

高温气体分子光谱系数计算方法研究

赵阳生¹ 杜小平²

(¹ 装备学院研究生管理大队, 北京 101416; ² 装备学院航天指挥系, 北京 101416)

摘要 为研究飞行器在高超声速飞行时其表面高温气体的光谱特性, 提出一种高温气体分子光谱系数计算的实用方法。通过对飞行器表面研究区域内高温气体分子各能级的数密度进行计算, 研究分子跃迁谱线的增宽效应, 基于 HITRAN 数据库获取所需光谱参数, 最后采用逐线算法对气体分子的光谱系数进行计算。该方法能够有效计算高温气体在不同波数下的光谱系数, 其结果能够为分析高超声速飞行器气动流场和目标光谱辐射特性提供重要的计算参数, 进而为研究其热防护及光学探测提供数据支持。

关键词 光谱学; 高温气体; 光谱辐射特性; 分子能态; 谱线增宽; 光谱系数

中图分类号 O433.2 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.123001

Calculation of Spectral Coefficient for Molecules in High Temperature Gas

Zhao Yangsheng¹ Du Xiaoping²

(¹ Company of Postgraduate Management, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)
(² Department of Space and Command, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract In order to study spectral properties of high temperature gas around the surface of aircraft in hypersonic speed, we propose a practical calculation method of spectral coefficient for high temperature gas molecules. By calculating the energy level population of high temperature gas molecules in the studied area of the aircraft, the broadening effect of spectral line is studied and the spectral parameter required is obtained based on the HITRAN database. Finally, the spectral radiation coefficient of the gas molecules is calculated by line-by-line method. The method can calculate the spectral coefficient of high temperature gas at corresponding wavelength effectively, and thus providing the important calculating parameters to analyze the aerodynamic flow field of hypersonic aircraft and the spectral radiation properties of the target. Furthermore, it can provide supporting data for the study of aircraft thermal protection and optical detection.

Key words spectroscopy; high temperature gas; spectral radiation properties; molecular energy level; spectral line broadening; spectral coefficient

OCIS codes 300.1030; 300.2140; 300.3700; 300.6390

1 引言

研究高超声速飞行器在大气层中飞行时, 飞行器头部激波层及尾流中高温气体产生的强烈辐射现象对于研究其表面热防护及目标光学探测、跟踪具有重要意义。国内外学者针对高温气体辐射效应对探测系统产生的影响开展了研究^[1-2]。目前, 气体辐射特性大多通过其光谱系数进行描述, 即发射系数 j_λ 和吸收系数 κ_λ 。在此方面, 学者们发展了多种描述高温气体能量状态和变化过程的计算模型^[3-6], 研究了多种气体谱线计算和谱线线形分析方法^[7-9], 此外, 国外还建立了相关的气体谱线数据库^[10-12], 这些都为开展高温气体光谱辐射特性的研究提供了理论基础。

收稿日期: 2013-05-29; 收到修改稿日期: 2013-07-06; 网络出版日期: 2013-11-15

作者简介: 赵阳生(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事目标探测与信号处理等方面的研究。

E-mail: zyszzz_1981@163.com

导师简介: 杜小平(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事目标探测与信息处理等方面的研究。

E-mail: dxp8600@163.com

高温下空气组分会发生多种形式的量子辐射跃迁,其组分形式包括原子组分和分子组分。高速飞行器表面流场特性决定着气体的辐射特性,而气体分子作为高温气体的主要组分,其辐射特性分析过程复杂,计算所需的参数也很难获取。因此,前人的研究都是针对高温气体的某一种效应提出的,并没有对高温气体光谱辐射进行全面的分析。本文提出了一种简化实用的计算方法,对飞行器表面高温气体分子的状态和谱线效应进行了分析,利用 HITRAN 数据库建立了气体分子的光谱系数模型。

2 飞行器表面区域高温气体分子能态的数密度计算

2.1 飞行器表面区域的分子数密度计算

飞行器表面区域高温气体状态十分复杂,为简化计算,采用适用于大多数情况下的理想气体状态方程,计算得到高速飞行器表面区域内的分子数密度,即体积内含有的气体分子个数。对处于温度 T ,压强 P 状态下,体积 V 中气体组分 x (N_2 、 O_2 、 NO 等) 的分子数密度 N_{tot}^x 为

$$N_{tot}^x = n_x \cdot N = n_x \frac{PVN_A}{RT}, \quad (1)$$

式中 N 为气体总的分子数密度, n_x 为其中组分 x 所占的体积分数, $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ 为 Avogadro 常数, $R = 8.315 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 为通用气体常数。

2.2 高温气体平衡状态的分子能级数密度计算

高温气体的平衡状态即气体组元之间达到了热力学的平衡状态,飞行器在大气层内长时间飞行时一般处于平衡状态。当气体处于平衡温度 T 时,其分子能级数密度可通过 Boltzmann 分布得 CGC,则处于特定能级(电子态 e 、振动能级 v 下的转动能级 J) 的分子数密度 $N_{e,v}(J)$ 的分布为^[5]

$$\frac{N_{e,v}(J)}{N_{tot}^x} = \frac{g_e \sigma (2J+1) \exp\{-[\Delta E(e) + \Delta E_e(v) + \Delta E_{e,v}(J)]/kT\}}{Q_{tot}}, \quad (2)$$

式中平衡态分子配分函数 Q_{tot} 为

$$Q_{tot} = Q_n \sum_e \left\{ \sum_v \left\{ \sum_J \left\{ (2J+1) \exp\left[-\frac{\Delta E_{e,v}(J)}{kT}\right] \right\} \exp\left[-\frac{\Delta E_e(v)}{kT}\right] \right\} g_e \exp\left[-\frac{\Delta E(e)}{kT}\right] \right\}. \quad (3)$$

2.3 高温气体非平衡状态的分子能级数密度计算

当飞行器再入大气层时,处于高温、低密度环境下,其周围的气体由于密度低,原子、分子碰撞不充分,会呈现低密度流动的特点。空气组元之间的碰撞几率较小,而高速度又会导致空气组元的运动时间缩短,使得气体分子的平动、转动、振动和电子激发等热力学能量来不及通过碰撞交换能量而达到平衡,因此要经历较长的热力学非平衡状态^[7]。

当气体处于非平衡状态时,采用三温度模型^[6],即通过电子平动-电子温度 T_e ,振动温度 T_v ,重粒子平动-转动温度 T_r 表示分子的非平衡状态,经推导可得分子在 (e,v,J) 能级下的数密度分布为

$$\frac{N_{e,v}(J)}{N_{tot}^x} = \frac{g_e \sigma (2J+1) \exp\{-[\Delta E(e)/kT_e] - [\Delta E_e(v)/kT_v] - [\Delta E_{e,v}(J)/kT_r]\}}{Q_{tot}}, \quad (4)$$

式中非平衡态分子配分函数 Q_{tot} 为

$$Q_{tot} = Q_n \sum_e \left\{ \sum_v \left\{ \sum_J \left\{ (2J+1) \exp\left[-\frac{\Delta E_{e,v}(J)}{kT_r}\right] \right\} \exp\left[-\frac{\Delta E_e(v)}{kT_v}\right] \right\} g_e \exp\left[-\frac{\Delta E(e)}{kT_e}\right] \right\}. \quad (5)$$

上述各式中, Q_n 为核配分函数 $\Delta E(e)$ 为分子电子态为 e 的电子能; $\Delta E_e(v)$ 为分子在电子态 e 下的振动能; $\Delta E_{e,v}(J)$ 为分子在电子态 e 、振动能级 v 下的转动能,其通过分子光谱常数^[13] (ω_e 、 $\omega_e x_e$ 、 $\omega_e y_e$ 、 B_e 、 α_e 、 β_e 、 D_e 等) 和分子振动-转动量子数 (v_u 、 v_l 、 J_u 、 J_l) 求得; σ 为对称因子,对于同核双原子分子为 1,异核双原子分子为 2; g_e 为电子统计权重。

3 气体分子谱线增宽效应分析

量子实际跃迁时,总是以跃迁频率为中心,在某一频率范围内按照某种概率分布发生,这种现象称之为谱线增宽,不同的量子运动情况会引发不同的谱线增宽机制^[7]。

3.1 碰撞效应增宽

在一定压力下,气体中的分子、原子和离子处于无规则的运动状态之中,相互之间会不断地发生碰撞,结果会导致发射的辐射相位发生无规则的变化,进而引起谱线的增宽,此增宽效应称为碰撞增宽或压力增宽,其线型函数半宽 γ_L 为

$$\gamma_L = \gamma_{\text{air}} \left(\frac{296}{T} \right)^{n_{\text{air}}} P_t, \quad (6)$$

式中 γ_{air} 为空气增宽半宽, P_t 为气体压力(单位为 atm), n_{air} 为温度系数。

3.2 多普勒效应增宽

当气体处于高温状态时,随着温度的升高,其分子和原子的热运动速度很大,当达到应考虑多普勒效应时将引起谱线增宽,此增宽效应称为多普勒增宽,其线型函数半宽 γ_D 为

$$\gamma_D = \frac{\omega_{\text{CL}}}{c} \left[\frac{2RT \ln 2}{M} \right]^{\frac{1}{2}} = 3.58128 \times 10^{-7} \omega_{\text{CL}} \left(\frac{T}{M} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

式中 ω_{CL} 为中心波数, c 为光速, M 为所研究气体的分子量。

3.3 混合效应增宽

当压力增宽效应与多普勒增宽效应同等重要时,需要同时考虑这两种增宽因素的影响,将其称为混合增宽效应,通过 Voigt 线型函数表示。精确的 Voigt 线型函数的计算涉及复杂的无穷积分运算,因此,本文在分析高速飞行器表面激波及尾迹流场中高温气体辐射光谱的混合增宽效应时,采用了 Whiting 等^[8]提出的近似 Voigt 线型函数,其误差不超过 2%:

$$\frac{f_v(\omega - \omega_{\text{CL}})}{I_{V,\text{max}}} = \left(1 - \frac{W_L}{W_V} \right) \exp \left[-2.772 \left(\frac{\omega - \omega_{\text{CL}}}{W_V} \right)^2 \right] + \left(\frac{W_L}{W_V} \right) \left[1 + 4 \left(\frac{\omega - \omega_{\text{CL}}}{W_V} \right)^2 \right]^{-1} + 0.016 \left(1 - \frac{W_L}{W_V} \right) \left(\frac{W_L}{W_V} \right) \left\{ \exp \left[-0.4 \left(\frac{\omega - \omega_{\text{CL}}}{W_V} \right)^{2.25} \right] - 10 \left[10 + \left(\frac{\omega - \omega_{\text{CL}}}{W_V} \right)^{2.25} \right]^{-1} \right\}, \quad (8)$$

式中 ω 为波数, W_L 、 W_D 、 W_V 分别为 Lorentz、Gauss、Voigt 线型函数的全线宽,其表达式为

$$W_D = 2\gamma_D, \quad (9)$$

$$W_L = 2\gamma_L, \quad (10)$$

$$W_V = 0.5346W_L + (0.2166W_L^2 + W_D^2)^{0.5}, \quad (11)$$

$I_{V,\text{max}}$ 为谱线中心处 Voigt 线型函数的值,其表达式为

$$I_{V,\text{max}} = \left\{ W_V \left[1.065 + 0.447 \left(\frac{W_L}{W_V} \right) + 0.058 \left(\frac{W_L}{W_V} \right)^2 \right] \right\}^{-1}. \quad (12)$$

4 高温气体分子的光谱系数计算

设能级跃迁的上能级为 u , 下能级为 l , 则当其从能态 u 跃迁到 l 时,对于中心波数为 ω_{CL} 处的单根谱线,其第 i 条谱线吸收系数在波数 ω 处的吸收系数 $\kappa_{v,ul}^i$ 为

$$\kappa_{v,ul}^i(\omega) = N_l S_{v,ul}^i f_v(\omega - \omega_{\text{CL}}^i) \quad (\text{cm}^{-1}), \quad (13)$$

式中 N_l 为下能级数密度, $S_{v,ul}^i$ 为谱线强度, $f_v(\omega - \omega_{\text{CL}})$ 为谱线线形因子。

通过推导可得,第 i 条谱线的发射系数 $j_{v,ul}^i$ 和吸收系数 $\kappa_{v,ul}^i$ 存在关系

$$j_{v,ul}^i(\omega) = \frac{N_u}{N_l} \frac{g_l}{g_u} \frac{2h\nu_{\text{CL}}^3}{c^2} \kappa_{v,ul}^i(\omega) \quad \left(\frac{\text{erg}}{\text{cm}^3 \cdot \text{sr}} \right), \quad (14)$$

式中 N_u 为上能级分子数密度, g_u 为上能级统计权重, g_l 为下能级统计权重, h 为普朗克常数, ν_{CL} 为中心频率, c 为光速。

本文采用逐线算法进行光谱系数的计算。根据(13)、(14)式计算得到的结果为:分子在以跃迁波数为中心进行跃迁时,其跃迁波数处的中心谱线系数由于增宽效应而对于其他波数处的谱线系数存在作用。因此,对于同一气体,在波数 ω 处,其光谱吸收系数 $\kappa_{v,ul}$ 等于各中心谱线 i 在该波数处的吸收系数 $\kappa_{v,ul}^i$ 的相互作用之和,则有

$$\kappa_{v,ul}(\omega) = \sum_i \kappa_{v,ul}^i(\omega) = \sum_i N_l S_{v,ul}^i b_v(\omega - \omega_{CL}^i) \quad (\text{cm}^{-1}). \quad (15)$$

同理可得,光谱发射系数 $j_{v,ul}$ 为

$$j_{v,ul}(\omega) = \sum_i j_{v,ul}^i(\omega) = \sum_i \frac{N_u}{N_l} \frac{g_l}{g_u} \frac{2h\nu_{CL}^3}{c^2} \kappa_{v,ul}^i(\omega) \quad \left(\frac{\text{erg}}{\text{cm}^3 \cdot \text{sr}} \right). \quad (16)$$

5 高温气体分子光谱系数仿真计算

5.1 基于 HITRAN 数据库的光谱参数获取

在采用逐线计算法计算气体分子光谱系数时,需要用到气体分子每条谱线的详细光谱参数。因此,采用美国 HITRAN08 版数据库获取气体分子辐射光谱参数,选取的主要参数如表 1 所示。

表 1 HITRAN08 数据库中选取的光谱参数

Table 1 Spectral parameters selected from HITRAN08 database

Number	1	2	3	4	5
Parameter	ω_{CL}	$S_{v,ul}(T_0)$	A	γ_{air}	γ_{self}
Definition	Wavenumber	Intensity	Einstein-A coefficient	Air-broadened half width	Self-broadened half width
Number	6	7	8	9	10
Parameter	E_l	n_{air}	ν_u	ν_l	J_u
Definition	Lower-state energy	Coefficient of temperature of γ_{air}	Upper-state global quanta	Lower-state global quanta	Upper-state local quanta
Number	11	12	13		
Parameter	J_l	g_u	g_l		
Definition	Low-state local quanta	Upper-state statistical weight	Lower-state statistical weight		

HITRAN 数据库适用于 70 K~3000 K 温度范围内的气体辐射特性计算,因此,当计算更高温度下的光谱参数时,必须对 HITRAN 数据库中获取的谱线强度进行修正。假设从 HITRAN 数据库获得的标准温度 ($T_0=296$ K) 下的谱线强度为 $S_{v,ul}(T_0)$,则温度 T 时的谱线强度 $S_{v,ul}(T)$ 为

$$S_{v,ul}(T) = S_{v,ul}(T_0) \frac{Q_v(T_0)Q_r(T_0)}{Q_v(T)Q_r(T)} \exp\left[\frac{1.439E_l(T-T_0)}{T \cdot T_0}\right], \quad (17)$$

式中 Q_v 和 Q_r 分别为分子的振动和转动配分函数。

通过所得的光谱参数,计算得到(2)、(4)式所需的分子电子统计权重 g_e 为

$$g_e = g_l / (2J_l + 1). \quad (18)$$

5.2 仿真计算与结果分析

当飞行器激波层及尾流中的高温气体发生光谱辐射时, N_2 、 O_2 和 NO 分子是其中的重要组分。因此,本文选取三种气体组分进行高温气体光谱系数仿真计算。

假设飞行器以高马赫数飞行时,其表面某处的压力为 $P/P_\infty=200$;取该区域单位体积 $V=1 \text{ cm}^3$ 进行分析。气体组分在不同平衡态下的体积比和温度参数采用文献[7]中的数据,如表 2 所示。

表 2 气体组分数据表

Table 2 Data of gascomponents

Gas component	Equilibrium		Nonequilibrium			
	Volume ratio	Equilibrium temperature /K	Volume ratio	Rotational temperature /K	Vibrational temperature /K	Electron temperature /K
N_2	9.339×10^{-4}	9650	2.143×10^{-3}	18000	14000	12000
O_2	2.598×10^{-7}	9650	1.160×10^{-2}	18000	14000	12000
NO	2.598×10^{-5}	9650	3.032×10^{-2}	18000	14000	12000

本文研究了高温气体在红外谱段的光谱系数。根据 HITRAN08 数据库现有数据,提取到了 N_2 在 $1800 \sim 3000 \text{ cm}^{-1}$, O_2 、 N_2 在 $4000 \sim 13000 \text{ cm}^{-1}$ 的光谱参数,对三种气体组分在平衡态和非平衡态下的光谱

系数进行了仿真计算。

5.2.1 N₂、O₂ 和 NO 分子平衡态光谱系数计算

平衡态时,气体组分 N₂、O₂ 和 NO 在不同谱段的光谱系数如图 1~3 所示。

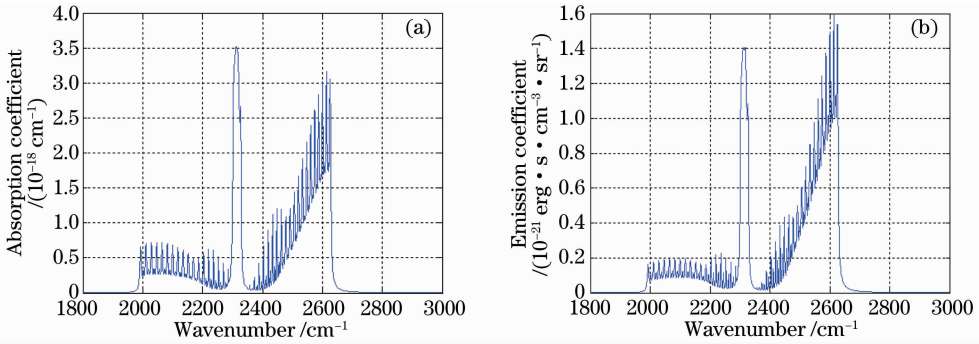


图 1 平衡态下 N₂ 光谱系数。(a) 吸收系数；(b) 发射系数

Fig. 1 Spectral coefficients of N₂ in equilibrium state. (a) Absorption coefficient; (b) emission coefficient

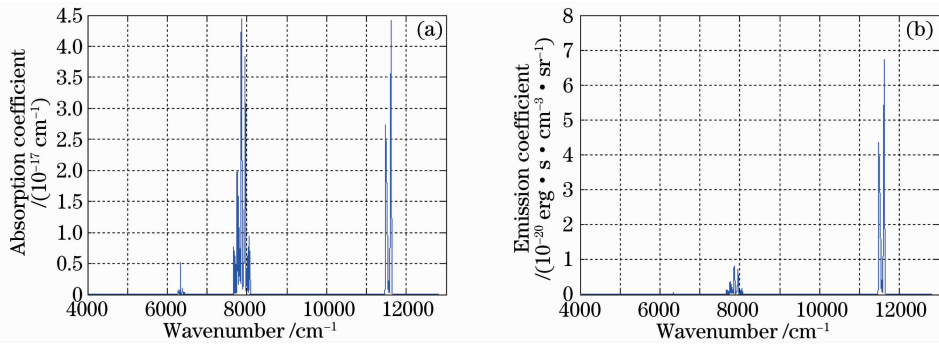


图 2 平衡态下 O₂ 光谱系数。(a) 吸收系数；(b) 发射系数

Fig. 2 Spectral coefficients of O₂ in equilibrium state. (a) Absorption coefficient; (b) emission coefficient

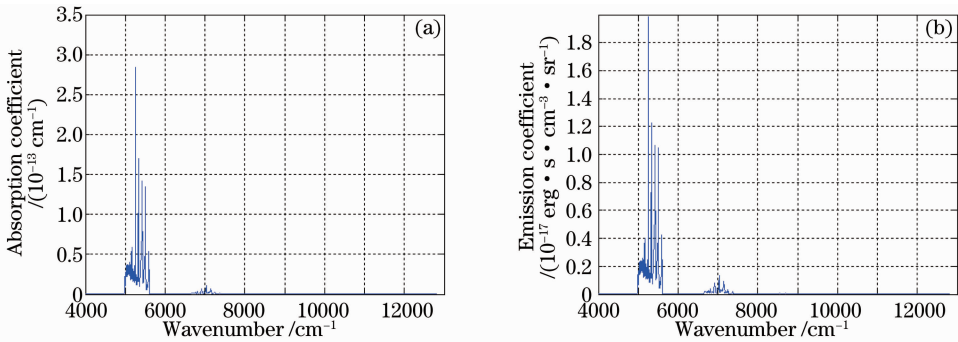


图 3 平衡态下 NO 光谱系数。(a) 吸收系数；(b) 发射系数

Fig. 3 Spectral coefficients of NO in equilibrium state. (a) Absorption coefficient; (b) emission coefficient

5.2.2 N₂、O₂ 和 NO 分子非平衡态光谱系数计算

非平衡态时,气体组分 N₂、O₂ 和 NO 在不同谱段的光谱系数如图 4~6 所示。

5.2.3 多组分高温气体光谱系数计算

通过计算气体各组分的光谱系数分析高温气体的光谱辐射特性。高速飞行器表面的高温气体辐射是一个十分复杂的作用过程。因此,本文通过简化计算,将高温气体辐射特性考虑成几种气体组分的辐射特性综合作用的结果,在不考虑各组分气体的间相互影响时,气体的光谱系数等于各组分气体的光谱系数之和。将 NO 和 O₂ 在相同谱段 4000~13000 cm⁻¹ 下的光谱系数进行求和处理,如图 7,8 所示。

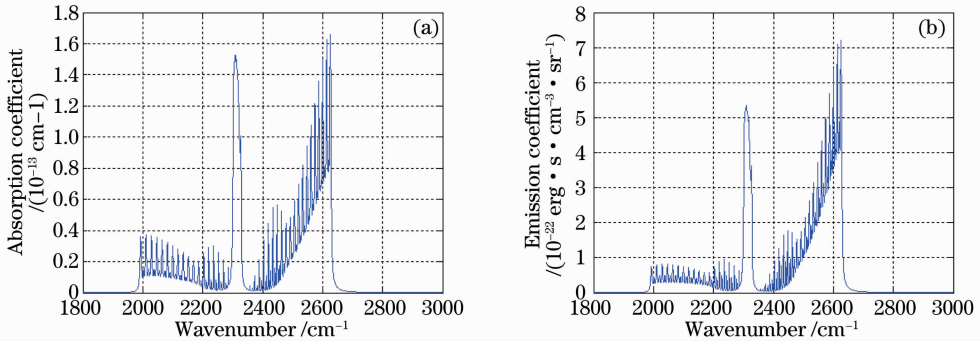


图 4 非平衡态下 N_2 光谱系数。(a) 吸收系数；(b) 发射系数

Fig. 4 Spectral coefficients of N_2 in nonequilibrium state. (a) Absorption coefficient; (b) emission coefficient

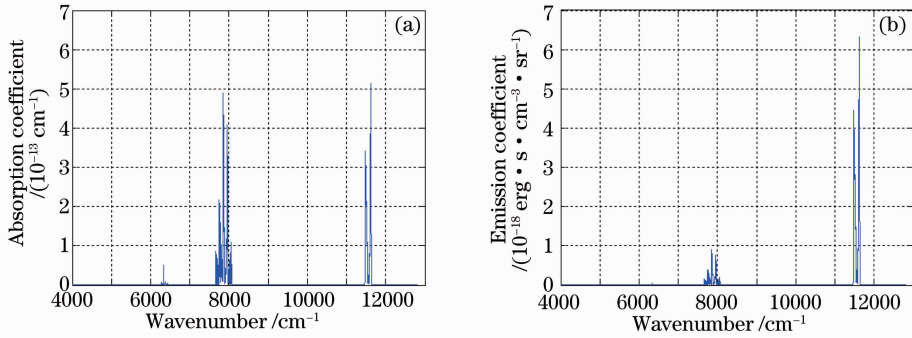


图 5 非平衡态下 O_2 光谱系数。(a) 吸收系数；(b) 发射系数

Fig. 5 Spectral coefficients of O_2 in nonequilibrium state. (a) Absorption coefficient; (b) emission coefficient

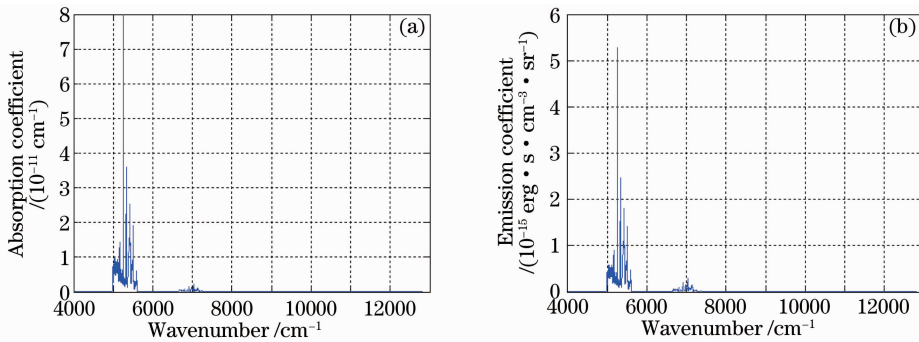


图 6 非平衡态下 NO 光谱系数。(a) 吸收系数；(b) 发射系数

Fig. 6 Spectral coefficients of NO in nonequilibrium state. (a) Absorption coefficient; (b) emission coefficient

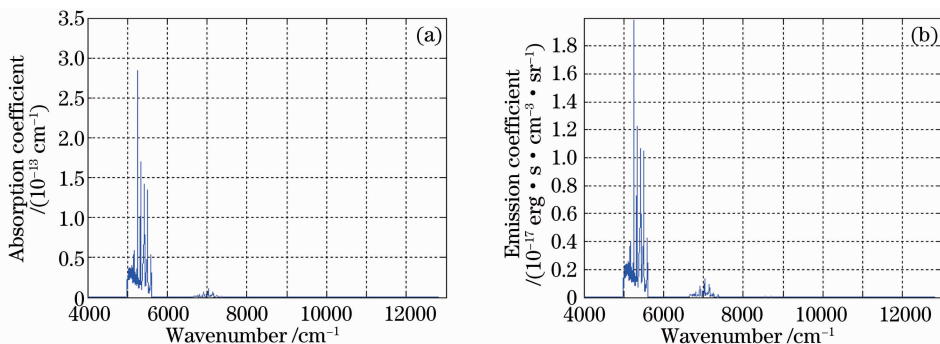


图 7 平衡态下 $NO+O_2$ 光谱系数。(a) 吸收系数；(b) 发射系数

Fig. 7 Spectral coefficients of $NO+O_2$ in equilibrium state. (a) Absorption coefficient; (b) emission coefficient

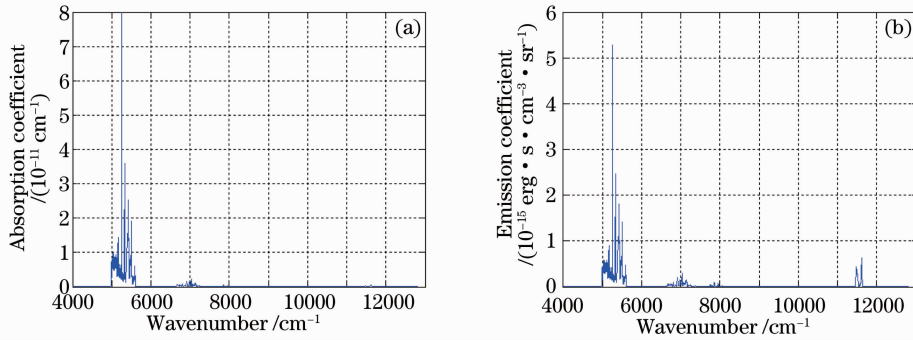


图 8 非平衡态下 $\text{NO}+\text{O}_2$ 光谱系数。(a) 吸收系数；(b) 发射系数

Fig. 8 Spectral coefficients of $\text{NO}+\text{O}_2$ in nonequilibrium state. (a) Absorption coefficient; (b) emission coefficient

通过对仿真结果进行分析,能够得到以下结论:

- 1) 气体分子在高温条件下,其光谱吸收和发射系数反映了其辐射光谱呈带谱分布,与目前对飞行器高温空气绕流辐射的分析^[14]相一致,说明其能够正确地反映气体分子的辐射状态。
- 2) 通过计算高温气体分子在不同波段的光谱吸收和发射系数,能够反映气体分子在不同波段的光谱辐射情况,为进一步分析高速飞行器表面气体流场的光谱辐射特性提供参数。
- 3) 通过计算高温气体分子的光谱吸收和发射系数,其数值能够反映飞行器表面高温气体在某状态下其辐射能量的传递情况,为进一步分析高速飞行器表面的辐射热流场提供参数。

6 结 论

本文提出的方法较为简便易行,不仅能够有效获取和计算气体分子在不同状态下的光谱参数,而且能够全面考虑高速流场的压力、温度等因素对于不同分子态跃迁的影响。由于高温气体辐射效应涉及的气体组分影响十分复杂,且高速飞行器在不同飞行状态时,其不同表面的流场状况也不一样,为了能够方便地计算获得高温气体的辐射特性,本文采用了理想气体状态方程,但其针对飞行器表面气体温度梯度和速度梯度都很大的区域存在局限,且在计算多组分高温气体时,简化了各组分气体间的相互影响,与真实情况可能会存在一定差异。因此,对于该方法计算结果的准确程度还需进一步验证。通过对仿真结果中气体辐射光谱的分布状态进行分析,说明计算结果对于反映高温气体分子的辐射状态具有正确性,能够为高速飞行器表面辐射热流场和光谱辐射特性的分析提供参考。

参 考 文 献

- 1 Troler J, Hudson D, Carlson D, *et al.*. Shock layer radiance effect on endoatmospheric interceptor seeker performance[C]. AIAA Annual Interceptor Technology Conference, 1992, 2816: 1—16.
- 2 Du Lei, Zhao Yan, An Yongquan, *et al.*. Analysis of hypersonic shock layer radiance effect on an IR imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 291—296.
杜磊,赵剡,安永泉,等.高超声速激波辐射对红外成像系统的影响分析[J].红外与激光工程,2012,41(2): 291—296.
- 3 Park C. Assessment of Two-Temperature Kinetic Model for Ionizing Air[R]. AIAA, 1987. 87—1574.
- 4 Greendyke R, Hartung L C. An Approximate Method for the Calculation of Non-Equilibrium Radiative Heat Transfer[R]. AIAA, 1990. 90—0135.
- 5 Han Peng, Chen Xi, Li Heping. On the correct form of the Saha equation modified for two-temperature plasma[J]. Chin Phys Lett, 1999, 16(3): 193—195.
- 6 Dong Shikui, Tan Hepig, He Zhihong, *et al.*. Calculation of spectral absorption coefficient of high temperature equilibrium or nonequilibrium 11-species air[J]. Chinese J Aeronautics, 2001, 14(3): 140—146.
- 7 Tan Heping, Xia Xinlin, Liu Llinhua, *et al.*. Numerical calculation of infrared radiation properties and Transfers[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006. 73—74, 97—98.
谈和平,夏新林,刘林华,等.红外辐射特性与传输的数值计算——计算热辐射学[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006. 73—74, 97—98.
- 8 Whiting E E. An empirical approximation to the Voigt profile[J]. J Quant Spectrosc Radiat Transfer, 1968, 8(6):

1379–1384.

- 9 Cheng Siyang, Gao Minguang, Xu Liang, *et al.*. Temperature correction method about spectrum analysis of high temperature gas concentration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 413–417.
程巳阳, 高闽光, 徐亮, 等. 高温气体浓度光谱分析中的温度修正方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(2): 413–417.
- 10 I S Rothman, D Jacquemart, A Barbe, *et al.*. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database[J]. *J Quantit Spectrosc Radiat Transfer*, 2005, 96(2): 139–204.
- 11 Jacquinet-Husson N, Arie E, Ballard J, *et al.*. The 1997 spectroscopic GEISA databank[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 1999, 62: 205–254.
- 12 Tashkun S A, Perevalov V I, Teffo J L, *et al.*. CSDS-1000, the high-temperature carbon dioxide spectroscopic databank [J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2003, 82(1-4): 165–196.
- 13 Herzberg. *Molecular Spectra and Molecular Structure*[M]. Wang Dingchang, Transl.. Beijing: Science Press, 1983. 79–82, 396–475.
赫兹堡. *分子光谱与分子结构*[M]. 王鼎昌译. 北京: 科学出版社, 1983. 79–82, 396–475.
- 14 Ouyang Shuiwu, Xie Zhongqiang. *High Temperature Nonequilibrium Air Flow*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001. 210–213.
欧阳水吾, 谢中强. *高温非平衡空气绕流*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001. 210–213.