维普资讯 http://www.cqvip.com

2006年 12月
第27卷 第4期

郑州大学学报(工学版)
Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)

Dec. 2006
Vol.27 No.4

文章编号:1671-6833(2006)04-0116-05

一种矩形微米流道的加工与流量测定

郭 强[1,2], 李振国[3]

(1.上海大学上海市应用数学和力学研究所,上海 200072;2.中国科学院力学研究所,北京 100080;3.中国科学技术大学力学和机械工程系,安徽 合肥 230027)

摘 要:介绍了一种比较成熟的矩形微米流道(微槽道)加工工艺,利用厚胶光刻工艺在硅片上制备胶模板,进而在该模板上用高分子聚合物PDMS(Polydimethylsiloxane,聚二甲基硅氧烷)制作了微米量级的微槽道(高、宽范围20~100μm),对制备的微槽道的几何精确度进行了20×100倍放大显微观测,对其流量特性进行了实验测定.实验结果与泊肃叶理论公式(NS方程的管流表达式)相对比,可以看到在微米量级的矩形微流道中,泊肃叶公式仍然适用.

关键词:矩形微槽道;进液口;出液口;PDMS;流量

中图分类号:O 351.2 **文献标识码**:A

0 引言

二十世纪九十年代初期,Manz等首先提出了微全分析系统(Miniaturized total analysis systems μ-TAS)[1],又称芯片实验室(Chip lab).芯片实验室是指把生物和化学等领域中所涉及的样品制备,生物与化学反应,分离、检测等基本操作单元集成或基本集成到一块几平方厘米的芯片上,用以完成不同的生物或化学反应过程,并对其产物进行分析的一种技术.芯片实验室原则上适用于从核酸、蛋白质直到有机、无机小分子的各种不同类型分子的反应、分离和检测[2].芯片实验室具有广阔的应用前景,已经在一定程度度上显示了其巨大的作用.但是芯片实验室的加工技术工艺复杂,成本较高,特别是微槽道的制作难度较大,因而在一定程度上限制了它的发展.此外,微槽道的制备也为若干宏观流体力学研究领域,例如冲刷腐蚀[3]等向微观领域的延展,创造了有利条件.但目前关于微槽道制备的论文发表的较少,许多研究人员苦于无法人手制备微槽道,从而不能进一步深入微流动方面的研究.

针对这种现状,作者介绍了一种简单的微槽道制备方法,用一种无色透明的弹性高分子聚合物PDMS(Polydimethylsiloxane,聚二甲基硅氧烷)来制作微槽道,作者在前人的基础上对微槽道的接口技术进行了改进,获得了良好的实用效果.

作者通过SU-8S胶的厚胶光刻工艺在硅片上制作了模板,如图1所示.

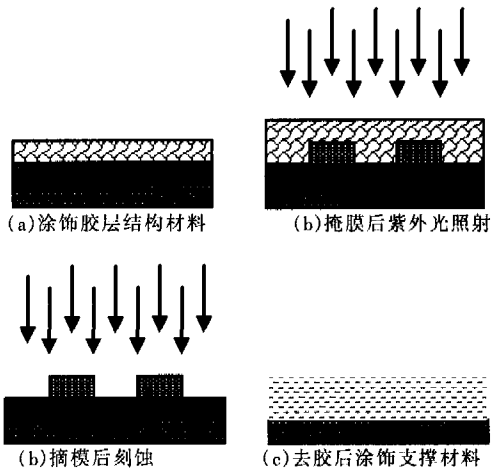

图1 模板的制作

Fig.1 The making of template

利用匀胶机的转速控制功能,在制成的模板上得到一定厚度的具有微米尺度槽道结构的PDMS薄膜,将该PDMS薄膜与光学玻璃通过氧离子键射仪进行不可逆粘合,制成闭合微槽道.最后通过对自制的微槽道流量特性的实验测定,研究了泊肃叶公式在微米尺度槽道中的适用情况,丰

收稿日期:2006-06-30;**修订日期**:2006-09-17

基金资助:中国科学院重大创新基金资助项目(KJCX2-SW-L2)

作者简介:郭 强(1975-),男,河南郑州人,上海大学硕士研究生,主要从事微尺度流体力学及其应用研究.

维普资讯 http://www.cqvip.com

富了微尺度流动理论.

1　微槽道制备

1.1　制备原理

由于微槽道的尺寸只有数十到数百微米,所以在设计和制作上都很困难[4].G.Whitesides 和 S.Quake 等人在软光刻工艺基础上实现了微米级槽道的制作[5].加州理工学院(Caltech, USA)的微细加工研究小组(Micromachining Group)在微槽道制作方面的工作也受到了极大关注[6].我们在实验中注意到,键合在整个微槽道制备过程中非常关键,实验室内的粉尘度、温度、湿度等,都会导至键合以至于整个微槽道制备的失败.微槽道的制备过程如图2所示.

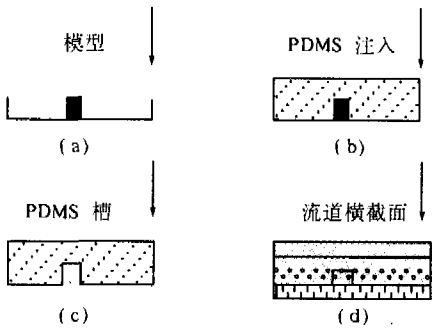

图2　微槽道的结构

Fig.2　The frame diagrams of a rectangular micro-tube fabrication

1.2　胶膜板的制备

我们用 LEDIT 软件画出槽道形状,直的、弯的,或是其它复杂形状的,然后制取对应的掩模板硅片,接着在硅片上涂饰环氧树脂负性光刻胶,用紫外光照射后,使涂饰在槽道部分的胶体基团固化,洗去多余的未固化的胶体,就形成了设计的槽道图样.所采用的 SU-8 光刻胶适合制备出深宽比较高的具有陡直壁面的结构,这正是制作槽道所必需的.

1.3　PDMS 槽道结构的制备

将 PDMS 原液和凝固剂按 10:1 的比例混合,充分搅拌2种成份,使混合均匀,在真空泵中抽取空气泡后,倾倒在硅模板表面.随后放在匀胶机上,控制转速在 500 r/min[7],得到约 0.5 mm 的 PDMS 槽片,将其放入 1 000 ℃烘箱中烘烤 30 min.为清洗盖玻片与载玻片,将 98% 的浓硫酸加热到 120℃,然后将过氧化氢加入,混合比例是浓硫酸与过氧化氢按体积比为 7:3,随后将盖玻片和载玻片放入,浸泡 0.5 h.将清洗好的盖玻片和载玻片与 PDMS 槽结构一起放入氧离子键射仪中,通入纯氧,调节进气阀使真空度保持在 4~10 Pa,电离电流保持在 15 mA,进行氧离子表面处理 60 s,然后取出,迅速对准进行粘合,接着放入烘箱中在 800 ℃下加热 1 h.如保持实验过程中各种材料的洁净度,保持适度的环境参数,可得到比较好的粘结效果.

1.4　槽道接口的制作

在微槽道的两端通过在 PDMS 上用自制的打孔器打两个直径约 1.6 mm 的孔,同时在盖玻片上用砂钻打同样直径的两个孔,在孔中插入细管来形成槽道的接口.如接口管过细,实验中容易扭断或松动,为了牢固,我们先采用一个较粗的管子,直径约为 3 mm,由于微槽道流量极小,如接口管过粗则使得出液过程相当长,为了避免延误实验时间,我们采用实际接通管的直径约 1.5 mm.首先将细管套在粗管中,并用环氧树脂粘结剂粘牢,如图3(a),将粗管的下部涂上环氧树脂粘接剂,如图3(b),待凝固后小心插入盖玻片上打好的孔中,然后再一次涂抹环氧树脂粘接剂,形成牢固粘接,如图3(c),这样做的目的是防止直接粘结形成的粘接剂渗漏到微槽道口,从而避免因堵塞造成微槽道制备失败.

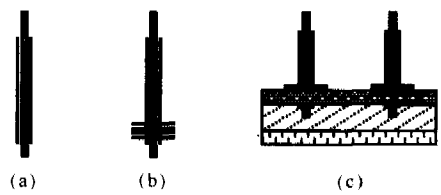

图3　槽道接口的制作与封装

Fig.3　The inlet and outlet diagram

2　微槽道流动

2.1　流动显示

高压氮气中的氮气经过减压、过滤,通过压力传感器后,产生的可调节的气压,经硬质塑胶管连接到微槽道接口,驱使微槽道中的含有荧光粒子的液体产生流动,我们利用 Olympus 倒置式显微镜进行了观测,如图4所示,可以看到槽道中的流动现象.

2.2　流量测定

为了进行流量定量测定,LNM 微流动实验室自行研制了微流量测定仪,如图5所示,已经申请并获得专利.其基本原理是:将微槽道中液体导入毛细玻璃管,在毛细玻璃管中用气针导入气泡,当气泡两次通过光电门时,秒表和位移表会即时记

维普资讯 http://www.cqvip.com

取相应的时间 t 和位移 L,如图6所示,毛细管内径 D,微槽道截面积 S 已知,可以算出毛细管内的实验平均流量,也就是微槽道中的实验平均流量 Q_{exp}.

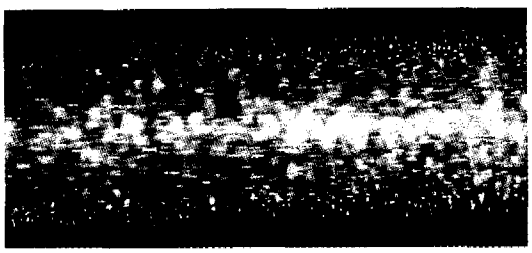

图4 微槽道流动显微观测

Fig.4 A microscope photo of one rectangular micro-tube flow With fluorescence particles planted in

$$Q_{exp}=\frac{\pi D^2 L}{4t} \tag{1}$$

式中:D 为毛细管直径;L 为两个光电门间的距离;t 为气泡流经此距离所用的时间.

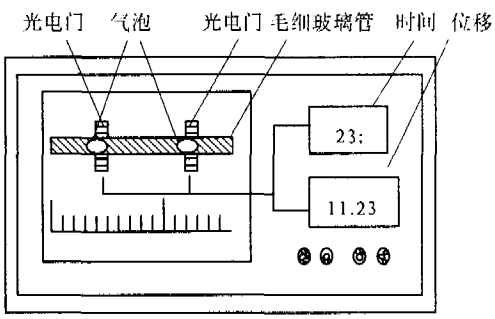

图5 微流量测定仪

Fig.5 The flow velocity measurer

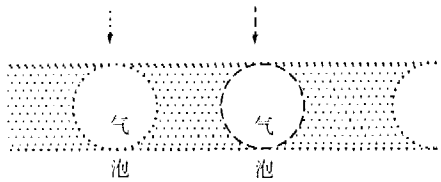

图6 毛细管段流量测定示意图

Fig.6 The measure principle of the capillary

对于槽管的平均流量,Henrik Bruus[8]介绍了一种近似解析解,是对泊肃叶方管理论公式[9]所做的改进:

$$Q_{HP}=\frac{h^3 w\Delta p}{12\mu l}\left(1-0.63\frac{h}{w}\right) \tag{2}$$

式中:w 为槽管的宽度;h 槽管高度,取 $W>h$;$\Delta p/l$ 为单位长度上的压降;μ 为液体黏性系数;l 为槽管的长度.

2.3 测量结果

对于所制备的槽道,其设计尺寸参数为:w 为100 μm,h 为50 μm,L 为30.1 mm,在10~20 kPa的压力范围内进行了压力驱动下的流量测定,理论和实验结果对比如下.

2.3.1 气压微流动

在气体压力下得到的流量数据如表1所列,图7和图8是理论流量和实验流量的对比.其中,Q_{exp}是实验流量,Q_{theo}是理论流量,C^* 为无量纲阻力系数,表征和理论流量和实验流量的比值.

2.3.2 水压微流动

我们对同一个槽道也进行了水柱供压的流量实验,得到的流量数据如表2所列,图9和图10是理论流量和实验流量的对比.

表1 10~20 kPa气压下毛细管流量实验数据

Tab.1 Experiment data with 10~20 kPa pressures

	$D=0.986$ mm, $L=10.0$ mm, $T=19.5$ ℃					
P/kPa	9.98	12.03	14.01	15.97	18.02	20.06
t/s	45.79	37.75	32.59	28.32	24.81	22.39
$Q_{exp}/(mm^3\cdot s^{-1})$	0.166 8	0.202 3	0.234 3	0.269 6	0.307 8	0.341 0
$Q_{theo}/(mm^3\cdot s^{-1})$	0.233 2	0.281 1	0.327 4	0.373 1	0.421 0	0.468 7
$1/C^*=\frac{Q_{exp}}{Q_{theo}}/\%$	72	72	72	72	73	73

表2 3~5 kPa水柱供压下毛细管流量实验数据

Tab.2 Experiment data with 3~5 kPa water pressures

	$D=0.986$ mm, $L=5.0$ mm, $T=19.3$ ℃					
P/kPa	3.41	3.62	3.79	3.99	4.19	4.36
t/s	75.00	71.01	68.31	64.09	61.38	59.87
$Q_{exp}/(mm^3.s^{-1})$	0.050 9	0.053 8	0.055 9	0.059 6	0.062 2	0.063 8
$Q_{theo}/(mm^3\cdot s^{-1})$	0.078 4	0.083 3	0.087 2	0.091 9	0.096 4	0.100 4
$1/C^*=\frac{Q_{exp}}{Q_{theo}}/\%$	65	65	64	65	64	64

维普资讯 http://www.cqvip.com

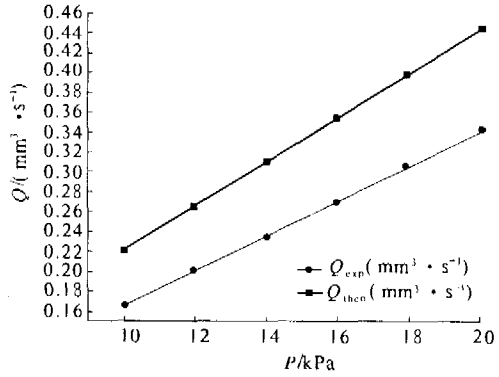

图7　气压下流量

Fig.7　Gas pressures and flux

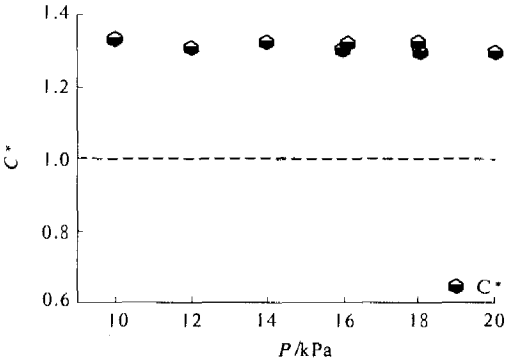

图8　气压与 C^* 关系

Fig.8　Gas pressures and C^*

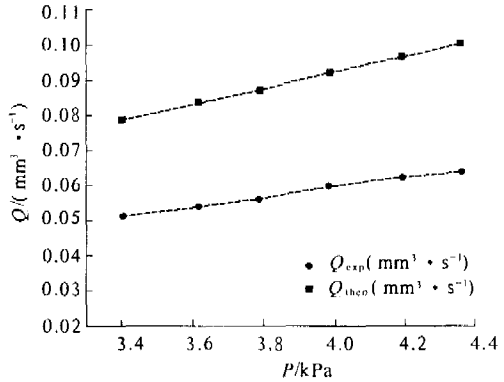

图9　水柱压力下流量

Fig.9　Water pressures and flux

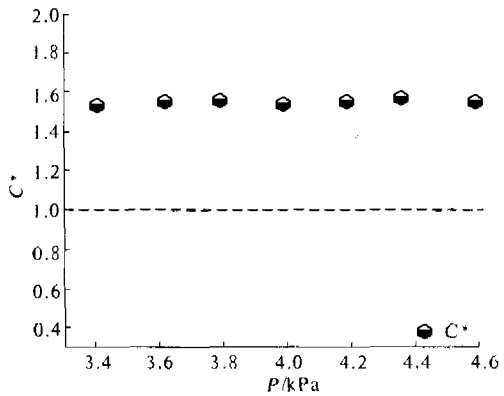

图10　水压与 C^* 关系

Fig.1　Water pressures and C^*

3　结果分析

实验结果表明，所制备的微槽道的流量实验值和经典泊肃叶公式得到的理论值是基本一致的，误差的来源主要有以下几方面，一是微槽道的尺寸误差，由加工工艺产生；二是驱动压力值误差，因为使用管道传输，气压值在管道中会有阶梯式下降，微槽道截面狭小，压降作用更为明显，从数据分析可以看到，驱动压力值越小，产生的误差就越明显，这是因为管道压力消耗对弱小压力的影响更为显著，该项误差较大，而在驱动压力较大时，实验结果趋进理论值；另外，由于所采用的方管道公式是一种简化的矩形槽道公式[10]，考虑微管道的特殊性，即所谓的微尺度效应，在矩形微管道中流量计算的泊肃叶公式的形式和参数有待于进一步确定.

4　结语

利用高分子聚合物 PDMS 制作了宽为 100 μm，高为 50 μm，长为 30.1 mm 的微槽道，这种材料兼容性好，具有良好紫外通透性能，制作微槽道比较简便，与玻璃材料容易键合，形成闭合微槽道.通过对不同压力驱动下的压力与流量关系的测定，与宏观的经典泊肃叶公式做了比较，对误差的来源进行了简单分析.

参考文献：

[1]　盛森芝，徐月亭，袁辉靖.日新月异的现代流动测量技术[M].北京：北京大学出版社，2000.

[2]　UNGER M A, COIH H P, HORSEN T. Monolithic micro - fabricated valves and pumps by multiplayer soft lithography[J]. Science, 2000, (288): 113 ~ 116.

[3]　丁一刚，韩秀丽，郑家燊.液固流动引起的腐蚀和磨损的数学描述[J].郑州大学学报(工学版)，2002，23(2): 63 ~ 66.

[4]　杨龙杰.微小尺度下的液体量测与驱动[J].物理，2003，25(3): 1 ~ 10.

[5]　WHITESIDES G M, STROOCK A D, Flexible, methods for micro fluidics[J]. Phys Today, 2001, (54): 42 ~ 48.

[6]　WALSH K. Photoresist as a sacrificial layer by dissolution in acetone [J]. Proceeding of IEEE MEMS. 2001, (3): 114 ~ 117.

[7]　崔海航，李战华，靳　刚.一种 PDMS 薄膜型微阀的制备与性能分析[J].微细加工技术，2004，(3): 70 ~ 75.

[8]　BRUUS H. Theoretical Micro - fluidics[OL]. Technical University of Denmark: MIC - Department of Micro and

维普资讯 http://www.cqvip.com

Nanotechnology, 2004, 137 ~ 142.

[9] CHOI C H, JOHN K, WESTIN A, et al. Apparent slip flows in hydrophobic and hydrophobic micro - channels [J]. Physics of Fluids, 2003, 46(15): 2897 ~ 2902.

[10] WHITE F M. Viscous Fluids Flow [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1974. 241 ~ 243.

The Manufacture of A Kind of Rectangular Micro - tube and Its Flux Measurement

GUO Qiang[1,2], LI Zhen - guo[3]

(1. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 3. Department of Mechanics and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: According to the author's experiment practices, this paper gives one kind of mature manufacture methods of making rectangular micro - tubes with PDMS (Polydimethylsiloxane). The outlets and the inlets for liquid flowing across the rectangular micro - tubes were designed especially after many times of experiments. With the soft lithography technology, a silicon mode plate was made. After this, some rectangular micro - tube structures (with widths and highs of 20 - 100μm) were made on the plate surface with PDMS concretion. The geometrical precisions of these micro - tubes were observed with a 20 × 100 microscope, besides that, with given pressures, fluxes quantities passing through the rectangular micro - tubeswere measured. The results of these experiments were compared with the results of HP (Hagen - Poiseuille) equation which is one simplified shape of NS (Navier - Stokes) equation. In the end, the HP equation was found to be still applicable to rectangular micro - tubes.

Key words: chiplab micro-tube; outlet; inlet; PDMS; flux