

文章编号:1671-4229(2021)03-0090-05

# 机械排风下建筑内公共卫生间 $\text{NH}_3$ 污染分布特征研究

曾雅娴, 裴清清

(广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 为了得出公共卫生间内点源氨污染对环境的影响,利用数值模拟方法研究某高校公共卫生间垃圾篓作为连续点源稳定释放污染物氨气的分布特征;运用 Fluent 软件模拟换气扇排风时公共卫生间内空气龄和氨气浓度分布。结果表明:在  $y=1.1\text{ m}$ (人员蹲姿高度)、 $y=1.6\text{ m}$ (人员站立高度)平面上,平均空气龄分别为 41 s 及 46 s;在人体呼吸区域附近的氨气浓度为  $0.58\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $0.65\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,超出要求室内氨气质量浓度限值  $0.2\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  的国家标准。该研究可为公共卫生间  $\text{NH}_3$  污染的有效防治提供理论依据。

**关键词:** 公共卫生间;点源;氨气浓度;平均空气龄;数值模拟

中图分类号: TU 83 文献标志码: A

## Distribution characteristics of $\text{NH}_3$ pollution in public toilets of buildings under mechanical exhaust

ZENG Ya-xian, PEI Qing-qing

(College of Civil Engineering Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** In order to find out the impact of point source ammonia pollution on the environment in public restrooms, the distribution characteristics of the pollutant ammonia released stably from the garbage basket in public restrooms of a university were studied by numerical simulation method. Fluent software was used to simulate the air age and ammonia concentration distribution in the public toilet when the ventilation fan was exhausted. The results showed that the average air age was 41 s and 46 s on the plane of  $y=1.1\text{ m}$  (squatting height) and  $y=1.6\text{ m}$  (standing height). The distribution of ammonia mass fraction near the human breathing area was  $0.58\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  and  $0.65\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , both exceeding the concentration limit of  $0.2\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , required by the national standard. This study can provide a theoretical basis for effective prevention and control of indoor  $\text{NH}_3$  pollution.

**Key words:** public toilet; point source pollution; ammonia concentration; average age of air; numerical simulation

有关调查结果表明,大部分民用建筑,其室内的空气污染程度是室外的 2~5 倍,有的甚至超过 100 倍。Sandberg 等<sup>[1]</sup>指出,室内空气污染物的浓度通常高于室外。在高校教学楼中,良好的公共卫生间环境和空气品质对师生的工作、学习和生

活具有重要影响,需要设计合理的气流组织来保证卫生间的空气品质。如果室内缺乏有效通风,就可能产生有害的化学污染物,将会造成学生的健康风险<sup>[2-4]</sup>。因此,改善室内环境质量显得尤为重要。近年来,国内外不少学者对室内污染物

作者简介:曾雅娴(1996—),女,硕士. E-mail:489372735@qq.com

\*通信作者. E-mail:drpei@126.com

引文格式:曾雅娴,裴清清. 机械排风下建筑内公共卫生间  $\text{NH}_3$  污染分布特征研究[J]. 广州大学学报(自然科学版),2021,20(3): 90-94.

进行了相关研究,研究者大多采用数值模拟方法考察室内通风效果和空气污染物迁移扩散的情况<sup>[5-8]</sup>。其中,针对卫生间污染物的研究,Tung等<sup>[8]</sup>通过实验研究了厕所的位置和通风量对通风效率的影响。敖永安等<sup>[9]</sup>运用CFD模拟了卫生间污染浓度分布,表明机械排风更有利于污染物排出;吉少杰等<sup>[10]</sup>对公共卫生间的室内污染物浓度进行了研究,得出门窗侧及风压较大均有利于污染物的排出的结论;汪洋等<sup>[11]</sup>采用数值模拟方法模拟了不同工况下卫生间氨气浓度分布,结果表明顶部送风方式更有利于氨气的排除。国内外关于卫生间的臭气研究,主要集中于以小便池和大便池为主要污染源,但是卫生间基础措施(管道安装、器具合格、冲水彻底)合理以及人员合理如厕(没有排泄物溅出)情况下,便池的存水弯可以有效隔绝臭气反味扩散,此时的卫生间只有垃圾篓中的排泄残留物散发的臭气,其中最主要是垃圾篓中的尿液残留散发的NH<sub>3</sub>。但目前并没有研究讨论污染源为垃圾篓的情况,本文以此为创新点研究垃圾篓散发的NH<sub>3</sub>在室内分布情况。对卫生间配备裸露的垃圾篓,大家已习以为常。进一步审视其作用和污染状况,量化其污染程度,为垃圾即时清扫甚至拆除曝露垃圾篓等卫生管理措施提供数据支持;对改变生活陋习,促进污物分类处置及密闭收集等新技术新产品开发应用,提高人们生活质量,具有现实意义。数值模拟方法是一种较为成熟的研究方法,运用较为成熟的方法解决实际问题具有应用创新的价值。

实质上对于整个卫生间空间来说,垃圾篓氨气释放可看做连续点源污染物向室内扩散过程,文章以公共卫生间的垃圾篓作为点源污染物,用数值模拟的方法研究机械排风时污染物扩散影响及分布情况,为公共卫生间室内污染控制研究提供了理论依据。

## 1 模型建立

以广州某高校教学楼卫生间(模型见图1)为研究对象。该公共卫生间尺寸为5.7 m(长)×4 m(宽)×2.5 m(高),门尺寸为1.5 m×2 m,内设有2个人体模型、8个厕格(各自带1个垃圾篓,共8个,垃圾篓上表面直径0.24 m)、1个洗手台、1个盥洗池和2个换气扇,尺寸为0.6 m×0.6 m。

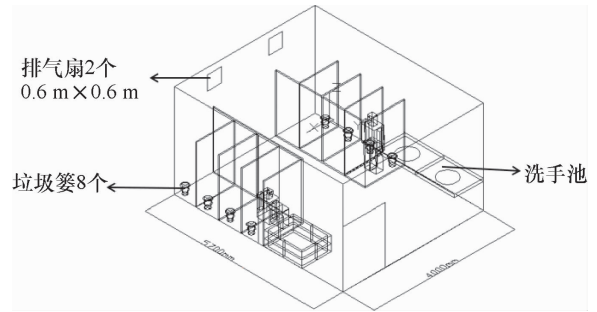


图1 公共卫生间数值模拟的物理模型

Fig. 1 A physical model for numerical simulation of public toilets

## 2 数值模拟研究

### 2.1 数学模型

采用Fluent软件作为数值模拟的工具,模拟过程中的污染物入口采用组分传输模型,气相湍流采用标准K-ε模型;考虑扩散过程中由浮力驱动的自然对流影响;运用有限容积法和SIMPLE格式的压力与速度耦合格式对控制方程进行离散求解<sup>[12-13]</sup>。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

式中, $\rho$ 为体积质量,单位 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $t$ 为时间,单位 $\text{s}$ ;  $u$ 为速度,单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \rho g_i \quad (2)$$

式中, $p$ 为压力,单位 $\text{Pa}$ ;  $\tau$ 为切应力,单位 $\text{Pa}$ 。

能量方程:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + u_x \frac{\partial e}{\partial x} + u_y \frac{\partial e}{\partial y} + u_z \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho} \nabla^2 T + q + \Phi \quad (3)$$

式中, $e$ 为内能,单位 $\text{J}$ ;  $\lambda$ 为导热系数,单位 $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $T$ 为温度,单位 $\text{K}$ ;  $q$ 为单位体积流体的热源,单位 $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\Phi$ 为耗散函数。

数值计算空气龄:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\mu \tau_p) + \frac{\partial}{\partial y}(\nu \tau_p) + \frac{\partial}{\partial z}(\omega \tau_p) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial \tau_p}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma \frac{\partial \tau_p}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma \frac{\partial \tau_p}{\partial z}) + 1 \quad (4)$$

式中, $u, v, w$ 分别为 $x, y, z$ 3个坐标轴方向的速度;  $\Gamma$ 为扩散系数。

污染物组分输运方程:

组分守恒定律表述为微元体存在多种组分且存在质交换。本文主要研究公共卫生间垃圾篓  $\text{NH}_3$  的分布情况,因此,所研究的流体主要为空气与  $\text{NH}_3$  气体的混合气体。组分输运方程如下:

$$\frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i c_s)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D_s \frac{\partial c_s}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

式中,  $\frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t}$  为时间的变化率;  $\frac{\partial(\rho u_i c_s)}{\partial x_i}$  为对流

项;  $\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D_s \frac{\partial c_s}{\partial x_j} \right)$  为扩散项。

## 2.2 网格划分

由于网格质量直接影响计算结果和精度,本文选择非结构网格对公共卫生间计算区域进行划分,并对污染点源、门、换气扇处进行局部加密处理,共划分非结构网格 2 171 018 个,检查网格质量:最小体积为 3.22E-09;最大网格体积为 2.51E-03,均无负体积,故网格检查符合要求(图2)。

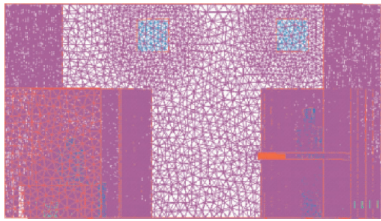


图2 公共卫生间数值模型网格划分结果

Fig. 2 Results of grid division of numerical model of public toilet

## 2.3 边界条件设置

在运用 Fluent 软件进行模拟时,在模拟过程中操作压力采用标准大气压 101.325 kPa,房间温度为 303 K。根据实际情况,对卫生间进行合理简化。

(1)卫生间的门处于常开启状态,设置为压力入口,进风温度为 300 K;换气扇设置为速度出口边界条件,速度设为  $0.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2)卫生间里的人员采用第一边界条件,表面温度设为 309 K。

(3)连续点源污染源垃圾篓向室内扩散氨气视为质量入口边界条件,设置  $\text{NH}_3$  浓度为  $0.33 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

## 3 数值模型可靠性验证

为了验证数值模型的准确性,现场对公共卫生间进行测试,测试点高度为 1.1 m,在 X~Z 平面投影为测试点 1(1 m,2.3 m)、测试点 2(4.3 m,

2.3 m)、测试点 3(1 m,1 m)、测试点 4(4.3 m,1 m)和测试点 5(2.5 m,3.5 m)。选用 testo405i 热线风速仪对室内风速场进行监测,并与数值模拟值进行对比(图3),由于在实际测试中存在如厕人员走动、仪器读数等问题,导致模拟值与实测值不同。结果表明,相对误差在 5%~14% 范围内,并小于 15%。因此,该模型可用于后续数值模拟研究。

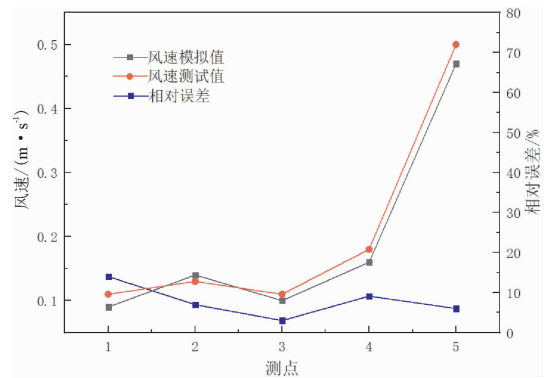


图3 数值模拟风速与实测风速对比

Fig. 3 Comparison between numerical simulation and measured wind speed

## 4 稳定排风时模拟结果分析

### 4.1 室内平均空气龄评估

室内平均空气龄是评价室内空气质量的重要指标,既能反映了室内空气质量的好坏,又可以用于衡量室内空气的换气能力。本文主要考虑  $y = 1.1 \text{ m}$  和  $y = 1.6 \text{ m}$  两个高度,通过模拟得出不同高度下公共卫生间的平均空气龄云图,见图4。由图4(a)和4(b)得到  $y = 1.1 \text{ m}$  和  $y = 1.6 \text{ m}$  平面处平均空气龄分别为 41 s 和 46 s,而且与门同侧的厕格空间内平均空气龄普遍小于异侧的,且越接近门的位置,平均空气龄呈减小趋势。由图4可以得出,随着高度逐渐增大,室内的平均空气龄整体呈增大趋势。

### 4.2 稳定排风时污染物浓度分布

室内污染物浓度能直接反映房间中空气质量的好坏。为了研究公共卫生间在换气扇排风时不同高度下氨气的扩散规律,通过模拟得出  $y = 1.1 \text{ m}$  (人员蹲姿高度)和  $y = 1.6 \text{ m}$  (人员站立高度)这两个不同高度的公共卫生间氨气浓度分布云图,见图5。由图5的氨气浓度不连续性可以明显看出,隔板对氨气抑制效果较为明显,而且与门同侧

的厕格空间内氨气质量分数小于与之异侧的,且越接近门的位置,厕格内的氨气污染散发得到较明显抑制。由于氨气分子质量小于空气分子质

量,引起其向上浮动,呈现出 $y = 1.6\text{ m}$ 的截面上红色区域面积大于 $y = 1.1\text{ m}$ 的截面上的,即随着空间高度的增大,其氨气质量分数则随之增大。

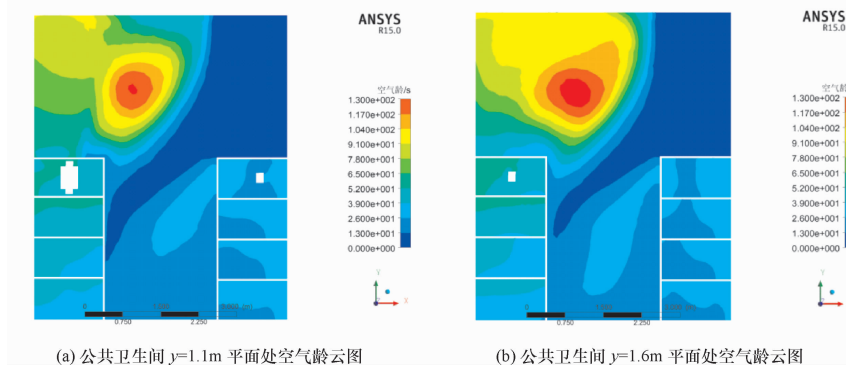


图4 换气扇排风时卫生间不同高度截面处的平均空气龄云图

Fig.4 Average air age cloud map of different height section of toilet when ventilator is vented

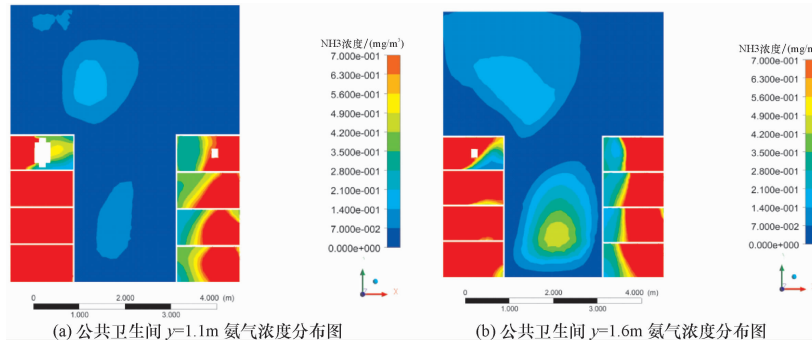


图5 换气扇排风时卫生间不同高度截面处的氨气浓度分布图

Fig.5 Ammonia concentration distribution at different height section of toilet when ventilating fan

为了更好地得出氨污染在室内环境的分布特征,在房间内不同地点选取5条竖直线分析污染物浓度随高度的变化情况<sup>[14]</sup>。5条直线在X~Z平面投影坐标为:测试点1(1 m,2.3 m)、测试点2(4.3 m,2.3 m)、测试点3(1 m,1 m)、测试点4(4.3 m,1 m)和测试点5(2.5 m,3.5 m),见图6。污染物浓度垂直方向变化曲线见图7。

Fig.6 Measured linear distribution

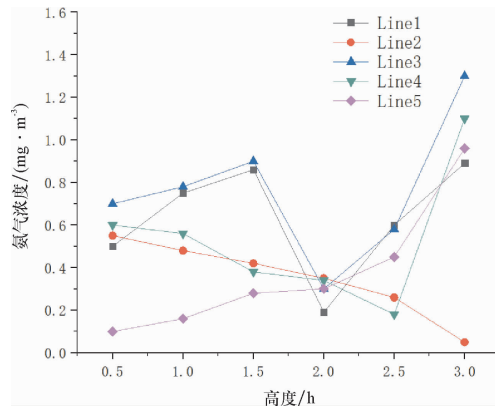


图7 氨气浓度垂直方向变化曲线

Fig.7 Vertical curve of ammonia concentration

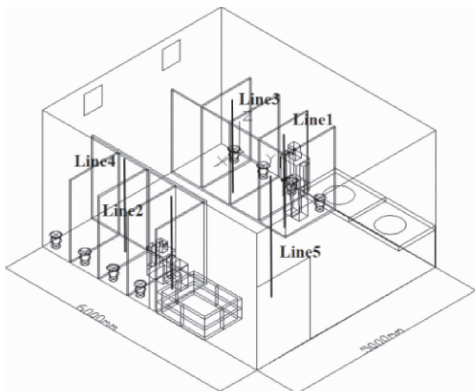


图6 测量直线分布

从图7可以看出,不同地点污染物浓度沿高度变化的特征。由于氨气分子质量小于空气分子质量,引起其向上浮动,大部分区域随着高度增加氨气浓度随之增大,但靠近门侧的厕格内的氨气

浓度能更好地被从门洞进入的空气稀释,其氨气浓度随着高度增加而减小。在高度为2.0~2.5 m范围内的氨气浓度随着高度增加明显降低,这是由于厕格内部是个较为封闭的区域,在厕格(高度为2.0 m)内的氨气散发得到了较明显抑制,而在厕格上方的氨气和厕格外部的空气混合,导致其氨气浓度降低。当换气扇安装高度为2.2 m,换气扇有效工作,使得氨气污染浓度较快降低。

## 5 结 论

(1)公共卫生间采用换气扇排风时随着高度增加,平面上室内的平均空气龄和氨气质量分数总体呈增大趋势。与门位置同侧的厕格氨气浓度

和平均空气龄皆低于其他厕格的,并且越接近门的厕格越小。

(2)在 $y = 1.1$  m(人员蹲姿高度)、 $y = 1.6$  m(人员站立高度)平面上,平均空气龄分别为41 s及46 s;人体呼吸区域附近的氨气浓度为 $0.58 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.65 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,超出要求室内氨气质量浓度限值 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的国家标准<sup>[15]</sup>。

综上所述,在存在氨气污染的公共卫生间内应高度重视垃圾篓摆放及清理问题,并充分考虑合理有效的措施防止其中的氨气扩散,如密闭垃圾篓以及不放置垃圾篓于厕格内,有效地改善公共卫生间内空气品质以确保公共卫生间环境舒适、无异味以及人员健康安全。

### 参考文献:

- [1] Sandberg M, Blomqvist C. Displacement ventilation in office rooms[J]. ASHRAE Transactions, 1989, 95: 1041-1049.
- [2] Daisey J M, Angell W J, Apte M G. Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: An analysis of existing information[J]. Indoor Air, 2003, 13: 53-64.
- [3] Bertoni G, Ciuchini C, Pasini A, et al. Monitoring of ambient BTX at Monterotondo (Rome) and indoor-outdoor evaluation in school and domestic sites[J]. Journal of Environmental Monitoring, 2002, 4: 903-909.
- [4] Blondeau P, Iordache V, Poupard O, et al. Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools[J]. Indoor Air, 2005, 15: 2-12.
- [5] 张磊,张国娟,于水. 不同气流组织下对室内甲醛浓度影响模拟分析[J]. 建筑节能, 2017, 45(8): 13-16.
- [6] 袁东升,田慧玲,高建成. 气流组织对空调房间空气环境影响的数值模拟[J]. 建筑节能, 2008, 36(9): 9-13.
- [7] 王倩,张浩. 夏季不同通风方式的房间内甲醛扩散模拟研究[J]. 洁净与空调技术, 2019(2): 16-21.
- [8] Tung Y C, Hu S C, Tsai T Y. Influence of bathroom ventilation rates and toilet location on odor removal[J]. Building Environment, 2009, 44: 1810-1817.
- [9] 敖永安,王利,贾欣,等. 卫生间污染物扩散规律数值模拟及排风口位置和补风方式的优化[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(4): 720-724.
- [10] 吉少杰,茅靳丰. 自然通风条件下卫生间污染物浓度研究[J]. 洁净与空调技术, 2012, 76(4): 22-24.
- [11] 汪洋,周颖,代立. 高层建筑公共卫生间氨气浓度分布数值模拟及补风优化[J]. 暖通空调, 2016, 46(11): 123-128.
- [12] 傅德薰,马延文. 计算流体力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002.
- [13] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001.
- [14] 付旺,孙丽颖. 置换通风条件下污染物分布特性的模拟研究[J]. 流体机械, 2010(2): 67-72.
- [15] GB 18883-2002, 中华人民共和国国家标准室内空气质量标准[S]. 北京:中国标准出版社, 2002.

【责任编辑:孙向荣】