

果蔬蒸汽烫漂与热风真空干燥设备的结构优化

王栋¹ 聂皓¹ 袁越锦^{1*} 谢永康² 赵哲¹ 卢禹铭¹

(1. 陕西科技大学机电工程学院 西安 710021; 2. 河南省农业科学院 郑州 450002)

Structure Optimization of Steam Blanching and Hot Air Vacuum Drying Equipment for Fruits and Vegetables

WANG Dong¹, NIE Hao¹, YUAN Yuejin^{1*}, XIE Yongkang², ZHAO Zhe¹, LU Yuming¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;

2. Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract In order to solve the problems of non-uniform wind speed and flow field in steam blanching and hot air vacuum drying equipment, improve the uniformity of the hot air drying process of drying equipment, computational fluid dynamics was used to simulate and analyze the flow field of hot air drying process, and three improvement schemes were proposed, and four groups of models were selected for each scheme. By comparing and analyzing the velocity uniformity and flow field distribution of each group of models, the velocity non-uniformity is taken as the index; it is obtained that the optimal model is to install a nozzle baffle with a width of 11 mm at the rear end of each nozzle outlet, and its velocity non-uniformity coefficient is 10.4%, which is 23.61% lower than the model before improvement, greatly improving the uniformity of hot air drying. Finally, the improved model was tested and verified. The relative error between the simulated value and the measured value is within 10%, and the difference between the simulated value and the measured value is small, indicating that the model is accurate.

Keywords Fruits and vegetables, Hot air-vacuum drying, CFD, Structural optimization

摘要 为解决蒸汽烫漂与热风真空干燥设备中流速流场不均匀的问题,提高干燥设备热风干燥过程的均匀性,利用计算流体力学对热风干燥过程的流场进行模拟分析,提出3种改进方案,并且每种方案选择4组模型。通过对比分析每组模型的速度均匀性和流场分布情况,以速度不均匀性为指标,得到在每个喷嘴出口处后端安装宽度为11 mm的喷嘴挡板为最优模型,其速度不均匀系数为10.4%,相比于改进前的模型速度不均匀性降低23.61%,极大的改善热风干燥的均匀性。最后对改进的模型进行试验验证,模拟值与试验测量值的相对误差均在10%以内,模拟值与实测值相差较小,说明所建模型较为准确。

关键词 果蔬 热风真空干燥 CFD 结构优化

中图分类号:TK173 文献标识码:A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202210016

果蔬是人们在日常生活中获取维生素、矿物质和有机酸等营养成分的主要来源^[1]。但果蔬含水率高、易腐烂,难以作为新鲜产品保存^[2]。干燥是果蔬产后加工、增值的一种重要手段^[3],对果蔬进行干燥加工可以有效克服果蔬采后质变损耗和季节性供需矛盾等问题,并极大的保留原有果蔬的风味特性和营养成分^[4]。近10多年来,市场对脱水果蔬的需

求量在逐年增加^[5],并且果蔬制品的品质成为人们追求首要目标^[6]。为提高果蔬干燥的效率和品质,研发果蔬蒸汽烫漂与热风真空干燥设备。该设备结合真空-蒸汽脉动烫漂与热风真空组合干燥技术,消除常压过热蒸汽烫漂时存在空气间层热阻、烫漂不均的问题,同时将两种干燥技术的优势互补^[7],发挥真空干燥产品品质好以及热风干燥设备成熟,操

收稿日期:2022-10-26

基金项目:陕西省教育厅青年创新团队项目(21JP016);国家自然科学基金项目(51876109);陕西省国际科技合作计划重点项目(2020KWZ-015)

* 联系人: Tel:15829045176; E-mail: yjyuan1@163.com

作方便的优点。但是,该设备也同样存在其它热风干燥设备所面临的问题,即热风干燥的不均匀性。Y Bie^[8]在热风干燥的生产实际中,发现物料箱中存在干燥不均匀的现象。Dev S R S^[9]发现在热风横流干燥炉中气流分布不均匀,存在干燥效率低、产品质量低和能耗高等问题。Misha S^[10]在日常实验研究中,也同样发现了托盘干燥机热风干燥不均匀的问题。于海明^[11]提出气流分配室是决定干燥机干燥质量的关键部件之一,其结果是否合理严重影响干燥品质。因此,通过改善干燥箱内的气流分布,来提高热风干燥均匀性,保证产品干燥的效率和品质有重要意义。

本文通过数值模拟的方法,研究原始进风气流分配室结构对箱体内部流场均匀性的影响,提出 3 种结构的改进方案并进行模拟,以速度不均匀系数为评价指标,对比分析 3 种改进方案的流场改善效果,选取较优的气流分配室结构,进行较优模型的验证试验。

1 蒸汽烫漂与热风真空干燥设备工作原理

选用自行设计的果蔬蒸汽烫漂与组合干燥设备进行试验,实验设备实物图如图 1 所示。该设备主要由蒸汽系统、热风干燥系统和真空系统组成。蒸汽系统由蒸汽发生器、蒸汽管路及蒸汽管路电磁阀组成。热风干燥系统主要包括进、回风气流分配室、离心风机、气流加热装置、热风循环管路和热风循环路上的阀门组成。真空系统由真空泵、冷却水箱、真空阀、真空管道和压力表等组成。



图1 蒸汽烫漂与热风真空干燥设备实物图

Fig. 1 Picture of steam blanching and hot air vacuum drying equipment

设备加工过程主要分为烫漂预处理和组合干燥两个阶段,工作原理如下:

烫漂预处理阶段:在烫漂之前,需对集成加工箱体进行预热。此时打开蒸汽发生器,待蒸汽发生

器加热至设定温度时,将蒸汽通入到集成加工箱体内,待箱体温度值达 70℃ ~ 80℃ 预热完成。同时关闭蒸汽管路电磁阀,开启真空泵与真空管路电磁阀,将箱体内的蒸汽抽走,泄压完成后,开始进行真空-蒸汽脉动烫。首先打开真空泵抽真空,当集成加工箱体真空度到达设定值时,关闭真空泵。此时打开蒸汽管路电磁阀,蒸汽通过蒸汽管路,流经进风管路,进入集成加工箱体进风气流分配室(如图 2 所示),由喷嘴均匀喷出,对物料进行烫漂,待烫漂时间达到设定值时,关闭蒸汽入口阀,至此完成一个真空-蒸汽脉动烫漂周期。对不同物料的烫漂,可循环进行上述的真空-蒸汽脉动烫漂周期。

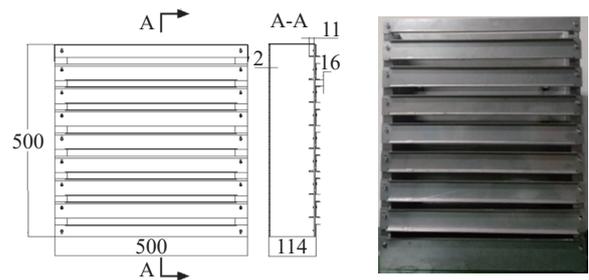


图2 气流分配室

Fig. 2 Air distribution chamber

组合干燥阶段:首先打开热风循环管路电动蝶阀,并启动离心风机、开启气流加热装置,气流经离心风机加速后被气流加热装置加热。热气流经进风管路进入到进风气流分配室,并由条形喷嘴将气流输送至物料表面。热气流与各层物料进行热湿交换后,进入回风气流分配室,并经回风管路回到离心风机的进风口,进行热气流的循环干燥。当物料含水率下降至一定值时,便进入到组合干燥阶段中的真空干燥部分,此时,关闭进、回风路上的电动蝶阀,离心风机,开启抽真空管路上的电磁阀,并开启真空泵将箱体内抽至设定真空度,而热水箱内被电加热器加热至设定值的水通过热水循环泵将其输送至加热盘管,对物料进行加热。当含水率降至小于设定值时,则停止干燥,进行泄压,并取出物料,此时,整个蒸汽烫漂与组合干燥集成加工完成。

2 相关模型建立与初始问题情境分析

2.1 相关模型建立

2.1.1 物理模型

本文对集成加工箱内包含气流分配室的整体

结构进行建模,简化后的集成加工箱三维模型如图3所示,物料层简化为长方体,共分为4层,每层间距为110 mm。设定X轴为集成加工箱模型的深度方向;Y轴为高度方向,Z轴为宽度方向。集成加工箱配有两个矩形进回风口,进风口在集成加工箱的左下方,上方配合有底部为敞口的进风气流分配室,回风气流分配室的顶部为敞口,即为回风口。

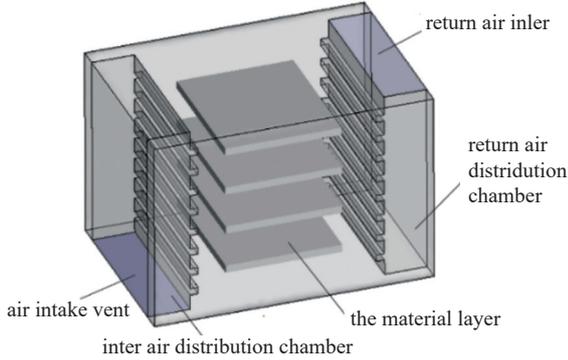


图3 集成加工箱体物理模型

Fig. 3 Integrated processing box physical model

2.1.2 数学模型

为简化数学模型,对箱体做出假设:(1)由于集成加工箱体内的流场是较为稳定的,且在标准大气压下风速小于100 m/s,可将其看作定常的不可压缩流体;(2)将物料层看作为多孔介质区域,并且在干燥过程中没有收缩变形;(3)集成加工箱壁面视为绝热,散热忽略不计;(4)湍流内部气流的粘度是各向同性的。

箱体内部的热气流为稳态的黏性流动,流体基本控制方程应用 standard(标准)的 $k-\varepsilon$ 模型对集成加工箱内的流场进行描述^[12];本文将物料层简化为多孔介质区域,需在原有的动量方程中的右边增加果蔬物料层的粘性阻力和惯性阻力这两种阻力的源项^[13]来表示多孔介质区域对流体流动的影响。

(1)连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

(2)动量守恒方程

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_u \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} + S_v \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial z} + S_w \quad (4)$$

式中: S_u 、 S_v 、 S_w 分别是动量守恒方程 x 、 y 、 z 方向上的广义源项。

3)标准 $k-\varepsilon$ 模型方程:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中 G_k 为平均速度梯度引起的湍动能产生项; G_b 为浮力影响引起的湍动能产生项; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响; μ_t 为湍流粘性系数; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 C_{μ} 为通用常数,由经验值确定 $C_{1\epsilon}=1.44$ 、 $C_{2\epsilon}=1.92$ 、 $C_{\mu}=0.09$; σ_k 、 σ_ϵ 分别为湍动能 k 与耗散率 ϵ 的湍流普朗特数,由经验值确定 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\epsilon=1.3$;

(4)物料控制方程:

$$S_i = -C_0 |v|^{C_1} = -C_0 |v|^{(c_1-1)} v_i \quad (7)$$

式中 S_i 为 i 方向上 (x, y, z) 动量方程的源项; $|v|$ 为速度大小; v_i 为 i 方向上的速度; C_0 、 C_1 为经验系数,本文物料选用无花果,其孔隙率为0.5061, C_0 、 C_1 分别为0.029和0.6849^[14]。

2.1.3 网格划分

利用 FLUENT 自带的网格划分软件对图3所建模型进行混合网格划分,在模型的几何结构规则处采用结构化网格,在不规则处采用非结构^[15],网格划分如图4所示。图5为不同网格数下中心线上速度的分布情况,由图可知网格方案1、2与其它方案相比存在较大误差,网格3、4、5网格因素对模拟结果的影响很小,但网格4、5总数多,选择网格3为后续计算网格。网格3模型总网格数为1042913,满足计算精度的要求。

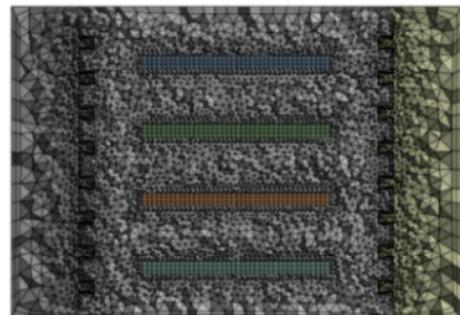


图4 集成加工箱整体网格划分

Fig. 4 Integrated meshing of integrated processing box

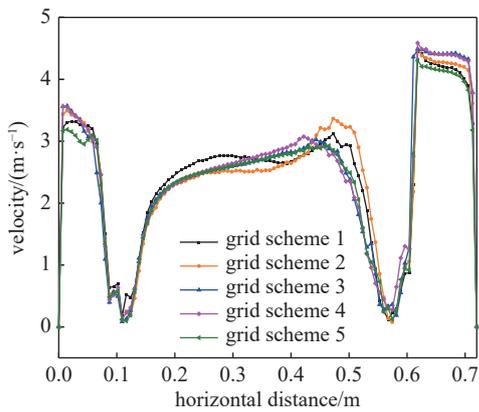


图5 不同网格数下中心线上速度的分布情况

Fig. 5 Velocity distribution on the center line at different grid numbers

2.2 原始模型情景分析

2.2.1 边界条件

进口边界条件选择速度入口, 空气的速度为 6 m/s, 温度设定为 323 K(50℃), 方向垂直于入口截面, 出口边界条件选择自由出流, 即 Outflow, 干燥模型只有一个出口, 所以 Flow Rate Weighting 取 1。壁面边界条件: 壁面边界设为无滑移条件, 将壁面视为绝热, 温度设定为环境温度 300 K, 厚度设为 2 mm。本文将料盘上的物料层简化为多孔介质区, 物料选用无花果, 其孔隙率为 0.5061。

2.2.2 模型区域划分

通过截取集成加工箱内若干个截面进行分析与研究, 可以更加直接清楚的了解到箱内气流分布状况与规律, 本文在 X 轴上截取了 X=300 mm 平面, 而在 Y 轴方向等距截取 4 个截面, 如图 6 所示, 从下到上依次为 $Y_1=100$ mm, $Y_2=210$ mm, $Y_3=320$ mm, $Y_4=430$ mm。

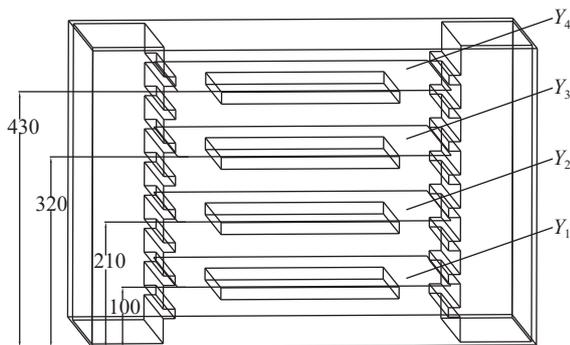


图6 高度方向上 4 个截面划分示意图

Fig. 6 Schematic diagram of 4 sections in the height direction

2.2.3 评价指标

本文以速度不均匀系数 M 为评价指标, 以定量

分析气流分布的均匀程度。对集成加工箱干燥区域布置风速的测量点, 以集成加工箱底部平面为基准面, 在竖直高度上等距离布置 4 层测量平面, 如图 6 所示, 分别为 $Y_1=100$ mm, $Y_2=210$ mm, $Y_3=320$ mm, $Y_4=430$ mm。同时为更直观和详细的了解风速在宽度方向的分布情况, 沿水平距离反方向等距的截取 5 个平面, 如图 7 所示, 依次为 $Z_1=560$ mm, $Z_2=460$ mm, $Z_3=360$ mm, $Z_4=260$ mm, $Z_5=160$ mm。

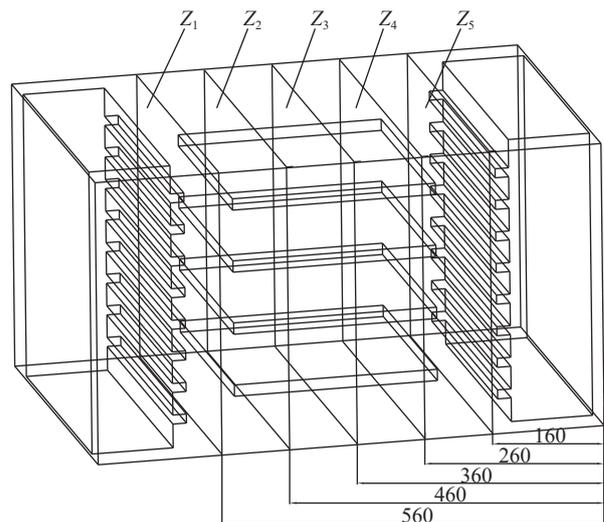


图7 水平距离方向五个截面划分示意图

Fig. 7 Schematic diagram of five sections in the horizontal distance direction

在每层测量平面布置 4×4 个风速测点, 整个干燥区域共布置 64 个测量点, 风速测点如图 8、图 9 所示。

速度不均匀系数的计算公式如下所示:

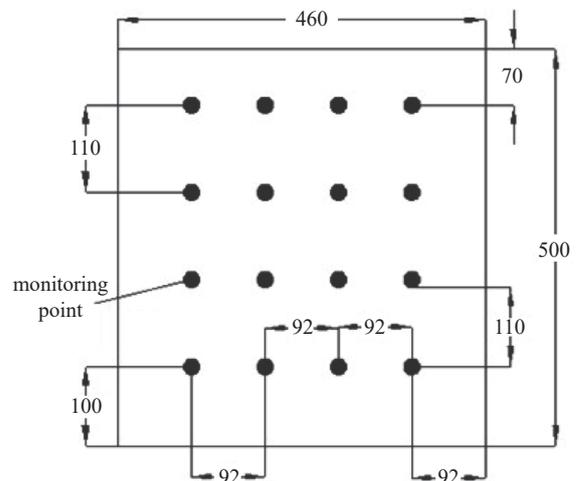


图8 Y-X 平面监测点布置图

Fig. 8 Y-X plane monitoring point layout

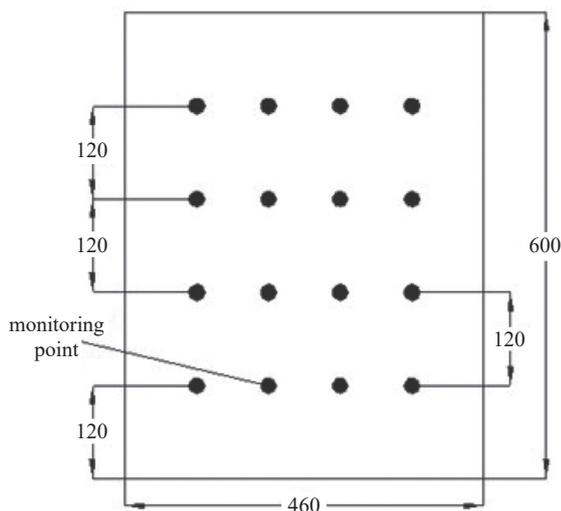


图9 Z-X平面监测点布置图

Fig. 9 Z-X plane monitoring point layout

$$M = \frac{\sigma_v}{\bar{v}} \times 100\% \quad (8)$$

式中 σ_v 为全部监测点风速的标准差; \bar{v} 为所有监测点风速的平均值(m/s)。

速度不均匀系数 M 越大, 说明内部风速流场越不均匀; M 越小, 则代表风速流场均匀性越好, 也表明干燥后的产品均匀性或品质会越好。利用以上评价标准, 对原始模型各截面进行数据采集, 并进行计算, 得出原始模型干燥区域内整体的速度不均匀系数为 34%。

3 结果分析与讨论

3.1 集成加工箱体改进优化

3.1.1 添加扰流板

在原始模型的基础上增设多块扰流平板, 利用平板之间形成的多个涡流区域可以起到改善流场分布的效果^[16]。经过预模拟, 本文将扰流板的宽度 b 范围设定在 10 mm ~ 40 mm 之间, 第一块扰流板位置 L 设为高于第一排喷嘴中线 16 mm(1 倍条形喷嘴的宽度), 平板间距 H 设为 4 倍喷嘴间距, 即 160 mm, 建立扰流平板宽度 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm 四组模型, 在保持其他模拟参数与原始模型一致的条件下进行分析。如图 10 所示, 本文将扰流板设置在气流分配室内相对于喷嘴的一侧, 长度为 500 mm, 与气流分配室长度一致, 厚度为 2 mm。

图 11 为模拟结果中沿水平方向各截面上的平均风速, 在干燥区间内风速沿水平距离的速度分布情况与原始模型趋于一致, 随着扰流板宽度的增加,

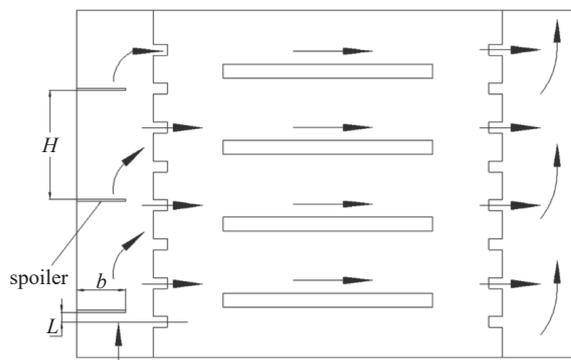


图10 扰流板模型结构示意图

Fig. 10 Structure of the spoiler model

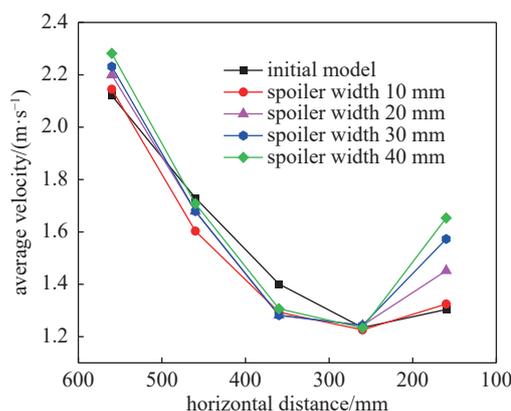


图11 不同扰流板宽度下风速沿水平的变化

Fig. 11 Variation of wind speed along the level of different spoiler widths

每个截面的风速的大小也随之增加。

图 12 中能够进一步看出添加扰流板后, 在扰流板的作用下, 风速在沿高度方向上分层有了较大的改进, 其中, 扰流板宽度为 10 mm 的风速分布最为均匀, 最大相差为 0.6 m/s, 而原始模型则为 1.1 m/s。在模拟结果中, 采集 64 个监测点的风速数据,

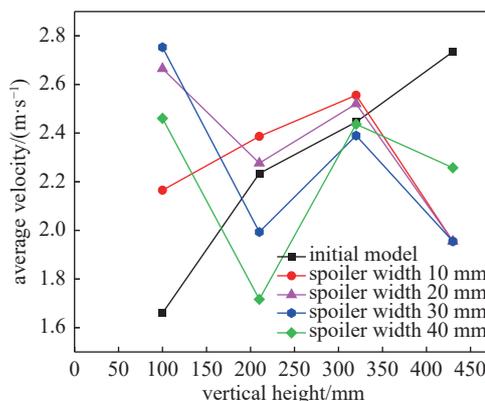


图12 不同扰流板宽度下风速沿高度的变化

Fig. 12 Variation in wind speed along height for different spoiler widths

计算各方案的速度不均匀系数, 结果如表 1 所示。对比原始模型和添加扰流板结果可知, 随着扰流板宽度的减小, 速度不均匀系数也随之减小, 其中扰流板宽度为 10 mm 的干燥区域的速度不均匀系数最小, 为 17.1%, 相较原始模型的均匀程度提升 49.7%。类似的, 郑劲民等^[17]在烟叶烘烤箱加装导流板, 速度不均匀度相比无导流板的速度不均匀度降低了 68%, 改善效果明显。

表 1 不同扰流板宽度模型的速度不均匀系数

Tab. 1 Coefficient of velocity non-uniformity for different spoiler width models

不同扰流板宽度	速度不均匀系数
扰流板宽度为 10 mm	17.1%
扰流板宽度为 20 mm	21.4%
扰流板宽度为 30 mm	26.7%
扰流板宽度为 40 mm	30%

3.1.2 减小封闭端宽度

通过减小气流分配室封闭端的宽度, 构造倾斜的风道, 可以用来改善箱体内部流场分布状况^[18]。图 13 为倾斜气流分配室模型结构示意图。通过前期模拟, 当封闭端宽度 ≥ 60 mm 时, 对气流分布的影响不明显, 其速度分布云图与原始模型趋近一致, 因此予以排除, 而封闭端宽度为 10 mm, 则不利于加工制造。因此将原始模型的进风气流分配室封闭端设为 20, 30, 40, 50 mm 四组模型进行对比分析, 其他模拟参数值与原始模型保持一致, 通过计算, 得到该结构下的流场分布情况。

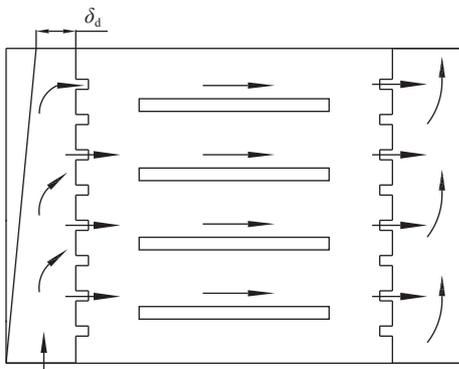


图 13 减少封闭端模型结构示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the structure of the inclined distribution room model

从图 14 可以看出, 与原始模型类似, 风速在干燥区间内沿水平距离的速度变化呈现先衰减后增加的趋势, 但是其衰减的程度有一定的减缓, 原始

模型在水平方向上的 5 个截面的平均速度相差最大为 0.9 m/s, 而减少封闭端的四组模型 5 个截面的平均速度最大相差均小于原始模型, 其中封闭端为 40 mm 的最小, 为 0.64 m/s, 表明减少封闭端宽度对干燥区域内沿水平距离的衰减起到一定的改善。

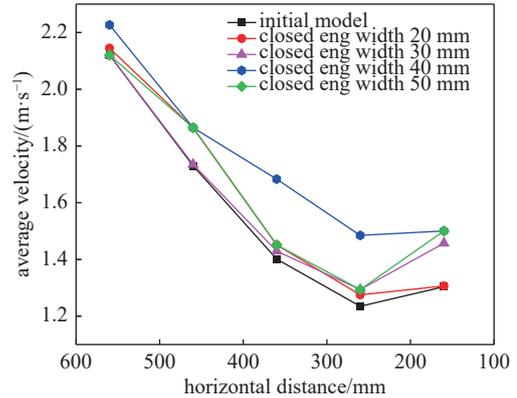


图 14 不同封闭端宽度下风速沿水平 Z 轴的变化

Fig. 14 Variation of wind speed along the horizontal level at different closed-end widths

由图 15 可知, 减少封闭端宽度对风速在高度上的分层问题效果不明显, 其风速沿水平距离的速度分布情况与原始模型近似, 在干燥区域内, 气流速度都随着高度的增加而增加, 气流的强弱较为明显。

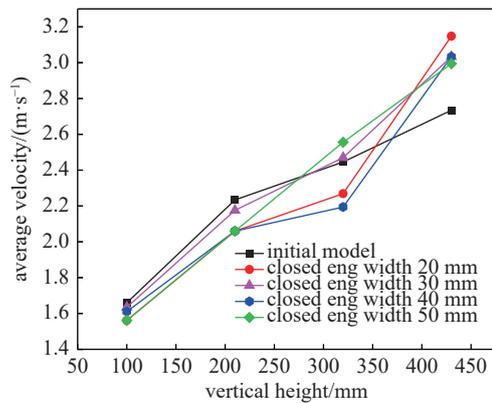


图 15 不同封闭端宽度下风速沿高度的变化

Fig. 15 Variation in wind speed along height at different closed-end widths

在模拟结果中, 采集 64 个监测点的风速数据, 计算各方案的速度不均匀系数, 结果如表 2 所示。对比原始模型和减小封闭端宽度结果可知, 减少封闭端宽度不能很好地改善风速不均匀的问题。该研究结果与王健^[19]研究结果一致, 其对果蔬干燥箱的气流分配室进行减少封闭端宽度的优化, 箱体内部

流场的均匀程度提高了 26%,但是整体气流强弱之分依然明显,不能很好的保证热风的均匀性。

表 2 不同封闭端宽度模型的速度不均匀系数

Tab.2 Coefficient of velocity non-uniformity for different closed-end width models

不同封闭端宽度模型	速度不均匀系数
封闭端宽度为 20 mm	37.9%
封闭端宽度为 30 mm	30.2%
封闭端宽度为 40 mm	34.3%
封闭端宽度为 50 mm	32.3%

3.1.3 添加喷嘴挡板

在喷嘴出口处设置挡板以对高速的气流进行导流,让更多的热气流从喷嘴进入到干燥区域,提升干燥区域的均匀性^[20]。为与扰流板类似,喷嘴挡板最为重要的结构参数是挡板宽度和挡板位置,喷嘴挡板的位置主要分为两种情况,喷嘴挡板在喷嘴出口的前端或者后端。通过前期模拟,设置喷嘴挡板宽度分别为 6 mm 和 11 mm 以及挡板在喷嘴前后的四组模型进行对比分析,其结构如图 16 所示。喷嘴挡板的长度与气流分配室长度一致,厚度则为 2 mm。

图 17 不同挡板位置和宽度风速沿水平距离的变化,喷嘴在出口前端的两个模型对风速沿水平距离的问题产生较好的影响,两个模型在水平距离上的 5 个截面的平均速度最大相差均在 0.5 m/s 左右,而喷嘴在出口后端的两个模型的则为 0.7 m/s; 4 组模型的速度最大相差均小于原始模型,并且除前两个截面,4 组模型在后面三个截面的平均速度相差很小,喷嘴在出口前端的两组模型最大为 0.15 m/s,喷嘴在出口后端的两组模型则为 0.1 m/s,表明添加喷嘴挡板对风速沿水平方向的速度不均匀问题有较大的改善。

图 18 为不同挡板位置和宽度风速沿高度的变化,由图可知,喷嘴挡板安装位置为出口前端,宽度为 6 mm 的模型对干燥区域的导流效果相比于其他三个模型较差, Y1 截面上的风速大部分为 1.2 m/s,而 Y4 截面上的风速范围在 4.8 m/s ~ 3.2 m/s,沿高度方向的速度分层问题甚至得到了进一步的恶化。

在模拟结果中,采集 64 个监测点的风速数据,计算各方案的速度不均匀系数,如表 3 所示。由表 3 可知,除第一个模型外,添加喷嘴挡板均对气流分布均匀性显著提升,其中速度分布最为均匀的模

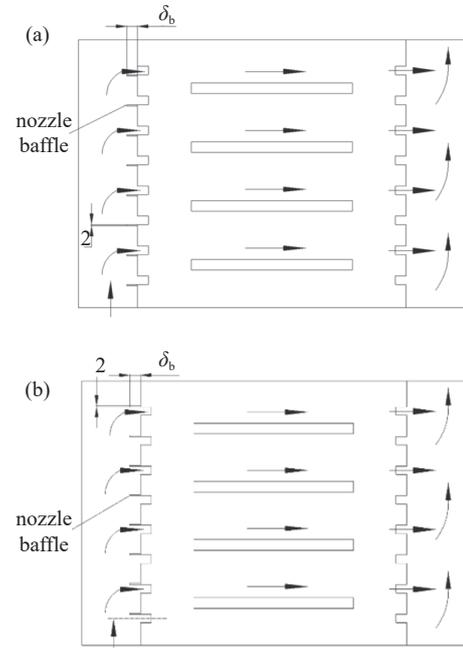


图 16 喷嘴挡板模型结构示意图。(a)喷嘴挡板在喷嘴出口前端,(b)喷嘴挡板在喷嘴出口后端

Fig. 16 Schematic diagram of the nozzle baffle model. (a) The nozzle baffle is in front of the nozzle inlet, (b) the nozzle baffle is at the rear end of the nozzle outlet

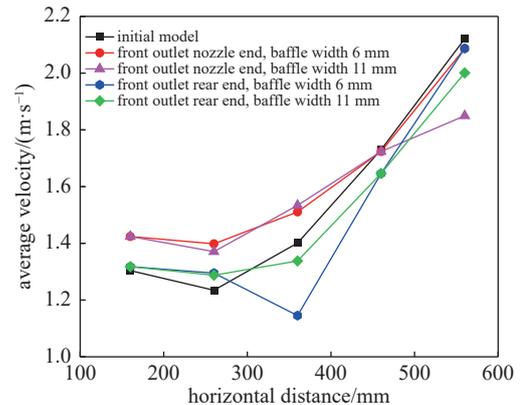


图 17 不同挡板位置和宽度风速沿水平距离的变化

Fig. 17 Variations in wind speed along horizontal distance at different baffle positions and widths

型为喷嘴挡板安装位置为出口后端,宽度为 11 mm,较好的改善速度在高度上分层的问题,并且整个干燥区域内的速度不均匀系数 10.4%,相较于原始模型提升 69%。这与潘晓伟^[21]研究类似,潘晓伟在锅炉烟气余热回收塔中添加喷嘴挡板,余热回收塔内流场均匀性得到进一步改善,可保证入口气流速度分布均匀。

通过上述对原始模型和 3 种改进方案的模拟分析,最终得到在进风气流分配室每个喷嘴出口后

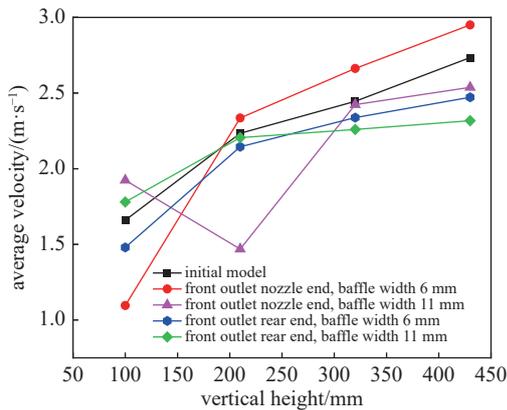


图18 不同挡板位置和宽度风速沿高度的变化

Fig. 18 Variations in wind speed along height at different baffle positions and widths

表 3 不同喷嘴挡板模型的速度不均匀系数

Tab. 3 Coefficient of velocity unevenness of different nozzle baffle models

不同喷嘴挡板模型	速度不均匀系数
喷嘴挡板位于出口前端, 宽度为 6 mm	38.6%
喷嘴挡板位于出口前端, 宽度为 11 mm	20.8%
喷嘴挡板位于出口后端, 宽度为 6 mm	16.2%
喷嘴挡板位于出口后端, 宽度为 11 mm	10.4%

端添加宽度为 11 mm 的挡板为较优模型。图 19 为添加喷嘴挡板喷嘴挡板于出口后端, 宽度为 11 mm 的速度分布云图。

3.2 模拟与试验验证

本文通过测量改进后集成加工箱内布置的测量点风速值, 以集成加工箱底部平面为基准面, 在垂直高度上等距离布置 4 层测量平面, 分别为 $Y_1=120\text{ mm}$, $Y_2=230\text{ mm}$, $Y_3=340\text{ mm}$, $Y_4=450\text{ mm}$, 并且在每层测量平面布置 3×3 个风速测点, 每层测量点在水平面上的位置相同, 故用序号 1-9 标识, 整个干燥区域内共布置 36 个测量点将其与数值模拟计算值进行对比, 以此来验证数值模拟的准确性。在试验中, 主要关注集成加工箱内部流场的分布情况, 试验时的风速通过风速仪测定, 每个测量点的风速采用 30 s 时稳定的测量值, 为各个测量点的最终风速值。

风速的模拟计算值和试验测量值的相对误差公式计算如下^[22]:

$$\varepsilon_i = \left| \frac{R_i - G_i}{R_i} \right| \quad (9)$$

式中 ε_i 为第 i 个测量点的试验测量值与模拟计算值

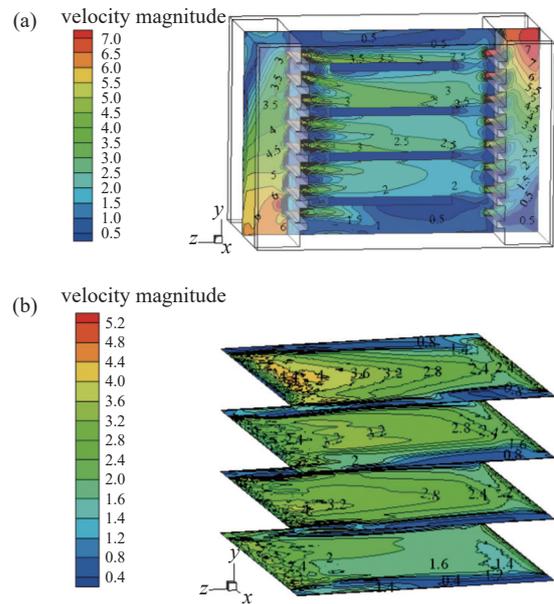


图19 添加喷嘴挡板速度分布云图。(a) $X=300\text{ mm}$ 处截面的速度分布云图, (b) Y 轴方向 4 个截面速度分布云图

Fig. 19 Add cloud chart of nozzle baffle speed analysis. (a) Velocity distribution cloud diagram of the section at $X=300\text{ mm}$, (b) cloud chart of velocity distribution of four sections in Y -axis direction

之间的相对误差; R_i 为第 i 个测量点的试验测量值; G_i 为第 i 个测量点的模拟计算值, $i=1, 2, 3, \dots, 9$ 。

根据表 4 数据, 对每个监测点的误差进行计算, 在每一层测量平面上的测量点的相对误差值中, 最大值为 9%, 均小于 10%。通过试验测量值与模拟值的对比研究, 发现模拟计算的数据与试验测量的数据的相差值均在合理的范围内。数据结果表明, 本文所建立的干燥结构模型能够反映出实际内部速度场的分布规律, 对气流分配室的结构改进具有较好的指导作用。

4 结论

本文针对蒸汽烫漂与热风真空干燥设备风速流场分布不均匀的问题, 对带有气流分配室的集成加工箱建立物理模型, 选择合适的热风干燥的控制方程和计算模型, 确定边界条件, 利用 FLUENT 软件对所建模型进行数值模拟分析。

对气流分配室进行改进, 主要提出添加扰流板、减少封闭端宽度和添加喷嘴挡板 3 种改进方案。添加扰流板的方案中, 最小的速度不均匀系数为 17.1%; 减少封闭端宽度的方案中, 最小的速度不均匀系数为 30.2%; 添加喷嘴挡板方案中, 最小的速度不均匀

表4 各截面监测点数据采集情况表

Tab. 4 Data acquisition at monitoring points of each section

1 监测点	Y_1		Y_2		Y_3		Y_4	
	模拟数据 m/s	实测数据 m/s						
1	2.69	2.52	2.47	2.31	2.71	2.54	0.91	1.10
2	2.04	2.13	2.54	2.42	2.72	2.64	1.08	1.20
3	1.83	1.72	2.45	2.51	2.48	2.32	1.2	1.10
4	2.41	2.23	2.42	2.43	2.90	2.86	1.25	1.33
5	2.09	2.21	2.64	2.75	3.13	2.91	1.58	1.21
6	1.86	1.83	2.48	2.31	2.96	2.93	1.61	1.54
7	2.68	2.72	2.82	2.72	3.06	3.11	1.13	1.13
8	2.14	2.11	2.67	2.63	3.08	2.81	1.11	1.17
9	1.90	1.81	2.38	2.24	2.79	2.62	1.08	1.03

系数为 10.4%。通过多种因素对比,确定在每个喷嘴出口处后端安装宽度为 11 mm 的喷嘴挡板为较优的改进结构。对改进的模型进行验证试验,得到每个测量点的相对误差均在 10% 以内,说明本文所建立的模型具有较高的准确性和可靠性,可有效解决设备内部风速流场不均匀的问题,能够为类似的气流分配室的结构改进提供一定的参考和借鉴。

参 考 文 献

- [1] Sun Fang, Jiang Shuiquan. Present situation and development prospect of fruit and vegetable drying processing technologies in China[J]. *Cereal and Food Industry*, 2016, 23(4): 11–15,20 (孙芳,江水泉.我国果蔬干燥加工技术现状及发展前景[J].*粮食与食品工业*,2016,23(4): 11–15,20(in chinese))
- [2] Kamiloglu S, Toydemir G, Boyacioglu D, et al. A review on the effect of drying on antioxidant potential of fruits and vegetables[J]. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2016, 56(sup1): S110–S129
- [3] Dereje B, Abera S. Effect of some pretreatments before drying on microbial load and sensory acceptability of dried mango slices during storage periods[J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2020, 6(1): 1807225
- [4] Ratti C. , Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review[J]. *J. Food Eng*, 2001, 49: 311–319
- [5] Li Lite. Present situation and suggestion on preliminary processing of agricultural products in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(1): 7–10 (李里特. 中国产地农产品初加工的现状与建议[J].*农业工程学报*, 2012, 28(1): 7–10(in chinese))
- [6] Babu A K, Kumaresan G, Raj V A A, et al. Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2018, 90: 536–556
- [7] Wu Ming-hui, Yu Yong, Guo Lei, et al. Study on combined vacuum and hot air drying technology for mushroom[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2014, 32(2): 29–33 (吴明晖,余勇,郭磊,等.真空与热风联合干燥香菇的研究[J].*包装与食品机械*,2014,32(2): 29–33(in chinese))
- [8] Bie Y, Li M, Guo X Y, et al. Experimental study on improving the drying uniformity in hot air cross-flow dryer//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science[J]. IOP Publishing, 2017, 93(1): 012001
- [9] Dev S R S, Raghavan V G S. Advancements in drying techniques for food, fiber, and fuel[J]. *Drying Technology*, 2012, 30(11-12): 1147–1159
- [10] Misha S, Mat S, Ruslan M H, et al. Review on the application of a tray dryer system for agricultural products[J]. *World applied sciences journal*, 2013, 22(3): 424–433
- [11] Yu Haiming, Li Haiyuan, Wang Chun, et al. Simulation analysis of flow field Uniformity in air distribution room of rice seedbed microwave hot air coupling dryer[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020, 42(2): 15–21 (于海明,李海源,汪春,等.秧盘干燥机气流分配室流场均匀性仿真分析[J].*农机化研究*,2020,42(2): 15–21(in chinese))
- [12] Xiao H W, Bai J W, Sun D W, et el. The application of superheated steam impingement blanching (SSIB) in agricultural products processing-A review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 132: 39–47
- [13] Böhner M, Barfuss I, Heindl A, et al. Improving the air-flow distribution in a multi-belt conveyor dryer for spice plants by modifications based on computational fluid dynamics[J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 115(3):

- 339-345
- [14] Amanlou Y, Zomorodian A. Evaluation of air flow resistance across a green fig. bed for selecting an appropriate pressure drop prediction equation[J]. *Food and Bioprocesses Processing*, 2011, 89(2): 157-163
- [15] Li Zhi-sheng, Liu Xu-hong, Zheng Jie-dong, et al. Thermal environment simulation and airflow distribution analysis of passenger boarding bridge[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2018, 35(2): 28-34 (李志生, 刘旭红, 郑杰东, 等. 登机桥热环境模拟与气流组织分析[J]. *广东工业大学学报*, 2018, 35(2): 28-34(in chinese))
- [16] Dai Jianwu, Xiao Hongwei, Bai Junwen, et al. Numerical simulation and optimum design on airflow distribution chamber of air-impingement jet dryer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(3): 69-76 (代建武, 肖红伟, 白竣文, 等. 气体射流冲击干燥机气流分配室流场模拟与结构优化[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(3): 69-76(in chinese))
- [17] Zheng Jinmin, Chen Guangqing, Liu Jiangjun, et al. Numerical simulation of Temperature-flow field and parameter optimization of deflector in tobacco curing test box[J]. *science Technology and Engineering*, 2022, 22(17): 6920-6926 (郑劲民, 陈广晴, 刘剑君, 等. 烟叶烘烤试验箱内流热场数值模拟与导流板参数优化[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(17): 6920-6926(in chinese))
- [18] Tian Songtao, Gao Zhen-jiang. Improved design of air-flow distribution chamber in air-impingement oven based on fluent[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2009, 25(6): 612-616 (田松涛, 高振江. 基于FLUENT的气体射流冲击烤箱气流分配室改进设计[J]. *现代食品科技*, 2009, 25(6): 612-616(in chinese))
- [19] WANG Jian, DONG Ji-xian, WANG Dong, et al. Numerical simulation and structure optimization of air distribution chamber in fruit and vegetable drying box[J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2019, 37(1): 128-134 (王健, 董继先, 王栋, 等. 果蔬干燥箱气流分配室的数值模拟与结构优化[J]. *陕西科技大学学报*, 2019, 37(1): 128-134(in chinese))
- [20] Qian Miao, Wang Jing-han, Xiang Zhong, et al. Structural effects of air duct with square nozzle on performance of heat setting machine[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(12): 2670-2676 (钱淼, 王景汉, 向忠, 等. 带方形喷嘴风道结构对热定型机性能影响[J]. *工程热物理学报*, 2018, 39(12): 2670-2676(in chinese))
- [21] Pan Xiaowei, Peng Shuo, Li Shuo, et al. Research on the uniformity of flow field in the low-temperature waste heat recovery tower of waste heat boiler flue gas[J]. *Electric Power*, 2022, 55(3): 159-166 (潘晓伟, 彭烁, 李硕, 等. 余热锅炉烟气低温余热回收塔流场均匀性研究[J]. *中国电力*, 2022, 55(3): 159-166(in chinese))
- [22] Huo Er-guang. Simulation and optimization study on air-flow organization in chrysanthemum drying room[D]. Nanchang: Nanchang University, 2016 (霍二光. 菊花烘干室内气流组织模拟与优化研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.(in chinese))