

# 曲房加湿的数值模拟及试验

吴相东<sup>1</sup>, 田建平<sup>1\*</sup>, 黄海飞<sup>1</sup>, 黄丹<sup>2</sup>, 杨海栗<sup>1</sup>, 高剑<sup>1</sup>

(1. 四川轻化工大学机械工程学院, 四川自贡 643002)

(2. 四川轻化工大学酿酒生物技术及应用四川省重点实验室, 四川自贡 643002)

**摘要:** 传统曲房通过人工开关门窗和向曲房内撒水的方法来调节曲房内相对湿度, 受自然环境的影响, 很难保证不同位置大曲质量等级一致。需要掌握曲房内加湿装置对曲块发酵过程中湿度调控的变化规律, 实现曲房内相对湿度的实时调控。基于曲房三维紊流模型, 以曲房加湿过程中的相对湿度为研究对象, 结合多孔介质模型及组分传输模型, 运用 Fluent 软件对曲房加湿过程进行数值模拟, 同时结合现有曲房加湿试验平台对曲房模拟模型进行验证。加湿过程中相对湿度模拟值和试验值最大偏差为 1.1%, 加湿时间仅相差 6.5 s, 验证曲房加湿模型的有效性。通过试验研究加湿管道直径、开孔数和开孔尺寸对曲房加湿效果的影响, 使用单因素和正交试验法筛选出加湿装置参数的最优组合。结果表明: 当管道直径为 80 mm、开孔数为 6、开孔直径为 30 mm, 曲房加湿效果最好, 与优化前的加湿装置相比, 优化控制参数后的加湿装置的加湿时间缩短了 6.6%, 为后续曲房湿度控制研究提供了模型参考和理论数据支撑。

**关键词:** 大曲发酵; 正交试验; 管道设计; 湿度场; 数值模拟

文章编号: 1673-9078(2022)05-218-225

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.5.0975

## Humidification Pipe Structure Design and Evaluation in Qu Fang

WU Xiangdong<sup>1</sup>, TIAN Jianping<sup>1\*</sup>, HUANG Haifei<sup>1</sup>, HUANG Dan<sup>2</sup>, YANG Haili<sup>1</sup>, GAO Jian<sup>1</sup>

(1.College of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643002, China)

(2.Liquor Marking Biological Technology and Application of Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643002, China)

**Abstract:** The relative humidity of traditional Qu workshops is controlled by opening and closing doors and windows as well as spraying water manually in the workshop. This humidity control method is greatly affected by the natural environment, and it is difficult to ensure a constant humidity. Consequently, it is difficult to maintain a consistent quality of Daqu at different locations in the workshop. To realize real-time control of relative humidity in the workshop, it is necessary to understand how the humidifying devices in the workshop affect humidity control during Daqu fermentation. A three-dimensional turbulent flow model of the Qu workshop, coupled with porous media and component transport models, was adopted to study the relative humidity during humidification of the workshop. Numerical simulation of the humidification process in the workshop was performed using Fluent. Furthermore, the model of the workshop was verified using the humidification test setup currently available. The maximum deviation between the simulated and experimental values of the relative humidity during humidification was 1.1%, and that for the humidifying time was only 6.5 s. These results demonstrate the effectiveness of the humidification model established for the workshop. The effects of the pipeline diameter, number of openings, and opening size on the humidification performance were examined experimentally. The humidification device parameters and their combination were optimized with the help of the single-factor and orthogonal test methods. Humidification was found to be optimized with 80 mm-diameter pipelines with six 30 mm-diameter openings. The humidifying time needed was reduced by 6.6% after parameter optimization compared to that before optimization. The findings of this research provide a

引文格式:

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 Xiangdong, TIAN Jianping, HUANG Haifei, et al. Humidification pipe structure design and evaluation in Qu Fang [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(5): 218-225

收稿日期: 2021-08-30

基金项目: 四川省科技计划项目 (2019YJ0475); 自贡市重点科技计划项目 (2018CXJD06)

作者简介: 吴相东 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 多物理场耦合技术, E-mail: 1748956533@qq.com

通讯作者: 田建平 (1965-), 男, 教授, 本科, 研究方向: 固态酿造智能制造, E-mail: tjp893@126.com

reference for model construction in subsequent humidity control research for Qu workshops in terms of both theory and data.

**Key words:** Daqu fermentation; orthogonal test; pipeline design; humidity field; numerical simulation

大曲的优劣直接影响着酒的品质和产量,而曲房的环境湿度对大曲成品质量产生重要影响<sup>[1,2]</sup>。在大曲霉菌、酵母菌大量生长的前缓期,需保持低温高湿的环境以促进大曲微生物的生长<sup>[3]</sup>。目前,为防止夏天曲坯表面水分被高温蒸干,以及冬天提高环境温度及湿度,需通过开关门窗和向地面或曲堆覆盖物上撒入大量水以维持合适的曲房发酵环境<sup>[4,5]</sup>。传统加湿方式存在人员劳动强度大、难以精准调控、且地面容易积水而滋生细菌等问题,造成不同批次或不同位置的曲块发酵质量差异性过大。超声波加湿装置具有加湿效率较高和对温度场影响较小等优点,而被方思贞等<sup>[6]</sup>用于气调保鲜运输车进行对果蔬保湿。胡松涛等<sup>[7]</sup>在烟厂对比超声波加湿和蒸汽加湿两种方案,并得到超声波加湿运行费用较低的结论。因此,本文设计一款采用超声波加湿器的管道装置用于解决曲房加湿难题。

为探究不同的水雾输送管道直径、开孔数、开孔直径对管道式加湿装置的加湿效率和加湿均匀性的影响,建立曲房瞬态三维湍流模型对曲房加湿过程进行数值模拟,分析曲房加湿视内部的相对湿度分布规律及各点位相对湿度的差异性。并通过现有的曲房发酵试验平台对相应点位温湿度的变化进行验证,证明了曲房加湿模型的有效性,为以后曲房湿度控制提供理论模型。再通过曲房发酵试验平台进行曲房加湿过程的单因素试验和正交试验,解析不同参数下各因素对加湿效果的影响规律,得到其结构参数设计的两种较优组合,并通过试验对比和验证其加湿性能,最终确定加湿装置最优参数组合,实现对曲房的快速的、均匀的加湿,改善曲房环境污染和加湿不均匀的问题,为后续的曲房湿度控制提供依据。

## 1 物理模型

已建立的曲房发酵试验平台,是将曲块放入曲房中的曲架上发酵,再在曲块和输送管道上铺一层稻草用于保温保湿,温湿度流场主要动力来源于输送风机,热源通过两侧送风孔板调整曲房内部温度,加湿器产生的水雾通过加湿管道并借助送风机调整曲房内部相对湿度。为了减少不必要的计算量,提高仿真效率,对曲房外部的输送管道和曲房中的曲架进行必要的简化。以1:1的曲房尺寸建立数字模型,总体尺寸为3000 mm×2360 mm×1080 mm,包含曲块、加湿管道、送风孔板三个实体,其中加湿管道直径80 mm、开孔数目

为8、开孔直径为20 mm。曲架上放有三层,每层四块曲堆,曲堆总体尺寸为1300 mm×1300 mm×700 mm,每层曲块间存在50 mm的间隙。

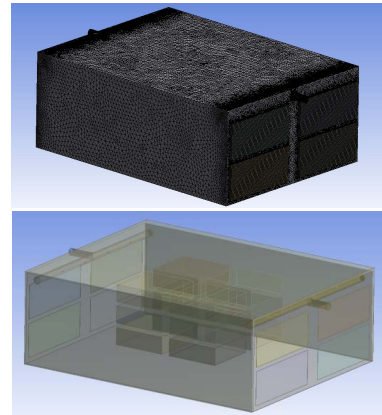


图1 曲房物理模型

Fig.1 Physical model

## 2 数学模型

建立曲房中加湿过程流场的数学模型,大曲在发酵过程中会产热产湿且对气流产生阻力,故将其作为多孔介质处理<sup>[8]</sup>。基本模型包含:曲房的瞬态通用控制方程、多孔介质模型和组分输送模型和 $k-\varepsilon$ 模型。

### 2.1 瞬态通用控制方程

为表征曲房加湿过程流场变化,采用有限体积法中的瞬态通用控制方程,包括质量、动量和能量守恒方程<sup>[9,10]</sup>:

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

式中:

$\rho$ —密度, kg/m<sup>3</sup>;

$u$ —速度, m/s;

$t$ —时间, s;

$\phi$ —广义变量;

$\Gamma$ —相对应的 $\phi$ 广义扩散系数;

$S$ —广义源项。

### 2.2 多孔介质模型

为模拟大曲对流场的阻力及本身发酵过程中的产热产湿,采用多孔介质模型来模拟大曲的湿热耦合传递。其方程如下<sup>[11,12]</sup>:

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

式中:

$S_i$ — $i$  方向动量源项;

$C$ —惯性阻力系数;

$D$ —黏性阻力系数;

$|v|$ —空气流动速率,  $m/s$ ;

$\mu$ —空气动力黏度,  $N\cdot s/m^2$ ;

$v_j$ —空气  $j$  方向流速,  $m/s$ 。

其中:

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

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

式中:

$d_p$ —多孔介质的当量直径,  $m$ ;

$\phi$ —多孔介质空隙率, %。

### 2.3 组分输送模型

无论是发酵过程还是加湿过程,均涉及水蒸气的流动及传递,且在传递过程中不涉及化学反应,故在此过程中需满足组分输送质量守恒方程,其方程如下<sup>[13,14]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + S_i \quad (5)$$

式中:

$\rho$  为第  $i$  种组分的密度,  $kg/m^3$ ;

$Y_i$  为组分  $i$  的质量分数, %;

$\vec{v}$  为速度矢量,  $m/s$ ;

$\nabla$  为拉普拉斯算子;

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

$S_i$  为组分源项,  $kg/(m^3\cdot s)$ 。

## 3 初始及边界条件的设定

### 3.1 边界条件

曲房的流体动力来自水雾输送风机,对模型进行雷诺数求解,其公式如下<sup>[15,16]</sup>:

$$Re = \frac{vL}{\eta} \quad (6)$$

表 1 自定义材料属性

Table 1 Custom material properties

材料	密度/( $kg/m^3$ )	比热容/( $J/kg\cdot K$ )	导热系数/( $W/m\cdot K$ )
曲块	833.3	3506	0.16
稻草	300	2010	0.06
不锈钢	7750	500	16.2

求解得曲房的雷诺数达  $10^4$  以上,为高雷诺数紊

流模型,判定该模型处于不可压缩湍流状态,故采用  $k-\epsilon$  模型。

将加湿管道入口设置为质量流入口,相对湿度为 100%,温度为 298.65 K,质量流量为 0.02 kg/s,  $H_2O$  的质量分数 0.02;将曲房左右两边的送风孔板设置为压力出口,表压为 0 Pa。据实际情况各壁面取为对流边界条件,曲房模型各固体材料特性根据工程中的实际参数选取,如表 1 所示。

### 3.2 多孔介质物性参数计算

孔隙率是指多孔介质材料中孔隙体积与总体积之比,其公式如下<sup>[17]</sup>:

$$\phi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (7)$$

式中:

$\rho_b$ —材料的表观密度,  $kg/m^3$ ;

$\rho_p$ —固体材料密度,  $kg/m^3$ 。

随机抽取 100 个大曲制造原料(粉碎的小麦粒),利用游标卡尺可测得麦粒的长、宽、厚。由椭圆体体积与球体体积相等可得:

$$d_p = 2^3 \sqrt{a_p b_p c_p} \quad (8)$$

式中:

$d_p$ —平均当量直径,  $mm$ ;

$a_p, b_p, c_p$ —分别为长、宽、厚二分之一的平均值,  $mm$ 。

将曲块的密度作为表观密度,曲块烘干粉碎压实后的密度作为固体材料密度,代入公式(7)得大曲孔隙率约为 0.2。通过测量可得小麦颗粒长、宽、厚平均值分别为 2.05 mm、1.23 mm、1.05 mm,代入公式(8)可得,小麦粒的平均当量直径  $d_p$  为 2.76 mm。将孔隙率  $\phi$  与平均当量直径  $d_p$  代入公式(3)(4)中可得曲块黏性阻力系数  $3.13 \times 10^8$ ,惯性阻力系数  $1.26 \times 10^5$ 。送风孔板孔隙率为 0.31,送风挡板黏性阻力系数为  $7.4 \times 10^6$ ,惯性阻力系数为 4506。

### 3.3 模型求解

在流场初始化时,曲房相对湿度初始值为 75%,温度为 299.65 K;大曲初始相对湿度为 80%,温度为 300.85 K,并添加各固体材料特性。运用 Fluent 瞬态求解器对曲房温湿度耦合进行求解,利用标准  $k-\epsilon$  湍流模型,结合组分输送模型和多孔介质模型,采用有限容积法,添加全局重力场  $g=9.8 m/s^2$ 。设置时间步长 0.5 s,时间步数为 1000,每步最长迭代次数设为 50 次。

### 4 模拟结果与分析

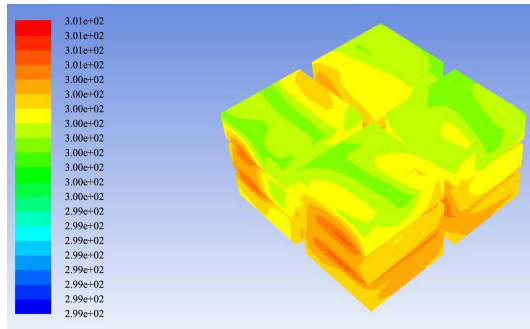


图2 曲堆表面温度分布

Fig.2 Surface temperature distribution cloud map of curved reactor

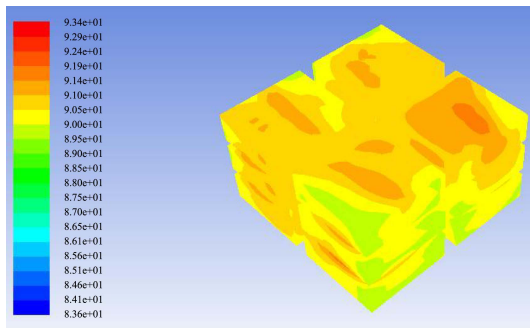


图3 曲堆表面相对湿度分布

Fig.3 Relative humidity distribution cloud map on curved reactor surface

通过 Fluent 的迭代运算，曲房内监测点的相对湿度从 75% 升高至 90% 的过程共耗费 160.5 s。曲堆表面的温湿度分布分别如图 2、3 所示，曲堆上表面温度略低，相对湿度较高，是因为水雾从输送管道中直接吹向曲堆上表面而产生直接影响；每层曲间和同一层不同曲堆间相对湿度及温度均偏高，这是由于曲块本身作为热源及湿源，间隙不利于散热散湿所导致。曲堆表面相对湿度差值为 9.8%。

### 5 试验验证

为了验证模拟结果的正确性，在曲房加湿实验平台进行实验，检测加湿过程中曲房内温湿度变化情况。试验所用的仪器多乐信 DRS-03A 型超声波加湿器、赛特 TSI9545 便携式热线热球风速仪、盛世瑞恩 DB4200-DB171-10-N 型分体式温湿度传感器<sup>[18]</sup>。温湿度传感器采集空间内不同点位，其点位分布如 4 图所示。

打开空调机组和加湿器对曲房内的环境参数进行调节，当曲房内部的温度达到  $25\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，湿度为  $75\%\pm 2\%$  时，空调机组停止工作，超声波加湿装置持续工作，直至所有传感器均到达 90% 时停止加湿。将

模拟结果和试验结果进行对比分析，以 a15 点位数据进行加湿速率对比，其相对湿度从 75% 上升至 90% 共用时 167 s，仿真加湿过程耗时为 160.5 s，即偏差值为 6.5 s。对比情况如图 5、6 所示，在相对湿度从 84% 升高至 90% 的过程中，相对湿度最大偏差值为 1.42%。各传感器试验值和模拟值间最大偏差为 1.1%。由图 5 可以看出，相对湿度变化模拟值与试验值整体趋势基本一致，综上所述，建立的发酵曲房加湿模型具有有效性，为之后探究管道参数对加湿的影响提供模型参考和理论基础。

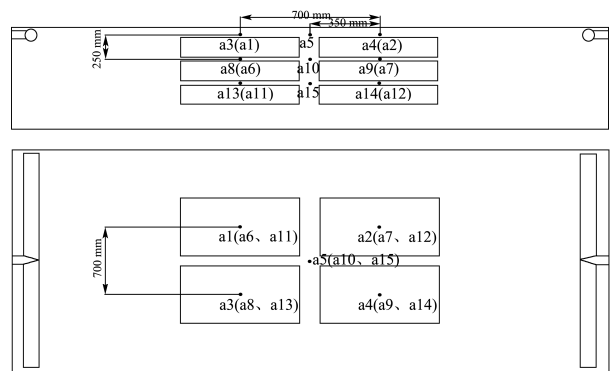


图4 曲房内传感器点位分布图

Fig.4 Distribution of sensor points in curved compartment

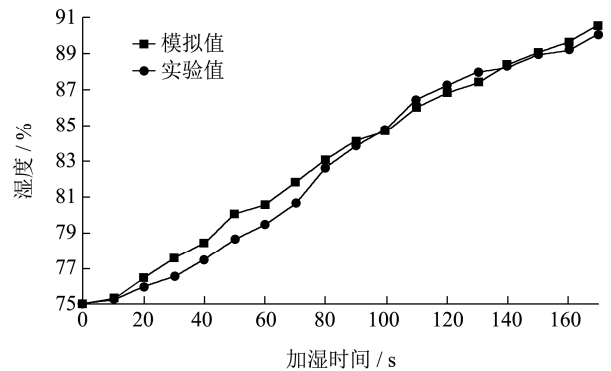


图5 a15 号点位模拟值与实验值对比

Fig.5 Comparison of simulated value and experimental value of a15 point

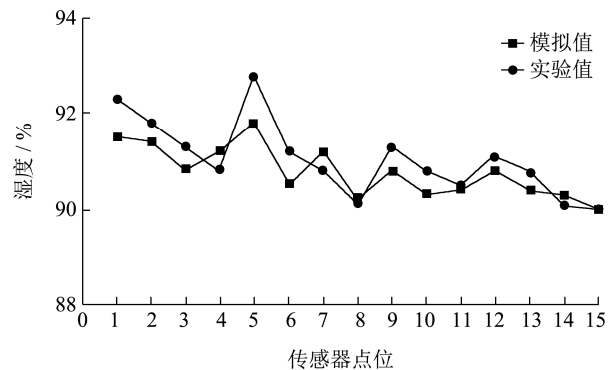


图6 加湿停止各点位模拟值与实验值对比

Fig.6 Comparison of simulated and experimental values at each point when humidification stop

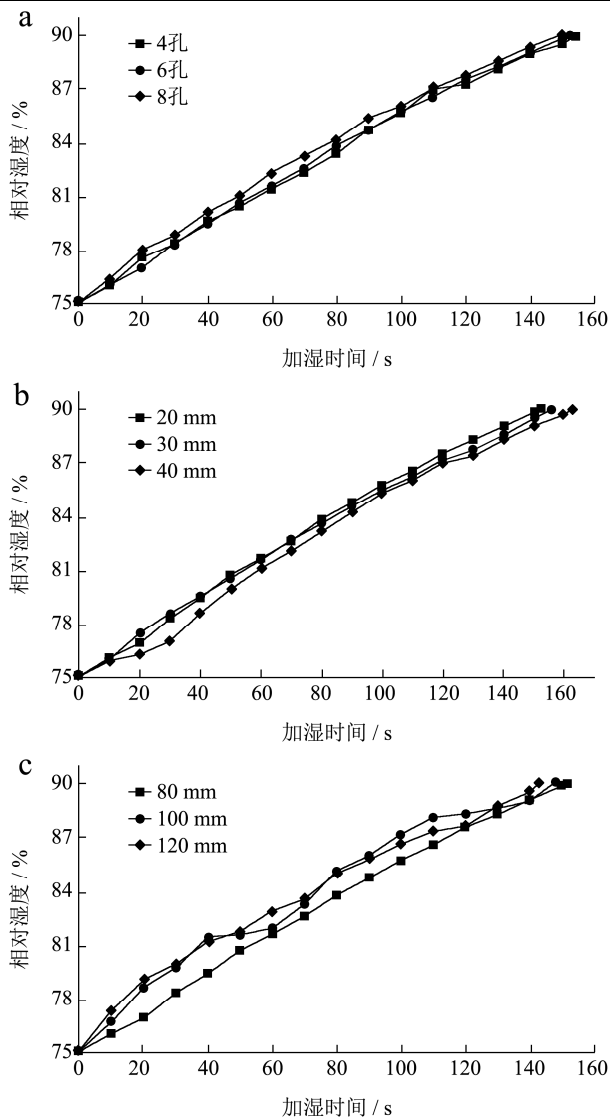


图7 各实验因素对相对湿度变化的影响

Fig.7 Influence of various experimental factors on relative humidity changes

注: a: 管径 80 mm、孔径 20 mm; b: 管径 80 mm、开孔数 6; c: 开孔数 6、孔径 20 mm。

## 6 曲房加湿装置工作特性研究

### 6.1 评价标准

加湿速率: 曲房内的平均湿度从 75% 上升至 90% 所耗费的时间, 其中曲房平均相对湿度  $\bar{s}$  为各点位湿度的平均值, 表达式如下:

$$\bar{S} = \frac{1}{15} \sum_{n=1}^{15} S_i \quad (9)$$

加湿均匀性: 通过 15 个传感器测量值的标准差来衡量, 表达式如下:

$$D = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{n=1}^{15} (v_n - \bar{v})^2} \quad (10)$$

式中:

$D$ ——传感器测量值的标准差;

$v_n$ ——第  $n$  个传感器的测试值;

$\bar{v}$ ——某次实验测试值的平均值。

## 6.2 单因素试验结果与分析

### 6.2.1 实验方案

通过改变管道直径、管道开孔数、开孔直径在超声波加湿装置上进行单因素实验<sup>[19,20]</sup>, 实验方案如表 2 所示。

表 2 实验方案

Table 2 Experimental scheme

实验因素	管道直径/mm	管道开孔数	开孔直径/mm
管径因素实验	80、100、120	6	20
开孔数因素实验	80	4、6、8	20
开孔直径因素实验	80	6	20、30、40

### 6.2.2 各实验因素对加湿速率的影响

在曲房中进行单因素实验, 得到各因素加湿过程中相对湿度随时间变化的关系如图 7 所示。由图可知: 随着管道开孔数的增加, 超声波管道加湿效率不断加快, 当开孔数为 8 时, 加湿效率最高, 加湿耗时 151 s; 随着开孔直径的增加, 管道加湿效率不断减缓, 当开孔直径为 20 mm, 加湿效率最高, 加湿耗时 152 s; 随着管道直径的增加, 管道加湿效率不断加快, 当管道直径为 120 mm, 加湿效率最高, 加湿耗时 143 s。因此, 在单因素实验中, 选择了管道直径为 120 mm, 管道开孔数为 8, 开孔直径为 20 mm 作为加湿速率最优组合。

### 6.2.3 各实验因素对加湿均匀性的影响

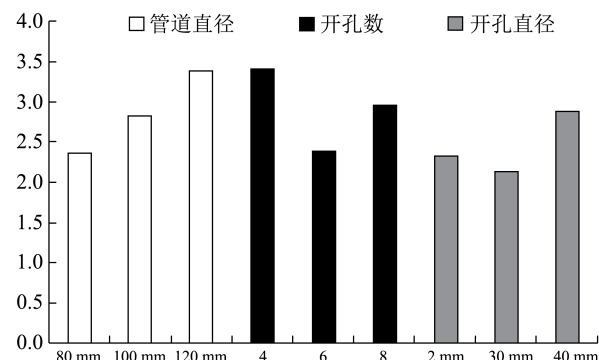


图 8 各实验因素对相对湿度标准差的影响

Fig.8 Influence of experimental factors on standard deviation of relative humidity

单因素试验得到各因素下相对湿度标准差如图 8 所示。由图可知: 随着管道直径的增大, 曲房内相对湿度标准差不断增大, 当管道直径为 80 mm 时, 相对湿度标准差为 2.37, 曲房内相对湿度最均匀; 随着开

孔数的增加, 曲房内相对湿度标准差先减小后增大, 当开孔数为 6 时, 相对湿度标准差为 2.39, 曲房内相对湿度最均匀; 随着开孔直径的增加, 曲房内相对湿度标准差先减小后增大, 当开孔直径为 30 mm 时, 相对湿度标准差为 2.15, 曲房内相对湿度最均匀。因此, 选择管道直径 80 mm、开孔数为 6、开孔直径 30 mm 为单因素实验加湿均匀性最优组合。

### 6.3 加湿均匀性正交优化实验

#### 6.3.1 试验方法

表 3 实验因素及水平值

Table 3 Experimental factors and horizontal values

实验因素	管道直径/mm	管道开孔数	开孔直径/mm
管径因素实验	80、100、120	6	20
开孔数因素实验	80	4、6、8	20
开孔直径因素实验	80	6	20、30、40

表 4 加湿速率正交实验结果

Table 4 Orthogonal experimental results of humidification rate

实验批次	实验因素			加湿标准差
	A	B	C	
1	1	1	1	3.43
2	1	2	2	2.15
3	1	3	3	3.29
4	2	1	2	3.63
5	2	2	3	3.52
6	2	3	1	3.08
7	3	1	3	4.19
8	3	2	1	3.39
9	3	3	2	3.57
-----				
K <sub>1</sub>	2.96	3.75	3.30	
K <sub>2</sub>	3.41	3.02	3.12	
K <sub>3</sub>	3.72	3.31	3.67	
R	0.76	0.73	0.55	

通过单因素试验得出管道参数对加湿速率及加湿均匀性的影响趋势, 但是该方法需假定各因素间没有交互作用, 即单因素结果并不是很精准的优化方案。因此, 采用正交试验进行优化和补充。将管道直径 (A)、开孔数 (B)、开孔直径 (C) 为试验因素, 以相对湿度标准差为试验指标, 通过三因素三水平正交优化测量条件<sup>[21,22]</sup>, 因素水平见表 3。

采用  $L_9(3^4)$  正交表安排相对湿度标准差的实验, 实验结果如表 4 所示。

#### 6.3.2 实验结果与分析

通过正交试验与极差分析处理数据<sup>[23,24]</sup>, 当只考虑加湿均匀性时, 因素 A、B、C 的极差分别为 0.76、

0.73、0.55, 因此影响因素的主次顺序为管道直径、开孔数、开孔直径, 即  $A>B>C$ 。且加湿均匀性最佳组合为  $A_1B_2C_2$ , 即为管道直径为 80 mm、开孔数为 6、开孔直径 30 mm 时, 曲房内相对湿度最均匀, 与单因素实验结果一致。

### 6.4 对比实验

加湿速率单因素实验最优组合  $A_3B_3C_1$  与加湿均匀性正交实验最优组合  $A_1B_2C_2$  不一致, 为验证最优参数组合, 将两个组合分别进行对比实验, 每个组合重复两次实验取平均值, 对比两组的加湿速率及各点位标准差, 实验结果如表 5 所示, 当湿空气流量一定, 管道直径越大, 管道内部的压力越小, 从而流速越慢, 导致靠近管道出口的湿空气更多, 增加了相对湿度的不均匀性; 当开孔数偏少时, 会导致输入水蒸气较为集中的问题, 而开孔数较大时, 会导致越靠近导管两端的开孔流出越少, 造成两侧区域相对湿度低于中间区域; 开孔直径在单因素试验中有孔径越大加湿时间越长, 但标准差却先减小后增加的现象, 故而选择加湿管道装置最佳组合为  $A_1B_2C_2$ , 即管道直径为 80 mm、开孔数为 6、开孔直径为 30 mm。

表 5 两组加湿时长及均匀性的比较

Table 5 Comparison of humidification time and uniformity between the two groups

组合	加湿时长	标准差
$A_3B_3C_1$	141	4.52
$A_1B_2C_2$	156	2.15

## 7 结论

7.1 通过对曲房加湿过程的数值模拟可得: 曲房相对湿度从 75% 升高至 90% 需要 160.5 s, 加湿效果良好, 曲堆表面相对湿度差值为 9.8%。经过曲房加湿试验验证, 模拟值与试验值随时间变化趋势基本一致, 相对湿度最大偏差值为 1.42%。各传感器试验值和模拟值间最大偏差为 1.1%。

7.2 利用单因素和正交试验寻求超声波加湿管道装置中加湿速率和加湿均匀性之间的平衡, 并在单因素试验的基础上进行以加湿均匀性为试验指标的正交试验, 三个实验因素对加湿均匀性影响程度排序依次为: 管道直径、开孔数、开孔直径。通过将单因素加湿速率和正交优化加湿均匀性的最优组合进行对比实验可得: 当管道直径为 80 mm、开孔数为 6、开孔直径为 30 mm 时加湿效果最好, 相较于优化之前加湿时间缩短了 6.6%。通过建立曲房模型和加湿管道优化为后续曲房湿度控制和曲块堆码方式优化研究提供理论支撑。

## 参考文献

- [1] 邱增钰,王亚平,李博艺,等.温度对高温大曲液态培菌过程菌群结构的影响[J].中国酿造,2017,36(5):30-35  
QIU Zengyu, WANG Yaping, LI Boyi, et al. Effect of temperature on microbial composition during high temperature daqu liquid cultivation [J]. China Brewing, 2017, 36(05): 30-35
- [2] 付绍鸿,赵荣寿,杨柳,等.高温大曲发酵过程中微生物多样性研究[J].酿酒科技,2019,3:76-79  
FU Shaohong, ZHAO Rongshou, YANG Liu, et al. Microbial diversity in the fermentation process of high-temperature daqu [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2019, 3: 76-79
- [3] 申孟林,张超,王玉霞.白酒大曲微生物研究进展[J].中国酿造,2016,5:1-5  
SHEN Menglin, ZHANG Chao, WANG Yuxia. Research progress on microorganism in daqu liquor [J]. China Brewing, 2016, 5: 1-5
- [4] 邱声强,唐维川,赵金松,等.酱香型白酒生产工艺及关键工艺原理简述[J].酿酒科技,2021,5:86-92  
QIU Shengqiang, TANG Weichuan, ZHAO Jinsong, et al. Brief introduction of jiangxiang baijiu production technology and principles of key processes [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2021, 5: 86-92
- [5] 张芸翌.中高温大曲主发酵期微生物群落与环境因子及理化性质的关联性研究[D].自贡:四川轻化工大学,2019  
ZHANG Yunzhao. Study on the correlation between microbial community and environmental factors and physicochemical properties during the main fermentation period of medium-high temperature daqu [D]. Zigong: Sichuan University of Science & Engineering, 2019
- [6] 方思贞,吕恩利,陆华忠,等.果蔬贮藏加湿技术研究现状与发展趋势[J].广东农业科学,2014,41(18):70-73,78  
FANG Sizhen, LYU Enli, LU Huazhong, et al. Research status and development trends of humidifying technology on storage of fruits and vegetables [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(18): 70-73, 78
- [7] 胡松涛,管宏宇,刘国丹,等.某烟厂卷接包车间湿度控制方案及节能策略研究[J].暖通空调,2017,47(9):115-119  
HU Songtao, GUAN Hongyu, LIU Guodan, et al. Humidity control schemes and energy saving strategy of package workshop in a cigarette factory [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2017, 47(9): 115-119
- [8] 赵春江,韩佳伟,杨信廷,等.基于CFD的冷藏车车厢内部温度场空间分布数值模拟[J].农业机械学报,2013,11:168-173  
ZHAO Chunjiang, HAN Jijia, YANG Xinting, et al. Numerical simulation of temperature field distribution in refrigerated truck based on CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 11: 168-173
- [9] 郭嘉明,吕恩利,陆华忠,等.冷藏运输箱体结构对流场影响的数值模拟[J].农业工程学报,2012,28(S1):74-80  
GUO Jiaming, LYU Enli, LU Huazhong, et al. Numerical simulation of effects of transport enclosure structure on flow field [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(S1): 74-80
- [10] 刘伟,杨洲,段洁利,等.蓄冷式冷藏箱降温过程的数值模拟及试验验证[J].华南农业大学学报,2019,40(4):119-125  
LIU Wei, YANG Zhou, DUAN Jieli, et al. Numerical simulation and experimental verification of cooling process in cool storage refrigerator [J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 119-125
- [11] 权洁,陈浩,孟庆睿.基于Fluent的纤维过滤器内部流场数值模拟[J].液压与气动,2019,12:46-50  
QUAN Jie, CHEN Hao, MENG Qingrui. Numerical simulation of flow field inside fiber filter based on fluent [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019, 12: 46-50
- [12] Wang C, Liu Y, Sun X, et al. A hybrid porous model for full reactor core scale CFD investigation of a prismatic HTGR [J]. Annals of Nuclear Energy, 2021, 151: 107916
- [13] 赵国强,贾鹤鸣,张森,等.微型植物工厂温湿度场分析与传感器优化布局[J].森林工程,2019,35(2):61-68  
ZHAO Guoqiang, JIA Heming, ZHANG Sen, et al. Analysis of temperature and humidity field and layout optimization of sensor in micro plant factory [J]. Forest Engineering, 2019, 35(2): 61-68
- [14] 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 Haifei, TIAN Jianping, WANG Kaizhu, 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
- [15] 席雷,徐亮,高建民,等.蒸汽冷却厚壁通道传热性能的耦合传热研究[J].西安交通大学学报,2017,51(9):32-38,62  
XI Lei, XU Liang, GAO Jianmin, et al. Conjugate calculation of heat transfer performance of a steam cooled thick-wall ribbed channel [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(9): 32-38, 62
- [16] 孙帅,陈华,段鼎立.微通道蒸发器的传热性能实验研究[J].

- 低温工程,2020,3:48-53  
SUN Shuai, CHEN Hua, DUAN Dingli. Experimental study on heat transfer performance of micro-channel evaporator [J]. Cryogenics, 2020, 3: 48-53
- [17] 王振华. 仓储粮堆湿热传递过程的数值模拟与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014  
WANG Zhenhua. Numerical simulation and experimental study on heat a mass transfer of stored grain pile [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014
- [18] 候山山, 黄丹平, 张芯豪, 等. 基于 LabVIEW 智能曲房测控系统研发[J]. 食品工业, 2018, 39(5): 234-238  
HOU Shanshan, HUANG Danping, ZHANG Xinhao, et al. Research and development of measurement and control system for intel igent fermentation room based on LabVIEW [J]. The Food Industry, 2018, 39(5): 234-238
- [19] 阙小峰, 方志成, 余雁, 等. 水油混相协同微波提取辣椒碱工艺优化及应用研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 159-164, 206  
QUE Xiaofeng, FANG Zhicheng, YU Yan, et al. Study on optimization of microwave assisted extraction of capsaicin by water oil mixture and its application [J]. Food and Machinery, 2021, 37(7): 159-164, 206
- [20] Shinzato T. Replica analysis for portfolio optimization with single-factor model [J]. Journal of the Physical Society of Japan, 2017, 86(6): 063802
- [21] 何琼, 卢清华, 黄兴山. 基于正交实验法的柔性平行四杆机构类型与尺寸综合分析[J]. 机床与液压, 2018, 46(4): 21-23, 40  
HE Qiong, LU Qinghua, HUANG Xinshan. Synthetic analysis for the type and size of complaint parallel four-bar mechanism based on orthogonal experimental [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(4): 21-23, 40
- [22] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55  
LIU Ruijiang, ZHANG Yewang, WEN Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment [J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52-55
- [23] Zhang L, Lu Y, Kang J, et al. Selection of optimum composition of aluminoborosilicate glasses with excellent dielectric properties according to orthogonal experiment design [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(7): 5746-5752
- [24] 尹升华, 吴爱祥, 李希雯. 矿柱稳定性影响因素敏感性正交极差分析[J]. 煤炭学报, 2012, S1: 48-52  
YIN Shenghua, WU Aixiang, LI Xiwen. Orthogonal polar difference analysis for sensitivity of the factors influencing the ore pillar stability [J]. Journal of China Coal Society, 2012, S1: 48-52

(上接第 253 页)

- [17] Karayannakidis P D, Zotos A. Physicochemical properties of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) skin gelatin and its modification by the addition of various coenhancers [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(5): 530-538
- [18] 陈小雷. 斑点叉尾鲴鱼皮明胶的制备、性质与应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013  
CHEN Xiaolei. Research on preparation, properties and application of channel catfish skin gelatin [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013
- [19] 李双, 涂宗财, 陈雪岚. 鱼明胶提取及其品质影响因素[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(2): 252-259  
LI Shuang, TU Zongcai, CHEN Xuelan. Extraction and quality influencing factors of fish gelatin [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(2): 252-259
- [20] 黄涛. 蛋白质修饰技术改善鱼明胶理化特性及其应用的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018  
HUANG Tao. Research on improvement of physical and chemical properties of fish gelatin by protein modification technology and its application [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018
- [21] M H Lau, J Tang, A T Paulson. Texture profile and turbidity of gellan/gelatin mixed gels [J]. Food Research International, 2000, 33(8): 665-671
- [22] 周新. 罗非鱼皮明胶优化提取及其物化特性研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012  
ZHOU Xin. Study on optimum extraction and physicochemical properties of Tilapia skin gelatin [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2012