

刮板输送机扁平链激光熔覆修复研究

翟建华^{1,2}, 张菟麟^{1*}, 许慧印¹, 刘志杰¹, 杨东山¹¹辽宁工程技术大学机械工程学院, 辽宁 阜新 123000;²辽宁工程技术大学先进制造技术研究院, 辽宁 阜新 123000

摘要 以磨损失效扁平链为研究对象,采用铁基合金粉末对基体进行了激光熔覆试验,在不同的熔覆工艺参数下,进行了金相组织、显微硬度和耐磨性分析。结果表明,激光功率 1600 W、扫描速度 600 mm·min⁻¹、送粉率 4.0 rad·min⁻¹、熔覆层数 3 的组合为最优工艺参数组合。在此工艺参数组合下,熔覆层与基体形成良好的冶金结合,无气孔等缺陷,且硬度和耐磨性均优于基体的。

关键词 激光技术; 扁平链; 激光熔覆; 显微组织; 硬度; 耐磨性

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.041402

Study on Laser Cladding Repair of Flat Chain of Scraper Conveyor

Zhai Jianhua^{1,2}, Zhang Wanlin¹, Xu Huiyin¹, Liu Zhijie¹, Yang Dongshan¹¹Mechanical Engineering College, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;²Institute of Advanced Manufacturing Technology, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China

Abstract With a flat chain with the wear failure as the research object, the experiment of laser cladding for the matrix is carried out by using the Fe-based alloy powder. The metallographic structure, micro-hardness and wear resistance under different cladding process parameters are analyzed. The parameters with a laser power of 1600 W, a scanning speed of 600 mm·min⁻¹, a feeding rate of 4.0 rad·min⁻¹ and a cladding layer number of 3 are the optimal process parameter set. Under this parameter set, the cladding layer has a good metallurgical bonding with its matrix, has no pores and other flaws, and has the hardness and wear resistance which are better than those of the matrix.

Key words laser technique; flat chain; laser cladding; microstructure; hardness; wear resistance

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 160.3900

1 引言

刮板输送机作为煤矿生产中的传送工具,其主要牵引部件为具有高强度、高韧性、高耐磨性的矿用扁平链,使用过程中扁平链承受载荷大,再加上井下环境恶劣,煤屑、链轮、周围腐蚀介质容易对链条表面造成损伤,故扁平链的好坏直接影响刮板输送机的使用寿命。目前,我国直径为 34 mm 以上的矿用链条用钢仍依赖进口,扁平链的生产成本较高^[1],对于失效的扁平链只能作报废处理,造成极大的资源浪费。如今,激光熔覆技术作为先进的修复技术之一,可利用高能激光束将熔覆材料与基体材料迅速熔化,从而获得具有各种特性的改性层与修复层^[2]。

目前,许多学者利用激光熔覆技术在修复失效零件和零件表面改性等方面开展了大量研究^[3-5]。王浩等^[6]根据离心压缩机叶轮失效特点,对失效叶轮模型进行了激光熔覆修复。封慧等^[7]在曲轴材料 45# 钢样件上进行熔覆试验,对熔覆层的显微组织、硬度进行观察和测定;在曲轴连杆轴颈表面进行熔覆试验,并推导了熔覆过程中曲轴连杆轴颈和激光束的运行轨迹及相对运行速度。申卫国等^[8]以不锈钢粉末作为熔覆材料,在硅锰钢表面采用激光熔覆的方法制备不锈钢合金涂层,并对熔覆后的试件进行了折弯和抗冲击强度试验。但目前对矿用扁平链的激光熔覆研究鲜有报道。本文以专门配置的铁基合金粉末作为熔覆材料,通过一系列激光熔覆试验找到

收稿日期: 2017-10-24; 收到修改稿日期: 2017-10-25

作者简介: 翟建华(1968—),男,博士,教授,主要从事三维打印方面的研究。E-mail: zhajianhua308@163.com

* 通信联系人。E-mail: 1622760381@qq.com

了合适的工艺参数,实现了对磨损扁平链的修复。

2 激光熔覆试验

2.1 试验材料

基体材料为 23MnNiCrMo54 钢,熔覆材料为铁

表 1 试验基材的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of test base materials (mass fraction,%)

Composition	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Al
Value	0.20- 0.26	1.40- 1.70	0.15- 0.35	≤0.020	≤0.020	0.90- 1.10	0.20- 0.40	0.40- 0.55	0.02- 0.050

表 2 铁基合金粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of Fe-based alloy powder (mass fraction, %)

Composition	C	P	S	Ni	Cr	Fe
Value	0.4- 0.7	0.014	0.006	1.25- 3.50	17- 19	Bal.

2.2 试验设备

所选用的激光器是德国 Laserline 公司的 LDF 型光纤耦合半导体激光器。送粉系统由送粉器、同轴送粉激光头、压缩空气和过滤净化装置、保护性气体的供给系统等组成。冷却系统采用德国 Laserline 公司生产的型号为 RIEDEL 的冷水机。加工控制系统采用激光加工专用机床,具有很高的加工精度(0.01 mm)。

2.3 试验方法

该试验以 $\Phi 48 \text{ mm} \times 152 \text{ mm}$ 的矿用扁平链为研究对象,实物图如图 1 所示,将其制成 $48 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的圆柱块试样,其中 Φ 为直径。试验采用同步式激光熔覆^[10-11],利用控制变量法改变激光功率、扫描速度、送粉率以进行单道熔覆试验,试验工艺参数见表 3。熔覆前后需对试样进行预热和保温处理,预热温度为 $300 \text{ }^\circ\text{C}$,预热时间为 30 min,试验结束后让其缓慢冷却,避免熔覆裂纹的产生^[12]。实际修复扁平链时,考虑到设备与扁平链自身的特点,对其进行分层处理,熔覆的每一层都在同一个平面内,



图 1 扁平链实物图

Fig. 1 Picture of flat chain

基合金粉末,化学成分见表 1 和表 2。在开始激光熔覆前,为了避免加工过程中烟雾和光吸收对试验结果产生影响^[9],对基体材料表面进行精细打磨,并用无水乙醇清洗,使样件表面平整,无油污、氧化膜、气孔、杂质颗粒等缺陷。

熔覆方式与试验一致,仅仅是每一层的平面形状略有不同,对结果没有影响,扁平链磨损位置及熔覆轨迹如图 2 所示。

表 3 单道激光熔覆工艺参数

Table 3 Process parameters for single channel laser cladding

Parameter No.	Laser power /W	Scanning	Feeding
		speed / ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	rate / ($\text{rad} \cdot \text{min}^{-1}$)
1A	1300	800	4.0
2A	1600	800	4.0
3A	1900	800	4.0
4A	2200	800	4.0
1B	1900	600	4.0
2B	1900	700	4.0
3B	1900	800	4.0
4B	1900	900	4.0
1C	1900	600	2.5
2C	1900	600	3.0
3C	1900	600	3.5
4C	1900	600	4.0

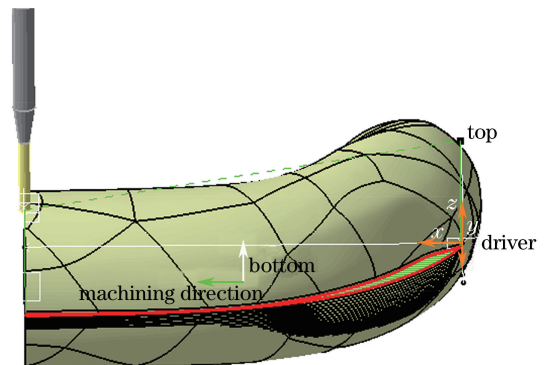


图 2 磨损位置及熔覆轨迹

Fig. 2 Cladding path and wear position

单道熔覆试验宏观形貌如图 3 所示,通过宏观观察,确定激光功率为 1600 W 和 1900 W ,扫描速度为 $600 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $700 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,送粉率为 $4.0 \text{ rad} \cdot \text{min}^{-1}$ 的成型效果比较好。但在实际修复中,常需要多层熔覆来满足磨损零件的修复要求,因

此选取激光功率、扫描速度、熔覆层数这三个因素作为正交试验的研究对象,其中两个因素是两水平,一个因素是三水平。正交熔覆试验的工艺参数见表4。

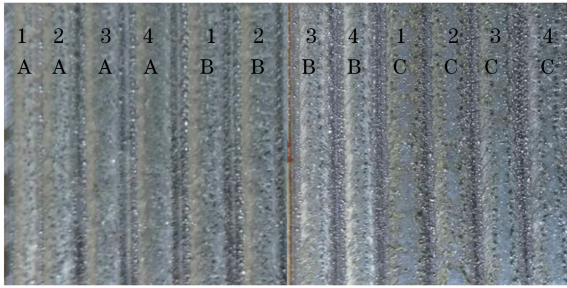


图3 单道熔覆试验宏观图

Fig. 3 Macroscopic diagram of single channel cladding experiment

表4 激光熔覆正交试验的工艺参数

Table 4 Process parameters for laser cladding orthogonal experiment

Parameter No.	Laser power /W	Scanning speed / (mm·min ⁻¹)	Cladding layer No.
1M	1600	600	1
2M	1900	700	1
1N	1600	700	2
2N	1900	600	2
1P	1600	600	3
2P	1900	700	3

试验结束后,沿试样熔覆层的垂直方向将试样切开,经粗磨、细磨、抛光、腐蚀后用德国卡尔蔡司公司生产的型号为 Axiovert 40 MAT 的倒置显微镜、日本岛津公司生产的型号为 XRD-6100 的 X 射线衍射 (XRD) 仪和日本 JEOL 公司生产的型号为 JSM-7500F 的冷场发射扫描电子显微镜对试样熔覆层进行显微组织观察及分析;用德国 Bareiss 公司生产的型号为 HV-500 的显微硬度测试仪对熔覆层截面进行维氏硬度测试,载荷为 5 N,时间为 10 s;

在济南凯锐公司生产的型号为 MMW-1A 的摩擦磨损试验机上进行室温干滑动摩擦试验,对磨件材料为 GCr15,试验条件:试验力 80 N,试验时间 1200 s,主轴转速 600 r·min⁻¹。

3 试验结果分析

3.1 熔覆层显微组织分析

对比 6 组正交试验的金相显微组织,发现 1M、2M、1P 这三组工艺参数组合的熔覆效果较好。图 4 所示为激光熔覆结合区的组织形貌,可以看出,这三组熔覆层与基体的结合界面比较完整,没有明显缺陷,少量被熔化的基体元素与熔覆层元素发生相互扩散,熔覆层最底部的主要组织为柱状晶,接近结合区的显微组织相对细小,冶金结合效果良好^[13]。图 5 所示为熔覆区的微观形貌,冷凝速度和激光熔池对流会对熔覆层组织产生影响,随着熔池内部过冷区域的变小,柱状晶沿着熔池散热最快的方向生长,在熔池内部产生大量的晶粒,这些晶粒在熔覆层中自由生长,形成等轴晶和枝状晶组织。由于熔池中不同区域的过冷度和成分过冷变化比较复杂,因此 1M 与 2P 工艺参数下的熔覆层组织略有不同^[14]。2M 工艺参数的熔覆层显微组织中出现气孔,如图 5(b)所示,气孔会导致熔覆层与基体的冶金结合变差,不能作为最优的工艺参数组合。气孔产生的主要原因是工艺参数不合理或某些元素在高温下发生氧化反应。其中基体热影响区只发生马氏体转变,不作进一步研究。图 6 所示是铁基合金熔覆层的 XRD 数据,可以看出,在衍射角为 44°, 64.5°, 82°处,铬化铁(FeCr)析出物出现 XRD 衍射峰;在衍射角为 44.3°和 51°处,镍化铁(FeNi₃)出现 XRD 衍射峰;在衍射角为 44.7°, 65°, 82.4°处,铁镍铬(Ni-Cr-Fe)的混合物出现 XRD 衍射峰,故熔覆层中的物相主要由析出的 FeNi₃、FeCr 及铁镍铬的混合物组成。

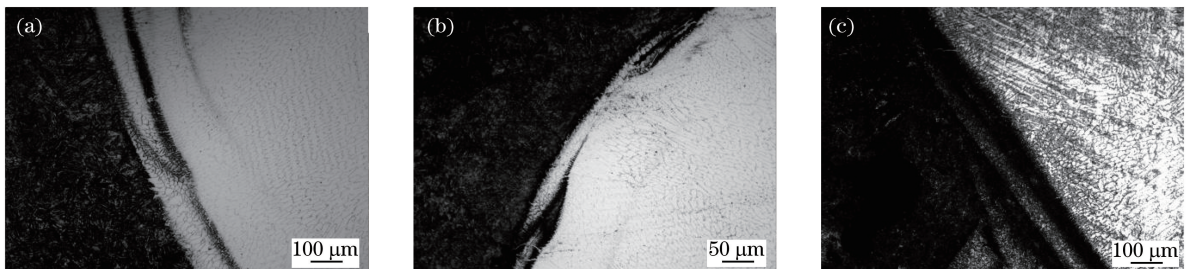


图4 不同工艺参数下的结合区显微组织。(a) 1M;(b) 2M;(c) 1P

Fig. 4 Microstructures at bonding zone under different process parameters. (a) 1M; (b) 2M; (c) 1P

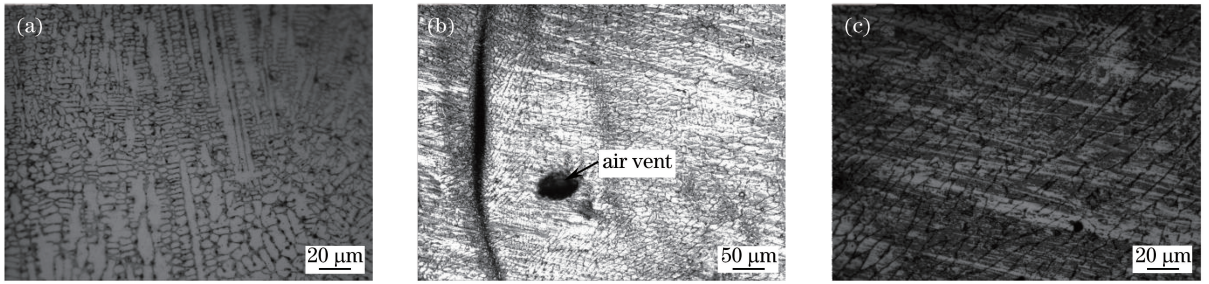


图5 不同工艺参数下的熔覆层显微组织。(a) 1M;(b) 2M;(c) 1P

Fig. 5 Microstructures of cladding layer under different process parameters. (a) 1M; (b) 2M; (c) 1P

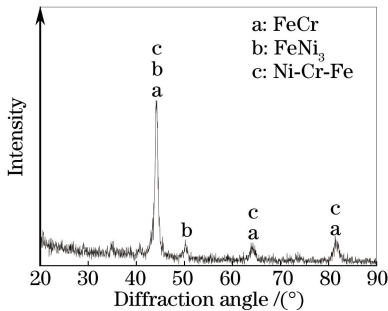


图6 熔覆层 XRD 图谱

Fig. 6 XRD diagram of cladding layer

利用能谱仪对熔覆层到基体进行线性扫描,结果如图7所示。可以看出,各元素均匀地分布在熔

覆层与基体内,并未出现明显的偏析现象。熔池内部存在对流现象,导致合金中分散的元素整体呈均匀分布的状态。元素铁(Fe)的相对含量最大,并且其波动变化也较大。一方面,基体本身为23MnNiCrMo54钢,而熔覆层中 FeNi_3 、 FeCr 和 Ni-Cr-Fe 混合物的引入不仅增加了元素Fe的相对含量,也增加了元素Ni和Cr的相对含量,根据 FeNi_3 、 FeCr 、 Ni-Cr-Fe 混合物中各元素所占比例的不同,其元素Fe、Ni和Cr的相对含量的增量也不同;另一方面,熔覆材料和基材中均含有元素Cr和Ni,导致最终熔池内部的元素Ni、Cr和C均匀分布,进而使得元素的相对含量较为稳定。

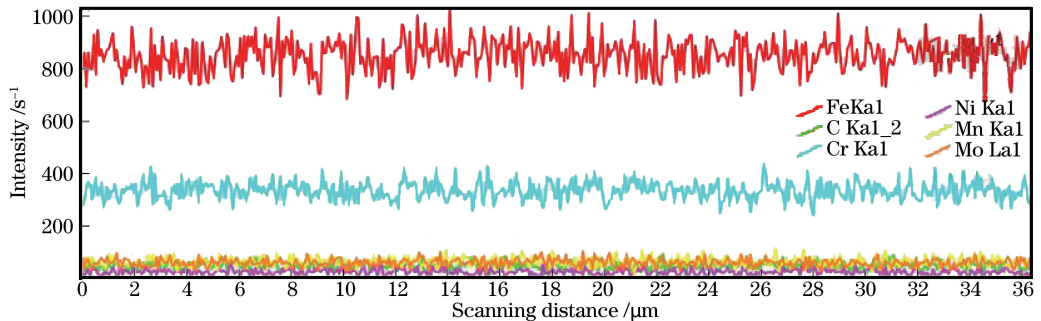


图7 熔覆层线扫描结果

Fig. 7 Line scanning results of cladding layer

3.2 熔覆层的显微硬度测试

图8所示为1M、2M、1P工艺参数组合下的显微硬度分布曲线图。可以看出,虽然优化参数和熔覆层数不同,但整个硬度曲线呈阶梯状降低的趋势是一致的,且显微硬度不等于某一定值,符合金相组织的分析结果。激光熔覆区的显微硬度最大且波动不大,热影响区次之,由于激光的相变强化作用,基体热影响区的硬度比基体原始硬度略大。在优化参数下,熔覆层平均显微硬度值可达500~700 HV,基体的平均硬度在400 HV左右,熔覆层的显微硬度均大于基体硬度。熔覆层硬度大幅度增大的原因

是Cr元素的固溶强化作用和激光处理后组织细晶的强化作用。从图8中可以看出,1P相比其他两组变化较为平缓。

3.3 熔覆层的耐磨性测试

在显微组织分析和硬度测试的基础上,初步选取1P为优化工艺参数组合,进行耐磨性试验,结果如图9所示。可以看出,激光熔覆层稳定阶段的摩擦系数小于基体的摩擦系数,说明激光熔覆层具有更优异的摩擦磨损性能。这是因为,在一般情况下,材料的硬度越大,耐磨性就越好;另一方面,因为熔覆材料中Ni元素对金属具有良好的润湿性,熔覆层

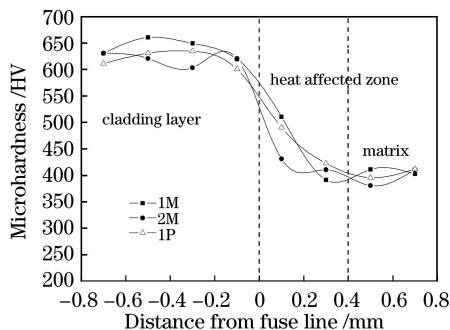


图 8 显微硬度的测试结果

Fig. 8 Test results of microhardness

的晶粒得到细化,提高了熔覆层的强韧性^[15]。图 10 所示为熔覆层与基体在相同载荷作用下磨损量的变化,可以看出,基体试验前后磨损量的变化相比熔覆层要大,这表明熔覆层的耐磨性优于基体的,熔覆层具有较好的耐磨性能。

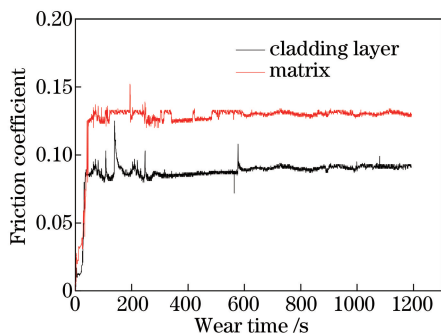


图 9 摩擦系数随时间的变化曲线

Fig. 9 Friction coefficient versus time

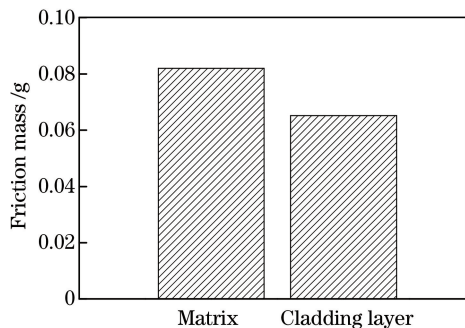


图 10 激光熔覆层和基体的磨损性能比较

Fig. 10 Wear property comparison between laser cladding layer and matrix

4 结 论

以磨损失效的扁平链为研究对象,以铁基合金粉末为熔覆材料进行了激光熔覆试验,利用控制变量法和正交试验法对激光功率、扫描速度、送粉率、熔覆层数等参数进行优化,并进行金相组织、显微硬

度、耐磨性分析,得到如下结论。

1) 1M、2M、1P 这三组的工艺参数组合较好,结合区的显微组织为相对细小的柱状晶,基体与熔覆层之间形成了良好的冶金结合,熔覆层形成了等轴晶和枝状晶组织。1M 和 1P 组合下,试样无明显的缺陷,且熔覆层的组织细小均匀,但 2M 工艺参数下样品存在气孔。

2) 由三组工艺参数组合的显微硬度分析可知,2M 工艺参数下熔覆层的显微硬度有较大波动,1M、1P 工艺参数下熔覆层的显微硬度达 500~700 HV,基体的平均硬度在 400 HV 左右,熔覆层的硬度明显大于基体的,1P 工艺参数下熔覆层显微硬度的变化相对 1M 较为平缓。结合金相组织与硬度分析,初步选取 1P 为激光熔覆的优化工艺参数组合。通过耐磨性试验验证得出,1P 工艺参数下激光熔覆层的摩擦系数小于基体的摩擦系数,熔覆层质量变化也小于基体的,表明熔覆层的耐磨性优于基体的。

3) 激光功率为 1600 W、扫描速度为 600 mm·min⁻¹、送粉率为 4.0 rad·min⁻¹、熔覆层为 3 的组合为扁平链激光熔覆的最优工艺参数组合。在该优化参数下,熔覆层与基体的结合性能良好,硬度与耐磨性能优于原始的基材的,基体的表面性能有一定的提高,能达到对磨损扁平链进行修复的要求。

参 考 文 献

- [1] Shang K C. Study on the processing technology of 23MnNiMoCr54 steel for ring chain used in mine[J]. Mining Machinery, 2013, 41(7): 134-137.
尚可超. 矿用圆环链用 23MnNiMoCr54 钢的加工工艺研究[J]. 矿山机械, 2013, 41(7): 134-137.
- [2] Guan Z Z. Handbook of laser processing technology [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2007: 287.
关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社出版, 2007: 287.
- [3] Shan X H, Wang C S, Yu Q. Microstructure and property of Nb-Al-Ti high temperature alloy coatings by laser cladding on Ti alloy surfaces[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0802015.
单晓浩, 王存山, 于群. 钛合金表面激光熔覆 Nb-Al-Ti 高温合金涂层组织与性能[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0802015.
- [4] Li Y D, Dong G, Yao J H. Microstructure evolution of heat-affected zones of 28CrMoNiV steel repaired by lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8):

0802009.
李允东, 董刚, 姚建华. 激光修复 28CrMoNiV 钢热影响区的组织演变 [J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0802009.
- [5] Chen Y, Sun W L, Huang Y, *et al.* Path planning of laser cladding for curved surface parts [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 061405.
陈影, 孙文磊, 黄勇, 等. 曲面零件的激光熔覆路径规划 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 061405.
- [6] Wang H, Zhao S W, Wang L W, *et al.* Remanufacturing method of damaged impeller in centrifugal compressor [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2016, 47(5): 407-412.
王浩, 赵世伟, 王立文, 等. 离心压缩机受损叶轮再制造方法 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 407-412.
- [7] Feng H, Li J F, Sun J. Study on remanufacturing repair of damaged crank shaft journal surface by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 0803003.
封慧, 李剑峰, 孙杰. 曲轴轴颈损伤表面的激光熔覆再制造修复 [J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0803003.
- [8] Shen W G, Fang Y, Dong L, *et al.* Experimental study on stainless steel alloy coating fabricated by laser cladding onto hydraulic support [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(18): 2533-2538.
申卫国, 方艳, 董玲, 等. 液压支架激光熔覆不锈钢合金涂层的实验研究 [J]. 中国机械工程, 2015, 26(18): 2533-2538.
- [9] Zhang J Q. Research on laser cladding technology of No. 45 steel [D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2016: 7-9
张吉庆. 45 号钢激光熔覆技术研究 [D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2016: 7-9.
- [10] Guan Z Z. Handbook of laser processing technology [M]. Beijing: China Metrology Press, 2007: 297.
关振中. 激光加工工艺手册 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2007: 297.
- [11] Peng R Y, Luo L, Liu Y, *et al.* Research progress in coaxial powder feeding nozzles [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 080004.
彭如意, 罗岚, 刘勇, 等. 同轴送粉器喷嘴研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 080004.
- [12] Zan S P, Jiao J K, Zhang W W. Study on laser cladding process of 316L stainless steel powder [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 061406.
笪少平, 焦俊科, 张文武. 316L 不锈钢粉末激光熔覆工艺研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 061406.
- [13] Zhi X, Zhao J F, Cai J. Effect of process on forming quality of fusion zone in laser cladding [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(10): 101403.
智翔, 赵剑峰, 蔡军. 激光熔覆修复工艺参数对熔合区成形质量的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 101403.
- [14] Zhang J. Study on laser cladding process of QT600-3 cast iron parts [D]. Changsha: Hunan University, 2010: 21-24
张静. QT600-3 铸铁件表面激光熔覆工艺研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2010: 21-24.
- [15] Zhai J H, Wang Q B, Wei X H, *et al.* Repair of scraper conveyor sprocket based on metal 3D printing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0402007.
翟建华, 王乾宝, 魏晓华, 等. 基于金属 3D 打印的刮板输送机链轮修复技术 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402007.