

抽油烟机新风系统对住宅厨房空气品质的影响

何海涛, 陈振雷*, 吕孝鲁, 石 凡
(宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315823)

摘要: 采用仿真与测试相结合的方法定量分析了室内抽油烟机某新风系统对厨房空气品质的影响, 总结建立了以空气龄、换气效率为依据的厨房空气品质评价方法. 结果表明, 在开启该新风系统的厨房环境中, 室内平均空气龄为 94.7 s, 换气效率为 82.4%, 平均空气龄比新风系统关闭时低 79.8%, 空气质量由新风系统关闭时的中度污染改善至清新. 此仿真分析流程可为深入研究厨房室内空气品质、定量评估新风系统提供指导.

关键词: 新风系统; 空气品质; 空气龄; 换气效率; 定量评估

中图分类号: TK422

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 01-0110-06

室内空气环境的好坏与人们的身体健康有着直接和极为密切的关系, 清新的厨房空气品质是室内环境健康舒适的重要组成部分^[1]. 如何定性定量地确定抽油烟机新风系统对厨房环境的影响, 已成为评价厨房空气品质的关键问题之一.

Zhang 等^[2]采用试验方法研究了住宅厨房内油烟颗粒物随着室外进风速度增加的传播规律, 以及对室内空气环境造成的影响. Yu 等^[3]研究了室内污染物的组成、物理和化学特性对室内空气质量的影响. Zhou 等^[4]利用空气幕增强了抽油烟机控烟效果, 降低了污染物浓度, 从而判断厨房的空气质量得到了提高, 但是这种评价方法难以全面合理地评价厨房抽油烟机等设备对空气品质的综合影响. 沈晋明^[5]则依据各种室内污染物浓度实测值与标准值所计算出的综合指数来划分室内的空气品质等级.

用空气龄去评估室内空气品质的优劣是一种较新的方法. 李先庭等^[6]提出可采用空气龄评价室内空气品质. Debnath 等^[7]通过改进印度农村厨房建筑参数, 来获得较低的室内空气龄, 但缺少对室内空气质量具体的定量分析. Ning 等^[8]采用 CFD 方法对 5 种不同工况下的室内空气流场、空气龄分布等进行了数值研究, 计算结果没有得到具体的试

验验证.

上述研究主要集中在室内油烟浓度或空气龄分布等方面, 缺乏对厨房室内空气品质定量评价的有效手段.

笔者在某试验厨房 CFD 流场的基础上, 采用空气龄输运方程、换气效率对抽油烟机新风系统作用下的厨房空气品质进行定量评估分析.

1 抽油烟机的新风系统

抽油烟机发展到现在, 其任务已不仅限于排除室内的油烟, 而向着更高层面的创造室内舒适环境, 提高室内空气品质和节约能源的方向发展.

本文研究的抽油烟机新风系统指的是位于挡烟板上方的一对上下新风口(图 1), 新风来自于室内风道. 2 个新风口设计的主要目的是区分工作区通风和冷却室内上部^[9]. 下新风口低速送风主要用于工作区通风, 新鲜空气直接送入工作区, 从而有效地提高工作区空气品质, 并起到了对排风口的补风作用, 防止排风口处的油烟外溢. 上新风口出风, 不仅可以冷却室内上部环境, 还可以避免厨房空间内产生梯度较大的温度分层现象^[9]. 因为如果只有下新风口送风, 会造成厨房上部形成混合气流区, 导致气流流动不畅^[10-11], 使厨房内工作人员

收稿日期: 2019-04-02.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波大学人才工程项目(421806920).

第一作者: 何海涛(1993-), 男, 江苏淮安人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 流体动力学性能分析. E-mail: 2741717703@qq.com

*通信作者: 陈振雷(1963-), 男, 浙江宁波人, 博士/教授, 主要研究方向: 高端制造的仿真分析与试验测试. E-mail: chenchenlei@nbu.edu.cn

因周围温度和油烟浓度突变感到身体不适。

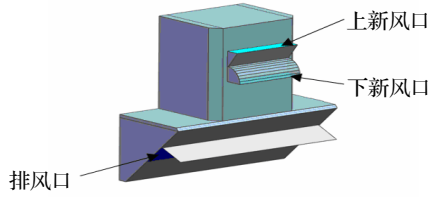


图1 抽油烟机的新风系统

2 厨房内部环境的计算模型

2.1 含有新风系统的厨房几何模型

根据某住宅厨房的实际建筑尺寸与室内厨具设备的分布情况, 在三维建模软件 UG 中建立如图 2 所示的几何模型。本文主要研究对象为侧吸式抽油烟机^[12], 其空间结构模型如图 2。该厨房的几何尺寸为 4.2 m×2.4 m×2.6 m, 内部空气体积为 20.761 m³。操作台宽 0.6 m, 高 0.84 m, L 型布置; 燃气灶: 内嵌式, 为双眼灶, 单个直径 0.3 m; 锅: 简化为柱体, 底面直径 0.3 m, 高 0.15 m。

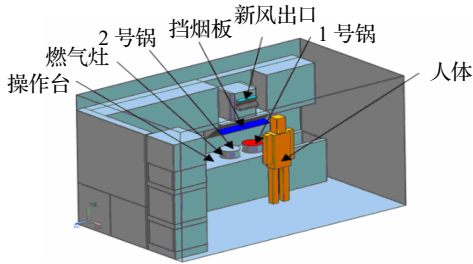


图2 试验厨房三维几何模型

2.2 网格模型

本文对厨房室内空间全部采用四面体网格, 为使数值模拟的计算求解更加合理, 网格划分如下: 网格最大尺寸为 85 mm, 最小尺寸为 3 mm; 在新风口和热源等局部温度梯度、速度梯度大的地方, 网格划分时进行局部细化加密; 划分得网格数为 69.3 万个。试验厨房网格模型如图 3 和 4 所示。

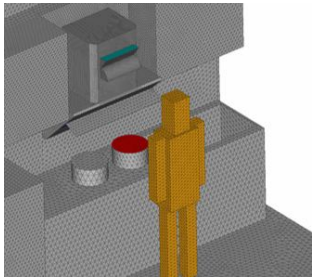


图3 厨房内局部面网格

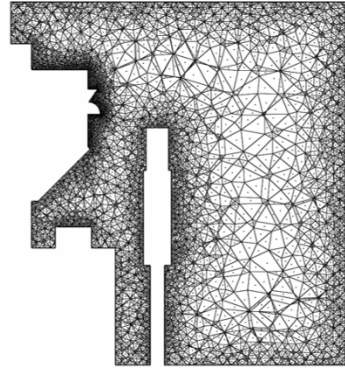


图4 厨房内空气的体网格

2.3 数学模型

2.3.1 流动控制方程

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0. \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i + \frac{\partial(-\rho \overline{u_i' u_j'})}{\partial x_j}. \quad (2)$$

式(1)和式(2)构成了流体流动的基本方程。式中, ρ 为流体密度; $\vec{u}$ 为流动速度; p 为流动压力; μ 为流体黏度; $-\rho \overline{u_i' u_j'}$ 称为雷诺应力。

组分运输方程:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u} Y_i) = -\nabla J_i + S_i, \quad (3)$$

式中, Y_i 为组分质量分数; S_i 为其他组分产生方式或者自定义的质量源项; 其中, J_i 定义如下:

$$J_i = -(\rho D_i + \frac{\mu_t}{Sc_i}) \nabla Y_i, \quad (4)$$

式中, Sc_i 为湍流施密特数, $Sc_i = \mu_t / \rho D_i$, D_i 为湍流扩散项, 本文取 0.7; D_i 为组分的质量扩散系数。

2.3.2 空气龄输送方程

为了定量评估厨房内的空气品质, 本文引用空气龄概念。空气龄是指空气质点从进入房间起, 至到达室内某个微小区域所有空气质点的平均值(图 5)。

文中将空气龄作为评价厨房空气品质的一个重要指标。为了在 Fluent 中计算空气龄场, 将自编的空气龄输送方程导入软件, 方程如下:

$$\frac{\partial(\rho \tau)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u} \tau) = \nabla(\Gamma \nabla \tau) + S_0, \quad (5)$$

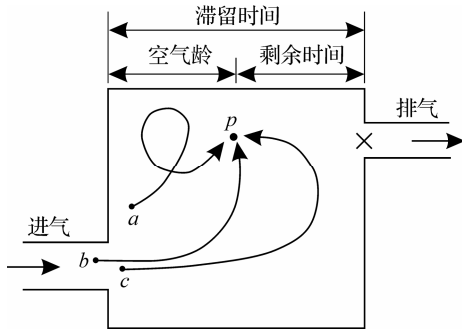


图5 空气龄示意图

式中, τ 为该点所有微团的空气龄平均值, 单位 s; Γ 为扩散系数; S_0 为源项^[13].

2.3.3 湍流模型

文中采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行厨房环境的瞬态计算. k 是指湍流动能, ε 是每单位质量湍流动能的耗散率^[14]. 标准 $k-\varepsilon$ 湍流双方程模型如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho k u) &= \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \\ &2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon, \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \varepsilon u) &= \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \\ &C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \cdot 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中, μ_t 为湍流黏性系数; S_{ij} 为应变率, 它是速度对坐标的导数; $\sigma_k = 1.00$, $\sigma_\varepsilon = 1.30$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, 分别为普遍使用的常数值.

2.4 边界条件设置

考虑到烹饪产生的油烟中含有水蒸气^[15], 为了能够最大限度地反映实际情况并简化计算, 本文采用水蒸气代替油烟进行模拟.

厨房环境初始温度为 27°C , 油烟入口采用速度入口边界条件. 设定锅开启时, 油烟释放速度为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 产生气体含 100% 水蒸气, 其温度为 70°C . 上下新风口也采用速度入口边界, 出风速度均为 $2.415\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 新风温度为 20°C . 新风系统总进风量为 $8\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$.

在 1800 s 的试验测试中, 油烟锅会有 2 次长达 40 s 的开启时间, 其余时间均关闭. 根据试验测试的具体步骤, 1 号油烟锅的油烟释放速度、相对质量浓度随时间变化的规律如图 6 所示. 在 $56\sim 95\text{ s}$ 、 $956\sim 995\text{ s}$ 的 2 个时间段内, 1 号油烟锅开启. 为评

价新风系统对厨房空气质量的作用, 测试中采用的上下 2 个新风口在 $0\sim 900\text{ s}$ 内处于开启状态, 而在 $901\sim 1800\text{ s}$ 内处于关闭状态.

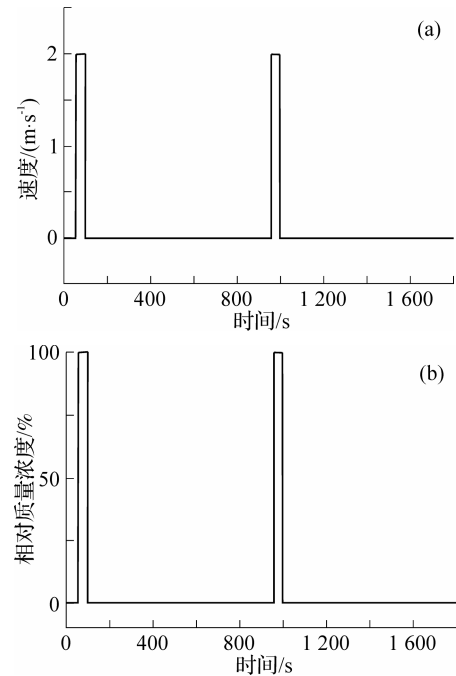


图6 1号锅的边界条件变化图

2 号锅无油烟产生, 处于关闭状态, 按绝热条件处理; 油烟机排风口采用压力出口, 考虑到电机性能设置风压为 -360 Pa , 在模型中其他壁面默认为非滑移边界条件.

气体流动的控制方程组采用压力基法进行离散求解, 对流项采用二阶迎风格式. 选用 SIMPLE 算法进行速度与压力的耦合计算.

3 厨房内部空气品质的评价方法

为创造良好的厨房室内环境, 在住宅厨房规划设计中, 不但要考虑其安全性, 还要考虑舒适性, 而室内空气品质对人体舒适性影响较大.

设厨房的空间体积为 V , 新风系统的进风量为 Q , 则厨房换气一次所需要的时间为 V/Q ^[16]. 考虑到实际厨房人员工作区约为厨房空间的 $1/2$ 左右, 故定义室内平均理想空气龄 τ_i 为:

$$\tau_i = \frac{1}{2} \cdot \frac{V}{Q}, \quad (7)$$

这样厨房内空气龄为 τ 的某点处换气效率为:

$$E_a = \frac{\tau_i}{\tau} \times 100\%. \quad (8)$$

当厨房换气效率为100%时,将2.1节和2.4节中设置的 V 、 Q 代入式(7)可得本试验厨房理想空气龄为78 s.

为了获得不同“空气新鲜度”所对应的空气龄,我们采用先确认对应的换气效率.首先,置换通风的换气效率最高为67%时^[10],空气新鲜度为清新;通常认为室内换气效率达到50%时,厨房的通风换气效果较好^[17-18],空气新鲜度适中;根据《实用供热空调设计手册》中居住厨房换气次数^[19],得出此时中度污染换气效率为13.04%;换气效率的最低标准4.35%是参照JGJ 134-2001中居住建筑换气次数的最低值^[20].至此,由上述各阶段换气效率及理想空气龄值78 s(100%换气效率),换算得到如表1所示的本试验厨房各阶段换气效率相对应的空气龄值.

表1 厨房空气品质的评价方法

空气龄/s	空气新鲜度	换气效率/%
78(理想状态)	纯净(无污染)	100
116.42	清新	67
156	适中	50
598.16	中度污染	13.04
1 793.1	污浊	4.35

4 厨房环境计算模型的标定分析

为了分析本试验厨房的空气品质,本研究对烹饪时厨房内A、B两测点进行时长1 800 s的油烟浓度监测. A测点距离地面188 cm,距离橱柜后壁77 cm,距离烟机左侧面40 cm; B测点距离地面166 cm,距离橱柜后壁107 cm,距离烟机左侧面28 cm. A、B测点具体位置如图7所示.

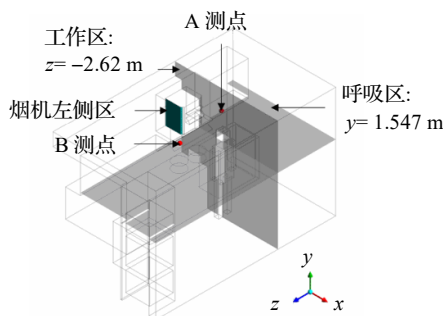


图7 典型截面与试验测点的位置

在处理完的试验数据基础上^[21],进行厨房环境的CFD流场及油烟浓度仿真分析及其与试验数

据的标定分析.图8为仿真计算与试验测试的油烟浓度对比分析.由图可见,2个测点仿真与试验曲线的走势大致相同,均在100~200 s和1 100~1 200 s时间段内呈现出峰状,且后面的油烟浓度峰值高于前面峰值,仿真结果基本上反映出实际厨房室内环境的变化规律.

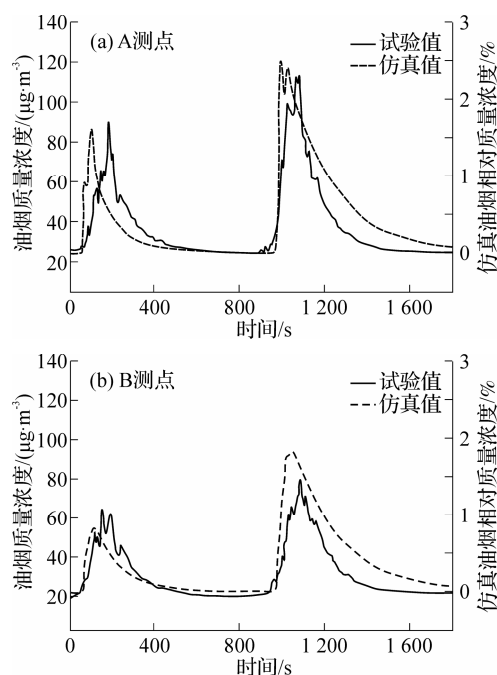


图8 油烟浓度仿真值与试验值的对标

5 新风系统对厨房空气品质的定量分析

在完成对厨房新风系统开启与关闭两种工况的CFD流场及油烟浓度标定后,再进行对应空气品质的量化分析.为便于观察比较,在模型中选取工作区 $z = -2.62$ m、人体呼吸区 $y = 1.547$ m的2个典型截面,厨房空间内截面如图7所示.

从图9可知,新风开启时厨房空气流动性强,室内空气置换较快.因此人体前方的空气龄要比后方低,尤其是人体脸部空气龄在80.5~92 s.室内空气龄最高处在远离新风系统的左端壁橱,其值为103.5 s.此时室内空气龄场分布较均匀.

从图10可知,新风关闭时厨房空气流动性弱,室内空气置换较慢,气体较浑浊.因此排风口附近的空气龄比其他地方低,尤其是人体脸部空气龄在297.7~416.8 s.室内空气龄最高处同样在远离新风系统左端壁橱,其值为535.9 s.此时室内空气龄场分布不均匀,人体前方的空气龄梯度变化较大.

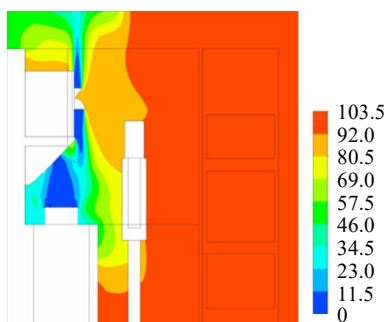
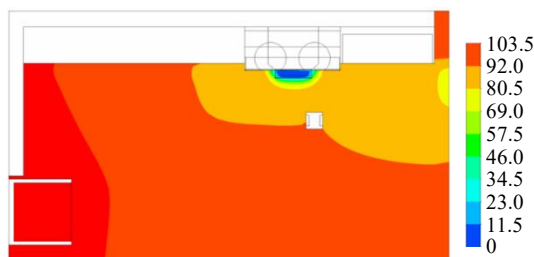
(a) $z = -2.62$ m 工作区空气龄分布(b) $y = 1.547$ m 人体呼吸区空气龄分布

图9 新风开启(90 s)

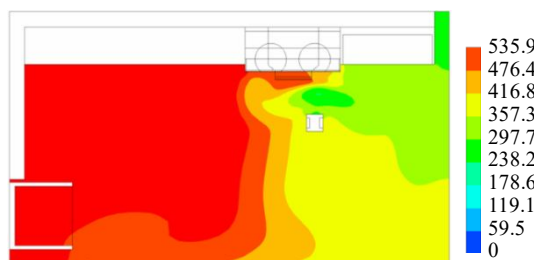
(a) $z = -2.62$ m 工作区空气龄分布(b) $y = 1.547$ m 人体呼吸区空气龄分布

图10 新风关闭(990 s)

此外,表3列出了2种工况中人体脸部区域和室内区域的空气品质状况。计算结果表明,新风的开启使人体脸部平均空气龄降低了73.5%,换气效率增加了2.8倍,室内平均空气龄降低了79.8%,室内平均换气效率增加了3.9倍。空气新鲜度从新风关闭时的中度污染提升至清新,量化地体现了新风系统的效果。

表2 人体脸部与室内区域的空气品质对比

工况	人体脸部平均 空气龄/s	人体脸部换气 效率/%	室内平均 空气龄/s	室内换气效 率/%	空气新鲜度
新风开启	88.4	88.2	94.7	82.4	清新
新风关闭	333.9	23.4	468.6	16.7	中度污染

6 结论

本文在住宅厨房环境 CFD 流场及油烟浓度仿真模拟的基础上,定量分析了试验厨房抽油烟机新风系统对室内空气品质的影响,主要结论如下:

(1)总结建立了以空气龄、换气效率为依据的厨房空气品质评价方法。

(2)定量分析了本试验厨房新风系统对室内空气品质的影响。新风开启后人体脸部平均空气龄下降至88.4 s,相对于新风关闭状态降低了73.5%,新风系统有效地提高了人体脸部区域的空气质量。

(3)本文方法能够准确有效地评估厨房环境空气品质,为厨房的不同设计及设备优化提供方向。

参考文献:

- [1] 刘建龙, 张国强, 阳丽娜. 室内空气品质评价方法综述[J]. 制冷空调与电力机械, 2004(2):24-32.
- [2] Zhang H, Cheng X, Pan W, et al. Experimental study of relative exposure to particles transmitted from kitchen in an apartment[J]. Procedia Engineering, 2017, 205:3830-3837.
- [3] Yu B F, Hu Z B, Liu M, et al. Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(1):3-20.
- [4] Zhou B, Chen F, Dong Z, et al. Study on pollution control in residential kitchen based on the push-pull ventilation system[J]. Building & Environment, 2016, 107:99-112.
- [5] 沈晋明. 室内空气品质的评价[J]. 暖通空调, 1997, 27(4):22-25.
- [6] 李先庭, 江亿. 用计算流体动力学方法求解通风房间的空气年龄[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(5):28-31.
- [7] Debnath R, Bardhan R, Banerjee R. Investigating the age of air in rural Indian kitchens for sustainable built-environment design[J]. Journal of Building Engineering, 2016, 22(7):320-333.

- [8] Ning M, Song M, Chan M, et al. Computational fluid dynamics (CFD) modelling of air flow field, mean age of air and CO₂ distributions inside a bedroom with different heights of conditioned air supply outlet[J]. Applied Energy, 2016, 164(1):906-915.
- [9] 于燕玲, 由世俊, 王荣光. 置换通风的应用及研究进展[J]. 中国建设信息(供热制冷专刊), 2005(6):61-65.
- [10] 周鹏, 李强民. 置换通风与冷却顶板[J]. 暖通空调, 1998, 28(5):1-5.
- [11] 刘晓凡, 袁寿其, 何志霞, 等. 改善饮食业厨房环境的新通风技术应用探讨[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(9): 152-155; 159.
- [12] 高丽颖, 李锐. 家用厨房脱排油烟机的 CFD 数值模拟[J]. 建筑节能, 2011, 39(2):65-67.
- [13] 庄达民, 袁修干. 空气龄的数值解法[J]. 北京航空航天大学学报, 1997, 23(5):565-570.
- [14] 王福军. 计算流体力学分析 CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [15] 王刚. 节能、环保、舒适家用厨房内气流组织的数值模拟及实验研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2009.
- [16] 马仁民. 通风的有效性与室内空气质量[J]. 暖通空调, 2000, 30(5):20-23.
- [17] 王华平, 范存养. 室内换气排污效果的评价指标[J]. 暖通空调, 1997, 27(1):29-34.
- [18] 唐振朝, 詹杰民. 室内空气环境的数值模拟与通风模式的评估[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2004, 19(增1):904-911.
- [19] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [20] JGJ 134-2001. 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准[S].
- [21] 王飞, 陈振雷, 石凡. 基于 CFD 技术的风幕式抽油烟机厨房环境分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2019, 32(2):42-47.

The impact of a range hood's fresh air system on air quality of residential kitchen

HE Haitao, CHEN Zhenlei*, LÜ Xiaolu, SHI Fan

(Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315823, China)

Abstract: The combination of simulation and testing was used to quantitatively analyze the influence of a fresh air system of indoor range hood on kitchen air quality. The evaluation method of kitchen air quality based on air age and air exchange efficiency was established. The results show that the indoor mean air age is 94.7 s, the air exchange efficiency is 82.4% in the kitchen environment when the fresh air system is turned on. The indoor mean air age is reduced by 79.8% compared to that of off-status of the fresh air system, and the air quality is improved to fresh from moderate pollution. The simulation analysis can provide guidelines for in-depth study of the kitchen air quality and quantitative assessment of the kitchen's fresh air system.

Key words: fresh air system; air quality; air age; air exchange efficiency; quantitative assessment

(责任编辑 章践立)