

文章编号:1007-6735(2013)01-0051-04

街道峡谷内颗粒物扩散沉积的数值模拟研究

黄远东, 林晓禹, 赵树夫
(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 采用计算流体动力学(CFD)技术,模拟分析了孤立街道峡谷内气流运动和颗粒物的扩散沉积. 计算中选取中低来流风速(3,5,10 m/s)和高来流风速(20 m/s),颗粒粒径范围为 0.01~10 μm . 得到了峡谷内气流速度场、颗粒运动轨迹和颗粒在建筑物不同表面及地面上的沉积率. 结果表明,颗粒在地面上的沉积率明显高于在建筑物各表面上的沉积率;来流风速一定时颗粒在峡谷迎风面、背风面、建筑物屋顶及地面上的沉积率都对粒径的变化不敏感,中低风速范围内颗粒在建筑物各表面和地面的沉积率都对风速变化不敏感;在峡谷迎风面及地面上,颗粒在高风速下的沉积率明显大于中低风速下的沉积率,而在峡谷背风面及建筑物屋顶上,颗粒在高风速下的沉积率明显低于中低风速下的沉积率;在中低风速下,颗粒在背风面的沉积率高于在迎风面的沉积率,而在高风速下,颗粒在背风面的沉积率却低于在迎风面的沉积率.

关键词: 街道峡谷; 颗粒物; 沉积; 扩散; 计算流体动力学模拟
中图分类号: X 169 **文献标志码:** A

Numerical Simulation on Dispersion and Deposition of Particles Within A Street Canyon

HUANG Yuandong, LIN Xiaoyu, ZHAO Shufu
(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The airflow and particle deposition within an isolated street canyon were studied numerically. In the numerical simulation, the low or medium wind speed (3,5,10 m/s) as well as the high wind speed (20 m/s) were adopted and particles with the diameter in the range of 0.01~10 μm were considered. The airflow fields, particle trajectories and particle deposition efficiencies on various building surfaces and on the street floor were all obtained. It is revealed that: the particle deposition efficiency on the street floor is obviously higher than that on building surfaces; the deposition efficiencies on the leeward and windward walls, building roofs and on the street floor are all insensitive to the particle size under a fixed wind velocity and insensitive to the wind velocity under low or medium wind speed; on the windward wall and the road surface, the particle deposition efficiency under high speed is apparently greater than that under low or medium wind speed, whereas on the leeward wall and the building roofs the particle deposition efficiency under high wind speed is obviously lesser than that under low or medium wind velocity; the deposition efficiency on the leeward wall is greater than that on the windward wall under low or medium wind speed whereas the deposition efficiency on the leeward wall is lesser than that on the

收稿日期: 2011-07-05
基金项目: 上海市教委科研创新资助项目(10ZZ95)
第一作者: 黄远东(1965-),男,教授. 研究方向: 大气污染控制. E-mail: huangyd@usst.edu.cn

windward wall under high wind speed.

Key words: *street canyon; particles; deposition; dispersion; computational fluid dynamics simulation*

动车尾气排放已成为大都市(如北京、上海、广州等)中空气污染的最主要来源. 机动车尾气在城市中的迁移扩散主要受气象条件、建筑物结构布局等因素的影响. 一种典型的建筑物结构布局形态就是街道峡谷. 街道峡谷内机动车排放出的污染物对行人、机动车驾驶员、机动车乘客及附近居民的健康带来直接的不利影响^[1], 且随着经济和社会的发展, 机动车拥有量仍在持续增加. 因此, 街道峡谷内机动车尾气扩散已成为当前环境领域中的研究热点之一. 机动车排放污染物既有气态污染物(如一氧化碳、氮氧化物、碳氢化合物等), 也包含颗粒物. 近年来, 气态污染物在街道峡谷中扩散的研究已开展得较为深入, 这些研究既有现场实测^[2-3]、风洞实验^[4-6], 也包含大量计算流体力学(CFD)模拟^[7-10]. 到目前为止, 对颗粒物在街道峡谷内扩散的研究开展得较少, 且已有研究以现场实测为主. 例如, Kumar 等^[11]利用快速反应分光光度计测量英国剑桥一个典型城市街道峡谷中近地面范围内粒径大小为 5~1 000 nm 的颗粒分布情况. 近年来, Nazridoust 等^[12]通过 CFD 模拟, 研究了碳粒子在街道峡谷内的扩散沉积, 但他们所采用的是风洞模型峡谷(模型建筑物的高度为 0.06 m). 鉴于街道峡谷内颗粒物扩散研究的现状, 本研究选取实际尺寸的街道峡谷(建筑物高度为 20 m)和机动车实际排放的碳粒子, 通过 CFD 数值模拟的方法, 探究颗粒物在街道峡谷内的扩散沉积规律, 以期对街道峡谷内颗粒物浓度预测分析等提供支撑.

1 街道峡谷结构及计算区域

选取方形平顶建筑物构成的街道峡谷, 由于街道峡谷长度远大于建筑物高度, 故可将三维街道峡谷简化为二维街道峡谷, 如图 1 所示. 图 1 中, B 表示街道峡谷的宽度, $B = 20$ m, H 表示建筑物的高度, 本研究中选取 $B/H = 1$ 的对称街道峡谷. 计算区域的顶部距地面的高度、入口距迎风建筑物的迎风面距离及出口距背风建筑物的背风面距离均为 $8H$, 在峡谷中心地面处设置一个高和宽为 0.5 m $\times$ 2 m 的水平线源以发放密度为 $2\ 000$ kg/m³ 的颗粒物. U_∞ 为自由来流风速.

采用四边形网格对计算区域进行网格划分, 计算区域的网格数目约为 23 万.

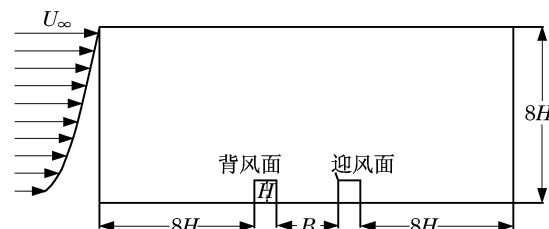


图 1 街道峡谷结构及计算区域

Fig. 1 Schematic diagram of street canyon and the computational domain

2 模型方程及数值方法

采用单向耦合的两相流动模型. 在欧拉框架下, 通过求解不可压缩流动的 N-S 方程和标准 κ - ϵ 湍流模型方程来得到不可压缩流动的气流场. 对于颗粒相的求解, 则采用 Lagrangian 方法, 其中, 颗粒运动的 Lagrangian 方程为

$$\frac{du_{p,i}}{dt} = \left(\frac{18\mu}{\rho_p d_p^2 C_c} \right) \left(\frac{C_D Re_p}{24} \right) (U_i + u_i - u_{p,i}) + g_i + n_i(t) + F_i \quad (1)$$

式中, $u_{p,i}$ 为颗粒速度, $i = 1, 2$, 分别表示水平方向和垂直方向; t 为时间; μ 为流体动力黏性系数; ρ_p 为颗粒密度; d_p 为颗粒粒径; C_D 为阻力系数; U_i 为流体速度; u_i 为流体湍流脉动速度; Re_p 为颗粒雷诺数; 式(1)右边第一项是单位质量颗粒所受的流体阻力; g_i 是重力加速度分量; $n_i(t)$ 是单位质量颗粒所受的 Brownian 力; F_i 是单位质量颗粒所受的 Saffman 升力; C_c 为 Stokes 阻力公式的 Cunningham 修正系数, 其计算公式为

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{-1.1d_p/2\lambda}) \quad (2)$$

式中, λ 为气体分子平均自由程.

求解方程(1)的关键是确定气相的湍流脉动速度, 本模拟计算应用 Fluent 软件中的随机游走模型来确定湍流对颗粒扩散的影响. 用沉积率(捕集率) η 来描述颗粒沉积, 其定义为^[11]

$$\eta = \frac{N_d}{N_i} \quad (3)$$

式中, N_d 是沉积在固体表面的颗粒数; N_i 是发放到街道峡谷内的总颗粒数.

计算中的边界条件为:入口处的自由来流风速为 U_∞ ,入口速度分布满足湍流 1/7 定律;右侧出口处各变量的法向导数为零;上边界为对称边界;所有的建筑物表面和街道地面都定义为无滑移速度边界,在固体表面上对颗粒物采用捕捉边界条件.

数值计算在 Ansys Fluent 12.0 平台上进行,采用 SIMPLE 算法和一阶迎风格式.

3 结果与讨论

3.1 流场分析

计算来流风速 U_∞ 分别为 3, 5, 10, 20 m/s 下的街道峡谷内部气流场. 图 2 为不同来流风速下峡谷内部的速度矢量分布,为简便,仅给出 3, 20 m/s 下的气流场. 图 2 显示,在峡谷内部形成一个顺时针大旋涡,该旋涡的中心位置位于建筑物一半高度以上. 特别是当来流风速为 20 m/s 时,顺时针旋涡中心已超出峡谷建筑物高度. 从图 2 中还可以看出,由于来流绕过迎风建筑物迎风面时,发生流动剧烈分离,从而在峡谷迎风建筑物屋顶上方形成一个顺时针小旋涡,该旋涡将把从峡谷中逃逸出的颗粒物迁移到迎风建筑物屋顶上方.

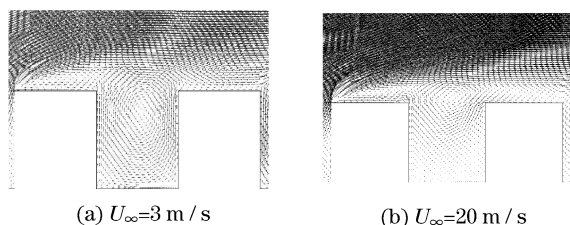


图 2 气流速度矢量场

Fig. 2 Flow velocity vector fields under different wind velocities

3.2 颗粒物沉积分析

图 3 为不同风速下,从线源释放出的 200 颗粒径为 $1 \mu\text{m}$ 颗粒物在街谷内的轨迹图. 从图 3 可以看出,由于顺时针大旋涡的作用,颗粒被带向峡谷背风侧,使得背风侧的颗粒轨迹线较迎风侧的密;由于迎风建筑物屋顶上方的顺时针小旋涡,从峡谷内逸出的部分颗粒物被气流带入到迎风建筑物屋顶上方. 由于迎风建筑物屋顶上方小旋涡的强度随自由

来流风速的增大而加强,导致在 3 m/s 风速下迎风建筑物屋顶上方的颗粒轨迹线较其它中高速下的轨迹线稀疏.

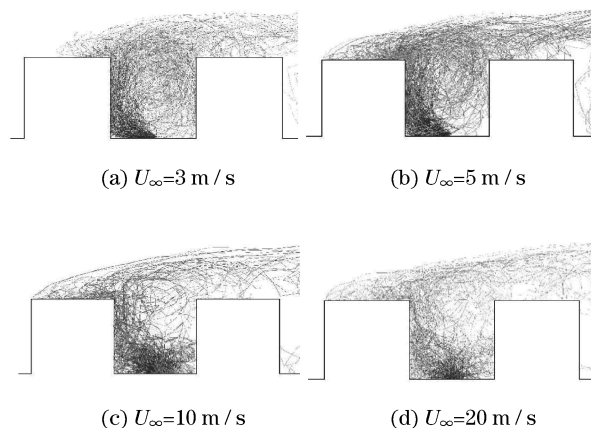


图 3 颗粒在不同风速下的轨迹

Fig. 3 Trajectories of particles under different wind velocities

图 4(见下页)为不同风速下不同粒径的颗粒在不同建筑物表面及地面的沉积情况. 图 4(a) 显示颗粒物在峡谷迎风面上的沉积率(捕集率)变化,可以看出在来流风速为 20 m/s 下的颗粒沉积率明显高于其它风速条件下的颗粒沉积率,而中低风速(3, 5, 10 m/s)范围内的颗粒沉积率基本不随风速的改变而变化;在风速一定的条件下,当颗粒物的粒径在 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ 内变化时,颗粒沉积率基本不随颗粒粒径而变化. 图 4(b) 显示,来流风速为 20 m/s 时峡谷背风面的沉积率明显低于中低风速条件下的沉积率,该图还显示在风速一定时,背风面颗粒沉积率在 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ 粒径范围内不随颗粒粒径的变化而变化. 对比图 4(a) 和图 4(b) 还可以明显看出,在中低风速条件下,背风面的颗粒沉积率明显高于迎风面的沉积率,而在高风速下,迎风面的沉积率明显高于背风面的沉积率. 图 4(c) 表明,中低风速时建筑物顶部的颗粒沉积率大于高风速时的沉积率. 事实上,高风速时,峡谷中逸出的颗粒被峡谷上部的高速气流带走,而降低了在建筑物顶部沉积的数量. 图 4(d) 显示出,当来流风速为 20 m/s 时,颗粒在路面沉积率超过 50%,在中低风速条件下,颗粒在路面的沉积率也超过 30%,即从线源释放出的颗粒物大部分在路面沉积.

从图 4 还可以看出,随着风速从中低风速增加到高风速,沉积在迎风面和道路表面的颗粒数增加,而沉积在背风面和建筑物屋顶的颗粒数减少.

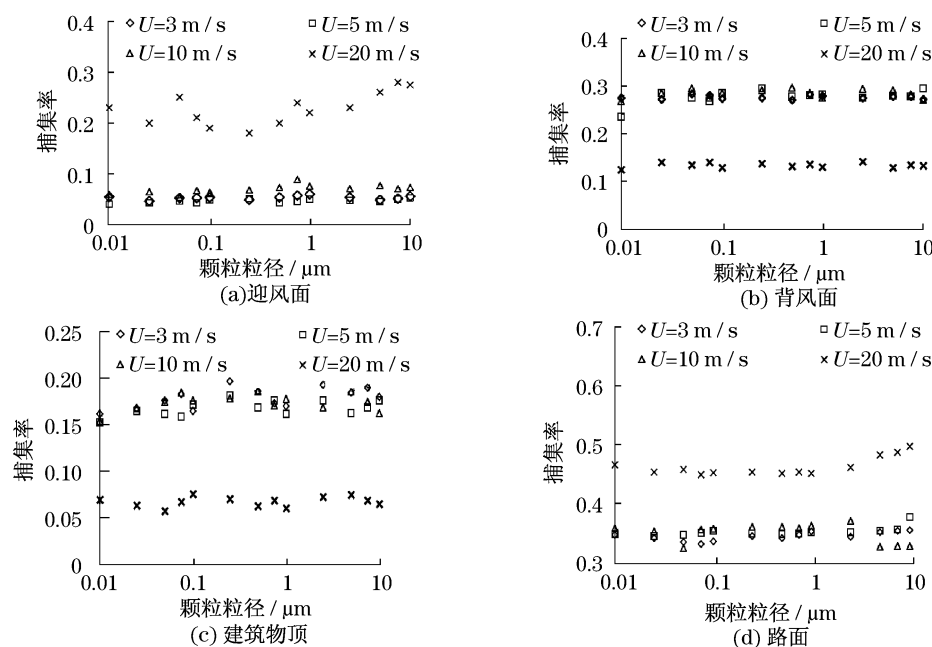


图4 颗粒物在不同表面上的沉积率

Fig.4 Particle deposition efficiencies on different solid surfaces

4 结论

在 Fluent 平台上,采用 Lagrangian 方法模拟分析了二维孤立街道峡谷内气流运动和颗粒物的迁移沉积.计算中分别选取 3,5,10,20 m/s 这 4 种风速,颗粒粒径范围为 0.01~10 μm ,得到了峡谷内气流速度场、颗粒运动轨迹和颗粒物在不同建筑物表面及地面上的沉积率.结果表明:

a. 在街道峡谷内,生成一个顺时针大旋涡,该旋涡中心位置位于建筑物一半高度以上,且随来流风速的增大而上移;由于流动剧烈分离,在迎风建筑物屋顶上方形成一个顺时针小旋涡.

b. 在来流风速一定的条件下,颗粒在峡谷迎风面、背风面、建筑物屋顶及地面上的沉积率都对颗粒粒径的变化不敏感;在峡谷迎风面上,中低来流风速下的不同粒径颗粒的沉积率基本一致,而高风速下的颗粒沉积率明显大于中低风速下的颗粒沉积率;在峡谷背风面及建筑物屋顶上,中低来流风速下的不同粒径颗粒的沉积率基本一致,而高风速下的颗粒沉积率明显低于中低风速下的颗粒沉积率;在街道峡谷地面上,高风速下的颗粒沉积率高达 50% 左右,而低风速下的颗粒沉积率也超过 30%,即大量颗粒在峡谷地面上沉积.

c. 在中低风速下颗粒在背风面的沉积率高于在迎风面的沉积率,而在高风速下颗粒在背风面的

沉积率低于在迎风面的沉积率.

d. 随着风速从中低风速增加到高风速,沉积在迎风面和道路表面的颗粒数增加,而沉积在背风面和建筑物屋顶的颗粒数减少.

参考文献:

- [1] Chan T L, Dong G, Leung C W, et al. Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(5): 861-872.
- [2] Xie S D, Zhang Y H, Li Q, et al. Spatial distribution of traffic-related pollutant concentrations in street canyons[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(23): 3213-3214.
- [3] Niachou K, Livada I, Santamouris M. Experimental study of temperature and airflow distribution inside an urban street canyon during hot summer weather conditions. Part II: Airflow analysis[J]. Building and Environment, 2008, 43(8): 1393-1403.
- [4] Christof G, Ruck B. Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon-experimental investigation of the flow and concentration field[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(16): 3287-3302.
- [5] Gromke C, Ruck B. On the impact of trees on dispersion processes of traffic emissions in street canyons[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2009, 131(1): 19-34.

(下转第 102 页)

不妨记 $x = x_\alpha, y = y_\beta, x_\alpha \cdot y_\beta = z_{\alpha\beta} \in M_{\alpha\beta}$, 于是

$$(x_\alpha \cdot y_\beta)\theta = z_{\alpha\beta}\theta = e_{\alpha\beta} = e_\alpha \cdot e_\beta = x_\alpha\theta \cdot y_\beta\theta$$

故 θ 为 C^* 到 N 的局部同态映射. 令 $S = C^* \dot{\cup} N$, 在 S 上定义以下运算“ $\circ$ ”

- a. $(\forall x, y \in C^*) x \circ y = xy$ 在 C^* 中;
- b. $(\forall x \in C^*, n \in N) x \circ n = x\theta \cdot n$ 在 N 中;
- c. $(\forall x \in C^*, n \in N) n \circ x = n \cdot x\theta$ 在 N 中;
- d. $(\forall \alpha, \beta \in N) \alpha \circ \beta = \alpha\beta$ 在 N 中.

则 S 关于运算“ $\circ$ ”成 Cwrpp 根的 Cwrpp 扩张半群, 由定理 4 知 S 是一个有强 Cwrpp 根 N 的 CRCE - 半群. 这里指出: 由于

$E(S) = E(N) \dot{\cup} E(C^*) = E(N) \dot{\cup} \{1_\alpha\}_{\alpha \in Y} \neq N$ 故 S 不是文献[3]中的左 Cwrpp(右 Cwrpp) - 半群, 也不是文献[5]中的完备 Wrpp 半群(见文献[3, 5 - 7]). 这说明 CRCE - 半群具有独特意义.

参考文献:

- [1] Fountain J B, Abundant semigroups [J]. Proc London Math Soc, 1982, 44(3): 103 - 129.
- [2] Tang X D, On a theorem of C-wrpp semigroup [J]. Comm Algebra, 1997, 25(5): 1499 - 1504.
- [3] Du L, Shum K P. On left C-wrpp semigroups [J]. Semigroup Forum, 2003, 67(3): 373 - 387.
- [4] Clifford A H, Preston G B. The algebraic theory of semigroups [M]. Providence: American Mathematical Society, 1961.
- [5] Guo X J, Shum K P, Guo Y Q. Perfect rpp semigroups [J]. Comm Algebra, 2001, 29(6): 2447 - 2459.
- [6] Fountain J B, Right pp monoids with central idempotent [J]. Semigroup Forum, 1996, 53(1): 229 - 237.
- [7] 高振林, 吴小宝. $C\text{-}\rho_R$ rpp 半群的结构特征[J]. 上海理工大学学报, 2012, 34(1): 48 - 50.

(上接第 54 页)

- [6] Ahmad K, Khare M, Chaudhry K K. Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections—a review [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93(9): 697 - 717.
- [7] Huang Y D, Hu X N, Zeng N B. Impact of wedge-shaped roofs on airflow and pollutant dispersion inside urban street canyons [J]. Building and Environment, 2009, 44(12): 2335 - 2347.
- [8] Li X X, Liu C H, Leung D Y C, et al. Recent progress in CFD modeling of wind field and pollutant transport in street canyons [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(29): 5640 - 5658.
- [9] Yassin M F. Impact of height and shape of building roof on air quality in urban street canyons [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45 (29): 5220 - 5229.
- [10] 黄远东, 吴文权, 范炳全, 等. 不同建筑物宽高比的街道峡谷内部气流场数值模拟 [J]. 上海理工大学学报, 2005, 27(3): 203 - 206.
- [11] Kumar P, Fennell P, Britter R. Measurements of particles in the 5~1 000 nm range close to road level in an urban street canyon [J]. Science of the Total Environment, 2008, 390(2/3): 437 - 444.
- [12] Nazridoust K, Ahmadi G. Airflow and pollutant transport in street canyons [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94 (6): 491 - 522.