

多尺度多线组宽带 k 分布模型参数优化方法

吴 越¹, 胡海洋¹, 王 强¹, 段 然², 谢业平³, 邓洪伟³

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 北京环境特性研究所 光学辐射重点实验室, 北京 100854;

3. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 针对喷气式飞行器跨声速排气系统的高温固壁与尾喷流的发射红外辐射及其在大气中的远距离传输衰减特性的数值计算, 将现有多尺度多线组宽带 k 分布气体辐射模型 MSMGWB (multi-scale multi-group wide-band k -distribution model) 从 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段扩展到 $2\sim 2.5$ 、 $3.7\sim 4.8$ 、 $7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段, 并对模型光谱吸收系数分组组合与匹配高斯积分格式的寻优方法进行了改进。56 个一维算例与真实结构跨声速排气系统远程红外成像算例计算结果表明, 优化后的 MSMGWB 模型对比多线组统计窄带模型计算精度和效率都有明显提升, 尤其在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 波段, 综合计算精度提升近一倍的同时, 计算效率分别提升了 4 倍和 1.5 倍; 对比国内主流目标远程红外特性计算方法, 综合计算精度提升更大, 计算效率则提升了 1 个量级左右。

关 键 词: 气体辐射; k 分布; 宽带模型; 多尺度多线组; 红外成像

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Parameter optimization of multi-scale multi-group wide-band k -distribution models

WU Yue¹, HU Haiyang¹, WANG Qiang¹, DUAN Ran², XIE Yeping³, DENG Hongwei³

(1. School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Science and Technology on Optical Radiation Laboratory,

Beijing Institute of Environmental Features, Beijing 100854, China;

3. Shenyang Engine Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: Considering the numerical calculation of remote infrared signal emitted by solid wall and hot combustion gas of jet aircraft's transonic exhaust system, the existing multi-scale multi-group wide-band k -distribution model (MSMGWB) was expanded from $3\sim 5\ \mu\text{m}$ wave band to $2\sim 2.5$, $3.7\sim 4.8$, $7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}$ and $8\sim 14\ \mu\text{m}$ wave bands. Moreover, the method of finding best combination of wavenumber subinterval grouping results and Gauss integral schemes was improved. The calculation results of 56 1D cases and a 3D real-structure transonic exhaust system remote infrared imaging case indicated that the optimized MSMGWB model significantly improved computation accuracy and

收稿日期: 2022-03-21

基金项目: 国家科技重大专项 (J2019-III-0009-0053)

作者简介: 吴越 (1997—), 男, 硕士生, 主要从事气动与红外辐射方面研究。E-mail: 956727910@qq.com

通信作者: 胡海洋 (1981—), 男, 讲师、硕士生导师, 博士, 主要从事计算热辐射学、计算流体力学、计算传热学、气固两相流方面研究。

E-mail: 09451@buaa.edu.cn

引用格式: 吴越, 胡海洋, 王强, 等. 多尺度多线组宽带 k 分布模型参数优化方法 [J]. 航空动力学报, 2024, 39(2): 20220144. WU Yue, HU Haiyang, WANG Qiang, et al. Parameter optimization of multi-scale multi-group wide-band k -distribution models [J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(2): 20220144.

efficiency compared with fictitious gas-based statistical narrow-band model, especially under 3—5 μm and 3.7—4.8 μm wave bands, the comprehensive calculation accuracy was nearly doubled, and the calculation efficiency was increased by 4 times and 1.5 times, respectively. At the same time, the optimized MSMGWB model's comprehensive calculation accuracy was improved more significantly, and calculation efficiency was improved by about an order of magnitude compared with the domestic mainstream calculation method of target remote infrared signals.

Keywords: gas radiation; k -distribution; wide-band model; multi-scale multi-group; infrared imaging

逐线计算(line-by-line, LBL)^[1]可以准确预测温度、压力、参与性组分比例剧烈变化的气体的辐射特性,但计算量过大,无法用于工程领域中复杂辐射传输问题的计算。于是出现了大量近似模型^[2-3],可在计算量仅为逐线计算的百分之一甚至千分之一量级的情况下,较为精确的计算均匀和弱非均匀气体的辐射特性。其中, k 分布模型^[4-5]可兼容各种辐射传输方程(radiation transfer equation, RTE)^[6]的积分与微分离散求解方法;相比统计窄带模型^[2], k 分布模型可通过快速迭代计算固壁间的多次反射辐射。

然而,如何将上述近似模型推广到强非均匀气体——如喷气飞行器红外特性预测需要计算高温燃气喷流的发射辐射在大气中的远距离传输衰减——是当前气体辐射模型研发的难点和热点。主要困难是气体温度或参与性组分比例的剧烈变化会破坏上述近似模型计算非均匀气体辐射特性所使用的关联 k (correlated- k , CK)假设,导致其计算精度大幅降低^[7-8]。温度对 CK 特性的破坏是由吸收谱线中的“热线”造成的^[9],可以通过多线组方法(multiple-line-group approaches, MLG)^[10-12]和光谱映射法(spectral mapping method, SMM)^[13-15]解决。其思想是将关心波段的吸收谱线(MLG)或波数间隔(SMM)分为多组,保证在每个分组内,气体的吸收光谱在不同温度和压力下具有 CK 特性。由于各种参与性组分的吸收光谱完全不同,当气体的参与性组分摩尔比发生变化时,自然会破坏其叠加吸收光谱的 CK 特性。解决这一问题的方法包括局部关联法^[16]、基于统计无关假设的多重积分法^[17]和联合分布函数法^[18]。需要注意的是:上述方法在解决 CK 特性被破坏的问题的同时也导致模型计算量增加。

与上述方法相比,多尺度多线组方法(multi-scale multi-group, MSMG)与 k 分布模型结合——如多尺度多线组宽带 k 分布模型(MSMGWB)——

在同时面对上述两种 CK 特性破坏机理时,可达到计算精度和计算量的良好折中,适合计算高温燃气发射红外信号在温度与组分比例完全不同的环境空气中的远距离传输衰减特性^[19-21]。MSMGWB 模型虽已经历了几年的发展,但目前仅被用于计算各类喷气发动机与燃气轮机排气系统固体结构与燃气喷流 3~5 μm 波段的远距离红外信号^[19-21],且已发现影响其计算量和计算精度的因素很多。文献[21]指出,其首要影响因素是波数间隔的分组策略,之后是分组初始化及模型的高斯积分格式。本文聚焦于后两个影响因素,以进一步提高 MSMGWB 模型的计算精度和效率:首先介绍 MSMGWB 模型的控制方程、边界条件与波数间隔分组方法,之后介绍 MSMGWB 模型的参数优化方法,最后是优化后的 MSMGWB 模型在一维与三维目标远程红外特性计算算例中的精度、效率对比验证。

1 MSMGWB 气体辐射模型

1.1 控制方程

以 3~5 μm 波段为例,当忽略散射增益时,辐射传输方程可以被写成^[22]

$$\begin{cases} \frac{dI_\eta}{ds} = [k_\eta(\phi) - k_{s\eta}]I_{b\eta} - k_\eta(\phi)I_\eta \\ I_{3\sim 5\mu\text{m}} = \int_{2000}^{3333} I_\eta d\eta \end{cases} \quad (1)$$

其中 η 为波数(单位 cm^{-1})、 k_η 为光谱消光系数、 $\phi = (T, p, x)$ 为所有影响 k_η 的气体热力学状态参数(温度 T 、压力 p 和各组分的摩尔分数 x)、 $k_{s\eta}$ 为光谱散射系数、 I_η 为光谱辐射亮度、 $I_{b\eta}$ 为黑体光谱辐射亮度(基于普朗特黑体辐射定律, $\int_0^\infty I_{b\eta}(T) d\eta = I_b = \frac{\sigma T^4}{\pi}$, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ 为斯提芬玻尔兹曼常数)、

s 为沿光线传播方向的位置。本文 $k_\eta = k_{s\eta} + \sum_{n=1}^4 k_{n\eta}$ 、 $k_{s\eta} = k_{4s\eta}$, 其中 $k_{n\eta}$ 为各辐射参与性组分的光谱吸收系数,下标 $n=1$ 代表水蒸气、 $n=2$ 代表二氧化

碳——碳氢燃料燃气中的主要辐射参与性介质, $n=3$ 为一氧化碳、 $n=4$ 为气溶胶。本文 k_{nm} 都由逐线计算获得, 其所用气体吸收谱线参数来自 HITEMP 数据库(2010 版); $k_{4s\eta}$ 采用 Mie 散射理论计算^[23]。 k_η 的积分范围设置从 $2\,000 \sim 3\,333\text{ cm}^{-1}$, 代表 $3 \sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 波段的大气红外辐射窗口(构建其他波段的 MSMGWB 模型只需要改变上述积分的波数范围, 如 $8 \sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 波段对应的积分范围为 $715 \sim 1\,250\text{ cm}^{-1}$)。除特殊说明外, 本文所有参数都是基于本地的 ϕ 计算。

喷气发动机燃气喷流中一氧化碳和气溶胶粒子的含量及其发射/散射辐射可忽略(部分加力状态除外, 但不在本文研究范围内); 计算燃气喷流发射辐射在大气中的传输衰减时, 一般不考虑大气自身发射与散射辐射的影响(通常将其视作背景辐射信号单独计算)。由于式(1)是线性的, 因此可改写成

$$\begin{cases} \frac{dI_{nm\bar{g},j}}{ds} = \bar{A}_{nm,j}(T) I_b(T) - k(\bar{g}_{nm,j}, T_0) I_{nm\bar{g},j} \\ I_{3 \sim 5\text{ }\mu\text{m}} = \sum_{n=1}^2 \sum_{m=1}^{M_n} I_{nm} = \sum_{n=1}^2 \sum_{m=1}^{M_n} \sum_{j=1}^{N_{nm}} I_{nm\bar{g},j} \\ \bar{A}_{nm,j}(T) = \frac{1}{I_b(T)} \int_{2000}^{3333} k_{nm\eta} I_{b\eta}(T) H[k_{nm}(\bar{g}_{nm,j}, T_0) - k_{nm\eta}] \cdot H[k_{nm\eta} - k_{nm}(\bar{g}_{nm,j-1}, T_0)] d\eta \\ 0 = \bar{g}_{nm,0} < \bar{g}_{nm,1} < \bar{g}_{nm,2} < \dots < \bar{g}_{nm,j-1} < \bar{g}_{nm,j} < \bar{g}_{nm,j+1} < \dots < \bar{g}_{nm,N_{nm}-1} < \bar{g}_{nm,N_{nm}} < \bar{g}_{nm,N_{nm}+1} = g_{nm}(\infty, T_0) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $g_{nm}(k_{nm}, T_0) = \frac{1}{I_b(T_0)} \int_0^\infty H(k_{nm} - k_{nm\eta}) I_{b\eta}(T_0) d\eta$, H 是 Heaviside 阶梯函数, T_0 是模型的参考温度, $I_b(T) = \int_{2000}^{3333} I_{b\eta}(T) d\eta$, $\frac{\bar{g}_{nm,j}}{g_{nm}(\infty, T_0)}$ 和

$$\frac{1}{I_b(T)} \int_{2000}^{3333} k_{nm\eta} H[k_{nm}(g_{nm}, T_0) - k_{nm\eta}] I_{b\eta}(T) d\eta \bigg|_{\eta \in m} = \frac{1}{I_b(T)} \int_{2000}^{3333} k_{nm\eta} H(k - k_\eta) I_{b\eta}(T) d\eta \bigg|_{\eta \in m} \quad (3)$$

对比文献[21]中的 MSMGWB 模型, 本文的改进在于每个组分的每一个分组的高斯积分格式都是相互独立的, 这样可在综合计算精度相当的情况下大幅提升模型计算效率。但该改进也会大幅增加寻找最优模型参数组合的难度, 因此其模型参数优化平台也要做相应的改进。

1.2 边界条件

式(4)的漫反射灰体固壁边界条件为:

$$\begin{aligned} I_{nm\bar{g},j,w} &= \frac{\varepsilon}{k(\phi_w, \bar{g}_{nm,j}, T_0)} \bar{A}_{nm,j}(\phi_w, T_w) I_b(T_w) + \\ &\frac{1-\varepsilon}{\pi} \int_0^{4\pi} I_{nm\bar{g},j} \max(0, -\mathbf{n}_w \cdot \mathbf{s}) d\Omega \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{dI_{nm\eta}}{ds} = k_{nm\eta} I_{b\eta}(T) - k_\eta I_{nm\eta} \\ I_\eta = \sum_{n=1}^2 I_{nm\eta} \\ k_{3\eta} = k_{4\eta} = k_{4s\eta} = 0 \quad \text{在燃气中} \\ I_{b\eta} = 0 \quad \text{在大气中} \end{cases} \quad (2)$$

其中 I_{nm} 代表由水蒸气($n=1$)或者二氧化碳($n=2$)发射, 但在传输过程中受到全部 4 种组分吸收光谱的衰减的光谱辐射亮度。进一步地, 水蒸气和二氧化碳的吸收光谱可以分成 M_n 个互不相关的子光谱(M_1 与 M_2 的值可以完全不同)。式(2)可进一步变换为

$$\begin{cases} \frac{dI_{nm\eta}}{ds} = k_{nm\eta} I_{b\eta}(T) - k_\eta I_{nm\eta} \\ I_\eta = \sum_{n=1}^2 I_{nm\eta} = \sum_{n=1}^2 \sum_{m=1}^{M_n} I_{nm\eta} \end{cases} \quad (3)$$

利用 k 分布变换, 式(3)可改写成

$\frac{\bar{g}_{nm,j}}{g_{nm}(\infty, T_0)}$ 是与 n 、 m 和 ϕ 无关的常数, 其值基于 N_{nm} 点 Gauss-Legendre 积分格式计算, 详见文献[24], 每个 $\bar{g}_{nm,j}(T_0)$ 对应的 k 值可由式(5)计算:

其中 ε 是灰体壁面的发射率, $\mathbf{n}_w$ 和 $\mathbf{s}$ 分别是壁面外法向单位向量和辐射传输方向, 固壁处热力学状态参数 $\phi_w = (T_w, p_w, x_w)$ 分别代表壁面温度和压力以及紧邻壁面气体的组分摩尔分数, Ω 为 $\mathbf{s}$ 对应的空间立体角。

1.3 光谱吸收系数分组方法

光谱吸收系数的分组是决定 MSMGWB 模型在非均匀气体中计算精度的首要因素。其原理是尽可能保证每一个分组内的吸收光谱在不同气体热力学状态参数组合下都具有关联 k 特性。本文构建 MSMGWB 模型的光谱吸收系数间隔的宽度设置为 0.005 cm^{-1} 。对第 n 个组分的光谱吸收系数间隔进行分组的方法如下:

步骤 1 选择 MSMGWB 模型使用环境中的典型热力学状态参数组合 $\phi_i = (T_i, p_i, x_i)$, 如表 1, 其中 $\phi_{1\sim5}$ 为燃气的典型热力学状态参数, $\phi_{6\sim9}$ 为环境空气的典型热力学状态参数。

表 1 MSMGWB 模型光谱吸收系数分组热力学状态样本点
Table 1 Thermodynamic state samples used for calculation of spectral absorption coefficient division of M SMGWB models

状态点	压力/Pa	温度/K	$x(\text{H}_2\text{O})$	$x(\text{CO}_2)$	$x(\text{CO})/10^{-7}$
ϕ_1	202 650	1900	0.12	0.12	0
ϕ_2	101 325	1900	0.12	0.12	0
ϕ_3	50 662.5	1 500	0.1	0.1	0
ϕ_4	101 325	900	0.08	0.08	0
ϕ_5	50 662.5	900	0.08	0.08	0
ϕ_6	101 325	300	0.034	0.000 34	1.42
ϕ_7	101 325	300	0.006 8	0.000 34	1.42
ϕ_8	91 192.5	293	0.02	0.000 34	1.42
ϕ_9	50 662.5	263	0.002	0.000 34	1.42

步骤 2 为第 n 个组分的各光谱吸收系数随机分配所属分组。

步骤 3 计算出 M_n 个对应分组的标记值

$$\xi_{nm\eta} = \sum_{i=1\sim5} \sum_{i'=6\sim9} \xi_{nm\eta,i,i'}^2 = \sum_{i=1\sim5} \sum_{i'=6\sim9} \ln^2 \left\{ \frac{k_{\eta}(\phi_{i'})}{k[\phi_{i'}, g_{nm}(\phi_i, k_{\eta}, T_0), T_0]} \right\} \quad (7)$$

然后将该光谱吸收系数调整到对应 $\xi_{nm\eta}$ 值最小的组。

步骤 4 重复步骤 3, 直到该次迭代只有不足 0.1% 的光谱吸收系数改变所属分组。

2 模型参数优化方法

文中第 1.3 节的光谱吸收系数分组迭代过程与标准 k -means 聚类非常类似, 唯一区别是式(7)定义的光谱吸收系数分组归属判别依据基于关联 k 特性而非 k -means 聚类的相似性。因此, 初始化(文中第 1.3 节步骤 2)对最终分组结果的影响不能忽略。由于无法套用各类克服 k -means 聚类初始化影响的成熟算法, 本文采用如下方法获取 MSMGWB 模型的最优分组组合和匹配的高斯积分格式:

2.1 优化目标函数

优化目标函数基于 MSMGWB 模型在 56 个一维算例中的计算精度建立, 其基准解为逐线计

算结果。如图 1 所示, 上述算例可分为两类。第一类算例(42 个), 计算固定厚度的均匀热燃气层(下标 h, 下同)的法向发射辐射在均匀环境空气(下标 a)中的衰减特性随传输距离的变化; 第二类算例(14 个), 计算黑体固壁(下标 w)与相邻固定厚度的热燃气和冷燃气层(下标 c)的叠加法向发射辐射在均匀环境空气中的衰减特性随传输距离的变化。其中 L 为辐射传输距离(气体层法向厚度), T_w 为黑体固壁温度。两类算例中燃气的辐射发射与吸收介质为水蒸气和二氧化碳; 空气的辐射吸收介质为水蒸气、二氧化碳、一氧化碳和气溶胶, 忽略空气的发射辐射。

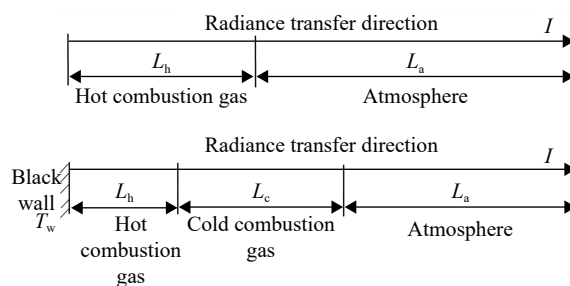


图 1 两种一维算例示意图

Fig. 1 Sketches of two kinds of 1D cases

图 2 为 56 个一维算例的燃气与环境空气热力学状态参数分布散点图, 其覆盖了主流喷气式飞行器远程红外特性计算涉及的固壁、燃气与不同海拔和气象条件下(极端天气除外)环境空气的热力学状态参数组合。其中 T 为温度、 p 为压力、 x 为组分的摩尔分数, 下标 1 代表水蒸气、2 为二氧化碳。受限于航空煤油的成分, 燃气中水蒸气和二氧化碳的摩尔浓度比在 1 左右(图 2(a)); 而环境空气中二氧化碳的摩尔浓度几乎恒等于 3.4×10^{-4} , 也就是算例集中空气的水蒸气和二氧化碳摩尔比范围为 0.024~177.2(图 2(b)), 燃气与空气温度、压力的差异(图 2(c))远小于辐射参与性组分比例的差异。

图 3 为一维算例中涉及的 3 种气溶胶的 2~5 μm 波段光谱消光因子(d 为粒子直径, m 为气溶胶粒子的复折射率, i 为虚数单位), 可覆盖不同种类和尺寸的气溶胶的光谱吸收特性。

56 个一维算例在 3.7~4.8、3~5 μm 和 8~14 μm 波段的计算参数见附录 A。由于气溶胶的吸收能力在 2~2.5 μm 波段远强于上述三个波段(图 3), 导致大气中气溶胶浓度较高时燃气在该波段的远程红外信号非常微弱。因此部分含气溶

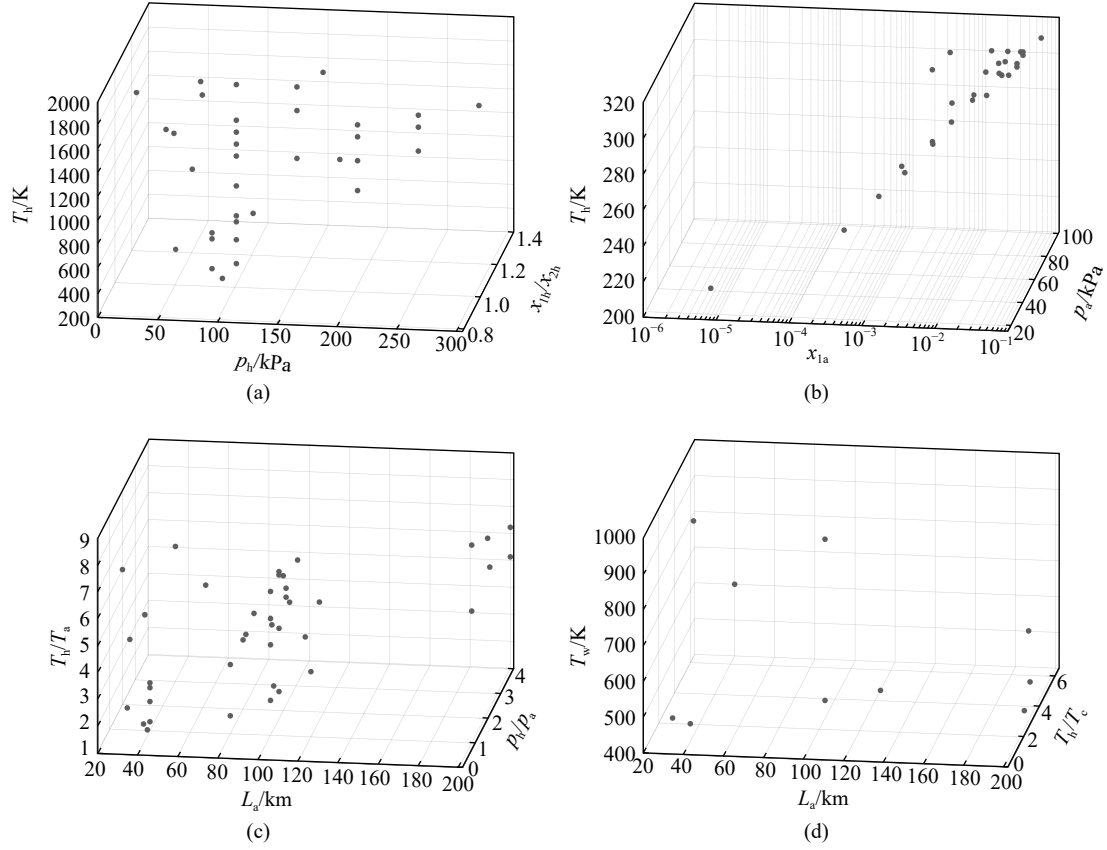


图2 56个一维算例的燃气与空气热力学状态参数分布散点图

Fig. 2 Thermodynamic state parameter distributions of combustion gas and atmosphere in 56 1D cases

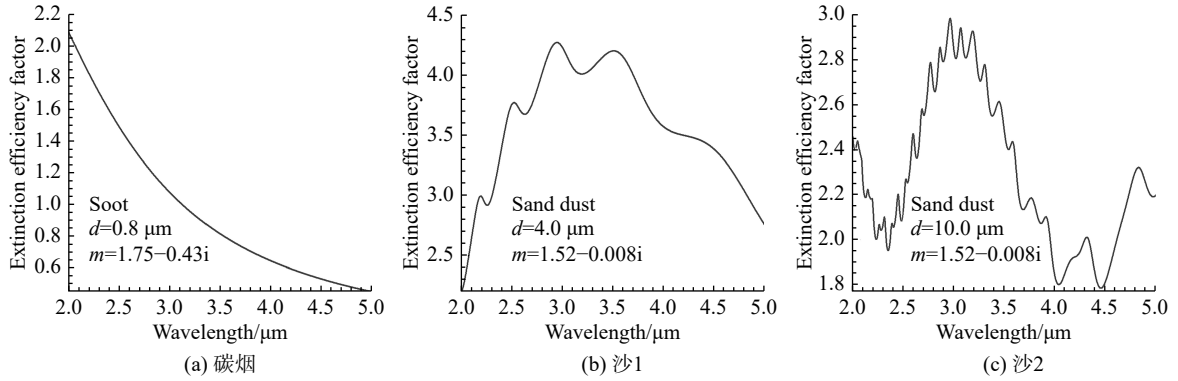


图3 一维算例中三种气溶胶在2~5 μm波段的光谱消光因子

Fig. 3 2—5 μm wave band extinction efficiency factors of three kinds of aerosols involved in the 1D cases

胶算例在2~2.5波段的最大 L_a 值低于上述三个波段(其他计算参数相同)。考虑到7.7~9.7 μm波段高温燃气和固壁的发射红外信号较弱,该波

段56个算例辐射在环境空气中的最大传输距离限制在60 km(其他计算参数相同)。

优化目标函数式如下:

$$f = \sum_{j=1}^{56} \begin{cases} E_{j,\max} & E_{j,\max} \leq 0.08 \\ 0.08 + 10(E_{j,\max} - 0.08) & 0.08 < E_{j,\max} < 0.12 \\ 0.48 + 100(E_{j,\max} - 0.12) & E_{j,\max} \geq 0.12 \end{cases} \quad (8)$$

其中 j 是一维算例的序列号。

2.2 优化过程

二氧化碳和水蒸气的光谱吸收系数分组及其对应的高斯积分格式组合的优化过程如图4。为

$$E_{j,\max} = \max \left[\left| \frac{I_{j,\text{MSGWB}}(L_a) - I_{j,\text{LBL}}(L_a)}{I_{j,\text{LBL}}(L_a)} \right| \right] \quad (9)$$

为了避免重复计算,对于每个一维算例不同 L_a 对应的各 $I_{j, nm\bar{g}, \bar{j}}(L_a)$ 和 $I_{j, LBL}(L_a)$ 进行了预计算与存储。

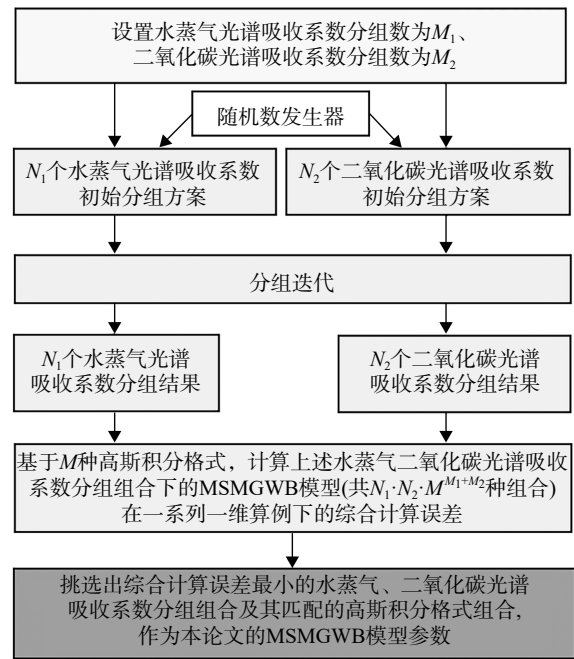


图 4 参数优化流程图

Fig. 4 Parameter optimization flow chart

图 4 中最后两步需计算 $N_1 \cdot N_2 \cdot M^{M_1+M_2}$ 种光谱吸收系数分组与高斯积分格式组合下的优化目标函数值, 计算量非常巨大。由于不同组合间的计算相互独立, 因此更适合使用 GPU(graphics processing unit)计算。本文利用 RTX 3080 GPU 对该部分进行计算。RTX 3080 与双 AMD EPYC 7H12 CPU(central processing unit, 共 128 核 256 线程)的计算时间对比见图 5。相比 CPU, GPU 不善于处理分支预测问题, 因此两个理论计算量接近, 但分支预测量不同的模型参数优化任务的 GPU 计算时间完全不同, 但都远小于 128 核 256 线程的 CPU 的计算时间。

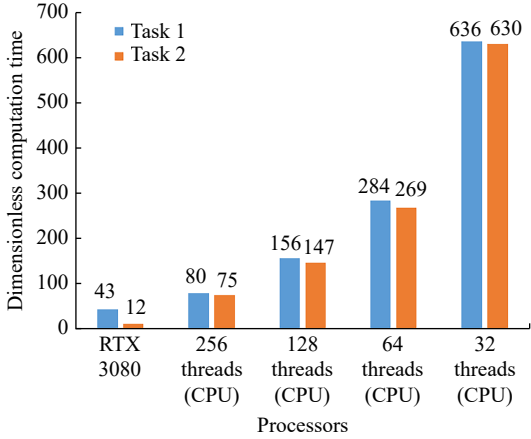


图 5 GPU 与 CPU 计算时间对比

Fig. 5 Optimization efficiency comparison of GPU and CPU

3 优化结果

根据不同波段, 二氧化碳与水蒸气对总辐射的贡献度的不同, 设定的不同波段的水蒸气与二氧化碳光谱吸收系数分组数和模型参考温度见表 2。优化后的 MSMGWB 模型与其他模型在上述 56 个算例中的计算精度与计算量对比见表 2 和图 6, 其中模型求解的 RTE 总数正比于模型的计算量。可以看出, 对比文献 [21] 中的 MSMGWB 模型, 本文的优化方法获得了更高的模型计算精度和效率; 相比国外工程领域最新的多线组统计窄带模型 SNBFG(fictitious gas-based statistical narrow-band model, 之后的数字为窄带波数带宽, 下同), 优化后的 MSMGWB 模型在 2~2.5、3.7~4.8、3~5、7.7~9.7 μm 和 8~14 μm 五个常用大气窗口波段都有不同程度的计算精度和效率优势, 尤其是 3~5 μm 和 3.7~4.8 μm 波段。对比国内主流目标远程红外特性计算方法(目标窄带发射辐射的大气透

表 2 不同波段 MSMGWB 模型参数的优化结果及与其他模型对比

Table 2 f and theoretical computational costs of each model under various wave bands

波段/ μm	MSMGWB					SNBFG		NB		
	M_1	M_2	T_0/K	f	RTE 总数	f	RTE 总数	f	RTE 总数	带宽/ cm^{-1}
2~2.5	15	5	300	17.35	123	54.21	280	1 813.4	800	5.0
3.7~4.8	5	10	1 300	13.33	87	130.9	217	371.0	496	5.0
3~5	5	10	1 900	5.59	70	216.1	350	424.0	800	6.7
3~5 ^[21]	2	10	750	23.17	134					
7.7~9.7	11	2	200	16.72	61	24.23	70	1 489.9	200	5.36
8~14	10	10	1 900	7.01	95	12.86	140	1 213.4	428	5.0

射率加权和法, 记作NB), 计算精度和效率的优势更明显。且当NB模型带宽达到约 5 cm^{-1} 后, 继续降低带宽只会进一步增加模型计算量, 不会对模型计算精度产生明显影响。部分一维算例的计算结果见图7, 其中纵坐标的数值为辐射亮度除以温度为 T_b 的黑体在对应波段的辐射亮度之后得到的无量纲值。

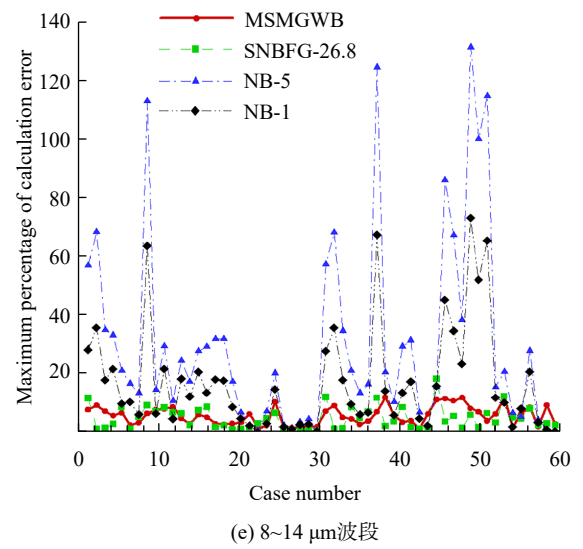
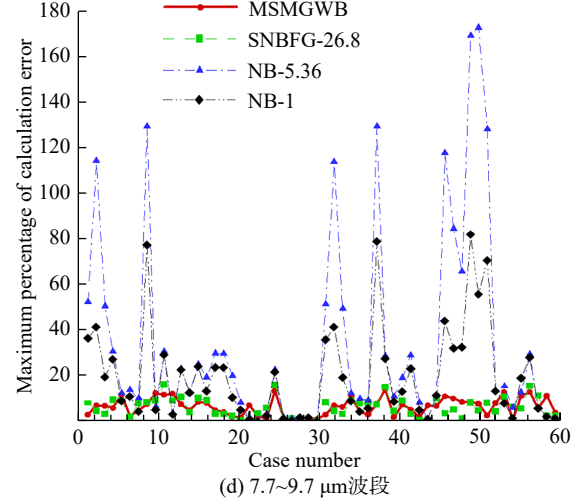
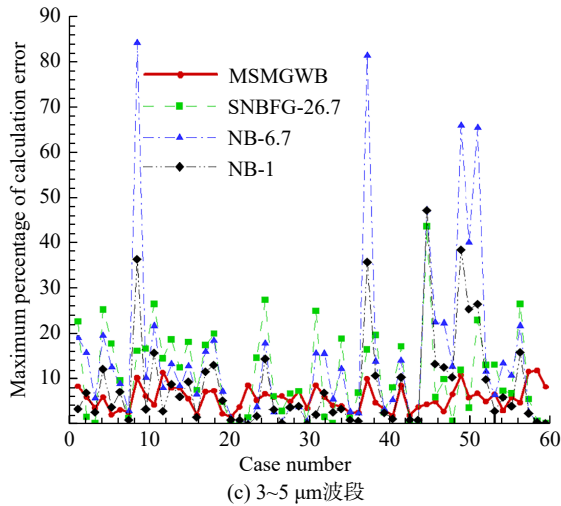
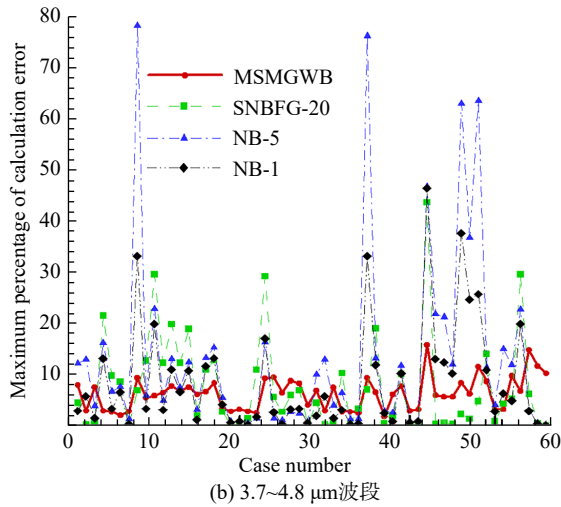
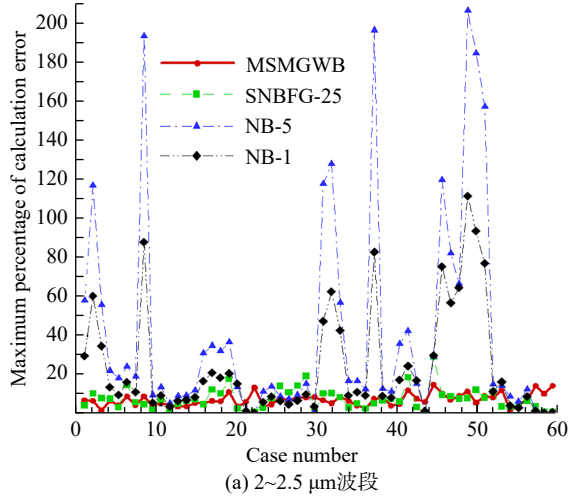
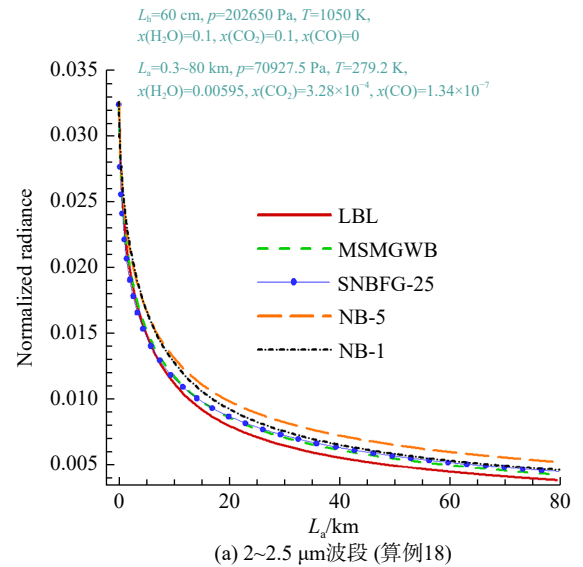


图6 不同气体辐射模型远程红外特性一维算例计算精度对比

Fig. 6 Calculation accuracies of various models in each 1D cases under different wave bands



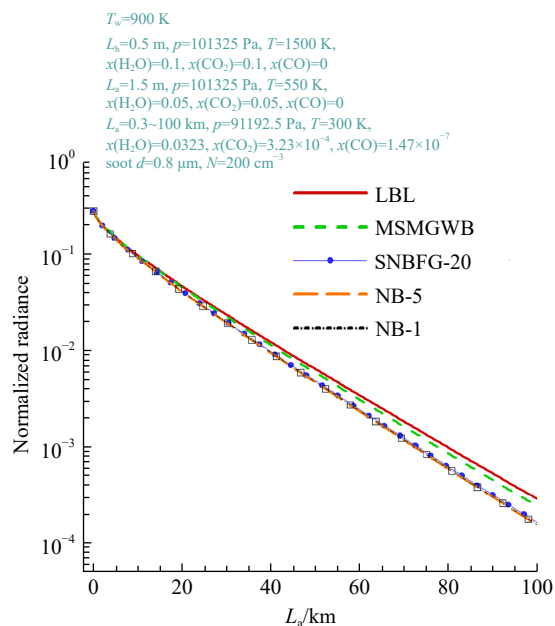
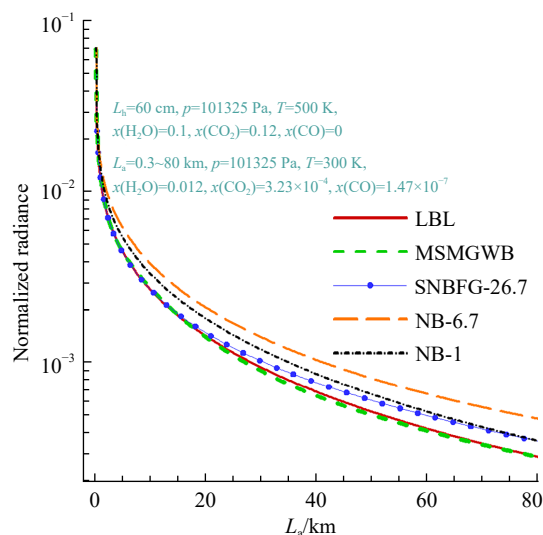
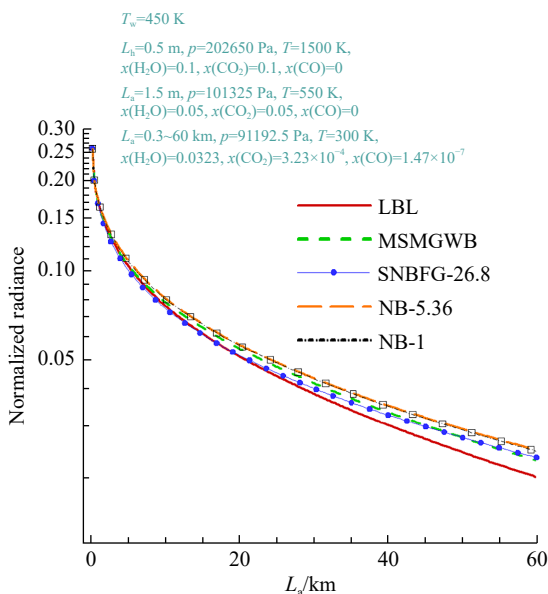
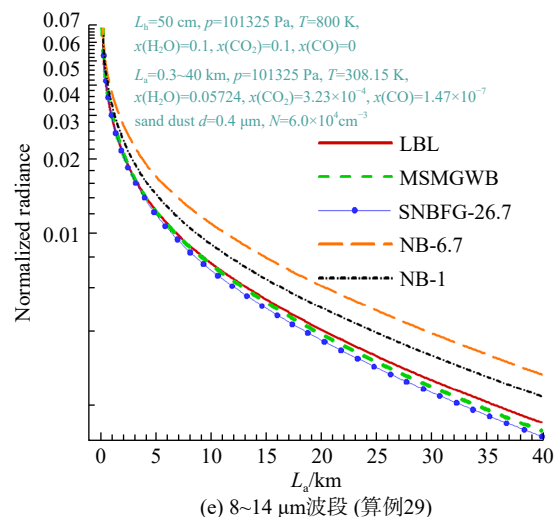
(b) 3.7~4.8 μm 波段 (算例42)(c) 3~5 μm 波段 (算例48)(d) 7.7~9.7 μm 波段 (算例23)(e) 8~14 μm 波段 (算例29)

图 7 部分一维算例中各模型计算结果对比

Fig. 7 Calculation results of various models in a part of 1D cases

4 优化结果的三维验证

本文使用参考文献[19]中的三维验证算例:典型喷气式发动机用跨声速排气系统由一个收缩的外罩、两段收缩的主喷管以及固壁冷却系统(多孔隔热屏和冷却风道)组成。喷管内流场与尾喷流中包含了一系列激波与膨胀波,主喷管出口的15个V形尾缘导致其尾喷流与环境空气混合层的形状非常复杂——两者共同作用形成了压力、温度和组分摩尔分数剧烈变化的排气系统内外流场。排气系统出口直径为791 mm,外罩最大直径为1 054 mm。整个内外流场的计算网格总数约为92万,计算得到的流场热力学状态参数空间分布与主喷管/隔热屏的固体结构温度分布如图8所示。

分别对该排气系统在2~2.5、3.7~4.8、3~5、7.7~9.7 μm 和8~14 μm 五个波段的远程红外成像进行计算。排气系统工作在7 km高空,红外探测器位于地面,0~7 km的大气热力学状态参数见表3。成像的方向与喷管轴线成45°角。排气系统固体壁面的表面发射率设置为0.8,生成红外图像的像素分辨率为1 700像素×80像素。计算时不考虑固壁反射辐射(作为计算精度基准的LBL模型计算量过于巨大,考虑固壁反射辐射的计算开销难以负担),环境空气包含有无气溶胶两种工况。计算使用的射线追踪算法与每条射线上的MSMGWB模型参数获取方法与文献[19]相同。

图9为环境空气中无气溶胶时的排气系统不同波段远距离红外成像,图中 I 表示辐射亮度。在2~2.5 μm 波段,喷管内壁面高温区辐射亮度

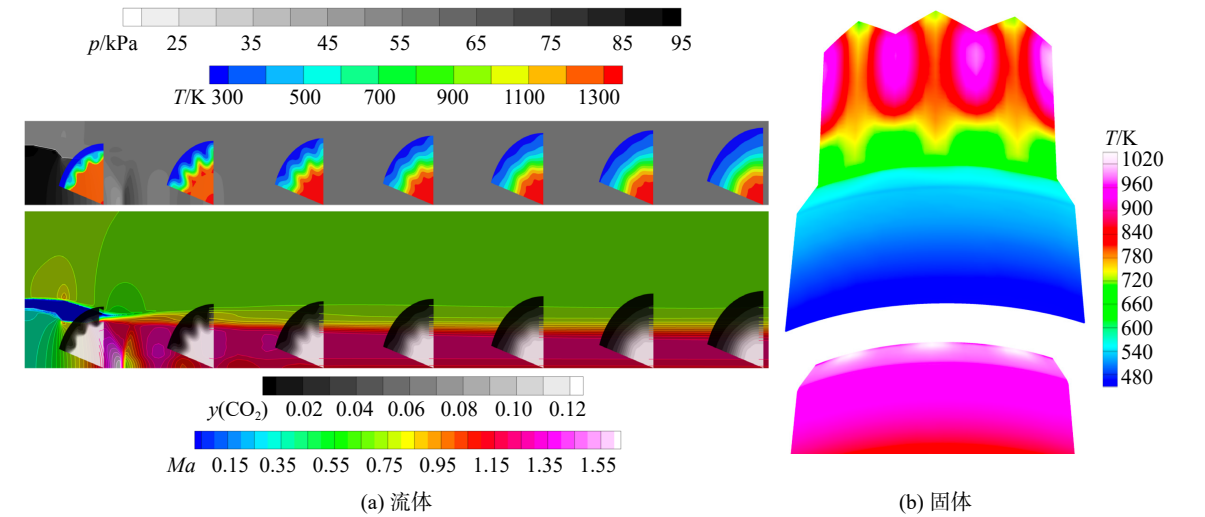


图 8 跨声速排气系统的内外流场热力学状态参数空间分布与主喷管、隔热屏结构温度分布
Fig. 8 Transonic exhaust system's internal and external flow field and temperature distributions of primary nozzle and its heat shield

表 3 0~7 km 高度的大气热力学状态参数
Table 3 Thermodynamic state parameters in the 0—7 km atmosphere

高度/km	压力/Pa	温度/K	$x(\text{H}_2\text{O})/10^{-3}$	$x(\text{CO}_2)/10^{-4}$	$x(\text{CO})/10^{-7}$
6~7	45 829.30	258.13	1.278	3.299	1.268
5~6	52 243.17	264.36	1.884	3.296	1.294
4~5	59 305.52	270.35	3.052	3.292	1.304
3~4	67 127.81	276.35	4.930	3.286	1.325
2~3	75 851.90	282.35	7.863	3.276	1.365
1~2	85 477.77	287.56	11.70	3.263	1.410
0~1	96 056.10	292.06	16.13	3.248	1.453

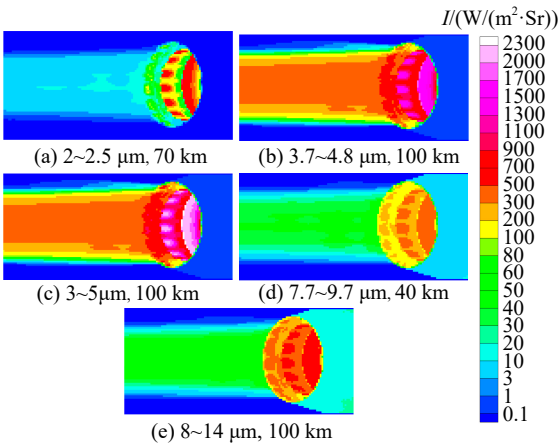


图 9 无气溶胶环境下排气系统不同波段远距离红外成像
Fig. 9 Remote infrared imaging of exhaust system under different wave bands under environment excluding aerosol

较大, 喷流辐射亮度非常低; 在 3~5 μm 及 3.7~4.8 μm 波段, 尾喷流的辐射占绝大部分, 但局部辐射亮度最高点来自喷管高温内壁面; 在 7.7~9.7 μm 与 8~14 μm 波段, 来自喷管内壁面和尾喷

流的辐射虽然明显低于 3~5 μm 及 3.7~4.8 μm 波段, 但来自排气系统低温外蒙皮的辐射远高于其他波段。

当环境空气中包含海盐气溶胶时, 排气系统 20 km 远 5 个波段的红外成像计算结果如图 10。中纬度环境下, 海盐气溶胶在不同海拔高度的光谱消光系数(即 $k_{4\eta} + k_{4s\eta}$)计算方法详见文献[23, 25]。此时 20 km 大气传输距离导致的红外信号衰减已明显高于上述无气溶胶 40~100 km 传输距离的衰减, 可见气溶胶对目标远程红外特性的影响不可以忽视。在 2~2.5 μm 波段, 气溶胶消光系数最大, 辐射衰减最剧烈, 导致此波段不适合用于喷气飞行器的远程红外探测。

图 11 和表 4 分别为排气系统在上述波段的远程红外成像 MSMGWB 模型计算相对误差 $\left(\frac{I_{\text{MSMGWB}} - I_{\text{LBL}}}{I_{\text{LBL}}} \times 100\%\right)$ 分布和 1 700 $\times$ 80 个成像像素点上的最大正/负相对误差值。 I_{MSMGWB} 和 I_{LBL} 分别代表利用 MSMGWB 和 LBL 模型得到的在各个成像像素点上的辐射亮度, L 为红外成像距

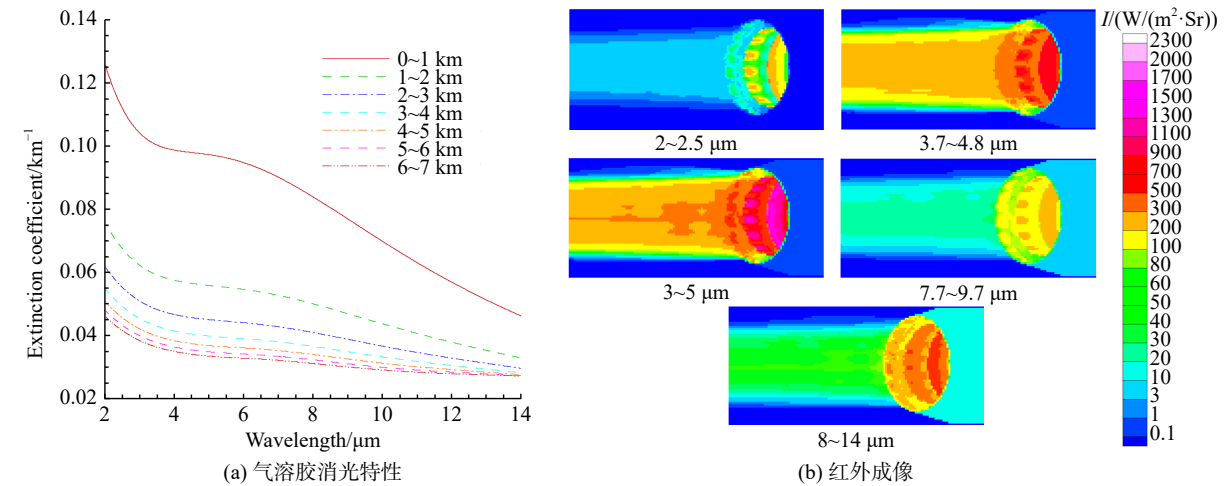


图 10 不同海拔高度海盐气溶胶光谱消光系数分布与含海盐气溶胶环境下排气系统不同波段 20 km 远距离红外成像
Fig. 10 Spectral extinction coefficients of sea salt aerosols at various altitudes, and 20 km remote infrared imaging of exhaust system under different wave bands under environment containing sea salt aerosol

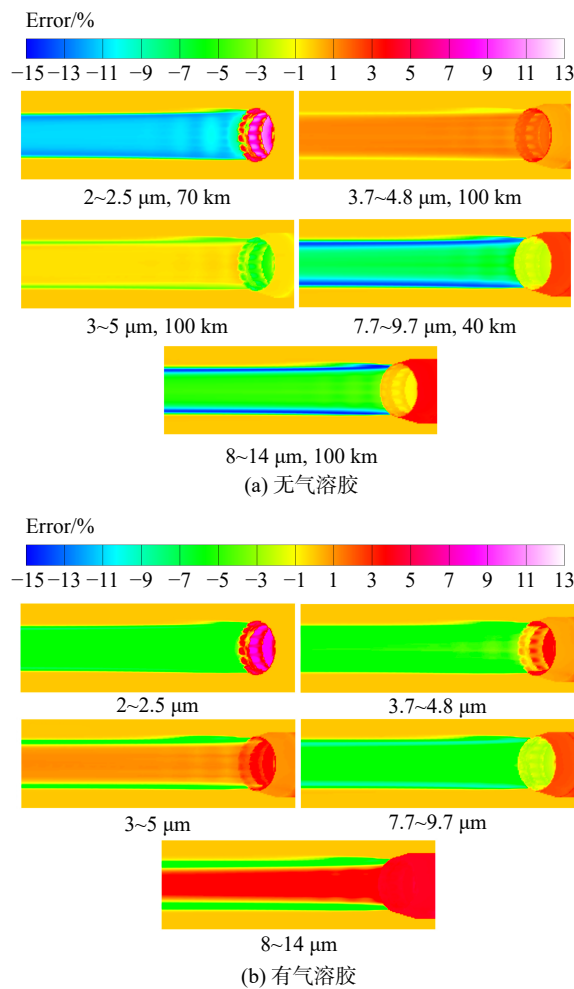


图 11 有无气溶胶环境下的 MSMGWB 模型远程红外成像计算误差分布
Fig. 11 Error distributions of MSMGWB model in calculation of remote infrared imaging under environment containing and excluding aerosol

表 4 三维算例 MSMGWB 模型远程红外成像最大计算误差
Table 4 Maximum calculation error of MSMGWB model in the 3D case

波段/ μm	最大计算误差/%	
	含海盐气溶胶环境	无气溶胶环境
2~2.5	-8.0~+10.2(L=20 km)	-12.2~+11.6(L=70 km)
3.7~4.8	-4.3~+4.8(L=20 km)	-1.3~+3.9(L=100 km)
3~5	-7.5~+3.7(L=20 km)	-8.3~+0.3(L=100 km)
7.7~9.7	-9.1~+2.5(L=20 km)	-13.8~+3.5(L=40 km)
8~14	-7.4~+5.1(L=20 km)	-14.8~+3.8(L=100 km)

离。可以看出优化后的 MSMGWB 模型胜任有/无气溶胶环境下的排气系统远距离红外成像计算。

5 结 论

本文对文献 [21] 中的 MSMGWB 模型及其模型参数优化方法进行了改进,改进后的 MSMGWB 模型相比原始模型,对喷气式飞行器跨声速排气系统及其尾喷流的 3~5 μm 波段远程红外特性计算精度接近,但计算量降低了将近 50%。在此基础上,将 MSMGWB 模型扩展到了 2~2.5、3.7~4.8、7.7~9.7 μm 和 8~14 μm 波段。一系列一维与三维计算结果表明,相比于 SNBFG 模型与国内主流的目标远程红外特性计算方法,MSMGWB 模型在上述 5 个常用大气窗口波段都具有更高的综合计算精度和计算效率。尤其在 3~5 μm 和 3.7~4.8 μm 波段,MSMGWB 模型相比 SNBFG 模型在综合计算精度提升近一倍的同时,计算效率分别提升了 4 倍和 1.5 倍;相比国内主流的目标远程红外特性计算方法,综合计算精

度提升更大,计算效率则提升了一个量级左右。

其他结论包括:对真实含冷却结构的航空燃气轮机跨声速排气系统的多波段红外成像计算结果表明:①气溶胶对目标发射辐射的大气衰减特性影响很大,在远程红外成像计算过程中不可忽略;②航空燃气轮机跨声速排气系统在 $2\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波段的远程红外特征远小于其他几个波段;③中红外窗口波段($3\sim 5\ \mu\text{m}$ 与 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 波段)适合探测喷管高温部件与尾喷流的红外特征,而远红外波段($7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}$ 与 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段)适合探测喷管外蒙皮的红外特征。

国内主流的目标大气窗口波段远程红外特性计算方法,即计算目标窄带发射辐射的大气透射率加权,在窄带宽度 $5\ \text{cm}^{-1}$ 量级达到计算精度的极限,进一步降低窄带宽度会大幅增加计算量,但对计算精度的改善微乎其微。

参考文献:

- [1] HARTMANN J M, LEON R L D, TAINE J. Line-by-line and narrow-band statistical model calculations for H_2O [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1984, 32(2): 119-127.
- [2] SOUFIANI A, TAINE J. High temperature gas radiative property parameters of statistical narrow-band model for H_2O , CO_2 and CO , and correlated-K model for H_2O and CO_2 [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(4): 987-991.
- [3] ANDRÉ F. The ℓ -distribution method for modeling non-gray absorption in uniform and non-uniform gaseous media[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2016, 179: 19-32.
- [4] MODEST M F. Narrow-band and full-spectrum k -distributions for radiative heat transfer-correlated- k vs. scaling approximation[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2003, 76(1): 69-83.
- [5] MARIN O, BUCKIUS R O. Wide band correlated- k approach to thermal radiative transport in nonhomogeneous media[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1997, 119(4): 719-729.
- [6] MODEST M F. Radiative heat transfer[M]. 3rd ed. Pittsburgh, US: Academic Press, 2013.
- [7] MODEST M F, ZHANG Hongmei. The full-spectrum correlated- k distribution for thermal radiation from molecular gas-particulate mixtures[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2002, 124(1): 30-38.
- [8] RIVIÈRE P, SOUFIANI A, TAINE J. Correlated- k fictitious gas model for H_2O infrared radiation in the Voigt regime[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1995, 53(3): 335-346.
- [9] ZHANG Hongmei, MODEST M F. Scalable multi-group full-spectrum correlated- k distributions for radiative transfer calculations[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2003, 125(3): 454-461.
- [10] KHODYKO Y V, KURSKOV A A, ANTIPOROVICH N V. Multigroup method for the calculation of selective IR radiation transfer in nonhomogeneous media[J]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 1986, 44(3): 284-288.
- [11] PIERROT L, RIVIÈRE P, SOUFIANI A, et al. A fictitious-gas-based absorption distribution function global model for radiative transfer in hot gases[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1999, 62(5): 609-624.
- [12] SOUFIANI A, ANDRÉ F, TAINE J. A fictitious-gas based statistical narrow-band model for IR long-range sensing of H_2O at high temperature[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2002, 73(2/3/4/5): 339-347.
- [13] WEST R, CRISP D, CHEN L. Mapping transformations for broadband atmospheric radiation calculations[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1990, 43(3): 191-199.
- [14] ANDRÉ F, HOU Longfeng, ROGER M, et al. The multispectral gas radiation modeling: a new theoretical framework based on a multidimensional approach to k -distribution methods[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 147: 178-195.
- [15] ANDRÉ F, SOLOVJOV V P, WEBB B W, et al. Spectral mapping method based on intervals of comonotonicity for modelling of radiative transfer in non-uniform gaseous media[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 229: 33-39.
- [16] ZHANG Hua. An optimal approach to overlapping bands with correlated k distribution method and its application to radiative calculations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D20): 4641.
- [17] SHI Guangyu, XU Na, WANG Biao, et al. An improved treatment of overlapping absorption bands based on the correlated k distribution model for thermal infrared radiative transfer calculations[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(8): 435-451.
- [18] PIERROT L, SOUFIANI A, TAINE J. Accuracy of narrow-band and global models for radiative transfer in H_2O , CO_2 , and $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ mixtures at high temperature[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1999, 62(5): 523-548.
- [19] HU Haiyang, WANG Qiang. Improved spectral absorption coefficient grouping strategy of wide band k -distribution model used for calculation of infrared remote sensing signal of hot exhaust systems[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 213: 17-34.
- [20] WANG Qiang, LI Yuxuan, HU Haiyang. Numerical simulation of remote infrared imaging for marine exhaust system using wide-band k -distribution model combined with a new grouping method for spectral sub-intervals[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2019, 96: 276-290.
- [21] HU Haiyang, LI Yihan, WEI Ziyu, et al. Parameter optimization for MSMGWB model used to calculate infrared remote sensing signals emitted by hot combustion gases of hydrocarbon fuel[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, 249: 107003.1-107003.17.
- [22] 谈和平, 夏新林, 刘林华. 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.
- [23] WISCOMBE W J. Improved Mie scattering algorithms[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(9): 1505-1509.
- [24] SOLOVJOV V P, ANDRÉ F, LEMONNIER D, et al. The rank correlated SLW model of gas radiation in non-uniform media[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 197: 26-44.
- [25] LAUSSAC S, PIAZZOLA J, TEDESCHI G, et al. Development of a fetch dependent sea-spray source function using aerosol concentration measurements in the North-Western Mediterranean[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 193: 177-189.

(编辑:王碧珺)

附录 A

表 A1 56 个一维算例的计算参数
Table A1 Calculation parameters of 56 1D cases

算例	热燃气层	冷燃气层	环境空气
1	$L_h=50\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=800\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 40\text{ km}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=308.15\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.057\ 24$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$
2	$L_h=50\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=600\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 40\text{ km}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=288.15\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.001\ 84$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$
3	$L_h=50\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=800\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 40\text{ km}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=288.15\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.001\ 84$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$
4	$L_h=80\text{ cm}$, $p=151\ 987.5\text{ Pa}$, $T=1\ 300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 100\text{ km}$, $p=91\ 192.5\text{ Pa}$, $T=298.15\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.032\ 26$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ ($7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
5	$L_h=80\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=1\ 300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 100\text{ km}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=298.15\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.032\ 26$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ ($7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
6	$L_h=80\text{ cm}$, $p=202\ 650\text{ Pa}$, $T=1\ 300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 100\text{ km}$, $p=81\ 060\text{ Pa}$, $T=285.2\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.009\ 59$, $x(\text{CO}_2)=3.27\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.39\times 10^{-7}$ ($7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
7	$L_h=80\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=1\ 300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 100\text{ km}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=298.15\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.003\ 226$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ ($7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
8	$L_h=80\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=400\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.11$, $x(\text{CO}_2)=0.11$		$L_a=0.3\sim 40\text{ km}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.032\ 3$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$
9	$L_h=80\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=1\ 600\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.11$, $x(\text{CO}_2)=0.11$		$L_a=0.3\sim 100\text{ km}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.032\ 3$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ ($7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
10	$L_h=80\text{ cm}$, $p=202\ 650\text{ Pa}$, $T=1\ 600\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.11$, $x(\text{CO}_2)=0.11$		$L_a=0.3\sim 100\text{ km}$, $p=91\ 192.5\text{ Pa}$, $T=300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.032\ 3$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ ($7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
11	$L_h=80\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=1\ 900\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.12$, $x(\text{CO}_2)=0.12$		$L_a=0.3\sim 100\text{ km}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.032\ 3$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ ($7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
12	$L_h=80\text{ cm}$, $p=151\ 987.5\text{ Pa}$, $T=1\ 900\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.12$, $x(\text{CO}_2)=0.12$		$L_a=0.3\sim 100\text{ km}$, $p=91\ 192.5\text{ Pa}$, $T=300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.032\ 3$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ ($7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
13	$L_h=80\text{ cm}$, $p=151\ 987.5\text{ Pa}$, $T=1\ 900\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.12$, $x(\text{CO}_2)=0.12$		$L_a=0.3\sim 100\text{ km}$, $p=91\ 192.5\text{ Pa}$, $T=294.2\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.018\ 4$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ ($7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
14	$L_h=70\text{ cm}$, $p=162\ 120\text{ Pa}$, $T=1\ 800\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.14$, $x(\text{CO}_2)=0.12$		$L_a=0.3\sim 100\text{ km}$, $p=81\ 060\text{ Pa}$, $T=300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.03$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ ($7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
15	$L_h=60\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=1\ 050\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 80\text{ km}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=294.2\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.018\ 4$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ ($7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)

续表			
算例	热燃气层	冷燃气层	环境空气
16	$L_h=60\text{ cm}, p=202\ 650\text{ Pa}, T=1\ 050\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.10, x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 80\text{ km}, p=91\ 192.5\text{ Pa}, T=294.2\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.018\ 4, x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4},$ $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}(7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}\text{ 时})$ $L_a=0.3\sim 60\text{ km})$
17	$L_h=60\text{ cm}, p=202\ 650\text{ Pa}, T=1\ 050\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.10, x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 80\text{ km}, p=101\ 325\text{ Pa}, T=294.2\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.018\ 4, x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4},$ $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}(7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}\text{ 时})$ $L_a=0.3\sim 60\text{ km})$
18	$L_h=60\text{ cm}, p=202\ 650\text{ Pa}, T=1\ 050\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.10, x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 80\text{ km}, p=70\ 927.5\text{ Pa}, T=279.2\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.005\ 95, x(\text{CO}_2)=3.28\times 10^{-4},$ $x(\text{CO})=1.34\times 10^{-7}(7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}\text{ 时})$ $L_a=0.3\sim 60\text{ km})$
19	$L_h=100\text{ cm}, p=42\ 556.5\text{ Pa}, T=1\ 500\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.08, x(\text{CO}_2)=0.08$		$L_a=0.3\sim 200\text{ km}, p=42\ 556.5\text{ Pa}, T=254.7\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.001\ 02, x(\text{CO}_2)=3.3\times 10^{-4},$ $x(\text{CO})=1.25\times 10^{-7}(7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}\text{ 时})$ $L_a=0.3\sim 60\text{ km})$
20	$L_h=100\text{ cm}, p=17\ 934.53\text{ Pa}, T=1\ 800\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.10, x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 200\text{ km}, p=17\ 934.53\text{ Pa}, T=215.8$ $\text{K}, x(\text{H}_2\text{O})=8.01\times 10^{-6}, x(\text{CO}_2)=3.3\times 10^{-4},$ $x(\text{CO})=6.38\times 10^{-8}(7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}\text{ 时})$ $L_a=0.3\sim 60\text{ km})$
21	$L_h=50\text{ cm}, p=101\ 325\text{ Pa}, T=1\ 500\text{ K},$ $T_w=900\text{ K}, x(\text{H}_2\text{O})=0.10, x(\text{CO}_2)=0.10$	$L_c=150\text{ cm}, p=101\ 325\text{ Pa}, T=550\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.05, x(\text{CO}_2)=0.05$	$L_a=0.3\sim 100\text{ km}, p=91\ 192.5\text{ Pa}, T=300\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.032\ 3, x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4},$ $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}(7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}\text{ 时})$ $L_a=0.3\sim 60\text{ km})$
22	$L_h=50\text{ cm}, p=101\ 325\text{ Pa}, T=1\ 500\text{ K},$ $T_w=450\text{ K}, x(\text{H}_2\text{O})=0.10, x(\text{CO}_2)=0.10$	$L_c=150\text{ cm}, p=101\ 325\text{ Pa}, T=550\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.05, x(\text{CO}_2)=0.05$	$L_a=0.3\sim 100\text{ km}, p=91\ 192.5\text{ Pa}, T=300\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.032\ 3, x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4},$ $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}(7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}\text{ 时})$ $L_a=0.3\sim 60\text{ km})$
23	$L_h=50\text{ cm}, p=202\ 650\text{ Pa}, T=1\ 500\text{ K},$ $T_w=450\text{ K}, x(\text{H}_2\text{O})=0.10, x(\text{CO}_2)=0.10$	$L_c=150\text{ cm}, p=101\ 325\text{ Pa}, T=550\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.05, x(\text{CO}_2)=0.05$	$L_a=0.3\sim 100\text{ km}, p=91\ 192.5\text{ Pa}, T=300\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.032\ 3, x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4},$ $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}(7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}\text{ 时})$ $L_a=0.3\sim 60\text{ km})$
24	$L_h=50\text{ cm}, p=253\ 312.5\text{ Pa}, T=1\ 700\text{ K},$ $T_w=650\text{ K}, x(\text{H}_2\text{O})=0.10, x(\text{CO}_2)=0.10$	$L_c=300\text{ cm}, p=101\ 325\text{ Pa}, T=550\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.05, x(\text{CO}_2)=0.05$	$L_a=0.3\sim 200\text{ km}, p=62\ 821.5\text{ Pa}, T=273.2\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.003\ 8, x(\text{CO}_2)=3.29\times 10^{-4},$ $x(\text{CO})=1.31\times 10^{-7}(7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}\text{ 时})$ $L_a=0.3\sim 60\text{ km})$
25	$L_h=50\text{ cm}, p=151\ 987.5\text{ Pa}, T=1\ 700\text{ K},$ $T_w=650\text{ K}, x(\text{H}_2\text{O})=0.10, x(\text{CO}_2)=0.10$	$L_c=300\text{ cm}, p=101\ 325\text{ Pa}, T=550\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.05, x(\text{CO}_2)=0.05$	$L_a=0.3\sim 200\text{ km}, p=62\ 821.5\text{ Pa}, T=273.2\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.003\ 8, x(\text{CO}_2)=3.29\times 10^{-4},$ $x(\text{CO})=1.31\times 10^{-7}(7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}\text{ 时})$ $L_a=0.3\sim 60\text{ km})$
26	$L_h=50\text{ cm}, p=253\ 312.5\text{ Pa}, T=1\ 700\text{ K},$ $T_w=650\text{ K}, x(\text{H}_2\text{O})=0.10, x(\text{CO}_2)=0.10$	$L_c=100\text{ cm}, p=101\ 325\text{ Pa}, T=550\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.05, x(\text{CO}_2)=0.05$	$L_a=0.3\sim 200\text{ km}, p=62\ 821.5\text{ Pa}, T=273.2\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.003\ 8, x(\text{CO}_2)=3.29\times 10^{-4},$ $x(\text{CO})=1.31\times 10^{-7}(7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}\text{ 时})$ $L_a=0.3\sim 60\text{ km})$
27	$L_h=50\text{ cm}, p=253\ 312.5\text{ Pa}, T=1\ 400\text{ K},$ $T_w=450\text{ K}, x(\text{H}_2\text{O})=0.10, x(\text{CO}_2)=0.10$	$L_c=300\text{ cm}, p=101\ 325\text{ Pa}, T=550\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.05, x(\text{CO}_2)=0.05$	$L_a=0.3\sim 200\text{ km}, p=62\ 821.5\text{ Pa}, T=273.2\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.003\ 8, x(\text{CO}_2)=3.29\times 10^{-4},$ $x(\text{CO})=1.31\times 10^{-7}(7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}\text{ 时})$ $L_a=0.3\sim 60\text{ km})$
28	$L_h=50\text{ cm}, p=72\ 954\text{ Pa}, T=1\ 800\text{ K},$ $T_w=500\text{ K}, x(\text{H}_2\text{O})=0.12, x(\text{CO}_2)=0.12$	$L_c=150\text{ cm}, p=48\ 636\text{ Pa}, T=550\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.1, x(\text{CO}_2)=0.1$	$L_a=0.3\sim 200\text{ km}, p=32\ 424\text{ Pa}, T=241.7\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.000\ 413, x(\text{CO}_2)=3.3\times 10^{-4},$ $x(\text{CO})=1.09\times 10^{-7}(7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}\text{ 时})$ $L_a=0.3\sim 60\text{ km})$
29	$L_h=50\text{ cm}, p=101\ 325\text{ Pa}, T=800\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.10, x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 40\text{ km}, p=101\ 325\text{ Pa}, T=308.15\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.057\ 24, x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4},$ $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}, \text{ sand aerosol}, d=0.4\ \mu\text{m},$ $N=60\ 000\text{ cm}^{-3}(2\sim 2.5\ \mu\text{m}\text{ 时})$ $L_a=0.3\sim 20\text{ km})$
30	$L_h=50\text{ cm}, p=101\ 325\text{ Pa}, T=600\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.10, x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 40\text{ km}, p=101\ 325\text{ Pa}, T=288.15\text{ K},$ $x(\text{H}_2\text{O})=0.001\ 84, x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4},$ $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}, \text{ sand aerosol}, d=0.4\ \mu\text{m},$ $N=6\ 000\text{ cm}^{-3}$

续表

算例	热燃气层	冷燃气层	环境空气
31	$L_h=50\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=800\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 40\text{ km}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=288.15\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.001\ 84$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$, sand aerosol, $d=0.4\text{ }\mu\text{m}$, $N=40\ 000\text{ cm}^{-3}$ ($2\sim 2.5\text{ }\mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 20\text{ km}$)
32	$L_h=80\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=1\ 300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 100\text{ km}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=298.15\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.032\ 26$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$, sand aerosol, $d=4.0\text{ }\mu\text{m}$, $N=0.3\text{ cm}^{-3}$ ($7.7\sim 9.7\text{ }\mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
33	$L_h=80\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=1\ 300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 100\text{ km}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=298.15\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.003\ 226$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$, sand aerosol, $d=4.0\text{ }\mu\text{m}$, $N=0.3\text{ cm}^{-3}$ ($7.7\sim 9.7\text{ }\mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
34	$L_h=80\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=1\ 300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 30\text{ km}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=298.15\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.032\ 26$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$, sand aerosol, $d=4.0\text{ }\mu\text{m}$, $N=3.0\text{ cm}^{-3}$
35	$L_h=80\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=400\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.11$, $x(\text{CO}_2)=0.11$		$L_a=0.3\sim 40\text{ km}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.032\ 3$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$, sand aerosol, $d=10.0\text{ }\mu\text{m}$, $N=0.2\text{ cm}^{-3}$ ($2\sim 2.5\text{ }\mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 20\text{ km}$)
36	$L_h=80\text{ cm}$, $p=202\ 650\text{ Pa}$, $T=1\ 600\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.11$, $x(\text{CO}_2)=0.14$		$L_a=0.3\sim 60\text{ km}$, $p=91\ 192.5\text{ Pa}$, $T=300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.032\ 3$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$, sand aerosol, $d=10.0\text{ }\mu\text{m}$, $N=0.1\text{ cm}^{-3}$
37	$L_h=2\text{ cm}$, $p=162\ 120\text{ Pa}$, $T=1\ 800\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.14$, $x(\text{CO}_2)=0.12$		$L_a=0.3\sim 20\text{ km}$, $p=81\ 060\text{ Pa}$, $T=300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.024$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$, sand aerosol, $d=10.0\text{ }\mu\text{m}$, $N=0.4\text{ cm}^{-3}$
38	$L_h=60\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=1\ 050\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 80\text{ km}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=294.2\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.018\ 4$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$, soot aerosol, $d=0.8\text{ }\mu\text{m}$, $N=70\text{ cm}^{-3}$ ($2\sim 2.5\text{ }\mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 40\text{ km}$, $7.7\sim 9.7\text{ }\mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
39	$L_h=60\text{ cm}$, $p=202\ 650\text{ Pa}$, $T=1\ 050\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 80\text{ km}$, $p=91\ 192.5\text{ Pa}$, $T=294.2\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.018\ 4$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$, soot aerosol, $d=0.8\text{ }\mu\text{m}$, $N=70\text{ cm}^{-3}$ ($2\sim 2.5\text{ }\mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 40\text{ km}$, $7.7\sim 9.7\text{ }\mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
40	$L_h=100\text{ cm}$, $p=42\ 556.5\text{ Pa}$, $T=1\ 500\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.08$, $x(\text{CO}_2)=0.08$		$L_a=0.3\sim 200\text{ km}$, $p=42\ 556.5\text{ Pa}$, $T=254.7\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.001\ 02$, $x(\text{CO}_2)=3.3\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.25\times 10^{-7}$, soot aerosol, $d=0.8\text{ }\mu\text{m}$, $N=10\text{ cm}^{-3}$ ($7.7\sim 9.7\text{ }\mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
41	$L_h=100\text{ cm}$, $p=17\ 934.53\text{ Pa}$, $T=1\ 800\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 200\text{ km}$, $p=17\ 934.53\text{ Pa}$, $T=215.8\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=8.01\times 10^{-6}$, $x(\text{CO}_2)=3.3\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=6.38\times 10^{-8}$, soot aerosol, $d=0.8\text{ }\mu\text{m}$, $N=4.0\text{ cm}^{-3}$ ($7.7\sim 9.7\text{ }\mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
42	$L_h=50\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=1\ 500\text{ K}$, $T_w=900\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$	$L_c=150\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=550\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.05$, $x(\text{CO}_2)=0.05$	$L_a=0.3\sim 100\text{ km}$, $p=91\ 192.5\text{ Pa}$, $T=300\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.032\ 3$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$, soot aerosol, $d=0.8\text{ }\mu\text{m}$, $N=200\text{ cm}^{-3}$ ($2\sim 2.5\text{ }\mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 20\text{ km}$, $7.7\sim 9.7\text{ }\mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
43	$L_h=15\text{ cm}$, $p=81\ 060\text{ Pa}$, $T=650\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 100\text{ km}$, $p=81\ 060\text{ Pa}$, $T=283.15\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.005$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ ($7.7\sim 9.7\text{ }\mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)
44	$L_h=5\text{ cm}$, $p=101\ 325\text{ Pa}$, $T=750\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 100\text{ km}$, $p=81\ 060\text{ Pa}$, $T=288.15\text{ K}$, $x(\text{H}_2\text{O})=0.01$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ ($7.7\sim 9.7\text{ }\mu\text{m}$ 时 $L_a=0.3\sim 60\text{ km}$)

续表			
算例	热燃气层	冷燃气层	环境空气
45	$L_h=5$ cm, $p=50\ 662.5$ Pa, $T=900$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.12$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 120$ km, $p=50\ 662.5$ Pa, $T=263.15$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.002$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ (7.7~9.7 μm 时 $L_a=0.3\sim 60$ km)
46	$L_h=10$ cm, $p=50\ 662.5$ Pa, $T=500$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 40$ km, $p=101\ 325$ Pa, $T=293.15$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.015$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$
47	$L_h=10$ cm, $p=101\ 325$ Pa, $T=550$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.12$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 100$ km, $p=60\ 795$ Pa, $T=273.15$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.004$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ (7.7~9.7 μm 时 $L_a=0.3\sim 60$ km)
48	$L_h=10$ cm, $p=101\ 325$ Pa, $T=500$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.12$		$L_a=0.3\sim 80$ km, $p=101\ 325$ Pa, $T=300$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.012$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ (7.7~9.7 μm 时 $L_a=0.3\sim 60$ km)
49	$L_h=150$ cm, $p=253\ 312.5$ Pa, $T=1\ 600$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 100$ km, $p=81\ 060$ Pa, $T=288.15$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.015$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ (7.7~9.7 μm 时 $L_a=0.3\sim 60$ km)
50	$L_h=10$ cm, $p=50\ 662.5$ Pa, $T=1\ 500$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.13$, $x(\text{CO}_2)=0.10$		$L_a=0.3\sim 120$ km, $p=91\ 192.5$ Pa, $T=293.15$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.02$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ (7.7~9.7 μm 时 $L_a=0.3\sim 60$ km)
51	$L_h=70$ cm, $p=101\ 325$ Pa, $T=1\ 400$ K, $T_w=400$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.12$, $x(\text{CO}_2)=0.12$	$L_c=30$ km, $p=101\ 325$ Pa, $T=300$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.03$, $x(\text{CO}_2)=0.000\ 34$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$	$L_a=0.3\sim 120$ km, $p=60\ 795$ Pa, $T=260$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.001\ 5$, $x(\text{CO}_2)=3.3\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.31\times 10^{-7}$ (7.7~9.7 μm 时 $L_a=0.3\sim 60$ km)
52	$L_h=150$ cm, $p=60\ 795$ Pa, $T=1\ 700$ K, $T_w=600$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.10$, $x(\text{CO}_2)=0.12$	$L_c=10$ km, $p=60\ 795$ Pa, $T=260$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.001\ 5$, $x(\text{CO}_2)=0.000\ 33$, $x(\text{CO})=1.31\times 10^{-7}$	$L_a=0.3\sim 40$ km, $p=101\ 325$ Pa, $T=300$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.03$, $x(\text{CO}_2)=3.4\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$
53	$L_h=80$ cm, $p=202\ 650$ Pa, $T=1\ 600$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.11$, $x(\text{CO}_2)=0.14$		$L_a=0.3\sim 100$ km, $p=91\ 192.5$ Pa, $T=300$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.032\ 3$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ (7.7~9.7 μm 时 $L_a=0.3\sim 60$ km)
54	$L_h=20$ cm, $p=303\ 975$ Pa, $T=1\ 800$ K, $T_w=1\ 000$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.12$, $x(\text{CO}_2)=0.12$	$L_c=40$ cm, $p=151\ 987.5$ Pa, $T=1\ 400$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.1$, $x(\text{CO}_2)=0.1$	$L_a=0.3\sim 40$ km, $p=101\ 325$ Pa, $T=300$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.03$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$, soot aerosol, $d=0.8\ \mu\text{m}$, $N=150\ \text{cm}^{-3}$ (2~2.5 μm 时 $L_a=0.3\sim 20$ km)
55	$L_h=3$ cm, $p=81\ 060$ Pa, $T=600$ K, $T_w=450$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.05$, $x(\text{CO}_2)=0.05$	$L_c=5$ cm, $p=81\ 060$ Pa, $T=500$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.02$, $x(\text{CO}_2)=0.02$	$L_a=0.3\sim 30$ km, $p=101\ 325$ Pa, $T=300$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.02$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$ sand aerosol, $d=4.0\ \mu\text{m}$, $N=2.0\ \text{cm}^{-3}$
56	$L_h=3$ cm, $p=81\ 060$ Pa, $T=350$ K, $T_w=450$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.05$, $x(\text{CO}_2)=0.05$	$L_c=5$ cm, $p=81\ 060$ Pa, $T=400$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.02$, $x(\text{CO}_2)=0.02$	$L_a=0.3\sim 40$ km, $p=101\ 325$ Pa, $T=288$ K, $x(\text{H}_2\text{O})=0.01$, $x(\text{CO}_2)=3.23\times 10^{-4}$, $x(\text{CO})=1.47\times 10^{-7}$, sand aerosol, $d=0.4\ \mu\text{m}$, $N=20\ 000\ \text{cm}^{-3}$ (2~2.5 μm 时 $L_a=0.3\sim 20$ km)