

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.17

航天器用微泵激光焊接气孔形成机理研究

欧阳自鹏¹, 钱龙根^{2,3*}, 梅在林¹, 王 稳¹, 阮世庭⁴, 王 江⁴

1. 上海杭和智能科技有限公司, 上海 201600
2. 常熟理工学院, 江苏 苏州 215500
3. 西安交通大学, 陕西 西安 710049
4. 上海卫星工程研究所, 上海 201109

摘要: 为研究微泵激光焊接过程中的气孔形成机理, 通过试验分析了激光焊接速度、离焦量、保护气体种类和吹气方式对微泵焊缝气孔率的影响规律。结果表明, 随着激光离焦量的增加, 焊缝气孔率逐渐降低, 当激光离焦量小于+3 mm时, 激光焊接模式为深熔焊, 焊缝内部存在较多的工艺型气孔和冶金型气孔; 激光离焦量大于+5 mm时, 激光焊接模式为热导焊, 焊缝内部气孔率显著降低。随着焊接速度的提高, 气孔上浮速度可能低于熔池凝固速度, 导致内部气孔率增加。降低焊接速度、采用N₂保护气和采用尾吹吹气方式均有助于降低微泵焊缝气孔率。

关键词: 微泵; 激光焊接; 气孔; 奥氏体不锈钢

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)04-0117-06

Porosity Formation Mechanism Research in Laser Welding of Micro-pump

OUYANG Zipeng¹, QIAN Longgen^{2,3*}, MEI Zailin¹, WANG Wen¹, RUAN Shiting⁴, WANG Jiang⁴

1. Shanghai Hanghe Intelligent Technology Co., Ltd., Shanghai 201600, China
2. Changshu Institute of Technology, Suzhou 215506, China
3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China
4. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China

Abstract: This paper investigates the mechanism of pore formation in the micro-pump laser welding process and analyzes the influence of laser welding speed, defocus amount, type of shielding gas, and blowing method on the porosity of micro-pump weld seams. The research results indicate that as the laser defocus amount increases, the porosity of micro-pump weld seams gradually decreases. When the laser defocus amount is less than +3 mm, the laser welding mode is deep penetration welding, and there are many process-induced pores and metallurgical pores inside the weld seam. When the laser defocus amount is greater than +5 mm, the laser welding mode is heat conduction welding, and the porosity inside the weld seam significantly decreases. Lowering the welding speed, using N₂ as the shielding gas, and adopting the trailing blowing method all contribute to reducing the porosity of micro-pump weld seams.

Keywords: micro-pump; laser welding; porosity defect; austenitic stain steel

引用格式: 欧阳自鹏, 钱龙根, 梅在林, 等. 航天器用微泵激光焊接气孔形成机理研究[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 117-122.

Citation: OUYANG Zipeng, QIAN Longgen, MEI Zailin, et al. Porosity Formation Mechanism Research in Laser Welding of Micro-pump[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 117-122.

0 引言

航天器服役过程中面临着复杂而恶劣的热流

载荷, 这给航天器热控系统带来了巨大挑战。流体回路技术具有传热效率高、可靠性强、设计灵活等优点, 被广泛应用于航天器热控系统中。微泵是流

收稿日期: 2023-06-12 修回日期: 2023-10-03

基金项目: 江苏省高校自然科学基金面上项目(20KJB460013)

作者简介: 欧阳自鹏(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事激光焊接及激光-电弧复合焊接技术研究。

通讯作者: 钱龙根(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事焊接及其仿真技术研究。E-mail: qianlonggen@163.com。

体回路技术中的重要功能部件,其尺寸精确性、密封性和可靠性直接影响了航天器热控系统的运行稳定性及服役寿命^[1-2]。微泵由前蜗壳和屏蔽套焊接而成,材料均为奥氏体不锈钢。根据相关技术要求,微泵焊接完成后需采用CT探伤检测焊缝内部缺陷。为满足尺寸精确性要求,前蜗壳和屏蔽套之间采用激光焊接。然而微泵激光焊接过程中的气孔形成倾向较大,影响了焊接质量和产品稳定性。因此,必须分析激光焊接气孔形成机理,改进激光焊接工艺,提高一次焊接合格率。

国内外学者对不锈钢激光焊接过程已开展了诸多研究。王茂^[3]对304不锈钢激光焊接气孔问题进行了研究,认为影响304不锈钢激光焊接气孔的首要因素是焊接模式,各种激光工艺参数通过作用于熔池稳定性而影响焊缝气孔率。夏佩云等人^[4]采用激光摆动焊接1Cr18Ni9Ti不锈钢,研究表明,适当提高焊接速度和摆动幅值更利于减小气孔率,“8”形摆动相比线性摆动可以获得更优的焊缝成形,焊缝气孔率更低。梁晓梅等人^[5]采用多种扫描焊方式对某304不锈钢结构件进行了激光焊接,证实通过获取合适的扫描方式和工艺参数能够实现304不锈钢的优质焊接。部分学者^[6]研究了侧吹气体对于不锈钢激光焊接焊缝气孔的影响,并总结了不同侧吹气体下微观组织和力学性能的变化规律。

上述研究大多数是采用激光扫描焊对多种不锈钢结构件进行工艺试验,但针对不锈钢常规激光焊的气孔形成机理和抑制手段等方面的研究相对较少。且现有研究大多针对平面对接直焊缝,而微泵焊缝为不等厚对接环焊缝,此类焊缝尚未见研究报道。本文研究了微泵激光焊接过程中的气孔形成机理,并分析了激光焊接速度、离焦量、保护气体种类及吹气方式对微泵焊缝气孔的影响规律。本文的研究对于指导微泵激光焊接工艺设计与优化,促进激光焊接技术完善与发展具有重要意义。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

微泵的前蜗壳和屏蔽套的材料为316L奥氏体不锈钢,其化学成分如表1所示。根据零件设计要

求,前蜗壳与屏蔽套之间的焊缝为不等厚对接环焊缝接头,如图1所示。

表1 316L不锈钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 316L stainless steel(wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
≤0.03	≤1.0	≤2.0	≤0.045	≤0.03	10~14	16~18	2~3	Bal.

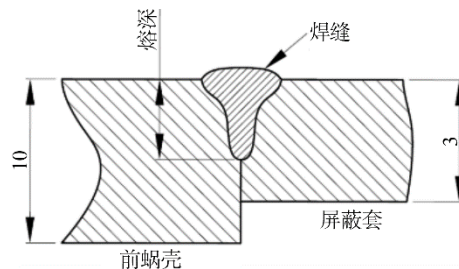


图1 焊接接头示意

Fig. 1 Schematic diagram of the welded joint

1.2 试验设备

采用IPG YLR-500型光纤激光器和Motoman HP20D机器人。激光器输出波长1 060~1 070 nm,额定输出功率500 W,激光器实际输出功率采用模拟量控制。系统配备PRECITEC YW30普通焊接头,焊接头配备横向侧吹气帘。

1.3 试验方法

焊接前将激光束固定,并将微泵装夹于水平精密转台上,通过控制水平转台实现单向匀速转动完成微泵环缝的焊接,如图2所示。设置激光焊接参数为:焊接速度范围为5~16.6 mm/s,激光功率300~500 W,激光离焦量0~+10 mm。

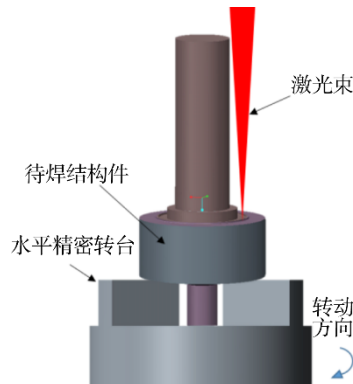


图2 微泵激光焊接示意

Fig. 2 Laser welding process of micro-pump

焊接过程中,在熔池周围设置不锈钢保护气嘴,保护气采用99.99% N₂或Ar,气体流量范围为20~50 L/min。结合微泵的结构特点,设计了两种吹

气方向:一种是激光在前,保护气在焊接前进方向后方的尾吹保护方式;另一种是激光在前,保护气在焊接前进方向的侧吹保护方式,如图3所示。

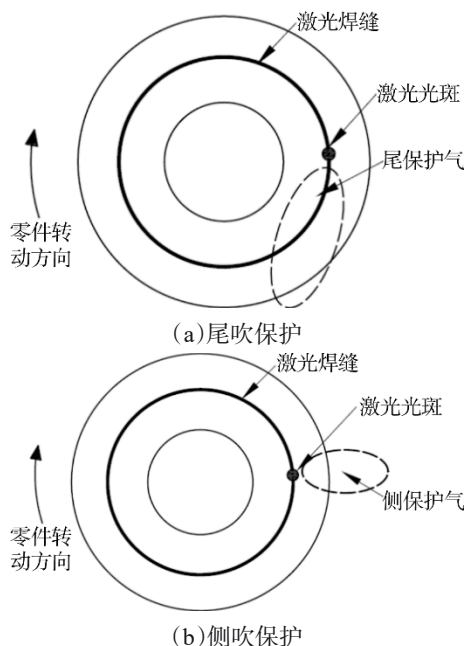


图3 微泵激光焊接不同的吹气保护方式

Fig. 3 Different shielding methods for laser welding of micro-pump

焊接完成后,采用5~10倍放大镜和德国ZEISS Discovery V12型体式显微镜检验焊缝表面质量。采用德国Phoenix V | Tome x M型高分辨率微焦点工业CT检测系统完成焊缝位置的CT扫描检测。CT扫描完成后,对三维CT扫描图片进行灰度图像处理,提取气孔轮廓范围,得到气孔阴影范围占焊缝面积的比率,以此指标衡量焊缝气孔率。

假设气孔区域面积为 S_1 ,焊缝其他区域的面积为 S_2 ,则气孔率 p 为:

$$p = \frac{S_1}{S_1 + S_2} \quad (1)$$

2 试验结果和分析

2.1 焊接速度对焊缝气孔率的影响

首先基于单因素实验法研究了焊接速度对微泵激光焊缝熔深和气孔率的影响。图4为激光功率450 W、离焦量+5 mm时不同焊接速度下的微泵焊缝熔深和气孔率。

由图4可知,随着焊接速度的增大,微泵熔焊缝

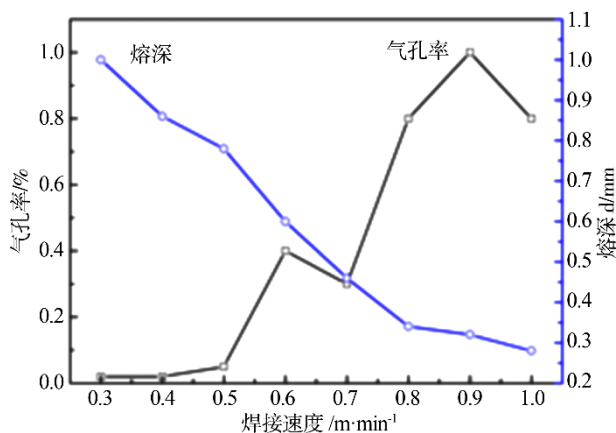


图4 焊接速度对于焊缝熔深及焊接气孔率的影响

Fig. 4 Effect of welding speed on weld penetration and weld porosity

熔深逐渐降低,焊缝内气孔率呈略微上升的趋势。这是由于随着焊接速度的降低,热输入逐渐升高,激光热量通过熔池的热传导效应传递至母材,不断熔化母材,焊缝的熔宽和熔深变大。

2.2 激光离焦量对焊缝气孔率的影响

图5为激光功率450 W、焊接速度0.5 m/min、保护气体Ar流量20 L/min时,不同激光离焦量下的微泵焊缝内部的气孔分布。图6为相同工艺参数下微泵焊缝内部的气孔率变化趋势。



图5 不同激光离焦量下环焊缝纵截面气孔分布

Fig. 5 Distribution of porosity in the longitudinal section of circumferential weld under different laser defocusing distance

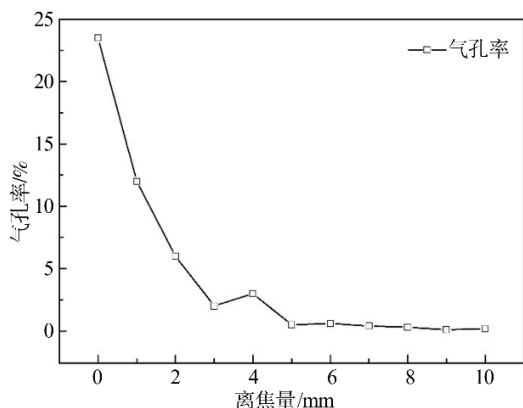


图6 激光离焦量对于焊缝气孔率的影响

Fig. 6 Effect of laser defocus on porosity of weld

由图5可知,随着激光离焦量的增加,焊缝内部气孔率逐渐降低。由图6可知,当激光离焦量小于+3 mm时,焊缝内部气孔率较大;当激光离焦量大于+5 mm时,焊缝内部气孔率显著降低。

当激光离焦量小于+3 mm时,试验过程中可持续观察到快速波动的蓝色火焰,并有金属蒸汽不断从小孔中喷出。上述现象表明当激光离焦量小于+3 mm时,激光焊接模式为深熔焊,材料在激光束的作用下形成局部蒸发气化,小孔和熔池处于高频波动状态,由于液态金属快速凝固,则会导致小孔和熔池的不规则闭合进而产生气孔。此种类型的气孔一般形状不规则,它的产生与焊接工艺参数密切相关,一般可以通过调节相应的工艺参数来降低或者减少。

当激光离焦量大于+5 mm时,焊缝熔深变浅,激光焊接转为热导焊模式,熔池内的气孔有充裕的时间逸出至表面,使得焊缝内部气孔率降低,此时产生的焊缝气孔原因是:熔池冶金反应产生的气体由于温度降低导致溶解度下降,气体在熔池内部经历了形核并长大的过程。此种类型的气孔一般为形状规则的球形气孔,受到熔池热循环作用的影响,此类气孔一般较小,直径普遍在100 μm以内,且较难通过调节工艺参数消除。

焊接过程为热导焊或者是深熔焊,主要的影响因素为功率密度 I :

$$I = \frac{kP}{\pi r^2} \quad (2)$$

式中 k 为材料对激光的吸收比; P 为激光功率; r 为光斑半径。

在实际激光焊接过程时,很难准确测量光斑半径,通常采用离焦量作为焊接工艺参数,为此应将式(2)中的光斑半径 r 换算成离焦量 Δf 。图7为激光聚焦光束示意图。

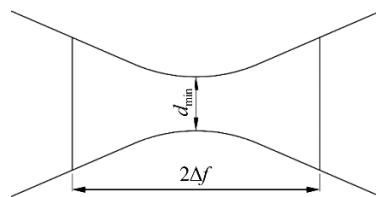


图7 激光聚焦示意

Fig. 7 Schematic diagram of laser focused

在距最小焦斑很近时,光束呈高斯分布,因此光斑半径与焦点位置的关系可表示为:

$$r = \frac{d_{\min}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{4\lambda\Delta f}{\pi d_{\min}^2} \right)^2} \quad (3)$$

式中 f 为透镜焦距; $d_{\min}$ 为聚焦光斑最小直径; λ 为激光波长。

将式(3)代入式(2)中得到:

$$I = \frac{4kP}{\pi d_{\min}^2 \left[1 + \left(\frac{4\lambda\Delta f}{\pi d_{\min}^2} \right)^2 \right]} \quad (4)$$

由式(4)可见,激光辐射照度 I 与激光功率 P 成正比,与离焦量 Δf^2 成反比。因此,影响激光焊接模式最主要的因素为离焦量 Δf ,其次是激光功率 P 。

图8为激光离焦量为0 mm时微泵焊缝内部气孔分布。如图8a所示,当激光离焦量为0时,单个气孔尺寸可达0.7 mm,气孔形状有近球形和不规则形。上述试验结果证实了当激光离焦量小于+3 mm时,微泵焊接过程属于激光深熔焊模式,气孔中既有来不及逸出的冶金型气孔,也有小孔不规则闭合产生的工艺型气孔。图8b、8c的结果表明,尺寸较大的气孔基本分布在焊缝底部位置。而在焊缝侧边位置,气孔尺寸逐渐变小,位置逐渐上移。分析可知,在焊接过程中,焊缝中心较深的位置处凝固速度快,工艺气孔无法及时逸出而残留在焊缝底部,冶金型气孔可能无法克服熔池粘性作用,残留在焊缝中间位置。

2.3 保护气体种类对焊缝气孔率的影响

焊接过程中,保护气体直接作用于熔池,其流量、种类、吹气方式对接头质量具有显著影响^[6-10]。

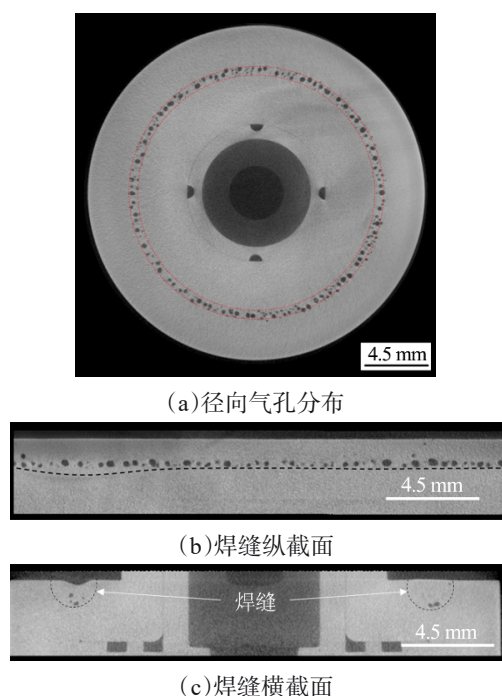


图8 激光离焦量为0时的焊缝气孔分布

Fig. 8 Distribution of porosity in the weld seam under 0 laser defocusing

本文研究了保护气体种类和吹气方式对焊缝微泵气孔率的影响,图9为纯度为99.99%的 N_2 和Ar作为保护气时微泵结构件的焊缝工业CT影像。

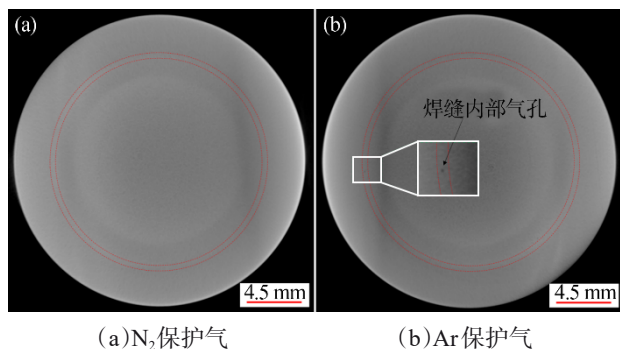


图9 不同种类的保护下焊缝气孔分布

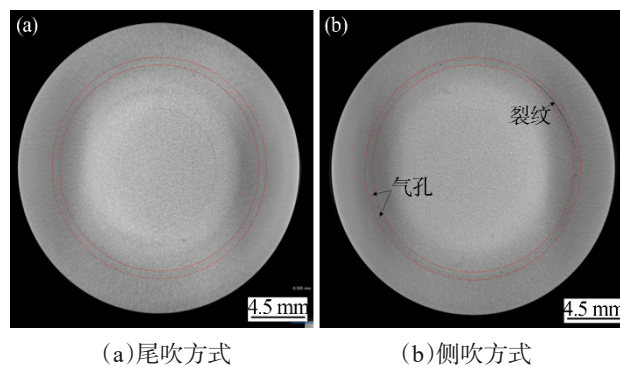
Fig. 9 Distribution of weld porosity after welding with different types of shielding gas

由图9可知,采用 N_2 保护的焊缝内部没有气孔存在,而采用Ar保护的焊缝内部存在少量直径在20~40 μm 的微型气孔。在微泵激光焊接时,保护气体一方面吹走了等离子体和烟尘,另一方面在熔池和热影响区附近形成惰性环境,防止焊缝高温氧化。由于Ar是典型的惰性气体,采用Ar保护焊缝时,不易与不锈钢溶液发生反应。由于Ar不溶于液体金属,此时焊缝中的Ar气泡只能通过浮力和熔池

对流运动逸出。当焊接速度较快时,其逸出窗口时间缩短,易形成气孔。而 N_2 作为保护气时,可与奥氏体不锈钢中的铬元素发生化学反应形成CrN化合物。由于氮气在不锈钢熔池中具有一定的溶解度,熔池中的气泡数量减少,焊缝内部无可见气孔。

2.4 保护气体吹气方式对焊缝气孔率的影响

由于微泵直径最大处只有25 mm,喷嘴的布置和吹气方向会对焊缝成形和质量造成重要影响。图10为不同保护气吹气方式下的焊缝气孔分布。

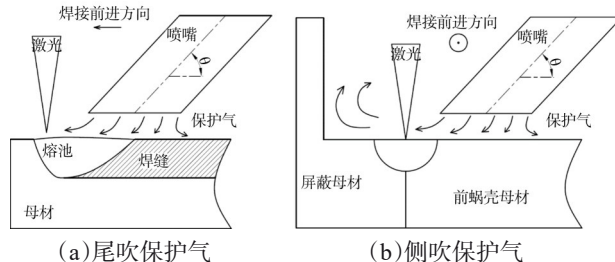


(a)尾吹方式 (b)侧吹方式

图10 吹气方式对接头质量的影响

Fig. 10 The influence of feeding method on the quality of joints

如图10所示,采用尾吹保护气方式可获得成形质量良好、内部无气孔的焊缝,而采用侧吹保护气时,焊缝内部极易出现气孔和纵向裂纹等缺陷。由于微泵结构特殊性,不同的吹气方式会导致熔池上方的气压和气流发生较大变化。尾吹保护气机侧吹保护气的作用方式如图11所示。



(a)尾吹保护气 (b)侧吹保护气

图11 尾吹保护气及侧吹保护气示意

Fig. 11 Schematic diagram of tail blowing method and side blowing method

在使用尾吹保护气时,焊接结构与平板对接接头类似,后置的保护气喷嘴在向焊接前进方向吹,保护气体在熔池上方形成了一个稳定的层流状态,气流几乎无其他扰动,对熔池形成了较好的保护效果。当使用侧吹保护气时,吹出的保护气将激光等

离子体吹向微泵的屏蔽套外壁,造成保护气体的回流。保护气回流时会卷入空气并卷入熔池形成不规则分布的气孔。

3 结论

本文研究了微泵激光焊接过程中的气孔形成机理,并分析激光焊接速度、离焦量、保护气体种类、吹气方式对微泵焊缝气孔的影响规律,得出结论:

(1)随着焊接速度的提高,气孔上浮速度可能低于熔池凝固速度,从而导致微泵焊缝内部气孔率呈增加。

(2)随着激光离焦量的增加,微泵焊缝内部气孔率逐渐降低。当激光离焦量小于+3 mm时,微泵焊接模式为深熔焊,焊缝内部存在较多的工艺型气孔和冶金型气孔;当激光离焦量大于+5 mm时,微泵焊接模式为热导焊,焊缝内部气孔率显著降低;

(3)与Ar相比,采用N₂作为保护气可有效抑制微泵内的气孔形成。

(4)采用尾吹法能够保持熔池附近气压环境相对稳定,从而提高微泵焊接过程稳定性,减少气孔和裂纹形成。

参考文献:

- [1] 童叶龙,李国强,耿利寅.航天器精密控温技术研究现状[J].航天返回与遥感,2016,37:1-8.
TONG Y L, LI G Q, GENG L Y. A Review on Precise Temperature Control Technology for Spacecraft [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2016, 37: 1-8.
- [2] 曹建光,顾燕萍,陈钢,等.微泵驱动流体回路主动热控系统在轨测试试验研究[J].航天器环境工程,2017,34:343-9.
CAO J G, GU Y P, CHEN G, et al. The flight experiments of active thermal control system with micro-mechanical pumped fluid loop [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2017, 34: 343-349.
- [3] 王茂.不锈钢对接接头激光焊接气孔抑制试验研究[D].湖南:长沙理工大学,2020.
WANG M. Experimental study on porosity suppression in laser welding of stainless steel butt joints [D]. Hunan: Changsha University of Science & Technology,

2020.

- [4] 夏佩云,封小松,王春明,等.激光摆动焊接工艺参数对不锈钢焊缝成形与气孔率的影响[J].焊接学报,2023,44(04):39-44+131.
XIA P Y, FENG X S, WANG C M, et al. Effect of parameters on weld formation and porosity of stainless steel in laser oscillating welding [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2023, 44 (04) : 39-44+131.
- [5] 梁晓梅,黄瑞生,刘金湘,等.核电用304不锈钢扫描激光微连接工艺研究[J].电焊机,2020,50(07):53-58.
LIANG X M, HUANG R S, LIU J X, et al. Research on scanning laser micro-connection technology of 304 stainless steel for nuclear power [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(07): 53-58.
- [6] SUN J, NIE P, FENG K, et al. The elimination of pores in laser welds of AISI 304 plate using different shielding gases [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 248: 56-63.
- [7] 周媛,蔡艳,衡昊坤,等.侧吹气体对奥氏体不锈钢激光焊缝组织和耐腐蚀性能的影响[J].中国激光,2017,44:113-120.
ZHOU Y, CAI Y, HENG H K, et al. Influence of Side Assist Gas on Microstructure and Corrosion Resistance of Welds of Austenitic Stainless Steel in Laser Welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44: 113-120.
- [8] 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,2016,43:91-98.
LI Z J, LV J X, ZOU J L, et al. Microstructure and Mechanical Property of Joints in Laser Welding of Stainless Steels with Nitrogen Shielding Gas [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43: 91-98.
- [9] 邓宝柱,马成勇,彭云,等.氮对316L不锈钢焊缝凝固模式和组织的影响[J].焊接学报,2010,31:89-92+117.
DENG B Z, MA C Y, PENG Y, et al. Effect of nitrogen on solidification mode and microstructure of 316L stainless steel [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2010, 31: 89-92+117.
- [10] 王鹤,杨勇.氮气/氩气对316不锈钢激光焊接的影响[J].热加工工艺,2018,47:207-209.
WANG H, YANG Y. Effect of N₂ or Ar Protective Atmosphere on Laser Welding of 316 Stainless Steel [J]. Hot Working Technology, 2018, 47: 207-209.