

非平衡流模拟参数 $\rho_\infty L$ 对辐射特性模拟有效性的分析

徐丹¹, 王东方¹, 曾明¹, 柳军¹, 林贞彬²

(1 国防科学技术大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073; 2 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 讨论高温高超声速流动的非平衡尺度效应模拟参数 $\rho_\infty L$ 在流场辐射特性模拟上的有效性。在飞行速度 5~11km/s、高度 41~66km 范围, 选取模拟参数 $\rho_\infty L$ 对高超声速飞行器模型全流场适用的若干算例, 数值计算 ρ_∞ 和 L 分别不同、但 $\rho_\infty L$ 值相等的两几何相似球锥模型的非平衡流场辐射系数、辐射谱强度, 考查 $\rho_\infty L$ 对非平衡流场辐射特性模拟的有效性并分析原因, 总结模拟参数 $\rho_\infty L$ 对辐射特性模拟有效所对应的飞行高度(密度)、自由流速度范围和具体的光谱波长范围。

关键词: 高超声速非平衡流; 数值模拟; 非平衡尺度效应模拟参数; 高温空气辐射

0 引言

在高超声速飞行器的研制过程中, 通常采用缩比模型开展风洞或试飞实验。而对于高超声速非平衡流, 除了粘性尺度效应外, 还存在非平衡流特有的尺度效应, 它起因于化学反应速率为有限大值这一事实。非平衡流相似律的现有研究成果^{[1][2]}指出, 双体反应的非平衡尺度效应模拟参数是特征密度 ρ_∞ 与特征长度 L 的乘积 $\rho_\infty L$, 三体反应时相应的模拟参数为 $\rho_\infty^2 L$, 但存在一大类重要的高超声速非平衡流动, 三体复合反应趋于冻结, 实验中模拟参数 $\rho_\infty L$ 能反映流场基本特征。文献^{[3][4]}通过对化学反应特征时间、流场具体区域热化学状态、辐射输运方程的分析, 并结合球

锥、返回舱模型的若干典型算例, 讨论双体碰撞反应的非平衡尺度效应模拟参数 $\rho_\infty L$ 对高空高超声速飞行器全流场适用的条件。结果表明, 当 $\rho_\infty L$ 值低于一定范围时, 流场非平衡区中离解非平衡起主导作用, 此时模拟参数 $\rho_\infty L$ 不仅对全流场的无量纲参数分布有效, 对流场电离特性、模型气动热特性、分子光谱范围的驻点辐射谱强度都是有效的。

本文进一步研究模拟参数 $\rho_\infty L$ 对高超声速飞行器高温非平衡流场辐射特性模拟的有效性。首先通过辐射输运方程、能量方程中辐射通量散度项分析模拟参数 $\rho_\infty L$ 对模拟辐射谱强度、辐射热通量可能有效的情况, 然后对球锥模型, 在较宽的自由流速度、密度范围(飞行速度 5~11km/s、高度 41~66km), 数值计算流场辐射特性, 选取驻点线上特征点考查模拟参数 $\rho_\infty L$ 对辐射谱强度模拟的有效性并分析原因, 总结模拟参数 $\rho_\infty L$ 对辐射特性模拟有效所对应的飞行高度(密度)、自由流速度范围和具体的光谱波长范围。

基金项目: 国家自然科学基金(10672170)

1 $\rho_{\infty}L$ 对辐射特性模拟有效性的机理分析

辐射输运特性的计算公式

记 I_{ν} 为辐射谱强度, 则量 $I_{\nu}(\mathbf{r}, \mathbf{l}, t)d\nu d\Omega$ 就是 1 秒内从单位面积上流过的在频率间隔 ν 到 $\nu+d\nu$ 之间的辐射能量——这块面积位于点 \mathbf{r} 处, 且垂直于立体角元 $d\Omega$ 中的光子的运动方向(单位矢量 \mathbf{l} 的方向)。

辐射谱强度 I_{ν} 可通过求解辐射输运方程得到。定常态辐射输运方程的形式解为

$$I_{\nu}(s) = \int_{s_0}^s \varepsilon_{\nu} \exp\left(-\int_{s'}^s \alpha_{\nu} ds''\right) ds' + I_{\nu_0} \exp\left(-\int_{s_0}^s \alpha_{\nu} ds''\right) \quad (1)$$

式中 ε_{ν} 是辐射发射系数, α_{ν} 是辐射吸收系数。解的物理意义是:

① $\varepsilon_{\nu} ds'$ 表示 s' 附近射线微元间隔 ds' 内所产生的辐射发射。

② $\exp\left(-\int_{s'}^s \alpha_{\nu} ds''\right)$ 代表上述间隔 ds' 内发射

的光量子中实际到达 s 的百分比, 余下的部分在沿途被吸收了。

③ s 处总强度 $I_{\nu}(s)$ 公式的第一项是由从边界 s_0 到 s 的所有微元间隔 ds' 内发射的量子组成, 即等于沿射线从 s_0 到 s 的积分。

④ I_{ν_0} 是在边界 s_0 处进入的外来辐射的强度, 因子 $\exp\left(-\int_{s_0}^s \alpha_{\nu} ds''\right)$ 则代表它实际到达 s 的百分比。

辐射谱能流矢量 $\mathbf{q}_{R\nu}$ 则是辐射谱强度沿所有方向的积分, 辐射总能流(亦称辐射热通量) \mathbf{q}_R 则是辐射谱能流对所有频率的积分

$$\mathbf{q}_R = \int_0^{\infty} \mathbf{q}_{R\nu} d\nu = \int_0^{\infty} \int_{(4\pi)} I_{\nu} l d\Omega d\nu \quad (2)$$

当高温非平衡流场中辐射能流较大, 影响到

流动时, 流动控制方程组中的能量方程需包含辐射源项, 即辐射通量的散度项 Q_R :

$$Q_R = -\nabla \cdot \mathbf{q}_R \quad (3)$$

模拟参数 $\rho_{\infty}L$ 对辐射特性有效的情况

根据辐射输运方程形式解(1)各项的物理含义, 可见决定沿途气体自身辐射发射量的是发射系数与微元距离的乘积 $\varepsilon_{\nu} ds'$, 而决定沿途吸收, 包括对气体自身发射的吸收和外来辐射强度的吸收的是吸收系数与微元距离的乘积 $\alpha_{\nu} ds''$, 也就是说辐射量的衰减因子取决于吸收系数与微元距离的乘积 $\alpha_{\nu} ds''$ 。气体的辐射系数取决于温度和粒子数密度, 在一定的温度和一定的粒子数密度范围内, 主要的辐射跃迁机制的辐射系数会近似与粒子数密度成正比。

在这类特殊情况下, 如果模拟参数 $\rho_{\infty}L$ 对流场特性有效, 即 $\rho_{\infty}L$ 值相等而 ρ_{∞} 和 L 分别不同的两相似外形流场的温度、无量纲密度、组元质量分数等参数分布相同, 那么与粒子数密度成正比的气体辐射系数也就与 ρ_{∞} 成正比, 从而模拟 $\rho_{\infty}L$ 可进一步反映取决于辐射系数与距离乘积的辐射强度 I_{ν} , 亦即 $\rho_{\infty}L$ 值相等的两不同尺寸模型流场的辐射谱强度相等。

而辐射谱能流 $\mathbf{q}_{R\nu}$ 是辐射谱强度沿所有方向立体角的积分, 辐射总能流 \mathbf{q}_R 亦即辐射热通量是将辐射谱能流对所有频率的积分(参见(2)式), 所以在模拟 $\rho_{\infty}L$ 对各个方向的辐射谱强度有效的情况下, 对辐射谱能流 $\mathbf{q}_{R\nu}$ 和辐射热通量 \mathbf{q}_R 会同样有效。

但是能量方程中的辐射源项 Q_R (参见(3)式)是辐射热通量的散度, 两不同尺寸模型流场的辐射通量 \mathbf{q}_R 相等时, 其辐射通量散度项将不同。如果辐射源项足以造成对流场的影响(例如在飞行速度达到 1 km/s 或更高), 那么由于模拟参数 $\rho_{\infty}L$ 对辐射源项无效, 会反过来影响它对模拟流场其他特性的有效性。

流场与辐射特性数值计算方法

本文考查辐射热流不足以影响流动的情况, 在

获得高温非平衡流场数值解的基础上, 进一步计算辐射特性。

流场计算采用 11 组元 (N_2 、 O_2 、 N 、 O 、 NO 、 NO^+ 、 N_2^+ 、 O_2^+ 、 N^+ 、 O^+ 、 e^-) 双温度的热化学非平衡模型, 控制方程为时间相关的轴对称非平衡流 NS 方程, 方程与求解的详细内容参见文献[3]。在求得流场定常解的基础上, 进行辐射特性计算。计算辐射系数时, 采用“线-线”精细辐射模型, 应用改进的 NEQAIR 程序[5][6]逐条计算分子、原子组元的辐射跃迁; 计算辐射谱强度时, 引入“切平板”假设[7]求解辐射输运方程, 忽略激波前方空气引起的先驱辐射, 并设定壁面为完全吸收壁。在紫外和可见光的波长范围 $\lambda = 1000 \sim 7600\text{A}$ 范围内取 80000 个光谱分布点计算流场点的辐射发射、吸收系数。作图时每 40 条谱线一组进行平均, 得到 2000 个光谱点对应的辐射特性谱

分布。

作为辐射输运特性计算程序的校验, 计算了 FireII^[8]飞船在再入 1634 秒飞行条件下驻点处的辐射谱强度, 与飞船扫描光谱辐射仪的测量结果对比发现, 本文计算结果在量级、趋势和峰值点均与实验测量结果符合。

数值算例与结果分析

算例外形取为钝锥标模 ELECTRE^[9]外形, 其半锥角 4.6° , 头部/底部半径比约为 1/2。模型的特征长度 L 取为头部半径 R_n 。具体算例条件见表 1, 算例涉及的 $\rho_\infty R_n$ 值范围为 $2 \times 10^{-5} \sim 6 \times 10^{-4} \text{kg/m}^2$, 自由流速度范围为 $4 \sim 11 \text{km/s}$ 。模型流场计算中均采用等壁温条件, 并设定为全催化壁条件。

表 1 算例条件

Model configuration	Free stream velocity / (m s ⁻¹)	$\rho_\infty R_n$ / (kg m ⁻²)	Model scale	Altitude / km
sphere-cone		2.43×10^{-5}	1L	53
ELECTRE	4230, 5530,		5L	66
($R_n = 0.035\text{m}$,	6500, 8500	1.22×10^{-4}	1L	41
Length: $12R_n$)	9500, 11000		5L	53
$T_w = 343\text{K}$		6.08×10^{-4}	5L	41
			25L	53

模拟参数 $\rho_\infty R_n$ 对全流场有效的情况

诸算例结果表明: $\rho_\infty R_n$ 值在 $3 \times 10^{-5} \text{kg/m}^2$ 以下时, 各自由流速度 ($4 \sim 11 \text{km/s}$) 条件下, 流场均符合文献[3][4]分析的“模拟参数 $\rho_\infty L$ 对全流场有效”的情况, 当 $\rho_\infty R_n$ 值相等时, 两不同尺寸模型全流场的无量纲量分布相同。如图 1、图 2 分别给出了 $V_\infty = 11000 \text{m/s}$ 、 $\rho_\infty R_n = 2.43 \times 10^{-5} \text{kg/m}^2$ 时驻点线上平动、振动温度分布和 N 原子的质量分数分布, 可见两不同尺寸模型流场的参数分布曲线完全重合。

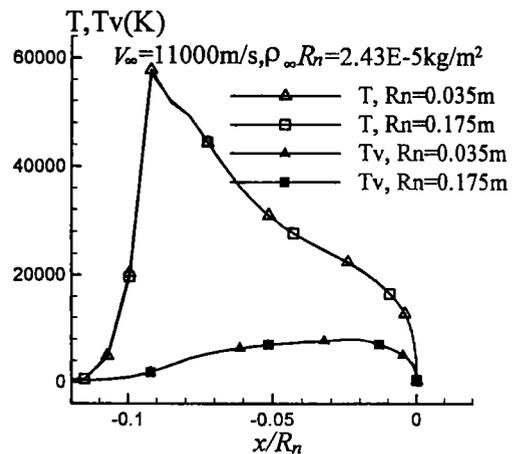


图 1 $V_\infty = 11000 \text{m/s}$ 、 $\rho_\infty R_n = 2.43 \times 10^{-5} \text{kg/m}^2$ 时

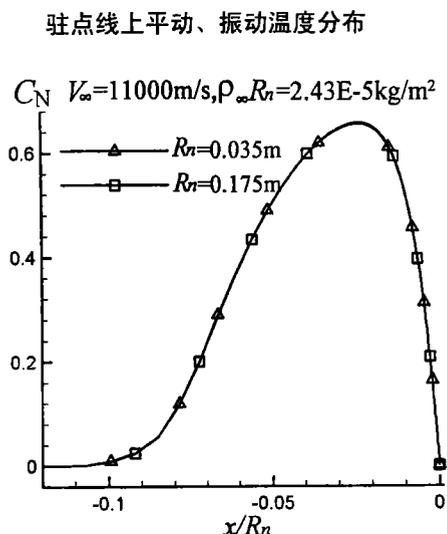


图2 $V_\infty=11000\text{m/s}$ 、 $\rho_\infty R_n=2.43 \times 10^{-5}\text{kg/m}^2$ 时
驻点线上 N 质量分数分布

$\rho_\infty R_n$ 值增大后，它对全场的有效性跟自由流速度、流场不同区域、不同类物理量均有关系。 $\rho_\infty R_n$ 值为 $1.22 \times 10^{-4}\text{kg/m}^2$ 时，自由流速度 5530m/s 、 6500m/s 算例中，仍表现出 $\rho_\infty R_n$ 对全流场所有无量纲物理量分布有效，但对速度更高的算例，模拟 $\rho_\infty R_n$ 就只对全流场的无量纲压力、密度、温度及中性组元质量分数分布有效，对离子组元的质量分数分布不再有效。并且模拟 $\rho_\infty R_n$ 的有效性在头部区流场要比尾部区差。

下面在 $\rho_\infty R_n$ 对全场有效的算例中，选取若干代表进一步分析模拟 $\rho_\infty R_n$ 对流场辐射特性的有效性。 $\rho_\infty R_n = 3 \times 10^{-5}\text{kg/m}^2$ 时，选取 $V_\infty = 5530\text{m/s}$ 、 8500m/s 、 11000m/s 三个算例； $\rho_\infty R_n = 1 \times 10^{-4}\text{kg/m}^2$ 时，选取 $V_\infty = 5530\text{m/s}$ 算例为代表。

部分算例的辐射谱强度计算结果及说明

(1) $\rho_\infty R_n = 2.43 \times 10^{-5}\text{kg/m}^2$ 时的算例结果

$\rho_\infty R_n = 2.43 \times 10^{-5}\text{kg/m}^2$ 时， $V_\infty = 5530\text{m/s}$ 算例中，两不同尺寸模型流场辐射谱强度分布非常一致，这里图 3 给出了两不同尺寸模型的驻点处、驻点线上距离壁面 $0.039R_n$ 处的辐射谱强度分布，图中 I_λ^- 代表指向壁面方向的辐射谱强度， I_λ^+ 代表指向激波方向的辐射谱强度。可见二者在整个紫外和可见光范围的辐射谱强度都非常接近。

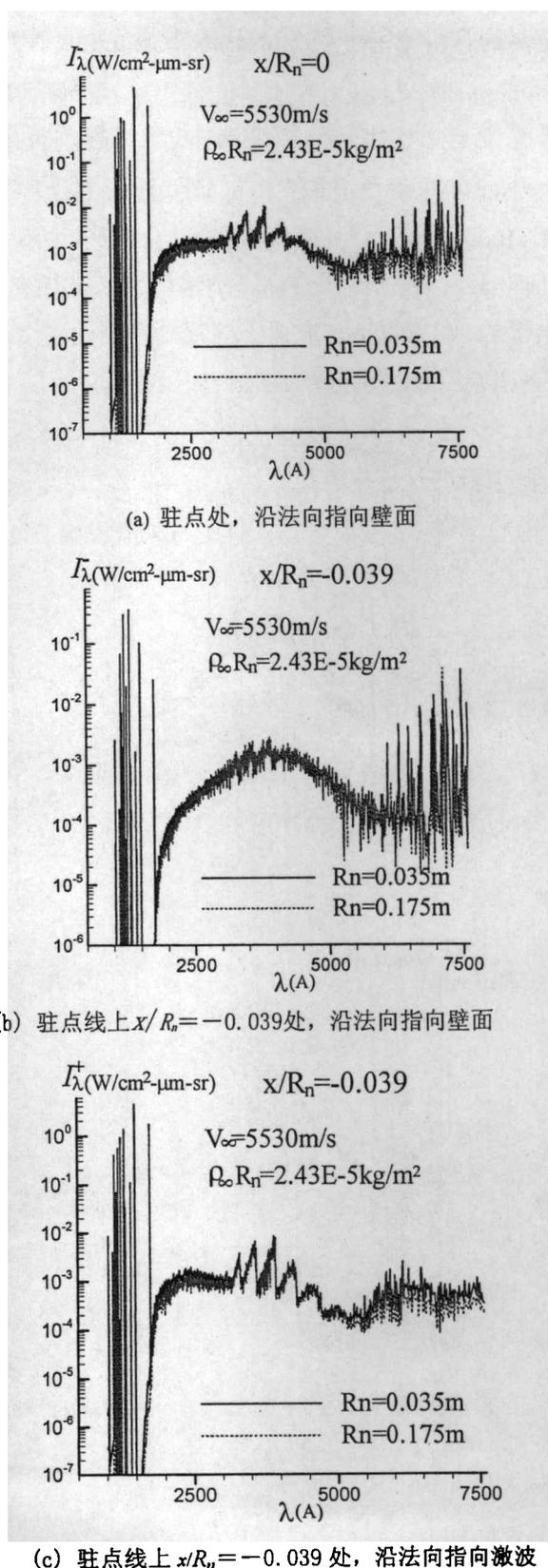
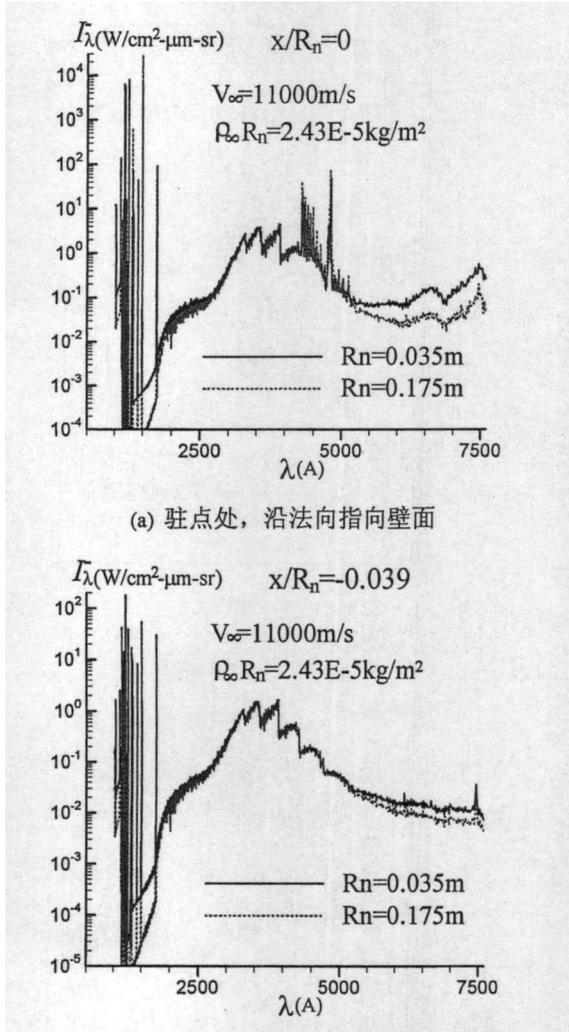


图3 $V_\infty=5530\text{m/s}$ 、 $\rho_\infty R_n=2.43 \times 10^{-5}\text{kg/m}^2$ 时
辐射谱强度

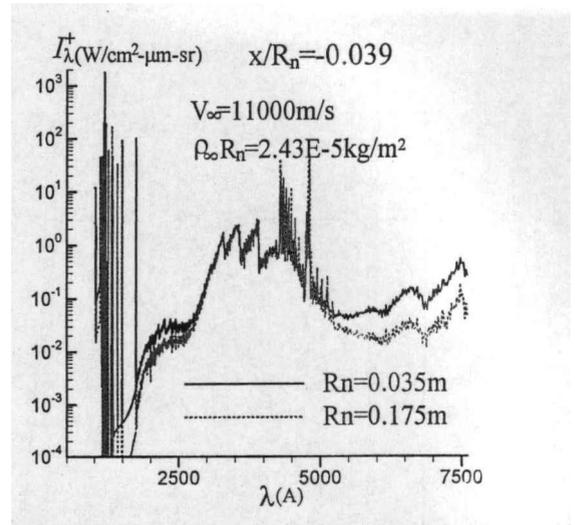
但对 $V_\infty = 8500\text{m/s}$ 和 $V_\infty = 11000\text{m/s}$ 两组算例，不同尺寸模型流场在 $\lambda = 5000 \sim 7600\text{A}$ 范围的辐射谱强度表现出一定差别，小尺寸模型(对应

更高的自由流密度情况)的辐射谱强度更高。 $V_\infty = 8500\text{m/s}$ 时, 小尺寸模型驻点线上某些位置的辐射谱强度结果比大尺寸模型高出近 1 倍, 而 $V_\infty = 11000\text{m/s}$ 算例情况该差别可能达到 2 倍。不过在 $\lambda = 1000 \sim 5000\text{\AA}$ 波长范围内, 两组算例中不同尺寸模型的辐射谱强度分布吻合得很好。下面图 4 给出了 $V_\infty = 11000\text{m/s}$ 时两不同尺寸模型的驻点处的 I_λ^- 、驻点线上距离壁面 $0.039R_n$ 处的 I_λ^- 、 I_λ^+ 。



(a) 驻点处, 沿法向指向壁面

(b) 驻点线上 $x/R_n = -0.039$ 处, 沿法向指向壁面



(c) 驻点线上 $x/R_n = -0.039$ 处, 沿法向指向激波

图4 $V_\infty = 11000\text{m/s}$ 、 $\rho_\infty R_n = 2.43 \times 10^{-5}\text{kg/m}^2$ 时驻点处沿法向指向壁面的辐射强度

(2) $\rho_\infty R_n = 1.22 \times 10^{-4}\text{kg/m}^2$ 时的算例结果

$\rho_\infty R_n = 1.22 \times 10^{-4}\text{kg/m}^2$ 时, $V_\infty = 5530\text{m/s}$ 、 8500m/s 、 11000m/s 三组算例中, 均表现出小尺寸模型的辐射谱强度值更高的特点。由于 $V_\infty = 5530\text{m/s}$ 算例是模拟 $\rho_\infty R_n$ 对全流场所有无量纲参数分布均有效的情况, 所以下面仅给出该组算例的辐射谱强度计算结果。图 5 为两不同尺寸模型驻点处的 I_λ^- 、驻点线上距离壁面 $0.039R_n$ 处的 I_λ^- 和 I_λ^+ 分布。在 $\lambda = 1000 \sim 1800\text{\AA}$ 范围 (这些密集的分立谱线来源于原子的束缚-束缚跃迁) 两不同尺寸模型的辐射强度结果还是比较接近的, 但在 $\lambda > 2000\text{\AA}$ 后的分子准连续谱范围, 小尺寸模型的辐射谱强度比大尺寸模型高 2~5 倍。二者驻点处的 I_λ^- 、距壁面 $0.039R_n$ 处的 I_λ^+ (贡献来源于激波层中靠壁面一侧部分) 结果差别要比距壁面 $0.039R_n$ 处的 I_λ^- (贡献来源于激波层中靠激波一侧部分) 大。

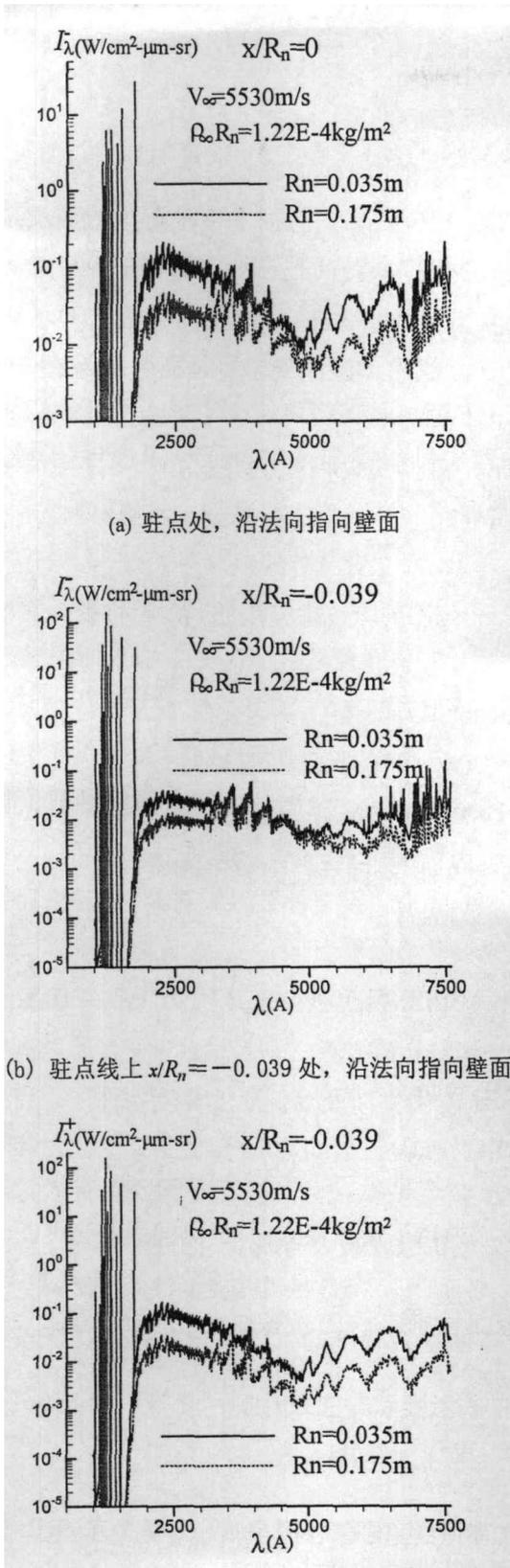
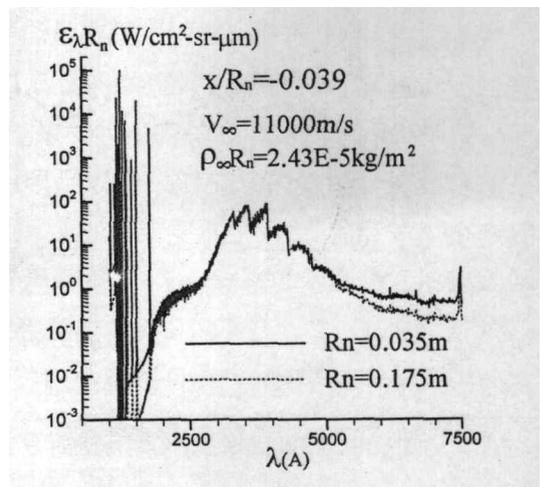


图5 $V_\infty=5530\text{m/s}$ 、 $\rho_\infty R_n=1.22 \times 10^{-4}\text{kg/m}^2$ 时
辐射谱强度

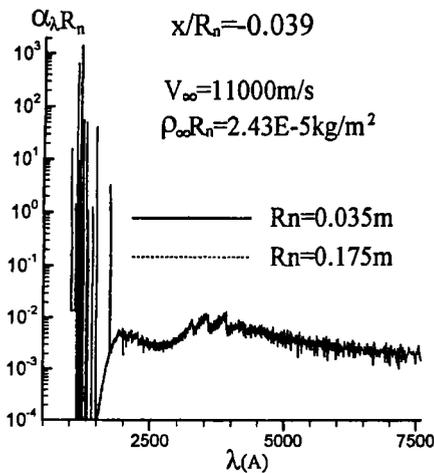
模拟 $\rho_\infty R_n$ 对辐射谱强度的有效性及原因分析

本文诸算例结果表明, 当 $\rho_\infty R_n$ 在 10^{-5}kg/m^2 量级、 $V_\infty < 8000\text{m/s}$ 时, 非平衡尺度效应模拟参数 $\rho_\infty R_n$ 在模拟辐射谱强度上是很有效的。原因就是这些条件下, 模拟参数 $\rho_\infty R_n$ 对全流场无量纲参数分布有效, 而且这些条件下高温空气主要的辐射跃迁机制的辐射系数近似与粒子数密度成正比。本文特别查看了驻点线上若干点的辐射发射和吸收系数谱分布, 发现确实满足该条件。

本文的 $\rho_\infty R_n = 2.43 \times 10^{-5}\text{kg/m}^2$ 、 $V_\infty > 8000\text{m/s}$ 的算例, 虽然模拟参数 $\rho_\infty R_n$ 对全流场无量纲参数分布有效(参见图 1、图 2), 但这些条件下某些波段的主要辐射跃迁机制的辐射系数不再近似与粒子数密度成正比, 因而模拟参数 $\rho_\infty R_n$ 无法有效反映这些波段范围的辐射谱强度。例如下面图 6 给出了两模型驻点线上某点的辐射系数与头部半径的乘积。因两不同尺寸模型流场的各组元粒子数密度的比值为两流场自由流密度的比值(亦即两模型尺寸比值的倒数), 故如两流场辐射系数与模型尺寸的乘积相同, 则说明辐射系数就是与对应辐射组元的粒子数密度成正比。由图可知两流场的吸收系数在整个紫外和可见光范围都是与粒子数密度成正比的, 发射系数在 $\lambda=1000\sim 5000\text{A}$ 波长范围与粒子数密度成正比, 在 $\lambda=5000\sim 7600\text{A}$ 波长范围内, 小尺寸模型的发射系数与头部半径乘积要高于大尺寸模型情况, 说明该波段范围内发射系数随粒子数密度的变化幅度要比线性关系更强。



(a) 发射系数与头部半径乘积



(b) 吸收系数与头部半径乘积

图6 $V_\infty=5530\text{m/s}$ 、 $\rho_\infty R_n=2.43 \times 10^{-5}\text{kg/m}^2$ 时
驻点线上 $x/R_n=-0.039$ 处辐射系数与头部半径乘积

$\rho_\infty R_n = 1.22 \times 10^{-4}\text{kg/m}^2$ 时两不同尺寸模型在 $\lambda > 2000\text{\AA}$ 后辐射谱强度的差异也是由于算例条件下(更高的粒子数密度)分子跃迁机制的发射系数不再近似与相应辐射组元的数密度成正比。下面图 7 给出了 $\rho_\infty R_n = 1.22 \times 10^{-4}\text{kg/m}^2$ 、 $V_\infty = 5530\text{m/s}$ 时驻点线上某点辐射发射系数与模型头部半径的乘积。可见,当气体密度更高时,在分子准连续谱范围,发射系数随密度增加要比线性关系更强。

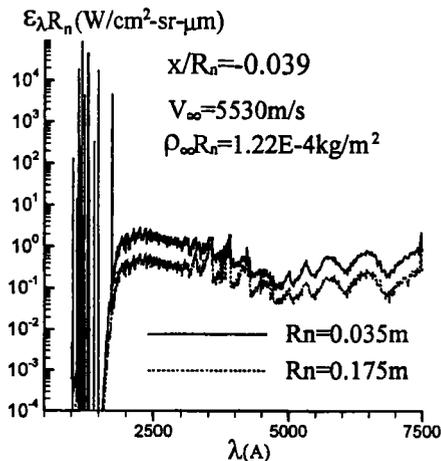


图7 $V_\infty=5530\text{m/s}$ 、 $\rho_\infty R_n=2.43 \times 10^{-5}\text{kg/m}^2$ 时
驻点线上 $x/R_n=-0.039$ 处发射系数与头部半径乘积

结 论

本文通过对辐射输运方程的分析和若干典型算例,研究双体反应的非平衡尺度效应模拟参数 $\rho_\infty L$ 对模拟高温高超声速流场辐射特性计算的有效性。得到如下结论:

(1) 当双体碰撞反应的非平衡尺度效应模拟参数 $\rho_\infty L$ 对高温高超声速全流场适用时,在某些条件下,模拟参数将进一步适用于非平衡流场的辐射特性。

(2) 本文对飞行速度 $4 \sim 11\text{km/s}$ 、高度 $41 \sim 66\text{km}$ 范围的球锥模型流场辐射特性的计算结果表明: $\rho_\infty R_n$ 值(模型特征长度 L 取为 R_n)在 $3 \times 10^{-5}\text{kg/m}^2$ 以下、自由流速度在 8km/s 以下时,模拟参数 $\rho_\infty L$ 不仅对全场无量纲参数分布有效,对 $\lambda = 1000 \sim 7600\text{\AA}$ 范围的辐射谱强度模拟也是有效的; $\rho_\infty R_n$ 值在 $3 \times 10^{-5}\text{kg/m}^2$ 以下、自由流速度超过 8km/s 后,模拟参数 $\rho_\infty L$ 对 $\lambda = 1000 \sim 5000\text{\AA}$ 范围的辐射谱强度有效; $\rho_\infty R_n$ 值达到 10^{-4}kg/m^2 量级后,虽然模拟参数 $\rho_\infty L$ 对流场参数如温度、组元质量分数等有效,但对辐射谱强度不再有效。

(3) 本文涉及算例速度高度条件下,高温空气的辐射吸收系数均与粒子数密度成正比,因此当模拟参数 $\rho_\infty L$ 对全流场无量纲变量有效时,也可有效模拟吸收系数与模型尺寸的乘积值。

(4) 下一步需要研究模拟参数 $\rho_\infty L$ 对更宽的波长范围辐射强度的模拟、壁面辐射热流模拟的有效性。

参 考 文 献:

- [1] 张涵信. 真实气体流动的相似规律[J]. 空气动力学学报, 1990, 8(1): 1~8.
- [2] Hornung H G. 28th Lanchester Memorial Lecture—Experimental Real-Gas Hypersonics[J]. Aeronautical Journal, 1988. Dec: 379~389.
- [3] 曾明. 高焓风洞流场测量的数值重建与非平衡效应的数值分析[D].[博士学位论文], 中国科学院力学研究所, 2007.

- [4] 曾明, 林贞彬, 柳军, 瞿章华. 非平衡流模拟参数 $\rho-L$ 有效性的数值分析[J]. 力学学报, 2009, 41(2): 177~184.
- [5] Park C. Nonequilibrium Air Radiation (NEQAIR) Program: User's Manual. NASA TM 86707. 1985.
- [6] Whiting E E, Park C, Liu Y, Arnold J O, Paterson J A. NEQAIR96, Nonequilibrium and Equilibrium Radiative Transport and Spectra Program: User's Manual. NASA RP 1389. 1996.
- [7] Henline W D. Documentation of the Detailed Radiation Property Data for the Radiation -Ablation Code RASLE. NASA TM-103848. 1991.
- [8] Lewis J H Jr., Scallion W I. Flight Parameters and Vehicle Performance for Project FIRE Flight II, Launched May 22, 1965. NASA TN D-3569, 1966.
- [9] Muylaert J, Walpot L, Häuser J, Sagnier P, Devezeaux D, Papirnyk O, Lourme D. Standard Model Testing in the European High Enthalpy Facility F4 and Extrapolation to Flight. AIAA 92-3905,