

大光斑半导体激光-TIG 电弧复合表面熔覆方法

顾玉芬¹, 苏艳文¹, 朱明¹, 曹驰², 魏玉斌³

¹兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

²兰州理工大学温州泵阀工程研究院, 浙江 温州 325105; ³南方阀门制造有限公司, 浙江 温州 325105)

摘要 针对现有表面熔覆方法所采用的单一热源特性调控范围窄, 熔覆效率低, 稀释率大, 裂纹倾向明显, 成本高等问题, 提出采用一种大光斑半导体激光与 TIG 电弧复合热源可调控的表面熔覆方法。以 Q235 为母材, 在建立的热源可调控试验系统上, 进行大光斑半导体激光热源、大光斑半导体激光与 TIG 复合热源表面熔覆 Co06 粉末工艺试验, 分析了不同热源及参数对于熔覆层形貌、宏观尺寸、稀释率等成形特征的影响规律。结果表明, 相比大光斑半导体激光熔覆, 大光斑半导体激光与电弧复合表面熔覆方法, 可以显著降低所需激光功率, 在减小激光热冲击作用的同时降低生产成本。70 A+500 W 复合熔覆层表面和剖面形貌, 与 1 300~1 500 W 大光斑半导体单激光的熔覆效果基本相似, 高宽比减小 35%, 稀释率减小 27%。通过对复合热源特性的调控, 可有效提高生产效率, 为高性能的表面熔覆提供一种新方法。

关键词 激光熔覆; 激光-TIG 复合熔覆; 熔覆层成形; Co 基合金粉末

中图分类号: TN249; TG156.99

文献标识码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20163604.379

A Hybrid Heat Source Surface Cladding Method of Large Flare Semiconductor Laser+TIG Arc

Gu Yufen¹, Su Yanwen¹, Zhu Ming¹, Cao Chi², Wei Yubin³

¹State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; ²Wenzhou Academy of Pump and Valve Engineering, Lanzhou University of Technology,

Wenzhou, Zhejiang 325105, China; ³South Valve Manufacture Co. Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325105, China)

Abstract The Existing single heat source methods of surface cladding have many disadvantages-difficulty regulating heat source characteristics, low deposition efficiency, high rate of dilution, easily induced cracks, high cost. Aiming at above issues, A hybrid heat source surface cladding method of large flare semiconductor laser and TIG arc is proposed. The heat source of the method can easily regulate. The Co06 alloy powder was deposited on Q235 steel plates by single large flare semiconductor laser heat source and the hybrid heat source method. Meanwhile, the effects of different heat source on morphology, macro-size, dilution ratio, etc. of cladding single-layer have been analyzed respectively. It was found that hybrid heat source method can significantly reduce the laser power, this method can reduce the thermal shock interaction via adding the arc heat to the laser heat source meanwhile reduce production costs. Using the same parameters, the results show that the morphology of cladding layer remained unchanged, the dilution rate of cladding layer decreased for about 27%, the height-width ratio of cladding layer decreased for about 35% with the hybrid heat source method. The hybrid heat source method can further improve the production efficiency and provide a new surface cladding method for high-end industrial.

Key words laser cladding; laser+TIG arc hybrid cladding; cladding layer; Co-based alloy powder

0 引言

在高端工业领域, 例如核电阀门的密封面、汽轮机燃机套筒、航空发动机叶片等, 通过表面熔覆技术

增强性能或延长零部件的使用寿命成为必须手段^[1]。目前, 国内外关于高参数的金属粉末的研究得到了长足的进步, 很多可以满足不同应用领域对

收稿日期: 2016-02-29; 收到修改稿日期: 2016-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(项目编号: 51305189); 甘肃省自然科学基金资助项目(项目编号: 145RJZA119); 国家火炬计划资助项目(项目编号: 2015GH531401); 温州市激光与光电产业集群科技专项资助项目(项目编号: J20130014)

作者简介: 顾玉芬(1975-), 女, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向新型焊接方法, 金属焊接性及材料性能分析。
E-mail: guyf@lut.cn

于耐磨、耐高温、耐蚀等性能的要求^[2]。但通常高性能金属粉末的合金成分较为复杂、硬度较高、熔覆层残余应力较强、应变较大,且与母材的物理、化学性差异较大;因此对热源的选择特别敏感、最佳熔覆工艺参数的匹配也较为严格。而常规的火焰喷涂、等离子喷焊、TIG/MIG 堆焊等熔覆工艺通常难以精确控制热源的作用形式,很难精确满足高性能粉末熔覆过程对于热量、温度分布的严格要求,因此易产生裂纹、孔洞等缺陷,及合金成分烧损、熔覆层性能下降等问题;TIG 堆焊采用高斯热源分布,高温区域窄,稀释率大。

虽然半导体大光斑激光具有热源模式调控准确、稳定的特点;可以精确控制熔覆过程的热量传导,由于焦点光斑面积较大具有稀释率较低^[3]、高宽比大的优点。但是半导体激光其功率过大导致热冲击作用较强^[4],高合金粉末熔覆层易产生裂纹等缺陷与残余应力集中、应变较大的问题;导致熔覆层合金成分烧损、熔覆层性能下降;一次性投入大、成本

高。虽然激光与电弧复合可以显著降低激光功率,根据不同热量需求灵活调控复合热源特性,获得理想的温度分布^[5]。但是传统的 YAG、CO₂、光纤激光与电弧复合技术适用于大厚件的深熔焊接,无法满足表面熔覆对于低稀释率的要求。国内外关于激光与电弧复合热源应用于表面熔覆行业的研究甚少。

综上所述,文中提出采用大光斑半导体激光与 TIG 电弧复合热源表面熔覆方法,在介绍该方法原理的基础上。搭建了激光与电弧复合热源熔覆试验平台,通过工艺试验分析了大光斑半导体激光、大光斑半导体激光与电弧复合热源表面熔覆参数对熔覆层成形规律的影响。

1 试验条件

1.1 实验材料

熔覆实验基体材料为 Q235。实验熔覆材料为 Co06 合金粉末,其化学成分如表 1 所示,采用预置粉末法施焊。

表 1 Co06 合金粉末化学成分(质量分数/%)

Tab.1 Chemical compositions of Co06 alloy (mass fraction%)

C	Si	B	Cr	Fe	Ni	W	Mo	Mn	rare earth	Co
1.0~1.2	1.0~2.0	3.0~4.0	28.0~32.0	≤3	2.0~3.0	4.0~6.0	0.5~1.5	0.4~0.8	—	Etc

1.2 实验方法

实验系统如图 1 所示。激光热源采用直接输出式矩形大光斑半导体激光器 FL-DLIGHT-3000。其参数为焦点尺寸 4 mm×4 mm,波长 976 nm,最大功率 3 000 W,热源模式为梯形平台。TIG 焊机为华意隆 WSE315,钨极直径为 3.2 mm,保护气流量为 4 L/min,钨极到工件的垂直距离为 3 mm。熔覆时电弧在前、激光在后,钨极尖端与激光焦点的平面距离为 2 mm,激光和电弧热源夹角为 30 °C。



图 1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic of diode laser with rectangular beam profile-TIG arc hybrid cladding

图 2 为熔覆层剖面示意图,熔覆试样经过研磨、抛光、腐蚀后测量熔覆层的几何尺寸,熔高 H 、熔深 D 、熔宽 B ;高宽比 $\alpha = \frac{H}{B}$,高宽比反映熔覆层横向扩展能力,高宽比越小熔覆道横向扩展能力越强。

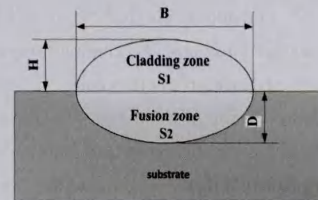


图 2 熔覆层横截面形貌图

Fig.2 Picture of cross-section cladding track

稀释率通常使用横截面面积测量值的比值进行计算。根据图 2 示意图,假设修复区域为抛物面,熔覆区域面积为 S_1 ,熔合区域面积为 S_2 ,根据抛物线面积公式 $S = \frac{2}{3}ab$,稀释率的公式可以简化为

$$d = \frac{S_2}{S_1 + S_2} = \frac{\frac{2}{3}BD}{\frac{2}{3} \cdot B(H+D)} = \frac{D}{H+D} \quad (1)$$

由式(1)可知,可以通过关注熔覆区高度和熔合区深度,来实现对熔覆层稀释率的求解^[6-7]。

稀释率反映熔覆层纵向扩展能力及基材对熔覆层稀释程度,稀释率越小纵向扩展能力越强,同时基材对熔覆材料稀释程度越低。

图3为矩形大光斑半导体激光与TIG电弧复合热源示意图,其中焊接方向为慢轴方向,垂直于焊接方向为快轴方向。在焊接方向,激光热源呈梯形平台状分布,边缘部位的温度梯度较大,而电弧热源的高温分布范围相对较窄;二者复合后,熔池高温区域的热源分布仍以激光为主,复合热源可以精确调控热量与温度的分布^[8-9],可以获得宽而均匀的温度分布,并且可以针对不同的材料体系调控激光的热源特性。激光的引入导致熔池金属蒸汽的大量电离与蒸发,形成光致等离子体,可以使得电弧更加稳定^[10-11]。电弧的引入使材料表面熔化形成熔池,使得金属对激光的吸收率显著增高,可以提高激光能量的利用率^[12];而在熔池边缘的低温区域,电弧的引入可以改善激光热源温度梯度较大的问题,减少应力集中,可通过调控电弧的热源特性满足激光对于低温区域的热量需求。

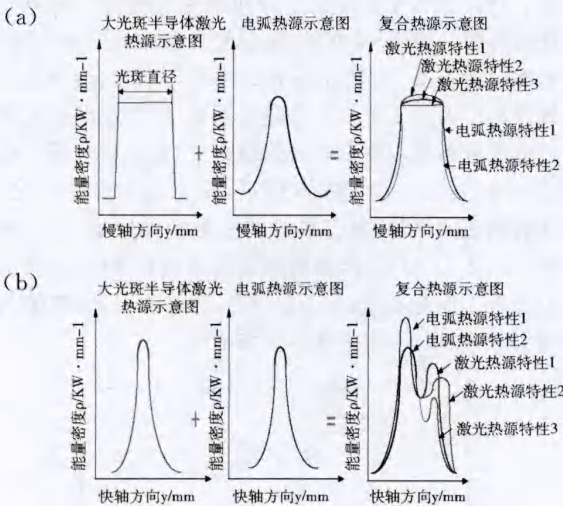


图3 大光斑半导体激光与电弧复合热源示意图
(a)慢轴方向热源 (b)快轴方向热源

Fig.3 Sketch of diode laser with rectangular beam profile-TIG arc hybrid heat source

在快轴方向,激光与电弧的热源特性均呈高斯分布。可以通过控制两种热源的作用形式,例如利用电弧热源熔化粉末,激光热源直接作用在熔池并熔化母材,通过这种不对称的热源分布形式,实现熔

化粉末与母材热量的独立调控,因此可以根据不同的熔覆需求,调控热源匹配形式。电弧热源可以满足金属粉末的熔化,激光热源仅需调控加热母材的热量,与单一依靠激光熔化粉末和母材相比;显著降低了所需的激光功率和生产成本。

2 工艺试验

2.1 直接输出式半导体矩形大光斑激光熔覆试验

采用表2的参数,进行矩形大光斑激光热源表面熔覆Co06粉末试验,获得了不同激光功率参数下的熔覆层形貌、形状特征参数、高宽比、稀释率的变化曲线。图4为激光功率800W的熔覆层形貌,由于激光器提供的能量无法完成金属粉末“熔化—球化—铺展—收缩”的过程,因此熔覆层不连续,成形不良。图5为激光功率900~1500W的熔覆层形貌和剖面。从图中可知随着激光功率的增加熔覆层成形变好,900、1000W成型较差,这是由于矩形大光斑激光热源呈梯形台阶分布,周边温度密度低、而温度梯度较大,易产生缺陷。如图6所示随着激光功率的增加,熔深、熔宽增加,熔高基本保持不变。从图3可知激光热源呈梯形平台状分布,高温区域宽,能量密度分布均匀;光斑大小不变,故熔宽在1200W以后变化范围较小;随着功率增加,热输入增加,熔深增加。如图7所示随功率的增加,稀释率呈线性上升趋势、高宽比总体呈线性下降趋势。随着激光功率增加,熔深熔宽同时增大,熔高基本保持不变,致使高宽比减小,稀释率增大。图8为激光功率2200W时的熔覆层形貌,从图中可得金属粉末烧损严重,熔覆层成形较差,这是由于激光功率的增加使熔覆层温度达到了有益元素的沸点,故将有一部分元素以金属蒸汽的形式逸出熔池,致使熔覆层成形差,性能下降。

表2 单激光熔覆工艺参数

Tab.2 process parameters of single laser cladding

air flow /(L/min)	powder thickness/mm	Laser power P/W	Scanning speed V_s /(mm/s)
4	1	700,900~	1.5
		1500,2200	



图4 激光功率800W时激光熔覆层形貌
Fig.4 Morphology of single cladding with laser power 800 W in single laser heat source cladding

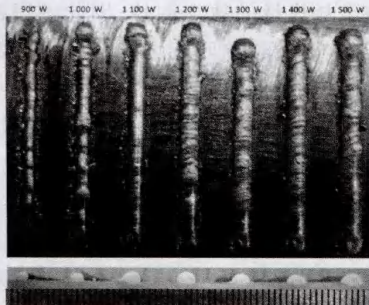


图5 单激光变功率熔覆层形貌和剖面
Fig. 5 Morphology and cross-section shapes of single cladding with different laser power in single laser heat source cladding

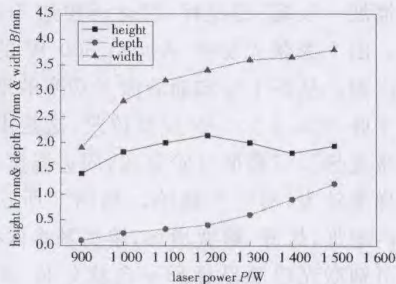


图6 激光功率对熔覆层熔宽、熔高和熔深的影响
Fig. 6 Effect of different laser power on cladding layer width, cladding-zone height and fusion-zone depth

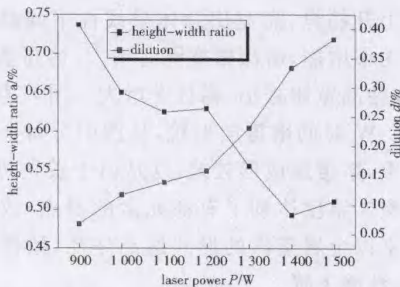


图7 激光功率对熔覆层稀释率和高宽比的影响
Fig. 7 Effect of different laser power on cladding layer dilution ratio and height-width ratio



图8 激光功率 2 200 W 时激光熔覆层形貌和剖面
Fig. 8 Morphology and cross-section shapes of single cladding with laser power 2 200 W in single laser heat source cladding

2.2 低功率直接输出式半导体矩形大光斑激光-TIG 复合热源表面熔覆试验

图9 为粉末厚度 1.5 mm, 离焦量为 0, 激光功

率保持 800 W, 熔覆速度 1.5 mm/s 不变、弧长不变, TIG 电流分别为 60、65、70、75 A 时, 复合熔覆层形貌和剖面。发现复合后 800 W 也能很好的熔覆, 表明引入电弧可降低所需的激光功率; 在熔池边缘的低温区域, 可以改善激光热源温度梯度较大的问题, 减少应力的集中, 改善金属粉材熔化后的铺展能力, 提高熔覆层成形质量。

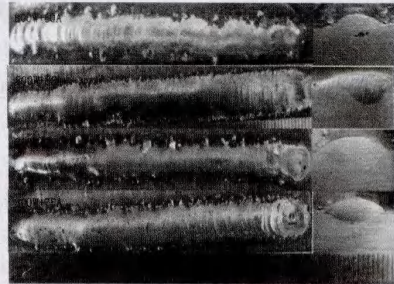


图9 TIG 电流对复合热源熔覆层形貌和剖面
Fig. 9 Morphology and cross-section shapes of single cladding with different TIG currents in hybrid heat source cladding

图 10、图 11 为粉末厚度 1.5 mm, 激光功率保持 800 W, 熔覆速度 1.5 mm/s 条件下, 激光-TIG 电弧复合热源获得单道熔覆层的成形参数随 TIG 电流变化趋势图。如图 10 所示, 随着复合电流的增加, 熔高基本保持不变, 熔宽到 65 A 以后不再变化, 熔深呈线性增加。由图 3 可知两个热源复合后, 熔池高温区域的热源分布仍以梯形平台热源为主; 复合后电弧的稳定性、挺度增加, 故 65 A 以后, 熔宽基本保持不变。随着电流的增加, 复合热源的能流密度增加, 熔深增大。由图 11 可得, 随着电流的增加稀释率增加, 而高宽比基本保持不变; 这是由于随着电流增加, 热输入增大, 熔深增大, 熔宽基本保持不变。

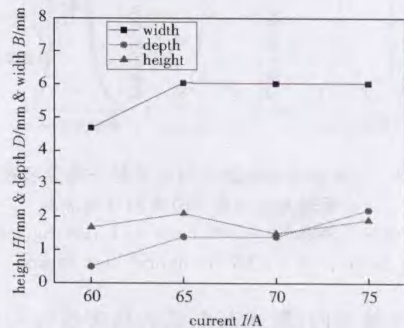


图10 TIG 电流对复合熔覆层熔宽、熔高和熔深的影响
Fig. 10 Effect of different TIG currents in hybrid heat source cladding on cladding layer width, cladding-zone height and fusion-zone depth

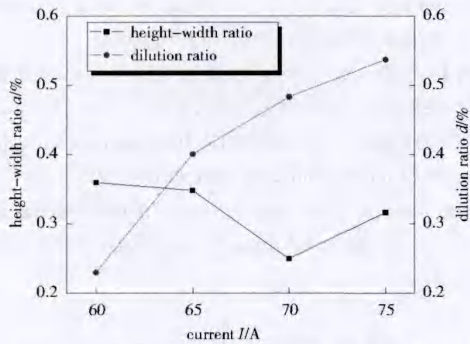


图 11 TIG 电流对复合熔覆层稀释率和高宽比的影响
Fig. 11 Effect of different TIG currents in hybrid heat source cladding on cladding layer height-width ratio and dilution ratio

3 试验对比与分析

图 12 为同一条件参数下,500 W 单激光、70 A 单 TIG、70 A+500 W 复合、1 400 W 单激光热源熔覆层形貌和剖面。从图 12 中可知,采用 500 W 大光斑激光熔覆时,不能得到连续的熔覆层;当采用复合热源进行熔覆时,其熔覆层成形较好。采用大光斑激光熔覆,由于工件表面的反射、500 W 时能量密度较低,不能满足熔覆层成形所需的热量,故不能得到连续的熔覆层。采用 1 400 W 大光斑激光熔覆,高温区域较宽且温度均匀,熔覆层中间成形较好;由于梯形平台热源边缘的温度梯度较大,故边缘易产生裂纹等缺陷。焊接电流为 70 A 的 TIG 电弧与 500 W 激光复合热源得到的熔覆层表面和剖面形貌,与单一采用 1 300~1 500 W 大光斑半导体激光得到的熔覆效果基本相似。两者复合后,一方面,引入电弧提高了激光的利用率,减小热冲击;另一方面,激光热源和 TIG 电弧热源复合后,减小了边缘温度梯度,减少裂纹等缺陷;其次激光对电弧有很强的控制作用,能增加电弧的稳定性,有利于形成稳定可靠的熔覆过程。

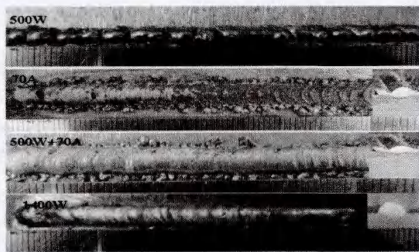


图 12 单激光、TIG、复合热源熔覆层形貌和剖面
Fig. 12 Morphology of single cladding with single laser, single TIG and hybrid heat source cladding

从表 3 中可以看出 70 A+500 W 复合熔覆层较单 70 A TIG,熔宽增加 13%,熔深减小 40%,熔高增加 54%,稀释率减小 55%。70 A+500 W 复合熔覆层较 1 400 W 单激光,熔宽增加 62%,熔深减小 33%,高宽比减小 35%,熔高基本保持不变,稀释率减小 27%。综上所述,矩形大光斑激光与 TIG 电弧复合较单 TIG 和单激光更有利于金属粉材表面熔覆工艺。

表 3 不同热源熔覆层特征参数对比

Tab. 3 Compared the characteristic parameters of different heat source cladding layer

热源形式	熔宽	熔深	熔高	高宽比	稀释率
70 A+500 W 复合	5.90	0.6	1.90	0.32	0.24
70 A 单 TIG	5.22	1.0	0.88	0.16	0.53
1 400 W 单激光	3.65	0.9	1.80	0.49	0.33

4 结论

低功率矩形大光斑半导体激光-TIG 电弧复合表面熔覆方法,相比大光斑半导体激光熔覆可以显著降低所需激光功率,在减小激光热冲击作用的同时降低生产成本;激光的引入提高了 TIG 电弧的稳定性,提高电弧挺度,复合后获得稀释率较低的熔覆层。70 A+500 W 复合熔覆层表面和剖面形貌,与 1 300~1 500 W 大光斑半导体单激光的熔覆效果基本相似,高宽比减小 35%,稀释率减小 27%。表明低功率矩形大光斑激光与 TIG 电弧复合热源熔覆方法较激光表面熔覆更适用于高性能金属粉末的表面熔覆。

参考文献

- [1] SAYED M E. Structure and properties[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2005, 10(1): 27-31.
- [2] 胡本美, 刘国权, 贾成厂, 等. 新型高性能粉末高温合金的研究与发展[J]. 材料工程, 2007(2): 49-57.
- [3] 郭士锐, 陈智君, 张群莉, 等. 大功率半导体激光表面改性的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013(5): 55-62.
- [4] 李东荣, 王富耻, 马壮, 等. ZrO₂ 涂层激光热冲击损伤机理研究[J]. 新技术新工艺, 2006(6): 39-42.
- [5] XIAO FENGHAO, SONG GANG. Spectral analysis of plasma in low-power laser/arc hybrid welding of Mg alloy [J]. Transactions on Plasma Science, 2009, 37(1): 76-82.
- [6] 潘许, 赵剑峰, 刘云雷, 等. 激光熔覆修复镍基高温合金稀释率的可控性研究[J]. 中国激光, 2013(4): 109-115.

- [7] 黄凤晓. 激光熔覆和熔覆成形镍基合金的组织与性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [8] 柳绪静, 刘黎明, 王恒, 等. 镁铝异种金属激光-TIG 复合热源焊接性分析[J]. 焊接学报, 2005(8): 40-43.
- [9] 刘黎明, 迟鸣声, 宋刚, 等. 镁合金激光-TIG 复合热源焊接热源模型的建立及其数值模拟[J]. 机械工程学报, 2006(2): 82-86.
- [10] LU DENGPIG, ZHANG SHAOBIN, HU SHENG-SUN, et al. Study on mechanism of mutual effect between laser and arc & its effect on weld penetration [J]. China Welding, 1993, 2(2): 104-108.
- [11] 樊丁, 中田一博, 牛尾诚夫. 激光与脉冲 MIG 复合焊接试验研究[J]. 应用激光, 2002, 22(2): 169-171.
- [12] LI CHENBIN, LIU LIMING. Investigation on weld ability of magnesium alloy thin sheet T-joints: arc welding, laser welding, and laser-arc hybrid welding [J]. Advanced Manufacturing Technology, 2013 (65): 27-34.