

H₂O 和 CO₂ 高温混合气体喷流红外辐射特性

郑海晶¹, 白廷柱¹, 王全喜², 曹峰梅¹

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;

²海军装备研究院系统所, 北京 100073

摘要 利用数值仿真方法研究了 H₂O 和 CO₂ 高温混合气体喷流的红外辐射特性。根据 H₂O 和 CO₂ 两种气体的吸收特性, 将红外波段划分为 1.32~1.69 μm、1.56~2.27 μm、2.27~3.8 μm、3.8~8.3 μm 和 8.3~20 μm 五个波段。建立了基于某型发动机喷嘴的尾流红外辐射特性模型, 并利用此模型分别研究了 H₂O 和 CO₂ 高温混合气体喷流在这五个波段的辐射特性分布。仿真结果表明, 喷流中 H₂O 含量越高, 越有助于能量的扩散, 因此喷流温度和辐射能量也越低; 在高温喷流的辐射特性中, 中波红外波段辐射能量最强, 长波红外波段的最弱。

关键词 物理光学; 红外辐射; 喷流; 吸收系数; 水蒸气; 二氧化碳

中图分类号 O432.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0726001

Infrared Radiation Characteristics of High-Temperature H₂O and CO₂ Gas Mixture Jet Flows

Zheng Haijing¹, Bai Tingzhu¹, Wang Quanxi², Cao Fengmei¹

¹School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²System Division, Navy Equipment Research Institute, Beijing 100073, China

Abstract Infrared radiation characteristics of the high-temperature H₂O and CO₂ gas mixture jet flows are investigated with the numerical simulation method. The infrared band is divided into five bands (1.32-1.69 μm, 1.56-2.27 μm, 2.27-3.8 μm, 3.8-8.3 μm and 8.3-20 μm) according to the absorption features of H₂O and CO₂ gases. The model for describing the infrared radiation characteristics of wake flows from an engine nozzle is set up, and the radiation characteristic distributions of jet flows in the five infrared bands are numerically simulated based on this model. The results show that the more H₂O content in the jet flows, the more contributions to the energy diffusion, thereby the temperature of jet flows and the quantity of radiation are lower. In addition, there is the maximum radiation quantity in the mid-wave infrared band and the minimum radiation quantity in the long wave infrared band.

Key words physical optics; infrared radiation; jet flows; absorption coefficient; water vapor; carbon dioxide

OCIS codes 260.3060; 260.2710; 300.1030

1 引 言

液体发动机尾焰的红外辐射是红外探测设备对飞行器进行探测、识别、跟踪、告警的重要特征依据之一, 也是进行发动机设计的重要参考之一。液体发动机尾流一般由高温气体组成, 燃料不同其尾流组分也有所不同, 尾流中 H₂O 和 CO₂ 气体成分占绝大多数。因此, 掌握发动机尾流中的 H₂O 和 CO₂ 气体红外光谱辐射特性具有重要意义和价值。相比于真实发动机实验的昂贵、操作复杂等, 数值仿真具有费用低、操作简单等优点, 是发动机尾焰红外辐射特性研究的主要手段之一。

近年来, 以仿真或实验的方式对尾焰或类似火焰的红外辐射特性进行的研究有很多。Brent 等^[1]用仿真与实验结合的方法, 研究了湍动非预混火焰的中波红外辐射特性。Blunck 等^[2-4]研究了(4.34±0.1) μm

收稿日期: 2017-03-16; **收到修改稿日期:** 2017-03-22

作者简介: 郑海晶(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事发动机尾焰辐射特性方面的研究。E-mail: zhjsea08@163.com

导师简介: 白廷柱(1955—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事红外、紫外、微光探测成像等方面的研究。

E-mail: tzhbai@bit.edu.cn

窄波段中湍流对辐射特性的影响。Mahulikar 等^[5]在 1.9~2.9 μm , 3~5 μm , 8~12 μm 三个波段研究了飞行器红外辐射源,同时考虑了太阳辐射、天空辐射、地面辐射的影响。刘尊洋等^[6-8]研究了飞行参数和复燃对火箭尾焰红外辐射特性的影响。王伟臣等^[9]研究了工作条件对固体发动机尾焰温度场的影响。但是,关于 H_2O 和 CO_2 气体辐射对尾焰红外辐射特性影响的研究鲜有报道。

本文以 HITEMP-2010 数据库为基础,分别计算 H_2O 和 CO_2 气体在 500~7600 cm^{-1} (1.32~20 μm) 波段,波数间隔为 0.1 cm^{-1} ,温度分别为 200,400,600,800,1000,1200 K 条件下的谱吸收系数,并根据 H_2O 和 CO_2 气体的谱吸收系数特征,将 500~7600 cm^{-1} (1.32~20 μm) 分成 5 个波段,分别计算 5 个波段的吸收系数,再利用多项式拟合,建立波段吸收系数与温度间的函数关系。基于以上高温气体的辐射特性,结合计算流体力学(CFD)解算器建立了一种喷流红外辐射特性模型,分别对不同比例的 H_2O 、 CO_2 高温混合气体喷流的红外辐射特性分布进行仿真,得到 5 个波段内不同比例 H_2O 、 CO_2 高温混合气体喷流的辐射特性,最后对结果进行详细分析。

在本文的仿真设计中, H_2O 、 CO_2 高温混合气体的比例和温度没有依照真实的发动机尾焰中物质的比例和温度,主要是为了更深入地研究 H_2O 、 CO_2 气体分别对尾焰红外辐射的影响,其结果对于液体发动机推进剂的设计,飞行器红外隐身技术以及导弹红外预警具有一定的借鉴意义。

2 气体辐射特性参数

2.1 谱吸收系数

利用 HITRAN 以及 HITEMP-2010 数据库^[10-12]中的基本参数来计算气体辐射特性参数。HITEMP-2010 数据库提供了 H_2O 、 CO_2 、 CO 、 NO 和 OH^{-1} 在 296 K、 1.013×10^5 Pa 条件下计算气体辐射所需的参数,包括谱线强度、空气展宽半宽、自展宽半宽、低能态能量以及压致线偏等。根据这些参数,可以计算 300~3000 K 温度范围内气体的谱吸收系数和谱透过率等参数^[13-14]。虽然 HITEMP-2010 数据库是由 HITRAN 发展而来,但在高温范围内,HITEMP-2010 拥有比 HITRAN 更多、更精确的谱线。因此,使用逐线(LBL)法分别计算 H_2O 和 CO_2 气体在 500~7600 cm^{-1} (1.32~20 μm),波数间隔为 0.1 cm^{-1} ,温度分别为 200,400,600,800,1000,1200 K 条件下的谱吸收系数^[15]。其中,200 K 和 400 K 温度下的气体辐射参数来自 HITRAN,600,800,1000,1200 K 的数据来自 HITEMP-2010。根据 H_2O 和 CO_2 气体的谱吸收系数特征,将 500~7600 cm^{-1} (1.32~20 μm) 分成 5 个波段,分别计算 5 个波段的谱带吸收系数。利用多项式拟合,得到波段吸收系数与波段和温度间的函数关系。

2.2 灰气体加权和模型

高温喷流中包含多种辐射物质,使用灰气体加权和模型(WSGGM)计算总发射率 ϵ_{emit} ,即

$$\epsilon_{\text{emit}} = \sum_{i=0}^I a_{\epsilon_{\text{emit}},i}(T)[1 - \exp(-\kappa_i p s)], \quad (1)$$

式中 I 为喷流中物质种类总数, $a_{\epsilon,i}$ 为第 i 种气体的发射率权重因子, κ_i 为第 i 种气体的吸收系数, p 为总压, s 为辐射传输路径长度, T 为温度。 $a_{\epsilon,i}$ 的取值来自文献^[16],吸收系数 κ_i 由 2.1 节在 1.013×10^5 Pa 条件下计算获得,当总压不等于 1.013×10^5 Pa 时,有

$$\kappa_i \rightarrow \kappa_i p_{\text{tot}}^m, \quad (2)$$

式中 m 是一个无量纲的量,与局部压强和温度有关^[17]; p_{tot} 为总压。

3 仿真模型

3.1 网格划分

图 1 所示为喷管模型示意图。仿真模型中的喷管为收缩型喷管,入口直径为 80 mm,出口直径为 70 mm,喷管总长为 185 mm。由于重力影响较小,因此将整个仿真区域设置为二维轴对称区域,大小为 2 m \times 10 m。

网格划分如图 2 所示。网格为四边形结构化网络,大小为 100 \times 1100,总量为 11 万个,对靠近中心轴的网格进行加密处理。

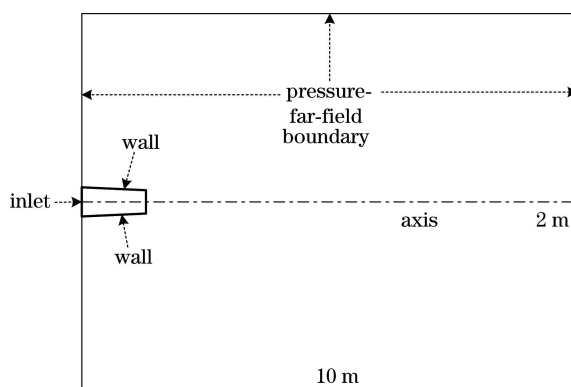


图 1 喷管模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of nozzle model

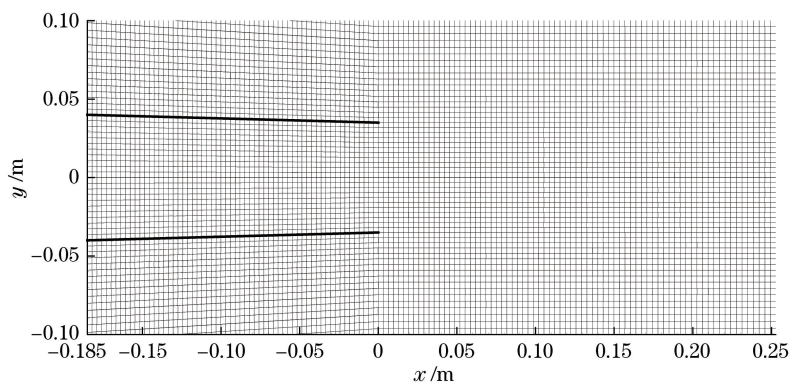


图 2 网格划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of meshing

3.2 边界条件

仿真模型中 H_2O 和 CO_2 高温混合气体为自由射流,除了压力进口以及标准壁面条件外,其他均为压力远场边界条件,即大气压强为 1.013×10^5 Pa,环境温度为 300 K,组成为 21% (体积分数) O_2 、0.03% CO_2 和 78% N_2 ,大气中的其他气体不予考虑。边界条件总结见表 1。

表 1 边界条件

Table 1 Boundary conditions

Boundary condition	Position	Content
Pressure inlet	Nozzle inlet	3.039×10^5 Pa, 1000 K
Wall	Nozzle wall	Adiabatic wall
Far-field boundary	Computation region boundary	1.013×10^5 Pa, 300 K, air

3.3 流场及辐射模型

喷流流场的运动属于高雷诺数湍流运动。使用雷诺平均法 (RANS) 模拟湍流运动对流场的影响。RANS 中的雷诺应力项采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型计算^[18-22]。

喷流包含大量各向异性的介质,求解喷流红外辐射特性就必须求解由大量各向异性介质参与的辐射传输方程^[23-26]。使用离散坐标 (DO) 模型求解辐射传输方程,即通过对辐射传输方向进行离散,将微分-积分形式的辐射传输方程转化为偏微分方程^[27-29]。

4 结果与讨论

4.1 吸收系数

基于最新的 HITRAN 和 HITEMP-2010 数据库,利用 LBL 法得到 6 个温度下 H_2O 和 CO_2 气体的谱吸

收系数,压强为 1.013×10^5 Pa。其中 200 K 和 400 K 的吸收系数谱线相关参数来自 HITRAN,其余来自 HITEMP2010 数据库。

图 3 为 H_2O 气体在不同温度下的吸收系数谱线,可以看出, H_2O 气体主要吸收峰的波长分别为 1.38, 1.87, 2.7, 6.3, 18 μm 。不同温度下, H_2O 气体的吸收峰中心波长位置几乎没有变化,只是吸收系数数值大小发生变化。从整体来看, H_2O 气体的吸收系数值随温度升高而降低。例如,6.3 μm 处的吸收峰值从 200 K 时的 13 cm^{-1} 降低到 1200 K 时的 1.5 cm^{-1} 。但是从 600 K 开始,18 μm 处的吸收峰比较显著,称之为“热线”。

由以上分析可知,温度变化对吸收峰位置几乎没有影响,但随着温度的升高,长波作用逐渐增强,短波作用逐渐减弱。

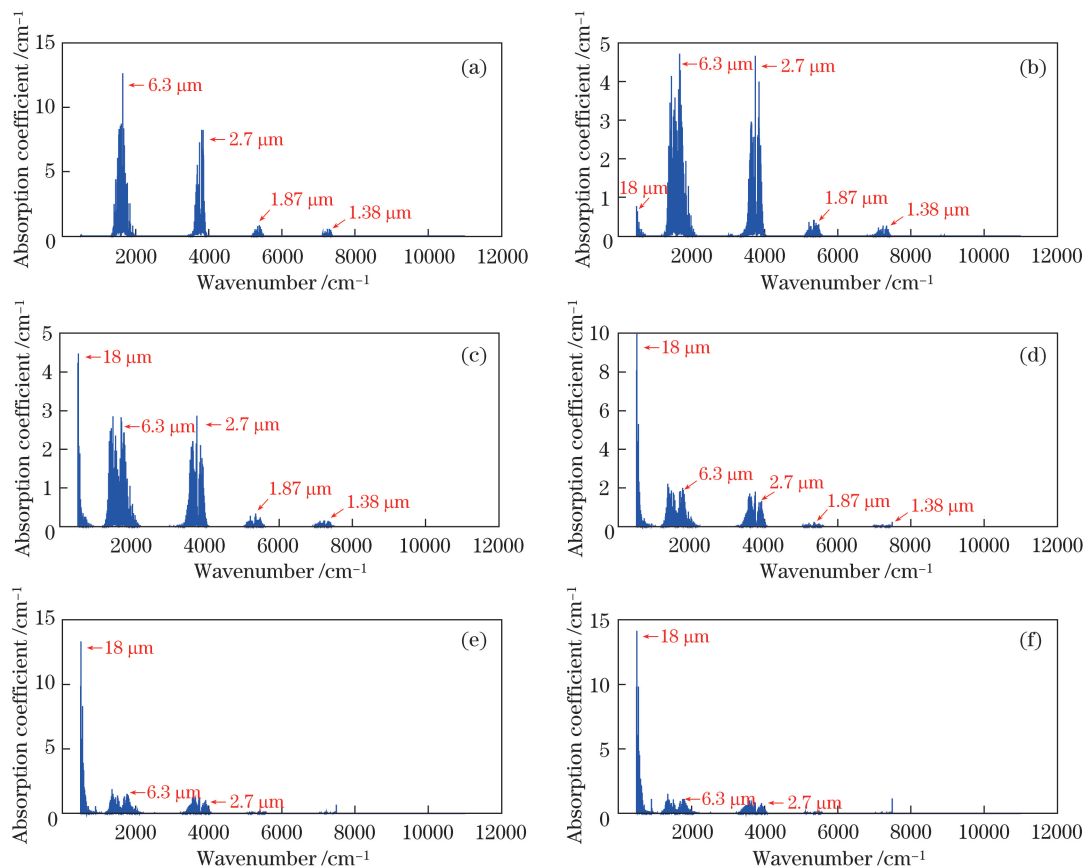


图 3 H_2O 气体在不同温度下的吸收系数谱线。(a) 200 K; (b) 400 K; (c) 600 K; (d) 800 K; (e) 1000 K; (f) 1200 K

Fig. 3 Absorption coefficient spectra of H_2O gas under different temperatures. (a) 200 K; (b) 400 K; (c) 600 K; (d) 800 K; (e) 1000 K; (f) 1200 K

图 4 为 CO_2 气体在不同温度下的吸收系数谱线,可以看到, CO_2 气体的吸收峰位置分别为 2.7, 4.3, 15 μm 。其中 4.3 μm 处的吸收系数最大,15 μm 处的次之,2.7 μm 处的最小。与 H_2O 气体的吸收规律相同,不同温度的 CO_2 气体吸收峰波长位置相同。随着温度的升高, CO_2 气体的吸收系数不断减小, CO_2 气体对红外辐射的吸收逐渐减弱, CO_2 气体主要吸收峰的吸收系数也呈相同变化趋势,即 4.3 μm 处的吸收系数最大,15 μm 处的次之,2.7 μm 处的最小。

由以上分析可知,温度变化对 CO_2 气体吸收峰位置几乎没有影响,对各 CO_2 气体吸收峰之间的相对强弱也无影响。

从不同温度下 H_2O 和 CO_2 气体的吸收系数谱线可以看出,温度升高时,吸收谱线有展宽效应,其中 CO_2 气体吸收系数谱线更加明显。这种展宽的根本原因是温度越高,跃迁到激发态振动-转动能级的气体分子数越多,谱带越宽。

尾焰中 H_2O 和 CO_2 气体组分最多,对尾焰红外辐射特性影响较大。根据 H_2O 和 CO_2 气体的上述吸收特性划分 5 个谱带,见表 2。

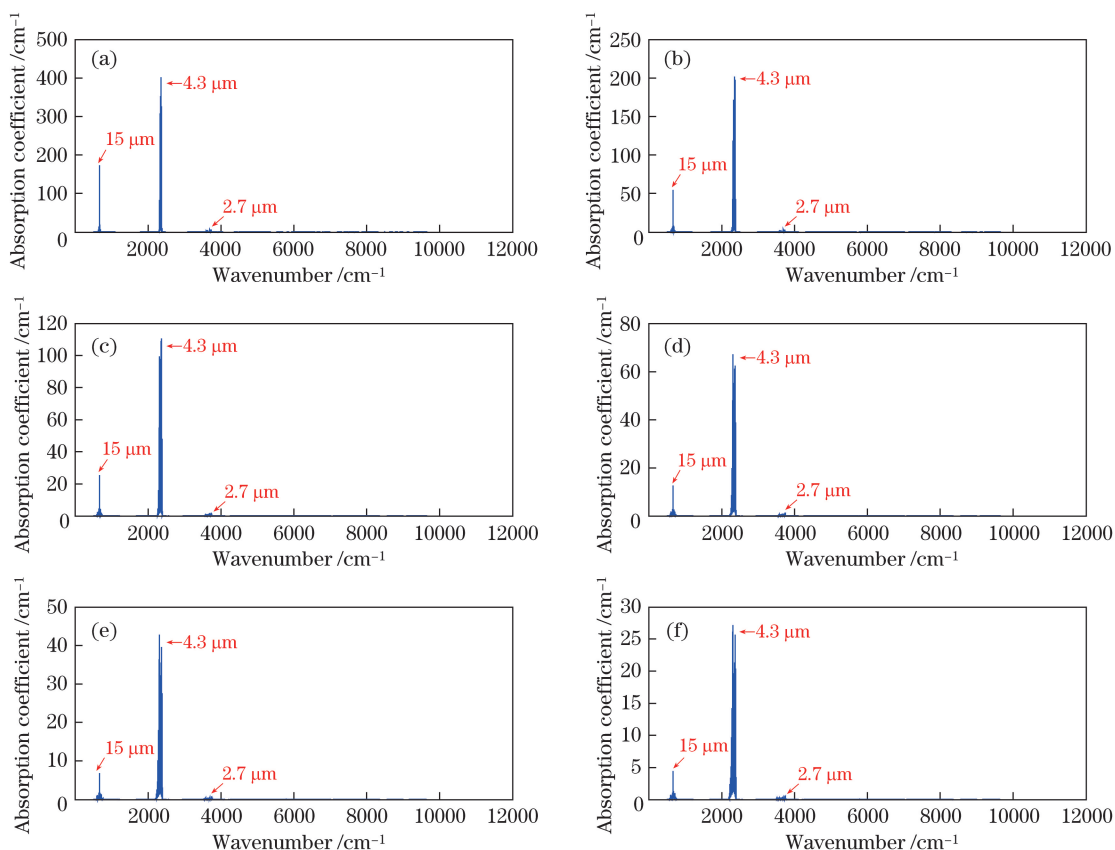


图 4 CO₂ 气体在不同温度下的吸收系数谱线。(a) 200 K; (b) 400 K; (c) 600 K; (d) 800 K; (e) 1000 K; (f) 1200 K

Fig. 4 Absorption coefficient spectra of CO₂ gas under different temperatures. (a) 200 K; (b) 400 K; (c) 600 K; (d) 800 K; (e) 1000 K; (f) 1200 K

表 2 谱带划分

Table 2 Classification of spectral bands

No.	Wavelength band / μm	Wavenumber / cm^{-1}
1	8.3-20	500-1200
2	3.8-8.3	1200-2600
3	2.27-3.8	2600-4400
4	1.69-2.27	4400-5900
5	1.32-1.56	6400-7600

4.2 模型验证

为了验证本文模型的正确性,选择与文献[30]相同的参数,并使用本文模型计算尾焰流场及其红外辐射特性。图 5(a)、(c)分别为使用本文模型计算的尾焰温度分布和红外辐射仿真结果,可以发现,温度较高区域的尾焰红外辐射也较强;图 5(b)、(d)分别为文献[30]中仿真计算结果和实验图像。对比图 5(b)~(d)可以发现,尾焰高温区基本一致,即红外辐射较强的区域基本一致,马赫盘位置也基本对应,本文仿真结果与文献[30]结果非常接近,证明了本文模型的正确性。

4.3 喷流温度分布

利用本文的模型,进行了 H₂O 和 CO₂ 高温混合气体喷流仿真。设置压力入口条件中的物质组分, H₂O 和 CO₂ 气体体积分数分别为 10% 和 90%、50% 和 50%、90% 和 10%, 温度均为 1000 K, 其他边界条件见表 1, 得到的高温混合气体流场温度分布如图 6~9 所示。

由图 6~9 可以看出, H₂O 和 CO₂ 气体的混合比例对喷流的温度分布有一定的影响。H₂O 气体的比例越大, 喷流的温度分布越广。图 6 中混合气体为 H₂O (10%) 和 CO₂ (90%), 喷流的核心长度达到 4.5 m;

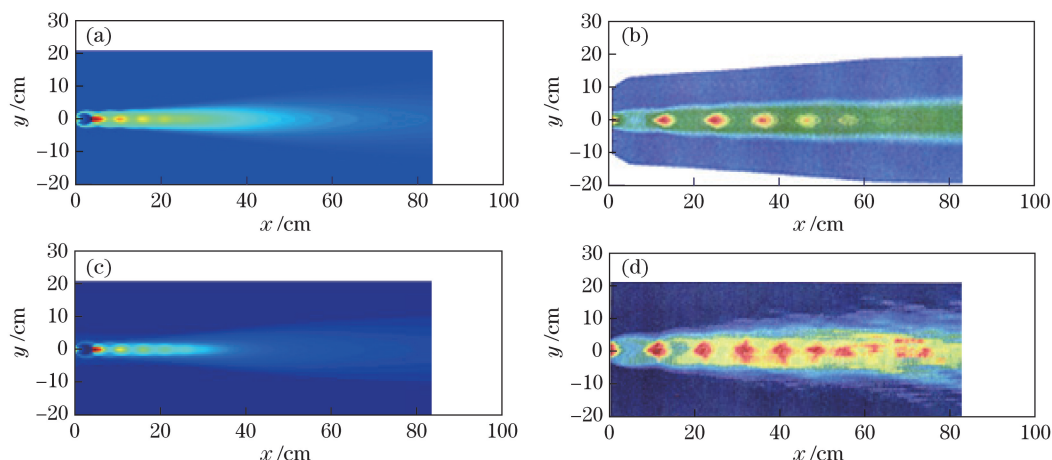


图 5 本文模型计算结果与文献[30]结果对比。(a)本文模型温度分布;(b)文献[30]仿真结果;
(c)本文模型仿真结果;(d)文献[30]实验结果

Fig. 5 Comparison of results in this paper and in Ref. [30]. (a) Temperature distribution in this paper;
(b) simulated result in Ref. [30]; (c) simulated result in this paper; (d) experimental result in Ref. [30]

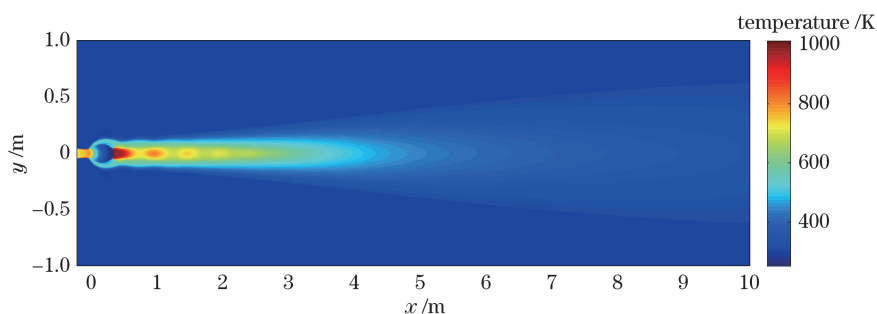


图 6 含 H_2O (10%) 和 CO_2 (90%) 气体的喷流温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of jet flows containing H_2O (10%) and CO_2 (90%) gases

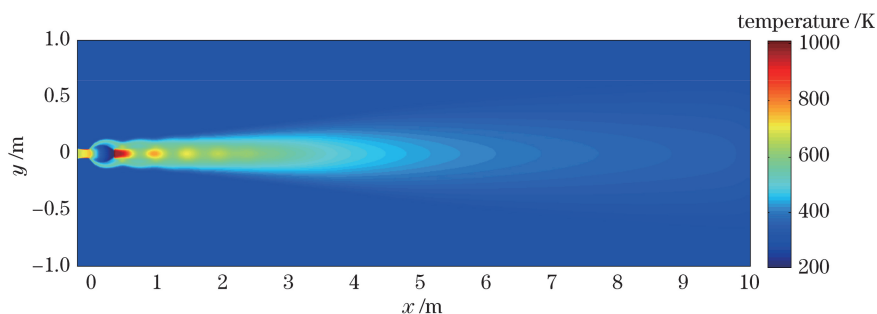


图 7 含 H_2O (50%) 和 CO_2 (50%) 气体的喷流温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of jet flows containing H_2O (50%) and CO_2 (50%) gases

图 7 中混合气体为 H_2O (50%) 和 CO_2 (50%), 喷流的核心长度达到 5.5 m; 图 8 中混合气体为 H_2O (90%) 和 CO_2 (10%), 喷流的核心长度达到 6.5 m。结果说明, H_2O 气体含量越高, 喷流在径向的温度分布越宽。

在图 9 的中心轴温度分布曲线中, H_2O 气体含量最高情况下的中心轴温度最低。这是因为 H_2O 气体含量越高, 喷流温度分布越广, 即能量扩散越严重, 所以温度也越低。图 9 中每一次温度波动对应于尾焰中的一个马赫盘, 每个马赫盘处都有压力、温度等物理量的突变。

由以上分析可知, H_2O 气体含量越高, 喷流尺寸越大, 整体温度越低。

4.4 喷流辐射分布

对 H_2O 和 CO_2 高温混合气体喷流在不同波段的辐射分布进行仿真, 结果如图 10~15 所示。文中辐射物理量为辐射出射度, 单位为 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

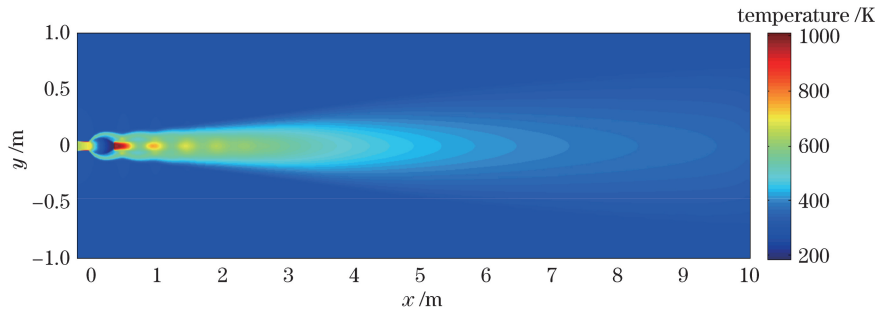


图 8 含 H_2O (90%)和 CO_2 (10%)气体的喷流温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of jet flows containing H_2O (90%) and CO_2 (10%) gases

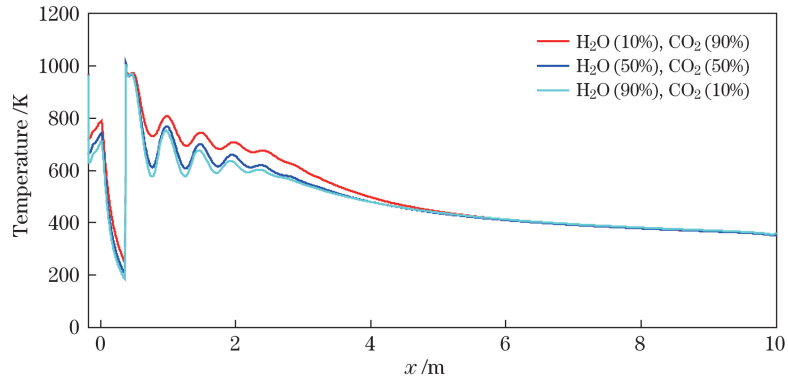


图 9 含不同比例 H_2O 和 CO_2 的混合气体中心轴温度分布曲线

Fig. 9 Temperature curves on the central axis of gas mixtures with different H_2O and CO_2 proportions

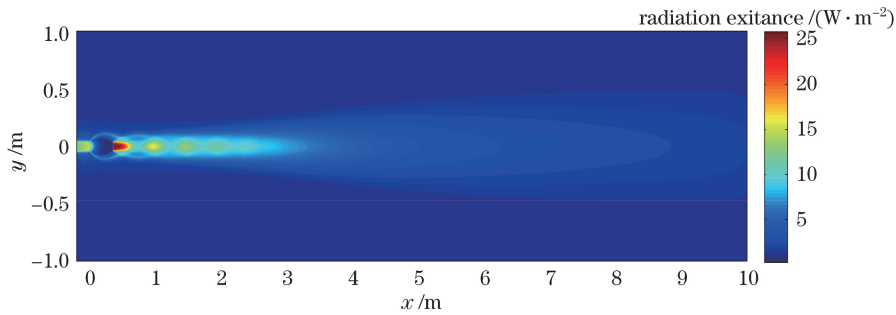


图 10 含 H_2O (50%)和 CO_2 (50%)气体的喷流在 $8.3\sim 20\ \mu\text{m}$ 波段的辐射出射度分布

Fig. 10 Radiation exitance distribution of jet flows containing H_2O (50%) and CO_2 (50%) gases in the wavelength band of $8.3\text{-}20\ \mu\text{m}$

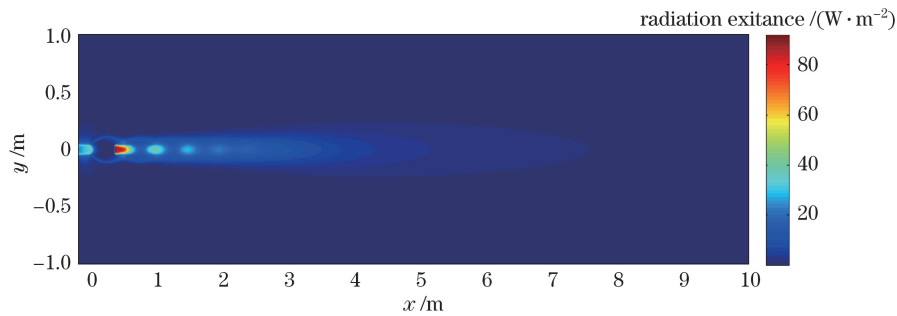


图 11 含 H_2O (50%)和 CO_2 (50%)气体的喷流在 $3.8\sim 8.3\ \mu\text{m}$ 波段的辐射出射度分布

Fig. 11 Radiation exitance distribution of jet flows containing H_2O (50%) and CO_2 (50%) gases in the wavelength band of $3.8\text{-}8.3\ \mu\text{m}$

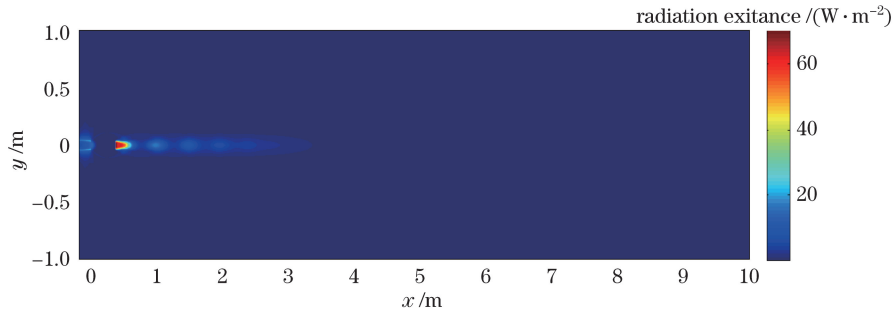


图 12 含 H_2O (50%) 和 CO_2 (50%) 气体的喷流在 $2.27\sim 3.8\ \mu\text{m}$ 波段的辐射出射度分布
Fig. 12 Radiation exitance distribution of jet flows containing H_2O (50%) and CO_2 (50%) gases in the wavelength band of $2.27\sim 3.8\ \mu\text{m}$

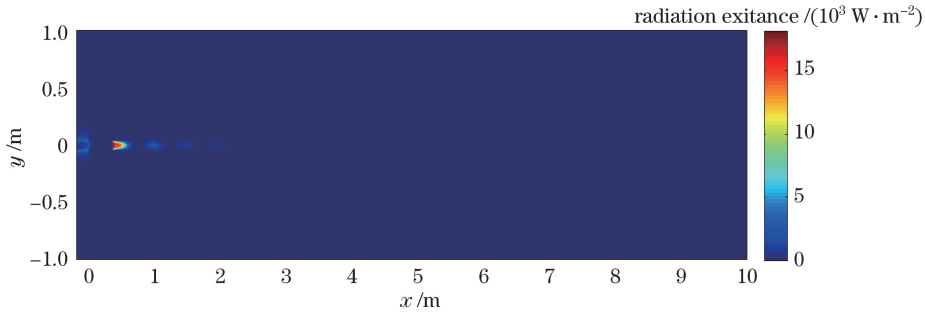


图 13 含 H_2O (50%) 和 CO_2 (50%) 气体的喷流在 $1.69\sim 2.27\ \mu\text{m}$ 波段的辐射出射度分布
Fig. 13 Radiation exitance distribution of jet flows containing H_2O (50%) and CO_2 (50%) gases in the wavelength band of $1.69\sim 2.27\ \mu\text{m}$

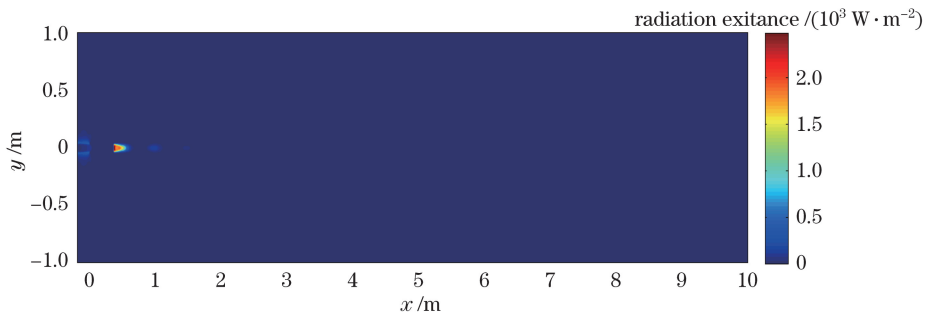


图 14 含 H_2O (50%) 和 CO_2 (50%) 气体的喷流在 $1.32\sim 1.56\ \mu\text{m}$ 波段的辐射出射度分布
Fig. 14 Radiation exitance distribution of jet flows containing H_2O (50%) and CO_2 (50%) gases in the wavelength band of $1.32\sim 1.56\ \mu\text{m}$

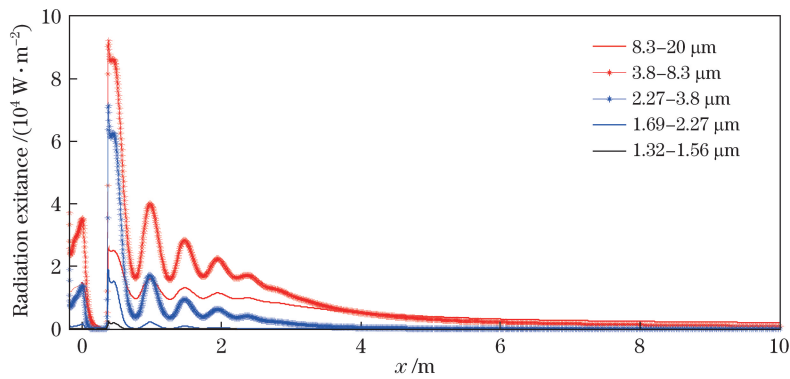


图 15 含 H_2O (50%) 和 CO_2 (50%) 气体的喷流在不同波段的中心轴辐射出射度分布曲线
Fig. 15 Radiation exitance distribution curves on the central axis of jet flows containing H_2O (50%) and CO_2 (50%) gases in different wavebands

图 10~15 中,在长波、中波和短波红外波段,喷流在第一个马赫盘后的最大辐射量分别为 2.4×10^4 , 9.0×10^4 , $7.0 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。而且长波红外波段的喷流辐射分布最广;中波的次之,但辐射量最大;短波红外波段喷流辐射量虽然比长波红外波段的大,但分布面积最小。

图 16~20 为不同混合比例的 H_2O 和 CO_2 高温气体喷流中心轴上的辐射分布曲线,可以看出,在同一波段, H_2O 气体含量越高,辐射出射度越小,这与温度分布规律一致。

以上结果表明, H_2O 和 CO_2 高温混合气体喷流在中波波段有最强辐射, H_2O 气体含量越高,喷流辐射越弱。

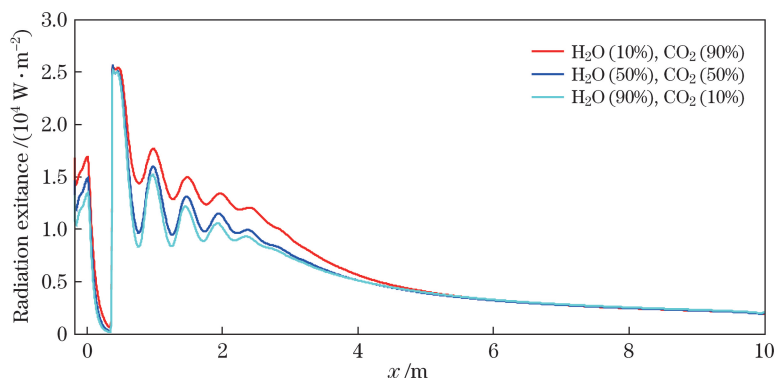


图 16 不同比例 H_2O 和 CO_2 混合气体的中心轴辐射出射度分布曲线 ($8 \sim 20 \mu\text{m}$)

Fig. 16 Radiation exitance distribution curves on the central axis in the wavelength band of $8 \sim 20 \mu\text{m}$ for gas mixtures with different H_2O and CO_2 proportions

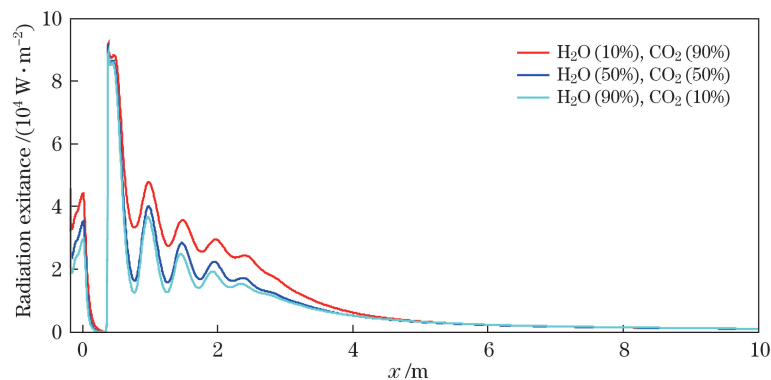


图 17 不同比例 H_2O 和 CO_2 混合气体的中心轴辐射出射度分布曲线 ($3.8 \sim 8.3 \mu\text{m}$)

Fig. 17 Radiation exitance distribution curves on the central axis in the wavelength band of $3.8 \sim 8.3 \mu\text{m}$ for gas mixtures with different H_2O and CO_2 proportions

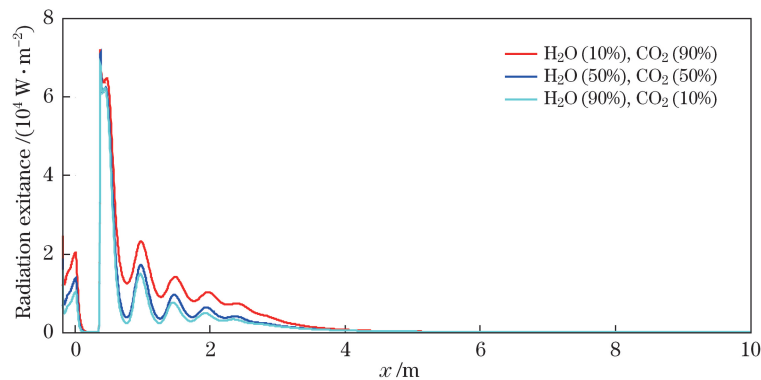


图 18 不同比例 H_2O 和 CO_2 混合气体的中心轴辐射出射度分布曲线 ($2.27 \sim 3.8 \mu\text{m}$)

Fig. 18 Radiation exitance distribution curves on the central axis in the wavelength band of $2.27 \sim 3.8 \mu\text{m}$ for gas mixtures with different H_2O and CO_2 proportions

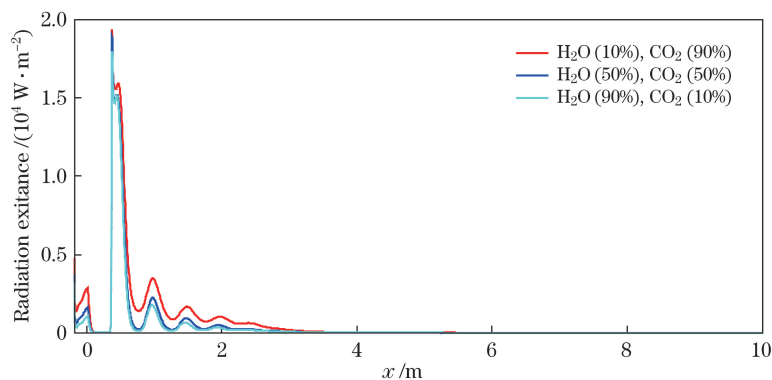


图 19 不同比例 H_2O 和 CO_2 混合气体的中心轴辐射出射度分布曲线(1.69~2.27 μm)

Fig. 19 Radiation exitance distribution curves on the central axis in the wavelength band of 1.69-2.27 μm for gas mixtures with different H_2O and CO_2 proportions

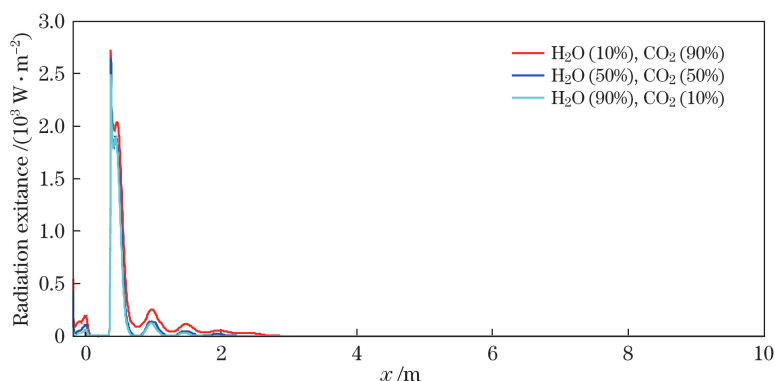


图 20 不同比例 H_2O 和 CO_2 混合气体的中心轴辐射出射度分布曲线(1.32~1.56 μm)

Fig. 20 Radiation exitance distribution curves on the central axis in the wavelength band of 1.32-1.56 μm for gas mixtures with different H_2O and CO_2 proportions

5 结 论

液体发动机尾流中的主要组分 H_2O 和 CO_2 气体在流场中的体积分数、温度分布对尾流的红外辐射分布以及高温混合气体喷流的红外辐射分布有较大的影响。 H_2O 气体含量越高,喷流的能量越分散,喷流的物理尺寸越大,喷流的整体温度越低,红外波段的辐射也越弱。

H_2O 和 CO_2 高温混合气体尾流在中波红外(3~8 μm)和中短波红外(2.27~3.8 μm)波段有较强的辐射,应该在中波红外波段或者短波红外波段对液体发动机尾流进行红外预警,此时可以获得最大的特征信息。

参 考 文 献

- [1] Rankin B A, Ihme M, Gore J. Quantitative model-based imaging of mid-infrared radiation from a turbulent non-premixed jet flame and plume[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(4): 1275-1283.
 - [2] Blunck D, Harvazinski M, Rankin R, *et al.* Turbulent radiation statistics of exhaust plumes exiting from a subsonic axisymmetric nozzle[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2012, 26(2): 286-293.
 - [3] Blunck D L, Harvazinski M E, Merkle C L, *et al.* Influence of turbulent fluctuations on the radiation intensity emitted from exhaust plumes[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2012, 26(4): 581-589.
 - [4] Blunck D L, Gore J. Study of narrowband radiation intensity measurements from subsonic exhaust plumes[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 27(1): 227-235.
 - [5] Mahulikar S P, Potnuru S K, Rao G A. Study of sunshine, skyshine, and earthshine for aircraft infrared detection[J]. *Journal of Optics A*, 2009, 11(4): 045703.
 - [6] Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, *et al.* Influence of flight parameters on the infrared radiation of a liquid rocket exhaust plume[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0404001.
- 刘尊洋, 邵立, 汪亚夫, 等. 飞行参数对液体火箭尾焰红外辐射特性的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0404001.

- [7] Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, *et al.* Influence of afterburning on the infrared radiation of solid rocket exhaust plume[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0604001.
刘尊洋, 邵立, 汪亚夫, 等. 复燃对固体火箭尾焰红外辐射特性的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0604001.
- [8] Liu Zunyang, Shao Li, Wang Yafu, *et al.* Influence of afterburning on infrared radiation of liquid rocket exhaust plume[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(4): 480-485.
刘尊洋, 邵立, 汪亚夫, 等. 复燃对液体火箭尾焰红外辐射特性的影响[J]. *光子学报*, 2013, 42(4): 480-485.
- [9] Wang Weichen, Li Shipeng, Zhang Qiao, *et al.* Influence of operating conditions on temperature distributions of exhaust plume of solid rocket motor[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(12):1493-1498.
王伟臣, 李世鹏, 张 峤, 等. 工作条件对固体发动机羽流温度场的影响[J]. *兵工学报*, 2011, 32(12): 1493-1498.
- [10] Fiveland W A, Jamaluddin A S. Three-dimensional spectral radiative heat transfer solutions by the discrete-ordinates method[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1991, 5(3):335-339.
- [11] Alberti M, Weber R, Mancini M, *et al.* Comparison of models for predicting band emissivity of carbon dioxide and water vapour at high temperatures[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 64: 910-925.
- [12] Rothman L S, Gordon I Z, Barber R J, *et al.* HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2010, 111(15): 2139-2150.
- [13] Alberti M, Weber R, Mancini M, *et al.* Validation of HITEMP-2010 for carbon dioxide and water vapor at high temperatures and atmospheric pressures in 450-7600 cm^{-1} spectral range[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 157: 14-33.
- [14] Laraia A L, Gamache R R, Lamouroux J, *et al.* Total internal partition sums to support planetary remote sensing[J]. *Icarus*, 2011, 215(1): 391-400.
- [15] Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, *et al.* Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2005, 91(2): 233-244.
- [16] Coppalle A, Vervisch P. The total emissivities of high-temperature flames[J]. *Combustion and Flame*, 1983, 49(1/2/3): 101-108.
- [17] Edwards D K, Matavosian R. Scaling rules for total absorptivity and emissivity of gases[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1984, 106(4): 684-689.
- [18] Molvik G, Merkle C. A set of strongly coupled, upwind algorithms for computing flows in chemical non-equilibrium[C]. 27th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1989: 199.
- [19] Sinha N, Dash S, Hosangadi A. Applications of an implicit, to steady/unsteady reacting, upwind Navier-Stokes code, CRAFT, multi-phase flowfields[C]. 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1992: 837.
- [20] York B, Sinha N, Dash S. Navier-Stokes simulation of plume vertical launching system interaction flowfields[C]. 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1992: 839.
- [21] Rao R, Candler G, Wright M. Numerical simulations of Atlas II rocket motor plumes[C]. 35th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1999: 2258.
- [22] Candler G, Rao R, Sinha K. Numerical simulations of Atlas-II rocket motor plumes[C]. 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2001: 354.
- [23] Jachimowski C J. An analytical study of the hydrogen-air reaction mechanism with application to scramjet combustion[R]. NASA Langley Research Center, 1988: 2791.
- [24] Cocks P, Dawes W, Cant R. The influence of turbulence-chemistry interaction modelling for supersonic combustion[C]. 49th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2011: 306.
- [25] Roblin A, Dubois I, Grisch F. Comparison between computations and measurements of a H_2/LOX rocket motor plume[C]. 8th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 2002: 3107.
- [26] Calhoon W H, Kenzakowsk D C. Flowfield and radiation analysis of missile exhaust plumes using a turbulent-chemistry interaction model[C]. 36th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2000: 3388.
- [27] Calhoon W H. Computational assessment of afterburning cessation mechanisms in fuel-rich rocket exhaust plumes[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(1): 111-119.
- [28] Calhoon W H, Kenzakowsk D C. Assessment of turbulence -chemistry interactions in missile exhaust plume signature analysis[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2003, 40(5): 694-695.
- [29] Calhoon W, Brinckman K, Tomes J, *et al.* Scalar fluctuation and transport modeling for application to high speed reacting flows[C]. 44th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2006: 1452.
- [30] Devir A, Lessin A, Lev M, *et al.* Comparison of calculated and measured radiation from a rocket motor plume[C]. 49th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2011: 358.