

大功率光纤激光焊接过程中工艺参数对熔深和气孔的影响

赵琳¹ 塚本进² 荒金吾郎² 张岩¹ 田志凌³

¹ 中国钢研科技集团有限公司, 新冶高科技集团有限公司, 北京 100081
² 物质·材料研究机构, 筑波 305-0047 日本
³ 中国钢研科技集团有限公司, 北京 100081

摘要 采用 7 kW 光纤激光器,研究了未熔透光纤激光焊接过程中工艺参数对熔深、气孔的影响,讨论了小孔深度与熔深的对应关系,并利用激光功率三角波脉冲的方法研究了功率调制对小孔型气孔的抑制作用。结果表明,激光焊接熔深与小孔深度基本一致。随着焊接速度的增大,焊缝熔深减小,气孔倾向降低。当离焦量为 0 时,焊缝熔深和气孔倾向最大;当焦点位置偏离工件表面时熔深和气孔倾向减小。在较宽的频率范围内(20~125 Hz),三角波调制激光功率有效地减少了光纤激光焊接小孔型气孔的产生,最佳频率为 60 Hz。利用 X 射线透射成像系统分析了小孔行为,发现激光功率脉冲调制提高了小孔的稳定性,从而减小了气孔倾向。

关键词 激光技术;光纤激光焊接;焊接工艺参数;脉冲调制;熔深;气孔

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.1103004

Influence of Welding Parameters on weld Depth and Porosity in High Power Fiber Laser Welding

Zhao Lin¹ Tsukamoto Susumu² Arakane Goro² Zhang Yan¹ Tian Zhiling³

¹ *New Metallurgy Hi-Tech Group Co. Ltd., China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China*
² *National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047, Japan*
³ *China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China*

Abstract The influence of welding parameters on weld depth and porosity is investigated in partial penetration fiber laser welding using 7 kW fiber laser, and the relationship between weld and keyhole depths is discussed. The suppression of porosity is also investigated using triangular wave power modulation. The results indicate that the keyhole depth coincides approximately with the weld depth in laser welding. The weld depth and the porosity reduce with the welding speed increasing. When the defocus distance is 0, the weld depth and porosity ratio reach the maximums, whereas both of them decrease as the laser focus position is off the sample surface. In a wide range of pulse frequency (20~125 Hz), the porosity is effectively suppressed by triangular wave power modulation for fiber laser welding, and the optimal frequency is 60 Hz. The keyhole behavior is analyzed by X-ray transmission imaging system to find that the stabilization of keyhole is promoted by power modulation, which results in the suppression of porosity.

Key words laser technology; fiber laser welding; welding parameters; power modulation; weld depth; porosity

OCIS codes 140.3390; 110.7440; 160.3900; 350.3850

1 引 言

由于具有光电转换效率高、光束质量好、生产效率高特点,光纤激光焊接得到了越来越广泛的关注,尤其是大功率光纤激光焊接成为了研究热点之

—^[1-7]。关于光纤激光焊接工艺参数和熔深的对应关系,各国学者纷纷发表了相关的研究数据^[8-11]。Quintino 等^[8]利用 8 kW 光纤激光研究了激光功率、焊接速度对 X100 高强钢焊缝熔深的影响,在激

收稿日期: 2013-05-03; 收到修改稿日期: 2010-07-16

作者简介: 赵琳(1977—),男,博士,高级工程师,主要从事激光加工技术和焊接技术等方面的研究。

E-mail: hhnds@aliyun.com

光功率 8 kW、焊接速度 0.5 m/min 的条件下焊缝熔深约为 11.5 mm。Kawahito 等^[9]分析了光纤激光过程中激光能量密度、焊接速度对不锈钢焊缝熔深的影响规律,他们发现采用激光功率 6 kW,在焦点位置激光光斑直径 0.13 mm、焊接速度 0.6 m/min 的条件下,焊缝熔深达到了 11 mm。李耿等^[10]在光纤激光焊接实验中通过改变气体类型、流量、混合比例、吹气角度、落点位置等,获得保护气参数对熔深的影响规律。但是,小孔作为激光深熔焊的重要特征,工艺参数对小孔深度的影响以及小孔深度与熔深对应关系的研究相对较少。另一方面,小孔型气孔是激光深熔焊尤其是未熔透激光焊接的主要问题之一^[12]。CO₂ 激光和 Nd:YAG 激光焊接过程中气孔形成机理及抑制方法已得到深入的研究^[13-15],但在光纤激光焊接中仍缺乏相关问题的研究。本文研究了未熔透光纤激光焊接过程中工艺参数对熔深、气孔的影响,并利用 X 射线透射成像系统分析了小孔行为,讨论了小孔深度与熔深的对应关系,最后采用激光功率三角波脉冲的方法研究了功率调制对小孔型气孔的抑制作用。

2 试验方法

焊接试件尺寸为 250 mm×20 mm×20 mm,材料为低碳钢板,其化学成分(质量分数,%)为: C 0.16, Si 0.35, Mn 1.46, P 0.016, S 0.006。激光

焊接试验采用平板堆焊方式,使用 7 kW 光纤激光器,传输光纤芯径 200 μm,聚焦透镜焦距 250 mm,焦点位置光斑直径 0.3 mm。焊接过程中,采用侧吹保护气体,喷嘴与激光束呈 45° 夹,保护气体为 Ar,流量 10 L/min,试验装置如图 1 所示。

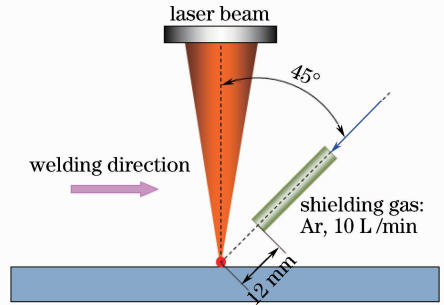


图 1 光纤激光焊接试验装置

Fig. 1 Experimental setup of fiber laser welding

焊接试验中,调节离焦量和焊接速度两个工艺参数:1) 焊接速度 1.0 m/min 条件下,离焦量分别为 -10、-5、0、5、10 mm;2) 离焦量 0 条件下,焊接速度分别为 0.5、1.0、3.0、5.0、10 m/min。为了分析小孔深度与熔深的对应关系,利用 X 射线透射成像系统观测了上述焊接工艺参数下的小孔行为,X 射线透射成像系统和试样尺寸如图 2 所示。焊接试验后,首先用 X 射线对焊缝进行无损探伤,观察气孔情况,然后制作金相试样,经过饱和苦味酸腐蚀后,对焊缝熔深进行测量。

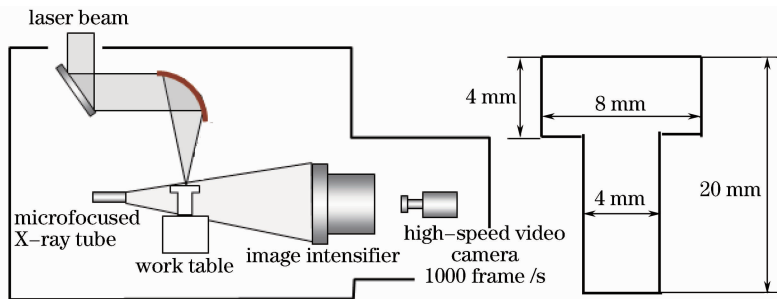


图 2 X 射线透射成像系统及试样尺寸

Fig. 2 Schematic illustration of microfocused X-ray transmission imaging system and sample size

小孔型气孔是激光深熔焊尤其是未熔透激光焊接的主要问题之一,已有的研究表明三角波激光功率脉冲调制比矩形波调制更能有效地抑制气孔产生^[15],因此本文采用激光功率三角波脉冲的方法研究功率调制对小孔型气孔的影响。图 3 所示是三角波激光功率脉冲调制波形,峰值功率为 7 kW,基值功率为 3 kW,三角波上升段时间为 5 ms,频率范围为 10~125 Hz。

3 试验结果与分析

3.1 焊缝熔深

图 4 所示是焊接速度 1.0 m/min、离焦量 0 条件下 X 射线透射成像系统实时采集的小孔形状与实际焊缝的对应关系,小孔深度与熔深相当。图 5 所示是焊接速度、离焦量对熔深和小孔深度的影响规律。随着焊接速度的减小,熔深和小孔深度均呈

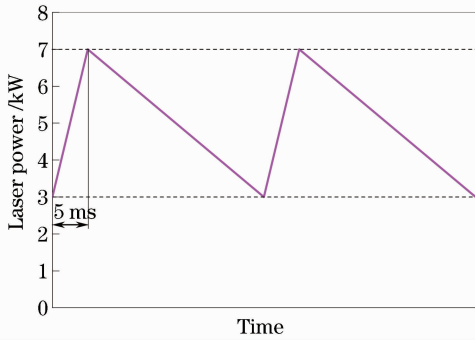


图3 激光功率脉冲调制波形

Fig. 3 Waveform of laser power pulse modulation

上升的趋势,如图5(a)所示。当焊接速度为0.5 m/min时,熔深和小孔深度均为10.3 mm;当焊接速度为5.0 m/min时,熔深和小孔深度分别为5.8 mm和5.5 mm。离焦量对熔深、小孔深度也具有较大的影响,呈抛物线变化规律,如图5(b)所示。

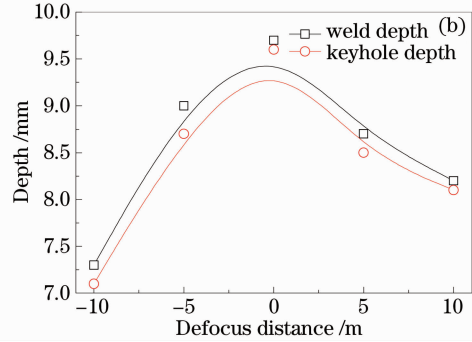
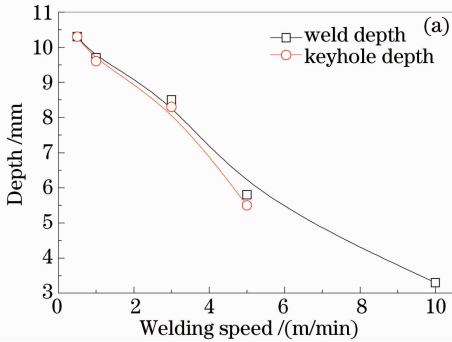


图5 焊接工艺参数对熔深、小孔深度的影响。(a) 焊接速度(离焦量0); (b) 离焦量(焊接速度1.0 m/min)

Fig. 5 Influences of welding parameters on weld and keyhole depths. (a) Welding speed (defocus distance of 0); (b) defocus distance (welding speed of 1.0 m/min)

3.2 焊缝气孔倾向

图6所示是焊接速度对焊缝气孔倾向的影响。Ar速率10 L/min,激光功率8 kW,离焦量为0。当

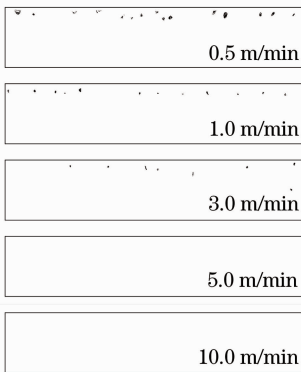


图6 不同焊接速度条件下焊缝气孔X射线图
(X射线从工件侧面照射)

Fig. 6 X-ray radiographs of fiber welds with various welding speed (X-ray irradiates from sample side)

当焦点位置在工件表面时,熔深和小孔深度最大,分别为9.7 mm和9.6 mm;焦点位置偏离工件表面时,熔深和小孔深度下降。由图5还可知,各深熔焊接条件下,小孔深度和熔深基本一致。

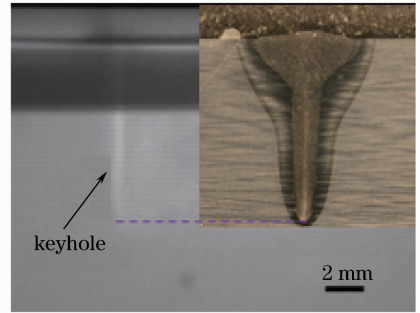


图4 小孔形状与实际焊缝的对应关系
(焊接速度1.0 m/min,离焦量0)

Fig. 4 Comparison between keyhole and weld geometries (welding speed of 1.0 m/min, defocus distance of 0)

焊接速度低于3.0 m/min时,焊缝均有气孔产生,气孔集中分布于焊缝熔深中部的区域;当焊接速度高于5.0 m/min时,焊缝未产生气孔。采用焊缝单位长度上的气孔面积 P_s 表征气孔倾向,焊接速度对气孔倾向的影响规律如图7所示。当低速焊接

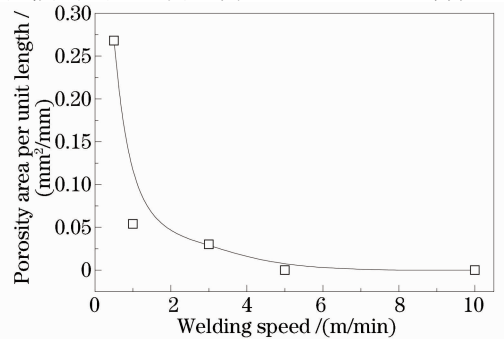


图7 焊接速度对焊缝气孔倾向的影响(离焦量为0)

Fig. 7 Influence of welding speed on porosity in fiber laser welding (defocus distance of 0)

时,激光深熔焊小孔型气孔倾向较大;随着焊接速度的增加,焊缝气孔倾向降低,焊接速度增大至 5.0 m/min时,焊缝单位长度上的气孔面积下降至 0。气孔倾向随焊接速度变化呈这种规律的原因在于:随着焊接速度增大,激光小孔深度迅速降低,致使小孔膨胀、收缩的变化程度减小,小孔稳定性改善,从而抑制了气孔的形成^[16]。

图 8 所示的是离焦量对气孔倾向的影响规律。当焦点位置在工件表面时,焊缝单位长度上的气孔面积最大;当焦点位置偏离工件表面时,即离焦量或入焦量增大时,气孔倾向降低。因此,离焦量对光纤激光焊接气孔倾向具有显著的影响。由图 5(b)可知,焦点位置偏离工件表面时,小孔深度减小,这有利于小孔稳定性的改善。但是,离焦量和入焦量数值相同时(例如离焦量为+10 mm 和-10 mm 的情况),气孔倾向存在较大的差异,其原因需要进一步实验研究和理论分析。

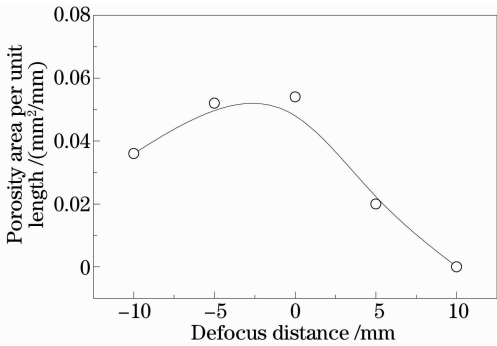


图 8 离焦量对焊缝气孔倾向的影响
(焊接速度 1.0 m/min)

Fig. 8 Influence of defocus distance on porosity in fiber laser welding (welding speed of 1.0 m/min)

3.3 功率调制对气孔的影响

图 9 所示是三角波激光功率调制条件下焊缝气孔的分布。与连续激光焊接相比,采用功率调制可减小气孔倾向,这证明功率调制抑制气孔产生的方法对于光纤激光焊接同样有效。图 10 所示是功率调制对焊缝气孔率的影响。随着脉冲频率的增加,气孔率快速降低;当脉冲频率为 60 Hz 时,气孔率降至最低值;在脉冲频率较宽的范围(20 ~ 125 Hz),功率调制可有效地减少气孔形成。利用 X 射线透射成像系统对光纤激光焊接中气孔的形成进行观测,小孔行为如图 11 所示。连续激光焊接过程中,小孔收缩和膨胀交替剧烈,小孔底部形成大量气泡,气孔倾向大,如图 11(a)所示。采用功率调制进行激光焊接时,在合适的脉冲频率范围内,小孔收缩

和膨胀程度较小,减少了气泡产生,气孔形成倾向降低,如图 11(b)所示。因此,功率调制提高了激光焊接小孔的稳定性,减少了气孔倾向。

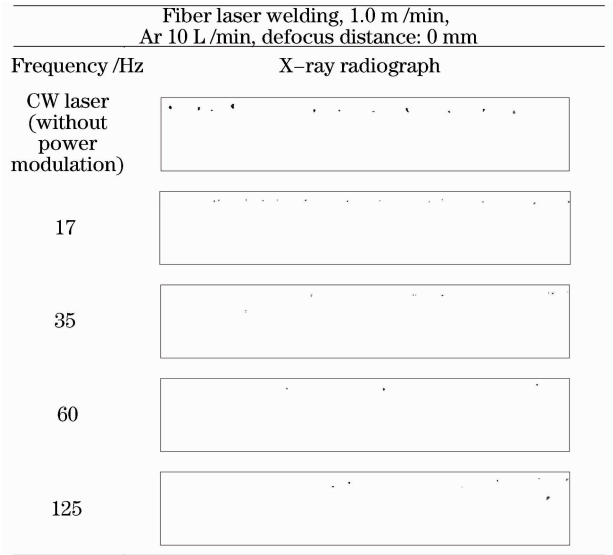


图 9 激光功率调制条件下焊缝气孔 X 射线图
Fig. 9 X-ray radiographs of fiber laser welds with different laser power modulations

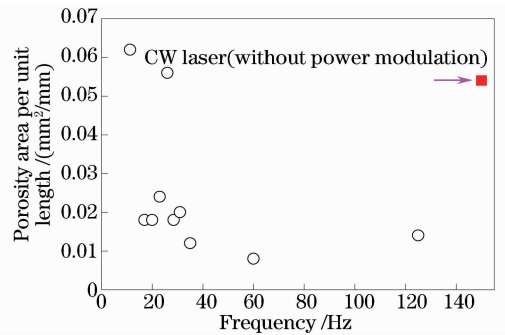


图 10 激光功率调制对焊缝气孔倾向的影响
Fig. 10 Influence of power modulation on porosity in fiber laser welding

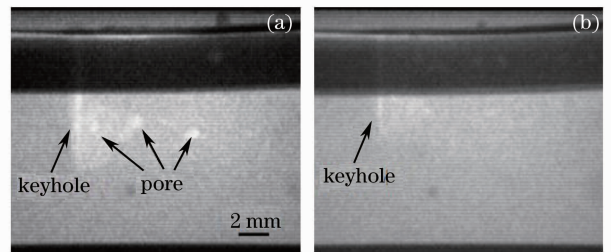


图 11 光纤激光焊接小孔行为。
(a) 连续激光焊接; (b) 功率调制焊接 (60 Hz)
Fig. 11 Keyhole behavior in fiber laser welding. (a) CW welding; (b) power modulation welding (60 Hz)

4 结 论

1) 光纤激光焊接过程中,小孔深度和熔深基本一致。随着焊接速度的减小,熔深和小孔深度均呈上升的趋势。熔深、小孔深度随离焦量的变化呈抛物线变化规律;离焦量为0时,熔深和小孔深度达到最大值。

2) 随着焊接速度的增加,焊缝气孔倾向降低;离焦量为0时焊缝气孔率最大,当焦点位置偏离工件表面时气孔率减小。

3) 三角波功率调制有效地减少了光纤激光焊接小孔型气孔的产生,最佳频率为60 Hz。功率调制提高了激光焊接小孔的稳定性,减少了气孔倾向。

参 考 文 献

- 1 Y Kawahito, M Mizutani, S Katayama. High quality welding of stainless steel with 10 kW high power fibre laser[J]. *Sci Technol Weld Join*, 2009, 14(4): 288-294.
- 2 Zhou Chunyang, Wu Shikai, Xiao Rongshi. Experimental investigation on fiber laser welding stainless steel to super alloy GH3128 [J]. *Applied Laser*, 2012, 32(2): 108-111. 周春阳, 吴世凯, 肖荣诗. 高温合金-不锈钢异种金属光纤激光焊接试验研究[J]. *应用激光*, 2012, 32(2): 108-111.
- 3 Pei Yinglei, Shan Jiguo, Ren Jialie. Study of humping tendency and affecting factors in high speed laser welding of stainless steel sheet[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2012, 48(12): 1431-1436. 裴莹蕾, 单际国, 任家烈. 不锈钢薄板高速激光焊驼峰焊道形成倾向及其影响因素[J]. *金属学报*, 2012, 48(12): 1431-1436.
- 4 Wen Peng, Zheng Shiqing, Shinozaki Kenji, *et al.*. Experimental research on laser narrow gap welding with filling hot wire[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(11): 1103004. 温鹏, 郑世卿, 荻崎贤二, 等. 填充热丝激光窄间隙焊接的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1103004.
- 5 Cui Li, He Dingyong, Li Xiaoyan, *et al.*. Effects of welding direction on weld shape of fiber laser-MIG hybrid welded titanium alloys[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 0103002. 崔丽, 贺定勇, 李晓延, 等. 焊接方向对光纤激光-MIG复合焊接钛合金焊缝成形的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0103002.
- 6 Chen Genyu, Kang Bin, Zhang Yi, *et al.*. Effects of incident angle on welding performance of fiber laser butt welding of high-strength automobile steel[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0103008. 陈根余, 康斌, 张屹, 等. 光纤激光入射角对高强度对接焊接性能的影响[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0103008.
- 7 Gao Xiangdong, Zhang Yong, You Deyong, *et al.*. Analysis of molten pool configuration and welding stability during high-power fiber laser welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(9): 13-16. 高向东, 张勇, 游德勇, 等. 大功率光纤激光焊熔池形态及焊接稳定性分析[J]. *焊接学报*, 2011, 32(9): 13-16.
- 8 L Quintino, A Costa, R Miranda, *et al.*. Welding with high power fiber lasers—A preliminary study [J]. *Mater Design*, 2007, 28(4): 1231-1237.
- 9 Y Kawahito, M Mizutani, S Katayama. Elucidation of high-power fibre laser welding phenomena of stainless steel and effect of factors on weld geometry[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2007, 40(19): 5854-5859.
- 10 Li Geng, Zhang Lin, Gao Ming, *et al.*. Influence of shielding gas on fiber laser welding of stainless steel [J]. *Hot Working Technology*, 2011, 40(23): 126-129. 李耿, 张林, 高明, 等. 保护气体对不锈钢光纤激光焊接的影响[J]. *热加工工艺*, 2011, 40(23): 126-129.
- 11 L Zhao, S Tsukamoto, G Arakane, *et al.*. Influence of oxygen on weld geometry in fibre laser and fibre-GMA hybrid welding [J]. *Sci Technol Weld Join*, 2011, 16(2): 166-173.
- 12 Chen Wuzhu. *Quality Control of Laser Welding and Cutting* [M]. Beijing: China Machine Press, 2010. 陈武柱. *激光焊接与切割质量控制* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- 13 A Matsunawa. Problems and solutions in deep penetration laser welding[J]. *Sci Technol Weld Join*, 2001, 6(6): 351-354.
- 14 S Tsukamoto, I Kawaguchi, G Arakane, *et al.*. Development of high power CO₂ laser welding process[J]. *Sci Technol Weld Join*, 2001, 6(6): 363-367.
- 15 S Tsukamoto. High speed imaging technique Part 2—High speed imaging of power beam welding phenomena[J]. *Sci Technol Weld Join*, 2011, 16(1): 44-55.
- 16 I Kawaguchi, S Tsukamoto, G Arakane, *et al.*. Characteristics of high power CO₂ laser welding and porosity suppression mechanism by nitrogen shield-(Report 1) study on high power laser welding phenomena [J]. *Quarterly J the Japan Welding Society*, 2005, 23(2): 259-264.

栏目编辑:宋梅梅