文章编号:1005-0523(2022)06-0103-09

施工扬尘空间扩散影响因素数值模拟研究

胡伟成[1,4],袁紫婷[2],陈华鹏[1,4],刘 伟[3],邢浩然[3],王永祥[3],金峻炎[3],孙世龙[3]

(1. 华东交通大学交通运输工程学院,江西 南昌 330013;2. 南昌交通学院土木建筑学院,江西 南昌 330100;
3. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013;4. 华东交通大学智能交通基础设施研究所,江西 南昌 330013)

摘要:围挡高度和来流风速是影响施工扬尘空间扩散的主要因素。以北京市某工地为例,选取某个时期的施工扬尘数据进行数值模拟,并与工地实测扬尘浓度数据进行对比验证。通过分析工地施工期间的气象风速资料,选取2,3,4,5,7 m/s和9 m/s共6种指数律剖面来流风速,以及1.8,2.0,2.2,2.5,2.8 m和3.0 m共6种围挡高度,进行施工扬尘空间扩散的数值模拟,对比分析不同围挡高度和来流风速下施工扬尘的空间分布与扩散特性。为综合评估施工扬尘对人体及外界环境的影响,提出将呼吸高度0.5~1.5 m范围内的平均扬尘排放率和扬尘的逃逸比作为评估指标。结果表明:6种来流风速下,3.0 m围挡高度的平均扬尘排放率指标整体最低,扬尘污染对人体的危害最小;相同风速下,6种围挡高度的扬尘逃逸比基本一致,对外界环境的影响程度相同;来流风速为3 m/s时,施工扬尘对人体的危害最大;来流风速为5 m/s时,施工扬尘对外界环境的危害最大。

关键词:计算流体动力学;施工扬尘;围挡高度;来流风速;排放率;逃逸比

中图分类号:U417;X531 **文献标志码**:A

本文引用格式:胡伟成,袁紫婷,陈华鹏,等. 施工扬尘空间扩散影响因素数值模拟研究[J]. 华东交通大学学报,2022,39(6):103-111.

Numerical Simulation Study on the Factors Influencing the Spatial Dispersion of Construction Dust

Hu Weicheng[1,4],Yuan Ziting[2],Chen Huapeng[1,4],Liu Wei[3],Xing Haoran[3],Wang Yongxiang[3],Jin Junyan[3],Sun Shilong[3]

(1. School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Civil Engingeering and Architccture, Nanchang Jiaotong Institute, Nanchang, 330100, China; 3. School of Civil Engingeering and Architccture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 4. Institute for Smart Transportation Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract:The fence height and incoming wind velocity are the main factors affecting the spatial dispersion of construction dust. Taking a construction site in Beijing as an example, the construction dust data of a certain period was selected for CFD simulation, and the results were compared with the actual measured dust concentration data of the site for verification. By analyzing the meteorological wind velocity data during the construction period of the site, 6 kinds of incoming wind velocities of 2,3,4,5,7 m/s and 9 m/s with exponential law were selected, and 6 kinds of fence heights of 1.8, 2.0, 2.2, 2.5, 2.8 m and 3.0 m were chosen. The CFD simulations were conducted to compare and analyze the spatial distribution and dispersion characteristics of construction dust under different fence heights and incoming wind velocities. In order to comprehensively evaluate the impact of construction dust on the human body and external environment, the averaged dust emission rate in the range of breathing height 0.5~1.5 m and the dust fugitive ratio were proposed as evaluation indexes. The results show that

收稿日期:2021-12-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52208479,51978263);浙江省博士后科研择优资助项目(ZJ2022037);江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ210657);江西省高校人文社会科学研究项目(GL21225)

the averaged dust emission rate of 3.0 m fence height has the lowest overall index at the six incoming wind velocities, indicating that dust pollution has the least harm to the human body. The dust fugitive ratios of the six fence heights under the same incoming wind velocity are almost the same, which indicates that the impacts on the external environment are almost the same. The impacts of the construction dust on the human body and the external environment are the most serious when the incoming wind velocity is 3 m/s and 5 m/s, respectively.

Key words: computational fluid dynamics; construction dust; fence height; incoming wind velocity; emission rate; fugitive ratio

Citation format: HU W C, YUAN Z T, CHEN H P, et al. Numerical simulation study on the factors influencing the spatial dispersion of construction dust[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(6): 103–111.

场地平整、基础工程、结构工程及建筑物料运输等建筑施工过程产生的扬尘颗粒是大气污染物的主要来源之一，其对大气中 PM_{10}（可吸入颗粒物，粒径小于 10 μm）和 $PM_{2.5}$（细颗粒物，粒径小于 2.5 μm）的颗粒物浓度贡献率分别可达到 38.9%和 37.7%[1]。这些扬尘颗粒物不仅会对植被和周围环境造成严重的影响，而且会引发人体的各类呼吸系统疾病，严重危害人类的身体健康[2]。

国内外学者从多个角度分析研究了施工扬尘空间扩散特性及危害，包括扬尘化学元素特征[3]、扬尘排放特征[4]和扬尘控制措施[5]等。田刚等[6]通过对北京市某大型建筑工地进行现场实测得到了 132 组相关数据，以此探讨了建筑工地内的 PM_{10} 排放率随风速的变化规律，发现施工扬尘排放强度随风速增大而增加。刘嘉明等[7]探究了西安市夜间土方工程施工的扬尘排放特征，发现土方施工过程产生的扬尘浓度与风速呈负相关。侯亚峰等[8]通过分析北京市土方施工过程产生的扬尘浓度后发现，不同粒径颗粒物浓度均与风速呈负相关。随着计算机水平的提高，数值模拟技术在扬尘空间扩散研究上的应用越来越广[9-10]。邓济通等[11]利用计算流体动力学（computational fluid dynamics，CFD）模拟技术研究了不同围挡高度对土方施工过程产生的扬尘污染情况，结果表明，2.2 m 围挡高度围成的施工工地对外界环境造成的扬尘污染影响最小，且风速越大围挡防止施工扬尘向外界空间扩散的效果越差。阮顺领等[12]针对施工扬尘的空间扩散进行数值模拟分析，发现扬尘浓度随风速增大而逐渐减小。单晓宇等[13]利用 Fluent 软件模拟不同来流风速和围挡离工地距离下的施工扬尘空间扩散，发现围挡后方扬尘浓度随风速增大而减小，围挡离工地较远时更有利于抑制扬尘扩散，且围挡离工地 10 m 时，3.3 m/s 风速下的扬尘浓度达到最高。然而，现有施工扬尘空间扩散数值模拟相关研究考虑的来流大多为均匀流，且扬尘颗粒粒径单一，数值模拟结果未与工地实测数据进行对比验证，结论的科学性与合理性仍有待研究。

本研究以北京市某实际工地数据为基础[14]，来流风速采用指数律风剖面形式[15]，利用 CFD 技术模拟工地附近施工扬尘污染的空间分布与扩散，并与工地实测扬尘浓度数据进行对比验证；对比分析了 6 种围挡高度和 6 种指数律剖面来流风速下的施工扬尘空间扩散特性，为施工扬尘污染管理控制措施的制定提供有力保障。

1 CFD 模拟技术与工程概况

1.1 CFD 模拟理论基础

在施工扬尘污染扩散的 CFD 模拟中，需要准确模拟空气介质的流动以及空气与扬尘颗粒之间的相互作用。空气为连续流体介质，扬尘颗粒为固体介质，可采用离散相对二者进行模拟。CFD 模拟中，由于空气流速较慢，通常假设空气为不可压缩流体[15]。本文采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型求解流场分布，相关控制方程如下

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}(2\nu S_{ij}+\tau_{ij}) \tag{2}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t}+u_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+\varepsilon \tag{3}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+u_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}G_k\frac{\varepsilon}{k}-C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

$$G_k=C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{5}$$

式中：t 为时间，s；x_i 为 3 个坐标分量，m；u_i 为 3 个速度分量，m/s；P 为压强，Pa；k 为湍动能，m^2/s^2；ε 为湍

动能耗散率，m^2/s^3；ρ 为空气密度，kg/m^3；v 为空气运动黏度，m^2/s；，$\tau_{ij}=2v_\tau S_{ij}-2/3k\delta_{ij}$ 为雷诺应力，m^2/s^2；$v_\tau=C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$，为湍流运动黏度，$m^2/s$；$S_{ij}=0.5\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$，为平均速度梯度，$s^{-1}$；$C_\mu$，$C_{1\varepsilon}$，$C_{2\varepsilon}$，$\delta_k$ 和 δ_ε 为模型参数，分别为 0.09，1.44，1.92，1.0 和 1.3。

根据式(1)~式(5)可求解整个流场的风速、压强、湍动能和湍动能耗散率分布，通过指定扬尘颗粒的密度、直径、初始位置和初始速度，即可计算扬尘颗粒的受力状态，从而通过反复迭代预测每个扬尘颗粒的运动轨迹，最终求得整个区域的扬尘颗粒位置和浓度分布。由于扬尘颗粒之间的相互碰撞会造成一定的耗散，且扬尘颗粒会反过来对流场产生一定的影响；本文采用随机轨道模型[16]与双向耦合算法[17]，充分考虑空气与扬尘颗粒的相互作用。

1.2　CFD 模拟入口边界条件

《建筑结构荷载规范》(GB 50009–2012)中规定了 A、B、C、D 共 4 类标准地貌，这 4 类标准地貌中的风速沿高度变化的剖面均满足指数律分布形式，在 CFD 模拟中必须考虑指数律风剖面形式。本文定义 CFD 模拟的入口边界条件[18–19]如下

$$U(z)=U_r(z/z_r)^\alpha \tag{6}$$

$$I_u(z)=I_{10}(z/10)^{-\alpha} \tag{7}$$

$$k(z)=(U(z)I_u(z))^2 \tag{8}$$

$$\varepsilon(z)=C_\mu^{0.75}k(z)^{1.5}/I_u(z) \tag{9}$$

式中：$U(z)$，$I_u(z)$，$k(z)$和(z)分别为地面高度 z 处的平均风速，湍流强度，湍动能和湍动能耗散率；z_r 为参考高度；U_r 为参考高度处的平均风速；α 为风剖面指数，与地貌类别有关，4 类标准地貌的取值分别为 0.12，0.15，0.22 和 0.30；I_{10} 为 10 m 高度处湍流强度，与地貌类别有关，4 类标准地貌取值分别为 0.12，0.14，0.23 和 0.39。

1.3　工程案例概况

以北京市国家游泳中心建筑工地为例[14]，该工地施工期间为 2004 年 5 月至 2005 年 5 月。在施工期间，距离工地围挡 0~105 m 的水平位置布置 8 个测点，测点的水平间隔为 15 m，测点离地高度为 3 m，测量每个测点位置在每个月份的施工扬尘浓度。该工地顺风向长度为 95 m，围挡高度为 2 m。为验证施工扬尘空间扩散 CFD 模拟结果的准确性与可靠性，选取施工阶段达到中期且施工扬尘浓度最高的的 2004 年 11 月的工地监测扬尘浓度数据进行对比验证，重现整个区域的施工扬尘颗粒空间分布与扩散过程。本文选取该工地扬尘监测数据用于 CFD 模拟对比验证的原因在于其扬尘监测数据比较可靠，且工地的相关参数相对比较明确，模拟难度较低。

1.4　施工扬尘污染评估指标

施工扬尘污染的常用评估指标包括扬尘浓度、扬尘排放率以及扬尘逃逸比等。扬尘浓度能够直观表示施工扬尘的污染情况，在评估扬尘污染程度时应用最为广泛[20]。然而，扬尘浓度无法考虑风速对扬尘颗粒的迁移作用而导致的污染加剧效应。与之相比，扬尘排放率是单位时间通过单位面积的扬尘质量，等于扬尘浓度乘以风速[6]，是综合考虑扬尘浓度和风速迁移作用的评估指标。在对比施工扬尘对人体造成危害的严重程度时，多数研究仅考虑 1.5 m 呼吸高度处的扬尘浓度或扬尘排放率大小。然而每个个体的呼吸高度存在显著差异，特别是成人与小孩，成人的平均呼吸高度为 1.5 m 左右，小孩则只有 0.5 m 左右。仅用 1.5 m 呼吸高度处的扬尘污染参数作为评估指标的方法不够全面。本文考虑人体的呼吸高度范围约为 0.5~1.5 m，提出该高度范围内的平均扬尘排放率如式(10)，作为评估施工扬尘对人体危害的指标。

$$R_m=\frac{1}{1.5-0.5}\int_{0.5}^{1.5}R(z)\mathrm{d}z=\int_{0.5}^{1.5}C(z)U(z)\mathrm{d}z \tag{10}$$

式中：R_m 为 0.5 m~1.5 m 呼吸高度范围内的平均扬尘排放率，$\mu g/(m^2/s)$；$R(z)$为高度 z 处的扬尘排放率，$\mu g/(m^2/s)$；$C(z)$为高度 z 处的扬尘浓度，$\mu g/m^3$；$U(z)$为高度 z 处的平均风速。

为评估施工扬尘对外界环境的污染强度，可采用扬尘逃逸比进行对比分析。扬尘逃逸比是指逃离工地的扬尘颗粒数与工地释放的扬尘颗粒数之比，如式(11)。逃逸比越大，表示施工扬尘对外界环境的影响越大[11]。

$$R_{escape}=N_{escape}/N_{emission}\times 100\% \tag{11}$$

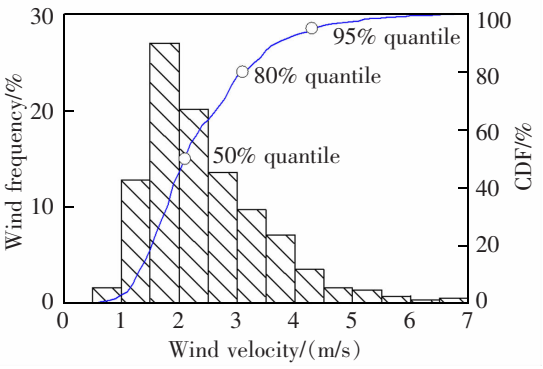
式中：R_{escape} 为扬尘逃逸比；$N_{emission}$ 为释放扬尘数目；N_{escape} 为逃离工地扬尘数目。

2　施工扬尘空间扩散 CFD 模拟验证

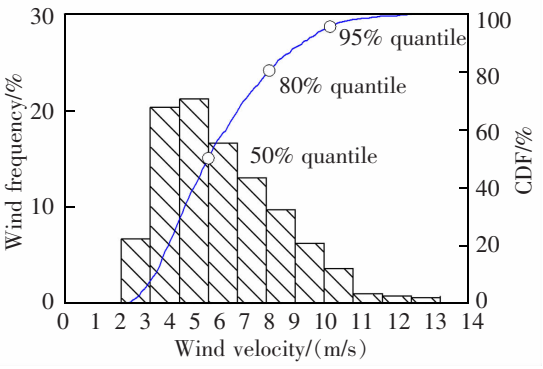
2.1　工程案例气象风速数据分析

由中国气象数据网下载得到施工工地附近的气象风速观测数据(http://data.sheshiyuanyi.com/WeatherData/)，选定离目标工地最近的北京市海淀

区气象站,该气象站的站台编号为54511,气象观测点距离地面高度为31.3 m。工地施工期横跨2004年和2005年,统计分析该气象站2004年1月1日至2005年12月31日这段时期内的日平均风速和日极大风速,绘制风频分布和风速累计分布函数如图1。



(a) Diurnal mean wind velocity



(b) Diurnal max wind velocity

图1 日均风速的风频与累计分布函数

Fig.1 Wind frequency and cumulative distribution function of diurnal mean wind velocity

由图可知,该工地所处地理位置的日平均风速所在区间最大可能为1.5~2.0 m/s和2.0~2.5 m/s,发生概率为27%和20%,日极大风速所在区间最大可能为4~5 m/s和3~4 m/s,发生概率为21%和20%。整体而言,其日平均风速最大可能在2 m/s左右,日极大风速最大可能在4 m/s左右。

为对比研究来流风速对施工扬尘空间分布与扩散特性的影响,针对日平均风速和日极大风速,选择累计分布函数的50%,80%和95%分位点,作为CFD模拟的来流风速。目标工地中,日平均风速的3个分位点对应风速分别为2,3 m/s和4 m/s,日极大风速的3个分位点对应风速分别为5,7 m/s和9 m/s;因此,本文对比的来流风速总计6个,包括2,3,4,5,7 m/s和9 m/s。注意,此处描述的来流风速为气象观测点距离地面高度31.3 m处的平均风速,即式中的参考高度z_r=31.3 m,参考高度处平均风速U_r为来流风速,CFD模拟时入口风速按照式的指数律剖面给定。

在对比分析之前,需要先验证CFD模拟结果的准确性与可靠性。本文以目标工地2004年11月的扬尘浓度监测数据[14]为对比对象,进行施工扬尘空间扩散的CFD模拟。根据统计,该工地2004年11月的月平均风速为2.2 m/s,风力等级为2级。根据该工地所处地理位置,确定其为标准B类地貌,可确定式(6)~式(9)的入口边界条件相关参数为:α=0.15,I_{10}=0.14,z_r=31.3 m,U_r=2.2 m/s。

2.2 数值建模

利用商用软件Ansys 14.5的流体力学模块Fluent进行CFD模拟,根据工地特点建立如图2的二维简化数值模型[21-22]。

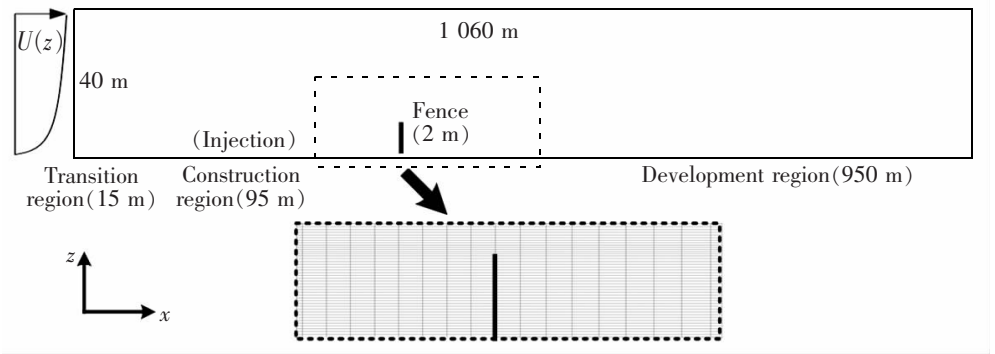


图2 CFD模拟计算域与局部网格示意

Fig.2 Schematic diagram of calculation domain and local grid of CFD simulation

根据工地的实际情况,确定施工区域的长度为95 m。为避免入口来流和出口边界对模拟结果的影响,在施工工地前后分别设置 15 m 和 950 m 的过渡段和尾流发展段,其中尾流发展段的长度为施工区域长度的 10 倍。计算域的高度通常需大于障碍物的 10 倍,本文取为该围挡高度的 20 倍,即为 40 m。因此,整个计算域大小为 1 060 m × 40 m,其中1 060 m 为顺风向(x)长度,40 m 为竖向(z)高度。为准确模拟围挡附近的复杂流动现象,针对围挡附近进行网格加密。在 x 方向,将过渡段、施工段和尾流段分别划分为 15,100 个和 90 个网格,共计 205 个;在 z 方向,将地面至围挡高度和围挡高度至顶部划分为 40 个和 48 个网格,共计 88 个。因此,整个计算域的网格数量总计为 18 040 个。本文采用的网格下近壁面无量纲网格尺度为 42,满足[30,100]范围内要求,可以达到预期模拟精度。

2.3　边界条件与参数设置

本次模拟在四核英特尔酷睿 i7-4790K 处理器上进行,CFD 模拟的相关参数设置如表 1[13,23]。模拟设定收敛准则为 10^{-6},同时监测出口处 3 m 高度处的平均风速,当出口风速变化不大时表明模拟基本趋于稳定。经测定,模拟在 10 000 步后趋于稳定,统计稳定后 10 000 步的平均风速和扬尘浓度数据用于分析研究。

表 1　CFD 模拟参数设置

Tab.1　Parameter settings of the CFD simulations

Object	Parameter	Settings
Solver	Solver	Pressure-based
	Steady/unsteady	Steady
	Gravity acceleration/(m/s^2)	-9.8
	Turbulence model	Standard k-ε
	Algorithm	Simple
	Discretization	Second order upwind
Boundary condition	Inlet	Velocity-inlet
	Outlet	Pressure-outlet
	Top	Symmetry
	Ground	No-slip wall
	Fence	No-slip wall
	Injection	Velocity-inlet
Discrete phase	Model	Discrete phase
	Couple frequency/step	10
	Injection type	Surface
	Discrete random walk model	on
	Boundary trap of particle	on
Dust	Density/(kg/m^3)	1 550
	Diameter distribution	Rosin-Rammler
	Minimum diameter/m	1.81×10^{-7}
	Maximum diameter/m	2.72×10^{-4}
	Mean diameter/m	3.52×10^{-5}
	Spread parameter	2.51
	Number of diameter	10
	Total flow rate/(kg/s)	1.5×10^{-5}
Convergence	Criterion	10^{-6}
	Steps for stability	10 000
	Steps for statistics	10 000

2.4 CFD模拟结果验证

为验证施工扬尘空间扩散CFD模拟结果的准确性与可靠性,将CFD模拟得到的扬尘浓度数据与工地实测扬尘浓度数据进行对比。提取距离围挡水平长度0~120 m,地面高度3 m位置的CFD模拟扬尘浓度数据,绘制扬尘浓度沿水平方向扩散的模拟结果与实测数据对比图,如图3。由图3可以看出,CFD模拟结果与实测数据吻合较好,二者的均方根误差RMSE仅为17.08 μg/m³,决定系数R^2为0.949 3。因此,该施工扬尘CFD模拟的结果较为可靠,为不同围挡高度和来流风速下施工扬尘空间扩散CFD模拟提供了可靠有力支撑。

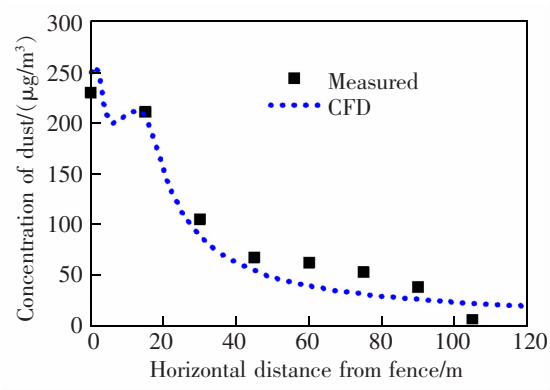


图3 CFD模拟扬尘浓度水平扩散结果验证

Fig.3 Verification of CFD results with horizontal dust concentration diffusion

3 围挡高度和来流风速对施工扬尘空间扩散影响分析

《建筑施工安全检查标准》(JGJ 59-2011)规定一般路段的工地必须设置封闭围挡,且围挡高度不得低于1.8 m,而通常围挡高度最高不超过3 m,因此,本文选取1.8,2.0,2.2,2.5,2.8,3.0 m共6种围挡高度进行施工扬尘空间扩散特性对比研究。来流风速取第2.1节中的6个风速,即2,3,4,5,7 m/s和9 m/s,与围挡高度共构成36组工况。采用CFD模拟技术对比分析不同围挡高度和来流风速对施工扬尘空间扩散特性的影响。

3.1 围挡高度的影响

3.1.1 扬尘浓度水平向分布

由于日平均风速发生频率最高为2 m/s,对比该风速下不同围挡高度的扬尘浓度空间分布。图4为6种围挡高度下1.5 m呼吸高度扬尘浓度沿水平方向的扩散结果。可以看出,围挡高度为1.8,2.5 m和3.0 m时,离围挡水平距离20 m处的扬尘浓度分别为172,154 μg/m³和136 μg/m³,最大差异为26.5%。表明围挡高度越高,则围挡对扬尘扩散的阻挡效应越强,导致扬尘浓度越低。但围挡影响扬尘浓度的水平范围有限,不同围挡高度下在距离围挡水平长度60 m左右基本趋于一致。

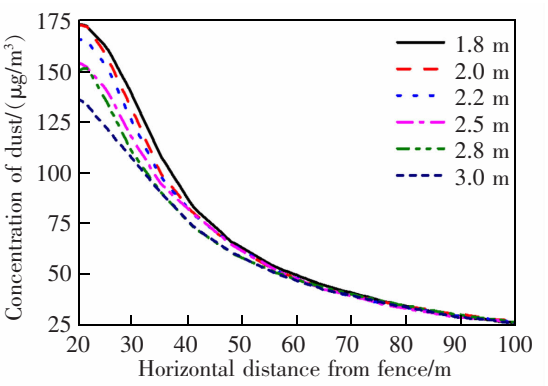


图4 不同围挡高度下1.5 m呼吸高度处扬尘浓度水平扩散结果–来流风速2 m/s

Fig.4 Horizontal dispersion results of dust concentration at 1.5 m breathing height under different fence heights–when incoming wind velocity is 2 m/s

3.1.2 扬尘浓度竖向分布

根据刘伟等[24]的分析结果可知,施工扬尘达到中度污染的最远距离为42 m,超过42 m可视为轻度污染区域,该结论对于本文不同围挡高度的影响分析同样适用。本文取距离围挡水平长度42 m位置处的扬尘浓度进行对比分析,研究不同围挡高度下扬尘浓度沿竖向的扩散特性,如图5。可以看出,在呼吸高度0.5~1.5 m范围内,6种围挡高度的扬尘

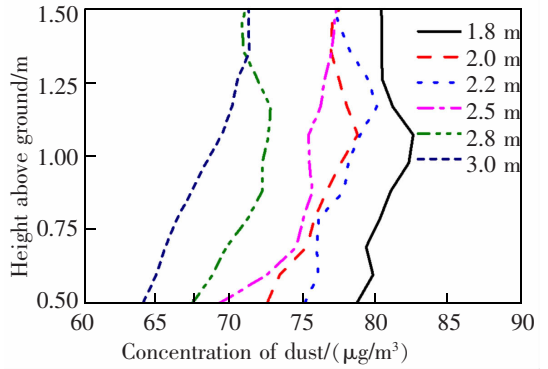


图5 不同围挡高度下离围挡水平长度42 m处扬尘浓度竖向扩散结果–来流风速2 m/s

Fig.5 Vertical dispersion results of dust concentration at 42 m from the fence under different fence heights–when incoming wind velocity is 2 m/s

浓度分别在 79~82,73~78,75~80,70~77,67~72 μg/m³ 和 64~71 μg/m³ 区间内。1.8 m 和 3.0 m 围挡高度导致的扬尘浓度最大差异约为 23.1%。若按照扬尘浓度从高到低排序,则为围挡 1.8 m>2.2 m>2.0 m>2.5 m>2.8 m>3.0 m。整体而言,围挡高度越高,呼吸高度范围内的扬尘浓度越低,扬尘污染越弱。

3.1.3　平均扬尘排放率

为综合考虑扬尘颗粒随风迁移作用及对人体造成的危害,绘制不同围挡高度和来流风速下离围挡水平距离 42 m 处的 0.5~1.5 m 呼吸高度内的平均扬尘排放率,如图 6。可以看出,来流风速为 2,3,4,7 m/s 和 9 m/s 时,3.0 m 围挡高度的平均扬尘排放率 R_m 分别为 7.7,10.0,5.9,5.0 μg/(m²/s) 和 5.0 μg/(m²/s),在 6 种围挡高度中平均扬尘排放率均为最低,比 1.8 m 围挡高度的平均扬尘排放率分别低 51.2%、12.6%、15.0%、21.9%和 19.5%。来流风速为 5 m/s 时,2.8 m 围挡高度的平均扬尘排放率最低,为 5.3 μg/(m²/s),而 3.0 m 围挡高度平均扬尘排放率为 5.8 μg/(m²/s),比 1.8 m 围挡高度的平均扬尘排放率低 8.9%。整体而言,在相同风速下,3.0 m 围挡高度的平均扬尘排放率最低,对人体造成危害最轻。

根据以上分析可知,1.8,2.0,2.2,2.5,2.8 m 和 3.0 m 这 6 种围挡高度中,3.0 m 围挡高度的扬尘浓度和平均扬尘排放率整体最低,即对于阻挡施工扬尘空间扩散的效果最佳,对人体造成的危害最轻,这也与围挡越高阻挡效果越好的认识基本一致。

3.2　来流风速的影响

根据图 7 可以看出,当围挡高度低于 2.6 m 时,来流风速越大,距离围挡 42 m 处的平均扬尘排放率越低,对人体危害越小;当围挡高度高于 2.6 m 时,距离围挡 42 m 处的平均扬尘排放率随来流风速的增加先增大后减小,在来流风速为 3 m/s 时达到最大,即对人体危害最大。对于 3.0 m 围挡高度而言,来流风速为 3 m/s 平均扬尘排放率最高,其次为来流风速 2 m/s,二者相差 28.6%;不同来流风速导致的平均扬尘排放率最大相差 99.0%。

为有效考虑施工扬尘对外界环境的影响,绘制不同围挡高度和来流风速下的扬尘逃逸比,如图 7。可以看出,2 m/s 来流风速时,6 种围挡高度的扬尘逃逸比最大差异为 1.2%;3,4,5,7 m/s 和 9 m/s 来流风速时,6 种围挡高度的扬尘逃逸比最大差异分别为 0.6%,0.9%,0.6%,0.4%和 0.6%。由此可见,相同来流风速时,围挡高度对扬尘逃逸比的影响较小,均小于 1.2%;因此,计算指定来流风速的 6 种围挡高度的扬尘逃逸比的平均值,作为该来流风速扬尘逃逸比的代表值,用于分析来流风速对逃逸比的影响。2,3,4,5,7 m/s 和 9 m/s 这 6 种来流风速的平均扬尘逃逸比分别为 10.6%,11.3%,12.5%,13.2%,4.5%和 4.9%。可以发现,当来流风速在 2~5 m/s 内,扬尘逃逸比随风速的增加而增大,在 5 m/s 时达到最大;当风速超过 5 m/s,扬尘逃逸比突然减小,之后保持不变。这是因为风速较小时,风速越大,扬尘颗粒受到的迁移作用越强,逃出工地的颗粒越多;但当风速达到一定程度时,大部分扬尘颗粒在逃离工地之前,会被围挡阻挡并捕捉,逃离的颗粒反而会大幅减小。整体而言,来流风速在 2~5 m/s 时,施工扬尘对外界环境的危害会随风速的增加而加剧,并在来流风速 5 m/s 时达到最强。

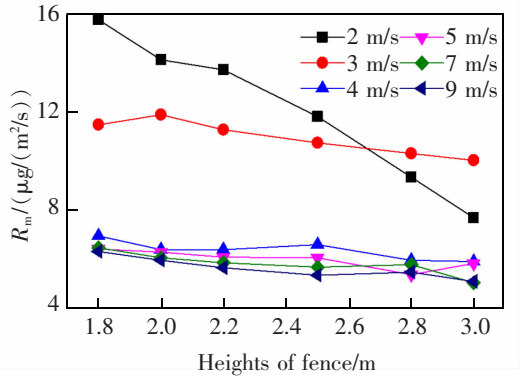


图 6　不同围挡高度和来流风速下离围挡 42 m 的平均扬尘排放率

Fig.6　Average dust emission rate at 42 m from the fence under different fence heights and incoming wind velocities

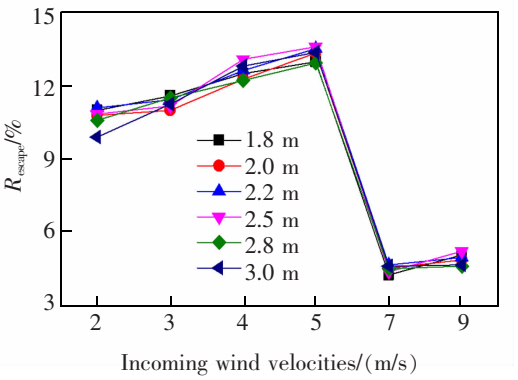


图 7　不同围挡高度和来流风速下的扬尘逃逸比

Fig.7　Dust fugitive ratios under different fence heights and incoming wind velocities

4 结论

1）将施工扬尘空间扩散的CFD模拟结果与工地实测扬尘浓度数据进行对比，发现二者的扬尘浓度RMSE误差仅为17.08 μg/m³。R^2指标为0.949 3，表明二者的结果基本一致，验证了施工扬尘空间扩散CFD模拟结果的准确性与可靠性。

2）对比1.8，2.0，2.2，2.5，2.8 m和3.0 m共6种围挡高度下施工扬尘空间扩散特性，发现相同风速下3.0 m围挡高度的扬尘浓度和平均扬尘排放率整体最低，表明3.0 m围挡高度时能最有效阻挡施工扬尘空间扩散，对人体危害最低。

3）对比2，3，4，5，7 m/s和9 m/s这6种来流风速下施工扬尘空间扩散特性，发现当围挡高度为3.0 m时，来流风速为3 m/s的平均扬尘排放率最高，对人体危害最高，其次为来流风速2 m/s；来流风速在2~5 m/s内，施工扬尘逃逸比随风速增加而增大，并在5 m/s时达到最大，即对外界环境危害最高。

4）本研究是针对北京市某施工工地而言，其结论可作为其它工地扬尘污染控制措施制定的依据，对于特定的工地需针对具体情况进行施工扬尘现场实测或CFD模拟，帮助进行决策。

参考文献：

[1] QIU X H，DUAN L，GAO J，et al. Chemical composition and source apportionment of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in different functional areas of Lanzhou，China[J]. Journal of Environmental Sciences，2016，40(2)：75-83.

[2] MENG J，LIU J F，FAN S M，et al. Potential health benefits of controlling dust emissions in Beijing[J]. Environmental Pollution，2016，213(1)：850-859.

[3] 钟宗莲，刘忠鹏，何军等. 自贡市冬季大气$PM_{2.5}$组分特征分析及来源解析[J]. 环境科学与技术，2021，44(2)：85-89.
ZHONG Z L，LIU Z P，HE J，et al. Characteristic analysis and source analysis of $PM_{2.5}$ chemical components in winter atmosphere of Zigong[J]. Environmental Science & Technology，2021，44(2)：85-89.

[4] 范武波，陈军辉，唐斌雁，等. 成都市施工扬尘排放特征研究[J]. 中国环境科学，2020，40(9)：3767-3775.
FAN W B，CHEN J H，TANG B Y，et al. Dust emission characteristics of construction activities in Chengdu[J]. China Environmental Science，2020，40(9)：3767-3775.

[5] LIU W，TANG P T，LI K，et al. Demolition dust formation，diffusion mechanism and monitoring quantitative research on demolition of existing buildings[J]. Applied Ecology and Environmental Research，2019，17(6)：14543-14559.

[6] 田刚，樊守彬，黄玉虎，等. 风速对人为扬尘源PM_{10}排放浓度和强度的影响[J]. 环境科学，2008，29(10)：2983-2986.
TIAN G，FAN S B，HUANG Y H，et al. Relationship between wind velocity and PM_{10} concentration & emission flux of fugitive dust source[J]. Environmental Science，2008，29(10)：2983-2986.

[7] 刘嘉明，狄育慧，梅源，等. 西安市夜间土方工程施工扬尘排放特征分析[J]. 制冷与空调，2019，33(3)：332-336.
LIU J M，DIU Y H，MEI Y，et al. Analysis on the characteristics of dust emission from earthwork construction at night in Xi′an[J]. Refrigeration and Air Conditioning，2019，33(3)：332-336.

[8] 侯亚峰，邢敏，潘研，等. 北京市土方阶段施工工地扬尘排放特征及关键影响因素分析[J]. 环境污染与防治，2021，43(2)：171-177.
HOU Y F，XING M，PAN Y，et al. Analysis of dust emission characteristics and key influencing factors in earthwork construction of typical construction sites in Beijing[J]. Environmental Pollution & Control，2021，43(2)：171-177.

[9] 许栋，张博曦，及春宁，等. 防风网扬尘庇护区湍流流场模拟数值边界条件[J]. 环境工程学报，2018，12(10)：115-122.
XU D，ZHANG B X，JI C N，et al. Numerical boundary conditions for simulation of turbulent flow field in the shielding zone behind windbreaks[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering，2018，12(10)：115-122.

[10] 张子文，杨帆，吴文豪，等. 输煤皮带巷运煤量对扬尘运移扩散影响的数值模拟[J]. 环境工程学报，2017，11(5)：2967-2976.
ZHANG Z W，YANG F，WU W H，et al. Numerical simulation for effect of coal amount on dust migration and diffusion in belt conveyer roadway[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering，2017，11(5)：2967-2976.

[11] 邓济通，黄远东，张强. 围栏高度对施工扬尘迁移扩散影响的数值模拟研究[J]. 环境工程，2014，32(4)：83-86.
DENG J T，HUANG Y D，ZHANG Q. A cfd study on effects of fence height on migration and diffusion of construction dust[J]. Environmental Engineering，2014，32(4)：83-86.

[12] 阮顺领，金裕，李玲燕，等. 施工场所点源扬尘扩散特征模拟分析[J]. 环境科学与技术，2019，42(S2)：275-279.
RUAN S L，JIN Y，LI L Y，et al. Simulating analysis of point source dust diffusion characteristics in construction sites[J]. Environmental Science & Technology，2019，42(S2)：275-279.

[13] 单晓宇，任高峰. 施工场地扬尘排放运移特征研究[J]. 工

业安全与环保,2019,45(10):56–61.
SHAN X Y,REN G F. Study on characteristics of dust emission and transportation in construction sites[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2019,45(10):56–61.

[14] 田刚,李钢,闫宝林,等. 施工扬尘空间扩散规律研究[J]. 环境科学,2008,29(1):259–262.
TIAN G,LI G,YAN B L,et al. Spatial dispersion laws of fugitive dust from construction sites[J]. Environmental Science,2008,29(1):259–262.

[15] 朱海燕,胡华涛,尹必超. 凸包非光滑表面高速列车气动阻力及噪声研究[J]. 华东交通大学学报,2020,37(4):88–95.
ZHU H Y,HU H T,YIN B C. Research on aerodynamic resistance and noise of high–speed train with convex non–smooth surface[J]. Journal of East China Jiaotong University,2020,37(4):88–95.

[16] 刘洪涛,杜敏. 方管内微细颗粒沉积特性 CFD 预测[J]. 居舍,2018,21(28):47–48.
LIU H T,DU M. CFD prediction of fine particle deposition characteristics in square tubes[J]. Home,2018,21(28):47–48.

[17] VRANCKX S,VOS P,MAIHEU B,et al. Impact of trees on pollutant dispersion in street canyons: A numerical study of the annual average effects in Antwerp,Belgium[J]. Science of the Total Environment,2015,532(1):474–483.

[18] HU W,YANG Q,CHEN H P,et al. Wind field characteristics over hilly and complex terrain in turbulent boundary layers[J]. Energy,2021,224:120070.

[19] 胡伟成,杨庆山,张建. 湍流边界层中三维山丘地形风场大涡模拟[J]. 工程力学,2019,36(4):72–79.
HU W C,YANG Q S,ZHANG J. Les study of turbulent boundary layers over three–dimensional hills[J]. Engineering Mechanics,2019,36(4):72–79.

[20] 刘子亮,谭卓英,李华,等. 司家营铁矿露天运输道路粉尘发生机理及控制[J]. 矿业研究与开发,2021,41(7):93–97.
LIU Z L,TAN Z Y,LI H,et al. Dust occurrence mechanism and its control on open–pit transportation road in sijiaying iron mine[J]. Mining Research and Development,2021,41(7):93–97.

[21] 樊世星. 高瓦斯易自燃采空区瓦斯与遗煤自燃共生灾害研究[D]. 合肥:安徽建筑大学,2016.
FAN S X. Research on prevention technology of symbiosis disaster of gas and residual coal spontaneous combustion of in high gassy and spontaneous combustible goaf[J]. Hefei:Anhui Jianzhu University,2016.

[22] 肖峻峰,许峰,樊世星,等. 大断面综掘巷道长压短抽条件下粉尘运移模拟[J]. 中国安全科学学报,2017,27(2):127–132.
XIAO J F,XU F,FAN S X,et al. Simulation of dust diffusion in fully mechanized excavation face having large cross–section under FPNA ventilation condition[J]. China Safety Science Journal,2017,27(2):127–132.

[23] 陈慧敏,冯星泰,王凤杰,等. 不同因素作用下坦克行驶扬尘浓度分布规律数值模拟[J]. 兵工学报,2018,39(10):1901–1909.
CHEN H M,FENG X T,WANG F J,et al. Numerical simulation on concentration distribution of dust caused by tank moving[J]. Acta Armamentarii,2018,39(10):1901–1909.

[24] 刘伟,袁紫婷,胡伟成,等. 施工扬尘空间扩散特性的模型分析与分级管控措施[J]. 环境工程学报,2021,15(6):1976–1987.
LIU W,YUAN Z T,HU W C,et al. Spatial diffusion characteristics and hierarchical control measures of construction dust[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2021,15(6):1976–1987.



第一作者:胡伟成(1992—),男,讲师,博士,硕士研究生导师,研究方向为结构风工程和大气污染防治。E–mail:weichenghu@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑:姜红贵)