文章编号:1673-9469(2021)02-0087-06 DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.02.014

基于CFD模拟的烟气在吸烟室中的扩散状态研究

舒 璠[1,2],王 予[3],潘晓薇[3],吴君章[3],陶 红[3],曾劲松[1,2*]

(1.华南理工大学 植物纤维研究中心,广东 广州 510640;2.华南理工大学,制浆与造纸工程国家重点实验室,广东 广州 510640;3.广东中烟工业有限责任公司,广东 广州 510385)

摘要:以吸烟室为研究对象,基于CFD模拟与步进电机实验相结合,对烟气在吸烟室中的扩散进行数值模拟,并通过PIV实验测量烟气速度进行模型验证,相对误差在25%以内。最终,得到了不同送排风方式、不同烟气源量、不同新风速度下的室内烟气速度和CO质量分数分布。结果表明:侧送上排是更加有效的净化室内烟气的送排风方式;吸烟室内不同高度的烟气浓度主要取决于送排风方式、污染源的位置;增大烟气源量,会使室内气流对流加强,气流流速加快,且室内烟气浓度较高,烟客受到二手烟的危害较高;增大新风速度是降低吸烟室内烟气浓度的有效方法。

关键词:吸烟室;步进电机;CFD数值模拟;PIV实验;CO浓度

中图分类号:TS411 **文献标识码**:A

Diffusion State of Smoke in the Smoking Room Based on CFD Simulation

SHU Fan[1,2], WANG Yu[3], PAN Xiaowei[3], WU Junzhang[3], TAO Hong[3], ZENG Jinsong[1,2*]

(1. Plant Micro/Nano Fiber Research Center, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Pulp and Paper Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. China Tobacco Guangdong Industrial Co., Ltd., Guangzhou 510385, China)

Abstract: This thesis takes smoking room as research object. Based on the combination of CFD simulation and the stepping motor experiment, this paper carries out numerical simulation of the smoke diffusion in the smoking room. The model is verified by PIV experiment, and the relative error is less than 25%. In the end, the indoor smoke velocity and CO mass fraction distribution under different ventilation modes, different smoke source quantities, and different fresh air velocity were obtained. Results showed that the upper side exhaustion is a manner of purifying the indoor smoking effectively. The indoor smoke concentration in different heights is mainly decided by exhaust manners and pollution source location. To increase the smoke source quantity will enhance the indoor air convection, and accelerate the airflow speed with relatively high indoor smoke concentration. The smokers will suffer much more damage from the second hand smoking. To accelerate the speed of new ventilation system is an effective method to decrease the indoor smoking concentration.

Key words: smoking room; stepper motor; CFD numerical simulation; PIV experiment; CO concentration

随着人们生活水平的提高,人们对降低香烟烟气危害越来越重视,如何设计净化香烟烟雾的吸烟室,使净化后的空气符合环境标准,已经成为科研人员的研究重点。目前降低吸烟室有害气体浓度的主要措施有三种[1-5]:一是从源头减少有害气体产生;二是加大新风量;三是改善排风系统。目前,烟气的模拟多针对卷烟烟丝和滤嘴部分,杜亮[6]、余其昌[7]对烟丝部分进行了数值模拟,得出不同卷烟纸厚度、不同卷烟纸孔隙率下烟气在烟丝的扩散和流动状态。唐大荣[8]、文建辉[9]等以

收稿日期:2020-12-09

基金项目:广东中烟工业有限责任公司资助项目(粤烟工[2019]科字第15号);国家重点研发资助项目(973计划:2017YFB0307900)

作者简介:舒璠(1995-),男,湖南怀化人,硕士研究生,主要研究方向为烟支的CFD数值模拟。

*通讯作者:曾劲松(1972-),女,贵州铜仁人,博士,教授级高级工程师,研究方向为植物纤维和计算机流体技术。

卷烟滤嘴为研究对象,基于CFD模拟,研究了烟气粒子在滤嘴中的扩散、截留机理,得出了不同结构的滤嘴对于烟气中粒相物的过滤效率。但是,运用CFD技术对吸烟室内的烟气扩散进行数值模拟的研究很少。宋黎[10]运用CFD技术对室内的有毒有害气体的扩散进行了模拟,分析了送风速度和释放源位置对有毒有害气体浓度场的影响,但并未建立吸烟室模型,对于吸烟室的选型无指导意义。

本次研究利用CFD技术建立吸烟室的三维模型,并利用步进电机实验得到模拟的初始数据,利用PIV实验测量烟气速度,对CFD模型的准确性进行验证,最终模拟得到不同的送排风方式、烟气源量和新风风量下,吸烟室内部烟气速度场分布和CO质量分数分布等数据,比较不同工况下的吸烟室的有害气体净化效率,对于吸烟室的选型提供了数据参考与指导。

1 实验装置与方法

吸烟机和PIV系统为主要的实验装置。吸烟机用来模拟卷烟抽吸的过程,提供模拟的初始数据。实验过程中利用流量计测量烟气流量;利用剑桥滤片采集烟气固相并进行称重,得到固相质量;利用铝箔采样袋采集烟气气相并进行称重,得到气相质量,将铝箔采样袋中的烟气经过气相色谱仪,经分析确定烟气成分,为后续的模拟提供初始数据。PIV系统用于测量吸烟室内烟气的速度,将实验结果和模拟结果进行对比,验证模型的准确性。

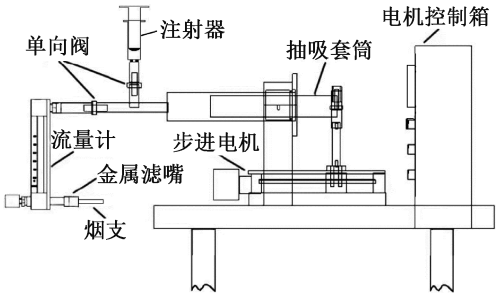

图1 卷烟烟气收集实验装置[6]

Fig. 1 Experimental facility for cigarette smoke collection[6]

如图1所示,吸烟机包含以下几部分:步进电机、电机控制箱、抽吸套筒、流量计、单向阀以及金属烟嘴,主要是利用步进电机的前后运动,带动抽吸套筒,对桶内的烟气进行抽吸和排出。抽吸开始前,用镊子将剑桥滤片放入金属烟嘴中,完全密封后点燃烟支并开始抽吸100 mL烟气,利用流量计测量抽吸烟气的流量。抽吸完成后,用100 mL注射器将抽吸套筒内的烟气全部注射到铝箔采样袋中。实验过程中,分别对铝箔采样带和剑桥滤片抽吸前后的质量进行称重测量,计算烟气中的气相质量分数为91.34%,粒相、气相物质的总质量为0.145 g。

将铝箔采样袋收集的烟气在气相色谱仪上进行定性定量分析,发现气相物质主要有烃类物质、二氧化碳、一氧化碳、氮气、氢气、氧气,其中CO体积分数为3.62%。利用理想气体方程 $pv = nRT$,其中 $n = \frac{m}{M}$,在理想气体常数R、压强 p 和温度 T 一定的条件下,烟气中各组分的质量与各组分的摩尔质量、体积成正比,然后根据气相中CO的摩尔质量、体积分数计算得出CO在烟气中的质量分数为3.12%。通过图1中的流量计测算得出卷烟烟气的流量为 2.49×10^{-5} m^3/s。

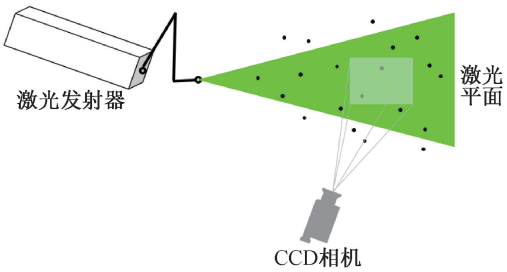

图2 PIV原理简图

Fig. 2 The principle diagram of PIV

如图2所示,PIV的原理主要是利用激光发射器,在烟气所在的位置形成激光平面,在垂直于激光平面的方向上放置CCD相机,利用CCD相机拍摄图片,通过电脑计算两张图片之间同一示踪粒子的移动距离、时间,得出烟气的速度分布矢量图、云图。其中,PIV系统最大输出800 mJ,脉冲持续时间4 ms,波长1 064 nm、532 nm;CCD相机分辨率为2 048×2 048。

2 数值模拟

2.1 吸烟室的模型建立与网格划分

如图3所示,通过proe初步建立起吸烟室的三维模型,整体吸烟室为2 m×2 m×2.5 m的长方体。吸烟室中共有4个座位供烟客抽烟,因此烟气源共4个,1、2号座位距离壁面0.75 m,3、4号座位距离壁面0.55 m,烟气产生位置的高度为1.5 m。在房间的4个角落设有4个侧面风口,顶

部是一块风口顶板。当吸烟室的送排风方式为侧送上排时,侧面风口为新风口,顶部风口为排风口;当吸烟室的送排风方式为上送侧排时,顶部风口为新风口,侧面风口为排风口。使用 CFD 软件构建吸烟室的三维模型,网格划分采用八叉树法,网格数量约为 2 000 万。

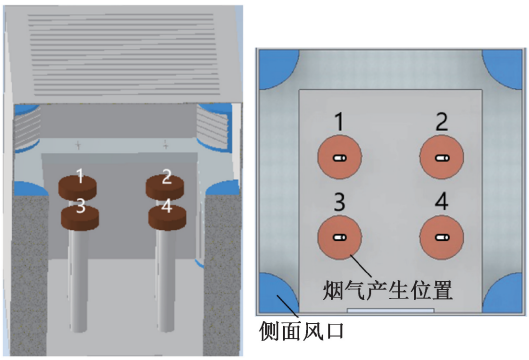

图 3　吸烟室的三维模型

Fig. 3　Three-dimensional model of smoking room

2.2　控制方程与边界条件

本次吸烟室烟气模拟采用 Realizable 的 $k-\varepsilon$ 湍流模型,控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\partial_k}{\partial x_j}\left(\mu+\frac{u_t}{\sigma_k}\right)\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_m \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\partial_k}{\partial x_j}\left(\mu+\frac{u_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\right]+\rho E C_1-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{v\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b \tag{2}$$

式中:x_i、x_j 为位置矢量;u_i 为速度矢量;ρ 为液体密度;k 为湍动能;μ 为分子黏度;u_t 为湍流黏性系数;σ_k 为常数,$\sigma_k=1$;G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能;G_b 为由于浮力影响引起的湍动能产生;Y_m 为可压缩湍流脉动对总的耗散率的影响;ε 为湍动能耗散率;σ_ε 为湍流动能耗散率普朗特数,$\sigma_\varepsilon=1.2$;E 为源项;v 为平行于重力方向的速度分量;$C_1=\max\left[0.43,\frac{\beta}{\beta+5}\right]$,$\beta=S\frac{k}{\varepsilon}$,$S=\sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$,$S_{ij}$ 为应变变化率张量;C_2、$C_{1\varepsilon}$、$C_{3\varepsilon}$ 均为常数。

边界条件采用速度进口和压力出口,采用 WALL 边界作为模型的壁面条件,同时选择无滑移固壁面,并使用标准壁面函数处理近壁区。采用组分运输模型模拟烟气在吸烟室内的流动与扩散。本次模拟在对照组的基础上改变 3 个参数,共做了 4 组吸烟室的模拟,具体的边界条件及相关参数如表 1 所示。

表 1　4 组吸烟室模拟的边界条件及相关参数

Tab. 1　Four groups of boundary conditions and related parameters in smoking room simulations

组别	送排风方式	烟气源量	新风速度/(m·s^{-1})	排风口压力/Pa
对照组	侧送上排	4 支烟	0.345	−100
实验组 1	上送侧排	4 支烟	0.345	−100
实验组 2	侧送上排	8 支烟	0.345	−100
实验组 3	侧送上排	4 支烟	0.173	−100

2.3　其他设置

此次模拟选用压力(Pressure-based)求解器,压力-速度耦合选用 COUPLE 算法,动量方程选用 1 阶迎风格式。

3　数值模拟结果

通过之前所设置的边界条件和相关参数,共进行了 4 组吸烟室模拟,得到了 $t=15$ min 时 4 种状态下的吸烟室内的烟气速度分布、CO 质量分数分布。

3.1　速度场分布

图 4 是烟气源所在位置的吸烟室纵向截面的速度场分布,速度范围为 0~0.2 m/s。可以看出,室内的烟气气流在经过座位的时候速度较大,因为烟气在经过桌椅的时候产生绕流和回流,且在相同的流量下,流通面积下降,导致流速增大。在烟气经过墙壁的时候,由于烟气碰到墙壁障碍物引起回流,以及烟气在壁面的累积,导致烟气气流速度在局部加快,所以在部分壁面形成了较大的烟气气流速度,最明显的就是实验组 2,因为产生的烟气较多,墙壁处累积的烟气越多,越容易发生烟气回流的现象。

图 5 是烟气源所在纵向轴线的速度分布,将实验组 1 和对照组对比,使用 fluent 计算得出对照组的室内平均烟气速度为 0.083 m/s,实验组 1 的室内平均烟气速度为 0.068 m/s,可以看出上送侧排的吸烟室内,烟气的整体速度较低。将实验组 2 和对照组对比,使用 fluent 计算得出实验组 2 的室内平均烟气速度为 0.092 m/s,可以看出当烟气源量增加的时候,室内的整体烟气速度、烟气浓度都呈现明显的上升趋势,且烟气源所在位置的烟气速度上升幅度较大,因为烟气浓度增大,烟气气流与送排风气流混合,产生漩涡,产生较强烈的湍动,

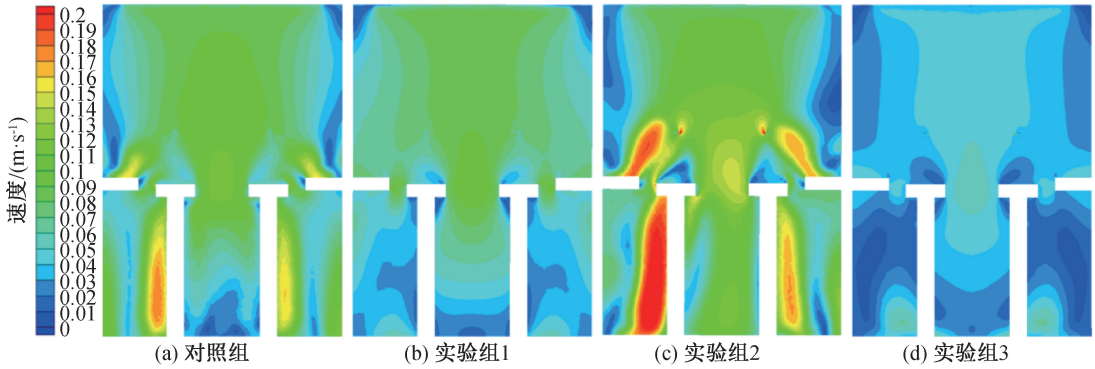

图4 烟气源所在位置的吸烟室纵向截面的速度场分布

Fig. 4 Longitudinal cross-section velocity field distribution of the smoking room in air source location

流速增大。将实验组3和对照组对比,使用fluent计算得出实验组3的室内平均烟气速度为0.033 m/s,发现当新风速度下降后,室内整体的烟气速度下降得更加明显。

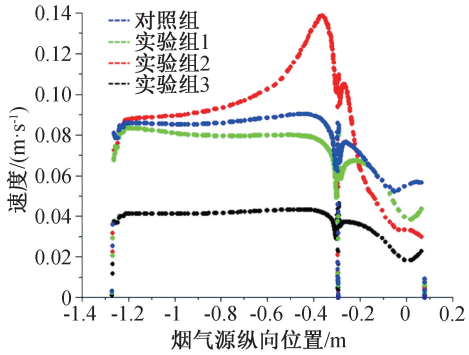

图5 烟气源所在纵向轴线速度场分布

Fig. 5 Longitudinal axis speed field distribution in smoke source location

3.2 CO质量分数分布

图6是烟气源所在位置的吸烟室纵向截面的CO质量分数分布,可以看出,上送侧排的送排风方式下,吸烟室的CO质量分数从上到下依次上升,CO质量分数范围在$4.5\times10^{-6}\sim4.5\times10^{-5}$之间,因为送风口处有大量的新风涌入,极大地稀释了烟气的浓度,降低了吸烟室内的CO质量分数。而侧送上排的送排风方式下,吸烟室的CO质量分数从上到下依次下降,CO质量分数范围在0~4.5×10^{-5}之间,因为4个空调的底部送风口送来大量的新风,稀释烟气的同时推动室内的烟气向上流动,上方的烟气越来越浓。将实验组3和对照组进行对比,发现当新风速度提升时,吸烟室底部的烟气几乎被净化。

图7是烟气源所在位置的吸烟室横向截面的CO质量分数分布,将实验组1和对照组对比,使用fluent计算得出对照组的室内平均CO质量分数为4.88×10^{-6},实验组1的室内平均CO质量分数为1.26×10^{-5},可以看出上送侧排的送排风方式下,吸烟室整体的CO质量分数较高,对于吸烟室内烟气的清洁效率不如侧送上排的送排风方式,因为烟气由烟支燃烧产生,热空气的比重较小,会向上升,带动烟气中的CO和细小粒相物向上升,而侧送上排的吸烟室内的送排风气流流动方向和烟气气流方向相同,净化效率较高。将实验组3和对照组对比,使用fluent计算得出实验组3的室内平均CO质量分数为1.94×10^{-5},发现当新风速度提升时,室内CO质量分数加速下降,因为随着新

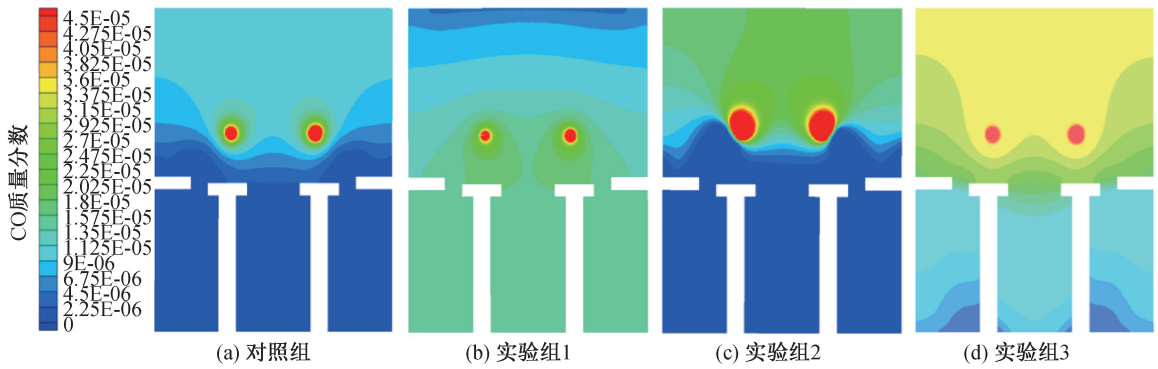

图6 烟气源所在位置的吸烟室纵向截面的CO质量分数分布

Fig. 6 Longitudinal cross-section CO mass fraction distribution of the smoking room in air source location

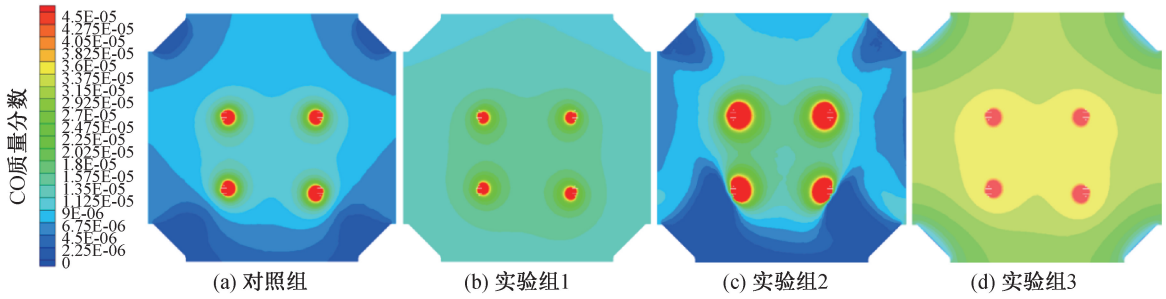

图 7　烟气源所在位置的吸烟室横向截面的 CO 质量分数分布

Fig. 7　Longitudinal cross-section CO mass fraction distribution of the smoking room in air source location

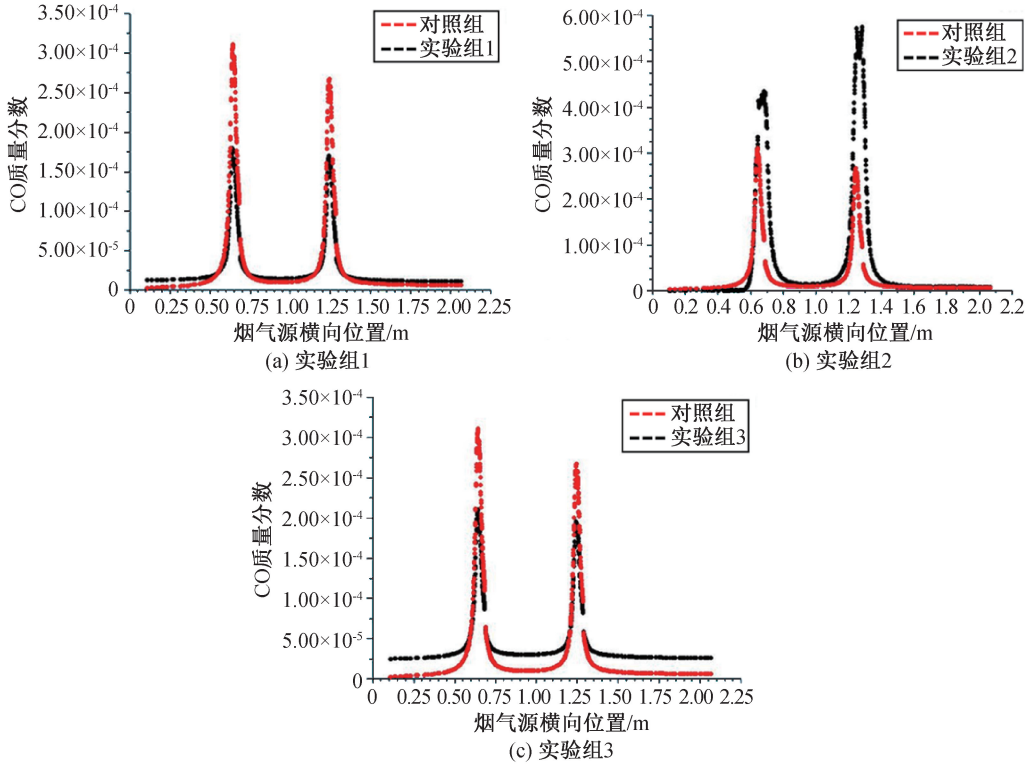

图 8　烟气源所在横向轴线 CO 质量分数分布

Fig. 8　Horizontal axis CO mass fraction distribution in smoke source location

风速度的增大，新风量也增大，送入室内的新鲜空气增多，相当于对室内气体进行了有效地稀释，在一定程度上能够提高排污效率。

图 8 是烟气源所在横向轴线的 CO 质量分数分布图，将实验组 1 和对照组对比，发现在上送侧排的吸烟室中，烟气源产生位置的 CO 质量分数较低，因为在上送侧排吸烟室中，侧面排风口距离烟气源很近，污染物被上送风的气流带动，通过排风口迅速排出。

室内烟气扩散的质量分数分布主要取决于室内的气流分布特征和烟气源的特性，从吸烟室质量分数分布的模拟结果也不难看出，烟气源量、边界条件、通风口设置、室内障碍物以及空间结构布局都是影响烟气扩散的重要因素。

3.3　模型验证

为了验证 CFD 模型的准确性，建立起吸烟室的 1∶1 模型，在两侧墙壁各开 1 个 1.5 m×1 m 的玻璃窗，用 PIV 装置对吸烟室内 4 个烟气源附近的烟气速度进行测量，将对照组的模拟结果中 4 点的烟气速度与 PIV 实验测得的 4 点的烟气速度进行对比分析，对 CFD 模型的准确性进行验证。

如图 9 所示，使用 PIV 系统对烟气源所在的激光平面进行拍摄，得到烟气的原始图像，因为流场中存在较多外界光源或者反光造成的杂信号，对计算造成了影响，使用 Dynamic Studio V3.41 软件对该图片截取烟气流动时外界干扰较少的图片。通过 Image Mean 处理，把所有拍摄的两帧图片像素值的平均值组成一张图片。通过 Image

(a) 原始图像 (b) 截取图像 (c) 截取图像-PIV后处理流场

图9 PIV流场图

Fig. 9 The flow chart of PIV

Arithmetic处理,将每一张原始图片的两帧图片减去Image Mean算法得到有效去除杂信号影响的图片。通过Adaptive Correlation相关计算得到流场的瞬时原始PIV矢量图。通过Average Filter处理,使用周围3×3网格的平均矢量来过滤掉相关计算过程中有可能产生的错误矢量。对瞬时的PIV流场矢量图做平均统计,得出烟气的速度。从表2中可以看出,实验结果和模拟结果的平均相对误差为17.9%,最大相对误差控制在25%以内,实验结果与模拟结果保持着较好的相似性,因此验证了模型的准确性。

表2 对照组吸烟室的4个烟气源点的烟气流速模拟结果与实验结果对比

Tab. 2 Comparison of simulation results and experimental results of smoke velocity at four smoke source points in the smoking room of control group

烟气源点	烟气流速/($m \cdot s^{-1}$)-实验结果	烟气流速/($m \cdot s^{-1}$)-模拟结果	相对误差/%
1	0.071	0.082	13.4
2	0.069	0.081	14.8
3	0.061	0.075	18.7
4	0.055	0.073	24.7

4 结论

建立了吸烟室的三维模型,运用商业软件FLUENT中的组分运输模型模拟了15 min内4组吸烟室内烟气的扩散和流动,得到烟气的速度分布和CO质量分数分布,得到如下结论:

1)上送侧排的送排风方式,对于吸烟室内烟气的净化效果一般,对于烟客所在区域的烟气净化效率较高;侧送上排的送排风方式,是更为有效的降低室内烟气浓度、净化空气的方式。

2)在吸烟室内,不同高度的烟气浓度、CO质量分数是不同的,这主要取决于送排风方式、污染源的位置。

3)当烟气源量增加的时候,室内的烟气气流速度呈现上升的趋势,且室内烟气浓度较高,烟客受到二手烟的危害较高。

4)当新风速度上升的时候,可以看出吸烟室的烟气净化效率大幅提升,提升新风量是降低吸烟室内烟气浓度的有效方法。但是,应当注重空调系统的新风比例,正确处理吸烟室内热舒适和空气质量之间的矛盾,保证烟客的健康。

参考文献:

[1]林孝鸿. 一种香烟烟气净化装置:ZL201510235722. X[P]. 2017-11-24.

[2]孙 剑, 许厚荣. 室内香烟烟气净化盒:ZL201721344447. 6[P]. 2018-05-25.

[3]于 鑫,李运兴,李 冬. 车厢及室内香烟烟气净化器:ZL201620110277. 4[P]. 2016-07-06.

[4]段恒山,张 潇,陈跃军. 一种装有新风系统的吸烟室:ZL201821320473. X[P]. 2019-04-26.

[5]王 琪. 空气流通的吸烟室:ZL200320008686. 6[P]. 2003-09-02.

[6]杜 亮. 基于CFD的卷烟烟气流动与扩散状态研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.

[7]余其昌,吴君章,黄翼飞,等. 基于CFD模拟卷烟烟气扩散过程的影响因素[J]. 烟草科技,2017,50(5):73-78.

[8]唐大荣. 基于CFD的卷烟烟气在滤嘴中流动状态研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.

[9]文建辉, 杜 文, 钟科军, 等. 烟气粒子在滤嘴中截留的计算流体力学模拟研究[C]//中国烟草学会优秀论文汇编. 北京:中国烟草学会,2015:265-276.

[10]宋 黎,柯佳雄,刘 峰,等. 室内有毒有害气体扩散的数值模拟[J]. 暖通空调,2006,36(9):12-14+19.

(责任编辑 王利君)