

Numerical Stimulation on Operating Process of Ice Valve for Controlling Micro/ Nano Fluidics

YANG Yang, LIU Jing*

(Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: As a new flow component, the ice valve was developed to close or open the liquid flow running inside a micro/ nano channel based on the freeze/ thawing phase change of the working fluid using a thermoelectric cooling device. Without any leakage, being very clean, causing no pollution to the solution itself and easily electricity-controllable, the ice valve would find significant applications in the control of micro or nano fluidics. Following the working principle of ice valve, this paper is aimed to numerically simulate the operation behavior of the ice valve by using the corresponding fluid mechanics and heat transfer models. Parametric studies were also performed from which the comprehensive working features and controlling activities can be well understood.

Key words: micro valve; ice valve; numerical simulation; micro/ nano fluidics

EEACC:11982

微/ 纳米流体控制用冰阀器件执行过程的数值模拟

杨 阳, 刘 静*

(中国科学院理化技术研究所, 北京 100080)

摘 要: 冰阀是一种利用微/ 纳米流道内流体自身的冻结/ 融化相变过程来实现关断或开启作用的新型流体元件。由于无运动部件、无泄漏、不会引起流体污染且易于实现电控等优点, 该器件在微/ 纳米流体系统的控制中具有重要的应用前景。针对冰阀的工作原理, 基于相应的流体力学及传热学数学模型, 从数值计算角度对微流道冰阀器件的执行过程进行了模拟, 并开展了相应的参数化研究, 在此基础上可对冰阀的工作状态及控制过程更好地加以理解和剖析。

关键词: 微型阀门; 冰阀; 数值模拟; 微/ 纳米流体

中图分类号: TB126

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2006)05-2022-03

微/ 纳米流体器件是微机电系统的一个重要分支。由于它具有尺寸微小, 无效体积小, 功耗低, 控制精度高, 响应速度快等特点, 且易于加工及实现微泵、微阀、微流量传感器等流体器件与控制电路的集成, 因而在许多领域有着广泛的应用^[1]。在过去数十年里, 随着微流体系统在 DNA 测序、药物筛选和运输、体内环境检测以及其他生物技术中的广泛应用^[2], 化学分析与检测过程的微型化已成为微系统技术中最重要的研究领域^[3-4]。在各种微化学分析与检测系统中, 需要精确并有效的控制反应物和样品

试剂在系统中的输运、混合、反应等活动^[5-6]。因此, 这就需要借助大量微阀门同时或顺次的执行来保证, 而阀门装置必须具有体积小, 耗能低, 易与系统结合等特点^[7]; 此外, 这类系统还要求可靠、高效、适宜微加工及易与控制系统整合^[8]。到目前为止, 微阀门可分为被动型(无驱动装置)和主动型两类^[3]。前者可与完整的器件整合, 但不能用作密封或对流体加以主动控制。后者则主要借鉴宏观尺度阀门的工作原理, 利用压电、静电、热力及电磁等驱动方式实现^[3,7,9-10]。以上各类阀门均存在成本高且由于有运

收稿日期: 2006-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助(50575219)

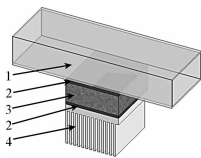
作者简介: 杨 阳(1982-), 女, 在读博士生, 从事微/ 纳米流体研究, yangy@mail.ipc.ac.cn;

刘 静(1969-), 男, 研究员, 博士生导师(通讯联系人), 从事微/ 纳米流体研究, jliu@cl.cryo.ac.cn

动部件而导致阀门可靠性差的问题.

2004 年,Gui 和 Liu 提出了一种采用半导体制冷器实现的基于流道内流体的自身相变来完成关闭/开启作用的纯电控型冰阀^[11]. 这一技术的提出解决了传统阀门泄漏的问题,同时不会对流体造成污染. 冰阀的工作原理十分简单:在需要关闭阀门时,可对流道中的流体进行主动冷却,使之在极短的时间内迅速冻结从而堵塞流道;在需要开启阀门的时候,则加热已冻结的部位使之融化,以恢复流体的流动状态. 实际上,在冰阀出现以前,就有研究人员利用石蜡的相变特点设计并制造出多种阀门,如由热电驱动的内嵌阀门^[12],以及一次性热驱动石蜡相变阀^[10]等. 虽然这些阀门在一定程度上弥补了传统的机械型微阀易泄漏、能耗大、不易与微系统整合的缺点,但仍然存在制造工艺复杂、可重复利用性差等缺点. 且由于石蜡在微管道内充当塞子的作用,容易与管道流体混合,污染反应物. 与此相比,冰阀工作过程中则无须运动部件,且由于借助于流体自身的相变来实现阀门作用,因此不会对流体引入污染,同时也彻底地避免了泄露问题. 特别是,流道尺寸越小时如处于纳米尺度,冰阀越易于工作,而这在采用其他原理实现的机械式阀门很难被实际制作出来. 由于这些特点,冰阀在需要大量微型阀门的微化学分析与检测系统或微流体芯片中,具有重要的应用前景.

一个典型的冰阀结构如图 1 所示,其主要部件为:热电冷却装置(双向)、流体流道、翅片散热器. 前期,冰阀虽已经过相应的实验验证^[11],但尚无法知晓冰阀作用下流道中流体的各种物理场的具体状态,因此本文从数值计算的途径,对冰阀的工作过程进行模拟,以期考察冰阀流道内的各种流动和热学状况.



1. 流道 2. 绝热层 3. 热电冷却装置 4. 翅片散热器

图 1 冰阀结构示意图

1 数值模拟及结果

这里,冰阀计算区域为图 1 所示的矩形流道,其尺度为 400 μm × 200 μm × 1 200 μm,在流道中部实施冷却或加热,流体从左端流入流道,从右端流出. 边界条件设置如下:左端为入口条件;右端为出口条件;流道底面中部设置为第二类热边界条件,即

给定热流量,在阀门关闭过程中,热流量取为负值,在阀门打开过程中,热流量则取为正值;其余壁面均设置为绝热. 计算过程借助计算流体力学通用软件——Fluent 完成.

1.1 冰阀典型执行过程

图 2、3 反映的是冰阀的一个典型执行工作过程的数值模拟结果. 其中,图 2 为冰阀冻结中流场中间截面上液体冻结与熔化的过程示意图,图中红色区域代表流道中介质的液体状态,蓝色区域代表该介质的固体状态. 图 2 (a)、2 (b) 分别反映了冰阀关闭及打开的过程. 冰阀在关闭过程中使液体从底部开始冻结,随着时间的延续,冻结部位逐渐向上扩增,最终将流道堵塞;在打开过程中,冻结的固体从底部开始熔化,随着时间的延续冻结部位逐渐向上减小,最终消失而使流道恢复通畅. 图 3 为冰阀工作过程中流场中液体速度场分布,图中红色区域代表流道中介质流动速度的峰值,蓝色区域代表该介质的流动速度为零,图 3 (a) 为冰阀关闭阀门的过程,随着流动液体冻结凝固,使得流道变窄,因此在流道上部出现速度峰值. 图 3 (b) 为冰阀打开阀门的过程,随着冻结的液体熔化,流道由堵塞变为通常,在流道下部出现速度峰值.

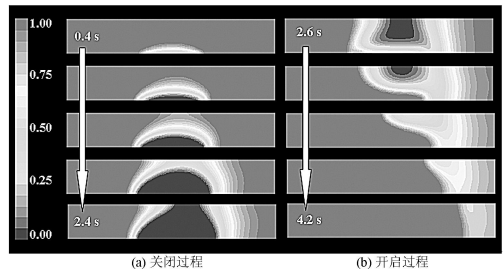


图 2 冰阀工作过程示意图

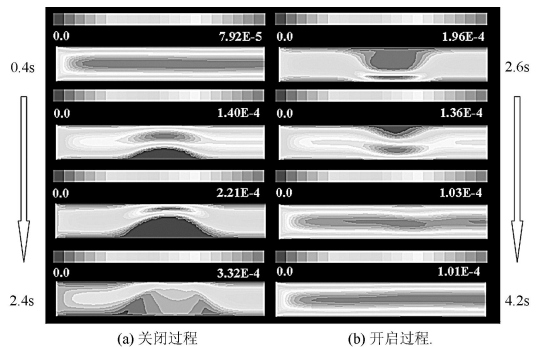


图 3 冰阀工作过程流场示意图

由于对冰阀的控制主要通过控制流体的流动速度和冰阀的制冷量来实现,当冰阀处于不同的工作介质中时,工作状态也会出现相应变动. 因此根据上述对冰阀工作原理和过程的数值模拟,将展开以下参数化研究,以期对冰阀的工作状态及精确控制

做进一步研究.

1.2 流动速度对冰阀的影响

图 4(a)为冰阀在制冷量为 $5E4 \text{ W/m}^2$ 工况下液体冻结时流道截面图. 从中可见, 当具有相同的制冷量并使用相同介质时, 选取不同的流体入口速度, 流道中液体冻结的形状十分相似, 但堵塞时间如图 4(b) 所示, 入口速度为 $2E-5 \text{ m/s}$ 时, 堵塞时间为 8.6 s ; 入口速度为 $1E-5 \text{ m/s}$ 时, 堵塞时间为 8.9 s ; 入口速度为 $5E-6 \text{ m/s}$ 时, 堵塞时间为 9.0 s . 随着速度的增大, 冰阀关闭的时间也随之延长.

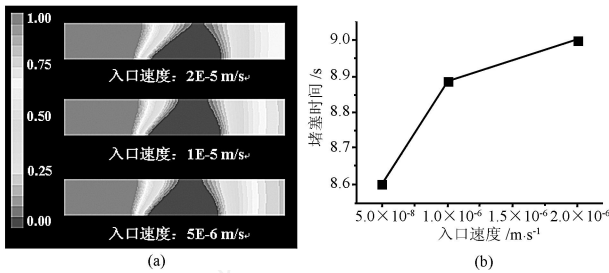


图 4

1.3 制冷量对冰阀的影响

当流体介质及其入口速度相同时, 改变冰阀的制冷量, 流道中的冻结状态如图 5 所示. 入口速度为 $5E-5 \text{ m/s}$, 当制冷量为 $1E5 \text{ W/m}^2$ 时, 流道在 1.1 s 时便被冰阀关闭; 当制冷量为 $5E4 \text{ W/m}^2$ 时, 流道在 2.4 s 时被冰阀关闭, 比制冷量为 $1E5 \text{ W/m}^2$ 时增加一倍多; 当制冷量为 $1E4 \text{ W/m}^2$ 和 $5E3 \text{ W/m}^2$ 时, 计算至 60 s 时流道中的液体仍然没有冻结, 说明在这种情况下冰阀已失去功效, 因此在实际应用中应避免这类情况发生.

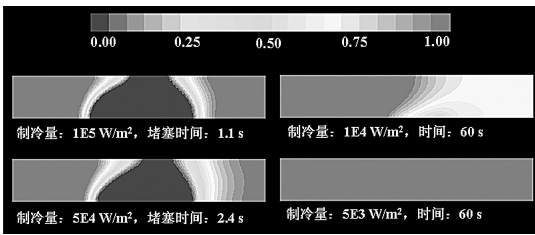


图 5 冰阀在入口速度为 $5E-5 \text{ m/s}$ 工况下流道中液体冻结示意图

1.4 流体介质对冰阀的影响

图 6 为介质分别采用苯、乙二醇和水时, 在相同来流速度和制冷量的情况下堵塞流道后的截面图; 表 1 列出了这三种介质的熔解热、凝固点与堵塞时间. 由图 6 和表 1 可以看出, 不同介质在同样冰阀的作用下, 由于自身的物理性质不同导致介质冻结的形状和堵塞流道所需的时间各不相同. 因此当冰阀的工作介质不同时, 应该根据介质的物理性质设置流道的入口速度和制冷量, 以更加

准确的控制冰阀.

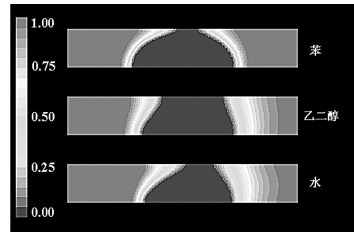


图 6 冰阀在不同介质下工作时流道中液体冻结示意图

表 1 各种介质的熔解热、凝固点与其在冰阀中冻结的时间

	熔解热/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	凝固点/ K	堵塞时间/ s
苯	1.26E5	278.5	7.26
乙二醇	1.87E5	261.5	1.98
水	3.24E5	273.0	2.40

2 结束语

本文通过数值模拟, 研究了冰阀的详细工作过程, 并考察了几类重要参数对冰阀执行过程的影响规律. 这些结果对于操作实际的微/ 纳米流体冰阀具有积极的参考价值, 在此基础上可望发展出冰阀器件的优化设计工具.

3 致谢

感谢国家自然科学基金(50575219)资助.

参考文献:

- [1] 王立文, 高殿荣. 液压与气动[J], 2005 年第 10 期: 1-4
- [2] Kozicki M, N, Maroufkhani P, Mitkova M, Superlattices and Microstructures[J], 2003, 34:467-473
- [3] Pal R, Yang M, Johnson B, N, Burke D, T, Burns M, A, Anal. Chem[J], 2004, 76:3740-3748
- [4] Niu X, Z, Wen W, J, Lee Y, K, Applied Physics Letters[J], 2005, 87, 243501
- [5] Hartshorne H, Backhouse C, J, Lee W, E, Sensors and Actuators B[J], 2004, 99:592-600
- [6] Hisamoto H, Funano S, I, Terabe S, G, Anal. Chem[J], 2005, 77:2266-2271
- [7] Selvaganapathy P, Carlen E, T, Mastrangelo C, H, Sensors and Actuators A[J], 2003, 104:275-282
- [8] Kozicki M, N, Maroufkhani P, Mitkova M, Superlattices and Microstructures[J], 2003, 34:467-473
- [9] Kim J, H, Na K, H, Kang C, J, Jeon D, Kim Y, S, Microelectronic Engineering[J], 2004, 73-74:864-869
- [10] Liu R, H, Bonanno J, Yang J, N, Lenigk R, Grodzinski P, Sensors and Actuators B[J], 2004, 98:328-336
- [11] Gui L, Liu J, Journal of Micromechanics and Microengineering[J], 2004, 14:242-246
- [12] Selvaganapathy P, Carlen E, T, Mastrangelo C, H, Sensors and Actuators A[J], 2003, 104:275-282