

手持激光填丝焊接技术修复超高压输电线路金具的工艺研究

郑三毛,刘东甲

(中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局,云南昆明 650217)

摘要: 激光焊接具有优良的焊接质量和高效率,已在部分行业替代传统的电弧焊接工艺,而手持激光焊接技术的开发提升了作业灵活性,大幅增加了工业领域的接受程度。为进一步提高超高压输电线路用铝合金金具的修复水平,研究了手持激光焊技术的修复可行性,考察了激光功率、光束摆动模式和幅度等参数对修复效果及形貌的影响,同时测试了修复接头相应的抗拉强度、导电性。研究表明:采用手持激光焊接修复技术,在光束为“一”摆动模式下可获得成形良好的修复层,修复层存在多道次组织特征,焊缝中间的晶粒较小,靠近母材处晶粒较大;在合适的激光功率、摆动幅度范围内,线性修补能够一次性实现对细小裂纹类线性缺口的修复且效果显著,修复接头的抗拉强度不低于母材、导电性可达到母材的89.43%、硬度高于母材。综上,采用手持激光填丝焊接可实现铝合金输电金具的修复,有望用于超高压输电线路金具缺口的修复。

关键词: 铝合金金具;手持激光焊接;修复工艺;超高压输电

中图分类号: TG456.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2022)04-0620-06

引文格式: 郑三毛,刘东甲.手持激光填丝焊接技术修复超高压输电线路金具的工艺研究[J].材料研究与应用,2022,16(4):620-625.

ZHENG Sanmao, LIU Dongjia. Research on Hand-Held Filling Wire Laser Welding Repair of Metal Fittings Used in Extra-High Voltage Power Transmission[J]. Materials Research and Application, 2022, 16(4): 620-625.

随着激光器制造技术及焊接枪头制造水平的进步,激光焊接技术在过去几十年发展迅速,在工业领域取得了长足的发展,在部分行业激光焊接逐步取代传统的电弧焊接工艺,其优良的焊接质量及高效率越来越受到重视^[1-3]。近两年来,手持激光焊接设备取得较大的进展,在工业中取得广泛的应用^[4]。手持激光焊接设备结构简单、操作较为方便,且在焊接时不需要复杂的夹具及设置,具有相当的灵活性^[5],焊接过程中产生的弧光、烟尘、飞溅等相比较于电弧焊较少,使得工业领域对手持激光焊接设备的接受程度大幅度增长。

超高压输电线路使用的金具一般由板形、杆形、环形各类形状的部件组成,由于在服役过程中受外力破坏、自然侵蚀等,金具不可避免地出现损坏甚至失效^[6-8]。目前,采用焊接修复技术实现现场修复可

减少更换零部件的数量,然而修复过程中需要高空作业,而且受环境、天气、地形、电磁等因素干扰影响大,传统的电弧修复易出现氧化、气孔、热裂纹等问题。因此,为进一步提高输电金具的修复水平,拟选用手持激光焊接修复的方法来替代电弧焊修复。本文针对铝合金金具,采用手持激光焊接修复的方法进行激光焊接修复,对焊接修复工艺及修复接头的各项性能进行了研究,为手持激光焊接修复用于超高压输电线路的铝合金金具打下基础。

1 实验部分

1.1 实验设备

用于实验研究的手持激光焊接设备由激光器、

水冷机、手持焊枪、控制系统、送丝机等部件组成。激光器为光纤激光器,其输出最大功率为 1.5 kW、波长为 1070 nm;手持激光头准直焦距为 100 mm、

聚焦焦距为 150 mm,传输光纤芯径为 200 μm。手持激光焊接设备如图 1 所示。

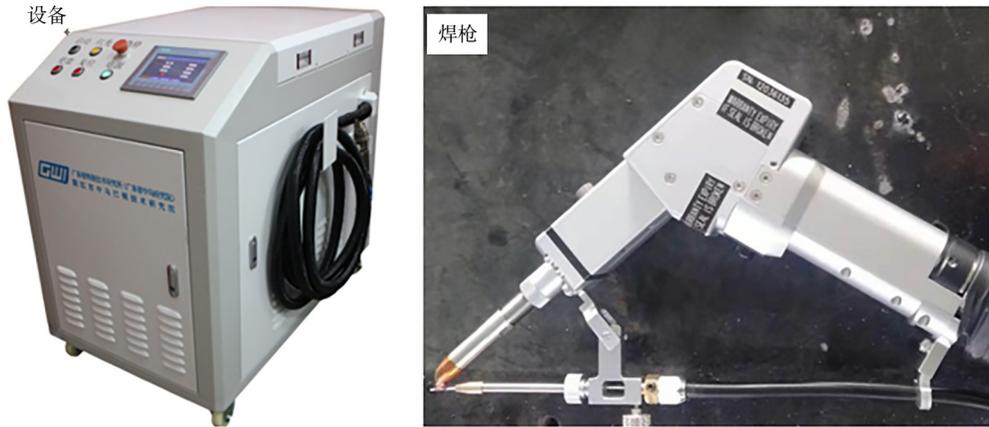


图 1 手持激光焊接设备

Figure 1 Hand-held laser welding equipment

1.2 实验材料

实验母材为 1050A 铝合金金具,选用直径 1.2

mm 的 4043 铝合金焊丝作为填充材料,母材及焊丝成分分别列于表 1 和表 2。

表 1 母材组成成分

Table 1 Chemical composition of base metal

成分	Al	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti
含量 w/%	99.50	≤0.25	≤0.05	≤0.05	≤0.07	≤0.05	≤0.05

表 2 焊丝组成成分

Table 2 Chemical composition of wire

成分	Al	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Fe
含量 w/%	Base	4.5—6.0	≤0.30	≤0.05	≤0.10	≤0.05	≤0.20	≤0.8

1.3 实验方法

为了模拟待修复的缺陷,首先对铝合金金具开具有宽 2 mm、深 2 mm 的坡口,然后对坡口进行单道激光填丝焊接修复。焊前用钢丝刷去除母材表面的氧化膜,并用酒精清除表面油污。焊后沿垂直于焊缝方向制备拉伸试样,拉伸试样尺寸如图 2 所示。

采用 GP-TS2000M 型拉伸机对接头进行拉伸测试,采用 FD-101 型数字便携式涡流导电仪对焊接接头进行电导率测试。

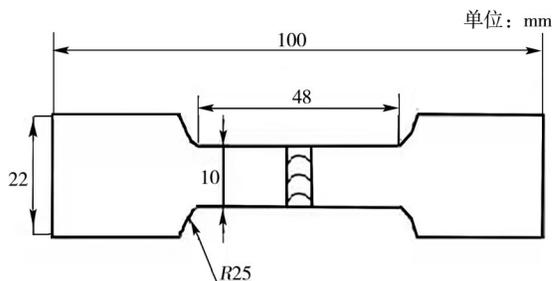


图 2 拉伸试样形状及尺寸

Figure 2 Dimension of tensile specimen

2 结果与分析

2.1 工艺参数对修复效果的影响

2.1.1 光束摆动方式对修复的影响

通过振镜的摆动可实现激光光束多模式摆动,实验研究了在其他参数不变的情况下,光束四种摆动模式对铝合金材料修复表面的影响,结果如图 3 所示。从图 3 可见,四种摆动模式分别是“○”、“△”、“∩”、“—”,其中“—”这种摆动模式获得的焊缝形貌效果较好,故在后续实验研究中光束采用此种摆动方式。

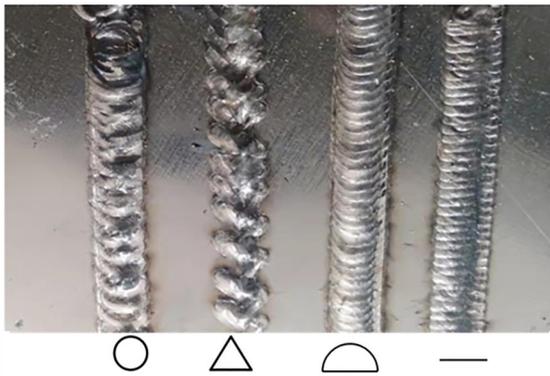


图3 光束摆动模式对接头成形的影响

Figure 3 Effect of beam swing mode on joint formation

2.1.2 工艺参数对修复效果的影响

表3为焊接工艺参数,采用表3的实验参数进行工艺实验研究,实验结果如图4所示。从图4可见:在合适的工艺范围内,线性修补能够实现细小裂纹类线性缺口的一次性修复,且修复效果显著;随着激

光功率的增加及摆动宽度增加,修复表面更为饱满,修复效率提高,成形美观。

表3 焊接工艺参数

Table 3 Laser welding process parameters

序号	激光功率/ W	摆动宽度/ mm	摆动频率/ Hz	送丝速率/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)
1		2.2	10	7
2	1125	3.0	10	7
3		4.0	10	7
4		2.2	10	7
5	1200	3.0	10	7
6		4.0	10	7
7		2.2	10	7
8	1275	3.0	10	7
9		4.0	10	7
10		2.2	10	7
11	1350	3.0	10	7
12		4.0	10	7

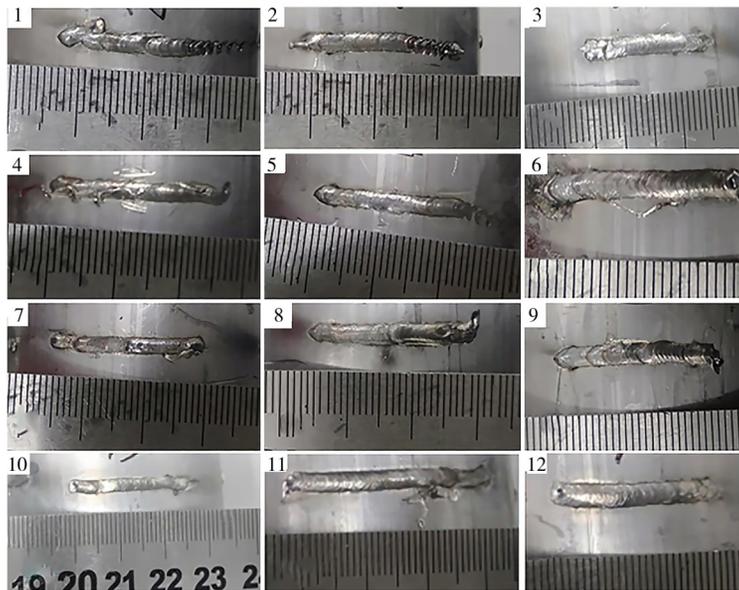


图4 实验结果

Figure 4 Test results

2.2 对焊接接头性能的影响

2.2.1 拉伸性能

对所制备的焊接修复接头进行拉伸性能实验(图5),并且与母材(13号)的拉伸性能进行对比,测试结果列于表4。从表4的结果可以看出:1、11号试样的断裂位置在焊接接头处,其余试样的断裂位置为母材处,表明手持激光焊接修复工艺获得的堆焊接头的抗拉性能不低于母材;在较大的抗拉强度参

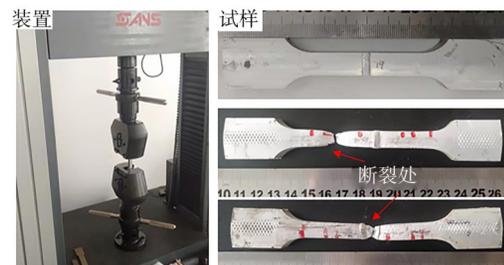


图5 拉伸测试实验

Figure 5 Tensile tests

表 4 试样力学性能检测结果
Table 4 Tensile test results

序号	抗拉强度/MPa	断后延伸率/%	断裂位置
1	49.0	66.01	接头
2	86.0	64.07	母材
3	54.0	65.13	母材
4	79.0	64.30	母材
5	77.0	65.22	母材
6	76.0	60.82	母材
7	79.0	64.50	母材
8	47.0	53.93	母材
9	55.0	60.32	母材
10	46.0	60.50	母材
11	54.0	62.30	接头
12	81.0	64.30	母材
13	76.0	69.00	—

数范围内,修复件的抗拉性能均好于母材,这也表明

了手持激光焊接工艺的适用性及实用性。随后对断裂位置为焊缝的试样进行观察,发现接头存在气孔,这导致了接头抗拉强度的下降。

2.2.2 导电性

对采用手持激光填丝焊接工艺修复的接头进行导电性测试,选择 2、4、7 和 12 试样进行测试,利用数字便携式涡流导电仪进行电导率测试,在焊缝测试 3 点,在焊缝两端的母材各测试 2 点,结果列于表 5。由表 5 可知,母材的电导率为 $30.29 \text{ Ms}\cdot\text{m}^{-1}$,而焊缝处的电导率为 $22.67\text{—}26.93 \text{ Ms}\cdot\text{m}^{-1}$,其最大电导率为母材的 89.43%。

2.2.3 显微硬度及金相组织

对 2 号试样进行维氏显微硬度测试,分别在上、中、下三层进行测试,在载荷为 0.05 kg、加载时间为 10 s 的条件下,最后测量结果如图 6 所示。图 6 可以看出,修复层硬度高于原始母材,修复层从上到下显微硬度逐渐降低。

表 5 导电性能测试结果

Table 5 Electrical conductivity test results

试样	焊缝/ $(\text{Ms}\cdot\text{m}^{-1})$		母材/ $(\text{Ms}\cdot\text{m}^{-1})$		比值/%
	测定值	平均值	测定值	平均值	
2	26.9、26.7、27.2	26.93	29.1、30.8、31.5、31.7	30.77	87.52
4	27.0、25.7、26.7	26.47	29.4、29.3、28.5、31.2	29.60	89.43
7	21.9、21.1、25.0	22.67	28.6、31.3、31.7、31.8	30.85	73.48
12	23.5、23.7、25.4	24.20	28.8、30.1、30.2、30.8	29.97	80.75

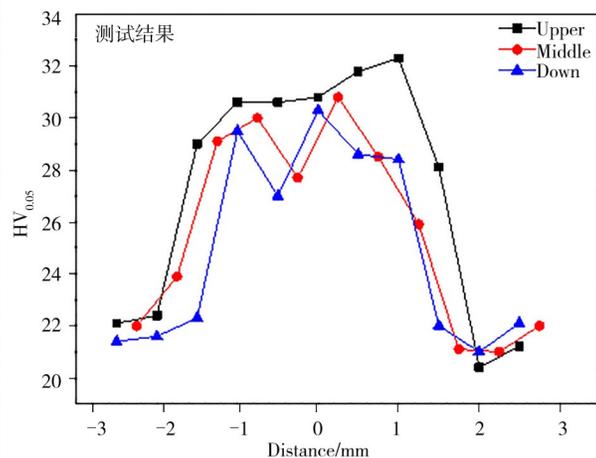
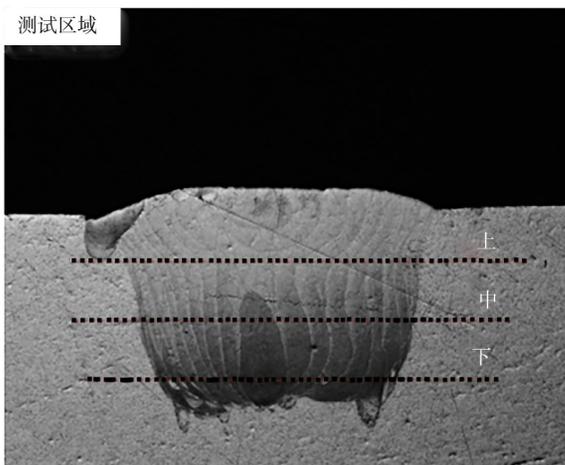


图 6 显微硬度测试结果

Figure 6 Microhardness test results

为进一步分析试样修复层的硬度,对 2 号试样进行了金相分析,不同区域的金相组织如图 7 所示。从图 7 可见,修复层存在多道次组织特征,焊缝中间

的晶粒比较细,靠近母材处晶粒较大,这与接头处硬度的波动相对应。这是因为修复过程中采用的是光束摆动模式,材料因此受到多次热循环的影响。

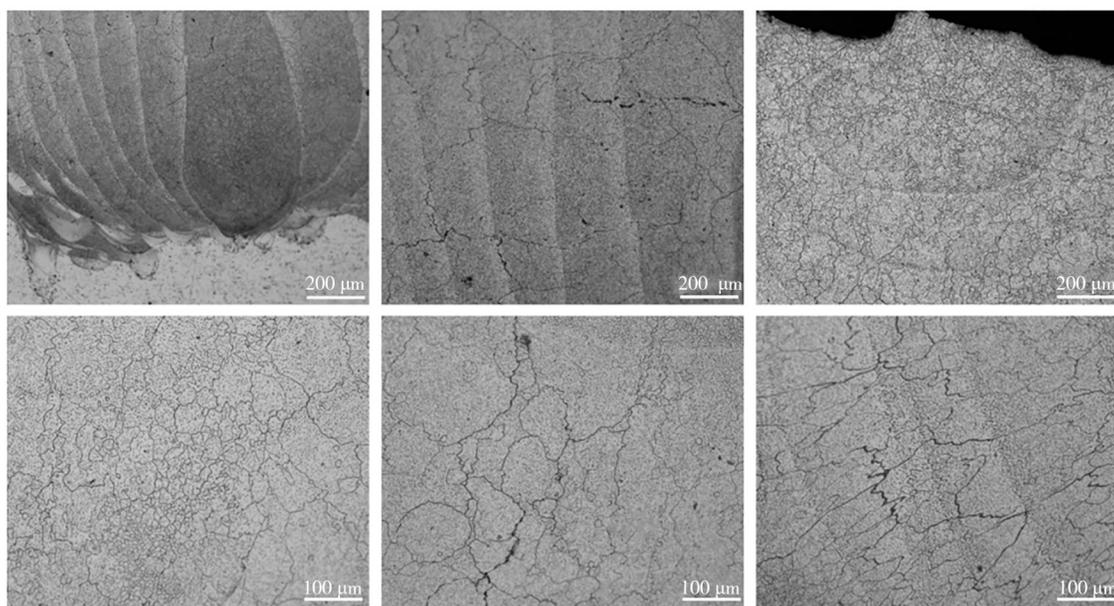


图7 2号试样不同位置的金相组织

Figure 7 Metallographic structure of sample #2 at different locations

3 结论

采用手持激光焊接技术,在合适的工艺范围内能够一次性对细小裂纹类线性缺口进行修复。修复层表面饱满,成形美观。手持激光填丝焊接修复接头的抗拉强度不低于母材,导电性可以达到母材的89.43%。研究表明,采用手持激光填丝焊接有望实现输电线路中铝合金金具的修复工作。

参考文献:

- [1] 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(1):95-102.
 [2] 陶武,杨上陆.铝合金激光焊接技术应用现状与发展趋势[J].金属加工(热加工),2021(2):1-4.

- [3] 武亚鹏.铝合金激光焊接工艺及其应用[J].金属加工(热加工),2020(9):35-37.
 [4] 徐赫唯,王子欣,刘春柏,等.手持激光焊技术焊接汽车涂层钢板的试验研究[J].汽车工艺与材料,2021(1):15-19.
 [5] XIN Y, HUANG Y, GAO S, et al. Development and application of hand-held laser welding system [J]. Journal of Physics Conference Series, 2020, 1650: 022087.
 [6] 叶建锋,周学明,沈祎依.某输电线路地线金具断裂分析[J].湖北电力,2021,45(3):43-48.
 [7] 陈浩,刘俊,郭心爱,等.500 kV 输电铁塔金具闭口销锈蚀原因分析[J].青海电力,2021,40(2):59-62.
 [8] 吴穹.500 kV 超高压输电线路金具挂环断裂原因及预防措施[J].电工技术,2020(13):113-114.

Research on Hand-Held Filling Wire Laser Welding Repair of Metal Fittings Used in Extra-High Voltage Power Transmission

ZHENG Sanmao, LIU Dongjia

(Kunming Bureau of CSG EHV Transmission Company, Kunming 650217, China)

Abstract: Laser welding has excellent welding quality and high efficiency, and has partly replaced the traditional arc welding process. The development of hand-held laser welding technology improves the

flexibility of operation, therefore greatly increasing its industrial acceptance. To further improve the repair level of aluminum alloy fittings for ultra-high voltage transmission lines, the repair feasibility of hand-held laser welding technology was studied, the influence of parameters such as laser power, beam swing mode, and swing amplitude on the repair effect and morphology were studied, and the tensile strength and electrical conductivity of respective repaired joints were tested. Results show that using the hand-held laser welding technology, a well-formed repair layer can be obtained when the beam is in the "—" swing mode. There are multi-pass microstructure characteristics in the repair layer, and the grains in the middle of the weld are relatively small, and the grains near the base metal are larger. With appropriate range of laser power and swing amplitude, linear repair can well repair small crack-like linear gaps at one time. The tensile strength of the repaired joint is not lower than that of the base metal, and the electrical conductivity can reach 89.43% of the base metal, and the hardness is higher than that of the base metal. In summary, the use of hand-held laser wire filling welding can realize the repair of aluminum alloy power transmission fittings, and it reveals significant prospects to be used for repairing gaps in ultra-high voltage transmission line fittings.

Keywords: aluminum alloy fitting; hand-held laser welding; repair technology; extra-high voltage power transmission

(学术编辑:褚欣)