

严寒地区住宅厨房油烟颗粒物扩散机理和沉积特性的数值模拟分析

李慧星,王元博,冯国会,刘欣怡

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究住宅厨房中细颗粒物的扩散规律,提出合理改善厨房环境的措施。方法 运用计算流体动力学的方法,模拟9种典型的通风工况。结合重整化群(RNG)湍流模型和滑移通量模型模拟厨房空间气流场,预测颗粒物分布。量化影响颗粒物扩散的各项机制,同时计算朝向壁面的沉积通量。结果 远离热源处的温度梯度太小,使得热泳力对颗粒物的传输过程没有显著影响。由湍流影响的滑移通量平均阶数约是由重力和动量变化率影响的350倍。开门会导致更多颗粒物沉积在地板上,沉积通量在 $1.5 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-5}$ 。结论 湍流在颗粒物的扩散中起主导作用,增强吸油烟机容纳热羽流能力,能降低厨房空间颗粒物浓度。

关键词 计算流体动力学;数值模拟;滑移通量模型;油烟细颗粒物

中图分类号 TU834

文献标志码 A

Numerical Simulate on Diffusion Mechanism and Deposition Characteristics of Cooking Particles from the Residential Kitchen in the Severe Cold Area

LI Huixing, WANG Yuanbo, FENG Guohui, LIU Xinyi

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China 110168)

Abstract: In order to fully grasp the distribution of fine particles in the residential kitchen, nine typical ventilation conditions were simulated by computational fluid dynamics methods. Combining the Renormalization Group (RNG) turbulence model and the drift flux model were used to simulate the airflow field in the kitchen space and to predict the distribution of particles. Various mechanisms that affect the diffusion of particles were quantified and deposition flux toward the wall was calculated. The results show that when the oil fume particles diffuse in the kitchen, the temperature gradient far away from the heat source is too small, so that the thermophoretic force has no significant effect on the transfer process of the particles. Average order for drift flux affected by turbulence is about 350 times that affected by gravity and the change rate of

收稿日期:2021-11-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFE0100300)

作者简介:李慧星(1964—),女,教授,主要从事建筑室内环境空气质量保障技术方面研究。

momentum. Opening the door will cause more particles to deposit on the floor, and the deposition flux is between 1.5×10^{-5} and 2×10^{-5} . The research results show that the turbulence plays a leading role in the diffusion of particles, and the concentration of particles in the kitchen space can be reduced by increasing the capacity of the range hood to contain the thermal plume.

Key words: computational fluid dynamics; numerical simulation; drift flux model; cooking fine particles

烹饪过程会向室内空间排放大量的有害物质。燃料燃烧散发出有害气体和颗粒物,油和食物加热过程产生油烟^[1-2]。中餐独有的煎、炒、烹、炸等方式所散发的有害气体和颗粒物更为严重。烹饪过程中会产生温度较高的热羽流,迫使大量颗粒物集中在烹饪人员呼吸区域并被吸入,对人体呼吸系统和心血管系统产生不利的影响^[3-6]。计算流体力学(CFD)是一种获取室内环境详细信息的经济有效的方法。一些研究通过烹饪源释放条件来预测颗粒物的空间分布^[7-8]。数值模拟预测烹饪颗粒物的浓度对评估室内空气质量有非常大的帮助。但是很少有研究单个烹饪颗粒物的扩散机制,即空气分布如何影响颗粒物扩散,缺乏对特定烹饪过程中颗粒物动力学机制的理解和量化。沉积是空气中颗粒物的重要空气动力学特征之一。一方面沉积会减少室内悬浮颗粒物的数量;另一方面沉积量过高会增加室内污染,形成非常难看的污垢。笔者通过计算流体动力学的方法,预测烹饪过程产生的颗粒物在住宅厨房中的分布,并基于滑移通量模型和半经验沉积模型,量化颗粒物的运动特性。通过模拟厨房中的门窗不同开闭情况,分析不同空气分布下烹饪颗粒物的扩散机理。

1 数值模拟分析

1.1 厨房模型

住宅厨房采用的布局形式为一字型。厨房长宽高分别为 3 m×1.8 m×2.4 m。烹饪人员简化为长方体多块模型,人员站在距离灶台 0.10 m 处^[9]。采用八叉树法(Octree)划分非结构化网格,并对窗、门、燃气灶和排

气口局部加密,以增加计算的精确度。

1.2 模拟工况

模拟不同通风模式下的 9 种工况如表 1 所示。吸油烟机的排气量是控制厨房污染物的关键,选取 304.3 m³/h、518.4 m³/h 和 777.6 m³/h 排气量进行分析^[10]。实际厨房中的扰流通常来源于人员移动、开着的门或窗等^[11]。采用 3 种不同的门窗开启条件,以提供不同的空气分配策略。在厨房中选取一些平面和截面交线显示整个空间的流动特性和颗粒物特征,线位置划分如图 1 所示。

表 1 模拟工况设定
Table 1 The setting of simulation cases

工况编号	速度/ (m·s ⁻¹)	窗户	门
1	0.7	开	关
2	0.7	关	开
3	0.7	开	开
4	1.2	开	关
5	1.2	关	开
6	1.2	开	开
7	1.8	开	关
8	1.8	关	开
9	1.8	开	开

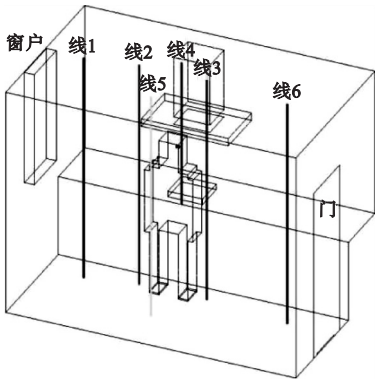


图 1 厨房线位置划分示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the line position division in the kitchen

1.3 边界条件

设置厨房边界条件类型和数值。将污染物/热源边界的入口速度设置为 0.1 m/s ^[12]。通过用户自定义标量标准化烹饪源处的初始浓度,以评估厨房颗粒物浓度分布。通风量分别为 $304.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $518.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $777.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 的吸油烟机排气口被定义为 0.7 m/s 、 1.2 m/s 和 1.8 m/s 的速度入口。将门或窗户设定为压力入口条件来实现不同的扰流条件,提供不同的室内气流模式。在当前的工作中,采用简化的烹饪过程,将其定义为油预热阶段。这个过程是一些传统的中高温中式烹饪的典型预热阶段。因此将烹饪过程合理地简化为油加热过程,油温设置为 $210 \text{ }^\circ\text{C}$ 。并根据个体的显热量 50 W ,将人体体表定义为热通量为 27.7 W/m^2 的壁面边界。模拟中假设厨房几乎不透气,厨房围护结构定义为传热系数 $1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,温度 295 K 的壁面。边界条件中湍流规范方法设置为湍流强度和水力直径。

2 数学模型的建立

2.1 气流模型

通过 ANSYS Fluent 软件,基于有限体积法将整个厨房作为计算域进行数值模拟。在湍流两方程模型中,相比于标准模型和可实现模型,重整化群(RNG)模型被认为可以在仿真和实验测量之间获得更好的一致性^[13]。因此采用 RNG 模型和标准壁面函数求解厨房三维气流场。在典型的室内环境中,颗粒物的体积分数约为 10^{-10} ,遵循单向耦合假设,利用 SIMPLE 算法来耦合压力场和速度场^[14]。

2.2 颗粒物传输模型

通过用户自定义函数将滑移通量模型嵌入到 FLUENT 中运行,来模拟室内颗粒物分

布。滑移通量模型是一种欧拉方法,其控制方程与 Navier-Stokes 方程相似,不同之处在于它将颗粒物的重力沉降效应整合到对流项中。目前滑移通量模型已广泛应用在室内环境领域,验证模型的适用性和准确性^[15]。然而,仅考虑重力沉降和扩散的滑移通量模型可能无法完整描述烹饪颗粒物的相间机理。因此,采用改进的滑移通量模型,该模型已经通过实验验证并考虑引起颗粒物滑移的所有机制^[16]。

$$\frac{\partial [(V_j + V_{\text{slip},j})C]}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} [\varepsilon_p \frac{\partial C}{\partial x_j}] + S_c. \quad (1)$$

式中: V_j 和 $V_{\text{slip},j}$ 分别为空气流速和颗粒物滑移速度; C 为颗粒物浓度; ε_p 为颗粒物的涡流扩散系数; S_c 为源项。

采用半经验沉积模型来获得颗粒物沉积通量^[17]。该模型基于通过壁面附近的浓度边界层的粒子通量,通量的表达式可以用菲克定律表示,其中扩散系数由布朗扩散系数和湍流扩散率之和为

$$J = -(D + \varepsilon_p) \frac{dC}{dy} + i v_s C. \quad (2)$$

式中: D 为布朗扩散系数; v_s 为颗粒物沉降速度; i 值的大小取决于壁面的朝向。

3 模拟结果分析

图2为9种工况的住宅厨房空气流速轮廓图。从图中可以看出,烹饪过程会导致在炉具处产生较大的温度梯度,形成强烈上升的热羽流。吸油烟机排气口处会产生不断扩大的负压区,使得厨房内部的空气向烹饪区流动。在开门的工况下,补充空气主要从门的下半部分进入厨房。这部分空气在进入烹饪区域后,在热羽流和吸油烟机周围气流的浮力作用下向上流动。而开窗时,部分流入的空气与烹饪区气流直接混合,部分空气补充下半部被吸油烟机排出的空气。

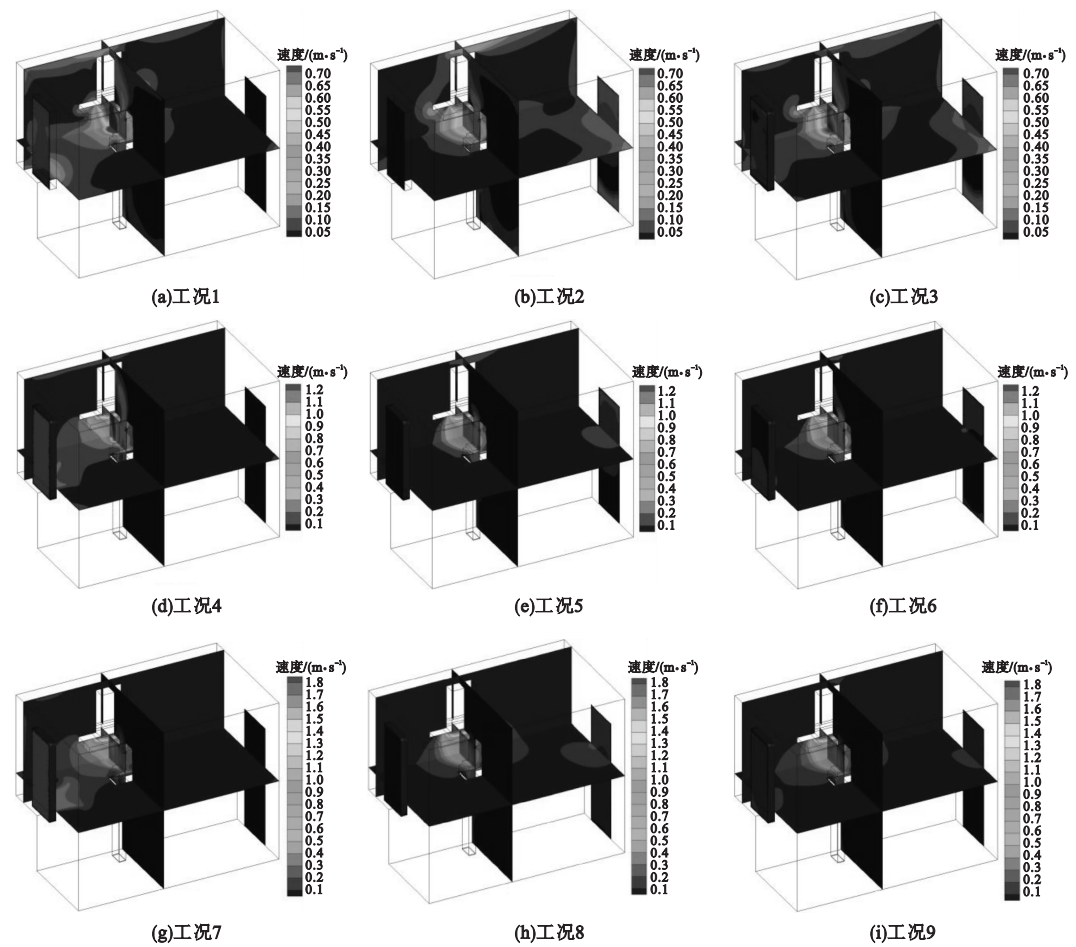


图2 工况1-工况9住宅厨房空气流速轮廓图

Fig. 2 The air velocity profile schematic of case1 to case 9 in the kitchen

4 油烟颗粒物分布

4.1 颗粒物扩散机理

图3为各因素引起滑移通量的平均影响阶数。由湍流引起的颗粒波动导致动量传输的滑移通量为 S_M ;由对颗粒物的热泳力引起的滑移通量为 F_{TH} ;由重力引起的滑移通量为 G ;由颗粒相每单位体积的动量变化率引起的滑移通量为 D 。从图3可以看出,颗粒物在住宅厨房热环境运动时受力的量阶大小有很大的差异。对不同粒径的颗粒物, F_{TH} 的平均阶数约为 10^{-14} ,量阶太小而无法显著影响空间内颗粒物的运动。通过对住宅厨房气流场的分析能够发现,除烹饪热源周围的区域外,厨房各平面平均气温相差不大,导致远

离热源处的温度梯度太小,使得热泳力对颗粒物在室内的传输过程影响很小。由重力引起的滑移通量阶数大小与颗粒物的直径直接相关,随着粒径的减小, G 的量阶也变小。 $PM_{2.5}$ 下 G 的平均阶数大小约为 10^{-4} ,而 $PM_{0.1}$ 下 G 的平均阶数大小约为 10^{-7} ,表明了重力对细颗粒物和超细颗粒物影响的显著不同。相比于热泳力的影响,颗粒相每单位体积的动量变化率引起的滑移通量的阶数明显更大, $PM_{2.5}$ 的平均阶数约为 10^{-5} ,并且对比不同粒径发现, D 与 G 的平均阶数相差不大。由湍流引起的滑移通量的阶数在不同粒径下都很大, $PM_{2.5}$ 的 S_M 平均阶数约是 D 和 G 的350倍,表明湍流的影响对颗粒物在住宅厨房中的扩散起主导作用。

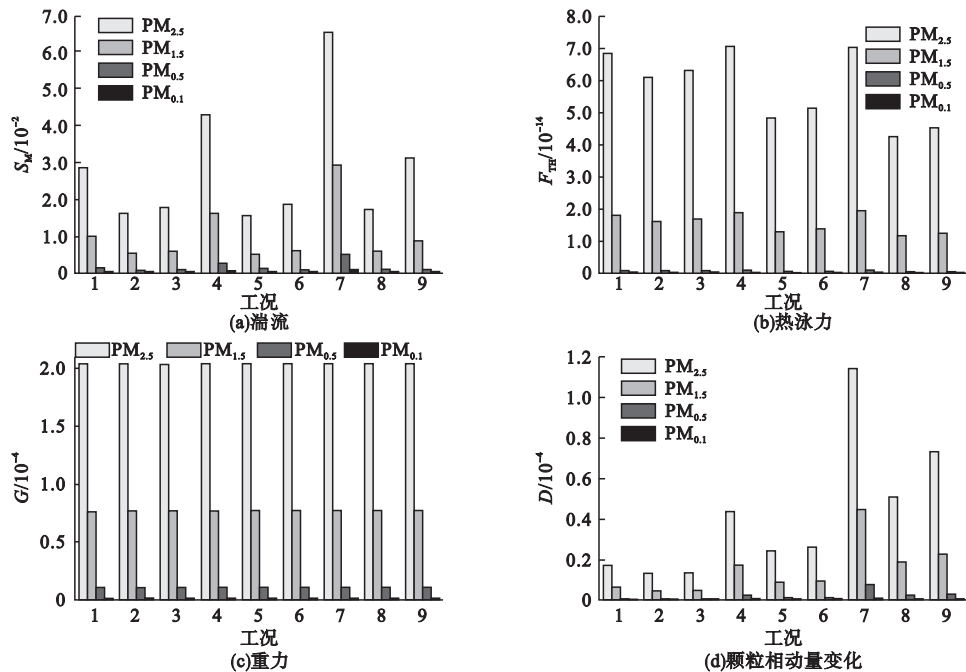


图3 各因素引起漂移通量的平均影响阶数

Fig. 3 The average order of drift flux caused by various factors

4.2 油烟细颗粒物分布

图4 为 $PM_{2.5}$ 在各线上的浓度分布。

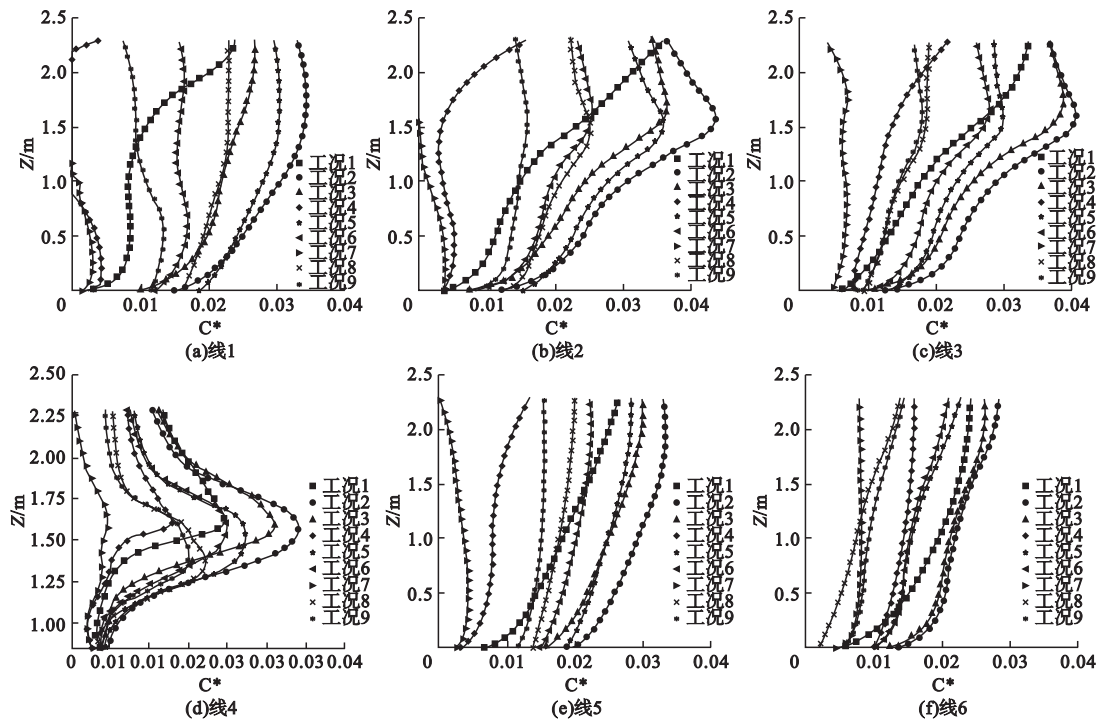


图4 工况1-9沿线 $PM_{2.5}$ 分布

Fig. 4 The concentration of the $PM_{2.5}$ in case 1 to case 9

从图4可以看出,不同气流场下颗粒物的空间分布有很大的差异。除线4外,线1到线6上的颗粒物分布表明在靠近天花板位置的无量纲颗粒物浓度 C^* 较高,而靠近地板的位置处颗粒物浓度都很小。比较不同排气速度下的颗粒物浓度分布,排气速度的增加导致各线上颗粒物浓度降低。这是因为在排气速度较小的情况下,从窗户或门流入的空气会破坏热源上方的热羽流并削弱吸油烟机对颗粒物的控制作用,造成空气向外逃逸。由于气流在颗粒物的扩散运动中起主导作用,逃逸的空气会夹带着颗粒物在厨房中形成循环流,使得颗粒物扩散到周围。在热浮力的作用下空气向上流动,造成天花板位置浓度较高。随着排气速度的增加,吸油烟机容纳气流的能力增强,外部空气对热羽流的影响急剧下降,大部分的颗粒物随气流从排气口排出,少部分颗粒物随逸出气流扩散到周围环境。

4.3 颗粒物对壁面沉积分析

图5为 $PM_{2.5}$ 在各壁面的沉积。图5(a)为不同通风模式下 $PM_{2.5}$ 对厨房各壁面的沉积速度,其中 V_{dd} 、 V_{du} 、 V_{df} 和 V_{db} 分别代表对天花板、地板、前壁面和后壁面的沉积速度。在不同工况下颗粒物对相同壁面的沉积速度几乎没有变化,近壁面附近的颗粒物浓度成

为沉积通量的最大决定因素。沉积速度的大小取决于摩擦速度和重力沉降速度,而对于同一粒径的颗粒物,重力沉降速度相同。摩擦速度定义为壁面切应力与空气密度之比的平方根,由近壁速度梯度决定。 $PM_{2.5}$ 对不同壁面的沉积速度差异很大,其中对地板的沉积速度 V_{du} 总是最大的。这一差异能够归结于近壁面的湍流速度不同,既受住宅厨房特殊的通风模式影响。图5(b)为不同通风模式下 $PM_{2.5}$ 对厨房各壁面的沉积通量。其中 J_{dd} 、 J_{du} 、 J_{df} 、 J_{db} 分别代表对天花板、地板前壁面和后壁面的沉积通量。对比不同工况 $PM_{2.5}$ 对前壁面和地板的沉积通量总是很大。对地板的沉积量大能够归结于沉积速度处于较高的数值。与开窗和门窗都开的工况比较,仅开启门时对地板的沉积量总是处于最大值,介于 $1.5 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-5}$ 。因为不同于开窗时流入的空气与烹饪区气流直接混合,开门时气流会从厨房地板流向天花板。这种气流形式起到了类似于置换通风的作用,导致地板近壁面速度梯度更大。前壁面的沉积通量大是因为距离烹饪源近,近壁面颗粒物浓度高。对相同壁面的沉积通量主要取决于颗粒物的浓度分布,而颗粒物分布与通风形式密切相关,说明通风形式也显著影响烹饪颗粒物的沉积。

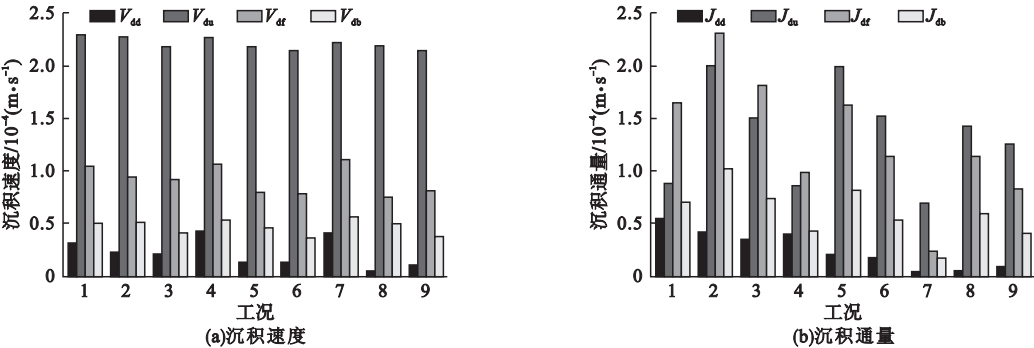


图5 $PM_{2.5}$ 在各壁面的沉积

Fig. 5 The deposition velocity and flux of $PM_{2.5}$ on each wall

5 结 论

(1)不同通风模式下厨房空间气流特性

相差很大,气流分布主要集中在烹饪区。当排气量较小时,从门窗流入的空气会干扰热羽流并削弱吸油烟机对颗粒物的控制作用。

而增大排气量能够增强吸油烟机容纳热羽流能力,降低厨房空间颗粒物浓度。

(2)当粒径在 $0.1 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 内的颗粒物在厨房中扩散时,湍流的影响起主导作用。由于远离热源处的温度梯度很小,使得热力不会对颗粒物扩散产生重大影响。

(3)开门情况下,颗粒物对地板的沉积增多,沉积通量介于 $1.5 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-5}$ 。在不同工况下颗粒物对相同壁面的沉积速度几乎没有变化,而对不同壁面的沉积速度差异很大,差异可以归结于近壁速度梯度不同。

参考文献

- [1] 吴鑫. 烹饪油烟的排放特征及颗粒物的个体暴露研究[D]. 上海:华东理工大学,2015. (WU Xin. Study on the emission characteristics of cooking oil fume and individual exposure to particulate matter [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology,2015.)
- [2] 韦志伊,陈淑琴,贾亚宾,等. 长三角地区城市住宅烹饪对室内超细颗粒物污染影响初探[J]. 建筑科学,2020,36(2):61-66. (WEI Zhiyi, CHEN Shuqin, JIA Yabin, et al. Preliminary investigation on the influence of cooking behaviors on indoor ultrafine particles in urban residences in two cities of Yangtze river delta region, China [J]. Building science, 2020,36(2):61-66.)
- [3] 王军,张旭. 建筑室内人员污染暴露量及其特征性分析[J]. 环境科学与技术,2012,35(1):13-16. (WANG Jun, ZHANG Xu. Amount of occupants' exposure to indoor pollutant and its characteristics [J]. Environmental science and technology, 2012,35(1):13-16.)
- [4] BUONANNO G, MARKS G B, MORAWSKA L. Health effects of daily airborne particle dose in children: direct association between personal dose and respiratory health effects [J]. Environmental pollution, 2013,180:246-250.
- [5] STABILE L, BUONANNO G, FICCO G, et al. Smokers' lung cancer risk related to the cigarette-generated mainstream particles [J]. Journal of aerosol science, 2017,107:41-54.
- [6] PACITTO A, STABILE L, VIANA M, et al. Particle-related exposure, dose and lung cancer risk of primary school children in two European countries [J]. Science of the total environment, 2018,616/617:720-729.
- [7] 许昂. 基于烹饪热羽流对厨房颗粒物扩散影响及人员健康风险评价[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2018. (XU Ang. Based on the impact of cooking heat

- plume on the diffusion of particulate matter in the kitchen and the health risk assessment of personnel [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
- [8] 李慧星,刘昱,冯国会. 东北地区住宅厨房油烟 $\text{PM}_{(2.5)}$ 分布及操作人员暴露量分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018,34(3):558-565. (LI Huixing, LIU Yu, FENG Guohui. Study on distribution and occupant's exposure of fine particles in a northern residential kitchen [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018,34(3):558-565.)
- [9] LIU Y, LI H, FENG G. Simulation of inhalable aerosol particle distribution generated from cooking by eulerian approach with RNG kepsilon turbulence model and pollution exposure in a residential kitchen space [J]. Building simulation, 2016,10(1):135-144.
- [10] DOBBIN N A, SUN L, WALLACE L, et al. The benefit of kitchen exhaust fan use after cooking an experimental assessment [J]. Building & environment, 2018,135:286-296.
- [11] 李健. 基于新型通风方式的家用厨房环境模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019. (LI Jian. Research on the simulation of home kitchen environment based on new ventilation methods [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.)
- [12] ZHOU B, CHEN F, DONG Z, et al. Study on pollution control in residential kitchen based on the push-pull ventilation system [J]. Building & environment, 2016,107:99-112.
- [13] ZHUANG C, YANG G, LONG T, et al. Numerical comparison of removal and deposition for fully-distributed particles in central and split-type air-conditioning rooms [J]. Building & environment, 2017,112:17-28.
- [14] GOLKARFARD V, TALEBIZADEH P. Numerical comparison of airborne particles deposition and dispersion in radiator and floor heating systems [J]. Advanced powder technology, 2014,25(1):389-397.
- [15] CAO C, GAO J, WU L, et al. Ventilation improvement for reducing individual exposure to cooking-generated particles in Chinese residential kitchen [J]. Indoor and built environment, 2016,26(2):226-237.
- [16] ZHAO B, CHEN C, TAN Z. Modeling of ultrafine particle dispersion in indoor environments with an improved drift flux model [J]. Journal of aerosol science, 2009,40(1):29-43.
- [17] CHEN F, YU S C M, LAI A C K. Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model [J]. Atmospheric environment, 2006,40(2):357-367.

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)