

文章编号: 1672-8785(2018)05-0008-05

## 高速飞行目标尾焰红外辐射特性的建模仿真计算

祝 念<sup>1,2</sup> 高思莉<sup>1</sup> 岳 娟<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 飞行器目标的尾焰红外辐射特性对目标的红外探测、识别和跟踪具有极其重要的作用。为了分析尾焰的红外辐射特性, 首先根据经验公式计算出尾焰的流场分布, 然后使用窄带模型计算出谱带的光谱吸收系数和透过率; 对于非均匀热气体, 考虑到碰撞展宽效应和多普勒展宽效应, 使用 C-G 谱带传输模型得到飞行器尾焰 2~5  $\mu\text{m}$  的红外辐射分布。最后, 计算了不同组分的尾焰红外辐射特性, 分析了组分分布和大气传输对尾焰红外辐射特性的影响, 为探测波段的选择提供了参考依据。

**关键词:** 尾焰; 红外辐射特性; 流场分布; 谱带模型; 建模仿真

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.05.002

## Modeling and Calculation of Infrared Radiation from High-speed Aircraft Plume

ZHU Nian<sup>1,2</sup>, GAO Si-li<sup>1</sup>, YUE Juan<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The infrared radiation characteristics of a high-speed vehicle plume are of great importance to the infrared detection, identification and tracking of a target. To analyze the infrared radiation characteristics of the plume, the flow field of the plume is first partitioned according to the empirical formula. Then, the spectral absorption coefficient and transmittance in the band are calculated by using a narrowband model. For the non-uniform hot gas, in view of the Collided-broaden effects and the Doppler-broaden effects, the infrared radiation intensity of a high-speed aircraft plume in the wave band from 2 to 5  $\mu\text{m}$  is computed by using a C-G band transmission model. Finally, the infrared radiation characteristics of a plume containing different components are calculated and the influence of composition distribution on the infrared radiation characteristics of the plume is analyzed. At the same time, the influence of atmospheric transmission on the infrared radiation characteristics of the plume is analyzed. This study is of referential value to the selection of detection bands.

**收稿日期:** 2018-03-14

**基金项目:** 国家“十三五”国防预研项目(Jzx2016-0404/Y72-2); 中国科学院青年创新促进会资助项目(2014216)

**作者简介:** 祝念(1992-), 女, 湖北孝感人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理。

E-mail: zhunian2012@163.com

**Key words:** plume; infrared radiation characteristic; flow field; band model; modeling and simulation

## 0 引言

作为研究高速飞行目标红外辐射特性的主要手段,尾焰红外辐射的建模仿真计算在目标红外探测、识别和跟踪方面具有极其重要的作用。与外场测试相比,建模仿真可以有效地节约成本和提高效率。国内对尾焰红外辐射进行了大量研究,比如李建勋、王超哲等人<sup>[1-2]</sup>对飞机发动机的红外辐射特性进行了仿真计算;阮立明等人<sup>[3]</sup>对导弹尾焰目标的红外辐射特性进行了数值仿真;未军光等人<sup>[4]</sup>研究了发动机排气系统的红外特征。

本文对飞行器目标的尾焰红外辐射特性进行了分析和研究。首先,根据经验公式分区计算了尾焰流场分布,包括各点温度、压强和组分参量;然后使用窄带模型计算出了谱带的光谱吸收系数和透过率;基于以上计算数据,考虑到碰撞展宽效应和多普勒展宽效应,使用 C-G 谱带传输模型得到了飞行器尾焰在 2~5 μm 波段的红外辐射分布;最后,根据尾焰的主要气体成分,分析了尾焰的红外辐射特性与各组分的关系以及大气传输对尾焰红外辐射特性的影响。

## 1 尾焰红外辐射计算

### 1.1 尾焰流场分布

尾焰流场分布主要包括流场温度分布、组分分布和压强分布,是尾焰红外辐射计算的基础。相互作用的流场可以分为初始段和基本段两个部分,其中初始段又可分为核心区和混合区<sup>[5]</sup>。核心区的温度、组分分布和压强分布基本恒定,其温度为最大值,对整个尾焰红外辐射贡献最大。对于初始段和基本段,可以采用不同的经验公式进行计算。此计算过程已有大量文献给出,在此不再赘述。

### 1.2 谱带模型

分子的红外辐射计算方法基本上可以分为逐线积分法和谱带模型法两种。其中,逐线积

分法需要用到与温度及压强等有关的光谱吸收系数,计算量非常大<sup>[1]</sup>。谱带模型法首先将整个分子谱带分解成大量的微小波段,每个波段都有不同的谱线位置和线型函数;然后根据理论公式计算各波段的谱线平均半宽、平均间距和平均吸收系数;最后将这些经验参数代入表达式,即可计算出各波段的平均透过率。谱带模型法不仅具有较高的计算精度,而且还可大大减小计算量。

Malkmus 模型<sup>[6]</sup>在大气科学研究中应用得较为广泛,后来气体高温辐射计算也采用了该模型<sup>[7-8]</sup>。在 Malkmus 模型中,波段的平均透过率表达式为<sup>[9]</sup>

$$\bar{\tau}\Delta\eta = \exp\left[-2d\frac{\bar{\gamma}}{d}\left[\sqrt{1+xpl\bar{k}\frac{d}{\bar{\gamma}}}-1\right]\right] \quad (1)$$

式中, $x$ 为分子的摩尔百分数; $p$ 为气体的总压强(单位为标准大气压); $l$ 为物理路径(单位为 cm)。

根据 Young S J 提出的针对高温高压气体谱带模型参数的计算方法<sup>[10]</sup>,谱线的平均吸收系数 $\bar{k}$ 、平均半宽 $\bar{\gamma}$ 和平均间距 $\bar{d}$ 的表达式为

$$\bar{k} = \frac{1}{\Delta\omega_{m=1}} \sum S_m \quad (2)$$

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{M} \sum \gamma_m \quad (3)$$

$$\bar{d} = \frac{\bar{k} \cdot \bar{\gamma}}{\left(\frac{1}{\Delta\omega_{m=1}} \sum \sqrt{S_m \cdot \gamma_m}\right)^2} \quad (4)$$

式中, $S_m$ 为 $\Delta\omega$ 内第 $m$ 条谱线的积分强度; $\gamma_m$ 为 $\Delta\omega$ 内的谱线半宽; $M$ 为 $\Delta\omega$ 内的谱线总数。

### 1.3 非均匀热气体的 C-G 谱带传输模型

C-G 谱带传输模型沿着视线的传输方向将非均匀尾焰热气体划分为若干温度、组分、压强一定的子层,并计算出各子层的光谱透过率;最后基于此计算结果,根据辐射传输方程

计算视线方向上的光谱辐射亮度。该模型计算简单、准确<sup>[11]</sup>。具体步骤如下:

(1)将视线方向上的气体分为若干层后,计算第  $n$  层的光学厚度。光学厚度的计算公式为

$$\Delta u_n = \frac{273}{T_n} P_n \Delta l_n \quad (5)$$

式中,  $\Delta l_n$ 、 $T_n$  和  $P_n$  分别为第  $n$  层的几何厚度、温度和压强,在尾焰流场分布中已算得。

(2)计算第  $n$  层的弱线极限光学厚度:

$$(X^*)_{n,\omega} = \sum_1^n K_{n,\omega} \cdot \Delta u_n \quad (6)$$

式中,  $K_{n,\omega}$  表示波数为  $\omega$  时第  $n$  层的吸收率。

(3)根据步骤(1)中获得的参数,计算第  $n$  层纯多普勒增宽的光学深度和纯碰撞增宽的光学深度:

$$\begin{aligned} (X_D)_{n,\omega} &= 1.7(\bar{a}_D)_{n,\omega} \\ &\times \left\{ \ln \left[ 1 + (0.588(X^*/\bar{a}_D)_{n,\omega})^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (7) \\ (X_c)_{n,\omega} &= (X^*)_{n,\omega} \left[ 1 + (X^*/(4\bar{a}_c))_{n,\omega} \right]^{-1/2} \quad (8) \end{aligned}$$

(4)计算第  $n$  层光学厚度和总的光学透过率。结合碰撞增宽与多普勒增宽的光学厚度为

$$\begin{aligned} (Y)_{n,\omega} &= \left[ 1 - (X_c/X^*)_{n,\omega}^2 \right]^{-2} \\ &+ \left[ 1 - (X_D/X^*)_{n,\omega}^2 \right]^{-1/2} - 1 \quad (9) \end{aligned}$$

则第  $n$  层的光学厚度为

$$(X)_{n,\omega} = (X^*)_{n,\omega} \left[ 1 - (Y)_{n,\omega}^{1/2} \right]^{1/2} \quad (10)$$

那么第  $n$  层的光学透过率为

$$(\tau)_{n,\omega} = \exp[-(Z)_{n,\omega}] \quad (11)$$

(5)根据每层的光谱透过率即可计算出每层的光谱辐射亮度( $W \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$ ):

$$(I)_{n,\omega} = -I_{bh,\omega,T_n} \cdot [\tau_{n,\omega} - \tau_{n-1,\omega}] \quad (12)$$

式中,  $I_{bh,\omega,T_n}$  为给定波数和温度时的黑体辐射计算普朗克公式。

通过对层数和波数进行求和,可以得到沿任意方向的光谱辐射亮度( $W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$ ):

$$I = \sum_n \sum_\omega (I)_{n,\omega} \cdot \Delta \omega \quad (13)$$

## 2 建模仿真结果分析

### 2.1 模型参数

表 1 列出了仿真计算中所采用的主要模型

参数。

表 1 模型参数设置

参数	数值
尾喷口半径(m)	0.23
轴向长度(m)	10
径向长度(m)	2
尾焰速度(m/s)	2088
飞行器速度(m/s)	450
大气温度(K)	288
喷口出温度(K)	2400
大气压强(Pa)	101325

### 2.2 结果分析

#### 2.2.1 尾焰流场分布

图 1 为由流场参数算得的尾焰温度分布图。可以看出,尾焰中温度最高的是核心区,且温度经混合区和基本段逐渐衰减。

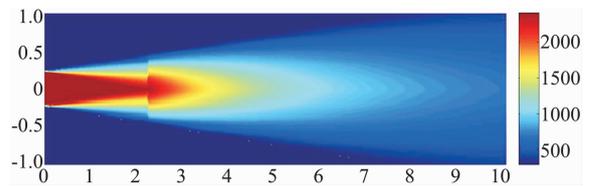


图 1 尾焰流场温度分布

#### 2.2.2 尾焰组分对红外辐射特性的影响

在尾喷口处,尾焰各组分( $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $CO$ 、 $HCl$ 、 $N_2$ )的质量分数分别为 27.3%、22.1%、11.5%、28.8%、10.3%。其中,主要辐射组分为  $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $CO$ 、 $HCl$ 。根据算得的流场温度分布和压强分布,按照上述计算步骤,可以得到尾焰的  $2 \sim 5 \mu m$  光谱辐射亮度(见图 2(a))。在  $2.6 \sim 2.8 \mu m$ 、 $3.4 \sim 3.6 \mu m$ 、 $4.2 \sim 4.3 \mu m$ 、 $4.3 \sim 4.4 \mu m$ 、 $4.6 \sim 4.7 \mu m$  附近分别出现了峰值,其中  $2.6 \sim 2.8 \mu m$  处是  $H_2O$  的辐射峰,  $3.4 \sim 3.6 \mu m$  处是  $HCl$  的辐射峰,  $4.2 \sim 4.3 \mu m$  和  $4.3 \sim 4.4 \mu m$  处主要是  $CO_2$  的辐射峰,  $4.6 \sim 4.7 \mu m$  处是  $CO$  的辐射峰。可以看出,计算结果与实际情况相符合。

不同类型飞行目标的尾焰组分不同,其红外辐射特性也不同。因此可通过调整尾焰的组分分布来研究各组分对尾焰红外辐射特性的影

响。当燃烧不充分且 CO 质量分数较高时, 各组分( $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、CO、HCl、 $\text{N}_2$ )的质量分数分别为 27.3%、5%、28.6%、28.8%、10.3%。图 2(b)所示为该尾焰的光谱辐射特性。此时, 原来  $\text{CO}_2$  的辐射峰  $4.2\sim 4.3\ \mu\text{m}$  和  $4.3\sim 4.4\ \mu\text{m}$  峰值较低, 而 CO 的辐射峰  $4.6\sim 4.7\ \mu\text{m}$  峰值较高, 此波段可以作为探测波段。当  $\text{H}_2\text{O}$  占比较高时, 各组分( $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、CO、HCl、 $\text{N}_2$ )的质量分数分别为 50%、15%、8%、20%、7%。图 2(c)所示为该尾焰的光谱辐射特性。此时  $\text{H}_2\text{O}$  的辐射峰  $2.6\sim 2.8\ \mu\text{m}$  峰值较高。当尾焰中的助推剂成分 HCl 占比较低时, 各组分( $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、CO、HCl、 $\text{N}_2$ )的质量分数分别为 36%、32%、17%、0%、15%。图 2(d)所示为该尾焰的光谱辐射特性。结果表明, 尾焰组分的种类决定了尾焰红外辐射光谱的辐射峰位置, 而尾焰组分的质量分数又决定了辐射峰值的大小。

本文按照实际可能的情况对尾焰组分分布

进行了模拟。对于某类型飞行目标, 根据其尾焰组分分布即可计算出尾焰的红外辐射特性, 从而为探测波段的选择提供了模型参考。

### 2.2.3 经大气传输后的尾焰红外辐射特性

飞行目标尾焰的红外辐射需要经过大气传输才能被探测器探测到。为了分析大气传输对尾焰红外辐射特性的影响, 我们计算了经大气衰减后的尾焰红外辐射特性。图 3 所示为  $5\ \text{km}$  高度上的水平传输大气在  $2\sim 5\ \mu\text{m}$  波段的光谱透过率。水平路径: 观察高度为  $5\ \text{km}$ , 目标高度为  $5\ \text{km}$ , 观测距离为  $20\ \text{km}$ 。大气模型: 中纬度夏天。悬浮颗粒: Rural  $23\ \text{km}$ 。

图 4 所示为在该大气透过衰减下尾焰的  $2\sim 5\ \mu\text{m}$  红外光谱辐射特性。可以看出, 经过大气衰减后, 辐射强度均下降,  $2.6\sim 2.8\ \mu\text{m}$  处的峰值几乎全被吸收,  $4.2\sim 4.3\ \mu\text{m}$  和  $4.3\sim 4.4\ \mu\text{m}$  处的峰值大幅衰减,  $4.6\sim 4.7\ \mu\text{m}$  处的辐射峰值相对变高。该结果为红外探测器探测波长的选择提供了参考依据。

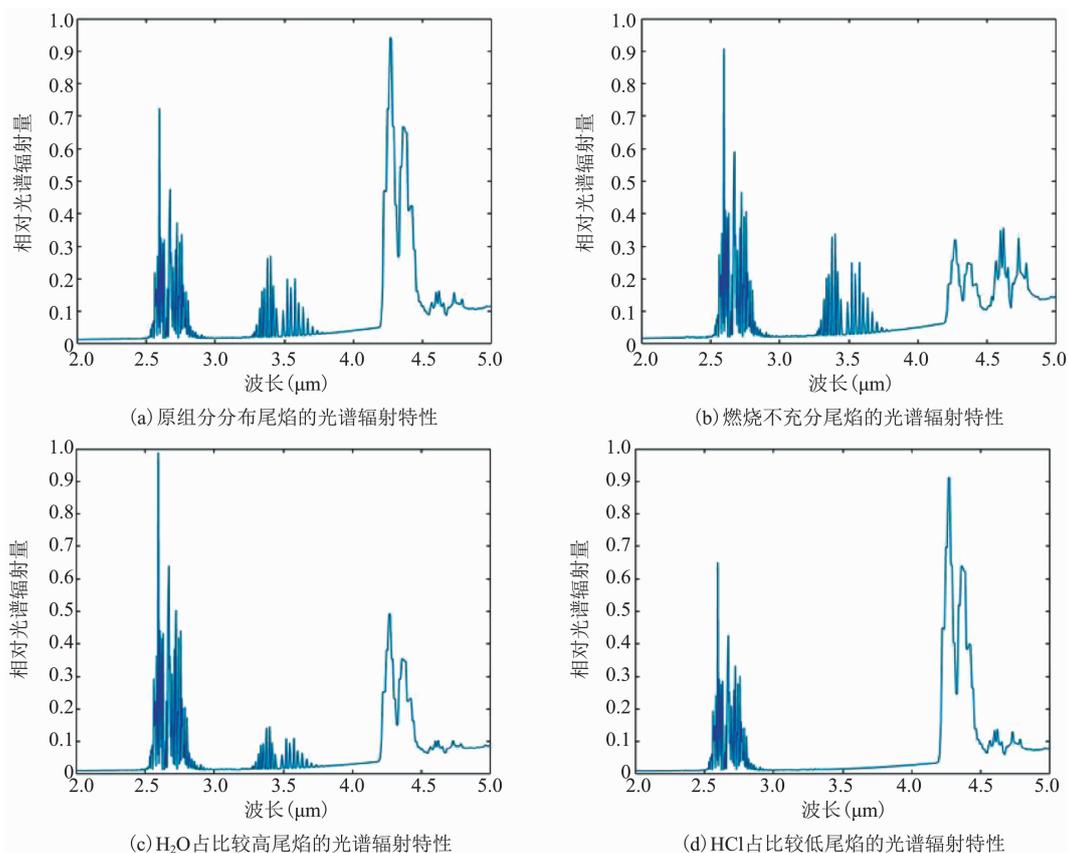


图 2  $2\sim 5\ \mu\text{m}$  尾焰的光谱辐射亮度

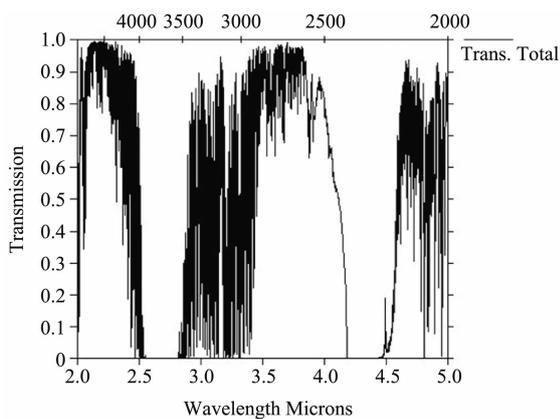


图3 5 km水平传输大气的光谱透过率

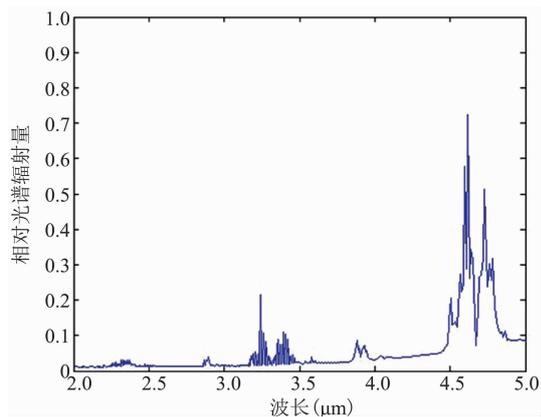


图4 经5 km水平大气衰减后的尾焰光谱辐射亮度

### 3 结束语

本文对飞行器目标的尾焰红外辐射特性进行了研究和分析。首先根据经验公式分区计算了尾焰流场分布,然后使用窄带模型算得了谱带的光谱吸收系数和透过率。对于非均匀热气体,考虑到碰撞展宽效应和多普勒展宽效应,使用C-G谱带传输模型得到了飞行器尾焰的2~5 μm红外辐射分布。尾焰的主要辐射组分为H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CO、HCl。尾焰在2~5 μm波段的红外辐射峰值出现在2.6~2.8 μm、3.4~3.6 μm、4.2~4.3 μm、4.3~4.4 μm、4.6~4.7 μm附近。其中,2.6~2.8 μm处是H<sub>2</sub>O的辐射峰,3.4~3.6 μm处是HCl的辐射峰,4.2~4.3 μm和4.3~4.4 μm处主要是CO<sub>2</sub>的辐

射峰,4.6~4.7 μm处是CO的辐射峰。结果表明,尾焰组分的种类决定了尾焰红外辐射光谱的辐射峰位置,而尾焰组分的质量分数又决定了辐射峰值的大小。另外,大气传输会使2.6~2.8 μm、4.2~4.3 μm、4.3~4.4 μm处的峰值产生强烈衰减。

### 参考文献

- [1] 李建勋,童中翔,王超哲,等. 发动机热喷流红外辐射计算与仿真[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(1): 7-13.
- [2] 王超哲,童中翔,李建勋,等. 战斗机红外点源目标特性计算方法[J]. 红外技术, 2012, 34(11): 666-671.
- [3] 阮立明,齐宏,王圣刚,等. 导弹尾焰目标红外特性的数值仿真[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 959-962.
- [4] 未军光,杨青真,李岳锋. 飞机发动机排气系统红外辐射强度数值仿真[J]. 计算机仿真, 2011, 28(4): 66-70.
- [5] 高思莉,汤心溢. 空中飞行目标尾焰红外辐射信号的建模与仿真[J]. 光电工程, 2007, 34(8): 25-27.
- [6] 孔文俊,艾育华,王宝瑞,等. 重力对层流扩散火焰烟黑生成特性影响[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(5): 867-870.
- [7] 张靖周,李立国,高潮. 直升机排气系统红外抑制器的模型实验研究[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(2): 125-129.
- [8] 单勇,张靖周,李立国. 直升机红外抑制器红外辐射特性的数值研究和实验验证[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(2): 95-100.
- [9] 马千里,童中翔,张志波,等. 基于窄谱带模型的尾焰红外辐射计算[J]. 红外, 2015, 36(3): 39-44.
- [10] Young S J. Nonisothermal Band Model Theory[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1977, 18(1): 1-28.
- [11] 曹毅刚. 尾焰红外辐射的数值仿真计算[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.