

高超声速化学反应对钝体绕流流动特征的影响

李康[†] 李进平 姜宗林

(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要 探索热化学反应过程对高超声速流动影响的机理一直是高温气体动力学研究的一个重要方便。研究从理论分析的角度出发, 给出了化学反应组分变化对钝体绕流流动特征的影响, 结果表明化学反应对组分密度和能量分配影响较大。为将这一影响更为具体化, 采用数值方法研究了热化学反应过程对激波形状、边界层内速度分布、沿流线状态参数分布以及沿壁面状态参数分布等流动特征的影响, 并将量热完全气体假设下的相应结果与其对比。数值模拟分析所得结论与理论分析的结论一致。

一、引言

高超声速流动是指飞行器的飞行速度远远大于周围介质的声速; 在此条件下, 需要考虑高温气体效应的影响, 如振动能的激发、化学反应和电离等过程。热化学反应的激发改变了再入飞行器的流场结构和热负载, 这也使得其对高超声速流动影响的研究一直是高超声速领域关注的焦点。

已知的研究过程多集中于热化学非平衡过程本身。由于流动和化学反应的耦合作用, 其中真实气体效应影响的机理阐述不是很明确。而在量热完全气体的假设下, 我们已对流动有了明确的认识, 且有一些相似原理可供应用。因此, 通过对比量热完全气体和热化学非平衡气体模拟结果的方法来研究热化学非平衡过程对高超声速流动的研究显得很重要。本文的工作便是从这样的角度来开展。

理论分析了化学组分浓度的变化对控制方程的影响, 结果表明化学反应对密度和能量分配的影响较大, 而对压力的改变较小。给出了采用的数值方法和方法的验证。给出了数值模拟的结果并对结果进行了分析, 结果中对比了量热完全气体和热化学非平衡气体条件下的相应模拟结果, 包括激波形状、沿壁面压力分布、边界层速度分布和沿流线参数分布等。

二、控制方程

无量纲化的控制方程:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}_i \bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho}_i \bar{v})}{\partial y} = \dot{\omega}_i \quad (1)$$

$$\left(\frac{2}{\gamma-1} \bar{u}^{-2} - 1 + \bar{V}^2\right) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \left(\frac{2}{\gamma-1} \bar{v}^{-2} - 1 + \bar{V}^2\right) \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{2}{\gamma-1} \bar{u} \bar{v} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}\right) = 0 \quad (2)$$

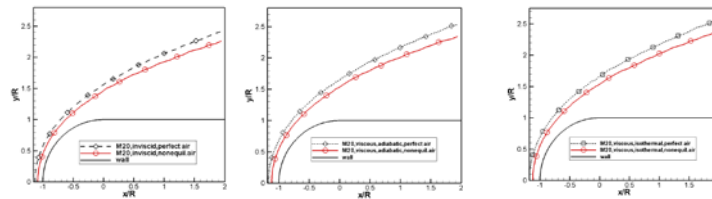
$$-\bar{V} \times (\nabla' \times \bar{V}) = \frac{\gamma-1}{2\gamma} (1 - \bar{V}^2) \nabla' \left(\frac{s}{R}\right) + \sum \frac{(\gamma-1) R_i}{2\gamma R} (1 - \bar{V}^2) \cdot \ln(P_i / P_0) \nabla c_i \quad (3)$$

[†]报告人简介: 李康, 男, likang@imech.ac.cn

方程(1)、(2)、(3)的边界条件可由斜激波关系式导出，其中的参数仅包含气体的比热比和激波角。由此得知，化学反应引起的组分浓度的变化仅仅出现于连续方程和能量方程中，其作用为改变各组分气体的浓度和重新分配流场中能量，而不出现于动量方程中。因此，由控制方程的理论分析我们知道，化学反应对密度和温度影响较大，而对压力和速度的影响可能较小。

三、数值结果与分析

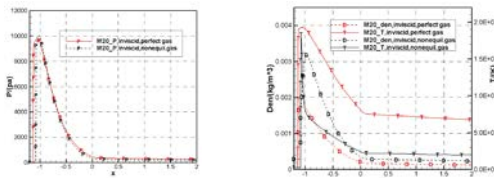
3.1 化学反应对脱体激波形状的影响



(a) 无粘流动 (b) 绝热壁面 (c) 等温壁面($T_w=300K$)

图3 量热完全气体和热化学非平衡气体条件下激波形状对比

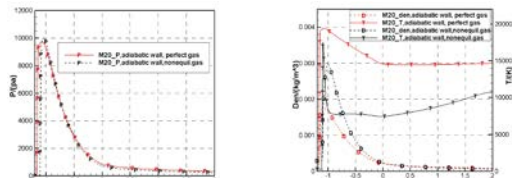
3.2 化学反应对沿流线压力分布的影响



(a)

(b)

图4 无粘流动条件下量热完全气体和热化学非平衡气体对应沿流线参数对比：(a) 压力；(b) 密度和温度

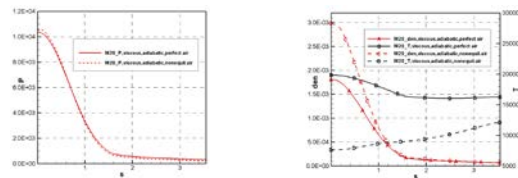


(a)

(b)

图5 绝热壁面条件下量热完全气体和热化学非平衡气体对应沿流线参数对比：(a) 压力；(b) 密度和温度

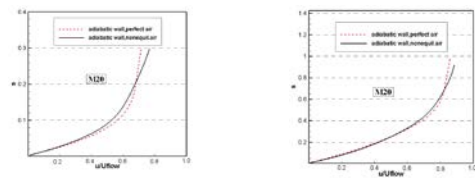
3.3 化学反应对壁面参数和边界层内速度分布的影响



(a)

(b)

图6 绝热壁面条件下量热完全气体和热化学非平衡气体所对应的沿壁面参数的对比：(a) 压力；(b) 密度和温度



(a)

(b)

图7 绝热壁面条件下量热完全气体和热化学非平衡气体边界层内速度分布对比：(a) 膨胀区；(b) 出口区

四、结论

理论分析了化学反应组分变化对控制方程的影响，结果显示组分变化对各组分密度分布和能量的重新分配影响较大，而对压力的影响相对较小。数值方法主要结论：

- 热化学非平衡过程对激波脱体距离影响较大，而对激波角的影响较小。
- 化学反应对沿流线参数的影响与理论分析的结果一致。
- 由于化学反应和膨胀效应的共同作用，热化学非平衡气体所对应的沿壁面压力分布下降更为剧烈。