

文章编号: 1001-2486(2002)04-0020-05

二维凹槽过渡流的 DSMC 方法模拟*

吴雄, 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: 采用 DSMC (Direct Simulation Monte-Carlo) 方法模拟二维凹槽过渡流动, 给出了在不同 Knudsen 数、不同展弦比、不同壁温条件下凹槽流的速度和温度分布, 并对 DSMC 方法在模拟全速度域流场时存在的局限性进行了讨论。

关键词: DSMC 方法; 凹槽; 过渡流

中图分类号: V211.3 文献标识码: A

Simulation of Transitional Flow in a 2D Groove by DSMC Method

WU Xiong, CHEN Wei-fang, SHI Yu-zhong

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

Abstract: The transitional fluid flow in a two-dimension groove is simulated by DSMC method. The velocity vector and isotherm are shown at different Knudsen numbers, different span-chord ratios and different temperature wall. The limitation of the DSMC method in simulating the all-velocity flow field is also discussed.

Key words: DSMC method; groove; transitional flow

凹槽流是计算流体力学的典型算例, 它没有解析解, 但是已存在多种数值解。譬如有限差分解^[1,2]、LGA 模型数值解、LBM 模型数值解及 BGK 模型数值解等^[3,4]。文献[1]应用预处理后的二维可压 N-S 方程数值模拟了低速情况下不同马赫数、不同雷诺数的二维驱动凹槽流动。文献[3]利用 BGK 模型比较全面地模拟了凹槽粘性流的宏观行为及旋涡的形成过程。上述数值解都是从流体的宏观运动角度出发对连续区的凹槽流动进行求解, 还没有见到相关的过渡区凹槽流的数值解。另一方面, 文献[3][4]所采用的 BGK 模型方程虽然在过渡领域被广泛应用, 然而从模型本质来看, BGK 模型方程在一定程度上简化了 Boltzmann 方程中的碰撞积分项, 用一个近似项代替了有坚实物理基础的准确项, 这种随意性将导致方法本身的不确定性。最近的研究表明, 在模拟壁温突升引起的流动和 Rayleigh 问题等远离平衡的流动时, BGK 方程是不准确的^[6-7]。本文应用 DSMC 方法从分子运动论层次对凹槽过渡流中的旋涡结构进行了精细模拟, 并对 DSMC 方法在模拟全速度域流场时存在的局限性进行了讨论。

1 DSMC 方法

DSMC 方法来源于分子动力学方法。分子动力学方法的基本思想是用大量的模拟分子的运动代替真实流体运动, 且认为当两个运动分子间的距离小于一定值时将发生碰撞, 碰撞后分子运动速度按经典力学的规律计算得到。除了初始建立模拟分子的速度分布和空间分布采用了随机抽样技术之外, 分子动力学方法完全是决定论的。这种方法的优点在于只要气体的初始状态给定, 就能够计算所有的 Knudsen 数 ($Kn = \lambda/L$, λ 为分子平均自由程, L 为流动特征尺度) 下的气体运动, 包括稠密气体和液体的运动。但是采用这种方法模拟任意一个分子的运动时, 都要考虑到所有其余气体分子的运动以发现是否有可能与其发生碰撞, 于是模拟所需的计算机时正比于模拟分子数的平方, 因此通常分子动力学方法所用的模拟分子数都不能太大, 限制了这一方法的应用范围。

* 收稿日期: 2002-03-29
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19902021)
作者简介: 吴雄(1977-), 男, 硕士生。

Bird^[8]注意到分子动力学方法的主要缺点在于采用了决定论方法判断分子间碰撞耗费了巨大机时。这种决定论方法既不是 Monte - Carlo 方法所需要的,也不是分子运动的物理事实,又带来计算的巨大困难。于是 Bird 提出采用几率论方法判断分子间是否发生碰撞,从而建立了 DSMC 方法。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,认为在充分短的时间间隔内,模拟分子的运动与碰撞是解耦的。即在计算时间步长内,模拟分子作匀速直线运动,之后从几率的角度出发处理模拟分子之间、以及模拟分子与壁面的碰撞问题。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。

2 模拟实例及结果分析

本文利用 DSMC 方法对 Knudsen 数为 0.01 和 0.02 的二维凹槽流动问题进行了数值模拟。计算域及边界条件的处理如图 1 所示,其中 AH 为来流边界, GF 是出口边界, HG 为外流边界, AB 、 BC 、 CD 以及 DE 和 EF 均是固壁,采用漫反射边界条件。凹槽上方流体以匀速运动驱动凹槽内流体运动。计算采用矩形网格。分子模型为可变硬球(VHS)模型。在对凹槽流的数值模拟中,流场初始分布采用与来流一致的平衡分布。

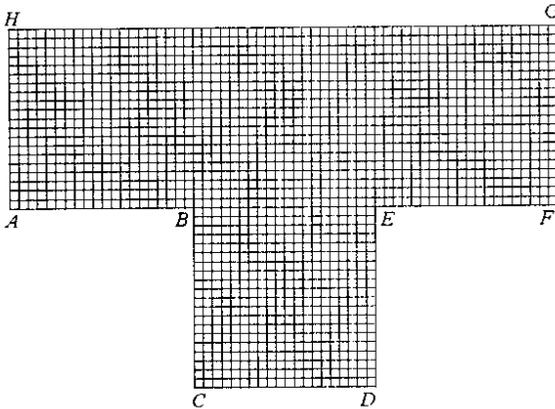


图 1 仿真计算的计算域、网格划分及边界条件示意图

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

图 2 表明,上表面具有匀速来流的凹槽粘性流,在腔内流场速度达到稳定后,凹槽内形成了以水平方向中点附近为中心的大旋涡。同时,由于 Knudsen 数较小(Re 数相应较大),在下水平边的左右角形成了清晰的二次流。这些结果与 BGK 模型的模拟结果^[2,3]是一致的。此外,从图 2~5 都可以看出,在凹槽上水平边的右角处流场有明显的分离流,这与实际的流动过程相符合。这些都表明 DSMC

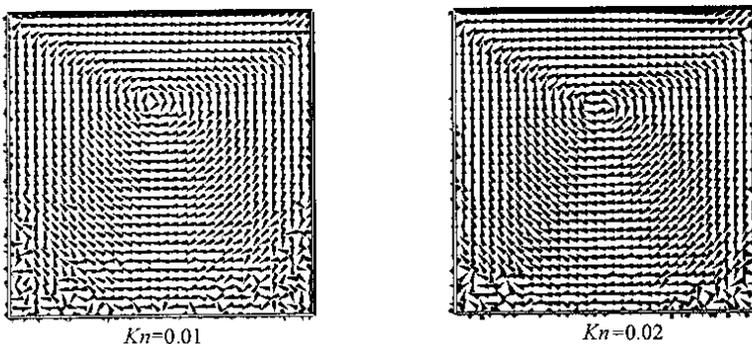


图 2 不同 Kn 数下的速度分布图

Fig. 2 Velocity vector in groove at different Knudsen number

方法确实能够真实的模拟凹槽粘性流。

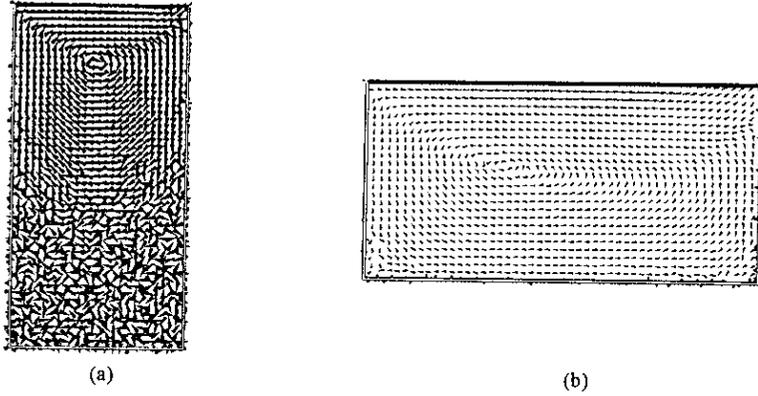
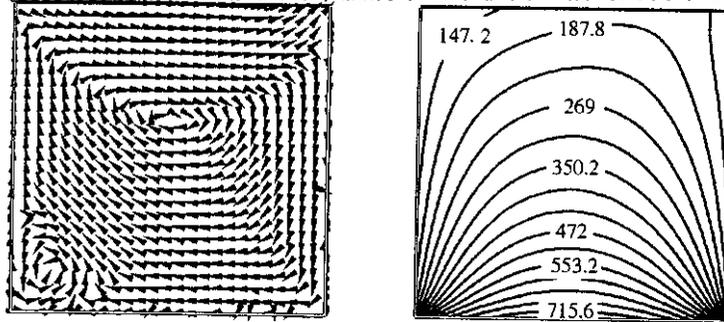


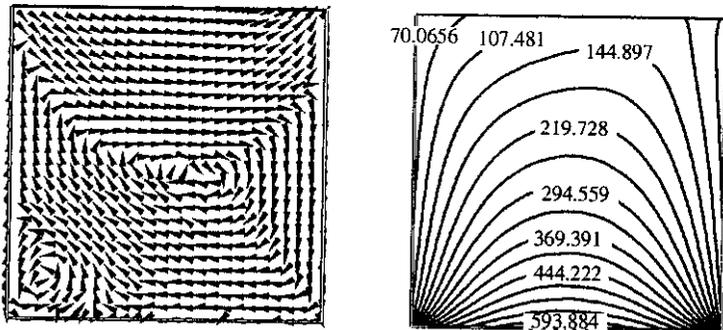
图3 不同展弦比凹槽速度分布图 ($Kn = 0.02$)

Fig.3 Velocity vector in groove at different span - chord ratio ($Kn = 0.02$)

形状不同的凹槽,其旋涡的发展也不一样。图3(a)中,凹槽深度加深,凹槽入口面积相对减小,水平来流只卷入凹槽上部分,旋涡只在凹槽上半部分形成,无法向凹槽下半部分发展。图3(b)中,由于凹槽入口面积增大,凹槽深度相对减小,水平来流卷入较深,旋涡发展得很全面,几乎充满了整个凹槽。计算中还考察了非等温壁对凹槽内旋涡的影响,如图4和图5所示。从图中可以看出,和等温壁的结果(图2)相比,在Knudsen数相同(即Re数相同)的前提下非等温壁凹槽内流动更为丰富,出现了一大一小的两个涡。热壁凹槽内的小涡出现于左下角处,而冷壁凹槽内的小涡则位于右下角处。在图5(b)中可以看到,冷壁凹槽内除右下角生成小涡外,在左下角处也生成了小涡。由于流体与下壁面温差很大,冷壁下壁面附近流体温度很低,造成流体分子在壁面处堆积,从而产生了这种现象。从图4中还可以得知,对于热壁凹槽,在温差加大时,旋涡中心下移向凹槽的几何中心。



(a) 下壁温度为1000K,其他壁面及来流温度为100K



(b) 下壁面温度为1000K,其他壁面及来流温度为33K

图4 热壁凹槽内速度分布及温度等值线图

Fig.4 Velocity vector and isotherm in the groove with heat wall at Knudsen number 0.02

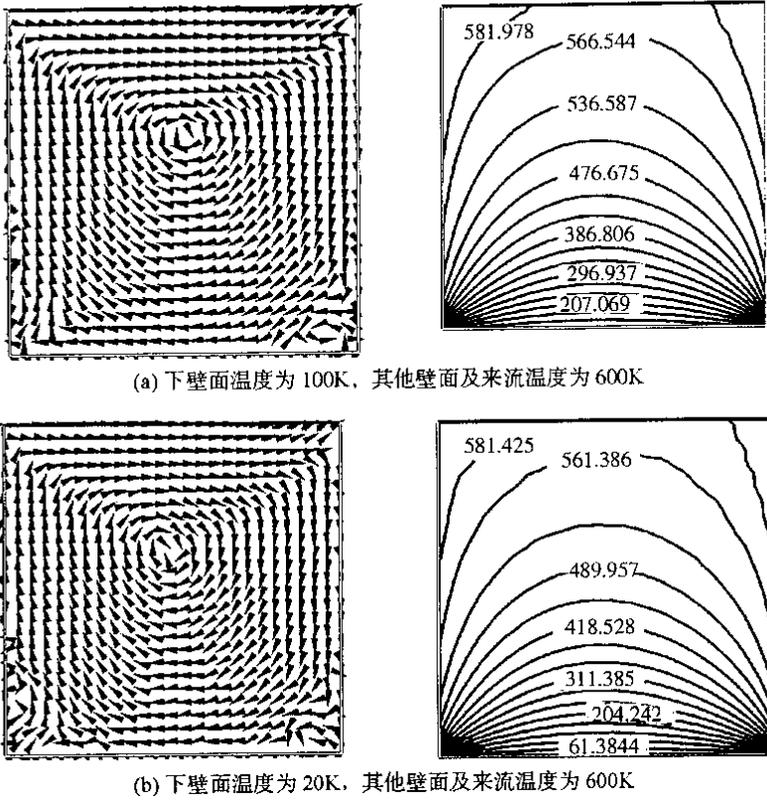


图 5 冷壁凹槽内速度分布及温度等值线图

Fig.5 Velocity vector and isotherm in the groove with cold wall at Knudsen number 0.02

DSMC 方法存在着不可避免的背景噪声。背景噪声所引起速度涨落的量阶为 $v_m/\sqrt{N_s}$ (v_m 为热运动速度, N_s 为统计样本个数)。凹槽流的流场为全速度域流场, 凹槽旋涡中的流体速度量阶为 1 ~ 10m/s, 远低于室温下的热运动速度 (1000m/s)。用 DSMC 方法模拟凹槽流动, 面临着宏观流动现象被背景噪声淹没的问题。从图 6 可以看出, 在相同条件和相同的样本数目情况下, 超声速来流更容易收敛。由此可见, 在模拟包含低速流动的全速度域流场时, 经典的 DSMC 方法有其局限性, 必须对其加以改进。

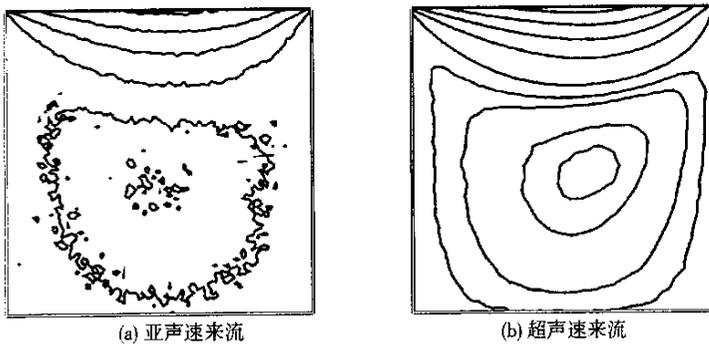


图 6 凹槽内的速度分量 u 的等值线图 (Kn = 0.02)

Fig.6 The isoline of the component u of the velocity vector in groove at Knudsen number 0.02

3 结论

计算结果表明所采用的 DSMC 方法能够真实模拟包含涡旋等复杂流动现象的凹槽粘性流动, 凹槽形状和壁温对凹槽内旋涡的大小、形状、位置等有极大的影响。此外, 在计算中发现 DSMC 方法在模拟全速度域流场时存在局限性, 必须加以改进。

参考文献:

- [1] 廖守亿, 王正华等. 预处理方法在低速粘性流动中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2000(2).
- [2] Boze mann J D. Numerical study of Viscous Flow in a Cavity[J]. J. Comp. phys, 1973.
- [3] 陈若航, 孔令江等. 二维凹槽粘性流的格子 Boltzmann 方法模拟[J]. 物理学报, 2000(4).
- [4] 孔令江, 刘海英等. 粘性凹槽流的格子 Boltzmann 方法模拟[J]. 广西物理, 1999(3).
- [5] 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.
- [6] Shen C, Xu X, Hu Z, Wu W. Transient motion of rarefied gas caused by heat addition[J]. Progress in Astro Aeronautics. 1994, 159-234.
- [7] Shen C, Yi Z Q. Direct numerical test of the BGK model by the DSMC method[J]. Acta Mechanica Sinica, 2000, 16: 133.
- [8] Bird G A. Molecular Gas Dynamics and Direct Simulation of Gas Flow[M]. Clarendon, Oxford, 1994.

