

DOI: 10.3901/JME.2013.08.178

压电驱动膜片式微滴喷射仿真与尺度一致性 试验研究*

周诗贵¹ 习俊通^{1,2}

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240;

2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240)

摘要: 微滴喷射技术是一种数字化控制微米级液滴产生和分配的技术,在微电子封装和微光学器件制造等领域具有极大的应用前景。提出一种压电驱动膜片式微滴喷射技术,阐述微喷工作原理,基于黏性流体力学进行微喷过程的理论分析并分析影响微滴喷射的关键参数。使用计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)软件基于流体体积法(Volume of fluid, VOF)的二维轴对称模型对微喷过程进行数值仿真,通过数值仿真分析按需喷射的机理和卫星滴产生的原因,并总结参数对微滴直径和微滴喷射速度影响的规律和经验公式。根据仿真研究结果设计压电驱动膜片式微喷装置,并构建微喷试验系统,试验结果与仿真结果吻合较好,说明提出的仿真方法是可行的。该微喷技术可实现 1~150 cP 黏度范围流体材料的按需喷射,喷射频率可达 300 Hz,且微滴尺寸具有良好的一致性。

关键词: 压电驱动膜片式 按需喷射 仿真 微喷试验

中图分类号: TH16 TP301

Simulation and Experiment Study on Piezoelectric Actuated Diaphragm-driven Microdroplet Jetting

ZHOU Shigui¹ XI Juntong^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;

2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: Micro-droplet jetting technology, a digital controlled micro-droplets generation and dispensing technology, is showing strong potential for application. A piezoelectric actuated diaphragm-driven micro-droplet jetting technology is presented to overcome the defects of the existing microjetting technology. The primary principle of the piezoelectric actuated diaphragm-driven microjetting technology is introduced and theoretical analysis is made to establish the mathematical model. Two-dimensional axisymmetric simulation model is built to predict the fluid interface during microjet process by CFD software and volume of fluid(VOF) method. The effect of the parameters on the droplet ejection characteristics based simulations is analyzed, such as droplet diameter and droplet ejection velocity. On the basis of the simulation results, a piezoelectric actuated diaphragm-driven microdroplet jetting experimental system is developed and made experiments using liquid material with viscosity ranging from 0 cP to 150 cP. The experiments demonstrate that this microjetting technology has a good performance on micron droplets generation and dispensing. And the experimental results agree well with the simulation results, which proves this simulation model and method is correct.

Key words: Piezoelectric actuated diaphragm-driven Drop-on-demand Simulation Micro-droplet jetting experiment

0 前言

微滴喷射技术是一种数字化控制微米级液滴

产生和分配的技术。由于具有非接触性、高效率、高材料利用率等优点,基于微滴喷射技术的加工工艺在微电子封装、微机电系统(Micro-electro-mechanical systems, MEMS)、微光学元器件制作、生物制造工程等领域展现出巨大的应用潜力^[1-3]。目前,国内外对微喷装置设计及微滴喷射理论进行了

* 国家自然科学基金资助项目(50975178)。20130105 收到初稿,20130320 收到修改稿

较为广泛的研究。

CHEN 等^[4]对一种压电式喷墨打印头基于流体体积法(Volume of fluid, VOF)方法进行了数值分析和仿真,研究了驱动参数对微滴喷射的影响。西北工业大学齐乐华等^[5]对均匀液滴喷射过程进行了数值模拟与试验研究。CHENG 等^[6]通过电磁阀控制压缩气体,使气压脉冲直接作用于材料液面进行喷射,这种喷射装置压力工作腔大,液滴成形难以精确控制且微滴尺寸一致性差。清华大学魏大忠等^[7]用压电晶片作为微喷装置的驱动,压电晶片变形挤压工作腔进行材料的按需喷射,但工作时压电晶片须直接与喷射材料接触,压电材料的温度特性(工作温度不能高于其居里温度的一半)限制了微喷材料的加热温度。

为克服气压驱动式微喷技术喷射液滴成形一致性差和压电晶片驱动式中压电陶瓷温度特性对加热温度的限制,本文提出了压电驱动膜片式微滴喷射技术。并使用计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)软件基于流体体积法对微喷过程进行了仿真分析,总结得驱动参数对微喷过程中成形液滴体积和喷射速度影响的规律和能够产生按需微滴喷射的参数条件,为压电驱动膜片式微喷装置的设计提供了理论基础。并构建了微喷试验平台,验证了仿真分析的可靠性,试验结果表明该微喷技术可实现高黏度材料微滴的按需喷射,且微滴尺寸具有良好的 consistency。

1 压电驱动膜片式微滴喷射原理

1.1 微滴喷射工作原理

压电驱动膜片式微滴喷射原理如图 1 所示。微喷装置主要由叠层式压电陶瓷、推杆、驱动膜片、喷嘴工作腔、微喷孔构成。喷嘴腔侧面通过节流孔与储料腔连通,上端面安装振动膜片密封。

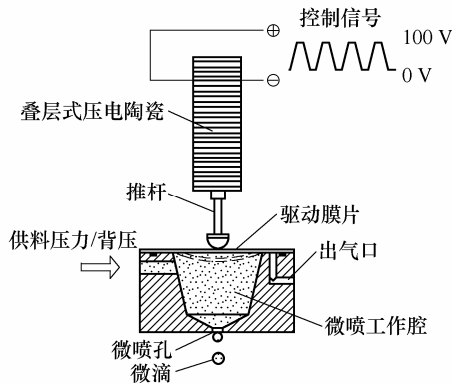


图 1 压电驱动膜片式微滴喷射原理图

使用叠层式压电陶瓷作为驱动部件,通过推杆驱动膜片变形挤压喷嘴工作腔,使腔内的流体压力急剧变化从而规律性喷出,形成微滴按需喷射。控制信号激励下,压电陶瓷进行高频率振动,膜片挤压喷嘴腔使腔内流体压力周期性变化。这个过程中,喷嘴口流体始终受到流体内部压力和表面张力作用,当流体压力足够克服表面张力时形成液滴喷射。压电驱动膜片式微喷一个微滴的喷射过程正好对应于压电控制信号一个周期的变化,这样通过压电陶瓷控制信号就能精确地控制微滴的按需喷射。

1.2 微喷过程理论分析

为了便于理论分析,将喷嘴腔结构简化为轴对称模型(图 2),喷嘴微孔直径 d_0 、喷嘴孔深度 Δh 、节流深孔直径 d_1 、膜片自由振动直径 D 、膜片中心最大变形挠度 Δl 。

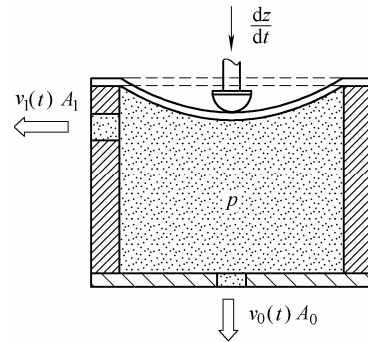


图 2 喷嘴腔理论分析模型

微喷过程中喷嘴工作腔和喷嘴微孔内的流体需要满足连续方程和 Navier-Stokes 方程^[8-9]

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \frac{d}{dt} \int_S \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \frac{d}{dt} \int_S \rho \mathbf{v} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS = \int_S (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) dS + \int_V \rho b_\phi dV \quad (2)$$

式中,体积为 V 的流体单元由带有法向指向外侧的矢量 \mathbf{n} 的封闭面 S 所确定, \mathbf{v} 表示流体的流速, ρ 表示流体密度, t 是时间, \mathbf{F} 表示作用在 S 面上的外加作用力, b_ϕ 为标量函数 ϕ 的源项。

流体在喷嘴腔内速度低,黏性阻力影响较小,故采用无黏性流体运动的连续方程来描述。膜片变形简化为直径为 D 的圆形边界上下振动,运动速度为 dz/dt ,喷嘴与节流孔出流体运动速度分别为 $v_1(t)$ 、 $v_0(t)$,喷嘴腔内的流体压力为 p ,则连续方程为

$$\frac{d(\rho V)}{dt} + \rho v_0(t) A_0 + \rho v_1(t) A_1 = 0 \quad (3)$$

式中, A_0 、 A_1 、 A 分别为节流孔、喷嘴和膜片的截面积, V 是膜片变形前喷嘴腔体积。

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = V \frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{dV}{dt}$$

$$\frac{dV}{dt} = -k_V A \frac{dz}{dt}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \rho k_S \frac{dp}{dt}$$

代入式(3)可得

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{k_S} \left(k_V A \frac{dz}{dt} - v_0 A_0 + v_1 A_1 \right) \quad (4)$$

式中, k_S 为流体体积压缩系数, $k_S \approx (\rho c^2)^{-1}$, c 为声速, k_V 是体积系数, 在这种膜片以小振幅振动下通常取值 0.3。

喷嘴孔中流体的状态与在喷嘴腔中不同, 流速快, 且喷嘴尺寸比较小, 流体黏性阻力为关键因素。喷嘴和节流孔都是属于圆柱形流道, 可将喷嘴中流体的流动看成细管道中的 Hagen-Poiseuille 流。这时, 连续方程可自动得到满足, 动量方程中的对流项为零, Navier-Stokes 方程在 z 轴的投影简化为

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv}{dr} \right) = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dz} \quad (5)$$

根据喷嘴壁上的边界条件是 $v_{r=d/2}=0$, 可以得出喷嘴处流体喷射的体积流量

$$q_V = \int_0^{d/2} 2\pi v_z r dr = \frac{\pi d^4}{128\mu\Delta h} \Delta p \quad (6)$$

式中, d 为微滴直径, $\Delta p = p - p_0$, p_0 为喷嘴孔外压力, 其压力值等于大气压力, 则

$$q_V = \frac{\pi d^4}{128\mu\Delta h} (p - p_0) \quad (7)$$

从式(7)可知, 喷嘴腔内部压强 p 对微喷流率产生直接影响。而式(4)是微喷过程中喷嘴腔内部压强 p 的变化公式, 压强是由膜片运动速度 dz/dt 决定的。所以对微滴喷射过程产生影响的根本因素是膜片变形挤压喷嘴腔的运动规律, 也即产生的体积变化 dV/dt , dV/dt 参数在分析中可以分解为两个驱动参数: 膜片变形产生的体积变化 ΔV 和膜片变形速度, 下述将以这两个驱动参数为变量进行微喷仿真研究。

2 微喷过程仿真模型的建立

微液按需喷射的过程为液-气自由表面的计算

和预测的问题。本文使用 FLUENT 13.0 进行微滴喷射过程的仿真研究, 采用 VOF 法^[10]进行液-气自由界面的跟踪和计算, 求出自由表面的位置。

控制方程是微喷模型建立的依据, 也是仿真模型进行数值计算的基础, 微喷仿真的控制方程是上述流体连续性方程和纳维-斯托克斯方程。为简化仿真模型, 首先对微喷过程做如下假设: ① 微喷材料为不可压缩牛顿流体; ② 流体特性稳定, 不随时间改变; ③ 喷嘴外表面为不浸润表面。

采用包含液体工作腔和空气腔的二维轴对称模型(图 3)进行仿真计算, 液体腔为模拟喷嘴腔, 腔内充满了微喷液体材料。液体腔上端边界为驱动膜片, 膜片运动挤压液体腔作为模型的压力入口, 空气腔的边界为压力出口。

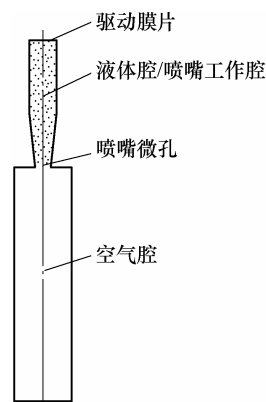


图 3 微喷仿真模型

液体腔包括柱状和锥状两部分, 整个模型的尺寸参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型尺寸

参数	液体腔				空气腔	
	直径	长度	喷嘴直径	喷嘴深度	直径	长度
数值	0.16	0.8	0.1~0.2	0.1	0.35	2.5

采用四边形网格对模型进行划分(图 4), 总网格单元数为 30 988, 可以满足计算精度的要求。

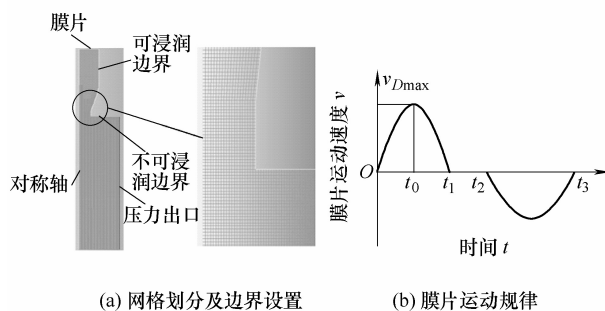


图 4 网格划分及边界条件

液体腔侧壁为可浸润无滑移边界, 而喷嘴口外

表面为不可浸润固定边界, 空气腔侧壁为压力出口。

液体腔上端边界为驱动膜片, 通过 UDF 自定义程序定义的动网格来模拟膜片运动挤压液体腔, 根据压电驱动下膜片的变形特性, 设定膜片的运动规律为类正弦函数, 其速度幅值为 v_{Dmax} 。

3 仿真分析结果与研究

通过微喷仿真, 首先模拟了微滴成形的过程和按需喷射的机理。然后研究了参数对微滴成形尺寸及喷射速度的影响, 这些变参数包括膜片运动挤压喷嘴腔引起的体积变化(以下称为驱动体积) ΔV , 膜片运动速度的幅值(以下称为膜片运动速度) v_{Dmax} , 喷嘴微孔直径 d_0 , 材料黏度 μ 。

3.1 微喷液滴形成过程

以水为喷射材料, 仿真参数如下: 黏度 $\mu=1$ cP, 喷嘴孔直径 $d_0=0.1$ mm, 驱动体积 $\Delta V=17 \times 10^{-4}$ mm³, 膜片运动速度 $v_{Dmax}=2$ m/s, 获得微滴喷射成形过程的相关变化图(图 5)和速度云图(图 6)。

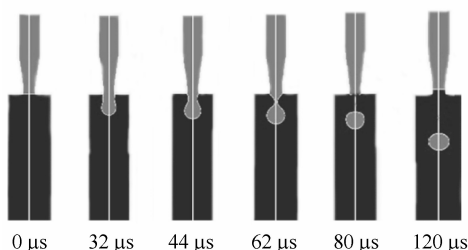


图 5 液滴形成过程相变化图

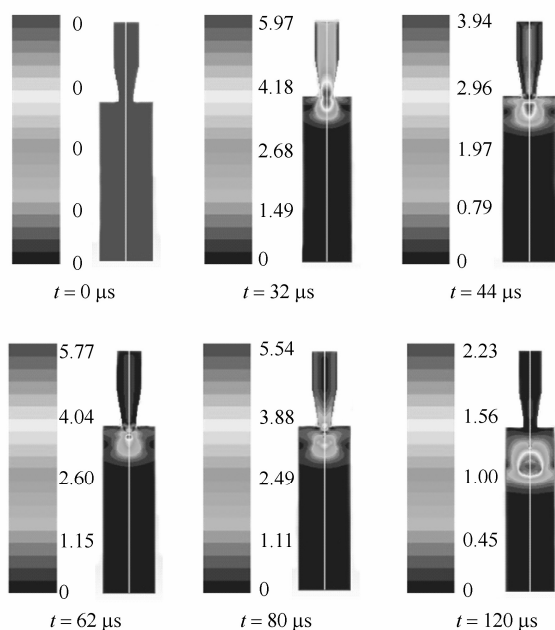


图 6 液滴形成过程速度云图(m/s)

从液滴形成的相变化的过程可以看出, 微喷液滴成形过程主要经历四个阶段: 液柱伸长、液柱缩颈、断裂成形、液滴喷射。0~32 μs 为初始阶段, 由于膜片运动挤压液体腔, 液面向外凸出形成液柱并逐渐伸长。在 32 μs 时, 膜片运动速度减小至零, 由于已喷出喷嘴部分的液柱获得了膜片驱动的动量以较高速度运动, 加上喷嘴口处黏性阻力的作用, 液柱缩颈。44~62 μs 阶段膜片复位, 工作腔内产生负压, 液柱在其颈部上下两部分受到反向作用力, 下端部分液滴断裂。80~120 μs 阶段, 微滴形成后以一定速度喷射出去。

从微喷过程的速度云图(图 6)也可以看出, 初始阶段, 喷嘴口处流体运动速度迅速增大, 到 32 μs 时达到 5.5 m/s。之后喷嘴口上下两部分流体出现两个流体速度极值域, 此时液柱产生缩颈, 颈部下端的液滴速度也趋于稳定但有所降低, 直到时断裂成滴以大约 2.1 m/s 的稳定的速度喷射。

3.2 参数对喷射微滴体积的影响

微喷液滴的体积受驱动体积 ΔV 、喷嘴微孔直径 d_0 和材料黏度 μ 的影响。本文采用喷射液滴的截面直径 d 作为液滴体积的研究参数。

当 $\mu=1$ cP, $v_{Dmax}=2$ m/s 时, 驱动体积 ΔV 对微滴直径的影响曲线如图 7 所示。 ΔV 太小时, 液面微小变形产生液柱振荡, 无法形成微滴喷射; ΔV 过大时, 微滴喷射不稳定, 会产生卫星滴; ΔV 在适当范围内时, 能形成稳定微滴喷射, 且液滴直径 d 随着 ΔV 的增大而增大。同时, 在可形成稳定微滴喷射的 ΔV 值区域, ΔV 减小的情况下, 微滴直径会逐渐减小接近喷嘴微孔的直径, 当减小至喷嘴孔直径的约 1.03 倍时, 无法产生微滴喷射。

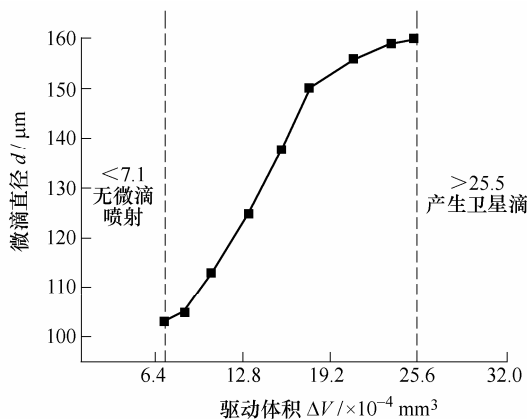


图 7 驱动体积对微滴直径的影响

同时, 喷嘴微孔直径 d_0 对液滴直径也有很大的影响, 液滴直径并非受到 d_0 和 ΔV 独立影响, 而是由两个参数共同决定的。

定义由参数 d 、 d_0 和 ΔV 组成的驱动体积系数 $k_{\Delta V} = \Delta V/V_0$ 和微滴直径系数 $k_d = d/d_0$ 来研究其影响规律, 其中 $V_0 = (4\pi/3)(d_0/2)^3$ 。从物理意义上来说, $k_{\Delta V}$ 是驱动变化体积与以喷嘴微孔直径为直径的球体体积之比。

从图 8 可以看出, 微喷液滴体积由驱动体积系数 $k_{\Delta V}$ 决定, $k_{\Delta V}=1.35$ 和 $k_{\Delta V}=4.86$ 分别是微喷能够产生按需喷射的下临界点和上临界点。两临界点之间的区域为微滴喷射成形区域, 这一区域只喷射形成主液滴, 是微滴喷射技术中的理想喷射条件。曲线中段 k_d 与 $k_{\Delta V}$ 呈线性关系, 线性系数为 0.235, 其数学关系可表达为

$$k_d = 0.235k_{\Delta V} \quad (8)$$

式(8)是参数对喷射微滴直径影响的经验公式, 在压电膜片式微喷装置参数设计时, 可以参考经验公式进行设计和优化参数。

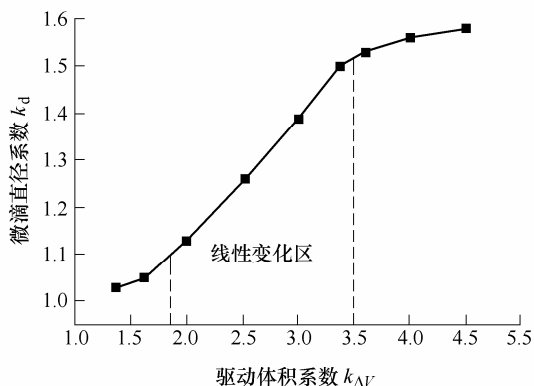


图 8 驱动体积系数与喷嘴直径系数的关系

材料黏度对喷射微滴直径也有一定的影响(图 9), 在一定范围内, 随着 μ 的增大, 微滴直径有所减小, 但对产生微滴的最小直径无明显影响。

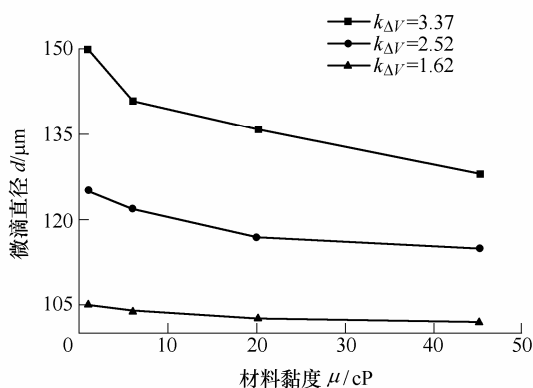


图 9 黏度对微滴直径的影响

根据上述分析, 驱动体积 ΔV 过大时, 微滴喷射过程除主滴外, 会产生卫星滴。图 10 是微喷卫星滴产生的过程, 液柱在 $35 \mu s$ 时发生第一次缩颈后,

膜片仍然挤压喷嘴腔, 使喷嘴腔内液体继续向外以较高的速度射出。 $50 \mu s$ 时, 位于主液滴上方的尾液滴开始产生第二次缩颈, 最终喷射成形时除了主液滴外, 还跟随有由尾液滴形成的卫星滴。按需喷射技术中, 卫星滴产生的现象不利于对微喷成形和流体微量分配的精确控制。

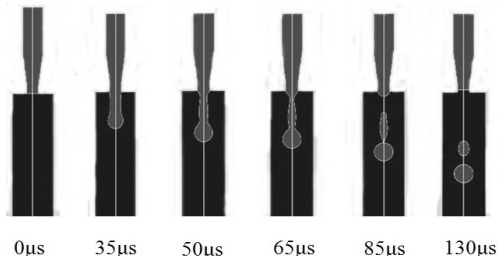


图 10 卫星滴产生过程

3.3 参数对微滴喷射速度的影响分析

参数对微滴喷射的速度有很大的影响, 本文以膜片运动速度 v_{Dmax} , 材料黏度 μ 为变参数, 进行参数对微滴喷射速度的影响分析。 $\mu=1 \text{ cP}$, $k_{\Delta V}=1.62$ 时, 改变膜片运动速度 v_{Dmax} 得到的膜片驱动速度与微滴喷射速度的关系曲线如图 11 所示。

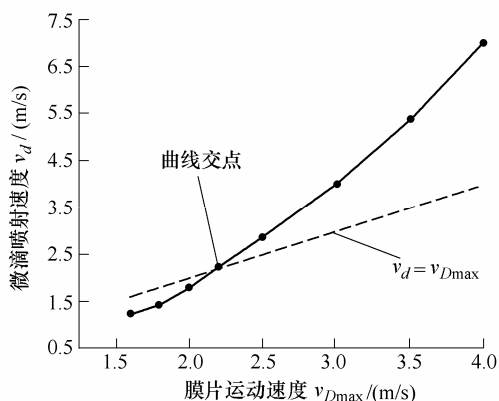


图 11 膜片运动速度对微滴喷射速度的影响

v_d 随着 v_{Dmax} 的增大而增大, 但在不同范围内曲线的斜率不同。 $v_{Dmax} < 2.2 \text{ m/s}$ 时, 曲线增长斜率较小, 而当 $v_{Dmax} > 2.2 \text{ m/s}$ 时, 曲线与 $v_d = v_{Dmax}$ 线相交, 之后 v_{Dmax} 继续增大时, 曲线斜率逐渐增大。

微滴喷射速度随着黏度增大而降低, 当材料黏度增大时, 微喷过程中液滴拖拽的距离增加, 微滴断裂成形时间明显增大(图 12)。从黏性流体力学的角度分析, 黏度越大, 流体分子之间的粘滞阻力也变大, 使流体在微喷过程中液柱不易断裂, 进而会消耗更多的能量来克服分子之间的粘滞阻力, 从而使微滴成形后的喷出速度减小, 微滴喷射变得困难。

4 试验结果与分析

为了验证压电驱动膜片式微喷技术进行微滴

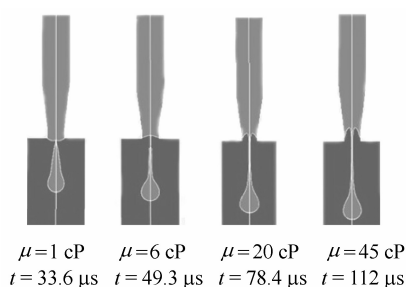


图 12 不同黏度材料微液滴断裂成形时间

按需喷射的效果, 根据仿真研究的结论和经验公式进行参数设计, 研制了压电驱动膜片式微喷装置(图 13), 并构建了微喷试验系统(图 14)进行微滴喷射试验。

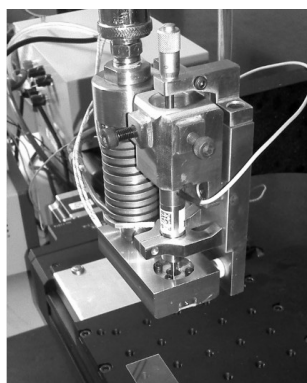


图 13 压电驱动膜片式微喷装置

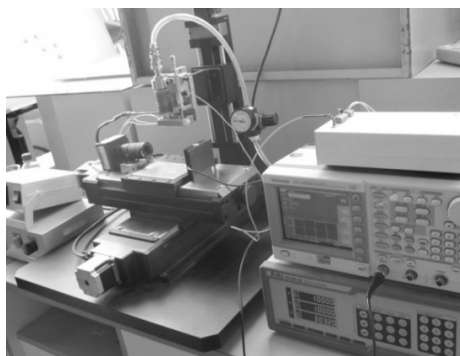


图 14 微喷试验系统

微喷试验中, 压电驱动膜片式微喷装置可以实现 0~150 cP 黏度范围内流体材料的按需喷射, 喷射频率可达 300 Hz。无论是在微电子封装还是微透镜阵列制作的应用, 都对按需喷射的稳定性和液滴成形一致性有很高的要求, 制成品的质量由微液滴沉积附着在基底上的成形效果决定。本文以水、质量分数为 58% 的甘油/水混合液和液态石蜡(物理参数见表 2)为试验材料进行微喷液滴尺寸一致性研究。

微滴喷出后沉积在基板上的过程是以一定动量撞击基板, 经过接触直径扩散, 最后以一定附着直径和接触角沉积在基板上(图 15)。

表 2 试验材料物理参数

参数	材料		
	水	水/甘油混合液	液态石蜡
密度/(g/cm ³)	1.0	1.16	0.85
黏度/cP	1.0	6.0	20
表面张力/(dyn/cm)	73	70	28.9

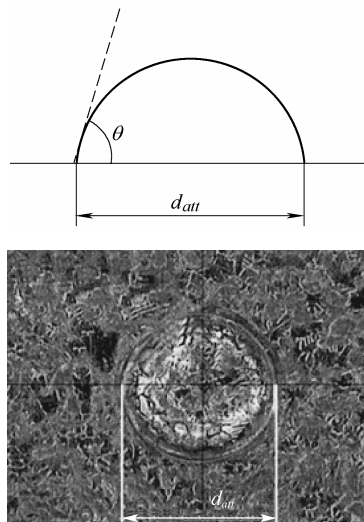
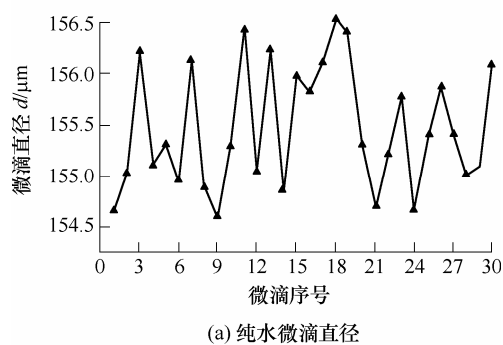
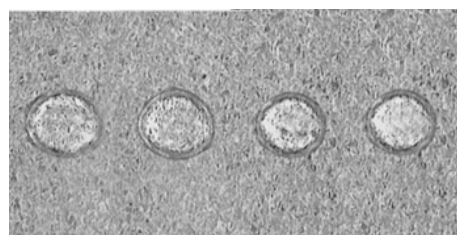


图 15 液滴附着在基板上的形态参数

本文以液滴在基板上的附着直径 d_{att} 为研究参数, 采用 Basic 300 影像测量仪对液滴直径进行测量, 照明光源为顶灯 LED 环光光源, 1/3" 高分辨率 CCD 相机, 镜头放大倍率为 40~200 倍。图 16 为背压 0.015 MPa、喷嘴直径为 100 μm、微喷频率为 110 Hz、压电陶瓷驱动电压为 80 V 和膜片预压 500 μm 的试验条件下, 连续测量 30 个纯水材料喷射到基板上微滴的附着直径的数据。



(a) 纯水微滴直径



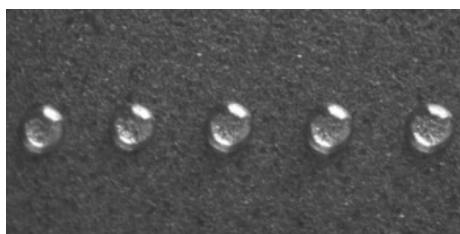
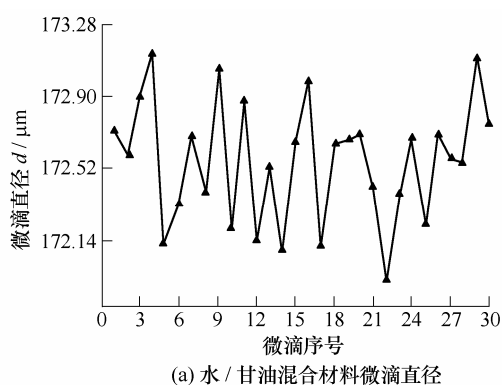
(b) 附着在基板上的纯水微滴

图 16 纯水的微喷一致性分析(铝合金基板)

从直径的变化可以分析得, 微滴直径最小为 $154.62\ \mu\text{m}$, 最大微滴直径为 $156.52\ \mu\text{m}$, 平均值为 $155.48\ \mu\text{m}$, 所测量的 30 个微滴附着直径最大变化率为 0.67% 。

同样试验条件下, 改变压电陶瓷驱动电压为 $100\ \text{V}$, 测得纯水的微喷液滴直径平均值为 $192.55\ \mu\text{m}$, 微滴附着直径最大变化率为 0.71% 。

在水/甘油混合材料的试验中, 为了更清晰地观察黏性材料在基板上的成形效果, 采用平面 LED 光源。从微滴直径变化可以看出(图 17), 最小直径是 $171.94\ \mu\text{m}$, 最大直径是 $173.12\ \mu\text{m}$, 平均值为 $172.57\ \mu\text{m}$, 所测量的 30 个微滴附着直径最大变化率为 0.37% , 液滴尺寸变化不大。



(b) 附着在基板上的水/甘油混合材料微滴

图 17 水/甘油混合材料的微喷一致性分析

由图 18 可得, 液态石蜡的附着直径最小为 $177.81\ \mu\text{m}$, 最大直径为 $178.79\ \mu\text{m}$, 平均值为 $178.23\ \mu\text{m}$, 所测量的 30 个微滴附着直径最大变化率为 0.31% 。

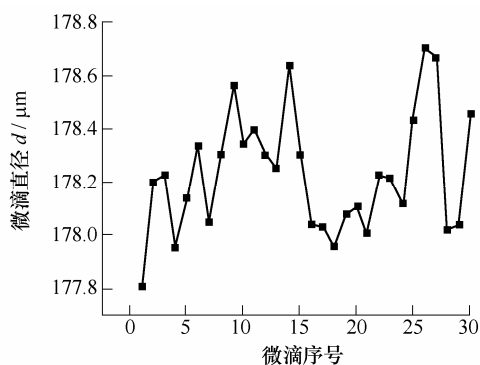


图 18 液态石蜡材料的微喷一致性分析

试验结果表明该微喷技术可实现不同黏度材料微滴的按需喷射, 且微滴尺度具有良好的一致性。

以水/甘油混合液为喷射材料, 背压为 $0.015\ \text{MPa}$, 驱动电源为 $100\ \text{V}$ 。在微喷频率分别为 $40\ \text{Hz}$ 、 $80\ \text{Hz}$ 、 $120\ \text{Hz}$ 、 $160\ \text{Hz}$ 和 $200\ \text{Hz}$ 的试验条件下, 分别取附着在基板上的 10 个微喷液滴直径的平均值作为研究参数, 所得的喷射频率对液滴直径的影响关系如图 19 所示。

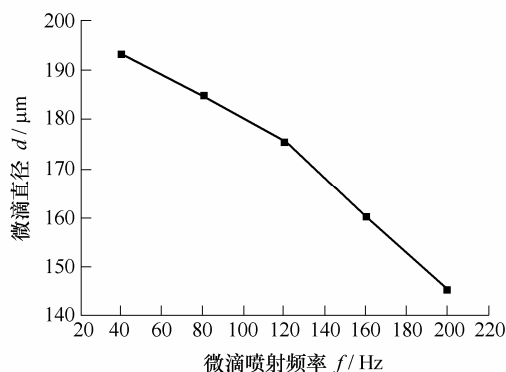


图 19 微喷频率与喷射液滴的关系

随着压电陶瓷振动频率的增加, 驱动行程降低, 会减小膜片的驱动体积。微喷频率从 $40\ \text{Hz}$ 增加到 $200\ \text{Hz}$ 时, 液滴附着在基板的直径从 $193.54\ \mu\text{m}$ 减小至 $145.44\ \mu\text{m}$, 图 20 为微喷频率分别在 $40\ \text{Hz}$ 和 $200\ \text{Hz}$ 得到的微滴。同时, 微滴喷射试验过程中, 微喷频率过小时, 由于膜片变形挤压喷嘴腔的驱动体积太大而微喷过程会产生卫星滴。

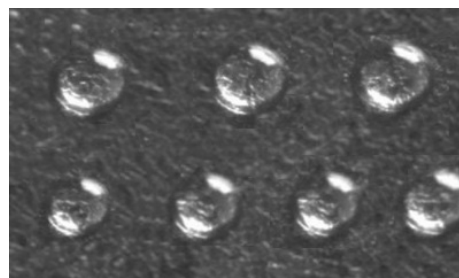
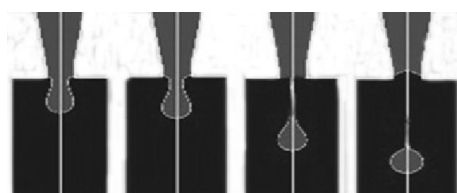


图 20 不同频率下微喷液滴的直径

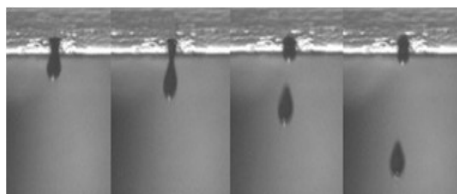
图 21a 为本文中微滴喷射过程仿真图, 图 21b 为利用高速 CCD 相机拍摄微滴按需喷射过程的图片^[11]。

从图 21 可以看出, 压电驱动膜片式按需喷射的微滴形成形态和成形过程与用高速相机拍摄微滴喷射照片基本一致, 也说明本文的仿真模型和方法是合理可行的。

通过微滴喷射试验可以看出, 本文提出的压电驱动膜片式微滴喷射技术进行按需喷射产生的微滴尺寸小, 微喷频率高, 且成形尺寸具有良好的一致性。



(a) 微喷过程仿真图



(b) 微滴喷射过程照片

图 21 微滴喷射过程仿真图与喷射过程图片对比

5 结论

(1) 压电驱动膜片式微滴喷射技术可以实现高、低黏度流体材料的按需喷射, 微滴尺寸具有良好的 consistency。

(2) 微滴按需喷射过程中液滴的形成要经过液柱伸长、液柱缩颈、断裂成形和液滴喷射四个过程, 驱动体积太大时, 液柱二次缩颈, 会产生卫星滴。

(3) 在可产生稳定按需喷射的参数条件下, 微滴的直径随着驱动体积的增大而变大, 驱动体积系数与喷射微滴直径系数在一定范围内呈线性关系, 线性系数约为 0.235。

(4) 膜片驱动速度也即压电陶瓷驱动信号很大程度上决定了微滴喷射的速度, 黏度增大会降低微滴喷射的速度。

(5) 微喷试验结果与仿真结论吻合较好, 本文提出的仿真模型和方法是合理可行的。

参 考 文 献

- [1] NALLANI A K, CHEN T, HAYES D J, et al. A method for improved VCSEL packaging using MEMS and ink-jet technologies[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(3): 1504-1512.
- [2] 高琛, 黄孙祥, 陈雷, 等. 液滴喷射技术的应用进展[J]. *无机材料学报*, 2004, 19(4): 714-722.
GAO Chen, HUANG Sunxiang, CHEN Lei, et al. Progress in inkjet technique and its applications[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2004, 19(4): 714-722.
- [3] 刘丰, 吴任东, 张人佶, 等. 喷射技术在生物制造工程中的应用[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(12): 14-20.
LIU Feng, WU Rendong, ZHANG Renji, et al. Jet application technology on bio-manufacture engineering[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(12): 14-20.
- [4] CHEN Y S, HUANG Y L, KUO C H. Investigation of design parameters for droplet generators driven by piezoelectric actuators[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2007, 49: 733-740.
- [5] 齐乐华, 罗俊, 李莉, 等. 均匀液滴喷射过程仿真与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(12): 86-92.
QI Lehua, LUO Jun, LI Li, et al. Simulation and experiment research of the uniform droplet spray process[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(12): 86-92.
- [6] CHENG S, CHANDRA S. A pneumatic droplet-on-demand generator[J]. *Experiments in Fluids*, 2003, 16: 755-762.
- [7] 魏大忠, 张人佶, 吴任东, 等. 压电驱动微滴喷射过程的数学模型[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(7): 611-614.
WEI Dazhong, ZHANG Renji, WU Rendong, et al. Mathematical model of piezoelectric actuated micro-droplet jetting process[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(7): 611-614.
- [8] 张国强, 吴家鸣. 流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
ZHANG Guoqiang, WU Jiaming. *Fluid mechanics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [9] 阎超, 钱翼稷, 连祺祥. 粘性流体力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
YAN Chao, QIAN Yiji, LIAN Qixiang. *Viscous fluid mechanics*[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005.
- [10] 陈维山, 刘岗, 刘军考, 等. 基于 CFD 的收缩型喷嘴的喷油仿真研究[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2002, 16(1): 57-63.
CHEN Weishan, LIU Gang, LIU Junkao. Injection process simulation of contracting nozzle based on CFD[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2002, 16(1): 57-63.
- [11] WOLFGANG W. A drop-on-demand printhead suitable for hot and relatively[C]//International Workshop on Ink-jet Printing of Functional Polymers and Materials, June 29-30, 2005, Eindhoven, The Netherlands.

作者简介: 周诗贵, 男, 1987 年出生。主要研究方向为微细加工和微滴喷射技术。

E-mail: shigui_zhou@126.com