

# 磁场辅助激光沉积复合涂层的微观组织与性能

石岩<sup>1,2\*\*</sup>, 陈奎明<sup>1\*</sup>, 刘佳<sup>1</sup>, 李凌宇<sup>1</sup>, 姜志恒<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 长春理工大学国家国际科技合作基地(光学), 吉林 长春 130022

**摘要** 采用激光沉积技术,在 304 不锈钢表面制备了 Fe106+5%Ni/WC 复合涂层,研究了不同磁场转速下涂层的宏观形貌、微观组织、显微硬度及摩擦磨损性能的变化。结果表明,当磁感应强度为 70 mT,磁场转速为 100~400 r·min<sup>-1</sup>时,旋转磁场对沉积层表面粗糙度影响较小;当磁场转速继续增大时,沉积层表面粗糙度逐渐减小,熔宽逐渐增大,润湿角逐渐减小,表面质量明显提升。随着磁场转速的增大,沉积层的显微硬度逐渐增大。当磁场转速为 600 r·min<sup>-1</sup>时,沉积层的平均显微硬度达到 825 HV,约为无磁场沉积层的 1.178 倍;同时,沉积层的磨损质量逐渐减小,最小磨损平均失重仅为 2.2 mg,比无磁场沉积层的耐磨性提高了 1.33 倍。

**关键词** 激光技术; 激光沉积; 旋转磁场; 显微组织; 复合涂层; 摩擦磨损

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1102009

## Microstructure and Properties of Composite Coatings by Magnetic Field Assisted Laser Deposition

Shi Yan<sup>1,2\*\*</sup>, Chen Kuiming<sup>1\*</sup>, Liu Jia<sup>1</sup>, Li Lingyu<sup>1</sup>, Jiang Zhiheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> National Base of International Science and Technology Cooperation in Optics, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** The Fe106+5%Ni/WC composite coatings are prepared on the 304 stainless steel surfaces by the rotating magnetic field assisted laser deposition technique, and the changes of their macro-morphologies, microstructures, microhardness, and friction and wear properties under different magnetic field rotating speeds are investigated. The results show that, the rotating magnetic field has a small effect on the surface roughness of the deposition layer when the magnetic field strength is 70 mT and the magnetic field rotating speed is 100-400 r·min<sup>-1</sup>. With the further increase of the magnetic field rotating speed, the surface roughness of the deposition layer gradually decreases, the melt width increases, and the wetting angle gradually decreases, which indicates the surface quality is obviously improved. In addition, the microhardness of the deposition layer gradually increases with the increase of the magnetic field rotating speed. When the magnetic field rotational speed is 600 r·min<sup>-1</sup>, the average hardness microhardness of the deposition layer reaches 825 HV, which is about 1.178 times that of the magnetic field free deposition layer. Simultaneously, the wear quality of the deposition layer gradually decreases, and the minimum average weight loss is only 2.2 mg, which is 1.33 times higher than that of the magnetic field free deposition layer.

**Key words** laser technique; laser deposition; rotating magnetic field; microstructure; composite coatings; friction and wear

**OCIS codes** 140.3390; 310.3840; 310.6870

收稿日期: 2018-05-18; 修回日期: 2018-07-16; 录用日期: 2018-07-26

基金项目: 国家重点研发计划“增材制造与激光制造”重点专项(2017YFB1104601)、吉林省科技厅重点科技攻关项目(20170204065GX,20180201063GX)

\* E-mail: 370895548@qq.com; \*\* E-mail: shiyan@cust.edu.cn

# 1 引 言

激光沉积技术是利用高能量密度连续激光将粉末或其他形态金属材料用同步或预置的送料方式进行加热熔化,并用增材涂层烧结的方式涂覆在基材上<sup>[1]</sup>。激光沉积技术具有组织致密、沉积层厚度可控、热影响区与加工变形小等优点<sup>[2]</sup>,可以显著提升基材表面的耐磨、耐蚀和抗氧化性能,是表面改性技术中比较活跃的研究领域<sup>[3-9]</sup>。然而,激光沉积的加热与冷却速度较快,导致沉积层组织不均匀,成分偏析,产生气孔等缺陷。现有的激光沉积加工工艺及处理方法已经不能满足对成形件性能的需求。因此,在激光沉积过程中辅以一些技术手段,以实现激光沉积层缺陷的抑制成为主要的研究方向。

随着磁控技术在材料制备领域的不断发展,电磁搅拌在激光沉积领域得到应用。电磁辅助激光沉积能够细化晶粒,增大沉积层硬度<sup>[10-14]</sup>,增强沉积层的耐腐蚀性<sup>[15-17]</sup>,抑制裂纹、气孔等缺陷<sup>[18-19]</sup>,从而改善沉积层的质量,延长材料的使用寿命。现有的磁

场装置分为静磁场与旋转磁场<sup>[12,14,16]</sup>,存在磁场分布不均、加工件尺寸受限等问题。

本文自行设计了特殊旋转磁场装置,该装置的安装位置较为灵活,磁场旋转轴与光斑扫描同步移动,通过试件的磁场分布较为均匀,加工试件不受尺寸限制且机械旋转速度可达到  $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。利用特殊旋转磁场装置产生的旋转磁场作用于熔池,重点分析了在磁场搅拌的作用下,磁场转速对激光沉积 Fe106+5%Ni/WC 复合涂层的宏观形貌、显微组织、显微硬度、摩擦磨损性能的影响,该研究为以后研究导磁材料提供了实验依据。

# 2 实验材料与amp;方法

选用尺寸为  $50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  的 304 不锈钢作为基体材料,其化学成分见表 1。在 Fe106 中混入 5%质量分数的镍包碳化钨(Ni/WC)粉作为沉积层粉末,Fe106 粉末的尺寸为  $53 \sim 150 \mu\text{m}$ ,其化学成分见表 2; Ni/WC 粉末的尺寸为  $44 \sim 109 \mu\text{m}$ ,其化学成分见表 3。

表 1 304 不锈钢的化学组成(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 304 stainless steel (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	N	Fe
Content	$\leq 0.08$	$\leq 1.0$	$\leq 2.0$	18.0-20.0	8.0-10.0	$\leq 0.03$	$\leq 0.035$	$\leq 0.1$	Bal.

表 2 Fe106 粉末的化学组成(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of Fe106 powder (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	B	Cr	Ni	Mo	W	V	Fe
Content	0.6	0.75	0.2	0.6	9.6	0.8	3.0	3.0	1.0	Bal.

表 3 Ni/WC 粉末的化学组成(质量分数,%)

Table 3 Chemical compositions of Ni /WC powder (mass fraction, %)

Element	C	B	Si	Fe	Cr	W	Ni
Content	1.5-3.0	1.5-3.5	1.0-4.0	$< 14$	8.0-12.0	5.62	Bal.

采用德国 Rofin 公司的 DC050 型 CO<sub>2</sub> 激光器进行激光沉积,最大输出功率为 5 kW,波长为  $10.6 \mu\text{m}$ ;采用预置粉末的方式在 304 不锈钢基材表面预置 1 mm 厚的沉积层粉末,然后放入真空干燥箱中烘干。采用积分镜将圆光斑转换为  $10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的宽带光斑,进行激光单道沉积实验,激光功率为 2.5 kW,扫描速度为  $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,扫描长度为 45 mm。沉积过程中连续通氩气作为保护气体,气体质量分数不小于 99.99%,流量为  $15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。自制旋转磁场装置如图 1 所示。利用电机驱动,通过同步带传动带动磁铁载体盘,使两块高强度永磁铁旋转,形成近似等价于水平方向的匀强旋转磁场,达到磁场旋转轴与光斑扫描同步移

动的目的,从而使加工过程中的熔池保持在旋转磁场轴心位置。磁场分布示意图如图 2 所示,其中黑圈区域为激光沉积工作区域,该区域近似为水平匀强磁场。为了研究磁场的搅拌速率对沉积层的影响,磁场转速为  $100 \sim 600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,磁感应强度固定为 70 mT。

激光沉积后,切取尺寸为  $10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的金相试样,经打磨抛光后用王水腐蚀。采用德国莱卡公司生产的 LeiCaDM2700M 型金相显微镜观察沉积层的微观组织。采用广州市明美光电技术有限公司生产的 ME61 型体式显微镜观察沉积层的表面形态,并测量其润湿角,测定方法示意图如图 3 所示。利用德国蔡司公司生产的 XRD-6000 型

X 射线衍射仪 (XRD) 研究沉积层的物相组成。采用杭州中仪克计量仪器有限公司生产的 MH-60 型显微硬度测量仪测试试样的显微硬度, 载荷为 4.9 N, 保载时间为 10 s。

采用上海工业大学附属工厂生产的 MM200 型摩擦磨损试验机对沉积层进行耐磨损实验, 摩擦实验示意图如图 4 所示。磨损试样尺寸为 14 mm × 8 mm × 10 mm, 对磨副为利用 GCr15 高碳铬钢制成的直径为 50 mm 的中空饼状对磨件, 表面粗糙度为 0.8 μm, 磨损面间加载压力为 98 N, 磨损时间为 40 min。实验前后把试样置于无水乙醇和丙酮溶液中分别超声清洗 10 min, 吹干后用精度为 0.1 mg 的

电子天平称重并计算其磨损失重。

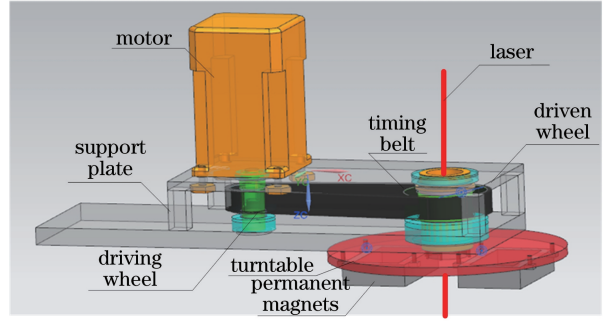


图 1 自制旋转磁场装置

Fig. 1 Home made rotatory magnetic field equipment

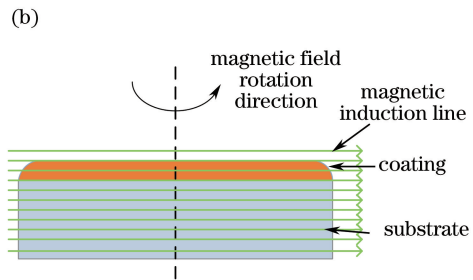
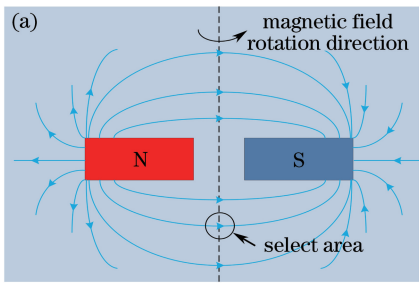


图 2 磁场分布示意图。(a)磁感线分布;(b)磁场在加工件中的分布

Fig. 2 Schematic of magnetic field distribution. (a) Magnetic induction line distribution; (b) magnetic field distribution within workpiece

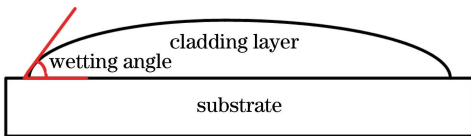


图 3 摩擦实验示意图

Fig. 3 Schematic of friction experiment

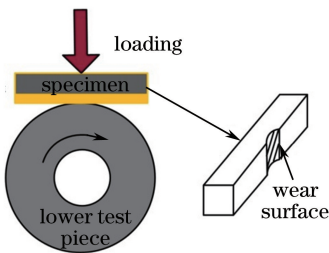


图 4 润湿角测定方法示意图

Fig. 4 Schematic of wetting angle measurement method

### 3 验结果与分析

#### 3.1 宏观形貌

不同磁场转速下沉积层的表面形貌如图 5 所示。可以看出, 不加磁场的沉积层表面平整度较差, 在宽度方向出现宽窄波动较大的情况, 并存在一

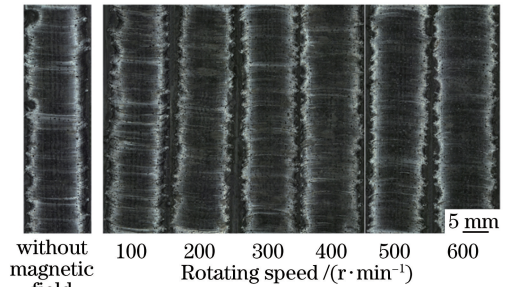


图 5 不同磁场转速下沉积层的表面形貌

Fig. 5 Surface morphologies of deposition layers under different magnetic field rotating speeds

明显的缺陷。不同磁场转速下沉积层的表面粗糙度如图 6 所示。结合图 5 可以发现, 施加旋转磁场后, 100~400 r·min<sup>-1</sup> 低转速磁场搅拌对沉积层的表面粗糙度影响较小, 同样出现了宽窄波动较大的情况, 沉积层侧面有缺失等缺陷; 随着磁场转速的增大, 沉积层表面粗糙度呈减小趋势, 并且远小于无磁场的沉积层, 沉积层表面质量得到明显提升, 表面波纹度和宽度方向波动程度越来越小, 沉积层的均匀性较好。这是因为在无磁场的激光沉积过程中, 熔池表面存在较大的表面张力, 沉积层的铺展性与流动性

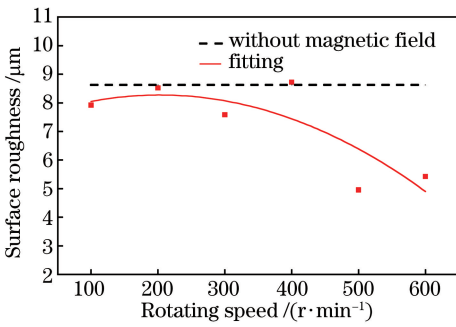


图 6 不同磁场转速下沉积层的表面粗糙度

Fig. 6 Surface roughness of deposition layers under different magnetic field rotating speeds

很差;同时,利用预置粉末的方法更容易使得熔池内含有大量气体。当施加磁场时,熔池在低转速磁场的作用下产生的磁场搅拌作用有限,对熔融金属的流动性、铺展性影响较小,沉积层缺陷不能完全消除,对表面粗糙度影响较小。随着磁场转速的增大,高速转动的磁场加快了熔池的流动和熔池中的对流

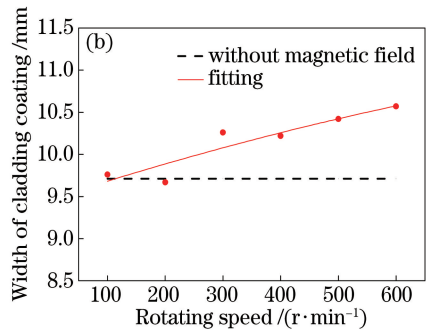
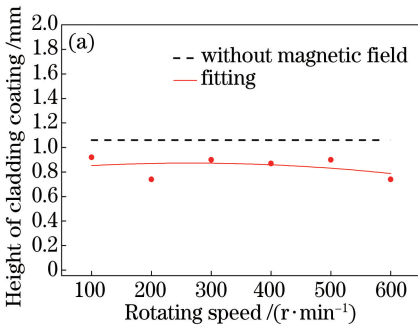


图 7 不同磁场转速下沉积层的变化。(a)熔高;(b)熔宽

Fig. 7 Changes of deposition layer under different magnetic field rotating speeds. (a) Melt height; (b) melt width

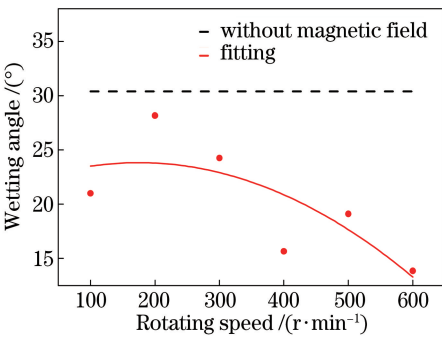


图 8 不同磁场转速下沉积层的润湿角

Fig. 8 Wetting angles of deposition layers under different magnetic field rotating speeds

预置粉末中含有铁、镍等铁磁性金属,在磁场的作用下,粉末颗粒沿磁场力与重力的合力方向运动,部分粉末微粒被磁场力吸出而不能进入熔池,使得进入熔池的粉末质量减小、熔高减小,但其预置粉末

作用,减小了熔体的表面张力和粘度,增大了流动性和铺展性,使沉积层表面质量有很大的改善。因此,在磁场辅助激光沉积过程中,采取合适的磁场转速及激光工艺参数可以获得表面成形质量更好的沉积层。

不同磁场转速下沉积层的变化如图 7 所示。从图 7(a)可以看出,沉积层的熔高受磁场转速的影响不大,随着磁场转速的增大,其波动幅度较小,略小于无磁场沉积层的熔高。从图 7(b)可以看出,磁场低转速时,沉积层的熔宽较小,随着磁场转速的增大,沉积层的熔宽逐渐增大;当磁场转速为  $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时,沉积层的熔宽明显大于无磁场作用下的。不同磁场转速下沉积层的润湿角如图 8 所示。可以看出,低转速时沉积层的润湿角较大,随着磁场转速的增大,沉积层的润湿角逐渐减小,当磁场转速为  $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时,沉积层的润湿角明显小于无磁场作用下的。

方式减小了被磁场力吸出熔池外的几率。因此,在激光沉积过程中,随着磁场转速的增大,沉积层的高度降幅有限。同时,沉积层粉末厚度仅为 1 mm,相对于 10 mm 宽度,熔高的变化幅度很小。对熔宽而言,当磁场低转速作用时,由于洛伦兹力对熔池的搅拌不够充分,因此,沉积层熔池对流较为缓慢,熔体黏性较大,导致熔池的润湿铺展性较差,润湿角较大,熔宽较小。随着磁场转速的增大,熔池的表面张力和熔体的黏度减小,熔池的流动性和润湿铺展性变好,润湿角减小,熔宽随之增大。

### 3.2 WC 分布特征

无磁场条件下沉积层横截面的显微形貌如图 9 所示。可以看出,WC 强化相主要弥散在沉积层的中部和下部区域。这是因为在沉积过程中,WC 硬质颗粒受到的液体对流作用小于自身重力作用。不同磁场转速下沉积层横截面的显微形貌如图 10 所示。可

以看出,随着磁场转速的逐渐增大,沉积层中部和下部的 WC 硬质相数量逐渐减少。这是因为随着磁场转速的逐渐增大,液态金属的对流效应不断增强,从

而加快了对大块硬质相 WC 的剪切作用,增强了硬质相 WC 的高温熔化解,在激光的作用下形成新的硬质合金相。

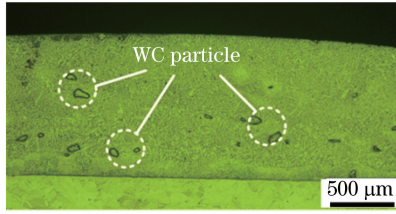


图 9 无磁场条件下沉积层横截面的显微形貌

Fig. 9 Cross-sectional micro-morphology of deposition layer under magnetic field free condition

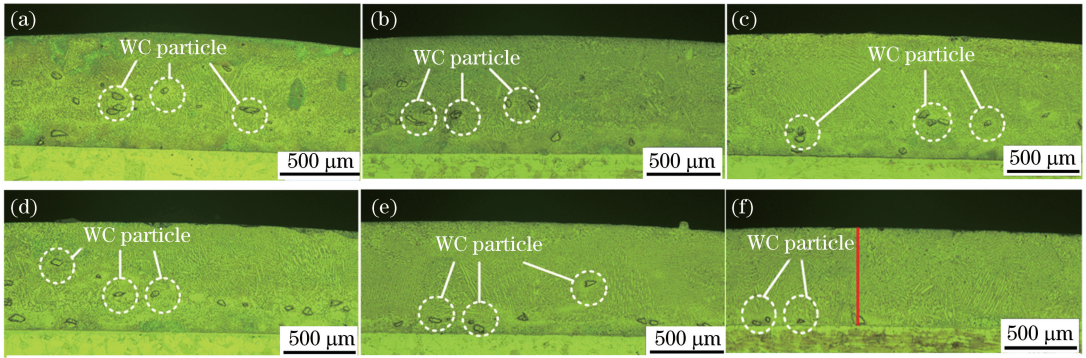


图 10 不同磁场转速下沉积层横截面的显微形貌。(a)  $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (b)  $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (c)  $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (d)  $400 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (e)  $500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (f)  $600 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

Fig. 10 Cross-sectional micro-morphologies of deposition layers under different magnetic field rotating speeds.

(a)  $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (b)  $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (c)  $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (d)  $400 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (e)  $500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (f)  $600 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

### 3.3 物相结构

不同磁场转速下沉积层的 XRD 图谱如图 11 所示。可以看出,预置粉末受到激光束辐照作用被加

热到较高的温度,熔池温度可达到  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ,无磁场作用下的沉积层仅有少量 WC 分解出 W 原子和 C 原子,其中一部分 WC 发生分解反应而生成了  $\text{W}_2\text{C}$  硬质相,还有部分 WC 与 Fe 和其他元素发生反应生成了 MC、Cr-Ni-Fe-C 等相。随着旋转磁场转速的增大,传热效应以及剪切作用逐渐增强,WC 在加工过程中发生了更多的熔化解,沉积层中逐渐出现新的  $\text{W}_2\text{C}$  和  $\text{Fe}_7\text{W}_6$  衍射峰,且  $\text{Fe}_7\text{W}_6$ 、Cr-Ni-Fe-C 和 MC 衍射峰强度随着磁场转速的增大而增强,硬质相  $\text{W}_2\text{C}$  的衍射峰强度也有所增强。因此,磁场辅助条件促进了沉积层对激光能量的吸收并产生了新的硬质增强相,促进了细晶强化和匀质效应,磁场转速越大,细化和匀质效应越明显。

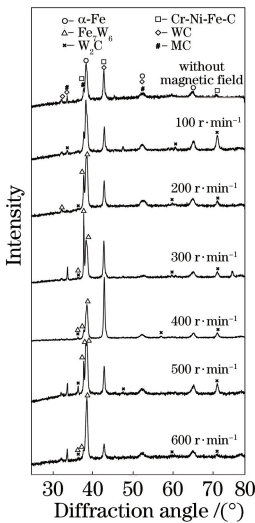


图 11 不同磁场转速下沉积涂层的 XRD 图谱

Fig. 11 XRD patterns of deposition layers under different magnetic field rotating speeds

磁场转速的逐渐增大使得液态金属的对流效应不断增强,加快了对大块硬质相 WC 的剪切作用,并加剧了液态金属的热传效应。当磁场转速为  $600 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时,沉积层的元素扫描图谱如图 12 所示。从图 12(b)可以看出,沉积层的底层颗粒处 W 含量非常大,沿沉积层向上未见 WC 颗粒,但含有 W 元素,含量较为平稳。从图 12(c)也可以看出,底

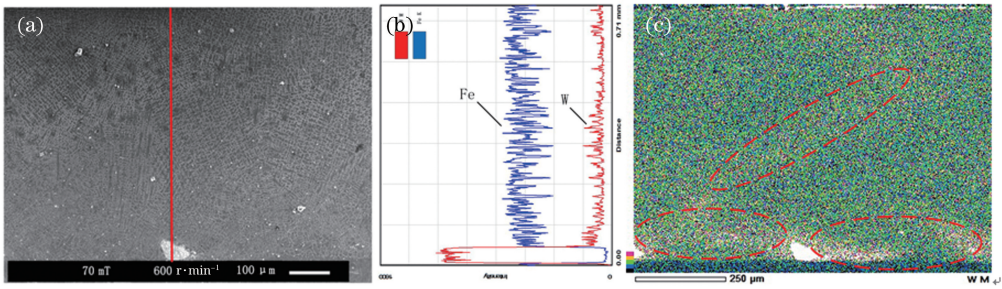


图 12 沉积层的元素扫描图谱。(a)扫描电镜形貌;(b) Fe、W 元素线扫描图谱;(c) W 元素面扫描图谱

Fig. 12 Element scanning map of deposition layer. (a) Morphology by SEM; (b) line scanning map of Fe and W elements; (c) area scanning map of W element

部以及中部有较为明显的灰白亮带,可以确定有 W 元素的存在。因此,增大磁场转速促使了硬质相 WC 的高温分解熔化,一部分分解的 C 和 W 分别与液体金属元素相互结合,在激光的作用下形成新的硬质合金相,还有一部分分解的 C 会在沉积层形成的过程中析出或形成气体溢出,从而使得 WC 颗粒减少。

### 3.4 微观组织特征

无磁场条件下沉积层横截面的扫描电镜形貌如

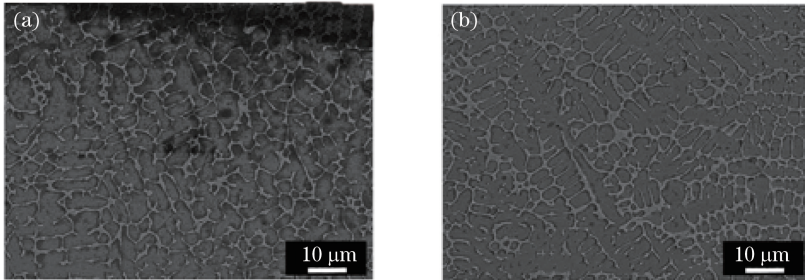


图 13 无磁场条件下沉积层横截面的扫描电镜形貌。(a)上部;(b)中下部

Fig. 13 Cross-sectional morphologies of deposition layer under magnetic field free condition by SEM.

(a) Upper part; (b) middle-lower part

不同磁场转速下沉积层横截面的扫描电镜形貌如图 14 所示。可以看出,随着磁场转速的逐渐增大,沉积层上部杂乱排布的等轴晶开始逐渐细化,组织机构越来越致密,中下部树枝晶区域开始出现越来越多的晶粒细化区和交叉网状结构,有序排布的金属晶粒区域面积随着磁场转速的增大而增大,柱状晶区面积减小,更多微小的初生枝晶从主树枝晶上被打断剥离下来。随着磁场转速的增大,细晶强化现象更为明显。

对比分析可知,在激光沉积过程中,对熔池施加旋转磁场,熔池内液态金属在洛伦兹力的作用下发生复杂的搅拌剪切运动,上部区域磁场的搅拌作用增大了上部组织区域的冷却速率,随着磁场转速的逐渐增大,熔体上部与空气对流传热过程不断增强,

图 13 所示。可以看出,靠近该沉积层横截面上部的是细小等轴晶区,沉积层横截面中下部的是杂乱排布的粗大树枝晶区。在凝固过程中,沉积层下部距离基材最近,冷却速度和梯度最小,使得晶粒的生长时间较长,生成粗大的柱状晶和树枝晶;沉积层中部为较大的过渡区域,冷却速度和梯度较大,部分粗大的柱状晶转化成胞状晶;沉积层顶部与外界空气热交换,冷却速度和梯度最大,组织结构主要是致密硬质等轴晶。

过冷度增大。由于凝固组织的生长形态与  $G/R$  ( $G$  为温度梯度,  $R$  为凝固速度) 有关,  $G/R$  比值逐渐减小,初生相的凝固形态向细小等轴晶转变<sup>[20]</sup>。此外,随着磁场的不断搅拌,上部初生枝晶不断被冲刷、打断,形成新的形核,晶粒得到细化,如图 14(e) 所示。磁场的搅拌作用使得中下部区域初生枝晶与液体熔体之间相互摩擦,并且伴随新生的初生枝晶臂不断的熟化和熔断,最终转化成细小晶块并对流回到熔池中充当了新的形核<sup>[16]</sup>。磁场转速的增大加剧了熔融金属流动效应,重新回到熔池中的被剪断晶块数量随之增多,进而使凝固过程中的形核率增大,并阻止晶粒进一步长大,形成粗壮树枝晶和柱状晶,从而获得更多晶核与细小的组织,如图 14(f) 所示。此外,磁场转速的逐渐增大使得熔池

中金属熔体流动更加剧烈,搅拌更加均匀;熔体内对流强度的逐渐增强,不仅加快了熔池内部对流传热过程,增大了熔体的凝固速率,而且使熔池内的固相率更趋于一致,从而有利于增大整个熔池的过冷度。随着磁场转速的增大, $G/R$  比值逐渐减小,熔体过冷度不断增大,晶体结构由粗大树枝

晶转变为细小等轴晶。同时,在激光辅助作用下,金属熔体的搅拌速率随着磁场转速的增大而不断增大,这加剧了组织扩散并减小了熔体的黏性,可以让液态金属能及时填补金属原子结晶过程中收缩产生的空洞。因此,沉积层中出现了细晶强化区和规则的网状结构<sup>[14]</sup>。

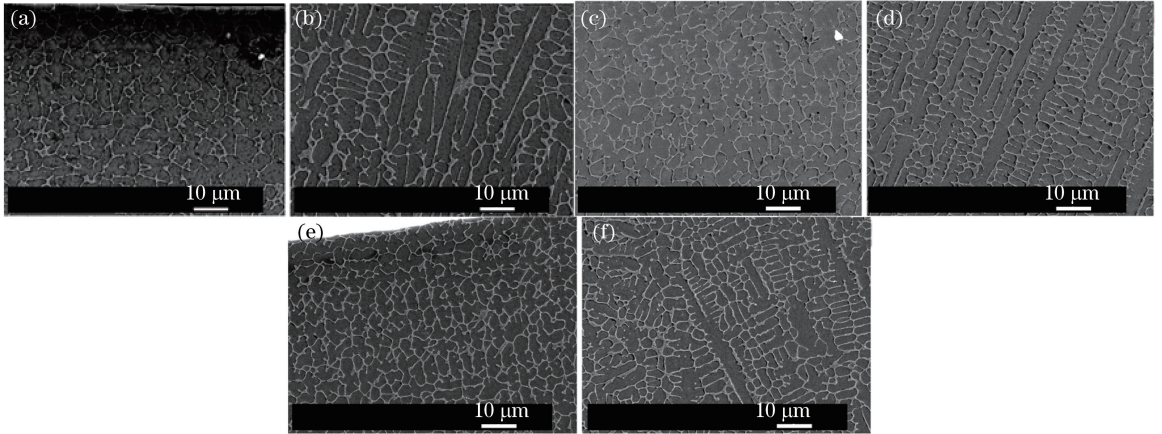


图 14 不同磁场转速下沉积层横截面的扫描电镜形貌。(a)  $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 上部;(b)  $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 中下部;  
(c)  $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 上部;(d)  $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 中下部;(e)  $600 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 上部;(f)  $600 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 中下部

Fig. 14 Cross-sectional morphologies of deposition layers under magnetic field rotating speeds by SEM. (a)  $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , upper part; (b)  $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , middle-lower part; (c)  $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , upper part; (d)  $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , middle-lower part; (e)  $600 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , upper part; (f)  $600 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , middle-lower part

### 3.5 显微硬度

不同磁场转速下沉积层的显微硬度如图 15 所示。可以看出,无磁场辅助沉积层的平均显微硬度为  $700 \text{ HV}$ ;加入旋转磁场作用后,当磁场转速为  $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时,沉积层的平均显微硬度为  $730 \text{ HV}$ ;随着磁场转速的增大,沉积层的显微硬度明显增大,当磁场转速增大到  $600 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时,沉积层的平均显微硬度达到  $825 \text{ HV}$ ,约为无磁场辅助沉积层的 1.178 倍。这是因为随着磁场转速的增大,熔池的对流加剧,使沉积层结晶前沿枝晶尖端冲刷动力增

大,被打断进入熔池的晶粒增多,形成的游离形核增多,形核率增大。同时也加速了空气与熔池的热交换,加快了熔池的冷却速度,晶粒尺寸减小,等轴晶占比增大。另外,随着磁场速度的增大,沉积层中 WC 颗粒的溃散与溶解加速,弥散在沉积层中的硬质相随着磁场转速的增大而分布更加均匀<sup>[12]</sup>。因此,沉积层的显微硬度增大。

### 3.6 摩擦磨损性能

不同磁场转速下沉积层的磨损质量如图 16 所示。可以发现,无磁场作用下沉积层的磨损质量明

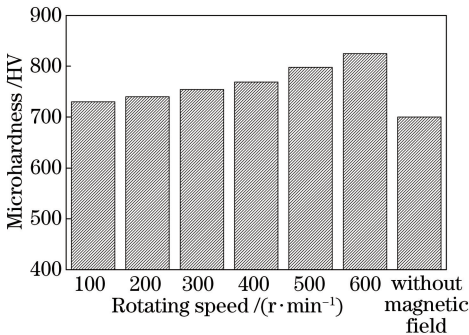


图 15 不同磁场转速下沉积层的显微硬度

Fig. 15 Microhardness of deposition layers under different magnetic field rotating speeds

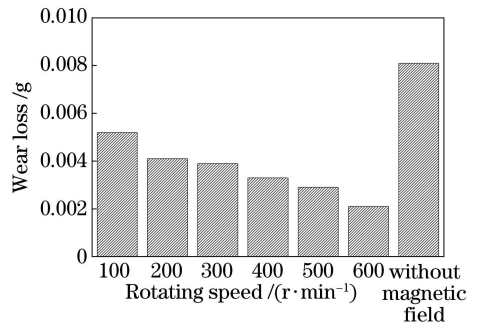


图 16 不同磁场转速下沉积层的磨损质量

Fig. 16 Wear qualities of deposition layers under different magnetic field rotating speeds

显大于磁场作用下沉积层的,随着磁场转速的增大,沉积层的磨损质量减小。当磁场转速为  $600 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时,沉积层的摩擦磨损性能最好,比无磁场沉积层的耐磨性提高了 1.33 倍。随着磁场转速的增大,熔池的搅拌速度增大,熔池内的对流增强,晶粒组织细化,耐磨合金相不断增多,匀质过程更加充分,沉积层的耐磨性能得到逐渐改善;同时,磁场辅助作用下沉积层的硬度大于无磁场辅助沉积层的硬度,这也是导致磁场搅拌作用下的沉积层耐磨性能较好的原因之一。这说明合适的磁场转速可以更好地提升沉积层的耐磨性能。

不同磁场转速下沉积层的磨损形貌如图 17 所示。可以看出,无磁场沉积层的磨损形式以黏着磨损为主,并伴随了极少的磨粒磨损,摩擦表面生成了很多由塑性变形引起的较高隆起,在载荷作用下,磨粒对沉积层进行挤压和切削,沉积层表面发生严重的材料转移及少量犁沟现象。这是因为铁基涂层本身硬度较小,W<sub>C</sub> 增强相很难匀质分布;同时,在其自身重力的作用下,W<sub>C</sub> 多数分布在沉积层中下部和底部,摩擦表面硬度相对较小;较硬的碳化物等硬质合金相分布不均匀,使得沉积层耐磨效果变差,在磨损过程中被转移的材料与摩擦表面粘着,最终,

在剪切力的作用下,粘着在摩擦表面的磨削材料被撕拖下来。加入旋转磁场搅拌作用后,随着磁场转速的增大,沉积层的磨痕宽度逐渐减小,磨损表面出现明显变化并呈现出向磨粒磨损转变的趋势,磨痕中塑性变形引起的黏着磨损痕迹逐渐减少,磨粒磨损痕迹(细密整齐“犁沟”<sup>[21]</sup> 状态)逐渐减少。当磁场转速为  $600 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时,沉积层磨损形式主要为磨粒磨损。这是因为外加磁场使熔池凝固过程中的初生枝晶臂不断被折断、击碎,沉积层内部形成了较大面积的等轴晶,对沉积层形成了细晶强化效应;随磁场转速的增大,晶粒细化造成细小等轴晶组织面积的增大,增大了沉积层的整体硬度,磨损犁沟逐渐减少,从而改善了沉积层的耐磨性<sup>[22]</sup>。与未加磁场的沉积层相比,加了磁场的沉积层的搅拌匀质效应更加充分,W<sub>C</sub> 增强颗粒及其他硬质合金相与铁基涂层结合更加稳定,使 W<sub>C</sub> 硬质颗粒和其他硬质合金相在摩擦过程中不易从基体中剥落,并均匀地弥散分布在沉积层中,充当降低摩擦的减磨相,有效地阻碍了磨屑对沉积层表面的进一步破坏,并抑制了犁沟的产生和扩展,也大大减少了磨损过程中的黏着,进而实现提升沉积层耐磨性能的效果。

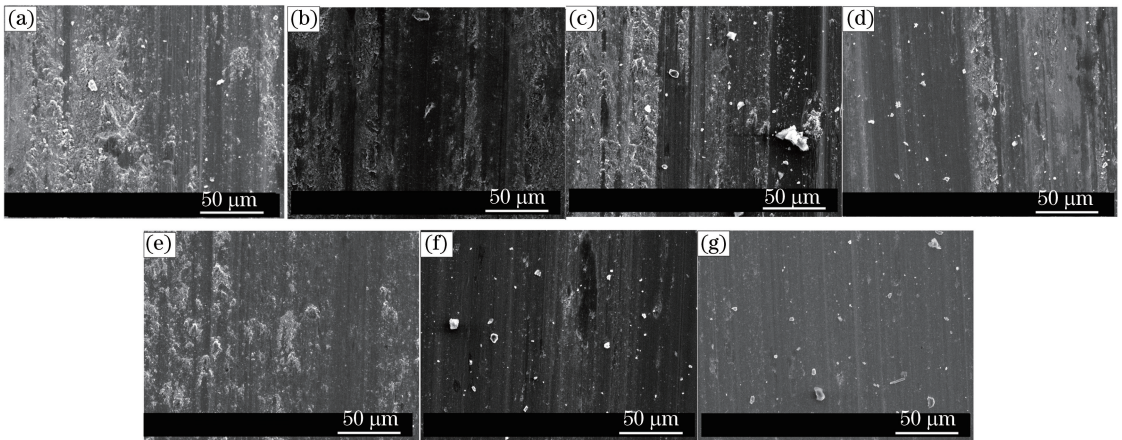


图 17 不同磁场转速下沉积层的磨损形貌。(a) 无磁场;(b)  $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ;(c)  $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ;(d)  $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ;(e)  $400 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ;(f)  $500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ;(g)  $600 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

Fig. 17 Wear morphologies of deposition layers under different magnetic field rotating speeds. (a) Without magnetic field; (b)  $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (c)  $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (d)  $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (e)  $400 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (f)  $500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (g)  $600 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

## 4 结 论

借助旋转磁场在 304 不锈钢表面激光沉积制备了 Fe106+5%Ni/W<sub>C</sub> 复合涂层,分析了不同磁场转速下沉积层宏观形貌,微观组织与性能的变化,得到以下结论。

- 1) 随着磁场转速的逐渐增大,沉积层表面波纹度和宽度方向波动程度逐渐变小;当磁场在低转速时,旋转磁场对沉积层表面粗糙度的影响较小。
- 2) 随着磁场转速的逐渐增大,熔池中金属熔体流动更加剧烈,液态金属熔体搅拌更加均匀,粗壮树枝晶和柱状晶逐渐增多,W<sub>C</sub> 硬质颗粒逐渐变少。



3) 沉积层主要由 WC、Fe<sub>7</sub>W<sub>6</sub>、W<sub>2</sub>C、Cr-Ni-Fe-C 和 MC 等物相组成,且 Fe<sub>7</sub>W<sub>6</sub>、Cr-Ni-Fe-C、MC 衍射峰信号随着磁场转速的增大而增强。

4) 随着磁场转速的逐渐增大,沉积层显微硬度逐渐增大,磨损质量逐渐减小。

## 参 考 文 献

- [1] Guan Z Z. Laser processing handbook[M]. Beijing: China Metrology Press, 2007.  
关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- [2] Liu D J, Chen Y B, Li F Q, *et al.* WC particulate reinforced metal matrix composites layers produced by laser melt injection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(7): 1083-1086.  
刘德健, 陈彦宾, 李福泉, 等. 激光熔注法制备 WC 颗粒增强金属基复合材料层[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1083-1086.
- [3] Xu J T, Li A, Liu D, *et al.* Research on corrosion resistance and wear resistance of laser cladding Cr<sub>3</sub>Si/γ multi-phase coating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0303006.  
徐金涛, 李安, 刘栋, 等. 激光熔覆 Cr<sub>3</sub>Si/γ 多相涂层耐蚀性和耐磨性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0303006.
- [4] Zhang T G, Sun R L. Microstructure and properties of nano-Ti<sub>3</sub>Al laser cladding layer prepared on Ti811 alloy surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0102002.  
张天刚, 孙荣禄. Ti811 表面原位生成纳米 Ti<sub>3</sub>Al 激光熔覆层的组织和性能[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0102002.
- [5] Yang J X, Wang Z Y, Zuo T C. High power diode laser cladding aggregate tungsten carbide-Ni based superhard composites[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3262-3266.  
杨胶溪, 王智勇, 左铁钊. 高功率半导体激光熔覆絮状 WC-Ni 基超硬复合材料[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3262-3266.
- [6] Zhai Y F, Wang X H, Huang J. Microstructure and properties of TiC-Mo<sub>2</sub>C particles reinforced Fe-based composite coatings produced by laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3287-3292.  
翟玉峰, 王新洪, 黄坚. 激光熔覆 TiC-Mo<sub>2</sub>C 颗粒增强 Fe 基涂层的组织与性能[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3287-3292.
- [7] Lu Y Z, Huang G K, Wang Y Z, *et al.* Crack-free Fe-based amorphous coating synthesized by laser cladding[J]. Materials Letters, 2018, 210: 46-50.
- [8] Wang Z T, Lin X, Cao Y Q, *et al.* Formation of anomalous eutectic in Ni-Sn alloy by laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 99: 154-159.
- [9] Li Y J, Dong S Y, Yan S X, *et al.* Phase evolution of ductile iron during laser cladding processing [J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 339: 37-47.
- [10] Bai F D, Sha M H, Li T J, *et al.* Influence of rotating magnetic field on the microstructure and phase content of Ni-Al alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(14): 4835-4838.
- [11] Gerald Tennyson P, Kumar P, Lakshmi H, *et al.* Experimental studies and phase field modeling of microstructure evolution during solidification with electromagnetic stirring[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(s3): 774-780.
- [12] Qin L Y, Yang G, Bian H Y, *et al.* Experimental study on electromagnetic stirring assisted laser metal deposition titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3): 0303004.  
钦兰云, 杨光, 卞宏友, 等. 电磁搅拌辅助激光沉积成形钛合金试验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0303004.
- [13] Luo J, Ma J, Wang X J, *et al.* Effect of magnetic field on weld microstructure and crack of AZ31B magnesium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(s3): 215-219.  
罗键, 马杰, 王向杰, 等. 外加磁场对镁合金焊缝组织与裂纹影响机制的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(s3): 215-219.
- [14] Liu H X, Ji S W, Jiang Y H, *et al.* Microstructure and property of Fe60 composite coatings by rotating magnetic field auxiliary laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 0103007.  
刘洪喜, 纪升伟, 蒋业华, 等. 旋转磁场辅助激光熔覆 Fe60 复合涂层的显微组织与性能[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103007.
- [15] Cai C X, Liu H X, Jiang Y H, *et al.* Influence of AC magnetic field on microstructure and wear behaviors of laser cladding Fe-based composite coating[J]. Tribology, 2013, 33(3): 229-235.  
蔡川雄, 刘洪喜, 蒋业华, 等. 交变磁场对激光熔覆 Fe 基复合涂层组织结构及其耐磨性的影响[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(3): 229-235.
- [16] Yu Q, Wang C S. Numerical simulation and experimental analysis of electromagnetic stirring assisted laser additive manufacturing Ni45 alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0402003.  
于群, 王存山. 电磁搅拌辅助激光增材制造 Ni45 合金数值模拟与实验分析[J]. 中国激光, 2018,

- 45(4): 0402003.
- [17] Yu B H, Hu X H, Wu Y E, *et al.* Studies of the effects and mechanism of electromagnetic stirring on the microstructures and hardness of laser cladding WC-Co based alloy coating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(10): 2672-2677.  
余本海, 胡雪惠, 吴玉娥, 等. 电磁搅拌对激光熔覆 WC-Co 基合金涂层的组织结构和硬度的影响及机理研究 [J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2672-2677.
- [18] Xue X. Study of titanium alloy laser deposition manufacturing in rotating magnetic field [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016.  
薛雄. 旋转磁场辅助钛合金激光沉积制造技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.
- [19] Xu H. Investigation on laser cladding hard alloy and laser cladding hard alloy with electromagnetic stirring [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005: 1-25 .  
许华. 激光熔覆硬质合金及电磁搅拌辅助激光熔覆硬质合金的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 1-25.
- [20] Yuan Q L, Feng X D, Cao J J, *et al.* Research on microstructure of Ni-based alloy coating by laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2116-2120.  
袁庆龙, 冯旭东, 曹晶晶, 等. 激光熔覆镍基合金涂层微观组织研究 [J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2116-2120.
- [21] Chen H H, Xing J D, Li W. Application handbook of wear-resisting materials [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 38-52.  
陈华辉, 邢建东, 李卫. 耐磨材料应用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 38-52.
- [22] Chen Z K, Liu M, Zeng D C, *et al.* Microstructure and wear resistance of laser cladding NiCrWB alloy coating on Cu substrate [J]. Tribology, 2010, 30(4): 344-349.  
陈志坤, 刘敏, 曾德长, 等. 铜表面激光熔覆 NiCrWB 合金的组织结构与耐磨性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2010, 30(4): 344-349.