

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.01.016

## 异型建筑风驱雨分布特性数值研究

王 辉, 周 荃, 唐 静

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘 要:**目前关于风驱雨(wind-driven rain, WDR)的研究主要以矩形截面建筑作为研究对象,针对常见的异型建筑 WDR 研究仍比较缺乏,因此揭示该类型建筑的 WDR 分布规律已成为 WDR 领域的重要工作。文章基于欧拉多相流模型的 WDR 数值模拟方法,模拟分析不同风速和降雨强度下 3 类异型建筑 WDR 分布特性及与典型矩形截面建筑 WDR 的差异。结果表明:与矩形建筑立面 WDR 连续分布的情况不同,异型建筑因其特殊外形的干扰,立面 WDR 分布更为复杂;由于迎风立面突出部分能有效减少 WDR 对附近区域的侵袭,转角区域的抓取率趋近于 0;相较于降雨强度,风速对异型建筑立面抓取率的影响更大,当降雨强度保持不变、风速从 2 m/s 增大至 10 m/s 时,抓取率最大值提高 0.8。

**关键词:**风驱雨;异型建筑;欧拉多相流;抓取率

**中图分类号:**TU119.22;V211.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1003-5060(2026)01-0111-08

### Numerical simulation of wind-driven rain distribution on shaped building

WANG Hui, ZHOU Quan, TANG Jing

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** At present, the research on wind-driven rain (WDR) mainly focuses on rectangular buildings, and there is still a lack of research on WDR for commonly shaped buildings. Therefore, revealing the WDR distribution pattern of this type of building has become an essential work in the field of WDR. In this paper, the WDR numerical simulation method based on the Eulerian multiphase (EM) model is used to simulate and analyze the WDR distribution characteristics of three types of shaped buildings under different wind speeds and rainfall intensities, and the differences between the WDRs of the three types of shaped buildings and those of the typical rectangular buildings. The results show that, unlike the case of a continuous distribution of the WDR on the facade of a rectangular building, the facade WDR distribution of shaped buildings is more complicated due to the interference of their particular shapes. As the protruding portion of the windward facade effectively reduces the intrusion of WDR into the neighborhood, the catch ratio in the corner area tends to be 0. Compared to the rainfall intensity, the wind speed has a more significant effect on the catch ratio of the shaped building facade, and the maximum value of the catch ratio is increased by 0.8 when the rainfall intensity is kept constant and the wind speed is increased from 2 m/s to 10 m/s.

**Key words:** wind-driven rain (WDR); shaped building; Eulerian multiphase (EM); catch ratio

风驱雨(wind-driven rain, WDR)是雨滴在风力作用下产生的斜向运动现象。作为建筑壁面最主要的水分来源之一<sup>[1]</sup>, WDR 是影响结构耐久

性和建筑温湿性能的重要因素,可引发诸多工程问题,如墙面渗水、开裂、风化以及污染<sup>[2]</sup>等,甚至危及结构安全。开展建筑外立面 WDR 分布规律

收稿日期:2023-08-02;修回日期:2023-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52468069);亚热带建筑科学国家重点实验室开放课题资助项目(2020ZB24)

作者简介:王 辉(1973—),男,安徽安庆人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: hfutwh@sina.com.

研究,是有效开展 WDR 效应研究和降低建筑雨水灾害的基础。

建筑风驱雨的研究主要采用现场实测、半经验模型和计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)数值模拟<sup>[3-4]</sup>等。现场实测是研究建筑 WDR 的必要方法,但费用高、耗时长,并且容易受到气象条件和雨量计精度的影响。半经验方法因涉及的建筑外形种类有限,其适用范围小,且由于该方法依据长期实测建立,其预测精度不高。随着计算流体力学和计算硬件不断发展,CFD 数值模拟方法能获得完整的 WDR 场分布和可靠的场量结果,因而逐渐成为重要的研究手段<sup>[5]</sup>。文献[6]结合雷诺平均方程和拉格朗日粒子追踪方法(Lagrangian particle tracking, LPT)对 WDR 进行稳态数值模拟;文献[7]将该方法进行扩展,研究在短暂降雨事件中 WDR 随空间和时间的变化。虽然 LPT 是以往研究中评估 WDR 强度最常用方法,但该方法仍然存在一些缺点<sup>[8]</sup>。文献[9]首次采用基于欧拉多相流(Eulerian multiphase,EM)模型的数值模拟方法,获得了更精确的孤立低层建筑迎风立面的 WDR 结果。近年来,EM 模型由于边界处理简便、计算量小、预测信息更多等优点,在 WDR 研究领域均应用越来越广。

建筑立面 WDR 分布受多种因素影响,如建筑外形、风速、降雨强度、雨滴粒径分布、风向、平面布局等<sup>[10]</sup>。在建筑 WDR 的 CFD 研究中仍有一些未解决的关键问题,已有建筑 WDR 研究均针对典型(矩形)截面低矮建筑,当前建筑体型具有多样化、复杂化特点,实际工程较多存在非矩形截面建筑,因此针对复杂外形建筑 WDR,开展有关研究已成为 WDR 领域需要解决的重点问题<sup>[11]</sup>。目前,关于异型建筑的研究主要集中于风荷载单独作用时建筑立面及周围的风压分布情况<sup>[12-13]</sup>,均未涉及 WDR 研究。由于不规则体型,异型建筑的风场将引起更为复杂的 WDR 模式,但目前有关异型低矮建筑 WDR 的研究仍然不够。本文基于 EM 模型的 CFD 模拟方法,针对凹型、L 型、T 型 3 类异型建筑,模拟分析异型建筑 WDR 场和迎风立面 WDR 分布特性,以及其与典型矩形截面建筑 WDR 的差异,并结合风速和降雨强度关键条件的变化,分析获得风速和降雨强度对异型建筑 WDR 影响特性,研究结果对 WDR 理论研究及工程设计具有一定指导意义。

## 1 数值模拟方法

### 1.1 多相流控制方程

以第  $k$  雨相为研究对象,其控制方程为:

$$\frac{\partial \rho_w \alpha_k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_w \alpha_k u_{kj})}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_w \alpha_k u_{ki}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_w \alpha_k u_{ki} u_{kj})}{\partial x_j} = \rho_w \alpha_k g_i + \rho_w \alpha_k \frac{3\mu C_D Re_R}{4\rho_w D_k^2} (u_i - u_{ki}) \quad (2)$$

$$Re_R = \frac{\rho_a D_k}{\mu} |\mathbf{u} - \mathbf{u}_k| \quad (3)$$

其中: $\rho_w = 998.2 \text{ kg/m}^3$  为雨水密度; $\alpha_k$  为第  $k$  雨相在同一直径范围内的体积分量;式(2)右侧第 1 项表示重力源, $g_i$  表示  $i$  向的重力加速度分量;式(2)右侧第 2 项为雨相与风相之间的阻力源,取决于两者之间的相对速度; $Re_R$  为相对雷诺数; $\mathbf{u}_k$  为第  $k$  雨相速度矢量, $u_{ki}$ 、 $u_{kj}$  分别为沿  $i$  向和  $j$  向的分量; $\mathbf{u}$  和  $u_i$  分别为风速矢量和风速分量; $\mu$  为风场黏性系数; $C_D$  为雨滴阻力系数,通常采用多项式拟合确定; $\rho_a$  为空气密度,在标准大气条件下其为  $1.225 \text{ kg/m}^3$ 。

对于风相,采用雷诺平均方程描述风场,用 realizable  $k-\epsilon$  湍流模型进行封闭求解,其控制方程为:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_a u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} + S_{li} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_a k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho_a \epsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho_a \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a \epsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho_a C_1 S \epsilon - \rho_a C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \quad (7)$$

其中: $\tau_{ji}$  代表雷诺应力, $\sigma_k$  和  $\sigma_\epsilon$  分别为湍动能  $k$  与耗散率  $\epsilon$  对应的湍流 Prandtl 数; $G_k$  为由平均风速梯度引起的湍动能产生项; $C_1$ 、 $C_2$  为常数; $S_{li}$  为雨相对风相的动量贡献。

### 1.2 WDR 参数

建筑物立面抓取率计算主要过程如下:① 计算特定抓取率  $\eta_D(D)$ ;② 基于  $\eta_D(D)$  确定抓取率  $\eta$ 。2 种抓取率的表达式为:

$$\eta_D(D) = \frac{R_{\text{wdr}}(D)}{R_h(D)} = \frac{\alpha_D |V_n(D)|}{R_h f_h(R_h, D)} \quad (8)$$

$$\eta = \int_D f_h(R_h, D) \eta_D(D) dD = \frac{1}{R_h} \int_D \alpha_D |V_n(D)| dD \quad (9)$$

其中: $R_h$  表示降雨强度; $R_{wdr}(D)$ 、 $R_h(D)$  分别表示  $R_{wdr}$  和  $R_h$  中粒径为  $D$  的雨滴所占的部分; $\alpha_D$  表示粒径为  $D$  的雨相在该点处的体积分数; $|V_n(D)|$  表示粒径  $D$  的雨相垂直于建筑物表面方向的速度; $f_h(R_h, D)$  表示粒径为  $D$  雨滴的通量分数。

### 1.3 边界条件

对于风相,入口边界水平风速根据大气边界层内的风剖面确定,本文采用指数律,表达式为:

$$U_z = U_b \left(\frac{Z}{Z_b}\right)^\alpha \quad (10)$$

其中: $Z$  为离地高度; $Z_b$  为标准参考高度; $U_z$  为高度  $Z$  处的风速; $U_b$  为标准参考高度处的平均风速; $\alpha$  为地面粗糙度指数,取决于地面粗糙度类别。

对于雨相,在 WDR 控制方程中,考虑到雨滴接触建筑物表面后会有吸附情况,因此对地面、壁面以及出口条件进行特殊处理,数学表达式为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \alpha_k}{\partial n} = 0, \frac{\partial u_k}{\partial n} = 0, & u_k \cdot n > 0; \\ \alpha_k = 0, u_k = 0, & u_k \cdot n < 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中: $n$  为垂直于边界面向计算域外的法向量。

## 2 模拟与分析

### 2.1 计算模型

选取典型的矩形截面及 3 类异型低矮建筑(凹型、L型和 T型)模型如图 1 所示。

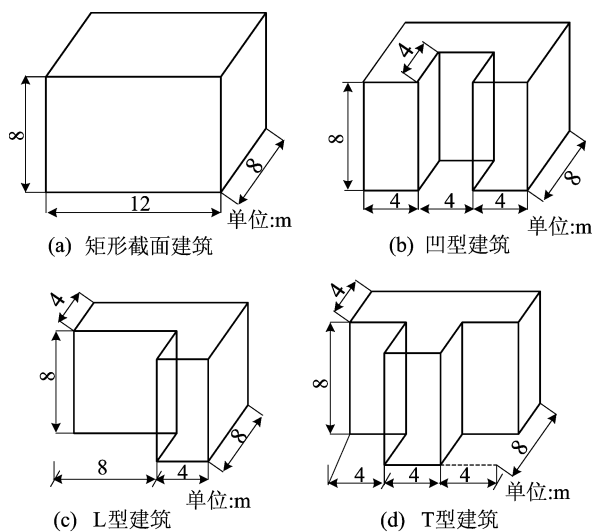


图 1 建筑几何模型

外围的尺寸( $L \times B \times H$ )均为  $12 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ 。取参考风速  $U_{10}$  分别为 2、5、10 m/s,降雨强度  $R_h$  分别为 2、10、30 mm/h,考虑风向垂直于建筑立面情况,地貌取 B 类。根据体积分数占优原则,在 0.5~4.0 mm 范围内取 12 种代表性雨滴粒径(0.5~1.0 mm 区间按 0.1 mm 递进,1.0~2.0 mm 按 0.25 mm 递进,2.0~4.0 mm 按 1.0 mm 递进)。

根据文献[14]提出的原则,建筑至计算域入口、两侧和顶面的距离为建筑高度的 5 倍,至计算域出口的距离至少为建筑高度的 15 倍,计算域设置如图 2 所示,由此确定计算域尺寸( $L_x \times L_y \times L_z$ )为  $168 \text{ m} \times 92 \text{ m} \times 48 \text{ m}$ 。

将计算域入口边界设置为速度入口,顶面设为剪应力为 0 的滑移壁面,出口设为自由出流,侧面设为对称边界,建筑物表面和地面均设置为无滑移壁面。其中地面的粗糙度值设为 0.03 m、建筑表面的粗糙度值为 0。

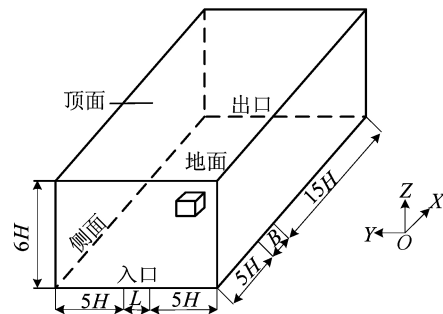


图 2 计算域设置

由于建筑的几何形状较为规则,采用结构化六面体单元,控制近地面处第 1 层网格尺寸为  $0.015H$  ( $H$  为建筑高度),近建筑壁面处第 1 层网格尺寸为  $0.005H$ 。此外,2 个连续网格间的增长率小于 1.3。选取矩形截面建筑进行网格无关性分析,通过 2 倍加密的方式分别获得粗( $120 \times 10^4$ )、中( $194 \times 10^4$ )、细( $251 \times 10^4$ )3 种网格。选取以迎风面和背风面  $0.1H$  距离的  $2H$  高度的竖直中线为参考线,通过比较该位置的风速与参考风速( $U_{ref} = U_{10} = 10 \text{ m/s}$ )的比值分析网格质量,测线位置与无关性分析结果如图 3 所示。3 种网格之间的偏差均在 10% 以内。为保证计算效率和计算精度,选择中质量网格作为计算网格。最终 4 类建筑网格设置如图 4 所示,按中网格设置方法,确定矩形、凹型、L 型、T 型截面的建筑网格数分别为  $194 \times 10^4$ 、 $263 \times 10^4$ 、 $245 \times 10^4$ 、 $255 \times 10^4$ 。

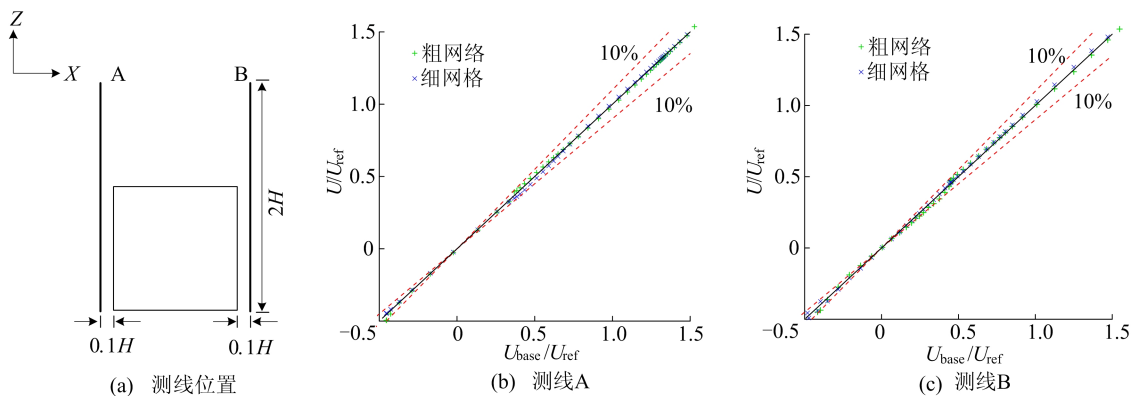


图 3 网格无关性分析

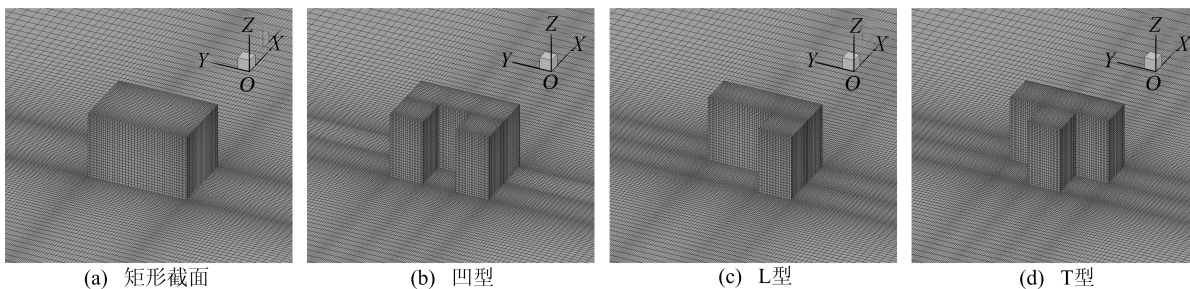


图 4 建筑网格设置

### 2.2 建筑形式对 WDR 的影响

以  $U_{10}=10\text{ m/s}$ ,  $R_h=10\text{ mm/h}$  为条件分析建筑形式对 WDR 的影响,建筑迎风立面的 WDR 抓取率如图 5 所示。由图 5 可知,4 类建筑抓取率最大值均出现于迎风立面顶部两端区域。竖直方向上,各建筑迎风立面抓取率值均随着高度的增加而增大。矩形建筑、凹型建筑和 T 型建筑由于形状对称,其抓取率也沿竖直中心对称线呈对称分布。

水平方向上,矩形截面建筑抓取率由中间向两侧区域增长;3 类异型建筑的迎风突出立面抓取率分布模式和矩形截面建筑相似,但由于迎风立面突出部分对附近有一定的遮蔽作用,导致迎风缩进立面的抓取率在转角区域骤降。越靠近转角区域以及立面中下部,抓取率的值越趋近于 0。

4 类建筑的风场流线和水平风速云图如图 6 所示。

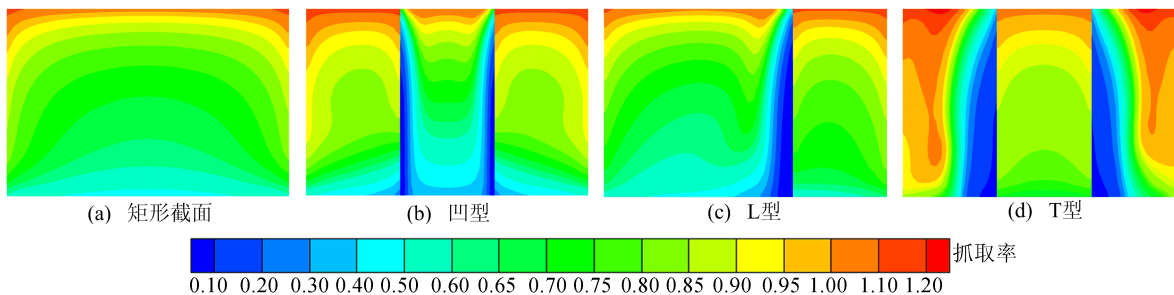


图 5 建筑迎风立面 WDR 抓取率分布云图

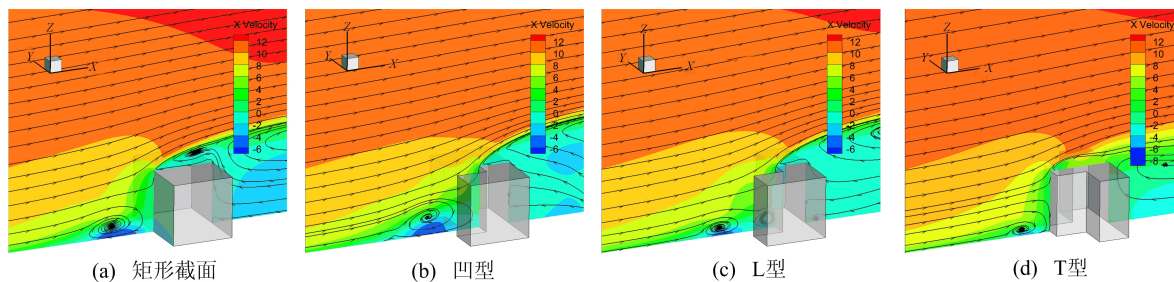


图 6 建筑竖向中心剖面处风速云图及风场流线

由于建筑物的阻挡,风场流线在靠近建筑物时开始弯曲,并在大约 2/3 高度位置处产生分离,部分气流向上爬升越过建筑,部分向下弯曲形成涡旋,且风速在屋面前角区域分离后加速流动,背风面区域形成的再循环尾迹区存在较大的马蹄涡。4 类建筑中,矩形建筑前方的涡旋范围较大,屋顶气流的再附着现象最明显。凹型建筑和 L 型建筑迎风立面的涡旋延伸至内凹区域,其中 L 型建筑的涡旋范围更小,但数量更多,T 型建筑突出部分前沿的马蹄涡范围最小。

由于异型建筑立面抓取率在水平方向上的变化更为显著,为定量分析典型建筑和异型建筑迎风立面 WDR 分布特性的差异,选取建筑立面上不同高度  $Z=1\text{ m}$ 、 $Z=4\text{ m}$ 、 $Z=7\text{ m}$  处 3 条水平

直线上的抓取率进行对比,抓取率变化趋势如图 7 所示。

由图 7 可知,3 条水平参考线的抓取率沿高度依次递增,在  $Z$  分别为 1、4、7 m 时,4 类建筑的抓取率平均值分别为 0.65、0.81、0.95。

在同一高度处,矩形截面建筑迎风立面的抓取率在水平方向上的变化比较平缓,而 3 种异型建筑迎风面的抓取率变化则较为剧烈,表现在立面凹角转角区域抓取率骤降并均趋近于 0,逐渐远离此区域,抓取率迅速增大。在相同高度处,各建筑立面抓取率峰值从高到低依次为 T 型建筑、凹型建筑、L 型建筑、矩形截面建筑,表明在外围尺寸相同的情况下,异型建筑立面 WDR 量更多。

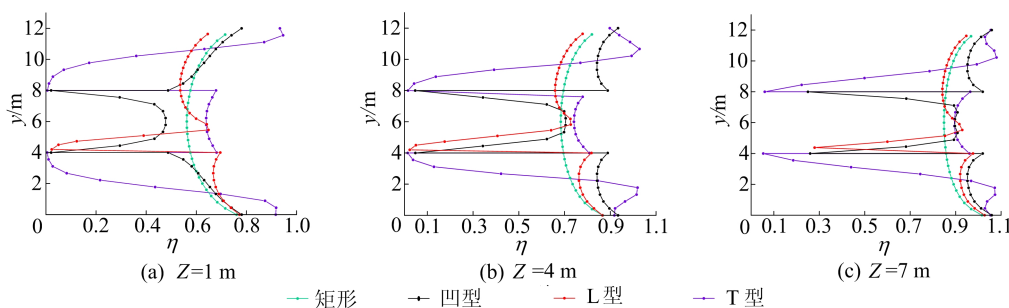


图 7 抓取率沿 3 条水平线的分布

### 2.3 雨滴粒径对 WDR 的影响

当  $U_{10}=10\text{ m/s}$ 、 $R_h=10\text{ mm/h}$  时,4 类建筑

迎风立面上粒径  $d$  为 0.5、4.0 mm 雨滴的特定抓取率如图 8 所示。

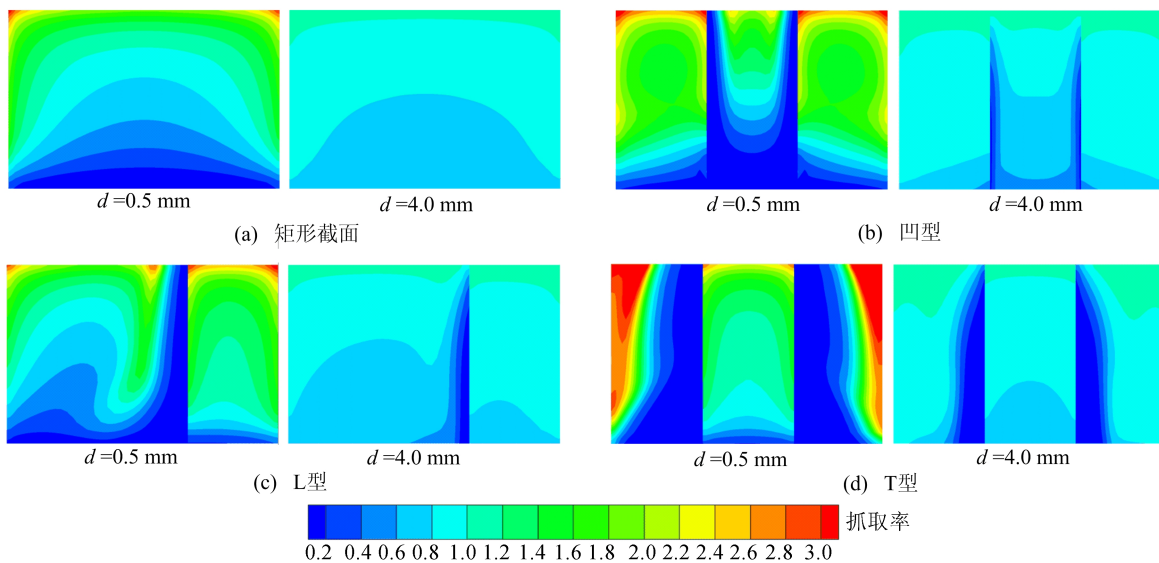


图 8 建筑迎风立面特定抓取率

从图 8 可以看出,迎风立面上不同粒径雨滴的抓取率分布存在显著差异。0.5 mm 雨滴的特

定抓取率数值变化剧烈,而 4.0 mm 雨滴的特定抓取率变化较为平缓,抓取率数值相近。在建筑

立面靠近地面的区域,4.0 mm 粒径雨滴的抓取率普遍大于 0.5 mm 雨滴的抓取率;在建筑顶部尤其是两端区域,0.5 mm 雨滴的抓取率则明显大于 4.0 mm 粒径雨滴。

由图 8b~图 8d 可知,3 类异型建筑转角区域的 2 种雨滴特定抓取率均产生骤降现象,其中,0.5 mm 粒径雨滴的抓取率数值骤降程度明显大于 4.0 mm 粒径雨滴。此外,由于降雨过程中小粒径雨滴体积更占优,0.5 mm 粒径雨滴抓取率云图与整体抓取率云图更为相似。

为了探究不同粒径雨滴特定抓取率产生差异

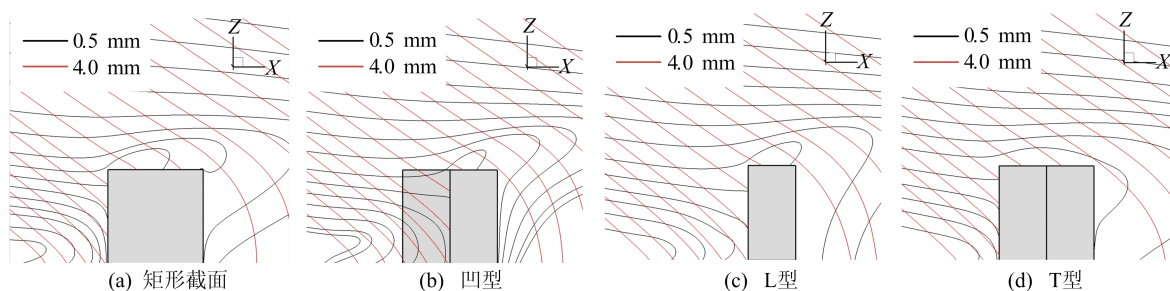


图 9 建筑竖向中心剖面处不同粒径雨滴雨迹线分布

4 类建筑迎风立面水平中线处的雨迹线如图 10 所示。为便于比较,风速和降雨强度条件保持不变( $U_{10} = 10 \text{ m/s}$ ,  $R_h = 10 \text{ mm/h}$ )。小粒径雨滴在 4 类建筑迎风立面水平中线处的分布存在较大差异,随着雨滴粒径的增大,雨迹线分布趋于相似。0.5 mm 雨滴的雨迹线在 3 类异型建筑的转角区域产生涡旋,导致其不易击中立面。而对于 4.0 mm 粒径雨滴,雨迹线未出现明显的涡旋,仅在 3 类异型建筑的转角区域稍有弯曲。

不同粒径雨滴的雨迹线产生差异是由于降雨

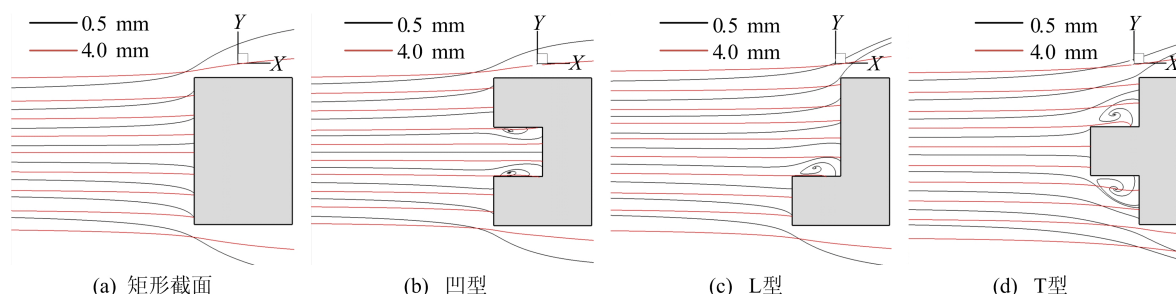


图 10 建筑水平中心剖面处不同粒径雨滴雨迹线分布

#### 2.4 风速及降雨强度对 WDR 的影响

其他条件一定时,同一建筑迎风立面的抓取率由参考风速  $U_{10}$  和降雨强度  $R_h$  确定。为定量分析风速对典型矩形建筑和 3 类异型建筑立面

的原因,分别选取最小粒径(0.5 mm)和最大粒径(4.0 mm)雨滴在建筑迎风立面处的雨迹线进行分析,4 类建筑迎风立面竖直中线处的雨迹线如图 9 所示。由图 9 可知,4 类建筑 0.5 mm 雨滴的雨迹线分布差异较大,而 4.0 mm 雨滴的雨迹线分布基本相似。对于 0.5 mm 雨滴,雨场与风场的流线分布趋势大致相似,雨迹线有明显的弯曲现象,迎风立面前端下部的雨滴轨迹几乎垂直于地面而未击中立面。对于 4.0 mm 雨滴,雨迹线向下倾斜的趋势明显,没有形成复杂的涡状流线,与风场流线有明显差异。

过程中需同时考虑雨滴重力和风的拖曳力。小粒径雨滴的阻力系数较大,风对其施加的拖曳力相对其自身重力占据主导地位,且由于其竖向末速度较小,运动轨迹更易受到风的影响。雨滴粒径越小,4 类建筑雨迹线的差异也越大,随着雨滴粒径的增大,4 类建筑的雨迹线分布趋于相似。

图 9、图 10 的雨迹线分布与上文描述的迎风立面抓取率分布规律相符。由于风场的影响,击中 4 类建筑底部与 3 类异型建筑转角区域的小粒径雨滴显著减少,导致这些区域的抓取率极低。

WDR 的影响,保持降雨强度  $R_h = 10 \text{ mm/h}$  不变,取  $U_{10}$  分别为 2、5、10 m/s 进行模拟,4 类建筑迎风立面竖直中线的抓取率在不同高度  $h$  随风速变化的情况如图 11 所示。从图 11 可以看出,

4 类建筑不同风速下的抓取率曲线较为分散,存在量值差异,说明风速的变化对 4 类建筑立面的 WDR 有着显著影响。增大风速能够大幅度提高建筑立面整体抓取率。此外,随着风速增大,抓取率沿高度增大的幅度也变大, $U_{10}=2\text{ m/s}$  时,4 类

建筑立面顶部和底部的抓取率差值均在 0.2 以内; $U_{10}=5\text{ m/s}$  时,立面顶部和底部的抓取率差值约为 0.4; $U_{10}=10\text{ m/s}$  时,立面顶部和底部的抓取率差值可达到 0.6。另外,越接近立面顶部区域,抓取率的变化越剧烈。

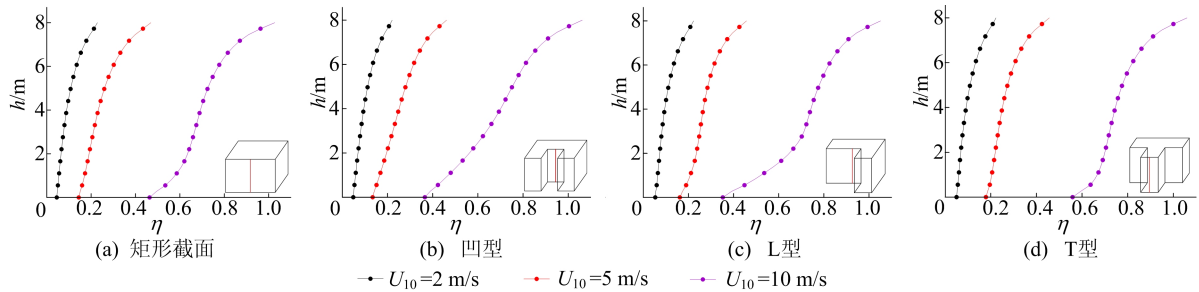


图 11 不同风速下抓取率沿迎风立面竖直中线的分布

为定量分析降雨强度对典型建筑和 3 种异型建筑立面 WDR 的影响,保持风速  $U_{10}=10\text{ m/s}$  不变,取  $R_h$  分别为 2、10、30 mm/h 进行模拟,4 类建筑迎风立面竖直中线的抓取率随降雨强度变化的情况如图 12 所示。

减小,抓取率沿高度增大的幅度变大, $R_h=30\text{ mm/h}$  时,4 类建筑立面顶部和底部的抓取率差值在 0.6 以内; $R_h=10\text{ mm/h}$  时,立面顶部和底部的抓取率差值在 0.7 以内; $R_h=2\text{ mm/h}$  时,立面顶部和底部的抓取率差值可达到 0.9。

从图 12 可以看出,4 类建筑不同降雨强度下的抓取率曲线分布较为集中,表明风速一定时,降雨强度的变化对建筑迎风立面 WDR 的影响微弱。提高降雨强度能够降建筑立面整体抓取率,但随着降雨强度的增大,抓取率的变化幅度减小, $R_h$  从 10 mm/h 增大到 30 mm/h 时,4 类建筑整体抓取率的差值均在 0.05 以内。随着降雨强度

与降雨强度相比,风速对提高建筑立面抓取率的作用更大。随着风速增大,更多雨滴在风的拖拽力作用下击中立面,直接导致建筑立面的抓取率不断增大。当风速由 2 m/s 增大至 10 m/s 时,异型建筑立面抓取率最大值增大 0.8,而降雨强度由 30 mm/h 减小至 2 mm/h 时,抓取率最大值仅增大 0.3。

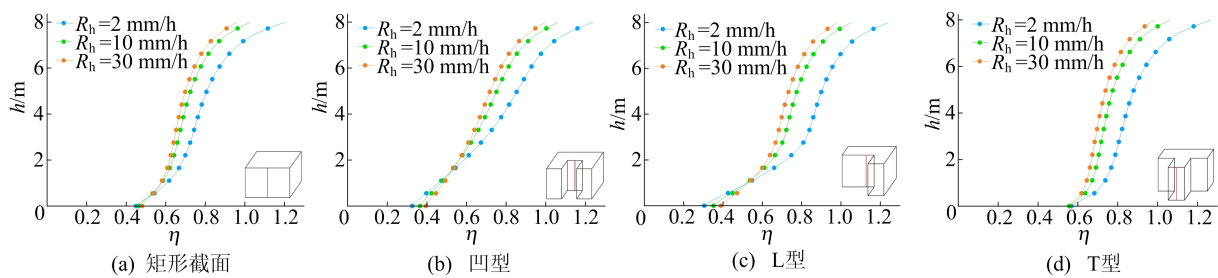


图 12 不同降雨强度下抓取率沿迎风立面竖直中线的分布

### 3 结 论

基于欧拉多相流模型,对典型矩形截面建筑和 3 类异型建筑 WDR 场进行模拟,通过对比分析得出以下结论。

称线呈对称分布。由于 3 类异型建筑的立面突出部分对附近立面有一定的遮蔽作用,导致其迎风收缩立面的抓取率显著降低甚至趋近于 0。由于 3 类异型建筑外表的不规则性,其水平方向上的抓取率变化相比于竖直方向更为显著,其中 T 型建筑的抓取率变化最剧烈。

1) 4 类建筑抓取率的最大值均出现于迎风立面顶部两端区域。矩形截面建筑、凹型建筑和 T 型建筑因其形状对称,抓取率也沿竖直中心对

2) 对于小粒径雨滴,4 类建筑的雨迹线明显差异,尤其在 3 类异型建筑的迎风立面前端和转

角区域;对于大粒径雨滴,4类建筑的雨迹线分布相似。这是由于小粒径的雨滴更易受到风场的影响,导致其雨迹线与风场流线相似,并在建筑立面底部与转角区域产生涡旋且不易击中立面,最终导致相应区域的抓取率趋近于0。

3)降低风速和提高降雨强度均能减小建筑立面WDR抓取率,与降雨强度相比,风速对抓取率影响更大。当风速由2 m/s增至10 m/s时,异型建筑立面抓取率最大值增大0.8;降雨强度由30 mm/h减至2 mm/h时,抓取率仅增大0.3。

### [参 考 文 献]

- [1] BLOCKEN B, CARMELIET J. A review of wind-driven rain research in building science[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2004, 92(13):1079-1130.
- [2] KUBILAY A, CARMELIET J, DEROME D. Computational fluid dynamics simulations of wind-driven rain on a mid-rise residential building with various types of facade details[J]. *Journal of Building Performance Simulation*, 2016, 10(2): 125-143.
- [3] BLOCKEN B, CARMELIET J. Overview of three state-of-the-art wind-driven rain assessment models and comparison based on model theory[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(3):691-703.
- [4] KUBILAY A, DEROME D, BLOCKEN B. High-resolution field measurements of wind-driven rain on an array of low-rise cubic buildings[J]. *Building and Environment*, 2015, 78(8):1-13.
- [5] WANG H, SONG W H, CHEN Y S. Numerical simulation of wind-driven rain distribution on building facades under combination layout[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 188:375-383.
- [6] CHOI E C C. Simulation of wind-driven-rain around a building[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 46(52):721-729.
- [7] BLOCKEN B, CARMELIET J. Driving rain on building envelopes- I : numerical estimation and full-scale experimental verification[J]. *Journal of Building Physics*, 2013, 24(1): 61-85.
- [8] KUBILAY A, DEROME D, BLOCKEN B, et al. CFD simulation and validation of wind-driven rain on a building facade with an Eulerian multiphase model[J]. *Building and Environment*, 2013, 61:69-81.
- [9] HUANG S H, LI Q S. Numerical simulations of wind-driven rain on building envelopes based on Eulerian multiphase model[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(12):843-857.
- [10] BLOCKEN B, CARMELIET J. Spatial and temporal distribution of driving rain on a low-rise building[J]. *Wind and Structure*, 2002, 5(5):441-462.
- [11] DEROME D, KUBILAY A, DEFRAEYE T, et al. Ten questions concerning modeling of wind-driven rain in the built environment [J]. *Building and Environment*, 2017, 114:495-506.
- [12] KAR R, DALUI S K. Wind interference effect on an octagonal plan shaped tall building due to square plan shaped tall buildings[J]. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 2016, 8(1):73-86.
- [13] KIM Y C, TAMURA Y, TANAKA H, et al. Wind-induced responses of super-tall buildings with various atypical building shapes[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, 133:191-199.
- [14] FRANKE J, HELLSTEN A, SCHLUNZEN K H, et al. The COST 732 best practice guideline for CFD simulation of flows in the urban environment; a summary[J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2011, 44(1/2/3/4):419-427.
- [15] EL-TAWIL S, VIDARSSON E, MIKESSELL T, et al. Inelastic behavior and design of steel panel zones[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1999, 125(2):183-193.
- [16] MAO C S, RICLES J, LU L W, et al. Effect of local details on ductility of welded moment connections[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(9):1036-1044.
- [17] 中国建筑标准设计研究院. 高层民用建筑钢结构技术规程:JGJ 99—2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016: 80-81.
- [18] 冯鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. *工程力学*, 2017, 34(3):36-46.

(责任编辑 吴 亮)

(责任编辑 吴 亮)

### (上接第 110 页)

- [12] 郁有升, 王燕, 刘秀丽. 钢框架梁翼缘削弱型节点循环荷载作用下的有限元分析及试验研究[J]. *工程力学*, 2009, 26(9):162-169.
- [13] 屠永清, 刘林林, 叶英华. 多室式钢管混凝土 T 形短柱的非线性分析[J]. *工程力学*, 2012, 29(1):134-140.
- [14] 中冶建筑研究总院. 钢结构焊接规范: GB 50661—2011 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011:31.
- [15] EL-TAWIL S, VIDARSSON E, MIKESSELL T, et al. Inelastic behavior and design of steel panel zones[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1999, 125(2):183-193.

- [16] MAO C S, RICLES J, LU L W, et al. Effect of local details on ductility of welded moment connections[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(9):1036-1044.
- [17] 中国建筑标准设计研究院. 高层民用建筑钢结构技术规程:JGJ 99—2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016: 80-81.
- [18] 冯鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. *工程力学*, 2017, 34(3):36-46.