

## 基于电磁场与流场耦合的电沉积加工过程仿真

吴蒙华, 刘新功, 王元刚, 贾卫平

(大连大学 机械工程学院, 大连 116622)

**摘要:** 在电沉积过程中运用 COMSOL Multiphysics 建立电磁场、流场的数学模型, 将有限元和有限差分相结合进行电磁场和流场的耦合模拟分析, 研究磁场对流场、电流密度分布、镀层表面形貌、晶粒及 SiC 含量的影响规律, 并进行预测与验证。结果表明: 施加平行磁场时, 磁感应强度在极头之间分布均匀, 溶液呈现不规则的运动, 镀层厚度预测值的最小误差为 1.84%, 镀层的晶粒尺寸随着磁感应强度的增大而细化; 施加垂直磁场时, 两极头间区域的磁感应强度较强, 溶液呈现漩涡流动, 且流速随磁场感应强度的增大而增大。XRD 分析表明: 在所研究磁感应强度范围内磁场对晶粒的取向没有明显的影响, 镀层中 SiC 含量随着磁感应强度的增大而增加。

**关键词:** 磁场; 流场; 耦合; 电沉积; 数值分析

中图分类号: TG174.4; TQ153.2

文献标志码: A

## Simulation of electrodeposition process based on electromagnetic coupling with flow field

WU Meng-hua, LIU Xin-gong, WANG Yuan-gang, JIA Wei-ping

(College of Mechanical Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China)

**Abstract:** The mathematical models of the electromagnetic field and the flow field in process of electrode positions were established by COMSOL Multiphysics. The simulation analysis of coupling electromagnetic field and flow field was realized by combining finite element and finite difference. The influences of the magnetic field on the flow field, distribution of current density, morphology of coating surface, grain size and SiC content were studied. The prediction and validation were conducted. The results show that the magnetic flux density between the poles is uniform distribution and the solution appears irregular movement in the parallel magnetic field, and the predictive value of minimum error of coating thickness is 1.84%. The grain size of coating is refinement with the increase of magnetic flux density. The magnetic flux density between the poles is stronger, and the solution presents the swirl flow and the flow rate increases with the magnetic flux density increasing in the vertical magnetic field. It is obtained by XRD analysis that the magnetic field has no significant impact on the grain orientation in the studied range of magnetic flux density. The SiC content in the coating increases with the magnetic flux density increasing.

**Key words:** magnetic field; flow field; coupling; electrodeposition; numerical analysis

随着现代工业和科学技术的进步, 电沉积的研究内容也在不断扩展。在磁场作用下用电沉积方法生产的各种表层功能材料和金属基复合结构材料, 不但能满足各种场合的特殊需要, 而且能简化生产工艺、节

约贵重原材料和降低成本。磁场作用下电沉积制备的非晶态合金、纳米级多层膜及梯度功能材料等均有十分广阔的开发前景<sup>[1]</sup>。

由于电磁场具有非接触、清洁环保、能量密度高

**基金项目:** 国家自然科学基金重点基金资助项目(51034002); 国家自然科学基金面上资助项目(50974038); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0097); 国家自然科学基金资助项目(50975034); 辽宁省科技计划资助项目(2010223006)

收稿日期: 2011-11-28; 修订日期: 2012-03-07

通信作者: 吴蒙华, 教授, 博士; 电话: 0411-87402147; E-mail: wmh005@163.com

且易控制等优点,在利用电沉积制备新材料的领域中得到了广泛的应用。鉴于磁场所具备的特点,研究磁场对电沉积过程的影响规律是非常必要的。但是到目前为止,很多学者<sup>[1-9]</sup>都集中在研究磁场的施加方式、大小对沉积层的性能、组织细化均匀化、枝晶取向和一些特殊性能的影响。黄琦晟<sup>[10]</sup>研究了磁场强度及磁场方向与电场的相对关系等对电沉积层表面形貌、侧面晶粒及择优取向影响的基本规律。张佳明<sup>[11]</sup>研究了磁场对电沉积制备纳米晶铁时的影响,阐述了磁场在电沉积中所起的作用。很少有人研究磁场作用下电沉积中传质过程对沉积层性能的影响。

本文作者建立了电沉积制备 Ni-SiC 复合镀层过程中宏观物质传输物理量耦合的数学模型,采用有限元软件 COMSOL 实现对电沉积中电磁场和流场的耦合模拟分析,重点研究电磁场的工艺参数对流场的影响规律,并且进行相应的实验验证。

## 1 建立模型

电沉积装置示意图如图 1 所示,该装置由电磁铁、沉积槽(160 mm×80 mm×120 mm)、镍板(40 mm×40 mm×20 mm)和钢片(20 mm×40 mm×10 mm)、电镀液等几部分组成。电磁铁 EMP-7(东方晨景研)采用磁场气隙可调双极头电磁铁,可以方便快捷地调节极头间隙,进而可以改变磁场的大小;同时也可通过控制电磁铁内电流的大小改变磁场的大小。在电沉积过程中,流体的流动切割磁感线进而产生感应电流,电镀液的流动和电磁场的相互作用产生作用在电镀液上的电磁力,从而驱动电镀液的运动。为了计算方便,整个电沉积装置模型可以简化成二维模型来处理。运用 COMSOL Multiphysics 建立电沉积过程中电磁场、

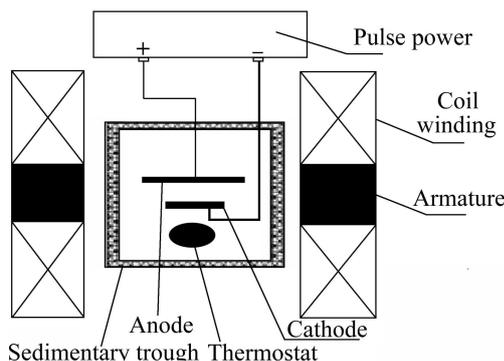


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipments

流场的数学模型。

### 1.1 磁场数学模型的建立

研究在电磁场作用下电镀液的运动时,可以把它看成由无数个流体质点组成的连续介质的运动,该运动是由位于电磁场中流体质点所受电磁力引起的,在流体流通的区域内形成流场,溶液的流动情况取决于各个流体质点在流场中的运动状态<sup>[12]</sup>。因此,描述质点运动规律所形成的数学方程是电解质溶液在电磁场下运动的基本方程。

电沉积槽的磁场由 3 部分组成: 1) 外加磁场; 2) 阴、阳极和溶液中电流产生的磁场; 3) 阴、阳极铁磁材料被磁化后产生的磁场。在外加磁场给定的情况下,第 2) 和 3) 部分的磁场会对外加磁场产生影响。第 2) 部分的磁场可用毕奥-萨伐定律的线积分和体积分进行计算。而第 3) 部分的磁场可采用磁标量势位法进行计算。电磁场的控制方程采用 Maxwell 方程组<sup>[13]</sup>。

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_e \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{H}$  是磁场强度,  $\mathbf{B}$  是磁感应强度,  $\mathbf{J}$  是电流密度,  $\mathbf{D}$  是电感应强度,  $\mathbf{E}$  是电场强度,  $\rho_e$  是电荷的体积密度。

### 1.2 流场数学模型的建立

在电磁场中把电镀液作为导体,电场由电极板通脉冲电流而产生,在电磁铁的绕组线圈内通交流电产生稳恒磁场。当电镀液通过电流时,电镀液就会在磁场中受到电磁力的作用。为了简化模型和提高求解的收敛性,对模型做如下假设:

- 1) 电流密度  $\mathbf{J}$  和电磁通密度  $\mathbf{B}$  均匀分布且相互垂直或平行。
- 2) 忽略阳极表面气泡对电镀液流动的影响,电镀液的流动视为单相稳态、不可压等温流动,电镀液上表面为自由面。
- 3) 流体的密度、电导率和动力粘度均为常数。

基于上述假设和根据电磁学和流体力学理论,推导出电镀液在电磁场下运动的基本方程组<sup>[14-15]</sup>:

$$\begin{aligned} & \text{电流密度方程} \\ & \mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \end{aligned} \quad (2)$$

电磁力密度方程

$$f = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (3)$$

连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4)$$

流体运动方程

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = f - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{J}$  是电流密度,  $\sigma$  是电导率,  $\mathbf{B}$  是磁感应强度,  $\mathbf{E}$  是电场强度,  $\mathbf{u}$  是流体的速度,  $f$  是电磁力,  $\rho$  是流体的密度,  $p$  是压力,  $\mu$  是流体的动力粘度。

### 1.3 边界条件及解法

电磁铁装置的线圈绕组简化为具有相同导电面积的载流区,并用载流密度来表征线圈绕组的电流强度。流体中含有的镍离子在沉积槽中受到磁场力、重力、浮力和流体粘度引起的粘拽力等多个力的作用,由于粘拽力相比于磁场力不是同一个数量级,并近似认为阳离子在流体中处于悬浮状态,因此只考虑磁场力,并将磁场力作为流场载荷加载到流场分析中,以实现磁场和流场的耦合。

## 2 模拟结果和讨论

### 2.1 磁场的模拟结果

在电磁铁线圈绕组内电流为 60A、极头极距为 9 cm 时,计算得到的结果如图 2 所示。图 2(a)所示为电磁铁两个极头之间没有介质时磁感应强度在两个极头之间的分布情况,从图 2 知,磁场在极头之间均匀分布并且磁感应强度为 0.23T。图 2(b)所示为磁场和电场方向垂直时磁感应强度的分布情况。从图 2(b)可知,阴、阳极之间的磁感应强度为 0.36T 且比沉积槽中的其它位置的磁感应强度要强。这是因为阴、阳极为铁磁性材料,在磁场中很容易被磁化,阴、阳极被磁化后产生的磁场与原来的磁场相叠加而导致阴、阳极之间的磁感应强度增加。图 2(c)所示为磁场方向与电场方向平行时磁感应强度在极头之间的分布情况。从图 2(c)可以看出,极头之间的磁感应强度分布非常均匀且为 0.36T。这是由于阴、阳极被磁化后产生的磁场方向与外加磁场的方向相同,因此使极头之间的磁感应强度变大。从图 2 中还可看出,磁感应强度在线圈的内部的边缘最强。这主要是线圈内部的铁磁性材料

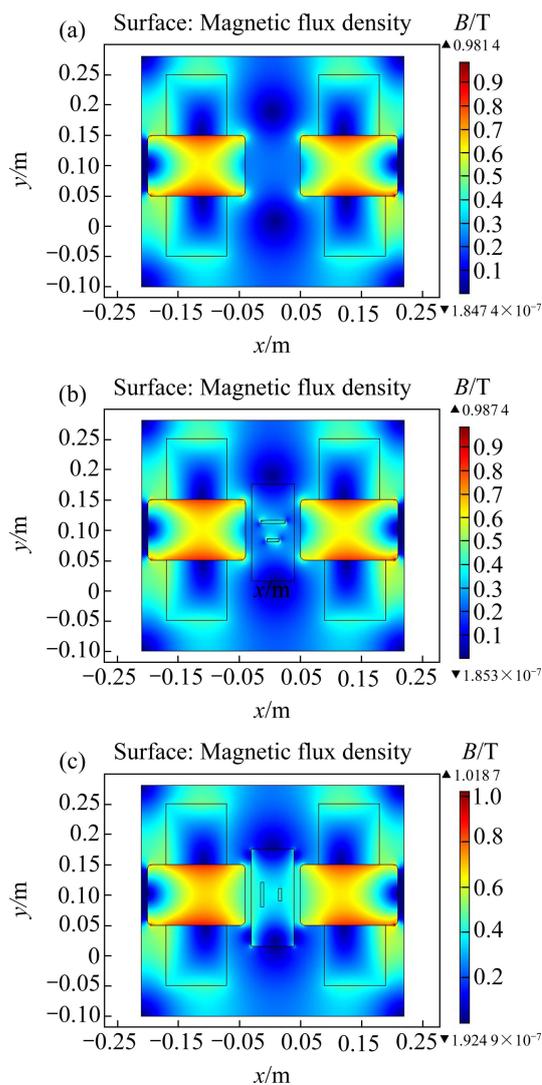


图 2 电磁场模拟结果

Fig. 2 Simulation results of electromagnetic fields: (a) Original magnetic field; (b) Vertical magnetic field; (c) Parallel magnetic field

磁化后的边缘效应所引起的。

电磁铁线圈绕组内的电流和极头之间的距离决定着磁感应强度的大小。在针对图 2(a) 且频率为 1 000 Hz 的情况下,分别取电流为 20、40、60 和 80 A 时得到的极头之间的磁感应强度随电流和极距的变化情况如图 3 所示。由图 3 可知,沉积槽中的磁感应强度随电流的增大而增大,随极距的增大而减小。在电流为 80 A、极距为 6 cm 时,沉积槽中的磁感应强度达到最大为 1.07T。

### 2.2 流场及电流密度分布情况

在极距为 9 cm、电流为 60A 时,计算沉积槽内流

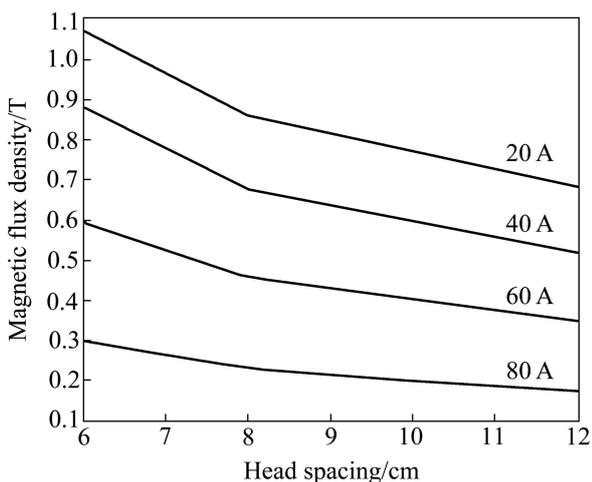


图3 磁感应强度随极头间距的变化情况  
Fig. 3 Changes of magnetic flux density of electromagnetic field with head spacing

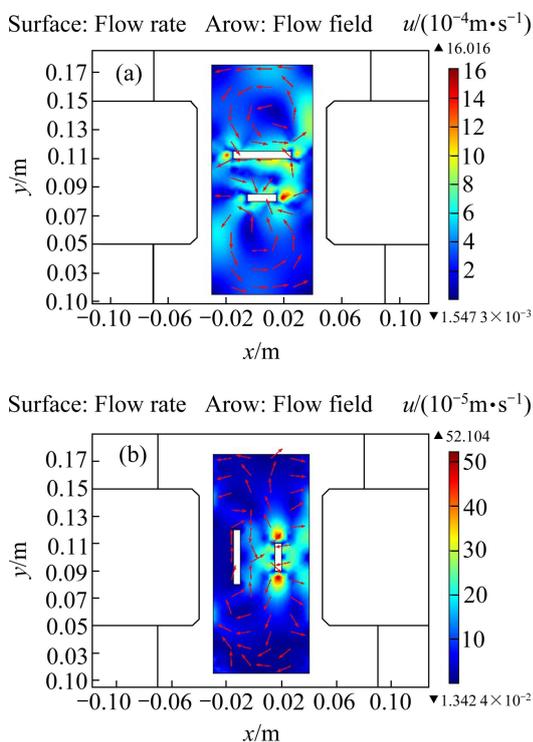


图4 流场的模拟结果  
Fig. 4 Simulation results of flow field: (a) Vertical magnetic field; (b) Parallel magnetic field

场的分布如图4所示。从图4(a)可知，在电磁力的作用下，溶液水平面上呈漩涡状态。在此漩涡呈现不规则的形状主要是因为阴阳极在磁场下被磁化，进而影响外加磁场使整体的磁场呈现一些不规则的变化。另外，流体的流速在阴、阳极表面附近很大，因为流速的大小和所受到的磁场力有关。从图2(b)可知，阴、

阳极被磁化后，其表面附近的磁感应强度很大，因此这地方的流速很大。由图4(b)可以看出，流体的流速显得混乱，且明显低于图4(a)所示的流体的流速。这主要是因为施加垂直磁场时能产生很强的磁流体效应，而施加平行磁场时，流体中的离子不再受磁场力的作用而只受电场力的作用。

电沉积过程中阴极表面电流密度的分布情况如图5所示。从图5可知，在阴极的边缘，电流密度非常高，在阴极的中间部分，电流分布非常均匀。对比图5(a)和(b)可知，图5(a)中阴极表面的电流分布比图5(b)中的更均匀。这是因为施加垂直方向的磁场比平行磁场对电镀液的分散能力更加显著，同时，施加垂直磁

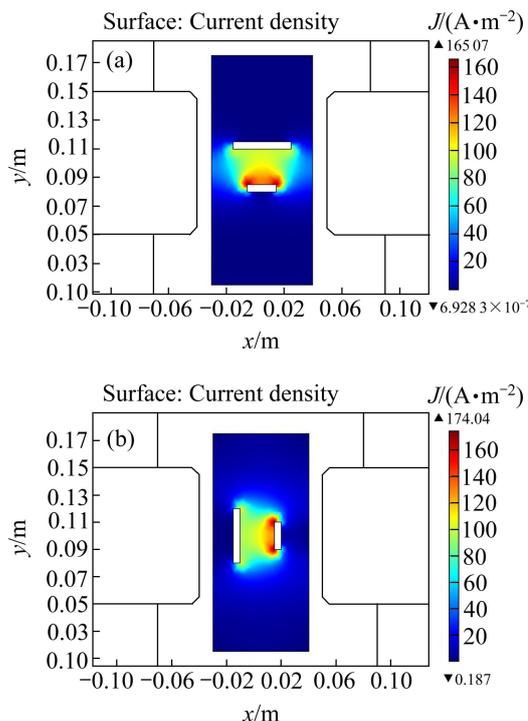


图5 阴极上电流密度的模拟结果  
Fig. 5 Simulation results of current density on cathode: (a) Vertical magnetic field; (b) Parallel magnetic field

场后阴极表面附近的流速比较大。

2.3 镀层厚度

利用上述方法对平行磁场作用下沉积层的厚度进行仿真，得到的仿真图形如图6所示。从图6(a)可以看出，沉积层呈现出中间薄两边厚，这与图5所示电流密度分布情况有关，并且与图5所示电流密度仿真的结果非常吻合。图6(b)所示为阴极边缘局部放大的图，图中的箭头表示电流密度的矢量。从图6(b)可以看出，阴极边缘附近的电流密度最大，边缘附近沉积

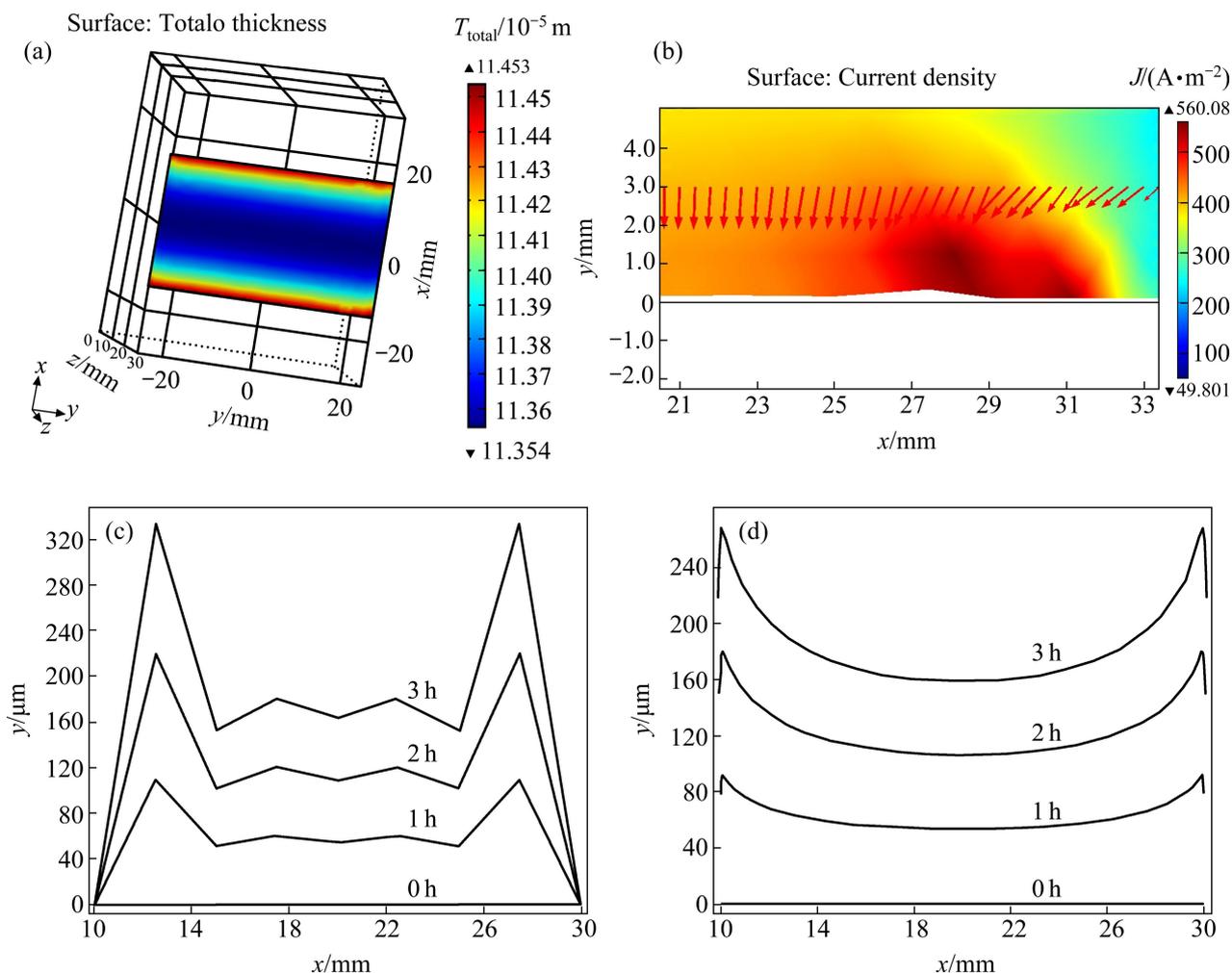


图 6 阴极上镀层厚度的分布情况

Fig. 6 Distribution of coating thickness on cathode: (a) Distribution map of thickness; (b) Partial enlargement of Fig. 6(a); (c) Surface roughness of coating in non-magnetic; (d) Surface roughness of coating in parallel magnetic field

层的厚度也最厚。这是因为阳极边缘的阳离子向阴极移动时带有一定的偏转速度, 到达阴极时并不是正好到达阴极边缘而是到达阴极边缘附近的地方。图中箭头的方向也可以说明此情况。

图 6(c)和(d)所示为在无磁场和有磁场的条件下镀层厚度随着时间的变化情况以及表面粗糙度。对比图 6(c)和(d)可知, 不管有无磁场作用, 镀层表面不平的趋势随着沉积时间的延长会逐渐恶化。这是因为在电沉积过程中电流的边缘效应造成边缘厚度比较大。随着沉积过程的进行, 沉积层的边缘部分不平趋势更明显, 此时不平的边缘部分更加加剧了电流密度的集中, 因此, 镀层边缘的厚度会随着沉积时间的延长有明显增长趋势。施加磁场后, 镀层边缘的电流密度集中趋势得到改善且沉积层表面较平整。

### 3 实验验证

#### 3.1 镀层厚度的实验验证

根据上述仿真方法进行电沉积实验, 镀液配方如下表 1 所列。采用  $L_9(3^4)$  正交实验表进行试验, 实验因素有电流密度(A)、占空比(B)、磁感应强度(C)和超声功率(D), 正交实验因素水平选择如表 2 所示。利用薄膜测厚仪对得到的沉积层进行厚度测量, 在测量厚度时随机取 5 个点进行测量, 最后取其平均值作为整个镀件的厚度, 得到的厚度数据如表 3 所列。

从表 3 中可以看出, 镀层厚度的预测值和实测值非常接近, 其中最大的误差为 6.60%, 最小的误差为 1.84%。这说明所建立的模型能精确地反映出电沉积

表1 电镀液成份

Table 1 Composition of micro-electroforming electrolyte

Composition	Concentration/(g·L <sup>-1</sup> )
NiSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O	300–500
NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5–10
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	30–45
C <sub>12</sub> H <sub>25</sub> NaSO <sub>4</sub>	0.1–0.3
SiC	8
Saccharin	2–3

表2 正交实验因素表

Table 2 Levels and factors of orthogonal test

Level	A/(A·dm <sup>-2</sup> )	B/%	C/T	D/W
1	5	10	0.2	180
2	6	20	0.4	240
3	7	30	0.6	300

表3 镀层厚度的预测值与实测值的对比

Table 3 Contrast between predicted values and measured values of coating thickness

Sample	Experimental value/μm	Predicted value/μm	Relative error/%
1	101.6	97.5	4.04
2	105.4	108.2	2.66
3	107.5	110.1	2.42
4	104.8	106.8	1.91
5	107.4	104.6	2.61
6	111.2	109.2	1.84
7	105.2	108.7	3.33
8	109.1	116.3	6.60
9	114.8	119.2	3.83

过程中沉积情况,进而说明所建立的模型是十分正确的。根据实际需要利用此方法可以得到所想要镀层的厚度,这对以后生产具有十分重要的意义。

### 3.2 磁场的施加方向对镀层表面形貌的影响

采用不同磁感应强度时电沉积制备的镀层表面SEM像如图7所示。根据所测得的SEM像,采用Image Tool图形分析软件测量了复合镀层的平均晶粒尺寸如图8所示。从图7和8可以看出,不管施加垂直磁场还是平行磁场,镀层的晶粒随着磁感应强度的增大而呈现细化的趋势,并且在平行磁场下得到的镀层比在垂直磁场下得到的镀层更加均匀细致。这是因为磁场

对电沉积过程中的传质过程、电子转移过程、镀层的形核长大过程均产生了显著的影响。磁场可以提高镀液的分散能力和覆盖能力,主要原因是施加磁场后,金属离子在磁场力的作用下,传质过程加快,粘滞系数下降,使镀液的电导率提高。同时,磁场和电场的耦合作用对电解液的传质过程的影响非常大,研究表明磁场和电场的耦合可以使电镀液产生流动,从而降低了边界层厚度,改善了传质过程。在垂直磁场中,随着磁感应强度的增大,磁流体效应增强,对镀层起到了修饰和整平作用。在平行磁场中,即使没有宏观磁流体效应的产生,但是在阴极前端必定存在微观的磁流体效应。在这种作用下,晶粒的尺寸会有所减小,并且平行磁场可以促使微观电流分布均匀,因此,得到的镀层更加均匀细致。

### 3.3 磁场对镀层微观结构的影响

在不同磁场强度下镀层的XRD谱及取向度计算结果如图9所示。从图9(a)可以看出,镀层的择优取向为(111)生长取向;由取向度计算结果看,磁场的施加对镀层各个晶向的生长影响并不大。这可能是由于SiC颗粒的加入扰乱了磁场的影晌,或者说磁场能对结晶取向的影响不足够改变SiC颗粒对镀层结晶取向的影响。

采用扫描电镜附带的能谱仪对Ni-SiC复合镀层表面成分进行能谱分析,结果如图10所示。从图10可知,与没有磁场作用时制备的复合镀层相比,施加磁场作用时得到的复合镀层中SiC颗粒的含量有很大的提高,且SiC颗粒的含量随着磁感应强度的增大而增加;在平行磁场作用下得到的复合镀层中的SiC含量比在垂直磁场作用下得到的复合镀层中的SiC含量高;在所研究的磁感应强度内,SiC颗粒的最大质量分数为2.05%。这是因为磁场对电沉积过程中的传质过程、电子转移过程、镀层的形核长大过程均产生显著的影响<sup>[16]</sup>。施加垂直磁场后,复合镀层中SiC含量的增加可能是因为磁流体效应对电荷转移过程的影响。磁流体效应增强了对流过程,有利于颗粒保持悬浮并把它们转移到阴极表面,这将为SiC颗粒接触阴极电极提供了一个机会。另一方面,磁流体效应提高了极限电流和电荷转移速率,这将导致SiC颗粒更迅速地融入复合镀层中。而施加平行磁场后,即使没有宏观磁流体效应的产生,但是在阴极前端必定存在微观的磁流体效应,此微观磁流体效应在一定程度上也会促进SiC颗粒的沉积。另外,施加平行磁场后,镀液的分散能力和覆盖能力提高了,镀液的粘滞系数降低了,镀液的电导率提高了,同时促使镍离子迅速向

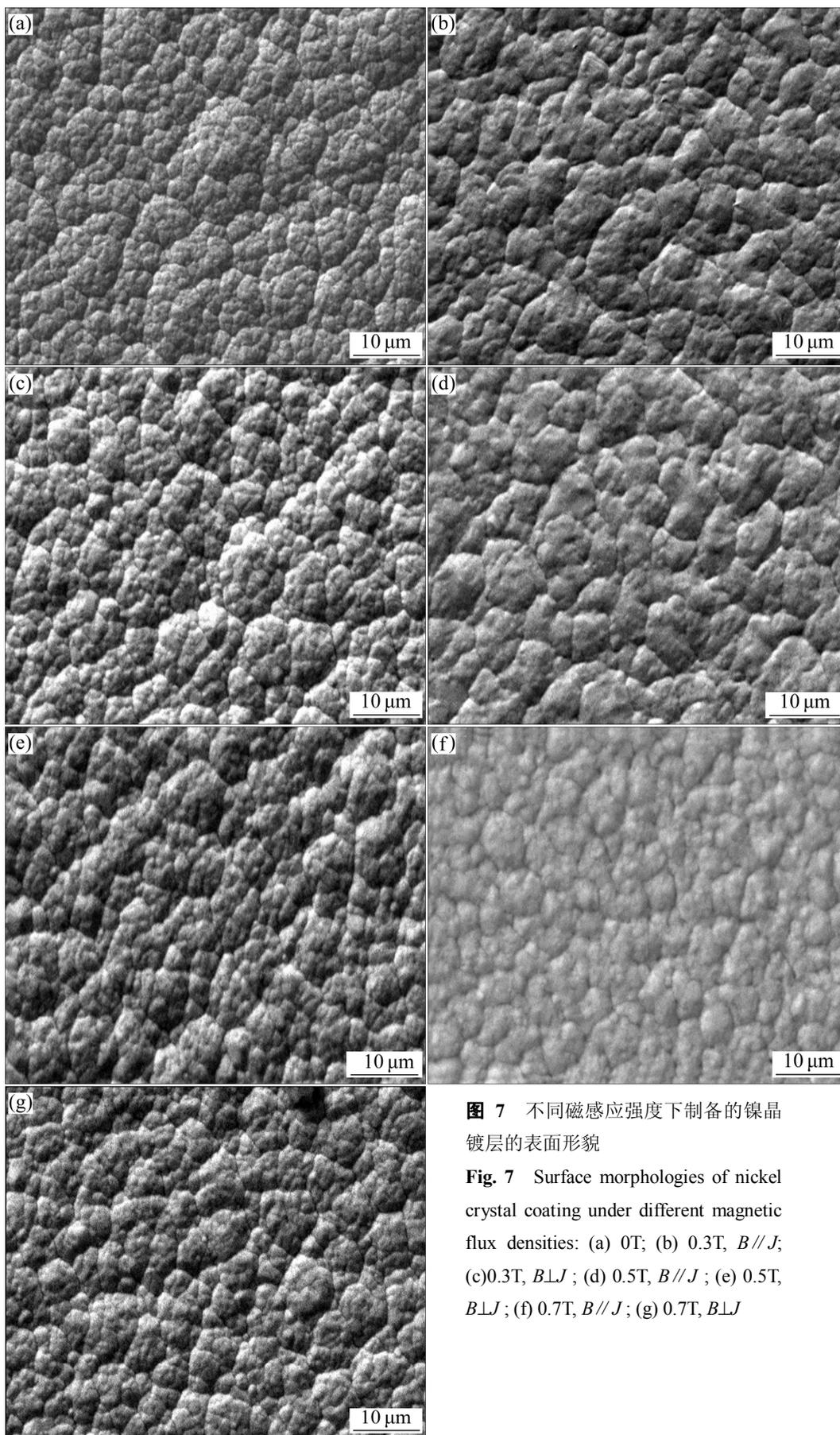


图 7 不同磁感应强度下制备的镍晶镀层的表面形貌

Fig. 7 Surface morphologies of nickel crystal coating under different magnetic flux densities: (a) 0T; (b) 0.3T,  $B//J$ ; (c) 0.3T,  $B\perp J$ ; (d) 0.5T,  $B//J$ ; (e) 0.5T,  $B\perp J$ ; (f) 0.7T,  $B//J$ ; (g) 0.7T,  $B\perp J$

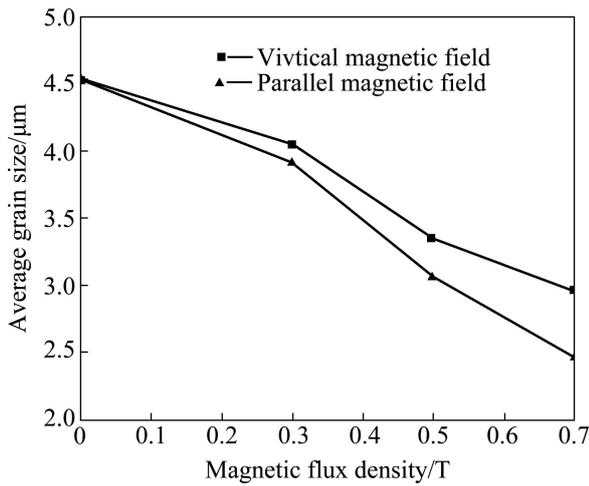


图8 磁感应强度对复合镀层晶粒平均尺寸的影响  
Fig. 8 Effect of magnetic flux density on average grain size of composite coating

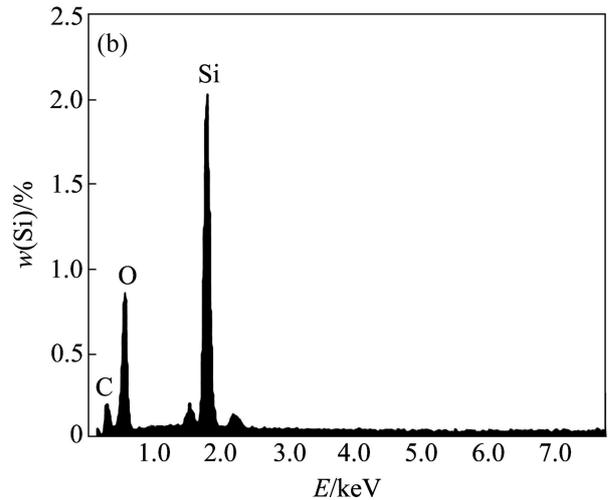
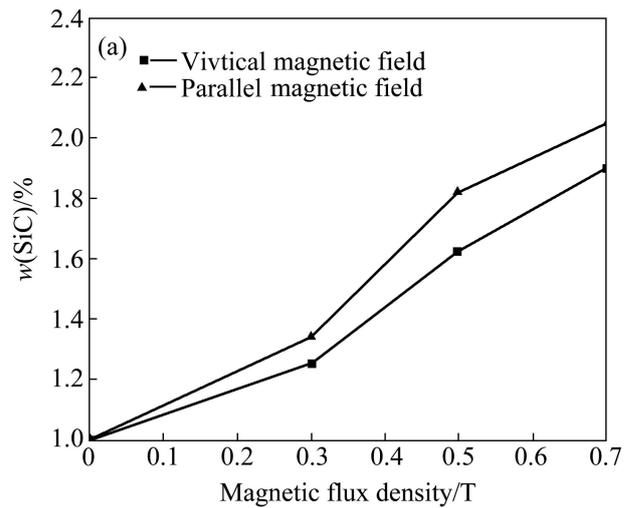


图10 磁感应强度对复合镀层 SiC 含量的影响以及 EDS 谱  
Fig. 10 Effect of magnetic flux density on SiC content of composite coating (a) and EDS pattern (b)

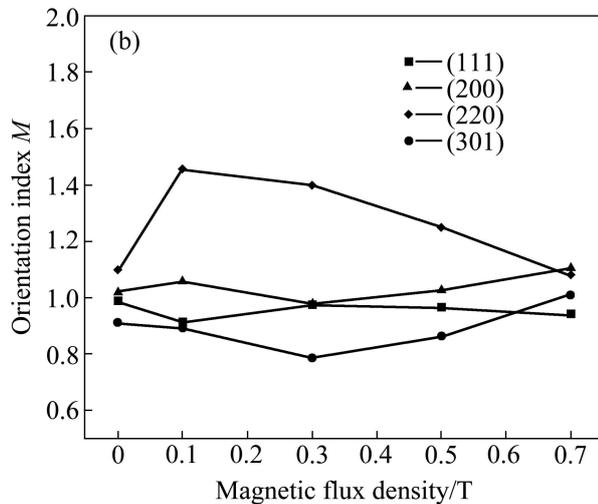
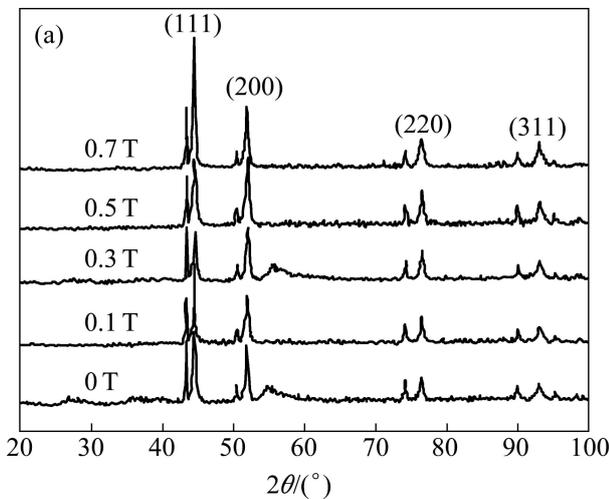


图9 磁感应强度对复合镀层结晶取向度(M)的影响  
Fig. 9 Effect of magnetic flux on crystal orientation of composite coating: (a) XRD pattern; (b) Orientation index

阴极移动, 使传质过程加快。

### 4 结论

1) 利用 COMSOL 软件系统的模拟了电沉积过程中电磁场和流场分布情况, 通过实验验证了所建立的模型能精确地反映出电沉积过程的沉积情况。

2) 垂直磁场作用下磁感应强度在两极头之间的区域比较强, 而在平行磁场作用下磁感应强度在两极头之间均匀分布。溶液在垂直磁场作用下由于受到电磁场力的作用而呈现漩涡流动, 且流速随着磁场强度的增大而增大; 在平行磁场作用下呈现无规则的运动。

3) 镀层厚度随着电流密度的提高和时间的延长而增大, 而且镀层的晶粒尺寸随磁感应强度的增大而

细化。

4) 平行磁场相比于垂直磁场更能使镀层表面平整光滑,在所研究的磁感应强度内磁场对镀层晶粒的取向没有显著的影响。

5) 施加磁场作用时,得到的复合镀层中 SiC 颗粒的含量有了很大的提高,且 SiC 含量随着磁感应强度的增大而增加。在平行磁场作用下,得到的复合镀层中的 SiC 含量比在垂直磁场作用下得到的复合镀层中的 SiC 含量高;在所研究的磁感应强度内,镀层中 SiC 颗粒的最大质量分数为 2.05%。

## REFERENCES

- [1] 赵林,樊占国,杨中东,高鹏,秦高梧. 磁场下电沉积制备CuCo颗粒膜的巨磁电阻效应[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(5): 924-929.  
ZHAO Lin, FAN Zhan-guo, YANG Zhong-dong, GAO Peng, QIN Gao-wu. Giant magnetoresistance of CuCo granular films electrodeposited in magnetic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19 (5): 924-929.
- [2] 方建军,李素芳,查文珂,陈宗璋. 电镀法制备镍-天然石墨复合材料及外加磁场的影响[J]. 电镀与涂饰, 2010, 29(9): 1-4.  
FANG Jian-jun, LI Su-fang, ZHA Wen-ke, CHEN Zong-zhang. Electrodeposition of nickel-graphite composite and the effect of external magnetic field[J]. Electroplating & Finishing, 2010, 29 (9): 1-4.
- [3] 贾晶,钟云波,汪超,雷作胜,任维丽,任忠鸣. 强磁场中电沉积 Ni-P 合金的研究[J]. 上海金属, 2009, 31(4): 10-14.  
JIA Jing, ZHONG Yun-bo, WANG Chao, LEI Zuo-sheng, REN Wei-li, REN Zhong-ming. Study of Ni-P alloy electro-deposited with high magnetic field[J]. Shanghai Metals, 2009, 31 (4): 10-14.
- [4] 龚春红,杜陈强,张玉,吴志申,张治军. 外加磁场条件下镍纳米材料的形貌可控制备[J]. 无机化学学报, 2009, 25(9): 1569-1574.  
GONG Chun-hong, DU Chen-qiang, ZHANG Yu, WU Zhi-shen, ZHANG Zhi-jun. Morphology-controlled synthesis of nickel nanostructures under magnetic fields[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2009, 25 (9): 1569-1574.
- [5] TSCHULIK K, KOZA J A, UHLEMANN M, GEBERT A, SCHULTZ L. Effects of well-defined magnetic field gradients on the electrodeposition of copper and bismuth[J]. Electrochemistry Communications[J]. 2009, 11 (11): 2241-2244.
- [6] WANG Chao, ZHONG Yun-bo, WANG Jiang, WANG Zhi-qiang, REN Wei-li, LEI Zuo-sheng, REN Zhong-ming. Effect of magnetic field on electroplating Ni/nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coating[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry. 2009, 630 (1/2): 42-48.
- [7] 王森林,洪亮亮. 平行电极表面磁场对电沉积钴-镍镀层的影响[J]. 稀有金属, 2007, 31(2): 211-215.  
WANG Sen-lin, HONG Liang-liang. Effect of magnetic field parallel to cathodic surface on electro-plating Co-Ni alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2007, 31(2): 211-215.
- [8] 杨中东,高鹏,薛向欣,樊占国,刘素兰,国栋. 稳恒磁场下Ni-W合金镀膜的制备与耐蚀性[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(10): 1710-1715.  
YANG Zhong-dong, GAO Peng, XUE Xiang-xin, FAN Zhan-guo, LIU Su-lan, GUO Dong. Preparation and corrosion resistance properties of nickel-tungsten alloy films by electroplating in stabilized magnetic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(10): 1710-1715.
- [9] 温艳玲,钟云波,任忠鸣,黄琦晟,邓康,徐匡迪. 强磁场对电沉积镍铁合金膜显微组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(4): 715-721.  
WEN Yan-ling, ZHONG Yun-bo, REN Zhong-ming, HUANG Qi-sheng, DENG Kang, XU Kuang-di. Effect of high static magnetic field on microstructure of electrodeposited NiFe film[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(4): 715-721.
- [10] 黄琦晟. 磁场下铜和铬电结晶过程的初步研究[D]. 上海: 上海大学, 2006: 54-56.  
HUANG Qi-sheng. Preliminary study of copper and chromium electrocrystallization process in the magnetic field[D]. Shanghai: Shanghai University, 2006: 54-56.
- [11] 张佳明. 磁场引导电沉积纳米晶铁的制备与性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007: 32-34.  
Zhang Jia-ming. Preparation and properties study of nanocrystalline iron using electrodeposition under magnetic field[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007: 32-34.
- [12] 李茂,周子民,王长宏. 300kA 铝电解槽电、磁、流多物理场耦合仿真[J]. 过程工程学报, 2007, 7(2): 354-359.  
LI Mao, ZHOU Jie-min, WANG Chang-hong. Coupled simulation of multiple physical fields in a 300 kA aluminum electrolysis cell[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2007, 7 (2): 354-359.
- [13] 孙泽,路贵民,李冰,宋兴福,于建国. 电磁场作用下的镁电解槽流场分析[J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2010, 36(2): 187-191.  
SUN Ze, LU Gui-min, LI Bing, SONG Xing-fu, YU Jian-guo. Coupled analysis of flow field in magnesium electrolyzer under electromagnetic field[J]. Journal of East China University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 36(2):

- 187-191.
- [14] 刘 伟, 李 继, 赖延清, 徐宇杰, 刘业翔. 铝电解槽电磁流场的数学建模与应用[J]. 中国有色金属学报. 2008, 18(5): 909-916.
- LIU Wei, LI Jie, LAI Yan-qing, XU Yu-jie, LIU Ye-xiang. Development and application of electro-magneto-flow mathematic model of aluminum reduction cells[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(5): 909-916.
- [15] 陈兴润, 张志峰, 徐 骏, 石力开. 电磁搅拌法制备半固态浆料过程电磁场, 流场和温度场的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(5): 937-944.
- CHEN Xing-run, ZHANG Zhi-feng, XU Jun, SHI Li-kai. Numerical simulation of electromagnetic field, flow field and temperature field in semi-solid slurry preparation by electromagnetic stirring[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(5): 937-944.
- [16] 高 鹏, 杨中东, 徐小连, 陈义庆, 钟 彬, 艾芳芳, 李 琳. 磁场约束下碳钢表面Ni-W合金电镀层的制备与性能[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(4): 136-140.
- GAO Peng, YANG Zhong-dong, XU Xiao-lian, CHEN Yi-qing, ZHONG Bin, AI Fang-fang, LI Lin. Preparation and properties of electrodeposited nickel-tungsten alloy on carbon steel under magnetic field[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(4): 136-140.

(编辑 何学锋)