

# 气体绝缘开关设备充气箱激光封焊工艺研究

朱有坤, 王钦伟, 王远刚, 秦川

重庆市光学机械研究所有限公司, 重庆 401123

**摘要:** 气体绝缘开关设备作为电网中重要部件之一, 对其制造的精度和气密性要求极高。目前主要采用手工氩弧焊和人工组装的方式对气体绝缘开关设备充气箱进行焊接, 存在焊接变形大、气密性较差等问题, 难以保证充气箱的焊接质量。针对上述难点, 开发了用于气体绝缘开关设备充气箱激光焊接的自动工装夹具和激光焊接工艺。通过试验验证, 开发的自动工装夹具可确保充气箱焊接质量和变形可控; 相较于 TIG 工艺, 激光焊接可减小充气箱的焊接变形量, 且焊缝质量优异, 稳定可靠; 采用试验设计法进行工艺优化, 激光气密性封焊的最佳工艺参数为激光功率 1 800 W, 焊接速度 20 cm/min, 保护气为 N<sub>2</sub>, 保护气流量 15 L/min ~ 18 L/min。最后通过氦质谱检漏发现充气箱无漏气情况, 密封性良好。

**关键词:** 气体绝缘开发设备; 充气箱; 激光焊接; 变形

中图分类号: TN911 文献标识码: A doi: 10. 14016/j. cnki. jgzz. 2024. 10. 236

## Study on laser welding technology of gas insulated switchgear

ZHU Youkun, WANG Qinwei, WANG Yuangang, QIN Chuan

Chongqing Optical Machinery Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401123, China

**Abstract:** As one of the important components in the power grid, gas-insulated switchgear requires high manufacturing precision and gas tightness. At present, the gas-insulated switchgear filling box is mainly welded by manual argon arc welding and manual assembly, which is difficult to ensure the welding quality of the filling box due to the problems of large welding deformation and poor airtightness. In view of the above difficulties, the automatic tooling fixture and laser welding process for gas-insulated switchgear gas tank laser welding were developed. Through experimental verification, the developed automatic tooling fixture can ensure the welding quality and deformation control of the inflatable box; compared with the TIG process, laser welding can reduce the welding deformation of the inflatable box, and the weld quality is excellent, stable and reliable; using the experimental design method of process optimization, the optimal process parameters of the laser gas-tight sealing welding for laser power of 1 800 W, the welding speed of 20 cm/min, shielding gas N<sub>2</sub>, shielding gas flow 15-18 L/min, and finally, no leakage of gas in the inflatable box is found by helium mass spectrometry, and the sealing is good.

**Key words:** gas-insulated development equipment; inflatable tanks; laser welding; deformation

## 1 引言

气体绝缘金属开关(简称 GIS)是电网中重要组成设备之一,其广泛用于电网配电系统中,直接影响电网的安全可靠运行。气体绝缘金属开关设备充气箱采用空气绝缘与六氟化硫气体隔室相结合,具备安

全可靠、紧凑、可扩充等优点,适用于配电自动化,可用在恶劣环境和对空间要求比较苛刻的场所<sup>[1]</sup>。目前,国内充气箱主要由 ABB、西门子、施耐德等外资品牌独霸市场,国内企业正处于探索研究阶段。焊接作为充气箱制造的关键工艺之一,焊缝质量对于气体绝缘开关设备的安全服役起着决定性作用<sup>[2-5]</sup>。

目前,充气箱的焊接一般采用氩弧焊或气体保护焊,焊接时热输入较大,极易导致焊接部位变形。同时充气箱的焊接主要由人工辅助装配,一定程度上充气箱的焊接质量由辅助人员决定,难以保证产品质量

收稿日期: 2023-12-24

基金项目: 重庆市科研机构激励绩效专项(No. cstc2021jxjl120014)

作者简介: 朱有坤(1984-),男,高级工程师,主要从事激光熔覆、激光焊接、激光淬火、激光三维切割工艺研究。E-mail: 526732341@qq.com

的稳定性。随着自动化技术的高速发展,国内自动化水平得到大幅提升,开发应用于充气箱的自动焊接工装具有可行性。相较于氩弧焊等传统焊接工艺,激光焊接具备熔深大、热影响区小、变形小等优点,在焊接可靠性、自动化批量生产等方面优势突出<sup>[6]</sup>。

针对充气箱结构,基于激光焊接技术,结合自动化焊接工装,研究充气箱焊接工艺。设计基于正交试验的激光焊接工艺参数优化方法,获得优选的工艺参数,并通过拉伸试验、金相分析等手段验证激光焊接工艺可靠性。最后采用优选的参数应用于充气箱焊接,利用真空氦检漏等方法对充气箱成品进行检验,证明优选的激光工艺参数能满足充气箱焊接气密性要求。

## 2 试验方法及设备

### 2.1 激光焊接流程

选用的充气箱板厚为 3 mm,材料为 304 不锈钢,其化学成分见表 1 所示<sup>[7]</sup>。为确保充气箱各板之间激光焊接间隙可控,设计了充气箱自动化焊接工装,主要由基座、回转工作台、定位装置、夹持装置等组成,如图 1 所示。充气箱焊接过程如下:精准定位点焊:采用人工辅助与自动相结合的方式,确保充气箱部件精准定位,然后实施点焊固定。确保位置精度是点焊定位的关键,同时为后续自动化激光焊接提供保证<sup>[8]</sup>。机器人自动焊接:采用工装自动夹紧,然后通过机器人编程实现充气箱各部件的自动化焊接。充气箱焊接的关键在于保证焊接质量的同时,还应该确保箱体的气密性<sup>[9]</sup>。因此,焊接过程中应避免出现焊穿、漏焊、偏焊和未焊透等焊接缺陷。充气箱激光焊前序对待焊出进行打磨,去除表面的氧化物和油污,防止形成气孔、夹渣等缺陷。

表 1 304 不锈钢的化学成分(质量分数,%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
≤0.08	≤1.0	≤2.0	≤0.05	≤0.03	8.0~10.5	18.0~20.0	Bal

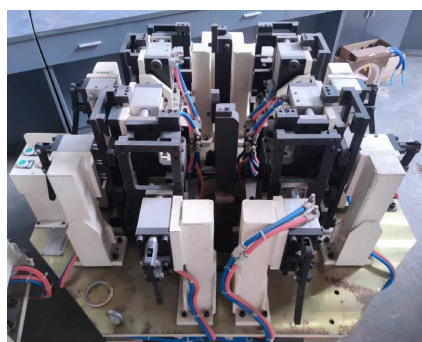


图 1 充气箱自动化焊接工装

### 2.2 充气箱焊接工艺

在焊接过程中,焊接质量关键影响因素主要有激光功率、焊接速度等。除此之外,根据充气箱的结构特点和板厚,焊接方式主要为对接直角焊接。角焊缝位置焊接方式为深熔焊,无须开坡口,通过板材对接融合进行焊接,如图 2 所示。为保证充气箱箱体在抽真空和长期放置户外而不变形,板材内部需焊接加强筋增加箱体强度<sup>[10]</sup>。激光焊接试验采用德国罗芬公司生产的 ROFIN-4000W 光纤激光器,焊接头为德国 Precitec 公司生产的 YW52 型激光焊接头,聚焦光斑直径为 0.6 mm,焊接过程由 ABB 机器人编程执行<sup>[11]</sup>。

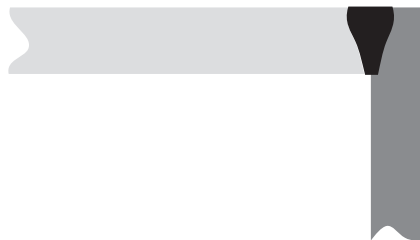


图 2 板材对接直角焊缝

### 2.3 激光焊接工艺参数设计

试验参数基于前期工艺实践,采用尺寸为 300 mm \* 150 mm \* 3 mm 的 304 不锈钢平板作为试样板进行激光焊接试验。以激光功率、焊接速度、脉冲频率和保护气作为试验控制因素,其中激光功率和焊接速度作为关键变量,工艺参数<sup>[12]</sup>如表 2 所示。

表 2 对接角焊缝激光焊接参数

编号#	试板厚度/ mm	激光功率/ W	焊接速度/ cm/min	脉冲频率/ Hz	保护气
1	3	1 200	14	1 000	N <sub>2</sub>
2	3	1 600	14	1 000	N <sub>2</sub>
3	3	1 600	20	1 000	N <sub>2</sub>
4	3	1 800	20	1 000	N <sub>2</sub>
5	3	2 000	20	1 000	N <sub>2</sub>
6	3	1 800	27	1 000	N <sub>2</sub>

## 3 试验及结果分析

通过初步试验,各组参数正面成型均良好,无气孔裂纹缺陷,如图 3 所示。激光功率越大,熔深越大;焊接速度越高,则熔深越浅。当激光功率为 1 800 W,焊接速度为 20 cm/min,保护气为 99.99% 的高纯氮气时,单面焊双面成型最优。



图3 试验样板

### 3.1 焊接接头的拉伸试验

焊接接头拉伸试验依据 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》执行。试验选择 3 组拉伸试样作为对比试验,即母材拉伸试样和不同焊接参数焊接试样各 3 件,断后发现试样断裂于焊缝与母材交接的位置,端面有明显的颈缩,为典型的韧性断裂。图 4 为 3 mm 厚的 304 不锈钢焊接接头拉伸试样结果,抗拉强度范围在 713 MPa~720 MPa,由图 4 可知焊接接头抗拉强度接近母材抗拉强度。由于激光焊接热输入比较集中,热影响区域较小,焊缝组织致密性高,从而得到和母材抗拉强度接近的力学性能焊接接头<sup>[13-14]</sup>。

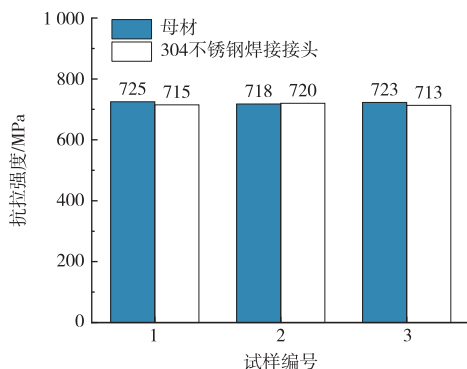


图4 拉伸试验结果

### 3.2 焊缝金相组织

图 5 为 3mm 厚 304 不锈钢焊缝截面形貌,呈典型的 Y 型形貌特征,焊缝深宽比大,无侧壁气孔和未熔合等缺陷。图 6 为焊缝中心典型组织,主要由铁素体和奥氏体组成,由于激光焊能量高度集中,冷却速度极快,此时焊缝中心区大部分组织由柱状晶向等轴晶转变,即出现了等轴晶的形核与长大现象。同时因焊缝中心区熔化的金属温度极高,晶粒之间无明显温差,导致焊缝中心的凝固过程几乎是同时进行的,液态金属在熔池内的形核不受约束,最终生成了杂乱分布的等轴晶<sup>[15-16]</sup>。

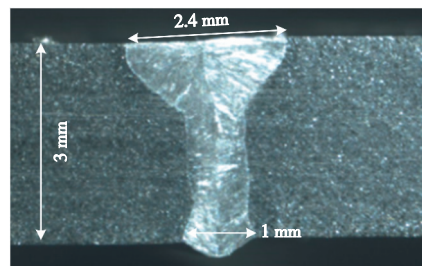


图5 焊缝宏观金相

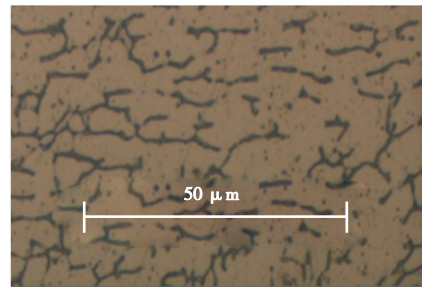


图6 焊缝中心区组织

## 4 充气箱氦检漏

充气箱激光焊接后实物如图 7 所示,经检查发现充气箱整体成形良好,焊接变形小,焊缝表面光滑平整。对已完成焊接工作的充气箱进行真空法氦质谱检漏试验,试验依据 GB/T 36176—2018《氦质谱真空检漏方法》执行<sup>[17]</sup>。真空法氦质谱检漏法具有检测灵敏度高、可精确定位等优点,能实现复杂结构或大容器产品的检漏。氦检漏流程如图 8 所示,将待检充气箱放在真空箱内,首先利用抽空泵对真空箱和充气箱分别抽真空,然后对充气箱充入氦气作为示踪气体,当充气箱泄露时氦气进入真空箱,能很快被与真空箱连接的氦质谱仪测量出来。本次检测过程如下:首先充气箱抽真空至 10 Pa,然后充入六氟化硫至 0.2 MPa,静置 1 天左右,最后通过氦质谱检漏仪进行检测。检测结果证明充气箱无漏气情况,密封性良好<sup>[18]</sup>。



图7 充气箱焊接后实物

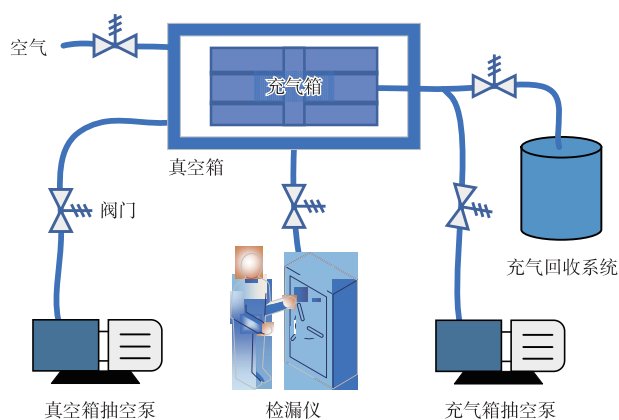


图8 充气箱氦检示意图

## 5 结论

针对气体绝缘金属开关设备充气箱焊接工艺,开发了用于充气箱产品的自动化焊接工装,实现了充气箱的精准定位和辅助焊接,操作简单,稳定可靠,大幅提高了焊接生产效率。通过试验发现,3 mm厚304不锈钢充气箱激光角焊缝优选焊接参数为:激光功率1 800 W,焊接速度为20 cm/min,保护气为 $N_2$ 。通过氦质谱检漏发现充气箱无漏气现象,密封性良好。

## 参考文献

[1] 陈波,许爱东,韩利群,等. 环保气体绝缘金属封闭开关设备研究现状及发展动向[J]. 科技创新与应用. 2017(03): 1-3.

- [2] 张红恩,赵建磊,史鸿威. 光纤激光在充气柜制造中的应用[J]. 焊接技术. 2012, 41(06): 28-29.
- [3] 张彦东,滕彬,陈永秋,等. 发动机稳定器激光焊接工艺[J]. 机械制造文摘(焊接分册). 2022,(04): 10-14.
- [4] 欧阳轶,邢少敏. A286 不锈钢薄板激光焊接工艺性研究[J]. 热加工工艺. 2021, 50(09): 144-147.
- [5] 沈亚仁. 2205 双相不锈钢薄板端接头焊接工艺[J]. 电焊机. 2021, 51(02): 70-73.
- [6] 王新明,康凯,冯小东. 激光焊接与传统焊接的区别及比较分析[J]. 产业与科技论坛. 2016, 15(24): 55-56.
- [7] 陈勇,陆建华,徐育娘,等. 不同焊接工艺下304不锈钢薄壁管件纵缝微观组织及力学性能研究[J]. 热加工工艺. 2022, 51(11): 127-131.
- [8] 王丽娟,牛瑞利. 不锈钢激光点焊接头组织和力学性能研究[J]. 精密成形工程. 2022, 14(10): 120-125.
- [9] 金越越,封芸,梁进智,等. 密封高压气体的激光焊接工艺研究[J]. 激光与红外. 2016, 46(10): 1195-1199.
- [10] 李竹洁,吕俊霞,邹江林,等. 氮气保护不锈钢激光焊接接头组织及力学性能[J]. 中国激光. 2016, 43(12): 91-98.
- [11] 魏文锋. 基于激光视觉焊缝跟踪技术的工业机器人焊接智能产线的设计[J]. 科技创新与应用. 2020,(24): 84-85.
- [12] 杜晓辉,陈凡红,刘帅,等. 压力传感器波纹膜片低应力激光焊接工艺[J]. 光学精密工程. 2023, 31(11): 1652-1659.
- [13] 李庆. SUS304 不锈钢薄板激光焊接工艺及接头性能研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2014: 17-18.
- [14] 杜坤,张丽芳. 激光熔化焊技术的应用及焊缝性能研究[J]. 汽车工艺与材料. 2014,(05): 1-7.
- [15] 王慧. 304 不锈钢激光焊接接头形貌与组织性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2015: 25-28.
- [16] 黄瑞生,李想,邹吉鹏,等.  $Ti_6Al_4V$  合金低真空激光焊接接头形貌特征分析[J]. 焊接学报. 2023, 44(09): 24-29.
- [17] 黄文平,王成智. 基于氦质谱检漏仪下的检漏技术研究[J]. 电子技术与软件工程. 2016,(04): 98-99.
- [18] 廖旭东,杨丹,冯晓,等. 大型真空系统氦检漏率的快速准确检测方法[J]. 真空. 2012, 49(03): 22-25.