

微喷管流动的 DSMC 方法模拟*

尹乐,陈伟芳,石于中

(国防科技大学航天与材料工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:目前微型航天器正在积极地发展中,微喷管在其推进系统中具有重要地位,对微喷管进行进一步研究是很有必要的。运用 DSMC(Direct Simulation Monte-Carlo)方法从分子运动论层次对轴对称微喷管流动现象进行模拟,分析了喷管流量以及尺寸大小对喷管流动和性能的影响。研究表明,喷管流量及尺寸对流动特性和微喷管性能存在不同程度的影响。

关键词:DSMC 方法,微喷管,流动

中图分类号:V211.3 **文献标识码**:A

Simulation of Micro-Nozzle Flow by DSMC Method

YIN Le, CHEN Wei-fang, SHI Yu-zhong

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: At present, micro-spacecrafts are being developed. Micro-nozzles are very important in propulsion systems of micro-spacecrafts. So further study on micro-nozzles is essential. DSMC(direct simulation Monte-Carlo) calculations for the flow in axisymmetric micro-nozzles are conducted on molecular-based models. The influence of the mass flow rate and dimension on the flow and performance in the nozzle are also discussed. The study indicates that the mass flow rate and dimension of the nozzle have different degrees of influence on the flow and performance.

Key words: DSMC, micronozzle, flow

微型航天器正处在积极发展中,通过对它的使用可以降低飞行任务的危险性,保证任务能够更加可靠的完成;在下一代全球定位系统以及地球低轨道通讯系统中,微型航天器起到非常重要的作用。微型航天器通常需要灵活机动的反应速度与精确无误的控制能力,这就需要推进系统提供很小的推力和总冲^[1]。微推力系统的出现满足了对推进系统的这种特殊要求。为了达到很小的推力,微推力系统通常采用低压强下工作的小尺寸喷管(微喷管),现在已经发展了大量微喷管的微推力系统,其中冷气体喷管能够提供很低的比冲和较小的推力($1\mu\text{N}$ 到 1N),并且在这类喷管中多采用良性气体作为推进工质,避免了污染的产生。微推力系统使用低压强下的微喷管将导致低的 Re 数和高的 Kn 数,此时气体的低密度效应非常显著。为了使微喷管具有较好的性能,进一步的研究工作是很有必要的,研究的目的是了解微喷管中的粘性流动特点以及确定尺寸效应对微喷管性能的影响。

在数值模拟方面,对微喷管的性能研究通常采用 NS 方程或 DSMC 的方法。文献[1]运用 DSMC 方法对二维微喷管流动进行了模拟,其模拟结果与实验数据符合较好。文献[2]对运用 DSMC 方法得到的 Reynolds 数范围在 $100 \sim 1000$ 中的轴对称微喷管流动现象和性能与运用 NS 方程所得到的结果进行了详细的比较。文献[3]运用 DSMC 方法研究了喷管外形对二维微喷管性能的影响,并与三维喷管计算结果进行了比较。

1 方法概述

Bird^[4]提出的 DSMC(Direct Simulation Monte-Carlo)方法是依赖统计物理学的概率模拟方法,它来源

* 收稿日期:2004-04-28
基金项目:国家部委基金资助项目(5413030301KG01)
作者简介:尹乐(1978—),女,博士生。

于分子动力学方法,采用几率论方法判断分子间是否发生碰撞。DSMC方法从微观角度出发,利用较少量的模拟分子代表真实流体的大量分子,用计算机模拟由于气体分子运动、碰撞而引起动量和能量的运输、交换,产生气动力和气动热这一宏观物理过程。在模拟初始,根据物理条件在计算域内布置模拟分子并给定其位置和速度,在每一时间步内分别计算运动和碰撞。处理运动时还包括分子进入或逸出计算域(对应于进出口边界)与壁面的相互作用;碰撞的处理主要是碰撞对的选择、碰撞面积的计算。流动的宏观量则由网格内模拟分子的运动参数统计平均得到。在求解过渡领域流动的众多解析、数值和模拟方法中,DSMC方法是惟一取得巨大成功的方法,从宏观参量到细观速度分布函数的水平上,该方法均能得到实验的支持。

本文采用DSMC方法中常用的可变硬球(VHS)碰撞模型,模拟气体为氦气。来流的气体总温为300K。计算域及边界条件的处理如图1所示,其中AE为来流边界;BC是出口边界,采用真空边界条件;AB为轴线;EDC为固壁,采用漫反射边界条件。网格划分为 141×52 ,每个网格划分 2×2 个子网格。流场初始分布采用与来流一致的平衡分布。

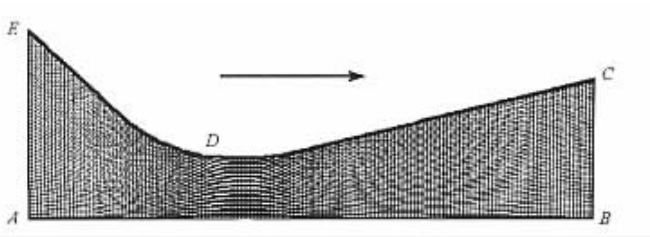


图1 计算域、网格划分及边界条件示意图

Fig.1 The computing domain, grids and boundary conditions for simulation

2 模拟实例及分析

影响喷管内流场结构的因素很多,本文主要考虑了流量以及尺寸效应的影响,并应用DSMC方法做了相应的数值模拟。

2.1 流量影响

表1 流量对喷管性能的影响

Tab.1 The influence of mass flow rate on nozzle performance

算例	\dot{m} ($\times 10^{-3} \text{g/s}$)	K_n	R_e^*	F ($\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$)	I_s (m/s)	F/F_{ideal}	$I_s/I_{s\text{ideal}}$
1	1.2	0.021	48.9	1.045×10^{-3}	1472.037	0.520	0.879
2	2.4	0.012	86.6	2.293×10^{-3}	1507.937	0.571	0.901
3	4.8	0.0064	167.9	4.916×10^{-3}	1540.972	0.612	0.920
4	9.6	0.0035	307.3	1.033×10^{-4}	1572.179	0.643	0.939

算例采用喉部直径为1.7mm的喷管,具有相同的壁温300K。图2为不同质量流量下所对应的 M_a 数分布图。从图中可以看到,随着流量的不断增大,在收缩段沿 x 轴 M_a 数增长程度加快,流动在喉部达到声速,但 $M_a = 1$ 的等值线前移;而在扩张段,随着流量的不断增大,密度增大导致分子碰撞频率增大,稀薄效应相应减小,粘性力对流动的影响降低,边界层逐渐变薄,垂直于扩张段壁面的 M_a 变化梯度增大,出口 M_a 数升高,逐渐接近于理论值(壁面绝热,理想状态)。由图3中可以看到,沿 x 方向法向应力逐渐减小并趋近于零,随着质量流量的不断增大,法向应力不断增大。壁面剪切应力(见图4)随着质量流量的增大也呈现增大的趋势,但在扩张段,剪切应力变化不大。由表1可知,随着质量流量增加, K_n 数不断减小,喉部的 R_e 逐渐增大,喷管推力 F 增加,比冲 I_s 增大,喷管效率提高。同时也可以看到,随着质量流量的不断增大,推力与理想推力的比值以及比冲与理想比冲的比值呈上升趋势发展。

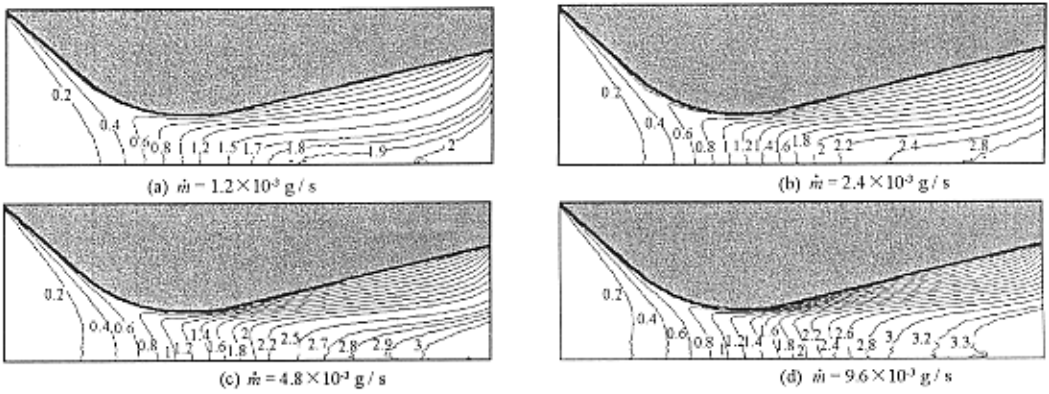


图2 不同质量流量下的 M_a 数分布

Fig.2 M_a at different mass flow rate

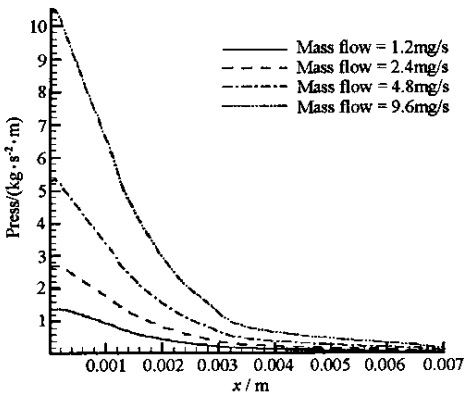


图3 不同质量流量下的壁面压力

Fig.3 Wall press at different mass flow rate

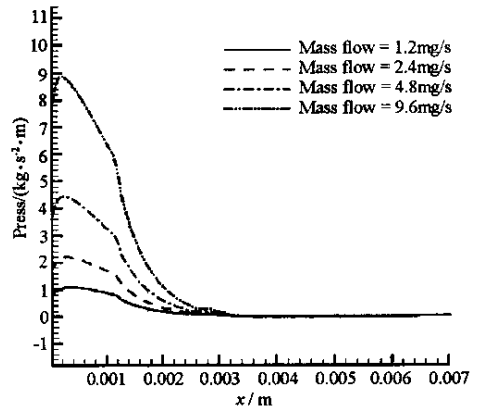


图4 不同质量流量下的壁面剪切应力

Fig.4 Wall shear stress at different mass flow rate

2.2 尺寸的影响

算例仍采用先前研究过的喷管外形,作尺度上适当的缩放,均采用 $200P_a$ 的入口总压边界条件。由图5及图6中可以看到,随着 x 方向尺寸的不断增大,法向应力不断增大,而壁面剪切应力也呈现增大的趋势,但在扩张段,剪切应力变化不大。如表2所示,随着尺寸增大,稀薄效应减弱, K_n 数不断减小,喉部的 R_e 逐渐增大,喷管推力 F 与比冲 I_s 相应增大,喷管效率提高,同时,推力与理想推力的比值以及比冲与理想比冲的比值呈上升趋势发展。

表2 尺寸对喷管性能的影响

Tab.2 The influence of dimension on nozzle performance

算例	喉部直径 (m)	K_n	R_e^*	F ($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$)	I_s (m/s)	F/F_{ideal}	I_s/I_{ideal}
5	1.7×10^{-3}	0.0556	19.663	2.11×10^{-4}	1435.872	0.302	0.858
6	3.4×10^{-3}	0.0297	35.834	1.56×10^{-3}	1459.501	0.558	0.872
7	8.5×10^{-3}	0.00968	111.915	1.66×10^{-2}	1514.838	0.950	0.905
8	1.7×10^{-2}	0.00515	218.219	6.94×10^{-2}	1534.367	0.992	0.917

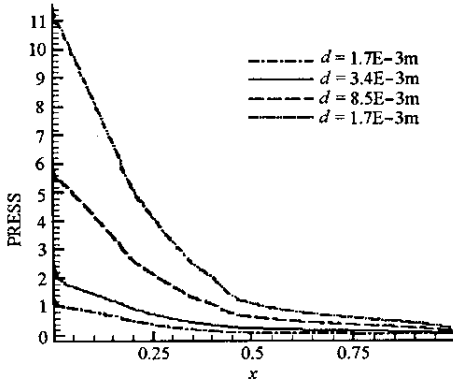


图5 不同尺寸下的壁面压力
Fig.5 Wall press at different dimension

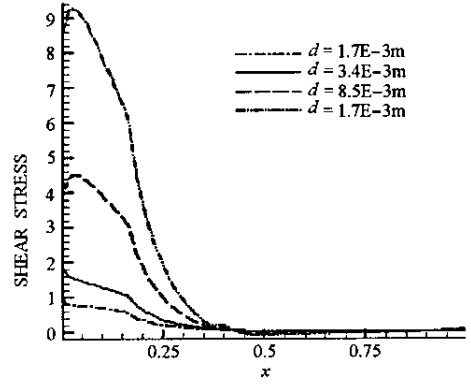


图6 不同尺寸下的壁面剪切应力
Fig.6 Wall shear stress at different dimension

3 结论

采用 DSMC 粒子仿真方法对轴对称微喷管中的流动现象进行了模拟。从结果中可以看到,质量流量的增加和喷管尺寸的增大,都导致稀薄效应减弱,粘性力影响降低, R_e 增大,从而使出口 M_a 升高。当喷管中的质量流量增加以及喷管尺寸增大时,喷管的工作效率 I_s 都得到了一定程度的提高;同时稀薄效应越强(K_n 越大),推力与理想推力的比值以及比冲与理想比冲的比值越小。

参考文献:

- [1] Boyd I K, Jafry Y, Beukel J V. Particle Simulations of Helium Microthruster Flow[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1994, 31(2).
- [2] Ivanov M S, Markelov G N, Ketsdever A D, et al. Particle Simulation of Micro-nozzle[R]. AIAA Paper No. 99-0166, Jan 1999.
- [3] Gennady N, Miknail S J. Numerical study of 2D/3D micronozzle flow[A]. Rarefied Gas Dynamics, 22nd International Symposium, Sydney, Australia, 2000.
- [4] Bird G A. Molecular Gas Dynamics and Direct Simulation of Gas Flow[M]. Clarendon, Oxford, 1994.
- [5] Michael M M, Andrew D K. Micropropulsion for Small Spacecraft[M]. Volume 187, Progress in Astronautics and Aeronautics, June, 2000.
- [6] 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.

