

# FTIR遥测化学烟雾及其干扰物的微弱光谱

张骏 荀毓龙

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽, 合肥, 230031)

X511

**摘要** 给出被动式傅里叶变换红外辐射仪 FTIR 远距离遥测烟雾微弱光谱, 分析了化学烟雾 DMMP 光谱特征, 以及用于屏蔽 DMMP 烟雾的多重干扰物光谱和屏蔽效果。

**关键词** 遥测, 光谱特征, 傅里叶变换红外光谱仪。

烟雾测定

## 引言

从远距离复杂环境中分离出红外光谱的“特殊”成份, 是一件相当复杂且费时的工作。由于烟雾的红外辐射微弱, 仅占背景及干扰物谱的 1% 或更低, 背景温度的微小变化远大于烟雾的辐射信号, 加之谱的特征与许多干扰物谱(如尘土、柴草烟等)十分相似, 使得辨别工作更加的困难。传统的光谱成份分析方法, 既费时又繁琐, 不能满足实时鉴别并报警的要求。因此利用模式识别方法<sup>[1]</sup>的光谱分类技术, 可快速识别光谱并实时报警。从大量野外实验获得的烟雾光谱中进行特征提取, 构成一鉴别器, 光谱鉴别器决定了该系统报警的正确率, 其质量取决于对光谱特征的提取。因此化学烟雾 DMMP 的光谱特征, 以及用于屏蔽 DMMP 特征的多种干扰物(如柴草烟、引擎废气、尘土等)的光谱属性, 是我们进行特征提取、构成鉴别器的关键。

## 1 基本原理

遥测烟雾的实验如图 1 所示。根据 Flaniagn<sup>[2]</sup>的辐射模型, 假定大气和烟雾都是均匀的, 当目标烟雾充满视场, 且烟雾厚度  $d$  远小于烟雾到传感器的距离  $R$  时 ( $R \geq d$ ,  $R > 1.5\text{km}$ ), FTIR 接收到的能量包括: 温度为  $T_{bk}$  的背景自身辐射亮度  $L_{bk}(\lambda, T_{bk})$  经目标烟雾长度为  $d$  的衰减, 并进一步经大气长度为  $R$  的衰减后到达传感器收集瞳孔的辐亮度, 温度为  $T_{tg}$  的目标烟雾自身辐射亮度  $L_{tg}(\lambda, T_{tg})$  经大气长度为  $R$  的衰减到达收集瞳孔的辐亮度, 周围环境温度为  $T_{am}$  的大气自身辐射亮度  $L_{am}(\lambda, T_{am})$  到达收集瞳孔的辐亮

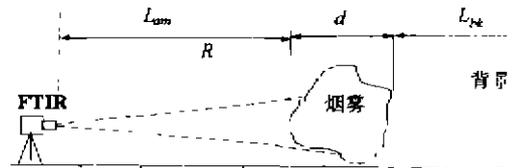


图 1 用 FTIR 遥测化学烟雾及干扰物的实验  
Fig. 1 Schematic diagram of remote detection of chemical smoke and interferences with FTIR

度. 因此探测仪器 FTIR 接收到的辐射功率  $L_{ob}(\lambda)$  为

$$L_{ob}(\lambda) = A(\lambda, T_{am}) \cdot \{ \tau_{ig}(\lambda) \cdot \tau_{am}(\lambda) \cdot L_{bk}(\lambda, T_{bk}) + \tau_{am}(\lambda) \cdot [1 - \tau_{ig}(\lambda)] \cdot L_{ig}(\lambda, T_{ig}) + [1 - \tau_{am}(\lambda)] \cdot L_{am}(\lambda, T_{am}) \} \quad (1)$$

式(1)中:  $L_{ob}(\lambda)$  表示有目标烟雾时, 探测仪器 FTIR 接收到的辐射功率,  $L_{bk}(\lambda, T_{bk})$  表示温度为  $T_{bk}$  的背景的辐射亮度,  $L_{ig}(\lambda, T_{ig})$  表示温度为  $T_{ig}$  的目标烟雾的辐射亮度,  $L_{am}(\lambda, T_{am})$  表示周围环境温度为  $T_{am}$  的大气辐射亮度,  $A(\lambda, T_{am})$  为与系统的立体角视场与探测器接收面积等因素有关的仪器常数,  $\tau_{ig}$ 、 $\tau_{am}$  分别为目标烟雾与大气透过率.

若  $T_{bk}$ 、 $T_{ig}$  和  $T_{am}$  已知, 则  $L_{bk}(\lambda, T_{bk})$ 、 $L_{ig}(\lambda, T_{ig})$  和  $L_{am}(\lambda, T_{am})$  可由 Plank<sup>[3]</sup> 公式计算. 当传感器视场内不存在烟雾时,  $\tau_{ig} = 1$ , 式(1)变为

$$L_0(\lambda) = A(\lambda, T_{am}) \cdot \{ \tau_{am}(\lambda) \cdot L_{bk}(\lambda, T_{bk}) + [1 - \tau_{am}(\lambda)] \cdot L_{am}(\lambda, T_{am}) \} \quad (2)$$

式(2)中  $L_0(\lambda)$  表示无目标烟雾时探测仪器 FTIR 接收到的辐射功率.

由于目标烟雾的特征谱总是在一定的背景下测得的, 也就是说传感器测得的总是目标和背景的复合谱, 一般情况下目标谱相对背景的大小约占 1% 或更低. 外场试验结果见图 2, 由图 2 可见, 我们无法区分曲线 1 和曲线 2. 原因是存在目标烟雾的光谱曲线 1 和没有目标烟雾的光谱曲线 2 的信号变化值并不大, 其特征峰值相对于背景的变化, 只不过 1% 左右, 有时甚至更低. 这是因为监测背景或目标烟雾的自然辐射, 尤其是目标烟雾的表观温度与背景温度趋于平衡时, 仪器监测的信号变化值必然非常小. 因此若能从含有目标烟雾的复合光谱中扣除大气辐射和背景辐射部分的影响, 对增强目标烟雾特征的相对强度将十分有利. 具体做法是: 利用差分方法, 在同一方位上红外光谱仪在有、无目标烟雾辐射时所对应的信号之差, 来扣除大气辐射的影响和消去大部分背景辐射的贡献. 即

$$\begin{aligned} \Delta L(\lambda) &= L_{ob}(\lambda) - L_0(\lambda) \\ &= A(\lambda, T_{am}) \cdot \{ \tau_{am}(\lambda) \cdot (1 - \tau_{ig}) \cdot [L_{ig}(\lambda, T_{ig}) - L_{bk}(\lambda, T_{bk})] \} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)表明: 差谱方法不仅可以消除大气辐射  $L_{am}$  的影响, 而且消去了大部分背景辐射  $L_{bk}$  的贡献. 由于背景辐射  $L_{bk}$  的变化比目标烟雾辐射  $L_{ig}$  的变化慢, 差值  $L_{ig} - L_{bk}$  可以消去背景的

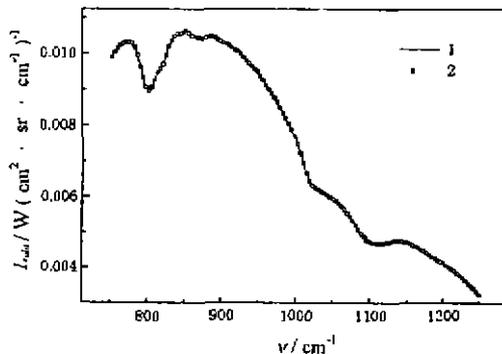


图 2 含有 DMMP 的  $L_{ob}$  光谱 1 和无 DMMP 的  $L_0$  光谱 2  
Fig. 2 Spectra containing DMMP ( $L_{ob}$ ) and no-DMMP ( $L_0$ ), respectively

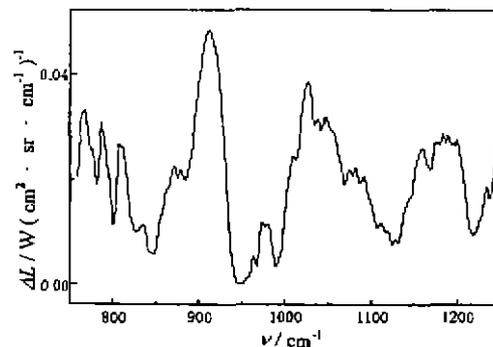


图 3 归一化含有 DMMP 烟雾辐射的差谱  
Fig. 3 Normalized difference spectrum ( $\Delta L$ ) containing simulat DMMP

大部分烟雾辐射对目标烟雾的影响,使得目标烟雾的特征得到增强.比较图 2 和含有 DMMP 烟雾辐射的差谱(见图 3),不难得出这样的结论:差谱方法消去了大部分背景辐射和大气辐射的影响,增加了目标烟雾特征的相对强度,有利于目标烟雾特征的提取.

差谱  $\Delta L$  不是单纯的目标烟雾光谱,受到背景的辐亮度  $L_{bk}$  变化和大气透过率  $\tau_{atm}$  的影响,要完全从  $\Delta L$  内分离出目标烟雾的特征量  $\tau_{tg}$  或  $L_{tg}$  是比较困难的,因为目标烟雾与周围环境的温差  $\Delta T$  难以确定.

## 2 实验结果与讨论

自行研制的高灵敏度被动式傅里叶变换红外辐射仪,可探测到 0.02K 的温度变化,其噪声等效光谱辐射度 NESR 为  $3 \times 10^{-9} \text{W}(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})^{-1}$ . 为了能够清晰地分辨化学烟雾的特征光谱,要求光谱辐射仪应有相适应的分辨率和工作波段.在仔细分析实验室内测得的化学烟雾样品特征光谱的基础上,兼顾到红外波段大气窗口的位置,选择光谱辐射仪的分辨率为  $4 \text{cm}^{-1}$ ,光谱范围为  $750 \sim 1250 \text{cm}^{-1}$ .

用 FTIR 得到含有目标烟雾或干扰物辐射干涉图,经 FFT 变换,得到与之对应的光谱.

### 2.1 DMMP 的谱特征

对含有 DMMP 烟雾的差谱图 3 分析表明:在  $1040, 920, 810 \text{cm}^{-1}$  三个波段附近有较明显的峰值变化,但也有不少差谱图并不明显,甚至显得很没有规律,特征信息几乎被淹没.由于爆弹(即通过炸药起爆 DMMP)的初生云团不仅含有 DMMP,同时还携带有大量的硝烟及大量尘土,获取的光谱总是目标烟雾与硝烟、尘土的混合谱,对于这些特征信息几乎被淹没的光谱,经过减去无目标烟雾时的光谱信号  $L_0$ (如式(3)所示),再减硝烟(空弹谱),最后进行高低通滤波处理后,几个峰都复现了.不过,这只能从理论上说减去硝烟有利于差别.事实上,对于任何一幅云团目标谱,即使扣除无目标烟雾时的光谱  $L_0$ (如式(3)所示),其中仍然会有同时出现的硝烟和大气的辐射或吸收,所以不可能进一步将它们分开.解决的办法只能通过对大量含有 DMMP 光谱样本进行特征提取,构成一个专供识别化学烟雾 DMMP 的鉴别器.

### 2.2 干扰物的特征及屏蔽效果

硝烟、烟幕、柴草烟、引擎废气及尘土是较常见的红外干扰物,它们在  $750 \sim 1250 \text{cm}^{-1}$  的光谱特性是我们关注的重点.

粗葱、 $\text{C}_2\text{Cl}_6$ 、滑石粉、PPIC、GLT、SMC、SAF 及 THT 等物质形成的烟雾在  $750 \sim 1250 \text{cm}^{-1}$  范围内无明显特征峰,对化学烟雾 DMMP 的监测基本无影响.

由于引擎废气除  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  外,主要由 CO、饱和烃、烯烃、氮氧化合物构成,这些产物除一部分饱和烃及烯烃外,其它产物的主要吸收峰都不在  $750 \sim 1250 \text{cm}^{-1}$  范围内,实际测量的结果说明:引擎废气对 DMMP 无明显干扰,较易区分.

柴草烟是一种非常复杂的混合物,由于柴草的种类不同,燃烧状况各异,其生成物是五花八门的,某些分解产物的确在  $750 \sim 1250 \text{cm}^{-1}$  范围内表现出较强的峰值.从含有柴草烟的差谱图 4 与含有 DMMP 烟雾的差谱图 3 相比,有时在某些波段上是相似的.因此,柴草烟有可能是—种较强的干扰,特别是处于较近距离时,与 DMMP 相似波段的信号会更大.

尘土影响是严重的,它们的红外光谱图 5 有些与含有 DMMP 烟雾的差谱很相似,由于

土壤中常见的粘土矿物包括高岭土、蒙脱土、伊利石、硅石及碳酸钙等,其中伊利石、蒙脱土和高岭土等在  $1000\sim 1050\text{cm}^{-1}$  有明显的吸收峰,碳酸盐在  $870\text{cm}^{-1}$  处有强的尖峰,硅石在  $1090\text{cm}^{-1}$  处有一个较强而且宽的吸收峰.可见,尘土在  $750\sim 1250\text{cm}^{-1}$  范围内是强的干扰物,对化学烟雾红外特征能起到屏蔽作用.

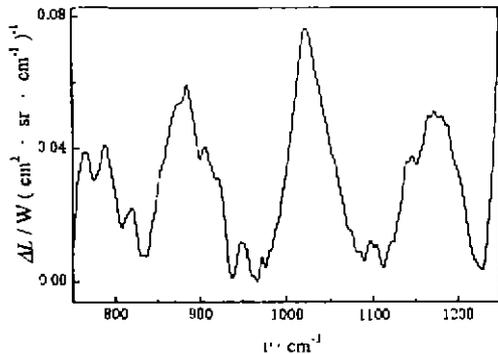


图4 归一化柴草烟辐射的差谱

Fig. 4 Normalized difference spectrum ( $\Delta L$ ) containing straw-smoke

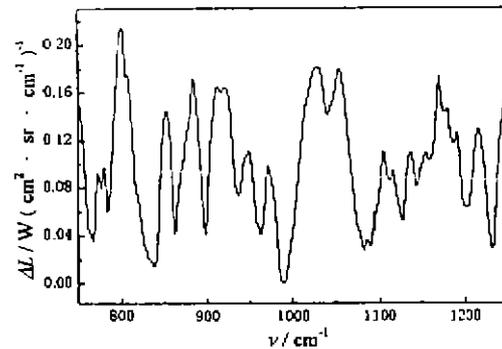


图5 归一化尘土辐射的差谱

Fig. 5 Normalized difference spectrum ( $\Delta L$ ) containing dust-cloud

### 3 结论

综上所述,使用高灵敏度 FTIR 进行远距离遥测化学烟雾及其干扰物的辐射光谱,实验证明是非常有效的.尽管目标烟雾的辐射十分微弱,同时受一些干扰物的屏蔽,利用差谱方法增强目标烟雾 DMMP 的特征,我们仍可从复合光谱中获取目标的特征,这对于光谱分类中目标特征的提取非常重要.这项远距离遥测技术和光谱处理方法,具有很高实用价值,可用于局部大气环境污染的监测和空气质量的评价.

硝烟、引擎废气、粗萘、 $\text{C}_2\text{Cl}_6$ 、滑石粉、PPIC、GLT、SMC、SAF 及 THT 等物质形成的烟幕对化学烟雾 DMMP 的屏蔽效果不明显,比较容易从复合光谱中区分这些干扰物和目标烟雾 DMMP 的光谱特征.

尘土和柴草烟形成的烟幕对化学烟雾 DMMP 的屏蔽效果比较大.由于尘土、柴草烟的某些光谱特征在  $750\sim 1250\text{cm}^{-1}$  波数范围内与目标烟雾的 DMMP 的光谱特征有些相似,使我们对 DMMP 光谱特征的提取增加了困难.

**致谢** 衷心感谢戴杰研究员,傅家卿副研究员,武惠忠和韦占凯高级工程师在实验上给予的大力协助.

### REFERENCES

- 1 LI J Z. *Introduction to Pattern Recognition* Beijing: High Education Publishing House (李金宗. 模式识别导论, 北京: 高等教育出版社), 1994, 137~147
- 2 Flanigan D F. *Applied Optics*, 1986, **25**(23), 4253~4260
- 3 CHEN H. *Infrared Physics*, Beijing: National Defence Industry Publishing House (陈衡. 红外物理学, 北京: 国防工业出版社), 1985, 57~62

## REMOTE DETECTION BY FTIR OF WEAK SPECTRAL FEATURES OF CHEMICAL SMOKE AND INTERFERENCE

ZHANG Jun XUN Yu-Long

*(Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)*

**Abstract** Weak spectral information of chemical smoke was remotely observed by passive Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectrometer. DMMP spectral information on chemical simulator and possible field interference were presented. Spectral features were analyzed and the results of the screened DMMP with field interference were given.

**Key words** remote detection, spectral feature, FTIR.