

基于金属 3D 打印的刮板输送机链轮修复技术

翟建华^{1,2}, 王乾宝¹, 魏晓华^{1,2}, 李艺凡¹, 张菟麟¹, 沈成¹, 刘志杰¹, 宋晓龙¹

¹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 为了修复矿用刮板输送机链轮, 运用了金属 3D 打印技术在 34CrNiMo6 钢板材上进行打印试验, 并对打印结果的金相组织、显微硬度及压痕、耐磨性进行了相关测试。试验结果表明, 打印层硬度为基材硬度的 2~3 倍, 且打印层耐磨性明显提高。展示了利用金属 3D 打印技术来修复链轮的整个工艺流程, 通过使用三维激光扫描仪来扫描标准和磨损链轮并获得其点云, 进而求得相应的链轮磨损量, 并用三维建模软件 CATIA 及其二次开发对磨损量进行适当分层切片, 以建立精确的数控程序来控制激光头对磨损链轮进行修复的路径。最终的打印以及铣削加工结果验证了该二次开发及数控程序的可行性。

关键词 激光光学; 金属 3D 打印; 刮板输送机链轮修复; 建模软件 CATIA; 合金粉末; 数控程序

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0402007

Repair of Scraper Conveyor Sprocket Based on Metal 3D Printing

Zhai Jianhua^{1,2}, Wang Qianbao¹, Wei Xiaohua^{1,2}, Li Yifan¹, Zhang Wanlin¹,
Shen Cheng¹, Liu Zhijie¹, Song Xiaolong¹

¹College of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;

²Institute of Advanced Manufacturing Technology, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China

Abstract In order to repair the sprocket of scraper conveyor, the 3D metal printing technology is used to test on 34CrNiMo6 steel plate samples. These samples are carefully examined to acquire metallographic structure, microhardness, indentation and wear resistance. Results show that the hardness is 2~3 times of that of the substrate material, and the wear resistance is also improved dramatically. Subsequently, the employment of this technology to repair a sprocket is carried out. A 3D laser scanner is used to scan a brand new and a worn sprocket to obtain the corresponding point clouds. The data are used to calculate the worn volumes of the sprocket. Software package CATIA is used for modeling and slicing with some newly developed add-on functions. Based on these data, the numerical control programs are established to define and control the repairing paths and parameters of the worn sprocket accurately. 3D printing, milling and test results show that the sprocket is properly repaired, which validates the secondary development, the numerical control programs as well as the developed add-on functions.

Key words laser optics; metal 3D printing; scraper conveyor sprocket repair; modeling software CATIA; powdered alloy; numerical control program

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 160.3900

1 引言

链轮是刮板输送机的关键零部件之一。刮板输送机在工作时, 刮板链条绕链轮作闭合循环运行, 运行中的链环与链轮链窝构成一对运动副, 这样每一次啮合都对链轮进行挤压, 且会产生滑动摩擦以及磨料磨损, 进而使链窝部位承受巨大的交变载荷和附加的冲击载荷, 使得链轮磨损严重。针对链窝以及齿侧壁的磨损严重、尺寸超差等问题, 近年来, 国内的专家学者运用新技术对报废的贵重零部件进行了一系列的修复研究。闫龙^[1]、李阳春等^[2]采用堆焊的方法来修补磨损链轮, 之后再仿形铣刀加工链窝, 但堆焊厚度不均匀, 且后

收稿日期: 2016-09-08; 收到修改稿日期: 2016-12-16

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

续加工时刀具磨损量较大,无法保证链轮的图纸要求,进而影响链轮的使用。韩文静等^[3-5]利用激光熔覆技术修复液压支架立柱,封慧等^[6]利用激光熔覆技术对曲轴轴颈磨损表面进行了修复,也都取得了一定成效。但在刮板输送机链轮上进行 3D 打印修复试验以及应用的研究鲜有报道。为节约链轮修复成本,提高链轮链窝修复质量及效率,本文在钢板材上进行多层打印试验,并对打印层的硬度和耐磨性进行测试,在满足与链轮基材结合良好和其正常运作的基础上,采用 3D 打印技术对磨损链轮进行修复,并借助计算机辅助设计软件 CATIA 生成用于自动加工的数控(NC)代码,通过打印结果以及最后的铣削结果验证程序的可行性。

2 样板 3D 打印试验

2.1 3D 打印试验设备

试验所用的设备是激光 3D 打印系统,该系统包括 4 个子系统:1)激光发生和传输系统,包括德国 Laserline GmbH 的半导体激光耦合激光器、激光耦合光纤、激光光学组件以及同轴打印喷嘴等;2)3D 打印数控系统,主要包括数控机床、数控柜及定位所需的激光水平仪;3)原料供应系统,包括金属粉末输送机、氮气供应装置和金属粉末烘烤箱;4)辅助系统,包括空气压缩机、储气罐、空气过滤器、空气冷干机、精密水冷机和激光器冷却机组等。图 1 是激光 3D 打印系统的部分设备。

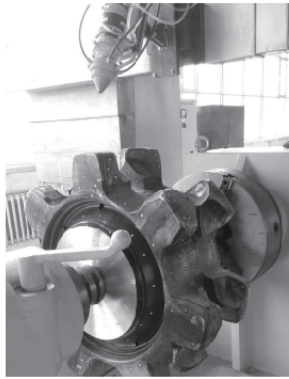


图 1 3D 打印部分试验设备

Fig. 1 Part of 3D printing experimental equipment

2.2 样板打印试验

2.2.1 打印样板准备

3D 打印用的钢板尺寸长宽高为 80 mm×30 mm×20 mm,钢板的材质为 34CrNiMo6(即是链轮基体材质)。把试验样板水平安装机床上,打印一块长宽高为 70 mm×25 mm×20 mm 的打印层。打印试验时,采用 3 kW 的半导体激光耦合激光器以及同轴送粉器。打印工艺参数为:激光功率 P 为 1200 W,数控机床进给率(即扫描速度) V 为 1000 mm/min,光斑直径为 3 mm,焦距为 15 mm,多道多层打印,其中每道搭接率为 50%,采用铁铬合金粉末^[7],表 1 给出了其化学成分。

表 1 铁铬合金粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the Fe-Cr-based alloy powder (mass fraction, %)

Element	Ni	Cr	B	Si	Fe	Cu	C	Mo
Content	Bal.	16.12	3.5	4.0	≤14	3.0	0.23	3.0

2.2.2 打印试验的初步处理

打印结束后对试样进行线切割,制作相关试样,之后研磨抛光。利用 HV-1000 型显微维氏硬度计测试截面打印层的显微硬度,载荷为(100,200,500 g),加载时间为 10 s,仪器对数据自动处理得出其维氏硬度值,每个试样测试 5 个点后取其平均值,测试间距为 0.2 mm,同时采用 VEGA3-SBH 型扫描电子显微镜(SEM)分析压痕形貌。耐磨性试验在 ML-100 型磨粒磨损试验机进行,对磨副为 180# 的水磨砂纸,试验载荷为 2 N,转速为 60 r/min,磨损行程为 70 mm。采用体积分数为 8% 的硝酸乙醇溶液对基材进行腐蚀,用王水对打印层进行腐蚀,并采用 Axiovert 40 MAT 型倒置显微镜观察金属打印层的金相组织。

2.3 试验结果及分析

2.3.1 打印层的表面形貌分析

打印后的成型效果如图 2 所示。由图 2 可知,打印的效果是两头略微高,中间略微低,这是由于 3D 打印的同轴打印喷嘴运行轨迹为矩形^[8]。图 3 所示为光斑点轨迹模拟,试验对于打印的设置是打印搭接率为 50%,轨迹的运行方向为由 *c* 向 *d* 运行,当轨迹的第一道端部的 *c* 到 *d* 运行之后,运行 1 到 2 接着运行第二道的 *c* 到 *d*,这样在第一道 *c*(或 *d*)与第二道的 *c*(或 *d*)形成微凸起,使 *c*、*d* 端部略微高于 *c* 到 *d* 之间的厚度,这是单层打印时的成型分析;当进行多层打印时,便可以观察到打印的微凸起(图 2),但不影响整体的打印效果。



图 2 打印试验效果

Fig. 2 Experimental result of print

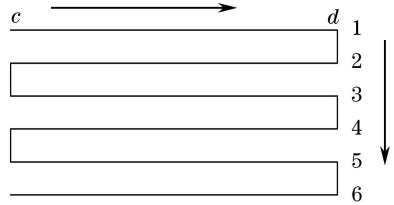


图 3 光斑点轨迹模拟视图

Fig. 3 Path simulation view of spot

2.3.2 打印层截面金相组织分析

图 4 为显微组织图, $P=1.2\text{ kW}$, $V=1000\text{ mm/min}$ 。由图 4 可知,所制备的组织均主要由枝晶组织、枝晶间组织和基本分布在枝晶间组织内的细小的析出物组成^[9]。由图 4(b)可知,基体热影响区和打印层之间存在几微米宽的白色亮带,且熔合区组织较打印区组织更加细小均匀,说明基体和金属打印层出现元素相互扩散,呈现出良好的冶金结合。熔合区内除了平面晶外,也出现了少量的由熔池底部指向顶部的树枝晶,这是由于在打印过程中熔池也具有极高的温度梯度和快的凝固速度,在熔池底部具有很大的温度梯度和最小的凝固速度,凝固时首先在基体上通过晶体外延生长的方式生长出一层平面晶,随着固液界面的推进,温度梯度减小,凝固速度逐渐加快,结晶组织转变为树枝晶,但大量析出物的存在减弱了树枝晶生长的方向性,细化组织,有利于组织性能的提高^[10]。

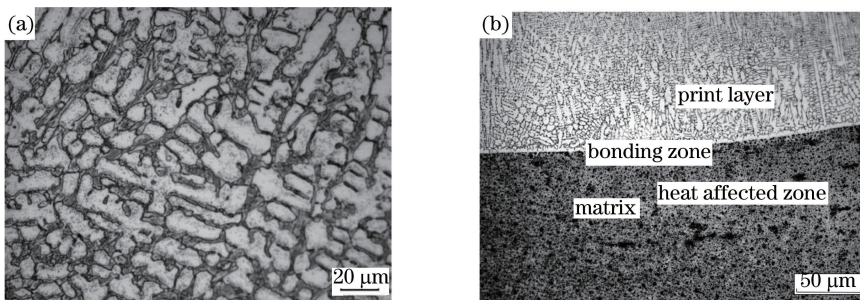


图 4 显微组织图。(a) 打印层的显微组织图;(b)横截面显微组织图

Fig. 4 Microstructure diagram. (a) Microstructure of the printing layer; (b) microstructure of cross section

2.3.3 打印层硬度分析

图 5 为从打印层表面至基材的显微硬度变化曲线。图 6 为试样块横截面压痕 SEM 图。由图 6 可知,打印层的硬度高于基体,大约是基体的 2~3 倍,显微硬度呈现出先上升后缓慢下降的趋势,最后降至基体的硬度。打印层硬度的提高可以从以下两个方面分析:1)由于打印层含有大量合金元素,在非平衡结晶条件下,导致涂层固溶强化作用增加;2)由于产生的多元共晶化合物引起的弥散强化以及由于熔池快速凝固引起的细晶强化导致该区组织致密,具有较高的硬度。另外,涂层的次表层较表层硬度高,这主要是在打印的过程中一部分合金元素被烧损、挥发或者是表面脱碳导致表层硬度性能降低。随着距表层距离的增加进入热影响区,其组织与基材相近,该区域在较高温度下淬火,加之结合区中少量合金元素扩散进去,从而使该区硬度

稍高于基材。涂层至基材的显微硬度呈现出梯度分布,降低了涂层与基体界面的内应力,同时也说明二者形成了良好的冶金结合。图 6(a)~(c)中,压痕边界与基材结合较好,未出现脱落、裂纹^[11]等现象,表明打印层与基材具有足够的结合强度。

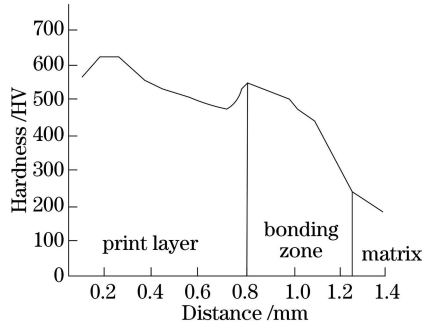


图 5 试样块横截面硬度的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of cross section hardness of sample block

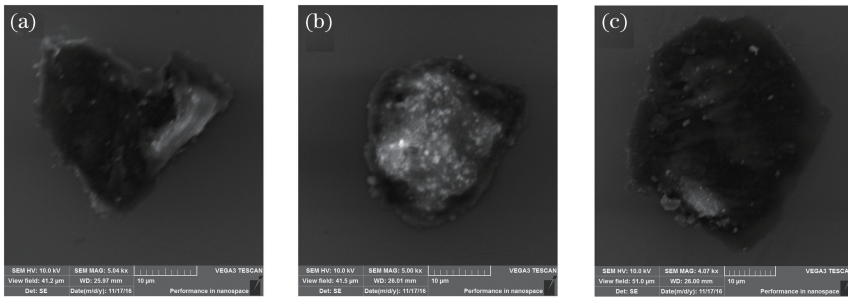


图 6 试样块横截面压痕 SEM 图。(a) 100 g;(b) 200 g;(c) 500 g

Fig. 6 Cross section indentation SEM morphology of sample block. (a) 100 g; (b) 200 g; (c) 500 g

2.3.4 打印层耐磨性分析

图 7 为不同磨损时间下基材和打印层磨损量的变化曲线。由图 7 可知,刚开始磨损时,基材磨损曲线的变化较平稳,增加磨损的时间,基材磨损量便逐渐增大,在磨损后期磨损量增长较快;而打印层的磨损量随着磨损时间的延长先减小后增大,在磨损 3 h 时,其磨损量达到最小值为 215×10^{-5} g,此后磨损量开始逐渐增大,但其增长速率较小。一方面,在摩擦磨损的过程中,涂层^[12]的增强相会与对磨副的磨粒相遇,由于增强相的硬度较高,所以在对磨副表面产生硬性磨削,磨粒的尖角被磨钝或磨粒破碎成细小的磨屑,这样就极大地降低了对磨件及涂层的磨损力度。另一方面,在涂层基体中含有牢固的增强相颗粒,未对耐磨性^[13]造成负面影响。Fe-Cr 自熔合金粉末中大量的 B、Si 等元素对金属良好的润湿性,减小了金属凝固生长时的斥力,为涂层在基体上的结晶生长创造了有利条件,晶粒得到细化,提高了涂层的强韧性,改善了打印层的耐磨性。同时,打印层与基体形成冶金结合,二者结合力较大,在磨损过程中涂层抗剥落能力强,从而提高了打印层的耐磨性。

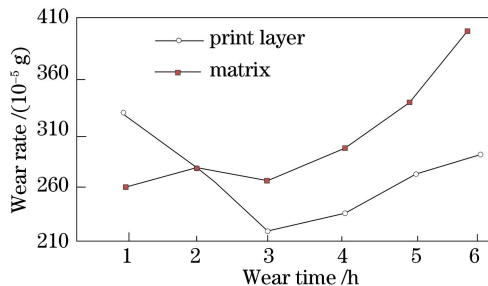


图 7 每小时磨损量变化曲线

Fig. 7 Change curves of wear amount per hour

3 刮板输送机链轮 3D 打印修复

3.1 打印的磨损链轮

所修复的链轮是美国久益公司刮板输送机中驱动的关键部件,磨损后的链轮如图 8 所示,打印所需粉末与在板材上试验打印的粉末一致。

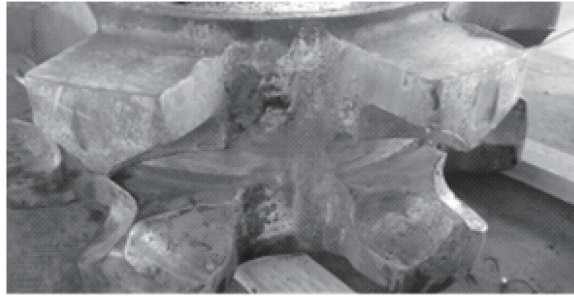


图 8 磨损后的链轮

Fig. 8 Sprocket after wear

3.2 链轮三维模型数据的获取

为了进行修复试验,需获取磨损链轮和标准链轮的模型数据以及进行相关的处理,其具体的操作是首先用加拿大 Creaform 公司的 HandySCAN 3D 扫描久益公司的标准链轮,获取其点云数据;然后再扫描磨损的链轮,获取其点云数据如图 9 所示;接着用 CATIA V5 对标准链轮与磨损链轮点云进行装配、求缺损量以及对缺损量分层切片^[14][图 10(b)]进而生成数控代码;最后导入到数控柜的控制面板中,进行 3D 打印。

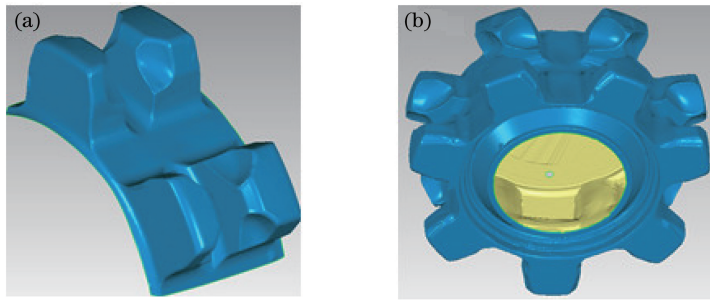


图 9 三维扫描处理后的链轮模型。(a)部分标准链轮模型;(b)磨损链轮模型

Fig. 9 Sprocket model of the 3D scanning process. (a) Part of standard sprocket wheel model;

(b) worn sprocket wheel model

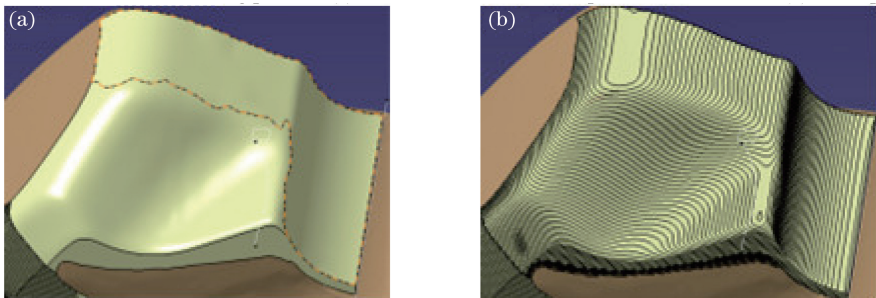


图 10 链轮处理后示意图。(a)链窝以及侧壁修补的填充;(b)剖分切片

Fig. 10 Schematic diagram of sprocket treatment. (a) Strand pit and side wall patch filled; (b) slice

3.3 激光打印的轨迹分析

3.3.1 基本条件

在激光打印修复链轮的过程中,通过工装把链轮安装到数控机床上,激光打印头与 yz 平面成一定的角度,以激光打印喷头所在的平面在 xy 平面内做运动。为了在链轮的链窝以及侧壁获得连续均匀的打印,应该满足如下条件^[15-16]:1)激光打印喷头到每一层打印表面的距离不变;2)激光打印是从底层开始打印的,逐

层向上堆积;3)在激光打印过程中,激光束要随每一层变化,恒定地向上移动。

3.3.2 激光束位置

采用数控机床,控制面板使用 Siemens 828D 控制器,可以高精度稳定实现 x 、 y 、 z 三根轴中任意两轴的同时运动。在激光打印过程中,链轮无偏心地安装在机床上,并绕主轴轴心在 yz 平面内做圆周运动^[17];激光束的运动轨迹为直线,并始终在一个平面内,即在 xy 平面内做往复直线运动,同时每一层结束后在 z 方向上做直线运动。打印过程中链轮的位置、激光束及送粉喷嘴的位置如图 1 所示。

3.3.3 计算机辅助生成激光多层打印轨迹

借助 CATIA V5、CAA-RADE 以及 Visual studio 软件,对于前期准备的分层切片进行进一步优化分析。然后结合 CATIA-CAA^[18-19] 自身强大的模块化、组件化、可视化开发技术,开发出一部分内嵌在 CATIA 中且适合 3D 打印的用户自定义命令,进而实现对磨损量的自动化分层切片并生成用于打印的数控程序。其对话框如图 11 所示。计算机辅助生成的数控程序如图 12 所示。

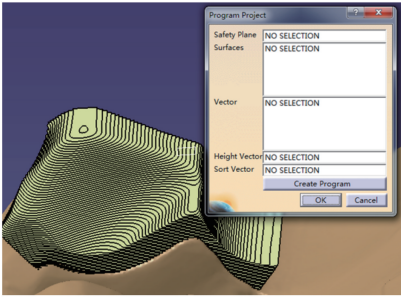


图 11 激光多层打印轨迹生成

Fig. 11 Generation of laser multi-layer print trajectory

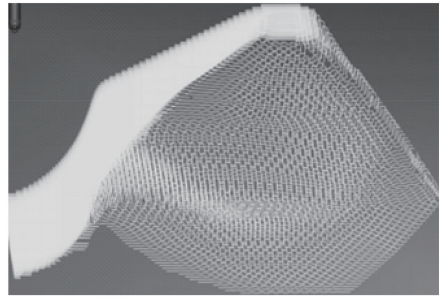


图 12 计算机辅助生成的数控程序

Fig. 12 NC program of computer aided generation

3.4 激光打印修复刮板输送机链轮试验

由于刮板输送机链轮在实际的应用中,链轮的链窝以及链轮的侧壁都产生了极大的磨损,故而在打印修复时,对链轮的链窝及侧壁进行整体打印。图 13~15 所示为打印过程(图 13)、整体打印后的效果(图 14)以及铣削^[20]后的效果(图 15)。



图 13 激光打印修复试验

Fig. 13 Laser printing repair test

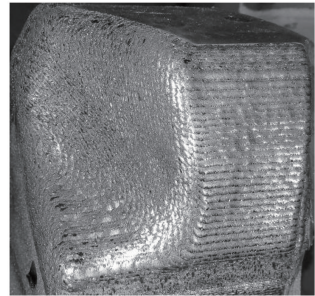


图 14 整体打印,兼顾侧壁

Fig. 14 Overall printing, taking into account the side wall

通过图 13~15 分析可知,3D 打印的链轮的整体成型效果已与标准链轮相一致,符合了预期的设计要求。最后使用立方氮化硼(CBN)刀具,在 1500 mm/min 进给率下、在沈阳机床 TH 系列卧式加工中心中,对打印后的链轮链窝进行铣削加工,使得链轮链窝表面粗糙度达到小于 $6.3 \mu\text{m}$ 的要求,从而符合最终的企业应用要求。

4 结 论

1) 采用 3D 打印技术在材质为 34CrNiMo6 的钢板上进行试验,对打印结果从打印层的宏观表面形貌、打印层的横截面金相组织结构、显微硬度曲线、横截面压痕形貌以及耐磨性等方面进行了分析,进而可知打印层与基材形成了良好的冶金结合,耐磨性良好。



图 15 铣削加工后的链轮表面形貌

Fig. 15 Surface topography of sprocket after milling

2) 为了在链轮的链窝以及侧壁获得连续均匀的打印,3D 打印修复链轮时应该满足如下条件:激光打印喷头到每一层打印表面的距离不变;从底层开始打印,逐层向上堆积;在激光打印过程中,激光束要随每一层恒定地向上移动。

3) 3D 打印链轮试验时,在打印前期使用了 CATIA V5 软件对链轮的缺损量进行了分层切片,然后对每一层基于 CATIA-CAA 强大的二次开发技术自动生成了数控代码。打印以及铣削结果验证了该二次开发及打印程序的可行性。

参 考 文 献

- [1] Yan Long. On the repair of mine scraper conveyor sprocket[J]. Inner Mongolia Science and Technology and Economy, 2014, 9(4): 314-318.
闫 龙. 浅谈矿用刮板输送机链轮修复[J]. 内蒙古科技与经济, 2014, 9(4): 314-318.
- [2] Li Yangchun, Zhang Ci. Repair technology of the scraper conveyor sprocket[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(6): 160-161.
李阳春, 张 翹. 刮板输送机链轮的修复工艺[J]. 煤矿机械, 2015, 36(6): 160-161.
- [3] Han Wenjing, Zhang Peixun, Tang Qijian, *et al.* Monomer hydraulic pillar cylinder laser printing Ni60A+20% WC alloy performance[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 340-343.
韩文静, 张培训, 汤其建, 等. 单体液压支柱缸体激光打印 Ni60A+20%WC 性能[J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 340-343.
- [4] Su Zhuoxin, Ding Weidong, Li Guodong, *et al.* The present situation and progress of the technology of the hydraulic support column piston surface repair technology[J]. Coal Technology, 2014, 33(10): 187-190.
粟卓新, 丁卫东, 李国栋, 等. 液压支架立柱活塞表面修复工艺的现状与进展[J]. 煤炭技术, 2014, 33(10): 187-190.
- [5] Xie Zhengwen, Li Chunqiang, Yang Zhiwei, *et al.* Study on the application of laser printing technology in hydraulic support[J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(10): 106-108.
解正文, 李春强, 杨志伟, 等. 激光打印技术在液压支架上的应用研究[J]. 煤矿机械, 2010, 31(10): 106-108.
- [6] Feng Hui, Li Jianfeng, Sun Jie, *et al.* Study on remanufacturing repair of damaged crank shaft journal surface by laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0803003.
封 慧, 李剑锋, 孙 杰, 等. 曲轴轴颈损伤表面的激光打印再制造修复[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0803003.
- [7] Mao Huaidong, Zhang Dawei. Experimental study on laser printing performance of Fe based alloy powder[J]. Applied Laser, 2007, 27(4): 273-277.
毛怀东, 张大卫. 铁基合金粉末的激光打印性能试验研究[J]. 应用激光, 2007, 27(4): 273-277.
- [8] Liu Lifeng, Yang Xichen. Laser remanufacturing robot path planning based on reverse engineering [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0703008.
刘立峰, 杨洗陈. 基于逆向工程的激光再制造机器人路径规划[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0703008.
- [9] Liu Fencheng, Lin Xin, Yu Xiaobin, *et al.* The evolution of interface and crystal orientation in the process of laser solid forming GH4146 alloy recrystallization[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(4): 463-470.
刘奋成, 林 鑫, 余小斌, 等. 激光立体成形 GH4146 合金再结晶过程中的界面和晶体取向演化[J]. 金属学报, 2014, 50(4): 463-470.
- [10] Li Jing, Lin Xin, Qian Yuanhong, *et al.* Study on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy by

- laser solid forming[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1103010.
- 李 静, 林 鑫, 钱远宏, 等. 激光立体成形 TC4 钛合金组织和力学性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103010.
- [11] Xu Jiale, Li Zhongguo, Guo Huafeng, *et al.* Research progress on crack defects in laser printing layer[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(8): 6-9.
- [12] Fu G Y, Liu S, Fan J W. The design of cobalt-free, nickel-based alloy powder (Ni-3) used for sealing surfaces of nuclear power valves and its structure of laser cladding coating[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(5): 1403-1406.
- [13] Liu X B, Meng X J, Liu H Q, *et al.* Development and characterization of laser clad high temperature self-lubricating wear resistant composite coatings on Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials & Design, 2014, 55(6): 404-409.
- 徐家乐, 李忠国, 郭华峰, 等. 激光打印层裂纹缺陷研究进展[J]. 热加工工艺, 2013, 42(8): 6-9.
- [14] Zhu Xiaopeng. Layered slice method in the process of laser printing and remanufacture[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013: 1-79.
- 朱晓鹏. 激光打印再制造过程中的分层切片方法[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 1-79.
- [15] Cao Xueliang, Gao Qiang, Cheng Fengfang, *et al.* Research and application of the repairing technology of the ring driving sprocket wheel for mining[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(11): 112-113.
- 曹学亮, 高 强, 程凤芳, 等. 矿用圆环驱动链轮修复工艺的研究与应用[J]. 煤矿机械, 2012, 33(11): 112-113.
- [16] Li Kaibin, Li Dong, Liu Dongyu, *et al.* Research of fiber laser cladding repair process with wire feeding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1103006.
- 李凯斌, 李 东, 刘东宇, 等. 光纤激光送丝熔覆修复工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103006.
- [17] Han Yuyong, Lu Lu, Li Jianfeng, *et al.* Lathe spindle remanufacturing based on laser cladding technology[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 147-153.
- 韩玉勇, 鲁俊杰, 李剑峰, 等. 基于激光熔覆的车床主轴再制造[J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 147-153.
- [18] Bao J R, Ding Y, Hu S B, *et al.* A study on intelligent parting line design of vehicle door based on CATIA CAA[C]. Advanced Materials Research, 2014, 902: 357-363.
- [19] Zhang G G, Chang Z B, Liu H T. Parametric modeling for globoidal cam based on CATIA/CAA [C]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 88-89: 236-239.
- [20] Han Junling. The generating method to process sprocket wheel of circular arc tooth profile and chain nest[J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(4): 91-92.
- 韩俊玲. 采用展成法加工圆环链链轮圆弧线齿廓和链窝[J]. 煤矿机械, 2009, 30(4): 91-92.