

文章编号 1004-924X(2018)03-0672-08

## 超声波键合熔接结构及压力自平衡夹具

刘 冲, 孟凡健, 梁 超, 李经民\*

(大连理工大学 辽宁省微纳米及系统重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 聚合物微流控芯片对键合精度、键合强度及键合效率要求高。为了避免超声波键合中微通道被堵塞, 解决键合过程中由调平精度和低频振动引起的键合强度低、键合压力分布不均的问题, 设计了一种基于超声波键合的熔接结构和压力自平衡夹具。首先, 利用感压胶片对压力自平衡夹具和不带自平衡功能的夹具的压力分布进行测量, 并定义了压力分布系数进行量化。其次, 利用两种夹具分别对设计芯片进行超声键合, 并利用工具显微镜对焊线和微通道截面进行观测。最后, 对两组芯片进行键合强度测试和密封性测试。实验结果表明: 所设计的熔接接头结构对微通道的控制精度可达  $2.0\ \mu\text{m}$ 。压力自平衡夹具结构简单可靠, 可提高压力均匀性  $35.20\% \sim 43.18\%$ , 并使得焊线均匀一致, 同时可提高键合强度  $15.3\% \sim 45.1\%$ , 并保证密封性。该熔接结构和压力自平衡夹具可满足聚合物微流控芯片的控制精度、键合强度、压力均匀性及其密封性的要求。

**关键词:** 微流控芯片; 超声波键合; 熔接结构; 压力自平衡夹具

**中图分类号:** TB559; TN405 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182603.0672

## A joint structure and self-balancing jig based on ultrasonic bonding

LIU Chong, MENG Fan-jian, LIANG Chao, LI Jing-min\*

(Key Laboratory of Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province,  
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

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

**Abstract:** Polymer microfluidic chips have high requirements for bonding precision, bonding strength and bonding efficiency. In order to avoid the clogging of microchannel by fusion and solve the problems of low bonding strength, uneven pressure distribution caused by leveling precision and high-frequency vibration in the process of ultrasonic bonding, the joint structure and self-balancing jig were designed and fabricated. First, based on the self-balancing jig and conventional jig with no leveling function, the pressure distribution coefficient was defined and measured by prescale film. Moreover, the chips we designed were bonded with two types of jigs respectively. The bonding line and cross-section of microchannels were measured by measuring microscope. Last, these chips were tested by electric tensile tester and sealing test. Experimental results indicate that the precision of controlling microchannel can reach about  $2.0\ \mu\text{m}$ . The self-balancing jig can improve pressure distribution about

收稿日期: 2017-05-16; 修订日期: 2017-07-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51375076, No. 51475079); 国家自然科学基金创新研究群体资助项目 (No. 51621064)

35.20%—43.18% with simple structure and easy operation, and make the bonding line uniform. The bonding strength increases about 15.3%—45.1% with excellent sealing performance. It concludes that the joint structure and self-balancing jig can satisfy the requirements of controlling precision, bonding strength, pressure distribution and sealing performance.

**Key words:** microfluidic chips; ultrasonic bonding; joint structure; self-balancing jig

## 1 引言

微流控芯片又称作微全分析系统( $\mu$ -TAS)、片上实验系统,是目前研究的热点<sup>[1]</sup>。微流控芯片是将宏观的生物、化学实验室缩小集成到一个数平方厘米的基片上,通过微流道内微量流体进行检测或控制<sup>[2-3]</sup>。聚合物微流控芯片的键合技术是实现批量化和自动化生产的主要瓶颈问题之一<sup>[4]</sup>。目前,常用的键合技术主要有热键合<sup>[5-6]</sup>、胶粘键合<sup>[7]</sup>和溶剂键合<sup>[8]</sup>等,这些方法存在着效率低、生物相容性差及键合不稳定等问题。超声波键合是利用超声能量,在极短时间内使聚合物局部产生熔融而实现连接的技术,因其具有生物相容性好,键合强度高及无需中间介质等优点<sup>[9]</sup>,超声波键合技术为聚合物微流控芯片的大批量生产提供了可行途径。

2006年,Truckenmüller等<sup>[10]</sup>首次利用超声波对微流控芯片、微单向阀以及盘形微瓣膜泵等进行封装,验证了超声波应用于微流控芯片的可行性。然而,随着微结构尺寸的不断减小,键合时,不仅要求键合强度高、生物相容性好,更要求焊接精度和焊接均匀。罗怡等<sup>[11]</sup>设计了三角形导能筋的超声波熔接结构,该结构可避免通道堵塞,但三角形导能筋的键合强度低,同时在键合过程中,基片与盖片的配合间隙无法消除,导致微通道高度难以有效控制。在超声键合过程中,超声压头与待键合芯片的平行度直接影响键合精度及均匀性,所以在键合过程中必须对超声压头和芯片夹具板进行调平。调平技术可分为主动式调平和被动式调平<sup>[12]</sup>。主动式调平是预先对平行度进行检测,然后对动平台进行控制调整。韩国电子电讯研究所提出了基于PSD(Position Sensitive Detector)的调平技术<sup>[13]</sup>,其准确度主要依赖调焦和调平精度,但其设备精密昂贵且容易受到外部振动冲击干扰,不适用于超声键合。被动式调平主要利用压力产生变形,实现待键合面

与压头的平衡,通常利用柔性铰链,硅胶,甚至弹簧等<sup>[14-16]</sup>的变形特性实现调平。该方法虽然可实现姿态的调平,但是从本质上来讲,柔性材料变形大的地方受到的压力大,而变形小的地方受到的压力小,无法从根本上来实现压力均衡。

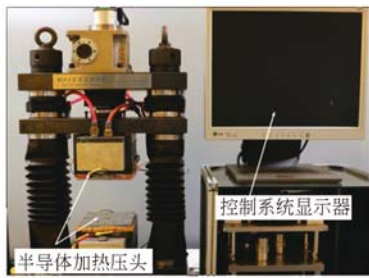
本文设计了一种聚合物微流控芯片的超声波键合熔接结构,可通过熔接池和阻融台,避免微通道被堵塞,微通道的控制精度可达 $2\mu\text{m}$ 。同时,设计并制作了压力自平衡功能的超声键合夹具,与不带自平衡功能的夹具相比,通过其球面副结构可实现待键合芯片随超声压头的自由转动,通过球面夹紧箍保证键合中的夹紧固定,操作简便,有效提高了压力均匀性、键合强度和气密性。

## 2 芯片与夹具的设计制作

### 2.1 芯片的设计制作

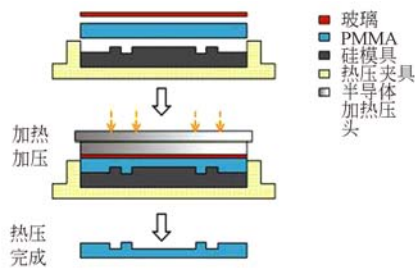
在超声键合中,基片和盖片之间的熔接面在超声压头的超声和压力作用下,产生高频摩擦,温度上升产生瞬间的融化,从而实现基片与盖片的永久键合<sup>[1]</sup>。本文所设计的微流控芯片分为基片和盖片,厚度为1mm,其聚合物材料选用日本旭化成公司生产的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),其玻璃转化温度为 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 。首先用激光器切成尺寸分别为 $69\text{ mm}\times 17\text{ mm}$ 的矩形板,盖片仅含有一个直径为3mm的注射进口。基片由热压法得到,采用的热压机为大连理工大学微系统研究中心自行研发的RYJ-1型,如图1(a)所示,其最大控制温度为 $300\text{ }^\circ\text{C}$ ,控制精度为 $2\text{ }^\circ\text{C}$ ,最大控制压力为30kN,压力控制精度为0.04kN。芯片的热压过程如图1(b)所示,硅片模具是利用干法刻蚀得到的。

基片主要包括检测区、混合区、延时区、检测区和废液池等。本文在被封接的微通道周围制备导能筋,并采用对称化的布置结构,以便在增加键合强度的同时,减小内应力。熔接接头结构决定着键合的精度和强度<sup>[4]</sup>。本文设计的熔接结构包



(a)热压机实物图

(a) Hot embossing machine



(b)热压过程示意图

(b) Hot embossing process

图 1 RYJ-1 型热压机实物图及热压过程示意图

Fig. 1 Image of hot embossing machine and schematic of hot embossing process

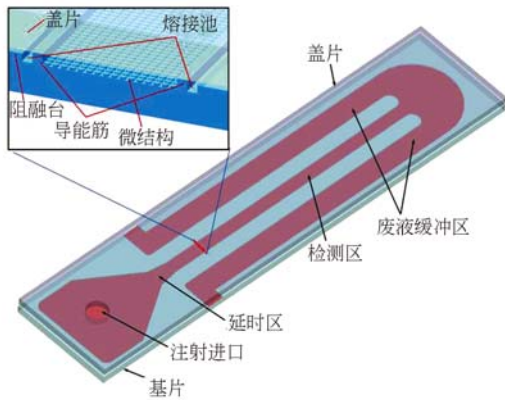


图 2 聚合物芯片与熔接接头示意图

Fig. 2 Schematic diagram of microfluidic chips and joint structure

括:导能筋、阻融台、熔接池。通常导能筋截面形状可分为三角形、矩形、半圆形,半圆形导能筋键合强度最大,但制作成本高;矩形导能筋键合强度次之,三角形键合强度最低<sup>[17]</sup>。考量键合强度以及制作成本,本文选择矩形导能筋并设计出了熔接接头形状,如图 2 所示,其中导能筋宽度和高度分别为  $150\ \mu\text{m}$  和  $60\ \mu\text{m}$ 。在超声键合时,超声压

头接触盖片后,同时施加压力和高频超声,导能筋融化并流延,熔接池(宽度和深度分别为  $150\ \mu\text{m}$  和  $45\ \mu\text{m}$ )用于承接融化的导能筋。当盖片接触基片上的阻融台后,阻融台吸收大部分超声能量,从而阻止导能筋的进一步融化,同时微通道高度得以被有效控制。

### 2.2 压力自平衡夹具的设计制作

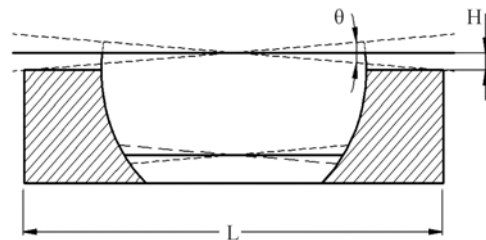
在聚合物微流控芯片的超声键合中,为了实现芯片的均匀键合,必须保证键合面与超声压头的平行。由于加工与装配误差的存在,键合时芯片与超声压头往往存在一定角度或者空气间隙,同时键合过程中的高频振动和压力,使得键合能量和压力分布更加不均,产生局部键合过度和键合不足,导致聚合物芯片键合密封失效或者漏液。

本文提出一种用于聚合物芯片超声波键合的压力自平衡夹具,如图 3(a)所示,主要包括芯片夹具板、上球面、球形底座、球面夹紧箍等主要部分,球面夹紧箍与球形底座通过合页及锁扣相连。压力自平衡夹具的作用主要包括两部分:调平和夹紧。调平功能主要依靠上球面与球形底座形成



(a)压力自平衡夹具实物图

(a) Image of self-balancing jig



(b)压力自平衡夹具示意图

(b) Schematic of self-balancing jig

图 3 压力自平衡夹具

Fig. 3 Self-balancing jig

的可动球面副,为增加球面副的耐磨性,对上球面、球面夹紧箍及球形底座的接触面进行调制及人工时效处理。如图 3(b)所示,球面副的转动角  $\theta = \tan^{-1} 2H/L$ ,其中  $H$  为球面高度差, $L$  为球面底座外圆直径。球面副的转动角  $\theta$  根据超声键合的实际工况进行匹配,同时为了降低上球面转动的压力阈值,在球面副之间添加 AZsmooth700 润滑脂。夹紧功能主要依靠球面夹紧箍上的合页及锁扣的夹紧作用,通过球面夹紧箍紧密贴合上球面,避免在超声键合中,上球面发生转动引起调平误差。

在超声键合前,首先将球面夹紧箍绕合页打开,超声压头下降并接触芯片夹具板内的芯片,在

压力作用下,上球面在球形底座内转动,并使得芯片夹具板中的待键合芯片与超声压头平行,利用锁扣实现球面夹紧箍对上球面的固定锁紧,抬起超声压头,完成键合之前的调平工作。在后续的键合中,无须再调平,即可保证芯片夹具板与超声压头的平行关系。与传统的不带调平的夹具相比,压力自平衡夹具通过上球面与球形底座的球面副,实现超声压头与芯片的完全的平行贴合。无调平功能的夹具与本文设计的压力自平衡夹具的工作原理图解说明,如图 4 所示,在无调平功能的夹具与芯片之间易产生空气间隙,而在压力自平衡的夹具与芯片之间完全贴合,很大程度上减少了键合不均匀的产生。

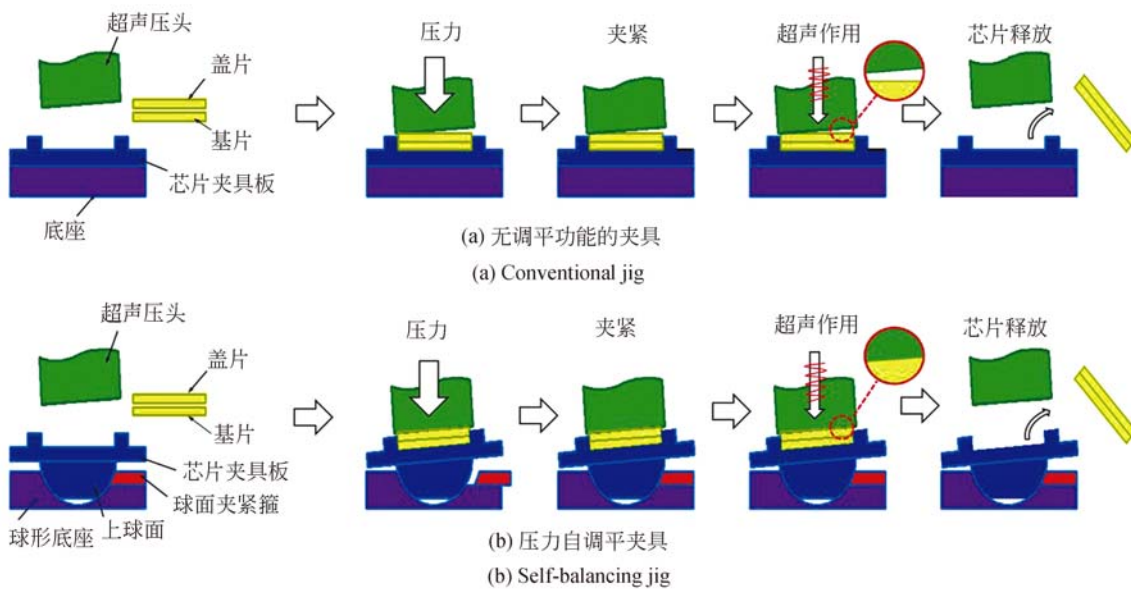


图 4 无压力自平衡功能的夹具和压力自平衡夹具的键合过程示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of ultrasonic bonding processes using conventional jig and self-balancing jig respectively

### 3 实验与结果

#### 3.1 压力分布均匀性实验

调平的效果可以从压力的均匀性来,当超声压头与芯片表面完全接触后,对接触面的压力分布进行测量,压力分布越均匀,调平效果越好。目前,常用的评价方法是利用日本 FUJIFILM 公司生产的压力测量胶片(俗称感压薄膜)。测量时,压力作用在 A 和 C 膜片上,A 膜片微囊破裂泄露,并在 C 膜显红色。膜片上红色越深,代表该

区域的的压力越大。

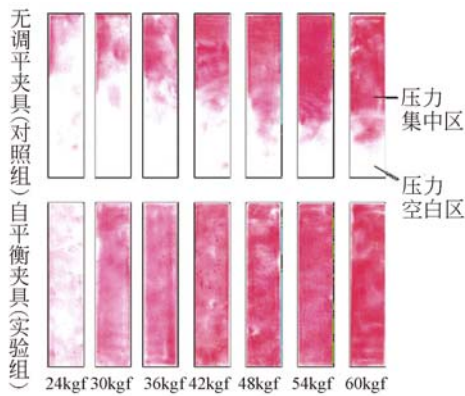
本文将实验分为两组,实验组和对照组。实验组采用的是本文设计的压力自平衡夹具,而对照组采用的无调平功能的夹具(仅含有芯片夹具板)。键合压力分别设置为 24~60 kgf,压力步长为 6 kgf,其他键合参数为振幅为 60  $\mu\text{m}$ ,键合时间为 0.1 s,保压压力与键合压力相等。在进行压力均匀性实验之前,调整超声压头的角度,模拟超声压头与待键合芯片的不平行。试验中,各部分的放置顺序从下到上依次为:夹具、平板玻璃、感压胶片、超声压头。为了显色充分,超声压头下降

30 s 后抬起。键合后的显色膜片如图 5(a) 所示。为了量化压力分布的均匀性,本文进一步将显色膜片用扫描仪扫描进 MATLAB,利用灰度函数将 RGB 文件转换成灰度值图像,灰度图像像素点的值为 0~255(0 和 255 分别代表纯黑和纯白),像素值越小,代表颜色越深。为精确量化压力分布,我们分别定义压力分布系数  $M$  和压力分布比  $\delta$ :

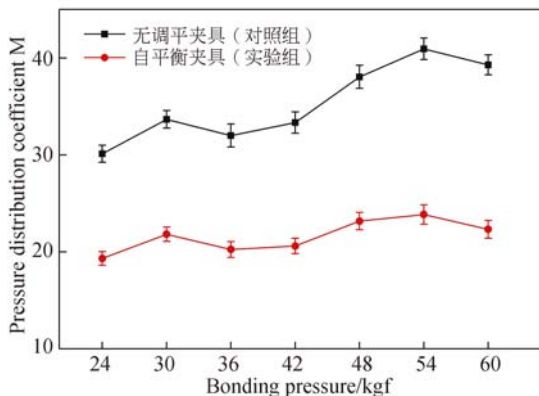
$$M = \sum |m_i - m_i'|, \quad (1)$$

$$\delta = \frac{|M_e - M_c|}{M_c} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: $m_i$  为感压纸某一点  $i$  的灰度像素值; $m_{ii}$  为点  $i$  关于感压纸中心对称点的灰度像素值; $M_c$  为实验组的压力分布系数; $M_e$  为对照组的压力分布系数。



(a) 试验后感压胶片扫描图  
(a) Scanned image of prescale film



(b) 压力分布系数曲线图  
(b) Diagram of pressure distribution coefficient

图 5 压力分布结果

Fig. 5 Experimental results of pressure distribution

实验组和对照组的图像处理结果如图 5(b) 所示,从结果可以看出:(1)当超声压头与键合芯片不平行时,对于无调平功能的夹具,随着键合压力的增加,压力分布系数  $M$  逐渐增加,即压力的均匀性逐渐恶化;(2)带有压力自平衡装置的夹具的压力分布系数  $M$  平稳且小于对照组,即带有压力自平衡夹具可有效地提高压力均匀性;(3)相对于无调平功能的夹具,带有压力自平衡夹具的压力分布比  $\delta$  提高了 35.20%~43.18%。

### 3.2 键合实验

键合实验所使用的聚合物超声键合设备如图 6 所示。该键合设备的控制模式为时间模式,控制精度为 0.01 s,最大键合压力为 200 kgf,超声压头的工作频率为 20 kHz,最大输出功率为 1 500 W。

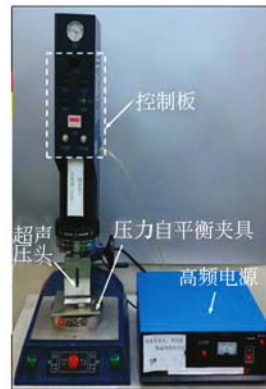


图 6 实验中所使用的超声键合设备

Fig. 6 Image of ultrasonic welding machine used in experiment

同 3.1 节,分别利用实验组和对照组进行芯片键合封装,实验组采用的是带有压力自平衡的夹具,而对照组采用的无调平功能的夹具。键合压力为 24~60 kgf,压力步长为 6 kgf,键合时间为 0.1 s,保压压力与键合压力相等。

对于超声键合后的芯片,利用奥林巴斯工具显微镜 (STM6-F10-3,精度为 0.1  $\mu\text{m}$ ) 对键合后的芯片焊线进行观察。在对照组中的通道两侧同时出现了键合不足以及键合过度的现象,如图 7(a) 所示,直观说明了无自调平功能的夹具在键合过程中存在着压力分布不均的情况。而在实验组,如图 7(b) 所示,可以看出焊线均匀一致,没有出现键合过度或者键合不足的情况。由此可以说明,利用压力自平衡夹具可有效提高焊线的均匀

性。本文对实验组的键合芯片截取通道截面,如图 7(c)所示,并利用扫描电子显微镜进行观察,得到的芯片截面 SEM 图。由 SEM 图可以看出,芯片盖片与阻融台接触后,键合过程被控制,熔接池承载融化的导能筋,避免了微通道被堵塞,如图 7(d)所示。

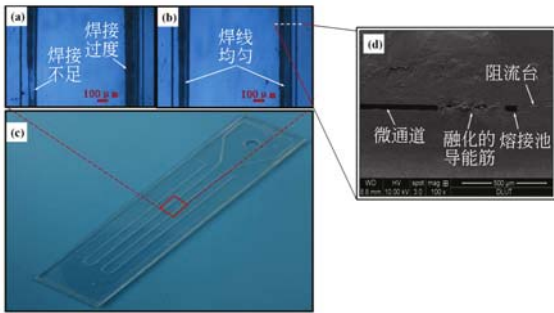


图 7 键合后的芯片形貌及微通道截面,(a~b)对照组和实验组芯片焊线(c)实验组键合后芯片(d)微通道截面 SEM 图

Fig. 7 Image of chip after bonding, including monopoly of bonding line and cross-section of microchannel (a-b) Bonding line in control group and experimental group (c) bonded chip in experimental group (d) SEM image of microchannel cross-section

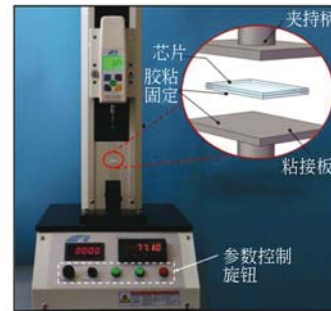
为了进一步探究所设计的超声波熔接结构的微通道高度保持性能,本文利用奥林巴斯工具显微镜,对实验组键合后的微通道高度进行测量,测量结果在  $34.5 \sim 36.5 \mu\text{m}$  之间,由此可得,本文设计的超声波键合熔接结构对微通道高度的控制精度为  $2 \mu\text{m}$ ,并可有效避免微通道的堵塞,提高对微通道高度的控制力。

### 3.3 键合强度与漏液测试

在键合技术中,键合强度是一个非常重要的参数。它是关系到键合好坏的一个技术指标:键合强度小,在加工过程中键合芯片很有可能会开裂,导致失效;只有较大的键合强度,才能保证产品的成品率和质量。在工业中应用的许多器件都要求有强的键合强度和稳定的键合界面。在微流控芯片的键合方法中,拉伸强度破坏实验是键合强度测试的主要方法。

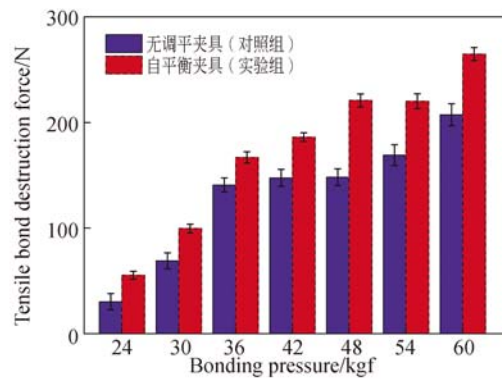
对上节键合的芯片进行拉伸破坏实验,实验组采用的是压力自平衡夹具,而对照组采用的无调平功能的夹具。键合压力分别设置为  $24 \sim 60 \text{ kgf}$ ,压力步长为  $6 \text{ kgf}$ ,在同一参数下分别键合 5 片芯片,对键合好的芯片分别进行拉伸破坏实验。

如图 8(a)所示,实验选用的拉伸试验机为艾谱 FGS-500 VC 系列(最大拉力为  $500 \text{ N}$ ,测量误差为  $\pm 0.5\%$ )。由于键合强度较大,将键合后的芯片切成  $15 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的小块试件,并用利用环氧树脂胶对芯片表面和粘接板进行胶粘处理,设定拉伸机的拉伸速度为  $0.5 \text{ mm/s}$ ,直至基片和盖片分离,记录拉伸过程中的最大拉力,结果如图 8(b)所示。



(a) 键合强度拉伸机

(a) Electric tensile tester



(b) 两种夹具键合芯片键合强度对比

(b) Comparison of bonding strength with two kinds of jigs

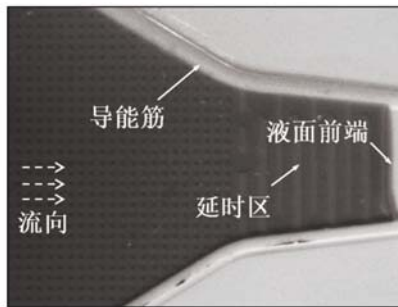
图 8 键合强度拉伸机及键合强度结果

Fig. 8 Image of electric tensile tester and result of bonding strength

键合强度的结果如图 8(b)所示,由拉伸破坏实验的结果可得,键合强度随着键合压力的增加而增加;与无调平功能的夹具相比,通过使用压力自平衡夹具可以提高芯片的键合强度  $15.3\% \sim 45.1\%$ 。

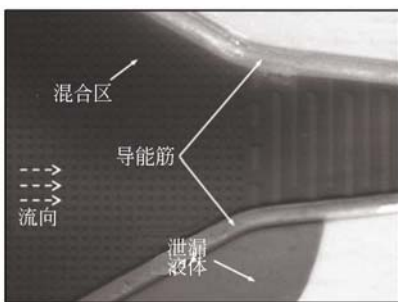
为了测试芯片的密封性,利用上海伊卡生物科技有限公司生产的红色生物染料 C0154 进行密封性测试。为了提高通道表面湿润性以及自流速

率,同时对两组芯片进行表面深紫外修饰改性,芯片充液后,利用 SZX-ILLK200 型奥林巴斯立体视



(a)实验组实验芯片

(a) Chip in experimental group



(b)对照组实验芯片

(b) Chip in control group

图 9 芯片密封性测试实验

Fig. 9 Test of air tightness

觉显微镜进行观察。如图 9(a)所示,在利用自平衡夹具的键合芯片中,微通道得到很好地密封,没有出现漏液和渗液的现象;而在无调平功能的夹具键合的芯片中,有一部分芯片出现了局部的键合不足,出现了不同程度的试剂泄漏,如图 9(b)所示。可以说明利用压力自平衡夹具可以有效对芯片进行超声波键合,大大降低芯片漏液的可能性。

## 4 结 论

本文根据超声波键合控制精度高、键合强度大、键合均匀的需求,设计制作了一种超声波熔接结构及压力自平衡夹具。该超声波键合熔接结构可以通过阻融台、熔接池等结构,减少微通道被堵塞的可能,同时对微通道高度的控制精度可达  $2\ \mu\text{m}$ 。压力自平衡夹具结构简单,操作方便,通过上球面与球形底座的球面副与超声压头进行姿态调整,球面夹紧箍保证键合中上球面的固定。与不带压力自平衡的夹具相比,可提高压力均匀性  $35.20\% \sim 43.18\%$ ,同时提高芯片的键合强度  $15.3\% \sim 45.1\%$ ,降低芯片漏液的可能性。本文设计压力自平衡夹具仅需一次调平、能够在键合中稳定均衡压力等特点,可有效提高生产效率,满足超声波键合高精度、高效率的要求。

## 参考文献:

- [1] KISTRUP K, POULSSEN E, Hansen M F, *et al.*. Ultrasonic welding for fast bonding of self-aligned structures in lab-on-a-chip systems [J]. *Lab on a Chip*, 2015, 15(9): 1998-2001.
- [2] 范建华, 邓永波, 宣明, 等. PC 微流控芯片黏接筋与溶剂的协同辅助键合[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(3): 708-713.  
FAN J H, DENG Y B, XUAN M, *et al.*. Synergistic bonding process of solvent and tendon for PC-based microfluidic chips[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 708-713. (in Chinese)
- [3] THORSEN T, MAERKL S J, QUAKE S R, *et al.*. Microfluidic large-scale integration[J]. *Science*, 2002, 298(5593): 580-584.
- [4] 张宗波. 聚合物微流控芯片超声波键合机理与方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.  
ZHANG Z B. *Study on the mechanism and methods of ultrasonic bonding for polymer microfluidic chips*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [5] YIN Z F, SUN L, CHENG E L, *et al.*. Two dimensional PMMA nanofluidic device fabricated by hot embossing and oxygen plasma assisted thermal bonding methods[J]. *Nanotechnology*, 2015, 26(21): 215302.
- [6] WANG X D, JIN J, LI X, *et al.*. Low-pressure thermal bonding[J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, 88(8): 2427-2430.
- [7] LI J M, LIANG CH, ZHANG H, *et al.*. Reliable and high quality adhesive bonding for microfluidic devices[J]. *Micro & Nano Letters*, 2017, 12(2): 90-94.
- [8] 徐征, 王继章, 杨铎, 等. 辅助溶剂对 PMMA 微流控芯片模内键合的影响[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(2): 321-328.  
XU ZH, WANG J ZH, YANG D, *et al.*. Effect of

- assistant solvent on in-mold bonding of PMMA microfluidic chips[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 321-328. (in Chinese)
- [9] 刘冲,周立杰,李经民,等. 面向即时检测芯片超声波精密键合的熔接结构及工艺参数[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(5), 1057-1064.
- LIU CH, ZHOU L J, LI J M, *et al.*. Joint structure and processing parameters of ultrasonic precision bonding for point-of-care testing chips [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1057-1064. (in Chinese)
- [10] TRUCKENMÜLLER R, CHENG Y, AHRENS R, *et al.*. Micro ultrasonic welding: joining of chemically inert polymer microparts for single material fluidic components and systems[J]. *Microsystem Technologies*, 2006, 12(10-11): 1027-1029.
- [11] LUO Y, HE SH Q, WANG L J, *et al.*. Study on ultrasonic fusion bonding for polymer microfluidic chips [J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 483: 311-315.
- [12] 蔡伟林,熊涛,尹周平. 基于螺旋理论的转动解耦调平机构型综合[J]. *中国机械工程*, 2012, 23(18): 2213-2217.
- CAI W L, XIONG T, YIN ZH P. Type synthesis of a rotational decoupled leveling mechanism based on screw theory[J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(18): 2213-2217. (in Chinese)
- [13] KIM D, JANG W I, CHOI B Y, *et al.*. Focusing and leveling system using position-sensitive detectors for the wafer steppers[J]. *Proceedings of the SPIE*, 1994, 2197: 997-1003.
- [14] 余志伟,于靖军,宗光华,等. 柔性调平机构概念设计[J]. *北京航空航天大学学报*. 2005, 31(7): 714-717.
- YU ZH W, YU J J, ZONG G H, *et al.*. Conceptual design of compliant leveling mechanism[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(7): 714-717. (in Chinese)
- [15] HUANG Y C, LEE C Y, CHEN C R. Theoretical and experimental design of a new flexible hinged positioning stage[J]. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, 2012, 33(1): 59-62.
- [16] 王洪喜,柴鹏,王冠伟,等. 基于柔性机构的精密调平调心平台设计与分析[J]. *机械设计*, 2016, 33(7): 27-30.
- WANG H X, CHAI P, WANG G W, *et al.*. Design and analysis of precision centering and leveling table based on flexible mechanism[J]. *Journal of Machine Design*, 2016, 33(7): 27-30. (in Chinese)
- [17] CHUAH Y K, CHIEN L H J, CHANG B C, *et al.*. Effects of the shape of the energy director on far-field ultrasonic welding of thermoplastics[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2000, 40(1): 157-167.

#### 作者简介:



刘冲(1963—),男,四川成都人,博士,教授,博士生导师,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



孟凡健(1990—),男,山东潍坊人,硕士研究生,2015年于青岛大学获得学士学位,主要从事聚合物微流控芯片封合方面的研究。E-mail: fjianmeng@163.com

#### 通讯作者:



李经民(1979—),男,辽宁抚顺人,博士,副教授,硕士生导师,2010年于大连理工大学获得博士学位,2012年博士后出站,主要从事微机电工程、机电一体化、反求工程等方面的研究。E-mail: jingminl@dlut.edu.cn