

焊接参数对 7075/6061 铝合金激光-MIG 复合焊 接头成形及组织性能影响研究

王刚¹, 曹江海^{1,2}, 田瑞^{3*}, 谭远航³, 薛皓月^{1,2}, 姚宗湘¹, 尹立孟¹

(¹重庆科技大学机械与智能制造学院, 重庆 401331; ²广东省科学院中乌焊接研究所, 广东 广州 510651;

³深圳市宝辰鑫激光科技有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要 采用 1.0%(体积分数)TiC 纳米颗粒的 7075 焊丝对厚度 $\delta=3$ mm 的 7075-T6 和 6061-T6 异种铝合金进行激光-MIG 复合焊接, 对比分析不同焊接参数对焊缝成形的影响, 并研究最佳焊接参数下接头微观组织及力学性能。结果表明: 随着焊接电流增加, 焊缝熔深、熔宽均增大, 气孔率先减少后增加; 随着焊接速度增加, 焊缝熔深、熔宽均减小, 气孔率先增加后减少; 随着激光功率增加, 焊缝熔深先减少后增大, 熔宽逐渐增大, 气孔率先减少后增加; 在焊接电流 $I=153$ A、焊接速度 $v=0.1$ m/s、激光功率 $P=4.1$ kW 最佳参数下, 接头气孔率约为 0.17%; 焊缝组织为细小的等轴枝晶, 焊接接头维氏硬度最低点出现在 6061 侧热影响区, 为 62.4 HV, 其宽度大约为 3 mm; 焊接接头 $R_m=208.6$ MPa, $R_{p0.2}=152.5$ MPa, $A=4.7\%$, 断口显现出明显的韧性断裂特征。

关键词 铝合金; 激光-MIG 复合焊; 焊接参数; 热影响区

中图分类号: TG457.14

文献标志码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20264604.087

Study on Forming and Joint Microstructure Properties of Laser-MIG Hybrid Welding of 7075/6061 Aluminum Alloys with Nanoparticle Reinforcement

Wang Gang¹, Cao Jianghai^{1,2}, Tian Rui^{3*}, Tan Yuanhang³, Xue Haoyue^{1,2}, Yao Zongxiang¹, Yin Limeng¹

(¹School of Mechanical and Intelligent Manufacturing, Chongqing University of Science and Technology,

Chongqing 401331, China; ²Zhongwu Welding Research Institute, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510651,

Guangdong, China; ³Shenzhen Baochenxin Laser Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract Laser-MIG composite welding of $\delta=3$ mm 7075-T6 and 6061-T6 dissimilar aluminum alloys was carried out by using 1.0 vol. % TiC nanoparticles of 7075 wire, the effects of different welding parameters on weld shaping were comparatively analyzed and the microstructure and mechanical properties of the joints under the optimal welding parameters were investigated. The results show that: with the increase of welding current, the weld depth and width increase, and the porosity decreases first and then increases; with the increase of welding speed, the weld depth and width decrease, and the porosity increases first and then decreases; with the increase of laser power, the weld depth decreases first and then increases, and the width gradually increases, and the porosity decreases first and then increases; with the increase of laser power, the weld depth decreases first and then increases, and the porosity decreases first and then increases; in the case of the laser-MIG composite welding with the welding current $I=153$ A, the welding speed $v=0.1$ m/s and the laser power $P=4.1$ kW optimal parameters, the joint porosity rate of about 0.17%; weld organization for the fine equiaxial dendrites, welded joint Vickers hardness minimum appeared in the 6061 side of the heat-affected zone, 62.4 HV, the width of which is about 3 mm; welded joints $R_m=208.6$ MPa, $R_{p0.2}=152.5$ MPa, $A=4.7\%$, the fracture shows a clear ductile fracture characteristics.

Key words aluminum alloy; laser-MIG composite welding; welding parameter; heat affected zone

收稿日期: 2024-06-16; 修回日期: 2024-07-17

基金项目: 重庆市自然科学基金(CSTB2022NSCQ-MSX1577, CSTB2022NSCQ-MSX1236)

作者简介: 王刚(1973—), 男, 硕士, 副教授。研究方向为异种金属先进连接技术。E-mail: wwq_16x@163.com

* 通信作者: 田瑞(1995—), 男, 硕士研究生。研究方向为轻质合金激光-MIG 复合高效连接与电弧增材。E-mail: tianrui0208@163.com

0 引言

6061 铝合金因其优异的成形性和连接性、良好的耐腐蚀性等众多理想性能而受到广泛关注^[1]。7075 铝合金是一种 Al-Zn-Mg-Cu 合金,由于其密度低、比强度高、机械加工性好等优点,常用于航空航天和汽车零部件等制造^[2]。铝合金焊接主要有钨极惰性气体(Tungsten inertgas welding, TIG)焊接、搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)和激光焊接等方法^[3],广泛应用于同种和异种铝合金焊接^[4-6]。FSW 虽然可实现铝合金的良好连接,但存在以下几方面的局限:焊接速度较慢导致焊接过程较长;FSW 的设备庞大且昂贵;不能够对所有的焊接结构适用;必要时焊接工艺上需要添加“引弧板或收弧板”;焊接过程中需对焊缝施加巨大的顶锻压力^[7-8]。

与搅拌摩擦焊相比,熔化焊接具有普适性强、操作简便等优点,是工业领域应用最广泛的焊接技术。Lakshminarayanan 等^[9]采用钨极氩弧焊(gas tungsten arc welding, GTAW)和气体金属电弧焊(gas metal arc welding, GMAW)对 AA6061 铝合金分别进行焊接,发现两种接头力学性能、抗热裂性均较差。因此,具有效率高、熔深大、变形小、间隙桥接能力高等优点的激光-MIG 复合焊在铝合金焊接中引起了广泛关注^[10]。Yan 等^[11]对 5 mm 厚的 1420Al-Li 合金板进行激光-MIG 复合焊接,能够获得高质量焊接接头,其抗拉强度为 223 MPa,达到了母材强度的 57%。Wang 等^[12]对 5083 和 6005A 异种铝合金进行激光-MIG 复合焊接,发现异种接头的抗拉强度达 219.8 MPa,比 6005A 接头高 11.7%。虽然铝合金进行激光-MIG 复合焊后能获得性能较好的

焊接接头,但焊接过程中容易受到 H₂ 及水蒸气、激光小孔易塌陷以及匙孔壁受力不均等影响而产生气孔等缺陷^[13-14];同时,铝合金进行激光-MIG 复合焊在焊接过程中也极易出现热裂纹,且焊接参数等对热裂纹敏感性有直接的影响^[15]。为此,Liu 等^[16]对 A7N01-T6 铝合金进行激光-MIG 复合焊接,通过对比不同焊接工艺参数下接头焊缝成形,结果表明,在激光功率 3.5 kW、焊接速度 4 m/min、焊接电流 140 A 等参数下,能获得高质量激光-MIG 复合焊接接头。Zhao 等^[17]采用激光-MIG 复合焊对 5A06 铝合金进行焊接,研究了激光、MIG 和复合热输入对焊接接头宏观形貌和气孔率的影响,表明适当的工艺参数可以减少飞溅、气孔、裂纹等缺陷的产生。

综上所述,焊接参数的控制能有效减少或避免缺陷的产生,因此,深入探讨焊接工艺参数对于提高异种铝合金接头焊接质量至关重要。本文采用含量为 1.0%(体积分数,下同)TiC 纳米颗粒的 7075 铝合金焊丝对 7075/6061 铝合金进行激光-MIG 复合焊接,对比分析不同焊接参数对接头成形的影响规律,并在最佳焊接参数下,对 7075/6061 激光-MIG 复合焊接接头进行显微组织观察和力学性能试验。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验材料为厚度 $\delta=3$ mm 的 7075-T6 铝合金和 6061-T6 铝合金板件,焊丝为在 7075 铝合金焊丝基础上添加 1.0% TiC 纳米颗粒的 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金焊丝,焊丝直径 $\Phi=1.2$ mm,母材成分与焊丝成分如表 1 所示,母材室温下力学性能如表 2 所示。

表 1 母材与焊丝化学成分质量百分比

Table 1 Mass percentage of chemical composition of base material and welding wire

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
AA7075	0.40	0.461	1.60	0.30	2.65	0.25	5.41	0.20	
AA6061	0.62	0.460	0.28	0.05	1.08	0.16	0.02	0.03	Bal.
7075TiC weld	—	—	1.80	3.20	—	—	8.60	1.80	

表 2 母材室温力学性能

Table 2 Mechanical properties of base material at room temperature

Mechanical properties	Tensile strength R_m /MPa	Yield strength $R_{p0.2}$ /MPa	Post-break elongation A
7075-T6	548	491	7.2
6061-T6	331	296	22.4

1.2 实验设备

实验采用宝辰鑫 MFSC 6000M 连续光激光器,输出功率 6 000 W,波长 1 070 nm,激光焦点直径 0.5 mm。弧焊机采用的设备为 Fronius TPS 5000,该弧焊机采用一元化控制,即改变焊接电流自动匹配焊接电压与送丝速度。复合焊接枪头采用同轴复合方式,激光与电弧固定夹角为 30°,机器人采用华数机器人,其最大工作范围 2 400 mm,重复定位精

度 0.07 mm。激光沿焊接方向偏转 75°,离焦量 F_d 为 -2 mm,电弧偏转 45°,焊丝干伸长 L 为 12 mm,激光与电弧之间的热源距离 D_{LA} 为 3 mm,如图 1 所示。保护气采用 99.99% 的 Ar 气,熔池保护气由电弧枪头保护罩吹出,气流量为 25 L/min,底保护气流量为 20 L/min。为了研究复合焊接参数对焊接接头成形性能的影响,采用正交实验法,实验参数如表 3 所示。

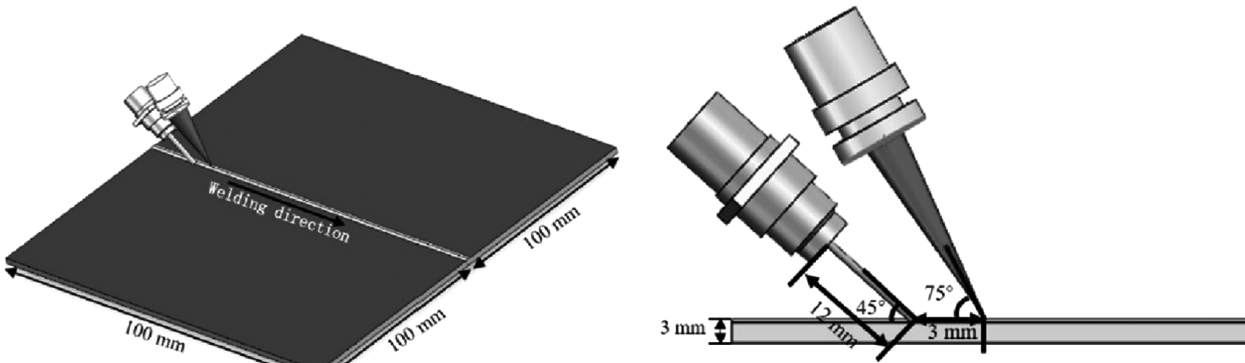


图 1 复合焊接示意图
Fig.1 Schematic diagram of composite welding

表 3 复合焊接工艺参数
Table 3 Composite welding process parameters

Serial number	Defocusing quantity/mm	Welding current/A	Welding voltage/V	Welding speed/(m · s ⁻¹)	Laser power/kW
1 [#]	-2	121	18.1	0.10	4.1
2 [#]	-2	153	20.0	0.10	4.1
3 [#]	-2	188	20.9	0.10	4.1
4 [#]	-2	218	21.7	0.10	4.1
5 [#]	-2	153	20.0	0.04	4.1
6 [#]	-2	153	20.0	0.06	4.1
7 [#]	-2	153	20.0	0.08	4.1
8 [#]	-2	153	20.0	0.10	3.9
9 [#]	-2	153	20.0	0.10	4.3
10 [#]	-2	153	20.0	0.10	4.5

1.3 实验方法

焊前用砂纸打磨待焊铝合金表面氧化膜,并用无水乙醇(C₂H₆O)清洗表面污渍。焊后对焊件进行线切割,采用体式显微镜对接头焊缝区进行观察,使用 ImageJ 对焊缝尺寸、气孔的面积及焊缝面积进行测量,如图 2 所示,计算接头中的气孔率(接头焊缝中气孔总面积占接头焊缝总面积的百分比)。使

用 Keller's 试剂(95% H₂O + 2.5% HNO₃ + 1.5% HCl + 1.0% HF)对精抛好的试样表面晶界进行蚀刻,采用基恩士 VHX-7000 光学显微镜(optical microscope, OM)观察试样微观晶体结构。使用 WilsonVH1202 硬度计从 7075 母材到 6061 母材的顺序进行硬度测试,测试点间隔 0.5 mm,设定加载力为 200 gf(约 2 N),加载时间 10 s。使用万

能试验机对拉伸试样进行拉伸实验,试样尺寸如图 3 所示,拉伸速率 0.5 mm/min,并使用扫描电

子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 对断口形貌进行观察。

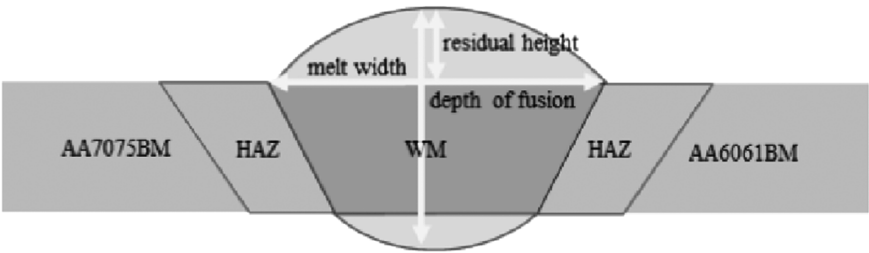


图 2 焊缝横截面示意图
Fig. 2 Schematic diagram of weld cross section

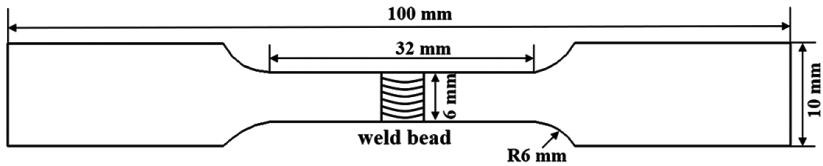


图 3 拉伸试样尺寸示意图
Fig. 3 Schematic diagram of tensile specimen dimensions

2 实验结果与分析

2.1 焊接电流对焊缝成形的影响

图 4 和图 5 分别为焊接速度 $v=0.1$ m/s、激光功率 $P=4.1$ kW 时,不同焊接电流下焊接接头的横截面形貌、焊缝尺寸和气孔率示意图。从图 4、图 5 可知,随着焊接电流增加,焊缝熔深、熔宽逐渐增大,余高无明显变化,气孔率先减少后增加。由于焊接电流增加,电弧输出功率更大,热输入随之增加,接头熔池增大,母材熔化更多,导致焊缝熔深、熔宽增加,当焊

接电流过小时,热输入减少,使得焊丝熔化减少,最终导致焊缝熔深、熔宽较小,甚至出现严重的咬边等缺陷。当焊接电流 $I=121\sim153$ A 时,气孔率显著减少,如图 4(a)、(b)所示,这是因为焊接电流增大,对激光小孔作用时喷出的等离子体的抑制效果增强,有利于气孔的逸出^[18];焊接电流 $I=153\sim218$ A 时,气孔率显著增加,如图 4(b)、(c)、(d)所示,随着焊接电流的增加,熔池中的金属向熔合线流动,从而导致熔池中的气体不能及时逸出,最终形成气孔^[19]。

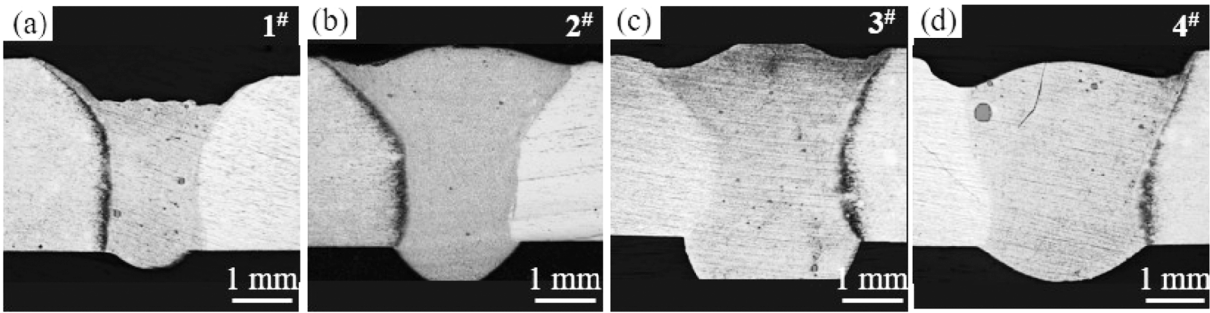


图 4 不同焊接电流接头横截面形貌图
(a)121 A;(b)153 A;(c)188 A;(d)218 A
Fig. 4 Cross-sectional morphology of joints with different welding currents
(a)121 A;(b)153 A;(c)188 A;(d)218 A

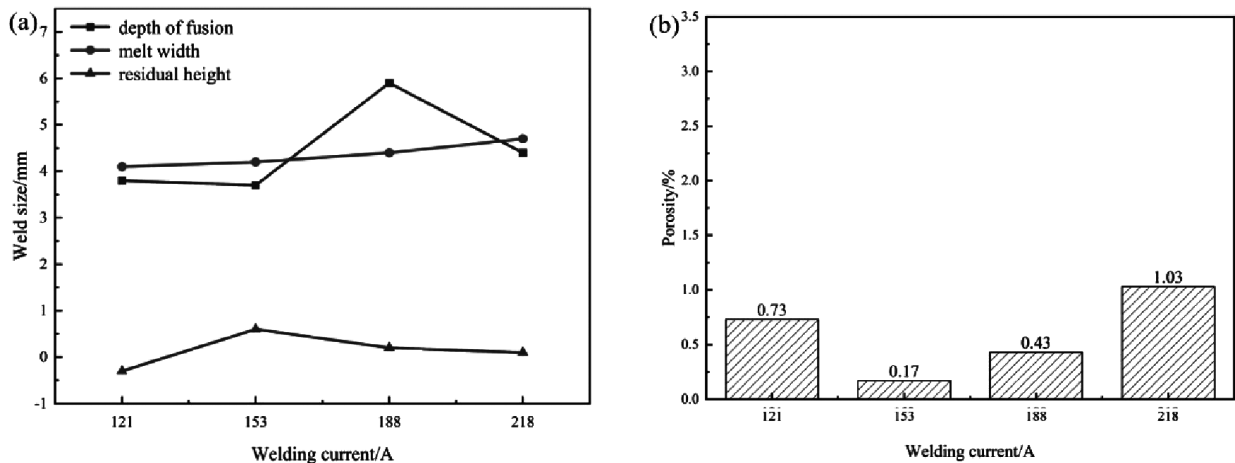


图 5 焊接电流对焊缝成形的影响

(a) 焊缝尺寸; (b) 气孔率

Fig. 5 Effect of welding current on weld shaping

(a) Weld size; (b) porosity

2.2 焊接速度对焊缝成形的影响

图 6 和图 7 分别为焊接电流 $I=153$ A、激光功率 $P=4.1$ kW 时,不同焊接速度下焊接接头的横截面形貌、焊缝尺寸和气孔率示意图。由图 6、图 7 可知,随着焊接速度增加,焊缝熔深、熔宽均减小,余高无明显变化,气孔率先增加后减少。增大焊接速度在一定范围可有效降低残余热效应的集中,但会导致焊缝不够饱满或焊透不足,以及在焊缝处产生陡峭的热循环效应而造成冶金缺陷;当焊接速度过大时,热输入过剩容易导致熔池过宽或熔透较深。当焊接速度 $v=0.04\sim0.06$ m/s 时,气孔数量急剧增加,由于焊接速度降低,对激光小孔作用时喷出的等

离子体的抑制效果更弱,导致激光的熔透能力下降,从而不利于焊缝中气体的逸出,此时激光作为气孔产生的主要因素,作用于熔池时间较长,导致金属蒸发剧烈,电弧压力减小且焊缝咬边增加,造成熔池塌陷,导致大部分气体不能逸出,最终形成大量气孔,如图 6(a)、(b)所示;当焊接速度 $v=0.06\sim0.1$ m/s 时,焊缝中的气孔率明显下降,随着焊接速度的进一步增加,激光作用于熔池的时间也随之缩短,导致熔池中的液体金属在流动过程中趋于平稳,激光小孔也随之趋于稳定,所以焊缝内气孔逐渐减小,如图 6(b)、(c)、(d)所示。

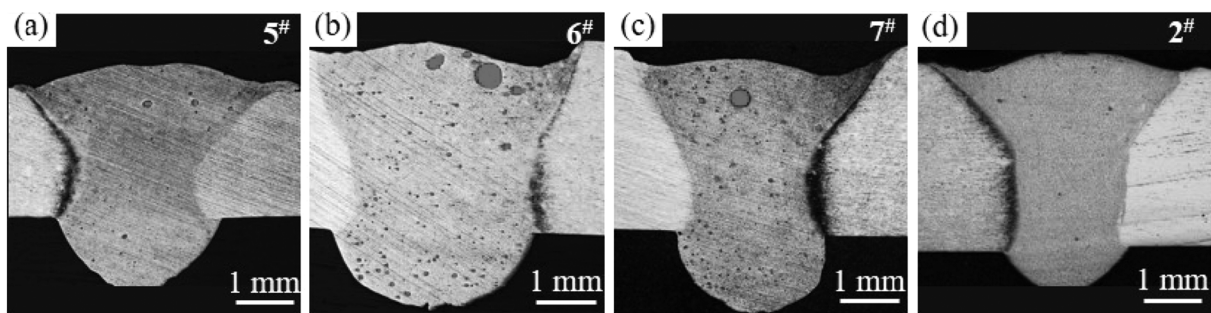


图 6 不同焊接速度接头横截面形貌图

(a) 0.04 m/s; (b) 0.06 m/s; (c) 0.08 m/s; (d) 0.10 m/s

Fig. 6 Cross-sectional morphology of joints with different welding speeds

(a) 0.04 m/s; (b) 0.06 m/s; (c) 0.08 m/s; (d) 0.10 m/s

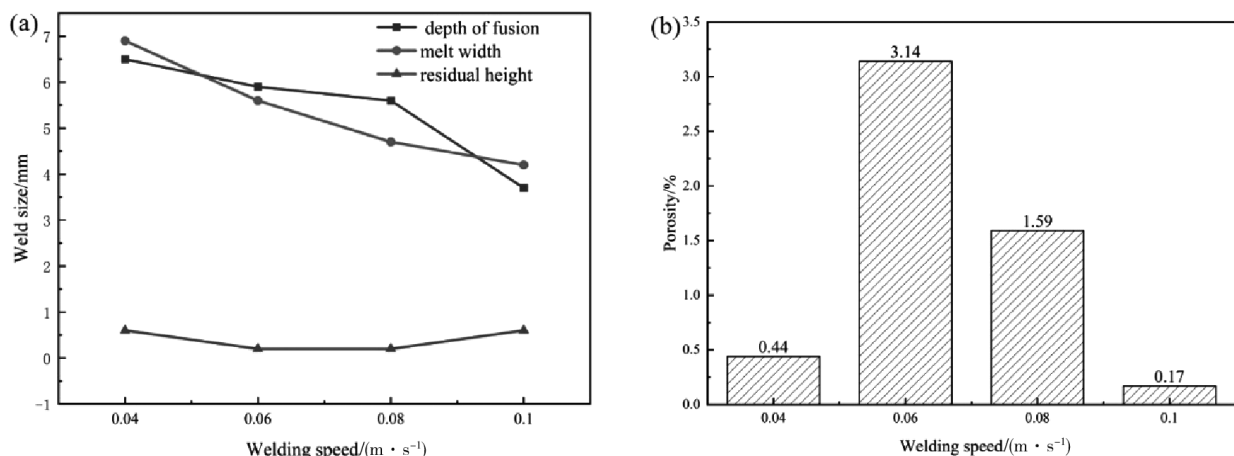


图7 焊接速度对焊缝成形的影响

(a)焊缝尺寸;(b)气孔率

Fig.7 Effect of welding speed on weld formation

(a)Weld size; (b)porosity

2.3 激光功率对焊缝成形的影响

图8和图9分别为焊接电流 $I=153\text{ A}$ 、焊接速度 $v=0.1\text{ m/s}$ 时,不同激光功率下焊接接头的横截面形貌、焊缝尺寸和气孔率示意图。从图8、图9可知,随着激光功率增加,焊缝熔深先减小后增大,熔宽呈增大趋势,余高无明显变化,气孔率先减少后增加。随着激光功率增加,焊缝熔深先出现减小,这是由于激光功率在穿过电弧后,随着热输入损失的比例增大所导致的。随着激光功率进一步增加,激光功率与电弧的协同效应也随之增强,使得更多的热输入从表面传递到熔池底部,从而导致熔池穿透量

增加^[20];同时,单位时间内焊丝熔化速度加快,造成熔池金属液体过多^[21],最终导致接头熔深与熔宽的增大。激光功率 $P=3.9\sim 4.1\text{ kW}$ 时,激光功率热输入增加对激光小孔作用时喷出的等离子体的抑制效果减弱,即激光功率较低时,在表面张力的作用下,熔融金属凝固过快导致未完全铺展,焊缝内气孔率较低,如图8(a)、(b)所示;激光功率 $P=4.1\sim 4.5\text{ kW}$ 时,过大的激光功率热输入会导致金属蒸发剧烈,在熔池中形成大量的气泡来不及逸出,最终在焊缝形成大量气孔,如图8(b)、(c)、(d)所示。

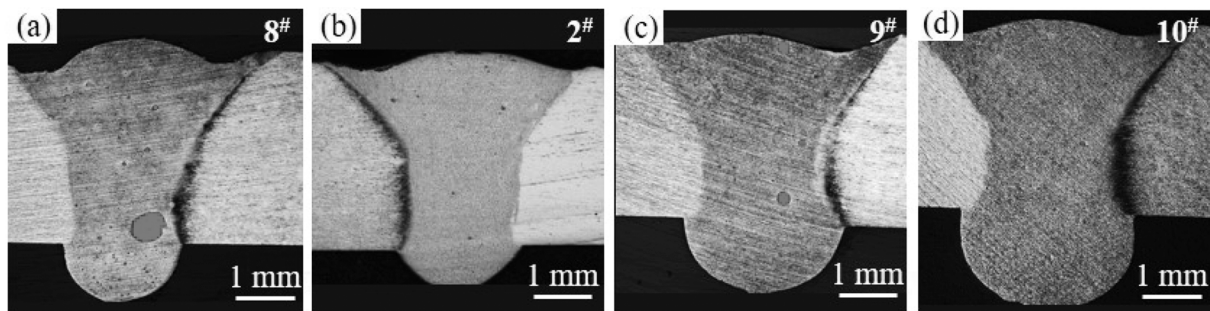


图8 不同激光功率接头横截面形貌图

(a)3.9 kW;(b)4.1 kW;(c)4.3 kW;(d)4.5 kW

Fig.8 Cross-sectional morphology of joints with different laser powers

(a)3.9 kW;(b)4.1 kW;(c)4.3 kW;(d)4.5 kW

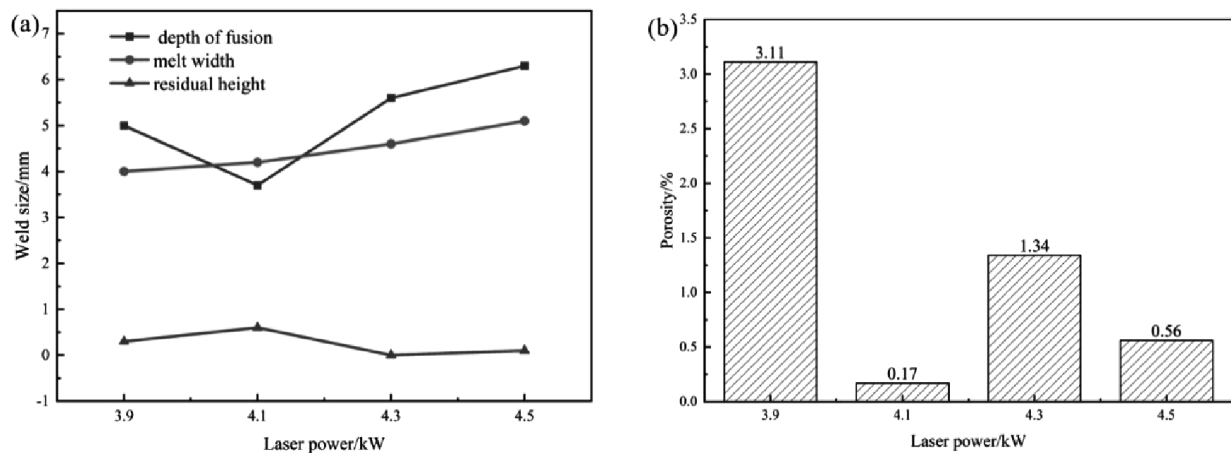


图9 激光功率对焊缝成形的影响

(a)焊缝尺寸;(b)气孔率

Fig. 9 Effect of laser power on weld shaping

(a)Weld size; (b)porosity

综上所述,使用 TiC 纳米改性焊丝对 7075/6061 异种铝合金进行激光-MIG 复合焊,不同焊接参数下焊缝区均未形成裂纹缺陷,且成形性能较好,但均有气孔存在,产生的原因是氢气在液态铝与固态铝中的溶解度差异较大,在熔池凝固过程当中液态熔池中的氢气未及时逸出^[22]。氢气孔是铝合金熔化焊接过程当中无法避免的缺陷,相关研究表明,当气孔尺寸小于 100 μm 时,气孔对力学性能的影响较小^[23]。通过对焊接试样焊缝宏观成形进行观察与统计,综合熔宽、熔深、余高等焊缝尺寸和气孔率,确定焊接电流 $I=153\text{ A}$ 、焊接速度为 $v=0.1\text{ m/s}$ 、激光功率 $P=4.1\text{ kW}$ 时接头成形最好,如图 4(b)、图 6(b)、图 8(b)所示。

2.4 不同焊接参数对 6061 侧铝合金 HAZ 软化区宽度影响

在焊接过程中,受焊接热循环作用,6061 铝合金热影响区析出的强化相 Mg-Si 发生溶解,从而使得强化作用减弱出现软化^[24-25]。为探寻激光-MIG 复合焊参数对异种铝合金接头 6061 侧热影响区力学性能的影响,选择各焊接接头的截面中线作为硬度测试点,并在水平方向对焊接接头进行测试,硬度测试结果如图 10 所示。焊接接头从 7075 母材区、7075 热影响区、焊缝区、6061 热影响区显微硬度呈逐渐下降的趋势,从 6061 热影响区结束到 6061 母材区显微硬度呈上升的趋势,接头硬度最低点出现在 6061 侧热影响区,为 62.4 HV,低于 6061 母材硬度(约 96 HV),说明在 6061 侧发生了严重的接头

软化现象。进一步对 6061 侧热影响软化区宽度进行对比(图 10),在不同焊接工艺参数下,6061 侧铝合金均出现了 3~6 mm 的软化区。随着焊接电流增加,6061 侧热影响区软化区的宽度先减小后增大,由于焊接电流受到接头间隙、焊丝直径等因素影响,当焊接电流较小时,焊丝在熔化时的速度变慢,从而形成较大的熔滴,熔池凝固时间缩短,最终导致 6061 侧热影响区软化区宽度先呈下降趋势,当焊接电流进一步增加时,焊接热输入过剩,熔池的凝固速度减慢,凝固时间增加,从而导致热影响的宽度增加,如图 10(a)所示。随着焊接速度增加,6061 侧热影响区软化区宽度呈上升趋势,这是因为热输入过剩时,向母材传递的热输入会增大,最终导致 6061 侧热影响区软化区宽度增加,如图 10(b)所示。随着激光功率增加,6061 侧热影响区软化区宽度先减少后增大,这是因为当激光功率增加时,会导致电弧趋于稳定,电弧的变化会导致熔滴过渡速度产生一定的变化,而稳定的熔滴过渡速度及轨迹能提高焊缝成形的均匀性^[26],故使 6061 侧热影响区的软化区宽度减小,当激光功率进一步增加时,会导致电弧极度不稳定,使得熔滴过渡速度增加,最终导致 6061 侧热影响软化区宽度增大,如图 10(c)所示。

综合图 10,当焊接电流 $I=153\text{ A}$ 、焊接速度为 $v=0.1\text{ m/s}$ 、激光功率 $P=4.1\text{ kW}$ 时,7075/6061 铝合金激光-MIG 复合焊接接头 6061 侧热影响区宽度最窄,其宽度仅为 3 mm 左右。

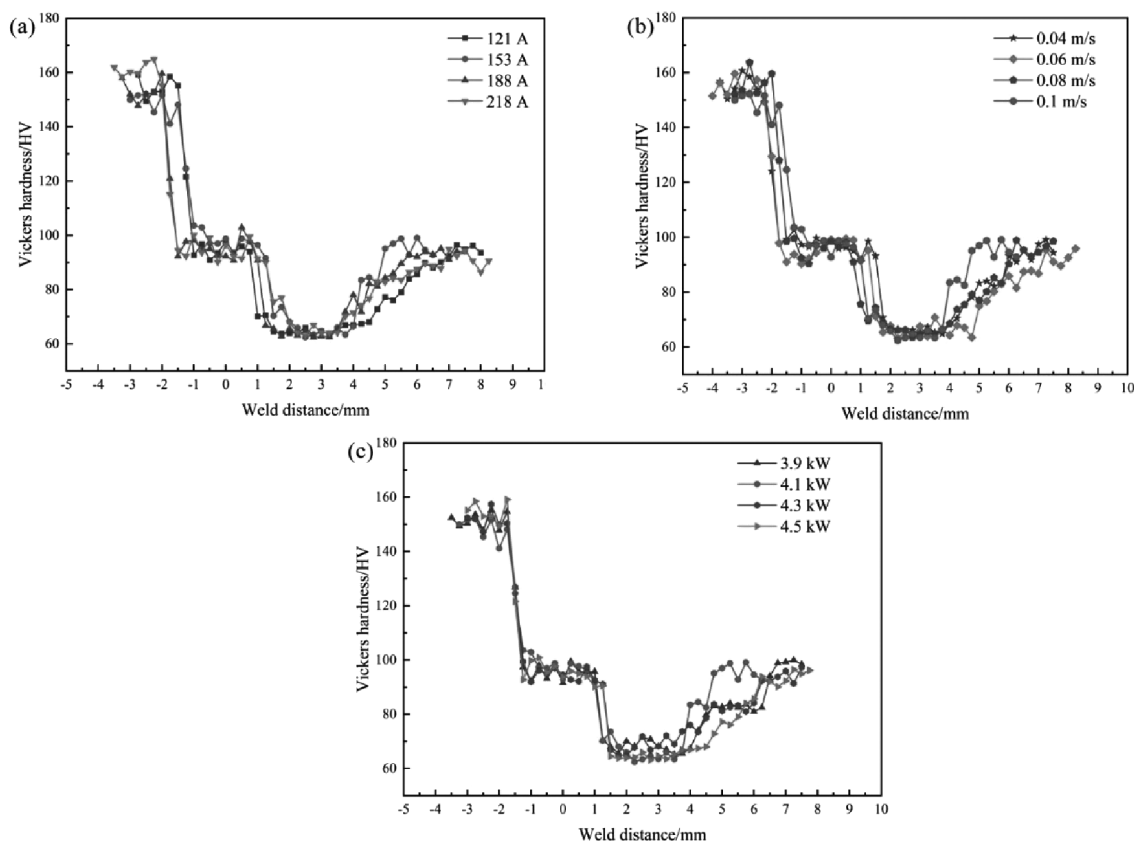


图 10 不同焊接参数接头的维氏硬度曲线

(a)不同焊接电流;(b)不同焊接速度;(c)不同激光功率

Fig. 10 Vickers hardness curves of joints with different welding parameters

(a)Different welding current; (b)different welding speed; (c)different laser power

2.5 7075/6061 铝合金激光-MIG 复合焊接头微观组织

图 11 为焊接电流 $I=153$ A、焊接速度为 $v=0.1$ m/s、激光功率 $P=4.1$ kW 时,7075/6061 铝合金焊接接头不同区域的显微组织图。从图 11(a)可以看出,在 7075 侧的母材与焊缝之间存在一个垂直于熔合线的细小柱状晶过渡区,这是由于靠近母材的晶粒仅有部分熔化,导致焊缝中出现熔化的液相与未熔合的固相共存的现象,在随后的凝固结晶过程中,在焊缝边缘的过渡区散热充分,冷却速度快,熔化的液相会在未熔化的固相晶粒表面成核;同时,在焊接过程中,母材受热熔化,向外延生长,受到焊缝边缘的快速凝固,晶粒会沿最大的温度梯度方向生长^[27],在两方面的共同作用下,最终形成了垂直于熔合线的细小柱状晶。从图 11(b)可以看出,7075/6061 异种铝合金的焊缝中心微观组织为均匀

细小的等轴晶,这是由于焊缝中的初生晶粒在凝固过程中逐渐放热从而导致微观组织逐渐细化,使相邻熔体更好地保持过冷状态,形成更多初生晶粒。TiC 纳米颗粒作为晶粒细化剂,保证了界面上的晶粒能均匀化生长,从而消除异种铝合金焊缝中常见的晶粒尺寸梯度^[28];同时,纳米颗粒的加入,能够使更多的晶粒形核,从而细化晶粒尺寸^[29],最终在焊缝中形成了均匀细小的等轴晶。从图 11(c)可以看出,6061 侧熔合线与热影响区交界处存在大量尺寸细小的等轴枝晶以及少量尺寸粗大的柱状晶,分析认为当过冷较少时(如在熔合线和母材之间的界面处),与母材晶粒具有相同晶格结构的许多晶核形成外延生长,在熔化区形成稳定的突出物或枝晶,从而形成柱状晶粒,当向焊缝中心线移动时,较小的温度梯度和增大的流体流量都导致柱状晶粒向等轴晶生长转变。

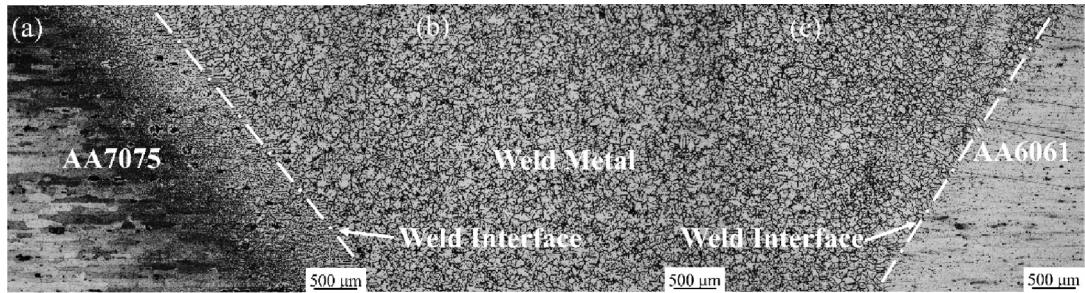


图 11 最佳焊接参数下接头热影响区和焊缝中心区的显微组织
(a)7075 侧母材及热影响区;(b)激光-MIG 复合焊缝;(c)6061 侧母材及热影响区

Fig. 11 Microstructure of heat affected zone and center zone of the weld at optimum parameters
(a)7075 side base material and heat affected zone; (b)laser-MIG composite weld;
(c)6061 side base material and heat affected zone

2.6 7075/6061 铝合金激光-MIG 复合焊接头拉伸性能

当焊接电流 $I=153$ A、焊接速度为 $v=0.1$ m/s、激光功率 $P=4.1$ kW 时,7075/6061 铝合金激光-MIG 复合焊接接头拉伸数据如表 4 所示。

综合相关文献得出的 $7\times\times\times/6\times\times\times$ 异种铝合金不同焊接方法接头力学性能对比,如图 12(a)所示。由图可知,搅拌摩擦焊接头的抗拉强度普遍在 170~230 MPa,熔化焊接头的抗拉强度普遍在 160~210 MPa,搅拌摩擦焊接头的断后延伸率多数大于熔化焊,说明搅拌摩擦焊接头的力学性能明显高于传统的熔焊;相较于传统熔焊,当加入 TiC 纳米颗粒后, $7\times\times\times/6\times\times\times$ 异种铝合金激光-MIG 复合焊接头的力学性能得到了大幅度的提升,超过了大部分的搅拌摩擦焊以及熔化焊。选择最佳焊接参数的接头进行拉伸测试,其拉伸曲线如图 12(b)

所示。由表 4 可知,加入 TiC 纳米颗粒的激光-MIG 复合焊接头平均抗拉强度 $R_m=208.6$ MPa,平均屈服强度 $R_{p0.2}=152.5$ MPa,断后延伸率 $A=4.7\%$,对比图 12(a)可以看出,在加入 TiC 纳米颗粒后的激光-MIG 复合焊接接头的平均抗拉强度,较其他常用熔焊有了大幅度的提升。通过对试样断裂位置和断口形貌进一步观察,发现接头断裂位置都在 6061 侧软化区,其断口处分布着密集且均匀的韧窝,焊缝内部存在着较深、较大的韧窝,其中大韧窝周围还存在许多小韧窝,属于明显的韧性断裂(图 13)。

表 4 激光-MIG 复合焊接接头拉伸结果数据表
Table 4 Data sheet of laser-MIG composite welded joints tensile results

R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A/\%$
208.6	152.5	4.7

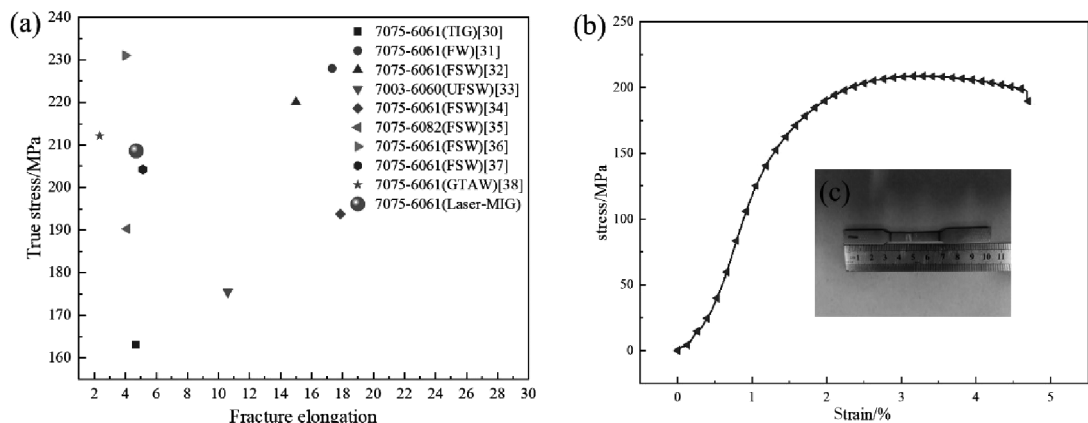


图 12 焊接接头拉伸曲线
(a) $7\times\times\times/6\times\times\times$ 不同焊接方法接头力学性能;(b)激光-MIG 复合焊接接头;(c)断口宏观形貌

Fig. 12 Tensile curves of welded joints
(a)Mechanical properties of joints with different welding methods of $7\times\times\times/6\times\times\times$; (b)laser-MIG composite welded joints;
(c)macro-morphology of the fracture

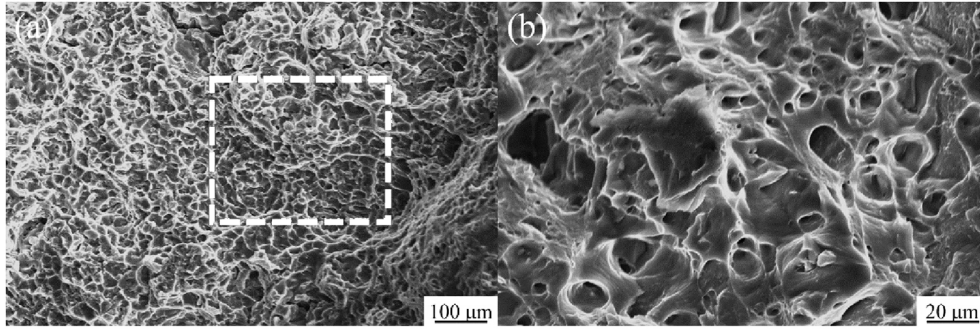


图 13 最佳参数下接头的断口 SEM 图

(a)350×;(b)1 000×

Fig. 13 SEM image of the fracture of the joint with optimum parameters

(a)350×;(b)1 000×

4 结论

(1)随着焊接电流增加,焊缝熔深、熔宽呈增大趋势,余高无明显变化,气孔率先减少后增加;随着焊接速度增加,焊缝熔深、熔宽呈减小趋势,余高无明显变化,气孔率先增加后减少;随着激光功率增加,焊缝熔深先减小后增加,熔宽呈增大趋势,余高无明显变化,气孔率先减少后增加。综合比对后,得到最佳焊接参数,即焊接电流 $I=153\text{ A}$ 、焊接速度为 $v=0.1\text{ m/s}$ 、激光功率 $P=4.1\text{ kW}$ 。

(2)在不同焊接参数下,复合焊接接头的 6061 侧均出现了严重的接头软化问题,在最佳焊接热输入下,其最低点的硬度仅为 62.4 HV ,热影响区宽度大约为 3 mm 。随着焊接电流增加,6061 侧热影响区软化区宽度先减小后增大;随着焊接速度增加,6061 侧热影响区软化区宽度呈上升趋势;随着激光功率增加,6061 侧热影响区软化区宽度先减小后增大。

(3)在最佳参数下,纳米颗粒的 7075/6061 铝合金激光-MIG 焊接接头焊缝组织为细小的等轴枝晶,在 7075 侧未熔合的母材与焊缝之间存在一个垂直于熔合线的细小柱状晶过渡区;在 6061 侧熔合线与热影响区交界处存在大量尺寸细小的等轴枝晶以及少量尺寸粗大的柱状晶。

(4)在最佳参数下,7075/6061 铝合金激光-MIG 复合焊接头平均抗拉强度 $R_m=208.6\text{ MPa}$,平均屈服强度 $R_{p0.2}=152.5\text{ MPa}$,断后延伸率 $A=4.7\%$,力学性能指标高于其他大部分常用熔焊方法;通过对断口形貌进行观察,发现存在密集且均匀的韧窝,为韧性断裂。

参考文献

[1] JIA J B, YANG Z G, XU B, et al. Microstructure evo-

lution, mechanical properties, and strengthening mechanisms of 6061 aluminum alloy processed *via* corrugated constrained groove pressing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 878: 145218.

[2] 胡士齐. 7075 铝合金激光增材制造工艺参数智能优化及组织调控[J]. 应用激光, 2024, 44(4): 7-14.

HU S Q. The intelligent optimization of laser additive manufacturing parameters and microstructure control of 7075 aluminum alloy[J]. Applied Laser, 2024, 44(4): 7-14.

[3] DENG A L, CHEN H, ZHANG Y B, et al. Effect of filler materials on the porosity formation of aluminum alloy by laser welding with filler wire[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 159: 109000.

[4] LI B B, HE P C, WANG J F, et al. Mechanical characteristic and stress-strain modelling of friction stir welded 6061-T6 aluminium alloy butt joints[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 198: 111645.

[5] ACHANKUNJU A, ANANDHU V A, THOMAS R, et al. Process optimization of aluminium 6061 and 5083 T6 alloys using friction stir welding[C]//AIJR Proceedings, "Proceedings of the 2nd International Conference on Modern Trends in Engineering Technology and Management. [s. l.]: AIJR Publisher, 2023: 447-455.

[6] VARUNRAJ S, RUBAN M. Investigation of the microstructure and mechanical properties of AA6063 and AA7075 dissimilar aluminium alloys by friction stir welding process [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 68: 1654-1657.

[7] CAMPANELLI S L, CASALINO G, CASAVOLA C, et al. Analysis and comparison of friction stir welding and laser assisted friction stir welding of aluminum alloy [J]. Materials (Basel), 2013, 6(12): 5923-5941.

[8] RAHMI M, ABBASI M. Friction stir vibration welding

- process; Modified version of friction stir welding process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(1): 141-151.
- [9] LAKSHMINARAYANAN A K, BALASUBRAMANIAN V, ELANGO VAN K. Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminium alloy joints[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(3): 286-296.
- [10] LIU F Y, YANG B, SUN H F, et al. Mechanism investigation for the influence of laser power on droplet transfer behaviors in laser-MIG hybrid welding[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 157: 108750.
- [11] YAN J, GAO M, LI G, et al. Microstructure and mechanical properties of laser-MIG hybrid welding of 1420 Al-Li alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9): 1467-1473.
- [12] WANG Q Y, CHEN H, ZHU Z T, et al. Mechanical properties of a dissimilar aluminum alloy joint welded by hybrid laser - MIG welding[J]. International Journal of Modern Physics B, 2017, 31(16/17/18/19): 1744037.
- [13] 苏菠, 陈大江, 张大斌, 等. 激光焊接 7A52 高强度铝合金焊缝气孔形成机理研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(3): 128-134.
- SU B, CHEN D J, ZHANG D B, et al. Mechanism of pore formation in laser welding of 7A52 high-strength aluminum alloy welds[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2024, 43(3): 128-134.
- [14] 罗震, 苏杰, 王小华, 等. 激光-电弧复合焊接铝合金的研究进展分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 57-74.
- LUO Z, SU J, WANG X H, et al. Research progress analysis of laser-arc hybrid welding of aluminum alloys[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(3): 57-74.
- [15] BUNAZIV I, AKSELSEN O M, REN X B, et al. Laser beam and laser-arc hybrid welding of aluminium alloys[J]. Metals, 2021, 11(8): 1150.
- [16] LIU S, LI J M, MI G Y, et al. Study on laser-MIG hybrid welding characteristics of A7N01-T6 aluminum alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(1): 1135-1144.
- [17] ZHAO Y Q, ZHAN X H, ZHOU X D, et al. Effect of heat input on macro morphology and porosity of laser-MIG hybrid welded joint for 5A06 aluminum alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(11): 4035-4045.
- [18] 王浩, 葛明韬, 施伟琪, 等. 焊接工艺对 7N01P 铝合金激光-MIG 复合焊接接头中气孔的影响[J]. 有色金属材料与工程, 2021, 42(5): 8-14.
- WANG H, GE M T, SHI W Q, et al. Influence of welding process on the porosity of laser-MIG hybrid welded 7N01P aluminum alloy joint[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2021, 42(5): 8-14.
- [19] 王良, 陈香锦, 晏文涛, 等. 中厚板铝合金激光-MIG 复合焊过程应力与变形研究[J]. 应用激光, 2023, 43(2): 70-79.
- WANG L, CHEN X J, YAN W T, et al. The study of stress and deformation during laser-MIG hybrid welding of medium and heavy plate aluminum alloy[J]. Applied Laser, 2023, 43(2): 70-79.
- [20] ZHANG C, GAO M, ZENG X Y. Influences of synergy effect between laser and arc on laser-arc hybrid welding of aluminum alloys[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 120: 105766.
- [21] 邵明皓, 张华, 刘德博, 等. 6082 铝合金激光-MIG 复合焊工艺组织及性能研究[J]. 应用激光, 2022, 42(2): 1-7.
- SHAO M H, ZHANG H, LIU D B, et al. Research on the microstructure and properties of laser-MIG composite welding of 6082 aluminum alloy[J]. Applied Laser, 2022, 42(2): 1-7.
- [22] HAN X H, YANG Z B, MA Y, et al. Porosity distribution and mechanical response of laser-MIG hybrid butt welded 6082-T6 aluminum alloy joint[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 132: 106511.
- [23] 喻程, 吴圣川, 胡雅楠, 等. 铝合金熔焊微气孔的三维同步辐射 X 射线成像[J]. 金属学报, 2015, 51(2): 159-168.
- YU C, WU S C, HU Y N, et al. Three-dimensional imaging of gas pores in fusion welded Al alloys by synchrotron radiation X-ray microtomography[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(2): 159-168.
- [24] CHENG J, SONG G, ZHANG X, et al. Review of techniques for improvement of softening behavior of age-hardening aluminum alloy welded joints[J]. Materials (Basel), 2021, 14(19): 5804.
- [25] 叶广文, 刘倩雯, 范西岸, 等. 激光-MIG 复合焊接熔滴过渡对焊缝表面成形的影响[J]. 中国激光, 2022, 49(8): 0802012.
- YE G W, LIU Q W, FAN X A, et al. Effect of droplet transition on weld surface formation of laser-MIG

- p>hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(8): 0802012.
- [26] 唐健江, 王嘉, 刘嘉乐, 等. 变形时效对 6061 铝合金板材的组织 and 力学性能的影响[J]. 锻压技术, 2019, 44(7): 165-169.
- TANG J J, WANG J, LIU J L, et al. Influence of deformation aging on microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy plate[J]. Forging & Stamping Technology, 2019, 44(7): 165-169.
- [27] EL-BATAHGY A, KUTSUNA M. Laser beam welding of AA5052, AA5083, and AA6061 aluminum alloys[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2009, 2009(1): 974182.
- [28] MURALI N, LI X C. TIG welding of dissimilar high-strength aluminum alloys 6061 and 7075 with nano-treated filler wires[M]//Light metals 2021. Cham: Springer International Publishing, 2021: 316-322.
- [29] CHEN L Y, XU J Q, LI X C. Controlling phase growth during solidification by nanoparticles[J]. Materials Research Letters, 2015, 3(1): 43-49.
- [30] SANTHOSH KUMAR S, GODWIN G. An enhancement of properties on Al7075 and Al6061 dissimilar materials welded by TIG process [J]. International Research Journal on Advanced Science Hub, 2020, 2 (6): 115-121.
- [31] BAKKIYARAJ M, PALANISAMY P, NAGARAJAN P K, et al. Effect of post-weld heat treatment on tensile strength and microstructure characteristics in dissimilar friction welded (AA6061 - AA7075-T6) joints [J]. Materials Research Express, 2019, 6 (12): 1265c1.
- [32] BAHEMMAT P, HAGHPANAHI M, BESHARATI M K, et al. Study on mechanical, micro-, and macro-structural characteristics of dissimilar friction stir welding of AA6061-T6 and AA7075-T6[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2010, 224 (12): 1854-1864.
- [33] DONG J L, ZHANG D T, ZHANG W W, et al. Effect of post-weld heat treatments on the microstructure and mechanical properties of underwater friction stir welded joints of 7003-T4/6060-T4 aluminium alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 862: 144423.
- [34] JAFARI H, MANSOURI H, HONARPISHEH M. Investigation of residual stress distribution of dissimilar Al-7075-T6 and Al-6061-T6 in the friction stir welding process strengthened with SiO₂ nanoparticles [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 43: 145-153.
- [35] DANILOLOS N M, PANTELIS D I. Microstructural and mechanical properties of dissimilar friction stir welds between AA6082-T6 and AA7075-T651 [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(9): 2497-2505.
- [36] 高士康, 周利, 张欣盟, 等. 6061-T6/7075-T6 异种铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能 [J]. 焊接学报, 2022, 43(6): 35-42.
- GAO S K, ZHOU L, ZHANG X M, et al. Microstructure and properties of friction stir welded joints for 6061-T6/7075-T6 dissimilar aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(6): 35-42.
- [37] AL-GHAZALY S B, AL-SHAFAIE S H. Optimization of friction stir welding parameters of Al 6061 and Al 7075 using GRA[J]. Journal of University of Babylon for Engineering Sciences, 2018, 26(5): 147-156.
- [38] MURALI N, ZHENG S Q, CHI Y T, et al. Natural aging of heterogeneous arc-welded AA6061-AA7075 joints with nanocomposite filler[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2023, 28 (4): 249-258.