

文章编号 1004-924X(2008)09-1706-06

# 玻璃三通微流体管道热流变拉制仪设计及实验

张晓乐, 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:**为了获得具有良好微流动特性的圆截面微流体器件,并构建二维裸微结构微流体管道网络,设计了玻璃三通微流体管道热流变拉制仪。在三通微管道拉伸成形过程中,变形区热软化后的V形玻璃毛细管,可在冷却过程中一次性拉制成三通微管道,储液池在拉制过程的同时成型,并与三通管光滑连接。拉制仪可实现等内径和不等内径拉伸。通过对加热时间、拉伸行程和玻璃材料分配系数的调节,可以控制三通微管道各项参数。制备出了内径为67、32和20  $\mu\text{m}$ 的圆截面三通微管道。它的三根微管道在三通结点处光滑连通;由于表面张力成型,微管道具有较高的表面质量。最后,以三通微管道和一维玻璃微管道为基础单元,组建了微流体管道网络。

**关键词:**微流体;热流变拉制仪;三通微管道;微管道网络

**中图分类号:**TH705;TQ171.68 **文献标识码:**A

## Design and experiment of hot rheologic deformation puller for fabricating vitreous three-way microchannel

ZHANG Xiao-le, HOU Li-ya, ZHANG Wei-yi

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

**Abstract:** In order to fabricate vitreous microfluidic components with round cross sections and microchannel networks with nude structure, a hot rheologic deformation puller for fabricating vitreous three-way microchannel was designed. In the forming process of the three-way microchannel, the tip of the bended glass capillary with the shape of "V" was softened by heating and then was pulled into three-way microchannel in cooling process. The reservoirs connecting the microchannels with conical pipes were also formed during the pulling process. The three-way microchannels with both equal or unequal inner diameters could be made by the puller. The temperature in the heating field, the inner diameter of microchannel and the distribution coefficient of vitreous material could be adjusted by heating time, pulling distance and micro-feed mechanism, respectively. A three-way microchannel with inner diameter of 67, 32 and 20  $\mu\text{m}$  was fabricated, its three ways were connected smoothly in the joint. For surface tension forming, the three-way microchannel shows a higher quality surface. Finally, a microchannel network was assembled with the one-dimension microchannels and the three-way

收稿日期:2008-01-23;修订日期:2008-03-17.

基金项目:教育部博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20060288005);江苏省自然科学基金资助项目(No. BK2007209)

microchannels successfully.

**Key words:** microfluid; hot rheologic puller; three-way microchannel; microchannel network

## 1 引言

微流体系统是目前微系统研究的一个热点,作为微量流体驱动和流动的平台,微流体器件在生物医学工程、微全分析系统( $\mu$ TAS)、微传热、微化学等领域有着重要的应用前景。近年来,微流体器件的制作技术发展很快,已从传统的光刻工艺发展到模塑法<sup>[1]</sup>、激光烧蚀法<sup>[2]</sup>、微细切削加工<sup>[3]</sup>、软刻蚀法<sup>[4]</sup>等多种方法。通用的二维微流体器件制备工艺通常是先在基片上加工出未封闭的微沟槽网络,然后通过键合工艺将基片与盖板封接在一起从而形成密封的微管道系统,微管道结构的加工成形方向一般与管道轴线所在平面垂直。多年来,研究者们一直致力于简化微管道加工工艺过程,降低制作成本,缩短制备周期,提高微管道表面质量。

微流体数字化技术以裸微结构的微流体器件为微量流体的流动载体<sup>[5]</sup>,通过裸微结构的微流体器件,将小幅脉冲惯性力施加于微量流体,在惯性力与粘性力交替作用下实现流体在微管道中的数字化脉冲流动<sup>[6]</sup>。为了获得具有良好微流动特性的圆截面微流体器件,并在此基础上构建二维裸微结构微流体管道网络,南京理工大学微系统研究室设计了基于热流变拉伸成形原理的玻璃三通微流体管道制备工艺<sup>[7]</sup>。本文在此工艺基础上设计了玻璃三通微流体管道热流变拉制仪。

## 2 工艺

### 2.1 工艺原理

玻璃是一种热粘弹性材料,从流变制造角度来看,玻璃的成型过程是一个复杂的粘弹材料流变成型过程<sup>[8]</sup>。根据玻璃成型的特点,在微管道拉伸成型工艺中,先将玻璃毛细管变形区加热至成型温度,使其达到半熔融状态。然后在其冷却固化过程中沿轴向对其施加一个瞬时的拉伸力。半融区的毛细玻璃管在沿拉伸方向伸长的同时内外径减小,从而完成圆形截面微管道成型。拉伸力牵引玻璃半融体发生变形,玻璃和空气间的表

面张力保证微管道内外壁面获得正确的圆柱形状。采用该工艺可制备理想圆截面的玻璃微管道<sup>[7]</sup>,微管道的加工成形方向在微管道轴线平面内。

### 2.2 工艺过程概述

玻璃三通微管道成型过程如图1所示,主要分为以下3步:

#### 2.2.1 毛坯弯制

将制作电极用硼硅酸盐玻璃毛细管(内径1.0 mm,外径1.6 mm,长100 mm)中部热软化后弯制成“V”字形的二维结构的玻璃毛细管毛坯,形成如图1所示的1端、2端和3端;

#### 2.2.2 粘丝工艺

芯丝通电红热后,靠近V形玻璃毛细管的1端部并将其热软化。微量进针,将芯丝嵌入到毛细管适当位置,冷却后1端固结在芯丝端部;

#### 2.2.3 三通管道二维热拉伸成型

将毛坯的固结区(1端)在加热器形成的加热域中软化,加热器断电后,在半熔融玻璃冷却过程中,牵引2、3端拉伸一个适当的距离,与原拉伸端对应形成1管、2管和3管,完成三通微管道成型。

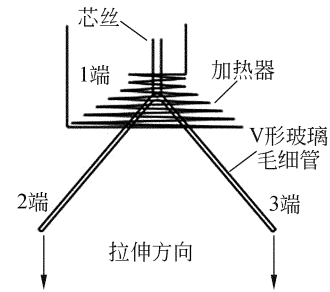


图1 三通管道热拉伸成型示意图

Fig. 1 Hot-pulling process of three-way microchannel

## 3 热流变拉制仪设计方案

图2为三通微管道拉制实验样机原理图。拉制仪主要完成粘丝工艺和拉伸成型两道工序。

芯丝和加热器固定在二维尺上,一起随二维尺运动。芯丝由可调变压器1供电。进行粘丝工艺时,先调整二维尺姿态,使芯丝对准毛细管1端

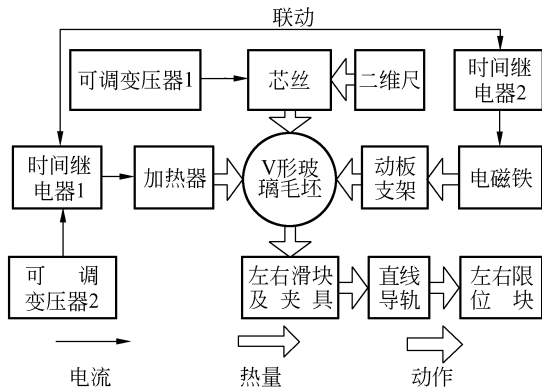


图2 三通微管道控制实验样机原理图

Fig. 2 Principle structure of experimental puller

(同时毛细管 1 端也进入加热域)。通电后,由二维尺控制微量进给将芯丝粘附于 1 端,断电后毛细管 1 端固结于芯丝。

加热域处于加热器中,由空间环绕的加热丝围绕而成。加热器在加热域中心通过热辐射形成高温温度场,将毛坯变形区软化。仪器采用控制时间的方式控制温度。先由可调变压器 2 调节电压,设置加热域稳定温度高于玻璃软化温度,通过时间继电器 1 控制加热时间。当加热域升温到玻璃软化温度时,时间继电器 1 切断加热器供电,然后进行微管道拉伸成形。

拉伸成型需在玻璃管冷却过程中进行,但加热器断电后,加热器在冷却到加热域中心温度前仍然对加热域进行热辐射。因此,设置时间继电器 2 延迟加热器断电后的电磁铁动作。当时间继电器 1 切断加热器供电后,时间继电器 2 启动延时,然后电磁铁带动动板支架回缩,引发拉伸动作。

控制过程采用重力作为拉伸牵引力。毛细管 2、3 端用夹具固定左右两滑块上,两滑块在竖直方向的两平行直线导轨上滑动。两导轨上设有限位块控制拉伸行程。拉伸前,电磁铁前舌与动板支架固联,处于伸出位置,两滑块托于动板支架上。电磁铁回缩后,两滑块牵动 2、3 端下滑拉伸直至限位块处停止。微三通管道在拉伸过程中成形。

## 4 结果与讨论

### 4.1 控制仪样机

三通微管道控制实验样机如图 3 所示。

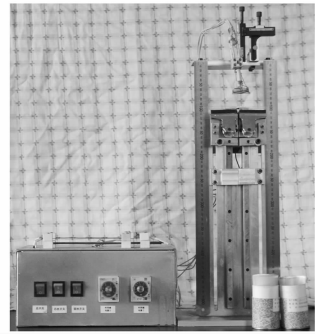


图3 三通微管道控制实验样机

Fig. 3 Experimental prototype of three-way micro-channel

### 4.2 成形工艺参数

加热域中心的加热温度和拉伸行程是微管道成型过程中的重要控制参数。加热域的软化温度与熔融玻璃体的粘度关系密切,温度过高则玻璃管粘度过低,玻璃熔体流动可能将微管道内腔封死;温度过低则玻璃管粘度过高,可能无法实现玻璃管变形,或有可能拉伸未到行程而将玻璃管拉断。在加热器形状一定的情况下,温度场温度与加热电压和加热时间关系密切。

实验样机采用固定加热域稳定温度,通过控制加热时间调节加热温度。对于内径 1.0 mm,外径 1.6 mm 的硼硅酸盐玻璃管,合适的拉伸温度应在 650~700 °C 之间。图 4 为实验测定的 1 min 内加热域中心温度随时间的变化曲线。从图 4 可知,对应于 650~700 °C 之间的加热时间为 40~45 s。所以拉伸时将时间继电器 1 设置为 42 s。

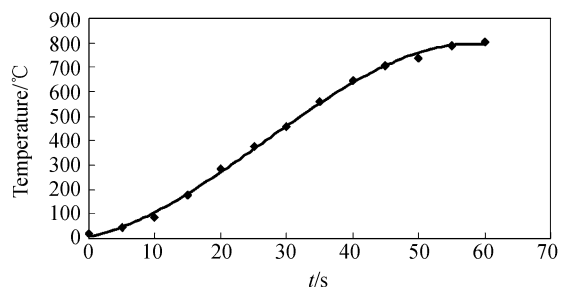


图4 1 min 内加热域中心温度随时间的变化

Fig. 4 Relationship between temperature in heating field and heating time

时间继电器 2 用于控制加热器断电后的电磁铁动作延迟时间。延迟时间过短会出现玻璃毛细管热拉断,延迟时间过长会出现玻璃毛细管冷

拉断。热拉断表现为局部毛细管在拉伸过程中迅速变细进而分为两端部不通的微针,这是由于软化的毛细管黏度过低;冷拉断表现为毛细管在拉伸过程中未达到拉伸行程而被扯断,主要是因为毛细管过早冷却到拉伸温度以下。表1给出了电磁铁延迟时间与拉伸状态的对应关系。由表可知,一般延迟时间应设置在400~700 ms之间。

表1 电磁铁动作延迟时间与拉伸状态

Tab. 1 Relationship between delay time of electromagnet and pulling state

时间(ms)	状 态
100	热拉断
200	热拉断
300	热拉断
400	成形
500	成形
600	成形
700	成形
800	冷拉断
900	冷拉断

三通微管道拉伸成型过程中,玻璃材料在3根管道间分配的比例直接影响拉制过程中管道的内外径尺寸。某一根管道分配材料越多,同行程拉伸变形后,该管道内外径尺寸越大。玻璃材料在3根管道间分配的比例主要受粘丝工艺的影响,粘丝工艺的进针行程(芯丝嵌入微管道中的深度)主要影响玻璃材料在1管与2、3管间的分配。将三通管道1管与2、3管占有玻璃材料的比称为材料的分配系数。图5为通过实验测得的材料分配系数与粘丝工艺进针行程的关系。V形毛坯1端玻璃管总外径为900  $\mu\text{m}$ 。当进针达到650  $\mu\text{m}$ 时,芯丝尖部已穿过毛细管内腔,粘到毛细管内壁面,所以不会再有1管拉出。所以当进针 $>650 \mu\text{m}$ 时,分配系数为0。

微管道内径随着拉伸行程的增大而减小。三通微管道拉制仪中通过调整限位块的位置来控制滑块在导轨上的行程,进而控制微管道的拉伸长度。图6为拉伸行程与拉制出三通微管道2管内径的关系。拉伸采用等径拉伸,所拉制的2管和3管内径相等。工艺分配系数为1,对应的芯丝进针距离为500  $\mu\text{m}$ 。

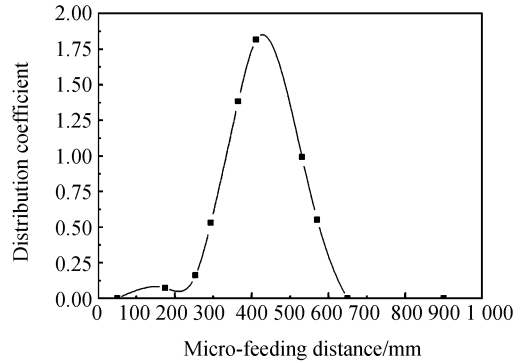


图5 材料分配系数与进针行程的关系

Fig. 5 Relationship between distribution coefficients of material and micro-feeding distances

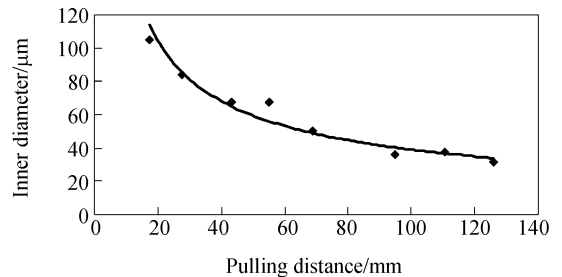


图6 控制行程与2管内径的关系

Fig. 6 Relationship between pulling distances and inner diameters of tube 2

#### 4.3 拉制出的三通微管道

在拉伸步骤中,当V形管2、3端同时受滑块牵引拉伸相同距离时,可以实现2、3管等内径拉伸<sup>[7]</sup>。若在拉伸前,设置3端限位块低于2端限位块一固定距离,拉伸过程中3端先行下落实伸此段固定距离后,然后2、3端再随两相对位置固定的限位块同时下落拉伸相同距离,这样就可以拉制出不同内径的2、3管。图7为拉制出的不等内径三通微管道外观图,3根微管道在三通结点处连通。从图中可以较明显看出3管外径小于2管。拉伸后未参与拉伸变形的毛细管自然形成了微管道的储液池,为微管道进液提供方便的宏观接口。

图8为在显微镜下拍摄的三管连通处的显微结构。为屏蔽观测内管道时光线折射的影响,将三通微管道三端密封后浸入到液体石蜡与香柏油配制的折射率液中(体积比19:15),由于该液和玻璃的折射率相近,三通微管道玻璃壁微显出。

可测得 1 管、2 管和 3 管内径分别为 67、32 和 20  $\mu\text{m}$ 。

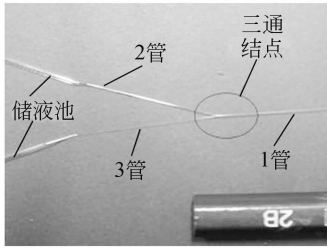


图 7 三通微管道外观图

Fig. 7 Outline of three-way microchannel

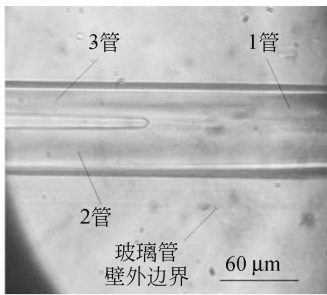


图 8 三通微管道结点内径显微照片

Fig. 8 Micrograph of joint inner diameter of three-way microchannel

#### 4.4 微管道网络的组建

以三通玻璃微管道和一维的玻璃微管道<sup>[9]</sup>为基本单元可以构建较复杂的微流体管道网络。热拉伸成形的储液池形成了微管道的宏观接口,可以方便地用热熔胶和三通微管道的 1 管进行封

接<sup>[7]</sup>,进而形成结构更为复杂的微管道网络。使用三通玻璃微管道和一维玻璃微管道相互封接,可以装配出用于生化分析的合流、分流微管道网络,如图 9 所示。使用 3 根三通微管道相互封接可以装配出具有二级分形结构的微管道网络<sup>[7]</sup>。

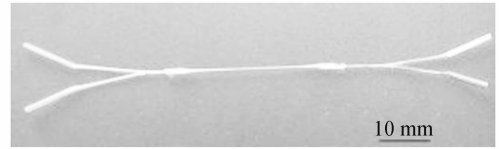


图 9 三通微管道与一维微管道封接而成的微管道网络

Fig. 9 Assembled microchannel network

## 5 结 论

(1) 本文所设计的玻璃三通微流体管道拉制仪具备以下功能特点:可实现 2 管和 3 管的等内径拉伸和不等内径拉伸;加热域的拉伸成形温度由加热时间控制;微管道的内径可由拉伸行程和粘丝进针行程控制;芯丝与两夹具同平面,保证了所制备三通微管道的平面度要求,进而保证微管道网络装配工序的顺利进行。

(2) 相对于腐蚀成形的微管道,表面张力成型的微管道表面具有更高的质量。已制备出内径为 67、32 和 20  $\mu\text{m}$  的圆截面三通微管道。

(3) 拉制仪采用非光刻工艺制备微管道,采用商品化的毛细玻璃管作为毛坯材料,工艺过程简单快捷,微管道制作成本低廉。拉制仪对使用环境无特殊要求,普通分析实验室条件即可。

#### 参考文献:

- [1] TATSUHIRO F, TAKATOKI Y, TAKESHI N, *et al.*. Microfabricated flow-through device for DNA amplification-towards in situ gene analysis[J]. *Chem. Eng. J.*, 2004, 101(1-3): 151-156.
- [2] KLANK H, KUTTER J P, GESCHKE O. CO<sub>2</sub>-laser micromachining and back-end processing for rapid production of PMMA-based microfluidic systems [J]. *Lab Chip*, 2002(2):242-246.
- [3] 赵岩,梁迎春,白清顺,等. 微细加工中的微型铣床、微刀具磨损及切削力的实验研究[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6):894-902.  
ZHAO Y, LIANG Y CH, BAI Q SH, *et al.*. Micro-milling machine tool, micro-tool wear and cutting forces in micro-machining [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6):894-902. (in Chinese)
- [4] JOHNA R, RALPHG N. Recent progress in soft lithography [J]. *Materials Today*, 2005, 8(2): 50-56.
- [5] 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 and Technology Review*, 2005, 23(8):4-9. (in Chinese)
- [6] 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 and integrated digitalization of matter-energy-information[J]. *Science and Technology Review*,2006,24(3):41-47. (in Chinese)

[7] ZHANG X L, HOU L Y, ZHANG W Y. Hot-drawing rheologic deformation for fabricating two-dimensional vitreous microfluidic components[C]. *International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics 2007. Science press USA Inc.*,2007:1799-1802.

[8] 耿铁,李德群,周华民,等. 玻璃成形数值模拟技术研究概述[J]. *机械设计与制造*,2006,4(4):170-171.  
GENG T, LI D Q, ZHOU H M, *et al.*. On the research of numerical simulation technology of glass forming processes[J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2006, 4(4):170-171. (in Chinese)

[9] 刘天军,章维一,侯丽雅. 细胞注射玻璃微针拉针器的研制[J]. *光学精密工程*, 2003,11(5): 15-18.  
LIU T J, ZHANG W Y, HOU L Y. Development of cell injection pipette puller[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5):15-18. (in Chinese)

作者简介:张晓乐(1981—),男,河南郑州人,博士研究生,主要研究方向为微流体系统和微胶囊制备技术。E-mail: zxl0665@163.com

侯丽雅(1954—),女,教授,博士生导师,主要从事微系统与纳米系统、生物制造工程、医学工程、机器人与自动控制技术等方面的研究。E-mail: w\_20010238@yahoo.com.cn

## ●下期预告

# 六杆并联机构运动学正解研究及 在同步辐射光束线中的应用

卢启鹏<sup>1</sup>,李勇军<sup>1,2</sup>,彭忠琦<sup>1</sup>,凌丽青<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

从相关物理模型出发,以同步辐射光束线六杆并联机构的运动学反解为基础,采用信赖域法对非线性超越方程组进行优化,编制相应的 MATLAB 程序,得到机构的运动学正解。实例应用结果表明,信赖域法是解决运动学正解问题的有效途径,求解程序稳定可靠,运算速度快,误差小,线性精度达  $10^{-12}$  mm,转动精度达  $10^{15}^\circ$ 。采用差动螺旋的微动调节方式,能使单色器箱体姿态的线性调节分辨达  $5\ \mu\text{m}$ ,转角分辨达  $3''$ ,完全满足实际工作的要求。