

移动家具对室内空气的影响研究

付杨¹, 代凤羽², 方海¹

(1.广东工业大学, 广州 510090; 2.莫纳什大学, 克雷顿 VIC3800)

摘要: **目的** 随着人类在室内活动时间的增加, 室内空气对人类健康的影响成为了学者们的重点研究对象。家具作为室内生活所必须的用品, 能否通过家具来改善室内空气成为业内的新兴课题。**方法** 通过CFD计算模拟技术, 模拟室内香烟燃烧情况下, 移动家具所带来的室内空气中CO的数值变化, 从而研究移动家具与室内空气变化的关系。**结论** 通过控制可移动家具在室内的移动情况, 可以在一定程度上控制室内空气的变化, 这为智能化家具提供了研究的新方向。

关键词: 家具移动; 室内空气; CFD仿真

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)02-0148-04

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.02.026

Impact of Furniture Movement on Indoor Air

FU Yang¹, DAI Feng-yu², FANG Hai¹

(1.Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China; 2.Monash University, Clayton VIC3800, Australia)

ABSTRACT: With the increase of human's indoor activity time, the impact of indoor air on human health has become the focus of scholars. Whether the indoor air can be improved through furniture (as a necessary article for indoor life) has become a new topic in the industry. The numerical changes of CO in indoor air caused by moving furniture in case of indoor cigarette burning were simulated by CFD simulation technology, so as to study the relationship between furniture movement and indoor air change. By controlling the movement of movable furniture in the room, the change of indoor air can be controlled to a certain extent, which provides a new research direction for intelligent furniture.

KEY WORDS: furniture movement; indoor air; CFD simulation

随着人类文明的发展与社会的进步, 城市人群有90%的时间是在室内度过, 室内空气在近些年成为世界科学研究的重要焦点^[1]。众多国内外学者的研究表明, 室内空气与人们的健康息息相关, 同时一些研究指出室内主要的污染气体主要有CO、PM2.5、多环芳香烃等^[2-3]。近些年, 大量的研究集中在通风条件下的室内空气中, 但忽略了家的移动带来的气流流通对室内空气的影响。在现代人类生活中, 家具以纽带形式连接了人类与室内空间, 俨然成为室内的必备器物之一, 而本文则从移动家具的角度研究其对室内空气的影响。

1 研究背景

家具的存在不仅为人们的生活提供了便利, 还在

一定程度上充当了室内空间的装饰, 为人们的生活营造了视觉上的美感。室内空气主要存在于室内空间, “空”相对于阻隔物、有形之物而言, 表示一种状态; 而“间”是起到了分割、隔断作用的某种物质, 表示两者之间的关系。从室内的使用角度来说, “空”的功能就是载物, “间”的功能是隔断。而在现代的室内生活中, 正是家具充当了隔断空间的功能, 以家具在空间内的布局作为间隔, 分割功能不一的若干空间。

随着人们生活质量的提升, 使用者更加关注以动态的观念来看待空间与家具, 空间在不同时段对不同功能的互动关系可形成动态的功能, 可移动家具便是在此观念上孕育而出。移动家具是指家具下方安有脚轮或移动的轨道, 可以随时移动。这种带脚轮或移动的轨道家具在体积上比普通家具要小、要轻, 可移动

收稿日期: 2018-08-12

作者简介: 付杨(1983—), 男, 黑龙江人, 广东工业大学博士, 主要研究方向为工业设计和家具设计。

家具的可移动性对空间大小的要求较低, 富有灵活性。智能化的可移动家具可以根据需要改变位置, 既可以实现某种使用功能, 又在无形中改变房间的空间布局。它对房间空间产生了类似切割的效果, 而这种切割方式的改变必然会对房间内的空气流动情况产生影响^[4]。一些研究人员声称, 室内家具对室内气流和污染物分布有很大的影响^[5-6]。只要家具的布置不阻碍大型办公室的气流, 便可以将其定义为对室内空气质量的最低的影响因素^[7]。有专家针对家具布局对通风效果的影响进行了研究, 但只是讨论通风方案和其他因素如何影响室内气流^[8], 对家具的最优位置并没有人进行深入研究。

2 研究方法

目前研究室内环境的方法主要有实验测试和模拟计算两类。实验测量是研究室内污染物分布和运动规律的重要手段, 通过采用不同的仪器、扩散方法以及显微成像分析等方法进行研究。实验测试能获取可靠的结果, 但是实验测试周期较长, 价格昂贵, 并且受实际情况所限制, 不一定能测试所有条件。相对于实验研究而言, 计算机模拟技术简便而且灵活, 以较小的代价便可以获得丰富的信息, 因此, 在进行室内环境分析时, 通常将 CFD 作为主要的计算工具, 对室内的热量传递、污染物传播等复杂物理现象进行数学量化描述。所谓 CFD 方法, 就是通过数值离散的方法求解室内空气流动的质量守恒方程、动量方程、能量方程和污染物组分方程, 得到室内空间各处的空气流速、温度、污染物浓度等, 因此 CFD 方法给出的是分布参数的结果^[8]。

本文的研究重点是检测在家具移动的情况下室内空气行程的变化, 以在室内燃烧香烟所产生的 CO 的数量为检测对象, 结合实验和数值模拟分析香烟中的 CO 在房间内的扩散情况, 同时还研究了家具的位置对烟气运动的影响。

3 研究模型与分析

采用计算流体力学软件 Fluent 对香烟燃烧产生的烟气在房间中的蔓延过程进行模拟, Fluent 软件的主体就是基于有限体积法(FVM)的求解器, 求解的方程类型是形如 N-S 方程的对流扩散方程。

3.1 室内烟雾实物模型测试

实验地点是一个空置的房间, 房间长 6.4 m, 宽 3.2 m, 高 3 m。实验过程中门窗紧闭, 将房间处理成完全封闭的状态。在距房间的左侧 1.6 m 的位置, 在高 1 m 的桌子上放一只点燃的香烟。在房间靠右侧的位置放置了烟雾测试仪, 选取 G1、G2 的位置作为测试点, 几何模型及监测点设置位置示意图 1。烟草

燃烧物中有几千种化学物质, 根据研究显示, 燃烧后 CO 的浓度较大, 占比超过 40%, 因此, 为了便于烟气分析仪测量, 选择 CO 作为污染判定依据^[9]。

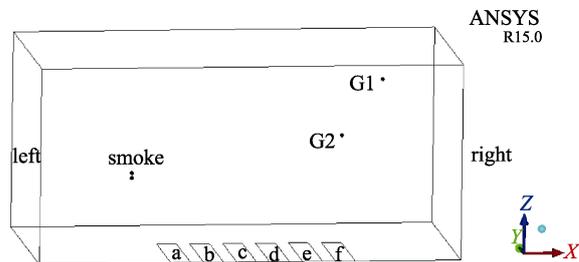


图 1 几何模型及监测点设置位置示意
Fig.1 Geometric model and indication of location of monitoring points

3.2 CFD 模拟分析

用实验房间的数据在 FLUENT 中构建 1 个相同的模型, 家具变化位置示意图 2。以角落为原点建立三维坐标系, X、Y、Z 轴分别代表长、宽、高。计算过程中监测各个监测点的 CO 浓度的测点。设置运行时间为 90 分钟, 燃烧时间为 8 分钟。

3.2.1 基本原理

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

其中: ρ 是密度; t 是时间; \mathbf{u} 是速度矢量; u, v, w — \mathbf{u} 在 x, y, z 方向的分量。

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (3)$$

其中: $\text{grad}() = \partial()/\partial x + \partial()/\partial y + \partial()/\partial z$; 符号 S_u 、 S_v 、 S_w 是动量方程的广义源项; $S_u = F_x + s_x$, $S_v = F_y + s_y$, $S_w = F_z + s_z$ 。一般来讲, s_x 、 s_y 和 s_z 是小量, 对于粘性为常数的不可压流体, $s_x = s_y = s_z = 0$ 。

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho T \mathbf{u}) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T \quad (4)$$

其中: c_p 是比热容; T 为温度; k 是流体的传热系数; S_T 为流体的内热源, 有时简称为粘性耗散项。

3.2.2 边界条件及假设

针对香烟的燃烧规律前人已做出了相应的研究^[10], 设定香烟的燃烧时间为 8 min, 燃烧共释放出 15 mg 的 CO。同时在模拟计算中做出如下的假设条件限定边界条件: 烟气是均匀的释放到房间内的; 室内空气

被看作是理想流体,密度为 1.225 kg/m^3 ,初始状态处于标准大气压下;实验室内的气流在模拟的过程中可视为不可压缩的气体;模拟室的四周墙壁与外界之间的传热量忽略不计,各壁面间的传热均匀,不考虑各传热表面之间辐射的影响;室内气体视为常物性流体,密度、粘度等参数保持不变。

3.2.3 网格划分与模型设置

本文对计算区域进行了网格划分,共划分了 4 480 000 个有限体积单元,网格类型为四面体网格。采用 fluent 中的双精度算法及 Simple 算法计算三维区域的烟雾扩散问题。

3.2.4 分析状况

为了研究家具的移动过程对室内烟雾扩散的影响,取 6 个书柜的位置进行模拟计算,分别为 layout1、layout2、layout3、layout4、layout5、layout6。书柜的宽度为房间宽度的一半,1.6m,家具变化位置示意图 2。对应的位置分别是在距离香烟 0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.5 m、3.0 m 的位置,并在距离房间右侧 1 m 的位置取 4 个监测点,监测点设置位置示意图 3。监测点坐标分别为: $p1(5.4, -0.8, 0.5)$ 、 $p2(5.4, -0.8, 1.5)$ 、 $p3(5.4, 0.8, 0.5)$ 、 $p4(5.4, 0.8, 1.5)$ 。 $p1$ 和 $p3$ 分别对应的是较低的点分别位于书柜后和开阔区域, $p2$ 和 $p4$ 分别对应较高的点位于书柜后和开阔区域。

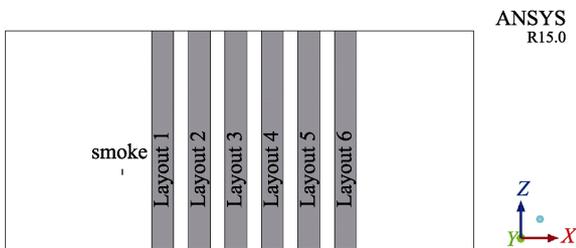


图 2 家具变化位置示意
Fig.2 Indication of furniture change position

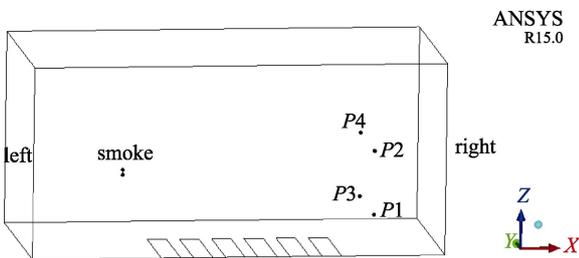


图 3 监测点设置位置示意
Fig.3 Indicating the position of monitoring points

4 实验结果与模拟结果对比和分析

实验所用的一氧化碳烟气分析仪(西门子 VARIO PLUS)的精度为 1 ppm,可以准确地捕捉到烟气浓度的变化。将模拟结果与实验数据进行对比,见图 4

—5。可以看出,两个监测点的烟雾浓度随时间变化的趋势基本一致,且两者的数值误差小于 9%,因此认为此次数值模拟的网格划分和模型选择设置是合理的,是适用于模拟室内烟雾扩散的情况的。

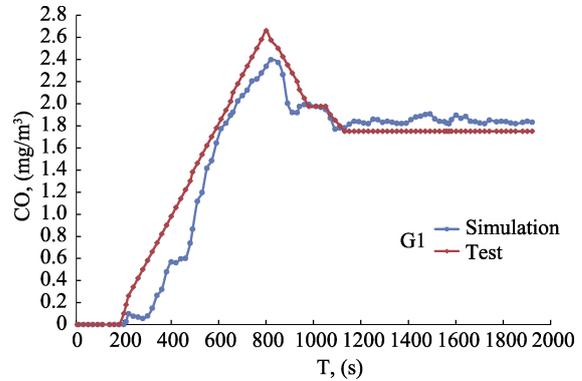


图 4 G1 点实验值与模拟值对比
Fig.4 Comparison of experimental and simulated values at G1 point

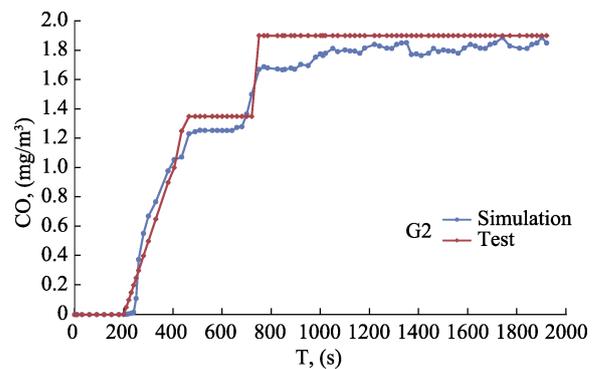


图 5 G2 点实验值与模拟值对比
Fig.5 Comparison of experimental and simulated values at G2 point

G1 点位于房间顶部。在 0~480 s 香烟燃烧阶段 CO 浓度持续升高,最高浓度接近 5.5 mg/m^3 ,是由于燃烧初始阶段,烟气竖直向上流动。燃烧结束后,顶部的烟气向下扩散,该点的浓度降至在 3.5 mg/m^3 左右。

4.2 家具移动对烟雾扩散的影响

分别对 6 个书柜位置进行了烟雾扩散的模拟计算,每个情况计算 32 min。从实验检测值中可以看出,烟气浓度在燃烧 800 s 左右达到最大值,但是每个位置的情况是有所区别的,因此,选取两个时间点进行分析,一个是香烟燃烧结束时,即 480 s,另一个是 960 s 的结果。对这两个时间点的结果进行对比分析,目的分析家具移动室内空气的影响关系,同时找到最优的家具摆放的位置。

480 s 时监测点的 CO 浓度见表 1,可以看出,在没有家具遮挡的情况下,监测点的烟雾浓度要远大于有家具遮挡的情况。这说明没有遮挡时烟雾分布速度较快,在香烟刚刚燃烧完时,已经有大量烟雾扩散到

了监测点的位置。 P_2 和 P_4 的值要大于 P_1 和 P_3 的值,这是因为 P_2 和 P_4 位于较高的位置,可以看出,烟雾向上运动的趋势。从此时的结果来看,Layout1家具的效果是最好的,有效地起到了隔绝烟雾的作用。Layout2的作用次之,但是也有很明显的效果。随着家具位置的不同,各监测点的检测值发生了变化,这说明家具的移动对室内检测的气体具有一定的影响,在智能家具的设计中可改善室内空气对人体的影响。

表1 480 s时监测点的CO浓度

Tab.1 CO concentration at monitoring point at 480 seconds

浓度, mg/m ³	P_1	P_2	P_3	P_4
None	1.2	1.78	1.49	1.815
Layout1	0.04	0.06	0.005	0.075
Layout2	0.115	0.235	0.035	0.045
Layout3	0.765	1.07	0.48	0.815
Layout4	0.4	1.71	1.265	2.135
Layout5	0.235	0.785	0.775	0.86
Layout6	0.665	0.895	0.465	2.265

随着时间的变化,监测点的浓度越来越大。无家具的监测点变化值是最小的,这说明无家具格挡时,烟雾扩散主要集中在烟气释放阶段,而有家具时,烟雾扩散则集中在香烟熄灭后的5~10 min内。 P_2 和 P_4 的值要大于 P_1 和 P_3 的值,这也同样印证了烟雾向上积聚的现象。

960 s时监测点的CO浓度见表2,从表中可以看出,室内无障碍物时,各个点的烟雾浓度区别不大,当房间中增加了障碍物后,变化十分显著,这是因为不同布局中的障碍物在不同程度上改变了烟雾流动的轨迹方向,从而显著地影响了房间的烟气和气流组织状况;而对于layout1,其各点的烟雾浓度都是最低的。这是因为在该布局方式中,家具有效地拦截了烟雾的扩散路径,导致烟雾向家具的角落积聚,或者沿着家具向墙壁壁面移动。这段对比数据表明,家具在室内空间中对室内的空气扩散速度影响巨大,通过不同家具的组合摆放,可以有效地改变和控制室内气体的扩散,

表2 960 s时监测点的CO浓度

Tab.2 CO concentration at monitoring point at 960 seconds

浓度, mg/m ³	P_1	P_2	P_3	P_4
None	1.725	2.235	1.66	1.945
Layout1	2.01	2.05	1.36	1.715
Layout2	2.7	2.76	4.36	4.43
Layout3	4.04	4.865	2.62	4.21
Layout4	3.11	3.935	2.685	4.18
Layout5	1.505	1.58	1.575	1.77
Layout6	2.59	2.82	4.02	4.485

5 结语

通过实验数据表明,在室内放置家具可以改变室内烟气的扩散情况,从而大大减缓烟雾扩散到其他区域的速度,通过多组家具的组合放置可以起到将烟雾隔离的效果;通过控制可移动家具在室内的移动可以有效地控制室内某些区域的气体变化,通过智能化的监控系统,可以根据室内情况的需要,通过自动调整家具的位置来快速缓解室内的空气问题。在现代室内外空气污染的生活状态下,研究智能化的移动家具可以快速、有效地缓解室内的空气问题。

室内家具的智能化移动将成为未来家具发展的重要研究课题,在智能家具的研发中智能化移动家具可以向具有室内新风系统功效的方向发展和延伸,家具的移动可以在固定的空间内影响到室内的温度、湿度、通光、气体扩散等多方面的问题,家具的移动是在短时间内改变人类室内生活质量的重要手段之一。

参考文献:

- [1] KUMAR R, NAGAR J K, GAUR S N. Indoor Air Pollutants and Respiratory Morbidity: a Review[J]. Indian J Allergy Asthma Immunol, 2005, 19(9): 1—9.
- [2] LU C, DENG Q, LI Y, et al. Outdoor Air Pollution, Meteorological Conditions and Indoor Factors in Dwellings in Relation to Sick Building Syndrome (SBS) Among Adults in China[J]. Science of the Total Environment, 2016(560): 186.
- [3] MELYMUK L, BOHLIN-NIZZETTO P, KUKUČKA P, et al. Seasonality and Indoor Outdoor Relationships of Flame Retardants and PCBs in Residential Air[J]. Environmental Pollution, 2016(218): 392—401.
- [4] LEE H, AWBI H B. Effect of Partition Location on the Air and Contaminant Movement in a Room[J]. Proceedings of Indoor Air, 1999.
- [5] ZHUANG R, LI X, TU J. CFD Study of the Effects of Furniture Layout on Indoor Air Quality Under Typical Office Ventilation Schemes[J]. Building Simulation, 2014, 7(3): 263—275.
- [6] CHEONG K W D, DJUNAEDY E, POH T K, et al. Measurements and Computations of Contaminants Distribution in an Office Environment[J]. Building and Environment, 2017(38): 135—145.
- [7] LAU J, CHEN Q. Floor-supply Displacement Ventilation for Workshops[J]. Building and Environment, 2013(42): 1718—1730.
- [8] FISER J, JICHA M. Impact of Air Distribution System on Quality of Ventilation in Small Aircraft Cabin[J]. Build Environ, 2013, 69(11): 171—182.
- [9] 汪焯, 楼波. 室内吸烟后烟气污染的数值模拟研究[J]. 环境工程, 2016, 34(5): 74—77.
WANG Ye, LOU Bo. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution after Smoking[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(5): 74—77.
- [10] 陈添, 钮式如, 农钢. 室内香烟烟雾动态变化规律的实验研究[J]. 卫生研究, 1992(21): 133—136.
CHEN Tian, NIU Shi-ru, NONG Gang. A Study on Dynamic Variation of Indoor Cigarette Smoke[J]. Journal of Hygiene Research, 1992(21): 133—136.