

# 细水雾作用下烟颗粒形貌及尺寸变化规律研究

房玉东

(国家安全生产监督管理总局通信信息中心, 北京 100013)

**[摘要]** 利用Sirion200型场发射扫描电子显微镜拍摄细水雾作用前后柴油和聚氯乙烯(PVC)材料烟颗粒的形貌和内部结构图像。定义了烟颗粒的采样平均直径( $d_A$ )和表面密度( $\rho_s$ ),利用统计分析的方法计算了细水雾作用前后烟颗粒的 $d_A$ 和 $\rho_s$ ,研究了采样点空间位置、细水雾工作压力、雾滴粒径和雾滴速度等因素对 $d_A$ 和 $\rho_s$ 的影响规律,揭示了细水雾冲刷火灾烟颗粒的主导机理,为细水雾技术用于计算机房等电气环境的火灾烟气抑制提供了科学的参考依据。

**[关键词]** 细水雾;烟颗粒;表面密度;采样平均直径

**[中图分类号]** X93 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)02-0093-08

## 1 前言

通常计算机房和程控交换机房等电气环境主要采用气体灭火系统进行火灾防护,如哈龙1301、惰性气体混合物及二氧化碳等,这些灭火剂或是对人员有伤害作用,或是对环境有破坏作用<sup>[1,2]</sup>。研究表明雾滴粒径较小的细水雾与火焰相互作用后蒸发速率更快,灭火后火场残余水量更小,单位重量吸收热辐射的能力更高,因此适合用于电气环境的火灾防治<sup>[3,4]</sup>。在某些精密电气设备环境,一旦发生火灾,火灾只会对起火地点的设备造成局部破坏,而烟气的四处蔓延扩散、渗透将会对整个房间内的仪器设备造成腐蚀、污染等严重破坏。统计结果表明,火灾中70%的人员伤亡是烟气造成的,火灾熄灭后,火场仍然充满大量的烟气,这会对火灾现场的逃生人员造成伤害。细水雾对火灾烟气具有较好的洗刷作用,目前国际上细水雾与火灾烟气相互作用的研究尚处于起步阶段,尚无细水雾冲刷烟颗粒的研究报道。国际上的火灾研究机构只开展了

为数不多的细水雾冲刷烟气的工程应用研究<sup>[5,6]</sup>,尚无细水雾作用下烟颗粒尺寸和形貌变化规律的研究工作。

为了深入研究细水雾与烟颗粒的相互作用过程,定性描述不同工况细水雾作用下烟颗粒的尺寸和形貌变化规律,分析采样点位置、雾滴粒径和雾滴速度等参数对烟颗粒凝聚和沉降作用的影响规律,本文利用Sirion200型场发射扫描电子显微镜研究了细水雾与烟颗粒的相互作用,拍摄了细水雾作用前后烟颗粒的形貌和内部结构图像,利用统计分析的方法揭示了细水雾作用前后烟颗粒的采样平均直径及表面密度的变化规律。为细水雾技术用于计算机房等电气环境火灾的烟气抑制提供了科学的参考依据。

## 2 实验描述

烟颗粒采样实验在3 m×3 m×3 m的受限空间内进行。实验中选取柴油和聚氯乙烯(PVC)塑料作为发烟材料,油盘尺寸为0.3 m×0.3 m×0.05 m,利用

**[收稿日期]** 2012-12-04

**[基金项目]** 国家自然科学基金青年科学基金项目(50904041);中国博士后科学基金面上项目(20070410067)

**[作者简介]** 房玉东,1979年出生,男,黑龙江哈尔滨市人,高级工程师,研究方向为清洁高效灭火技术、公共安全应急技术等;

E-mail: fangyd@chinasafety.gov.cn

酒精引燃柴油和PVC。火焰上方有一块0.8 m×0.8 m的防火板,是用来阻挡细水雾直接进入火焰将火焰熄灭的,在细水雾与烟气相互作用的过程中,火焰没有熄灭。实验中利用直径4 mm、厚度0.1 mm的圆形磷铜网进行烟颗粒采样,该铜网可以有效的吸附烟颗粒。细水雾喷头位于受限空间顶棚的中心位置,利用高压泵式细水雾发生装置产生细水雾,雾滴粒径范围在50~100 μm。油盘紧靠受限空间的墙角。每次实验中分别在受限空间6个不同位置进行取样。烟颗粒采样实验系统如图1所示。

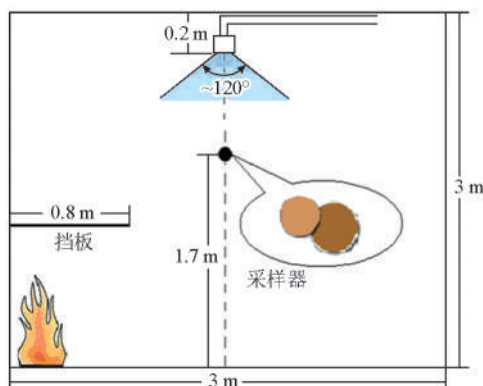


图1 烟颗粒采样实验系统示意图

Fig.1 The sketch map of sampling experiment system of smoke particles

实验中首先点燃可燃物,燃烧30 s后施加细水雾,细水雾与烟气作用一段时间后,关闭细水雾,进行烟颗粒采样。采样实验全部结束后,对烟颗粒标本进行蒸晶,然后利用Sirion200型场发射扫描电子显微镜扫描样本,统计每个采样器上的烟颗粒数目,最后对实验数据进行处理分析。型场发射扫描电子显微镜如图2所示。表1给出了实验工况。将火源中心设为坐标原点,实验中6个采样点空间位置坐标分别为(0.2 m、0.2 m、0.2 m)、(0.7 m、0.7 m、0.7 m)、(1.2 m、1.2 m、1.2 m)、(1.7 m、1.7 m、1.7 m)、(2.2 m、2.2 m、2.2 m)、(2.7 m、2.7 m、2.7 m)。

### 3 典型实验结果及分析

#### 3.1 采样点位置对 $d_A$ 和 $\rho_s$ 影响分析

为了定量表征细水雾作用下烟颗粒尺寸和形貌的变化规律,首先定义两个变量,即烟颗粒采样平均直径 $d_A$ 和烟颗粒表面密度 $\rho_s$ 。

$$d_A = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \quad (1)$$

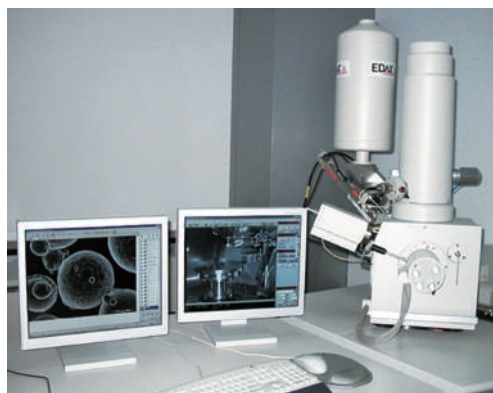


图2 Sirion200型场发射扫描电子显微镜

Fig.2 Sirion200 field emission scanning electron microscope

表1 实验工况列表

Table 1 The experimental condition list

工况	细水雾	可燃物	细水雾施加时间/s	压力/MPa	燃烧时间/s
1	无	柴油	无	无	10、20、30、40
2	有	柴油	20、40、60、80	7	50、70、90、110
3	有	柴油	20、40、60、80	8	50、70、90、110
4	有	柴油	20、40、60、80	9	50、70、90、110
5	有	柴油	20、40、60、80	10	50、70、90、110
6	无	PVC塑料	无	无	10、20、30、40
7	有	PVC塑料	20、40、60、80	7	50、70、90、110
8	有	PVC塑料	20、40、60、80	8	50、70、90、110
9	有	PVC塑料	20、40、60、80	9	50、70、90、110
10	有	PVC塑料	20、40、60、80	10	50、70、90、110

式(1)中, $N$ 为采样器烟颗粒的总数; $d_i$ 为第 $i$ 个烟颗粒的直径,μm。

$$\rho_s = \frac{N}{S} \quad (2)$$

式(2)中, $N$ 为采样器表面的烟颗粒总数, $S = \pi \times (2\text{ mm})^2 \approx 12.56 \text{ mm}^2$ ,为采样器的表面积。

从图3和图4可以看出,细水雾施加时间增加,烟颗粒的采样平均直径增大,表面密度增大。在同一细水雾作用时间下,随着采样点空间位置的变化,烟颗粒表面密度和烟颗粒采样平均直径没有明显变化。这主要是因为细水雾施加后扰动烟气和空气流场,由于细水雾具有较强的扩散性,整个空间很快就会形成全淹没状态,在细水雾的扰动下,空间充满了雾滴与烟颗粒的混合物,雾滴与烟颗粒的混合物在受限空间接近均匀混合,且处于循环运动的分布状态。

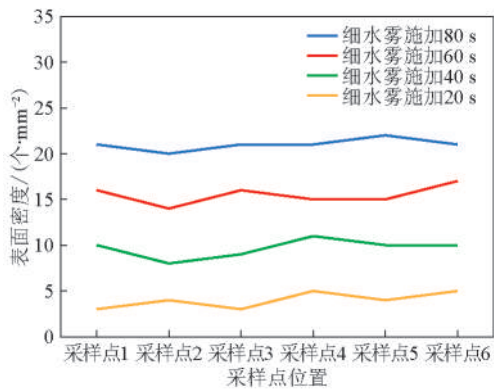


图3  $\rho_s$ 随采样位置变化曲线(PVC)

Fig.3 Change regulation of  $\rho_s$  with sampling position (PVC)

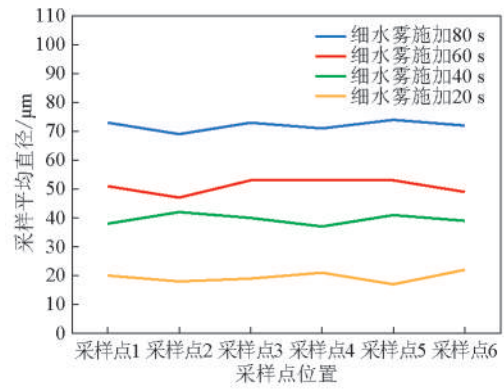


图4  $d_\lambda$ 随采样位置变化曲线(PVC)

Fig.4 Change regulation of  $d_\lambda$  with sampling position (PVC)

### 3.2 细水雾对烟颗粒形貌及内部结构影响分析

从图5可看出在初始燃烧阶段,柴油烟颗粒尺寸在 $3\mu\text{m}$ 左右,20s后烟颗粒尺寸增大至 $9\mu\text{m}$ 左右,30s后烟颗粒尺寸增长至 $15\mu\text{m}$ 左右,40s后烟颗粒仍维持在 $15\mu\text{m}$ 左右,通过对多组扫描照片分析发现,随着燃烧过程的进行,柴油烟颗粒尺寸有所增大并最终稳定在 $15\mu\text{m}$ 左右。这是因为在火羽流的作用下,烟气与空气流场不断扰动,烟颗粒

之间不断发生碰撞凝结使得烟颗粒尺寸增大。进入充分燃烧阶段后,烟颗粒尺寸无明显增大趋势,基本上趋于稳定。

从图6可以看出在初始燃烧阶段PVC塑料烟颗粒尺寸在 $10\mu\text{m}$ 左右,随着燃烧时间的增加,烟颗粒尺寸继续增大,通过对多组扫描照片的分析发现,随着燃烧过程的进行,PVC塑料烟颗粒尺寸有所增大并最终稳定在 $25\mu\text{m}$ 左右。

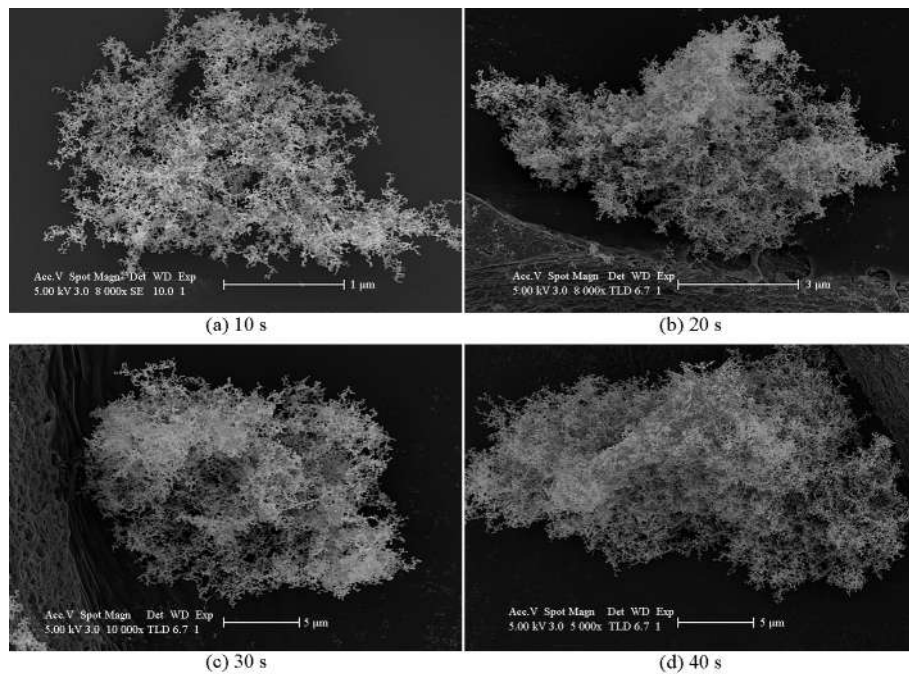


图5 柴油不同时刻烟颗粒形貌(工况1)

Fig.5 Diesel oil smoke particle shape of different time (case1)

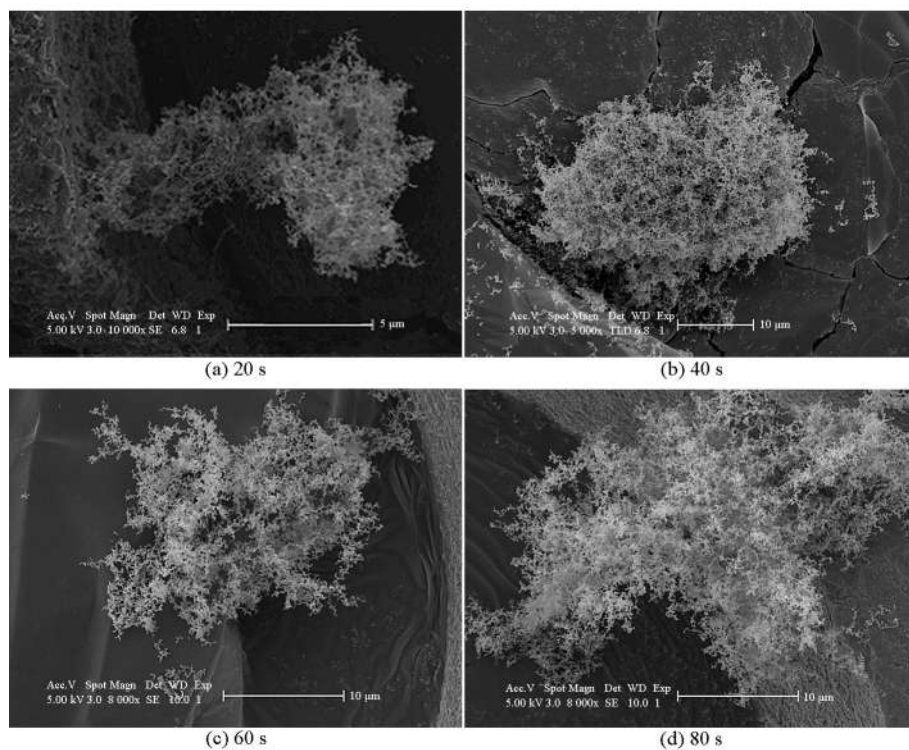


图6 PVC塑料不同时刻烟颗粒形貌(工况6)

Fig.6 PVC smoke particle shape of different time(case6)

图7给出了柴油及PVC塑料烟颗粒的内部结构图片,从图7中可以看出,这两种材料燃烧生成的烟颗粒内部结构基本一致,烟颗粒都是由直径在 $0.05\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 的分散球形基本粒子构成。通过对图5和图6的比较可以看出,随着燃烧的进行两种材料的烟颗粒尺寸变化规律基本相同,在同一时刻,PVC塑料的烟颗粒直径要大于柴油烟颗粒直径。这是因为烟颗粒尺寸的大小主要取决于可燃物的物理化学特性,由于PVC塑料为聚合物,柴油的主要成

分为烷烃,通常聚合物燃烧产生的烟颗粒尺寸要大于烷烃类燃烧产生的烟颗粒尺寸。

通过对图7和图8比较可明显看出,在细水雾的冲刷作用下,两种烟颗粒内部的球形基本粒子更加离散,同时细水雾作用后的球形基本粒子要略大于无细水雾作用下的球形基本粒子。这是因为过饱和水蒸气凝结在烟颗粒上,球形基本粒子吸附了大量的水蒸气,体积和重量略有增加。

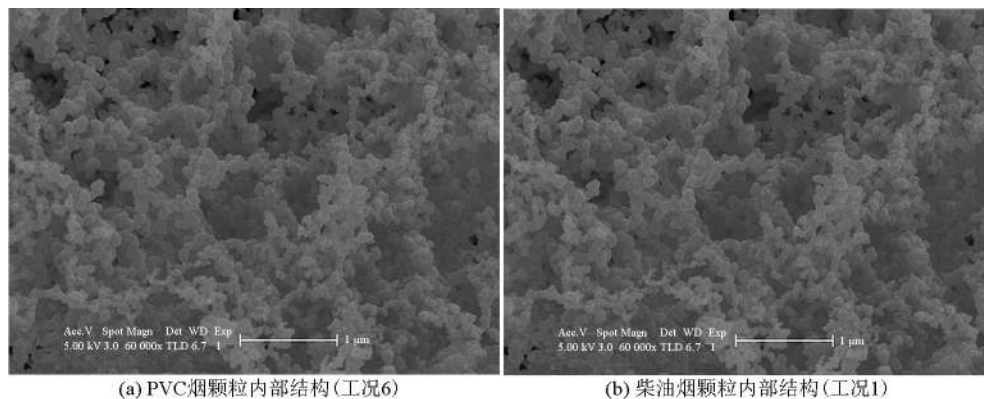


图7 无细水雾作用下烟颗粒内部结构图片

Fig.7 Smoke particle structure without water mist applying

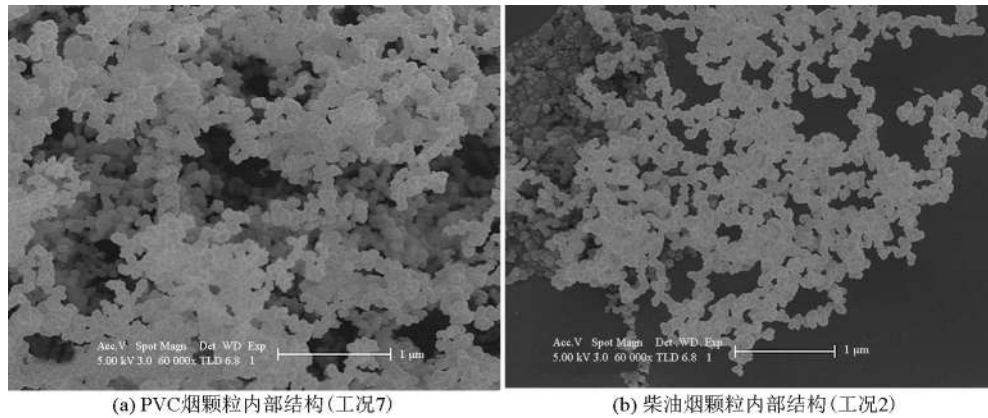


图8 细水雾作用下烟颗粒内部结构图片

Fig.8 Smoke particle structure with water mist applying

从图9和图10中可看出,在细水雾的作用下柴油烟颗粒从最初的 $15\ \mu\text{m}$ 增大到 $60\ \mu\text{m}$ ,PVC塑料烟颗粒从最初的 $25\ \mu\text{m}$ 增大到 $70\ \mu\text{m}$ 。由于粒径较小的细水雾迅速蒸发,火灾环境的高温进一步加快了雾滴的蒸发,烟气中水蒸气迅速饱和,此时烟颗粒不断与微小水滴和水蒸气发生凝联合并,烟颗粒体积和重量不断增大。粒径较大的细水雾通过与烟颗粒的碰撞、拦截、凝聚以及扩散等动力学作用加速烟颗粒的凝聚。同时水的相变和云滴形成会导致温度和浓度变化,伴随着喷雾流引起的含烟颗

粒空气运动,使携带着烟颗粒的云滴和其他雾滴相互碰撞、凝聚进而增重下沉。在喷雾区内,雾滴迅速蒸发时,必然会在液滴附近区域内产生蒸气的浓度梯度,形成由液滴向外流动扩散的斯蒂芬流,当水蒸气在某一烟颗粒上凝结时,也会造成烟颗粒周围蒸气浓度的不断降低,形成由周围向凝结核运动的斯蒂芬流。因此,悬浮于喷雾区中的烟颗粒,必然会在斯蒂芬流的输运作用下迁移运动,最后接触并粘附凝结在雾滴上实现沉降。

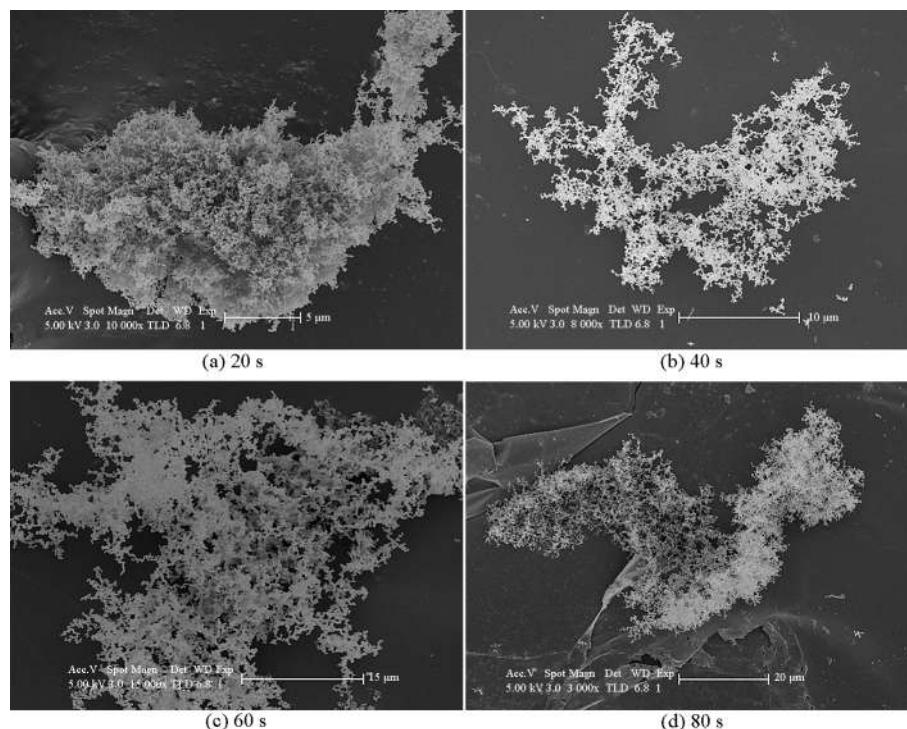


图9 细水雾作用下柴油烟颗粒形貌变化过程(工况5)

Fig.9 Change progress of diesel oil smoke particle shape with water mist applying (case5)

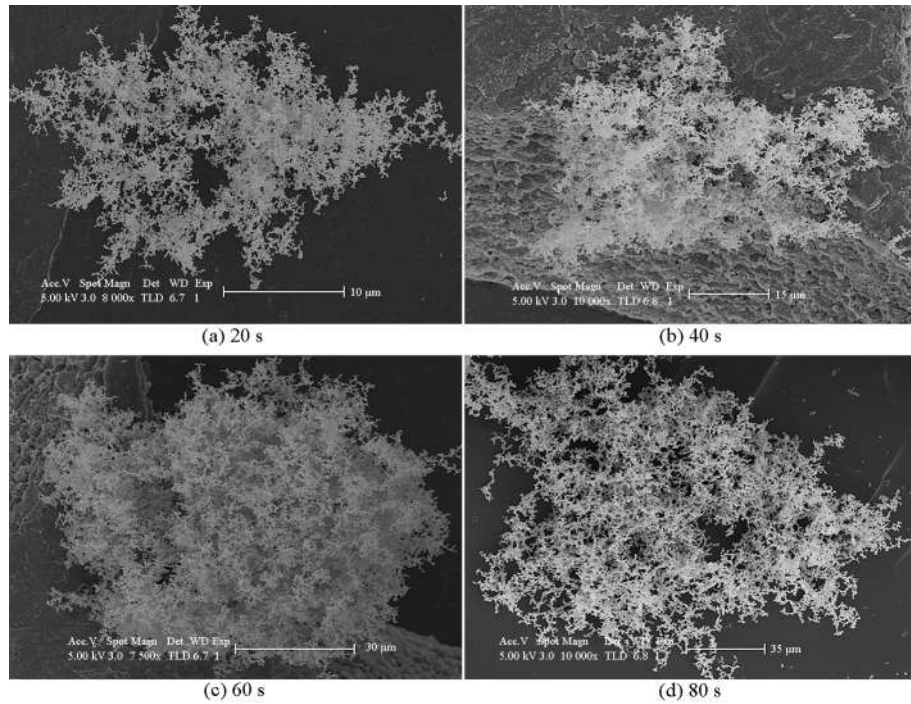


图 10 细水雾作用下PVC塑料烟颗粒形貌变化过程(工况 10)

Fig.10 Change progress of PVC smoke particle shape with water mist applying (case10)

### 3.3 细水雾对 $d_A$ 影响分析

从图 11 中可以看出,在细水雾的作用下,两种材料的烟颗粒直径明显增大。根据对图 8 的分析可知,构成烟颗粒的球形粒子吸收了水蒸气,使得烟颗粒的体积和重量有所增大,同时烟颗粒与微小雾滴不断凝聚合并,这也导致烟颗粒尺寸不断增大。笔者定义一个无量纲参数  $I_d$  :

$$I_d = \frac{d_{AW} - d_{A0}}{d_{A0}} \quad (3)$$

式(3)中,  $I_d$  代表细水雾作用下烟颗粒采样平均直径的增大倍数;  $d_{A0}$  为细水雾作用前烟颗粒的采样平均直径;  $d_{AW}$  为细水雾作用后烟颗粒的采样平均直径。

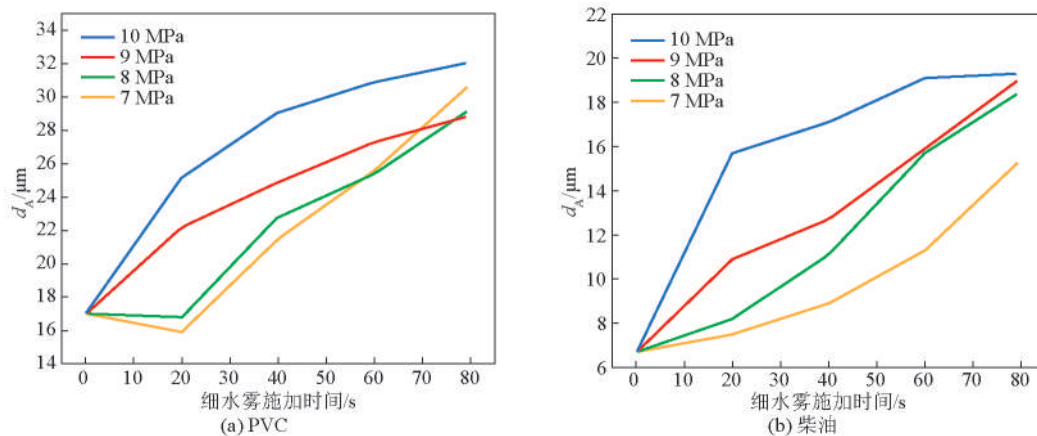


图 11 烟颗粒  $d_A$  随细水雾作用时间变化曲线

Fig.11 Change regulation of smoke particle  $d_A$  with water mist applying time

从图 12 中可以看出,烟颗粒的采样平均直径增大倍数  $I_d$  随着压力的增大而增加,这是因为随着工

作压力的增大,雾滴粒径不断减小,雾滴粒径越小,雾滴的蒸发速率就越快,这样有利于烟气中的水蒸

气达到过饱和。同时随着工作压力的增大,雾滴速度不断增大,这强化了雾滴与烟颗粒之间的碰撞,更有利于烟颗粒的凝联合并。

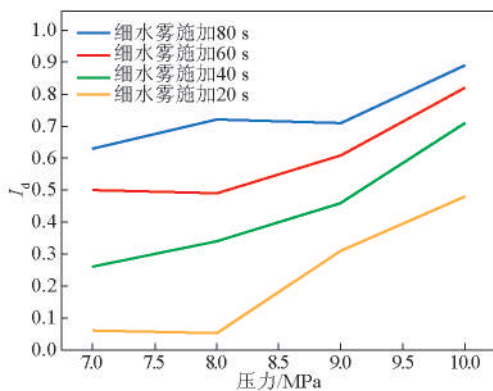


图12 柴油烟颗粒 $I_a$ 随压力变化曲线

Fig.12 Change regulation of diesel oil smoke particle  $I_a$  with pressure

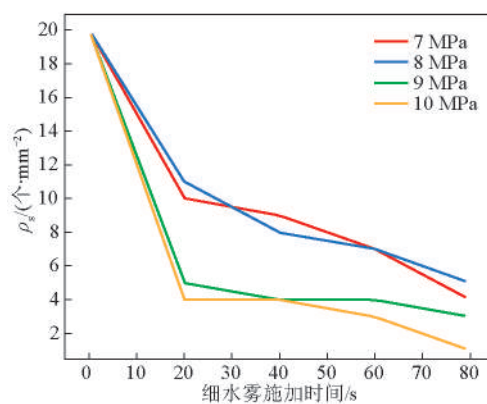
### 3.4 细水雾对 $\rho_s$ 影响分析

从图13可以看出,在细水雾作用下,两种材料的烟颗粒表面密度明显减小。这主要是因为细水雾有效地冲刷烟颗粒,烟颗粒不断地凝聚沉降,导致空间中烟颗粒数量快速下降,使得吸附在采样器表面的烟颗粒数量也快速下降。笔者等定义一个无量纲参数  $A_p$  :

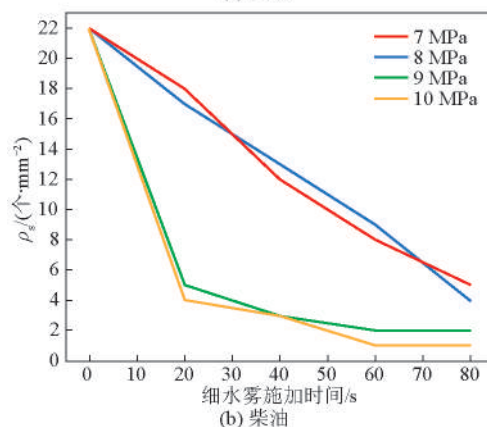
$$A_p = \frac{\rho_{s0} - \rho_{sw}}{\rho_{s0}} \quad (4)$$

式(4)中,  $A_p$  为细水雾作用下烟颗粒表面密度的衰减比例;  $\rho_{s0}$  为细水雾施加前烟颗粒的表面密度;  $\rho_{sw}$  为细水雾施加后的烟颗粒表面密度。

从图14可以看出,  $A_p$  随着压力的增大而增加。这是因为随着压力的增大,雾滴粒径不断减小,在细水雾与烟气相互作用的过程中,颗粒较小的细水雾滞空性较好,有足够的时间与烟颗粒凝联合并;雾滴粒径较大的细水雾则很快降落到地面,在空中悬浮时间较短,没有充足的时间与烟颗粒凝联合并。随着压力的增大,雾滴速度有所增加,这强化了雾滴与烟颗粒之间的碰撞作用,但雾滴速度加快也会导致细水雾滞空时间缩短,这不利于烟颗粒与雾滴的凝联合并,从图14可以看出,随着压力的增大烟颗粒表面密度的衰减比例不断增大,因此可以推断出,速度增大时,烟颗粒与雾滴之间的碰撞强化作用占主导地位,这有利于烟颗粒的沉降,而滞空时间缩短造成对烟颗粒沉降的不利因素占次要



(a) PVC



(b) 柴油

图13 烟颗粒表面密度随细水雾作用时间变化曲线

Fig.13 Change regulation of smoke particle  $\rho_s$  with water mist applying time

地位。可以得出这样的结论,雾滴粒径较小、速度较大且滞空时间长的细水雾更有利于烟颗粒表面密度的衰减。

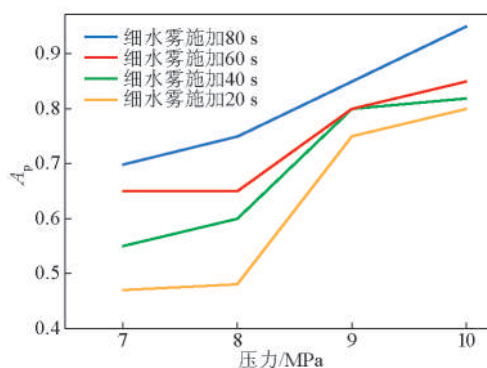


图14 柴油烟颗粒 $A_p$ 随工作压力变化曲线

Fig.14 Change regulation of diesel oil smoke particle  $A_p$  with different pressure

## 4 结语

通过实验研究和理论分析得出如下结论。

1)柴油和PVC塑料烟颗粒均是由直径在0.05~0.1  $\mu\text{m}$ 的分散球形基本粒子构成。PVC塑料烟颗粒直径略大于柴油烟颗粒,随着燃烧进行烟颗粒尺寸不断增大,进入充分燃烧阶段,烟颗粒尺寸不再增大。

2)随着细水雾施加时间增长,烟颗粒采样平均直径 $d_A$ 增大,表面密度 $\rho_s$ 减小。改变采样点的空间位置对 $d_A$ 和 $\rho_s$ 测量结果影响不大,实验结果基本相同。这主要是因为雾滴与烟颗粒的混合物在受限空间接近均匀混合,且处于循环运动的分布状态。

3)实验发现,粒径较小、速度较大且滞空时间长的细水雾更有利于烟颗粒的凝聚和沉降。在细水雾作用下烟颗粒表面密度快速下降,采样平均直径快速增大。随着压力的增大,烟颗粒表面密度衰减比例和采样平均直径增大倍数不断增大。

#### 参考文献

- [1] Kim A, Mawhinney J, Su J. Water-mist system can replace Halon for use on electrical equipment[J]. Canadian Consulting Engineer, 1996(5): 30-35.
- [2] Botting R E. Fire engineering and research: Fire detection and protection of telephone exchange main distribution frames[C]// Annual Conference of the Institution of Fire Engineers Telecom Corporation of New Zealand Ltd. New Zealand : New Zealand Branch, 1990.
- [3] Hills A T, Simpson T, Smith D P. Water mist fire protection systems for telecommunication switch gear and other electronic facilities[C]. USA: Water Mist Fire Suppression Workshop, 1993, 123-144.
- [4] Carlzon B. Fire protection in computer room nordic conference on water mist applications[R]. Swedish : Swedish National Testing and Research Institute, 1997.
- [5] 张晓燕,郭强,李全. 微细水雾除尘技术的研究[J]. 环境污染与防治,2003(8), 234-237.
- [6] 张晓燕. 微细水雾除尘系统设计及实验研究[J]. 工业安全与环保,2001(8), 1-4.

## Study on variational principles of smoke particle shape and dimension with water mist applying

Fang Yudong

(Communication and Information Center of the State Administration of Work Safety, Beijing 100013, China)

**[Abstract]** The micrographs of diesel oil soot particles were achieved by transmission scanning electron microscope with and without water mist applied. It was seen by statistical analysis that the average diameter of soot particle increased and the surface density of soot particle decreased with water mist applied. The experimental results show that water mist washes out smoke mainly by dynamics effect, cloud physics effect and transportation mechanism of Steffen flow. This paper provides scientific references for water mist technology using in smoke scrubbing of computer room fires.

**[Key words]** water mist; smoke particle; surface density; average diameter