

DOI: 10.7652/xjtuxb201303022

带吸油烟机厨房内热环境评价的数值分析

王星, 刘小民, 席光

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 以带有吸油烟机的家庭闭式厨房为研究对象, 数值研究了烹饪过程中厨房内部热环境以及烹饪者对温度和油烟污染的感知。根据已获得的关于气幕式吸油烟机的最佳设计参数组合方案, 从人体感知温度、人体感知油烟浓度、油烟释放温度、油烟逃逸浓度 4 个方面对比了原型吸油烟机和气幕式吸油烟机对厨房环境的影响, 并数值分析了带有吸油烟机的厨房内油烟流动特性及其逃逸机理。研究结果表明: 引入合理设计的气幕式吸油烟机能有效抑制厨房内油烟和热空气逃逸, 降低人体面部区域对油烟和高温的感知, 使厨房内操作者的舒适度得到提高。

关键词: 射流气幕; 吸油烟机; 厨房环境; 数值模拟

中图分类号: X57; O355 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)03-0120-06

Numerical Analysis on Thermal Environment Evaluation in Kitchen with Range Hood

WANG Xing, LIU Xiaomin, XI Guang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A residential kitchen was selected as the studied object, and the indoor air environment including the distribution of temperature and oil fumes pollutant in the closed kitchen with the range hood system was simulated numerically by using the commercial CFD software CFX. On the basis of the optimal scheme on the air curtain range hood obtained in the previous paper Part I, the effects of the original and improved range hood on the kitchen environment were analyzed respectively according to the body perception to temperature and oil fume concentration, oil fume temperature and oil fume escaping. The flow characteristics and spillage mechanisms of the oil fumes were also presented in the kitchen. The results show that the improved range hood can restrain the oil fume to escape into the kitchen. The perception to the oil fume with high temperature in the body facial region can be reduced by using the improved range hood, and the comfort of cooking in the kitchen is improved.

Keywords: jet air curtain; range hood; kitchen environment; numerical simulation

气幕式吸油烟机能够有效抑制烹饪过程中产生的油烟向厨房内扩散, 减少室内空气污染, 达到改善厨房环境的效果。作者通过对吸油烟机射流气幕的

参数化研究, 获得了厨房内人体感知最舒适的气幕式吸油烟机结构参数, 并给出了厨房内气幕吸油烟机的数值计算模型和计算方法^[1]。

收稿日期: 2012-05-25。 作者简介: 王星(1986—), 男, 博士生; 刘小民(通信作者), 男, 副教授。 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(xjj20100073); 博士后基金资助项目(20100481329); 中国博士后科学基金特别资助项目(201104665)。

网络出版时间: 2012-11-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121116.1039.003.html>

Huang 等人采用试验方法对传统家用吸油烟机和倾斜气幕式吸油烟机的油烟泄漏特性进行了比较,研究发现:对于传统吸油烟机,放置炊具的灶台前缘和吸油烟机下方两侧边为油烟主泄漏区;对于倾斜气幕式吸油烟机,并未观察到油烟的泄漏^[2]。为了进一步明确气幕射流参数对油烟逃逸的影响及其作用机理,Chen 等人对带有壁挂式吸油烟机和气幕式吸油烟机的厨房内空气流动状态和油烟泄漏特性进行了试验测量^[3]。壁挂式吸油烟机的油烟泄漏区主要位于灶台前缘和吸油烟机两侧边缘区域,当吸油烟机的风量大于临界风量时,虽然能够减少吸油烟机两侧的油烟泄漏,但同时会增加灶台前缘的油烟逃逸。当采用气幕式吸油烟机时,油烟分布广泛并且表现出不稳定的运动状态,这是由于没有足够的空气进入到被气幕封闭的区域内。增大气幕射流风量有助于减少油烟泄漏,然而提高射流速度会引起湍流扩散增加,增大油烟逸流量。Tsai 等人试验研究了固定吸气流量与吸气速度的传统式吸油烟机 and 挡帘气幕式吸油烟机对人体面部呼吸区域的油烟浓度大小的影响^[4]。当流量一定时,相对于传统式吸油烟机,挡帘气幕式吸油烟机对油烟浓度分布的控制效果要好得多;吸气流量对吸油烟机性能的影响较吸气速度更敏感。Huang 等人在试验研究中分别针对壁挂式吸油烟机和气幕式吸油烟机考虑了人体运动对厨房内空气运动和油烟扩散特性的影响,研究指出:当操作者静止站立在灶台前方时,油烟向操作者方向迁移,引起大量油烟通过吸油烟机前缘向厨房内逃逸;当操作者在厨房内移动时,壁挂式吸油烟机和气幕式吸油烟机的油烟泄漏量都有所增大,使得厨房内环境恶化^[5]。

相对于试验研究,厨房内空气运动、温度和油烟浓度分布的数值模拟计算更能对厨房内环境改善提供有益的参考。Hunt 等人采用改进的数学模型描述了径向射流在吸油烟机进口局部产生的对称流动及其对油烟运动特性的影响^[6]。Chiang 等人采用数值模拟考察了传统厨房内温度和空气污染物的分布,以期为改善厨房内环境寻找有效的策略^[7]。Lim 等人在吸油烟机中引入分流板,数值研究了分流板形状改变对厨房内空气质量和环境的影响^[8]。我国国内针对厨房内环境污染的数值研究工作起步相对较晚,朱培根等人采用数值计算方法对厨房内油烟浓度分布进行了模拟,并在不同风量条件下对油烟浓度场进行了实验测量^[9]。王希星通过对高层住宅厨房内油烟污染进行数值分析,详细研究了高

层住宅厨房集中排烟系统设计方法及其对室内环境的影响^[10]。

以上试验研究和数值计算主要集中在气幕式吸油烟机近场区域流动特性方面,以揭示吸油烟机对油烟逃逸的控制效果,很少有从人体对温度和油烟浓度感知的角度来评价吸油烟机性能及其对厨房环境的改善。本研究耦合整流板和优化的射流气幕方案设计^[1],在吸油烟机风量为 $10.5\text{ m}^3/\text{min}$ 的条件下,采用数值模拟方法研究了原型吸油烟机和气幕式吸油烟机对厨房内温度和油烟分布的影响,详细分析了吸油烟机近场区油烟逃逸以及人体面部近呼吸区对油烟浓度(文中均为体积分数)和温度的感知,从而为改善厨房环境提供参考。这对于厨房建造师、吸油烟机设计者,甚至健康和环保人士来说都是十分重要的。

1 吸油烟机-厨房模型的建立及性能分析

图 1 为吸油烟机-厨房模型以及后续分析用到的监测点和观察位置。监测点位置坐标为 $(0.8\text{ m}, 1.45\text{ m}, 1.22\text{ m})$ 。两个观察面用于分析厨房内的油烟和温度的分布,其中观察面 1 为 YOZ 平面,沿 X 方向上 $X=0.3\text{ m}$,主要用来显示吸油烟机前侧油烟的分布;观察面 2 为 XOY 平面,沿 Z 方向上 $Z=1.22\text{ m}$,用来显示吸油烟机集烟罩两侧油烟的分布。

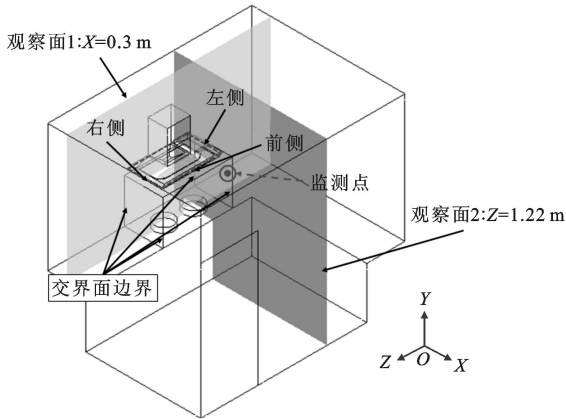


图 1 吸油烟机-厨房模型及其监测点和观察位置

文献^[1]进行的参数化研究表明气幕式吸油烟机的最佳设计参数组合为:射流速度 1.5 m/s ,射流角度 -5° ,射流孔宽度 4 mm ,整流板面积 0.22 m^2 ,吸油烟机风量 $10.5\text{ m}^3/\text{min}$ 。表 1 给出了原型吸油烟机 and 优化的气幕式吸油烟机的性能比较。从表中可以看出,气幕式吸油烟机几乎完全阻挡了油烟的

逃逸,在监测点处油烟逃逸浓度仅为 0.000 09%。人体几乎感知不到油烟的污染,油烟释放温度和人体感知温度分别下降到 299.6 K 和 301.0 K,均低于人体正常体温 309.2 K,烹饪者在操作过程中能够避免热污染。这表明采用优化的气幕式吸油烟机将使得人体感知的舒适度增加,并可改善厨房环境。

表 1 原型吸油烟机与最优方案气幕吸油烟机的监测数据对比

监测指标	原型吸油烟机	气幕式吸油烟机
T_1 /K	308.40	301.00
C_1 /%	0.007 6	1.39×10^{-8}
T_2 /K	305.72	299.60
C_2 /%	0.018 3	0.000 09

注: T_1 为人体感知温度; C_1 为人体感知油烟浓度; T_2 为油烟释放温度; C_2 为油烟逃逸浓度。

由文献[1]对正交试验结果的极差分析还可发现,吸油烟机风量是影响厨房内热环境的重要因素,其大小主要通过风量对厨房内热环境的影响规律确定。图 2 为人体感知温度、人体感知油烟浓度、油烟释放温度和油烟逃逸浓度随吸油烟机风量的变化。由图可知,当吸油烟机风量为 $10.5\text{ m}^3/\text{min}$ 时,人体感知温度、人体感知油烟浓度、油烟释放温度、油烟逃逸浓度这 4 个指标均为最小值。这表明人体舒适度提高,油烟逃逸得到有效控制,因此也是气幕式吸油烟机的最佳风量选为 $10.5\text{ m}^3/\text{min}$ 的原因。

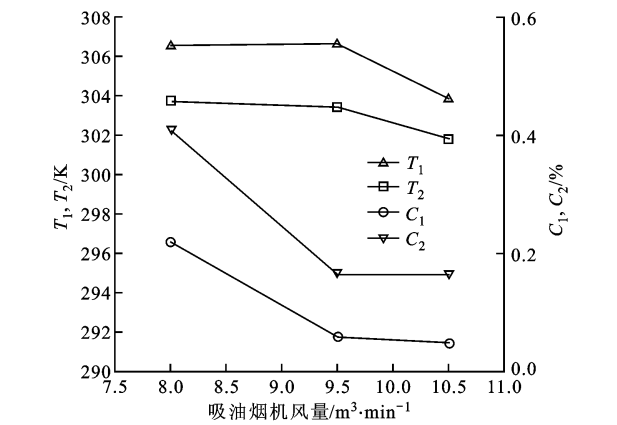


图 2 吸油烟机风量对厨房内环境的影响

2 厨房内环境分析

2.1 厨房内油烟浓度分布

为了明确优化后的气幕式吸油烟机对厨房环境和人体感知的改善,本文首先从厨房内油烟浓度 φ_v 角度与原型吸油烟机进行了对比。

图 3 为观察面 1 上厨房内油烟浓度分布。采用原型吸油烟机时,在吸油烟机上方有油烟存在,并有可能沉积在吸油烟机表面上,在吸油烟机集烟罩右侧处存在明显的油烟逃逸现象,油烟随着热空气向上升腾,漂浮在厨房上方。从图 3b 中可以看到,当采用参数优化的气幕式吸油烟机后,吸油烟机集烟罩右侧无明显的油烟逃逸,油烟随热空气被吸油烟机带走,排到厨房外部。

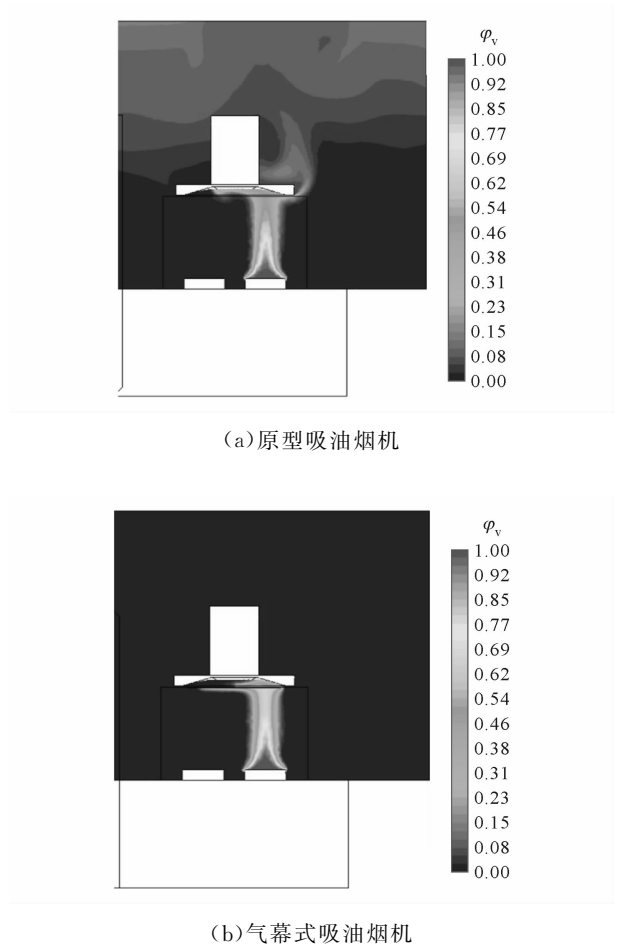
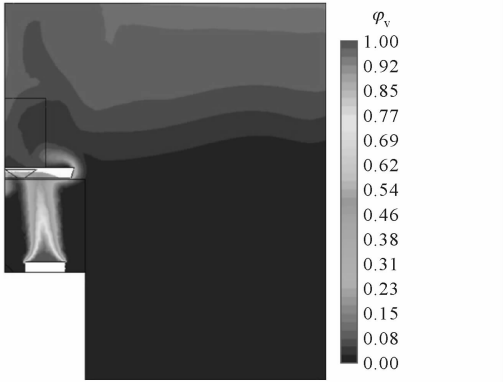


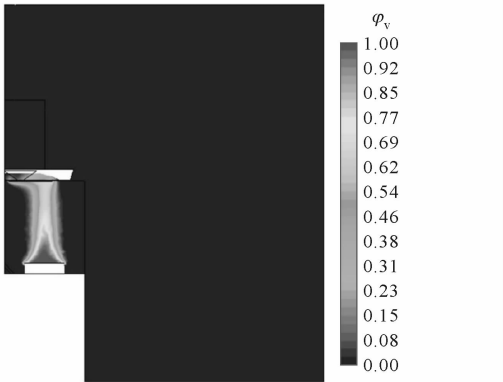
图 3 观察面 1 上的油烟浓度分布

图 4 为观察面 2 上厨房内油烟浓度分布。采用原型吸油烟机时,油烟经吸油烟机前侧向外逃逸,随热空气向厨房上方迁移,离厨房顶部越近,油烟分布浓度越大。当厨房内温度降低时,这些聚集在厨房上部的油烟如果不被及时清除,将会再次污染厨房内环境。采用参数优化的气幕式吸油烟机后,在吸油烟机集烟罩前侧边无明显的油烟逃逸现象,除热源到吸油烟机下表面之间的区域之外,油烟浓度几乎为 0。

结合对图 3 和图 4 的分析可知,采用参数优化的气幕式吸油烟机后,有效地抑制了油烟的逃逸,降

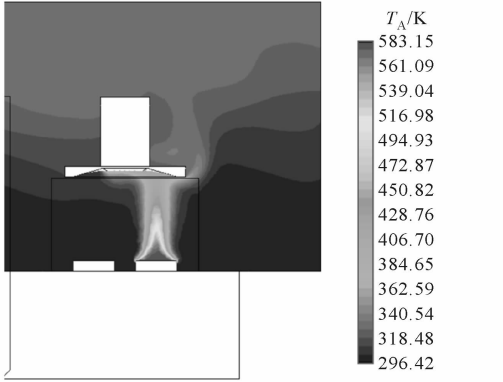


(a)原型吸油烟机

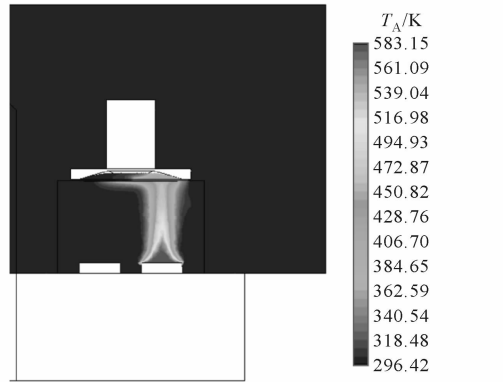


(b)气幕式吸油烟机

图 4 观察面 2 上的油烟浓度分布



(a)原型吸油烟机



(b)气幕式吸油烟机

图 5 观察面 1 上的温度分布

低了油烟对厨房内环境的污染。

2.2 厨房内温度分布

对于烹饪者来讲,除了烹饪过程中产生的油烟会使其健康受到危害,高温气体的产生也会使其感到不适,因此需要对厨房内热环境进行分析和改进。图 5 分别给出了带有原型吸油烟机和气幕式油烟机的厨房内观察面 1 上的空气温度 T_A 的分布。从图 5a 中可以看出:原型吸油烟机并不能将烹饪过程中产生的热空气全部吸走,部分热空气逃逸后向厨房上方逃逸;在图 5b 中,采用优化的气幕式吸油烟机后,热空气几乎被全部吸走,高温(温度大于 310 K)空气主要集中分布在炊具与吸油烟机下表面之间的局部区域。炊具上部吸油烟机的抽吸,使两个炊具之间很少有热空气的窜动。

图 6 所示的观察面 2 上的厨房内空气温度分布表明,采用原型吸油烟机时,大量高温气体从吸油烟机的集烟罩前侧边缘向外逃逸,站立在灶台前的操作者会直接受到高温气体的影响而感到不适。在图 6b 中,气幕阻隔了热空气的逃逸,烹饪过程产生的高温基本被控制在炊具到吸油烟机之间的局部范围

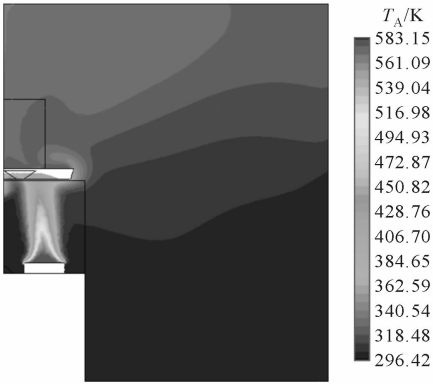
内,操作者受到的热影响明显减小。

2.3 厨房内油烟浓度和温度随人体高度的变化

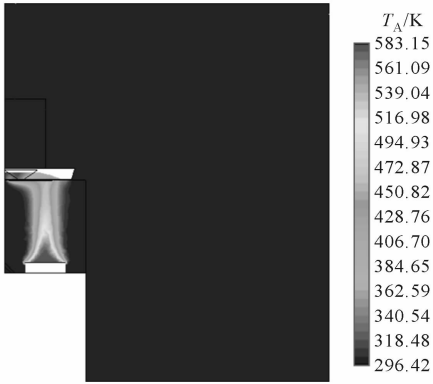
为了全面分析和评价优化设计的气幕式吸油烟机对人体感知油烟浓度和温度场的控制效果,本文给出了厨房内油烟浓度和温度分布沿人体高度的变化。由于站立在灶台前的烹饪者最直接受到油烟和热污染,因此根据亚洲女性的体形特征,给定操作者身体高度为 1.6 m,正对工作的炊具站立,距离灶台前 0.2 m。

图 7 为厨房内温度沿人体高度的变化。采用原型吸油烟机时,大约从 0.6 m 高度开始,人体感知油烟温度沿人体高度不断增加,在人体面部区域达到 309 K 左右。采用优化的气幕式吸油烟机时,沿人体高度方向上的温度先升高,从 1.3 m 位置处开始逐渐降低。在人体面部区域温度约为 301 K,低于人体正常体温,因此不会产生人体对温度的不适。

图 8 给出了带原型吸油烟机和气幕式油烟机的厨房内油烟浓度沿人体高度方向上的变化。采用原型吸油烟机时,厨房内油烟浓度随着人体高度的



(a)原型吸油烟机



(b)气幕式吸油烟机

图 6 观察面 2 上的温度分布

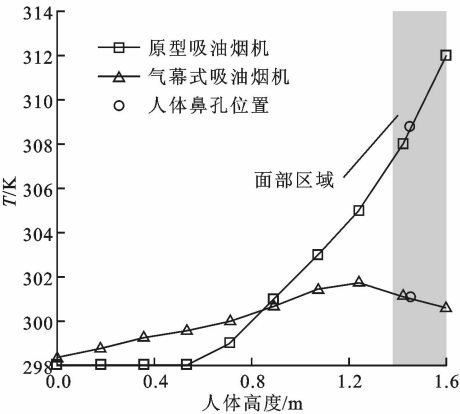


图 7 沿人体高度方向上温度的变化

增加而增大,从 1.2 m 处开始急剧增加。当采用优化设计的气幕式吸油烟机时,厨房内沿人体高度方向上的油烟浓度较采用原型吸油烟机时大约低 4 个数量级,在 1.2 m 高度以上油烟浓度开始降低。通过对人体面部近呼吸区内油烟浓度变化的分析可以看出,气幕式吸油烟机能够有效控制油烟对人体面部的污染,减少人体对油烟等污染物的吸入。

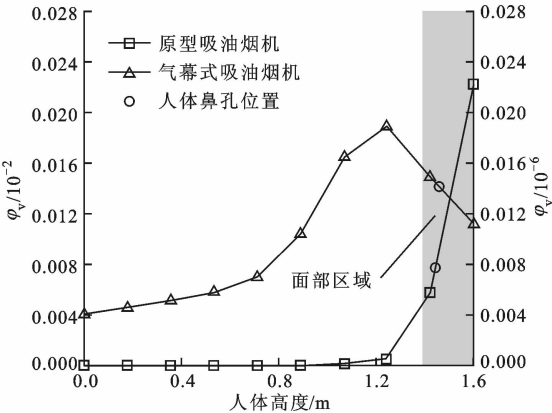
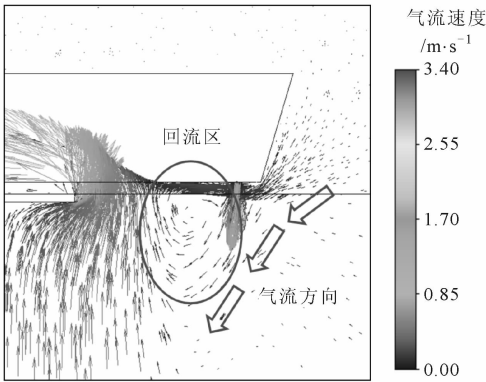


图 8 沿人体高度方向上油烟浓度的变化

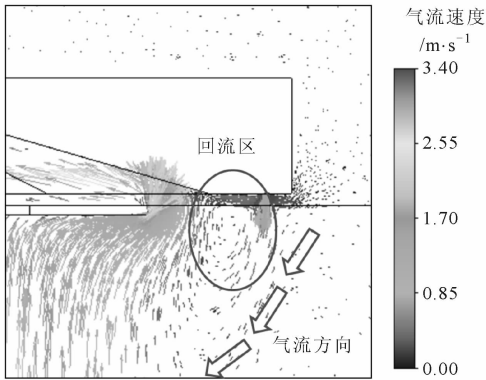
2.4 速度矢量场分析

以上结果表明,采用优化的气幕式吸油烟机能够有效改善厨房内环境。由于速度场对油烟浓度和温度分布有重要影响,本文采用速度矢量揭示气幕式吸油烟机对油烟逃逸和温度分布的控制机理。

如图 9a 所示,当采用优化的气幕时,吸油烟机前侧下表面附近会形成回流区,使油烟和高温空气被限制在气幕以内而无法向厨房逃逸。图 9b 所示的吸油烟机左侧附近的速度矢量也显示出了同样的现象。



(a)吸油烟机前侧



(b)吸油烟机左侧

图 9 气幕式吸油烟机附近速度矢量

3 结 论

本文采用数值模拟方法,将原型吸油烟机和经参数优化的气幕式吸油烟机引入吸油烟机-厨房模型,通过人体感知度及厨房内油烟和温度分布的对比,分析了原型吸油烟机和气幕式吸油烟机对厨房内环境的影响差异,揭示了气幕式吸油烟机对烹饪过程中产生的带有油烟的高温气体的流动控制机理,获得的主要结论如下。

(1)常规吸油烟机的采用会使烹饪过程中产生的油烟和高温气体向厨房上部逃逸,并分布在吸油烟机上方到厨房顶部空间内,严重影响了厨房内的环境。

(2)引入合理设计的气幕式吸油烟机能有效抑制厨房内油烟和热空气逃逸,降低人体面部区域对油烟和高温的感知,提高厨房内操作者的舒适度。

(3)从人体感知温度、人体感知油烟浓度、油烟释放温度和浓度4个方面对厨房内环境进行评价,为厨房设计和吸油烟机性能改进提供了有益的参考。

在下一步工作中,本研究将在数值计算模型中施加人体模型及人体运动,以实现对厨房环境更真实的模拟;另一方面,还将同时考虑厨房内油烟污染、热污染以及噪声污染;同时,还将采用DNS、LES等高级的数值方法,以进一步提高对厨房内污染物运动和分布状态的计算精度。

参考文献:

- [1] 刘小民,王星,席光. 厨房内吸油烟机射流气幕的参数化研究[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(1): 126-131.
LIU Xiaomin, WANG Xing, XI Guang. Parameterization of jet air curtain of range hood in kitchen [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(1): 126-131.
- [2] HUANG R F, NIAN Y C, CHEN J K. Static condition differences in conventional and inclined air-curtain range hood flow and spillage characteristics [J]. Environmental Engineering Science, 2010, 27(6): 513-522.
- [3] CHEN J K, HUANG R F, DAI G Z. Flow characteristics and spillage mechanisms of wall-mounted and jet-isolated range hoods [J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2010, 54(7): 651-661.
- [4] TSAI S J, HUANG R F, ELLENBECKER M J. Air-

borne nanoparticle exposures while using constant-flow, constant-velocity, and air-curtain-isolated fume hoods [J]. Annals of Occupational Hygiene, 2011, 54(1): 78-87.

- [5] HUANG R F, DAI G Z, KUN C J. Effects of mannequin and walk-by motion on flow and Spillage characteristics of wall-mounted and jet-isolated range hoods [J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2010, 54(6): 625-639.
- [6] HUNT G R, INGHAM D B. Long range exhaustion: a mathematical model for the axisymmetric air flow of a local exhaust ventilation hood assisted by a turbulent radial jet [J]. Annals of Occupational Hygiene, 1996, 40(2): 171-196.
- [7] CHIANG C M, LAI C M, CHOU P C, et al. The influence of an architectural design alternative (tansoms) on indoor air environment in conventional kitchens in Taiwan [J]. Building and Environment, 2000, 35(7): 579-585.
- [8] LIM K, LEE C. A numerical study on the characteristics of flow field, temperature and concentration distribution according to changing the shape of separation plate of kitchen hood system [J]. Energy and Buildings, 2008, 40(2): 175-184.
- [9] 朱培根,朱明亮,蔡浩. 住宅厨房油烟浓度的数值模拟和实测[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 2006(7): 153-156.
- [10] 王希星. 高层住宅厨房集中排烟气系统设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.

[本刊相关文献链接]

- 刘小民,王星,席光. 厨房内吸油烟机射流气幕的参数化研究. 2013,47(1):126-131.
- 顾兆林,张铭旭. 采用低温太阳能集热的旋转热浮力射流风能利用概念. 2013,47(1):7-10.
- 谷云庆,赵刚,郑金兴,等. 射流表面射流角度与射流速度耦合减阻特性. 2012,46(9):71-77.
- 张荻,樊涛,蓝吉兵,等. 涡旋射流控制逆压梯度平板边界层分离的涡结构研究. 2012,46(1):1-8.
- 刘小民,周海洋,王星,等. 低压透平叶片表面合成射流非定常流动控制机理研究. 2011,45(3):95-101.
- 刘小民,周海洋. 低压透平叶片流动分离主动控制的数值研究. 2010,44(9):21-26.
- 刘小民,肖立宁. 射流式漩涡发生器对离心叶轮性能的影响. 2009,43(6):123-128.
- 王海军,卜琳,罗毓珊,等. 扇形射流的空气动力学特性. 2009,43(3):97-100.

(编辑 荆树蓉)