

基于 CFD 的烟熏炉改进设计

Improvement design of fumigation furnace based on CFD

张玲玲¹ 沈施佳² 刘红²

ZHANG Ling-ling¹ SHEN Shi-jia² LIU Hong²

(1. 浙江瑞邦智能装备股份有限公司, 浙江 嘉兴 314006; 2. 浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

(1. Zhejiang Ribong Intelligent Equipment Co., Ltd, Jiaxing, Zhejiang 314006, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310024, China)

摘要:针对某款烟熏炉在使用过程中出现的烟熏效果不佳、加热仓内各部分食物熏制的成熟及着色不同步的问题,提出了通过对烟熏炉加热仓的结构改进来改善加热仓内流场分布、从而提高烟熏效果的方法。采用 CFD 技术建立了加热仓的二维、三维仿真模型,通过仿真计算,对加热仓结构改进前后的烟熏气流场的分布进行比较分析。研究表明,改进后的加热仓结构可有效改善加热仓内烟熏气流场的分布。

关键词:CFD 技术;气流场;烟熏炉

Abstract: A method of improving the flow distribution within the heating chamber to enhance the fumigating effect through changing the fumigation oven structure based on the CFD technology were investigated in this study. We established a two-dimensional and three-dimensional simulation model for the heating chamber, and the distribution of the fumigation vapor oven was compared by simulation. The results which showed that the optimized structure of the heating chamber could improve the distribution of the vapor flow field.

Keywords: CFD Techniques; vapor field; fumigation furnace

烟熏作为一种改善食品的色泽、风味,并延长保质期的方法而广泛应用于食品、医药等领域^[1-3]。实现烟熏的装置称为烟熏炉,其主要组成有控制系统、换热系统、动力系统和加热仓,换热系统提供加热仓熏制食品所需的高温气体,加热仓是熏制过程完成的主要部件。换热系统的换热器的效率是烟熏炉的重要性能指标,加热仓内的流场分布是否合理是影响烟熏制品质量的重要因素。目前,中国产烟熏炉设备普遍存在烟熏效果不同步的问题,即加热仓上部的食品已经熏制完成,而下部的食品熏制和着色效果均不理想。

关于换热器的研究及成果比较多,如刘红等^[4]提出了基于 CFD 的 U 型管换热器温度降模型;闪建平^[5]对 U 型管换热器做了创新设计,并对其进行校核;张勇等^[6]对工程用油-水列管式换热器进行了流场计算,分析了其性能;陈斐奇等^[7]对换热器进口主流道的流动性进行了分析,并提出了改进方案。但是对加热仓内流场分布的影响因素的研究几乎没有涉猎,施明等^[8]在烟熏炉加热仓中引入了导流板装置,用于改善仓内气流场,其下进上出气流运行路线虽然使水蒸气达到了仓底部,但食物上部依旧存在烟熏不充分的缺陷。本研究针对这一问题,以某一烟熏炉为研究对象,通过 CFD 流体仿真软件对加热仓内的流场进行模拟仿真,来研究结构改进方案。

1 烟熏炉工作原理

1.1 烟熏炉基本结构

由烟熏炉的工作原理可知,影响烟熏炉工作效率的因素除了换热器的换热效率外,加热仓内的风循环(即烟熏气流场分布)也是一个重要因素。可以通过对加热仓的气流仿真来分析原因。图 1 是典型的烟熏炉结构示意图,炉顶部的左右两侧均匀分布着若干进风口,而炉顶部的中央是出风口。根据烟熏炉的结构特点,可以将烟熏炉的加热仓近似分解为若干个结构相同的基本单元,每个单元包括左右两侧各一进风口,对中央单元而言不仅两侧各一进风口,而且顶部中间有一个出风口。基于这种分解可以建立加热仓的三维仿真模型,即取一个基本单元建立仿真模型,见图 2。

对该三维仿真模型,假设左右两侧的进风口风速相等,选择标准 $k-\epsilon$ 湍流计算模型计算,并设置其边界条件:左右为进风口,风速为 3 m/s,出口为压力出口,其他均为壁面条件。由于该结构属于前后、左右的对称结构,所以只需分别截取 3 个横截面,即左右 1 进口轴线、左右 2 进口轴线和左右 3 进口轴线的横截面来查看仿真结果,速度云图见图 3。

基金项目:浙江省科技厅公益技术研究项目(编号:2016C31043)

作者简介:张玲玲,女,浙江瑞邦智能装备有限公司工程师,大专。

通信作者:刘红(1960—),男,浙江工业大学教授,博士。

E-mail: hliu@zjut.edu

收稿日期:2017-10-12

1.2 烟熏炉存在的缺陷及试验分析

从图3可以看出:3个截面的流场分布基本相同。加热仓上部由于出风口的作用风速较大,但下部风速很小,甚至存在风速为零的区域。因此在烟熏时,流场分布并不均匀,有一大部分风量未达到加热仓下半部,就在出风口的抽风作

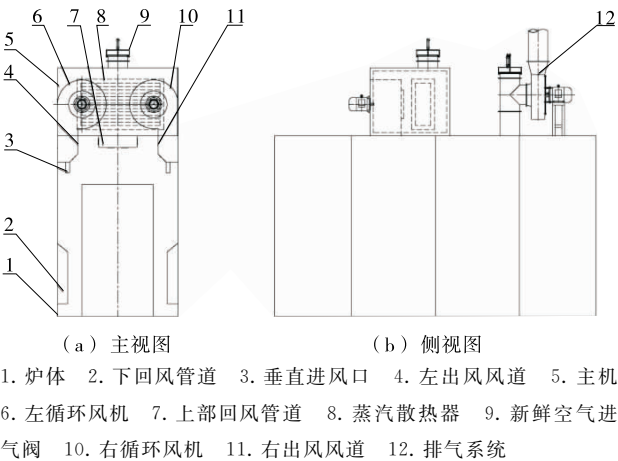


图1 烟熏炉结构示意图
Figure 1 Schematic diagram of the structure of afumigation furnace

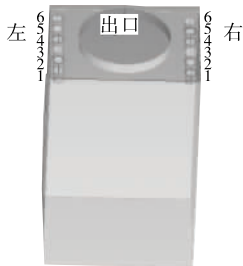


图2 加热仓三维模型
Figure 2 Three-dimensional model of heated chamber

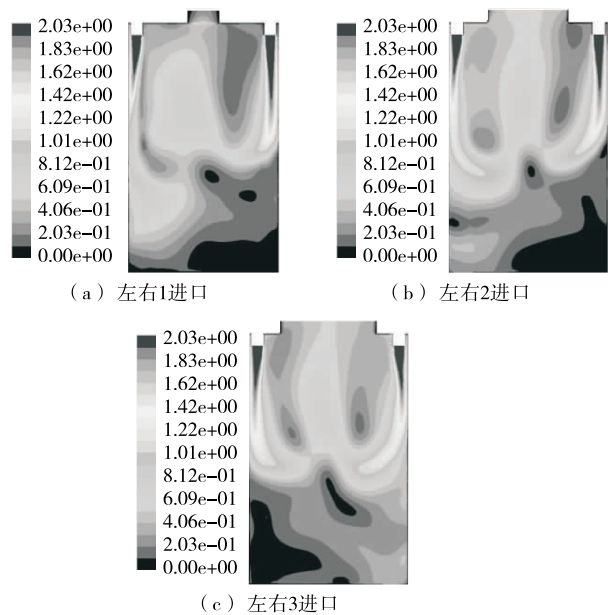


图3 进口横截面速度云图
Figure 3 The velocity cloud of the cross section of the inlet

用下改变流动方向被抽出加热仓,导致了在规定的时间内,下半部一小部分加热过慢,表面效果未能达到所需烟熏标准,整体烟熏时间延长,造成能量的浪费。

取一仓内典型平面,如图4所示,将该平面划分3个区域,记为A、B、C区域;每个区域选取3个点,编号为A1、A2、A3、B1、B2、B3、C1、C2及C3。利用风速仪来检测9个检测点的速度。因为流速是矢量,矢量的特点是方向性,即同一点不同方向的流速是不同的。因此,为了获得矢量数据,在同一点取二个相互垂直的方向检测,可以得到该点的速度矢量。

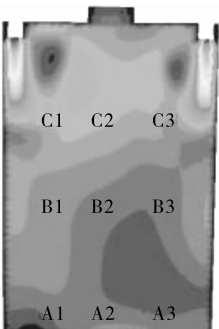


图4 试验选点图
Figure 4 Test points chart

采集加热仓内各点风速与仿真风速进行比较,结果见表1。由表1可知,试验结果与仿真结果基本一致,加热仓内部气流场分布不均匀,风量在加热仓内上多下少,存在局部加热过慢的缺陷,烟熏效果欠佳。

表1 加热仓内的试验风速与模拟风速数据对比表
Table 1 Comparison table of experimental wind speed and simulated wind speed in a heated chamber m/s

选点	试验值	仿真值	选点	试验值	仿真值	选点	试验值	仿真值
A1	1.22	1.21	B1	2.55	2.57	C1	2.05	2.41
A2	1.85	1.64	B2	2.67	1.95	C2	3.00	2.66
A3	2.36	1.63	B3	1.46	1.83	C3	2.22	2.47

2 烟熏炉加热仓结构改进及流场仿真分析

2.1 加热仓结构改进

上述分析是对加热仓空仓状态的分析。加热仓内部放满待熏制食品(工作状态)后,内部气流场与空仓状态是不同的,但很显然空仓状态下内部气流场不理想,工作状态下的内部气流场也难以保证理想。

对加热仓结构进行调整与改进,目标是烟熏汽流场流速均匀。为此建立带食品加热仓仿真模型,见图5。该模型既不是空仓状态,也不是工作状态。为方便计算,将实物按一定比例缩小,整体尺寸不做改变,改进后加热仓的进风口喷头均匀分布在加热仓的两侧,相邻间隔600 mm,相对间隔750 mm。喷头模型见图6,该喷头模型是扇面,扇面的半径是100 mm,喷洒口为一个矩形曲面,进风速度为3 m/s。两片食物位于喷头正下方。而原位于加热仓顶部的出风口,则

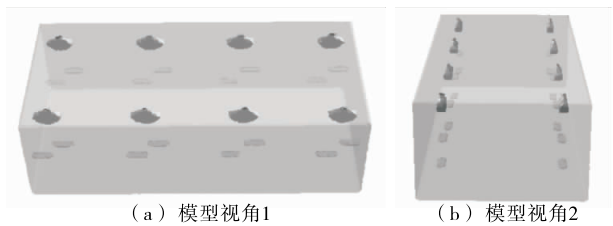


图 5 改进后加热仓的结构模型

Figure 5 Structural model of improved heated chamber

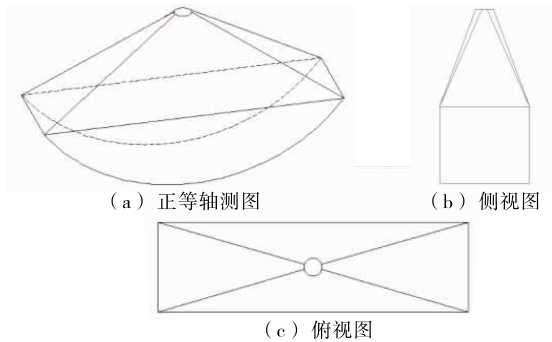


图 6 喷头结构模型

Figure 6 Nozzle structure model

调整在加热仓底部,左右 4 个喷头的中心处。本文采用风扇实现出风,其参数有与地面的夹角、出风的速度,风扇口的半径是 60 mm。

2.2 加热仓二维仿真计算

2.2.1 仿真计算 利用喷头到风扇的截面近似建立二维仿真模型,给定进出口的基本参数,通过仿真计算比较出口的流速对加热仓流场的影响,计算的时间均为 5 s。其中分别考虑了风扇与地面的夹角取不同值的情况、风扇工作或不工作(即有无流速)。通过比较,选择风扇与地面的夹角为 60°、出口流速 $u_c = 2$ m/s 可以产生较好效果,其速度图、温度图、水蒸气分布图见图 7。

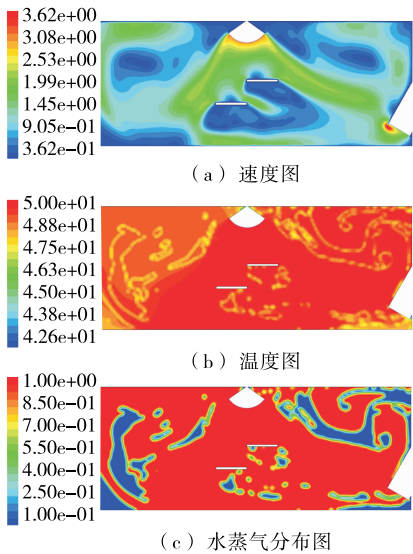


图 7 夹角 60°时的速度、温度、水蒸气分布云图

Figure 7 Cloud chart of velocity, temperature, and vapor distribution with 60° fan

仿真表明,出口处风扇无速度时,水蒸气只能在加热仓上部分扩散,且扩散比较缓慢,食物上部可以被水蒸气覆盖,但是食物下部的接触效果很不理想,水蒸气明显过少,甚至出现为 0 的情况,使食物上下部分烟熏的速率不同,造成烟熏效率降低,浪费时间和原料。出口风扇有速度时,水蒸气几乎充满了整个加热仓,温度上下也比较均匀,这提高了烟熏效率质量,验证了出口速度对流场的影响。

2.2.2 数据比较 二维计算时截取的截面是其中一个喷头中心与风扇中心的纵向截面,二维模型的作用是给出烟熏流场随风口参数变化的变化趋势。选取 15 个点采集仿真后的流速,见图 8。

采集二维仿真选点的速度结果进行比较,结果见表 2。通过观察速度数据可见,风扇对于加热仓流场有明显改善作用。

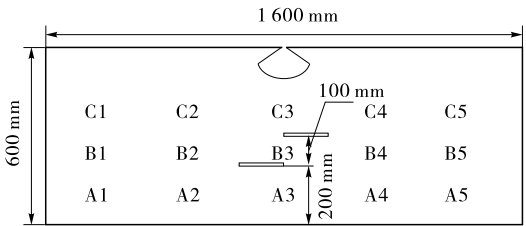


图 8 二维仿真速度选点图

Figure 8 2D simulation speed location map

表 2 二维仿真速度数据对比表

Table 2 Two dimensional simulation speed data comparison table

采集点	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	采集点	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	采集点	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
A1	0.88	B1	0.76	C1	0.26
A2	0.92	B2	1.78	C2	0.64
A3	0.34	B3	1.02	C3	1.45
A4	0.55	B4	1.38	C4	0.69
A5	1.14	B5	1.48	C5	0.16

2.3 加热仓三维仿真计算

2.3.1 仿真模型 在二维仿真的基础上建立三维仿真模型。由于加热仓为周期对称机构,计算时选取的是加热仓中的一个单元,其宽度为整个加热仓的一半,具体尺寸为:长 900 mm,宽 500 mm,高 600 mm,进风口为 2 个喷头,出风口风扇直径为 120 mm,与地面角度为 60°,仿真计算时边界条件为:入口流速 $u_c = 3$ m/s,出口流速 $u_c = -2$ m/s,环境温度 $T_h = 20$ °C,入口水蒸气温度 $T_r = 50$ °C,计算时间为 5 s。

三维仿真模型包括 2 排喷头(即 4 个喷头)与 2 个出风口,再考虑对称性后的模型见图 9。

2.3.2 数据分析 仿真计算后,采集喷头食物所在截面的三维仿真选点数据(见图 10)进行比较,结果见表 3。由表 3 可知,仓内各点的速度比较一致,结果是气流带动温度水蒸气

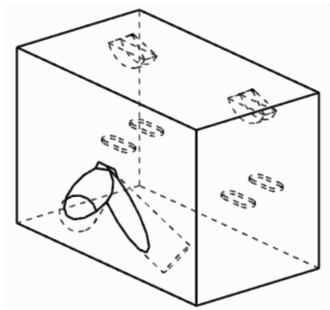


图 9 三维仿真模型图

Figure 9 Three dimensional simulation mode

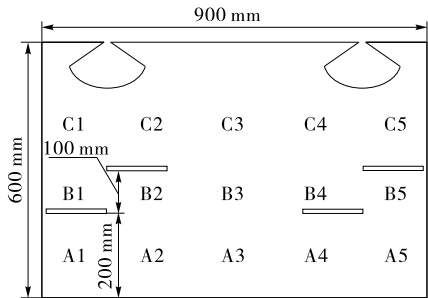


图 10 三维仿真数据选点图

Figure 10 3D simulation data points map

表 3 三维仿真速度、温度、水蒸气分布数据

Table 3 Three dimensional simulation of velocity, temperature, and water vapor distribution data

选点	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	水蒸气 分布	选点	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	水蒸气 分布	选点	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	水蒸气 分布
A1	0.50	41.5	0.65	B1	0.76	46.9	0.97	C1	1.60	47.6	0.99
A2	0.35	38.5	0.54	B2	0.50	47.4	0.98	C2	1.50	47.7	0.99
A3	0.33	44.5	0.82	B3	0.63	47.9	1.00	C3	0.20	47.0	1.00
A4	0.40	41.4	0.95	B4	0.40	45.5	0.98	C4	1.18	46.5	1.00
A5	0.65	47.9	1.00	B5	0.30	47.5	0.99	C5	1.12	46.0	1.00

均匀分布到整个仓内。这表明加热仓内的流场得到了很好的改善,尤其是喷头下方有食物处的位置,其余空间略有减弱,但已能达到烟熏需求。

3 结论

仿真分析表明,经过改进的加热仓,在短时间内可以使食物上下分布的温度和水蒸气更加均匀、合理,巧妙地利用了风扇,使加热仓内的流场往所需的方向流动,既让食品充分接触加热,又能充分地利用能源。

本研究基础是带食品加热仓仿真模型,与加热仓工作状态还是有差别的。后续的研究将考虑加热仓工作状态气流场分析,以便改善烟熏气流场。

参考文献

[1] 孔令明,李芳,徐洁洁,等.熏马肠制作过程中腌制工艺优化

[J].食品与机械,2013,29(4):176-181.
[2] 朱建军,王晓宇,胡萍,等.黔式腊肉加工过程中挥发性风味物质的变化[J].食品与机械,2013,29(4):20-23.
[3] 汤定明.肉制品加工中的烟熏技术[J].肉类研究,2007(2):36-38.
[4] 刘红,杨哲人,蒋兰芳,等.基于CFD的U型管换热器温度降模型[J].食品与机械,2015,31(2):152-156.
[5] 闪建平,张雷,陈雪静.U型管式换热器的设计与校核[J].河北化工,2010,33(6):55-57.
[6] 张勇,胡京明,李航,等.基于CFD技术的某管式换热器结构改进[J].湖南工业大学学报,2012,26(4):97-100.
[7] 陈斐奇,祝高永,刘红,等.烟熏炉换热器进口主流道流动性改进[J].轻工机械,2014,32(6):101-103.
[8] 施明,刘红,李伟国,等.烟熏炉加热仓流动性能研究[J].轻工机械,2016,34(4):79-82.

(上接第 66 页)

[19] MILLOUR S, NOËL L, KADAR A, et al. Simultaneous analysis of 21 elements in foodstuffs by ICP-MS after closed-vessel microwave digestion: Method validation[J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2011, 24(1): 111-120.
[20] 刘亚轩,李晓静,白金峰,等.植物样品中无机元素分析的样品前处理方法和测定技术[J].岩矿测试,2013,32(5):681-693.
[21] 魏琳丰.不同消解方法在测定样品中重金属含量的应用[J].河南化工,2016,33(3):12-15.
[22] 沈宇,张尼,高小红,等.微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定地球化学样品中钼铬镍钴砷[J].岩矿测试,2014,33(5):649-654.
[23] 王佩佩,李霄,宋伟娇,等.微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定地质样品中稀土元素[J].分析测试学报,2016,35(2):

235-240.
[24] 王秋霜,吴华玲,陈栋,等.广东英德红茶代表产品的香气成分鉴定研究[J].茶叶科学,2012,32(5):448-456.
[25] 戚康标,郑宇晴.英红九号红茶的品质特征及抗氧化活性研究[J].广东茶业,2014(5):15-21.
[26] ZHOU Hua, LI Hai-mei, DU Yang-min, et al. C-geranylated flavanones from YingDe black tea and their antioxidant and α -glucosidase inhibition activities[J]. Food Chemistry, 2017, 235: 227-233.
[27] 余煜棉,黄绍铨,李增禧,等.英德红茶、绿茶及其浸出液中的微量元素研究[J].微量元素,1985(1):69-73.
[28] 陈雄,方宣启,戴璇,等.微波消解/ICP-MS法测定黑茶中5种重金属元素及15种稀土元素[J].食品与机械,2016,32(8):55-57.