

# 固体火箭发动机尾喷焰红外特性数值模拟\*

郝金波 董士奎 谈和平

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江, 哈尔滨, 150001)

**摘要** 在给定浓度场、温度场、粒子和气体组份辐射物性参数的条件下, 将贴体坐标系下有限体积法用于主动段尾喷焰红外光谱特性计算, 考虑了粒子的各向异性散射, 计算结果与贴体坐标系下的离散坐标法进行了比较. 分析了  $2.7\mu\text{m}$ 、 $2.95\mu\text{m}$  表观光谱辐射强度及  $2.7\sim 2.95\mu\text{m}$  的表观谱带辐射强度, 考察了若不考虑散射或用各向同性散射假设, 来近似非线性各向异性散射所带来的计算误差.

**关键词** 主动段, 尾喷焰红外光谱特性, 各向异性散射, 有限体积法.

## NUMERICAL SIMULATION OF INFRARED RADIATION PROPERTIES OF SOLID ROCKET ENGINE EXHAUST PLUME\*

HAO Jin-Bo DONG Shi-Kui TAN He-Ping

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** In the case of certain parameters for concentration and temperature profile, particle and radiation properties of gas, the finite volume method in body-fitted coordinates is used to calculate the infrared spectral properties of the solid rocket exhaust plume with anisotropic scattering particles, results of which are compared with those of discrete ordinate method. Apparent spectral radiative intensities at  $2.7\mu\text{m}$  and  $2.95\mu\text{m}$  and band radiative intensity within  $2.7\sim 2.95\mu\text{m}$  are analyzed. Furthermore, the errors caused by isotropic scattering or no scattering approximation to non-linear anisotropy scattering model are investigated.

**Key words** boosting stage, infrared radiation of plume, anisotropic scattering, finite volume method.

### 引言

固体火箭发动机尾喷焰中含大量  $\text{Al}_2\text{O}_3$  或其它粒子. 尾喷焰红外光谱辐射场与非等压超音速射流流场、含粒子气体的辐射物性等多种因素有关. 而粒子的辐射物性与粒径、光谱折射率、浓度、温度等有关; 气体组份的辐射物性与分压力、温度等有关. 所以, 红外光谱特性的计算要考虑非灰、非等温、非均匀及各向异性散射效应等因素. 由于测量尾喷焰红外特性非常困难, 试验数据很少, 且局限在特定的范围内, 因此, 有必要建立准确模拟特征信号的红外辐射模型, 从而提供较大范围内红外特性参数进行理论研究及红外系统设计. Ludwig 等人<sup>[1]</sup> 基于双热流及六热流法, 发展了标准远红外计算模型 (SIR-

RM), 但热流密度法计算精度较低. 徐南荣<sup>[2]</sup> 计算了喷气流红外辐射流典型点处的积分辐射量及光谱分布. 姚连兴等人<sup>[3]</sup> 估算了战术导弹发动机喷焰的红外辐射强度.

有限体积法 (FVM) 易于处理多维复杂几何形状、各向异性散射和物性参数变化复杂的问题. 本文流场计算采用半经验公式<sup>[4]</sup>; 根据 Mie 理论计算  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子的散射系数; 以分子光谱数据库 HITRAN 和高温燃气光谱数据库 HITEMP<sup>[5]</sup> 为基础, 采用逐线积分法计算气体光谱吸收系数. 用贴体坐标下 FVM 计算尾喷焰红外辐射场, 并与离散坐标法 (DOM)<sup>[6]</sup> 进行了比较. 考察了含各向异性散射粒子介质, 若不考虑散射或按各向同性散射近似计算所引起的误差.

\* 国家自然科学基金 (批准号 50076010) 和哈工大跨学科交叉性研究基金 (HIT. MD2001. 14) 资助项目  
稿件收到日期 2002 - 08 - 30, 修改稿收到日期 2003 - 01 - 10

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50076010) and the Multidiscipline Scientific Research Foundation of Harbin Institute of Technology (No. HIT. MD2001. 14)  
Received 2002 - 08 - 30, revised 2003 - 01 - 10

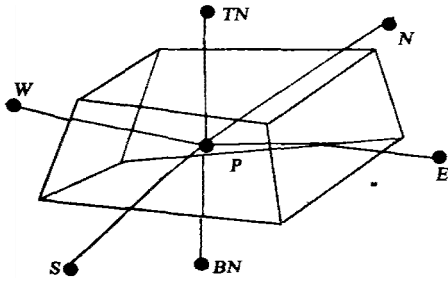


图1 控制容积示意图

Fig. 1 The sketch of control volume

## 1 尾喷焰内辐射传输方程求解

将贴体坐标下 FVM 用于尾喷焰红外辐射,可以解决复杂几何形状非灰介质内的辐射传输问题.考虑非灰介质的吸收、发射、散射,尾喷焰内辐射传递方程的表达式为

$$\frac{dI_{\lambda}(r,s)}{ds} = -\kappa_{e\lambda}I_{\lambda}(r,s) + \kappa_{a\lambda}I_{b\lambda}(r,s) + \frac{\kappa_{s\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\lambda}(r,s')\Phi(s,s')d\Omega', \quad (1)$$

式(1)中  $I_{\lambda}(r,s)$  表示单位矢量  $s$  方向、空间位置  $r$

的光谱辐射强度;  $I_{b\lambda}(r,s)$  表示黑体光谱辐射强度;  $\Phi(s,s')$  为散射相函数,  $\Omega'$  为立体角;  $\kappa_{e\lambda}$  为光谱衰减系数;  $\kappa_{a\lambda}$  为光谱吸收系数;  $\kappa_{s\lambda}$  为光谱散射系数. 令

$$S_{\lambda}^i = \kappa_{a\lambda}I_{b\lambda}(r,s) + \frac{\kappa_{s\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\lambda}(r,s')\Phi(s,s')d\Omega', \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)

$$\frac{dI_{\lambda}(r,s)}{ds} = -\kappa_{e\lambda}I_{\lambda}(r,s) + S_{\lambda}^i. \quad (3)$$

采用 FVM 对式(3)进行离散. 在控制体积  $\Delta V$  和控制立体角  $\Delta\Omega^i$  内对吸收、发射、散射性非灰介质的辐射传递方程积分,可得  $\Delta\Omega^i$  内辐射能量守恒方程的有限体积表达式<sup>[7]</sup>

$$\sum_{i=1}^{NA} A_i I_{i\lambda} \int_{\Delta\Omega^i} (\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}_i) d\Omega^i = (-\kappa_{e\lambda} I_{\lambda}^i + S_{\lambda}^i) \Delta V \Delta\Omega^i, \quad (4)$$

式(4)中  $A_i$  为控制体表面积,  $NA$  为控制体表面的个数,  $\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}_i$  表示立体角的离散方向与控制体表面法向量之间的点乘.

采用阶梯格式,假定下游控制体表面上的辐射强度与控制体上游节点的辐射强度相等,有

$$a_{p'}^i I_{p'}^i = a_j^i I_j^i + b, \quad (5)$$

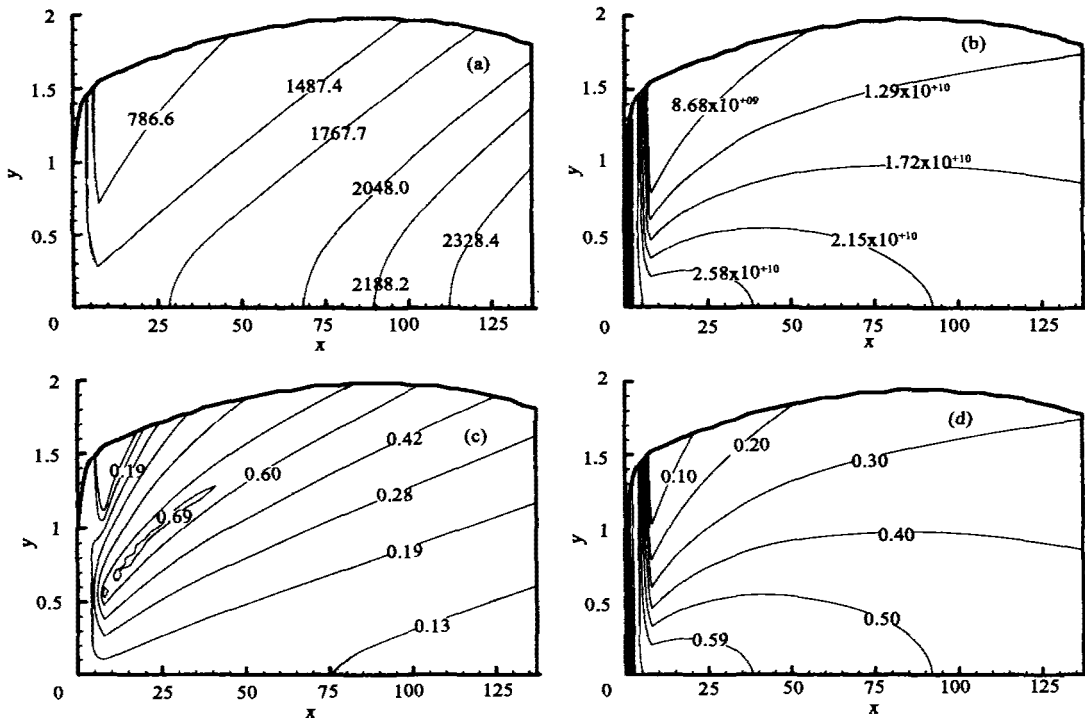


图2 流场计算参数及辐射物性参数 (a)流场的温度  $T(K)$  (b)  $Al_2O_3$  颗粒数密度(个数/ $m^3$ ) (c)  $4.3\mu m$  下  $CO_2$ 、 $H_2O$ 、 $CO$  总的光谱吸收系数 (d)  $4.3\mu m$  下  $Al_2O_3$  光谱散射系数

Fig. 2 computational parameters of flowfield and radiative parameters of gas phase molecular species (a) temperature profile of flowfield (b) particles concentration profile of  $Al_2O_3$  (c) total spectral absorption coefficients of  $CO_2$ ,  $H_2O$  and  $CO$  at  $4.3\mu m$  (d) spectral scattering coefficients of  $Al_2O_3$  at  $4.3\mu m$

式中,

$$a_p^i = \sum_{i=1}^{NA} \max(A_i D_i^i, 0) + [\kappa_{a\lambda} + \kappa_{s\lambda}] \Delta V \Delta \Omega^i,$$

$$a_i^i = \max(-A_i D_i^i, 0),$$

$$D_i^i = \int_{\Delta \Omega^i} (\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}_i) d\Omega,$$

$$b = S_\lambda^i \Delta V \Delta \Omega.$$

上述各式中,下标  $i = w, e, n, s, tn, bn$  表示控制体表面上的点,下标  $I = W, E, N, S, TN, BN$  表示与  $P$  控制体相邻的各控制体中心节点上的值,如图 1 所示.

求解复杂几何形体内辐射传递问题时,若采用直角坐标系,需要通过插值的方法处理边界条件,当边界处的物理量变化很大时会带来较大的计算误差.采用贴体坐标的优点是,可以将物理域上的不规则形状映射为计算域上的规则形状,便于处理边界条件及网格局部加密计算等.关于曲线坐标与直角坐标转换关系的详细推导见文献[8].离散方程组采用文献[9]CGSTAB 方法迭代求解.

## 2 火箭尾喷焰的红外辐射场计算

本文用半经验方法<sup>[4]</sup>计算尾喷焰流场燃气组份的浓度场和温度场.飞行高度 10km,马赫数为 1.6 h,流场的温度  $T(K)$  分布见图 2(a);流场中  $Al_2O_3$  的颗粒数密度(个数/ $m^3$ )分布见图 2(b).图中,横坐标  $x$  表示尾喷焰的长度除以喷管半径,纵坐标  $y$  表示尾喷焰的径向宽度除以喷管半径.吸收系数计算用逐线积分法<sup>[5]</sup>, $4.3\mu m$  下  $CO_2, H_2O, CO$  总的光谱吸收系数  $\kappa_{a\lambda} (m^{-1})$  见图 2(c); $Al_2O_3$  的散射由 Mie 理论确定<sup>[10]</sup>, $4.3\mu m$  光谱散射系数  $\kappa_{s\lambda} (m^{-1})$  见图 2(d).

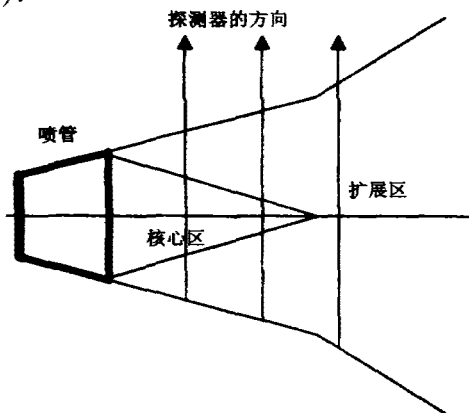


图 3 尾喷焰计算区域和探测方向示意图  
Fig. 3 The sketch of calculation zone of exhaust plume radiation and the direction of detection

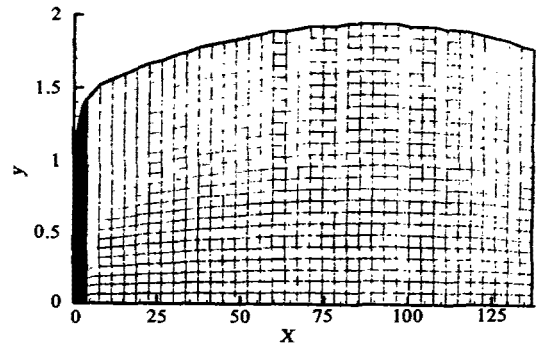


图 4 计算网络  
Fig. 4 Spatial grid

分别考虑各向异性散射、纯吸收(无散射)和各向同性散射,各向异性散射时相函数用 Legendre 多项式表示,令  $\Psi$  为入射方向  $s$  与散射方向  $s'$  的夹角,采用前向散射相函数  $F_2^{[11]}$ ,表达式为

$$\Phi_{F_2}(\cos\Psi) = 1 + \sum_{j=1}^8 A_j \sum_{n=0}^{j_1} (-1)^n \times \frac{(2j-2n)!}{2^n!(j-n)!(j-2n)!} [\cos\Psi]^{j-2n},$$

(6)

式(6)中  $A_1 = 2.00917, A_2 = 1.56339, A_3 = 0.67407, A_4 = 0.22215, A_5 = 0.04725, A_6 = 0.00671, A_7 = 0.00068, A_8 = 0.00005$ .  $j$  为偶数时,  $j_1 = [j/2]$  为  $j/2$ ;  $j$  为奇数时,  $j_1 = [j/2]$  为  $(j-1)/2$ .

对于 FVM,散射相函数需作归一化处理,平均散射相函数表达式为

$$\bar{\Phi} = \frac{\int_{\Delta\Omega} \int_{\Delta\Omega'} \Phi(s, s') d\Omega d\Omega'}{\Delta\Omega \Delta\Omega'}.$$

(7)

尾喷焰计算区域和探测方向如图 3 所示.天顶角  $N_\theta$  与圆周角  $N_\phi$  均匀划分,  $N_\theta \times N_\phi = 8 \times 10$ ;空间网格划分为  $N_x \times N_y = 55 \times 24$ ,见图 4,靠近喷口处,网格划分较密,喷口边界温度取为气体温度,界面发射率取 0.9.

为了检验本文的方法,用贴体坐标系下离散坐标法(DOM)的对称混合积分格式 LSH  $S_8^{[12]}$  作比较.

考虑大气窗口为  $2.7\mu m$  和  $4.3\mu m$  附近,探测角为  $90^\circ$ ,波长为  $2.7\mu m, 2.95\mu m$ ,考虑各向异性散射,FVM 与 DOM 的无因次表观光谱辐射强度计算结果如图 5(a)和图 5(b)所示.图中,横坐标表示尾喷焰的长度除以喷管的半径;纵坐标  $I_\lambda/I_{\lambda max}$ .在本文计算条件下,采用 DOM 计算时,在喷口附近,光谱辐射强度值达到最大,故  $I_{\lambda max} [W/(m^2 \cdot sr \cdot$

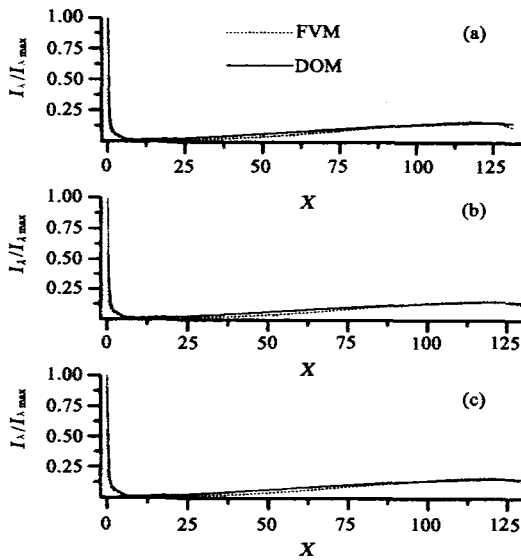


图5 喷焰辐射强度场 (a)2.7 $\mu\text{m}$  喷焰辐射强度场 (b)2.95 $\mu\text{m}$  喷焰辐射强度场 (c)2.7~2.95 $\mu\text{m}$  喷焰辐射强度场

Fig. 5 Radiation field of exhaust plume (a) radiation field of exhaust plume at 2.7 $\mu\text{m}$  (b) radiation field of exhaust plume at 2.95 $\mu\text{m}$  (c) radiation field of exhaust plume of 2.7~2.95 $\mu\text{m}$  spectral band

$\mu\text{m}$ ]取 DOM 最大表观光谱辐射强度. 靠近喷口附近辐射强度值较大. 是由于喷口附近的介质温度值较高,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的颗粒数密度较大. 由于尾喷焰的后燃, 在离喷口较远处, 辐射强度增大. 两种方法的计算结果有一定偏差, 这是由于二种方法的假设条件、求解过程不同造成的, 结果变化趋势一致. 2.7~2.95 $\mu\text{m}$  表观谱带辐射强度见图 5(c).

对于含各向异性散射粒子的介质, 若未考虑散射(纯吸收)或用各向同性散射近似可能会出现误差. 采用贴体坐标系下 FVM, 考察探测角为  $90^\circ$ , 波长为 4.2 $\mu\text{m}$ 、4.3 $\mu\text{m}$  和 4.45 $\mu\text{m}$ .

表观光谱辐射强度的相对误差  $RE_\lambda$  如图 6 中 (a)、(b)、(c) 所示. 光谱辐射能相对误差  $RE_{\lambda}$  和谱带辐射能相对误差  $RE_z$  见表 1 所列.

未考虑散射时, 靠近喷口区域的温度较高,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒数密度较大, 粒子的散射作用较大; 因此, 该区域表观辐射强度计算误差较大. 距离喷口无因次量为 6 附近区域的吸收系数值相对较大,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒数密度变小, 粒子的散射作用较小; 随距离喷口无因次量增大, 靠近轴线区域的吸收系数变小; 因此, 该区域表观辐射强度计算误差先变小, 然后变大. 距离喷口无因次量为 112 附近区域,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒数密度变小, 靠近轴线区域的温度较高, 散射的影响

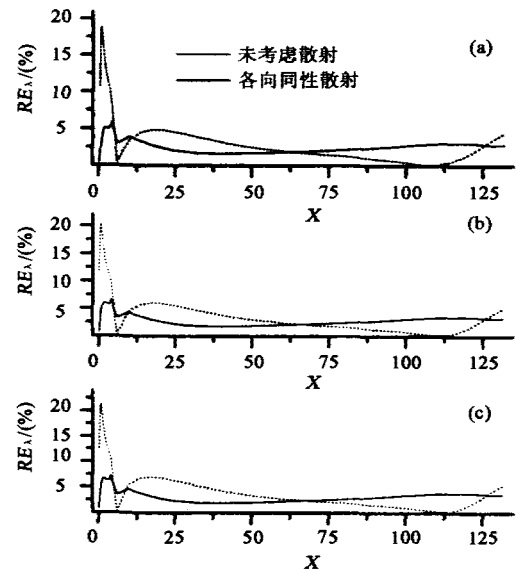


图6 4.2 $\mu\text{m}$  的近似计算相对误差 (a)4.2 $\mu\text{m}$  的近似计算相对误差 (b)4.3 $\mu\text{m}$  的近似计算相对误差 (c)4.45 $\mu\text{m}$  的近似计算相对误差

Fig. 6 Relative error of approximation at 4.2 $\mu\text{m}$  (a) relative error of approximation at 4.2 $\mu\text{m}$  (b) relative error of approximation at 4.3 $\mu\text{m}$  (c) relative error of approximation at 4.45 $\mu\text{m}$

变小; 随距离喷口无因次量增大, 远离轴线区域的散射系数变大; 所以, 该区域表观辐射强度计算误差先变最小, 然后变大.

采用各向同性散射近似时, 距离喷口无因次量为 32 附近区域,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒数密度较大, 减弱了各向异性散射的作用; 随距离喷口无因次量增大, 粒子的散射作用增大; 因此, 该区域表观辐射强度计算误差先变最小, 然后变大.

由图 6 可见, 不同波长表观光谱辐射强度的计算误差变化趋势基本一样, 随波长 4.2 $\mu\text{m}$  增大到 4.45 $\mu\text{m}$ , 计算误差加大. 未考虑散射时, 4.45 $\mu\text{m}$  表观光谱辐射强度的最大相对误差为 21.3%; 采用各向同性散射近似, 最大相对误差为 6.7%.

由表 1 可见, 采用各向同性散射近似随波长由 4.2 $\mu\text{m}$  增大到 4.45 $\mu\text{m}$ , 光谱辐射能的计算误差略有增加. 这是因为随波长的增加, 靠近喷口轴线区域  $\text{Al}_2\text{O}_3$  散射系数增大, 使散射作用增加, 但总体上对辐射能的计算影响不大.

表 1 采用各向同性散射近似时辐射能的计算误差  
Table 1 Relative error of total radiative energy of isotropic scattering approximation

$\mu\text{m}$	4.2	4.3	4.45	$\mu\text{m}$	4.2~4.45
$RE_{\lambda}$ (%)	3.69	4.11	4.48	$RE_z$ (%)	3.97

### 3 结论

本文在给定流场及辐射物性参数的条件下,将贴体坐标系下 FVM 用于固体火箭发动机尾喷焰的计算. 分析了  $2.7\mu\text{m}$ 、 $2.95\mu\text{m}$  表观光谱辐射强度及  $2.7\sim 2.95\mu\text{m}$  的表观谱带辐射强度.

计算结果表明,靠近喷口附近的辐射强度较大;离喷口较远处,辐射强度值增大;FVM 计算结果与 DOM 相比有一定偏差,但二种方法计算结果的变化趋势一致.

采用 FVM 考察,不考虑散射或用各向同性散射假设来近似非线性各向异性散射所带来的计算误差. 分别计算了  $4.2\mu\text{m}$ 、 $4.3\mu\text{m}$  和  $4.45\mu\text{m}$  表观光谱辐射强度及光谱辐射能  $4.2\sim 4.45\mu\text{m}$  的表观谱带辐射强度及谱带辐射能.

在本文计算情况下,不同波长表观光谱辐射强度的计算误差变化趋势基本一样,随波长增加,计算误差加大;未考虑散射时,靠近喷口区域,表观辐射强度的计算误差较大;采用各向同性散射近似时,辐射能的计算误差不大.

### REFERENCES

- [1] Ludwing C B, Malkmus W, Walker J, *et al.* A theoretical model for absorbing, emitting and scattering plume radiation. Horton T E (Ed). *Spacecraft Radiative Transfer and Temperature Control*. New York: AIAA Progress Series in Astronautics and Aeronautics, 1982, **83**: 111—127
- [2] XUN Nan-Rong. Numerical computation on infrared plume radiation. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica* (徐南荣. 喷气流红外辐射场的数值计算. *航空学报*), 1995, **16** (6): 647—653
- [3] YAO Lian-Xing, YU Meng-Long, LI Jian-Bing. Optical radiation characteristic of missile engine exhaust plumes and earth's atmospheric background. *Research on Properties of Object and Environment* (姚连兴,俞萌龙,李建兵. 导弹发动机喷焰与地球大气背景的光辐射特性. *目标与环境特性研究*), 1998, **2**: 34—39
- [4] Piesik E T. Aluminized propellants and a method defining low-altitude exhaust plumes. *J. of Spacecraft and Rocket*, 1986, **23**: 215—221
- [5] Scutaru D. Measurements and calculations of  $\text{CO}_2$  absorption at high temperature in the  $4.3$  and  $2.7\mu\text{m}$  regions. *J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1993, **50** (2): 179—191
- [6] DONG Shi-Kui, TAN He-Ping, HE Zhi-Hong, *et al.* Numerical simulation of visible and infrared radiation properties of hypersonic reentry hodies. *J. Infrared Millim Waves* (董士奎,谈和平,贺志宏,阮立明. 高超声速再入体可见、红外辐射特性数值模拟. *红外与毫米波学报*), 2002, **21** (3): 180—184
- [7] HE Zhi-Hong, TAN He-Ping, LIU Lin-Hua. Finite volume method for coupled radiation and conduction in scattering non-gray medium. *J. of Chemical Industry and Engineering* (贺志宏,谈和平,刘林华. 有限体积法解多场耦合下散射性非灰介质内的辐射换热. *化工学报*), 2001, **52**(5): 434—439
- [8] Thompson J F, Warsi U A, Masin C W. Numerical grid generation: Foundations and applications. New York: North-Holland, 1985, 95—169
- [9] Ferziger J H, Peric M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 1996, 104—107
- [10] DONG Shi-Kui. A study on the thermal radiation properties of high temperature gas and its application to space technology. Dissertation of Harbin Institute of Technology for The Doctoral Degree in Engineering (董士奎. 高温气体热辐射特性研究及其在航天技术中的应用. 哈尔滨工业大学博士学位论文), 2002
- [11] Baek S W, Kim M Y. Analysis of radiative heating of a rocket plume base with the finite volume method. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 1997, **40**(7): 1501—1508
- [12] Fiveland W A. The selection of discrete ordinate quadrature sets for anisotropic scattering. *ASME HTD-160*, 1991, 89—96