

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80435

# 隧道式鹿茸菇烘干机流场数值模拟与结构优化

赵辉辉<sup>1</sup> 张春燕<sup>1</sup> 徐震<sup>1</sup> 黄忠祥<sup>2</sup> 郑雪平<sup>3</sup>

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201600; 2. 苏州雷科萨科技有限公司, 江苏 苏州 215000;  
3. 上海荣美农业科技有限公司, 上海 201500)

**摘要:** [目的] 针对隧道式鹿茸菇烘干机内部流场分布不均引发的干燥品质问题, 提出基于多孔介质模型的结构优化方法, 旨在提升干燥均匀性与能效。[方法] 通过实测获取鹿茸菇的黏性阻力系数与惯性阻力系数, 建立 Realizable  $k-\epsilon$  端流—多孔介质耦合模型; 设计双端均流板导流装置, 基于六方密排孔阵优化气流分布, 结合 5 种孔径方案的压降特性分析筛选最优参数。[结果] 优化后 YZ、XZ、XY 截面平均速度分别提升了 48%、25%、26%, 风速不均匀系数降低了 62%、48%、49%; 验证实验表明, 干燥均匀性指数标准差降低了 67.5%, 单位能耗效率提升了 30.1%, 干燥周期缩短了 19%。[结论] 均流板孔径对流场整形的双效机制: 细窄孔阵通过加速气流抑制流动分离, 周期性孔阵均衡速度分布。

**关键词:** 鹿茸菇; 干燥; 多孔介质; 结构优化; 数值模拟

## Simulation of flow field and structure optimization of tunnel-type dryer for *Lyophyllum decastes*

ZHAO Huihui<sup>1</sup> ZHANG Chunyan<sup>1</sup> XU Zhen<sup>1</sup> HUANG Zhongxiang<sup>2</sup> ZHENG Xueping<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China; 2. Suzhou Lexa Technology Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215000, China;  
3. Shanghai Rongmei Agriculture Technology Co., Ltd., Shanghai 201500, China)

**Abstract:** [Objective] In response to the drying quality problem caused by the uneven distribution of the flow field inside the tunnel-type dryer for *Lyophyllum decastes*, this paper proposes a structural optimization method based on the porous media model, aiming at improving the drying uniformity and energy efficiency. [Methods] The viscous drag coefficient and inertial drag coefficient of *L. decastes* are measured, and the Realizable  $k-\epsilon$  turbulence-porous medium coupling model is established. A double-end flow equalizing plate deflector is designed and used to optimize the airflow distribution based on a hexagonal close-packed hole array, and the optimal parameters are screened by combining the analysis of pressure drop characteristics for five aperture schemes. [Results] After optimization, the average velocity of YZ, XZ, and XY sections are increased by 48%, 25%, and 26%, respectively, and the nonuniformity coefficient of air velocity is reduced by 62%, 48%, and 49%, respectively. Experimental verification shows that the standard deviation of drying uniformity index is reduced by 67.5%, and the energy efficiency is increased by 30.1%. As a result, the drying cycle is shortened by 19%. [Conclusion] The dual mechanism of flow field shaping by the aperture of the flow equalizing plate is obtained in this study: narrow apertures accelerate the airflow to suppress flow separation, while periodic aperture arrays balance the velocity distribution.

**Keywords:** *Lyophyllum decastes*; drying; porous media; structural optimization; numerical simulation

鹿茸菇 (*Lyophyllum decastes*) 作为新兴食药两用菌, 因含水量高 (鲜菇含水率 > 90%)、菌盖层叠结构特性, 采后易褐变腐烂, 而传统晾晒法存在气候依赖性强、卫生风险高等<sup>[1]</sup> 缺陷, 需通过脱水加工实现商品化<sup>[2-3]</sup>。工业化生

基金项目: 上海市农业科技创新项目 (编号: 2023-02-08-00-12-F04583)

通信作者: 张春燕 (1980—), 女, 上海工程技术大学教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: keke204102@163.com

收稿日期: 2025-05-09 改回日期: 2025-08-20

引用格式: 赵辉辉, 张春燕, 徐震, 等. 隧道式鹿茸菇烘干机流场数值模拟与结构优化[J]. 食品与机械, 2026, 42(2): 82-92.

Citation: ZHAO Huihui, ZHANG Chunyan, XU Zhen, et al. Simulation of flow field and structure optimization of tunnel-type dryer for *Lyophyllum decastes*[J]. Food & Machinery, 2026, 42(2): 82-92.

产普遍采用热风干燥技术,该技术通过强制对流实现高效脱水,具备能耗低、产能弹性高等优势<sup>[4-5]</sup>。然而,鹿茸菇多孔介质特性导致其对流场分布极度敏感,设备内部风速不均将引发局部过热与干燥梯度失衡,制约干品品质与烘干能效提升<sup>[6]</sup>。

对于鹿茸菇热风干燥过程中流场均匀性调控的关键问题,基于计算流体力学(CFD)技术研究主要聚焦于设备结构优化与多孔介质模型构建两大方向。针对设备结构优化,Zou等<sup>[7]</sup>通过EDEM-Fluent耦合方法构建了烟草烘干过程离散元模型,实现了物料运动与流场分布的动态耦合仿真,进气口结构对干燥均匀性影响系数达0.78;Hassan等<sup>[8]</sup>基于CFD集成模型,揭示了网格化进风结构可消除干燥室低能区,但垂直样本排列会加剧流速梯度,为多物料协同干燥流场调控提供理论依据;李研等<sup>[9]</sup>研究发现,在气流下降式烟叶模拟烘烤机中加装孔径8~10 mm、孔间距40 mm的均风板可显著提升装烟室气流分布均匀性,验证了均风板通过形成保压层优化风场的作用机制;王晋伟等<sup>[10]</sup>基于均流板原理设计了一种全网孔通风墙型植物工厂,通过CFD模拟验证发现,该设计显著提升了温度、气流速度及CO<sub>2</sub>浓度的分布均匀性,空气龄降低至传统结构的1/9。针对多孔介质模型构建,Nadew等<sup>[11]</sup>通过蘑菇切片渗透试验测定了有效直径与孔隙率,基于Ergun方程建立了黏性-惯性阻力源项模型,验证结果显示干燥温度预测R<sup>2</sup>达0.926;Tegenaw等<sup>[12]</sup>通过切片阵列阻力试验建立了黏性-惯性阻力预测模型,发现甜薯切片阵列阻力系数与孔隙率呈幂函数关系;刘瑞等<sup>[13]</sup>建立了菊花多孔介质一端流耦合模型,通过引风罩优化使干燥室风速均匀性提升了38%;胡如响等<sup>[14]</sup>开发了香菇-干燥箱一体化模型,实现了物料收缩过程与流场演化的动态耦合仿真。

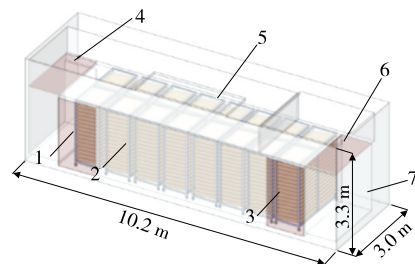
然而,上述研究存在两大局限:①多孔介质模型构建多直接引用常见食用菌的阻力参数,而鹿茸菇特有的层叠伞状结构导致其孔隙率与惯性阻力系数存在显著差异<sup>[15-17]</sup>,现有的常见食用菌多孔介质模型无法适用于其特有的层叠伞状结构;②传统导流装置难以适配高堆积密度物料<sup>[18]</sup>,中部通风不足引发的“气流短路”效应使物料层风速差异过大,显著高于常见食用菌干燥工况。试验拟建立一种精准适用于鹿茸菇高堆积状态的多孔介质模型,并提出两端均流板结构,通过孔径梯度设计打破边界层效应,以实现流场调控技术的突破性进展。

## 1 烘干机结构与数学模型

### 1.1 烘干机结构及烘干工艺

图1为基于Solidworks建立的隧道式鹿茸菇烘干机模型,该模型由烘干室、物料小车、保温壁面等组成。湿冷的鲜菇从低温入口处进入烘房,每间隔固定周期移动

小车前进到下一个小车位置处,以此类推,最后逐渐向湿度较高一侧进行平移。此过程中鹿茸菇与热风进行湿热传递,完成鹿茸菇干燥,最后从出口离开烘房,进行包装,烘干过程形成“低温进高温出”的典型隧道式鹿茸菇烘干工艺,如图2所示。



1. 物料入口 2. 物料小车 3. 物料出口 4. 出风口 5. 回风出口 6. 进风口 7. 烘干机壁面

图1 隧道式鹿茸菇烘干机模型

Figure 1 Model of tunnel-type dryer for *Lyophyllum decastes*

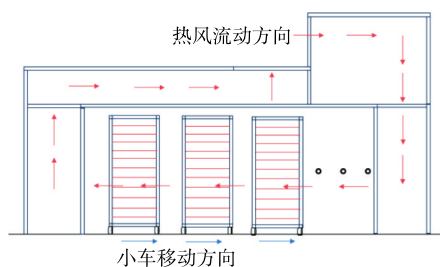


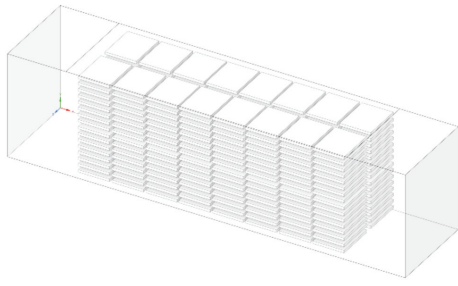
图2 隧道式鹿茸菇烘干工艺示意图

Figure 2 Schematic diagram of tunnel-type *Lyophyllum decastes* drying process

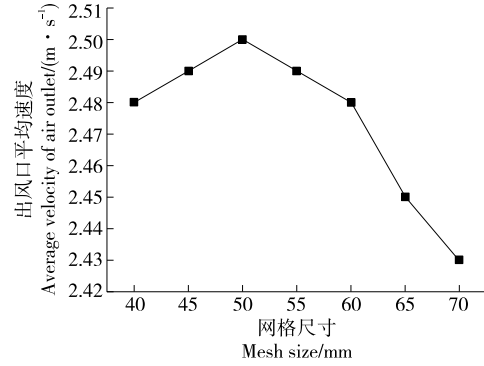
### 1.2 隧道式鹿茸菇烘干机网格划分

采用SpaceClaim 2022R1软件对图1所示的隧道式鹿茸菇烘干机进行模型简化[图3(a)],过滤直径<10 mm的螺栓孔、焊缝凸起等非关键几何要素。网格划分使用Ansys Fluent Meshing软件,采用多区域混合网格方案实现隧道式烘干设备模型的精细化划分,对核心流动区域采用多面体网格,近壁面区域构建3层棱柱层网格,初始高度2 mm,增长率1.2,其他区域采用六面体网格;同时整体网格正交质量>0.35,扭曲率<0.75。

通过网格独立性验证<sup>[19]</sup>确定最优划分单元尺寸如图3(b)所示:单元尺寸由70 mm加密至40 mm,当网格尺寸缩减至50 mm时,出风口质量加权平均速度达到峰值。此时继续加密网格,出风口平均速度变化率<1.2%,表明流动特征已充分解析。最终确定混合网格方案各区域占比(图4)为:多面体/棱柱层/六面体网格62%/28%/10%,总单元数3 843 247,平均网格质量因子0.61,满足Fluent求解器收敛要求。



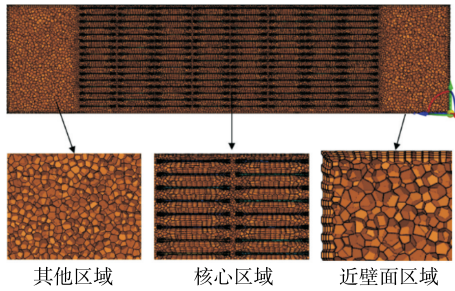
(a) 流体域模型



(b) 网格无关性验证

图 3 隧道式鹿茸菇烘干机流体域模型及网格无关性验证

Figure 3 Fluid domain model of tunnel-type dryer for *Lyophyllum decastes* and mesh independence verification



其他区域 核心区域 近壁面区域

图 4 流体域网格划分

Figure 4 Fluid domain meshing

### 1.3 数学模型

针对隧道式鹿茸菇烘干机内非稳态、非等温湍流场特性,通过雷诺数分析,确认流动状态为充分发展湍流。控制方程<sup>[20]</sup>由 3 部分组成。

(1) 质量守恒方程:

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

式中:

$u, v, w$ —— $x, y, z$ 方向上速度分量。

(2) 动量守恒方程:

$$\rho \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} - S_i \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

式中:

$p$ ——微元体所受流体压强, Pa;

$\mu$ ——流体动力黏度, Pa·s;

$u_i, u_j$ ——各时均速度分量;

$x_i, x_j$ ——各坐标分量(当  $i=j$  时,  $\delta_{ij}=1$ ; 当  $i \neq j$  时,  $\delta_{ij}=0$ );

$S_i$ ——鹿茸菇多孔介质动量源项。

(3) 湍流模型: 由于鹿茸菇特殊的层叠伞状结构,隧

道式烘干设备内部会出现强压力梯度与旋转流动现象,为了选择适用于鹿茸菇高堆积密度的湍流模型,对比标准  $k-\epsilon$ 、RNG  $k-\epsilon$  及 Realizable  $k-\epsilon$  模型的预测精度,最终选择 Realizable  $k-\epsilon$  模型<sup>[21]</sup>进行求解[式(3)~式(5)]。

湍动能  $k$  方程

$$\rho \frac{d_k}{d_t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon, \quad (3)$$

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}. \quad (4)$$

耗散率  $\epsilon$  方程

$$\rho \frac{d_\epsilon}{d_t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + G_{1\epsilon} (G_k + G_{b\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k},$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (5)$$

式中:

$\mu_t, \mu_t, t$ ——分子黏性系数( $m^2/s$ )、湍流黏度( $m^2/s$ )、时间变量(s);

$G_k, G_b$ ——层流速度梯度产生的湍动能和浮力产生的湍流动能,  $m^2/s^2$ ;

$C_\mu$ ——标准  $k-\epsilon$  模型系数,取 0.09;

$\sigma_k$ ——湍动能湍流普朗特数,取 1.0;

$\sigma_\epsilon$ ——耗散率湍流普朗特数,取 1.3;

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

$G_{b\epsilon}$ ——湍流扩散率,  $m^2/s$ 。

## 2 多孔介质模型设置

### 2.1 多孔介质设置

鹿茸菇堆积层采用各向同性多孔介质模型进行等效,动量源项表达式<sup>[22]</sup>为:

$$S_i = \sum_{j=1}^3 D_{ij} u v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} |v_j| v_j, \quad (6)$$

$$S_i = \frac{\mu}{\alpha} v_j + \frac{1}{2} C_2 \rho |v_j| v_j, \quad (7)$$

式中:

$S_i$ —— $i, j$ 方向动能源项,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$ ;  
 $|v_j|$ ——速度,  $\text{m/s}$ ;  
 $\alpha$ ——渗透率,  $\text{m}^2$ ;  
 $D_{ij}, C_{ij}$ ——黏性阻力系数 ( $\text{m}^{-2}$ ) 和惯性阻力系数 ( $\text{m}^{-1}$ )。

## 2.2 参数计算

鹿茸菇多孔介质模型关键参数包括菌体材料密度、孔隙率以及黏性阻力系数与惯性阻力系数, 建立如图5所示的试验方案, 采用量筒排水法与电子天平称重法对鹿茸菇密度及多孔介质阻力系数进行测定。

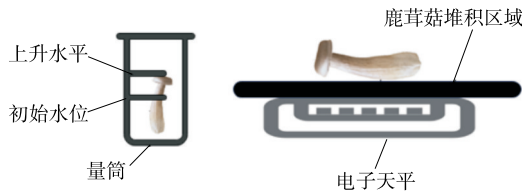


图5 试验原理示意图

Figure 5 Schematic diagram of experimental principle

### 2.2.1 鹿茸菇密度 按式(8)计算鹿茸菇实际密度。

$$\rho_1 = \frac{m_0}{v_1 - v_0}, \quad (8)$$

式中:

$\rho_1$ ——鹿茸菇实际密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  
 $m_0$ ——鹿茸菇质量,  $\text{kg}$ ;  
 $v_0$ ——初始水位刻度,  $\text{m}^3$ ;  
 $v_1$ ——加入鹿茸菇水位刻度,  $\text{m}^3$ 。

按式(9)计算鹿茸菇堆积密度。

$$\rho_2 = \frac{m_2 - m_1}{v_2}, \quad (9)$$

式中:

$\rho_2$ ——鹿茸菇堆积密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  
 $m_1$ ——托盘质量,  $\text{kg}$ ;  
 $m_2$ ——堆积状态下鹿茸菇和托盘总质量,  $\text{kg}$ ;  
 $v_2$ ——堆积状态下鹿茸菇与空隙总体积,  $\text{m}^3$ 。

按式(10)计算鹿茸菇孔隙率。

$$\varphi = \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \times 100\%, \quad (10)$$

式中:

$\varphi$ ——鹿茸菇孔隙率, %。

### 2.2.2 多孔介质阻力系数 采用图像分析法统计鹿茸菇菌盖直径 $D_p$ 。随机选取 100 个鹿茸菇样本, 通过图像识别按式(11)计算菌盖直径。

$$D_p = \frac{\sum_{i=1}^{100} D_i}{100}, \quad (11)$$

式中:

$D_i$ ——菌盖直径,  $\text{cm}$ 。

在多孔介质流动模型中, 黏性阻力系数与惯性阻力系数的计算采用多孔介质流动场景<sup>[23]</sup>的经典 Ergun 方程 [式(12)], 该方程将多孔介质压降  $\Delta P$  分解为黏性项和惯性项。

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu(1-\varphi)^2}{D_p^2\varphi^3} v + \frac{1.75\rho(1-\varphi)}{D_p\varphi^3} v^2. \quad (12)$$

对比达西—福希海默方程:

$$\Delta P = \frac{\mu}{\alpha} v + \frac{1}{2} C_2 \rho v^2. \quad (13)$$

基于式(12)和式(13)可推导出黏性阻力系数  $1/\alpha$  [式(14)]与惯性阻力系数  $C_2$  [式(15)]的理论表达式:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{150(1-\varphi)^2}{D_p^2\varphi^3}, \quad (14)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\varphi)}{D_p\varphi^3}. \quad (15)$$

## 2.3 边界条件

为确保鹿茸菇隧道式烘干机数值模拟的湍流模型适用性, 通过雷诺数验证其流动湍流强度。按式(16)计算雷诺数。

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}, \quad (16)$$

式中:

$d$ ——进风口水力直径,  $\text{m}$ ;  
 $\rho$ ——烘干机内空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  
 $v$ ——进风口风速,  $\text{m/s}$ 。

根据计算结果, 流动处于充分发展湍流状态, 因此选用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型是合理的。

湍流强度  $I$  表征隧道式鹿茸菇烘干机入口流动的脉动强度, 其经验公式为:

$$I = 0.16 Re^{-1/8} \times 100\%. \quad (17)$$

通过式(8)~式(17)可推导确定仿真所需边界条件及多孔介质模型参数, 参数设置见表1。

## 2.4 模型可靠性验证

为确保多孔介质参数测定与湍流模型构建的准确性, 针对烘干机内多物料车导致的检测空间限制问题, 采用分层采样的策略验证模型的可靠性。选取第1、8、16层作为典型监测平面(图6), 每层按等间距网格布置96个测点。通过热线风速仪阵列实现速度场同步采集, 通过图7及计算可得: 数值模拟结果与试验测量值在整体分布趋势上呈现高度一致性, 各测点速度分量平均偏差  $< 8.5\%$ , 最大局部偏差  $< 12.3\%$ , 证实模型能准确重构流场分布特征。

表 1 边界条件及多孔介质模型参数

Table 1 Boundary conditions and porous media model parameters

参数	单位	数值
入口速度	m/s	2.5
入口边界类型		速度入口
入口温度	℃	65
出口边界类型		Outflow
壁面类型		无滑移壁面
入口湍流强度	%	3.2
水力直径	m	1.8
黏性阻力系数	m <sup>-2</sup>	183 654
惯性阻力系数	m <sup>-1</sup>	188
孔隙率		0.75
堆积密度	kg/m <sup>3</sup>	416.6

### 3 数值模拟

#### 3.1 原始结构流场模拟分析

为系统分析隧道式鹿茸菇烘干机结构的流场特性，基于 CFD-Post 后处理模块，沿烘干机轴向 (X)、横向 (Y) 及垂向 (Z) 截取特征截面，如图 9 所示，并均匀布设 96 个监测节点  $v_i$  提取速度矢量数据。分别按式 (18)、式 (19) 计算各截面的平均速度和均匀系数，构成后续优化分析的初始工况特征<sup>[24]</sup>。

$$\bar{v} = \frac{\sum v_i}{n}, \tag{18}$$

$$M = \frac{\sigma_v}{\bar{v}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} / \bar{v}, \tag{19}$$

式中：

$\bar{v}$ ——特征平面内风速场空间均值，m/s；

$v_i$ ——第  $i$  个采样点的瞬态风速观测值，m/s；

$n$ ——对应测站布设总数量；

$\sigma_v$ ——表征测点风速分布的离散程度，m/s。

通过对整体风速迹线图 (图 8) 及各截面风速云图 (图 9) 和风速均匀性系数进行分析，气流从顶部吹入后，呈现出一种明显的非均匀分布状态。由于内部鹿茸菇平铺区域存在阻力，在重力的影响下，热风会向底部聚集，进风气流在靠近进风口的地方出现涡流 (图 8)，涡流中心流速极低，烘干室整体风速出现上下不均匀的现象，底部风速明显大于顶部风速。

由图 9 可知，进风系统的高速气流在惯性力与结构约束作用下，导致底部速度梯度畸变，形成高速贴壁流动和热风滞留区。烘干室内气流分布显著不均：物料平铺区域风速较低 (平均约 1.5 m/s)，而底部同垂直高度风速较高 (平均约 3 m/s)。垂直方向上，除底部高速与顶部低速差异外，中部区域亦存在复杂流态，如局部低速涡流区和高速通道区。综上，烘干机内部存在明显的气流组织分布不均问题。

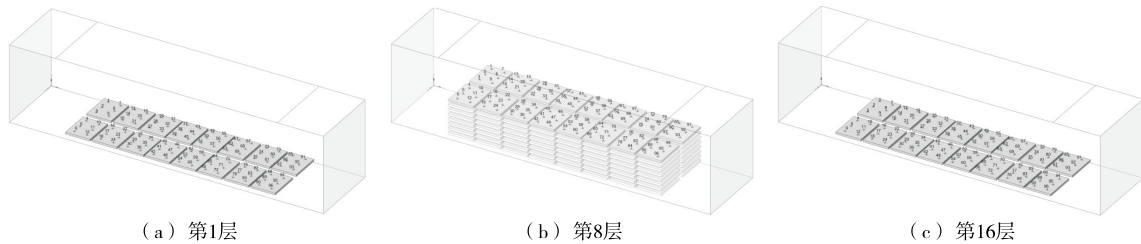


图 6 隧道式鹿茸菇烘干机截面监测点位置

Figure 6 Locations of cross-sectional monitoring points of tunnel-type dryer for *Lyophyllum decastes*

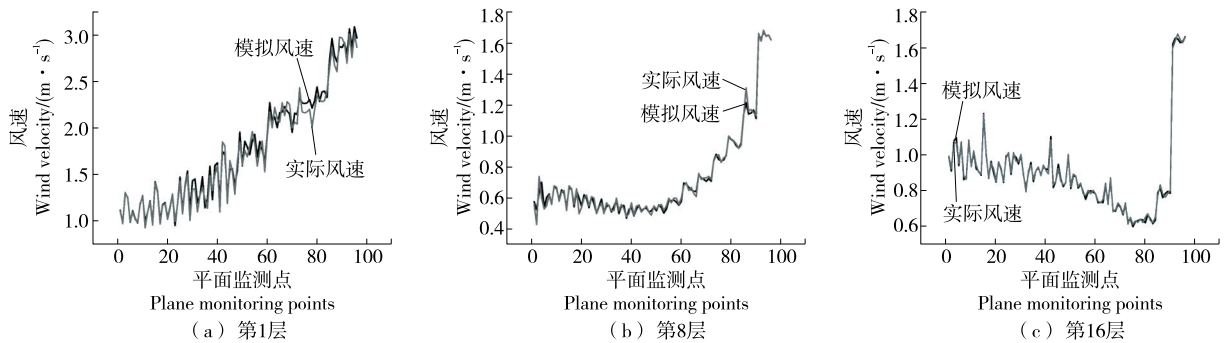


图 7 各截面监测点模拟风速与实际风速

Figure 7 Simulated wind speed and actual wind speed at monitoring points



图8 整体风速迹线图

Figure 8 Overall wind speed trace diagram

### 3.2 均流板孔径优化设计

3.2.1 均流板结构设计 为解决上述隧道式烘干机气流分布不均问题,开发一种双端均流板优化装置[图10(a)]。该装置在进风口和出风口处各安装一个多孔均流板,与内部物料车协同形成特有的双端导流结构。优化原理:通过调节孔直径减少局部气流紊乱,平衡气流阻力分布。在保持原有风道结构的前提下[图10(b)],以六方密排圆形孔板为基础构型,系统性比对5种孔径方案(见表2),筛选出可显著提升烘干室气流稳定性的最优配置。

3.2.2 均流板压降特性分析 均流板呈现典型的六方密

表2 均流板孔径大小

Table 2 Aperture of flow equalizing plate

优化方案	圆孔直径/mm
方案1	30
方案2	20
方案3	15
方案4	10
方案5	5

排结构,各中心孔洞由6个相邻孔洞以60°角间距对称环绕,形成周期性有序排列。这种几何特征表明,通过提取含中心圆孔的六边形晶胞(图11),即可基于平移对称性实现多孔板结构的全域表征<sup>[25]</sup>。

为探究不同孔径与过孔风速的关联特性,选择最优的孔径配置;针对六方密排孔阵(图11),以中心孔直径 $d$ 为变量,构建周期性晶胞单元。在CFD求解器中设置速度入口( $V_{in}$ ),监测出口截面平均风速 $V_{out}$ ,定义加速比 $\beta = V_{out}/V_{in}$ 作为优化指标。过孔板后压降与风速变化如图12所示。

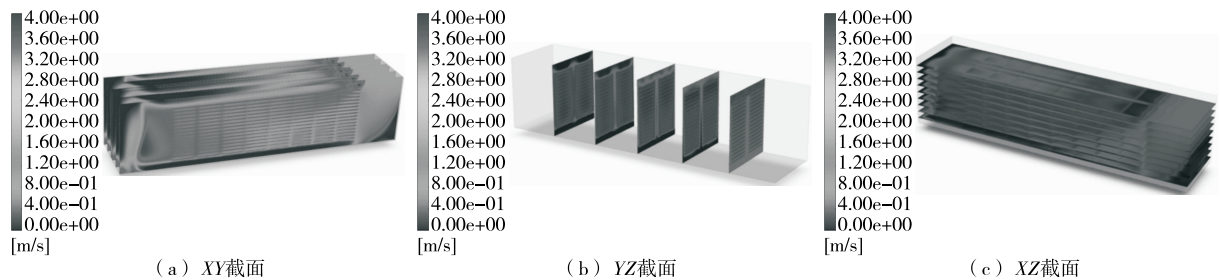


图9 各截面风速云图

Figure 9 Wind speed contour plot for each cross-section

根据仿真数据分析,10 mm孔径在多孔板设计中展现了最优的综合性能,这种性能差异源于六方密排孔阵中孔径与孔隙率的非线性关系:孔径过小时(如5 mm),高加速比以牺牲流动阻力为代价;孔径过大时(如20 mm),孔隙率过高导致气流路径分散,无法形成有效的

加速通道。10 mm孔径恰好在孔隙率与流动加速之间取得平衡,既通过适度的流道收缩实现动能转化,又避免了过高的湍流耗散。

### 3.3 优化结构分析

基于均流板压降特性分析结果,采用 ANSYS

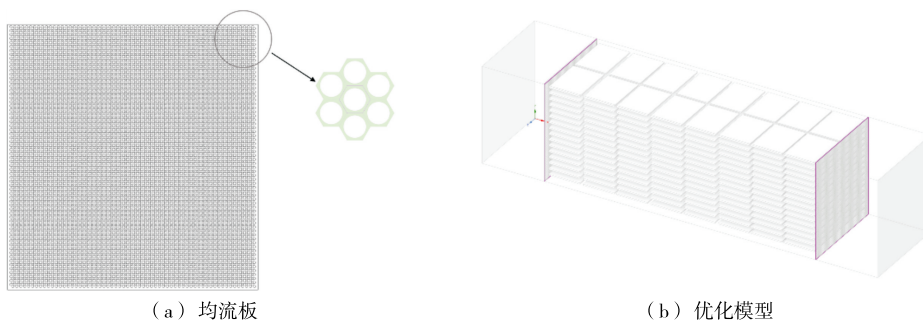
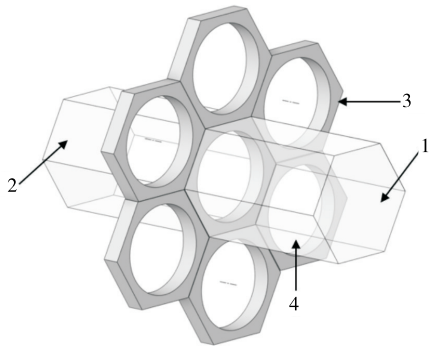


图10 均流板设计及优化模型

Figure 10 Design and optimization model of flow equalizing plate

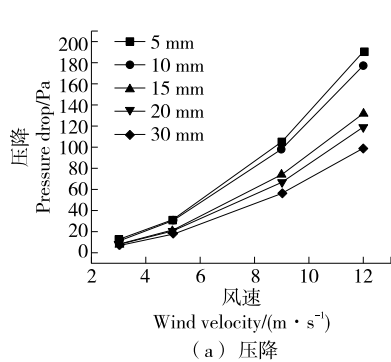


1. 速度入口 2. 压力出口 3. 六方密排多孔板 4. 晶胞壁面  
图 11 多孔板六方密排结构晶胞模型

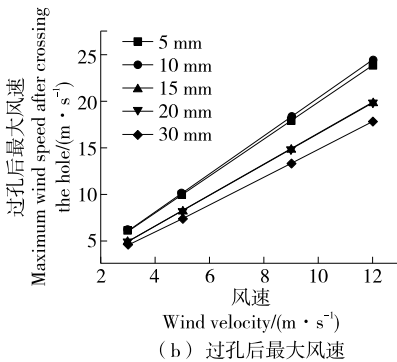
Figure 11 Hexagonal close-packed unit cell model of perforated plate

FLUENT 构建三维多孔介质流场模型: 针对 5 种特征孔径建立 1:1 几何模型, 以截面平均流速与风速不均匀系数量化流场均匀性品质。

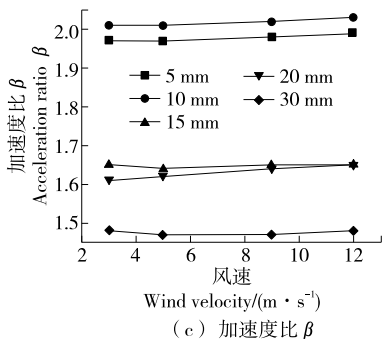
由图 13 可知, 由于均流板的整流作用, 烘干设备底部 ( $Y=0.2\text{ m}$ ) 与顶部区域风速 ( $Y=2.2\text{ m}$ ) 分别降低了 28% 和 19%, 而中部核心区速度则从 1.28 m/s 跃升至 1.77 m/s。这种差异化优化表明均流板通过抑制底部高速边界层、增强中间穿透流, 实现了轴向速度剖面的再平衡。当孔径为 10 mm 时,  $XY$ 、 $YZ$ 、 $XZ$  3 个特征截面的平均速度分别达到 2.58, 2.26, 1.77 m/s, 较原始结构提升了 48%, 25%, 26%。这种速度场强化效应源于均流板对气流的整流作用: 通过调节进风动量分布, 有效抑制底部高速流区的形成, 使更多气流穿透物料层。



(a) 压降



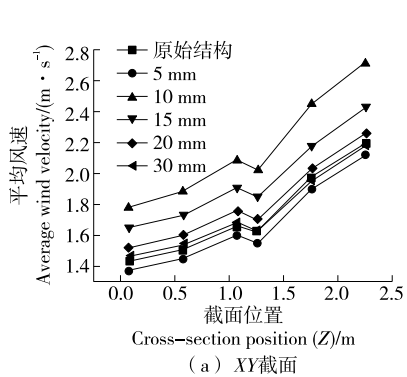
(b) 过孔后最大风速



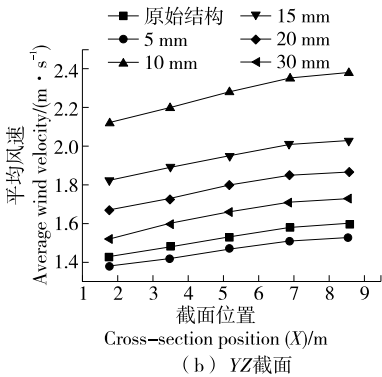
(c) 加速度比  $\beta$

图 12 不同孔径风速压降变化

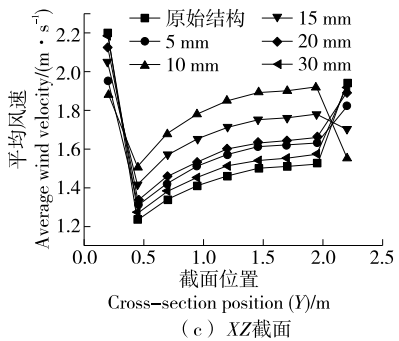
Figure 12 Variation of pressure drop and wind speed for different apertures



(a) XY截面



(b) YZ截面



(c) XZ截面

图 13 不同孔径的截面平均速度对比

Figure 13 Comparison of cross-sectional average velocity for different apertures

由图 14 可知, 10 mm 孔径方案使各截面速度不均匀系数降至 0.15~0.30。YZ 截面的风速不均匀系数从 0.43 降至 0.16, XZ 截面的风速不均匀系数由 0.42 降至 0.21, XY 截面的风速不均匀系数由 0.43 降至 0.22。这种均匀性提升主要归因于均流板产生的二次流效应: 当气流通过规则排列的孔阵时, 形成的微涡流结构有效破坏了原有的大尺度涡旋, 使速度梯度分布更趋平缓。

由图 15 可知, 优化后流场能量分布显著改善。原始结构在进风口附近及底部区域存在大范围高速流区, 最大湍动能达  $6.14\text{ m}^2/\text{s}^2$ , 呈现明显的“斑块状”分布; 而优化后高速区面积缩减了 65%, 最大湍动能降至  $3.58\text{ m}^2/\text{s}^2$ 。表明六方密排孔阵通过对隧道式鹿茸菇烘干机内部流场的射流调控, 重构了湍流能量分布, 抑制了局部涡流与“气流短路”效应。

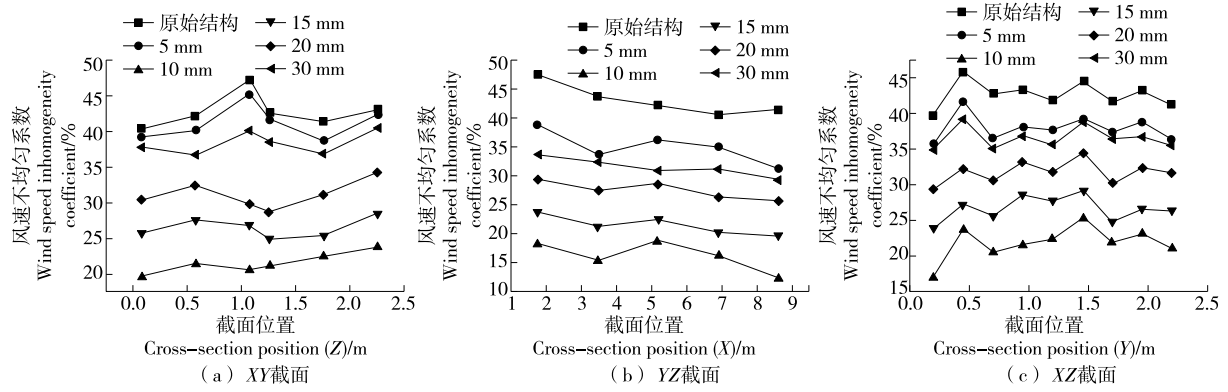


图 14 不同孔径的截面速度不均匀系数对比

Figure 14 Comparison of cross-sectional velocity nonuniformity coefficients for different apertures

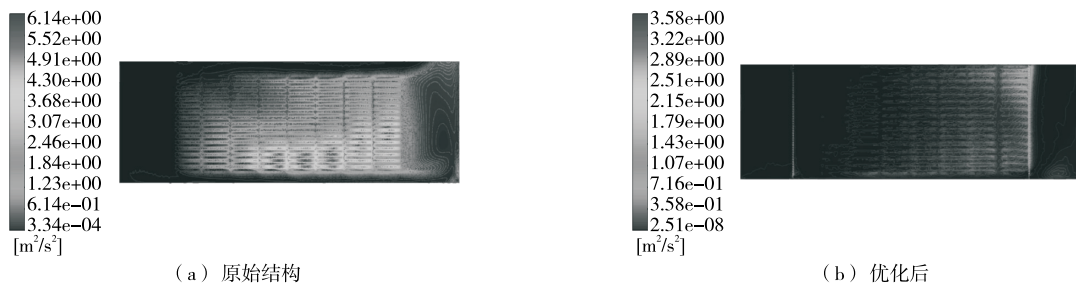


图 15 湍动能分布云图

Figure 15 Turbulent kinetic energy distribution contour plots

由图 16 可知,优化后的均流板系统实现了三维流场协同调控:在轴向截面核心物料层平均速度从 1.28 m/s 增至 1.77 m/s,高速气流通道占比扩大至 43%,速度标准差降幅达 61.4%;在纵向截面上,底部高速区 (>3.2 m/s) 与顶部低速区 (<1.0 m/s) 的极差从 2.4 m/s 缩小至 0.6 m/s,

低速滞留区面积约缩减了 70%,平均风速提升了 48%;横向截面通过抑制角涡使左右壁面速度差由 1.2 m/s 降至 0.5 m/s,不均匀系数降低了 48%;这种多维度流场重构突破了传统干燥设备的气流组织瓶颈,三维截面协同作用使热风穿透效率提升,验证了均流板结构设计的多维度

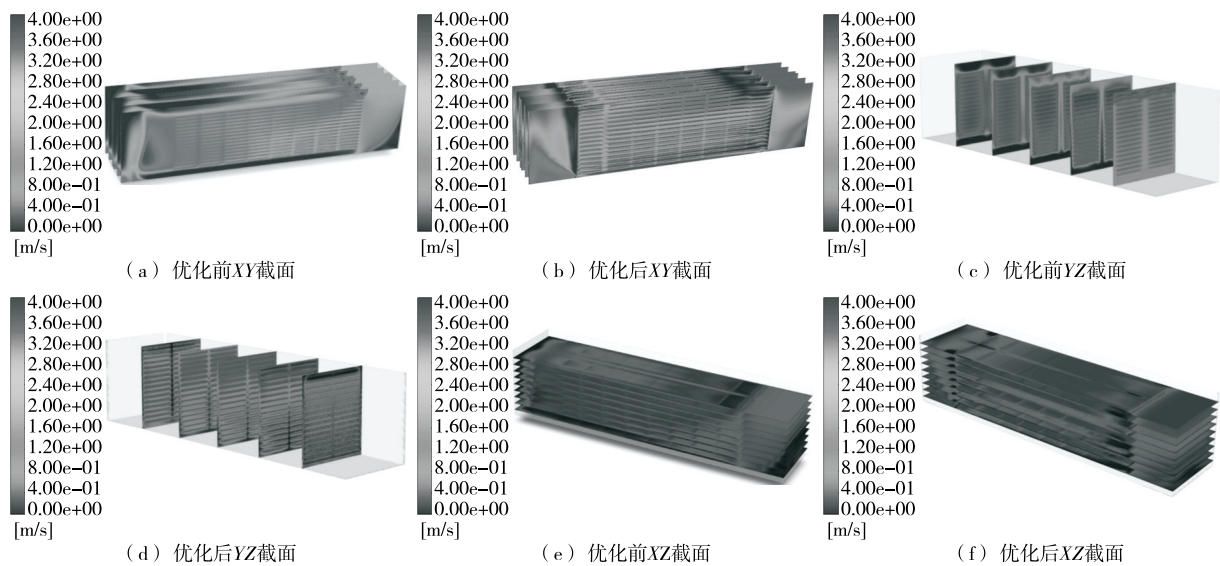


图 16 优化前后各截面风速云图

Figure 16 Comparison of wind speed contour plot in each section before and after optimization

流场调控能力。

## 4 验证实验与能效评估

### 4.1 试验系统构建

将优化后的孔径 10 mm 均流板集成至隧道式烘干机。选用形态完整、尺寸一致的鹿茸菇。在烘干室 XYZ

三轴方向设置 27 个核心监测位点(表 3)。在各物料架底部支撑结构安装高精度压力传感器(HBM U10M, 量程 0~50 kg, 精度±0.05% FS, 采样频率 10 Hz), 通过数据采集系统每 10 min 记录托盘质量变化曲线。评价指标包括干燥均匀性指数(DUI)、平均含水率和单位能耗干燥效率。

表 3 监测点选取

Table 3 Selection of monitoring points

维度	划分依据	具体坐标
X轴	气流发展阶段	X=1.2 m(衰减区)、X=4.0 m(稳定区)、X=7.8 m(加速区)
Y轴	热风分层效应	Y=0.3 m(近底板)、Y=1.2 m(物料层中线)、Y=2.1 m(近顶板)
Z轴	横向均匀性	Z=-0.5 m(左侧)、Z=0 m(中线)、Z=0.5 m(右侧)

### 4.2 评价指标

4.2.1 干燥均匀性指数 按式(20)计算干燥均匀性指数<sup>[26]</sup>。

$$DUI = 1 - \frac{\sigma_{MC}}{\overline{MC}} \times 100\%, \quad (20)$$

式中:

DUI——干燥均匀性指数, %;

$\sigma_{MC}$ ——干燥终点时物料层不同位点含水率标准差, m/s;

$\overline{MC}$ ——平均含水率, %。

4.2.2 平均含水率 按式(21)计算平均含水率<sup>[27]</sup>。

$$\overline{MC} = \frac{M_{total\_wet} - M_{total\_dry}}{M_{total\_dry}} \times 100\%, \quad (21)$$

式中:

$\overline{MC}$ ——平均含水率, %;

$M_{total\_wet}$ ——托盘中所有鲜菇总质量, kg;

$M_{total\_dry}$ ——托盘中所有菇干燥后总质量, kg。

4.2.3 单位能耗干燥效率 按式(22)计算单位能耗干燥效率(SEDR)。

$$SEDR = \frac{M_w}{E_t}, \quad (22)$$

式中:

SEDR——单位能耗干燥效率, kg/(kW·h);

$M_w$ ——总脱水量, kg;

$E_t$ ——系统总能耗, kW·h。

### 4.3 结果与分析

4.3.1 干燥均匀性提升验证 由图 17 和表 4 可知, 未优

化时含水率差异显著; 加装均流板后, 监测点含水率集中于 5.5%~7.5%, 极端值基本消除, 干燥均匀性指数(DUI)从 89.31% 显著提升至 95.37%。该提升主要源于平均含水率标准差绝对值大幅降低了 67.5%, 导致标准差与平均含水率的比值从 0.107 减至 0.046, 驱动 DUI 趋近 100%; 同时, 流场优化使干燥周期从 18.00 h 缩短至 14.58 h。综上, 均流板通过有效抑制底部高速和顶部低速区的极端含水率分布, 在提升干燥速率的同时显著提升整体干燥一致性, 其 DUI 提升了 6.8%, 反映了 67.5% 的核心优化成效, 结合流场模拟显示的风速均匀性提升, 充分验证了其有效调控流场失衡的机制。

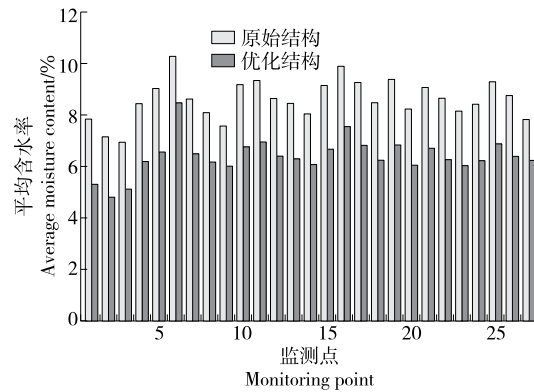


图 17 优化前后平均含水率对比

Figure 17 Comparison of average moisture content before and after optimization

表 4 干燥均匀性对比

Table 4 Comparison of drying uniformity

结构类型	平均含水率/%	标准差/%	干燥均匀性指数	总脱水量/kg	总能耗/(kW·h)	SEDR/(kg·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )
原始结构	8.585	0.918	89.31	16 800	6 250	2.69
优化结构	6.431	0.298	95.37	20 480	5 848	3.50

4.3.2 能效优化效果验证 由表4可知,在16 h的干燥时长下,原始结构实现了总脱水水量16 800 kg,系统总能耗6 250 kW·h;优化后系统脱水水量提升至20 480 kg,总能耗降至5 848 kW·h。经计算,单位能耗干燥效率(SED<sub>R</sub>)从2.69 kg/(kW·h)显著提升为3.50 kg/(kW·h)。

综上,基于干燥效率与能耗的综合评估,10 mm孔径方案在平均风速、不均匀系数及干燥均匀性等关键参数上均达到最优平衡。

## 5 结论

(1) 通过构建 Realizable  $k-\epsilon$  湍流—多孔介质耦合模型,结合试验测定的鹿茸菇黏性阻力系数与惯性阻力系数,实现了隧道式烘干机内三维流场的高精度数值模拟。模型验证结果表明,风速场平均偏差 $<8.5\%$ ,最大局部偏差 $<12.3\%$ 。

(2) 设计的多孔均布透风板双端导流装置,通过六方密排孔阵机制实现了流场分布的三维协同调控。优化后,YZ、XZ、XY截面平均速度分别提升了48%、25%、26%,风速不均匀系数分别降低了62%、48%、49%,有效解决了传统结构因气流短路效应导致的局部过热与干燥梯度失衡问题。验证实验表明,优化结构显著提升了干燥均匀性(标准差降幅67.5%,干燥均匀性指数提升6.8%),单位能耗效率提高了30.1%,干燥周期缩短19%。生产应用中,该设计可实现单位产能提升12.7%、能耗降低9.3%,验证了其工业化应用的经济性与可行性。

(3) 试验提出的流场整形理论框架,通过均流板孔径设计与多孔介质参数适配机制,为食用菌及类似多孔物料的热风干燥装备优化提供了普适性解决方案。未来研究可进一步探索非对称孔阵布局与动态孔径调控技术,以适配不同物料堆积密度与干燥工艺需求。

### 参考文献

- [1] 于海玲,汪依霓,万雨欣,等.不同干燥方式对鹿茸菇品质的影响[J].华侨大学学报(自然科学版),2024,45(5):673-680.  
YU H L, WANG Y N, WAN Y X, et al. Effect of different drying methods on quality of *Lyophyllum decastes*[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2024, 45(5): 673-680.
- [2] 戴竹青,孙思燕,江宁,等.不同干燥处理对荷叶离褶伞品质的影响[J].江苏农业科学,2020,48(13):220-224.  
DAI Z Q, SUN S Y, JIANG L, et al. Effect of different drying treatments on quality of *Lyophyllum decastes*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(13): 220-224.
- [3] 程继红.名贵食药菌鹿茸菇商业化生产现状与发展前景[J].食药菌,2014,22(4):194-197.  
CHENG J H. The commercial production situation and prospects of the new valuable edible and medicinal mushroom, *Lyophyllum decastes*[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2014, 22(4): 194-197.
- [4] ADNOUNI M, JIANG L, ZHANG X J, et al. Computational modelling for decarbonised drying of agricultural products: sustainable processes, energy efficiency, and quality improvement [J]. Journal of Food Engineering, 2023, 338: 111247.
- [5] ACAR C, DINCER I, MUJUMDAR A. A comprehensive review of recent advances in renewable-based drying technologies for a sustainable future[J]. Drying Technology, 2022, 40(6): 1 029-1 050.
- [6] WANG H C, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Comparison of three new drying methods for drying characteristics and quality of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) [J]. Drying Technology, 2014, 32(15): 1 791-1 802.
- [7] ZOU K, HUANG Y Y. Analysis of the flow field in the lower air-inlet drying area of the tobacco baking equipment[C]//Advanced Manufacturing and Automation XII. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 798-807.
- [8] HASSAN A, JOARDDER M U H, KARIM A. A CFD integrated drying model for improving drying conditions in industry scale dryers[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025, 61: 103533.
- [9] 李研,普恩平,王亚辉,等.均风板对烟叶模拟烘烤机内气流分布的影响[J].西南农业学报,2020,33(2):423-428.  
LI Y, PU E P, WANG Y H, et al. Influence of uniform air plate on air distribution in tobacco simulated baking machine[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(2): 423-428.
- [10] 王晋伟,陈竞楠,韩冬,等.基于均流板原理的通风墙型植物工厂循环送风系统设计与模拟[J].农业工程学报,2023,39(13):213-221.  
WANG J W, CHEN J N, HAN D, et al. Design and simulation of the circulating air supply system for a ventilated wall-type plant factory based on the principle of uniform flow plate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(13): 213-221.
- [11] NADEW T T, TEGENAW P D, TEDILA T S. Mathematical-based CFD modelling and simulation of mushroom drying in tray dryer[J]. Modelling and Simulation in Engineering, 2023, 2 023(1): 6128517.
- [12] TEGENAW P D, VERBOVEN P, VANIERSCHOT M. Numerical and experimental study of airflow resistance across an array of sliced food items during drying[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 312: 110739.
- [13] 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 R, DONG J X, WANG D, 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.
- [14] 胡如响,孙东亮,朱跃强,等.物料—干燥箱一体化的香菇热风干燥模拟方法及应用[J].食品科学,2023,44(15):57-68.

- HU R X, SUN D L, ZHU Y Q, et al. A simulation method based on material-drying oven integration for hot air drying of *Lentinus edodes* and its application[J]. Food Science, 2023, 44(15): 57-68.
- [15] 刘静, 翁小祥, 奚小波, 等. 香菇干燥技术研究进展[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(2): 37-44.
- LIU J, WENG X X, XI X B, et al. Research progress in technology of drying *Lentinus edodes*[J]. Packaging and Food Machinery, 2021, 39(2): 37-44.
- [16] 李佳欢, 杨斌, 任佳媛, 等. 热风干燥温度对荷叶离褶伞干燥特性及挥发性风味物质的影响[J]. 菌物学报, 2021, 40(12): 3304-3319.
- LI J H, YANG B, REN J Y, et al. Effects of hot air drying temperature on drying characteristics and volatile flavor compounds for *Lyophyllum decastes*[J]. Mycosystema, 2021, 40(12): 3304-3319.
- [17] 高晓倩, 刘瑞玲, 吴来春, 等. 基于 LF-NMR 研究双孢菇远红外辅助热泵干燥过程中水分迁移规律及品质变化[J]. 中国食品学报, 2024, 24(8): 403-413.
- GAO X Q, LIU R L, WU L C, et al. Studies on water migration rule and quality change of *agaricus bisporus* during far-infrared assisted heat pump drying based on LF-NMR technology[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(8): 403-413.
- [18] LIU R, DONG J X, DONG P P, et al. Analysis and structure optimization of the flow and temperature fields of the large-scale hot air drying room[J]. Drying Technology, 2024, 42(15): 2195-2211.
- [19] LIN J M, BAO M, LI H Z, et al. Characteristic simulation and working parameter optimization of the aggregate dryer[J]. Drying Technology, 2023, 41(4): 590-604.
- [20] 田津津, 谷旭东, 张哲, 等. 不同果径苹果差压预冷性能模拟与分析[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 117-124, 176.
- TIAN J J, GU X D, ZHANG Z, et al. Simulation and analysis of forced air precooling performance of apples with different fruit diameters[J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 117-124, 176.
- [21] 魏新龙, 李三平, 吴立国, 等. 基于 Fluent 的核桃带式连续烘干机设计[J]. 食品与机械, 2021, 37(12): 80-88.
- WEI X L, LI S P, WU L G, et al. Design of walnut belt continuous dryer based on Fluent[J]. Food & Machinery, 2021, 37(12): 80-88.
- [22] 郭子文, 张晓勤, 王志琴, 等. 热风红外联合干燥装置均风板的设计与试验[J]. 农机化研究, 2024, 46(1): 238-246.
- GUO Z W, ZHANG X Q, WANG Z Q, et al. Design and experiment of uniform outflow plate in hot air infrared combined drying device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(1): 238-246.
- [23] 袁越锦, 史韵, 聂皓, 等. 果蔬隧道式气流冲击干燥流场模拟及其设备结构优化[J]. 包装与食品机械, 2024, 42(5): 70-81.
- YUAN J Y, SHI Y, NIE H, et al. Simulation of flow field and equipment structure optimization for tunnel airflow impact drying on fruit and vegetable[J]. Packaging and Food Machinery, 2024, 42(5): 70-81.
- [24] 卢富明, 范雪琪, 丁雨晴, 等. 双向侧风木材干燥窑内流场的数值模拟与优化[J]. 林产工业, 2023, 60(1): 33-39.
- LU F M, FAN X Q, DING Y Q, et al. Numerical simulation and optimization of flow field in bilateral side-fan wood drying kiln[J]. China Forest Products Industry, 2023, 60(1): 33-39.
- [25] 张利峰, 廖骞, 刘大为, 等. 5H-2 谷物烘干机干燥箱多孔角状盒的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(2): 86-91.
- ZHANG L F, LIAO Q, LIU D W, et al. Design and experiment of multi-hole horn box in oven of 5H-2 grain dryer[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2024, 50(2): 86-91.
- [26] WANG X J, XU S Q, ZHOU S W, et al. Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: a review[J]. Biomaterials, 2016, 83: 127-141.
- [27] ZHOU X, RAMASWAMY H, QU Y T, et al. Combined radio frequency-vacuum and hot air drying of kiwifruits: Effect on drying uniformity, energy efficiency and product quality[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 56: 102182.