

## 稀薄气体二维外部柱体绕流特性研究

王秋旺<sup>1</sup> 王 媛<sup>1</sup> 陶文铨<sup>1</sup> 郑 平<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049;  
2. 香港科技大学机械工程系, 香港)

**摘要** 本文采用直接模拟蒙特卡罗方法对稀薄气体二维外部柱体绕流问题进行了数值模拟。结果表明: 外部绕流问题, 在特定情况下会产生激波, 激波的产生, 不仅与气体的稀薄程度有关, 还与来流马赫数有关。而气流与壁面之间的换热, 随来流马赫数增加而增加, 随气体稀薄程度增加而减小。

**关键词** 直接模拟蒙特卡罗; 稀薄气体; 外部柱体绕流; 激波

中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2003)02-0298-03

### NUMERICAL SIMULATION OF RAREFIED GAS FLOW AROUND TWO-DIMENSIONAL RECTANGULAR CYLINDER

WANG Qiu-Wang<sup>1</sup> WANG Xian<sup>1</sup> TAO Wen-Quan<sup>1</sup> Cheng Ping<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

**Abstract** The rarefied gas flow around two-dimensional rectangular was simulated by Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) method, using air as working fluid. It was found that the shock wave will appear under some special conditions, and the intensities of the shock wave were related not only to the rarefied content of the gas, but also to the Mach number of the inlet flow. The heat transfer between the gas and wall increased with the increase of inlet Mach number, but it decreased with the increase of the rarefied content of gas.

**Key words** direct simulation Monte Carlo; rarefied gas; gas flow around rectangular cylinder; shock wave

### 1 引言

稀薄气体流动常常会在低压、真空的环境下产生, 如超音速飞行器及一些真空器械<sup>[1]</sup>; 也有可能在常压下的微小器械中产生, 如微电子机械系统 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)。气体的稀薄程度可以根据气体粒子平均自由程长度与所研究问题特征尺寸之间的比值大小, 即 Knudsen 数 ( $Kn$ ) 来衡量。 $Kn$  数越大, 气体的稀薄程度越高。

人们对于连续气体的外部流动已经研究的比较透彻, 但是有关稀薄气体外部流动的文献还比较少见<sup>[2]</sup>。本文将对亚音速及超音速稀薄气体外部柱体绕流问题进行数值模拟, 旨在揭示不同来流马赫数下, 稀薄程度不同的气流流动与换热规律。计算所采用的数值方法为直接模拟蒙特卡罗 DSMC(Direct

Simulation Monte Carlo) 方法<sup>[3]</sup>。

DSMC 方法是在微观层次上, 直接从分子运动的机理着手, 以分子运动论为依据, 用有限个仿真模拟分子代替大量的真实气体分子, 通过跟踪仿真分子的运动轨迹, 记录各个仿真分子的状态参数, 最后将这些仿真分子做统计平均, 从而得到气体宏观状态参数的一种方法。该方法的具体实施细节见文献 [4]。

### 2 物理问题描述

图 1 为所研究的外部流动问题示意图。被绕流物体长  $l = 0.06$  m, 宽  $h=0.06$  m, 壁温  $T_w = 500$  K,  $T_\infty = 300$  K, 来流  $Kn$  数分别为 1, 0.5 和 0.1(由此可以计算出  $P_\infty^{[3]}$ ),  $Ma_\infty$  数分别为 0.5, 5 和 10。计

收稿日期: 2002-12-12; 修訂日期: 2003-01-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划经费资助项目 (No.G2000026303)

作者简介: 王秋旺 (1969-), 男, 湖北黄冈人, 教授, 博士, 主要从事传热强化、计算传热及新型高效换热器方面的研究。

算区域取为:  $L = H = 0.6 \text{ m}$ 。计算工质为空气, 计算中视为 79% 的氮气与 21% 的氧气混合物。计算区域的边界(图 1 中虚线所示)均采用宏观上有流量通量的流体边界条件; 分子与被绕流柱体壁面的碰撞采用漫反射模型; 温度为完全热适应; 分子之间的作用势采用 VHS 模型<sup>[3]</sup>。另外, 壁面热流密度  $q_w$  与换热系数  $h$  的计算方法如下:

$$q_w = \frac{\sum E_r - \sum E_i}{\Delta t \cdot A} \quad h = \frac{q_w}{T_w - T_\infty}$$

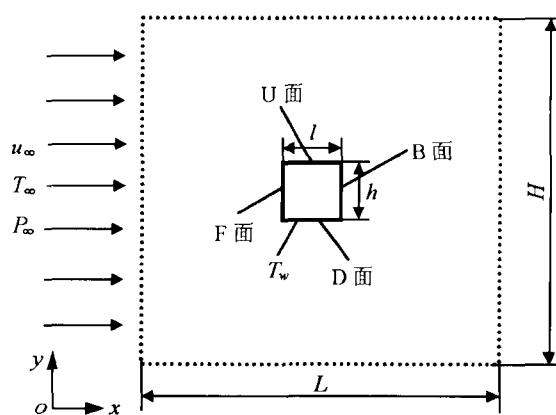


图 1 二维外部柱体绕流示意图

其中  $E_r$ 、 $E_i$  分别为分子与壁面碰撞时反射分子与入射分子的总能量, 包括动能、转动能及振动能。 $\Delta t$ 、 $A$  分别为作用时间与作用面积。

### 3 计算结果及讨论

#### 3.1 流动计算结果

计算结果示于图 2 及图 3。图 2 为来流马赫数  $Ma_\infty$  等于 10 时, 不同  $Kn$  数下的等压线及等温线图。可以看出, 当  $Kn = 0.1$  时, 在柱体的前端出现了一个强烈的激波; 当  $Kn = 0.5$  时, 激波不明显; 而当  $Kn = 1$  时, 柱体前端没有出现激波。文献 [2] 表明, 当  $Kn < 0.1$  时, 激波会更强烈。所以, 气体的稀薄程度越大, 激波的强度越弱, 到接近自由分子区时, 激波不再出现。

图 3 为不同  $Kn$  数下的等马赫数线图。由该图亦可以看出超音速下 ( $Ma_\infty = 5, 10$ ),  $Kn = 0.1$  时会产生激波, 且来流马赫数越大, 激波强度越大。但当  $Ma_\infty = 0.5$  时, 即亚音速流动时, 却没有出现激波。当  $Kn$  数继续减小, 亦不会出现激波<sup>[2]</sup>。所以在亚音速范围内, 无论气体的稀薄程度如何, 都不会出现激波, 但在超音速范围内, 直到气体的稀薄程度接近于自由分子区时, 才不会出现激波。

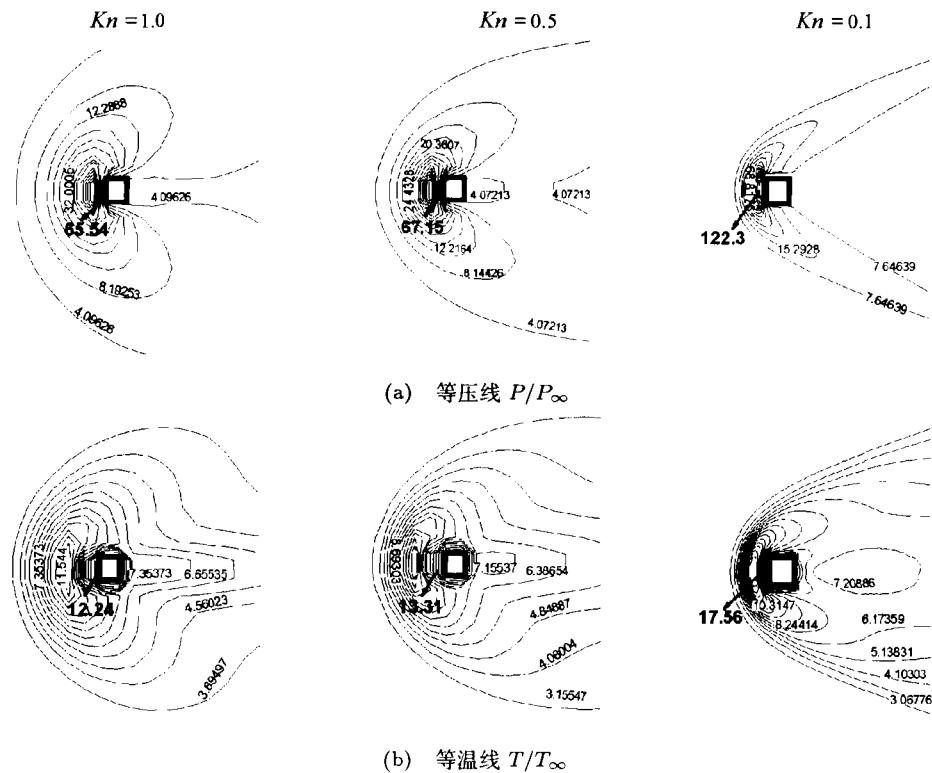
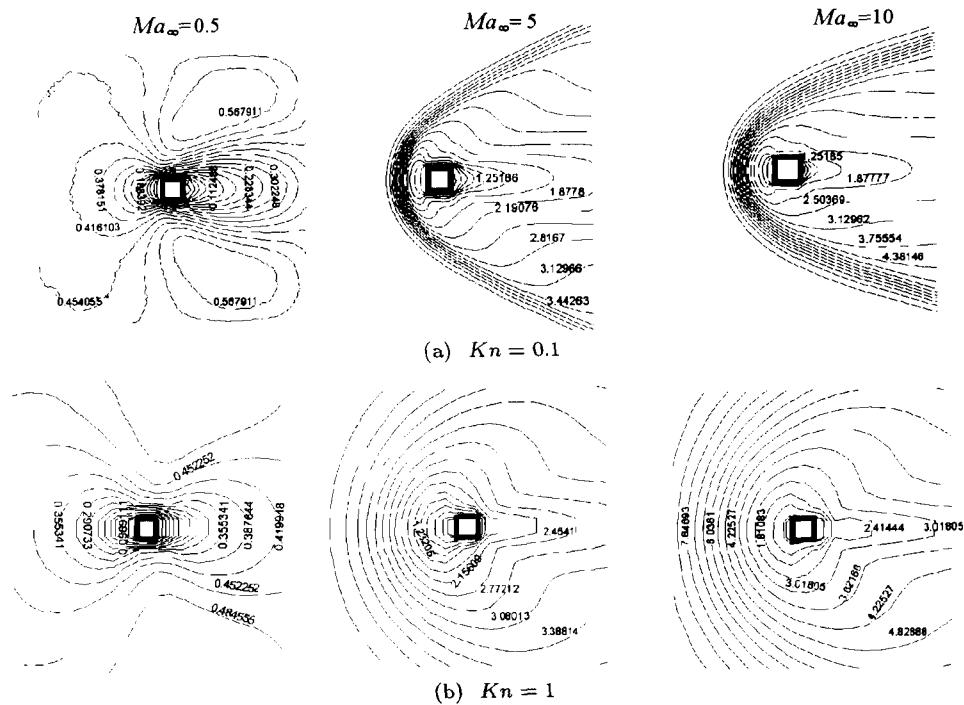


图 2  $Ma_\infty = 10$  时, 不同  $Kn$  数下的等值线图

图 3 不同  $Kn$  数下的马赫数等值线图

### 3.2 换热计算结果

表 1 为各壁面上总换热系数  $h$  的计算结果。可以看出, F 面的换热系数最大, 其次为 U、D 面(即上下面), B 面的换热最弱, 且上下面的换热情况是完全对称的。对于 F、U、D 面,  $Ma_{\infty}$  越大, 则换热系数越大。而对于 B 面, 从亚音速到超音速, 由于激波的产生, 使得分子与 B 面撞击的机会减小, 从而换热系数减小; 在超音速范围内, 随着来流马赫数的增大, 激波增强并向内收缩(见图 2,3), 使得激波内分子运动空间减小, 从而分子与 B 面撞击的机会增加, 导致换热系数增大。另外, 对于各个壁面, 无论  $Ma_{\infty}$  有多大, 气体的稀薄程度( $Kn$  数)越大, 换热系数越小。表中换热系数很小, 主要是由与气体十分稀薄的缘故。

表 1 壁面上总换热系数  $h$  的计算结果(单位:  $W/(m^2 \cdot K)$ )

面	$Kn$	$Ma_{\infty} = 0.5$	$Ma_{\infty} = 5$	$Ma_{\infty} = 10$
F	0.1	$4.91 \times 10^{-2}$	3.79	46.89
	1	$1.03 \times 10^{-2}$	$7.82 \times 10^{-1}$	7.25
B	0.1	$2.83 \times 10^{-2}$	$8.57 \times 10^{-3}$	$7.67 \times 10^{-2}$
	1	$4.74 \times 10^{-3}$	$1.62 \times 10^{-6}$	$1.19 \times 10^{-4}$
U	0.1	$3.73 \times 10^{-2}$	$6.16 \times 10^{-1}$	5.85
	1	$7.17 \times 10^{-3}$	$7.39 \times 10^{-2}$	$4.48 \times 10^{-1}$
D	0.1	$3.76 \times 10^{-2}$	$6.16 \times 10^{-1}$	5.85
	1	$7.18 \times 10^{-3}$	$7.40 \times 10^{-2}$	$4.48 \times 10^{-1}$

### 4 结 论

(1) 在超音速流动中, 气体绕流柱体时, 在柱体前端会有激波产生, 激波的强度随气体稀薄程度的增加而减弱, 随来流马赫数的增加而增强, 但当气体的稀薄程度很高时(接近于自由分子区), 无论来流马赫数有多大, 均不会产生激波。

(2) 在亚音速流动中, 气体绕流柱体时, 无论气体的稀薄程度如何, 均不会产生激波。

(3) 不论气体的稀薄程度如何, 除后面(B 面)外, 来流马赫数增加, 气流与壁面间换热增强, 而 B 面的换热与激波的产生及其强弱均有关系。

(4) 不论来流马赫数如何, 气体的稀薄程度增加, 气体与壁面间换热减弱。

### 参 考 文 献

- [1] Muntz E P. Rarefied Gas Dynamics. Annu. Rev. Fluid Mech., 1989, 21: 387-417
- [2] Cheng C H, Liao F L. DSMC Analysis of Rarefied Gas Flow Over a Rectangular Cylinder at All Knudsen Numbers. J. Fluids Engineering, 2000, 122: 720-729
- [3] Bird G A. Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows. Oxford: Clarendon Press, 1994
- [4] WANG Xian, WANG Qiu-wang, TAO Wen-quan, et al. Simulation of Rarefied Gas Flow and Heat Transfer in Microchannels. Science in China, Series E, 2002, 45(3): 321-327