

6061 铝合金 GMAW 焊缝成形及接头组织性能

杨晨^{1,2}, 余陈², 郭春富², 王海燕², 郝晓曦¹, 邝幸胜¹

(1. 五邑大学机械与自动化工程学院, 广东 江门 529020; 2. 广东省科学院中乌焊接研究所, 广东省材料连接与先进制造重点实验室, 广东 广州 510650)

摘要: 采用3种熔化极气体保护焊(GMAW)焊接工艺:冷金属过渡焊(CMT)、熔化极惰性气体保护焊(MIG)和脉冲熔化极惰性气体保护焊(P-MIG),对6061-T6铝合金进行焊接试验,研究了3种焊接工艺下的焊缝成形及接头组织性能。结果表明:3种工艺均能获得成形良好的接头;对焊缝横截面气孔进行统计,发现CMT焊与MIG焊气孔率相差不大,而P-MIG焊气孔率约为CMT焊的2.6倍;相较于MIG焊与P-MIG焊,CMT焊缝组织更为细小;3种工艺下接头硬度分布水平相差不大,接头拉伸试样断裂位置在热影响区,断裂形式属于延性断裂;其中CMT焊接接头的抗拉强度最高,为199.20 MPa,达到母材的69.8%,断后伸长率为11.01%。

关键词: 6061-T6 铝合金; 焊缝成形; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2025)04-0226-09

GMAW weld formation and joint microstructure properties of 6061 aluminum alloy

YANG Chen^{1,2}, YU Chen², GUO Chun-fu², WANG Hai-yan², HAO Xiao-xi¹, KUANG Xing-sheng¹

(1. School of Mechanical and Automation Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, China;

2. China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Provincial Academy of Sciences, Guangdong Provincial

Key Laboratory of Material Joining and Advanced Manufacturing, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Three types of gas metal arc welding (GMAW) processes, namely cold metal transfer welding (CMT), melting inert-gas welding (MIG), and pulsed melting inert-gas welding (P-MIG), were used to conduct welding experiments on 6061-T6 aluminum alloy. The weld formation and joint microstructure and properties under the three welding processes were studied. The results show that all three processes can obtain well-formed joints. Statistical analysis of porosity in the cross-section of the weld shows that there is not much difference in porosity between CMT welding and MIG welding, while the porosity of P-MIG welding is about 2.6 times that of CMT welding; compared to the MIG welding and P-MIG welding, the microstructure of the CMT weld is finer. The hardness distribution levels of the joints under the three processes are not significantly different. The fracture location of the joint tensile specimen is in the heat affected zone, and the fracture form belongs to ductile fracture. The tensile strength of the CMT welded joints is the highest, reaching 199.20 MPa, which is 69.8% of the base metal, and the elongation is 11.01%.

Keywords: 6061-T6 aluminum alloy; weld formation; microstructure; mechanical property

6061-T6 铝合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀性好、焊接性能良好等特点,被广泛应用于航空航天、船舶、汽车等领域^[1-4]。铝合金焊接方法包括非熔化

极气体保护焊(GTAW)、熔化极气体保护焊(GMAW)、搅拌摩擦焊(FSW)、激光电弧复合焊(Laser-MIG/TIG)等^[5-7]。其中GMAW焊因其低成

收稿日期: 2024-06-13 **修订日期:** 2024-07-24

基金项目: 广东省科学院发展专项资金项目资助(2020GDASYL-20200301001);环保在线检测仪器研发项目(2022AL004);高效节能进水阀的研发与升级(2320002000601);广东省普通高校重点领域专项(2021ZDZX1045)

作者简介: 杨晨(2000—),男,硕士研究生,主要从事碳钢及铝合金焊接及增材制造研究,E-mail: 18700094053@163.com。

通信作者: 邝幸胜(1985—),男,正高级实验师,主要从事精密制造工艺研究,E-mail: jmkxs@189.cn。

引用格式: 杨晨,余陈,郭春富,等.6061 铝合金 GMAW 焊缝成形及接头组织性能[J].材料热处理学报,2025,46(4):226-234.

YANG Chen, YU Chen, GUO Chun-fu, et al. GMAW weld formation and joint microstructure properties of 6061 aluminum alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2025, 46(4):226-234.

本、效率高、可在任何位置实现自动焊接而被广泛应用在各个行业^[8-10]。然而铝合金 GMAW 工艺易产生气孔、热影响区软化等问题,影响了接头强度系数。

Duan 等^[11]采用熔化极惰性气体保护焊(MIG)对 6005-T6 铝合金进行焊接试验,对焊接接头的显微组织与力学性能进行分析,发现焊缝存在等轴晶且热影响区的晶粒大于母材,在热影响区由于再溶与强化相的分离而出现软化现象,其接头的抗拉强度为 191 MPa,达到母材的 67%。Hadadzadeh 等^[12]在使用 GMAW 工艺焊接应变硬化 Al-6.7Mg 合金板材时,发现此类工艺焊接材料时普遍存在热影响区软化的问题,而采用脉冲 GMAW 工艺在合适的工艺参数下可以减少热影响区软化提高焊缝的整体强度。Nie 等^[13]采用脉冲 MIG 工艺对 4 mm 厚变形 6061-T6 铝合金板与铸造 A356-T6 铝合金板进行对接试验,发现接头的抗拉强度可达 235 MPa,为 6061 铝合金的 83%。奥地利福尼斯公司为了减少飞溅与热输入量开发了一种新型焊接技术:冷金属过渡焊接(Cold metal transfer, CMT)。CMT 技术的特点就是焊丝回抽运动和熔滴过渡过程相结合,当数字化控制监测到短路信号时,焊丝会迅速回抽并切断电流,使得焊丝与熔滴分离从而减少飞溅与热输入量^[14-16]。Wang 等^[17]采用 CMT 与 MIG 两种不同焊接工艺对 2 mm

厚 6N01 铝合金进行对接焊接试验时,发现 CMT 工艺的焊接接头的外观良好、飞溅少、晶粒组织更为细小且力学性能略高于 MIG 焊接接头。Wang 等^[18]采用 P-MIG 与 CMT 工艺对 6082-T6 铝合金进行焊接试验时,发现 CMT 焊接接头的抗拉强度与硬度均优于 P-MIG 焊接接头,其主要原因是 CMT 焊接接头的平均晶粒尺寸与第二相尺寸要小于 P-MIG 焊接接头。

目前,不同 GMAW 焊接工艺对 6061-T6 铝合金接头的焊缝形貌、气孔率、显微组织和力学性能的系统研究尚缺乏,本文采用 CMT、MIG 和 P-MIG 工艺对 5 mm 厚 6061-T6 铝合金进行焊接试验,阐明这 3 种焊接工艺对接头的焊缝形貌、气孔率、显微组织和力学性能的影响,为汽车、船舶等领域铝合金产品焊接工艺优化提供依据。

1 试验材料及方法

试验母材为 6061-T6 可热处理强化铝合金,尺寸为 300 mm×150 mm×5 mm,填充材料选用 ER4043 焊丝,直径为 1.2 mm。母材及焊丝化学成分如表 1 所示。接头形式为两块铝板对接,I 型破口,配对间隙为 1.2 mm,如图 1 所示,单面焊双面成形。焊接前采用钢丝刷对焊缝及 25 mm 内区域进行打磨处理,再使用丙酮溶液清理母材表面油污与灰尘,吹干后待焊。

表 1 母材 6061 铝合金和 ER4043 焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base material 6061 aluminium alloy and ER4043 welding wire (mass fraction, %)									
Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6061	0.638	0.413	0.266	0.080	1.074	0.196	0.001	0.041	Bal.
ER4043	5.6	0.8	0.3	0.05	0.05	-	0.1	0.15	Bal.

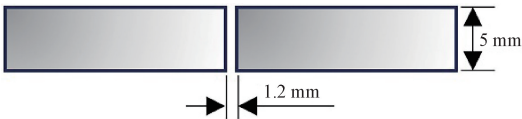


图 1 接头形式
Fig. 1 Joint form

焊接设备为 TPS-5000 CMT 焊机,焊接工艺使用一元化调节模式,即在调节焊接电流时,控制系统会自动选定与该电流相匹配的电弧电压与送丝速度。使用焊接电信号同步采集系统 GWE-2,收集焊接实时电流电压信号,采集频率为 200 KHz。在焊接时采用前推的方式进行,即焊枪与焊缝的夹角为 75°,这种方式能够使得焊接过程中电弧更稳定,并且一定程度上降低铝合金接头的软化^[19]。GMAW 焊接热效

率取 0.8,热输入 Q 可根据公式(1)计算:

$$Q = \mu \frac{VI}{S}$$

(1)

式中: V 为焊接电压, I 为焊接电流, S 为焊接速度, μ 为热效率。具体的焊接工艺参数如表 2 所示。焊接后将焊接试件通过线切割加工成金相、硬度和拉伸试样。通过 Ario Imager. M2m 型金相显微镜观察接头显微组织,所用的腐蚀溶液为凯勒试剂(95 mL H₂O+1 mL HCl+1.5 mL HF+2.5 mL HNO₃),腐蚀时间 20 s。采用 WILSON VH1202 维氏硬度计测试接头硬度值,测试点从焊缝中心向母材区域依次分布,测试点间隔 0.5 mm,加载载荷为 200 g,保压时间 10 s。拉伸试验在 CMT5105 型试验机上进行,拉伸试样尺寸如图 2 所示,试样厚度为 5 mm,拉伸速率为

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Welding process parameters

Welding method	Welding current/A	Welding voltage/V	Wire feed speed/(m/min)	Weld speed/(mm/s)	Heat input/(J/mm)	Dry wire elongation/mm	Gas flow rate/(L/min)
CMT	148	16. 6	6. 6	6. 67	294. 67	15	20
MIG	148	21. 3	6. 9	6. 67	378. 10	15	20
P-MIG	148	21. 2	6. 7	6. 67	376. 32	15	20

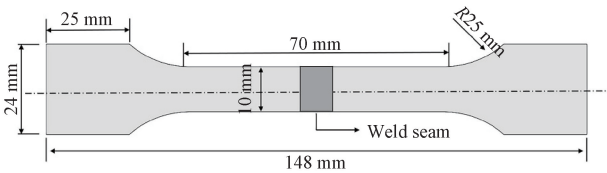


图 2 拉伸试样尺寸
Fig. 2 Dimensions of tensile specimen

2.5 mm/min。采用 S-3400 型扫描电镜 (SEM) 对拉伸断口进行观察。

2 试验结果及分析
2.1 焊缝宏观成形与实测电流电压波形

图 3 为不同 GMAW 工艺对接接头焊缝表面与背面的形貌以及横截面形貌情况。可以看出,在不同的工艺参数下,焊缝成形美观,鱼鳞纹明显,保护效果好,母材均完全熔透,未见明显缺陷与裂纹。

焊接接头尺寸示意图如图 4 所示,图 4 中 W_1 为焊缝熔宽, H_1 为焊接接头余高, H_2 为焊接接头背面余高。图 5 为焊接接头尺寸变化,从图 5 可以看出,

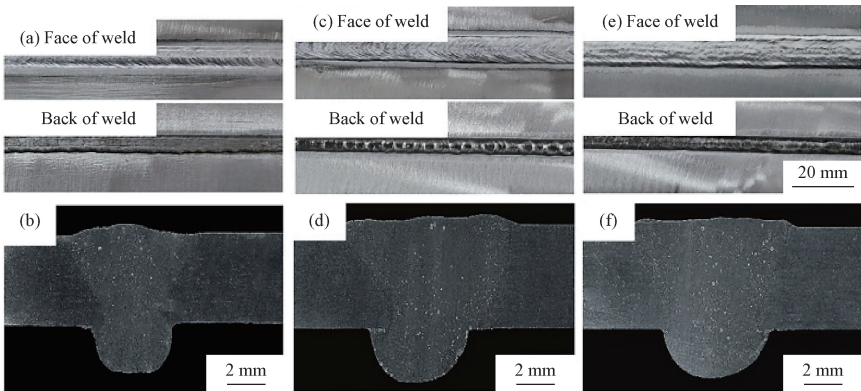


图 3 不同 GMAW 焊接接头的表面形貌 (a) CMT 焊缝表面形貌; (b) CMT 焊缝横截面形貌; (c) MIG 焊缝表面形貌; (d) MIG 焊缝横截面形貌; (e) P-MIG 焊缝表面形貌; (f) P-MIG 焊缝横截面形貌

Fig. 3 Surface morphology of different GMAW welded joints (a) CMT weld surface morphology; (b) CMT weld cross-section morphology; (c) MIG weld surface morphology; (d) MIG weld cross-section morphology; (e) P-MIG weld surface morphology; (f) P-MIG weld cross-section morphology

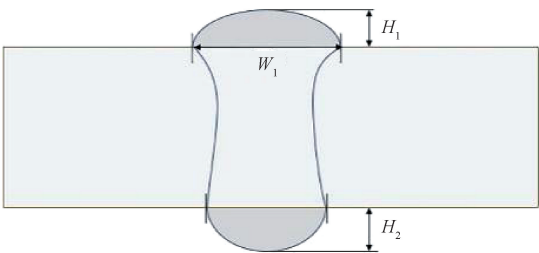


图 4 焊接接头尺寸示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the welded joints dimensions

3 种工艺下 H_1 与 H_2 变化值不大, CMT 焊缝熔宽明显小于 MIG 焊与 P-MIG 焊, MIG 焊的熔宽最大,其原因

是 CMT 焊具有较低的热输入,从而使得母材与焊丝熔化量少焊缝熔宽变窄。

图 6 为不同 GMAW 工艺实测电流电压波形,图 6(a) CMT 焊为短路过渡,图 6(b) MIG 焊为滴状过渡,图 6(c) P-MIG 焊为射滴过渡。从图 6 可以看出,3 种工艺下电流电压波形最稳定的为 CMT 焊接工艺,其飞溅量几乎为零,其次为 P-MIG 焊与 MIG 焊。其中 P-MIG 焊相较于 MIG 焊的电流电压波形,波动周期少频率较高,其产生的飞溅量也就越少^[21]。在 CMT 波形阶段,其峰值电流和电压分别为 182 A 和 23 V,短路电流和短路电压分别为 35 A 和 5 V。而在

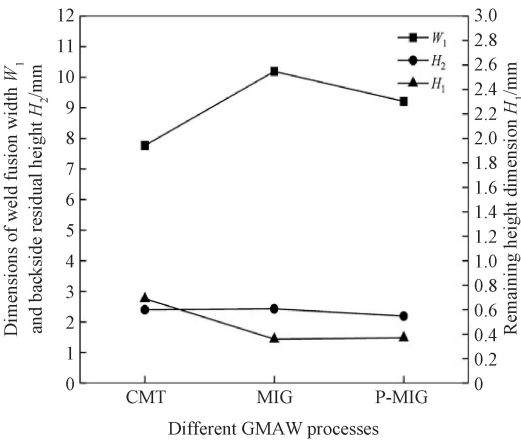


图 5 焊接接头的尺寸变化

Fig. 5 Dimensional changes of the welded joints

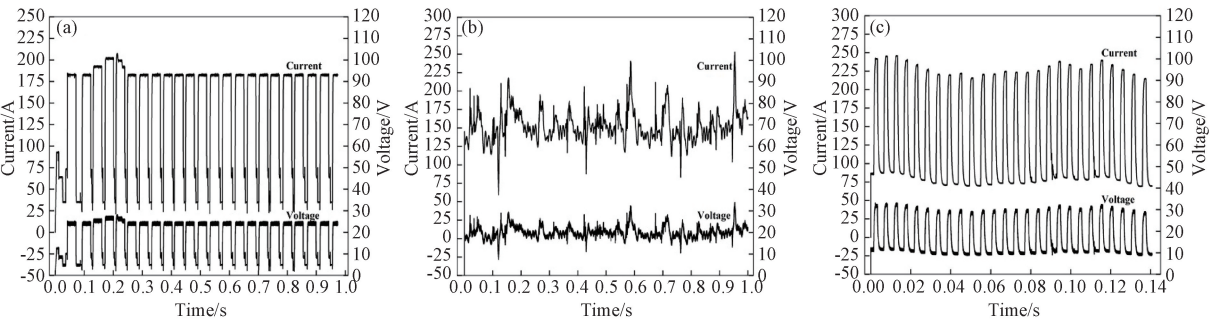


图 6 不同 GMAW 工艺实测电流电压波形 (a) CMT 焊波形; (b) MIG 焊波形; (c) P-MIG 焊波形

Fig. 6 Measured current and voltage waveforms of different GMAW processes

(a) CMT welding waveforms; (b) MIG welding waveforms; (c) P-MIG welding waveforms

显微镜观察焊接接头横截面气孔,使用 ImageJ 软件统计了 38 μm 级以上气孔,气孔统计区域与统计结果如图 7 所示,可根据公式(2)计算焊缝气孔率:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S_w} \quad (2)$$

式中: S_i 为单个气孔面积, S_w 为焊缝区域面积。从

图 7(b) 可以看出 CMT 焊接工艺的气孔面积与气孔率最低,因为 CMT 焊接工艺相较于 MIG 焊与 P-MIG 焊具有较低的热输入,使得在焊接过程中空气中氢的溶解量较低,所以焊缝中析出的气孔较少。MIG 焊接工艺的气孔面积与气孔率和 CMT 焊接工艺相差不大,其原因是随着热输入的增加,增长了焊缝熔池存

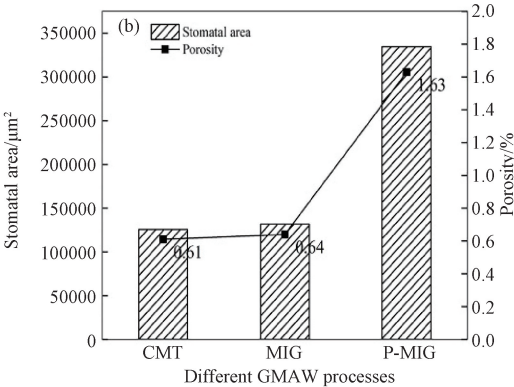
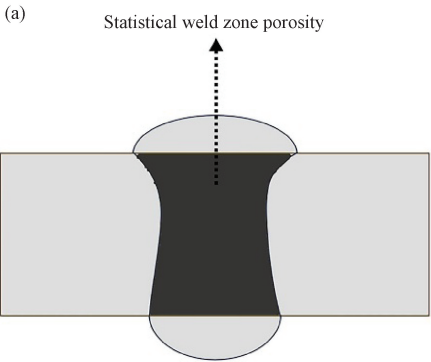


图 7 接头气孔统计 (a) 气孔统计区域; (b) 气孔面积与孔隙率

Fig. 7 Joint porosity statistics (a) pore statistical region; (b) pore area and porosity

在时间,使得氢的逸出^[22]。其中 P-MIG 焊接工艺的气孔面积与气孔率最多,约为 CMT 焊的 2.6 倍,主要因为脉冲电流会对熔池进行搅拌,使得内部流体变得不稳定,焊接稳定性变差,导致气孔面积与气孔率增多^[23]。

2.3 不同 GMAW 工艺接头显微组织

不同 GMAW 工艺、接头显微组织如图 8 所示。图 8(a) 为母材 (Base metal, BM) 组织, BM 组织主要由 α (Al) 基体相与 β (Mg_2Si) 相组成。图 8(b) 为 CMT 焊部分熔化区 (Partially melted zone, PMZ) 和热影响区 (Heat affected zone, HAZ) 组织, 黑色箭头所指的黑点是破碎的氧化物在流动状态下呈现不均匀分布致使局部致密, 在腐蚀后形成黑色富氧区域^[24]。图 8(c) 为 CMT 焊缝 (Welding zone, WZ) 组

织, 主要为等轴树枝晶, 结构是由 α (Al) 固溶体与 Al-Si 共晶组织组成, 晶内中还有黑色颗粒 Mg_2Si 析出。从图 8(b)、8(d) 和 8(f) 可以看出 3 种工艺下 PMZ 的显微组织主要为粗大的柱状晶, 其方向沿着焊缝中心生长。MIG 焊与 P-MIG 焊的焊缝组织主要由粗大的柱状晶与等轴树枝晶组成, 如图 8(e) 和 8(g) 所示, 其原因是过多的热输入使得焊缝晶粒有足够的时间生长, 使得晶粒尺寸较大, 在 P-MIG 焊接工艺下, 因脉冲电流的作用会使得焊缝组织中有大量低熔点偏析相 Al-Si 共晶组织析出。从图 8 可以看出, CMT 焊相较于 MIG 焊和 P-MIG 焊的焊缝组织更为细小, 这是由于 CMT 具有较低的热输入, 使得熔池快速冷却导致晶粒来不及生长, 并且焊缝过冷度更高, 成核效率更高从而阻碍晶粒长大^[25]。

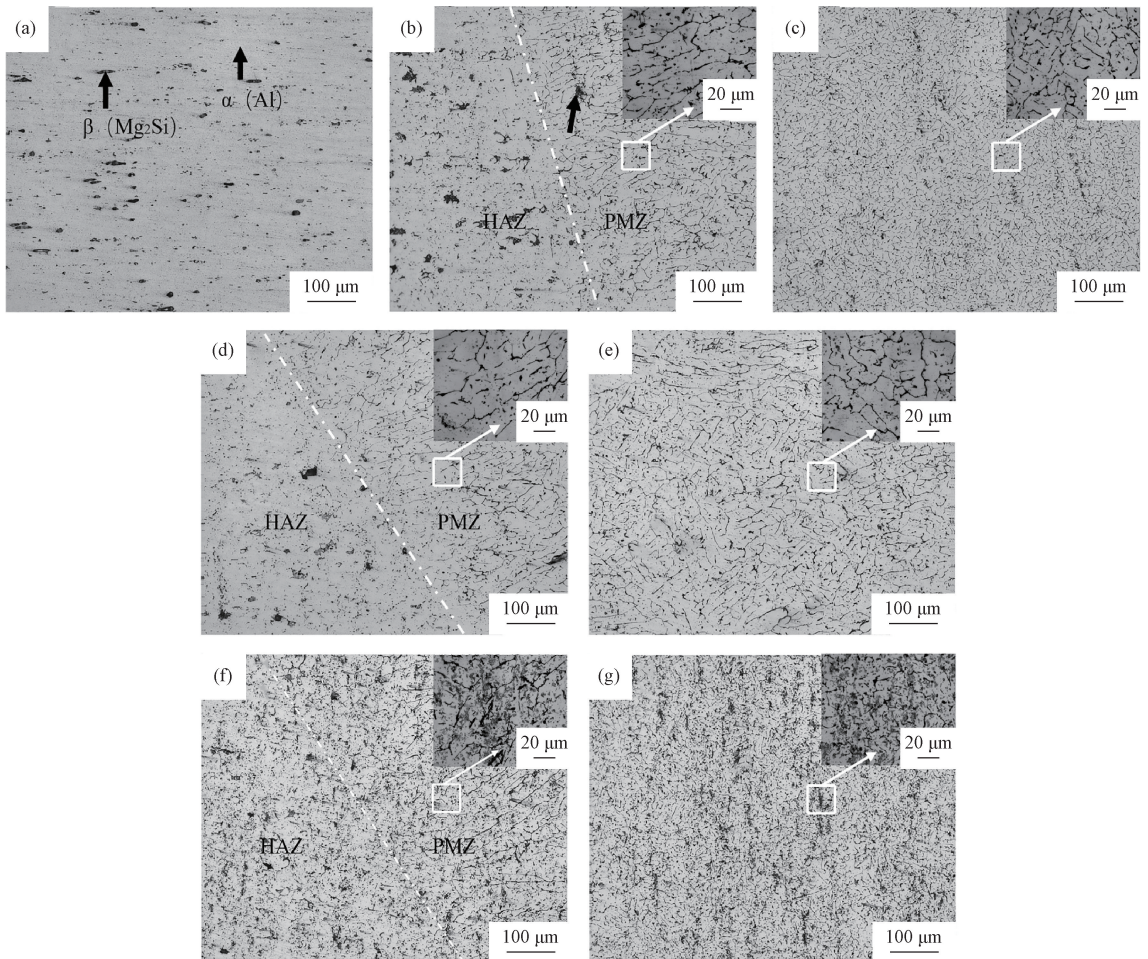


图 8 不同 GMAW 工艺接头显微组织 (a) BM; (b) CMT 焊 PMZ 附近; (c) CMT 焊缝中心; (d) MIG 焊 PMZ 附近; (e) MIG 焊缝中心; (f) P-MIG 焊 PMZ 附近; (g) P-MIG 焊缝中心

Fig. 8 Microstructure of the joints with different GMAW processes (a) BM; (b) CMT welding near PMZ; (c) weld center of CMT welding; (d) MIG welding near PMZ; (e) weld center of MIG welding; (f) P-MIG welding near PMZ; (g) weld center of P-MIG welding

2.4 不同 GMAW 工艺对接头硬度的影响

图 9 为不同 GMAW 工艺的接头的显微硬度分布。从图 9 可以看出,3 种 GMAW 工艺从熔合线到热影响区硬度值会缓慢下降,达到整个接头硬度值最低点(软化区),然后又缓慢上升。其硬度值下降的原因是热影响区受热循环的作用,致使该区域发生过时效,导致析出相的溶解与强化相的聚集长

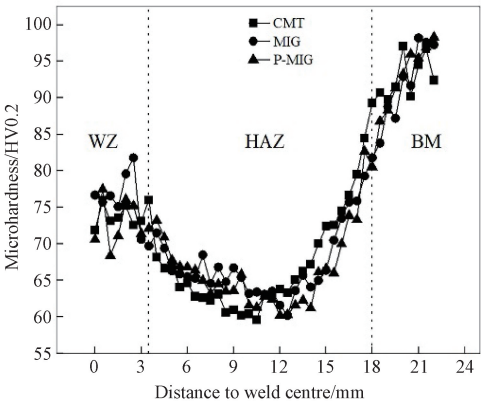


图 9 不同 GMAW 工艺的接头的显微硬度分布
Fig. 9 Microhardness distribution of the joints with different GMAW processes

大^[18]。从图 9 还可以看出,3 种工艺下接头硬度值相差不大,MIG 焊和 P-MIG 焊热影响区宽度一样,但相比于 CMT 焊长 1.5 mm。其中母材平均硬度为 94 HV0.2,CMT 焊缝平均硬度为 74 HV0.2,热影响区最低硬度为 60 HV0.2。MIG 焊缝平均硬度为 76 HV0.2,热影响区最低硬度为 60 HV0.2。P-MIG 焊缝平均硬度为 73 HV0.2,热影响区最低硬度为 60 HV0.2。

2.5 不同 GMAW 工艺对拉伸性能的影响

图 10 为不同 GMAW 工艺下试样断裂宏观形貌。从图 10 中可以看出,3 种工艺下试样拉伸均断裂在热影响区的软化区,距离焊缝中心 13~15 mm 处,并且在断裂前有明显的颈缩现象。表 3 为不同 GMAW 焊接工艺下接头拉伸试验结果。由表 3 可知 CMT 焊、MIG 焊和 P-MIG 焊的平均抗拉强度分别为 199.20、183.68 和 185.48 MPa,可达母材的 69.8%、64.3%和 64.9%,平均断后伸长率分别为 11.01%、10.73%和 11.36%。综合来看,CMT 工艺下接头具有较好的拉伸性能。

图 11 为不同 GMAW 焊接工艺下试样拉伸断口形貌,从图 11 中可以看出,BM 和 CMT、MIG 和

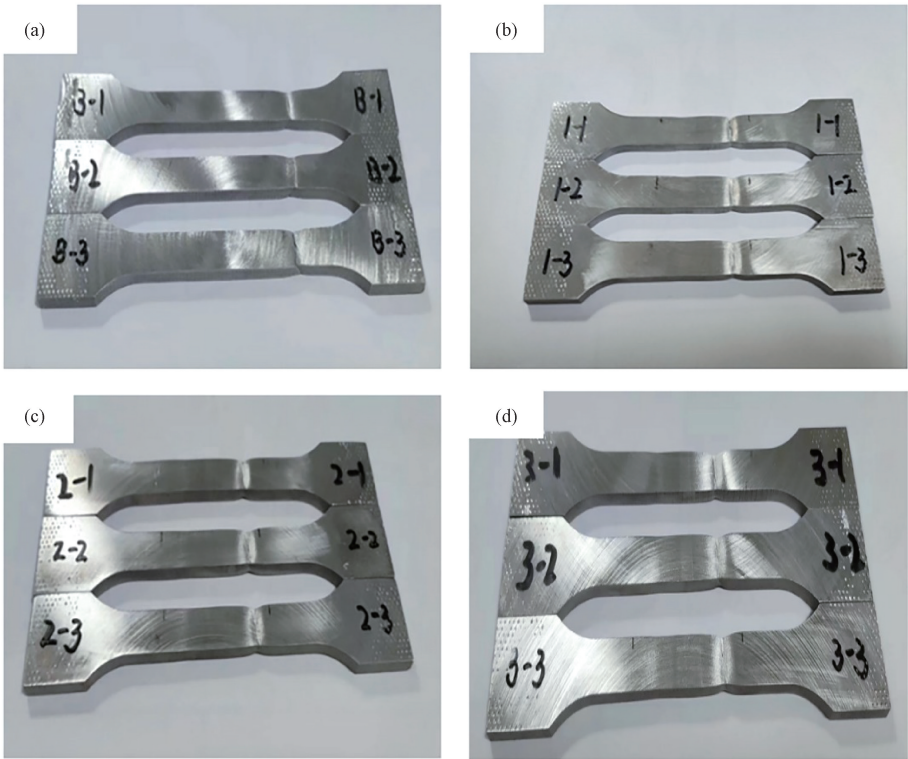


图 10 不同 GMAW 焊接工艺下试样断裂宏观形貌 (a) BM; (b) CMT; (c) MIG; (d) P-MIG
Fig. 10 Macroscopic fracture morphology of the specimens under different GMAW welding processes
(a) BM; (b) CMT; (c) MIG; (d) P-MIG

表 3 不同 GMAW 焊接工艺下接头拉伸试验结果

Table 3 Tensile test results of the joints with different GMAW welding processes

Welding method	Number	Tensile strength/MPa	Average tensile strength/MPa	Elongation/%	Average elongation/%	Rupture position
BM	B-1	284.93	285.60	14.89	14.33	BM
	B-2	279.93		14.06		BM
	B-3	291.94		14.03		BM
CMT	1-1	199.55	199.20	11.70	11.01	HAZ
	1-2	195.50		10.95		HAZ
	1-3	202.56		10.38		HAZ
MIG	2-1	185.94	183.68	10.55	10.73	HAZ
	2-2	182.76		10.70		HAZ
	2-3	182.34		10.95		HAZ
P-MIG	3-1	189.18	185.48	11.40	11.36	HAZ
	3-2	185.00		11.48		HAZ
	3-3	182.27		11.20		HAZ

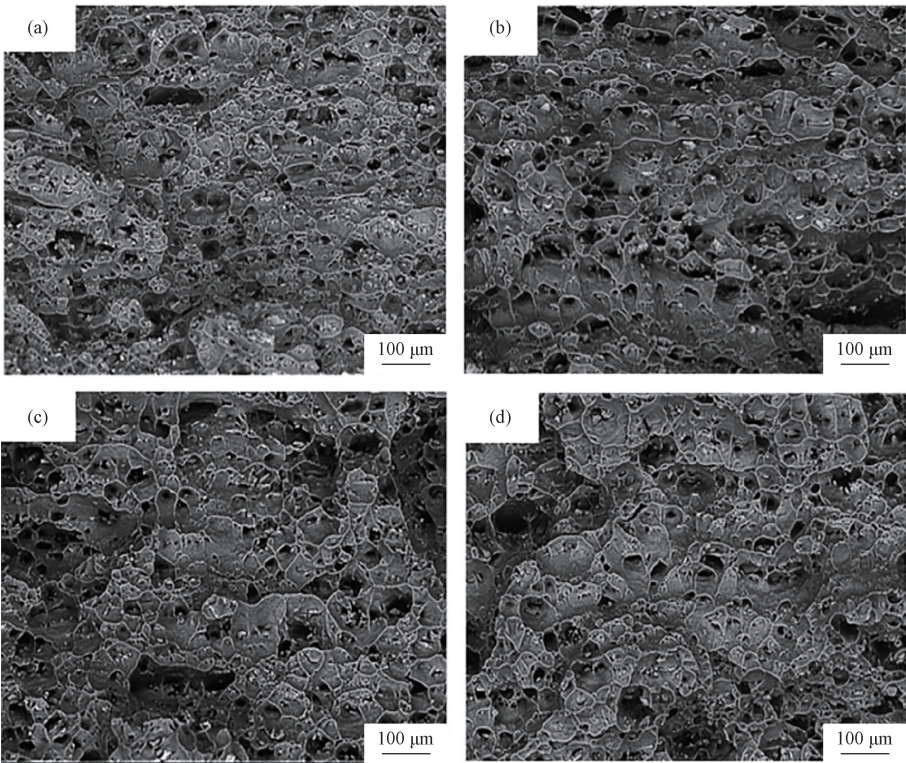


图 11 不同 GMAW 焊接工艺下试样的拉伸断口形貌 (a) BM; (b) CMT; (c) MIG; (d) P-MIG

Fig. 11 Tensile fracture surface morphology of the specimens under different GMAW welding processes

(a) BM; (b) CMT; (c) MIG; (d) P-MIG

P-MIG 工艺下拉伸断口中分布着大量细小韧窝,并且在韧窝中可以观察到第二相颗粒的残余物,4 种拉伸断口的特征属于延性断裂。

3 结论

1)通过 CMT、MIG 和 P-MIG 工艺均实现完全熔透,并且焊缝成形美观、焊缝表面无明显缺陷,其中

CMT 焊具有较低的热输入,焊丝与母材的熔覆量较低,使得焊缝宽度较窄;

2) 采用 ImageJ 对焊缝区域统计 $38\text{ }\mu\text{m}$ 级以上气孔, CMT 焊具有较低的气孔率, 而 P-MIG 焊气孔率最多, 约为 CMT 焊的 2.6 倍, 其原因是脉冲电流会对熔池进行搅拌, 使得内部流体变得不稳定, 焊接稳定性变差, 导致气孔面积与气孔率增多;

3) CMT 焊相较于 MIG 焊和 P-MIG 焊, 焊缝组织更为细小, 主要为等轴树枝晶, 其结构是由 α

(Al) 固溶体与 Al-Si 共晶组织组成, 晶内中还有黑色颗粒 Mg_2Si 析出, 3 种工艺下部分熔化区的显微组织主要为粗大的柱状晶, 其方向沿着焊缝中心生长;

4) 3 种工艺下接头硬度值差别不大, 其硬度最低点在热影响区的软化区, 并且试样拉伸断裂也是在此区域, 断裂类型属于延性断裂, 其中 CMT 焊具有较好的拉伸性能, 接头抗拉强度为 199.20 MPa, 可达母材的 69.8%, 断后伸长率为 11.01%。

参 考 文 献

- [1] 祁麟, 喻军, 李超, 等. 船舶铝合金焊接工艺方法对比分析[J]. 船海工程, 2023, 52(3): 43-47.
QI Lin, YU Jun, LI Chao, et al. Comparative analysis of welding processes of aluminium alloys for ships[J]. Ship & Ocean Engineering, 2023, 52(3): 43-47.
- [2] 任泽良, 项肇, 余细平, 等. 6061 铝合金 MIG 焊接头的组织和力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(3): 139-141.
REN Ze-liang, XIANG Zhao, YU Xi-ping, et al. Microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy MIG welded joint[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(3): 139-141.
- [3] 耿占一, 霍佳磊, 胡连海, 等. 6061 铝合金/DP600 钢 CMT 熔钎焊接头的组织及力学性能[J]. 热加工工艺, 2024, 53(1): 58-62.
GENG Zhan-yi, HUO Jia-lei, HU Lian-hai, et al. Microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy/DP600 steel CMT fusion brazed joint[J]. Hot Working Technology, 2024, 53(1): 58-62.
- [4] 刘方军, 陈超广, 王阳, 等. 基于相图计算的汽车车身用 Al-Mg-Si 系合金成分设计[J]. 装备制造技术, 2020, (5): 13-16.
LIU Fang-jun, CHEN Chao-guang, WANG Yang, et al. Metallurgical insights into new automobile body Al-Mg-Si series alloys on the basis of calphad[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020, (5): 13-16.
- [5] 雷小伟, 马照伟, 陈利阳, 等. 不同 CMT 焊接工艺对 5083 铝合金焊缝成形及性能的影响[J]. 电焊机, 2022, 52(9): 39-44.
LEI Xiao-wei, MA Zhao-wei, CHEN Li-yang, et al. Effect of different cold metal transfer welding technology on weld forming and properties of 5083 aluminum alloy[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(9): 39-44.
- [6] Mohammadzadeh Jamalian H, Farahani M, Besharati Givi M K, et al. Study on the effects of friction stir welding process parameters on the microstructure and mechanical properties of 5086-H34 aluminum welded joints[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(1/4): 611-621.
- [7] Bunazir I, Akselsen O M, Salminen A, et al. Fiber laser-MIG hybrid welding of 5mm 5083 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 233: 107-114.
- [8] 韩颖. 5E83 铝合金 GMAW 焊接工艺研究[J]. 轻合金加工技术, 2023, 51(1): 46-52.
HAN Ying. Study on GMAW welding process of 5E83 aluminum alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2023, 51(1): 46-52.
- [9] 葛佳棋, 万升云, 汤旭祥, 等. GMAW 自动焊工艺参数对焊缝成形影响研究[J]. 金属加工(热加工), 2022(6): 45-48.
GE Jia-qi, WAN Sheng-yun, TANG Xu-xiang, et al. Study on the influence of GMAW automatic welding process parameters on weld forming[J]. MW Metal Forming, 2022, (6): 45-48.
- [10] 葛佳棋, 李帅贞, 汤旭祥, 等. 国产与进口 ER5356 铝合金焊丝质量性能对比研究[J]. 金属加工(热加工), 2021(11): 31-34.
GE Jia-qi, LI Shuai-zhen, TANG Xu-xiang, et al. Comparative study on quality and performance of domestic and imported ER5356 aluminium alloy welding wire[J]. MW Metal Forming, 2021(11): 31-34.

- [11] Duan C F, Yang S L, Liu H B, et al. Formation and fatigue property of MIG welded high-speed train 6005A-T6 aluminum alloy[J]. Materials Research Express, 2019, 6(5): 056532.
- [12] Hadadzadeh A, Ghaznavi M M, Kokabi A H. HAZ softening behavior of strain-hardened Al-6.7Mg alloy welded by GMAW and pulsed GMAW processes[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92: 2255–2265.
- [13] Nie F, Dong H, Chen S, et al. Microstructure and mechanical properties of pulse MIG welded 6061/A356 aluminum alloy dissimilar butt joints[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(3): 551–560.
- [14] 董颖, 于建明, 康铭, 等. 6061 铝合金 CMT 与 MIG 焊接头组织及性能研究[J]. 铝加工, 2021(2): 70–72.
DONG Ying, YU Jian-ming, KANG Ming, et al. Study on microstructure and properties of CMT and MIG welded joint of 6061 aluminum alloy[J]. Aluminium Fabrication, 2021(2): 70–72.
- [15] 关军印, 姜佳成, 牟晨飞, 等. CMT 焊接电流对铝合金/镀锌钢板熔钎焊接头组织及性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(9): 156–162.
GUAN Jun-yin, JIANG Jia-cheng, MOU Chen-fei, et al. Effect of CMT welding current on microstructure and properties of aluminum alloy/galvanized steel plate brazed joint[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2019, 40(9): 156–162.
- [16] 胡玉, 王凯, 周少艺, 等. CMT 焊接 S32101 双相不锈钢电弧稳定性研究[J]. 焊接技术, 2023, 52(12): 59–63.
HU Yu, WANG Kai, ZHOU Shao-yi, et al. Research on arc stability of CMT welding of S32101 duplex stainless steel[J]. Welding Technology, 2023, 52(12): 59–63.
- [17] Wang H, Cen S. Research on microstructure and mechanical properties of CMT and MIG welded joints of A6N01 aluminum alloy [C]//2021 International Conference on Advanced Technologies and Applications of Modern Industry (ATAMI 2021), Wuhan, 2021: 012051.
- [18] Wang Y, Li M, Yang X, et al. Effect of P-MIG and CMT on microstructure and properties of 6082-T6 joints[J]. Materials Science and Technology, 2023, 39(15): 2074–2089.
- [19] 张志强, 白玉洁, 徐连勇, 等. UNS S32750 超级双相不锈钢的 CMT+P 焊接工艺[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(11): 197–206.
ZHANG Zhi-qiang, BAI Yu-jie, XU Lian-yong, et al. CMT+P welding process of UNS S32750 super duplex stainless steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(11): 197–206.
- [20] 刘志强. 磁场辅助 CMT 焊接铝合金的焊接过程及接头组织性能分析[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2020.
LIU Zhi-qiang. Magnetic field-assisted welding process of CMT welding aluminum alloy and analysis of microstructure and properties of joints[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering and Technology, 2020.
- [21] 王好猛. 熔化极气体保护焊电信号与焊接过程稳定性的相关性研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
WANG Hao-meng. Study on the correlation between GMAW electrical signal and the stability of welding process[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [22] 魏国. 浅析铝焊缝气孔的产生与防止[J]. 有色金属加工, 2006(3): 46–48.
WEI Guo. Causes and preventive measures of gas pinhole within aluminum weld[J]. Nonferrous Metals Processing, 2006(3): 46–48.
- [23] 朱轩, 杨晓益, 陆鑫, 等. 电弧脉冲对 6005A-T6 铝合金 CMT-P 焊接接头组织和性能的影响[J]. 材料导报, 2024, 38(23): 23090035.
ZHU Xuan, YANG Xiao-yi, LU Xin, et al. Effect of arc pulse on microstructure and properties of 6005A-T6 aluminum alloy CMT-P welded joint[J]. Materials Reports, 2024, 38(23): 23090035.
- [24] Cui S, Tian F, Ma R, et al. Study on the morphology, microstructure, and properties of 6082-T6 aluminum alloy joints in MIG welding[J]. Metals, 2023, 13(7): 1245.
- [25] 姚尚坤, 冯曰海, 黄俊, 等. 5A06 铝合金 GMAW 熔透接头组织与性能对比研究[J]. 电焊机, 2022, 52(11): 52–60.
YAO Shang-kun, FENG Yu-hai, HUANG Jun, et al. Comparative study on microstructure and properties of 5A06 aluminum alloy full-penetration joint with gas metal arc welding process[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(11): 52–60.