

文章编号: 1001-2486 (2001) 03-0018-03

三维化学非平衡粘性激波层流场数值模拟*

石于中, 陈伟芳, 吴雄, 张志诚

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 本文通过引进主流贴体坐标, 将粘性激波层概念推广到三维流场, 得到了三维粘性激波层方程; 应用空间推进与总体迭代相结合的求解方法, 对三维化学非平衡粘性激波层流场进行了数值模拟。

关键词: 高超音速; 化学非平衡; 粘性激波层

中图分类号: O35 文献标识码: A

On Chemical Non-equilibrium 3D-VSL Flow

SHI Yu-zhong, CHEN Wei-fang, WU Xiong, ZHANG Zhi-chen

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

Abstract: The chemical non-equilibrium three-dimensional viscous shock layer flows are calculated numerically. The coupled solutions of the chemical non-equilibrium viscous shock layer flows are obtained through space-marching and global iterations.

Key words: hypersonic; chemical non-equilibrium; viscous shock layer

粘性激波层的概念最早由 Davis^[1]提出, 其思想是将物面到激波层之间的流动区域看作为一个整体, 即粘性激波层, 并用统一的控制方程来描述, 其中保留了边界层方程和无粘 Euler 方程中的各项。粘性激波层方程在边界层区域和无粘区域中具有一致的二阶精度。在低雷诺数情形下, 由于粘性影响扩展到流场的大部分区域, 边界层概念已经失效, 代之以粘性激波层概念是十分自然和适当的。

Mine^[2]等人发展了粘性激波层概念, 应用于模拟具有离解和电离的化学非平衡流动, 提出了七组元: O_2 , O , N_2 , N , NO , NO^+ , e^- 热空气模型。石于中^[3]等人应用粘性激波层方法数值研究了流过泰氟隆烧蚀表面的化学非平衡球锥绕流流场。在此基础上, 本文通过引进主流贴体坐标, 将粘性激波层概念推广到三维流场, 得到了三维粘性激波层方程; 数值求解了小攻角球锥绕流流场, 并与实验结果进行了对比, 结果是合理的。

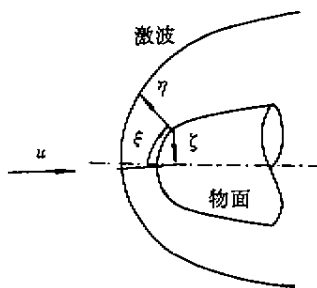


图 1 求解区域和贴体坐标系

Fig.1 Flow-field and coordinates

1 控制方程

建立贴体正交曲线坐标系 $O_{\xi\eta\zeta}$, 其中坐标 ξ , η 分别表示沿主流和物面法向, 坐标 ζ 按右手法则确定, 见图 1。与之相应的速度分量为 (u, v, w) , 拉梅系数为 $(h_1, 1, h_3)$ 。可得三维无量纲粘性激波层方程。

连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial \xi}(\rho u h_3) + \frac{\partial}{\partial \eta}(\rho v h_3 h_1) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(\rho w h_1) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\rho \left(\frac{u}{h_1} \frac{\partial u}{\partial \xi} + v \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{h_3} \frac{\partial u}{\partial \eta} - \frac{v^2}{h_1} \frac{\partial h_2}{\partial \zeta} + \frac{uw}{h_1} \frac{\partial h_1}{\partial \eta} + \frac{wu}{h_3 h_1} \frac{\partial h_1}{\partial \zeta} - \frac{w^2}{h_3 h_1} \frac{\partial h_3}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{h_1} \frac{\partial p}{\partial \xi}$$

* 收稿日期: 2000-09-20

作者简介: 石于中 (1956-), 男, 副教授。

$$= \varepsilon^2 \frac{1}{h_1 h_3} \left[\frac{\partial}{\partial \eta} \left(\mu h_3 h_1^2 \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{u}{h_1} \right) \right] + \varepsilon^2 \mu \frac{\partial h_1}{\partial \eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{u}{h_1} \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{u}{h_1} \frac{\partial v}{\partial \xi} + v \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{h_3} \frac{\partial v}{\partial \zeta} - \frac{w^3}{h_3} \frac{\partial h_3}{\partial \zeta} - \frac{u^2}{h_1} \frac{\partial h_1}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial p}{\partial \eta} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{u}{h_1} \frac{\partial w}{\partial \xi} + v \frac{\partial w}{\partial \eta} + \frac{w}{h_3} \frac{\partial w}{\partial \zeta} - \frac{u^2}{h_3 h_1} \frac{\partial h_1}{\partial \zeta} + \frac{wu}{h_3 h_1} \frac{\partial h_3}{\partial \xi} + \frac{vw}{h_1} \frac{\partial h_3}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{h_3} \frac{\partial p}{\partial \zeta} \\ & = \varepsilon^2 \frac{1}{h_1 h_3} \left[\frac{\partial}{\partial \eta} \left(\mu h_3^2 h_1 \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{w}{h_3} \right) \right] + \varepsilon^2 \mu \frac{\partial h_3}{\partial \eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{w}{h_3} \end{aligned} \quad (4)$$

能量方程：

$$\begin{aligned} & \rho C_p \left(\frac{u}{h_1} \frac{\partial T}{\partial \xi} + v \frac{\partial T}{\partial \eta} + \frac{w}{h_3} \frac{\partial T}{\partial \zeta} \right) - \left(\frac{u}{h_1} \frac{\partial p}{\partial \xi} + v \frac{\partial p}{\partial \eta} + \frac{w}{h_3} \frac{\partial p}{\partial \zeta} \right) \\ & = \varepsilon^2 \frac{1}{h_1 h_3} \left[\frac{\partial}{\partial \eta} \left(\kappa h_3 h_1 \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) \right] + \varepsilon^2 \mu \left[\left(h_3 \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{w}{h_3} \right)^2 + \left(h_1 \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{u}{h_1} \right)^2 \right] \\ & + \varepsilon^2 \frac{1}{h_1 h_3} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(h_3 h_1 \sum_{i=1}^{ns} \frac{\mu Le_i}{Pr} h_i \frac{\partial C_i}{\partial \eta} \right) - \sum_{i=1}^{ns} h_i \dot{w}_i \end{aligned} \quad (5)$$

组元扩散方程：

$$\rho \left(\frac{u}{h_1} \frac{\partial C_i}{\partial \xi} + v \frac{\partial C_i}{\partial \eta} + \frac{w}{h_3} \frac{\partial C_i}{\partial \zeta} \right) = \dot{w}_i + \varepsilon^2 \frac{1}{h_1 h_3} \left[\frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\mu Le_i}{Pr} h_3 h_1 \frac{\partial C_i}{\partial \eta} \right) \right] \quad (6)$$

其中

$$C_i = \frac{\rho_i}{\rho}, C_p = \sum_{i=1}^{ns} C_i C_{pi}$$

状态方程：

$$p = \frac{\rho RT}{MC_{p\infty}} \quad (7)$$

其中

$$J_i = -\frac{\mu}{Pr} Le_i \frac{\partial C_i}{\partial y}, C_i = \rho_i / \rho, C_p = \sum_{i=1}^{ns} C_i C_{pi}, \bar{M} = 1 / \sum_{i=1}^{ns} \frac{C_i}{M_i}$$

在薄激波层近似并给定激波形状条件下，上述控制方程具有双曲抛物型性质。本文采用空间推进加总体迭代方法求解。

2 定解条件

求解区域为弓形激波与物面之间的区域。激波波后物理量由 Rankine - Hugoniot 关系式给出。壁面条件为：

$$\text{无滑移条件：} u = 0, v = 0, w = 0 \quad (8)$$

$$\text{等温壁条件：} T = T_w \quad (9)$$

完全催化壁：

$$C_{O_2} = 0, C_{O_2} = 0.23456, C_{NO} = 0, C_{N} = 0, C_{NO^+} = 0, C_{N_2} = 0.76544 \quad (10)$$

3 计算方法

本文采用 Miner^[2] 组元： $O_2, O, N_2, N, NO, NO^+, e^-$ 热空气模型。用代数方法给定初始激波形状，确定驻点线位置。曲线坐标与网格生成方法：首先在物面上进行曲线坐标与网格生成，所有 ξ 线均从驻点出发， ξ 线在底部均匀分布，从驻点到底部用几何方法逐渐过渡； ζ 线与 ξ 线正交，从驻点到底部 ζ 线的分布由密到稀。然后生成 η 线， η 线为直线且与物面垂直。从物面到激波，按指数变化划分网格。第一次总体迭代时，方程 (3) 作薄激波层近似。驻点线计算作轴对称近似。得到驻点线解后，沿 ξ 线推进求解。在每一推进一步计算时，采用串行求解方法，即分别由方程 (2)、(4)

(5)和(6),依次求解速度分量 u 和 w 、温度 T 、组元质量分数 C_{O_2} 、 C_{CO_2} 、 C_{NO} 、 C_N 和 C_{NO^+} ,由方程(3)计算压强 p ,由方程(1)计算速度分量 v 及激波脱体距离 η_{sh} ,反复迭代直到收敛。当推进到底部后,对激波脱体距离 η_{sh} 和方程(3)中包含速度分量 v 导数的项沿流向进行光滑,得到激波形状后进行下一次总体迭代,重复这一过程直到总体迭代收敛。

4 计算结果及分析

本文计算了攻角为 0° 和 10° 两种状态。图2和图3分别是 7.5° 球锥在 0° 攻角状态下壁面压力和热流计算结果与 Pappas-Lee^[4]的实验数据的比较,其中 p_s 和 q_s 分别为驻点压强和驻点热流。计算条件: $M = 13.41$, $Re = 1515$, $T_w = 300K$,其中 M 、 Re 和 T_w 分别为来流马赫数,来流雷诺数和壁面温度。由图可见数值模拟结果与实验数据相当吻合,说明本文的计算方法是可靠的。图4和图5为 $M = 15.15$, $Re = 1037$, $T_w = 300K$, 10° 攻角时 11.2° 球锥对称面上温度和压强的等值线图。

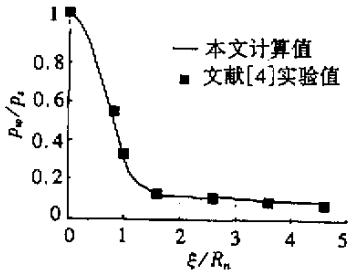


图2 壁面压强
Fig.2 Wall-pressure

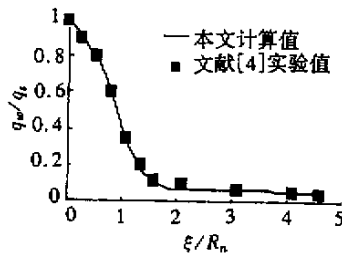


图3 壁面热流
Fig.3 Wall heat-transfer

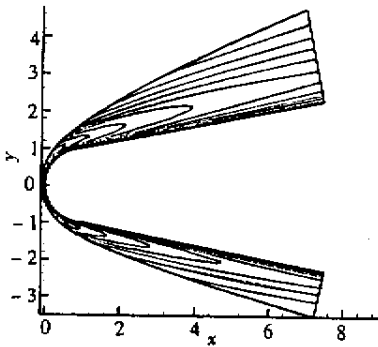


图4 温度等值线
Fig.4 Temperature contours

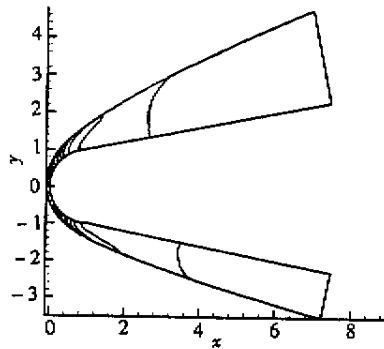


图5 压强等值线
Fig.5 Pressure contours

参考文献:

[1] Davis R T. hypersonic flow of a chemically reacting binary mixture past a blunt body [R]. AIAA paper70-805, 1970.
 [2] Miner E W & Lewis C H. hypersonic ionizing air viscous shock-layer flows over non-analytic blunt bodies [R]. NASA CR-2550, 1975.
 [3] 石子中, 郑忠华, 吴其芬. 流过泰氟隆烧蚀表面的化学非平衡粘性激波层数值研究 [J]. 国防科技大学学报, 1999, 21 (1).
 [4] Pappas C C, Lee G. Heat Transfer and Pressure on a Hypersonic Blunt Cone with Mass Addition [J]. AIAA Journal, 1970, 8 (5).

