

新型粉丝烘干室流场模拟与结构优化

Flow field simulation and structure optimization of a new type of vermicelli drying room

安兆元 师占群

AN Zhao-yuan SHI Zhan-qun

(河北工业大学机械工程学院, 天津 300401)

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

摘要:目的:提高现有粉丝烘干室热空气利用效率。方法:以 $k-\epsilon$ 湍流模型作为模拟分析的理论模型,应用 Fluent 软件对烘干室进行模拟仿真运算,得到空气在烘干室中的运动特征和流速分布情况。结果:对烘干室结构进行优化后,加入引流管道,较原烘干室在垂直于粉丝烘干板方向的速度可提升 120.83%,对引流管道的横截面形状及尺寸进一步优化,200 mm×200 mm 横截面的引流管道出口位置的平均速度较第 1 次优化后可提升 19.2%,风速不均匀系数下降 8.89%。结论:优化后,烘干室的热空气利用效率提高,各出口处风速均匀性表现得改善。

关键词:粉丝;烘干室;流场仿真;结构优化

Abstract: Objective: This study aimed to improve the hot air utilization efficiency of the existing vermicelli drying room. **Methods:** Using the $k-\epsilon$ turbulence model as the theoretical model for the simulation analysis of the drying room, the core component of the automated production line, the Fluent software is used to simulate the drying room, and the movement characteristics and flow velocity distribution of the air in the drying room were obtained. **Results:** The structure of the drying room was optimized and drainage pipes were added. The initial plan was 120.83% faster than the original drying box in the direction perpendicular to the vermicelli drying plate. The cross-sectional shape and size of the drainage pipe were further optimized. The average speed at the outlet position of the drainage pipe with cross-section of 200 mm×200 mm was increased by 19.2% compared with the first optimized scheme, and the coefficient of wind speed unevenness has decreased by 8.89%. **Conclusion:** After optimization, the hot air utilization efficiency of the drying room,

and the wind speed uniformity performance at each outlet are improved.

Keywords: vermicelli; drying room; flow field simulation; structure optimization

粉丝是中国的传统主食之一,其制作步骤一般是原料处理、磨取浆粉、和面、漏粉、冷却及干燥^[1]。生产过程中干燥的温度、湿度和风速是影响粉丝质量和生产效率的重要因素^[2]。现有粉丝烘干室存在气流分布不均匀、对热空气的流动利用率不高等问题。

计算流体力学(CFD)可以利用已有的流体力学理论,借助计算机工具,便捷、可靠地解决现实生活中的工程案例。利用 CFD 软件进行仿真,可以节约时间、经济成本,免于制造、试验、验证的流程,可实现对烘干设备流场仿真,获得烘干空间内部流场情况,加以分析后可对其进行有针对性的结构优化。王振文等^[3]分析了热泵烘房内气流分布,并对热泵烘房结构进行了优化。李赫等^[4]通过模型仿真分析了菊花干燥过程中干燥机内部的流场分布及变化规律,并验证了结果的可靠性。还有大量学者^[5-12]对烘干或加工设备进行了流场仿真和结构优化,说明数值仿真方法可以验证流场内部情况,对烘干室结构进行优化可以提高烘干效率及产品品质。但现阶段尚未发现对于速食粉丝的烘干室流场研究,且现有粉丝烘干室的热空气流速分布不均匀,能源利用效率较低。研究拟针对该问题,借助 CFD 模拟软件仿真得到烘干部分的流场分布,并对烘干室结构进行优化设计,以求提高热空气流速的利用效率,旨在为企业提高生产效率、降低生产成本及创造更多商业价值提供依据。

1 烘干室流场模拟

1.1 粉丝烘干室

粉丝烘干室是新型粉丝烘干自动线(图 1)的核心结构,新型粉丝烘干自动线主要是将前序已加工好而尚未

基金项目:国家自然科学基金(编号:51875166)

作者简介:安兆元,男,河北工业大学在读硕士研究生。

通信作者:师占群(1963—),男,河北工业大学教授,博士。

E-mail: z_shi@hebut.edu.cn

收稿日期:2021-09-22

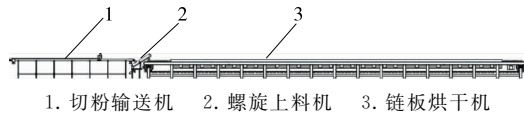


图1 新型粉丝烘干自动线

Figure 1 Vermicelli drying automatic line

切断的粉丝放置在该生产线上自主实现切割分离、成团上料、入盒烘干。现有的粉丝烘干室只在其顶部居中位置布置一个入口,未设置热空气出口,由链板烘干机粉丝前后两个进出通道进行排气。文中提出一种新的工艺,在烘干室中加入一个引流管道,热空气从侧面进入引流管道,流经引流管道后,直吹需要被烘干的粉丝,再从顶部排出,在升温度烘干的基础上引入热风烘干的模式,以提高热空气对粉丝烘干的作用效率。

1.2 数值模拟

应用 CFD 软件 Fluent 对原始烘干室进行流场模拟,研究空气在湿热条件下的流动问题,故选择基于压力的求解器,关联形式为压力—速度,选择 SIMPLE 算法,插值方法为二阶迎风,其精度相对于一阶迎风更为精确。热空气在烘干室中的运动为湍流,故采用湍流模型进行仿真模拟,模型选择兼具稳定性、经济型,计算精度比较高的标准 $k-\epsilon$ 模型对烘干室内的流场进行仿真,该模型主要基于湍流动能 k 和扩散率 ϵ ,方程如式(1)和式(2)所示^[13]。

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_1 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon, \quad (1)$$

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

有效的黏性系数

$$\mu = \mu_1 + \mu_t, \quad (3)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (4)$$

式中:

μ_1 ——层流黏性系数;

μ_t ——湍流黏性系数;

G_k ——由层流速度梯度而产生的湍流动能;

G_b ——由浮力产生的湍流动能;

$C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ ——经验常数,分别取 1.44, 1.92;

$C_{3\epsilon}$ ——湍流扩散率;

σ_k ——湍动能的湍流普朗特常数,取 1.0;

σ_ϵ ——耗散率的湍流普朗特常数,取 1.3;

C_μ ——湍流常数,取 0.09。

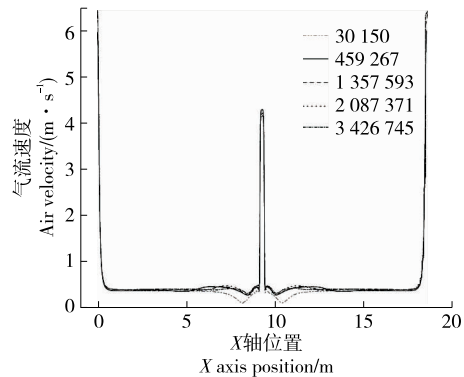
1.3 网格划分

对厂家现有粉丝烘干室结构进行简化建模与仿真,现有烘干室在箱体中部设置有一个热风入口,未专门设

置出口,通过粉丝的进出两个通道进行排风。对模型进行简化,去掉烘干链板,模拟热空气在空载箱体中的流场分布。

1.3.1 网格建立 利用 Solidworks 建立烘干室模型,箱内用于烘干的封闭尺寸(长×宽×高)为 18 500 mm×560 mm×470 mm。应用 SpaceClaim 对模型进行处理并完成修复,抽取流体域,设置出入口后,导入 Fluent Meshing 中进行网格划分,采用结构化网格和非结构化相结合的混合网格划分方式,网格为六面体和四面体组合的形式,该组合可以在提高计算效率的情况下保证精度,并提高模型的局部计算精度。

1.3.2 网格无关性 为了确保仿真模拟运算的准确性,对简化模型进行网格划分,将模型网格数划分为 30 150, 459 267, 1 357 593, 2 087 371, 3 426 745,并对这些不同数量的网格模型进行模拟,将入口速度设置为 4 m/s,在建立的烘干室模型中选取 $Y=0.16$ m, $Z=0$ m 沿 Z 轴直线,对其风速进行监测,进行网格无关性检测。

图2 不同网格数下($Y=0.16$ m, $Z=0$ m)的风速分布Figure 2 Wind speed distribution under different grid numbers ($Y=0.16$ m, $Z=0$ m)

由图 2 可知,当网格数为 30 150 时,在 6~14 m 区间内与其他网格数的模型所得结果差距较大,密度加大后,风速的趋势、大小均趋于一致,可以满足仿真要求。故选用网格数为 2 087 371 作为仿真模型进行仿真求解计算。

1.4 边界条件

设置重力加速度沿 Y 轴向下 9.81 m/s^2 ,烘干室入口位于箱体顶端,由外部风机鼓吹热空气进入箱体,入口选择速度进口,入口速度设为 6 m/s。出口与外界相通,故出口选择压力出口边界条件。湍流定义方法选择湍流强度和湍流直径,其中入口的湍流直径为 244 mm,两个出口的湍流直径为 131 mm,烘干室的外壁材料为不锈钢,在粉丝烘干过程中不会发生移动,该仿真只模拟空气的流动,不涉及热量交换,所以壁面边界条件为无滑移,温度固定。

1.5 模拟结果

仿真计算得到的结果如速度云图(图 3)和流线图

(图 4)所示。由图 3 可知,热空气从入口以初速度进入后,由于惯性向下移动,受出口位置的影响,中间与出口水平方向接近的位置空气流速相对于竖直方向较快,在入口对应的箱体底部,由于受到壁面的阻挡,空气速度沿底部向两侧延展,底部正对入口的地方流速比较低,呈现比竖直方向其他位置大的现象。箱体的绝大部分区域的空气流速低于 1 m/s。两侧的出口处,随着水平位置越来越靠近出口,流速逐渐增大,最大可达 10 m/s。由图 4 可知,空气先以较大速度进入箱体直到底部壁面,受到阻碍后又向上流动,反复波动之后逐渐向左右两出口水平移动,接近出口时在竖直方向向出口位置聚拢,直到离开箱体。对于一个连续的粉丝烘干自动线,在同一水平面上热空气在烘干室内的流动速度变化较大,且绝大部分空间的空气流速都很低,热空气利用效率较低,所以对烘干室结构进行优化是必要的。

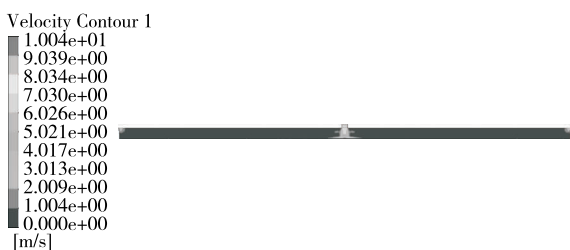


图 3 烘干室 $Z=0$ m 截面速度云图

Figure 3 The velocity cloud diagram of the $Z=0$ m section of the drying chamber

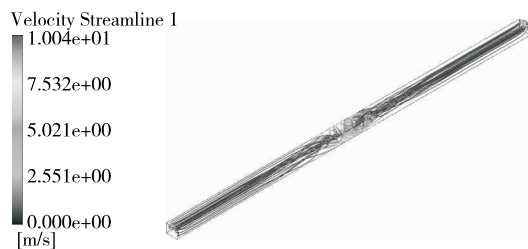


图 4 烘干室流线图

Figure 4 Streamline diagram of drying room

2 模型优化与分析

2.1 仿真评价指标

对粉丝烘干自动线的原有烘干室结构进行优化,在烘干室内加入引流管道,使热空气通过管道引导到达粉丝烘干链板所在的位置。在对整体结构改进的前提下,对引流管道结构进行优化设计,对不同结构的烘干室进行流场仿真,得到各优化指标下的烘干效果。针对不同模型的仿真结果,需要建立评价标准,考察优化效果。

2.1.1 烘干热风速度数据分析

(1) 平均速度 $\bar{V}_a$:用于评价在样本取值范围内的风速强度,一定程度上反映烘干效果,其计算式为:

$$\bar{V}_a = \frac{\sum V_n}{n}, \quad (5)$$

式中:

$\bar{V}_a$ ——风速分布的总体均值, m/s;

n ——选取的监测位置数;

V_n ——不同监测位置的风速值, m/s。

(2) 风速不均匀系数 M :用于评价分析整体风速分布的均匀性,其计算式为:

$$M = \frac{\sigma_v}{\bar{V}_a} \times 100\% = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V}_a)^2}}{\bar{V}_a} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

σ_v ——标准偏差;

n ——选取的监测位置数;

V_i ——各点的速度, m/s。

(3) 竖直方向平均速度 $\bar{V}_{ay}$, 竖直方向风速不均匀系数 M_Y 。

2.1.2 速度云图、流线图 通过 Fluent 后处理软件 CFD-Post 对 Fluent 的运算结果进行处理,得到烘干室内截面速度云图和流线图,通过速度云图可以判断热空气流速的分布情况,从而直观地反映热空气的速度的利用效率;流线图可以反映出一个质点从入口进入到烘干室中运动的整个过程,实现粒子运动路线模拟。以上两种图像可以更加具象地对烘干室内的流场分布进行分析,实现流场分布的可视化。

2.2 结构优化影响对比

原有烘干室的烘干模式是依靠热空气的温度进行烘干,效率低。当入口处空气速度为 6 m/s 时,取粉丝烘干时盛放粉丝的链板的水平位置下方 5 cm 处居中的一条直线,在该条直线上取 1 000 个点,求得其速度平均值 $\bar{V}_a$ 为 0.63 m/s,风速不均匀系数 M 为 82.02%,但由于粉丝烘干盒只有顶部和底部可以空气流通,故竖直方向的平均速度增大时可以引入对流烘干,更直接地作用于粉丝,故提取空气流动的竖直方向速度,并对其取绝对值,求得竖直方向平均速度 $\bar{V}_{ay}$ 为 0.24 m/s,竖直方向风速不均匀系数 M_Y 为 308.30%,造成风速不均匀的原因为入口处空气速度与箱体内流速平均水平差距过大。对粉丝烘干自动线的原有烘干室结构进行优化,在烘干室内加入引流管道,使热空气通过管道引导到达粉丝烘干链板所在的位置。同时提出有助于提升烘干室对于粉丝烘干效率的结构方案并验证优化结果。

2.2.1 烘干室整体优化方案与影响分析 保持原箱体规格,并在其中设置一个长 18 m、直径 200 mm 的圆形截面引流管道,管道入口接烘干室对外部的风机出口,入口水平布置,垂直于引流管道本体,置于烘干室侧面,共设置

90 个管道出口,位于引流管道顶部,每间隔 200 mm 设有一个管道出口,使气流的分布相较于原有烘干室更加有针对性且在输入速度不变的情况下提升了局部流速。为保持进入箱体的空气流量与原箱体一致,按照入口面积比例,将入口风速设置为 8.68 m/s,其他设置保持不变。箱体空气出口仍设置于箱体顶部,将其导入 Fluent 得到运算结果。



图 5 优化后烘干室 Z=0 m 截面速度云图

Figure 5 Speed cloud diagram of Z=0 m section of drying chamber after optimization



图 6 优化后烘干室流线图

Figure 6 Streamline diagram of drying chamber after optimization

由图 5、图 6 可知,空气从 3 个入口进入引流管,通过引流管出口流出,进入烘干室体,最终从烘干室顶部排出箱体。该过程中,空气从引流管流出时,直接以垂直方向速度流经烘干区域,提高了空气流速的利用效率。采用与原箱体相同的流速提取方法,求得其速度平均值 $\bar{V}_x$ 为 0.62 m/s,竖直方向平均速度 $\bar{V}_{ay}$ 为 0.58 m/s,与优化前的模型相比,优化后的方案将竖直方向平均速度提升了 120.83%,热空气由原来的随机流动到加入管道后规律性更加明显,可以达到热空气直吹粉丝起到对流烘干的目的。但由图 5 可知,引流管出口的速度存在一些差异,由于入口初始速度过大,受到阻挡后其方向改变有限,导致有出口空气也会受初始速度影响无法从入口顶部的出口流出。优化前后烘干室气流运动路线简图如图 7、图 8 所示。

2.2.2 引流管道截面影响分析 引流管道截面形状为圆形,分别取管道直径为 150,200,250 mm 进行仿真,结果如图 9 和表 1 所示。在 90 个出口位置上方 2 cm 处,以相同间距取 5 个点并求得平均速度,其值随直径的减小而

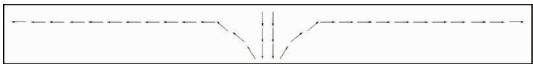


图 7 原烘干室气流路线示意图

Figure 7 Schematic diagram of the air flow path of the original drying room



图 8 优化后烘干室气流路线示意图

Figure 8 Schematic diagram of the air flow path of the drying chamber after optimization

增大,可认为在圆形截面的条件下平均速度随截面面积的减小而增大,受制于引流管道入口的限制,其直径无法进一步减小,为探究平均速度和风速不均匀系数是否只与截面面积相关,将引流管道截面设置为长方形,选取截面规格为 60 mm×200 mm,200 mm×200 mm,300 mm×200 mm 并建立模型,模拟仿真结果见图 10 和表 2。平均速度也随截面面积的减小而下降,但是其整体速度低于圆形截面,且风速不均匀系数有上升,风速不均匀系数的上升会导致各出风口间风速差距较大,不利于风速的统一设置和监控,结合图 10,虽然 60 mm×200 mm 的矩形截面引流管道的平均速度最高,但是单个出风管不同位置的风速差距较大,不同出风管道间的平均风速差距也较大。而 200 mm×200 mm 的矩形截面引流管道的平均速度与直径为 150 mm 的圆形截面相似,比 200 mm 圆形截面的平均速度提升了 19.2%,但风速不均匀系数较

表 1 圆形截面 90 个出口处相同间距取 5 点速度数据

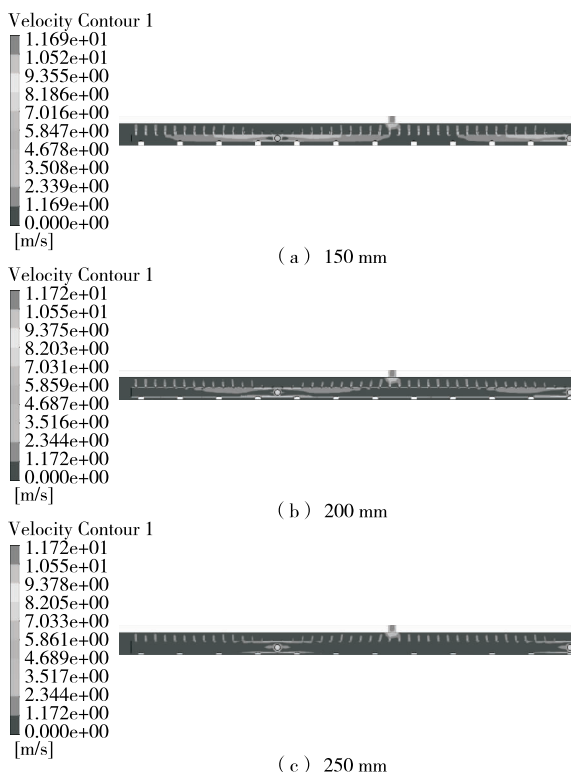
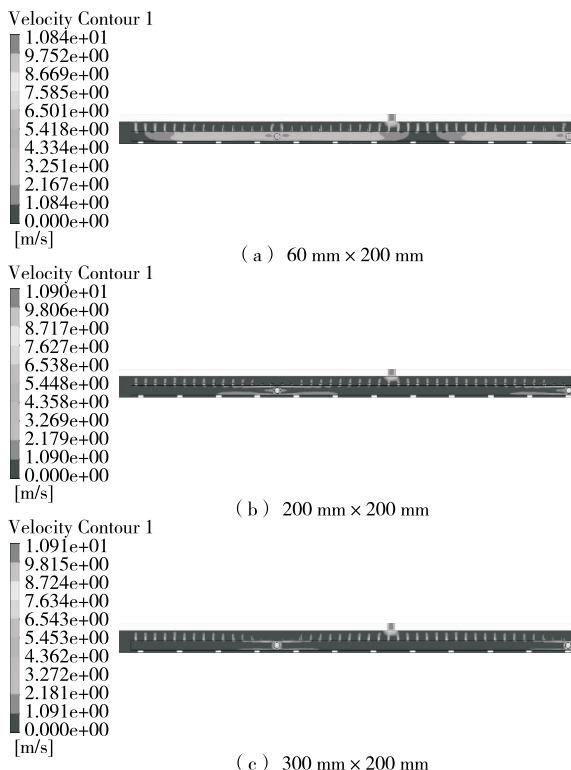
Table 1 In the case of a circular cross-section, the speed data of five points at the same interval at 90 exits are taken

直径/mm	平均速度/(m·s ⁻¹)	风速不均匀系数/%
150	1.50	54.25
200	1.25	53.32
250	1.23	42.59

表 2 矩形截面 90 个出口处相同间距取 5 点速度数据

Table 2 In the case of a rectangular section, the speed data of five points are taken at the same interval at 90 exits

长×宽/mm ²	平均速度/(m·s ⁻¹)	风速不均匀系数/%
60×200	1.54	62.05
200×200	1.49	44.43
300×200	1.45	44.96
180×180	1.50	48.51
220×220	1.47	44.05

图 9 圆形截面烘干室 $Z=0$ m 截面速度云图Figure 9 The velocity cloud diagram of the circular cross-section drying chamber $Z=0$ m图 10 圆形截面烘干室 $Z=0$ m 截面速度云图Figure 10 The velocity cloud diagram of the circular cross-section drying chamber $Z=0$ m

150 mm 圆形截面下降了 9.82%，较 200 mm 圆形截面下降了 8.89%，所以 200 mm × 200 mm 矩形截面的引流管道整体效果更好。由于烘干室空间和出入口直径的限制，长宽不能过大或过小，故对长、宽均为 180, 220 mm 的矩形截面进行仿真，其平均速度与边长为 200 mm 截面的结果非常接近，边长为 180 mm 的正方形截面风速不均匀系数增加了 4.08%，边长为 220 mm 的矩形截面与边长为 200 mm 的矩形截面相差 0.38%，综合平均速度与风速不均匀系数考虑，200 mm × 200 mm 的矩形截面的效果最好。在同一形状的条件下，平均速度随横截面积的缩小而增大，当横截面积减小时，空气在横截面上的流动距离变短，速度损失更小。空气在圆形截面的管道中流动接触到壁面时，空气会延圆弧切向运动，由于惯性无法从出口流出，矩形截面的管道受该影响较小，故在尺寸接近时，平均速度和风速不均匀系数两方面的表现均优于圆形管道。

3 结论

通过 CFD 软件模拟了原始烘干室内的流场情况，发现气体流动对粉丝烘干的影响较大，对其进行优化，在新型烘干室内加入引流管道，气流进入烘干室时，更具目标性地直接作用于需要烘干的粉丝上，在烘干链板位置处竖直方向的平均速度较原始烘干室的提升了 120.83%。进一步优化引流管道横截面的形状和尺寸，最终选取效果最好的 200 mm × 200 mm 的矩形截面的引流管道，在引流管道出口位置的平均速度较初始直径 200 mm 圆形截面的提升了 19.2%，风速不均匀系数下降了 8.89%，提高热空气利用效率和粉丝烘干效率，达到节能减排。后续将结合粉丝烘干模型进行综合分析，以求进一步提高粉丝自动线烘干效率及产品品质。

参考文献

- [1] 向卓亚. 甘薯粉丝品质特性及其干燥新工艺研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018: 2.
XIANG Zhuo-ya. Study on the quality of sweet potato starch noodles and its new drying technology[D]. Chongqing: Xinan University, 2018: 2.
- [2] 周洁. 甘薯粉丝干燥机理和干燥技术的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2010: 24.
ZHOU Jie. Research on drying mechanism and drying technology of sweet potato vermicelli[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2010: 24.
- [3] 王振文, 吴敏, 徐新民, 等. 热泵烘房结构及参数优化仿真设计[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 464-475.
WANG Zhen-wen, WU Min, XU Xin-min, et al. Optimal simulation design of structure and parameter in heat pump drying room[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 464-475.

- [4] 李赫, 张志, 任源, 等. 基于 FLUENT 的菊花热风干燥流场特性仿真分析[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 133-138.
LI He, ZHANG Zhi, REN Yuan, et al. Simulation analysis of flow field characteristics of chrysanthemum drying based on FLUENT[J]. Food & Machinery, 2018, 34(10): 133-138.
- [5] 吴敏, 段豪, 王振文, 等. 基于温湿度控制的红外热风联合干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 483-492.
WU Min, DUAN Hao, WANG Zhen-wen, et al. Design and experiment of infrared-hot air combined dryer based on temperature and humidity control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 483-492.
- [6] 刘瑞, 董继先, 王栋, 等. 菊花热风烘房的流场模拟及结构优化[J]. 机械设计, 2021, 38(1): 47-54.
LIU Rui, DONG Ji-xian, WANG Dong, et al. Flow-field simulation and structural optimization of the chrysanthemum hot air drying room[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(1): 47-54.
- [7] 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.
WANG Jian, DONG Ji-xian, WANG Dong, et al. Numerical simulation and structure optimization of air distribution chamber in fruit and vegetable drying room[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2019, 37(1): 128-134.
- [8] DARABI H, ZOMORODIAN A. Design a cabinet dryer with two geometric configurations using CFD[J]. Journal of Food Science & Technology, 2015, 52(1): 359-366.
- [9] 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.
YU Hai-ming, LI Hai-yuan, 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.
- [10] 李海亮, 汪春, 胡军, 等. 气力式水稻穴盘成型机气流分配室流场仿真与优化设计[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 94-101.
LI Hai-liang, WANG Chun, HU Jun, et al. Simulation and optimum design on airflow distribution chamber of pneumatic forming machine for rice seeding-growing tray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 94-101.
- [11] 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: 57-60.
HUO Er-guang. Simulation and optimization study on airflow organization in chrysanthemum drying room [D]. Nanchang: Nanchang University, 2016: 57-60.
- [12] 李若兰. 空气能热风式枸杞烘干机流场均匀性模拟研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019: 51-53.
LI Ruo-lan. Simulating study on flow field uniformity of air-energy hot-air lyceum barbarum dryer[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019: 51-53.
- [13] 孙帮成, 李明高. ANSYS FLUENT 仿真分析与优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 8-11.
SUN Bang-cheng, LI Ming-gao. ANSYS FLUENT simulation analysis and optimization design[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2014: 8-11.
- (上接第 31 页)
- [5] LIU Qi-zheng, MA Hu-sheng, ZHANG Ya, et al. Artificial cultivation of true morels: Current state, issues and perspectives[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2018, 38(2): 259-271.
- [6] 赵瑞华, 任桂梅, 贺晓龙, 等. 陕北南泥湾野生羊肚菌研究现状及对策[J]. 陕西农业科学, 2019, 65(6): 96-98.
ZHAO Rui-hua, REN Gui-mei, HE Xiao-long, et al. Present status and strategy of wild *Morchella* in Nanniwan of Northern Shaanxi[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2019, 65(6): 96-98.
- [7] 李翔, 任菁菁, 钟方友, 等. 野生和人工栽培羊肚菌营养和安全性的对比分析[J]. 食品工业, 2018, 39(4): 211-213.
LI Xiang, REN Jing-jing, ZHONG Fang-you, et al. Comparative analysis of nutrient and safety between wild and artificial cultivation *Morchella*[J]. The Food Industry, 2018, 39(4): 211-213.
- [8] 乔俊, 支彩艳, 陈志文, 等. 野生和人工栽培羊肚菌营养价值对比分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(5): 211-216.
QIAO Jun, ZHI Cai-yan, CHEN Zhi-wen, et al. Comparative analysis of nutritional value between wild and cultivated *Morchella*[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(5): 211-216.
- [9] 张开强, 韦荣编, 宋茹, 等. 北太平洋鲑鱼(*Todarodes pacificus*) 内脏自溶液总氨基酸组成质量评价和体外抗氧化性分析[J]. 食品科学, 2017, 38(1): 238-243.
ZHANG Kai-qiang, WEI Rong-bian, SONG Ru, et al. Assessment of total amino acids and antioxidant activity of squid (*Todarodes pacificus*) viscera autolysates[J]. Food Science, 2017, 38(1): 238-243.
- [10] 李丽, 周洪斌, 王苏华, 等. 离子色谱法测定肉类中总硫的含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(16): 5 588-5 593.
LI Li, ZHOU Hong-bin, WANG Su-hua, et al. Determination of total sulfur in meats by ion chromatography[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(16): 5 588-5 593.
- [11] 韩忠然. 硅钼蓝比色法测定本地木贼、玉米须中的可溶性硅[J]. 中国医药导报, 2008(24): 55, 111.
HAN Zong-ran. The study of determining the dose of solubility silicon of local *Equisetum hicalc* and *Zea mays* with colorimetric analysis[J]. China Medical Herald, 2008(24): 55, 111.
- [12] 张勇, 李弘文, 曹晋良, 等. 栽培与野生羊肚菌营养成分及抗氧化性研究[J]. 食品科技, 2019, 44(1): 103-108.
ZHANG Yong, LI Hong-wen, CAO Jin-liang, et al. Study on nutrition and antioxidant of cultivated and wild *Morchella esculenta*[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(1): 103-108.
- [13] LIU Yun-tao, SUN Jun, LUO Ze-yu, et al. Chemical composition of five wild edible mushrooms collected from Southwest China and their antihyperglycemic and antioxidant activity[J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(5): 1 238-1 244.