

# 内缸活塞杆的激光熔覆修复

翟建华<sup>1,2</sup>, 刘志杰<sup>1</sup>, 张勇<sup>1,2</sup>, 史耀君<sup>3</sup>, 邓晗<sup>3</sup>, 魏晓华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 辽宁工程技术大学机械工程学院, 辽宁 阜新 123000;

<sup>2</sup> 辽宁工程技术大学先进制造技术研究院, 辽宁 阜新 123000;

<sup>3</sup> 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏 常州 213011

**摘要** 选取了两种不同的合金粉末材料,采用激光熔覆技术,对内缸活塞杆表面进行了修复强化处理,对比分析了两种不同材料熔覆后的微组织、微硬度、耐腐蚀性和耐磨性,提出了两种不同熔覆材料修复的内缸活塞杆所适用的工作环境。研究表明,两种熔覆层材料均能有效提高内缸活塞杆表面的耐磨性、抗冲击性和抗腐蚀性。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 修复; 显微组织; 硬度; 耐蚀性

中图分类号 TH142 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.111411

## Laser Cladding Repair of Inner Cylinder Piston Rods

Zhai Jianhua<sup>1,2</sup>, Liu Zhijie<sup>1</sup>, Zhang Yong<sup>1,2</sup>, Shi Yaojun<sup>3</sup>, Deng Han<sup>3</sup>, Wei Xiaohua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Mechanical Engineering College, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;

<sup>2</sup> Institute of Advanced Manufacturing Technology, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;

<sup>3</sup> CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu 213011, China

**Abstract** With the laser cladding technology, two different types of alloy powders are chosen to repair the inner cylinder rod surface. The microstructures, microhardness, corrosion resistance and wear resistance of the cladding layers with two different types of powders are compared and analyzed. The suggestions are given in terms of the applicative working environments of the inner cylinder piston rods repaired with these two different cladding materials. The study results show that these two types of cladding layer materials can both effectively improve the abrasive resistance, impact resistance and corrosion resistance performances of the inner cylinder piston rod surfaces.

**Key words** laser technique; laser cladding; repair; microstructure; hardness; corrosion resistance

**OCIS codes** 140.3390; 140.3460; 160.3900

## 1 引言

某型内缸活塞杆表面采用电镀硬铬工艺进行表面强化处理,但在使用过程中,受到外部介质的冲击作用及周围环境的影响,其电镀层表面会经常出现锈蚀、剥落和磨损等现象,从而造成活塞杆的失效。传统的修复方法是首先去除原有的表面镀层,然后再重新进行镀硬铬处理。这种修复方法工艺相对比较简单,成本较低,但电镀硬铬工艺会对人体健康和生态环境造成严重的危害,同时电镀层的厚度较薄,其与基材的结合并非冶金结合,因而结合强度不高,当其应用在较易受到外部坚硬介质冲击的工作环境中时,镀铬层会出现受损和脱落的问题。

为解决上述问题,激光熔覆修复技术应运而生,国内许多学者对该技术展开了研究<sup>[1-6]</sup>。栗卓新等<sup>[1-3]</sup>对激光熔覆修复液压支架立柱进行了研究,结果表明,激光熔覆能显著改善熔覆层的性能。智翔等<sup>[4]</sup>对激光熔覆的工艺参数和熔覆区质量的关系进行了研究,发现合适的工艺参数能使修复件熔合区获得较好的成形质量。封慧等<sup>[5]</sup>对曲轴轴颈进行了激光熔覆修复,取得了较好的效果。但目前关于某型内缸活塞杆的激光熔

收稿日期: 2017-04-19; 收到修改稿日期: 2017-06-08

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: zhaijianhua308@163.com

覆修复研究鲜有报道。为了改善内缸活塞杆轴颈表面的耐磨、耐腐蚀性能,本文采用激光熔覆技术对其进行修复<sup>[7-8]</sup>,先在内缸活塞杆材料 35CrMo 试样上进行了两种不同粉末的熔覆实验,对熔覆层的显微组织、硬度、耐腐蚀性和耐磨性能<sup>[9-11]</sup>进行了观察和分析,在熔覆层性能满足要求的前提下,对内缸活塞杆轴颈表面进行了修复,取得了良好的效果。

## 2 实验材料、设备及方法

### 2.1 实验材料

实验选用多根 35CrMo 合金结构钢为熔覆基材,激光熔覆层材料选用两种不同成分的铁基合金粉末,其化学成分分别见表 1 和表 2。

表 1 合金粉末 A 主要化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of alloy powder A (mass fraction, %)

| Element | C    | W   | Mn  | Cr  | Si  | V   | Nb  | B    | Ti  | Fe   |
|---------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|
| Content | 0.98 | 9.1 | 1.3 | 3.5 | 1.4 | 1.8 | 1.6 | 0.85 | 0.3 | Bal. |

表 2 合金粉末 B 主要化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of alloy powder B (mass fraction, %)

| Element | P     | S     | Ni   | Cr    | Fe   |
|---------|-------|-------|------|-------|------|
| Content | 0.008 | 0.005 | 2.04 | 16.12 | Bal. |

### 2.2 实验设备和实验方法

激光熔覆采用德国 Laserline 公司生产的 LDF 型大功率光纤耦合半导体激光器,其激光头光斑直径为 3 mm,最大可输出功率为 3000 W,送粉方式采用德国 GTV 公司生产的 GTV PF2/2 型送粉器同轴<sup>[12]</sup>自动送粉,实验过程中采用氮气(N<sub>2</sub>)进行保护。在试样的圆周表面上分别进行粉末 A 和粉末 B 的单层熔覆,搭接率为 50%,熔覆层厚度为 1 mm,熔覆路径为杆的圆周方向,熔覆的工艺参数见表 3,熔覆效果如图 1 所示。

表 3 激光熔覆的工艺参数

Table 3 Process parameters of laser cladding

| Material | Laser power /W | Powder feed rate /( $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ ) | Scanning speed /( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ) |
|----------|----------------|--|---|
| Powder A | 2700           | 22   | 1000  |
| Powder B | 2200           | 23   | 1000  |

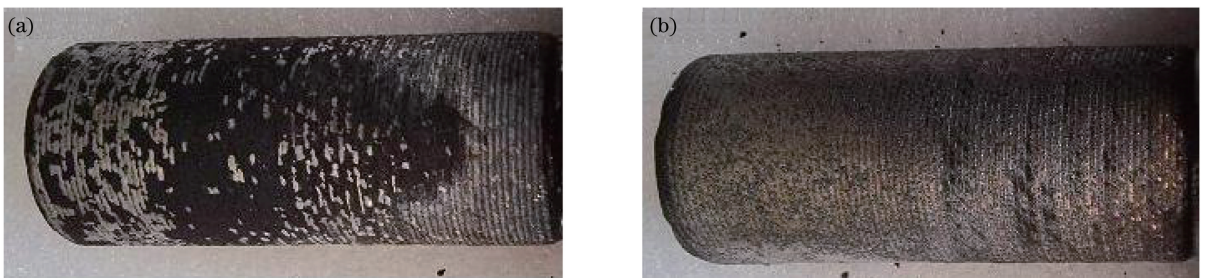


图 1 对活塞杆采用不同粉末熔覆的效果图。(a)粉末 A;(b)粉末 B

Fig. 1 Effect diagrams of piston rods after laser cladding with different powders. (a) Powder A; (b) powder B

由图 1 可知,经激光熔覆修复后的试样表面无可见裂纹,将试样按照限定尺寸进行线切割,制作成金相试样,并进行研磨抛光。考虑到熔覆层比基材耐腐蚀性强,使用硝酸乙醇溶液对基材进行腐蚀,使用王水溶液对熔覆层进行腐蚀。采用倒置显微镜观察过渡结合区和熔覆层的金相组织,采用能谱分析仪(EDS)检测熔覆层微区成分和结合区的组成元素,利用 X 射线衍射(XRD)仪分析熔覆层的物相结构,采用 Cu 靶, K $\alpha$  波段,扫描角度为 20°~90°,扫描速度为 10 (°)·min<sup>-1</sup>。使用显微维氏硬度计分别测量两种不同材料的熔覆层的显微硬度,各相邻硬度测量点间隔 0.2 mm,所加载荷为 100 g,加载时间为 10 s,测量 5 次,取平均值。实验分别选取两种不同熔覆层材料的试样进行 48 h 中性盐雾实验,采用的设备为中国东莞惠源仪器有限公司

生产的 WY/Q 650 型盐雾试验箱,实验依据的方法为文献[13]中采用的方法。实验采用中国兰州中科凯华仪器设备有限公司生产的 CFT-1 型摩擦磨损试验机对熔覆层、基体和镀铬试样分别进行干滑动摩擦磨损实验,对磨副用 Cr15 钢,加载载荷为 20 N,电机转速为  $500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,磨损时间为 3600 s,磨损后,采用深圳市山星鼎盛电子秤仪器公司生产的 ESJ205-4 型分析天平称量质量,测量精度为 0.1 mg,每个试样测量 5 次,取平均值。

### 3 实验结果和分析

#### 3.1 金相组织及物相分析

图 2 所示为熔覆层材料为粉末 A 时各区域的显微组织。可以看出,熔覆层的显微组织为胞状晶和一些分布在晶界间的析出物的冶金结合,越靠近基材部分,组织越细小。这是因为熔覆层在凝固过程中,靠近基材的部位首先开始凝固,散热冷却速率较快,所以晶粒细小;当凝固现象从基体进入熔覆层时,散热冷却速度下降,晶粒的尺寸逐渐变大。此外,少量的 V、Nb 合金起到了细化晶粒的作用,在基材和熔覆层交界处,两侧元素相互扩散,呈现出良好的冶金结合。熔覆层中各微区的化学成分见表 4,可以看出,两个微区最为明显的区别是铬的含量,结合图 3(a)所示的 XRD 物相分析可知,微区 1 对应于  $\alpha$ -Fe 基体组织和  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,微区 2 的碳化物硬质相较多,这些硬质相为  $\text{Fe}_3\text{B}$ 、 $\text{FeW}_3\text{C}$  和  $\text{Fe}_3\text{C}$ 。

图 4 所示为熔覆层材料为粉末 B 时各区域的显微组织。可以看出,熔覆层的显微组织为近似等轴晶或短柱状晶,组织分布均匀致密,越靠近熔合区,组织越细小,说明基材和熔覆层之间出现了元素的相互扩散,呈现良好的冶金结合,形成了有一定宽度、无微观偏析的组织薄带,这部分主要由树枝晶组成。另外,基材部分组织较熔覆层模糊,说明熔覆层有更好的耐腐蚀性。结合图 3(b)所示的 XRD 物相分析可知,这部分主要由析出的  $\text{Ni}_3\text{Fe}$  和  $\text{FeCr}$  组成。

通过对两种不同粉末的熔覆层和过渡区的金相组织进行分析对比,可以得出:晶体结构均是较均匀的,且没有出现明显的气孔和裂纹,这说明两种粉末的熔覆层和基材间均形成了良好的冶金结合,且粉末 A 的晶粒更加细小致密,更有利于强度和韧性的提高。

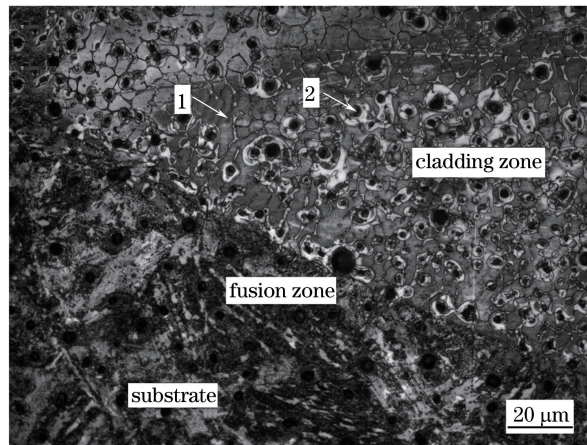


图 2 熔覆层材料为粉末 A 时各区域的显微组织

Fig. 2 Microstructures of different regions when cladding layer material is powder A

表 4 当熔覆层材料为粉末 A 时,熔覆层中各微区的化学成分(质量分数,%)

Table 4 Chemical compositions of different micro-areas of cladding layer when cladding layer material is powder A (mass fraction, %)

| Micro-area | C    | V    | Cr   | Mn   | Fe    | W     |
|------------|------|------|------|------|-------|-------|
| 1          | 2.53 | 2.46 | 6.01 | 1.75 | 73.35 | 13.91 |
| 2          | 3.03 | 1.98 | —    | 2.51 | 79.96 | 12.52 |

#### 3.2 熔覆层成分分布及分析

从熔覆层到基体进行线扫描,分析结果如图 5 所示。可以看到,熔覆层和基体的组成元素发生了相互扩



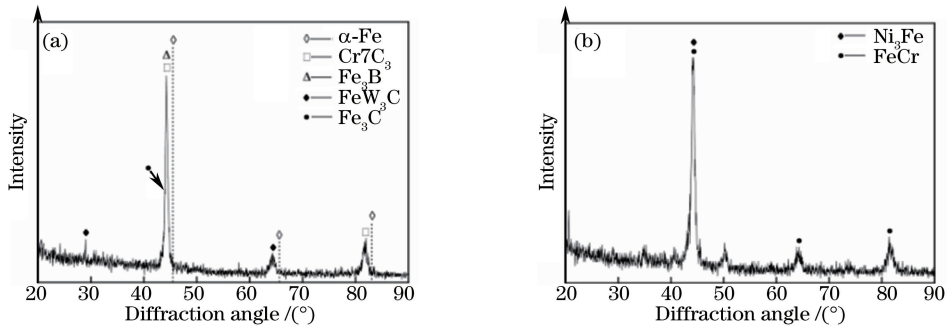


图3 熔覆层的 XRD 图谱。(a)粉末 A;(b)粉末 B

Fig. 3 XRD patterns of cladding layer. (a) Powder A; (b) powder B

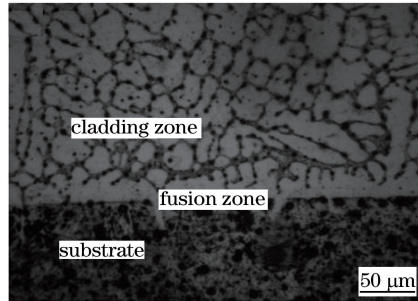


图4 熔覆层材料为粉末 B 时各区域的显微组织

Fig. 4 Microstructures of different regions when cladding layer material is powder B

散,两种粉末熔覆层中各主要元素分布出现了随机波动,界面结合区附近熔覆层内的合金元素含量与远离界面结合区的不同,界面处粉末 A 熔覆层中合金元素 W、V 等含量增大,粉末 B 熔覆层中合金元素 Ni 含量增大,说明界面结合区发生了合金元素的扩散,基体与熔覆层结合较好,有利于组织性能的提高。

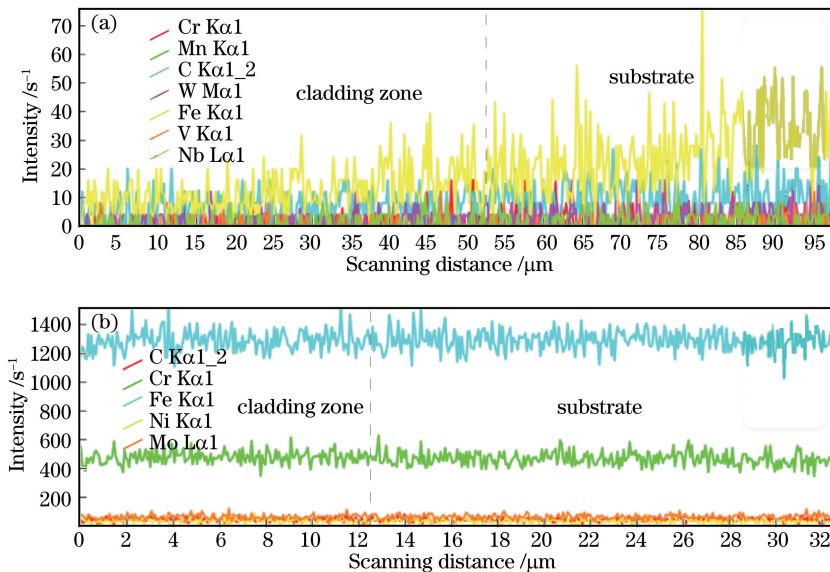


图5 熔覆层线扫描结果。(a)粉末 A;(b)粉末 B

Fig. 5 Line scanning results of cladding layer. (a) Powder A; (b) powder B

### 3.3 硬度检测

两种不同粉末的硬度测量结果如图 6 所示。可以看出,两种不同粉末的熔覆层硬度均比基材的高,粉末 A 熔覆层硬度为基材的 4~5 倍,粉末 B 约为基材的 3 倍,说明两种粉末均能使熔覆层的显微硬度得到显著提高;由熔覆区到融合区再到基材区,显微硬度值都是先增大后减小,且在熔覆区和融合区的交界处达到最



大。这是因为该区域靠近基材,散热冷却速度快,发生了大量马氏体组织的转变,使该处的组织细化,起到了细晶强化的作用;融合区的底部和基材相接,在激光熔覆过程中,熔覆层与基材顶部融合的部分相互渗透扩散,使得融合区的显微硬度明显减小,最后降至基材的硬度值。

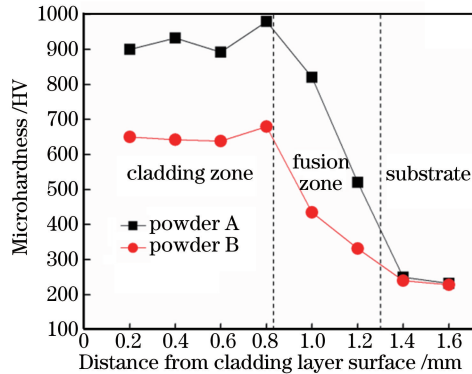


图 6 两种不同粉末的硬度测量结果

Fig. 6 Microhardness test results of two kinds of powders

### 3.4 耐磨性测试

#### 3.4.1 摩擦性能

图 7 所示为基材、熔覆层和镀铬层摩擦系数随时间的变化曲线。摩擦系数曲线分为两个阶段:早期摩擦阶段和稳定磨损阶段。在早期摩擦阶段,摩擦副接触面不平整,波纹度较大,导致摩擦系数急剧增大;在稳定磨损阶段,熔覆层表面被磨平,摩擦系数趋于平稳,在小范围内上下波动。从图 7 还可以看出,在 35CrMo 钢表面熔覆两种不同的合金粉末,均可显著减小其表面的摩擦系数,这主要是因为熔覆层组织均匀致密,其硬度远远大于 35CrMo 的。此外,粉末 A 的摩擦系数稳定值与镀铬层的最为接近且低于粉末 B 的,表明粉末 A 具有更稳定的摩擦性能。

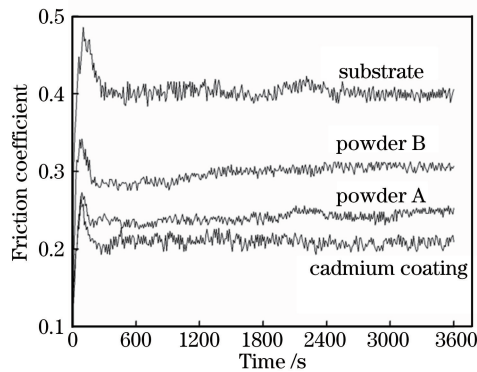


图 7 基材、熔覆层与镀铬层的摩擦系数曲线

Fig. 7 Friction coefficient curves of substrate, cladding layer and cadmium coating

#### 3.4.2 磨损性能

图 8 所示为基材、熔覆层和镀铬层的磨损量对比图。可以看出,在相同的磨损条件下,基材的磨损量为 11.26 mg,是熔覆层磨损量的 2~3 倍,电镀铬的磨损量小于熔覆层的。熔覆层的磨损量小主要是因为其内部晶粒细小均匀,提高了熔覆层的耐磨性能。磨损量测试结果表明,采用两种不同粉末进行激光熔覆,均能减小基材表面的磨损量,提高其耐磨性能。

### 3.5 耐蚀性测试

分别利用粉末 A 和粉末 B 所修复的试样进行中性盐雾实验,效果图如图 9 所示。经 12 h 中性盐雾实验后,使用粉末 A 进行激光熔覆修复试样的熔覆层表面开始出现随机分布的细小点蚀坑,随着腐蚀时间的增加,点蚀坑数量逐渐增多,经 48 h 腐蚀后,该试样锈蚀严重,熔覆层表面覆盖了一层红褐色的腐蚀累赘物,并伴随块状脱落。而使用粉末 B 进行激光熔覆修复的试样经腐蚀后,其熔覆层表面大体上依旧光滑平整,只

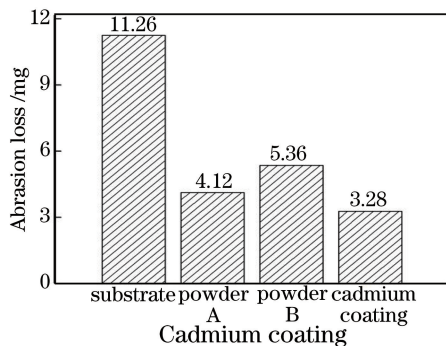


图 8 基材、熔覆层与镀铬层的磨损量对比图

Fig. 8 Abrasion loss comparison among substrate, cladding layer and cadmium coating

在试样靠近端面处有极少量的针瘤状凸起,整个表面腐蚀情况均匀一致,这主要是因为粉末 B 为铁素体不锈钢成分,且粉末 B 的含铬量远大于粉末 A 的,表面易形成致密的氧化铬钝化膜。由此可知,粉末 B 较粉末 A 具有更好的耐腐蚀性能。



图 9 中性盐雾实验结果图。(a)粉末 A;(b)粉末 B

Fig. 9 Results of neutral salt spray test. (a) Powder A; (b) powder B

#### 4 激光熔覆内缸活塞杆实验

在实际应用中,由于内缸活塞杆轴颈表面易出现摩擦磨损的现象,因此需对内缸活塞杆轴颈表面进行激光熔覆修复。首先磨削活塞杆表面,去除硬铬层和中间镀层以暴露基体材料,原活塞杆表面镀铬层的厚度为  $50\sim 70\ \mu\text{m}$ ,硬度为  $900\sim 1000\ \text{HV}$ ,依据选定的修复方案,使用两种合金粉末在待修复的内缸活塞杆上进行激光熔覆以恢复尺寸,熔覆完成后,得到的优质熔覆层表面厚度约为  $1.3\ \text{mm}$ ,实际加工量为  $0.2\sim 0.3\ \text{mm}$ ,完全达到所需的尺寸恢复要求,熔覆后的轴颈表面效果如图 10 所示。可以看出,轴颈表面经过激光熔覆后,熔覆层表面均匀,没有宏观裂纹、气孔等缺陷,符合预期的实验要求。

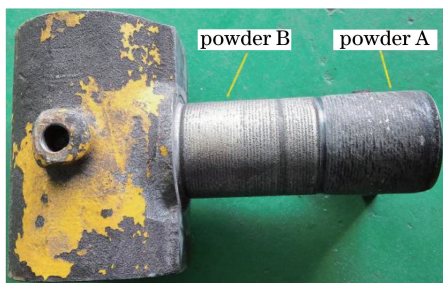


图 10 内缸活塞杆表面熔覆效果

Fig. 10 Cladding effect of inner cylinder piston rod surface

## 5 结 论

采用激光熔覆技术对内缸活塞杆表面进行了修复强化处理,研究了熔覆层的显微组织、硬度、耐腐蚀性和耐磨性能,得到以下结论。

1) 熔覆层与活塞杆基材的结合为高强度的冶金结合,且熔覆层厚度远大于原有镀铬层厚度,因而能显著提高活塞杆的耐磨和抗冲击性能。

2) 使用合金粉末材料 A 所修复的活塞杆表面硬度达到了原有镀铬层的硬度水平,但表面耐腐蚀性能低于原有镀铬层的性能,因而该活塞杆适用于比较干燥且沙尘较多的环境,譬如靠近沙漠的地区。

3) 使用合金粉末材料 B 所修复的活塞杆表面硬度低于原有镀铬层的硬度值,但表面耐腐蚀性能明显优于原有镀铬层的性能,因而该活塞杆较适用于较为恶劣的环境,譬如高温高湿或多盐分的环境。

未来的工作包括把修复后的内缸活塞杆应用在实际工作现场,比较试用的效果,进而提出改进的措施。

## 参 考 文 献

- [1] Li Zhuoxin, Ding Weidong, Li Guodong, *et al.* Current situation and progress of reparation process for hydraulic support piston rod[J]. Coal technology, 2014, 33 (10): 187-190.  
栗卓新, 丁卫东, 李国栋, 等. 液压支架立柱活塞杆表面修复工艺的现况与进展[J]. 煤炭技术, 2014, 33(10): 187-190.
- [2] Cai Fa, Liu Hunju. The progress of the technology of the hydraulic support pillar[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2016, 4: 125-127.  
蔡发, 刘混举. 液压支架立柱激光熔覆技术修复工艺分析[J]. 机械工程与自动化, 2016, 4: 125-127.
- [3] Li Wenqiang, Ma Zongbin, Ding Ziyang. Mine hydraulic support repair based on laser cladding technology[J]. Coal Mine Machinery, 2016, 11: 122-123.  
黎文强, 马宗彬, 丁紫阳. 基于激光熔覆技术的矿用液压支架修复[J]. 煤矿机械, 2016, 11: 122-123.
- [4] Zhi Xiang, Zhao Jianfeng, Cai Jun. Effect of process parameters 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.
- [5] Feng Hui, Li Jianfeng, Sun Jie. 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.
- [6] Shan Xiaohao, Wang Cunshan, Yu Qun. Microstructure and property of Nb-Al-Ti high temperature alloy coatings by laser cladding on Ti alloy surfaces[J]. Chinese J 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.
- [7] Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida, *et al.* Research status and development of laser cladding technology[J]. Applied Laser, 2012, 32(6): 538-544.  
王东生, 田宗军, 沈理达, 等. 激光熔覆技术研究现状及其发展[J]. 应用激光, 2012, 32(6): 538-544.
- [8] Li Pengfei, Sun Wenlei, Huang Yong, *et al.* Research status of multi-track overlapping laser cladding technology[J]. Hot Working Technology, 2016, 24: 7-10.  
李朋飞, 孙文磊, 黄勇, 等. 激光多道搭接激光熔覆技术研究现状[J]. 热加工工艺, 2016, 24: 7-10.
- [9] Duan Xiaoxi, Gao Shiyong, 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.
- [10] Zhu Hongmei, Yin Quan, Peng Rushu. Effects of high-frequency microforging on the laser cladding layer prepared on the 304 stainless steel substrate[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 121401.  
朱红梅, 尹泉, 彭如恕. 高频微锻造处理对 304 不锈钢表面激光熔覆层的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 121401.
- [11] Yu Pengcheng, Liu Xiubo, Lu Xiaolong, *et al.* Study on tribology and high-temperature oxidation resistance of laser cladding composite coatings on Ti6Al4V alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1003004.



- 余鹏程, 刘秀波, 陆小龙, 等. Ti6Al4V 合金激光熔覆复合涂层的摩擦学和高温抗氧化性能研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003004.
- [12] Peng Ruyi, Luo Lan, Liu Yong, *et al.* Research progress of coaxial powder feeder nozzle [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.
- [13] Ge Xiaomin, Yin Jun. The artificial environment the corrosion test of the artificial environment—salt spray test (3rd edition) [J]. Solar Energy, 2013, 5: 17-21, 33-37.
- 葛晓敏, 殷骏. 人工环境中的腐蚀实验——盐雾实验(上)(第三版) [J]. 太阳能, 2013, 5: 17-21, 33-37.