

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80332

基于非平衡热模拟的粮糟摊晾工艺优化

张 超¹ 陈 涛^{1,2} 周中林² 杨 健³

(1. 泸州老窖集团有限责任公司, 四川 泸州 646000; 2. 醉清风酒业股份有限公司, 四川 泸州 646000;
3. 浙江大学能源工程学院, 浙江 杭州 310013)

摘要: [目的] 提高粮糟摊晾温度控制的自动化程度。[方法] 采用 SST $k-\omega$ 湍流模型及粮糟非平衡热模型进行理论分析, 利用 Fluent 软件仿真运算并结合工艺验证, 探究粮糟摊晾过程中的温度场分布规律, 并对摊晾工艺进行优化。以摊晾完出料温度符合工艺要求的程度为评价标准, 分析粮糟层厚度、板链行进速度以及排风量对空气流动分布、温度场分布及粮糟在整个行进过程中的温度变化情况。[结果] 经过分析, 料层厚度对摊晾出料温度存在显著影响, 板链行进速度以及排风量的影响次之, 分别确定了出料温度对粮糟处理量和排风量的关系式, 便于工艺变更时的出料温度预测。[结论] 经工艺验证, 非平衡热模拟方法对摊晾过程仿真准确有效。该摊晾机最佳的工艺条件为粮糟摊晾厚度 20 cm, 板链行进速度 0.150 m/s, 排风量 5 000 m³/h。

关键词: 粮糟; 非平衡热模型; Fluent; 摊晾工艺; 温度场

Study of grain spreading and cooling process based on non equilibrium thermal simulation

ZHAO Chao¹ CHEN Tao^{1,2} ZHOU Zhonglin² YANG Jian³

(1. Luzhou Laojiao Group Co., Ltd., Luzhou, Sichuan 646000, China; 2. Zuiqingfeng Liquor Co., Ltd., Luzhou, Sichuan 646000, China; 3. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310013, China)

Abstract: [Objective] To improve the automation level of the temperature control of grain cooling. [Methods] Using SST $k-\omega$ turbulence model and non-equilibrium thermal model to conduct theoretical analysis. Fluent was used for simulation and combined with process validation to explore the temperature distribution law during the process of grain spreading and cooling, and to optimize the spreading and cooling process via Univariate analysis and multivariate orthogonal analysis. Based on the degree how the discharge temperature meets the process requirements, and analyzed the impact of the thickness of the grain layer, the speed of the plate chain movement, and the impact of the exhaust air volume on the air flow distribution, temperature field distribution, and the temperature changes during the entire grain movement process. [Results] After analysis, it was found that the thickness of the material layer has significant impact on the discharge temperature, the speed of the plate chain movement and the exhaust air volume have secondary impacts. The relationship equations between the discharge temperature and the grain residue processing capacity, and exhaust air volume were determined, which were convenient for predicting the discharge temperature in case of process changes. [Conclusion] Through process verification, the non-equilibrium thermal simulation method is accurate and effective in simulating the spreading and cooling process. The optimal process conditions for this spreading and cooling machine are about 20 cm in thickness of grain, 0.15 m/s in plate chain movement and 5 000 m³/h exhaust air volume.

Keywords: grain; non-equilibrium thermal model; Fluent; spreading and cooling process; temperature field

粮糟摊晾是白酒酿制工艺中的重要环节, 是控制粮糟入槽水分和温度的重要操作步骤^[1]。随着酿酒科技的进步和学科间的广泛融合, 摊晾工艺从人工逐渐发展到

机械化, 如现阶段使用最广泛的链板式摊晾机, 大大提高了摊晾效率, 降低了工人劳动强度^[2]。近年来, 滚筒式摊晾设备被广泛应用^[3]。

基金项目: 科技部国家重点研发计划 (编号: 2021YFB2601601); 浙江省科技计划项目 (编号: 2023C03175)

通信作者: 杨健 (1968—), 男, 浙江大学副教授, 博士。E-mail: zdhjkz@zju.edu.cn

收稿日期: 2024-04-10 **改回日期:** 2024-09-07

随着机械化摊晾设备的引入,摊晾方法操作简单,工艺控制稳定,但仍存在降温不均匀或波动大、工艺难匹配、机械操作带来酒糟物化性质破坏及酒体质量下降等问题^[4]。目前,有关摊晾工艺的研究多集中于酒糟摊晾的应用^[5],而针对摊晾过程中物质变化规律、影响因素及其对粮糟品质影响的系统研究尚未见报道。郑昌宁^[6]致力于摊晾机结构设计与试验研究;黄汉清^[7]基于 CFD 对风室进行结构优化,而对动态摊晾过程中的热模拟却未见报道。研究针对某公司摊晾工艺中存在的问题,拟通过 Fluent 探索粮糟摊晾工艺动态热模拟的方法、分析不同摊晾工艺对摊晾机出料温度的影响,确定相互影响规律,旨在为摊晾工艺设备的研发、设计及优化提供依据。

1 粮糟摊晾工艺流程

1.1 粮糟摊晾工艺

生产流程:出粮—泡粮—蒸煮—摊凉加曲—糖化—粮糟混糟—二级摊晾—入槽发酵—上甄蒸酒。整个工艺过程存在三类摊晾:常温摊晾、一级摊晾及二级摊晾,摊晾设备包括多孔链板、风机、风箱与排风口(图1),粮糟平摊在板链上,板链下方的风机鼓风经风箱从板链下方吹过粮糟层,然后从排风口排出,从而实现降温,根据实际降温要求组合使用单个或多个风箱入口单元,并对所有单元的风量进行阵列控制,使粮糟温度最终满足工艺参数要求。

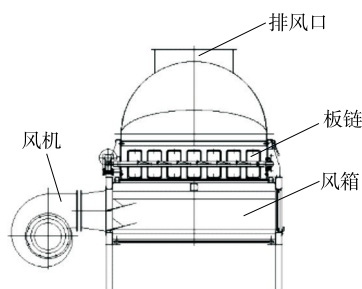


图1 摊晾设备结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of the structure of the spreading and drying equipment

常温摊晾将出蒸锅的高粱以及高温混合粮糟进行快速降温至 45℃ 左右;一级摊晾将常温摊晾后的混合粮糟从 45℃ 降至 35℃;二级摊晾将一级摊晾后混合粮糟(35℃)降至适宜入槽发酵的温度(22℃左右),再入槽发酵。

1.2 粮糟摊晾工艺问题

由于摊晾工艺中的影响因素较复杂,实际操作中多以经验为主^[8],在不同产地的高粱切换或生产新工艺调整时,多款摊晾设备带来的工艺细节调整复杂,导致摊晾后温度时有不合格现象,为确保酿酒品质,需要进行小批试

产,却造成成本增加且影响生产效率。为解决此问题,需研究各工艺参数对摊晾温度的影响,得出最佳入槽温度控制参数,以指导现场新工艺调整并实现全自动化调控。

现场实践经验总结得出,影响摊晾效果的因素主要有链板行进速度、粮糟的物理性质^[9]、粮糟处理量、通风风量及温度,通过调控确保各位置的粮糟温度均匀,提高酿酒质量。

考虑到二级摊晾入槽的粮糟温度对发酵及酒品质量有较大影响,并起到温度纠偏的作用,以二级摊晾系统为研究对象,拟通过 CFD 仿真研究料层厚度、板链速度与冷却排风量对其粮糟摊晾温度的影响,获得料层厚度与板链速度的最优比,将入槽温度尽量趋近 22℃。尝试确定相互关系和摊晾温度预测方法,并类推到各摊晾机的出料温度控制,以指导现场生产人员进行新原料、新工艺细节调整。

2 模型的建立

2.1 物理模型

二级摊晾设备长度为 21.4 m,板链宽度为 1.275 m,链板厚度为 1.5 mm;出风口直径 0.5 m,设计排风量约 5 000 m³/h,风箱内保持微正压 500 Pa,进风温度 7~10℃,相对湿度 70%。板链行进速度由电机运行频率控制,设计输送能力 25 m³/h,中途无翻转,在生产处理量一定下,粮糟层厚由板链行进速度来控制,为 15~25 cm。摊晾机物理模型如图 2 所示。

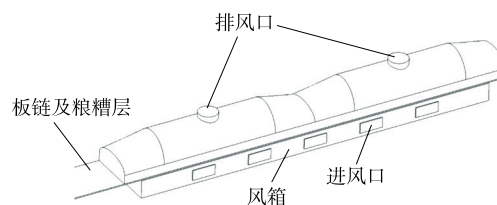


图2 摊晾机物理模型

Figure 2 Simulation model of spreading & cooling machine

对于粮糟而言,虽然存在微观层面相互碰撞而导致的热量传递现象,但是传热过程主要表现在粮糟与载体之间的少量热传导及粮糟内部的热传递,其对整个热量传递的影响较小^[10],研究重点关注热对流。

为简化数学模型,对摊晾设备作出如下假设:

- (1) 粮糟铺上链板后,链板的温度与粮糟温度一致,不锈钢链板的影响不予考虑。
- (2) 粮糟在摊晾过程中不存在翻料过程,故简化为全程粮糟与链板保持相对静止。
- (3) 带走热量的气流主要由抽风机抽走,鼓风机鼓风总量略大于抽风量,假定各风箱的微正压^[11]、风速均匀,且其风速由排风流量决定,多出部分为泄漏量,不予考虑。
- (4) 不考虑水汽蒸发带走的热量。

2.2 数学模型

摊晾机内传热过程满足连续方程、动量守恒方程和能量守恒方程,连续方程和动量守恒方程描述换热流动过程,能量方程描述热量传递^[12]。考虑试验模拟的流动特性较复杂,采用 SST $k-\omega$ 湍流模型^[13]能更好地表现其流动特性。控制方程式为^[14-15]:

(1) 连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

式中:

u_i —— x, y, z 3 个方向的流速分量, m/s;

x_i —— x, y, z 3 个方向向量, $i=1, 2, 3$ 。

(2) 动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i V) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{x_1 x_i}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{x_2 x_i}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{x_3 x_i}}{\partial x_3} + \rho f_{x_i}, \quad (2)$$

式中:

ρ ——流体密度, kg/m³;

V ——合成速度, m/s;

p ——压力, Pa;

τ ——黏性应力, Pa·s;

ρf_{x_i} —— x, y, z 方向的体积力, N。

(3) $k-\omega$ 湍流模型

k 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \mu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon, \quad (3)$$

ω 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_\omega \mu_t \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + P_\omega - C_1 \rho \omega^2, \quad (4)$$

式中:

k ——湍流动能, m²/s²;

P_k ——湍流能量产生项;

P_ω ——湍流耗散率产生项;

μ ——运动黏度, m²/s;

σ_k, σ_ω ——修正系数;

ϵ ——湍流耗散率;

ω ——湍流耗散率;

C_1 ——限制因子。

(4) 能量方程:链板从低到高行进,通过整个风箱,整个过程粮糟均经过相同温度的风箱,粮糟内部温度与冷却空气无法达到局部平衡,即粮糟的温度 T_r 与空气的温度 T_a 的局部温差不能忽略,故仿真分析采用多孔介质非平衡条件下^[16-17]的传热模型。

流体(空气)能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_a c_m \epsilon T_a) + \nabla \cdot (\rho_a u_a h_a) = \nabla \cdot (k_{a, \text{eff}} \nabla T_a) + h_{ra} \alpha (T_r - T_a), \quad (5)$$

固体(粮糟)能量方程:

$$(1 - \epsilon) \rho_r c_r \frac{\partial T_r}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{r, \text{eff}} \nabla T_r) - h_{ra} \alpha (T_r - T_a), \quad (6)$$

式中:

c_m ——空气与粮糟综合比热容, J/(kg·°C);

c_r ——粮糟比热容, J/(kg·°C);

u_a ——空气流经粮糟的速度, m/s;

h_a ——对流换热系数, W/(m²·K);

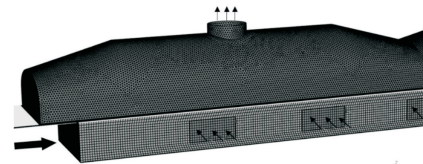
h_{ra} ——粮糟表面对流换热系数, W/(m²·K);

$k_{a, \text{eff}}, k_{r, \text{eff}}$ ——空气及粮糟的有效导热率, W/(m·K);

α ——渗透率, mD。

2.3 仿真模型

(1) 网格划分:采用分块技术,各块采用不同网格尺寸划分,粮糟层和风箱流体域为结构化网格,而粮糟层上方排气流体域为高质量的非结构化网格(图3)。



粗箭头表示板链行进方向

图3 摊晾机仿真模型及网格

Figure 3 Simulation model and grid of spreading and drying machine

(2) 边界条件:进气口正风压 500 Pa,排风口排风量为 3 500~5 000 m³(计算时换算成流速),其他结构表面设定为壁面边界条件(绝热壁面)。

(3) 混合物质比热容计算:按式(7)计算。

$$C_r = \sum_{i=1}^n m_i C_i, \quad (7)$$

式中:

C_r ——混合物比热容, J/(kg·°C);

m_i ——不同组分的含量, %;

C_i ——不同组分的比热容, J/(kg·°C)。

粮糟混合物由高粱、糠壳和水组成,各成分的质量百分比及比热容见表1,经计算,混合物比热容 $C_r = 3 006 \text{ J/(kg·°C)}$ 。

(4) 模型阻力系数计算:按式(8)、式(9)进行计算。

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{150 (1 - \gamma)^2}{D_r^2 \gamma^3}, \quad (8)$$

$$C_2 = \frac{300 (1 - \gamma)^2}{D_r \gamma^3}, \quad (9)$$

表 1 水、高粱和糠壳的比热容

Table 1 Specific heat capacity of water, sorghum, and husk

原料	比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	质量百分比/%
高粱	1.280	31.4
糠壳	1.722	11.2
水	4.200	57.4

式中:

$\frac{1}{\alpha}$ ——渗透率的倒数(黏滞阻力系数),Pa·s;

γ ——粮糟的孔隙率,取 53.7%;

D_r ——粮糟颗粒的平均当量值,取 1.8 mm;

C_2 ——惯性阻力系数。

(5) 仿真方案:主要考察摊晾机在不同处理量(板链速度和料层厚度)与排风量条件下的温度关系,仿真方案设计:板链行进速度分别为 0.100,0.150,0.178(现场工艺实际经验值),0.200,0.300 m/s;粮糟层厚度分别为 15,20,25 cm,排风量分别为 3 500,4 000,4 500,5 000 m³/h。

3 结果与讨论

3.1 仿真结果及验证

经过非平衡热模拟,在粮糟层厚度、板链速度及排风量变化不大的情况下,摊晾机内部流场的速度分布和温度分布基本一致,如图 4 所示,冷却空气入口及排风口的速度较大,摊晾机内部、风箱内的速度明显较低,主要是粮糟层的阻碍,使空气在风箱内形成滞流;而粮糟层上方空间,由于排风机的抽气作用,速度梯度较大,排风口处速度最大。

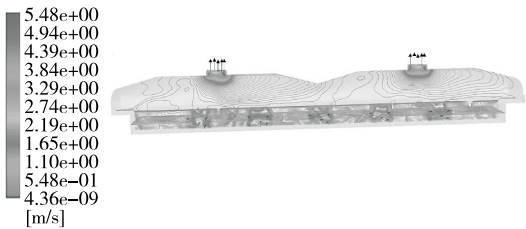


图 4 摊晾机中心面速度分布图

Figure 4 Speed distribution of the center surface of the spreading and drying machine

如图 5 所示,粮糟层下方的风箱内温度基本保持冷却风的温度,尤其靠近粮糟的空气温度高于风箱内部,越靠近板链入口越明显。粮糟层及上方空间能明显看出右侧温度小于左侧,这是因为随着板链由左向右行进,粮糟层温度逐渐降低,渗透的空气温度也降低,针对这一规律,从能效角度考虑,可以对风箱进行分割单元并实施阵列

控制,使左侧风箱冷却风量更大或冷风温度更低,右侧调低风量或提高冷风温度,达到最佳状态。

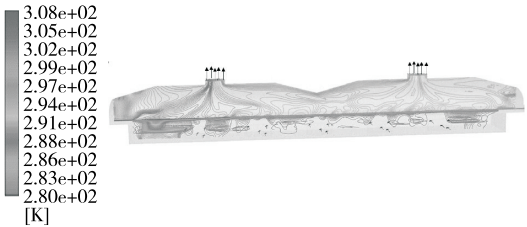


图 5 摊晾机中心面温度分布图

Figure 5 Temperature distribution of the center surface of the spreading and drying machine

经验证,按目前生产现场料层厚度为 20 cm,板链速度为 0.178 m/s 的生产工艺,热模拟的摊晾后温度为 22.36 ℃,而实际生产数据如图 6 所示,平均出料温度为 22.10 ℃,模拟结果与实际温度误差为 1.18%,证明采用多孔介质的非平衡热模拟粮糟摊晾的方法正确有效。

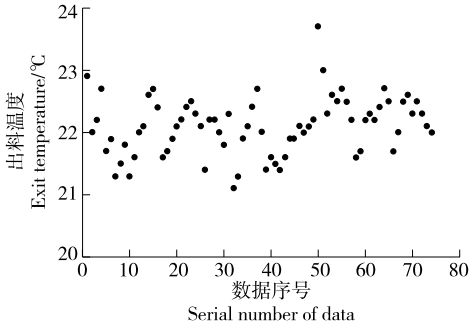


图 6 应用试验的出料温度

Figure 6 Exit temperature from experiments

3.2 摊晾温度与粮糟处理量的关系

板链速度越快,料层越厚,降温速度越慢,反之亦然。而在实际生产中粮糟摊晾量与速度及料层厚度直接相关。

(1) 板链速度的影响:针对不同板链速度(0.100,0.150,0.178,0.200,0.300 m/s),在粮糟层厚 20 cm 的条件下,分析粮糟层横向截面各点从进入摊晾机到完成摊晾的整个过程温度随时间的变化情况,横向截面各监测点位置如图 7 所示。

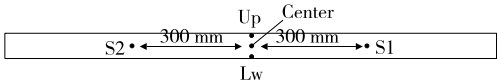


图 7 粮糟层横向截面 5 个监测点的位置图示

Figure 7 Location of 5 monitoring points on the transverse section of the grain layer

如图8所示,当粮糟层厚20 cm时,底部点的温度普遍比中间及以上各点的低,这是因为冷空气在下方风箱最先吹入粮糟底部,所以温度降得快,在粮糟的黏滞和惯性阻力作用下,空气不容易进入粮糟内部,其中间偏上部

分的温度较为接近;随着板链的行进,各点的温度逐渐冷却而降低,但随着粮糟截面进入到摊晾机中间部分,由于空气被两个排气口抽得往两侧流动,中间部分冷却空气流动少,故粮糟温度有所回升,但变化不大。

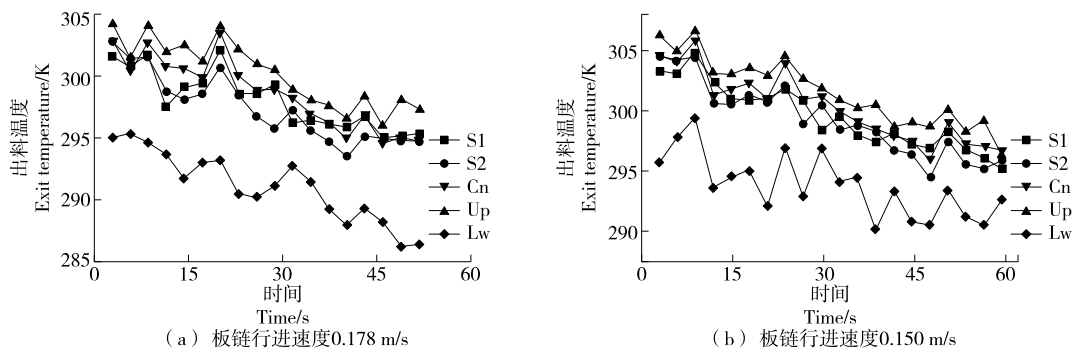


图8 不同时间下粮糟截面温度变化曲线

Figure 8 Temperature variation curve of grain residue cross-section at different times

通过对不同板链速度下粮糟出粮平均温度的对比如图9所示,速度为0.15~0.20 m/s时满足工艺要求的(22 ± 2) °C,而速度太大,摊晾降温不够;速度太小则摊晾时间过长,容易冷却过度,均不符合工艺要求。

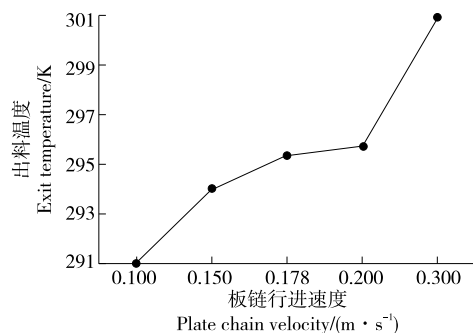


图9 不同板链速度下的出粮平均温度对比

Figure 9 Comparison of average grain temperature at different plate chain speeds

(2) 粮糟料层厚度的影响:针对不同粮糟层厚(15, 20, 25) cm,在同样的行进速度下,厚度越小,出粮平均温度越低。由图10可知,当粮糟厚度为15~20 cm时,出料温度均符合工艺要求;当粮糟厚度 >20 cm时,摊晾效果迅速下降。

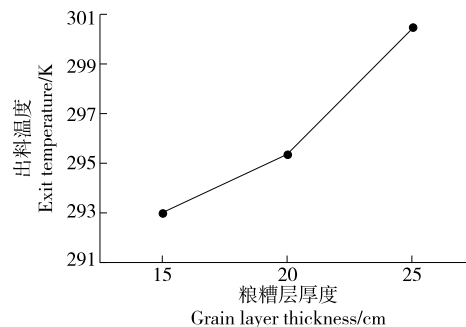


图10 不同料层厚度的摊晾后温度

Figure 10 Temperature after air drying for different material layer thicknesses

表2 不同处理量对应的出料温度

Table 2 Temperature corresponding to different processing capacities

层厚/cm	板链速度/(m·s ⁻¹)	处理量/(m ³ ·h ⁻¹)	温度/K
20	1.000	84.96	291.00
15	1.780	113.42	293.00
20	1.500	127.44	294.00
20	1.780	151.23	295.36
20	2.000	169.92	295.72
25	1.780	189.04	301.50
20	3.000	254.88	300.91

大。由表3和图12可知,当排风量 $<4\,500\text{ m}^3/\text{h}$ 时,摊晾效果不佳,无法满足工艺要求。因此,需要确保排风量在 $5\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 左右。

3.4 正交仿真设计

结合各单因素分析,以层厚、行进速度和风量为因

(3) 以粮糟处理量 Q 为综合因素,出料温度与处理量的对应关系见表2,其关系曲线如图11所示。由图11可知,除了厚度为25 cm对应的温度偏差较大外,其他点的误差较小,说明层厚超过一定程度后,摊晾效果迅速变差。

3.3 摊晾温度与排风量的关系

在处理量一定的条件下,排风量对摊晾温度影响较

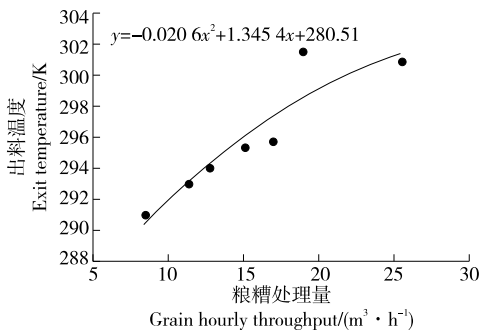


图 11 出料温度与处理量的关系曲线

Figure 11 Relationship curve between discharge temperature and processing capacity

表 3 不同排风量对应的出料温度

Table 3 Temperature corresponding to different exhaust volume

排风量/(m³·h ⁻¹)	排风速度/(m·s ⁻¹)	温度/K
3 500	2.48	298.53
4 000	2.83	298.14
4 500	3.18	297.90
5 000	3.54	295.36

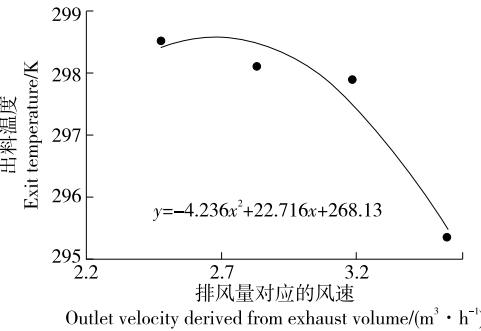


图 12 储量温度与排风量的关系曲线

Figure 12 Relationship curve between storage temperature and exhaust air volume

素,摊晾温度为指标,不考虑因素间的交叉作用,采用 $L_9(3^4)$ 正交试验优化各因素对摊晾温度的影响。正交试验因素水平见表 4,试验设计及结果见表 5。

由表 5 可知,各因素影响主次为层厚>板链行进速度>风量。考虑摊晾温度目标为 (295 ± 2) K,最趋近 295 K 的组合最优,根据正交试验结果,符合工艺条件的因子水平为层厚 20 cm,板链行进速度 0.150 m/s,风量保持 5 000 m³/h。

4 结论

针对粮糟摊晾新工艺下摊晾温度控制经验不足的问题,运用非热平衡模拟方法研究了摊晾机内粮糟料层温

表 4 正交试验因素水平表

Table 4 Orthogonal experimental factor levels

水平	A 层厚/cm	B 板链行进速度/(m·s ⁻¹)	C 风量/(m³·h ⁻¹)
1	15	0.150	4 500
2	20	0.178	4 750
3	25	0.200	5 000

表 5 正交试验设计及结果

Table 5 Design of orthogonal experiment and results

试验号	A	B	C	摊晾温度/K
1	1	1	1	298.85
2	1	2	2	296.04
3	1	3	3	296.35
4	2	1	2	295.77
5	2	2	3	295.36
6	2	3	1	296.79
7	3	1	3	297.53
8	3	2	1	298.89
9	3	3	2	300.67
k_1	296.08	296.38	297.18	297.29
k_2	295.97	296.76	297.49	296.79
k_3	299.03	297.94	296.41	297.00
R	2.95	1.17	0.76	0.29

度场的分布情况,模拟得出不同板链行进速度、料层厚度以及通风量下的出料温度。结果表明:将粮糟视为多孔介质,基于非平衡热模拟的方法能准确呈现摊晾过程的温度场分布并预测出粮温度。粮糟摊晾厚度 15~20 cm,板链行进速度 0.150~0.178 m/s,排风量 5 000 m³/h 时出料温度最符合工艺要求,最佳组合为厚度 20 cm,速度 0.150 m/s,风量 5 000 m³/h。由于白酒生产工艺过程中存在多个粮糟摊晾工艺过程,入粮温度以及粮糟的物理性质不同,后续研究应将典型的粮糟类型及入粮温度纳入分析,进一步研究出料温度与多个变量的耦合关系。

参考文献

[1] 潘大金,程伟,潘天全,等.白酒酿酒用带压蒸料及蒸汽回收利用设备系统的设计与应用研究[J].酿酒科技,2020(7): 17-21.
PAN D J, CHENG W, PAN T Q, et al. The design and application research of the equipment system for pressure distilling materials and steam recycling for Baijiu making[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2020(7): 17-21.
[2] 郑昌宁,张宿义,黄治国,等.酿酒生产摊晾控温装备的研究[J].酿酒科技,2021(6): 84-88.
ZHENG C N, ZHANG S Y, HUANG Z G, et al. Development

- of automatic grain cooling equipment for Baijiu production[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2021(6): 84-88.
- [3] 梅潇, 王伟, 刘海洋, 等. 大倾角螺旋输送机中物料颗粒的运动特性研究[J]. *机械设计与制造*, 2018(S2): 14-17, 21.
- MEI X, WANG W, LIU H Y, et al. Research on the motion characteristics of material particles in high angle spiral conveyors[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2018(S2): 14-17, 21.
- [4] 周金虎. 论传统白酒生产机械化智能化设备[J]. *酿酒*, 2017, 44(4): 21-23.
- ZHOU J H. Discussion on mechanized and intelligent equipment for traditional Baijiu production[J]. *Liquor Making*, 2017, 44(4): 21-23.
- [5] 邓皖玉, 许永明, 程伟, 等. 摊晾面积对酱香型白酒窖池产出差异性的影响[J]. *酿酒科技*, 2019(12): 32-35.
- DENG W Y, XU Y M, CHENG W, et al. The influence of the spreading area on the production difference of maotai flavor Baijiu pits[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2019(12): 32-35.
- [6] 郑昌宁. 螺旋输送式白酒糟醅摊晾机设计[D]. 宜宾: 四川轻化工大学, 2021: 41-53.
- ZHENG C N. Design of spiral conveyance type distiller's grains stall and cooling machine[D]. Yibin: Sichuan University of Science and Engineering, 2021: 41-53.
- [7] 黄汉清. 基于CFD仿真的酒醅自动摊凉机风室结构计算分析[J]. *科技新时代*, 2023(5): 45-51.
- HUANG H Q. Calculation and analysis of the wind chamber structure of the automatic fermented grain cooling machine based on CFD simulation[J]. *Popular Science*, 2023(5): 45-51.
- [8] 陈钦明. 粮糟自动摊晾设备的研发[J]. *海峡科学*, 2021(1): 46-48.
- CHEN Q M. Research and development of automatic spreading and drying equipment for grain residue[J]. *Straits Science*, 2021 (1): 46-48.
- [9] 吴生文, 林培, 肖美兰, 等. 机械化酿造车间摊晾过程标准化研究[J]. *酿酒科技*, 2017(10): 92-95.
- WU S W, LIN P, XIAO M L, et al. Standardized cooling in mechanized manufacturing workshops of Baijiu[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2017(10): 92-95.
- [10] 于洋, 蔚明强, 王尔杰, 等. 枸杞烘干箱温度场优化及仿真[J]. *食品与机械*, 2024, 40(1): 101-114.
- YU Y, WEI M Q, WANG E J, et al. Optimization and simulation analysis of temperature field of wolfberry drying box[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(1): 101-114.
- [11] 张良栋, 孟思栋, 田建平, 等. 浓香型固态发酵白酒自动上甄蒸馏装置研究[J]. *酿酒科技*, 2015(9): 94-97, 101.
- ZHANG L D, MENG S D, TIAN J P, et al. Automatic steamer distillation apparatus for Nongxiang Baijiu (liquor) by solid-state fermentation[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2015(9): 94-97, 101.
- [12] FRANÇOIS A, IBOS L, FEUILLET V, et al. In situ measurement method for the quantification of the thermal transmittance of a non-homogeneous wall or a thermal bridge using an inverse technique and active infrared thermography[J]. *Energy & Buildings*, 2021, 233: 233-242.
- [13] 张勇. 大比重气体在排风柜中的流动特性和受控效果研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021: 10-22.
- ZHANG Y. Study on the flow characteristics and controlled effect of large specific gravity gas in fume cabinet[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021: 10-22.
- [14] NICHOLSON G P, CLARK R P, CALCINA-GOFF M. Computational fluid dynamics as a method for assessing fume cupboard performance[J]. *Occupational Hygiene Society*, 2020, 44(3): 203-217.
- [15] 田东, 郭树国, 王丽艳. 基于ANSYS/CFX渐加速双螺杆设计及三维流场分析[J]. *食品与机械*, 2023, 39(6): 99-104.
- TIAN D, GUO S G, WANG L Y. Design and 3D flow field analysis based on ANSYS/CFX stepwise acceleration twin screw[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(6): 99-104.
- [16] 路朗, 辛成运, 刘忠鑫. 多孔介质局部非热平衡模型研究综述[J]. *热能动力工程*, 2019, 34(7): 1-8.
- LU L, XIN C Y, LIU Z X. A review of local non equilibrium thermal models in porous media[J]. *Thermal Power Engineering*, 2019, 34(7): 1-8.
- [17] 李鑫. 局部非热平衡条件下填充多孔介质的平板换热器耦合换热特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 36-52.
- LI X. Study on coupled heat transfer characteristics of a flat plate heat exchanger filled with porous media under local non thermal equilibrium conditions[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021: 36-52.