

铝合金激光角焊缝背部质量控制及检测方法的研究

宋宏伟, 孔德群, 王玉水, 李春宇, 张壹铭

北京奔驰汽车有限公司 北京 100176

摘要: 车用铝合金在进行非填丝激光角焊过程中会出现背部质量问题, 包括背部熔穿及开裂, 影响产品外观及强度。以某产品易出现此类问题的覆盖件区域为研究对象, 通过激光焊接工艺试验、金属材料宏观组织分析、金相检测、成分分析等方法对失效的原因及规律进行探究。通过视觉测量试验研究熔穿、裂纹等缺陷的在线检测手段, 并评估可行性。结果表明: 通过合适的参数设置可以避免熔穿, 获得稳定的熔深, 同时需要在高热变形区域控制热输入, 以避免背部开裂。在高生产节拍下, 视觉检测对于熔透监控探测度较高, 但是对于开裂问题需寻求更准确的探测手段。

关键词: 铝合金激光角焊缝; 熔穿; 裂纹; 视觉检测

Research on quality control and detection methods for backside of aluminum alloy laser fillet welding seam

SONG Hongwei, KONG Dequn, WANG Yushui, LI Chunyu, ZHANG Yiming

Beijing Benz Automotive Co., Ltd., Beijing 100176, China

Abstract: Laser fillet welding process of automotive aluminum alloys may have defects of backside quality issues, including back melting and cracking, which affect the appearance and strength of the product. Taking the coverage area of a certain product that is prone to such problems as laser welding process experiments, macroscopic microstructure analysis of metal materials, metallographic testing, composition analysis, and other methods, this study explores the causes and patterns of failure. Study the feasibility of online detection methods for defects such as melting through and cracking through visual measurement experiments. The results indicate that stable penetration can be avoided through appropriate parameter settings, while controlling heat input in high constraint stress areas to prevent back cracking. At high production rates, visual inspection has a high detection rate for melting through monitoring, but more accurate detection methods need to be sought for cracking issues.

Keywords: aluminum alloy laser fillet weld; melting through; crackle; visual inspection

1 序言

随着新能源汽车的快速普及, 轻量化合金在车身领域的应用明显加快。特别是在车身的外壳、门板、引擎盖等覆盖件的制造过程中, 铝合金焊接技

术的应用也越加广泛。激光焊接作为一种高效、高精度的焊接技术, 因其能够精确控制热输入, 减少变形, 并且适用于薄板材料, 而成为铝合金车身覆盖件焊接的理想选择。激光焊接能够实现深熔透、

窄焊缝的高质量连接，有效提升车身的结构强度与碰撞安全性。

然而，铝合金在焊接过程中容易出现咬边、未熔合、裂纹等缺陷，进而影响加工质量^[1-3]。铝合金激光焊接受到基体材料本身性质的影响也存在较多难点，如表面张力低、熔点低导致的气孔或易形成裂纹等^[4]。由于铝合金焊接缺陷的返修极为困难，一旦出现批量质量缺陷将会导致大量的产品报废。

在新车型应用非填丝激光角焊接后，相关区域的质量稳定性控制一直是困扰汽车行业的难点。此种连接方式在实际应用中主要存在两种背部缺陷，即背部熔穿和背部裂纹（见图1）。背部熔穿会使产品的外观可视区域产生视觉缺陷，不仅影响外饰部件的安装，还会影响客户使用感受。背部裂纹则会影响产品的强度，可能导致车身局部失效。对此类问题开展工艺试验、探究缺陷产生的原因并优化工艺流程可以降低产品质量风险，减少报废的产生，进而提高焊接质量和生产效率。对已产生的缺陷进行图像识别检测，可以防止不合格品的流出。

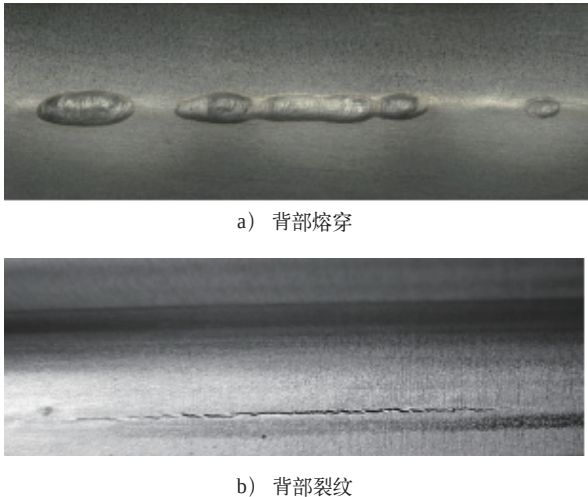


图1 激光角焊缝背部缺陷

2 试验条件及检测方法

本次焊接研究采用铝合金激光角焊专用设备，额定功率为6kW，光束质量为8mm·mrad的碟形激光器。焊接头采用IPFO智能可编程聚焦镜组，同时集成Seam-line-remote焊接区域自动识别-纠偏-检测功能模块，以保证焊接位置处于角接位置中心，并按需求做编程偏移。该激光焊接系统具备自动循迹和轨迹调整功能，确保焊接位置的准确性。焊接机器

人采用KUKA公司的KRC4六轴机器人。在焊接过程中，机器人轨迹控制焊接速度，保证接头的焊接位置，激光源产生焊接所需能量。

背部质量检测研究采用HEMA公司生产的VISAL高速质量监控系统。该系统可以通过蓝光照明对检测区域进行拍照并通过灰度识别焊接缺陷。

被焊材料为上板厚1.75mm、下板厚1.5mm的AL5-STD铝合金。AL5-STD铝合金是一种用于结构应用的自然硬锻镁铝合金，具有优良的成形特性，适用于在车辆运行100h期间服务温度不超过80℃的区域。此种铝合金的成分见表1。在进行焊接测试时，将两块试片为一组以搭接形式对上板边缘及下板接触区域加热熔化，从而形成焊接接头。

表1 AL5-STD铝合金化学成分（质量分数）（%）

Si	Fe	Cu	Mn	Mg
≤0.20	≤0.35	≤0.15	0.20~0.50	4.0~5.0

3 工艺过程对背部成形的影响

3.1 工艺参数试验及分析

在焊接速度为0.117m/s、入射角为25°的前提下，对背部有衬垫及无衬垫的试片进行不同热输入的焊接试验，其背部成形状态见表2。在两侧压紧试片无预设应力的前提下，当激光功率<4.7kW时，无法形成熔核；当激光功率为4.9~5.3kW时，无论有无背部衬垫，均可以形成较理想的熔核，且背部无熔穿或裂纹。但当激光功率≥5.4kW时，无背部衬垫的状态下会出现背部熔穿的情况，随着能量的增加，熔穿情况加重；而在有背部衬垫的情况下，焊缝依然可以获得良好的质量状态，直到5.6kW时出现背部熔穿。由此可知，背部衬垫的加入使背部热量分布更为均匀，可降低局部过热情况，扩大良好成形的参数窗口。无论有无衬垫，均不会出现背部裂纹。

表2 不同焊接状态下的背部成形状态

支撑 状态	激光功率/kW						
	4.7	4.9	5.1	5.3	5.4	5.5	5.6
	背部成形状态						
有衬垫	o	✓	✓	✓	✓	✓	×
无衬垫	o	✓	✓	✓	×	×	×

注：o代表无熔核；✓代表成形良好；×代表背部熔穿无裂纹。

试验表明,当激光功率为4.9~5.3kW时,在两侧压紧无间隙且无额外预变形的情况下,可获得稳定且成形良好的焊缝。而在生产应用中,位于B柱或内板滑道等小变形区域,在此参数区间内可以达到稳定的质量状态。

3.2 裂纹敏感区域测试与分析

在实际生产测试环节,在局部区域会出现测试参数内焊接后背部开裂的情况,在未熔穿的情况下依然存在,不稳定区域位置及模拟变形量如图2所示。

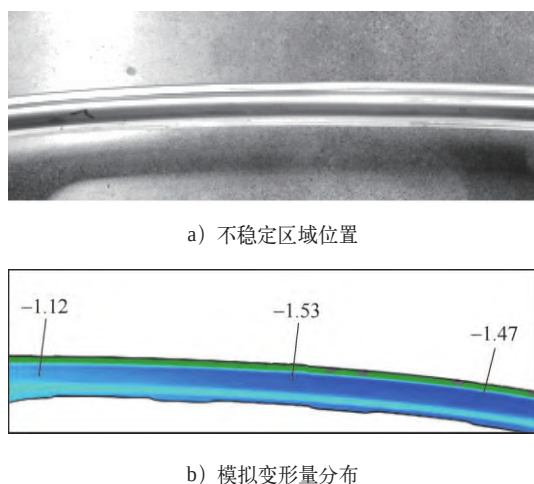


图2 不稳定区域位置及模拟变形量

为研究开裂产生的原因,对此区域进行焊接测试,发现高形变区域功率范围窗口明显窄于理想情况,当激光功率 $>5.1\text{kW}$ 时,即会出现背部开裂的情况。在背部开裂时熔深最小为0.73mm,即仅超过下板厚度的1/2。开裂区域截面宏观表现为熔深最低处的背部母材或热影响区出现裂纹,一般延伸至熔池边缘。当激光功率 $\geq 5.3\text{kW}$ 时,裂纹会扩展至熔池区域甚至出现贯穿式断裂。背部裂纹截面宏观形貌如图3所示。

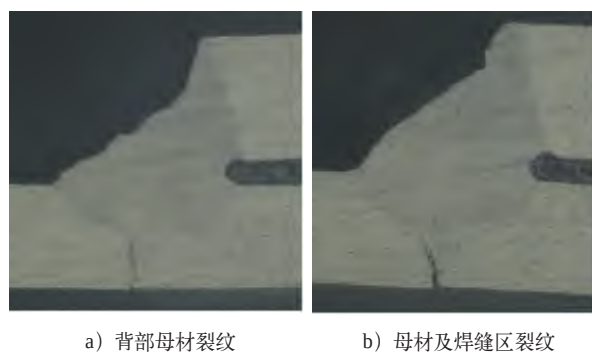


图3 背部裂纹截面宏观形貌

目前,普遍认为超高强铝合金含有较多的合金元素,且这些元素的存在会降低金属的固相线温度,并扩大合金的凝固温度区间。在合金尚未完全凝固时,冷却过程中的收缩应力可能会引发裂纹的形成。然而,并非所有在固液相线温度区间内的半固态金属都会出现开裂现象^[2],故需要更深入地分析机理。

采用扫描电子显微镜对焊缝的断口进行检测,以分析失效发生的机理,断口形貌如图4a所示。断口分为界限明显的背部母材断口和熔池区断口两部分,如图4b、c所示。裂纹从背部母材的自由面起始,母材断面最小深度为0.3mm,断口呈现典型的

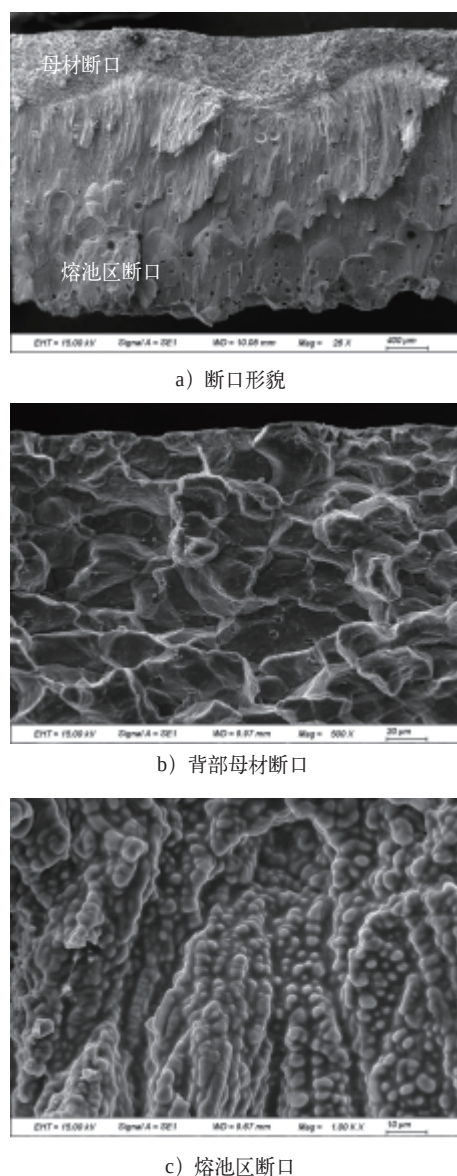


图4 高形变区断口显微组织

韧窝与解理形貌，晶面干净且无腐蚀产物。

图4c所示的熔池区断口显示出典型的结晶裂纹形貌。在焊缝金属凝固结晶的后期，含镁元素较多的低熔点共晶体被排挤到柱状晶体交界处的中心位置，形成液态薄膜。此时，背部裂纹继续延伸至熔池区域，在薄弱地带的晶界被拉开，最终形成自由表面。熔池区外观呈现圆形晶体结构，表明在结晶阶段熔池已经开裂，形成了热裂纹。

激光角焊缝凝固段的焊后应力分布如图5所示。随着温度逐渐降低，熔池开始凝固并收缩^[3]，从而在热影响区产生拉应力。在焊接过程中，由于未完全凝固时焊趾处的应力集中过高，如果预变形引起的应力也是拉应力，则可能导致母材的抗拉强度在薄弱区域不足，因此会在母材的最高应力集中处产生裂纹。随着焊缝凝固及外力的变化，裂纹会扩展至焊缝内部。

基于以上分析，在无法减小形变量的情况下，严格控制热输入，同时保证背部衬垫的贴合，使焊接熔深小于母材厚度的一半，可以有效避免热裂纹的产生。

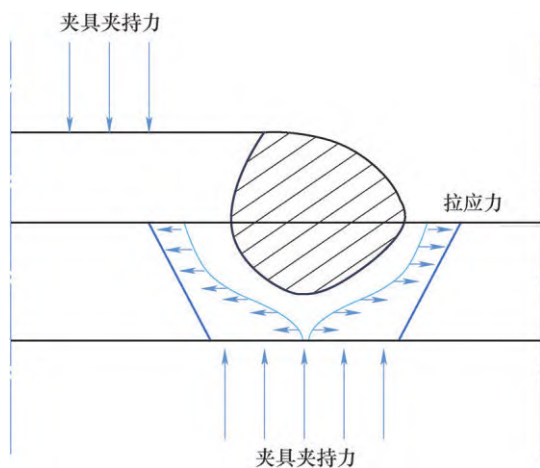
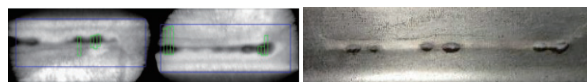


图5 激光角焊缝凝固段的焊后应力分布

4 背部缺陷检测方法的研究

当前，激光角焊缝背部质量检测还没有应用方法。本次研究尝试利用HEMA公司生产的VISAL高速质量监控系统对缺陷位置进行拍摄识别，以评估对于熔透、裂纹缺陷的探测度。

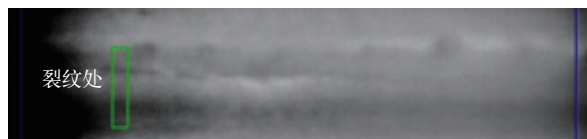
背部熔穿探测试验如图6所示。对于凸起高度 $>0.3\text{mm}$ 、凸起面积 $>1\text{mm}^2$ 的熔穿缺陷，系统可有效探测并传送结果，起到实施监控作用。



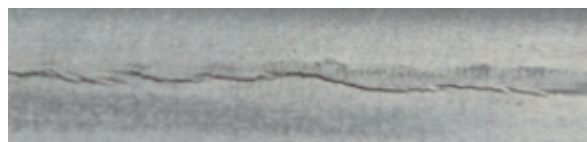
a) 背部熔穿灰度图片 b) 背部熔穿状态

图6 背部熔穿探测试验

对于背部裂纹的探测试验，无论如何调整照明和探测参数，都无法识别出具有特征性的灰度梯度，因此无法探测到裂纹缺陷。背部裂纹探测试验如图7所示。进行30次不同形貌裂纹的拍照测试，探测检出率为0%。无法检出的原因为在二维的灰度图中无法提取裂纹区域窄范围内的特征。由此可见，当前的检测方法仍存在较大局限性，后续更为可靠的在线监控方案亟待开发。



a) 背部裂纹灰度图片



b) 背部裂纹状态

图7 背部裂纹探测试验

为此，当前采用基于偏振OCT（光学相干断层扫描）的匙孔深度测量方法，以消除多重反射光的影响，从而提高测量的准确性^[4]。通过附加相位差对信号进行筛选，去除多重反射引起的错误深度数据，最终获得待测匙孔的真实深度。基于匙孔深度对裂纹生成进行预测，已成为一个有前景的研究方向。在裂纹检测中，OCT具有独特优势，尤其是在高分辨率和高灵敏度方面。传统的表面检测方法往往受限于表面反射和复杂的光散射，而OCT可以通过穿透材料表面，实时获取深度信息，并识别内部微小裂纹。其在金属材料、复合材料等的裂纹监测中展现了极大的潜力，能够在早期阶段发现潜在的裂纹，进而提供可靠的预警。这使得OCT不仅在实验室研究中有广泛应用，也为工业中的在线监控提供了新的技术手段。

5 结束语

1) 通过对铝合金激光角焊缝工艺参数试验得出，当激光功率为 $4.9\sim 5.3\text{kW}$ 、无间隙且无额外预变形的情况下，可获得稳定且成形良好的焊缝。在

(下转第93页)

8min/m; 碳弧气刨速度约6min/m; 药芯焊丝消耗量约0.42kg/m; 埋弧焊焊丝消耗量约1.46kg/m; 埋弧焊焊剂消耗量约1.75kg/m; 碳弧气刨消耗量约3根/m。

双丝埋弧焊免坡口免清根工艺, 腹板不需要开坡口, 提高生产效率、节省成本, 同时不存在坡口切割精度问题, 更容易保证装配质量。在焊接方面, 采用双面埋弧焊, 两面均为1层1道焊接成形, 平均焊接速度约3min/m; 埋弧焊焊丝消耗量约0.95kg/m; 埋弧焊焊剂消耗量约1.14kg/m; 焊缝不需要碳弧气刨清根, 因此可减小车间噪声、粉尘污染, 有利于操作人员身体健康。

本项目共1868根工字梁, 焊缝外观光顺饱满, 超声波无损检测显示焊缝合格率99.5%, 焊接质量稳定。开坡口、碳弧气刨、焊接总时间减少5360h; 工字梁产量由8件/班提升至10件/班, 生产效率提高25%; 在金属填充量上, 免开坡口双丝埋弧焊工艺比单丝埋弧焊工艺减少49.5%, 节约焊接材料29.9t。

5 结束语

1) 双丝埋弧焊在较大的焊接参数、合适的焊接接头角度、焊丝对位尺寸等工艺下, 可以实现免坡口免清根, 使腹板厚度20mm的焊接接头达到全熔透。焊接接头的熔深、内部缺陷、力学性能检测结果均满足相关要求。

2) 双丝埋弧焊免坡口免清根工艺在德州至上饶

高速公路赣皖界至婺源段新建工程钢梁中的成功应用, 改善焊工劳动条件, 减少施工工序, 节约焊接材料, 降低生产成本, 实现工字梁高效化、自动化生产, 对降本增效起到了良好的效果, 可为同类项目提供借鉴。

参考文献:

- [1] 张华. 钢桥工字梁的高效焊接工艺[J]. 机械工人(热加工), 2008(1-2): 49-50.
- [2] 张华, 范泽平, 王磊, 等. 单电双细丝埋弧焊在钢桁梁杆件制造中的应用[J]. 金属加工(热加工), 2015(20): 52-55.
- [3] 黄智强, 朱正亮, 邵军, 等. 双丝埋弧焊技术在钢板组合梁上的应用[J]. 焊接技术, 2019(10): 66-69.
- [4] 于绍兴, 宋光涛, 贾江涛, 等. 海洋工程厚板双丝埋弧焊焊接工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2023(2): 60-63.
- [5] 中交第一公路工程局有限公司. 公路桥涵施工技术规范: JTG/T 3650—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [6] 毕艳霞. T型接头焊接温度场与应力场的数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [7] 许凯. 中厚板非对称角根焊温度场建模及熔透形态视觉检测[D]. 天津: 天津工业大学, 2018.
- [8] 张建平, 滕骐, 阙子雄. H型钢双丝埋弧焊不清根全熔透焊接工艺[J]. 电焊机, 2018, 48(5): 9-14.

(收稿日期: 20250209)

(上接第88页)

生产应用中, 位于B柱或内板滑道等小变形区域, 此参数区间内可以达到稳定的质量状态。

2) 在实际生产测试环节, 在局部区域会出现测试参数范围内焊后背部开裂的情况, 尽管未熔穿, 但裂纹依然存在, 其原因在于预变形引起的应力也是拉应力, 导致母材的抗拉强度在薄弱区域不足, 进而在母材最高应力集中处产生裂纹。因此, 严格控制热输入, 同时保证背部衬垫的贴合, 使焊接熔深小于母材厚度的一半时, 可以有效避免热裂纹的产生。

3) 对于激光角焊缝背部熔透缺陷的探测, 通过灰度图像识别的方式可以实现快速测量报警, 并具有很高的探测度; 而对于背部裂纹的探测, 无法通

过相同方式实现, 需后续通过OCT等方式, 通过匙孔深度对裂纹生成进行预测。

参考文献:

- [1] 吴雁, 李朝阳, 郭立新, 等. 焊接工艺参数对铝/铝激光焊缝形貌及力学性能的影响[J]. 焊接, 2021, 32(11): 27-30.
- [2] 岳考捷. 超高强铝合金激光焊接工艺与裂纹抑制方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [3] 刘恩泽. 薄板激光搭接焊非熔透侧焊后变形研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [4] 李召阳, 李中梁, 南楠, 等. 基于偏振OCT的激光焊接匙孔深度测量方法[J]. 中国激光, 2023, 50(20): 1-7.

(收稿日期: 20250214)