

# 双层微齿轮型腔镶块电铸均匀性 Ansys 模拟与优化

岳彪, 秦宗慧

(华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237)

**摘要:**目的 提高双层微齿轮模具型腔镶块电铸过程中铸层的均匀性。方法 利用 Ansys 对双层微齿轮型腔镶块电铸过程中电场强度的分布情况进行模拟, 确定施加绝缘挡板的可行性。采用正交试验考察绝缘挡板几何及位置尺寸对电场强度的影响, 应用灰关联理论得出最优工艺参数组合。结果 绝缘挡板的施加, 在一定条件下可以使光刻胶电铸层厚度更为均匀和平整。路径 a 的相对误差由 62.48% 降低到 33.18%, 路径 b 的相对误差由 48.01% 降低到 8.91%。结论 施加绝缘挡板可以提高双层微齿轮模具型腔镶块电铸过程中铸层的均匀性。

**关键词:** 铸层均匀性; Ansys; 正交试验; 灰色关联

中图分类号: TQ153.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)04-0052-07

## Ansyz Simulation and Optimization of Electroforming Uniformity of Double Micro Gear Insert Block

YUE Biao, QIN Zong-hui

(School of Mechanical and Power Engineer, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To improve the electroforming uniformity of double micro gear die cavity inserts in the process of electroforming. **Methods** First of all, the electric field intensity distribution on the double micro gear cavity inserts in the electroforming process was simulated with Ansys, and the method of applying insulating baffle was proved to be feasible. Second, the effects of insulating baffle geometry and position size on the electric field intensity was investigated using the orthogonal experiment method. Finally, the application of grey theory was used in finding the optimal combination of process parameters. **Results** Ansys simulation results showed that the application of insulating baffle under certain conditions could increase the uniformity and evenness of the thickness of photoresist electroforming layer. The relative error of path a was reduced from 62.48% to 33.18%. The relative error of path b was reduced from 48.01% to 8.91%. **Conclusion** By applying insulating baffle, the uniformity of the cast layer was improved during the electroforming process of double micro gear die cavity inserts.

**KEY WORDS:** uniformity of cast layer; Ansys; orthogonal experiment; grey correlation

收稿日期: 2014-03-08; 修订日期: 2014-04-18

Received: 2014-03-08; Revised: 2014-04-18

基金项目: 复旦大学专用集成电路与系统国家重点实验室资助项目(10KF006)

Fund: Supported by the Specific Funding Project of the State Key Laboratory of Integrated Circuit and System in Fudan University (10KF006)

作者简介: 岳彪(1987—), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 主要研究方向为微型模具加工技术。

Biography: YUE Biao(1987—), Male, from Baoding, Hebei, Master, Research focus: micro mould processing technology

通讯作者: 秦宗慧(1961—), 女, 上海人, 硕士, 副教授, 主要研究方向为模具旋转机械故障诊断。

Corresponding author: QIN Zong-hui(1961—), Female, from Shanghai, Master, Associate professor, Research focus: mould rotating machinery fault diagnosis.

20 世纪 90 年代以后,微机电系统(MEMS)被广泛应用到医疗、信息、通信、航空航天以及国防工程等领域。同时伴随着 MEMS 的发展,如何实现器件形成和功能材料、结构材料制备的难题已经被攻克。但是,电铸技术仍然存在高深宽比孔洞填充、电沉积厚度的均匀性较低、铸层内应力较大等一系列问题<sup>[1-2]</sup>。特别是多层结构件在制造过程中出现的电铸层不均匀,妨碍了电铸工艺技术优势的正常发挥<sup>[3-4]</sup>。

文中利用 Ansys 对双层微齿轮型腔镶块制造过程中的电场强度分布进行模拟,应用灰色关联理论进行分析,从而得到最优工艺参数,为进一步开展微型多层结构件的电铸研究提供参考。

## 1 微电铸层均匀性 Ansys 有限元模拟

### 1.1 微电铸物理模型

电沉积过程包含离子形成原子以及结晶两个过程。该过程可以用法拉第定律定性表示,见式(1)。

$$m=\frac{QM}{zF}$$

(1)

式中: $F$ 为法拉第常数, $m$ 为结晶后的沉积层质量, $Q$ 为整个电铸过程通过的电量, $M$ 为电铸液材料的摩尔质量, $z$ 为电铸过程中得失电子数量。

进一步推导得到式(2)。

$$D=\frac{M}{z\rho F}Jt$$

(2)

式中: $t$ 为时间, $D$ 为电铸层的厚度, $J$ 为电流密度, $\rho$ 为金属材料的密度。

变换式(2)的形式得到式(3):

$$D=kJ$$

(3)

式中: $k$ 表示相应系数。

根据式(3)得知,铸层厚度  $D$  与电流密度  $J$  成正比关系。

最后,根据电沉积及恒定电场理论,在电铸系统中的电场为:

$$J=\gamma E$$

(4)

式中: $\gamma$ 为溶液电导率。

因此,通过 Ansys 模拟电铸过程中电场强度的分布,可得知实际电铸过程中铸层均匀性的分布,从而为寻求改善双层微齿轮型腔镶块光刻胶电铸过程中电铸不均匀性的方法提供了思路<sup>[5-6]</sup>。

### 1.2 有限元建模

#### 1.2.1 电铸模拟装置结构

电铸装置主要由阴极板(Ni)、阳极板(ITO 玻璃基底)<sup>[7]</sup>、电铸液(氨基磺酸镍电镀液)、绝缘挡板、光刻胶等组成。几何及位置尺寸如图 1 所示,光刻胶局部三维示意图如图 2 所示。

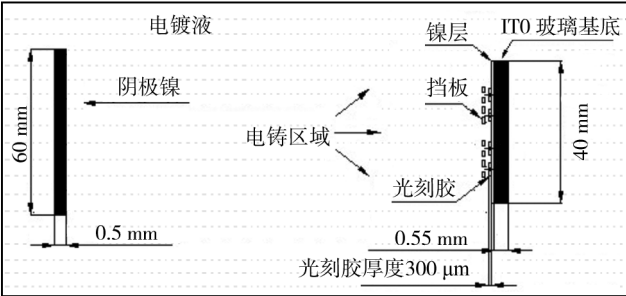


图 1 有限元模型示意  
Fig. 1 The finite element model

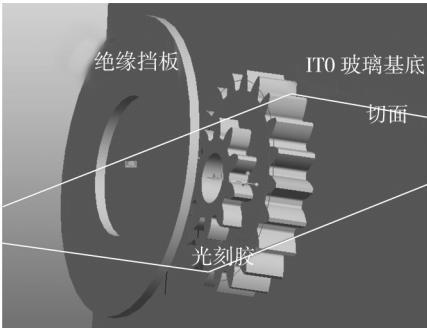


图 2 局部三维示意  
Fig. 2 Local 3D sketch

实验中拍摄的光学显微镜照片如图 3 所示,表明电铸缺陷主要集中在齿顶部位,因此仅选取齿顶方向的剖面进行研究。



图 3 模具型腔光学显微镜照片  
Fig. 3 Mold cavity optical microscope

由于电铸模型中光刻胶胶模、绝缘挡板的最小结构与其他结构尺寸相比较小,为了使模拟过程简单

化,建立以光刻胶胶模、绝缘挡板为中心的局部 2D 模型,如图 4 所示。在 2D 模型中,定义大齿轮上表面为路径 a,大齿轮下表面所在平面为路径 b<sup>[8-9]</sup>。

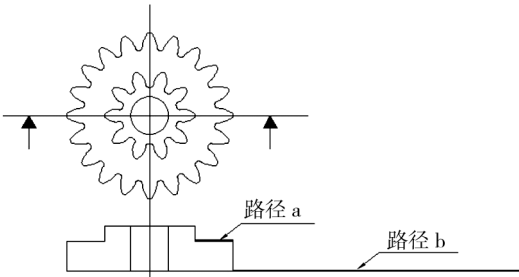


图 4 2D 模拟模型图  
Fig. 4 2D simulation model

1.2.2 模拟参数及方案的确定

微电铸建模采用有限元分析软件 Ansys 中的 electric 模块分析单元,定义单元类型为 plane230<sup>[10]</sup>,加载条件为电流密度 495 A/dm<sup>2</sup><sup>[11]</sup>,同时在电镀液表面定义边界条件。实际材料参数见表 1<sup>[12]</sup>。

表 1 材料电阻率

Tab. 1 Resistivity parameters of the materials

材料	电阻率/(V · m <sup>-1</sup> )
电镀液	0.66
阳极板 (Ni)	6.84×10 <sup>-8</sup>
阴极板 (ITO)	5×10 <sup>-6</sup>
光刻胶	1×10 <sup>10</sup>
绝缘挡板	1×10 <sup>13</sup>

由于实验中起主要作用的为极板和挡板,因此,为了获取更好的观察效果,同时为了提高计算效率,采用自由划分网格的方式,如图 5 所示。

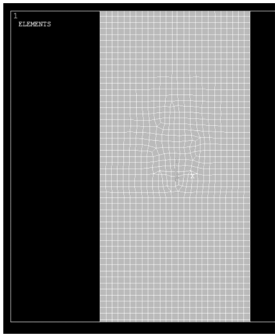


图 5 网格划分示意  
Fig. 5 Schematic diagram of grid division

如图 6 所示。由图 6 可知,双层微齿轮胶膜表面的电场分布极不均匀,不同颜色区域表示不同的电场强度。直角凸角和直角凹角位置处,其周边范围内电场强度相对较大,过渡位置的电场强度则相对较小。这反映了在实际电铸过程中,在无挡板的情况下,电铸均匀性较差的情况。

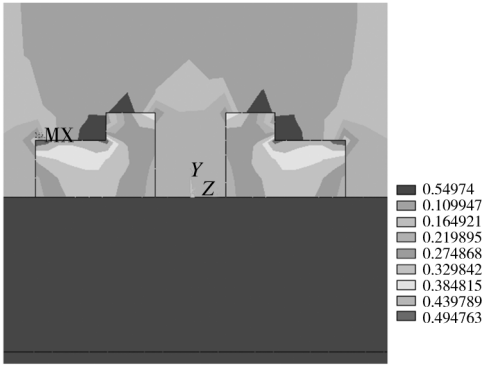


图 6 Ansys 模拟电场分布 (无绝缘挡板)  
Fig. 6 Ansys simulation of the electric field distribution (without insulating baffle)

路径 a 和路径 b 电场强度的均匀性各自代表了所在平面区域电场强度的均匀性。为了从具体数据上说明其均匀性大小,引入 Error(相对误差)。

$$\text{Error} = (E_{\max} - E_{\min}) / E_{\text{ave}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $E_{\max}$ ,  $E_{\min}$  分别为路径 a 或路径 b 中电场强度的最大值和最小值,  $E_{\text{ave}}$  为电场强度的几何平均值<sup>[13]</sup>。

研究要求光刻胶表面铸层的均匀性越高越好,即路径 a 和路径 b 的相对误差越小越好。经模拟计算得出:当无绝缘挡板时,路径 a 的相对误差为 62.48%,路径 b 的相对误差为 48.01%。

当无绝缘挡板时,路径 a 和路径 b 的相对误差较大,表明通过施加绝缘挡板来降低路径 a 和路径 b 的相对误差这一方法具有可行性。绝缘挡板的位置尺寸及几何尺寸并不确定,为了减少试验的工作量,本文采用正交试验法进行试验<sup>[14]</sup>。

选取路径 a 和路径 b 的相对误差作为铸层质量的主要评价因子,绝缘挡板几何及位置尺寸为试验因素<sup>[15]</sup>,包括距离 ITO 玻璃基底距离  $H$ 、内径  $d$ 、外径  $D$ 、厚度  $t$ 。实验因素水平见表 2,正交试验方案及结果见表 3<sup>[16]</sup>。

当  $H=0.36 \text{ mm}$ ,  $d=0.60 \text{ mm}$ ,  $D=1.60 \text{ mm}$ ,  $t=1.00 \text{ mm}$  时,路径 a 的相对误差最小,为 33.18%,意味着路径 a 所代表区域的铸层质量改善效果最佳。

在无绝缘挡板时,进行 Ansys 模拟所得电场分布

表 2 实验参数及水平

Tab.2 Experimental parameters and levels

因素	$H/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	$D/\text{mm}$	$t/\text{mm}$
水平 1	0.34	0.60	1.50	0.60
水平 2	0.36	0.72	1.60	0.80
水平 3	0.38	0.84	1.70	1.00

表 3 正交试验方案及模拟结果

Tab.3 The orthogonal experiment scheme and simulation results

序号	$H$	$d$	$D$	$t$	相对误差 / %	
					路径 a	路径 b
1	1	1	1	1	47.15	12.45
2	1	2	2	2	43.79	11.53
3	1	3	3	3	37.97	16.76
4	2	1	2	3	33.18	17.82
5	2	2	3	1	47.05	8.91
6	2	3	1	2	43.64	13.02
7	3	1	3	2	35.86	10.81
8	3	2	1	3	45.31	18.74
9	3	3	2	1	43.06	13.00

因此,路径 a 的最优序列为: $H_2d_1D_2t_3$ 。图 7 为因素均值分析对应的折线图。

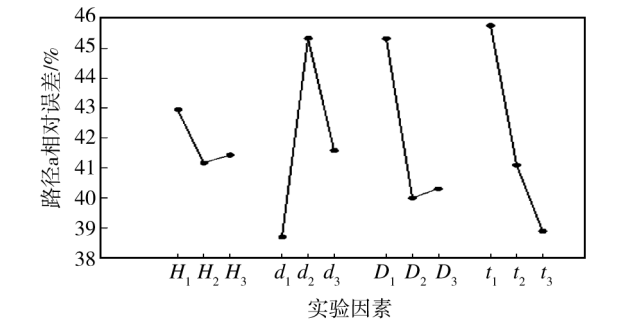


图 7 水平因素趋势图(路径 a 相对误差)  
Fig.7 Trend chart of levels and factors (relative error of path a)

当  $H=0.36\text{ mm}$ ,  $d=0.72\text{ mm}$ ,  $D=1.70\text{ mm}$ ,  $t=0.60\text{ mm}$  时,路径 b 的相对误差最小为 8.91%,意味着路径 b 代表区域的铸层质量改善效果最佳。因此,路径 b 的最优序列为: $H_2d_2D_3t_1$ 。图 8 为因素均值分析对应的折线图。

路径 a 与路径 b 的最优因素序列见表 4。

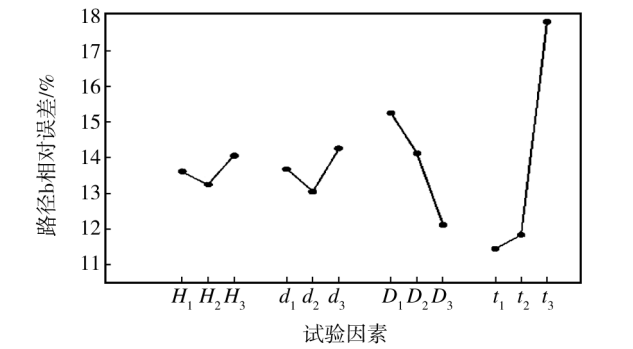


图 8 水平因素趋势图(路径 b 相对误差)  
Fig.8 Trend chart of levels and factors (Relative error of path b)

表 4 最优因素序列

Tab.4 The optimal sequence of factors

路径	$H$	$d$	$D$	$t$
a	0.36	0.60	1.60	1.00
b	0.36	0.72	1.70	0.60

因为求得路径 a 和路径 b 的最优因素序列结果并不是同一个序列,而双层微齿轮型腔镶块的光刻胶电铸过程中铸层质量是由路径 a 和路径 b 代表区域共同体现的。因此,在前面工作的基础上,需要借助灰色关联分析理论中的 GRA 分析法来解决此类问题。

2 结果与讨论

在实际生产过程中,产品的最终质量一般由多个质量指标综合决定,并且各质量指标之间存在联系与区别。灰色关联方法可以对多个试验目标进行综合评定,最终得出最优参数<sup>[17]</sup>。

2.1 灰色关联分析计算

针对被分析对象/系统进行灰色关联分析 (Grey Relational Analysis, GRA)。首先,指定反映系统特征的序列;其次,需要确定影响系统主行为的若干因素序列<sup>[17]</sup>。

假设  $x_i(k)=[x_i(1),x_i(2),x_i(3),\cdots,x_i(n)]$  代表参考数据数列,  $x_i(k)$  代表系统特征系列,两者相关,并且有  $m$  个相关因素水平,  $n$  个相关因素序列。则  $x_1(k),x_2(k),x_3(k),\cdots,x_m(k)$  ( $k=1,2,3,\cdots,n$ ) 表示相关因素序。  $r(x_0,x_i)$  代表灰色关联度,表示为:

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma[x_0(k), x_i(k)] \tag{5}$$

$$\gamma[x_0(k), x_i(k)] = \frac{\min_i |x_0(k) - x_i(k)| + \xi \max_i |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \xi \max_i |x_0(k) - x_i(k)|} \tag{6}$$

式中： $\xi(0-1)$ 表示分辨率,取值为  $0.5^{[17]}$ 。

### 2.2 初值化处理

以路径 a 的平均相对误差为最优序列,  $x_0(k) = (0.36, 0.60, 1.60, 1.00)$ 。首先, 带入各个因素序列进行计算, 结果见表 5。

表 5 因素序列的初值变换  
Tab.5 Initial value transformation of factor sequences

因素	因素序列	初值变换后
<i>H</i>	(0.34, 0.36, 0.38)	(0.94, 1.00, 0.95)
<i>d</i>	(0.60, 0.72, 0.84)	(1.00, 0.83, 0.71)
<i>D</i>	(1.50, 1.60, 1.70)	(0.9375, 1.00, 0.94)
<i>t</i>	(0.60, 0.80, 1.00)	(0.60, 0.80, 1.00)

经过初值化处理,  $x_0 = (1.00, 1.00, 1.00, 1.00)$  为路径 a 的平均相对误差的参考序列。 $\xi = 0.5$ , 每次正交试验对应指标的关联系数及关联度见表 6。

表 6 路径 a 关联系数和关联度  
Tab.6 Correlation coefficient and correlation degree of path a

组号	灰色关联数				灰色关联度
	<i>H</i>	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>t</i>	
1	0.333	1.000	0.333	0.333	0.5000
2	0.333	0.460	1.000	0.500	0.5734
3	0.333	0.333	0.342	1.000	0.5023
4	1.000	1.000	1.000	1.000	1.0000
5	1.000	0.460	0.342	0.333	0.5340
6	1.000	0.333	0.333	0.500	0.5417
7	0.375	1.000	0.342	0.500	0.5544
8	0.375	0.460	0.333	1.000	0.5422
9	0.375	0.333	1.000	0.333	0.5104

同理, 以路径 b 为参考,  $x_0(k) = (0.36, 0.72, 1.70, 0.60)$ , 初值化后, 计算灰色关联度见表 7。

表 7 路径 b 关联系数和关联度  
Tab.7 Correlation coefficient and correlation degree of path b

组号	灰色关联数				灰色关联度
	<i>H</i>	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>t</i>	
1	0.333	0.333	0.333	1.000	0.5000
2	0.333	1.000	0.500	0.444	0.5694
3	0.333	0.378	1.000	0.333	0.5111
4	1.000	0.333	0.500	0.333	0.5417
5	1.000	1.000	1.000	1.000	1.0000
6	1.000	0.378	0.333	0.444	0.5389
7	0.375	0.333	1.000	0.444	0.5382
8	0.375	1.000	0.333	0.333	0.5104
9	0.375	0.378	0.500	1.000	0.5632

根据灰色关联理论分析, 灰色关联度越大效果越好<sup>[18]</sup>。就路径 a 及路径 b 而言, 因为 3D 模型转 2D 模型的切面线段路径 a 对应模具型腔内表面区域约占整个型腔内表面总面积的 60%。因此路径 a 分配的权重为 0.6, 路径 b 分配的权重为 0.4。区别权重后的各组关联度见表 8。

表 8 平均灰色关联度 (区别权重)  
Tab.8 Average gray relational degree ( difference weight)

组号	灰色关联度	组号	灰色关联度
1	0.5000	6	0.5406
2	0.5718	7	0.5479
3	0.5058	8	0.5295
4	0.8167	9	0.5315
5	0.7204		

因此, 第 4 组试验为最优工艺参数组合, 如图 9 所示。

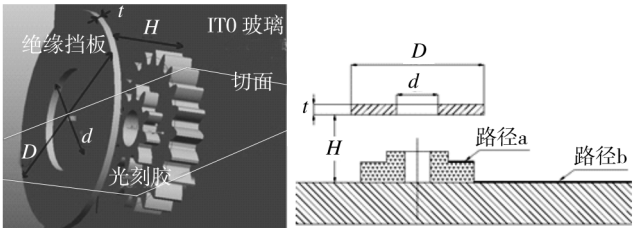


图 9 挡板位置示意  
Fig.9 Baffle sketch map

Ansys 模拟所得电场分布如图 10 所示。



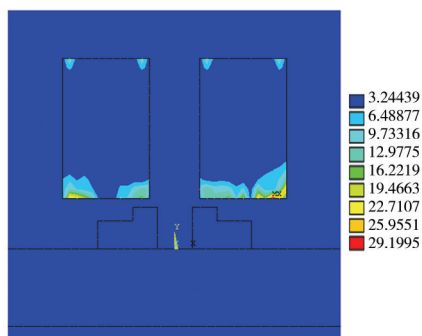


图 10 最优工艺参数组合的 Ansys 电场分布

Fig. 10 Ansys electric field distribution of the optimal combination of process parameters

采用最优工艺参数组合施加绝缘挡板后, 电场强度的不均匀区域主要集中在绝缘挡板的下部, 而双层微齿轮胶膜表面电场强度分布均匀。这反映了实际电铸中在选用最优工艺参数组合施加绝缘挡板后, 电铸的均匀性得到显著提高。

在施加绝缘挡板之前, 双层微齿轮模具型腔内部电铸缺陷主要集中在齿顶部位(图 3), 齿顶型腔不完整, 表面不平整等缺陷均是由于电铸均匀性差导致, 电铸效果很不理想。在施加最优参数组合的绝缘挡板之后, 光学显微镜拍摄的双层微齿轮模具型腔内部电铸效果如图 11 所示, 电铸缺陷基本得到解决, 只是小齿轮上表面电铸 Ni 存在粗糙颗粒, 这和去胶效果有一定的关系。

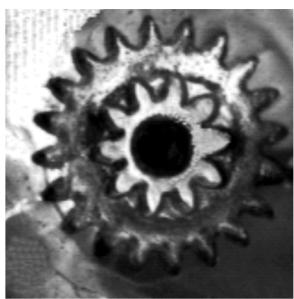


图 11 施加挡板后型腔表面形貌

Fig. 11 Surface morphology of cavity after applying insulating baffle

双层微齿轮型腔共有 30 个齿, 在施加绝缘挡板前, 型腔内电铸受损齿轮 4 个, 齿轮电铸受损面积比率为 13.33%; 施加绝缘挡板进行改善后, 只有 1 个齿电铸内表面存在损伤, 齿轮电铸面积比率为 3.33%, 表明实验结果与模拟结论具有一致性。除此之外, 其他部位在施加绝缘挡板之后, 电铸受损面积也明显减少, 铸层均匀性得到显著提高。

### 3 结论

1) Ansys 模拟表明: 在电铸工艺过程中, 采用施加绝缘挡板的方法, 可以提高双层微齿轮模具型腔镶块电铸过程中铸层的均匀性。施加绝缘挡板后, 路径 a 的相对误差由 62.48% 降低到 33.18%; 路径 b 的相对误差由 48.01% 降低到 8.91%。

2) 采用 Ansys 有限元模拟, 正交试验及灰色关联理论相结合的方法得到最优工艺参数: 绝缘挡板外径 1.60 mm, 内径 0.60 mm, 厚度 1.00 mm, 距离基底 0.36 mm。

3) 从光学显微镜拍摄的型腔表面形貌分析, 施加绝缘挡板后, 电铸受损面积比率由 13.33% 降低到 3.33%, 有效提高了铸层均匀性。

### 参考文献

- [1] 王星星, 雷卫宁, 刘维桥, 等. EMS 微器件电沉积层均匀性的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(12): 3—4.  
WANG Xing-xing, LEI Wei-ning, LIU Wei-qiao, et al. The Research Progress of Micro Devices Electricity Deposit Uniformity[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(12): 3—4.
- [2] 王明浩, 周超亮, 谢磊, 等. 铝上氨基磺酸盐镀铁取代镍中间层的工艺研究[J]. 表面技术, 2012, 41(3): 1—2.  
WANG Ming-hao, ZHOU Chao-liang, XIE Lei, et al. Study on Hamate Iron Plating on Aluminum Substrate as Nickle Substitute[J]. Surface Technology, 2012, 41(3): 1—2.
- [3] TANG S H, TAN Y J. Metallic Biodegradable Coronary Stent[J]. Materials Processing Technology, 2012, 31(3): 43—45.
- [4] CHANG S H, DONG J L. Tool-based Micro Machining[J]. Journal of Material Processing Technology, 2002, 25(2): 5—7.
- [5] 汤俊, 汪红, 刘瑞. MEMS 微结构电沉积层均匀性的有限元模拟[J]. 微细加工技术, 2008, 5(3): 3—4.  
TANG Jun, WANG Hong, LIU Rui. Electric Sedimentary MEMS Microstructure Uniformity of Finite Elementsimulation[J]. Microfabrication Technology, 2008, 5(3): 3—4.
- [6] 李国峰, 王翔, 何冀军. 微细电铸电流密度的有限元分析[J]. 微细加工技术, 2007, 6(5): 5.  
LI Guo-feng, WANG Xiang, HE Ji-jun. The Finite Element Analysis of Micro Electroforming Current Density[J]. Microfabrication Technology, 2007, 6(5): 5.

- [7] 段远富,高四,张伟. 纳米碳孔金属化直接电镀技术[J]. 装备环境工程,2013,10(1):1.  
DUAN Yuan-fu, GAO Si, ZHANG Wei. Direct Plating Technology for PTH Nano-carbon[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1):1.
- [8] 黄霞,丁军,周静. 热障涂层界面位移非稳定性的有限元模拟[J]. 表面技术,2011,40(2):1.  
HUANG Xia, DING Jun, ZHOU Jing. Numerical Simulation of Interfacial Displacement Instability in TBC System[J]. Surface Technology, 2011, 40(2):1.
- [9] 李国亮,揭晓华,肖波. 液相脉冲放电沉积涂层的温度场模拟及研究[J]. 装备环境工程,2012,9(2):1.  
LI Guo-liang, JIE Xiao-hua, XIAO Bo. Thermal Field Simulation of Electrical Discharge Coating in Liquid and Its Research[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2):1.
- [10] 聂时振. 微电铸的工艺技术研究[D]. 合肥:中国科技大学,2009.  
NIE Shi-zheng. Micro Electroforming Technology Research [D]. Hefei: China University of Science and Technology, 2009.
- [11] 张昕,张秀芝,朱华军. AZ91 镁合金表面制备 Ni-SiO<sub>2</sub> 纳米复合电镀层的工艺研究[J]. 表面技术,2012,41(4):2—3.  
ZHANG Xin, ZHANG Xiu-zhi, ZHU Hua-jun. Study on the Plating Process of Ni-SiO<sub>2</sub> Coating for AZ91 Magnesium Alloys[J]. Surface Technology, 2012, 41(4):2—3.
- [12] 董久超,王磊,汤俊. 电镀层均匀性的 Ansys 模拟与优化[J]. 新技术新工艺,2011,8(11):1—2.  
DONG Jiu-chao, WANG Lei, TANG Jun. Electrodeposited Coating Uniformity of Ansys Simulation and Optimization [J]. New Technology & New Process, 2011, 8(11):1—2.
- [13] 吕文龙,陈义华,孙道恒. 微电铸及其在 MEMS 中的应用[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2005,44(1):3.  
LYU Wen-long, CHEN Yi-hua, SUN Dao-heng. The Micro Electroforming and Its Application in MEMS[J]. Journal of Xiamen University (Nature Science), 2005, 44(1):3.
- [14] 李燃灯,秦宗慧,周嘉. 基于 UV-LIGA 技术的双层微齿轮模具镶块工艺[J]. 微纳电子技术,2012(2):1—2.  
LI Ran-deng, QIN Zong-hui, ZHOU Jia. Insert Process of the Double-deck Micro Gear Mold Based on the UV-LIGA Technology[J]. Micronanoelectronic Technology, 2012(2):1—2.
- [15] 王琳,孙本良,许为,等. Ni-ZrO<sub>2</sub> 纳米复合电镀工艺研究[J]. 表面技术,2012,41(1):1.  
WANG Lin, SUN Ben-liang, XU Wei, et al. A Study on Ni-ZrO<sub>2</sub> Nano-composite Plating [J]. Surface Technology, 2012, 41(1):1.
- [16] 黄燕滨,邵新海,宋高伟,等. 陶瓷涂层性能影响因素及工艺优化研究[J]. 装备环境工程,2012,9(1):2—3.  
HUANG Yan-bin, SHAO Xin-hai, SONG Gao-wei, et al. Research of Influencing Factors on Performance and Process Optimization of Ceramic Coating[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1):2—3.
- [17] 童尧,秦宗慧. 注射成型工艺参数的混合优化[J]. 现代塑料加工应用,2010,22(3):3—4.  
TONG Yao, QIN Zong-hui. Hybrid Optimization of Technical Parameters of Injection Molding Processing [J]. Modern Plastics Processing and Application, 2010, 22(3):3—4.
- [18] 郭欢. 灰关联决策方法的灵敏度分析研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2009.  
GUO Huan. Grey Relational Decision Method of Sensitivity Analysis [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.

(上接第 51 页)

- [12] 罗胜联,张涛,周海晖,等. 有机胺对镁合金阳极氧化的影响[J]. 中国有色金属学报,2004,14(4):691—696.  
LUO Sheng-lian, ZHANG Tao, ZHOU Hai-hui, et al. Effect of Organic Amine on Anodizing of Magnesium Alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(4):691—696.
- [13] ANDERS F, SOREN A. A Simplified Model for Wear Prediction in Helical Gears[J]. Wear, 2001, 249(324):285—292.