

文章编号: 1001-3806(2011)03-0395-03

## 不锈钢低功率脉冲活性激光焊的试验研究

权雯雯, 刘顺洪\*, 柳家良, 段元威

(华中科技大学 材料科学与工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 为了研究活性焊接技术对低功率脉冲激光焊焊缝熔深增加的可行性, 提高脉冲激光焊的焊接效率和降低焊接成本, 采用低功率脉冲活性激光焊接方法, 就  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaF}_2$  和  $\text{NaF}$  5种活性剂对 SUS304 不锈钢板焊缝熔深的影响进行了理论分析和试验验证, 取得了焊缝熔深、深宽比及熔宽变化的数据。结果表明, 活性剂对焊缝熔深均有不同程度的影响, 其中  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  分别使熔深增加 38.290%, 17.175%; 在焊缝深宽比方面,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  活性剂均使深宽比有不同程度的增加, 而氟化物则对深宽比没有明显增加效果; 同时, 活性剂的存在不仅提高了激光的吸收率, 还改变了熔池流动状态, 使得焊缝中的显微组织发生变化。这一结果对于进一步探讨活性剂在激光焊接技术中的实际应用是有帮助的。

**关键词:** 激光技术; 熔深增加; 焊接; 活性剂

**中图分类号:** TG456.7 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.03.028

## Research of low-power pulsed laser welding of stainless steel with activating fluxes

QUAN Wen-wen, LIU Shun-hong, LIU Jia-liang, DUAN Yuan-wei

(College of Material Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To improve the welding efficiency and reduce cost, the possibility of the penetration improvement on the welding joints by low-power pulsed laser with activating fluxes was studied. Based on the research of low-power pulsed laser welding of SUS304 stainless steel with five activating fluxes ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{NaF}$ ), the effect of the fluxes on the penetration of joints, as well as the mechanism of penetration improvement, was studied, and the relevant data was received. The results show that the penetration can be changed with all the activating fluxes, among which  $\text{TiO}_2$  and  $\text{SiO}_2$  can deepen the penetration by 38.290% and 17.175% respectively. Meanwhile the depth/width ratios are improved in different degrees by  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  and  $\text{SiO}_2$ , however the fluoride has little effect on this ratio. The existence of activating fluxes not only improves the absorption rate of laser power, but also changes the convection of the welding pool, which makes the microstructures within the welding vary. The result is helpful for the further application of the activating fluxes in the laser technique.

**Key words:** laser technique; penetration improvement; welding; activating flux

### 引言

活性焊接技术是在传统焊接前将一层很薄的表面活性剂涂敷在施焊板材表面, 焊接时活性剂将引起焊接电弧收缩或熔池金属流动状态改变, 从而在相同的焊接规范下, 焊接熔深会显著增加<sup>[1-3]</sup>。由于 YAG 激光器的功率和能量转化率都比较低, 因此存在熔深浅、焊接效率低等缺点<sup>[4]</sup>。为了响应节能高效的时代要求, 提高激光焊接的效率, 作者旨在将活性焊接技术引入激光焊接, 尤其是低功率脉冲激光焊。通过研究

$\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaF}_2$  和  $\text{NaF}$  5种活性剂对 SUS304 不锈钢板焊缝熔深增加的影响规律, 初步探讨活性剂增加熔深的机理, 为活性剂的实际应用提供一定的试验基础。

### 1 试验材料和方法

试验材料采用 SUS304 不锈钢, 钢板尺寸为 200mm × 110mm × 3mm。其主要化学成分见表 1。

Table 1 The main components of SUS304

components	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
mass	≤	≤	≤	≤	≤	0.18 ~ 0.0825	~	—
fraction	0.0008	0.01	0.02	0.0005	0.0003	0.20	0.1050	—

试验前首先用丙酮擦拭工件表面, 去除油污; 然后将研磨过的活性剂粉末与丙酮混合; 用扁平毛刷将糊

作者简介: 权雯雯 (1986-), 女, 硕士研究生, 现主要从事激光加工技术方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: liusang@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2010-06-17; 收到修改稿日期: 2010-07-05

状活性剂均匀刷涂于被焊工件表面,刷涂的厚度以能遮盖待焊工件表面为宜,待丙酮挥发后,活性剂粉末吸附在工件表面形成涂层。

实验中采用华中科技大学自主研发的脉冲 Nd:YAG 激光器,对涂覆单一活性剂的试样一次施焊,采用氩气正面保护,焊接过程如图 1 所示。其焊接规范如表 2 所示。

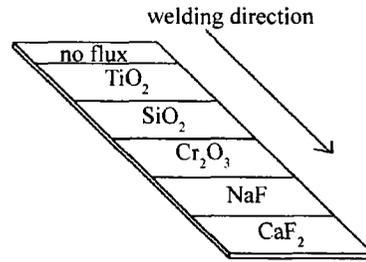


Fig. 1 The diagram of welding process

Table 2 The welding parameters

pulse width/ms	frequency/Hz	welding speed/(mm · min <sup>-1</sup> )	defocusing distance/mm	gas flow/(L · min <sup>-1</sup> )	average power/W
6	10	450	0	14	> 300

焊后用线切割方法按国标制取试样,经过粗磨、细磨和抛光后,用王水侵蚀 100s 左右,用金相显微镜进行观察分析。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 活性剂对焊缝熔深、熔宽及深宽比的影响

图 2 为在不同活性剂作用下焊缝横截面的宏观形貌,表 3 为焊缝熔深、熔宽和深宽比  $\beta$  的具体数据。从

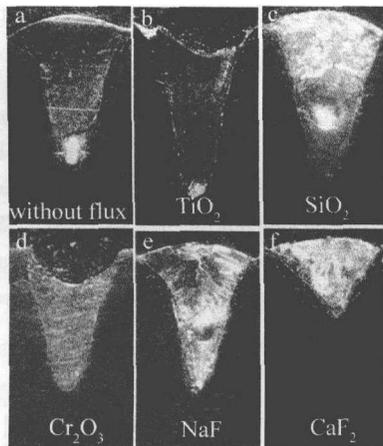


Fig. 2 Macro-morphology of welding joints with and without fluxes(35 ×)

Table 3 The data of the samples with and without fluxes

flux	no flux	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NaF	CaF <sub>2</sub>
penetration depth/mm	1.345	1.860	1.576	1.395	1.550	0.672
width/mm	1.086	1.134	1.033	0.775	1.348	0.830
$\beta$	1.238	1.640	1.525	1.800	1.150	0.810

图 2 中可以看出,在涂覆 TiO<sub>2</sub> 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的焊缝中出现了下凹现象,这主要是由于激光能量高度集中于焊缝表面,对焊缝较大的热冲击作用,从而使焊缝表面出现了下凹。此外,在涂覆了 TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, NaF 以及无活性剂时焊缝均出现了气孔,这是由于激光焊接过程中的加热、冷却过程较快,焊接熔池中气体不能及时排出所形成的<sup>[5]</sup>。

除了涂覆 CaF<sub>2</sub> 的焊缝外,其它 4 种活性剂的存在均使焊缝熔深有了不同程度的增加,其中 TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, NaF 分别使熔深增加 38.290%, 17.175% 和

15.242%。在熔宽的变化方面, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> 均使熔宽减小,其中 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 使得焊缝熔宽减小了 28.637%, 而涂覆 NaF 的焊缝熔宽不但没有减小,反而大幅度地增加。从各组试样焊缝深宽比的比较中可以看出,5 种活性剂中,氧化物均可使深宽比有不同程度的增加,其增加效果由大到小分别为 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, 而氟化物对深宽比无明显的增加, CaF<sub>2</sub> 甚至使深宽比大幅度降低。

### 2.2 活性剂熔深增加机理分析

从分子能量方面来说, O, F 等是自然界中电负性最大的物质, Cr, Ti, Si 以及金属的电负性则较小, 分子的组成元素电负性差异越大则分子的极性越大, 分子极性越大对激光的吸收能力也越大<sup>[6]</sup>。此外, 活性剂涂覆在工件表面上形成了具有一定孔隙结构的细颗粒涂层, 减小了工件对激光的反射; 与此同时, 活性剂颗粒表面形状的不规则使得散射的激光易被其它颗粒吸收。综上所述, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub> 和 NaF 的存在可以有效地提高工件表面对激光辐照的吸收率, 增加焊缝热输入, 从而使焊缝熔深显著增加。

由于本次试验为低功率的脉冲激光焊, 产生的等离子体较稀疏, 活性剂对等离子体的抑制作用有限, 熔深增加的主要原因是活性剂对熔池流动状态的改变<sup>[7-10]</sup>。在未加入活性剂时, 熔池中液态金属表面张力的温度系数为负值, 即在熔池边缘区域的温度较低, 表面张力值较高, 形成了从熔池中心区域向熔池周边流动的表面张力流, 使熔池变得浅而宽; 而加入氧化物活性剂之后, 熔池液态金属的表面张力数值降低并且转变为正的温度系数, 使熔池表面张力流的方向改变, 变成从熔池周边向着熔池中心区流动。在熔池中心区域, 通过液流直接传向熔池底部的电弧热量提高了熔池底部的加热效率, 促进了窄而深的熔池的形成, 同时焊缝深宽比也显著增加。而与氧化物相比, 氟化物对熔池表面张力没有明显的作用, 这也是氟化物对深宽比没有明显增加效果的原因。

### 2.3 焊缝的显微组织分析

焊缝的金相组织主要为柱状晶和等轴晶<sup>[11]</sup>。熔池中的热量主要靠热传导作用向外扩散。因此,在焊缝与母材结合处的温度梯度很大,大的冷却速度将直接促进柱状晶生成,柱状晶垂直于熔合线,逆向于温度梯度方向向熔池内部生长。随着凝固过程的进行,熔池内部温度梯度逐渐变小,出现了等轴晶。

与未涂覆活性剂的焊缝金相组织相比,涂覆活性剂后焊缝中等轴晶区域变小,柱状晶区域变大,尤其是在焊缝顶部出现了存在亚晶粒的奥氏体柱状晶,这是活性剂的存在导致焊接热输入增加引起的,如图3所示。

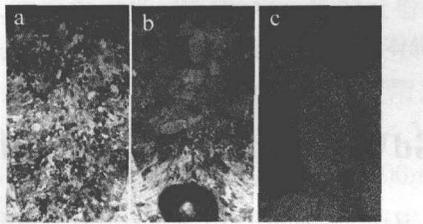


Fig. 3 Microstructures of welding joints without flux and with SiO<sub>2</sub>  
a—without flux(100×) b—with SiO<sub>2</sub>(100×) c—with SiO<sub>2</sub>(200×)

如图4所示,气孔的存在使得其周围局部区域的



Fig. 4 Porosity of welding joint with SiO<sub>2</sub> and the crystal morphology (100×)

热导率降低,导致气孔周围的温度梯度较低,从而促使该局部区域的晶粒形态由柱状晶转变为等轴晶。

### 3 结论

(1)将活性焊接技术引入 SUS304 的低功率脉冲激光焊接中,研究发现单一活性剂的存在使焊缝熔深均有不同程度的改变。其中,TiO<sub>2</sub> 增加熔深效果最为明显。氧化物活性剂均可使深宽比有不同程度的增

加,其增加效果由大到小分别为 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,TiO<sub>2</sub>,SiO<sub>2</sub>。而氟化物对深宽比则无明显增加效果。

(2)活性剂涂层可以有效提高激光的利用率,增加焊缝的热输入。此外,氧化物活性剂还通过改变熔池表面张力的分布影响了熔池流动状态,使焊缝深宽比显著增加。

(3)焊缝显微组织为柱状晶和等轴晶。活性剂的存在导致焊接热输入增加,从而使得焊缝中的柱状晶区域扩大,等轴晶区域变小。由于气孔会影响其周围的热导率,气孔周围的局部区域出现了等轴晶。

### 参 考 文 献

- [1] SIMONIK A G. The effect of contraction of the arc discharge upon the introduction of electronegative elements[J]. Welding Production,1976 (3):49-51.
- [2] ZHANG Zh D. The study of activating flux welding for magnesium alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007: 27-42 (in Chinese).
- [3] HUANG Y. Study on activating tig welding and mechanism of fluxes increasing weld penetration for aluminum alloys [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2007: 35-46 (in Chinese).
- [4] FAN Y F, LIU J H, LUO X N, *et al.* Effects of activating fluxes on low-power pulse laser welding of stainless steel [J]. Hot Working Technology, 2008, 37(23): 78-80 (in Chinese).
- [5] ZHENG Q G, GU J H, WANG T, *et al.* Investigation on melting pool behavior and defects of laser welding[J]. Laser Technology, 2000, 24(2): 90-94 (in Chinese).
- [6] ZHANG G Sh. Modern laser manufacturing technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 23-32 (in Chinese).
- [7] ZHAO Y Zh, SHI Y W, LEI Y P. The study of surface-active element oxygen on flow patterns and penetration in A-TIG welding[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2006, B37(3): 485-493.
- [8] XU Y L, DONG Z B, WEI Y H. Marangoni convection and weld shape variation in A-TIG welding process[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2007, 48(2): 178-186.
- [9] KAUL R, GANESH P, SINGH N, *et al.* Effect of active flux addition on laser welding of austenitic stainless steel[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(2): 127-137.
- [10] ZHANG R H, YIN Y, FAN D. Test of fluid flow forming in A-TIG welding pool[J]. Electric Welding Machine, 2008, 38(12): 41-44 (in Chinese).
- [11] FOLKHARD E. Welding metallurgy of stainless steels[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 63-68 (in Chinese).

(上接第375页)

- (PSO)[C]//Proceedings of the 2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition. Washington D C: IEEE Computer Society, 2009: 77-81.
- [9] ROSENFELD A. Digital straight line segments[J]. IEEE Transactions on Computers, 1974, 23(12): 1264-1268.
- [10] BHOWMICK P, BHATTACHARYA B B. Fast polygonal approximation of digital curves using relaxed straightness properties[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29

(9): 1590-1602.

- [11] ROSIN P L. Techniques for assessing polygonal approximation of curves[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(6): 659-666.
- [12] WALL K, DANIELSSON P E. A fast sequential method for polygonal approximation of digitized curves[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1984, 28(3): 220-227.