

# 特种微型机械加工技术

李 勇, 郭 旻, 周兆英

(清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

**摘要:** 综述微型机电系统/微型机械的三维形状加工及极限尺寸加工的研究开发现状。相对硅微细加工和 LIGA 工艺, 不采用掩膜版的特种微细加工技术, 如微细激光成型、微细电火花加工以及微细机械加工等近年来取得较大进展, 在三维微小机械结构成型上有独到优势; 同时扫描隧道显微加工技术的开发将微型机械向极限尺寸领域推进。微型机电系统/微型机械的长足发展有赖于融合已有先进技术和交叉学科思想的微型机械加工技术的进一步研究开发。

**关键词:** 微型机电系统; 微型机械; 微细加工; 微细激光成型; 微细电火花加工;

扫描探针显微加工

**中图分类号:** TG665, TN305.7 **文献标识码:** A

## 1 引言

微型机电系统/微型机械技术衍生于微电子技术领域, 由于这种历史原因, 迄今硅微细加工在微型机械制造中占据主要位置。硅微细加工批量制作、预组装方式及易与电路集成的技术特点为微型机电系统/微型机械的实现提供可行的途径和新颖的概念, 为从机械工程角度考虑微型机械的实现予以有益启迪。

硅微细加工适合微型传感器的制作及与电路集成, 但成型结构形状有限、不利于致动器的制作。微型机电系统/微型机械技术领域的发展, 同时带动了微细加工技术的研究开发。LIGA 工艺在对各种材料和深度加工方面比硅微细加工有了明显的优势, 但其缺点是 X 射线曝光及 X 射线掩膜版等的加工费用昂贵。

相对使用掩膜版的加工方法, 微细电火花加工、微细激光成型加工、微细机械加工等特种微细加工技术在微小型三维立体结构、致动器的制作上有其长处, 且其批量制作可以通过模具加工、电铸、注塑等方法实现。虽在与电路集成方面有待探讨, 但微型机电系统的实现不必要一味追求片内集成, 模块化集成途径将更为可取。

微型机械的加工一方面在向三维复杂形状的制作发展, 同时也在向更高加工精度和极限尺寸领

域推进。从加工原理来看, 机械加工、化学腐蚀、能量束加工以及扫描隧道显微加工等最终都可能达到纳米级加工精度。但就加工方法而言, 微型机械加工将在结合硅微细加工批量制作及与电路集成的思想的基础上, 以极限尺寸加工原理和复合工艺手段, 得到进一步的开发和完善。

## 2 微细电火花加工(Micro EDM)

电火花加工是利用工件和工具电极之间的脉冲性火花放电, 产生瞬间高温使工件材料局部熔化和汽化, 从而达到蚀除加工的目的。电火花加工由于其非机械接触加工的特点适合微细加工, 不但能够加工金属等导体, 亦能够加工硅等半导体材料。

实现微细电火花加工的关键在于微小轴(工具电极)的在线制作、微小能量放电电源、工具电极的微量伺服进给、加工状态检测与系统控制以及加工工艺方法等。

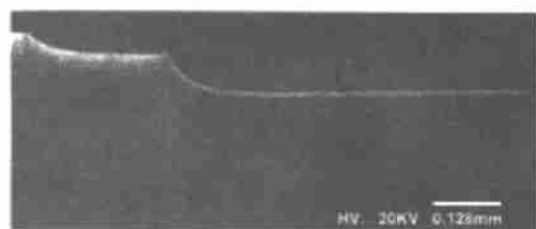
微小电极线放电磨削(WEDG: wire electro discharge grinding)工艺为微细电火花加工提供了一可行途径<sup>[1]</sup>。其加工原理基于丝线和被加工轴之间的电火花线切割和电极反拷方法的优化结合, 被加工轴(工具电极)的成型通过主轴的进给和旋转运动以及线放电磨削丝的移动实现。

图 1(a)所示为线放电磨削加工出的  $\phi 38\mu\text{m} \times 0.6\text{mm}$  微小圆轴,图 1(b)所示是使工具电极随主轴旋转,利用微小圆轴在单晶硅材料上加工出的微小文字结构<sup>[2]</sup>。

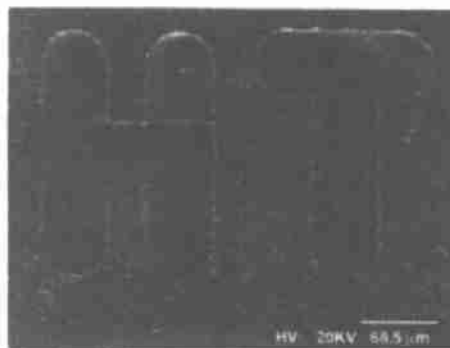
利用简单形状工具电极、采用选择电极端部放电扫描加工,已成为三维微小结构的微细电火花加工的一有效方法<sup>[3]</sup>。图 2(a)所示是用电极端部放电扫描加工的方法制作出的微小型汽车外形

模具,图 2(b)是将模具加热至  $200^\circ\text{C}$  注塑成形的微小型汽车外形。

对微细电火花加工技术的不断研究探索,已使微细电火花加工在与微型机械制造结合及实用化方面取得了长足进展,最小加工尺寸已达到  $5\mu\text{m}$ ,其加工对象由简单的圆截面微小轴、孔拓展到复杂的微小三维结构。

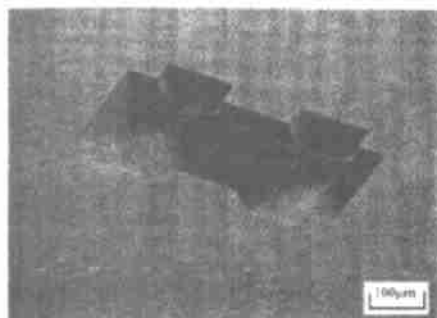


(a)



(b)

Fig. 1 Micro shaft and letters



(a)



(b)

Fig. 2 Microcar mold and model

### 3 微细激光成型加工

光成型加工已被尝试用于微细结构的制作,为制作三维立体微结构提供又一有益途径。光成型加工利用紫外光硬化树脂作为被加工材料,当树脂受到紫外线照射时,可由液态变为固态,控制曝光方式,即可成形各种三维结构。

进行微细激光成型加工时,聚焦的紫外光斑依靠 XYZ 工作台的运动扫描硬化一层树脂,然后 Z 向运动调节光斑聚焦位置,扫描硬化相邻层树脂。三维结构的成形由这样一层层的二维形状堆叠而成。成形尺寸和精度主要取决于光硬化树脂

的光敏分辨率、光源聚焦精度、机械结构 XYZ 方向的运动控制精度以及液态树脂的粘性等。以树脂结构为模具,可进一步电铸金属结构。

微细激光成型加工具有可加工成形树脂或金属材料的高深宽比三维结构、无需工具或掩模版制作、成形快捷等特点。但聚焦光斑大小应与扫描间隔匹配,光斑小于扫描间隔时结构容易断裂,反之影响成形尺寸精度。

图 3 所示为一由光纤阵列组成的激光成型批量制作微细加工系统示意图<sup>[4]</sup>。该系统设计可以微小化的光学系统实现安全低成本、高生产率的高深宽比三维结构成形。

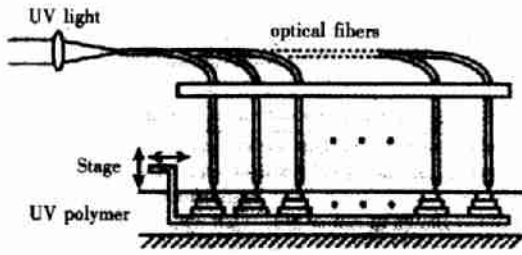


Fig. 3 Mass productive micro stereo lithography

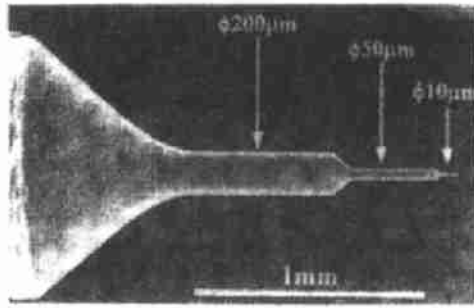


Fig. 4 Movable gear ( $\phi 50\mu\text{m}$ ) lithography

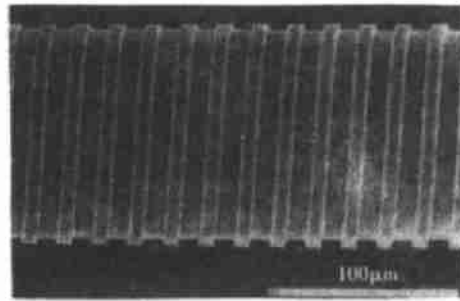
通常光成型微细加工方法难以制作自组装的可动结构,新近研究开发出的点聚焦扫描加工三维成型方法在制作可动结构方面有所突破<sup>[5]</sup>。一般光成型加工时树脂感光即硬化,而点聚焦光成型方法是使树脂硬化仅限于紫外光聚焦点上。这就使其加工成型可以不使用基板,加工分辨率取决于光聚焦点的大小,可直接制作出自组装可动结构,并消除了液体树脂粘性和表面张力的不利影响。图4所示是利用点聚焦成型加工出的外径为 $\phi 50\mu\text{m}$ 的可动齿轮。

#### 4 微细机械加工

机械切削加工由于切削力的产生一般认为不适于微型机械的加工制作。但超精密加工已成功地制作出尺寸在 $10\sim 100\mu\text{m}$ 的微小三维构件<sup>[6]</sup>,图5(a)、(b)所示分别为阶梯轴和螺纹。机械加工出的三维微小构件与压电薄膜的热液制作结合,试制出了振动陀螺结构。超精密切削加工可望适于三维复杂形状的微小型致动器的制作。



(a)



(b)

Fig. 5 Micro stepped shaft and screw

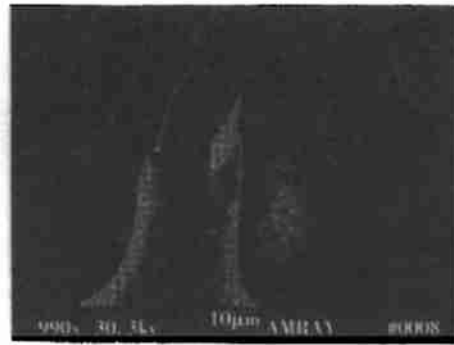


Fig. 6 Micromilling tool made with FIB machining

以制作微型构件的模具和X射线光刻掩模版为应用背景的铣削加工工艺<sup>[7]</sup>,采用聚焦离子束(FIB; focused ion beam)加工高速钢材料的铣削刀具,加工出直径为 $22\sim 100\mu\text{m}$ 的微小铣刀。图6所示为微小铣刀前端显微照片。进行机械的微细铣削加工,对机床结构运动精度及其控制均提出了很高要求,尤其是主轴旋转精度需要特殊的机构设计来保证。以主轴转速 $19000\text{r}/\text{min}$ ,在PMMA (polymethyl methacrylate)材料上加工的螺旋槽的一部分如图7所示,图中壁厚约为 $8\mu\text{m}$ ,高度为 $62\mu\text{m}$ ,高深宽比接近8。

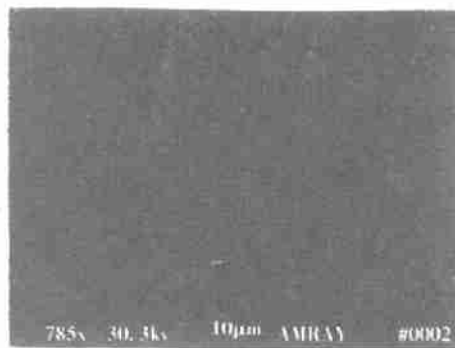


Fig. 7 Portion of trenches with walls as thin as  $8\mu\text{m}$

在 PMMA 上可直接电铸成型微小构件,可电铸金作 X 射线光刻掩模版,作为光刻工艺的辅助手段。

## 5 扫描探针显微镜(SPM)加工

在极限的微细加工方面,应用扫描探针显微镜(SPM; scanning probe microscope)技术,在探针尖端进行原子、分子级表面加工的 SPM 加工技术亦获得重大进展。应用 SPM 加工技术,可利用接近试验材料表面的探针尖端的高电场,切断原子间的结合并蒸发掉原子,进行单个原子的去除、添加和移动。

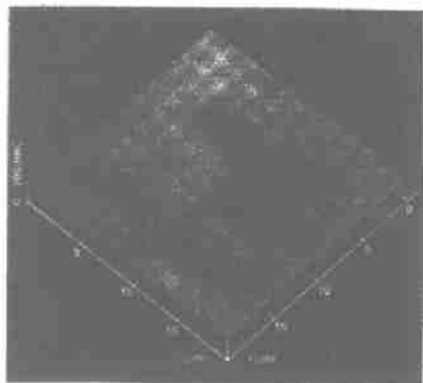


Fig. 8 A Chinese character on Cr substrate

通常 SPM 加工之明显缺点是加工区域和速度过小。电化学加工或光刻加工与 SPM 加工的结合可有效地解决这一问题<sup>[6]</sup>。SPM 探针电化学加工的关键是探针尖端局部导电区域的控制处理,即探针除尖端外镀绝缘层。这种加工原理基于法拉地电流而非隧道电流。图 8 所示为用 Pt-Ir 合金探针在 Cr 基板上电解加工出的槽宽 200-300nm,深 100nm 的正字图形。利用光纤作为探针,安装在原子力显微镜(AFM; atomic force

microscope)上的扫描近场光学/原子力显微镜进行的探针光刻加工,其近场光学原理可以使线宽精度突破光衍射极限精度。图 9 所示为用波长 488nm 的 Ar 离子激光通过光纤在基板上对 400nm 厚的感光胶曝光,刻蚀出的字母图形。每个字母大小为  $5 \times 5\mu\text{m}^2$ ,线宽 300nm,刻蚀深度为 10nm。

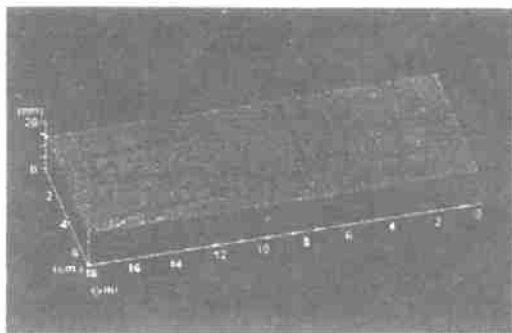


Fig. 9 Pattern "SII" in photoresist film

## 6 结 语

由于微型机械/微型机电系统研究具有的交叉学科领域的特点,随着其交叉范围的不断拓展和发展,微型机械加工技术的开发亦在取得不断进展。除上述之外,尚有许多基于不同原理或机理的微型机械加工技术处于研究开发之中,这里不再一一枚举。

在微型机械/微型机电系统研究领域,微型机械的概念不仅仅是机械的单纯微小型化,微型机电系统的集成将有利于智能化。就微型机械加工技术而言,多功能复合加工比单一的加工手段更适合微型机械/微型机电系统制造的需求。

半导体加工技术本身就体现了复合加工的特点,光刻过程是利用光能和化学能的复合加工,淀积和刻蚀分别属于添加加工和去除加工的形式,为提高加工深度和精度的激光辅助刻蚀以及电子束光刻等加工技术更是发挥了复合加工的优势。

微细电火花加工与在线装配技术的组合,提示出解决非光刻加工零部件组装的可行途径。微细电火花加工与电解加工的复合可望提高加工效率,进一步改善表面加工精度。

SPM 技术使极限的测量、加工集于一体,并有助于生物加工技术的研究开发。多功能复合微型机械加工技术的研究开发,将与微型工厂(Microfactory)的概念有机结合,将达到以小制小

的境界。

#### 参考文献:

- [1] Masuzawa T, et al. Wire electro-discharge grinding for micro-machining[J]. Annals of the CIRP, 1985, 34(1):431-434.
- [2] 李勇,等. 微细电火花加工关键技术研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(8). 45-48.
- [3] 余祖元,等. 放电加工による微細キヤビテイの形成[J]. 东京大学生产技术研究所生产研究, 1997, 49(9), 395-400.
- [4] Ikuta K, et al. Development of mass productive micro stereo lithography (Mass-IH process)[C]. Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, 1996, 301-306.
- [5] Ikuta K, et al. New micro stereo lithography for freely movable 3D micro structure[C]. Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, 1998, 290-295.
- [6] Higuchi T, et al. A new fabrication method for micro actuators with piezoelectric thin film using precision cutting technique[C]. Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, 1996, 307-311.
- [7] Friedrich C R, Vasile M J. Development of the micromilling process for high-aspect-ratio microstructures[J]. Journal of Microelectromechanical Systems. 1996, 5(1):33-38.
- [8] Suda M, et al. Electrochemical and optical processing of micro structures by scanning probe microscopy (SPM) [C]. Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems, 1996, 296-300.

### Overview of non-traditional micromachining technologies

LI Yong, GUO Min, ZHOU Zhao-ying

(*Department of Precision Instruments and Mechanology,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

**Abstract:** The research activities on non-traditional micromachining technologies to shape microstructures with 3 DOF and to make microstructures with ultimate size are summarized in this paper. Compared with silicon process and LIGA process, the non-traditional micromachining technologies without mask such as stereolithography, micro EDM and micro mechanical machining have got great progress in recent years, which have advantages especially in shaping microstructures with 3 DOF. At the same time, SPM processing technology accelerates miniaturization to ultimate size area. The research and development of micromachining technologies by integrating multidisciplinary novel ideas and advanced technologies will give the possibility for getting much further progress in MEMS/micromachines.

**Key words:** MEMS; micromachine; micromachining; stereolithography; micro EDM; SPM processing

**作者简介:** 李 勇(1962-),男,1962年2月出生于河南省方城县,博士。清华大学精密仪器与机械学系副教授。中国机械工程学会(CMES)高级会员,日本精密工学学会(JSPE)会员。

1982年取得哈尔滨工业大学工学学士学位;1987年、1991年分别取得日本新潟大学工学硕士和博士学位;1991年4月至1992年7月在日本AOTS从事博士后研究;1992年8月至1994年8月在清华大学从事博士后研究;1994年9月至今在清华大学精密仪器与机械学系工作。

迄今涉足的研究方向主要包括精密机械加工和微细加工、微型机电系统(MEMS)/微型机械、超精密进给定位技术、小型机电一体化技术等。

已在国内外学术刊物和会议上发表学术研究论文56篇,申报国家发明专利3项、实用新型专利1项。