

文章编号 1004-924X(2005)03-0283-08

# 一种压电驱动微操作器及其释放位置精度分析

吴建华, 褚家如

(中国科学技术大学 工程科学学院, 安徽 合肥 230026)

**摘要:**报道了一种利用压电陶瓷双晶片驱动的适用于尺寸在  $20\sim 200\ \mu\text{m}$  之间微器件装配操作的微操作器。夹持臂尖端直径约  $15\ \mu\text{m}$ , 在  $80\ \text{V}$  的电压驱动下闭合约  $200\ \mu\text{m}$  的距离。通过理想操作模型分析了微器件释放的位置误差来源和提高微器件释放位置精度的方法, 并进行了高分子小球的排列和释放实验。在相对湿度  $50\%$  的环境下对直径约  $170\ \mu\text{m}$  的高分子小球的操纵中, 实现了  $2\ \mu\text{m}$  的释放位置精度。实验表明本微操作器能高精度地完成微器件的拾取、移动和释放操作。

**关键词:**微操作器; 位置精度; 压电陶瓷双晶片; 粘附力

中图分类号: TP703.6; TN384 文献标识码: A

## Piezoelectric driven micromanipulator and its positioning accuracy analysis

WU Jian-hua, CHU Jia-ru

(*School of Engineering Science, University of Science and  
Technology of China, Hefei 230026, China*)

**Abstract:** A micromanipulator driven by piezoelectric bimorph was developed to assemble micro parts  $20\sim 200\ \mu\text{m}$  in size. The manipulator closes about  $200\ \mu\text{m}$  while a driven voltage of  $80\ \text{V}$  is applied. The diameter of grasping arm tips is about  $15\ \mu\text{m}$ . The release positioning accuracy is analyzed with a theoretical model and the methods to obtain high position accuracy are discussed. A positioning accuracy of  $2\ \mu\text{m}$  is achieved while a  $170\ \mu\text{m}$  diameter polymer sphere is released in humid environment ( $\text{RH}=50\%$ ). The manipulation experiments indicate that the micromanipulator could pick, transfer and release micro parts with a satisfactory positioning accuracy.

**Key words:** micromanipulator; positioning accuracy; piezoelectric bimorph; adhesion force

## 1 引言

为了获得更加功能化的微器件,微系统正在变得越来越复杂,制作难度也相应增加。然而,由于工序过于复杂、工艺不兼容等原因,依赖传统的加工工艺获得复杂的整体三维器件非常困难<sup>[1]</sup>。如果考虑把各零部件分别加工,再利用微装配技术进行组装,则可以在相对较低的成本下获得复杂的三维微结构<sup>[2]</sup>,从而以较低的成本实现更加强大的功能。微操作器是微器件装配系统的核心部件,其性能直接影响到系统的可靠性、装配精度和装配效率。

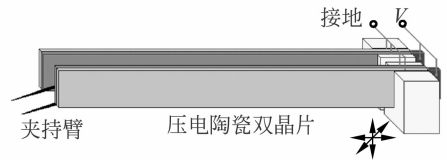
对于一次微装配任务,微操作器需要把微器件从基底上拾起再传送到目标点,然后精确地释放到预定位置。虽然真空吸管和粘附型的微型探针等都被成功应用于微器件搬运操作<sup>[2-3]</sup>,但基于可靠性和装配精度考虑,目前使用最广泛的还是利用机械夹持力的微操作器。在微尺度下,静电力<sup>[4]</sup>、热应力<sup>[5]</sup>、逆压电效应<sup>[6]</sup>等都可被用做驱动力,而逆压电效应与前三种力比较,具有响应速度快(小于 10 ms)、驱动力大、力的大小可以通过驱动电压精确控制等优点,适合高精度的微操作器驱动。

由于微器件装配要求几微米甚至亚微米级的装配精度,微操作器释放微器件所能达到的位置精度也是衡量微操作器性能的一个重要指标,而微器件释放位置精度与系统工作环境,微器件的尺寸和形状,微操作器的结构以及操纵策略等因素都有密切的关系。因此,分析微器件释放位置误差的来源并据此提高装配精度是非常必要的。

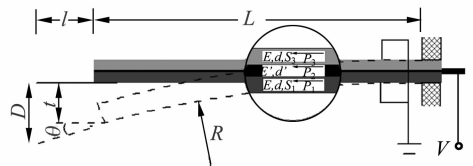
本文设计并实现了一种利用压电陶瓷双晶片驱动的微操作器并对尺寸在几十到 200  $\mu\text{m}$  的高分子小球进行了操纵实验,对微器件释放过程中的位置误差来源和提高释放位置精度的方法进行了分析和讨论。

## 2 微操作器结构和位移分析

如图 1(a)所示,微操作器由三维微移动台、压电陶瓷双晶片和夹持臂组成。2 块沿厚度方向极化的压电陶瓷双晶片被水平相向固定在一个三维微动平台上,陶瓷片末端安装了通过电化学刻蚀<sup>[7]</sup>获得的钨针尖作为夹持臂,夹持臂的尖端直径约 15  $\mu\text{m}$ ,与水平面成 15°角。通过调整微移动台对准左右夹持臂的针尖,以保证工作时可以完全闭合。为了释放针尖上的静电荷,减少粘附现象的发生,夹持臂通过导线接地。



(a) 两个压电陶瓷双晶片驱动器被相向安装  
(a) Two piezoelectric bimorph drivers were fixed face to face



(b) 压电陶瓷双晶片驱动器和微夹持臂的位移示意图  
(b) Schematic of piezoelectric bimorph actuator and grasping arm

图 1 微操作器原理图

Fig. 1 Schematic of micromanipulator

若陶瓷片长为  $L$ ,夹持臂在水平方向上的投影长  $l$  图 1(b)。下压电层、中间金属层、上压电层的弹性模量、厚度、内部平均压力分别为  $E, d, P_1, E', d', P_2$  和  $E, d, P_3$ 。加上驱动电压  $V$  以后,上下压电层的

应变分别为  $S_3$  和  $S_1$ , 压电陶瓷片的弯曲半径为  $R$ 。如果不考虑负载, 则由静力平衡关系可得<sup>[8]</sup>:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ \frac{d}{2} & d + \frac{d'}{2} & d' + 3\frac{d}{2} & \frac{2Ed^3 + E'd^3}{12} \\ \frac{1}{Ed} & -\frac{1}{E'd'} & 0 & \frac{d+d'}{2} \\ 0 & \frac{1}{E'd'} & -\frac{1}{Ed} & \frac{d+d'}{2} \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \frac{1}{R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -S_1 \\ S_3 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

解得

$$R = \frac{8Ed^3 + 12Ed^2d' + 6Edd'^2 + E'd^3}{6Ed(d+d')(S_3 - S_1)}, \quad (2)$$

压电层的应变由下式给出:

$$S_1 = -d_{31} \frac{V}{d}, \quad S_3 = -d_{31} \frac{V}{d}, \quad (3)$$

其中,  $d_{31}$  是压电陶瓷的横向压电系数。在小位移情况下, 陶瓷片左端位移  $t$ , 转角  $\theta$  和夹持臂尖端位移  $D$  由几何关系求得:

$$t = L^2 / 2R, \quad (4)$$

$$\theta = L / R, \quad (5)$$

$$D = t + l \sin \theta \approx t + l\theta. \quad (6)$$

由式(1)至(6),

$$D = \frac{3E(d+d')(L^2 + 2Ll)d_{31}V}{8Ed^3 + 12Ed^2d' + 6Edd'^2 + E'd^3}, \quad (7)$$

由式(7)可知, 在小负载小位移情况下, 操作器的闭合距离相对驱动电压具有良好的线性。微操作器的原型尺寸为  $L = 40 \text{ mm}$ ,  $l = 2 \text{ mm}$ ,  $d = 0.3 \text{ mm}$ ,  $d' = 0.1 \text{ mm}$ 。通过式(7)计算得  $D/V = 1.17 \text{ } \mu\text{m/V}$  ( $E = 76.5 \text{ GPa}$ ,  $E' = 115 \text{ GPa}$ ,  $d_{31} = 190 \text{ pC/N}$ )。实验测得在  $80 \text{ V}$  的驱动电压下微操作器的夹持臂闭合约  $200 \text{ } \mu\text{m}$  的距离, 与计算值基本一致。

由于压电陶瓷具有快速响应特性和亚微米级的位移精度(取决于电源的噪声水平), 根据被操作器件的尺寸和夹持臂刚度, 通过调节驱动电压可以控制夹持力到合适的水平, 从而提高操作的可控性和可靠性, 以利于快速准确地完成对微器件的拾取与释放操作。

### 3 微器件操纵实验

微装配实验系统主要由 2 个三维移动工作台、微操作器、体视显微镜、环形照明灯和视频监控系组成(图 2)。微操作器和样品分别放在 2 组三维移动台上。移动台在水平方向的移动分辨率为  $2 \text{ } \mu\text{m}$ , 在垂直方向的移动分辨率为  $1 \text{ } \mu\text{m}$ 。体视显微镜物镜放大倍率  $8 \times$ , 工作距离  $35 \text{ mm}$ 。微操作器由电压连续可调的直流电源供电(纹波电压  $20 \text{ mV}$ )。考虑到驱动电源的噪声, 操作器的位移精度优于  $0.1 \text{ } \mu\text{m}$ 。整个系统放置在洁净室内的隔振平台上, 工作环境温度  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ , 相对湿度约  $50\%$ 。

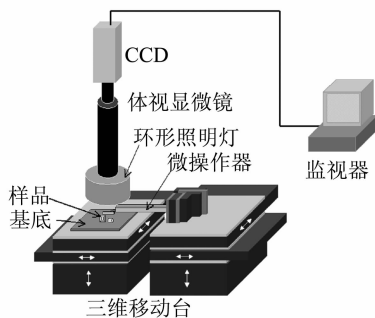


图 2 微装配实验系统原理图

Fig. 2 Schematic of micro assembly system

用于微操纵实验的样品有几十微米至  $200 \text{ } \mu\text{m}$  大小的(聚乙稀基吡啶-b-二乙稀基苯)高分子小球, 直径约  $50 \text{ } \mu\text{m}$  的小铜棒和  $\text{NaCl}$  立方晶体。基底是用  $\text{KOH}$  溶液刻蚀至表面粗糙度  $270 \text{ nm}$  后再镀金的硅片。实验采用样品台移动的方式, 微操作器被

固定在显微镜视场中央。一次操纵过程包括：

- (a) 移动样品到微操作器的工作范围内；
- (b) 给操作器加电闭合；
- (c) 降低样品台拾起样品；
- (d) 移动样品台使样品对准释放位置并上升样品台到合适的高度；
- (e) 张开微操作器释放样品到目标位置。

成功地利用该微装配系统将小铜棒堆放成三层 log pile 结构(图 3), 将高分子小球重新排列整齐(图 4)。对小铜棒的堆放实验和对高分子小球的重排列实验表明, 微操作器能高效灵巧地完成尺寸在数 10~200  $\mu\text{m}$  的微器件操纵。

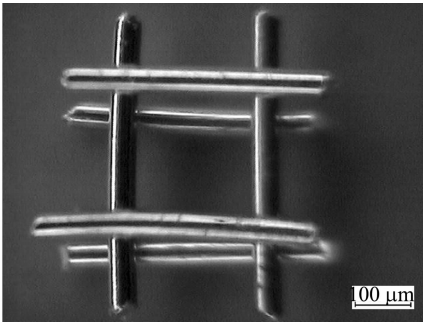


图 3 微操作器堆放的三层 log pile 结构  
Fig. 3 Three layers log pile structure assembled by micromanipulator

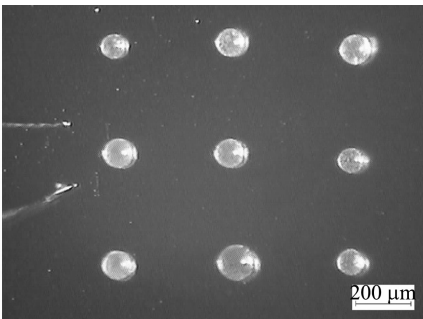
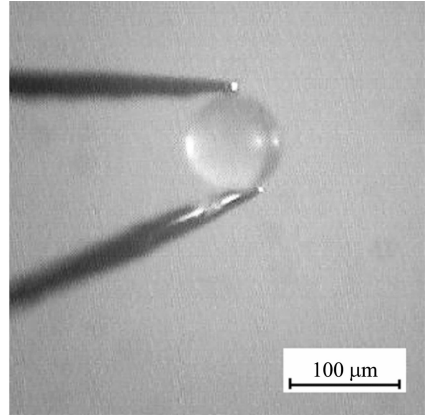
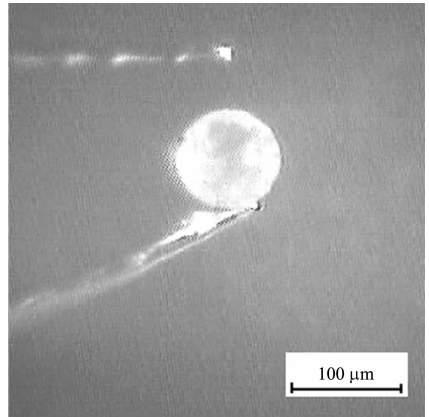


图 4 重新排列整齐的高分子小球组  
Fig. 4 Rearranged polymer spheres array



(a) 小球被成功从基底上抬起  
(a) Sphere is picked from substrate



(b) 小球与夹持臂发生粘附导致释放失败  
(b) Unsuccessful release due to adhesion between the grasping arm and micro sphere

图 5 微操作器操纵直径约 95  $\mu\text{m}$  的高分子小球  
Fig. 5 A 95  $\mu\text{m}$  diameter polymer sphere is manipulated

#### 4 释放位置误差分析

由于微器件的典型特征尺寸在数十到数百微米, 在该尺度下, 粘附力常常较重力表现得更为显著<sup>[9]</sup>。在释放过程中, 粘附力会阻碍微器件与微操作器的分离(图 5 (b)), 并会带来微器件释放位置误差。影响释放位置精度的有操纵策略、微操作器的结构、操纵对象和工作环境等因素。

### 4.1 不同释放距离的影响

微器件释放有两种方式:一种是在目标位置正上方张开微操作器让微器件在重力的作用下与微操作器分离;另一种方式是先将微器件放置到预定位置使之与基底接触后再张开微操作器,从而受益于微器件与基底之间的粘附力和摩擦力。

为了简化问题的研究,假设被夹持的微器件是半径为  $R$  的理想球形,而夹持臂是一个水平放置的半径为  $r$  的圆柱。设左右两个夹持臂与微器件之间的粘附力分别为  $A_{g_1}$  和  $A_{g_2}$ ,并且  $A_{g_1} < A_{g_2}$ 。

对于第一种释放方式,在微操作器张开的过程中,左边的夹持臂首先与微器件分离,微器件此时受到与右夹持臂之间的粘附力  $A_{g_2}$ ,摩擦力  $f_{g_2}$ ,以及自身重力  $G$  的作用(图 6(a))。当  $A_{g_2} > G$  时,微器件就粘附在夹持臂上而不能在重力的作用下与操作器分离,导致释放失败。当  $A_{g_2} < G$  时,在  $A_{g_2}$ ,  $f_{g_2}$  和  $G$  的作用下,微器件将绕着与夹持臂的接触点转动(图 6(b))。设转过角度  $\theta$  时,  $A_{g_2}$  与  $f_{g_2}$  的合力开始小于  $G$ ,微器件在重力的作用下与夹持臂分离。 $\theta$  与  $A_{g_2}$  和  $G$  有如下关系

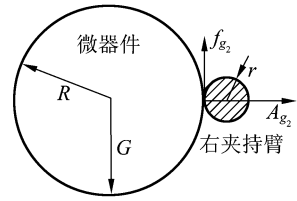
$$A_{g_2} = G \sin \theta, \quad (8)$$

此时,微器件偏离初始位置

$$\Delta e = (R+r)(1 - \cos \theta), \quad (9)$$

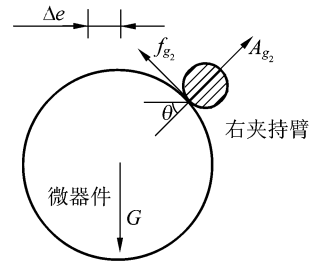
由式(8)和(9)可知,粘附力越大,释放器件的位置误差越大。器件下落后和基底的碰撞也可能产生水平方向上的位移,释放距离(微器件离基底的距离)越大,这种移动的可能性和移动距离越大。因此,减小释放距离也有助于减小释放位置误差。

对于第二种释放方式(图 7),在  $A_{g_2}$  的作用下,器件将可能在基底上滑动或转动,从而偏离目标位置。同样,  $A_{g_2}$  越大,发生滑动或转动的可能性越大,从而产生较大的位置误差。微器件与基底的摩擦力  $f_s$  越大,微器件发生滑动的可能性就越小。



(a)微操作器刚张开时微器件受力图

(a) Force diagram while the grasping arms were opened



(b)微器件在夹持臂上发生相对位移后的受力图  
(b)Micro sphere having moved on the grasping arm

图 6 不与基底接触释放时微器件的受力图  
Fig. 6 Releasing micro sphere above substrate

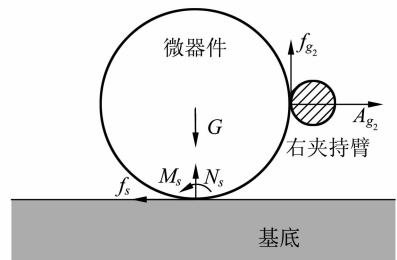


图 7 在基底上释放时微器件的受力图

Fig. 7 Releasing micro sphere on substrate

如果器件所受的滑动或转动阻力过小,则器件也可能被夹持臂带走,从而导致释放失败。

如果在第一种释放方式中释放距离不够大,器件在未转到角度  $\theta$  时就和基底发生了接触,则后面的情形和第二种释放方式类似。一般情况下,采取第二种释放方式更有利于获得较高的释放位置精度。但在被广泛采用的视频反馈微装配系统中,难于通过视频信号精确地判断微器件和基

底的 Z 向位置。如果样品台被升得过高,则微器件可能因为受到基底支承力  $N_s$  的作用而脱离微操作器跳出视场范围,导致释放失败。

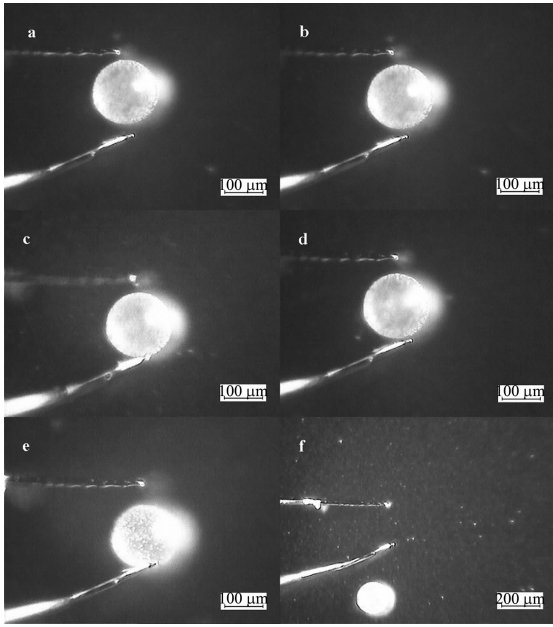


图 8 离基底不同距离上释放小球的效果图 (a,b,c,d,e,f 的释放距离分别是  $5 \mu\text{m}$ ,  $10 \mu\text{m}$ ,  $25 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$ ,  $500 \mu\text{m}$ )

Fig. 8 Micro sphere released with various release distances. (Release distances of a,b,c,d,e,f are  $5 \mu\text{m}$ ,  $10 \mu\text{m}$ ,  $25 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$ ,  $500 \mu\text{m}$ , respectively)

表 1 离基底不同距离上释放小球的位置误差

Tab. 1 Positioning accuracy of releasing micro sphere with various release distance

释放距离 ( $\mu\text{m}$ )	位置误差 ( $\mu\text{m}$ )
0	2
5	3
10	7
25	19
50	27
100	37
500	201

选用直径约  $170 \mu\text{m}$  的高分子小球做了一系列采用不同释放距离的释放实验,

每次实验采用相同的夹持力。图 8 所示为在离基底不同距离上释放同一个小球后的一系列照片,通过 3 次实验测得的平均释放位置误差如表 1 所示。由表 1 可知,在离基底较近的距离上释放时获得的位置精度较高。

#### 4.2 操纵器结构和夹持力的影响

为了保持适当的夹持力,夹持臂在微操作器夹持物体时有一定的变形。刚度较小的夹持臂可以在一定范围内避免因为夹持力过大而导致的微器件损坏。在微操作器逐渐张开到粘附力较小的夹持臂与微器件分离的过程中,由于左右夹持臂的刚度不同或左右驱动器位移不等的原因,微器件也会偏离初始位置。对于本微操作器,实验测得在夹持物体以后每增加  $30 \mu\text{N}$  的夹持力,被夹持物体就会产生约  $1 \mu\text{m}$  的位移。因此,提高驱动器和左右夹持臂的对称性,选择适当刚度的夹持臂有助于获得较高的释放位置精度。

减小夹持力可以减小夹持臂的变形,也就减小了由夹持臂和驱动器不对称带来的释放位置误差。由于粘附力受接触面积的影响,适当减小夹持力,减小接触变形也有助于削弱粘附力,从而提高释放位置精度。

#### 4.3 操纵对象和基底的影响

除了操纵策略和微操作器的结构之外,被操纵对象的尺寸、外形、表面状况、材料以及与基底的粘附力和摩擦力大小都会影响微器件的释放位置精度。微器件与微夹持臂的粘附力越小或与基底的粘附力和摩擦力越大,越有利于获得较高的释放位置精度。

与立方形的微小物体比较,球形物体因为容易滚动且与基底的接触面积较小,释放时更容易发生水平方向上的移动,导致较大的位置误差。对 NaCl 立方晶体(尺寸约  $120 \mu\text{m} \times 110 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ )进行了释放实验。实验采用与基底接触的释放方

式。释放过程中未观察到晶体有明显的位移(图9,视频监控系统的分辨率约 $1.2\ \mu\text{m}$ )。因此,选用球形物体进行释放位置精度研究是比较稳妥和保守的。

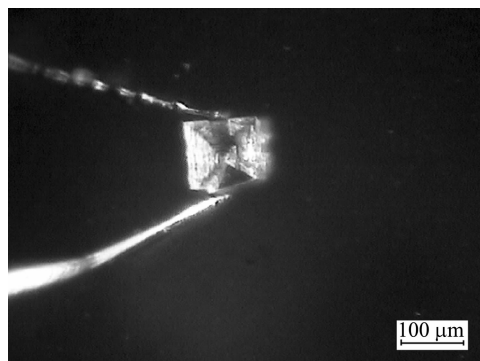


图9 微操作器释放 NaCl 立方晶体  
Fig. 9 Released NaCl cubic crystal

#### 4.4 操纵环境的影响

微器件与微操作器之间的粘附力主要来源于二者之间的毛细力、范德华力和静电力。两微小物体之间的接触面积越大粘附力越显著。在潮湿的大气环境中,粘附力中表现最为显著的常常是毛细力<sup>[10]</sup>。随

着湿度的降低,毛细力也逐渐被削弱。范德华力可以通过提高器件和夹持臂的表面粗糙度等减小接触面积的措施来削弱。导电且接地良好的夹持臂和基底有助于电荷的释放,会削弱静电力的影响。因此,适当控制环境有助于削弱微操作器与微器件间的粘附力,从而提高释放位置精度。

## 5 结 论

本文设计并实现了一种利用压电陶瓷双晶片驱动的微操作器。在 $80\ \text{V}$ 的驱动电压下,微操作器的夹持臂可以闭合约 $200\ \mu\text{m}$ 的距离。在对直径约 $170\ \mu\text{m}$ 的高分子小球的操纵中,实现了 $2\ \mu\text{m}$ 的释放位置精度。分析和实验表明,减小释放距离、增加夹持臂和驱动器的对称性、选择适当刚度的夹持臂、控制夹持力的大小、控制微操纵环境等措施都有助于提高微操作器释放微器件的位置精度。

#### 参考文献:

- [1] NELSON B J, ZHOU Y. Sensor-based microassembly of hybrid MEMS devices[J]. *IEEE Control Systems*, 1998, 18(6):35-45.
- [2] ZESCH W, BRUNNER M, WEBER A. Vacuum tool for handling microobjects with a nanorobot [C]. *Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1997: 1761-1766.
- [3] WU J, LU J, CHU J. Handling micro objects by adhesion forces using gilt probe[C]. *4<sup>th</sup> International Workshop on Microfactories*, 2004:182-187.
- [4] 李勇, 李玉和, 李庆祥, 等. 基于体硅工艺的静电致动微夹持器制作工艺分析[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(2):109-113.  
LI Y, LI Y H, LI Q X, *et al.* Fabrication process analysis for electrostatically actuated micro-gripper based on silicon bulk micromachining[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(2):109-113. (in Chinese)
- [5] DU H, SU C, LIM M K, *et al.* A micromachined thermally-driven gripper: a numerical and experimental study[J]. *Smart Materials and Structures*, 1999, 8(5):616-622.
- [6] SUN L, CHEN J, SUN P. The design of milli-grippers using piezoelectric actuator as well as electro-magnetic force[C]. *Proceedings of 1995 IEEE 6<sup>th</sup> International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1995:199-204.

- [7] 胡小唐, 郭有, 刘安伟, 等. 微探针电化学加工机理及尺寸控制技术[J]. 化工学报, 1995, 45(5):557-561.  
HU X T, GUO Y, LIU A W, *et al.* Mechanism of micro-tip electrochemical etching and tip radius control technique[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 1995, 45(5):557-561. (in Chinese)
- [8] HUANG C, LIN Y Y, TANG T A. Study on the tip-deflection of a piezoelectric bimorph cantilever in the static state[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, 14:530-534.
- [9] FEARING R S. Survey of sticking effects for micro parts handling[C]. *Proceedings of 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems*, 1995:212-217.
- [10] TSUCHITANI S, SUZUKI S, MATSUMOTO M, *et al.* Theoretical study on the surface force in microstructures[J]. *Transaction of the Society of Instrument and Control Engineer*, 2001, E-1(1):1-9.

**作者简介:**吴建华(1979—),男,四川南江人,中国科学技术大学博士研究生,研究方向为微器件装配技术。jhw@mail.ustc.edu.cn