

基于小波分解的油料火焰光谱特性分析研究

刘洪涛¹ 陈志莉² 刘 强¹ 尹文琦² 杨 毅³

¹后勤工程学院军事油料应用与管理工程系, 重庆 401311

²后勤工程学院国防建筑规划与环境工程系, 重庆 401311

³后勤工程学院军事工程管理学系, 重庆 401311

摘要 针对油料火焰光谱特性研究不足的现状,通过构建全火焰红外测试系统,在室外开放空间条件下对多种油料及其他可燃物火焰的发射光谱进行了测试分析研究,光谱范围为1~14 μm 。结果表明,蜂窝煤原始光谱信号最为特殊。其他燃料火焰光谱信号经db2小波5层分解后,92#汽油、95#汽油、0#柴油、航空煤油、润滑油火焰光谱低频分量特征相似,在1.2、3.4、4.5 μm 附近存在较强的发射峰。各油料火焰光谱第5层细节系数重叠度较高。92#汽油、0#柴油火焰光谱低频分量及细节系数与其他燃料(木柴、酒精及纸张)相比特征明显。实验结论对基于光谱特性分析的油料火焰探测识别具有重要借鉴意义。

关键词 光谱学; 油料火焰; 发射光谱; db2小波; 火焰探测; 红外测试系统

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0130004

Analytic Study on Spectrum Characteristics of Oil Flame Based on Wavelet Decomposition

Liu Hongtao¹ Chen Zhili² Liu Qiang¹ Yin Wenqi² Yang Yi³

¹Department of Military Oil Application and Management Engineering,
Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China

²Department of National Defense Architecture Planning and Environmental Engineering,
Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China

³Department of Military Engineering Management, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China

Abstract Due to the lack of adequate studies on the characteristics of infrared spectra of oil flame, an analytical study on flame spectra of various oil types and other combustible objects in outdoor space is carried out by establishing an all-flame infrared testing system with the spectral range of 1~14 μm . The results show that the signal of honeycomb briquette spectrum is the most special among all the spectra. After 5-layer decomposition of other fuel flame spectral signals by the db2 mother wavelet, low frequency components of 92# gasoline, 95# gasoline, 0# diesel oil, aviation kerosene and lube flame spectral features are similar and there exist strong emission peaks in the vicinity of 1.2, 3.4 and 4.5 μm . The 5th layer detail coefficients of various fuel oil flame are in line with each other. The low frequency components and the detail coefficients of 92# gasoline and 0# diesel oil flame spectra have obvious features compared with those of other fuels (wood, alcohol and paper). The experimental conclusion is of great significance in the detection and identification of oil flame based on spectral characteristic analysis.

Key words spectroscopy; oil flame; emission spectrum; db2 wavelet; flame detection; infrared test system

OCIS codes 300.2140; 300.6170; 300.6340

1 引 言

油料是重要的能源物资,闪点较低,在存储与运输作业过程中有发生火灾事故的潜在风险。油库火灾

收稿日期: 2015-07-15; 收到修改稿日期: 2015-09-06

基金项目: 国家863计划(2014AA7013037)、国家自然科学基金(21377166)

作者简介: 刘洪涛(1988—),男,博士研究生,主要从事环境化学方面的研究。E-mail: 382106994@qq.com

导师简介: 陈志莉(1971—),女,博士,教授,主要从事环境污染治理方面的研究。E-mail: 1012262034@qq.com(通信联系人)

产生的热辐射及烟气等污染源强度大,易对周边环境造成严重污染。在油库火灾发生早期探测识别燃烧的火焰,可减少火灾损失,为消防指挥奠定基础。现有的火灾监测技术主要包括感温式火焰探测技术、感烟式火焰探测技术、感光式火焰探测器及可燃气体探测技术等,存在探测准确率受环境因素影响较大等问题,会发生漏报或误报等错误^[1]。研究敏感度高的火焰探测器是实现火灾早期报警的关键。油罐爆炸掀顶后的燃烧是典型油池火非预混燃烧^[2],感光式火焰探测器以火焰光谱识别为基础,但目前缺乏针对油料火焰光谱的特征数据源,鲜有油料燃烧火焰光谱特性的研究分析。

国内外研究人员针对其他燃料的火焰光谱进行了系列分析测试研究。夏卿等^[3]对航空发动机尾气气体组分进行了被动式傅里叶红外光谱(FTIR)分析,得到了尾气红外发射光谱。聂万胜等^[4]对火箭发动机尾喷预混燃烧火焰红外辐射特性进行了研究, H_2O 及 CO_2 的强发射波段特征明显。蔡小舒等^[5]基于CCD光纤光谱仪,在500~1100 nm波段范围内对柴油、蜡烛、丁烷等燃料的火焰光谱进行了研究,结果表明柴油、丁烷、蜡烛火焰光谱相似, H_2O 在940 nm的特征峰强度受火焰温度影响,在高温工业环境中呈现发射峰,而在文中实验结果呈现吸收峰。Suo-Anttila等^[6]以正庚烷等燃料作为研究对象,研究了大尺度池火焰辐射光谱特性,结果表明所选的几种燃料池火焰在 H_2O 及 CO_2 发射波段处强度较强,燃烧过程中产生的烟气在靠近液面处会产生强烈的辐射,在光谱图上则表现为遮蔽部分 H_2O 及 CO_2 的发射光谱。Raj^[7]对大尺度液化天然气(LNG)池火焰光谱特性进行了研究,结果表明在整条谱线中存在多个 H_2O 及 CO_2 吸收与发射波段。肖喜中等^[8]针对飞机的探测和跟踪,基于机体红外辐射特征设计了中红外多波段成像光谱仪,结果表明对机体敏感的4个波段中,有2个波段对飞机羽流特别敏感。

红外光谱分析技术基于宽波段范围(0.76~1000 μm)的光谱数据,可对研究目标进行快速、高效、低成本的定性、定量分析,在化学工业中的化学组分特性分析、食品加工业中的食品质量检测等领域均有广泛应用^[9-15]。本文通过搭建光学系统,使用傅里叶红外光谱仪,对92#汽油、95#汽油、0#柴油、航空煤油、润滑油、木柴、蜂窝煤、酒精及纸张的火焰光谱进行测试研究并进行对比分析,重点对油料火焰的光谱特性进行了分析研究,并通过小波分解提取了各种燃料的火焰光谱特征信息,为基于光谱信息的光学传感器识别油料火焰奠定基础。

2 实 验

2.1 实验仪器

采用美国 Thermo Fisher Scientific 公司的 Nicolet 6700 傅里叶红外光谱仪测试各种燃料火焰的红外光谱。该光谱仪的主要技术参数为:信噪比为 50000:1;光谱测试范围为 1~14 μm ,光谱分辨率为 5 nm。点火设备为加加林(JAJALIN)电子点火器。

开放空间条件下的油储罐燃烧属于池火燃烧,相关人员均使用油盘作为液体燃料容器研究池火燃烧特性。实验以油盘(直径为 10 cm,高为 3 cm)盛放油料及酒精,92#汽油、95#汽油、0#柴油购于某加油站,航空煤油购于某机场,润滑油、酒精(乙醇含量为 99%)及纸张(A4)均购于市场;木柴选用杨树的枯树枝;实验过程中保证每次实验油盘内的油量相同,每次用油 50 mL;酒精燃烧火焰光谱测试实验每次使用酒精 60 mL;木柴每次使用数条,保证每次实验质量差在 ± 0.1 kg 范围内;纸张火焰光谱测试实验每次使用 20 页纸。

2.2 实验过程

实验在室外开放空间进行,在各种燃料的火焰上方搭建光学系统,获取整个火焰的光谱信息。在可升降三角支架上安装反射镜,反射镜为圆形(直径为 15 cm),调节反射镜高度和角度,使地面火焰发射光能被反射镜反射到光谱仪探头处。调节好的反射镜距地面 1.5 m、距光谱仪 1.3 m、与地面呈 45°放置,搭建的光学系统实验平台如图 1 所示。实验过程中室外温度为(19±2) °C,气压为 1.013×10⁵ Pa,风力较弱。每次实验前先测定环境背景噪声,消除背景噪声对测试结果的干扰。

2.3 数据处理

对每种燃料燃烧火焰光谱进行多次测试分析,选取测试结果较好的 40 组数据进行分析研究,每组实验扫描 64 次,对每种燃料的 40 组光谱数据取平均并进行归一化处理。各燃料燃烧过程中火焰温度的不断变化、仪器的信号响应强度及环境条件的变化对测得的光谱数据会有一定影响。小波分析在光谱数据分析处理中,可快速、高效地识别光谱特征信息,是光谱研究领域内重要的分析工具。小波分解可将信号分解成包含信号基本特征的低频组分及包含细节特征的高频组分,以短的时间间隔获得原始信号中的高频信息,长的

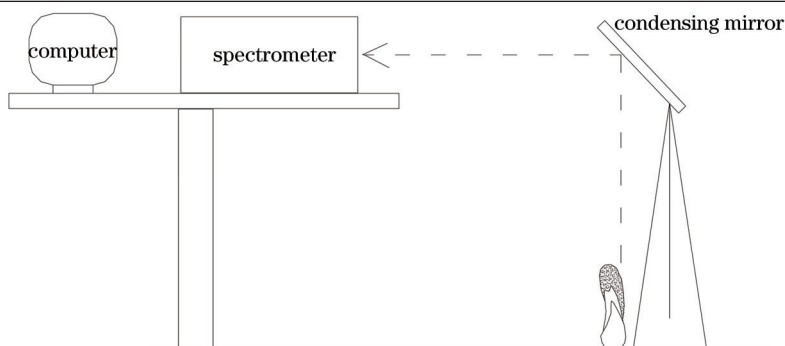


图1 实验平台布局图

Fig.1 Layout of experimental platform

时间间隔获得低频信息,具备局部分析信息细节的能力,广泛应用于噪声处理、图像增强等领域^[16-17]。为定性分析各燃料的火焰光谱特性并获取火焰光谱特征信息,对光谱信号进行小波分解。

波函数的振幅在很短的一段区间上非零且振荡,满足这两个条件的波函数可称为小波^[18]。基本的小波函数可表达为

$$\psi_{a,b}(x) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right), \quad (1)$$

式中 a 为缩放因子, b 为平移因子。若以函数 $f(x)$ 表示原始信号,则对 $f(x)$ 进行小波变换可表示为

$$W_{a,b,f} = W_f(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) f(x) dx. \quad (2)$$

当参数 a, b 为连续数值,则 $\psi_{a,b}(x)$ 称为连续小波变换函数,连续变化的参数 a, b 使连续小波变换函数构成函数系,具有较大的相关性。但连续小波变换会导致计算耗时长、信息冗余,而离散小波变换可同样满足正交完备的条件,可达到压缩数据的效果。经多次实验,选用 db2 小波作为小波基函数,基于 Matlab 2013 分析软件,对各燃料光谱信号进行离散小波变换分析处理。原始光谱信号经小波变换 5 层分解后分别获取低频分量 a_5 及细节系数 d_5 ,在此基础上分析各燃料火焰光谱特性。

3 结果与讨论

3.1 各燃料火焰光谱特性分析

油料燃烧过程一般包括燃烧发展、稳定燃烧及衰减熄灭 3 个阶段,实际油库的储罐内底部可能还含有水层,有可能发生沸腾燃烧,不考虑这种情况。在燃烧发展阶段火焰温度急剧上升,上升到稳定燃烧阶段火焰温度较为稳定,随着液态油不断被燃烧消耗,燃烧进入衰减熄灭阶段,火焰温度逐渐下降直至熄火。3 个燃烧阶段火焰的温度不断变化,主要是由于油料燃烧属于有焰燃烧,且燃烧过程中液态油不断被气化并与空气中的氧气发生反应,释放大量的热量,氧气不断被卷吸至火焰内部,另外环境中风对火焰的稳定性也有一定的影响,因此火焰的温度是在温度平均值上下波动的。文献[5]的研究结果表明温度对 H_2O 的特征峰有影响,在电站锅炉的高温条件下,燃烧产生的 H_2O 在 940 nm 波长处的辐射光谱呈现发射峰;而在文献中开放空间实验条件下,火焰温度比锅炉内火焰温度低,相同波长处 H_2O 的辐射光谱呈吸收峰。

实验测得的各种油料燃烧火焰光谱如图 2 所示。从图中可以看出,92#汽油、95#汽油、0#柴油、航空煤油、润滑油的火焰光谱在 6 μm 后几乎无明显特征,仅在 6.3 μm 附近存在微弱的 H_2O 发射峰;在 1.1 μm 附近存在 H_2O 强发射峰,4.5 μm 附近存在 CO_2 的强发射峰。油料火焰燃烧过程中温度的跳动变化对辐射强度产生了一定的影响,且同种油料不同的燃烧阶段其火焰光谱发射强度不同,但未出现文献[5]中提到的火焰温度改变特征峰的吸收或发射特性。原因是实验在相同的室外开放空间条件下进行,环境条件较为稳定;同时构建的全火焰测试系统可以测得全火焰光谱,火焰温度的变化对火焰光谱特征波段的提取分析影响较小。

酒精、纸张等燃料燃烧过程中温度的变化规律与油料相似,即燃烧过程中温度的变化只影响光谱的辐射强度,因此直接讨论其他燃料火焰的平均发射光谱特性,如图 3 所示。蜂窝煤火焰的光谱曲线最为特殊,明显区别于其他几种燃料的火焰光谱,在 4~5 μm 范围内存在较强的一谷两峰的特征,且两峰的辐射强度几

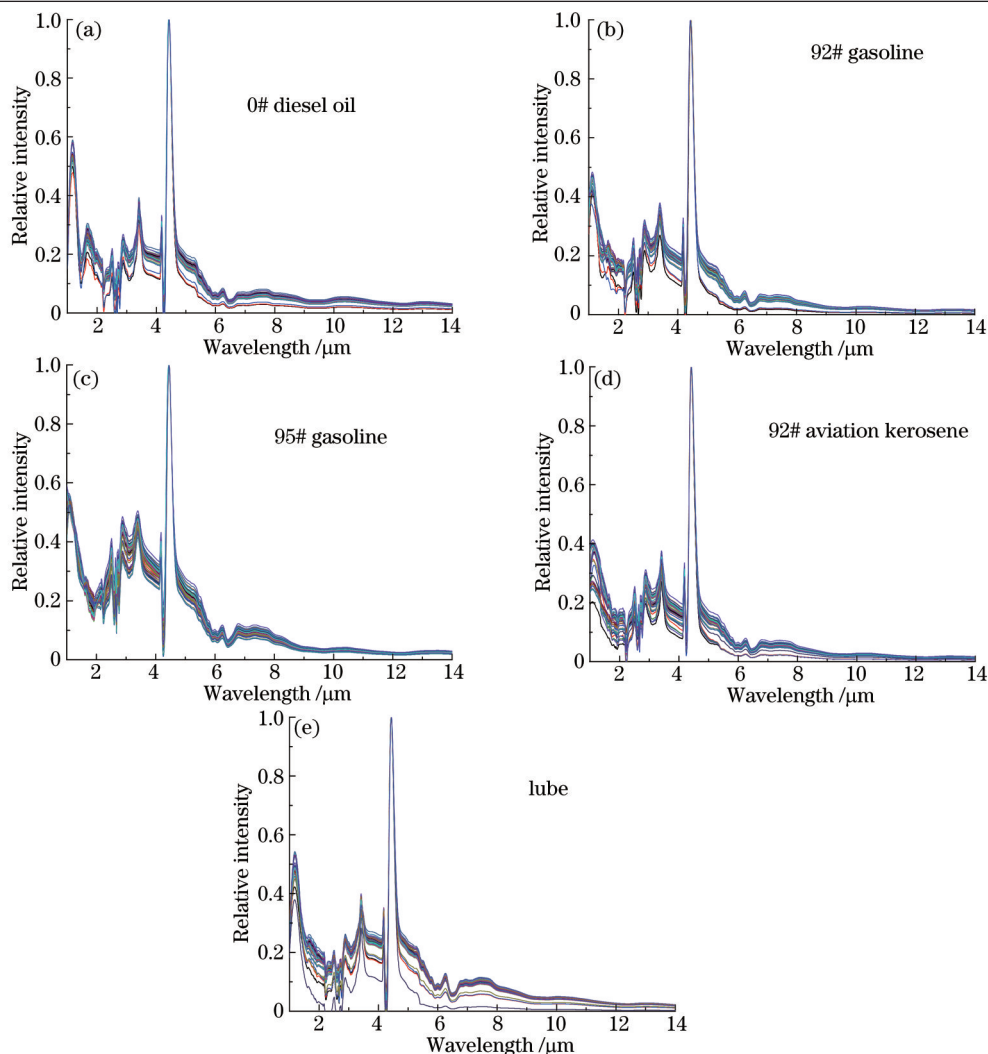


图2 各油料火焰光谱

Fig.2 Flame spectra of various oil types

乎相等;在 $7.5 \mu\text{m}$ 附近存在较强的发射峰。蜂窝煤主要由原煤及碳化木屑等原料组成,成分复杂。煤燃烧反应首先是在高温环境中分解出可燃气,气体在高温作用下与空气中的氧气发生化学反应,即有焰燃烧过程,生成 CO_2 及 H_2O 等物质。随着燃烧反应的进行,煤挥发后的固体不再分解出可燃气,变成以黑碳为主要成分的固体残渣。测试系统得到的煤火焰光谱为整块燃煤火焰及高温固体残渣组成的混合光谱,个别波段出现 $\text{CO}_2(2.7 \mu\text{m}、4.5 \mu\text{m})$ 及 $\text{H}_2\text{O}(2.8 \mu\text{m}、6.3 \mu\text{m})$ 的特征峰。

3.2 各燃料火焰光谱小波变换分析

蜂窝煤火焰光谱信号特征最为明显,因此不作小波变换处理分析。各油料火焰光谱在 $6.3 \mu\text{m}$ 后无明显光谱特征,因此在 $1\sim 6 \mu\text{m}$ 波段范围内对 92#汽油、95#汽油、0#柴油、航空煤油、润滑油火焰光谱信号进行小波变换分析,得到的低频及高频信号如图 4、图 5 所示。

从图 4 可以看出,92#汽油、95#汽油、0#柴油、航空煤油、润滑油火焰光谱低频信号特征波段相似,在 $1.2、2.9、3.4、4.5 \mu\text{m}$ 附近存在发射峰。文献[6-7]对红外波段范围内的碳氢燃料燃烧产物 $\text{H}_2\text{O}、\text{CO}_2$ 等的特征辐射波段进行了详细的论述,相关内容也适于本文的研究分析。如图 4 所示, $1.2 \mu\text{m}$ 附近是 H_2O 的特征发射峰; $1.5\sim 1.75 \mu\text{m}$ 是燃烧产生的烟气颗粒的特征发射,柴油燃烧发烟量略高,因此其火焰光谱在此波段范围内发射强度略强;在 $2\sim 2.6 \mu\text{m}$ 波段范围内不存在 H_2O 及 CO_2 的特征发射峰,辐射强度主要是碳烟颗粒产生的,在 $2.3 \mu\text{m}$ 附近的吸收峰是未燃烧的碳氢蒸气产生的;在 $2.75 \mu\text{m}$ 附近的发射峰是油料燃烧产物 H_2O 蒸汽产生的; $3.4 \mu\text{m}$ 附近的发射峰是参与油料燃烧过程的碳氢蒸气的 C—H 伸缩振动峰;在 $4.5 \mu\text{m}$ 附近的强发射峰是燃烧产物中的热 CO_2 产生的^[6-7]。

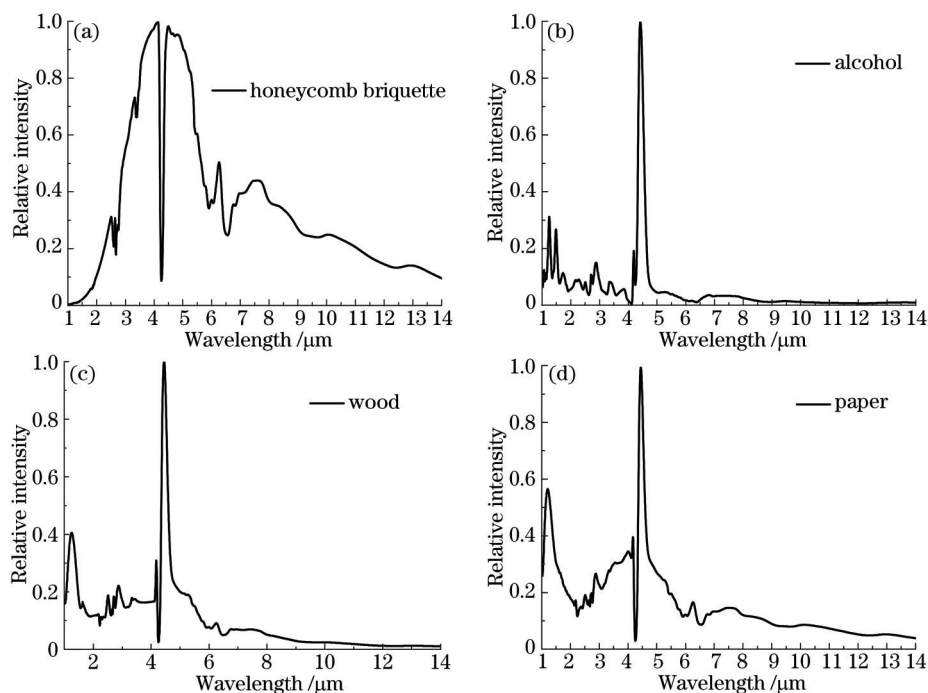


图3 其他燃料火焰光谱

Fig.3 Flame spectra of other fuel types

92#汽油、95#汽油、0#柴油、航空煤油、润滑油火焰光谱信号细节系数如图5所示,5种油料火焰的光谱信号细节系数重叠度较高,表明各油料火焰原始光谱特性相差较小。油料的燃烧过程复杂,各油料的主要成分均来源于原油,因此各油料火焰光谱特性相差不大。

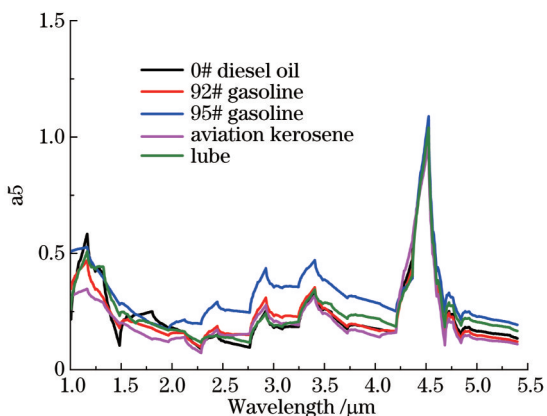


图4 db2小波5层分解低频系数

Fig.4 5th layer low frequency coefficients of db2 wavelet decomposition

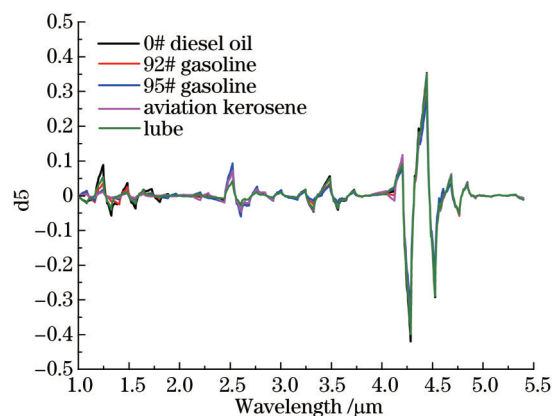


图5 db2小波5层分解细节系数

Fig.5 5th layer detail coefficients of db2 wavelet decomposition

以0#柴油、92#汽油火焰光谱低频信号为代表,与酒精、木柴及纸张火焰光谱的低频系数进行对比分析,结果如图6所示。油料及酒精同属液体燃料,油料中的烷烃是重要组分,酒精主要组分为乙醇。碳氢化合物在3~4 μm区间存在特征红外光谱,因此主要在该波段范围内对0#柴油、92#汽油、酒精、木柴及纸张的火焰光谱细节系数进行分析,结果如图7所示。各燃料火焰光谱低频系数及高频系数特征波段统计如表1所示。

从图6可以看出,5种燃料火焰光谱低频系数具有很大差别,具体表现为:0#柴油、92#汽油及酒精火焰光谱在3.4 μm处呈现较强的发射峰,是液态燃料蒸气C—H伸缩振动引起的,且酒精在4.0 μm附近还存在一个吸收峰。酒精主要由乙醇组成,但其燃烧反应过程也较为复杂,燃烧反应产生多种中间产物,但可能由于存在时间极短或辐射强度较低,因此在火焰光谱中没有体现出特征的发射谱线。汽油组成成分比酒精更复杂,目前尚未见到其详细统一的燃烧化学反应机理。同为液体燃料,汽油与酒精二者燃烧火焰光谱的差异

主要是燃料化学组成及燃烧反应机理不同决定的。纸张及木柴的火焰光谱在 $3.4\ \mu\text{m}$ 处无 C—H 伸缩振动峰。木柴与纸张同为固体燃料,其燃烧反应过程与煤相近。0#柴油、92#汽油、木柴与纸张的火焰光谱因燃料组成及化学反应机理的不同而表现出差异性。木柴与纸张的完全燃烧产物主要为 CO_2 及 H_2O ,因此火焰光谱的主要特征体现在这两种燃烧产物的发射波段处。

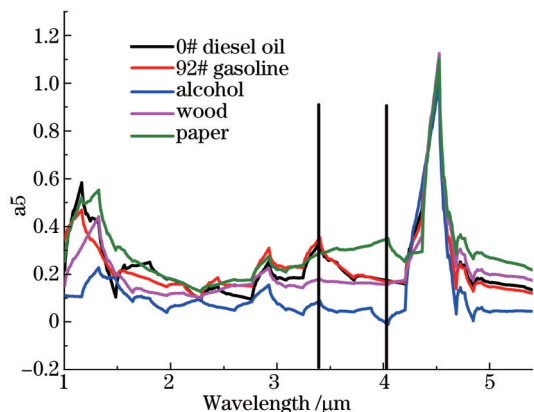


图6 db2小波5层分解低频系数

Fig.6 5th layer low frequency coefficients of db2 wavelet decomposition

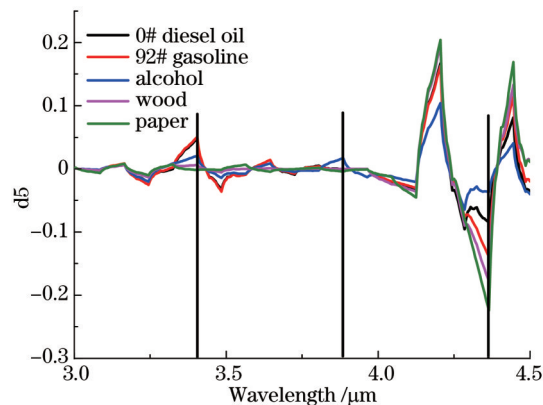


图7 db2小波5层分解细节系数

Fig.7 5th layer detail coefficients of db2 wavelet decomposition

0#柴油、92#汽油、酒精、木柴及纸张的火焰光谱细节系数如图7所示。从图7可以看出,木柴、纸张在 $3.3\sim 4\ \mu\text{m}$ 区间内光谱曲线近似一条水平直线,无明显特征。0#柴油、92#汽油、酒精在 $3.4\ \mu\text{m}$ 处呈现出较强的发射峰,酒精在 $4.3\ \mu\text{m}$ 附近的吸收强度不及其他几种燃料,且在 $3.8\ \mu\text{m}$ 附近存在较强的发射峰,是区别于油料火焰光谱的主要特征波段。

表1 各燃料火焰光谱低频系数及高频系数的特征波段

Table 1 Characteristic bands of low frequency coefficients and high frequency coefficients of fuel flame spectra

	a5 (1~5 μm)	d5 (3~4.5 μm)
0# diesel oil	1.2 μm , 2.9 μm , 3.4 μm , 4.5 μm	3.4 μm , 4.5 μm
92# gasoline	1.2 μm , 2.9 μm , 3.4 μm , 4.5 μm	3.4 μm , 4.5 μm
95# gasoline	1.2 μm , 2.9 μm , 3.4 μm , 4.5 μm	3.4 μm , 4.5 μm
Aviation kerosene	1.2 μm , 2.9 μm , 3.4 μm , 4.5 μm	3.4 μm , 4.5 μm
Lube	1.2 μm , 2.9 μm , 3.4 μm , 4.5 μm	3.4 μm , 4.5 μm
Alcohol	1.2 μm , 2.9 μm , 3.4 μm , 4 μm , 4.5 μm	3.4 μm , 3.8 μm , 4.3 μm , 4.5 μm
Wood	1.2 μm , 2.9 μm , 4.5 μm	4.3 μm , 4.5 μm
Paper	1.2 μm , 2.9 μm , 4.5 μm	4.3 μm , 4.5 μm

4 结 论

通过搭建基于傅里叶红外光谱仪的光学测试系统,在 $1\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段范围内测试分析了多种油料及其他可燃物火焰的光谱特性,以 db2 为小波基对各燃料的火焰光谱信息进行了小波变换特征提取分析。结果表明,在本文实验条件下,油料火焰燃烧过程中温度的变化对火焰光谱辐射强度有一定的影响,但不会导致相同波段处特征峰、谷交替变化;比较各燃料的原始光谱信号,蜂窝煤火焰光谱最为特殊,在 $4\sim 5\ \mu\text{m}$ 范围内存在较强的一谷两峰的特征。92#汽油、95#汽油、0#柴油、航空煤油、润滑油原始光谱信号经小波分解后,火焰光谱低频系数特征相似,在 1.2 、 3.4 、 $4.5\ \mu\text{m}$ 附近存在较强的发射峰,细节系数重叠度较高,表明原始光谱信息的细节特性相差不大;与其他燃料火焰光谱低频系数相比,油料火焰光谱特征主要体现在波长 $3.4\ \mu\text{m}$ 处的发射峰,木柴及纸张在该波段处无明显发射峰;酒精火焰光谱虽然在 $3.4\ \mu\text{m}$ 附近也有类似辐射发射,但在 $4\ \mu\text{m}$ 附近存在较强的吸收特征,而油料在该波段处无特征峰。油料及酒精细节系数在 $3.4\ \mu\text{m}$ 附近特征明显,酒精在 $3.8\ \mu\text{m}$ 附近有发射峰,而油料的细节系数在此波段不存在特征峰。研究结果为基于光谱分析探测识别油料火焰,掌握开放空间条件下的油料火焰燃烧特性奠定了基础,具有重要的研究意义。

- 1 Liu Ping. Research of Flame Recognition Method Based on Multi-Feature Fusion[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012: 2-3.
刘 萍. 基于多特征融合的火焰识别方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012: 2-3.
- 2 J A Fay. Model of large pool fires[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 136(2): 219-232.
- 3 Xia Qing, Zuo Hongfu, Li Shaoheng, *et al.*. Remote passive sensing of aeroengine exhausts using FTIR system[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(3): 616-619.
夏 卿, 左洪福, 李绍成, 等. 航空发动机尾气的 FTIR 被动遥感[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(3): 616-619.
- 4 Nie Wansheng, Yang Junhui, He Haobo, *et al.*. The IR radiation characteristic of exhaust plume of the liquid rocket engine[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2005, 27(5): 91-94.
聂万胜, 杨军辉, 何浩波, 等. 液体火箭发动机尾喷焰红外辐射特性[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(5): 91-94.
- 5 Cai Xiaoshu, Ji Kun, Zhao Zhijun. The measurement of radiation spectrum of flame of different fuel[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(1): 171-173.
蔡小舒, 季 锐, 赵志军. 不同种类燃料火焰的辐射光谱测量[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(1): 171-173.
- 6 J M Suo-Anttila, T K Blanchat, A J Ricks, *et al.*. Characterization of thermal radiation spectra in 2 m pool fires[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 2567-2574.
- 7 P K Raj. LNG pool fire spectral data and calculation of emissive power[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 142(3): 720-729.
- 8 Xiao Xizhong, Wang Yueming, Ma Jun, *et al.*. Multispectral measurements of infrared spectral characteristics of an aircraft[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1030002.
肖喜中, 王跃明, 马 骏, 等. 飞机红外光谱辐射特性的多光谱测量[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1030002.
- 9 Chen Quansheng, Zhao Jiewen, Zhang Haidong, *et al.*. Identification of authenticity of tea with near infrared spectroscopy based on support vector machine[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(6): 933-937.
陈全胜, 赵杰文, 张海东, 等. 基于支持向量机的近红外光谱鉴别茶叶的真伪[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 933-937.
- 10 Zhao Jiewen, Zhang Haidong, Liu Muhua. Preprocessing methods of near-infrared spectra for simplifying prediction model of sugar content of apples[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(1): 136-140.
赵杰文, 张海东, 刘木华. 简化苹果糖度预测模型的近红外光谱预处理方法[J]. 光学学报, 2006, 26(1): 136-140.
- 11 Shi Youming, Liu Gang, Liu Jianhong, *et al.*. Identification of *Auricularia auricular* from different regions by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(1): 129-132.
时有明, 刘 刚, 刘剑虹, 等. 不同产地黑木耳的傅里叶变换红外光谱鉴别[J]. 光学学报, 2007, 27(1): 129-132.
- 12 Zhang Haihong, Zhang Shujuan, Wang Fenghua, *et al.*. Study on fast discrimination of seabuckthorn juice varieties using visible-NIR spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 574-578.
张海红, 张淑娟, 王凤花, 等. 应用可见-近红外光谱快速识别沙棘汁品牌[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 574-578.
- 13 Sun Tong, Wu Yiqing, Li Xiaozhen, *et al.*. Discrimination of camellia oil adulteration by NIR spectra and subwindow permutation analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0630005.
孙 通, 吴宜青, 李晓珍, 等. 基于近红外光谱和子窗口重排分析的山茶油掺假检测[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0630005.
- 14 Song Jia, Li Chenliang, Xing Gaoyang, *et al.*. Study on analyzing active ingredient of *Marasmius androsaceus* via radial basis function neural network combining with near infrared spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1230001.
宋 佳, 李臣亮, 邢高杨, 等. 径向神经网络结合近红外光谱技术分析安络小皮伞发酵组分的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1230001.
- 15 Wu Shengnan, Chen Yongjie, Xing Zhenfang, *et al.*. Synthesis, characterization, and luminescence properties of rare-earth europium aromatic carboxylate organic complexes with 1,10-phenanthroline[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0116005.
吴胜男, 陈永杰, 邢贞方, 等. 稀土铕-芳香羧酸-邻菲罗啉三元有机配合物的合成、表征及发光性能[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0116005.
- 16 Zhang Su, Fu Qiang, Duan Jin, *et al.*. Low contrast target polarization recognition technology based on lifting wavelet[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0211002.
张 肃, 付 强, 段 锦, 等. 基于提升小波的低对比度目标偏振识别技术[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211002.
- 17 Li Qingzhong, Liu Qing. Adaptive enhancement algorithm for low illumination images based on wavelet transform[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0209001.
李庆忠, 刘 清. 基于小波变换的低照度图像自适应增强算法[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0209001.
- 18 Yu Fengqin. Ten Lectures on Practical Wavelet Analysis[M]. Xi'an: Xidian University Publishing House, 2013: 3-4.
于凤芹. 实用小波分析十讲[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013: 3-4.