

ZL114A/6061-T6 铝合金 MIG 对接焊接头组织和性能研究

李 科¹ 张元好^{1,2} 王金凤^{1,2} 饶牧成³ 胡明治³ 车亚军³ 郭 亿¹

(1. 湖北汽车工业学院材料科学与工程学院, 十堰 442000; 2. 汽车轻量化材料及连接技术湖北省工程研究中心, 十堰 442000; 3. 东风零部件有限公司, 十堰 442001)

摘 要 采用 MIG 对接焊工艺焊接 ZL114A 和 6061-T6 异种铝合金, 焊接电流为 112 A, 焊接电压为 18.5 V。通过光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)、显微硬度计及万能试验机等设备对焊接接头的微观组织和力学性能进行了分析。研究表明, 焊接接头的微观组织以 α -Al 相为基体, 基体中分布有 Al-Mg 和 Al-Mg-Si 析出相。当焊接速度为 340 mm/min 时, 接头的力学性能达到最佳状态, 其抗拉强度为 195 MPa, 断口呈现韧性断裂特征。硬度分析表明, 焊接接头两侧的热影响区平均硬度值均低于母材, 发生了软化现象, 接头最低硬度(HV)出现在 6061-T6 侧的 HAZ(热影响区), 为母材的 95%。

关键词 ZL114 合金; 6061-T6 合金; MIG 焊; 抗拉强度; 硬度

中图分类号 TG456.9; TG146.21

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.Y20240045

Microstructure and Properties of ZL114A/6061-T6 Aluminum Alloy MIG Welded Joints

LI Ke¹, ZHANG Yuanhao^{1,2}, WANG Jinfeng^{1,2}, RAO Mucheng³, HU Mingzhi³, CHE Yajun³, GUO Yi¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Hubei Institute of Automotive Industry, Shiyan 442000; 2. Hubei Provincial Engineering Center for Automotive Lightweight Materials and Joining Technology, Shiyan 442000;

3. Dongfeng Motor Parts and Components Group Co., Ltd., Shiyan 442001)

Abstract: ZL114A and 6061-T6 dissimilar aluminum alloys were welded by MIG butt welding process with welding current of 112 A and welding voltage of 18.5 V. The microstructure and mechanical properties of welded joints were analyzed by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), microhardness tester and universal testing machine. The results indicate that α -Al phase is the matrix of welded joint, and Al-Mg and Al-Mg-Si precipitation are distributed in the matrix. With the welding speed of 340 mm/min, mechanical properties of welded joint are desirable, where the tensile strength is 195 MPa, and the fracture is characterized by plastic fracture. The hardness analysis reveals that the average hardness values at the heat-affected zone on both sides of the welded joint are lower than that of base metal, indicating softening phenomenon, and the minimum hardness appears in the HAZ on 6061-T6 side, which is 95% of base metal.

Key Words: ZL114A Alloy, 6061-T6 Alloys, MIG Welding, Tensile Strength, Hardness

6061-T6 铝合金具有密度低、比模量高、韧性好、耐腐蚀性优和抗冲击性好等特点, 在航空航天、舰船远洋和车辆运输等领域得到了广泛应用^[1-2]。ZL114A 铸造铝合金凭借其优异的铸造性能、良好的导热、导电性, 被广泛应用在汽车制造、建筑和电子设备等领域^[3-4]。近年来, 由于铝合金在汽车轻量化中应用日益增加, 为充分发挥不同铝合金的性能优势, 单个零件中会应用到不同牌号的铝合金, 如 6061-T6 变形铝合金和 ZL114A 铸造铝合金, 因此其连接必不可少^[5]。某摩托车的前悬

挂模块采用了铸造铝合金和变形铝合金。由于 ZL114A 铸造铝合金与 6061-T6 变形铝合金化学成分和力学性能均存在较大差异, 两者的焊接具有很大的挑战性^[6-7]。

目前, 国内外研究者对铝合金焊接工艺及焊接接头质量进行了广泛研究。宋刚等^[8]采用双轧辊系统对 6061-T6 薄板铝合金直流双脉冲熔化极气体保护焊接头进行同步双面轧制, 使得铝合金接头的硬度明显提升, 过时效软化区的硬度(HV)由 60~70 提升至 80~

收稿日期: 2024-12-06; 修订日期: 2025-01-21

第一作者: 李科, 男, 1999 年出生, 硕士研究生, E-mail: likedxs@163.com

通信作者: 王金凤, 女, 1978 年出生, 教授, E-mail: iwwangjinfeng@126.com

引用格式: 李科, 张元好, 王金凤, 等. ZL114A/6061-T6 铝合金 MIG 对接焊接头组织和性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(1): 69-73.

LI K, ZHANG Y H, WANG J F, et al. Microstructure and properties of ZL114A/6061-T6 aluminum alloy MIG welded joints[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(1): 69-73.

90。鲁宽亮等^[9]研究了 6063/7075 铝合金熔化极惰性气体保护(Metal Inert-Gas, MIG)焊工艺与接头综合性能的关系,发现与单面焊相比,双面焊接头可以在保持力学性能基本相当的前提下,金相组织更加均匀,晶粒更加细化。JIANG Y H 等^[10]通过激光表面重熔(Laser surface remelting, LSR)技术在 6061-T6 铝合金 MIG 焊接接头上制备了“软硬”交替的仿生异质结构。结果表明,该仿生异质结构可以有效地发展非均质变形诱导(Heterogeneous deformation induction, HDI)应力强化和 HDI 应变硬化,实现了强度和韧性的协同强化。WANG M 等^[11]研究了 A356 铝合金和 6061 铝合金 MIG 焊接接头的微观组织和力学性能,通过显微组织分析发现,接头力学性能的提高主要是由于母材由真空高压压铸生产、热处理和 MIG 焊接等制造工艺的综合作用,使其孔隙率降低,同时生成金属间强化相和更细小的晶粒组织。拉伸试验发现,焊接接头在连接的 A356 侧发生断裂。QIN Y 等^[12]采用纳米 TiC 粉末填充激光焊接的方法对 7075-T6 板材进行焊接,发现将 TiC 纳米颗粒掺入 7075 铝合金粉末中可以让接头焊接区组织由铸态枝晶向等轴晶转变,焊接区组织中心的平均晶粒尺寸由 85 μm 细化到 14 μm ,有效降低接头内孔隙率,大幅提升抗拉强度。HASSANIFARD S 等^[13]研究了固溶处理+人工时效对搅拌摩擦焊铝合金 6061-T6 接头疲劳强度的影响。结果发现,相比于热处理前焊态接头,固溶处理+人工时效处理后的试样抗拉强度提高了 73%。

虽然对 6061-T6 铝合金及铸造铝合金进行了大量研究,但采用熔化极惰性气体保护焊研究 6061-T6+ZL114A 异种铝合金的研究报道很少。为满足某摩托车底盘前悬挂件对异种铝合金的需求,本研究采用 MIG 对接焊的方式对 ZL114A 和 6061 异种铝合金的工艺焊接性进行探索,通过金相组织分析、力学性能测试和维氏硬度研究等研究其工艺焊接性,确定焊接工艺对焊接接头组织和性能的影响,为某车型前车架异种铝合金 MIG 焊零件的应用提供参考。

1 试验材料与方法

根据工况条件,前车架采用的 ZL114A 和 6061-T6 厚度均为 3 mm,为节约材料,选用板材对接的方式来研究其焊接工艺。将板材切割成尺寸为 65 mm $\times$ 50 mm $\times$ 3 mm 的块状待用。选用 ER5356 铝镁焊丝作为填充材料^[4,14]。母材及焊丝主要化学成分见表 1。

使用 VR-4000 逆变式脉冲 MIG 弧焊电源,采用高

表 1 母材和焊丝主要化学成分

Tab.1 Chemical composition of base metal and welding wire

材料	w_B						
	Si	Mg	Cu	Fe	Zn	Mn	Al
ZL114A	7.10	0.30	0.20	0.65	0.32	0.35	余量
6061	0.65	1.38	0.44	0.32	0.12	0.11	余量
ER5356	0.05	4.90	0.05	0.12	0.09	0.12	余量

纯 Ar(质量分数为 99.99%)气作为保护气体,气体流速为 15 L/min,焊丝直径为 1.2 mm,单面对接。经过前期大量的焊接工艺试验,筛选出了焊接工艺参数范围,焊接电流为 112 A,焊接电压为 18.5 V,焊接速率分别为 310、320、330、340 和 350 mm/min。使用线切割方法垂直于焊缝切取拉伸试样和金相试样,取样位置见图 1,金相试样经研磨抛光后使用质量分数为 7% 的 NaOH 试剂腐蚀 40 s。采用金相显微镜(AXIO OBSERVER Z1M)观察接头的宏观形貌;采用附带能谱仪(Energy dispersive spectroscopy, EDS)的高分辨场发射扫描电镜(Scanning electron microscope, SEM, JSM-7900F)观察接头不同亚区的微观组织;根据 GB/T 2651-2023 制备板状拉伸试样形状和尺寸,见图 2,用 CMT5205 型万能试验机对试样的力学性能进行分析,拉伸速度为 2 mm/min;用维氏硬度计(MH-5)测定焊接接头距离上表面 1 mm 的横截面硬度分布,在测试过程中,以焊缝中心为 0 点,左右各测试 20 个点,点间距为 0.5 mm,施加载荷为 0.98 N,保压时间为 15 s。

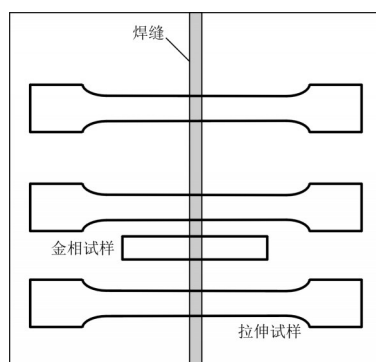


图 1 取样位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling location

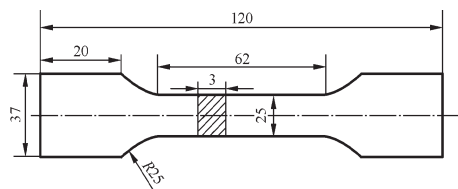


图 2 拉伸试样尺寸示意图

Fig.2 Schematic diagram of dimension of tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 铝合金 MIG 焊接接头组织及成分分布

图 3 为焊接接头宏观形貌及接头各亚区的微观形貌。图 4 为焊缝区微观组织。根据焊接热循环和组织变化情况,将焊接接头分为焊缝金属区(WM)、热影响区(HAZ)和母材区(BM)。从图 3b 可以观察到灰色的 α -Al 基体和大量的白色晶间共晶 Si 颗粒。图 3c 中灰色区域为 α -Al 基体,白色细小晶粒为 6061 铝合金经过 T6 热处理后,晶粒进一步细化的 Mg_2Si 强化相,这种相结构赋予了 6061-T6 母材更好的韧性和力学性能^[14]。由于焊接热输入的影响,ZL114A 合金近缝区组织发生了显著的变化,见图 3d。再结晶和局部溶解导致了大颗粒结构的形成,相较于母材,颗粒间距增大,组织变得粗大,晶粒明显长大。从图 3e 中可见大量细长的柱状晶组织,相比于母材,晶界有明显的粗化现象,晶界处有近似等轴状的白色共晶体聚集,这与文献[4]结论一致。

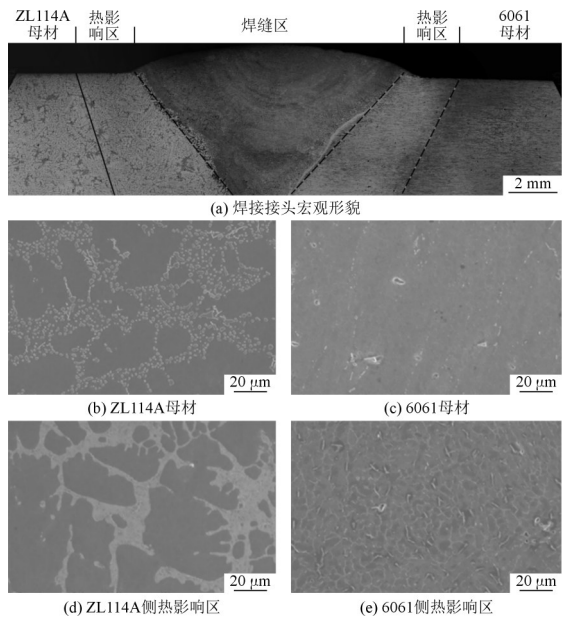


图 3 ZL114A 和 6061 铝合金 MIG 焊接接头宏观形貌及不同区域微观组织

Fig.3 Macro morphologies of MIG welded joints of ZL114A and 6061 aluminum alloy and microstructure in different regions

表 2 为焊缝区域两种物质的 EDS 点扫描结果。可以观察到,焊缝区由大量粗大的胞状树枝晶和少部分的等轴晶组成,枝晶中第二相间距较大,晶界处存在偏析,黑色的第二相呈长棒状和点状分布在基体中。焊缝区域的显微组织主要为基体固溶体和第二相组成的共晶组织,灰色基体区(谱图 1)主要是 Al 和 Mg,构成了稳定的 Al-Mg 固溶体;晶界处黑色区域(谱图 2),有

少量的 Si 和 Mg 偏聚,为 Mg_2Si 相,该结构有助于优化焊接接头的力学性能^[15]。

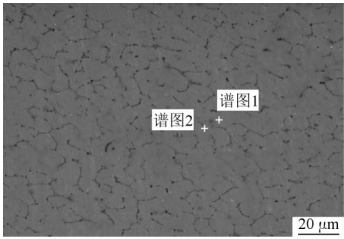


图 4 焊缝区域微观组织

Fig.4 Microstructure of welded joint area

表 2 焊缝区域 EDS 点扫描结果

Tab.2 EDS point scanning results in the weld area %

谱图	x_B				
	C	Mg	Al	Si	O
1	0.58	3.00	96.42	—	—
2	0.90	14.49	69.52	9.43	0.90

分别对 ZL114A 和 6061-T6 两侧的母材-热影响区-焊缝边缘进行线扫描,结果见图 5 和图 6。可以看出,在热影响区靠近焊缝一侧,Al 含量保持稳定,Mg 和 Si 含量较低,但在扫描线晶粒处,Al 含量大幅下降,而 Si 含量则有一定程度的上升,这表明该晶粒为 Al-Si 金属固溶体;在热影响区靠近焊缝一侧,Al 含量整体有小幅下降趋势,Mg 含量则明显上升,这是由于焊接过程中填充的富含 Mg 的 ER5356 焊丝在该处生成 Al-Mg 相固溶体造成的,而 Si 含量无明显变化。在焊缝区域可以看出,Al 含量波动较大,Mg 和 Si 含量有一定程度上升,但同样有较大波动。结合点扫描结果, Mg_2Si 析出相和 Al-Mg 固溶体相在焊缝区域交替分布^[16]。

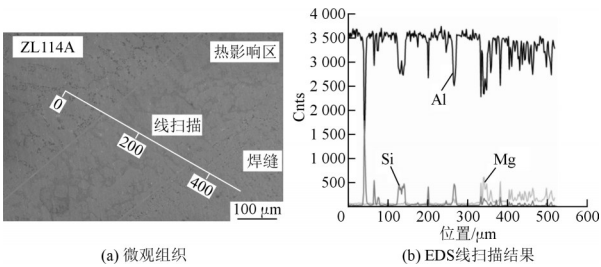


图 5 ZL114A 侧界面组织 EDS 线扫描结果

Fig.5 EDS linear scanning results of structure on ZL114A side

从图 6 可以看出,与接头另一侧相似,Al 含量在热影响区靠近母材侧大幅下降,Mg 含量在该区域产生峰值,Si 含量无明显变化且含量较低,表明该区域为 Al-Mg 金属固溶体^[17]。在焊缝区域,Al 含量分布均匀,Mg 和 Si 含量有较大波动,与 ZL114A 侧扫描结果相似,该区域同样有 Mg_2Si 析出相和 Al-Mg 固溶体生成,呈均匀分布。

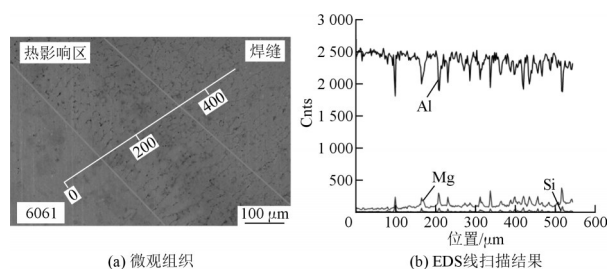


图 6 6061-T6 侧界面组织 EDS 线扫描结果

Fig.6 EDS linear scanning results of structure on 6061-T6 side

2.2 铝合金 MIG 焊接接头力学性能分析

试验所用 ZL114A 母材抗拉强度为 220 MPa, 而伸长率仅为 2%; 6061-T6 母材抗拉强度为 260 MPa, 伸长率为 9%。图 7 为拉伸试样应力-应变曲线和力学性能。可以看出, 当焊接速度为 340 mm/min 时, 试样表现出最佳的力学性能, 抗拉强度达到 195 MPa, 为 ZL114A 母材的 88%, 6061-T6 母材的 75%, 伸长率达到 3.3%, 超过 ZL114A 母材, 同时达到 6061-T6 母材的 36%; 当焊接速度为 320 mm/min 时, 力学性能最差, 强度和延展性均较低。

图 8 为试样 1 和试样 4 的焊接接头的微观拉伸断口形貌。从图 8a 可以看出, 试样 1 断口呈典型的

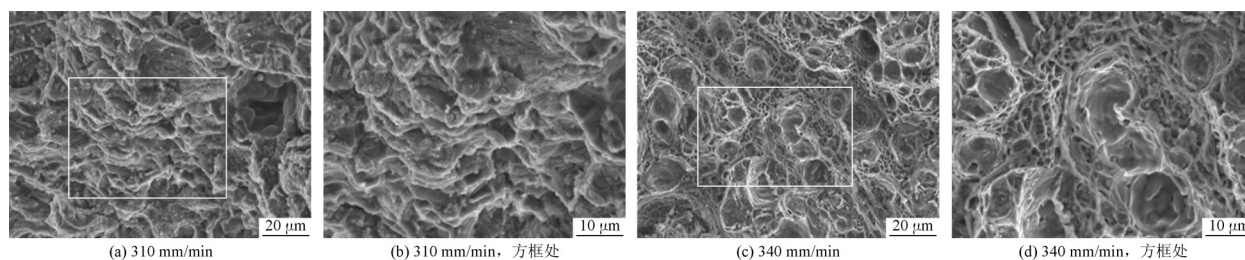


图 8 不同焊接速率下试样的拉伸断口形貌

Fig.8 Tensile fracture morphologies of specimens at different welding speeds

2.3 焊接接头横截面硬度分析

焊接接头在拉伸过程中断裂位置通常是硬度最低的区域, 因此硬度在一定程度上同样也反映了接头的力学性能^[18-20]。针对抗拉强度最高的试样 4 的横截面进行了硬度测试, 硬度分布见图 9。可以看出, 整个接头的硬度分布总体上呈现出焊缝区高, 热影响区下降, 然后母材区回升的规律, 基本呈现“W”形。ZL114A 母材区的平均硬度(HV)为 89.8, 该侧热影响区硬度较母材有所降低, 其硬度(HV)平均值为 85.9, 较 ZL114A 母材降低了 4.3%; 6061-T6 母材的平均硬度(HV)为 82.3, 该侧热影响区的硬度平均值为 79.5, 略低于母材的硬度, 较 6061-T6 母材降低了 3.4%, 同时在该区域检测出焊接接头最低硬度值(HV)为 78.4。焊缝金属区的硬度最高, 平均硬度值(HV)为

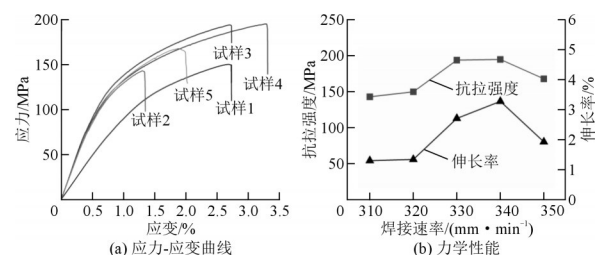


图 7 不同焊接速度下的力学性能

Fig.7 Mechanical properties of specimens at different welding speeds

韧性断裂特征, 可观察到明显的塑性变形痕迹和较多的韧窝结构, 表明试样在拉伸过程中经历了较大的塑性变形, 符合韧性断裂特征。然而, 其韧窝分布并不均匀, 部分区域韧窝较小, 边缘比较锐利, 表明材料在拉伸时微孔聚合不足, 并且小范围扩展。这种现象的产生与焊接速度偏低有关。在其他焊接参数不变时, 较低的焊接速度增大了焊接过程中热输入, 从而促进了晶粒的长大, 形成了粗大的晶粒, 影响了材料的整体韧性。试样 4 同样具有韧性断裂特征, 但与试样 1 相比, 其韧窝结构较大、边缘圆滑且分布均匀。这表明试样 4 在断裂前承受了更为均匀的塑性变形, 拉伸时微孔聚合和扩展充分, 韧性显著优于试样 1。

99.8, 较 ZL114A 母材提升了 11.2%, 较 6061 母材提升了 21.3%, 焊缝区最高硬度值(HV)为 105.6, 说明母材在热影响区发生了组织软化, 造成接头在这些部位的性能下降, 这主要是由于焊接过程中快速冷却效应引起的组织演变, 导致热影响区冷却时形成粗大晶粒, 从而影响了硬度分布。

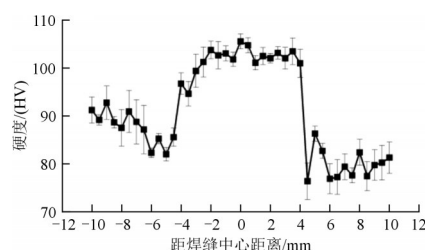


图 9 接头焊缝周围区域的硬度分布

Fig.9 Hardness distribution near the welding joint

3 结 论

(1) 焊接电流为 112 A、焊接电压为 18.5 V、焊接速度为 340 mm/min 时, ZL114A/6061-T6 铝合金 MIG 对接焊接头表现出理想的力学性能, 抗拉强度达到 195 MPa, 为 ZL114A 母材的 88%、6061-T6 母材的 75%, 伸长率为 3.3%, 超过 ZL114A 母材, 同时为 6061-T6 母材的 36%, 接头断裂形式为典型的韧性断裂。

(2) 对接焊接头焊缝区组织以 α -Al 相为基体, 由 Al-Mg 固溶体相和少量分布在晶间的 Mg 和 Si 形成的 Mg_2Si 析出相构成。ZL114A 侧热影响区由较大的晶粒组成, 相较于母材, 晶粒明显长大, 在靠近 ZL114A 母材侧生成了 Al-Si 固溶体, 在靠近焊缝侧生成了 Al-Mg 固溶体。6061-T6 侧热影响区由大量细长的柱状晶组成, 相比于母材, 晶粒有粗化现象, 在近母材区和近焊缝区均有 Al-Mg 固溶体生成。

(3) 焊接接头横截面硬度分布不均匀, 在两侧的焊接热影响区中存在明显的软化现象, ZL114A 侧热影响区的平均硬度值较母材降低了 4.3%, 6061-T6 侧热影响区的平均硬度值较母材降低了 3.4%, 焊缝区平均硬度(HV)值为 99.8, 显著高于两侧的母材, 为焊接接头的硬化区, 其硬度较 ZL114A 母材提升了 11.2%, 较 6061-T6 母材提升了 21.3%。

参 考 文 献

- [1] 梁成成, 冯锡峰, 林思洙, 等. 6061/5052 异种铝合金钎焊惰性气体保护焊接头的组织与性能[J]. 机械工程材料, 2024, 48(8): 30-34.
- [2] SONI B, BISWAS S. Evaluation of mechanical properties under quasi-static compression of open-cell foams of 6061-T6 Al alloy fabricated by pressurized salt infiltration casting method[J]. Materials Characterization, 2017, 130: 198-203.
- [3] 丁俭, 范玮, 赵乃勤, 等. 汽车铝合金轮毂低压铸造工艺的有限元模拟及优化[J]. 机械工程材料, 2016, 40(4): 93-98.
- [4] 李秀坤, 李兴康, 全列宁, 等. 铸铝 ZL101 与 5xxx 系铝合金可焊性分析[J]. 焊接技术, 2020, 49(S1): 152-155.
- [5] 操龙飞. 某汽车轮毂轴承法兰内圈开裂原因[J]. 机械工程材料, 2020, 44(4): 83-86.
- [6] 陈国庆, 柳峻鹏, 树西, 等. 铝合金焊接工艺的研究进展[J]. 焊接, 2017(9): 7-12, 68.
- [7] 郭富宝, 王东, 刘春兰, 等. ZL101A 焊丝焊接 6061-T6 板材接头的组织性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(1): 18-21.
- [8] 宋刚, 董孝南, 程继文, 等. 6061-T6 铝合金 DP-MIG 焊轧复合成形接头组织与力学性能[J]. 焊接学报, 2023, 44(4): 1-6, 29.
- [9] 鲁宽亮, 张春芝, 王宁, 等. MIG 焊 6063/7075 铝合金接头的金相组织、耐腐蚀性和力学性能研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 60-69.
- [10] JIANG Y H, QIU X L, SONG Z H, et al. New insights into enhancing the mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy MIG welded joints by constructing bionic heterostructure[J]. Materials Science & Engineering, 2024, A912: 147 009.
- [11] WANG M, HU H. Fusion welding of vacuum high pressure die cast aluminum alloy A356 and wrought alloy 6061[J]. SAE International

Journal of Materials and Manufacturing, 2013, 6(2): 299-303.

- [12] QIN Y, YUE S, SUN X Y, et al. Enhancing strength performance of laser welded 7075 aluminum alloy joints with TiC nanoparticle-mixed filler powder[J]. Materials Science & Engineering, 2024, A915: 147 285.
- [13] HASSANIFARD S, NABAVI K A, GHIASVAND A, et al. Monotonic and fatigue response of heat-treated friction stir welded Al 6061-T6 joints: Testing and characterization[J]. Materials Performance and Characterization, 2021, 10(1): 353-369.
- [14] 张洪涛, 林皓, 杜涛, 等. 5083 与 6082 铝合金焊接对比试验研究[J]. 金属加工(热加工), 2023(11): 41-44.
- [15] ALLACHI H, CHAOUKET F, DRAOUI K. Protection against corrosion in marine environments of AA6060 aluminium alloy by cerium chlorides[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 491(1-2): 223-229.
- [16] 聂甫恒, 董红刚, 李鹏, 等. 6061/A356 异种铝合金脉冲 MIG 搭接焊[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 65-71.
- [17] LUO Y J, YI J X, CHEN M Z, et al. Effect of hot rolling on microstructures and mechanical properties of SiC_p /A356 aluminum matrix composites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 1 776-1 784.
- [18] HUANG Z Y, DU R, LI J, et al. Research on the microstructure and mechanism of high content Sn modified A356 alloy[J]. Materials Today Communications, 2024, 41: 110 994.
- [19] GANG C, WU K, WANG Y, et al. Quantitative study on the correlation between microstructure and mechanical properties of additive friction stir deposited 6061-T6 Al-Mg-Si alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 6 725-6 736.
- [20] 吴圣川, 谢成, 胡雅楠, 等. 中高强度铝合金熔化焊接接头的缺陷容忍评价方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 46-59.

(编辑: 彭瑾)

欢迎关注《特种铸造及有色合金》微信公众号矩阵, 文章信息、行业研究动态与资讯信息早知道!



特种铸造
(关注铸造及有色合金
领域重要研究成果)



压铸界
(压铸领域最新动态
及研究)



青稞讲堂
(金属领域青年科学家
最新研究成果)



特种铸造及有色
合金杂志
(文章动态时刻关注)