

文章编号 1004-924X(2010)02-0363-06

# UV-LIGA 和微细电火花加工技术 组合制作三维金属微结构

杜立群<sup>1,2</sup>, 莫顺培<sup>1</sup>, 张余升<sup>2</sup>, 刘冲<sup>1,2</sup>

- (1. 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 116024;
2. 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 116024)

**摘要:**为了制作三维金属微结构,研究了UV-LIGA和微细电火花加工技术组合的工艺方法。使用UV-LIGA技术制作了准三维金属微结构,然后,对该微结构进行微细电火花加工制作三维金属微结构。使用提出的方法制作出了局部为梯形凸台和锥形凹槽三维微结构的镍模具,给出了梯形凸台和锥形凹槽的尺寸。分析了微细电火花加工中放电参数对表面粗糙度的影响,在工作电压为65 V,标称电容为100 pF时得到了 $R_a$ 为 $0.08 \mu\text{m}$ 的微细电火花加工表面。研究结果表明,使用该方法可实现三维金属微结构的制作;通过减小工作电压和标称电容的方法可降低微细电火花加工的表面粗糙度。

**关键词:**三维金属微结构;UV-LIGA;微细电火花加工;组合制作;表面粗糙度

**中图分类号:**TG661 **文献标识码:**A

## Fabrication of 3D metal microstructure based on UV-LIGA and micro-EDM technology

DU Li-qun<sup>1,2</sup>, MO Shun-pei<sup>1</sup>, ZHANG Yu-sheng<sup>2</sup>, LIU Chong<sup>1,2</sup>

- (1. *Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;*
2. *Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)*

**Abstract:** In order to fabricate 3D metal microstructures, a combined machining process based on UV-LIGA and micro Electrical Discharge Machining (EDM) technology was proposed. Firstly, a quasi-3D metal microstructure was fabricated by UV-LIGA technology, and then a 3D metal microstructure was fabricated by micro-EDM. A 3D nickel mold with the local trapezium protrusion and taper groove was fabricated by this method and the sizes of the trapezium protrusion and taper groove were given in detail. Meanwhile, the influence of micro-EDM discharge parameters on the surface roughness was analyzed. The results show that the surface roughness is  $0.08 \mu\text{m}$ , when the operating voltage and nominal capacitance are 65 V and 100 pF respectively. The research results demonstrate that the 3D metal

收稿日期:2009-07-16;修订日期:2009-10-23.

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, No. 50775020)

microstructure can be fabricated by this method and the surface roughness will decrease by reducing the operating voltage and nominal capacitance.

**Key words:** 3D metal microstructure; UV-LIGA; micro Electrical Discharge Mechining(EDM); surface roughness

## 1 引言

随着微机电系统(MEMS)的深入研究和快速发展,具有三维金属微结构的微小型器件由于体积小、重量轻、能耗低、灵敏度高等特点,在精密机械、生物医疗、国防、航空航天、核工业等领域有着广泛的应用前景<sup>[1]</sup>,而三维金属微结构的成功制作是微小型器件实用化的基础,因此,研究制作三维金属微结构的微细加工技术具有重要意义。

目前,对于制作三维金属微结构微细加工技术的研究主要集中在 UV-LIGA 技术和微细电火花加工技术两方面。UV-LIGA 技术由于加工精度高和适合制作高深宽比、侧壁垂直金属微结构的特点,成为重要的微细加工技术。但 UV-LIGA 技术是一种平面制作工艺,不能直接用于制作三维金属微结构。T. Tanaka<sup>[2]</sup>和陈祥猷<sup>[3]</sup>等人通过对 UV-LIGA 技术改进制作出了三维金属微结构,但些方法制作的三维金属微结构形状都比较单一。微细电火花加工技术由于为非接触加工且具有可实现自由曲面加工的特点,成为制作三维金属微结构的主要加工技术。余祖元<sup>[4-5]</sup>和佟浩<sup>[6-7]</sup>等人利用微细电火花铣削加工技术制作了不同形状的三维金属微结构,但在微细电火花成形加工中存在微细复杂成形电极本身制造困难的问题,而且在微细电火花铣削加工中由于电极损耗严重,使得在进行大面积材料去除加工时加工效率和加工精度都很低。

针对微细电火花成形加工中制作微细复杂成形电极困难的问题,K. Takahata<sup>[8]</sup>和邹丽芸<sup>[9]</sup>等人提出了使用 LIGA 技术制作微细复杂成形电极的方法。该方法将 LIGA 与微细电火花加工技术的优点相结合,能够高效率地制作复杂形状微结构,但该方法中用 LIGA 技术制作的成形电极本身不是三维的,因此也难以实现三维金属微结构的加工。目前对于将 UV-LIGA 和微细电火花加

工技术组合制作三维金属微结构的研究还很少有相关报道。

本文对 UV-LIGA 和微细电火花加工技术组合制作三维金属微结构的方法做了初步的研究。通过对 UV-LIGA 制作的准三维金属微结构进行微细电火花加工来制作三维金属微结构。根据聚合物微流控芯片金属模具的结构需要,使用该方法制作出了局部为梯形凸台和锥形凹槽微结构,其余部分为侧壁垂直微结构的镍模具。

## 2 制作工艺

UV-LIGA 和微细电火花加工技术组合制作三维金属微结构的过程主要分为两步:(1)使用 UV-LIGA 技术制作侧壁垂直的准三维金属微结构;(2)使用微细电火花加工技术对该金属微结构进行加工,以获得三维金属微结构。制作工艺流程如图 1 所示。

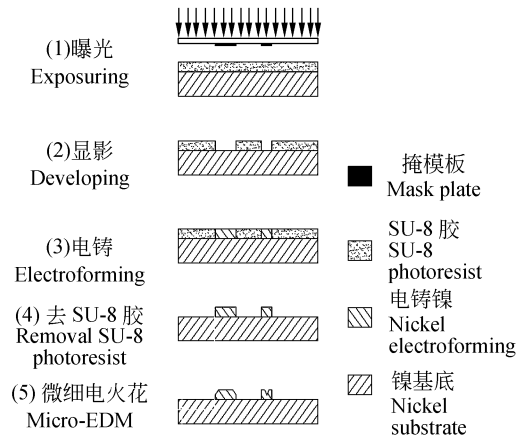


图 1 三维金属微结构制作工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart of fabricating 3D metal microstructure

具体实施步骤如下:

(1)使用设计的掩模版图形,对涂在镍基底上的 SU-8 胶进行紫外线曝光;

(2)使用专用显影液显影,去除未曝光的 SU-8 胶,得到所需的胶模微结构;

(3)将胶模微结构放入电铸液中电铸,在胶模凹槽中生长出金属镍;

(4)对电铸的镍微结构表面研磨抛光后去除剩余的 SU-8 胶,得到侧壁垂直的准三维镍微结构;

(5)使用圆柱形电极和圆锥形电极对制作的准三维镍微结构进行微细电火花加工,得到局部为三维的镍微结构。

## 3 实验与结果

### 3.1 UV-LIGA 加工

首先在镍基底上旋涂 SU-8 光刻胶,厚度约为  $100\ \mu\text{m}$ ;然后在热板上进行前烘,温度为  $85\ ^\circ\text{C}$ ,时间为  $70\ \text{min}$ 。前烘后进行紫外线曝光,时间为  $6\sim 8\ \text{min}$ ;接着进行后烘,温度为  $85\ ^\circ\text{C}$ ,时间为  $3\sim 5\ \text{min}$ 。使用专用显影液显影  $4\sim 6\ \text{min}$ ,得到 SU-8 胶模结构;显影后在氨基磺酸盐溶液中进行微电铸,在胶模中生长金属镍,电铸时间为  $6\ \text{h}$ 。最后将电铸镍研磨抛光并去除剩余的 SU-8 胶,从而得到如图 2 所示的侧壁垂直的准三维微结构。其特征尺寸为:长度  $41\ \text{mm}$ ,宽度  $70\ \mu\text{m}$ ,高度  $50\ \mu\text{m}$ 。

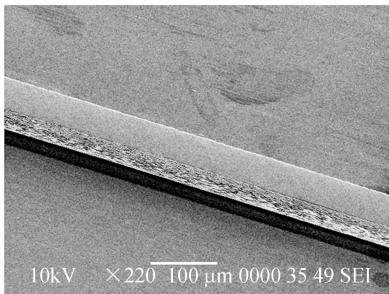


图 2 UV-LIGA 制作的准三维镍微结构

Fig. 2 Quasi-3D nickel microstructure fabricated by UV-LIGA

### 3.2 微细电火花加工

#### 3.2.1 梯形凸台三维微结构的制作

在大连理工大学自主研发的卧式微细电火花加工机床上使用圆柱形微细电极对 UV-LIGA 制

作的准三维镍微结构进行加工,得到局部为梯形凸台的三维微结构。加工过程如图 3 所示。

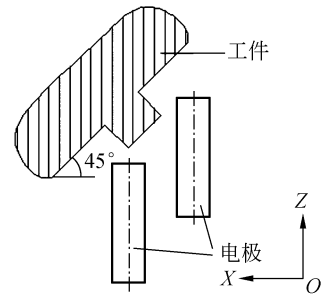


图 3 梯形凸台微结构加工示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fabricating microstructure with trapezium table

保持准三维微结构的棱线与机床 Y 轴平行,并使工件表面与 XOY 面之间的夹角为  $45^\circ$ 。首先,采用线电极放电磨削(WEDG)的方法,将直径  $\varphi 300\ \mu\text{m}$  的成品钨丝加工成直径  $\varphi 80\ \mu\text{m}$  的圆柱电极,再分别使用圆柱电极的端面和侧面加工微结构的左侧和右侧。机床 Z 向和 X 向的进给量与放电间隙决定了加工面的宽度,Y 向的位移与电极直径和放电间隙则共同决定了加工面的长度。加工条件为:电极材料为钨,直径  $\varphi 80\ \mu\text{m}$ ,工件材料为电铸镍,工作电压  $65\ \text{V}$ ,标称电容  $100\ \text{pF}$ ,主轴转速  $300\ \text{r/min}$ ,正极性加工,工作液为煤油。

在一次装夹中加工出两个面,有利于提高加工精度,然而由于左右斜面加工方式不同会产生如下问题:(1)两斜面在始末位置处形状不同;(2)在 Y 向位移相同的情况下两斜面长度不等。通过电极底面加工时在始末位置加入 X 向移动和

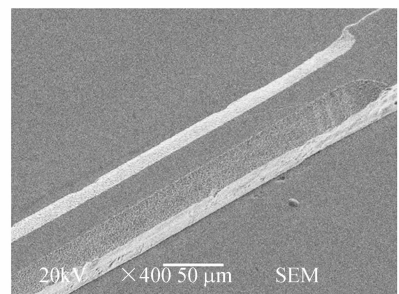


图 4 局部为梯形凸台的三维镍微结构

Fig. 4 Three dimensional nickel microstructure with trapezium table in local

使用较小直径电极的方式可改善斜面始末位置的形状。当电极直径和进给量确定时,计算可得电极侧面加工的斜面在长度方向的差异,通过  $Y$  向位移补偿可使两斜面长度一致。

图 4 为局部为梯形凸台三维镍微结构的 SEM 照片。微结构的尺寸为:长  $584 \mu\text{m}$ ,高  $50 \mu\text{m}$ ,顶面宽  $24 \mu\text{m}$ ,底面宽  $70 \mu\text{m}$ ,斜面倾角  $45^\circ$ 。

### 3.2.2 锥形凹槽三维微结构的制作

保持准三维微结构的棱线与机床  $Y$  轴平行,并使工件表面与  $XOY$  面平行。保持  $X$  坐标不变,圆柱电极分别接触微棱的左右两侧,利用机床的接触感知原理确定微棱的中心位置和电极的直径。

采用线电极放电磨削(WEDG)的方法,圆柱电极在  $XOZ$  面内斜线进给,在线制作顶端为圆锥形微细电极。图 5 为直径  $\varphi 88 \mu\text{m}$ 、 $60^\circ$  锥角的钨电极放电加工后的 SEM 照片。可以看到前端的尖角在加工中因损耗而变钝。

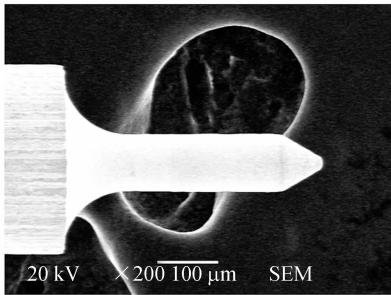


图 5 在微细电火花加工中使用后的圆锥形电极

Fig. 5 Taper electrode after being used in micro-EDM

使用圆锥形电极对准三维镍微结构的顶部进行扫描加工,制作局部为锥形凹槽的三维微结构。加工条件为:工作电压  $80 \text{ V}$ ,标称电容  $100 \text{ pF}$ ,主轴转速  $600 \text{ r/min}$ ,正极性加工,工作液为煤油。图 6 为局部为锥形凹槽三维镍微结构的 SEM 照片。微结构的尺寸为:长  $600 \mu\text{m}$ ,宽  $27 \mu\text{m}$ ,深  $23 \mu\text{m}$ ,斜面夹角  $60^\circ$ 。图中凹槽边缘出现的凸起是微细电火花加工时使用直线插补算法进行斜线加工时留下的痕迹。

## 4 测量实验与结果

为实现微小尺寸的电火花加工,需要降低单次脉冲放电能量。单次脉冲放电能量的大小直接

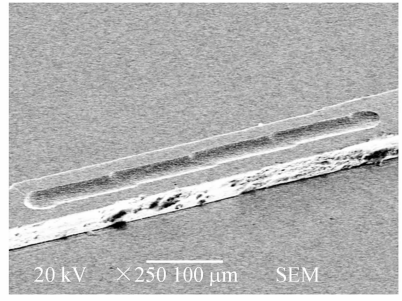


图 6 局部为锥形凹槽的三维镍微结构

Fig. 6 3D nickel microstructure with taper groove in local

决定了电火花加工微坑的尺寸,因此单次脉冲放电能量成为影响加工表面粗糙度的主要因素。实验中的微细电火花机床使用 RC 式脉冲电源,其单次脉冲放电能量可以近似地用电容所储存的能量来表示,即:

$$W_M = \frac{1}{2} C U^2, \quad (1)$$

其中, $W_M$  为单脉冲放电能量, $C$  为电容的容值, $U$  为 RC 电源的工作电压。

RC 式脉冲电源的电容值并不是单纯的标称电容值,还包括各种寄生电容。各种寄生电容能达到数百波法到数千皮法。即使采取了降低寄生电容的措施,要将其降低到  $100 \text{ pF}$  以内仍是极其困难的<sup>[10]</sup>。因此,降低工作电压和标称电容是减小单次脉冲放电能量的主要方式。

在其他条件相同的条件下,改变 RC 式脉冲电源的工作电压和标称电容进行微细电火花加工实验,分析了放电参数对表面粗糙度的影响。实验中表面粗糙度通过触针式台阶仪测量得到。由于受到加工尺寸的限制,测量  $R_a$  时选择的取样长

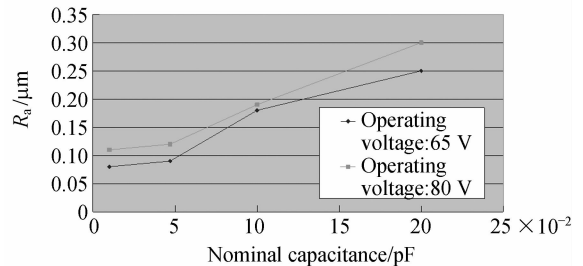


图 7 不同工作电压下标称电容与表面粗糙度的关系曲线

Fig. 7 Relation curve between nominal capacitance and surface roughness under different work voltages

度为 0.08 mm,评定长度为 3 倍的取样长度。

图 7 为不同工作电压下标称电容与表面粗糙度的关系曲线。由图 7 可知,在标称电容相同时,工作电压较低时加工的表面粗糙度较好;在工作电压相同时,随着标称电容的减小,表面粗糙度得到明显改善。工作电压 65 V,标称电容 100 pF 时得到了  $R_a$  为 0.08  $\mu\text{m}$  的表面。

实验表明,通过降低工作电压和标称电容来减小单次脉冲放电能量,可以有效地降低微细电火花加工的表面粗糙度。然而寄生电容的存在限制了脉冲能量的降低。一般认为 RC 式脉冲电源同独立式脉冲电源一样都存在着放电维持电压,这又限制了工作电压的降低。Egashira Kai 等人<sup>[11]</sup>进行了电源低电压放电的实验研究,为进一步减小脉冲能量、降低表面粗糙度提供了可能。

## 参考文献:

- [1] 苑伟政,王振龙. 微机械与微细加工技术[M]. 西安:西北工业出版社,2000.  
YUAN W ZH, WANG ZH L. *Micro Machine and Micro Fabrication Technology* [M]. Xi'an: Northwest Industrial University Press, 2000. (in Chinese)
- [2] TANAKA T, NOMURA T, FUNABIKI Y, *et al.*. Fabrication of a tapered structure by means of exposure to diffracted UV light[J]. *Micro-Nano Mechatronics and Human Science*, 2006, *International Symposium on*: 1-6.
- [3] 陈祥献. 光刻热熔微透镜阵列的电铸成形复制技术研究[J]. 仪器仪表学报, 1998, 19(1): 56-60.  
CHENG X X. Technology of electroforming based on microlens array of melting photoresist[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1998, 19(1): 56-60. (in Chinese)
- [4] YU Z Y, MASUZAWA T, FUJINO M. 3D micro-EDM with simply shaped electrode[J]. *Annals of CIRP*, 1997, 46(1): 1-8.
- [5] YU Z Y, MASUZAWA T, FUJINO M. Micro-EDM for three-dimensional cavities[J]. *Annals of the CIRP*, 1998, 47(1): 169-172.
- [6] TONG H, LI Y, WANG Y, *et al.*. Servo scanning 3D micro-EDM based on macro/micro-dual-feed

## 5 结 论

本文研究了 UV-LIGA 和微细电火花加工技术组合制作三维金属微结构的工艺方法。针对聚合物微流控芯片金属模具的结构需要,使用该方法制作出了局部为梯形凸台和锥形凹槽三维微结构,其余部分为侧壁垂直微结构的镍模具。梯形凸台的尺寸为:长 584  $\mu\text{m}$ 、高 50  $\mu\text{m}$ 、顶面宽 24  $\mu\text{m}$ 、底面宽 70  $\mu\text{m}$ 、斜面倾角 45°;锥形凹槽的尺寸为:长 600  $\mu\text{m}$ 、宽 27  $\mu\text{m}$ 、深 23  $\mu\text{m}$ 、斜面夹角 60°。在使用 RC 式脉冲电源的微细电火花加工中,随着工作电压和标称电容的下降,单次脉冲的放电能量减小,表面粗糙度得到降低。在工作电压为 65 V、标称电容为 100 pF 时,得到了  $R_a$  为 0.08  $\mu\text{m}$  的微细电火花加工表面。

- spindle [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48: 858-869.
- [7] 李勇,佟浩,郁鼎文,等. 三维微细电火花伺服扫描加工工艺[J]. 纳米技术与精密工程, 2008, 6(4): 307-311.  
LI Y, TONG H, YU J W, *et al.*. Servo scanning process of 3D micro EDM[J]. *Nanotechnology and precision engineering*, 2008, 6(4): 307-311. (in Chinese)
- [8] TAKAHATA K, SHIBAIKE N, GUCKEL H. High-aspect-ratio WC-Co Microstructure Produced by the Combination of LIGA and Micro-EDM[J]. *Microsystem Technologies*, 2000, 6: 175-178.
- [9] 邹丽芸,张院春,彭良强,等. 基于 LIGA 技术的微细电火花加工优化研究[J]. 电加工与模具, 2004: 39-41.  
ZOU LY, ZHANG Y C, PENG L Q, *et al.*. Optimal process of micro-EDM based on LIGA technique [J]. *Electromachining & Mould*, 2004: 39-41. (in Chinese)
- [10] 任忠辉,宋博岩,韩荣第,等. 电火花微能脉冲电源研究现状[J]. 电加工与模具, 2006: 29-32.  
REN ZH H, S B Y, H R D, *et al.*. The present research status on micro-energy pulse generator [J]. *Electromachining & Mould*, 2006: 29-32. (in Chinese)

[11] EGASHIRA K, MIZUTANI K. EDM at Low Open-circuit Voltage[J]. Journal of the Japan So-

ciety of Electrical Machining Engineers, 2003, 37 (85):18-23.

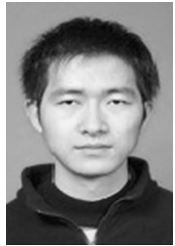
#### 作者简介:



杜立群(1966-),女,黑龙江望奎人,教授,博士生导师,分别于1988年、1991年、1999年在东北大学获得学士、硕士、博士学位,2002年在日本名古屋大学获得博士后,主要从事微机电系统方面的研究。E-mail: duliqun@dlut.edu.cn



张余升(1985-),男,安徽六安人,硕士研究生,2007年于大连理工大学获得学士学位,主要从事微细电火花加工技术方面的研究。E-mail: zhangyusheng@gmail.com



莫顺培(1984-),男,江苏南京人,硕士研究生,2007年于南京理工大学获得学士学位,主要从事微细加工技术方面的研究。E-mail: moshunpei@yahoo.com.cn



刘冲(1966-),男,四川成都人,教授,博士生导师,主要从事微机电系统、精密仪器及测试技术等方面的研究。E-mail: chongl@dlut.edu.cn

#### ●下期预告

## 0.5 m 超薄镜主动支撑面形校正及实验

曾春梅<sup>1,2</sup>, 郭培基<sup>1,2</sup>, 余景池<sup>1,2</sup>

(1. 苏州大学 江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;

2. 苏州大学 现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)

为了研究超薄镜在主动支撑条件下对面形误差的校正能力,以一个直径 500 mm 的超薄镜为例进行面形校正的仿真分析及实验验证。分析了致动器作用力与超薄镜面形的关系,引入了一些需校正的面形误差,如初级球差、慧差、像散及重力变形等,确定了致动器作用力的优化目标,用求解非线性约束问题的优化算法——序列二次规划法计算了校正面形误差所需的致动器作用力,得到了超薄镜面形残余误差。仿真分析表明,对于归一化系数为 1 的初始球差、慧差、像散以及它们的叠加,用本文提供的致动器排布方式可以将面形误差校正到  $\text{RMS}\lambda/26$  以内,且对初级像散的校正能力最强,慧差和球差次之;竖直放置时的重力变形加上 3 种低阶像差的叠加也可被校正到  $\lambda/26$ 。在得到主动支撑的 0.5 m 实验镜的初始面形结果后,重新计算了优化力和面形误差。结果表明:计算结果和实际装调结果基本一致,RMS 约为  $\lambda/7$ 。计算分析了超薄镜面形未能达到预期目标的原因,提出了适当增加致动器和提高超薄镜初始面形精度的改进方案,最终使超薄镜面形达到  $\text{RMS}\lambda/20$  的要求。