

局部负压激光焊缝成形特点及其影响因素

罗 燕 唐新华 芦凤桂 陈钦涛 崔海超

(上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)

摘要 真空激光焊接具有更大的熔深和更小的气孔敏感性,为了利用真空激光焊接的优点,同时消除真空室尺寸对工件大小的限制,设计了局部负压激光焊接方法。此方法将负压腔与激光焊接头固定,通过真空泵对负压腔快速抽气从而在焊接熔池上方形成负压环境,在此环境下进行了一系列的激光点焊试验和连续焊试验,并与相同焊接参数下的常压和常压带侧吹条件的焊缝进行对比。通过高速摄影分析了负压环境下的金属蒸汽羽烟特点和熔池行为。结果表明,点焊时负压环境下金属蒸汽羽烟抑制效果明显,焊缝熔深增加,除去凹坑深度的焊缝熔深相比常压侧吹最大可增加 4.5 mm。连续焊时熔池后方匙孔闭合,金属液向后堆叠,获得的焊缝成型良好,负压下焊缝熔深比常压侧吹条件下平均增加 2 mm。

关键词 激光技术;激光焊接;局部负压;熔深;金属蒸汽羽烟;熔池

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0603008

Effects of Welding Parameters on Bead Formation of Laser Welding under Subatmospheric Pressures

Luo Yan Tang Xinhua Lu Fenggui Chen Qintao Cui Haichao

(Shanghai Key Laboratory of Laser Processing and Material Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Deeper penetration depth and less pore sensitivity are the advantages of laser welding in vacuum. In order to make use of these advantages and eliminate the size limit of workpiece by the vacuum chamber as well, a new vacuum chamber is designed which can maintain a subatmospheric pressure above the welding molten pool. The chamber is fixed on the laser nozzle and the relatively lower pressure is generated with a vacuum pump. A series of spot welding and continuous welding experiments are taken under subatmospheric pressures. The results are compared with the weld bead under normal atmosphere with and without side-blowing shielding gas. The behaviors of plasma plume and molten pool are observed by the high-speed camera. The results show that the plasma plume is suppressed obviously and the penetration depth increases under subatmospheric pressure in spot laser welding. The penetration depth of spot weld bead is 4.5 mm deeper at most than the weld bead with side-blowing shielding gas. During continuous laser welding under subatmospheric pressure, the keyhole closed at the rear of the molten pool, the molten metal stacks backwards and sound weld can be achieved. The penetration depth of weld bead under subatmospheric pressure is averagely 2 mm deeper than the weld bead in normal atmosphere with side-blowing shielding gas.

Key words laser technique; laser welding; local subatmospheric pressure; weld penetration; plasma plume; molten pool

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850; 350.5400

1 引 言

与具有同样功率密度级别的真空高能电子束焊接相比,激光焊接不需要真空室且对焊接工件尺寸

大小没有限制,因而适用性强,已广泛应用于薄壁构件的焊接^[1-2]。但是,在大厚度构件焊接领域,激光焊接应用并不广泛^[3-4],这是因为虽然增大激光器

收稿日期: 2013-12-17; **收到修改稿日期**: 2014-01-10

作者简介: 罗 燕(1987—),女,博士研究生,主要从事激光焊接方面的研究。E-mail: luoyan@sjtu.edu.cn

导师简介: 唐新华(1964—),男,博士,教授,主要从事厚板高效焊接技术方面的研究。E-mail: xhtang@sjtu.edu.cn

功率可增大焊缝熔深^[5],但是由于焊接时产生的光致等离子体或金属蒸汽羽烟对激光的吸收、反射和散射作用使得到达工件激光的功率被衰减,熔深并不会因为激光功率的增加而显著增加,且这种作用随着激光功率的增加而增强。因此抑制等离子体或金属蒸汽羽烟,进而提高激光利用率是增加焊缝熔深的有效方法。

侧吹保护气体是目前应用最广泛的抑制等离子体或金属蒸汽羽烟的方法^[6-7],但这种方法抑制效果有限。早在 20 世纪 80 年代日本大阪大学就效仿电子束焊提出了真空激光焊的想法^[8],研究人员发现焊接熔深随真空压力和焊接速度的降低而提高,当真空压力变小且焊接速度非常慢时可以得到很大的熔深。虽然真空法是目前唯一能彻底消除等离子体的方法,但真空室的使用使工件大小受到限制,一定程度上失去与真空电子束焊的竞争优势,推广应用价值不大,并且每次进行工件的焊接都需要重新抽真空,工作效率低,因此相关的研究较少^[9-12]。

本文设想把真空室置于工件焊接区上面,即在产生等离子体或金属蒸汽羽烟的焊接熔池上方形成一个可移动的局部真空,这样既保留了真空对等离子体的有效抑制作用,同时工件又不受真空室大小的限制。据此思路自制了一个可与激光焊接头同步移动的局部“真空室”,用光纤激光器进行了一系列的点焊和连续焊试验研究,对比分析了在此“真空”环境、常压以及常压带侧吹方法下所获得的焊缝成形特点。

2 试验设备与方法

2.1 试验设备

为了在工件焊接熔池上方形成局部真空,构建了一个与激光焊接头同步移动的“真空室”。由于此腔室随焊枪与工件做相对运动,其密封性相对比较差,不可能达到与真正的真空室一样的密封要求,实际上只能通过快速抽气在其封闭腔内产生一定的局部负压(即低于大气常压),所以称其为“负压腔”,其工作原理如图 1 所示。试验表明,负压腔的内部压力与腔体底部的动密封程度及真空泵的抽气速度有关,当密封程度比较好,抽气速度足够大,腔内可以保持相对较低的负压。

试验使用的是 10 kW 的 IPG 光纤激光器,激光波长 $1.07 \mu\text{m}$,焦距约 350 mm。负压腔为一个下部开口的半封闭腔室,腔室上部开有小孔并放置透镜,让激光通过的同时对腔室密封。透镜材料是石英玻

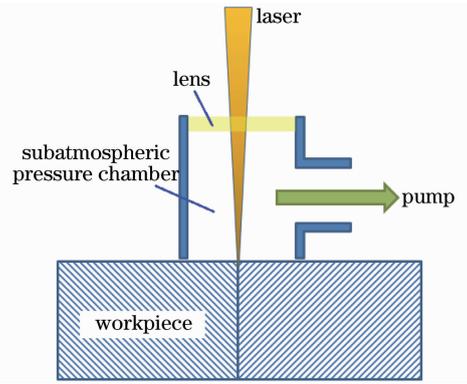


图 1 负压激光焊接示意图

Fig. 1 Schematic illustration of laser welding under subatmospheric pressure

璃,可让 $1.07 \mu\text{m}$ 波长激光透过,透镜两面都镀有增透膜以提高激光透过率。由于激光聚焦镜的焦距较短,工作区可用高度约 200 mm,在熔池小孔金属蒸汽和飞溅的喷射范围内,因此负压腔内设置了一个防飞溅装置,以便让激光光束通过的同时阻挡下方的金属蒸汽和飞溅。与负压腔相连的是带有过滤网的水冷装置,以冷却抽出的高温金属蒸汽和过滤其中的颗粒。真空泵的抽气速度为 70 L/min,其上装有调节抽气速度的阀门来调节负压腔内压力,负压腔内压力通过压力感应计来测量。为使用高速摄影拍摄焊接时的金属蒸汽羽烟和熔池形貌,负压腔上开有圆筒状的观测窗口,如图 2 所示,观察熔池时须将观测圆筒上扬一定角度。



图 2 局部负压激光焊设备

Fig. 2 Setup of laser welding under local subatmospheric pressure

2.2 试验材料与方法

试验材料是应用广泛的低合金钢 16 Mn。焊接

时,平板固定在速度可调节的工作台上,与激光焊接头固定的负压腔则轻压于平板上进行堆焊。为防止反射激光对激光器传输光纤的损坏,激光焊接头倾斜 7° 进行焊接。由于负压腔与平板的相对运动会影响负压腔的密封性,因此先进行点焊试验研究,然后再尝试一系列的激光连续焊试验以进一步研究局部负压下激光焊接的焊缝成形特点。

进行了常压、常压带侧吹和负压激光焊的对比试验。试验中激光功率从 2 kW 升至到 8 kW,焊接速度为 1 m/min,离焦量为 0,常压带侧吹点焊的气流量为优化的 15 L/min,负压点焊测得的负压腔内的压力为 25 kPa。试验使用高速摄影(FASTCAM-Super 10KC)拍摄焊接时蒸汽羽烟形貌和熔池行

为。连续焊时由于负压腔与工件的相对运动,密封性不及点焊,测得的负压腔内的局部压力约为 35 kPa。

3 试验结果与分析

3.1 负压下点焊

3.1.1 点焊焊缝成形

提出了比侧吹法可更有效抑制等离子体的负压激光焊的方法。作为此新方法的初步研究,分别在负压、常压和常压带侧吹环境下进行了激光焊接的对比试验,在相同的激光功率($P=8$ kW)和点焊时间($t=1$ s)下采用三种方法获得的激光点焊焊缝表面形貌和截面形貌如图 3 所示。

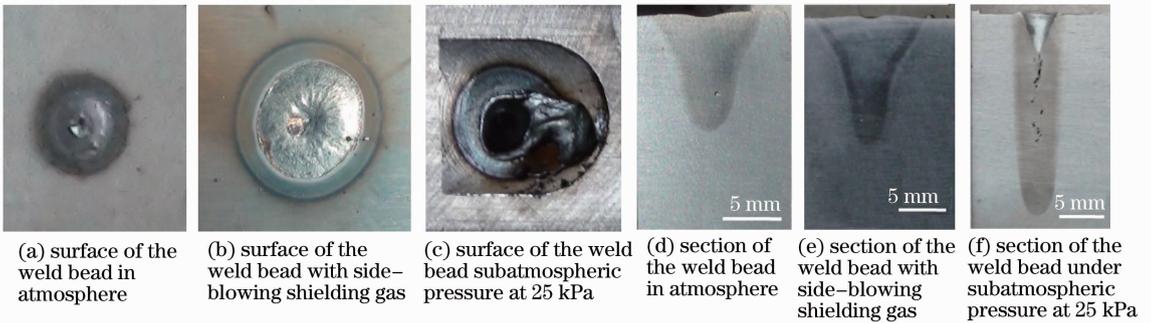


图 3 点焊焊缝表面和截面形貌图

Fig. 3 Surface and section shapes of the point welding bead

由图 3 可见常压和常压带侧吹所获得的焊缝形貌基本相同,焊缝表面都是圆形的凸起,中间有略微的下凹,而负压焊获得的点焊焊缝表面是一个圆锥形的凹孔,在凹孔边缘抽气的方向上有金属堆积。由于金属蒸汽的蒸发使焊缝有部分金属损失,因此常压和常压带侧吹焊缝表面的中心略有下凹。从负压焊的焊缝形貌可看出焊接时熔池的部分金属被吸出而堆积在抽气的一侧,因此凝固后没有足够的金属回填而在表面形成一个凹孔。常压和常压带侧吹

所获得的焊缝截面为钉型,由于蒸汽羽烟对激光的逆韧致辐射吸收的能量主要在小孔上部释放,因此焊缝的上方较宽,形成钉型。而负压激光焊的焊缝截面深而窄,焊缝的两壁是平行的,说明负压环境下的小孔主要通过内壁的菲涅尔吸收,能量分布比较均匀。

3.1.2 激光功率对焊缝尺寸的影响

焊接速度为 1 m/min,离焦量为 0 的条件下,常压、常压带侧吹和负压环境下的焊缝熔深及熔宽随

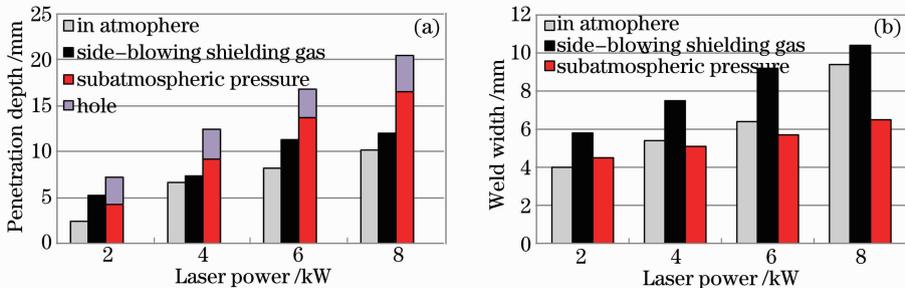


图 4 常压、常压带侧吹和负压环境下点焊焊缝的(a)熔宽和(b)熔深

Fig. 4 (a) Penetration depth and (b) width of point welding bead under atmospheric pressure with and without side-blowing shielding gas and subatmospheric pressure

激光功率的变化规律如图 4 所示,由于负压下激光焊缝表面有凹孔,因此进行了两种熔深的测量,一种是从工件表面到焊缝根部,一种是从表面最低点(即除去凹孔深度)到焊缝根部。

由图 4(a)可见负压下的焊缝熔深大大增加,即使不计凹孔深度,相比常压带侧吹条件下获得的焊缝,负压下的焊缝熔深随着功率的增加增长幅度变大。由图 4(b)可见与常压和常压带侧吹所得的焊缝相比,负压下所得焊缝的熔宽相对较小,且随功率的增大缓慢增加。

3.1.3 环境压力对金属蒸汽羽烟的影响

光纤激光焊接过程中,产生的金属蒸汽羽烟对激光有散射和吸收的衰减作用,试验中通过高速摄影系统分别记录了常压侧吹和负压环境下的金属蒸

汽羽烟的行为(如图 5 所示),其中激光功率为 4 kW,焊接时间 1 s,离焦量为 0。

图 5(a)是激光功率为 4 kW 的常压侧吹情况下的金属蒸汽羽烟形貌图,图 5(b)是激光功率为 4 kW 负压环境下的金属蒸汽羽烟形貌图。所有的图片均在相同的相机参数下拍摄,可明显看出负压环境对金属蒸汽羽烟的抑制效果优于常压侧吹的方法。因为当气体达到稳定平衡的情况下,它的压力与气体密度成正比,因此降低压力可直接降低金属蒸汽羽烟的密度,相比侧吹方法将金属蒸汽吹散,负压方法的抑制效果更好。通过负压环境对金属蒸汽羽烟的抑制降低其对入射激光能量的衰减,增强了激光到达工件表面的能量,从而增加熔深。

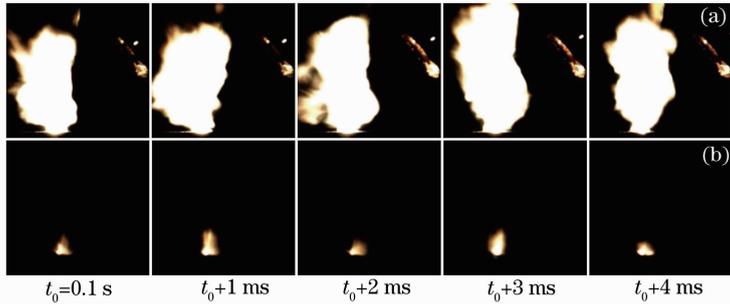


图 5 金属蒸汽羽烟高速摄影图(1000 frames/s)。(a) 常压侧吹; (b) 负压 25 kPa

Fig. 5 High-speed photographs of plasma plume (1000 frames/s). (a) Side-blow in atmosphere; (b) subatmospheric pressure of 25 kPa

3.2 负压下连续焊

3.2.1 连续焊缝成形

点焊研究表明,相比于常压侧吹条件,负压下的焊缝熔深增加而熔宽减小,焊缝表面的金属液会被部分吸出而堆叠在抽气的一侧,由于点焊缝快速冷却,并且激光束关闭时也未采取任何功率衰减措施,金属液来不及回填而使部分焊缝中心有裂缝。根据点焊焊缝的特点,可推测连续焊时金属液持续向抽气一侧堆叠可形成连续堆高,而且激光束向前移动时,也推动熔池小孔向前移动,小孔移动过程中,小孔后壁因小孔前壁激光的反射、金属蒸汽的冲击和加热作用而保持较长时间的流动性,且熔池前方冲开小孔的液态金属也不断向后流动填补后方,使小孔后壁在熔池表面张力和重力等作用下发生坍塌和闭合,形成焊缝,相对于点焊时激光突然停止对小孔的加热而言,连续焊时熔池尾部的冷却速度放慢,因而焊缝金属液有足够的时间回填,因此可以判断不需改动装置即可获得成形良好的连续焊缝。

连续焊接时,由于负压腔与工件之间存在相对

运动,负压腔内气密性减弱,试验时测得负压腔内压力约为 35 kPa,激光功率为 2~8 kW,焊接速度分别为 0.5、1.0、1.5 m/min,常压侧吹流量仍为 15 L/min。图 6 为局部负压下连续焊缝表面和截面形貌图,可见局部负压条件下可得到成形较好的焊缝,焊缝表面为连续的堆叠,焊接过程中金属液的损失在焊缝末尾形成较大的凹坑,焊缝截面无裂缝缺陷。图 7 显示出高速摄影拍得的局部负压环境

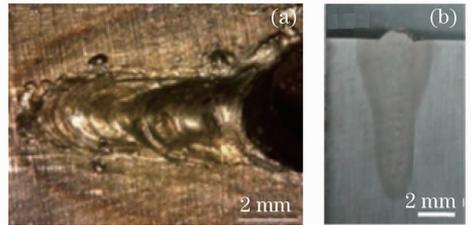


图 6 负压(35 kPa)连续焊缝(激光功率 6 kW,速度 1 m/min)。(a) 焊缝表面; (b) 焊缝截面

Fig. 6 Continuous welding bead under 35 kPa subatmospheric pressure (laser power 6 kW, velocity 1 m/min). (a) Penetration surface; (b) weld section

下的熔池行为,可见匙孔上方口径较大,大滴的金属液随着熔池向后运动,从而填补小孔形成连续焊缝,且焊缝的堆高相比常压侧吹所得的焊缝要高。



图7 负压(35 kPa)连续焊熔池表面形貌图

Fig.7 Surface of the molten pool under 35 kPa subatmospheric pressure

3.2.2 焊接速度对焊缝熔深的影响

图8为局部负压下连续焊和常压侧吹连续焊在不同焊接速度下的焊缝熔深随激光功率的变化规律。由图可见负压环境下获得的焊缝熔深普遍高于常压侧吹的焊缝熔深,且当激光功率高于4 kW时,负压下的焊缝熔深比常压侧吹焊缝有更大的提高,速度低的情况下焊缝熔深增加的更多。这说明高功率低速度下产生的金属蒸汽羽烟越多,负压的抑制效果越好。负压下激光连续焊缝熔深增加的幅度小于负压下激光点焊熔深,部分原因是连续焊时的环境压力高于点焊,另外也与熔池流动和小孔行为有关,需进一步的研究。

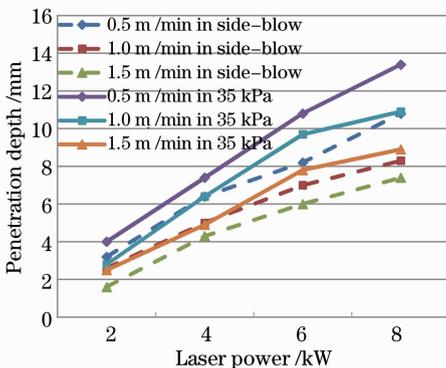


图8 常压侧吹和负压下连续激光焊熔深曲线

Fig.8 Penetration depth of continuous welding bead in side-blowing shielding gas and under subatmospheric pressure

相比常压侧吹方法,负压下焊缝熔深增加一方面是通过抑制金属蒸汽羽烟增加激光能量利用率,另一方面金属熔点随着压力的降低而降低,在负压环境下,金属材料的熔点降低使焊接过程中匙孔更易形成。焊接时,表面张力、流体静压力和流体动压力都迫使匙孔闭合,而匙孔内的金属蒸汽压力与环境的压力差维持小孔的张开。环境压力降低了,小孔更易形成也更稳定,因此负压环境下焊缝熔深增加。

4 结 论

作为局部负压激光焊的前期研究,设计并构建了局部负压腔,并在此条件下进行了一系列的光纤激光焊接试验,通过试验结果分析和讨论,得出以下结论:

1) 局部负压环境下,点焊时除去凹坑深度的焊缝熔深相比常压侧吹最大可增加4.5 mm,连续焊时焊缝熔深比常压侧吹条件下平均增加2 mm。随着激光功率的增加,熔深增加趋势更加明显。

2) 局部负压环境下,点焊焊缝深而窄,焊缝截面两侧边缘平行,焊缝表面因部分金属液被吸出而形成凹孔。连续焊时除焊缝收尾阶段外,焊缝表面金属液连续堆叠,焊缝截面无缺陷。

3) 与常压侧吹方法相比,局部负压环境下的金属蒸汽羽烟受到明显抑制,金属蒸汽羽烟略偏向抽气的一侧。

参 考 文 献

- Mei Lifang, Chen Genyu, Jin Xiangzhong, *et al.*. Study on fiber laser overlap-welding of automobile aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2091-2097.
梅丽芳, 陈根余, 金湘中, 等. 车用铝合金光纤激光搭接焊的研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2091-2097.
- Wang Wenxian, Zhang Ya'nan, Cui Zeqin, *et al.*. Study on microstructure and properties of double ultra-thin stainless steel clad plate by laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0503002.
王文先, 张亚楠, 崔泽琴, 等. 双面超薄不锈钢复合板激光焊接接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0503002.
- Huang Jian, Li Zhuguo, Tang Xinhua. High-power laser welding of plate[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 2: 26-29.
黄坚, 李铸国, 唐新华. 中厚板的高功率激光焊接[J]. 航空制造技术, 2010, 2: 26-29.
- Wu Shikai, Xiao Rongshi, Chen Kai. Laser welding of heavy section stainless steel plants[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2422-2425.
吴世凯, 肖荣诗, 陈铠. 大厚度不锈钢板的激光焊接[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2422-2425.
- F Vollertsen, C Thomy. Welding with fiber lasers from 200~17000 W[C]. International Inst of Welding London, 2005. 254-263.
- Wang Chunming, Meng Xuanxuan, Huang Wei, *et al.*. Role of side assisting gas on plasma and energy transmission during CO₂ laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(4): 668-674.
- Zhang Yi, Li Shichun, Jin Xiangzhong, *et al.*. Research key technology of laser welding of galvanized steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47: 071401.
张屹, 李时春, 金湘中, 等. 镀锌钢板激光焊接关键技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47: 071401.
- Y Arata, N Abe, T Oda, *et al.*. Fundamental Phenomena During Vacuum Laser Welding[M]. International Inst of Welding London, 1985, 4.
- A Verwaerde, R Fabbro, G Deshors. Experimental study of continuous CO₂ laser welding at subatmospheric pressures[J]. J

- Appl Phys, 1995, 78(5): 2981—2984.
- 10 Seiji Katayama, Yoshihiro Kobayashi, Masami Mizutani, *et al.*.
Effect of vacuum on penetration and defects in laser welding[J]. J
Laser Appl, 2001, 13(5): 187—192.
- 11 Seiji Katayama, AbeYohei, Masami Mizutani, *et al.*.
Development of deep penetration welding technology with high
brightness laser under vacuum[J]. Physics Procedia, 2011, 12
(A): 75—80.
- 12 Christian Börner, Thomas Krüssel, Klaus Dilger. Process
characteristics of laser beam welding at reduced ambient pressure
[C]. SPIE, 2013, 8603: 86030M.

栏目编辑: 韩 峰