

曲房环境温湿度场的数值模拟及分布规律

黄海飞¹, 田建平¹, 王开铸¹, 付磊¹, 杨海栗¹, 黄丹²

(1. 四川轻化工大学机械工程学院, 四川宜宾 644000)

(2. 四川轻化工大学酿酒生物技术及应用四川省重点实验室, 四川宜宾 644000)

摘要: 为得到大曲在发酵过程中曲房环境参数的变化规律, 解析大曲在发酵不同时期温湿度差异性, 同一时期内曲房各层及各点间温湿度差异性。应用流体力学 (CFD) 软件 Fluent, 以发酵曲房为研究对象, 通过 profile 导入发酵过程中大曲的实时发酵温度, 借助多孔介质模型、组分输运模型, 建立曲房内部三维紊流模型, 采用非稳态计算方法, 模拟研究了不同发酵阶段下曲房内部环境的温湿度分布特性, 同时对相对应测点的温湿度变化情况进行检测与验证。研究结果表明: 仿真结果与实测结果温度最大误差为 7.74%, 相对湿度最大误差为 8.42%, 均小于 10% 的误差允许范围, 证明了曲房环境的对流换热及传质计算有足够精度; 曲房内环境热湿传递具有耦合性, 相对湿度在温度较高的中层呈现相对较低的情况, 在温度较低的上层相对湿度较高; 同时通过解析不同发酵阶段曲房环境温湿度分布规律及差异性, 获得曲房内其他未检测区域的温湿度数据, 为后续曲房风控策略提供模型参考, 能够为下一步温湿度传感器位置的优化研究提供理论基础。

关键词: 大曲发酵; 数值分析; 温度场; 湿度场

文章编号: 1673-9078(2020)09-148-155

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.9.0251

Numerical Simulation and Distribution of Ambient Temperature and Humidity Field in Qu Fang

HUANG Hai-fei¹, TIAN Jian-ping¹, WANG Kai-zhu¹, FU Lei¹, YANG Hai-li¹, HUANG Dan²

(1. College of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, China)

(2. Liquor Marking Biological Technology and Application of Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, China)

Abstract: The purpose of this study was to obtain the law of the changes in the environmental parameters of Daqu during fermentation, to analyze the difference in temperature and humidity of Daqu during different periods of fermentation, and the difference in temperature and humidity of all Daqu in the same fermentation room during the same period. Applying fluid mechanics (CFD) software Fluent, taking fermentation room as the research object, the real-time fermentation temperature of Daqu during the fermentation process was imported through the profile, and the porous media model and component transport model were used to establish a three-dimensional turbulent model inside the chamber. Then the non-steady-state calculation method was used to simulate the temperature and humidity distribution characteristics of the internal environment of the fermentation room at different fermentation stages. At last, the temperature and humidity changes at the corresponding detection points were detected and verified. The research results showed that the maximum error between the simulation results and the measured results was 7.74% for temperature and 8.42% for relative humidity, both of which were within the allowable error range of less than 10%, which proved that the convective heat transfer and mass transfer in curved room environment were accurate enough. The heat and humidity transfer in the fermentation is coupled, the relative humidity is relatively low in the middle layer with higher temperature, and the

引文格式:

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

HUANG Hai-fei, TIAN Jian-ping, WANG Kai-zhu, 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

收稿日期: 2020-03-18

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目 (2019YFG0167); 中国轻工业浓香型发酵重点实验室项目 (2018JJ011); 自贡市重点科技计划项目 (2018CXJD06)

作者简介: 黄海飞 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 多物理场耦合技术

通讯作者: 田建平 (1965-), 男, 教授, 研究方向: 固态酿造智能制造

relative humidity is higher in the lower layer with lower temperature. At the same time, the temperature and humidity data of other undetected areas in the fermentation room were obtained by analyzing the temperature and humidity distribution laws and differences of the fermentation room environment at different fermentation stages. It provides a model reference for subsequent fermentation room risk control strategies, and provides a theoretical basis for further optimization study of the temperature and humidity sensor position.

Key words: Daqu fermentation; numerical analysis; temperature field; humidity field

大曲发酵过程中伴随着微生物的生长,其理化指标和环境温湿度会发生不断的变化,由于曲块摆放方式及空间位置的不同,曲块间温湿度差异性较大,导致曲房各区域环境温湿度在空间分布不均,同时环境温湿度的变化也对曲块微生物生长及理化指标产生影响,两者间相互关联,故需对曲房环境温湿度进行监测及实时调控^[1-3]。目前,河北诺亚森科技有限公司先后为衡水老白干和山东古贝春集团进行了在曲房高温高湿环境下,以无线方式监测曲块生长情况和实现对酒窖、酒缸内酒醅上、中、下三层温度的同时测量,以及曲心、曲间、曲房内环境温度的监测^[4,5],未对相关数据深入研究,且由于缺乏对曲房环境温湿度差异性研究,故难以对曲房内环境温湿度参数进行调控。

发酵过程中,针对特定形状与摆放位置的曲块,上缓期及中挺期发酵情况复杂,环境温湿度分布不均,研究发酵过程中曲房环境温湿度分布情况及上缓期、中挺期差异性尤为重要^[6]。本文以发酵曲房内有限点的温湿度分布为研究对象,借助多孔介质模型和组分输送模型,建立曲房内部三维湍流模型,采用非稳态计算方法,模拟研究上缓期及中挺期曲房内部的温湿度分布,解析不同点位及发酵时期温湿度差异性,通过有限点位预测曲房环境温湿度分布,并对相应点位温湿度的变化情况进行了验证试验。旨在解析不同发酵阶段下,曲房内部环境温度、湿度分布特性规律及差异性,为后续曲房风控策略提供模型参考。

1 物理模型

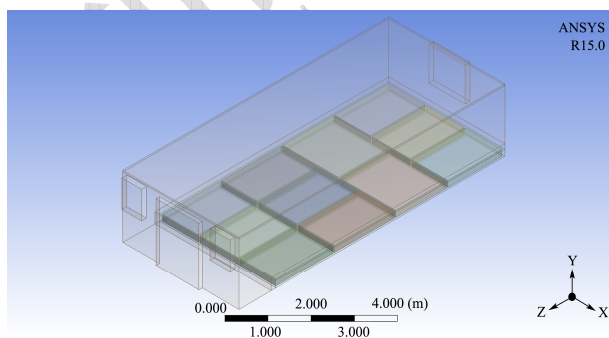


图1 上缓期曲房简化模型

Fig.1 Simplified model of upper slow qu fang

由于大曲发酵的主要时期为上缓期及中挺期,其中上缓期曲堆为一层,曲块与曲块间紧密排列,其整

体尺寸为 $7.5\text{ m} \times 3.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$;中挺期曲堆为三层,其整体尺寸为 $5.17\text{ m} \times 2.8\text{ m} \times 0.6\text{ m}$,两个阶段曲堆外部均覆盖 0.15 m 厚的稻草。本文以基于压差原理的封闭发酵曲房为研究对象。在保证结果精确性的情况下,对模型的门、窗、曲等结构进行简化。由于曲房结构上对称,故可将曲堆划分为 11 个热源,故利用 Solidworks 三维绘图软件建立曲房上缓期和中挺期的等比例三维物理模型,分别如图 1、2 所示。

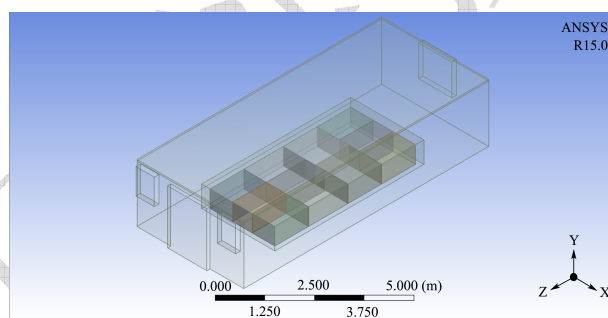


图2 中挺期曲房简化模型

Fig.2 Simplified model of mid-life qu fang

2 基本假设

为简化模型,提高仿真效率,对模型进行如下假设^[7,8]:

- (1) 厢体内气体为牛顿气体,且在流动过程中不可压缩,符合 Boussinesq 假设;
- (2) 厢体内为封闭空间,密封性能良好,不存在漏气现象;
- (3) 表面蒸发的水雾为已汽化的水蒸气,水蒸气在固体壁面不凝结;
- (4) 稻草为多孔介质各向同性,内部为层流模式;
- (5) 忽略厢内热辐射影响;
- (6) 厢内壁面处空气无滑移。

3 数学模型

针对曲堆发酵工况下的传统曲房内部温湿度场的数值模拟,建立描述曲房内部热质交换的数学模型。本文采用 $k-\epsilon$ 模型、组分输送模型和 SIMPLE 算法对发酵过程的温湿度场及流场变化进行模拟。采用有限体积法中的瞬态控制通用方程为^[9,10]:

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

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; u 为速度, m/s ; t 为时间, s ; S 为广义源项; ϕ 为广义变量; Γ 为相对应 ϕ 的广义扩散系数; S 为广义源项。

在发酵过程中涉及水蒸气的流动, 且不涉及化学反应, 在组分传输的过程中须符合如下组分质量守恒方程^[11,12]:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + S_i \quad (2)$$

式中: Y_i 为组分 i 的质量分数, %; $\bar{u}$ 为速度矢量, m/s ;

S_i 为定义的组分源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; $\bar{J}_i$ 为组分 i 的扩散通量,

$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。 S_i , $\bar{J}_i$ 的表达式如下:

$$\bar{J}_i = -\rho D_i \nabla Y_i \quad (3)$$

$$S_i = k_m p_{\text{sat}} \left(a_w - \frac{R_H}{100} \right) a_p \quad (4)$$

式中: D_i 为组分 i 的扩散系数, m^2/s ; k_m 为总传质系数, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa})$; p_{sat} 为饱和蒸气压, Pa ; a_w 为水的活性; R_H 为相对湿度, %; a_p 为比表面积, m^2/m^3 。

为了考虑稻草对温湿度场及气流场的影响, 本文采用多孔介质模型来模拟稻草的存在, 以模拟稻草对空气阻力及温湿度的影响, 方程为^[13-15]:

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} |v| v_j \right) \quad (5)$$

式中: S_i 为 i 方向动量源项; C 为惯性阻力系数; D 为黏性阻力系数; $|v|$ 为空气流动速率, m/s ; μ 为空气动力黏度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; v_j 为空气 j 方向流速, m/s 。其中, D 和 C 可通过如下经验公式表示:

$$D = \frac{150(1-\phi)^2}{d_p^2 \phi^2} \quad (6)$$

$$C = \frac{3.5(1-\phi)}{d_p \phi^3} \quad (7)$$

式中: d_p 为多孔介质的当量直径, m ; ϕ 为多孔介质孔隙率, %。

4 初始及边界条件的设定

曲房内的升温与气流流动主要依靠曲药发酵引起的对流换热, 对曲块及稻草组成的发酵区的传热传质使用雷诺数计算, 曲房环境气体区进行瑞利数计算^[16], 分别求得雷诺数 Re 达到 133.3 、瑞利数 Ra 达到 8.79×10^9 , 分别属于层流和高瑞利数湍流, 以下为雷诺数和瑞利数计算公式^[17]:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (8)$$

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\mu \alpha} \quad (9)$$

式中: β 为热膨胀系数; μ 为粘滞系数; ρ 为密度, kg/m^3 ; L 为特征长度, m ; T 为温差, $^{\circ}\text{C}$ 。

(1) 大曲在入房发酵前经过了加工成型, 初始温度较环境温度偏高, 利用传感器检测并记录发酵过程中曲药各区域的实时温度参数, 并通过 profile 导入 11 块热源^[18], 设定曲药发酵实时温度边界条件。

曲房内温湿度检测方法如下^[19]: 将温度传感器 pt100 以及水分传感器完全插入大曲内部, 检测发酵时大曲的曲心温度与大曲的水分变化; 温湿度变送器根据不同的发酵阶段设置在曲房的不同空间点位, 检测曲房内环境的温度、湿度数据。将温湿度的数据以模拟信号输出到西门子 S7-200smart EM AM04 (模拟量模块), 再由 EM AM04 将接收并转化为数字信号, 传输至西门子 S7-200smart PLC (CPU), 最后通过以太网将转化的数字信号传输到本地 PC 机上进行储存。实验检测所用传感器均为每 5 分钟测量并上传一次数据, 其中上缓期及中挺期检测点位分布分别如图 3、4 所示。

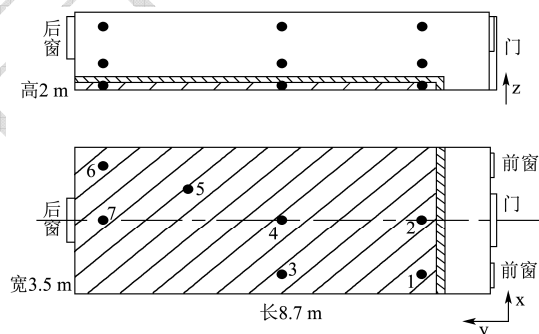


图 3 上缓期曲房检测点位分布图

Fig.3 The distribution map of detection points in the upper slow

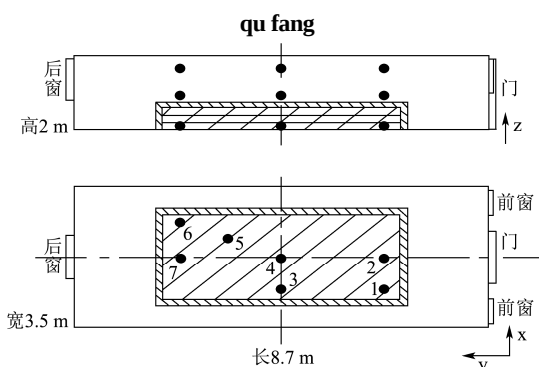


图 4 中挺期曲房检测点位分布图

Fig.4 The distribution map of detection points in the mid-life qu fang

由于曲房在结果上对称, 故可将检测点位 1、3、5、6 沿对称线对称至曲房另一侧, 从而可以获得 11 个监测点, 能够更加准确的描述曲房内热源及环境温

湿度分布。曲心温度变化曲线如图 5、6。

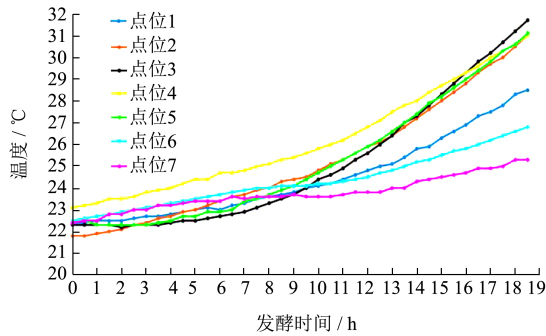


图 5 上缓期部分阶段曲心温度变化曲线

Fig.5 Curve of qu center temperature change in the upper slow

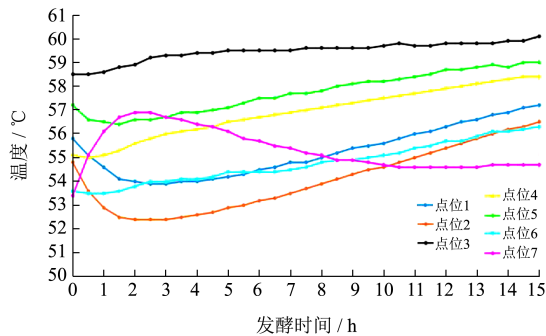


图 6 中挺期部分阶段曲心温度变化曲线

Fig.6 Curve of qu center temperature change in the mid-life

(2) 对于初始环境的湿度，由传感器测得初始值后，通过相对湿度转化为水蒸气的质量分数输入^[20,21]。

以下为相对湿度与水蒸气质量分数的换算过程：曲房内的空气为湿空气，由水蒸气和干空气组成，对于湿空气，可以根据如下公式计算含湿量：

$$d = 0.622\phi \frac{P_s}{P_b - \phi P_s}$$
(10)

式中： ϕ 为相对湿度，%； P_s 为空气温度下水的饱和蒸汽压，Pa； P_b 为空气的绝对压力，Pa。

由含湿量根据： $w = \frac{d}{1+d}$ 可得水蒸气的质量分数。从而得出曲房环境在初始温度 15℃下，水蒸气的质量分数为 0.0076；稻草区域在初始温度 21℃下，水蒸气的质量分数为 0.014。

(3) 为使计算结果尽量贴合实际结果，各壁面根据实际情况取对流边界条件^[22]，本文结构参数均来自工程中的实际参数，各固体材料特性，见表 1^[23,24]。

运用 FLUENT 瞬态求解器进行求解，利用标准 k-ε 湍流模型^[25]，结合多孔介质和组分输送模型，采用有限容积法，采用二阶迎风离散格式。添加浮升力影响因素，设置环境重力加速度为 9.8 m/s²，时间步长为 10 s，上缓期模拟计算 18 h，即 6780 个时间步长，每步最大迭代次数为 20 次，中挺期模拟 15.25 h，即 5490 个时间步长，每步最大迭代次数为 20 次。

表 1 固体材料特性

Table 1 Solid material properties

名称	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	比热容 $c/[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	导热系数 $\lambda/[\text{J}\cdot(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})^{-1}]$	传热系数 $K/[\text{J}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{K})^{-1}]$
曲药	1050	215	1.2	
稻草	150	2010	0.04	
窗户	2500	837	0.71	4.54
门	500	2400	0.18	1.42
墙壁	1500	1050	0.81	3.66

表 2 上缓期温度模拟数据 (°C)

Table 2 Simulation data of upper delay temperature

层	点位						
	一	二	三	四	五	六	七
上层	19.39	18.22	18.42	17.91	17.86	17.79	17.42
下层	19.64	19.07	18.55	18.32	18.19	18.12	17.75

表 3 中挺期温度模拟数据 (°C)

Table 3 Simulation data of mid-life temperature

层	点位						
	一	二	三	四	五	六	七
上层	34.92	35.48	35.34	35.72	34.25	32.64	32.53
下层	35.65	35.82	36.03	36.34	35.09	32.57	32.86

5 模拟结果与分析

曲房为大曲发酵提供发酵环境，本文主要针对大曲发酵上缓及中挺期的温湿度场进行模拟分析，以下分别为上缓期和中挺期温湿度场模拟结果及相关分析。

5.1 空气温度场模拟结果

上缓期及中挺期温度模拟数据如表 2、表 3 所示，曲房对称纵截面温度云图分别如图 7、图 8 所示。上缓期曲房环境温度最高值与最低值差值为 2.2 ℃，中挺期环境温度最高与最低值相差 3.8 ℃。由于曲块为热源，温度为曲房中最高；稻草覆盖于曲块上方，为曲块保温保湿，保证曲块正常发酵，温度其次；由图可知，由于窗户、门及墙壁与外界环境对流换热，故在靠近窗户、门及墙壁的位置温度相对最低，曲房环境中层温度较上层略高。

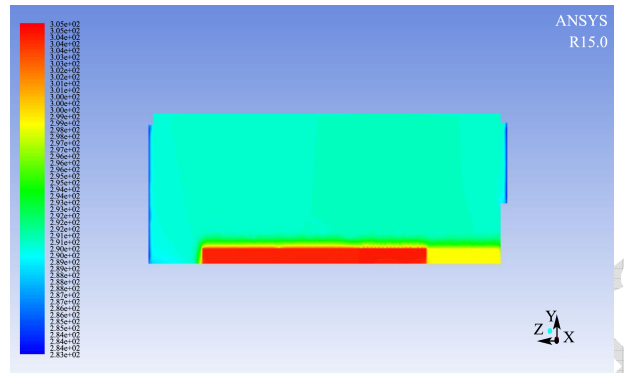


图 7 上缓期曲房对称纵截面温度云图

Fig.7 Temperature nephogram of symmetrical longitudinal section of qu fang in the upper slow

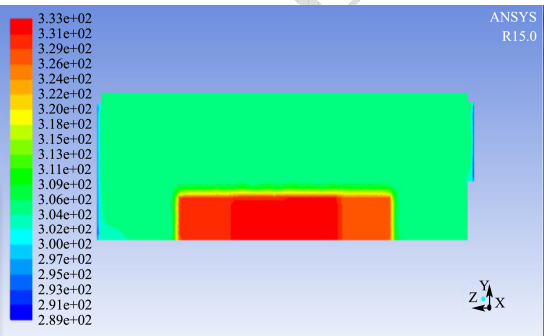


图 8 中挺期曲房对称纵截面温度云图

Fig.8 Temperature nephogram of symmetrical longitudinal section of qu fang in the mid-life

5.2 空气相对湿度模拟结果

上缓期及中挺期相对湿度模拟数据如表 4、表 5，曲房对称纵截面相对湿度云图分别如图 9、图 10 所示。上缓期曲房环境相对湿度最高与最低值相差 6.3%，中挺期最高与最低值相差 9.52%，房内相对湿度与温度分布情况类似，呈现出强烈的耦合关系：温度较低的区域相对湿度较高，温度较高的区域相对湿度较低。由于靠近门窗及墙壁位置温度相对较低，其饱和蒸汽压较低，该温度下容纳水蒸气能力较弱，临近位置相对湿度较高，部分区域突破 100%；曲房环境其余位置由于曲块发酵温度不同，其环境相对湿度均有所差异，由于受到对流传质影响，曲房环境上层相对湿度较中层略高。

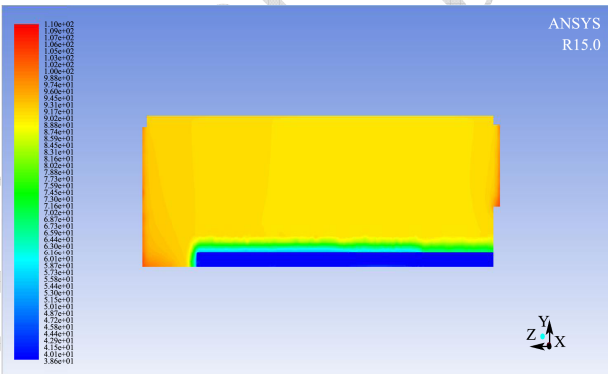


图 9 上缓期曲房对称纵截面相对湿度云图

Fig.9 Relative humidity nephogram of symmetrical longitudinal section of qu fang in the upper slow

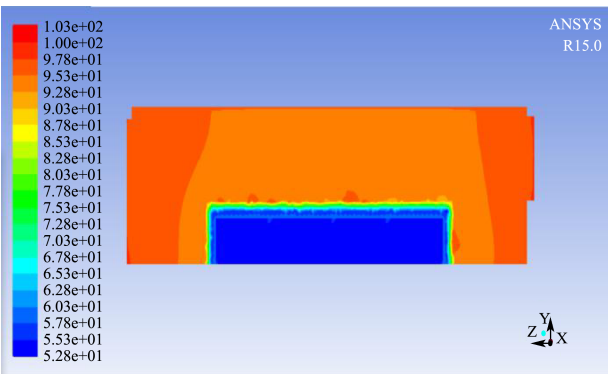


图 10 中挺期曲房对称纵截面相对湿度云图

Fig.10 Relative humidity nephogram of symmetrical longitudinal section of qu fang in the mid-life

表 4 上缓期相对湿度模拟数据 (%)

Table 4 Simulation data of relative humidity in upper delay period

层	点位						
	一	二	三	四	五	六	七
上层	88.26	90.44	92.67	91.28	92.18	87.57	92.56
中层	86.37	88.3	90.63	89.62	87.49	91.78	89.42

表 5 中挺期相对湿度模拟数据 (%)

层	点位						
	一	二	三	四	五	六	七
上层	94.49	98.68	93.34	94.03	96.24	95.61	97.38
中层	89.16	90.71	92.29	93.58	91.83	92.68	94.21

6 数值模拟结果验证

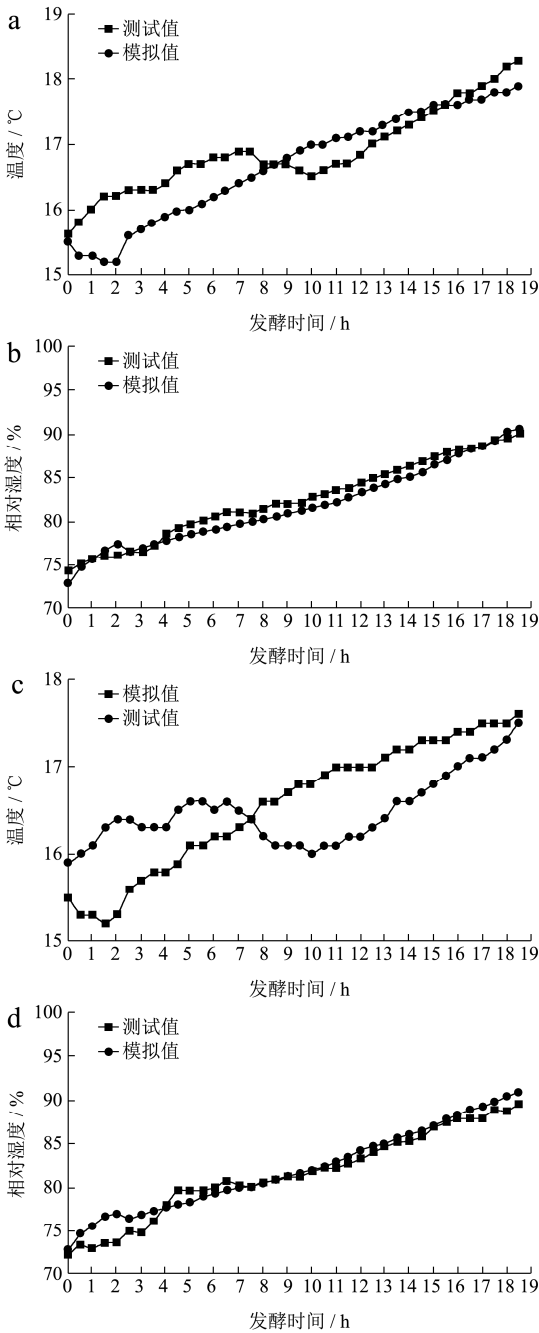


图 11 上缓期试验值与模拟值对比

Fig.11 Comparison of the experimental value with the simulated value in the upper slow

注: a: 上层 4 号点温度试验值与模拟值对比; b: 上层 4 号点相对湿度试验值与模拟值对比; c: 中层 7 号点温度试验值

与模拟值对比; d 中层 7 号点相对湿度试验值与模拟值对比。

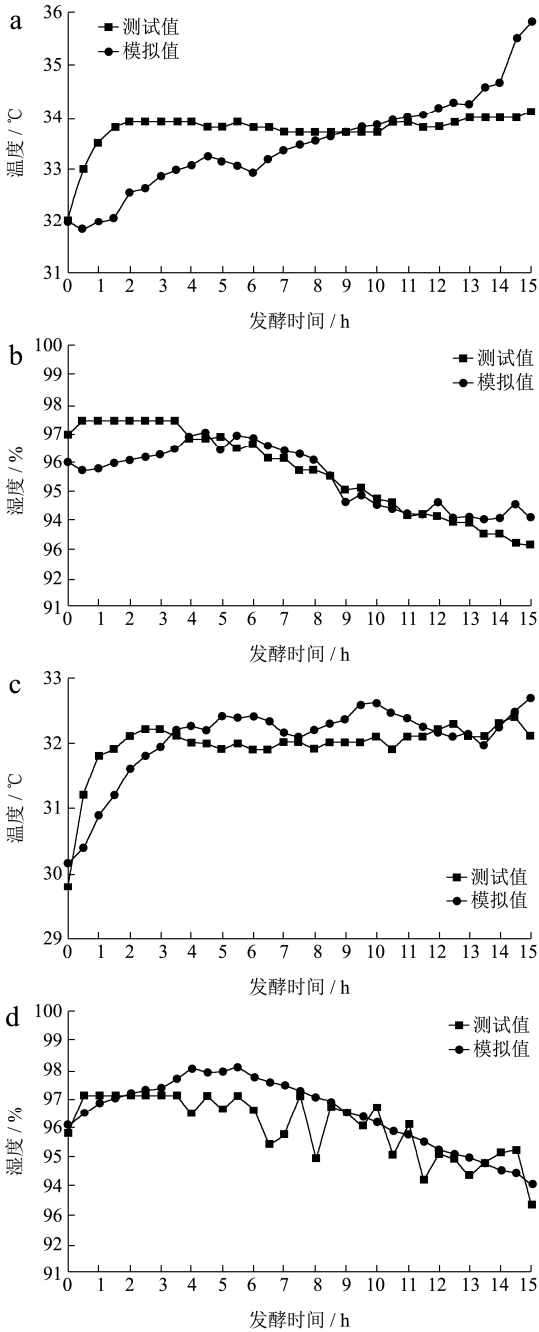


图 12 中挺期试验值与模拟值对比

Fig.12 Comparison of the experimental value with the simulated value in the mid-life

注: a: 上层 4 号点温度试验值与模拟值对比; b: 上层 4 号点湿度试验值与模拟值对比; c: 中层 7 号点温度试验值与模拟值对比; d: 中层 7 号点湿度试验值与模拟值对比。

为了验证模拟结果准确性,同时由于发酵过程温湿度变化缓慢,故选取较有代表性的中层7号点,上层4号点每隔1h进行试验值与模拟值的对比。上缓期及中挺期试验结果与模拟结果的对比分别如图11、图12所示。

由图11可知,在0~7h时,由于曲块发酵自然对流,曲房环境温度稳定缓慢上升,8~12h时,由于外界环境温度降低,曲房内环境温度由于与外界对流换热略微降低,12~18h,温度继续上升。该阶段,相对湿度保持稳定上升趋势,符合上缓期温湿度变化规律。房内温度测试值与模拟值平均相对误差为2.29%,最大相对误差为6.17%;相对湿度平均误差为1.14%,最大相对误差4.32%。其中温度在8~10h出现较大偏差,是由于在此期间人员进入房间后开关门窗观测所致,温度小幅下降,中层7号点较之其他点更加靠窗,故而下降更为明显。

由图12可知,由于中挺期前,采取了翻曲的操作,故在中挺期后温度上升较快,在约3h时达到最高,后保持动态稳定,与中挺期曲块温度变化类似;相对湿度在达到98%最大值后缓慢下降至93%,是由于发酵进入中挺期后曲块间发酵能力变弱,曲药内部产湿效率下降。房内温度测试值与模拟值平均相对误差为3.39%,最大相对误差7.74%;相对湿度平均相对误差为2.18%,最大相对误差8.42%。

由图11及图12可以看出,发酵状态下曲房内温湿度变化模拟值与测试值整体趋势较为一致,曲房上缓期及中挺期环境温湿度数值模拟具有科学性和参考性,出现偏差的主要原因在于模型简化及传感器精度问题,此外,曲块摆放方式及曲形状均会对模拟结果产生影响。

7 结论

本文建立了发酵曲房等比例模型,结合多孔介质与组分输送模型,利用Fluent模拟研究了大曲发酵过程中曲房内温湿度场分布通过模拟计算与实验验证得出以下结论:

(1)大曲发酵的上缓及中挺期,曲药自身发酵产热及通过墙壁向外散热对曲房内环境温度场影响较大,使得曲药发酵及上方稻草区域温度偏高,曲房内靠近墙壁附近温度偏低,总体上呈现出中层环境温度高于上层环境温度。

(2)由于曲块发酵及稻草区域温度较高,热空气密度较小,由曲房下层向上层浮动,同时带动空气中的水分上移,形成了上层相对湿度高于中层的分布情况。

(3)通过数值模拟与试验验证相结合的方法,经过对比,数值模拟结果与试验值较为吻合:上缓期及中挺期的仿真结果与实测结果温度最大误差为7.74%,相对湿度最大误差为8.42%,均小于10%的误差允许范围,证明了曲房环境的对流换热及传质计算有足够精度。通过解析不同发酵阶段曲房环境温湿度分布规律及差异性,为后续曲房风控策略提供模型参考,通过模拟仿真可获得曲房内其他未检测区域的温湿度数据。同时能够为下一步温湿度传感器位置的优化研究提供理论基础。

参考文献

- [1] 邱增平,王亚平,李博艺,等.温度对高温大曲液态陪菌过程菌群结构的影响[J].中国酿造,2017,5(36):30-35
QIU Zeng-ping, WANG Ya-ping, LI Bo-yi, et al. Effect of temperature on the structure of bacteria in high temperature daqu liquid fermentation process [J]. China Brewing, 2017, 5(36): 30-35
- [2] FAN Yi, HUANG Xiao-ning, CHEN Jingyu, Han, et al. Formation of a mixed-species biofilm is a survival strategy for unculturable lactic acid bacteria and *saccharomyces cerevisiae* in Daqu, a Chinese traditional fermentation starter [J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 138
- [3] 杨国华,邱树毅,黄永光.酱香白酒生产中产香微生物研究[J].中国酿造,2011,30(4):24-27
YANG Guo-hua, QIU Shu-yi, HUANG Yong-guang. Study on microorganism of maotai-scented liquor production [J]. China Brewing, 2011, 30(4): 24-27
- [4] 黄奥云,高瑜翔.曲房温湿度智能监控系统的设计与实现[J].微型机与应用,2016,35(22):95-97
HANG Ao-yun, GAO Yu-xiang. Design and implementation of intelligent monitoring system for temperature and humidity of qufang [J]. Microcomputer & Applications, 2016, 35(22): 95-97
- [5] 黄亚东,杨猛.架子曲培养试验及对酒品质影响的研究[J].现代食品科技,2013,29(1):127-129
HANG Ya-dong, YANG Meng. Culture experiment of shelf qu and its influence on wine quality [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(1): 127-129
- [6] 张崇军,隋明,吴霞,等.浓香型大曲白酒生产工艺探讨[J].粮食与食品工业,2018,25(2):62-65
ZHANG Chong-jun, SUI Ming, WU Xia, et al. Discussion on the production technology of luzhou-flavor daqu liquor [J]. Food and Food Industry, 2018, 25(2): 62-65
- [7] LIU Ya-jiao, HUANG Guang-qin, LU Jun, et al. A novel 2-D

- ring-tubes model and numerical investigation of heat and moisture transfer around helix ground heat exchanger [J]. *Geothermics*, 2020, 85: 101789
- [8] ZHAO Hai-tao, JIANG Kai-di, YANG Rui, et al. Experimental and theoretical analysis on coupled effect of hydration, temperature and humidity in early-age cement-based materials [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 146: 118784
- [9] 郭嘉明,吕恩利,陆华忠,等.冷藏运输厢体结构对场影响的数值模拟[J].农业工程学报,2012,28(增刊1):74-80
- GUO Jia-ming, LYU En-li, LU Hua-zhong, et al. Numerical simulation of the influence of refrigerated carriage structure on the flow field [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2012, 28(suppl. 1): 74-80
- [10] WANG Yi, WU Song-heng, YANG Yang, et al. Evaporation and movement of fine droplets in non-uniform temperature and humidity field [J]. *Building and Environment*, 2019, 150: 75-87
- [11] 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 Guo-qiang, JIA He-ming, ZHANG Sen, et al. Temperature and humidity field analysis and sensor optimal layout in micro plant factory [J]. *Forest Engineering*, 2019, 35(2): 61-68
- [12] 郭嘉明,方思贞,曾志雄,等.管道式加湿装置湿度场分布的数值模拟及试验验证[J].农业工程学报,2015,16(31):57-64
- GUO Jia-ming, FANG Si-zhen, ZENG Zhi-xiong, et al. Numerical simulation and experimental verification of humidity field distribution in pipe humidifier [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2015, 16(31): 57-64
- [13] 杨娇.大孔隙率多孔介质渗透率与流动特性的分形理论研究[D].南昌:华东交通大学,2016
- YANG Jiao. Fractal theory of permeability and flow characteristics of large porosity porous media [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2016
- [14] Behnam Rajabzadeh, Mohammad Hojaji, Arash Karimipour. Numerical simulation of forced convection in a bi-disperse porous medium channel by creating new porous micro-channels inside the porous macro-blocks [J]. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2019, 29(11): 4142-4166
- [15] 巩剑南,王启立,杨娜娜,等.多孔介质渗透性能的研究进展[J].渗流力学进展,2019,9(2),9-16
- GONG Jian-nan, WANG Qi-li, YANG Na-na, et al. Research progress of porous media permeability [J]. *Progress in Seepage Mechanics*, 2019, 9(2), 9-16
- [16] 胡坤.ANSYS CFD入门指南计算流体力学基础及应用[M].北京:机械工业出版社,2019
- HU Kun. Foundation and Application of Computational Fluid Dynamics in Introduction Guide to ANSYS CFD [M]. Beijing: China Machine Press, 2019
- [17] 胡坤.ANSYS Fluent实例详解[M].北京:机械工业出版社,2019
- HU Kun. Detailed Explanation of Fluent ANSYS [M]. Beijing: Mechanical Engineering Press, 2019
- [18] S. Mauro, R. Lanzafame, S. Brusca, et al. Unsteady computational fluid dynamics analysis of the hydrodynamic instabilities in a reversible Francis turbine used in a storage plant [J]. *Heliyon*, 2019, 5(9): e02441
- [19] 侯山山,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 Shan-shan, HUANG Dan-ping, ZHANG Xin-hao, et al. Research and development of labview-based intelligent qufang measurement and control system [J]. *Food Industry*, 2018, 39(5): 234-238
- [20] 何凯强,庄春龙,杨小凤,等.送风相对湿度对冷藏集装箱内温湿度场的影响[J].兵器装备工程学报,2017,10(38):97-103
- HE Kai-qiang, ZHUANG Chun-long, YANG Xiao-feng, et al. Influence of relative humidity of air supply on temperature and humidity field in reefer container [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 10(38): 97-103
- [21] 邓书辉,施正香,李保明.低屋面横向通风牛舍温湿度场CFD模拟[J].农业工程学报,2015,31(9):209-214
- DENG Shu-hui, SHI Zheng-xiang, LI Bao-ming. CFD simulation of temperature and humidity field in low roof transverse ventilation cowshed [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2015, 31(9): 209-214
- [22] Seo I H, Lee I B, Moon O K, et al. Modelling of internal environmental conditions in a full-scale commercial pig house containing animals [J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 111(1): 91-106
- [23] 刘红光,罗斌,申士杰,等.秸秆建材的研究与发展现状概述[J].林业机械与木工设备,2019,47(5):4-12
- LIU Hong-guang, LUO Bin, SHEN Shi-jie, et al. Overview of research and development status of straw building materials [J]. *Forestry Machinery and Woodworking Equipment*, 2019, 47(5): 4-12