

## 多工位压曲机压制大曲成型工艺优化

高 剑, 田建平, 王开铸, 黄丹平, 罗惠波, 黄 丹, 吴相东

### Optimization of Molding Process of Daqu's Multi Position Press

GAO Jian, TIAN Jianping, WANG Kaizhu, HUANG Danping, LUO Huibo, HUANG Dan, and WU Xiangdong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070051>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于高光谱技术的羊肉含水率无损检测

Nondestructive detection of mutton moisture content based on hyperspectral technique

食品工业科技. 2018, 39(4): 215–218

#### 山楂微波干燥特性及含水率预测

Microwave Drying Characteristics and Moisture Content Prediction of Hawthorn

食品工业科技. 2021, 42(12): 32–38

#### 间歇超声辅助加快咸蛋腌制速度工艺优化

Intermittent Ultrasound Assisted in Speeding up the Pickling Speed of Salted Eggs

食品工业科技. 2018, 39(22): 204–211

#### 响应面-主成分分析法优化大曲发酵桑叶茶工艺

Optimization of Fermentation Technology of Daqu Mulberry Leaf Tea by Response Surface Method and Principal Component Analysis

食品工业科技. 2021, 42(17): 113–119

#### 基于模糊综合评判法优选冻梨工艺参数及糖酸含量研究

Optimal Processes for Frozen Pears(*Pyrus ussuriensis* Maxim.)Based on the Fuzzy Comprehensive Evaluation Method and Sugar and Acid Contents

食品工业科技. 2021, 42(2): 124–129,137

#### 盐含量对草鱼片冰温腌干特性的影响

Effect of salt concentration on properties of pickled and dried *Ctenopharyngodon idellus* fillets under low temperature

食品工业科技. 2018, 39(5): 287–290



关注微信公众号，获得更多资讯信息

高剑, 田建平, 王开铸, 等. 多工位压曲机压制大曲成型工艺优化 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 172–179. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070051

GAO Jian, TIAN Jianping, WANG Kaizhu, et al. Optimization of Molding Process of Daqu's Multi Position Press[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 172–179. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070051

· 工艺技术 ·

# 多工位压曲机压制大曲成型工艺优化

高 剑<sup>1</sup>, 田建平<sup>1,\*</sup>, 王开铸<sup>1</sup>, 黄丹平<sup>1</sup>, 罗惠波<sup>2</sup>, 黄 丹<sup>2</sup>, 吴相东<sup>1</sup>

(1. 四川轻化工大学机械工程学院, 四川宜宾 644005;

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 644005)

**摘要:** 大曲是白酒酿造过程中的糖化剂、发酵剂和生香剂, 其质量的好坏将直接影响白酒的品质。为确定多工位压曲机压制大曲的最佳成型工艺参数, 本文以大曲表面提浆效果面积比和大曲内部含水率均匀因子为评价指标, 进行响应面试验, 研究了不同压制速度、踩踏次数与成型次数 3 个因素对大曲提浆效果和含水率均匀度的影响。结果表明, 各工艺参数对大曲提浆效果的影响作用依次为: 踩踏次数>成型次数>压制速度, 对大曲含水率均匀度的影响作用依次为: 压制速度>踩踏次数>成型次数。最佳工艺参数为: 压制速度 A=20 mm/s, 踩踏次数 B=20 次, 成型次数 C=7 次。在该工艺参数条件下压制大曲得到的大曲表明提浆效果面积比为 85.66%, 大曲内部含水率均匀因子为 6.37。本研究为白酒大曲成型工艺提供了生产性和实用性的技术支持。

**关键词:** 大曲成型, 工艺参数, 提浆效果, 含水率

中图分类号: TS261

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2022)08-0172-08

DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2021070051](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070051)

本文网刊:



## Optimization of Molding Process of Daqu's Multi Position Press

GAO Jian<sup>1</sup>, TIAN Jianping<sup>1,\*</sup>, WANG Kaizhu<sup>1</sup>, HUANG Danping<sup>1</sup>, LUO Huibo<sup>2</sup>, HUANG Dan<sup>2</sup>,  
WU Xiangdong<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644005, China;

2. Liquor Marking Biological Technology and Application of Key Laboratory of Sichuan Province, Yibin 644005, China)

**Abstract:** Daqu is a saccharifying agent, starter culture agent and aroma generating agent in the process of liquor brewing. The quality of Daqu directly affects the quality of liquor. In order to find the Daqu's optimal molding process parameters during the pressing process of Daqu's multi position press, this paper deployed area ratio of surface pulping and the uniform factor of internal moisture content of Daqu as evaluation indexes. Surface response experiment studied the influence of three factors of different pressing speed, stepping times and forming times on Daqu's pulp extraction effect and moisture content uniformity. The research results showed that the impact of each process parameter on the pulping effect of Daqu ranked as follows: Stepping times>forming times>pressing speed. The influence on the uniformity of Daqu water content was pressing speed>stamping times>forming times. The best process parameters were: Pressing speed (A)=20 mm/s, times of trampling (B)=20, and times of molding (C)=7. Under the conditions of the process parameters, the Daqu obtained by pressing Daqu showed that the effective area ratio of pulping was 85.66%, and the uniformity factor of water content inside Daqu was 6.37. The thesis provided productive and practical technical support for the standardization and industrialization of liquor Daqu pressing production.

**Key words:** Daqu molding; process parameters; pulping effect; moisture content

大曲制酒是我国酿酒的独特工艺<sup>[1]</sup>。近年来, 在白酒“158 计划”的推动下, 白酒行业不断开拓新技

术, 创新酿酒工艺<sup>[2]</sup>。在白酒生产过程中, 制曲是整个白酒生产工艺中的关键工序之一, 大曲成型的效果

收稿日期: 2021-07-06

基金项目: 四川省科技厅重点项目 (2019YJ0475)。

作者简介: 高剑 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 固态酿造智能化技术, E-mail: [echobiu@126.com](mailto:echobiu@126.com)。

\* 通信作者: 田建平 (1965-), 男, 本科, 教授, 研究方向: 固态酿造技术及其装备, E-mail: [tjp893@126.com](mailto:tjp893@126.com)。

将直接影响到大曲的质量<sup>[3~4]</sup>。虽然机械化制曲提高了大曲成型的效率, 改善了工作环境; 但机械化制曲与人工踩曲的质量存在着差距<sup>[5]</sup>。为了提高机械化制曲的质量, 必须要对机械化大曲成型工艺参数进行优化<sup>[6]</sup>。

目前国内对压制成型工艺的研究主要集中在农业纤维物料(如玉米秆<sup>[7]</sup>、棉秆<sup>[8]</sup>、小麦秆<sup>[9]</sup>)、塑料<sup>[10~11]</sup>、复合材料<sup>[12~13]</sup>以及金属材料<sup>[14~15]</sup>的压制成型工艺参数优化和研究。当前, 大曲工艺方面的研究主要集中在小麦粉粹度<sup>[16]</sup>, 对大曲的研究主要集中在大曲温度<sup>[17~18]</sup>、含水率<sup>[19~20]</sup>、酸度<sup>[21]</sup>等方面。但是对大曲的成型工艺研究并不多, 尤其是关于大曲压制速度、踩踏次数和成型次数等成型工艺参数对大曲质量的影响鲜有报道<sup>[22]</sup>, 生产过程也还未形成现有的成型理论, 无法进行直接生产指导<sup>[23]</sup>, 所以必须深入研究成型工艺参数对大曲质量的影响, 以加快实现大曲自动化生产进程。

本文应用响应面分析方法深入研究了大曲成型工艺参数对大曲质量的影响, 确定多工位压曲机大曲成型的最佳工艺参数, 以期为今后大曲生产工艺和目前机械化成型提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

优质小麦 均来自四川宜宾某酒厂, 该批小麦经过强行干燥, 含水率为 10%。

多工位大曲成型实验台 四川轻化工大学机械工程学院研制如图 1, 其主要设计参数如表 1; SX-150 盘式研磨机 湖北省石首市四新机械厂; DGX-9053B-1 小型电热烘干机 上海福玛实验设备有限公司; FX17E 高光谱成像系统 芬兰 Specim 公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 大曲制作生产流程和操作要点

##### 1.2.1.1 生产流程 浓香型大曲生产过程较为复杂,

其流程如图 2 所示。大曲生产过程中的润粮、粉碎与拌料机械化水平较高。

**1.2.1.2 操作要点** 首先, 按照 100:5 的比例将小麦与水均匀混合, 其中水为 80°左右的热水, 之后静置等待大约 4 h, 将其倒入盘式研磨机里面研磨, 研磨好的小麦见图 3。最后用电子计重称称取质量为 3541.39 g 研磨好的小麦, 用量筒量取 1485.61 g 的水, 将小麦与水均匀混合搅拌, 即可完成实验中一块大曲所需的原料制备(一块大曲原料 5 kg, 含水率 39%)。

制备好的原料利用多工位大曲实验台进行大曲成型, 多工位大曲实验台其设计参数如表 1, 结合本大曲成型设备对成型工艺参数的分析, 发现压制速度、踩踏次数与成型次数这三个参数对大曲品质都存在不同程度的影响, 所以将这三个工艺参数纳入多工位大曲成型工艺参数的优化因素中。

表 1 多工位大曲成型实验台主要设计参数

Table 1 Main design parameters of the multi-station Daqu forming test bench

| 参数名称        | 参数值                   |
|-------------|-----------------------|
| 外形尺寸(长×宽×高) | 2400 mm×60 mm×1900 mm |
| 下压速度        | 20~50 mm/s            |
| 上升最大速度      | 60 mm/s               |
| 液压缸最大推力     | 8000 N                |
| 横踩工位行程      | 90~110 mm             |
| 纵踩工位行程      | 100~120 mm            |
| 成型工位行程      | 110~120 mm            |
| 曲盒大小        | 300 mm×190 mm×80 mm   |
| 电机功率        | 1.8 kW                |

**1.2.2 单因素实验** 在一些研究成型设备与大曲成型相关的文献中, 得出大曲成型的压制速度区间为 6~45 mm/s, 成型次数为 1~9 次<sup>[24~26]</sup>, 但踩踏次数目前还未有相关的研究。

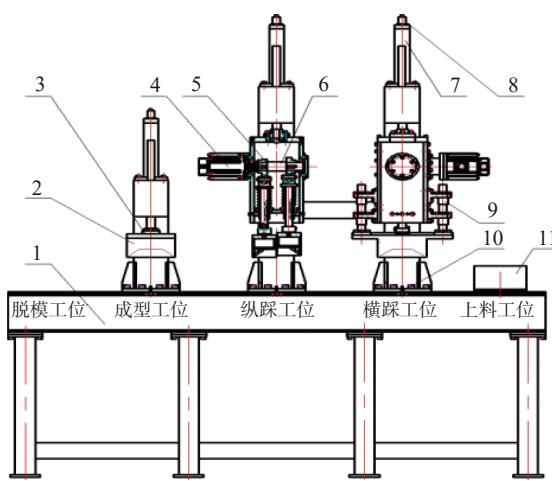


图 1 多工位大曲成型实验台

Fig.1 Multi-station Daqu forming experiment platform



注: 1. 机架; 2. 锤头; 3. 压力传感器; 4. 伺服电机; 5. 凸轮; 6. 传动轴; 7. 液压缸; 8. 位移传感器; 9. 导向轴; 10. 模盒定位机构; 11. 模盒。

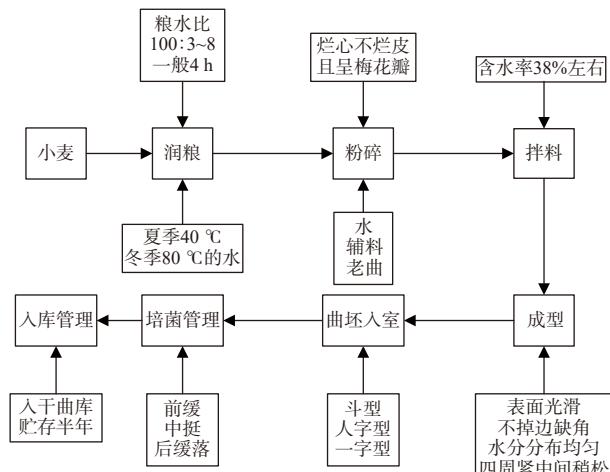


图 2 大曲生产流程  
Fig.2 Daqu production process



图 3 粉碎小麦图  
Fig.3 Plot of flour wheat

选定压制速度、踩踏次数、成型次数 3 个因素做单因素实验, 探究各因素对大曲表面提浆效果和大曲内部含水均匀性的影响及参数范围。分别设置压制速度为 5、15、25、35、45 mm/s, 踩踏次数 10 次, 成型次数 5 次; 踩踏次数为 2、5、8、12、18 次, 压制速度为 15 mm/s, 成型次数为 5 次; 成型次数为 1、3、5、7、9, 压制速度为 15 mm/s, 踩踏次数为 10 次。

**1.2.3 响应面试验** 由响应面设计原理, 选取压制速度、踩踏次数、成型次数, 三个单因素最佳值及其前后相邻值作为试验因素, 并选取大曲表面提浆效果面积比和大曲内部含水均匀因子为响应值, 进行响应面优化设计得到大曲成型最佳工艺。各试验因素及水平的取值如表 2 所示, 借助 Design-Expert10.0.7 软件进行数据分析。

表 2 成型试验因素水平设定表  
Table 2 Forming experiment factor level table

| 水平编号 | 因素          |          |          |
|------|-------------|----------|----------|
|      | A压制速度(mm/s) | B踩踏次数(次) | C成型次数(次) |
| -1   | 10          | 4        | 3        |
| 0    | 25          | 12       | 5        |
| 1    | 40          | 20       | 7        |

### 1.3 大曲品质的检测方法

#### 1.3.1 大曲内部含水率均匀性检测 大曲内部含水

率均匀性表示大曲内部水分均匀分布程度。宜宾某酒厂在多年的实践与探索中发现<sup>[27]</sup>: 大曲保持含水率在 39% 左右, 内部水分均匀分布时, 能得到更高品质的白酒。在大曲在成型过程中所受到的力是不相等的, 故应在垂直方向上应分层取样。检测点分布图为图 4 所示。其中大曲的水分检测方法使用常压干燥法<sup>[28]</sup>。大曲内部含水均匀因子计算公式如下:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{式 (1)}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad \text{式 (2)}$$

$$Y = \frac{1}{\sigma} \quad \text{式 (3)}$$

式中:  $x$  为某块大曲  $n$  个检测点水分数据的平均值;  $x_i$  为第  $i$  个测量数据值;  $\sigma$  为某块大曲内部水分的标准差,  $Y$  为均匀因子。

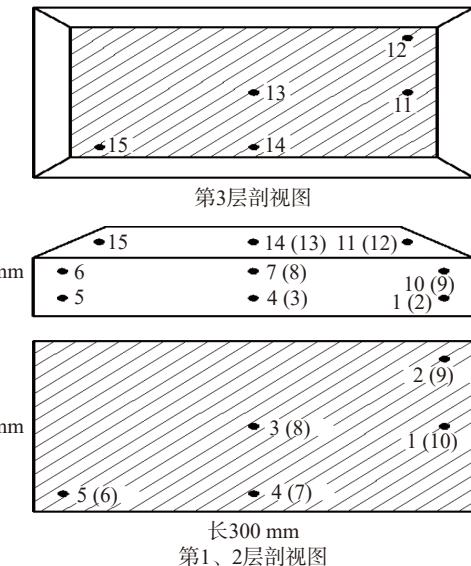


图 4 检测点分布图  
Fig.4 Distribution map of testing points

**1.3.2 大曲表面提浆效果检测** 大曲表面提浆是大曲内部的水麦胶(实际是一种蛋白)与水的混合物一起提取到大曲表面的一种现象。对大曲表面进行提浆效果检测, 为了保证数据的准确性, 本文利用高光谱成像技术作为大曲提浆效果的检测手段<sup>[29]</sup>。大曲表面水麦胶与水的混合物含量高低反映大曲表面提浆的效果, 麦胶与水的混合物含量高则提浆效果好。对成型的一块完整大曲进行光谱数据采集, 得到大曲表面每个像素点的光谱值, 将光谱值带入大曲表面提浆预测模型中, 计算出各像素点所对应的提浆含量值, 并进行可视化。

其中, 大曲表面提浆效果面积比( $X$ )计算公式如式(4)。

$$X = \frac{S_1}{S} \quad \text{式 (4)}$$

式中:  $S_1$  为大曲表面含水率大于 33% 的面积;  $S$  为大曲表面积;  $X$  为面积比。

## 1.4 数据处理

所有试验均进行 3 次重复, 数据结果用均值±标准差来表示, 采用 Design-Expert10.0.7 软件和 Matlab 软件进行数据分析处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验结果

**2.1.1 压制速度对大曲表面提浆效果和内部含水均匀性的影响** 从图 5 可知, 压制速度由 5~25 mm/s 增加时, 大曲表面提浆面积比  $X$  和内部含水率均匀因子得到有效的提高, 而当压制速度大于 25 mm/s 时大曲表面提浆面积比  $X$  和大曲内部含水率均匀因子开始下降。由于压制速度过快将会导致大曲在压缩的过程中内部水分无法得到充分流动, 造成大曲内部水分不均, 同时由于大曲受压时间较短, 被挤压到大曲表面的小麦浆较少, 导致提浆效果变差。因此试验选取 25 mm/s 的压制速度。

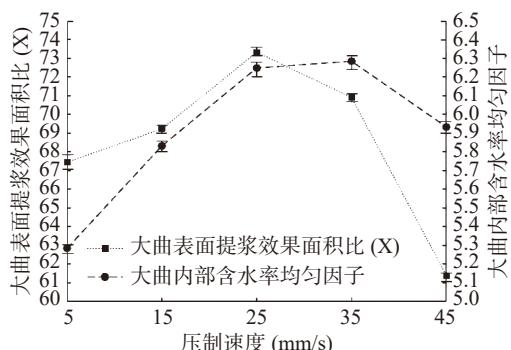


图 5 压制速度对大曲表面提浆效果和内部含水均匀性的影响  
Fig.5 Influence of pressing speed on surface pulping effect and internal water uniformity of Daqu

**2.1.2 踩踏次数对大曲表面提浆效果和内部含水均匀性的影响** 由图 6 可知, 随着踩踏次数的增加, 大曲表面提浆面积比  $X$  和内部含水率均匀因子也逐渐升高。当达到 12 次以后, 随着踩踏次数的增加, 大曲表面提浆面积比  $X$  和内部含水率均匀因子也都变

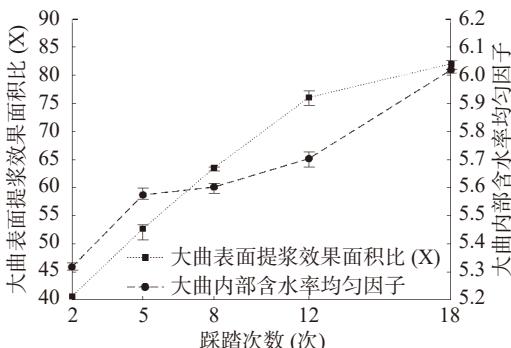


图 6 踩踏次数对大曲表面提浆效果和内部含水均匀性的影响  
Fig.6 Influence of treading times on surface pulping effect and internal water uniformity of Daqu

化不大。由于踩踏次数的增加, 大曲内部的空气和水分流动更加充分并在大曲内部形成更多的小麦浆液, 而在踩踏次数达到 12 次后踩踏作用使得大曲表面提浆效果和内部含水均匀性到达平衡, 因此试验选取 12 次的压制次数。

**2.1.3 成型次数对大曲表面提浆效果和内部含水均匀性的影响** 由图 7 可知, 随着成型次数的增加, 大曲表面提浆面积比  $X$  逐渐上升而在成型次数超过 5 次时, 开始上升缓慢。而大曲内部含水率在成型次数达到 5 次时到达最高值, 均匀因子 5.786, 由于成型次数的增加, 大曲内部的水分和小麦浆液更加均匀的分布至大曲的四周和表面, 当成型次数达到 5 次后从大曲内部挤压至表面的水分和小麦浆液趋近平衡, 因此试验选取的成型次数为 5 次。

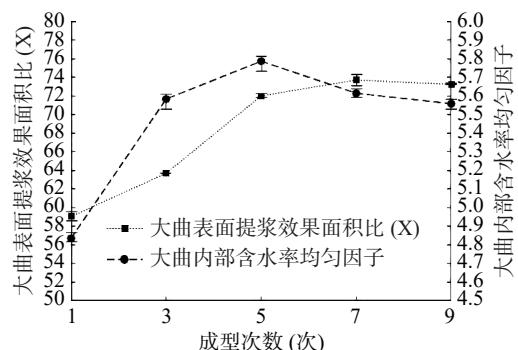


图 7 成型次数对大曲表面提浆效果和内部含水均匀性的影响  
Fig.7 Influence of molding times on surface pulping effect and internal water uniformity of Daqu

### 2.2 响应面试验结果

大曲表面提浆效果差(即面积比值低)会引起大曲表皮保持水分的能力变差、表层的皮较厚、微生物群落生长缓慢<sup>[30-31]</sup>, 而大曲内部含水率低则会抑制各种酶的产生和曲块中微生物的生长代谢<sup>[32]</sup>, 最终都将导致白酒质量下降<sup>[33]</sup>。本文以压制速度、踩踏次数和成型次数为自变量, 大曲表面提浆面积比( $X$ )和大曲内部含水率均匀因子( $Y$ )作为参考指标进行响应面试验分析。实现大曲成型工艺参数的优化<sup>[31]</sup>。结果如表 3 所示。

### 2.3 回归模型的建立与验证

**2.3.1 大曲表面提浆效果面积比回归方程** 大曲表面提浆效果面积比( $X$ )的回归方程方差分析结果如表 4 所示, 由该表可知, 该模型的决定系数  $R^2=0.9936$ , 说明该模型拟合优度较好, 能充分反映大曲表面提浆效果面积比与各因素之间的关系;  $F=121.43$ ,  $P<0.001$ , 表明高度显著, 可用于大曲表面提浆效果的预测。其中大曲表面提浆效果(面积比)与各因素编码值的回归方程由式 5 所示。

$$X = 1.311503 - 0.92556A + 4.87235B + 9.89042C - 9.1667 \times 10^{-4}AB + 0.047833AC + 0.090625BC + 0.010618A^2 - 0.13588B^2 - 0.88025C^2 \quad (5)$$

表 3 响应面试验结果

Table 3 Test results of response surface

| 实验号 | 压制速度 A(mm/s) | 踩踏次数 B(次) | 成型次数 C(次) | 面积比(X) (%) | 均匀因子(Y) |
|-----|--------------|-----------|-----------|------------|---------|
| 1   | 25           | 12        | 5         | 74.13      | 6.3651  |
| 2   | 25           | 12        | 5         | 74.33      | 6.3270  |
| 3   | 40           | 12        | 3         | 63.11      | 5.9272  |
| 4   | 25           | 4         | 3         | 44.32      | 5.9695  |
| 5   | 25           | 12        | 5         | 74.09      | 6.3156  |
| 6   | 10           | 12        | 3         | 68.67      | 5.2646  |
| 7   | 10           | 4         | 5         | 54.28      | 5.5898  |
| 8   | 40           | 12        | 7         | 80.14      | 5.8276  |
| 9   | 10           | 12        | 7         | 79.96      | 5.4421  |
| 10  | 40           | 20        | 5         | 81.09      | 6.2196  |
| 11  | 40           | 4         | 5         | 47.20      | 6.1549  |
| 12  | 10           | 20        | 5         | 88.61      | 5.9209  |
| 13  | 25           | 20        | 3         | 69.64      | 6.3746  |
| 14  | 25           | 12        | 5         | 75.57      | 6.3081  |
| 15  | 25           | 12        | 5         | 73.39      | 6.2834  |
| 16  | 25           | 4         | 7         | 51.23      | 6.3523  |
| 17  | 25           | 20        | 7         | 85.35      | 6.3282  |

表 4 面积比(X)方差分析

Table 4 Area ratio (X) analysis of variance

| 因素    | 平方和     | 自由度 | 均方差     | F值     | P值      | 显著性 |
|-------|---------|-----|---------|--------|---------|-----|
| 模型    | 2801.87 | 9   | 311.32  | 81.20  | <0.0001 | *** |
| A     | 49.90   | 1   | 49.90   | 13.02  | 0.0087  | **  |
| B     | 2037.13 | 1   | 2037.13 | 531.33 | <0.0001 | *** |
| C     | 324.36  | 1   | 324.36  | 84.60  | <0.0001 | *** |
| AB    | 0.048   | 1   | 0.048   | 0.013  | 0.9137  | 不显著 |
| AC    | 8.24    | 1   | 8.24    | 2.15   | 0.1861  | 不显著 |
| BC    | 19.36   | 1   | 19.36   | 5.05   | 0.0595  | 不显著 |
| $A^2$ | 15.42   | 1   | 15.42   | 4.02   | 0.0849  | *   |
| $B^2$ | 298.58  | 1   | 298.58  | 77.88  | <0.0001 | *** |
| $C^2$ | 44.36   | 1   | 44.36   | 11.57  | 0.0114  | **  |
| 残差    | 26.84   | 7   | 3.83    |        | —       |     |
| 失拟项   | 15.71   | 3   | 5.24    | 6.43   | 0.0520  | 不显著 |
| 纯误差   | 3.26    | 4   | 0.81    | —      | —       | —   |
| 总离差   | 2980.89 | 16  | —       | —      | —       | —   |
| $R^2$ | 0.9936  | —   | —       | —      | —       | —   |
| 信噪比   | 36.807  | —   | —       | —      | —       | —   |

注: <0.0001 表示高度显著, 采用 \*\*\* 表示; <0.01 表示较显著, 采用 \*\* 表示; <0.05 表示显著, 采用 \* 表示; — 表示为空; 表 5 同。

2.3.2 大曲内部含水率均匀因子回归方程 大曲含水率均匀因子(Y)的回归方程方差分析结果如表 5 所示。由表 5 可知, 该模型的决定系数  $R^2=0.9918$ , 说明该模型拟合优度较好, 能充分反映大曲含水率均匀因子(Y)与各因素之间的关系;  $F=95.58$ ,  $P<0.001$ , 表明模型高度显著, 可用于大曲水分均匀性的预测。其中大曲含水率均匀因子(Y)与各因素编码值的回归方程由式 6 所示。

$$Y = 2.43231 + 0.14406A + 4.74969 \times 10^{-3}B + 0.68862C - 5.55000 \times 10^{-4}AB - 2.30917 \times 10^{-3}AC - 6.70625 \times 10^{-3}BC - 2.19848 \times 10^{-3}A^2 + 2.28309 \times 10^{-3}B^2 - 0.052452C^2 \quad \text{式 (6)}$$

由方差分析表 4、表 5 中的 F 值可计算出各因素对大曲提浆效果和大曲含水率均匀度的影响贡献

表 5 均匀因子(Y)方差分析

Table 5 Uniformity factor (Y) analysis of variance

| 因素    | 平方和                    | 自由度 | 均方差                    | F值      | P值      | 显著性 |
|-------|------------------------|-----|------------------------|---------|---------|-----|
| 模型    | 1.950                  | 9   | 0.220                  | 93.580  | <0.0001 | *** |
| A     | 0.460                  | 1   | 0.460                  | 197.32  | <0.0001 | *** |
| B     | 0.075                  | 1   | 0.075                  | 32.570  | 0.0007  | **  |
| C     | 0.021                  | 1   | 0.021                  | 9.270   | 0.0187  | *   |
| AB    | 0.018                  | 1   | 0.018                  | 7.660   | 0.0278  | *   |
| AC    | 0.019                  | 1   | 0.019                  | 8.290   | 0.0237  | *   |
| BC    | 0.046                  | 1   | 0.046                  | 19.890  | 0.0029  | **  |
| $A^2$ | 1.030                  | 1   | 1.030                  | 444.920 | <0.0001 | **  |
| $B^2$ | 0.090                  | 1   | 0.090                  | 38.820  | 0.0004  | **  |
| $C^2$ | 0.190                  | 1   | 0.190                  | 80.010  | <0.0001 | **  |
| 残差    | 0.016                  | 7   | $2.316 \times 10^{-3}$ | —       | —       | —   |
| 失拟项   | 0.013                  | 3   | $4.209 \times 10^{-3}$ | 4.700   | 0.0846  | 不显著 |
| 纯误差   | $3.583 \times 10^{-3}$ | 4   | $8.59 \times 10^{-4}$  | —       | —       | —   |
| 总离差   | 1.97                   | 16  | —                      | —       | —       | —   |
| $R^2$ | 0.9918                 | —   | —                      | —       | —       | —   |
| 信噪比   | 31.252                 | —   | —                      | —       | —       | —   |

率<sup>[34-35]</sup>, 可得到; 各工艺参数对大曲提浆效果的影响作用大小依次为: 踩踏次数(A)>成型次数(B)>压制速度(C), 模型中 A、B、C 两两因素交互不显著 ( $P>0.05$ )。各工艺参数对大曲含水率均匀度的影响作用大小依次为: 压制速度(A)>踩踏次数(B)>成型次数(C), 模型中两两因素交互显著( $0.05>P>0.01$ )。

#### 2.4 因素之间交互作用分析

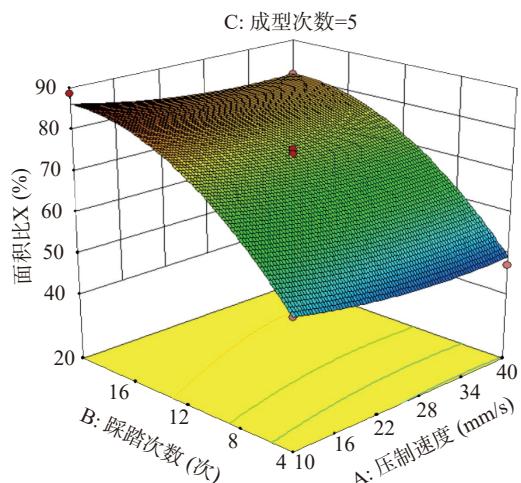
为了更直观地观察各设计变量与响应指标之间的关系, 通过建立三维响应曲面进一步分析大曲成型过程中工艺参数对大曲表面提浆效果、大曲内部含水率均匀度的影响。压制成型的大曲样品如下图 8 所示。图 9 和图 10 分别为压制速度与踩踏次数, 压制速度与成型次数和踩踏次数与成型次数两两交互作用, 对大曲表面提浆面积比(X)大曲内部含水率均匀因子(Y)的影响。



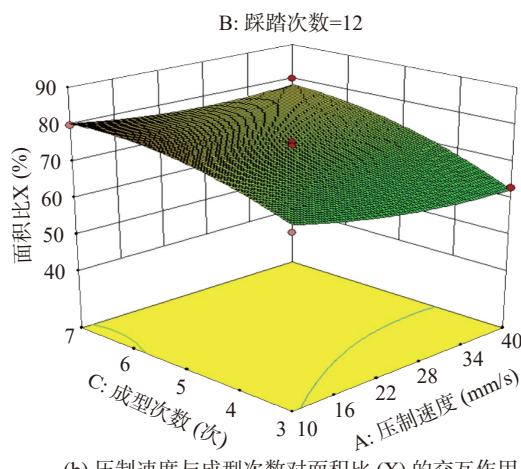
图 8 大曲样品

Fig.8 Daqu sample

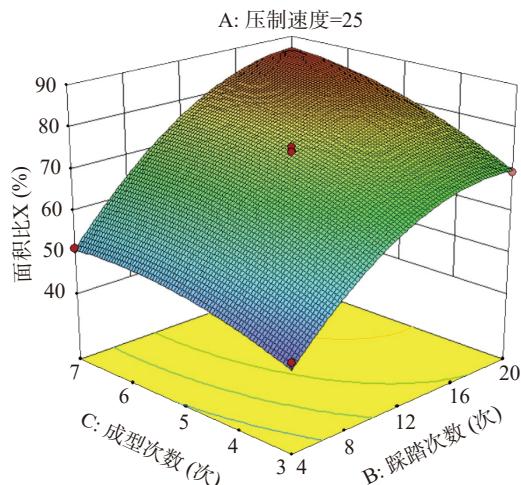
2.4.1 因素交互作用对大曲表面提浆效果面积比影响分析 图 9 为成型工艺参数对大曲表面提浆面积比的交互作用响应曲面图。由图可知, 踩踏次数和成型次数对表面提浆的影响最为显著, 而压制速度与踩踏次数以及压制速度与成型次数的交互作用对提浆效果的影响则不显著。大曲表面提浆效果小麦浆液在经过成型和踩踏后附着在大曲表面的情况, 踩踏次数增加时, 大曲内部挤压越激烈产生更多的小麦浆



(a) 压制速度与踩踏次数对面积比 (X) 的交互作用



(b) 压制速度与成型次数对面积比 (X) 的交互作用



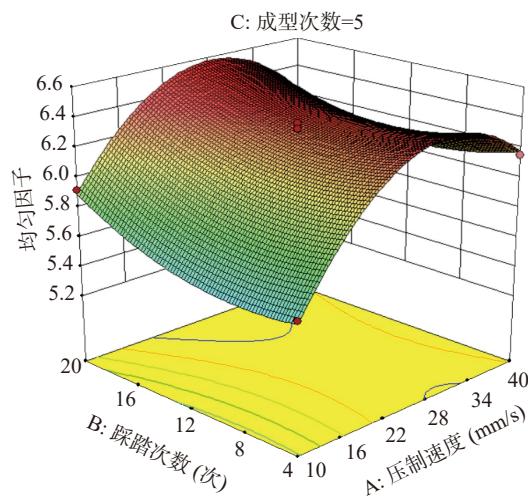
(c) 踏步次数与成型次数对面积比 (X) 的交互作用

图 9 两因素交互作用对面积比 (X) 的影响

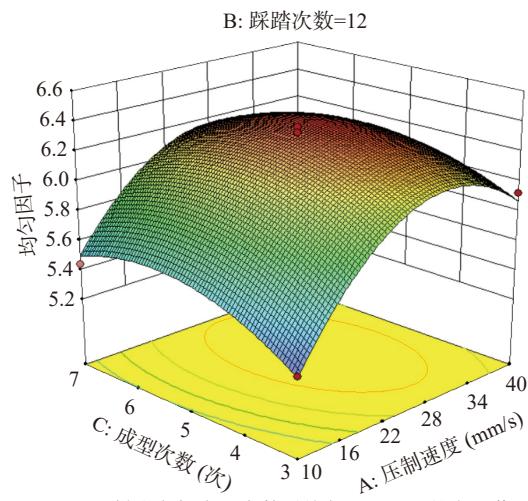
Fig.9 Influence of interaction of two factors on area ratio X

液在大曲内部, 成型次数的增加将产生的小麦浆液由大曲内部挤压到表面。对此, 踏步次数在 4~20 次, 成型次数在 6~7 次, 可有效提高大曲提浆效果。

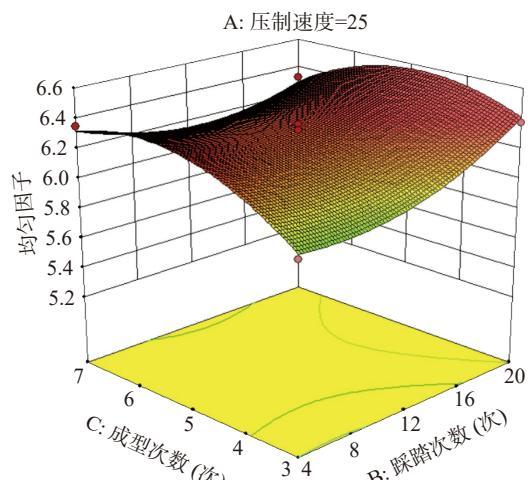
**2.4.2 因素交互作用对大曲内部含水率均匀因子影响分析** 图 10 为成型工艺参数对大曲内部含水率均匀因子的交互作用响应曲面图。由图可知, 踏步次数与成型次数的交互作用对内部含水率均匀性最



(a) 压制速度与踩踏次数对均匀因子 (Y) 的交互作用



(b) 压制速度与成型次数对均匀因子 (Y) 的交互作用



(c) 踏步次数与成型次数对均匀因子 (Y) 的交互作用

图 10 两因素交互作用对均匀因子 (Y) 的影响

Fig.10 Influence of interaction of two factors on uniform factor (Y)

为显著, 其次为压制速度与踩踏次数、压制速度与成型次数。这是由于含水率均匀性表示大曲的水分分布情况, 大曲在成型过程中水分分布情况是由踩踏次数和成型次数共同作用的结果, 成型次数和踩踏次数的增加会使得曲料间的水分流动更加充分, 所以两者

表 6 验证实验结果  
Table 6 Experiment data of test validation

| 含水率均匀因子 |       | 相对误差   | 提浆效果面积比 |        | 相对误差   |
|---------|-------|--------|---------|--------|--------|
| 预测值     | 实测值   |        | 预测值     | 实测值    |        |
| 6.37    | 6.295 | 1.177% | 85.66%  | 82.33% | 0.385% |
| 6.37    | 6.382 | 0.188% | 85.66%  | 82.79% | 3.350% |
| 6.37    | 6.303 | 1.051% | 85.66%  | 81.73% | 4.581% |
| 平均值     | 6.326 | 0.690% | 平均值     | 82.28% | 3.945% |

的交互作用对大曲内部含水率均匀因子最为明显。对此, 踩踏次数在 16~20 次, 成型次数在 4~7 次, 可有效提高大曲含水率的均匀性。

## 2.5 参数的优化分析及验证实验

2.5.1 工艺参数优化分析 在 Design-Expert10.0.7 软件优化求解, 以大曲表面提浆效果面积比为评价目标; 得出预测的最佳工艺参数; 压制速度  $A=10.972 \text{ mm/s}$ 、踩踏次数  $B=17.832$  次和成型次数  $C=6.827$  次, 所得到的面积比  $X=88.90\%$ 。以大曲表面含水率均匀因子为评价目标; 得出预测的最佳工艺参数; 压制速度  $A=29.753 \text{ mm/s}$ 、踩踏次数  $B=5.262$  次和成型次数  $C=5.400$  次, 所得到的均匀因子  $Y=6.370$ 。

兼顾大曲内部含水率均匀因子和大曲表面提浆效果面积比条件下, 得到预测的最佳工艺参数; 压制速度  $A=19.558 \text{ mm/s}$ , 踩踏次数  $B=20.00$  次, 成型次数  $C=6.77$  次, 在该工艺参数条件下大曲表明提浆效果面积比预测值为 85.66%, 大曲内部含水率均匀因子预测值为 6.370。

2.5.2 工艺参数优化的验证实验 为验证回归方程和工艺参数优化结果的可靠性, 以兼顾大曲内部含水率和大曲表面提浆效果预测的最佳工艺参数值; 压制速度  $A=19.558 \text{ mm/s}$ 、踩踏次数  $B=20.00$  次和成型次数  $C=6.77$  次, 将成型次数化为整为 7 次, 压制速度取  $A=20 \text{ mm/s}$ , 分别做 3 组实验, 其结果作为实测值并与回归方程的预测值进行对比分析。从表 6 能够看出, 大曲的表面提浆面积比和内部含水率均匀因子的预测值与实测值之间的平均相对误差为 3.945% 和 0.690%。得出回归方程预测值与实验实测值逼近, 模型拟合度较高。

## 3 结论

本研究以大曲的表面提浆效果和内部含水均匀性为评价指标, 针对压制速度、踩踏次数以及成型次数进行单因素考察, 在此基础上进行响应面优化实验, 得到最佳成型工艺为压制速度  $A=20 \text{ mm/s}$ , 踩踏次数  $B=20$  次, 成型次数  $C=7$  次, 在该工艺参数条件下得到的大曲表面提浆效果面积比( $X$ )为 85.66%, 大曲内部含水率均匀因子( $Y$ )为 6.370, 符合响应面模型验证结果。成型工艺对大曲表面提浆效果的影响程度大小依次为: 踩踏次数>成型次数>压制速度, 成型工艺对大曲内部含水率均匀度的影响程度大小依次为: 压制速度>踩踏次数>成型次数。研究结果

为大曲成型工艺提供了新的技术支撑, 也为改善机械制曲现状提供了有效依据。

## 参考文献

- [1] 刘绪兴, 程鹏, 陈才, 等. 真菌在大曲酒生产中的应用研究[J]. 酿酒科技, 2020(7): 50~57. [ LIU X X, CHENG P, CHEN C, et al. Application of fungi in Daqu Baijiu production[J]. Liquor-Making Science & Techonologe, 2020(7): 50~57. ]
- [2] 钱冲, 廖永红, 张弦, 等. 白酒生产机械自动化技术应用进展[J]. 中国酿造, 2013, 12(32): 5~8. [ QIAN C, LIAO Y H, ZHANG X, et al. Application progress of mechanical automation liquor-production technologies[J]. China Brewing, 2013, 12(32): 5~8. ]
- [3] HE G Q, HUAN J, WU C D, et al. Bioturbation effect of fortified Daqu on microbial community and flavor metabolite in Chinese strong-flavor liquor brewing microecosystem[J]. Food Research International, 2020: 9.
- [4] 顾强, 田建平, 杨海栗, 等. 多工位柔性压曲机锤头设计与压曲过程仿真分析[J]. 食品工业, 2018, 39(7): 246~250. [ GU Q, TIAN J P, YANG H L, et al. Multi-station flexible bending press hammer design and simulation analysis of buckling process[J]. The Food Industry, 2018, 39(7): 246~250. ]
- [5] 王永亮, 张治刚, 李二召, 等. 贾湖酒业自动化制曲生产线的探讨[J]. 酿酒, 2019, 5(46): 101~103. [ WANG Y L, ZHANG Z G, LI E Z, et al. Discussion on automated Koji production line of Jiahu liquor industry[J]. Liquor Making, 2019, 5(46): 101~103. ]
- [6] 钱冲, 廖永红, 张弦, 等. 白酒酿造新技术应用进展[J]. 酿酒科技, 2014(7): 88~94. [ QIAN C, LIAO Y H, ZHANG X, et al. Application progress of new Baijiu(liquor)-making techniques[J]. China Brewing, 2014(7): 88~94. ]
- [7] CHEN T Y, JIA H L, ZHANG S W, et al. Optimization of cold pressing process parameters of chopped corn straws for fuel[J]. Energies, 2020: 21.
- [8] SONG X B, ZHANG S Y, WU Y M, et al. Investigation on the properties of the bio-briquette fuel prepared from hydrothermal pre-treated cotton stalk and wood sawdust[J]. Renewable Energy, 2020: 8.
- [9] 胡建军, 雷廷宙, 何晓峰, 等. 小麦秸秆颗粒燃料冷态压缩成型参数试验研究[J]. 太阳能学报, 2008(2): 241~245. [ HU J J, LEI T Z, HE X F, et al. Experimental research on the compressing molding parameter under cold conditions for wheat straw pellet fuel[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008(2): 241~245. ]
- [10] WANG X Y, LI H X, GU J F, et al. Pressure analysis of dynamic injection molding and process parameter optimization for reducing warpage of injection molded products[J]. Polymers, 2017, 9(12): 85.
- [11] WANG G Q, WANG Y M, YANG D Y. Study on automotive back door panel injection molding process simulation and process parameter optimization[J]. A. Kumar. Advances in Materials

- Science and Engineering, 2021, 2021: 1–15.
- [12] LU C R, XU N, ZHENG T, et al. The optimization of process parameters and characterization of high-performance CF/PEEK composites prepared by flexible CF/PEEK plain weave fabrics[J]. *Polymers*, 2018, 11(1): 53.
- [13] 赵盼, 史耀耀, 康超, 等. 复合材料机器人纤维铺放工艺参数优化[J]. *西北工业大学学报*, 2018, 36(4): 693–700. [ZHAO P, SHI Y Y, KANG C, et al. Optimization of process parameters for robotic fibre placement[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2018, 36(4): 693–700.]
- [14] 樊玲玲, 孔孟, 孙大龙. 基于响应面法 PE 吹塑用汽油瓶工艺参数优化分析[J]. *塑料科技*, 2021, 49(4): 66–70. [FAN L L, KONG M, SUN D L. Optimization analysis of process parameters for PE blowing gasoline bottle base on response surface method [J]. *Plastic Science and Technology*, 2021, 49(4): 66–70.]
- [15] 刘斐然, 纵荣荣, 李乐乐, 等. 汽车后风挡横梁冲压工艺仿真分析与优化设计[J]. *河北工业大学学报*, 2020, 49(3): 55–62.
- [16] LIU F R, ZONG R R, LI L L, et al. Stamping process simulation analysis and optimization design for a car-rear-windshield-cross beam[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2020, 49(3): 55–62. ]
- [17] 张明. 机械制曲过程中影响小麦粉碎度的因素探究及调控[J]. *酿酒科技*, 2019(1): 76–80, 85. [ZHANG M. Investigation on and control of the factors influencing wheat crushing degree in the process of mechanical Daqu-making[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2019(1): 76–80, 85.]
- [18] 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.
- [19] HUANG H F, TIAN J P, WANG K Z, et al. Numerical simulation and distribution of ambient temperature and humidity field in Qufang[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(9): 148–155, 40. ]
- [20] DENG L, MAO X, LIU D, et al. Comparative analysis of physicochemical properties and microbial composition in high-temperature Daqu with different colors[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 588117.
- [21] 叶建秋, 黄丹平, 田建平, 等. 高光谱图像技术检测大曲发酵过程中的水分含量[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(9): 250–254. [YE J Q, HUANG D P, TIAN J P, et al. Detection of water content in Daqu during fermentation using hyperspectral image technology[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(9): 250–254. ]
- [22] HUANG H P, HU X J, TIAN J P, et al. Multigranularity cascade forest algorithm based on hyperspectral imaging to detect moisture content in Daqu[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 44(3): 13633.
- [23] 孙婷, 胡新军, 田建平, 等. 基于高光谱成像技术的大曲酸度值预测及其可视化[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(17): 226–231. [SUN T, HU X J, TIAN J P, et al. Prediction and visualization of Daqu acidity based on hyperspectral imaging technology [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(17): 226–231.]
- [24] 温翔. 转盘式制曲设备的设计与试验研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2018. [WEN X. Design and experimental research of turntable making starter block equipment[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2018.]
- [25] 李瑞. 汾酒用曲块制作机理及其关键技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011. [LI R. Study on mechanism and key technology of fen Chiew starter making [D]. Taiyuan : Taiyuan University of Technology, 2011.]
- [26] 秦禹. 凸轮分割式旋转压曲机的设计与传动系统的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015. [QIN Y. Design on cam indexers revolving distiller's yeast press machine and research on its drive system [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.]
- [27] 李大和. 白酒工人培训教程[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1999: 6. [LI D H. Liquor worker training course [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1999: 6.]
- [28] 中华人民共和国工业和信息化部门. QB/T 4257-2011: 酿酒大曲通用分析方法[S]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011. [Ministry of Industry and Information Technology. QB/T 4257-2011: General analysis method for liquor-making Daqu[S]. Beijing: China Light Industry Press, 2011.]
- [29] HUANG H P, HU X J, TIAN J P, et al. Rapid detection of the reducing sugar and amino acid nitrogen contents of Daqu based on hyperspectral imaging[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2021, 101: 103970.
- [30] 王贤, 丁琳. 中高温大曲制曲过程关键控制点探析[J]. *酿酒科技*, 2015(3): 87–89. [WANG X, DING L. Exploration on the critical control points of medium/high-temperature Daqu culture[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2015(3): 87–89.]
- [31] 周斐成, 吴生文, 朱庆圣, 等. 特香型大曲发酵过程中曲块不同部位理化指标及主要酶系动态分析[J]. *中国酿造*, 2019, 38(4): 58–64. [ZHOU F C, WU S W, ZHU Q S, et al. Physicochemical indexes and dynamic analysis of main enzymes in different layers of Te-flavor Daqu during fermentation process[J]. *China Brewing*, 2019, 38(4): 58–64.]
- [32] 毛洪川. 整粒高粱酿造浓香型白酒的工艺开发及应用研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017. [MAO H C. Development and application of a new technology of Luzhou flavour liquor using intact sorghum as raw material[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.]
- [33] 唐洁, 陈申习, 林斌, 等. 清香小曲白酒新工艺中微生物及环境因子对酒体风味变化的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(17): 40–47. [TANG J, CHEN S X, LIN B, et al. Effects of microorganisms and environmental factors on changes in aroma composition in Fen-flavor Xiaoqu Baijiu[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(17): 40–47.]
- [34] 潘天全, 程伟, 张杰, 等. 金种子浓香型中高温大曲制曲工艺控制探析[J]. *酿酒*, 2021, 48(3): 69–73. [PAN T Q, CHENG W, ZHANG J, et al. Study on Koji-making process control of Jinzhongzi Nonxiang medium and high temperature Daqu[J]. *Liquor Making*, 2021, 48(3): 69–73.]
- [35] JEFFREY N R, CHRISTOPHER R E, SIMON M C, et al. Model comparison in ANOVA[J]. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2016, 23(6): 1779–1786.