

# 无限冷硬铸铁轧辊的激光表面改性

陈长军<sup>1</sup> 张 敏<sup>1</sup> 王晓南<sup>2</sup> 张 超<sup>1,3</sup> 敬和民<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 苏州大学机电学院激光加工中心, 江苏 苏州 215021  
<sup>2</sup> 苏州大学沙钢钢铁学院, 江苏 苏州 215021  
<sup>3</sup> 安徽工业大学材料科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243002

**摘要** 轧辊作为轧制过程中金属变形的直接工具,其质量和使用寿命至关重要。同时轧辊也是冶金企业的主要消耗部件,在轧钢生产成本中占很重的比例。使用  $\text{Cr}_2\text{C}_3 + \text{NiCr}$  粉末,利用激光熔覆技术对镍铬无限冷硬铸铁轧辊进行了表面改性,旨在大幅度提高轧辊硬度及使用寿命。研究表明,熔覆层与基材呈良好的冶金结合,相对于基材微观组织,熔覆层组织更为致密;基材和熔覆层的平均硬度分别为 506 HV 和 1137 HV,熔覆层的硬度提高了 25%,熔覆层的耐磨性能明显提高。激光熔覆层内形成的微裂纹主要由结晶裂纹和高温低塑性裂纹组成,通过二次扫描和调整粉末化学成分可有效地减少微裂纹的形成。

**关键词** 光学制造;激光熔覆;无限冷硬铸铁;微观组织;硬度

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s103010

## Laser Surface Modification of Indefinite Chilled Cast-Iron Roller

Chen Changjun<sup>1</sup> Zhang Min<sup>1</sup> Wang Xiaonan<sup>2</sup> Zhang Chao<sup>1,3</sup> Jing Hemin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laser Processing Research Center, School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021

<sup>2</sup> Shagang School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021

<sup>3</sup> School of Materials Science & Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002

**Abstract** As the direct tool of metal deforming in rolling, the quality and operational life span of mill roll are of high significance. Mill roll is the main consumption component with a high ratio in steel rolling production costs. In this paper, the indefinite chilled cast-iron roller is surface-modified by laser cladding, using  $\text{Cr}_2\text{C}_3$  and NiCr powder. The results indicates that, the cladding layer and base materials are a good metallurgical bond, and the microstructure of cladding layer is finer than base materials. The average microhardnesses of base materials and cladding layer are 506 HV and 1137 HV, respectively. Compared with the base material hardness, cladding layer hardness increases by 25%, so the wear resistance of the cladding layer is significantly improved. Microcrack in cladding layer includes solidification crack and low plasticity crack, and the microcrack is effectively decreased by the secondary scanning and adjusting chemical composition of the powder.

**Key words** optical fabrication; laser cladding; infinite chilled cast-iron; microstructure; hardness

**OCIS codes** 350.3390; 350.3850; 140.3390; 160.3900

## 1 引 言

机械零部件在生产应用过程中,由于表面摩擦磨损、腐蚀、疲劳裂纹等原因经常发生各种不同情况

的失效,浪费大量人力、物力,影响生产进度<sup>[1-5]</sup>。工程上常采用表面工程技术来提升其耐磨、耐蚀等性质,从而提高整个机械零部件的使用寿命<sup>[6-10]</sup>。

**收稿日期**: 2013-07-21; **收到修改稿日期**: 2013-09-12

**基金项目**: 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室开放基金(2009320, FMRU2008K05)、科技部科技人员服务企业行动项目(2009GJD10047)、绿色制造与节能减排科技研究中心开放基金(C1001)

**作者简介**: 陈长军(1976—),男,教授,主要从事激光制造与再制造/高能微弧火合金化等方面的研究。

E-mail: chjchen2001@aliyun.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

如钢厂中的轧辊,就是一个除铁矿石之外最大的消耗件,而棒线材的铸铁轧辊处于高温、冷却水和轧制力的交互作用下<sup>[6,8]</sup>,使得轧辊更换频繁、磨损速度快,并带来辊径尺寸的改变。在目前钢铁产量过剩,吨钢利润低的背景下,提高吨钢的利润空间具有重要的现实意义。

在众多的表面处理技术中,激光表面技术可谓独树一帜。激光表面改性是将激光束照到工件的表面,以改变材料表面性能的加工方法<sup>[11-14]</sup>。通过激光束的高能量对轧辊表面进行强化处理所得到的改性层,具有表面硬度高、与轧辊基体冶金结合和耐磨耐蚀的优点,可以广泛地应用于钢铁冶金轧辊的抗磨损等修复与强化。NiCr 粉末具有耐高温抗腐蚀、抗氧化和耐热的性能,而  $\text{Cr}_2\text{C}_3$  则具有抗磨损效果好的优点,广泛应用于耐磨和耐热工程领域。本研究利用激光熔覆的办法在无限冷硬铸铁轧辊上制备耐热耐磨涂层,探讨了激光制备  $\text{Cr}_2\text{C}_3 + \text{NiCr}$  合金涂层组织的磨损性能。

## 2 实验材料及方法

### 2.1 实验材料

激光熔覆实验用基材来自于国内某钢厂生产过程中使用的轧辊,为镍铬无限冷硬合金铸铁,其化学成分(质量分数,%)为 2.90~3.70 C, 0.60~1.20 Si, 0.40~1.20 Mn,  $\leq 0.25$  P,  $\leq 0.12$  S, 1.00~2.00 Li, 0.70~1.20 Cr, 0.20~0.60 Mo。基材取样尺寸为 30 mm×15 mm×5mm(长×宽×厚)。激光熔覆实验用粉末类型为  $\text{Cr}_2\text{C}_3 + \text{NiCr}$ 。

### 2.2 实验方法

激光熔覆实验利用输出功率为 5 kW 横流  $\text{CO}_2$  激光器完成,采用的激光熔覆工艺为同步送粉法。激光熔覆参数为电流 7 A,电压 182 V,激光功率 1.5 kW。激光熔覆后获得样品经过热镶嵌、机械研磨及抛光后,采用体积比 1:1 比例混合的稀 HF 和稀  $\text{HNO}_3$  的腐蚀液浸蚀抛光表面。利用 Axioplan2 型金相显微镜和 XL30TMP 型扫描电镜(SEM)观察样品的表面形貌。利用 HXD-1000TMC 显微硬度计测定熔覆层、过渡层及基材的硬度,载荷为 200 g,保压时间为 15 s。通过摩擦磨损试验评价了熔覆层与基材的耐磨性能。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 基材及熔覆层的微观组织分析

图 1 是基材(镍铬无限冷硬铸铁)的光学显微组织。由图可见,基体的显微组织为多相复合组织,由马氏体、下贝氏体、上贝氏体、回火贝氏体、铁素体及呈点状或条状分布的石墨和碳化物组成<sup>[3,7]</sup>。马氏体为图中呈现透镜形态的竹叶形的片状部分,有的部分有中脊背,互相呈  $60^\circ$  或  $120^\circ$  夹角;下贝氏体为图中深色的针条状部分,其上有细微的碳化物析出,并无固定夹角,分布无规律;上贝氏体是呈束条状或者排状近乎平行的组合部分,其间的间隙是同样近乎平行的铁素体夹杂;回火贝氏体是铸态贝氏体经回火后的产物<sup>[8-10]</sup>,在光镜下看不到明显的变化,特征不明显。

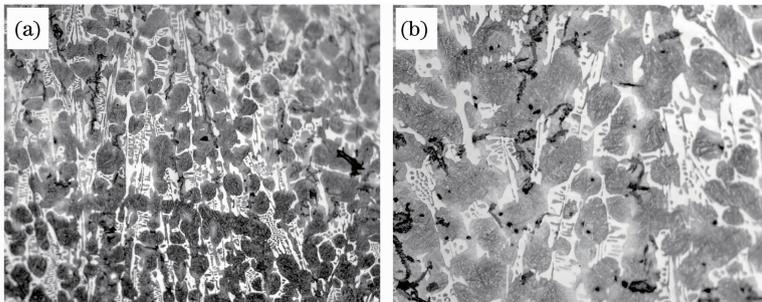


图 1 基材的光学显微组织。(a) 低倍;(b) 高倍

Fig. 1 Optical microstructure of base material. (a) Low magnification; (b) high magnification

图 2 给出的是激光熔覆后样品的扫描电子显微镜照片。图 2(a)和(b)给出的是样品的低倍宏观照片,由图可见,熔覆层与基材已经形成了良好的冶金结合。但是,熔覆层、过渡层和基材的显微组织有着明显的区别。图 2(c)给出的是熔覆层的显微组织

形貌,由图可见,其显微组织为大量密集排列的竹叶状组织,含有大量的树枝状晶体和横向排列的平行晶粒。图 2(d)给出的是过渡层的显微组织,由图可见,其显微组织为大量的竹叶状或接近矩形大块马氏体、针状晶体,以及一些不规则的胞晶和碳化物。

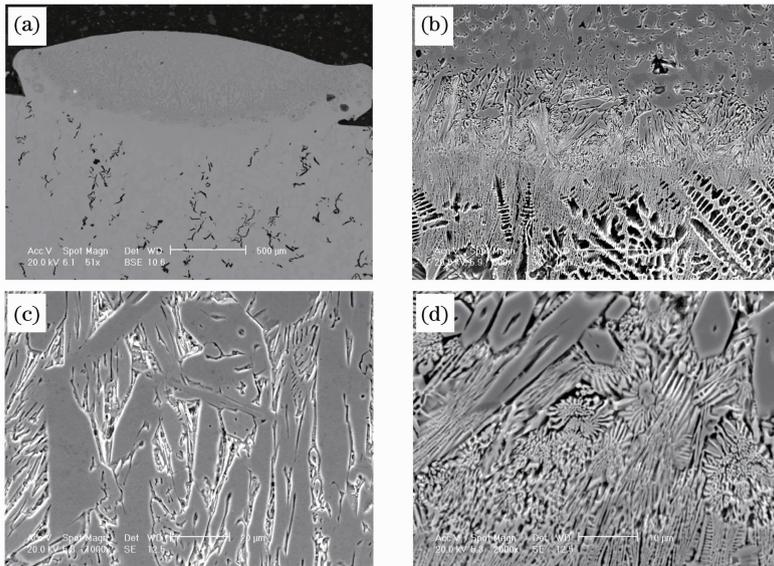


图 2 图 2 激光熔覆样品的扫描电子显微镜照片。(a),(b) 低倍宏观照片;(c) 熔覆层;(d) 过渡层

Fig. 2 SEM images of laser cladding sample. (a), (b) Low magnification macro photos; (c) cladding layer; (d) transition layer

利用扫描电镜对熔覆层与基材之间的界面进行了元素分析,结果如图 3 所示。线扫描方向如图 3 (a)中的黑色实线所示,图 3(b)中的绿色/红色/蓝

色实线分别代表 Cr/Fe/Ni 三种元素。由图可见,三种主要元素 Cr、Fe、Ni 已经在界面处发生元素扩散,形成冶金结合界面。

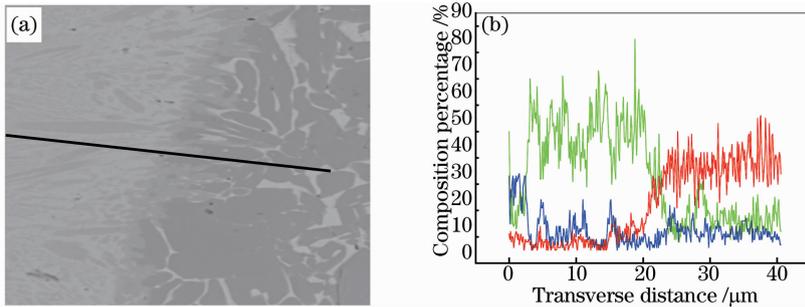


图 3 熔覆层与基材结合界面。(a) 线扫描路径;(b) 能谱分析结果

Fig. 3 Bonding interface of cladding layer and base material. (a) Line scan path; (b) Energy dispersive spectrometer analysis results

### 3.2 硬度及耐磨性能分析

利用显微硬度计测定了熔覆层至基材的硬度变化情况,其中 CL 为熔覆层,TL 为过渡层,BM 为基材。将距离熔覆层顶端 20  $\mu\text{m}$  处作为第一个压痕点,压痕的间隔取为 40  $\mu\text{m}$ 。图 4 给出的是熔覆层至基材的硬度变化曲线。由图可见,距离熔覆层顶端距离小于 600  $\mu\text{m}$  范围内为熔覆层区,其硬度分布较为均匀,平均硬度为 1137 HV;距离熔覆层顶端距离在 600~720  $\mu\text{m}$  范围内为过渡层,硬度逐渐降低,平均硬度为 723 HV;距离熔覆层顶端距离超过 720  $\mu\text{m}$  时为基材,其硬度值仅为 506 HV。因此,与基材相比,熔覆层的硬度有显著提升,提升比例达到 125%;过渡层的硬度较基材相比亦有 43% 的提升。一般而言,

材料耐磨性能与硬度呈正比关系。

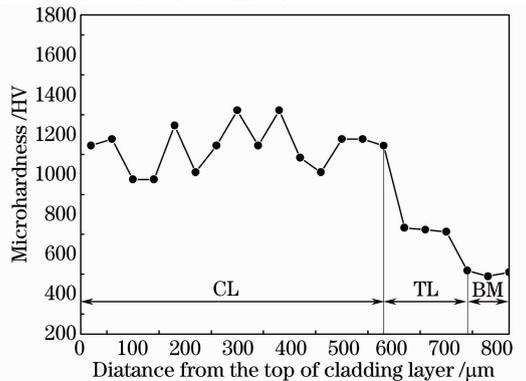


图 4 激光熔覆样品硬度变化规律

Fig. 4 Microhardness variation of laser cladding sample

利用摩擦磨损试验机对基材和熔覆层的耐磨性进行了表征。图 5 给出了样品磨损断面的扫描电子显微镜照片。由图可见,基材上的摩擦磨损痕迹清晰可见,存在明显的犁沟,基材组织结构受到较大程

度的破坏;而熔覆层的摩擦磨损痕迹轻浅许多,不存在明显的犁沟,组织结构破坏程度显著降低。因此,熔覆层硬度的大幅度提高致使其耐磨性能有显著

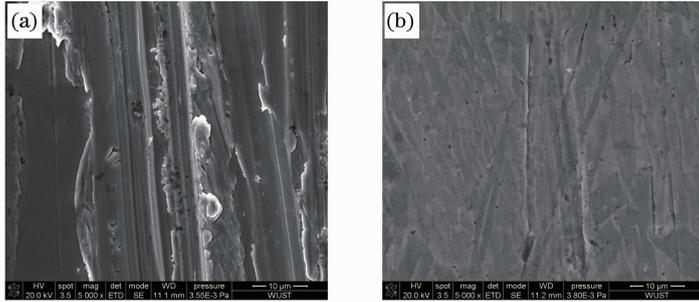


图 5 磨损面微观照片。(a) 基材;(b) 熔覆层

Fig. 5 Images of wear surface. (a) Base material; (b) cladding layer

### 3.3 熔覆层内微裂纹形成机理分析

在激光熔覆实验中,发现个别样品的熔覆层存在微裂纹,如图 6 所示。导致熔覆层产生微裂纹的因素有多种,其中熔覆材料化学成分及熔覆工艺的影响最为显著<sup>[15]</sup>。

熔覆材料的化学成分尤其是 B、Si、C 含量对微裂纹的形成有较大的影响。研究证实,增加 B、Si 和 C 的含量将提高硬质相的百分数,从而提高熔覆层

硬度,但是同时也将导致韧性下降,熔覆层内微裂纹形成几率增大。以图 6(a)熔覆层顶部附近的微裂纹为例,由于激光熔覆过程中所形成的熔池寿命极短, Si 和 B 被氧化而形成硼硅酸盐,这些夹杂物来不及完全上浮至熔池表面而被保留在熔覆层内形成液态薄膜,当熔覆层完全冷却至室温时,在拉应力的作用下产生微裂纹<sup>[16]</sup>。

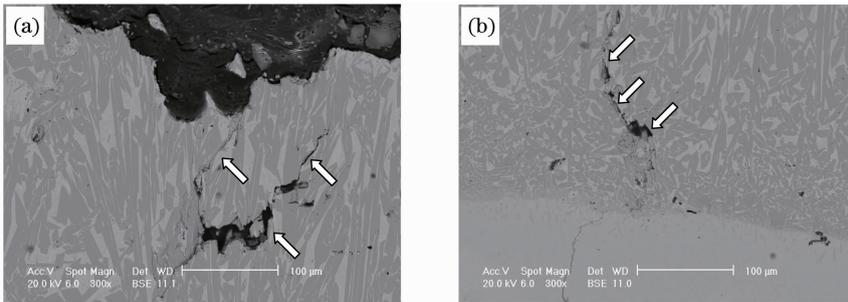


图 6 熔覆层内的微裂纹。(a) 熔覆层顶端;(b) 过渡区附近

Fig. 6 Microcrack in cladding layer. (a) Top of cladding layer; (b) near the transition zone

激光熔覆输入能量的大小直接影响着熔覆层的质量。当输入能量较低时,熔覆层与基材界面无法形成良好的冶金结合且存在缺陷;当输入能量过高时,熔覆层与基材之间的化学成分扩散明显,成分稀释较大,导致表面强化效果降低;当输入能量适宜时,熔覆层表面强化效果最佳,且与基体形成良好的冶金结合。实验中出现的少部分微裂纹可能是由于激光熔覆过程中能量输出不稳定而导致的<sup>[6]</sup>。为更好地控制熔覆层的内部质量,作者通过大量的实验证实,通过二次扫描的方法(即在第一次扫描后的熔层上再扫描一次)可使熔覆层的化学成分均匀、消除缺陷,第一次扫描后产生的微裂纹在第二次扫描后

消除,而熔覆层的硬度及晶粒尺寸未发生明显变化。

综上所述,激光熔覆层内形成的微裂纹主要是由结晶裂纹和高温低塑性裂纹组成。因此,为有效消除熔覆层内部的微裂纹,首先应优化粉末的化学成分,进而提高熔覆层的强韧性;其次应尽可能降低热应力<sup>[17-18]</sup>。

## 4 结 论

1) 熔覆层与基材呈良好的冶金结合,相对于基材而言,熔覆层微观组织更为致密,但熔覆层顶端及部分过渡区域有少量裂纹产生。

2) 基材的硬度平均值为 506 HV,过渡区平均

硬度为 723 HV, 而熔覆层的平均硬度高达 1137 HV 左右。熔覆层的硬度值相比于基材得到了大幅度的提高, 因此, 熔覆层的耐磨性能也有明显的提高。

3) 激光熔覆层内形成的微裂纹主要是由结晶裂纹和高温低塑性裂纹组成。通过二次扫描和调整粉末化学成分的方法可有效地减少微裂纹的形成。

### 参 考 文 献

- 1 Yao Chengwu, Huang Jian. Application status of laser hardening and repairing technology on roller surface[J]. *Material & Heat Treatment*, 2007, 36(8): 69-77.  
姚成武, 黄坚. 轧辊表面激光强化与修复技术的应用现状[J]. *热加工工艺*, 2007, 36(8): 69-77.
- 2 Zang Chenfeng, Liu Changsheng. Research progress of laser modification techniques used on roller surface [J]. *Materials Review (Review Article)*, 2010, 24(2): 6-10.  
臧辰峰, 刘常升. 轧辊表面激光处理技术的研究进展[J]. *材料导报(综述篇)*, 2010, 24(2): 6-10.
- 3 Sun Guifang, Liu Changsheng, Tao Xingqi, *et al.*. Research on laser alloying of high-Ni-Cr infinite chilled cast iron roller[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2008, 29(6): 845-848.  
孙桂芳, 刘常升, 陶兴启, 等. 高镍铬无限冷硬铸铁轧辊表面激光合金化的研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(6): 845-848.
- 4 Lu Jian, Luo Fang. Research on improving roller life by laser alloying technique[J]. *Zhejiang Metallurgy*, 2007, (4): 41-45.  
鲁建, 骆芳. 激光合金化技术提高轧辊寿命的研究[J]. *浙江冶金*, 2007, (4): 41-45.
- 5 Sun Rongmin, Feng Shuqiang, Wen Zongling, *et al.*. Research on laser alloying process of low-Ni-Cr infinite chilled cast iron roller[J]. *Applied Laser*, 2009, 29(6): 493-496.  
孙荣敏, 冯树强, 温宗胤, 等. 低镍铬无限冷硬铸铁轧辊激光表面合金化的工艺研究[J]. *应用激光*, 2009, 29(6): 493-496.
- 6 Chen Changjun, Zhang Min. Laser surface strengthening of medium-Ni-Cr infinite chilled cast iron roller[J]. *Applied Laser*, 2010, 30(1): 26-31.  
陈长军, 张敏. 中镍铬无限冷硬铸铁轧辊激光表面强化[J]. *应用激光*, 2010, 30(1): 26-31.
- 7 Hou Xinyun, Wei Guo. The application of laser roller strengthens technology[J]. *Henan Metallurgy*, 2007, 15(5): 46-47.  
侯心愿, 魏国. 激光轧辊强化技术应用[J]. *河南冶金*, 2007, 15(5): 46-47.
- 8 Song Yang, Zhu Shigen, Qu bin, *et al.*. Methods to repair and

- strengthen surface of the roll [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2005, 8: 113-115.  
宋阳, 朱世根, 渠彬, 等. 轧辊表面修复与强化的技术途径[J]. *机械设计与制造*, 2005, 8: 113-115.
- 9 Tong Xin, Li Fuhai, Liu Min, *et al.*. Thermal fatigue resistance of non-smooth cast iron treated by laser cladding with different self-fluxing alloys[J]. *Optics and Laser Technology*, 2010, 42(7): 1154-1161.
- 10 Zhang Guodong, Huang Anguo, Li Zhiyuan, *et al.*. Laser transformation hardening of high-Ni-Cr infinite chilled cast iron roller[A]. *The Sixth National Conference on Surface Engineering [C]*. 2006.  
张国栋, 黄安国, 李志远, 等. 高镍铬无限冷硬铸铁轧辊激光相变硬化[A]. 第六届全国表面工程学术会议论文集[C]. 2006.
- 11 Li Zhaohui. Practice to strengthen surface of roller with laser[J]. *Hebei Metallurgy*, 2008, (2): 29-30.  
李朝晖. 激光表面强化技术处理轧辊的生产实践[J]. *河北冶金*, 2008, (2): 29-30.
- 12 Lin Chaowen, Wang Yong, Zhang Zhe, *et al.*. Influence of overlapping ratio on hardness and residual stress distributions in multi-track laser surface melting roller steel [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(12): 1224-1230.
- 13 Wu Guosheng, Wang Yutao. Laser surface hardening of high NiCr indefinite chill cast iron roll material[J]. *Journal of Wuhan Engineering Institute*, 2008, 20(4): 1-3.  
吴国胜, 王玉涛. 激光表面强化处理高 NiCr 无限冷硬铸铁轧辊材料研究[J]. *武汉工程职业技术学院学报*, 2008, 20(4): 1-3.
- 14 YB4052-1991, Metallographic test of high-Ni-Cr infinite chilled centrifugal cast iron roller[S]. 1991.  
YB4052-1991, 高镍铬无限冷硬离心铸铁轧辊金相检验[S]. 1991.
- 15 Shi shihong. Influences of technology and powder in laser cladding treatment on cracking behavior of cladding layer[D]. Changsha: Central South University, 1998.  
石世宏. 激光熔覆工艺与粉末对覆层开裂行为的影响[D]. 长沙: 中南大学, 1998.
- 16 Dong Xiuhua. Effect of parameters of laser intensify treatment process on milling roll surface properties[J]. *Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology*, 2003, 22(3): 242-246.  
董秀花. 激光强化处理参数对轧辊表面性能的影响[J]. *包头钢铁学院学报*, 2003, 22(3): 242-246.
- 17 Yungchun Lee, Chengyu Chiu. Roller-based laser-assisted direct imprinting for large-area and continuous nano-fabrication [J]. *Microelectronic Engineering*, 2010, 87: 35-40.
- 18 Janne Nurminen, Jonne Nakki, Petri Vuoristo. Microstructure and properties of hard and wear resistant MMC coatings deposited by laser cladding[J]. *Int J Refractory Metals & Hard Materials*, 2009, 27: 472-478.

栏目编辑: 宋梅梅