

文章编号 1004-924X(2014)02-0406-08

通道型电磁常闭微阀结构参数优化

施缪佳^{1,2*}, 董景新¹, 谭映军², 叶雄英¹, 王春艳²

(1 清华大学精密仪器系, 北京 100084; 2 中国航天员科研训练中心, 北京 100094)

摘要: 优化了通道型电磁常闭微阀的结构参数, 以提高其工作性能。基于近似结构模型对结构参数进行理论分析; 以泄漏率为指标, 利用有限元方法仿真分析了微通道的宽度、高度, 底膜厚度, 顶膜厚度及电磁驱动机构压力等主要结构参数对泄漏率的影响。提取了经验公式, 基于正交实验法研究了结构参数对泄漏率和开启率的影响。最后, 结合理论分析、仿真和正交实验结果对微阀结构参数进行了优化。实验结果表明, 通道高度和宽度对泄漏率影响最大, 通道高度对开启率影响最大。获得最优关闭性能的结构参数组合为: 通道宽度 1 mm, 高度 0.1 mm, 底膜厚度 0.2 mm, 顶膜厚度 0.2 mm, 电磁机构压力 3×10^4 Pa。基于该结构参数组合的微阀在 10 kPa 内可以实现零泄漏及近似完全开启。该阀具有易与微流控芯片集成、低电压驱动、制作简单、无死体积等优点。

关键词: 电磁微阀; 结构参数; 泄漏率; 仿真; 正交实验

中图分类号: TH134.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142202.0406

Optimization of structure parameters of channel-type electromagnetic microvalves

SHI Liu-jia^{1,2}, DONG Jing-xin¹, TAN Ying-jun², YE Xiong-ying¹, WANG Chun-yan²

(1. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: shilj09@mails.tsinghua.edu.cn

Abstract: The structure parameters of a channel-type electromagnetic normally-closed microvalve were optimized to improve its performance. Firstly, the structure parameters were analyzed theoretically based on an approximate structure model. The impacts of main structure parameters on the leakage rate, such as the width and height of a microchannel, the thicknesses of bottom and top films, and the pressure generated by an electromagnetic mechanism were analyzed based on the Finite Element Simulation (FES), and then an empirical formula was established. On the orthogonal experiment method, the influences of the structure parameters on the leakage rate and the open rate were also researched. Finally, the structure parameters of the microvalve were optimized according to the theoretical analysis, FES and the experiment results. The experimental results show that the width and height of the microchannel have the effect on the leakage rate greatly, and the channel height effects on the open rate most. Furthermore, the optimal structure parameters of the microvalve are the width and height to be 1 mm and 0.1 mm, the bottom and top film thicknesses both to be 0.2 mm, and the pressure to be 3×10^4 Pa, respectively. On the parameters mentioned above, the microvalve has no

收稿日期: 2013-09-20; 修订日期: 2013-11-05.

基金项目: “十一五”国家科技支撑重大专项资助项目 (No. 2009BAK59B02); 航天医学基础与应用国家重点实验室重点项目 (No. SMFA11A02, No. SMFA13A03)

detectable leakage flow when the backpressure is up to 10 kPa. The microvalve shows its advantages on the low-voltage driving, zero dead volume, simple process and easy to integrate with microfluidic devices.

Key words: electromagnetic microvalve; structure parameter; leakage rate; simulation; orthogonal experiment

1 引言

随着微流控技术的进步,微流控芯片的应用已经扩展到航天生物医学研究等领域,这类特殊环境中,整个微流控系统的高度集成和小型化是必要的。流体控制部件如微阀能否与系统其它部分良好集成,并实现可靠工作是能否成功搭建集成-小型化微流控系统的关键。目前,人们已研制了各种各样的微阀^[1],按驱动方式它们大致可分为主动微阀和被动微阀两大类。主动微阀需要从外界获取能量来实现流体控制,如机械式以电磁^[2]、压电^[3]、静电^[4]、热^[5]、气^[6]等为驱动源的微阀和非机械式的相变微阀^[7]等;被动阀不需要外界输入能量,在微流控系统中一般配合微泵用作止回阀元件,如机械式的悬臂梁阀^[8]和非机械式的毛细管阀^[9]等。按阀的初始状态又可分为常开阀和常闭阀两大类。这些微阀各有优缺点,但同时具有在数十千帕时零泄漏、不污染生物样品、易组装更换、无死体积、结构较简单等优点,又能和微流控芯片主体高度集成的常闭型微阀,目前还没有看到比较理想的研究成果。

前期,作者研制了一种可与聚二甲基硅氧烷(PDMS)微流控芯片高度集成、且具有上述特性的通道型电磁常闭微阀^[10]。该阀主要由一层含有微通道的PDMS结构层和一个电磁驱动机构组成。考虑该阀的闭锁和开启性能与微阀的结构参数密切相关,本文以微阀的泄漏率和开启率为优化指标,结合理论分析、仿真和实验研究,对微阀结构参数进行了优化分析。基于实验获得的最小泄漏率和最大开启率的优化结构参数组合并通过有限元仿真提炼泄漏率关于结构参数的经验公式,指导优化了微阀性能。

2 微阀设计、制作及实验

2.1 原理与结构设计

通道型电磁常闭微阀的工作原理如图1所

示,PDMS结构层包括一段微通道,其上、下游可以为任意PDMS微流控芯片结构,该段微通道的顶膜和底膜分别与压板和电磁驱动机构压头紧密贴合。常态下,压头将电磁机构内部压簧向上的预紧力传递给微通道底膜,底膜向上变形,与受到上方压板抵制的顶膜紧密贴合,微阀关闭;向电磁铁线圈中通以适当的直流电流,电磁力克服压簧预紧力拉下压头,底膜离开顶膜,微阀开启。根据已有研究^[11]和我们前期的仿真^[10],将通道截面取为弧形以使通道完全闭合。

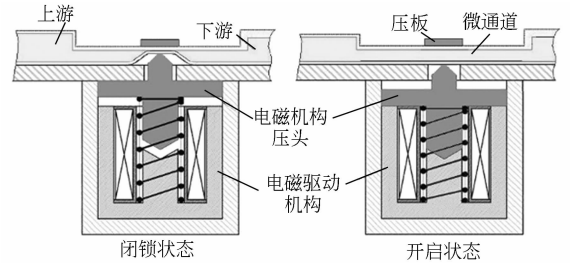
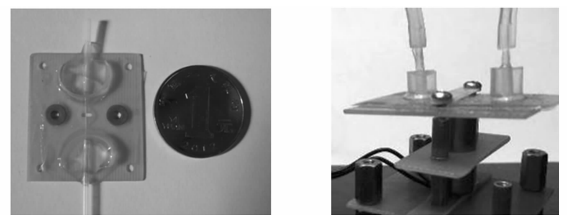


图1 微阀工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the microvalve

2.2 工艺实现

微通道结构层的加工基于PDMS成型工艺。精密加工制得所需微通道宽度和高度的浇铸模具;PDMS前聚物(Sylgard 184, Dow Corning)与其固化剂按质量比10:1混合脱气后分别倾倒入浇铸模具和平整硅片上,控制匀胶机转速和旋涂时间,得到预定厚度的上结构层及底膜层,上结构层固化后脱模,粘接到预固化的底膜上,得到微通



(a) PDMS 结构层 (b) 微阀实物
(a) PDMS structure (b) Prototype of microvalves

图2 PDMS结构层及微阀实物

Fig. 2 Prototypes of PDMS structure and microvalves

道结构层;通道上下游安装进出口,将整个结构层粘接到具有电磁机构安装孔的基板上,即得完整 PDMS 结构层,如图 2(a)所示。将压板、完整 PDMS 结构层和电磁机构按图 1 所示原理用螺栓连接,调节压簧压缩量获得所需电磁机构压力,即得到通道型电磁常闭微阀,如图 2(b)所示。

2.3 微阀开闭性能测试方法

通道顶膜和底膜能否完全闭合是实现微阀关断的关键,微阀能否充分开启也需要考虑,通道几何结构参数和电磁机构压力是影响微阀开闭的关键因素。若几何参数和压力控制不当,预期闭合的通道截面将出现泄漏区,如图 3 所示。若仅保

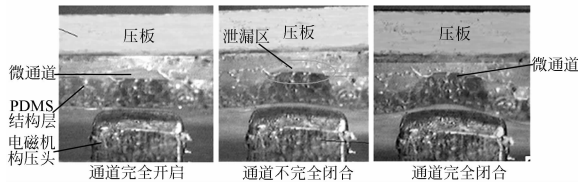


图 3 微阀压头作用截面的 CCD 照片

Fig. 3 Photographs of plunger packed-channel cross-section

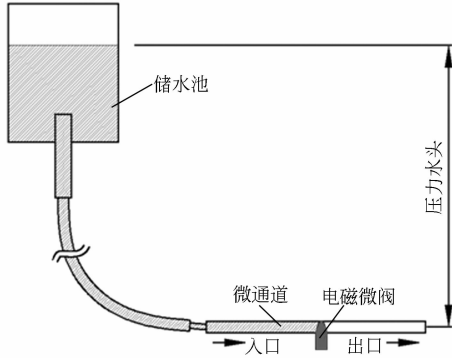


图 4 微阀开闭性能测试装置示意图

Fig. 4 Schematic of measurement setup for microvalve

证零泄漏,又可能导致不能充分开启。设计制作了不同参数的微阀,测试其泄漏率和开启率,测试装置如图 4 所示,在上游施加一定水压,分别测量未安装微阀、微阀关闭和开启时下游的体积流量 Q 、 Q_L 和 Q_o ,则微阀泄漏率和开启率分别定义为 $\eta_v = (Q_L/Q) \times 100\%$ 及 $\xi_v = (Q_o/Q) \times 100\%$

3 理论分析

微通道底膜受到电磁机构压头作用向上弯

曲,顶膜受到经底膜传递的力也发生变形。

底膜刚受到压头挤压时,通道正下方的部分在压力作用下发生挠曲变形,此时的底膜受力情况可近似简化为两侧固支、压头作用处受均布载荷的无限长矩形薄板。根据大挠度薄板弯曲理论,薄膜变形 w 与通道宽度 a ,薄膜厚度 t 和薄膜所受载荷 q 之间的关系为:

$$\frac{\pi^5 E t}{16(1-\mu^2)a^4} w^3 + \frac{\pi^5 E t^3}{48(1-\mu^2)a^4} w = q, \quad (1)$$

其中: E 和 μ 分别为材料的杨氏模量和泊松比。

分别求 w 对 t 、 a 、 q 的偏导得: $\frac{\partial w}{\partial t} < 0$, $\frac{\partial w}{\partial a} > 0$, $\frac{\partial w}{\partial q}$

> 0 ,故为使底膜变形增大,应减小膜厚、增大通道宽度和载荷。由各变量的数量级(长度 m ,力 N) w 、 t 、 $a \sim 10^{-4}$, $q \sim 10^5$,以及 PDMS 的 $E = 0.75$ MPa 和 $\mu = 0.499$ 可知,任何情况下均有 $\frac{\partial w}{\partial t} \ll \frac{\partial w}{\partial a}$

和 $\left| \frac{\partial w}{\partial t} \right| > \frac{\partial w}{\partial q}$,即通道宽度和膜厚变化对薄膜变形的影响大于载荷变化的影响。

对于顶膜,以及压头向上挤压至其两侧部位也接触到底膜时,影响薄膜形变的主要因素为膜厚应变正比于压头对整个通道层的压力,即 $\Delta t/t = q/E$,其中, t 和 Δt 分别为薄膜厚度及其变化, q 为均布载荷,可见为使薄膜变形 Δt 增大,应增大膜厚和载荷。

综上,影响微通道闭合性能的主要结构参数为微通道宽度 a ,顶膜厚度 t_1 ,底膜厚度 t_2 和电磁机构压力 q 。此外,减小通道高度 h 利于通道闭合,但其选取需要综合考虑所需流量及加工工艺限制等因素。

4 仿真计算分析

为了进一步明确各结构参数对微阀闭锁性能的影响,并进行量化分析,基于有限元仿真(ANSYS,12.1),根据相似准则函数理论^[12],提炼泄漏率关于各结构参数的经验公式。对于 2.3 节定义的微阀泄漏率 $\eta_v = (Q_L/Q) \times 100\%$,因微通道为等直通渠道,故在微阀闭锁时可近似将微通道中的流动视为不可压缩流体的稳定流动,则体积流量之比可近似等于流体流过截面面积之比,现重

新将微阀泄漏率定义为 $\eta = (S_L/S) \times 100\%$, S_L 和 S 分别为泄漏区和整个微通道的截面面积,如图 5 所示。

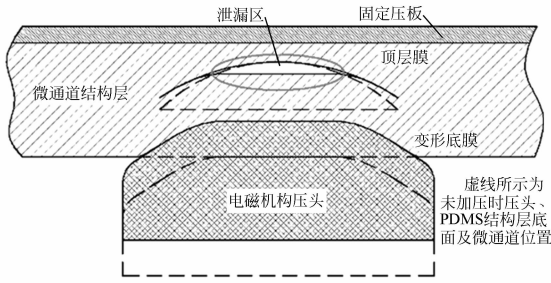


图 5 微通道泄漏区示意图

Fig. 5 Schematic of leakage area

影响微阀泄漏率 η 的结构参数为:通道宽度 a ,顶膜厚度 t_1 ,底膜厚度 t_2 ,通道高度 h ,电磁机构压力 q 和 PDMS 弹性模量 E 。设泄漏率 η 与前述结构参数之间的函数关系为:

$$\eta = f(a, E, h, q, t_1, t_2) \quad (2)$$

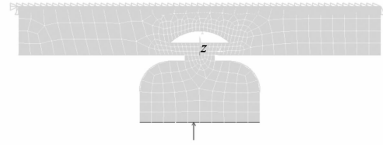
根据相似第二定理,以 h 和 E 为基本物理量,将式(2)改写为:

$$\eta = f\left(\frac{a}{h}, \frac{t_1}{h}, \frac{t_2}{h}, \frac{q}{E}\right) \quad (3)$$

以 η 为因变量,综合考虑 PDMS 材料特性、微流控芯片尺寸,将 h 和 E 的值分别固定为 $200 \mu\text{m}$ 和 0.75 MPa ,并在与 PDMS 芯片参数相匹配的取值范围内以 a, t_1, t_2, q 为自变量进行仿真实验,在此基础上总结 η 关于各变量的相似型经验公式。

微通道为等直通道,且压头顶部近似为长方体,故可选取受压头挤压通道部分的任一截面作为分析对象,用 2D 仿真近似实际情况。固定压板对顶膜的抵制简化为顶膜上表面 X 和 Y 方向的位移约束;通道上下底面之间及压头与底膜下表面之间均有接触和力的传递,故在这两对接触面间分别设置了接触对,具体建模和载荷加载情况见图 6(a)(实验用电磁机构压头中心处有一 $100 \mu\text{m}$ 高的小凸起,故按实际情况建模)。微通道结构材料 PDMS 和压头材料不锈钢的弹性模量 E 和泊松比 μ 分别为 0.75 MPa , 0.499 , 206 GPa 和 0.3 。根据前期研究初步确定的结构参数以及相似准则函数理论,为 4 个自变量确定选择基准值依次为: $a' = 1 \text{ mm}$, $t_1' = 200 \mu\text{m}$, $t_2' = 200$

μm , $q' = 2 \times 10^4 \text{ Pa}$,选择辅助值为 $t_1'' = 400 \mu\text{m}$ 。基于选择基准值(选择辅助值)仿真时,针对任一自变量进行研究,其余变量的数值均固定为相应的选择基准值 $\frac{a'}{h}, \frac{t_1'}{h}, \frac{t_2'}{h}, \frac{q'}{E}$ (选择辅助值 $\frac{a''}{h}, \frac{t_1''}{h}, \frac{t_2''}{h}, \frac{q''}{E}$)。



(a) ANSYS 建模及加载

(a) ANSYS modeling and loading



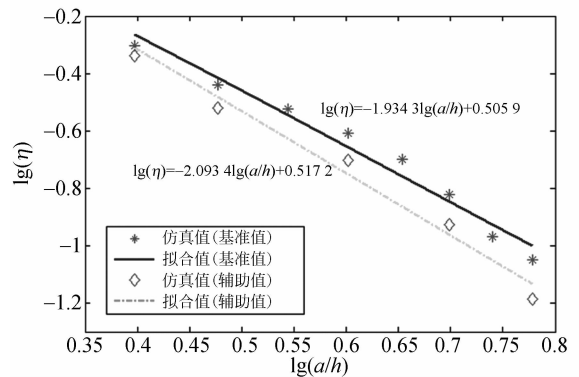
(b) ANSYS 位移云图

(b) ANSYS displacement image

图 6 ANSYS 建模及典型结果

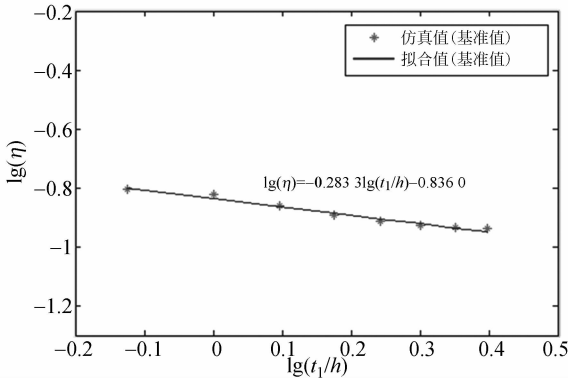
Fig. 6 ANSYS modeling and representative result

进行 ANSYS-2D 接触仿真,典型微通道位移云图如图 6(b)所示,进一步得到基于选择基准值和选择辅助值的泄漏率计算结果,如图 7(a)~(d)所示,图中横纵坐标均为对数坐标。7 条图线均有较好的线性。从图中可见,泄漏率 η 随宽度 a 、顶膜 t_1 、压力 q 增大而减小,随底膜 t_2 增大而增大,且各参量变化对泄漏率变化的影响程度从



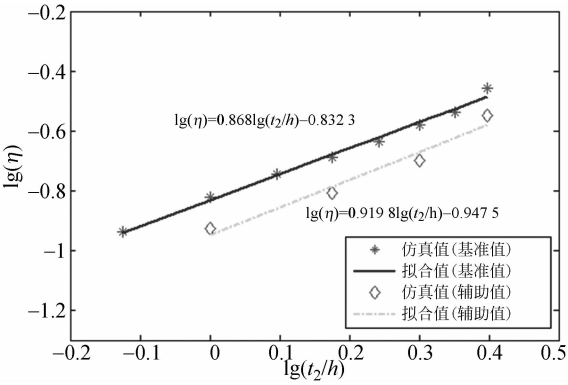
(a) (a/h) 与泄漏率的双对数关系

(a) Leakage rate as a function of (a/h)



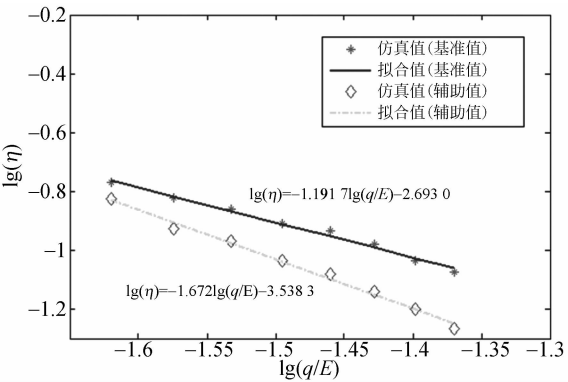
(b) (t_1/h) 与泄漏率的双对数关系

(b) Leakage rate as a function of (t_1/h)



(c) (t_2/h) 与泄漏率的双对数关系

(c) Leakage rate as a function of (t_2/h)



(d) (q/E) 与泄漏率的双对数关系

(d) Leakage rate as a function of (q/E)

图 7 各自变量与泄漏率的双对数关系

Fig. 7 Leakage rate as a function of independent variables

大到小依次为:宽度 $a >$ 压力 $q \approx$ 底膜 $t_2 >$ 顶膜 t_1 。

同时,对各自变量,基于选择基准值和选择辅

助值得到的“泄漏率-变量”双对数曲线基本平行,故根据相似准则函数理论判断准则,此时的经验公式可近似为乘积关系,即:

$$\eta = f\left(\frac{a}{h}, \frac{t_1}{h}, \frac{t_2}{h}, \frac{q}{E}\right) = c_1 \left(\frac{a}{h}\right)^{k_1} \cdot c_2 \left(\frac{t_1}{h}\right)^{k_2} \cdot c_3 \left(\frac{t_2}{h}\right)^{k_3} \cdot c_4 \left(\frac{q}{E}\right)^{k_4} \quad (4)$$

其中: $c_i, k_i (i=1, 2, 3, 4)$ 依次对应于图 7 中选择基准值对应图线的线性拟合系数,具体数值如表 1 所示。

表 1 “泄漏率-变量”双对数曲线线性拟合系数

Tab.1 Linear coefficients of leakage rate-variables functions

$c_i (i=1, 2, 3, 4)$	$k_i (i=1, 2, 3, 4)$
3.205 5	-1.934 3
0.145 9	-0.283 3
0.141 7	0.868 0
0.002 0	-1.191 7

将表 1 中系数数值代入式(4),到得基于仿真数据取值范围内泄漏率的经验公式:

$$\eta = 0.040 5 \frac{t_2^{0.8680} h^{1.349 6} E^{1.191 7}}{a^{1.934 3} t_1^{0.283 3} q^{1.191 7}} \quad (5)$$

5 正交实验设计与分析

针对实际加工出的微阀,基于正交实验理论,本文以通道宽度 a ,顶膜厚度 t_1 ,底膜厚度 t_2 ,通道高度 h 和电磁机构压力 q 为因素,泄漏率和开启率为指标,研究了微阀结构参数对微阀闭锁和开启性能的影响,并对式(5)进行了实验验证。

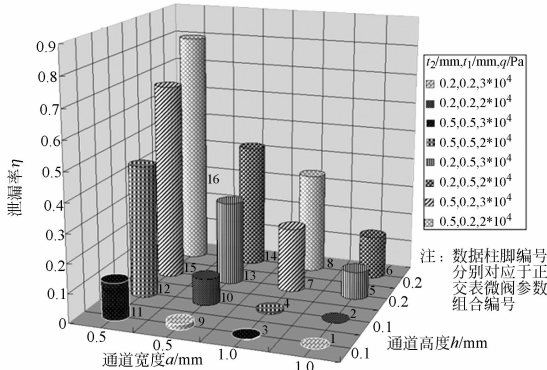
5.1 正交实验设计与实验结果

基于 PDMS 芯片结构参数,以及 ANSYS 仿真计算的微阀结构参数取值范围,5 个结构参数的因素水平选择如表 2 所示,5 个因素 2 个水平的搭配参照标准 L16 正交表^[13]的第 1、2、4、6、8 列,对应于 16 组结构参数组合加工 16 个微阀。测试水压为 10 kPa,16 个微阀的泄漏率和开启率测量结果分别如图 8(a)和 8(b)所示,各数据柱代表的微阀在两图中的位置依次对应。

表 2 正交实验因素水平

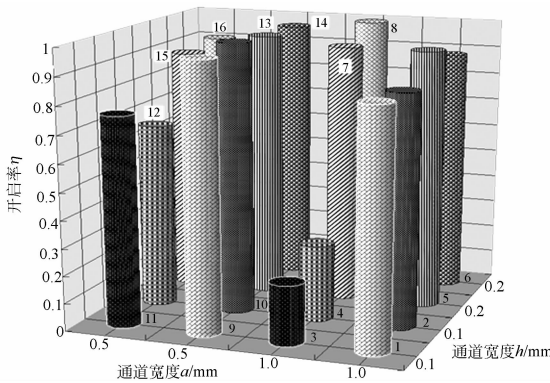
Tab.2 Factor-level design of orthogonal experiment

水平	A	B	C	D	E
	通道宽度	通道高度	底膜厚度	顶膜厚度	压头压力
	a/mm	h/mm	t_2/mm	t_1/mm	$q/\times 10^4 \text{ Pa}$
1	1	0.1	0.2	0.2	3
2	0.5	0.2	0.5	0.5	2



(a) 泄漏率测试结果

(a) Measurement results of leakage rate



(b) 开启率测试结果

(b) Measurement results of open rate

图 8 正交实验结果

Fig. 8 Results of orthogonal experiments

分别计算以泄漏率和开启率为指标时因素 j ($j=1,2,3,4,5$ 分别对应 A,B,C,D,E) 在水平 i ($i=1,2$) 时泄漏率和开启率的平均值 δ_{ij} , 以及因素 j 对应的极差 T_j , 结果如表 3 和表 4。

5.2 正交实验直观分析

表 3 中, $\delta_{11} < \delta_{21}, \delta_{12} < \delta_{22}, \delta_{13} < \delta_{23}, \delta_{24} < \delta_{14}, \delta_{15} < \delta_{25}$, 故实验所选参数范围内可获得最小泄漏率的参数组合为 $A_1B_1C_1D_2E_1$, 即通道宽 1 mm, 通道高 0.1 mm, 底膜厚 0.2 mm, 顶膜厚 0.5

mm, 电磁机构压力 $3 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。又 $T_2 > T_1 > T_3 > T_5 > T_4$, 故对泄漏率的影响从大到小的结构参数依次为: 通道高 $h >$ 通道宽 $a >$ 底膜厚 $t_2 >$ 压力 $q >$ 顶膜厚 t_1 ; 同理, 由表 4 可知获得最大开启率的参数组合为 $A_2B_2C_1D_1E_1$, 即通道宽 0.5 mm, 通道高 0.2 mm, 底膜厚 0.2 mm, 顶膜厚 0.2 mm, 电磁机构压力 $3 \times 10^4 \text{ Pa}$, 对开启率影响从大到小的结构参数依次为: 通道高 $h >$ 底膜厚 $t_2 >$ 顶膜厚 $t_1 >$ 通道宽 $a >$ 压力 q , 且因极差 T_5 非常小, 可认为压力变化对开启率几乎没有影响。

表 3 泄漏率正交分析结果

Tab.3 Analysis results of leakage rate

j	δ_{1j}	δ_{2j}	T_j
1	0.407 1	1.438 9	1.031 8
2	0.348 5	1.497 5	1.149 0
3	0.532 0	1.314 0	0.782 0
4	1.075 5	0.770 5	0.305 1
5	0.710 7	1.135 3	0.424 6

表 4 开启率正交分析结果

Tab.4 Analysis results of open rate

j	δ_{1j}	δ_{2j}	T_j
1	2.981 9	3.553 6	0.571 6
2	2.791 3	3.744 2	0.952 8
3	3.707 8	2.827 7	0.880 2
4	3.692 5	2.843 0	0.849 5
5	3.271 1	3.264 5	0.006 6

5.3 实验结果与经验公式的对比

依次求 16 个组合中两个因素相同时的泄漏率平均值, 以表 5 宽度 a 和高度 h 相同时为例, 并绘制如图 9 的二元图(部分)。图中每 2 条图线都没有交叉, 故实验所选参数范围内各结构参数对泄漏率的影响是相互独立的。又由第 4 节中的仿真计算结果可知, 各结构参数对泄漏率的影响基本成线性关系, 本实验中各参数的两水平取值分别为该参数取值范围接近端点的值, 故可近似认为在实验所选参数范围内当其他参数取值固定时每个参数对泄漏率的影响成单一趋势。具体为: 通道宽度 a 、顶膜厚度 t_1 、电磁机构压力 q 增加, 泄漏率减小; 底膜厚度 t_2 、通道高度 h 增加, 泄漏率增大。该结论与经验公式(5)指出的泄漏率随各结构参数变化的趋势一致。再将通道高度 $h =$

0.2 mm 的 8 组结构参数代入式(5)分别计算泄漏率并与对应的实测结果标示于如图 10,可见经验公式的预测结果和实验结果比较接近。综上,可认为根据仿真结果得到的经验公式在仿真所用结构参数选择范围内对微阀泄漏率的预测比较准确。

表 5 通道宽度和通道高度对应泄漏率二元表

Tab. 5 Two-variable table of average leakage rate

通道宽/mm	通道高/mm	试验号	平均泄漏率
1	0.1	1,2,3,4	0.001 7
1	0.2	5,6,7,8	0.201 8
0.5	0.1	9,10,11,12	0.172 5
0.5	0.2	13,14,15,16	0.546 9

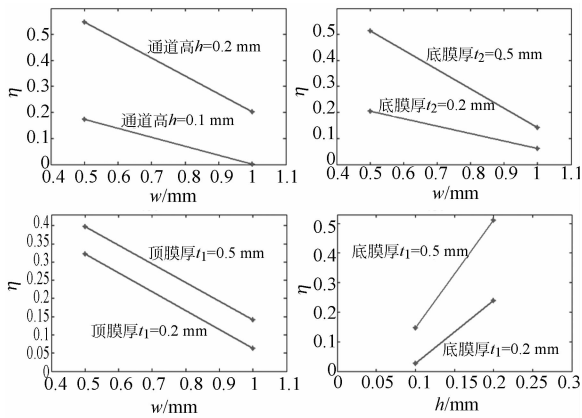


图 9 各对因素对应泄漏率二元图

Fig. 9 Two-variable figure of average leakage rate

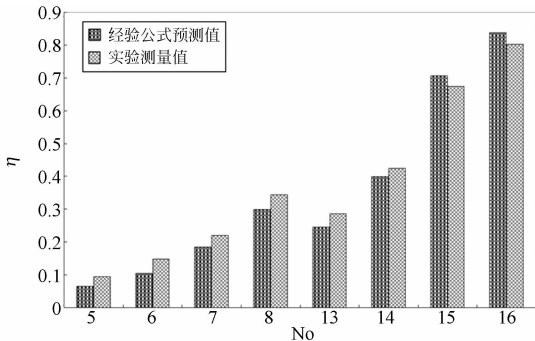


图 10 微阀泄漏率预测值与实测值对比

Fig. 10 Estimated value and measured value of leakage rate

6 结构参数优化分析

根据仿真结果得到的经验公式和正交实验直观分析的结果均表明,较大的通道宽度、顶膜厚度

和电磁机构压力及较小的通道高度和底膜厚度可以获得较小泄漏率;同时,正交实验结果表明,较大的通道高度以及较小的通道宽度、顶膜厚度和底膜厚度可以获得较大开启率。综合考虑微流控芯片尺寸和电磁机构功率的限制以及工艺实现难易程度,结构参数不能无限地向着获得最佳开闭性能的趋势方向选取,且经验公式也仅在所选仿真结构参数范围内才有效,故最终的优化参数组合在表 2 所列水平范围内选取。尽管获得最小泄漏率和最大开启率的参数组合不一致,但考虑到微流控系统正常工作的关键一般是零泄漏,开启不充分仅会造成流量的一定损失,故应重点保证较小的泄漏率。最终确定获得微阀最优开闭性能的结构参数组合为:通道宽度 1 mm,通道高度 0.1 mm,顶膜厚度 0.2 mm,底膜厚度 0.2 mm,电磁机构压力 3×10^4 Pa。图 8 中 1 号微阀即对应该组参数,其泄漏率为 0,其开启率也达到了 85.72%,说明根据经验公式和正交实验结果选取的最佳参数组合可以获得较好的微阀开闭性能。

对于经验公式,其预测的泄漏率随各结构参数的变化趋势与理论分析和正交实验的结论均一致;公式中变量幂次的大小指出通道宽度是对泄漏率影响最大的因素,该结论也和理论、实验分析一致;具体结构参数数值代入经验公式计算出的泄漏率与实验所得数据的趋势一致,数值上也比较接近,说明本文提取的经验公式在其取值范围内是有效的。将通道高 0.1 mm 的参数组合代入经验公式,计算出的泄漏率与实测值误差比较大,这是由相似型经验公式主要在其取值范围内才比较准确的局限性决定的。

7 结论

本文针对通道型电磁常闭微阀,研究了结构参数对泄漏率及开启率的影响。基于大挠度薄板弯曲理论及材料力学相关理论初步分析得到主要影响因素包括:微通道高度、微通道宽度,底膜厚度,电磁机构压力、顶膜厚度和 PDMS 弹性模量,并初步预测了泄漏率随各结构参数改变的变化趋势。在此基础上,基于有限元仿真结果,根据相似原理提炼了所选参数范围内适用的经验公式。根据正交实验所得数据,基于正交直观分析法分析了各结构参数影响微阀开启和关闭性能的重要程

度,并获得了能实现最佳性能的结构参数组合。结合理论分析、经验公式预测和正交实验结果得到:对泄漏率影响较大的结构参数为微通道高度、微通道宽度和底膜厚度。以保证较小的泄漏率为选取依据,确定获得最优开闭性能的结构参数组合为:通道宽度 1 mm,通道高度 0.1 mm,底膜厚

度 0.2 mm,顶膜厚度 0.2 mm,电磁机构压力 3×10^4 Pa。选用该组参数的微阀,在 10 kPa 的压力内,可以实现零泄漏及很好的开启。今后还需针对得到的对泄漏率影响较大的结构参数,选取更多的参数水平进行进一步的实验分析,以获得更细化的优化参数。

参考文献:

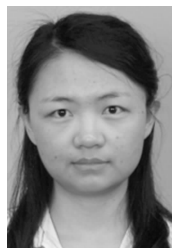
- [1] KWANG W O, CHONG H A. A review of microvalves[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16:13-39.
- [2] KWANG W O, RONG R, CHONG H A. Miniaturization of pinch-type valves and pumps for practical micro total analysis system integration [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15:2449-2455.
- [3] TAO L, ALLAN T, EVANS S C, *et al.*. Compact, power-efficient architectures using microvalves and microsensors, for intrathecal, insulin, and other drug delivery systems [J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2012, 64:1639-1649.
- [4] KAZUSHI Y, SHUJI T, YOSUKE H, *et al.* Normally closed electrostatic microvalve with pressure balance mechanism for portable fuel cell application [J]. *Sensors and Actuators A*, 2010, 157: 299-306.
- [5] FENG G H, CHOU Y C. Fabrication and characterization of thermally driven fast turn-on microvalve with adjustable backpressure design[J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, 88: 187-194.
- [6] SIMONE G, PEROZZIELLO G, SARDELLA G, *et al.*. A microvalve for hybrid microfluidic systems [J]. *Microsyst Technol*, 2010, 16:1269-1276.
- [7] NEUMANN C, VOIGT A, PIRES L. Design and characterization of a platform for thermal actuation of up to 588 microfluidic valves [J]. *Microfluid Nanofluid*, 2013, 14:177-186.
- [8] 赵明丽,黄琴,张玮,等. 悬臂梁阀单腔压电泵设计方法研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4):

607-611.

ZHAO M L, HUANG Q, ZHANG W, *et al.*. Investigation on design method of single chamber piezoelectric pump with cantilever valve [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 607-611. (in Chinese)

- [9] 杜新,张平,刘永顺,等. 基于 PDMS 和玻璃材料的毛细管被动阀临界压力分析[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1852-1858.
- DU X, ZHANG P, LIU Y SH, *et al.*. Burst pressure of capillary burst valve based on glass and PDMS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1852-1858.
- [10] SHI L J, TAN Y J, DONG J X, *et al.*. Design and optimization of an electromagnetic microvalve for portable cell culture biochips [J]. *The 3rd International Conference on Advances in Microfluidics and Nanofluidics*, 2012: 62-64.
- [11] NOBUYUKI F, WEI G, SHUICHI T. Rapid prototyping of microstructures with bell-shaped cross-sections and its application to deformation-based microfluidic valves [J]. *Advanced Materials*, 2004, 16(15):1320-1323.
- [12] 徐挺. 相似方法及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
- XU T. *Similarity Method and Its Applications* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [13] 金良超. 正交设计与多指标分析[M]. 北京:中国铁道出版社,1988.
- JIN L CH. *Orthogonal Designs and Multifactor Analysis* [M]. Beijing: China Railway Press, 1988. (in Chinese)

作者简介:



施镠佳(1986—),女,云南楚雄人,博士研究生,研究实习员,2007年于清华大学获得学士学位,主要从事微机电系统及微流控方面的研究。E-mail: shilj09@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介:



董景新(1948—),男,上海人,教授,博士生导师,1981年于清华大学获得硕士学位,主要从事机电控制及自动化、导航仪器及控制等方面的研究。E-mail: dongjx@tsinghua. edu. cn