



超细干粉施放、流动过程的数值模拟

陆 诚¹, 吕晓东², 魏 巍¹, 张立博³

(1. 北京特种车辆研究所, 北京 100072; 2. 西安新竹防灾救生设备有限公司, 陕西 西安 710075;
3. 中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249)

摘要:在不改变实验舱灭火系统结构和设置的条件下,对新型灭火剂超细干粉的可替代性进行研究;基于流体力学和气-固两相流的基本理论,结合 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型和颗粒轨道模型,建立用于描述超细干粉灭火剂灭火过程中施放、流动和扩散过程的数学模型;利用该模型,对实验舱体内超细干粉灭火剂的施放、流动和扩散过程进行模拟分析,得到详细的流场和浓度分布情况。结果表明:灭火剂从喷嘴施放后,在舱体内逐渐扩散形成全淹没状态;超细干粉灭火剂平均浓度高于要求的灭火浓度,用超细干粉灭火剂可以替代哈龙型灭火剂。

关键词:超细干粉;灭火剂;气-固两相流;数值模拟

中图分类号:TQ 021.1

文献标志码:A

文章编号:1008-5548(2014)06-0017-05

Numerical Simulation Analysis of Discharge and Flow of Ultrafine Powders

LU Cheng¹, LYU Xiaodong²,

WEI Wei¹, ZHANG Libo³

(1. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China;

2. Xi'an Xinzhu Fire and Rescue Equipment Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

3. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: The substitutability of ultrafine powder extinguishing agents was researched with the original structure and equipment of the experimental cabin. Based on the computational fluid dynamics and two-phase flow theory, the mathematic model combined with $k-\varepsilon$ two equations turbulent model and particle trajectory model was developed to describe the discharge, flow and diffusion of ultrafine powder extinguishing agents in an experimental cabin. The discharge, flow and diffusion of ultrafine powders were simulated with the model in the experimental cabin. The detailed information of the flow field and ultrafine powders concentration distribution were obtained. The results show that the extinguishing agents are full submerged after discharging. The average concentration of ultrafine powder extinguishing agents in experimental cabin is higher than the required extinguishing concentration. Ultrafine

powder extinguishing agents are able to replace Halon extinguishing agents without any change of the existing fire extinguishing system.

Keywords: ultrafine powder; extinguishing agent; gas-solid flow; numerical simulation

目前一些车辆中的灭火系统仍采用哈龙型灭火剂,该灭火剂毒性大且环保性差,正逐步被新兴的灭火剂取代^[1-2]。作为新型灭火剂,超细干粉灭火剂粒度小、质量轻、比表面积较大,且具有类气体流动特性,在灭火过程中能够形成气溶胶,灭火性能好,是哈龙型灭火剂的良好替代产品^[3-4]。关于能否在不改变原有灭火系统的前提下直接用超细干粉灭火剂替代哈龙型灭火剂的问题十分值得研究。在本文的前期实验研究中,车辆实验舱内超细干粉灭火剂在不改变原装置的情况下可以达到灭火浓度要求,但是受检测方法的限制,难以获得灭火剂在车辆内部详细的流动和扩散信息,而灭火剂的流动扩散过程直接影响了灭火剂在车辆内的分布情况,从而影响对其灭火性能的评价。本文中采用数值模拟方法对超细干粉灭火剂在车辆内的灭火过程^[5]进行分析,揭示超细干粉灭火剂的施放、流动及扩散规律,弥补实验研究的不足,为车辆内灭火系统的设计和布置提供参考。

1 数学模型

采用超细干粉灭火剂灭火时,驱动装置启动后,气体将密封膜片打开,超细干粉在驱动气体作用下从灭火装置喷嘴喷出,在舱体内进行流动和扩散运动,与火面接触达到灭火目的。超细干粉灭火剂为固体小颗粒,因此超细干粉灭火过程属于气-固两相流动,其中驱动气体为连续相,超细干粉颗粒为离散相^[6-7]。由此可知,超细干粉灭火过程需采用气-固两相模型进行模拟,其中,驱动气体的流动行为采用基于质量守恒方程、动量守恒方程、湍动能方程和湍动能耗散率方程等流体力学基本方程组^[8]来描述,而超细干粉颗粒的流动和扩散行为需采用基于拉格朗日方法的颗粒轨道模型^[9]进行描述。颗粒轨道模型有如下几点假

收稿日期:2014-02-28,修回日期:2014-05-15。

第一作者简介:陆诚(1973—),男,工程师,研究方向为车辆消防与安全工程。E-mail:zsyylb@126.com。

通信作者简介:张立博(1989—),男,硕士研究生,研究方向为过程模拟与优化。电话:010-89731773,E-mail:zhanglibo7@126.com。

设:1)颗粒与驱动气体间有速度滑移,但是颗粒与驱动气体处于同一恒温场,无温度滑移;2)颗粒没有自身的湍流黏性、湍流扩散和湍流传热;3)各组颗粒沿其自身的轨道运动而互不干扰;4)颗粒对气体流场的影响很小,可以忽略不计。

颗粒运动时所受的外力包括重力、Saffman 升力、曳力、浮力、压力梯度力、虚假质量力、Magnus 力和 Basset 力等。超细干粉颗粒的粒径较小,浓度较小,颗粒所受的曳力和重力是最主要的,其他力(如范德华力)在量级上与之相比非常小,一般可以忽略不计,因此在计算中只考虑曳力和重力对超细干粉颗粒的作用。在笛卡尔坐标系下超细干粉颗粒的作用力平衡方程的形式(x 轴方向)为

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_d(u - u_p), \quad (1)$$

符号说明见附录。其中 $\frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$ 为重力项, $F_d(u - u_p)$ 为颗粒的单位质量曳力,且

$$F_d = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_d Re}{24}, \quad (2)$$

其中曳力系数 C_d 的表达式为 $C_d = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}$, 对于球形颗粒,在一定的雷诺数 Re 范围内,该表达式中的 a_1 、 a_2 、 a_3 为常数,具体数值见表 1。

表 1 颗粒不同雷诺数时 a_1 、 a_2 、 a_3 的值

Tab. 1 a_1 , a_2 and a_3 with different Reynolds number

雷诺数范围	a_1	a_2	a_3
$Re \leq 0.1$	0	24.00	0
$0.1 < Re \leq 1.0$	3.690 0	22.73	0.093
$1.0 < Re \leq 10.0$	1.222 0	29.17	-3.889
$10.0 < Re \leq 10\ 000$	0.616 7	46.50	-116.700
$Re > 10\ 000$	0.364 4	98.33	-2\ 278.000

结合方程(1)、(2)及表 1,在一定离散时间步长内对方程(1)逐步积分,可得颗粒轨道上每个位置处颗粒的速度。通过对下式进行积分可得对轨迹本身的计算(只写 x 轴方向):

$$\frac{dx}{dt} = u_p. \quad (3)$$

超细干粉灭火剂颗粒平均粒径为 $6\ \mu\text{m}$,颗粒粒径较小,颗粒间范德华力对颗粒运动影响作用较大^[10]。范德华力为

$$F_a = \frac{2\pi\omega d_p}{3} \left[\frac{1}{4} \left(\frac{h}{z_0} \right)^{-8} - \left(\frac{h}{z_0} \right)^{-2} \right]. \quad (4)$$

以颗粒气速为 $30\ \text{m/s}$,颗粒质量浓度为 $0.08\ \text{kg/m}^3$

(灭火要求浓度)工况对比计算颗粒单位质量曳力与范德华力,单位质量曳力约为 $10^{-8}\ \text{N}$,而范德华力约为 $10^{-18}\ \text{N}$,与曳力相差较大,主要原因是颗粒浓度较小,颗粒间范德华力较小,可忽略不计。

2 模拟工况

模拟的对象为一个实验舱体,基本结构尺寸为 $1\ 996\ \text{mm} \times 1\ 910\ \text{mm} \times 920\ \text{mm}$ 。灭火剂储瓶放置在舱体外,通过管路通入舱体内部,通过 2 个灭火喷嘴进行灭火。喷嘴 1 位于舱体左侧,喷嘴出口向下;喷嘴 2 位于舱体右侧,喷嘴出口面向舱体侧壁。灭火喷嘴具体布置如图 1 所示,灭火喷嘴结构如图 2 所示。

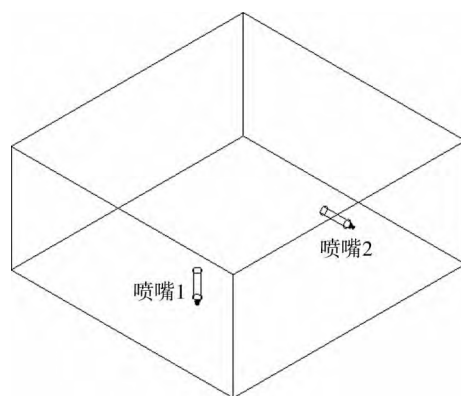


图 1 灭火喷嘴位置

Fig. 1 Fire nozzle position

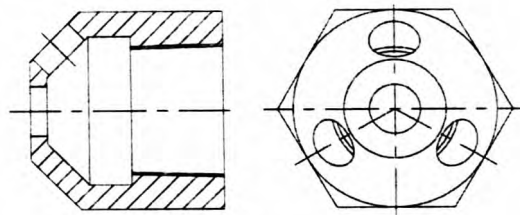


图 2 灭火喷嘴结构

Fig. 2 Structure of fire nozzle

超细干粉灭火剂在驱动气体作用下由灭火装置喷嘴施放,在舱体内扩散流动。超细干粉灭火剂储瓶体积为 $1.8\ \text{L}$,压力为 $2.3\ \text{MPa}$,充装质量为 $0.323\ \text{kg}$,驱动气体为氮气,施放时间为 $7\ \text{s}$ 。超细干粉颗粒平均粒径为 $6\ \mu\text{m}$,能扑灭火焰所需的质量浓度为 $0.08\ \text{kg/m}^3$ 。

3 模拟方法

采用计算流体动力学(CFD)Fluent 软件对该模拟工况条件下的超细干粉灭火剂在舱体内的施放、流动、扩散过程进行模拟计算。压力-速度耦合方程的求解采用 SIMPLE 算法^[8],湍流耗散率、动量、组分和湍动能方程的离散格式均取二阶迎风差分格式,利用标准壁面函数法处理舱体壁面。为了更准确地模拟喷嘴

周边区域中各物理量较大的变化趋势,对喷嘴周边区域的网格进行加密,整个舱体的网格数约为 2×10^6 。

求解颗粒的运动轨迹时,先给定在各种边界处处理颗粒的方法。在入口处,给定颗粒的初始速度、粒径分布等;当颗粒运动到壁面时发生3种情况:颗粒发生弹性反射、颗粒发生非弹性反射、颗粒被壁面捕集^[11],本文中认为颗粒在壁面发生弹性反射;当颗粒运动到火面时,对其进行灭火反应,此时颗粒轨迹的计算终止。

4 结果与分析

4.1 流场分析

图3为舱体内灭火喷嘴喷出的超细干粉灭火剂的流线图。可以看出,由喷嘴施放出的超细干粉在驱动气体的作用下先喷到喷嘴出口所对的壁面上,随后折流向顶部运动,同时在舱体内逐渐扩散至均匀状态。还可以看出,在喷嘴附近超细干粉灭火剂流动速

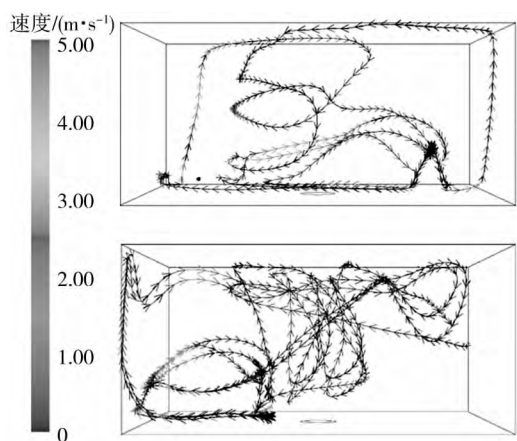


图3 超细干粉灭火剂的流线

Fig. 3 Flow line of ultrafine powders extinguishing agent

度较大,且流线较集中,超细干粉浓度较大;随着超细干粉灭火剂在舱内的流动和扩散,流动速度逐渐减小,浓度也减小。由此可知,喷嘴附近发生的火灾可以很好地被熄灭,而舱内其他位置上发生的火灾能否及时被熄灭则取决于该位置上灭火剂的浓度,这与灭火剂的流动和扩散过程密切相关。模拟计算得到的灭火剂流动和扩散规律可为灭火装置的设计和布置提供重要的参考。

4.2 超细干粉浓度分布

超细干粉灭火剂在舱体内的分布直接决定了灭火剂的灭火效果,超细干粉浓度分布是否均匀与灭火装置喷嘴结构及分布位置有很大关联。对超细干粉灭火剂施放过程中不同时间浓度分布情况进行分析,结果如图4所示。从不同时间舱体内部超细干粉浓度分布可以得出超细干粉灭火剂施放和流动扩散过程。超细干粉由喷嘴施放,首先喷到喷嘴对应的壁面上;由图4(a)、(b)、(c)可知,喷到壁面上的超细干粉向舱体上部运动,同时向舱体其他部位扩散。由图4(d)、(e)可知,扩散到顶部的超细干粉由于重力作用向舱体下部低浓度区流动,在舱体内部形成全淹没状态;由图4(f)、(g)、(h)可知,随着灭火剂的施放,舱体内部浓度逐步增大,并覆盖整个舱体。综合分析可得,超细干粉颗粒从喷嘴喷出,在驱动气流作用下,颗粒聚集在对应的墙壁上,再向顶部扩散。随着颗粒重力作用占主导,颗粒开始向舱内底部运动,在舱内形成全淹没状态。

图4很好地展示了不同时间舱体内超细干粉灭火剂浓度变化情况,在此基础上,对舱体内超细干粉灭火剂分布进行定量分析,检测舱体内0、0.2、0.4、0.6、0.8 m高度截面上的超细干粉均浓度,检测位置如

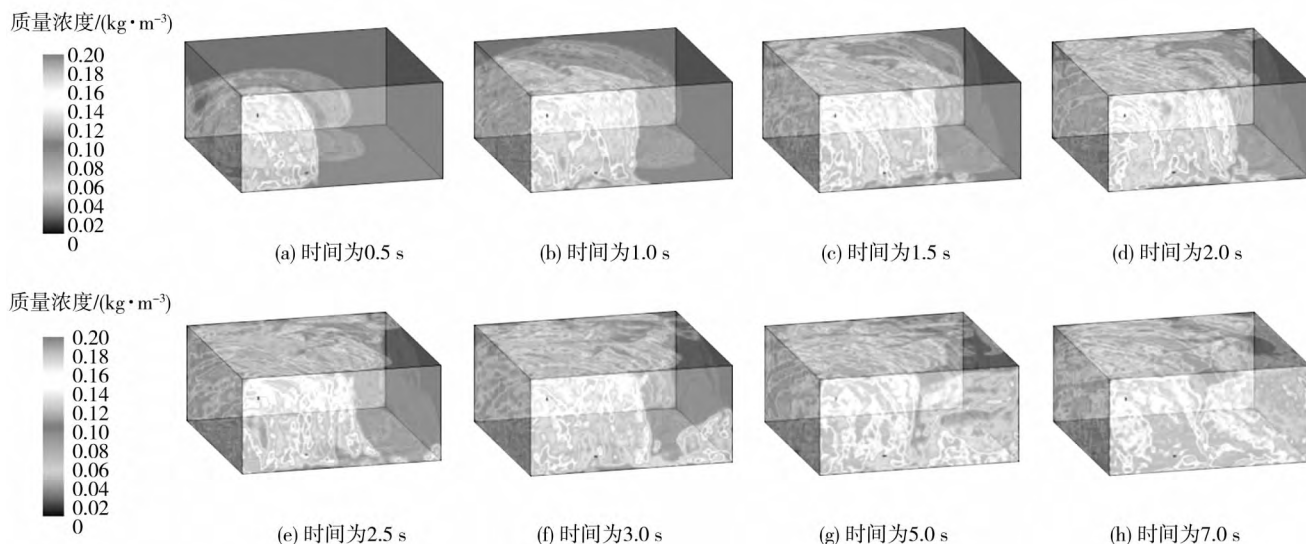


图4 不同时间舱体内超细干粉浓度分布

Fig. 4 Concentration of ultrafine powders in cabin at different time

图 5 所示。

图 6 所示为舱体内超细干粉浓度分布随时间的变化曲线。由图可知,在超细干粉投放过程中(1~7 s),舱体底部浓度明显大于顶部与中部浓度。原因是喷嘴 1 投放的所有颗粒及喷嘴 2 投放的部分颗粒在驱动气体作用下先喷到底面,因此底部颗粒浓度较大。超细干粉投放结束后(7~14 s),底部颗粒浓度继续增大,而顶部颗粒浓度有所减小。原因是投放结束后超细干粉所受的气体驱动力逐渐减小,重力作用占主导地位,整个舱体空间内的超细干粉颗粒在重力作用下先向底部运动。由图 6 还可以看出,当超细干粉投放刚结束(7 s)时,超细干粉灭火剂在舱内形成全淹没状态,且平均质量浓度达到 0.09 kg/m^3 ,可满足灭火浓度

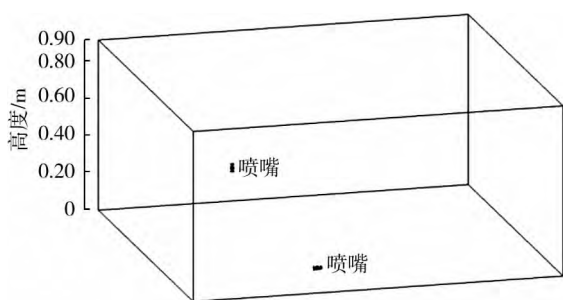
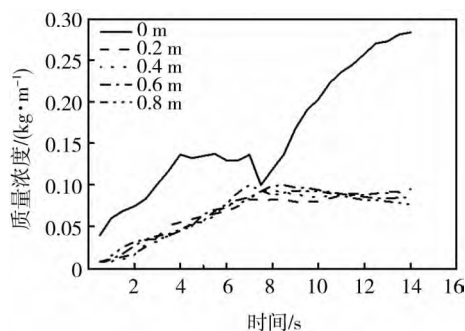
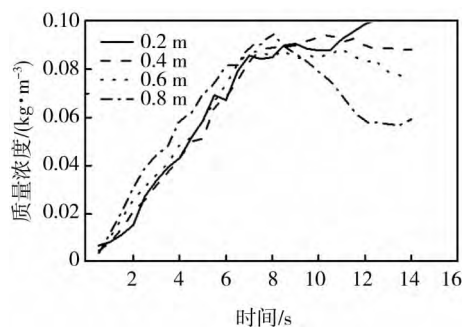


图 5 超细干粉浓度检测位置

Fig. 5 Detected position of ultrafine powders concentration



(a) 所有检测截面



(b) 不含底面(0 m)检测截面

图 6 舱体不同位置处灭火剂浓度随时间的变化

Fig. 6 Ultrafine powders concentration at different detected positions varying with time

0.08 kg/m^3 的要求。投放结束之后(7~14 s),舱体底部灭火剂浓度继续增大,而顶部灭火剂浓度逐渐减小,质量浓度约为 0.06 kg/m^3 ,小于灭火所需浓度。此时,舱体底部的火焰可以扑灭,而发生在舱体上部的火焰可能无法扑灭。这就要求超细干粉灭火剂需具有良好的化学性能,超细干粉一接触到火焰马上发生反应,熄灭火焰。

上述模拟研究表明,在实验舱体内,不改变灭火系统任何设置,直接用超细干粉灭火剂替代哈龙型灭火剂,完全可以达到灭火要求。模拟计算得到的舱体内超细干粉颗粒投放、流动及扩散规律显示,为了更好地达到灭火效果,应该合理设置灭火喷嘴,以便快速投放灭火剂且在舱体内形成全淹没状态;同时要求灭火剂具有良好的化学性能,使其一接触到火焰马上发生反应,熄灭火焰,否则灭火剂投放之后,随着时间的推移,舱体局部空间灭火剂浓度变小,难以熄灭火焰。

5 结论

1)在分析超细干粉灭火剂灭火过程中灭火剂投放、流动和扩散行为特点的基础上,基于计算流体力学和气-固两相流基本理论,结合 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型和颗粒轨道模型,建立了描述超细干粉灭火剂投放、流动和扩散过程的数学模型,并给出了相应的数值求解方法。

2)采用建立的数学模型对舱体内超细干粉灭火剂的投放、流动和扩散过程进行了模拟分析,得到了舱体内超细干粉灭火剂的流场和浓度分布情况。模拟结果显示,超细干粉灭火剂从喷嘴投放之后,在驱动气体作用下先喷到喷嘴出口对应的壁面上,随后折流到对面,然后在舱体内逐渐扩散形成全淹没状态。灭火剂投放结束,驱动气体作用力逐渐减弱,在重力作用下超细干粉灭火剂向舱体底部运动,底部区域灭火剂浓度较大。

3)在不改变实验舱灭火系统任何设置下,用超细干粉灭火剂替代哈龙型灭火剂,超细干粉灭火剂质量为 0.323 kg 时,舱体内灭火剂的平均质量浓度约为 0.09 kg/m^3 ,可满足灭火所需的浓度要求。

附录

符号表

ρ —密度, kg/m^3 ;

u —气体速度, m/s ;

t —时间, s ;

k —湍流脉动动能;

(下转第 24 页)

输送背压 p_b 不同时的 ECT 成像结果。可以看出,在煤粉流量和表观气速基本不变的情况下,随着输送背压 p_b 的增大,管道内流动形态先后经历了移动栓流和线状流,其中输送背压较大的工况下移动栓的出现频率和栓长均变小,线状流流动层高度也变小。原因是随着输送背压的增大,气体的密度会增大,而其动力黏度几乎不变,相同的气速和管径下,气体雷诺数会增大,同时颗粒的沉积速度随着气体密度的增大而减小,气体携带颗粒能力有所提高。在气速相同的情况下,输送背压较小时沉积下来的颗粒在输送背压较大时会被气体吹起,直到所有沉积在管道底部的颗粒全部悬浮在管道内。

3 结论

在不同的输送背压、煤粉流量以及表观气速时进行了煤粉气力输送实验,通过电容成像系统对管道内煤粉流动形态进行观测。

1)随着表观气速的减小,煤粉先后出现悬浮流、不同滑动层高度的线状流、沙丘流以及移动栓流。

2)随着煤粉流量的增大,管内煤粉浓度增大,煤粉流型向移动栓流状态发展,移动栓出现的频率以及移动栓长有所增大。

3)随着输送背压的增大,管内煤粉浓度减小,煤粉

流型向悬浮流状态发展,在输送背压较大时,较小的表观气速就可以形成移动栓流。

参考文献 (References):

- [1] GELDART D, LING S J. Dense phase conveying of fine coal at high total pressure[J]. Powder Technology, 1990, 62: 243–252.
- [2] CHEN Xiaoping, FAN Chunlei, LIANG Cai, et al. Investigation on characteristics of pulverized coal dense-phase pneumatic conveying under high pressure [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2007, 24 (3): 499–502.
- [3] 刘小军, 龚欣, 屈强, 等. 粉体密相气力输送中的管道压降预测[J]. 计算机与应用化学, 2003, 20 (1): 13–15.
- [4] 鹿鹏, 陈晓平, 梁财, 等. 不同煤粉高压密相气力输送特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(5): 16–20.
- [5] PU Wenhao, ZHAO Changsui, XIONG Yuanquan, et al. Numerical simulation on dense phase pneumatic conveying of pulverized coal in horizontal pipe at high pressure [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65 (8): 2500–2512.
- [6] JAWORSKI A J, DYAKOWSKI T. Investigations of flow instabilities within the dense pneumatic conveying system[J]. Powder Technology, 2002, 125: 279–291.
- [7] 梁财, 赵长遂, 陈晓平, 等. 高压浓相变水分煤粉输送特性及香农信息熵分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (26): 40–45.
- [8] XU C L, LIANG C, ZHOU B, et al. HHT analysis of electrostatic fluctuation signals in dense-phase pneumatic conveying of pulverized coal at high pressure [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65 (4): 1334–1344.

(上接第 20 页)

ε —湍流动能耗散率;

g_x —重力加速度, m/s^2 ;

u_p —颗粒平均速度, m/s ;

C_d —曳力系数;

d_p —颗粒直径, m ;

Re —雷诺数;

F_a —范德华力, N ;

h —颗粒间间隙距离, m ;

ω —粘附功, J/m^2 ;

z_0 —范德华力平衡力矩, m_0 。

参考文献 (References):

- [1] 刘江虹, 金翔, 黄鑫. 哈龙替代技术的现状分析与展望[J]. 火灾科学, 2005, 14 (3): 160–165.
- [2] 陈智慧, 杨荣杰. 哈龙替代技术的应用选择方法[J]. 火灾科学, 2003, 12 (2): 115–118.
- [3] 周文英, 杜泽强, 介燕妮, 等. 超细干粉灭火剂[J]. 中国粉体技术, 2005, 11 (1): 42–44.

- [4] MIKHAIL K. Studies of fundamental physical chemical mechanisms and processes of flame extinguishing by powder aerosols[J]. Fire and Materials, 2008, 32 (1): 27–47.
- [5] HUA Min, XU Dayong, ZHOU Ru, et al. Simulation research of superfine powder extinguishing agent movement [J]. Procedia Engineering, 2012, 45: 1031–1038.
- [6] 华敏, 殷志平, 潘仁明. 超细微粒灭火剂冷施放运动特性试验研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12 (4): 217–220.
- [7] 郑斌. 超细微粒灭火剂施放与流动研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [8] 陶文柱. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2011: 347–375.
- [9] HARRTS AT, DAVIDSON JF, THORPER B. The influence of the riser exit on the particle residence time distribution in a circulation fluidized bed riser[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58: 3669–3680.
- [10] 柳冠清. 范德华力和静电力下的细颗粒离散动力学研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [11] LI T, GRACE J, BI X. Study of wall boundary condition in numerical simulations of bubbling fluidized beds [J]. Powder Technology, 2010, 203 (3): 447–457.