

# 火灾条件下气溶胶灭火剂固体微粒沉降过程分析

陈长坤<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学土木建筑学院防灾科学与安全技术研究所,长沙 410075;

2. 河南理工大学煤矿瓦斯与火灾防治重点实验室,河南焦作 454003)

**[摘要]** 对火灾下气溶胶灭火剂固体微粒的空间分布特点及沉降过程进行了非稳态分析,给出了微粒粒径对其运动状态的影响特征,对固体微粒在流场中的稳定性及滞留时间进行了研究,获得了微粒到达火源表面的临界粒径表达式。结果表明,微粒沉降过程其沉降的雷诺数与粒子直径相关,且基本处于低雷诺数状态,沉降速度与微粒粒径的平方成正比。当微粒直径小于 100  $\mu\text{m}$  时,将在很短时间内达到相对稳定的流动状态;当微粒直径达到 1  $\mu\text{m}$  时,可在空间中长期滞留,并通过卷吸进入火焰区域,达到灭火的效果。

**[关键词]** 固体微粒;气溶胶灭火剂;沉降过程

**[中图分类号]** X932 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)01-0048-04

## 1 前言

固体微粒气溶胶灭火剂能有效地扑灭 B、C 类火灾及排除煤矿中瓦斯和粉尘混合物的爆炸,其灭火效率是哈龙 1301 的 4~6 倍,具有较高的灭火效力。相对于其他类型灭火剂,它具有对臭氧层破坏潜能(ODP)值为 0,不导电,储存周期长,空间/重量比低,不需要采用耐压容器和阀门等特点<sup>[1,2]</sup>。在许多场所如:电力电讯、通讯机房、计算机房、发电机房、油气油田的泵房泵站等均可替代哈龙灭火产品<sup>[2]</sup>。近年来,美国空军、海军、陆军和 Spectronix 有限公司也都在进行固体微粒气溶胶灭火剂技术的研究,开发出了系列气溶胶灭火剂和灭火装置<sup>[3]</sup>。北京理工大学也已研制出代号为 EBM 的第二代气溶胶灭火剂<sup>[4]</sup>。目前国内外研究人员主要对气溶胶灭火剂的灭火机理及应用技术及多种性能比如吸湿、冷却技术、绝缘性、腐蚀性等进行了研究<sup>[3-6]</sup>。但结合气溶胶颗粒的分散与流体流动特征,对其在火灾下的流动与沉降过程的研究则相对较少。

气溶胶灭火剂主要依靠所产生的固体微粒吸附和消除火场中的活性自由基以抑制火灾的链式反

应,并通过固体微粒的吸热降温而达到灭火的目的,这也决定了其灭火过程中固体颗粒的流动速度、浓度分布、空间滞留时间及沉降过程是决定其灭火效果的关键因素。笔者对气溶胶固体微粒的空间分布特点及沉降过程进行了理论分析,研究其在流场中的稳定性及滞留时间,探讨不同微粒粒径对其运动状态的影响特征。

## 2 气溶胶微粒灭火过程的空间分布特点

气溶胶固体微粒与火焰的相互作用,一方面受流场运动的强烈扰动,分布趋于均匀,同时又受到颗粒本身质量力的作用,发生沉降。气溶胶固体颗粒在火场空间的分布有如下特征:

1) 部分原有或碰并后形成的大粒径气溶胶颗粒在靠近喷口附近沉降。

2) 处于火焰上方的气溶胶微粒,由于受到火羽流向上速度的作用,所受到的拖曳力增大,进而影响固体微粒在空间的滞留时间与分布。此时,火焰上方粒径较小的颗粒容易离开火焰,向上运动,不利于灭火。而存在超过某一临界粒径的较大颗粒由于所受重力较大,将可克服拖曳力向下运动,并达到火源表面。

**[收稿日期]** 2007-05-29

**[基金项目]** 河南省煤矿瓦斯与火灾防治重点实验室开放基金项目(HKLG200503);国家自然科学基金项目(50706059)

**[作者简介]** 陈长坤(1977-),男,福建福安市人,中南大学副教授,博士,研究方向为火灾科学与公共安全;E-mail: cckchen@mail.csu.edu.cn

3) 由于火焰对周围空气的卷吸作用,使周围的小粒径气溶胶微粒随空气流被卷吸进入火焰区域,并随气流向上运动,该混合方式有利于消除火场的自由基,达到灭火的目的。

4) 远离火焰区域的固体微粒,将随该区域流场而运动或沉降,对灭火过程影响不大。

### 3 理论分析模型

气溶胶粒子在受限空间内主要受到重力及周围介质的阻力作用,笔者只考虑以上力引起的气溶胶沉降及流动问题,不考虑相间阻力外的其他作用,则单个粒子在  $i$  方向上受到的拖曳阻力可表示为<sup>[7]</sup>:

$$F_{D,i} = k_d(u_{pi} - u_i)^2 \quad (1)$$

$$k_d = \frac{1}{2}\rho_g C_D A_p$$

式中  $C_D$  为拖曳阻力系数;  $A_p$  为粒子的投影面积  $= 1/4\pi d_p^2$ ;  $d_p$  为粒径;  $\rho_g$  为气体介质的密度;  $u_{pi}$  为粒子在  $i$  方向上的速度;  $u_i$  为  $i$  方向火灾引起的流体速度。

其中拖曳阻力系数  $C_D$  可采用一简单化的模型,将拖曳曲线分为两部分<sup>[7]</sup>。

高滑动雷诺数时 ( $Re_p > 1\ 000$ ):

$$C_D = 0.44$$

低滑动雷诺数时 ( $0 < Re_p \leq 1000$ ):

$$C_D = 24/Re$$

滑动雷诺数  $Re = d_p \times (u_{pi} - u_i)/\mu$ , 其中  $\mu$  是运动黏度。

在以下分析中只考虑气溶胶固体颗粒沿重力方向的沉降过程。由于气体密度远小于颗粒密度,因此相对于粒子的重力,可忽略浮力的作用。利用牛顿第二定律来描述颗粒的运动,于是有:

$$m_d g - k_d(u_{py} - u_y)^2 = m_d \frac{du_{py}}{dt} \quad (2)$$

$$m_d = \frac{1}{6}\pi d_p^3 \rho_d$$

$g$  重力加速度;  $m_d$  为微粒质量;  $u_y$  为火灾引起的流场在重力方向(即  $y$  方向)的分速度,为了简化分析,可假设其为常数  $u_{y0}$ ;  $\rho_d$  为微粒密度。

### 4 固体微粒沉降过程的非稳态分析

根据拖曳阻力系数  $C_D$  模型,下面将分为两个部分来考虑固体微粒的非稳态沉降过程。其中,气溶胶灭火剂的密度  $\rho_d$  为  $1.37 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 空气或烟气密度  $\rho_g$  为  $1.29 \text{ kg/m}^3$ , 黏度系数  $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

#### 4.1 固体微粒的高滑动雷诺数运动 ( $Re_p > 1\ 000$ )

此时  $C_D = 0.44$ , 对公式(2)进行求解,可得:

$$u_{pyt} = \sqrt{\frac{m_d g}{k_d}} \left[ \frac{2}{1 + \exp(-2 \sqrt{\frac{k_d g}{m_d}} t - P)} - 1 \right] + u_{y0} \quad (3)$$

$$\text{其中 } P = \left[ \ln \left| \frac{\sqrt{\frac{m_d g}{k_d}} + u_{py0} - u_{y0}}{\sqrt{\frac{m_d g}{k_d}} - u_{py0} + u_{y0}} \right| \right]$$

式中,  $u_{pyt}$  为  $t$  时刻固体微粒在  $y$  方向的分速度;  $u_{py0}$  为固体颗粒在  $y$  方向的初始速度;  $u_{y0}$  为火灾引起的流场在  $y$  方向分速度。

$$\text{取 } G = \frac{m_d}{k_d} = \frac{4}{3} \frac{d_p \rho_d}{C_D \rho_g}$$

将  $\rho_d$ ,  $\rho_g$  与  $C_D$  值代入上式,  $G = 3\ 218 d_p$ 。于是对于式(3)右边的时间相关项:

$$\exp(-2 \sqrt{\frac{k_d g}{m_d}} t - P) = \exp(-0.11 d_p^{-0.5} t - P)$$

对于固体颗粒的沉降过程中,因为

$$\left| \frac{\sqrt{\frac{m_d g}{k_d}} + u_{py0} - u_{y0}}{\sqrt{\frac{m_d g}{k_d}} + u_{py0} - u_{y0}} \right| > 1.0, \text{ 所以 } P > 0.0$$

$$-2 \sqrt{\frac{k_d g}{m_d}} t - P = -0.11 d_p^{-0.5} t - P < -0.11 d_p^{-0.5} t$$

对于  $d_p$  小于  $100 \mu\text{m}$  的颗粒,有:

$$\exp(-2 \sqrt{\frac{k_d g}{m_d}} t - P) = \exp(-0.11 d_p^{-0.5} t - P)$$

$$< \exp(-0.11 d_p^{-0.5} t) < \exp(-11.0t)$$

可见时间

$$\text{当 } t > 0.42 \text{ s 时, } \exp(-2 \sqrt{\frac{k_d g}{m_d}} t - P) <$$

$$\exp(-11.0t) < 0.01$$

通过以上分析可见,对于直径小于  $100 \mu\text{m}$  的气溶胶固体颗粒沉降过程中将在很短时间内便达到相对稳定状态(固体微粒与流场介质的相对速度趋于稳定),即方程(3)中与时间的相关项可以忽略。

$$\begin{aligned} \text{得 } u_{pyt} &= \sqrt{\frac{m_d g}{k_d}} + u_{y0} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_d g}{C_D \rho_g}} \cdot d_p^{0.5} + u_{y0} \\ &= 177.6 d_p^{0.5} + u_{y0} \end{aligned} \quad (4)$$

上式给出了高雷诺数时气溶胶固体颗粒沉降速

度的表达式,表明此情况下颗粒的沉降相对速度与粒径的方根成正比。

#### 4.2 固体微粒的低滑动雷诺数运动

( $0 < Re_p \leq 1\ 000$ )

将  $C_d = 24/Re$  代入式(1)与式(2)中,得:

$$m_d g - 3\mu\rho_g \pi d_p (u_{py} - u_{y0}) = m_d \frac{du_{py}}{dt} \quad (5)$$

求解可得:

$$(u_{py0} - u_{y0} - \frac{d_p^2 \rho_d}{18\mu\rho_g} g) \exp(-\frac{18\mu\rho_g}{d_p^2 \rho_d} t) = u_{pyt} - u_{y0} - \frac{d_p^2 \rho_d}{18\mu\rho_g} g \quad (6)$$

上式中速度时间相关项为  $\exp(-\frac{18\mu\rho_g}{d_p^2 \rho_d} t)$ , 令  $\Psi$

$= -\frac{18\mu\rho_g}{d_p^2 \rho_d}$ , 图1给出了不同粒径颗粒的时间项的大小。

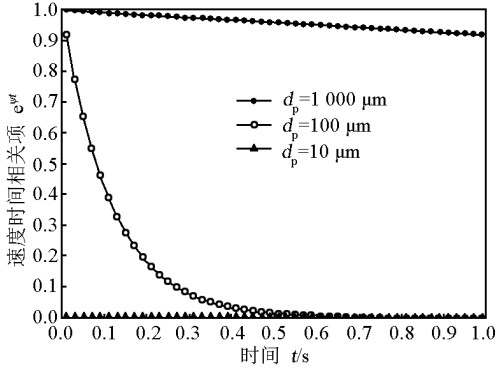


图1 固体微粒不同粒径的时间相关项

Fig. 1 Time relevant item of the solid particles with different diameters

可见当粒径  $d_p$  小于  $100\ \mu\text{m}$  时,时间相关项  $\exp(-\frac{18\mu\rho_g}{d_p^2 \rho_d} t)$  将在  $0.5\ \text{s}$  时就趋于  $0.0$ ,也即固体微粒将随着流场变化很快达到亚稳定沉降状态。

因此在分析时,当粒径  $d_p$  小于  $100\ \mu\text{m}$  时,可忽略式(6)中的右侧项,即在竖直方向上有:

$$u_{pyt} - u_{y0} = \frac{d_p^2 \rho_d}{18\mu\rho_g} g \quad (7)$$

根据以上的理论分析,当粒径  $d_p$  小于  $100\ \mu\text{m}$ ,固体微粒将在较短的时间内达到一种亚稳定沉降状态,沉降相对速度在低雷诺数运动下与颗粒粒径的二次方成正比。

#### 4.3 固体微粒流动过程的雷诺数分析

1) 高雷诺数流动分析。

$$Re = d_p \times (u_{pi} - u_i) / \mu \quad (8)$$

将式(4)的结果代入上式中,可以得到:

$$Re = \sqrt{\frac{4 \rho_p g}{3 C_D \rho_g}} \cdot \frac{d_p^{1.5}}{\mu} = \frac{177.6 d_p^{1.5}}{\mu} \quad (9)$$

当  $d_p \leq 100\ \mu\text{m}$  粘时,  $Re < 10$

这与滑动雷诺数大于  $1\ 000$  的条件相矛盾,因此,式(4)不能用以描述固体微粒沉降的过程。而实际上,固体微粒流动过程中,除了起始的短暂时间内的不稳定阶段可能存在高雷诺数运动外,其他主要阶段均处于低雷诺数运动状态。

2) 低雷诺数流动分析。将式(7)的结果代入雷诺数的表达式(8)中,可以得到:

$$Re = d_p^3 g \rho_d / (18\mu^2 \rho_g) = 578.2 d_p^3 / \mu^2 \quad (10)$$

当  $d_p \leq 100\ \mu\text{m}$  时,  $Re < 2$  这与滑动雷诺数小于  $1\ 000$  的条件一致。根据以上分析,对于  $d_p \leq 100\ \mu\text{m}$  的固体微粒其流动过程基本上处于低雷诺数状态,因此式(7)可用于计算固体颗粒的沉降速度。表1给出了不同粒径下,相对速度及相对沉降时间。由表可以看出,当粒径为  $100\ \mu\text{m}$  时,微粒在空间中的相对滞留时间很短,约为  $3\ \text{s/m}$ ,不利于灭火。而当粒径减小至  $10\ \mu\text{m}$  时,微粒便可在空间中的相对滞留时间达到  $309\ \text{s/m}$ ,当粒径减小至  $1\ \mu\text{m}$  时,相对滞留时间为  $30\ 947\ \text{s/m}$ ,基本处于一种悬浮状态。

表1 不同粒径下固体微粒的相对速度及相对沉降时间

Table 1 Relative velocity and deposition time of the solid particles with different diameters

$d_p / \mu\text{m}$	0.1	1	10	100
$u_{py} - u_{y0}$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$3.231\ 3 \times 10^{-7}$	$3.231\ 3 \times 10^{-5}$	0.003 23	0.323 13
$t / (\text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	$3.094\ 73 \times 10^6$	30 947.317	309.473 17	3.094 73

目前成品的气溶胶灭火剂固体微粒粒径基本上都是在  $1\ \mu\text{m}$  以下<sup>[1]</sup>,因此适合用式(7)进行描述。

#### 4.4 微粒沉降至火源表面的临界粒径

要保证微粒能够达到火源表面,则微粒在灭火过程中应保持  $u_{pyt} > 0$ ,于是有:

$$d_p > \left[ \frac{18u_y \mu \rho_g}{g \rho_d} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

表2给出了不同火焰速度下,固体微粒沉降的临界直径。

表2 不同火焰速度下固体微粒沉降的临界直径

Table 2 Criterion diameters of the solid particles to deposit in different flame velocities

$u_{y0}$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.01	0.1	0.5	1	2	3	5	10
临界 $d_p / \mu\text{m}$	17.6	55.6	124	176	249	305	393	556

而一般由火灾浮力效应引起的火焰内的气流速度可达到  $3\ \text{m/s}$  以上<sup>[8]</sup>,由此可见,灭火过程中固体

微粒基本上很难达到火源表面,而绝大部分微粒是经过卷吸进入火焰区域而达到灭火的目的。

## 5 结语

文章分析了气溶胶灭火剂固体微粒沉降过程的特点,并考虑其受到的摩擦力与重力的作用,对其沉降过程进行非稳态分析,得到以下结论:

1)当直径小于  $100\ \mu\text{m}$  时,微粒能够在较短的时间内随流场达到相对稳定状态,微粒沉降过程其沉降的雷诺数与粒子直径相关,且基本处于低雷诺数状态,沉降速度与微粒粒径的平方成正比。

2)当直径达到  $1\ \mu\text{m}$  时,微粒即可在空间长期滞留,并通过卷吸进入火焰区域,达到灭火的效果。目前成品的气溶胶灭火剂微粒基本上都是在  $1\ \mu\text{m}$  以下,其沉降过程基本上处于低雷诺数状态,可在空间长期滞留,满足良好灭火的要求。

3)火源上方固体微粒沉降的临界直径与火焰速度的  $1/2$  次方成正比。由于火灾浮力效应引起的

火焰速度可达  $3\ \text{m/s}$  以上,其沉降的临界直径达到  $300\ \mu\text{m}$  以上,因此,灭火过程中固体微粒很难达到火源表面,绝大部分微粒是经过卷吸进入火焰区域,进而达到消除自由基而灭火的目的。

## 参考文献

- [1] Widmann J F, Duchez J, Yang J C, et al. Measurement of the optical extinction coefficient of combustion-generated aerosol[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2005, (36):283-289
- [2] 余明高,廖光焯,张和平,等.哈龙替代产品的研究现状及发展趋势[J]. *火灾科学*,2002,11(2):108-112
- [3] Kibert C J, Dierdorf D. Solid particulate aerosol fire suppressant[J]. *Fire Technology*, 1994, 4: 387-399
- [4] 傅智敏,杨荣杰.固体微粒气溶胶灭火剂的改性研究[J]. *火灾科学*,2000,9(3):35-41
- [5] 杨杰.灭火气溶胶发生剂灭火机理及配方设计[J]. *火炸药学报*,2003,26(4):84-86
- [6] Heinonen E W, Tapscott R E, Kibert C J, et al. *Aerosol Technology Overview and Bibliography* [R]. WL-TR-95-XX, 1995
- [7] 杨书申,彭竹琴.气体-颗粒两相流动力学及其在气溶胶采样中的应用[J]. *北京:中原工学院学报*, 2004,15(2):59-62
- [8] 杜文锋. *消防燃烧学* [M]. 北京:中国人民公安大学出版社, 1996

# Analysis on the depositing process of the solid particulates produced by aerosol fire suppressants under fire conditions

Chen Changkun<sup>1, 2</sup>

(1. Institute of Disaster Prevention Science & Safety Technology, Central South Univ., Changsha 410075, China; 2. Henan Key Lab. of Preventing and Curing on Coal Mine Gas & Fire, Henan Polytechnic Univ., Jiaozuo, Henan 454003, China)

[Abstract] In this paper, unsteady analysis was conducted on the space distribution and depositing process of the solid particulates produced by aerosol fire suppressants under fire conditions. How the particles diameters affects their movement was demonstrated. The features of the particle diameters affecting the movement status were presented. The stability and resort time for the solid particles in the flow filed was explored. And the expression of the criterion (critical) diameter for a particle depositing to the fire source surface was obtained. The results demonstrated that: the depositing process of the solid particulates and the depositing Renault number are related to the particle diameter, and the flow is almost in the relatively steady flow status with low Renault number. The depositing velocity is proportional to the square of the particle diameter. When the particle diameter is lower than  $100\ \mu\text{m}$ , the flow will reach the steady flow status in very short time, and while the particle diameter reaches  $1\ \mu\text{m}$ , the particles can suspend in the space for a long time, and can be entrained into the flame region showing the extinguishing effect.

[Key words] solid particulates; aerosol fire suppressant; depositing process