

超高层建筑单立管排水系统水力工况的数值模拟

赵瑞云¹, 张均锋¹, 张哲², 张磊²

(1. 中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190; 2. 中国建筑
设计研究院 国家住宅与居住环境工程技术研究中心, 北京 100044)

摘要: 利用多相流的数值模拟方法,对超高层建筑单立管排水系统立管中的压力波动情况进行了模拟分析,进而得到压力与流量之间的无量纲关系,并通过试验进行验证。结果表明,模拟结果与排水立管中的压力波动情况基本一致,且压力与流量的平方之间近似呈线性关系。

关键词: 超高层建筑; 单立管排水系统; 压力波动; 数值模拟

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2015)17-0150-05

Numerical Simulation on Hydraulic Regime of Single-stack Drainage System in Super High-rise Building

ZHAO Rui-yun¹, ZHANG Jun-feng¹, ZHANG Zhe², ZHANG Lei²

(1. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. National Engineering Research Center for Human Settlements, China Architecture Design and Research Group, Beijing 100044, China)

Abstract: The air pressure fluctuation in the single-stack drainage system in super high-rise building was simulated and analyzed by multiphase flow numerical simulation method, and the dimensionless relationship between the pressure and flow rate was obtained. The simulation results were verified by tests, and the results showed that the numerical simulation results were basically consistent with the air pressure fluctuation in the single-stack drainage system, and the relationship between the value of air pressure and the square of water flow rate was approximately linear.

Key words: super high-rise building; single-stack drainage system; pressure fluctuation; numerical simulation

超高层建筑(高度 > 100 m)排水系统与普通高层建筑排水系统有很大差异,其在设计要求、难度和成本上都远高于普通高层建筑。由于超高层建筑排水立管长、排水量大、立管内气压波动大而且流动状态十分复杂,因此其排水立管内的气压波动应控制在允许的合理范围内才不至于导致水封破坏,从而避免排水管道返水返臭等影响人们的居住环境。

在超高层建筑排水立管中,因其高度很高,水与管壁、空气的相互作用非常剧烈,在壁面边界层内由于旋转而剥离壁面或与壁面碰撞形成破碎等,都会导致“离散雾化”现象的产生。而“离散雾化”不仅改变了管内空气的组分,大的离散水滴与空气作用,还会加速管内空气速度,进而增大管内负压值以及通气量。“离散雾化”现象在普通高层建筑排水立

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07406002)
通信作者: 张均锋 E-mail: zhangjf@imech.ac.cn

管内也存在, 只是由于高度较低, 管内空气密度变化程度以及由于重力作用形成的静压不至于引起过大的压力变化, 因此并未引起重视。由于计算流体力学控制方程不涉及相间相互作用程度与离散规律的本构模型, 所以“离散雾化”现象能否被很好地辨识与所选模型及网格的划分有密切关系。

以往对于建筑排水系统, 因为做过大量试验研究, 数值模拟结果也与试验相对较为吻合, 因此数值模拟方法得到广泛应用。主要的数值模拟方法有特征线法^[1~3]和直接求解多相流方程方法^[4,5], 其中多相流模型主要有 VOF 法、MIXTURE 法和 EULER 法。笔者采用直接求解多相流控制方程的 EULER 方法, 对超高层建筑单立管排水系统在定流量工况下的压力波动情况进行数值模拟研究, 并通过量纲分析立管内压力与流量间的关系。

1 超高层建筑排水系统的数值模拟

1.1 控制方程

在超高层建筑排水立管中, 实际是气液固三相介质的混合流, 这里只讨论排水时流体介质为气液两相的情况, 以便于同试验做对比验证。

① 质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i v_i) = 0 \quad i=1, 2 \quad (1)$$

式中: ρ_i 为第 i 相的密度, α_i 为第 i 相的组分, v_i 为第 i 相的速度。

② 动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i \vec{v}_i) = -\alpha_i \nabla \cdot p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \sum_{i=1}^n \vec{R}_{ij} + \alpha_i \rho_i \vec{F}_i \quad i, j=1, 2 \quad (2)$$

其中: $\vec{\tau} = -p\vec{I} + \vec{\tau}$, \vec{I} 为单位张量, p 为压力, $\vec{\tau}$ 为粘性应力张量, \vec{F}_i 为体积力, \vec{R}_{ij} 是相间相互作用力。

③ 湍流模型

这里采用混合湍流模型的 $k-\varepsilon$ 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m k) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_{k,m} - C_{2\varepsilon} \rho_m \varepsilon) \quad (4)$$

其中 ρ_m 为混合密度, \vec{v}_m 为混合速度, $\mu_{t,m}$ 为湍

流粘度, $G_{k,m}$ 为湍流动能。

1.2 几何模型与网格划分

因为排水立管为圆形管, 与进水管在单侧方向相交, 因此不能简化为二维模型, 且数值模拟中的几何模型与实际模型比例为 1:1。由于超高层建筑排水系统是一个非常复杂且极其不稳定的系统, 前面提到的“离散雾化”现象能否很好地被辨识也与网格的划分有着密切的关系, 所以几何模型的网格划分是至关重要的, 特别是在流动状态发生改变的关键部位, 网格划分更需加密(如图 1 所示)。

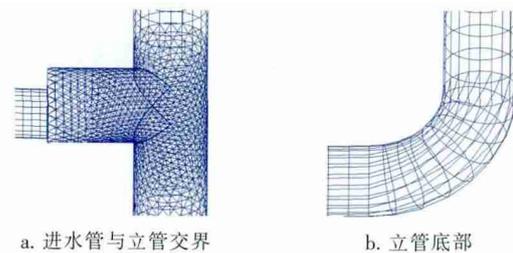
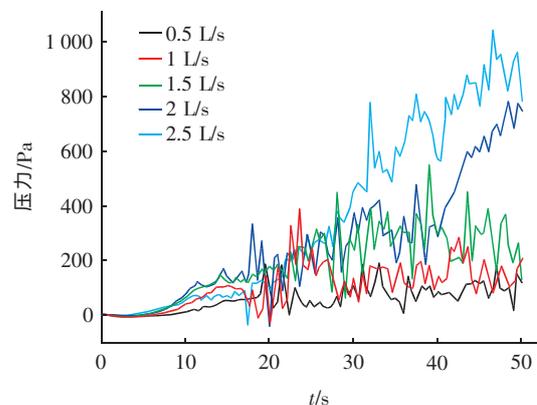


图 1 排水立管关键部位网格划分

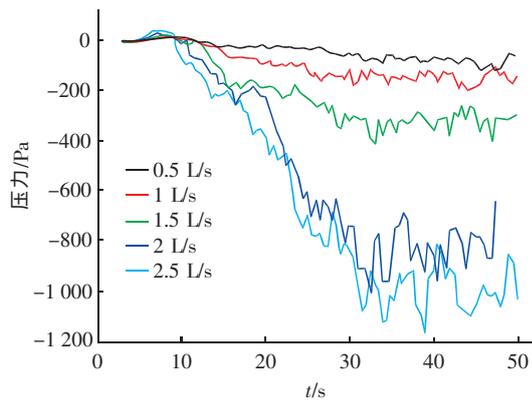
Fig. 1 Divided meshes in key parts of stack

1.3 数值模拟工况与结果分析

以 33 层超高层建筑单立管伸顶通气排水系统为例(与实际试验装置一致), 固定排水高度为 31 层。立管顶部和底部均为压力边界条件, 31 层入口设为速度边界条件。分别对流量为 0.5、1、1.5、2、2.5 L/s 的情况进行模拟计算。图 2~5 给出了不同流量下的模拟结果, 其中图 2 为最大正压和最大负压(并称为特征压力)位置处压力的变化情况; 图 3 为流动达到稳定后整个立管内压力的分布规律, 同时给出了从进水管处立管内的流态情况(见图 4); 图 5 为同时计算的表征伸顶通气量的立管顶部速度随时间的变化特征。



a. 1 层的压力变化



b. 27层的压力变化

图2 特征压力位置处压力随时间的变化

Fig. 2 Pressure fluctuation with time in position of characteristic pressure

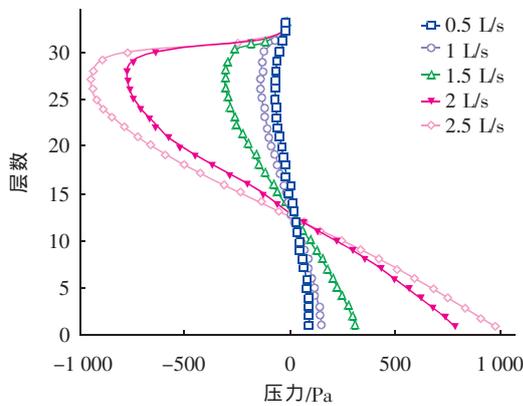


图3 给水稳定后立管中的压力分布

Fig. 3 Pressure distribution in stack at stable status

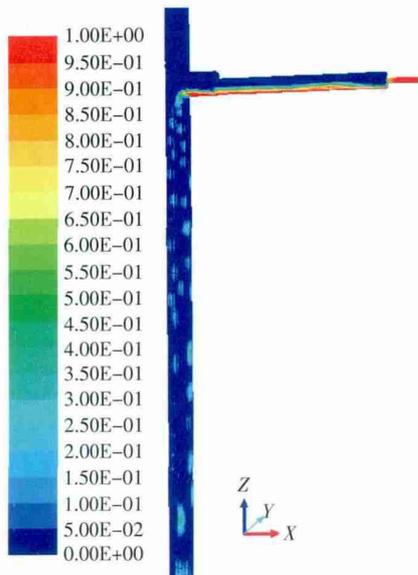


图4 排水量为2.5 L/s时立管中的流态

Fig. 4 Flow status in stack with flow rate of 2.5 L/s

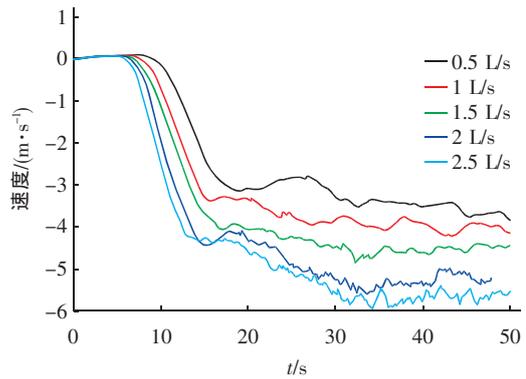


图5 立管顶部通气速度随时间的变化

Fig. 5 Ventilation speed over time of stack

从图2~5可知,随着流量的增加,各层压力的绝对值以及顶部速度的绝对值也在增加。由图4可知,最大负压发生在27层附近,最大正压发生在立管底部,零压力值出现在13层附近。最大负压与最大正压以及零压值所发生的位置与流量没有明显的关系,而是与排水高度、管径等其他因素有关。

2 试验结果与分析

2.1 试验简介

试验在国家住宅与居住环境技术研究中心的试验基地进行。楼层为33层(高度为104 m),排水管道为普通的PVC-U单立管系统,试验设置工程外径DN150排水立管,每层采用直三通与工程外径DN100的横支管相连接,楼层间隔为3 m。底部采用弯头与排水横主管连接,排水横主管直管段管长为21 m。试验过程中采用电磁流量计控制给水量,在靠近排水立管附近的横支管内安装压力传感器,试验装置示意图图6。

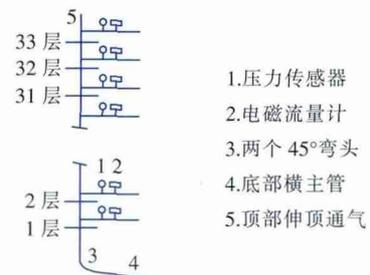


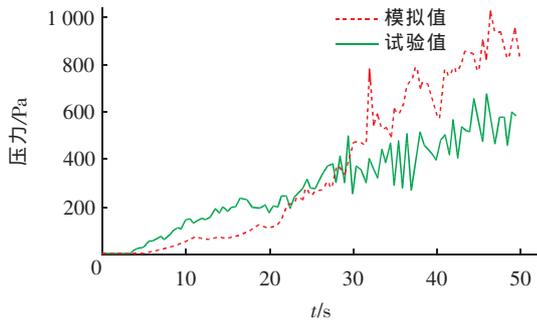
图6 试验装置示意

Fig. 6 Schematic diagram of experimental setup

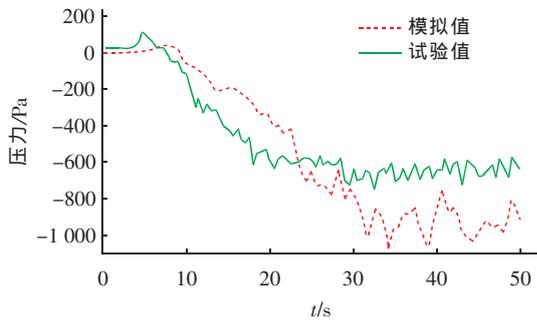
2.2 试验结果与分析

以典型的排水量为2.5 L/s工况下的模拟结果与试验结果进行对比。图7为两个特征压力位置处压力随时间的变化情况,图8为立管内压力的分布

规律, 图 9 为立管顶部的通气速度变化。



a. 1 层的压力变化



b. 27 层的压力变化

图 7 试验中特征压力位置处压力随时间的变化

Fig. 7 Pressure fluctuation with time in position of characteristic pressure

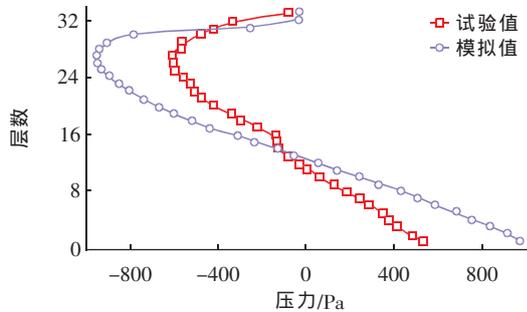


图 8 立管内压力的分布规律

Fig. 8 Pressure distribution law in stack

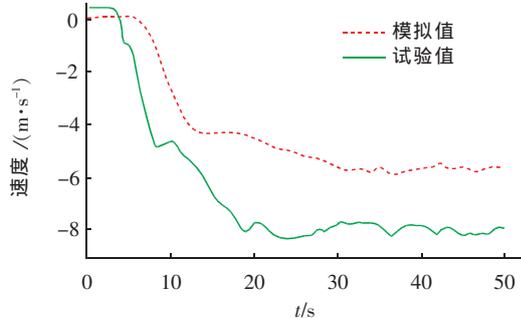


图 9 顶部通气速度随时间的变化

Fig. 9 Ventilation speed over time in stack

由图 7~9 可以看出, 模拟结果和试验结果在压力分布变化特征和数量级上基本一致, 模拟结果的最大负压绝对值和最大正压都大于试验结果, 而顶部通气速度小于试验结果, 量值上最大误差可达 40%。但这只是与单次试验结果比较, 在不同外部环境下的试验结果差异也较大, 有些情况下负压值还大于模拟结果。首先, 超高层排水系统是一个非常复杂且不稳定的系统, “离散雾化”现象在数值模拟中没有很好的模型能加以体现; 其次, 试验过程中, 季节与外界风速、立管内湿度等也会影响立管中的压力波动, 但在数值模拟过程中不考虑上述因素; 再次, 数值模拟过程中不同的离散方法及求解格式也会导致一定的误差。

从量纲分析角度对影响管内压力 P 变化的主要因素进行分析。这些因素有重力加速度 g 、流量 Q_w 、管径 D 、排水高度 H 、水的密度 ρ_w 和粘性 μ_w 以及空气的密度 ρ_a 和粘性 μ_a , 并存在以下关系:

$$P = f(\rho_a, \mu_a; \rho_w, \mu_w, Q_w, D, H, g) \quad (5)$$

取 ρ_a 、 Q_w 、 H 为独立的变量, 式 (5) 可改写为:

$$\frac{P}{\rho_a g H} = f\left(\frac{\rho_a}{\rho_w}, \frac{\mu_a}{\mu_w}, \frac{\rho_w Q_w}{\mu_w D}, \frac{Q_w}{g^{\frac{1}{2}} D^{\frac{5}{2}}}, \frac{H}{D}\right) \quad (6)$$

式 (6) 右端第 3 项为 Reynolds 数, 第 4 项为 Froude 数, 对于立管内流动无明显界面且压力梯度很小时, Froude 数可忽略。此外因为本次模拟仅仅为研究压力波动与流量的关系, 所以当只改变流量而其他因素都固定不变时, 式 (6) 可简化为:

$$P = \rho_a g H \cdot f\left(\frac{\rho_w Q_w}{\mu_w D}\right) \quad (7)$$

式中 ρ_w 和 μ_w 都恒为常数, 由以上的量纲分析可以得出无量纲量 $P_{\max}/\rho_a g H$ 、 $P_{\min}/\rho_a g H$ 与 Q_w/D 之间的关系如图 10 所示。

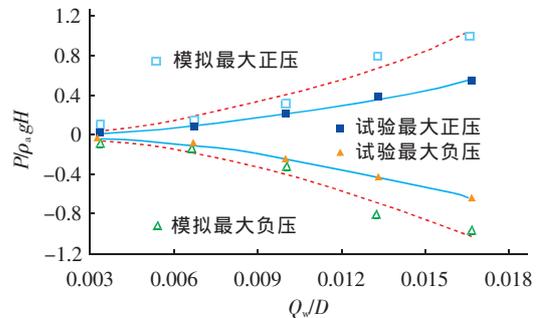


图 10 管内压力与流量的无量纲关系

Fig. 10 Dimensionless relationship between pressure and flow rate

经过拟合可得到压力无量纲量与 Q_w/D 之间的关系式,其中模拟结果为式(8)和(9),试验结果为式(10)和(11)。

$$\frac{P_{\max}^{(s)}}{\rho_a g H} = 2\,429.07 \left(\frac{Q_w}{D}\right)^{1.89} \quad (8)$$

$$\frac{P_{\min}^{(s)}}{\rho_a g H} = 2\,255.84 \left(\frac{Q_w}{D}\right)^{1.88} \quad (9)$$

$$\frac{P_{\max}^{(e)}}{\rho_a g H} = -1\,628.50 \left(\frac{Q_w}{D}\right)^{1.95} \quad (10)$$

$$\frac{P_{\min}^{(e)}}{\rho_a g H} = -1\,658.80 \left(\frac{Q_w}{D}\right)^{1.92} \quad (11)$$

由式(8)~(11)的右端指数项可看出, $P_{\max}/\rho_a g H$ 、 $P_{\min}/\rho_a g H$ 与 Q_w/D 的平方之间都存在近似线性关系。

3 结论

① 超高层建筑与普通高度建筑排水系统中压力变化的本质区别在于:管内水的“离散雾化”现象及其影响。普通高度建筑由于管内空气密度变化程度以及重力作用形成的静压不至于引起过大的压力变化,因此可以不予考虑;而在超高层建筑排水系统中,这种现象导致的压力变化会成倍增加且不可忽视。

② 随着流量的增加,立管中的压力波动情况越来越剧烈,顶部通气速度也越大,但是最大负压和最大正压发生的位置与流量没有明显的关系。

③ 通过量纲分析并拟合模拟和试验结果,得到了立管内最大正压和最大负压与流量的平方之间近似呈线性关系。

参考文献:

- [1] Campbell D P. Surfactant effect on air pressure transients in building drainage, waste and ventilation (DWV) systems [J]. *Build Environ* 2007, 42(5): 1989-1993.
- [2] Cheng C L, Mui K W, Wong L T *et al.* Characteristic of air pressure fluctuations in high-rise drainage stacks [J]. *Build Environ* 2010, 45(3): 684-690.
- [3] Wong E S W, Li Y, Zhu Z. Predicting air pressure in drainage stack of high-rise building [J]. *Appl Math Mech* 2013, 34(3): 351-362.
- [4] 刘慧,程浩,张振,等.单立管建筑排水系统水力工况的数值模拟研究[J].*哈尔滨商业大学学报:自然科学版* 2011, 27(1): 107-111.
- [5] 陈霞.基于 FLUENT 的建筑排水系统模拟仿真分析[D].天津:天津大学,2012.



作者简介:赵瑞云(1989-),女,山西运城人,硕士研究生,主要从事工程力学研究。

E-mail: zhaoruiyun@imech.ac.cn

收稿日期:2015-03-14

