



垂直壁面附近细颗粒物热泳效应实验研究

夏晓康, 李 灿, 朱尚斌

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为了观测室内细颗粒物的热泳规律, 在一间环境实验舱内构造冷热垂直壁区, 用卫生香燃烧烟尘作为细颗粒物源, 采用扫描电迁移率粒径谱仪观测在不同冷热壁面温差情况下, 细颗粒物数量浓度的衰减系数, 以间接对比其热泳效应。实验表明: 冷热壁面在 50、70、90 °C 温度差下, 冷壁面附近卫生香烟尘细颗粒物衰减系数依次减小, 即随着冷热壁面温度差增大, 卫生香烟尘细颗粒物趋冷壁的热泳效应增强, 能够产生热泳效应的细颗粒物粒径增大。冷热壁面温差为 70、90 °C 时, 分别能够引起 90~170、210~450 nm 粒径范围细颗粒物产生明显热泳效应。

关键词: 细颗粒物; 热泳效应; 垂直壁面

中图分类号: TU834.6⁺1 文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2017)06-0001-05

Experimental study on effect of thermophoresis of fine particles near surface of vertical wall

XIA Xiaokang, LI Can, ZHU Shangbin

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: To observe the law of indoor fine particles' thermophoresis, the incense smoke was used as the fine particles source in an environmental laboratory with an artificial hot and cold vertical wall zone, and the scanning electrical mobility sizer was used to measure the decay coefficient of fine particles number concentration near the cold wall under different temperature difference for the indirect comparison of its thermophoresis. Experimental results show that the decay coefficient of fine particles near the surface of cold wall decreases in turn under the temperature difference between the hot and cold surface of vertical wall at 50, 70, 90 °C. That is, the greater the temperature

difference near the vertical wall, the stronger the thermophoresis effect of incense smoke particles tends to be closed to the cold surface, and the larger size of fine particles with thermophoresis effect. When the temperature difference between the hot and cold surface of vertical wall are 70, 90 °C, it results in obvious thermophoresis effect of fine particles in the range from 90 to 170 nm and from 210 to 450 nm respectively.

Keywords: fine particles; effect of thermophoresis; vertical wall

大量流行病学研究表明, 室内细颗粒物中含有大量的有毒有害成分^[1-2], 其粒径小、比表面积大, 易吸附多芳烃、多环苯类、重金属微量元素等各种物质^[3-4], 而这些物质对人体呼吸器官、血液和皮肤等都存在致癌、致畸、致突变的危害^[5]。室内细颗粒物除了对人体健康造成影响之外, 其沉降到电子产品、精密仪器设备、文物艺术品和生物医药制品等物体表面会引起腐蚀和损坏^[6-7]。室内细颗粒物沉降效应受力行为较复杂, 但其中热泳力对细颗粒物在室内表面沉降影响很大^[8]。热泳效应, 即细颗粒物悬浮在有温度差的空气中, 受到与温度差方向相反的作用力, 使细颗粒物产生逃离热壁面、靠近冷壁面的运动趋势。

生活中颗粒物热泳效应现象比较常见, 如冬季采暖期散热器后方墙面上, 由于颗粒物沉降形成的黑色污迹, 南方近年来使用的壁挂炉周边物体表面积灰较严重, 厨房中油烟颗粒在灶台附近沉降等。目前, 细颗粒物热泳效应的运动机理、热泳力计算方法、热泳效应等方面有了一定程度的研究^[9-10], 但国内外关于热泳的实验研究大多集中在矩形、圆形等受限的微通道内层流和紊流运动状态下开展^[11-12], 而对较大室内壁面上的热泳沉降效应规律研究较少, 尤其垂直壁面。因此, 本文中通过实验手段, 以卫生香烟尘作为细颗粒物源, 观测垂直壁面附近细颗粒物在不同温度差下数量浓度变化和粒径分布特征, 研究细颗粒物热泳效应的影响规律。

1 实验装置及方法

1.1 实验装置

垂直壁面附近细颗粒物热泳效应实验研究装置

收稿日期: 2016-11-25, 修回日期: 2017-11-17。

基金项目: 国家自然科学基金, 编号: 51246008; 湖南省自然科学基金项目, 编号: 2017JJ4005; 湖南省级研究生创新基金, 编号: CX2016B636。

第一作者简介: 夏晓康(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为室内空气质量。E-mail: qea210120@126.com。

通信作者简介: 李灿(1968—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为室内空气质量品质和建筑节能研究。E-mail: lc19992@126.com。

的布局示意图如图 1 所示。选用卫生香燃烧后的烟尘作为实验颗粒物源,为了避免细颗粒物在发生和扩散过程中受到相对湿度波动的影响^[13],实验在恒温恒湿的步入式环境实验舱内进行。实验过程中环境实验舱的温度控制在 $(25\pm 2)^\circ\text{C}$,湿度控制在 $(50\pm 5)\%$ 。多组测量数据表明,卫生香烟尘释放的颗粒物粒径主要分布在 20~450 nm,其颗粒物数量密度可达到环境实验舱内同粒径本底颗粒物数量密度的近 200 倍,因此实验结果可忽略本底浓度的影响。使用耐高温胶带将电加热膜固定在不锈钢板支架上,作为稳定温度的热壁,距离环境实验舱内一侧温度为 30°C 的不锈钢壁面 1 500 mm,形成一定的温度差。由于实验舱恒温功能,冷壁面在实验过程中受热壁面电加热膜辐射传热的影响很小。为保证卫生香烟尘均匀散落至冷热壁面之间,将卫生香放入一自制带有小型动力设备的扩散装置中。

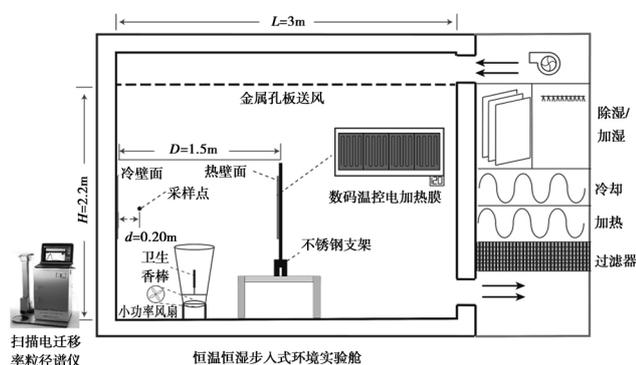


图 1 实验布局示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental layout

卫生香烟尘颗粒物数量浓度和粒径分布谱特征使用德国 GRIMM 公司生产的扫描电迁移率粒径谱仪(scanning mobility particle sizer, SMPS)测量,其主要由差分粒子电迁移器和凝聚核粒子计数器组成。采样扫描过程中设置 23 个粒径通道,测量粒径范围 10~1 100 nm,每完成一次采样需要 4 min 时间。

1.2 实验方法

为了研究卫生香烟尘细颗粒物在不同温度差下,热泳沉降效应现象中颗粒物数量浓度和粒径分布特征的变化关系,将加热膜温度分别设定为 80、100、120 $^\circ\text{C}$,分别形成 50、70、90 $^\circ\text{C}$ 的温度差。具体实验步骤如下:

1)通风。打开步入式环境实验舱门与室外保持通风状态,将舱内细颗粒物排出。

2)恒温恒湿。开启步入式环境实验舱恒温恒湿功能,待舱内的温度和湿度分别达到并稳定在 25 $^\circ\text{C}$ 和

50%。

3)加热。开启电热膜并设定好温度,保证电加热膜垂直面与舱内冷壁面形成相应的温度差。

4)颗粒物源释放。每次选取同等长度的卫生香,放置在冷壁面和热壁面的中间释放颗粒物。点燃卫生香同时开启颗粒物扩散装置中的小功率风扇,使燃香烟尘均匀扩散至实验舱冷壁面和热壁面之间。卫生香全部燃烧完需要 30 min 时间,每次燃烧完释放的细颗粒物数量浓度均可以达到 $1.8\times 10^5\text{ cm}^{-3}$ 左右,基本上可以保证每次实验释放的细颗粒物数量相等。

5)测量。每次点燃卫生香的同时,开启 SMPS 测量舱内冷壁面附近、燃香烟尘上方同样高度位置的颗粒物粒径分布谱特征和数量浓度。实验数据分析仅采用卫生香完全燃烧后第 1 次至第 14 次的测量结果,期间冷热垂壁区间的卫生香烟尘细颗粒物在热泳效应下衰减 56 min。

2 结果与讨论

2.1 细颗粒物在不同温度差下数量浓度变化

室内颗粒物沉降到物体表面主要通过 3 种与粒径相关的机制实现,即布朗运动、重力作用和热泳^[14]。卫生香烟尘细颗粒物在无热源存在时,通过布朗运动扩散沉降至实验舱内表面。当有热源存在时,除了布朗运动扩散之外,主要由于热泳效应引起垂直壁面附近细颗粒物数量浓度变化,因此,垂直热壁面附近细颗粒物沉降量随着温度差的增大而越少,冷壁面附近由于热泳效应细颗粒物数量增多,导致其衰减变得缓慢。室内细颗粒物的衰减程度是由单位时间内的衰减量决定的,具体描述^[15]为

$$C_t = e^{-(\alpha+\kappa)t} C_{t-1}, \quad (1)$$

式中 C_t 、 C_{t-1} 分别为 t 、 $t-1$ 时刻室内细颗粒物浓度; α 、 κ 分别为换气次数和细颗粒物衰减速率。对式(1)两端取自然对数整理可得

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_{t-1}}\right) = -(\alpha+\kappa)t. \quad (2)$$

以时间 t 为 X 轴,细颗粒物浓度的自然对数值 $\ln C$ 为 Y 轴,对测量数据进行线性回归拟合。当实验舱内换气次数 α 小到可忽略不计时,拟合直线斜率的绝对值即为细颗粒物在实验舱内的衰减速率 κ 。根据式(2)和 SMPS 测量的细颗粒物数量浓度,细颗粒物热泳衰减过程的线性回归拟合如图 2 所示。通过图 2 中各条直线斜率的绝对值,便可比较在不同温度差下细颗粒物的热泳衰减情况。

表 1 列出了细颗粒物在无热壁面和不同温度差下衰减过程线性拟合直线的斜率绝对值和方差。

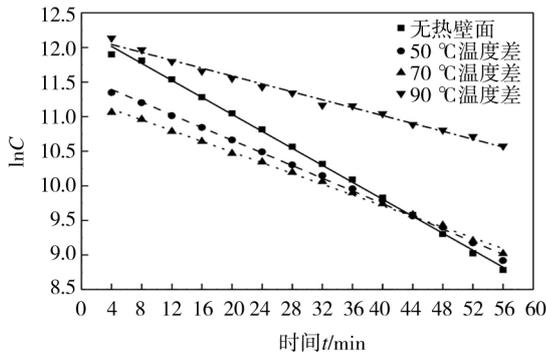


图 2 细颗粒热泳衰减过程的线性回归拟合
Fig. 2 Linear fitting of decay process of fine incense dust particles

结合图 2 和表 1 可以看出,卫生香烟尘细颗粒物在不同程度热泳力作用下,其数量浓度衰减过程线性回归拟合方差均都接近于 1,表明用指数方程可以较好地描述细颗粒物在实验舱内的衰减过程。与热壁面不存在的情况下相比较发现,有温度差时,冷壁面附近细颗粒物衰减系数 κ 要小,说明垂直冷壁面附近细颗粒物在衰减过程中除了自然沉降之外,主要由于热泳效应使热壁面附近卫生香烟尘细

颗粒物向冷壁面运动,造成冷壁面附近细颗粒物数量增加,从而冷壁面附近细颗粒物衰减得相对慢一些。随着温度差越来越大,垂直冷壁面附近的细颗粒物数量浓度衰减速率逐渐变慢;反之,说明热壁面附近的细颗粒物运动受到热泳效应也越明显,细颗粒物数量浓度越来越小。

表 1 细颗粒物不同工况下衰减过程线性拟合参数
Tab. 1 Parameters of linear fitting about decay process of fine particles under different conditions

| 工况 | 斜率 | R^2 |
|-----------|---------|---------|
| 无热壁面 | 0.0 819 | 0.9 981 |
| 50 °C 温度差 | 0.0 611 | 0.9 976 |
| 70 °C 温度差 | 0.0 517 | 0.9 971 |
| 90 °C 温度差 | 0.0 381 | 0.9 908 |

2.2 细颗粒物在不同温度差下粒径分布

卫生香烟尘细颗粒物在热泳效应下,除了改变数量浓度之外,同时也会改变其粒径分布特征。在卫生香完全燃烧后,不同温度差下细颗粒物粒径分布特征曲线如图 3 所示。

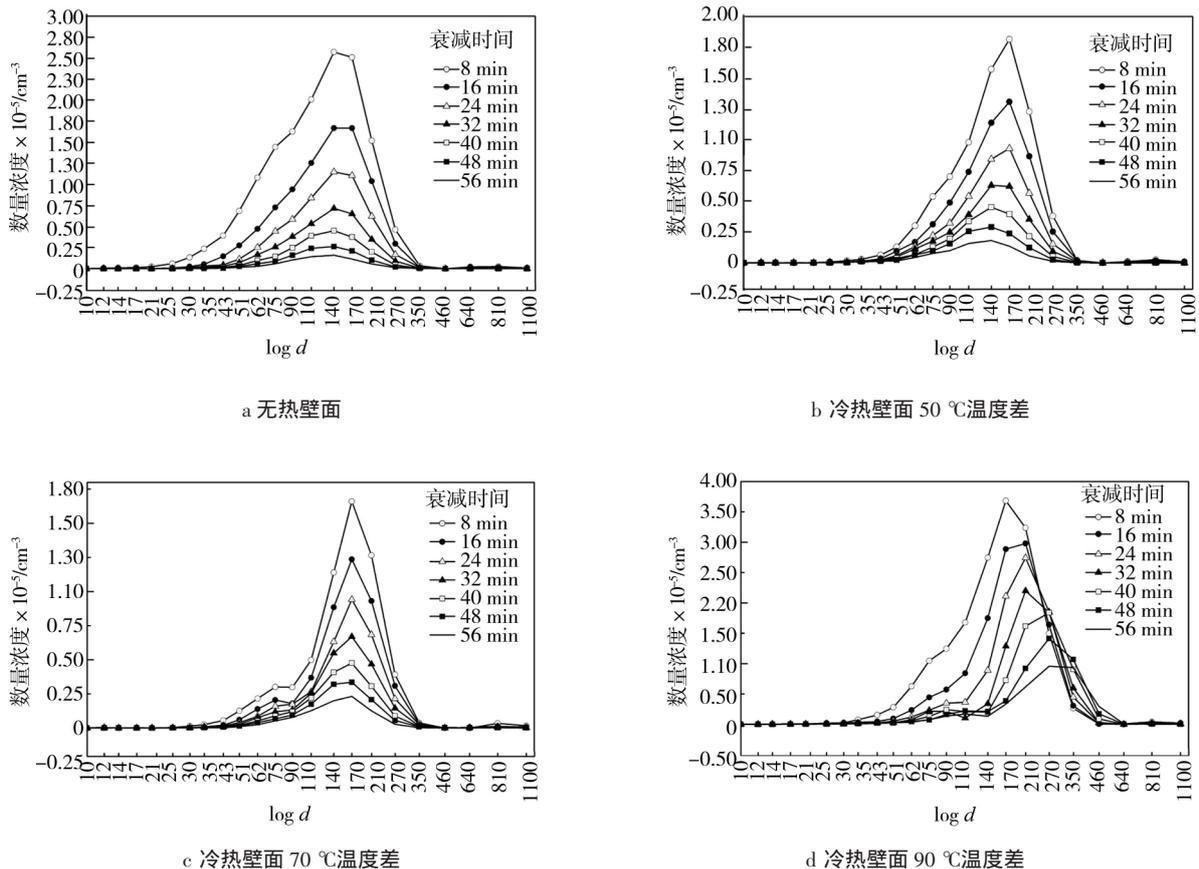


图 3 不同温度差下细颗粒物粒径分布特征曲线
Fig. 3 Curves of size distribution of fine particles under different temperature

· 流 态 化 ·

从图 3a 可以看出, 细颗粒物数量浓度在无温度差情况下逐渐减少且粒径分布特征曲线也逐渐变得扁平。图 3b—d 与图 3a 相比较而言, 可以清晰看到, 细颗粒物数量浓度在有温度差的情况下同样逐渐减小, 但随着温度差的增大, 粒径分布特征曲线逐渐变得瘦高, 且各粒径所对应的细颗粒物数量浓度相对减小得慢, 与之前采用线性回归拟合分析所得结论一致。从图 3b、c、d 还可以进一步观察到, 随着冷热壁面之间的温度差逐渐增大, 垂直冷壁面附近细颗粒物粒径分布特征曲线峰值所对应的粒径逐渐往大粒径段偏移。从上述分析结果表明, 在扫描电迁移率粒径谱仪测量范围内, 不同粒径段细颗粒物随着温度差变化所受到热泳力大小也不尽相同, 但仍呈现出细颗粒物中粒径段大的所受热泳力也越大。

2.3 不同粒径范围细颗粒物在热泳效应下数量浓度变化

通过对数据进行初步统计分析可知, 10~30、600~1 100 nm 这 2 个粒径范围的颗粒物在卫生香完全燃烧后的实验过程中, 数量浓度都不到整个粒径范围的 1%。故此以下分析中, 不考虑上述 2 个粒径范围的细颗粒物对整个粒径范围数量浓度变化的影响, 主要对粒径范围 35~450 nm 细颗粒物分成 3 个粒径范围, 分别为 $d_1=35\sim75$ nm、 $d_2=90\sim170$ nm、 $d_3=210\sim450$ nm。在无热壁面和温度差分别为 50、70、90 °C 时卫生香完全燃烧后第 1 次和经过 56 min 热泳效应衰减后, 第 14 次的不同粒径范围细颗粒物数量浓度变化如图 4 所示。

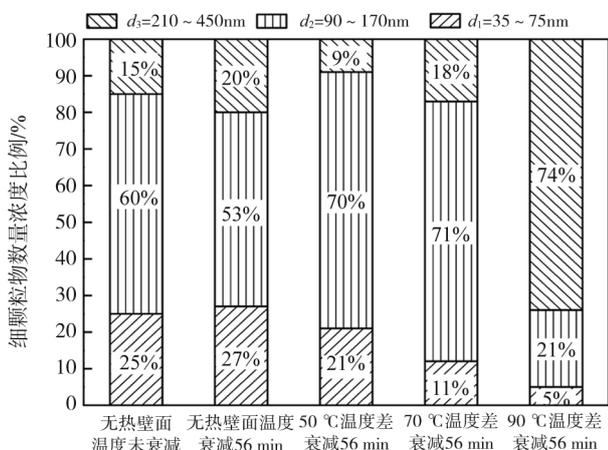


图 4 不同粒径范围细颗粒物的数量浓度
Fig. 4 Number concentration in different size range of fine particles

从图 4 中可以看出, 垂直冷壁面附近卫生香烟尘细颗粒物在热泳效应一段时间后, 不同的粒径范围数量浓度分布比例变化差异不大, d_2 粒径范围的卫生

香烟尘细颗粒物均占主要部分。

50、70 °C 温度差的卫生香烟尘细颗粒物在经过相同时间热泳效应后发现, 垂直冷壁面附近 70% 的细颗粒物为 d_2 粒径范围的细颗粒物, 且比无热壁面时多 20% 左右。在 90 °C 温度差下, 垂直冷壁面附近 70% 的为 d_3 粒径范围的细颗粒物, 与 50、70 °C 温度差下 d_2 粒径范围所占比例相当。而 d_1 粒径范围的颗粒物随着温度的增大, 在冷壁面附近沉降的细颗粒物中所占比例逐渐减小, 说明随着温度差的增大, 卫生香烟尘中 d_2 和 d_3 粒径范围内越大的细颗粒物受到的热泳效应越强, 从而易于在冷壁面附近沉降, 因此冷壁面附近细颗粒物数量浓度和粒径分布特征曲线发生变化, 也即当热壁面温度小于 100 °C 时, 90~170 nm 粒径范围细颗粒物在冷壁面附近易于沉降, 而当热壁面温度大于 100 °C 时, 210~450 nm 粒径段细颗粒物同样容易沉降在冷壁面附近。

早在 1929 年, Epstein 推导出了在有温度差的流体中, 球形颗粒物的热泳计算式:

$$F_{th} = -\frac{9\pi\mu v d_p \nabla T}{2T_0} \left(\frac{k_g}{k_p + 2k_g} \right) \quad (3)$$

式中, F_{th} 为热泳力; μ 为流体黏度; v 为颗粒物流动速度; ∇T 为温度差; T_0 为颗粒物附近流体的平均温度; k_g 和 k_p 分别为流体和颗粒物材料的导热系数。

式(3)对于 $\lambda/d \leq 1$ (λ 为气体分子的平均自由程) 的低导热系数的颗粒具有较好的适用性^[10], 而卫生香烟尘颗粒物中 d_1 粒径范围颗粒物粒径接近于标况下空气分子平均自由程 ($\lambda = 6.9 \times 10^{-8}$ nm), 满足该适用条件。从式(3)可看出, 随着温度差的增加, d_1 粒径范围的颗粒物所受热泳力增大。

结合文献[10]总结的热泳力计算模型中可以看出, 颗粒物的热泳力大小与温度差、粒径成正比。随着温度差增加, d_2 和 d_3 粒径段的卫生香烟尘细颗粒物所受热泳力增加的幅度比 d_1 粒径段的颗粒物大得多, 说明其在相同的外部条件下更易沉降在冷壁面附近, 因此, 温度差越大, 冷壁面附近卫生香烟尘中 d_2 和 d_3 粒径范围细颗粒物越多。

3 结论

通过实验分析了在不同温度差下, 垂直冷壁面附近细颗粒物衰减系数和粒径分布特征曲线的变化, 间接地研究垂直壁面附近细颗粒物热泳规律, 并得到以下结论:

1) 在无热壁面和冷热壁面 50、70、90 °C 温度差下, 冷壁面附近卫生香烟尘细颗粒物衰减系数 κ 分别为 0.0 819、0.0 611、0.0 517 和 0.0 381, 依次减小, 即

由于热泳沉降效应作用,造成往冷壁面附近迁移沉降的细颗粒物增加,因此扩散引起的浓度衰减明显减弱,且随着冷热壁面温度差增大,卫生香烟尘细颗粒物趋冷壁的热泳效应增强。

2)当冷热壁面温度差分别为70、90℃时,经过一段时间热泳效应后,垂直壁面附近细颗粒物数量浓度和粒径分布特征曲线发生变化,其分别由90~170、210~450 nm 粒径范围内细颗粒物变化所引起,说明随着冷热壁面之间温度差的增大,能够产生热泳效应的细颗粒物粒径越大。

在热泳效应下,垂直壁面区间内的细颗粒物会逐渐逃离热壁面而向冷壁面靠近,造成冷壁面附近的细颗粒物数量增加和衰减速率变小。研究考察不同温度差下,垂直壁面区间内细颗粒物的数量浓度和粒径分布特征曲线的变化特点,对于利用热泳效应选择合适的温度差和粒径范围去除细颗粒物具有重要的参考意义。

参考文献(References):

- [1] RASHDI A S, ARABI A A, HOWARI F, et al. Distribution of heavy metals in the coastal area of Abu Dhabi in the United Arab Emirates[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 97(1/2):494-498.
- [2] SUN L M, LIN Z Q, LIAO K, et al. Adverse effects of coal combustion related fine particulate matter (PM_{2.5}) on nematode *Caenorhabditis elegans*[J]. Science of the Total Environment, 2015, 512-513:251
- [3] 李英红,饶志国,谭吉华,等.兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析[J].环境科学,2016,37(7):2428-2435.
- [4] 张霖琳,薛荔栋,吕怡兵,等.APEC会期5个城市空气细颗粒物中重金属健康风险评估[J].环境化学,2015(6):1218-1220.
- [5] 邓启红.中国室内环境与健康研究进展报告2013—2014[M].北京:中国建筑工业出版社,2014:64-65.
- [6] 顾和章.灰尘对医疗设备工作的危害性——两实例分析[J].医疗装备,2013,26(10):77-77.
- [7] WANG L N, XIU G L, CHEN Y X, et al. Characterizing particulate pollutants in an enclosed museum in Shanghai, China[J]. Aerosol and Air Quality Research. 2015, 15(1):319-328.
- [8] 贺启滨,高乃平,朱彤,等.人体呼出气溶胶在通风房间中运动的受力分析[J].安全与环境学报,2011,11(1):242-245.
- [9] 杨瑞昌,刘若雷,周涛,等.可吸入颗粒物在管内湍流流动时的动力学特性及热泳沉积[J].中国化学工程学报(英文版),2008,16(2):192-197.
- [10] 张记刚.窄通道中细颗粒温度场内运动特性研究[D].北京:华北电力大学(北京),2011.
- [11] 孙春华,姜玲玲,宁智,等.基于柴油机微粒沉降的脉动湍流管流内近壁流场特性[J].北京交通大学学报(自然科学版),2015,39(3):82-89.
- [12] 周涛,杨旭,林达平,等.湿度对矩形窄通道内细颗粒热泳沉积的影响[J].上海交通大学学报,2015,49(5):718-724.
- [13] 李灿,崔术祥,杨维,等.相对湿度对室内细颗粒物粒径分布影响的试验研究[J].安全与环境学报,2014,14(4):254-258.
- [14] 张杰峰,白志鹏,丁潇,等.空气颗粒物室内外关系研究进展[J].环境与健康杂志,2010,27(8):737-741.
- [15] 吕琪铭.居民建筑室内外颗粒物浓度水平及相关性研究[D].长沙:中南大学,2007.