

光纤耦合半导体激光的焊接性能

徐国建¹ 钟立明^{1*} 杭争翔¹ 石磊² 武斌斌³ 傅新皓³ 王志一⁴

¹沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870

²南京中科煜宸激光技术有限公司, 江苏 南京 210038

³鞍山煜宸科技有限公司, 辽宁 鞍山 114044

⁴朝阳重型机器有限公司, 辽宁 朝阳 122000

摘要 为了拓展半导体激光器在激光加工领域的应用范围,使其能够应用到厚板金属材料的焊接中,采用了Laserline公司研制的LDF4000-40光纤耦合半导体激光焊接系统,研究了其厚板SUS304奥氏体不锈钢的焊接性能。实验结果表明,其厚板SUS304奥氏体不锈钢焊接过程中完全能够形成匙孔效应,具有较强的穿透能力;相比于同等工作条件下的光纤激光,其焊接熔深有所减小,而焊接熔宽有所增加;焊缝成型及焊接过程稳定性要优于光纤激光,飞溅量明显小于光纤激光。由此证实了光纤耦合半导体激光器完全可以用于厚板金属材料的焊接。

关键词 激光技术;半导体激光器;光纤耦合;焊接性能;光纤激光;SUS304

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.061404

Welding Performances of Fiber Coupled Diode Laser

Xu Guojian¹ Zhong Liming¹ Hang Zhengxiang¹ Shi Lei² Wu Binbin³
Fu Xinhao³ Wang Zhiyi⁴

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

²*Nanjing Zhongke Raycham Laser Technology Limited Company, Nanjing, Jiangsu 210038, China*

³*Anshan Raycham Technology Limited Company, Anshan, Liaoning 114044, China*

⁴*Chaoyang Heavy Machinery Limited Company, Chaoyang, Liaoning 122000, China*

Abstract In order to expand the applied range of diode laser in laser processing field, and to apply diode laser to the thick plate welding of metal materials, the fiber coupled diode laser of LDF4000-40 that developed by the Laserline company is adopted to investigate the welding performance of the thick SUS304 austenitic stainless steel. Experimental results show that the keyhole can be formed, proving the ability of strong penetration. Compared to the fiber laser welding under the same welding conditions, the weld penetration depth decreases and bead width increases slightly; weld forming and welding process stability is better, and spatter is significantly smaller. The results confirm that the fiber coupled diode laser can be used for the thick plate welding of metal materials.

Key words laser technique; diode laser; fiber coupled; weldability; fiber laser; SUS304

OCIS codes 140.3390; 140.5960; 160.3900

1 引言

由于半导体激光具有光电转换高效、体积小及金属对其吸收率高等优点,在激光表面强化(堆焊、合金化及淬火)领域引起了人们的广泛关注^[1-3],并逐步走向实际生产应用。日本名古屋大学研究人员研究了半

收稿日期: 2014-01-08; 收到修改稿日期: 2014-01-26; 网络出版日期: 2014-05-12

基金项目: 沈阳市科学技术计划项目(F13-319-6-03)

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的研究。

E-mail: xuguojian1959@hotmail.com

*通信联系人。E-mail: zhongliming1101@126.com

导体激光器、CO₂激光器和Nd:YAG激光器在双相不锈钢表面熔覆钴基合金的效果,结果表明,半导体激光器的熔覆效率及堆焊层稀释率易控制性均优于后两种激光器^[4]。美国南卫理公会大学先进制造技术研究中心的Santhanakrishnan等^[5-6],利用高功率半导体激光器进行表面强化时,开发了一种基于温度监控的闭环控制系统,实时调节激光输出功率,以保证强化区域的温度保证一个恒定值,最后保证在金属材料表面获得稳定的硬度值和硬化层深度,该项技术在冶金行业已经产业化。但是,关于半导体激光器用于厚板金属材料焊接的研究,到目前为止还没有报道^[7-11]。本文采用芯径为400 μm的光纤耦合半导体激光器,研究了厚板奥氏体不锈钢SUS304的焊接性能,为光纤耦合半导体激光器在厚板焊接方面的应用提供了理论依据。

2 实验过程

2.1 实验材料

实验材料为SUS304奥氏体不锈钢板,尺寸为200 mm×100 mm×10mm,实验材料的成分如表1所示。

表1 材料化学成分

Table 1 Chemical composition of material

Substrates	Mass fraction of chemical compositions /%							
	C	Si	Mn	S	P	Fe	Cr	Ni
SUS304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	Bal	18.00-20.00	8.00-10.50

2.2 实验方法

光纤耦合半导体激光焊接系统如图1所示。该焊接系统由光纤耦合4.0 kW半导体激光器,配套水冷机、6轴联动机器人、激光焊接头(聚焦镜和准直镜焦距均为100 mm,其焦点直径为Φ0.4 mm)及工作平台组成。其中半导体激光器为Laserline公司研制的LDF4000-40,由4个模块组成,为了增加半导体激光束的焦深,4个模块的波长分别采用了915、940、980、1030 nm,激光器的原理示意图如图2所示,4种波长组成激光光束焦深约为1.6 mm,光束参数积(BPP)约为23 mm·mrad。

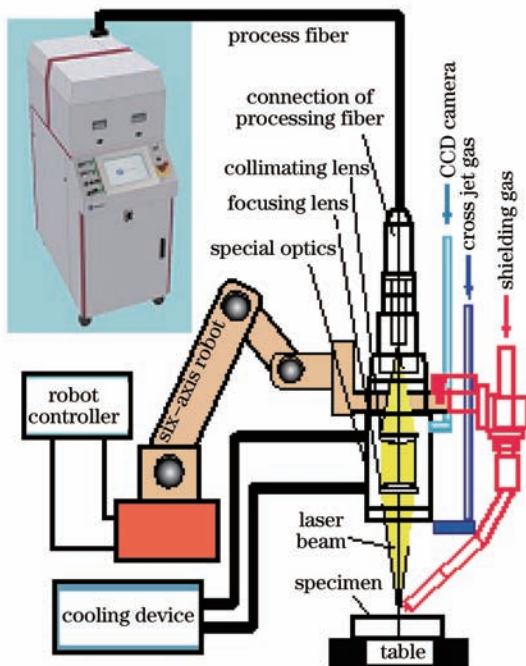


图1 光纤耦合半导体激光焊接系统

Fig.1 Welding system of fiber coupled diode laser

实验过程中,激光输出功率为3.5 kW、激光入射角为0°、离焦量为0 mm、保护气体(Ar)流量为15 L/min、焊接速度范围为1.0~5.0 m/min。

焊后用线切割方法截取横断面金相试样,然后进行研磨、抛光和腐蚀(腐蚀液为王水,硝酸和盐酸的比

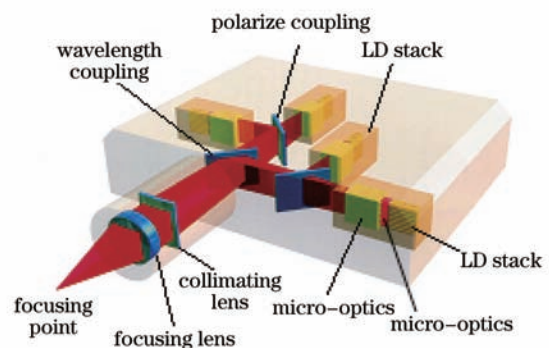


图2 4 kW 半导体激光器的原理示意图

Fig.2 Principle schematic of 4 kW diode laser

例为 1:3), 以研究焊缝的成型和组织状态。

3 实验结果与讨论

3.1 焊缝成型

在上述的焊接条件下, 不锈钢 SUS304 平板上的焊接外观形貌如图 3 所示。由图可知, 获得的焊缝表面光滑、成型美观; 通过焊接过程的观察, 发现焊接过程非常稳定, 飞溅量很小, 优于光纤激光的焊接过程。另外, 由图可知, 在弧坑处可以清楚地看到焊接过程中的匙孔痕迹, 也就是说光纤耦合半导体激光焊接过程中, 与光纤激光同样也能形成匙孔效应。这是因为实验所用的光纤耦合半导体激光器的能量密度约高达 $3.2 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 完全具有形成匙孔效应的能力。

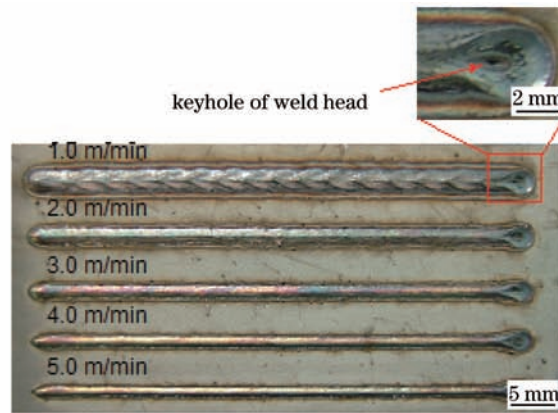


图3 半导体激光焊接的焊缝外观形貌

Fig.3 Weld appearance morphology of diode laser welding

在 1.0~5.0 m/min 的焊接速度下(从左至右), 光纤耦合半导体激光及光纤激光焊接(光纤激光焊接的操作光纤芯径 $\Phi 200 \mu\text{m}$, 准直镜焦长 150 mm、聚焦镜焦长 300 mm, 其焦点直径为 $\Phi 0.4 \text{ mm}$; 其他焊接条件与光纤耦合半导体激光相同)的焊缝横断面对比结果如图 4 所示。由图可知, 进一步证实了光纤耦合半导体激光焊接过程中形成了匙孔效应。其焊接熔深与光纤激光的对比结果如图 5 所示, 由图可知, 光纤耦合半导体激光的焊接熔深略低于光纤激光, 而焊缝宽度略微大于光纤激光; 这是由于光纤激光的光束质量要优于半导体激光, 能量密度稍高的缘故。并且两种激光焊接方法的熔深随着焊接速度的增加而减小, 这是由于随着焊接速度的增加, 热输入量减小的缘故。另外, 观察焊缝的横断面可知, 光纤耦合半导体激光的焊缝中气孔量明显少于光纤激光。这是由于与光纤激光焊接相比, 光纤耦合半导体激光焊后的焊缝深度略为减小, 而焊缝宽度略微增加, 有利于熔池中气泡上浮外溢的缘故。

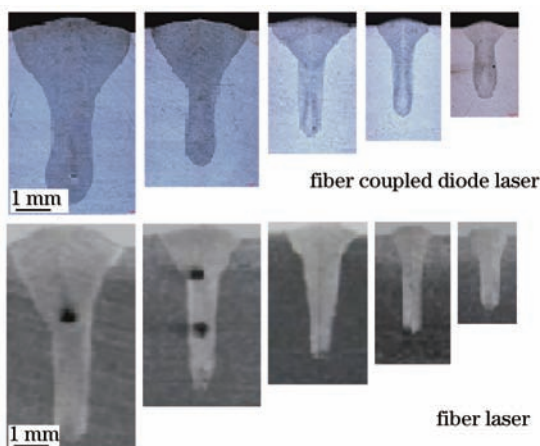


图4 半导体和光纤激光不同焊接速度下焊缝横断面
Fig.4 Weld cross section of different welding speed

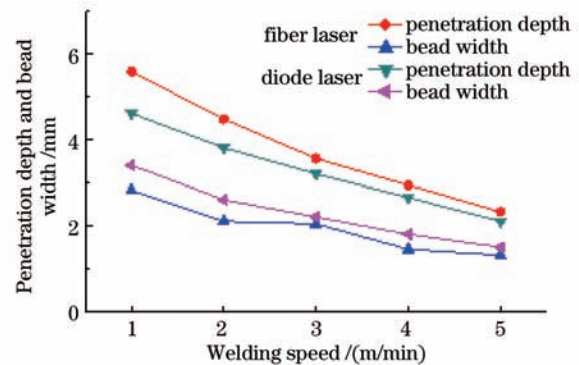


图5 各种焊接速度下半导体和光纤激光的焊缝熔深和熔宽
Fig.5 Weld depth and width in various welding speeds using diode laser and fiber laser

由上述的分析可知,与光纤耦合半导体激光相比,虽然光纤激光的光束质量(BPP为 $5.4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$)好(图6)、激光束焦深大(约为 5.5 mm)。但是光纤耦合半导体激光通过四种波长组成的激光束焦深优于单波长的半导体激光,另外,由于波长短,金属材料对其吸收率高(图7),所以焊接熔深略微小于光纤激光。通过上述结果,证实了光纤耦合半导体激光在焊接过程中能够形成匙孔效应,实现厚板金属材料的焊接。由此也可以推测,由于光纤耦合半导体激光的波长短,金属材料对其吸收率高(图7),所以更容易实现有色金属(对激光束高反材料)的激光焊接。

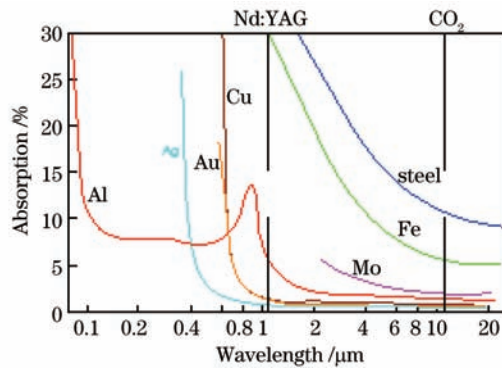


图6 各种金属对不同波长激光束的吸收率

Fig.6 Absorption rate of various metals to different wavelength laser beams

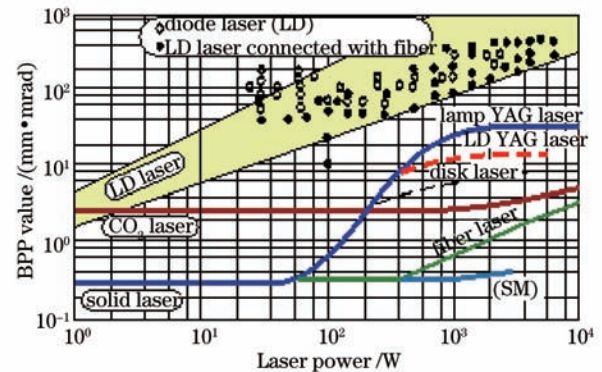


图7 各种激光的光束质量与功率之间关系

Fig.2 Relationship of beam quality and power in different lasers

3.2 性能分析

不锈钢 SUS304 在焊接速度为 3.0 m/min 时的焊缝金属微观组织结构如图 8 所示。焊缝金属由致密和细小的柱状奥氏体组织构成,熔合线附近的焊缝组织为外延结晶方式生长,与母材之间形成良好冶金结合。由图可知,焊缝金属的晶粒尺寸明显小于母材金属,这是由于激光快速加热和快速冷却的作用结果,使得焊缝组织比母材组织细小的缘故。

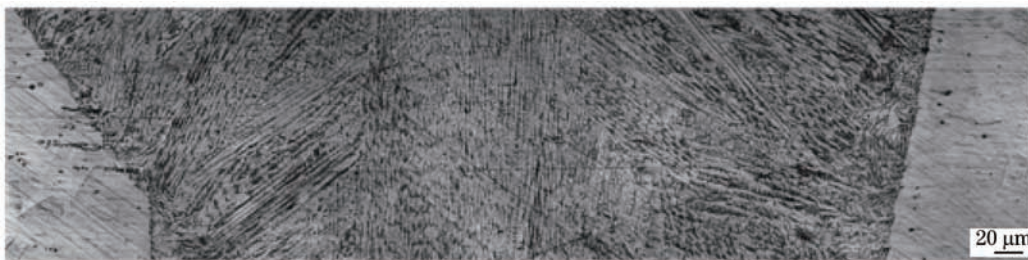


图8 焊缝金属显微组织

Fig.8 Microstructure of weld metal

采用数显维氏硬度计,对焊接速度为 3.0 m/min 时的不锈钢 SUS304 的焊接接头硬度测试结果如图 9 所示。硬度测试条件为压头载荷 100 g 、测量部位距离试件表面 2.0 mm 、由焊缝中心向母材方向测试、测量间

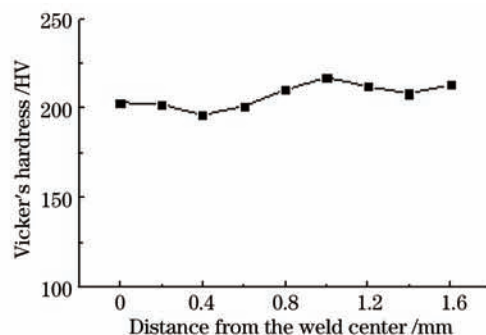


图9 焊接接头的硬度分布曲线

Fig.9 Hardness distribution curve of welded joint

隔为 0.2 mm。焊缝和热影响区的硬度约为 201.1 HV,母材的硬度约为 212.9 HV。两者硬度值的差别不大,因为母材和焊缝金属均由奥氏体组织构成。单激光焊接的快速热循环作用,使得焊缝组织比母材组织细小,晶界强化效果增大;但是实验板材为冷轧钢板,焊后由于焊缝和热影响区的加工强化效果消失,导致焊缝和热影响区的硬度略低于母材金属。

4 结 论

1)本实验条件下,光纤耦合半导体激光在厚板不锈钢 SUS304 焊接过程中,具有匙孔效应,有较强的穿透能力,由此可以证实光纤耦合半导体激光完全可以应用于厚板金属的焊接。

2)在相同焊接条件下,与光纤激光焊接比较,光纤耦合半导体激光的焊接熔深略微降低,而熔宽略微增加,焊缝中的气孔明显减少。

3)与光纤激光焊接比较,焊缝成形更加美观,焊接过程更加稳定,飞溅量更小。

4)可以推测,由于光纤耦合半导体激光的波长短,金属材料对其吸收率高,所以其更容易实现有色金属(对激光束高反材料)的激光焊接。

参 考 文 献

- 1 Zhang Jun, Shan Xiaonan, Liu Yun, *et al.*. Kilowatt-output and high beam quality diode laser linear array coupling source [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0202010.
张俊,单肖楠,刘云,等.千瓦级高光束质量半导体激光线阵合束光源[J].中国激光,2012,39(2):0202010.
- 2 Lin Li. The advances and characteristics of high-power diode laser materials processing [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 34(4-6): 231-253.
- 3 Xu Guojian, Yin Deyang, Hang Zhengxiang, *et al.*. Microstructure and property of laser overlaid layer of mixed Co-based alloy and VC powder [J]. J Shenyang University of Technology, 2012, 34(1): 26-30.
徐国建,殷德洋,杭争翔,等.激光堆焊 Co 基合金与 VC 混合粉末组织和性能[J].沈阳工业大学学报,2012,34(1):26-30.
- 4 Katsushige Yamada, Sou Morisita, Muneharu Kutsuna, *et al.*. Direct diode laser cladding of Co based alloy to dual phase stainless steel for repairing the machinery parts [C]. SPIE, 2003, 4831: 65-70.
- 5 S Santhanakrishnan, F Kong, R Kovacevic. An experimentally based thermo-kinetic phase transformation model for multi-pass laser heat treatment using high power direct diode laser [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(1-4): 219-283.
- 6 S Santhanakrishnan, R Kovacevic. Hardness prediction in multi-pass direct diode laser heat treatment by on-line surface temperature monitoring [J]. Materials Processing Technology, 2012, 212(11): 2261-2271.
- 7 Hu Liming, Liu Yun, Lu Zhihua, *et al.*. Skin welding with a combination of 980 nm and 1064 nm lasers [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0404001.
胡黎明,刘云,芦志华,等.980 nm/1064 nm 双波长半导体激光皮肤焊接[J].中国激光,2011,38(4):0404001.
- 8 Gong Fei, Hu Xiyuan, Tan Yun, *et al.*. Semiconductor laser transmission welding of thermoplastic polypropylene [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(4): 109-112.
龚飞,胡席远,谭贇,等.热塑性塑料 PP 半导体激光焊接工艺[J].焊接学报,2013,34(4):109-112.
- 9 Bachmann F G, Russek U A. Laser welding of polymers using high-power diode laser [C]. SPIE, 2002, 4637: 505-518.
- 10 Zhou Mingzhao, Zhang Qunli, Shi Yuhua, *et al.*. Microstructure and properties of welded joint of 85Cr17 steel and 0Cr18Ni9 steel by semi-conductor laser welding [J]. Hot Working Technology, 2011, 40(7): 127-129.
周明召,张群莉,施彧翰,等.半导体激光焊接 85Cr17 与 0Cr18Ni9 不锈钢的组织与性能[J].热加工工艺,2011,40(7):127-129.
- 11 Yang Jiaoxi, Wang Zhiyong, Zuo Tiechuan. High power diode laser cladding aggregate tungsten carbide-nibased superhard composites [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3262-3266.
杨胶溪,王智勇,左铁钊.高功率半导体激光熔覆絮状 WC-Ni 基超硬复合材料[J].中国激光,2009,36(12):3262-3266.