

316L 不锈钢粉末激光熔覆工艺研究

笞少平 焦俊科 张文武

中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201

摘要 为了探索激光工艺参数对 316L 不锈钢粉末在 304 # 不锈钢板上熔覆质量的影响规律,发现最优的工艺参数,利用实验室自行设计组装的光纤激光熔覆系统对其进行了一系列的激光熔覆工艺试验。用激光共聚焦显微镜、维氏硬度计以及其他方法,对不同组合的工艺参数(激光功率、熔覆速度、激光频率以及离焦量等)下单道熔覆的试样的表面形貌和横截面质量进行了检测和分析,发现了工艺参数对熔覆质量的影响规律,并据此确定了一个最佳的熔覆参数组合范围,在这个范围内得到的熔覆试样结果显示,熔覆条表面光滑,有完整的熔覆条纹,无气孔和裂纹。

关键词 激光光学; 激光熔覆; 316L 不锈钢; 熔覆工艺; 熔覆宽度; 工艺参数

中图分类号 TG44; TG43 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.061406

Study on Laser Cladding Process of 316L Stainless Steel Powder

Zan Shaoping Jiao Junke Zhang Wenwu

*Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences,
Ningbo, Zhejiang 315201, China*

Abstract In order to explore the influence of laser parameters on the cladding quality of 316L stainless steel powder on the 304 # stainless steel plate and find out the optimal cladding parameters, a series of laser cladding experiments are carried out with a self-designed and assembled fiber laser cladding system. The surface morphology and cross sectional quality with different combinations of process parameters (laser power, cladding speed, laser frequency, defocusing amount, and so on) are detected and analyzed by means of laser scanning confocal microscope and Vickers hardness tester. The influence law of process parameters on the cladding quality is found and the optimum range of the cladding parameters is determined. The experimental results in this range show that the cladding surface is smooth with holonomic coating lines and without pores and cracks.

Key words laser optics; laser cladding; 316L stainless steel; cladding process; cladding width; process parameters

OCIS codes 140.3390; 140.3070; 140.3510

1 引言

激光熔覆技术是利用高能激光束将合金粉末涂层熔化,在基体合金表面形成冶金结合涂层的表面处理技术^[1]。它对基体和涂层材料无限制,可以在低性能廉价钢材上制备出高性能贵重的合金钢表面,以降低材料成本,节约贵重稀有的金属材料,降低能源消耗,延长金属零部件的使用寿命^[2-3],是一种经济效益较高的涂层表面改性技术^[4]。但激光熔覆是一个复杂的物理化学过程,目前想要得到较好的熔覆结果还面临着一系列的问题,如基体材料与熔覆材料的兼容性问题,以及熔覆过程中激光工艺参数对熔覆质量的影响规律等。

不锈钢具有良好的力学性能和优异的耐蚀性能,在航空、冶金、机械、石油化工、建筑、医疗和家庭耐用消

收稿日期: 2015-12-30; **收到修改稿日期:** 2016-01-21; **网络出版日期:** 2016-05-11

基金项目: 宁波市自然科学基金(2015A610078)

作者简介: 笞少平(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光多维增材制造技术方面的研究。

E-mail: zanshaoping@nimte.ac.cn

导师简介: 焦俊科(1981—),男,博士,高级工程师,主要从事激光与物质相互作用,激光加工技术与装备等方面的研究。

E-mail: jiaojunke@nimte.ac.cn(通信联系人)

费品等领域得到了广泛应用^[5]。而对受损不锈钢工件的修复和再利用,是当代工业绿色生产的需要。国内的学者围绕不锈钢的激光熔覆开展了一系列的探索研究,王围等^[6]对不锈钢熔覆技术再制造修复液压油缸杆件的问题作了探讨,说明了使用不锈钢粉末熔覆技术修复各种类型的矿用综采支架、液压油缸杆件在经济上和技术上的可行性。高美娜等^[7]针对不锈钢-碳钢板层合板制备方法中结合面存在的缺陷问题,采用激光熔覆法制备金属层合板,获得了冶金结合及组织性能均良好的层合板,屈服强度和延伸率均达到了不锈钢层合板的标准要求,表明了该工艺方法的可行性。杨宁等^[8-11]研究了激光熔覆不锈钢的工艺参数对熔覆层质量的影响,得出了扫描速度与稀释率之间的关系,发现了激光功率对熔覆层成型高度、宽度和深度的积极影响,以及对扫描速度的消极影响。作为一种表面修复工艺,激光熔覆对熔覆结果的表面耐磨耐蚀性能要求很严格。何祥明等^[3,12]对不锈钢熔覆的摩擦磨损行为作了研究,发现了不同熔覆材料在其耐磨性最优情况下的组织成分及环境温度。最近,刘娟等^[13]利用数值模拟的方法分析了激光熔覆过程中温度场分布情况和熔池节点温度梯度的变化规律及扫描路径对温度场的影响。段晓溪等^[14]利用纳米碳化硅增强了 316L 不锈钢熔覆层,提高了熔覆层的硬度和抗磨损性能。在国外,诸多学者在激光熔覆不锈钢方面开展了大量的研究^[15-18]。早在 2004 年 Pinkerton 等^[19]对激光在 316L 不锈钢熔覆方面的应用作了研究,他们通过试验,研究了激光多层熔覆的应用,发现了主要输入工艺参数与成型试样的尺寸、特性以及表面粗糙度之间的联系。

为研究激光熔覆工艺参数对熔覆效果的影响规律,推动激光熔覆技术在不锈钢工件强化和修复上的应用,本文利用中低功率可调制光纤激光器在不同的激光功率、激光频率、扫描速度和离焦量下对 316L 不锈钢粉末的激光熔覆进行了一系列试验,探索出了一定参数范围内最优的 316L 不锈钢粉末在 304# 不锈钢基板上的熔覆工艺参数,并找出了各种激光参数对熔覆质量的影响规律。

2 试验设计

2.1 试验装置及材料

熔覆试验在三维光纤激光加工系统上进行,该系统包括光纤激光器、XYZ 运动系统、激光焊接头、稀有气体保护系统和熔覆工装系统等。其中,所使用的激光器为国产 500 W 光纤激光器(波长为 1064 nm,最大功率为 500 W),激光头的聚焦镜焦距为 125 mm,激光束准直聚焦后的光斑直径为 150 μm 。XYZ 三维运动控制平台的行程为 500 mm \times 500 mm \times 200 mm。

在熔覆过程中,熔覆层的氧化控制是决定质量的关键,为了避免熔覆层的氧化,自行设计了一套稀有气体保护系统,该系统为一个加盖的树脂箱体(200 mm \times 200 mm \times 80 mm),箱底有载物台和夹具,可避免试样随平台运动而晃动。箱盖有一个圆孔(直径为 80 mm),试验过程中,用一块高透石英玻璃(100 mm \times 100 mm \times 2 mm)盖住圆孔,并不断通入氩气以保证熔覆试样一直处在高纯氩气的环境内。熔覆时,激光束透过石英玻璃透射窗口对试样进行加工,如图 1 所示。

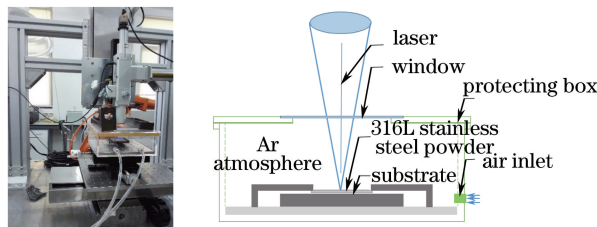


图 1 试验装置和原理图

Fig. 1 Experimental setup and schematic diagram

试验以不锈钢作为研究材料,其中基体选择尺寸为 50 mm \times 25 mm \times 2 mm 的普通 304# 不锈钢板,粉末材料选择粒度为 500 目的 316L 不锈钢。304# 不锈钢和 316L 不锈钢的物理和化学特性相似(表 1),但是 316L 不锈钢在耐高温耐腐蚀和强度方面都优于 304# 不锈钢,并且与 316 不锈钢相比,316L 不锈钢在熔覆之后,不需退火处理,就可以获得最佳的耐腐蚀性能。因此,采用 316L 不锈钢对 304# 不锈钢易损和使用强度要求较高的部位进行修复和强化具有重要的工程应用意义。

表 1 基体材料和粉末材料相关特性参数的对比
Table 1 Related characteristics of substrate and cladding materials

Material	Density /(g/cm ³)	Melting point /°C	Specific heat capacity at 20 °C /(kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	Thermal conductivity at 100 °C /(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Hardness /HV
304#	7.93	1398~1454	0.50	16.3	≤200
316L	7.93	1375~1450	0.50	16.3	≤200

2.2 试验准备及工艺参数设置

试验开始前用 600 号的砂纸对不锈钢基板表面进行打磨处理,并用无水乙醇进行清洗。采用预置涂层的方式,用 3D 打印机制成的模具进行铺粉,以保证粉厚(0.8 mm)的均匀性,铺粉过程中不添加粘结剂,以保证熔覆过程的稳定性和熔覆层的纯度。

在材料和铺粉参数确定的情况下,可调的工艺参数为激光频率、功率、扫描速度以及离焦量等,工艺参数可调范围如表 2 所示。

表 2 工艺参数可调范围
Table 2 Adjustable range of process parameters

Parameter	Laser frequency /Hz	Power /W	Scanning speed /(mm/s)	Defocusing amount /mm
Range	500~10000	≤500	≤30	-20~20

激光束沿着同一个方向进行扫描。为了对基板进行预热,扫描的宽度(14 mm)略大于铺粉宽度(12 mm),如图 2(b)所示。在激光表面熔覆过程中,单道熔覆的质量直接决定面熔覆的质量,开展单道熔覆工艺的研究是进行面熔覆工艺研究的基础。为了防止熔覆条之间相互影响,将相邻熔覆条之间的距离设置为 5 mm,如图 2(b)所示。熔覆现象与一般的焊接类似,火花四溅,尤其是在功率较大,离焦量较小的时候,火花飞溅现象尤为显著,熔覆过程及示意图如图 2 所示。

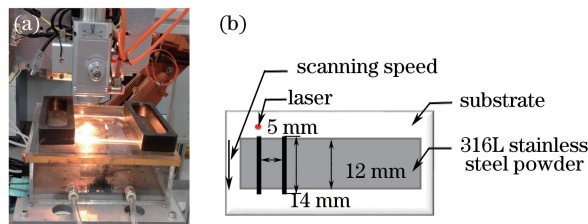


图 2 (a) 熔覆过程图; (b) 熔覆路径规划示意图
Fig. 2 (a) Cladding process; (b) cladding path designing

3 试验结果与分析

熔覆过程中,当激光束从金属粉末扫描到基板的时候,由于粉末不足,熔覆条末端的熔覆厚度和宽度都会减小,如图 3(b)所示。此外,由于激光束作用时熔池的对流传质作用能充分搅拌熔池,使熔池中杂质上浮析出^[20],并随着熔池的形成发生移动和积累,在每道熔覆条末端形成一个黑点,如图 3(b)所示。熔覆时,只有被激光扫描的粉末发生了熔化和凝固,形成一个完整的熔覆条,其他粉末依然停留在基板表面。图 3(a)

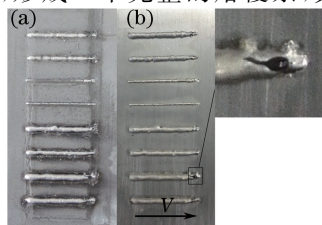


图 3 (a) 熔覆后去粉前的形貌; (b) 去粉之后的形貌以及末端放大图

Fig. 3 (a) Morphology of cladding with powder on it;
(b) morphology of cladding without powder and enlargement of one of its ends

和3(b)分别为去粉前后的熔覆结果对比图。

3.1 频率对熔覆的影响

试验中使用峰值功率为 500 W 的光纤激光器,该激光器可以通过外部调制的方法实现脉冲出光,频率可调范围为 500~10000 Hz。调制频率对熔覆效果的影响,共涉及 8 组试验,激光功率固定为 224 W,离焦量固定为 -10 mm。具体试验参数如表 3 所示,其中 v 为扫描速度, f 为激光频率,其熔覆结果如图 4 所示。

表 3 频率对熔覆的影响试验参数

Table 3 Parameters used to test the influence of frequency on cladding

Serial number	1	2	3	4	5	6	7	8
$v / (\text{mm/s})$	4	4	4	4	8	8	8	8
f / Hz	500	1000	1500	2000	500	1000	1500	2000

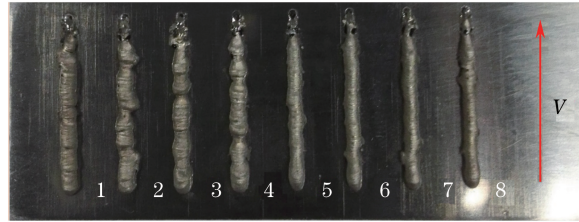


图 4 不同频率下的熔覆形貌

Fig. 4 Cladding morphology with different frequencies

从图 4 可以看出,当熔覆速度一定时,第 1~4 道和第 5~8 道熔覆条的粗细程度和宏观形貌分别相似,而在低扫描速度时,由于热量积累后形成的熔池吸附周围粉末,导致粉末分布不均,产生了一定程度的缩颈,如第 1~4 条熔覆条。因此可以得出,激光频率的改变并没有明显改善熔覆条的宏观形貌,具体原因分析如下。在脉冲激光熔覆过程中,功率和光斑半径恒定的情况下,光斑重叠率是决定熔覆质量的主要因素。

$$\delta = 1 - \frac{v}{fd}, \quad (1)$$

式中 d 为光斑直径, δ 为激光光斑重叠率。当 $fd \gg v$ 时, $\delta \approx 1$,因此激光频率在 500~2000 Hz 甚至更大范围内,不会对熔覆结果造成明显的影响。在本试验中,激光的扫描速度为 4~8 mm/s,频率为 500~2000 Hz,光斑直径为 0.15 mm,因此激光光斑重叠率几乎相同,频率的影响几乎可忽略不计。

3.2 扫描速度、熔覆功率、离焦量对熔覆的影响分析

下面讨论激光频率固定在 1000 Hz 时,用控制单因子变量的方法研究激光扫描速度、熔覆功率和离焦量对熔覆质量的影响。

前期的探索试验发现,当激光功率小于 132.3 W ($v=4$ mm/s) 时,基板未能充分加热融化,不能与熔覆条形成牢固的结合,而当激光功率大于 344 W 时,离焦量和速度的控制不当会导致基板受热变形。因此将激光器的功率范围缩小在 132.3~344 W 之间,取 224 W 和 316 W 进行熔覆时,熔覆结果如图 5(a) 所示。用游标卡尺测量熔覆条横截面的最大宽度,试验参数及宽度测量结果如表 4 所示。

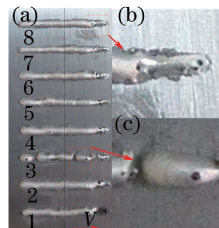


图 5 (a) 不同工艺参数下的熔覆效果; (b) 熔覆条末端放大图; (c) 不连续熔覆条部分位置放大图

Fig. 5 (a) Results with different cladding parameters; (b) end and impurities; (c) inconsecutive cladding and impurities

表 4 扫描速度、熔覆功率和离焦量的探索参数及熔覆条宽度

Table 4 Exploration parameters of scanning speed, cladding power and defocusing amount and the width of each cladding strip

Serial number	1	2	3	4	5	6	7	8
Power/W	224	316	224	316	224	316	224	316
Scanning speed/(mm/s)	8	8	10	10	8	8	10	10
Defocusing amount/mm	-20	-20	-20	-20	-10	-10	-10	-10
Width/mm	1.27	1.44	1.13	1.28	0.57	0.78	1.06	1.15

从图 5(b) 可以看到熔覆末端的缩小以及杂质的累积, 这与前面的分析结果吻合。根据试验参数和熔覆结果, 由第 1 条和第 3 条的对比可以得出, 当激光器功率和离焦量一定时, 扫描速度过大会导致热输入不足, 粉末融化不均匀, 难以形成连续的熔覆条, 如图 5(c) 所示; 将第 1、3、5、7 条和第 2、4、6、8 条对比, 从熔覆条的宽度测量值(表 4) 可以看出, 当扫描速度和离焦量一定时, 激光器功率越低, 形成的熔覆条越细。这是因为激光光斑的能量密度呈高斯分布, 从圆心向边缘部分逐渐降低造成的; 由第 1~4 条和第 5~8 条的对比可以看出, 在离焦量为 -20 mm 时熔覆条的截面宽度值大于离焦量为 -10 mm 时的宽度值, 说明离焦量的大小可以直接影响熔覆条的截面宽度, 因此在多道搭接熔覆时, 可以通过控制离焦量来改变相邻熔覆条的搭接率。

为了观察熔覆条与基板的结合情况, 将图 5(a) 试样沿基板中心线用水刀切开, 利用激光共聚焦显微镜对其横截面的形貌进行观察。图 6 为共聚焦显微镜下 200 倍放大倍数的观测结果。

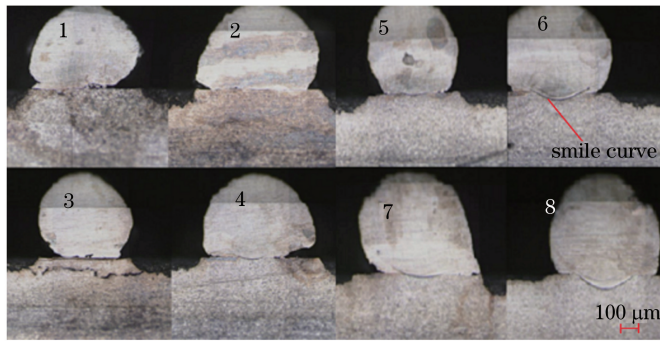


图 6 共聚焦显微镜 200 倍放大倍数下的观测结果

Fig. 6 Observed results under confocal microscopy with 200 \times amplification

从显微镜观测的结果可以看出, 在离焦量为 -20 mm 时, 第 1 和第 3 条由于能量摄入不足, 和基板之间没有明显的结合层, 即结合部位没有形成的一定的“微笑曲线”, 如图 6 所示, 因此熔覆条不牢固。第 2 条有微弱的连接。第 4 条以及在离焦量为 -10 mm 时的熔覆条, 在与基板结合面处形成了“微笑曲线”, 可知基板表面融化, 和熔覆条形成了紧密的连接, 并且激光功率越大, “微笑曲线”的弧度也越大, 说明连接强度也越好。

3.3 参数优化后的单道熔覆试验

根据以上的探索结论和得到的熔覆工艺参数对熔覆结果的影响规律, 对试验参数进行了优化, 并且尝试在零离焦状态下进行熔覆, 熔覆结果如图 7 所示, 优化后的工艺参数如表 5 所示。

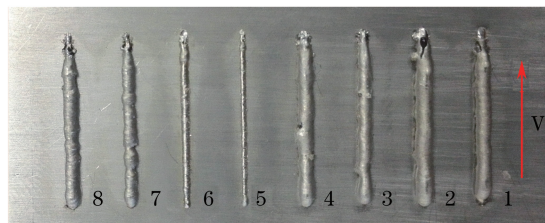


图 7 优化后的单道熔覆结果

Fig. 7 Optimized results of single cladding

表5 优化后的熔覆工艺参数

Table 5 Optimized parameters of cladding process

Serial number	1	2	3	4	5	6	7	8
Power /W	224	316	224	316	150.8	224	150.8	224
Scanning speed /(mm/s)	8	8	12	12	8	8	8	8
Defocusing amount /mm	-10	-10	-10	-10	0	0	-5	-5

从图7可以看出,在选定的参数下,得到了形貌比较好的单道熔覆条纹。在200倍的共聚焦显微镜下观测,发现熔覆条表面形成了稳定的熔覆纹路,没有出现断续和球状凝结。尤其是在零离焦状态下(第5、6道)的熔覆条,其表面更为光滑,并有金属光泽。图8为第6道熔覆条部分位置的平面和三维形貌图。

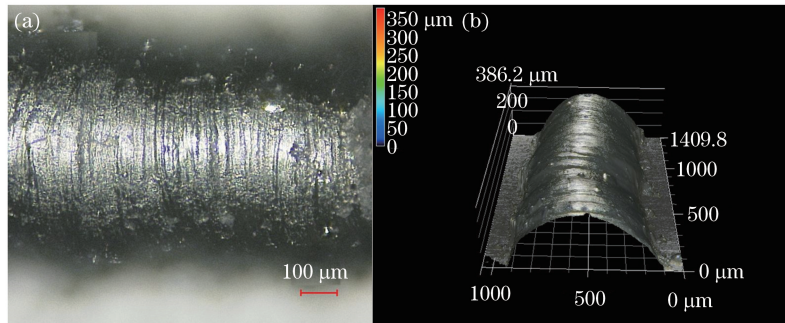


图8 (a) 第6道熔覆条部分位置的表面形貌图; (b) 第6道熔覆条部分位置三维形貌

Fig. 8 (a) Surface morphology of the sixth cladding strip; (b) three-dimensional morphology of the sixth cladding strip

3.4 硬度检测结果

利用维氏硬度计(HXD-1000TMC/LCD,上海泰明光学仪器有限公司,中国),在25 GF(1 kGF=9.8 N)的载荷下,对图4的第1~4道和第5~8道熔覆条以及基板的硬度进行了测量。将图4中的试样沿两条中心线切开,分别制作了1~4道和第5~8道两个样品,如图9(a)、(b)所示,并选择了其中第3道和第7道熔覆条进行硬度打点测试。

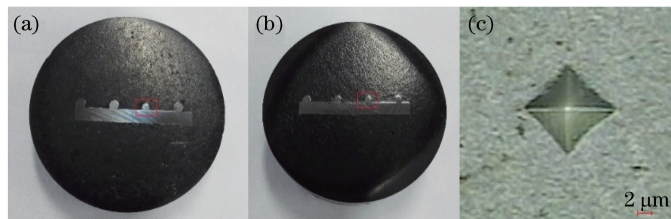


图9 (a) 1~4道熔覆条的横截面形貌; (b) 5~8道熔覆条的横截面形貌; (c) 硬度打点的结果图

Fig. 9 (a) Cross section morphology of cladding strips 1~4; (b) cross section morphology of cladding strips 5~8;

(c) results of hardness dot

在试样上打硬度点,如图9(c)所示,打点的区域选择在熔覆条的横截面中部和基材靠近上表面区域,在每个测量区域测量三点并求其平均值作为该区域硬度值,基材、第3道和第7道的维氏硬度值分别为245.0、220.4、219.0 HV。从硬度测量的结果可以看出,基板和熔覆条的硬度值相差不大,但是有一定程度的下降(约10%),说明激光熔覆制备的熔覆层硬度会有所降低,并且在其他熔覆工艺参数相同,速度不同的情况下,熔覆条的硬度并不会明显地改变。

4 结 论

通过在304#不锈钢基板上激光熔覆316L不锈钢粉的一系列试验,研究了激光参数对熔覆质量的影响规律,在一定参数范围内找到了最优的熔覆工艺参数,得出以下结论:

1) 单位时间单位面积的激光能量输入量是影响熔覆质量的关键因素。能量摄入过高,会使已熔部分对粉末强烈吸附,导致熔覆条球化、不连续,另外还会导致基板烧毁,即基板稀释率过高,起不到熔覆修复或强化的作用。而影响输入能量的主要因素包括激光功率、扫描速度和离焦量;

2) 要实现较好的熔覆质量,在扫描速度和离焦量恒定的情况下,激光功率存在一个合适的范围,在这个范围内,功率越高,形成的熔覆条宽度越宽;在扫描速度和激光功率恒定的情况下,离焦量也存在一个合适的范围,在这个范围内,离焦量越大,形成的熔覆条宽度越宽。在激光功率和离焦量足以保证能量摄入的情况下,扫描速度越快,形成的熔覆条质量越好,但是速度对熔覆层硬度的影响不明显;

3) 利用脉冲激光进行金属粉末的熔覆时,在激光频率与光斑半径的乘积远大于熔覆扫描速度时,激光器频率对熔覆质量的影响不大。

参 考 文 献

- Zhang Deqiang, Niu Xinglin, Li Jinhua, *et al.*. The study of laser cladding on Q235D [J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(6): 105-108.
张德强, 牛兴林, 李金华, 等. Q235D 激光熔覆实验研究 [J]. 机械设计与制造, 2015(6): 105-108.
- 张大伟, 雷廷权, 李 强, 等. 激光熔覆金属表面改性研究进展(上) [J]. 中国表面工程, 1999, 12(3): 1-6.
- He Xiangming, Liu Xiubo, Yang Maosheng, *et al.*. Elevated temperature tribological behaviors of laser cladding nickel-based composite coating on austenitic stainless steel [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0903007.
何祥明, 刘秀波, 杨茂盛, 等. 奥氏体不锈钢激光熔覆镍基复合涂层高温磨损行为 [J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0903007.
- Li Chunyan, Zhang Song, Kang Yuping, *et al.*. Comment on material system for laser cladding [J]. Laser Journal, 2002, 23(3): 5-9.
李春彦, 张 松, 康煜平, 等. 综述激光熔覆材料的若干问题 [J]. 激光杂志, 2002, 23(3): 5-9.
- Sun Yaoning, Liang Zefen, Zhang Xudong, *et al.*. Progress and key technology analysis of laser cladding wear resistance coating on stainless steel surface [J]. Hot Working Technology, 2009, 38(16): 113-116.
孙耀宁, 梁泽芬, 张旭东, 等. 不锈钢表面激光熔覆耐磨涂层的进展 [J]. 热加工工艺, 2009, 38(16): 113-116.
- Wang Wei, Chen Yun, Zou Yuanping, *et al.*. To investigate the repairing hydraulic cylinder rod manufacturing stainless steel cladding [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2013(5): 46-52.
王 围, 陈 辉, 邹元平, 等. 不锈钢熔覆技术再制造修复液压油缸杆件的探讨 [J]. 现代制造技术与装备, 2013(5): 46-52.
- Gao Meina, Wang Xuyue, Xu Wenji, *et al.*. Experimental study on the stainless-carbon steel laminated plates prepared by laser cladding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 021403.
高美娜, 王续跃, 徐文骥, 等. 不锈钢-碳钢层合板激光熔覆制备方法试验研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 021403.
- Yang Ning, Yang Fan. Effect of laser cladding parameters on the quality of cladding layer [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2010, 31(4): 17-19.
杨 宁, 杨 帆. 激光熔覆工艺参数对熔覆层质量的影响 [J]. 热处理技术与装备, 2010, 31(4): 17-19.
- Xu Peng, Dong Liang, Ju Heng, *et al.*. Microstructure and corrosion resistance of 304 stainless steel coating by laser cladding [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(s1): 221-225.
徐 鹏, 董 梁, 鞠 恒, 等. 激光熔覆 304 不锈钢涂层的组织及耐腐蚀性 [J]. 材料热处理学报, 2014, 35(s1): 221-225.
- Xu Peng, Lin Chengxin, Zhou Chaoyu, *et al.*. Preparation and microstructure of 304 stainless steel layer by laser cladding [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(7): 142-146.
徐 鹏, 林成新, 周超玉, 等. 激光熔覆 304 不锈钢涂层的工艺及组织 [J]. 材料热处理学报, 2013, 34(7): 142-146.
- Bai Mei, Liao Haihong, Liu Heping, *et al.*. Research on technology and corrosion resistance of laser cladding 316L stainless steel coating [J]. Hot Working Technology, 2015, 44(6): 125-128.
白 梅, 廖海红, 刘和平, 等. 基于激光熔覆不锈钢涂层技术的工艺及腐蚀性研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 44(6): 125-128.
- Feng Aixin, Chen Fengguo, Pei Shaohu, *et al.*. Effects of laser cladding on friction and wear properties of 304 stainless

- steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(8): 223-228.
- 冯爱新, 陈凤国, 裴绍虎, 等. 激光熔覆对 304 不锈钢表面摩擦磨损性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(8): 223-228.
- 13 Liu Juan, Luo Kaiyu, Jing Xiang, *et al.*. Simulation and analysis of the temperature field in laser cladding 316L stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(s1): s103002.
- 刘娟, 罗开玉, 景祥, 等. 激光熔覆 316L 不锈钢温度场模拟与分析[J]. 中国激光, 2015, 42(s1): s103002.
- 14 Duan Xiaoxi, Gao Shiyu, Gu Yongfei, *et al.*. Study on reinforcement mechanism and frictional wear properties of 316L-SiC mixed layer deposited by laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(1): 0103004.
- 段晓溪, 高士友, 顾勇飞, 等. 激光熔覆 316L+SiC 的强化机制和摩擦磨损性能研究[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0103004.
- 15 Majumdar J D, Pinkerton A, Liu Z, *et al.*. Mechanical and electrochemical properties of multiple-layer diode laser cladding of 316L stainless steel[J]. Applied Surface Science, 2005, 247(1): 373-377.
- 16 Ganesh P, Moitra A, Tiwari P, *et al.*. Fracture behavior of laser-clad joint of Stellite 21 on AISI 316L stainless steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(16-17): 3748-3756.
- 17 Hemmati I, Ocelik V, De Hosson J T M. The effect of cladding speed on phase constitution and properties of AISI 431 stainless steel laser deposited coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205(21-22): 5235-5239.
- 18 Riveiro A, Mejias A, Lusquiños F, *et al.*. Laser cladding of aluminium on AISI 304 stainless steel with high-power[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 253(9): 214-220.
- 19 Pinkerton A J, Li L. Multiple-layer cladding of stainless steel using a high-powered diode[J]. Thin Solid Films, 2004, 453-454: 471-476.
- 20 Shi Shihong, Fu Geyan. Study on corrosion resistance of laser cladding layer on stainless steel surface[J]. Heat Treatment of Metals, 1999(3): 14-16.
- 石世宏, 傅戈雁. 不锈钢表面激光熔覆层耐腐蚀研究[J]. 金属热处理, 1999(3): 14-16.