

CO 和 CO₂ 气体红外光谱技术在火灾早期探测中的应用研究

杜建华, 张认成, 黄湘莹, 龚雪, 张晓华

华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362011

摘要 通过对现有各种火灾探测方法进行归纳分析, 提出以 CO 和 CO₂ 作为探测特征参量的傅里叶红外光谱技术早期火灾探测新方法, 并在此基础上建立了完善的早期火灾实验系统。通过大量真假火灾实验得出常见材料在火灾发生过程中产生气体浓度的变化特征: 真实火灾产生出大量的 CO 和 CO₂, 浓度变化非常有规律; 假火灾只产生极少量的 CO, 且浓度变化杂乱无章。从浓度数据中提取出火灾发生的特征信息制定探测算法就可以有效地提高早期报警的分辨率, 降低火灾探测的误报率。

关键词 傅里叶变换红外光谱 (FTIR); 早期火灾探测; 气体浓度探测

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2007)05-0899-05

引言

火灾探测是关系人民生命财产安全的重大课题。随着火灾探测技术的不断发展, 人们对火灾的认识也越来越深入, 不断涌现出新的探测手段。然而现有的大多数火灾探测器只能在火灾发生到难以控制的形势后才发出报警信号。对于一些处于长期运行状态的, 电气设备过载、过热、短路的火灾隐患, 火灾孕育初产生的热量和燃烧物都很少的重要场所, 如计算机机房、DCS 控制中心、精密仪器实验中心、网络数据中心等需要对火灾进行严格控制, 确保在火灾发生初期就能及时发现火情并进行扑灭, 否则造成的损失将无法估量。因此, 如何把火灾消灭在萌芽状态, 实现火灾早期探测报警避免严重损失是目前亟待解决的一个重大问题。火灾的早期探测难题主要集中在探测对象和探测方法上, 针对这些问题, 需要对火灾发生的过程和产物作一个详细的了解。

1 火灾中 CO 和 CO₂ 红外光谱探测

火灾的发生和发展是一个非常复杂的非平稳过程, 除了自身的物理化学变化以外还会受到许多外界的干扰, 火灾一旦发生便以接触式(物质流)和非接触式(能量流)的形式向外释放能量。接触式形式包括气体、烟雾、气溶胶等。非接触式如声音、辐射等^[1]。火灾发生初期主要是热解的过程, 生成物以烟气为主, 其中包括完全燃烧产物(如 CO₂ 和 H₂O)和不完全燃烧产物, 如 CO、气态及液态碳氢化合物、炭粒以

及醇类、醛类、酮类、酸类、酯类和其他类化学物质^[2]。其中气体产物主要成分为 CO₂, CO 和水汽, 由于空气湿度对水汽含量有很大影响, 一般不取它作为火灾探测的对象。因此将 CO₂ 和 CO 作为判断早期火灾探测的特征气体。图 1 将各类探测器报警时间做了一个比较, 从中可以看出气体作为早期报警探测对象的明显优势^[3]。

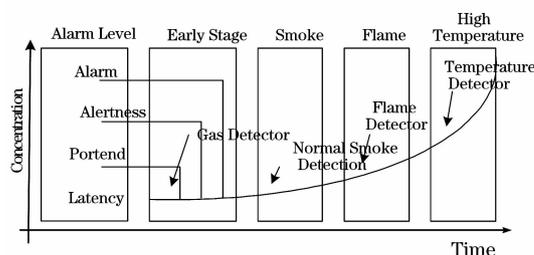


Fig. 1 Alarm time of all kinds of fire detectors

针对气体的探测方法很多, 目前使用较多的是电化学方法和金属氧化物探测。电化学方法有定电位电解式, 隔膜离子电极式等, 但价格较高, 寿命不长, 且无法预知其是否失效。金属氧化物探测需要加热, 非本质安全, 其他干扰气体易使它产生虚假报警, 在潮湿环境下极易失效退化, 且无法探测低浓度的气体。

傅里叶变换红外光谱法是目前气体浓度测量最为理想的一种手段。它将光束通过迈克尔逊干涉仪变为干涉光通过气体样品, 经过傅里叶变换还原出气体的光谱图, 光谱图含有丰富的谱元信息, 具有高的信噪比和分辨率^[4]。根据气体对特定波长的入射光的吸收作用, 由特定波长处的吸收峰大小

收稿日期: 2006-01-20, 修订日期: 2006-04-08

基金项目: 福建省自然科学基金项目(D020015, 2006J0138)和华侨大学基金项目(06HZR09)资助

作者简介: 杜建华, 1979 年生, 华侨大学机电及自动化学院助教

e-mail: dujh98@163.com

可以计算出气体的浓度。

2 火灾实验

为研究火灾发生过程中的 CO 和 CO₂ 气体浓度变化规律, 研究人员建立起专门的实验装置。通过红外气体光谱方法对各种典型火灾中的 CO 和 CO₂ 气体浓度数据进行采集, 下面将实验系统做一简单介绍。

2.1 实验装置

实验系统主要由美国热电尼高力公司的 NEXUS 傅里叶变换红外光谱仪, 10 米长光程气体池, 材料加热装置, 辅助传感器和气体输送管道等构成, 如图 2 所示, 其中 1, 2, 3, 4 分别为光电感烟探测器、离子感烟探测器、热电偶和定温探测器; 5 为 CO 和 CO₂ 监测仪; 6, 7 分别为摄像头和红外温度监测仪; 8, 9 分别为抽风机和材料加热装置; 10 为气体输送管道; 11 为墙体; 12 为感烟感温报警控制器; 13, 14 分别为实验中使用的计算机和 10 米长光程气体池; 15 为傅里叶变换红外光谱仪。

系统各部分分别放置于两间实验室(燃烧实验室和气体检测实验室), 材料加热燃烧在燃烧实验室进行, 产生的气体产物通过管道输送到光谱仪气体池内进行光谱测量, 然后又经管道送回燃烧实验室, 动态采集材料加热或燃烧过程中的气体光谱数据。在燃烧实验间安装的仪器将各自的数据发送至气体检测实验室的计算机中进行监控。其中热电偶和红外测温仪分别用于监测环境温度和燃烧物表面温度。

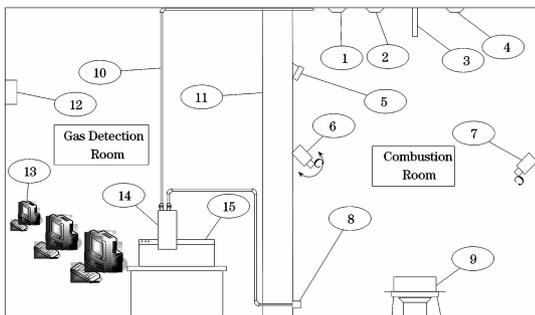


Fig. 2 The structure of lab

2.2 材料燃烧过程分析

根据燃烧学理论^[5, 6]可知, 可燃物燃烧时一般经历吸热、热解、发烟、火焰扩散、全燃、衰减等 6 个阶段。由于各种材料的结构、成分、抗燃烧能力等特性的不同, 其燃烧的 6 个阶段所经历的时间也各不相同。

吸热、热解、发烟这 3 个阶段属于火灾的早期阶段。吸热阶段中热量不断集聚, 温度逐渐升高, 最后达到材料的热解临界温度进入热解阶段。在热解阶段, 材料表面处于不完全燃烧的状态, 产生大量 CO 和少量的 CO₂, 同时伴随着极少量的烟雾, 环境温度基本没有变化。热解过程中, 热量继续积累, 局部材料在微观结构上表现出完全燃烧性状, CO₂ 生成速率增大, 烟雾增加。在发烟阶段, 烟雾开始大量产生, 同时 CO 和 CO₂ 浓度继续增加。这 3 个阶段火灾尚未造成损失, 热量释放率比较低, 环境温度基本没有变化, 烟雾浓度

也不是很高。一般的探测器如感温探测器和感烟探测器无法实现报警, 而特征气体 CO 和 CO₂ 的浓度已经具有非常显著的浓度特征, 研究它们在这 3 个阶段的浓度变化, 对于早期火灾探测具有非常重大的意义。

扩散、全燃、衰减这 3 个阶段属于燃烧阶段。在扩散阶段中, 烟雾大量产生, 材料大部分碳化, CO 和 CO₂ 浓度继续增加, 经过一段时间, 热量累积到其着火点, 明火出现, 进入全燃阶段。全燃阶段中光、热、烟变化剧烈, 是火灾最具破坏力的阶段。可燃物质燃烧殆尽后便进入衰减阶段, 火灾过程逐渐结束。目前各类传统火灾探测器均只能在扩散阶段中后期和全燃阶段实现报警, 此时火灾损失已经相当严重。

2.3 材料加热燃烧实验

火灾早期一般都是热量逐步积聚的过程, 材料处于加热状态, 且温度不是很高, 材料进入阴燃燃烧后温度才会继续升高。

为研究火灾早期过程中 CO 和 CO₂ 的产生规律, 进行了各类型材料的加热燃烧实验。实验中光谱仪采用 MCT-A 检测器, 分辨率为 4 cm⁻¹, 扫描次数 64, 光谱采集时间间隔为 1 min。用于火灾早期探测特征气体 CO 和 CO₂ 定量分析波段分别为 2 203~2 188 cm⁻¹, 2 183~2 165 cm⁻¹, 772~746 cm⁻¹ 和 739~722 cm⁻¹。

2.3.1 木材加热实验

按照国家标准火灾实验要求^[7], 将湿度 3% 的山毛榉木切割成 1 cm×2 cm×3.5 cm 规格大小的木块。木块叠放于加热盘上, 调节加热炉的温度控制器, 使炉温由室温升至 500 °C 后保持恒温。从加热炉通电开始, 每隔一定的采样间隔, 同时记录气体光谱, 环境温度, 燃烧物表面温度, 以及气体监测仪等数据, 试验中全程记录燃烧过程的视频录像, 以备将光谱特性的变化趋势与燃烧过程进行对照分析与对比。实验持续 60 min, 采集时间间隔为 1 min。实验过程中采集的视频截图如图 3 所示。

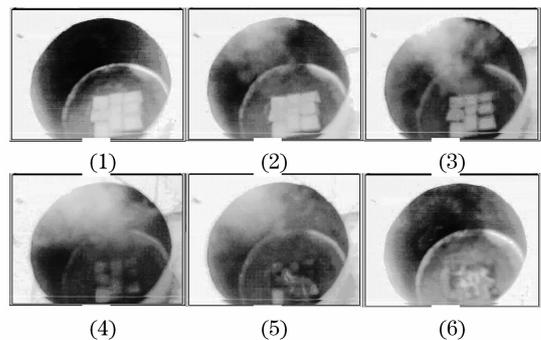


Fig. 3 Image of wood block when heated

图 4 和图 5 所示为实验过程中截取某个 5 min 时间段内的 CO₂ 和 CO 的光谱图。从图中可以看出 CO₂ 和 CO 吸收峰高度已经有了一定的变化。将实验连续采集得到的光谱图进行处理形成光谱瀑布图。如图 6 和图 7 所示, 从光谱瀑布图可以形象的看出随着时间的变化, CO₂ 和 CO 吸收峰出现了显著的高度变化, 这说明它们的浓度发生了连续的改变。通

过光谱定量分析方法对所有光谱进行浓度定量得到所对应的气体浓度数据,如图 8 所示。

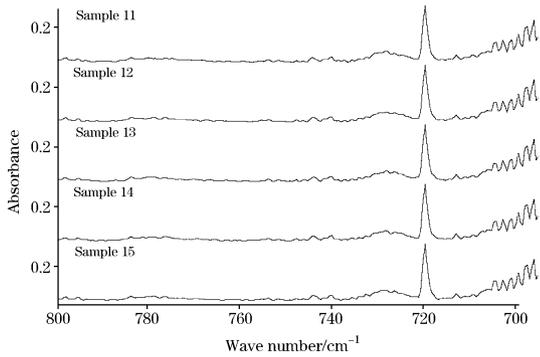


Fig. 4 Part of spectra of wood block when heated(CO₂)

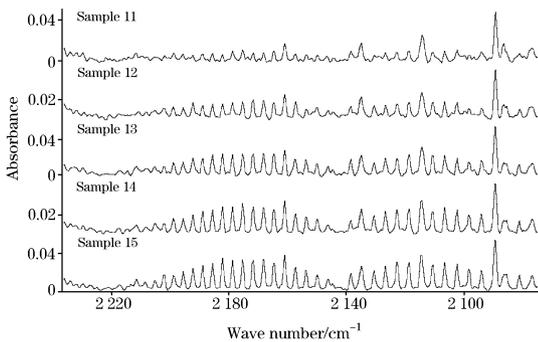


Fig. 5 Part of spectra of wood block when heated(CO)

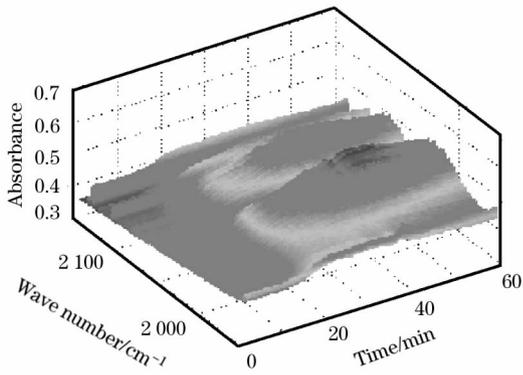


Fig. 6 Continuous spectra of wood block when heated(CO)

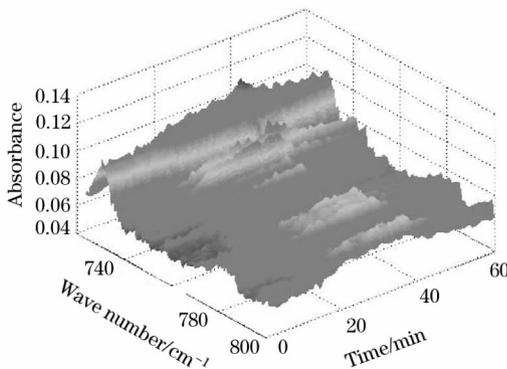


Fig. 7 Continuous spectra of wood block when heated(CO₂)

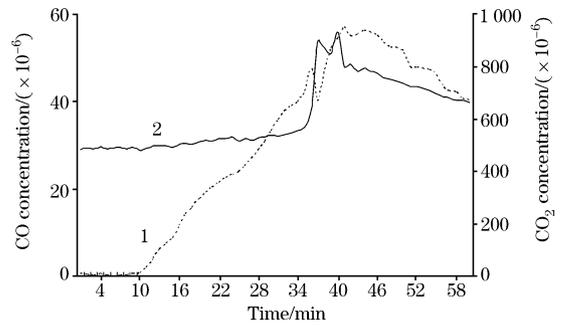


Fig. 8 Concentration curves of CO and CO₂

1: CO; 2: CO₂

2.3.2 木材加热实验结果分析

加热开始后木块进入吸热阶段,木块表面温度逐渐升高,在达到其热解临界温度以前,基本不产生任何火灾产物(CO, CO₂和烟雾等)。在这一阶段的光谱瀑布图(见图6)中CO没有吸收峰出现,因而表现为一个平面;CO₂的吸收峰由空气中存在的CO₂产生,总浓度没有变化,故在光谱图上表现为一个水平曲面(见图7)。由光谱定量得到的浓度数据曲线(见图8)同样可以看出这一阶段CO和CO₂浓度基本没有变化。吸热阶段的实际加热图像如图3中(1)所示,此阶段大约持续10 min。

10 min以后热量已经积累到一定程度,超过其热解临界温度,木块进入热解阶段。开始产生CO和CO₂,浓度曲线(见图8)呈现上升趋势。此时木材由于受热还不是特别强烈,微观结构上主要是以不完全燃烧为主,产生出大量的CO,少量烟雾也随之出现。从瀑布图6可以明显看到CO吸收峰出现,且峰值开始增加。这个阶段大约持续至第25 min左右,实物如图3中(2)所示。

发烟阶段,烟雾开始大量产生,如图3中(3)(4)所示,木块局部碳化程度已经很大,CO和CO₂浓度继续攀升。木块处于极不稳定的状态。到达35 min后热量积累到一定极限,明火出现[如图3中(5)],CO₂大量产生,由(见图8)浓度曲线可以看出CO₂上升趋势非常剧烈,相应的吸收峰(如图7)增加也很大。此后木块经过一段时间的燃烧便基本耗尽,如图3中(6),气体开始扩散,CO和CO₂浓度开始逐渐恢复到正常环境状态值。

2.3.3 其他材料加热实验

除木材外,还对其他一些典型火灾材料进行了加热燃烧实验。采集系列光谱图,通过光谱定量分析方法得出各个光谱所对应的气体浓度数据。图9和图10列出了其中几种材料加热过程中的CO和CO₂气体浓度变化综合图。

可以看出,四种材料在加热过程中都产生了大量的CO₂和一定量的CO。加热开始后,与加热板接触的材料表面温度开始迅速上升,当热量积聚到一定程度时,材料组织开始碳化,产生出CO和CO₂,随着加热的不断进行,局部会形成阴燃现象,材料急剧碳化,CO和CO₂大量产生。加热开始阶段碳颗粒主要处于不完全燃烧的状态,CO生成量明显多于CO₂,所以CO浓度的上升速率非常快,浓度曲线非常

陡峭。当热量积累达到材料的燃点时明火产生，CO₂ 大量产生，部分 CO 也在高温作用下进一步氧化为 CO₂。故易于燃烧的材料(如毛巾，棉绳等)，CO₂ 浓度的峰值总是滞后于 CO 的峰值。不易燃烧的材料(如木块，胶合板等)在加热开始阶段碳颗粒主要生成 CO 气体，由于这类材料的内部组织相对较为密实，碳化速度较慢，所以 CO 浓度上升趋势比较平缓，CO₂ 浓度基本不变。当热量积聚使得材料产生明火燃烧后 CO₂ 大量增加，产生一个明显的上升波峰(如木块 CO₂ 曲线)。胶合板是一种经过特殊研制的木质材料，具有防火性能，在木块着火燃烧时，它仍然没有燃烧，只是生成少量 CO₂，仍要经过一段时间的持续加热才会有明火出现。

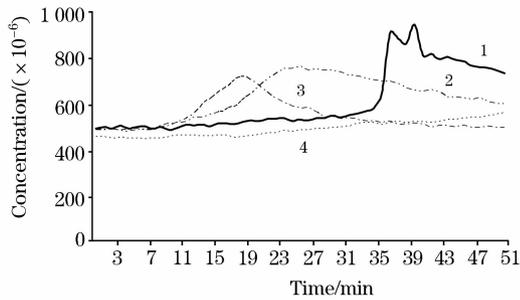


Fig. 9 CO₂ concentration curves of four materials when heated
1: Wood; 2: Cotton wick; 3: Veneer; 4: Washrag

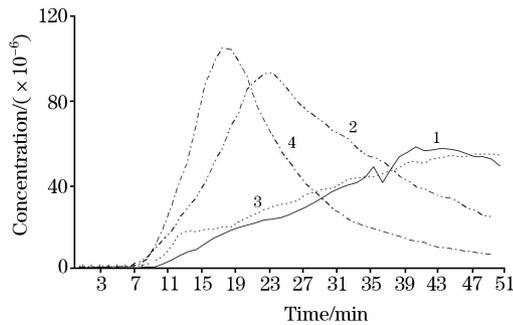


Fig. 10 CO concentration curves of four materials when heated
1: Wood; 2: Cotton wick; 3: Veneer; 4: Washrag

可见各类材料在受热过程中，CO 和 CO₂ 浓度变化非常有规律。提取真实火灾中气体浓度的这种特征信息可以有效实现火灾的早期预警和探测的灵敏度。

2.4 火灾探测干扰源气体采集实验

一般情况下，许多火灾探测干扰源都不产生 CO，或生成少量的 CO，且其变化规律也和真实火灾不相同。因此，除了对于真实火灾源材料的实验分析外，还对于可能出现的火灾探测干扰源进行了气体采集实验。图 11 所示为家居环境下蜡烛燃烧、香烟燃烧和烹饪过程液化气燃烧时的 CO 浓度变化图。从图中可以明显看出它们与真实火灾热加实验气体浓度变化的区别，干扰源产生的 CO 浓度没有明显的规律，且最大值只有 1×10^{-6} 。这种变化特征很容易与真实火灾源区分开来，从而降低火灾探测的误报率。

3 特征气体浓度数据初步分析

火灾中 CO 和 CO₂ 总是伴随产生，两者之间存在着必然的联系。在真实火源实验初期，材料表面温度开始迅速上升，当热量积聚到一定程度时，材料组织开始碳化，产生 CO 和 CO₂，直至局部发生阴燃，CO 和 CO₂ 快速增长。由于阴燃是材料的不完全燃烧，CO 的相对增长率明显高于 CO₂，阴燃持续一段时间后产生明火，材料充分燃烧，产生大量 CO₂，部分 CO 进一步被氧化为 CO₂，随后火灾气体逐渐扩散，燃烧过程结束。可见，真火源初期 CO 浓度绝对值小，但上升速度快，相对变化大。CO₂ 绝对值大，但变化缓慢，相对变化小。因此两者浓度比值 n_{CO}/n_{CO_2} 在火灾初期的变化必然较大。而假 CO/CO₂ 火源中产生的 CO 极少， n_{CO}/n_{CO_2} 浓

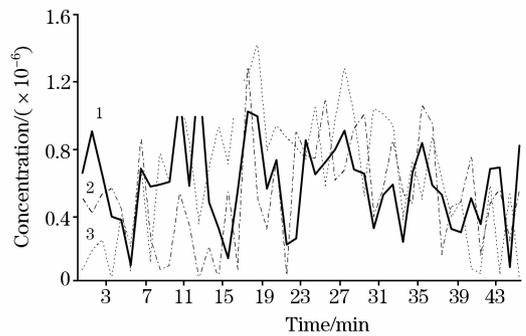


Fig. 11 CO concentration of three nuisance sources
1: Candle; 2: Petroleum; 3: Petroleum

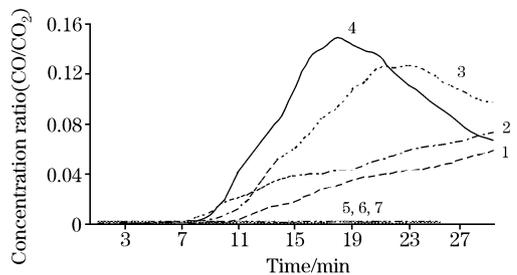


Fig. 12 Concentration ratio of Co and CO₂

1: Wood; 2: Veneer; 3: Cotton wick; 4: Washrag;
5: Candle; 6: Petroleum gas; 7: People smoking

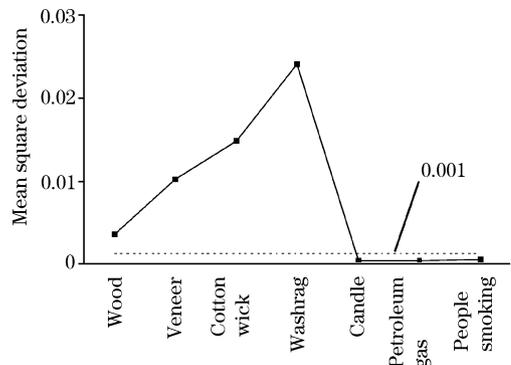


Fig. 13 Mean square deviation of concentration ratio of Co and CO₂

度比值总是接近零。真假火源的 n_{CO}/n_{CO_2} 在量值上有着明显的差别。图 12 给出了几种材料采集实验前 30 min CO 和 CO₂ 浓度比值的曲线图。

从统计的观点考虑, 标准差反映出数据点与其均值的分散程度的一种数字特征。数据分散程度大, 则标准差大; 数据分散程度小, 则标准差也较小。取火灾开始前 13 min 的数据进行计算, 得出各材料 CO/CO₂ 浓度比值标准差, 如图 13 所示, 从中可以看出在前 13 min 内, 真火源 CO/CO₂ 浓度比值变化大, 其标准差也较大。虚假火源 CO/CO₂ 浓度比值变化较小, 则其标准差必然较小, 均在 1×10^{-3} 以下。根据 CO/CO₂ 浓度比值标准差的这种数值特性, 可以很容易在 13 min 内将真假火源分辨出来。而传统火灾探测器报警时间一般都在火灾发生 21 min 以后。如表 1 所示。

4 小 结

火灾早期探测技术研究是火灾研究领域一个非常重要的课题, 探索新型智能的早期探测手段是火灾研究的必然趋

势。火灾发生的初期, CO 和 CO₂ 会大量产生, 浓度变化十分有规律, 非火灾源产生的 CO 极少, 且浓度变化杂乱无章, 两者浓度变化具有极紧密的联系, 且与火灾源特性密切相关。通过对各种火灾环境下的 CO 和 CO₂ 浓度变化进行归纳分析, 得出其中的变化规律, 建立专家知识库, 从而形成完善的早期火灾探测算法就可以有效的提高火灾早期探测灵敏度, 降低误报率。

Table 1 The alarm time of traditional fire detector/min

| | Photoelectric smoke detector | Ionization smoke detector | Fixed temperature detector |
|---------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Wood | 32 | 33 | — |
| Veneer | 26 | 28 | — |
| Cotton wick | 27 | 26 | — |
| Washrag | 21 | 22 | — |
| Smoking | — | — | — |
| Candle | — | — | — |
| Petroleum gas | — | — | — |
| — No alarm | | | |

参 考 文 献

- [1] DU Jian-hua, ZHANG Ren-cheng(杜建华, 张认成). Fire Technic and Products Information(消防技术与产品信息), 2004, (7): 10.
- [2] FAN Wei-cheng, et al(范维澄, 等). Fire Safe Science Tutorial(火灾学简明教程). Hefei: Press of University of Science and Technology of China(合肥: 中国科技大学出版社), 1995. 10.
- [3] Hagen B C. Evaluation of Gaseous Signature in Large-Scale Test, Master of Science Thesis. Department of Fire Protection Engineering, The University of Maryland. College Park, MD, 1994.
- [4] NIE Liang, ZHANG Jun(聂亮, 张骏). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2004, 24(8): 953.
- [5] ZHAO Hui-fu(赵惠富). Combustion Science(燃烧学). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1983. 9.
- [6] ZHOU Li-xing(周力兴). Combustion Theory and Hydrodynamics(燃烧理论与流体力学). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1986.
- [7] Fire Safe Standard Manual(消防标准汇编). Beijing: Standard of China Press(北京: 中国标准出版社), 2002. 405.

Research on Early Fire Detection with CO-CO₂ FTIR-Spectroscopy

DU Jian-hua, ZHANG Ren-cheng, HUANG Xiang-ying, GONG Xue, ZHANG Xiao-hua
College of Mechanical Engineering and Automation of Huaqiao University, Quanzhou 362011, China

Abstract A new fire detection method is put forward based on the theory of FTIR spectroscopy through analyzing all kinds of detection methods, in which CO and CO₂ are chosen as early fire detection objects, and an early fire experiment system has been set up. The concentration characters of CO and CO₂ were obtained through early fire experiments including real alarm sources and nuisance alarm sources. In real alarm sources there are abundant CO and CO₂ which change regularly. In nuisance alarm sources there is almost no CO. So it's feasible to reduce the false alarms and increase the sensitivity of early fire detectors through analyzing the concentration characters of CO and CO₂.

Keywords FTIR; Early fire detection; Gas concentration detection

(Received Jan. 20, 2006; accepted Apr. 8, 2006)