

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.03.019

基于CFD的烟熏炉风室结构改进

吴恩光¹, 刘红², 高俊涛^{2*}, 胡文豪²

(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)

摘要:针对目前烟熏炉加工烟熏食品出现品质低下和成色不均匀的问题,课题组以常见的烟熏炉为研究对象,利用计算流体力学(CFD)技术和实验验证的方法研究了烟熏炉送风系统的风室结构,通过仿真模拟提出采用变径结构和多管连接结构的2种风室结构改进方案。仿真结果表明:2种改进后新风室结构均能够有效减小各个出风口之间的速度差,从而改善烟熏炉加热仓内部的流场分布。改进方案能有效提高烟熏食品的品质。

关键词:烟熏炉;计算流体动力学;送风系统;风室;变径结构;多管连接结构

中图分类号:TS205.3;TH44 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2021)03-0100-05

Structure Improvement of Wind Chamber for Smoked Oven Based on CFD

WU Enguang¹, LIU Hong², GAO Juntao^{2*}, HU Wenhao²

(1. Zhejiang Ribong Intelligent Equipment Co., Ltd., Jiaxing, Zhejiang 314006, China;
2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to solve the problems of low and inhomogeneous quality of smoked foods in smoked oven, the research group studied the windchamber structure of air supply system on smoked oven by using CFD (computational fluid dynamics) technique and experiment verification for a common smoked oven, and proposed two kinds of wind chamber structure improvement schemes with variable diameter structure and multi pipe connection structure through simulation. The results show that the two improved wind chamber structure both can effectively reduce the velocity difference between each outlet of pipe, so as to improve the flow field distribution in the heating chamber of the smoked oven. The improved scheme can effectively improve the quality of smoked foods.

Keywords: smoked oven; CFD (Computational Fluid Dynamics); airflow system; wind chamber; variable diameter structure; multi-pipe connection structure

社会的进步和经济的发展提高了人们生活水平,烟熏食品也愈发受到人们的青睐。烟熏炉是加工烟熏食品的重要设备,其性能的好坏对烟熏食品的品质起着至关重要的作用。烟熏炉是通过烟熏气体实现对烟熏食品的加工,在加工烟熏食品时,加热仓内烟熏气体的流场分布将直接决定烟熏食品的品质。烟熏炉送风系统、加热仓的设计和加热仓气流调节技术等都是影响加热仓流场分布的重要因素;其中,烟熏炉送风系统是影响加热仓内部流场分布的关键。

垂直气流烟熏炉的风室流道比较简单,加热仓内部流场紊乱,容易导致烟熏食品成色不均匀、品质低下等问题。智能集热型烟熏炉采用双风机风室结构,2个风室对称分布在烟熏炉箱体的2侧,依次布置有若干个出风管;2台离心风机协同工作,在一定程度上改善了烟熏食品的品质。

陈嘉宏等^[1]提出了一种可以调节进风口风量的结构,用于改善加热仓内部的流场分布状况,提高烟熏食品的加工效率。张玲玲等^[2]基于CFD技术对烟熏

收稿日期:2020-11-08;修回日期:2021-03-26

第一作者简介:吴恩光(1981),男,浙江嘉兴人,工程师,主要研究方向为肉制品深加工设备。通信作者:高俊涛(1995),男,浙江嘉兴人,硕士研究生,主要研究方向为CAE仿真。E-mail:gaojuntao0514@163.com

炉加热仓的结构进行改进,从而改善加热仓内部流场分布,提高烟熏效果。李伟国^[3]引入了风量调节机构后使用动压方差和皮尔森相关系数作为流场改善效果和动边界模型仿真效果的指标,并实验验证了风量调节机构对加热仓气流场的改善效果。施明等^[4]采用二维简化建模分析方法,提出了在加热仓进风口增加导流板结构的方案,有助于改善加热仓内部流场分布不均匀和食品加工效率低的问题。陈斐奇^[5]不仅对加热仓进行了结构改进,还提出新的食品摆放思路,进一步改善其流场分布,提高食品加工质量与效率。Mikhail Zaydman^[6]提出了一种同时具有固定食品和发烟加热功能的可旋转食物支架,不仅提高了烟熏食品的熏制效率,还提高了熏制的充分程度。Han DaeHee^[7]将红外线加热应用于传统的烟熏熏制工艺,弥补了单一加热方式的不足。

1 烟熏炉的基本结构

烟熏炉由炉体系统、发烟系统、送风系统、交换系统、清洁系统、物载系统和控制系统组成^[8]。其中炉体系统是烟熏炉的核心,其他系统都是在炉体系统之上建立起来的,所有系统协同工作在烟熏炉内形成的物理场称作烟熏室。烟熏室是烟熏炉的核心,主要包括加热仓和风室,加热仓是烟熏炉加工食品的场所,风室是烟熏气体在送风系统中流经的主要场所,加热仓内部的流场分布状况将直接关系到烟熏食品的品质。

发烟系统主要是对木屑、树枝等通过不完全燃烧产生烟气^[9],21世纪以来,烟熏液作为一种更加健康的食品添加剂已得到广泛应用^[10-11]。

送风系统^[12-14]较为复杂,除了能够使发烟系统产生的烟气进入烟熏炉,还能够让烟熏室内的气流循环往复工作,使得食品熏制达到更好的效果。送风系统主要是由风机、风室和调节装置组成,加热仓内部的流场分布很大一部分取决于送风系统,送风系统利用风机使得烟熏气体在加热仓和风室内循环往复流动以熏制食品。此外,烟熏炉内外气压的平衡、烟熏气体的热交换、工作模式的转换都与送风系统有着密切的联系。

风机可以调节烟熏气体的整体流动情况,风室是烟熏气体在送风系统中的主要流经场所,其结构形状都会对烟熏气体的流场产生影响,调节装置可以改善烟熏气体的流场分布,例如,均风板可以让烟熏气体相对均匀地从每一个出风管吹出。

交换系统主要是通过盘管和盘管内的高温蒸气与烟熏气体进行热交换;清洁系统是用来对烟熏炉进行清洗;物载系统是用于烟熏食品的装载和放置;控制系

统是控制烟熏炉的启动和关闭以及烟熏炉各个工作模式之间的转换^[15]。

2 送风系统

2.1 送风系统风室原始结构

针对某款智能集热型烟熏炉同一车烟熏食品出现部分食品品质较低或者成色不均匀的问题,首先对该2门5车烟熏炉整体模型进行简化,提取其单侧风室结构,使用 FLUENT 软件进行流场仿真。

智能集热型烟熏炉采用双通道送风系统,2个风室分别设置在炉体顶部的2侧,每个风室的出口依次设置有34个同样的出风管,烟熏气体从出风管流出进入加热仓熏制食品。2门5车智能集热型烟熏炉的简化模型如图1所示。

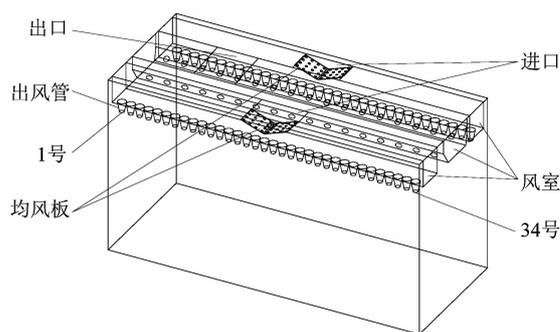


图1 2门5车智能集热型烟熏炉的简化模型

Figure 1 Simplified model of 2-door 5-car intelligent heat collecting smoked oven

由于2侧风室对称分布,因此利用对称性进行建模。此外,为提高计算结果的准确性,在出口处增加拓展域部分,建立了2门5车智能集热型烟熏炉单侧风室仿真模型,使用四面体网格进行自由网格划分,并对均风板周围和出风管进行局部网格加密处理,网格划分如图2所示。

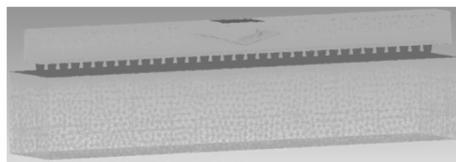


图2 2门5车智能集热型烟熏炉风室仿真模型网格划分

Figure 2 Mesh model of wind chamber for 2-door 5-car intelligent heat collecting smoked oven

2.2 送风系统风室原始结构仿真分析

采用 FLUENT 软件进行仿真,其边界条件的设置如表1所示。

表 1 烟熏炉风室计算边界条件设置
Table 1 Boundary condition settings for wind chamber of somked oven

名称	边界条件	备注
进口管	流量入口	流量 4.66 kg/s
出口管	压力出口	压力 0 Pa
壁面	壁面	壁面无滑移、光滑、绝热壁面

仿真计算时假设烟熏气体为不可压缩理想气体,使用压力求解器进行稳态求解,选取 Standard 标准湍流模型和 Simple 算法,耗散率设置为 2 级迎风格式, k 和 Epsilon 方程、连续性方程和动量方程的最小收敛误差准则均设置为 10^{-3} 。

将送风系统风室的出风管进行编号,沿小车入口方向至小车出口方向依次编号为 1~34 号,经过 34 个出风管口圆心的截面速度云图如图 3 所示。

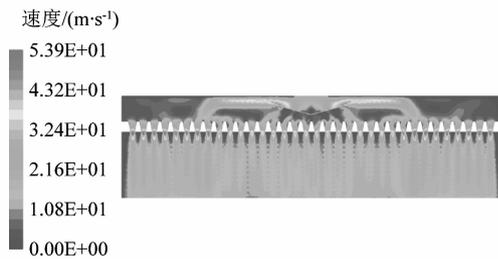


图 3 出风管中心截面速度云图
Figure 3 Sectional velocity cloud chart of centers of wind outlet pipes

烟熏气体从风室入口进入,一部分气体穿过均风板上的圆孔流入附近的出风管,另一部分气体撞击到均风板上后被反弹,流到两侧风室的更远处,然后从各个出风管流入加热仓。由图 2 可以直观地看出,2 侧的 16 个出风管比中间的 18 个出风管速度大,即 1~8 号管和 27~34 号管出口速度要明显大于 9~26 号管,最大风速出现在第 27 号出风管,速度为 43.73 m/s,最小风速出现在第 13 号出风管,速度为 33.45 m/s,二者差值为 10.28 m/s,出现了显著的速度分布不均匀的现象,容易造成加热仓内部流场紊乱,导致烟熏食品品质低下和成色不均匀。

2.3 送风系统风室原始结构实验

为验证所建立的烟熏炉送风系统风室仿真模型的正确性和合理性,课题组进行了试验。采用风速仪对 2 门 5 车智能集热烟熏炉送风系统风室的各个出风管风速进行测量,并与仿真结果比较。实验步骤如下:

- 1) 在空载状态下正常启动智能集热型烟熏炉;
- 2) 启动送风系统的 2 个风机,等待一段时间后观

察控制面板上的电压和电流值,直到 2 个数值都趋于稳定;

3) 将风速仪的感应区依次对准各个出风管出口,垂直对准风口,保持静止直到读数稳定之后,记录下读数;

4) 不改变烟熏炉工作状态,重复测量 3 次,并记录数据;

5) 先后关闭送风系统的 2 个风机和烟熏炉总闸,再关闭风速仪,整理实验器材。

将 3 组实验数据取平均值后作为各个出风管风速的实验数值,并与仿真计算得到的各个出风管风速大小的平均值在同一坐标下绘制 2 条折线,如图 4 所示。

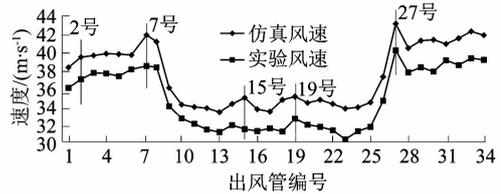


图 4 仿真与实验出口速度比较
Figure 4 Comparison of outlet velocities between simulation and experiment

由图 4 可知,根据仿真数据和实验数据所绘制成的折线图走势基本一致,最高风速都出现在第 27 号管,仿真数值为 43.73 m/s,实验数值为 40.64 m/s,差值为 3.09 m/s,误差为 7.07%,再取其他点位进行比较,误差均在 10% 以内,说明课题组所建立的仿真模型是合理可靠的。

3 送风系统结构改进

有研究表明,随着烟熏炉的增大,烟熏炉送风系统风室出口速度差值也变得越来越大,表 2 所示为不同规格的烟熏炉出风管速度的分析数据。

表 2 出风管速度分析表

Table 2 Speed analysis of wind outlet pipes

规格	最大平均速度/($m \cdot s^{-1}$)	最小平均速度/($m \cdot s^{-1}$)	速度差/($m \cdot s^{-1}$)
1 门 1 车	41.94	40.98	0.96
1 门 2 车	41.75	39.97	1.78
1 门 3 车	41.03	37.86	3.17
2 门 4 车	41.54	35.73	5.81
2 门 5 车	43.73	33.45	10.28

由表 2 可知,1 门 1 车、1 门 2 车和 1 门 3 车的速度分布相对均匀,2 门 4 车和 2 门 5 车的最大速度差达 10.28 m/s,容易导致加热仓内部流场紊乱,不利于烟熏食品的熏制。

3.1 送风系统风室变径结构仿真分析

课题组以 2 门 5 车智能集热型烟熏炉送风系统的风室为原始模型,提出了图 5 所示的变径结构模型。去掉了原始结构中的均风板,依据风室高度变高气流速度变缓的原理,对风室原始结构的高度以及顶板和底板之间的角度重新进行了设计。

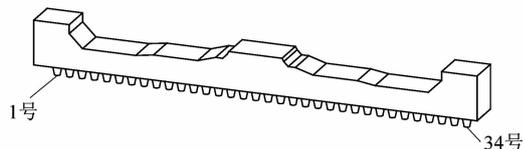


图 5 2 门 5 车烟熏炉风室变径结构模型

Figure 5 Variable diameter structure model for wind chamber of 2-door 5-car smoked oven

同样采用对称仿真模型对变径结构进行仿真计算,得到了图 6 所示的风室速度矢量图。分析后发现,2 门 5 车烟熏炉送风系统风室变径结构出风管最大平均速度出现在第 17 号管,风速为 40.03 m/s,最小平均速度出现在第 26 号管,风速为 37.92 m/s,二者差值为 2.11 m/s,相较于原始结构减小了 79.47%。

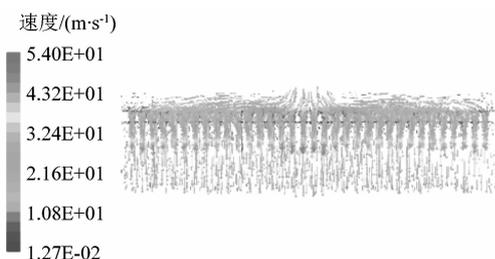


图 6 2 门 5 车烟熏炉风室变径结构速度矢量图

Figure 6 Velocity vector chart for variable diameter structure wind chamber of 2-door 5-car smoked oven

3.2 送风系统风室多管连接结构仿真分析

烟熏炉送风系统风室多管连接结构的简单模型和剖视图如图 7 和 8 所示。多管连接结构一头连接风室进风口,另一头连接若干个出风管。

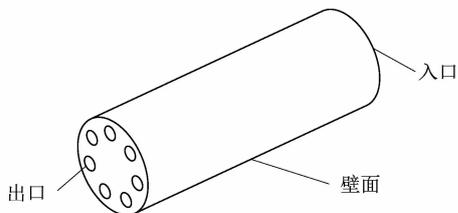


图 7 烟熏炉风室多管连接结构简单模型

Figure 7 Simplified model of multi-pipe connection structure for wind chamber of smoked oven

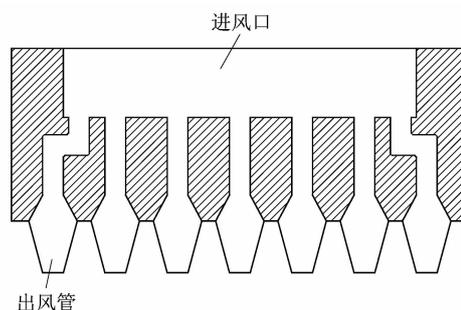


图 8 烟熏炉风室多管连接结构剖视图

Figure 8 Cross section of multi-pipe connection structure for wind chamber of smoked oven

采用和原始结构一样的仿真模型对多管连接结构进行仿真计算,得到如图 9 所示的多管连接结构简单模型的速度云图。分析后发现,每个出风管平均速度大小基本相同,并且每个出风管的速度分布也很相似。最大平均速度出现在第 5 号管,速度大小为 31.99 m/s,最小平均速度出现在第 4 号管,速度大小为 31.42 m/s,二者差值为 0.57 m/s。

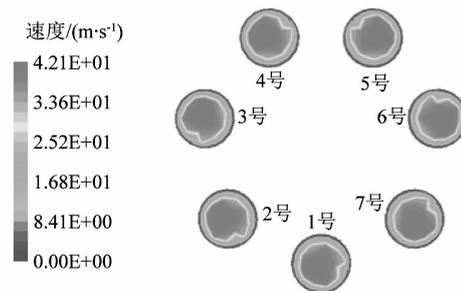


图 9 烟熏炉风室多管连接结构简单模型速度云图

Figure 9 Velocity cloud chart for multi-pipe connection structure wind chamber of smoked oven

3.3 烟熏炉送风系统风室结构比较

改进后的变径结构和多管连接结构都有效改善了原始结构出风管出口速度不均匀的问题,其中变径结构将出风管平均速度的最大差值降低至 2.11 m/s,多管连接结构将出风管平均速度最大差值降低至 0.57 m/s。从理论角度考虑,多管连接结构对于改善烟熏室送风系统风室出风管风速分布不均匀的问题效果更好;从工程应用角度考虑,多管连接结构的制造成本更高且加工难度更大,经济效益没有变径结构好。综上所述,应该针对实际情况选择合适的改进方案,当变径结构能够满足生产要求时,可以选择变径结构追求更好的经济效益;当对食品的品质有更高的要求时,应当选择多管连接结构。

4 结语

课题组针对目前烟熏炉加热仓存在气流场紊乱的现象,通过仿真计算和实验验证的方法对2门5车智能集热型烟熏炉送风系统风室的原始结构进行了分析,并验证了仿真模型的准确性和合理性;在此基础上,提出了变径结构和多管连接结构2种改进方案。经过仿真计算表明:这2种方案都有效改善了出风管出口速度不均匀的问题,能够减小加热仓气流场的紊乱程度,提高烟熏食品的品质。

参考文献:

- [1] 陈嘉宏,沈施佳,刘红. 基于CFD的加热仓风量调节装置[J]. 轻工机械,2018,36(3):79-83.
- [2] 张玲玲,沈施佳,刘红. 基于CFD的烟熏炉改进设计[J]. 食品与机械,2018,34(2):93-96.
- [3] 李伟国. 烟熏炉流场仿真分析及结构改进[D]. 杭州:浙江工业大学,2016:5-45.
- [4] 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.
- [5] 陈斐奇. 基于CFD烟熏炉加热系统的流场及热效率研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2015:23-43.
- [6] ZAYDMAN M. Compact smoking oven with a rotatable food support: US09217469 t[P]. 2006-10-31.
- [7] DAEHEE H. Assembly-type smoking oven; KR20140042309A[P]. 2014-04-07.
- [8] 施明,郭锡铎. 烟熏炉原理与应用技术[M]. 北京:中国轻工业出版社,2016:51.
- [9] 沈施佳. 基于CFD的烟熏炉节能装置关键技术研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2019:2.
- [10] 于连江. 肉制品加工烟熏炉的技术特点[J]. 养殖技术顾问,2013(7):249.
- [11] 高宁宁,胡萍,朱秋劲,等. 烟熏液及其在肉制品中的应用研究进展[J]. 肉类研究,2019,33(1):66-70.
- [12] 郭园园,姜爱华,沈清武. 烟熏液在食品加工中的应用现状与研究进展[J]. 食品工业科技,2020,41(17):339-344.
- [13] 于凤娇,郑学林,臧建彬. 动车组空调系统风道仿真及送风均匀性优化分析[J]. 制冷,2018,37(3):44-50.
- [14] 巴顿. 烟叶闭式循环烤房均匀送风及热泵系统研究[D]. 大连:大连理工大学,2015:11-41.
- [15] 高晓娟,李庆军. 喷漆房空调送风系统的优化设计及工程应用[J]. 现代涂料与涂装,2016,19(5):53-55.

[信息·简讯]

· 行业简讯 ·

西门子携手英科医疗打造行业数字化灯塔工厂

西门子近日与英科医疗科技股份有限公司(英科医疗)签署战略合作协议,双方将开展全面深化战略合作,基于西门子领先的产品和数字化解决方案,覆盖工厂规划、工程建设、生产运行和维户,及应用培训等方面的全生命周期支持与服务,共同打造医疗手套行业的数字化灯塔工厂。

此次签约是在2020年签订的数字化工厂咨询服务合同后,双方合作的进一步推进。基于西门子为英科医疗提供的涵盖顶层数字化规划,已有自动化系统评估升级,及物流仓储模拟仿真等在内的数字化咨询服务方案,双方将携手正式开启英科医疗数字化工厂项目的落地与实施。

英科医疗作为一家快速成长的创新型企业,一直致力应用领先技术,不断提升生产装备的自动化、数字化和智能化水平。面对席卷而来的数字化浪潮,英科医疗以前瞻性的眼光率先开始数字化转型探索。西门子有信心凭借在工业领域数字化转型的成功实践,及深耕于行业多年获得的精准洞察力及创新技术,助力英科医疗迈向数字化创新征程,与英科医疗携手打造医疗手套行业数字化工厂新标杆。

(梁秀璟)