

文章编号 1004-924X(2009)09-2184-07

微电铸中电流-流体耦合的数值分析及实验

邵力耕^{1,3}, 杜立群^{1,2}, 刘冲^{1,2}, 王立鼎^{1,2}

- (1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023;
2. 大连理工大学 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 辽宁 大连 116023;
3. 大连交通大学, 辽宁 大连 116028)

摘要:研究了 LIGA/UV-LIGA 的核心技术微电铸的内在规律,对影响铸层生长的阴极电流密度和流体流场进行了数值分析。以微流控芯片微模具上的十字电铸层为研究对象,建立了微电铸的数学模型。给出了描述微电铸体系电流密度和流体流场的偏微分方程,运用有限元法对微电铸体系进行三维数值仿真,得到了电流密度分布和流体流场分布的数值结果。选择十字铸层上的测量点,由该点处电流密度和流体流速仿真数据计算出微电铸 4 h 的铸层生长高度仿真值,并与相同工艺条件下的微电铸实验铸层生长高度进行对比。结果显示,对应各测量点微电铸生长高度仿真值和实验值的变化趋势接近,绝对偏差小,最大绝对偏差为 4.437 μm ,最小绝对偏差为 0.264 μm 。实验表明这种数值仿真方法适用于微电铸工艺设计的辅助分析,可缩短微电铸工艺的开发周期。

关键词:微电铸;阴极电流密度;流体;三维数值仿真

中图分类号:TQ153.4 **文献标识码:**A

Numerical analysis and experiment of current-fluid coupling in micro-electroforming

SHAO Li-geng^{1,3}, DU Li-qun^{1,2}, LIU Chong^{1,2}, WANG Li-ding^{1,2}

(1. *Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining*

Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian

University of Technology, Dalian 116023, China; 3. Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: The cathode current density and the fluid field relevant to the growth of electroforming layer is studied with numerical analysis to explore the inherent laws of micro-electroforming that is a key technology of UV-LIGA. By taking the crossing electroforming layer of a micro-fluidic chip mold as a research object, a mathematical model is established. Then, the current density and the fluid field are described with partial differential equations, and the 3D numerical simulation of the micro-electroforming system is performed with the finite element method to obtain the simulated results of the current density distribution and fluid field distribution. Choosing measuring points on the crossing electroforming layer, the simulated growth height during 4 hour electroforming is calculated based on the simu-

收稿日期:2008-10-28;修订日期:2008-11-18.

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(No. 2006BAF04B13);国家自然科学基金资助项目(No. 50675025)

lated data of current density and fluid velocities at the measuring points. Finally, the simulated growth height of electroforming layer is compared with that gotten from the micro-electroforming experiment under the same technological condition. The results indicate that the simulated one of electroforming layer is close to the experimental growth height to every measuring point and show low absolute deviations in a maximum of $4.437 \mu\text{m}$ and a minimum of $0.264 \mu\text{m}$. These results also indicate that the numerical simulation can be used in the analysis and design of micro-electroforming, and can reduce the developing time of micro-electroforming technology.

Key words: micro-electroforming; cathode current density; fluid; 3D numerical simulation

1 引言

微电铸是微机电系统中重要的金属微结构加工技术。运用光刻技术制作的微电铸模型,其阴极被电铸液中的金属离子电沉积填充,去胶后获得金属微结构^[1,2]。微电铸体系是典型的多物理场耦合系统,主要包括电、热、流体和电化学等,影响铸层微观结构和性能的因素较多。微电铸常用的研究方法主要是在理论分析的基础上进行工作参数优化,以期得到性能良好的微结构。由于微电铸体系比较复杂,有些问题在理论分析上尚有困难,对微电铸实践也起不到指导作用。近年来,国外学者把数值仿真技术应用于电铸和电镀体系设计及工艺优化中,取得了一定的研究成果。其中,瑞典 Replisaurus Technologies AB 利用数值仿真辅助开发了屏蔽阳极的铜微电铸新工艺。法国工业和机械技术中心(CETIM)开发的 Accu-Plate 3D 电镀仿真软件,能够仿真镀层的均匀性和厚度等^[3,4]。根据初始工艺方案,结合仿真结果优化电镀工艺,英国 HNK 公司开发了电镀有限元仿真软件,可以辅助改善产品表面的电镀均匀性、降低次品率、提高产品质量、缩短产品上市周期^[5]。

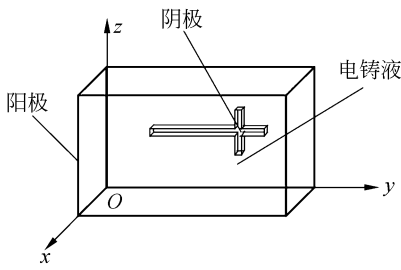
铸层高度是微电铸中非常重要的质量控制因素,它直接影响着微结构的尺寸精度和表面精度,因而要求铸层高度有良好的均匀性^[6]。阴极金属电沉积过程一般由液相传质、表面转化、电子转移和新相生成 4 个步骤串联组成。通常表面转化、电子转移和新相生成进行得比较快,而液相传

质步骤进行得较慢,因而成为一个控制步骤。理论上,沉积金属量与阴极电流密度成正比,阴极表面附近的传质速度与流体动力学条件相关,阴极移动可以消除浓差极化,对铸层表面具有整平作用^[7]。所以,在微电铸体系中,阴极电流密度和阴极附近流体流场是影响铸层生长的重要因素。本文以微流控芯片微模具上的十字电铸层为研究对象,建立了微电铸数学模型,通过对阴极电流密度和流体流场耦合的三维数值仿真,得到铸层生长高度,并与实验结果进行对比。结果表明,铸层各测量点生长高度的仿真值与实验值的绝对偏差不大,变化趋势接近。

2 理论模型

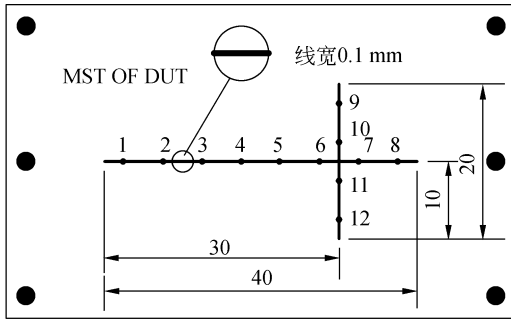
2.1 数学模型

在微流控芯片模具的微电铸过程中,微电铸体系主要包括电铸液、阴极、阳极和电源。电源可以通过施加电流参数来实现,不需要建立其物理模型。在建立模型的过程中,应保证阳极、阴极和电铸液的相对位置不变,突出微电铸体系的主要性质,忽略其次要因素。微电铸体系的数学模型如图 1(a)所示。在机械搅拌情况下,假设主体电铸液中浓度分布均匀。阳极为纯镍平板,简化为一平面。阴极主要包括镍基板、微电铸十字沟道和 SU-8 光刻胶,其中十字沟道是待电铸微图形,其侧壁是 SU-8 胶,底部为镍基板的一部分,镍基板的其它部分忽略不计。阴极较大的平面部分为 SU-8 胶。仿真和实验测量点分布如图 1(b)所示。



(a) 数学模型

(a) Mathematic model



(b) 测量点分布

(b) Distribution of measuring points

图 1 微电铸体系模型

Fig. 1 Micro-electroforming model

电铸液的主要物理属性如表 1 所示。

表 1 电铸液的主要物理属性

Tab. 1 Main physical properties of electroforming solution

密度	电导率	动力粘度	运动粘度	扩散系数
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\kappa/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	$\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$D_i/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
1.33×10^3	5.4	0.7×10^{-3}	0.526×10^{-6}	2.496×10^{-9}

根据法拉第第一电解定律, 阴极电沉积的金属质量为

$$M = \eta k I t, \quad (1)$$

其中 η 是电流效率, k 是金属元素的电化当量, I 是电流强度, t 是电流通过的时间。

微电铸沉积的金属质量也可以用金属的体积和密度计算:

$$M = \rho V = \rho S \delta. \quad (2)$$

其中 V 为沉积金属的体积, S 为沉积金属的面积, δ 为沉积金属的高度, ρ 为沉积金属的密度。由式(1)和(2)可得铸层高度:

$$\delta = \frac{\eta k i_k t}{\rho}. \quad (3)$$

其中 $i_k = \frac{I}{S}$ 为阴极电流密度。在微电铸过程中, 同一时刻沉积表面各点的阴极电流密度是不一样的, 经过 t 时间后, 铸层表面各点的高度会有微小差异。

微电铸体系的电流分布和阴极附近的流体流场分布, 可以利用有限元法求解描述电流场和流体流场的偏微分方程得到。先建立微电铸体系的数学模型, 然后设置区域和边界条件, 划分网格, 最后进行求解计算和后处理^[8-9]。

2.2 电流分布

微电铸体系中, 阴极铸件与阳极间的间隙充满电铸液。微电铸的外加电源用导线与阴极、阳极相连, 以维持连续的电流。考虑到所加的电源在研究的电场之外, 体系的电场可简化为无源导电媒质电场。微电铸过程进入平衡加工状态后, 电场参数均不随时间变化, 而只是位置的函数, 属于稳恒电场^[10]。

电铸液中的电位分布符合拉普拉斯方程, 即

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0, \quad (4)$$

其中 u 为电场中各点的电位。

电铸液作为导电媒质, 其导电率 $\kappa > 0$, 有电场存在时, 就有电流流动。电流场的分布特征用电流密度 i 来表示, i 与电场强度 E 的关系为:

$$i = \kappa E, \quad (5)$$

可以用电流密度线和等电位面对电铸液中的电场进行直观几何描述。

按照微电铸工艺参数, 设定电场分布的边界条件。阴极电流密度为 -200 A/m^2 , 阳极电流密度为 200 A/m^2 , 其余界面均绝缘。

2.3 流场分布

电铸液属于不可压缩流体, 服从纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes)^[11]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u = f - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u, \quad (6)$$

其中 $\nu = \mu/\rho$ 为电铸液的运动粘度, $\nabla p = i \frac{\partial p}{\partial x} + j$

$\frac{\partial p}{\partial y} + \kappa \frac{\partial p}{\partial z}$ 为压强梯度, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 为拉普拉斯算子。

不可压缩流体的连续性方程为:

$$\nabla \cdot u = 0. \quad (7)$$

式(6)和(7)组成偏微分方程组, 当初始条件

和边界条件给定后,方程组理论上是可解的。

阴极以一定的速度在电铸液中往复移动来消除附近的浓差极化。对阴极移动的微电铸体系做出假设^[12]:(1)薄的平板电极相对于电铸液处于静止状态,电铸液以一定的速度流过平板电极铸面;(2)电铸液流速不太大,处于层流状态。移动阴极与电铸液冲击方向的关系如图 2 所示,电铸液流速与阴极表面平行,冲击点为 o 点,切向速度大小为 u_0 。

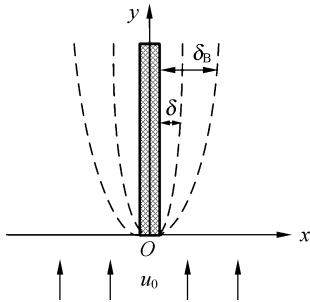


图 2 移动阴极表面扩散层与边界层的厚度
Fig. 2 Thicknesses of diffusion layer and border layer on moving cathode surface

阴极附近的电铸液受电极表面的粘滞作用影响,靠近电极表面的流速小,远离电极表面的流速大。即在 $x=0$ 处, $u=0$; 在 $x=\delta_B$ 处, $u=u_0$ 。靠近阴极表面的液流层为“边界层”,其厚度用 δ_B 表示。

根据扩散传质理论,紧靠阴极表面有一很薄的液层,在该液层中反应离子存在着一个浓度梯度,所以存在着反应离子的扩散运动,这一薄液层为扩散层,其厚度用 δ 表示。阴极移动可以改善扩散层的均匀性,对阴极铸层起到整平作用。阴极铸层表面的扩散层厚度:

$$\delta = D_i^{\frac{1}{2}} \nu^{\frac{1}{6}} y^{\frac{1}{2}} u^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

其中, D_i 为反应离子的扩散系数; $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 为运动粘度, μ 动力粘度, ρ 为电铸液的密度; y 为电极表面上某点到冲击点的距离; u 为阴极表面该点的电铸液流速。

阴极正向和负向移动时铸层某点的平均扩散层厚度:

$$\bar{\delta} = \frac{\delta_+ + \delta_-}{2} \quad (9)$$

δ_+ 和 δ_- 为阴极正负向移动时该点的扩散层厚度。

阴极移动时铸层某点的相对整平系数:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\delta}{\delta_{\max}}} \quad (10)$$

3 仿真结果

3.1 阴极电流密度分布

微电铸体系中,金属电沉积速度正比于阴极电流密度,电流密度的分布体现了电沉积速度的分布。图 3 是电流密度和等电位面的分布图。阴极电位高于阳极电位,阴极附近的电流线要比阳极附近的电流线密。阴极真正导电部分是十字沟道铸层,其附近的电流密度分布较均匀。

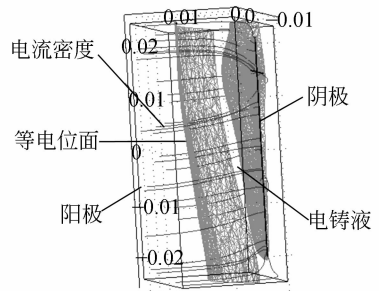


图 3 电流密度和等电位面分布
Fig. 3 Current density and distribution of equipotential

阴极十字沟道各测量点的平均电流密度如图 4 所示,点 8 处的平均电流密度最大,为 209.02 A/m^2 ; 点 7 处的最小,为 187.42 A/m^2 。

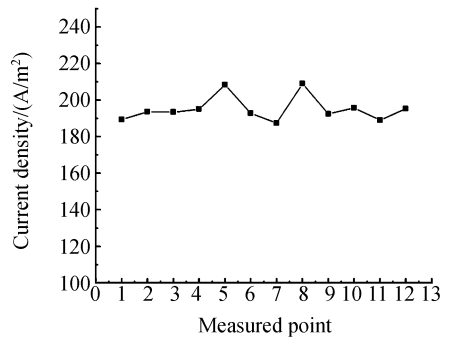
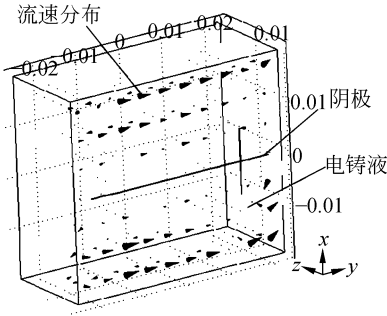


图 4 阴极十字沟道的平均电流密度
Fig. 4 Average current density of crossing cathode channel

3.2 流场分布

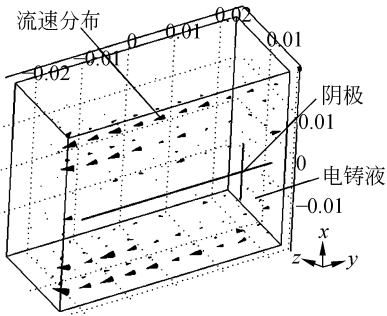
根据微电铸数学模型,阴极沿 y 轴移动,可以分别获得沿 y 轴正向和负向移动时微电铸体

系的电铸液流场分布,如图 5 所示,对应各测量点的电铸液流速大小如图 6 所示。阴极移动的一个周期中,前半周期为正向移动,后半周期为负向移动,可以计算出一个周期内各测量点的电铸液流速平均值。



(a) 正向移动时的流场

(a) Fluid field under positive movement



(b) 负向移动时的流场

(b) Fluid field under negative movement

图 5 阴极移动时的流场分布

Fig. 5 Fluid field distribution under cathode movement

阴极移动对铸层生长表面具有整平作用。取各测量点的正向和负向流速,由式(8)和(9)计算得到各点阴极正向和负向移动时的扩散层厚度及其平均值。扩散层的厚度越薄,阴极移动对该点的整平效果就越好。测量点中扩散层平均厚度最大的测量点相对其它各点对生长铸层无整平作用,该点的相对整平系数 $\lambda=1$ 。由式(10)计算出各测量点的相对整平系数如表 2 所示。

表 2 测量点扩散层厚度和相对整平系数

Tab. 2 Thicknesses of diffusion layers and relatively unknitting coefficients

序号	扩散层厚度/ (μm)			相对整平系数
	正向	反向	平均值	
1	16.364	49.240	32.802	0.905
2	22.008	46.475	34.241	0.945
3	26.385	43.916	35.151	0.970
4	30.213	41.346	35.780	0.988
5	33.642	38.824	36.233	1.000
6	44.584	25.359	34.972	0.965
7	46.993	20.703	33.848	0.934
8	49.461	14.601	32.031	0.884
9	45.569	23.043	34.306	0.947
10	46.768	23.085	34.926	0.964
11	45.182	23.005	34.093	0.941
12	45.785	23.044	34.414	0.950

4 实验分析

4.1 微电铸系统的工艺参数

微电铸是通过金属电沉积制取金属微结构的工艺过程,具有极高的复制精度和优良的物理机械性能^[13]。实验选用沉积速度较快、易得到低应力铸层的氨基磺酸盐作电铸液^[14],其组分为氨基磺酸镍 $\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2$ (600 g/L),氯化镍 NiCl_2 (5 g/L),硼酸 B_2CO_3 (35 g/L),十二烷基硫酸钠 (0.3 g/L)。

在微电铸中,采用适当的温度,可以在不破坏电铸液络合作用的前提下,增加电导,加大阴极电流密度,起到加快反应速度和改善电铸液分散能力的双重作用。阴极移动可以弥补自发性传质不足引起的阴极反应受阻从而保证电沉积铸层质量。

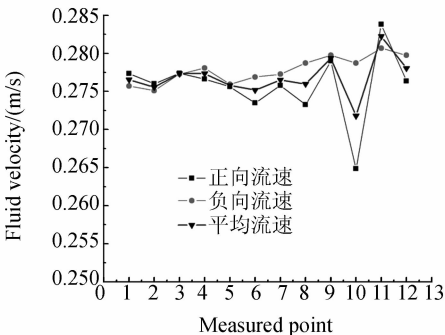


图 6 阴极移动时的流体流速

Fig. 6 Fluid velocities under cathode movement

微电铸的工艺参数:温度为 50~55 ℃,阴极移动和机械搅拌,电流密度为 200 A/m²,pH 值为 3.8~4.5。

4.2 微电铸铸层高度

根据微电铸体系阴极十字沟道处的电流密度和铸层表面附近的流体流速,计算出了铸层生长高度的仿真值,并与实验获得的铸层生长高度值进行了比较。

十字沟道铸层沉积的是镍金属,电化当量 $k = 1.095 \times 10^{-3} \text{ kg/A} \cdot \text{h}$ 。仿真过程中假设微电铸的电流效率 $\eta = 1$,由式(3)铸层高度计算公式,考虑铸层表面附近的流体流动对铸面的整平效果,引入相对整平系数 λ ,可得铸层生长高度的仿真值计算公式:

$$\delta = 0.123 \times 10^{-6} \lambda i_k t. \quad (11)$$

取各测量点平均电流密度的仿真值,可以由式(11)计算出经过 4 h 微电铸测量点铸层生长高度的仿真值,并与实际微电铸体系中 4 h 生长高度的实验值进行比较,如图 7 所示。对应各测量点生长高度仿真值与实验值的平均绝对偏差为 1.799 μm ,最大绝对偏差为 4.437 μm ,最小绝对偏差为 0.264 μm 。各测量点生长高度的仿真值与实验值存在偏差,主要是因为仿真过程未考虑温度因素,仿真模型中假设阴极移动带动电铸液流过铸面时是层流状态,而实际微电铸实验中受电铸结构影

响,阴极铸面附近电铸液存在着局部紊流。

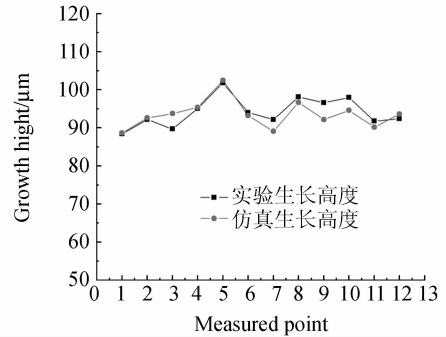


图7 铸层生长高度

Fig. 7 Growth height of electroforming layer

5 结 论

微电铸体系中电场分布和流场分布是影响铸层生长的主要因素。通过仿真分析发现,阴极铸层附近的电流分布比较均匀,扩散层越薄的地方,微电铸电流分布越接近于宏观分布。

阴极电流密度与铸层生长高度成正比,阴极移动对铸层表面具有整平作用。针对 4 h 微电铸铸层生长高度,各测量点的仿真值和实验值变化趋势相同,绝对偏差小。平均绝对偏差为 1.799 μm ,最大绝对偏差为 4.437 μm ,最小绝对偏差为 0.264 μm 。这种微电铸电流和流体耦合数值计算方法适用于微电铸工艺和设计的辅助分析。

参考文献:

- [1] MALEKA C K, SAILE V. Applications of LIGA technology to precision manufacturing of high-aspect-ratio micro-components and systems: a review [J]. *Microelectronics Journal*, 2004,35:131-143.
- [2] PAN L W, LIN L, NI J. A flip-chip LIGA assembly technique via electroplating[J]. *Microsyst Technol.*, 2001,7(1):40-43.
- [3] DRUESNE F, PAUMELLE P, VILLON P. Application of the BEM to chromium electroplating simulation and to identification of experimental polarisation laws[J]. *Engineer Analysis with Boundary Elements*, 2000,24:615-622.
- [4] DRUESNE F, AFZALI M. Electroplating simulation and design tool[J]. *Proc. Instn Mech.*, 2003, 217:705-707.
- [5] WILLIAM, KIMBERLEY. Research group pioneers electroplating simulation[J]. *Automotive Engineer*, 2006,31(6):44-46.
- [6] 李加东,吴一辉,张平,等.掩模电镀镍微结构的镀层均匀性研究[J]. *光学精密工程*, 2008,16(3):452-458.
- LI J D, WU Y H, ZHANG P, et al.. Thickness uniformity of Ni microstructure deposited by through-mask electroplating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(3):452-458. (in Chinese)
- [7] 刘仁志.实用电铸技术[M].北京:化学工业出版社,2006.
- LIU R ZH. *Practical electroforming technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [8] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT 流体工程仿真计

- 算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- HAN ZH ZH, WANG J, LAN X P. *FLUENT fluid engineering simulation examples and applications*[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [9] 郑晓虎, 朱荻. 金属微结构阵列的电铸成型[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 473-477.
- ZHENG X H, ZHU D. Micro electroforming of metal microstructure array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 473-477. (in Chinese)
- [10] 朱树敏. 电化学加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- ZHU SH M. *Electrochemical fabrication technology*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [11] 王惠民. 流体力学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- WANG H M. *Introduction to fluid mechanics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [12] 李荻. 电化学原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999.
- LI D. *Electrochemical fundamentals*[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 1999. (in Chinese)
- [13] MCGEOUGH J A, LEU M C, RAJURKAR K P, et al.. Electroforming process and application to micro/macro manufacturing[J]. *Keynote paper in annals of CIRP*, 2001, 50(2): 499-513.
- [14] 杜立群, 刘海军, 秦江, 等. 微电铸器件铸层均匀性的研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 69-75.
- DU L Q, LIU H J, QIN J, et al.. Study on uniformity of micro-electroformed device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 69-75. (in Chinese)

作者简介:



邵力耕(1970—), 男, 甘肃定西人, 博士研究生, 1998年于兰州交通大学获得硕士学位, 主要研究方向为微机电系统。E-mail: shaolg@djtu.edu.cn



刘冲(1963—), 男, 湖北武汉人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事微机电工程、精密仪器及机械的研究。E-mail: chongl@dlut.edu.cn



杜立群(1966—), 女, 黑龙江人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微机电系统。E-mail: duliqun@dlut.edu.cn



王立鼎(1934—), 男, 辽宁辽阳人, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 主要从事超精密齿轮工艺与测试、精密机械设计 & 微纳米机械的研究。E-mail: wangld@dlut.edu.cn