

文章编号 1004-924X(2012)02-0321-08

辅助溶剂对 PMMA 微流控芯片模内键合的影响

徐 征*, 王继章, 杨 铎, 刘 冲, 王立鼎

(大连理工大学 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 为了提高聚合物微流控芯片的键合效率, 以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)微流控芯片为对象, 以微型注塑机为平台, 研究了聚合物模内键合方法。利用注塑机提供的合模力作为键合力, 利用模温机提供键合温度, 选择异丙醇作为辅助溶剂, 借助溶剂溶解特性来降低模内键合中的键合温度和压力。在 30~70 °C, 用测量显微镜和台阶仪测试分析了不同键合温度条件下, 辅助溶剂对芯片的表面形貌和微通道结构的影响; 利用辅助溶剂进行模内键合实验, 用电子万能试验机测试了芯片的键合强度, 对模内键合工艺参数进行了优化。结果表明: 异丙醇对键合质量的影响与键合温度、键合时间有关, 在较高温度下会使芯片产生破裂、微沟槽变形和堵塞; 在键合温度为 35 °C, 键合时间为 5 min 时, 芯片的表面质量和微沟槽形貌较完整, 键合强度不小于 2.64 MPa。

关键词: 模内键合; 聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA); 微流控芯片; 异丙醇; 微注塑; 溶剂辅助键合

中图分类号: TN405 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122002.0321

Effect of assistant solvent on in-mold bonding of PMMA microfluidic chips

XU Zheng*, WANG Ji-zhang, YANG Duo, LIU Chong, WANG Li-ding

(Key Laboratory for Micro & Nano Technology and System of Liaoning Province,
Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

* Corresponding author, E-mail: xuzheng@dlut.edu.cn

Abstract: To improve the bonding efficiency of microfluidic chips, an in-mold bonding method is researched by taking a Polymethyl Methacrylate(PMMA) microfluidic chip as an research object and a micro injection machine as a working platform. Clamping forces and bonding temperatures are provided by the micro injection machine and a mold temperature machine. Isopropanol is selected as assistant solvent to reduce the bonding temperature and bonding pressure with its solubility. At 30 °C to 70 °C, a microscope and a step profiler are used to analyze the influence of assistant solvent on surface morphologies and micro channel structures of chips at different temperatures. An in-mold bonding experiment is operated with the assistant solvent, then the electric universal testing machine is utilized to measure the bonding strength and to optimize the process parameters. Experimental results illustrate that the influence of isopropanol on bonding quality is related with the bonding temperature and bonding period. The surfaces of chips chap and the micro grooves become deformed or block at higher tempera-

收稿日期: 2011-06-27; 修订日期: 2011-09-05.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2007CB714502); 国家自然科学基金资助项目 (No. 91023046, No. 20890024); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. DUT11SM11)

tures. The surface quality and morphologies of micro grooves are correspondingly improved when the bonding temperature is 35 °C, the bonding time is 5 min, and the bonding strength is no less than 2.64 MPa.

Key words: in-mold bonding; Polymethyl Methacrylate (PMMA); microfluidic chip; isopropanol; micro injection; solvent assistant bonding

1 引言

微流控芯片可以将多种单元技术在整体可控的微小平台上灵活组合、规模集成,具有体积小、分析速度快、成本低等特点,应用前景广阔^[1]。聚合物材料由于具有成本低、光学特性好、生物兼容性好等优点,是制备微流控芯片的理想材料。目前,聚合物微流控芯片的生产效率还比较低,键合工艺是主要瓶颈。

聚合物微流控芯片的键合是将至少两片包含或不包含微细沟槽/腔室结构的薄片封接在一起形成封闭的微通道网络的工艺,键合方法可分为热压键合^[2]、超声辅助键合^[3-4]、溶剂辅助键合^[5-6]、激光键合^[7-8]等。其中,溶剂辅助键合简单易行,键合强度高,应用广泛。Yusuke Suzuki^[9]等人采用四乙氧基硅烷单体 (TEOS) 作为辅助溶剂,在室温下 2 h 实现 PDMS 与 PMMA 平板的键合,键合强度高于 1.0 MPa。F. Umbrecht^[10]等人采用乙二醇作为辅助溶剂,在 85 °C 实现 PMMA 芯片的键合,键合后,芯片需要在 60 °C 的真空环境中放置 24 h,去除残留的辅助溶剂,键合强度可达 (3.5 ± 0.8) MPa。目前,微流控芯片键合的主要问题是:微结构成型和键合工艺在不同工位甚至不同地点完成,芯片在工位转移过程中易污染,影响键合质量,通常在键合前需二次清洗,导致键合效率低。

微注塑是一种高效的聚合物微器件制造方法,通过将塑性材料在加热料筒中均匀塑化,由柱塞或螺杆推挤到闭合模具的型腔内,经过注射、保压、冷却等过程获得具有较高成型精度的塑件。微注塑成型的适用范围广,几乎适用于所有的热塑性材料和部分热固性材料,具有成型周期短、制造成本低、成型工艺简单、塑件复制精度高的优点,适合微流控芯片的批量生产。但是,在实际生产中,微注塑成型只能加工相互分离的基片或盖片,在成型后需要将基片和盖片转移至其他设备中完成键合,影响键合质量和生产效率。中南大

学蒋炳炎^[13-14]提出以注塑机为平台的模内键合技术,并进行了实验研究,在键合温度为 105 °C,键合压力为 1.0 MPa 时,得到键合质量较好的微流控芯片,有望仅用注塑机实现微塑件成型和键合的批量化生产,提高生产效率。

本文选择常用的聚合物材料聚甲基丙烯酸甲酯 (Polymethyl Methacrylate, PMMA),以微流控芯片为对象,以微型注塑机为平台,借鉴前人思路,研究了 PMMA 微流控芯片的溶剂辅助模内键合工艺方法,采用辅助溶剂使芯片的键合温度低于玻璃态温度 (T_g),实验分析了辅助溶剂在键合过程中对微沟槽结构和芯片表面形貌的影响,测试了微流控芯片的键合强度,优化了键合温度、键合时间等工艺参数,为聚合物微流控芯片高效生产奠定了基础。

2 聚合物溶剂辅助键合

模内键合需要将模具温度升至材料的玻璃态温度 (T_g) 附近,利用注塑机的合模力提供键合压力,加温加压一定时间后完成键合。但是,在前期实验中发现存在以下问题:(1)键合时间长,通常在 15 min 左右;(2)PMMA 材料的玻璃态转化温度 (T_g) 约为 115 °C,这对模温控制系统升降温性能提出较高的要求。

聚合物微流控芯片的键合可以用扩散理论解释:两种聚合物在高于玻璃态温度 (T_g) 的条件下紧密接触时,在分子布朗运动和链段的蠕动作用下,大分子会穿越聚合物之间的界面相互扩散,使两种聚合物的分子链交织在一起^[15],因此,常规键合方法需要将温度升至聚合物的玻璃态温度 (T_g) 附近。

选择与芯片材料相容性较好的辅助溶剂可以有效实现低温键合,如图 1 所示:辅助溶剂使芯片表面产生了液化溶解,液化后的聚合物分子链活性增加,可以克服分子间的范德华力,在低于玻璃态温度 (T_g) 的条件下穿越聚合物-辅助溶剂-聚合物的界面相互扩散,打破原有界面的平衡状态,导

致相互界面的消失和过渡区的产生,辅助溶剂在本质上起到了黏合剂的作用,在适宜的温度和时间条件下,略施加键合力即可形成一定强度的键

合结构。但是,辅助溶剂会使芯片表面发生消融,当温度过高或辅助溶剂不能快速挥发时,芯片会产生皴裂和白色雾状膜。

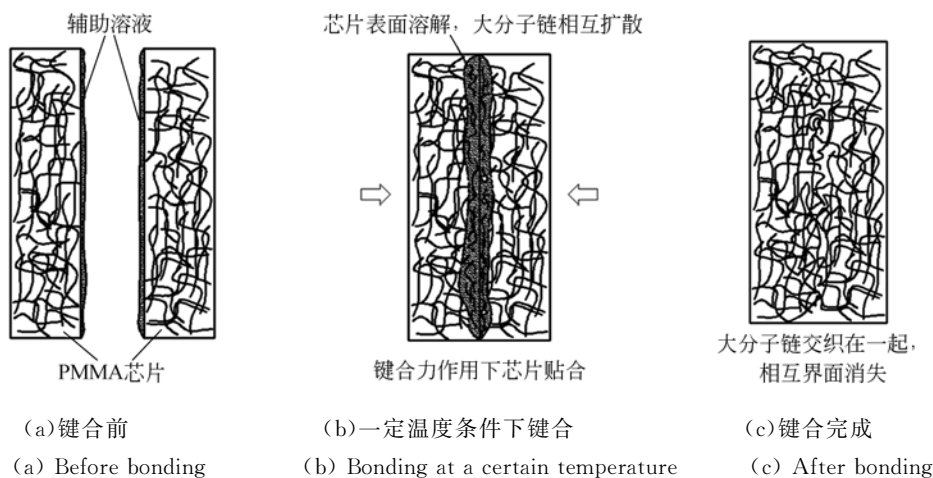


图 1 溶剂辅助键合原理

Fig. 1 Principle of solvent-assisted bonding

聚合物之间的扩散过程需符合热力学条件^[16]:

$$\Delta F = \Delta H - T\Delta S, \quad (1)$$

式中: ΔF 为混合自由能, ΔH 为混合热, T 为绝对温度, ΔS 为混合熵变化。

在等温等压条件下,若扩散过程可自由进行,需满足条件 $\Delta F < 0$,即

$$\Delta H - T\Delta S < 0, \quad (2)$$

通常情况下,扩散过程使分子排列趋于无序,因此混合熵 $\Delta S > 0$,对于高分子聚合物,熵变可忽略不计。同时,高聚物的互扩散(溶解)过程一般需要吸收热量,即 $\Delta H > 0$ 。因此,若使混合自由能 $\Delta F < 0$,则 ΔH 必须接近或等于0。

根据 Hildebrand 和 Scott 溶液理论^[17],高分子互扩散过程的能量变化为:

$$\Delta U_m = V_1 V_2 V_m (\delta_1 - \delta_2)^2, \quad (3)$$

式中: V_1, V_2 为两物质的摩尔体积百分数; V_m 为混合体系的总摩尔体积; δ_1, δ_2 为两物质的溶解度参数。

而 $\Delta U_m = \Delta H - P\Delta V$,通常认为混合后体积变化 $\Delta V = 0$,因此,混合热 $\Delta H = \Delta U_m = V_1 V_2 V_m (\delta_1 - \delta_2)^2$ 。

综上所述,聚合物微流控芯片的键合要求混合热 ΔH 趋近于零,需满足 $\delta_1 = \delta_2$,即选用辅助溶剂的溶解度参数应与聚合物材料的溶解度参数(SP值)接近或相等。另外,为减少芯片表面由于

消融产生的皴裂和白色雾状膜,选用的辅助溶剂应具有一定挥发性。因此,在选取辅助溶剂时,应重点考察溶解度参数和挥发速度。

3 实验设备、方法及结果讨论

3.1 实验设备

实验采用的设备如下:在辅助溶剂相溶性测试中,利用泰斯特公司 DK-98-1 电热恒温水浴锅提供温度;超声波清洗 PMMA 芯片;利用 Olympus 测量显微镜观察实验结果;利用台阶仪测量芯片表面粗糙度。在溶剂辅助模内键合实验中,利用 Babyplast 微型注塑机进行键合,最大合模力 6.25 kN;利用 DEGA 模温机提供键合温度;利用电子万能实验机测量芯片键合强度。

3.2 实验方法

本文实验测试了不同温度条件下,辅助溶剂对芯片整体质量的影响,根据测试结果进行了键合实验,对比了不同工艺参数下芯片的键合质量。

3.2.1 PMMA 芯片与辅助溶剂相溶性测试

采用 PMMA 作为微流控芯片的制备材料,根据聚合物材料的键合机理,选用异丙醇作为键合辅助溶剂。这是因为异丙醇的溶解度参数(SP)值为 11.15,与 PMMA 的 SP 值较接近(约为 9.3)。另外,异丙醇相对分子量较小,具有良好的挥发性。

通过相溶性测试研究异丙醇溶液对 PMMA 芯片的表面质量和微通道变形的影响:在一定温度条件下,将注塑的 PMMA 芯片置于异丙醇溶液中浸泡一定时间,将浸泡后的芯片与浸泡前进行对比。具体方法如图 2 所示,在 500 ml 烧杯中倒入少量异丙醇溶液,然后放入电热恒温水浴锅中,加热至一定温度后,将 PMMA 芯片置于烧杯内,浸泡一定时间后取出。

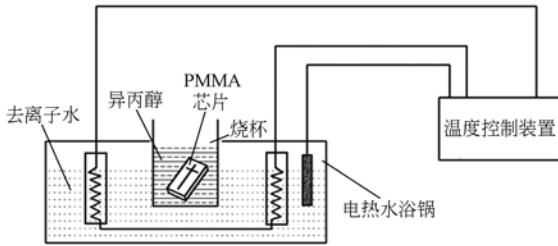


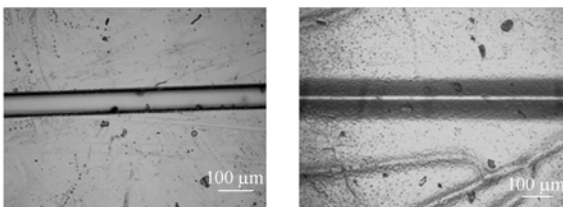
图 2 相溶性测试设备
Fig. 2 Solubility test device

实验分为 7 组进行,温度分别为 30, 35, 40, 45, 50, 60 和 70 °C, 每组温度下的浸泡时间为 5 min, 如表 1 所示:

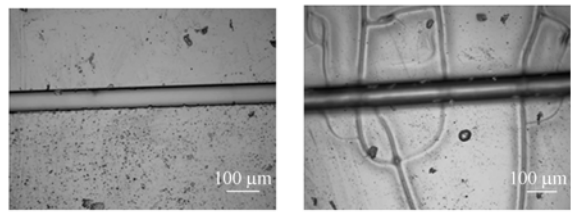
表 1 相溶性测试实验参数
Tab. 1 Experimental parameters of solubility test

实验组数	温度 T/°C
1	70
2	60
3	50
4	45
5	40
6	35
7	30

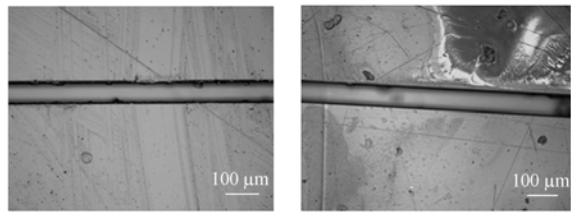
利用 Olympus 测量显微镜观察,对比浸泡前与浸泡后的微通道形貌和表面质量,如图 3 所示:



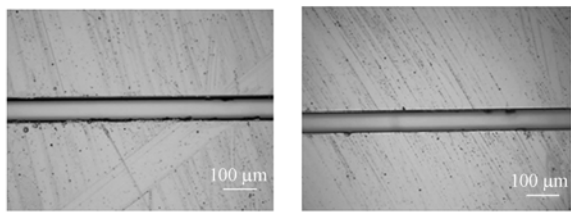
(a) 70 °C 浸泡 5 min 前后微通道形貌对比
(a) Contrast of morphologies for micro channels before and after soaking at 70 °C for 5 min



(b) 60 °C 浸泡 5 min 前后微通道形貌对比
(b) Contrast of morphologies for micro channels before and after soaking at 60 °C for 5 min



(c) 50 °C 浸泡 5 min 前后微通道形貌对比
(c) Contrast of morphologies for micro channels before and after soaking at 50 °C for 5 min



(d) 35 °C 浸泡 5 min 前后微通道形貌对比
(d) Contrast of morphologies for micro channels before and after soaking at 35 °C for 5 min

图 3 不同温度不同时间下微通道形貌

Fig. 3 Morphologies of micro channels under different temperatures and periods

为评价不同参数条件下异丙醇对 PMMA 芯片表面质量的影响,用台阶仪测量实验前后芯片

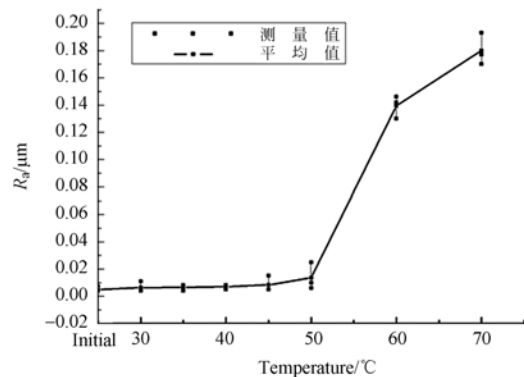


图 4 温度对芯片表面粗糙度的影响

Fig. 4 Effect of temperatures on surface roughness

表面粗糙度 R_a 值(评定长度 4 mm),数据如图 4 所示。

实验结果表明:异丙醇溶液对 PMMA 芯片微通道形貌和表面质量的影响随着温度递减逐渐降低,在 35 °C,浸泡时间 5 min 时,异丙醇溶液对 PMMA 芯片微通道质量和整体形貌的影响已不明显。

3.2.2 借助辅助溶剂的模内键合实验

微注塑模具设计为两板式结构,型腔尺寸为 35 mm×20 mm×1.2 mm(长×宽×深),如图 5 所示:

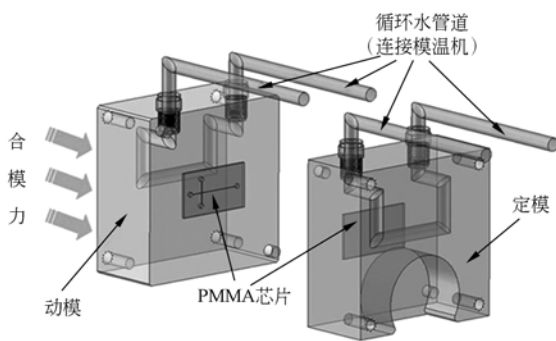


图 5 模内键合实验微模具

Fig. 5 Micro mold in in-mold bonding experiment

首先将加工完成的基片和盖片进行超声清洗,然后调整模温机参数,加热模具,将 PMMA 芯片分别放入定模板和动模板的型腔内。键合前,控制模具行程,使基片和盖片的距离为 1 mm 左右,保持 5 min,使基片和盖片充分受热;然后,在基片和盖片的贴合面喷涂异丙醇溶液,合模键合。键合实验的参数如表 2 所示:

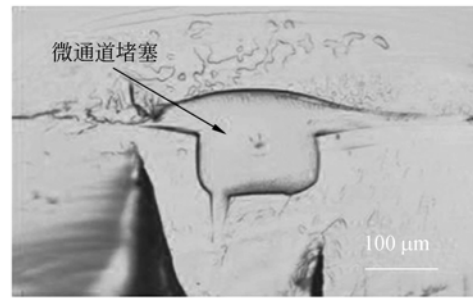
表 2 溶液辅助键合实验参数

Tab. 2 Experimental parameters of solvent-assisted bonding

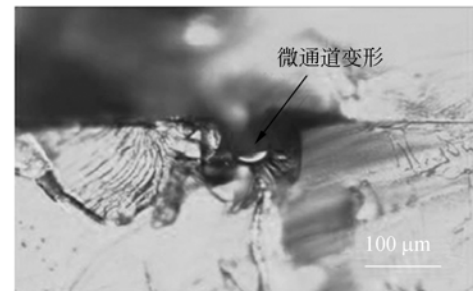
实验组数	键合温度/°C	键合时间/min
1	70	10 5
2	60	10 5
3	50	10 5
4	45	10 5
5	40	10 5
6	35	10 5
7	30	10 5

将键合后的 PMMA 芯片剖开,用显微镜观察微通道截面,图 6 所示为 70,50,35 °C 时键合后

微通道的截面图,图 7 所示为键合的微流控芯片。



(a)70 °C,5 min



(b)50 °C,5 min



(c)35 °C,5 min

图 6 键合后芯片微通道截面

Fig. 6 Cross-section of micro channels after bonding

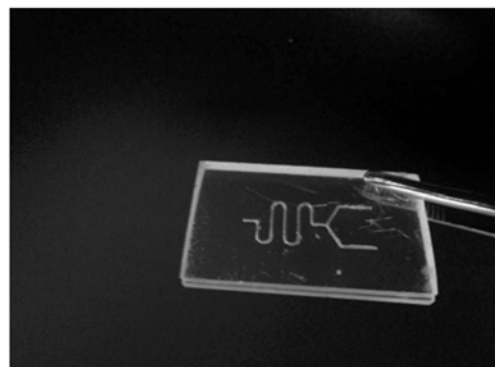


图 7 溶剂辅助键合的微流控芯片

Fig. 7 Microfluidic chip after solvent-assisted bonding

利用电子万能试验机测量芯片的键合强度,设计了夹具,将键合后的芯片固定在夹具的上、下平板间,当拉力达到 1.85 kN 时,芯片整体与夹具脱离,基片和盖片并未被拉开,可知微流控芯片的键合强度不小于 2.64 MPa。

实验结果表明:

(1)采用异丙醇辅助溶剂键合,键合质量与键合时间、键合温度有关,键合压力的影响不明显;

(2)在 30~70 °C,在较高的键合温度下,芯片表面会发生溶胀,在压力作用下会产生破裂,而且,微通道会堵塞或变形;

(3)随着键合温度的降低和键合时间的缩短,芯片表面的破裂和白色雾状膜逐渐减小,微通道变形逐渐改善,在键合温度 35 °C,键合时间 5min 时,芯片的表面质量和微通道质量较好,并具有一定的键合强度;当键合温度低于 35 °C 时,不能实

现芯片键合。

4 结 论

研究了借助有机溶剂在注塑机上进行模内键合的方法,分析了键合机理,采用异丙醇作为辅助溶剂,使键合温度低于玻璃态温度(T_g),在微注塑机模具上完成 PMMA 微流控芯片的键合。在 30~70 °C,测试了异丙醇溶剂对 PMMA 芯片表面质量和微通道形貌的影响,优化了键合工艺参数。在键合温度 35 °C,键合时间 5 min 时即可实现键合,与传统的模内键合^[13]相比,降低了键合温度,提高了键合效率,经测试,芯片键合强度不小于 2.64 MPa,与热压键合^[2]和超声辅助键合^[3]的强度处于同一水平,为实现聚合物微流控芯片的高效率键合提供了依据。

参考文献:

- [1] 林炳成,秦建华. 图解微流控芯片实验室[M]. 北京:科学出版社,2008.
- LIN B CH, QIN J H. *Graphic Laboratory on a Microfluidic Chip* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [2] SUN Y, KWOK Y C, NGUYEN N T. Low-pressure, high-temperature thermal bonding of polymeric microfluidic devices and their applications for electrophoretic separation[J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2006(16):1681-1688.
- [3] ZHANG Z B, WANG X D, LUO Y, *et al.*. Thermal assisted ultrasonic bonding method for poly(methyl methacrylate) (PMMA) microfluidic devices[J]. *Talanta*, 2010,81(4-5):1331-1338.
- [4] 罗怡,张苗苗,孙屹博,等. 面向聚合物微器件超声波精密封接的阵列波导能结构[J]. *光学精密工程*, 2011,19(4):754-761.
- LUO Y, ZHANG M M, SUN Y B, *et al.*. Micro energy director array for ultrasonic precise sealing of polymer MEMS device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(4):754-761. (in Chinese)
- [5] NG S H, THEODORE R, WANG Z F. Formation of embedded microchannels by a solvent displacement bonding technique[C]. *Proceedings of 9th E-*
- lectronics Packaging Technology Conference, India: IEEE*, 2007:211-214.
- [6] NIRANJAN P, ALBERTO C B, MARCO S. Solvent effects on the thermal and mechanical properties of poly(methyl methacrylate) casted from concentrated solutions[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2011,12(20):12-20.
- [7] 赖建军,陈西曲,周宏,等. 应用于微系统封装的激光局部加热键合技术[J]. *微纳电子技术*, 2003,(7/8): 257-260.
- LAI J J, CHEN X Q, ZHOU H, *et al.*. Laser locally heating and bonding for micro system packaging[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2003, (7/8):257-260. (in Chinese)
- [8] USSING T, PETERSEN L V, NIELSEN C B, *et al.*. Micro laser welding of polymer microstructures using low power laser diodes[J]. *Int J. Adv. Manuf. Technol.*, 2007,33(1-2):198-205.
- [9] SUZUKI Y, YAMADA M, SEKI M. Sol-gel based fabrication of hybrid microfluidic devices composed of PDMS and thermoplastic substrates[J]. *Sensors and Actuators B*, 2010,148(1):323-329.
- [10] UMBRECHT F, MÜLLER D, GATTIKER F, *et al.*. Solvent assisted bonding of polymethylmethacrylate: characterization using the response surface methodology[J]. *Sensors and Actuators*

- B, 2009,156(1):121-128.
- [11] LIN C H, CHAO C H, LAN CH W. Low azeotropic solvent for bonding of PMMA microfluidic devices[J]. *Sensors and Actuators B*, 2007, 121(2):698-705.
- [12] SHAH J J, GEIST J, LOCASCIO L E, *et al.*. Capillarity induced solvent-actuated bonding of polymeric microfluidic devices[J]. *Anal. Chem.*, 2006,78(10):3348-3353.
- [13] 蒋炳炎,刘瑶,李代兵,等. PMMA微流控芯片高效键合工艺研究[J]. *塑料工业*, 2010, 38(4):33-36.
- JIANG B Y, LIU Y, LI D B, *et al.*. Research on efficient bonding procedure of PMMA microfluidic chip[J]. *China Plastics Industry*, 2010, 38(4):33-36. (in Chinese)
- [14] 蓝才红,蒋炳炎,刘瑶,等. 聚合物微流控芯片键合微通道变形仿真研究[J]. *塑料工业*, 2009, 37(5):31-34.
- LAN C H, JIANG B Y, LIU Y, *et al.*. Simulation study of microchannel distortion of polymeric microfluidic chip with bonding technique[J]. *China Plastics Industry*, 2009, 37(5):31-34. (in Chinese)
- [15] 严志云,石虹桥,梁世强,等. 聚合物复合材料界面粘合理论研究进展[J]. *仲恺农业技术学院学报*, 2007, 20(2):62-65.
- YAN ZH Y, SHI H Q, LIANG SH Q, *et al.*. Progress of study on the interfacial adhesion of polymer composites[J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Technology*, 2007, 20(2):62-65. (in Chinese)
- [16] 周瑞明. 粘接机理的扩散理论与溶解度参数[J]. *温州师范学院学报*, 1994, (3):60-64.
- ZHOU R M. Diffusion theory of adhesion mechanism and the solubility parameters[J]. *Journal of Wenzhou Teachers College*, 1994, (3):60-64. (in Chinese)
- [17] 高保娇. 溶解度参数及其应用[J]. *山西化工*, 1998, (2):18-19.
- GAO B J. Application for solubility parameters[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 1998, (2):18-19. (in Chinese)
- [18] MAIR D A, ROLANDI M, SNAUKO M, *et al.*. Room-temperature bonding for plastic high-pressure microfluidic chips[J]. *Anal. Chem.*, 2007, 79(13):5097-5102.
- [19] SHAH J J, GEIST J, LOCASCIO L E, *et al.*. Capillarity induced solvent-actuated bonding of polymeric microfluidic devices [J]. *Anal. Chem.*, 2006,78(10):3348-3353.
- [20] SUN X H, PEENI B A, YANG W C, *et al.*. Rapid prototyping of poly(methyl methacrylate) microfluidic systems using solvent imprinting and bonding [J]. *Journal of Chromatography A*, 2007, 1162:162-166.
- [21] 李丽萍,杜晓光. 溶剂键合法制作聚碳酸酯微流控分析芯片[J]. *分析化学*, 2009, 37:138.
- LI L P, DU X G. Solvent bonding method of polycarbonate microfluidic chips[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2009, 37:138. (in Chinese)

作者简介:



王继章(1987—),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事微注塑成型与微模具设计制造方面的研究。E-mail: jizhang_wang@163.com



杨铎(1980—),女,辽宁宽甸人,博士研究生,主要从事微注塑与聚合物流动方面的研究。E-mail: neuduoyang@yahoo.com.cn

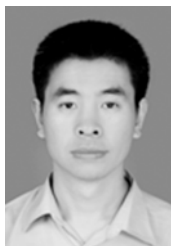


刘冲(1963—),男,四川成都人,博士,教授,1989年于华中科技大学获得硕士学位,1993年于华南理工大学获得博士学位,主要从事微机电工程领域的研究工作。E-mail: chongl@dlut.edu.cn



王立鼎(1934—),男,辽宁辽阳人,教授,中国科学院院士,1960年于吉林工业大学获得学士学位,微机电与精密工程领域知名专家。E-mail: wangld@dlut.edu.cn

导师简介:



徐征(1973—),男,河南郑州人,博士,副教授,1997年于吉林工业大学获得学士学位,2004年于大连理工大学获得博士学位,主要从事微装配、微操作、微流体等方面的研究工作。E-mail: xuzheng@dlut.edu.cn

●下期预告

纳米级针孔矢量衍射波前误差分析

王 俐^{1,2,3} 饶长辉^{1,2} 饶学军^{1,2}

(1. 中国科学院 光电技术研究所,四川 成都 610209;

2. 中国科学院 自适应光学重点实验室,四川 成都 610209;

3. 中国科学院 研究生院,北京 100049)

应用哈特曼-夏克(H-S)波前检测仪对大数值孔径透镜进行检测时,需要采用纳米级针孔产生参考球面波前对 H-S 传感器进行标定,要制作出满足要求的高质量针孔,需对影响参考波前质量的各种要素进行仿真计算和分析,以获得最优的针孔加工参数。基于矢量衍射理论,在会聚高斯光束照射情况下,计算了针孔厚度、直径大小对衍射波前误差的影响、衍射波前中的像差成份、能量透过率、强度均匀性、针孔加工误差及光束相对针孔中心发生平移、离焦、倾斜时衍射波前误差的变化。分析计算得出,为了得到数值孔径 NA 为 0.6,相对于理想球面波的波峰波谷值(P-V)偏差不大于 0.005λ ($\lambda=193\text{ nm}$) 的球面波前,在实际针孔的加工制作中,选取材料铬,针孔厚度 200 nm,直径 180 nm 最佳。