



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.06.15

手持式激光焊接在机车侧墙蒙皮焊接中的应用

钟俊林, 李 强, 周天星, 杨少龙, 温明明, 邓 敏

中车资阳机车有限公司, 四川 资阳 641301

摘 要: 针对手持式激光焊接 Q345NQR2 耐候钢气孔敏感性强、角焊缝根部熔合困难的问题, 以功率补偿为关键工艺变量, 研究其对焊接头成形与气孔的影响规律, 确定各接头最优工艺窗口, 并通过工艺评定与工程应用验证其可行性。设计 5 类接头焊接工艺试验, 研究功率补偿 (0~90%) 对接头宏观形貌、根部熔深及气孔的影响; 依据 ISO 15614-11:2022 进行工艺评定; 研制工装实现 1 850 mm 长直对接焊缝机械手自动化焊接; 按 EN 15085-4 完成焊工培训与考核。结果表明: 全熔透对接焊缝排气充分、气孔少, 满足 ISO 13919-1:2021 B 级, 而带垫板焊缝因排气受限易产生条虫状气孔; 功率补偿调控激光能量分布, 对接焊缝功率补偿为 0 时呈 I 型成形良好, 角焊缝功率补偿 $\geq 60\%$ 时焊缝由倒 M 型转为 U 型、根部完全熔合; 卷边焊缝因送丝定位困难不适用。经工艺评定, 对接焊接头抗拉强度 506~517 MPa, 均断于母材外侧; 该工艺已应用于 4 台出口机车侧墙焊接, 焊后平面度优于富氩气保焊, 车体静强度试验后焊缝无缺陷, 表明手持激光焊接工艺可满足轨道车辆薄壁结构的工程要求。

关键词: 手持式激光焊接; Q345NQR2 耐候钢; 功率补偿; 焊接气孔; 焊接工艺评定

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)06-0119-10

Application of Handheld Laser Welding in Locomotive Side Wall Skin Welding

ZHONG Junlin, LI Qiang, ZHOU Tianxing, YANG Shaolong, WEN Mingming, DENG Min

CRRC Ziyang Locomotive Co., Ltd., Ziyang 641301, China

Abstract: To address the strong porosity sensitivity and difficulty in root fusion of fillet welds during handheld laser welding of Q345NQR2 weathering steel, power compensation was taken as the key process variable to investigate its effects on weld formation and porosity, determine the optimal process windows for various joint types, and verify the feasibility through procedure qualification and engineering application. Welding tests were designed for five joint types to systematically study the effects of power compensation (0-90%) on weld macro-morphology, root penetration, and porosity; procedure qualification was conducted per ISO 15614-11:2022; tooling was developed to enable robotic welding of 1 850 mm long butt seams; welder training and qualification were completed per EN 15085-4. Results show that full-penetration butt welds allow sufficient gas escape with few pores, meeting ISO 13919-1:2021 level B, while backed butt welds are prone to wormhole porosity due to restricted gas escape. Power compensation regulates laser energy distribution: butt welds form I-type profile at power compensation of 0, while fillet welds transform from inverted-M to U-type with complete root fusion at power compensation $\geq 60\%$. Flanged joints are unsuitable due to wire feeding and positioning difficulties. Qualified butt weld tensile strength reaches 506-517 MPa with fractures outside the weld. The process has been applied to four export locomotive side walls, achieving better flatness than GMAW and no weld defects after carbody static strength testing, demon-

收稿日期: 2026-04-10 修回日期: 2026-06-03

作者简介: 钟俊林(1972—),男,高级技师,主要从事机车钢结构及大型钢结构焊接工作。E-mail:357938033@qq.com。

strating that handheld laser welding can meet the engineering requirements for thin-walled structures in rail vehicles.

Keywords: handheld laser welding; Q345NQR2 weathering steel; power compensation; weld porosity; welding procedure qualification

引用格式: 钟俊林, 李强, 周天星, 等. 手持式激光焊接在机车侧墙蒙皮焊接中的应用[J]. 电焊机, 2026, 56(6): 119–128.

Citation: ZHONG Junlin, LI Qiang, ZHOU Tianxing, et al. Application of Handheld Laser Welding in Locomotive Side Wall Skin Welding[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(6): 119–128.

0 引言

中车资阳机车公司承接了4台出口机车制造,大侧墙蒙皮选用2.5 mm厚的Q345NQR2耐候钢,焊缝密集、作业量大,平面度要求 $\leq 2 \text{ mm/m}^2$ 。传统富氩气体保护焊工艺热输入量大,焊后侧墙波浪变形严重,调修困难,影响外观质量。鲍洪阳等^[2]对轨道车辆拼焊结构的研究也指出,弧焊角变形与波浪变形是车体制造中的突出问题。

激光焊接热输入小、深宽比大,焊接变形可控,是薄壁结构低变形焊接的有效方法^[3],在轨道车辆制造中的应用需求持续增长。手持式激光焊设备操作灵活、适配复杂空间位置,已在薄板焊接和角焊缝焊接中得到验证^[4-5]。然而,手持激光焊Q345NQR2耐候钢仍面临两大工艺难题:一是焊缝气孔敏感性强,匙孔失稳塌陷及保护气体卷入均易诱发气孔^[6-7];二是对装配间隙要求高,参数选择不当易产生气孔及角焊缝根部熔深不足等缺陷。

目前气孔控制措施多集中在保护气体优选和焊前处理方面^[8],而通过调节功率补偿参数改善焊缝成形与气孔的研究尚未见报道。房顺利等^[9]在异种钢激光填丝焊中提出“大功率补偿熔深”的气孔

抑制策略,表明功率补偿对焊缝成形有显著影响。本文所用IPG手持激光焊机具有功率补偿调节功能,实验发现调节该参数可改变激光能量在焊缝中心与边缘的分配,为解决角焊缝根部熔深不足和气孔问题提供了新途径。

本文针对轨道机车侧墙2.5 mm Q345NQR2耐候钢蒙皮焊接,以功率补偿为关键工艺变量,研究功率补偿对手持激光焊接头宏观形貌、根部熔深及焊缝气孔的影响,确定对接与角接接头的最优工艺窗口,并通过焊接工艺评定和工程应用验证,为手持激光焊接技术在轨道车辆薄壁结构中的可靠应用提供工艺依据。

1 机车侧墙结构及焊接难点

机车侧墙长17 104 mm,宽2 385 mm,主要由10块蒙皮与上弦梁、立柱、筋板等焊接组成,如图1所示。蒙皮厚度2.5 mm。长直焊缝较多、焊接量大,焊接变形难以控制,保证侧墙蒙皮平面度 $\leq 2 \text{ mm/m}^2$ 是制造关键。

1.1 焊接气孔

手持激光焊接Q345NQR2耐候钢,极易产生气孔

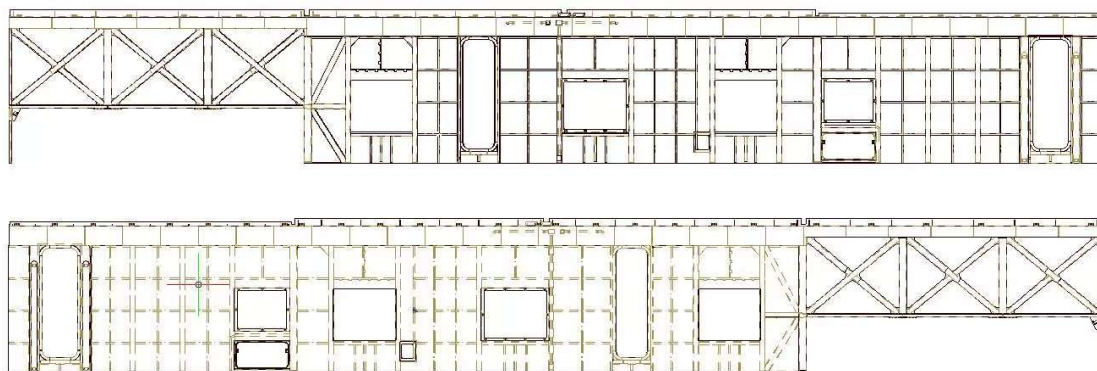


图1 机车侧墙结构

Fig. 1 Structure of locomotive side wall

孔。激光焊接气孔可分为冶金类气孔和工艺类^[6],主要原因有三:一是耐候钢焊接过程中熔池冷却速度较快,氢元素的溶解度降低而析出,形成细小氢气孔;二是匙孔坍塌时熔池金属来不及回填,形成较大尺寸的缩孔^[7];三是激光功率波动、光束模式不均匀导致熔池剧烈振荡、匙孔失稳,将保护气体卷入熔池底部形成气泡。此外,功率、焊接速度等工艺参数设置不当也会造成气孔缺陷。

针对气孔问题,采取以下措施:

(1)焊前清理。对焊缝母材端面及两侧10 mm范围内打磨至金属光泽。

(2)保护气体优选。牛广浩等^[5]在手持激光焊接试验中发现,使用氩气作为保护气时焊缝内部出现气孔的概率极大,改用氮气后明显改善。因此采用纯度99.99%氮气作为保护气体。

(3)选用功率输出稳定的焊接设备。比如IPG LIGHTWELD 1500XC在较大功率焊接时能保持光束质量和功率稳定性,可有效规避因设备性能波动引发的气孔。

(4)优化焊接速度与焊接姿态。较低焊接速度有利于熔池中气体逸出^[6]。在保证焊缝成形质量的前提下,适当降低焊接速度、增加摆动幅度,促进气体逸出。手持激光焊接过程中,若焊枪倾斜角度过大,保护气体气流会偏离熔池高温区域,无法实现有效防护,空气易卷入熔池,导致焊缝发黑、氧化严重并产生气孔。焊接时焊枪尽量保持垂直状态,可小幅后倾,严格控制焊枪与工件表面夹角在70°~85°之间。

1.2 装配间隙控制

手持激光焊接聚焦后光斑直径仅为150 μm,光斑作用区域小,对焊缝装配间隙要求高。若焊缝装配间隙过大,激光光束将直接穿透缝隙,焊接能量无法有效作用于两侧母材,易出现焊穿、未熔合、接头连接失效等缺陷。结合本次机车侧墙焊接工艺要求,角焊缝和搭接焊缝装配间隙需<0.5 mm,对接焊缝需<0.2 mm。

控制措施:板材下料采用激光切割,保证切口平整规整、尺寸精度合格;制作专用蒙皮对接装配、焊接压紧工装,提升对接装配、焊接的稳定性与精度。装配时,优先在侧墙胎位上先完成骨架组装焊

接并调修至平面度≤1.5 mm/m²,再配合夹紧工装完成蒙皮与骨架装配;采用填丝焊接并适当加大焊接摆动幅度,有效补偿小幅装配间隙偏差。

1.3 长直焊缝自动化焊接

蒙皮拼接焊缝长1 850 mm,人工手持激光焊接分段多、接头多,稳定性差,易出现气孔、未焊透等缺陷,效率也低。为此研制专用适配装置,制作手持激光焊枪专用夹持机构,配套焊接机械手信号接收模块与控制盒,将手持激光焊接设备与松下机械手集成,实现侧墙蒙皮焊缝自动化焊接,减少接头数量、稳定成形质量、提升效率。

1.4 角焊缝焊脚尺寸保证

手持激光熔深较大但焊脚尺寸较小,为保证角焊缝Z2焊脚尺寸,需选用直径1.6 mm的焊丝,增加摆动宽度2~3 mm,适当降低焊接速度。

2 母材与焊接材料

侧墙蒙皮采用Q345NQR2耐候钢,耐大气腐蚀性能为普通碳素钢的2~8倍,力学性能和焊接性优良,广泛应用于铁道车辆和桥梁^[11]。根据国际焊接学会(IIW)推荐的碳当量公式,Q345NQR2的Ceq=0.26%,碳当量较低,焊接性较好。

焊接Q345NQR2耐候钢,焊丝选择的关键是保证焊缝强度和耐腐蚀性不低于母材,需选用含Cu、Cr、Ni等合金元素较高的耐候钢专用焊丝。本文选用大西洋CHW-40CNH耐候钢专用焊丝,规格∅1.6 mm和∅1.2 mm。母材与焊丝化学成分如表1所示,力学性能如表2所示。

表1 母材和焊丝化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of Q345NQR2 steel and CHW-40CNH welding wire (wt. %)

材料	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
Q345NQR2	0.07	0.46	0.40	0.093	0.001	0.29	0.44	0.16
CHW-40CNH	0.075	0.5	1.15	0.013	0.008	0.35	0.35	0.3

表2 Q345NQR2及CHW-40CNH力学性能

Table 2 Mechanical properties of Q345NQR2 steel and CHW-40CNH welding wire

材料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%
Q345NQR2	480	357	30
CHW-40CNH	525	415	26

3 焊接工艺方案

3.1 设备选型

通过对国内机车车辆公司在罐车焊接中采用手持激光与机械手激光焊接调研,在厂家指导下对4种国产手持激光焊机及美国IPG LIGHTWELD 1500XC进行了2.5 mm和3 mm对接全熔透焊接对比试验。焊缝成形都较好,但4种国产手持激光焊机焊接试板经X射线探伤发现焊缝熔合线处密集气孔,仅达到ISO13919—1:2021(焊接—电子束和激光焊接接头—缺欠质量分级指南)^[12]的C级要求;IPG手持激光焊机焊接试板达到ISO13919—1标准B级要求,对比如图2所示。

IPG LIGHTWELD 1500XC手持激光焊机(见图3)采用双向侧泵浦光纤激光器,最大连续波功率>1 500 W,峰值功率2 500 W,脉冲模式下平均功率500 W,可焊碳钢厚度0.5~3 mm。该设备在较大功率焊接时能保持稳定的光束质量和功率输出,匙孔平稳,气孔少。



图2 国产手持激光焊机与IPG手持激光焊机X射线探伤照片局部放大

Fig. 2 Local magnification of X-ray radiographs of welds made by domestic and IPG handheld laser welding machines

3.2 工装制作

为配合自动化焊接,制作了3套工装:

(1)手持激光焊枪转换至松下焊接机械手的夹持机构,如图4所示。

(2)松下焊接机械手信号接收与控制盒,如图5所示。

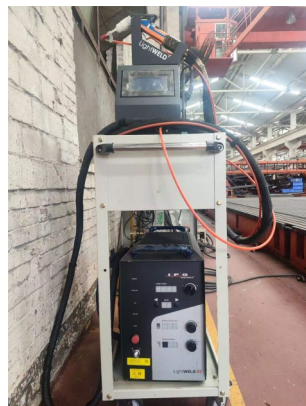


图3 IPG LIGHTWELD 1500 xc手持激光焊机

Fig. 3 IPG LIGHTWELD 1500XC handheld laser welding machine

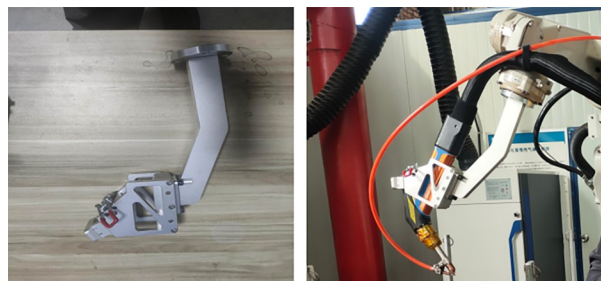


图4 转换到松下焊接机械手加持工装

Fig. 4 Clamping fixture for mounting handheld laser welding gun on Panasonic welding manipulator



图5 松下焊接机械手信号接收、控制盒

Fig. 5 Signal receiver and control box for Panasonic welding manipulator

(3)蒙皮拼接焊缝装配压紧工装,采用多孔平台装配保证焊缝间隙,两块长方形压铁压紧焊缝两侧30 mm控制焊接变形(见图6)。

3.3 焊缝试验方案

机车侧墙蒙皮焊缝主要有5类接头形式,分别进行焊接工艺试验,参数如表3所示。焊前对焊缝母材断面及两侧10 mm范围内打磨至金属光泽,然后采用手持激光焊机进行焊接,保护气体采用纯度99.99%氮气,一层一道焊接,环境温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$,相对



图 6 侧墙蒙皮拼接装配压紧工装

Fig. 6 Assembly and clamping fixture for side wall skin butt welding

湿度≤60%。焊后对接焊缝采用 X 射线检测和宏观金相分析。

3.4 试验结果

3.4.1 对接焊缝 X 射线检测与气孔分析

对试件 1(对接全熔透,功率补偿 0)和试件 2(对接带垫板,功率补偿 0)进行 X 射线检测,结果如图 7 所示。试件 1 焊缝内仅检测到少量气孔,符合 ISO 13919-1:2021 B 级要求;试件 2 焊缝局部出现条虫状气孔,未达到 B 级要求。

两种对接方式的气孔差异源于排气路径的不

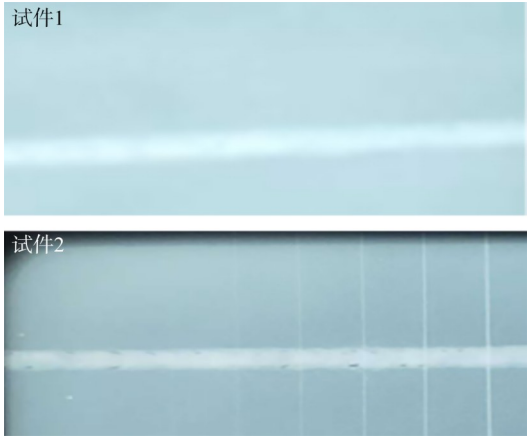


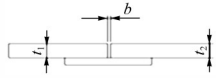
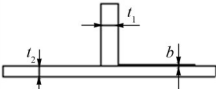
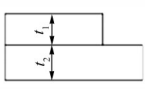
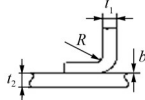
图 7 X 射线照片气孔局部放大

Fig. 7 Local magnification of porosity in X-ray radiographs

同。全熔透状态下,熔池深度与板厚一致,熔池气体可从上下表面双向逸出,且匙孔底部在焊接过程中周期性张开,金属蒸气从底部持续排出,匙孔坍塌概率低,气孔数量少^[9]。带垫板状态下,焊缝背面未熔透,气体仅能从熔池上方单向逸出,排气通道受限,文献[8]报道此类条件下气孔率可达 1.31%。因此,对接焊缝应优先采用单面焊双面成形全熔透方案;当结构设计必须使用垫板时,建议采用富氩

表 3 焊接试验方案及参数

Table 3 Welding test schemes and parameters

试件 编号	焊缝 位置	接头类型	焊缝尺 寸/mm	母材 牌号	母材 规格 t_1 /mm	母材 规格 t_2 /mm	焊丝 直径 /mm	焊丝 牌号	气体流 量(L· min ⁻¹)	通道	功率 /W	频率 /Hz	摆宽 /mm	送丝速 度/(cm· s ⁻¹)	功率 补偿
1	蒙皮拼接 对接全熔 透接头		2.5I	345N QR2	2.5	2.5	1.2	CHW- 40CHN	20~22	8	1 500	40	1.8	60	0
2	蒙皮对接 与立柱带 垫板全熔 透接头		2.5I	345N QR2	2.5	2.5	1.2	CHW- 40CHN	20~22	8	1 500	40	1.8	60	0
3	蒙皮与筋 板 T 型接 头角焊缝		Z2	345N QR2	2.5	3	1.6	CHW- 40CHN	20~22	8	1 500	50	3	35	0
4			Z2	345N QR2	2.5	3	1.6	CHW- 40CHN	20~22	8	1 500	50	3	35	40
5			Z2	345N QR2	t2.5	3	1.6	CHW- 40CHN	20~22	8	1 500	50	3	35	90
6	蒙皮与立 柱、筋板 搭接焊缝		Z2	345N QR2	t2.5	3	1.6	CHW- 40CHN	20~22	8	1 500	50	3	35	60
7	蒙皮与立 柱卷边焊 缝		3HY	345N QR2	2.5	3	1.6	CHW- 40CHN	20~22	8	1 500	40	2	45	60

气体保护焊。

3.4.2 功率补偿对接头形貌与根部熔合的影响

功率补偿是 IPG 手持激光焊机的可调参数,其数值增大使激光能量分布向焊缝中心汇聚,数值减小则能量集中于焊趾区域。不同功率补偿参数下各试件的焊缝金相照片如图 8 所示,金相形貌与根部熔合情况见表 4。

(1)对接焊缝。试件 1(对接,功率补偿 0)焊缝

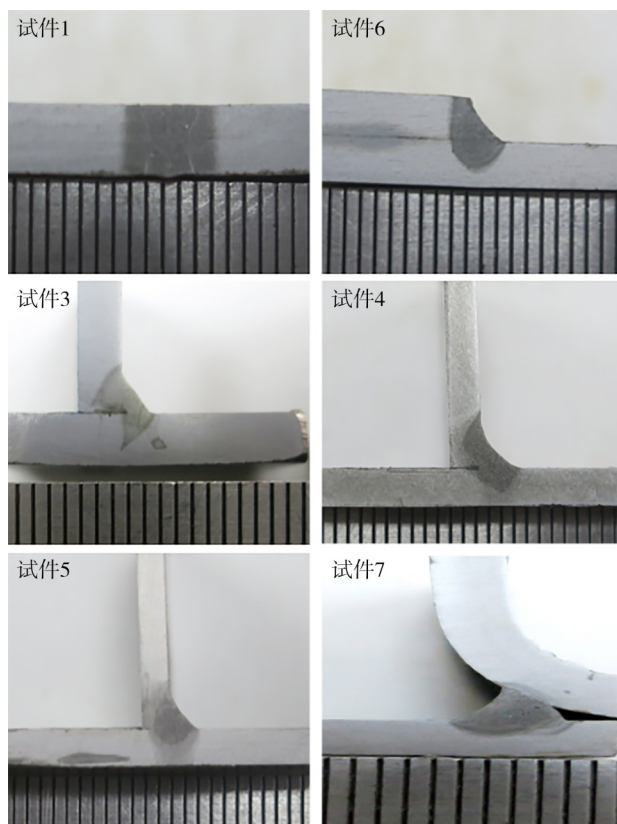


图 8 不同功率补偿下的焊缝金相照片

Fig. 8 Weld metallographic cross-sections under different power compensation levels

表 4 不同功率补偿焊缝金相形貌及焊缝根部熔合情况

Table 4 Weld metallographic morphologies and root fusion conditions under different power compensation levels

试件编号	接头形式	功率补偿	宏观金相形貌	焊缝熔合情况
1	对接焊缝	0	I型	单面焊双面成形
3	角焊缝	0	倒M型	焊缝焊趾熔深较深,根部熔深较浅,未熔合
4		40%	倒M型	焊缝根部熔深不足
5		90%	U型	焊缝根部熔合,熔深 1.5 mm
6	搭接角焊缝	60%	单U型	焊缝根部熔合熔深 1.5 mm
7	卷边焊缝	60%	V型	焊缝根部熔合

宏观金相形貌接近 I 型,焊趾过渡圆滑,应力集中程度低,实现单面焊双面成形。对接接头要求两侧母材充分熔合,功率补偿为 0 时激光能量集中于焊缝两侧母材,恰好满足这一要求。

(2)角焊缝。功率补偿参数对角焊缝的成形质量有影响。试件 3(功率补偿为 0)和试件 4(功率补偿为 40%)的宏观金相均呈倒 M 型焊趾区域熔深偏大而根部熔深不足,试件 3 根部存在明显未熔合缺陷。当功率补偿较低时,激光能量主要集中于焊趾区域,角焊缝根部得不到有效加热。试件 5(功率补偿 90%)焊缝金相形貌优化为 U 型,根部完全熔合,熔深达 1.5 mm。随着功率补偿增大,激光能量分布向焊缝中心汇聚,根部加热效率显著提高,应力集中大幅降低。试验结果表明,角焊缝功率补偿需 $\geq 60\%$ 方可保证根部熔合质量。

(3)搭接角焊缝。试件 6(搭接角焊缝,功率补偿 60%)焊缝成形良好,根部完全熔合,熔深稳定达到 1.5 mm,满足工艺要求。

(4)卷边焊缝。试件 7(卷边焊缝,功率补偿 60%)焊缝金相虽呈 V 型且表观根部熔合,但实际焊接中质量稳定性差,易出现焊偏及根部未熔合缺陷(见图 9)。其原因在于:①该接头根部为窄深 V 形间隙,手持激光焊送丝嘴固定于枪头下方,送丝角度调节范围有限,焊丝难以精准输送至根部;②激光聚焦光斑直径仅 $150\ \mu\text{m}$,焊枪角度小幅偏移即可导致激光偏离接头根部;③现场空间位置受限,人工手持作业难以稳定保持焊枪角度与定位精度,焊缝易偏移至立板圆弧面或底板。综合上述因素,T 型卷边接头不适用于手持激光焊接工艺。

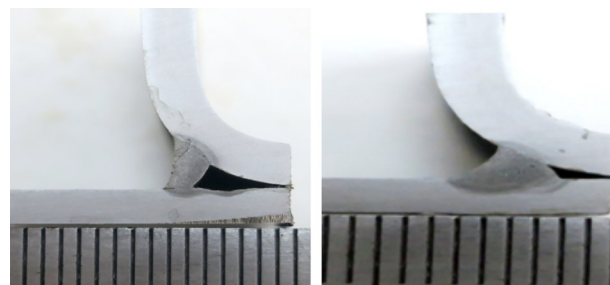


图 9 T 型卷边接头焊偏立板圆弧面和底板,根部未熔合金相照片

Fig. 9 Metallographic cross-sections of T-type flanged joint showing weld deviation to vertical plate fillet and base plate with root lack of fusion

(5) 各接头形式工艺适用性。综合 X 射线检测与金相分析结果,手持激光焊接工艺对 5 类接头的适用性总结如表 5 所示。

表 5 手持激光焊接工艺各接头适用性
Table 5 Applicability of handheld laser welding for various joint types

接头形式	功率补偿	适用性	说明
对接全熔透	0	适用	I 型焊缝,气孔少,满足 B 级
对接带垫板	—	不适用	条虫状气孔超标,建议用富氩气保焊
T 型角焊缝	≥60%	适用	U 型焊缝,根部熔深≥1.5 mm
搭接角焊缝	60%	适用	根部熔合良好,熔深 1.5 mm
卷边焊缝	60%	不适用	送丝与定位困难,根部未熔合风险高

3.4.3 焊缝工艺评定

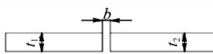
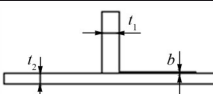
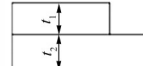
根据 ISO 15614-11:2022《金属材料焊接工艺规范和评定 第十一部分:电子和激光束焊》,采用上

述优化参数进行对接及角接手工焊和松下机械手焊接工艺评定,焊接工艺评定参数见表 6。

WPQR-2025-004 为对接全熔透焊接试件,焊缝成形良好。外观及 X 射线无损检测结果表明,焊缝质量符合 ISO13919-1:2021 B 级要求。该激光焊接焊缝形貌趋近于 I 型,相较富氩气体保护焊的 V 形焊缝,如图 10 所示,热影响区更窄,焊接变形可控性更佳,仅产生水平方向收缩,角变形量较小。

力学性能试验结果见表 7。所有拉伸试样的断裂位置均位于焊缝外侧 10~20 mm 的母材区域(见图 11),表明激光焊接接头强度高于母材。焊缝硬度检测及弯曲试验等各项力学性能指标均满足 ISO 15614-11:2022 标准要求。对于薄板耐候钢,激光焊接接头的拉伸性能显著优于传统电弧焊接头^[12]。

表 6 焊接工艺评定参数
Table 6 Welding procedure qualification parameters

试件编号	接头类型	焊缝尺寸 /mm	母材 牌号	母材	母材	焊丝 直径 /mm	焊丝 牌号	焊接工艺参数								机械手焊 接速度/ (cm·s ⁻¹)
				规格 t ₁ /mm	规格 t ₂ /mm			气体流 量/(L· min ⁻¹)	通道	功率 /W	频率 /Hz	摆宽 /mm	送丝速 度/(cm· s ⁻¹)	功率 补偿		
WPQR-2025-004		2.5I	345NQ R2	2.5	2.5	1.2	CHW- 40CHN	20~22	8	1 500	40	1.8	60	0	—	
WPQR-2025-002(松下机械手)		2.5I	345NQ R2	2.5	2.5	1.2	CHW- 40CHN	20~22	8	1 500	40	1.8	45	0	60	
WPQR-2025-005		Z2	345NQ R2	t2.5	t3	1.6	CHW- 40CHN	20~22	8	1 500	50	3	35	90	—	
WPQR-2025-006		Z2	345NQ R2	t2.5	3	1.6	CHW- 40CHN	20~22	8	1 500	50	3	35	60	—	

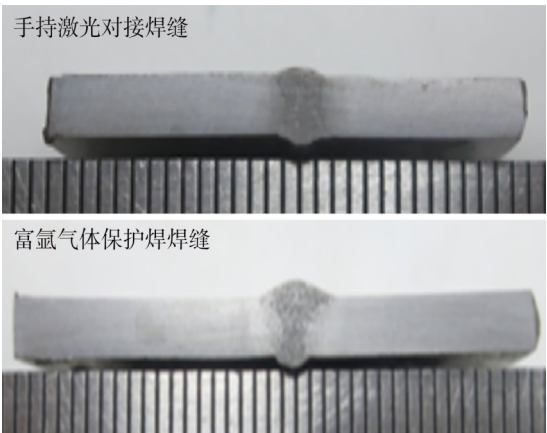


图 10 2.5 mm 对接焊缝金相照片
Fig. 10 Metallographic cross-sections of 2.5 mm butt weld

4 焊接工艺实施

4.1 焊前准备

焊接设备为 IPG LIGHTWELD 1500 XC 手持激光焊机及松下焊接机械手。焊接材料选用 CHW-40CNH 耐候钢专用焊丝,直径 $\varnothing 1.2$ mm、 $\varnothing 1.6$ mm。保护气体采用纯度 99.99% 氮气。焊前对焊缝母材端面及两侧 10 mm 范围内打磨至露出金属光泽。施焊环境温度不低于 5℃,相对湿度不大于 60%。

4.2 侧墙蒙皮拼接焊缝焊接

蒙皮拼接对接焊缝采用松下机械手自动化焊

表 7 Q345NQR2 t2.5 mm 对接焊缝拉伸试件

Table 7 Tensile test results of Q345NQR2 2.5 mm butt welded joints

试件编号		屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断后伸长率 /%	断口	硬度检测 HV10 (硬度 HV10≤380)	弯曲试验(EN ISO5173, 芯棒直径:4t mm, 180°)			
WPQR-2025-003	1	409	517	26.5	断于母材	最大 243	正弯 1	正弯 2	背弯 1	背弯 2
	2	382	506	26.5	断于母材		合格	合格	合格	合格
Q345NQR 母材		345	480	≥22						



图 11 对接拉伸断口

Fig. 11 Tensile fracture of butt welded joint

接。在组装平台上完成蒙皮组装,焊缝两端加装引熄弧板,装配间隙控制在 0.2 mm 以内,采用两块压板压紧焊缝两侧(见图 12)。定位焊采用手持激光焊接,焊点长度 4~6 mm。松下机械手焊接工艺参数见表 8。

表 8 蒙皮对接松下焊接机械手焊接工艺参数

Table 8 Welding parameters for skin butt joint by Panasonic welding manipulator

焊层	焊接方法	焊材规格	功率/W	电流种类/极性	脉冲频率/Hz	摆幅/mm	功率补偿/%	焊接速度/cm·min ⁻¹	送丝速度/cm·min ⁻¹
1	52	Ø1.6	1500	DC(+)	40	1.8~2	0	45~55	60

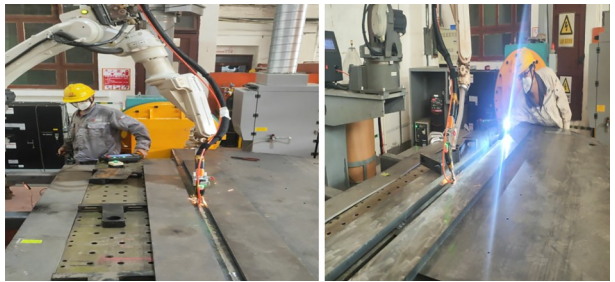


图 12 松下机械手持激光焊接应用

Fig. 12 Application of handheld laser welding with Panasonic welding manipulator

手持激光焊枪通过专用夹持机构安装于松下机械手(见图 12),配合信号接收与控制盒,实现焊接启停与参数的自动控制。该方案将原需分段手持焊接的 1 850 mm 长直焊缝改为机械手连续焊接,减少了焊接接头数量,稳定了焊缝成形质量。

4.3 侧墙骨架与蒙皮组焊

侧墙组焊遵循“先骨架后蒙皮”的原则,工艺流程如图 13 所示。首先组焊侧墙骨架,采用富氩气体保护焊焊接;焊后调平骨架,保证骨架外侧平面度≤ 2 mm/m²。随后组焊骨架与蒙皮,采用 F 夹将蒙皮与骨架夹紧,装配间隙控制在 0.3 mm 以内。蒙皮与筋板、蒙皮与立柱的角焊缝及搭接焊缝采用手持激光焊接,工艺参数见表 9。

表 9 侧墙蒙皮手持激光焊焊接工艺参数

Table 9 Welding parameters for side wall skin by handheld laser welding

接头形式	焊层	焊接方法	焊材规格	功率/W	电流种类/极性	脉冲频率/Hz	摆幅/mm	功率补偿/%	焊接速度/cm·min ⁻¹
角接	1	52	Ø1.6	1500	DC(+)	40	3	90	35~40
搭接	1	52	Ø1.6	1500	DC(+)	40	3	60	35~40

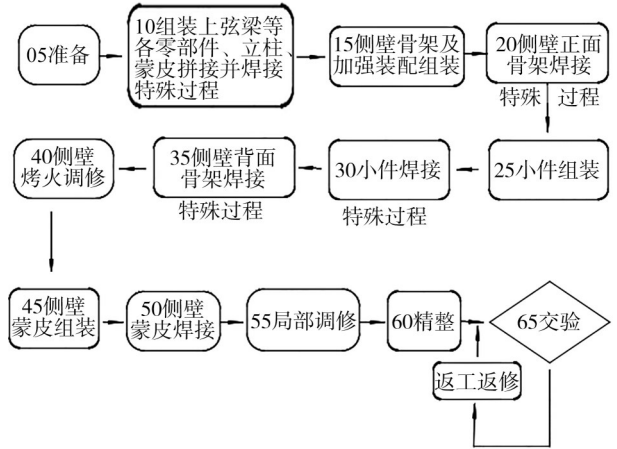


图 13 侧墙组焊顺序

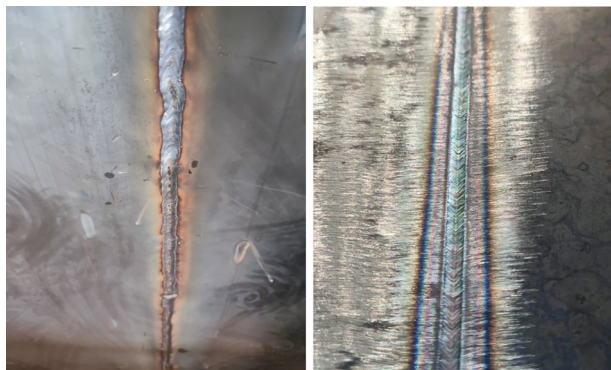
Fig. 13 Assembly and welding sequence of side wall

5 焊后检测

5.1 外观与无损检测

对 4 台机车侧墙的全部手持激光焊缝进行外观检查和 X 射线检测,包括蒙皮拼接对接焊缝、筋板

角焊缝及蒙皮与立柱搭接焊缝。检测结果表明,焊缝成形均匀,与母材过渡平滑,无焊接飞溅;X射线检测结果满足 ISO 13919-1:2021 B级要求,焊缝表面磁粉探伤符合 JB/T 6061 标准。典型焊缝外观对比如图 14、图 15 所示,与富氩气体保护焊相比,手持激光焊缝成形更为规整,焊趾过渡圆滑,有利于降低应力集中、提升接头疲劳性能。



富氩气体保护焊

手持激光焊

图 14 蒙皮对接焊缝成形对比

Fig. 14 Comparison of weld appearance for skin butt joints



图 15 蒙皮段焊缝成形对比

Fig. 15 Comparison of weld appearance for skin stitch welds

5.2 焊接变形检测

对焊后侧墙蒙皮平面度进行检测,结果为 0.5~2.0 mm/m²,满足设计要求的≤2 mm/m²。作为对比,同期采用富氩气体保护焊焊接的侧墙蒙皮平面度为 3~5 mm/m²,变形量显著更大。激光焊接热输入小、焊缝趋近 I 型截面,仅产生水平收缩变形,角变形可控,这是平面度精度提升的根本原因。两种工艺下的蒙皮平面度检测结果如图 16、图 17 所示。

5.3 车体静强度验证

4 台机车按照 TB/T 2541—2010《机车车体静强度试验规范》完成静强度试验后,对侧墙激光焊缝



图 16 富氩气体保护焊焊接侧墙蒙皮平面度

Fig. 16 Flatness of side wall skin welded by gas metal arc welding



图 17 手持激光焊焊接侧墙蒙皮平面度

Fig. 17 Flatness of side wall skin welded by handheld laser welding

进行磁粉探伤复检,结果符合 JB/T 6061 标准,未发现焊接缺陷,进一步验证了手持激光焊接接头的承载可靠性。

6 结论

(1)对接焊缝的气孔敏感性与熔透状态密切相关。全熔透状态下,熔池气体可从上下表面双向逸出,且匙孔底部周期性张开促进蒸气排出,焊缝气孔少,满足 ISO 13919-1:2021 B级要求;带垫板未熔透状态下,气体仅能从熔池上方单向逸出,易形成条虫状气孔,不宜采用手持激光焊接。

(2)功率补偿是决定角焊缝根部熔合质量的关键参数。功率补偿为 0 时,激光能量集中于焊趾区域,角焊缝呈倒 M 型,根部未熔合;功率补偿提升至 60% 以上后,能量分布向焊缝中心汇聚,焊缝转为 U 型,根部熔深达 1.5 mm;对接焊缝功率补偿为 0 即可获得 I 型焊缝。搭接角焊缝在功率补偿 60% 时根部完全熔合;卷边焊缝因送丝定位困难及光斑覆盖

窄,不适用于手持激光焊接工艺。

(3)焊接工艺评定结果表明,对接全熔透焊接头拉伸试样均断于母材(屈服强度 382~409 MPa,抗拉强度 506~517 MPa),接头强度高于母材;焊缝硬度及弯曲性能均满足 ISO15614-11:2022 标准要求。

(4)四台机车侧墙蒙皮的焊后平面度为 0.5~2.0 mm/m²,满足设计指标≤2 mm/m²,优于同期富氩气保焊的 3~5 mm/m²。静强度试验后侧墙激光焊缝磁粉探伤未发现缺陷,验证了该工艺的工程可靠性。

参考文献:

- [1] 曹媛,闵阳春,金希红,等. 机车车体轻量化技术研究[J]. 电力机车与轨道车辆,2019(4):32-36.
CAO Y, MIN Y C, JIN X H, et al. Research on light-weight technology of locomotive carbody[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2019(4):32-36.
- [2] 鲍洪阳,王亚男,严格格. 两种轨道市域车辆司机室与客室拼焊结构的焊接变形与工艺性分析[J]. 电焊机, 2026, 56(1):96-101.
BAO H Y, WANG Y N, YAN G G. Welding deformation and process analysis of two types of welded structures for urban rail vehicle cab and passenger compartment[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(1):96-101.
- [3] 尹东坤,徐锴,滕彬,等. 万瓦级激光高效焊接研究现状[J]. 电焊机, 2024, 54(5):1-16.
YIN D K, XU K, TENG B, et al. Research status of high-efficiency 10000 W laser welding[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(5):1-16.
- [4] 牛广浩,关旭东,丁超,等. 镀锌板手持激光焊接工艺研究[J]. 电焊机, 2025, 54(12):79-83.
NIU G H, GUAN X D, DING C, et al. Research on handheld laser welding technology of galvanized sheets[J]. Electric Welding Machine, 2025, 54(12):79-83.
- [5] 丁正祥,王彦龙,曹旭武,等. 船用新型 TA3 钛板手持激光填丝焊接接头组织与力学性能研究[J]. 电焊机, 2024, 54(12):21-27.
DING Z X, WANG Y L, CAO X W, et al. Study on microstructure and mechanical properties of handheld laser wire filling welded joint of new TA3 titanium plate for ships[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(12):21-27.
- [6] 张迪,赵琳,刘奥博,等. 激光能量对激光焊接接头熔化形状、气孔和微观组织的影响及其调控方法[J]. 中国激光, 2021, 48(15):1502005.
ZHANG D, ZHAO L, LIU A B, et al. Understanding and controlling the influence of laser energy on penetration, porosity, and microstructure during laser welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15):1502005.
- [7] 侯豁然,付俊岩. 我国铁道车辆用高强度耐大气腐蚀钢的进展[J]. 钢铁, 2004, 39(6):71-74.
HOU H R, FU J Y. Progress of high-strength atmospheric corrosion resistant steel for railway vehicles in China[J]. Iron and Steel, 2004, 39(6):71-74.
- [8] 陈苗苗,文梦蝶,郑文海,等. 6061 铝合金薄板激光焊接气孔控制研究[J]. 机械设计与制造, 2024(10):358-363.
CHEN M M, WEN M D, ZHENG W H, et al. Research on pore control in laser welding of 6061 aluminum alloy thin sheets[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(10):358-363.
- [9] 刘超. Q345NQR2 耐候钢薄板激光焊接接头拉伸与疲劳性能研究[D]. 吉林:吉林大学, 2020.
LIU C. Study on tensile and fatigue properties of laser welded joints of Q345NQR2 weathering steel thin sheet[D]. Jilin:Jilin University, 2020.
- [10] ISO 13919-1: 2021, Welding—Electron and laser-beam welded joints—Guidance on quality levels for imperfections — Part 1: Steel, nickel and its alloys, titanium and its alloys[S]. Geneva:International Organization for Standardization, 2021.
- [11] ISO 15614-11: 2022, Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure test — Part 11: Electron and laser beam welding[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2022.
- [12] 机械工业哈尔滨焊接技术培训中心. 国际焊接工程师培训教程—第一册[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2023:248.
- [13] 欧洲标准化委员会. EN 15085-4:2023, 轨道应用—轨道车辆及其部件焊接—第 4 部分:生产要求[S]. 布鲁塞尔:CEN, 2023.