

白酒曲房湿度场数值模拟及影响因素研究

郝琪¹ 石艳^{1,2} 杨正权³ 林椿松¹ 徐广琦¹ 温恩晗¹

(1. 四川轻化工大学机械工程学院, 四川 宜宾 644000; 2. 四川轻化工大学过程装备与控制工程四川省重点实验室, 四川 宜宾 644000; 3. 四川宜宾岷江机械制造有限公司, 四川 宜宾 644000)

摘要: [目的] 考察曲房通风条件和大曲堆放方式等对曲房内湿度的影响。[方法] 建立小型曲房的三维非稳态气固耦合模型, 以加湿送风口高度(H)、曲架层间距(h)和曲堆间隙(δ)为变量, 分析曲房内湿度场的变化规律; 并基于响应面法(RSM)和第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行多目标优化。[结果] H 、 h 、 δ 均显著影响湿度场, 其中 h 的影响权重较高。参数优化获得 Pareto 前沿最优解为 $H=492$ mm、 $h=167$ mm、 $\delta=140$ mm。相较于原始模型, 优化后湿度调节速率提升了 31.9%, 湿度均匀性指数提高了 11.82%。[结论] 曲房布局参数 H 、 h 、 δ 协同优化可有效改善固态发酵环境调控, 显著提升湿度调节速率和均匀性。

关键词: 曲房; 湿度场调控; 数值模拟; 响应面法; 曲房优化

Numerical simulation of humidity field in Baijiu fermentation rooms and influencing factors

Hao Qi¹ Shi Yan^{1,2} Yang Zhengquan³ Lin Chunsong¹ Xu Guangqi¹ Wen Enhan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin, Sichuan 644000, China; 2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Process Equipment and Control, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin, Sichuan 644000, China; 3. Sichuan Yibin Minjiang Machinery Manufacturing Co., Ltd., Yibin, Sichuan 644000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of ventilation conditions and Daqu stacking methods in the fermentation room on the humidity levels at various points within the room. [Methods] A three-dimensional unsteady gas-solid coupling model of a small-scale fermentation room is established. Then, the humidity field variation patterns in the room are analyzed using the height of the humidifying air supply outlet (H), the interlayer spacing of fermentation racks (h), and the gap between fermentation piles (δ) as variables. Additionally, multi-objective optimization is performed based on response surface methodology (RSM) and the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II). [Results] H , h , and δ all significantly affect the humidity field, with h exerting the highest influence weight. Parameter optimization yields the Pareto optimal front: $H=492$ mm, $h=167$ mm, and $\delta=140$ mm. Compared with the original model, the humidity regulation rate is increased by 31.9%, and the humidity uniformity index is improved by 11.82% after optimization. [Conclusion] The collaborative optimization of the fermentation room layout parameters H , h , and δ can effectively improve the regulation of the solid-state fermentation environment, significantly enhancing both the humidity regulation rate and uniformity.

Keywords: fermentation room; humidity field regulation; numerical simulation; response surface methodology; fermentation room optimization

大曲作为固态白酒酿造的核心功能菌剂,其质量直接决定了酒体风味物质前体的丰度^[1]。发酵过程,特别是关键阶段的湿度精准调控,对塑造大曲微生物群落结构及其代谢活性至关重要,进而影响成酒风味与口感品质。

基金项目: 宜宾市科技计划项目(编号: 24KJJH0033); 四川省科技厅重点研发项目(编号: 2022YFG0068)

通信作者: 石艳(1971—), 女, 四川轻化工大学教授, 博士。E-mail: 408624969@qq.com

收稿日期: 2025-06-22 改回日期: 2026-02-09

引用格式: 郝琪, 石艳, 杨正权, 等. 白酒曲房湿度场数值模拟及影响因素研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 168-179.

Citation: Hao Qi, Shi Yan, Yang Zhengquan, et al. Numerical simulation of humidity field in Baijiu fermentation rooms and influencing factors[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 168-179.

发酵初期(前缓期),高湿度环境的相对湿度(RH)≥80%对于微生物的快速定殖与生长繁殖不可或缺,可显著促进目标功能菌群(如芽孢杆菌属(*Bacillus*)、毕赤酵母属(*Pichia*))的丰度提升,为其后续主导的代谢活动奠定基础^[2]。此阶段曲霉属(*Aspergillus*)与酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)的协同作用初步构建了曲块的酶系基础^[2]。维持适宜高湿是保障此阶段菌群有效建立的关键,当环境湿度<80% RH时,微生物菌丝生长速率显著降低40%以上,且 α -淀粉酶活性损失可达35%^[3]。发酵中期,精细控制湿度(如降至70% RH)成为核心调控策略。此阶段目标在于维持关键功能菌群(如芽孢杆菌、毕赤酵母)的旺盛代谢活性,促进目标风味物质(如酯类、醇类)的高效合成,从而增强酒体的果香与花香特征^[4]。同时,适度地降低湿度对于抑制杂菌过度滋生、维持群落平衡至关重要。若此阶段湿度过高,极易引发杂菌污染,导致有机酸(如乳酸、乙酸)过量积累,造成酒体酸涩;反之,若湿度过早或过度降低(如≤60% RH),则非目标菌属(如曲霉属、肠杆菌属(*Enterobacter*))可能占据优势^[5],改变氨基酸等关键代谢通路,影响呈味前体物质的生成,并显著抑制酶(如糖化酶)活性及多糖类物质的合成,最终导致酒体口感单薄。传统曲房采用湿度调节系统常因响应延迟(30~45 min)、湿度变异系数(CV)高达23%及显著的垂直湿度梯度($\Delta RH > 12\%$)等缺陷^[6-7],形成非稳态湿度场,导致曲块微生物群落结构呈现显著空间异质性^[8]。

因此,依据发酵进程实施湿度调控(初期高湿促生长奠基,控湿稳代谢防杂菌)是优化大曲微生物群落结构(如促进乳酸菌(*Lactobacillus*)与酵母协同作用)、平衡关键生化反应(如酯化反应与有机酸生成)的核心手段。然而,精准调控的实现高度依赖于曲房环境湿度分布的均匀性及调节速率,此二者恰为固态酿造行业长期面临的核心技术瓶颈。吴相东等^[9]探究了水雾输送管道直径、开孔数、开孔直径对管道式增湿装置的增湿效率和增湿均匀性的影响。黄海飞等^[10]研究了微循环半吹半回和全吹全回两种送风方式下曲房湿度场的分布,结合试验平台中的微循环送风系统进行对比分析,探讨了不同风控方式在大曲发酵过程中调节环境相对湿度的必要性与可行性,并优化了曲房内的湿度调节方法。杨功志等^[11]综合考虑蒸发器、增湿器、风机及湿度控制策略的影响,确保了仿真模型能够精确模拟冰箱的实际运行过程,并研究了增湿速率和位置对冷藏室相对湿度动态变化及空间分布的影响。孔得丞^[12]通过对籽棉增湿箱内环境建立含多孔介质模型,经网格划分、参数确定等模拟分析了侧送侧回和下送上回两种气流组织形成。杜县南^[13]针对果蔬保鲜运输箱体超声波增湿,研究了水雾粒径特性,搭建了调控试验平台,分析了多种因素对湿度分布的影响,并进行

了CFD数值模拟和试验验证。Alexander等^[14]探讨了堆叠方式对冷藏苹果保鲜效果的影响。通过构建多孔介质模型,运用CFD模拟不同堆叠配置,分析关键参数,提出了优化方案。张国荣等^[15]通过分析进风管锥度与供风方式对冷风发酵房流场均匀性的影响,建立了三维CFD模型,以冷风发酵房内空气流动为研究对象,经数值模拟与试验验证确定了最优结构参数,用Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型求解控制方程,通过模型验证后分析了循环供风模式下的流场优化案例。Guo等^[16]研究表明,超声波雾化器和传感器的数量及其布局对增湿效率具有显著影响。此外,喷雾的高度、导流板的角度以及雾化器的配置数量对增湿过程中湿度分布的均匀性也有显著作用。

现有研究多聚焦于增湿器与通风板结构参数(尺寸、角度、数量)以及针对湿度调控设备的改进对湿度调节均匀性的影响,然而此类研究缺乏对曲房空间尺度的量化分析,尤其对多层曲架结构中气流与湿度场的耦合作用机制尚未明晰。试验拟采用数值模拟的方法探究曲房的湿度场,模拟曲房加湿过程中湿度场的变化规律,并从加湿送风口高度及曲架结构参数(层高、曲堆间隙)入手,探索不同布局方案对室内湿度场的影响规律,通过揭示立体空间内多物理场耦合传输机制,为提升曲房湿度调节效率与均匀性提供依据。

1 曲房模型

采用图1所示的曲架式发酵工艺,曲块整齐排列于曲架之上。依据曲架设计,每24块单大曲构成一个曲堆单元,每层曲架水平排列6个曲堆单元,整个曲架共设4层。鉴于大曲以曲堆单元为基本分布单元,且单曲块间物理间隙较小(可近似认为间隙内物质属性均质),同时单曲块尺度微观、内部湿度场高度均一,而曲堆单元尺度已具备独立的环境响应特性,因此将6块单曲块组成的曲堆单元确立为仿真计算的基本对象,模型中设定4层曲架共计24个曲堆单元(对应576块单曲块)。该建模尺度能够有效表征曲房系统尺度的湿度场空间异质性特征。

曲房内采用超声雾化增湿器产生的水雾通过增湿管道对曲堆进行增湿,设置通风孔板对室内温湿度进行调

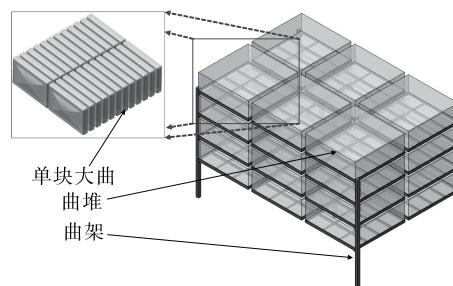


图1 曲架式放置模型

Figure 1 Daqu rack placement model

整。由于曲房内部增湿环境受外部输送管道及曲架结构细节的影响可忽略,故对上述组件进行几何简化,在保障模型精度的前提下显著提升计算效率。建立如图 2 所示的曲房实体模型。

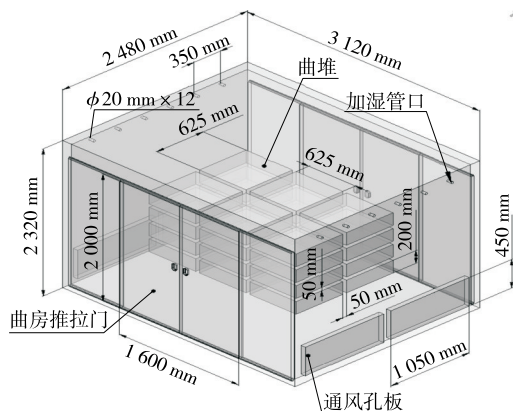


图 2 曲房实体模型

Figure 2 Fermentation room physical model

其内部整体属于流体区域,除去墙体外的流体区域尺寸为 3 000 mm × 2 360 mm × 2 200 mm (墙厚 60 mm) 包括曲堆、增湿管、通风孔板 3 部分实体。其中单曲堆尺寸为 625 mm × 625 mm × 200 mm,基于曲架结构将曲堆之间隔出 50 mm 间隙均匀放置,且曲架层高为 50 mm。增湿管质量入口开孔直径为 20 mm,曲房两侧均匀分布共计 12 个入口。通风孔板尺寸 1 050 mm × 450 mm × 60 mm × 4 层,由于曲房基于试验平台尺寸,通风孔板均置于曲房侧下方^[13]。曲房模型试验共设置 19 组,每组均设置 5 次平行重复,以减少偶然误差,提高结果的可靠性。

2 数学模型

2.1 曲房模型假设

对曲房模型进行以下假设:① 曲房的密封性能优秀,可排除气体泄漏或冷热交换的影响;② 曲房内气体遵循牛顿流体的特性,且视为不可压缩流体,满足 Boussinesq 假设;③ 所有表面蒸发的水雾已经完全汽化,且在接触固体壁面时不会发生凝结;④ 将曲块视为具有各向同性特征的多孔介质。

2.2 Realizable $k-\epsilon$ 模型

选用 Realizable $k-\epsilon$ 模型来探究曲房内的增湿流场分布。相较于标准 $k-\epsilon$ 模型,Realizable $k-\epsilon$ 模型在预测复杂外流问题上具有更高的准确性,尤其适合于中等强度涡流的预测。该模型已被成功应用于自由流动(包括射流和混合流)、管道流动以及壁面流动等多种场合。曲房内气流流动主要包含壁面流动、曲堆间湿气自由流动以及混合流动,因此,结合 Realizable $k-\epsilon$ 模型和成熟的 SIMPLE 算法,能有效针对曲房湿度场进行数值模拟

计算。

2.3 时间瞬态通用控制方程

采用有限体积法控制方程进行计算,包括质量、动量和能量守恒方程,得到时间瞬态通用控制方程:

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S, \quad (1)$$

式中:

ρ ——密度, kg/m³;

u ——速度, m/s;

t ——时间, s;

ϕ ——广义变量;

Γ ——相对应 ϕ 的广义扩散系数;

S ——广义源项。

2.4 多孔介质模型

曲块孔隙结构为微生物提供了栖息地,因此引入多孔介质模型。式(1)中源项 S 表示为:

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=3}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} |v| v_j \right), \quad (2)$$

$$D = \frac{150(1-\epsilon)^2}{d_p^2 \epsilon^2} \quad (3)$$

$$C = \frac{3.5(1-\epsilon)}{d_p \epsilon^3} \quad (4)$$

式中:

S_i —— i 向的动量源项;

D ——黏性阻力系数;

C ——惯性阻力系数;

μ ——流体黏度, Pa·s;

v_j —— j 向流速, m/s;

d_p ——大曲的当量直径, m;

ϵ ——大曲的孔隙率, %^[17]。

针对大曲材料特性,通过对体积约为 1.296 m³,总质量约为 1 080 kg 曲块采样试验,得到 24 h 内曲块水分平均减少 1.17%,再将材料烘干粉碎压实测量出大曲孔隙率为 20%、粉碎粒平均当量直径为 2.8 mm 以及湿基含水率为 37.76%。大曲的出湿量以及导热系数为:

$$\nu_s = \frac{M_q(W_1 - W_2)}{V_q \cdot d}, \quad (5)$$

$$\lambda_s = 0.117 + 0.13W, \quad (6)$$

式中:

ν_s ——大曲出湿量, (kg·s)/m³;

M_q ——曲堆总质量, kg;

W_1, W_2 ——取出曲块试验前后水分含量, kg;

W ——湿基含水率, %;

V_q ——曲堆总体积, m³;

D ——取出大曲试验时间, s^[9]。

分别代入式(3)~式(6)中可得大曲黏性阻力系数为

$3.134\ 7\times 10^8$; 惯性阻力系数为 $1.264\ 9\times 10^5$; 出湿量为 $1.13\times 10^4\ (\text{kg}\cdot\text{s})/\text{m}^3$; 导热系数为 $0.166\ \text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 。由

式(5)、式(6)得到孔隙率为 0.31 的通风孔板,黏性阻力系数为 7.4×10^6 ,惯性阻力系数为 $4\ 506$,多孔介质属性见表 1。

表 1 多孔介质属性

Table 1 Porous medium properties

介质材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}$)	导热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}$)	孔隙率	黏性阻力系数	惯性阻力系数
曲块	833.3	3 506	0.166	0.20	$3.134\ 7\times 10^8$	$1.264\ 9\times 10^5$
孔板	7 750.0	500	16.200	0.31	$7.400\ 0\times 10^6$	$4.506\ 0\times 10^3$

2.5 组分输送模型

在曲房增湿发酵过程中存在空气和雾化水蒸气混合组分与曲房环境、曲块物料之间的水分物质传递不涉及化学反应,故在此过程需满足组分输送质量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + S_i, \quad (7)$$

式中:

ρ ——第 i 种组分的密度, kg/m^3 ;

Y_i ——组分 i 的质量分数, %;

$\vec{v}$ ——速度矢量, m/s ;

∇ ——拉普拉斯算子;

$\vec{J}_i$ ——组分 i 的扩散通量, $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$;

S_i ——组分源项, $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$ 。

3 边界条件

根据实际模拟,将曲房初始相对湿度从 70% 增湿到 80%,条件设定见表 2。

表 2 边界条件

Table 2 Boundary conditions

名称	相对湿度/%	温度/K	压力/Pa
入口边界	100	298.65	0
出口边界			
初始化	70	299.65	
曲堆局部初始化	75	300.85	

入口边界质量流量为 $0.052\ \text{kg}/\text{s}$,采用有限容积法设置时间步数为 800 步,时间步长为 $0.5\ \text{s}$,最长迭代次数为 20 次进行模拟。

4 试验曲房模拟分析

4.1 监测点位设置

为测量曲房内增湿特性,分别设置曲房内近大曲区域的 15 个测点位,以得到曲房增湿过程中湿度随时间变化的曲线,其点位分布如图 3 所示^[18-19]。

4.2 曲房湿度场模拟

基于现有曲房实验室曲块布局及加湿送风口配置的仿真分析结果如图 4~图 6。由图 4 可知,曲房内监测

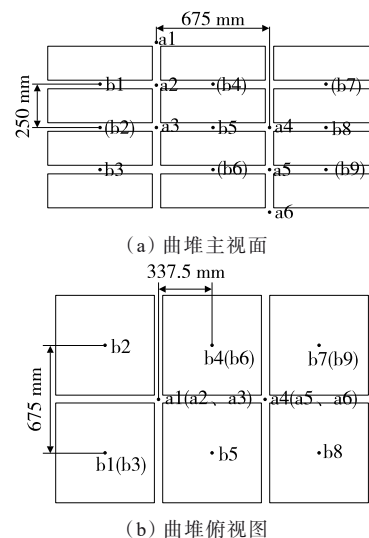


图 3 监测点点位分布图

Figure 3 Monitoring point distribution

点相对湿度从 70% 升至 80% 用时 287 s。随着时间的推移,曲房的相对湿度有一段延迟变化时间,这段时间加湿气流喷出经过一段时间到达大曲表面,曲堆湿度迅速上升,在 90 s 左右相对湿度开始变化平缓,此段时间曲房内湿气从曲堆上层透过曲堆间隙流向下层,与曲房侧壁面流向曲房下壁面的不同湿度气体交汇,到 120 s 左右曲房湿气逐渐充盈,相对湿度继续上升直至达到所需湿度。

由图 6 可知,曲堆上表面区域呈现显著的高湿区,主要是由于增湿管道直接向曲堆上表面喷射水雾所致。监测数据显示,曲堆表面相对湿度梯度最大值达 7.4% (大曲表面相对湿度差值),湿度梯度越大,曲堆湿度差异性越大,这与增湿气流的定向作用密切相关^[20]。

5 曲房湿度场影响因素分析

考虑到现有曲房实验室增湿气流的影响因素,增湿入口距曲顶高度(H)影响增湿气体到曲块的速度以及扩散距离影响后续增湿气流流动分布、曲架层间距(h)影响增湿气流层间传递效率、曲堆间隙(δ)影响上层增湿气流入下层曲层,因此建立不同的增湿入口距曲顶高度、曲架层间距、曲堆间隙参数下的曲房模型如图 7 所示,分别采用湿度

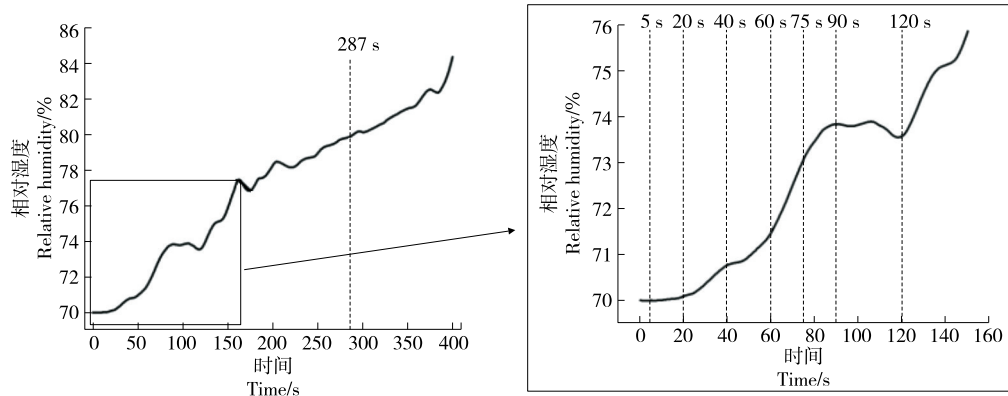


图 4 曲房相对湿度变化曲线

Figure 4 Relative humidity variation curves in fermentation rooms

调节均匀性和湿度调节速度作为评价指标,分析不同模型的湿度场影响曲线,研究不同参数对曲房湿度场的影响^[21]。图 8 为曲房湿度场影响因素的综合影响划分流程。

5.1 曲房湿度场的评价指标

5.1.1 湿度调节均匀性评价 为了定量分析增湿位置以及出口位置调整对曲室内增湿湿度均匀性的影响,引入

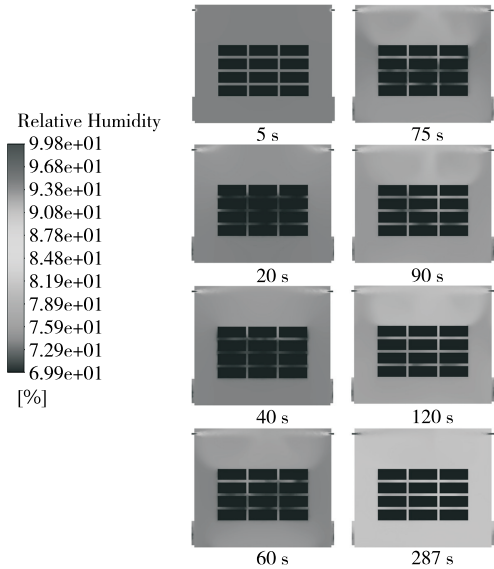


图 5 曲房湿度场随时间分布

Figure 5 Time distribution of fermentation room humidity field

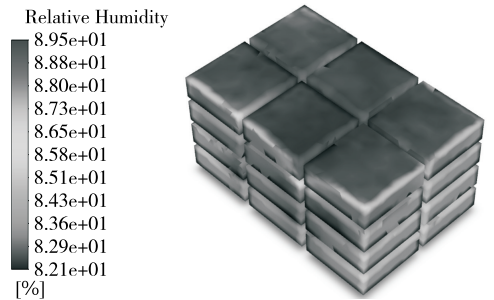


图 6 曲堆表面湿度分布

Figure 6 Surface humidity distribution of Daqu piles

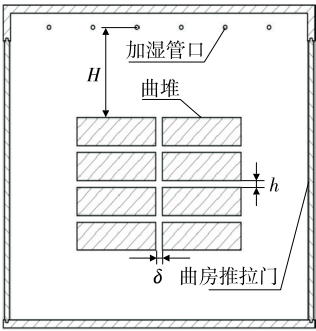


图 7 曲房湿度影响因素标识图

Figure 7 Influence factors in the fermentation room

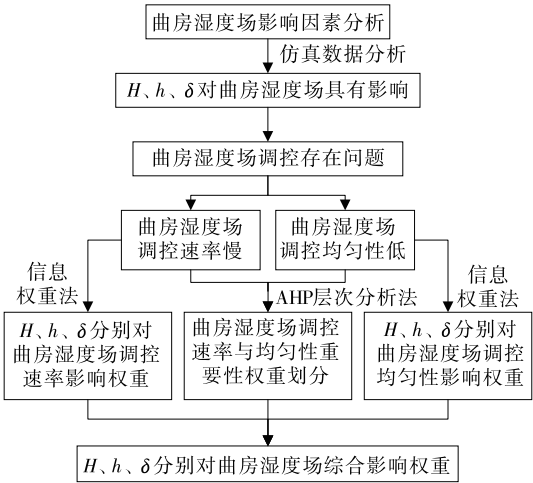


图 8 曲房湿度场影响因素综合影响权重划分流程

Figure 8 Process for dividing comprehensive influence weights of factors affecting fermentation room humidity field

湿度变异系数作为表征指标,定义为:

$$\varphi_{j,ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_{ij}, \quad (8)$$

$$\varphi_{ave} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \varphi_{j,ave}, \quad (9)$$

$$\varphi_{\max,j} = \max \{ \varphi_{1j}, \varphi_{2j}, \varphi_{3j}, \dots, \varphi_{nj} \}, \quad (10)$$

$$\varphi_{\min,j} = \min \{ \varphi_{1j}, \varphi_{2j}, \varphi_{3j}, \dots, \varphi_{nj} \}, \quad (11)$$

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (\varphi_{\max,j} - \varphi_{\min,j})^2}}{\varphi_{ave}}, \quad (12)$$

式中:

$\varphi_{j,ave}$ —— j 时刻下各监测点湿度平均值,%;

φ_{ij} ——第 i 个监测点在 j 时刻的相对湿度,%;

n ——监测点总数;

φ_{ave} ——一个启停周期内各监测点湿度平均值,%;

k ——监测时间,s;

$\varphi_{\max,j}, \varphi_{\min,j}$ —— j 时刻下各监测点湿度的最大值和最小值,%;

CV ——湿度变异系数(CV 越大表明曲房的湿度均匀性越差^[11])。

5.1.2 湿度调节速度评价 为了测量曲房内湿度调节速度,采集曲房仿真相对湿度从70%调节到80%所需时间,取每组最慢达到80%相对湿度的时间作为该组增湿速度时间参考^[21]。

5.2 加湿送风口高度对曲房湿度的影响

通过固定曲架顶层高度,调整加湿送风口距曲架顶层高度 H ,建立5组不同 H 下的曲房模型,虽然加湿送风口高度发生变化,但曲房整体结构未发生改变,为了避免加湿气体直接吹向大曲,控制间距 >300 mm,因此 H 分别设置为350,450,500,550,650 mm,如图9所示。

由图10可知,随着时间的推移,曲房的相对湿度有一段延迟变化时间,这段时间加湿气流喷出经过一段时间到达大曲表面,随着 H 的减小,曲堆湿度上升延迟时间缩

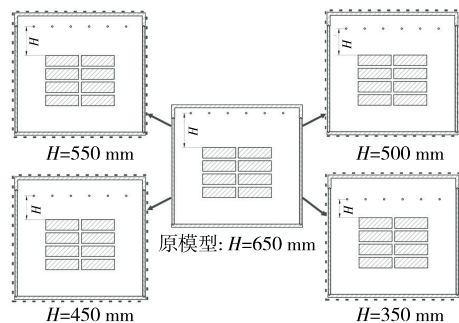


图9 不同 H 下的曲房模型

Figure 9 Fermentation room models under different H values

短,在90 s左右相对湿度变化平缓时间在适宜的 H 区间有所提前,曲房湿气逐渐充盈时间也有所提前。由图11可知,加湿气体在90 s左右时充盈曲房,变异系数开始在相对固定区间波动,由于加湿气流受到不同加湿送风口距曲顶高度的影响,当 H 为450~550 mm时,曲房湿度场均匀性较优且湿度调节速率较快,表明增湿入口距曲顶高度的变化对曲房湿度场有影响。

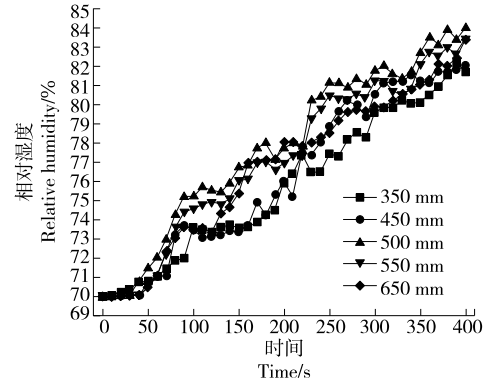


图10 不同 H 下曲房湿度影响的相对湿度曲线

Figure 10 Relative humidity curves of the influence of different H on fermentation room humidity

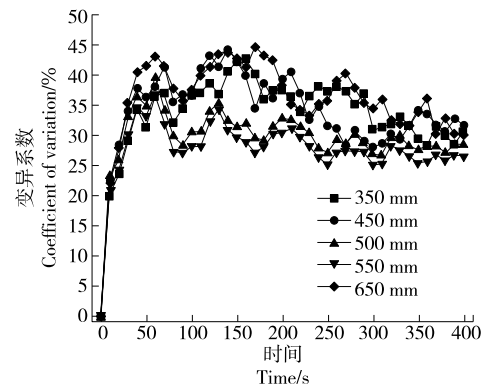


图11 不同 H 下曲房湿度影响的变异系数曲线

Figure 11 Coefficient of variation curves of the influence of different H on fermentation room humidity

5.3 曲架层间距对湿度场的影响

当曲架层间距(h)发生变化时,加湿雾化气体通过曲堆垂直间隙流向下层后,更容易在对应层间流通,从而使得曲房湿度场发生变化。为方便堆曲以及防止曲房湿度调控底部大曲过度吸取壁面湿气,曲架底部高度需控制在200 mm以上,因此, h 分别设置为100,150,200,250 mm,如图12所示。

由图13可知, h 的变化不会改变加湿雾化气体对湿度场影响的规律,但对湿度场速率影响明显,相比原模型 $h=50$ mm,其他组湿度速率均提升了7.14%~27.42%。由

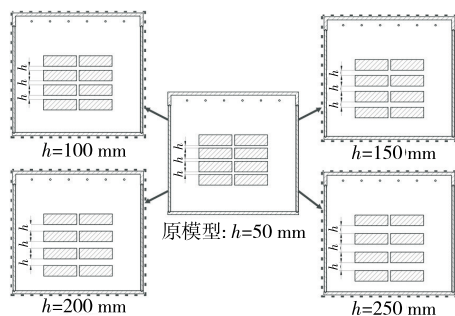
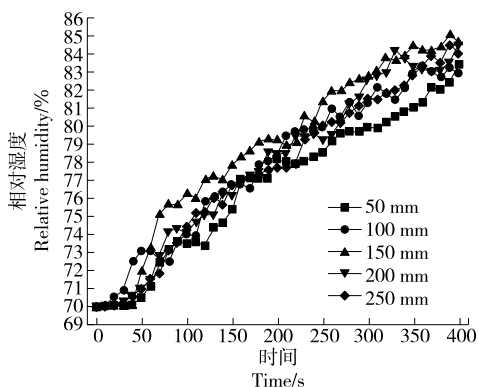
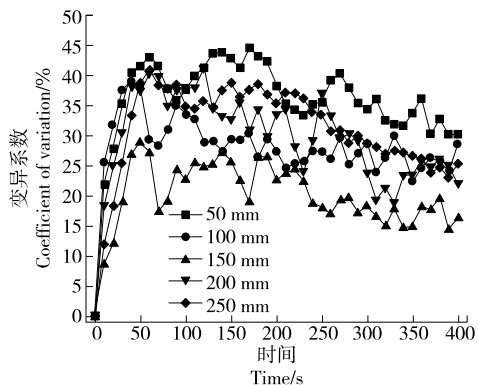
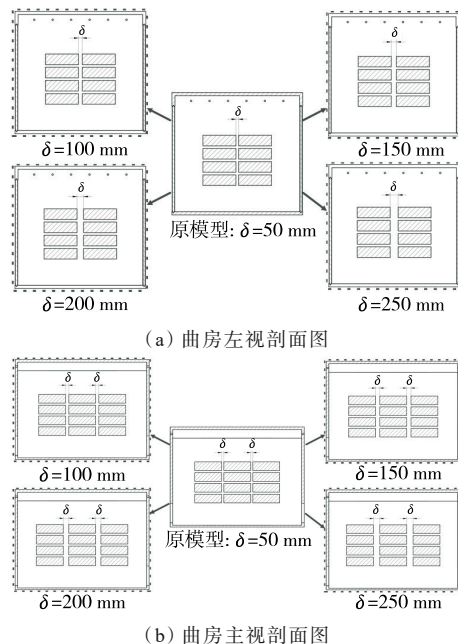
图 12 不同 h 下的曲房模型Figure 12 Fermentation room models under different h values

图 14 可知, 变异系数较原模型均降低, 说明改变 h 对曲房湿度调节均匀性有所提升, 但不能无限制改变 h , 当 h 为 250 mm 时, 相较原模型, CV 值有所下降但不明显, 可能是因为曲架底层距曲房下壁面距离过小, 引起曲堆对下壁面雾气吸引过多, 引起局部湿度集中, 降低了湿度均匀性。因此, h 为 100~200 mm 为适宜间距。

图 13 不同 h 下曲房湿度影响的相对湿度曲线Figure 13 Relative humidity curves of the influence of different h on fermentation room humidity图 14 不同 h 下曲房湿度影响的变异系数曲线Figure 14 Coefficient of variation curves of the influence of different h on fermentation room humidity

5.4 曲堆间隙对湿度场的影响

对曲堆间隙(δ)的改变需要考虑到人工或者机械进入曲房将大曲置于曲架上时的站立空间满足 >500 mm, 所以曲堆需控制与曲房侧壁保持 500 mm 的距离。在原模型的基础上调整 δ , 使上层湿度雾气更容易进入到下层空间增加流通效率, 因此 δ 分别设置为 100, 150, 200, 250 mm, 如图 15 所示。

图 15 不同 δ 下曲房湿度影响的曲房模型Figure 15 Fermentation room models for the influence of different δ on fermentation room humidity

由图 16 可知, δ 的变化与 h 改变相似, 均不会改变加湿雾化气体对湿度场的影响规律。相比原模型 $\delta=50$ mm, 其他组湿度速率均提升 3.23%~17.74%, 较 h 影响曲房湿度场速率弱, 说明 δ 对上层湿空气进入下层曲堆影响较大, 但湿空气的扩散还需要对 h 进行调整控制。由图 17 可知, δ 的改变对湿度场调节均匀性影响较小, 但相较原模型 $\delta=50$ mm, 当 δ 为 100~250 mm 时, 对湿度场调节均匀性有一定提升。因此, 可以通过改变 δ 来改善曲房湿度场调节。

5.5 H 、 h 、 δ 三因素对曲房湿度场影响的权值

信息量权重法也称变异系数法, 是一种客观赋权法, 其思想在于利用数据的权重赋值系数进行权重赋值, 权重赋值系数越大, 说明其携带的信息越大, 因而权重也会越大, 该方法适用于对评价对象进行综合评价^[22]。

各因素对湿度场调节速率以及均匀率的影响评价见表 3。

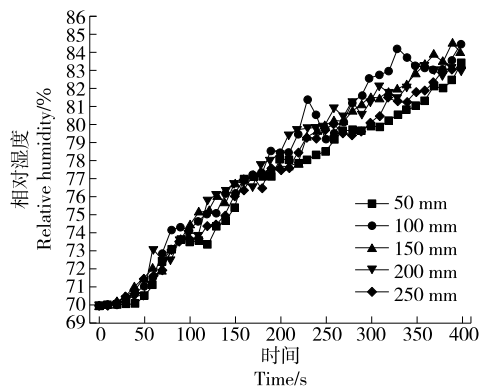
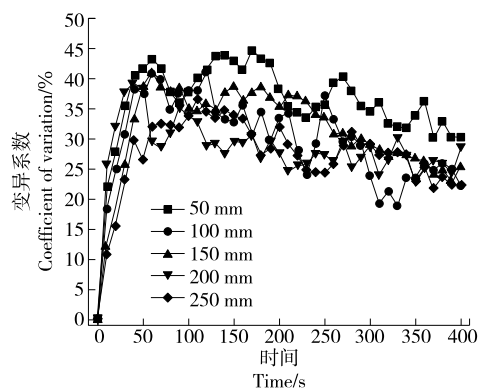
图 16 不同 δ 下曲房湿度影响的相对湿度曲线Figure 16 Relative humidity curves of the influence of different δ on fermentation room humidity图 17 不同 δ 下曲房湿度影响的变异系数曲线Figure 17 Coefficient of variation curves of the influence of different δ on fermentation room humidity

表 3 因素影响评价表

Table 3 Influence factor evaluation

序号	湿度场调节速度评价/s			湿度场调节均匀性评价/%		
	H	h	δ	H	h	δ
1	323	226	223	35.50	27.00	27.16
2	312	312	312	31.48	31.48	31.48
3	265	249	248	30.00	25.96	28.00
4	243	250	254	28.18	22.23	25.94
5	229	367	299	25.52	16.88	23.00

利用表 3 参数,基于在线 SPSSAU 系统中的信息量权重模块可以得到如表 4~表 5 的各因素影响湿度场评价权值。

由表 4~表 5 可得到, H 、 h 、 δ 分别对曲房湿度场调节速率与均匀性两个目标的权重值,实际对原模型的优化无法分别设置不同的两种 H 、 h 、 δ 参数以满足双目标要求,因此需对双目标重要程度加以赋值。由于实际曲房使用过程中湿度场的均匀程度决定了大曲空间均质性,湿度

表 4 各因素影响湿度场调节速率的评价权值

Table 4 Evaluation weights of the influence of various factors on humidity field regulation rate

项	平均值/s	标准差	权重赋值系数/%	权重/%
H	274.4	41.567	15.15	30.52
h	280.8	57.807	20.59	41.48
δ	267.2	37.131	13.90	28.00

表 5 各因素影响湿度场调节均匀性的评价权值

Table 5 Evaluation weights of the influence of various factors on humidity field regulation uniformity

项	平均值/%	标准差	权重赋值系数/%	权重/%
H	30.14	3.73	12.38	26.94
h	24.71	5.48	22.18	48.26
δ	27.12	3.09	11.40	24.80

调节速率同样影响大曲发酵,但加湿速率在加湿阶段前 80 s 的影响较大,而总体加湿稳定时间在 250 s 左右,占比 $\leq 50\%$,因此认为湿度场调节速率总体影响较湿度场调节均匀性弱,认定湿度场调节均匀性稍微重要于湿度场调节速率,因此由层次分析法(AHP)实现权重系数 ω_1 的量化^[23]。分别对湿度场调节均匀性与湿度场调节速率构建双目标权重系数 ω_1 、 ω_2 的评估因素集:

$$P = \{p_1, p_2\}, \quad (13)$$

式中:

p_1 ——湿度场调节均匀性;

p_2 ——湿度场调节速率。

使用 Santy 的 1~9 标度方法构建判断矩阵 P ,标度值及重要程度见表 6。

表 6 p_{ij} 标度值及重要程度Table 6 p_{ij} scale values and importance levels

p_{ij}	重要程度
1	p_i 与 p_j 相同重要
3	p_i 比 p_j 稍微重要
5	p_i 比 p_j 明显重要
7	p_i 极其重要
9	p_i 强烈重要
2, 4, 6, 8	相邻两个标度的中间值
倒数	$p_{ji} = 1/p_{ij}$

对评估因数进行两两比较, i 和 j 取 1, 2, 判断矩阵 P 及取值为

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{pmatrix}.$$

为了实现权重系数 ω_i 的量化,采用根方法计算出

对应的两个权重系数值,分别为 $\omega_1=0.75, \omega_2=0.25$ 。

根据表 4 和表 5 权重分配后归一化得到如表 7 所示的 H, h, δ 对曲房湿度场的综合影响权重值。

表 7 H, h, δ 对曲房湿度场的综合影响权重值
Table 7 Comprehensive influence weight values of $H, h,$ and δ on fermentation room humidity field

因素	综合权重值/%
H	27.84
h	46.56
δ	25.60

6 基于响应面法的 H, h, δ 三因素综合影响分析

6.1 方案设计

针对曲房增湿均匀度进行深入分析,对增湿检测点的变异系数(CV)进行变式,构造一种新评价方式异变异系数(uCV):

$$uCV = \frac{1}{1 + CV}, \tag{14}$$

式中:

uCV——对极端值(如 $CV \rightarrow \infty$ 时 $uCV \rightarrow 0$)具有鲁棒性。

uCV=1 为完美均匀,uCV=0 为完全不均匀,通过该方法,可量化评估增湿均匀性。

以曲房内增湿监测点的相对湿度的异变异系数(CV)作为评价指标,考察 H, h, δ 三因素对曲房增湿均匀性的影响。通过 Design-Expert 13 平台根据试验设计原理,设计三因素五水平试验。试验因素水平见表 8,试验方案及结果见表 9。

表 8 响应面试验因素水平
Table 8 Factors and levels in response surface experiments

水平	A H/mm	B h/mm	C δ/mm
2	650	250	250
1	550	200	200
0	500	150	150
-1	450	100	100
-2	350	50	50

6.2 方差分析和响应面回归模型

通过 R^2 值可量化模型的拟合程度,该指标越接近 1 表明模型拟合精度越高。基于表 4 建立的变异系数(uCV)与增湿时间响应面回归模型方差分析显示:两个模型的 $P<0.000\ 1$,其中 uCV 回归模型决定系数 R^2 为 0.981 6,增湿时间模型 R^2 为 0.991 5,表明二者均具有高度统计显著

表 9 响应面试验设计方案及结果

Table 9 Response surface experimental design and results

试验号	A	B	C	uCV/%	增湿时间/s
1	2	0	0	84.981	229.5
2	0	0	2	83.005	271.1
3	1	-1	-1	82.335	240.5
4	0	0	0	86.655	198.1
5	-2	0	0	84.412	226.6
6	0	0	0	86.698	197.9
7	1	1	1	82.795	264.1
8	0	0	0	86.556	199.1
9	-1	-1	-1	81.695	272.3
10	1	-1	1	84.112	253.8
11	-1	1	-1	83.395	224.3
12	0	0	0	86.211	197.2
13	0	0	-2	81.112	248.9
14	0	0	0	86.988	198.3
15	-1	1	1	82.751	237.5
16	-1	-1	1	85.222	254.2
17	1	1	-1	84.625	224.9
18	0	2	0	83.842	227.9
19	0	-2	0	83.686	257.5

性($P<0.01$)和优异的拟合精度。

由图 18 可知,残差点紧密沿基准直线分布,证实误差服从正态分布特征,同时验证了最小二乘法在该模型中的适用性。预测值与实际模拟值的高度吻合(平均绝对百分比误差 $<5\%$)进一步证明,所建立的响应面回归数学模型具有较高的预测精度。

7 H, h, δ 三因素对曲房湿度场影响的目标优化

7.1 优化及 NSGA-II 算法

总体优化流程如图 19 所示。

7.2 算法对试验优化结果

将响应面回归模型输入 NSGA-II 算法中,设定变量个数为 3,目标函数为 2,获得 Pareto 最优前沿如图 20 所示。理想点选取增湿时间最小处,异变异系数选取最大处,实际上无法实现。选择离理想点相对最近的位置作为帕累托边界上的最佳点,其中一个符合要求的增湿时间和异变异系数的 NSGA-II 预测值为 196.1 s 和 86.411 6% (见表 10),对应设计变量的相应值为 $H=492\ \text{mm}, h=167\ \text{mm}, \delta=140\ \text{mm}$ 。通过 CFD 对 NSGA-II 预测值进行仿真验证,增湿时间和异变异系数的仿真验证值与预测值的误差分别约为 0.296% 和 0.232%,说明使用 NSGA-II 多目标遗传算法进行优化产生的结果具有一定的可

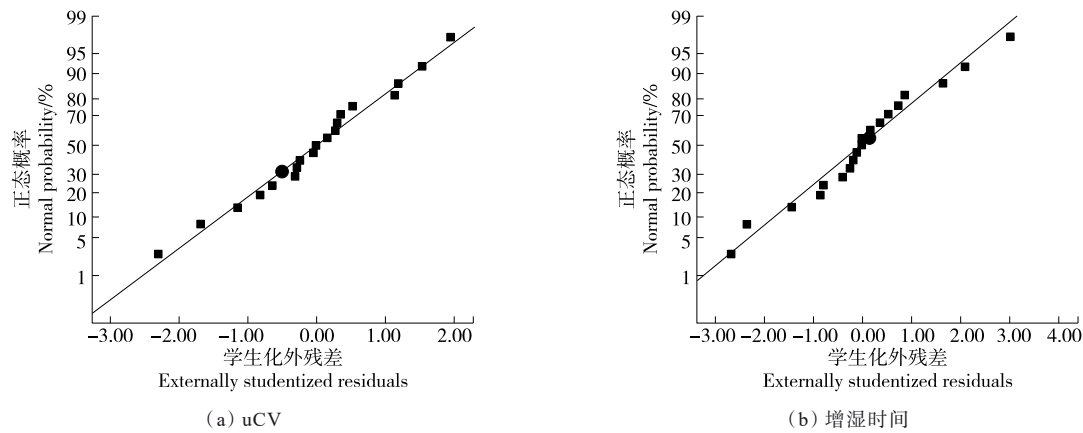


图 18 正态概率图残差
Figure 18 Normal probability plot with residuals

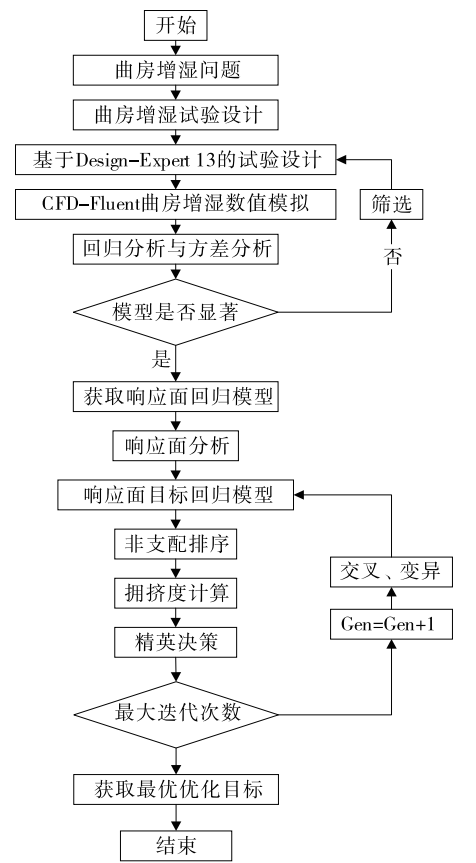


图 19 总体优化流程
Figure 19 Global optimization process

靠性。

8 目标优化最优组的湿度场分析

通过曲房湿度场影响因素试验与响应面目标优化试验可以得出 $H=492\text{ mm}$ 、 $h=167\text{ mm}$ 、 $\delta=140\text{ mm}$ 的湿度场调控较好,其增湿湿度分布如图 21 和图 22 所示。

由图 21 可知,湿空气更多地流向下方曲堆,减少了增

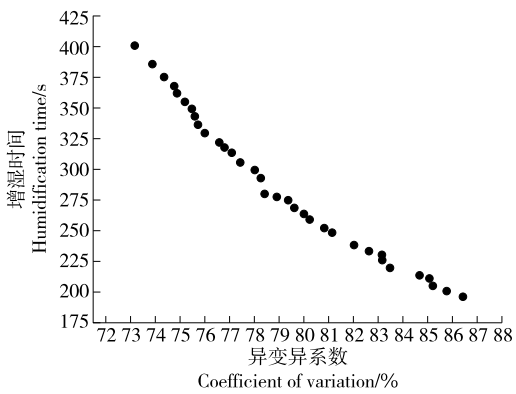


图 20 Pareto 前沿最优解集分布
Figure 20 Pareto optimal front set distribution

表 10 初始、预测和验证模型目标结果对比

Table 10 Comparison of initial, predictive, and validation model target results

指标	增湿时间/s	异变系数/%
初始值	287.5	74.393 7
NSGA-II 预测值	196.1	86.411 6
CFD 验证值	195.5	86.211 5

湿管道直接向曲堆上表面喷射水雾堆积,减轻了曲堆顶部的湿度集中现象,同时下方曲块增湿均匀性得到提升,层间相对湿度差异减小,最大相对湿度为 88.2%,最小相对湿度为 82.9%,湿度梯度最大为 5.3%,表观湿度均匀性明显提升。根据均匀性评价曲堆增湿均匀度由变异系数 74.39% 升至 86.21%,均匀性显著提升 11.82%。

由图 23 可知,优化前, $H=650\text{ mm}$ 、 $h=50\text{ mm}$ 、 $\delta=50\text{ mm}$ 下相对湿度最晚增湿到 80% 的时间为 287 s,优化后, $H=492\text{ mm}$ 、 $h=167\text{ mm}$ 、 $\delta=140\text{ mm}$ 下相对湿度最晚增湿到 80% 的时间为 195.5 s,增湿速度提升了 31.9%。

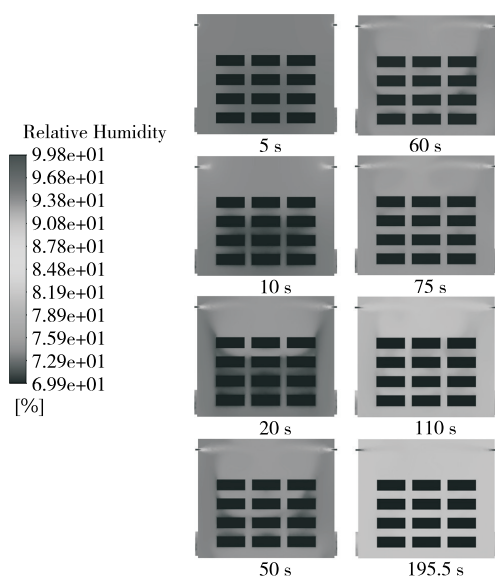


图 21 优化后曲房空间湿度场随时间分布

Figure 21 Temporal distribution of the spatial humidity field in optimized fermentation room

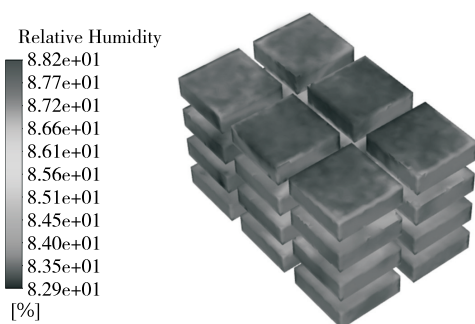


图 22 优化后曲堆表面湿度分布

Figure 22 Surface humidity distribution of optimized fermentation piles

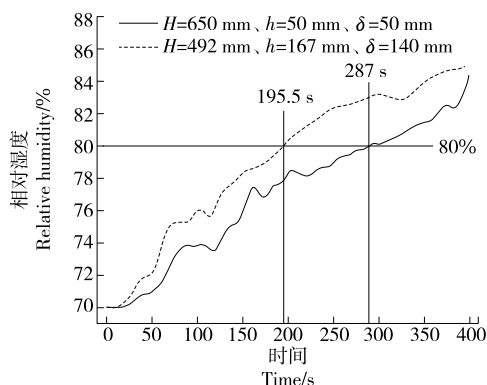


图 23 曲房湿度调控曲线

Figure 23 Humidity regulation curve of fermentation room

9 结论

利用 Fluent 软件模拟分析了架子曲发酵过程中,加湿送风口高度(H)、曲架层间距(h)及曲堆间隙(δ)对曲房内

大曲增湿效果的影响。结果表明,加湿过程中,曲房内相对湿度从 70% 提升至 80% 所需的最长时间为 287 s。在原始布局参数下,曲堆顶部区域出现显著的湿度积聚现象,局部湿度梯度高达 7.4%,湿度场变异系数达 34.42%,表明湿度分布极不均匀。 H 、 h 、 δ 三因素对湿度场综合影响的权重值分别为 27.84%、46.56%、25.60%,其中, h 的影响最为显著。结合响应面试验设计与遗传算法,得到最优参数组合为 $H=492$ mm, $h=167$ mm, $\delta=140$ mm,此时湿度分布均匀性提升了 11.82%,湿度调节速率提高了 31.9%,表观湿度均匀性亦得到增强。

参考文献

- [1] 吴成,程平言,谢丹,等. 酱香型白酒 4 轮次堆积发酵理化因子、风味物质与微生物群落相关性分析[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 240-247.
- [2] 徐千惠,饶家权,邹永芳,等. 浓香型大曲贮存期微生物群落演替及代谢产物的变化机制[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 225-234.
- [3] 薄涛,吕娜,杨凯环,等. 白酒大曲发酵过程中微生物群落及功能研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 385-393.
- [4] Chihoub W, Dias M I, Barros L, et al. Valorisation of the green waste parts from turnip, radish and wild cardoon: nutritional value, phenolic profile and bioactivity evaluation[J]. Food Research International, 2019, 126: 108651.
- [5] Park J, Oh S K, Chung H J, et al. Effect of steaming and roasting on the quality and resistant starch of brown rice flour with high amylose content[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 167: 113801.
- [6] 廖俊杰,胡光忠,夏秋,等. 基于改进 SSA 优化预测模型的大曲发酵湿度监控系统[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 93-97.
- [7] Liao J J, Hu G Z, Xia Q, et al. Monitoring system of Daqu fermentation humidity based on improved SSA-optimization prediction model[J]. Food & Machinery, 2022, 38(9): 93-97.
- [8] Menneer T, Mueller M, Sharpe R A, et al. Modelling mould growth in domestic environments using relative humidity and temperature[J]. Building and Environment, 2022, 208: 108583.
- [9] 徐佳乐,黄丹平,田建平,等. 新型曲房内循环温度测控系统设计[J]. 食品与机械, 2020, 36(12): 90-94.

- Xu J L, Huang D P, Tian J P, et al. New cycle temperature measurement and control system in Kojibank[J]. Food & Machinery, 2020, 36(12): 90-94.
- [9] 吴相东, 田建平, 黄海飞, 等. 曲房加湿的数值模拟及试验[J]. 现代食品科技, 2022, 38(5): 218-225.
- Wu X D, Tian J P, Huang H F, et al. Humidification pipe structure design and evaluation in Qu Fang[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(5): 218-225.
- [10] 黄海飞, 田建平, 王开铸, 等. 曲房环境温湿度场的数值模拟及分布规律[J]. 现代食品科技, 2020, 36(9): 148-155, 40.
- Huang H F, Tian J P, Wang K Z, et al. Numerical simulation and distribution of ambient temperature and humidity field in Qu Fang[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(9): 148-155, 40.
- [11] 杨功志, 张胜棋, 韩丽丽, 等. 风冷冰箱的湿度场动态仿真通用模型及湿度均匀性改善[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(2): 134-145.
- Yang G Z, Zhang S Q, Han L L, et al. General model for dynamic simulation of humidity distribution in frost-free refrigerator and humidity uniformity improvement[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(2): 134-145.
- [12] 孔得丞. 籽棉加湿箱内环境的模拟验证与气流组织优化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2023: 1-16.
- Kong D C. Simulation verification of the internal environment of seed cotton humidification box and optimization of air distribution[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2023: 1-16.
- [13] 杜县南. 果蔬保鲜运输用超声波加湿雾化特性及湿度调控研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019: 8-9.
- Du X N. Ultrasonic humidification atomization characteristics and humidity control of fruit and vegetable fresh-keeping transportation[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019: 8-9.
- [14] Alexander L D, Jakhar S, Dasgupta M S. Optimizing cold storage for uniform airflow and temperature distribution in apple preservation using CFD simulation[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 25402.
- [15] 张国荣, 张界威, 季家东, 等. 进风管锥度与供风方式对冷风发酵房流场均匀性的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 94-100.
- Zhang G R, Zhang J W, Ji J D, et al. Effects of inlet duct taper and air supply mode on flow field uniformity in cold air fermentation room[J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 94-100.
- [16] Guo J M, Wei X Y, Li B, et al. Characteristic analysis of humidity control in a fresh-keeping container using CFD model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 179: 105816.
- [17] 黄海飞. 发酵曲房的湿度数值模拟及加湿调控特性研究[D]. 自贡: 四川轻化工大学, 2021: 19-24.
- Huang H F. Humidity numerical simulation and humidification control characteristics of fermentation kosher[D]. Zigong: Sichuan University of Science & Engineering, 2021: 19-24.
- [18] 肖晓. 白酒曲房的温度场及智能控制系统应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021: 4-11.
- Xiao X. Research on temperature field and intelligent control system application of Chinese Baijiu Daqu workshop[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021: 4-11.
- [19] 靳光远, 赵玉杰, 唐群勇, 等. 实验室规模大曲发酵虚拟仿真与控制[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(17): 103-110.
- Jin G Y, Zhao Y J, Tang Q Y, et al. Virtual simulation and control of Daqu fermentation at lab-scale[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(17): 103-110.
- [20] 周书宇, 田建平, 高剑, 等. 大曲发酵过程的环境温湿度均匀性调控系统研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(18): 148-156.
- Zhou S Y, Tian J P, Gao J, et al. Study on regulating system of ambient temperature and humidity uniformity in Daqu fermentation process[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(18): 148-156.
- [21] 金听祥, 张国防, 杜帅华, 等. 超声波加湿空调器加湿装置的设计与试验[J]. 低温与超导, 2020, 48(5): 80-86.
- Jin T X, Zhang G F, Du S H, et al. Design and test of humidifying device for ultrasonic humidifying air conditioner[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2020, 48(5): 80-86.
- [22] 周俊, 马世澎. SPSSAU 科研数据分析方法与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2024: 1-20.
- Zhou J, Ma S P. SPSSAU scientific research data analysis method and application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2024: 1-20.
- [23] 王同林, 邵志勇, 聂智星, 等. 基于德尔菲法及层次分析法构建鲜食番茄品质评价体系[J]. 浙江农业学报, 2025, 37(12): 2 583-2 592.
- Wang T L, Shao Z Y, Nie Z X, et al. Construction of a quality evaluation system for fresh-eating tomatoes based on delphi method and analytic hierarchy process[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2025, 37(12): 2 583-2 592.