

文章编号:1000-8055(2009)10-2189-04

基于分子运动模拟的微喷管流体流动

杨海威¹, 朱卫兵¹, 赵 阳²

(1. 哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院 航天工程系, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 航天学院 航天工程系, 哈尔滨 150001)

摘 要: 深入研究微喷管内流场性能有助于微推进系统的优化设计. 在高克努森数条件下, 运用直接模拟蒙特卡罗方法模拟微喷管流动过程, 对不同入口温度下的拉伐尔喷管流场进行二维数值模拟, 模拟结果表明随着入口流体温度的升高, 由于黏性力的增强, 微喷管的推力减小而比冲增大. 对微喷管的三维数值模拟表明, 推力效率随着喷管蚀刻深度的减少而降低, 微喷管蚀刻深度的增加将使三维壁面边界的影响降低.

关 键 词: 微喷管; 蒙特卡罗法; 尺度效应; 附面层; 数值模拟

中图分类号: V435

文献标识码: A

Micronozzle flow based on simulation of molecule movement

YANG Hai-wei¹, ZHU Wei-bing¹, ZHAO Yang²

(1. Department of Aerospace Engineering, College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Department of Aerospace Engineering, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In-depth study on micro-nozzle flow field performance contributes to optimization design of micro-propulsion system. Under high Knudsen number conditions, a direct simulation Monte-Carlo method was employed for two-dimensional numerical simulation of the flow field within a Laval micro-nozzle at different inlet temperatures. The results show that along with the increase of fluid temperature at the entrance, micro-nozzle thrust would reduce and specific impulse would increase as the adhesive strength increase. Three-dimensional numerical simulation of micro-nozzle shows that thrust efficiency would decrease with the declining etching depth, and as the etching depth becomes deeper, the influences of three-dimensional boundary wall would reduce.

Key words: micro-nozzle; Monte-Carlo method; scale effect; boundary layer; numerical simulation

航天器发射任务中, 微型航天器在削减发射质量、增加发射速率及降低任务风险等方面的优势日益受到人们的重视, 其在下一代全球定位系统和地球低轨道通讯系统的作用也日益突出, 因此相应的微推进系统研究受到了各国学者的广泛关注.

微喷管作为微推进系统的主要部件, 其对微小型航天器的设计和性能预估都有很大影响. Alexeenko 等国外学者运用直接模拟蒙特卡罗 (DSMC) 法进行了微喷管流体流动的相关模拟研究^[1-4], 陈伟芳、张先锋对不同压力和温度边界条件下的微喷管流动进行了模拟^[5-6], Gadepali 采用

收稿日期: 2008-04-26; 修订日期: 2009-08-10

基金项目: 黑龙江省博士后基金 (LBH-Z08249)

作者简介: 杨海威 (1970 -), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 主要研究方向: 微尺度流动与传热.

Navier-Stokes 方法分析喷管流动特性^[7],唐飞采用 Navier-Stokes 理论对高雷诺数三维微喷管进行数值模拟^[8],刘赵森基于连续介质模型计算了落压比变化对流场结构的影响^[9].以上文献大多针对低温工况,近年来国外已研制出温度高达 1000 K 的微尺度喷射燃烧室,在高温情况下随着雷诺数的降低,黏性损失对喷管流场所带来的影响更加不能忽略,本文采用 DSMC 方法对微喷管流动进行模拟,并对不同来流温度下喷管性能及三维喷管的流动特性和推力性能进行模拟分析.

1 数值方法与模型

1.1 方法介绍

DSMC 方法从微观角度出发,通过计算大量模拟粒子的运动和碰撞再现气体分子的运动过程,模拟由此引起的动量和能量的输运、交换等宏观物理过程. DSMC 方法的基本要点即用有限个仿真分子代替真实气体分子,并在计算机中存储仿真分子的位置坐标、速度分量以及内能,其值随仿真分子的运动、与边界的作用以及仿真分子之间的碰撞改变,最后通过统计网格内仿真分子的运动状态实现对真实气体流动问题的模拟. DSMC 方法的特点是在时间步长内将仿真分子的运动与仿真分子间的碰撞解耦,先让仿真分子在小于平均碰撞时间的时间步长内作匀速直线运动,然后再计算相应于这一时间步长的有代表性的仿真分子间的碰撞,从而大大减小仿真所需的计算机时.

1.2 模拟模型

取典型的拉伐尔型微喷管对流场进行模拟.如表 1 所示建立微喷管流体分子运动与碰撞模型.

表 1 模拟模型

Table 1 Simulation models

模型	方法
分子作用势模型	负幂率
散射模型	VHS(variable hard sphere)
物面反射模型	CLL (Cercignani-Lampis-Lord)

在物面反射模型上使用 CLL 反射模型.通常使用的 Maxwell 核模型仅对有限的一类问题能得到满意结果,其给出的调节系数被认为是与入射分子的性态无关.从现象学角度分析,以给定速度值而在不同方向入射物面的分子,当它反射后

所具有的速度与反射角的散布几率应有所不同,越大的入射角,有越大的反射分子切向动量被保存下来,即 α_r 值越小.因此本文在进行 DSMC 模拟时,使调节系数 α_r, α_n 依赖于入射分子的速度 ξ 及入射角 θ 而变化,它们的相互依变关系取自文献^[10]经实验验证的经验关系式.在高温气流条件下入射分子的平动温度与物面温度差值增大,完全热调节不易达到,必须考虑能量调节系数不为 1 的影响.能量调节系数 α 服从的经验公式为^[10]

$$\alpha = 0.6 \left[1.0 - \frac{2}{\pi} \theta \right]$$

2 数值模拟与结果分析

2.1 二维流场模拟

利用 DSMC 方法对微型拉伐尔喷管进行二维流动模拟(根据对称性计算一半的流场区域),喷管喉部半径 17 μm ,模拟气体为氮气,来流气体总压 10 kPa,入口温度 1000 K.计算区域网格划分为 475×170 ,每个网格划分为 2×2 个子网格,流场初始分布采用与来流一致的平衡分布.

图 1 显示了流场的克努森数 (Kn) 分布.气体的稀薄程度是由克努森数划分的,当 $10^{-1} < Kn < 10$ 时流动属过渡区域, $Kn > 10$ 时为自由分子区,以上两流动区域连续假设已不再成立.由图 1 可见,整个喷管流场克努森数在 2~8 范围内,处于过渡区域.因此,采用 DSMC 方法对这一流场进行模拟是必要的.文献^[11]中论述并验证了采用该方法进行模拟的正确性.

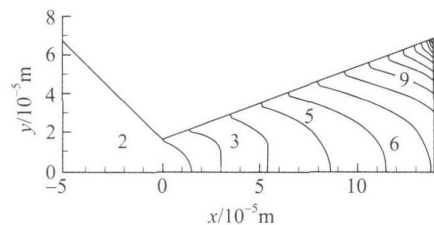


图 1 克努森数分布

Fig. 1 Kn number distribution

针对 300, 1000, 2000 K 等不同流体入口温度分别对流场进行数值模拟,考察黏性力对微喷管性能影响.表 2 显示了三种温度下壁面平均剪切应力(即黏性力)的模拟结果.由表 2 可见喷管壁面黏性力随温度升高而加强,黏性力增强是由于当温度升高时,分子的不规则运动加剧,使动量交换更加频繁而引起的.从模拟结果看,其增长的比

率随温度升高而下降.

表 2 壁面参数
Table 2 Wall parameters

温度/ K	剪切应力/ kPa
300	1. 452
1000	4. 369
2000	6. 485

模拟结果显示,对应入口温度 300,1000,2000 K,喷管相应推力分别为 0.605,0.425,0.302 N,相应的比冲分别为 694.2 m/s,991.1 m/s 和 1146.6 m/s.可见,随温度的变化黏性力对喷管的推力性能产生较大影响.由于黏性力随温度升高而增长,使喷管推力受到影响随入口流体温度升高而下降,但比冲仍随温度的增长而增长.

考察不同入口压力条件下喷管内流体传递到固体壁面的热流量变化.图 2 为喷管壁面热流密度值,其中 a, b, c 分别为入口压力 2000,5000,10000 Pa 所对应的热流密度曲线.对比不同压力条件下壁面热流密度值,可以看到热流密度值随压力升高而增大,压力越高其热流密度值增长的速率越大.压力升高时,微喷管壁面的热损失也随之增加.从文献[11]分析知道,壁面绝热条件下,微喷管的推进效果会随压力的增高而增强,因此,对内壁不采取绝热措施微喷管,压力的增高对微喷管性能有正反两方面的影响,对微喷管工作压力的设计应该综合考虑这两个因素.

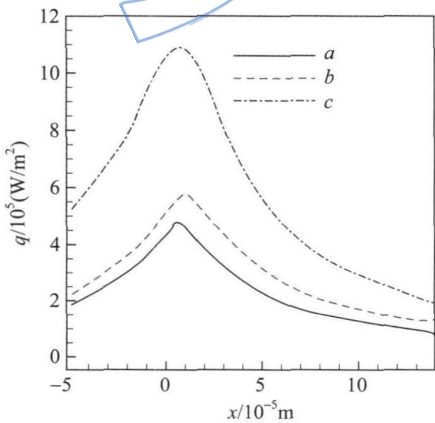


图 2 壁面热流密度
Fig.2 Wall heat flux density

2.2 三维流场模拟

微喷管的二维模拟通常可以较准确反应喷管流场性能,但当喷管的三维壁面影响不能被忽略

时,例如喷管蚀刻深度较小时,只有三维模拟才能精确反映出流场情况.

利用 DSMC 方法模拟处于过渡区流动的三维锥形拉伐尔喷管,喷管尺寸:喉部宽度为 34 μm ,扩张段长 77 μm ,收缩段长 28 μm ,展向深度 70 μm .由于对称性只计算三维喷管的 1/4 部分,转动、振动模型之间的能量传递使用 Larsen-Borgnake 模型,粒子碰撞采用可变硬球碰撞模型,流场初始分布采用与来流一致的平衡分布.

图 3 为二维、三维流场马赫数对比图,其中 (a) 为三维喷管在垂直于 z 轴方向的马赫数分布剖面图, (b) 为相同工况下二维流场马赫数分布图.图 4 为二维、三维流场中心线温度对比图.

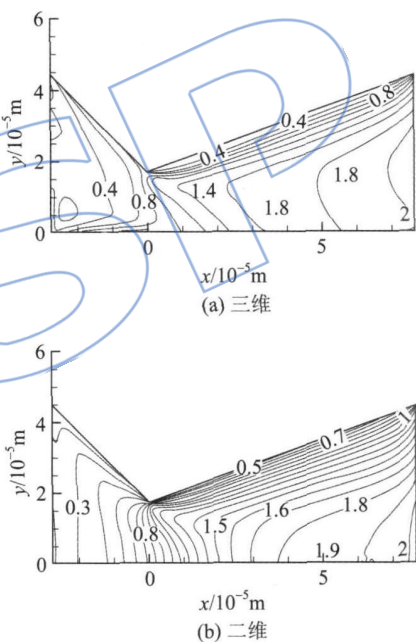


图 3 马赫数分布
Fig.3 Mach number distribution

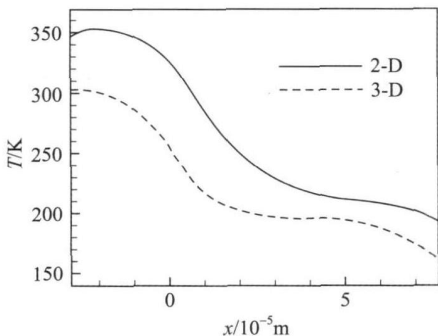


图 4 中心线温度对比
Fig.4 Temperature comparison along the midline

从模拟结果看,无论是马赫数还是温度值,二维模拟计算结果都要高于三维模拟的数值,其中

主流区域模拟值平均高 10 %左右,这是由于二维模拟没有考虑喷管侧壁对流动的影响,分析原因是由于侧壁附面层的作用,使微喷管内流体增加了能量损失,从而导致三维模拟结果小于二维模拟结果.

表 3 为喷管性能对比.表中分别显示了二维流场和不同蚀刻深度三维喷管流场的比冲值和推力系数值.从表 3 可见,三维模拟比冲值和推力系数值都要低于二维模拟值,采用二维模拟忽略了高度方向上附面层的影响,从表中可见随着三维喷管蚀刻深度的增加,其数值越来越接近于二维模拟值.这是因为三维壁面边界的影响会随着蚀刻深度的增加而降低.

表 3 推力性能
Table 3 Thrust performance

喷管尺寸/ μm	比冲/ (m/s)	推力系数
二维	666.7	1.65
深度 70	587.2	1.04
三维 深度 90	604.6	1.19
深度 180	626.3	1.20

3 结 论

利用 DSMC 方法对大克努森数下拉伐尔型微喷管流体流动进行二维和三维数值模拟,研究结果表明:

在高温情况下黏性损失对喷管流场所带来的影响较大.喷管壁面黏性力随温度升高而加强,其增长的比率随温度升高而下降.喷管推力随入口流体温度升高而下降,但比冲仍随温度的增长而增长.较高的压力能提高微喷管的推进效果,但高压也使微喷管的热损失增加.

由于二维模拟没有考虑微喷管侧壁附面层对流动的影响,对于蚀刻深度较小的微喷管,无论是流场参数还是推力性能值,二维模拟计算结果都要高于三维模拟的数值,推力效率随着喷管蚀刻深度的减少而降低,微喷管蚀刻深度的增加将使三维壁面边界的影响降低.

参考文献:

[1] Alexeenko A A , Levin D A , Gimalshein S F. Numerical simulation of high-temperature gas flows in a millimeter-

scale thruster[R]. AIAA 2001-1011.

[2] Jamison A , Ketsdever A. Performance comparisons of underexpanded orifices and deLaval nozzles at low Reynolds numbers[R]. AIAA 2002-2041.

[3] Waltz J. A numerical study of the incompressible flow past a sphere affixed to a microchannel [R]. AIAA 2002-3198.

[4] Li S , Freidhoff C B. Fabrication of micronozzles using low-temperature wafer-level bonding with SU-8[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering , 2003 , 13 (4) :732-738.

[5] 张先鋒,刘明候,李蕾,等. 温度边界条件对微喷管性能的影响[J]. 中国科技大学学报, 2008 ,38(4) :394-399.

ZHANG Xianfeng , LIU Minghou , LI Lei , et al. Effect of temperature boundary conditions on micronozzle performance[J]. Journal of University of Science and Technology of China , 2008 ,38(4) :394-399. (in Chinese)

[6] 陈伟芳,王全利,尹乐. 微喷管流动粒子仿真与 Navier-Stokes 数值模拟比较研究[J]. 计算力学学报, 2005 ,22 (6) : 44-47.

CHEN Weifang , WANG Quanli , YIN Le. Study on comparison of particle imitation and Navier-Stokes equations numerical simulation for flow in micro-nozzle[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics , 2005 ,22(6) : 44-47. (in Chinese)

[7] Gadepalli V V , Lin C X. Navier-Stokes modeling of gas flows in a de-Laval micronozzle[R]. AIAA 2006-1425.

[8] 唐飞,叶雄英,周兆英. 微喷管内气体流动的三维数值模拟[J]. 清华大学学报,2004,44(11) :1478-1481.

TANG Fei , YE Xiongying , ZHOU Zhaoying. 3-D numerical simulation of gas flow in micro nozzles[J]. Journal of Tingshua University , 2004 ,44 (11) :1478-1481. (in Chinese)

[9] 刘赵森,张谭. Laval 型微喷管内气体流动的计算及分析[J]. 航空动力学报, 2009 ,24(7) :1556-1563.

LIU Zhao miao , ZHANG Tan. Numerical investigation on gas flow in Laval micronozzle [J]. Journal of Aerospace Power , 2009 ,24(7) :1556-1563. (in Chinese)

[10] 吴其芬,陈伟芳. 高温稀薄气体热化学非平衡流动的 DSMC 方法[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1999: 106-111.

WU Qifen , CHEN Weifang. DSMC method for high temperature gas thermochemistry unblanced flow[M]. Changsha : National University of Defense Technology Press , 1999 :106-111. (in Chinese)

[11] 杨海威,赵阳,张大伟. 微喷管流动的 DSMC 模拟研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007 ,39(5) :817-820.

YHANG Haiwei , ZHAO Yang , ZHANG Dawei. Research on micro nozzle flow by DSMC method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology , 2007 ,39(5) :817-820. (in Chinese)