

# 窗口开启方式对PM2.5室内运动影响的探究

金沙, 孟冲

(中国建筑科学研究院, 100013, 北京)

**摘要:** 采用FLUENT软件模拟自然通风条件下,不同窗口开启方式下住宅室内PM2.5的运动和分布情况。窗口开启方式选择平开窗、上悬窗及下悬窗3种。连续相模拟采用标准模型,颗粒相模拟采用离散相模型(DPM)。研究表明:在室外空气质量优于室内的前提下,平开窗工况下,室内流场均匀平稳,室内颗粒物平均浓度最低;上悬窗工况下,对气流向上的引导作用造成下部人员活动区新风量降低,颗粒物堆积不易排出,室内颗粒物平均浓度最高;下悬窗工况下室内颗粒物平均浓度介于两工况之间。

**关键词:** 窗口开启方式;数值模拟;离散相模型(DPM);PM2.5颗粒物浓度

**中图分类号:** TU 201.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-4726(2014)11-1022-04

## STUDY ON IMPACT OF WINDOW OPENING MODES ON MOTION OF INDOOR PM2.5

JIN Xi, MENG Chong

(China Academy of Building Research, 100013, Beijing, China)

**Abstract:** Standard  $\kappa-\epsilon$  model and discrete phase model (DPM) were used in the simulation of movement and distribution of residential indoor PM2.5 with different window open modes under the condition of the natural ventilation. The window open modes contain casement windows, top-hung window and bottom-hinged window. The results showed that on the premise of air quality outdoor better than indoor, under the condition of casement windows, indoor flow distribution is steady and the average concentration of indoor particulate matter is the lowest among all the simulated conditions; under the condition of top-hung window, the window shape gives an upward guidance on airflow, results in decrease of fresh air volume in the lower personnel activity area. Particulate matter piled up, so the indoor particulate matter concentration on average is the highest among all the operation conditions; under the condition of bottom-hinged window, the indoor particulate matter concentration on average is between the top-hung window condition and the bottom-hinged window condition.

**Key words:** window open modes; numerical simulation; discrete phase model(DPM); PM2.5 concentration

自然通风作为一种安全有效、经济实用的通风模式,能在不消耗不可再生能源的情况下改善室内热湿环境、降低污染,是建筑设计中以被动式技术改善室内空气品质的重要手段。随着人们对室内环境和自身健康的日益关注,逐渐发现细颗粒物PM2.5会严重威胁人体健康。同时,PM2.5也是产生灰霾的主要原因。

本文将住宅室内自然通风和去除PM2.5相结合,探讨在室外空气质量优于室内的前提下,以自然通风为手段降低室内PM2.5浓度,缓解室内污染程度。当室外空气质量劣于室内时,开窗通风改善室内环境的方法不可取。目前,影响室内颗粒物运动及分布的主要因素有窗口开启方式、窗口尺寸、窗口布置形式和建筑朝向等。这些因素通过改变室内气流组织分布间接影响室内空气中颗粒物的分布。本文基于FLUENT数值模拟,

以室内颗粒物浓度为衡量指标,研究不同的窗口开启方式对室内颗粒物运动和分布的影响,为建筑室内设计提供借鉴。

### 1 物理模型

目前建筑中常见的窗户开启方式有平开窗、上悬窗和下悬窗(图1)。本文以这3种常见的开窗方式为例,研究不同窗口开启方式对室内颗粒物分布的影响。

模型计算区域由两部分构成,分别是室外区和室内房间区。设置室外区的目的在于能够清晰地显示气流从室外进入室内时,不同窗口对气流不同的引导作用。若缺少对室外区域气流的模拟,则模拟结果只会显示气流进入室内后的流场分布情况,无法显示不同窗口开启方式对气流及颗粒物的导向作用。

室外区域为2m×5m×3m (X×Y×Z),室内区域为5m×5m×3m (X×Y×Z)。窗口尺寸均为2m×1.5m,采取对开式布置,放置在东西墙面的中间位置,窗口中心距地面1.5m高度。室内颗粒源为一小长方体,尺寸为0.1m×

收稿日期:2014-10-08

基金项目:国家“十二五”资助项目(2012BAJ02B02)

作者简介:金沙(1988—),女,北京市人,助理工程师,e-mail: jinxjcy@163.com.

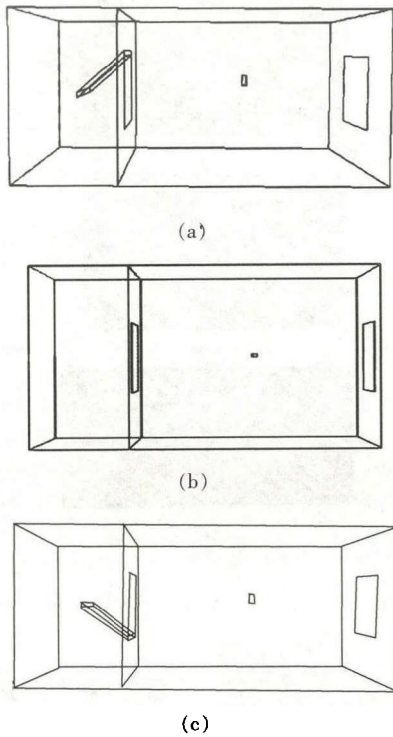


图1 常见窗户开启方式示意  
(a)上悬窗;(b)平开窗;(c)下悬窗

0.1 m×0.2 m (X×Y×Z), 放置在房间中间距地面1.5 m高度的位置,长方体上表面为颗粒散发源。

## 2 求解模型

本研究的模拟过程分为两部分,即连续相模拟过程和颗粒相模拟过程。连续相模拟选用基于有限体积分法的SIMPLE算法,湍流模型选择较常用的标准模型,近壁面采用壁面函数法。考虑到本研究中颗粒相体积分数小于10%,且研究自然通风条件下颗粒物在室内的运动轨迹和分布情况,因此采用欧拉-拉格朗日方法研究颗粒相运动,选择离散相模型(DPM)对其进行模拟,颗粒的力平衡方程和颗粒轨道计算方程见公式(1)和(2)。

模拟求解步骤为:先计算连续相流场,再结合场变量求解每一个颗粒的受力情况,获得颗粒速度后可追踪每一个颗粒的轨道。

在拉格朗日坐标系下,建立颗粒的力平衡方程为(以X方向为例):

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g_x - \frac{du_p}{dt} g_x + F_x \quad (1)$$

式中: $F_D(u - u_p)$ 为单位重量颗粒受到的阻力; $F_D$ 为斯托克斯阻力系数, $F_D = \frac{18\mu}{\rho_a d_p^2} C_D Re$ ;  $Re$ 为相对雷诺数

$Re = \frac{\rho_a d_p |u - u_p|}{\mu}$ ;  $g_x$ 为颗粒单位重量重力在X方向上的分

力; $\frac{\rho_a}{\rho_p} g_x$ 为颗粒单位重量浮力在X方向上的分力; $F_x$ 为其他各个作用力在X方向上的分力,比如视质量力、热泳力、布朗力以及Saffman力等,在旋转参考系当中,还包括了附加作用力。 $u$ 为气相速度; $u_p$ 为颗粒相速度; $\rho$ 为气相密度; $\rho_a$ 为颗粒相密度; $\mu$ 为流体动力粘度; $d_p$ 为颗粒直径。

对颗粒运动方程积分就得到了颗粒轨道在每一个位置上的颗粒速度。颗粒轨道求解方程见公式(2),沿每个坐标方向求解该方程就可得到离散相的轨迹。

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (2)$$

## 3 边界条件设置

连续相边界条件设置如下。

- (1) 室外来流面设为压力进口,进口压力为1.3 Pa,室内出风口设为压力出口,出口压力为-0.5 Pa。
- (2) 沟通室内外的房间窗口设为interior。
- (3) 房间的墙面、顶部、地面及室外侧面、顶面设为无滑移的壁面条件。

针对颗粒项,将散发源简化为一小长方体,尺寸为0.1 m×0.1 m×0.2 m,布置在房间活动区域中心位置,距地面1.5 m高度处。根据文献2,确定室内污染源颗粒物平均散发强度为 $3 \times 10^{-8}$  kg/s,散发速度为0.1 m/s。颗粒相边界条件设置如下:

- (1) 房间内的进出风口采取逃逸(escape)条件;
- (2) 房间的墙面、顶部、地面及室外部分侧面、顶面采取捕集(trap)条件;
- (3) 室内源散发表面采取捕集(trap)条件。

## 4 模拟结果分析

### 4.1 上悬窗

图2~4为上悬窗时不同平面速度、空气龄及颗粒物分布情况。由模拟结果可看出,由于开启窗扇的遮挡作用,导致上悬窗进风口有效面积减小。气流沿窗扇下侧进入室内后明显向上部倾斜,造成下部人员活动区的风量及风速较小,不利于空气流通和污染物的消散,空气新鲜度较差。室内源存在时,由于颗粒物重量小,相比于气流上升的带动力,重力作用微弱,没有明显的沉降趋势,颗粒物随气流先向上运动,再下降由窗口排出。颗粒物浓度图显示窗口附近颗粒物浓度较高。

### 4.2 平开窗

图5~7为平开窗时不同平面速度、空气龄及颗粒物分布情况。平开窗的窗扇能完全敞开形成进风口,有利于气流在室内形成较平稳的组织形式,室内流动基本

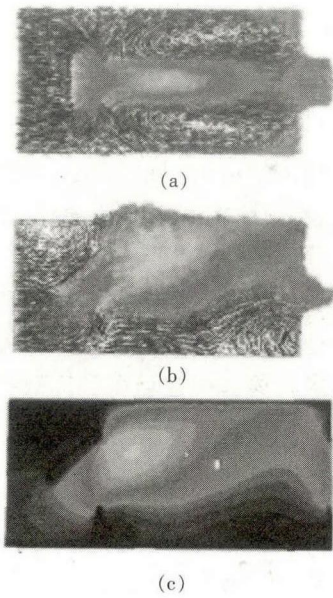


图2 上悬窗平面速度

(a)Z=1.7m处速度矢量;(b)Y=2.5m处速度矢量;(c)Y=2.5m处速度云图

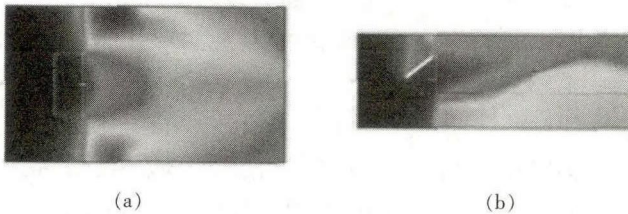


图3 上悬窗平面空气龄图

(a)Z=1.7m处;(b)Y=2.5m处

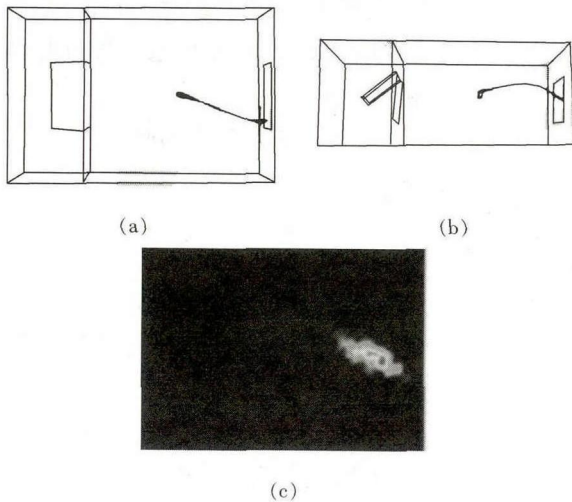


图4 上悬窗颗粒轨迹图及平面浓度

(a)颗粒物轨迹一;(b)颗粒物轨迹二;(c)Z=1.7m处颗粒物浓度

成平行状态,风速适宜,没有局部高速的区域。空气流通性及空气品质整体较好。室内源存在时,颗粒物随气流平直地流过室内,没有上下起伏和迂回,直接排出室外。

### 4.3 下悬窗

图8~10为下悬窗时不同平面速度、空气龄及颗粒

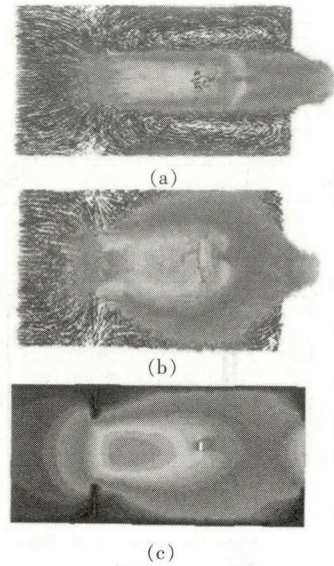


图5 平开窗平面速度

(a)Z=1.7m处速度矢量;(b)Y=2.5m处速度矢量;(c)Y=2.5m处速度云图

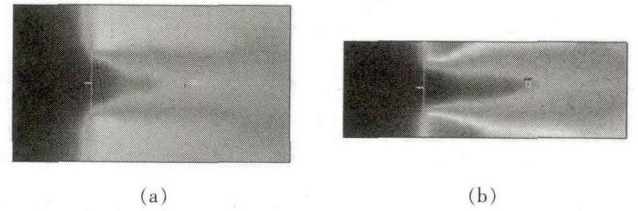


图6 平开窗平面空气龄图

(a)Z=1.7m处;(b)Y=2.5m处

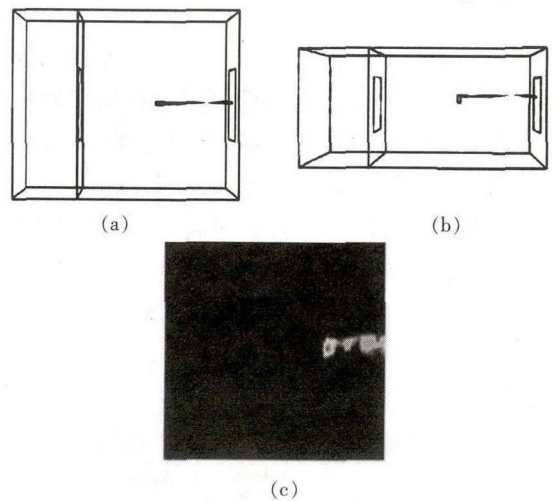


图7 平开窗颗粒轨迹图及平面浓度

(a)颗粒物轨迹一;(b)颗粒物轨迹二;(c)Z=1.7m处颗粒物浓度

物分布情况。下悬窗遮挡了下部的气流,空气沿着窗扇上侧进入室内,该开窗方式有效地引导了气流向下部人员活动区域流动,使人员活动区的新风量加大,提高了该区域的空气新鲜度,通风情况良好。室内源存在时,颗粒物随气流先向下运动,然后上升至窗口排出。

### 4.4 对比分析

表1为三种工况下不同平面内颗粒物浓度,图11为

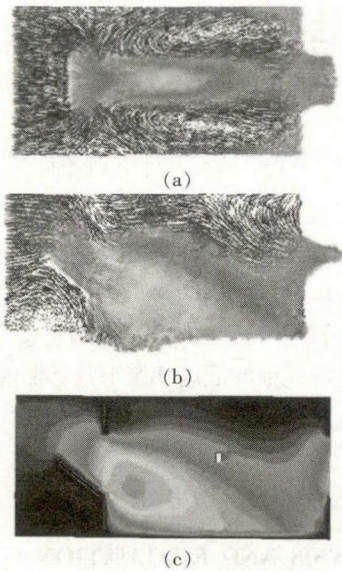


图8 下悬窗平面速度

(a)Z=1.7 m处速度矢量;(b)Y=2.5 m处速度矢量;(c)Y=2.5 m处速度云图

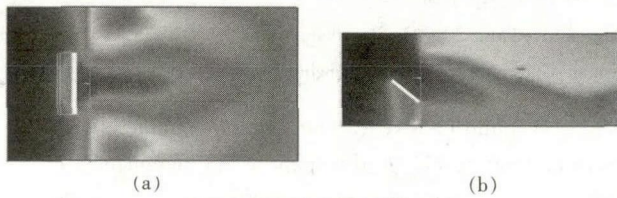


图9 下悬窗平面空气龄图

(a)Z=1.7 m处;(b)Y=2.5 m处

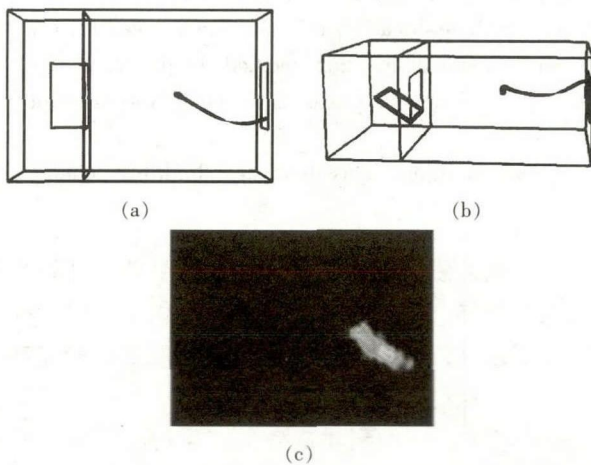


图10 下悬窗颗粒轨迹图及平面浓度

(a)颗粒轨迹一;(b)颗粒轨迹二;(c)Z=1.7 m处颗粒浓度

三种工况下颗粒物浓度随高度变化趋势图。

室内源存在时,颗粒物运动轨迹与气流流动路径相似,说明颗粒物运动对气流有很好的跟随性。由模拟结果可见,在室外空气质量优于室内的前提下,上悬窗对气流向上的引导作用造成下部人员活动区内新风量减少,通风不畅,颗粒物堆积其中,难以被稀释和排出,颗粒物体平均浓度最高;平开窗工况下,室内流场平稳,气流能携带颗粒物平直的排出室外,轨迹简单,没有迂回和折拐,颗粒物平均浓度最低;下悬窗

表1 三种工况下不同平面内颗粒物浓度  $kg/m^3$

工况	下悬窗	平开窗	上悬窗
体平均浓度	$5.42 \times 10^{-9}$	$4.24 \times 10^{-9}$	$6.88 \times 10^{-9}$
1.1 m面平均浓度	$4.20 \times 10^{-9}$	$4.17 \times 10^{-9}$	$7.60 \times 10^{-9}$
1.3 m面平均浓度	$5.36 \times 10^{-9}$	$4.22 \times 10^{-9}$	$6.81 \times 10^{-9}$
1.5 m面平均浓度	$5.82 \times 10^{-9}$	$4.59 \times 10^{-9}$	$6.24 \times 10^{-9}$
1.7 m面平均浓度	$5.14 \times 10^{-9}$	$4.20 \times 10^{-9}$	$5.68 \times 10^{-9}$

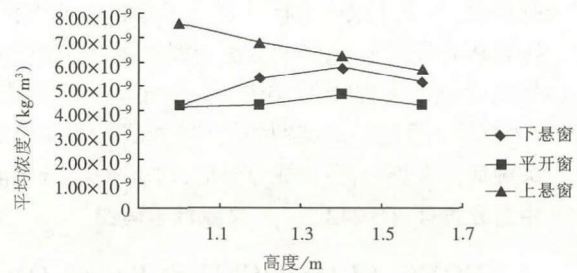


图11 颗粒物浓度随高度变化趋势

室内颗粒物平均浓度介于两者之间。

竖直高度方向上,三种开窗方式造成了不同的颗粒物浓度分布。平开窗工况下,由于室内气流组织较平稳,除散发源高度平面上颗粒物浓度突然增大外,其颗粒物浓度在高度方向上基本成均匀分布。上悬窗和下悬窗由于对气流和颗粒物分别有向上和向下的引导作用,导致颗粒物浓度分布趋势相反。上悬窗工况下颗粒物浓度随高度的增加而降低,而下悬窗工况下颗粒物浓度随着高度的增加而升高。

### 5 结束语

本文利用FLUENT软件模拟在室外空气质量优于室内的前提下,室内污染源存在时,不同窗户开启方式下室内气流组织分布和窗户开启方式对PM2.5运动及浓度分布的影响。根据模拟结果分析,得到以下结论。

(1) 细颗粒物PM2.5重量轻,运动过程中重力作用微弱,对气流有很好的跟随性。

(2) 不同窗户开启方式下,室内PM2.5平均浓度水平依次为:平开窗<下悬窗<上悬窗。由于平开窗室内流场平稳,气流能携带颗粒物快速平稳地排出,室内通风换气效果最好;上悬窗对气流向上的引导作用导致人员活动区新风量不足,造成活动区内颗粒物难以被稀释和排出,室内空气品质较差。

### 参考文献

[1] 滕恩江,胡伟,吴国平,等.中国四城市空气中粗细颗粒物元素组成特征[J].中国环境科学,1999,19(3):238-242.  
 [2] 郑聪.环境烟草烟雾引起的室内空气污染的定量研究[D].湖南:湖南大学土木工程学院,2007:32-42.  
 [3] 李静.典型布局下的建筑室内自然通风 [J]. 建筑技术,2012,43(12):1124-1126.