

固体火箭羽流红外辐射特征预测的 多相态 Al_2O_3 模型*

张立功¹⁾ 白璐^{1)2)†} 李金录¹⁾ 郭立新¹⁾

1) (西安电子科技大学物理学院, 西安 710071)

2) (西安电子科技大学信息感知与理解协同创新中心, 西安 710071)

(2025年4月16日收到; 2025年5月28日收到修改稿)

含铝固体推进剂以其可靠性、耐久性在战略战术导弹中得到广泛应用. 作为被动探测的主要手段, 准确识别排气羽流的红外辐射特征有助于快速预警和跟踪. 本文基于高温羽流环境下燃烧产物 Al_2O_3 晶体结构的变化, 提出了含多相态 Al_2O_3 的固体火箭羽流辐射计算模型. 采用球谐离散坐标法求解两相羽流的光谱辐射特性. 与忽略 Al_2O_3 颗粒相变的传统模型相比, 新模型与实验测量数据结果更加吻合, 进一步提高了计算精度. 利用该模型研究了不同含铝比例的羽流红外光谱辐射特性. 结果表明, 在 1.7—2.0 μm 范围内, 传统模型明显高估了低含铝情况的羽流辐射结果, 最大差异达 67.2%. 在 2.5—3.0 μm 范围内, 随着含铝比例的增大, 两种模型之间的差异逐渐减小; 在 4.0—4.5 μm 范围内的颗粒相变对整体结果影响不明显, 平均相差 7% 左右. 所以有必要通过考虑羽流中颗粒的相态变化实现辐射特性的精确预测. 本研究结果可为固体火箭发动机的准确检测和识别提供理论依据和参考.

关键词: 相变, 辐射传输方程, 粒子散射, 红外光谱

PACS: 82.35.Jk, 42.68.Ay, 52.25.Tx, 33.20.Ea

CSTR: 32037.14.aps.74.20250493

DOI: 10.7498/aps.74.20250493

1 引言

固体推进剂由于其高能量和可靠性, 被广泛应用于各种运载火箭和导弹系统中. 其中, 含铝固体推进剂因其优异的燃烧性能和高比冲而尤为引人注目^[1-4]. 铝粉作为固体推进剂中的主要添加成分, 对燃烧效率和羽流特性有显著影响^[5,6]. 因此, 实现对固体推进剂羽流的精确辐射探测是现代国防系统的重要组成部分.

然而, 准确计算气固两相羽流的辐射特性仍然是一项具有挑战性的工作. 这主要是由于气体分子的光谱依赖性、粒子数量密度的空间分布以及辐射

传输方程的角度离散化. 近年来, 人们对固体推进剂羽流的辐射特性进行了大量研究. Nelson^[7] 假设羽流是均匀的圆柱介质, 分析了羽流中不同的颗粒浓度的影响. 他发现 Al_2O_3 粒子的质量载荷对烟羽的红外辐射有显著影响. Lared 和 Netzer^[8] 研究了固体火箭发动机中铝燃烧产生的 Al_2O_3 颗粒对排气烟羽近场辐射的影响. Alexeenko 等^[9] 分析了 Atlas 火箭羽流的红外辐射, 对比实测数据证实有必要将烟尘颗粒视为重要的辐射源. Boischot 等^[10] 利用复合火箭发动机研究了羽流红外辐射特性. 然而, 计算模型中 Al_2O_3 粒子的温度被限制在 2300 K, 导致靠近喷嘴区域和高粒子数密度区域的辐射值被低估. Cai 等^[11] 利用流场实验数据计算了固体

* 国家自然科学基金 (批准号: U20B2059, 61875156, 62405230) 和中央高校基本科研业务费专项 (批准号: ZYTS25132) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: blu@xidian.edu.cn

火箭羽流在 2—6 μm 和 8—12 μm 波长范围内的辐射. Feng 等^[12]研究了 Al_2O_3 颗粒初速对烟羽辐射的影响. 结果表明, 粒子辐射在烟羽中起主要作用, 飞弹速度越快, 气相辐射越弱, 固相辐射越强. 申文涛等^[13]采用有限体积法研究了固液混合火箭羽流的红外辐射特性. Zhang 和 Chen^[14]通过数值研究探讨了地面试验条件下各种比例火箭模型与全尺寸模型烟羽红外辐射的相似性. 并认为 Al_2O_3 粒子是火箭排气的辐射成分, 其辐射主要集中在 2—6 μm 波长. Riolland 等^[15]模拟了高度为 80 km 的 Black Brant 火箭羽流, 并将结果与测量数据进行了比较. Zhang 等^[16]研究了簇团粒子对羽流红外辐射的影响, 并计算了 Atlas 火箭在不同观测方向的红外辐射. 张腾等^[17]研究了助推段喷焰的红外辐射特性, 建立了连续流域到过渡流域的尾喷焰反应流场计算模型. 详细分析了尾喷焰随流域变化的红外光谱辐射特征差异. Bao 等^[18]通过数值研究分析了排气羽流的辐射特性. 结果表明, 固体颗粒在短波段的辐射不容忽视, 高温 Al_2O_3 对辐射贡献的影响高达 30%. 因此, 要准确探测和识别含固体推进剂的飞行目标, 就必须详细考虑 Al_2O_3 粒子的辐射特性.

需要指出的是, 以往研究将 Al_2O_3 粒子视为单一液相颗粒, 从而简化了其辐射特性计算. 然而, Al_2O_3 粒子的光学特性受温度、粒度分布、形状、折射率和相态的影响^[19-21]. 燃烧产物在尾焰中会随着温度场的变化而发生相变. 研究表明, 不同相态的 Al_2O_3 颗粒的散射特性存在显著差异^[22,23]. 由于飞行器尾喷焰介质场中存在较大温度梯度, Al_2O_3 往往在计算单元中呈现多种相态. 在这种情况下, 传统模型对两相羽流的预测往往会出现一些偏差. 忽略 Al_2O_3 粒子的相变不仅会影响粒子的光学特性, 还会对羽流的辐射特性产生重大影响.

因此, 本研究的主要目标是考虑 Al_2O_3 粒子燃烧过程中晶格结构的变化, 建立固体火箭烟羽辐射的精确求解模型. 采用球谐离散纵坐标法 (SHDOM)^[24]求解两相羽流的辐射传输方程. 为了验证光谱辐射计算结果, 我们对照双基推进剂地面实验数据进行验证. 本文的结构如下: 第 2 节详细介绍求解两相羽流辐射传输方程的方法; 第 3 节验证所建模型的准确性, 并分析在不同含铝条件下 Al_2O_3 相变如何影响羽流的红外光谱辐射; 第 4 节总结计算结果并进行讨论.

2 两相羽流辐射计算模型

2.1 两相羽流的辐射传递方程

固体推进剂羽流的辐射特性可以由辐射方程得到:

$$\frac{1}{\kappa_{\text{ext},\lambda}(s)} \frac{dI_{\lambda}(s, \Omega)}{ds} = -I_{\lambda}(s, \Omega) + J_{\lambda}(s, \Omega), \quad (1)$$

其中, $I_{\lambda}(s, \Omega)$ 为固定视线方向 Ω 传输路径上 s 点的辐射强度, $J_{\lambda}(s, \Omega)$ 是两相羽流中的辐射源函数, $\kappa_{\text{ext},\lambda}(s)$ 为消光系数.

对于含铝固体推进剂, 羽流中含有大量燃烧产物 Al_2O_3 颗粒. 在计算羽流的辐射特性时, 辐射源函数需要同时考虑粒子的热辐射 $J_{\lambda}^{\text{p}}(s, \Omega)$ 和粒子的散射 $J_{\lambda}^{\text{sca}}(s, \Omega)$:

$$\begin{aligned} J_{\lambda}(s, \Omega) &= J_{\lambda}^{\text{p}}(s, \Omega) + J_{\lambda}^{\text{sca}}(s, \Omega) \\ &= (1 - \omega)I_{\text{b}\lambda} + \frac{\omega}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\lambda}(s, \Omega') \Phi_{\lambda}(\Omega, \Omega') d\Omega', \quad (2) \end{aligned}$$

其中, $I_{\text{b}\lambda}$ 为粒子的黑体辐射, ω 为单次散射反照率, Φ_{λ} 为散射相位函数. 可以得到固体火箭羽流的光谱辐射强度:

$$\begin{aligned} I_{\lambda}(s, \Omega) &= I_{\lambda}(0, \Omega) \exp \left[- \int_0^s \kappa_{\text{ext},\lambda}(s') ds' \right] \\ &\quad + \int_0^s \exp \left[- \int_{s_1}^{s'} \kappa_{\text{ext},\lambda}(s'') ds'' \right] \\ &\quad \times \kappa_{\text{ext},\lambda}(s') J_{\lambda}(s', \Omega) ds'. \quad (3) \end{aligned}$$

图 1 是固体推进剂两相羽流辐射求解的示意图. 图 1(a) 为固体推进剂红外波段的主要辐射源; 图 1(b) 显示了两相羽流的辐射传递过程; 图 1(c) 为固体燃烧产物 Al_2O_3 颗粒的多种相态.

散射项的复杂空间积分是处理粒子多次散射的关键步骤. SHDOM 可以高效地计算网格点辐射源, 通过变换离散坐标和球谐函数形式之间变换源函数和辐射强度, 并在离散方向上对源函数进行迭代积分. 消光系数和源函数的具体计算将在以下几节中描述.

2.2 气体消光系数

利用 Malkmus 函数计算各窄带沿光传输方向的平均透射率并确定气体的消光系数^[25]. 其中平均透过率可以推导为

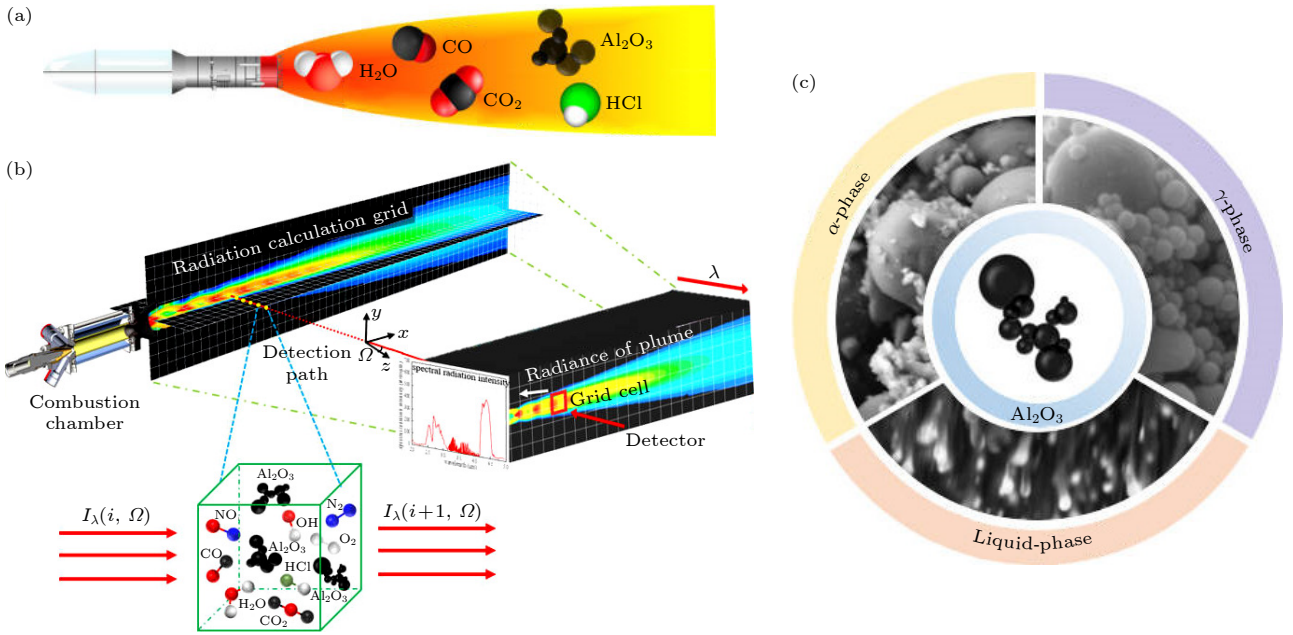


图 1 固体推进剂羽流多相态 Al_2O_3 模型示意图 (a) 羽流的主要辐射产物; (b) 气固两相流的辐射传输求解; (c) Al_2O_3 颗粒的多种相态

Fig. 1. Schematic diagram of multiphase state Al_2O_3 model for solid propellant plume: (a) Main radiation product of the plume; (b) radiation transfer of gas-solid two-phase flow; (c) Al_2O_3 particles in multiple phases.

$$\bar{\tau}_{\Delta\nu} = \exp \left[-2 \frac{\bar{\gamma}}{\bar{d}} \left(\sqrt{1 + u \cdot \bar{\kappa} \cdot \bar{d} / \bar{\gamma}} - 1 \right) \right], \quad (4)$$

其中, $\bar{\kappa}$, $\bar{\gamma}$, \bar{d} 分别表示窄带平均吸收系数、窄带平均半宽度和窄带平均谱线间距. 因此, 根据吸收系数与光谱透过率的关系, 可以得到每个计算单元内的气体吸收系数:

$$\kappa_{\text{abs}}^{\text{gass}} = -\log(\bar{\tau}_{\Delta\nu})/l. \quad (5)$$

基于 HITEMP 谱线数据库, 采用 Young^[26] 的方法对上述光谱波段参数进行处理:

$$\begin{aligned} \bar{\kappa} &= \frac{1}{\Delta\nu} \sum_{m=1}^M S_m, \quad \bar{\gamma} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \gamma_m, \\ \bar{d} &= \bar{\kappa} \cdot \bar{\gamma} / \left(\frac{1}{\Delta\nu} \sum_{m=1}^M \sqrt{S_m \cdot \gamma_m} \right)^2, \end{aligned} \quad (6)$$

其中, M 为对应波数范围内的谱线个数; m 为窄带范围 $\Delta\nu$ 内的谱线数目, S_m 和 γ_m 为第 m 条谱线的谱线强度和谱线半宽. HITEMP 数据库基于标准条件 ($p = 1.01325 \times 10^5$ Pa, $T = 296$ K) 下的光谱参数^[27], 其他温度 T 条件的线强 $S_i^m(T_{\text{ref}})$ 可由 (7) 式合理外推得到:

$$\begin{aligned} S_i^m(T) &= S_i^m(T_{\text{ref}}) \frac{Q(T_{\text{ref}}) \exp(-c_2 E_i/T)}{Q(T) \exp(-c_2 E_i/T_{\text{ref}})} \\ &\times \frac{[1 - \exp(-c_2 \nu_0/T)]}{[1 - \exp(-c_2 \nu_0/T_{\text{ref}})]}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中, c_2 为第二辐射常数, E_i 为谱线能级跃迁所需的低态能量, $Q(T_{\text{ref}})$ 和 $Q(T)$ 分别为参考温度和计算温度下的配分函数.

2.3 多相态 Al_2O_3 颗粒辐射特性

对于羽流中的固体燃烧产物, 尺寸参数符合 Mie 理论的适用范围^[28,29]. 其散射、消光效率因子可以表示为

$$Q_{\text{sca},\lambda} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2), \quad (8)$$

$$Q_{\text{ext},\lambda} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n), \quad (9)$$

其中, x 为粒子的尺度因子 $x = \pi D/\lambda$, Re 表示结果的实部, a_n, b_n 是 Mie 系数. 粒子的散射相位函数可以表示为

$$\Phi_{\lambda}(\theta) = 2 \frac{|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2}{x^2 Q_{\text{sca},\lambda}}. \quad (10)$$

由于两相羽流中颗粒的辐射特性主要受尺度因子 x 和复折射率 m 的影响. 根据文献^[30,31], 可以假设颗粒粒径服从对数正态分布, 其中 σ_g 为 1.5, 其概率密度函数 $f(r)$ 为

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r \ln \sigma_g}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\ln r - \ln r_g}{\ln \sigma_g} \right]^2 \right\}. \quad (11)$$

在高温环境下, 烟羽内 Al_2O_3 颗粒的燃烧被认为是造成颗粒云内粒径分布不均匀的原因. 粒子云的辐射特性与粒子粒径分布和粒子数密度有关^[32,33], 可以表示为

$$\kappa_{\xi,\lambda}^{\text{particle}} = N_p \int_0^\infty \pi r^2 Q_{\xi,\lambda}(m, r) f(r) dr, \quad (12)$$

其中, $Q_{\xi,\lambda}$ 为粒子云的吸收系数和散射系数, N_p 表示计算单元内的粒子数密度. 考虑粒径分布的统计平均散射相位函数为

$$\bar{\Phi}_\lambda = \frac{N_p \int_0^\infty \Phi_\lambda(r) Q_{\xi,\lambda}(m, r) \pi r^2 f(r) dr}{\kappa_{\text{sca},\lambda}^{\text{particle}}}. \quad (13)$$

复折射率 $m = n + ik$ 与粒子温度 T 和波长 λ 有关. 由于以往的研究中认为颗粒尺度很小, 在模拟过程中往往忽略了燃烧过程中颗粒的相变. 本文针对粒子相变改进了两相羽流辐射计算模型, 并对不同温度区间的粒子进行独立表征, 如图 2 所示.

温度场和波长变化情况下 Al_2O_3 折射率实部参考^[32]:

$$n = \left[1 + \lambda^2 \left(\frac{1.024}{\lambda^2 - 0.00376} + \frac{1.058}{\lambda^2 - 0.01225} + \frac{5.281}{\lambda^2 - 321.4} \right) \right]^{0.5} \left[1 + 0.0202 \left(\frac{T}{1000} - 0.473 \right) \right]. \quad (14)$$

粒子相变后的折射率虚部可以看作是该波段原子振动、自由电子和 Urbach 长波吸收共同贡献的结果^[20,21]:

$$k_0 = h \cdot \lambda \cdot \exp \left[-\frac{6.07 \cdot 10^{-3}}{T} \left(\frac{10^4}{\lambda} - \omega_0 \right)^2 \right] \times \left[1 - \exp \left(-\frac{1.438 \cdot \omega_0}{T} \right) \right], \quad (15)$$

$$k_1 = \frac{d \cdot \lambda}{n \cdot \left[1 + (e/\lambda)^2 \right]} \cdot \exp \left(-\frac{6875}{T \cdot \lambda_g} \right), \quad (16)$$

$$k_2 = a \cdot \lambda^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\text{opt}}} \right) \cdot T \right]^2, \quad (17)$$

$$k_3 = b \cdot \lambda \cdot \exp \left[\frac{c}{T} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\text{opt}}} \right) \right], \quad (18)$$

其中, 折射率虚部的计算公式为 $k = k_0 + k_1 + k_3$ ^[19]. λ_g 表示电导率作用能量对应的波长, 而 λ_{opt} 表示禁带宽度的波长. 对于高温流场中不同的颗粒相态, 采用相应的方程来表征:

$$\begin{aligned} \lambda_g &= \frac{1}{-E_0 + f/T} \quad (\text{for liquid}), \\ \lambda_g &= \frac{1}{E_0 - f \cdot T} \quad (\text{for } \gamma, \alpha), \\ \lambda_{\text{opt}} &= \frac{1}{E_0 + E_{\text{pol}} - f \cdot T} \quad (\text{for } \gamma, \alpha). \end{aligned} \quad (19)$$

(15) 式—(19) 式中使用的参数来源于参考文献^[20]中的实验数据和经验分析, 由表 1 给出.

表 1 Al_2O_3 相变参数^[20]
Table 1. Al_2O_3 phase transition parameter^[20].

参数	液相	γ 相	α 相
a/K^{-2}	2.1×10^{-7}	2.1×10^{-7}	2.1×10^{-7}
$E_0/\mu\text{m}^{-1}$	4.472	6.25	6.82
$f/\mu\text{m}^{-1}$	1.784×10^{-4}	1.3×10^{-3}	8.8×10^{-4}
$E_{\text{pol}}/\mu\text{m}^{-1}$	—	0.53	0.53
$b/\mu\text{m}^{-1}$	2.5×10^{-2}	2.5×10^{-2}	2.5×10^{-2}
$c/(\text{K}^{-1} \cdot \mu\text{m})$	6800	6800	6800
$d/\mu\text{m}^{-1}$	2.0	2.0	1.6
$e/\mu\text{m}^{-1}$	0.95	0.95	0.95
$h/\mu\text{m}^{-1}$	—	7.93×10^{-4}	7.93×10^{-4}
$\omega_0/\mu\text{m}^{-1}$	—	1333	1333

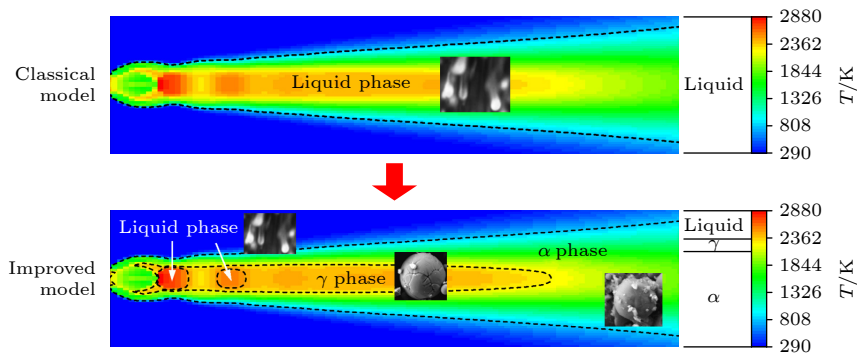


图 2 改进模型与传统模型比较

Fig. 2. Comparison of improved and classical models.

经过上述过程后, 颗粒在流场中的燃烧状态可以更加清晰地反映出来. 后续颗粒辐射特性的计算可归纳为以下两个步骤:

1) 计算 Al_2O_3 颗粒不同相态的数密度. 根据 Al_2O_3 在不同相态中的密度 ρ 的变化, 可以得到颗粒质量如 (20) 式所示, 其中 i 分别表示 α , γ 和液相. 然后, 依据流场网格中 Al_2O_3 颗粒的温度分布, 计算出各相态对应的颗粒数密度 n_i , 单位为 m^{-3} , 如 (21) 式所示. M_{total} 为辐射计算网格内总粒子质量密度, 单位为 kg/m^3 .

$$m_i = \rho_i V = \rho_i \frac{4\pi r^3}{3}, \quad (20)$$

$$n_i = M_i/m_i, \quad (21)$$

$$M_{\text{total}} = M_\alpha + M_\gamma + M_L. \quad (22)$$

2) 单元内颗粒辐射特性计算. 根据第一步得到的各相态颗粒数密度, 可以将 (12) 式和 (13) 式展开为

$$\kappa_{\text{ext,total}}^{\text{particle}} = \sum_{i=1}^3 n_i \cdot \kappa_{\text{ext}}^{(i)}, \quad (23)$$

$$\kappa_{\text{sca,total}}^{\text{particle}} = \sum_{i=1}^3 n_i \cdot \kappa_{\text{sca}}^{(i)}, \quad (24)$$

$$\Phi_{\text{total}} = \sum_{i=1}^3 n_i \cdot \bar{\Phi}_\lambda^{(i)}. \quad (25)$$

多相态 Al_2O_3 粒子羽流辐射在每个网格单元内的单散射反照率 ω 可以表示为

$$\omega = \frac{\kappa_{\text{sca,total}}^{\text{particle}}}{\kappa_{\text{abs}}^{\text{gass}} + \kappa_{\text{ext,total}}^{\text{particle}}}, \quad (26)$$

其中, $\kappa_{\text{ext,total}}^{\text{particle}}$ 和 $\kappa_{\text{sca,total}}^{\text{particle}}$ 为网格单元内多相 Al_2O_3 粒子的总消光系数和总散射系数. 将其代入 (3) 式中即可迭代计算任意观测视线上的辐射特性.

3 数值结果分析与讨论

3.1 光谱辐射模型的验证

将改进模型结果与双基推进剂地面试验的实测数据进行对比 [34]. 发动机具体参数包括喷管喉部直径 10 mm, 喷管出口直径 23 mm, 收缩半角 45° , 膨胀半角 15° . 双基推进剂的主要配方包括硝化纤维素、硝化甘油、HMX 和铝粉. 实测喷嘴燃烧室平均压力为 7.4 MPa, 温度为 2884 K. 燃烧室内的反应组分见表 2.

表 2 双基推进剂燃烧室参数

Table 2. Parameter of combustion chamber for double-base propellant.

压强 /MPa	温度 /K	燃烧室组分的质量分数					
		H_2O	CO_2	CO	N_2	H_2	Al_2O_3
7.4	2884	0.1084	0.2462	0.3850	0.1630	0.0140	0.0835

实验测量了羽流下游 0.5 m 处光斑的光谱辐射. 实验过程中通过高速摄影得到的羽流大小的可见光图像如图 3 所示. 计算结果 (图 4) 表明, 本文计算的流场温度分布与实验及文献计算结果基本一致, 可用于后续的光谱辐射特性计算.

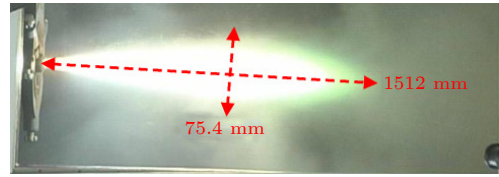


图 3 可见光实验图像 [34]

Fig. 3. Images of experiments visible [34].

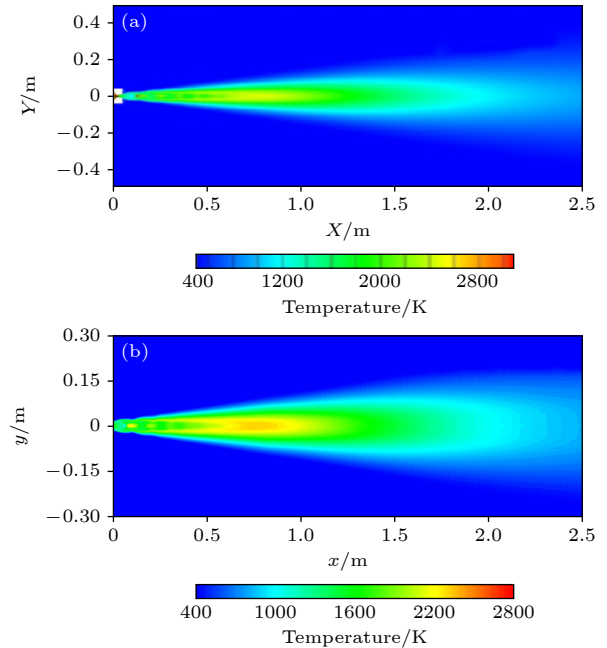


图 4 羽流结果与文献 [34] 比较 (a) 文献结果; (b) 计算结果

Fig. 4. Comparison of plume results with Ref. [34]: (a) Reference result; (b) calculate result.

图 5 给出了羽流的光谱辐射计算结果和实验对比. 红线是文献 [34] 中使用的传统模型, 未考虑粒子相变; 蓝线是采用本文提出的改进模型计算结果; 绿线为实验测量数据. 与传统计算模型相比, 改进模型的精度有一定程度的提高.

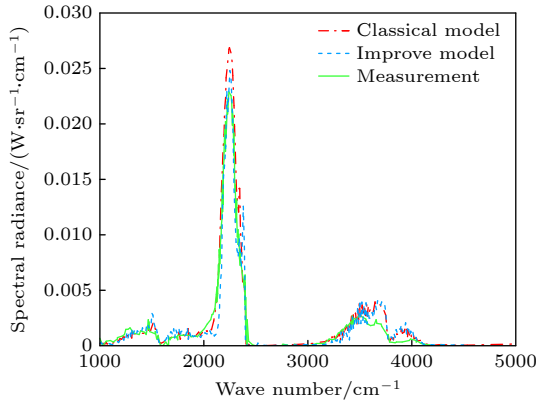


图 5 与文献 [34] 中的计算结果和测量值比较

Fig. 5. Comparison with measurement and calculated in the Ref. [34].

图 6(a) 比较了红外辐射的一些主要波段. 图 6(b) 为两种模型与实验测量数据的相对误差. 可见, 改进模型在主要红外辐射特征波段的精度都有不同程度的提高. 因此, 改进的两相羽流辐射传递计算模型能够更好地预测固体推进剂排气羽流的光谱辐射.

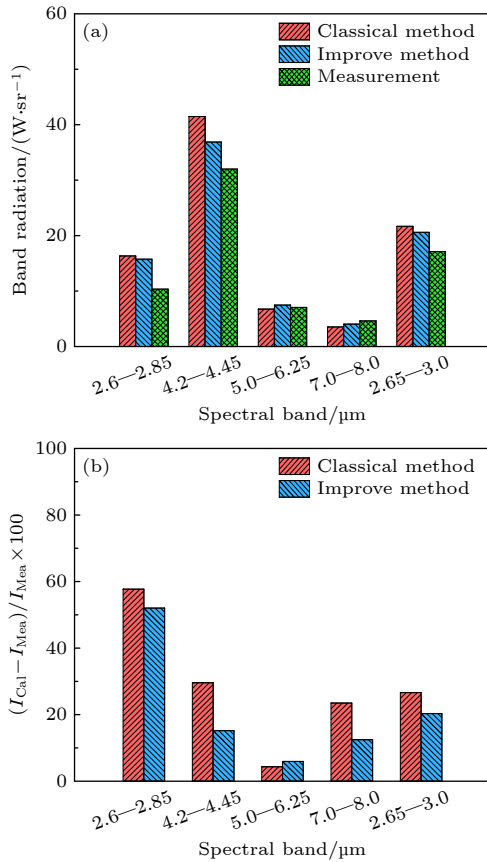


图 6 与实验结果比较 (a) 波段辐射强度; (b) 相对误差

Fig. 6. Comparison with experimental results: (a) Band radiation intensity; (b) relative error.

3.2 含铝推进剂羽流流场计算

利用改进的计算模型, 研究了固体推进剂中铝含量变化对排气羽流红外光谱特征的影响. 以 BEM-2 发动机和 HTPB/AP 推进剂为研究对象进行数值模拟. 电机参数参考文献 [35]. 为了分析推进剂中铝粉含量对羽流红外辐射特性的影响, 选取了一种典型的含铝推进剂 HTPB(13%)/AP(87%), 研究了含铝比例为 5%—20% 时的辐射差异. 利用 CEA 程序计算了燃烧室内和喷嘴处的气体成分. 各掺杂比的化学平衡组分列于表 3.

表 3 不同含铝比例的燃烧室中各组分参数

Table 3. Mass fraction of each component in the combustion chamber at different doping ratios.

工况	铝含量/%	燃烧室组分的质量分数				
		H ₂ O	CO ₂	CO	HCl	Al ₂ O ₃
1	5	0.24	0.13	0.17	0.244	0.09
2	10	0.20	0.09	0.18	0.235	0.17
3	15	0.16	0.06	0.19	0.225	0.24
4	20	0.12	0.04	0.20	0.216	0.31

推进剂中铝的浓度影响燃烧, 导致 Al₂O₃ 颗粒大小发生变化. 因此, 需要对其粒径进行讨论. 采用 Hermesen 推荐的质量加权平均公式计算出 4 种掺杂情况下的平均粒径分别为 1.67 μm, 2.92 μm, 3.81 μm 和 4.46 μm^[36].

图 7 显示了 HTPB/AP/Al 推进剂羽流的温度对比和颗粒密度分布. 随着含铝量的增大, 马赫环处的温度显著升高. 随着掺杂比的增大, 马赫环向前移动, 且分布变得不明显. 出现这种现象的部分原因是颗粒的温度变化比气相慢, Al₂O₃ 颗粒的涌动导致温度停滞. 大颗粒向轴靠近的趋势导致颗粒活动区域的缩小. 颗粒浓度的增大降低了气体湍流的影响.

3.3 粒子相变对羽流辐射的影响

为了比较考虑粒子相变与否对羽流辐射计算结果的影响. 选取 2000—6000 cm⁻¹ 波段长度为 1 m 的羽流核心区域, 分析 Al₂O₃ 粒子相变对羽流红外辐射特性的贡献, 计算间隔为 5 cm⁻¹. 不同铝掺杂条件下红外羽流光谱辐射强度对比结果如图 8 所示.

结合图 7 中的温度场数据可以发现: 当铝掺杂比较低时, 羽流的温度分布特征明显, Al₂O₃ 颗粒

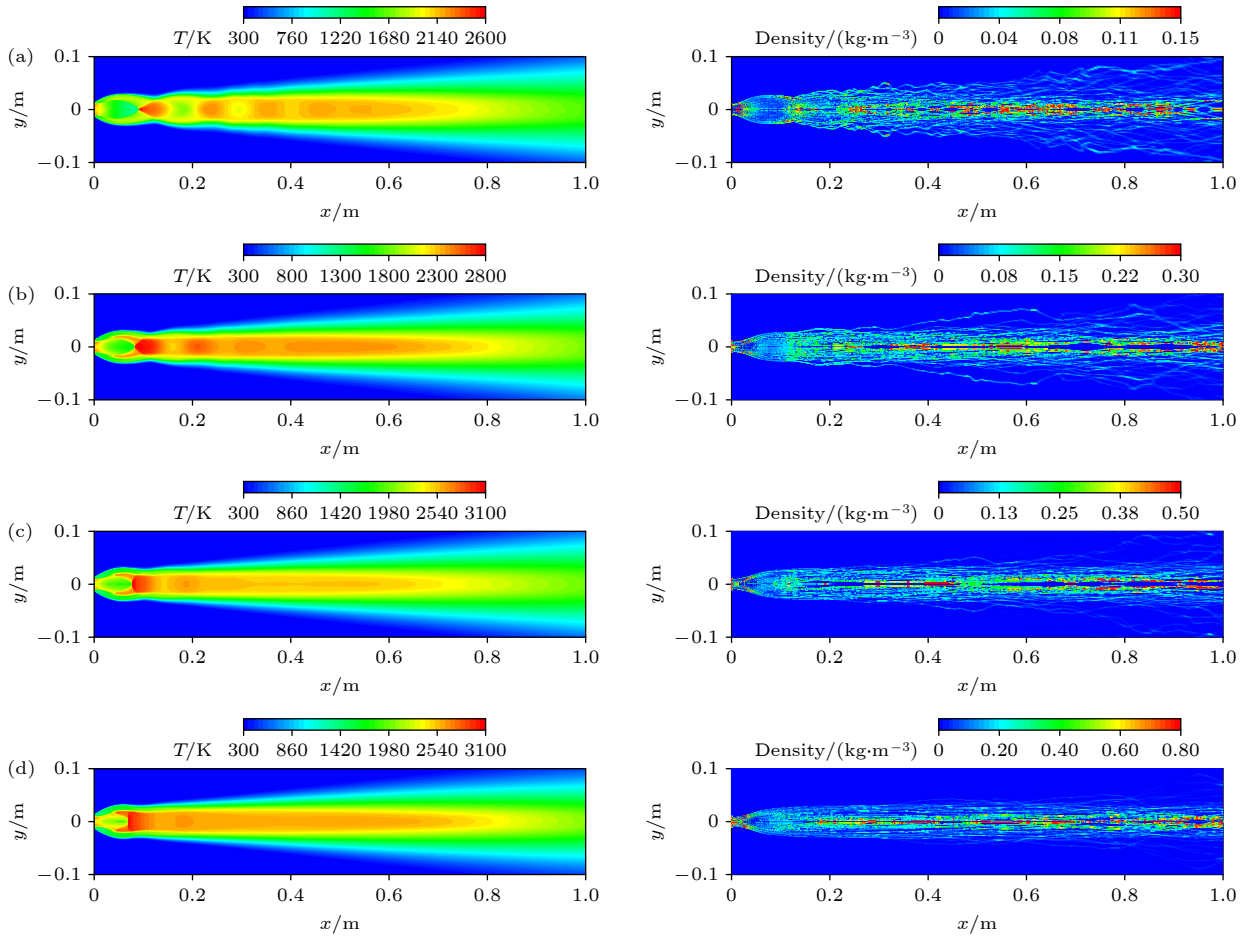


图 7 不同含铝情况的温度场及对应的粒子总质量密度 (a) Al-5%; (b) Al-10%; (c) Al-15%; (d) Al-20%

Fig. 7. Temperature field and corresponding particle density for different aluminum contents: (a) Al-5%; (b) Al-10%; (c) Al-15%; (d) Al-20%.

表现出不同的相态, 核心区域主要以 γ 相为主, α 相颗粒分布在外围. 然而, 传统模型中粒子的液相假设过高估计了羽流辐射的强度. 如图 8(a), (b) 所示; 当铝掺杂比为 15% 和 20% 时, 由于羽流核心区域保持较高的温度, Al_2O_3 颗粒主要表现为液相状态. 导致计算结果与未考虑相变的传统模型结果基本一致, 如图 8(c), (d) 所示. 粒子相变对羽流光谱辐射的贡献减弱.

通过比较红外 3 个特征波段下多相态模型与传统模型之间的辐射特性差异, 如表 4 所示. 模型差异根据公式给出: $|I_M - I_T|/I_T$, 其中 I_M 和 I_T 分别表示本文采用的多相态模型和传统模型计算的波段辐射强度. 结果表明: 粒子相变对红外羽流辐射的影响随含铝量增加呈现先增大后减小的趋势, 主要集中在 $1.7\text{--}2.0\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\text{--}3.0\ \mu\text{m}$. 在 $1.7\text{--}2.0\ \mu\text{m}$ 波段, 粒子的辐射特性受到相态的强烈影响, 羽流核心区域以 γ 相为主, 导致低含铝情况的羽流辐射特性明显高估, 最大降低了 67.2%; 在

$2.5\text{--}3.0\ \mu\text{m}$ 波段, Al_2O_3 颗粒的相态对辐射结果的影响减小, 当铝掺杂率为 20% 时, 颗粒相变对辐射结果基本没有影响. 在 $4.0\text{--}4.5\ \mu\text{m}$ 波段, 粒子相变对整体结果影响不大. 分析其原因是当含铝比例较低时 (如 Al-5%, Al-10%), 羽流的核心区域主要分布 γ 相以及部分 α 相和少量的液相颗粒. 多相态模型与简化模型对羽流区域相态的划分存在明显差异. 但是由于推进剂本身含铝量较低, 整体羽

表 4 不同含铝情况下多相态模型与传统模型的红外波段辐射强度差异

Table 4. Difference of infrared band radiation intensity between the multiphase model and the traditional model under different aluminum contents.

铝含量/%	红外波段辐射强度差异/%		
	1.7—2.0 μm	2.5—3.0 μm	4.0—4.5 μm
5	47.2	18.6	2.7
10	67.2	21.6	13.1
15	3.4	10.1	7.5
20	1.8	3.6	4.8

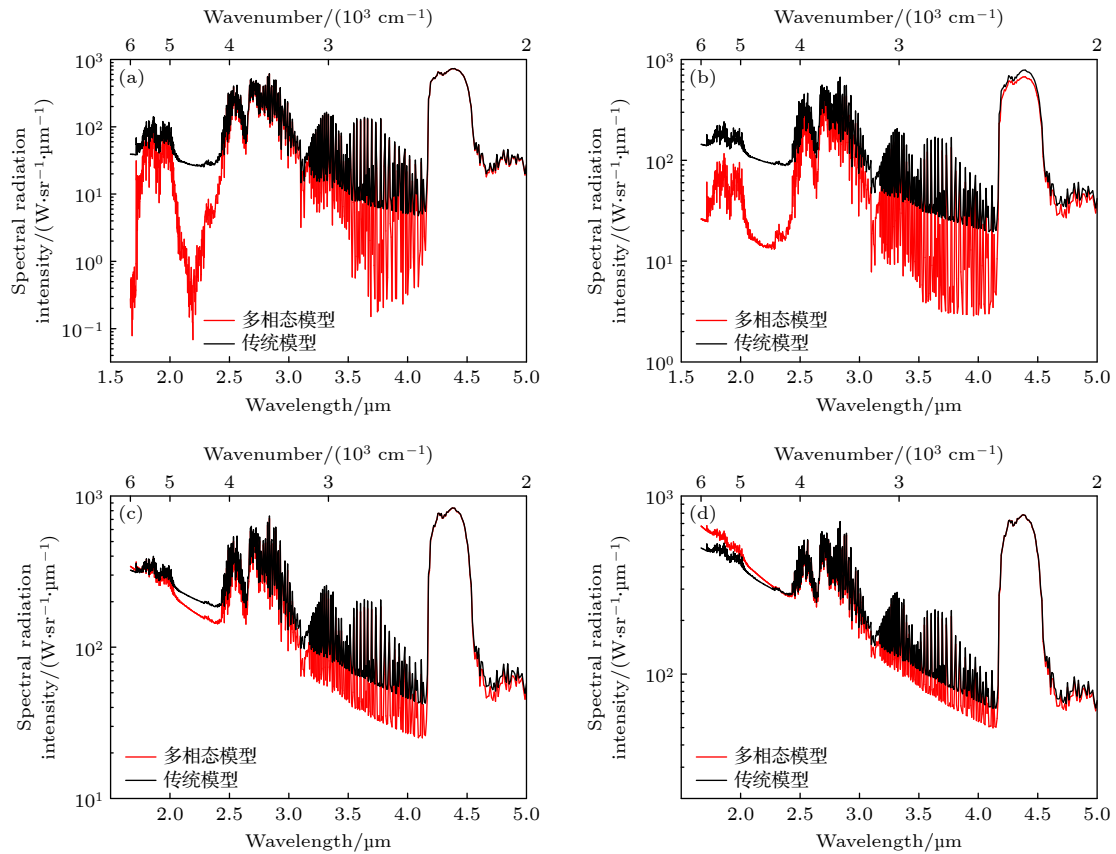


图 8 不同含铝情况下多相态模型与传统模型的羽流红外光谱辐射强度对比 (a) Al-5%; (b) Al-10%; (c) Al-15%; (d) Al-20%
 Fig. 8. Comparison of plume infrared spectral radiation intensity between the multiphase model and the traditional model under different aluminum contents: (a) Al-5%; (b) Al-10%; (c) Al-15%; (d) Al-20%.

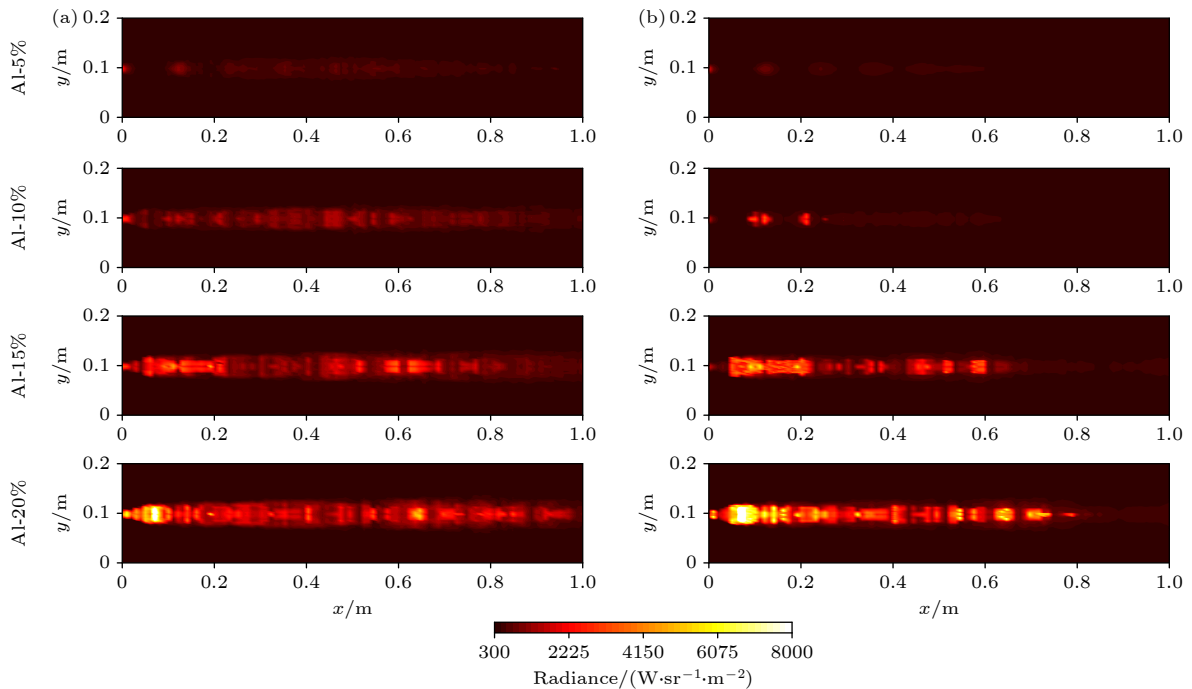


图 9 不同含铝情况下多相态模型与传统模型在 1.7—2.0 μm 波段排气羽流的辐射亮度对比 (a) 传统模型; (b) 多相态模型
 Fig. 9. Radiance comparison of exhaust plumes at 1.7—2.0 μm band between multiphase model and traditional model under different aluminum contents: (a) Traditional model; (b) multiphase model.

流中分布的颗粒数密度相对较小,两种模型计算的辐射特征差异并未达到峰值;当含铝比例提升到10%,羽流中分布的颗粒数密度明显增多,羽流核心区域颗粒相态的分布依然以 γ 相为主,导致了多相态模型与传统模型计算羽流的辐射特性差异持续增大.随着含铝比例继续增大,羽流的核心区域由 γ 相转变为液相,导致羽流主体辐射区域与传统模型划分一致,虽然含铝量增大,但是两种模型之

间的辐射计算结果基本一致,相变对羽流辐射的影响减小.

图9—图11比较不同波段中 Al_2O_3 粒子的相态所导致的羽流辐射亮度差异.除了上述结论之外,还可以看到羽流马赫环附近核心区域受相态的影响辐射亮度明显增强,而周围区域的辐射亮度降低.这是由于传统模型对粒子相位状态的简化导致的目标特征模糊,可能会影响目标的精确识别和准确分类.

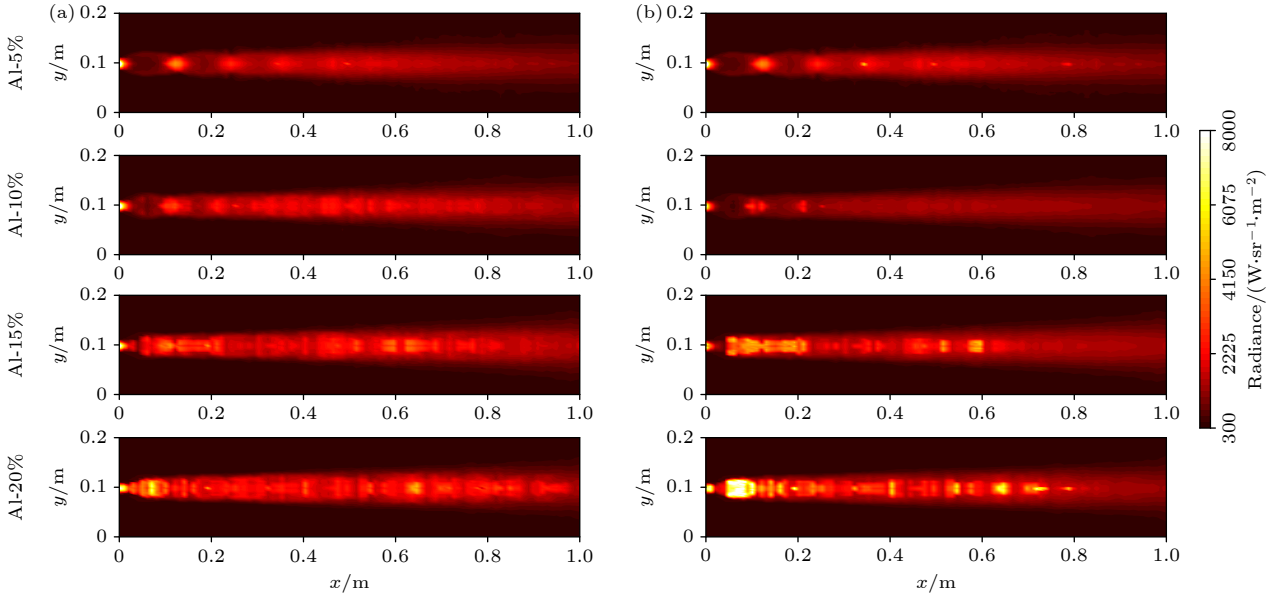


图 10 不同含铝情况下多相态模型与传统模型在 2.5—3.0 μm 波段排气羽流的辐射亮度对比 (a) 传统模型; (b) 多相态模型
Fig. 10. Radiance comparison of exhaust plumes at 2.5–3.0 μm band between multiphase model and traditional model under different aluminum contents: (a) Traditional model; (b) multiphase model.

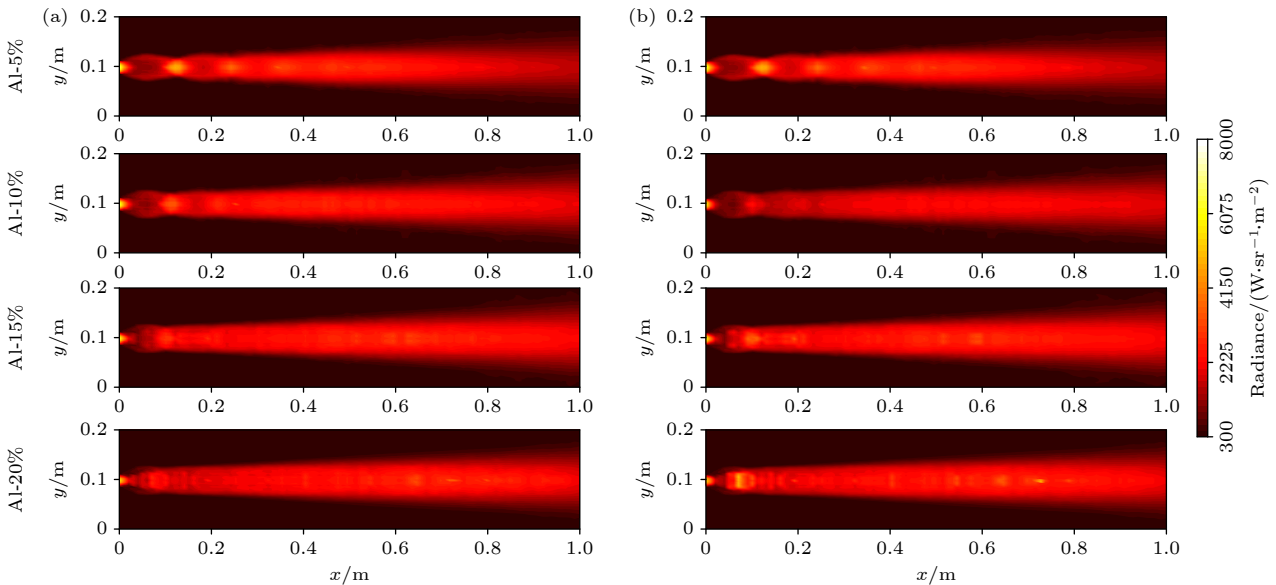


图 11 不同含铝情况下多相态模型与传统模型在 4.0—4.5 μm 波段排气羽流的辐射亮度对比 (a) 传统模型; (b) 多相态模型
Fig. 11. Radiance comparison of exhaust plumes at 4.0–4.5 μm band between multiphase model and traditional model under different aluminum contents: (a) Traditional model; (b) multiphase model.

因此,为了准确预测含铝推进剂羽流的红外辐射特性,必须考虑颗粒相变的影响.特别是在含铝量较低的情况下,如果不考虑粒子相变,则会严重高估羽流的近红外辐射特性.

4 结 论

本文通过考虑粒子燃烧过程中的相变,建立了含有多相态氧化铝的两相羽流的辐射计算模型.研究了不同铝比的 HTPB/AP/Al 推进剂在 BEM-2 发动机中的红外辐射特性.主要结论如下.

1) 建立了求解气固两相羽流红外光谱辐射特性的精确模型.考虑到颗粒的温度敏感性,将不同温度下的颗粒相变特性耦合到辐射方程的求解中.与传统模型相比,改进后的模型与实验结果更加吻合.

2) 研究了颗粒相变对不同含铝量的 HTPB/AP/Al 推进剂红外光谱辐射特性的影响.结果表明,在低含铝条件下,忽略粒子相变会明显高估羽流的近红外辐射,其中差异最大达到 67.2%.同时,在 2.5—3.0 μm 范围内,随着含铝量的增大,粒子相变的影响减小.在 4.0—5.0 μm 时,颗粒相变的影响可以忽略不计.

参考文献

- [1] Lucas M, Brotton S J, Min A, Pantoya M L, Kaiser R I 2019 *J. Phys. Chem. Lett.* **10** 5756
- [2] Zhang W C, Fan Z M, Shu Y, Ren P, Liu P J, Li L K, Ao W 2024 *Aerosp. Sci. Technol.* **149** 109164
- [3] Lee Y R, Lee J W, Shin C M, Kim J W, Myong R 2022 *J. Aircr.* **59** 1320
- [4] Shi L, Zhao G J, Yang Y Y, Gao D, Qin F, Wei X G, He G Q 2019 *Prog. Aeronaut. Sci.* **107** 30
- [5] Orlandi O, Plaud M, Godfroy F, Larrieu S, Cesco N 2019 *Acta Astronaut.* **158** 470
- [6] Liu M Y, Xiong L, Huang H X, Cai J, Zhao D, Li S P 2024 *Therm. Sci. Eng. Prog.* **49** 102505
- [7] Nelson H F 1984 *J. Spacecr. Rockets* **21** 425
- [8] Laredo D, Netzer D W 1993 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **50** 511
- [9] Alexeenko A, Gimelshein N, Levin D, Collins R J, Rao R, Candler G V, Gimelshein S F, Hong J S, Schilling T 2002 *J. Thermophys. Heat Transfer* **16** 50
- [10] Boisshot A, Roblin A, Hespel L, Dubois I, Prevot P, Smithson T 2006 *Targets and Backgrounds XII: Characterization and Representation* Orlando, Florida, USA, May 4, 2006 p195
- [11] Cai G B, Zhu D Q, Zhang X Y 2007 *Aerosp. Sci. Technol.* **11** 473
- [12] Feng S J, Nie W S, Xie Q F, Duan L W 2007 *39th AIAA Thermophysics Conference* Miami, Florida, USA, June 25–28, 2007 p4415
- [13] Shen W T, Dong C, Zhu D Q, Cai G B 2012 *J. Aerosp. Power* **27** 1874 (in Chinese) [申文涛,董超,朱定强,蔡国飙 2012 *航空动力学报* **27** 1874]
- [14] Zhang X Y, Chen H 2016 *Chin. J. Aeronaut.* **29** 924
- [15] Rialland V, Guy A, Gueyffier D, Perez P, Roblin A, Smithson T 2016 *Journal of Physics: Conference Series* Albi, France, April 1–3, 2015 p12
- [16] Zhang D M, Bai L, Wang Y K, Lü Q, Zhang T J 2022 *Infrared Phys. Technol.* **122** 104054
- [17] Zhang T, Niu Q L, Liu Y F, Gao W Q, Dong S K 2024 *Acta Armamentarii* **45** 2228 (in Chinese) [张腾,牛青林,柳云峰,高文强,董士奎 2024 *兵工学报* **45** 2228]
- [18] Bao X D, Yu X L, Wang Z H, Mao H X, Liu D 2020 *Proced. Comput. Sci.* **174** 645
- [19] Bitjukov V K, Petrov V A 2013 *Appl. Phys. Res.* **5** 51
- [20] Plastinin Y, Sipatchev H, Karabadzak G, Khmelinin B, Khlebnikov A, Shishkin Y 2000 *38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* Reno, USA, January 10–13, 2000 p735
- [21] Anfimov N, Karabadyak G, Khmelinin B, Plastinin Y, Rodionov A 1993 *28th Thermophysics Conference* Orlando, Florida, USA, July 6–9, 1993 p2818
- [22] Xu Y Y, Lu B, Li J Y, Li J L, Gao P H 2020 *Opt. Express* **28** 17
- [23] Li J Y, Bai L, Wu Z S, Guo L X, Gong Y 2017 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **202** 233
- [24] Evans K F 1998 *J. Atmos. Sci.* **55** 429
- [25] Malkmus W 1967 *J. Opt. Soc. Am.* **57** 323
- [26] Young S J 1977 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **18** 1
- [27] Rothman L S, Gordon I, Barber R, Dothe H, Gamache R R, Goldman A, Perevalov V I, Tashkun S A, Tennyson J 2010 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **111** 2139
- [28] Hulst H C, van de Hulst H C 1981 *Light Scattering by Small Particles* (Courier Corporation) pp4–12
- [29] Bohren CF, Huffman DR 2008 *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* (John Wiley & Sons) pp83–129
- [30] Gossé S, Sarou K V, Véron E, Millot F, Rifflet J C, Simon P 2003 *36th AIAA Thermophysics Conference* Orlando, Florida, USA, June 23–26, 2003 p3649
- [31] Hespel L, Delfour A, Gosse S, Millot F 2003 *36th AIAA Thermophysics Conference* Orlando, Florida, USA, June 23–26, 2003 p3650
- [32] Dombrovsky L A, Baillis D 2010 *Thermal Radiation in Disperse Systems: An Engineering Approach* (New York: Begell House) pp64–221
- [33] Mishchenko M I 2018 *OSA Continuum* **1** 243
- [34] Bao X D, Yu X L, Wang Z H, Mao H X, Liu D, Xiao Z H 2021 *J. Propul. Technol.* **42** 3 (in Chinese) [包醒东,余西龙,王振华,毛宏霞,肖志河 2021 *推进技术* **42** 3]
- [35] Avital G, Cohen Y, Gamss L, Kanelbaum, Y, Macales J, Trieman B, Yaniv S, Lev M, Stricker J, Sternlieb A 2001 *J. Thermophys. Heat Transfer* **15** 377
- [36] Hermsen R 1981 *J. Spacecr. Rockets* **18** 483

Multi-phase state Al_2O_3 model for predicting solid-rocket plume infrared radiation characteristics*

ZHANG Ligong¹⁾ BAI Lu^{1)2)†} LI Jinlu¹⁾ GUO Lixin¹⁾¹⁾ (*School of Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China*)²⁾ (*Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

(Received 16 April 2025; revised manuscript received 28 May 2025)

Abstract

Aluminum-doped propellants are widely used in strategic tactical missiles for their reliability, durability and adaptability. The accurate identification of infrared radiation characteristics of exhaust plumes, as a main means of passive detection, is helpful for rapid warning and tracking. In response to the shortcomings of traditional model that ignores the evolution of particle crystal phases, this paper proposes a radiation calculation model for multiphase Al_2O_3 containing the solid rocket plumes based on the changes of Al_2O_3 crystal structure in high temperature environments. The radiative transfer equation of the gas-solid two-phase plume is solved by using spherical harmonic discrete ordinate method (SHDOM). Compared with the classical method of simplifying the Al_2O_3 particles as single liquid phase particles, the model is more consistent with the results of experimental measurement data, which further improves the calculation accuracy. The infrared spectral radiation characteristics of plumes with different aluminum doping ratios are investigated using the model. The results show that under low aluminum doping ratios, the classical method significantly overestimates the plume radiation in the near-infrared band. At 1.7–2.0 μm , the maximum decrease is 67.2%; in the range of 2.5–3.0 μm , the difference in results between the two methods decreases from 21.6% to 3.6% with the increase of aluminum doping rate; and the particle phase transition in the range of 4.0–4.5 μm does not have much influence on the overall results, whose difference is about 7% on average. Therefore, it is necessary to accurately predict the radiation characteristics by considering the phase change of particles in the plume. These results contribute to the accurate detection and identification of solid rocket motors.

Keywords: phase transition, radiative transfer equation, particle scattering, infrared spectral**PACS:** 82.35.Jk, 42.68.Ay, 52.25.Tx, 33.20.Ea**DOI:** [10.7498/aps.74.20250493](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250493)**CSTR:** [32037.14.aps.74.20250493](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250493)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U20B2059, 61875156, 62405230) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. ZYTS25132).

† Corresponding author. E-mail: blu@xidian.edu.cn

固体火箭羽流红外辐射特征预测的多相态 Al_2O_3 模型

张立功 白璐 李金录 郭立新

Multi-phase state Al_2O_3 model for predicting solid-rocket plume infrared radiation characteristics

ZHANG Ligong BAI Lu LI Jinlu GUO Lixin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 168201 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250493

CSTR: 32037.14.aps.74.20250493

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250493>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同相对湿度条件下复杂外混合气溶胶粒子群的光学特性

Optical properties of ensemble of complex externally mixed aerosol particles under different relative humidity conditions

物理学报. 2025, 74(6): 064203 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241140>

稠密流体氮高温高压相变及物态方程

Phase transition and equation of state of dense liquid nitrogen at high temperature and high pressure

物理学报. 2022, 71(15): 158701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220124>

BaF_2 高压相变行为的第一性原理研究

First-principles study of phase transition of BaF_2 under high pressure

物理学报. 2022, 71(1): 017102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211163>

热峰作用下单斜 ZrO_2 相变过程的分子动力学模拟

Molecular dynamics simulation of phase transition by thermal spikes in monoclinic ZrO_2

物理学报. 2021, 70(13): 136101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201861>

双光腔光机械系统的动力学相变和选择性能量交换

Dynamical phase transition and selective energy exchange in dual-cavity optomechanical systems

物理学报. 2021, 70(14): 140301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210178>

粗糙面上粒子层矢量辐射传输方程的二阶迭代解法

High-order iterative method for vector radiative transfer equation of particle layer on rough surface

物理学报. 2022, 71(3): 034201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211183>