

基于 CFD 技术的风幕式抽油烟机厨房环境分析

王 飞, 陈振雷*, 石 凡

(宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了研究某新型风幕式抽油烟机工作下的厨房环境, 建立了基于零方程湍流模型的标准试验厨房 CFD 数值模型, 并利用 6σ 标准化处理后的油烟浓度测试数据对计算模型和分析流程进行标定分析, 建立了实测油烟浓度与水蒸气仿真油烟浓度之间的近似关系式, 利用标定后的模型对厨房内的气流组织状态进行了详细的模拟分析研究, 最后利用该模型有效地模拟了不同风幕状态下的厨房环境, 为评估及改善厨房环境奠定了基础。

关键词: 厨房; 油烟浓度; 风幕; CFD 模拟

中图分类号: TK422

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 02-0042-06

餐饮油烟在北京市大气 PM_{2.5} 中的比例约为 13%, 在京津冀地区所占比例约为 6%, 在广州比例达到 14%^[1]。研究发现, 在餐饮油烟中检测出的挥发性有机物达 300 多种, 高温状态下的油烟凝聚物具有强烈的致癌、致突变作用^[2-5], 直接威胁着人体健康。目前传统的家用厨房往往空间封闭狭小, 在烹饪过程中油烟难以消散, 对于厨房人员的健康影响尤为突出。因此, 如何提升油烟排放效率, 改善厨房空气品质和环境舒适性, 保障人体健康已成为一个急待解决的问题。

长期以来国内外学者对于厨房油烟环境的研究主要依赖于现场实测。但是油烟扩散过程中瞬态效应明显, 烹饪过程中有效测量时间短, 且测试设备易被油烟等颗粒物堵塞而造成结果不准确甚至设备损坏。加之烹饪阶段人为干扰误差较大, 导致试验测试成本高, 精度也难以保证^[6-7]。随着计算机技术以及数值模拟的发展和成熟, 计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)在厨房环境工程设计及应用领域崭露头角^[8-10]。Mak 等^[11]利用 CFD 技术模拟了一个 2.6 m×3.2 m×2.9 m 带有窗户的典型厨房的气流组织情况, 结果表明, 为保证厨房良好的热舒适性, 厨房窗口面积最小应该为建筑面积的 23.33%; Panagopoulos 等^[12]通过 CFD

数值仿真, 模拟了一个公寓内的室内流场, 从排放因子的角度分析了厨房主要室内污染源、挥发性有机物和甲醛释放物及其排放特性。目前国内采用 CFD 数值模拟技术对厨房环境进行研究处于起步阶段, 相关文献较少。如何结合测试和仿真手段来分析评估厨房环境, 如何衡量、优化诸如增加风幕等方法来提升厨房环境是目前研究的热点之一。

本文以某住宅用厨房(含风幕式抽油烟机)为研究对象, 建立了该厨房的 CFD 模型。采用零方程湍流模型以兼顾厨房气流计算的效率与精度, 运用 6σ 理论进行实测数据的处理分析, 建立了实测油烟浓度 f_{test} 与水蒸气仿真油烟浓度 f_{CFD} 之间的近似关系式, 经过与试验数据的标定分析建立了修正后的 CFD 模型, 根据抽油烟机风幕系统的开、关 2 种工况, 最终就风幕系统对厨房环境的作用进行了数值分析及量化评估。

1 厨房环境数值模拟

1.1 物理模型及网格划分

根据厨房的实际建筑尺寸与室内厨具设备的分布情况, 建立如图 1 所示的几何模型。该厨房的几何尺寸为: 长×宽×高=4.2 m×2.4 m×2.6 m。

采用六面体占比 99.8%的混合网格, X、Y、Z

收稿日期: 2018-06-07。

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(理)(421700090); 宁波大学研究生科研创新基金(G17100)。

第一作者: 王飞(1994-), 男, 浙江杭州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 船舶与海洋结构物流体与动力学性能。E-mail: ccgwwj@163.com

*通信作者: 陈振雷(1963-), 男, 浙江宁波人, 教授/博士, 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

方向网格单元最大尺寸为 80 mm, 最小尺寸为 1 mm, 对抽油烟机的抽风口、上下风幕口处进行网格加密, 同时从网格无关性及计算效率两方面考虑, 确定网格数量为 93 万个。

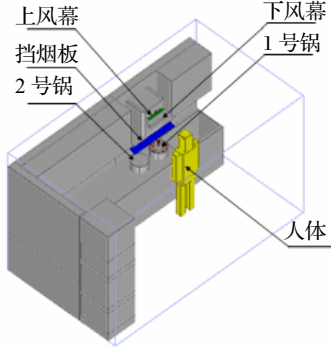


图1 厨房模型

1.2 数学模型

采用零方程湍流模型进行厨房环境的瞬态计算。零方程模型是指采用代数关系式把湍流黏性系数与时均值联系起来的模型。相对于双方程的 $k-\varepsilon$ 湍流模型及其他湍流模型, 零方程模型在处理室内气流组织模拟问题时不仅具有较高的收敛性和稳定性, 而且能够有效地节约计算资源^[12]。

空气湍流运动方程及浓度扩散控制方程具体如下:

连续方程

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0; \quad (1)$$

动量方程

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

式中: $\bar{u}$ 为流动速度; ρ 为流体密度; p 为流动压力; μ 为流体黏度; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力。 (1)和(2)式构成了流体流动的基本方程。

基于 Boussinesq 假设, 湍流脉动所造成的雷诺应力可以按照黏性应力的形式表示, 即:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij}, \quad (3)$$

式中: k 为单位质量流体湍动动能; μ_t 为湍流黏度, 分别定义为:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}, \quad (4)$$

其中 u' 表示速度的脉动值,

$$\mu_t = 0.03874 \rho u_0 L, \quad (5)$$

其中 u_0 为当地时均速度; L 为湍流脉动特征尺寸。

(5)式即为 Chen 等^[13]提出的零方程模型。

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \bar{u}) = \nabla \cdot ((k + k_t) \nabla T) + S_h, \quad (6)$$

式中: $h = \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p dT$ 为可感焓, 其中 C_p 为比热容, T 为温度, $T_{\text{ref}} = 298.15 \text{ K}$; $k_t = C_p \mu_t / Pr_t$, 其中 Pr_t 为普朗特数; S_h 为源项。

组分运输方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} Y_i) = -\nabla J_i + S_i, \quad (7)$$

式中: Y_i 为组分质量分数; S_i 为其他组分生产方式或者自定义的质量源项; J_i 定义为:

$$J_i = -(\rho D_i + \frac{\mu_t}{Sc_i}) \nabla Y_i, \quad (8)$$

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

运用有限体积法将上述微分方程离散化求解。

1.3 计算模型设置

在研究厨房环境的气流组织时采用与油烟密度接近的水蒸气来模拟油烟, 暂不考虑油烟本身具备的离散相相关性^[14]。1号锅作为油烟发生源, 采用速度进口边界, 相关速度、浓度百分比与时间的关系如图2所示。在 56~95 s 和 956~995 s, 1号锅油烟开启, 仿真水蒸气速度为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 浓度百分比设置为 100%, 温度设置为 70°C 。仿真时长与实际测试时长相同, 为 1800 s, 其中 0~900 s 为风幕开启状态, 901~1800 s 为风幕关闭状态。

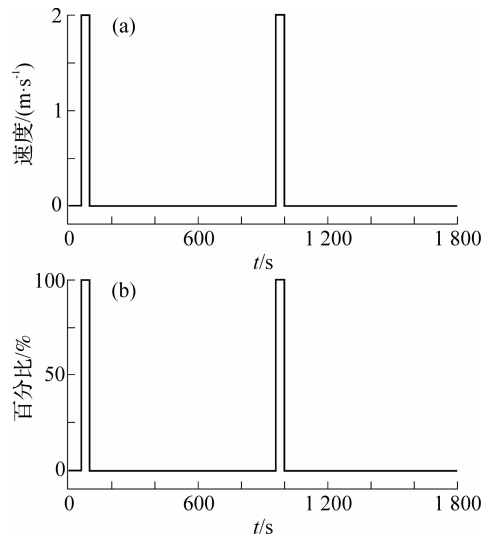


图2 1号锅边界条件

2 号锅无油烟产生,处于关闭状态;油烟机排烟口采用压力边界,设置负压 360 Pa;上(下)风幕射流口采用速度边界,出风速度均为 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,温度为 20°C ;赋予站立的人体新陈代谢率 $58.15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$;其他壁面边界采用绝热、无渗透、无滑移的边界设置。

采用 SIMPLE 算法求解离散方程,其中压力项采用 Body Force Weighted 格式,对流项、扩散项采用二阶迎风格式。

2 计算模型标定分析

2.1 厨房油烟浓度测试

为标定计算模型,对常见的中式烹饪炒土豆丝过程所产生的油烟浓度进行了试验测试,如图 3(a)所示。在厨房内 a、b 两个位置分别布置颗粒物采样仪(图 3(b))。a 测点距离地面 188 cm,距离橱柜后壁 107 cm,距离烟机左侧 40 cm; b 测点距离地面 166 cm,距离橱柜后壁 77 cm,距离烟机左侧 28 cm。采用 Lighthouse 颗粒物采样仪对 a、b 两测点的油烟浓度进行测试与记录,测试时长 1800 s。该采样仪通过捕集到油烟颗粒物质量以及抽取的气体体积,可以计算颗粒物的排放浓度及排放总量,最高分辨率达 $0.01 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,每 5 s 采集一次数据。试验严格按照既定的测试流程进行,共重复进行 20 次,得到如图 4 所示的 a、b 两测点风幕开和关两状态下的油烟质量浓度 f_{test} 。

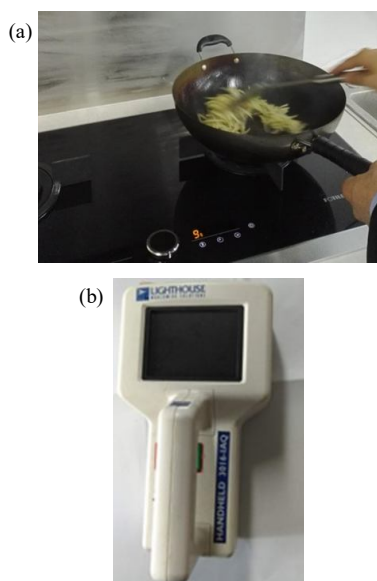


图 3 油烟环境试验(a)和颗粒物采样仪(b)

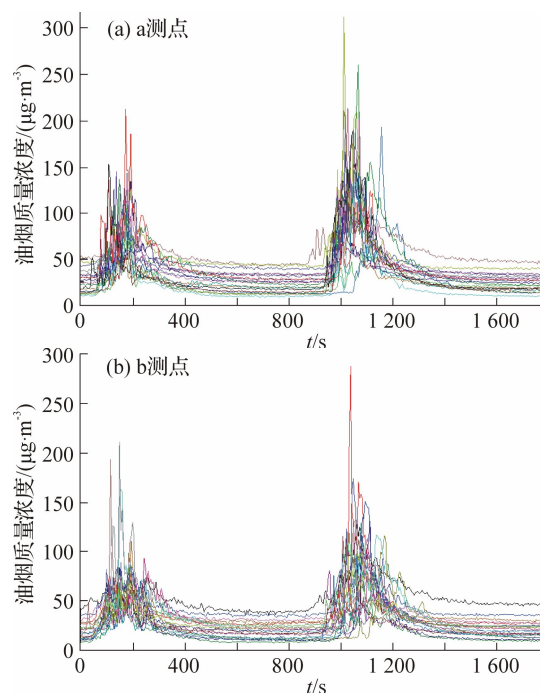


图 4 20 组油烟质量浓度试验曲线

2.2 测试数据 6σ 处理

考虑测试过程及所测数据的偏差,为保证数据分析的合理性,采用 6σ 测试数据处理方法,去掉低于均值 5%,超出 95% 的异常点,然后取均值。针对本试验所采集的 20 组数据,去除异常点后剩下 18 组有效数据,取均值后得到如图 5 所示的 f_{test} 测试曲线。

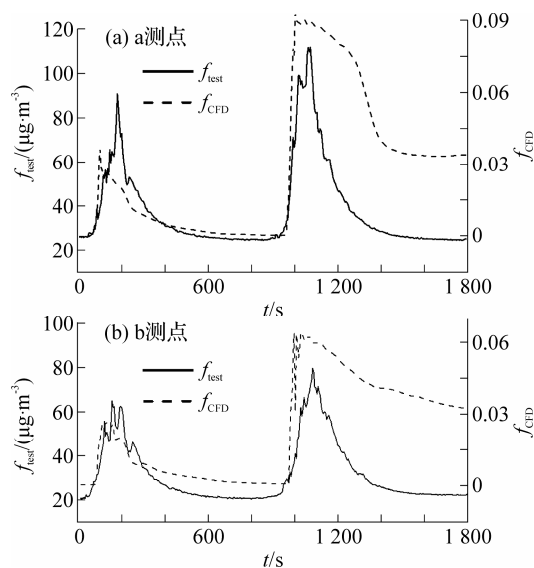


图 5 6σ 处理后 a、b 测点均值与初步仿真测试标定

2.3 油烟浓度初步标定分析

将仿真结果与测试数据按最佳吻合放置于同

一图中进行对比分析(图 5), 仿真结果基本上反映出厨房油烟浓度的变化规律, 仿真与实验曲线均呈双峰形状; 风幕开启状态下的油烟浓度峰值小于风幕关闭系统下的油烟浓度峰值, 与实验曲线两峰相对关系保持一致。

为定量分析图 5 所示的数据对比关系, 考虑基于实测的油烟浓度 f_{test} 与模拟的水蒸气仿真油烟浓度 f_{CFD} 有组分差别, 并注意到基于风幕开启、关闭测试点压力值对结果的影响, 故此建立以下近似公式来描述上述两者之间的关系:

$$f_{\text{test}} = n\Delta pf_{\text{CFD}} + m, \quad (9)$$

式中: n 、 m 为常数; Δp 为测点 a 或 b 风幕开、关 2 种工况的压差, 由图 6 可见此值为 1.02 Pa。由图 5 比较两纵坐标某两对值(如首尾两对值)可以计算得到 n 为 $1\,062.09\,\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{Pa}^{-1}$, m 为 $26.25\,\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

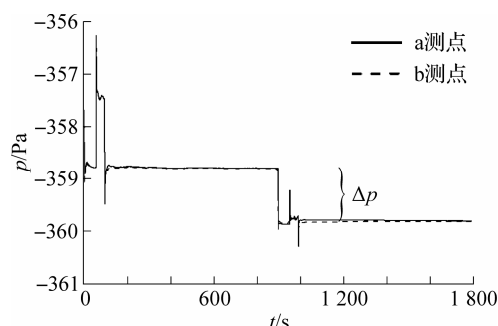


图 6 a、b 测点静压

初步得到测试值 f_{test} 与仿真值 f_{CFD} 的关系后, 再重点关注图 5 中 2 个峰值及曲线尾部这 3 个关键部位的测试值与仿真值差异, 见表 1。a、b 两测点在上述 3 个关键部位的测试与仿真平均误差较大, 分别为 44%、43%。注意到该 CFD 厨房模型是按完全密封处理的, 与实际不符, 因此需要对该模型进行修正。

表 1 a、b 两测点初步对标分析

测点	数据 来源	测试与仿真对标值/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{Pa}^{-1})$			3 组值平 均误差/%
		开风幕峰	关风幕峰	尾部	
a	测试值	91	112	25	44
	仿真值	65	128	63	
b	测试值	65	79	22	43
	仿真值	55	94	62	

2.4 CFD 模型修正

修正模型考虑了实际厨房门缝的影响, 如图 7 所示。该门缝边界设置为标准大气边界, 其余边界

条件设置不变, 保证 CFD 模型室内气压稳定, 符合试验厨房气流组织实际情况。

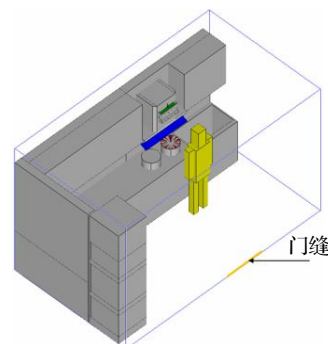


图 7 修正后的厨房模型

2.5 修正后模型标定分析

同上, 在修正模型中将计算得到的水蒸气仿真油烟浓度 f_{CFD} 与实测的油烟浓度 f_{test} 进行对比, 如图 8 所示。结果表明, 考虑实际厨房门缝存在的影响后, CFD 模型仿真值与试验曲线吻合度得以大幅提升, 两者基本一致。其中门缝处进气流量 $5.7\,\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$, 油烟机抽风口处流量为 $14.0\,\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$, 可见门缝流量对厨房流场模拟相当重要, 门缝对结果的影响不可忽略, 不考虑门缝的模拟与实际不符。

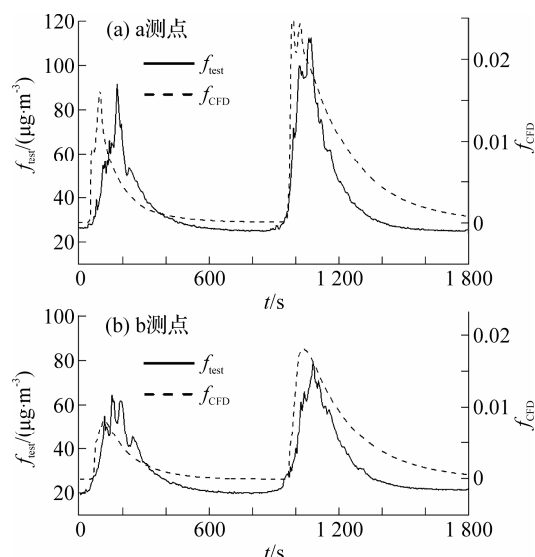


图 8 修正后模型油烟浓度仿真测试标定

由图 9 可见测点 a 或 b 风幕开、关 2 种工况的压差 Δp 约为 2.9 Pa, 再对比图 8 中两纵坐标首尾两对值, 可以计算得到(9)式模型修正后的常数 n , m 分别等于 $1\,109.2\,\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{Pa}^{-1}$, $26.3\,\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。(9)式中尽管常数 n 模型修正前后略有误差(4.2%), 但关系式

保持不变,从而基本验证了(9)式所揭示的风幕开、关两工况有压差情况下实测的油烟浓度 f_{test} 与水蒸气仿真油烟浓度 f_{CFD} 的关系式。

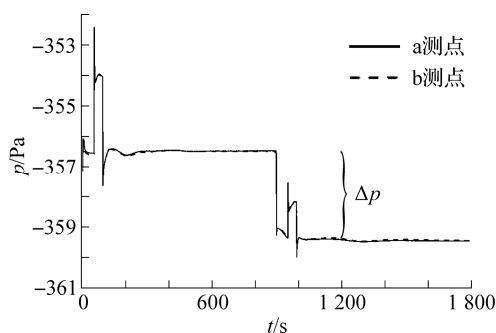


图9 a、b测点静压

分析图8中两峰值及曲线尾部这3个关键点测试与仿真值的差异,见表2。a测点3个关键点处的平均误差由修正前的44%降至修正后的10%;b测点关键点处的平均误差由修正前的43%降至修正后的15%,故修正后的CFD模型能够相对准确地反映厨房的真实油烟环境。

表2 CFD模型修正后a、b两测点对标分析

测点	数据来源	测试与仿真对标值/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{Pa}^{-1}$)			3组值平均误差/%
		开风幕峰	关风幕峰	尾部	
a	测试值	91	112	25	10
	仿真值	86	119	31	
b	测试值	65	79	22	15
	仿真值	53	84	28	

3 仿真结果分析与讨论

基于修正后的CFD计算模型,本文对风幕式抽油烟机厨房环境进行详细计算与分析。图10为 $z=2.64\text{ m}$ 处的油烟浓度分布云图。由图可见,风幕的开启,有效隔离了油烟颗粒物的扩散,显著降低了人体周围的油烟浓度。其中风幕开启时,人体脸

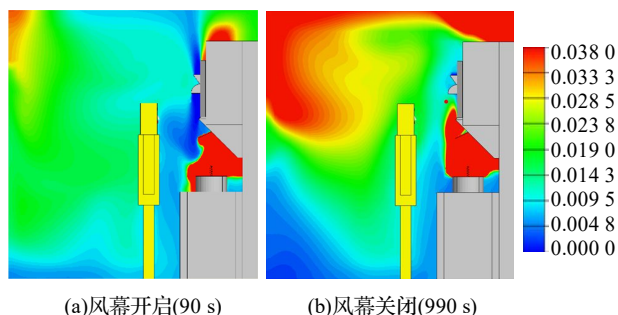


图10 $z=2.64\text{ m}$ 油烟浓度分布

部油烟质量浓度为 $54.5\sim 56.4\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,口鼻处质量浓度 $55.4\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;当风幕关闭时,人体脸部油烟质量浓度高达 $88.3\sim 98.0\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,口鼻处质量浓度为 $88.3\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中口鼻处质量浓度增幅达59.2%。

图11为厨房截面 $z=2.64\text{ m}$ 温度云图。由图可知,风幕开启后,烹饪所产生的热量被抽油烟机带走得更彻底,提高了人体体表热舒适性。其中风幕开启期间,人体脸部的最高温度达到 $34.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低温度为 $26.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,脸部温差为 $8.9\text{ }^{\circ}\text{C}$;当风幕关闭后,人体脸部最高温度达到 $39.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低温度为 $28.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,脸部温差达到 $11.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,热舒适性相对较差。

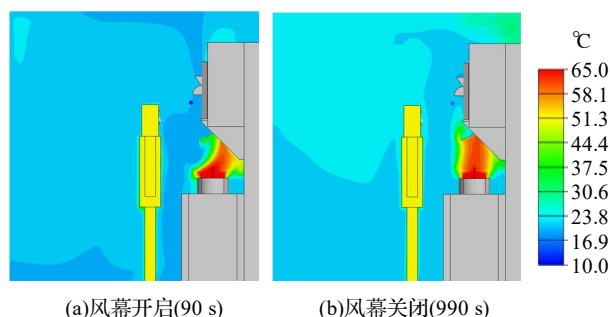


图11 $z=2.64\text{ m}$ 厨房温度分布

图12为截面 $z=2.64\text{ m}$ 速度分布云图,由图可知风幕与隔烟屏两者的组合有效减少了油烟的逸散,隔离了锅与人体区域之间的组分扩散。

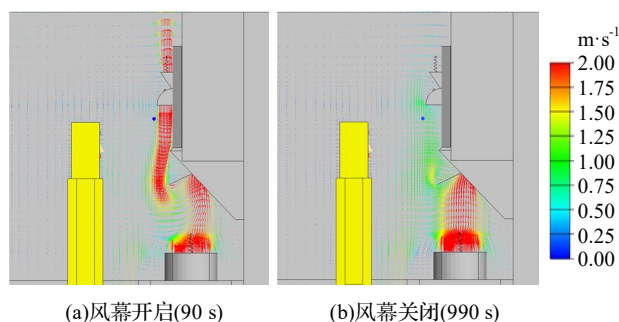


图12 $z=2.64\text{ m}$ 速度分布

4 结论

基于零方程湍流模型的CFD数值方法模拟厨房油烟环境,并采用 6σ 方法处理后的试验数据对仿真模型进行标定,形成了一套完整、可靠的仿真流程,主要结论如下:

(1)建立了实测的油烟浓度 f_{test} 与水蒸气仿真油烟浓度 f_{CFD} 之间的近似关系式,据此可以通过厨房环境的CFD仿真对标真实的油烟浓度。

(2)通过与试验结果的标定分析,模型修正前后关键测点的平均误差分别从 44%和 43%降至 10%和 15%,证明修正后模型能够相对准确地反映厨房真实油烟浓度、温度等指标,同时可以有效地模拟不同风幕状态下的厨房环境。

参考文献:

- [1] 寇江泽. 敢啃硬骨头,才有好空气[N]. 人民日报, 2016-12-24(12).
- [2] Beumer R R, Kusumaningrum H. Kitchen hygiene in daily life[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2003, 51(4):299-302.
- [3] 唐爱玲. 住宅厨房卫生间环境质量评价与改善研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
- [4] 朱利中, 王静, 江斌煊. 厨房空气中 PAHs 污染特征及来源初探[J]. *中国环境科学*, 2002, 22(2):142-145.
- [5] 王凯雄, 朱杏冬. 烹调油烟气的成分及其分析方法[J]. *上海环境科学*, 1999, 18(11):526-528.
- [6] Melink S. Commissioning kitchen: Making sure the equipment fills the bill[J]. *ASHRAE Journal*, 2003, 45(6): 23-27.
- [7] 陈吉伟. 空调室内流场及颗粒物运动分布的数值模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [8] 徐亚, 赵金平, 陈进生, 等. 室内空气中颗粒物污染特征研究[J]. *环境污染与防治*, 2011, 33(1):52-60.
- [9] 陈锋, 周斌, 刘金祥, 等. 条缝隙型空气幕对抽油烟机污染控制的辅助作用[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(3): 709-718.
- [10] Ma Y J, Chen R J, Pan G W, et al. Fine particle air pollution and daily mortality in Shenyang, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(13):2473-2477.
- [11] Mak C M, Yik F W H. A study of natural ventilation in a kitchen using computational fluid dynamics (CFD)[J]. *Architectural Science Review*, 2002, 45(3):183-190.
- [12] Panagopoulos I, Karayannis A, Kassomenos P, et al. A CFD simulation study of VOC and formaldehyde indoor air pollution dispersion in an apartment as part of an indoor pollution management plan[J]. *Aerosol & Air Quality Research*, 2011, 11(6S):758-762.
- [13] Chen Q Y, Xu W R. A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation[J]. *Energy and Building*, 1998, 28(2):137-144.
- [14] 李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 等. 模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散[J]. *环境科学*, 2017, 38(1):33-40.

Kitchen environment analysis of range hood with air curtain based on CFD technology

WANG Fei, CHEN Zhen-lei*, SHI Fan

(Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to study the kitchen environment of a new type range hood with air curtain, a CFD model based on zero-equation turbulence theory is established in this paper. It simulates a standard experimental kitchen. The model is calibrated by the test data obtained from the kitchen cooking fume concentration test. And the data was processed by 6σ approach. A relationship between the measured cooking fume concentration and the simulated steam vapor concentration is established approximately. The calibrated model is able to simulate the air distribution characteristics in the ventilated kitchen. It can also be used to analyze the kitchen environment with different air curtains of the range hood and offer a basis for evaluating and improving the kitchen environment.

Key words: kitchen; fume concentration; air curtain; CFD simulation

(责任编辑 韩 超)