

冬季散热器采暖房间颗粒物扩散模拟研究*

包晓琳¹, 张 浩^{1,2,3}, 姚聚鹏¹

(1. 山东建筑大学 热能工程学院, 济南 250101; 2. 山东省可再生能源建筑应用技术重点实验室, 济南 250101; 3. 山东省绿色建筑协同创新中心, 济南 250101)

摘要: 室内空气品质与人体健康息息相关, 颗粒物浓度是室内空气品质的一个重要指标。以冬季散热器采暖房间为模型, 对于室内的颗粒物($PM_{2.5}$) 浓度进行数值模拟, 采用计算流体力学(CFD) 方法, 建立了房间内颗粒物扩散的数学模型和输运模型。模拟结果显示, 室内颗粒物的来源主要是由冷风渗透带来的, 其分布状况受到渗透风及热气流的影响, 并且极易在入口处和室内上方空间聚集。模拟结果对今后研究室内空气质量具有一定的指导意义。

关键词: 室内空气品质; 颗粒物; 散热器; 数值模拟; CFD

中图分类号: TU83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-7237(2019)07-0031-05

Simulation of Dispersion of Particulates in Rooms Heating with Radiator in Winter

BAO Xiao-lin¹, ZHANG Hao^{1,2,3}, YAO Ju-peng³

(1. Department of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;
2. Shandong Key Laboratory of Renewable Energy Technologies for Buildings, Jinan 250101, China;
3. Shandong Co-Innovation Center of Green Building, Jinan 250101, China)

Abstract: Indoor air quality is closely related to human health. Particle concentration is an important indicator of indoor air quality. This paper mainly selects the winter room under the radiator heating as a model to simulate the indoor particle($PM_{2.5}$) concentration. Using the Computational Fluid Dynamics(CFD) method, the mathematical model and transport model are established. The simulation results show that the source of the indoor particles is mainly caused by the cold air infiltration, and its distribution is affected by the permeation wind and hot gas flow, and it is very easy to gather at the entrance and above the room. The simulation results have some guiding significance for the study of indoor air quality in the future.

Keywords: indoor air quality; particle concentration; radiator; numerical simulation; CFD

0 引言

现代社会, 大气污染问题越来越受到重视, 大量污染物的排放导致室外空气品质急剧下降, 室外颗粒物通过门窗和通风系统进入室内, 进一步影响到室内空气质量。研究发现, 人体健康与颗粒污染物联系密切, 主要是由于颗粒物容易引起呼吸系统和心血管系统的疾病^[1]。值得注意的是, 颗粒物的直径是非常重要的参数之一, 它与颗粒物的某些性质息息相关^[2]。研究者认为, 颗粒污染物的粒径越小, 污染物数量浓度越高, 越容易深入到人体呼吸系统, 进而危害人体健康, 当颗粒物粒径达到 $2.5 \mu m$ 及以下的时

候, 就可以通过支气管系统直接到达肺部, 引发疾病甚至死亡^[3,4]。因此, 对于 $PM_{2.5}$ 的研究意义重大。随着城市化进程的加快, 室内空调、采暖方式的完善, 人类处于相对密闭环境中的时间也越来越长, 这就对于室内环境有着更高的要求。大量研究表明, 室内颗粒物已成为影响人类健康的重要因素之一, 室内空气质量至关重要^[5]。

1 数值模型

研究室内颗粒物扩散的问题, 必须要对颗粒所处的空气流动进行研究, 因此研究流体的速度场和温度场对于颗粒物来说非常重要^[6-8]。

1.1 基本控制方程

所有流体的运动都必须满足流体动力学的基本

收稿日期: 2018-08-14; 修回日期: 2018-09-25

* 基金项目: 山东省自然科学基金项目(No. ZR2014JL039)

方程,也就是所谓的三大控制方程,它们分别是质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程。房间内的空气流动一般都是处于湍流,流动的基本规律符合基本方程,在单位时间、单位体积内满足某个物理量的守恒,此时,用一个通用物理量代替具体的某个质量、动量、能量,将三个方程用一个通用形式来代替。如下式:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

其中 ϕ 表示通用变量,可以代替速度、温度、常数, Γ 和 S 分别表示广义扩散系数和广义源项。

式中从左开始每一项表示的依次是瞬态项、对流项、扩散项、源项。

1.2 湍流方程

冬季供暖房间内气体流动是由于温差引起的,房间内有局部热源,因此模拟过程浮升力作用不可以忽略。本文选用标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型作为湍流模型。

具体如下:

湍流能 k 方程:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + S_k \quad (2)$$

湍流耗散率 ε 方程:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial(u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{c_1 \varepsilon}{k} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + S_\varepsilon \quad (3)$$

式中: S_k 、 S_ε 分别为热浮升力的附加项。

1.3 颗粒物受力

房间内颗粒物受力情况复杂,重力、拖曳力和布朗力是主要作用力,热泳力和浮力虽有一定影响,但由于数量级的差异,可忽略^[8]。

(1) 重力

重力与粒径大小呈正比,计算公式如下:

$$G_d = \frac{\pi}{6} d^3 \rho g \quad (4)$$

式中: ρ 为颗粒物密度;

d 为颗粒物的当量直径。

(2) 拖曳力

由于惯性和黏性效应,拖曳力与相对运动的速度大小有关。一般而言,如下式:

$$F_d = \frac{\pi d^2 \rho_a (u_a - u) C_d}{8 C_c} \quad (5)$$

式中: ρ_a 为空气密度;

u_a 、 u 分别为气流速度和粒子速度;

C_d 、 C_c 分别为拖曳系数和 Cunningham 滑动修正因数。

(3) 布朗力

分子时时刻刻都在做无规则布朗运动。布朗力通常用平均自由程和松弛时间描述。计算公式如下:

$$F_{bi} = \xi \sqrt{\frac{216 \mu \sigma T}{\pi \rho^2 d^3 C_c \Delta t}} \times \frac{1}{6} \pi d^3 \rho = \xi \sqrt{\frac{6 \pi \mu \sigma d T}{C_c \Delta t}} \quad (6)$$

式中: ξ 为颗粒物的涡扩散率;

Δt 为计算过程中用到的时间步长;

T 为流体绝对温度;

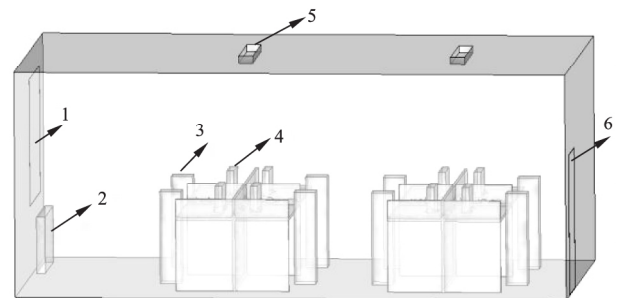
ν 为气体运动粘性系数;

σ 为波尔兹曼常数。

2 物理模型

2.1 物理模型概述

本文模拟选用济南市某一办公房间,房间模型如图1所示,房间具体尺寸如表1所示。



1-窗户; 2-散热器; 3-人员; 4-电脑; 5-电灯; 6-门

图1 房间物理模型

表1 房间设施参数

名称	个数	尺寸	边界类型	备注
房间	1	4.2 m × 7.8 m × 3.2 m	—	—
人	8	0.3 m × 0.4 m × 1.1 m	常热流	75 W
计算机	8	0.5 m × 0.1 m × 0.4 m	常热流	110 W
灯	2	0.1 m × 1.2 m × 0.1 m	常热流	35 W
窗户	1	1.2 m × 1.8 m	常壁温	—
墙	—	—	常壁温	—
地面	1	4.2 m × 7.8 m	常壁温	—

2.2 网格划分

本文的物理模型选用非结构网格的划分,网格划分如图2所示,经网格独立性验证,本文网格数目最少为112万,最大网格尺寸为0.4 m,网格质量均为0.3以上。对于缝隙和房间内设施(人员、电脑和桌子)等处进行网格加密。

2.3 物理模型简化及边界条件设置

由于影响室内流场的因素很多,对采暖房间的物理模型和边界条件作了如下简化假设^[10-12]:

(1) 采暖房间里的气体为不可压缩、常物性的定常流,采用 Boussinesq 的密度假设;

(2) 采暖房间各壁面传热均匀,设定为定温;

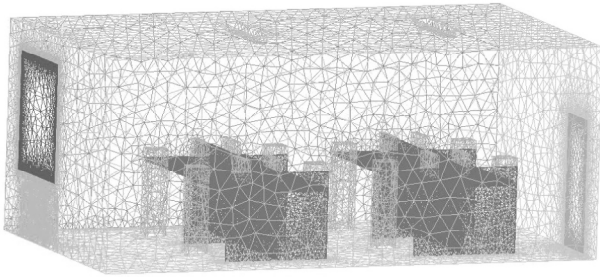


图2 网格划分

(3) 在各种工况下都达到了稳态,与时间无关,

$$\frac{d\varphi}{dt} = 0.$$

(4) 根据模拟地区主导风向,将窗户定义为入口,缝隙宽度取 4 mm,速度大小是 1.74 m/s,将门定义为出口,取 5 mm 的窄缝面;

(5) 室外颗粒物浓度参考济南市 2017 年 12 月 PM_{2.5} 取值,平均值 88 μg/m³;

(6) 离散相的各壁面边界条件都是“追捕”;但是出口处设置为“逃逸”;当颗粒物到达桌子时,设置一定的反弹系数,0.4 左右。

3 数值模拟及分析

模型房间采暖方式选用普通散热器供暖,模拟这种供暖方式下的室内流场、温度场和颗粒物的分布情况,并选取了 3 个典型位置(分别是入口位置、中间位置、出口位置)。如图 3 所示,进行颗粒物浓度对比。在房间里取 3 条垂直线,每条线选取 32 个点,然后对房间的各个位置进行模拟分析,3 条线分别为 line 1 (2.1,1.3,0) - (2.1,1.3,3.2), line 2 (2.1,3.9,0) - (2.1,3.9,3.2), line 3 (2.1,6.5,0) - (2.1,6.5,3.2)。

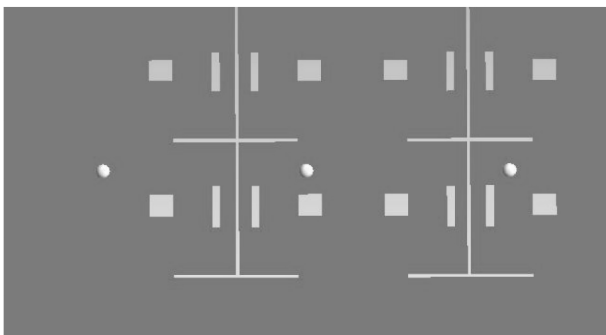


图3 典型位置选取

3.1 截面 X=2.1 m 上的各场分布

通过对 X 截面的分析可以发现,温度场整体分布虽然可以满足热舒适性的要求,但是不太均匀,尤其是入口处温度明显偏低,而温度较高的位置主要集中在室内上部空间也就是热源的上方,如图 4 所示;并且房间的左边部分由于冷风和热空气的接触温差,形成了一个大的环流,而房间的右边在热空气的带动下形成了很多小环流,如图 5 所示;同时结合颗粒物浓

度分布图可知,入口处颗粒物较多,随着气流在室内的扩散,即大环流的带动作用,颗粒物进一步深入到房间,在热源的影响下聚集到房间内部,从而危害人类健康,如图 6 所示。



图4 截面 X=2.1 m 上的温度分布图(单位:K)

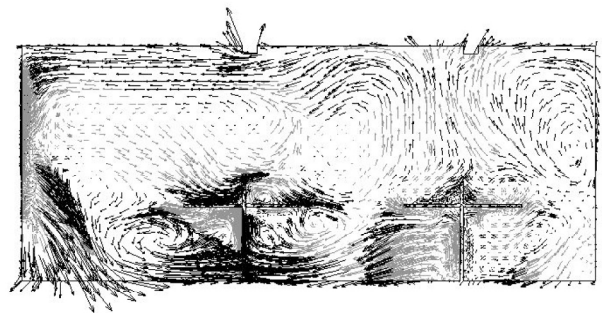


图5 截面 X=2.1 m 上的速度矢量图

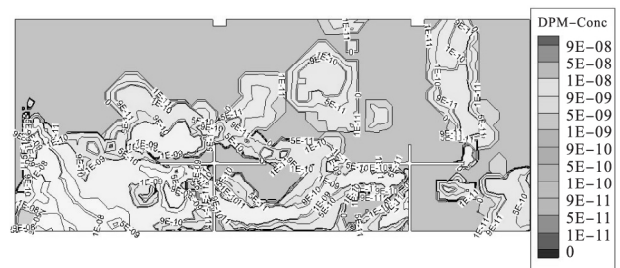


图6 截面 X=2.1 m 上的颗粒物浓度图(单位:kg/m³)

3.2 截面 Y=1.3 m、3.9 m、6.5 m 上的各场分布

通过对 Y 截面的典型分析,可以看出冷风渗透和窗户的传热对室内的温度影响很大,尤其是入口位置,同时地面处温度有一定程度的降低,主要是由于冷空气下沉引起的,而设备处因自身散热导致温度上升但幅度不大(见图 7);Y=1.3 m 处温差作用形成环流,房间内部即 Y=3.9 m 处在人体、电脑等热源的作用下,形成两个环流,出口位置环流方向发生变化如图 8 所示;就颗粒物而言,窗户处由于重力作用下降集聚,在环流带动下贴着地面前行,进入房间后在房间的中间位置,遇到桌子等障碍物被阻挡折回向上运动,此时颗粒物主要分布在室内上部空间,出口处由于抽吸作用浓度较入口处下降显著(见图 9)。

3.3 截面 Z=1.2 m 上的各场分布

Z=1.2 m 处是人类工作时的呼吸截面,由图 10 可知窗户附近温度较低,与房间内部温度有一定的差距,各设备处温度梯度明显;速度场比较紊乱,如图 11 所示,这主要是因为人员、电脑、桌子等处产生了涡

流,对流场的影响不可忽略,速度场入口处存在两处射流,颗粒物在射流和涡流的共同作用下深入房间内部;Z截面上的颗粒物浓度整体来看,出口处颗粒物主

要集中在门、设备的边角等处,浓度较低,入口位置的颗粒物分布相对密集,且桌子对颗粒物的阻挡作用不可忽略(见图12)。

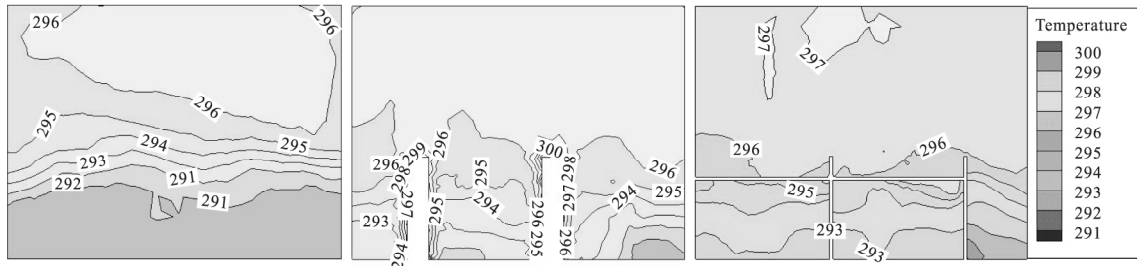


图7 截面 $Y=1.3\text{ m}$ 、 3.9 m 、 6.5 m 上的温度分布图(单位: K)

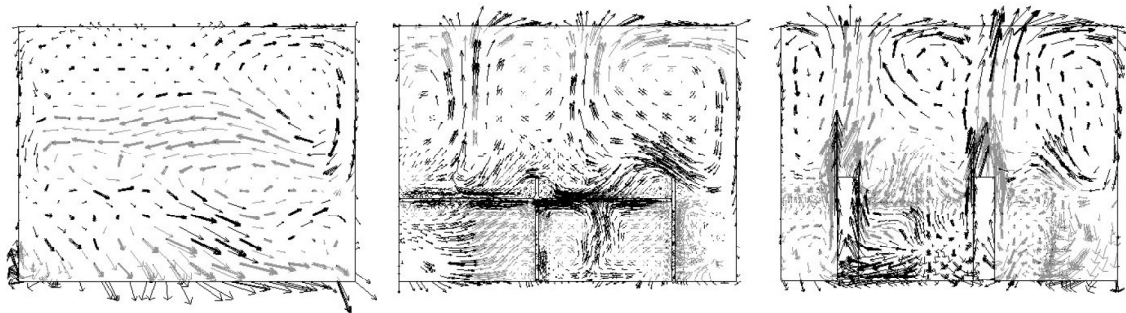


图8 截面 $Y=1.3\text{ m}$ 、 3.9 m 、 6.5 m 上的速度矢量图

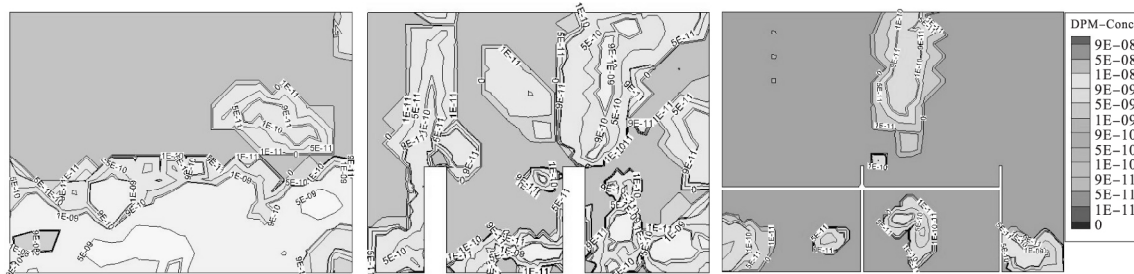


图9 截面 $Y=1.3\text{ m}$ 、 3.9 m 、 6.5 m 上的颗粒物浓度图(单位: kg/m^3)

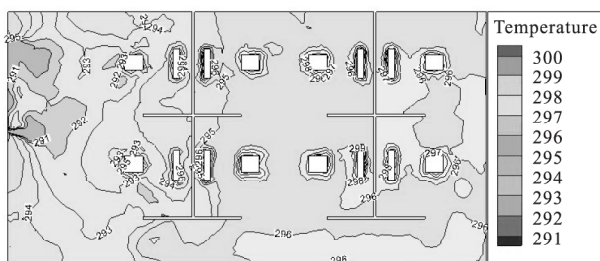


图10 截面 $Z=1.2\text{ m}$ 上的温度分布图(单位: K)

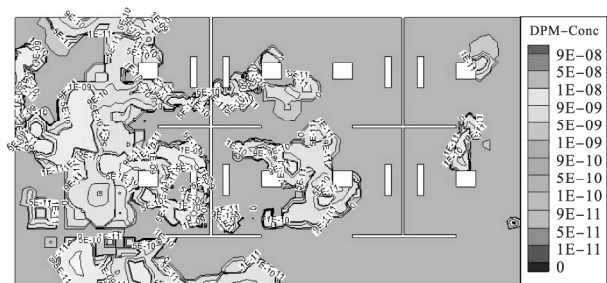


图12 截面 $Z=1.2\text{ m}$ 上的颗粒物浓度图(单位: kg/m^3)

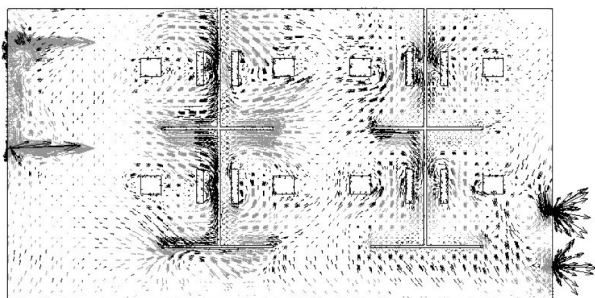


图11 截面 $Z=1.2\text{ m}$ 上的速度矢量图

3.4 典型位置的颗粒物浓度对比

通过对比房间典型位置颗粒物浓度如图13,入口位置颗粒物由于重力作用聚集,浓度较大,但随着气流运动,浓度沿程大大降低,而中间位置由于桌子等的阻挡加上气流涡旋作用,会使得颗粒物折回浓度再次上升,到达出口处时气流上升带动颗粒物在门口内角等处积聚,但出口抽吸会带走室内一大部分颗粒物,使室内空气品质满足要求;从横坐标出发即高度

分布来看,窗户入口处颗粒物浓度随高度增加而减少,1.5 m 以上空间几乎没有颗粒物存在,中间位置和出口位置由于室内设施的阻挡作用,在 1.2 m 高度以下颗粒物分布情况变化较大;但随着室内气流运动,房间整体颗粒物浓度显著下降。

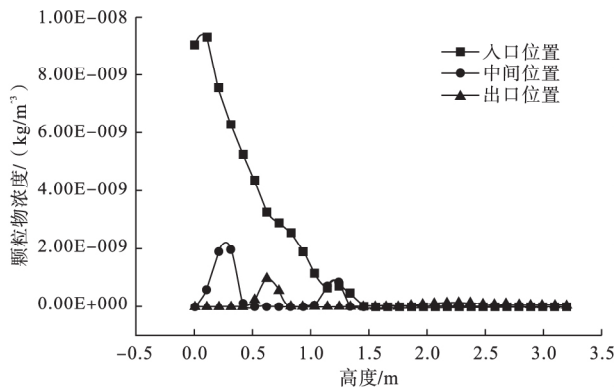


图 13 典型位置颗粒物浓度对比

4 结论

本文主要研究渗透风对冬季散热器采暖房间内颗粒物分布的影响。选取具有代表性的办公房间建立模型,对速度场、温度场、颗粒物浓度场进行模拟,分析不同截面处的温度场、速度场以及颗粒物浓度场,并对典型位置处浓度进行对比。结果如下:

(1) 房间内的温度场基本可以满足舒适性要求,但是分布并不均匀,靠近入口处温度较低,主要是受冷风渗透和室外温度的影响;而地面处由于冷空气下沉,温度有一定程度的下降;各设备周围温度变化明显。

(2) 房间内速度场比较紊乱,由于温差作用、阻挡作用形成环流,尤其是左边的入口位置,室外冷风和室内热空气相互碰撞形成较大的环流;房间中间部分的桌子、电脑等,对气流也会产生一定的阻碍;出口位置抽吸作用导致环流方向发生改变。

(3) 房间内的颗粒物主要集中在入口位置和室内上部空间,呼吸区也会有不少颗粒物,对人体健康有害;颗粒物浓度受气流影响很大,随室内气体流动下降,桌子等设备也对颗粒物运动产生一定阻挡作用;冬季室内的通风方式主要是门窗渗透风,同时这也是室外颗粒物进入房间的主要方式。

参考文献:

- [1] OBERDÖRSTER G. Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles [J]. Int Arch Occup Environ Health, 2001, 74(1): 1-8.
- [2] VASILE V, PETRAN H, DIMA A, et al. Indoor air quality - a key element of the energy performance of the buildings [J]. Energy Procedia, 2016, 96: 277-284.
- [3] 朱梅. 基于 PM2.5 浓度标准的室内环境控制方法的研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
- [4] 项琳琳, 刘东, 左鑫. 上海市某办公建筑 PM2.5 浓度分布及影响因素的实测研究 [J]. 建筑节能, 2015, 43(3): 85-91.
- [5] 刘敏. 不同空调房间室内颗粒物的演变规律 [D]. 上海: 东华大学, 2008.
- [6] 卓俊, 黄流兴, 牛胜利, 等. 湍流边界层中颗粒物扩散的双拉格朗日模拟计算 [J]. 现代应用物理, 2016, 7(3): 65-70.
- [7] 王芳娟, 方栋, 李红, 等. 大气超细颗粒物观测和扩散模拟研究进展 [J]. 环境污染与防治, 2010, 32(2): 79-85.
- [8] ZHANG Z, CHEN Q. Prediction of particle deposition onto indoor surfaces by CFD with a modified Lagrangian method [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(2): 319-328.
- [9] 安朴艳. 室内气流组织及颗粒物分布的数值模拟研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [10] 高泉. 散热器与地板辐射采暖混合供热系统节能研究与应用 [D]. 长春: 长春工程学院, 2017.
- [11] YASUSHI KONDO, SHIN-YA UEMURA, MINKU KIM, et al. Study on improvement of air quality in smoking areas of restaurants: part 2 experiments and moving-body CFD simulation on combined system of local ventilation and displacement ventilation [J]. Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, 2013, 38(195): 19-26.
- [12] Cui Yuanlong, Zhu Jie. CFD assessment of multiple energy piles for ground source heat pump in heating mode [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 139: 99-112.

作者简介: 包晓琳(1994),女,山东青岛人,建筑与土木工程专业,硕士研究生,研究方向: 建筑热湿环境、流动传热研究(sdjzbaoxl@163.com)。

指导教师(通讯作者): 张浩(1976),男,博士,教授,硕士研究生导师,研究方向: 非牛顿幂律流体边界层、建筑外环境、室内热湿环境(qdzhanghao@126.com)。