

厨房内吸油烟机射流气幕的参数化研究

刘小民, 王星, 席光

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对带有射流气幕和整流板的家用吸油烟机, 采用正交试验方法, 分别研究了射流速度、射流角度、射流孔宽度、整流板面积和吸油烟机风量对吸油烟机性能及其厨房内环境的影响, 最终获得了能够有效控制油烟和热空气逃逸的吸油烟机气幕设计参数。结果表明: 吸油烟机风量对厨房内油烟浓度和温度有重要的影响, 当吸油烟机风量为 $10.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 、整流板面积为 0.22 m^2 、射流速度为 1.5 m/s 、射流角度为 -5° 、射流孔宽度为 4 mm 时, 厨房内人体舒适度最佳。

关键词: 射流气幕; 吸油烟机; 厨房环境; 试验设计; 参数化研究

中图分类号: X57; O355 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)01-0126-06

Parametric Study of Jet Air Curtain of Range Hood in Kitchen

LIU Xiaomin, WANG Xing, XI Guang

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

Abstract: The orthogonal experiment design was performed to investigate the effects of the jet velocity, the jet angle, the jet slot width, the commutated plate area and the range hood flow rate on the performance of the range hood and the kitchen environment for the range hood with a jet air curtain and a commutated plate. The optimum design parameters of the air curtain were obtained. The results show that, coupled with the commutated plate, the air curtain with the optimum parameters can effectively control the movement of the high temperature air with oil fume in the kitchen. The range hood flow rate has a significant influence on the temperature distribution and the oil fumes concentration. For the range hood studied, the optimum value of the flow rate, the commutated plate area, the jet velocity, the jet angle, and the jet slot width are $10.5 \text{ m}^3/\text{min}$, 0.22 m^2 , 1.5 m/s , -5° , and 4 mm , respectively.

Keywords: jet air curtain; range hood; kitchen environment; design of experiment; parametric study

改善厨房环境对于提高人类生活水平、减少疾病危害具有十分重要的意义。在烹饪过程中, 不但会产生油烟等污染物对人体健康造成损害, 还会产生局部高温使人体感到不适。See 等研究指出, 当操作人员长时间暴露在烹饪释放物中时, 身体健康会受到较大程度的损害^[1]。厨房内安装吸油烟机主要用来排除油烟, 减少油烟污染, 而很少考虑到关于厨房内热环境的改善。Lai 等研究发现, 厨房内存

在明显的热羽流现象, 正是这种热羽现象使得厨房内超细微粒的污染物浓度分布表现出典型的非均匀特性^[2]。Lai 等采用试验和数值计算方法分析了厨房内烹饪过程中产生的油烟微粒浓度分布的不均匀性, 特别指出在灶台和炊具附近污染物浓度最高^[3], 这也是本文研究中重点关注的区域。

为了有效地减少油烟向厨房的逃逸, 人们研究了吸油烟机安装高度与油烟控制效果的关系^[4-5], 结

收稿日期: 2012-05-25。 作者简介: 刘小民(1971—), 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); 博士后科学基金资助项目(201000431329); 中国博士后科学基金特别资助项目(201104665)。

网络出版时间: 2012-10-12

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121012.1142.003.html>

果表明,吸油烟机安装高度距离污染源越近,对油烟的清除效果就越好。然而,由于人体身高的限制,吸油烟机的安装高度不可能过低,否则会挡住操作者的视线或者发生碰头事件,因此传统的吸油烟机无法做到对油烟等污染物的有效清除。为了提高对油烟的清除效果并控制油烟的逃逸,射流气幕被引入到传统的吸油烟机设计中。Tsai 等对固定吸气流量、固定吸气速度的传统式吸油烟机和挡帘气幕式吸油烟机的性能进行对比,揭示了人体面部呼吸区油烟浓度的分布,研究结果表明:采用固定流量的传统式吸油烟机时,人体面部呼吸区油烟浓度最大;采用固定吸气速度的传统式吸油烟机,油烟浓度次之;采用挡帘气幕式吸油烟机时,油烟浓度最小^[6]。Huang 等通过对试验现象的总结和分析,基于回归分析法获得了吸油烟机气幕的临界射流和吸入速度^[7]。尽管回归分析法是一种有效的数据处理方法,但只能对试验数据进行被动的处理,并不涉及对试验设计的要求^[8]。一些研究者也基于正交试验法^[9]对室内环境控制和污染物分布进行了数值和试验研究^[10-11]。本文采用正交试验方法,并结合数值模拟计算,完成了厨房内吸油烟机气幕设计参数的优化。

在烹饪过程中,油烟挟裹在高温热空气中从炊具内由下向上升腾,气幕式吸油烟机主要通过射流气幕阻挡油烟的逃逸,同时也能阻挡热空气的逃逸。由于厨房内吸油烟机安装高度与人体面部位置基本相当,因此气幕式吸油烟机的引入不但会改变厨房内空气运动状态,而且会直接影响到人体面部对油烟浓度和温度的感知。

然而,以上研究工作主要从流动特性的角度对气幕式吸油烟机的油烟浓度控制效果进行研究,并未同时考虑射流气幕的存在对厨房内温度和油烟浓度分布的影响,也未对厨房内人体面部(局部)对温度和油烟浓度的感知进行分析和评价。本文以改善厨房环境为目的,采用正交试验方法,通过对整流板面积、吸油烟机流量、气幕射流速度、气幕射流角度和气幕射流孔宽度等设计的优化,获得了最优参数组合方案,有效地控制了厨房内油烟浓度和温度分布,进而实现了厨房环境的改善和人体感知舒适度的提高。

1 吸油烟机-厨房数值计算模型

1.1 空间结构及几何参数

以典型的闭式厨房结构为基础建立了厨房空间

模型,该模型主要包括吸油烟机、房门、灶台、炊具,但未包含窗户结构,厨房门作为厨房空间的气流入口。本文主要研究射流气幕参数的优化设计及其对厨房环境的影响,因此主要针对吸油烟机外形结构进行建模,而不考虑吸油烟机的内部结构及流动特性。为简化数值计算模型,用两个圆柱体表示厨房炊具,柱体半径和高度参考实际炊具的大小来确定。

图 1 为吸油烟机-厨房结构及空间布置图,其中标示了厨房、厨房门、灶台和吸油烟机等结构的尺寸参数。吸油烟机外形及结构参数由国内著名品牌的吸油烟机生产企业提供,吸油烟机由集烟罩和箱体组成,箱体内装有多翼式离心风机、过油滤网及其他辅助装置。

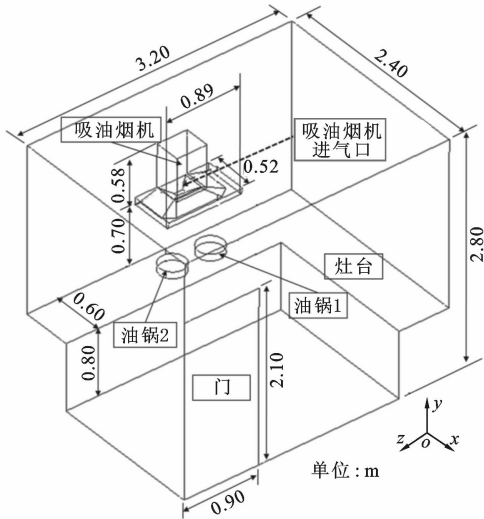


图 1 带有吸油烟机的厨房结构

为了改进吸油烟机的性能及其对油烟的控制能力,在集烟罩的下表面前端和两侧引入缝隙式射流孔,在吸油烟机主进风口装有整流板,如图 2 所示。未安装整流板时,部分油烟会紧贴吸油烟机下表面向外侧逃逸;安装整流板后,烟气沿着整流板与吸油烟机下表面形成的缝隙被吸入吸油烟机内部,经排

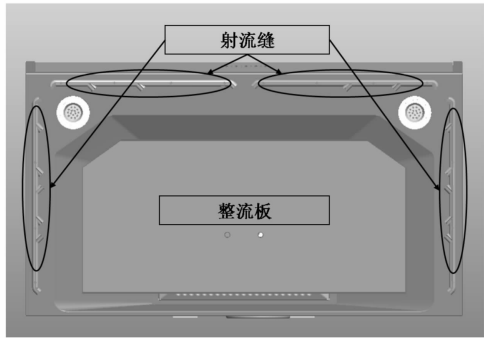


图 2 吸油烟机整流板和射流缝

气管道排出。

1.2 数值计算模型

1.2.1 两相流计算模型 厨房内运动介质主要包括煎、炸、炒等操作过程中产生的热空气和油烟,并且油烟与热空气的运动状态差异明显,因此本研究主要考察油烟和热空气的两相流运动。由于烹饪油烟主要由大量的细小水雾组成,并且在厨房内分布不均,所以本研究采用商用 CFD 软件 ANSYS 13.0 中的非均匀粒子两相流模型,又因为油烟和空气之间的热量传递对厨房内温度分布有影响,因此需要全面考虑油烟与热空气之间的质量、动量和热量交换。在非均匀粒子两相流模型中,流体动力学控制方程包括了连续方程、动量方程和能量方程,它们的具体表达式如下

$$\nabla \cdot (r_a \rho_a \mathbf{U}_a) = S_{MSa} + \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{a\beta} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (r_a (\rho_a \mathbf{U}_a \otimes \mathbf{U}_a)) &= -r_a \nabla p_a + \\ \nabla \cdot (r_a \mu_a (\nabla \mathbf{U}_a + (\nabla \mathbf{U}_a)^T)) &+ \\ \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{a\beta}^+ \mathbf{U}_\beta - \Gamma_{\beta a}^+ \mathbf{U}_a) &+ S_{Ma} + M_a \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (r_a \rho_a \mathbf{U}_a h_{a,\text{tot}}) &= \nabla \cdot (r_a \lambda_a \nabla T_a) + \\ r_a \nabla \cdot (\mathbf{U}_a \tau_a) &+ S_{Ea} + Q_a + \\ \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{a\beta}^+ h_{\beta,\text{tot}} - \Gamma_{\beta a}^+ h_{a,\text{tot}}) & \end{aligned} \quad (3)$$

式中各变量及角标的具体含义可参考文献[12]。

1.2.2 网格划分及方程的离散 采用非结构化网格对吸油烟机-厨房计算模型流动区域进行网格划分。对吸油烟机与灶台之间的厨房空间、射流孔附近区域进行网格加密处理,以提高计算精度,并获得较为详细的流动细节。整个计算域内网格单元总数为 1 737 396。

流动控制方程在空间上的离散采用有限容积法,其中对流项的守恒部分采用二阶中心差分格式,非守恒部分采用二阶迎风格式,扩散项和源项采用二阶中心差分格式。在方程求解过程中,采用多重网格技术加快计算的收敛,当求解变量的最大残差小于 10^{-4} 时,认为计算收敛。

1.2.3 边界条件 在图 1 所示的吸油烟机-厨房模型中,将房门处设置为进口压力边界条件。在气幕射流孔处给定速度大小和方向。厨房出口边界条件设置在吸油烟机进气口,并给定流量边界条件,流量大小根据试验用吸油烟机的流量确定。厨房内墙壁面、橱柜壁面、吸油烟机外表面均设定为绝热、无滑移边界条件。

根据实际烹饪状态,模型内的油锅 1 被看做为油烟释放源和主要热源。在试验中,通过将水加入到热油中产生白色雾汽来显示油烟运动状态。当热源温度高于 270°C 时,向高沸点的食用油中加入水会使水分急剧汽化膨胀,并冷凝成白色雾汽^[13]。通常情况下,爆炒和煎炸过程中产生的油烟中水蒸气体积分数高达 99% 以上^[14],因此本研究将水蒸气作为油烟污染物进行分析处理。模型内油锅的水蒸气释放量以试验测定值为准。由于油锅 1 也是厨房内的主热源,参考实际炸、煎的温度,在该位置给定热源温度为 310°C 。

1.2.4 模型有效性验证 为了验证数值计算方法和数值计算模型的有效性,首先采用试验测量方法对带有原型吸油烟机的厨房内油烟分布进行观测,其次采用数值模拟方法在相同条件下对带有原型吸油烟机的厨房内环境进行计算。在试验中,使油锅 1 工作,油锅 2 关闭。随后先在炊具 1 中加入 1.5 mL 的食用油,加热至 310°C ,然后用注射器向炊具内注入 50 mL 的饮用水,用来模拟烹饪过程中产生的热空气和油烟。从图 3 中可以看到,在吸油烟机前端和侧边都有油烟(白色雾汽)逸出并向厨房顶部升腾。

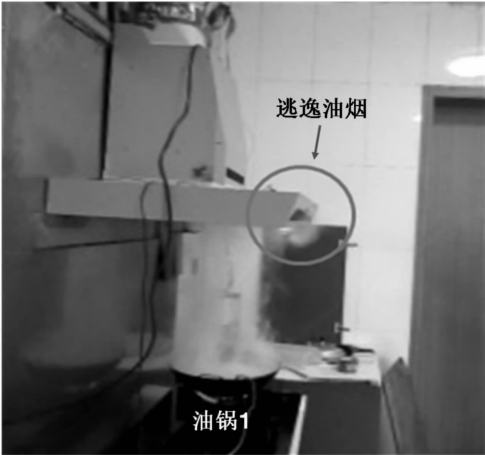
图 4 给出了带有原型吸油烟机的厨房内油烟浓度 φ_v (空气中水蒸气的体积分数)分布的数值计算结果,可以看出,油烟分别在吸油烟机侧边和前端出现明显的逃逸现象,逸出的带有油烟的热空气向上运动,并在厨房顶部积聚。

通过数值计算结果与试验观测结果的比较发现,数值计算结果与试验观测结果在定性上基本一致,这表明本文采用的数值计算模型可以用来描述厨房内热环境及油烟污染物的分布。

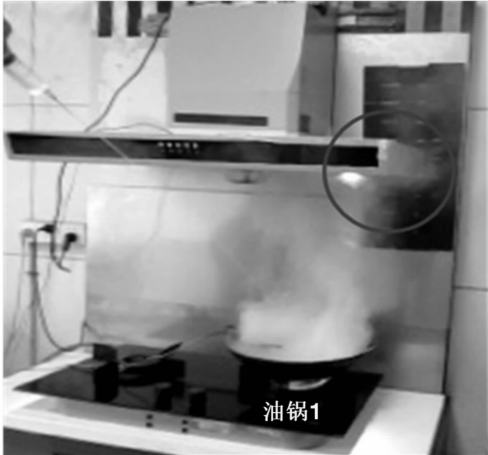
2 正交试验设计

气幕射流参数的正确选择和设计对提高吸油烟机性能、改善厨房内环境具有十分重要的影响,在本文的正交试验中,气幕射流参数分别选为气幕射流速度、气幕射流角度、气幕射流孔宽度。通过调整整流板面积来改变吸油烟机进气口处气流流动状态,吸油烟机风量范围根据吸油烟机不同档位的风量确定。设计参数及其取值范围如表 1 所示。

正交表的选择需要根据实际因素个数和每个因素的水平数确定。针对气幕射流速度(因素 A)、气幕射流角度(因素 B)、气幕射流孔宽度(因素 C)、整流板面积(因素 D)和吸油烟机风量(因素 E) 5 个因

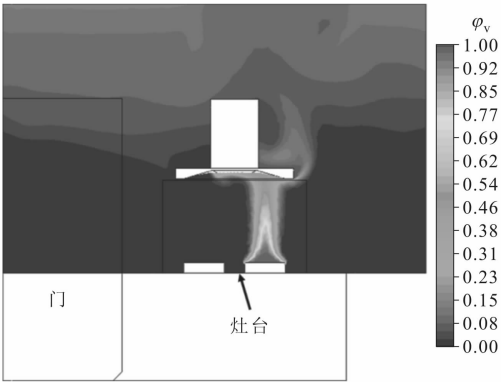


(a) 油烟侧面逃逸

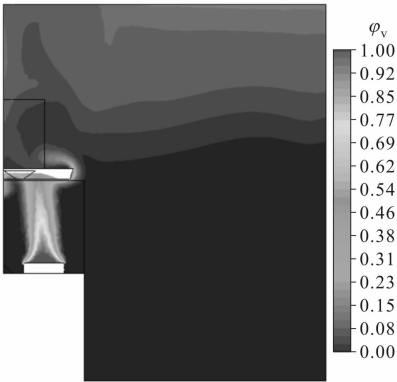


(b) 油烟正面逃逸

图 3 带有原型吸油烟机的厨房内油烟分布(试验观测结果)



(a) 油烟侧面逃逸



(b) 油烟正面逃逸

图 4 带有原型吸油烟机的厨房内油烟分布(数值计算结果)

素,每个因素取 3 个水平,则正交试验表的试验次数设计为 18 次。

表 1 正交试验设计参数及其取值范围

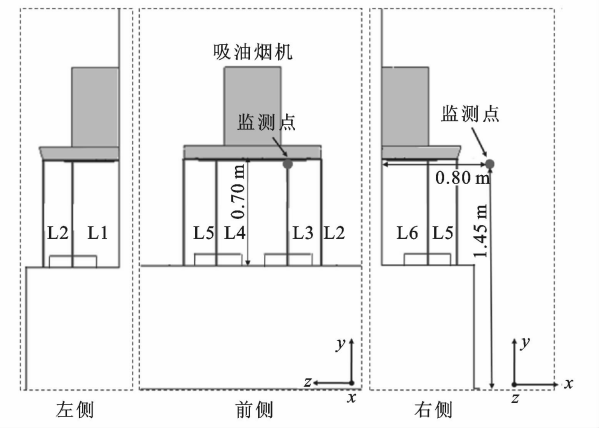
设计参数	取值范围
气幕射流速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.4, 1.0, 1.5
气幕射流角度/ $^{\circ}$	-5, 0, 5
气幕射流孔宽度/mm	2, 3, 4
整流板面积/ m^2	0.18, 0.20, 0.22
吸油烟机风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	8.0, 9.5, 10.5

3 结果及分析

本文采用人体感知温度 T_1 、人体感知油烟浓度 C_1 、油烟释放温度 T_2 和油烟逃逸浓度 C_2 作为考察油烟逃逸的评价指标,以评价不同试验方案对厨房

内环境的影响。 T_1 和 C_1 用于评价试验方案中人体面部位置感知到的油烟温度和浓度,当厨房内油烟浓度过大、温度过高时会使人身体舒适度下降。 T_2 和 C_2 用来评价不同试验方案对厨房内油烟的清除能力以及对厨房内灶台附近温度的控制效果。本文用监测点处的油烟浓度来确定人体对油烟的感知,人体对温度的感知由监测点处的空气温度确定。油烟逃逸浓度为 6 个监测区域油烟浓度的平均值,油烟释放温度为 6 个监测区域空气温度的平均值,正交试验指标的监测位置如图 5 所示。

表 2 给出了采用数值模拟方法获得的各正交试验方案结果。从表中可以看出:对于人体感知温度,方案 11 的值最高,方案 3 的值最低;对于人体感知油烟浓度,方案 6 的值最高,方案 16 的值最低;对于油烟释放温度,方案 11 的值最高,方案 16 的值最



L1~L6:监测区域

图 5 正交试验指标监测位置

低,为 0.000 6%。对于油烟逃逸浓度,方案 1 的值最高,方案 16 的值最低。由此可见,对每一个正交试验指标而言,均有一个最好的试验方案与之对应。但是,不同的正交试验指标也分别对应着不同的最佳试验方案,因此从这些最佳试验方案中选择均合适于上述 4 个衡量指标的气幕设计参数成为需要解决的关键问题。

表 2 正交试验方案设计及结果

方案编号	T_1/K	$C_1/\%$	T_2/K	$C_2/\%$
1	305.06	0.040 0	303.63	0.65
2	306.72	0.020 0	304.21	0.20
3	299.35	0.020 0	300.26	0.12
4	308.97	0.090 0	304.25	0.18
5	300.63	0.000 0	300.38	0.10
6	307.77	0.790 0	302.53	0.36
7	302.68	0.150 0	301.39	0.37
8	307.93	0.150 0	305.52	0.57
9	307.70	0.070 0	302.99	0.17
10	303.81	0.060 0	301.62	0.16
11	310.30	0.050 0	304.82	0.27
12	303.96	0.020 0	303.31	0.36
13	306.30	0.120 0	303.77	0.26
14	305.80	0.060 0	303.35	0.33
15	308.97	0.080 0	304.25	0.18
16	300.95	0.000 6	299.96	0.06
17	306.47	0.210 0	303.54	0.25
18	307.20	0.100 0	304.10	0.37

为了从以上 18 组试验方案中选择一组能够有效控制人体感知温度、人体感知油烟浓度、油烟释放温度以及油烟逃逸浓度的最优组合方案,本文采用综合评分法,首先获得各指标的隶属度,通过对各试

验方案的 4 个指标的隶属度进行加权求和,获得该试验方案的综合得分,进而确定出气幕设计参数的最优组合方案。

指标隶属度 m 计算公式如下

$$m = \frac{\text{指标值} - \text{指标最小值}}{\text{指标最大值} - \text{指标最小值}} \tag{4}$$

本研究重点考察气幕吸油烟机在人体舒适度和油烟逃逸两方面对厨房环境的影响。作为评价人体舒适度的人体感知温度、人体感知油烟浓度和评价油烟逃逸的油烟释放温度和油烟逃逸浓度等参数在评价气幕吸油烟机的性能时其重要性是一样的,所以文中 4 个指标的隶属度的权重大小相同,权重值均为 0.25,由此计算获得不同试验方案的综合分为

$$\begin{aligned} \text{综合分} = & 0.25m_{T_1} + 0.25m_{C_1} + \\ & 0.25m_{T_2} + 0.25m_{C_2} \end{aligned} \tag{5}$$

表 3 为计算获得的试验方案的综合分,可以看出,方案 8 的试验综合分值最高,方案 16 的试验综合分值最低。由于舒适的厨房环境主要体现在降低厨房内的油烟浓度和温度,因此对烹饪者而言,就是尽可能减少对油烟污染物的吸入和烹饪过程中产生的热量对人体的热污染;对吸油烟机来讲,就是防止油烟污染物向厨房的外逸以及通过排气带走更多的高温空气。因此,综合分最低的方案 16 为气幕吸油烟机设计的最优水平。

表 3 不同试验方案的综合分

方案编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
分值	0.56	0.40	0.04	0.49	0.06	0.69	0.32	0.71	0.40
方案编号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
分值	0.24	0.58	0.39	0.46	0.43	0.49	0.03	0.47	0.53

表 4 为正交试验综合分极差分析。通过对综合分的极差分析,能够获得各参数对试验结果的影响程度,并能得到满足指标需要的各参数的最佳组合。根据表 4 中列出的极差大小,得出各参数对试验的影响程度大小依次为:吸油烟机风量>整流板面积>射流孔宽度>射流速度>射流角度。根据各因素对应水平综合分的最小平均值,吸油烟机气幕射流参数的最优组合方案为 $A_3B_1C_3D_3E_3$,由此确定的最终气幕设计参数为射流速度 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 m^3/min 。

表 4 正交试验综合分极差分析

综合分之和	因素				
	A	B	C	D	E
K_1	2.23	2.09	2.98	3.10	3.27
K_2	2.62	2.68	2.18	2.54	2.51
K_3	1.93	2.53	2.15	1.67	1.53
k_1	0.74	0.70	0.99	1.03	1.09
k_2	0.87	0.89	0.73	0.85	0.84
k_3	0.64	0.84	0.72	0.56	0.51
R	0.23	0.19	0.27	0.47	0.58
因素主次顺序	E	D	C	A	B
最优方案	A_3	B_1	C_3	D_3	E_3

注: K_i 表示水平数为 i 时各因素所对应的综合分之和; $k_i=K_i/6$;极差 $R=\max k_i-\min k_i$ 。

4 结 论

本文首先对带有吸油烟机的厨房空间进行了数值建模,研究了气幕射流参数、整流板设计参数以及吸油烟机风量的变化对厨房内环境的影响。通过正交试验研究和数值模拟,获得的主要结论如下。

(1)通过数值计算和试验观测结果的比较,定性地证实了本文数值计算方法和计算模型的有效性。

(2)正交试验结果表明,气幕参数、整流板面积和吸油烟机风量都直接影响着厨房内人体感知温度、人体感知油烟浓度、油烟释放温度以及油烟逃逸浓度。通过对不同试验方案综合分的评定和极差分析,得出气幕式吸油烟机设计参数对厨房内环境控制效果的影响度依次为:吸油烟机风量>整流板面积>射流孔宽度>射流速度>射流角度。

(3)与未施加气幕和整流板的原型吸油烟机相比,当吸油烟机风量为 $10.5\text{ m}^3/\text{min}$ 、气幕射流速度为 1.5 m/s 、射流角度为 -5° 、射流孔宽度为 4 mm 、整流板面积为 0.22 m^2 时,厨房内环境最佳。

参考文献:

[1] SEE S W, BALASUBRAMANIAN R. Risk assessment of exposure to indoor aerosols associated with Chinese cooking [J]. Environmental Research, 2006, 102(2): 197-204.

[2] LAI A C K, CHEN F Z. Modeling of cooking-emitted

particle dispersion and deposition in a residential flat; a real room application [J]. Building and Environment, 2007, 42(9): 3253-3260.

[3] LAI A C K, HO Y W. Spatial concentration variation of cooking-emitted particles in a residential kitchen [J]. Building and Environment, 2008, 43(5): 871-876.

[4] SILVERMAN L. Centerline velocity characteristics of round openings under suction [J]. Journal of Industrial Hygiene and Toxicology, 1942, 24: 259-266.

[5] HUANG R F, SIR S Y, CHEN Y K, et al. Capture envelopes of rectangular hoods in cross drafts [J]. American Industrial Hygiene Association, 2001, 62(5): 563-572.

[6] TSAI S J, HUANG R F, ELLENBECKER M J. Airborne nanoparticle exposures while using constant-flow, constant-velocity, and air-curtain-isolated fume hoods [J]. Annals of Occupational Hygiene, 2011, 54(1): 78-87.

[7] HUANG R F, LIN S Y, JAN S Y, et al. Aerodynamic characteristics and design guidelines of push-pull ventilation systems [J]. The Annals of Occupational Hygiene, 2005, 49(1): 1-15.

[8] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[9] 方开泰. 正交设计的最新发展和应用 [J]. 数理统计与管理, 1999, 18(2): 44-49.

[10] HWANG R L, LIN T P, LIANG H H, et al. Additive model for thermal comfort generated by matrix experiment using orthogonal array [J]. Building and Environment, 2009, 44(8): 1730-1739.

[11] GONG G C, XU C W, JIAO J J, et al. Investigation of moisture condensation on paper-making plant envelopes in high humidity environment by orthogonal analysis and CFD simulation [J]. Building and Environment, 2011, 46(8): 1639-1648.

[12] SAS IP Inc. ANSYS 13. 0 theory guide [M]. Canonsburg, USA: ANSYS Inc. , 2010.

[13] 左乐, 李彩亭, 曾光明. 烹饪油烟净化技术发展的探讨 [J]. 中国油脂, 2007, 32(11): 16-19.

ZUO Le, LI Caiting, ZENG Guangming. Development disposal measures of cooking oil fume [J]. China Oils and Fats, 2007, 32(11): 16-19.

[14] 于春梅, 张登春. 套室内厨房油烟浓度的数值模拟 [J]. 湘潭师范学院学报: 自然科学版, 2008, 30(1): 72-75.

(编辑 荆树蓉)