

## pL级超微量点胶笔的开发及其在封孔中的应用

张勤, 叶斯伦, 罗凯, 徐策

引用本文:

张勤, 叶斯伦, 罗凯, 等. pL级超微量点胶笔的开发及其在封孔中的应用[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(5): 1132–1139.

ZHANG Qin, YE Si-lun, LUO Kai, et al. Development and application on hole-sealing of pL ultra-micro dispenser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(5): 1132–1139.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202805.1132>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 跨尺度微管微球三维半自动装配点胶系统

3D semi-automatic assembly and dispensing system for trans-scale parts of micro-tube and micro-sphere

*光学精密工程*. 2015, 23(11): 3121–3128 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152311.3121>

### 双压电驱动高频喷射点胶阀的设计与实验

Design and Experiment of High Frequency Jetting Dispenser Driven by Double Piezoelectric Stacks

*光学精密工程*. 2019, 27(5): 1128–1137 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192705.1128>

### 基于柔顺机构的压电式微喷点胶系统设计与性能分析

Design and performance analysis of piezoelectric micro-spray dispensing system based on compliant mechanism

*光学精密工程*. 2019, 27(9): 1990–2001 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192709.1990>

### 压电驱动微点胶器的控制与实验

Control and experiment of micro-dispenser by piezoelectric drive

*光学精密工程*. 2016, 24(5): 1042–1049 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162405.1042>

### 压电驱动液压放大式喷射系统

Piezoelectric driven hydraulic amplification jetting system

*光学精密工程*. 2015, 23(6): 1627–1634 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152306.1627>

文章编号 1004-924X(2020)05-1132-08

# pL 级超微量点胶笔的开发及其在封孔中的应用

张 勤<sup>1\*</sup>, 叶斯伦<sup>1</sup>, 罗 凯<sup>1</sup>, 徐 策<sup>2</sup>

- (1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641;
2. 中国文昌航天发射场, 海南 文昌 571300)

**摘要:**狭小空间内 pL 级超微量点胶是胶接技术的难点, 针对这个问题, 开发了 pL 级超微量自动点胶笔。基于转印式点胶分液原理, 通过移液针穿过装有胶液的玻璃微管, 获取胶滴, 利用胶滴在点胶面上的转移分离, 实现超微量点胶。开发的点胶笔全长仅为 65 mm, 最小分辨率 0.24  $\mu\text{m}/\text{step}$ , 最大行程 7 mm, 点胶笔通过 USB 接口连接到上位机上, 可以实现对点胶过程的控制。通过大量实验, 研究了点胶笔的性能, 并将其应用到直径 170 mm, 长度 350 mm 小空间密封腔内, 直径 5~20  $\mu\text{m}$  的微孔胶封上。实验结果表明: 开发的点胶笔, 装夹方便, 重复精度高, 即适用于覆盖式封孔, 也适用于插入式封孔。通过调整点胶笔移液针的种类、尺寸、移动速度和封胶方式, 可以在密闭小空间内, 压力环境变化的工况下, 实现微孔的 pL 级密封, 最小封胶量为 4.4 pL, 满足工程需要, 为小空间内的封胶提供了有效技术途径。

**关 键 词:** pL 级点胶; 自动点胶笔; 微孔密封; 小空间

**中图分类号:** U649.72 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202805.1132

## Development and application on hole-sealing of pL ultra-micro dispenser

ZHANG Qin<sup>1\*</sup>, YE Si-lun<sup>1</sup>, LUO Kai<sup>1</sup>, XU Ce<sup>2</sup>

- (1. School of Mechanical & Automotive Engineering,  
South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
  2. Wenchang Satellite Launch Center, Wenchang 571300, China)
- \* Corresponding author, E-mail: zhangqin@scut.edu.cn

**Abstract:** Adhesive bonding technology faces challenges regarding achievement of pL-magnitude ultra-micro dispensing in narrow spaces. To address this problem, a pL-magnitude ultra-micro automatic dispenser was designed in this study. The transfer-type sealing method was adopted, and a dispensing needle was driven to traverse through a glass microtube with loading glue; adherence was achieved with a micro-droplet. Subsequently, the micro-droplet could be partly transported to the target surface. The dispenser, which was 65 mm in total length and had a minimum resolution of 0.24  $\mu\text{m}/\text{step}$  and a maximum stroke of 7 mm, was linked to the upper computer via a USB interface, using which the dispensing process was controlled. An experimental platform was constructed, and a manual micro-positioning platform with a resolution of 10  $\mu\text{m}$  was used to load a micro-ball with a micro-hole drilled on its surface. Four CCD microscopes were used to detect the position of the micro-

收稿日期: 2019-11-01; 修订日期: 2020-01-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51675187)

hole and provide visual feedback to the operator. An electronic micro-positioning platform with a resolution of  $0.2\ \mu\text{m}$  was also employed to hold the dispenser and transport it seamlessly to the correct position for hole sealing. After the hole-sealing process was completed, two optical microscopes were used to measure the size of the glue spot and assess the quality of the hole sealing. Many experiments were conducted to study the performance of the dispenser. Subsequently, the dispenser was also used to seal micro-holes of diameters varying from  $5$  to  $20\ \mu\text{m}$  in a narrow seal cavity with a diameter of  $170\ \text{mm}$  and length of  $350\ \text{mm}$ . Experimental results indicate that the glue dispenser enables excellent repeatability rates and effective covering and insertion for hole sealing. When the dispensing needle's size and types as well as the moving speed and sealing method are adjusted, it can be used to seal micro-holes with pL-magnitude-volume glue in a narrow space at different pressures. The smallest experimental glue volume was  $4.4\ \text{pL}$ , which satisfies the requirement and enables effective sealing in a narrow space.

**Key words:** pL-magnitude; automatic dispenser; hole-sealing; narrow space

## 1 引言

胶粘接技术是微装配技术的重要组成部分,微装配中的胶粘接主要应用于微小零件之间的固定、连接及密封等方面,并广泛应用在微电子器件连接、LED封装及微型系统制造等领域<sup>[1-2]</sup>。随着微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)的迅猛发展和机械电子产品的微小化,对微量胶粘接技术提出了更高的要求,在微观尺度下,如何实现高可靠性胶粘接是微装配中的重要研究课题。

点胶分液的机理、设备的构成、控制过程和工艺直接影响胶粘接质量和可靠性,点胶分液技术是微装配胶粘接技术的核心。在微量胶液分配技术上,主要分为接触式和非接触式两种方法。接触式点胶<sup>[3-4]</sup>方法主要有时间/压力式、螺杆泵式、活塞泵式、针式转印式和丝网印刷式分配方法。非接触式主要有喷射式点胶<sup>[5]</sup>,与接触式胶液分配方法相比,喷射式分液特点是速度快,效率高,出胶量小,但一般只适用于低黏度胶液。基于上述的分液技术,目前商业用点胶机的最小胶量可以控制在  $2\ \text{nL}$  左右,国内微机械装配中使用到的最小单滴胶量大约为  $10\ \text{nL}$  左右<sup>[6]</sup>,不能满足 pL 级的胶量控制要求。为此国内外学者作了大量研究工作。

在 pL 级点胶技术应用上,史亚莉等人<sup>[6-7]</sup>基于时间/压力式分配原理,通过改进细胞实验用的微注射器,搭建了一个 pL 级点胶平台,实现了靶

丸充气管胶接密封装配,最小胶量为  $2\ \text{pL}$ ,但提出的方法仅适用于黏度小于  $500\ \text{cp}$  的胶液,且辅助设备较多。Saurabh Mishra 等人<sup>[8]</sup>提出一种压电驱动式喷射点胶系统,能获取的最小液滴体积可达到  $30\ \text{pL}$ ,并且液滴体积一致性误差可以控制在  $6\%$  以内。Cade B. Fox 等人<sup>[9]</sup>成功将 pL 级喷射式液滴分配装置应用到药液填装中,通过控制电压、脉冲宽度和频率能精确控制单颗液滴的体积,可控体积范围为  $50\sim 800\ \text{pL}$ ,平均填装速度是  $400\ \text{个}/\text{min}$ 。文献<sup>[10]</sup>提出了一种微球点胶封孔装置,使用直径  $11\ \mu\text{m}$  的碳丝点蘸胶液,利用碳丝侧面黏附的微小球覆盖微孔,实现了直径几十微米小孔的密封,这种装置结构简单,尺寸小,虽然可实现狭小空间内的超微量点胶,但是由于碳丝点蘸胶液,其侧面形成胶滴大小受多种因素影响,携带的胶量随机性大,控制非常复杂,影响了胶斑的一致性。本课题组<sup>[11]</sup>提出一种转印式 pL 级点胶方法,该方法可以适用的黏度范围广( $1\sim 350\ 000\ \text{cp}$ ),通过匹配移液针尺寸、移液针先端与点胶面之间的微小距离,控制点胶量,最小点胶量可以控制到 pL 级。在此基础上,文献<sup>[12]</sup>通过仿真和实验研究了影响 pL 级点样性能的因素。

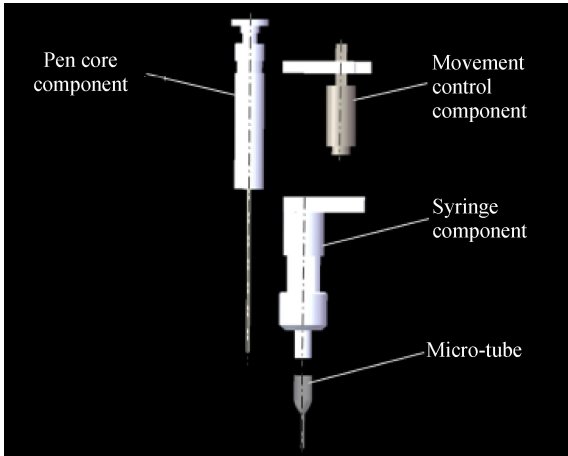
综合国内外微量胶粘结技术现状可以看出,虽然在点胶分液单元技术方面取得了很大进步,但目前应用在微装配中的 pL 级点胶装置,仍然存在适用黏度范围窄,设备复杂的问题。由于点胶装置中针头结构和喷射压力的限制,现有的点胶设备目前还很难应用于小空间内的微装配中。

为了解决这个问题,本研究基于转印式 pL 点胶原理,开发了 pL 级超微量点胶笔,体积小,重量轻,适用黏度范围广,装夹方便,便于清洗,满足小空间内微装配的需求。

## 2 pL 级自动点胶笔的结构

点胶笔采用转印式分液原理,通过移液针穿过装有胶液的玻璃微管,获取胶滴,利用胶滴在点胶面上的转移分离,实现超微量点胶<sup>[11]</sup>。通过改变移液针先端的尺寸、调整移液针吸附的微小液滴与点胶面的接触量,可以容易地控制胶斑的大小<sup>[12]</sup>。自动点胶笔的结构如图 1(a)所示,由针芯

组件、针筒组件、运动控制组件和储液微管组成。针芯组件实现移液针的装夹固定,按动移液针调整栓,可以调整针头的长短,也可以方便地更换移液针,适应不同的应用需求,同时方便移液针的清洗维护。移液针的材料可以是钨丝棒也可以是碳纤维,钨丝棒采用电化学方法加工成需要的尺寸,再通过电火花研磨尖端制成。针筒组件为针芯组件提供移动的轨道,其外侧形状可以根据点胶笔的固定需求进行设计。运动控制组件驱动针芯组件上下运动,采用微型电机作为动力源,重量 3.8 g,最小分辨率为 0.24  $\mu\text{m}/\text{step}$ ,最大行程为 7 mm。储液微管材料为玻璃,利用毛细原理储存胶液,储液微管与针筒组件采用磨口连接,便于储液微管的更换。开发的 pL 级自动点胶笔的实物如图 1(b)所示。点胶笔的全长仅为 65 mm,满足小空间内点胶要求。实际使用时,点胶笔的控制电机连接驱动器,通过 USB 接口连接到上位机上,通过软件控制点胶笔的点胶速度、点胶行程和点胶次数,连接示意如图 2 所示。点胶笔可以单独使用,也可以根据要求搭载在微动平台上使用。



(a) 点胶笔的结构图  
(a) 3D model image of dispenser



(b) 点胶笔的实物图  
(b) Real product image of dispenser

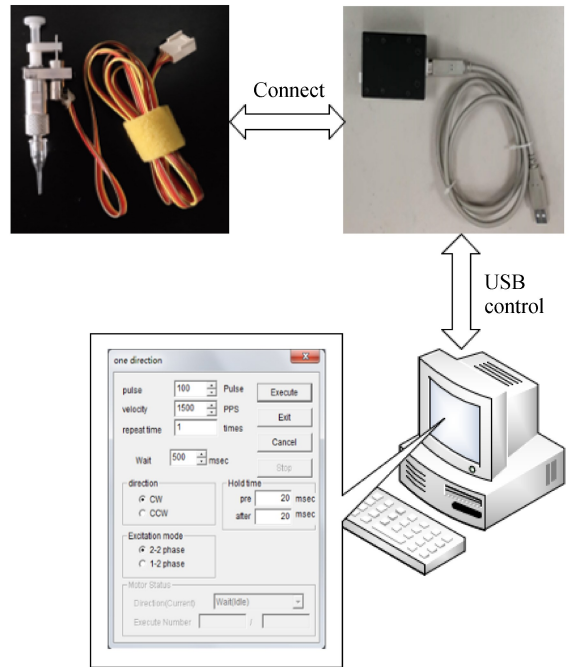


图 2 点胶笔控制连接示意图

Fig. 2 Dispenser control connection diagram

图 1 pL 级超微量点胶笔

Fig. 1 pL-magnitude ultra-micro dispenser

### 3 实验研究

#### 3.1 实验方法

超微量封胶的实验平台如图 3 所示。点胶笔装夹固定在三自由度的电动微操纵平台上(美国 Sutter 的 MP-285,分辨率  $0.2 \mu\text{m}/\text{step}$ ),实现对点胶位置的精确定位。操作对象固定在多自由度微动平台上(KOHZU),实现微零件的位置和姿态调整。在相互垂直平面内( $xoz, yoz$ ),分别设置水平和  $45^\circ$  方向两路显微视觉(NAVITAR 镜头, Baumer CCD)。水平面内  $x, y$  方向布置的两路显微视觉,放大倍数较低,可获取目标对象的整体轮廓信息; $45^\circ$  方向的视觉具有较高放大倍数,可以观测封胶局部的信息。通过显微视觉反馈,实现封胶过程的多维实时观察与精确定位。实验过程中图像信息实时传输到计算机,便于观察与记录。

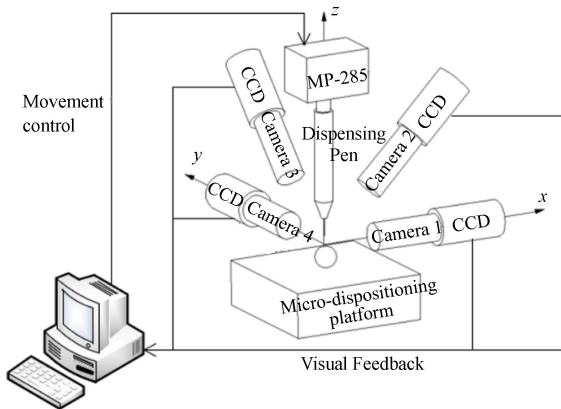


图 3 超微量点胶平台示意图

Fig. 3 Ultra-micro dispenser platform diagram

#### 3.2 重复性实验

实验所使用的移液针是经过电解研磨加工而成,将移液针安装到点胶笔的笔芯组件中,并调整其长度,使其长于微管先端  $2 \text{ mm}$ 。将点胶笔安装并固定到电动微动平台上。点胶笔的控制电机连接驱动器后,通过 USB 接口连接到上位机上,使用软件控制点胶笔的点胶速度、点胶行程和点胶次数。为了便于测量,点胶面使用玻璃载玻片,实验前放在超声波洗净器中用酒精洗净、擦干,并安装在微动平台上粘结固定,根据点样速度节拍

控制微动平台移动,可以实现多次点样。点样后载玻片上的微小胶滴分配量通过显微镜(Nikon MM-400)进行观察和测量,根据测得的胶斑直径、高度和接触角,可以计算胶斑的体积。

依次选用不同直径的移液针进行重复性点胶实验,验证点胶笔性能。移液针先端直径分别为  $25 \mu\text{m}, 35 \mu\text{m}, 50 \mu\text{m}$ ,考虑玻璃载玻片的长度和视野,设定每组实验点样 7 次,实验所用胶液为低温胶。待点胶  $12 \text{ h}$  后,胶斑完全固化,对各胶斑  $x, y$  两个方向的直径进行测量,取其平均值作为测量结果。重复点胶过程和胶斑情况如图 4 所示。图 5 是尖端直径不同,其他条件相同的点胶重复性实验结果,3 组实验(直径  $25 \mu\text{m}, 35 \mu\text{m}, 50 \mu\text{m}$ )的胶斑直径的均方差分别是  $0.97, 1.25, 1.11$ 。3 组实验均有很好的重复一致性,此点胶方法可靠。

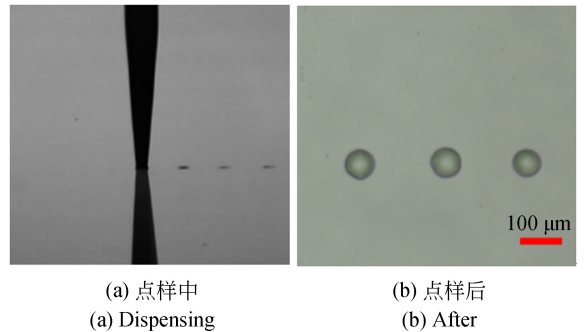


图 4 重复点胶过程与胶斑

Fig. 4 Repeatability experiment and glue spot

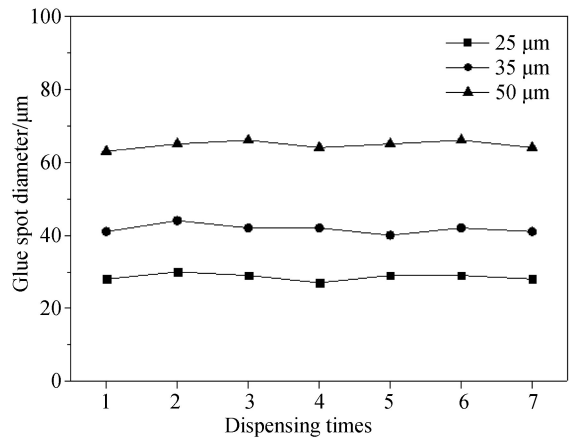


图 5 重复点胶的实验结果

Fig. 5 Repeatability experiment results

### 3.3 封孔实验

#### 3.3.1 封孔要求与封胶效果

某工程上要求在直径为  $700\ \mu\text{m}$ ，壁厚为  $20\ \mu\text{m}$  的微球上，用胶封其上直径为  $5\sim 20\ \mu\text{m}$  的微孔，且要求封胶过程在内径  $170\ \text{mm}$ ，长度  $350\ \text{mm}$  的密闭柱形空间内进行。在微米级尺度效应下，微米级微孔的封装是微装配的难点，特别是在小空间内微孔封装，目前的点胶方法和工艺还很难实现。微米级微孔的密封有覆盖式封孔和插入式封孔两种方法，采用开发的  $\text{pL}$  级自动点胶笔，尝试了不同工况下的封孔实验。由于目前检测设备的局限性，使用 CT 扫描也无法较好地观测到  $1\ \mu\text{m}$  像素点的介质厚度，所以对于微孔封胶实验结果的密封性评价主要通过显微镜 (Nikon MM-400) 观测胶接部位的胶斑位置、形貌，包括胶斑直径，胶斑高度信息，再利用胶液的透明性和固化后其胶斑表面对反射光敏感的特点进行判断。显微镜观测时，通过 LED 顶光源照射胶斑，根据其表面是否呈现亮度状态来进一步判断微孔的密封状况，如果胶斑表面呈现一块亮白光圈则说明微孔已经完全密封。实验中的封胶体积是根据测得的微孔上下胶斑大小、高度和接触角计算得到。以下封孔实验数据均为经过检测，成功胶封的结果。

#### 3.3.2 覆盖式封孔实验

密封腔内压力为常压下的封孔实验。当微孔直径  $d \leq 10\ \mu\text{m}$  时，采用覆盖式封孔方法，选择移液针直径  $D/d \geq 4$ ，可以实现有效密封。

首先筛选微孔直径为  $5\ \mu\text{m}$  的实验微球，依次对其进行编号、分组，每组实验使用不同直径的移液针。点胶笔安装在密封腔内的微动平台上，其控制线通过密封接头转接线插到腔外的电机驱动器上，并与电脑相连。实验中选用的胶液黏度为  $15\ \text{p}$  的低温胶，每组实验，多自由度微动平台上放置 7 个微球，在相同条件下进行封孔实验。移液针先端直径为  $25\ \mu\text{m}$  时，封胶过程如图 6 所示。胶斑的测量如图 7 所示，封胶后的各微孔上形成的胶斑直径平均为  $24\ \mu\text{m}$ ，高度为  $10\ \mu\text{m}$ ，体积约为  $4.4\ \text{pL}$ 。

图 8 为移液针直径不同 ( $25\ \mu\text{m}$ ,  $35\ \mu\text{m}$ ,  $50\ \mu\text{m}$ ) 情况下， $5\ \mu\text{m}$  微孔封装实验结果，重复性精度分别是  $93.9\%$ ， $95.8\%$ ， $94.7\%$ 。随着移液针直径增大，对应的胶斑直径增加，封胶量增加，实

际应用中可以根据胶斑要求，选择合适的移液针直径。

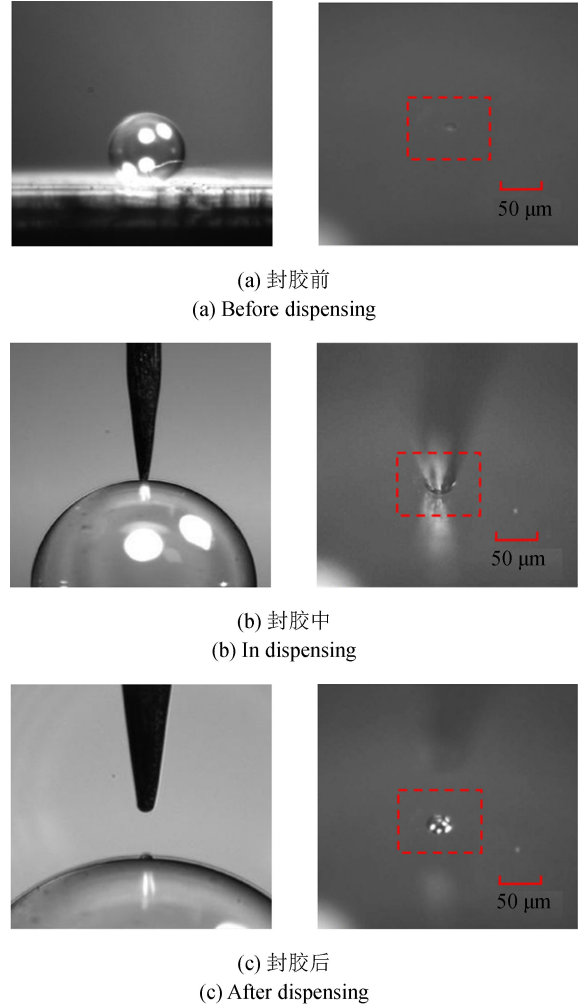


图 6 常压下覆盖式封胶实验  
Fig. 6 Hole-sealing on covering method under normal pressure

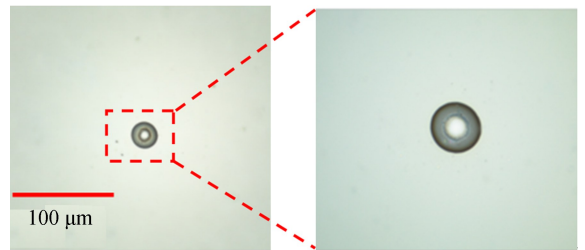


图 7 胶斑的测量  
Fig. 7 Measuring result of glue spot

根据特殊工艺要求，有时需要通过加压的方式，从微孔向微球内充入需要的气体，然后再对微孔进行密封。将点胶笔安装在腔体内密封，首先

需要对密封腔抽真空,然后再充入某种气体,压力达到 0.5 MPa,持续此压力保证微球内充满气体后,进行封孔密封操作。实验发现在密封腔内压力变化时,点胶笔储液微管内胶液会出现气泡和滴出现象,影响了点胶笔的使用,如图 9 所示。

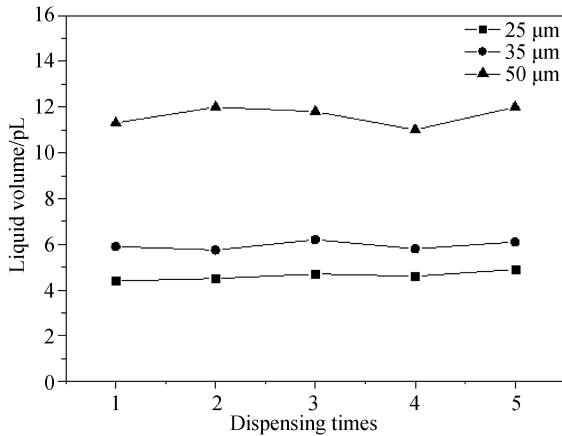


图 8 移液针直径对封胶量的影响

Fig. 8 Glue volume under effect of needle's diameter

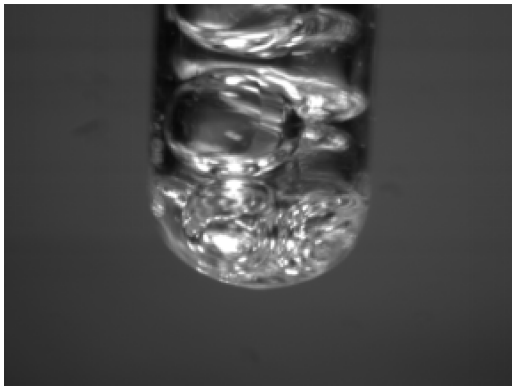
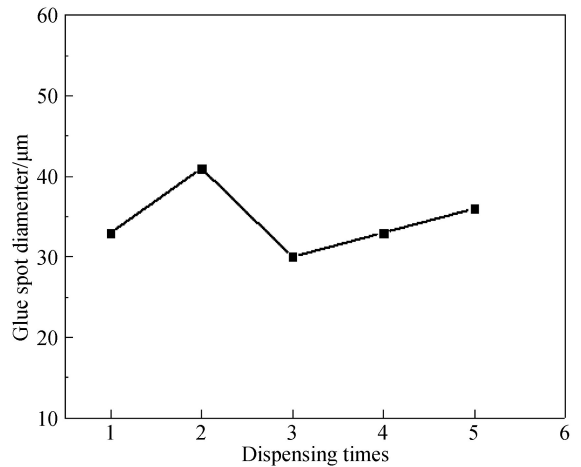


图 9 储液微管中胶液的气泡和滴出现象

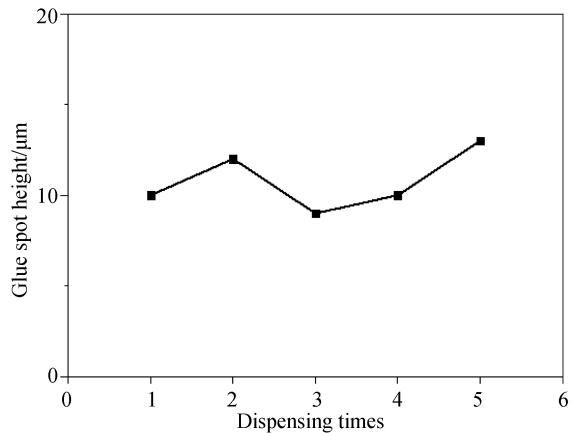
Fig. 9 Gas saturation bubbling phenomenon in microtube

这主要是由于胶液的溶解度受压力变化造成,只要实验前预先通过高速离心机预处理混合后的胶液,就可以避免上述现象发生,在微球表面得到质量均匀的胶斑。

图 10 为移液针直径为 35 μm,预处理胶液,黏度为 8 p,5 个微球上微孔直径为 10 μm 的封胶实验结果,形成表面胶斑平均直径为 34.6 μm,胶斑平均厚度为 10.8 μm,重复精度分别为 81.5% 和 79.6%。实验结果表明:在狭小的压力变化密封空间内,开发的点胶笔仍然可以获得 pL 级胶斑,实现微孔的密封。



(a) 胶斑直径变化  
(a) Diameter change of glue spot



(b) 胶斑高度变化  
(b) Height change of glue spot

图 10 0.5 MPa 压力下封孔实验结果

Fig. 10 Hole-sealing result under 0.5 Mpa pressure

### 3.3.3 插入式微孔封胶实验

当微孔直径  $d$  较大时(十几微米到几十微米),如果采用覆盖式封胶,要求点胶针的直径  $D$  较大,才能携带足够的胶量(一般要求  $D/d \geq 4$ ),满足密封要求。这样会造成封孔后微球上胶斑直径过大,无法满足工艺要求。这种情况下可以采用插入式封胶:移液针选用碳纤维材料,利用碳纤维移液针通过储液微管中胶液后黏附在其侧面的微小胶球,进行微孔的密封。微孔直径为 15 μm 时,根据经验选择碳纤维直径为 10 μm,封胶过程如图 11 所示。

碳纤维丝从微管中穿出时,由于碳纤维材料的特性,其侧面携带不连续的胶滴,胶滴直径大小与移动速度有关,将碳纤维丝插入微孔,其侧面的

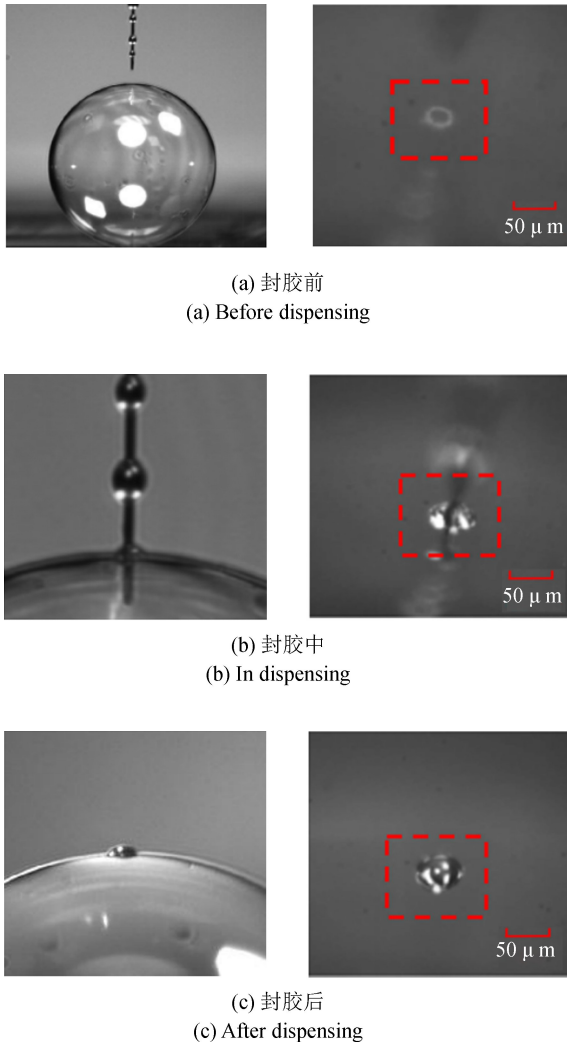


图 11 插入式封孔实验过程

Fig. 11 Hole-sealing on inserting method

胶滴接触微孔的侧壁面,由于毛细作用,胶液转移到孔中,完成封孔。微球表面上形成的胶斑平均直径为  $40\ \mu\text{m}$ ,高度为  $16\ \mu\text{m}$ ,体积约为  $9\ \text{pL}$ 。碳纤维移液针从微孔内离开的速度大小,影响胶滴转移到微孔表面的胶量,图 12 为移液针返回速度对封胶量影响的实验结果,通过控制移液针速度,

可以调整胶斑的大小。预先对胶液进行预处理,插入式微孔封胶也同样适用于压力变化的环境。

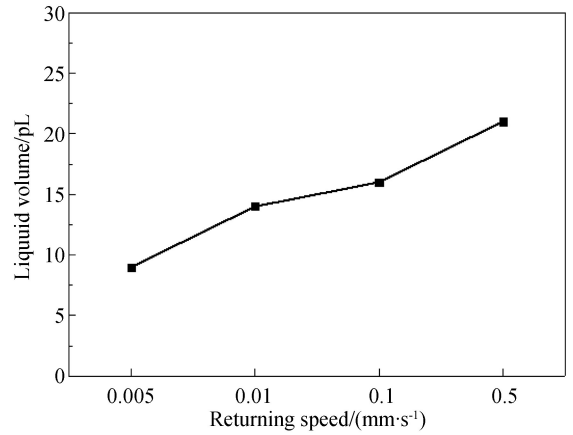


图 12 返回速度的影响

Fig. 12 Glue volume under effect of returning speed

## 4 结 论

本文基于转印式点胶原理开发了  $\text{pL}$  级自动点胶笔,适用的黏度范围广,体积小,装夹方便,便于清洗;通过 USB 接口连接到上位机上,可以实现点胶过程的控制,适用于小空间内  $\text{pL}$  级点胶。通过大量的实验,研究了点胶笔的性能及其在密闭小空间内微孔的  $\text{pL}$  级封胶方法。实现了内径  $170\ \text{mm}$ ,长  $350\ \text{mm}$  密闭空间内, $5\sim 20\ \mu\text{m}$  微孔的  $\text{pL}$  级胶封。研究和试验结果表明:通过调整点胶笔移液针的种类、尺寸、移动速度,可以控制点胶量;根据微孔大小,选择点胶方式,可以在狭小的密闭空间内,实现微孔的  $\text{pL}$  级密封,最小封胶量为  $4.4\ \text{pL}$ ,满足了工程的需要。本文以微孔的密封为例,说明点胶笔的应用,开发的点胶笔同样可以应用在高黏度、小空间内的微部件胶结,窄缝内点胶等领域。

## 参考文献:

- [1] 陈立国,姜勇涛,倪灯塔,等. MEMS 热电堆芯片固晶工艺参数的优化 [J]. 光学 精密工程, 2019, 27(1):137-145.  
CHEN L G, JIANG Y T, NI D T, *et al.*. Optimization of die bond process parameters of MEMS thermopile chip [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019,

27(1):137-145. (in Chinese)

- [2] 胡俊峰,梁龙,赵永祥. 基于柔顺机构的压电式微喷点胶系统设计与性能分析 [J]. 光学 精密工程, 2019, 27(9):1990-2001.  
HU J F, LIANG L, ZHAO Y X. Design and performance analysis of piezoelectric micro-spray dispensing system based on compliant mechanism [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(9):1990-2001. (in Chinese)

- [3] LIU S, XU D, LI Y F, *et al.*. Nanoliter fluid dispensing based on microscopic vision and laser range sensor [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(2):1292-1302.
- [4] 洪彬,王红美,曹建军,等. 定量点胶技术的研究进展 [J]. *微型机与应用*, 2009, 28(16):1-2.  
HONG B, WANG H M, CAO J J, *et al.*. Research progresses of quantitative dispensing technology [J]. *Microcomputer and Its Applications*, 2009, 28(16):1-2. (in Chinese)
- [5] 王凌云,黄翔,林四英,等. 双压电驱动高频喷射点胶阀的设计与实验 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5):1128-1137.  
WANG L Y, HUANG X, LIN S Y, *et al.*. Design and experiment of high frequency jetting dispenser driven by double piezoelectric stacks [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(5):1128-1137. (in Chinese)
- [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 H, XU D, *et al.*. Time/pressure pL micro-bonding technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11):2724-2730. (in Chinese)
- [7] 史亚莉,张正涛,徐德. 跨尺度微管微球三维半自动装配点胶系统 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(11):3121-3128.  
SHI Y L, ZHANG Z H T, XU D. 3D semi-automatic assembly and dispensing system for trans-scale parts of micro-tube and micro-sphere [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(11):3121-3128. (in Chinese)
- [8] MISHRA S, SENGAR R S, BADODKAR D N. Development of volumetric control and machine vision of antibodies microdroplet to make biochips [C]. 2016 *International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCA)*, Noida, 2016:1372-1376.
- [9] FOX C B, NEMETH C L, CHEVALIER R W, *et al.*. Picoliter-volume inkjet printing into planar microdevice reservoirs for low-waste, high-capacity drug loading [J]. *Bioengineering & Translational Medicine*, 2017, 2(1):9-16.
- [10] 黄勇,张占文,史瑞廷,等. 一种微球半自动点胶封孔装置及方法:中国,CN108877957A[P],2018-11-23.  
HUANG Y, ZHANG Z H W, SHI R T, *et al.*. A semi-automatic dispensing and sealing device for microspheres; China, CN108877957A[P]. 2018-11-23. (in Chinese)
- [11] 张勤,徐策,徐晨影,等. 超微量点胶方法与实验 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(8):2071-2078.  
ZHANG Q, XU C, XU C H Y, *et al.*. Approach and experiment of ultra-micro dispensing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8):2071-2078. (in Chinese)
- [12] 张勤,吴锐奇,青山尚之. 转印式 pL 级液体分配方法的性能分析与实验 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(5):9-15.  
ZHANG Q, WU R Q, AOYAMA H. Performance analysis and experiment of transfer printing pL class droplet approach [J]. *Journal of South China University of Technology*, 2017, 45(5):9-15. (in Chinese)

#### 作者简介:



张 勤(1964—),女,辽宁锦州人,博士,教授,1991年3月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工学博士学位,主要从事微机电系统开发及其应用研究。E-mail: zhangqin@scut.edu.cn



叶斯伦(1994—),男,广东惠州人,硕士研究生,2016年于南京农业大学获得学士学位,主要从事微机电系统开发及其应用研究。E-mail: silent\_yee@163.com