

固体火箭发动机羽烟紫外辐射特性分析

国爱燕 白廷柱 胡海鹤 唐 义

(北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要 为了研究推进剂类型和铝粉含量对固体火箭发动机羽烟紫外辐射特性的影响,采用二维流场和三维辐射传输相结合的方式建立羽烟紫外辐射模型,模型中可考虑热发射、CO+O 化学发光、OH 自由基化学发光、以及不同状态和直径 Al_2O_3 颗粒辐射特性等紫外辐射机理。利用模型计算了双基、改性双基和复合推进剂羽烟的紫外辐射分布,并以复合推进剂为例,研究了铝粉含量对羽烟紫外辐射特性的影响。研究结果为紫外预警系统判断导弹的类型,以及导弹紫外隐身性能的提高提供了参考。

关键词 光谱学;固体推进剂;铝粉;OH 自由基;羽烟;紫外辐射

中图分类号 O432.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1016002

Analysis of Ultraviolet Radiation Characteristics of Solid Propellant Rocket Motor Exhaust Plume

Guo Aiyan Bai Tingzhu Hu Haihe Tang Yi

(Key Laboratory of Photoelectronic Technology and System, Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract To study the effect of propellant type and content of aluminum powder on the ultraviolet radiation of solid rocket motor plume, a plume ultraviolet radiation model is build, using two-dimensional flow-field and three-dimensional radiation transfer calculation, taking thermal emitting, CO + O chemiluminescence, OH radical chemiluminescence, Al_2O_3 particles of different crystalline states and diameters into consideration. The ultraviolet radiation distributions of double base, modified double base and composite propellant rocket motor plume are calculated, and the effect of aluminum powder content on plume ultraviolet radiation is analyzed, taking composite propellant as an example. This study can provide reference for the judgment of missile type in the process of early warning, as well as improvement of missile ultraviolet stealth performance.

Key words spectroscopy; solid propellant; Al powder; OH radical; plume; ultraviolet radiation

OCIS codes 300.6540; 030.5620; 030.7060

1 引 言

工作在“日盲区”紫外(UV)波段的预警设备具有适应性强、虚警率低、无需制冷、体积小和质量轻等优点,目前已发展为装备量最大的导弹逼近预警系统之一。火箭发动机羽烟紫外辐射特性研究对于紫外预警系统的分析、设计和优化,预警过程中导弹类型的判断,以及导弹紫外隐身性能的评估和提高都具有重要的意义。火箭发动机推进剂的类型是影

响火箭发动机羽烟紫外辐射特性的主要因素,有必要对其进行深入分析。Plastinin 等^[1]采用 NARJ 流体仿真软件计算羽烟流场,PRCJ 程序求解辐射特性参数及辐射传输方程,计算了 Atlas 液体火箭发动机和模型固体推进剂火箭发动机羽烟在 15 km 和 40 km 海拔高度羽烟紫外辐射强度的光谱分布,计算中考虑了 OH 自由基化学发光和固体火箭发动机羽烟中 Al_2O_3 颗粒状态变化对羽烟紫外辐射

收稿日期: 2012-03-28; **收到修改稿日期**: 2012-05-31

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724005)资助课题。

作者简介: 国爱燕(1984—),女,博士研究生,主要从事火箭发动机羽烟紫外辐射数值计算方面的研究。

E-mail: guoaiyan@gmail.com

导师简介: 白廷柱(1956—),男,博士,教授,主要从事光电成像和信息工程等方面的研究。E-mail: tzhbai@bit.edu.cn

(中国光学学会会员号: 1000073)

分布的影响。Robin 等^[2]根据经验参数计算了固体火箭发动机羽烟的流场参数,考虑 CO+O 化学发光和 Al₂O₃ 颗粒的辐射特性对羽烟紫外辐射分布的影响,采用 Pincus 等^[3]提出的球谐离散坐标法计算了羽烟在 280 nm 的辐射强度随空间角度的变化,并分析了 Al₂O₃ 颗粒的复折射率对辐射强度的影响。Neele 等^[4,5]采用流体仿真软件计算固体火箭发动机羽烟流场参数,考虑 CO+O 化学发光和 Al₂O₃ 颗粒的辐射特性对羽烟紫外辐射分布的影响,采用 N-Flux 方法求解辐射传输方程,并将上述方法集成到 UVPLUME 程序中,计算了不同固体推进剂火箭发动机羽烟在 280 nm 波长处不同视角的二维紫外辐亮度分布。国内对火箭发动机羽烟紫外辐射特性的研究开展较晚。娄颖^[6]采用 FLUENT 仿真固体火箭发动机羽烟流场,考虑 CO+O 化学发光和 Al₂O₃ 颗粒的辐射特性,采用分层介质离散纵坐标法计算了羽烟的积分辐射强度随空间方位角的变化。赵文娟^[7]假设羽烟为冻结流,采用经验公式计算固体火箭发动机羽烟流场,在此基础上利用二次燃烧模型对羽烟流场参数进行修正,并考虑 CO+O 化学发光和 Al₂O₃ 颗粒的辐射特性,采用 SHDOM 方法计算了羽烟在 280 nm 的辐射强度随空间方位角的变化。国内对于火箭发动机羽烟辐射模型的研究工作不够全面,现有模型中忽略了 OH 自由基化学发光和 Al₂O₃ 颗粒状态变化的作用,并且没有开展推进剂类型对羽烟紫外辐射分布影响的相关研究工作。

由于羽烟的紫外辐射引起的热交换对流场的温度变化影响较小,本文采用流场和辐射传输计算分离的方法建立了火箭发动机羽烟紫外辐射模型。利用火箭发动机羽烟紫外辐射模型计算双基推进剂、改性双基推进剂和复合推进剂三种典型固体推进剂火箭发动机羽烟的紫外光谱辐射强度分布和二维辐亮度分布。以复合推进剂为例,计算了铝粉质量分数为 5%、10% 和 15% 情况下羽烟的紫外辐射分布,研究了铝粉质量分数对固体火箭发动机羽烟紫外辐射特性的影响。

2 火箭发动机羽烟紫外辐射模型

火箭发动机羽烟紫外辐射模型主要包括四个部分:流场模型、辐射特性参数计算模型、离散坐标模型和后期处理。在流场和辐射传输计算分离的基础上,模型中分别采用二维和三维网格计算流场参数和辐射传输,既节省了计算时间,又可得到羽烟在不

同视角的紫外光谱辐射强度分布和二维辐亮度分布。流场模型中采用 RNG $k-\epsilon$ 模型模拟湍流运动、涡耗散概念模型模拟二次燃烧、离散颗粒模型跟踪颗粒运动;可以计算热发射、CO+O 化学发光、OH 自由基化学发光、不同状态和直径 Al₂O₃ 颗粒的紫外辐射特性参数;采用离散坐标法求解辐射传输方程;可根据需求对三维辐亮度数据进行后期处理:1) 将单一波长的三维辐亮度数据沿不同视角积分,得到该波长二维辐亮度的空间分布;2) 根据某一视角的二维辐亮度分布数据和羽烟面积,可以计算该视角方向单一波长的辐射强度;3) 选择不同的波长,多次运行火箭发动羽烟紫外辐射模型和处理步骤 1)、2),可以得到该视角方向的光谱辐射强度分布。关于流场模型中的涉及的物理模型和数值计算方法见参考文献[8],热发射和 CO+O 化学发光辐射特性参数的计算见参考文献[9],离散坐标法的迭代计算过程见参考文献[10],本文主要介绍 OH 自由基化学发光以及不同状态和直径的 Al₂O₃ 颗粒的辐射特性参数计算方法。

将固体火箭发动机羽烟视为三维发射-吸收-散射-非均匀介质,在离散坐标法中,其辐射传输方程为

$$\begin{aligned} \mu^m \frac{\partial L^m}{\partial x} + \xi^m \frac{\partial L^m}{\partial y} + \eta^m \frac{\partial L^m}{\partial z} = \\ -\beta_c L^m + S_r + \frac{\sigma_s}{4\pi} \sum_{m'=1}^M \omega^{m'} \Phi^{m',m} L^{m'}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中省略了波长下标 λ ,如果没有特别指出,下面的参数均为光谱特性参数; β_c 为衰减系数, $\beta_c = \kappa_a + \sigma_s$; κ_a 为吸收系数; σ_s 为散射系数, $\Phi(\Omega' \rightarrow \Omega)$ 为散射相函数,这两个参数受到羽烟内 Al₂O₃ 颗粒的状态和直径分布的影响; S_r 为辐射源项,表示单位体积内发射的辐射强度,等于热发射、CO+O 和 OH 自由基化学发光发射系数之和; ω^m 为离散方向 Ω^m 的权重; μ^m 、 ξ^m 和 η^m 为 Ω^m 的方向余弦。

2.1 OH 自由基化学发光

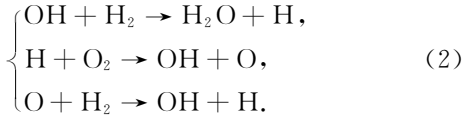
OH 自由基化学发光辐射特性参数计算的关键是 OH 自由基数密度和分子谱线强度的计算。

2.1.1 OH 自由基数密度的计算

根据化学发光反应机制,通过求解 OH($A^2 \Sigma$) 各个能级的非平衡化学反应方程得到 OH 自由基数密度的方法称为非平衡化学发光模型,计算过程非常复杂。通过引入局部平衡假设,建立了 OH 自由基数密度与局部平衡气体和基态 OH 数密度的关系,简化了 OH 自由基数密度的计算方法,称为局部平衡化学发光模型,下面介绍该模型的计算

方法。

Davis 等^[11]在研究 O₂ 过量的情况下氢氧焰中 OH 自由基化学发光强度时发现,在局部平衡假设下,OH 自由基化学发光强度与基态 OH 数密度的 5 次幂成正比,并进行了氢氧焰化学发光强度测量实验,发现实验数据与理论计算非常吻合,验证了局部平衡的假设。在火箭发动机羽烟的二次燃烧过程中,相对于周围大气中含量丰富的 O₂,火箭发动机羽烟中 H₂ 的含量非常少,所以 H₂ 的二次燃烧反应中 O₂ 过量,因此可以引入 Davis 的局部平衡假设进行分析。在下面的分析过程中不区分 OH 自由基在 A²Σ 能级的振动状态,统一采用 OH* 表示,基态 OH(X²Σ)采用 OH 表示。根据局部平衡假设,虽然在化学发光过程中 OH* 没有与稳定产物 H₂O 和 O₂ 达成平衡,但是 H₂O 和 O₂ 由于快速、可逆的双分子反应彼此之间达到了平衡,这些双分子反应为



根据(2)式,局部平衡常数可以表示为

$$K_{\text{I}} = \frac{[\text{OH}][\text{H}_2]}{[\text{H}_2\text{O}][\text{H}]}, \quad (3)$$

$$K_{\text{II}} = \frac{[\text{H}][\text{O}_2]}{[\text{OH}][\text{O}]}, \quad (4)$$

$$K_{\text{III}} = \frac{[\text{O}][\text{H}_2]}{[\text{OH}][\text{H}]}. \quad (5)$$

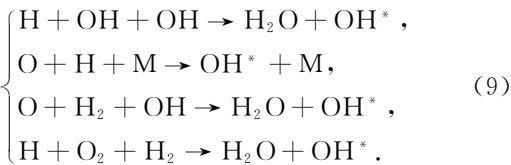
由于 H₂O 和 O₂ 这两种稳定组分具有平衡浓度,根据(3)~(5)式,O、H 和 H₂ 的数密度可以用 OH 数密度表示为

$$[\text{H}] = \frac{K_{\text{II}}K_{\text{III}}}{K_{\text{I}}} \frac{[\text{OH}]}{[\text{O}_2]_e[\text{H}_2\text{O}]_e}, \quad (6)$$

$$[\text{O}] = \frac{K_{\text{III}}}{K_{\text{I}}} \frac{[\text{OH}]^2}{[\text{H}_2\text{O}]_e}, \quad (7)$$

$$[\text{H}_2] = K_{\text{II}}K_{\text{III}} \frac{[\text{OH}]^2}{[\text{O}_2]_e}. \quad (8)$$

认为 OH* 的主要激发反应为

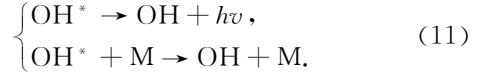


结合(6)~(9)式,产生 OH* 数密度可以表示为

$$[\text{OH}^*] = k_{\text{v}}K_{\text{H}} \frac{[\text{OH}]^5}{[\text{O}_2]_e[\text{H}_2\text{O}]_e}, \quad (10)$$

式中 k_{v} 为激发反应速率; $K_{\text{H}} = \frac{K_{\text{II}}K_{\text{III}}}{K_{\text{I}}}$ 。

考虑自发辐射和碰撞引起的退激发反应



OH* 的净产率为

$$\frac{d[\text{OH}^*]}{dt} = k_{\text{v}}K_{\text{H}} \frac{[\text{OH}]^5}{[\text{O}_2]_e[\text{H}_2\text{O}]_e} - A[\text{OH}^*] - k_{\text{m}}[\text{M}][\text{OH}^*], \quad (12)$$

式中 A 为 OH* 的跃迁概率, k_{m} 为碰撞退激发反应速率。在稳定状态下,[OH*] 不随时间变化,因此得到

$$[\text{OH}^*] = \frac{k_{\text{v}}K_{\text{H}}}{A + k_{\text{m}}[\text{M}]} \frac{[\text{OH}]^5}{[\text{O}_2]_e[\text{H}_2\text{O}]_e}. \quad (13)$$

从(13)式中可以看出,[OH*] 与处于局部平衡状态的 O₂ 和 H₂O 的数密度成反比,与基态 OH 数密度的 5 次幂成正比。

2.1.2 分子谱线强度

利用 HITRAN 数据库计算热力学平衡状态下,在参考温度 $T_{\text{ref}} = 296 \text{ K}$ 时,OH(A²Σ, $v' = 0, 1, 2$)向基态 OH(X²Σ)跃迁产生的谱线强度为^[12]

$$S_{\eta'}(T_{\text{ref}}) = \frac{8\pi^3}{3hc} \nu_{\eta'} \frac{g_{\eta'} \exp(-c_2 E_{\eta'}/T_{\text{ref}})}{Q(T_{\text{ref}})} \times [1 - \exp(-c_2 \nu_{\eta'}/T_{\text{ref}})] \mathcal{R}_{\eta'} \times 10^{36}. \quad (14)$$

在给定温度下 $S_{\eta'}$ 的修正公式为

$$S_{\eta'}(T) = S_{\eta'}(T_{\text{ref}}) \frac{Q(T_{\text{ref}})}{Q(T)} \frac{\exp(-c_2 E_{\eta'}/T)}{\exp(-c_2 E_{\eta'}/T_{\text{ref}})} \times \frac{[1 - \exp(-c_2 \nu_{\eta'}/T)]}{[1 - \exp(-c_2 \nu_{\eta'}/T_{\text{ref}})]}, \quad (15)$$

式中 $S_{\eta'}$ 的单位为 cm; η, η' 分别代表低能级和高能级状态; h 为普朗克常数; c 为光速; $\nu_{\eta'}$ 为跃迁频率,单位为 cm^{-1} ; c_2 为第二辐射常数; $E_{\eta'}$ 为低状态能级,单位为 cm^{-1} ; $Q(T)$ 为配分函数。

谱线加宽采用 Voigt 线型函数 $f(\nu)$ 描述为

$$f(\nu) = \frac{1}{\gamma_{\text{D}}} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} K(x, y),$$

$$K(x, y) = \frac{y}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-t^2)}{y^2 + (x-t)^2} dt,$$

$$x = \frac{(\nu - \nu_0)}{\gamma_{\text{D}}} \sqrt{\ln 2}, \quad y = \frac{\gamma_{\text{L}}}{\gamma_{\text{D}}} \sqrt{\ln 2}, \quad (16)$$

式中 $f(\nu)$ 的单位为 cm; γ_{D} 和 γ_{L} 分别为多普勒增宽和压力增宽的谱线半宽; $K(x, y)$ 为积分核函数; ν_0 为中心波数。

根据 OH* 的数密度和分子谱线强度,采用逐线法计算其光谱吸收系数为^[13]

$$\kappa_{\eta'}(\nu, T, p) = S_{\eta'}(T) f(\nu) [\text{OH}^*]. \quad (17)$$

辐射源函数为^[14]

$$B(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left(\frac{N_m g_n}{N_n g_m} - 1 \right)^{-1}, \quad (18)$$

式中 N_n 、 N_m 为能级数密度, g_n 、 g_m 为能级简并度。

OH* 的光谱发射系数为

$$j(\nu) = B(\nu, T) \kappa_{\eta'}(\nu, T, p), \quad (19)$$

式中 $j(\nu)$ 的单位为 $W \cdot sr^{-1} \cdot cm^{-4}$ 。

2.2 Al₂O₃ 颗粒紫外辐射特性

为了提高固体推进剂的能量,增加密度,抑制不稳定燃烧,会在其中添加一定量的 Al 粉^[15]。与推进剂中的气体组分不同,铝粉的燃烧非常复杂,会在羽烟中形成具有不同结晶状态和直径的 Al₂O₃ 颗粒。参考文献[16]给出了 Al₂O₃ 颗粒结晶过程中温度和辐亮度的变化,在羽烟紫外辐射模型中根据 Al₂O₃ 颗粒的温度判断颗粒的状态,并分别计算其辐射特性参数。判断规则为: $T > 2327$ K 为液态, 2327 K $> T > 2095$ K 为 γ 相, $T < 2095$ K 为 α 相。

采用双峰分布模式计算羽烟中 Al₂O₃ 颗粒直径分布^[17], 计算公式为

$$\varphi(X) = \frac{1}{2\pi} \sum \frac{a_i}{\sigma_i} \exp \left[- \left(\frac{X - \xi_i}{2\sigma_i} \right)^2 \right], \quad \sum a_i = 1 \quad (20)$$

式中 X 为颗粒直径的对数, φ 为 X 的频率函数, ξ_i 和 σ_i 为第 i 种峰值模式所对应的平均直径对数和标准偏移量, a_i 为第 i 种峰值模式颗粒的体积分。在喷管出口处, Al₂O₃ 颗粒直径分布服从峰值位于 $1 \mu m$ 和 $4 \mu m$ 的双峰分布模式, 相关参数取值为 $10^{\xi_1} = 1$, $a_1 = 0.5$, $\sigma_1 = 0.32$, $10^{\xi_2} = 4$, $a_2 = 0.5$, $\sigma_2 = 0.35$ 。

羽烟中的 Al₂O₃ 颗粒绝大多数为球形, 因此可以将 Al₂O₃ 颗粒的辐射特性参数计算按球形颗粒处理。球形 Al₂O₃ 颗粒的复折射率 $m = n - i\kappa$ 是计算颗粒辐射特性参数的关键, 其中 n 为折射率指数, κ 为吸收指数。

考虑 Al₂O₃ 颗粒的液态、 γ 相和 α 相三种状态, 结合上述辐射机理, 复折射率中吸收指数的计算公式为^[8]

$$\kappa = \kappa_{bb} + \kappa_{ub} + \kappa_{ff} + \kappa_{la}, \quad (21)$$

式中 κ_{bb} 对应本征吸收, 是价带电子吸收光子跃迁至导带的过程; κ_{ub} 对应 Urbach 边本征吸收; κ_{ff} 对应自由载流子的吸收; κ_{la} 对应晶格吸收。

折射率指数 n 的计算公式为

$$n = \left[1 + \lambda^2 \left(\frac{1.02378}{\lambda^2 - 0.00377588} + \frac{1.058264}{\lambda^2 - 0.0122544} + \frac{5.280792}{\lambda^2 - 321.36164} \right) \right]^{0.5} \times \left[1 + 0.029 \left(\frac{T}{1000} - 0.473 \right) \right]. \quad (22)$$

根据复折射率, 利用米氏散射理论可以得到颗粒的散射系数、吸收系数和散射相函数。

3 计算结果与讨论

3.1 模型验证

利用本文模型计算了 MSPM 固体火箭发动机羽烟在 $0.2 \sim 0.4 \mu m$ 范围内的光谱辐射强度分布, 并与 PRCJ 模型^[1] 的计算结果进行比较。计算采用的参数见参考文献[1], 图 1 给出了两种模型计算得到的羽烟在 90° 视角的紫外光谱辐射强度分布。通过比较可以看出, 本文模型计算得到的紫外光谱辐射强度与 PRCJ 模型的计算结果基本在同一数量级内。主要差别在于 $0.26 \sim 0.32 \mu m$ 波段, 该波段是 OH 自由基化学发光特征波段, 产生差别的原因因为本文模型中采用 OH 自由基局部平衡化学发光模型计算化学发光强度, PRCJ 模型采用非平衡化学发光模型。

图 2 给出了局部平衡化学发光模型和非平衡化

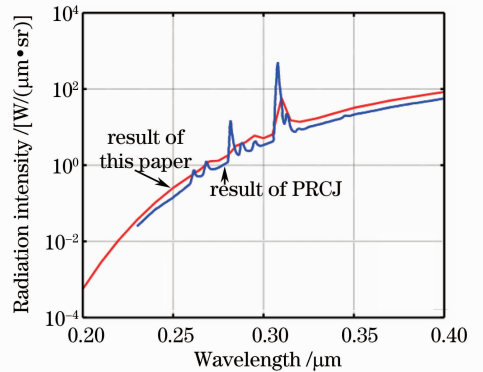


图 1 MSPM 羽烟紫外光谱辐射强度图

Fig. 1 UV spectral radiation intensity of MSPM plume
学发光模型计算得到的 OH 自由基化学发光特征谱段的光谱辐射强度。两种模型的主要区别在于 OH 自由基数密度的计算方法, 非平衡化学发光模型根据化学发光反应机制, 通过求解 $OH(A^2\Sigma)$ 各个能级的非平衡化学反应方程得到 OH 自由基数密度。局部平衡化学发光模型通过引入局部平衡假设, 建立了 OH 自由基数密度与局部平衡气体和基

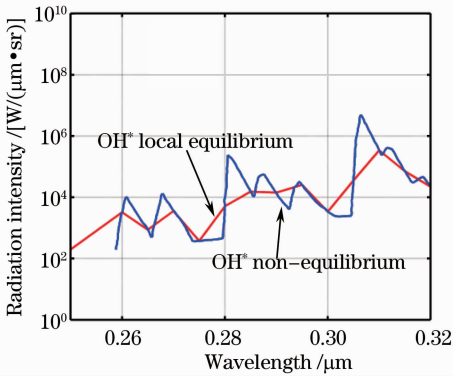


图 2 OH 自由基化学发光紫外光谱辐射强度
Fig.2 UV spectral radiaiton intensity of OH radical chemiluminescence

态OH数密度的关系,避免了求解复杂的化学反应

表 1 不同推进剂燃烧时燃烧室内的温度

Table 1 Combustion chamber temperature of different propellants

Propellant	Double base	Modified double base	Composite (5% Al)	Composite (10% Al)	Composite (15% Al)
Temperature /K	2563	2884	2753	3005	3188

表 2 不同推进剂燃气组分质量分数

Table 2 Gas component mass fraction of different propellants

Species	Double base	Modified double base	Composite (5% Al)	Composite (10% Al)	Composite (15% Al)
N ₂	0.1472	0.1629	0.0911	0.0861	0.0815
CO	0.3317	0.3850	0.2755	0.3028	0.3106
H ₂ O	0.1161	0.1084	0.1228	0.0878	0.0457
CO ₂	0.3701	0.2462	0.1365	0.0618	0.0214
H ₂	0.0137	0.0140	0.0253	0.0270	0.0297
H	0	8.835×10^{-8}	2.118×10^{-8}	6.668×10^{-8}	1.021×10^{-8}
HCl	0	0	0.2376	0.2244	0.2125
Al ₂ O ₃	0.0211	0.0834	0.1112	0.2101	0.2985

图 3~6 为 5 种推进剂配方火箭发动机羽烟流场轴线上的温度和与化学发光相关组分的分布,从图中可以看出,除了双基推进剂外,其他 4 种推进剂配方火箭发动机羽烟在大气中都产生了明显的二次燃烧,复合推进剂火箭发动机羽烟二次燃烧区域的范围最大,并且随着复合推进剂中铝粉含量的增加,羽烟在空气中的二次燃烧更加剧烈,流场温度增加的幅度更大,燃烧消耗的 CO 更多,生成的 O 和 OH 也更多。与复合推进剂相比,改性双基推进剂二次燃烧的程度较弱,双基推进剂最弱。

图 7 为 5 种推进剂配方火箭发动机羽烟流场轴线上 Al₂O₃ 颗粒的密度分布,从图中可以看出,Al₂O₃ 颗粒的密度从大到小依次为铝粉的质量分数为 15%、10%、5% 的复合推进剂,改性双基推进剂和双基推进剂,与表 2 所示的推进剂燃气组分中

机制。此外,PRCJ 模型只能给出羽烟的光谱辐射强度,而本文模型还可以得到羽烟二维辐亮度分布。

3.2 固体火箭发动机羽烟紫外辐射特性

利用火箭发动机羽烟紫外辐射模型计算了双击推进剂、改性双基推进剂、铝粉的质量分数为 5%、10% 和 15% 的复合推进剂 5 种配方的火箭发动机羽烟在 90°视角的紫外光谱辐射强度分布和二维辐亮度分布。

流场模型对喷管和羽烟进行一体化计算,输入参数为燃烧室内的温度和燃气组分,表 1 和表 2 为 5 种推进剂配方在燃烧室内燃烧时产生的温度和燃气组分构成^[18]。羽烟在大气中的二次燃烧采用 9 组分-10 基元反应机制模拟。流场模型计算区域的大小为 5 m×0.5 m,边界条件为压力远场。

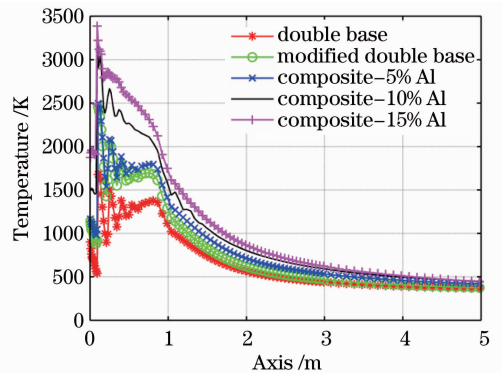


图 3 不同推进剂配方火箭发动机羽烟流场轴线上的温度分布

Fig.3 Tempeprature distributions along the axis of the flowfield of different solid propellant rocket motor plumes

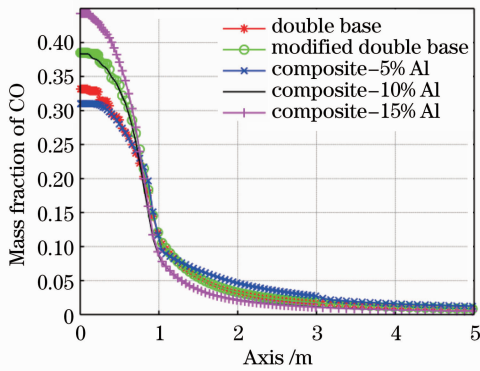


图 4 不同推进剂配方火箭发动机羽烟流场轴线上的 CO 分布

Fig. 4 CO distributions along the axis of the flowfield of different solid propellant rocket motor plumes

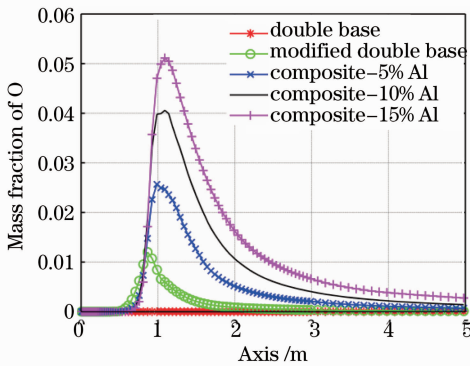


图 5 不同固体推进剂火箭发动机羽烟流场轴线上的 O 分布

Fig. 5 O distributions along the axis of the flowfield of different solid propellant rocket motor plumes

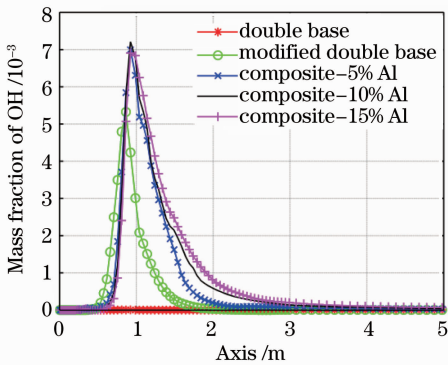


图 6 不同固体推进剂火箭发动机羽烟流场轴线上的 OH 分布

Fig. 6 OH distributions along the axis of the flowfield of different solid propellant rocket motor plumes

Al_2O_3 颗粒质量分数的大小顺序一致。

根据流场参数,结合固体火箭发动机羽烟紫外辐射特性参数,利用离散坐标(DOM)模型计算 5 种推

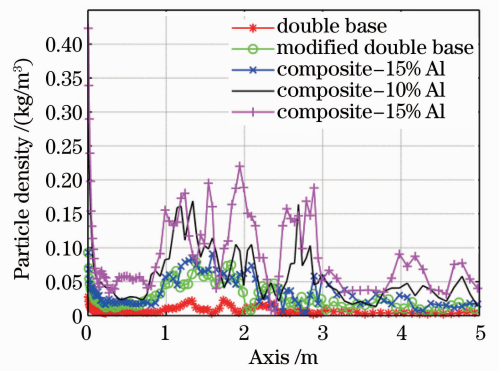


图 7 不同固体推进剂火箭发动机羽烟流场轴线上的 Al_2O_3 颗粒密度

Fig. 7 Al_2O_3 particle density distributions along the axis of the flowfield of different solid propellant rocket motor plumes

进剂配方火箭发动机羽烟的紫外辐射分布。DOM 模型的计算域大小为 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m} \times 2.5\text{ m}$, 图 8(a)为双基推进剂、改性双基推进剂和铝粉的质量分数为 5%的复合推进剂 3 种配方火箭发动机羽烟在 90° 视角的紫外光谱辐射强度,图 8(b)为不同 Al 含量的复合推进剂火箭发动机羽烟在 90° 视角的紫外光谱辐射强度。图 9 为 5 种推进剂配方火箭发动机羽烟在 90° 视角 $0.28\mu\text{m}$ 波长处的辐亮度分布。

从图 8(a)可以看出,双基推进剂火箭发动机羽烟紫外光谱辐射强度的数量级在 $10^{-9} \sim 10^{-5}$ 之间,改性双基推进剂在 $10^{-8} \sim 10^{-4}$ 之间,复合推进剂在 $10^{-7} \sim 10^{-2}$ 之间。3 种固体推进剂火箭发动机羽烟紫外光谱辐射强度在 $0.2 \sim 0.4\ \mu\text{m}$ 内都存在最小值,双基推进剂火箭发动机羽烟紫外光谱辐射强度的最小值位于 $0.32\ \mu\text{m}$,改性推进剂位于 $0.27\ \mu\text{m}$,复合推进剂位于 $0.24\ \mu\text{m}$ 。在 $0.2 \sim 0.24\ \mu\text{m}$ 波段,3 种固体推进剂火箭发动机羽烟的光谱辐射强度几乎相等。在 $0.24 \sim 0.27\ \mu\text{m}$ 波段,复合推进剂火箭发动机羽烟光谱辐射强度最大,双基推进剂和改性双基推进剂火箭发动机羽烟的光谱辐射强度相等。在 $0.27 \sim 0.32\ \mu\text{m}$ 波段,复合推进剂火箭发动机羽烟光谱辐射强度最大,改性双基推进剂次之,双基推进剂最小。在 $0.32 \sim 0.4\ \mu\text{m}$ 波段,复合推进剂火箭发动机羽烟的紫外光谱辐射强度比改性双基推进剂大 1 个数量级,比双基推进剂大 4~5 个数量级。从图 8(b)可以看出,铝粉质量分数为 10%时在 $10^{-5} \sim 10$ 之间,铝粉质量分数为 15%时在 $10^{-2} \sim 10^2$ 之间。在 $0.2 \sim 0.4\ \mu\text{m}$ 波段范围内,铝粉质量分数 15%的复合推进剂火箭发动机羽烟辐射强度

的数量级比铝粉质量分数 10% 大 1~2 个数量级，比铝粉质量分数 5% 大 1~5 个数量级，紫外辐射强

度随着铝粉质量分数的增加明显变大。

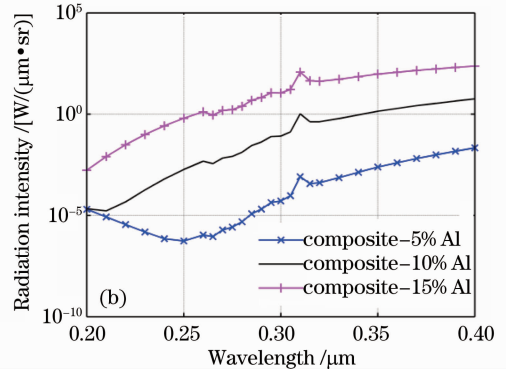
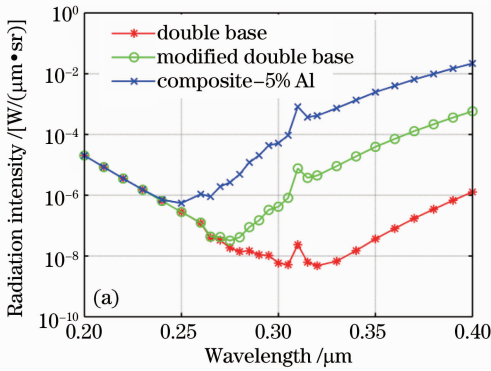


图 8 不同固体推进剂火箭发动机羽烟紫外光谱辐射强度

Fig. 8 UV spectra radiation intensity of different solid propellant rocket motor plumes

从图 9(a)~(c)中可以看出，波长为 0.28 μm 时，双基推进剂火箭发动机羽烟紫外辐亮度的数量级为 10⁻⁷，分布范围为 1.05 m×0.03 m。改性双基推进剂火箭发动机羽烟紫外辐亮度的数量级为 10⁻⁷，分布范围为 1.15 m×0.03 m。复合推进剂火箭发动机羽烟紫外辐亮度的数量级为 10⁻⁵，分布范围为 1.35 m×0.04 m。3 种固体推进剂中，复合推进剂火箭发动机羽烟紫外辐亮度最大，比双基推进剂和改性双基推进剂大 2 个数量级。复合推进剂火

箭发动机羽烟紫外辐亮度的分布范围也最大，改性双基推进剂次之，双基推进剂最小。从图 9(d)和图 9(e)可以看出，铝粉质量分数为 10% 的复合推进剂火箭发动机羽烟辐亮度的数量级为 10⁻¹，分布范围为 1.505 m×0.05 m。铝粉质量分数为 15% 的复合推进剂火箭发动机羽烟辐亮度的数量级为 10²，分布范围为 1.605 m×0.05 m。随着铝粉质量分数的增加，复合推进剂火箭发动机羽烟紫外辐亮度的分布范围扩大，数量级呈指数上升趋势。

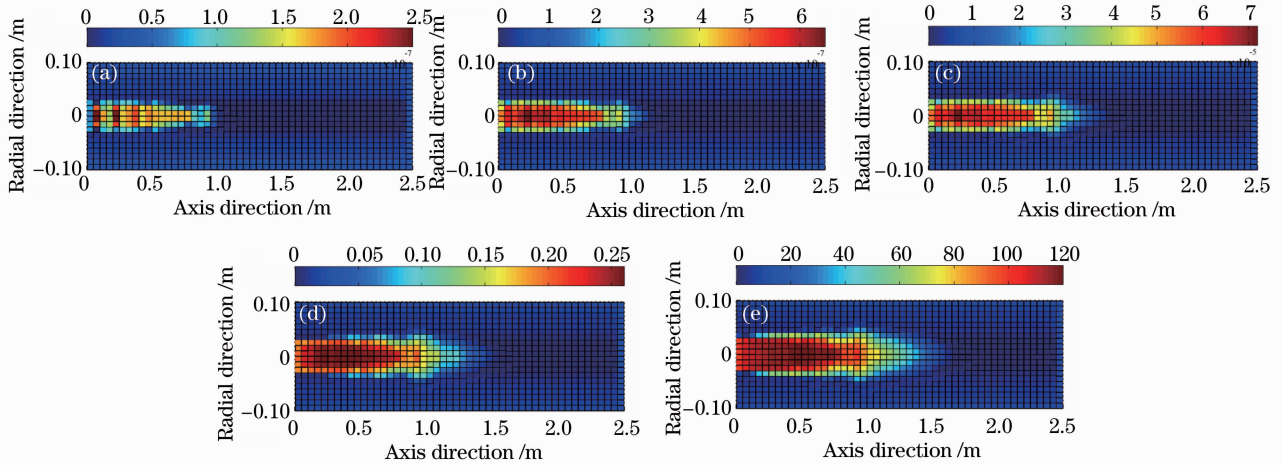


图 9 不同固体推进剂火箭发动机羽烟紫外辐亮度分布。(a)双基推进剂；(b)改性双基推进剂；(c)复合推进剂-5；(d)复合推进剂-10；(e)复合推进剂-15

Fig. 9 UV radiance distributions of different solid propellant rocket motor plumes. (a) Double propellant; (b) modified double base; (c) composite propellant -5; (d) composite propellant -10; (e) composite propellant -15

根据以上分析可以认为，双基推进剂、改性双基推进剂和复合推进剂火箭发动机羽烟都会产生紫外辐射，其中复合推进剂的紫外辐射强度最大，辐亮度分布范围最广，改性双基推进剂次之，双基推进剂最小。推进剂中铝粉的质量分数对于火箭发动机羽烟

紫外分布有很大影响。随着铝粉质量分数的增加，复合推进剂固体火箭发动机羽烟紫外光谱辐射强度明显增加，紫外辐亮度分布范围扩大，数量级呈指数上升。在满足性能要求的前提下，为了降低火箭发动机羽烟的紫外辐射强度，获得较好的隐身性能，应

当减小固体推进剂中铝粉的含量。

固体推进剂火箭发动机羽烟紫外光谱辐射强度分布和二维辐亮度分布特点可以为紫外导弹预警系统工作波段的选择, 预警过程中判断导弹所采用的火箭发动机推进剂类型、以及固体火箭发动机导弹紫外隐身性能的改进提供参考。

4 结 论

建立了集成流场模型、辐射传输特性参数计算和 DOM 模型的火箭发动机羽烟紫外辐射模型。在流场和辐射传输计算分离的基础上, 分别采用二维和三维网格计算流场参数和辐射传输, 既节省了计算时间, 又可得到羽烟在不同视角的紫外光谱辐射强度分布和二维辐亮度分布。利用火箭发动机羽烟紫外辐射模型计算了双基推进剂、改性双基推进剂和复合推进剂 3 种固体推进剂火箭发动机羽烟的紫外辐射分布。以复合推进剂为例, 研究了铝粉含量对固体火箭发动机羽烟紫外辐射特性的影响。结果表明, 双基推进剂、改性双基推进剂和复合推进剂火箭发动机羽烟都会产生紫外辐射, 并且推进剂中铝粉的含量对于火箭发动机羽烟紫外分布有很大影响。研究结果可以为紫外导弹预警系统判断导弹所采用的固体火箭发动机推进剂类型, 固体火箭发动机导弹紫外隐身性能的改进提供依据。

参 考 文 献

- 1 Y. Plastinin, G. Karabadzhak, B. Khmelinin *et al.*. Ultraviolet, visible and infrared spectra modeling for solid and liquid-fuel rocket exhausts[J]. *AIAA*, 2001. 660~650
 - 2 A. Roblin, P. E. Baudoux, P. Chervet. UV missile plume signatures model[C]. *SPIE*, 2002, **4718**: 344~355
 - 3 R. Pincus, K. F. Evans. Computational cost and accuracy in calculating three-dimensional radiative transfer: results for new implementations of monte carlo and SHDOM[J]. *J. Atmospheric Science*, 2009, **66**(10): 3131~3146
 - 4 F. Neele, R. Schleijsen. UV missile plume signatures[C]. *SPIE*, 2002, **4718**: 369~379
 - 5 F. Neele, R. Schleijsen. Electro-optical missile plume detection [C]. *SPIE*, 2003, **5075**: 270~280
 - 6 Lou Ying. Study on Some Key Techniques of UV Warning[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2006. 9~20
- 娄 颖. 紫外告警若干关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学,

2006. 9~20

- 7 Zhao Wenjuan. Theoretical Calculation of Ultraviolet Radiation Properties for Solid Propellant Aircraft Plume[D]. Xi'an: Xidian University, 2006. 1~4
- 赵文娟. 固体推进剂飞行器尾焰紫外辐射特性理论研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006. 1~4
- 8 F. Fluent. 6.3 User Guide [EB/OL]. [2006-09-20]. http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/html/ug/main_pre.htm
- 9 Guo Aiyun, Bai Tingzhu, Tang Yi. The study of ultraviolet radiation characteristics of solid propellant rocket motor exhaust plumes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 295~299
- 国爱燕, 白廷柱, 唐 义. 固体火箭发动机羽烟紫外辐射研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 295~299
- 10 W. A. Fiveland, A. S. Jamaluddin. Three-dimensional spectral radiative heat transfer solution by the discrete-ordinates method [J]. *J. Thermophysics*, 1990, **5**(3): 335~339
- 11 M. G. Davis, W. K. McGregort, A. A. Mason. OH chemiluminescent radiation from lean hydrogen-oxygen flames [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1973, **61**(4): 1352~1356
- 12 L. S. Rothman, C. P. Rinsland, A. Goldman *et al.*. The HITRAN molecular spectroscopic database and hawks (hitran atmospheric workstation): 1996 edition [J]. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1998, **60**(5): 665~710
- 13 M. Simeckova, D. Jacquemart, L. S. Rothman *et al.*. Einstein A-coefficients and statistical weights for molecular absorption transitions in the HITRAN database [J]. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2006, **98**(1): 130~155
- 14 Dong Shikui, Ma Yu, Huang Wenxiong *et al.*. Study on ultraviolet radiation characteristics of OH radical in rocket plume [C]. In: Meeting of Chinese Society of Engineering Thermophysics, 2006. 546~551
- 董士奎, 马 宇, 黄文雄等. 火箭喷焰内 OH 自由基紫外辐射特性研究[C]. 中国工程热物理学会学术会议, 2006. 546~551
- 15 Zhang Hongan, Ye Dingyou, Hou Xiao *et al.*. Study on the condensed partial size distribution at SRM nozzle outlet [J]. *J. Solid Rocket Technology*, 2001, **24**(3): 14~18
- 张宏安, 叶定友, 侯 晓等. 固体发动机喷管出口凝相微粒粒度分布研究[J]. *固体火箭技术*, 2001, **24**(3): 14~18
- 16 Y. A. Plastinin, H. P. Sipatchev, G. F. Karabadzhak *et al.*. Influence of aluminaparticles' phase transition on its radiation in the middle infrared and ultraviolet regions of spectrum [J]. *AIAA*, 2000. 735~914
- 17 R. Jeenu, K. Pinumalla, D. Deepak. Size distribution of particles in combustion products of aluminized composite propellant [J]. *J. Propulsion and Power*, 2010, **26**(4): 715~723
- 18 Wang Weichen. Research on Infrared Radiation Signature of Exhaust Plume from Solid Rocket Motor[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010. 85~107
- 王伟臣. 固体火箭发动机排气羽流红外特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2010. 85~107

栏目编辑: 李文洁