

铸造 Al-Si 合金焊接技术研究进展

张润泽 娄照坤 仝 越 田金昌 丁洋洋 孙 楠 丁宏升

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 金属精密热加工国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要 铸造 Al-Si 合金因其优异的铸造流动性、良好的力学性能及较高的比强度, 在汽车、航空航天及复杂机械结构领域应用广泛。系统分析了铸造 Al-Si 合金的焊接性能特点, 汇总了电弧焊、激光焊、激光-电弧复合焊及搅拌摩擦焊(FSW)等主流焊接方法的技术原理、工艺特点、常见问题与改善措施, 为针对不同服役条件和质量要求的铸造 Al-Si 合金构件提供参考。

关键词 铸造 Al-Si 合金; 搅拌摩擦焊; 激光-电弧复合焊; 进展

中图分类号 TG146.21; G353.11

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.Y20250026

Research Progress in Welding Technology of Cast Al-Si Alloy

ZHANG Runze, LOU Zhaokun, TONG Yue, TIAN Jinchang, DING Yangyang, SUN Nan, DING Hongsheng

(National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals, School of Materials Science and Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: Cast aluminum-silicon alloys exhibit extensive application in automotive, aerospace, and complex mechanical structural fields owing to the favorable casting fluidity, adequate mechanical properties, and high specific strength. The weldability characteristics of cast aluminum-silicon alloys was systematically investigated, and the technical principles, process features, common challenges, and mitigation strategies of mainstream welding techniques, including arc welding, laser welding, laser-arc hybrid welding, and friction stir welding were reviewed, aiming to provide a theoretical foundation and practical guidance for optimizing processes of cast Al-Si alloy components under varying service conditions and quality requirements.

Key Words: Cast Al-Si Alloy, Friction Stir Welding, Laser-Arc Hybrid Welding, Progress

铝合金具有密度低、强度高、易成形、价格低廉等特点, 被广泛应用于各生产领域以及轻质合金中^[1-3]。铸造铝合金分为 Al-Si、Al-Cu、Al-Mg、Al-Zn 系, 其中 Al-Si 系是铸造铝合金体系中研究和应用最早的合金, 其具有优异的流动性、低热裂倾向和较小的收缩率, 较高的比强度、耐热性、耐磨性能, 良好的热稳定性和较低的热膨胀系数, 适于铸造复杂薄壁构件。采用该合金制造的发动机活塞、缸体、缸盖、轮毂等零部件使用寿命比普通铝合金提高了 35% 左右^[4-6]。

在铸造生产过程中常出现夹渣、气孔、缩松等局部缺陷, 使铸件的合格率降低。采用焊接方法对局部出现缺陷的铸件进行修补, 可以大幅减少生产成本, 提高合格率^[5]。此外, 焊接还可以将多个铸造铝合金部件连接成一个整体, 制造出更大或结构更复杂的组件, 从而实现铝合金铸件的多样化设计, 满足特定应用需求。

本综述系统梳理了适用于铸造 Al-Si 合金的主流焊接技术, 围绕 TIG 焊、激光焊、激光-电弧复合焊及搅拌摩擦焊(FSW), 深入分析其技术原理、工艺特点、常见问题与改善措施, 旨在为铸造 Al-Si 合金焊接的方法选择与工艺优化提供指导。

1 铸造 Al-Si 合金的特点及焊接性能

Al-Si 系合金的 Si 含量通常为 5%~13% (质量分数, 下同), 属于亚共晶或共晶型合金。Al 与 Si 形成共晶体而非金属间化合物, 在共晶温度(577 °C)下, Si 在 Al 中的最大溶解度为 1.65%, 且随温度降低而显著下降。因此室温下, 组织主要由 α 相(Si 溶于 Al 的固溶体, 性能接近纯 Al)和 β 相(Al 在 Si 中溶解度极低, 可视为纯 Si 相)组成。当熔体冷却至 577 °C 时, 发生 $L \rightarrow \alpha$ -Al+Si 共晶反应, 最终室温组织为 α -Al 枝晶 + (α

收稿日期: 2025-12-18; 修订日期: 2026-02-08

第一作者: 张润泽, 男, 2000 年, 硕士研究生, E-mail: qw18088799709@126.com

通信作者: 丁宏升, 男, 1968 年出生, 教授, E-mail: dinghsh@hit.edu.cn

引用格式: 张润泽, 娄照坤, 仝越, 等. 铸造 Al-Si 合金焊接技术研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(7): 990-997.

ZHANG R Z, LOU Z K, TONG Y, et al. Research progress in welding technology of cast Al-Si alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(7): 990-997.

-Al+Si)共晶相。在此基础上,为提升性能常添加合金元素,如常见牌号 ZL101、ZL114 等。在 Al-Si 二元系中加 Mg,通过形成 β - Mg_2Si 强化相实现时效硬化,见图 1。随着航空工业对高温性能要求的提高,进一步发展出 Al-Si-Mg-Cu 四元合金,借助 Cu 添加形成 $\text{Q-Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ 、 θ - Al_2Cu 等高温稳定相,与 Mg_2Si 共同发挥协同强化作用,显著提升合金的高温强度和抗蠕变能力。

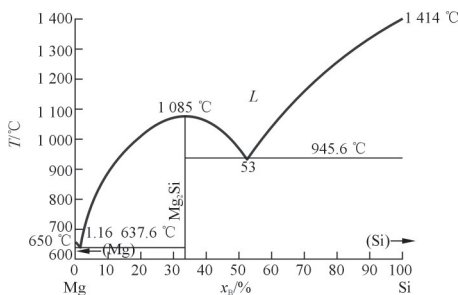


图1 Mg-Si 二元相图^[2]

Fig.1 Mg-Si binary phase diagram

然而,Mg 与 Cu 的加入导致凝固温度区间变宽,富 Cu 的低熔点共晶相(如 Al- Al_2Cu)在凝固后期呈薄膜分布,大幅增加热裂纹倾向。Mg 易烧损并促进氧化膜吸氢,导致焊缝气孔敏感性升高。此外,Al 合金焊接还存在一系列共性问题,如表面 Al_2O_3 膜熔点高(约 2 050 °C)易造成未熔合与夹渣,焊接时需采用高能量密度热源以保证熔深,高膨胀系数导致焊接变形与残余应力控制难度大,液态 Al 溶氢能力强,凝固时溶解度骤降易形成气孔。铸造 Al-Si 合金中通常包含 α -Al 枝晶与粗大板块/针状共晶 Si,且存在缩松、气孔及氧化夹渣。在焊接热循环作用下,这些缺陷极易被激活并扩展成为焊缝气孔的核心来源,同时粗大脆性共晶 Si 网络也加剧了凝固热裂纹的敏感性,严重制约了铸造 Al 合金在高端装备、汽车轻量化等领域的规模化应用,也对焊接工艺优化、材料研发与缺陷

控制提出更高要求。

2 铸造 Al-Si 合金的焊接方法

由于 Al 合金导热系数和膨胀系数大且易氧化,传统的熔焊技术在焊接 Al 合金时容易出现气孔、热裂纹和明显的焊接变形^[7-8]。对此,研究者对传统的钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊进行改进。随着焊接技术的发展,产生了新的焊接方法,如摩擦焊、复合焊等。

2.1 电弧焊

2.1.1 TIG 焊

TIG 焊是铸造 Al 合金修复与补焊最常用的方法之一,采用钨极作为非熔化电极,电弧稳定、热量集中,特别适合手工操作和复杂轨迹焊接。但由于 TIG 焊常采用手工送丝,电弧熔深浅,不适用于中厚板与厚板的焊接,且 TIG 焊的熔敷速率低、焊接速度慢,导致生产效率不高。同时,TIG 焊过程中焊接电流的大小对焊接接头质量具有较大的影响。张震^[9]通过多层焊接的方式研究了焊接电流在 ZL114A 机匣补焊过程中的影响,微观组织见图 2。可以发现,在修补直径为 $\phi 20$ mm、深度为 10 mm 的孔洞时,当焊接电流为 200 A 时,焊缝中气孔尺寸最大,且在焊缝底部发现了夹钨情况。这是由于热输入较小,为了熔化金属,使焊枪过分下探,容易造成钨极触碰熔池。由于电流较小,熔深不足以将上一道焊缝中的气孔层完全融化,最终形成了层间气孔带。大尺寸气孔以及焊缝夹钨的连续出现,对接头力学性能有很严重的负面影响。乔伟琦^[10]使用 240 A 电流单层补焊的方式,采用与母材成分相同的专用焊丝对直径为 $\phi 10$ mm、深度为 5 mm 的 ZL114A 机匣进行 TIG 电弧补焊,经 $540\text{ }^\circ\text{C}\times 12.5\text{ h}+175\text{ }^\circ\text{C}\times 9\text{ h}$ 处理后,焊缝抗拉强度提高至 369 MPa。

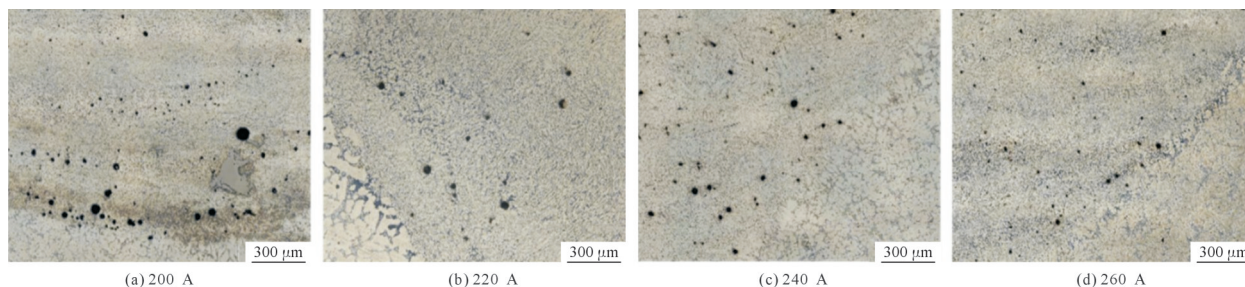


图2 焊接电流对焊缝内气孔大小和数量的影响^[9]

Fig.2 Effects of welding current on size and quantities of pores in welded joint^[9]

活性 TIG 焊(A-TIG)有效解决了传统钨极惰性气体保护焊(TIG)在中厚板焊接中熔深不足的问题^[11]。通过在焊材表面预置特定活性剂,改变电弧收缩行为与

熔池流动模式,从而在不增加热输入的条件下显著增加焊缝熔深。研究表明,该方法可减少或取消坡口准备,大幅缩减焊接道次,在保持 TIG 焊接头冶金质量高、缺

陷率低等优势的同时显著提升了焊接生产效率,实现了质量与效率的协同优化。LI H 等^[12]以 2219Al 合金为对象开展 TIG 焊试验,分别在焊材表面预置单组分 AlF_3 、单组分 LiF 、三元复合($\text{AlF}_3 + 30\% \text{LiF} + 10\% \text{KF} - \text{AlF}_3$, 质量分数)及四元复合活性剂($\text{AlF}_3 + 30\% \text{LiF} +$

$10\% \text{KF} - \text{AlF}_3 + 10\% \text{K}_2\text{SiF}_6$, 质量分数),并对焊缝表面成形质量与熔深尺寸进行观测分析,结果见图 3。可以看出,添加活性剂有助于去除 Al 合金表面氧化膜,其中,四元复合活性剂对应的焊缝表面成形质量最优,而单组分 AlF_3 活性剂对焊缝熔深的提升效果最显著。

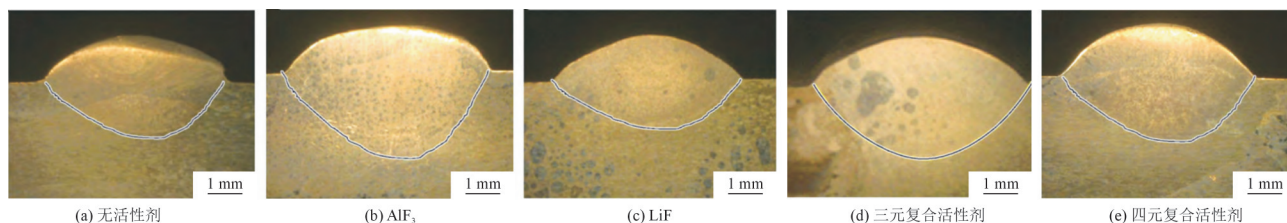


图 3 不同活性剂条件下的焊缝熔深^[12]

Fig.3 Welding joint penetration under different activator conditions^[12]

综上,多层多道焊工艺与活性剂(A-TIG)技术有效解决了 TIG 焊熔深浅、效率低的固有局限。前者通过分层热输入,实现了对厚大铸件缺陷的逐层修复,还可以有效避免因单道热输入不足导致的未熔合与层间气孔;后者通过改变熔池表面张力与电弧收缩,在不增加热输入的条件下显著增加熔深,减少坡口加工需求。合适的热处理工艺可以有效地提升焊接头的强度,避免焊接热过程导致的铸件强度下降。将 TIG 焊的应用从传统的薄壁件修补,有效拓展至中等厚度铸件结构的修复与连接,提升了工艺经济性与适用范围。

2.1.2 MIG 焊

MIG 焊是以连续送进的焊丝作为熔化电极的惰性气体保护焊方法,其核心特征在于焊丝本身即为一极,在高热电弧作用下熔化并过渡至母材熔池。对比非熔化极的 TIG 焊,MIG 焊可采用更大的电流密度,从而获得更深的熔透、更快的熔敷速度与更高的生产效率,尤其适合焊接厚板,且从根本上避免了钨极熔损造成的夹渣缺陷。鉴于其焊接过程本质上是焊丝的持续熔化与过渡,因此熔滴过渡形态是影响焊缝成形的关键。

脉冲过渡技术通过对高峰值的脉冲电流和低水平的基值电流的精准调控,实现了精准、可控的熔滴过渡循环,在 Al 合金焊接的过程中获得广泛应用。NIE F 等^[13]采用单脉冲 MIG 焊接工艺对 4 mm 厚的 6061 和 A356Al 合金板进行异种对接焊接,研究了焊接速度对焊接接头组织和力学性能的影响。结果表明,接头的抗拉强度在行进速度为 12 mm/s 时达到最大值(235 MPa),随后强度随行进速度增加而下降。双脉冲 MIG 焊是在单脉冲波形的基础上,叠加一层低频的幅值调制。这项技术能优化熔池的冶金过程,并精确控制焊缝的凝固形态与宏观成形。YE Z 等^[14]通过双脉冲 MIG 焊接

工艺实现了 3 mm 厚的 7075Al 合金的焊接。当焊接速度为 10 mm/s 时,焊接接头表现出最优性能和最高抗拉强度。热处理前的平均抗拉强度达到 378.51 MPa,为原始基体金属的 65%。

冷金属过渡技术(CMT)为改进的 MIG 焊工艺^[15],其智能送丝方式和焊接过程的数字化控制易于实现可控的材料沉积和低热输入焊接。WU D 等^[16]采用 ER4047 和 ER5356 两种焊丝进行 CMT 焊接时,均可获得良好的焊接接头形貌,见图 4。与 ER4047 焊丝相比,ER5356 焊丝的氢气孔隙率从 9.3% 降低至 7.9%。

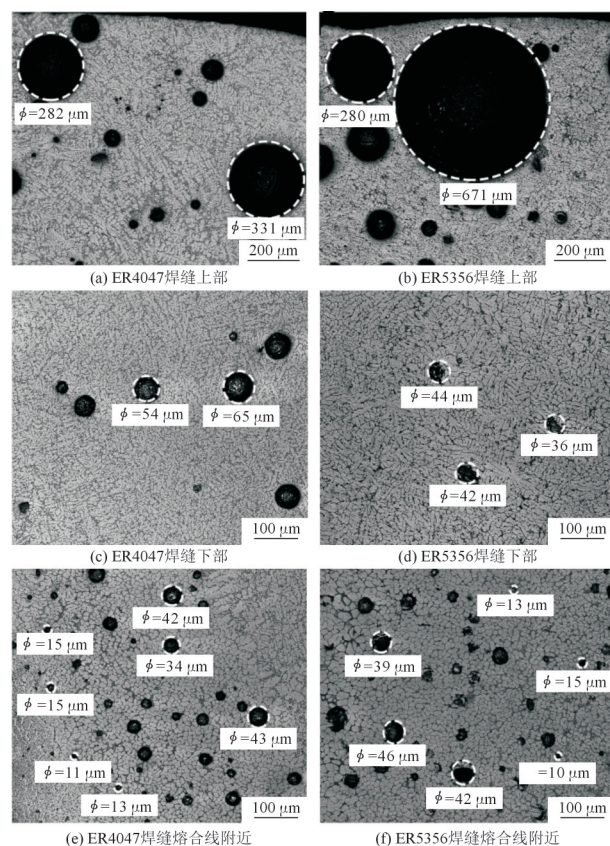


图 4 AlSi7Mg 合金 CMT 焊接产生的孔隙形貌^[16]

Fig.4 Pore morphologies of AlSi₇Mg alloy during CMT welding^[16]

脉冲 MIG 与冷金属过渡(CMT)技术通过对熔过渡和热循环的精准控制,有效改善了 MIG 焊在铸造 Al 合金中焊接飞溅大、气孔敏感的问题,优化了熔池凝固组织,减少飞溅并大幅降低热输入,使得 MIG 焊能够在控制变形与缺陷的前提下,实现对中厚板铸造 Al-Si 合金的高效连接,从而将其应用领域从变形 Al 合金拓展至对热输入更敏感、结构更复杂的铸造 Al 合金构件。

2.2 激光焊

激光焊接技术利用高能量密度激光束作为热源,具有能量密度高、加热速度快、热输入小、变形精确可控的特点,极其适合连接对热输入极度敏感、要求变形极小或具有精密装配关系的薄壁结构,如新能源汽车电池包内的精密连接件。然而,Al-Si 合金的热裂纹敏感性较高。CICALĂ E 等^[17]研究了不同焊丝种类与焊接送给速率对 Al 合金激光焊接中的热裂纹影响,见图 5。发现焊丝种类和送给速率对热裂纹的出现有重要影响。高速送给会产生不稳定性,而低速送给则不足以充分改变熔池的化学成分。保护气体的流量对于热裂纹的产生影响较小。选择合理的激光焊接参数,可以提高接头性能。吴萍辉等^[18]采用 5A06 为焊丝的激光填丝焊对 3 mm 厚的 ZL101A 薄板进行盖面焊,当焊接速度为 0.8 m/min、激光功率为 2.3 kW、保护气体流量为 9 L/min 时,可以获得成形良好的焊缝,焊缝强度为 187 MPa。WU M 等^[19]利用有限元分析法模拟 Al-Si 合金的双面激光密封过程,并提出了结构优化设计策略。通过试验与模拟对比发现,经过两次焊接后,壳体底部的平整度将显著提升,底部盖板的厚度以及应力释放槽的深度为影响激光密封焊接应力分布的关键因素。

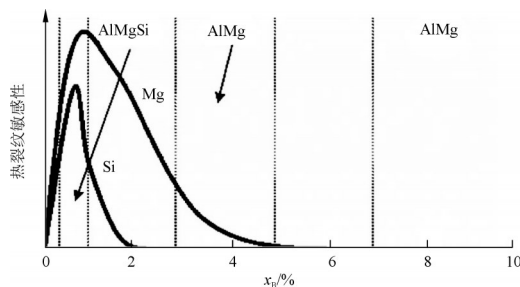


图5 不同成分的 Al 合金的热裂纹敏感性^[17]

Fig.5 Hot cracking susceptibility of aluminum alloys with different compositions^[17]

此外,气孔也是影响激光焊接接头强度的重要因素,其中铸造 Al-Si 合金气孔产生的主要因素包括低沸点元素(如 Mg)蒸发形成气体,氢在熔融 Al 中高溶解度

导致微孔、匙孔不稳定或闭合捕获气体。因此,可以通过改变激光焊接工艺,对待焊件表面进行热处理来控制激光焊接气孔率。HABOUDOU A 等^[20]评估了双光束焊接以及不同表面预处理方式对控制焊接接头气孔率的有效性,见图 6。结果发现,激光清洗后得到的激光焊接接头气孔率最低(<2%)。相比于单光束,双光束也可显著降低孔隙率,尤其是大光束间距(0.75~0.9 mm)时,气孔率由 8% 降至 1.5%。综合使用这两种方法可在不影响性能的前提下,显著提升 Al 合金激光焊接质量。

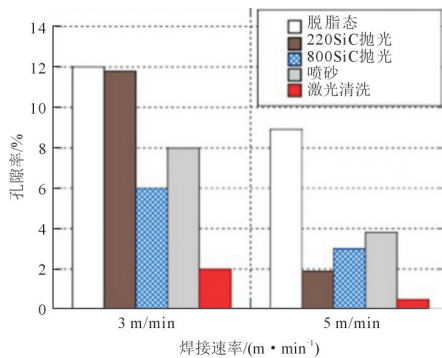


图6 在 4 kW 功率下两种不同焊接速率时表面处理对孔隙率的影响^[20]

Fig.6 Effects of surface treatment on porosity at different welding speeds with 4 kW power^[20]

通过改变激光热源的作用方式也可以有效降低气孔率。CHEN X M 等^[21]采用连续激光焊接(CW)、准连续激光焊接(QCW)和振荡准连续激光焊接(O-QCW)对 Al-Si 合金进行激光焊接,见图 7。结果表明,CW 焊缝孔隙率高达 10.8% 且存在大量匙孔诱导孔隙和密集气孔,QCW 焊缝孔隙率降至 5.9%,匙孔闭合次数减少,O-QCW 焊缝孔隙率最低达 0.3%,强度和伸长率分别达 258.5 MPa 和 8.8%,断口无明显密集气孔与裂纹。

综上,合理的焊接参数选择是激光焊接应用于铸造 Al 合金焊接、防止热裂纹产生的前提。此外,铸造 Al-Si 合金激光焊的主要障碍在于匙孔诱导气孔与较高的装配要求。光束调制与表面预处理技术的发展有效解决了这些问题。光束调制通过稳定匙孔动态直接抑制气孔形成,而激光清洗则从源头上消除了氢吸附源。这些技术将激光焊的气孔率从较高水平(>10%)降低至工程应用上可接受的范围(<2%),使其突破仅适用于变形 Al 合金薄壁精密件的范畴,可靠地应用于新能源汽车压铸电池壳等对气孔极度敏感且本身存在原始铸造缺陷的复杂铸 Al 构件密封连接领域。

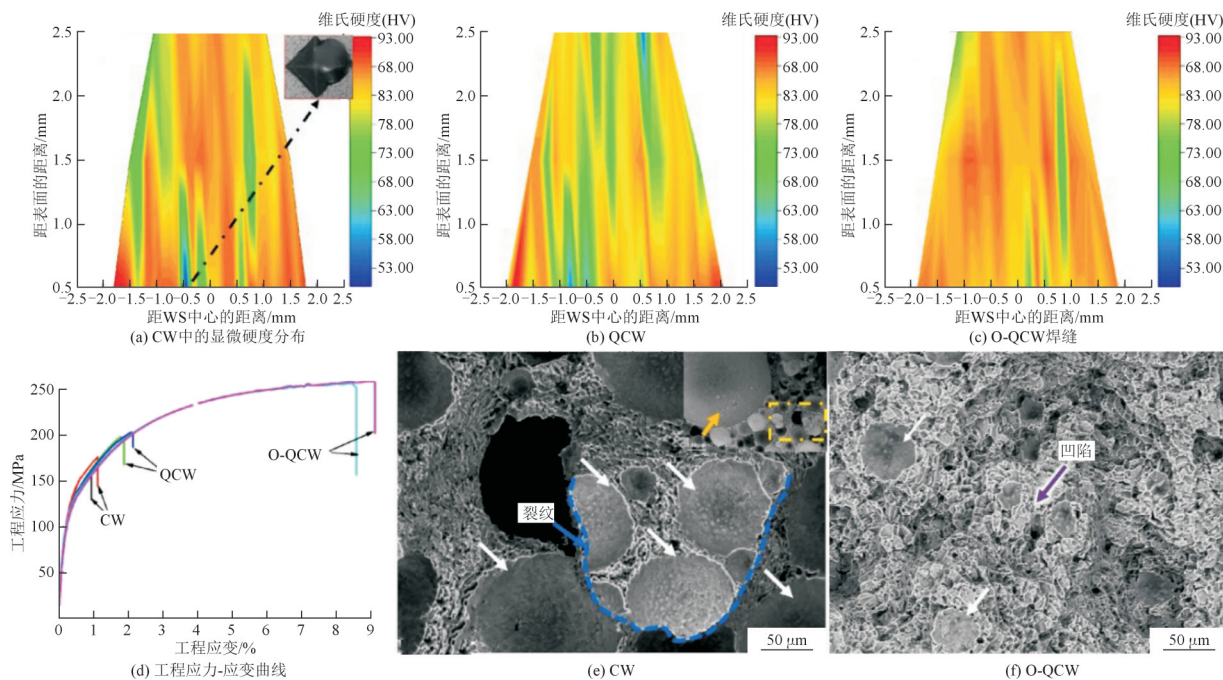

 图7 焊接接头的力学性能和断裂形态^[21]

Fig.7 Mechanical properties and fracture morphologies of welded joints

2.3 激光-电弧复合焊

鉴于 Al-Si 合金激光焊接存在装配精度要求极高、焊接过程不稳定、能量利用率低等问题,利用激光和电弧复合焊接方法焊接 Al 合金时,激光与电弧的相互影响作用可以克服单独使用激光或电弧焊时焊接方法自身的不足,产生良好的复合效应,大幅提高焊接效率,主要是因为高的能量密度可以得到高的焊接速度。此外,两种热源同时作用在相同区域能产生叠加效应。

根据复合电弧热源的不同,激光-电弧复合焊接可以分为激光-GMAW(熔化极)复合焊和激光-TIG(非熔化极)复合焊。其中激光-GMAW 复合焊由于无需考虑钨极的烧损且参数设置相对简单,得到了广泛的应用。相比于激光焊,激光电弧复合焊在保持高速焊接的同时实现了深熔焊接,有效提高了焊接效率并减少了缺陷,逐渐应用于各领域^[22-24]。现有工作通过采用自主研发的 YAG 激光-MIG 复合焊接系统实现了 4 mm Al 合金板材的焊接取得了良好的效果^[25-26]。同时该系统可显著降低工件对装配精度的要求,在对接间隙为 1.00 mm 时,仍可获得外观良好的接头。余阳春等^[27]采用 YAG 激光-熔化极惰性气体保护 MIG 电弧复合焊接方法研究 ZL114AA1 合金的焊接性能。发现由于焊接时冷却速度快,且焊接线能量的输入较为合理,在高速焊接的条件下得到了高质量的焊接接头。

激光功率作为影响激光-电弧复合焊接过程中热输入和匙孔动力学的关键参数,直接影响了焊池的温度分布、熔融金属流动行为及凝固特性^[28-30]。GUO X

等^[31]研究表明,在 6061Al 合金焊接过程中,激光功率对焊缝组织形态有直接影响。当激光功率为 3 000 W 时,焊接接头几乎无气孔且力学性能最佳。由于激光电弧复合焊过程中同样存在匙孔坍塌、快速凝固的现象,在焊接接头处易产生气孔。HAN J 等^[32]研究发现,与恒定功率振荡焊接(CP)相比,梯度功率模式(GP)通过优化焊缝表面的能量分布,将更多能量聚集在熔池中心,从而显著增强了金属蒸气反冲压力,促进了熔池流动并稳定了匙孔,见图 8。这有效防止了匙孔塌陷导致的

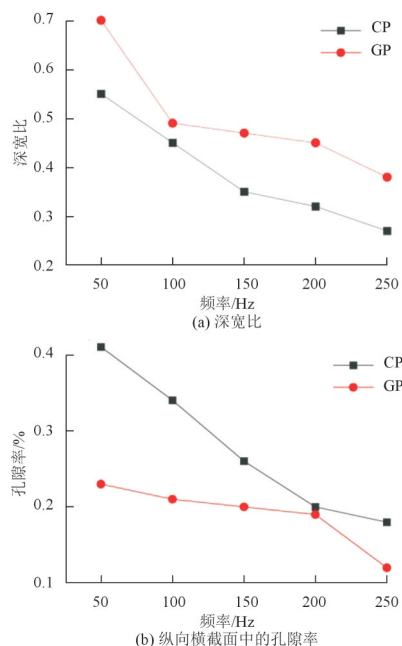

 图8 振荡频率和功率模式对焊缝的影响^[32]

 Fig.8 Effects of oscillation frequency and power mode on welded joint^[32]

气孔形成,在减少气孔的同时获得了更大的熔深和更高的深宽比,实现了抑制气孔与提高能量利用率双重优化。

激光-电弧复合焊通过两种热源的协同效应,解决了单一热源的瓶颈。激光提供了深熔所需的能量密度并稳定电弧,而电弧增强了桥接能力,降低了对工件装配间隙的敏感性。这种协同使得该技术能够在保持高焊接速度与深熔能力的同时,容许更大的装配误差,有效降低装配精度需求,并解决铸造 Al 合金对于激光吸收率不高的问题,为大型、复杂铸造 Al 合金构件非理想装配条件下的高质、高效连接提供了可行的工艺方案。

2.4 搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊(FSW)是一种固相连接技术,具有优质、高效、低耗、焊接变形小等特点^[33],被广泛用于 Al 合金的焊接。Al 合金焊接接头主要由搅拌区(焊核区)、机械热影响区组成。焊核区的组织与母材明显不同,焊核区细化的粒子均匀、弥散地分布在 Al 基体中,随着焊速增加,焊核区粒子所占体积分数逐渐下降,机械热影响区的晶粒相对粗大且为再结晶晶粒结构,前进侧晶粒被拉长。进行搅拌摩擦焊时,母材并未熔化,焊缝产生的机械热影响区相对较小且焊核中不会产生气孔及裂纹的缺陷,显著提高焊缝的强度。值得注意的是,当搅拌区域存在大量原始气孔或缩松时,这些缺陷会在塑性流动过程中被撕裂、扩大、连接形成贯穿性的孔洞隧道缺陷或缩松组织,Al-Si 合金中原本粗大的共晶 Si 还会在搅拌时容易破碎,成为微裂纹源,严重损害焊接接头性能。因此采用低压铸造、差压铸造或半固态铸造等工艺生产内部缺陷少、组织均匀的优质铸件,同时进行恰当的焊前热处理以溶解脆性相改善塑性。

搅拌摩擦焊工具对焊接接头的形貌与性能有重要影响。苏苑琪等^[34]分别采用单针锥形、双针圆柱形搅拌头对 5 mm 厚的 A356 Al 合金板进行搅拌摩擦焊,见图 9。发现双针圆柱搅拌头接头横截面存在不同程度的隧道缺陷,而单针锥形搅拌头接头横截面在焊接速度为 130 mm/min 时才出现隧道缺陷。单针圆锥形的最大抗拉强度达到母材的 85%,而双针圆柱形仅达到母材的 78%。铸造合金本身高温塑性较差,金属无法较好地跟随搅拌头运动,容易产生表面沟槽、飞边不连续或内部隧道缺陷。LEE W B 等^[35]研究不同焊接速度下 A356 焊接接头的组织与性能变化,见图 10,发现与母材相比,焊缝区力学性能大幅改善。随着焊接速度从 87 mm/min 提升至 267 mm/min,共晶 Si 尺寸从 6.46 μm 增大至 7.89 μm ,较低的焊接速度有利于通过更充分的热机械搅拌作用,将母材中粗大的片状共晶

Si 破碎得更细小、分布更均匀。同时纵向与横向的抗拉强度分别出现先升高后降低和先降低后升高的趋势。

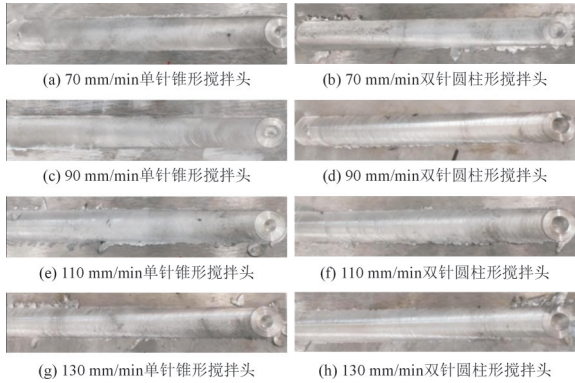


图 9 不同焊接速度下 FSW 接头的表面形貌^[34]

Fig.9 Surface morphologies of FSW joints at different welding speeds^[34]

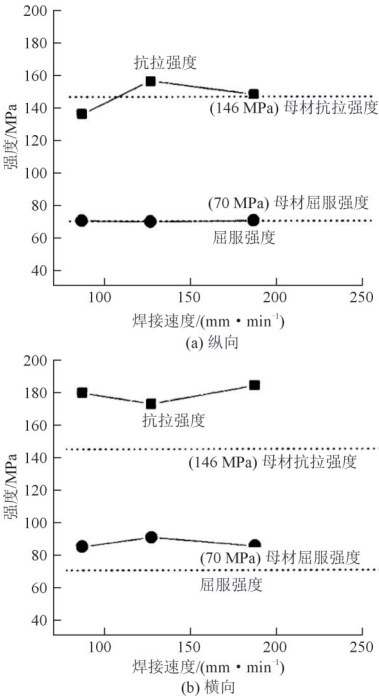


图 10 不同焊接速度下的纵向和横向强度^[35]

Fig.10 Longitudinal and transverse strength at different welding speeds^[35]

FSW 焊缝与母材(BM)的力学性能不同限制了焊接接头的整体性能^[36-37]。对可热处理 Al 合金的接头进行焊后热处理,包括固溶处理(ST)和人工时效处理(AAT)^[38-39],发现焊前固溶处理及焊后快速热处理(RHT)均可有效抑制接头在焊后固溶处理后晶粒的异常长大现象^[38-39]。

搅拌摩擦焊(FSW)作为固相连接技术,应用于铸造 Al-Si 合金的关键在于通过热机械过程改善原始的铸态组织,并避免缺陷。搅拌头几何优化与工艺参数

的精确匹配,可以促进材料充分塑性流动以消除内部隧道、组织不均匀等缺陷的产生,并破碎粗大的共晶Si相。此外,焊前与焊后的热处理进一步调控了焊核区的析出相与晶粒结构,使FSW不仅避免了熔焊缺陷,更能通过破碎铸造Al-Si合金中粗大的共晶Si相,调控晶粒尺寸与析出相提升焊缝区的力学性能,从而将其应用从传统的变形Al合金板材连接,成功拓展至对疲劳性能、可靠性要求极高的铸造Al合金承力部件(如轮毂、发动机框架)的制造与修复领域。

TIG焊因工艺灵活、热输入可控,是铸Al件补焊修复的主要方法。通过预热、多层多道焊、活性剂及脉冲技术,可改善熔深并减少缺陷。MIG焊效率更高,双脉冲与CMT技术进一步降低了热输入与气孔率,适用于中厚板焊接。但电弧焊仍存在热影响区宽、变形大、效率有限等问题。激光焊能量密度高、热输入小、变形小,在薄壁精密件连接中潜力显著,但对装配精度要求高,且易产生匙孔不稳、密集气孔等问题。通过双光束、振荡准连续激光与表面激光清洗等工艺,可有效抑制缺陷、提升接头性能。激光-电弧复合焊结合了二者优势,在熔深、速度、装配宽容度和焊缝成形方面表现突出,是中厚板高效高质量焊接的重要方向。搅拌摩擦焊作为固相连接技术,从根本上避免了气孔与热裂纹的问题,具有接头性能好、变形小、节能环保的优势,但对母材原始质量要求高,内部缺陷易导致隧道缺陷。通过优化工艺参数与热处理,可细化组织、提升强韧性,适用于高质量要求的压铸Al结构件。

综上,铸造Al-Si合金的焊接方法选择需依据构件的服役条件与性能要求,在焊缝质量、生产效率、工艺成本之间取得平衡。针对薄壁精密构件,传统电弧焊因热输入较高,难以满足要求。激光焊凭借其高能量密度、低热输入的固有特性,成为该类部件的首选方案。针对中厚板及大型复杂结构件,MIG焊通过优化熔滴过渡与热循环,在保证质量的前提下实现了高效率焊接。激光-电弧复合焊利用激光与电弧的复合效应,在焊接参数选择合理的情况下,往往可以得到更加优质的接头。针对气孔与热裂纹极度敏感的高性能铸件,搅拌摩擦焊作为成熟的固相连接技术,通过热-机械作用实现连接,彻底避免了凝固气孔与热裂纹,并破碎粗大的共晶Si提升接头性能,是目前此类场景下最可靠的连接方案。

3 未来展望

铸造Al-Si合金在航空航天、新能源汽车领域日益广泛的应用,对其焊接接头的质量与可靠性提出了更

高的要求。目前铸造Al-Si合金焊接过程中存在的关键物理冶金现象的机理理解不充分、固有的铸造缺陷使其对工艺参数的波动极为敏感、缺乏针对铸造Al-Si合金组织特性和缺陷而设计的专用焊材等问题制约着其发展。未来可以从以下几方面开展深入研究。

(1)发展耦合计算流体动力学(CFD)、相场法与晶体塑性有限元(CPFEM)的跨尺度模型。模拟激光-复合焊中瞬态匙孔的形成、波动与坍塌全过程;模拟FSW中材料在复杂热-机耦合下的三维塑性流动,预测隧道缺陷、第二相破碎与晶粒演化。

(2)基于深度学习模型(如卷积神经网络、时序模型),建立从多模态传感信息到焊接质量、再到工艺参数调整的端到端映射。开发自适应算法,根据熔池状态的微小变化实时微调功率、速度、送丝等参数,动态补偿铸件局部差异。

(3)基于凝固理论与相图计算,设计新型焊丝成分。建立涵盖专用焊丝、活性剂、母材牌号、焊接方法与热处理制度的协同性能数据库与知识图谱,为一体化解决方案提供数据支撑。

参 考 文 献

- [1] 杨庆,王哲,欧弘飞,等.新能源汽车轻量化领域Al合金焊接技术研究综述[J].内燃机与配件,2023(10):104-106.
- [2] DU S, ZHANG S G, WANG J W, et al. Energy flow of aerospace aluminum scraps cycle and advanced integration principles for upcycling technologies: A review [J]. J. Clean Prod., 2024, 448: 141 176.
- [3] YOU X H, XING Z Q, JIANG S W, et al. A review of research on aluminum alloy materials in structural engineering [J]. Developments in the Built Environment, 2024, 17: 100 319.
- [4] 杨伟,隋育栋,蒋业华,等.高强韧铸造Al合金的研究进展[J].轻合金加工技术,2021,49(7):15-21.
- [5] LI Z Y, GENG M Y, WANG J X, et al. Synergy analysis of tribo-corrosion behaviour of aluminum alloy under different hydrostatic pressures [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 6 949-6 957.
- [6] ZHU H, LI J F. Advancements in corrosion protection for aerospace aluminum alloys through surface treatment [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2024, 19(2): 100 487.
- [7] YAN D Y, WU A P, SILVANUS J, et al. Predicting residual distortion of aluminum alloy stiffened sheet after friction stir welding by numerical simulation [J]. Materials & Design, 2011, 32(4): 2 284-2 291.
- [8] WEBER D, KIRSCH B, CHIGHIZOLA C R, et al. Investigation on the scale effects of initial bulk and machining induced residual stresses of thin walled milled monolithic aluminum workpieces on part distortions: Experiments and finite element prediction model [J]. Procedia CIRP, 2021, 102: 337-342.
- [9] 张震.热处理与补焊工艺对ZL114A机匣组织性能影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.

- [10] 乔伟琦. TIG 电弧补焊及热处理对 ZL114A 机匣组织性能影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [11] 解旭, 翟鑫钰. Al 合金焊接方法综述 [J]. 有色金属加工, 2022, 51(4): 4-11.
- [12] LI H, ZOU J S, YAO J S, et al. The effect of TIG welding techniques on microstructure, properties and porosity of the welded joint of 2219 aluminum alloy [J]. JALIC, 2017, 727: 531-539.
- [13] NIE F H, DONG H G, 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] YE Z, ZHU H Y, WANG S F, et al. Fabricate high-strength 7075 aluminum alloy joint through double pulse MIG welding process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 125: 512-522.
- [15] BORREGO L P, JESUS J S, BRANCO R, et al. Mechanisms of fatigue crack growth in 7050-T6 aluminium alloy [J]. IJFA, 2025, 194: 108 830.
- [16] WU D F, CUI L, WU X, et al. Cold metal transfer welding of AlSi7Mg alloy sheets prepared by selective laser melting [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 84: 282-297.
- [17] CICALÀ E, DUFFET G, ANDRZEJEWSKI H, et al. Hot cracking in Al-Mg-Si alloy laser welding-operating parameters and their effects [J]. Materials Science and Engineering, 2005, A395(1): 1-9.
- [18] 吴萍辉, 王洋, 杨涛, 等. ZL101A 铸造 Al 合金焊接工艺研究 [J]. 焊接, 2013(10): 58-61, 75-76.
- [19] WU M P, LUO Z, AO S S. A novel welding method for extra-thick high-strength steel: Double-sided narrow gap oscillating laser and oscillating laser-TIG hybrid welding [J]. Optics & Laser Technology, 2023, 164: 109 432.
- [20] HABOUDOU A, PEYRE P, VANNES A B, et al. Reduction of porosity content generated during Nd:YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminium alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2003, A363(1): 40-52.
- [21] CHEN X M, ZHANG L Z, QIN K L, et al. Porosity suppression in the oscillating quasi-continuous laser welding of high hydrogen aluminum alloy [J]. Optics & Laser Technology, 2025, 189: 113 115.
- [22] YANG T, CHEN L, ZHUANG Y, et al. Arcs interaction mechanism in Plasma-MIG hybrid welding of 2219 aluminium alloy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 635-642.
- [23] BINTORO S R, SUROJO E, MUHAYAT N, et al. A comprehensive review on fusion arc welding of aluminum matrix composites: Challenges, mechanisms, and advancements [J]. Results in Engineering, 2025, 27: 106 257.
- [24] JIANG Y S, MENG Y F, CHEN H, et al. Effects of oscillating frequency on keyhole stability and porosity inhibition in high-power laser-arc hybrid welding of 10 mm-thick 6082 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 385-396.
- [25] NAMIT N P, MEHROTRA S, RAVI R A, et al. Development of hybrid welding processes incorporating GMAW and SMAW [J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 18: 2 924-2 932.
- [26] ZHANG S, ZHANG Y, BAI H Y. Adaptive control method for ship curved hybrid laser-arc welding through lightweight encoder-decoder architecture [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 145: 110 193.
- [27] 余阳春, 王春明, 邓玉平, 等. YAG-MIG 复合焊接 ZL114AA1 合金的接头组织与性能研究 [J]. 激光技术, 2008, 32(6): 601-604.
- [28] GUO J Q, LI H Z, SU R, et al. Effect of laser power on stability of pulsed laser-arc hybrid welding process for 6082-T6 aluminum alloy [J]. Optics & Laser Technology, 2025, 190: 113 126.
- [29] ARUNAKUMARA P C, SAGAR H N, GAUTAM B, et al. A review study on fatigue behavior of aluminum 6061 T-6 and 6082 T-6 alloys welded by MIG and FS welding methods [J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 74: 293-301.
- [30] WANG P, LIU Y Z, CHEN Z H, et al. Fatigue propagation behavior and interaction mechanism of internal multiple cracks for 6082-T6 aluminum alloy joints [J]. Structures, 2025, 80: 109 992.
- [31] GUO X H, MENG Y F, YU Q X, et al. Effect of laser power on microstructure and mechanical properties of oscillating laser-arc hybrid additive manufactured high-strength aluminum alloy [J]. Optics & Laser Technology, 2025, 187: 112 800.
- [32] HAN J, SHI Y, GUO J C, et al. Porosity inhibition of aluminum alloy by power-modulated laser welding and mechanism analysis [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 102: 827-838.
- [33] MENG X C, HUANG Y X, CAO J, et al. Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding [J]. Prog. Mater. Sci., 2021, 115: 100 706.
- [34] 苏苑琪, 张洪申, 王崇仰. 单双针搅拌头对 A356Al 合金接头组织及性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2025, 54(21): 175-180.
- [35] LEE W B, YEON Y M, JUNG S B. The improvement of mechanical properties of friction-stir-welded A356 Al alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2003, A355(1): 154-159.
- [36] LU J Q, YANG Z, FAN K H, et al. Characteristics and mechanical properties of retractable pin-tool friction stir welded joints of A356-alloy LPDC hollow hubs [J]. Mater. Charact., 2024, 210: 113 707.
- [37] LIU W, HAO Y G, WANG R Q. Global damage behavior and formability prediction of AA2219 FSW blanks at cryogenic temperature [J]. IJMS, 2023, 249: 108 193.
- [38] LEZAACK M B, SIMAR A. Avoiding abnormal grain growth in thick 7XXX aluminium alloy friction stir welds during T6 post heat treatments [J]. Materials Science and Engineering, 2021, A807: 140 901.
- [39] PABANDI H K, JASHNANI H R, PAIDAR M. Effect of precipitation hardening heat treatment on mechanical and microstructure features of dissimilar friction stir welded AA2024-T6 and AA6061-T6 alloys [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 214-220.

(编辑: 彭瑾)