文章编号:1673 - 0062(2015)04 - 0050 - 06

气溶胶在通风柜中沉积率和逸出率的实验研究

彭贤勋[1,2],叶勇军[1*],李 志[1],丁德馨[1],杨 蓉[1],代鑫涛[1],尹安松[1]

(1. 南华大学 环境保护与安全工程学院,湖南 衡阳 421001;2. 核工业理化工程研究院,天津 300180)

摘 要:为研究粒径、开方面风速和热源温度对气溶胶在通风柜内沉积率和逸出率的影响,本文以粒径为 1 μm、2.5 μm、5 μm 和 8 μm 的气溶胶为实验材料,通风柜开放面风速分别取 0.5 m/s 和 1 m/s,热源温度分别为 300 K、523 K 和 753 K,进行实验研究. 实验结果表明,气溶胶在通风柜内的沉积率和逸出率与粒径、开放面风速以及热源温度有关,其中:1)在 1 μm ~ 8 μm 内,随着气溶胶粒子粒径的增大,气溶胶粒子在通风柜中的沉积率升高,逸出率降低;2)当开放面风速由 0.5 m/s 增加到 1 m/s 时,气溶胶粒子的沉积率和逸出率均降低;3)在 300 K ~ 753 K 内,随着热源温度的升高,气溶胶粒子的沉积率降低,而气溶胶的逸出率随之升高.

关键词:气溶胶;沉积率;逸出率;通风柜

中图分类号:X513 **文献标识码**:B

Experiments of Aerosol Deposition Rate and Evolution Rate in Fume Hood

PENG Xian-xun[1,2], YE Yong-jun[1*], LI Zhi[1], DING De-xin[1], YANG Rong[1], DAI Xin-tao[1], YIN An-song[1]

(1. School of Environmental Protection and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Research Institute of Physical and Chemical Engineering of Nuclear Industry, Tianjin 300180, China)

Abstract: To explore the influence of particle size, operating area wind speed and heat source temperature on aerosol deposition rate and escape rate in fume hood, this article takes the aerosol of 1μm, 2.5 μm, 5 μm and 8 μm as experimental material with the operating area wind speed of 0.5 m/s and 1 m/s and heat source temperature of 300 K, 523 K

收稿日期:2015 - 09 - 08

基金项目:国家自然科学青年基金资助项目(11105069);南华大学研究生创新课题基金资助项目(2014XCX26)

作者简介:彭贤勋(1983 -),男,浙江苍南人,南华大学环境保护与安全工程学院硕士研究生,副研究员. 主要研究方向:核安全与辐射防护. * 通讯作者.

and 753 K. The results of experiments indicate that, operating area wind speed, particle size and heat source temperature have a certain correlation with aerosol deposition rate and escape rate in fume hood: 1) within 1μm ~ 8μm, the aerosol deposition rate increases with the increase of particle size, but the aerosol escape rate is on the contrary; 2) as operating area wind speed increases from 0.5 m/s to 1 m/s, both aerosol deposition rate and escape rate decrease; 3) within 300 K ~ 753 K, the aerosol deposition rate decrease with the increase of heat source temperature, but the aerosol escape rate is on the contrary.

key words: aerosol; deposition rate; escape rate; fume hood

0　引言

通风柜是一种广泛运用于实验室和工业中的特殊密闭罩,通过机械通风,使通风柜内部形成负压,防止由于通风柜内机械设备的扰动、化学反应或者热源的热压、以及室内气流的干扰等原因引起的有害物逸出. 上世纪五十年代以来,国内外许多学者采用控制风速法来确定排风柜的风量,研究通风柜内部结构、操作面高度、导流板和送排风模式等因素对通风柜内部气流组织的影响[1-2]. 随着气溶胶科学的发展,研究发现,气溶胶粒子在风柜中的扩散和沉积与操作面的风速有较强的相关性,过低的开放面风速势必造成污染物的逃逸,危害试验人员的安全[3];开放面的风速度太大,会产生文丘里效应,从而把有害物诱导至工作区,同时可导致通风柜内工作台上方空间内气流紊乱,污染物可能在柜内某个角落积聚[4]. 某些工艺过程中产生的热量,会在风柜内形成温度场,从而对气溶胶在风柜中的扩散与沉积产生影响;气溶胶粒子在风场中的运动除了受周围气流的影响,在很大程度上还取决于气溶胶粒子的粒径[5-9]. 综上所述,气溶胶粒子在通风柜内的沉积和逸出与开放面风速、热源温度以及粒径有关,然而,其在通风柜内的沉积量和逸出量具体为何值,目前鲜有报道. 因此,本文结合通风柜设计理论和气溶胶科学,探究气溶胶粒子在通风柜内的沉积率与逸出率,使对通风柜安全性能的评价能够量化.

随着工业和科技的发展,越来越多的研究分析和工业生产需要在通风柜内完成,由此可见,通风柜在职业卫生防护方面占据了举足轻重的地位,而由于通风柜设计及操作的不合理,导致污染物物外逸,对工作区域内操作人员的安全和健康造成严重危害,由此导致的中毒和职业伤害事故时有发生,截止 2012 年,全国累计报告职业病已超过 80 万例,其中 2012 年新增 2.7 万例,在这些职业病中由尘毒所致职业病达到 90% 以上,并且事故发生率呈直线上升趋势. 作为一种局部排风设备,通风柜是一种有效控制尘毒危害的重要方法和常用技术,然而,目前缺乏对通风柜安全性能的定量评价. 为此,本文通过实验研究热源温度、开放面风速以及粒径对气溶胶在通风柜中沉积率与逸出率的影响,这对于改善通风气流组织形式,降低气溶胶在风柜中的逸出率以及保障作业人员生命健康具有重要的意义.

1　实　验

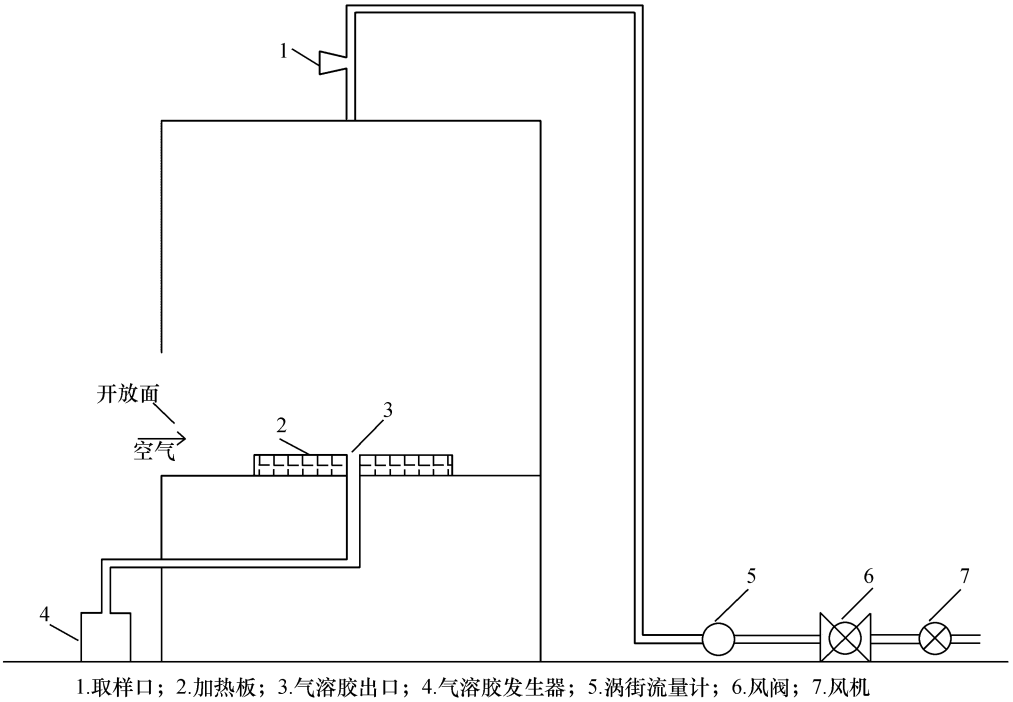
1.1　实验仪器

由于柜内存在热源,本文选用上部排风通风柜,所用实验装置如图 1 所示,实验所用通风柜尺寸为 2 m × 0.8 m × 1.3 m,开放面为 1 m^2;风速仪采用德国 test 425 热敏式风速仪,测量范围 0 ~ +20 m/s,分辨率 0.01 m/s. 气溶胶由美国 TSI 3475凝聚式单分散气溶胶发生器产生,该仪器是一种准确、快速、能提供高浓度的单分散性气溶胶的发生器,能产生 0.1 ~ 8 μm 的单分散性气溶胶粒子,几何标准偏差小于 1.1. 气溶胶测量仪采用美国 APS 3321 气溶胶粒径谱仪测量,该仪器能测量 0.5 ~ 20 μm 的气溶胶粒子. 采用德通 DT9-4A-4kW/220V 型风机进行机械通风,流量计采用 DN300 型涡街流量计,实验用加热盘通过与温控器的连接,可以实现对温度的控制,能提供 0 ~ 600 ℃的温度.

1.2　实验原理

通过调节风阀的开度,可以控制开放面的风速,开放面的平均风速由 test 425 热敏式风速仪测量. 通过温控器设置好加热温度,从而将加热板温度控制在设定的温度点,用来模拟热源温度. 单粒径的气溶胶由 TSI 3475 凝聚式单分散气溶胶发生器产生,其所用原料为 DOP. 本文将在此实验系统上,完成粒径 1 μm、2.5 μm、5 μm 和 8 μm 气溶胶在通风柜内沉积率与逸出率的实验,通风柜开放面风速分别取 0.5 m/s、1 m/s,热源温度设

置为 300 K、523 K 和 753 K.



1.取样口；2.加热板；3.气溶胶出口；4.气溶胶发生器；5.涡街流量计；6.风阀；7.风机

图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental device

1.3 实验方案

实验时,打开风机进行通风,观察流量计流量,调节风阀将通风量调至实验设定值,用 test 425 热敏式风速仪测量开放面平均风速,根据测量值,微调风阀开度,重复以上操作,直至将开放面平均风速控制在实验设定值;打开温控器开关,通过控制面板将加热板的温度加热至实验设定值,待温度稳定后,打开气溶胶发生器,根据实验设定的粒径值,调节饱和室温度和流量,然后,打开 APS 3321 粒径谱仪,测量气溶胶发生器出口气溶胶的粒径和浓度,根据测量值,微调气溶胶发生器,重复以上操作,直至所产生的气溶胶粒径达到实验设定值. 用 APS 3321 粒径谱仪测量环境中的气溶胶浓度,通风一段时间后(至少 10 次换气时间),测量风柜中气溶胶浓度和取样口位置气溶胶浓度.

在气流的作用下,风柜中气溶胶近似为混合均匀的,绝大部分气溶胶随风流经出风口排出,一部分受自身的重力作用在通风柜内部沉积下来,其余的气溶胶粒子(特别是小颗粒)在布朗运动或回流的作用下,穿过开放面逃逸出去.

1.3.1 气溶胶的扩散

小粒径气溶胶的扩散与气体分子非常相似,不同之处仅在于粒度和形状,由于质量大粒子的惯性和表面积较大,因此较大粒子的扩散系数比小粒子小,气溶胶粒子的扩散系数为[10]:

$$D = \frac{kTC_c}{3\pi\eta d_p} \tag{1}$$

式中:

k 为玻尔兹曼常数,$1.38e^{-23}$ J/K;

η 为气体粘度,Pa·s;

d_p 为粒子的粒径,m.

1.3.2 气溶胶的沉积

气溶胶粒子受到重力场的作用,部分粒子会沉积在通风柜底部,当通风柜内部流场稳定后,通风柜内部气溶胶平均质量浓度近似于一个稳定值,此时,气溶胶粒子将以一个稳定的速度沉降,用公式表示为[10]:

$$V_{ts} = \frac{\rho_p d_p^2 g C_c}{18\eta} \tag{2}$$

式中:

ρ_p 为粒子密度,kg/m^3;

d_p 为粒子的动力学直径,m;

g 为重力加速度,N/kg;

η 空气的粘度,Pa·s;

C_c 为滑流修正系数,无量纲:

$$C_c = 1 + Kn[\alpha + \beta\exp(-\gamma/Kn)] \quad (3)$$

式中:

$\alpha = 1.207$, $\beta = 0.440$, $\gamma = 0.596$;

Kn 为克努森数,无量纲:

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_p} \quad (4)$$

式中:

λ 为气体的平均自由行程,m.

1.3.3　沉积率和逸出率计算

实验中发现,气溶胶粒子主要沉积在通风柜底部,而沉积在柜子底部的气溶胶粒子绝大部分来自底部边界层内,故气溶胶粒子在重力作用下沉积在风柜底部的沉积率为:

$$\phi_1 = \frac{V_{ts}SC_b}{(V_{inlet}C_i + QC_p)} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

V_{ts} 为粒子的重力沉降速度,m/s;

S 为通风柜底部面积,m^2;

C_b 为通风柜底部的气溶胶质量浓度,kg/m^3;

V_{inlet} 为开放面的风速,m/s;

C_i 为环境气溶胶浓度,kg/m^3;

Q 为气溶胶发生器的出口流量,m^3/s,取 $6.7\times10^{-3}m^3/s$;

C_p 为气溶胶发生器出口浓度,kg/m^3;

在通风气流的作用下,绝大部分的气溶胶粒子随气流经出风口排出,一小部分沉积在通风柜内,剩下一部分则穿过开放面逃逸出去,根据质量守恒原理,气溶胶粒子的逸出率可以由以下公式计算:

$$\phi_2 = \left(1 - \frac{V_{inlet}C_o}{V_{inlet}C_i + QC_p}\right)\times 100\% - \phi_1 \quad (6)$$

式中:

C_o 为出气口气溶胶浓度,kg/m^3.

2　实验结果及分析

由式(1)和式(2)~式(4)计算出各工况下,气溶胶的扩散系数和沉积速度,如图 2 和图 3 所示. 由图可知,小粒径的气溶胶粒子布朗运动比较剧烈,其扩散系数较大,随着粒径的增大,布朗运动减弱,扩散系数逐渐减小;随着粒径的增大,气溶胶粒子质量增大,受本身重力作用,粒子的沉降速度增大. 随着温度的升高,气溶胶粒子的热运动加剧,导致其扩散系数增大;随着温度的升高,气溶胶粒子在热浮生升力的作用下,沉降速度逐渐减小.

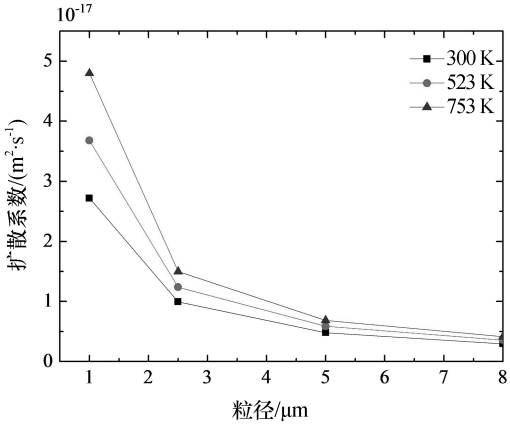


图 2　气溶胶的扩散系数

Fig. 2　Diffusion coefficient of aerosol

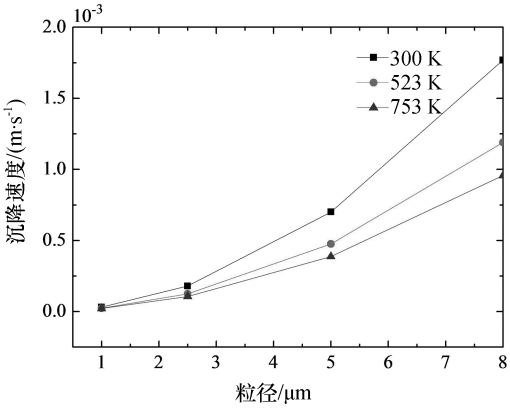


图 3　气溶胶的沉降速度

Fig. 3　Settling velocity of aerosol

根据现场试验所测量的数据,按式(2)~式(5)计算,可得到各工况下气溶胶粒子的沉积率,如图 4~图 5 所示. 由图 4 和图 5 可知,在风速为 0.5 m/s 时,当温度由 300 K 增加到 753 K,8 μm 气溶胶粒子沉积率由 1.3% 降低到 0.8%,1 μm、2.5 μm 和 5 μm 气溶胶粒子沉积率也随温度的升高而降低,但是变化不大;在风速为 1 m/s 时,当温度由 300 K 增加到 753 K,8 μm 的气溶胶粒子沉积率由 0.8% 降低到 0.3%,1 μm、2.5 μm 和 5 μm的气溶胶粒子沉积率随温度升高而降低,但同样变化不大. 各工况下,气溶胶粒子的沉积率随粒径的增大而升高. M Xu, A Lai 和 T Thatcher 等学者[11-13]研究认为,气溶胶粒子在热浮升力的作用下,有向上运动的趋势,不利于粒子在通风柜底部的富集,故气溶胶粒子的沉积率随温度的增加而降低;同时,随着气溶胶粒子粒径的增大,其所受重力逐渐增大,在重力的作用下,粒子的沉降速

度也随之增大,从而导致气溶胶粒子沉积率升高,这与本次实验结果显示的规律相吻合.

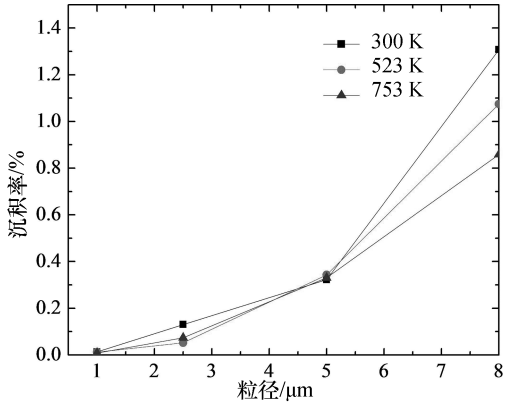


图 4 风速为 0.5 m/s 时气溶胶沉积率

Fig. 4 Aerosol deposition rate with speed 0.5 m/s

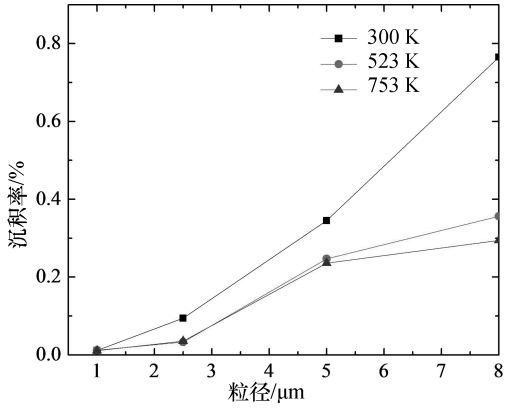


图 5 风速为 1 m/s 时气溶胶沉积率

Fig. 5 Aerosol deposition rate with speed 1 m/s

根据现场实验测量数据,按式(6)计算得到各工况下,气溶胶粒子的逸出率,如图 6 和图 7 所示. 由图 6 和图 7 可知,在温度为 300 K 时,当开放面风速由 0.5 m/s 增大到 1 m/s 时,1 μm、2.5 μm、5 μm 和 8 μm 粒子的逸出率分别下降了 15.9%、2.9%、2.2% 和 1.5%;在温度为 523 K 的时,当开放面风速由 0.5 m/s 增大到 1 m/s 时,1 μm、2.5 μm、5 μm 和 8 μm 粒子的逸出率分别下降了 16.0%、3.8%、2.7% 和 2.9%;在温度为 753 K 的时,当风速由 0.5 m/s 增大到 1 m/s 时,1 μm、2.5 μm、5μm 和 8 μm 粒子的逸出率分别下降了 18.9%、4.0%、3.6% 和 2.8%. 程勇、王新林等[14]等学者研究认为,开放面风速过低,排风柜内外没有形成有效的气流组织形式,对外界干扰气流的抵抗力较弱,导致柜内有害物大量逸出,本文实验数据显示,当风速由 0.5 m/s 增加到 1 m/s,各工况下气溶胶粒子逸出率显著下降,有效的减少了气溶胶粒子从通风柜内的逸出量.

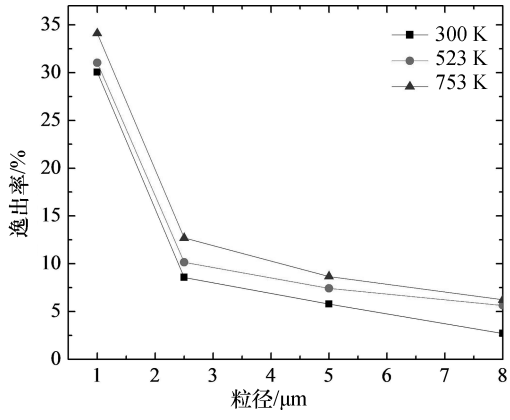


图 6 风速为 0.5 m/s 时气溶胶逸出率

Fig. 6 Aerosol escape rate with speed 0.5 m/s

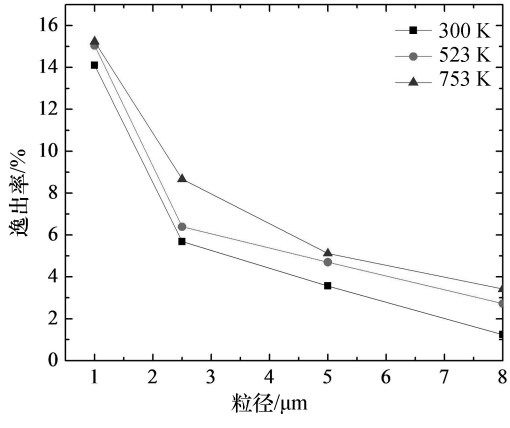


图 7 风速为 1 m/s 时气溶胶逸出率

Fig. 7 Aerosol escape rate with speed 1 m/s

研究发现,小粒径粒子的布朗运动较强,粒子的扩散系数较大,其从开放面逃逸出去的几率增加,而随着粒径的增大,气溶胶粒子布朗运动减弱,其主要随通风气流做惯性运动[15],由图 6 和图 7 可知,各工况下,随着粒径的增大,气溶胶粒子在通风柜内的逸出率显著降低,由此可知,粒径对气溶胶粒子逸出率具有较大的影响.

气溶胶粒子的热运动与温度有关,温度越高,粒子的布朗运动越强烈,扩散系数也越大[16-18],所以,由图 6 和图 7 可知,各工况下,随着温度的升高,气溶胶粒子在通风柜内的逸出率略有升高,相对于开放面风速和粒径这两个因素,温度对气溶胶粒子逸出率的影响较弱.

3　结　论

1)气溶胶粒子在通风柜内的沉积率,受粒径、开放面风速和热源温度的影响,随着温度的升高和开放面风速的增大,气溶胶粒子的沉积率下降,而随着粒径的增大,气溶胶粒在通风柜内的沉积率升高.

2)温度、粒径和开放面风速是影响气溶胶粒子在通风柜内逸出率的重要因素,随着粒径和开放面风速的增大,气溶胶粒子的逸出率下降,而随着温度的升高,气溶胶粒在通风柜内的逸出率升高.

3)开放面风速对气溶胶粒子在通风柜内逸出率具有较大的影响,适当增大开放面的风速,可以有效地阻止气溶胶粒子的逸出.

参考文献:

[1] 姜蔚. 教学实验室通风柜排风系统设计的思考[J]. 林业科技情报,2003,35(1):46-47.

[2] 周守喜. 实验室通风柜的设计和使用[J]. 渝西学院学报(自然科学版),2004,3(4):28-32.

[3] 刘卫斌. 通风柜变风量控制的技术分析[J]. 武汉工业学院学报,2007,26(1):79-81,89.

[4] 邢秀强,汤晓丽. 通风柜的节能措施及存在的问题[J]. 节能技术,1998(2):45-48.

[5] 贺启滨,朱彤,董昆,等. 气溶胶在全混通风小室中浓度衰减的试验研究[J]. 安全与环境学报,2011,11(3):109-111.

[6] 施孝增,吴家正,李曹县,等. 室内气溶胶颗粒物沉积特性的实验研究[J]. 洁净与空调技术,2010(3):10-14.

[7] 吴乃诚. 通风柜设计基本知识-兼论通风柜排风的补热问题[J]. 通风除尘,1985(3):30-37.

[8] 丹尼斯. 气溶胶手册[M]. 北京:原子能出版社,1988.

[9] 许钟麟. 空气洁净技术原理[M]. 上海:同济大学出版社,1998.

[10] Baron P A. Aerosol measurement principles, techniques, and applications[M]. 3rd ed. American: A John Wiley & Sons. Inc. Publication,2011.

[11] Xu M, Nematollahi M, Sextro R, et al. Deposition of tobacco smoke particles in a low ventilation room[J]. Aerosol Science and Technology,1994,20(2):194-206.

[12] Lai A C K, Wang K, Chen F Z. Experimental and numerical study on particle distribution in a two-zone chamber[J]. Atmospheric Environment,2008,42(8):1717-1726.

[13] Thatcher T L, Lai A C K, Moreno-Jackson R, et al. Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors[J]. Atmospheric Environment,2002,36(11):1811-1819.

[14] 程勇,刘东,王婷婷,等. 实验室排风柜面风速要求与实测分析[J]. 暖通空调,2012,42(8):84-88

[15] Ruzer L S, Harley N H. Aerosols handbook: measurement, dosimetry, and health effects[M]. Boca Raton: CRC Press Inc,2012.

[16] 张景,郑坤,李安桂,等. 通风管道中颗粒沉积的实验研究[J]. 制冷与空调(四川),2007,21(2):97-100.

[17] 韩云龙,胡永梅,钱付平,等. 通风管道内温湿度对颗粒沉积的影响[J]. 土木建筑与环境工程,2010,32(4):66-70.

[18] 胡大山. 粉尘在通风除尘管道内沉积行为的研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2008.