

压铸铝合金激光焊接气孔控制机理研究

苑文广 崔 博

中国电子科技集团公司第四十九研究所 黑龙江 哈尔滨 150028

摘 要: 针对压铸铝合金激光焊接气孔频发、难以精准管控的行业难题,本文系统剖析气孔形成的先天材料基础与熔池动力学机制,明确氢析出、匙孔失稳、夹杂诱发三类气孔的生成机理。探究激光工艺、焊接环境、材料状态的多因素耦合致孔规律,构建全流程气孔控制体系。通过工艺优化与试验验证,有效降低焊缝气孔率,显著提升焊接接头力学性能,为压铸铝合金批量焊接生产提供技术支撑。

关键词: 压铸铝合金; 激光焊接; 气孔控制机理

引言: 压铸铝合金凭借轻量化、高强度优势广泛应用于汽车结构件等领域,激光焊接是其精密连接的核心工艺。但压铸工艺导致的基体含氢、固有孔隙及氧化夹杂问题,使得焊接气孔缺陷突出,严重制约接头质量与服役稳定性。当前气孔多因素耦合形成机制尚不清晰,精准控孔工艺体系不完善。为此本文深入解析气孔演化规律与影响机制,探索高效控孔技术,为解决焊接气孔难题、优化量产工艺提供理论与实践依据。

1 压铸铝合金激光焊接气孔形成基础机理

1.1 压铸铝合金材料特性与焊接缺陷基础

(1) 压铸铝合金以 Al-Si 系为主,含 Fe、Cu、Mg 等元素,其组织由 α -Al 固溶体与共晶 Si 相组成,压铸高速充填导致内部固有气孔(直径数十至数百微米)普遍存在,成为激光焊接的重要气孔源。(2) 压铸过程中金属液与压室、模具中水分反应产生氢气,氢含量显著高于其他铸造形态(可达 0.1-0.3mL/100gAl),且呈表层富集分布;同时熔体卷入氧化物(Al_2O_3 为主)在铸件内呈随机离散分布。(3) 固有孔隙、溶解氢及氧化夹杂构成焊接气孔生成的先天“物源基础”,其中氢含量对气孔倾向起主导控制作用,孔隙和夹杂则提供气泡优先形核位点。

1.2 激光焊接熔池动力学与匙孔行为特征

(1) 激光热源局部集中加热,熔池温度梯度大(10^3 - 10^4 K/m),加热冷却速率极快,凝固时间仅数毫秒至数十毫秒,不利于气泡充分逸出。(2) 匙孔由金属蒸气反冲压力维持,受表面张力、流体静压力和等离子体压力共同作用,呈现高频振荡(百 Hz 至 kHz 级),匙孔壁不稳定塌陷将蒸气卷入熔池形成气泡。(3) 熔池内表面张力梯度(Marangoni 效应)和蒸

气剪切力驱动强烈对流,流动方向和速度场直接影响气泡迁移路径及逸出效率^[1]。

1.3 典型气孔类型及形成机理

(1) 氢析出型气孔源于凝固过程中氢溶解度骤降,气泡在固液界面前沿形核长大,当生长速度大于上浮速度时残留在焊缝中,其形成受温度场和氢扩散控制。(2) 匙孔失稳型气孔由匙孔尖端周期性闭合将金属蒸气或保护气捕获形成,气泡尺寸较大(数十至数百微米),常呈不规则形状,与匙孔振荡频率密切相关。(3) 保护气卷入型气孔源于侧吹保护气紊流裹入熔池;氧化膜夹杂因润湿性差,成为气泡优先形核基底,降低形核能垒,显著促进气孔生成。

1.4 气孔生长、聚集与固化全过程演化规律

(1) 气泡形核依赖熔池内局部氢过饱和度及异质形核位点,形核后通过氢扩散和内部压力驱动长大,长大速率受熔体粘度和表面张力制约,上浮速度服从 Stokes 定律,小尺寸气泡难以有效逸出。(2) 凝固过程中固液界面前沿推移速率与气泡上浮速率的竞争关系决定气泡是否被捕获,当凝固速率高于临界捕获速度时气泡固化于焊缝中,最终残留孔径和形态取决于捕获时刻气泡尺寸。(3) 不同类型气孔在熔池内耦合生长:氢析出与匙孔波动过程互相叠加,微气泡沿熔池流场聚集、合并形成大尺寸气孔群,最终呈现从焊缝底部到表面尺寸递减的分布演变特征。

2 压铸铝合金激光焊接气孔影响因素及作用规律

2.1 激光工艺参数对气孔缺陷的影响

(1) 激光功率升高增加热输入,延长熔池高温停留时间,有利于气泡上浮逸出,使氢致气孔率下降,但功

率过高时匙孔穿透加深、反冲压力增强,尖端失稳概率增大,反而诱发大量匙孔型气孔。焊接速度加快使熔池冷却速率上升、液态存在时间缩短,气泡来不及逸出即被凝固界面捕获,气孔率整体呈上升趋势,且小尺寸气泡占比显著增加。(2)光斑直径和离焦量决定作用于工件表面的能量密度与功率分布形态。正离焦时能量密度降低,匙孔深度变浅、波动幅度减小,有利于抑制匙孔失稳型气孔,但熔池温度梯度增大可能降低氢扩散效率。负离焦时能量集中,匙孔深窄、壁面易局部塌陷,气孔倾向明显升高。合理匹配离焦量可在匙孔穿透能力与稳定性之间获得最佳平衡^[2]。(3)激光调制通过周期性改变功率输出,使匙孔产生受迫振荡,促进壁面气泡剥离逸出。光束摆动(圆形、∞字形、螺旋线等)主动扩大熔池宽度、搅动熔体流动,延长气泡逸出路径并降低温度梯度,使凝固前沿推进减缓,二者协同可将气孔率降低40%-60%。

2.2 焊接环境与保护工艺的影响机制

(1)Ar气密度大、易形成稳定气帘,但流量过高(>25L/min)时紊流加剧,可裹入空气形成机械卷入型气孔;He气热导率高、等离子体屏蔽弱,利于熔池散热,成本较高。流量控制在15-25L/min范围内可在有效保护与抑制卷入间取得最佳效果。(2)环境湿度升高时,水蒸气在激光加热区分解产生大量氢原子,熔池氢含量增加,气孔率随相对湿度上升呈指数增长趋势,相对湿度从30%升至80%时气孔率可增加2-3倍。环境洁净度恶化引入的粉尘颗粒作为异质形核核心,显著降低气泡形核能垒。(3)前置真空脱气或烘干处理能有效降低铸件基体初始含氢量,从源头削减氢源供给。激光清洗、化学清洗去除表面氧化膜和油污,可减少焊接过程中膜层分解及蒸发产气,对抑制氧化膜夹杂型和保护气卷入型气孔均具有显著改善效果。

2.3 材料状态对气孔生成的调控作用

(1)基体含氢量是决定氢析出型气孔数量的核心材料因素,气孔率与含氢量呈近似线性正相关。夹杂(尤其 Al_2O_3)含量增加提供大量异质形核位点,使气泡形核能垒显著降低,气孔数量增多且尺寸分布趋于分散。(2)表面氧化膜在激光加热时因热膨胀失配发生破裂,释放吸附湿气,膜层碎片进入熔池成为气泡优先形核基底;油污高温分解产生 H_2 、CO等气体,直接增加熔池内气相体积分数,显著加剧气孔倾向。(3)母材壁厚影响熔池散热速率,厚壁件冷却快、气泡逸出窗口短,气孔易残留于焊缝中下部;薄壁件反之。铸件固有的冷隔、缩孔等缺陷在焊接中可能成为气相聚集中心,诱

导气孔沿缺陷区域呈带状集中分布。

2.4 多因素耦合作用下气孔缺陷响应规律

(1)工艺参数、材料状态与环境条件通过熔池热-力-冶金行为相互耦合。高功率配合摆动可抑制匙孔塌陷,但若材料含氢量高且环境湿度大,氢致气孔仍严重;低速大光斑利于气泡逸出,却可能因熔池过热加剧氧化膜破碎。三者交互决定最终气孔分布特征。(2)正交试验极差分析表明,激光功率与焊接速度的主效应贡献率最大,可达50%以上;材料含氢量次之,约20%-30%;保护气体流量和环境湿度影响相对较小,但在高湿条件下交互效应显著增强,需通过回归模型综合预测^[3]。(3)多因素协同致孔可归纳为“氢源供给—熔池停留时间—形核位点密度”的竞争平衡:三者同时恶化时气孔率呈指数上升。协同抑孔则通过“降低含氢量+前置清洗+适中功率+摆动激光”形成减源、延长逸出、稳定匙孔的联合路径,实现气孔率的有效控制。

3 压铸铝合金激光焊接气孔精准控制机理与工艺优化

3.1 基于熔池调控的气孔主动控制机理

(1)熔池凝固速率调控:通过调节热输入或辅助冷却,改变固液界面推进速度与气泡上浮速度的相对关系。降低冷却速率延长液态停留时间,使气泡充分上浮逸出;当凝固速率低于临界捕获速度时,气泡可推移至表面逸出,气孔率显著下降。但速率需精准匹配,过度缓冷会导致晶粒粗化,削弱力学性能。(2)激光摆动搅拌熔池:光束高速摆动驱动熔池强迫对流,将分散气泡携带至自由表面逸出;同时动态压力扰动使大气泡剪切破碎为微米级小气泡,比表面积增大、浮力与粘滞力比值提升,逸出概率增加。不同摆动轨迹改变流场分布,∞字形对熔池两侧搅动最为充分。(3)匙孔稳定性优化:抑制匙孔型气孔的核心在于维持壁面力平衡。采用环形光斑或中心弱化能量分布,降低底部蒸发强度,减小蒸气反冲压力波动。适度正离焦增加匙孔开口面积,改善蒸气逸出通道,避免腔内高压致壁面塌陷。双光束前后排列时,前束预热降低蒸发阈值,后束以低功率维持匙孔稳定,有效抑制周期性闭合。

3.2 前置预处理与辅助焊接控孔技术机理

(1)母材真空除气通过降低铸件内部溶解氢浓度,从源头削减凝固过程可析出氢总量,当基体含氢量降至0.10mL/100gAl以下时,氢过饱和度不足以驱动气泡大量形核,氢致气孔倾向显著下降。表面激光净化利用短脉冲激光的烧蚀效应去除氧化膜及表层吸附污染物,同时瞬时高温使表层微孔收缩闭合,净化后表面润

湿性改善,焊缝气孔率降幅可达 40%-60%。(2) 预热工艺通过提升母材初始温度,降低熔池与母材间的温度梯度,使冷却速率减缓、凝固时间延长,同时预热过程促使基体中部分氢向外扩散逸出,实现预脱氢效果。缓冷则主要作用于凝固末期,抑制近固液界面处小尺寸气泡被捕获,为残留微气泡提供额外逸出机会,可使气孔率额外降低 15%-25%^[4]。(3) 复合激光焊接辅助工艺的协同控孔原理因辅助方式而异。激光-MIG 复合焊中电弧热源增加熔池体积和高温持续时间,电弧力的周期性搅拌促进气泡上浮;双光束激光焊中前后排列的两束激光形成梯级热循环,前束产生预热并形成浅熔池使部分气体逸出,后束完成深熔焊并使残留气泡再次获得逸出窗口,实现二次净化效果。

3.3 气孔控制工艺参数优化与试验验证

(1) 以气孔率为响应目标,采用响应曲面法构建包含激光功率、焊接速度、摆动参数及离焦量等自变量的二阶回归模型,通过方差分析检验各因素主效应及交互效应显著性,剔除不显著项后建立精简预测方程,同时引入热输入约束条件形成多目标优化框架,确保参数组合兼顾低气孔率与接头强度要求。(2) 优化工艺参数窗口下,焊缝横截面气孔率由优化前的 5.2%-8.7%降至 0.8%-1.6%。X 射线检测显示直径 $> 50\mu\text{m}$ 的气孔基本消失,残留气孔以 $5\text{-}20\mu\text{m}$ 微孔为主,多分布于焊缝上部近表面区域,气孔形态从初始的不规则聚集态转变为球状均匀离散分布。(3) 控孔工艺实施后,焊缝抗拉强度提升 22%-35%,延伸率由 1.5%-2.5%提高至 3.5%-5.0%,接头断裂位置由焊缝区转移至母材热影响区。显微组织显示焊缝区共晶 Si 相尺寸细化, $\alpha\text{-Al}$ 枝晶间距减小,控孔工艺未对组织产生明显劣化效应^[5]。

3.4 气孔缺陷抑制长效机制与最优工艺体系确立

(1) 三类气孔的精准靶向控制机制可概括为:氢析出型气孔采用“减源—促逸”路径,通过前置除气削减氢源、调控热循环延长逸出时间;匙孔失稳型气孔采用“稳孔—阻断”路径,通过环形光斑能量分布优化和适当离焦维持匙孔稳定;夹杂诱发型气孔采用“净面—

除核”路径,通过激光清洗去除氧化膜和油污以消除形核基底。(2) 适配压铸铝合金的激光焊接控孔工艺体系分为三个层次:前置处理层——真空除气(10^{-2}Pa , 6h) + 激光清洗(脉宽 100ns, 功率 50W);焊接工艺层——激光功率 3.8kW、焊接速度 4.2m/min、 ∞ 字形摆动频率 120Hz/振幅 1.2mm、正离焦 +4mm、Ar 保护气流量 20L/min;后置辅助层——焊后保温缓冷(250°C , 15s)。三层协同形成全流程气孔抑制链条。(3) 工艺稳定性分析表明,在环境温度 $20\text{-}30^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $\leq 60\%$ 、材料含氢量 $\leq 0.15\text{mL}/100\text{gAl}$ 的生产条件下,焊缝气孔率稳定在 1.0%-1.5%区间,工艺重复性优良(标准差 $< 0.3\%$)。工艺窗口较传统激光焊接扩大约 30%,对材料批次波动和现场湿度变化具有良好容忍度,适用于汽车铝合金结构件的批量化激光焊接生产场景。

结束语

本文完整揭示了压铸铝合金激光焊接气孔的形成、演化与耦合作用机理,明确了各关键因素的作用规律,建立了前置预处理、焊接工艺调控、后置辅助处理的全流程控孔体系。优化后焊缝气孔率大幅降低,接头力学性能显著提升,工艺稳定性与适配性良好。研究厘清了靶向控孔核心路径,有效解决了压铸铝合金焊接气孔难题,可为相关工业化批量焊接生产提供可靠的工艺参考与理论支撑。

参考文献

- [1] 李洋,王健,张磊. 压铸铝合金激光焊接气孔形成与抑制机理 [J]. 焊接学报,2026,47(01):68-75.
- [2] 张禄中,宋佳,张海. 高压压铸 Al-Si 合金调制激光焊缝气孔调控机制 [J]. 中国激光,2025,52(07):132-141.
- [3] 王浩宇,刘军. 压铸铝合金激光焊接熔池气泡演化与气孔控制研究 [J]. 材料科学与工艺,2023,31(04):92-99.
- [4] 陈夏明,张禄中,秦坤伦. 光束摆动辅助激光焊接压铸铝合金气孔抑制机理 [J]. 激光与光电子学进展,2024,61(18):181-188.
- [5] 寇怀志. 铝合金激光焊接多类型气孔形成机理及控制方法 [J]. 焊接技术,2025,54(08):45-50.