

近空间高超声速流场通量分裂型 DSMC-IP 方法

许 啸, 王学德, 谭俊杰

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 南京 210094)

摘 要: 针对近空间高超声速流场的特点, 采用 Van Leer 格式对直接模拟蒙特卡洛-信息保存(DSMC-IP)方法质量守恒方程中的计算格式进行改进, 将局部马赫数作为分裂通量的标准, 并重构单元分界面两侧的左右输运通量, 使得计算格式具有通量分裂的特点, 解决了 DSMC-IP 方法在高超声速流场计算中的应用问题, 将改进后的通量分裂型 DSMC-IP 方法引入非结构网格中, 对二维近空间高超声速流场进行数值模拟. 计算结果表明: 通量分裂型 DSMC-IP 方法所得出的数值结果与实验值及参考值符合较好, 明显降低了直接模拟蒙特卡洛(DSMC)方法所带来的统计耗散. 当来流气体的稀薄程度增加时, 其非平衡效应也更加明显, 而通量分裂型 DSMC-IP 方法的计算结果与参考值相差均在 10% 以内, 良好地反映了非平衡条件下的流场特征, 验证了通量分裂型 DSMC-IP 方法的可行性和有效性.

关 键 词: 近空间; 高超声速; 直接模拟蒙特卡洛-信息保存(DSMC-IP)方法; Van Leer 格式; 流场

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Flux splitting DSMC-IP method in near space hypersonic flow field

XU Xiao, WANG Xue-de, TAN Jun-jie

(School of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: According to the characteristics of the hypersonic flow field in near space, the computational format of the mass equation of direct simulation Monte Carlo-information preserve (DSMC-IP) method was improved by the Van Leer scheme. The local Mach number was set as the standard of the flux splitting, and the transport fluxes on both sides of the cell interfaces were reconstructed. So the computational format has the characteristic of the flux splitting, and the application problems of the DSMC-IP method in hypersonic flow field were solved. The two-dimensional hypersonic flow field in near space was simulated by the improved flux splitting DSMC-IP method with unstructured grid. The solution of computation by the flux splitting DSMC-IP method has good agreement with the results of experiment and reference value, and the statistics dissipation of direct simulation Monte Carlo (DSMC) method was reduced significantly. When the flow becomes more rarefied, the non-equilibrium effect becomes more obvious. In this situation the results of flux splitting DSMC-IP method differs within 10% from the reference values, so the characteristic of the flow field is well reflected in non-equilibrium situation. The results prove the feasibility and validity of the flux splitting DSMC-IP method.

收稿日期: 2014-03-11

基金项目: 预研基金; 南京理工大学紫金之星计划项目; 江苏省青蓝工程资助项

作者简介: 许啸(1986—), 男, 江苏兴化人, 博士生, 主要从事稀薄气体空气动力学方面的研究.

Key words: near space; hypersonic;
direct simulation Monte Carlo-information preserve (DSMC-IP) method;
Van Leer scheme; flow field

随着航空航天技术的不断发展,各类飞行器在近空间中的工作时间越来越长,其飞行过程中的运动特性逐渐成为研究的热点.在高空低密度环境中,连续介质模型开始失效,基于 Navier-Stokes 方程的计算流体动力学(CFD)方法不再适用,而稀薄气体动力学方法则成为该领域的主要研究方法^[1-6].这其中 Bird 提出的 DSMC 方法得到了广泛的运用.但 DSMC 方法的计算具有随机性,因此该方法一直面临统计涨落对计算结果的干扰^[7-9].为此,FAN 等提出了 DSMC-IP 方法.该方法将分子的信息量进行保存,并在计算中即时更新,最后将其用于数值统计.由于该方法排除了随机信息在统计中的干扰,因此可以降低 DSMC 方法的耗散性^[10].DSMC-IP 方法最初应用于低速领域,并获得了成功^[10-11].但在稀薄气体高超声速流场计算中,强激波的出现造成了数值间断,稀薄气流中剧烈的内能变化引发了非平衡效应并导致分子不再遵循 Maxwell 分布律,因此原低速条件下的 DSMC-IP 方法不再适用于该领域的数值模拟,需要针对高超声速流场中出现的问题对 DSMC-IP 方法进行修正.

针对稀薄气体高超声速流场中的非平衡效应,WANG 和 Boyd 在 2003 年提出了一种 DSMC-IP 能量通量模型,并将其运用于计算非平衡流场^[12].SUN 和 Boyd 在 2005 年以 Maxwell 输运方程为基础,推导出 DSMC-IP 方法的控制方程,并采用单元内的平均速度将动量和能量方程的关联项划分为不同的部分进行计算,改善了 DSMC-IP 方法在非平衡流场中失效的问题^[13].此后,Masters 和 YE 提出了统计空间三维八分法^[14];ZHANG 和 FAN 等在此基础上引入了 2 阶温度张量,将分子温度均分到各运动方向上^[15];另外一些研究也为 DSMC-IP 方法计算提供了各种思路,并结合不同的情况进行了优化处理^[16].

为解决稀薄气体高超声速流场计算时出现数值间断的问题,本文结合文献[13]中的 DSMC-IP 方法,采用 Van Leer 格式对其中的质量通量差格式加以改进,将其引入非结构网格 DSMC 方法中,对 DSMC-IP 方法进行改进,编制程序并进行二维高超声速流场的数值模拟,通过与文献中的算法和实验结果进行比较,验证通量分裂型

DSMC-IP 方法的可行性和有效性,并对计算方法的特点和规律进行分析.

1 数值方法

1.1 DSMC-IP 方法控制方程

SUN 和 Boyd 以 Maxwell 输运方程为基础,推导出 DSMC-IP 方法所满足的质量、动量和能量守恒方程形式为^[13]

$$\frac{\partial}{\partial t}(nm) + \nabla \cdot (nm \mathbf{V}_c) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(nm \bar{\mathbf{V}}) + \nabla \cdot (nm \bar{\mathbf{c}} \bar{\mathbf{V}}) = -\nabla \cdot (nm \bar{\mathbf{c}} \bar{\mathbf{c}}') + \Delta P \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{2} nm \overline{(V^2 + \xi RT)} \right] + \nabla \cdot \left[\frac{1}{2} nm \bar{\mathbf{c}} (\overline{V^2 + \xi RT}) \right] = \nabla \cdot \left[\frac{1}{2} nm \bar{\mathbf{c}}' (\overline{V^2 + \xi RT - c'^2}) \right] + \Delta Q \quad (3)$$

式中 n 为分子数密度; m 为分子质量; $\mathbf{c}$ 为分子的微观速度; $\mathbf{V}$ 为分子的信息速度; ξ 为分子自由度; $\mathbf{V}_c$ 为单元内的统计速度,下标 c 表示单元; R 为理想气体常数; T 为分子的信息温度;上标“—”表示单元内的平均值. $P = mc$, $Q = \frac{1}{2} mc^2$. 方程等号右端项中 $\mathbf{c}'$ 为单个分子的微观速度与流场宏观速度之差, $\mathbf{c}''$ 为单个分子的微观速度与分子的信息速度之差,分别代表了分子速度与宏观速度和信息速度之间的波动值.

方程式(1)中等号左端第 1 项为质量的时间变化率,等号左端第 2 项为单元中分子的微观运动对质量造成的变化;方程式(2)和式(3)中等号左端第 1 项为动量和能量的时间变化率,等号左端第 2 项为分子运动对动量和能量造成的变化,等号右端第 1 项为分子不同类型的波动值之间的关联项,等号右端第 2 项为分子碰撞积分项^[13].

1.2 DSMC-IP 质量守恒方程的计算方法

DSMC-IP 方法的控制方程中包含分子的运动项、碰撞项和关联项,但质量守恒方程中仅包含运动项,采用计算连续方程的形式进行处理^[13].低速条件下的 DSMC-IP 方法使用线性差分法计算输运方程中的质量通量^[9],但高超声速流场中

激波的出现使计算中出现了数值间断,此时线性差分法无法准确计算出激波处的通量,若使用线性差分法,则不但在激波两侧会出现强烈的数值振荡,甚至可能会出现严重的错误,如图1所示.图中所显示的物理量为密度,可以看出,在激波边界附近的数值呈现出明显的不稳定趋势,继续计算则会出现密度小于零的非物理解,最终导致程序崩溃.为解决这一问题,本文引入 Van Leer 格式,对质量守恒方程的通量构造格式进行了修正,具体步骤如下:

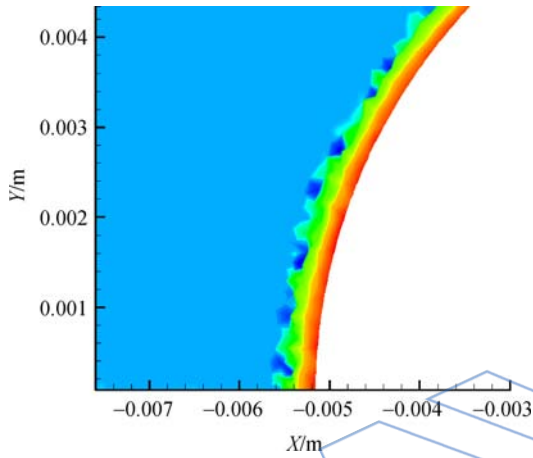


图1 线性差分法计算质量通量时出现的问题

Fig. 1 Numerical errors of mass flux calculation using linear interpolation method

1) 首先将方程式(1)应用于每一个网格单元中,将其格式改写为

$$(n \cdot m)^{t+\Delta t} - (n \cdot m)^t = - \left(\frac{\Delta t}{A} \right) \oint_{\text{cell}} (n \cdot m \cdot V_c \cdot n_i) dl \quad (4)$$

式(4)等号右端项为每个单元的质量通量, n_i 表示边线外法向, A 为计算单元的面积.

2) 对每个单元内的分子进行统计,将其所携带的信息量进行统计平均,计算出单元内的统计速度 V_c , 平均温度 $\bar{T}$ 和声速 c' .

3) 将单元内分子的信息量的统计平均值作为统计量,计算出单元中各边界上的局部马赫数 Ma . 计算公式为

$$Ma = Ma_l + Ma_r \quad (5)$$

在计算每条边的通量时,首先计算两侧单元内的统计速度与边线外法向的乘积,根据该值的正负确定左右单元,并求出左右单元内的局部马赫数.

4) 采用 Van Leer 格式,将方程式(4)中等号右端项改写为

$$- \left(\frac{\Delta t}{A} \right) \oint_{\text{cell}} (n \cdot m \cdot V_c \cdot n_i) dl = - \left(\frac{\Delta t}{A} \right) \oint_{\text{cell}} (f_{\text{mass}}^+ + f_{\text{mass}}^-) dl \quad (6)$$

对每条边左右单元内的质量通量进行重构,具体形式为

$$f_{\text{mass}}^+ = \begin{cases} n_l m c'_l \cdot Ma_l & Ma_l \geq 1 \\ + n_l m c'_l \frac{(Ma_l + 1)^2}{4} & |Ma_l| < 1 \\ 0 & Ma_l \leq -1 \end{cases} \quad (7)$$

$$f_{\text{mass}}^- = \begin{cases} 0 & Ma_r \geq 1 \\ - n_r m c'_r \frac{(Ma_r - 1)^2}{4} & |Ma_r| < 1 \\ n_r m c'_r \cdot Ma_r & Ma_r \leq -1 \end{cases} \quad (8)$$

式中 f 为质量通量,下标 l 和 r 表示左右单元.由此可以得到质量通量重构后的左右状态,并求和得出每条边线上的质量通量.

5) 对单元中所有线段的质量通量求和,得出每一时间步中单元的总质量通量,最后根据方程式(4)求出单元中下一时间步的密度.

在质量守恒方程中,影响密度的主要变量是单元内的统计速度 V_c , Van Leer 格式以局部马赫数为判断依据将速度矢量分裂开,将波的传播方向体现到计算中,使激波处的速度通量符合流场特征.将该格式引入计算中,改进守恒方程中质量通量的构造格式,从而解决了数值间断给通量计算带来的问题.

1.3 DSMC-IP 动量与能量守恒方程的计算方法

在动量与能量守恒方程中,分子的信息速度和信息温度计算包括分子运动项、碰撞项和分子关联项,分子运动项和碰撞项可在 DSMC 方法的分子随机运动与碰撞过程中进行处理,而分子关联项则按照求解控制方程的步骤进行计算.

分子的运动与碰撞遵循动量和能量守恒定律,并且会导致分子趋向于平衡态,因此分子碰撞项修正的计算公式将分子碰撞对中的动量与能量进行平均分配,结合分子直径的修正^[9],其具体形式为

$$V''_{i,1} = \frac{1 + C_\mu \cdot \cos \theta}{2} V'_{i,1} + \frac{1 - C_\mu \cdot \cos \theta}{2} V'_{i,2} \quad (9)$$

$$V''_{i,2} = \frac{1 - C_\mu \cdot \cos \theta}{2} V'_{i,1} + \frac{1 + C_\mu \cdot \cos \theta}{2} V'_{i,2} \quad (10)$$

$$T_1' = \frac{1 + C_k \cdot \cos \theta}{2} T_1' + \frac{1 - C_k \cdot \cos \theta}{2} T_2' + \frac{(V'_{x,1} - V'_{x,2})^2 + (V'_{y,1} - V'_{y,2})^2}{4\xi R} \quad (11)$$

$$T_2' = \frac{1 - C_k \cdot \cos \theta}{2} T_1' + \frac{1 + C_k \cdot \cos \theta}{2} T_2' + \frac{(1 - C_\mu \cdot \cos^2 \theta) \cdot (V'_{x,1} - V'_{x,2})^2 + (V'_{y,1} - V'_{y,2})^2}{4\xi R} \quad (12)$$

式中等号左端项和右端项的 V 和 T 分别为碰撞后和碰撞前的分子信息值, C_k 和 C_μ 分别为热碰撞参数和摩擦碰撞系数^[9], θ 为碰撞后的偏转角. 据此可得出碰撞后分子的信息速度和信息温度.

分子关联项表示了动量和能量的输运过程给单元内分子信息值造成的影响, 在求解控制方程时需要取某一界面进行输运量的积分, 因此其处理过程类似于通量计算. 在稀薄气体高超声速流场中, 剧烈的内能变化和强烈的稀薄效应引发了非平衡效应, 这使得分子速度分布律严重偏离了 Maxwell 分布律. 在低速条件下的 DSMC-IP 方法中, 分子关联项的速度分布基于 Maxwell 分布律, 因此无法体现出非平衡效应时的流场特性.

为解决这一问题, 本文采用通量分裂型 DSMC-IP 方法^[13]进行计算. 该方法将分子的信

息量分为不同的速度空间进行处理, 对速度分布函数进行修正, 因此可以将速度分布的情况反映到计算中, 从而使得计算条件更加符合真实情况. 其具体步骤如下:

1) 对方程式(2)和式(3)进行转换, 略去其中的分子运动项, 将方程变为如下形式.

$$\frac{\partial}{\partial t}(nm\bar{V}) = -\nabla \cdot (nm\bar{c}'c') \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{2} nm \overline{V^2} + \xi RT \right] = \nabla \cdot \left[\frac{1}{2} nm \overline{c'(V^2 + \xi RT - c'^2)} \right] \quad (14)$$

通过该方程计算分子关联项的数值.

2) 循环流场中每个单元中的各条边线, 将单元中所有分子速度与该边线的外法向相乘, 得出所有分子速度在该法向上的投影. 将这些速度求和平均, 得出该单元在该法线方向上的平均速度.

3) 将单元中的分子速度与平均速度进行比较, 按照比较值把分子分入两个不同的空间, 并统计各自集合中的分子数及分子信息值.

4) 根据文献[13]中所给出的分子关联项的改进形式对方程式(13)和式(14)的等号右端项进行求解计算, 具体表达式为

$$\overline{c'_k c'_j} \big|_{FS, j=k} = \frac{1}{2} \overline{RT} \big|_{c_{i,k} > a_k} + \frac{1}{2} \overline{RT} \big|_{c_{i,k} \leq a_k} + \frac{1}{2} RT f_{er} \frac{V_k - \bar{c}_k}{\sqrt{2RT}} \big|_{c_{i,k} > a_k} - \frac{1}{2} RT f_{er} \frac{V_k - \bar{c}_k}{\sqrt{2RT}} \big|_{c_{i,k} \leq a_k} \quad (15)$$

$$\overline{c'_k c'_j} \big|_{FS, j \neq k} = \sqrt{\frac{RT}{2\pi}} (V_k - \bar{c}_k) \exp \left[-\frac{(V_k - \bar{c}_k)^2}{2RT} \right] \big|_{c_{i,k} > a_k} - \sqrt{\frac{RT}{2\pi}} (V_k - \bar{c}_k) \exp \left[-\frac{(V_k - \bar{c}_k)^2}{2RT} \right] \big|_{c_{i,k} \leq a_k} \quad (16)$$

$$\overline{(V^2 + \xi RT - c'^2) c'_k} \big|_{FS} = -R \overline{TV_k} \big|_{c_{i,k} > a_k} - R \overline{TV_k} \big|_{c_{i,k} \leq a_k} - RT V_k f_{er} \frac{V_k - \bar{c}_k}{\sqrt{2RT}} \big|_{c_{i,k} > a_k} +$$

$$RT V_k f_{er} \frac{V_k - \bar{c}_k}{\sqrt{2RT}} \big|_{c_{i,k} \leq a_k} - \sqrt{\frac{RT}{2\pi}} RT \exp \left[-\frac{(V_k - \bar{c}_k)^2}{2RT} \right] \big|_{c_{i,k} > a_k} + \sqrt{\frac{RT}{2\pi}} RT \exp \left[-\frac{(V_k - \bar{c}_k)^2}{2RT} \right] \big|_{c_{i,k} \leq a_k} \quad (17)$$

其中下标 j 和 k 代表不同分子速度在单元各面法线方向上的投影, i 表示单元中的分子编号. FS 表示通量分裂, a 表示单元内分子平均速度, f_{er} 表示误差函数. 从式中可以看出, 方程等号右端项表示为两个不同空间中分子信息值表达式之和. 将不同空间中的分子信息值代入上式并求和平均, 构造出等号右端项的具体数值, 并以此求解出下一时刻分子的信息速度和信息温度.

2 通量分裂型 DSMC-IP 方法流程

通量分裂型 DSMC-IP 方法具体步骤如下:

1) 将初始流场中的宏观温度和速度赋值给每个分子, 作为其携带的分子信息值, 在此基础上生成分子随机速度, 并将流场初始密度赋值给每个单元.

2) 按照分子随机速度计算所有分子在每一

时间步内的运动轨迹,得出其新的坐标位置与所在单元,并将跃出流场范围的分子删除,同时在外场边界增添新进入的分子。

3) 以 DSMC 方法随机选取分子碰撞对,按照变径硬球模型(VHS)处理碰撞后的分子速度,同时按照文献[9]中提供的模型计算出碰撞后分子信息速度和信息温度。

4) 计算出单元内分子速度的平均值,采用改进后的质量通量分裂格式处理方程式(1),计算出新密度值,同时采用通量分裂型 DSMC-IP 方法处理方程式(2)和式(3),得出分子信息速度和信息温度。

5) 统计单元中的分子信息值,得出每一时间步的统计值,反复循环步骤 2)~步骤 4)直至流场稳定。

6) 对流场内单元进行取样统计,得出流场最终计算结果。

3 数值实例及结果分析

3.1 带有扩张角的圆管绕流计算分析

3.1.1 模型尺寸及初始条件

模型和计算条件来自文献[17],结构如图 2 所示,计算区域为管外的流场,即管壁与扩张角形成的组合体。来流气体为纯氮气,黏度的温度幂指数为 0.74,分子自由度为 5,来流速度为 2301.7 m/s,来流气体温度为 118.2 K,初始密度为 $9.023 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ 。模拟海拔高度约为 55 km,连续性方程并未完全失效,但文献[17]中指出该流场已处于非平衡条件下,并列出了 DSMC 方法的计算结果。

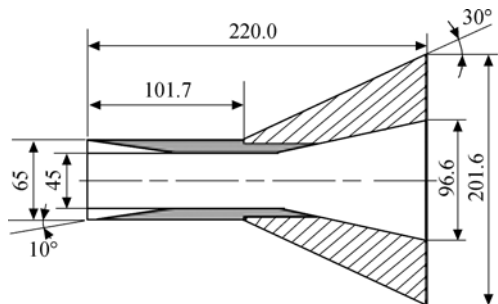


图 2 带有扩张角的圆管结构示意图(单位:cm)

Fig. 2 Structure sketch of hollow cylinder with conical flare (unit:cm)

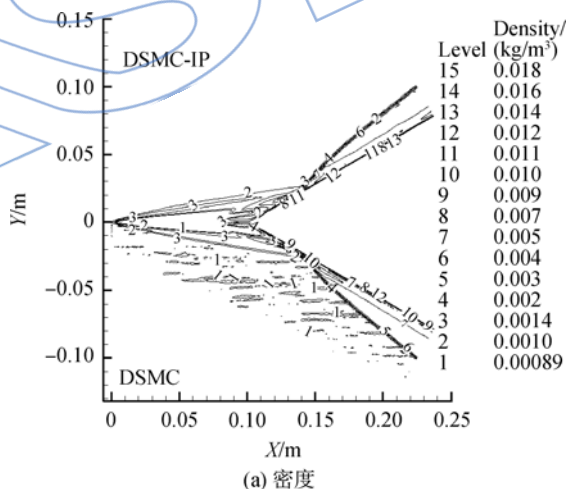
本文计算中分子碰撞模型取为 variable hard sphere(VHS)模型,气体分子与物面作用采用漫反射模型。流场中分子数密度为 $1.94 \times 10^{22} / \text{m}^3$,

每个模拟分子所代表的真实分子数设为 3.5×10^{14} 。采用非结构网格覆盖全流场,共由 76 407 个三角形单元和 39 406 个点组成整体网格区域,计算中统计分子数约为 400 万,时间步长为 $7 \times 10^{-9} \text{ s}$,共计算 400 000 时间步,统计 10 000 时间步。

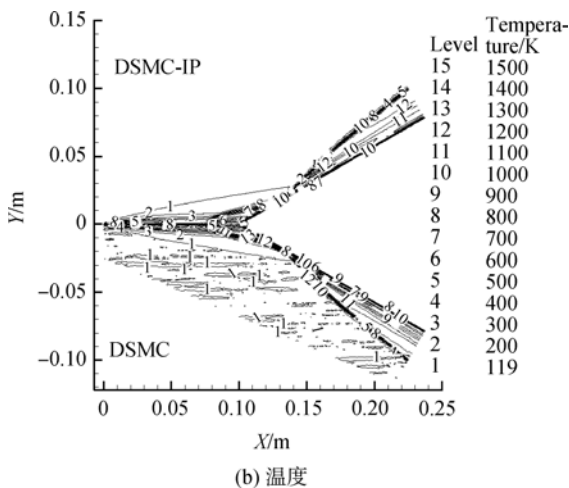
3.1.2 计算结果分析

图 3 给出了 DSMC-IP 和 DSMC 方法计算结果比较。从图中可以看出,两种方法所得流场结果大体一致,激波内部的等值线位置基本吻合,能够清晰地显示出激波相交现象。相对于 DSMC-IP 方法,DSMC 方法由于其统计特性问题显现出云状的耗散现象,这使得激波区域的分界面不够清晰,而 DSMC-IP 方法结果中的激波外层边界较为光滑,由此可证明通量分裂型 DSMC-IP 方法明显提高了流场的分辨率。

图 4 分别给出了 DSMC-IP 方法计算结果中壁面的压力系数 C_p 、热传导率系数(表示单位时间内单位面积上的热流量) S 和摩擦因数 C_f ,并与文献[17]中的计算结果与实验结果进行对比



(a) 密度



(b) 温度

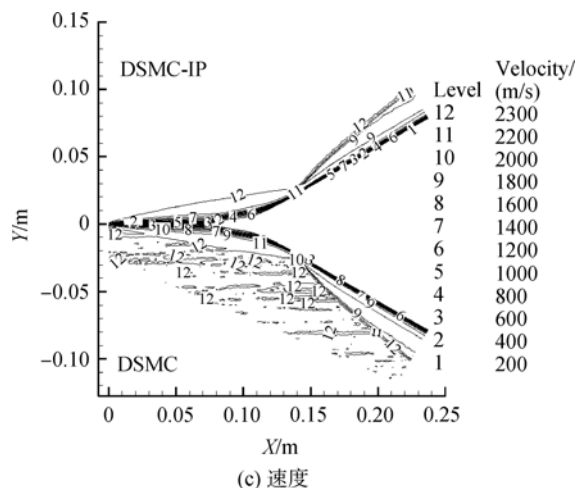


图3 DSMC和DSMC-IP方法计算结果比较
(带有扩张角的圆管)

Fig. 3 Results comparison of DSMC and DSMC-IP methods (hollow cylinder with conical flare)

(L 为以驻点为起始点的弧长值).从图中可以看出,DSMC-IP方法计算结果与实验结果基本一致,在激波发展与相交位置的计算结果与实验结果相符.各图均显示出激波相交区数值最高,随后急剧下降的趋势.而由于激波相交区的压力最高,流场中产生了逆压梯度,在激波相交区前部出现了分离涡,这对压力系数和热传导率系数均产生了影响,而由于回流摩擦因数出现了负值.该计算

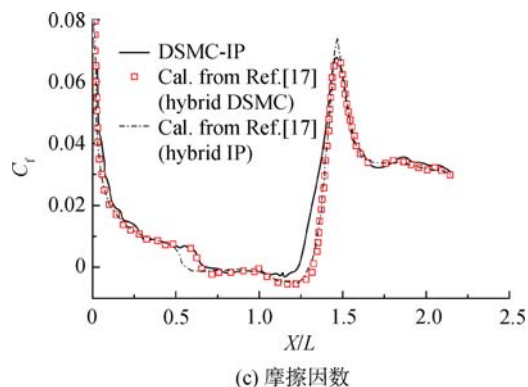
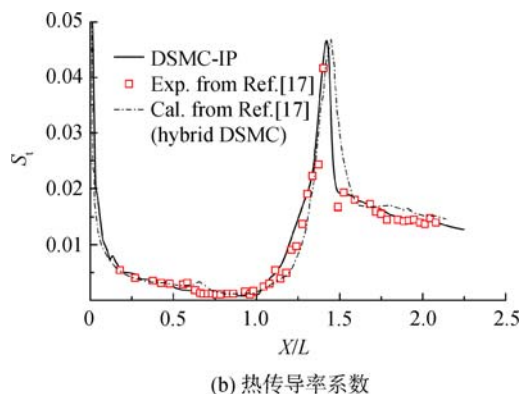
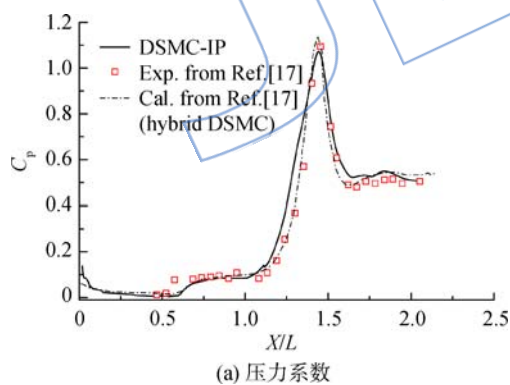


图4 壁面特征值计算结果比较(带有扩张角的圆管)
Fig. 4 Results comparison of characteristics on wall
(hollow cylinder with conical flare)

结果所反映出的流场特性均得到了文献[17]实验结果和计算结果的验证.由此说明了通量分裂型DSMC-IP方法可以较好地反映流场的物理特性,初步验证方法的可行性.

3.2 超声速圆柱绕流计算分析

3.2.1 模型尺寸及初始条件

超声速圆柱绕流模型初始条件来自文献[18],圆柱直径为0.1 m,采用非结构网格覆盖全流场,共由41694个三角形单元和21090个点组成整体网格区域.来流气体为纯氮气,黏度的温度幂指数为0.74,分子自由度为5,来流速度为1412.5 m/s,温度为300 K,圆柱壁面温度为500 K,密度为 $4.65 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$.计算条件中海拔高度约为90 km,来流气体克努森数约为0.133,此时连续性方程已失效.本文计算中分子碰撞模型取为VHS模型,气体分子与物面作用采用漫反射模型.流场中分子数密度为 10^{20} /m^3 ,每个模拟分子所代表的真实分子数设为 2.5×10^{13} .计算统计分子数约为140万,时间步长为 $4 \times 10^{-8} \text{ s}$,共计算100000时间步,统计10000时间步.

3.2.2 计算结果分析

图5分别给出了DSMC-IP和DSMC方法计算结果比较.从图中可以看出,当来流气体更加稀薄时,DSMC-IP方法的计算结果不仅完整地体现了流场结构,而且与DSMC方法的结果相比也符合较好.DSMC-IP方法所计算的流场等值线光滑而清晰,不但完整地体现了来流在经过圆柱头部时形成的强烈压缩,而且展示了随后出现的膨胀过程.在两种方法的计算结果中,各等值线的位置均相互对应,可以证明DSMC-IP方法的正确性.而在相同统计时间步的情况下,该方法所显示的

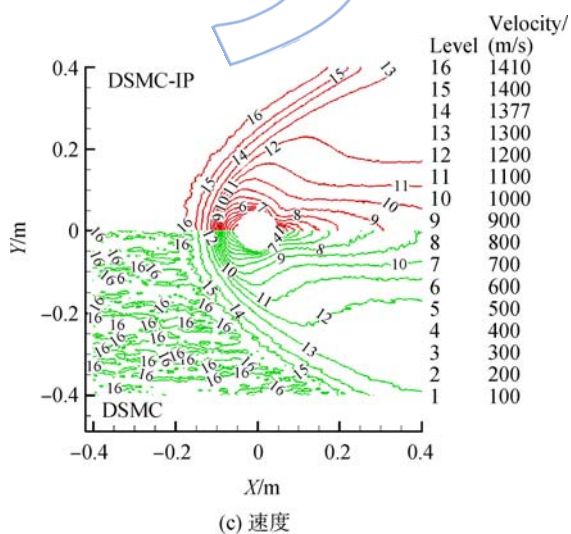
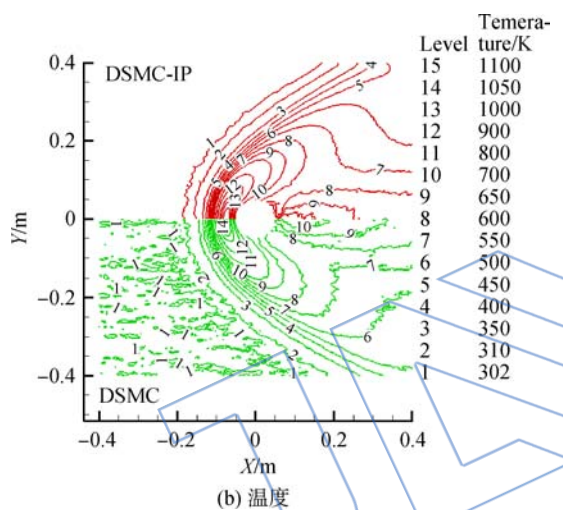
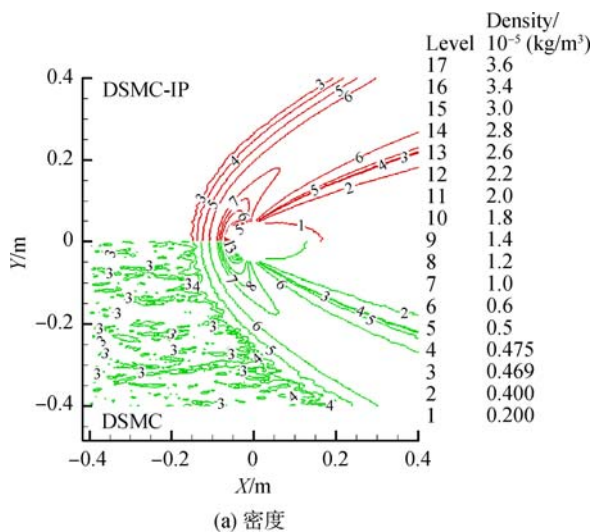


图5 DSMC和DSMC-IP方法计算结果比较
(超声速圆柱)

Fig. 5 Results comparison of DSMC and DSMC-IP
methods (supersonic cylinder)

流场结构明显更加清晰和光滑. DSMC 方法的计算结果在激波内外侧均显现出不同程度的耗散, 说明了 DSMC 方法要达到与 DSMC-IP 方法同等的结果需要更多统计时间步, 同时也证明了 DSMC-IP 方法在不同来流条件下同样具有正确性和有效性的结论.

图6给出了 DSMC 方法计算结果中分子不同自由度温度沿驻点线的分布情况. 从图中可以看出, 流场中平动温度峰值达到近 1300 K, 而转动温度峰值则为 900 K 左右, 其数值变化的趋势和峰值的位置也有不同, 说明了流场处于热力学非平衡状态. 这是由于计算条件中的克努森数大于 0.1, 已处于稀薄气体过渡区域, 其稀薄效应加剧了非平衡现象, 因此在该条件下采用通量分裂型 DSMC-IP 方法是必要的.

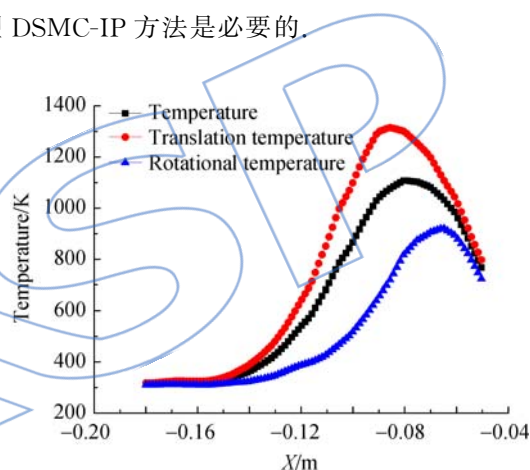
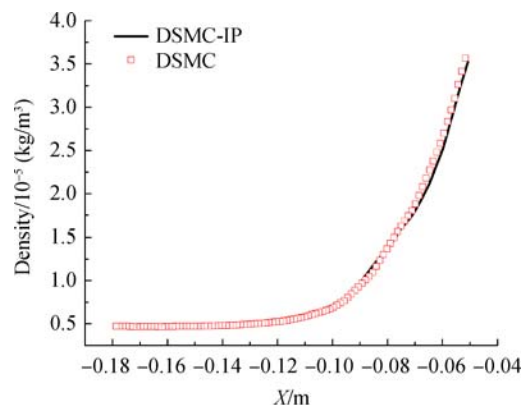


图6 不同自由度温度沿驻点线的分布

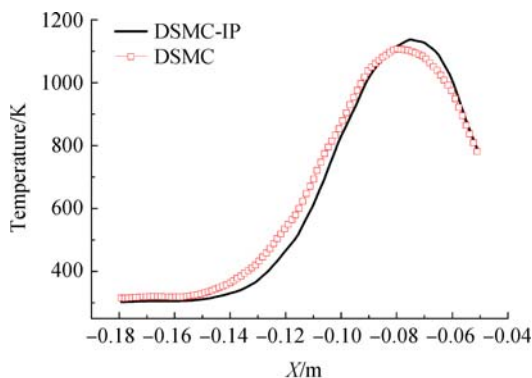
Fig. 6 Distribution of temperature in different
freedom degrees along stagnation line

图7给出了两种方法的计算结果沿驻点线分布的比较. 从图中可以看出, 两种方法计算结果沿驻点线的分布基本相同. 密度和速度的计算结果相差在 1% 以内, 其数值量级和变化趋势均相互吻合, 说明通量分裂型 DSMC-IP 方法对高超声速流场中的激波位置捕捉起到了良好的作用. 两种方法的温度计算结果存在一些差异, DSMC-IP 方法计算结果的峰值相对高出约 3.4%, 其位置略靠近圆柱头部, 相对偏差约为 0.005 m, 占总激波宽度的 4.7%. 出现这样的情况是因为在非平衡条件下, DSMC-IP 方法中的宏观温度与实际分子温度之间有一定差异. 而经过通量分裂格式的修正, 两者之间的偏差不超过 5%, 这一结果与文献[13]中的计算情况相符, 从而证明了该方法在非平衡条件下的可行性.

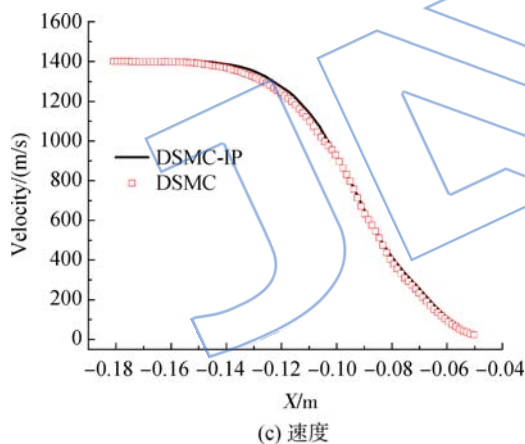
图8给出了两种方法计算结果在圆柱壁面的



(a) 密度



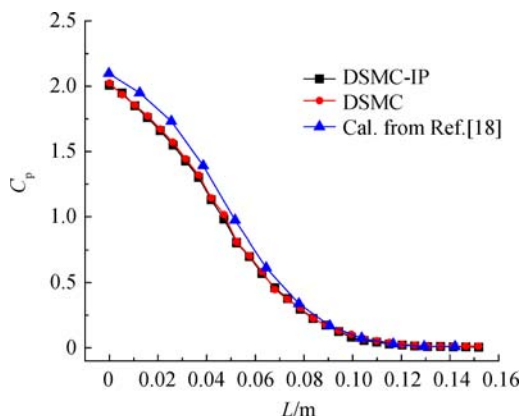
(b) 温度



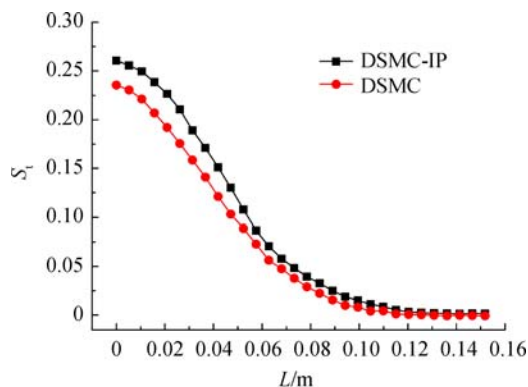
(c) 速度

图7 计算结果沿驻点线分布的比较

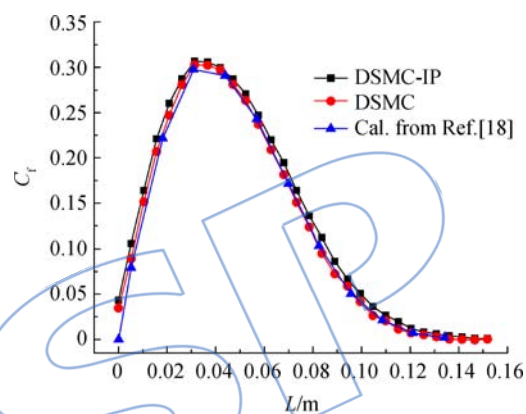
Fig. 7 Results comparison of distribution along stagnation line



(a) 压力系数



(b) 热传导率系数



(c) 摩擦因数

图8 壁面特征值计算结果比较(超声速圆柱)

Fig. 8 Results comparison of characteristics on wall (supersonic cylinder)

特征值分布情况,并与文献[18]中的计算结果进行比较.从图中可以看出,两种方法的计算结果趋势基本一致,并与文献[18]中的计算结果符合较好.两种方法计算的压强系数基本吻合,与文献[18]相比较,在驻点部分相差不到5%,可认为是计算条件中网格单元数和分子数不同所带来的误差.摩擦因数的计算结果则符合得更好,其峰值处相差不足1%,趋势也均相互吻合.而热传导率系数在驻点处则出现了一定的差异,其值约为10%.这是由于壁面处于强烈的非平衡条件下,对于单个分子,分子的信息量内能假设难以绝对满足,因此在统计与壁面碰撞的分子能量时出现了差异.但其整体数值偏差仅在10%左右.由此证明了通量分裂型 DSMC-IP 方法在稀薄气体高超声速流场的计算中有较好的正确性和规律性.

4 结 论

针对高超声速稀薄气体流场和通量分裂型 DSMC-IP 方法的特点,本文结合 Van Leer 格式,对 DSMC-IP 方法中质量通量的构造格式进行改

造,综合本文的数值计算结果,可以得出如下结论:

1) 在高超声速稀薄气体流场中,DSMC-IP 方法不但可以正确计算出流场的结构,而且计算结果更加清晰.而在相同的时间下,DSMC 方法的计算结果具有明显的耗散性,说明了 DSMC-IP 方法在降低结果的耗散性方面具有明显的优势.

2) Van Leer 格式对 DSMC-IP 方法在高超声速流场中的计算结果有明显的修正作用.在不同的来流条件下,两种方法的计算值均符合较好,完整体现了高超声速流场中的激波结构,说明 Van Leer 格式对计算结果的改进是有效的.

3) 非平衡效应对分子信息温度造成的影响会随着气体稀薄程度的增加而变得明显,因此在高超声速稀薄气体流场中采用通量分裂型 DSMC-IP 方法是必要的.而在统计壁面的特性参数时,分子信息值与真实值之间有一定偏差,但仍可完整地反应其数值变化趋势.

参考文献:

- [1] 王保国,李学东,刘淑艳.高温高速稀薄流的 DSMC 算法与流场传热分析[J].航空动力学报,2010,25(6):1203-1220.
WANG Baoguo, LI Xuedong, LIU Shuyan. DSMC algorithm and heat transfer analysis of high temperature and high velocity rarefied gas flow[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(6): 1203-1220. (in Chinese)
- [2] 王保国,李耀华,钱耕.四种飞行器绕流的三维 DSMC 计算与传热分析[J].航空动力学报,2011,26(1):1-20.
WANG Baoguo, LI Yaohua, QIAN Geng. Three-dimensional DSMC calculation and heat transfer analysis of four capsules for hypersonic rarefied conditions[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(1): 1-20. (in Chinese)
- [3] 王保国,黄伟光,钱耕,等.再入飞行中 DSMC 与 Navier-Stokes 两种模型的计算与分析[J].航空动力学报,2011,26(5):961-976.
WANG Baoguo, HUANG Weiguang, QIAN Geng, et al. Computation and analysis of DSMC and Navier-Stokes model in reentry flight[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(5): 961-976. (in Chinese)
- [4] 朱荣丽,曹义华,李栋,等.高超声速飞行器复杂流场过渡区 DSMC 数值模拟的一种新方案[J].宇航学报,2006,27(2):167-171.
ZHU Rongli, CAO Yihua, LI Dong, et al. A new version of hypersonic vehicle numerical simulation in direct simulation of Monte Carlo method of three dimensional flow in transitional regime[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(2): 167-171. (in Chinese)
- [5] 李中华,李志辉,李海燕,等.过渡流区 N-S/DSMC 耦合计算研究[J].空气动力学学报,2013,31(3):282-287.
LI Zhonghua, LI Zhihui, LI Haiyan, et al. Research on CFD/DSMC hybrid numerical method in rarefied flows [J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2013, 31(3): 282-287. (in Chinese)
- [6] 梁杰,阎超,李志辉,等.稀薄过渡区横向喷流干扰效应数值模拟研究[J].空气动力学学报,2013,31(1):28-33.
LIANG Jie, YAN Chao, LI Zhihui, et al. Numerical investigation of jet interaction effects in rarefied transition flow regime[J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2013, 31(3): 28-33. (in Chinese)
- [7] Bird G A. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows[M]. New York, US: Oxford University Press, 1994.
- [8] 沈青.稀薄气体动力学[M].北京:国防工业出版社,2003.
- [9] SUN Quanhua, Boyd D. A direct simulation method for subsonic, microscale gas flows[J]. Journal of Computational Physics, 2002, 179(2): 400-425.
- [10] FAN Jing, SHEN Qing. Statistical simulation of low-speed rarefied gas flows[J]. Journal of Computational Physics, 2001, 167(2): 393-412.
- [11] SUN Quanhua, Boyd I D, Candler G V. A hybrid continuum/particle approach for modeling subsonic, rarefied gas flows[J]. Journal of Computational Physics, 2004, 194(1): 256-277.
- [12] WANG Wenlan, Boyd I D. A new energy flux model in the DSMC-IP method for nonequilibrium flows[R]. AIAA-2003-3774, 2003.
- [13] SUN Quanhua, Boyd I D. Theoretical development of the information preservation method for strongly nonequilibrium gas flows[R]. AIAA-2005-4828, 2005.
- [14] Masters N D, YE Wenjing. Octant flux splitting information preservation DSMC method for thermally driven flows [J]. Journal of Computational Physics, 2007, 226(2): 2044-2062.
- [15] ZHANG Jun, FAN Jing, JIANG Jianzheng. Multiple temperature model for the information preservation method and its application to nonequilibrium gas flows[J]. Journal of Computational Physics, 2011, 230(19): 7250-7265.
- [16] YAO Zhaohui, ZHANG Xiwen, XUE Xiaobo. IP-DSMC method for micro-scale flow with temperature variation [J]. Applied Mathematical Modeling, 2011, 35(4): 2016-2023.
- [17] WANG Wenlan, Boyd I D. Hybrid DSMC-CFD simulation of hypersonic flow over sharp and blunted bodies [R]. AIAA-2003-3644, 2003.
- [18] 王学德,伍贻兆,夏健.二维热化学非平衡流动的非结构网格 DSMC 方法及其应用[J].空气动力学学报,2006,24(3):325-330.
WANG Xuede, WU Yizhao, XIA Jian. The implementation or unstructured DSMC method for 2D thermodynamic and chemical reaction non-equilibrium flow and its application [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2006, 24(3): 325-330. (in Chinese)