

文章编号: 1001-9014(2006)05-0382-04

火灾早期过程特征的红外光谱探测和诊断

张晓华, 张认成, 龚雪, 黄湘莹
(华侨大学 机电学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 提出用 CO 作为早期火灾探测的观察对象, 利用红外光谱法进行气体探测, 并在此基础上建立了基于 FTIR 的试验系统. 通过该方法成功获得 CO 的浓度值. 并用时间序列分析方法建立二阶自回归模型, 提取出特征参数进行分析, 能在较短时间内将真假火灾区分开来.

关键词: 红外光谱; 吸收谱; 时间序列分析; 模型

中图分类号: TP274+.52 **文献标识码:** A

DETECTION AND ESTIMATION OF EARLY FIRES' PROCESS CHARACTER BY USING INFRARED SPECTRUM

ZHANG Xiao-Hua, ZHANG Ren-Cheng, GONG Xue, HUANG Xiang-Ying
(Department Of Mechanical Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: It was proposed that CO could be chosen as a target gas to detect early fires. A specific experiment system was set up based on FTIR technology. By using time series analysis, an auto-regressive models for the concentration of CO can be built. Finally, characteristic parameters of models can distinguish the real fire source from nuisance sources in short times.

Key words: infrared spectrum; absorption spectrum; time series analysis; model

引言

火灾对人类的生存及财产安全构成极大的威胁. 在火灾发生的早期及时发现火情, 准确地报警, 防火于未燃是火灾监测的基本要求.

近几年来, 人们充分注意到早期火灾是一个发展过程, 相应的各个物理特征参量也表现出一定的发展规律, 于是利用传感器, 把现场检测到的物理信息传给计算机, 计算机将这种信号变化的历程与事先储存的, 由模拟试验得到的火灾信号变化历程进行相互比较, 做出火灾是否发生的判断, 再根据这种判断决定是否给出火灾报警信号^[1].

基于以上思想, 利用红外光谱法对火灾早期特征气体 CO 进行探测, 建立了基于傅立叶红外光谱 (FTIR) 的试验系统. 利用时间序列分析方法建立 CO 的自回归模型, 提取出特征参数进行分析, 能在较短时间内将真假火灾区分开来. 为火灾的判断提供依据.

1 火灾早期过程观察对象的选择

火灾发生初期主要是进行热解, 生成物以烟气为主, 包括完全燃烧产物 (如 CO₂ 和 H₂O) 和不完全燃烧产物, 如 CO、气态及液态碳氢化合物、碳粒以及醇类、醛类、酮类等其它化学物质.^[2] 该烟气是燃烧产物和燃烧卷吸进来的空气的混合物. 在火灾功率不是很大的情况下, 烟气混合了大量常温空气后, 温度不高. 烟气上升速度大大减慢, 升不到顶棚开始向四周蔓延, 并缓慢沉降. 所以选择温度、烟雾颗粒的浓度作为观察对象, 比较适用于火灾已经剧烈发生的过程中, 不适用于火灾早期探测.

在火灾早期的阴燃阶段, CO 会大量产生, 且浓度变化只受火源燃烧状态的影响; CO 需要很少的热量驱动就可以快速上升; CO 比空气轻, 扩散到天花板顶部比烟雾来的快; 又 CO 浓度的变化早于烟雾的生成, 且浓度变化有规律可循, 于是将它作为火灾早期过程的观测对象.

收稿日期: 2005-11-12, 修回日期: 2006-06-22

基金项目: 福建省自然科学基金项目 (D020015)

作者简介: 张晓华 (1982-), 女, 福建永安人, 华侨大学机电学院硕士研究生, 研究方向: 现代检测技术等.

Received date: 2005-11-12, revised date: 2006-06-22

2 红外光谱探测

2.1 红外光谱法理论分析

本试验对 CO 气体的探测方法不同于常使用的电化学法、金属氧化物探测法以及光生光谱法,而是采用了红外光谱法.它的测量精度高,可对微量气体进行测量.

红外光通过某些透明物质时,某些频率的光会被选择性地吸收而使其强度减弱.因此用选定波长的光,固定光程照射被测物质,测定它的吸光度.计算吸光度的理论根据是 Lambert-Beer 定律^[3]:

$$A = Kl\rho \quad (1)$$

式(1)表明当吸收系数 K 和气体池的长度 L 一定时,红外光通过样品气体时,吸光度 A 与气体浓度 ρ 成正比关系.

一种气体的红外特征吸收光是一个或多个波数连续的谱带.若浓度为 ρ_0 的标准气体的吸光度为 $A_0(v)$,吸收谱带为 $v_0 \sim v_0 + \Delta v$,被测气体浓度为 ρ ,则有:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\int_{v_0}^{v_0+\Delta v} A(v) dv}{\int_{v_0}^{v_0+\Delta v} A_0(v) dv} \quad (2)$$

式中积分因子是给定波段上光谱曲线与波数轴围成的面积,即对应波谱带上光的光强度.因此由此可求得气体浓度.

2.2 基于傅立叶红外光谱仪的试验装置

试验装置是一套基于傅立叶变换红外光谱分析技术(FTIR)的系统.

在傅立叶变换红外光谱仪中,光源发出的光经过迈克尔逊干涉仪变成干涉光^[4],再让干涉光通过气体池,在检测器上获得干涉图样.吸收光谱即为干涉图样的傅立叶变换.

$$B_0(v) = \frac{1}{RT} \int_{-\infty}^{+\infty} I_D(x) e^{-i2\pi vx} dx = \frac{1}{RT} FT[I_D(x)] \quad (3)$$

式(3)中 R 、 T 分别为干涉仪中分束片的反射率和透射率; $B_0(v)$ 为入射光光强信号. $I_D(x)$ 为检测器得到的干涉信号.因此这是利用干涉光得到原始光谱的理论根据.

该系统主要由 NEXUS 傅立叶变换红外光谱仪、10 米气体池、材料加热装置、辅助传感器、气体输送管道、燃烧室和检测室构成,具体试验装置系统如图 1 所示.

材料在燃烧室内加热燃烧,产生的气体通过管

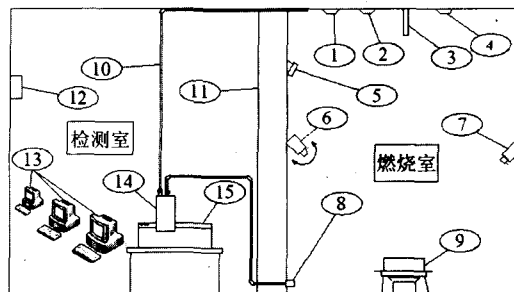


图1 试验装置系统

1. 离子感烟探测器; 2. 光电感烟探测器; 3. 热电偶; 4. 感温探测器; 5. CO/CO₂ 监测器; 6. 视频摄像头; 7. 红外测温仪; 8. 抽风机; 9. 加热装置; 10. 气体输送管道; 11. 墙体; 12. 控制器; 13. 计算机; 14. 10 米气体池; 15. 傅立叶变换红外光谱仪

Fig. 1 Experimental equipment system

1. ionization smoke detector; 2. smoke photoelectric detector; 3. thermocouple; 4. temperature - based fire detector; 5. CO/CO₂ monitor; 6. video camera; 7. infrared - based temperature detector; 8. exhaust fan 9. heater; 10. gas transportation pipeline; 11. wall; 12. controller; 13. computer; 14. 10-meter gas pool; 15. FTIR instrument

道输送到光谱仪气体池中进行光谱测量,然后经管道送回燃烧实验室.

2.3 CO 吸收谱带的确定

实验得到的 CO 气体光谱如图 2 所示.由图可以看出 CO 在 $2000\text{cm}^{-1} \sim 2250\text{cm}^{-1}$ 有很强的光谱吸收,但水蒸汽在这个波长范围内也有吸收峰,尤其是当水蒸汽浓度较大时,许多峰的吸光度都大于 0.05,为避开水蒸汽的这些吸收峰,可选取 $2165\text{cm}^{-1} \sim 2183\text{cm}^{-1}$ 和 $2188\text{cm}^{-1} \sim 2203\text{cm}^{-1}$ 作为 CO 的定量分析光谱区.即图 2 中粗实线所示范围.

3 试验结果

在试验平台上对几种典型的火灾源材料进行了

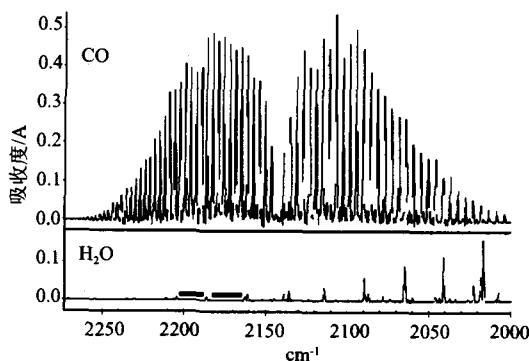


图2 CO 的定量分析区域

Fig. 2 Quantificational analysis area of CO

小功率火灾加热试验,采集时间长度依据材料的特性而定,一般都覆盖了燃烧全过程,包括吸热、热解、发烟、扩散、剧烈燃烧、衰减这6个阶段.另外也作了部分虚假火灾试验.

对光谱数据进行定量分析,便可以得到燃烧过程中CO的浓度的原始数据.部分试验得到的CO浓度数据曲线如图3和图4所示.两图进行对比可知:在真实火灾中,CO的浓度变化是有规律的.CO的浓度从加热开始便不断处于上升趋势,随着加热的不断进行,产生的CO迅速上升至最大浓度值,然后随着材料由不完全燃烧转为完全阴燃燃烧最后耗尽,CO随着气体的外溢而不断减少.在虚假火灾中,CO浓度的变化没有规律可循,具有随机性.

4 时间序列建模

火灾探测得到的CO浓度数据是典型的时间序列.对数据进行规一化和趋势性剔除处理后,能得到零均值的平稳时间序列.对平稳时间序列建模,可得任意P阶的AR模型:

$$x_t = \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} + \dots + \phi_p x_{t-p} + a_t \quad (4)$$

于是将火灾的过程信息提取成几个自回归系数 ϕ ,有效进行了信息的压缩.然后根据压缩后的特征量进行分析.便于将真实火灾和虚假火灾区分开.

选取数据点的个数和报警时间密切相关,在数

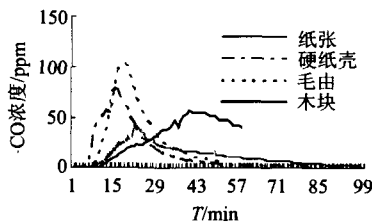


图3 四种材料加热的CO浓度变化
Fig.3 The trend of CO concentration of four kinds of material

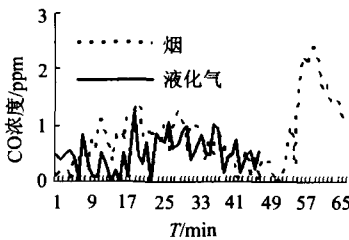


图4 两种假火灾的CO浓度变化
Fig.4 The trend of CO concentration of two kinds of fake fire

据点数最少的情况下建立起的AR模型,提取的特征量若能区分出真假火源,这就是可能达到的最早报警时间.

取出每种典型材料产生CO的前20分钟浓度数据,前19分钟浓度数据直至前10分钟浓度数据,分别计算其自回归模型,并采用AIC准则^[5]对模型阶次进行适应性检验.

$$AIC(P) = N \ln \sigma_a^2 + 2P \quad (5)$$

其中P为模型阶次,N为数据点长度, σ_a^2 为方差.取AIC(P)最小时的模型阶次P为适用模型阶次.经过计算,得出各种材料在不同数据长度下各阶次模型AIC值.取各次试验的20分钟数据建立的AR模型的适应性检验值进行比较,可绘成图5.

从图5可以看出AR(2)、AR(3)和AR(4)模型的AIC值均非常接近,说明这几阶次的模型对火灾前20分钟内CO浓度数据构成的时间序列进行预测差别不大,图中大部分AIC(2)的值相对较小(图中实线所示),根据实际运用需要,2阶模型能满足要求.对不同数据长度建立的模型进行适应性检验均都能得到该结论,因此均对试验数据建立二阶模型.

建立了模型后,提取出二阶模型自回归系数 ϕ_1 、 ϕ_2 绘于相平面,可以看出真假火灾其模型参数有着明显不同的分布.如图6和图7,图中圆圈代表假火灾,星号代表真实火灾,横纵坐标分别为 ϕ_1 、 ϕ_2 除以各自的残差均方值(以便更好的看出其分布特性).从图中可见真火灾(星号)和假火灾(圆圈)分别位于两个不同的区域.

同理绘出19至12分钟火灾分布相平面图,可得:20分钟的时候能从图中较好的区分真假火灾,随着所取建模数据点数的减少,真假火灾的区域逐渐靠近.到达13分钟的时候还是能将它们区分开,而到12分钟的时候,模型参数已经混成一片,真假火源的分界线趋于模糊.因此,确定建模数据为各次试验的前13分钟的数据,可以保证真假火源判别的准确性和火灾探测的“及时性”.

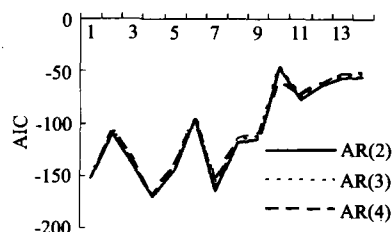


图5 AIC值比较图
Fig.5 Comparison image of AIC data

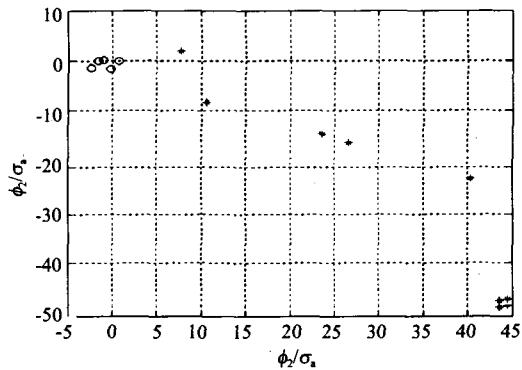


图6 真假火灾分布图(20分钟)

Fig.6 Distributed image of real fire and fake fire (20 min)

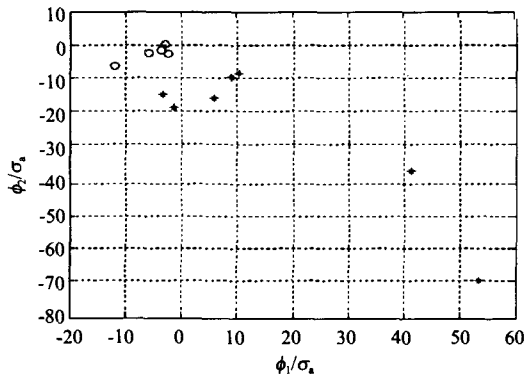


图7 真假火灾分布图(13分钟)

Fig.7 Distributed image of real fire and fake fire (13 min)

中的特征气体数值,为全面分析火灾过程提供详尽的数据资料。

通过对早期火灾过程的时间序列建模,提取出 ϕ_1 、 ϕ_2 这两个含有丰富火灾信息过程的参数进行分析,能在较短时间内将真假火灾区分开来。该方法充分利用了火灾的过程,而不是针对某个时刻的值对火灾进行判断。

可以继续通过大量的试验,对各种火灾环境下的CO数据建模,归纳分析建立专家知识库,从而将这一针对过程的探测算法不断完善,以提高火灾早期探测的灵敏度,降低误报率。

REFERENCES

- [1] CHENG Xiao-Fang, WANG Rui-Fang. Intelligent fire safeguard system in Japan[J]. *Fire Technology and Product Information* (程晓舫,王瑞芳. 日本智能火灾安全系统. 消防技术与产品信息). 1996, (3): 36—43.
- [2] FAN Wei-Cheng. *Compendious tutorial of fire* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press (范维澄. 火灾简明教程. 合肥:中国科技大学出版社). 1995.
- [3] WU Jin-Guang. *Neoteric fourier transform Infrared Spectroscopy Methods and Applications (Vol. 1st)* [M]. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House (吴瑾光. 近代傅立叶变换红外光谱技术及应用(上卷). 北京:科学技术文献出版社). 1994.
- [4] WU Hang-Xing, Wang Mo-Chang. Analysis on the decrease of signal modulation in fourier transform spectrometer[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吴航行,王模昌. 傅立叶变换光谱仪信号调制下降的分析. 红外与毫米波学报). 2004, 23(5): 337—340.
- [5] YANG Shu-Zi, WU Ya. *The engineering Application of Time series Analysis* [M]. Wuchang: Huazhong University of Science and Technology Press (杨叔子,吴雅. 时间序列分析的工程应用. 武昌:华中理工大学出版社). 1992.

5 结束语

利用红外光谱探测方法,能动态采集火灾过程