

# 基于统计窄谱带模型的油料火焰辐射光谱模拟

彭吴迪, 刘礼喜, 陈志莉, 唐瑾, 陈林, 胡天佑, 王皓文  
(桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541006)

**摘要:** 近年来油料火灾污染事故频发危害性极大, 通过分析光谱特性来提取火灾信息已成为研究油料火灾事故的重要途径。目前国内外学者已建立了多种气体辐射和炭黑辐射的模型对燃料燃烧进行研究, 但少有对火焰光谱进行建模深入分析燃烧污染物光谱特征信息。本文搭建了油料火焰光谱测试平台, 测量了单一尺度下酒精、92号汽油、95号汽油和0号柴油的火焰光谱, 以及多尺度下0号柴油的火焰光谱。实验结果表明3种油料的火焰光谱相似, 随着尺度的增大辐射亮度呈非线性增大。基于统计窄谱带法(statistical narrow band, SNB)构建了油料火焰光谱辐射模型, 通过实验数据验证曲线拟合度达0.895。利用该光谱辐射模型计算出油料火焰大尺度下的平均辐射亮度与平均透过率、不同烟气浓度下的平均透过率, 能为遥感探测火灾污染及反演污染物浓度提供帮助。

**关键词:** 红外光谱; 油料火焰; 窄谱带; 烟气辐射; 数值模拟

中图分类号: O433 文献标志码: A 文章编号: 1001-8891(2022)03-0217-08

## Oil Fire Radiation Calculation Based on a Statistical Narrow-Band Model

PENG Wudi, LIU Lixi, CHEN Zhili, TANG Jin, CHEN Lin, HU Tianyou, WANG Haowen  
(College of Environmental Science & Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

**Abstract:** In recent years, oil fire pollution accidents have occurred frequently and caused significant harm. It has become important to study oil fire accidents by extracting fire information through the analysis of spectral characteristics. Many domestic and foreign scholars have established a variety of gas radiation and carbon black radiation models to study fuel combustion; however, few scholars have directly modeled flame spectra to analyze and extract spectral characteristic information on combustion pollution products. In this study, a test platform for the flame spectra of oil was constructed, and the flame spectra of alcohol, 92 gasoline, 95 gasoline, and 0 diesel were measured at a single scale, as was the flame spectra of 0 diesel at multiple scales. The experimental results demonstrate that the flame spectra of the three oils are similar and the radiance increases nonlinearly with an increase in scale. Based on the statistical narrow-band method, a spectral radiation model for the oil flame was established, and a curve fitting degree of 0.895 was obtained based on experimental data. The spectral radiation model can be used to calculate the average radiance and transmittance of oil flames on a large scale, as well as the average transmittance at different flue gas concentrations, which can be helpful for remote fire pollution detection and pollutant concentration inversion.

**Key words:** infrared radiation spectrum, oil flame, narrow band, soot radiation, numerical simulation

## 0 引言

据统计, 国内外每年的大型石油化工储罐火灾事故有15~20起左右<sup>[1]</sup>, 油料火灾危害巨大。为了对油料火灾危害进行监测分析, 大量学者通过实验测试了油料火焰的辐射光谱。刘洪涛<sup>[2]</sup>等人测试了

10 cm 燃烧尺度的不同种类油料的火焰光谱并通过小波分解进行了分析。油料主要是由多种烷烃、环烷烃、芳香烃组成的混合物, 其燃烧火焰辐射特征也是多种石油烃燃烧特性的综合表征。Wakatsuki K.和Fuss S P<sup>[3]</sup>用 $4\text{ cm}^{-1}$ 分辨率从296 K到900 K测量甲烷、乙烷、丙烷的红外光谱。结果表明甲烷、乙烷、

收稿日期: 2021-03-08; 修订日期: 2021-04-25。

作者简介: 彭吴迪(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事环境遥感监测方面的研究。E-mail: 1981552937@qq.com。

通信作者: 陈志莉(1971-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事环境遥感监测方面的研究。E-mail: zhilichen518@foxmail.com。

基金项目: 国家自然科学基金(21976043); 桂林理工大学科研启动基金(GUTQDJJ20172017075)。

丙烷单位 C-H 键的总吸收率相近。Raj P K<sup>[4-5]</sup> 对大尺度下的液化天然气 (Liquefied Natural Gas, LNG) 池火焰光谱特性进行了研究分析, 结果表明 H<sub>2</sub>O 及 CO<sub>2</sub> 的发射强度较强, 在整条谱线中存在多个吸收与发射波段。通过火焰光谱与油料之间的关系, Maout Y L 等<sup>[6]</sup> 在近红外波段范围内 (750~1100 nm) 对火焰光谱进行了研究分析, 通过分析火焰的脉动等特征, 建立了基于近红外光谱分析的火焰识别方法。徐建楠<sup>[7]</sup> 等人对汽油初期火焰进行了研究, 分析火焰中具有特征谱峰的分子的生成机理, 为油料火灾爆炸的早期识别提供了技术手段。油料燃烧会产生炭黑, 大量学者对炭黑辐射<sup>[8-9]</sup> 进行了研究, 油料火灾中的火焰辐射本质上是火灾区域内高温气体和烟尘发出的辐射。目前国内外学者已建立了多种气体辐射和炭黑辐射的模型, Grosshandler W L<sup>[10]</sup> 采用窄谱带模型构建了窄谱带吸收系数数据库 RadCal, Rothman L S<sup>[11]</sup> 编辑的 HITRAN 和 HITEMP 数据库目前也用于计算光谱吸收系数。Malkmus W<sup>[12]</sup> 根据线强分布对窄谱带模型进行了改进。部分学者将模型与实验相结合, 楚化强<sup>[13]</sup> 等对 CO<sub>2</sub>, CO 等气体辐射进行了研究, 基于窄谱带数据库计算了气体的吸收系数。Hamins A 等<sup>[14]</sup> 对油料中的庚烷、甲苯、甲醇进行池火燃烧实验, 对燃烧速率、平均热释放速率进行了模拟。虽然国内外建立了多种气体辐射模型与炭黑模型并得到了很好的验证, 但这些模型建立的初衷和适用的领域均是火灾辐射传热计算, 而非火焰光谱的准确建模。其重心放在了火焰热辐射对火灾蔓延和燃烧速率的预测上, 对火焰辐射的预测也仅停留在总辐射热流上, 少有通过构建火焰光谱模型来研究分析燃烧污染产物的光谱特征等信息。本文针对 92、95 号汽油和 0 号柴油进行了火焰光谱测试实验, 基于统计窄谱带法 (Statistical Narrow Band, SNB) 和辐射传输理论建立油料火焰光谱模型并用实验数据进行了验证, 对小尺度油料火灾透过率进行计算, 外推到 1~10m 大尺度油料火灾。利用该模型能模拟出燃烧不同尺度、不同波段火焰光谱, 计算不同尺度下油料池火的透过率和辐射亮度, 来定量研究光谱特征信息, 为地面油料火灾温度、污染物反演提供帮助。地面油料光谱特征的定量研究是遥感探测与定量反演的基础, 可为后续遥感探测火灾温度与燃烧产生的污染物定量反演研究奠定基础。

## 1 油料红外波段火焰光谱辐射实验

本实验采用小型池火的方式进行研究, 选取 92

号汽油、95 号汽油和 0 号柴油为火焰光谱测试的研究对象, 所用油料购置于临近的加油站, 购买了一批内径为 6 cm、10 cm、14 cm、18 cm 和 22 cm, 高位 3 cm 的油盘, 保证每次加入的油量到 3 cm 的高度, 研究油料在不同尺度下的火焰光谱。实验平台由傅里叶红外光谱仪、铁架台、燃烧器、抽烟装置、CO<sub>2</sub> 浓度检测器 (Smart Sensor AS8904)、CO 浓度检测 (Smart Sensor AS8900)、热电偶 (UNI-T UT320D) 和台式电脑组成如图 1 所示。

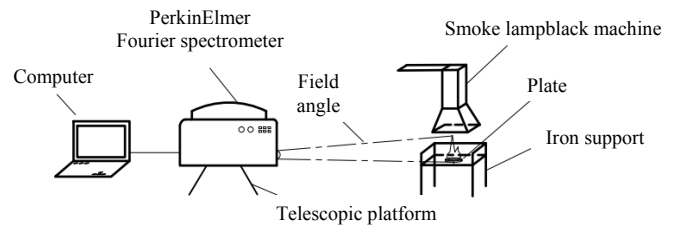


图 1 油料火焰光谱测试平台

Fig.1 Oil flame spectrum testing platform

由于油料火焰中燃烧产物的发射光谱主要在中红外波段范围内, 使用铂金埃尔默公司生产的傅里叶红外光谱仪 (PerkinElmer Fourier spectrometer), 测试了油料池火的红外光谱, 其光谱仪的测试波段范围为 350~8300 cm<sup>-1</sup>, 仪器的视场角为 10°, 分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>, 采用黑体源对光谱仪进行了定标。

实验时可以通过伸缩架调整傅里叶红外光谱仪的高度, 使仪器与油盘位于同一高度上。点火后开启仪器进行能量值状态监控, 左右摆动仪器, 当能量值达到最大值后且能量波动较小时固定仪器的位置。在火焰稳定后, 使用连续扫描模式采集光谱, 扫描次数为 8 次, 对 8 次扫描的数据进行处理取平均值。在火焰上方放置 CO<sub>2</sub>、CO 的浓度检测器, 火焰燃烧时长在 1 min 30 s 左右, 在 1 min 火焰燃烧较稳定, 对油料燃烧产生的组分浓度进行监测, 记录产生的气体浓度如表 1 所示, 用热电偶对油料火焰的外焰、内焰和焰心的温度进行测量取平均值。为了更准确地测试火焰光谱, 实验均在晚间进行, 气压为标准大气压 1 kPa, 室内温度约为 24°C。实验时光谱采用波数单位来描述, 为了后续分析, 在计算完成后, 再将波数单位转换成波长。

表 1 92 号汽油, 95 号汽油, 0 号柴油, 酒精燃烧 60 s 时的组分体积分数与温度

Table 1 Volume fraction and temperature of gasoline 92, gasoline 95, diesel 0, alcohol in 60 s combustion

Type	92#gasoline	95#gasoline	0#diesel	Alcohol
CO	0.0067%	0.0066%	0.0074%	0.0047%
CO <sub>2</sub>	0.0821%	0.0892%	0.0854%	0.0823%
T/K	1155	1165	1202	977

## 2 结果与讨论

### 2.1 油料火焰光谱实测值

通过 FTIR (傅里叶红外光谱仪) 测试了在 6 cm 圆盘尺度下的酒精与柴油的火焰光谱如图 2, 并对其进行辐射定标处理。

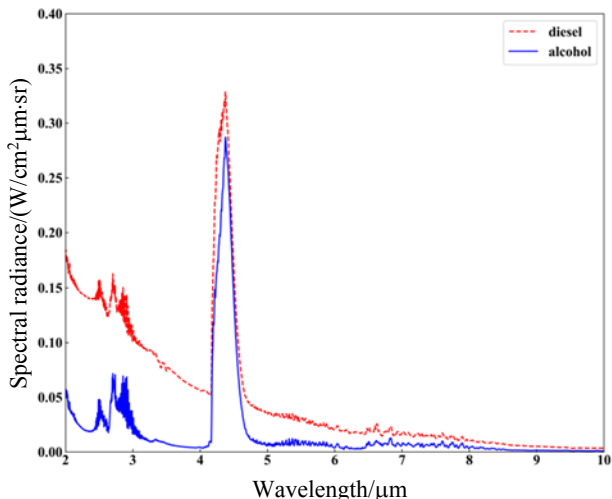


图2 柴油与酒精的火焰光谱对比

Fig.2 Flame spectral comparison of diesel and alcohol

柴油与酒精相比, 在 2~4 μm 波段柴油的火焰光谱辐射值整体高于酒精, 在 4.2 μm 的特征峰处柴油的火焰光谱与酒精的火焰光谱相近。其原因是油料火焰会产生大量的炭黑, 其火焰光谱来自炭黑辐射和高温气体分子辐射, 油料火焰产物为 CO<sub>2</sub> 与 H<sub>2</sub>O, 在此波段存在多个发射峰与吸收峰, 大气中的水汽及 CO<sub>2</sub> 在 2.66 μm 附近存在吸收峰。炭黑的光谱辐射强于在 2~4 μm 处的高温气体分子辐射导致柴油火焰光谱高于酒精。因此, 对于油料的火焰光谱模拟, 不能等同于非发烟烃类燃料的火焰光谱, 需要考虑烟气中炭黑颗粒辐射特性的影响。

通过傅里叶红外光谱仪测得同一尺度下 92 号汽油、95 号汽油和 0 号柴油 3 种油料的火焰光谱如图 3 所示。实验中所选用的各油品主要由碳氢化合物组成, 在开放空间条件下, 火焰燃烧过程中主要产物为 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CO 及烟尘颗粒。3 种油料的火焰光谱在 2.5~4 μm 波段存在细微差别, 其原因可能是由于 3 种油料所含烷烃成分不同, 95 号汽油着火快且燃烧剧烈, 在相同时间内燃烧产生的烟气浓度不同造成的。不同油料在烷烃组成及含量上存在差异, 燃烧产物均为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O。3 种油料燃烧时的火焰光谱近似相同, 说明火焰光谱与燃烧产物的成分、浓度以及燃烧的温度相关, 火焰的光谱曲线可以用来研究燃烧产物的成分及浓度等信息。

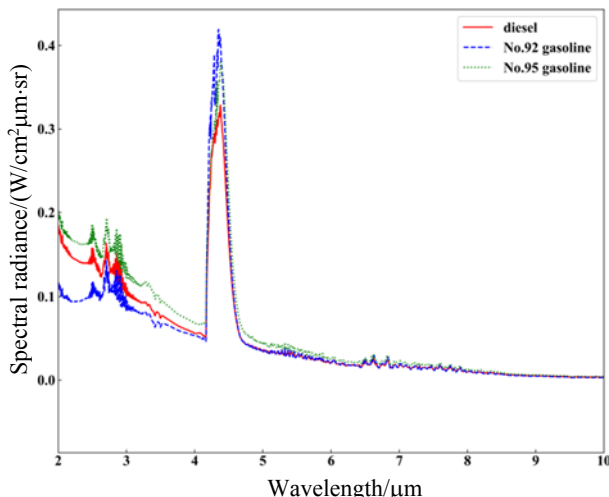


图3 6 cm 尺度下柴油、92 号汽油、95 号汽油火焰光谱对比  
Fig.3 Flame spectral comparison of diesel oil, No. 92 gasoline and No. 95 gasoline at the scale of 6cm

采用 0 号柴油进行实验, 测试了 6 cm、10 cm、14 cm、18 cm 和 22 cm 五个尺度下柴油燃烧的火焰光谱, 如图 4, 由于 10 cm 尺度下实验时油盘碎裂, 未得到 10 cm 燃烧尺度下的实验数据。在 2.5~4 μm 波段随着燃烧尺度的增大光谱辐射亮度成非线性增大, 在 5 μm 之后不同尺度下光谱强度趋于一致。从火焰光谱的辐射亮度变化可以看出, 由于燃烧尺度变大, 火焰变得不稳定, 达到 22 cm 尺度后火焰光谱在 4.3 μm 处出现了吸收峰, 其原因可能是卷入周围空气中的水蒸汽和 CO<sub>2</sub> 对火焰光谱存在很强的吸收作用导致出现吸收峰。随着燃烧尺度的增加, 火焰辐射亮度会逐渐增大两者之间的关系近似于指数。这是由于在实验过程中, 随着燃烧尺度的增加, 火焰的燃烧越发剧烈, 火焰形态也会随着变化, 火焰

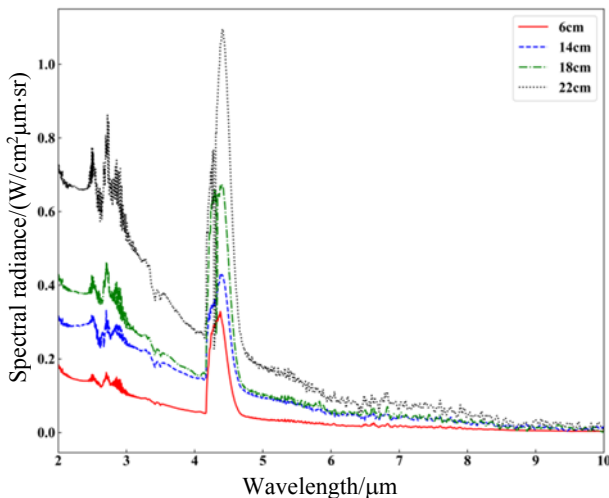


图4 6 cm、14 cm、18 cm 和 22 cm 四种尺度下柴油火焰光谱对比  
Fig.4 Spectral comparison of diesel flame at 6 cm, 14 cm and 22 cm scales

的宽度和高度也会随之增加,使得火焰在 FTIR 光谱仪视域内所占比例随之增大,尺度与辐射亮度之间存在一定关系。通过统计窄谱带模型模拟油料的火焰光谱,有望计算出实际大型火场条件下的辐射亮度等信息,用来反演火灾的温度。

## 2.2 柴油火焰光谱辐射计算模型

目前用于燃烧产物气体光谱辐射特性计算的方法分为3大类:①逐线法;②窄谱带模型法;③基于 WSGGM (Weighted Sum of Grey Gases Model) 概念的全局模型。由于大多数燃烧气体的发射光谱和吸收光谱为非线性结构,致使燃烧气体的辐射换热变得极其复杂。例如,不同版本 HITRAN 的 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 的吸收光谱在每个光谱上包含 105~106 条谱线。尽管近 20 年来对非灰气体辐射特性的处理进行了大量的研究,但在精度和效率上仍然很难达到良好的计算性能。目前,计算辐射特性最精确的模型是逐线法 (line by line, LBL) [15],但这需要大量的计算。例如,在 100~10000 cm<sup>-1</sup> 的光谱范围内,如果间隔为 0.02 cm<sup>-1</sup>,则辐射传输方程 (radiative transfer equation, RTE) 必须求解 4.95×10<sup>5</sup> 次。因此,LBL 通常用于解决低维问题或基准解决方案,以检查其模型的准确性。统计窄带模型,包括标准 SNB (statistical narrow band)、指数 SNB 和指数尾倒数线强分布,其中指数尾倒数线强分布被认为是最成功的频带模型[12]。在一些复杂且计算量大的情况下,SNB 模型可以作为 LBL 的替代物来进行基准测试。因此本文基于 RADCAL 程序采用统计窄谱带方法建立油料燃烧的火焰光谱模型。RADCAL 能计算的温度范围为 270~2500 K、波数变化在 0~10000 cm<sup>-1</sup>,采用统计窄谱带方法对油料火焰辐射光谱进行模拟。根据谱线强度分布不同,统计窄谱带模型分为等线强度分布 (Uniform) [16]、指数线强度分布 (Goody) [17] 和指数尾倒数线强分布 (Malkmus) [12]。为了得到吸收系数和发射率的光谱平均值或窄谱带值,采用统计窄谱带模型计算某一中心波数为 η 的谱带平均透过率。对于等温、均匀分布条件下的辐射气体在摩尔分数 f 和总压强 p 的条件下,SNB 模型提供窄谱带下平均透过率为:

$$\bar{\tau}_v(L) = \exp\left[-\frac{\pi B}{2}\left(\sqrt{1+\frac{4SL}{\pi B}}-1\right)\right] \quad (1)$$

式中: L 为路径长度;  $B=2\bar{\beta}_v/\pi^2$ ,  $S=\bar{k}_v fp$ ,  $\bar{\beta}_v=2\pi\bar{\gamma}_v/\bar{\delta}_v$ , 其中对 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 的参数  $\bar{\gamma}_v$ ,  $\bar{\delta}_v$ ,  $\bar{k}_v$  均通过 Soufiani 和 Taine 提供的 SNB 窄谱带数据库的数据计算得到[18]。这个窄带数据集覆盖了从 300~2900 K 的更广泛的温度范围,在 150~9300 cm<sup>-1</sup> 之间

的均匀带宽为 25 cm<sup>-1</sup>。

黑体曲线的辐射亮度:

$$I_{b,\eta}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda\kappa_B T}\right)-1} \quad (2)$$

式中: h 为普朗克常数; c 为光速; κ<sub>B</sub> 为玻尔兹曼常数; T 为温度; λ 为波长。

烟气与燃烧组分混合的发射率为:

$$\varepsilon = \frac{\pi}{\sigma T^4} \int_0^\infty I_{b,\eta} \varepsilon_\eta d\eta \quad (3)$$

式中: σ=5.6697×10<sup>-8</sup>(W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)), 其中 ε<sub>η</sub> 为气体自身的吸收率。

烟气与燃烧组分的吸收系数:

$$k_{\alpha,\eta} = \frac{\pi}{\sigma T^4} \int_0^\infty I_{b,\eta} k_\eta d\eta = \frac{\pi}{\sigma T^4} \sum_{i=1}^j I_{b,\eta} \bar{k}_i \Delta\eta \quad (4)$$

式中: j 为总的窄谱带数目;  $\bar{k}_i$  为谱线平均强度,来源于 EM2C 实验室。

对于发射、吸收、无散射介质,其辐射传递方程为:

$$\frac{\partial I_\eta}{\partial s} = -\kappa_{\alpha,\eta} I_\eta + \kappa_{\alpha,\eta} I_{b,\eta} \quad (5)$$

式(5)中: I<sub>η</sub> 为气体分子光谱辐射强度,左边表示每 ds 微元的火焰发射的光谱辐射强度,右边第一项为分子自身的吸收,第二项为分子自身的发射,考虑火焰燃烧时的发射与火焰燃烧产生的气体自吸收得到火焰光谱的辐射亮度。

由于光谱仪距油盘 0.5 m 距离较近,通过 MODTRAN 软件模拟了 25℃ 室温条件下,0.5 m 大气传输距离的大气透过率,在 2~11 μm 中红外波段的整体透过率在 0.95 以上。因此建模时只考虑了火焰本身的发射光谱,不考虑火焰与光谱仪之间大气吸收的影响。

## 3 比较与验证

### 3.1 柴油燃烧火焰光谱辐射值对比

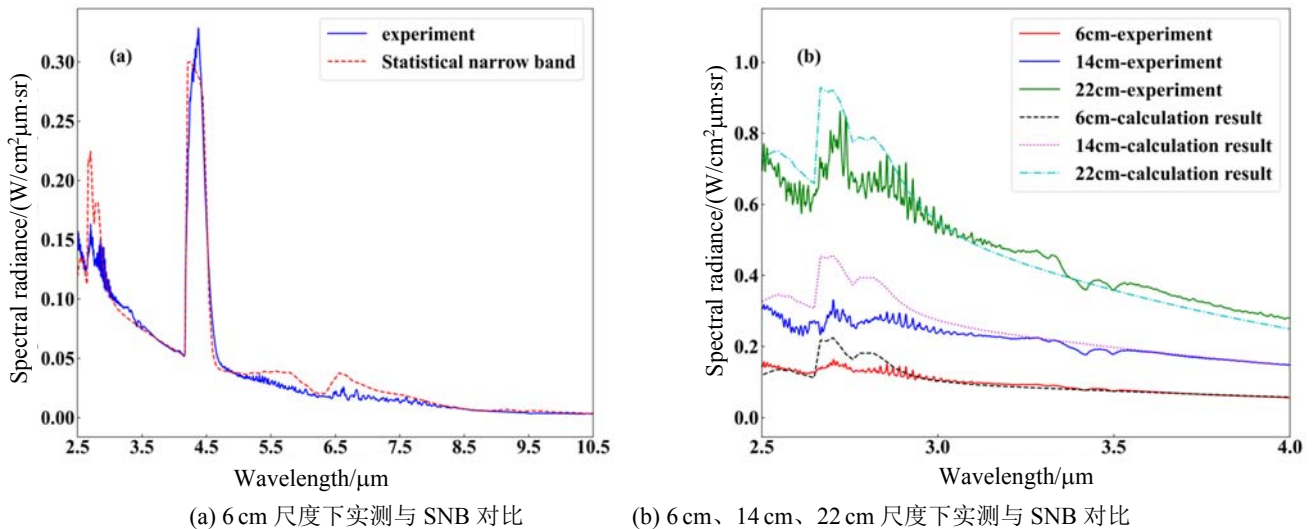
图 5(a)采用 SNB 模型对 6 cm 尺度下 2.5~10 μm 波段下的柴油燃烧的火焰光谱进行了模拟,由 HITRAN (高分辨率气体分子光谱数据库)可知,2.7 μm 处存在 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 的发射峰,4.3 μm 处为 CO<sub>2</sub> 的发射峰。在 2.7 μm 处 SNB 的预测值高于实验测量值,4.3 μm 处 SNB 计算值略小于实验测量值,5 μm 之后 SNB 模型计算值与实际测量值相近。在整个波段下 SNB 模型的计算值与实测数据重合度很高。SNB 模型模拟的在柴油燃烧光谱 2.5~4 μm 波段的光

谱辐射值偏高，对 2.5~4 μm 波段进行了进一步分析。图 5(b)通过 SNB 模型模拟了 6 cm、14 cm 和 22 cm 三种尺度下在 2.5~4 μm 波段下的火焰光谱，在 2.5~4 μm 波段随着燃烧尺度的增大，火焰光谱辐射值增长较大，在 2.7 μm 处 6 cm 的尺度下实验光谱辐射值为 0.197 W·cm<sup>-2</sup>·μm<sup>-1</sup>·sr<sup>-1</sup>，模拟值为 0.222 W·cm<sup>-2</sup>·μm<sup>-1</sup>·sr<sup>-1</sup>；14 cm 尺度下实测值为 0.386 W·cm<sup>-2</sup>·μm<sup>-1</sup>·sr<sup>-1</sup>，模拟值为 0.454 W·cm<sup>-2</sup>·μm<sup>-1</sup>·sr<sup>-1</sup>；22 cm 尺度下实测值为 0.796 W·cm<sup>-2</sup>·μm<sup>-1</sup>·sr<sup>-1</sup>，模拟值为 0.921 W·cm<sup>-2</sup>·μm<sup>-1</sup>·sr<sup>-1</sup>。误差分别为 12.6%、17.8%、15.7%。随着尺度的变化，与实验测量结果相比，SNB 模型计算结果重合度较高。因此可以通过 SNB 模型来模拟大尺度油料火灾燃烧下的火焰光谱。

光谱模型计算时的分辨率为 25 cm<sup>-1</sup>，而实验仪器的分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>，模型的分辨率低于仪器。可以

看出，高分辨率的实测值与低分辨率的模型之间存在误差，一些精细的特征在低分辨率数据中并不明显。模型在精度上未达到仪器的精度，但对于光谱特征峰处的强度和波峰位置计算相一致，可以通过该模型研究火焰光谱的宏观特征。由于遥感技术中所用的光谱传感器普遍精度不高，发射的高光谱卫星较少，因此借助于高分辨率光谱数据得出的结论不太适用目前的遥感领域。通过研究火焰光谱的宏观特征更能适应目前卫星的遥感探测。

表 2 为在 6 cm 燃烧尺度下选取了 2.5 μm、2.7 μm、4.3 μm、5.5 μm、6.3 μm 五个 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 的特征峰处的辐射亮度值进行了比对，在 5 个特征峰处的准确度分别为 0.81、0.88、0.98、0.79、0.86，对产物特征峰处光谱辐射值拟合的准确度较高。



(a) Measured at 6cm scale compared with SNB (b) The measured data were compared with SNB at 6 cm、14 cm and 22 cm scales

图 5 柴油火焰光谱实测值与 SNB 模拟值对比

Fig.5 Comparison of measured values of diesel flame spectrum with simulated values of SNB

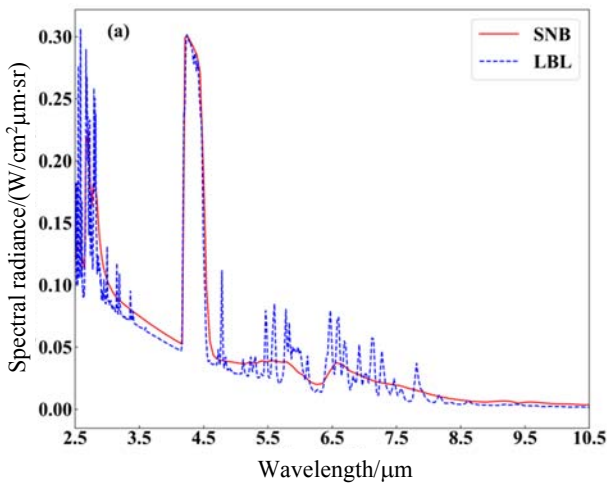
表 2 LBL, SNB 和实验数据在 2.5 μm, 2.7 μm, 4.3 μm, 5.5 μm, 6.3 μm 特征峰处辐射亮度比较

Table 2 LBL, SNB and experimental data were compared at characteristic peaks of 2.5, 2.7, 4.3, 5.5, 6.3 μm

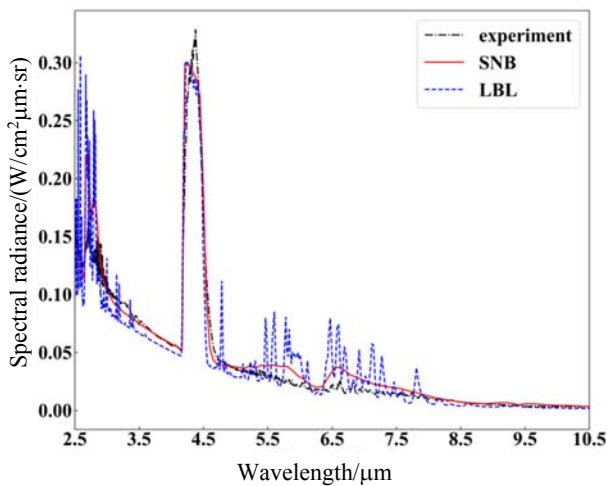
Spectral radiance/(W·cm <sup>-2</sup> ·μm <sup>-1</sup> ·sr <sup>-1</sup> )	2.5 μm	2.7 μm	4.3 μm	5.5 μm	6.3 μm
LBL	0.1236	0.2358	0.2936	0.0261	0.0142
SNB	0.1194	0.2245	0.2956	0.0381	0.0206
Experiment	0.1466	0.1976	0.3001	0.0299	0.0178

基于 HITRAN 数据库的逐线法公认是最准确的气体辐射模型。图 6(a)通过 SNB 窄谱带模型构建了柴油燃烧的火焰辐射光谱，并与逐线法计算结果进行对比，在 2.7 μm、4.3 μm 的 CO<sub>2</sub> 特征峰处窄谱带与逐线法计算结果一致，整个波段模拟值相近，验证了窄谱带模型的准确性。图 6(b)将 6 cm 柴油燃烧

火焰光谱、SNB 计算模型和逐线法计算模型三者相对比，2.5~10.5 μm 波段三者光谱辐射值相近，统计窄谱带的模拟值符合实验测得的光谱辐射亮度。



(a) LBL 与 SNB 对比  
(a) LBL versus SNB



(b) 实验数据、LBL、SNB 对比

(b) Comparison of experimental data, LBL and SNB

图6 实验数据、逐线法模拟值、SNB 模拟值对比

Fig.6 Comparison of experimental data, line by line simulation value and SNB simulation value

基于实验数据、窄谱带法和逐线法计算值，在 2.5~10 μm 选取了等间距的 100 个点进行回归评价指标计算。结果如表 3 所示，逐线法的拟合度达到了 0.9486；RMSE (root mean square error) 的差值为 0.0113；绝对误差 MAE (mean absolute error) 达到了 0.00769，统计窄谱法拟合度 ( $R^2$ ) 达到了 0.8950；RMSE 的差值为 0.0162；MAE 为 0.0109，统计窄谱带与逐线法的拟合度 ( $R^2$ ) 为 0.776，统计窄谱带与逐线法接近，统计窄谱带法的精确度稍逊于逐线法，但其拟合精度也很高且计算速度快，更适用于

实际火焰燃烧研究。

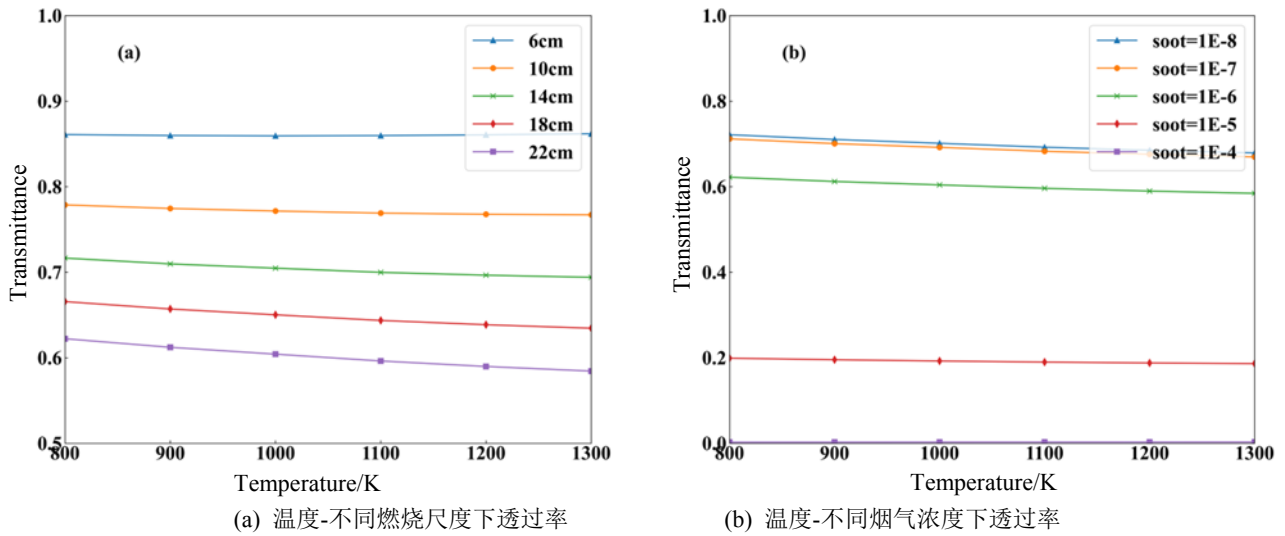
表3 SNB, LBL 拟合评价指标分析

Evaluation	RMSE	MAE	$R^2$
LBL-experiment	0.0113	0.00769	0.9486
SNB-experiment	0.0162	0.0109	0.8950
SNB-LBL	0.0215	0.0129	0.7760

### 3.2 尺度、温度、烟气浓度对火焰燃烧平均透过率影响

对于实际火灾遥感监测的卫星影像上，拍摄的卫星图像中火场范围近似一个火点，对于燃烧时火焰整体辐射亮度、整体透过率的计算很有必要。通过 SNB 模型计算了不同尺度、不同温度下的透过率。由图 7(a)可知，同一温度下，随着燃烧尺度的增大，燃烧组分的透过率呈非线性下降，800 K 时从 6 cm 到 22 cm，透过率从 86% 下降到了 62.2%。同一尺度下，随着燃烧温度上升透过率下降，22 cm 燃烧尺度下从 800 K 到 1300 K 透过率从 62.2% 下降到了 58.4%，尺度越大时，随温度上升透过率下降越快。图 7(b)为在同一尺度下比较烟气浓度与温度对透过率的影响图。同一燃烧温度下，随着烟气浓度的变大，燃烧产物透过率逐渐下降；空气中烟气浓度在  $10^{-7}$  时，火焰整体透过了 71.2%；烟气浓度达到  $10^{-5}$ ，透过率陡降到 19.2%；当空气中烟气浓度达到  $10^{-4}$  时，火焰燃烧产物的透过率为 0.29%，趋近于 0。在实际发生油料火灾时，检测空气中的烟气浓度达到  $10^{-4}$  时，可以近似看作烟气遮蔽了火焰，燃烧产生的辐射全部来自烟气中的炭黑辐射。

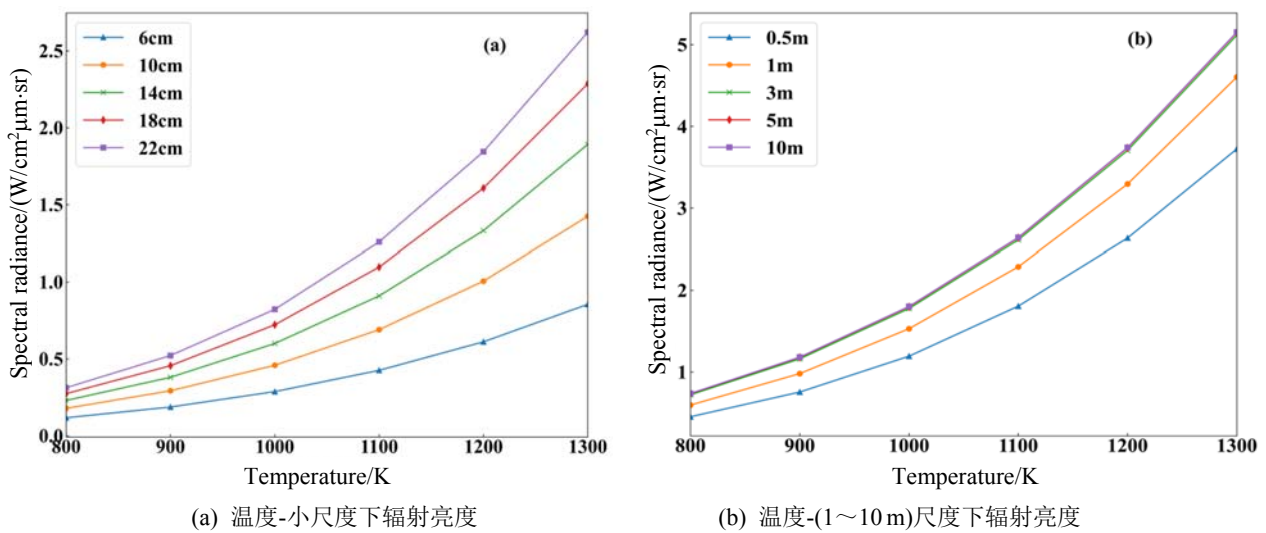
图 8(a)为采用统计窄谱带模型模拟的 6 cm、10 cm、14 cm、18 cm 和 22 cm 五个尺度下的油料燃烧的辐射亮度。由图可知，22 cm 燃烧尺度下随着温度的升高，由 800 K 到 1300 K 光谱辐射亮度从  $0.3129 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$  增长到  $2.622 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ ，成指数形式增大；同一温度下随着尺度的变大，火焰光谱辐射亮度增大，增长幅度逐渐减小。图 8(b)为 1 m 以上较大尺度火焰计算值，由 5 m 增到 10 m 过程中辐射亮度增长很小；当火灾燃烧尺度越大时，辐射亮度趋于饱和，与黑体辐射曲线相比可以用来识别燃烧温度。



(a) Temperature transmittance at different combustion scales (b) Temperature transmittance at different flue gas concentrations

图7 SNB 模拟不同燃烧尺度、不同烟气浓度下火焰平均透过率

Fig.7 SNB simulates average flame transmittance at different combustion scales and flue gas concentrations



(a) Temperature-brightness of radiation at small scales (b) Temperature-transmittance at different flue gas concentrations

图8 SNB 模拟不同尺度下火焰光谱辐射亮度

Fig.8 SNB simulates flame spectral luminance at different scales

#### 4 结论

基于统计窄谱带法和气体辐射方程建立了柴油火焰光谱辐射模型，利用实验数据对模型进行了验证与分析，通过实验测量了同一尺度下酒精、汽油和柴油的火焰光谱并进行比较。油料燃烧会产生黑烟，火焰光谱来自碳黑辐射与气体分子辐射。测量了不同尺度下柴油的火焰光谱，随着尺度的增长，柴油火焰光谱辐射值成指数增长。采用柴油、92号汽油和95号汽油等实验数据对统计窄谱带模型进行了验证，在 $2.7\mu\text{m}$ 、 $4.3\mu\text{m}$ 波段 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 的特征峰处模拟准确度为88%和98%，与实测结果相比，曲

线拟合度达0.8950。将统计窄谱带法与逐线法相对比，拟合度达0.7760，表明统计窄谱带模型可靠且精确度较高，对火焰的特征峰和整体强度的计算较为准确。通过窄谱带模型计算出6cm、10cm、14cm、18cm和22cm五个尺度下的油料火焰的平均透过率。随着燃烧尺度的变大，火焰透过率逐渐下降。计算了5个尺度下火焰光谱辐射亮度，尺度越大则辐射亮度值变大，尺度达到10m以上时增长趋近饱和。在遥感监测油料火灾时，对遥感影像中火点的辐射亮度、烟气透过率计算，可为反演火灾温度与污染物浓度提供基础数据。

构建模型模拟仪器测量的辐射光谱，在实际火

灾中通过设定不同浓度下火焰的光谱值与仪器实测值进行对比,用于反演火灾中污染物组分浓度。模型上仍存在不足,由于采用统计窄谱带法构建火焰光谱辐射模型,其光谱分辨率为 $25\text{ cm}^{-1}$ ,而光谱仪可以调节测量得光谱分辨率最小可达 $4\text{ cm}^{-1}$ ,在研究高光谱数据时,统计窄谱带法在精度上存在缺陷,仍需要改进。在实验中,光谱仪与火焰间隔距离较近未考虑大气吸收带来得影响,在实际遥感监测火灾的过程中当卫星传感器与地面火灾之间长距离时大气吸收的影响需要进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] 周锋, 阮桢. 石油化工储罐火灾事故统计与分析[C]//2016 中国消防协会科学技术年会论文集, 2016: 30-32.  
ZHOU Feng, RUAN Zhen. Statistics and analysis of fire accidents in petrochemical storage tanks[C]//*Proceedings of 2016 China Fire Protection Association Science and Technology Annual Meeting*, 2016: 30-32.
- [2] 刘洪涛, 陈志莉, 刘强, 等. 基于小波分解的油料火焰光谱特性分析研究[J]. *光学学报*, 2016, **36**(1): 320-326.  
LIU Hongtao, CHEN Zhili, LIU Qiang, et al. Analysis of oil flame spectrum characteristics based on wavelet decomposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(1): 320-326.
- [3] Wakatsuki K, Fuss S P, Hamins A, et al. A technique for extrapolating absorption coefficient measurements to high temperatures[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, **30**(1): 1565-1573.
- [4] RAJ P K. LNG pool fire spectral data and calculation of emission power[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **140**(3): 720-729.
- [5] RAJ P K. Large hydrocarbon fuel pool fires: Physical characteristics and thermal emission variations with height[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **140**(1): 280-292.
- [6] Maoult Y L, Sentenac T, Orteu J J, et al. Fire Detection: A New Approach Based on a Low Cost CCD Camera in the Near Infrared[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2007, **85**(3): 193-206.
- [7] 徐建楠, 蒋新生, 张昌华, 等. 不同工况下汽油蒸气爆炸着火延迟与机理分析[J]. *化工学报*, 2019, **70**(1): 398-407.  
XU Jiannan, JIANG Xinshen, ZHANG C H, et al. The ignition delay and mechanism analysis of gasoline vapor explosion under different working conditions[J]. *CIESC Journal*, 2019, **70**(1): 398-407.
- [8] Boudreau S, Levasseur S, Perilla C, et al. Chemical detection with hyperspectral lidar using dual frequency combs[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(6): 7411-8.
- [9] Klassen M S, Sutula J A, Holton M M, et al. Transmission through and breakage of single and multi-pane glazing due to radiant exposure: state of research[J]. *Fire Technology*, 2010, **46**(4): 821-832.
- [10] Grosshandler W L. The effect of soot on pyrometric measurements of coal particle temperature[J]. *Combustion & Flame*, 1982, **55**(1): 59-71.
- [11] Rothman L S, Gordon I E, Barber R J, et al. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2010, **111**(15): 2139-2150.
- [12] Malkmus W. Random lorentz band model with exponential-tailed S-I line intensity distribution function[J]. *Optical Society of America*, 1967, **57**(3): 323-329.
- [13] CHU H Q, LIU F S, ZHOU H. Calculations of gas thermal radiation transfer in one dimensional planar enclosure using LBL and SNB models[J]. *Heat Mass Transfer*, 2011, **54**(21): 4736-4745.
- [14] Hamins A, Anderson D T, Miller J H. Mechanistic studies of toluene destruction in diffusion flames[J]. *Combustion Science & Technology*, 1990, **71**(4-6): 175-195.
- [15] Gordon I E, Rothman L S, Hill C, et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2017, **130**(11): 4-50.
- [16] Elsasser W M. *Heat Transfer by Infrared Radiation in the Atmosphere*[M]. Harvard: Harvard University Press, 1943:43-45.
- [17] Goody R M. A statistical model for water vapour absorption[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1952, **78**(336): 165-169.
- [18] Soufiani A, Taine J. High temperature gas radiative property parameters of statistical narrow band model for H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and CO and correlated k model for H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>[J]. *Heat Mass Transfer*, 1997, **40**(4): 987-991.