

文章编号 1004-924X(2012)07-1580-07

## 数字化微喷射用玻璃基组合微喷嘴设计及实验

杨眉, 朱丽, 侯丽雅\*, 章维一

(南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094)

**摘要:**为提高液滴微喷射的喷射效率和粉体微喷射的喷射方向性,选用普通硼硅酸盐毛细管和石英玻璃管为原材料,基于稳定的拉制和锻制工艺,设计并制作了直列式组合微喷嘴和同轴式组合微喷嘴。在基于微流体数字化的微喷射实验平台上,利用4×2直列式组合微喷嘴单次喷射得到了形状规则、圆整,大小均匀,无卫星液滴的液滴阵列,液滴平均直径为180 μm;相对于单微喷嘴,直列式组合微喷嘴提高了单次微喷射的效率。另外,进行了粉体微喷射实验,相对于单微喷嘴,同轴式组合微喷嘴在相同驱动条件下,出射角由33°减小至10°,成形粉线的宽度由450 μm降低至300 μm。结果表明,同轴式组合微喷嘴中的辅助喷嘴有效地约束了主喷嘴出射的粉体流动,粉体喷射的方向性有显著提高。

**关键词:**微流体数字化;微喷射;玻璃基;组合微喷嘴

中图分类号:TQ022.12;TQ171.68 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20122007.1580

## Design and experiment of vitreous combined micro nozzles used in digital micro injection

YANG Mei, ZHU Li, HOU Li-ya\*, ZHANG Wei-yi

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

\* Corresponding author, E-mail:hou\_liya@hotmail.com

**Abstract:** In order to improve the injection efficiency of liquid micro injection and the injection directivity of powder micro injection, a borosilicate capillary and a quartz glass tube are chosen as raw materials to design and manufacture the in-line combined micro nozzle and the coaxial combined micro nozzle based on stable drawing and forging process. Using these two combined micro nozzles, liquid and powder micro injection experiments are performed on a micro injection experiment system based on the digitalization of microfluidic technology. In liquid micro injection experiment, the regular and uniform droplet array with a average diameter of 180 μm and no satellite droplets is prepared with one injection in a 4×2 in-line combined micro nozzle, by which the efficiency of micro injection under in-line combined micro nozzle is improved as compared with that of single micro nozzle. In powder micro injection experiment, the injection angle is reduced from 33° to 10° and the width of formed powder line is decreased from 450 μm to 300 μm as compared with that of single micro nozzle. The results indicate that the powder flow of the major micro nozzle in coaxial combined micro nozzle is constrained with the as-

收稿日期:2012-01-28;修订日期:2012-03-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175268, No. 11102090);教育部博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20113219110004)

sisted micro nozzle and the injection directivity is improved greatly.

**Key words:** digitalization of microfluidic; micro injection; vitreous; combined micro nozzle

## 1 引言

微喷射是一种用外力迫使流体以“液滴”的形式从小孔中射出的技术<sup>[1]</sup>。目前,微喷射技术已广泛应用在喷墨打印<sup>[2]</sup>、基因工程<sup>[3]</sup>、微化学反应<sup>[4]</sup>、生物制造<sup>[5]</sup>、金属零件快速成形<sup>[6-7]</sup>等领域。微喷射过程的实现需要两项关键技术支撑:微流体驱动技术和与驱动技术相应的微喷嘴制造技术。

液体微喷射大都使用单微喷嘴,当需要制备大量均一微液滴时,单微喷嘴的喷射效率较低,现大都采用微喷嘴阵列以提高喷射效率。现有的微喷嘴阵列大多采用IC工艺制作。许宝建等<sup>[8]</sup>利用该工艺制备了硅微喷嘴阵列,并制备了平均直径为 $356\ \mu\text{m}$ 的样品微阵列;JENG等人<sup>[9]</sup>制成了喇叭状的喷嘴阵列,用作液体喷雾器的雾化喷嘴以获得表面积较小的液滴;KÖHLER等<sup>[10]</sup>基于该工艺在硅片上制备了直径为 $15\ \mu\text{m}$ 的圆柱状微喷嘴阵列,并用该微喷嘴阵列制备了PMMA微纳颗粒。利用IC工艺可以一次成形密度较高的微喷嘴阵列,但IC工艺的设备昂贵,成本较高,对操作人员和环境要求也较高<sup>[11]</sup>。张晓乐等基于流变压铸工艺,利用毛细腐蚀现象,以规格化的石英毛细管为原材料制备了微喷嘴阵列<sup>[11]</sup>,但仅是一维直列式微喷嘴阵列。

在粉体微喷射时,如激光熔覆中,一般都采用所谓的同轴微喷嘴,它包括激光束入口、粉体入口、保护气入口3个部分<sup>[12-13]</sup>,其本质仍是单微喷嘴,“同轴”仅仅是指工作时粉末流和激光束同时输出<sup>[14]</sup>,粉体微喷射的方向性还需进一步提高。

微流体数字化技术以脉冲当地惯性力为主动动力,使流体(液体和粉体)在惯性力与黏性力或摩擦力交替作用下实现脉冲流动<sup>[15-16]</sup>。与此技术相应的微喷嘴多采用基于玻璃冷热加工工艺制作的单微喷嘴。针对上述问题,本文选择普通硼硅酸盐玻璃和石英玻璃为制作组合微喷嘴的基材,设计一种新的玻璃基组合微喷嘴制作工艺,并在微喷射实验平台上进行数字化微喷射实验。

## 2 玻璃基组合微喷嘴设计及制作

### 2.1 工艺准备

#### 2.1.1 单微喷嘴的拉制

制作玻璃基组合微喷嘴首先要制作出规格化的玻璃单微喷嘴。制作单微喷嘴的原材料需要根据应用场合不同选用,在芯片点样中,使用普通硼硅酸盐玻璃即可,而在激光熔覆中,因激光的高温作用,需要使用石英玻璃为原材料。原材料的不同对制备方法提出的要求主要体现在加热方式上。硼硅酸盐玻璃的熔化温度为 $1\ 252\ ^\circ\text{C}$ 以上,石英玻璃的熔化温度在 $1\ 713\ ^\circ\text{C}$ 以上,本文综合考虑采用激光加热的方法实现玻璃单微喷嘴的拉制,拉制原理示意图如图1所示。

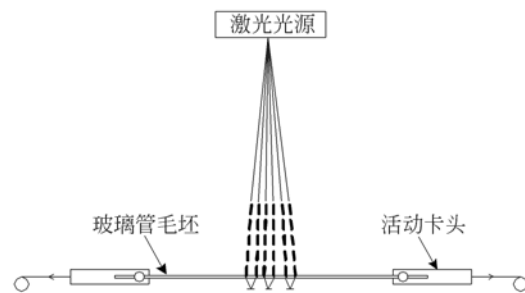


图1 拉制原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of drawing principle

玻璃管毛坯装夹在水平可活动卡头之间,活动卡头的尾部有水平方向的拉力,激光发生器产生的激光光束加载在玻璃管的中间位置,当温度达到玻璃的塑性加工工艺温度时,在水平拉力的作用下,玻璃管将被拉长,最终可形成所需微喷嘴。图2所示为拉制成形的微喷嘴,图2中的 $L$ 定义为微喷嘴的锥长。

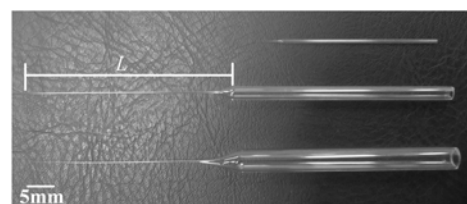


图2 拉制成形的微喷嘴

Fig. 2 Drawn micro nozzle

控制过程中有 5 个参数:加热温度、拉力、延时、拉制速度、加热区域长度。其中,前 4 个参数对拉制成形的微喷嘴的形貌有重要影响。

拉制成形的微喷嘴锥长和微喷嘴内径之间呈现反比例关系,即锥长增长,内径减小;锥长减短,内径增大。同时,根据实验需要,拉制成形的微喷嘴往往需要锻制至合适的内径才能使用。因此,本文只研究拉制过程中的 4 个参数(加热温度、拉力、延时、拉制速度)对微喷嘴锥长的影响规律,如图 3(a)~图 3(d)所示。

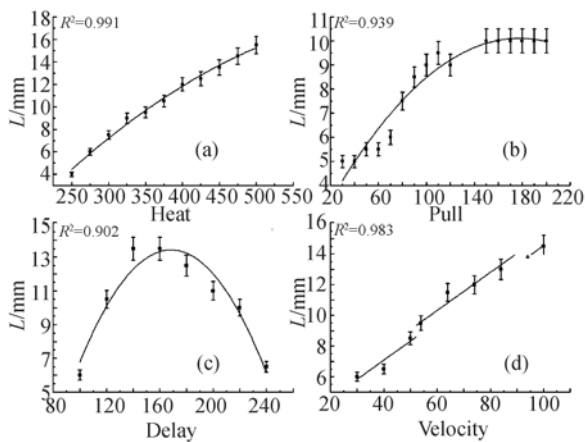


图 3 拉制参数对微喷嘴锥长的影响关系曲线

Fig. 3 Relationship between draw parameters and taper length of micro nozzle

从图 3(a)中可以看出,锥长  $L$  随着加热温度 Heat 的增加而增长。图 3(b)表明,拉力 Pull 与微喷嘴锥长  $L$  之间呈现正比例关系。当 Pull 为 30~70 时,锥长  $L$  变化较小;当 Pull 为 70~120 时,锥长  $L$  变化趋势明显;当 Pull 增大至 150~200 时,锥长  $L$  不变。从图 3(c)中可以看出,当延时 Delay 为 100~170 时,微喷嘴锥长  $L$  随着 Delay 的增大而增长;当 Delay 为 170~240 时,微喷嘴锥长  $L$  随着 Delay 的增大而减短。图 3(d)表明微喷嘴锥长  $L$  随着拉制速度 Velocity 的加快而增长。

将拉制参数固定为 Heat = 350, Fil = 4, Velocity = 50, Delay = 225, Pull = 150, 拉制 20 根微喷嘴,并测量 20 根微喷嘴的锥长  $L$ , 研究拉制稳定性,稳定性曲线如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,20 根微喷嘴的锥长在 9~10.5 mm 之间变化,变异系数为 3.5%,结果表明,单微喷嘴拉制工艺稳定性良好,为组合微喷嘴

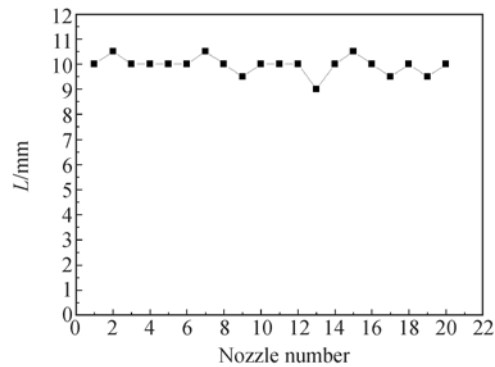


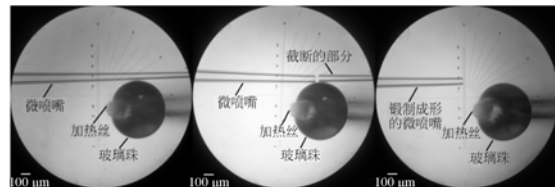
图 4 拉制稳定性曲线

Fig. 4 Stability curve of drawing

的制作打下了良好的基础。

### 2.1.2 单微喷嘴的锻制

锻制是制作组合微喷嘴的第二步,通过锻制,能够得到任意内径的微喷嘴,锻制过程如图 5 所示。将待锻制的微喷嘴缓慢移至加热丝前端的玻璃珠上方(图 5(a));打开加热丝开关,微喷嘴和玻璃珠接触的外壁受热收缩,收缩到一定程度时,停止加热,微喷嘴和加热丝接触的区域因急速冷却收缩、断裂,即可得到合适的微喷嘴(图 5(b)、图 5(c))。从图 5 中可以看出,微喷嘴端口平滑,无毛刺,满足实验需要。



(a)移至加热丝上方 (b)锻制 (c)锻制完成  
(a)Removing micro nozzle on the above of heater (b)Forging (c)Forge is done

图 5 微喷嘴锻制过程

Fig. 5 Forge process of micro nozzle

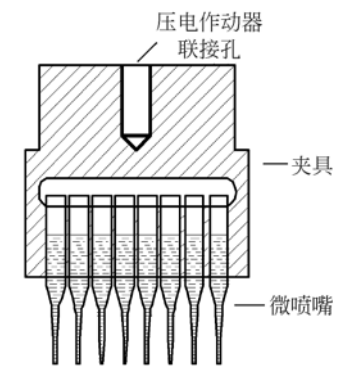
## 2.2 组合微喷嘴的设计和制作

应用场合不同,作用对象不同,对组合微喷嘴的要求也不相同,主要体现在微喷嘴原材料和微喷嘴结构 2 个方面。本文针对微喷射在生物芯片制备和激光熔覆中的应用,设计了 2 种组合微喷嘴。

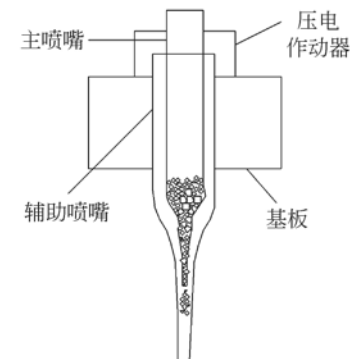
生物芯片制备中,作用对象为液体,可利用虹吸现象完成进样,且工作环境温和,因此,本文选用普通硼硅酸盐毛细管为原材料,将规格化的微

喷嘴阵列化,制成直列式组合微喷嘴,如图 6(a)所示。

激光熔覆过程中,作用对象为粉体,无法利用虹吸现象完成进样,且工作过程中伴随着激光高温作用,普通硼硅酸盐玻璃不适用。本文采用管径较大的石英玻璃管作为微喷嘴的原材料,进样方便且不受激光高温作用的影响。本文设计了如图 6(b)所示的同轴式组合微喷嘴,其由主喷嘴和辅助喷嘴组成。



(a) 直列式组合微喷嘴  
(a) In-line combined micro nozzle



(b) 同轴式组合微喷嘴  
(b) Coaxial combined micro nozzle

图 6 组合微喷嘴示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of combined micro nozzle

制作直列式组合微喷嘴的关键是制备规格化的单微喷嘴。本文选用外径 1.0 mm,内径 0.6 mm 的普通硼硅酸盐毛细管为制作单微喷嘴的原材料,在同一拉制参数下进行拉制,再通过后续的锻制处理,就可以得到锥长和内径基本一致的单微喷嘴。将规格化的单微喷嘴截取成相同程度,并固定在夹具上,即可形成直列式组合微喷嘴。图 7 所示为制备成形的 4×2 直列式组合微喷嘴,

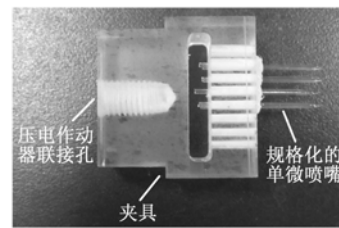
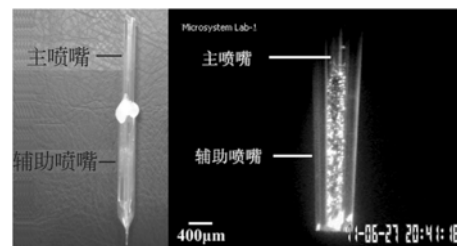


图 7 制作成形的 4×2 直列式组合微喷嘴  
Fig. 7 4×2 in-line combined micro nozzle

内径为 150 μm。

同轴式组合微喷嘴的制作相对简单,本文选用外径 4.4 mm,内径 2.8 mm 和外径 6.5 mm,内径 4.9 mm 的石英玻璃管分别作为主喷嘴和辅助喷嘴的原材料,通过拉制、锻制得到不同尺寸的主喷嘴和辅助喷嘴,将两者互相嵌套即可形成同轴式组合微喷嘴。制作成形的同轴式组合微喷嘴如图 8 所示,其中,主喷嘴尺寸为 200 μm,辅助喷嘴尺寸为 400 μm。



(a) 外观形貌 (b) 内部显微放大图  
(a) Appearance shape (b) Micrograph

图 8 制作成形的同轴式组合微喷嘴

Fig. 8 Coaxial combined micro nozzle

### 3 微喷射实验

#### 3.1 微喷射实验系统

基于微流体数字化技术,构建微喷射实验系统,如图 9 所示,系统由计算机、微流体脉冲驱动-控制系统(微系统研究室自制)、压电作动器(P-844.10,德国 PI 公司)、CCD 摄像机(MTC-23K9HC,台湾 MINTRON 公司)、二维工作台(上海斯达普实业有限公司)、组合微喷嘴等组成。

微流体数字化技术中,压电作动器安装在流路本体外部,微流体脉冲驱动-控制系统输出的波形信号加载在压电作动器两端,使直列式组合微

喷嘴中的液体或者同轴式组合微喷嘴中的粉体获得足够大的惯性力,克服黏性力从微喷嘴中喷出。不同大小的惯性力可以通过设置微流体脉冲驱动-控制系统输出的驱动电压、驱动频率得到。

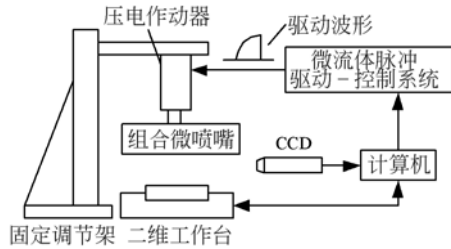


图 9 微喷射实验系统示意图

Fig. 9 Experimental system of micro-injection

### 3.2 实验结果

#### 3.2.1 液体微喷射

在微喷射实验系统的平台上,利用  $4 \times 2$  直列式组合微喷嘴进行液体微喷射实验。微喷嘴内径:  $150 \mu\text{m}$ ; 微喷射对象: 体积比为  $1:3$  的甘油水溶液, 黏度为  $2.08 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ ; 实验条件: 驱动电压  $30 \text{ V}$ , 驱动频率  $2 \text{ Hz}$ 。图 10 所示为用  $4 \times 2$  直列式组合微喷嘴单次喷射的液滴阵列照片, 液滴平均直径为  $180 \mu\text{m}$ 。从图 10 中可以看出, 液滴形状规则、圆整, 大小均匀, 无卫星液滴。相对于单微喷嘴和一维直列式微喷嘴阵列, 直列式组合微喷嘴的单次喷射效率更高。

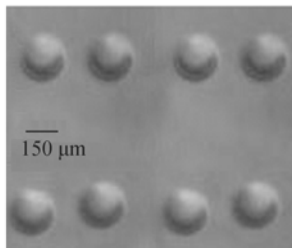


图 10 直列式组合微喷嘴喷射的液滴阵列

Fig. 10 Droplet array prepared by in-line combined micro nozzle

#### 3.2.2 粉体微喷射

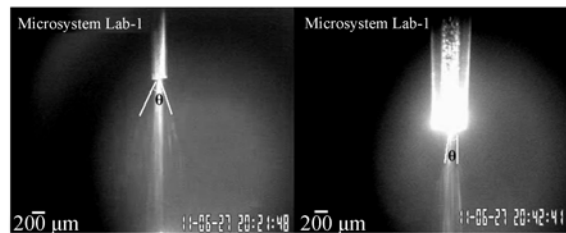
在微喷射实验系统的平台上, 利用同轴式组合进行粉体微喷射实验。微喷嘴尺寸: 主喷嘴  $200 \mu\text{m}$ , 辅助喷嘴  $400 \mu\text{m}$ ; 微喷射对象:  $-300$  目  $\sim +170$  目的角形铬粉 (平均粒径  $75 \mu\text{m}$ ); 实验条件: 驱动电压  $30 \text{ V}$ , 驱动频率  $2 \text{ Hz}$ 。

图 11 所示为单微喷嘴和同轴式组合微喷嘴

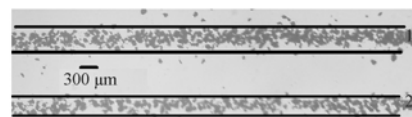
在上述驱动条件下的微喷射效果对比。图 11(a) 为出射角  $\theta$  对比, 左侧图显示的是单微喷嘴的出射角, 约为  $33^\circ$ , 右侧显示的是同轴式组合微喷嘴的出射角, 约为  $10^\circ$ , 小于单微喷嘴的出射角。

图 11(b) 为单微喷嘴和同轴式组合微喷嘴喷射成形的粉线对比, 粉线“1”是由单微喷嘴喷射成形的粉线, 线宽约为  $450 \mu\text{m}$ ; 粉线“2”是由同轴式组合微喷嘴喷射成形的粉线, 线宽约为  $300 \mu\text{m}$ 。图中, 黑线区域内的为粉线主体部分, 可以看出, 粉线“1”的主体部分之外存在多数散射的粉体颗粒, 而粉线“2”的主体部分之外几乎不存在散射的粉体, 较为集中, 和出射角的对比结果一致。

对比结果表明, 同轴式组合微喷嘴中的辅助喷嘴有效地约束了主喷嘴出射的粉体流动, 减小了出射角, 降低了成形粉线的宽度, 提高了粉体微喷射的方向性和粉体利用率。



(a) 出射角对比。左: 单微喷嘴, 右: 同轴式组合微喷嘴  
(a) Comparison of injection angle: single micro nozzle(left); coaxial combined micro nozzle(right)



(b) 喷射成形的粉线对比  
(b) Comparison of injected powder lines

图 11 单微喷嘴和同轴式组合微喷嘴微喷射效果对比  
Fig. 11 Micro-injection effect comparison of single micro nozzle and coaxial combined micro nozzle

## 4 结 论

采用激光加热的方式控制单微喷嘴, 控制过程中的加热温度、拉力、延时和控制速度对单微喷嘴的锥长有重要影响; 同一参数下, 控制稳定性良好, 为组合微喷嘴的制作打下了良好的基础。

针对微喷射技术在生物芯片制备中的应用,

设计并制作了直列式组合微喷嘴,其较之文献[11]中的一维直列式微喷嘴阵列在空间上有了扩展。利用 $4 \times 2$ 直列式组合微喷嘴,在基于微流体数字化技术的微喷射实验平台上进行了液滴微喷射实验,单次喷射得到了形状规则、圆整,大小均匀、无卫星液滴的液滴阵列,液滴平均直径为 $180 \mu\text{m}$ 。相较于单微喷嘴和一维直列式微喷嘴阵列,直列式组合微喷嘴的单次喷射效率更高。

### 参考文献:

- [1] RAYLEIGH L. On the instability of jets [J]. *Proc. London Math. Soc.*, 1878, s1-10(1):4-13.
- [2] CHANG C J, LIN Y H, TSAI H Y. Synthesis and properties of UV-curable hyperbranched polymers for ink-jet printing of color micropatterns on glass [J]. *The Solid Films*, 2011, 519:5243-5248.
- [3] 耿鑫,侯丽雅,杨眉,等.微流体数字化技术制备基因芯片微阵列[J].*光学精密工程*, 2011, 19(6): 1344-1352.
- GENG X, HOU L Y, YANG M, *et al.*. Preparation of genechip microarrays using microfluid digitalization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(16):1344-1352. (in Chinese)
- [4] ZH L, HOU L Y, ZHANG W Y. A new fabrication method for glass microfluidic devices used in micro chemical system [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010(148):135-146.
- [5] 颜永年,张婷,张人佶,等.细胞及生物材料的成形制造技术[J].*机械工程学报*, 2010, 46(5):80-87.
- YAN Y N, ZHANG T, ZHANG R J, *et al.*. Forming and manufacturing technique for cells and biological materials [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(5): 80-87. (in Chinese)
- [6] LUO J, QI L H, ZHOU J M, *et al.*. Modeling and characterization of metal droplets generation by using a pneumatic drop-on-demand generator [J]. *J. Mater. Process. Tech.*, 2012, 212(3):718-726.
- [7] 侯丽雅,王振琪,章维一,等.金属微粉体脉冲输送的微特性实验[J].*光学精密工程*, 2011, 19(5): 1030-1038.
- HOU L Y, WANG Z Q, ZHANG W Y, *et al.*. Experiments of micro characteristics of pulse-transfer for micro metallic powders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1030-1038. (in Chinese)
- [8] 许宝建,乔治,金庆辉,等.硅微喷嘴阵列芯片的设计、制作与应用研究[J].*微细加工技术*, 2006, 4:48-52.
- XU B J, QIAO Z, JIN Q H, *et al.*. Design, fabrication and application of silicon based micro dispensing array chip [J]. *Micro Fabrication Technology*, 2006, 4:48-52. (in Chinese)
- [9] JENG Y R, SU C C, FENG G H, *et al.*. A PZT-driven atomizer based on a vibrating flexible membrane and a micro-machined trumpet-shaped array [J]. *Microsyst Technol*, 2009, 15:865-873.
- [10] KÖHLER J M, MÖLLER F, SCHNEIDER S, *et al.*. Size-tuning of monodisperse PMMA nanoparticles by micro-continuous-flow polymerization using a silicon micro-nozzle array [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 167:688-693.
- [11] 张晓乐,侯丽雅,章维一.数字化微喷射用直列微喷嘴制作工艺[J].*光学精密工程*, 2008, 16(11): 2221-2227.
- ZHANG X L, HOU L Y, ZHANG W Y. Fabrication of in-line micropipette for digital micro-jetting experiment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2221-2227. (in Chinese)
- [12] LAMIKIZ A, TABERNERO I, UKAR E, *et al.*. Current designs of coaxial nozzles for laser cladding [J]. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2011, 4: 29-36.
- [13] ZHU G X, LI D C, ZHANG A F, *et al.*. Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle in laser direct metal deposition [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43: 106-113.
- [14] 田凤杰.卸载式激光同轴送粉喷嘴的研制[J].*中国机械工程*, 2011, 22(19):2298-2302.
- TIAN F J. Development on coaxial feeding nozzle with unloading carrier gas for laser manufacturing [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(19): 2298-2302. (in Chinese)

- [15] 章维一,侯丽雅.微流体数字化的科学与技术问题(I):概念、方法和效果[J].科技导报,2005,23(8):4-9.

ZHANG W Y, HOU L Y. Scientific and technological problems of digitalization of microfluids (Part I): concepts, methods and results [J]. *Science & Technology Review*, 2005, 23(8):4-9. (in Chinese)

- [16] 章维一,侯丽雅.微流体数字化的科学与技术问题(II):物质数字化及物质能量信息统一数字化概念研究[J].科技导报,2006,24(3):41-47.

ZHANG W Y, HOU L Y. Scientific and technological problems of digitalization of microfluids (Part II): Conceptual study of digitalization of matter-energy-information [J]. *Science & Technology Review*, 2006, 24(3):41-47. (in Chinese)

#### 作者简介:



杨眉(1984—),女,江苏盐城人,博士研究生,2006年于中北大学获学士学位,主要从事微流体数字化技术的研究。E-mail: yangmei\_513@163.com



朱丽(1977—),女,江苏扬州人,副研究员,2003年、2009年于南京理工大学分别获得硕士和博士学位,主要从事微系统与纳米系统、微流体数字化技术等方面的研究。E-mail: nlglz@163.com

#### 导师简介:



侯丽雅(1954—),女,江西余干人,教授,1984年于北京航空航天大学获硕士学位,1995年于(日)法政大学获博士学位,主要从事微系统与纳米系统、微流体数字化技术、生物制造工程等方面的研究。E-mail: hou\_liya@hotmail.com



章维一(1943—),男,浙江临海人,教授,1982年于中国纺织大学获硕士学位,1990年于北京航空航天大学获博士学位,主要从事微系统与纳米系统、微流体数字化技术、医学工程等方面的研究。E-mail: zhangweiyi\_email@163.com

(本栏目编辑:马健)

#### ●下期预告

## 应用双摆动技术加工离轴碳化硅反射镜

李俊峰,宋淑梅

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造技术重点实验室,吉林 长春 130033)

针对离轴 SiC 反射镜的研制,介绍了双摆动抛光技术加工离轴非球面的抛光原理,并分析了双摆动抛光技术中抛光盘与工件的相对运动特性及各个工艺参数对相对运动路径的影响。建立了双摆动抛光的数学模型,并进行了计算机仿真,对不同参数下的仿真结果进行了比较。建立了抛光模形状模型,并通过实验验证了不同形状抛光模的材料去除特性。给出了应用双摆动加工技术加工一个 224 mm×108 mm 离轴碳化硅反射镜的工程实例,实验结果表明:应用双摆动抛光技术加工离轴非球面镜可以有效抑制光学表面中频误差,具有较高的材料去除效率,且面形精度可以稳定达到  $\lambda/30(\text{rms}, @633 \text{ nm})$  水平。