

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.12.11

镀锌板手持激光焊接工艺研究

牛广浩, 关旭东, 丁超, 李小鹏

中国核工业第五建设有限公司, 上海 201512

摘要: 在某核电项目通风系统调研发现, 碳钢通风管道主要采用厚度2.0 mm的镀锌板, 焊前需要对待焊区表面进行除锌, 在除锌过程中可能带来大气污染, 增加工作量和焊接效率较低等问题。本文利用手持激光焊接技术的便捷性和优势, 通过调节焊接参数, 在不去除锌层的状态下进行正交试验, 并进行无损检测和理化性能检测。最终实验表明, 采用负离焦、适中的激光功率、合适的送丝速度、焊枪倾角在30°~55°、有效的保护气环境等工艺参数, 激光不除锌焊接镀锌板, 能够获得符合要求的焊接接头。

关键词: 核电; 镀锌板; 手持激光; 焊接参数; 不除锌焊接

中图分类号: TG456.7; TG457.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)12-0079-06

Research on Handheld Laser Welding Process of Galvanized Sheet

NIU Guanghao, GUAN Xudong, DING Chao, LI Xiaopeng

China Nuclear Industry Fifth Construction Co., Ltd., Shanghai 201512, China

Abstract: In the investigation of the ventilation system of a nuclear power project, it was found that the carbon steel ventilation pipe mainly uses galvanized sheet with a thickness of 2.0 mm, and the zinc removal needs to be carried out on the surface of the welding area before welding, which may bring air pollution, increased workload and low welding efficiency in the process of zinc removal. In this paper, taking advantage of the convenience and advantages of handheld laser welding technology, the orthogonal test is carried out without removing the zinc layer by adjusting the welding parameters, and the non-destructive testing and physical and chemical performance testing are carried out. The final experiment shows that the welding joints that meet the requirements can be obtained by using the process parameters such as negative defocusing, moderate laser power, appropriate wire feeding speed, welding torch inclination angle of 30°-55°, and suitable protective gas environment.

Keywords: Nuclear power; galvanized sheet; hand-held lasers; welding parameters; Do not remove zinc welding

引用格式: 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, 55(12): 79-84.

Citation: NIU Guanghao, GUAN Xudong, DING Chao, et al. Research on Handheld Laser Welding Process of Galvanized Sheet[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(12): 79-84.

0 引言

镀锌板的焊接方法主要有电阻焊、二氧化碳熔化极气保焊和等离子焊, 但是由于镀锌层的影响, 镀锌板的不除锌焊接始终是一大难题。对于电阻焊而言, 焊接成本低, 焊接速度快, 但是在焊接时锌层容易附着在电极上, 降低电极寿命, 为了获得满

足要求的焊缝, 焊接前需要对焊接位置的镀锌层进行处理。使用二氧化碳熔化极气保焊时, 由于焊接热输入高, 容易产生飞溅、裂纹等焊接缺陷, 而且镀锌层烧损严重, 为了获得合格的焊接接头, 也需要对镀锌层进行处理, 加大工作量^[1-2]。等离子焊接技术虽能够实现不除锌层焊接镀锌板, 但是这种焊接方法热影响区大, 镀锌层烧损严重, 增大焊后补锌

收稿日期: 2025-05-17 修回日期: 2025-07-23

作者简介: 牛广浩(1995—), 学士, 工程师, 主要进行焊接技术与工程、焊接工艺相关研究。E-mail: 1440495585@qq.com。

层的工作量。和传统焊接工艺相比,激光焊接镀锌板时激光加热能力强、焊接速度快、热影响区更小,锌层烧损面积小,同时焊缝强度普遍高于母材、容易实现远程自动化焊接^[3-4],广泛应用于汽车制造、航空航天、海洋工程等领域^[5-8],但目前关于激光焊接在核电领域的应用工艺研究较少^[9]。

周牧等^[10]在对 0.7 mm 异种镀锌钢板搭接填丝焊的工艺和力学性能研究中,通过对激光功率、焊接速度、离焦量和送丝速度等关键工艺参数进行控制,焊缝成形美观。核电现场应用的镀锌板采用热镀工艺,且板正面反面的镀锌层厚度不均匀,存在偏差,增加激光焊接的难度,现场镀锌板焊接工程量较大的焊缝形式为对接焊缝。本文使用现场生产同类型的 2.0 mm 镀锌板,进行焊接工艺研究,验证手持激光焊接不除锌层镀锌板的工艺可达性,解决焊缝成形不美观等问题,同时结合生产实际的需要,推进激光自动焊焊接风管的进程,增强生产实用性。

1 试验条件与方法

1.1 试验材料

试验用 2.0 mm 厚的镀锌板,牌号 DC51D,其化学成分如表 1 所示,抗拉强度为 341 MPa。

表 1 母材化学成分(质量分数,%)和抗拉强度

Table 1 Chemical composition (wt. %) and tensile strength of base metal

C	Si	Mn	P	S	Ti
0.042	0.01	0.18	0.014	0.008	0

1.2 试验设备

本文使用 2 000 W 光纤激光器的手持激光焊机(见图 1),设备参数如表 2 所示,激光器的最大输出功率为 2 000 W,焦距为 150 mm,输出波长 $1\ 080\pm 10$ nm。该焊机的操作简单方便,使用效率高,采用光纤传输,便于柔性加工试件。

1.3 试验流程

1.3.1 焊前准备

使用激光切割或剪板机将镀锌板加工成尺寸 $300\text{ mm}\times 125\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的试样,用打磨工具清理试件边缘处的毛刺、氧化皮或锈渣,并利用纯工业酒



图 1 手持激光焊机

Fig. 1 Handheld laser welding

表 2 试验激光焊机概况

Table 2 General situation of test laser welding machine

属性	范围
产品型号	LB2000
输入电压	220 Vac
输入频率	50/60 Hz
最大输入电流	45 A
最大输出激光功率	2000 W
激光波长	$1080\text{ nm}\pm 10\text{ nm}$

精清洗试件待焊处,将表面自然风干。

根据薄板焊接情况和工艺要求,薄板在组对的过程中,保证薄板的错边量 $\leq 10\%T$,且组对间隙在 $\leq 1.0\text{ mm}$ 。试件组装如图 2 所示。

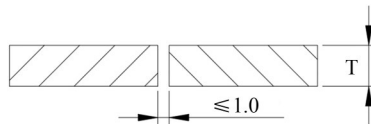


图 2 组对间隙

Fig. 2 Group of gap diagrams

为减少试件因变形影响,采用推拉压紧装置进行装配固定,如图 3 所示。

由于光源扫描宽度窄,薄板组对间隙小,焊枪在送丝速度控制下快速移动,手持激光焊接过程中容易出现光斑跑偏情况,因此在实验时配备一名操作娴熟的焊工。手持激光焊接如图 4 所示。

1.3.2 试验流程

按照图 5 所示的流程进行工艺试验。

1.3.3 无损检测与性能测试

按照 GB/T 29710—2013 电子束及激光焊接工艺评定试验方法进行试件检测。待试件焊接完成,按照 GB/T 3323.1—2019 的标准进行无损检测,并按照工艺评定试验方案进行无损检测。无损合格

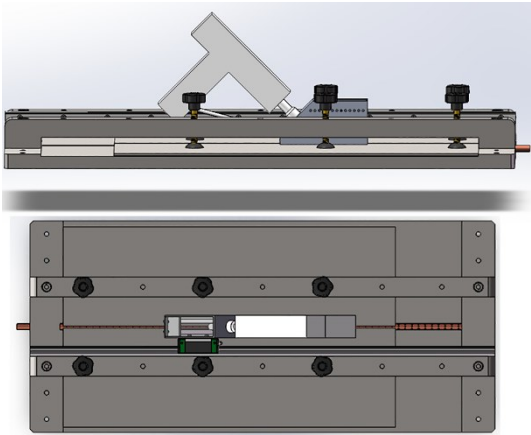


图3 焊接工装夹具

Fig. 3 Welding fixture diagram

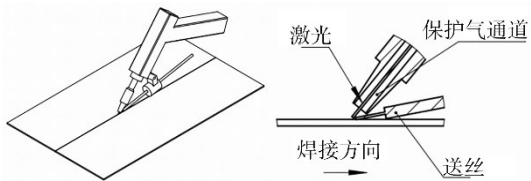


图4 模拟焊接状态

Fig. 4 Simulated welding state diagram

后按照 GB/T 26955-2011 标准进行理化检测。

以焊缝为中心截取长宽为 50×50 的焊接接头用于金相试验。利用砂纸和抛光机将待测试件表面处理至光滑没有划痕。利用 4% 的硝酸酒精溶液进行腐蚀试验,最后将试样清洗干净。

拉伸试样制备:将试样的切痕磨平,清理干净,防止拉伸过程中造成结果不准确。按照 GB/T 2651—2023 加工满足拉伸要求的试样,如图 6 所示。

表3 对接焊缝焊接参数表

Table 3 Welding parameters of the butt weld

焊接参数	扫描速度	扫描宽度	峰值功率	离焦	组对间隙	焊丝直径	送丝速度	保护气	保护气(L·min ⁻¹)		焊枪倾角
	mm/s	/mm	/W	/mm	/mm	/mm	/(cm·min ⁻¹)		正面	背面	/(°)
设定基础值	600	3	1 300	0	0	1.0	50	Ar/N ₂	20	N/A	45
参数调节范围	±200	±1	±300	±5	0-1	1.2/1.6	±10	Ar/N ₂	±5	N/A	±15

2.2 镀锌板对接拼焊试件成形

使用手持激光焊接,经过多次试验焊接后,确定焊接工艺参数,焊缝成形均满足 GB/T 29710—2013 的标准。I 型坡口组对间隙≤1.0 mm,采用不摆动单道焊、后置送丝,确保起弧点完全融合。在 1300±300 W 的功率范围内进行焊接试验,当功率>1 600 W 时,焊缝表面余高几乎为 0,出现收缩沟,且背面焊缝高于要求值,当功率<1 000 W 时,背面出

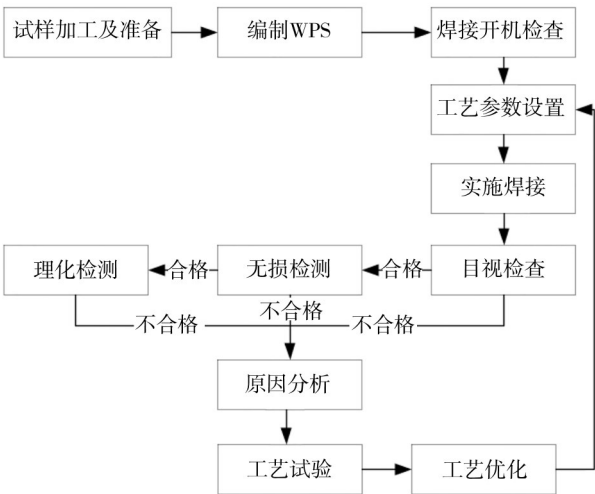


图5 试验流程

Fig. 5 Test flow chart

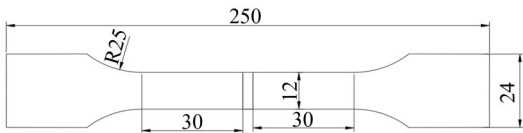


图6 拉伸试样加工

Fig. 6 Processing diagram of bending sample

2 试验过程

2.1 镀锌板不除锌层对接拼焊

镀锌板表面光亮,反射强度大,且试件表面镀锌层蒸发容易产生锌蒸汽,且金属熔化时容易产生等离子云影响,激光能量会降低,需要适当增加焊接功率,按照表 3 的焊接参数进行正交试验焊接。

现未焊透,如表 4 所示。

2.3 镀锌板不除锌焊接工艺优化

2.3.1 镀锌板对接焊缝参数优化

经过正交试验获得以下焊接参数。利用以下焊接参数均能获得目视检测合格的焊缝,具体参数如表 5 所示。

2.3.2 焊接参数固化

焊接完成后,按照 GB/T 29710—2013 标准进行

表 4 2.0 mm 镀锌板对接试件成形情况
Table 4 Forming condition of 2.0 mm butt specimen

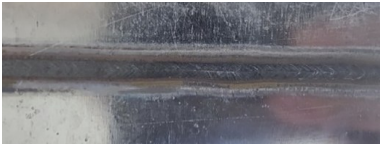
功率	位置	图像	备注
<1 000 W	背面		焊缝背面未焊透
	正面		正面焊缝余高≤0, 出现焊缝收缩线
>1 600 W	背面		背面焊缝余高>2 mm

表 5 2.0 mm 镀锌板不除锌对接焊接参数
Table 5 Parameters for butt welding of 2.0 mm galvanized sheet without removing zinc

编号	扫描速度 /(mm·s ⁻¹)	扫描宽度 /mm	峰值功率 /W	离焦 /mm	组对间隙 /mm	焊丝直径 /mm	送丝速度 /(cm·min ⁻¹)	保护气	保护气(L·min ⁻¹)		焊枪倾角 /(°)
									正面	背面	
1	600	3.0	1 450	-5	<1.0	1.6/1.0	50	Ar/N ₂	20	—	30~50
2	400	3.0	1 500	-5	<1.0	1.6/1.0	50	Ar/N ₂	20	—	30~55
3	500	2.0	1 500	-5	<1.0	1.0/1.2	50	Ar/N ₂	20	—	40~55
4	400	3.0	1 450	-5	<1.0	1.6	50	Ar/N ₂	20	—	45~50

检测。无损检测试验发现,当使用氩气作为保护气焊接时,焊缝内部出现气孔,且气孔出现概率极大,当氮气作为保护气时,焊缝内气孔出现的情况得到改善。为实现焊接,保证焊接合格率,对无损检测合格的参数做了大量试验,并固化相关参数范围,得到兼容性强的焊接工艺参数,如表6所示。

表 6 固化焊接参数范围
Table 6 Range of curing welding parameters

项目	扫描速度 /(mm·s ⁻¹)	扫描宽度 /mm	峰值功率 /W	离焦 /mm	组对间隙 /mm	焊丝直 径/mm	送丝速度 /(cm·min ⁻¹)	保护气	保护气 L/min		焊枪倾斜角 度/(°)
									正面	背面	
对接	400~600	2.0~3.0	1 400~1 500	-5	≤1.0	∅1.0	50	N ₂	20	—	30~55

3 检测结果与分析

利用固化参数进行焊接,对无损检测合格的试件,按照理化检测项目加工试样,并进行理化试验,分别进行宏观检测、微观检测、弯曲、拉伸试验。

3.1 焊缝接头宏观检测

首先将加工好的 50 mm×50 mm 试件利用抛光砂纸进行处理,将试件加工满足要求后,先利用 10% 的硝酸酒精溶液腐蚀试件,并利用×10 倍的放大镜进行检测,如图 7 所示。经过检测后发现,无裂纹、气孔、夹杂、未焊透、未熔合等缺陷,焊缝正面余

高 0.3 mm,焊缝背面余高 0.4 mm,满足 GB/T 29710—2013 工艺评定质量检测 B 级焊缝要求。



图 7 宏观对接测试样

Fig. 7 Macro docking sample diagram

3.2 焊缝接头微观检测

利用 4% 的硝酸酒精溶液进行腐蚀,将试件在 200 倍的放大镜下进行微观接头观察,并对微观进行分析,如图 8 所示。从放大镜的观察中,图中主要

分为三个区域,焊缝区(WM)、热影响区(HAZ)、母材(BM),但是在焊缝和热影响区微观组织形成较复杂,焊缝区域主要由细小的针状铁素体(af)和块状的多边形铁素体(pf)为主,同时由于激光负离焦

的情况下,在焊接过程中会有更多的热输入进入焊缝,产生少量的魏氏组织铁素体(wf)生成。焊接接头的热影响区组织和母材组织基本相同,由少量的铁素体(f)和少量的珠光体(p)组成。

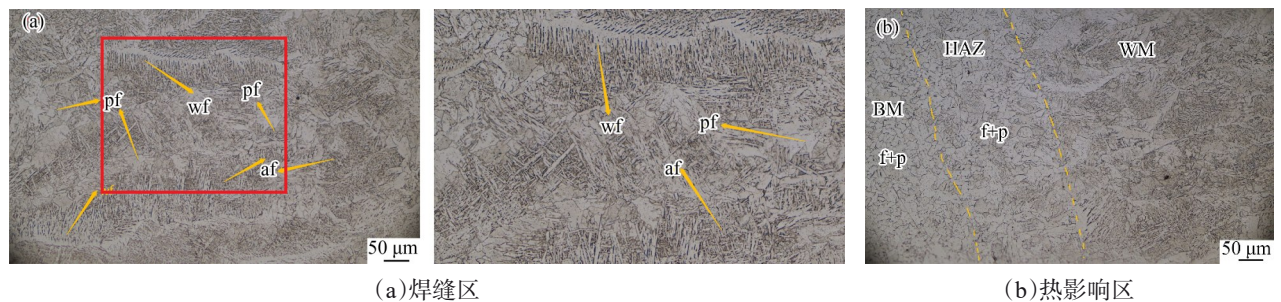


图 8 焊接接头焊缝及热影响区显微组织

Fig. 8 Microstructure of weld seam and heat affected zone of welded joint

3.3 力学性能试验

焊接接头的力学性能影响工件的使用,为了验证试件的力学性能,对无损检测合格的试件进行拉伸和弯曲试验。试验结果如表 7、表 8 所示,载荷位移曲线如图 9 所示,试验件如图 10 所示。

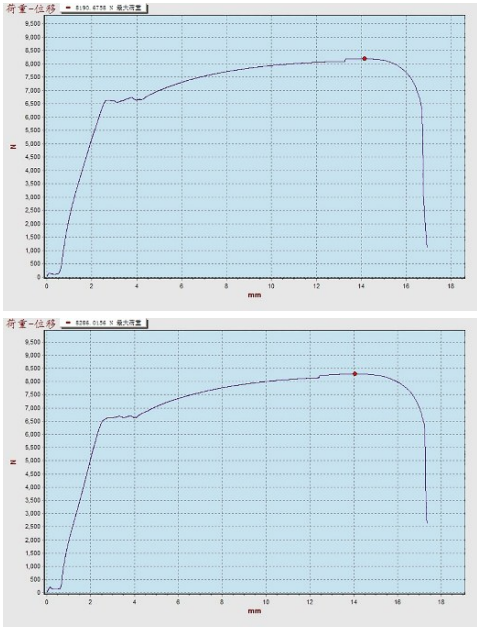


Fig. 9 Load-displacement curve of tensile test

表 7 拉伸试验结果

Table 7 Results of tensile test

试样 编号	抗拉强度/MPa (要求值≥341)	断裂位置	执行标准	结论
2	384	母材	GB/T 2651—2023	合格
3	389	母材	GB/T 2651—2023	合格

表 8 弯曲试验结果

Table 8 Bending test results

试样编号	试验项目	执行标准	结论
4	面弯	GB/T 2653—2008	合格
5	背弯	GB/T 2653—2008	合格

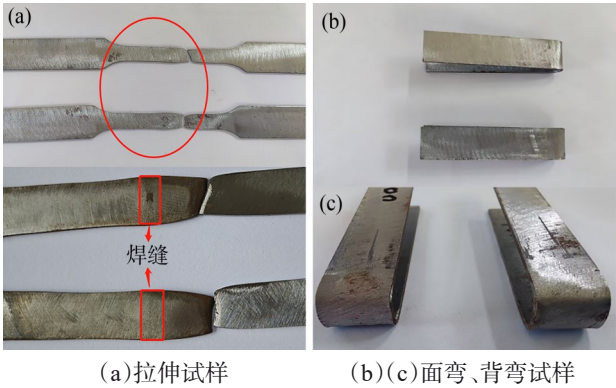


图 10 焊接接头的拉伸与弯曲试样

Fig. 10 Tensile and bending specimens of welded joints

4 结论

(1)手持激光焊接镀锌板时,氩气作为保护气时,容易产生气孔,氮气能够很好减少气孔出现。

(2)当利用手持激光焊接不除锌层 2 mm 镀锌板时,扫描频率为 400~600 mm/s,扫描宽度为 2.0~3.0 mm,峰值功率 1 400~1 500 W,离焦量为-5 mm,组对间隙≤1.0 mm,送丝速度 50 cm/min,使用氮气作为保护气,正面保护气 20 L/min,焊枪角度 30°~55°时,焊缝成形好,可获得高质量焊缝。

(3)在热输入的影响下,焊缝的组织为针状铁

素体和片状多边形铁素体,热影响区则由铁素体和珠光体组成。

(4)手持激光焊接核电现场镀锌板时,能够获得满足力学性能要求的焊缝,后续可在手持焊接工艺参数的基础上推行自动化,固化相关焊接工艺和操作要求,提升焊接效率,优化焊接环境,实现一键自动化焊接,推进激光焊在核电项目的应用。

参考文献:

- [1] 张正浩. 镀锌薄板摆动激光对接焊接工艺及接头组织性能研究[D]. 北京:北京工业大学,2021.
ZHANG Z H. Research on Oscillating laser butt welding process and joints microstructure and properties of zinc-coated thin sheets[D]. Beijing University of Technology,2021.
- [2] 张冬平,钟万良,陈峰,等. 镀锌板焊接电极失效原因分析及改进[J]. 工程技术研究,2017(07):5-6.
ZHANG D P, ZHONG W L, CHEN F, et al. Analysis and Improvement of the Causes of Failure in Galvanized Sheet Welding Electrodes[J]. Engineering Technology Research,2017(07):5-6.
- [3] 刘浩东,戴京涛. 激光焊接技术的应用研究进展与分析[J]. 电焊机,2022,52(01):95-102.
LIU H D, DAI J T. Research Review and Analysis of Laser Welding Application [J]. Electric Welding Machine,2022,52(01):95-102.
- [4] 程定富,朱平. 核电用 S220GD 型镀锌钢板等离子弧焊接技术[J]. 金属加工(热加工),2017(22):30-34.
CHENG D F, ZHU P. Plasma Arc Welding Technology for S220GD Galvanized Steel Plates Used in Nuclear Power[J]. MW Metal Forming,2017(22):30-34.
- [5] 裴雷振,尹东海,王东亮,等. SGCC 镀锌钢板激光接头组织及力学性能研究[J]. 焊接技术,2019,48(02):23-25.
PEI L Z, YIN D H, WANG D L, et al. Study on the microstructure and mechanical properties of SGCC galvanized steel laser welding joint[J]. Welding Technology, 2019,48(02):23-25.
- [6] 刘立波,华治华,赵立富,等. 激光焊接技术在汽车工业领域的运用及问题探讨[J]. 汽车实用技术,2023,48(04):121-124.
LIU L B, HUA Z H, ZHAO L F, et al. Application and Issues of Laser Welding Technology in the Automotive Industry[J]. Automotive Practical Technology,2023,48(04):121-124.
- [7] 林元航. 激光焊接技术及其在汽车工业的应用[J]. 机电工程技术,2016,45(05):21-24.
LIN Y H. Laser Welding Technology and Its Application in the Automotive Industry[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology,2016,45(05):21-24.
- [8] 李琳. 激光焊在航空制造领域的应用现状研究[J]. 焊接技术,2020,49(03):1-4.
LI L. Research on the Current Application of Laser Welding in the Field of Aerospace Manufacturing [J]. Welding Technology,2020,49(03):1-4.
- [9] 陈挥扬,卓理政,崔运佳,等. 核电领域激光焊接技术的研究与应用现状[J]. 电焊机,2023,53(07):81-89.
CHEN H Y, ZHUO L Z, CUI Y J, et al. Research and Application of Laser Welding in Nuclear Power Field [J]. Electric Welding Machine,2023,53(07):81-89.
- [10] 周牧,周林柱,李金宝,等. 镀锌钢板激光填丝焊接工艺与接头力学性能研究[J]. 电焊机,2023,53(05):64-69.
ZHOU M, ZHOU L Z, LI J B, et al. Study on laser wire filling welding process and mechanical properties of galvanized steel plate [J]. Electric Welding Machine, 2023,53(05):64-69.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>