性能, 所以钢结构制作过程中对消除或降低焊道残余应力的摸索就显得极其关键。本文以上海振华重工(集团)股份有限公司生产的新加坡龙门吊的厚板焊接为对象, 研究超声波振动锤击法对厚板焊缝应力的影响, 为后续生产

度板搅拌摩擦焊接头疲劳性能的研究[J].金属加工(热加工), 2019(9): 8-10.

[3] TAN C, YANG J, ZHAO X, et al. Influence of Ni coating on interfacial reactions and mechanical properties in laser welding-brazing of Mg/Ti butted joint[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 764: 186-201.

[4] QIN G, LEI Z, SU Y, et al. Large spot laser assisted GMA brazing-fusion welding of aluminum alloy to galvanized steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2684-2692.

[5] 雷振, 秦国梁, 林尚扬. 激光与MIG/MAG复合热源焊接工艺发展概况[J]. 焊接, 2005(9): 9-13.

[6] 吴志明, 李金龙, 彭章祝. 轨道交通车体用铝合金材料及其焊接技术[J]. 金属加工(热加工), 2021(2): 5-10.

[7] 韩晓辉, 李帅贞, 毛镇东, 等. 高速列车用6106-T6铝合金型材激光-电弧复合焊接工艺及接头性能[J].

中国激光, 2019, 46(12): 86-94.

[8] 季卫东, 陈辉. 10mm厚6005A铝合金激光-MIG复合焊接[J]. 电焊机, 2014, 44(9): 128-132.

[9] 张林, 冯曰海, 刘思余, 等. 7A52厚板铝合金激光-MIG复合焊接组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(3): 19-23.

[10] STEEN W M, EBOO M. Arc augmented laser welding[J]. Metal Construction, 1979, 11(7): 332-333.

[11] 刘敬萱, 沈健, 李锡武, 等. 6005A-T5铝合金搅拌摩擦焊接头组织与疲劳性能[J]. 材料导报, 2021, 35(2): 2092-2097.

[12] 王磊, 许雪宗, 王克鸿, 等. 中厚板7A52铝合金光纤激光焊接接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2020, 41(10): 28-31, 37, 98-99.

[13] 胥国祥, 郭庆虎, 胡庆贤, 等. 中厚板铝合金光纤激光+MIG复合热源焊残余应力的数值分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 77-83.