doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.038

基于均匀板加热法的饲料糊化参数试验研究

金　楠　方　鹏　王红英　段恩泽
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 提出一种应用铸铝板对饲料样品夹持加热的装置及方法。通过将预调好含水率的饲料密封于自封袋中,夹持于一组平行可控温的铸铝板内,实现对样品的加热。基于一维热传导方程、借助 Matlab 有限差分法,求解得到样品从室温加热到设定温度的温度曲线,以此评估饲料样品在受热过程中的温度分布情况。结果显示,样品达到温度均匀分布所需的时间尺度远小于样品糊化的时间尺度,可实现对样品热处理时间的准确控制。在此基础上,以育肥猪配合饲料粉料为研究对象,以饲料的糊化温度、糊化时间和饲料含水率为试验因素,以饲料热处理后的糊化度为评价指标,按照三因素五水平二次回归正交旋转组合试验方法,利用 Design-Expert 软件回归分析和响应面分析法,建立了饲料糊化度与 3 个因素的二次回归模型(R^2 = 0.942 0),并验证了回归模型的有效性。在对饲料样品热处理后的色差分析中发现,在某些条件下,过高的热处理温度并不能提高饲料的糊化度,反而会加剧美拉德反应,导致饲料颜色加深,影响外观质量。

关键词: 配合饲料; 糊化参数; 均匀板加热法; 色差分析
中图分类号: S816.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)10-0329-08

Experiment on Feed Gelatinization Parameters Based on Homogeneous Plate Heating Method

JIN Nan　FANG Peng　WANG Hongying　DUAN Enze
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In the study of gelatinization characteristics and kinetics of starchy raw materials, hydrothermal treatment with controllable parameters was needed, but the effect of heating methods on homogenization of temperature distribution of samples was usually neglected. A device and method for clamping and heating feed samples with cast aluminium plates were presented. The moisture-adjusted feed samples were sealed in zip lock bags and clamped in a set of parallel temperature-controlled cast aluminium plates for heating treatment. Based on one-dimensional heat conduction equation, the temperature curves from room temperature to setting temperature were obtained by using the finite difference method of Matlab, and the temperature homogenization of feed samples during heating process was evaluated. The results showed that the device could achieve full homogenization of samples temperature distribution in a short time, and the time scale for achieving homogeneous temperature distribution of samples was much smaller than the gelatinization time scale, which indicated that the time for heat treatment of samples could be controlled accurately. On this basis, taking the formula feed for finishing pigs as research material, the pasting temperature, pasting time and feed moisture were selected as the influencing factors, and the degree of gelatinization was selected as evaluating indicators, thus the quadratic regression orthogonal rotatory combination experiments were carried out. As a consequence, the order of influence of each factor on feed gelatinization degree was feed moisture, pasting temperature and pasting time. A quadratic regression model (R^2 = 0.942 0) for feed gelatinization degree and three factors was established by regression analysis and response surface analysis with Design-Expert software, and the validity of the regression model was verified. In the analysis of chromatic aberration of feed samples after heat treatment, it was found that excessive heat treatment temperature would not increase the gelatinization

收稿日期: 2019-08-06　修回日期: 2019-08-30
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0500600)和现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-43-D-2)
作者简介: 金楠(1993—),男,博士生,主要从事饲料加工工艺技术与装备研究,E-mail: jinnan@cau.edu.cn
通信作者: 王红英(1966—),女,教授,博士生导师,主要从事饲料加工及畜禽养殖技术与装备研究,E-mail: hongyingw@cau.edu.cn

degree of feed under certain conditions; on the contrary, it would intensify Maillard reaction leading to the deepening of feed color and affecting the appearance quality.

Key words: formula feed; gelatinization parameters; homogeneous plant heating method; chromatic aberration analysis

0 引言

调质工艺是影响颗粒饲料加工质量的重要因素之一。饲料原料通过调质器桨叶的搅拌混合,在与饱和蒸汽充分进行湿热传递的过程中发生糊化,在提高饲料中营养物质消化利用率的同时,改善了饲料成型特性[1]。文献[2]指出,温度和时间是影响糊化的主要因素,但目前尚无文献给出优化饲料糊化的确切参数。

现有饲料调质工艺研究中,主要包括对饲料及饲料原料比热、热导率等热特性的分析[3-5],饲料调质器的传质过程、物料运动过程的建模仿真模拟及优化[6-7],饲料糊化度的测定方法[8],以及在生产条件下探究调质温度、调质时间对饲料热敏性组分和饲料质量的影响等方面[2,9-10],而对饲料糊化特性、糊化过程和糊化参数的基础研究较少[11]。

在饲料淀粉源原料的糊化特性及其动力学研究中,往往需要对原料进行可控参数的水热处理。文献[12]使用 DSC(差示扫描量热法)程序控温,对不同糖添加量的木薯淀粉进行热处理,研究其糊化动力学;文献[13]将糯玉米淀粉悬浮液密封于铝坩埚后,置于热水浴中对其进行加热处理;文献[14]则是将小麦淀粉样品加水后置于试管内,放入水浴锅隔水加热;此外还有油浴加热[15]等处理方式。在热处理过程中样品温度的均匀性通常被忽视,达到温度均匀分布所需的时间尺度可能比糊化时间尺度大得多,这对糊化时间的控制、重复试验结果的稳定性是不利的。

本文提出一种应用铸铝板对饲料样品夹持加热的装置及方法,并使用样品从室温加热到设定温度的温度曲线,对板加热装置实现样品均匀加热的方法进行评估。以育肥猪配合饲料粉料为对象,基于该装置研究温度、时间、含水率 3 个糊化参数对饲料糊化度的影响,并分析饲料热处理后的色差变化,以期为饲料热处理及糊化参数的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

基于正交旋转组合试验原理,以饲料糊化过程中的糊化温度、糊化时间和饲料含水率 3 个参数为试验因素,以饲料热处理后的糊化度 Y 为评价指标,开展三因素五水平二次回归正交旋转组合试验,因素编码如表 1 所示,各试验因素取值范围参照文献[15]及饲料调质工艺参数,共进行 23 次试验[16]。并利用 Design-Expert 软件回归分析法和响应面分析法,建立饲料糊化度的数学模型。

表 1 二次回归正交旋转组合试验因素编码

Tab. 1 Factors and codes of quadratic regression orthogonal rotatory combination design

编码	因素		
	温度 x_1/℃	时间 x_2/min	含水率 x_3/%
1.682	101.8	36.8	34.1
1	95.0	30.0	30.0
0	85.0	20.0	24.0
-1	75.0	10.0	18.0
-1.682	68.2	3.2	13.9

1.2 试验材料及预处理

本试验所用饲料为育肥猪配合饲料粉料(混合后调质处理前),取自北京首农畜牧发展有限公司饲料分公司,其配方组成(质量分数)为:玉米 66.52%、豆粕 15.15%、麦麸 8.00%、玉米干全酒糟 7.00%、石粉 0.85%、磷酸氢钙 0.48%、复合预混料 2.00%。经高速万能粉碎机(天津泰斯特仪器有限公司)粉碎后过 70 目筛,样品初始含水率为 10.78%,根据不同试验组别水分要求调整饲料含水率,通过往原始粉料中喷洒计算好的达到目标含水率所需蒸馏水量,并充分混合 15 min 后装入聚乙烯密封袋中,置于 4℃的冰箱平衡 48 h,期间每隔 8 h 晃动一次,每次持续 1 min,以保证获得含水率均一的已知含水率样品。根据试验要求分别取 2 g 样品于自封袋(60 mm × 85 mm)中密封,共 23 份不同含水率处理组饲料样品用于后续热处理。

1.3 饲料板加热处理装置

利用自主搭建的铸铝板加热装置对不同含水率处理组的饲料进行热处理,如图 1 所示。智能温控器开启并设定加热温度后,铸铝加热板(150 mm × 150 mm × 20 mm)开始升温加热,温度传感器实时监测铸铝板温度并反馈至温控箱,实现对加热板温度的精准控制;待实时温度达到目标设定值,将装有样品的自封袋铺平后放入两加热板间夹持热处理使饲料糊化,处理时间依据各试验组别;待达到加热时长,将装有样品的自封袋立即取出置于冰袋上,以迅速停止饲料的糊化进程。该铸铝板加热装置升温速

度快、发热均匀、导热性能好，同时样品的需要量少、操作方便，可以很好地实现饲料样品在热处理过程中的均匀糊化。

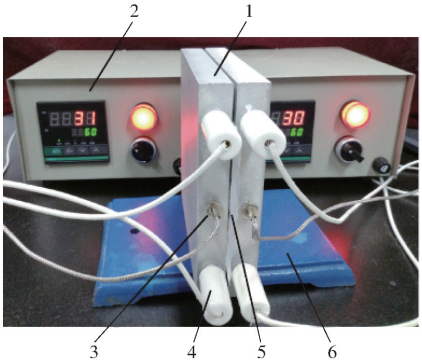

图 1　基于均匀板加热法的饲料热处理装置

Fig. 1　Heat treatment device for feed based on homogeneous plate heating method

1. 铸铝加热板　2. 智能温控器　3. 温度传感器　4. 接线柱　5. 样品　6. 隔热垫板

1.4　饲料糊化度的测定

饲料样品糊化度的测定方法参照文献[17]提出的简易酶法。酶溶液选用糖化酶(*Amyloglucosidase*，CAS：9032－08－0，上海源叶生物科技有限公司)配制，酶解最适温度为 50℃。在紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司) 420 nm 波长下读取吸光度，糊化度计算公式为

$$Y=\frac{A_s-A_b}{A_t-A_b}\times 100\% \tag{1}$$

式中　A_s——待测样品的吸光度

A_b——空白吸光度

A_t——全糊化样品的吸光度

1.5　饲料色差的测定

将饲料原样及热处理后的各试验组样品放置于铝盒中，在温度设定为 40℃的电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司)中静置 12 h，干燥至质量恒定，用于样品的色差测定，以排除水分对色度的影响。样品的色度参数使用 LabScan XE 型分光测色仪(美国 HunterLab 公司)测定，色差计算公式为

$$\Delta E^*=[(\Delta L^*)^2+(\Delta a^*)^2+(\Delta b^*)^2]^{1/2} \tag{2}$$

式中　ΔL^*、ΔA^*、ΔB^*——标准参考白板与被测样品色度参数 L^*、A^*、B^* 值的差值

2　结果与分析

2.1　饲料板加热处理的均匀性分析

2.1.1　一维热传导方程的有限差分法求解

本文提出了一种运用铸铝板夹持对饲料进行热处理的方法，为评估整个样品在受热过程中的温度均匀性，将饲料的传热过程假设为一维热传导方程，公式为

$$\frac{\partial u}{\partial t}=\alpha\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{3}$$

其中

$$\alpha=\frac{k}{\rho c} \tag{4}$$

式中　u——样品温度，℃

t——传热时间，s

x——样品厚度，mm

α——导温系数，m^2/s

k——热导率，W/(m·K)

ρ——堆积密度，kg/m^3

c——比热容，J/(kg·K)

通过测量，本研究热处理样品厚度 $x=0.8$ mm，同时参照相关饲料热特性的研究[4-5]，确定样品在 25℃初始条件下，$c=2\ 025.60$ J/(kg·K)，$\rho=671.00$ kg/m^3，$k=0.092$ W/(m·K)，计算得到 $\alpha=6.77\times10^{-8}$ m^2/s。并借助 Matlab 有限差分法编程求解热传导方程。

有限差分法是将求解区域划分为差分网格，用有限个网格节点代替连续的求解域，通过已知的传热方程，建立一个关于时间和样品厚度的函数，如图 2 所示，图中，T 为传热总时长，L 为样品总厚度，时间步长 $\Delta t=T/N$，空间步长 $\Delta x=L/M$，M、N 分别为差分网格设置的空间点数和时间点数[18]。通过对原方程建立的差分格式，把原方程离散到各个节点上进而计算数值近似解。

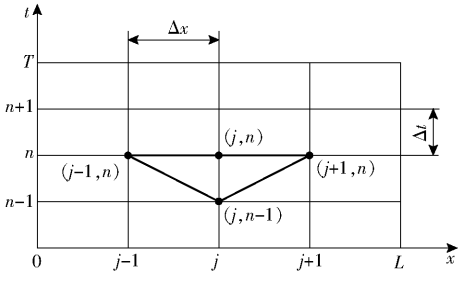

图 2　热传导方程隐格式网格划分

Fig. 2　Implicit scheme mesh generation for heat conduction equation

$u(x,t)$ 关于 t 的向后差商为[18]

$$\frac{\partial u}{\partial t}\approx\frac{u(j,n)-u(j,n-1)}{\Delta t} \tag{5}$$

关于 t 的二阶中心差商为[18]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\approx\frac{u(j+1,n)-2u(j,n)+u(j-1,n)}{(\Delta x)^2} \tag{6}$$

对式(3)进行离散，离散后的方程为

$$\frac{u(j,n)-u(j,n-1)}{\Delta t}=\alpha\frac{u(j+1,n)-2u(j,n)+u(j-1,n)}{(\Delta x)^2} \tag{7}$$

令 $r=\frac{\alpha\Delta t}{(\Delta x)^2}$,则式(7)转化为[18-19]

$$(1+2r)u(j,n)-ru(j+1,n)-ru(j-1,n)=u(j,n-1) \tag{8}$$

可转换为矩阵形式

$$\begin{bmatrix}1+2r & -r & 0 & 0 & \cdots & 0\\ -r & 1+2r & -r & 0 & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots\\ 0 & 0 & -r & 1+2r & -r & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r & 1+2r\end{bmatrix}_{(M-1)\times(M-1)}\times$$

$$\begin{bmatrix}u(1,n)\\ u(2,n)\\ \vdots\\ u(M-2,n)\\ u(M-1,n)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}u(1,n-1)+ru(0,n)\\ u(2,n-1)\\ \vdots\\ u(M-2,n-1)\\ u(M-1,n-1)+ru(M,n)\end{bmatrix} \tag{9}$$

2.1.2 热处理中的温度变化

以铸铝板加热温度设定为 75℃为例,分析样品自夹持在板间加热开始后的温度曲线分布情况,如图 3 所示。样品的初始温度为 25℃,随着加热时间变化,由样品与铸铝板接触处逐渐向样品内部传热,自起始加热后 5 s 内达到均匀的温度分布,若提高加热板设定温度,将会缩短样品温度均匀分布的时间。由此可见,在相对较短时间内,本文所采用的板加热装置保证了样品温度分布的充分均匀性,实现对样品处理时间的准确控制。

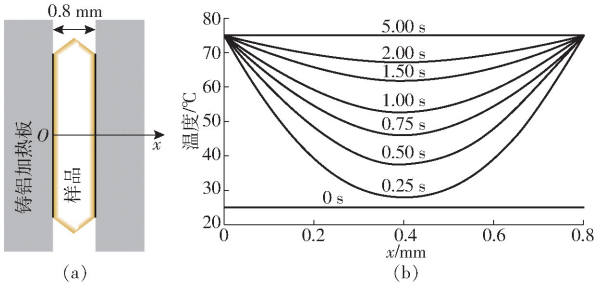

图 3 样品加热处理中温度曲线分布

Fig. 3 Calculated temperature profiles of sample during heating treatment

热处理过程中样品温度分布的均匀性在淀粉源物料糊化等研究中至关重要,不均匀加热可能导致样品不同区域糊化程度的差异,使试验结果的原因分析复杂化[20]。水分子在淀粉颗粒中的扩散对于糊化过程起着重要作用,但样品的不均匀加热会出现“水分掠夺效应”,即当样品的某一区域比其周围更早达到糊化温度时,淀粉颗粒会从周围吸收可用的水分子,给水分子向相邻区域的扩散带来阻力,尤其在限制水分条件下更加明显[21]。

2.2 糊化度回归模型的建立

2.2.1 回归模型及显著性检验

以温度、时间、含水率 3 个试验因素的编码值 X_1、X_2、X_3为自变量,以饲料热处理后测定的糊化度 Y 为评价指标的二次回归正交旋转组合试验结果如表 2 所示。

表 2 二次回归正交旋转组合试验方案及结果

Tab. 2 Scheme and results of quadratic regression orthogonal rotatory combination design

试验序号	X_1	X_2	X_3	Y/%	ΔE^*
1	-1	-1	-1	21.54	35.21
2	1	-1	-1	19.08	36.56
3	-1	1	-1	15.57	36.63
4	1	1	-1	14.38	38.10
5	-1	-1	1	29.02	37.64
6	1	-1	1	54.33	40.17
7	-1	1	1	27.18	38.63
8	1	1	1	46.30	44.18
9	-1.682	0	0	21.33	35.71
10	1.682	0	0	26.37	42.35
11	0	-1.682	0	16.28	35.89
12	0	1.682	0	17.93	37.85
13	0	0	-1.682	16.72	36.60
14	0	0	1.682	47.17	42.14
15	0	0	0	14.32	36.36
16	0	0	0	17.68	36.79
17	0	0	0	17.75	37.24
18	0	0	0	17.25	37.64
19	0	0	0	15.07	37.67
20	0	0	0	12.70	37.75
21	0	0	0	18.80	38.44
22	0	0	0	15.13	37.22
23	0	0	0	17.87	37.61

应用 Design-Expert 软件对试验结果进行分析,得到糊化度 Y 与各试验因素编码值的二次回归模型为

$$Y=16.21+3.61X_1-1.30X_2+10.07X_3-0.62X_1X_2+6.01X_1X_3+0.10X_2X_3+3.43X_1^2+1.04X_2^2+6.29X_3^2 \tag{10}$$

回归模型的方差分析结果如表 3 所示,该回归模型 $F=23.45$,$P<0.0001$,回归方程关系极显著;决定系数 $R^2=0.9420$,校正决定系数 $R^2_{adj}=0.9018$,说明该回归方程拟合度较高、可靠性较好,可用于对试验结果的分析;由方差分析中的 P 值可知,饲料处理温度 X_1、饲料含水率 X_3、交互项 X_1X_3及 X_1^2、X_3^2 对糊化度 Y 的影响极显著。通过依次固定 3 个试验因素中的 1 个因素为零水平,由 Design-Expert 软件绘制其他 2 个因素对饲料糊化度影响的交互作用结果见图 4。由图可见,在本试验中升高温度将不同程

表 3　糊化度回归模型方差分析

Tab. 3　ANOVA for regression model of degree of gelatinization

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
回归模型	2 702. 77	9	300. 31	23. 45	<0. 000 1 **
X_1	177. 65	1	177. 65	18. 21	0. 000 9 **
X_2	23. 11	1	23. 11	3. 38	0. 089 1
X_3	1 383. 79	1	1 383. 79	141. 82	<0. 000 1 **
X_1X_2	3. 03	1	3. 03	0. 31	0. 587 1
X_1X_3	288. 96	1	288. 96	29. 61	0. 000 1 **
X_2X_3	0. 08	1	0. 08	0. 01	0. 929 2
X_1^2	186. 82	1	186. 82	15. 53	0. 001 7 **
X_2^2	17. 33	1	17. 33	0. 88	0. 364 1
X_3^2	628. 84	1	628. 84	57. 66	<0. 000 1 **
残差	166. 48	13	12. 81		
失拟项	133. 10	5	26. 62	6. 38	0. 011 2
纯误差	33. 38	8	4. 17		
总和	2 869. 25	22			

注：**表示差异极显著，下同。

度地提高饲料的糊化度，温度是促使饲料糊化的必需条件，通过升高温度可获取饲料糊化所需的活化能[21]；提高饲料含水率有助于饲料的糊化，而加热时间处于低水平时饲料糊化度较高，但随着加热时间的延长糊化度呈下降趋势，加热时间越长越不利于淀粉的糊化。对糊化度的影响因素从大到小依次为含水率、温度、时间。

2. 2. 2　回归模型中的因素主效应分析

由方差分析可知，饲料糊化时间 X_2 对糊化度的影响不显著，因此仅对温度 X_1 和含水率 X_3 两个因素的主效应进行分析。图 5a 所示为糊化温度 X_1 对糊化度的主效应影响图，可见当含水率 X_3 取 0、1 水平时，温度对糊化度的影响呈上升趋势，当含水率 X_3 取 −1 水平时，随着温度的增加对糊化度的影响呈下降趋势。也就是说，在含水率较高情况下尤其是大于 24% 水平，糊化度随温度升高而上升，但低含水率情况下升温甚至可使饲料糊化度下降。这可能是因为低含水率处理饲料，使淀粉分子形成了高分子淀粉的集聚体，进而使淀粉晶型更加紧密，分子间氢键难以断裂，导致糊化度下降[22-23]。在实际加工中，饲料往往是在限制水分条件下加热的，低含水率高温处理对饲料糊化度下降的影响有待进一步研究。

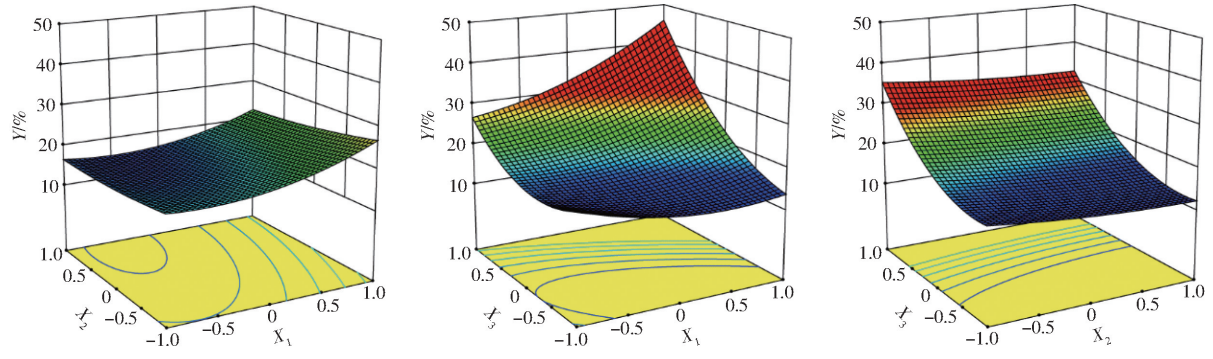

图 4　试验因素交互作用响应曲面

Fig. 4　Surface diagrams of interaction of test factors

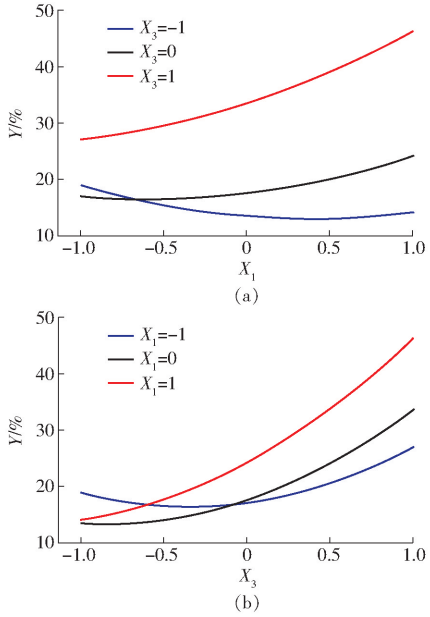

图 5　主效应影响分析

Fig. 5　Validation results of regression model

图 5b 所示为饲料含水率 X_3 对糊化度的主效应影响图，可见当温度 X_1 取 0、1 水平时，随着含水率的升高糊化度增长趋势较明显，而当温度 X_1 取 −1 水平，即低温 75℃ 时，在低含水率区域随着含水率增加糊化度略有降低，但随后糊化度呈现明显的增长趋势。

2. 2. 3　回归模型的验证

图 6 为用式(10)得到的育肥猪配合饲料粉料糊化度的预测值与实测值之间的对比结果。可见预测方程斜率较接近于 1，截距相较于 0 略有偏差，但式(10)仍可对育肥猪配合饲料粉料在不同温度、时间、含水率条件下热处理后的糊化度进行有效预测。

2. 3　饲料色差变化的相关性分析

如图 7 所示，不同试验组别经过板加热处理后

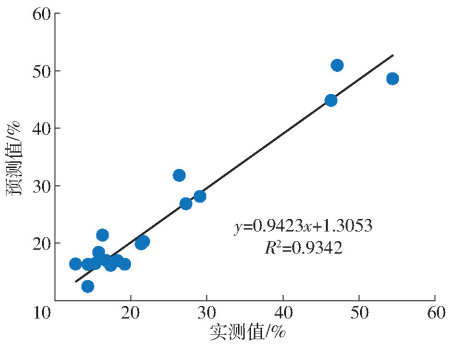

图 6 回归模型验证结果

Fig. 6 Validation results of regression model

的饲料颜色发生了变化,且颜色差异明显。各试验组别的色差 ΔE^* 结果见表 2,色差越大,表明饲料颜色越深。饲料色泽是饲料外观质量之一,从动物视觉角度来看,影响畜禽对饲料的采食量[24],饲料色泽主要受饲料配方、加工工艺和有色添加剂等的影响[25]。为研究饲料热处理对饲料色泽的影响,对样品热处理后的色差、糊化度与糊化参数进行了 Pearson 相关性分析,如表 4 所示。

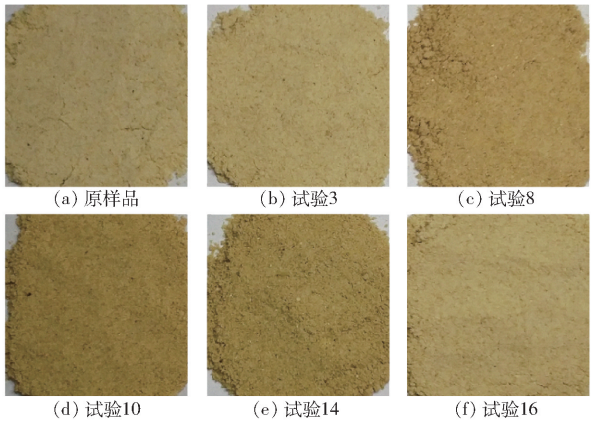

图 7 热处理后风干饲料样品

Fig. 7 Air-dried feed samples after heating treatment

表 4 色差、糊化度与糊化参数的相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis of chromatic aberration, gelatinization degree and gelatinization parameters

参数	色差 ΔE^*		糊化度 Y		温度 x_1		时间 x_2		含水率 x_3	
	相关系数	Sig. 值	相关系数	Sig. 值	相关系数	Sig. 值	相关系数	Sig. 值	相关系数	Sig. 值
色差 ΔE^*	1		0.737**	<0.001	0.572**	0.004	0.292	0.177	0.608**	0.002
糊化度 Y	0.737**	<0.001	1		0.249	0.252	−0.090	0.684	0.694**	<0.001

结果显示,在本研究中,色差 ΔE^* 与糊化度 Y、温度 x_1、含水率 x_3 存在极显著的相关关系,但相关系数并不高,从大到小依次为糊化度、含水率、温度。而糊化度只与糊化参数中的含水率存在极显著的相关性。对比分析可知,饲料热处理色差的变化除与糊化度有关外,还存在独立于糊化度且与温度相关的因素。由此推断,美拉德反应是试验中引起色差变深的另一重要原因,美拉德反应是还原糖和蛋白质氨基之间化学反应的复杂网络,且温度是影响其反应速率的最重要参数之一,通常温度每提升 10℃,反应速率可提高 3~5 倍[26],这种反应通常在食品及饲料的加工和储存中发生,反应过程伴随褐变现象,并产生非挥发性有色化合物和含氮的棕色聚合物等反应产物,随反应的持续进行,反应体系的颜色变得越来越深[27]。

综上所述,过高的热处理温度,在某些特定条件下并不会提高饲料的糊化度,反而会加剧美拉德反应,导致饲料颜色加深影响外观质量。

3 结论

(1)提出一种应用铸铝板对饲料样品夹持加热的装置及方法。通过将预调好含水率的饲料密封于自封袋中,夹持于一组平行可控温的铸铝板内,实现对样品的加热。并将该传热过程表示为一维热传导方程,借助 Matlab 有限差分法求解得到样品从室温加热到设定温度的温度曲线。对饲料样品在受热过程中温度均匀性的评估结果表明,该装置可以在较短时间内,实现样品温度分布的充分均匀性,样品达到温度均匀分布所需的时间尺度远小于糊化的时间尺度,可在一定程度上实现对样品热处理时间的准确控制。

(2)基于板加热装置及方法,以育肥猪配合饲料粉料为研究对象,通过三因素五水平二次回归正交旋转组合试验,得出各试验因素对饲料糊化度的影响大小依次为:饲料含水率、糊化温度、糊化时间。通过 Design-Expert 软件对试验结果进行回归分析,得到饲料糊化度与各试验因素的二次回归模型(R^2 =0.942 0),通过对比试验值与预测值,验证了回归模型的有效性。在对饲料热处理后的色差分析中发现,在某些条件下,过高的热处理温度并不能提高饲料的糊化度,反而会加剧美拉德反应,导致饲料颜色加深,影响外观质量。

参 考 文 献

[1] 曹康, 郝波. 中国现代饲料工程学[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2014.

[2] LEWIS L L, STARK C R, FAHRENHOLZ A C, et al. Evaluation of conditioning time and temperature on gelatinized starch and vitamin retention in a pelleted swine diet[J]. Journal of Animal Science, 2015,93(2):615 - 619.

[3] 孔丹丹, 方鹏, 王红英, 等. 高含量乳清粉的仔猪配合饲料热特性及调质温度控制[J]. 农业工程学报, 2017,33(16):299 - 307.
KONG Dandan, FANG Peng, WANG Hongying, et al. Thermal properties and conditioning temperature control of formula feeds containing high content of whey powder for weanling pigs[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(16):299 - 307. (in Chinese)

[4] 孔丹丹, 方鹏, 金楠, 等. 温度和粉碎粒度对不同能量饲料原料热物理特性的影响[J]. 农业工程学报, 2019,35(6):296 - 306.
KONG Dandan, FANG Peng, JIN Nan, et al. Effect of temperature and particle size on thermophysical properties of different energy feedstuffs material[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(6):296 - 306. (in Chinese)

[5] 孔丹丹, 陈啸, 杨洁, 等. 仔猪配合料比热预测模型的构建[J]. 农业工程学报, 2016,32(18):307 - 314.
KONG Dandan, CHEN Xiao, YANG Jie, et al. Establishment of specific heat prediction model for weaned piglet mash feed[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(18):307 - 314. (in Chinese)

[6] 彭飞, 方芳, 王红英, 等. 基于 CFD - DEM 的饲料调质器物料运动模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(12):355 - 363.
PENG Fei, FANG Fang, WANG Hongying, et al. Numerical simulation and experiment on raw material in feed conditioner based on coupled CFD - DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(12):355 - 363. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20181242&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.042. (in Chinese)

[7] 李恒, 李辉, 吴德胜, 等. 基于 CFD - DEM 耦合法的调质器传质过程建模与仿真[J]. 饲料工业, 2016,37(17):5 - 9.
LI Heng, LI Hui, WU Desheng, et al. Modeling and simulation of conditioner mass-transfer process based on CFD - DEM coupling method[J]. Feed Industry, 2016,37(17):5 - 9. (in Chinese)

[8] 王海东, 董致远, 吕小文, 等. 颗粒饲料淀粉糊化度的快速检测方法[J]. 农业工程学报, 2008,24(12):249 - 253.
WANG Haidong, DONG Zhiyuan, LÜ Xiaowen, et al. Rapid quantification of gelatinization degree of pellet feedstuff starch[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(12):249 - 253. (in Chinese)

[9] 牛化欣, 过世东, 祝爱侠. 水产沉性颗粒饲料挤压蒸煮工艺对其理化特性的影响[J]. 农业工程学报, 2011,27(9):368 - 374.
NIU Huaxin, GUO Shidong, ZHU Aixia. Effects of extrusion cooking processing on physicochemical properties of aquafeed sinking pellets[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(9):368 - 374. (in Chinese)

[10] 段海涛, 李军国, 秦玉昌, 等. 调质温度及模孔长径比对颗粒饲料加工质量的影响[J]. 农业工程学报, 2018,34(11):278 - 283.
DUAN Haitao, LI Junguo, QIN Yuchang, et al. Effects of conditioning temperature and length-diameter ratio of ring die on quality of pelleted feeds[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(11):278 - 283. (in Chinese)

[11] 金楠, 段恩泽, 王红英, 等. 梯度恒温水热处理饲料的糊化时间温度特性研究[J]. 农业工程学报, 2019,35(14):300 - 307.
JIN Nan, DUAN Enze, WANG Hongying, et al. Time and temperature characteristics of feed gelatinization applying gradient isothermal hydrothermal treatment[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(14):300 - 307. (in Chinese)

[12] ZHANG X, TONG Q, ZHU W, et al. Pasting, rheological properties and gelatinization kinetics of tapioca starch with sucrose or glucose[J]. Journal of Food Engineering, 2013,114(2):255 - 261.

[13] SABLANI S S, KASAPIS S, AL-TARQE Z H, et al. Isobaric and isothermal kinetics of gelatinization of waxy maize starch[J]. Journal of Food Engineering, 2007,82(4):443 - 449.

[14] TURHAN M, GUNASEKARAN S. Kinetics of in situ and in vitro gelatinization of hard and soft wheat starches during cooking in water[J]. Journal of Food Engineering, 2002,52(1):1 - 7.

[15] 胡友军, 周安国, 杨凤, 等. 饲料淀粉糊化的适宜加工工艺参数研究[J]. 饲料工业, 2002,23(12):5 - 8.

[16] 彭飞, 王红英, 方芳, 等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(4):140 - 147.
PENG Fei, WANG Hongying, FANG Fang, et al. Calibration of discrete element model parameters for pellet feed based on injected section method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(4):140 - 147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180416&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.016. (in Chinese)

[17] 熊易强. 饲料淀粉糊化度(熟化度)的测定[J]. 饲料工业, 2000,21(3):30 - 31.

[18] 史策. 热传导方程有限差分法的 MATLAB 实现[J]. 咸阳师范学院学报, 2009,24(4):27 - 29.
SHI Ce. Heat conduction equation finite difference method to achieve the MATLAB[J]. Journal of Xianyang Normal University, 2009,24(4):27 - 29. (in Chinese)

[19] 杨建宏. 抛物型方程有限差分法显-隐格式比较分析[J]. 河南科学, 2012,30(4):407 - 410.
YANG Jianhong. Comparation on explicit-implicit schemes of finite difference method for the parabolic equations[J]. Henan Science, 2012,30(4):407 - 410. (in Chinese)

[20] HERRERA-GOMEZ A, CANONICO-FRANCO M, RAMOS G. Aggregate formation and segregation of maize starch granules cooked at reduced moisture conditions[J]. Starch-Stärke, 2005,57(7):301 - 309.

[21] PEREZ-SANTOS D, VELAZQUEZ G, CANONICO-FRANCO M, et al. Modeling the limited degree of starch gelatinization [J]. Starch-Stärke, 2016,68(7/8):727 - 733.

[22] XUE Q, NEWMAN R K, NEWMAN C W. Effects of heat treatment of barley starches on in vitro digestibility and glucose responses in rats[J]. Cereal Chemistry, 1996,73(5):588 - 592.

[23] 王德培, 潘慧生. 干热处理对绿豆淀粉和豌豆淀粉化学组成的影响及其与粉丝品质的关系[J]. 浙江农业大学学报, 1997,23(增刊):49 - 53.
WANG Depei, PAN Huisheng. Effect of dry-air treatment on chemical compositions of mung bean starch and pea starch and eating quality of starch silk[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1997,23(Supp.):49 - 53. (in Chinese)

[24] 刘爽. 几种甜味剂、香味剂和饲料颜色对仔猪增重效果的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.

[25] 冯永江, 吴艳芬. 饲料产品色差原因分析[J]. 饲料工业, 2001,22(4):35 - 36.

[26] LAN X, LIU P, XIA S, et al. Temperature effect on the non-volatile compounds of Maillard reaction products derived from xylose-soybean peptide system: further insights into thermal degradation and cross-linking[J]. Food Chemistry, 2010, 120(4):967 - 972.

[27] 李良, 周艳, 滕飞, 等. 射流空化对大豆蛋白美拉德反应及产物乳化特性的影响[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8): 372 - 378.
LI Liang, ZHOU Yan, TENG Fei, et al. Effects of jet cavitation on Maillard reaction and conjugate structure and emulsifying properties of soy protein isolate[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8):372 - 378. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190841&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.041. (in Chinese)

(上接第 268 页)

[39] 杨秀才. 碳磷比对土壤磷素有效性的影响研究进展[J]. 土壤科学, 2019, 7(1): 10 - 15.
YANG Xiucai. Research progress in the effect of C/P ratio on soil phosphorus availability[J]. Hans Journal of Soil Science, 2019, 7(1): 10 - 15. (in Chinese)

[40] SMITH V H. Effects of nitrogen: phosphorus supply ratios on nitrogen fixation in agricultural and pastoral ecosystems[J]. Biogeochemistry, 1992, 18(1): 19 - 35.

[41] 张晗,欧阳真程,赵小敏. 不同利用方式对江西省农田土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(3): 1 - 12.
ZHANG Han, OUYANG Zhencheng, ZHAO Xiaomin. Effects of different land use types on ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in farmland soils in Jiangxi Province, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(3): 1 - 12. (in Chinese)

[42] AI Zemin, HE Lirong, XIN Qi, et al. Slope aspect affects the non-structural carbohydrates and C: N: P stoichiometry of *Artemisia sacrorum* on the Loess Plateau in China[J]. CATENA, 2017, 152: 9 - 17.

[43] 郭金瑞,宋振伟,彭宪现,等. 东北黑土区长期不同种植模式下土壤碳氮特征评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 178 - 185.
GUO Jinrui, SONG Zhenwei, PENG Xianxian, et al. Evaluation in soil carbon and nitrogen characteristics under long-term cropping regimes in black soil region of Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 178 - 185. (in Chinese)

[44] 肖烨,商丽娜,黄志刚,等. 吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征[J]. 地理科学, 2014, 34(8): 994 - 1001.
XIAO Ye, SHANG Li'na, HUANG Zhigang, et al. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in mountain swamps of eastern Jilin Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(8): 994 - 1001. (in Chinese)

[45] 王燕,赵哈林,董治宝,等. 荒漠绿洲农田盐渍化过程中土壤环境的演变过程[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1744 - 1751.
WANG Yan, ZHAO Halin, DONG Zhibao, et al. Change of soil physico-chemical characteristics in farmland salinization in arid oasis[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(11): 1744 - 1751. (in Chinese)