

高功率光纤激光焊接羽辉对焊接过程的影响

邹江林 李 飞 牛建强 孔晓芳 马 然 肖荣诗

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 采用 IPG YLS-6000 光纤激光进行平板焊接实验。利用高速摄像观测羽辉的形态,通过超音速横向气帘在不同高度处抑制羽辉的高度,并测量熔宽和熔深,研究羽辉对焊接过程的影响。结果表明高功率光纤激光焊接羽辉可分为两部分:小孔口波动部分和类似于激光束聚焦形态的狭长形部分。当超音速横向气帘在距焊接板面 5 mm 高度处抑制羽辉上升后,焊接熔深和熔宽分别提高约 20% 和缩小约 24%;焊接过程的稳定性和焊缝表面成形也得到了很大提高。进一步分析表明,羽辉对光纤焊接过程产生了显著影响,其本质是羽辉中存在的微粒对光纤激光产生了显著影响。

关键词 激光技术; 光纤激光焊接; 羽辉; 微粒; 吸收

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0603005

Effect of Laser-Induced Plume on Welding Process During High Power Fiber Laser Welding

Zou Jianglin Li Fei Niu Jianqiang Kong Xiaofang Ma Ran Xiao Rongshi

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract The plate welding experiment is carried out by IPG YLS-600 fiber laser. The effect of plume is observed by a high speed camera, and measuring the weld width and penetration as the plume height is controlled by using the supersonic cross jet at different heights during bead-on-plate welding. The results show that the plume can be divided into two parts: a randomly fluctuating plume out of the keyhole and a slender plume similar to the focused laser beam. The weld penetration and width have an improvement of about 20% and a decrease of about 24%, respectively, as the rising of plume is controlled by applying a cross jet at 5 mm height during welding. And the stability of the welding process and the appearances of the weld seam are also greatly improved. Further analysis indicates that the effect nature of plume on the fiber laser is the effect of particles in plume on the fiber laser, which results in a significant effect on the welding process.

Key words laser technique; fiber laser welding; plume; particle; absorption

OCIS codes 060.2310; 140.3510; 140.3390; 350.3850; 350.4600

1 引 言

高功率光纤激光与 CO₂ 激光、Nd:YAG 激光和碟片激光相比,具有更高的加工柔性、更高的功率、更好的光束质量和更低的运行成本等优势^[1-2]。因此,在激光加工行业中被认为是最理想的热源之一,吸引了众多研究者的关注^[3-6]。

激光焊接羽辉是高功率光纤激光焊接过程中存在的一种固有的物理现象,其特性行为与焊接过程密切相关^[6]。Kawahito 等^[7-8]采用光谱诊断的方法测得高功率光纤激光焊接羽辉温度为 6000 K,并认为羽辉是低电离度的等离子体,对焊接熔深的影响可以忽略不计。但是,Shcheglov 等^[9-10]利用羽

收稿日期: 2013-11-04; 收到修改稿日期: 2014-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(51175008)

作者简介: 邹江林(1982—),男,博士研究生,主要从事激光与材料相互作用等方面的研究。

E-mail: zoujianglinl@163.com

导师简介: 肖荣诗(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造理论与技术等方面的研究。

E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn(中国光学学会会员号: S040111702)

辉对 1 mW 水平探测激光的衰减和阿贝尔变换,算得高功率光纤激光焊接羽辉将吸收光纤激光低于 12% 的能量,并提出羽辉对焊接过程产生了严重影响。本课题组前期研究^[11]发现,在高功率光纤激光焊接羽辉外的空间中存在大量微粒。这表明水平探测激光测量的主要是羽辉外的微粒对探测激光的衰减,并非羽辉对探测激光的衰减,更不是羽辉对高功率光纤激光的衰减。因此,为进一步研究羽辉是否对焊接过程产生了影响,需要采用一种更直接的研究方式。

本文采用 IPG YLS-6000 光纤激光器进行平板焊接实验。通过高速摄像观察羽辉的形态。采用超音速横向气帘在不同高度处控制羽辉的高度,测量焊接熔深和熔宽随横向气帘高度的变化规律,更直接地验证羽辉是否会对焊接过程产生影响,并分析其机制。

2 实验条件及方法

采用波长为 1.07 μm 的 IPG YLS-6000 光纤激光器进行平板焊接实验。光束经过芯径为 200 μm 的光纤传输,输出耦合准直镜焦距为 200 mm,经焦距为 300 mm 的透镜聚焦,获得的光斑直径为 0.3 mm。运行系统为德国 Arnold 公司生产的六轴联动机床。实验样品为 100 mm \times 50 mm \times 10 mm 的工业纯铁。采用美国生产的 PHOTRON Fastcam 1024R2 彩色高速摄像机拍摄羽辉形貌。实验装置如图 1 所示。

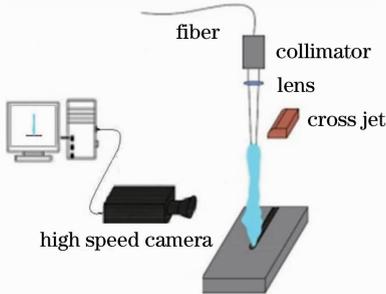


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimentd setup

激光输出功率设定为 5 kW,焊接速度为 2 m/min,离焦量为零,在空气中进行焊接实验。高速摄像的采集帧数设置为 500 frame/s 和 2000 frame/s。利用 3 kW 的电弧灯辐照焊接空间。采用压缩空气(压缩空气的气压为 8 atm)产生的超音速横向气帘在距板材表面不同高度处吹除羽辉,控制羽辉的高度。横向气帘的高度从 5~80 mm 变

化,每个参数均重复 3 次。每道焊缝中心区域截取 6 个横截面,通过 Olympus 光学显微镜测量焊接熔宽和熔深,并求平均值。

3 实验结果

3.1 羽辉的动态特征和形态

典型的连续羽辉照片如图 2 所示。根据羽辉的形状,羽辉可分为两部分:小孔口外的波动部分和狭长形部分。羽辉的波动部分为亮白色,其形态和高度均随着时间的变化而随机摆动,高度约为 15 mm。羽辉的狭长形部分在纵向上亮度并不连续,其颜色大致为黄橙色;在横向上几乎不摆动,类似于激光束的聚焦形态;高度可以达到 80 mm。

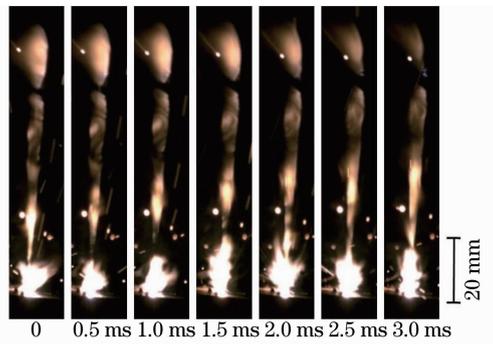


图 2 连续的高速摄像观测羽辉形态(2000 frame/s)
Fig. 2 Series of high speed (2000 frame/s) observation pictures of plume

采用电弧灯辐照焊接空间,当高速摄像的采集帧数设置为 500 frame/s 时,获得典型的羽辉形态如图 3 所示。可见,环绕着狭长形羽辉的空间中弥漫着大量白烟。

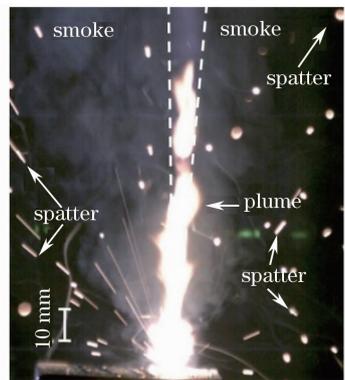


图 3 高速摄像观察羽辉的照片(500 frame/s)
Fig. 3 High speed (500 frame/s) observation picture of plume

随后,采用超音速横向气帘在不同高度处控制羽辉,获得的典型羽辉形态如图 4 所示。随着超音速横向气帘高度的升高,横向气帘均能够从其所在

的位置水平吹除羽辉和白烟的上部分,即剩余羽辉的高度等于超音速横向气帘的高度。

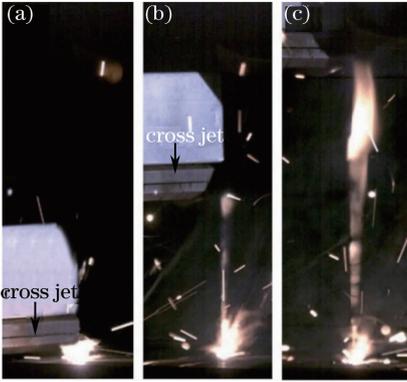


图4 羽辉形态随横向气帘高度的变化关系, 500 frame/s.

(a) $h=5$ mm; (b) $h=40$ mm; (c) $h=70$ mm

Fig. 4 Change of plume with cross jet height (500 frame/s).

(a) $h=5$ mm; (b) $h=40$ mm; (c) $h=70$ mm

3.2 羽辉对焊接熔深和熔宽的影响

图5为采用超音速横向气帘控制羽辉以后,羽辉高度为5 mm和80 mm时典型的焊缝横截面。从焊缝横截面中可发现,两种羽辉高度对应的横截面的差异是非常明显的。当羽辉高度为5 mm时,焊缝横截面较窄,拥有较为平行的侧边缘。而当羽辉高度为80 mm时,熔宽更宽,但熔深却更浅。

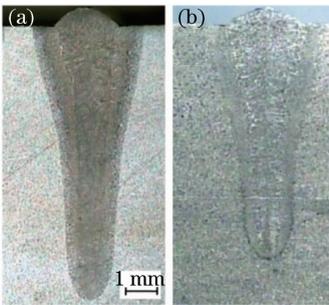


图5 横向气帘作用位置对焊缝横截面形貌的影响。

(a) $h=5$ mm; (b) $h=80$ mm

Fig. 5 Effect of cross jet position on weld seam

cross-section. (a) $h=5$ mm; (b) $h=80$ mm

焊接熔深和熔宽随羽辉高度的变化关系如图6所示。可以看出熔深随着羽辉高度的增加而减小,熔宽则随着羽辉高度的增加而增大。羽辉高度为5 mm时的熔深比80 mm高度时的熔深提高了约20%,熔宽却降低了约24%。

3.3 羽辉对焊接过程稳定性的影响

焊接过程的稳定性,可参照焊缝的表面形态和熔深或熔宽的波动情况进行判断。图7为羽辉高度为5 mm和80 mm时典型的焊缝表面形态。当羽辉的高度为5 mm时,焊缝的表面窄而光滑。而当

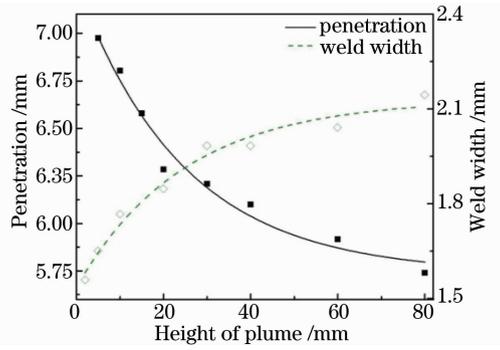


图6 熔深和熔宽随羽辉高度的变化规律

Fig. 6 Change of weld penetration and width with height of plume

羽辉的高度为80 mm时,焊缝表面更宽且粗糙。这表明羽辉的高度越高,对焊缝表面成形的影响越大。

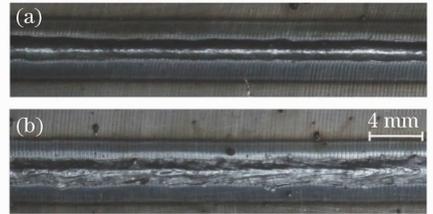


图7 焊缝的表面形态。(a) $h=5$ mm; (b) $h=80$ mm

Fig. 7 Appearances of weld seam. (a) $h=5$ mm;

(b) $h=80$ mm

熔深和熔宽的波动情况,可通过其均方差进行表征。每道焊缝均沿其中心截取6个横截面,图8为当横向气帘在5 mm高度处一道焊缝的6个横截面。可见,即使同一道焊缝中,熔深和熔宽也并非完全一致的,而是存在一定程度的波动。



图8 当横向气帘在5 mm高度处时焊缝横截面的形态

Fig. 8 Appearances of weld seam cross-section as the height of cross jet is 5 mm

每一个参数均重复了3次,因此同一参数熔深和熔宽的测量值共18个。根据这18个测量值得熔深和熔宽的均方差随羽辉高度的变化规律如图9所示。可见羽辉的高度越低,熔深的均方差越小,即熔深的波动越小。熔宽的均方差随横向气帘高度的变化也具有相似的规律。

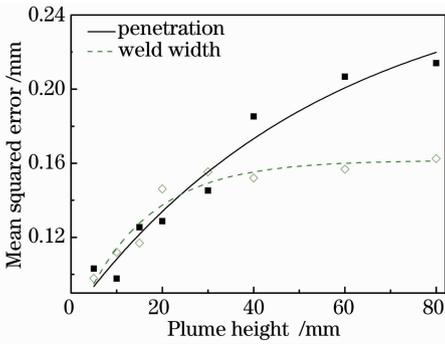


图9 羽辉的高度对熔深和熔宽的均方差的影响
Fig. 9 Effect of height of plume on mean squared error of weld penetration and width

4 分析和讨论

Kawahito 等^[7-8]认为高功率光纤激光焊接羽辉为低电离等离子体,对入射光纤激光的逆韧致吸收和折射均可忽略不计,并基于熔深随激光功率增加的变化关系提出羽辉对熔深的影响可以忽略不计。但是,采用超音速横向气帘控制羽辉的高度后,发现熔深、熔宽、及其均方差和焊缝表面形貌等评价焊接过程的参数均发生了显著变化,这直接证明了高功率光纤激光焊接羽辉对焊接过程是具有明显影响的。由于光纤激光的波长为 $1.07 \mu\text{m}$,等离子体对这类波长激光的逆韧致吸收和折射确实可以忽略不计,因此,高功率光纤激光焊接羽辉不可能完全为低电离度的等离子体,其中必然存在大量微粒,特别是在激光束内。

焊接空间中弥漫的白烟便是羽辉中存在微粒的直接证据,其白色为大量微粒漫反射电弧灯的白光所体呈现出的形态。本课题组前期研究^[11]指出该类微粒为直径约 40 nm 的 Fe_3O_4 颗粒,焊接中类似于激光束聚焦形态的狭长形羽辉正是激光加热光束中的微粒发光,而小孔口羽辉的波动部分主要为孔内喷出的金属蒸气发光。随后,Shcheglov 等^[10]的研究也支持该观点,并指出羽辉中的微粒以吸收的方式衰减了低于 12% 的光纤激光能量,微粒对光纤激光的散射可以忽略不计。因此,可以肯定熔深的显著降低与羽辉中的微粒对光纤激光的吸收有关。

然而,当羽辉的高度被控制在 5 mm 高度后熔深可提高约 20% ,与 Shcheglov 等^[9-10]提出羽辉中微粒吸收低于 12% 的激光能量不匹配。同时,熔宽也缩小了约 24% 。如果羽辉中的微粒只通过吸收激光能量的方式衰减光纤激光,则熔宽随着羽辉高度变化而变化的可能性便较小。因此,羽辉对光纤激光的衰减

除了羽辉中微粒的吸收外,还存在其他的衰减机制。有研究表明^[12]熔宽与光斑在板材表面的直径成正比,羽辉高度增加熔宽便增大表明羽辉的存在可能使光斑的直径增大。由于羽辉对光纤激光的折射可以完全忽略^[7],因此羽辉使激光光斑增大的机制可能是羽辉中的微粒对光纤激光的散射不可以忽略。光束内一定数量的微粒对入射激光的小角散射可以导致光束在板材表面的光斑直径增大,故而使熔宽增加,相关的机制还需要进一步研究。

羽辉的高度越高,焊缝表面成形越差,熔深和熔宽的波动也越大,这些均表明羽辉严重的影响到了焊接过程的稳定性。目前的研究表明高功率光纤激光焊接羽辉的两部分均是周期性波动的,其波动周期约为 $0.4 \sim 0.6 \text{ ms}$ ^[6,8]。羽辉的周期性波动将导致光束内微粒的密度存在较大波动。因此,羽辉中微粒对光纤激光的衰减也是周期性波动的,故而羽辉对焊接过程的稳定性带来了严重影响。

5 结 论

- 1) 高功率光纤激光焊接羽辉可分为小孔口外的波动羽辉和类似于激光束聚焦形态的狭长形羽辉。
- 2) 高功率光纤激光焊接羽辉对焊接过程具有明显影响。当超音速横向气帘在 5 mm 高度处控制羽辉的高度时,熔深可提高约 20% ,熔宽可缩小约 24% ;焊接过程的稳定性和焊缝的表面成形也得到了很大提高。
- 3) 羽辉对光纤激光衰减的本质是羽辉中的微粒对激光的衰减。微粒不仅通过吸收入射光纤激光的能量使熔深降低,也能够使熔宽增加。

参 考 文 献

- 1 S Ruppik, F Becker, F P Grundmann, *et al.*. High power disk and fiber lasers-a performance comparison [C]. SPIE, 2012, 8235: 82350V.
- 2 L Quintino, A Costa, R Miranda, *et al.*. Welding with high power fiber lasers-a preliminary study[J]. Materials and Design, 2007, 28(4): 1231-1237.
- 3 Cai Hua, Kong Xiaofang, Xiao Rongshi. Effect of surface status on microstructures and solidification cracking susceptibility in laser beam welding of 2524 aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0203002.
- 蔡 华, 孔晓芳, 肖荣诗. 表面状态对 2524 铝合金激光焊接组织和结晶裂纹的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0203002.
- 4 Zou Jianglin, Wu Shikai, Xiao Rongshi, *et al.*. Comparison of melting efficiency in high power fiber laser and CO_2 laser welding [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0803002.
- 邹江林, 吴世凯, 肖荣诗, 等. 高功率光纤激光和 CO_2 激光焊接熔化效率对比[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0803002.
- 5 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.
- 6 J Wang, C Wang, X Meng, *et al.*. Study on the periodic oscillation of plasma/vapour induced during high power fibre laser penetration welding[J]. Opt & Laser Technol, 2012, 44(1): 67-70.
- 7 Y Kawahito, K Kinoshita, N Matsumoto, *et al.*. Effect of weakly ionised plasma on penetration of stainless steel weld produced with ultra high power density fibre laser [J]. Sci Technol Weld Joi, 2008, 13(8): 749-753.
- 8 Y Kawahito, N Matsumoto, M Mizutani, *et al.*. Characterisation of plasma induced during high power fibre laser welding of stainless steel[J]. Sci Technol Weld Joi, 2008, 13(8): 744-748.
- 9 P Y Shcheglov, S A Uspenskiy, A V Gumenyuk, *et al.*. Plume attenuation of laser radiation during high power fiber laser welding[J]. Laser Phys Lett, 2011, 8(6): 475-480.
- 10 P Y Shcheglov, A V Gumenyuk, I B Gornushkin, *et al.*. Vapor-plasma plume investigation during high-power fiber laser welding [J]. Laser Phys, 2013, 23(1): 016001.
- 11 Rongshi Xiao, Jianglin Zou. Studying on characteristics of plume/plasma in fiber laser welding and CO₂ laser welding [C]. 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO), 2012.
- 12 Lampa, A F H Kaplan, J Powell, *et al.*. An analytical thermodynamic model of laser welding[J]. J Phys D: Appl Phys, 1997, 30(9): 1293-1299.

栏目编辑:宋梅梅