

四边形阵列的微通道型 Knudsen 泵内 热驱流动的 DSMC 数值模拟优化

韩峰 王晓伟 张文青 张世伟* 张志军*

(东北大学机械工程与自动化学院 沈阳 110819)

Numerical Simulation Optimization via DSMC Method for Thermally Induced Flow in Microchannel-Type Knudsen Pumps with Quadrilateral Arrays

HAN Feng, WANG Xiaowei, ZHANG Wenqing, ZHANG Shiwei*, ZHANG Zhijun*

(School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract A microchannel geometry with different temperature quadrilaterals is proposed, and its pumping capacity is demonstrated, giving its optimal parameters for pumping gas. Numerical simulations of the microchannel are performed using the direct simulation Monte Carlo (DSMC) method. The results show that the mass flow rate of the microchannel increased almost linearly with the temperature difference in the range of 75 to 1200 K. The mass flow rate at a temperature difference of 1200 K is 10 times higher than that at a temperature difference of 75 K. Both the maximum gas flow rate and mass flow rate occur at $Kn = 0.3$, indicating that the gas pumping capacity is strongest in transitional flow. Also, the dimensionless mass flow rate of this microchannel at the same operating conditions is 62 times higher than that of a conventional rectangular Knudsen pump.

Keywords Knudsen pump, Quadrilateral microchannels, DSMC method, MEMS, Parameter optimization

摘要 Knudsen 泵是可应用于微机电系统(MEMS)的一种微型气体输送装置。本文提出一种带有不同温度四边形的微通道构型,通过直接模拟蒙特卡罗(DSMC)方法对该微通道内气体流动特性进行了数值模拟研究,并针对其气体泵送特性进行了优化研究,给出了泵送气体的最佳参数。研究发现,微通道内温差在 75~1200 K 范围内时,质量流量随着温差的升高几乎呈线性增大,且温差在 1200 K 时质量流量是 75 K 时的 10 倍。对于不同的 Knudsen 数,最大气体流速和质量流量均出现在 $Kn = 0.3$ 时,说明在过渡流态微通道的气体泵送能力最强。另外,相同工况下该微通道的无量纲质量流量是传统矩形 Knudsen 泵的 62 倍。这些结论可为工业领域内各种微型气体泵送装置的实现和设计提供参考依据。

关键词 Knudsen 泵 四边形阵列微通道 DSMC 方法 微机电系统(MEMS) 参数优化

中图分类号: TB71+1;O356

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202212008

微机电系统(MEMS)被认为是一种革命性的现代技术,在电子、医疗、工业、汽车和航空航天领域有着广泛的应用。Knudsen 泵作为一种微型泵,早在 20 世纪初就被提出^[1],直到近年随着微机电系统和现代计算机技术的发展,对于 Knudsen 泵的理论研究和应用才逐渐得以实现和发展。典型的 Knudsen 泵是由一系列窄和宽的通道交替连接而形

成的矩形微通道,微通道壁面的温度梯度驱使其内部的稀薄气体流动。在稀薄气体环境下,仅由温度梯度驱动的气体流动被称为热驱流动,典型的热驱流动是热蠕流动(热流逸),最早的 Knudsen 泵也是基于这一原理提出的。在稀薄气体环境下,热蠕流产生于具有温度梯度的壁面附近,并沿着壁面由低温处流向高温处。Knudsen 泵的特点是在稳定的温

收稿日期: 2022-12-06

基金项目: 北京卫星环境工程研究所创新基金项目(CAST-BISEE 2019-008); 北京控制工程研究所先进空间推进技术实验室和北京市高效能及绿色宇航推进工程技术研究中心开放基金项目(LabASP-2020-02)

* 联系人: E-mail: shwzhang@mail.neu.edu.cn; zhjzhang@mail.neu.edu.cn

度场中可以驱使稀薄气体流动而不需要任何移动部件,也不需要任何压力梯度^[1],与具有运动部件的微泵相比,其制作简单且使用寿命更长。同时,在维持温度梯度恒定的情况下,它可以不间断的提供稳定的气流。另外,其能耗也非常低。这些特点使得 Knudsen 泵具有广泛的应用潜力,比如气体传输、混合气体分离、微型压缩机、真空获得等。

针对 Knudsen 泵的实际应用问题,国内外学者已进行了相关的研究。ZENG 等^[2]研究了一种利用 Knudsen 泵的自持式自增压燃烧器,通过将该燃烧器与固体氧化物燃料电池相结合,可用作微型发电机。Liu 等^[3]将 Knudsen 泵应用于微气相色谱系统,试验结果表明,当工质分别为氮气和干燥空气时,Knudsen 泵可分别为系统提供 1 mL/min 和 0.26 mL/min 的气体流量。Martini-Laithier 等^[4]将 Knudsen 泵用作为微型气体传感器泵送被检测气体的装置。Pennetta 等^[5]将 Knudsen 泵应用于超灵敏测量的光机械设备中,设备中的微型指针受到来自于 Knudsen 泵输送气体的作用发生偏转,从而反映谐振器谐振频率的变化以完成检测。Bell 等^[6]将 Knudsen 泵用作输液泵向皮肤伤口提供低流量药物,人体的体温即可作为维持 Knudsen 泵运转的热源。孙海等^[7]研究了电容薄膜规内热蠕效应的修正方法。覃日帅等^[8]讨论了多级联结的集成式 Knudsen 泵在工业生产中的可行性。

Knudsen 泵以级联的方式形成微通道,不同微通道的工作环境参数和几何构型会对微通道内流体特性产生重大影响,因此针对提升微通道工作性能参数的研究迫在眉睫。王博韬等^[9]研究了直管微通道的真空获得特性。卢苇等^[10]研究了不同横截面微通道的流导特性,发现过渡流区域流导受截面形状影响较大,且截面形状对称性强的微通道流导性能较好。但是两者均没有讨论微通道内部结构对气体流动产生的影响。王晓伟等^[11]研究了宽窄通道交替连接的典型微通道的气体传输特性,但这种微通道需要赋予壁面正向和负向交替变化的温度梯度,其诸多变形则需要同一组件不同壁面上赋予不同的温度,不易于加工制造。

本文尝试改变微通道内部的结构和温度分布,以期降低其工业制造难度,提高微通道的气体输送能力和探究其气体输送机理,为此提出了一种内部带有恒定且不同温度四棱柱的微通道,该微通道摆脱了需要在同一壁面上设置温度梯度和在同一组

件不同壁面处设置不同温度的限制,即每个四棱柱仅需要维持同一固定的温度即可,降低了工业制造难度。采用直接模拟蒙特卡洛(DSMC)方法对微通道内的流动特性进行数值模拟研究,分析四棱柱间不同的温差和微通道内不同 Knudsen 数对其气体输送能力的影响,给出其气体输送的最佳参数,为工业领域内各种微型气体泵送装置的实现和设计提供参考依据。

1 问题描述

本文研究了具有不同温度四边形的二维微通道内氦气的流动过程。微通道内的四边形是四棱柱的横截面,假设四棱柱的长度远大于其横截面尺寸,所以只进行二维结构的数值模拟就能够合理的表征微通道的泵送能力。图 1(a)示意性的展示了微通道的结构,微通道上下两侧为壁面,两壁面之间包含一系列排列整齐的温度为 T_c 的低温四边形和温度为 T_h 的高温四边形。每一竖列低温四边形和与其距离相近的高温四边形组成一组,沿壁面(x 方向)可以有多组四边形。箭头方向为气体流动方向,低温四边形一侧(左侧)为气体入口,高温四边形一侧(右侧)为气体出口。微通道内一个低温四边形和与其邻近的一个高温四边形作为一个单元,则本文只需研究其中一个单元即可满足研究需求。图 1(b)展示了数值模拟的计算域,计算域包含了一个完整的单元和与其上下相邻的两个单元的二分之一,其中高温和低温四边形的宽度都为 a ,高度都为 b 。每一行中,相邻两个不同温度四边形之间的距离为 d 。每一列中,相邻两个相同温度四边形之间的距离为 h 。计算域上下两侧的边界除了四边形的部分以外都

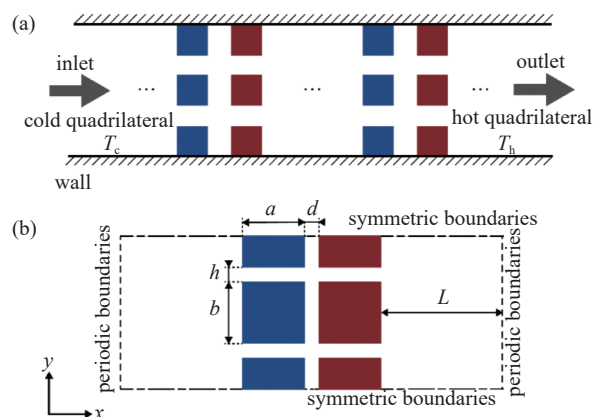


图1 (a)微通道和(b)计算域的示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of (a) microchannels and (b) computational domains

为对称边界, 而计算域的左右两侧则为周期边界。四边形与周期边界的距离为 L 。计算域内空白区域为气流通道。表 1 给出了计算域内各参数的值。针对不同的温差和 Knudsen 数对计算域内的氦气进行了数值模拟分析。

表 1 计算域参数设置表

Tab. 1 Calculation domain parameters

参数	数值
四边形宽度 a/nm	400
四边形高度 b/nm	400
不同温度四边形间距离 d/nm	100
相同温度四边形间距离 h/nm	100
四边形与周期边界距离 L/nm	800
低温 T_c/K	300
高温 T_h 范围/K	375~1200
压力范围/kPa	3.93~1900
Knudsen 数范围	0.02~10

2 数值计算方法及数学模型

Knudsen 泵中的热驱流动以过渡流为主, 传统的 Navier-Stokes(NS)方程并不适合求解此类问题, 而采用 Boltzmann 方程求解得到的结果会更加准确可靠, 但是鉴于 Boltzmann 方程的复杂性, 在进行研究时多采用 Boltzmann 方程的各种简化形式, 但是 DSMC 方法则另辟蹊径, 这种方法利用大量粒子模拟真实气体分子, 通过对粒子的统计来得到 Boltzmann 方程的解。DSMC 方法的计算结果已经被验证与实验数据的结果非常一致^[12], 其缺点是计算效率低^[13], 目前已经成为解决稀薄气体流动问题的主要数值模拟方法之一^[14-15]。与传统的计算流体力学方法类似, DSMC 方法的计算域需要划分为网格单元, 通过对每个网格单元内的粒子采样统计, 最终得到气流的宏观流动特性。在 DSMC 方法中, 每个 DSMC 粒子代表大量的物理原子或分子。在计算开始时, 模拟粒子均匀分布在网格单元中。随着时间步的推进, 粒子以各自的速度运动, 相互碰撞或与边界相互作用, 然后进行采样统计。

为了得到准确的数值模拟结果, 需要在 DSMC 求解器中设置一系列工作参数。本研究采用无时间计数器 (no-time-counter, NTC) 碰撞方法来选择碰撞对进行计算。本文借助于面向对象的 CFD 开源程序 OpenFOAM(Open Source Field Operation and Manipulation)中发布的 DSMC 求解器——dsmc-

Foam^[12]展开数值模拟计算。在该程序中, 采用可变径硬球(variable hard sphere, VHS)模型来描述分子间的碰撞过程^[14-15]。划分的网格中, 每个网格中的模拟粒子数量控制在 20 个以上。网格的最大尺寸 e 不得大于 $\lambda/3$, λ 为氦气分子运动的平均自由程, 可由式 (1) 得到:

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi p_0 \theta^2} \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{(\omega-0.5)} \quad (1)$$

式中, $\theta = 2.33 \times 10^{-10} \text{ m}$ 为 VHS 模型中氦气粒子参考直径, $T_{\text{ref}} = 300 \text{ K}$ 为参考温度, ω 为粘性指数, 标准情况下 (101325 Pa 和 0°C) 氦气的粘性指数为 0.66。另外, 模拟的时间步长则应该小于 e/u_0 , 其中 $u_0 = \sqrt{2k_B T_c/m}$ 为微通道中粒子的特征速度, $m = 6.65 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 为氦气的分子质量, k_B 为玻尔兹曼常数。

本文研究了微通道内气流无量纲化温度 T/T_c 、气流结构、速度 u/u_0 和质量流量 M/M_0 随无量纲化温差 $\Delta T/T_c$ 和 Knudsen 数的变化情况, 其中,

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (2)$$

$$Kn = \frac{\lambda}{W_{\text{eff}}} \quad (3)$$

W_{eff} 为气体流动的特征尺寸, 可由下式得到:

$$W_{\text{eff}} = 2h + 2b - \frac{4ab}{2a+b} \quad (4)$$

无量纲质量流量可由下式得到:

$$\frac{M}{M_0} = \frac{\int_0^{2(b+h)} n u_x dy}{2(b+h)n_0 u_0} \quad (5)$$

式中, n 为气体粒子的数密度, 下标 0 代表初始时刻对应参数的值。

3 结果与讨论

3.1 温差对流动特性的影响

本节内容研究了温差对微通道内气体流动特性的影响, 其中 Knudsen 数保持不变, 即 $Kn \equiv 0.5$ 。通过维持低温四边形的温度不变, 改变高温四边形的温度来获取不同的温差进行研究。图 2 展示了在不同温差下微通道内的温度分布云图和速度流线图。可以看出, 在不同温差下, 微通道内的温度分布规律是相同的, 即低温四边形附近的温度较低, 高温四边形附近的温度较高, 因此在四边形周围形成了温度梯度, 进而产生了热蠕效应, 最终形成了沿壁面的“类似热蠕流”。“类似热蠕流”是热驱流动的其中一种形式, 顾名思义, 其形成机理与热蠕

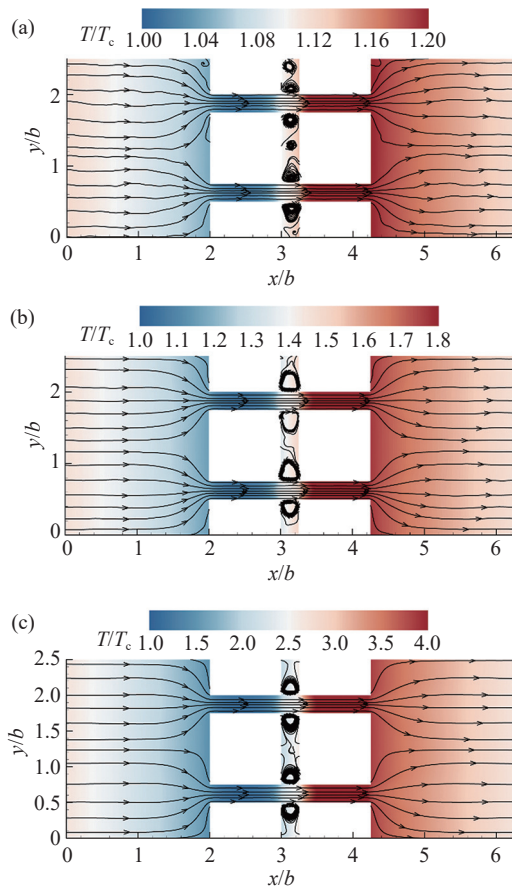


图2 不同温差下微通道内的温度分布云图和速度流线图,
(a) $\Delta T/T_c = 0.25$; (b) $\Delta T/T_c = 1$; (c) $\Delta T/T_c = 4$

Fig. 2 Temperature contours and streamlines with different temperature differences, (a) $\Delta T/T_c = 0.25$; (b) $\Delta T/T_c = 1$; (c) $\Delta T/T_c = 4$

流动类似, 热蠕流动是由具有温度梯度的壁面诱导产生的, 而“类似热蠕流”是由恒温壁面诱导产生的。从速度流线可以看出, 在不同温差下, 微通道内的速度流线均从左侧指向右侧, 说明微通道内气体的净流动方向从低温指向高温, 这一结果与棘轮形微通道的结果^[16-17]相同。另外, 在温差较大的情况下 ($\Delta T/T_c \geq 1$), 速度流线比较平滑和顺畅, 而在温差较小时 ($\Delta T/T_c = 0.25$), 速度流线较粗糙。说明温差会对气流结构造成一定的影响, 温差越高越有利于气体流动。图中还可以发现, 在高低温四边形之间的狭窄通道内存在大量涡流, 并且随着温差的增大, 较小的多个涡流逐渐合成一个较大的涡流, 这是因为随着温差的增大也就是温度梯度的增大, 微通道内的热蠕效应增大了, 使得“类似热蠕流”增强了, 气体粒子运动速度加快, 气流结构趋于稳定。高低温四边形之间的狭窄通道内气体粒子运动方向也

趋于一致, 导致多个小涡流逐渐合成一个大涡流。

图3展示了微通道内沿x轴方向在不同温差下速度分布曲线。可以看出, 在任何温差下, 微通道左右两侧(低温四边形的左侧和高温四边形的右侧)的速度都很小, 而在四边形附近速度急剧增大, 尤其是在高温四边形附近速度达到最大值。这是因为四边形附近的温度梯度大, “类似热蠕流”强, 尤其是高温四边形附近的“类似热蠕流”最强。另外, 气体流速随着温差的增大而增大, 在四边形附近速度变化的程度更为明显。同时, 高温与低温四边形附近的流速差随着温差的增大也增大了, 例如, $\Delta T/T_c = 0.25$ 时高低温四边形附近的流速几乎相等, 但是当 $\Delta T/T_c = 4$ 时高低温四边形附近的流速差相差一倍以上。这是因为温差的改变是由高温四边形的温度改变引起的, 而低温四边形的温度始终保持不变。所以随着温差的增大, 低温四边形附近的气流速度变化不大, 但是高温四边形附近的气流速度随之增大。

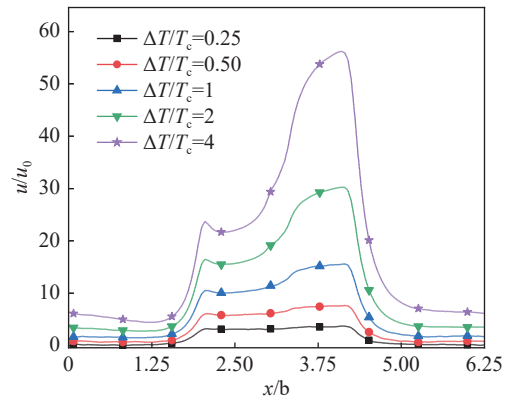


图3 不同温差下微通道内速度分布曲线

Fig. 3 Velocity distribution curves with different temperature differences

与图3相比, 图4更直观的展示了气体流速随温差变化的规律。由图可知, 气体流速随温差的增大呈线性增大。质量流量最能直观的展示微通道的泵送能力, 图4还展示了质量流量随温差的变化趋势。质量流量随温差的变化规律与气体流速随温差的变化规律相似, 但是随着温差的增大, 其对于提高微通道泵送能力的影响有削弱的趋势。这一结果与棘轮形微通道的结果^[16]相同。 $\Delta T/T_c = 4$ 时的质量流量是 $\Delta T/T_c = 0.25$ 时的10倍。可以预见的是, 如果温差继续增大, 质量流量的值也会相应的增大, 也就是说, 微通道的泵送能力也会相应的

增强,但是过高的温差也会提高微通道的制作成本。综上,在实际应用中为提高微通道泵送性能而选择合适的温差时,还应考虑壁材的导热系数和热阻等问题。

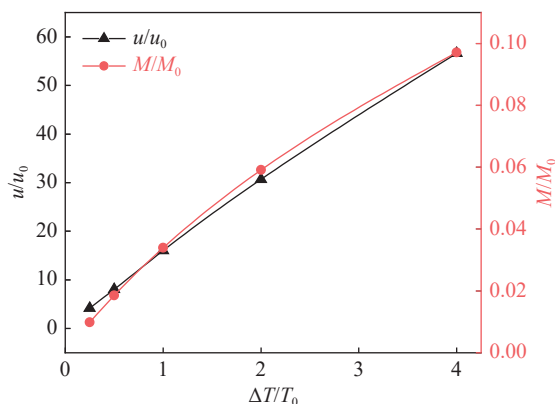


图4 不同温差下流速和质量流量

Fig. 4 Velocities and mass flow rates with different temperature differences

3.2 Knudsen 数对流动特性的影响

本节内容研究了 Knudsen 数对微通道气体流动特性的影响,其中温差保持不变,即 $\Delta T/T_c \equiv 1$ 。图5展示了在不同 Knudsen 数下微通道内的温度分布云图和速度流线图。微通道内的温度分布受 Knudsen 数的影响较大,随着 Knudsen 数的增大,气体的温度变得越来越小,这是因为随着 Knudsen 数增大,气体变得稀薄,气体粒子与壁面总的碰撞概率降低,因此与壁面的热交换率降低,气体从壁面获得的能量减少,气体的温度随之降低。气体温度的降低进而导致微通道内的温度梯度减小,“类似热蠕流”变弱。从图中可以看出,Knudsen 数较小时,速度流线比较平滑,而当 $Kn = 10$ 时,速度流线变得粗糙且混乱,在四边形左右两侧形成了很多没有规律的涡流。这是因为“类似热蠕流”强度减弱,进而对气体粒子的驱动力减弱,同时气体过于稀薄,导致气体粒子数量大量减少。

图6展示了微通道内沿 x 方向在不同 Knudsen 数下速度分布曲线。与图3相似,在各 Knudsen 数下,高低温四边形附近的速度很高,而微通道两侧的速度很低,这是因为四边形附近的温度梯度远高于微通道两侧的温度梯度,并且高温四边形附近的速度同样明显高于低温四边形附近的速度。由图5可知,Knudsen 数越小,高温四边形附近的温度越高,但是图6显示气流速度却不是随着 Knudsen 数的减

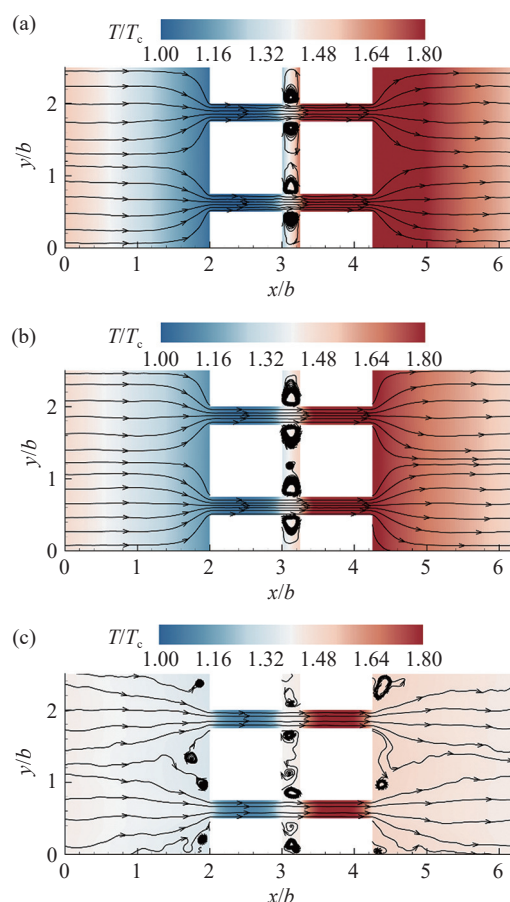


图5 不同 Knudsen 数下微通道内温度分布云图和速度流线图, (a) $Kn=0.05$; (b) $Kn=0.3$; (c) $Kn=10$

Fig. 5 Temperature contours and streamlines with different Knudsen numbers, (a) $Kn=0.05$; (b) $Kn=0.3$; (c) $Kn=10$

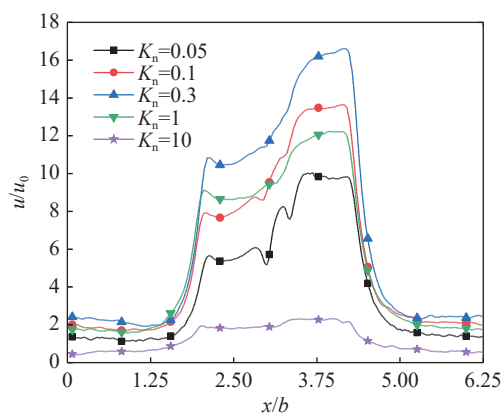


图6 不同 Knudsen 数下微通道内速度分布曲线

Fig. 6 Velocity distribution curves with different Knudsen numbers

小而提高。 $Kn = 0.3$ 时速度达到最大值,自此,Knudsen 数增大或减小,气流速度均逐渐减小。尤其是当 $Kn = 10$ 时,四边形附近的速度几乎等于微通道两侧的速度,且接近于0。在 Knudsen 数较低时

气流速度也较低是因为热驱流动需要在稀薄气体中才能产生, 当 Knudsen 数变小时, 气流状态逐渐接近连续流态, 将会难以产生热驱流动; 在 Knudsen 数较高时气流速度较低则是因为气体过于稀薄, 气体粒子数量太少, 与壁面碰撞的总概率降低, 无法将壁面的能量传递给气体, 进而导致热驱流动减弱, 气流速度降低。

图 7 展示了气流速度和质量流量随 Knudsen 数变化的曲线。在 Knudsen 数约为 0.3 时气流的无量纲速度达到最大值 16.614。在 $Kn \geq 0.3$ 时, 气流速度随着 Knudsen 数的增大而减小, 可以预见, 当 Knudsen 数大到一定程度时, 随着 Knudsen 数的增大, 气流速度的变化量会很小且速度值无限接近于零; 在 $Kn < 0.3$ 时, 气流速度随着 Knudsen 数的减小几乎呈线性减小。这一变化规律与棘轮形微通道的结果相同^[16]。质量流量随 Knudsen 数变化的规律与流速随 Knudsen 数变化的规律相似, 同样在 Knudsen 数约为 0.3 时达到最大值。这是因为在 Knudsen 数较小时, 气流接近连续流态, 热驱流动弱, 因此质量流量较小; 而在 Knudsen 数较大时, 一方面是因为温度梯度较小导致的热驱流动较弱, 另一方面是因为气体稀薄程度大, 气体粒子数量少, 所以传输的气体质量就小。这说明了在过渡流态微通道的泵送能力比在连续流态和自由分子流态都好。这一结果与其他 Knudsen 泵^[16]得到结果相同。

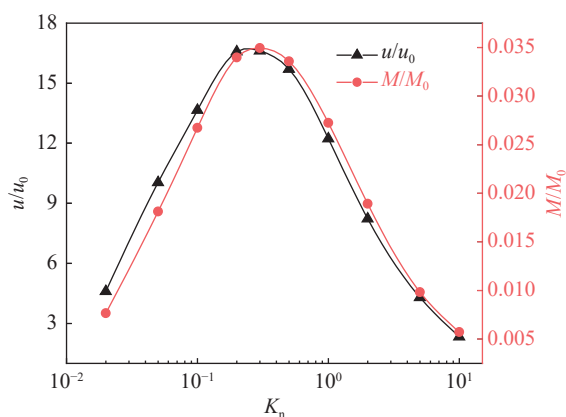


图7 不同 Knudsen 数下流速和质量流量

Fig. 7 Velocities and mass flow rates with different Knudsen numbers

另外, 将本文提出的微通道与典型的矩形微通道^[11]在相同条件下做了对比, 发现本文所提出微通道的无量纲质量流量是矩形微通道的 62 倍。本文所提微通道既降低了工业制造难度, 又提高了气体

泵送能力。

4 结论

本文提出了一种新的内部带有恒定且不同温度四棱柱的微通道型 Knudsen 泵, 它摆脱了需要在同一壁面上设置温度梯度和在同一组件不同壁面处设置不同温度的限制, 降低了工业制造难度, 采用 DSMC 方法对该二维微通道内的气体流动特性进行了数值模拟研究。研究表明, 微通道内气体从低温四边形流向了高温四边形, 证明了微通道的气体泵送能力, 同时也验证了由温度梯度引起的热驱流动使得气体从低温区流向高温区。相同工况下该微通道的无量纲质量流量是传统矩形 Knudsen 泵的 62 倍。本文所解决的关键问题在于提出一种新型微通道构型, 该微通道即降低了工业制造难度, 又提高了气体传输性能。

微通道内的温差会影响气体流动特性, 在 75 ~ 1200 K 范围内时, 温差越高, 气体流线越平滑, 速度越快, 质量流量越大, 说明温差越高, 微通道的气体泵送能力越强, 并且质量流量随着温差的升高几乎呈线性增大。温差在 1200 K 时质量流量是温差在 75 K 时的 10 倍。气体的稀薄程度, 也就是 Knudsen 数在 0.05~10 范围内时, 受“类似热蠕流”强度和气体分子数量的影响, 最大气体流速和质量流量均出现在 $Kn = 0.3$ 时, 说明在过渡流态微通道的气体泵送能力最强。

参 考 文 献

- [1] Knudsen M. Eine revision der gleichgewichtsbedingung der gase[J]. Thermische Molekularströmung[J]. Annalen Der Physik, 1909, 336(1): 205-229
- [2] ZENG P, WANG K, AHN J, et al. Thermal transpiration based pumping and power generation devices[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2013, 8(2): 370-379
- [3] Liu J, Gupta N K, Wise K D, et al. Demonstration of motionless knudsen pump based micro-gas chromatography featuring micro-fabricated columns and on-column detectors[J]. Lab Chip, 2011, 11(20): 3487-3492
- [4] Martini-Laithier V, Graur I, Bernardini S, et al. Ammonia detection by a novel pyrex microsystem based on thermal creep phenomenon[J]. Sensors and Actuators B:Chemical, 2014, 192: 714-719
- [5] Pennetta R, Xie S, Russell P S. Tapered glass-fiber mi-

- crospike: high-Q flexural wave resonator and optically driven knudsen pump[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, 117(27): 273901
- [6] Bell A, Ehringer W D, McNamara S. Scavenged body heat powered infusion Pump[J]. *Journal of micromechanics and microengineering*, 2013, 23(11): 114019
- [7] Sun H, Li D, Zhang D et al. Corrections of thermal transpiration in capacitance diaphragm gauges[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2009, 29(01): 16–20 (孙海, 李得天, 张涤新, 等. 电容薄膜规热流逸效应修正方法研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2009, 29(01): 16–20(in chinese))
- [8] Qin R, Meng S, Wang B et al. Analyses on characteristics of flow rate and pressure for multistage thermal transpiration based vacuum pump[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2022, 42(11): 1–7 (覃日帅, 蒙仕达, 王博韬, 等. 多级热流逸式真空泵流量与压力特性分析[J]. *真空科学与技术学报*, 2022, 42(11): 1–7(in chinese))
- [9] Wang B, Lu W, Xu K et al. Effect of thermal transpiration on vacuum pumping characteristics: a theoretical study[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2017, 37(09): 866–872 (王博韬, 卢苇, 徐昆, 等. 热流逸效应的抽真空特性分析[J]. *真空科学与技术学报*, 2017, 37(09): 866–872(in chinese))
- [10] Lu W, Xing P, Wang B. Impact of cross-section symmetry of micro-channels on its conductance in thermal transpiration vacuum pump: a theoretical analysis[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2020, 40(05): 478–484 (卢苇, 邢鹏浩, 王博韬. 热流逸效应下不同截面形状微通道的流导特性分析[J]. *真空科学与技术学报*, 2020, 40(05): 478–484(in chinese))
- [11] Wang X, Zhang Z, Zhang W et al. Study of transmission characteristics of gas in a rectangular Knudsen pump[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2020, 26(01): 73–81 (王晓伟, 张志军, 张文青, 等. 矩形微通道Knudsen泵中的气体传输特性研究[J]. *真空与低温*, 2020, 26(01): 73–81(in chinese))
- [12] White C, Borg M K, Scanlon T J, et al. Dsmcfoam+: An openfoam based direct simulation monte carlo solver[J]. *Computer Physics Communications*, 2018, 224: 22–43
- [13] Zhang Y, Bi H, Fan X et al. Numerical simulation of flow conductivity of vacuum pipeline under different flow regimes[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2022, 42(04): 276–281 (张一聪, 毕海林, 樊翔, 等. 不同流态下真空管道流导值的数值模拟研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2022, 42(04): 276–281(in chinese))
- [14] Bird. *Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows*[M]. Clarendon Press, Oxford University Press, 2003:1-458.
- [15] 沈青. 稀薄气体动力学[M]. 国防工业出版社, 2003:1-321.
- [16] Wang X, Zhang Z, Zhang W, et al. Numerical simulation of thermal edge flow in ratchet-like periodically patterned micro-channels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 135: 1023–1038
- [17] Han F, Wang X, Zhao F, et al. Numerical investigation of gas separation via thermally induced flows in ratchet-like patterned microchannels[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, 172: 107280