

文章编号 1004-924X(2012)12-2744-07

用于微胶接的 pL 级点胶方法

史亚莉*, 李福东, 杨鑫, 张正涛, 徐德

(中国科学院自动化研究所精密感知与控制研究中心, 北京 100190)

摘要: 为了获得与微米级零件尺寸相匹配的 pL 级胶滴, 分析了注射式、喷射式和转移式 3 种常用的微小液滴生成机制。基于注射式原理设计了一种时间压力型 pL 级点胶方案, 通过视觉在线检测胶斑直径, 控制点胶针尖内径、作用压力和时间, 得到 pL 级胶斑。实验研究了针尖内径、压力、时间对胶斑直径的影响, 并将此方法应用于激光惯性约束核聚变实验中冷冻靶装配时靶丸零件与充气管零件之间的微胶接。实验结果表明: 胶斑直径与点胶针尖内径、压力和时间三者成正比关系, 当使用端部 1.2 μm 内径的点胶针, 设置压力为 0 psi (1 psi \approx 6.895 kPa), 时间为 8~10 s 时, 可以满足胶斑体积小于 3 pL, 直径小于 40 μm 的指标要求。该方法可实现微米级零件微胶接时的 pL 级点胶, 而且工艺简单, 易于实现。

关键词: 微装配; 微胶接; pL 级胶滴; 点胶; 时间压力型

中图分类号: TH706; TL632 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122012.2744

pL class adhesive dispensing approach for micro bonding

SHI Ya-li*, LI Fu-dong, YANG Xin, ZHANG Zheng-tao, XU De

(Research Center of Precision Sensing and Control, Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

* Corresponding author, E-mail: shiyali0825@126.com

Abstract: To obtain pL class adhesive drop to match the micro parts in size, three kinds of micro drop making mechanisms, injection, bubble jetting, and needle transfer, were analyzed. A pL class adhesive dispensing approach based on time-pressure dispensing was present, then pL class adhesive spots were obtained by online visual monitoring of the spot diameter, and controlling the internal diameter of the dispensing needle tip, pressure and time. The effects of three factors mentioned above on the adhesive spot size were experimented, and this technique combined with a micromanipulation system were used in Inertial Confinement Fusion (ICF) experiments to bond a fill tube and a capsule together for the cryogenic targets. The results show that the adhesive spot diameter is proportional to the internal diameter of the dispensing needle tip, pressure and time. When the internal diameter of needle tip, pressure and time are controlled to be 1.2 μm , 0 psi, and 8~10 s, the adhesive volume and diameter will be less than 3 pL and 40 μm , respectively.

Key words: micro assembly; micro adhesive bonding; pL class adhesive drop; adhesive dispensing; time-pressure

收稿日期: 2012-07-26; 修订日期: 2012-09-05.

基金项目: 国家重大科研仪器设备研制专项资助项目; 青年科学基金资助项目 (No. 61105036)

1 引言

微小零件联接在三维复杂微小系统的制造和装配中占有非常重要的地位。随着光刻等微小零件制作工艺的快速发展,微小零件的加工尺寸越来越小,对微联接的要求也随之提高。目前常用的微小零件联接方法有:在零件上加工出柔性铰链结构、利用材料的热胀冷缩等特性进行机械联接、或者采用微焊接和微胶接等其它联接方式^[1-4]。微胶接技术是使用胶粘剂把金属、塑料、硅等不同材料制成的微型零件联接起来,并且零件表面不需要熔化的工艺。相对于其它联接方法,微胶接具有以下几个优点:①同种或不同种材料的零件都能够胶接;②固化温度低,可以避免高温环境对微零件造成的尺寸变化、应力不均甚至性能破坏等;③固化强度高且应力分布均匀;④易于实现密封、传导或绝缘等附加功能;⑤可适用于各种形状和尺寸的零件^[5-7]。

如何能够获得与微小零件尺寸相匹配的微小液滴是微胶接的关键技术之一,目前商业点胶机的最小胶量可以控制在 nL 级别,不能满足微小零件胶接时的 pL 级胶量要求。本文以激光惯性约束核聚变实验用冷冻靶中靶丸充气管胶接时的 3 pL 胶量要求为背景,对几种常用的微小液滴生成机制及其在微胶接中的应用情况进行了分析,在此基础上设计了一种时间压力型 pL 级点胶方案,通过视觉在线检测胶斑直径、控制点胶针尖内径、作用压力和时间,实现 pL 级胶量的控制,并对该方案进行了分析和实验研究,最后应用其实现了靶丸充气管装配中的微胶接。

2 微小液滴生成机制

微小液滴的生成机制有 3 种:注射式、喷射式和转移式。

图 1 是生物领域用来向细胞内注射化学试剂的细胞注射器,通过往装有液体的玻璃微管后端施加压力获得微小液滴,因为玻璃管前端和末端内径的尺寸差距太大,所以该方法的压力控制是一个难点。文章[8]曾对该方法进行改进实现了三维微装配中 5 μm 球体之间的微胶接,利用毛细管先将胶体吸进毛细针尖的末端,根据胶量与

针尖内胶液长度成正比的关系来控制吸入胶体量的多少,使得点胶时不需要很精确的压力控制便可以实现对胶量大小的控制。

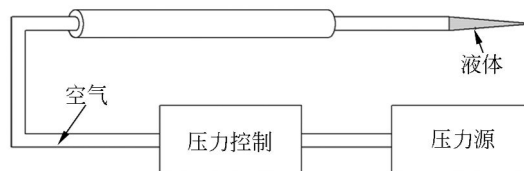


图 1 注射式系统

Fig. 1 Injection system

图 2 是喷墨式打印机的原理,通过对装有墨水的喷嘴进行瞬间局部加热,使得墨水气化,利用气泡由小变大时所产生的膨胀力将墨水由喷嘴挤出。该方法的问题在于虽然能够获得微小液滴,但是因为其喷嘴的结构尺寸大,喷射时液滴方向不易控制,在微装配中很难对胶滴精确定位。

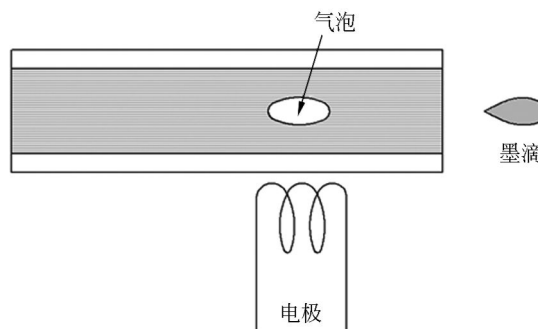


图 2 喷墨式系统

Fig. 2 Bubble jetting system

如图 3 所示,将毛细针尖的末端浸入溶液蘸取适量的液体,之后通过转移带有微量液体的毛细针尖实现微量液体的转移。此方法受环境的温度、湿度,以及针尖的特性影响很大,一致性差。文章[9]对该方法进行了改进并将其用于三维微反射镜的装配中,加工出如图 4 所示的微探针,根据蘸取胶量大小与探针上贮胶块的特征尺寸成正比的关系控制蘸取胶量。该形状的探针有效改善了蘸取胶体时,爬山现象导致的胶量控制问题。

上述文章[8]和文章[9]提出的方法虽然能够实现微小液滴的控制,但是共有的缺点是每次加胶后只能使用一次,需要反复加胶,尤其是文章[8]加胶时必须是在显微镜下观察胶液的高度,工艺十分复杂。

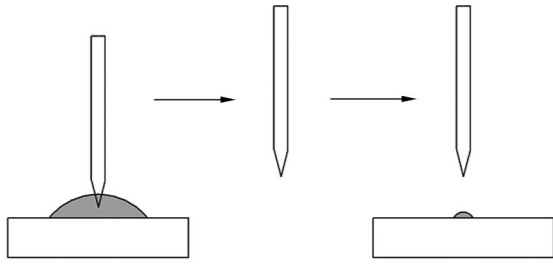


图 3 转移式系统

Fig. 3 Needle transfer system

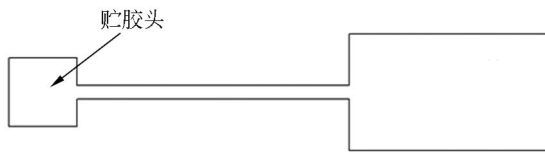


图 4 微探针

Fig. 4 Micro-probe

3 时间压力型 pL 级点胶方案

根据在毛细管材料和胶体特性不变的条件下,液体的流速与毛细管内径尺寸 ID 、液面作用压力 p 成正比的规律,设计了时间压力型 pL 级点胶方案如图 5 所示,各控制参数与点胶量之间的理论关系见文章[10]。玻璃毛细针的端部内径为几个微米,末端外径为 1 mm,毛细针内贮胶,毛细针末端与压力控制器相联接。点胶时,通过控制胶液末端压缩空气的保持压力 p 和玻璃毛细针的针尖内径 ID 控制胶体的流速,通过控制玻璃毛细针尖与点胶工件的接触时间 t 来控制点胶量,使用显微镜实时检测针尖的位置信息和

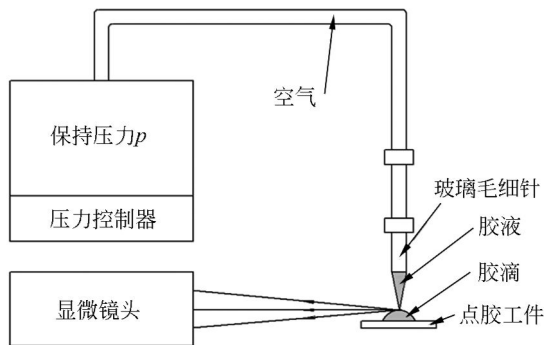


图 5 时间压力型 pL 级点胶方案

Fig. 5 Time-pressure pL class adhesive dispensing approach

胶斑的尺寸信息。这种方法一次加胶后可以进行多次点胶,且可以利用微米量级的点胶针头将胶滴精确定位到点胶工件上的理想位置。

4 影响因素分析与实验

使用本文方案进行 pL 级点胶时,影响胶量大小和点胶一致性的因素很多,除了压力、作用时间、和针尖内径外,胶体特性、工件表面状况等也不可忽略。在影响点胶质量的因素中,有些因素是可以实时控制的,如点胶时间、压力,温度等;有些因素是不可以控制并且不能在线测量的,如气体的可压缩性、胶体动态特性随时间和温度的变化等。将其进行分类总结如下:

(1)环境参数:主要是温度 θ ,不同温度下同种胶的黏度等特性变化很大。

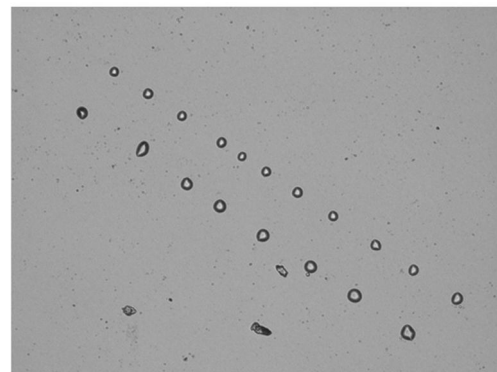
(2)点胶器参数:针管内的保持压力 p 、毛细针尖的内径 ID ,加胶液面高度 H 等。

(3)胶的特性:黏度、接触角、表面张力、气泡含量、杂质等。

(4)平台参数:毛细针尖与点胶工件之间的接触时间 t 、距离 h 、针尖抬高的速度 v 等。

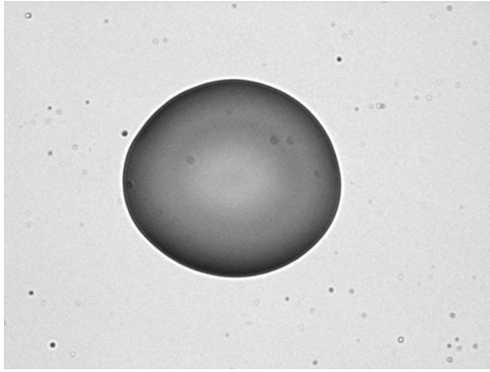
(5)工件:工件的材质、表面粗糙度和化学处理等。

下面通过 3 个实验分别研究了针尖内径 ID 、胶液面上的作用压力 p 和针尖与零件的接触时间 t 对胶斑直径 D 的影响。实验温度为 25 °C,胶体黏度为 5 Pa,实验时,每组参数下各在硅片表面点 10 个胶斑,之后使用测量显微镜对胶斑的直径进行测量。如图 6 所示是测量显微镜检测到的硅片表面的胶斑。



(a)50 倍

(a)50×



(b)1 000 倍
(b)1 000×
图 6 胶斑

Fig. 6 Adhesive spots

实验 I : 针尖内径 ID 与胶斑直径 D 的关系

保持压力为 0 psi, 时间为 3 s 不变, 制作针尖内径分别为 0.6、1.2、2.6 和 3.6 μm 的点胶针头, 测量针尖内径对胶斑直径的影响。实验结果如表 1 所示, 可以看出, 当保持压力和时间不变时, 胶斑直径随着针尖内径的增大而变大。

实验 II : 作用压力 p 与胶斑直径 D 的关系

保持时间为 5 s, 点胶针尖内径为 1.2 μm 不变, 分别设定压力大小为 0.5、1、1.5、2 psi, 测量作用压力对胶斑直径的影响。实验结果如表 2 所示, 可以看出, 当接触时间和点胶针尖内径不变时, 胶斑直径随着压力值的增大而变大。

表 1 实验数据 I

Tab. 1 Data of experiment I (μm)

针尖内径	10 个胶斑直径										均值	误差
0.6	9.5	7.5	10.6	7.7	8.8	9.2	7.5	7.9	8.5	7.6	8.48	2.12
1.2	20.4	20.1	21.6	19.9	22.1	20.8	21.7	19.0	22.9	19.7	20.82	2.08
2.6	55.6	53.8	58.2	52.2	54.2	56.0	55.2	53.2	60.0	54.0	55.24	4.76
3.6	65.0	61.3	67.7	68.4	70.2	65.8	64.4	69.2	67.8	66.3	66.61	5.31

表 2 实验数据 II

Tab. 2 Data of experiment II

压力/psi	10 个胶斑直径(μm)										均值	误差
0.5	30.7	33.1	31.4	33.1	39.2	37.3	39.5	38.0	41.6	41.2	36.51	5.81
1	42.4	41.3	42.1	44.1	44.5	43.5	43.6	42.2	42.6	39.6	42.59	2.99
1.5	47.6	54.2	54.7	51.9	60.1	59.9	52.4	60.1	59.1	60.8	56.08	8.48
2	71.8	68.6	70.5	66.8	69.0	64.8	60.8	65.6	68.6	69.0	67.55	6.75

实验 III : 接触时间 t 与胶斑直径 D 的关系

保持压力为 0 psi, 点胶针尖内径为 1.2 μm 不变, 分别设定时间为 2、5、8、10 s, 测量接触时间

对胶斑直径的影响。实验结果如表 3 所示, 可以看出, 当作用压力和点胶针尖内径不变时, 胶斑直径随着时间的增大而变大。

表 3 实验数据 III

Tab. 3 Data of experiment III

时间/s	10 个胶斑直径(μm)										均值	误差
2	18.5	19.1	18.6	20.4	18.9	20.4	20.8	20.1	19.7	20.7	19.72	1.22
5	24.9	25.9	27.8	24.7	25.0	23.4	25.9	25.6	26.3	25.5	25.5	2.3
8	30.6	29.5	32.7	30.2	31.5	30.3	29.3	30.3	29.5	28.8	30.27	2.43
10	33.0	34.7	32.4	32.6	34.5	34.2	29.5	33.2	33.4	33.1	33.06	3.56

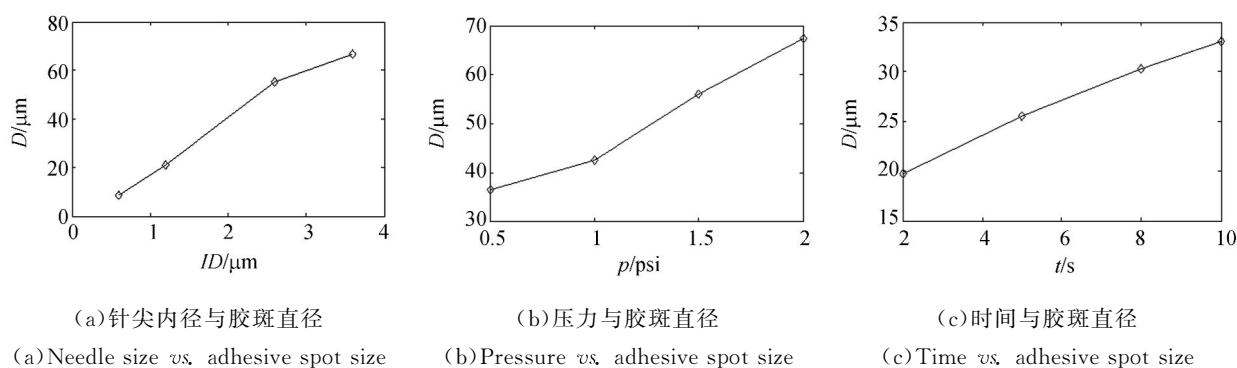


图 7 实验结果曲线图

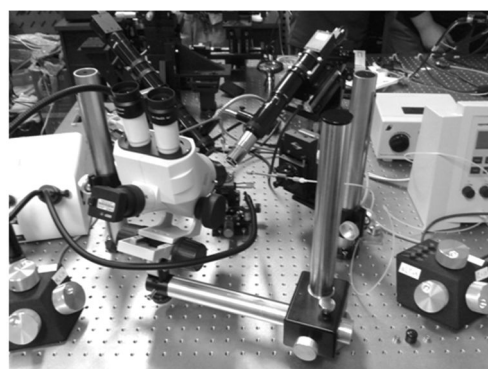
Fig. 7 Curves of experimental results

实验结论:综合分析以上 3 组实验数据和图 7,可以看出,胶斑直径尺寸对内径和压力改变比较敏感,对时间改变最不敏感,所以选用 $1.2\ \mu\text{m}$ 内径的点胶针,设置保持压力为 $0\ \text{psi}$,并且使用显微镜镜头在线监测胶斑直径的变化,可以精确控制胶斑的尺寸。

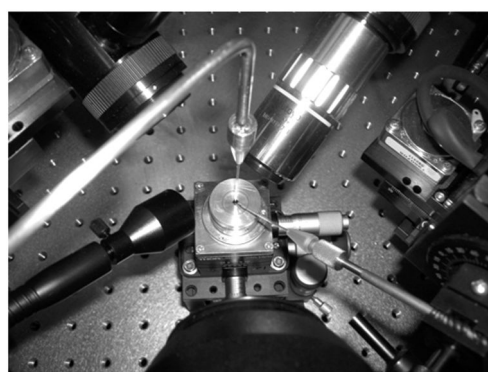
5 靶丸充气管微胶接实验

搭建的靶丸充气管微胶接实验平台如图 8 所示,该实验平台可以将外径为 $10\ \mu\text{m}$ 的充气微管插入靶丸上直径为 $12\ \mu\text{m}$ 的孔内,并将点胶针尖运动到靶丸孔与充气管的联接位置进行点胶实现二者的联接和密封。平台上的测量显微镜以 $15\ \text{frame/s}$ 的频率实时检测点胶针与点胶工件的距离以及胶斑的直径,3 自由度电动平台与测量显微镜形成闭环来控制点胶针尖相对于点胶工件的位置。

在实验平台上模拟靶丸充气管装配后,通过两路正交放置的带有 CCD 的显微镜获取点胶针头的图像,对图像进行处理获取点胶针尖与靶丸充气管上点胶位置之间的相对位置 (X, Y, Z),驱动与点胶针固定联接的 3 自由度电动平台运动。当点胶针尖与充气管外壁接触后,开始计时,同时根据图像实时检测胶斑的直径,当胶斑直径 $D > 30\ \mu\text{m}$ 时,驱动点胶针以 $10\ \mu\text{m/s}$ 的速度离开充气管直至距离为 $50\ \mu\text{m}$ 时停止。实验中使用尖端内径为 $1.2\ \mu\text{m}$ 的点胶针,设置压力控制器为 $0\ \text{psi}$,当胶斑直径达到 $30\ \mu\text{m}$ 时,需要的时间约为 $8\sim 10\ \text{s}$ 。如图 9 所示,分别是点胶开始、点胶中



(a) 整体布局图
(a) Overall layout



(b) 操作空间放大图
(b) Partial enlargement

图 8 靶丸充气管微胶接实验平台

Fig. 8 Experimental platform of micro adhesive bonding for capsule and fill tube

和点胶结束采集到的 3 幅胶斑图片。经过测量和计算,胶斑的直径为 $30.7\ \mu\text{m}$,高 $8.5\ \mu\text{m}$,体积约为 $2.3\ \text{pL}$ 。

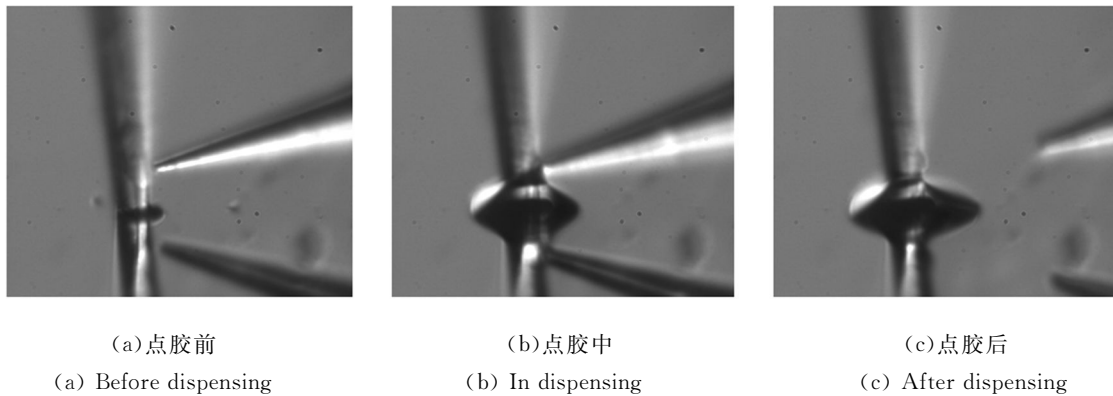


图 9 靶丸充气管点胶过程

Fig. 9 Dispensing process to bond capsule and fill tube together

6 结 论

本文设计了一种时间压力型 pL 级点胶方法,通过视觉在线检测胶斑直径,以及控制点胶针尖内径、作用压力和时间来实现 pL 级点胶。实验结果表明:使用 $1\ \mu\text{m}$ 左右甚至更小内径的点胶针,设置 1psi 甚至更小的压力时,可以将胶体的流速控制得非常小,这样可以留下足够长的胶

斑生成时间,以便于视觉检测系统对胶斑的尺寸进行实时检测。将本文方法用于激光惯性约束核聚变实验用冷冻靶中靶丸充气管组件装配时 $10\ \mu\text{m}$ 充气管与 $12\ \mu\text{m}$ 靶丸孔之间的胶接实验,实现了胶斑直径小于 $40\ \mu\text{m}$,体积小于 $3\ \text{pL}$ 的点胶要求。该方法可以用来实现微米级零件微胶接时的 pL 级点胶,且加胶容易,一次加胶后可多次使用,很大程度上简化了 pL 级点胶工艺。

参考文献:

- [1] BRUSSEL H V, PEIRS J, REYNAERTS D, *et al.*. Assembly of microsystems [J]. *Annals of the CLRP*, 2000, 49(2):451-472.
- [2] WANG X J, WANG X D, YAO G J, *et al.*. Automatic micro-bonding technology of capillaries with adhesives [C]. *6th International Conference on Electronic Packaging Technology*, 2005, 1-5.
- [3] 徐征,王晓东,程新宇,等.基于机器视觉的微装配控制策略及软件架构[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4):820-824.
XU ZH, WANG X D, CHENG X Y, *et al.*. Control tactics and software architectures for micro-assembly based on machine vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 820-824. (in Chinese)
- [4] YUSOF A, ZENGERLE R, KOLTAY P. Towards a microfluidic dispenser chip for printing single cells [C]. *24th International Conference on MEMS*, 2011, MEXICO: Cancun, 2011(23-27):1059-1062.
- [5] SCHUHMACHER D, NIEKRAWIETZ R, SCHEITHAUER H, *et al.*. Production of solder micro-droplets using a highly parallel and contact-free printing method [C]. *IEEE 20th International Conference on MEMS, Japan: Kobe, 2007, Jan. 21-25*: 357-360.
- [6] 马维民, HESSELBACH J, 郝极.一种微型步进电机的微胶接装配方法的研究[J]. *中国机械工程*, 2007, 18(9):1024-1027.
MA W M, HESSELBACH J, HUAN J. Experimental study on assembling a micro step motor using adhesive bonding technology [J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(9):1024-1027. (in Chinese)
- [7] WANG L D, MILLS J K, WILLIAM L. Adhesive mechanical fastener design for use in microassembly [C]. *Electrical and Computer Engineering*, 2008: 1093-1096.
- [8] TANIKAWA T, HASHIMOTO Y, ARAI T. Micro drops for adhesive bonding of micro assemblies

and making a 3-D structure “micro scarecrow” [C]. *Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems Victoria*, 1998:776-781.

- [9] WANG L D, MILLS J K, CLEGHORN W L. Robotic manipulation of adhesive droplets for applications in microassembly [C]. *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Informa-*

tion and Automation, 2009:1562-1567.

- [10] 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 SH, XU D, *et al.*. Time/pressure pL micro-bonding technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2724-2730. (in Chinese)

作者简介:



史亚莉(1982—),女,山西运城人,助理研究员,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事精密机械方面的研究。E-mail: shiyali0825@126.com



张正涛(1981—),男,山东烟台人,助理研究员,2010年于中国科学院自动化研究所获得博士学位,主要从事微装配与显微视觉方面的研究。E-mail: zhengtao.zhang@ia.ac.cn



李福东(1985—),男,山东青岛人,博士研究生,主要从事精密视觉测量与控制方面的研究。E-mail: fudong_li@yahoo.com



徐德(1965—),男,山东日照人,研究员,博士生导师,1981年、1990年于山东工业大学分别获得学士、硕士学位,2001年于浙江大学获得博士学位,主要从事机器人视觉测量与控制方面的研究。Email: xude@compsys.ia.ac.cn



杨鑫(1987—),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事机器视觉与数字图像处理方面的研究。E-mail: yangxin_casia@126.com

(本栏目编辑:马 健)