

非结构化网格下自由分子微电热推力器数值模拟

孙志新¹ 李增耀¹ 王裕峰¹ 韩先伟² 陶文铨¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100)

摘要 采用非结构化网格, 压力边界条件的 DSMC-FVM 耦合方法对自由分子微电阻加热推力器微喷管内的流动与换热进行了数值模拟。分析了微喷管的流场特征, 证明所采用的 DSMC-FVM 多尺度方法对微喷管内流场与温度场模拟是合适而且必要的。

关键词 微喷管; DSMC-FVM 耦合; 非结构化网格; 压力边界条件; 多尺度计算
中图分类号: TK124 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2008)07-1205-03

NUMERICAL SIMULATION OF FMMR WITH UNSTRUCTURED-GRID

SUN Zhi-Xin¹ LI Zeng-Yao¹ WANG Yu-Feng¹ HAN Xian-Wei² TAO Wen-Quan¹

(1. The State Key Lab. of Multiphase Flow in Power Engineering; Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. China Academy of Aerospace Liquid Propulsion Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract The flow field and temperature distribution of free molecular micro-electro-thermal resist jet (FMMR) were studied with DSMC-FVM coupled method. The characteristics of the flow field were analyzed. The results show that the adopted DSMC-FVM coupled method is appropriate and necessary for flow and temperature field simulation in FMMR.

Key words micro nozzle; DSMC-FVM coupled method; unstructured-grid; pressure boundary conditions; multiscale computation

0 引言

微型航天器由于具有体积小, 重量轻, 成本低, 开发、制造和发射周期短等诸多优点, 从上个世纪 80 年代后期以来受到了各国航天界的高度重视。随着 MEMS 和微制造技术的快速发展, 加工基于微型喷管的微型推进器成为可能, 自由分子微电阻加热推力器 (Free molecular micro-electro-thermal resist jet, FMMR) 即是其中的一种。

由于 FMMR 结构尺寸小 (通道宽度 1~100 μm), 气体工作压强低 (100~10000 Pa) 而温度相对较高, 其内气体的流动处于过渡流和自由分子流, 因此, 基于连续性假设基础上的传统数值模拟的方法不再有效。用直接模拟蒙特卡罗 (Direct simulation of Monte Carlo, DSMC) 方法来研究 FMMR 系统中的流动与传热是当前最好的一种方法。

目前采用 DSMC 方法对 FMMR 进行研究的文献较多, 但大多数模拟是在事先给定喷管壁面温度的条件下进行的。文献 [1],[2] 采用 DSMC 与有限元耦合的方法对高温微喷管的工作过程进行了模拟,

由于该文模拟了微喷管从启动到稳态的真实过程, 因而计算工作量极大。本文采用超松弛方法得到了微喷管的稳态流场, 大大减小了模拟过程所需的计算量, 并对耦合方法在微喷管模拟中的必要性进行了分析。

1 计算模型

1.1 计算区域

FMMR 的工作原理是通过推进剂分子与薄膜电阻加热器表面的碰撞, 将能量传递给推进剂, 再经过喷管喷出, 产生推力 (图 1)。FMMR 要求加热元件与出口缝隙之间的空间距离与气体的分子平均自由程处于同一数量级, 从而增加分子与壁面间的碰撞, 减小分子间的碰撞, 提高总效率。根据 FMMR 的结构特点, 它在垂直于图 2 中纸面方向的尺度远大于纸面方向的尺度, 因此可以采用二维计算模型进行计算; 同时该推进器由多个结构相同的推力单元组成, 可以选取其中一个喷管为代表进行计算。由于每个推力单元本身是轴对称的, 可以将计算区域进一步缩小到每个喷管截面的一半。

收稿日期: 2008-01-10; 修订日期: 2008-05-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No.50636050)

作者简介: 孙志新 (1983-), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要从事微尺度流动与传热方面的研究。

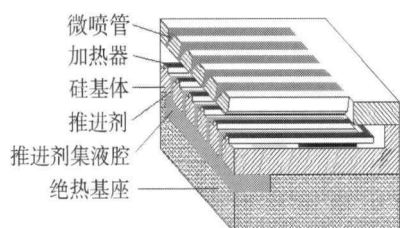


图1 FMMR 结构
Fig.1 Structure of FMMR

1.2 边界条件

由于 FMMR 内部气体流动速度小于声速，下游的流动状态会对上游产生直接影响，因此不宜采用给定入口速度的边界条件，本文采用文献 [3] 提出的边界压力条件处理方法将入口压力转化为宏观入口速度。出口边界都处理为“真空”边界，即没有分子从外部进入计算区域。流体计算区域的左右边界为对称边界，工质在界面上作镜面反射。

1.3 网格划分

非结构化网格具有不规则，无固定结构的特点，是处理复杂结构区域的一种有效的方法，本计算中流体区域与固体区域均采用非结构化网格。在二维的非结构化网格中，所采用的基本单元是三角形 [4]，DSMC 方法要求网格特征尺寸小于平均自由程 [5]，每个网格包含 7 个计算分子 [6]。随着流动工质密度逐渐降低，分子自由程逐渐增大，为了保证每个网格中分子数相等，本研究采用了边长逐渐增大的非结构化网格。（见图 3 左边）。

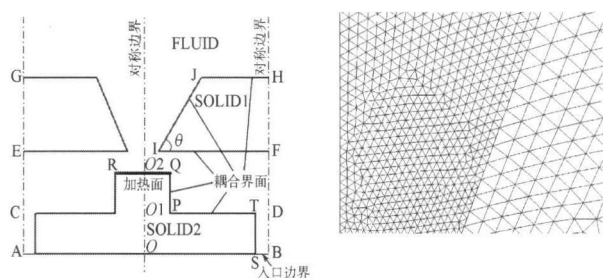


图2 单个推进单元剖面
Fig.2 Single propulsion unit

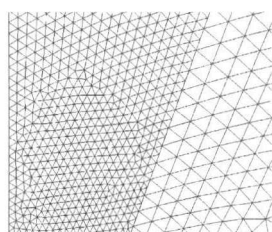


图3 局部非结构化网格

1.4 计算方法

流体区域工质为 Ar，属单原子分子，本文采用变径硬球 (Variable hard sphere, VHS) 模型计算分子之间的碰撞，加热面温度为 600 K，采用 CLL 反射模型计算分子与壁面的碰撞 [7]。固体部分材料为硅，导热系数是 149 W/(m·K)。

本文采用了 D-N 型的耦合方式处理流-固耦合问题 [4]，首先假定壁面温度，然后进行流体区域的 DSMC 计算，从流体区计算获得壁面热流密度作为第二类边界条件用有限容积法计算非稳态的固体区域温度场 (Neumann 边界条件，N 型)，然后将固

体区计算获得的界面温度作为壁面温度更新上一步计算所用的壁面温度，进行流体区域的 DSMC 计算 (Dirichlet 边界条件，D 型)。流场进入稳态以后，壁面温度不再变化，只进行 DSMC 计算。由于流体区域网格尺度较小，固体区域网格尺度较大，因此固体区域一个网格对应于流体区域多个网格，图 3 为喉部上方的网格，表示了这种对应关系。

由于工质为稀薄气体，固体壁面上的热流密度较小，固体区域温度分布达到稳态需要很长时间，由于流体区域达到稳态所需的时间远小于固体区域 [1,2]，为了加速收敛，计算过程中人为减小了固体区域的热惯性，这实质上是一种超松弛的计算方法，并不会对达到稳态后的温度场产生影响。

2 计算结果及分析

本文对入口压力 1000 Pa、2000 Pa、5000 Pa 三种工况进行了计算 (分别称为工况 1、2、3)，工质入口温度都是 300 K。图 4 给出了 SOLID1 的温度分布，在固体靠近加热面处由于受高温高密度气体的冲击，温度较高，在靠近气体入口处由于受到刚刚进入流场的低温气体的冲击，温度较低，从等温线的分布可以判断出固体 SOLID1 从靠近加热面处的气体吸收热量，并对刚刚进入流场的低温气体进行加热。可以看出，SOLID1 内部温差很小，因此可以认为 SOLID1 存在一个“总体温度”，在三种工况下，SOLID1 的总体温度分别是 561 K、529 K、433 K。SOLID1 的总体温度随入口压力的减少而降低，这是由于压力越高，分子自由程就越小，与高温壁面碰撞后能够直接到达 SOLID1 的分子占分子总数的比例也就越小，也就是说，密度比较高的气体阻碍了加热面与 SOLID1 之间的热量传递。不同工况下 SOLID1 总体温度存在明显差异，从而证明 DSMC-FVM 耦合的多尺度计算对于结构复杂的 FMMR 流场模拟是必要的，若采用壁面温度恒定的边界条件会带来较大的误差。

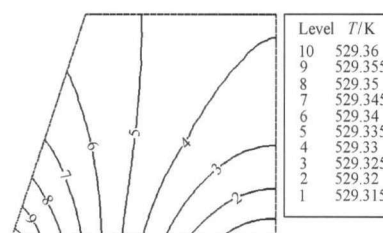


图4 SOLID1 温度分布 (工况 2)
Fig.4 Temperature distribution of SOLID 1 (Case 2)

流体区域温度分布见图 5，气体进入流场后很快被加热至高温，在通过喷管喉部以后，由于膨胀，

温度急剧降低, 由于摩擦的影响, 气体温度在靠近壁面处比较高。

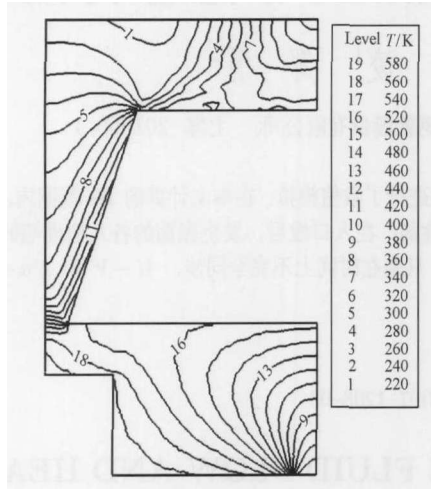


图 5 流场温度分布 (工况 2)

Fig.5 Temperature distribution of flow field (Case 2)

流体区域压力和密度分布见图 6 和图 7, 可以看出, 压力从入口到喉部之间变化不大, 但在喉部急剧降低, 这是由于流速的急剧升高造成的, 气体在通过喉部以后由于流道的扩张, 压力和密度继续降低, 逐渐接近零。与压力分布不同, 流体密度在入口附近和喉部变化都很剧烈, 由公式 $P = nkT$ (n 是数密度, k 是玻尔兹曼常数) 可以看出, 由于工质进入流场以后很快被加热至较高温度, 在压力不变的情况下密度与温度成反比。

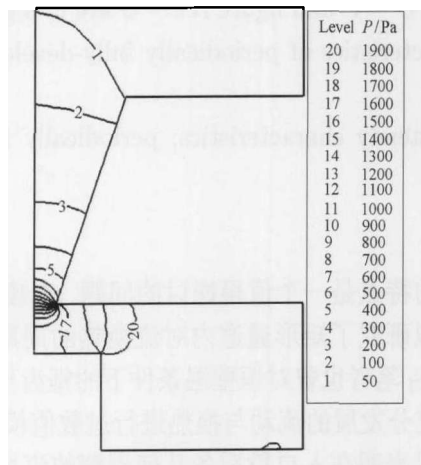


图 6 流场压力分布 (工况 2)

Fig.6 Pressure distribution of flow field (Case 2)

流体区域马赫数分布见图 8, 工质速度在喷管喉部急剧升高, 在通过喉部以后, 速度继续上升。与连续介质的喷管流动有所不同, 工质在通过喉部以后才达到声速。通过与其它工况的比较可知, 入口压力越高, 工质的马赫数等于 1 的点便越接近喉部。由于管道张角的影响, 在喷管壁面附近速度有所降

低, 在喷管出口外部速度达到最大值。

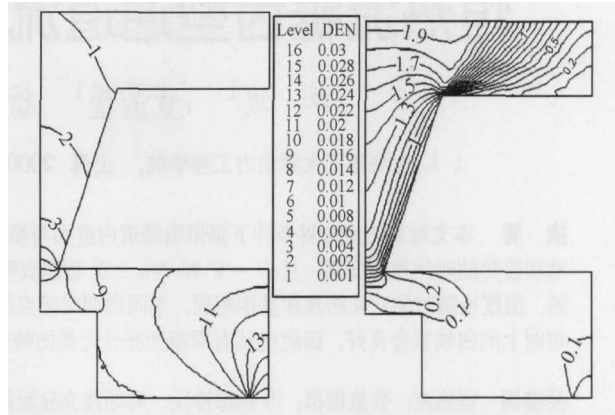


图 7 流场密度分布 (工况 2)

Fig.7 Density

distribution (Case2)

图 8 马赫数分布 (工况 2)

Fig.8 Mach number

distribution (Case 2)

3 结 论

本文通过耦合的 DSMC-FVM 多尺度计算解决了 FMMR 流场模拟中固体界面温度未知的问题, 不同工况下固体区域的总体温度存在明显差异, 从而证明耦合 DSMC-FVM 的多尺度计算对于结构复杂的 FMMR 流场模拟是必要的。工质在加热面处被加热后膨胀, 流场中压力、密度和温度在喉部急剧降低, 流速迅速升高; 工质流出喷管后压强很低, 速度很高, 从而达到了提高工质比冲的目的, 提高了系统性能。

参 考 文 献

- [1] Alexeenko A A, Levin D A, Fedosov D A, et al, Performance Analysis of Microthrusters Based on Coupled Thermal-fluid Modeling and Simulation. Journal of Propulsion and Power, 2005, 21(1): 95-101
- [2] Alexeenko A A, Fedosov D A, Sergey F, et al. Transient Heat Transfer and Gas Flow in a MEMS-based Thruster. IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, 2006, 15(1): 181-194
- [3] Wang Moran, Li Zhixin. Simulations for Gas Flows in Microgeometries Using the Direct Simulation Monte Carlo Method. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2004, 25: 975-985
- [4] 陶文铨. 计算传热学的近代进展. 北京: 科学出版社, 2000. 64-79; 50-52
TAO W Q. Recent Advances in Computational Heat Transfer. Beijing: Science Press, 2000. 64-79; 50-52
- [5] Alexander F J, Garcia A L, Alder B J. Cell Size Dependence of Transport Coefficients in Stochastic Particle Algorithms. Physics of Fluids, 1998, 10(6): 1540-1542
- [6] Bird G A. Sophisticated DSMC. Notes Prepared for a Short Course At the DSMC07 Meeting Santa Fe, 2007
- [7] Bird G A, Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows. Oxford: Clarendon Press, 1994. 118-121