

## 屏蔽阳极模板随动式微细电铸的定域性研究

曾永彬<sup>1</sup> 胡洋洋<sup>2</sup> 曲宁松<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016;

2. 中国电子科技集团公司第二十八研究所, 南京, 210007)

**摘要:**屏蔽阳极模板随动式微细电铸技术是一种新颖的金属微结构加工方法,具有工艺简单、成本低以及高深宽比微结构加工能力的优点。电沉积定域性是影响其复制精度和分辨率的核心因素。对电沉积定域性进行了理论分析和实验研究,结果表明:极间距对定域性的影响较大,杂散沉积宽度随着极间距线性增大;而在极间距一定时,极间电压(即电沉积电流密度)、屏蔽胶膜厚度及微槽特征宽度不影响电沉积的定域性。

**关键词:**微细电铸; 定域性; 微结构

中图分类号: TQ153.44

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2014)05-0786-07

### Localization of Micro Electroforming by Using Movable Patterned Anode

Zeng Yongbin<sup>1</sup>, Hu Yangyang<sup>2</sup>, Qu Ningsong<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. The 28<sup>th</sup> Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing, 210007, China)

**Abstract:** Micro electroforming by using a movable patterned anode is a novel process to fabricate metal microstructure, which is simple, cost effective and able to fabricate high-aspect-ratio microstructure. The accuracy and resolution of the proposed micro electroforming process are significantly affected by the localization of electrodeposition. The localization of electrodeposition is studied theoretically and experimentally. The results indicate that the width of stray deposition is proportionally linear to the gap between the anode and the cathode; however, it has nothing to do with the current density, the thickness of the anode insulation layer and the width of the feature.

**Key words:** micro electroforming; localization; microstructure

随着微机电系统(Micro electromechanical system, MEMS)的发展,具有特定功能或满足特定需要的复杂形状金属微结构器件突显其重要性,其制造技术成为微细加工领域一项重要内容,已经引起国内外研究机构的极大重视<sup>[1-10]</sup>。金属微结构加工技术主要有:LIGA和LIGA-like技术、微细电铸、微细电火花加工技术、微细电解加工技术、高能束(激光束、离子束、电子束)加工技术以及超

精密机械加工,等等。这些工艺技术各有其优势和特征,形成了微细加工技术群,并在一定程度上满足了丰富多样的MEMS加工要求。

屏蔽阳极模板随动式微细电铸技术是新近开发的一种金属微结构加工方法,是一项包含了光刻技术、电沉积技术以及数控技术于一身的集成制造技术,它利用电沉积原理,选择性地沉积金属,将金属微结构分层叠加起来<sup>[11,12]</sup>。屏蔽阳极模板随动

基金项目:国家自然科学基金(51375238)资助项目;江苏省自然科学基金(BK20131361)资助项目。

收稿日期:2014-05-10;修订日期:2014-07-10

通信作者:曾永彬,男,副教授,E-mail:binyz@nuaa.edu.cn。

式微细电铸技术具有工艺过程简单、成本低和高深宽比微结构加工能力的特点,是微细加工技术群的补充。

屏蔽阳极模板随动式微细电铸的加工结果受电沉积区域性、电沉积参数、液相传质、光刻工艺、过程控制、运动控制等多种因素的影响,其中电沉积区域性是其中的核心因素,直接影响电沉积时对屏蔽膜图形的复制精度和分辨率。本文将对电沉积区域性进行理论分析和实验研究。

## 1 工艺路线

屏蔽阳极模板随动式微细电铸技术具有独特的电极结构、沉积方式和过程控制。首先采用光刻工艺制造带有特定镂空光刻胶图案的屏蔽阳极模板,然后进行微细电铸。阳极模板的金属基底具有双重作用,一方面作为屏蔽膜的支撑,另一方面在电铸过程中充当阳极。

利用屏蔽模板随动微细电铸技术加工金属结构的具体工艺过程如图 1 所示,即:

### (1) 电沉积第一层金属

将屏蔽模板与阴极贴合或留微量间隙  $G_0$ , 接通阴阳极间电源,电沉积第一层金属,如图 1(a) 所示。

### (2) 更新电解液

一层金属电铸结束后,断开阴阳极间的电源,屏蔽阳极模板与阴极分离一定距离,电铸液从两者之间的间隙流过以更新屏蔽阳极模板微腔中的电铸液,如图 1(b) 所示。

### (3) 电沉积其他层金属

屏蔽阳极模板向阴极移动,使两者之间的间距为  $G_i$ , 而后接通电源,电沉积其他层金属,如图 1(c) 所示。

### (4) 重复图 1 (b,c) 步骤

每次循环,根据电铸产物的高度  $H_{i-1}$  的增加,相应增大微量间隙  $G_i$ , 直到达到总厚度要求,如图 1(d) 所示。最后得到如图 1(e) 所示的金属微结构。

从工艺过程可见,屏蔽阳极模板随动式电铸技术采用光刻胶对阳极进行屏蔽,而作为电沉积表面的阴极是完全裸露的,沉积过程中屏蔽阳极模板与阴极存在一定的间距,即使这个间距十分微小,也会引起电场的发散使金属在光刻胶图形对应的区域外析出,形成杂散沉积区,从而影响加工精度和分辨率。下面通过有限元电场分析与实验研究相结合的方法来研究屏蔽阳极模板随动式微细电铸

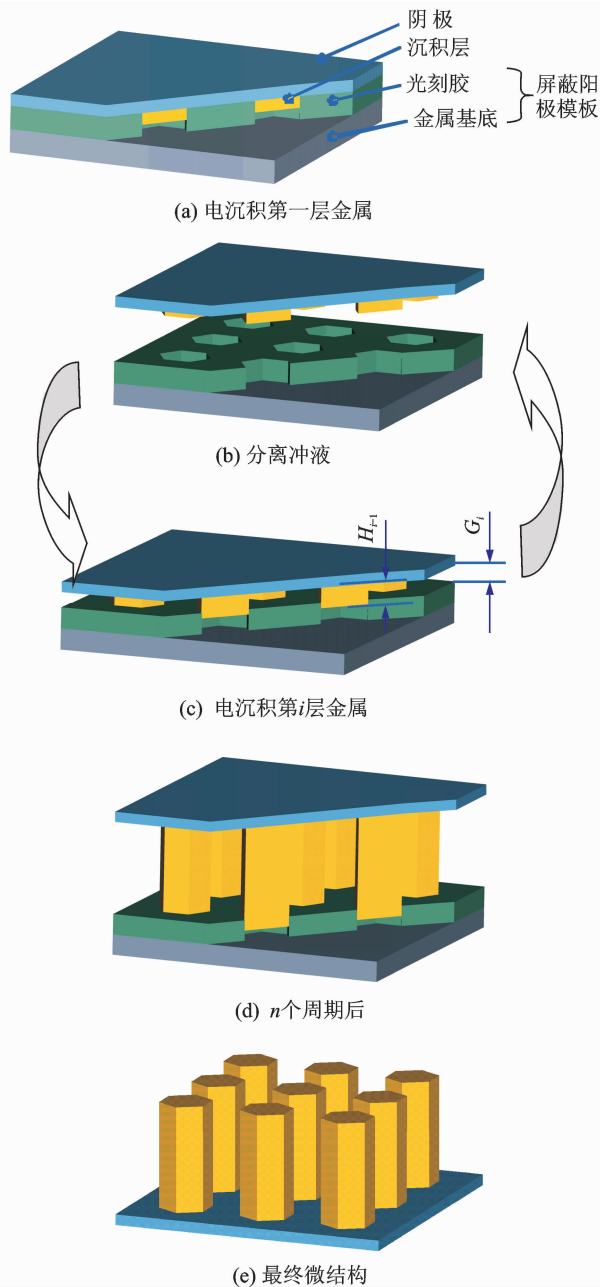


图 1 屏蔽模板随动式微细电铸工艺路线

Fig. 1 Technical route of micro electroforming by using a movable patterned anode

技术中的定域性问题。

## 2 电沉积区域性概念

区域性是指沉积在阴极上的微结构图形投影轮廓与屏蔽阳极模板上光刻胶图形在阴极上投影轮廓的一致性程度。屏蔽阳极模板上光刻胶图形在阴极表面的投影区为定域沉积区,或主动沉积区;投影区以外而产生电沉积的区域,称为杂散沉积区,或被动沉积区,如图 2 所示,图中蓝色表示定域沉积区,而红色表示杂散沉积区,  $L$  为单边杂散沉积宽度。区域性直接影响电沉积时对屏蔽膜图

形的复制精度, 定域性越好, 复制精度就越高; 同时, 也影响该技术的分辨率, 即将相邻图形区分出来的能力, 定域性越好, 分辨率就越高。理想情况下, 电沉积只在定域沉积区内发生, 阴极图形与阳极图形完全一致, 也就是不存在杂散沉积区。

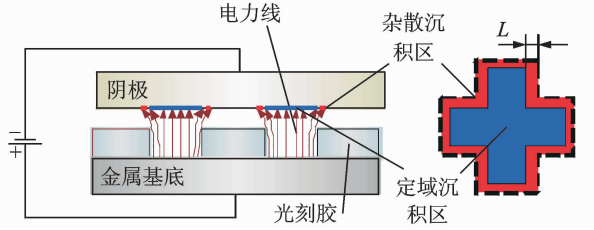


图2 电沉积定域性示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electrodeposition localization

### 3 定域性数值分析

电铸时, 在阴极上要沉积出金属, 阴极的电极电位必须达到某一最小值, 此时所对应的能析出金属的最小电流密度称为临界电流密度 ( $i_{\text{临}}$ )。临界电流密度的大小取决于被沉积金属和基体金属的本性以及电解液的组成和温度等, 如酸性电解液镀铜时  $i_{\text{临}}$  为几个  $\text{mA}/\text{dm}^2$ , 而在镀铬时则为  $10 \sim 20 \text{ A}/\text{dm}^2$  [13]。根据欧姆定律, 阴极面上电流密度为电导率  $\kappa$  与电场强度的乘积, 即  $i_n = \kappa E_n$ 。如果该区域的电场使电流密度大于金属析出的临界电流值  $i_{\text{临}}$ , 金属就会沉积在该区域。因为镀铜时  $i_{\text{临}}$  值很小, 可近似为零 (即认为只在电场强度为零的区域金属才不会析出), 因此, 可以从电场在阴极沉积面上的分布情况来判断定域性。

#### 3.1 极间电场数学模型

屏蔽阳极模板随动式电沉积时, 阳极表面被模板分割成多个不连通的区域, 每个区域可以看作是一独立的电极。为研究问题方便, 以图3所示的单一槽特征为研究对象。图3中  $w$  为槽特征宽度,  $h$  为槽深,  $G$  为阴极与光刻胶膜表面的距离。

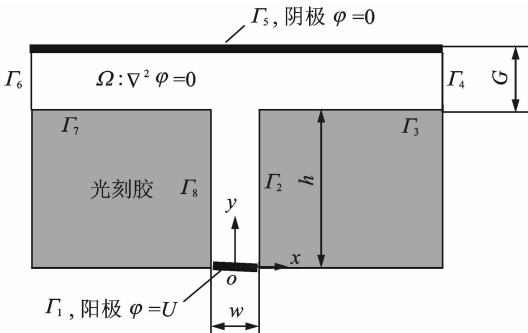


图3 极间封闭区域内电场模型

Fig. 3 Electric model of close region between electrodes

电沉积过程中, 如果取足够小的时间间隔  $\Delta t$ , 可以近似地认为此沉积时间内阴极沉积面处于平衡状态, 电场为静态。不考虑电化学极化和浓差极化, 假设加工间隙内电解液电导率为常数, 忽略边界效应, 将极间电场近似地看作稳恒电场, 同时假设电解液各向同性。在极间间隙内, 电场服从 Laplace 方程

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

电沉积时, 阴极接电源的负极、阳极接电源正极, 因此在阴、阳表面形成两个不同电位的等位面, 也就是在两个边界上各加上第一类边界条件

$$\varphi|_{\Gamma_1} = U \quad (\text{阳极}) \quad (2)$$

$$\varphi|_{\Gamma_3} = 0 \quad (\text{阴极}) \quad (3)$$

此外, 电铸中除去阴、阳极边界外, 由屏蔽模板形成的绝缘边界和其他边界应该封闭, 或近似封闭, 这些边界满足第二类边界条件

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad (\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_6, \Gamma_7, \Gamma_8 \text{ 边界}) \quad (4)$$

结合式(1~4), 得到描述屏蔽阳极模板电铸过程电场分布的数学模型

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi|_{\Omega} = 0 \\ \varphi|_{\Gamma_1} = U \\ \varphi|_{\Gamma_3} = 0 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n}|_{\Gamma_{2,3,4,5,6,7,8}} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

#### 3.2 基于电场的定域性分析

以3.1中所述方法建立阴阳极间电场模型, 在有限元软件 ANSYS 中求解, 计算完成后提取阴极表面上关键点的电场值, 观察其分布情况, 以此来研究电场对定域性的影响。采用静电场分析技术, 求解过程中保持电极不动, 即极间距固定不变。有限元分析过程为: 建立模型  $\rightarrow$  选择单元类型  $\rightarrow$  设置物性参数  $\rightarrow$  加载及设置边界条件  $\rightarrow$  划分网格  $\rightarrow$  有限元求解  $\rightarrow$  后处理  $\rightarrow$  显示电场分布云图  $\rightarrow$  提取阴极上关键点电场值。

为了考察某一因素对定域性的影响, 分析时只改变该因素的值, 而其他各因素均保持不变。由于所分析的槽特征关于  $y$  轴对称, 在对称轴  $y$  的两侧电场分布情况完全一致, 因此可只画出其关于对称轴  $y$  一侧的电场分布情况。为便于比较, 将阴极上的电场强度经过归一化处理 (即每次分析后, 阴极上各点的电场强度都除以本次分析所得的阴极上的最大电场强度), 其结果如图4~7所示。

图4表示  $G=10 \mu\text{m}$  时极间电压对阴极表面

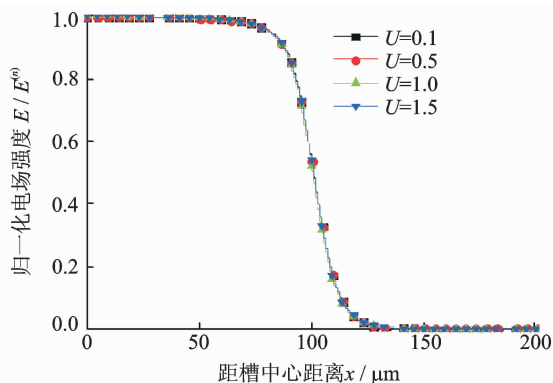


图 4 极间电压对阴极表面电场分布的影响

Fig. 4 Effects of voltage on electric distribution

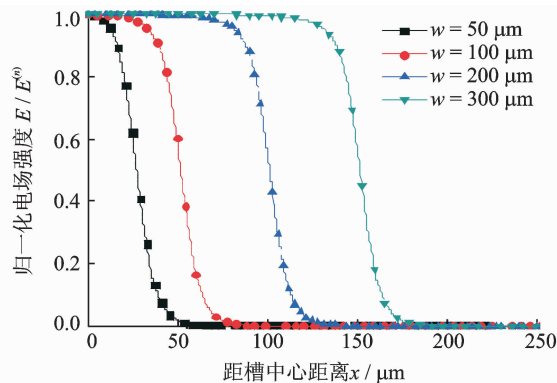


图 6 微槽特征宽度对阴极表面电场分布的影响

Fig. 6 Effects of microgroove width on electric distribution

电场分布的影响,分析时保持  $w = 200 \mu\text{m}$ ,  $h = 150 \mu\text{m}$ ,  $G = 10 \mu\text{m}$  不变,  $U$  分别取为 0.1, 0.5, 1, 1.5 V。极间电压的变化通过在阳极上施加不同的电压值来实现,可表示电沉积时采用不同的电流密度。

图 5 表示  $G = 10 \mu\text{m}$  时光刻胶膜厚度对阴极表面电场分布的影响,分析时保持  $w = 200 \mu\text{m}$ ,  $U = 1 \text{ V}$ ,  $G = 10 \mu\text{m}$  不变,  $h$  分别取为 50, 75, 100, 150, 200, 300  $\mu\text{m}$ 。

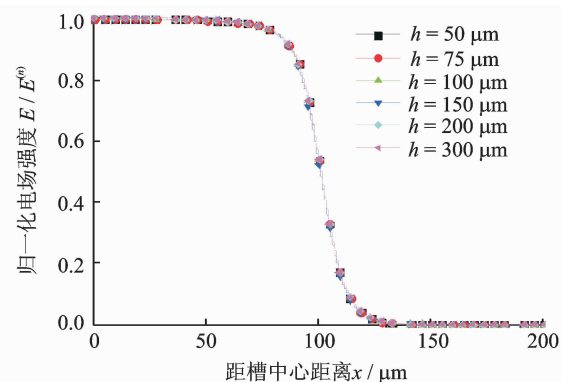


图 5 光刻胶膜厚度对阴极表面电场分布的影响

Fig. 5 Effects of resist film thickness on electric distribution

图 6 表示  $G = 10 \mu\text{m}$  时,微槽特征宽度对阴极表面电场分布的影响,分析时保持  $G = 10 \mu\text{m}$ ,  $h = 150 \mu\text{m}$ ,  $U = 1 \text{ V}$  不变,  $w$  分别取 50, 100, 200, 300  $\mu\text{m}$ 。

在微槽特征宽度、屏蔽膜厚度、极间电压一定时( $w = 200 \mu\text{m}$ ,  $h = 150 \mu\text{m}$ ,  $U = 1 \text{ V}$ ),极间距  $G$  取不同值( $G$  分别取 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60  $\mu\text{m}$ ),考察极间距  $G$  对定域性的影响,结果如图 7, 8 所示。

由数值分析结果来看,在极间距一定时,无论极间电压(即电沉积电流密度)、屏蔽模板光刻胶厚

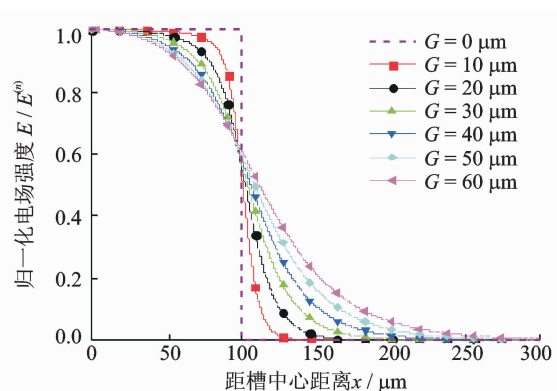


图 7 极间距对阴极表面电场分布的影响

Fig. 7 Effects of inter-electrode gap on electric distribution

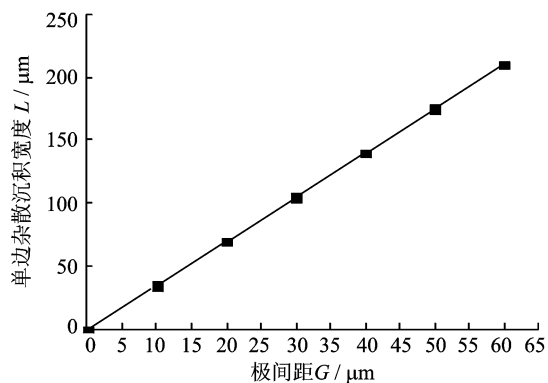


图 8 极间距对单边杂散沉积宽度的影响

Fig. 8 Effects of inter-electrode gap on stray deposition range

度及微槽特征宽度怎么变化,阴极表面电场分布不改变,这说明:极间电压(即电沉积电流密度)、屏蔽模板光刻胶厚度及微槽特征宽度不影响电沉积的定域性。但是,极间距  $G$  对定域性的影响较大,杂散沉积宽度随着  $G$  线性增大。这是由于:极间间隙不为零时,阴极表面上的电场不完全集中在微槽对应的区域,而沿极间间隙向外延伸,形成一定的梯度,经过一段距离后降为零。当阴阳极间距较小



时,电场较集中,定域性好。阴极与屏蔽膜紧密贴合( $G=0\ \mu\text{m}$ )时,电场完全限制在槽对应的区域内(图7中的虚线),定域性最高。此后,随着阴阳极间距增大,电场分布区域变宽,定域性随之降低。

屏蔽阳极模板随动式电铸技术是一个批量图形转印加工工艺,一次可完成多个微结构器件的电铸成型。当进行批量图形转印加工时,阳极模板上不再是单个图案,而是按一定规律排列的图形阵列,这些图形的排列方式、密集程度等都会对最后的电铸结果产生影响。对于均布图形阵列的分布密度可用电活性面积密度(Active area density, AAD)来表示,它对加工结果有直接的影响。AAD代表单位面积上的电活性面积,对于屏蔽阳极模板,即为某一区域中阳极可溶解面积(屏蔽膜镂空图案所对应的面积) $A_{\text{act}}$ 与该区域的平面投影面积 $A_{\text{sup}}$ 之比

$$\text{AAD} = \frac{A_{\text{act}}}{A_{\text{sup}}} \quad (6)$$

当阳极表面没有用光刻胶进行图形化而完全裸露时 AAD 取值为 1, 见图 9(a); 当其表面分布不同密度的光刻胶图形时, AAD 取值小于 1, 如图 9 图(b, c); 在特殊情况下, 如果阳极表面具有三维形貌, 则金属可溶解的面积将可能大于区域的平面投影面积, 见图 9(d), 其 AAD 为 2。屏蔽阳极模板随动式电铸技术采用光刻胶对阳极进行屏蔽, 其 AAD 值小于 1。

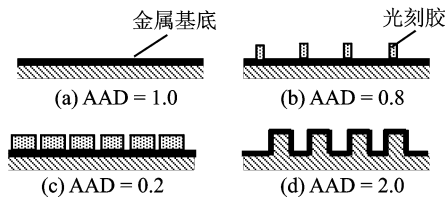


图9 AAD示意图

Fig. 9 Schematic diagrams of AAD

AAD 值大, 说明屏蔽阳极模板上光刻胶图形阵列密集程度高, 相邻图形间距小。在某一极间距  $G$  加工时, 如果 AAD 值较大使得相邻图形间距小于在该  $G$  下两倍单边杂散沉积宽度, 则整个阴极表面都有电场存在, 图形间有少量金属析出, 沉积出的金属微结构不能保持独立而会相互联通。同样, AAD 值一定时, 如果极间距  $G$  大到使相邻图形间距小于在该  $G$  下两倍单边杂散沉积宽度, 相邻图形也会联通。

图 10 以 3 个特征为例, 保持  $w=200\ \mu\text{m}$ ,  $h=150\ \mu\text{m}$ ,  $d=200\ \mu\text{m}$ ,  $U=1\ \text{V}$ , 分析了  $\text{AAD}=0.5$

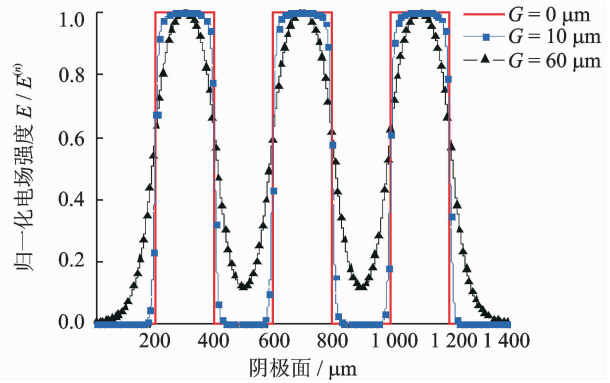


图10 多个结构同时沉积时阴极表面电场分布

Fig. 10 Electric distribution of multiple deposited structures on the cathode surface

时, 极间距  $G$  对阴极表面电场分布的影响。可见, 当  $G=0$  和  $G=10\ \mu\text{m}$  时, 各图形可保持独立; 而  $G=60\ \mu\text{m}$  时, 相邻图形间的电场已达到相当强度足以使金属析出, 图形不能保持独立。因此, 进行批量图形转印时要达到较高的分辨率就必须综合考虑 AAD 与极间距  $G$  的相互关系, 才能得到相互独立的图形, 如: AAD 较大时, 加工时就应保持较小的阴阳极间距  $G$ 。

## 4 定域性实验研究

由前面的分析可知, 单个特征电沉积时, 定域性只与极间距有关, 且单边杂散沉积的宽度与极间距成正比例。下面通过实验来研究定域性与极间距的关系。电沉积实验在焦磷酸铜电解液中进行, 阴极为圆周经绝缘处理的不锈钢圆棒, 其一端与机床相连, 一端作为沉积面。因为不锈钢基底为亮白色, 而沉积的铜为褐色, 因此可根据颜色来区别沉积区域, 加工后在工具测量显微镜(Mitstoyo, 日本)下测量沉积区域的大小, 用所测值减去屏蔽阳极模板上光刻胶图形的尺寸即可得杂散沉积的宽度。

由图 11 可见, 实验测得的单边杂散沉积宽度与基于电场的理论分析值基本一致, 单边杂散沉积宽度与极间距成正比例关系。实测值与理论分析值之间的差异主要是由实验中极间距控制误差及测量误差所引起。

图 12 为不同极间距下电沉积的微十字结构, 从图中可清楚地看出杂散沉积随极间距的变化情况。极间距较小时( $G=0, 10, 20\ \mu\text{m}$ ), 沉积区域轮廓与十字相似, 定域性较高; 而极间距大于等于  $30\ \mu\text{m}$  时( $G=30, 50, 60\ \mu\text{m}$ ), 整个沉积区域已为一圆形, 定域性差。极间距一定时, 沿十字轮廓四周都存在杂散沉积区, 且杂散沉积宽度基本均匀。

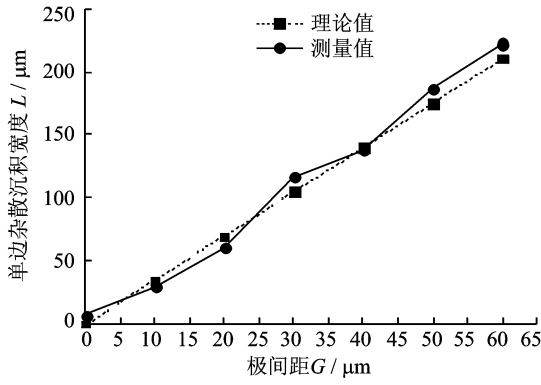


图 11 单边杂散沉积宽度随极间距变化曲线

Fig. 11 Variation of stray deposition width with inter-electrode gap

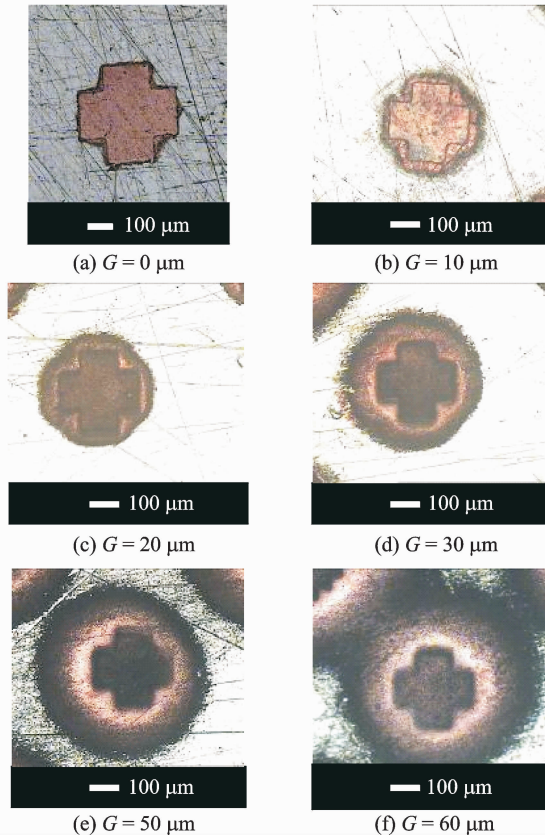


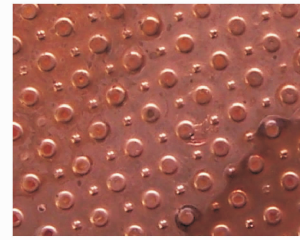
图 12 不同极间距下电沉积的微十字结构

Fig. 12 Micro cross structures deposited of different inter-electrode gaps

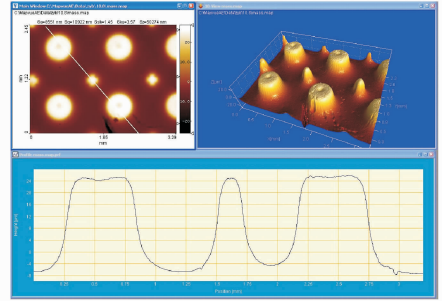
图 13 为在  $AAD=0.4$ , 加工时极间距为  $100 \mu\text{m}$  下电沉积的实验结果, 可见, 由于极间距过大, 沉积定域性差, 分辨率低, 整个阴极表面都呈褐色, 表明整个阴极表面都有金属析出, 相邻微结构彼此联通, 且微结构与阴极基底的结合处不是直角, 而成圆弧过渡。

### 5 高定域性加工实例

图 14, 15 为保持极间间距  $G$  等于零时(即阴极表面上非电沉积区域与光刻胶表面贴合), 电铸



(a) 显微镜照片



(b) 轮廓图

图 13 大极间距导致电沉积微结构相互联通

Fig. 13 Linked micro structures deposited under large inter-electrode gap

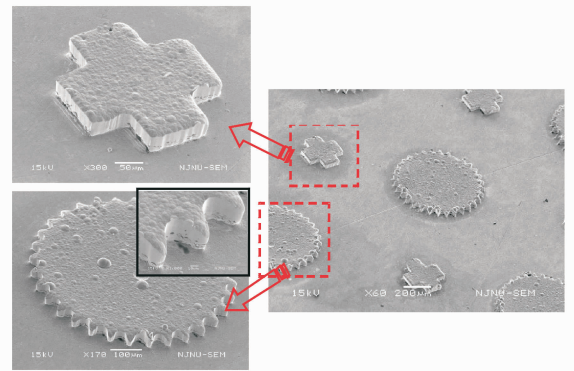


图 14 电铸微齿轮及十字结构 SEM 图

Fig. 14 SEM graphs of deposited micro cross and micro gear

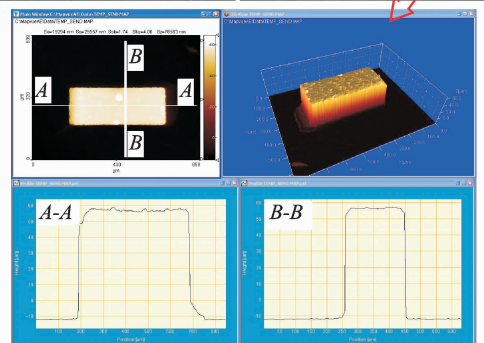
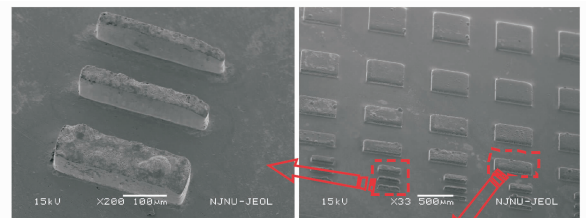


图 15 电铸微结构

Fig. 15 Deposited micro structures

得到的各种金属微结构。可见,这种方式下获得的微结构轮廓清晰、侧壁陡直,表明屏蔽阳极模板能很好的控制电沉积区域,沉积的金属亦能够高精度地复制胶模形状。

## 6 结 论

本文首先根据电场的基本理论建立起屏蔽阳极模板随动式微细电铸技术的极间电场模型,并利用该模型对加工定域性进行分析和模拟,然后开展了电沉积定域性的实验研究,结果表明:

(1)沉积定域性随屏蔽模板表面与阴极表面之间的距离(极间距)的增大而降低,微结构轮廓的陡直度也变差。

(2)在极间距一定时,极间电压(即电沉积电流密度)、屏蔽模板厚度及微槽特征宽度不影响电沉积的定域性。

(3)当极间距不为零时,微结构与阴极基底的结合处不是直角,而成圆弧过渡,且极间距越大,过渡圆弧的半径就越大。

(4)当极间距始终保持为零时,可以获得侧壁陡直的微结构。

### 参考文献:

- [1] Shin H S, Park M S, Kim B H, et al. Recent researches in micro electrical machining [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 12 (2): 371-380.
- [2] Rajurkar K P, Levy G, Malshe A, et al. Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2006, 55 (2): 643-666.
- [3] Byun J W, Shin H S, Kwon M H, Kim B H, et al. Surface texturing by micro ECM for friction reduction [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2010, 11 (5): 747-753.
- [4] Chung C K, Lin C J, Chen C C, et al. Combination of thick resist and electroforming technologies for monolithic inkjet application [J]. *Microsystem Technologies*, 2004, 10 (6): 462-466.
- [5] Khan Y, Falih H A, Zhang Y G, et al. Two step

controllable electrochemical etching of tungsten probe microscopy tips [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(6): 1-7.

- [6] Jin W, Dong X Z, Zhao Z S, et al. Effects of laser scanning conditions on metallic micro/nanostructures in multiphoton nanofabrication [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011, 56 (12): 58-62.
- [7] Cheng X, Wang Z G, Nakamoto K. A study on the micro tooling for micro/nano milling [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 53 (5/6/7/8): 523-533.
- [8] Zeng Y B, Yu Q, Wang S H, et al. Enhancement of mass transport in micro wire electrochemical machining [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2012, 61(1): 195-198.
- [9] Pham D T, Dimov S S. Micro-EDM-recent developments and research issues [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149 (1): 50-57.
- [10] 狄士春,黄瑞宁,迟关心,等. 微细电火花线切割加工关键技术[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(1): 221-226.  
Di Shichun, Huang Ruining, Chi Guanxin, et al. Key technology of micro wire electrical discharge machining [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(1): 221-226.
- [11] Zhu D, Zeng Y B. Micro electroforming of high-aspect-ratio metallic microstructures by using a movable mask [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2008, 57(1): 227-230.
- [12] 曾永彬,朱获,明平美,等. 屏蔽模板随动式微细电铸技术基础研究[J]. *中国机械工程*, 2007, 18(16): 1891-1895.  
Zeng Yongbin, Zhu Di, Ming Pingmei, et al. Fundamental research on micro electroforming technology of metal microstructures by using a movable patterned anode [J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(16): 1891-1895.
- [13] 覃奇贤,郭鹤桐. 电镀原理与工艺[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1993.  
Tian Q X, Guo H T. Principle of electroplating technology [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1993.