

# 真空环境对激光熔覆镍基碳化钨涂层组织和性能的影响

姚永强, 林晨\*, 申井义, 刘佳, 徐欢欢

青岛理工大学机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520

**摘要** 研究真空环境对激光熔覆镍基碳化钨涂层组织、性能的影响。结果表明:在真空试验条件下,涂层的组织得到改善,涂层中的粗大树状晶减少,组织更均匀、致密;涂层中的微裂纹显著减少,涂层中几乎没有气孔缺陷;涂层中的金属间化合物可以更均匀地弥散在镍基固溶体中,显著提高了涂层的硬度;涂层的摩擦磨损性能得到明显改善,涂层的摩擦因数相对于非真空试验条件下的摩擦因数降低了约 14%,耐磨性提高了约 56%;真空试验条件有效提高了涂层的综合性能。

**关键词** 激光器; 耐磨性; 激光熔覆; 镍基碳化钨; 真空

中图分类号 TG146.23

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.221402

## Effect of Vacuum on Microstructure and Properties of Laser Cladding Ni-Based WC Coating

Yao Yongqiang, Lin Chen\*, Shen Jingyi, Liu Jia, Xu Huanhuan

*School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology,  
Qingdao, Shandong 266520, China*

**Abstract** The effect of vacuum test condition on the microstructure and properties of the laser cladding Ni-based WC coating is investigated. The results denote that under vacuum test condition, the microstructure of the coating is improved, the coarse dendrites in the coating are reduced, and the structure becomes denser and more uniform. The microcracks in the coating are significantly reduced, and there are almost no porosity defects. The intermetallic compounds in the coating are uniformly dispersed in the Ni-based solid solution, which significantly increases the hardness of the coating. In addition, the friction and wear properties of the coating are significantly improved. The friction coefficient is reduced by approximately 14% when compared with that in the non-vacuum condition, whereas the wear resistance is increased by approximately 56%. Under vacuum test condition, the overall performance of the coating is significantly improved.

**Key words** lasers; wear resistance; laser cladding; Ni-based WC; vacuum

**OCIS codes** 140.3510; 350.3390; 350.3850

## 1 引言

激光熔覆是随着激光技术的发展而新兴起来的一种表面改性方法<sup>[1]</sup>。该方法利用高能量激光束作用在工件材料表面,使工件材料发生所希望的理化性质的改变。激光熔覆涂层可以显著地提高材料的强度、硬度、耐磨性、耐蚀性和高温性能等<sup>[2]</sup>,从而大幅提高产品的质量,延长产品的使用寿命,降低成

本,取得一定的经济效益。激光束能量密度高,其作用在工件表面的时间短,因此激光熔覆是一个快热、快冷的过程,熔覆过程中会产生较大的过冷度,导致熔覆层易产生裂纹;此外,由于激光束的作用时间短,熔池内产生的气体无法及时排出,因此易在涂层内产生气孔;这些缺陷都会严重影响涂层的组织和性能,阻碍激光熔覆技术在实际生产中的应用。针对激光熔覆过程中存在的上述问题,国内外研究者

收稿日期: 2019-05-06; 修回日期: 2019-05-13; 录用日期: 2019-05-15

\* E-mail: 1443214345@qq.com

对激光熔覆技术中存在的问题进行了大量研究,并取得了一定成果。许多人研究了工艺参数对激光熔覆层缺陷的改善,还有部分人在激光熔覆过程中施加辅助工艺,如超声振动、机械振动、电磁搅拌等<sup>[3-11]</sup>,研究了它们对激光熔覆层缺陷的改善作用。这些研究对改善激光熔覆层中的缺陷具有一定意义,可在一定程度上减少熔覆层中的气孔、裂纹等缺陷。

镍(Ni)基合金具有良好的高温耐腐蚀性和抗氧化性能,并且价格比较低,因此应用十分广泛。在Ni基合金中添加适量的铬(Cr)、碳(C)、钨(W)等元素,可以有效改善Ni基合金的硬度和耐磨性,获得高性能的优异涂层。本文采用真空辅助工艺,以Ni基WC复合粉体作为熔覆材料,研究

表1 Q235钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of Q235 steel

Element	C	Mn	Si	S	P	Fe
Mass fraction /%	0.140-0.220	0.300-0.650	≤0.300	≤0.050	≤0.045	Bal.

表2 Ni基WC粉体的化学成分

Table 2 Chemical composition of Ni-based WC powder

Element	Cr	Fe	B	Si	Co	WC	Ni
Mass fraction /%	13.0	3.0	3.1	4.3	5.0	25.0	Bal.

## 2.2 试验方法

采用德国Rofin公司的FL020型光纤激光器对预置涂层进行熔覆,激光器的额定功率为2000 W。真空设备采用自制的真空箱,如图1所示,采用耐高温高透光玻璃对真空箱进行密封,玻璃的透光率大于95%。采用真空泵对真空箱进行抽真空,真空度可达100 Pa。通过正交试验确定最优试验参数如下:激光功率为1600 W,光斑直径为5 mm,扫描速度为4 mm/s,搭接率为30%。

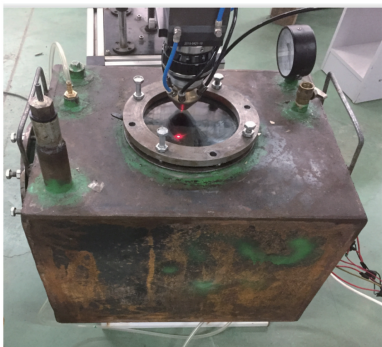


图1 真空箱实物照片

Fig. 1 Vacuum box picture

了真空环境对激光熔覆Ni基WC涂层组织及性能的影响。

## 2 试验

### 2.1 试样制备

试验基体材料选用Q235钢,其化学成分如表1所示。利用线切割将Q235钢切割成尺寸为60 mm×45 mm×15 mm的矩形块,对试样表面进行磨削、抛光以及清洁处理。熔覆材料为Ni基WC,其粒径为150~300目(48~106 μm),化学成分如表2所示。预置涂层为Ni基WC,黏接剂为无水乙醇,预置涂层厚度为1 mm,在80℃下烘烤4 h。试样1的制备在非真空氮气直吹保护条件下进行;试样2的制备在真空环境下进行。

利用线切割将熔覆试样在垂直于涂层表面的方向上切割成尺寸为10 mm×10 mm×15 mm的试样块。对垂直于涂层表面方向的横截面进行打磨抛光处理,制成金相试样。采用Future-Tech公司的FM700型显微硬度仪在距涂层表面0.3 mm处测试涂层的显微硬度。随后,对试样进行打磨抛光处理,然后用王水腐蚀试样15 s,采用日立公司的S-3400N型扫描电子显微镜观察涂层的显微组织。将试样块的涂层表面打磨平整,采用Rigaku公司的D/Max2500PC型X射线衍射仪分析涂层的物相。将试样表面打磨光滑,采用美国GETR公司的UMT-3型多功能摩擦磨损试验机以及粗糙度仪测试涂层的摩擦磨损性能。

## 3 结果与讨论

### 3.1 涂层的微观组织

图2(a1)、(b1)所示为涂层底部的微观组织形貌,图2(a2)、(b2)所示为涂层中部的微观组织形貌。从图2(a1)、(b1)可以看出,涂层与基体之间存在一条明亮的结合带<sup>[12]</sup>,说明二者之间形成了良好的冶金结合。

从图2(a1)、(a2)中可以看出:在非真空环境条件下,涂层的组织以粗大的树状晶和柱状晶为主。在非真空试验条件下,熔覆过程中熔池内液体的流动性较差,金属液相的成分不均匀,结晶时易发生枝晶偏析,促进了树枝晶的形成;另外,冷却凝固过程

中的过冷度较大,晶粒生长得快,促进了树枝晶的长大,导致涂层的组织粗大、不均匀。此外,涂层中存在许多微裂纹。这是因为在非真空试验条件下,凝固过程中较大的过冷度会使涂层内部产生很大的残余应力,从而导致涂层易在存在硬质相的部位产生微裂纹。涂层中还存在明显的气孔缺陷,这是因为在非真空试验条件下,液体的流动性差,熔池内产生的气体无法从熔池内及时排出,残留在涂层内部形成了气孔缺陷。

从图 2(b1)、(b2)中可以看出,涂层组织较为均匀、致密,粗大的树状晶明显减少,组织主要以胞状晶和柱状晶为主。原因是在真空环境条件下,熔池

内液体的流动性变好<sup>[13]</sup>,液相成分更均匀,减少了熔池内液相凝固时的枝晶偏析,减少了树状晶的形成;另外,熔池内液体流动性变好可以降低熔池的温度梯度,减小晶核的生长速度,从而抑制树枝晶的生长,使涂层的组织更均匀、致密。此外,涂层中几乎不存在气孔。这是因为在真空试验条件下,熔池内外的压差可以加快气体的逸出,从而显著减少了涂层中的气孔缺陷。涂层中微裂纹的数量也明显减少。这是因为在真空环境下,熔池内液体的流动性变好,可以在一定程度上减小凝固过程的过冷度,从而减小了残余应力,使涂层中的微裂纹数量有所减少。

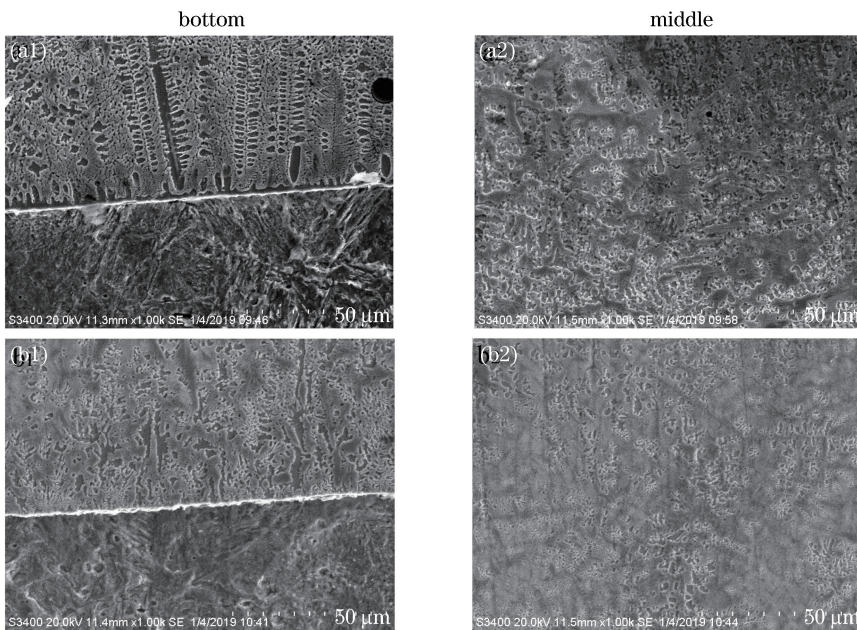


图 2 不同工艺条件下涂层的微观组织。(a1)(a2)非真空环境;(b1)(b2)真空环境

Fig. 2 Microstructures of coatings under different process conditions. (a1)(a2) non-vacuum environment; (b1)(b2) vacuum environment

### 3.2 涂层中的物相

图 3 所示为不同工艺条件下涂层的 X 射线衍射(XRD)谱图,可以看出:在非真空试验条件下,涂层中的物相主要有  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 、 $\text{NiB}_2$ 、 $\gamma\text{-Ni}$ 、 $\text{FeNi}_3$ ;在真空试验条件下,涂层中的物相主要有  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 、 $\text{FeNi}$ 、 $\gamma\text{-Ni}$ 、 $\text{FeNi}_3$ 、 $\text{Cr}_3\text{C}_2$ 。涂层中的物相以 Ni 基固溶体以及弥散在其中的金属间化合物为主。此外,在两种试验条件下,都未发现 WC 相。原因是采用大功率激光制备熔覆涂层时,极易导致涂层中的 WC 烧损和分解形成新的碳化物<sup>[14]</sup>。在涂层的物相组成中,Cr 和 C 形成的  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  属于硬质相,硬质相的存在是微裂纹产生的重要原因。在真空试验条件下,涂层中的  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  相减少,并出现  $\text{Cr}_3\text{C}_2$

相。原因是在真空试验条件下,熔池内液体的流动性好,加速了基体中的 C 元素向涂层中扩散,使涂层中的 C 元素含量相对增加,而 Cr 元素的含量相对减少,这有助于  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  相的形成。相对于  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  相, $\text{Cr}_3\text{C}_2$  相是较细的硬质相组织,它的生成可以有效减少裂纹的产生。另外,液体的流动性变好可以使金属间化合物在 Ni 基固溶体中的分布更均匀,降低了硬质相的聚集,有效减少了涂层中的粗大组织,使涂层的组织更致密、均匀,降低了涂层中出现微裂纹的可能性,这也是涂层中微裂纹数量较少的重要原因。

### 3.3 涂层的硬度

采用显微硬度仪测试涂层的显微硬度。以涂层

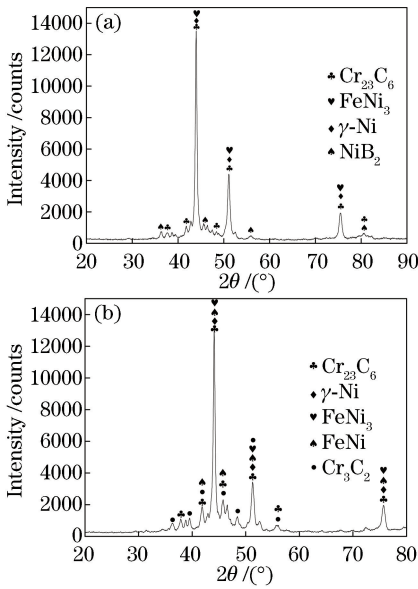


图3 不同工艺条件下涂层的XRD谱图。(a)非真空环境；(b)真空环境

Fig. 3 XRD patterns of coating under different process conditions. (a) Non-vacuum environment; (b) vacuum environment

的结合区为零点,在垂直于涂层表面的方向上,从零点开始,分别向上、向下等间距(0.1 mm)测试涂层和基体的硬度,共测试9组,每组测试3个点,取3个点平均值作为该组的硬度值。测试条件如下:加载载荷为1 N,保压时间为5 s。测试结果如图4所示,可以看出:在非真空试验条件下,涂层的平均显微硬度为635.8 HV,约为基体硬度的2.5倍;在真空试验条件下,涂层的平均显微硬度863.1 HV,约为基体硬度的3倍。

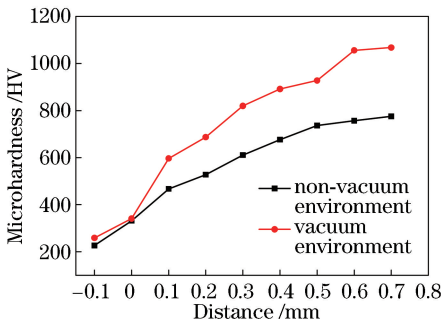


图4 涂层的显微硬度曲线

Fig. 4 Microhardness curves of the coating

硬度测试结果表明,真空环境可以提高涂层的显微硬度。在真空试验条件下,液体的流动性变好,液相成分更均匀,涂层中的偏析现象减弱,涂层的组织均匀、致密,在一定程度上提高了涂层的硬度。通过3.2节中的物相分析可知,涂层中的物相主要是

Ni基固溶体和金属间化合物,液体的流动性改善后,可以使涂层中的金属间化合物均匀地弥散在Ni基固溶体中,对涂层起到弥散强化的作用<sup>[15]</sup>,从而进一步提高了涂层的硬度。

### 3.4 涂层的摩擦磨损性能

本文中的摩擦磨损试验是不加任何润滑剂的干摩擦试验,摩擦形式是点接触的往复直线摩擦,对磨件是直径为9.25 mm的轴承钢球(其材料为GCr15),对磨时间为15 min,施加的载荷为10 N,频率为2 Hz。图5所示为涂层的摩擦因数曲线,可以看出:在非真空试验条件下得到的涂层的平均摩擦因数约为0.59,在真空试验条件下得到的涂层的平均摩擦因数约为0.51,较非真空条件下的降低了约14%。这主要是由于在真空试验条件下,涂层的组织更均匀、致密,均匀、致密的组织可以减小涂层的表面粗糙度,降低涂层表面的摩擦因数;另外,涂层中几乎没有气孔和裂纹缺陷,降低了摩擦过程中材料的磨损,有效减少涂层表面剥落的材料对摩擦表面的刮擦。因此,真空环境下获得的涂层的摩擦因数更小,摩擦过程更平稳,涂层具有更好的减磨性。

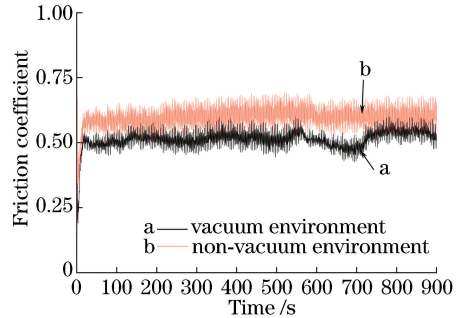


图5 涂层的摩擦因数曲线

Fig. 5 Friction coefficient curves of the coating

摩擦磨损试验结束后,采用粗糙度仪测试涂层的磨痕形貌,得到涂层垂直于磨痕方向的波纹曲线,如图6所示,其中X为磨痕的宽度,Y为磨痕的深度,波纹曲线的横截面积即为该截面上涂层的磨损量<sup>[16]</sup>。利用曲线的横截面积来评估整个涂层的磨损量,横截面积越大,则涂层的磨损量越大,涂层的耐磨性越差。通过Origin积分计算得到在真空试验条件下涂层的磨损量为 $0.73 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ ,而非真空试验条件下涂层的磨损量为 $1.65 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ ,磨损量降低了约56%。这主要是由于在真空试验条件下,涂层的组织更均匀、致密,涂层表面材料的抗黏接能力增强,在

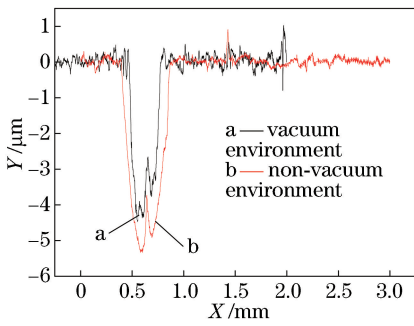


图6 涂层磨痕波纹曲线

Fig. 6 Scratch corrugated curves of the coating

相同的摩擦条件下,涂层表面材料的去除程度更小,因此涂层具有更高的耐磨性<sup>[17-18]</sup>。

## 4 结 论

在真空环境下进行激光熔覆具有以下优点:1)增大了气体逸出涂层的速度,使涂层中几乎没有气孔缺陷;2)减小了凝固过程的过冷度,使涂层中的微裂纹数量显著减少;3)明显改善了涂层的组织,涂层中粗大的树枝晶减少,组织主要为胞状晶和柱状晶,组织更均匀、致密。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang W P, Liu W Y. Progress of laser cladding about ceramic coating [J]. *Surface Technology*, 2001, 30(4): 30-33.  
张维平, 刘文艳. 激光熔敷陶瓷涂层综述[J]. *表面技术*, 2001, 30(4): 30-33.
- [2] Liu S H. *Laser materials processing* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2011: 247-270.  
刘顺洪. *激光制造技术* [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011: 247-270.
- [3] Guo H F, Li Z, Xiong Y C, *et al.* Analysis and control of Ni-base alloy coating defect formed by laser cladding [J]. *Hot Working Technology*, 2008, 37(19): 126-129.  
郭华锋, 李志, 熊永超, 等. 激光熔覆成形 Ni 基合金层的缺陷分析及控制 [J]. *热加工工艺*, 2008, 37(19): 126-129.
- [4] Xu J L, Li Z G, Guo H F, *et al.* Research progress of crack defect in laser cladding layer [J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(8): 6-9.  
徐家乐, 李忠国, 郭华锋, 等. 激光熔覆层裂纹缺陷的研究进展 [J]. *热加工工艺*, 2013, 42(8): 6-9.
- [5] Zhou S F, Zeng X Y, Hu Q W, *et al.* Analysis of crack behavior for Ni-base WC composite coatings by

laser cladding and crack-free realization [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 255(5): 1646-1653.

- [6] Liu H X, Tao X D, Zhang X W, *et al.* Microstructure and interface distribution of Fe-Cr-Si-B-C laser cladding alloy coatings assisted by mechanical vibration [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(8): 2192-2202.  
刘洪喜, 陶喜德, 张晓伟, 等. 机械振动辅助激光熔覆 Fe-Cr-Si-B-C 涂层的显微组织及界面分布形态 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(8): 2192-2202.
- [7] Jendrzejewski R, Śliwiński G, Krawczuk M, *et al.* Temperature and stress during laser cladding of double-layer coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(6): 3328-3334.
- [8] Wang Y L, Liu S Y, Zhang X Y, *et al.* Experiments and analyses of 3540Fe/CeO<sub>2</sub> coatings by ultrasonic vibration assisted laser cladding [J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(21): 2600-2605.  
王玉玲, 刘善勇, 张翔宇, 等. 超声振动辅助激光熔覆 3540Fe/CeO<sub>2</sub> 涂层实验及分析 [J]. *中国机械工程*, 2018, 29(21): 2600-2605.
- [9] Zhang A F, Fu T, Wang T, *et al.* Effect of ultrasonic vibration on microstructure and properties of laser clad and solution-aging treated Ti6Al4V alloys [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1202004.  
张安峰, 付涛, 王潭, 等. 超声振动对激光熔覆及固溶时效 Ti6Al4V 合金组织和性能的影响 [J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1202004.
- [10] Xu J L, Zhou J Z, Tan W S, *et al.* High-temperature oxidation resistance of Co-based alloy coatings by ultrasonic vibration assisted laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0102006.  
徐家乐, 周建忠, 谭文胜, 等. 超声振动辅助激光熔覆钴基合金涂层的抗高温氧化性能 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0102006.
- [11] Xu J L, Zhou J Z, Tan W S, *et al.* Thermal corrosion resistance of Co-based alloy coatings by laser cladding assisted by electromagnetic stirring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0114002.  
徐家乐, 周建忠, 谭文胜, 等. 电磁搅拌辅助激光熔覆钴基合金涂层的抗热腐蚀性能 [J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0114002.
- [12] Zhou C H, Lin C, Zhang J J, *et al.* Effect of Ni-based solder on defects of laser cladding WC alloy layers on 45# steel [J]. *Surface Technology*, 2018, 47(3): 91-95.

- 周昌欢, 林晨, 张娟娟, 等. 镍基钎料对 45# 钢激光熔覆镍基 WC 合金熔覆层缺陷的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 91-95.
- [13] Huang X B. Study on the preparation and properties of vacuum fusion sintered WC/Ni and WC/Co composite coatings [D]. Xi'an: Xidian University, 2005.  
黄新波. 真空熔覆 Ni 基合金-碳化钨和 Co 基合金-碳化钨复合涂层的制备及性能研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [14] Wu P, Zhou C C, Tang X N. Preparation of wear-resistant graded metal-ceramic coating by laser-alloying[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1994, 30(23): 508-512.  
吴萍, 周昌焱, 唐西南. 激光合金化熔覆制备耐磨陶瓷梯度涂层[J]. 金属学报, 1994, 30(23): 508-512.
- [15] Wang T H, Wang J. Mechanical engineering materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.  
王廷和, 王进. 机械工程材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [16] He L J, Gao R, Zhao X J, *et al.* Effects of fiber laser cladding Fe-based alloy powder on microstructure and properties of 45 steel surface[J]. Foundry Technology, 2016, 37(1): 44-47.  
何力佳, 高睿, 赵晓杰, 等. 光纤激光熔覆铁基合金粉末对 45 钢表面组织和性能的影响[J]. 铸造技术, 2016, 37(1): 44-47.
- [17] Song W L, Echigoya J, Zhu B D, *et al.* Vacuum laser cladding and effect of Hf on the cracking susceptibility and the microstructure of Fe-Cr-Ni laser-clad layer [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 126(1): 76-80.
- [18] St-Georges L. Development and characterization of composite Ni-Cr + WC laser cladding [J]. Wear, 2007, 263: 562-566.