

文章编号 1004-924X(2013)08-2071-08

## 超微量点胶方法与实验

张勤<sup>1\*</sup>, 徐策<sup>1</sup>, 徐晨影<sup>1</sup>, 青山尚之<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东广州 510640;

2. 日本东京电气通信大学机械工程与智能系统系, 日本东京 182-8585)

**摘要:**针对微装配/密封工程对用胶量超微化( $\leq 1$  pL)的需求,提出了一种既适用于接触式点胶,也适用于非接触式点胶的超微量点胶方法。采用移液针穿过装有胶液的玻璃微管,在移液针先端吸附微小胶滴,当移液针先端靠近点胶面时,其先端吸附的微小胶滴与点胶面接触,移液针离开点胶面后,微小胶滴的一部分将残留在点胶面上,实现超微量点胶。通过匹配点胶的参数,实现点胶量的控制。该方法可以适用于任何黏度( $1 \sim 3.5 \times 10^5$  cP)的胶液、任意空间方向的超精密点胶。实验讨论了移液针直径和点胶距离(移液针先端与点胶面的距离)对点胶性能(胶斑直径)的影响;在此基础上,匹配移液针直径、点胶距离、玻璃微管内径和点胶速度等参数,实现了胶液黏度为 971 cP,点胶量为 40 fL、170 fL、180 fL 在 3 种亲水性不同的点胶面上的微量点胶;以及胶液黏度为  $3 \times 10^4$  cP,胶斑直径为 243.9  $\mu\text{m}$  时的超微量点胶。实验结果验证了提出方法的可行性。

**关键词:**超微量点胶;点胶控制;点胶分析;高黏度

**中图分类号:** TH706 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132108.2071

## Approach and experiment of ultra-micro dispensing

ZHANG Qin<sup>1\*</sup>, XU Ce<sup>1</sup>, XU Chen-ying<sup>1</sup>, AOYAMA Hisayuki<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical & Automotive Engineering,

South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Department of Mechanical Engineering & Intelligent Systems, University  
of Electro-communications, Tokyo 182-8585, Japan)

\* Corresponding author, E-mail: zhangqin@scut.edu.cn

**Abstract:** To satisfy the requirement of an ultra-micro dispensing volume no more than 1 pL in micro-assembly and sealing engineering, an ultra-micro dispensing method applicable to both contact dispensing and non-contact dispensing was presented. In this method, a needle was moved through the capillary equipped with dispensing fluid and the droplet was adhered to its tip. When the needle tip approached to the target surface, the dispensing could be achieved due to the interfacial tension between the adhered droplet and the target surface. The dispensing volume could be easily controlled by matching the parameters of dispensing process. This method is suitable for any viscosity dispensing fluid ranging from 1 cP to  $3.5 \times 10^5$  cP, and can dispense for spatial arbitrary directions. Based on an ultra-micro dispensing experiment platform built in this paper, the influences of needle diameter and gap

**收稿日期:** 2013-03-15; **修订日期:** 2013-03-27.

**基金项目:** 广东省国际合作计划资助项目(No. 2012B050600011); 广东省教育厅高校国际科技合作创新平台资助项目(No. GJHZ1002); 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室开放基金资助项目(No. SKLRS-2010-MS\_16)

(the distance between needle tip and target surface) on the size of dispensing spot were investigated. According to the studies, proper needle diameters, gaps, inner diameters of capillary and dispensing velocity were chosen, the ultra-micro dispensing with the volume of 40 fL, 170 fL and 180 fL was achieved when the fluid viscosity was 971 cP and the dispensing spot diameter was 243.9  $\mu\text{m}$ , as well when the viscosity was up to  $3 \times 10^4$  cP. The experimental results verify that the proposed method is feasible.

**Key words:** ultra-micro dispensing; dispensing control; dispensing analysis; high viscosity

## 1 引言

点胶技术的应用范围很广,从半导体封装工业、集成电路产业、SMT/PCB 装配业到一般性工业的焊接、注涂和密封,点胶技术都起着至关重要的作用。

按照点胶原理的不同,经典的流体点胶技术主要有接触式和非接触式<sup>[1-3]</sup>。针对接触式微量点胶方法,Jeffrey P. Fugere 等人<sup>[4-5]</sup>提出一种螺旋泵式微量点胶方法,通过对点胶针进行精细的设计、选择可编程精密控制的微量螺旋泵等措施保证微量胶斑尺寸,其胶斑最小尺寸可控制在 254  $\mu\text{m}$ ,但由于该方法在电机加速和减速过程中存在系统响应延迟,很难快速精密地控制点样过程。史亚莉等人<sup>[6-7]</sup>提出了时间/压力型微量点胶方法,针对惯性约束核聚变实验中靶丸与充气管之间的联接和密封的装配要求,设计和搭建了一个时间/压力型 pL 级微点胶平台,该平台可实现的最小点胶量为 2 pL,但由于采用加压方式将胶液挤出,加压过程中产生的振动会影响点胶的一致性,且压力导致针筒中温度升高,影响胶液黏度,这些因素都影响点胶量的控制,该方法仅适用于黏度不大于 500 cP 的胶液。除此之外,接触式点胶还有大量式(多针式转印技术、丝网印刷)、截流阀式、活塞泵式(容积式)<sup>[1-3,8]</sup>等方法。由于点胶原理上的问题,接触式点胶很难实现重复精度高的微量点胶,点胶量的精确调整比较繁琐,价格昂贵且不易清洗,而优点是适用的胶液黏度范围较大。

非接触式点胶主要是喷射式点胶,在微量点胶方法上,Peng Peng 等人<sup>[9-10]</sup>将气液两相流体同时运用到流体点胶技术中,提出了一种微量点胶设计方案,利用气液两相形成一种气泡与液滴相互间隔的稳定流动活塞流,使胶液变成液滴从喷头喷出进行点样,单次喷射的点胶量能达到

660.6 nL;Jonas Bergkvist 等人<sup>[11]</sup>提出 PZT 三角架布局的新型驱动器结构,相对于传统的堆叠式 PZT 驱动结构具有微型化特点,使得点胶系统更适应于微小操作空间的需求,其点胶量可以控制在 23~60 pL,但该方法主要适用于低黏度的胶液(如等离子水),对高黏度胶液的适用性有待验证。Mohammed Jalal Ahamed 等人<sup>[12]</sup>采用压电驱动器,通过活塞头推动一个弹性膜片,以使弹性膜片弯曲产生压力脉冲,喷出液滴,实验和分析表明该系统点胶量可以控制在 50 pL~1 nL,但是由于在喷嘴尖处存在控制“死区”,该部分胶液不能得到很好地使用,同时对于高黏度胶液的适用性也有待验证。非接触式微量点胶除了上述几种方法外,按其驱动方式还有热驱动<sup>[13]</sup>、气动<sup>[14]</sup>、静电驱动<sup>[15]</sup>、超声驱动<sup>[16]</sup>等,一般均需要控温装置,控制胶体黏度的变化,设备复杂化且很难适用于胶液黏度大的情况。

随着机械电子产品的微型化,微装配部件的尺寸越来越小,对微量点胶提出了更高的要求。为了满足微装配/密封工程中对胶量的超微量化( $\leq 1$  pL)需求,本文提出超微量点胶方法<sup>[17-18]</sup>。与现有的点胶技术相比,该方法既适用于接触式点胶,也适用于非接触式点胶;通过改变移液针先端的尺寸、控制移液针吸附微小液滴与点胶面的相对接触量,可以很容易地控制胶斑的大小,实现 fL 级超微量点胶;根据胶液黏度,匹配不同的玻璃微管和移液针,控制吸附于移液针先端的微液滴与点胶面的接触量;从而实现空间各个方向、各种粘度胶液的超微量点胶;移液针,玻璃微管可以简单地更换,维护更方便。

## 2 超微量点胶方法

超微量点胶的原理如图 1 所示, $v$  为移液针上下移动的速度。移液针穿过装有胶液的玻璃微

管时,移液针先端吸附的微小液滴,如图 1(b),当移液针靠近点胶面时,移液针先端的微小液滴与点胶面接触,由于点胶面和液体之间的界面张力,微小液滴涂在点胶面上,移液针离开点胶面后,微小液滴的一部分残留在点胶面上,如图 1(d),实现超微量点胶。通过改变移液针的直径,使移液针先端吸附的液滴量改变,从而可以控制胶斑的尺寸;通过调整移液针先端与点胶面之间最小距离(以下简称:点胶距离 Gap),使移液针先端吸附的微小液滴与点胶面之间的接触面积变化,从而实现胶斑尺寸的超微量调整。匹配玻璃微管的内径、移液针的材料和尺寸等参数,可以适应不同黏度的胶液实现超微量点胶。在微小尺度下,液体 Bond 数很小,表面力起主要作用<sup>[19]</sup>,液滴的重力对液滴形态的影响可以忽略,因此该方法可以适用于空间任意方向的点胶。如图 2 所示。

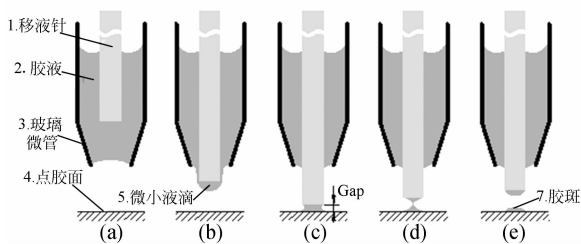


图 1 超微量点胶原理图

Fig. 1 Schematic diagram of ultra-micro dispensing

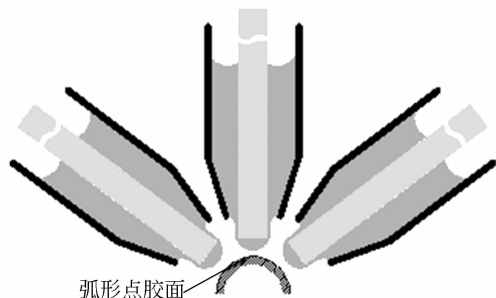


图 2 空间点胶示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spatial dispensing

### 3 实验研究

#### 3.1 实验方法

为了便于观察,减少胶液蒸发对实验结果的影响,选取黏度较大的胶液,移液针材料为钨丝,

经过电解研磨加工成需要的尺寸。点胶面选用玻璃,并使用氟化物(FS-1010TH-2.0)对点胶面进行浸泡、清洁,以改变胶液与点胶面之间的接触性质,便于显微镜下的观察和测量,并且可以减少表面粗糙度对点胶性能的影响。实验原理框图如图 3 所示。玻璃点胶面固定在微动点胶平台上,控制微动点胶平台的移动,可以实现多次点样。移液针的上下移动速度、移动量由计算机控制精密微动平台(KOUZH ZA 系列)实现。移液针与点胶面间的 Gap 通过超景深显微系统观测(镜头:VH-Z35、控制器:VH-5000;KEYENCE),并由显示器显示(TRINITRON COLOR VIDEO MONITORGM-1415),根据显示图像进行 Gap 的调整。点样后的胶斑通过红色半导体激光型超景深形状测量显微镜(VK-8550;KEYENCE)测量和观察。由于液滴为透明体,液滴的高度非常小,液滴表面有时出现干涉纹,通过超深度显微镜测量胶斑时,显微镜很难正确地捕捉液滴表面形状和高度,很难准确测量其点胶量,因此实验中,我们通过测得的胶斑直径大小来描述点胶量的变化

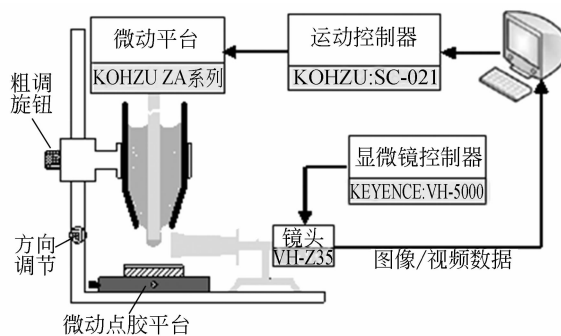


图 3 实验原理框图

Fig. 3 Block diagram of experiment

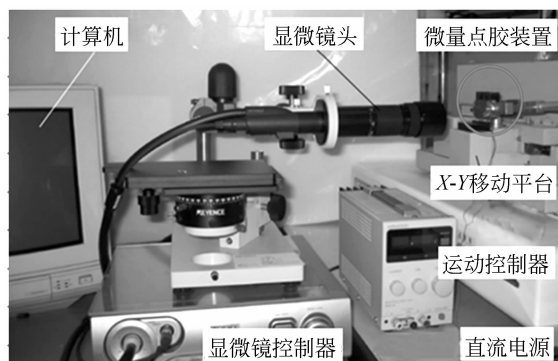


图 4 实验装置实物图

Fig. 4 Physical picture of experimental device

或者通过多次点样后消耗的总胶量来估算每次点胶量。实验装置如图 4 所示。

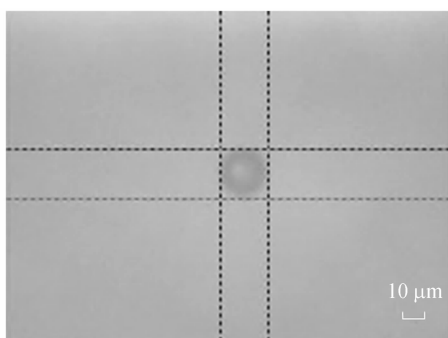
### 3.2 点胶性能分析实验

点胶的性能受到诸多因素的影响,当点胶面、胶液、移液针的材质、移动速度一定的条件下,移液针的直径和移液针先端与点胶面的距离 Gap 是影响点胶量或胶斑尺寸的重要因素。这里通过实验研究移液针直径、Gap 对胶斑的影响。

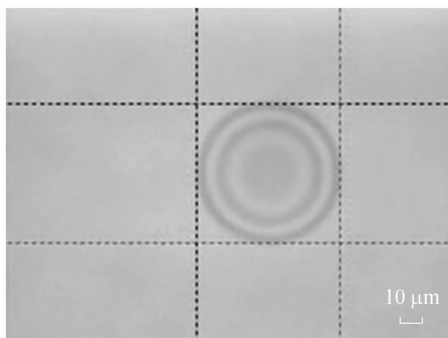
#### 3.2.1 移液针直径对胶斑的影响

为了减少误差,相同参数下进行多次点样。实验时,首先粗调点胶装置,使玻璃微管与点胶面间的距离为 1 mm,然后调整驱动移液针微动的平台向下移动,每次移动  $1\ \mu\text{m}$ ,根据显微图像调整移液针先端与点胶面的距离为一定值 Gap,再控制微动平台向上移动 1.5 mm,该位置作为移液针的初始位置,控制移液针往复运动 1.5 mm,完成多次点样。

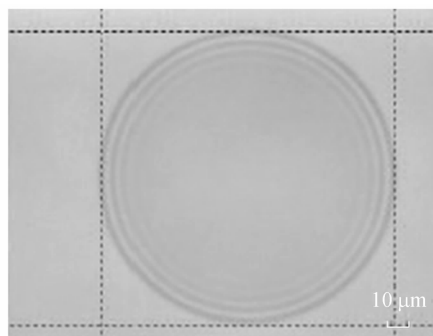
实验中,采用胶液黏度为 971 cP 的 TSF451-1000,玻璃微管先端内径为  $125\ \mu\text{m}$ ,点胶速度为  $1\ \text{mm/s}$ ,Gap 为  $5\ \mu\text{m}$ ,移液针直径分别为 10、30、70、 $100\ \mu\text{m}$  4 种情况下,进行点样试验,每组参数做 10 次,通过超景深显微镜观察到的胶斑如图 5



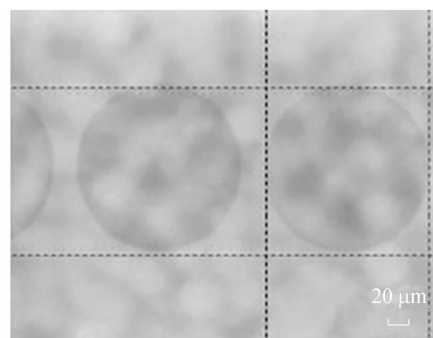
(a)放大 200 倍  
(a)Magnified 200 times



(b)放大 200 倍  
(b)Magnified 200 times



(c)放大 200 倍  
(c)Magnified 200 times



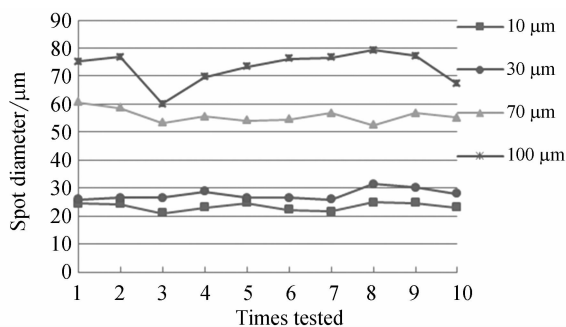
(d)放大 400 倍  
(d)Magnified 400 times

图 5 液针直径对胶斑的影响实验

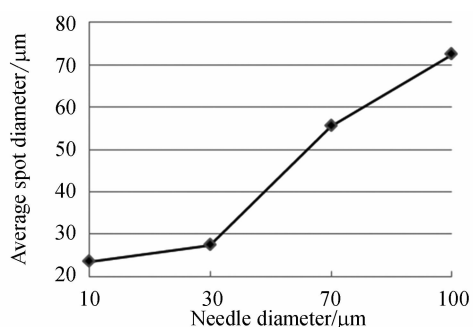
Fig. 5 Experiment for influence of needle's diameter on dispensing spot

所示,各组 10 次试验结果分布如图 6(a)所示,重复精度约为 86.39%、84.08%、92.14%、86.35%,对试验数据进行处理后,得到移液针直径与胶斑尺寸的关系如图 6(b)所示。

由图 5 和图 6 可知,在其他参数相同的条件下,随着移液针直径的增加,移液针先端吸附的胶液量增加,点胶后,胶斑直径将增大;但在移液针先端直径较小时(如  $10\ \mu\text{m}$  左右),移液针先端直径的变化对胶斑影响相对减少。



(a)实验结果  
(a)Experiment results

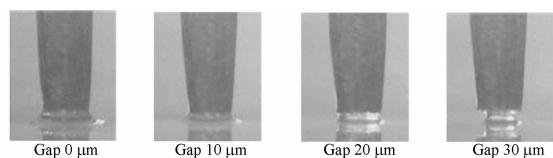


(b) 移液针直径对胶斑的影响

(b) Influence of needle's diameter on dispensing spot

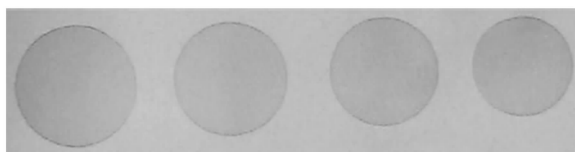
图 6 移液针直径对胶斑影响实验数据

Fig. 6 Experimental data and result for influence of needle's diameter on dispensing spot



(a) 点胶距离 Gap

(a) Dispensing Gap



(b) 对应不同 Gap 的胶斑

(b) Dispensing spot corresponding to the Gap

图 7 点胶距离 Gap 对胶斑影响实验

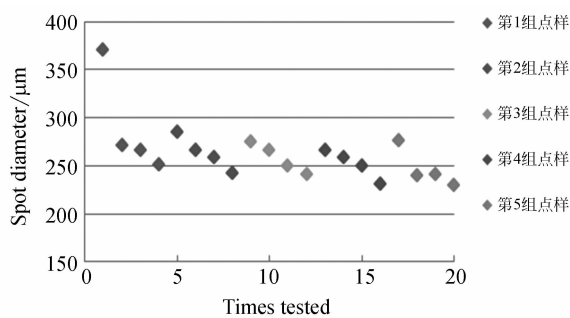
Fig. 7 Experiment for influence of Gap on dispensing spot

### 3.2.2 点胶距离 Gap 的影响

移液针直径为 100 μm,玻璃微管先端内径为 800 μm,胶液采用黏度为 5 000 cP 的 TSF451-5000,点胶距离 Gap 依次为 0、10、20、30 μm 4 种情况下进行了点样实验,观察到的 Gap 如图 7(a)所示,测得胶斑尺寸如图 7(b)所示。4 种不同点胶距离 Gap 下,分别进行 5 次点样,测量胶斑直径结果如图 8(a)所示,数据处理后得到的 Gap 与胶斑尺寸的变化关系如图 8(b)所示。相同参数下的重复精度分别为 96.41%、96.98%、96.55%、95.50%。

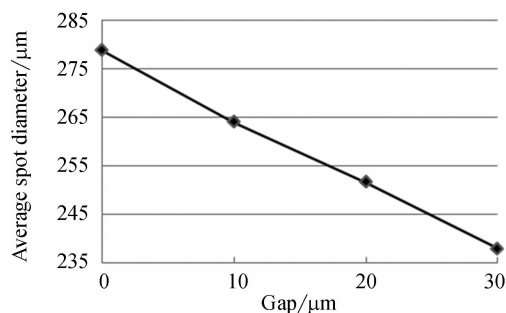
由图 8 可知,在其他参数相同的条件下,随着点胶距离 Gap 的减小,胶斑的直径增大,基本上呈现线性反比例关系。因为 Gap 变小,胶滴与点

胶面充分接触,与点胶面的湿润半径增大,残留在点胶面上胶液体积相应增加。从实验还可以看出,当 Gap 较小(0~10 μm)时,胶斑的重复精度较高。分析原因主要考虑随着 Gap 的减小,移液针先端的微小振动对胶斑的影响变小。



(a) 实验结果

(a) Experiment results



(b) Gap 对胶斑的影响

(b) Influence of Gap on dispensing spot

图 8 点胶距离 Gap 对胶斑直径的影响实验结果

Fig. 8 Experimental result and data for influence of Gap on diameter of dispensing spot

### 3.3 微量点胶实验

#### 3.3.1 超微量(fL 级)点胶实验

在 3.2 节的点胶性能实验与分析的基础上,选取玻璃微管的内径 125 μm,移液针为钨丝棒,其先端直径为 10 μm,点样速度为 1 mm/s,胶液黏度为 971 cP,点胶面分别为洗净的玻璃表面,经硅油处理的玻璃表面和经氟处理的玻璃表面,这 3 种点胶面与胶液的接触角逐渐变大。分别进行接触式点胶(Gap 为 0)实验。每套参数实验分为 10 组,每组点样 10 次,根据胶液的使用量,估算每组的平均点胶量,实验结果如图 9 所示。

从实验可以看出,在亲水性不同的点胶面上都可以实现 fL 级点胶。点胶面的亲水性越好(接触角越小),点胶量相对越大;其均值分别是 180、170、40 fL。从图 9(彩图见期刊电子版)可知:相

同参数下,各组实验结果有一定的偏差,分析其原因主要考虑,点胶点处的灰尘以及点胶瞬间移液针的微小振动等随机因素的影响。合理匹配点胶过程中各部分的参数,可以实现 fL 级的点胶量。

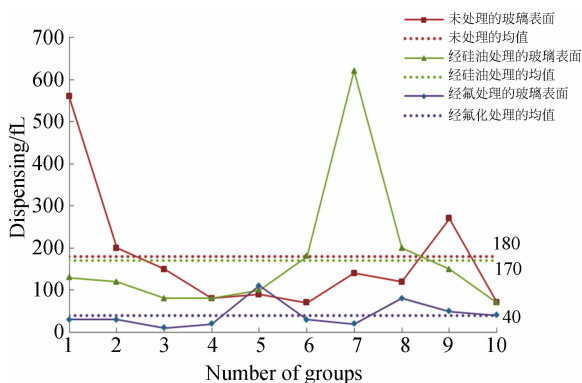
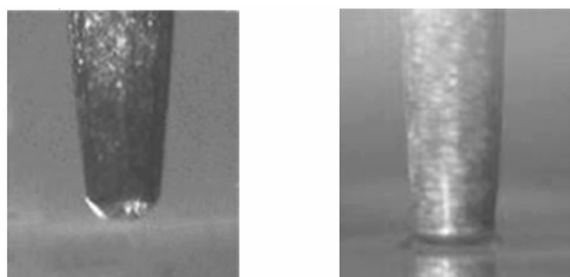


图 9 超微量 (fL) 级点胶实验结果

Fig. 9 Experimental result of ultra-micro dispensing of fL calss

### 3.3.2 高黏度胶液点样实验

胶液黏度较大为  $3 \times 10^4$  cP 时,选取玻璃微管的内径为 0.8 mm,移液针的直径为 100  $\mu\text{m}$ , Gap 为 10  $\mu\text{m}$ ,点胶面为洗净的玻璃表面,进行了点胶实验。实验时,手动调整 Gap,首先调整粗调钮,使玻璃管先端与涂胶面的距离为 1.8 mm,然后逐渐控制微动平台步进向下运动,每次步长为 1  $\mu\text{m}$ ,通过显微镜观察 Gap 的变化,如图 10 所示。点胶后,移液针的向上移动速度 1 mm/s,胶斑通过显微镜 (VK-8550; KEYENCE) 观测。重复上述过程 5 次,点样实验的结果如图 11 所示,



(a)微小液滴未接触点胶面 (b)移液针处于 Gap 10  $\mu\text{m}$  处  
(a)Micro-droplet doesn't (b)Needle's position at the  
contact with the target surface Gap 10  $\mu\text{m}$

图 10 高黏度胶液 ( $3 \times 10^4$  cP) 点样实验

Fig. 10 Dispensing experiment with high viscosity ( $3 \times 10^4$  cP) fluid

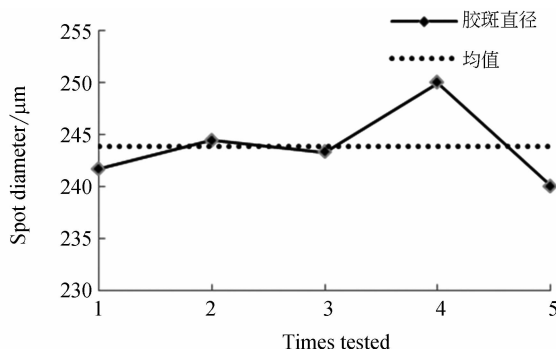


图 11 高黏度胶液 ( $3 \times 10^4$  cP) 点胶实验结果

Fig. 11 Experimental result of high viscosity ( $3 \times 10^4$  cP) dispensing

平均胶斑直径为 243.9  $\mu\text{m}$ 。

从实验可知,胶液黏度较大时,提出的点胶方法也能够实现稳定的微量点胶。

### 3.4 实验结果分析

超微量点胶过程是一个受多种因素作用影响的过程。移液针的参数,胶液特性以及点胶面的亲水性等都会影响点胶量。目前国内外商业点胶机<sup>[4-6]</sup>最小点胶量一般为 nL 级,现有的非接触式<sup>[9-12]</sup>与接触式<sup>[6-7]</sup>微量点胶技术,主要适用于低黏度胶液 ( $\leq 500$  cP),且点胶量最小控制在 2 pL ~ 1 nL。高黏度胶液的微量点胶, fL 级的超微量点胶技术还处在研究阶段。在 3.3 节的实验中,通过匹配移液针直径、点胶距离、点胶速度等参数实现了黏度 971cP 的胶液在 3 种亲水性不同的点胶面上的 40、170、180 fL 的超微量点胶;高黏度胶液  $3 \times 10^4$  cP,胶斑直径为 243.9  $\mu\text{m}$  的微量点胶。实验结果表明,与现有的微量点胶技术相比,提出的方法可以实现 fL 级的超微量点胶和高黏度的微量点胶。

## 4 结 论

本文提出了超微量点胶方法,该方法既可以实现接触式点胶,也可以实现非接触式点胶。通过改变移液针先端的尺寸、控制移液针吸附的微小液滴与点胶面的接触量,可以很容易地控制胶斑的尺寸。根据胶液黏度,匹配不同的玻璃微管、移液针的尺寸,控制吸附于移液针先端的微液滴与点胶面的接触量,可以实现空间各个方向、各种黏度胶液的超微量点胶。通过实验详细分析了移

液针直径和点胶距离 Gap 对点胶量的影响;在此基础上,匹配移液针直径、点胶距离和点胶速度等参数实现了胶液黏度 971 cP,在 3 种亲水性不同

的点胶面上的 40、170、180 fL 的 fL 级超微量点胶;高黏度胶液  $3 \times 10^4$  cP,胶斑直径为 243.9  $\mu\text{m}$  的微量点胶。

### 参考文献:

- [1] 孙道恒,高俊川,杜江,等. 微电子封装点胶技术的研究进展[J]. 中国机械工程,2011,22(20):2513-2519.  
SUN D H, GAO J C, JIANG Y W. Advances in fluid dispensing technology for micro-electronics Packaging [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011,22(20): 2513-2519. (in Chinese)
- [2] 舒霞云,张鸿海,刘华勇,等. 高粘度微量喷射系统的实验研究[J]. 中国科学,2010,40(2):171-176.  
SHU X Y, ZHANG H H, LIU H Y. Experimental study on high viscosity fluid micro-droplet jetting system [J]. *Sci China Tech Sci*, 2010, 42(2):171-176. (in Chinese)
- [3] LI J P, DENG G L. Technology development and basic theory study of fluid dispensing -a review [C]. *Proceeding of the Sixth IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis (HDP04)*, Shanghai, China: CPMT, 2004: 198-205.
- [4] JEFFREY P F. Precision needle dispensing—get to the point [J]. *Chip Scale Review*, 2004: 1-4.
- [5] JEFFREY P. F. Micro-dispensing pastes and adhesives [J]. *HDI*, 2001, 10: 15-18.
- [6] 史亚莉,张文生,徐德,等. 时间/压力型 pL 级微点胶技术[J]. 光学精密工程,2011,19(11):2724-2730.  
SHI Y L, ZHANG W S, XU D. Time/pressure PL micro-bonding technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2724-2730. (in Chinese)
- [7] 史亚莉,李福东,杨鑫,等. 用于微胶接的 pL 级点胶方法[J]. 光学精密工程,2012,20(12):2744-2750.  
SHI Y L, LI F D, YANG X, et al.. pL class adhesive dispensing approach for micro bonding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2744-2750. (in Chinese)
- [8] MINGGAN L, CHEN X B. Recent patents in fluid dispensing processes for electronics packaging [J]. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2009, 2:19-25.
- [9] PENG P, ZHANG J H, ZHANG J S. A new two-phase fluid dispensing technology for the adhesive distribution [C]. *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Beijing, China: ICMA*, 2011: 1242-1246.
- [10] PENG P, ZHANG J H, ZHANG J S. Simulations for a novel fluid dispensing technology based on gas-liquid slug flow [C]. *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, Shanghai, China: ICEPT-HDP*, 2011: 756-760.
- [11] JONAS B, TOBIAS L, JOHAN N. Miniaturized flow through micro-dispenser with piezoceramic tripod actuation [J]. *Journal of Microelectronic Mechanical Systems*. 2005, 14(1): 134-140.
- [12] MOHAMMED J A, SERGEY I G, RIDHA B M, et al.. A piezoactuated droplet-dispensing microfluidic chip [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, 19(1): 110-119.
- [13] SEN K, DARABI J. Droplet ejection performance of a monolithic thermal inkjet print head [J]. *J. Micromech. Microeng*, 2007, 17(8): 1420-1427.
- [14] KOLTAY P, STEGER R, BOHL B, et al.. The dispensing well plate: A novel nanodispenser for the multiparallel delivery of liquids (DWP Part I) [J]. *Sens. Actuators A, Phys*, 2004, 116(3): 483-491.
- [15] CHOI W K, LEBRASSEUR E, AIHAQ M I, et al.. Nano-liter size droplet dispenser using electrostatic manipulation technique [J]. *Sens. Actuators A, Phys*, 2007, 136(1): 484-490.
- [16] DEMIRCI U. Acoustic picoliter droplets for emerging applications in semiconductor industry and biotechnology [J]. *J. Microelectromech Syst*, 2006,

15,(4):957-966.

- [17] 张勤,杜启亮,刘俊. 超微量点胶装置及方法:中国,102101097A[P]. 2011.  
ZHANG Q,DU Q L,LIU J. Ultra micro glue dispensing device and approach: China, 102101097A [P]. 2011. (in Chinese)

- [18] LIU J, ZHANG Q, DU Q. Ultra micro glue dispensing device:CN201949996-U[P]. 2011.

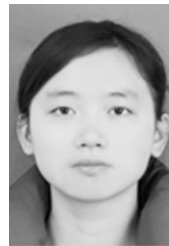
- [19] 高世桥,刘海. 毛细力学[M]. 北京:科学出版社, 2011.

- GAO S Q, LIU H. *Capillary Mechanics* [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)

#### 作者简介:



张 勤(1964—),女,辽宁锦州人,副教授,1991年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2000年于日本国立金泽大学机械电子工程专业获得博士学位,主要从事微小机器人及应用、精密仪器等方面的研究。E-mail: zhangqin@scut.edu.cn



徐晨影(1990—),女,四川乐山人,硕士研究生,主要从事微小机器人及自动化方面的研究。E-mail: xuchenyinger@163.com



徐 策(1988—),男,安徽铜陵人,硕士研究生,主要从事微小机器人及自动化方面的研究。E-mail: xucescau2007@163.com



青山尚之(1958—),男,日本东京人,教授,1983年于东京工业大学获得硕士学位,1988年于东京工业大学获得博士学位,主要从事微细作业机器人及应用、智能机械等方面的研究。E-mail: aoyama@mce.uec.ac.jp

(版权所有 未经许可 不得转载)