

细管径侧吹气体流量对光纤激光中厚板焊接的影响

邢孟琪¹, 李铸国¹, 孙军浩¹, 张 旺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表面改性重点实验室, 上海 200240;

²液化空气(中国)研发有限公司, 上海 200233

摘要 在细管径侧吹气体的辅助下,对 SUS 304 不锈钢试样进行了光纤激光焊接,使用高速摄影设备配合背景激光光源对匙孔、熔池以及金属蒸气的行为进行了观察,并对焊缝熔深和焊缝成形进行了分析。结果表明:在激光功率、焊接速度、离焦量、喷嘴位置与角度等参数一定的情况下,焊缝熔深随着细管径侧吹气体流量的增大而增加。细管径侧吹气体可以明显打开匙孔并维持匙孔稳定性,并扩大熔池面积。气体流量大小对焊缝成形有较大影响。当无细管径侧吹气体时,飞溅较大,焊缝成形均匀;当气体流量较小时,飞溅较小,且焊缝成形均匀;当气流量过大时,飞溅较小,但焊缝成形较差。

关键词 激光加工; 光纤激光焊接; 侧吹气体; 高速摄影; 熔池与金属蒸气; 熔深

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0302012

Effect of Small Diameter Side-Blown Gas Flow on Fiber Laser Welding of Medium and Heavy Plate

Xing Mengqi¹, Li Zhuguo¹, Sun Junhao¹, Zhang Wang²

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

²Air Liquide (China) Research and Development Co., Ltd, Shanghai 200233, China

Abstract With the assistance of the small diameter side-blown gas, the fiber laser welding of SUS 304 stainless steel sample is performed. The behaviors of keyholes, molten pools and metallic vapor are observed by using the high-speed photography equipment under the background light source and the fusion depth and formation of welds are also analyzed. The results indicate that, when the laser power, welding speed, defocusing amount, position and angle of gas jet nozzle, and other welding parameters are constant, the fusion depth of welds increases with the increment of small diameter side-blown gas flow. The small diameter side-blown gas can open the keyholes obviously, maintain the stability of the keyholes, and also enlarge the area of the molten pool. The gas flow value has a great influence on the formation of welds. Without the small diameter side-blown gas, the uniformly-distributed weld formation with lots of the spatters is achieved. When the gas flow value is small, the uniformly-distributed weld formation with few spatters is achieved. When the gas flow value is too large, the spatters are few and the weld formation is poor.

Key words laser technique; fiber laser welding; side-blown gas; high-speed photography; molten pool and metallic vapor; depth of fusion

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 160.3900; 060.3510

1 引 言

SUS 304 不锈钢是一种常见的奥氏体不锈钢,广泛应用于船舶、航空航天、核电^[1]等领域。激光焊接以

收稿日期: 2016-10-08; 收到修改稿日期: 2016-12-07

作者简介: 邢孟琪(1992—),女,硕士研究生,主要从事光纤激光方面的研究。E-mail: amethyxing@163.com

导师简介: 李铸国(1972—),男,博士,教授,主要从事激光焊接与表面工程方面的研究。

E-mail: lizg@sjtu.edu.cn(通信联系人)

焊接速度快、热影响区小、深宽比高、控制精确等优点得到广泛使用^[2]。在中厚板焊接过程中,能量传输与物质交换过程复杂,易产生缺陷。为了增加熔深、改善焊缝成形,研究者进行了大量研究,发现通过外加侧吹气体的方法可以优化工艺。Arata 等^[3]研究了侧吹气体对大功率激光深熔焊中焊缝成形的影响,发现存在可以产生三种不同焊缝形貌的临界压力。当辅助气体压力等于或略高于等离子体从匙孔中逸出的压力时,焊缝熔深最大,且焊缝呈酒杯形;当辅助气体压力较高时,焊缝呈椭圆形,其熔深略低于焊缝呈酒杯形时的熔深,但焊缝气孔较少;当辅助气体压力过高时,产生了驼峰状的焊缝。王振家等^[4]研究了侧吹工艺对焊缝熔深的影响,得到了最佳侧吹气体角度。Wang 等^[5]研究了侧吹气体对激光深熔焊中焊缝及等离子体形貌的影响,发现侧吹气体可以使焊接过程稳定。这些研究大部分采用 CO₂ 激光器,而 CO₂ 激光器在激光功率较大时光束质量较差,激光光斑和发散角较大,移动性不佳,且光致等离子体对激光束的屏蔽、吸收与折射效应严重,光束能量利用率较低,故 CO₂ 激光焊能达到的焊接板厚和工作范围有限。光纤激光器的出现改善了这一局面。但光纤激光焊接技术的发展时间短,目前针对光纤激光焊加大熔深的方法多是大功率焊、填丝焊等,而关于通过侧吹气体优化光纤激光深熔焊工艺的研究鲜有报道。本文在细管径侧吹气体的辅助下,采用 4 kW 光纤激光对 SUS 304 不锈钢试样进行了焊接,研究了细管径侧吹气体流量对激光中厚板焊接过程及焊缝成形的影响,利用高速摄影观察了焊接过程中熔池、匙孔及金属蒸气的变化。

2 试验材料及设备

试验材料为 SUS 304 不锈钢,其化学成分见表 1。试样尺寸为 150 mm×100 mm×8 mm。使用最大输出功率为 10 kW 的光纤激光器进行焊接,光束质量(BPP)为 12 mm·mrad,最小光斑直径为 700 μm,焦距为 210 mm。使用 Photron SA-X2 高速相机(Fastcam SA-X2,Photron 公司,日本)与 Cavilux 激光辅助光源系统(Cavilux HF,Cavitar 公司,芬兰)观察焊接过程。

表 1 SUS 304 不锈钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of SUS 304 stainless steel (mass fraction, %)

Element	C	Si	P	S	Mn	Ni	Cr	Fe
Content	0.08	1.00	0.04	0.03	2.00	8.00~10.50	18.00~20.00	Bal.

3 试验方法

用砂纸对试样进行打磨以去除表面氧化膜,并用丙酮除去表面油污,对钢板进行穿透焊。激光焊接系统如图 1 所示,侧吹气体喷嘴内径为 2 mm,距工件表面 2 mm,与工件夹角成 45°,气流中心对准激光光斑中心。保护气体喷嘴内径为 10 mm,距工件表面 10 mm,与工件夹角成 45°,与侧吹气体喷嘴方向相反。保护气体与侧吹气体均使用氩气。高速摄影系统如图 2 所示,熔池匙孔拍摄时采用侧拍方式,镜头与水平面成 45°,拍摄参数:帧频为 4000 frame/s,曝光时间为 5 μs,视窗尺寸为 1024 pixel×1024 pixel,背景光源使用波长为 808 nm、功率为 500 W 的激光。金属蒸气拍摄时采用水平侧拍方式,镜头与水平面平行,参数同上,但不使用背景光源。焊接时功率为 4 kW,离焦量为 -10 mm,保护气体流量为 10 L/min,焊速为 0.6,1.0,1.4 m/min,侧吹气体流量范围为 0~20 L/min。

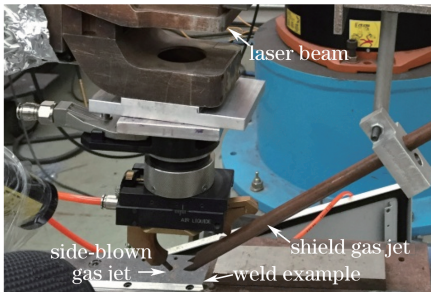


图 1 激光焊接系统装置图

Fig. 1 Schematic setup of laser welding system

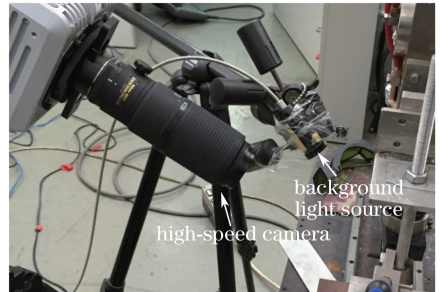


图 2 高速摄影系统装置图

Fig. 2 Schematic setup of high-speed photography system

4 试验结果及分析

4.1 侧吹气体流量对熔池及匙孔的影响

当焊速为 0.6 m/min、功率为 4 kW 时,不同侧吹气体流量对熔池的流动及焊接小孔的影响如图 3 所示,其中较暗的区域为熔池,熔池中较亮的圆形区域为匙孔。由图 3 可以发现,随着侧吹气体流量的增加,熔池和匙孔的长度和面积均增大;当侧吹气体流速为 15 L/min 和 20 L/min 时,如图 3(d)、(e)所示,熔池凹陷较大,匙孔难以观察。图 4 所示为不同焊速下,有无侧吹气体时熔池和匙孔的面积,由图可见,侧吹气体能增大熔池与匙孔的面积。另外,统计高速摄影视频中匙孔的开闭次数发现,在相同时间内,无侧吹气体时匙孔的开闭次数较有侧吹气体时匙孔的多。侧吹气体能使匙孔稳定张开,减少匙孔的开闭振荡,从而降低焊缝多孔性形成的可能性。Amara 等^[6]用 VOF(流体体积模型)方法建立了 3D 模型,模拟了激光深熔焊中侧吹气体对液态金属流动的影响。熔池的流动是金属蒸气的摩擦力、液体表面张力、浮力、反冲压力共同作用的复杂结果。金属蒸气从匙孔由内向外溢;摩擦力带动匙孔后壁的液体翻动,有打开匙孔的倾向;表面张力有关闭匙孔的倾向。侧吹气体把熔池表面压低,减少了回流,使熔池的流动更快且更具规律性,从而增大了熔池与匙孔的面积。

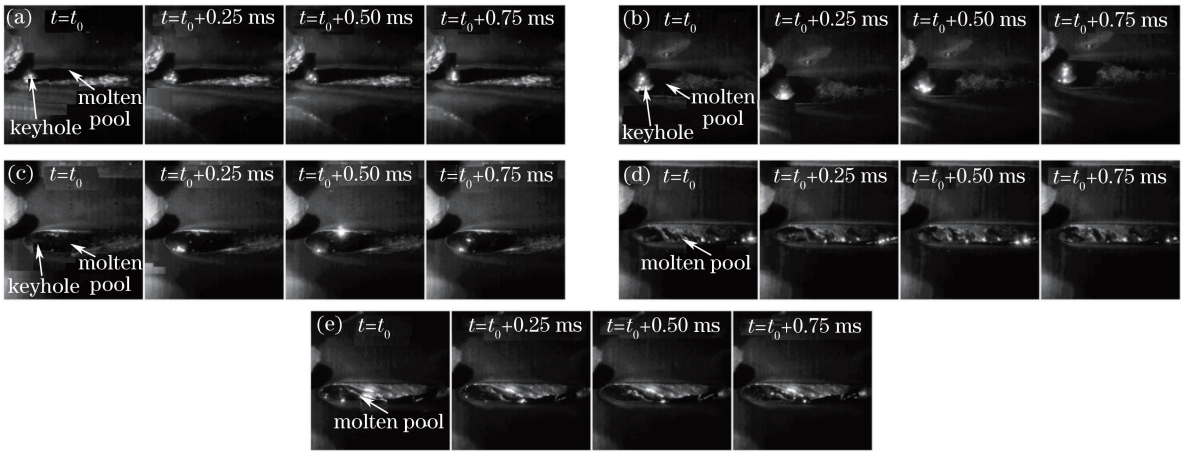


图 3 不同侧吹气体流量下熔池和匙孔的高速摄影图像。(a) 0 L/min; (b) 5 L/min; (c) 10 L/min; (d) 15 L/min; (e) 20 L/min

Fig. 3 High-speed photography images of molten pool and keyhole under different side-blown gas flow. (a) 0 L/min; (b) 5 L/min; (c) 10 L/min; (d) 15 L/min; (e) 20 L/min

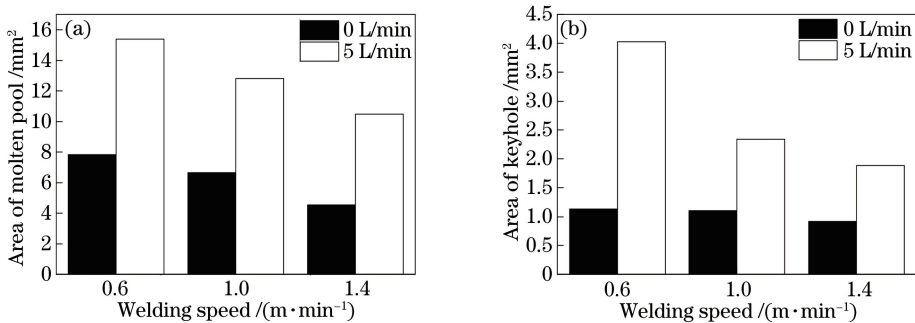


图 4 有无侧吹气体时(a)熔池和(b)匙孔面积

Fig. 4 Area of (a) molten pool and (b) keyhole with and without side-blown gas

4.2 侧吹气体流量对金属蒸气的影响

当焊速为 0.6 m/min、功率为 4 kW 时,不同侧吹气体流量下金属蒸气的高速摄影图像如图 5 所示,其中金属蒸气呈白色高亮烟雾状。由图可知,外加侧吹气体能够减小金属蒸气的高度,这是因为侧吹气体增强了气体对流冷却作用。金属蒸气的高度被压制,激光束在金属蒸气内的穿行距离减小,金属蒸气吸收的能量也减少,进而使到达工件表面的激光有效能量增加。

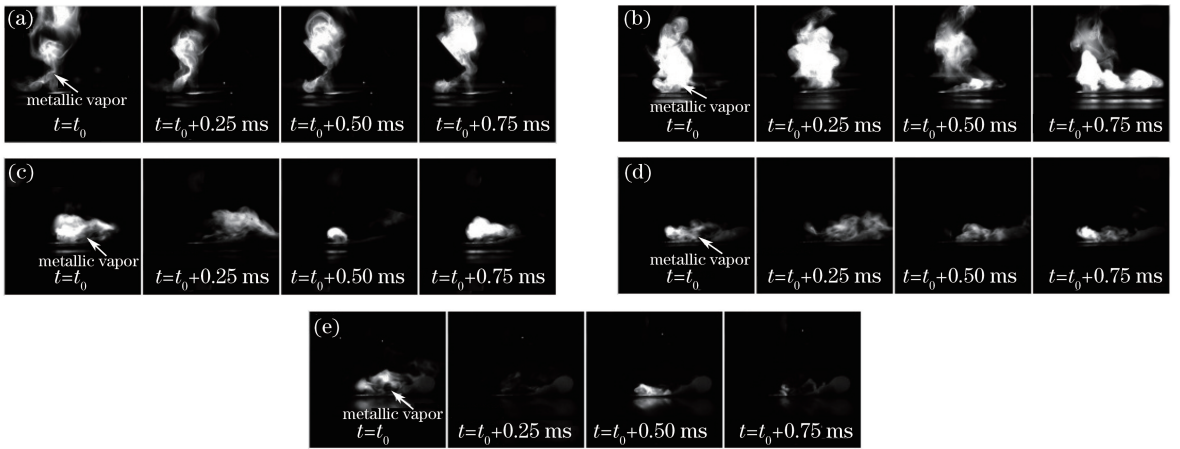


图 5 不同侧吹气体流量下金属蒸气的高速摄影图像。(a) 0 L/min; (b) 5 L/min; (c) 10 L/min; (d) 15 L/min; (e) 20 L/min

Fig. 5 High-speed photography images of metallic vapor under different side-blown gas flow.

(a) 0 L/min; (b) 5 L/min; (c) 10 L/min; (d) 15 L/min; (e) 20 L/min

4.3 侧吹气体流量对焊缝成形及熔深的影响

当焊速为 0.6 m/min、功率为 4 kW 时,不同侧吹气体流量下的焊缝宏观形貌如图 6 所示。图 7 所示为图 6(d)的焊缝侧面形貌。由图 6 可见,随着侧吹气体流量的增大,焊缝成形有所变化。当气体流量为 10 L/min 时,宏观成形良好,焊缝均匀。当气体流量大于或等于 15 L/min 时,焊缝成形较差。分析原因如下:当气体流量为 15 L/min 时,如图 3(d)所示,熔池凹陷明显,且侧吹气体将熔池向下压制,加大了熔深;此外,被气体压制的液态金属在向下运动的同时,也会向熔池后部运动。当熔池底部无法容纳更多液态金属时,液态金属向上、向外喷发,并被侧吹气体吹向熔池后方,此时冷却速度较快无法形成回流,故在焊缝表面形成一个个浪花形状的固态形状,焊缝成形较差。

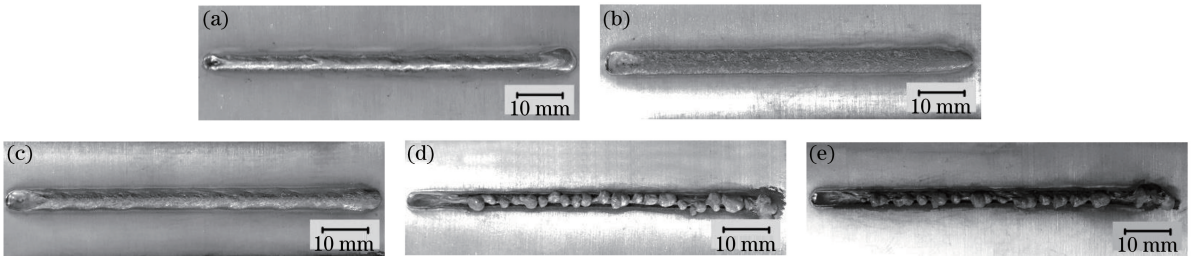


图 6 不同侧吹气体流量下的焊缝成形。(a) 0 L/min; (b) 5 L/min; (c) 10 L/min; (d) 15 L/min; (e) 20 L/min

Fig. 6 Weld formation under different side-blown gas flow. (a) 0 L/min; (b) 5 L/min; (c) 10 L/min;

(d) 15 L/min; (e) 20 L/min



图 7 成形较差的焊缝侧面

Fig. 7 Side view of poor weld formation

不同焊速下,焊缝熔深随侧吹气体流量的变化趋势如图 8 所示。由图 8 可知,随着侧吹气体流量的增大,焊缝熔深呈增加趋势,且均在气体流量为 20 L/min 时获得最大熔深,熔深最大可分别增加 46.59%、53.17%、44.96%。当气体流量为 10 L/min 时,熔深最大可分别增加 34.55%、45.53%、33.26%,此时焊缝宏观成形良好。此外,焊缝熔深随着焊速的增大而减小。一方面,外加侧吹气体能扩大匙孔,使其稳定张开,减少开闭振荡,有利于激光束进一步到达工件内部,增加激光能量的有效利用,从而增加熔深。另一方面,在侧吹气体的作用下,金属蒸气高度减小,激光束被金属蒸气吸收的能量减小,到达工件表面的有效能量增加,有

利于焊缝熔深的增加。此外,侧吹气体压制金属蒸气的同时,也会压制熔池中的液态金属,迫使液态金属向下运动,并减少回流,从而有利于焊缝熔深的增加。在本文采用的试验条件下,侧吹气体流量为 10 L/min 时,效果最佳。

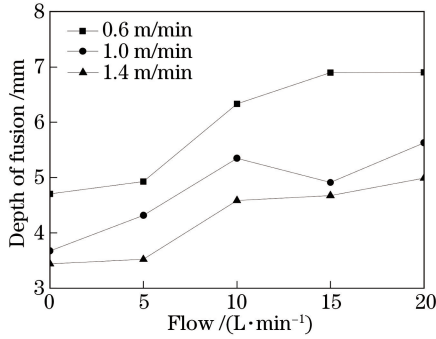


图 8 熔深随侧吹气体流量的变化

Fig. 8 Change of depth of fusion with side-blown gas flow

5 结 论

当激光功率、焊接速度、离焦量、喷嘴位置与角度等参数一定时,焊缝熔深随着细管径侧吹气体流量的增大而增加。细管径侧吹气体可以打开匙孔和维持匙孔稳定性,并增大熔池面积。气体流量大小对焊缝成形有较大影响。在本文采用的试验参数中,气体流量为 10 L/min 时,获得的熔深最大且焊缝成形良好。

参 考 文 献

- [1] Wu Shikai, Yang Wuxiong, Xiao Rongshi, *et al.* Laser welding of HR3C new austenitic heat-resistant steel for utility boiler[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(6): 96-99, 120-121.
吴世凯, 杨武雄, 肖荣诗, 等. 电站锅炉用 HR3C 新型奥氏体耐热钢的激光焊接[J]. 焊接学报, 2008, 29(6): 96-99, 120-121.
- [2] You Deyong, Gao Xiangdong. The research status and prospect of laser welding technology[J]. Welding Technology, 2008, 37(4): 5-9.
游德勇, 高向东. 激光焊接技术的研究现状与展望[J]. 焊接技术, 2008, 37(4): 5-9.
- [3] Arata Y, Oda T, Nishio R. Effect of assist gas on bead formation in high power laser welding[J]. Transactions of JWRI, 1983, 12(2): 161-166.
- [4] Wang Zhenjia, Su Yan, Chen Wuzhu. Study on gas-assisting blowing of CO₂ laser beam welding[J]. Hot Working Technology, 2004(6): 49-50.
王振家, 苏 严, 陈武柱. 激光焊接侧吹工艺的研究[J]. 热加工工艺, 2004(6): 49-50.
- [5] Wang H, Shi Y, Gong S, *et al.* Effect of assist gas flow on the gas shielding during laser deep penetration welding[J]. J Mater Process Tech, 2007, 184(1-3): 379-385.
- [6] Amara E H, Fabbro R. Modelling of gas jet effect on the melt pool movements during deep penetration laser welding [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(5): 055503.