

光纤激光及CO₂激光焊接高强钢

徐国建¹ 李响¹ 杭争翔¹ 普雄鹰² 张超逸² 杳名宗春³

¹沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870; ²鞍山煜宸科技有限公司, 辽宁 鞍山 114051

³最新激光技术研究中心, 日本爱知县 安城 4460026

摘要 为了比较光纤激光及CO₂激光焊接特性,采用2 kW 光纤激光器及2.4 kW CO₂激光器对590 MPa 高强钢板进行焊接试验,通过改变离焦量及焊接速度等焊接参数,研究了两种焊接方法的熔深变化情况。结果表明,当焊接速度和输出功率相同时,光纤激光与CO₂激光焊接相比可获得更大的熔深;在负离焦条件下,离焦量在焦深以内时可使熔深增大;功率一定时,熔深随着焊接速度的增加而减小,但是CO₂激光焊接的熔深减小比率大于光纤激光焊接。

关键词 激光技术;光纤激光焊接;CO₂激光焊接;高强钢;离焦量;焦深

中图分类号 TG456.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.031403

Laser Welding of High Strength Steel Using Fiber Laser and CO₂ Laser

Xu Guojian¹ Li Xiang¹ Hang Zhengxiang¹ Pu Xiongying² Zhang Chaoyi²

Kutsuna Muneharu³

¹School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China

²Anshan Raycham Technology Co. Ltd., Anshan, Liaoning 114051, China

³Advanced Laser Technology Research Center Co. Ltd., Anjo-shi, Aichi-ken 4460026, Japan

Abstract In order to compare the welding characteristics of fiber laser and CO₂ laser, a 2 kW fiber laser and a 2.4 kW CO₂ laser are used to weld 590 MPa high strength steel plates. By changing the defocusing distance and the welding speed, the penetration depth is investigated. The results show that with the same welding speed and the same output power, the fiber laser welding gets more penetration depth compared with CO₂ laser welding. With a negative defocusing distance, the penetration depth becomes greater when the defocusing distance is within the range of focal depth; the penetration depth increases with the decrease of welding speed when the power is constant, and the penetration depth using the CO₂ laser welding decreases faster with the increase of welding speed than fiber laser welding.

Key words laser technique; fiber laser welding; CO₂ laser welding; high strength steel; defocusing distance; focal depth

OCIS codes 140.3510; 140.3470; 350.3390; 290.5870

1 引言

近年来由于新材料及新工艺的发展需求,迫切需要一种高效率、高质量的焊接方法来满足其发展。激光焊接以其自身优势迅速代替了传统焊接方法,在工业中获得日益广泛的应用。由于CO₂激光设备成本低、发展历史较长,因而被首选应用于激光焊接^[1-2]及激光-电弧复合焊接等领域^[3-4]。

最近几年,高能量短波长的光纤激光发展非常迅速^[5],其输出功率从100 W增大到50 kW。到目前为止,掺镱光纤激光器最高输出功率可达100 kW。光纤激光与CO₂激光相比拥有诸多优点,如光束质量好、波长短、运行成本低、免维护、加工柔性高、不存在外光路、抗震性好、便于移动、电光转换效率高(大于25%)等特点,近几年引起人们的高度重视。

收稿日期:2013-10-15;收到修改稿日期:2013-11-26;网络出版日期:2014-02-20

基金项目:2012~2014年国家外国专家局“高端外国专家项目”(文教类)(GDW20122101064)

作者简介:徐国建(1959—),男,博士,教授,主要从事激光加工工艺及成套加工设备方面的研究。

E-mail:xuguojian1959@hotmail.com

本试验采用了CO₂激光器和光纤激光器,对汽车制造领域应用较广的590 MPa 高强钢板进行了焊接,对比CO₂激光器和光纤激光器的焊接特性,并重点研究了离焦量和焊接速度对焊接熔深的影响。

2 试验过程

2.1 激光焊接系统

光纤激光焊接系统原理图如图1所示。光纤激光器型号为IPG YLR-2000。最大输出功率为2 kW,波长约为1070 nm,光束质量[光束参数积(BPP)]约为4.2 mm·mrad,传输光纤的直径为100 μm,操作光纤直径为150 mm,准直镜焦长为100 mm,聚焦镜焦长为200 mm。

CO₂激光焊接系统原理图如图2所示,该激光器为日本三菱公司生产的24CF-R型轴快流CO₂激光器,额定输出功率为2.4 kW,波长为10.6 μm,光束模式为TEM₀₁,采用ZnSe透镜聚焦,聚焦镜焦长为200 mm。

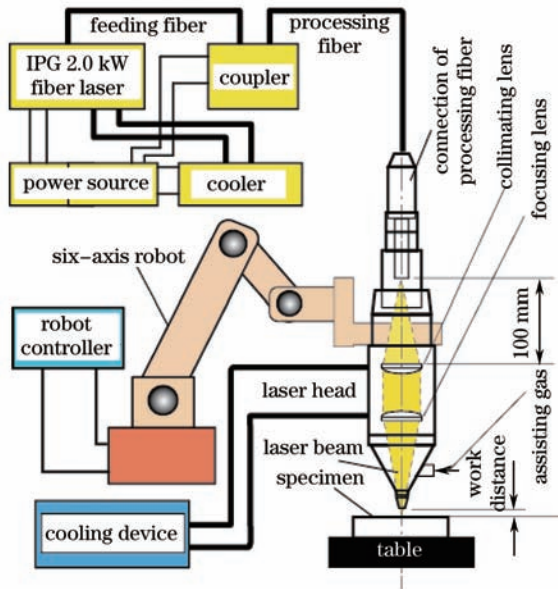


图1 光纤激光焊接系统原理图

Fig.1 Schematic of fiber laser welding setup

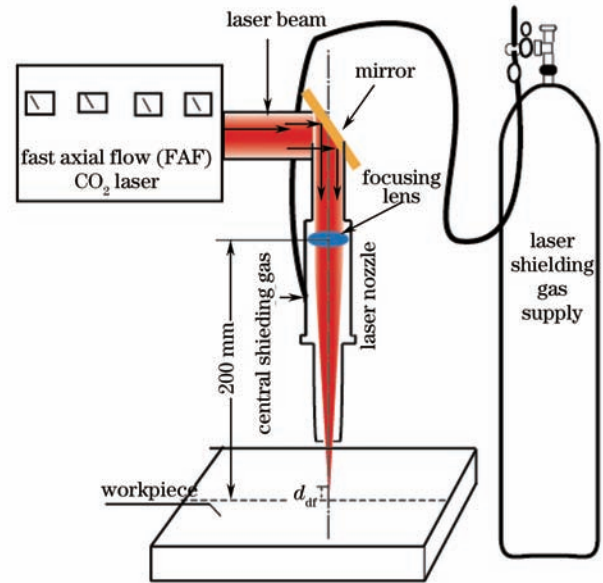


图2 CO₂激光焊接系统原理图

Fig.2 Schematic of CO₂ laser welding setup

2.2 试验材料

试验采用尺寸为160 mm×60 mm×6 mm的抗拉强度为590 MPa的高强钢板,牌号为WEL-TEN590。表1给出了材料化学成分。

表1 高强钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical components of base metal (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Mo	Ti	Cu	Fe
0.09	0.25	1.58	0.011	0.004	0.03	0.06	0.08	0.11	Bal.

光纤激光和CO₂激光焊接规范参数如表2所示。

表2 光纤激光和CO₂激光焊接规范参数

Table 2 Welding parameters of fiber laser and CO₂ laser

Laser	Power /kW	Speed /(mm/s)	Defocusing distance /mm	Shielding gas flow /(L/min)
CO ₂ laser	2	8	0, -1, -2, -3, 4	12
		6.67, 13.33, 33.33, 66, 67	-2	20
Fiber laser	2	8	0, -1, -2, -4	12
		8, 15, 25, 35, 50, 80, 150	-2	20

3 试验结果与讨论

3.1 焦点直径和焦深的计算

试验中CO₂激光的聚焦前光束直径是24 mm。焦点直径 d 和焦深 L 可通过以下公式计算^[6]:

$$d = \frac{2.44\lambda F(2M+1)}{D}, \quad (1)$$

$$L = \frac{2\lambda}{\pi} \left(\frac{2F}{D}\right)^2, \quad (2)$$

式中 λ 为激光波长(μm), F 为聚焦镜焦距(mm), D 为聚焦前光束直径(mm), M 为与光束模式有关的系数, 光束模式为 TEM_{01} 时, $M=0.01$ 。

经过计算, CO_2 激光焦点直径约为 0.22 mm, 焦深为 1.87 mm。

而对于 2 kW 的光纤激光焊接, 准直镜焦距为 100 mm, 聚焦镜焦距为 200 mm, 光纤直径为 100 μm 。焦点直径和焦深通过以下公式计算^[7]:

$$d = \frac{f}{f_c} \times D_c, \quad (3)$$

$$L = \frac{d^2}{2 \times P_{\text{BP}}}, \quad (4)$$

式中 f 为聚焦透镜的焦距(mm), f_c 为准直透镜的焦距(mm), D_c 为光纤直径(mm), P_{BP} 为光束质量($\text{mm} \cdot \text{mrad}$)。

经计算, 光纤激光的焦点直径约为 0.2 mm, 焦深约为 4.8 mm。尽管 CO_2 激光和光纤激光聚焦斑点直径几乎相同, 但焦深却差异很大。当采用焦距为 200 mm 的聚焦透镜时, CO_2 激光和光纤激光所得焦深分别为 1.87 mm 和 4.8 mm。

3.2 离焦量对熔深的影响

离焦量是指激光焦点相对于被焊工件表面的位置偏离。定义焦点在工件表面时离焦量为零, 而焦点在工件表面以上和表面以下分别为正值和负值。

采用光纤激光焊接厚度为 6 mm 的高强钢板, 在最佳工艺参数的焊接速度为 8 mm/s、保护气体 Ar 流量为 12 L/min 时, 离焦量 d_{af} 的变化(-4~0 mm)对焊缝外形及横断面的影响如图 3 所示。采用 CO_2 激光焊接厚度为 6 mm 的高强钢板时, 在最佳工艺参数的焊接速度为 8 mm/s、保护气体 Ar 流量为 12 L/min 时, 离焦量 (d_{af}) 的变化(-4~0 mm)对焊缝外形和横断面的影响如图 4 所示。从中可以知道, CO_2 激光与光纤激光相比较, 焊缝宽而浅。

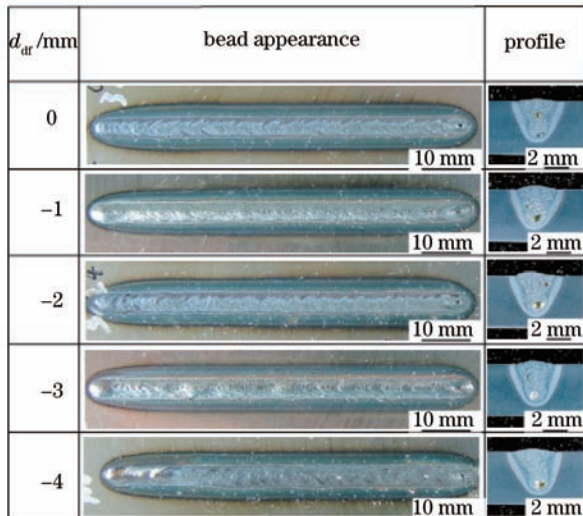


图 3 光纤激光焊接时离焦量对焊缝形状和熔深的影响

Fig.3 Effect of defocusing distance on bead appearance and profile in fiber laser welding

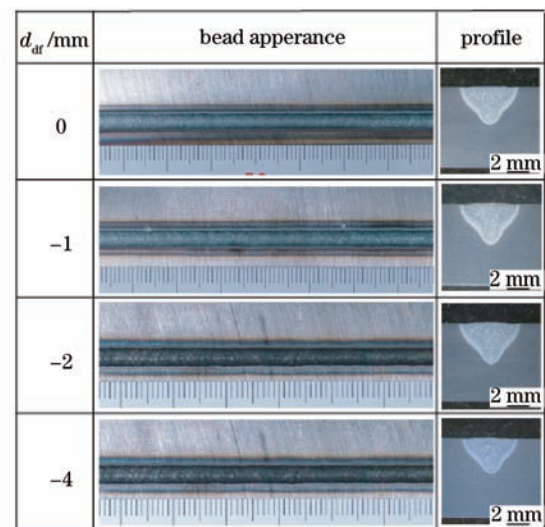


图 4 CO_2 激光焊接时离焦量对焊缝形状和熔深的影响

Fig.4 Effect of defocusing distance on bead appearance and profile in CO_2 laser welding

CO_2 激光焊接和光纤激光焊接的深宽比与离焦量之间的关系如图 5 所示。从中可以看出, 在相同条件下, 光纤激光的深宽比是 CO_2 激光的深宽比的 2 倍左右, 穿透能力更强。这是由于与 CO_2 激光相比, 短波长的光纤激光的能量更容易被金属和合金所吸收^[8](图 6), 获得的熔深更大。

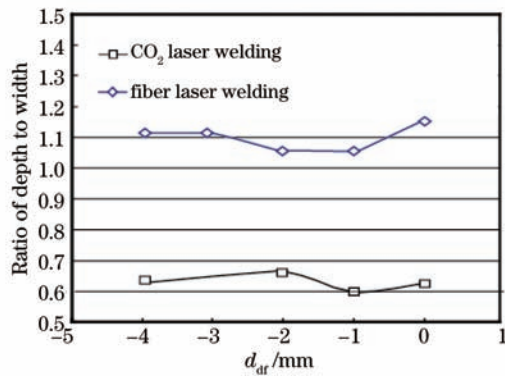
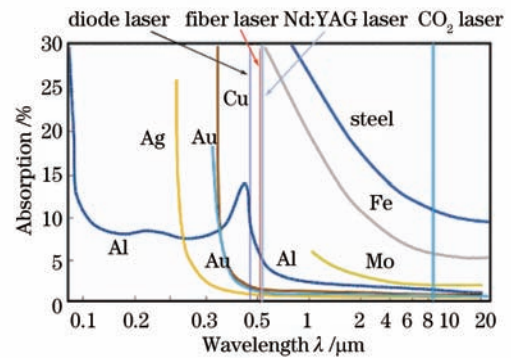
图5 CO₂激光焊接和光纤激光的离焦量对深宽比的影响Fig.5 Effect of defocusing distance on ratio of depth to width in CO₂ laser welding and fiber laser welding

图6 各种金属材料对激光的吸收率

Fig.6 Absorption to different laser radiation wavelengths for a number of metals

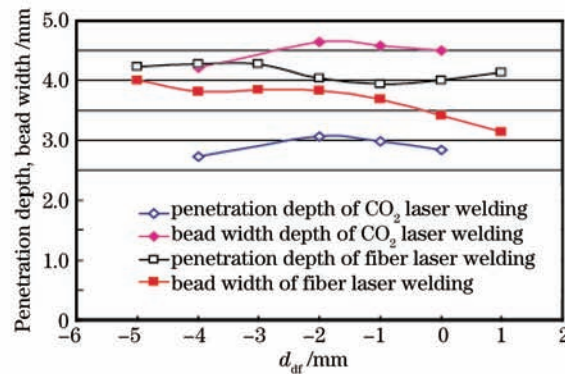
图7 CO₂激光焊接和光纤激光焊接熔深与焊缝宽度的比较Fig.7 Comparison of penetration depth and bead width in CO₂ laser welding and fiber laser welding

图7为CO₂激光焊接和光纤激光焊接熔深与焊缝宽度的比较。在激光输出功率为2 kW、离焦量在-5~1 mm之间变化时,光纤激光的焊接熔深在3.9~4.3 mm之间变化。然而CO₂激光输出功为2 kW、离焦量在-4~0 mm之间变化时,其焊接熔深在2.7~3.1 mm之间变化。由图7可知,当离焦量约为-4 mm时,光纤激光的焊接熔深最大,而当离焦量约为-2 mm时,CO₂激光达到最大焊接熔深。理论计算的CO₂激光和光纤激光所得焦深分别为1.87 mm和4.8 mm,由此可知在负离焦量条件下,离焦量在理论计算的焦深处所形成的熔深最大。因为当离焦量在焦深一半以内时,工件表面的光斑大小变化不大,即功率密度几乎不变,而负离焦导致焦点下移,有利于被焊材料对激光能量的吸收,所以离焦量在焦深范围内变化时,采用一定的负离焦量可使熔深变大^[9-10];而在负离焦量过大,达到脱离焦深的范围时,工件表面的光斑尺寸变大,能量密度减小,导致了熔深减小,所以CO₂激光焊接时,离焦量为-4 mm时熔深变小。

3.3 焊接速度对熔深的影响

采用光纤激光焊接厚度为6 mm的高强钢板,在最佳工艺参数即离焦量为-2 mm、保护气体Ar流量为20 L/min时,焊接速度的变化(8~150 mm/s)对焊缝外形及横断面的影响如图8所示。采用CO₂激光焊接厚度为6 mm的高强钢板时,在最佳工艺参数即离焦量为-2 mm、保护气体Ar流量为20 L/min时,焊接速度的变化(6.67~66.67 mm/s)对焊缝外形和横断面的影响如图9所示。从中可以知道,CO₂激光与光纤激光相比较,焊缝宽而浅,且不适合高速焊接。

在激光输出功率为2 kW时,光纤激光和CO₂激光焊接的熔深和焊接速度的关系如图10所示。对于光纤激光而言,当焊接速度从8 mm/s增加到150 mm/s时,焊接熔深从4 mm降到0.8 mm。然而,对于CO₂激光焊接,当焊接速度从6.67 mm/s增加到66.67 mm/s时,焊接熔深从3 mm降到0.5 mm。与CO₂激光相比,光纤激光的焊缝宽度与焊接熔深随着速度的增加,变化的较迟缓。

在激光输出功率为2 kW、焊接速度由8 mm/s增加到35 mm/s时,CO₂激光的焊接熔深减小了2.3 mm,而光纤激光的焊接熔深仅减小了1.2 mm。由上述结果可知,在相同焊接条件下,光纤激光焊接的熔深要比CO₂

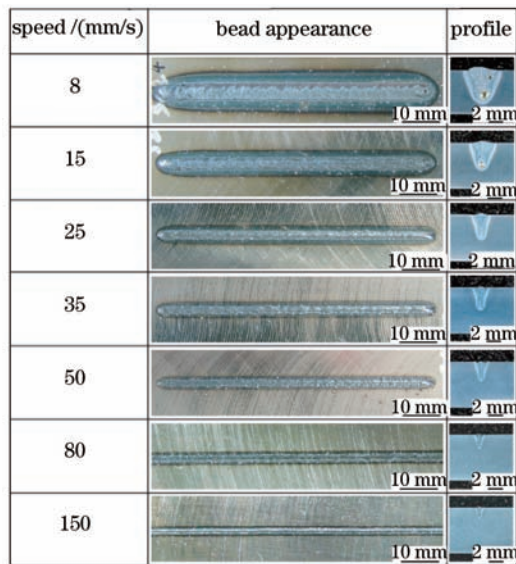
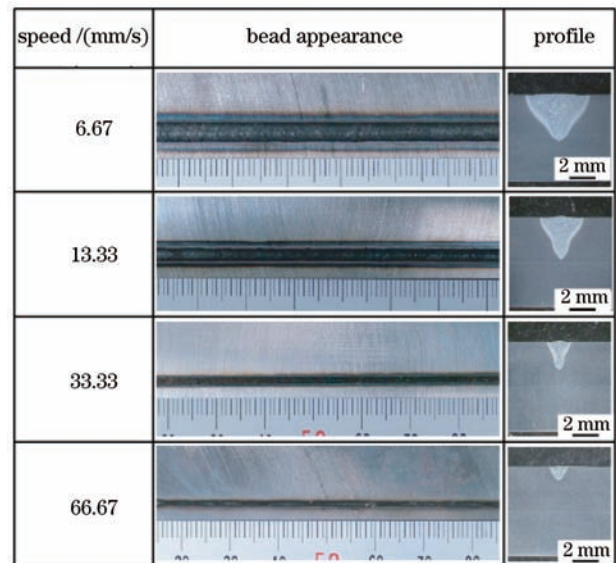
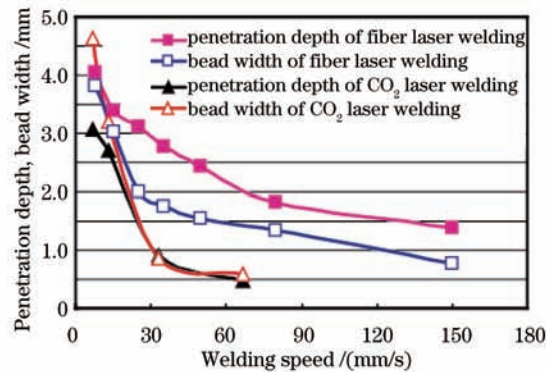


图8 光纤激光焊接速度对焊缝形状和熔深的影响

Fig.8 Effect of welding speed on bead appearance and profile in fiber laser welding

图9 CO₂激光焊接速度对焊缝形状和熔深的影响Fig.9 Effect of welding speed on bead appearance and profile in CO₂ laser welding

激光深1~2 mm。由于两种激光的波长不同,材料对激光的吸收率存在较大差异。由图6可知^[8],碳钢对光纤激光的吸收率为30%以上,而对CO₂激光的吸收率约为12%;同时CO₂激光焊接易产生大量的等离子体,而等离子体对激光的吸收作用也会大大削弱激光到达工件表面的能量,对焊接熔深也会产生较大影响。

图10 焊接速度对光纤激光和CO₂激光焊接的熔深的影响Fig.10 Effect of welding speed on penetration depth and bead width in fiber laser welding and CO₂ laser welding

4 结 论

通过上述的试验结果及讨论可得到如下结论:

- 1) 由于光纤激光的波长短,金属材料对其吸收率高。所以,光纤激光焊接与CO₂激光焊接相比可获得更大的熔深及更窄的熔宽。
- 2) 在焦深范围内的负离焦量可使焊接熔深增大。
- 3) 功率一定时,熔深随着焊接速度的增加而减小,CO₂激光焊接的熔深减小速率大于光纤激光焊接。

参 考 文 献

- 1 J Xie. Dual beam laser welding [J]. *Welding Journal*, 2002, 81(10): 223-230.
- 2 S Venkat, C E Albright, S Ramasamy, *et al.*. CO₂ laser beam welding of aluminum 5754-O and 6111-T4 alloys [J]. *Welding Journal*, 1997, 76(7): 275-282.
- 3 C V Hyatt, K H Magee, J F Porter, *et al.*. Laser-assisted gas metal arc welding of 25-mm-thick HY80 plate [J]. *Welding Journal*, 2001, 80(7): 163-172.

- 4 Shi Gongqi, David Howse. Laser welding and laser-MAG compound welding of shipbuilding [J]. *Electric Welding Machine*, 2007, 37(6): 37-39.
石功奇, David Howse. 船用钢结构的激光焊接以及激光-MAG复合焊接[J]. *电焊机*, 2007, 37(6): 37-39.
- 5 H Fukube. High power fiber laser [J]. *Welding Technology Journal of the Japan Welding Engineer Society*, 2005, 53(2): 100-106.
- 6 Christopher Dawes. *Laser Welding: A Practical Guide* [M]. Abington: Abington Publishing, 1992. 78-80.
- 7 Takeshi Araya, Answer your question: from technical service Q&A laser process [J]. *Welding Technology J Japan Welding Engineering Society*, 2005, 53(6): 122-129.
- 8 L Quintino, A Costa, R Miranda, *et al.*. Welding with high power fiber lasers a preliminary study [J]. *Materials & Design*, 2007, 28(4): 1231-1237.
- 9 Qin Guoliang, Lin Shangyang. Radial dimension of keyhole and its dynamic characteristics in laser deep penetration welding [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(4): 557-561.
秦国梁, 林尚扬. 激光深熔焊接过程中小孔径向尺寸及其动态特性[J]. *中国激光*, 2005, 32(4): 557-561.
- 10 Wang Jiachun, Wang Xizhe, Hui Songxiao. Research of linear heat input and laser focus position for laser welding HE130 titanium alloy [J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 30(2): 179-184.
王家淳, 王希哲, 惠松晓. HE130合金激光焊接线能量与焦点位置研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(2): 179-184.