

基于CFD流体模拟的新型污染物在室内的传播特性分析

张雁南, 李 丁, 程 祥, 潘 政

江苏大学能源与动力学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2023年4月23日; 录用日期: 2023年7月4日; 发布日期: 2023年7月12日

摘 要

本文针对新型污染源的非常态传播特征, 提出了新型污染源可及性的概念。在此基础上, 尝试构建动态和稳态室内新型污染物平均浓度关系式, 并将通过计算流体动力学方法进行验证, 并进一步探讨影响污染源传播的主要因素。

关键词

新型污染物, 室内, 传播特性, CFD流体模拟

Analysis of Indoor Propagation Characteristics of New Pollutants Based on CFD Fluid Simulation

Yannan Zhang, Ding Li, Xiang Cheng, Zheng Pan

School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: Apr. 23rd, 2023; accepted: Jul. 4th, 2023; published: Jul. 12th, 2023

Abstract

In view of the non-steady propagation characteristic of new pollution sources, the concept of accessibility of new pollution sources was put forward in this paper. On this basis, we try to build a dynamic and steady relationship between the average concentration of new indoor pollutants, which will be verified by the computational fluid dynamics method, and further discuss the main factors affecting the spread of pollution sources.

Keywords

New Pollutants, Indoor, Propagation Characteristics, CFD Fluid Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

21 世纪以来, 能源危机显现了建筑节能的紧迫性, 但随之而来的室内空间紧密, 空气交换不顺畅, 新风量下降等状况导致室内空气品质问题愈发严重。尤其是装修材料中的室内污染物, 威胁着居民和动植物的生命安全, 干扰舒适的居住环境。以下是典型的空气污染示例: 1) 室外 PM2.5 的渗入。在雾霾天, 即使门窗紧闭, 细小的 PM2.5 颗粒还是可以通过门窗以及建筑缝隙大量渗入室内。测试结果显示, 在人数众多的教室内 PM2.5 的浓度略低于户外约 10%~20%, 学生充当了“净化器”, 学生针对 PM2.5 的预防手段几乎为零; 而 PM2.5 对人体呼吸系统有很大损害, 易引发哮喘、支气管炎、过敏等方面的疾病[1]。2) 偏高的 CO₂ 浓度。在雾霾天、冬季和夏季, 门窗通常会关闭, 室内 CO₂ 浓度长升高; 长时间不通风换气时, CO₂ 浓度将高达 2000~3000 ppm。较高的 CO₂ 浓度使居民产生胸闷头晕、注意力分散、嗜睡、等症状。3) 传染性病菌传播。倘若室内人员密集, 往往湿度偏高, 病菌极易滋生和传播, 如流行性腮腺炎、水痘、流行性感、细菌性痢疾等。4) 室内装修污染。通常情况下, 室内装修多与空气调节装置相配套。所以气流和室内温、湿度调节对污染物的扩散影响非常重要[2]。

在新型污染物产生方面, 除了室内人员由气溶胶飞沫产生的病菌、CO₂, 建筑相关的各种材料散发的 VOC (挥发性的有机物)等有害物也同样是室内空气品质(IAQ)研究的重点[3]。在近年来的新冠疫情事件中, 已造成了很多世界人口的死亡。事件背后忽视了短时间内的新型污染物动态扩散的特性, 由此带来了较严重的后果[4]。为了实现环境参数的快速和准确控制, 这方面的研究需要给予重视[5]。在不同的空间分布情况下, 单纯对个性化送风方式属性的固有认识有可能和人们“享用”的实际环境质量和污染物扩散存在不同[6] [7]。长期以来, 在混合通风的统一假设下, 室内污染源位置等因素的重要性往往被忽略, 但计算流体力学(CFD)引入的详细室内气流建模技术的出现, 使得对污染源的仔细考虑成为可能[8]。为了对送风系统进行合理评价和对室内环境进行高效控制, 需要通过对送风和污染源在房间内扩散属性的认识, 从定性和定量的角度明确各因素对室内空气品质(主要是污染物浓度)的影响, 建立计算室内污染物浓度等环境参数的简便方法[9]。建立一个新的送风有效性和室内空气品质的评价方式, 以更全面地反映室内环境的实际效能。

2. 研究技术路线设计

本文将研究室内污染物扩散的数值作为主要研究对象, 并且相较于之前的研究, 将更加注重送风浓度、新型污染源强度等变量对研究结果的综合影响。

本文的研究思路是建立一个如下图 1 所示的简单空气处理系统(AHS), 其中 Q_s 和 Q_r 为送风率和回风率, 及系统室外进风口 Q_{oa} 和 Q_{inf} 渗透。这些变量为 AHS 模型确定了因此而产生的区域空气平衡。当进、回气流不平衡时, 该区域将产生负压或正压, 并结合当地排气 Q_{lx} , 则可以确定入渗速率 Q_{inf} 。表示时间的速率粒子在区域表面质量的变化等于粒子沉积在表面上的速率。之后再利用 CFD 来模拟室内的平

均浓度；而模拟得到的平均浓度则在计算 ASA 的基础上获得。

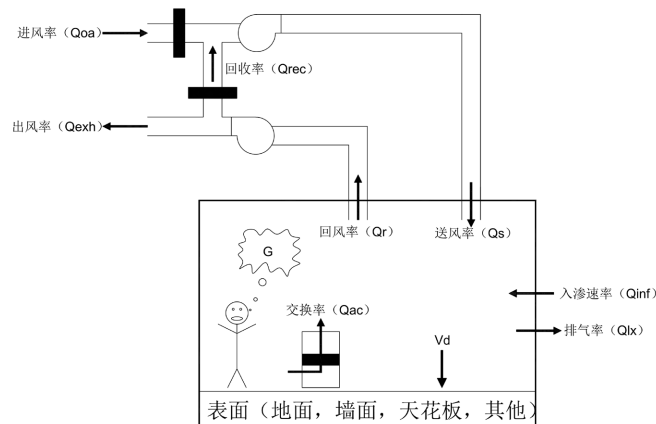


Figure 1. Simple air handling system (AHS)
图 1. 简单空气处理系统(AHS)

通过提出新型污染物扩散关系式，可以使得在送风浓度、新型污染源强度等变量发生变化后，可用代数关系取代传统的 CFD 计算来获得室内浓度场，对于评价空气品质具有更便捷的特点，从而更好地满足人们对生活的舒适度和卫生健康的要求，同时也有助于劳动生产率的提高。

3. 理论基础

3.1. 送风有效性描述

送风有效性考虑到送风在室内持续影响的特点及程度，反映送风在任意时刻到达室内各点的能力，与时间相关，存在如下关系：

$$A_{s,i}(x,y,z,\tau) = \frac{\int_0^\tau C(x,y,z,t) dt}{C_{in,i} \cdot \tau} \quad (1)$$

其中 $A_{s,i}(x,y,z,\tau)$ 是在时间段 τ 内送风口 i 在室内位置 (x,y,z) 处的送风可及性； $C(x,y,z,t)$ 是在时刻 t 时 (x,y,z) 点处的示踪气体浓度； $C_{in,i}$ 是送风口 i 的示踪气体浓度； τ 是持续送风时间， t 代表任意时刻。

送风有效性参数 $A_{s,i}$ 是无量纲数，定量地给出了来自风口的送风如何连续地送到房间内的任一点。可及性大小可以用示踪气体连续测量或数值计算的方法得到。

3.2. 污染物可及性的描述

污染物可及性是探讨污染源散发的污染物如何到达空间各处，各因素关系为：

$$A_{c,i}(x,y,z,\tau) = \frac{\int_0^\tau C(x,y,z,t) dt}{C_{e,i} \cdot \tau} \quad (2)$$

其中 $A_{c,i}(x,y,z,\tau)$ 是在时间段 τ 内污染源 i 在 (x,y,z) 处的可及性； $C(x,y,z,t)$ 是在时刻 t 时点 (x,y,z) 处的污染物浓度； τ 是持续送风时间， t 代表任意时刻； $C_{e,i}$ 为稳态时排风口的平衡浓度，它和房间通风量 Q 、污染物的散发强度 S_i 存在如下关系：

$$C_{e,i} = \frac{S_i}{Q} \quad (3)$$

3.3. 污染物浓度影响关系式

假定稳态情况下:

$$\bar{C}(\tau) = C_0 + \sum_{i=1}^N \{ (C_{in,i} - C_0) \cdot A_{s,i}(\tau) \} + \sum_{j=1}^M \left\{ \frac{S_j}{Q} \cdot A_{c,j}(\tau) \right\} \quad (4)$$

在稳态情况下, 所有风口送风的总可及性在房间任一点处均为 1, 因此上式变为:

$$\bar{C}(\tau) = \sum_{i=1}^N C_{in,i} A_{s,i} + M \sum_{j=1}^M \frac{S_j}{Q} \cdot A_{c,j} \quad (5)$$

其中 $\bar{C}(\tau)$ 表示任一点在时间 t 内的平均浓度(在稳态时用 C 表示), C_0 为房间初始浓度, $C_{in,i}$ 表示各个风口送风中的污染物浓度, $A_{s,i}$ 表示相应风口的送风可及性, S_j 为各个污染物的散发强度, Q 为房间通风量, $A_{c,j}$ 为相应污染源的可达性。为简略, 各个变量指代中位置参数 (x,y,z) 忽略不写。

公式(5)既展示出各因素影响室内污染物浓度的定性关系, 也给出了这些影响因素对室内污染物的定量作用。送风可及性是气流组织的反应, 而新型污染物可及性需要气流组织和新型污染源两者共同确定, 因此可通过 CFD 计算获得后。当送风的浓度或新型污染源的散发强度发生改变时, 对房间内的新型污染物预估不用再次的 CFD 计算, 而是通过上式可直接获得, 因而对于评价空气质量具有更便捷的特点。

4. 模拟验证

4.1. 建立数学物理模型

在一个封闭小室中, 通过示踪气体测量对上述关系式进行模拟验证。图 2 为此测试房间的布置。房间顶棚上送风口 A 的直径为 0.15 m, 侧墙上送风口 B 直径为 0.21 米。两个排风口在侧墙的下部, 尺寸均为 0.35×0.35 m。共进行了两个测量工况, 在每个工况下只有一个送风口和一个回风口使用, 其他的风口密封, 如表 1 所示。送风温度为 24°C , 房间内没有其他热源, 墙壁绝热。

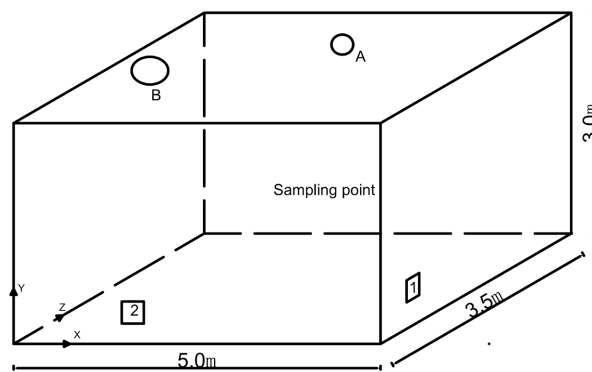


Figure 2. Tracer gas testing room
图 2. 示踪气体测试房间

Table 1. Explanation of model validation conditions

表 1. 模型验证工况说明

工况	送风口	排风口	风量(m^3/h)
A1	A	1	400
B2	B	2	400

示踪气体采用稀释的甲烷(浓度 0.5%)。初始时刻房间内的甲烷浓度被均匀控制在 100 ppm 附近,接着停止甲烷的散发,送风系统开始启动。测点布置在接近房间正中的点 $(x, y, z) = (0.5 \text{ m}, 0.8 \text{ m}, 1.55 \text{ m})$ 处,气体浓度每 8 分钟采样一次。

在此测试过程中,室内没有污染源且每次只有一个送风口送风,则式简化为:

$$\bar{C}(\tau) = C_0 \cdot \{1 - A_s(\tau)\} \quad (6)$$

4.2. 模拟结果分析及验证

测量工况对应的平均浓度由即时测量结果平均而得,而模拟得到的平均浓度则在计算 ASA 的基础上,通过式(6)获得。由于采样点接近送风口 A 的正下方而远离送风口 B,所以工况 1 中浓度呈现衰减下降的趋势而更快。

当设置截面 z 方向为 1.75 米,房间高度为 1.65 米时,用 CFD 模拟的结果与实测值如下图示。ASA 模拟结果,工况 A2 条件下。具体模拟结果可以见附录材料。图 3~图 5 分别是实验的实际测定值和 CFD 软件模拟数值的误差的 ASA 工况趋势图,基本上比较一致,说明实验测定值和 CFD 软件模拟数值在误差范围内。

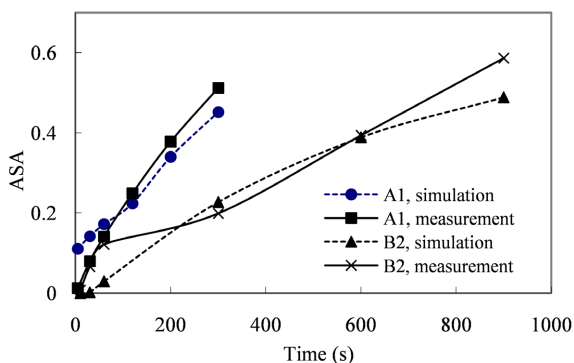


Figure 3. ASA working condition diagram of the error between the actual measured values of the experiment and the simulated values using CFD software

图 3. 实验的实际测定值和 CFD 软件模拟数值的误差的 ASA 工况图

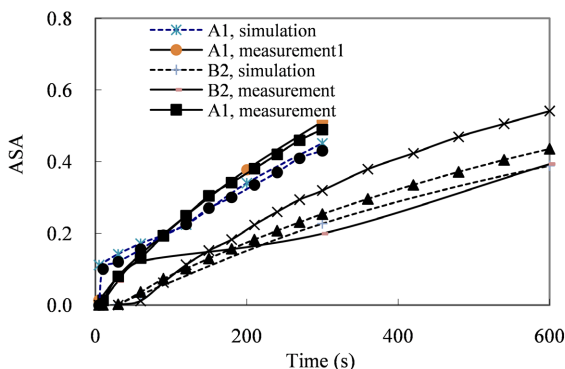


Figure 4. ASA working condition curve trend of the error between the actual measured values of the experiment and the simulated values using CFD software

图 4. 实验的实际测定值和 CFD 软件模拟数值的误差的 ASA 工况曲线趋势图

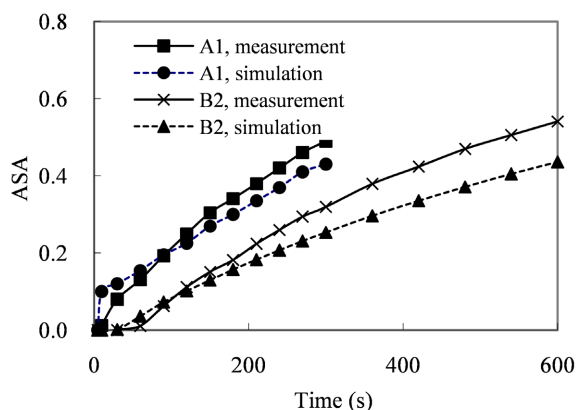


Figure 5. ASA synchronization error reduction curve trend of experimental measurements and CFD software simulation values

图 5. 实验测定值和 CFD 软件模拟数值的 ASA 同步误差减小曲线趋势图

5. 总结

通过本论文研究观点的提出,对室内空气品质将有所提高,更有助于人们改善人们的舒适度和卫生健康,同时也有助于劳动生产率的提高[10]。在应急通风状况下,控制目标是人员伤害度最小而非单纯的浓度值降低,其原因在于新型污染物浓度水平和人员所受伤害程度并非总是具有线性关系。当浓度低于一定水平时,浓度的变化对人们的感受无影响;而浓度高到一定程度后,浓度的进一步升高对人体的危害程度也可能不再变化(如均是短时间危及生命)。为此,相对于舒适性通风的优化,应急通风的反问题更加复杂[11]。因此,由新型污染物扩散关系式的提出,使得在送风浓度、新型污染源强度等变量发生变化后,可用简单的代数关系取代传统的 CFD 计算模拟来获得室内浓度场,大大提高了计算速度[12]。这也使此类反问题快速求解的条件基本具备。通过应用本论文提出的理论,建立数学模型对各个风口的送入浓度进行优化。通过优化,从而将会节约大量的人力和物力。

致 谢

感谢江苏大学 2022 年度大学生创新创业训练计划项目(项目编号: 202210299189Y)的支持。

参考文献

- [1] 岳红蕾. 温度对住宅区气体污染物扩散的影响[J]. 安徽农学, 2014(21): 7159-7160.
- [2] 张玮. 高大空间室内污染物控制的数值模拟与研究[D]. [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [3] 任艳莉. 高大空间气流组织的数值模拟与实验研究[D]. [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2012.
- [4] 赵福云, 王云鹤, 杨国彪. 洁净手术室空态气流组织模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(11): 986-994.
- [5] 邓月超. 地下车库机械通风系统研究[D]. [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2009
- [6] 陈吉伟. 空调室内流场及颗粒物运动分布的数值模拟[D]. [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [7] 王小丽, 代佳玲. 办公建筑室内污染物扩散数值模拟[J]. 建筑热能通风空调, 2020, 39(8): 76-79+30.
- [8] 范雪妮, 王海东, 胡毅冰. 基于粗网格 CFD 模拟方法的室内空气污染物实时寻源反计算研究[J]. 流体机械, 2020, 48(7): 77-83.
- [9] Chen Qing Yan, Jones, Waters. 数值模拟技术对室内气流组织和空气品质[J]. 环境学报, 2008(4): 98-102.
- [10] Srebric, J., Vokovic, V., He, G., et al. (2008) CFD Boundary Conditions for Contaminant Dispersion, Heat Transfer and Airflow Simulations around Human Occupants in Indoor Environments. *Building and Environment*, 43, 294-303.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.023>

- [11] 贺广兴. 城市热岛与空气污染物特性分析及其影响参数研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [12] 杨建荣. 送风有效和污染物传播特性的研究与应用[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2004.