

大曲的热风干燥特性及其动力学模型

夏珂¹, 罗惠波^{1,2}, 周平³, 黄丹¹, 邓波^{4,5}, 沈才萍⁴, 鄂捷峰⁴, 张曼¹

(1. 四川理工学院生物工程学院, 四川自贡 643000) (2. 酿酒生物技术及应用四川省重点实验室, 四川自贡 643000) (3. 劲牌有限公司, 湖北黄石 435100) (4. 泸州老窖股份有限公司, 四川泸州 646000) (5. 国家固态酿造工程技术研究中心, 四川泸州 646000)

摘要: 通过探究温度和风速对大曲热风干燥特性、水分有效扩散系数 D_{eff} 以及活化能 E_a , 以建立排潮降温期大曲的热风干燥动力学模型, 并探究热风干燥与曲虫致死情况的相关性。结果表明, 大曲干燥阶段主要是降速干燥阶段。干燥温度对水分有效扩散效果要明显大于干燥风速, 说明干燥过程中温度对大曲脱水影响较大; 大曲热风干燥活化能 E_a 为 59.744 kJ/mol。选取 8 种典型干燥模型方程分别描述排潮降温期大曲的干燥曲线, Midilli 模型具有更优越的拟合效果, 拟合精度高, 且经过热风干燥后干燥环境和大曲内部的曲虫能够完全死亡。因此, 本文研究外源加热的曲药干燥工艺, 在排湿的同时对曲虫进行有效的杀灭, 为大曲热风干燥工艺的研究和生产控制提供理论依据。

关键词: 大曲; 曲虫; 热风干燥; 动力学; 模型

文章编号: 1673-9078(2018)04-206-214

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.04.031

Study on Hot-air Drying Characteristics and Dynamic Model of Daqu

XIA Yu¹, LUO Hui-bo^{1,2}, ZHOU Ping³, HUANG Dan¹, DENG Bo^{4,5}, SHEN Cai-ping⁴, WU Jie-feng⁴, ZHANG Man¹

(1.College of Bioengineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)(2.Liquor Making Bio-Technology & Application of Key Laboratory of Sichuan Province, Zigong 643000, China) (3.Jingjiu Co.Ltd, Huangshi 435100, China) (4.Luzhou Laojiao Co., Ltd., Luzhou 646000, China) (5.National Engineering Research Center of Solid-state Brewing, Luzhou 646000, China)

Abstract: The hot-air drying dynamics model of Daqu during the period of drainage and cooling was established in this study to explore the correlation between hot-air drying and the lethality of Daqu pest by investigating the hot-air drying characteristics, the effective diffusion coefficient (D_{eff}) and the activation energy (E_a) of Daqu. The results demonstrated that the drying stage of Daqu was mainly the deceleration-drying stage. The effect of drying temperature on D_{eff} was obviously greater than the drying air speed, indicating the temperature had a great influence on the dehydration of Daqu, and the E_a was 59.744 kJ/mol. In addition, eight typical drying model equations were selected to describe the drying curve of Daqu during the desiccation-cooling period. The Midilli model had superior fitting effect and high fitting accuracy, and the Daqu pests in external and internal environment would completely die after hot-air drying process. Therefore, the paper investigated the drying technology of Daqu with external heating process, and the Daqu pests were effectively exterminated. The obtained results provided a theoretical basis for research and production control of hot-air drying process of Daqu.

Key words: Daqu; Daqu pest; hot-air drying; dynamics; model

大曲是大曲酒酿造过程中的糖化发酵剂, 含有多种微生物及其酶类, 其质量决定了大曲酒的出酒率和优质品率^[1]。大曲在曲房内进行发酵培菌的过程中, 通过传统人工翻曲工艺使得大曲在高温发酵期后逐渐

收稿日期: 2017-11-13

基金项目: 固态酿造关键技术研究四川省院士(专家)工作站项目(GY2014-03); 四川省科技成果转化项目(2016CC0032)

作者简介: 夏珂(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事酿酒生物技术及应用方面的研究

通讯作者: 罗惠波(1969-), 男, 教授, 主要从事酿酒生物技术及应用方面的研究

进入降温期^[2]。

目前, 我国大曲生产过程中的“降温期”是通过人工开发发酵房门窗的方式, 自然排除曲房内湿度, 降低曲房温度来完成。这种传统的“降温”方式不仅耗费人力物力, 对大曲生产的控温控湿无法做到数字化; 且新鲜的曲香味会诱来曲虫, 它们在大曲上取食、产卵、繁殖, 且大曲通风排潮降温时间越长, 含虫量越大^[3,4]。可见, 大曲排潮降温期是曲虫滋生的重要时期, 是治理曲虫的关键时间节点。此阶段治理的根本是既要完成大曲的干燥, 又要阻断周围环境中曲虫的进入和杀灭大曲中已有的曲虫。所以建立外源

加热的曲药干燥工艺既可以在排湿的同时又可以对曲虫进行有效的杀灭。

热风干燥技术是目前我国应用最为广泛的一种干燥技术,是利用热源加热空气,风机输送热空气达到干燥湿物料目的,具有技术成熟、操作简单和易于控制等优点^[5,6]。应用热风干燥技术,排除了人工对曲房环境的影响,使得大曲生产中的“排潮降温期”得到有效的控制。本文研究热风干燥对排潮降温期大曲干燥特性的影响,计算得出大曲干燥过程的水分有效扩散系数 D_{eff} 和扩散活化能 E_a ,建立排潮降温期大曲的热风干燥动力学模型。并探究热风干燥与曲虫致死情况的相关性,以进一步优化大曲干燥工艺参数,为大曲热风干燥工艺的研究和生产控制提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料及处理

取大曲曲房发酵培菌第 8 d 的曲样,含水率为 30%。原材料采集于泸州怀玉制曲生态园。

1.2 仪器与设备

84Y-3 型风速可控干燥箱,和成仪器仪表(昆山)有限公司;3302 型手持式温度计,深圳市拓尔为电子科技有限公司;WSB-2 型数显高精度温湿度计,郑州博洋仪器仪表有限公司

1.3 试验方法

1.3.1 不同温度、风速下的大曲干燥特性曲线的测定

测定未进行干燥的排潮降温期大曲水分含量,作为同一批次大曲的干燥初始水分的估算。设置热风风速为 1.2 m/s,温度分别为 45 °C、50 °C、55 °C,进行不同温度下大曲的干燥实验;设置热风温度为 50 °C,风速为 0.4 m/s、0.8 m/s、1.2 m/s,进行不同风速下大曲的干燥实验。测定大曲的初始质量,然后每隔 3 h 测定该时间下大曲的质量,直至计算出大曲水分含量在 15%左右结束干燥,每组做三个平行大曲样。绘制排潮降温期大曲在不同温度、风速条件下的干燥曲线和干燥速率曲线^[7]。

1.3.2 不同温度和风速下的大曲温度变化曲线的测定

对进行干燥处理的降温期大曲的曲皮(曲块表面 0~1 cm)和曲心(5~10 cm)进行温度监测。并绘制降温期大曲在不同干燥条件下的温度变化曲线。

1.3.3 不同温度和风速下的两种曲虫致死情况

的测定

在 500 mL 烧杯中装入咖啡豆象(或土耳其扁谷盗)试虫各 30 头,为防止曲虫飞出,用纱布封住烧杯口。然后放入大曲热风干燥的环境中,当大曲热风干燥完成后取出两种曲虫,同时以在室温环境下放置同样时间的曲虫为对照组。热处理结束后将曲虫放置于正常室温环境中恢复 24 h 后检查曲虫的死亡情况,检查方法为用牙签轻触曲虫腹部,曲虫无反应者为死亡^[8]。

1.3.4 指标测定及计算方法

1.3.4.1 大曲湿基含水量

采用直接干燥法,将大曲粉碎后置于 105 °C 干燥箱中进行干燥,具体操作参考 GB 5009.3-2010^[9],计算公式如下:

$$X = \frac{G_0 - G_t}{G_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, X 是大曲湿基含水量(%); G_t 是任意干燥 t 时刻大曲的质量(g); G_0 是干燥时刻为零的大曲初始质量(g)。

1.3.4.2 大曲干基含水量

即某时刻大曲中水分质量与绝干大曲质量之比,计算公式如下^[10]:

$$W = \frac{G_t - G_g}{G_g} \times 100\% \quad (2)$$

式中, W 是大曲干基含水量(%); G_t 是任意干燥 t 时刻大曲的质量(g); G_g 是大曲的绝干质量(g)。

1.3.4.3 大曲水分比

表示热风干燥下的大曲还有多少水分未被干燥去除,可以用来反映大曲干燥速率的快慢,计算公式如下^[10]:

$$MR = \frac{W_t}{W_0} \quad (3)$$

式中, MR 是大曲水分比; W_t 是大曲干燥 t 时刻的干基含水量(%); W_0 是大曲初始干基含水量(%).

1.3.4.4 大曲干燥速率

指在大曲干燥过程中每分钟蒸发的水分量,其计算公式如下^[10]:

$$DR = \frac{W_{t_1} - W_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

式中, DR 是大曲干燥速率(%/h); W_{t_1} 、 W_{t_2} 是干燥 t_1 、 t_2 时刻的大曲干基含水量(%); t 是大曲干燥时间(h)。

1.3.4.5 大曲水分有效扩散系数

用来描述大曲干燥降速阶段的干燥特性,干燥过程中大曲的水分扩散规律采用 Fick 扩散方程来描述。在大曲热风干燥实际运用中, Fick 扩散方程的解可以简化如下^[11]:

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L_0^2} t \quad (5)$$

式中, D_{eff} 是水分有效扩散系数(m^2/h); L_0 是大曲厚度的二分之一(m); 以大曲干燥水分比的对数 $\ln(MR)$ 为纵坐标, 干燥时间 t 为横坐标做直线方程, 将直线方程的斜率 k 代入公式(6)中即可求出水分有效扩散系数。

$$D_{eff} = -\frac{4L_0^2}{\pi^2} k \quad (6)$$

1.3.4.6 大曲干燥活化能

干燥活化能是评价干燥过程中大曲脱除水分的能力, 是从能耗方面来进行评价。大曲水分有效扩散系数与热风干燥温度之间的关系可以用简化的阿伦尼乌斯方程来表示, 其方程如下^[12]:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{R(T+273)}\right) \quad (7)$$

式中, E_a 是大曲干燥活化能 (kJ/mol); D_0 是大曲中的扩散常数 (m^2/s); R 是气体状态常数, 值为 $8.314 J/(mol \cdot k)$; T 是大曲的热风干燥温度($^{\circ}C$)。

将式(7)线性转化如下:

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T+273} \quad (8)$$

将 $\ln D_{eff}$ 与 $1/(T+273)$ 进行作图后线性拟合, 根据得到的拟合方程的斜率为 E_a/R , 从而可以计算出大曲的干燥活化能 E_a 。

1.3.5 大曲干燥动力学数学模型的选择与建立

大曲的干燥是一个复杂的过程, 为了确定大曲干燥动力学变化规律, 选择合适的数学模型描述排潮降温期大曲的干燥过程, 本文选用常见的 8 种经典干燥模型方程分别描述排潮降温期大曲的干燥曲线, 所选干燥模型如表 1 所示。

表 1 8 种常用的干燥模型及其参数^[13-16]

Table 1 8 common drying models and their parameters

编号	干燥模型	模型方程	模型参数
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	k
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	$k; n$
3	Henderson-Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	$a; k$
4	Parabolic	$MR = a + bt + ct^2$	$a; b; c$
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	$a; k; c$
6	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	$a; k; n; b$
7	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	$a; b$
8	Two term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	$a; k$

用决定系数 R^2 、卡方 χ^2 、均方根误差 RMSE 3 个参数对大曲干燥的 8 种数学模型进行评价, R^2 越大,

χ^2 和 RMSE 越小, 说明模型拟合效果越好, 其计算公式分别为^[16]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{exp})^2} \quad (9)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N}} \quad (11)$$

式中, $MR_{exp,i}$ 表示第 i 个数据点 MR 试验值; $MR_{pre,i}$ 表示第 i 个数据点 MR 模型预测值; $\overline{MR_{exp}}$ 为 MR 试验值的平均值; n 为模型中待测参数的个数; N 为实验数据点的个数。

1.3.6 数据统计分析

实验所得数据采用 origin 作图及进行大曲干燥动力学模型拟合分析、SPSS 进行方差分析, 多重比较采用 Duncans 新复极差法进行差异显著性的分析, 以 $p < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与讨论

2.1 热风干燥温度和风速对大曲热风干燥特性的影响

2.1.1 不同干燥温度和风速对大曲干燥曲线的影响

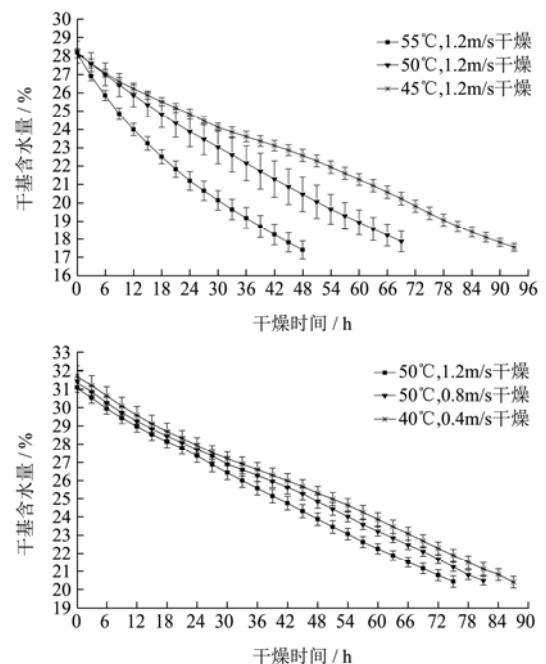


图 1 不同干燥温度、风速下大曲的干燥曲线

Fig.1 Drying curve of Daqu under different drying temperatures and air speeds

干燥曲线常用于描述物料的干基含水量随干燥时

间的变化趋势。对排潮降温期大曲在不同温度和风速条件下干燥情况的追踪监测,得到不同温度和风速下大曲干燥曲线如图 1。

由图 1 可知,不同温度和风速下大曲的干基含水量均随干燥时间延长而逐渐下降;大曲热风温度越高,风速越大,干基含水量降低越快,大曲干燥达到目标含水量所需的时间也越短。由于热风温度的升高加速了大曲表面的水分蒸发速度,也降低了干燥环境中干燥介质的相对湿度,使其与大曲的湿度差越大,从而使大曲表层水分向干燥气体的扩散动力增加,进而缩短了大曲的干燥时间。因此提高热风干燥温度能够显著地缩短大曲干燥时间,提高热风干燥的效率。

2.1.2 不同干燥温度和风速对大曲干燥速率的影响

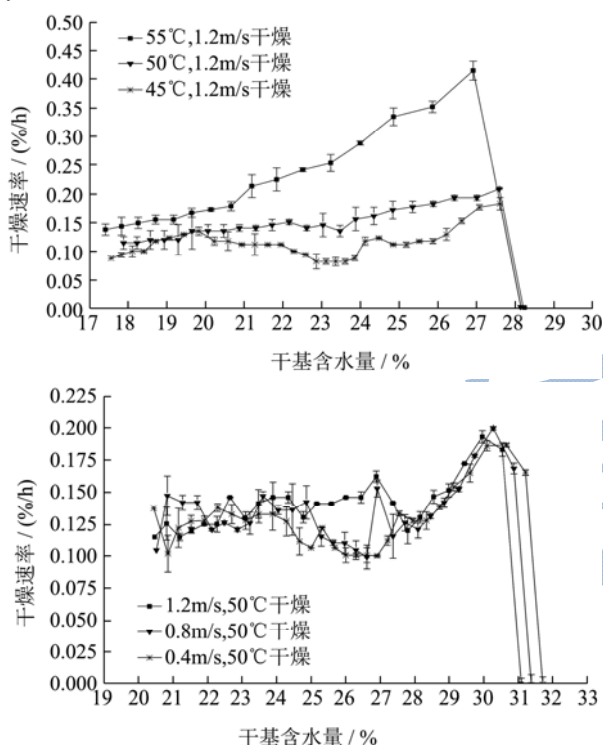


图 2 不同干燥温度、风速下大曲的干燥速率曲线

Fig.2 Drying rate curve of Daqu under different drying temperatures and air speeds

热风干燥的温度和风速对干燥速率和大曲的品质有着重要的影响,不同干燥温度和风速下大曲的干燥速率曲线如图 2 所示。

从图 2 可知,热风温度越高,大曲的干燥速率越大,干基含水量下降的也越快;随着热风干燥进行,大曲干基含水量逐渐减低,干燥速率也随之下降。但风速对干燥速率的影响有限,不同风速下干燥速率曲线变化情况一致且曲线有部分重合;不同风速下大曲干燥速率基本没有差别,风速对大曲干燥速率已经基本没有影响,这可能与热风干燥设备有很大关系,其

内容体积大,而大曲量少。

热空气向大曲传递热量时,一部分热量使大曲温度升高,建立了大曲外部与内部的水分梯度,加大了大曲水分向外扩散的速度;另一部分热量用于汽化大曲外部的自由水,为大曲水分向外扩散提供空间。在热风干燥初期,大曲表层自由水含量高。大曲表层的自由水被快速除去,干燥速率很快增加到最大。所以温度越高,风速越大,干燥速率上升的越快,对应的干燥速率也就越大;但由于大曲是由小麦等原料制成,内部是多孔的网状结构,大曲内部水分向表面扩散迁移的速率受到阻碍。随着干燥的继续进行,大曲内部水分扩散成为了影响干燥的主要因素,大曲内部的水分向外迁移的速率小于表层水分向干燥环境中迁移的速率,造成了大曲干燥速率不断下降。因此大曲干燥阶段主要是降速干燥阶段。

2.2 不同干燥条件下大曲水分有效扩散系数

与活化能

2.2.1 不同干燥条件下大曲的水分有效扩散系数

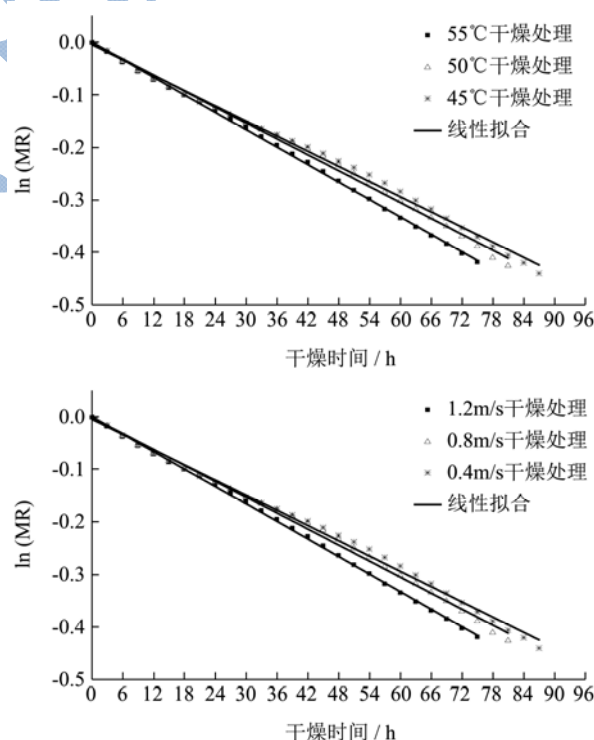


图 3 不同干燥温度和风速下 ln (MR) 与干燥时间的关系曲线

Fig.3 Relationship between ln (MR) and drying time under different drying temperatures and air speeds

水分有效扩散系数(D_{eff})用来表示干燥过程中物料脱水能力的大小,大曲热风干燥大部分过程属于降速干燥阶段,因此大曲热风干燥过程的水分有效扩散

系数可以用 Fick 第二定律计算,大曲在干燥过程中的水分比自然对数 lnMR 与干燥时间 t 呈线性关系,不同干燥温度和风速下大曲的 lnMR 与干燥时间 t 的关系曲线如图 3 所示。

根据不同干燥条件下大曲的水分比自然对数 lnMR 与干燥时间 t 得到的拟合曲线,通过得到的拟合方程,找出方程的斜率和截距,根据公式(6)计算得出的不同干燥条件下大曲水分有效扩散系数 D_{eff} 如表 2 所示。由表 2 可知,在大曲干燥温度为 45~55 °C 范围内,大曲的水分有效扩散系数 D_{eff} 在

$1.113 \times 10^{-9} \sim 2.218 \times 10^{-9}$ 范围内波动。水分有效扩散系数 D_{eff} 随着干燥温度的升高而升高;在大曲干燥风速为 0.4~1.2 m/s 范围内,大曲的水分有效扩散系数 D_{eff} 在 $1.101 \times 10^{-9} \sim 1.265 \times 10^{-9}$ 之间,从中可以看出,随着干燥风速的增大,大曲的水分有效扩散系数 D_{eff} 也随之增加;从大曲的干燥温度和风速对大曲的水分有效扩散系数 D_{eff} 的影响来看,干燥温度对 D_{eff} 的影响效果要明显大于干燥风速。大曲的水分有效扩散系数是干燥优化设计的重要参数之一。

表 2 不同干燥条件下大曲热风干燥有效水分扩散系数

Table 2 Effective moisture diffusion coefficients of Daqu under different drying conditions

干燥条件	线性拟合方程	R ²	D _{eff} /(m ² /s)	
不同温度	45 °C	y = -4.88 × 10 ⁻³ x - 0.002	0.993	1.113 × 10 ⁻⁹
	50 °C	y = -6.56 × 10 ⁻³ x - 0.006	0.999	1.496 × 10 ⁻⁹
	55 °C	y = -9.74 × 10 ⁻³ x - 0.033	0.989	2.218 × 10 ⁻⁹
不同风速	0.4 m/s	y = -4.83 × 10 ⁻³ x + 0.004	0.996	1.101 × 10 ⁻⁹
	0.8 m/s	y = -5.06 × 10 ⁻³ x + 0.000	0.996	1.154 × 10 ⁻⁹
	1.2 m/s	y = -5.55 × 10 ⁻³ x + 0.001	0.999	1.265 × 10 ⁻⁹

2.2.2 大曲的干燥活化能

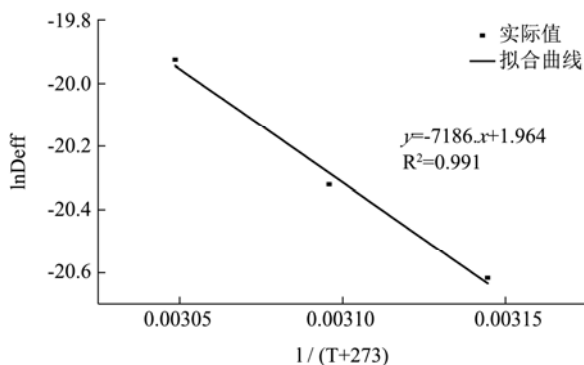


图 4 lnDeff 与 1/(T+273) 的关系曲线图

Fig.4 Relationship between lnDeff and 1/(T+273)

干燥活化能表示物料干燥过程中除去单位摩尔水分所需能量,活化能值越大说明物料越难干燥。物料干燥活化能大小受温度影响较小,主要由物料本身的结构、形状和大小等性质决定。

将 $\ln D_{eff}$ 与 $1/(T+273)$ 为坐标进行作图,对曲线进行线性拟合结果如图 4 所示。从图 4 可知,曲线呈线性关系为 $\ln D_{eff} = -0.716/(T+273) + 1.964$, 相关系数 R^2 大于 0.99, 经拟合后,根据斜率计算出大曲的干燥活化能 E_a 为 59.744 kJ/mol, 说明从大曲中去除 1 mol 水分所需的最低能量为 59.744 kJ, 那么从大曲中干燥脱离 1 kg 的水分需要的最低能量为 3319.111 kJ, 约合耗

电量 0.922 kW/h。

2.3 大曲热风干燥动力学数学模型的适用性研究

2.3.1 大曲热风干燥模型的确定

本文参考 8 种经典干燥模型方程来描述排潮降温期大曲干燥的变化规律,8 种动力学模型的拟合情况如表 3、4 所示。

从表 3、4 中看出,不同干燥温度和风速下的 8 种动力学模型的 R^2 在 0.976~0.999 之间变化, χ^2 在 $0.105 \times 10^{-5} \sim 31.910 \times 10^{-5}$ 范围内变化, RMSE 在 $0.937 \times 10^{-3} \sim 17.328 \times 10^{-3}$ 之间变化,说明这 8 种数学模型对大曲干燥过程中水分变化规律的拟合效果都比较好。其中 Midilli 模型与其他模型相比,其 R^2 最大, χ^2 和 RMSE 最小,拟合程度最高,在不同干燥温度和风速下 R^2 在 0.99 以上, χ^2 低于 2.600×10^{-5} , RMSE 低于 4.766×10^{-3} , 所以其拟合效果最好。相比于其他模型, Midilli 模型既考虑指数关系,又考虑了线性关系,因此 Midilli 模型具有更优越的拟合效果,所以本研究选择 Midilli 模型作为大曲热风干燥的最适数学模型。

表3 不同干燥温度下8种干燥模型的常数项和评价指标

Table 3 Constant terms and evaluation indexes of 8 drying models under different drying temperature

模型	温度/°C	模型参数	R ²	χ ² (×10 ⁻⁵)	RMSE(×10 ⁻³)
Lewis	45	k=0.0049	0.9939	7.230	8.369
	50	k=0.0067	0.9991	1.090	3.229
	55	k=0.0109	0.9766	31.910	17.328
Page	45	k=0.0049, n=0.9986	0.9937	7.470	8.368
	50	k=0.0079, n=0.9587	0.9999	0.142	1.142
	55	k=0.0217, n=0.8022	0.9992	1.020	2.999
Henderson-Pabis	45	a=0.9948, k=0.0048	0.9943	6.850	8.015
	50	a=0.9945, k=0.0066	0.9997	0.413	1.945
	55	a=0.9728, k=0.0100	0.9885	15.710	11.775
Parabolic	45	a=0.9839, b=-0.0040, c=1.109e ⁻⁵	0.9968	3.840	5.902
	50	a=0.9960, b=-0.0066, c=2.028e ⁻⁵	0.9997	0.338	1.719
	55	a=0.9904, b=-0.0122, c=9.513e ⁻⁵	0.9982	2.470	4.510
Logarithmic	45	a=6.5828, k=6.049e ⁻⁴ , c=-5.5988	0.9968	3.840	5.898
	50	a=0.8660, k=0.0079, c=0.1310	0.9998	0.243	1.458
	55	a=0.5212, k=0.0261, c=0.4742	0.9994	0.770	2.518
Midilli	45	a=1.0004, k=0.0140, n=0.1756, c=-0.0037	0.9978	2.600	4.766
	50	a=1.0006, k=0.0080, n=0.9190, c=-6.387e ⁻⁴	0.9999	0.105	0.937
	55	a=1.0012, k=0.0206, n=0.8896, c=0.0020	0.9998	0.233	1.335
Wang and Singh	45	a=-0.0047, b=7.108e ⁻⁶	0.9940	7.180	8.204
	50	a=-0.0069, b=2.295e ⁻⁵	0.9996	0.547	2.240
	55	a=-0.0129, b=1.082e ⁻⁴	0.9972	3.770	5.769
Two term exponential	45	a=0.0062, k=0.7797	0.9943	6.750	7.954
	50	a=0.0072, k=0.9096	0.9998	0.225	1.436
	55	a=0.0888, k=0.0930	0.9995	0.639	2.375

表4 不同干燥风速下8种干燥模型的常数项和评价指标

Table 4 Constant terms and evaluation indexes of 8 drying models under different drying speeds

模型	风速/(m/s)	模型参数	R ²	χ ² (×10 ⁻⁵)	RMSE (×10 ⁻³)
Lewis	0.4	k=0.0049	0.9957	4.529	6.617
	0.8	k=0.0051	0.9968	3.349	5.683
	1.2	k=0.0055	0.9993	0.769	2.720
Page	0.4	k=0.0053, n=0.9795	0.9958	4.500	6.478
	0.8	k=0.0049, n=1.0075	0.9967	3.450	5.660
	1.2	k=0.0052, n=1.0163	0.9994	0.678	2.501
Henderson-Pabis	0.4	a=0.9946, k=0.0048	0.9962	4.020	6.126
	0.8	a=0.9977, k=0.0050	0.9968	3.350	5.576
	1.2	a=1.0001, k=0.0055	0.9993	0.801	2.720
Parabolic	0.4	a=0.9881, b=-0.0042, c=3.882e ⁻⁵	0.9970	3.180	5.351
	0.8	a=0.9899, b=-0.0043, c=2.710e ⁻⁵	0.9982	1.840	4.048
	1.2	a=0.9960, b=-0.0051, c=7.939e ⁻⁵	0.9997	0.361	1.787

转下页

接上页

Logarithmic	0.4	a=2.0166, k=0.0021, c=-1.0281	0.9971	3.140	5.320
	0.8	a=3.1685, k=0.0014, c=-2.1784	0.9982	1.830	4.037
	1.2	a=1.4654, k=0.0035, c=-0.4692	0.9997	0.361	1.786
Midilli	0.4	a=1.0015, k=0.0094, n=0.3911, c=-0.0035	0.9982	1.880	4.037
	0.8	a=1.0006, k=0.0086, n=0.3004, c=-0.0039	0.9990	1.050	2.998
	1.2	a=0.9989, k=0.0043, n=0.8963, c=-0.0021	0.9997	0.319	1.642
Wang and Singh	0.4	a=-0.0048, b=8.931e ⁻⁶	0.9953	4.980	6.818
	0.8	a=-0.0048, b=7.638e ⁻⁶	0.9970	3.160	5.417
	1.2	a=-0.0053, b=1.021e ⁻⁵	0.9995	0.569	2.292
Two term exponential	0.4	a=0.0068, k=0.6994	0.9964	3.870	6.012
	0.8	a=0.0028, k=1.7831	0.9968	3.320	5.554
	1.2	a=1.293e ⁻⁴ , k=42.6747	0.9993	0.803	2.723

2.3.2 大曲热风干燥模型的验证

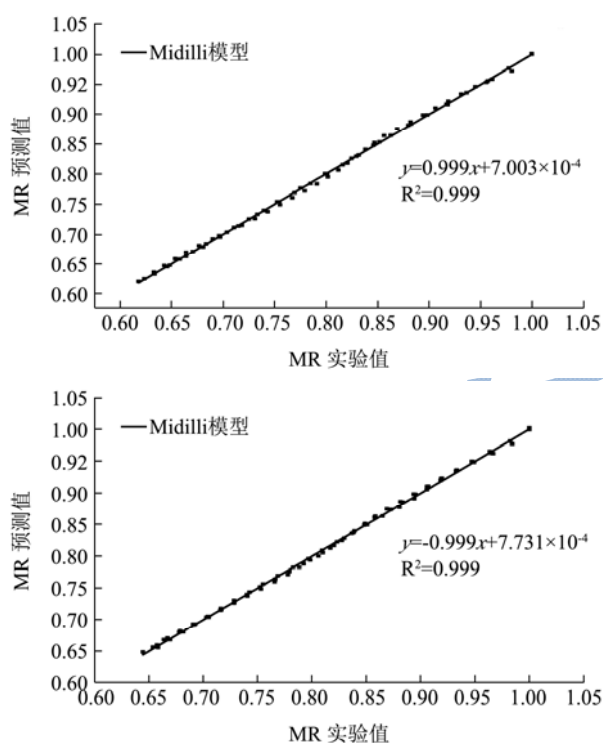


图5 不同干燥温度、风速下Midilli模型实测值和模型预测值的相关性

Fig.5 Correlation between measured values and predicted values of Midilli model under different temperatures and wind speed

为检测Midilli模型的准确度,验证模型的有效性,即判断实测值和Midilli模型预测值的接近程度,以MR实验值为横坐标, Midilli模型MR预测值为纵坐标作图进行线性拟合,通过线性方程得到的决定系数 R^2 来判断预测值和实测值之间的差异,如图5、6所示。

由图5可知,在不同干燥温度和不同干燥风速下Midilli模型拟合曲线的决定系数 R^2 均达到了0.999,

说明该模型拟合曲线的预测值与实验值之间有非常好的相关性, Midilli模型的拟合精度高。因此,选择Midilli模型作为大曲热风干燥过程的最佳动力学模型。

2.4 大曲热风干燥与曲虫致死情况的相关性

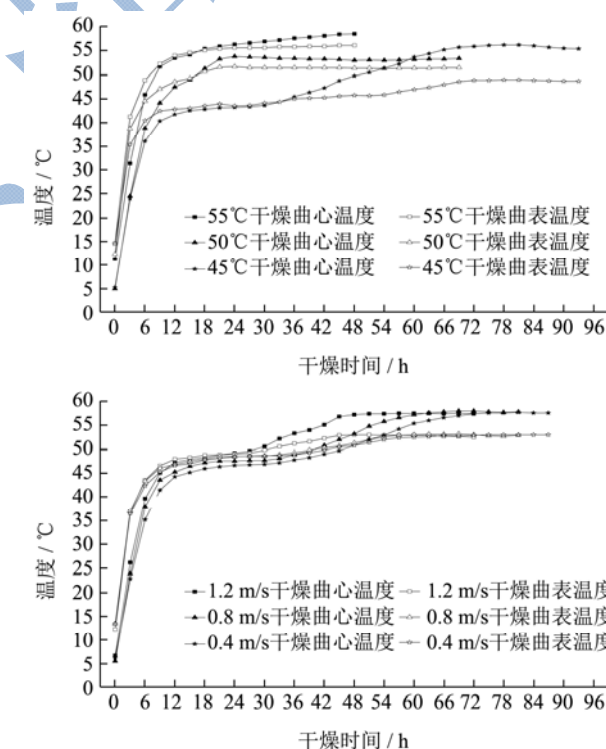


图6 大曲在不同干燥温度、风速下的温度变化曲线

Fig.6 Temperature variation curve of Daqu under different drying temperatures and air speeds

不同热风干燥温度、风速下,干燥过程中大曲表层和中心的温度随时间的变化曲线如图6所示,干燥环境中两种曲虫死亡情况如表5所示。

表5 两种曲虫在不同干燥温度、风速下校正死亡率变化情况

Table 5 Correction of mortality changes in two kinds of Daqu pests under different drying temperatures and air speeds

曲虫品种	不同温度条件			不同风速条件		
	45 °C	50 °C	55 °C	0.4 m/s	0.8 m/s	1.2 m/s
咖啡豆象	100%	100%	100%	100%	100%	100%
土耳其扁谷盗	100%	100%	100%	100%	100%	100%

在 45 °C 下对咖啡豆象、土耳其扁谷盗进行热处理,校正死亡率达到 100%的时间分别为 180 min、750 min^[17]。由图 6 可知,在 45 °C、50 °C 和 55 °C 下干燥时曲心温度达到 45 °C 持续的时间分别为 57 h、57 h 和 42 h,在 0.4 m/s、0.8 m/s 和 1.2 m/s 下持续时间分别为 72 h、69 h 和 63 h。从表 5 可以看出,大曲干燥结束后环境中两种曲虫都已经全部死亡,说明不同温度下干燥的条件要比曲虫完全致死的条件更加苛刻,所以在不同干燥温度下大曲完成热风干燥后,干燥环境和大曲内部的曲虫能够完全死亡。

3 结论

热风干燥作为目前我国应用最为广泛的一种干燥技术,本文利用热风干燥技术对排潮降温期大曲干燥特性进行了研究,并探究了热风干燥最佳动力学模型和与曲虫致死的相关性研究。得出的结论如下:

3.1 大曲干燥的整个过程主要为降速干燥阶段。随着热风温度的升高,大曲内部水分扩散的速度加快,干燥速率也越快。干燥速率随着风速的升高而略有增加,但风速对干燥速率的影响较小。

3.2 干燥温度为 45 °C~55 °C 时,大曲的水分有效扩散系数 D_{eff} 在 $1.113\sim 2.218\times 10^{-9}$ 范围内波动;风速在 0.4 m/s~1.2 m/s 时, D_{eff} 在 $1.101\sim 1.265\times 10^{-9}$ 之间;且 D_{eff} 随着干燥温度和干燥风速的升高而升高。大曲的干燥活化能 E_a 为 59.744 kJ/mol,说明从大曲中去除 1 mol 水分所需的最低能量为 59.744 kJ。

3.3 不同干燥温度和风速下的 8 种动力学模型中, Midilli 模型与其他模型相比其 R^2 最大, χ^2 和 RMSE 最小,对大曲干燥过程实验数据的拟合程度最高,验证模型的有效性,发现 R^2 均达到了 0.999,所以选择 Midilli 模型作为大曲热风干燥的最适动力学模型。

3.4 曲心温度达到 45 °C 持续的时间长于两种曲虫在 45 °C 下完全致死的时间,大曲干燥结束后环境中的两种曲虫也全部死亡,因此大曲完成热风干燥后,干燥环境和大曲内部的曲虫能够完全死亡。

本研究探索出大曲干燥阶段主要是降速干燥阶段,排潮降温期大曲热风干燥的最适数学模型为 Midilli 模型,此工艺达到干燥大曲和杀灭曲虫的目的。在今后的研究中,将通过对比经过热风干燥工艺后的大

曲在理化生化、风味和微生物群落等方面进行研究,以期为进一步优化大曲干燥工艺提供技术依据。

参考文献

- [1] 胡承, 郭捷锋, 沈才洪, 等. 浓香型(泸型)大曲的研究及其应用[J]. 酿酒科技, 2004, 121(1): 33-36
HU Cheng, WU Jie-feng, SHEN Cai-hong, et al. Research on Luzhou-flavor Daqu stater & application [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2004, 121(1): 33-36
- [2] 王富花, 沈发治, 张占军. 大曲害虫的发生、危害及治理[J]. 酿酒科技, 2009, 181(7): 56-58
WANG Fu-hua, SHEN Fa-zhi, ZHANG Zhan-jun. The occurrence, the harm and the prevention of Daqu pests [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2009, 181(7): 56-58
- [3] 程开禄, 黄富, 潘学贤, 等. 论析大曲曲虫的发生及危害[J]. 酿酒, 2000, 140(5): 28-29
CHENG Kai-lu, HUANG Fu, PAN Xue-xian, et al. Analysis the occurrence and harm of Daqu pest [J]. Liquor Making, 2000, 140(5): 28-29
- [4] 程开禄, 黄富, 潘学贤, 等. 酒曲害虫的发生、危害与大曲生产周期的关系研究[J]. 酿酒科技, 2000, 100(4): 32-33
CHENG Kai-lu, HUANG Fu, PAN Xue-xian, et al. Relationship between the occurrence of Daqu pests and the period of Daqu production [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2000, 100(4): 32-33
- [5] 于蒙杰, 张学军, 李超新, 等. 红枣热风干燥特性的试验研究[J]. 农机化研究, 2014, 11: 176-179
YU Meng-jie, ZHANG Xue-jun, LI Chao-xin, et al. The experimental study of red hot air drying characteristics [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 11: 176-179
- [6] 王君. 传统熟化甘薯干燥工艺、模型及品质变化研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2012
WANG Jun. Study on optimization of drying technology mathematical modeling and quality changes of traditional cooked sweet potatoes during hot-air dring [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2012
- [7] 唐璐璐. 干燥方式对丰水梨片干燥特性及品质影响的研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2016

- TANG Lu-lu. Effect of drying methods on drying characteristics and quality of feng shui pear slices [D]. Alaer: Tarim University, 2016
- [8] 张会娜,吕建华,亚川川,等.高温处理对玉米象成虫死亡率和水分含量的影响[J].河南工业大学学报:自然科学版,2014,35(6):45-48
- ZHANG Hui-na, LV Jian-hua, YA Chuan-chuan, et al. Study on preparation of sesame protein from subcritical sesame cake [J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2014, 35(6): 45-48
- [9] GB/T 5009.3-2003,食品中水分的测定[S]
- GB/T 5009.3-2003, Determination of Moisture in Food [S]
- [10] 钱婧雅,张茜,王军,等.三种干燥技术对红枣脆片干燥特性和品质的影响[J].农业工程学报,2016,32(17):259-265
- QIAN Jing-ya, ZHANG Qian, WANG Jun, et al. Effects of three drying technologies on drying characteristics and quality attributes of jujube crisps [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(17): 259-265
- [11] 王存堂,张雄峰,杨丽,等.干制温度和切片厚度对山楂切片热风干制动力学的影响[J].食品工业科技,2016,37(13):131-136
- WANG Cun-tang, ZHANG Xiong-feng, YANG Li, et al. Effect of temperature and slice thickness on drying kinetics of hot-air drying of hawthorn slices [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(13): 131-136
- [12] 邓红,尤毅娜,李宁,等.猕猴桃片的热风干燥特性[J].食品与发酵工业,2014,40(11):165-170
- DENG Hong, YOU Yi-na, LI Ning, et al. The hot air drying on kiwi fruit slices [J]. Food and Fermentation Industry, 2014, 40(11): 165-170
- [13] 王强,邓朝芳,任彦荣,等.无核紫葡萄干燥特性及其总酚含量变化研究[J].食品科学,2016,37(5):62-66
- WANG Qiang, DENG Chao-fang, REN Yan-rong, et al. Drying characteristics and change in total polyphenol content of seedless purple grapes [J]. Food Science, 2016, 37(5): 62-66
- [14] 王军,程晶晶,余垒.南瓜片热风-微波联合干燥特性及品质评价[J].食品工业,2016,37(4):84-88
- WANG Jun, CHENG Jin-jin, YU Lei. Characteristics of combined hot-air and microwave drying for pumpkin slice and quality evaluation [J]. Food Industry, 2016, 37(4): 84-88
- [15] 任丽芳,张超,赵晓燕,等.西兰花叶干燥模型的建立和验证[J].食品科技,2015,40(10):30-34
- REN Li-fang, ZHANG Chao, ZHAO Xiao-yan, et al. Construction and validation of the drying model for broccoli leaves [J]. Food Science and Technology, 2015, 40(10): 30-34
- [16] 王军,程晶晶,牛亚冰.番薯片热风与微波联合干燥特性及品质评价[J].食品工业科技,2016,37(2):138-147
- WANG Jun, CHENG Jing-jing, NIU Ya-bing. Characteristics of combined hot-air and microwave drying for sweet potato slice and quality evaluation [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(2): 138-147
- [17] 周平,罗惠波,黄丹,等.中温热处理对酒曲害虫杀灭效果的研究[J].中国酿造,2015,34(12):64-68
- ZHOU Ping, LUO Hui-bo, HUANG Dan, et al. Effect of moderate temperature heat treatment on pest mortality in Jiuqu [J]. China Brewing, 2015, 34(12): 64-68