

文章编号 1004-924X(2019)05-1128-10

双压电驱动高频喷射点胶阀的设计与实验

王凌云^{1,2*}, 黄翔², 林四英², 林晓龙², 林志鸿²

(1. 厦门大学深圳研究院, 广东深圳 518057; 2. 厦门大学机电工程系, 福建厦门 361102)

摘要: 为了满足电子封装产业对胶体高速、微量分配的需求, 设计了一种基于圆弧柔性铰链放大机构的双压电陶瓷驱动喷射点胶阀。首先, 利用有限元分析软件对放大机构输出位移和模态进行了计算与分析。针对其高频需求, 讨论了结构参数对其影响因素。基于微元法并结合喷嘴内胶体动力学分析, 建立了喷嘴内胶体喷射的流体力学模型。结合阀杆与阀座配合的仿真模型, 利用 FLOW-3D 的流固耦合仿真, 揭示了喷射点胶时胶点的成型过程。在此基础上探究了胶体喷射时喷嘴处压力的变化与流速的关系, 为点胶阀参数的控制和优化奠定了基础。最后, 搭建了喷射系统实验平台, 选用黏度为 180 cps 的胶体进行点胶性能测试, 得出了供料压力和驱动方波频率对胶点尺寸的影响规律。实验结果显示, 在供料压力为 6 bar、驱动方波幅值频率 360 Hz 等参数下, 获得胶点最小直径为 525 μm 。同时, 在 380~400 Hz 的频率区间内进行高频喷射实验, 能够获得均匀微小的圆形胶点。实验结果验证了该圆弧柔性铰链放大机构的双压电驱动点胶阀的高频、微量喷射性能, 为压电高频喷射点胶的应用和研究提供了参考。

关键词: 电子封装; 压电驱动; 高频点胶; 位移放大机构

中图分类号: TM282; TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192705.1128

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

WANG Ling-yun^{1,2*}, HUANG Xiang², LIN Si-ying², LIN Xiao-long², LIN Zhi-hong²

(1. Shenzhen Research Institute of Xiamen University, Shenzhen 518057, China;

2. Department of Mechanical and Electrical Engineering,
Xiamen University, Xiamen 361005, China)

* Corresponding author, E-mail: wangly@xmu.edu.cn

Abstract: To meet the requirements of high-frequency and micro-scale distribution of glue, a novel jetting dispenser with a corner-filletted flexure hinge driven by double piezoelectric stacks was developed. First, the output displacement and modal of the amplifier were calculated using finite element analysis software. The influencing factors of the structural parameters were discussed with regard to the requirement of high frequency operation. Based on the microelement method and analysis of the glue dynamics in the nozzle, a hydrodynamic model of the glue jetting in the nozzle was established. Combined with the simulation model of stem and seat assemblies, a FLOW-3D fluid-structure interaction simulation was conducted to reveal the formation process of droplets during dispensing. On this basis,

收稿日期: 2018-10-25; 修订日期: 2018-12-17.

基金项目: 深圳市科技计划资助项目 (No. JCYJ20170818141912229); 航空科学基金资助项目 (No. 20160868004)

the change of pressure in the nozzle and its relationship with the flow rate were studied, thus preparing a foundation for the control and optimization of the parameters of the dispenser. Finally, a jetting system platform was established, glue with a viscosity of 180 cps was used to test the dispensing property, and the relations between the feeding pressure, square-wave frequency, and droplet size were determined. Experimental results indicate that a minimum droplet diameter of 525 μm is obtained when a 6-bar feed pressure and a 360-Hz square-wave frequency are used. Simultaneously, high-frequency dispensing experiments between 380 and 400 Hz yield uniform micro-droplets. These results verify the high-frequency and micro-jetting performance of the double piezoelectric jetting dispenser with a corner-filletted flexure hinge, thus providing a good reference for the application and research of piezoelectric high-frequency dispensing.

Key words: electronic packaging; piezoelectric driving; high frequency dispensing; displacement amplifier

1 引言

流体点胶技术是以特定的方式对流体进行精确分配,将适量的胶体转移到芯片、电子元件和电路板等工件的合适位置,实现了电子元器件的连接和保护^[1]。近年来,电子产品不断朝向高性能、多功能、小型化的方向发展^[2]。激烈的市场竞争使智能手机、手表和平板电脑等产品快速地更新换代,导致产品的生产周期变短。因此,需要更加高效技术和手段完成电子产品的封装。随着芯片表面贴封、底部填充和顶部包封等技术的密集应用,尤其是这些微胶接技术广泛应用于微机电系统(MEMS)的研究,对如何高速度、高精度、超微量地完成点胶提出了极大挑战^[3-5]。

按照点胶头与基板是否接触,流体点胶技术大致可分为接触式点胶和喷射式点胶两种^[6,7]。喷射点胶技术的原理是通过在喷嘴处提供一个压力波使胶液从喷嘴处射出并落在基板上形成胶点。其中,根据胶液获得压力波的方式不同,分为热气泡式^[8]、气动式^[9]、电磁力驱动式^[10]和压电式^[11]等。相比于其它喷射点胶技术,压电式点胶技术具有胶体适应广泛、胶点一致性好及工作效率高等特点。国外对压电喷射点胶技术的研究始于上世纪九十年代,美国、德国和日本等国家拥有先进的压电流体分配技术并占据着高端点胶装备的市场。其中,德国 VERMES 公司推出的 MDS3200A 压电喷射点胶系统,连续工作频率可达 500 Hz,最小胶点体积为 2 nL,实现了不同胶体的高频微量喷射。近年来,国内许多高校对压

电喷射点胶技术进行了研究。北京航空航天大学袁松梅等^[2]设计的采用双向杠杆放大机构的压电驱动喷射点胶阀,由于位移放大机构在传递力过程中压电陶瓷将受到剪切应力,其喷射频率仅为 250 Hz。中南大学邓圭玲等^[13,14]设计的含柔性放大臂双压电叠堆驱动的喷射阀可以实现最高喷射频率 200 Hz,但由于阀体结构限制了点胶阀动态驱动精度,因此无法实现更高频率的胶点喷射。吉林大学刘建芳等^[15]开发的压电气体混合驱动式喷射点胶阀,能实现对最高黏度 3 000 cps 胶体的喷射。由于撞针的输出位移受弹簧膜片响应的限制,最高点胶频率低于 80 Hz。尽管以上科研单位在压电喷射点胶技术方面的研究取得了一定的突破,但是这些喷射点胶阀难以达到 350 Hz 以上的稳定工作频率,且与国外主流点胶阀的性能之间存在较大的差距,很难适应电子封装产业发展的应用需求。

为了实现对封装胶体的高速高精微量分配,本文提出了一种基于柔性铰链放大机构的双压电驱动高频喷射点胶阀。利用有限元仿真分析软件计算了放大机构的输出位移并通过模态分析验算其高频动态特性。通过微元法对喷嘴腔内胶体喷射时动力学模型进行了分析,并建立了阀杆及阀座配合的流体仿真模型,通过流固耦合仿真,揭示了压电喷射点胶中胶点形成过程,探究了点胶时喷嘴处压力变化规律及其对流速的影响作用关系。在完成喷阀加工装配的基础上,搭建喷射点胶系统,分析了供料压力及方波频率对胶点形成的影响,验证压电驱动喷射点胶阀高频、微量的喷射性能。

2 喷射点胶阀结构及工作原理

2.1 喷射点胶阀的组成结构

图 1 所示为本文所设计的双压电点胶阀的结构图。该装置主要包括:阀体、两个叠层压电陶瓷、柔性铰链、三角盖板、挡块、阀杆、连接块、密封元件及喷嘴。两个完全相同的层叠压电陶瓷两端分别与柔性铰链和挡块连接,并通过两根螺纹拉杆实现对压电陶瓷的固定和预紧力的调节。前后三角盖板分别通过螺栓固定于柔性铰链和连接块上,构成完整的、紧凑型三角放大器;该结构在位移输出方向上通过压电陶瓷的倒置安装,极大地降低了放大机构的整体尺寸,且三角形盖板可以在保证输出力强度的同时,有效地降低运动块的质量,从而为放大机构的高频动态特性奠定了基础。放大器末端连接着阀杆,阀杆下方为喷嘴。圆弧柔性铰链通过材料的弹性形变实现运动和力的传递,具有较大的转动能力和旋转精度、无摩擦、无间隙等优点^[16 17],能够减小压电陶瓷的应力,增长陶瓷的寿命。喷嘴采用高强度钨钢材料制作,防止工作过程中阀杆的高频冲击产生变形和磨损。同时,为了实现对不同尺寸胶点的喷射,喷嘴的设计采取可拆卸式,以便更换孔径不同的喷嘴。点胶阀主要尺寸参数如表 1 所示。

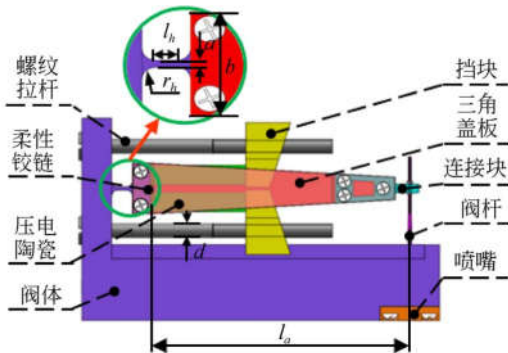


图 1 喷射点胶阀结构图

Fig. 1 Structure diagram of jetting dispenser

表 1 点胶阀主要参数尺寸

Tab. 1 Main parameter dimension of dispenser (mm)

部件	位移放大器	螺纹拉杆	压电陶瓷	柔性铰链
尺寸	$l_a=86$	$d=7$	$7 \times 7 \times 32.5$	$l_1=3, r_1=2,$ $a=1, b=18$

2.2 喷射点胶阀的工作原理

喷射点胶阀在图 2 所示的波形信号驱动下,分别激励上下压电陶瓷,使阀杆产生上下往复运动。在脉冲宽度为 T_1 时,上方压电陶瓷通电伸长,下方压电陶瓷断电不发生形变,则柔性铰链的旋转臂逆时针小角度转动,经位移放大机构放大后,阀杆产生一个向上的位移,胶液在压力的作用下挤入空腔,此时喷孔处于开启状态;同理,在脉冲宽度为 T_2 时,下方压电陶瓷通电激励伸长,上方压电陶瓷断电恢复原长,则柔性铰链的旋转臂顺时针小角度转动,经位移放大机构放大后,阀杆产生一个向下的位移,胶液受供料压力和阀杆高速冲击和挤压作用,从喷嘴流出,同时喷孔关闭。工作过程中,两压电陶瓷按此周期交替伸长和缩短,带动阀杆不断地做往复运动,从而使胶体实现按需分配。在实际控制中,通过改变电压大小及 T_1, T_2 的时间,可实现胶点喷射大小和频率的精确控制。

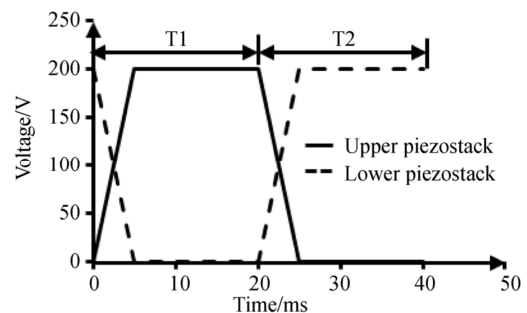


图 2 点胶阀的驱动波形

Fig. 2 Waveform of jetting dispenser

2.3 位移放大机构的仿真分析

利用 ANSYS 软件进行仿真计算以获得放大机构的输出位移并验证其高频动态性能。本文选用锆钛酸铅(PZT)压电致动器,在 200 V 电压下,其最大伸长量为 $45 \mu\text{m}$,刚度为 $35 \text{ N}/\mu\text{m}$,其阀体有限元模型中所选主要部件材料及物理特性如表 2 所示。

将阀体模型导入有限元分析软件中,设置各部件材料物理特性,进行网格划分。对两块压电堆叠分别施加 10 MPa 的预紧压强,并模拟将其中一块压电堆叠接入 200 V 的直流电压进行计算,最后取三角盖板前端点位移值,即为该位移放大机构的最大输出位移,结果如图 3 所示。根据

仿真结果,放大机构位移输出可达 350 μm,其放大倍数约为 7.8 倍,该位移放大量,可以较好地满足中高黏度胶体的喷射。

表 2 点胶阀主要部件材料及物理特性

Tab. 2 Material and physical characteristics of main components of dispenser

项目	三角盖板、挡块、基体	压电堆叠	柔性铰链
材料	不锈钢	陶瓷	弹簧钢
密度/(kg·m ⁻³)	7 850	7 700	7 810
弹性模量/MPa	2 × 10 ⁵	3.4 × 10 ⁵	2.06 × 10 ⁵
泊松比	0.3	0.22	0.29

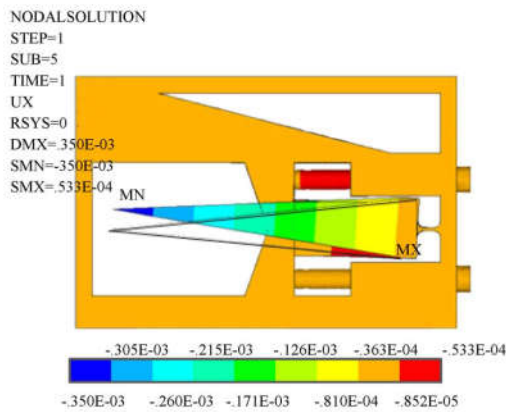


图 3 放大机构位移云图

Fig. 3 Displacement nephogram of magnifying mechanism

为了避免点胶阀在高频工作下产生共振,导致机构的损坏,需使得喷射阀体结构在工作方向上的固有频率尽可能高,一方面可以使得喷射结构具有较好的动态响应,另外,可以为喷射频率的提高提供较大的频率冗余空间,而避免高频喷射过程中引起的结构共振。因此,需要对位移放大机构的谐振频率进行验算,图 4 是通过模态分析的位移放大机构的前四阶振型结果。可见,该放大机构的前三阶振动变形方向多为扭转变形,且与放大机构实际工作时的运动方向相垂直,再由于压电陶瓷的激励方向不在这些模式的变形方向上,因此,该几种模式不会对喷射产生不良影响。第四阶振动方向与工作方向相同,该振型频率高达 1 216 Hz,远高于目前业内点胶阀连续工作频率,其模态分析结果进一步验证了前述圆弧柔性

铰链放大机构的高频构想,为该点胶阀体的高频喷射奠定了运动结构学基础。

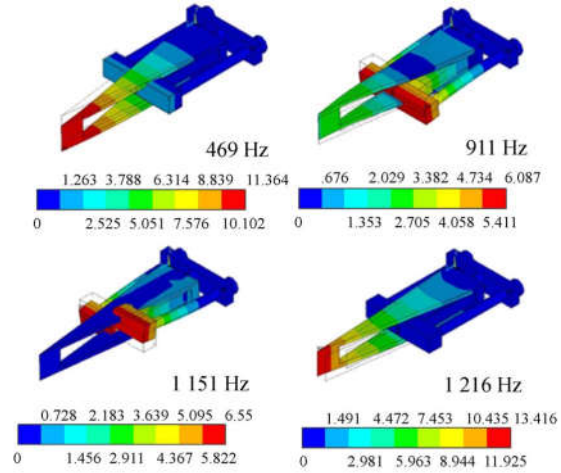


图 4 放大机构的模态分析

Fig. 4 Modal analysis of amplifying mechanism

3 点胶过程流体动力学分析

3.1 喷射点胶流体动力学模型

在建立喷射胶体流体动力学模型前,对胶体进行如下假设:(1)胶体不可压缩且材料特性连续;(2)无滑移边界;(3)忽略胶体重力;(4)忽略剪应力对胶体黏度影响;(5)忽略胶体径向流动。以上假设适用于大部分胶体喷射,故不影响分析的正确性。

喷射点胶时,喷阀内胶体的流量相对于总的点胶量是变化的,可以通过喷嘴内胶体动力学进行推导^[18]。如图 5 所示,依据喷嘴内胶体的分布,建立一柱坐标系,取半径为 r 处,长为 dz ,厚为 $d\omega$ 的环形微元为分析对象。

对环形微元按牛顿第二定律分析如式(1)所示:

$$2\pi r dr \cdot P + 2\pi r dr dz \cdot \rho g + 2\pi r dz \cdot \tau - 2\pi r dr (P + \frac{\partial P}{\partial Z} dz) - 2\pi (r + dr) dz \left[\tau + \frac{\partial \tau}{\partial r} dr \right] = 2\pi r dr dz \cdot \rho a, \quad (1)$$

其中: ρ 为胶体密度, a 为胶体加速度,由重力 g ,剪应力 τ 及微元上下表面的压力 P 和 $P + \frac{\partial P}{\partial Z}$ 共同产生的结果。

胶体微元的加速度 \mathbf{a} 可由 $\frac{d\mathbf{v}}{dt}$ 表示, \mathbf{v} 为微元的速度。并且因为喷嘴截面积固定, 压力 P 只在 Z 方向上发生变化, 因此 $\boldsymbol{\tau} \cdot \partial_r$ 为二阶无穷小。微元的体积极小, 因此重力对其作用可忽略不计。忽略该无穷小量及胶体重, 则式(1)可化为:

$$-\frac{\partial P}{\partial Z} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\boldsymbol{\tau} \cdot r) = \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt}, 0 \leq r \leq R_{\text{nozzle}}, \quad (2)$$

式中 R_{nozzle} 为喷嘴孔径。

由黏性流体总流的伯努利方程可知, 因摩擦力的作用, 胶体流过单位长度后损失的机械能为 C (常值), 即:

$$\frac{dP}{dZ} = \frac{\Delta P}{L_{\text{nozzle}}} = \frac{P_i - P_o}{L_{\text{nozzle}}} = C, \quad (3)$$

其中: P_i 为喷嘴内端面的压力, P_o 为喷嘴外端面的压力, 一般为大气压值; ΔP 为喷嘴内外端面的压力差, L_{nozzle} 为喷嘴的长度。

由幂律流体的流变模型可得剪应力 $\boldsymbol{\tau}$ 与胶体黏度之间的关系, 即:

$$\boldsymbol{\tau} = -\mu \left[-\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial r} \right]^n, \quad (4)$$

式中: n 为流性指数, μ 为胶体的动力黏度 (Pa · s)。

胶体在喷嘴内为定常流动时, 速度变化量 $\frac{d\mathbf{v}}{dt} = 0$ 。由此将式(3), 式(4)代入式(2)中可得:

$$\frac{\Delta P}{L_{\text{nozzle}}} - \mu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left[-\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial r} \right]^n \right] = 0. \quad (5)$$

在无滑移边界条件下: $r = R_{\text{nozzle}}$ 时, $\mathbf{v} = 0$; $r = 0$ 时, $\boldsymbol{\tau}_0 = 0$ 。将边界条件代入式(5)可得到胶体流速沿 r 方向上的分布:

$$\mathbf{v}(r) = \frac{n}{n+1} \left[\frac{\Delta P}{2\mu L_{\text{nozzle}}} \right]^{\frac{1}{n}} \left(R_{\text{nozzle}}^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right). \quad (6)$$

又因为体积流量 Q_{nozzle} 和流速有如式(7)所示关系:

$$Q_{\text{nozzle}} = \int_0^{R_{\text{nozzle}}} 2\pi r \mathbf{v}(r) dr. \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)计算可得:

$$Q_{\text{nozzle}} = \frac{n\pi}{3n+1} \left[\frac{\Delta P}{2\mu L_{\text{nozzle}}} \right]^{\frac{1}{n}} R_{\text{nozzle}}^{3+\frac{1}{n}}. \quad (8)$$

由式(7)可得喷嘴内胶体的平均流速 $\overline{\mathbf{v}(r)}$ 及流出胶体的体积 V_{out} 为:

$$\overline{\mathbf{v}(r)} = \frac{Q_{\text{nozzle}}}{\pi R_{\text{nozzle}}^2} = \frac{\Delta P}{8\mu L_{\text{nozzle}}} R_{\text{nozzle}}^2 (n=1), \quad (9)$$

$$V_{\text{out}} = \int_{\#}^{t_{\text{on}}} Q_{\text{nozzle}} dt = \frac{\pi}{8} \frac{\Delta P}{\mu L_{\text{nozzle}}} R_{\text{nozzle}}^4 t_{\text{on}} (n=1), \quad (10)$$

其中: t_{on} 为喷嘴打开的时间, 喷嘴打开和关闭瞬间胶体的压力变化忽略不计, 即 ΔP 为常量。且对于牛顿流体, 流性指数 n 取 1。由式(10)可知, 减小喷嘴孔径 R_{nozzle} 为控制胶体微量喷射的最有效方法。但根据式(9)可知, 随着喷嘴孔径的减小, 喷嘴流速也会呈平方倍减小。保持胶体流速一定时, 按一定倍数减小喷嘴孔径则需要以平方倍增大喷嘴入口处的压力, 或以平方倍减小喷嘴的长度。但是喷嘴的长度不能太小, 否则阀杆在装配中稍有偏心就将影响到射流的垂直度。因此, 胶体在喷射时提高喷嘴处的压力为较有效的方法。

3.2 喷射点胶流体动力学仿真

为了阐明阀体工作时胶点的形成过程, 利用流体仿真软件 FLOW-3D 对喷嘴进行建模并对点胶过程中的流体动力学行为进行分析。仿真流体模型如图 6 所示, 其中设置喷嘴孔径为 $200 \mu\text{m}$, 长度为 $600 \mu\text{m}$, 喷嘴腔内径为 3 mm 和阀杆外径为 2 mm 。由于喷嘴及其射流都中心对称, 因此可以在仿真时将模型简化为二维, 以节约计算空间。

仿真过程中, 设定胶体供料压力为 3 bar , 网格上边界点为高于阀杆与阀座接触点 1 mm 处; 网格下边界点距离喷嘴出口 4 mm 处, 设定为固壁边界用于模拟收集板; 网格外侧边界超出喷嘴腔 0.1 mm , 因为仿真时不会触及该面, 因此设定为边界对称; 同时, 点胶过程胶体通常为层流流动, 则可将靠近中轴线的网格边界设定为对称边界条件, 因为通常此边界上胶体不发生横流; 同理, 将前后网格边界也设定为对称边界条件。

由于在点胶实验中, 甘油因其易于清理及黏度范围广等优点常被用作喷射胶体。因此仿真时, 使用 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的甘油参数作为条件, 其黏度为 141.2 cps , 表面张力为 0.0633 N/m , 密度 1263.31 kg/m^3 。另外, 为了观察胶体从喷嘴腔流到喷嘴出口的过程, 仿真时设定初始条件为胶体充满喷嘴腔, 而喷嘴内无胶体。

图 7 所示为阀杆与阀座相对位移曲线及关键位置的胶体压力云图。设定阀杆最大升程

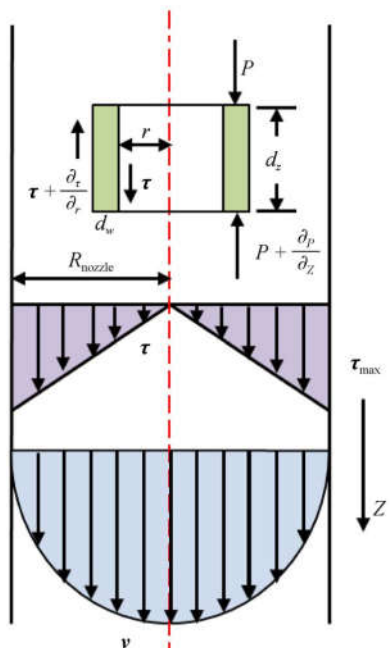


图 5 胶体微元动力学分析示意图
Fig. 5 Schematic diagram of colloidal micro-element dynamics analysis

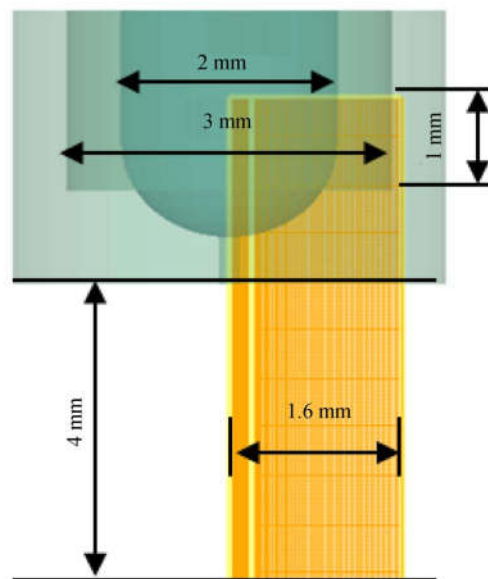


图 6 仿真流体模型
Fig. 6 Fluid model in Simulation

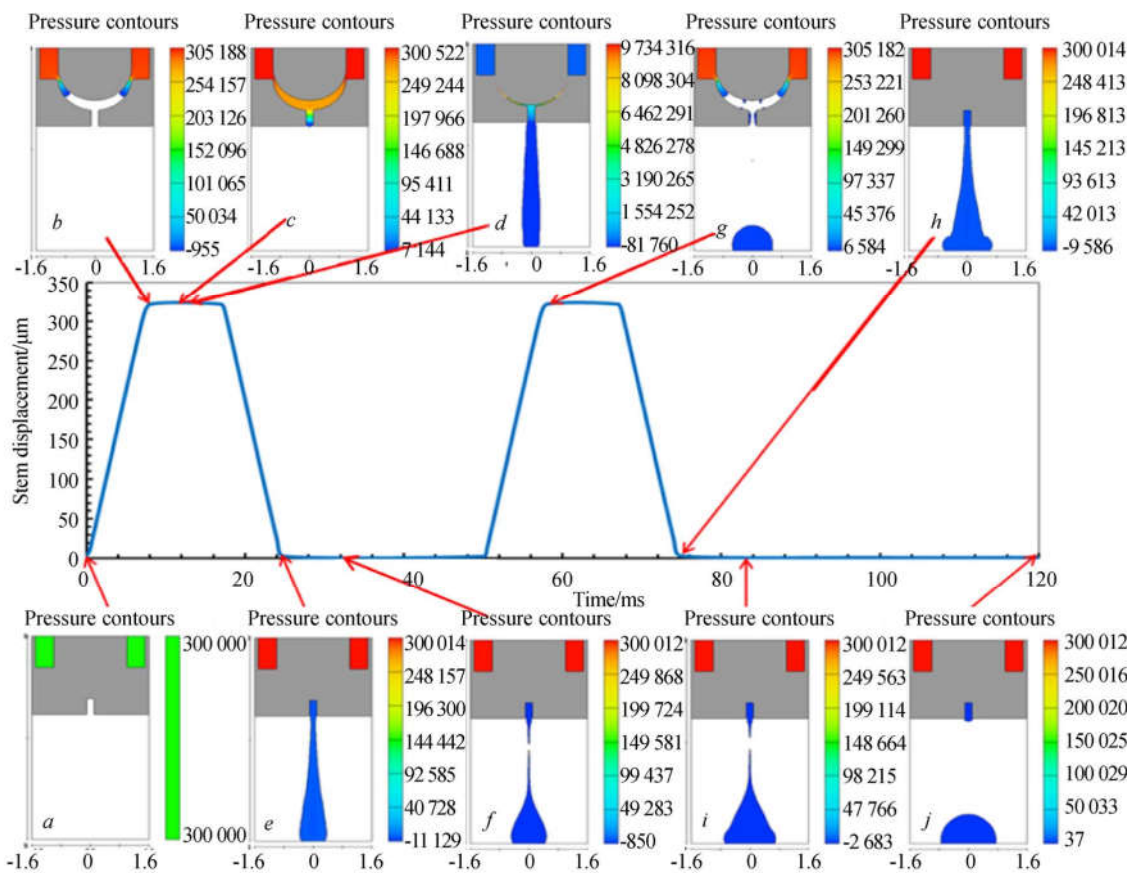


图 7 阀杆位移曲线及关键位置压力云图
Fig. 7 Displacement curve of stem and pressure cloud diagram of key position

320 μm , 开始上升及下降时, 经过约 1 ms 加速后以 44 mm/s 速度匀速运动。为了能完整地观察到喷嘴中射流的喷射情况并且尽可能节约计算资源, 在仿真中设定阀杆运行两个周期, 频率为 20 Hz, 占空比为 35%, 总历程为 0.12 s。由图可知, 当阀杆快速从最低位置抬起时, 阀杆与喷嘴间产生一个瞬时负压, 空气由喷嘴孔被压入腔体。当阀杆处于抬升状态时, 胶体受到外部背压的作用迅速流入阀杆与喷嘴间的空腔。在胶体填充空腔的过程中, 其承受的压力逐渐变大。当阀杆下落到最低位置过程中, 填充内的胶体受阀杆的冲击力的作用被挤压出喷嘴。到达最低位置时, 阀杆与喷嘴紧密配合, 胶体停止流出。喷射出的射流由于在垂直方向上速度分布不均匀, 胶体在首端逐渐聚集成球状。同时, 由于表面张力的作用, 射流细长的尾部发生断裂。分离后的射流到达基板并逐步“收尾”, 形成圆润的胶滴^[12]。

点胶过程中, 为了使胶点获得较大的喷射速度, 从而有利于高黏度胶体的喷射挤出和有效断裂, 并精确地沉积在基板指定位置上, 喷嘴入口处需要获得较大的压力波动。图 8 所示为仿真过程中压力随时间变化曲线。由图可知, 随着阀杆抬起, 喷嘴开启, 喷嘴入口处压力迅速增大。当阀杆下落过程中, 压力值持续增大, 并且增幅加大, 最大值达 22.8 bar。这是由于阀杆下落时形成较大的冲击力对胶体产生挤压作用。当阀杆和喷嘴紧密配合时, 喷嘴入口处压力又回到初始值。

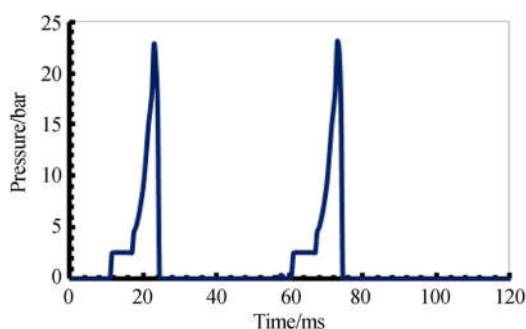


图 8 喷嘴入口压力随时间变化曲线

Fig. 8 Relationship between nozzle inlet pressure and time

图 9 所示为点胶阀喷嘴处胶体压力与流速的关系曲线。由图可知, 胶体喷射速度随喷嘴处压力的增大而增大, 且基本成线性关系。当压力为

22.8 bar 时, 喷嘴出口处胶体最大流速为 6.88 m/s。因此, 可以在点胶过程中适当提高喷嘴处压力以提高胶体喷射速度, 使点胶阀实现对高黏度胶体的喷射。

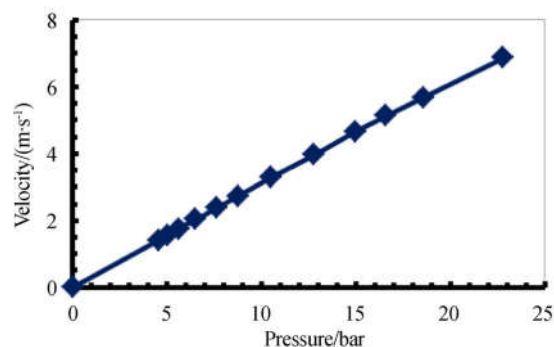


图 9 胶体流速与喷嘴处压力关系图

Fig. 9 Relationship between glue velocity and nozzle pressure

4 实验与分析

4.1 测试系统的搭建

在对点胶阀喷射性能测试之前, 需要搭建完整的测试系统, 如图 10 所示。该平台主要由方波信号发生器、压电陶瓷驱动器、温度控制器、移动控制平台、点胶阀 (120 mm \times 95 mm \times 16 mm)、胶点收集基板和高压供气系统八部分组成。实验中选用黏度为 180 cps 的甘油/酒精混合溶液为测试对象, 选用直径为 200 μm 的喷嘴, 实验过程中保持驱动方波信号幅值电压为 180 V。

4.2 供料压力对胶点直径的影响

给压电喷射阀接入频率为 80 Hz, 占空比为 50% 的驱动信号, 在不同的供料压力下获得的胶点直径变化如图 11 所示。当供料压力从 6 bar 增大到 7.2 bar 时, 胶点由 1.42 mm 增大到 1.65 mm。当点胶阀开启时, 随着供胶压力的增大, 喷嘴处胶体的流速变大, 出胶量变多, 这是由于供料压力是胶体流入阀杆和阀座之间空腔的主要动力。因此, 胶点直径会随着供料压力的增大而增大。但是, 当供料压力小于 6 bar 时, 喷嘴处出现挂胶现象, 这是由于喷嘴处胶体所获的动能较小, 流出的胶体无法获得较大的初始速度, 因此无法实现喷射。

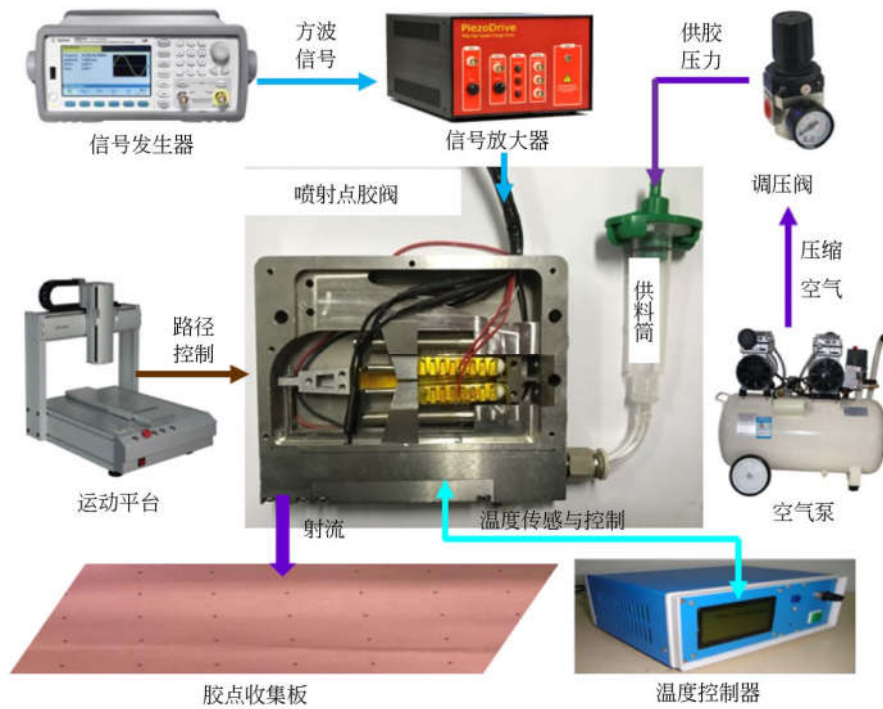


图 10 点胶阀性能测试系统

Fig. 10 Performance test system of jetting dispenser

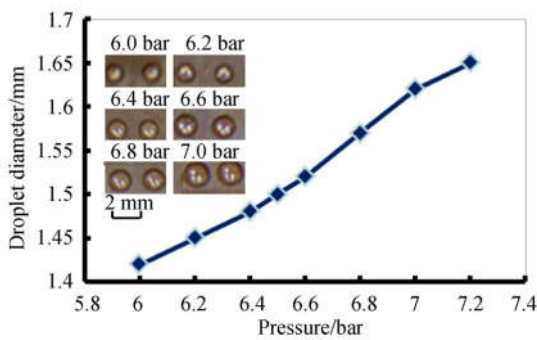


图 11 胶点直径与供胶压力关系图

Fig. 11 Relationship between droplet diameter and pressure

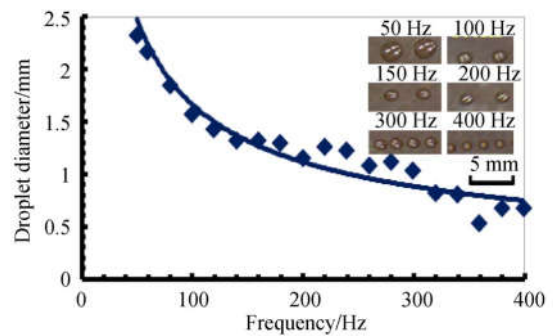


图 12 胶点直径随方波频率变化曲线

Fig. 12 Relationship between droplet diameter and square-wave frequency

4.3 方波频率对胶点直径的影响

设定喷射阀的供料压力为 6 bar, 给定驱动信号的占空比为 50%, 在不同的方波频率下获得的胶点直径变化如图 12 所示。当方波频率由 50 Hz 增大到 400 Hz 时, 胶点直径由 2.3 mm 逐渐减小到 0.6 mm 左右。一方面由于方波频率增大时, 点胶阀的喷射周期减小, 在脉冲宽度一定的前提下, 单次喷射胶体的量减小, 胶点直径随之减小。另外, 由于压电陶瓷本身为容性负载, 其本身

在伸长过程中需要一定的响应时间, 当压电陶瓷充放电电流不足时, 很容易导致在高频喷射时阀杆抬起行程变短, 也将导致高频喷射时胶点直径减小。当工作频率为 360 Hz 时, 能获得的最小的胶点平均直径为 525 μm , 且点胶阀喷射性能稳定。图 13 所示为频率为 380~400 Hz 时的喷射胶点图片, 可见, 点胶阀在高频区间喷射性能稳定, 能够得到均匀的微小胶点, 因此验证了阀体的高频喷射性能。

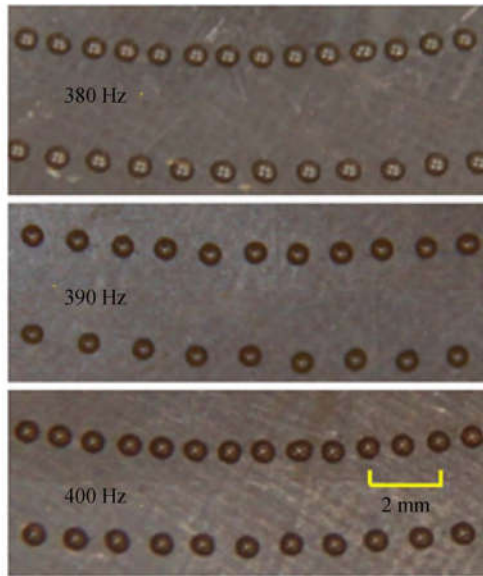


图 13 高频下的胶点图像

Fig. 13 Droplets images at high frequency

5 结 论

本文设计了基于柔性铰链的三角位移放大机构,使用有限元分析软件计算了其输出位移,结果

显示该机构能将层叠压电陶瓷伸长量放大约 7.8 倍,满足了点胶阀对阀杆位移行程的放大需求。验算了结构的工作谐振频率,其结果表明该圆弧柔性铰链放大机构的双压电陶瓷驱动体现出了良好的高频动态特性。利用微元法对胶体喷射动力学进行分析,通过仿真揭示了胶点形成过程及点胶时喷嘴处压力的变化行为,并讨论了喷嘴处胶体压力与流速的关系。当阀杆从抬升到下降的过程中,喷嘴处压力持续增大,并且,胶体的喷射流速与喷嘴处压力基本成线性关系。采用粘度为 180 cps 的甘油/酒精混合溶液为测试对象,在喷嘴直径为 200 μm ,驱动方波幅值电压为 180 V 的条件下,在搭建的测试平台上分析了供料压力及方波频率对胶点大小的影响,结果显示:胶点直径随供料压力的增大而增大,随方波频率的增大而减小。同时,高频喷射性能的实验验证结果表明,所设计的压电喷射点胶阀其最高喷射频率可达 400 Hz,在高频喷射时能够获得最小平均直径为 525 μm 的均匀微小的圆形胶点。综上所述,本文所设计的双压电驱动开关阀式喷射点胶阀具有喷射性能稳定、频率高及胶点直径小等优势,基本满足了电子封装对高效率点胶应用等行业的需求。

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 D CH, DU J, *et al.*. Advances in fluid dispensing technology for micro-electronics packaging [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(20): 2513-2519. (in Chinese)
- [2] 周晓阳. 先进封装技术综述[J]. 集成电路应用, 2018, 297(6): 8-14.
ZHOU X Y. Overview of advanced IC packaging technology[J]. *Applications of IC*, 2018, 297(6): 8-14. (in Chinese)
- [3] 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 CH Y, *et al.*. Approach and experiment of Ultra-micro dispensing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(8):2071-2078. (in Chinese)
- [4] 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 ZH 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)
- [5] 刘益芳,陈丹儿,戴婷婷. 无源 MEMS 压力开关的设计与制备[J]. 光学精密工程, 2018, 26(5): 1133-1139.
LIU Y F, CHEN D E, DAI T T. Design and fabrication of passive MEMS pressure switch[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(5): 1133-1139. (in Chinese)
- [6] JEON J C, NGUYEN Q H, CHOI S B. The design and modeling of jetting dispenser actuated by dual piezostack actuator[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2013,433-435:72-75.
- [7] JEON J, HONG S M, CHOI M, *et al.*. Design and performance evaluation of a new jetting dispenser system using two piezostack actuators[J]. *Smart Materials & Structures*, 2015, 24(1): 015020.
- [8] 赵钧,陈硕,尚智. 热气泡式微喷技术研究[J]. 中国机械工程, 2005,16(z1):377-379.
ZHAO J, CHEN SH, SHANG ZH, *et al.*. Ther-

- mal bubble micro-injection technology China mechanical engineering[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005,16(z1):377-379. (in Chinese)
- [9] 李渭松,单修洋,魏新明. 气动式喷射阀泄压过程数值模拟与分析[J]. 现代制造工程, 2017(1):1-6, 18. LI W S, SHAN X Y, WEI X M. Numerical simulation and analysis of pressure relief process of pneumatic jetting valve[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2017, 436(1): 1-6, 18. (in Chinese)
- [10] ZHOU C, LI J H, DUAN J A, *et al.*. The principle and physical models of novel jetting dispenser with giant magnetostrictive and a magnifier[J]. *Scientific Reports*, 2016, 5:18294.
- [11] WANG L Y, Du X H, LI Y P, *et al.*. Simulation and experiment study on adhesive ejection behavior in jetting dispenser[J]. *Journal of Adhesion Science & Technology*, 2014, 28(1):53-64.
- [12] 黄大任,袁松梅,褚祥诚,等. 压电非接触式点胶阀的设计与实验[J]. 压电与声光, 2016, 38(1): 11-15. HUANG D R, YUAN S M, CHU X CH, *et al.*. Design and experiment of a piezoelectric driven noncontact dispenser [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2016, 38(1):11-15. (in Chinese)
- [13] ZHOU C, LI J, DUAN J A, *et al.*. Direct-acting piezoelectric jet dispenser with rhombic mechanical amplifier[J]. *IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology*, 2018, 8(5): 910-913.
- [14] DENG G L, WANG N, ZHOU C, *et al.*. A simplified analysis method for the piezo jet dispenser with a diamond amplifier[J]. *Sensors*, 2018, 18(7): 2115.
- [15] 焦晓阳,刘建芳,丁宁宁,等. 压电气体混合驱动式喷射点胶阀的设计与实验[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(11):1445-1449. JIAO X Y, LIU J F, DING N N, *et al.*. Design and experiment for the piezoelectric-gas hybrid driven jet dispensing valve[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, 34(11): 1445-1449. (in Chinese)
- [16] 李耀,吴洪涛,杨小龙,等. 圆弧柔性铰链的优化设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1370-1379. LI Y, WU H T, YANG X L, *et al.*. Optimization design of circular flexure hinges[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018,26(6): 1370-1379. (in Chinese)
- [17] 张伟,杨立保,李清雅,等. 直圆抛物线复合铰链柔度研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 250-256. ZHANG W, YANG L B, LI Q Y, *et al.*. Research on compliance of compound circular-parabolic hinges[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 250-256. (in Chinese)
- [18] ZHANG J S, JIA H L, ZHANG J H. A fluid dynamic analysis in the chamber and nozzle for a jetting dispenser design[C]. *International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, Xi'an, P. R. China: IEEE*, 2010:879-883.

作者简介:



王凌云(1978—),男,四川通江人,副教授,博士生导师,2001年、2009年于厦门大学分别获得学士、博士学位,主要从事微纳传感系统、微光学系统与人工视觉、流体喷射与3D打印等方面的研究。E-mail: wangly@xmu.edu.cn



黄翔(1995—),男,浙江安吉人,硕士研究生,2017年于厦门理工学院获得学士学位,主要研究方向为流体喷射和微光学系统。E-mail: huangxiang701@163.com