

叠层模板的电沉积成形技术实验

范 晖¹ 田宗军² 黄因慧² 姜海波¹

(1. 江苏师范大学机电工程学院, 徐州, 221116; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

摘要:介绍了叠层模板电沉积(Laminated template electrodeposition, LTE)方法的加工原理和具体工序,利用LTE系统进行了电沉积成形加工实验。对加工中由于电场强度分布不均导致沉积层生长不均的实验现象通过模拟仿真进行了分析和探讨,预估实验过程。根据加工策略对主要影响因素电流和时间进行了优化选择,通过拉伸试验测试了层间结合强度。最后,进行了异型铜质结构零件的实验研究,探讨和验证了该方法对于复杂结构零件成形的可行性。

关键词:叠层制造;电沉积成形;铜质零件

中图分类号:TQ153.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)05-0780-06

Experiment on Laminated Template Electrodeposition Prototyping Technology

Fan Hui¹, Tian Zongjun², Huang Yinhui², Jiang Haibo¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou, 221116, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The principle and specific procedures of laminated template electrodeposition (LTE) are introduced. The LTE system is used to conduct electrodeposition prototyping experiment. The phenomena that the electric field nonuniform distribution exists and leads to non-uniform sediment growth, are analyzed. The experiment condition is also predicted by the simulation system. According to processing strategies, the main influencing factors, i. e., current configuration and time are optimized. The layer-to-layer bond strength is tested by the tensile test. Finally, the special-profiled copper parts are produced in the experiment. The feasibility of the method for prototyping complex structure parts is verified.

Key words: laminated manufacturing; electrodeposition prototyping; copper parts

金属原形的直接制造一直是快速原型制造领域的重要研究内容和关注方向^[1]。目前,成形工艺和手段较为多样,如多相组织沉积、形状沉积制造、激光近形制造、液态金属微滴沉积、热化学反应金属直接成形以及射流电沉积快速成形等。但在某些方面还存在着技术的固有不足,如:LIGA及准LIGA技术工艺过程繁复;激光及其他高能束加工

技术多需要大功率激光器或相应高能设备,投资和维护成本较高,骤冷骤热的加工环境会给金属成形致密性带来一定的负面影响^[2-3]。因此,研究者也在尝试将传统的加工方法和现代的理念相结合,采取多种加工技术的复合型加工方式,以取长补短。其中,传统的电沉积工艺,因其具有无应力和热变形影响、无工具损耗、加工精度高、成本经

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51305178,51305177)资助项目;江苏师范大学自然科学基金(11XLA15)资助项目。

收稿日期:2014-05-10;**修订日期:**2014-07-10

通信作者:范晖,男,副教授,E-mail:xzfanhui@163.com。

济、适用范围广等优点而倍受重视^[3-6]。

基于此背景,叠层模板电沉积(Laminated template electrodeposition, LTE)成形技术通过将电沉积手段和快速原型制造的核心思想“叠层制造”结合,并不断完善,成为了一种成形金属零件的新方法。它主要针对毫米级加工尺度上的微小型金属结构器件制造,是特种成形技术领域内新型工艺研究的一次有益的探索。

1 LTE 原理、加工流程和实验条件

1.1 LTE 原理

LTE 的技术原理体现了叠层制造的加工思路:首先对目标零件进行分层切片处理,制作出一组具有特定轮廓的屏蔽模板,然后金属阳离子逐层、选择性地沉积至模板限定的区域内,最后形成以模板型腔为侧面边界的金属零件。

技术路线如图 1 所示。

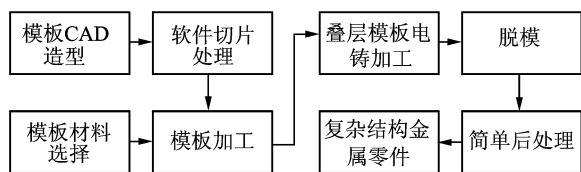


图 1 叠层模板电沉积加工流程示意图

Fig. 1 Flow diagram of LTE process

实验中,根据加工对象几何特征的不同,加工方式可分为实心实体加工与内腔实体加工两种,如图 2 所示。

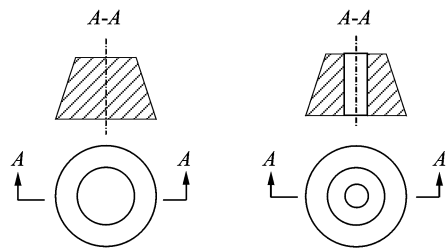


图 2 实心和内腔结构的三维实体

Fig. 2 Solid and inner cavity structures of 3-D entity

1.2 LTE 实验步骤

实心实体的加工包含以下步骤:

(1) 电沉积第一层金属

首先将第 1 层模板通过模板定位装置固定在阴极上。通过数控程序调整机床 Z 轴高度(Z 轴方向即为沉积生长方向),设定极板间距,接通电源等加工设备,开始沉积第一层金属。

(2) 层间处理及模板的定位与更新

首层沉积结束后,关闭电解液泵和电源,移动工作台,取下阳极板检查沉积质量。如沉积高度不均匀,则先进行平坦化加工(修磨)。之后,再安装第 2 层模板。模板之间需加以定位和装夹,以防错位影响精度。具体方式即采用圆柱销穿过模板的预留定位孔,将叠层模板装配在一起,并辅以定位腔定位,如图 3 所示。

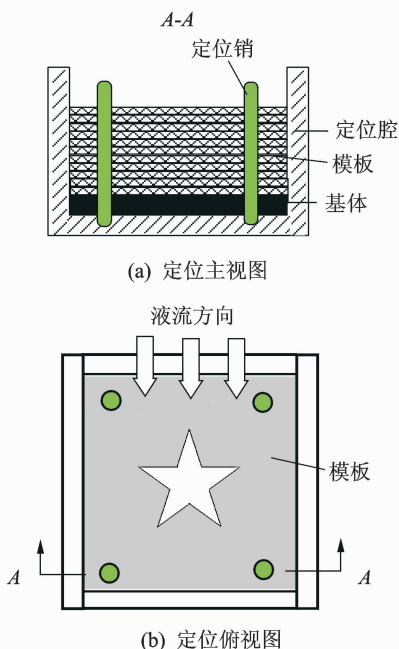


图 3 模板定位示意图

Fig. 3 Schematic diagram of templates locating

接着将 Z 轴在电沉积生长方向移动长度为模板厚度的距离以设定新的极板间距。启动加工设备,在第 1 分钟内反接电源以电解方式去除停机时产生的氧化层,确保基体具有新鲜的沉积表面。之后转换为正常电源极性,开始沉积第 2 层金属。

(3) 电沉积其他层金属

重复步骤(2)。每次循环中,随着电沉积高度的增加,相应增大阴极与阳极的间隙,经过一定时间达到目标结构需要的高度要求。以上过程均通过数控方法实现。

(4) 去除模板和基体

从零件上取下模板较为简单,只需在常温下把叠加的模板逐层脱离即可。分离的过程不会产生热变形和机械变形,因此最大限度避免了零件变形。

(5) 打磨抛光

脱模后的零件侧面存在一定的阶梯效应,需进

行修整,可采用砂纸进行手工打磨,或用布砂轮抛光即可消除。

对于内腔结构的金属实体,需要对模板的制作和加工工艺加以改变。该类结构的实体经过分层后的模板图案如图4所示,具有典型的环状结构特征。

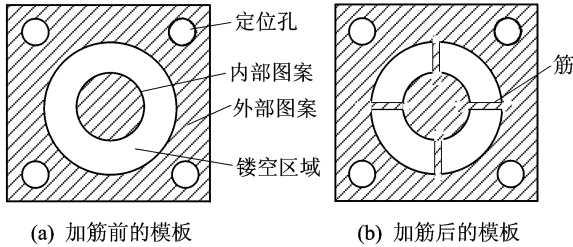


图4 具有环状几何特征的模板

Fig. 4 Circular geometric feature templates with and without added tendon

1.3 实验平台及材料

基于LTE成形原理及工艺研究,设计了加工系统,如图5所示。

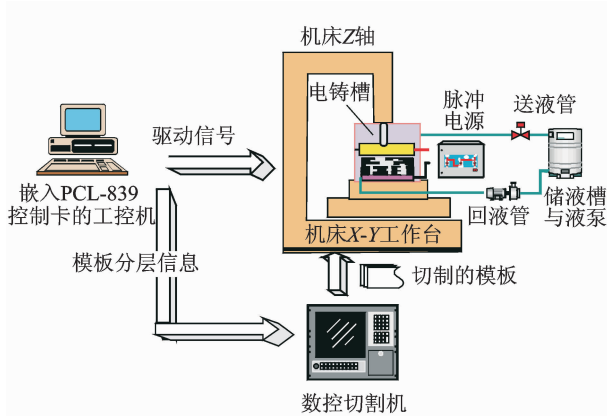


图5 实验平台示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental platform

实验材料包括:阳极:含磷0.04%~0.06%的磷铜板,尺寸为40 mm×40 mm×5 mm,外用涤纶布包覆,以防阳极泥渗出。阴极:石墨板,尺寸为40 mm×40 mm×5 mm,实验前对其表面打磨、抛光。阴阳极板水平安装在电沉积槽内,平行配置,间距设定为25 mm,浸没于电解液中,分别于电源的负、正极相连。电解液从极板一侧流入,另一侧流出,平行流过电极表面,与其发生电化学反应,即平流方式。此流动方式具有结构简单,流动阻力小的特点。所用电解液为酸性硫酸铜溶液,成分为:CuSO₄·5H₂O(200 g/L),H₂SO₄(50 g/L);pH值为4.0,温度设定为40℃,连续循环搅拌。

模板材料为环氧树脂板,厚度为0.2 mm,由数控切割机切制而成。

1.4 结合强度测试

作为验证性的叠层制造技术,叠层模板电沉积的最终目的是制备出达到生产标准的金属零件产品。其必要的力学性能特别是层间结合强度需要针对性地进行测试。测试方式为试样Z向拉伸测试。因试样的拉伸向尺寸较小,难以装夹在拉伸机上,故在拉伸件表面粘接固定了钢质装夹柄用以装夹。所用粘接剂为HY-914室温快速固化环氧粘合剂,其针对铜及铜合金材料的粘接强度较高,可达到25 MPa以上,经计算可保证试件在胶体剥离之前被拉断,满足测试需求。

2 结果与分析

2.1 电场模型的建立

电沉积过程中,阴极表面的电场强度分布直接影响沉积层的厚度分布。通过建立三维简化模型,可对影响电场分布因素进行定性分析,总结出电场变化规律,为探索改善沉积质量的工艺方案提供理论依据,进而指导后续实验^[7]。

电解液的三维实体模型采用电沉积槽的内壁结构尺寸和电解液的工作液面高度。实验中所用阳极板为金属平板,阴极(基体)的实体模型简化为3部分:石墨基板、微电铸图形和绝缘层。该电场强度仿真属三维稳态电流传导分析,通过Ansys仿真系统实现。仿真分析中涉及的材料电阻率如表1所示。

表1 仿真分析中的材料特性

Tab. 1 Material features in simulation analysis

建模部件	阳极	阴极	模板	电铸液
材料	铜	石墨	树脂	硫酸铜
电阻率/ (Ω·m)	1.6×10^{-8}	1×10^{-5}	1×10^{14}	5

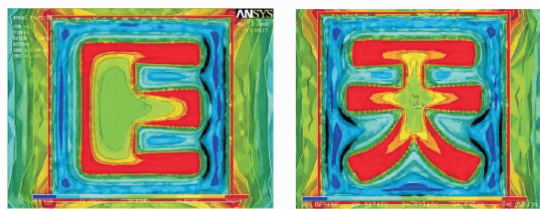
电场计算的边界条件为:

- (1)阴极电位为基础电位,定义为0 V;
- (2)阳极电位为1 V。

电场计算过程中的假设为:

- (1)电沉积槽无漏电,电流全部通过阳极和阴极。
- (2)阴极基体和阳极均为等势体。

根据实际电沉积参数进行的仿真分析发现,无论沉积图形如何变化,其表面的电场强度分布遵循着相同的规律,如图6所示。



(a) “E”形沉积图形 (b) “天”形沉积图形

图 6 阴极表面的电场分布图

Fig. 6 Electric distribution of cathode surface

这些共性包括:

(1)在阴极表面场强分布极不均匀,较高的场强分布在电沉积图案的边缘和角落。

(2)阴极中部存在电场强度趋于均匀的区域,但其数值远低于边角部分。

(3)电场强度在边角和中间区域的差值达到 2~3 倍。

由上述结果可知,电场强度不均匀分布势必造成沉积层生长的极不平衡,需要在加工中采取相应对策加以改善。

2.2 单层沉积加工策略中工艺参数的选择

叠层模板电沉积需要多次的单层电沉积过程,因此,改善单层沉积层的表面质量及均匀性对沉积的有效进行和目标零件的尺寸精度都具有重要影响。上述仿真分析揭示了不均匀沉积生长的成因,而实验现象也印证了仿真的预测。

经实验,阴极电流密度对沉积表面形貌的影响情况存在以下规律^[7-10]。随着电流密度的增大,沉积表面粗糙度会不断加大。当电流密度 $\leq 3 \text{ A/dm}^2$ 时,表面形貌一般平整;而电流密度 $> 3 \text{ A/dm}^2$ 时,表面将开始粗糙,但根据加工经验,不用干预叠层沉积仍可以继续进行。但当电流密度 $> 7 \text{ A/dm}^2$ 后,表面出现大结瘤,如图 7 所示。

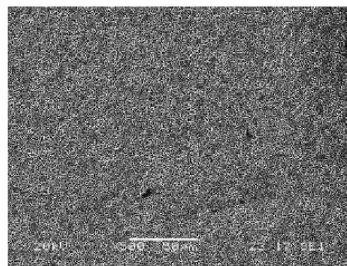
此时,工序须中断进行平坦化处理,程序较为复杂。显然,保证单层沉积层加工质量及加工顺利进行成为必须考虑的问题。综合考虑沉积速度和沉积质量,选用的最高电流密度为 7 A/dm^2 。

对于沉积层均匀性的分析比较,可引用不均匀度 σ 表示沉积层的不均匀性^[7]

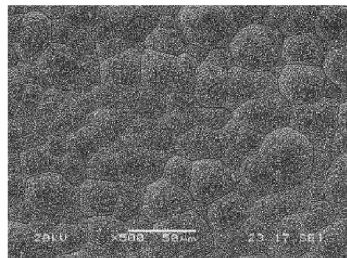
$$\sigma = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{h_{\text{av}}}$$

式中: h_{\max} 表示沉积层高度的最大值; h_{\min} 表示最小值; h_{av} 表示平均值。

图 8,9 分别给出了直流和脉冲状态下的沉积不均匀度。可以看出,无论是直流或脉冲沉积状



(a) $i = 3 \text{ A/dm}^2$



(b) $i = 7 \text{ A/dm}^2$

图 7 电流密度对沉积层表面形貌的影响

Fig. 7 Current density effect on deposit morphology

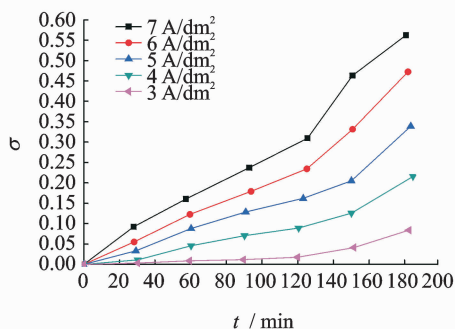


图 8 直流状态下不均匀度曲线

Fig. 8 Nonuniformity curves of direct current condition

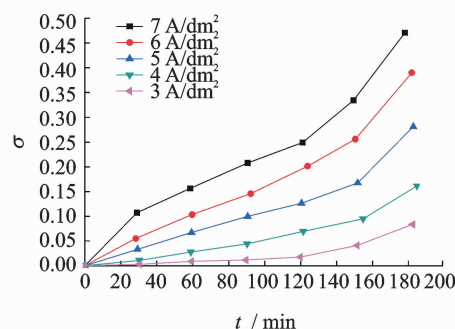


图 9 脉冲状态下不均匀度曲线

Fig. 9 Nonuniformity curves of pulse current condition

态,不均匀度都会随着加工时间不断地增加。对于直流曲线,在加工时间前 120 min 内,不均匀度处于缓慢增长阶段,之后,不均匀度开始了加速增长。这是由于边缘效应^[10-11]导致了沉积面的外缘处呈胞状生长,如不干预则胞状物会在数量和体积上

不断增大,其衍生物具有较大的比表面积,导致局部电流集中,造成沉积物加速生长,短时间内不均匀度会迅速恶化。与直流相比,脉冲电流也具有相似的变化趋势,但不均匀度的恶化速度比较稳定,这说明脉冲电流在延缓和减弱边缘效应上具有一定的作用。

从加工工序的角度考虑,如模板厚度较小,达到指定高度生长的沉积时间能控制在 120 min 左右(不同的沉积形状会略有差异),不均匀度的变化较稳定,可以不用干预。如超过此时间段、沉积高度较大,则必须采取相应的干预措施,如停机对凸起进行机加工处理,采用包括磨削等手段以使之平坦化;或为了保证加工的效率 and 连续性,使用平衡电场或屏蔽局部电场的方式等^[12]。对直流、脉冲、冷轧制备条件下得到的铜零件进行了层间结合强度的拉伸测试,结果如表 2 所示。

表 2 工艺方法对铜零件拉伸性能的影响

Tab. 2 Influence of process on tensile properties of copper parts

制备方法	Z 向抗拉强度/MPa
直流	349
脉冲	394
冷轧铜	303

表 2 中结果表明,试件 Z 向拉伸性能好于工业用冷轧铜,可知其层间结合强度可以满足普通或更特殊条件下的使用要求。

3 加工实例

3.1 外形设计

由于先期实验目的是优化参数、验证可行性,因此为简化制作难度,样模的几何轮廓设计得较为简单。图 10 为样模设计的立体视图,它的外延轮廓为直径 20 mm,高 5 mm 的圆柱体,圆柱体中有一贯穿上下底面的管道,母线为样条曲线。

样模虽然造型简单,但属于典型的非等截面几

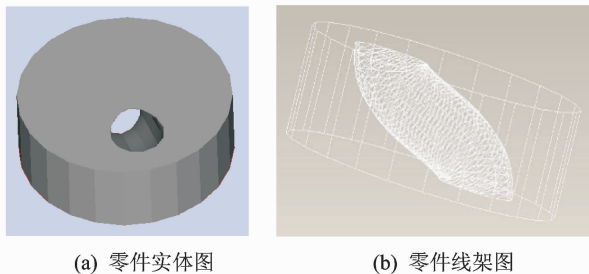


图 10 零件在 ProE 软件中的效果图

Fig. 10 Part sketch in drawing of ProE

何体。对于内部的曲形管道加工,传统的机加工方式如铣削和钻削均有较大的难度,而通过分层加工则可较简便地解决问题,体现出适合异型结构加工的特点。

3.2 软件分层和模板切割

分层操作中,可利用分层软件加载 STL 文件,并设置相应的切片厚度。切片后,软件会自动将切片图像保存为位图文件,并传送至数控雕刻设备进行切割。图 11 即为加工好的模板。使用前,可先打印出实际尺寸的图纸,将切制好的模板逐个与图纸比对,如一致无误,则可进行加工。

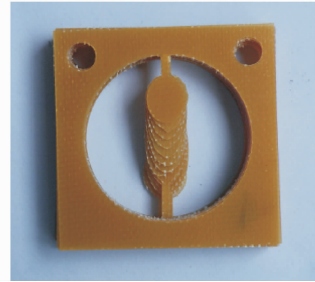


图 11 组合后的模板

Fig. 11 Assembled template

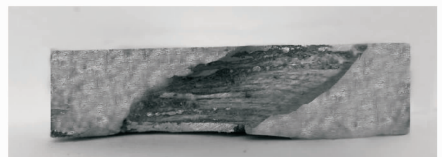
3.3 加工过程

在前述的工艺条件下,采用电流密度为 7 A/dm²,正负占空比分别为 80% 和 30%,频率 1 000 Hz 的双脉冲电流^[12]。进行了成形实验,加工后的金属铜零件如图 12(a)所示。

其轮廓清晰并具有良好的外形结构。底面因加工时附着在基体上,其整平性较好,粗糙度 Ra 值为 0.653 μm,而顶面则略微粗糙 Ra 值为



(a) 去除模板后的零件



(b) 零件内腔形貌

图 12 加工后的零件形貌

Fig. 12 Appearance of finished part

2.75 μm ,需要进行后处理。零件的侧面轮廓和管道结构比较清晰,但在分层处也存在着明显的界面,如果采用更小的分层厚度,则会有一定的改善。

图 12(b)为零件的剖面图,可以发现其内腔具有设计的几何特征,但分层处的特征比较明显,具有台阶效应,需要通过适当地打磨进行后续处理。

4 结 论

本文介绍了 LTE 方法的加工原理和工序,进行了仿真与电沉积成形加工实验,结果表明:

(1) 该沉积系统能够实现预期的成形功能,工序可满足异形零件的成形要求。通过拉伸强度测试,层间结合强度较好。

(2) 仿真和实验结果表明,单次沉积过程会存在沉积质量和均匀性的问题,需要从电流参数和沉积时间入手进行选择并加以控制和改善,必要时辅之以干预措施。

(3) 仿真仅反映了静态单层沉积过程,部分工序仍需人工操作,零件分层特征依然较为明显,这也成为后期研究的改进方向。

参考文献:

- [1] 王华明. 高性能金属构件增材制造技术 开启国防制造新篇章[J]. 国防制造技术, 2013(3):5-7.
Wang Huaming. High performance metal components additive manufacturing technology open a new chapter on defense manufacturing[J]. Defense Manufacturing Technology, 2013(3): 5-7.
- [2] 袁巨龙,张飞虎,戴一帆,等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.
Yuan Julong, Zhang Feihu, Dai Yifan, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 161-177.
- [3] 刘志东. 特种加工[M]. 北京: 北京大学出版社, 2013.
Liu Zhidong. Special process[M]. Beijing: Beijing Univesity Press, 2013.
- [4] 吕鏢,胡振峰,汪笑鹤,等. 电流密度对柔性摩擦辅助电沉积镍镀层质量的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(1): 137-144.
Lü Biao, Hu Zhenfeng, Wang Xiaohe, et al. Effect of current density on quality of electrodeposited Ni coatings by flexible friction[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(1): 137-144.
- [5] Jeswiet J, Geiger M, Engel U, et al. Metal forming process since 2000[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2008,1(1): 2-17.
- [6] 李圣怡. 国防工业的先进制造技术[J]. 国防科技, 2010, 31(2): 1-7.
Li Shengyi. Advanced manufacturing technology of the defense industry[J]. National Defense Science & Technology, 2010, 31(2): 1-7.
- [7] 刘海军. 微电铸器件均匀性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
Liu Haijun. Study on uniformity of micro-electroformed device [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [8] 田宗军,王桂峰,黄因慧,等. 射流电沉积快速成形金属镍制件[J]. 华南理工大学学报, 2010, 38(12): 41-44.
Tian Zongjun, Wang Guifeng, Huang Yinhui, et al. Rapid prototyping of nickel metal products via jet electrodeposition[J]. Journal of South China University of Technology, 2010, 38(12): 41-44.
- [9] Liu Chong, Ke Xue, Li Jingmin, et al. Optimization of micro electroforming process for fabrication of low deformation nickel mold [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2013,11(3): 271-276.
- [10] 赵阳培,黄因慧,赵剑峰,等. 射流电铸快速成型基础试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(4):458-461.
Zhao Yangpei, Huang Yinhui, Zhao Jianfeng, et al. Fundamental experiment of jet electroforming oriented by rapid prototyping[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 36(4): 458-461.
- [11] 明平美,朱荻,胡洋洋,等. 高深宽比微细结构电铸时传质过程数值分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8):195-201.
Ming Pingmei, Zhu Di, Hu Yangyang, et al. Numerical analysis on mass transport in micro electroforming of micro structures with high-aspect-ratio [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8): 195-201.
- [12] 范晖,田宗军,黄因慧,等. 叠层模板电沉积中沉积均匀性的实验研究[J]. 华南理工大学学报, 2009, 37(9):117-122.
Fan Hui, Tian Zongjun, Huang Yinhui, et al. Experimental investigation into deposition uniformity of laminated template electrodeposition[J]. Journal of South China University of Technology, 2009, 37(9): 117-122.