

火灾标准火烟雾颗粒测量及 粒径尺度分布函数研究

疏学明^{1,2}, 郑魁², 袁宏永¹, 姚斌²

(1. 清华大学公共安全研究中心, 北京 100084;

2. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

[摘要] 烟雾是火灾探测的重要参量, 烟雾颗粒粒径及其尺度分布直接影响到感烟探测器的灵敏度, 而目前有关烟雾颗粒粒径的研究相当匮乏。采用扫描迁移率粒子测量仪对火灾标准火烟雾颗粒的粒径大小及其分布进行实验测量, 并采用数学拟合方法系统研究了烟雾颗粒粒径分布函数, 研究结果表明对数正态分布函数较好地描述了烟雾颗粒尺度分布特征, 其结论有益于火灾探测基础研究的发展。

[关键词] 烟雾; 颗粒; 粒径; 分布函数

[中图分类号] TK121 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)08-0051-05

1 引言

随着我国经济和社会生产的飞速发展, 火灾发生的频度和造成的危害呈明显上升趋势, 严重威胁到人民生命和国家财产安全, 受到各级政府和科技工作者的高度重视。采用清洁高效的防治技术是降低火灾损失的基本方法, 而早期智能探测则是火灾防治的重要手段^[1,2]。

“烟为火始”, 烟雾是火灾早期重要的特征参量。从传统的离子感烟探测器到光电感烟探测器, 从线性光束到高灵敏度的空气采样式烟雾探测器等各种感烟探测器得到了广泛应用。据统计, 目前我国每年新安装的火灾探测器数量有500~600万只, 其中约80%为感烟火灾探测器, 其正在发挥着无法替代的作用^[3]。

然而, 烟雾探测器的误报、迟报和漏报现象时有发生, 降低了探测系统的可靠性和有效性。因此火灾烟雾颗粒特性研究是提高烟雾探测器性能、减少误报的重要基础研究之一, 而烟雾颗粒的粒径大小及其尺度特征正是这项研究的重要内容。

目前, 有关烟雾颗粒粒径大小及其尺度分布函

数的研究相当匮乏, 在火灾探测领域相关研究还处在探索阶段, 在多数情况下只能参照有关亚微米粉体颗粒的研究结论。科技工作者试图采用标准测试仪器开展研究, 但由于烟雾气溶胶与粉体颗粒有一定的差别, 还存在诸如烟雾生长过程中的凝聚分形现象对测试结果的影响、测试仪器的选择、光学测量方法中折射率的选取以及测试结果的表征等一系列的问题^[4,5]。作者采用扫描迁移率粒子测量仪对火灾标准火烟雾颗粒的粒径大小及其分布进行测量, 采用数学拟合方法系统研究了烟雾颗粒粒径分布函数, 其结果可为火灾烟雾颗粒基础研究提供有效的数据支持。

2 基于扫描迁移率粒子测量方法的火灾标准火烟雾颗粒粒径测量

2.1 测量仪器工作原理

扫描迁移率粒子测量仪(SMPS)是一种通过测量悬浮气溶胶颗粒的电迁移量来确定颗粒粒径及其分布的仪器, 具有响应快速、分辨率高、测量粒径范围宽、粒子浓度范围大以及操作简单等优点^[6,7], 可对3~1 000 nm范围内的亚微米级颗粒

[收稿日期] 2004-08-02; **修回日期** 2004-09-03

[基金项目] “九七三”国家重点基础研究发展规划资助项目(2001CB409600); 国家自然科学基金资助项目(50476023)

[作者简介] 疏学明(1970-), 男, 安徽枞阳县人, 清华大学公共安全中心博士后

进行高精度测量。

扫描迁移率粒子测量仪由微分迁移率分析仪(DMA)和粒子浓度计数器(CPC)两种测量仪组合而成。微分迁移率分析仪被认为是粒子带通过滤器,可根据多分散悬浮颗粒中带电粒子的电迁移率分离出不同尺寸的颗粒,用DMA分离出的粒子,尺寸误差在 $\pm 5\%$ 之间。粒子浓度计数器类似于光学粒子计数器,不同之处是粒子首先通过饱和蒸汽凝聚在粒核上,被放大到可测量的尺寸,将散射光脉冲转换成电脉冲,电脉冲被计数,最后再转换成粒子浓度。

工作时,悬浮气溶胶粒子首先通过单级撞击器,去除测量范围限度外的大颗粒;通过双极充电器以获得一定量的电荷,再进入由计算机控制扫描电压的DMA,DMA由同心圆柱电极组成,接地的外电极和内电极之间具有较高的电位差,悬浮微粒进入电极和气流之间的外套中,与外界的洁净空气一起通过DMA。由于电迁移率与颗粒粒径大小成反比关系,在这里,按电迁移率大小进行粒径分级。分级的颗粒进入粒子浓度计数器,测量粒子数目浓度,并通过一定的数据处理方法将测试值换算成粒子粒径分布。根据双极充电器上电压的指数,或者用户自设定的时间,整个粒子群尺度分布得到了高精度测量。

电迁移率 Z_p 与颗粒粒径 D_p 成反比关系:

$$Z_p = \frac{neC}{3\pi\mu D_p} \quad (1)$$

其中, n —粒子电荷数; e —基本电荷 (1.6×10^{-19} C); C —修正系数; μ —气体粘度系数; D_p —粒子粒径。可从相关资料^[6~8]中查出式中有关一般气体参数的解释。

目前,光学测量方法以其非接触、响应速度快、分辨率高、不干涉被测流场和实时在线连续测量等一系列优点,在亚微米颗粒测量中占据了重要地位。如基于光学衍射原理的激光粒度仪、基于全散射法的消光法测粒仪和基于光散射的光子相关光谱仪(PCS)等。然而,这些光学测量仪器都与被测颗粒的光学折射率有关,而目前对烟雾颗粒的光学折射率的研究相当欠缺。很多仪器在使用时只能输入前人研究的有限折射率数值并根据对测量的尺度分布结果作出适当调整,而无法根据被测材料性质和测试条件输入准确的数值,难免会影响测量结果的可靠性。而扫描迁移率粒子测量方法,与光学

折射率无关,测量结果准确可靠,可用来对光学测量结果进行校验。

2.2 测量方法与过程

国家标准“点型感烟火灾探测器技术要求及试验方法”(GB4715—93)中规定了检验感烟探测器性能的4种标准试验火:木材热解阴燃火(SH1)、棉绳阴燃火(SH2)、聚氨脂塑料火(SH3)和正庚烷火(SH4),在规范中已将标准火的试验方法作出了详细规定^[9]。

木材热解阴燃火(SH1):采用 $1\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 3.5\text{ cm}$ 的山毛榉木棍(含水量小于3%)作为实验材料,将木棍呈辐射状放置于规定尺寸的加热盘上面。试验开始时,先给加热盘通电,加热盘的温度在11 min内升到 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 并保持稳定,通过空气采样管从标准燃烧室($10\text{ m} \times 7\text{ m} \times 4\text{ m}$)顶部距离中心3 m的圆环上抽吸烟雾颗粒,送入SMPS测试仪器进行分析。

棉绳阴燃火(SH2):将90根直径为3 mm,长为80 cm的洁净、干燥棉绳固定在直径为10 cm的金属圆环上,然后悬挂在支架上,从棉绳下端点火,点燃后立即熄灭火焰,保持连续冒烟,烟雾颗粒被采样管送入SMPS仪器进行测试。

聚氨脂塑料火(SH3):相对密度约 40 kg/m^3 的阻燃剂软聚氨脂泡沫塑料作为实验材料,3块尺寸为 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的泡沫塑料叠在一起。在直径为5 cm的盘中,装入5 ml甲基化酒精,从最下面垫块的一角开始点火燃烧,并将燃烧烟雾颗粒通过采样管送入SMPS测试仪器去分析。

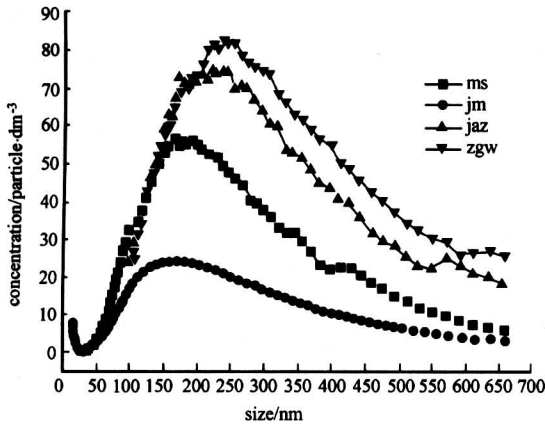
正庚烷火(SH4):正庚烷加3%的甲苯作为实验材料,将燃料放置于2 mm厚的钢板制成的底面积为 $1\ 100\text{ cm}^2$ ($33\text{ cm} \times 33\text{ cm}$)、高为5 cm的容器中,采用电火花点燃,燃烧产生的烟雾颗粒送入SMPS进行测试。

2.3 实验测量结果

按照上述实验方法分别对4种标准火烟雾进行3次实验测量,实验结果稳定一致。图1是在某一次测试中4种标准火烟雾颗粒粒径分布图。

在4种标准火烟雾颗粒粒径分布图中,榉木(SH1)的中位径最小且峰值浓度最低($2.52e+4\text{ particle/cm}^3$),正庚烷(SH4)的中位径最大且峰值浓度也最大($8.35e+4\text{ particle/cm}^3$),棉绳(SH2)和聚氨脂(SH3)中位径介于两者之间,峰值浓度分别为 $5.68e+4\text{ particle/cm}^3$ 和 $7.51e+4$

particle/cm³, 经过多次重复试验, 数据稳定, 结论一致。



ms—棉绳; jm—桦木; jaz—聚氨酯; zgw—正庚烷

图 1 4 种标准火烟雾颗粒粒径分布图

Fig.1 Distribution of particles size of 4 standard fire materials

3 烟雾颗粒粒径尺度分布函数的数学拟合

3.1 常见亚微米颗粒尺度分布函数

目前应用最广泛的粒子尺寸分布的数学表达式有 Rosin-Rammler 分布函数、正态分布函数和对数正态分布函数^[5]。

1) Rosin-Rammler 分布函数 Rosin-Rammler 分布函数简称 R - R 分布函数, 它是 1933 年是由 Rosin 和 Rammler 在研究磨碎煤粉的颗粒尺寸分布时首先提出来的, 对于大多数由破碎形成的颗粒均能用此函数来表示尺寸分布, 其表达式是

$$\frac{dN}{dD} = \frac{6}{\pi D^3} (k/\bar{D})(D/\bar{D})^{k-1} \exp(D/\bar{D})^k \quad (2)$$

式中 \bar{D} 是特征尺寸参数, 单位为 μm , 表示小于该值的颗粒占总体积的 63.21%。无量纲量 k 是分布参数, k 值越大, 颗粒分布越窄, k 值越小则分布越宽。

2) 正态分布函数 正态分布函数表征颗粒数的分布, 它的形式如下

$$\frac{dN}{dD} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{D - \bar{D}}{\sigma}\right)^2\right) \quad (3)$$

式中 \bar{D} 表征颗粒数的分布, 它和 σ 分别是尺寸参数和分布参数。正态分布函数是对称函数, 故尺寸参数 \bar{D} 就等于颗粒群的数目中位径, 而分布参数 σ 越小, 分布就越窄, σ 越大, 分布越宽。

3) 对数正态分布函数 由于实际颗粒的分布

形状很少是对称的, 故正态分布函数实际应用并不多, 较常用的是对数正态分布函数, 它是非对称曲线, 其形式如下

$$\frac{dN}{dD} = \frac{1}{\sqrt{2\pi D \ln \sigma}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln D - \ln \bar{D}}{\ln \sigma}\right)^2\right) \quad (4)$$

3.2 火灾烟雾颗粒粒径尺度分布函数的数学拟合

由于上述的分布函数中都含有未知的参数, 根据扫描迁移率粒子测量仪实验测量的火灾标准火烟雾颗粒粒径尺度分布值, 通过数学拟合的方法在多次测量结果中找出使得理论值与实验值之间方差最小的参数, 再将理论计算值与实验测量值进行比较分析, 以确定与实验测量结果吻合最好的函数表达式。

1) Rosin-Rammler 分布函数拟合 通过大量的计算, 得出分布参数 k 在 $[0, 5]$ 之间时, 理论值与实验值之间的方差比较小。进一步让 k 在这个范围内进行遍历, 找出使得理论值与实验值之间方差最小的 k 值, 通过程序计算得出棉绳阴燃火拟合的参数 $k = 2.87$ 。限于篇幅, 仅用棉绳材料的拟合结果来表示, 其他材料的研究结论基本一致。从图 2 中可以看出, 数学拟合结果 ($R - R$) 与实验测量结果 (N) 在后段吻合较好, 但在前段差距较大, 所以分布并不能表达火灾烟雾标准火烟雾颗粒粒径尺度分布。

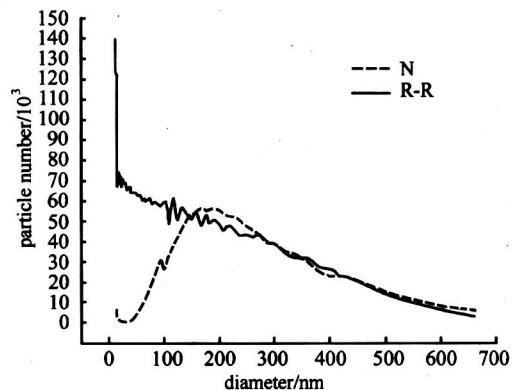


图 2 棉绳阴燃火用 R - R 分布数学拟合结果

Fig.2 Fitting result of cotton smoldering fire with R - R distribution function

2) 正态分布函数 通过大量计算, 得出分布参数 σ 在 $[0.01, 1]$ 之间时, 理论值 (a) 与实验值 (N) 之间的方差比较小。进一步让 σ 在这个范围内进行遍历, 找出使得理论值与实验值之间方差最小的 σ 值, 通过程序计算得出棉绳阴燃火拟合的参数 $\sigma =$

0.11。从图 3 中可以看出由于正态分布是对称分布的，显然也不符合烟雾颗粒的粒径尺度分布。

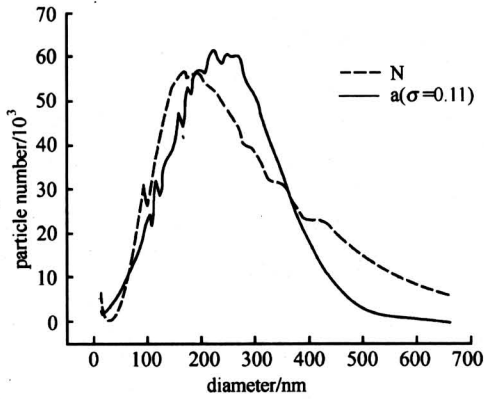
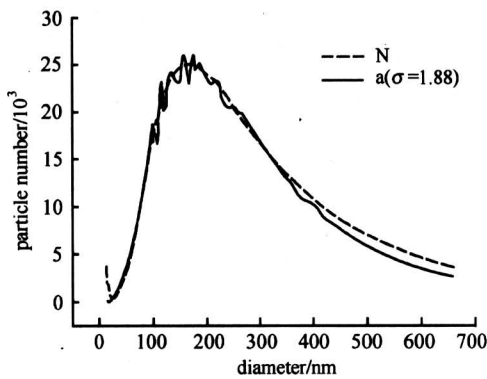


图 3 棉绳阴燃火用正态分布数学拟合结果
Fig.3 Fitting result of cotton smoldering fire with normal distribution function

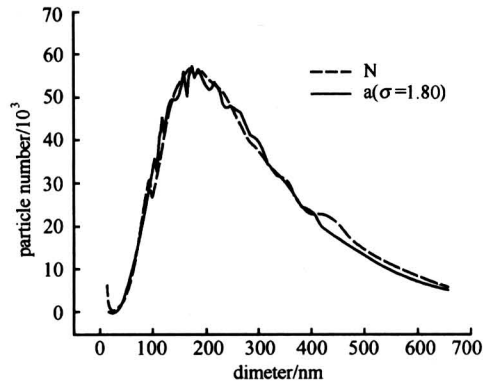
3) 对数正态分布函数 通过大量的计算，得出分布参数 σ 在 $[1, 3]$ 之间时，理论值 (a) 与实验值 (N) 之间的方差比较小。进一步让 σ 在这个范围内进行遍历，找出使得理论值与实验值之间方差最小的 σ 值。从图 4 中可以看出，对数正态分布数学拟合得到了较好的结果，理论计算值与实验测量值之间误差最小，图中局部的抖动是由于用连续分布拟合离散点分布而导致的。

4 结论

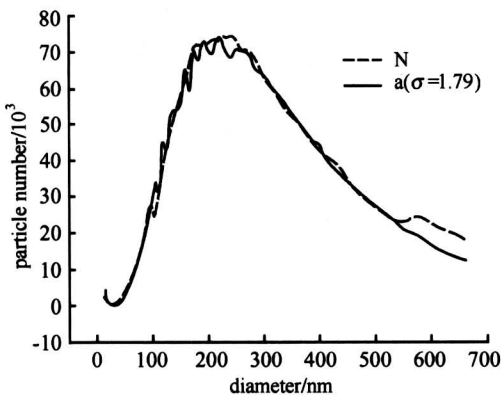
介绍了扫描迁移率粒子测量仪的工作原理、系统构成及其测试方法，并对国家规范中规定的 4 种火灾标准火烟雾颗粒进行实验测量，获得了不同材料烟雾颗粒粒径及其尺度分布数据。实验测量的 4 种标准火的尺度分布形式比较接近，适合于用一种数学分布函数来描述，通过对 3 种常用粒径分布函



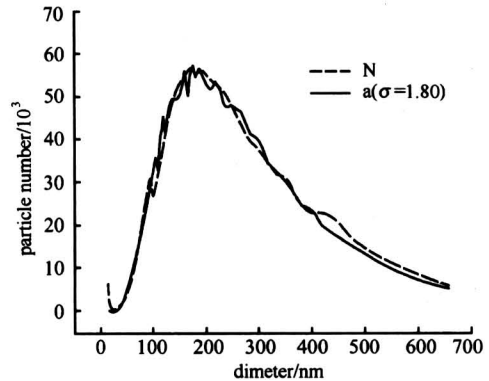
a. 木材阴燃火 (SH1)



b. 棉绳阴燃火 (SH2)



c. 聚氨酯塑料火 (SH3)



d. 正庚烷火 (SH4)

图 4 4 种火灾标准火烟雾颗粒对数正态分布数学拟合结果

Fig.4 Fitting results of 4 standard fire with logarithm normal distribution function

数的数学拟合以及理论计算值与实验测量值的比较, 对数正态分布函数较好地表达了火灾烟雾颗粒粒径的尺度分布特征, 根据对实验结果的分析讨论, 得出如下主要结论:

1) 扫描迁移率粒径测量方法的原理与光学测试方法不同, 能避免烟雾光学折射率的影响, 测试结果可信度高, 为烟雾折射率研究和光学测量方法提供可参比的实验数据。

2) 扫描迁移率粒子测量仪实验重复性好, 稳定性高, 响应速度快, 测量范围宽, 适合于火灾烟雾颗粒粒径测量。

3) 4种标准火的尺度分布形式比较接近, 对数正态分布函数较好地描述了烟雾颗粒粒径尺度分布特征。

参考文献

- [1] 范维澄, 王清安, 姜冯辉, 等. 火灾学简明教程 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995
- [2] 吴龙标, 袁宏永. 火灾探测与控制工程 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999
- [3] 梅志斌, 宋立巍, 厉剑, 等. 火灾早期烟气特性多信息数据采集系统设计 [J]. 消防科学与技术, 2003, 22 (6): 501~503
- [4] Fang Jun, Shu Xueming, Yuan Hongyong, et al. Self-preserving size distribution of fire soot fractal coagulation in flaming combustion [J]. Journal of Fire Sciences, 2004, 22 (1): 53~68
- [5] 王乃宁, 等. 颗粒粒径的光学测量技术及应用 [M]. 北京: 原子能出版社, 2000
- [6] Wang S C, Flagan R C. Scanning electrical mobility spectrometer [J]. Aerosol Sci and Tech, 1990, 6 (13): 230~240
- [7] Wiedensohler A. An approximation of the bipolar charge distribution for particles in the submicron range [J]. J Aerosol Sci, 1988, 19 (3): 387~389
- [8] Keedy P B. 空气过滤介质的微粒穿透和最强穿透粒子尺寸的测量技术 [J]. 吴英译. 产品用纺织品, 1998, 16 (90): 36~43
- [9] GB4715—93 点型感烟火灾探测器技术要求及试验方法 [S]

Study on Particle Size and Its Distribution Function of Standard Fire Smoke

Shu Xueming^{1,2}, Zheng Kui², Yuan Hongyong¹, Yao Bin²

(1. Center for Public Safety Research, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and
Technology of China, Hefei 230026, China)

[Abstract] Smoke is the important parameter of fire detection, and smoke particle size and its distribution may affect the sensitivity of smoke detectors directly. However, up to now there had no report about such research. In this paper, the theory, configuration and measurement method of Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) were described and the particle size and its distribution of four standard fire smoke were measured by SMPS. The particle size distribution function of smoke were studied by mathematic fitting methods, and the result of research showed that Logarithm Normal Distribution (LND) could represent the distribution of fire smoke particle size. The results may be benefit for the foundational research on fire smoke detection.

[Key words] smoke; particle; size; distribution function