

## 再入体过渡区气动特性预测\*

陈伟芳,王全利,吴雄

(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)方法模拟球双锥复杂外形过渡区流动。给出了近连续区的温度与压强分布图,以及在不同 Knudsen 数、不同马赫数条件下球双锥表面压强系数和阻力系数的分布,并将阻力系数模拟结果与桥函数一体化估算结果进行了比较分析。

**关键词** DSMC 方法;桥函数;过渡区流动

中图分类号:O354 文献标识码:A

## Research on Aerodynamic Characteristics of Re-entry Figure in Transition Domain

CHEN Wei-fang, WANG Quan-li, WU Xiong

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

**Abstract** The transitional flow over a complicated sphere-bicone figure was simulated by DSMC method. The isotherm and pressure contour were shown in the near-continuum region and the drag coefficient and the pressure coefficient distribution curves of the surface were also presented at different Knudsen numbers and different Mach numbers. Comparison analysis of the drag coefficient was carried out between simulated results and approximation data estimated by the bridging-function formula.

**Key words** DSMC method; bridging-function; transitional flow

飞行器的气动力特性是确定其气动外形、飞行轨道和飞行性能的先决条件。过渡区流动中稀薄气体效应、强烈的粘性效应和压缩性效应三者耦合,流动现象复杂。由于过渡区域流动的物理现象的复杂性和流动控制方程的非线性,航天飞行器设计所需要的气动力和加热特性目前主要由工程计算方法得到。其中被广泛使用的一种工程计算方法称为桥函数方法<sup>[1]</sup>。这种方法是将飞行实验数据拟合合成经验公式,或由低  $Re$  数和高  $Ma$  数连续流特性经相似关联到过渡区域流动条件,再经实验结果调整。由于飞行试验数据的有限性和其本身固有的局限性,加上上述的相似关联性理论并无坚实的理论基础,使人们对桥函数经验公式结果的可信度提出了质疑,为此,有必要对之进行合理的检验和验证。本文应用在过渡区稀薄气体流动领域广泛使用的 DSMC 方法对过渡区球双锥气动力特性进行了数值模拟和计算,并相应地与桥函数经验公式估算结果作了比较。

### 1 桥函数经验公式

对于过渡流,洛克希德(Lockheed)提出了连接粘性干扰区与自由分子流区的桥关系公式:

$$c_{\text{过渡}} = c_{\text{连续}} + (c_{\text{自由分子}} - c_{\text{连续}}) \sin^n[\pi(A + B \lg Kn_{\infty})]$$

式中,  $n = 2$ ;  $A = \frac{3}{8}$ ;  $B = \frac{1}{8}$ ;  $Kn_{\infty}$ ——克努森数。上式中  $c$  可表示任何气动力系数(如升力,阻力,俯仰力矩系数等),下标“过渡”、“连续”和“自由分子”分别表示各区域的系数。连续流和自由分子流系数  $c$  值由对应的  $Kn_{\infty} = 0.001$  和  $Kn_{\infty} = 10.0$  分别确定。

\* 收稿日期:2003-09-10  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(19902021)  
作者简介:陈伟芳(1970—),男,副教授,博士。

## 2 DSMC 方法

Bird<sup>[2]</sup>提出的 DSMC(Direct Simulation Monte-Carlo)方法实质是用适当数目的模拟分子代表大量的真实气体分子,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。模拟过程主要包括两个部分:分子的微观运动和碰撞。在实际情况中,运动和碰撞是耦合在一起的,这在数值模拟中很难实现。如果限制 DSMC 时间步长小于平均碰撞时间,则在平均意义上一个分子在一个时间步内最多只有一次碰撞;同时要求网格小于平均自由程,则碰撞只会发生在同一网格中的分子间发生。这样就可将分子的运动和碰撞分开处理。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。处理运动还包括研究分子进入或逸出计算域(对应于进出口边界条件)与壁面的相互作用,碰撞的处理主要是碰撞对的选择、碰撞截面积的计算。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。关于 DSMC 方法的详细论述可见文献[3]。

## 3 计算结果分析与结论

本文应用 DSMC 方法对不同  $Kn$  数和不同  $Ma$  数条件下的球双锥绕流流场进行了数值模拟。

图 1 是  $Kn = 0.0284$  的近连续区球双锥绕流流场的压强及温度等值线。在近连续区,高超声速气流绕经目标流动时,在钝头前方形成一道极强的脱体弓形激波,一直往远后方延伸,直到最后退化成马赫波。高马赫数来流导致激波极为贴近物面,以至于物面和激波围成的激波层流动区域的宽度很小。在激波层内,沿物面方向的速度远大于法向速度,具有主流特征。高马赫数气流流经肩部后,迅速膨胀。由于第二半锥角比第一半锥角小,气流在双锥交接处发生较大的膨胀。

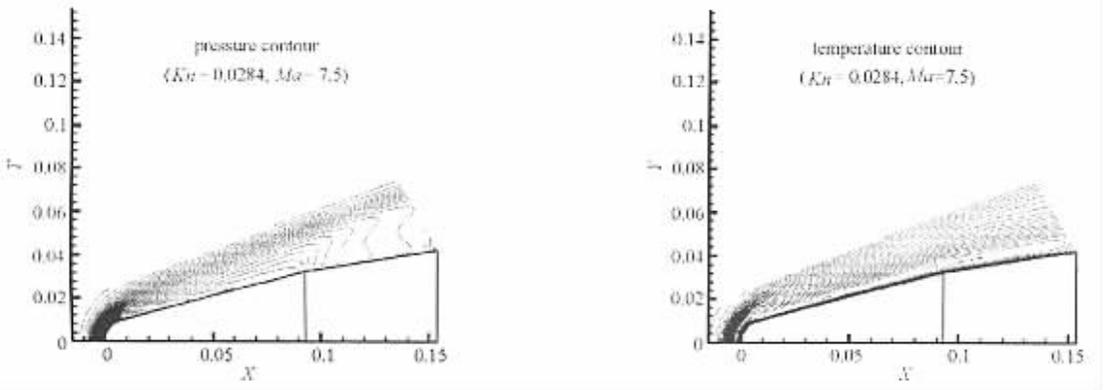


图 1 球双锥绕流流场压强及温度等值线

Fig.1 Pressure and temperature contours of blunt bi-cone flow field

图 2 是球双锥表面压强系数分布图。双锥交接处的压强系数有较大的下降,表明在该处气流有明显的膨胀流动。由图可知(1)在相同的马赫数条件下,随着  $Kn$  数的加大(气体越来越稀薄),球双锥表面压强系数分布曲线逐渐远离连续区( $Kn < 0.001$ )中的压强系数分布曲线,并且慢慢向自由分子流( $Kn > 10$ )中的压强系数分布曲线靠拢。当马赫数变大时,不同流动区域内的球双锥表面压强系数之间的差别有减小的趋势,这说明大的  $Ma$  数可能有抑制稀薄效应的作用。(2)在相同的  $Kn$  数条件下,随着马赫数的变大,球双锥表面各点的压强系数缓慢减小,并趋向于一个极限值,这正是马赫数无关原理的体现。当  $Kn$  数较大(气流比较稀薄)时,球双锥表面各点的压强系数接近于极限值的趋势有所缓慢。这表明当气流比较稀薄时,稀薄效应会影响马赫数无关原理。

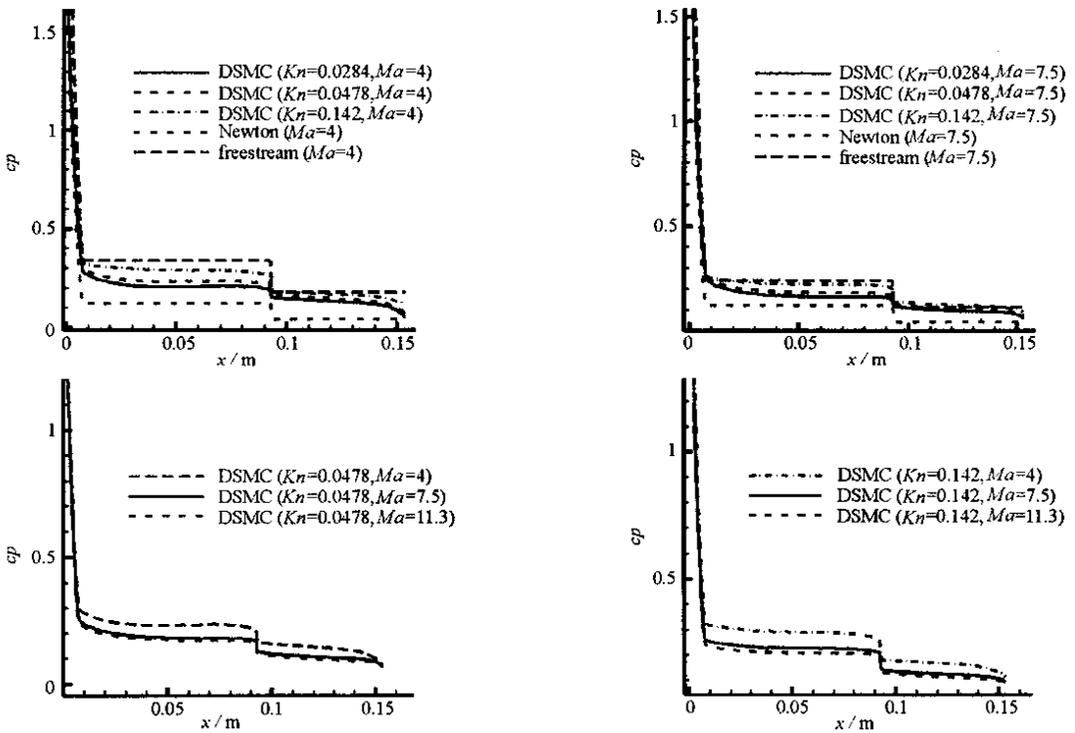


图 2 球双锥表面压强系数分布

Fig.2 The distribution of pressure coefficient on blunt bi-cone surface

表 1 球双锥阻力系数计算结果比较(攻角为零)

Tab.1 The comparison of drag coefficient of blunt bi-cone( zero angle of attack)

$Kn$ 数	$Ma$ 数	Bridge1	DSMC	误差
0.0284	4	0.8337	0.799	4.3%
	7.5	0.72053	0.65369	10.2%
	11.3	0.69242	0.63963	8.25%
0.0478	4	1.02	0.97922	4.16%
	7.5	0.8832	0.80717	9.42%
	11.3	0.85048	0.7893	7.75%
0.14	4	1.43056	1.47953	3.3%
	7.5	1.2415	1.22578	1.28%
	11.3	1.19864	1.17722	1.82%

表 1 是球双锥阻力系数计算结果比较。表中的“Bridge1”指 Lockheed 桥函数连接公式的估算结果，“DSMC”为 DSMC 数值模拟结果。从表中可以看出,在同一  $Ma$  数条件下,随着  $Kn$  数的增加(气体越来越稀薄),上述两种方法的阻力系数计算结果之间的相对误差随之减小。

通过以上对球双锥再入体的 DSMC 数值模拟与桥函数一体化估算,可以得到以下结论(1)DSMC 可以对球双锥复杂外形再入体过渡区的绕流场进行数值模拟,并获得真实的流动图像和较准确的气动阻力特性(2)通过洛克希德(Lockheed)桥关系式构造的一体化计算方法可以有效地估算过渡区的气动特性(3)低密度效应对过渡区再入体的表面压强系数分布及阻力系数影响很大,目前还缺乏可靠的理论计算方法,有必要加强低密度效应的理论研究。

参考文献:

[1] Matting F W. Approximate Bridging Relations in the Transitional Regime between Continuum and Free-Molecule Flows[J]. J.Spacecraft, 1971 (8)1.  
 [2] Bird G A. Molecular Gas Dynamics and Direct Simulation of Gas Flow[M]. Clarendon, Oxford, 1994.  
 [3] 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.

