



CSTAM 2012-B03-0202

微直通道内亚拥塞现象机理研究

单小东，王沫然

清华大学工程力学系，微纳米力学与多学科交叉研究中心

第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

微直通道内亚堵塞现象机理研究¹⁾

单小东, 王沫然*

清华大学工程力学系, 微纳米力学与多学科交叉研究中心, 北京市海淀区 100084

摘要 本文采用基于 Enskog 理论的蒙特卡洛法 (GEMC) 进行数值模拟与理论分析, 揭示了微通道内气体流动亚堵塞现象的机理。数值模拟结果总结如下: (1) 当微直通道内气体出现堵塞时, 出口下游并不总是出现音速点, 主要取决于进口压力以及微直管道长高比, 由此可将亚堵塞现象分为音速堵塞和亚音速堵塞。(2) 当模拟缓冲区进出口压力比大于临界值时, 实际作用于微直管道的进出口压力比并不随着缓冲区进出口压力比的变化而变化, 这是出现亚堵塞的根本原因。(3) 对于给定的进口压力, 临界压力比随长高比呈线性变化。

关键词 亚堵塞, 气体流动, 微管道, GEMC, 音速点

引言

采用 MEMS 技术制造的微流体器件, 诸如微喷管[1, 2], 微气体流量计[3, 4], 微粒成型器等在航天航空、生物医药以及流体测量等领域具有广泛的应用。故而微机电系统 (MEMS) 内的流体流动及热传导问题, 尤其是平板间气体流动与导热问题成为近年来非常热门的研究领域[5-8]。

常规尺度下气体在喷管中的流动当进出口压力比达到一定值时, 流动将会出现堵塞, 其根本原因是喷管内气体流动最大马赫数大于 1, 其中变截面喷管音速点出现在喉部, 直喷管音速点出现在管道出口处[9]。相较于宏观尺度下通道内气体流动, 微通道内气体流动表现出了显著的不同, 如在微通道出现堵塞现象[4, 10-12]。姚朝辉等[13]通过实验对长直微通道内气体流动现象进行了研究, 发现流经长直管道气体流量随进出口压力比增大而逐渐趋近与一定值, 于此同时出口最大马赫数小于 1, 这就是所谓的亚堵塞现象。他们将该现象归因于微尺度下的“表面效应”。谢翀[11]采用 DSMC 数值法对微直通道内气体流动亚堵塞现象进行了研究, 指出了亚堵塞现象不仅仅出现在长管道内, 短管道内气体流动也会出现亚堵塞现象。研究表明之所以出现亚堵塞现象是因为在管道出口处出现了音速点。对于等温条件下微

直管道内气体流动, 为得到长微管道内质量流量理论解, 通常采用无滑移、一阶滑移或者二阶滑移边界条件, 同时给出了进出口效应忽略不计的假设[5, 10]。理论解[10]以及实验数据[14]表明, 当长微管道内气体流动出现堵塞时, Kn 为 0.1。但是通过数值模拟发现上述方法得到的解析解对速度分布预测有较大误差, 研究表明其原因是等温假设以及粘性力可忽略假设在管道出口处不成立[12]。

本文采用基于 Enskog 理论的蒙特卡洛法 (GEMC) 对微管道内气体流动进行了模拟, 揭示了微直管道内气体流动亚堵塞现象的机理。文献表明在微管道内流动气体在壁面处产生的阻力对流动有较大影响[10, 15-18], 为此我们对与之相关的参数如进口压力、管道长度进行研究, 并探讨其对亚堵塞规律的影响。

1 数值方法

由于微直管道内气体可能并不稀薄, 因此本文采用基于 Enskog 方程的蒙特卡洛法, 即广义 Enskog 蒙特卡洛法 (GEMC) [19]对两平板间气体流动进行数值模拟。该方法考虑了 L-J 流体分子间作用势对碰撞截面的影响, 由此引入了广义分子碰撞模型; 根据 Enskog 理论考虑了气体稠密效应对分子间碰撞率的强化引入了考虑分子间吸引势的内能转换模型; 考虑了有

1) 基金资助项目: 51176089

2) Email: mrwang@tsinghua.edu.cn

限密度效应以及范德瓦耳兹分子间作用力，最终推导出非理想气体状态方程。

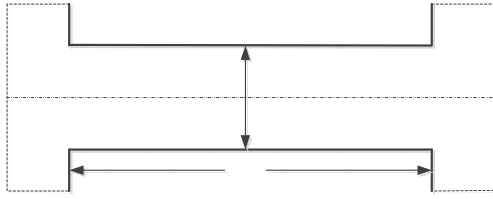


图 1 加入缓冲区计算域

与前人的蒙特卡洛法相比[20-22]，GEMC方法对更大温度适用范围，稠密气体输运性质的预测与实验数据对比符合的更好，数值模拟结果证明该方法既可以应用于理想气体，也可以应用于非理想气体[23]。此外，GEMC方法引入了广义软球模型，其适用的温度区间沿拓到低温与高温区域。

为了能够与姚朝辉[13]等人的实验条件相匹配，采用GEMC法对微直管道内气体流动进行数值模拟时，在管道进口与出口处分别加入一流动缓冲区，故此进出口的压力直接施加在进出口的缓冲区，如图1。 p_i, p_o 和 p_i', p_o' 分别为管道进出口压力以及进出口缓冲区压力。在本文中，由于缓冲区的出现，我们主要探讨有效压力比在亚堵塞现象中的影响，并由此引入两种不同的堵塞形式：音速堵塞和亚音速堵塞。最后还将讨论长高比效应。

2 结果与讨论

为了揭示亚堵塞气体流动的机理，我们主要研究了以下两个参数：进口压力（ p_i' ）以及管道长高比（ $s=L/H$ ）。为探讨进口压力效应，我们分别设计了不同进口压力（ p_i' ）的算例：0.01MPa，0.1MPa以及0.5MPa。上述算例采用的管道尺寸相同。为探讨长高比效应，我们分别设计了如下不同长高比（ $s=L/H$ ）算例：长高比分别为5，10，20和40，以上算例中进口压力 p_i' 均为0.1MPa。在模拟过程中进出口压力直接作用在微直管两侧的缓冲区，故而对于一给定的缓冲出口处背压，作用于微直管道压力比通过数值模拟采集数值取得。为了得到亚堵塞流动的具体信息，

我们将会在模拟时逐渐减小出口背压直至真空。

2.1 等效压力比效应

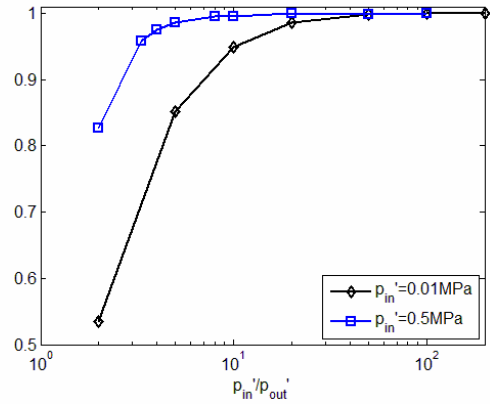


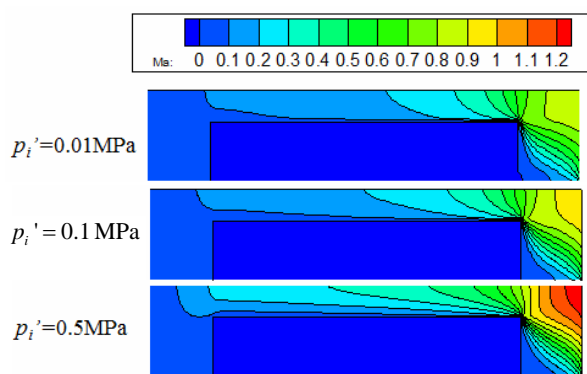
图 2. 归一化质量流量随进出口压力比变化关系

对于不同的进口压力 p_i' ，归一化质量流量分布见图2，该算例中管道尺寸相同。图2表明当进出口压力比达到一临界值时，管道内气体质量流量达到最大，这也意味着流动出现了堵塞。比较图2中三个不同的算例，我们发现对于不同的进口压力，临界进出口压力比不同。图3(a)是不同进口压力下出口真空时的马赫数云图分布，图3(b)是随微直管道中线上马赫数分布图，其中出口处的压力均为设为0，此时管道内流动出现质量堵塞。由图3可知对于进口压力为0.01MPa流动，出口最大马赫数小于1，即此时的流动为亚堵塞流动。对于出口压力为0.5MPa流动，音速点出现在了管道出口处。由此可知，与谢翀[11]的结论不同，当微直管道内流动出现堵塞时，流动出口处是否出现音速点并不是根本原因，而且音速点的出现主要取决于进口压力。

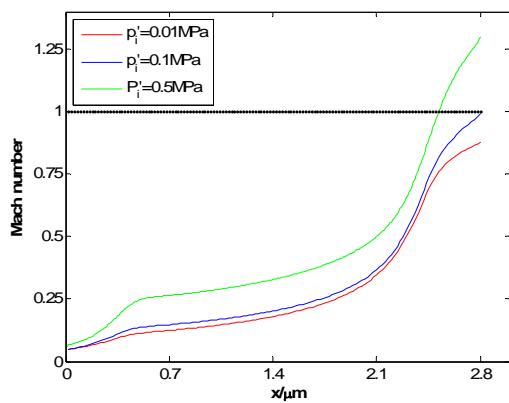
在微管道内气体流动模拟中，我们给出的是管道缓冲区进出口压力 p_i', p_o' 。故而实际作用于管道进出口的有效压力 p_i, p_o 将根据 p_i', p_o' 相应变化。当进出口压力比 p_i'/p_o' 达到一临界值时，管道内气体流动将会出现堵塞。如果继续降低出口压力 p_o' ，进出口压力比 p_i'/p_o' 将大于临界值，如图4，此时实际作用于微直管道进出口的压力 p_i/p_o 不再随着缓冲进出口压力比 p_i'/p_o' 的增大而变化。由此可知，对于一给定的进口压力 p_i' ，存在一临界

P_o'
Out

出口压力 $p_{o,critical}$ 使得管道内流动拥塞。与此同时，管道出口处压力 p_o 将会达到其最小值 $p_{o,min}$ 。若缓冲区出口压力 $p_o' < p_{o,critical}$ ，此时由于流动出现拥塞，管道内气体流动与传热性质将不再变化，即管道内沿程速度、压力、温度等不再随着出口压力降低而变化，这也是微直管道内气体流动亚拥塞现象的根本原因。文献[24]表明对于管道内的亚音速流动，在某些条件下可能出现膨胀波。由此我们推断在管道出口下游将会出现膨胀波，但具体的情况还需要进一步的研究。



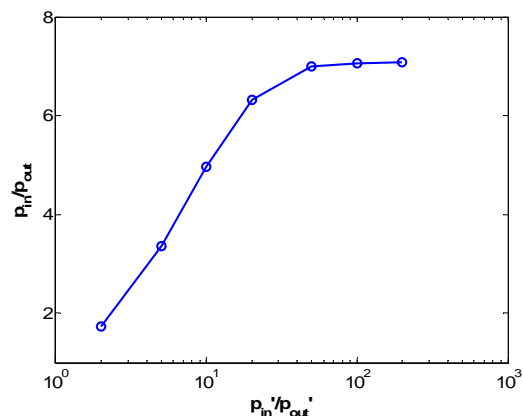
(a)



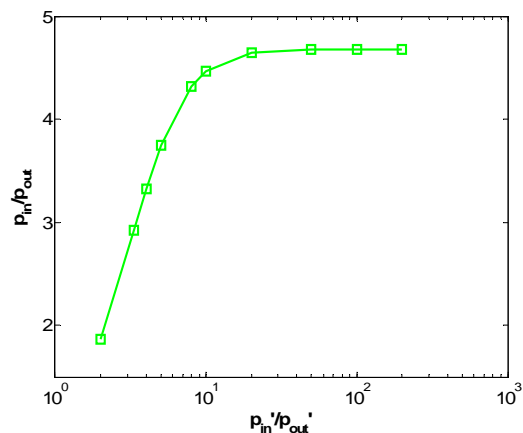
(b)

图 3 (a) 不同进口压力下马赫数云图。其中出口压力均为 0，最大马赫数分别为 0.88, 0.99 和 1.30； (b) 不同进口压力下马赫数沿程分布。

由图 3 可知当流动出现拥塞时，进口压力 p_i' 为 0.01 MPa 时最大马赫数小于 1，未出现音速点，而进口压力 p_i' 分别为 0.1 MPa, 0.5 MPa 算例则在出口处下游出现了音速点。由此我们可以讲微直管内拥塞流动分成两种不同的类型：音速拥塞（出现音速点）和亚音速拥塞（未出现音速点）。对于具有相同尺寸的管道，两种不同的拥塞流动具有不同的临界压力比，见图 4。



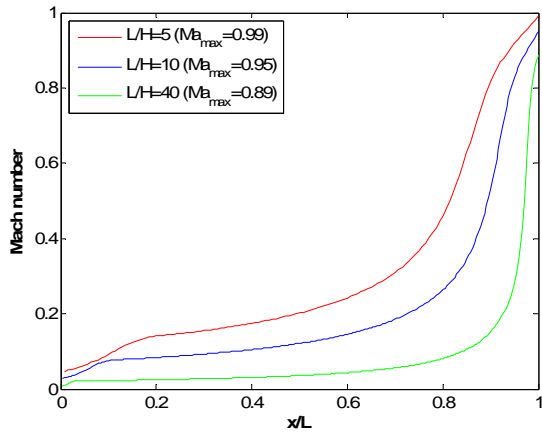
(a)



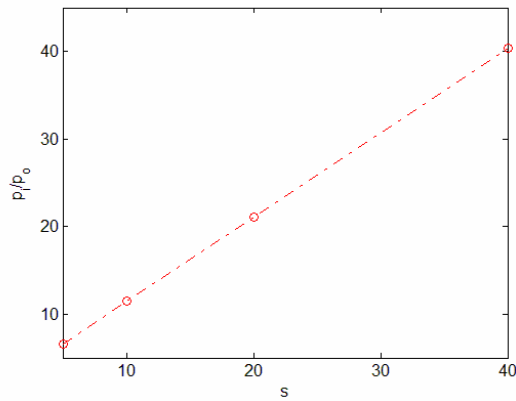
(b)

图 4 进出口压力比 p_i' / p_o' 随有效压力比 p_i' / p_o' 变化关系。(a) 进口压力 $p_i' = 0.1$ MPa，其最大马赫数位 0.88； (b) 进口压力 $p_i' = 0.5$ MPa，其中最大马赫数为 1.30。

2.2 长高比效应



(a)



(b)

图 5 (a) 不同管长下堵塞流动马赫数沿程分布；
(b) 有效进出口压力 p_i / p_o 比管道随长高比变化关系

在微直管内气体流动中，对于一给定的进口压力，当该管道长高比变大时，其作用在管道壁面上的总的摩擦力也将增大，这对于管道内堵塞现象将会产生非常大的影响。图 5 (a) 表明当管道长高比足够大时，管道内流动将会从音速堵塞流动退化为亚音速堵塞流动，由此表明管道尺寸（即长高比）将会对微直管内堵塞形式产生较大的影响。

3 结 论

本文采用了广义 Enskog 蒙特卡洛法对微直管道内气体流动亚堵塞现象的机理进行了探讨。主要结论如下：（1）数值计算结果表明当流动出现堵塞时，其最大马赫数有可能大于 1，也可能小于 1，取决于进口压力以及管道长高比，故而音速点的出现不是亚堵塞现象的根

本原因；（2）堵塞流动可以分为两种不同的形式，即音速堵塞以及亚音速堵塞，主要取决于在出口下游处是否会出现音速点；（3）当缓冲区压力比 p_i / p_o 大于临界值时，实际作用于管道进出口的压力 p_i / p_o 不再随出口压力 p_o 的减小而变化，这是亚堵塞现象的根本原因，其中临界值与进口压力以及管道尺寸相关；（4）对于给定进口压力堵塞流动，临界压力比随管道长高比呈线性变化。

参考文献

1. Chigier, N. and G. Tevfik, A Review of Micro Propulsion Technology, in 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2003, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
2. M. Wang, Z. Li. Numerical Simulations on Performance of MEMS-Based Nozzles at Moderate or Low Temperatures. *Microfluidics and Nanofluidics*, 1(1): 62-70, 2004.
3. Wang M., Chen Z., Li Z. Simulations and optimization for micro gas flowmeter. *Micronanoelectronic Technology*, (7/8): 61-65, 2003.
4. Gass, V. et al. Nanofluid Handling by Micro-Flow-Sensor Based on Drag Force Measurements. *Proceedings of the IEEE Micro-electronics Mechanical Systems Conference 1993*. p167-172, 1993.
5. Arkilic, E.B., K.S. Breuer, and M.A. Schmidt, Mass flow and tangential momentum accommodation in silicon micromachined channels. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001. **437**: p. 29-43.
6. Yitshak, Z., et al., Subsonic gas flow in a straight and uniform microchannel. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002. **472**: p. 125-51.
7. Pong, K.C., et al., Non-linear pressure distribution in uniform micro-channels. *Proceedings ASME-FED*, 1994. **197**: p. 51.
8. Hao, P.F., et al., Size effect on gas flow in micro nozzles. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005. **15**(11): p. 2069-2073.
9. Frank M. White, *Fluids Mechanics*. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
10. Dongari, N., A. Agrawal, and A. Agrawal, Analytical solution of gaseous slip flow in long microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007. **50**(17-18): p. 3411-21.
11. Xie, C., Subsonic choked flow in the microchannel. *Physics of Fluids*, 2006. **18**(12): p. 127104-1-5.
12. Roohi, E., et al., DSMC solution of supersonic scale to choked subsonic flow in micro to nano channels. *Proceedings of the 6th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*, Pts a and B. 2008. 985-993.

13. Yao, Z.H., et al., Low-speed gas flow subchoking phenomenon in a long-constant-area microchannel. *AIAA Journal*, 2004. **42**(8): p. 1517-21.
14. Tison, S.A., Experimental data and theoretical modeling of gas flows through metal capillary leaks. *Vaccum*, 1993. **44**(11): p. 1171-1175.
15. Araki, T., M.S. Kim, and H. Iwai, An experimental investigation of gaseous flow characteristics in microchannels. *Microscale Thermophysical Engineering*, 2002. **6**(2): p. 117-130.
16. Aubert, C. and S. Colin, High-order boundary conditions for gaseous flows in rectangular microducts. *Microscale Thermophysical Engineering*, 2001. **5**(1): p. 41-54.
17. Sharipov, F., Application of the Cercignani-Lampis scattering kernel to channel gas flows. *AIP Conference Proceedings*, 2001(585): p. 347-53.
18. Shokouhmand, H., S. Bigham, and R.N. Isfahani, Effects of Knudsen number and geometry on gaseous flow and heat transfer in a constricted microchannel. *Heat and Mass Transfer*, 2011. **47**(2): p. 119-130.
19. Wang, M. and Z. Li, An Enskog based Monte Carlo method for high Knudsen number non-ideal gas flows. *Computers and Fluids*, 2007. **36**(8): p. 1291-1297.
20. Bird, G.A., *Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows*. 1994, Clarendon press: Oxford.
21. Wang, M. and Z.X. Li, Nonideal gas flow and heat transfer in micro- and nanochannels using the direct simulation Monte Carlo method. *Physical Review E*, 2003. **68**(4).
22. Wang, M., M. Macrossan, and Z. Li, Relaxation time simulation method with internal energy exchange for perfect gas flow at near-continuum conditions. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2007. **12**(7): p. 1277-1282.
23. Wang, M., X. Lan, and Z. Li, Analyses of gas flows in micro- and nanochannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008. **51**(13-14): p. 3630-3641.
24. Malte, P.C. and K.R. Sivier, *Experimental evaluation of a subsonic expansion tube*, A.A. Mich, Editor. 1969, National Aeronautics and Space Administration: Washiton, D. C.

NUMERICAL STUDY OF SUBSONIC CHOKED GAS FLOWS IN MICROCHANNELS

Xiao-dong Shan and Moran Wang

Department of Engineering Mechanics and CNMM, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Subsonic choked gas flows in microchannels were reported based on experimental data, but the mechanism has not been clarified yet. In this work, we are to reveal the mechanism of subsonic choked gas flows in long straight microchannel using a Generalized Enskog Monte Carlo method (GEMC). Our results indicate that: (i) the sonic point does not always appear even though the gas flows appear choked, depending on the inlet-outlet pressure ratio and the length-height ratio of the channel. (ii) The pressure ratio (p_i / p_o) really acting on the channel does not vary with the pressure ratio on the buffer regions (p_i' / p_o') any more when p_i' / p_o' is higher than a critical value. This critical value also depends on the inlet Knudsen number and geometrical information of channel. (iii) with a given inlet pressure, the critical pressure ratio varies linearly with the length-height ratio.

Key words subsonic choking; gas flow; microchannel; GEMC; sonic point