

铝合金激光-MIG 复合焊接的研究进展与展望^①

刘长军, 吴小翠, 张昊, 杜禧悦, 邹婷

(沈阳工业大学 化工装备学院, 辽宁 辽阳 111003)

摘要: 利用 VOSviewer 可视化工具, 系统梳理了中国知网 (CNKI) 核心期刊数据库及谷歌学术数据库中 2000—2023 年铝合金激光-MIG 复合焊接领域的相关文献, 综合考虑关键文献的被引频次及研究热点演变趋势, 得出该领域研究重点为: ① 激光与 MIG 热源的相互作用, 重点探讨光丝间距、热源引导模式对等离子体行为及熔池稳定性的影响; ② 复合焊接接头, 通过研究其形貌特征揭示气孔、裂纹等缺陷的成因及优化策略; ③ 焊接接头的力学性能, 主要分析显微硬度分布规律及热影响区软化机制。结果表明, 采用焊丝合金化方法可成功实现 Mg 等合金元素的过渡, 可热处理的铝合金通过热处理实现时效强化, 能显著提升焊缝金属的强度和硬度。后续研究可通过多尺度数值模拟, 解析激光-电弧动态耦合机制、熔滴过渡与匙孔稳定性的交互作用, 优化工艺参数以抑制焊接气孔缺陷, 突破速度-质量协同提升的技术瓶颈。本文为铝合金激光-MIG 复合焊接的性能提升提供参考。

关键词: 文献计量学; VOSviewer; 中国知网数据库; 铝合金; 激光焊接; 熔化极惰性气体保护焊; 复合焊接; 显微硬度; 能量配比; 焊接缺陷; 文献分析

中图分类号: TG442; G353

文献标志码: B

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.033

文章编号: 0253-6099(2025)02-0183-010

Research Progress and Prospect of Laser-MIG Hybrid Welding of Aluminum Alloy

LIU Changjun, WU Xiaocui, ZHANG Hao, DU Xiyue, ZOU Ting

(School of Chemical Equipment, Shenyang University of Technology, Liaoyang 111003, Liaoning, China)

Abstract: The relevant literature on laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy from the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) core journal database and Google Scholar database in 2000–2023 was systematically analyzed by using VOSviewer. Three primary research focuses were identified by analyzing citation frequencies of key literature and the evolution of research hotspots: ① the interaction between laser and MIG heat sources, particularly the effects of laser-arc distance and heat source leading modes on plasma behavior and molten pool stability; ② hybrid welded joints, revealing the formation mechanisms and optimization strategies for defects such as porosity and cracks by investigation into morphological characteristics; ③ mechanical properties of welded joints, focusing on microhardness distribution and softening mechanisms in the heat-affected zone. Results indicate that the transition of Mg and other alloying elements can be effectively achieved by adopting welding wire alloying, and after heat treatment of those heat-treatable aluminum alloys, the welded metal exhibit remarkably enhanced strength and hardness through aging. The subsequent researches can employ multi-scale numerical simulations to explore the dynamic coupling mechanisms between laser and arc, and the interaction between droplet transfer and keyhole stability, as well as to optimize process parameters to suppress porosity and overcome the technical bottleneck in simultaneously improving welding speed and quality. This review can provide insights for enhancing the performance of laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy.

Key words: bibliometrics; VOSviewer; CNKI database; aluminum alloy; laser welding; MIG welding; hybrid welding; microhardness; energy ratio; welding defect; literature analysis

① 收稿日期: 2024-10-25

基金项目: 辽宁省高等学校基本科研重点项目 (LZGD2021037)

作者简介: 刘长军 (1971—), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 教授, 主要研究方向为激光焊接、高强铝合金焊接及表面强化。E-mail: 18941998881@126.com

通过检索 CNKI 核心期刊数据库及谷歌学术数据库,得出该领域当前的研究热点为激光与 MIG 热源的相互作用^[6]、复合焊接接头^[7]及焊接接头力学性能^[8],如图2所示。基于这些研究热点,本文展开了相应分析。

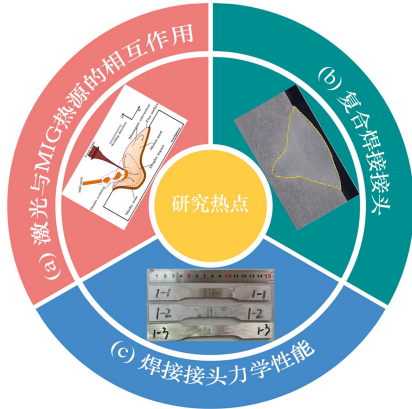


图2 铝合金激光-MIG 复合焊接的研究热点

Fig.2 Research hotspots in laser-MIG hybrid welding of aluminum alloys

2 激光与 MIG 热源的相互作用

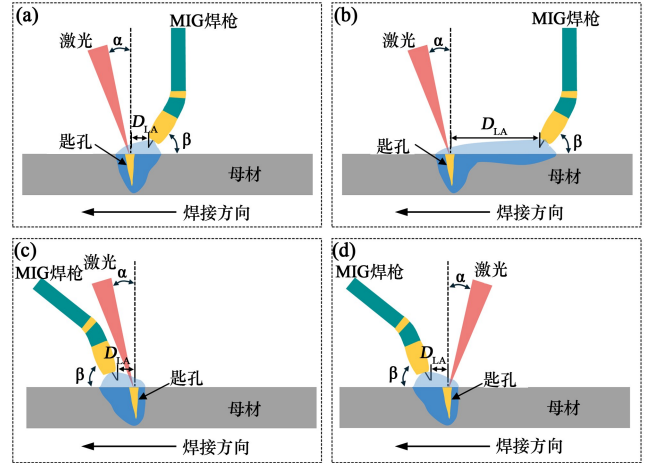
2.1 两热源间的光丝间距

激光-MIG 复合焊接过程中激光与电弧两种不同的热源耦合形成一个源,其协同效应会受到多个工艺参数的影响,如激光电弧引导模式、光丝间距、离焦量等空间位置参量,最终会影响复合焊接过程的稳定性及焊接质量^[9]。

在激光-MIG 复合焊接中,电极与激光束的间距(D_{LA})是调控双热源协同作用的关键参数。激光与 MIG 电弧热源相对位置如图3所示。该间距直接影响电弧特性、熔滴过渡模式及焊缝成形质量,尤其通过改变等离子体行为决定热源耦合效率。研究表明,当电极与激光束间距控制在 0~5 mm 范围内时,双热源可形成统一熔池,等离子体与电弧的交互作用促进能量高效耦合^[10];当间距增至 7.5 mm,热源解耦导致熔池分离,破坏协同效应^[11]。需注意的是,间距为 0 时,激光与焊丝的直接接触将引发等离子体屏蔽效应,反而降低耦合效率。因此,电极-激光间距的精确控制对维持稳定热源交互、抑制缺陷形成具有决定性意义。

激光-MIG 复合焊接通过协同作用显著优化焊缝质量,有效抑制气孔、裂纹等缺陷,同时降低残余应力与结构变形,提升接头性能与焊接效率。当前研究多聚焦于双热源宏观交互的实验现象,而对等离子体与熔池的微观耦合机理、熔滴转移行为等关键问题尚缺

乏系统认知。深入揭示等离子体能量传递路径、熔滴界面演变规律及熔池流动调控机制,将为工艺稳定性控制与缺陷抑制提供理论支撑,推动该技术向高精度、高可靠性方向发展。



(a) 小光丝间距激光-MIG 复合焊接;

(b) 大光丝间距激光-MIG 复合焊接;

(c) 激光-MIG 同侧复合焊接; (d) 激光-MIG 异侧复合焊接

图3 激光与 MIG 电弧热源相对位置示意图

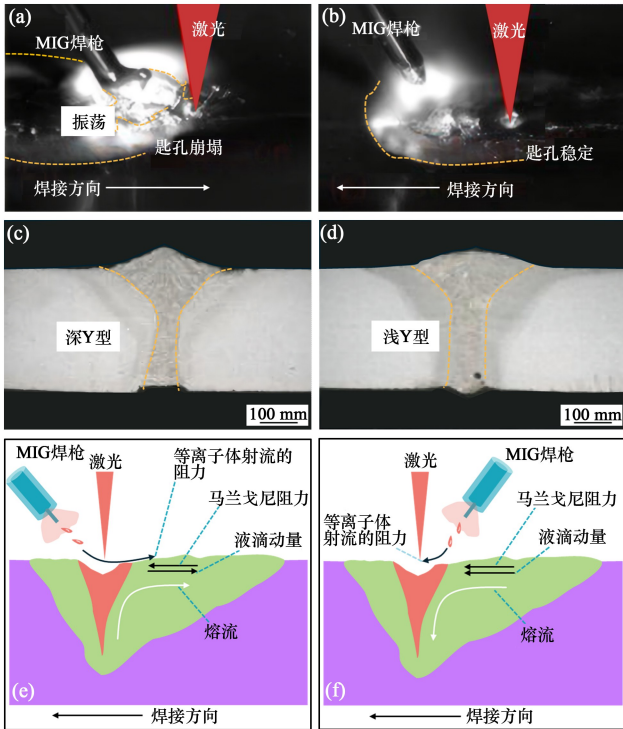
Fig.3 Schematic drawings of relative positions of laser and MIG arc heat sources

2.2 激光热源前置与 MIG 热源前置

图4展示了铝合金复合焊接激光前置与 MIG 前置对比^[12]。激光前置时,熔滴动量引发匙孔振荡,增强了电弧的扩展及对熔池的冲击作用,形成深 Y 形焊缝;MIG 前置条件下,匙孔保持稳定,熔体沿孔壁下流,形成浅 Y 形结构。可见,匙孔的动态稳定性在熔池能量分布与焊缝形貌调控中起着关键作用^[13-14]。

表1对比了激光前置与 MIG 前置方式下 6N01 铝合金复合焊接的效果^[11]。激光前置可获得良好的焊缝形态与优质的焊缝表面;MIG 前置时焊缝狭窄且余高较大,不利于正面成形与气体保护效果提升。MIG 前置的不足之处在于,过宽的熔融区削弱了承载能力,过高的焊缝余高则导致应力集中并降低表面质量;相比之下,激光前置可实现焊缝余高较低、尺度均衡、成形良好的焊接效果。

激光前置工艺虽具有较大的熔深,但气孔率较高;MIG 前置工艺熔深较浅,气孔较少,力学性能更优^[15]。在实际应用中,应根据具体工况需求选择合适的工艺。目前的研究多聚焦于两种工艺的宏观对比,未来有必要深入探讨激光与金属蒸气的相互作用机制,以建立更加完善的理论体系。



(a) 激光前置复合焊接匙孔特征; (b) MIG 前置复合焊接匙孔特征;
(c) 激光前置焊接缝横截面宏观特征;
(d) MIG 前置焊接缝横截面宏观特征;
(e) MIG 前置复合焊接熔池流动; (f) 激光前置复合焊接熔池流动

图4 铝合金复合焊接激光前置和MIG前置的对比
Fig.4 Comparison of laser leading and MIG leading in hybrid welding of aluminum alloy

表1 激光前置与MIG前置方式下6N01铝合金复合焊接效果对比
Table 1 Comparison of laser leading and MIG leading in hybrid welding of 6N01 aluminum alloy

比较项目	激光前置方式	MIG前置方式
焊缝表面覆盖物	焊缝表面较光洁	焊缝表面附着一层黑色粉末
铝和镁蒸气运动方向	非后方	后方
焊缝的横截面形貌	余高小,熔宽大	余高较大,熔宽较小
液体金属运吹向	待焊部位	向后堆积
熔透性	背部充分成形	液态金属没有充分填充到垫板凹槽中
坡口底部直接被作用的物质	激光	非激光
熔池宽度	宽	窄
熔池深度	浅	深
气孔数量	少	多
匙孔塌陷后气泡能否逸出	激光作用熔池前方,气泡有时间逸出	不易逸出
焊缝熔合边界晶粒	沿母材晶粒取向的外延生长	沿母材晶粒取向的外延生长
焊接接头硬度	较高	较低
拉伸强度和屈服强度	较高	较高

3 复合焊接接头

不同种类铝合金的复合焊接接头截面形状通常呈酒杯形或T字形^[16]。常见的焊接接头缺陷包括气孔、裂纹、塌陷等。此外,随着激光功率提升,接头的连接效率通常也会提高。焊接工艺的复合引入了除单一焊接工艺控制参数之外的新参数,使得各自最优的焊接参数无法直接叠加,从而难以优化焊接接头质量。

3.1 接头宏观形貌

图5展示了不同种类铝合金激光-MIG复合焊接接头的宏观形貌^[1,13,16-19]。合金种类对焊接接头形貌影响不大,接头在外观上未表现出显著区别,其截面形状通常呈酒杯形或T字形^[16-17]。在厚板焊接时,接头截面形状多为Y形或V形^[20]。

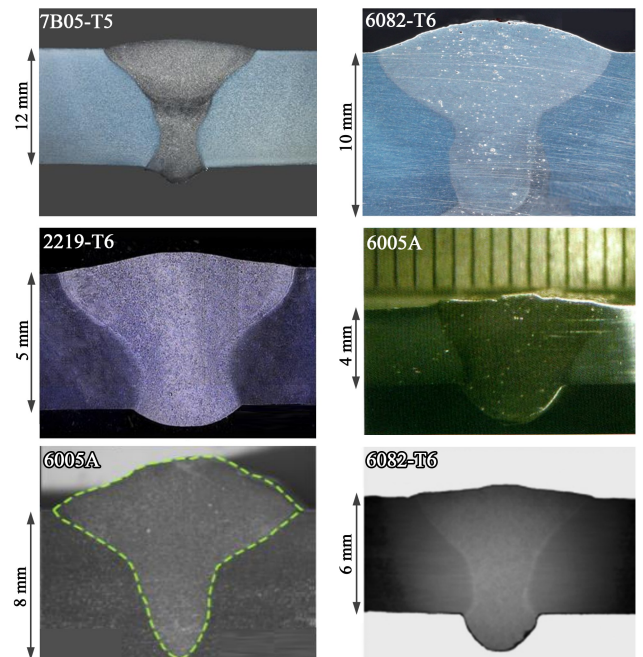


图5 不同种类铝合金激光-MIG复合焊接接头宏观形貌
Fig.5 Macroscopic morphology of laser-MIG hybrid welded joints in different kinds of aluminum alloy

3.2 接头缺陷

焊接接头缺陷可分为冶金缺陷(如气孔、裂纹、不均匀组织)、几何缺陷(如不连续几何形状)和力学缺陷(如应力集中)^[21]。铝合金激光-MIG复合焊接常见缺陷及解决措施如表2所示。在焊接接头部分,焊缝区域易出现气孔和结晶形成的裂纹^[22];在母材的热影响区域,易出现软化现象^[23];焊趾处则易出现微缺陷。焊接接头上的熔合区是最易受损的部分,该区域的化学组成和微观结构不均衡,且焊接接头的几何形态导致应力集中^[19]。

表 2 铝合金激光-MIG 复合焊接常见问题及解决措施

Table 2 Common problems and solutions for laser-MIG hybrid welding of aluminum alloys

焊接缺陷	起因	危害	解决措施	参考文献
气孔	H ₂ 来不及析出;熔池波动,小孔稳定性差、坍塌	降低有效承载面积;应力集中;削弱接头强度	添加活性剂;优化工艺参数;增大坡口角度	[17,19]
飞溅	熔滴过渡过程振荡;激光匙孔	焊缝表面塌陷、咬边	加入与焊接方向平行且振幅小的超声振动;增大焊接速度	[14,22]
耐蚀性较差	焊缝区和母材之间存在电化学腐蚀;沉淀相增加	晶粒内部溶解、脱落,晶间结合力下降	制备石墨烯/微弧氧化复合膜层	[15]
裂纹	应力集中;焊缝内部气孔孔径较大	疲劳寿命降低;接头抗拉强度降低	补焊修复;细化晶粒	[1]
软化	铸态树枝晶;树枝晶间析出第二相;偏析;热循环	强度系数大大降低,接头强度低于母材;接头性能降低	增大送丝速度;减小焊缝区域热输入;减少传递到焊缝区的能量	[24-25]
塌陷严重	激光功率增大;熔池金属液体过多;匙孔受力平衡遭到破坏	焊缝开裂	增大送丝速度;提高匙孔深度稳定性;减小坡口角度	[14,19,25]
咬边、未焊透	熔池过分振荡;送丝速度过大	降低抗疲劳性;焊缝开裂	减小送丝速度;增大激光功率	[14,25]

3.3 接头连接效率

大多数铝合金复合焊接接头的连接效率可达 65% 以上^[15,26],且通过焊后热处理,连接效率可得到显著提升。图 6 展示了激光功率对铝合金激光-MIG 复合焊接接头连接效率的影响^[9,13-15,18,26-28]。连接效率指焊接接头的极限抗拉强度与母材区极限抗拉强度的比值,对比分析表明,不同焊缝组织和工艺参数下,接头连接效率存在明显差异。由图 6 可见,激光功率与接头连接效率大致呈正相关,但在 5、7 系铝合金中,这种正相关关系并不明显^[5]。

3.4 焊接工艺参数

表 3 汇总了不同铝合金激光-MIG 复合焊接的工艺参数。激光功率(2.8~7.3 kW)与板厚正相关,例如,厚 16.0 mm 的 1561 铝合金需要 6.8 kW,而厚 3.0 mm 的 2023 铝合金仅需 2.8 kW。送丝速度(1.44~15.00 m/min)根据焊接需求进行匹配,6061-T6 使用 15.00 m/min 以填充大坡口。光丝间距(2~3 mm)优化热源协同,过小可能降低熔深。保护气采用高纯 Ar(流量 15~45 L/min)以减少氧化和气孔;离焦量(-2~3 mm)调控熔深,负离焦适用于深熔焊。焊丝与母材需匹配(如 5 系用

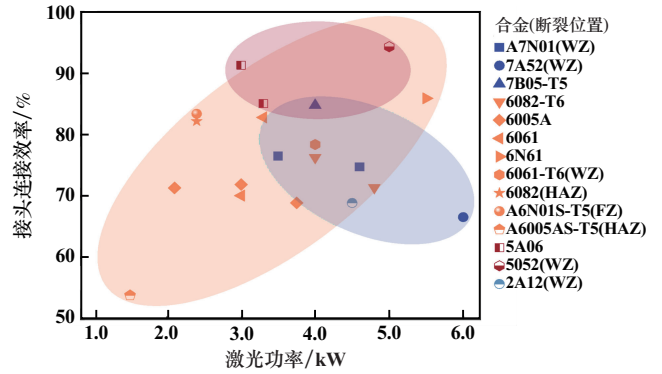


图 6 激光功率对不同种类铝合金激光-MIG 复合焊接接头的连接效率的影响

Fig.6 Effect of laser power on joining efficiency of laser-MIG hybrid welded joints in different kinds of aluminum alloys

ER5356,6 系用 ER6061),确保成分一致性。参数组合直接影响熔深、缺陷率及接头性能,需动态调整以平衡热输入与成形质量。一般情况下,随着激光功率增大,焊缝熔宽与熔深增大^[9];焊接速度越大,焊缝熔宽越小^[10,29]。

表 3 铝合金激光-MIG 复合焊接常用工艺参数

Table 3 Common process parameters for laser-MIG hybrid welding of aluminum alloys

母材	板厚/mm	激光器	激光功率/kW	送丝速度/(m·min ⁻¹)	D _{LA} /mm	电流/A	焊枪角度/(°)	焊丝	保护气/%	气流量/(L·min ⁻¹)	离焦量/mm	参考文献
1561	16.0	—	6.8	6.00	—	250	—	OK18.22	Ar	20	2	[20]
2023	3.0	光纤	2.8	1.44	2	120	—	4043	99.99Ar	25	3	[10]
5A06	6.9	—	3.5	10.00	3	168	55	ER5356	99.99Ar	15	—	[9]
6061-T6	4.0	—	2.8	15.00	2	120	—	ER6061	99.99Ar	25	-1	[23]
6082-T6	6.0	—	7.3	10.00	3	200	60	ER5356	Ar	45	2	[29]
6082-T6	10.0	光纤	4.0	8.00	—	178	—	ER5087	99.999Ar	20	-2	[1]
7A52	8.0	光纤	6.0	—	2	180	—	A5356-WY	99.99Ar	25	-2	[22]
7B05-T5	12.0	光纤	4.0	12.00	3	191	68	ER5356	99.999Ar	30	0	[9]

复合焊接除需控制单一工艺参数外,还需引入新参数(如光丝间距、能量配比),因激光与电弧的耦合效应使各自的最优参数无法直接叠加,熔深由激光功率与电弧电流共同调控,前者主导匙孔形成,后者影响熔池流体补充。此外,激光功率作为关键因素,决定焊缝强度与缺陷率,并在特定功率区间内可实现高质量接头。不同铝合金在导热性与熔池流动性方面存在差异,参数需根据材料特性动态调整。多参数的协同调控构成该工艺优化的核心难点。

4 焊接接头力学性能

4.1 拉伸性能

由于不同系列铝合金的材料属性差异,焊接接头的拉伸性能可通过合理选材加以调控。不同种类铝合金激光-MIG 复合焊接接头的极限抗拉强度与延伸率的关系^[18-20,22,25,27,30]如图7所示。5系铝合金焊接接头的极限抗拉强度适中,但因高镁含量引起凝固收缩和热应力,残余应力较大;6系铝合金焊接接头质量较好,但受焊接热循环影响,热影响区发生软化,延伸率降低,塑性变形能力减弱;7系铝合金强度极高但焊接性差,接头极限抗拉强度虽高,但焊接裂纹敏感性使延伸率显著下降,且高残余应力易引发宏观变形(如翘曲)。

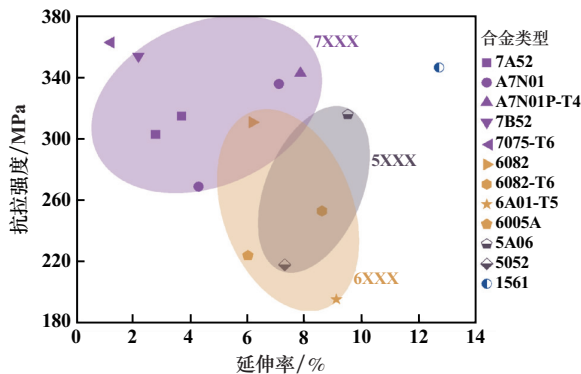


图7 不同种类铝合金激光-MIG 复合焊接接头极限抗拉强度与延伸率的关系

Fig.7 Relationship between ultimate tensile strength and elongation of laser-MIG hybrid welded joints in different kinds of aluminum alloys

能量配比常被定义为激光功率与电弧功率之比。不同能量配比系数下 5A06 铝合金焊接接头拉伸性能^[9]如表4所示。相比母材,接头的抗拉强度与延伸率均有所下降。当能量配比小于1时,电弧主导热输入,热分布较为均匀,有助于减小残余应力和变形,并提高延伸率。然而,由于焊缝深宽比较小,抗拉强度可能降低。当能量配比大于1时,激光主导热输入,温度

梯度较高,因热输入集中,焊缝深宽比增大,从而增强抗拉强度。高温梯度可能导致晶粒粗化,进而降低延伸率。

表4 5A06 铝合金焊接接头拉伸性能
Table 4 Tensile properties of welded joints of 5A06 aluminum alloy

激光-MIG 复合焊接能量配比系数	抗拉强度/MPa	延伸率/%
0.492	302.26	14.816
0.522	253.90	9.734
0.692	256.96	9.918
0.743	276.36	11.932
0.788	283.90	12.644
0.856	260.62	10.008
0.983	265.74	9.132
1.031	276.08	11.558
1.032	229.57	7.652
1.496	264.82	10.234

注:母材 5A06 铝合金的抗拉强度为 355 MPa,延伸率为 15%。

提高焊接接头拉伸性能的方法之一是采用激光振荡辅助激光-MIG 复合焊接,其有助于晶粒细化。细小晶粒可阻碍位错运动,从而提高材料的抗拉强度。未来仍需进一步探索通过新型焊接技术实现晶粒细化,目前第二相粒子对力学性能改善的研究仍处于起步阶段。

4.2 显微硬度

4.2.1 焊接接头显微硬度

在铝合金激光-MIG 复合焊接中,焊接接头的显微硬度呈典型 W 形分布:焊缝熔合区因超快冷却速率形成细晶组织,硬度显著高于热影响区(HAZ, heat affected zone);HAZ 受热循环作用,时效强化铝合金(如6系、7系)发生析出相溶解/粗化,非热处理强化铝合金(如5系)出现晶粒粗化,形成硬度软化谷;母材区保持原始显微组织与硬度水平^[21]。

4.2.2 热影响区显微硬度

焊接过程中,母材在焊接热循环作用下形成 HAZ^[31]。研究者采用激光冲击技术进行焊后热处理,以获得理想的组织结构和较低的残余压应力。激光-MIG 复合打底焊接接头的显微硬度分布^[21]如图8所示。相较于母材(BM),HAZ 不仅硬度下降,且其硬度分布的波动幅度较大。焊接过程中母材温度场分布具有显著非均匀性:靠近焊缝的区域因高热输入经历快速加热和高温,随后因高散热梯度产生快速冷却。该区域硬度下降主要源于 HAZ 的软化^[10];熔池附近区域的峰值温度最高,熔池内部对流主要影响熔融金属

流动,母材热传递仍以热传导为主;远离焊接接头的区域因热输入不足,未达析出相溶解温度,保留原始显微组织,故硬度较高^[3]。时效强化铝合金(如 6 系、7 系) HAZ 析出相溶解/粗化导致硬度显著下降;非热处理强化铝合金(如 1 系、5 系) HAZ 软化程度较低,主要源于晶粒粗化。对可热处理铝合金,焊后经固溶处理与人工时效可部分恢复 HAZ 硬度,尤其适用于焊前处于 T4 状态的材料^[9]。

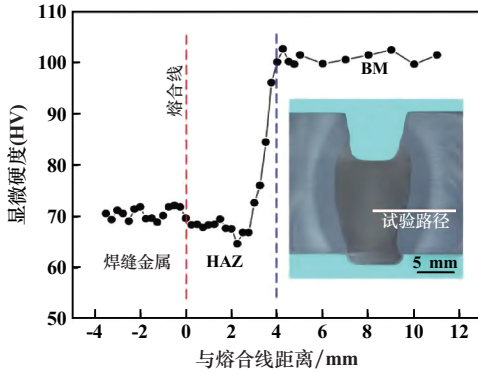


图 8 激光-MIG 复合打底焊接接头的显微硬度分布

Fig. 8 Microhardness distribution of laser-MIG hybrid backing welded joint

焊接 HAZ 的软化行为对焊接接头的力学性能及结构可靠性具有显著影响,晶粒的粗化与第二相的演变是 HAZ 软化形成的主要原因^[10]。通过焊丝填充补充的溶质元素可提高焊缝中 Mg 等元素的含量,增强其固溶强化作用,从而减缓 HAZ 的软化程度^[22]。目前,对软化机理的研究仍显不足,主要涉及三个方面:微观组织演化与软化趋势的预测模型构建;微量元素添加对晶界迁移抑制效应的量化评估;焊接残余应力场与软化区域之间的耦合机制解析。此外,不同复合焊接工艺在 HAZ 梯度特性调控方面的差异仍有待深入研究。

4.3 显微组织和力学性能的关系

不同种类铝合金激光-MIG 复合焊接析出相及焊接问题如表 5 所示。2 系铝合金焊接接头因热循环导致 θ 相过时效或溶解,引起软化,同时 Cu 元素偏析加剧晶间腐蚀;5 系铝合金焊接接头中 β 相在晶界析出,显著增加应力腐蚀开裂倾向;6 系铝合金焊接接头因 Mg_2Si 析出相粗化(过时效)导致强度降低;7 系铝合金焊接接头中 η 相($MgZn_2$)粗化降低断裂韧性,需严格控制热输入以避免过时效。通过优化焊接参数可调控析出相尺寸与分布^[32],此外,细化晶粒(如添加晶粒细化剂)亦能有效提升接头力学性能,需在工艺设计中重点考虑。

表 5 不同种类铝合金激光-MIG 复合焊接析出相及焊接问题

Table 5 Precipitation phases and welding issues in laser-MIG hybrid welding of different kinds of aluminum alloys

合金	析出相	问题	参考文献
1XXX	$\alpha-Al, Fe(MnAl)_6$	力学性能降低	[20]
2XXX	$S(Al_2CuMg) + \theta, \alpha + \theta(CuAl_2), \alpha(Al) + Al_2Cu + Mg_2Si$	耐腐蚀性能差,接头软化,抗拉强度低,容易开裂	[10]
5XXX	$\alpha(Al) + \beta + Mg_2Si, \beta, Mg_2Al_3$	焊缝硬度降低与明显脆性	[3]
6XXX	$\alpha' \rightarrow GP \rightarrow \beta'' \rightarrow \beta' \rightarrow \beta, \alpha(Al) + AlFeSi, Mg_2Si$	接头软化、焊缝区疲劳断裂,拉伸断裂与疲劳裂纹	[15, 24, 29]
7XXX	$MgZn_2, Mg_3Zn_3Al_2, \alpha-Al$	焊缝区软化与断裂韧性差	[22]

铝合金激光-MIG 复合焊接接头的组织^[3,18,30]如图 9 所示。可见焊缝中心区(WZ)为晶粒细小的等轴晶;熔合区(FZ)靠近焊缝一侧基本未见沿散热方向生长的柱状晶组织;热影响区(HAZ)组织较为粗大,并出现部分粗大的析出相。

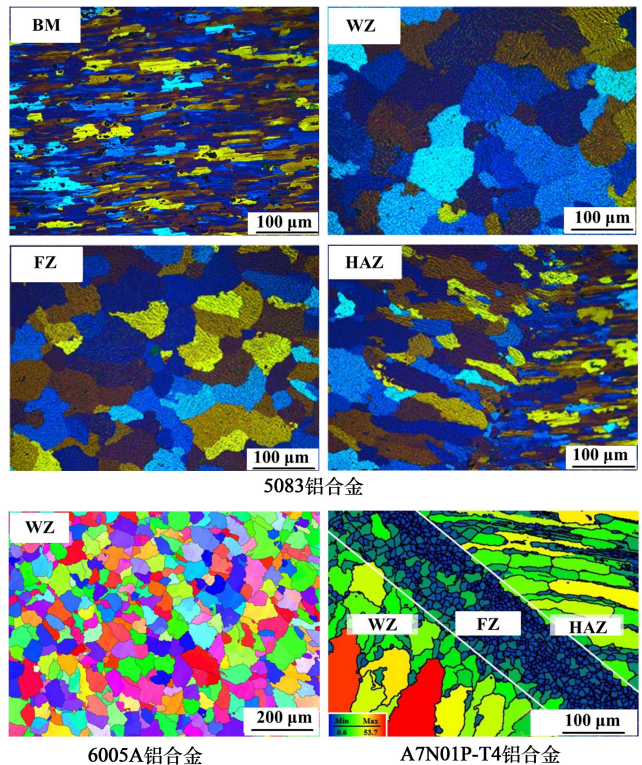


图 9 铝合金焊接接头 IPF 图

Fig. 9 IPF of welded joints of aluminum alloys

综上所述,细小晶粒通过优化晶粒结构和提升晶界稳定性,显著增强了铝合金激光-MIG 复合焊接接头的强度、韧性及抗裂等力学性能。对于多物理场(如激光与磁场、超声^[33]与电场)协同作用对晶粒细化的

影响、纳米颗粒添加剂的细化效果以及细晶区的动态演化机制,尚缺乏系统性研究,仍需进一步深入探讨与研究。

5 展望

针对铝合金激光-MIG 复合焊接现状,提出如下展望(如图 10 所示)。

1) 两热源耦合机制:结合数值模拟与高精度实验^[34],揭示等离子体动态演化、熔滴界面行为及熔池流动的微观机理。

2) 复合焊接接头参数优化:激光-MIG 复合焊接涉及众多工艺参数,在探究各参数及其相互作用方面^[35]

尚有广阔研究空间,具备开展多个研究课题的潜力。

3) 力学性能调控:深入探究焊后热处理(如激光冲击、时效处理)对热影响区组织重构的作用机制,开发梯度热输入工艺以缓解软化问题。结合多物理场辅助技术(如磁场、超声振荡、摆动激光)^[36],细化晶粒并优化析出相分布,从而提升接头的强韧性匹配。

4) 复合焊接的智能化:当前智能化机器人仍处于初级阶段,焊接机器人发展与生产实际需求之间存在显著差距。借助激光-MIG 复合焊接过程智能化^[37]以提升生产质量仍需深入推进。未来可结合数字孪生等技术,开发焊接机器人遥控操作试验平台,实现焊接过程的远程控制与实验验证。

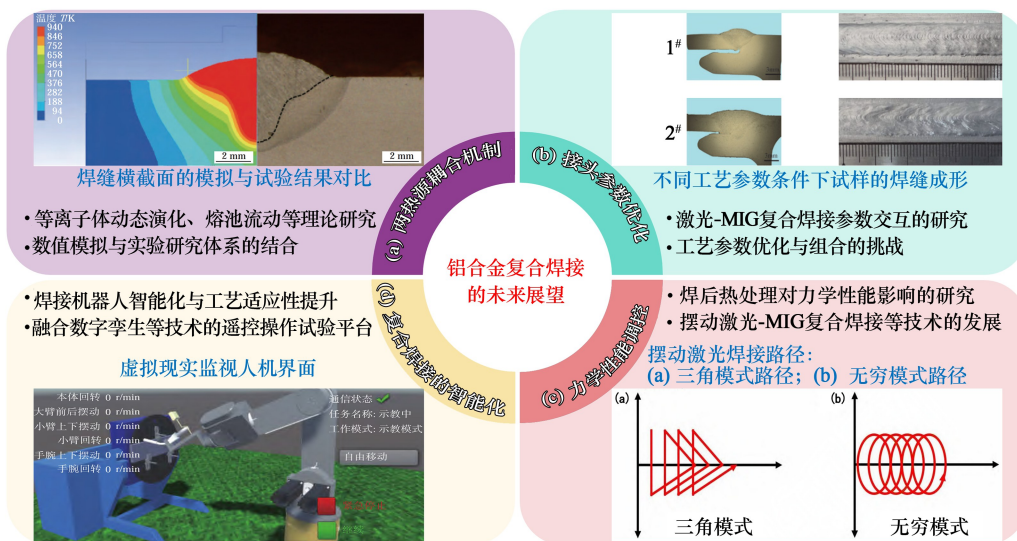


图 10 铝合金激光-MIG 复合焊接展望

Fig. 10 Prospect of laser-MIG hybrid welding of aluminum alloys

6 结论

1) 激光与 MIG 热源的相互作用:激光与电弧的协同效应显著影响焊接过程稳定性及质量。光丝间距(0~5 mm)和能量配比(激光功率与电弧功率的比值)是调控热源耦合效率的关键参数。激光前置模式可形成深熔焊缝且有利于熔池稳定,MIG 前置模式熔深较浅但对间隙适应性更强。

2) 复合焊接接头:接头形貌多呈酒杯形或 Y 形,其质量受工艺参数(激光功率、送丝速度、保护气成分)直接影响。气孔、裂纹及塌陷是主要缺陷,可通过熔池振荡控制、多场耦合工艺优化及自适应坡口设计有效抑制。

3) 焊接接头的力学性能:铝合金复合焊接接头的显微硬度分布具有显著特征,焊缝中心因快速冷却形

成高硬度细晶区,两侧热影响区因析出相演变(时效合金)或晶粒粗化(非时效合金)出现软化谷,母材硬度维持原始水平。通过细化晶粒以优化晶粒结构并提升晶界稳定性,显著增强了焊接接头的强度、韧性及抗裂等力学性能。

参考文献(References):

- [1] 邓望红,陈顺,廖宁宁,等. 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[J]. 金属加工(热加工), 2021(6):51-56.
DENG Wanghong, CHEN Shun, LIAO Ningning, et al. Comparative study of MIG welding and laser-MIG hybrid welding processes with numerical simulation of 6082-T6 aluminum alloy medium thick plate[J]. MW Metal Forming, 2021(6):51-56.
- [2] 孟祥超,孙有平,何江美,等. ZL114A 和 6061 异种铝合金激光焊接工艺及接头显微组织和力学性能研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):160-

- 164.
- MENG Xiangchao, SUN Youping, HE Jiangmei, et al. Microstructure and mechanical properties of ZL114A and 6061 dissimilar aluminum alloy welded joints by laser welding process[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023,43(3):160-164.
- [3] 史鹏飞. 5083 铝合金激光-MIG 复合焊接过程稳定性与气孔缺陷研究[D]. 上海:上海交通大学, 2018.
- SHI Pengfei. Study on the stability and pore defects of 5083 aluminum alloy laser-MIG hybrid welding[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [4] 王淼,李天景,曾一达,等. 6061-T4 铝合金激光焊接接头组织与力学性能研究[J]. *矿冶工程*, 2023,43(1):141-144.
- WANG Miao, LI Tianjing, ZENG Yida, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded joint of 6061-T4 aluminum alloy[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023,43(3):141-144.
- [5] 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 Zhen, SU Jie, WANG Xiaohua, 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.
- [6] CHEN X, YU G, HE X, et al. Effect of droplet impact on molten pool dynamics in hybrid laser-MIG welding of aluminum alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96:209-222.
- [7] LIU F, DONG Y, TAN Z, et al. Mechanism analysis on suppressing porosity in laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy via external magnetic field[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 101:1124-1135.
- [8] LIU S, LI J, MI G, et al. Study on laser-MIG hybrid welding characteristics of A7N01-T6 aluminum alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016,87:1135-1144.
- [9] 赵艳秋. 5A06 铝合金激光-MIG 复合焊接气孔缺陷形态与影响因素研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020.
- ZHAO Yanqiu. Research on the porosity morphology and influence factors in laser-MIG hybrid welded joint for 5A06 aluminum alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [10] 徐佳诚. 2024 铝合金激光焊及激光-MIG 复合焊与焊后热处理工艺研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2021.
- XU Jiacheng. Research on 2024 aluminum alloy laser welding and laser-MIG hybrid welding and post-weld heat treatment process[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2021.
- [11] 张世欣,苗海滨,何秀丽,等. 铝合金激光-MIG 复合焊中两种焊接方向对焊缝的影响[J]. *热加工工艺*, 2015,44(3):80-82.
- ZHANG Shixin, MIAO Haibin, HE Xiuli, et al. Influence of welding directions on weld seam of aluminum alloy by laser-MIG hybrid welding[J]. *Hot Working Technology*, 2015,44(3):80-82.
- [12] 顾思远. 汽车用钢高速激光电弧复合焊接成形机理的研究[D]. 上海:上海工程技术大学, 2019.
- GU Siyuan. Research on the mechanism of high speed laser-arc hybrid welding of high-strength steel[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2019.
- [13] 万帅,韩晓辉,刘建,等. 7B05-T5 铝合金激光-MIG 复合焊接接头组织性能研究[J]. *机械*, 2019,46(3):30-37.
- WAN Shuai, HAN Xiaohui, LIU Jian, et al. Study on microstructure and properties of 7B05-T5 aluminum alloy laser-MIG hybrid joint[J]. *Machinery*, 2019,46(3):30-37.
- [14] 张羽昊. A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊接特性研究及工艺优化[D]. 成都:西南交通大学, 2022.
- ZHANG Yuhao. Research on process characteristics and optimization of A7N01 aluminum alloy laser-MIG hybrid welding[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [15] 张航. 6061 铝合金激光-MIG 焊接接头晶间腐蚀行为研究[D]. 成都:西南交通大学, 2020.
- ZHANG Hang. Investigation of intergranular corrosion behavior in laser-MIG welded joints of 6061 aluminum alloy[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [16] 火巧英,陶富文. 激光-MIG 复合焊与其他焊接方法性能对比分析[J]. *金属加工(热加工)*, 2017(12):57-60.
- HUO Qiaoying, TAO Fuwen. Comparative analysis of laser-MIG hybrid welding performance against other welding methods[J]. *MW Metal Forming*, 2017(12):57-60.
- [17] 丁权华. 铝合金激光-MIG 复合焊用活性剂研制及焊接工艺研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2022.
- DING Quanhua. Development of active agent for aluminum alloy laser-MIG hybrid welding and research on welding process[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2022.
- [18] 杨策. 铝合金脉冲激光-MIG 复合焊接过程稳定性与气孔缺陷研究[D]. 成都:西南交通大学, 2022.
- YANG Ce. Study on the stability and pore defects of aluminum alloy pulsed laser-MIG hybrid welding[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [19] 马寅,韩晓辉,杨志斌,等. 坡口尺寸对铝合金激光-MIG 复合焊缝成形及力学性能的影响[J]. *大连交通大学学报*, 2021,42(1):57-61.
- MA Yin, HAN Xiaohui, YANG Zhibin, et al. Effects of groove size on weld formation and mechanical property of laser-MIG hybrid welded aluminum alloy joint[J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2021,42(1):57-61.
- [20] 韩善果,罗子艺,蔡得涛,等. 铝合金激光-MIG 双面焊接接头组织和性能研究[J]. *电焊机*, 2017,47(7):106-109.
- HAN Shanguo, LUO Ziyi, CAI Detao, et al. Study on microstructure and mechanical properties of laser-MIG double-sided welded joints of aluminum alloy[J]. *Electric Welding Machine*, 2017,47(7):106-109.
- [21] 杨志斌,谢延祺,盛立康. 20 mm 厚铝合金激光-MIG 复合打底焊工艺及组织性能[J]. *中国激光*, 2024,51(20):9-19.
- YANG Zhibin, XIE Yanqi, SHENG Likang. Laser-MIG hybrid backing welding process of 20 mm thick aluminum alloy and structure properties[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024,51(20):9-19.
- [22] 许雪宗. 7A52 高强铝合金激光及电弧复合焊工艺试验研究[D]. 南京:南京理工大学, 2020.

- XU Xuezhong. Research on laser welding & laser-MIG hybrid welding of 7A52 aluminum alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [23] 徐育焱. 6061-T6 铝合金激光焊接头组织性能及热力耦合研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2019.
- XU Yuxun. Study on microstructure properties and thermo-mechanical coupling of 6061-T6 aluminum alloy laser welded joint [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2019.
- [24] 董力群,梁景恒,毛镇东,等. 6A01 铝合金激光-MIG 复合焊和 MIG 焊接头性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2019,42(2):60-63.
- DONG Liqun, LIANG Jingheng, MAO Zhendong, et al. Joint properties of 6A01 aluminum alloy by laser-MIG hybrid welding and MIG welding[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019,42(2):60-63.
- [25] 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 Minghao, ZHANG Hua, LIU Debo, 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.
- [26] 李巧艳,赵昕,辛志彬,等. 6082 铝合金激光-MIG 复合焊接工艺及接头组织性能[J]. 应用激光, 2021,41(6):1168-1177.
- LI Qiaoyan, ZHAO Xin, XIN Zhibin, et al. Welding process and mechanical properties of laser-MIG hybrid welding for 6082 aluminum alloy[J]. Applied Laser, 2021,41(6):1168-1177.
- [27] 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.
- ZHANG Lin, FENG Yuehai, LIU Siyu, et al. Research on microstructure and properties of 7A52 aluminum alloy thick plate by laser-MIG hybrid welding [J]. Hot Working Technology, 2019,48(3):19-23.
- [28] 张威,叶兵,祁小勇,等. 6061 铝合金激光-MIG 复合焊中能量比影响的研究[J]. 激光技术, 2018,42(4):500-504.
- ZHANG Wei, YE Bing, QI Xiaoyong, et al. Study on the effect of energy ratio in laser-MIG hybrid welding of 6061 aluminum alloy[J]. Laser Technology, 2018,42(4):500-504.
- [29] 刘洋. 铝合金激光-电弧复合焊接头质量缺陷修复工艺研究[D]. 太原:太原科技大学, 2023.
- LIU Yang. Research on quality defect repairing technology of aluminum alloy laser-arc hybrid welding joint[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2023.
- [30] 周希孺. 激光-MIG 复合热源熔修铝合金 A7N01P-T4 接头的抗疲劳性能[D]. 成都:西南交通大学,2022.
- ZHOU Xiru. Fatigue resistance of A7N01P-T4 alloy joints repaired by laser-MIG hybrid heat source[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [31] 毛颖,雷雨,丁旭,等. TC18 钛合金双圆锥台试样热变形有限元模拟研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(5):128-133.
- MAO Ying, LEI Yu, DING Xu, et al. Finite element simulation for thermal deformation of TC18 titanium alloy specimen on a double cone[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(5):128-133.
- [32] 吴嘉,杨昭,范纲衍,等. T6 热处理与焊接顺序对 A356 铝合金搅拌摩擦焊接头组织和力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):157-161.
- WU Jia, YANG Zhao, FAN Gangxian, et al. Effect of sequence of T6 heat treatment and welding on microstructure and mechanical properties of friction stir welding joints of A356 Al alloy[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):157-161.
- [33] 胡一杰,孙有平,周思鹏,等. 超声辅助对 2524 铝合金搅拌摩擦点焊组织与性能影响研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):129-133.
- HU Yijie, SUN Youping, ZHOU Sipeng, et al. Effect of ultrasonic assistance on microstructure and properties of 2524 aluminum alloy by friction stir spot welding[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(3):129-133.
- [34] 李俐群,何平,宫建锋. 铝合金激光-MIG 复合焊熔滴对匙孔作用的模拟[J]. 焊接学报, 2022,43(8):1-7.
- LI Liqun, HE Ping, GONG Jianfeng. Simulation analysis of droplet action on keyhole during laser-MIG composite welding of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022,43(8):1-7.
- [35] 马国龙,张志毅,毛镇东,等. 高速列车用铝合金型材激光-MIG 复合焊工艺特性和接头性能[J]. 材料导报, 2023,37(12):195-200.
- MA Guolong, ZHANG Zhiyi, MAO Zhendong, et al. Processing characteristics and joints properties of laser-MIG hybrid welding for aluminium alloy of high-speed trains[J]. Materials Reports, 2023,37(12):195-200.
- [36] 解雪云,宋晓杰,刘明磊,等. 摆动模式对 7005-T6 铝合金激光焊接头力学性能及腐蚀行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2024,34(7):2200-2214.
- XIE Xueyun, SONG Xiaojie, LIU Minglei, et al. Effect of oscillating mode on mechanical properties and corrosion behavior of 7005-T6 aluminum alloy laser welded joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024,34(7):2200-2214.
- [37] 高辉,胡晓慧,王龙,等. 面向工程现场维修的焊接机器人数字孪生技术[J]. 焊接学报, 2024,45(11):55-60.
- GAO Hui, HU Xiaohui, WANG Long, et al. Digital twin technology of welding robot for on-site maintenance[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024,45(11):55-60.
- 引用本文:刘长军,吴小翠,张昊,等. 铝合金激光-MIG 复合焊接的研究进展与展望[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):183-192.
- LIU Changjun, WU Xiaocui, ZHANG Hao, et al. Research progress and prospect of laser-mig hybrid welding of aluminum alloy [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):183-192.