

5083 铝合金厚板超窄间隙激光填丝焊 成形缺陷研究

谢余发生^{1,2}, 黄坚^{1,2}, 王伟^{1,2}, 王欢³, 华学明^{1,2}

¹上海交通大学材料科学与工程学院上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240;

²高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240;

³沪东中华造船(集团)有限公司, 上海 200129

摘要 针对 5083 铝合金厚板激光焊接中易出现的未熔合倾向和气孔缺陷问题, 利用光纤激光对厚度为 20 mm 的 5083 铝合金进行了超窄间隙填丝焊接试验。分析了激光功率、焊接速度和送丝速度对未熔合倾向和气孔缺陷的影响。结果表明, 增加激光功率、减小焊接速度或送丝速度将会减小未熔合倾向; 气孔缺陷将随激光功率和焊接速度的减小而减小, 随送丝速度的增加先减小后增大。采用优化的工艺参数, 即光丝间距为 +1 mm、焊接速度为 0.42 m/min、激光功率为 3.8 kW、送丝速度为 3.5 m/min、离焦量为 +20 mm, 实现了深度为 17 mm 的超窄间隙坡口的 5083 铝合金激光填丝焊接, 焊缝无未熔合缺陷, 气孔率减小至 0.25%。

关键词 激光技术; 5083 铝合金厚板; 超窄间隙; 激光填丝焊接; 成形缺陷

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0302008

Ultra-Narrow Gap Laser Wire Filling Welding Forming Defects of 5083 Aluminum Alloy Thick Plate

Xie Yufasheng^{1,2}, Huang Jian^{1,2}, Wang Wei^{1,2}, Wang Huan³, Hua Xueming^{1,2}

¹Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, School of Materials
Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

²Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China;

³Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co., Ltd., Shanghai 200129, China

Abstract To solve the problems of poor fusion tendency and pore defect occurred during the process of laser welding of 5083 aluminum alloy thick plate, a fiber laser is used in the ultra-narrow gap wire filling welding test for 5083 aluminum alloy with the thick of 20 mm. The effects of laser power, welding speed and wire feed rate on poor fusion tendency and pore defect are analyzed. The results show that increasing laser power, decreasing welding speed and decreasing wire feed rate are beneficial to reducing poor fusion tendency. Pore defects can be reduced when we reduce laser power or welding speed, and decrease first and then increase while the wire feed rate is increasing continually. The laser wire filling welding for 5083 aluminum alloy with ultra-narrow gap groove (the depth is 17 mm) is achieved with optimal parameters, i. e., distance between laser and filler wire of +1 mm, welding speed of 0.42 m/min, laser power of 3.8 kW, wire feed rate of 3.5 m/min and defocus distance of +20 mm. The poor fusion is eliminated and the porosity is reduced to 0.25%.

Key words laser technique; 5083 aluminum alloy thick plate; ultra-narrow gap; laser wire filling welding; forming defect

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 140.3510

收稿日期: 2016-10-28; 收到修改稿日期: 2016-11-30

基金项目: 工业与信息化部高技术船舶科研计划

作者简介: 谢余发生(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: beanwz@163.com

导师简介: 黄坚(1967—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光焊接方法、组织与性能以及激光表面改性等方面的研究。E-mail: jhuang@sjtu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

我国是天然气进口大国,目前液化天然气(LNG)船是 LNG 的主要海上运输载体,是 LNG 远洋贸易的重要保障^[1]。LNG 船的液货围护系统是独立于船体的特殊构造,目前营运的 LNG 船的液货围护系统的类型主要包括薄膜型和独立型^[2]。独立型液货围护系统由 5083 铝合金等金属材料组成,能够独立承受载荷,这类围护结构的材料厚度大,焊接质量要求高、难度大且工作量大,因此焊接技术是 LNG 船的液货围护系统建设的核心技术之一^[3]。如何实现厚板铝合金的高效、高质量焊接是目前面临的重大挑战。

近年来,坡口间隙宽度平均值小于 6 mm 的超窄间隙激光填丝焊综合了激光焊和窄间隙焊的特点,具有焊接变形小、热影响区窄和可通过填丝调整焊缝冶金成分等优点,有关厚板焊接的研究和应用越来越广泛^[4-7]。王柏平等^[8]和张波等^[9]分别采用 CO₂ 激光和光纤激光,并利用多层激光填丝焊工艺分别实现了厚度为 16 mm 的不锈钢和厚度为 40 mm 的高强钢的超窄间隙激光焊接。Yu 等^[10]采用窄间隙光纤激光填丝焊的方法焊接了厚度为 17 mm 的 Q235 钢,指出未熔合和气孔是窄间隙激光焊接最主要的焊接缺陷,并讨论了焊接缺陷的成因。铝合金的焊接难度明显大于钢的焊接,在铝合金焊接领域,肖荣诗等^[11]利用 3500 W 的 CO₂ 激光器,将焊丝从双面 U 形坡口垂直送入,并采用激光束倾斜入射的方式,减少了焊缝气孔,完成了厚度为 20 mm 的铝合金的窄间隙激光焊接。Dittrich 等^[12]采用窄间隙激光填丝多层焊的方法对厚度大于 20 mm 的 6060 铝合金进行了焊接,研究结果表明,通过光束摆动可解决侧壁未熔合等问题,但仍有不少焊接气孔存在,这是后期研究待解决的主要问题。目前,针对铝合金厚板窄间隙激光填丝焊的研究较少,相关焊接工艺及焊接缺陷等问题缺少详细的研究。基于以上问题,针对厚度为 20 mm 的 5083 铝合金,采用光纤激光和填充焊丝的方式进行了超窄间隙多层焊接试验,研究了主要焊接参数对未熔合倾向和气孔缺陷的影响。

2 试验条件与方法

试验中选用的母材为退火状态的 5083 铝合金,铝合金板的厚度为 20 mm,板长为 130 mm。填充焊丝牌号为 ER5183(直径为 1.2 mm)。母材及填充焊丝的化学成分如表 1 所示。试验采用 IPG 公司生产的 10 kW 光纤激光器和 KUKA 公司生产的 6 轴焊接机器人,送丝设备使用 Fronius 公司生产的 TPS500 气保护焊机的送丝系统。后置侧吹气体为纯氩气,用来抑制等离子体和保护焊接熔池。这里主要研究填充焊道的缺陷情况,为排除对接装配间隙和钝边焊缝成形波动等因素对试验的干扰,直接在厚板上开深槽的焊接坡口,坡口深度为 17 mm,坡口底边宽度为 3 mm,单边角度为 4°,焊接坡口示意图如图 1 所示。

表 1 母材及填充焊丝的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of base metal and filler wire (mass fraction)

Type	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
5083Al	0.4	0.4	0.1	0.4-1.0	4.0-4.9	0.05-0.25	0.25	0.15	Balance
ER5183	0.4	0.4	0.1	0.5-1.0	4.3-5.2	0.05-0.25	0.25	0.15	Balance

焊接前,对试板表面进行处理。首先采用饱和氢氧化钠溶液去除板材表面的氧化膜,使用浓度为 10% 的盐酸溶液中和板材表面残余的碱液,用水冲洗板材表面后,将其吹干并放入真空干燥箱,12 h 后再进行焊接试验。焊接试验过程中,每个坡口内均采用激光填丝焊接方法焊两道焊缝。激光填丝焊的基本焊接参数设置为:激光功率为 4.0 kW,焊接速度为 0.42 m/min,送丝速度为 3.5 m/min,光丝间距为 +1 mm,离焦量为 +20 mm,侧吹氩气流量为 20 L/min。光丝间距为待焊表面上焊丝末端沿焊接方向离开激光束中心的距离。由前期的准备试验可知,光丝间距对焊接稳定性影响很大,当光丝间距为 +1 mm 时,焊缝表面最平稳,因此确定光丝间距为 +1 mm。通过改变激光功率、焊接速度和送丝速度,观察其对未熔合和气孔焊缝成形缺陷的影响。

气孔缺陷程度由气孔的多少和大小来反映。焊接试验完成后对焊缝进行侧向 X 射线无损探伤检测,X 射线无损检测示意图如图 2 所示,探伤方向垂直于焊缝纵剖面。得到 X 射线探伤底片后,利用相机拍摄底片上完整的气孔分布图,使用 Photoshop 和 Image J2x 软件标定和统计焊缝中的气孔情况。经 Photoshop 和 Image-J2x 处理后的图片分布如图 3 所示。为了表征窄间隙填充焊缝中的气孔缺陷,将气孔率 P_r 作为评价参数,气孔率定义为规定长度焊缝上的气孔总面积占焊缝纵剖面面积的比率,即

$$P_r = \frac{\sum A_p}{LH}, \quad (1)$$

式中 L 为所检测焊缝的设定长度, 去掉各 15 mm 的焊缝首尾不稳定段, 试验中 L 取 100 mm; H 为焊缝的高度; $\sum A_p$ 为 L 长度焊缝上的气孔总面积。计算了焊缝中的气孔平均直径, 以反映气孔的尺寸。

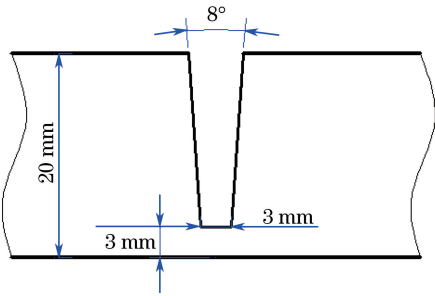


图 1 焊接坡口示意图

Fig. 1 Diagram of welding groove

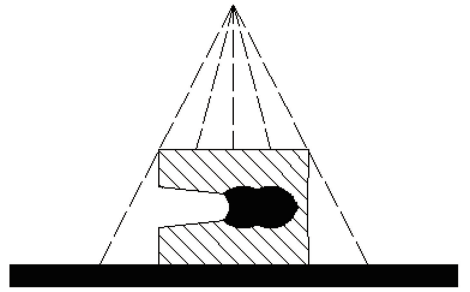


图 2 X 射线无损检测示意图

Fig. 2 Diagram for X-ray nondestructive test

焊缝对坡口侧壁母材和前道焊缝的熔化能力不足时, 会产生侧壁未熔合和层间未熔合的缺陷, 这种熔化能力反映了未熔合缺陷的倾向。通过线切割取样制备金相, 将母材研磨抛光后, 用浓度为 10% 的氢氟酸溶液对其进行腐蚀, 以观察焊缝的宏观形貌。在焊缝横截面上测量焊缝在侧壁的熔深 D_w , 以此反映焊缝对侧壁的熔化能力, D_w 值越大, 侧壁出现未熔合的倾向越小。测量焊缝在前道焊缝中形成的熔深 H_p , 以此来反映焊缝层间的熔化能力, 即层间出现未熔合的倾向。超窄间隙激光填丝焊缝的几何参数示意图如图 4 所示。每个试样的 D_w 取左右两侧值的平均值。

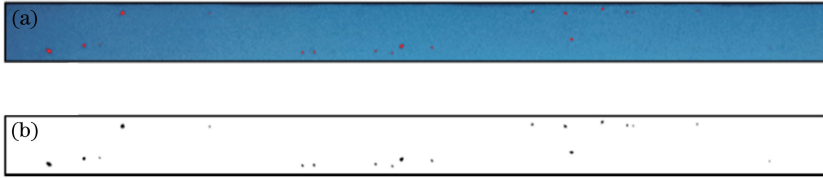


图 3 使用不同软件标定后的气孔示意图。(a)使用 Photoshop; (b)使用 Image-J2x

Fig. 3 Diagram of pores after demarcating using different softwares. (a) Using Photoshop; (b) using Image-J2x

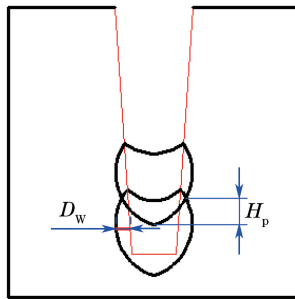


图 4 超窄间隙激光填丝焊缝的几何参数示意图

Fig. 4 Diagram of geometry parameters of ultra-narrow gap laser wire filling weld

3 试验结果与分析

3.1 焊接参数对未熔合倾向的影响

3.1.1 激光功率的影响

图 5 为激光功率对 5083 铝合金厚板超窄间隙激光填丝焊缝未熔合倾向的影响。由图 5 可知, 侧壁熔深 D_w 和层间熔深 H_p 均随激光功率的增加而增加, 而且 H_p 的增加速率 (2.61 mm/kW) 明显大于 D_w 的增加速率 (0.99 mm/kW)。当激光功率为 3.0 kW 时, 焊丝熔化并堆积在坡口底部, 而侧壁和底部的母材未被熔

化, D_w 和 H_p 接近于 0, 说明激光能量太小, 只能熔化焊丝, 不足以继续熔化母材; 当激光功率增加到 3.5 kW 时, 焊丝金属与侧壁出现一定的熔深 ($D_w = 0.94$ mm), 但是坡口底部的熔深仍基本为 0; 当激光功率继续增大到 4.0 kW 时, 侧壁和底部的母材均出现一定的熔深; 当激光功率为 4.5 kW 时, D_w 增加至 1.5 mm, H_p 增加至 3.82 mm; 当激光功率为 4.0 kW 时, 两道焊缝之间有很大的重叠部分, 且第二道焊缝已经出现轻微的咬边, 说明此时激光能量过大。因此, 合适的激光功率为 4.0 kW 左右, 此时激光能量可以使送入的焊丝顺利熔化并与坡口侧壁和底部的母材形成合适的熔深, 能够避免未熔合缺陷的产生。

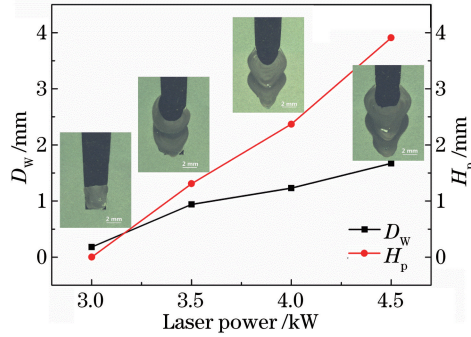


图 5 激光功率对焊缝未熔合倾向的影响

Fig. 5 Effect of laser power on weld poor fusion tendency

3.1.2 焊接速度的影响

图 6 为焊接速度对 5083 铝合金厚板超窄间隙激光填丝焊缝未熔合倾向的影响。由图 6 可知, 随着焊接速度的增加, D_w 和 H_p 均呈现减小的趋势, 当焊接速度由 0.36 m/min 增加到 0.60 m/min 时, D_w 和 H_p 分别减小了 17.7% 和 11.8%。焊接速度较小时, 焊接热输入较大, 有利于焊丝的熔化和侧壁的熔合。随着焊接速度的增加, 焊接线能量减小, 分布到母材单位长度上的激光能量减小, 侧壁的熔深减小, 进而使焊接时对激光光斑的对中要求提高。因此, 较小的焊接速度 (0.36~0.40 m/min) 有利于抑制未熔合缺陷的产生。

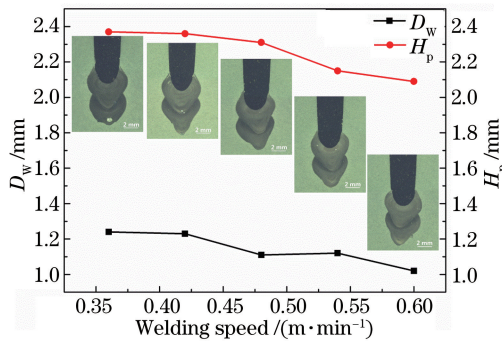


图 6 焊接速度对焊缝未熔合倾向的影响

Fig. 6 Effect of welding speed on weld poor fusion tendency

3.1.3 送丝速度的影响

图 7 为送丝速度对 5083 铝合金厚板超窄间隙激光填丝焊缝未熔合倾向的影响。由图 7 可知, 随着送丝速度的增加, H_p 逐渐减小。当送丝速度从 2.5 m/min 增加到 3.5 m/min 时, H_p 减小的幅度不大; 当送丝速度增加到 4.0 m/min 时, H_p 急剧减小, 即层间未熔合倾向明显增大, 这是因为激光能量更多地用在了熔化填充焊丝上, 所以用到坡口底部的激光能量随之减少。从图 7 还可以看出, 侧壁熔深 D_w 随送丝速度的增加呈现先增加后减小的趋势, 但变化范围较小 (仅为 0.13 mm), 说明送丝速度对侧壁熔深的影响不大。

3.2 焊接参数对气孔缺陷的影响

3.2.1 激光功率的影响

图 8 为激光功率对 5083 铝合金厚板超窄间隙激光填丝焊缝气孔率和气孔平均直径的影响。由图 8 可知, 气孔率和气孔平均直径均随激光功率的增加而增大, 当激光功率由 3.5 kW 增加到 4.5 kW 时, 气孔率由 0.93% 增大到 2.10%, 气孔平均直径由 0.28 mm 增大到 0.42 mm。出现上述现象的原因是: 1) 随着激光功

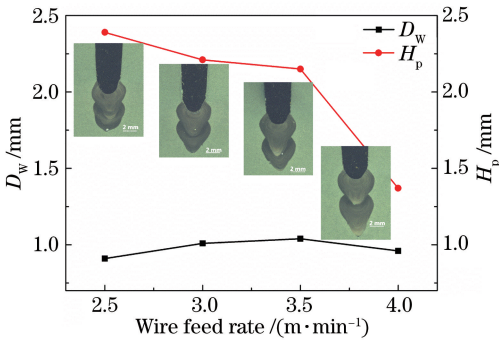


图7 送丝速度对焊缝未熔合倾向的影响
Fig. 7 Effect of wire feed rate on weld pool fusion tendency

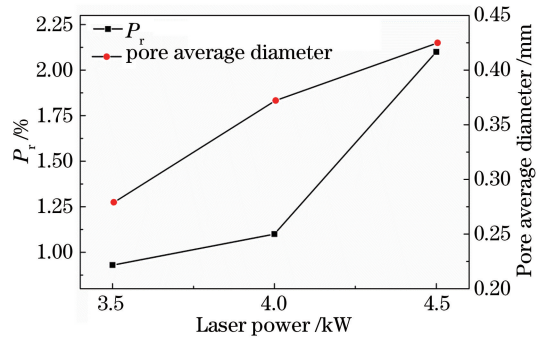


图8 激光功率对焊缝气孔率和气孔平均直径的影响
Fig. 8 Effect of laser power on weld porosity and pore average diameter

率的增加,焊缝熔深增加,气泡逸出的路径增长,底部产生的气泡需要更长的时间才能逸出,使得气孔率增大;2)激光功率的增加使得小孔深度增加,从而使得因小孔崩塌导致的气孔尺寸增大。因此,对于5083铝合金厚板超窄间隙激光多层焊接,在保证熔合状况良好的情况下,应采用较小的激光功率。

3.2.2 焊接速度的影响

图9为焊接速度对5083铝合金厚板超窄间隙激光填丝焊缝气孔率和气孔平均直径的影响。由图可知,随着焊接速度的增加,气孔率和气孔平均直径均呈现增大的趋势。当焊接速度由0.36 m/min增加到0.55 m/min时,气孔率由0.92%增大到1.70%,这主要是由于随着焊接速度的增加,液态金属凝固速度加快,缩短了焊缝液态熔池存在的时间,导致气泡不容易逸出而形成气孔;当焊接速度继续增加到0.60 m/min时,气孔率并未继续增大,保持在1.70%,这主要是由于焊接速度的进一步增加缩短了熔池液态金属的滞留时间,气体溶解量减少。另外,当焊接速度由0.36 m/min增加到0.60 m/min时,气孔平均直径由0.25 mm增大到0.41 mm,这是由于随着焊接速度的增加,匙孔沿焊接方向被拉长,此时小孔崩塌导致的气孔尺寸随之增大。

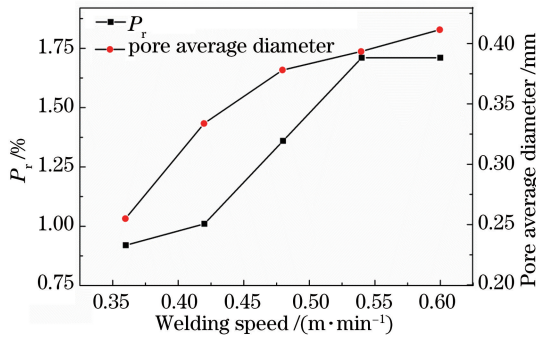


图9 焊接速度对焊缝气孔率和气孔平均直径的影响

Fig. 9 Effect of welding speed on weld porosity and pore average diameter

3.2.3 送丝速度的影响

图10为送丝速度对5083铝合金厚板超窄间隙激光填丝焊缝气孔率和气孔平均直径的影响。由图10可知,随着送丝速度的增加,气孔率和气孔平均直径先减小后增大,送丝速度为3.5 m/min时达到最小值。当送丝速度由2.5 m/min增加到3.5 m/min时,气孔率由0.40%减小到0.20%;当送丝速度进一步增加到4.0 m/min时,气孔率迅速增大到0.50%。相应地,气孔平均直径先由0.40 mm减小到0.30 mm,然后再增大到0.34 mm。分析可知,送丝速度改变了激光能量在焊丝与母材之间的分配^[13]。随着送丝速度的增加,更多的激光能量用于熔化焊丝,较少的激光能量作用于匙孔前壁,使得从前壁喷射出的金属蒸汽对匙孔后方的冲击力减小,匙孔深度也随之减小,提高了激光小孔的稳定性,从而使气孔缺陷数量和尺寸减少;但是,随着送丝速度的进一步增加,焊缝堆高增加,气孔逸出变得更困难,气孔在更长的上浮逸出路径上会进一步增大,这会使气孔缺陷数量也随之增加。综合上述两方面的原因,气孔率和气孔平均直径随送丝速度的增加先减小后增大。

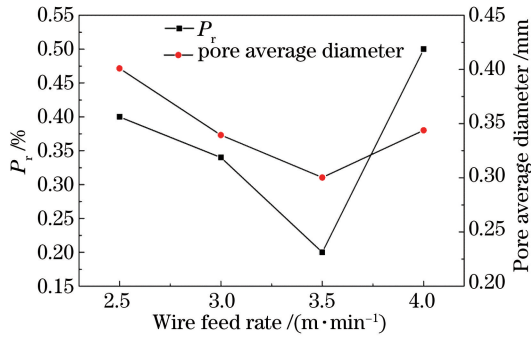


图 10 送丝速度对焊缝气孔率和气孔平均直径的影响

Fig. 10 Effect of wire feed rate on weld porosity and pore average diameter

3.3 深度为 17 mm 的超窄间隙坡口激光填丝多层焊

根据前面获得的激光填丝焊接参数对焊缝成形缺陷的影响规律,确定了 5083 铝合金厚板的超窄间隙坡口激光填丝多层焊的优化工艺参数为:光丝间距为 +1 mm、焊接速度为 0.42 m/min、激光功率为 3.8 kW、送丝速度为 3.5 m/min、离焦量为 +20 mm 和侧吹氩气流量为 20 L/min。使用 7 道激光填丝焊实现了深度为 17 mm 的超窄间隙坡口的 5083 铝合金激光填丝焊接,焊缝截面形貌如图 11 所示。由图 11 可以看出,通过工艺优化,可以完全消除侧壁未熔合和层间未熔合缺陷,虽然仍有少量气孔,但气孔率控制在 0.25%,焊缝质量已有明显改善。

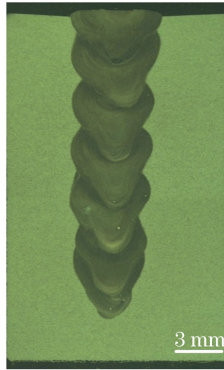


图 11 深度为 17 mm 的超窄间隙坡口激光填丝多层焊焊缝截面形貌

Fig. 11 Weld section morphology of laser wire filling multilayer welding with ultra-narrow gap groove (depth is 17 mm)

4 结 论

通过对 5083 铝合金厚板超窄间隙激光填丝焊成形缺陷的研究,得出以下结论:

- 1) 合适的激光功率和较小的焊接速度有利于抑制未熔合缺陷的产生,送丝速度对侧壁未熔合倾向的影响较小。
- 2) 气孔缺陷随激光功率的增加而增大,随焊接速度的增加而增大,随送丝速度的增加先增大后减小。采用合适的工艺参数可以完全消除未熔合缺陷,并且能够在很大程度上抑制气孔缺陷。
- 3) 采用光丝间距为 +1 mm、焊接速度为 0.42 m/min、激光功率为 3.8 kW、送丝速度为 3.5m/min、离焦量为 +20 mm、侧吹氩气流量为 20 L/min 的工艺参数,实现了深度为 17 mm 的超窄间隙坡口的 5083 铝合金激光填丝焊接,完全消除了未熔合缺陷,气孔率控制在 0.25%。

参 考 文 献

[1] Zhang Yaoguang, Liu Guichun, Liu Kai, *et al.* Progress at home and abroad in the building of liquefied natural gas carriers (LNG carrier)[J]. Marine Economy, 2012, 2(6): 7-14.
张耀光, 刘桂春, 刘 锴, 等. 液化天然气船舶(LNG 船)制造国内外进展[J]. 海洋经济, 2012, 2(6): 7-14.

- [2] Kumar S, Kwon H T, Choi K H, *et al.* Current status and future projections of LNG demand and supplies: A global prospective[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(7): 4097-4104.
- [3] Lin Wenhua, Hua Xueming, Wu Yixiong, *et al.* Reviews of the cargo containment systems of large scale LNG carriers and the welding of related low temperature metals[J]. *Ocean Engineering Equipment and Technology*, 2014, 1(2): 160-165.
林文虎, 华学明, 吴毅雄, 等. 大型液化天然气船围护系统及其低温金属材料焊接技术[J]. *海洋工程装备与技术*, 2014, 1(2): 160-165.
- [4] 黄 坚. 厚板窄间隙激光多层焊接技术进展[J]. *金属加工(热加工)*, 2013(s2): 95-98.
- [5] Zhao Yong, Wang Qingzhao, Huang Jian, *et al.* Microstructures and properties of ultra-narrow-gap multi-pass welded joint of 50 mm turbine rotor steel by laser welding with filler wire[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0203007.
赵 勇, 王清瑛, 黄 坚, 等. 50 mm 转子钢超窄间隙激光填丝焊接接头组织与性能[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0203007.
- [6] Zhang Guowei, Xiao Rongshi. Microstructure and mechanical property of 60 mm-thick 304 stainless steel joint by ultra-narrow gap fiber laser beam welding[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0803007.
张国伟, 肖荣诗. 60 mm 厚 304 不锈钢板超窄间隙光纤激光焊接接头组织性能研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0803007.
- [7] Xu Guojian, Zhong Liming, Huang Zhengxiang, *et al.* Performance of narrow gap laser welding with filling wire for SUS304 stainless steel[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1003001.
徐国建, 钟立明, 杭争翔, 等. SUS304 不锈钢窄间隙激光填丝焊性能[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1003001.
- [8] Wang Baiping, Zhao Yong, Huang Jian. Investigation on microstructure of thick plate steel joint welded by multi-pass laser welding with filler wire[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0203008.
王柏平, 赵 勇, 黄 坚. 厚板不锈钢激光填丝多道焊的接头组织分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0203008.
- [9] Zhang Bo, Huang Jian, Sun Zhiyuan, *et al.* Microstructure and properties of narrow-gap multi-pass high strength thick plate steel joint by fiber laser welding with filler wire[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(17): 70-73.
张 波, 黄 坚, 孙志远, 等. 40 mm 高强钢窄间隙激光填丝焊接接头组织与性能[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(17): 70-73.
- [10] Yu Y C, Yang S L, Yin Y, *et al.* Multi-pass laser welding of thick plate with filler wire by using a narrow gap joint configuration[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 27(7): 2125-2131.
- [11] Xiao Rongshi, Kang Li, Yang Wuxiong, *et al.* Innovative laser beam welding process of high strength aluminum alloy with thick plate[J]. *New Technology & New Process*, 2006(5): 63-65.
肖荣诗, 康 黎, 杨武雄, 等. 高强铝合金厚板窄间隙激光焊接新工艺[J]. *新技术新工艺*, 2006(5): 63-65.
- [12] Dittrich D, Schedewy R, Brenner B, *et al.* Laser-multi-pass-narrow-gap-welding of hot crack sensitive thick aluminum plates[J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 225-233.
- [13] Arata Y, Maruo H, Miyamoto I, *et al.* High power CO₂ laser welding of thick plate: Multipass welding with filler wire (welding physics, process & instrument)[J]. *Transactions of JWRI*, 1986, 15(2): 199-206.