

研究报告

大气悬浮颗粒 PM₁₀对感烟火灾探测器本底效应研究

谢启源, 袁宏永, 蒋亚龙

(中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

[摘要] 针对大气污染引起的悬浮颗粒, 尤其是可吸入颗粒 (PM₁₀) 对感烟火灾探测器产生的本底效应进行了分析, 并以离子型感烟探测器为例对本底值进行计算, 通过比较, 显示不同程度的大气颗粒物污染对感烟探测器本底影响的差异极小, 排除了感烟探测器在悬浮颗粒污染严重地区发生灵敏度和误报率升高的可能。确认目前各国感烟火灾探测器检测标准对灵敏度指标的规定可以统一, 粒子计数等高分辨率颗粒浓度测量技术的发展将使该本底效应的影响不可忽略。

[关键词] 悬浮颗粒; 火灾探测; 本底效应

[中图分类号] TU998.12 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)06-0084-04

1 前言

发生火灾时产生的烟是指人眼可见的燃烧生成物——粒子直径为 0.01~10 μm 的液体或固体微粒悬浮于空气之中^[1]。感烟火灾探测器根据检测烟雾浓度做出火灾是否发生的判断, 目前主要分两种: 离子型与光电型。在离子感烟火灾探测器中, 利用放射元素产生 α 射线使电离室内的空气电离, 从而使电离室在电子线路中呈现电阻特性。当烟雾进入电离室后, 改变了空气电离的离子数量, 因此改变了电离电流, 也就相当于电离室阻值发生了变化, 通过电阻变化大小就可得知烟雾大小, 并做出是否发生火灾的判断。光电感烟火灾探测器, 则根据烟雾粒子与光相互作用时, 既可以发生散射从而以同样波长向所有方向辐射已接收能量, 又可通过吸收将辐射能转变成其它形式的能, 从而设计出减光式和散射光式感烟探测器。

环保部门对大气成分的监测表明, 空气中长期悬浮大量污染颗粒。大气总悬浮颗粒 (TSP) 和可吸入颗粒 (PM₁₀) 质量浓度已作为衡量悬浮颗粒多少的首要指标。其中 PM₁₀ 已成为众多大中城市

的首要大气污染物^[2]。大气悬浮颗粒中约有 1/4 为降尘 (粒径为 10~100 μm), 其在空中停留期短, 受重力作用很快降落, 外界环境影响下这部分颗粒的浓度可能突然升高而对感烟探测器造成误报; 而 PM₁₀ 是指粒径小于 10 μm、在大气中停留较长时间的颗粒物, 它可以几小时甚至长达几年漂浮在大气中。PM₁₀ 污染物对人体呼吸系统的危害引起国内外流行病学和毒理学研究人员的高度重视^[3,4]。在火灾探测领域, 由于探测器实际工作时始终处于这些悬浮颗粒的包围中, 且这些悬浮粒子与火灾中生成的烟雾粒子一样, 能对电离室电阻值发生影响或者与光发生散射和吸收作用。因此, 这些长期悬浮于大气中的可吸入颗粒 PM₁₀ 使感烟火灾探测器始终存在“本底烟雾值” (电子器件和电子线路的噪声也引起本底烟雾值, 文中“本底烟雾值”均指由悬浮颗粒引起部分)。

2 本底值影响分析

不同国家或不同地区间由于使用燃料不同、气象条件差异将导致其 PM₁₀ 的质量浓度 $\rho_{PM_{10}}$ 不同。

如图 1 所示， D_1 、 D_2 分别对应大气污染程度不同的两地区中 PM₁₀对感烟探测器引起的两个本底烟雾值；若 D_1 与 D_2 之差足够大，则原本具有相同灵敏度的感烟火灾探测器在本底烟雾值不同环境下对同一烟源的反应将不同。本底烟雾值大时，探测器从正常状态到其报警阈值所需烟浓度增加值 ΔD_1 比小本底烟雾值 D_2 环境下所需的 ΔD_2 小。因此，必然造成同一探测器的灵敏度因所处环境 $\rho_{PM_{10}}$ 的差异而不同： $\rho_{PM_{10}}$ 大时，本底烟雾值也大，导致探测器灵敏度“自然”提高，同时误报率也上

升。不同地区间 $\rho_{PM_{10}}$ 的差异是否对探测器的灵敏度与误报率产生影响，关键在于 $\rho_{PM_{10}}$ 对本底烟雾值的影响有多大。若其差值小于目前感烟火灾探测器分辨能力，即图 1 中两条曲线在现有感烟火灾探测器分辨能力意义上重合，则 $\rho_{PM_{10}}$ 的差异对探测器灵敏度和误报率的影响可忽略；否则，为了防止误报率的升高，悬浮颗粒物污染程度不同国家或地区之间对感烟探测器灵敏度规定必须依据所在地 $\rho_{PM_{10}}$ 制定。

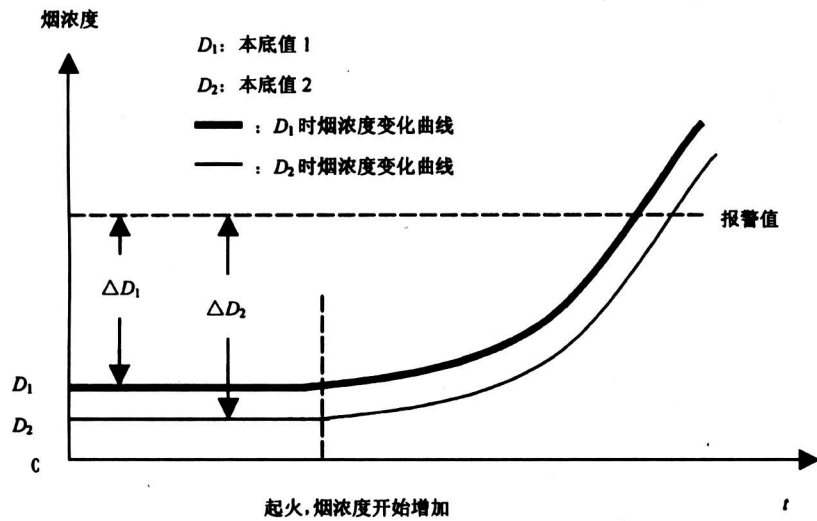


图 1 不同本底值时同一火源引起的烟浓度变化对比曲线

Fig.1 Compare of the smoke density increase according to the same smoke source between two different base-smoke-density

3 本底值计算及讨论

由上述分析知，不同 $\rho_{PM_{10}}$ 引起的本底烟雾值差异的大小决定了其对探测器灵敏度和误报率影响的程度。因此，必须对大气中不同 $\rho_{PM_{10}}$ 产生的本底烟雾值进行计算与比较。国标^[5]中规定用于测量离子型感烟火灾探测器响应阈值的高精度测量仪器为离子烟浓度计^[6]，因此，以离子感烟火灾探测器为例，导出 $\rho_{PM_{10}}$ 与离子烟浓度计测量值 y 之间的函数关系 $y = f(\rho_{PM_{10}})$ 。根据地区间、国家间 $\rho_{PM_{10}}$ 的差异，结合环保部门对空气质量评价中不同等级所对应的 $\rho_{PM_{10}}$ 差异，得出 $\rho_{PM_{10}}$ 差值对应的 y 值相差大小，将其与目前离子烟浓度计的最高分辨能力 y_H 相比较，最终确定 $\rho_{PM_{10}}$ 的差异是否对目前感烟火灾探测器灵敏度和误报率产生影响，具体

计算如下。

对于离子式感烟探测器，粒子进入电离室后，电离电流下降，电离室阻抗升高。Hosemann J. P.^[7]指出，电离电流下降的相对值 x 与粒子数浓度 z 和粒子平均粒径 \bar{d} 的乘积 $z \cdot \bar{d}$ 之间存在下列关系：

$$z \cdot \bar{d} = \eta \cdot y, \tag{1}$$

式中： $y = x \cdot \frac{2-x}{1-x}$

x ：电离电流相对变化量，

$$x = \frac{\Delta I}{I_0} = \frac{I_0 - I}{I_0};$$

I_0 ：无粒子时的电离电流，pA；

I ：有粒子时的电离电流，pA；

\bar{d} ：粒子的平均粒径， μm ；

z ：粒子数浓度， cm^{-3} ；

η : 电离室常数, cm^{-2} ;
 η 值由下式决定:

$$\eta = \frac{3 \cdot R_0 \cdot I_S \cdot \mu}{0.307 \cdot L^2}, \quad (2)$$

式中 R_0 : 电离室等效电阻;

I_S : 饱和电流;

μ : 平均离子迁移率;

L : 电极间距, cm;

国家标准 GB4715 - 93^[5] 给出的离子烟浓度计^[6]电离室参数为: $R_0 = 1.9 \times 10^{11} \Omega \pm 5\%$, $L = 3 \text{ cm}$, 试验得知 $I_S = 600 \text{ pA}$, 取 $\mu = 1.6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{S}$, 则电离室常数 $\eta = 198 \text{ cm}^{-2}$, 代入 (1) 式并将单位统一为国际标准单位, 得到离子烟浓度计测得的 y 值与粒子平均粒径 \bar{d} 和粒子数浓度 z 在特定电离室条件下的定量关系为:

$$y = 0.015 \cdot \bar{d} \cdot z \cdot 10^{-5}. \quad (3)$$

而国内外环保部门测量的是 PM_{10} 在大气中的质量浓度 (mg/m^3), 将其换算为颗粒数浓度, 其关系如下所示:

$$z = \frac{\rho_{\text{PM}_{10}}}{\frac{4}{3} \cdot 3.14 \cdot \left(\frac{\bar{d}}{2}\right)^3 \cdot \rho \cdot 10^6}, \quad (4)$$

式中 \bar{d} : 粒子平均粒径, m;

ρ : 颗粒密度, kg/m^3 ;

将式 (4) 代入式 (3) 并化简得到 y 值与 $\rho_{\text{PM}_{10}}$ 值之间的关系:

$$y = \frac{6 \times 0.051 \times 10^{-11}}{3.14 \times \rho \times \bar{d}^2} \cdot \rho_{\text{PM}_{10}} = \frac{9.745 \times 10^{-13}}{\rho \cdot \bar{d}^2} \cdot \rho_{\text{PM}_{10}}$$

令 $k = \frac{9.745 \times 10^{-13}}{\rho \cdot \bar{d}^2}$ 则离子烟浓度计测得的 y 值与 $\rho_{\text{PM}_{10}}$ 值间函数关系为:

$$y = k \cdot \rho_{\text{PM}_{10}}. \quad (5)$$

$\rho_{\text{PM}_{10}}$ 颗粒密度取粘土密度 $\rho = 1460 \text{ kg}/\text{m}^3$, 平均直径取 $\bar{d} = 3 \mu\text{m}$, 则

$$k = \frac{9.745 \times 10^{-13}}{1460 \times (1.5 \times 10^{-6})^2} = 2.967 \times 10^{-4},$$

故有

$$y = 2.967 \times 10^{-4} \times \rho_{\text{PM}_{10}}. \quad (6)$$

因此, 由国家环保部门对空气质量分类各等级对应的 $\rho_{\text{PM}_{10}}$ 值, 再根据 (6) 式可计算出的响应 y 值, 其结果列于表 1。

由表 1 计算结果可见, 大气受重污染与大气质量为优之间可吸入颗粒浓度相差值 $\Delta\rho_{\text{MP}_{10}}$ 约为 $0.420 \text{ mg}/\text{m}^3$, 对应的 y 相差值 Δy 为 1.246×10^{-4} , 而离子烟浓度计的最高分辨率为 $\Delta y_{\text{H}} = 0.02$, 比 Δy 大得多。同时国内外环保部门测得的数据^[2, 8-15]表明, 无论是各国间, 还是同一国家各地区之间 $\rho_{\text{PM}_{10}}$ 的差异均小于 $\Delta\rho_{\text{PM}_{10}}$, 因此目前离子烟浓度计无法分辨出悬浮颗粒污染程度不同的地区间不同 $\rho_{\text{PM}_{10}}$ 所产生的本底值差异, 即目前感烟火灾探测器的分辨率无法识别大气中 $\rho_{\text{PM}_{10}}$ 产生的本底效应, 计算结果也说明图 1 中两条曲线应几乎重合。

表 1 空气质量分类、 $\rho_{\text{PM}_{10}}$ 值及 y 值对应关系

Table 1 The relationship among air quality, $\rho_{\text{PM}_{10}}$ and y

空气质量状况	$\rho_{\text{PM}_{10}}/\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$y/10^{-4}$
优	$0 < \rho_{\text{PM}_{10}} \leq 0.050$	$0 < y \leq 0.148$
良	$0.050 < \rho_{\text{PM}_{10}} \leq 0.150$	$0.148 < y \leq 0.445$
轻微污染	$0.150 < \rho_{\text{PM}_{10}} \leq 0.250$	$0.445 < y \leq 0.742$
轻度污染	$0.250 < \rho_{\text{PM}_{10}} \leq 0.350$	$0.742 < y \leq 1.038$
中度污染	$0.350 < \rho_{\text{PM}_{10}} \leq 0.385$	$1.038 < y \leq 1.142$
中度重污染	$0.385 < \rho_{\text{PM}_{10}} \leq 0.420$	$1.142 < y \leq 1.246$
重污染	$0.420 < \rho_{\text{PM}_{10}}$	$1.246 < y$

4 结论

目前的离子型感烟火灾探测器的分辨率无法识别本底效应的差异。因此, 各国或各地区间对感烟探测器灵敏度指标可以统一, 不会出现在 PM_{10} 浓度高地区工作由于本底烟雾值大而产生灵敏度与误报率升高的问题。但是, 随着粒子传感技术的飞快发展, 特别是具有高分辨率的粒子计数式烟雾浓度测量技术的发展, 大气悬浮微粒 PM_{10} 对感烟火灾探测器的本底效应, 以及污染程度不同地区间本底烟雾值差异对探测器灵敏度和误报率的影响将引起相关人员的重视。

参考文献

- [1] 吴龙标, 袁宏永. 火灾探测与控制工程 [M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 1999. 70
- [2] <http://www.zhb.gov.cn/quality/air.php3>

- [3] 许德毓, 蔡小舒. 激光散射法测量 TSP 和 PM_{10} 的最佳采光角及立体角的研究 [J]. 上海理工大学学报, 2001, 23 (1): 57~60
- [4] 吴国平, 胡伟, 腾恩江, 等. 室外空气污染对成人呼吸系统健康影响的分析 [J]. 中国环境监测, 2001, 17 (7): 33~38
- [5] GB4715-93 点型感烟火灾探测器技术要求及实验方法 [S]
- [6] 中国原子能科学研究院电子仪器厂. LZY-4013 离子烟浓度计
- [7] 吴龙标, 袁宏永. 火灾探测与控制工程 [M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 1999. 56
- [8] 邵龙义, 时宗波, 黄勤, 等. 都市大气可吸入颗粒物的研究 [J]. 环境保护, 2000, (1): 24~26
- [9] 吴国平, 胡伟, 腾恩江, 等. 我国四城市空气中 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的污染水平 [J]. 中国环境科学, 1999, 19 (2): 133~137
- [10] 王淑英, 张小玲. 北京地区 PM_{10} 污染的气象特征 [J]. 应用气象学报, 2002, 13: 177~184
- [11] 时宗波, 邵龙义, 李红, 等. 北京市西北城区取暖期环境大气中 PM_{10} 的物理化学特征 [J]. 环境科学, 2002, 23 (1): 30~34
- [12] Morel B, Yeh S, Cifuentes L. Statistical distributions for air pollution applied to the study of the particulate problem in Santiago [J]. Atmospheric Environment 1999, 33: 2575~2585
- [13] Hoek G, Forsberg B, Borowska M. Wintertime PM_{10} and black smoke concentrations across Europe: results from the peace study [J]. Atmospheric Environment, 1997, 31 (21): 3609~3622
- [14] van der Wal J T, Janssen L H J M. Analysis of spatial and temporal variations of PM_{10} concentrations in the Netherlands using Kalman filtering [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34: 3675~3687
- [15] Hosiokangas J, Ruuskanen J, Pekkanen. Effects of soil dust episodes and mixed fuel sources on source apportionment of PM_{10} particles in Kuopio [J]. Finland Atmospheric Environment, 1999, 1. 33: 3821~3829

The Base Smoke Density of Smoke Fire Detector Created by the Suspended Particulate PM_{10} in Atmosphere

Xie Qiyuan, Yuan Hongyong, Jiang Yalong

(State Key Lab. of Fire Science, USTC, Hefei 230026 China)

[Abstract] The base smoke density of the smoke fire detectors created by the air-pollutant inducing suspended particulate, especially the PM_{10} , has been analyzed. It has also been calculated according to the ionization fire detectors. Through the comparison of the differences of the base smoke density, induced by the different levels of particulate pollution in atmosphere in different areas, it was found that the difference in base affection is quite little. In this case, it is impossible that the sensitivity and false alarm ratio of the smoke fire detectors will increase when they work in the heavy air pollutant area. So, the standards to define the sensitivity of the smoke fire detector could be the same in different areas, which have different levels of air pollutant. In the future, the effect of the base smoke density would not be neglected with the development of the way to measure smoke with high distinguishability, such as the particulate counter.

[Key words] suspended particulate; fire detection; base affection