

# 不同前处理对饲料玉米比热的影响

王红英, 李倪薇, 高蕊, 杨洁, 康宏彬

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了明确以玉米为原料的配方饲料在调质、膨化、冷却过程中传热传质的基本特性, 该文利用差示量热扫描仪 (differential scanning calorimeter, DSC) 测比热的方法, 研究了自然干燥条件下, 不同的烘干温度 (45~105℃)、含水率 (12%~16%, 湿基计)、粉碎粒度 (0.2~0.6 mm) 等前处理因素对玉米比热的影响。采用 3 因素 5 水平 2 次正交旋转设计, 通过回归分析和响应面分析, 建立了玉米比热基于烘干温度、含水率 (湿基计)、粉碎粒度的数学模型。研究结果表明: 所得回归方程拟合情况良好, 当烘干温度为 45℃、含水率为 12% (湿基计)、粉碎粒度为 0.6 mm 时, 玉米的比热值最小为 2051J/(kg·K)。此模型的建立可为不同处理条件下玉米比热值的直接获得提供理论方法与依据, 为不同配方饲料的湿热加工特性研究提供参考。

**关键词:** 比热, 烘干, 含水率, 前处理, 玉米, 饲料加工

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.14.041

中图分类号: S816.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-14-0269-08

王红英, 李倪薇, 高蕊, 等. 不同前处理对饲料玉米比热的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 269-276.

Wang Hongying, Li Niwei, Gao Rui, et al. Effects of different pretreatments on specific heat of forage maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(14): 269-276. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

玉米不仅为人类提供了丰富多样的食品, 也是动物最重要的能量饲料之一。据统计, 玉米大约有 10% 用于生产淀粉、酒精, 75% 用于生产动物饲料。在饲料加工过程中, 常常需要对不同配方的饲料原料进行调质、膨化、冷却等诸多湿热加工。调质是乳猪料加工过程中的关键工艺之一, 调质效果直接决定了产品质量<sup>[1]</sup>。在调质过程中, 通过通入高质量的干饱和蒸汽, 为饲料提供充足的热量和水分, 使饲料中的淀粉得到充分糊化。掌握不同配方饲料的传热传质特性规律可以有效地控制调质过程中热量的高效供给。比热是单位质量的物质温度每升高或降低 1℃ (K) 所吸收或放出的热量<sup>[2]</sup>, 是物料传热特性的重要参数。

目前, 国内主要采用量热法对谷物及颗粒饲料的比热进行研究。杨洲等<sup>[3]</sup>研究了稻谷的热特性参数, 研究结果表明: 稻谷的比热与其含水率 (湿基计) 呈良好的线性正相关。宗力<sup>[4]</sup>利用混合法对 6 种颗粒饲料的比热做了初步的测定研究, 得到了颗粒饲料比热关于含水率 (湿基计) 和温度的二元数学模型。差示量热扫描仪是国内外使用得较广泛的仪器之一, 因为它可以获得大量的热力学数据<sup>[5]</sup>, 用 DSC 法测定食品比热已有一定研究。张素文<sup>[6]</sup>等利用差示量热扫描仪测定了不同含水率 (湿基

计) 的西兰花在 -35~40℃ 温度范围内的比热容, 得出西兰花比热容关于温度和含水率 (湿基计) 的经验公式。Jin Hu<sup>[7]</sup>等研究了不同脂肪含量对牛乳比热的影响, 并建立了不同温度下比热关于脂肪含量和温度的二元模型。结果表明, 在低脂乳中脂肪含量影响不显著, 高脂乳中显著。Murata<sup>[8]</sup>用 DSC 法测定了谷物的比热, 并研究了水分和温度对其比热特性的影响。目前关于比热的研究大多集中于探究含水率 (干基计) 与温度对其变化规律的影响<sup>[9-12]</sup>。综上所述表明, 在饲料中普遍应用的玉米比热特性研究很少, 特别是对玉米经前处理后, 同时考虑其烘干温度、粉碎粒度等影响因素条件下, 其比热特性的变化规律未见报道。因此, 本文利用 DSC 测定不同前处理条件下玉米的比热, 采用响应面分析方法建立了这 3 个因素与比热的回归模型, 以预测乳猪饲料在调质过程中 (调质温度 70~80℃), 玉米不同的前处理条件对其比热的影响, 为后期不同配方的饲料原料的湿热加工热特性参数的研究提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用玉米品种为纪元一号, 购于中国农业大学上庄试验站。将玉米棒去表皮, 人工脱粒后测得质量含水率为 38% (湿基计, 下同) 左右。在自然晾干条件下, 待玉米的质量含水率降到 12% 左右时放入自封袋中, 在 4℃ 的环境中进行贮藏。

### 1.2 试验材料前处理

试验前, 首先将玉米籽粒浸入水中, 在室温下放置 24 h 后沥干放入自封袋中, 以使其水分均匀分布, 此时初始质量含水率约 27%。然后, 采用不同干燥方式, 获

收稿日期: 2011-11-17 修订日期: 2012-06-15

基金项目: “十二五” 国家科技计划课题 (2011BAD26B0401)

作者简介: 王红英 (1966—), 女, 江西九江人, 教授, 博士生导师, 中国农业工程学会会员 (E041200500S), 主要从事饲料加工工艺技术与设备及畜禽养殖技术与装备的研究。北京 中国农业大学工学院, 100083。

Email: hongyingw@cau.edu.cn

得不同含水率的玉米籽粒。具体处理如下：1) 自然干燥：把复水后的玉米籽粒平铺在托盘中（单层），露天晾干（气温为 12~23℃，风力 2~4 级，时间为 3 d<sup>[13]</sup>）；2) 人工烘干：把玉米籽粒平铺于 5 个托盘中（单层），分别置于不同温度（45、54、75、93 和 105℃）的烘箱中并烘干到试验设定的含水率（12%、13%、14%、15%、16%）<sup>[14]</sup>。具体做法为：当烘箱温度分别稳定为 45℃或 54℃时，将玉米籽粒放入烘箱中烘干约 40 min 后，每隔 5 min 取约 40 粒左右，共取 20 次并按顺序编号，测定这 20 个样品的含水率，从中选取试验设定含水率的玉米籽粒。当烘箱温度分别稳定为 75、93 和 105℃时，将玉米籽粒放入烘箱中烘干约 10 min 后每隔 5 min 取 1 次，具体做法同上。含水率的测定采用 105℃烘干干燥法，参考 GB/T5009.3-2003<sup>[15]</sup>。

目前国内普遍认为，乳猪颗粒饲料的原料粉碎粒度应控制在 600 μm 以下<sup>[16]</sup>，因此本研究中玉米粉碎粒度选择范围为 0.2~0.6 mm。新收获玉米由于含水率高，在饲料调质时添加蒸汽困难，物料吸收的蒸汽量少，糊化度不高。所以玉米在收获后均会经过烘干处理，特别是东北地区。根据董洪全<sup>[17]</sup>对玉米精细烘干工艺参数确定与优化的研究，本试验的烘干温度选择为：45~105℃。而据现有饲料生产企业调研，部分饲料企业所采购的新收获玉米含水率为 15%~17%，故本试验的玉米含水率选择为 12%~16%。

### 1.3 试验设备与仪器

DSC-60 型差示量热扫描仪（日本，岛津公司）；密封铝制坩埚（日本，岛津公司）；电子精密天平（梅特勒-托利多仪器有限公司）；电热恒温鼓风干燥箱（上海精宏实验设备有限公司）；FW100 型高速万能粉碎机（天津市泰斯特仪器有限公司）；BZS-200 标准检验筛机（新乡市同心机械有限责任公司）。

### 1.4 测定方法

DSC 法测物质比热主要分为 2 种方法：直接法和间接法。直接法是在 DSC 曲线上直接读取纵坐标数值，代入公式 (1)<sup>[18]</sup>即可计算样品的比热

$$\frac{dH}{dt} = m \times C_p \times \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

式中， $m$  为样品的质量，mg； $C_p$  为样品的比热，J/(kg·K)； $dH/dt$  为单位时间内的焓变，即热流速率，mW； $dT/dt$  为单位时间内温度的变化，K/s。但由于样品量及仪器本身的局限性，很难测定  $dH/dt$  的绝对值，因此本试验采取间接法测量玉米的比热<sup>[19]</sup>，其原理是在维持样品与参比物的温度相同的程序控制下，测量输送给被测物质和参比物质的能量差值与温度之间的关系。具体做法是先用 2 个空白样以同样的升温速度画一条基线，再用一种已知比热容的标准样品（蓝宝石）作为标准，以同样的条件画一条 DSC 曲线，最后以相同的条件画未知样品的 DSC 曲线，将样品的热量信号与之进行对比，如图 1 所示。

根据测得空白、标准样品和试验样品的  $\frac{dH}{dt} - t$  曲线

( $H$  为热焓)，按公式 (2)<sup>[20]</sup>计算样品的比热

$$C_p = \frac{m_{std}}{m_s} \times \frac{DSC_s - DSC_{bl}}{DSC_{std} - DSC_{bl}} \times C_{p, std} \quad (2)$$

式中， $C_p$ 、 $C_{p, std}$  分别为试验样品和标准样品在温度  $T$  时的比热，J/(kg·K)； $m_s$ 、 $m_{std}$  分别为试验样品和标准样品的质量，mg； $DSC_s$ 、 $DSC_{std}$ 、 $DSC_{bl}$  分别为试验样品曲线、标准样品曲线和基线在温度  $T$  时的 DSC 信号值，mW。

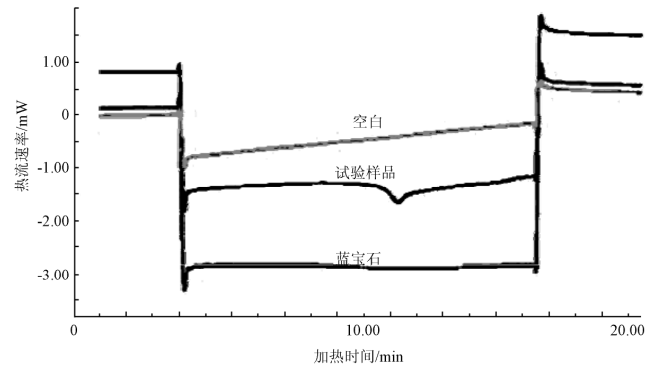


图 1 标准样品与试验样品的 DSC 曲线图

Fig.1 DSC curves of sample and reference material

在样品池中左边放空坩埚，右边放装有 5~10 mg 样品的坩埚，在保持 2 个坩埚起始温度相同的情况下，同时加热，设定起始温度为 25℃，以 10℃/min 的速度<sup>[21]</sup>升温到 150℃，保持 10 min。然后将仪器冷却，同时准备下一次测试样品。每个样品至少进行 3 次试验，取其平均值作为最终结果。

### 1.5 试验设计

首先采用单因素试验，分别比较自然干燥条件下、人工烘干温度、含水率、粉碎粒度对玉米比热的影响。然后采用正交旋转组合设计方案，以人工烘干条件下的烘干温度、含水率、粉碎粒度为影响因素，每个因素 5 个水平。以调质温度范围内（70~80℃）玉米比热值的平均值为响应，设计得出的因素水平编码表如表 1 所示。

表 1 试验设计因素水平编码表

Table 1 Experimental values and coded level of factors			
水平	烘干温度 $X_1/^\circ\text{C}$	质量含水率 $X_2/\%$	粉碎粒度 $X_3/\text{mm}$
+1.682	105	16	0.6
+1	93	15	0.5
0	75	14	0.4
-1	57	13	0.3
-1.682	45	12	0.2

### 1.6 数据处理

用多项式回归分析，对表 2 中的试验结果进行拟合。用最小二乘估计模型参数，得到一个二次多项式模型，如式 (3)

$$y_i = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i X_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^3 b_i X_i^2 \quad (3)$$

式中， $X_i$  和  $X_i X_j$  表示一次项和交互项对响应值的影响， $X_i^2$  表示平方项对响应值的影响， $b_0$ 、 $b_i$ 、 $b_{ij}$  分别表示回归

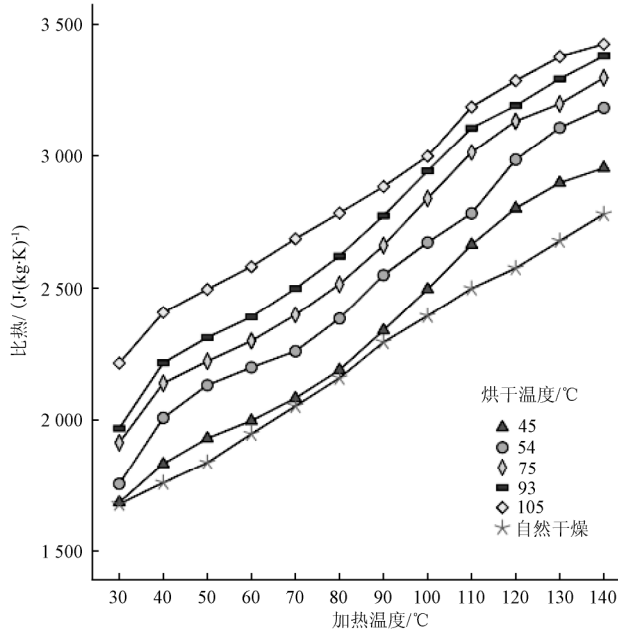
系数。用统计软件 Design-Expert 7.0 对试验进行回归分析，其它数据处理利用 SPSS 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验分析

#### 2.1.1 自然干燥和人工烘干温度对玉米比热的影响

图 2 为自然干燥和人工烘干温度对玉米的比热值的影响。



注：粉碎粒度为 0.6 mm，质量含水率为 13%。

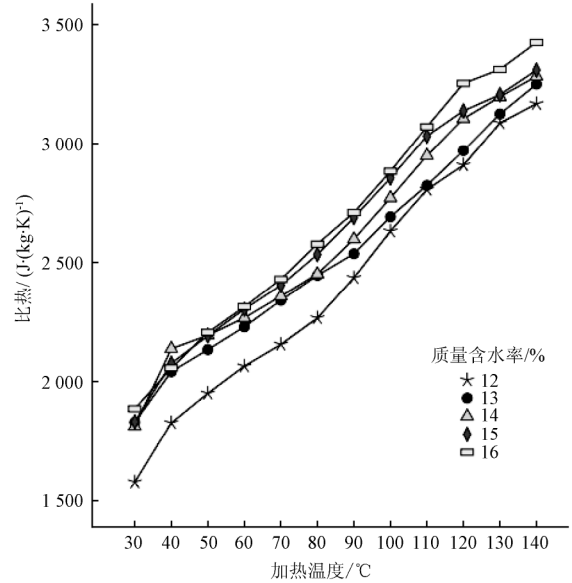
图 2 不同干燥处理的玉米比热曲线图

Fig.2 Specific heat curves of maize at different drying processing

如图 2 所示，在加热温度为 40℃时，人工烘干处理的玉米的比热在 1 830~2 410 J/(kg·K)之间，自然干燥条件下的玉米比热最低，为 1 760 J/(kg·K)，105℃烘干的玉米比热最高，为 2 410 J/(kg·K)，这和有关玉米比热研究的文献一致<sup>[2]</sup>；玉米的比热随着温度的升高而增加，并且自然干燥条件下、不同人工烘干温度玉米比热随加热温度的变化趋势一致；不同人工烘干温度的玉米比热值在同一温度下有差异，人工烘干温度越高玉米的比热值越大。由 Yang Jie<sup>[22]</sup>对自然烘干及人工烘干处理下的玉米显微电镜扫描的结果可以看出，在自然干燥及低温人工烘干条件下玉米淀粉颗粒较小，分子间空隙大小均匀，而高温人工烘干处理下的玉米，淀粉颗粒较大，分子间空隙狭小，这说明高温烘干条件下玉米质构上产生了变化，同时玉米密度增大，造成比热增大。由肖红伟<sup>[23]</sup>对不同干燥条件玉米饲用品质所做的研究进展得出，不同的干燥工艺对玉米中淀粉、蛋白质、脂肪等含量可能会产生影响。而玉米的比热是随上述营养成分的改变而变化的，这与本研究玉米经过不同的干燥处理后，比热发生变化的结果一致。

#### 2.1.2 不同含水率对玉米比热的影响

图 3 为人工烘干的不同含水率条件下玉米的比热值变化规律。



注：粉碎粒度为 0.6 mm，烘干温度为 57℃。

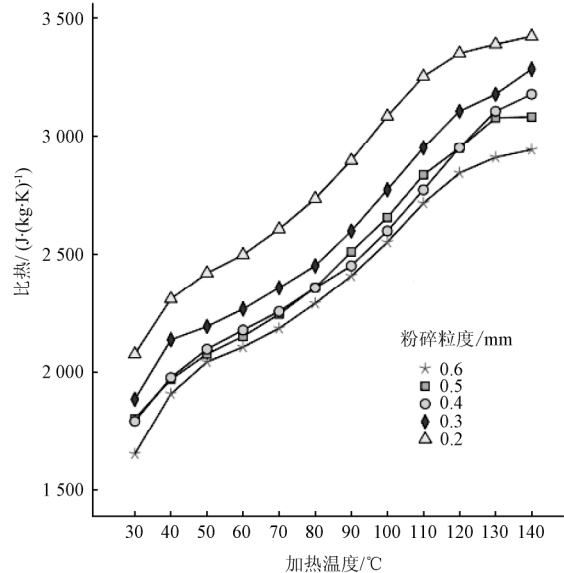
图 3 不同含水率的玉米比热曲线图

Fig.3 Specific heat curves of maize at different moisture content

如图 3 所示，不同含水率的玉米比热均随着加热温度的升高而升高，且升高曲线趋势一致。同一温度下，不同含水率的玉米比热值有差异，随着含水率的上升比热值增大。原因是由于水的比热值约为 4 200 J/(kg·K)，玉米干物质比热约为 2 000 J/(kg·K)，水分含量越高，实际配方所用的玉米的比热值越高。在调质、膨化、冷却过程中也就需要提供越多的能量。

#### 2.1.3 不同粉碎粒度对玉米比热的影响

图 4 为人工烘干的不同粉碎粒度条件下玉米的比热值变化规律。



注：烘干温度为 57℃，质量含水率为 13%。

图 4 不同粉碎粒度的玉米比热曲线图

Fig.4 Specific heat curves of maize at different particle size

如图 4 所示，随着粉碎粒度的增加，玉米比热随之减小。黄钰香等<sup>[24]</sup>在探讨 DSC 检测过程影响因素中亦有

和本文相似发现。这一部分是因为大颗粒玉米颗粒的热阻较大而使试样热焓偏低,由公式(1)可知样品的热焓值越低,其比热越小。另一部分原因是因为颗粒越大,比表面积越小,获取的热量越小。

## 2.2 回归模型的建立与分析

本研究采用的试验方案以及不同处理条件下的玉米比热实测值如表2所示。采用 Design-Expert 7.0 软件对表2中的试验数据进行回归分析,得到如下回归方程。

$$Y = 1.97 - 1.062 \times 10^{-4} X_1 + 0.106 X_2 - 3.714 X_3 - 3.819 \times 10^{-4} X_1 X_2 + 0.016 X_1 X_3 + 0.124 X_2 X_3 + 3.431 \times 10^{-5} X_1^2 - 3.548 \times 10^{-3} X_2^2 + 0.733 X_3^2 \quad (3)$$

式中,  $Y$  为玉米比热,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $X_1$  为烘干温度,  $^{\circ}C$ ;  $X_2$  为质量含水率, %;  $X_3$  为粉碎粒度, mm。

运用 ANOVA 程序进行方差分析,结果如表3所示。在显著性水平  $\alpha < 0.05$  情况下,所得玉米比热的回归方程 ( $P < 0.0001$ ) 显著,且失拟检验不显著 ( $P = 0.1752$ )。这说明式(3)的回归模型较理想,用方程  $Y$  拟合不同含水率、不同烘干温度和不同粉碎粒度与玉米比热之间的关系是可行的,可用回归模型代替试验真实点对试验结果进行分析。

表2 响应面设计方案与试验结果

Table2	Design program and experimental results of RSM			
试验序号	烘干温度 $X_1/^{\circ}C$	质量含水率 $X_2/\%$	粉碎粒度 $X_3/mm$	比热 $Y/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$
1	1	1	1	2278
2	1	1	-1	2394
3	1	-1	1	2419
4	1	-1	-1	2452
5	-1	1	1	2553
6	-1	1	-1	2348
7	-1	-1	1	2240
8	-1	-1	-1	2335
9	-1.682	0	0	2204
10	1.682	0	0	2519
11	0	-1.682	0	2348
12	0	1.682	0	2461
13	0	0	-1.682	2161
14	0	0	1.682	2270
15	0	0	0	2345
16	0	0	0	2344
17	0	0	0	2315
18	0	0	0	2340
19	0	0	0	2360
20	0	0	0	2356
21	0	0	0	2463
22	0	0	0	2341
23	0	0	0	2334

表3 玉米比热试验结果方差分析表  
Table3 Variance analysis of corn specific heat

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	0.19	9	0.022	250.59	< 0.0001
$X_1$	0.16	1	0.16	1906.81	< 0.0001
$X_2$	0.012	1	0.012	138.84	< 0.0001
$X_3$	$5.891 \times 10^{-3}$	1	$5.891 \times 10^{-3}$	68.52	< 0.0001
$X_1 X_2$	$3.781 \times 10^{-3}$	1	$3.781 \times 10^{-4}$	4.40	0.0561
$X_1 X_3$	$6.670 \times 10^{-3}$	1	$6.670 \times 10^{-3}$	77.59	< 0.0001
$X_2 X_3$	$1.225 \times 10^{-3}$	1	$1.225 \times 10^{-3}$	14.25	0.0023
$X_1^2$	$1.888 \times 10^{-3}$	1	$1.888 \times 10^{-3}$	21.97	0.0004
$X_2^2$	$3.571 \times 10^{-4}$	1	0.031	4.15	0.0624
$X_3^2$	$1.523 \times 10^{-3}$	1	0.015	17.71	0.0010
残差	$1.118 \times 10^{-3}$	13	$5.994 \times 10^{-4}$		
失拟误差	$6.276 \times 10^{-3}$	5	$1.012 \times 10^{-3}$	2.05	0.1752
纯误差	$4.990 \times 10^{-4}$	8	$3.413 \times 10^{-4}$		
总和	0.2	22			

## 2.3 主效应分析

由表3方差分析可以看出,该方程的一次项  $X_1$  ( $P < 0.0001$ )、 $X_2$  ( $P < 0.0001$ ) 和  $X_3$  ( $P < 0.0001$ ) 均对玉米的比热有极显著影响,烘干温度对比热影响尤为明显,且影响顺序依次为:  $X_1 > X_2 > X_3$ ,二次项  $X_1^2$  ( $P = 0.0004$ )、 $X_3^2$  ( $P = 0.0010$ ) 均对玉米比热有极显著影响,  $X_2^2$  ( $P = 0.0624$ ) 影响不显著。这表明响应值的变化相当复杂,各个具体的试验因素对响应值的影响不是简单的线性关系,而是呈二次关系,且3个因素之间存在交互作用。

## 2.4 交互作用分析

表3的方差分析中还可以看出烘干温度和含水率的交互作用  $X_1 X_2$  ( $P = 0.0561$ ) 是不显著的,烘干温度和粉碎粒度的交互作用  $X_1 X_3$  ( $P < 0.0001$ ) 是极显著的,含水率和粉碎粒度的交互作用  $X_2 X_3$  ( $P = 0.0023$ ) 是显著的,3个交互作用对玉米比热的影响依次为:  $X_1 X_3 > X_2 X_3 > X_1 X_2$ 。

### 1) 烘干温度和含水率的交互作用

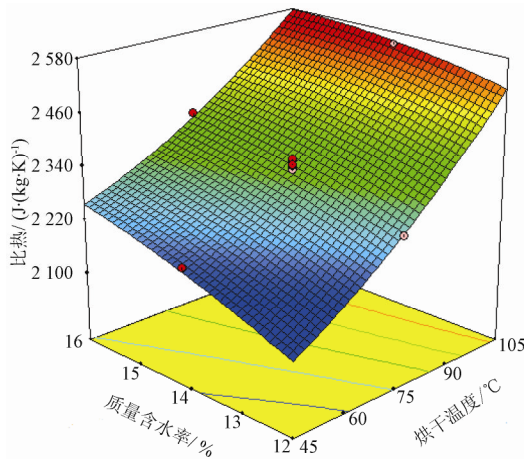
将粉碎粒度  $X_3$  固定在0水平,得到另外2个因素交互作用对玉米比热的影响模型,并根据模型绘制三维曲线图及等高线图。如图5所示,玉米比热随着烘干温度的升高和含水率的升高而增大。烘干温度对玉米比热呈正相关,且在含水率低于14%时,对玉米比热的影响极明显,随着烘干温度的升高,玉米比热随之增大;在含水率高于14%时,烘干温度对玉米比热的影响较明显。含水率对玉米比热呈正相关,在烘干温度低于75 $^{\circ}C$ 时,对玉米比热的影响较明显,随着含水率的增加,玉米比热明显增大;在烘干温度高于75 $^{\circ}C$ 之后,含水率对玉米比热的影响较弱,也是随着含水率的增加而增大。

### 2) 烘干温度和粉碎粒度的交互作用

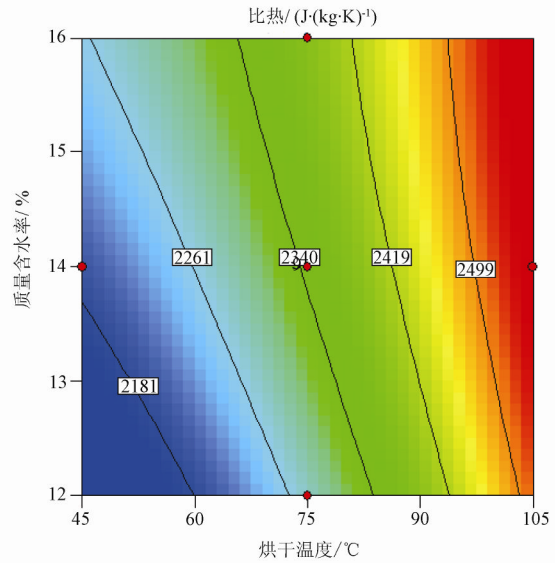
将含水率  $X_2$  固定在0水平,得到另外2个因素交互作用对玉米比热的影响模型,并根据模型绘制三维曲线

图及等高线图,如图 6 所示。在粉碎粒度低于 0.4 mm 时,烘干温度对玉米比热的影响较弱;当粉碎粒度大于 0.4 mm 时,烘干温度对玉米比热影响较明显。随着烘干温度的升高,玉米比热明显增大。在烘干温度低于 75℃

时粉碎粒度对玉米比热呈负相关,影响不是很明显,随着粉碎粒度的增大,玉米比热随之减小;在烘干温度高于 75℃时对玉米比热呈正相关,影响较弱,玉米比热随着粉碎粒度的增加而增大。



a. 响应面图

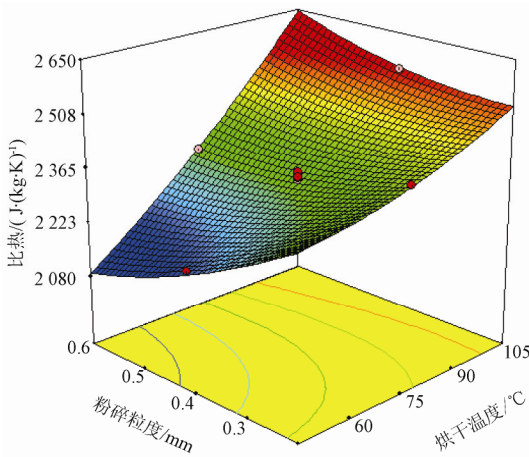


b. 等高线图

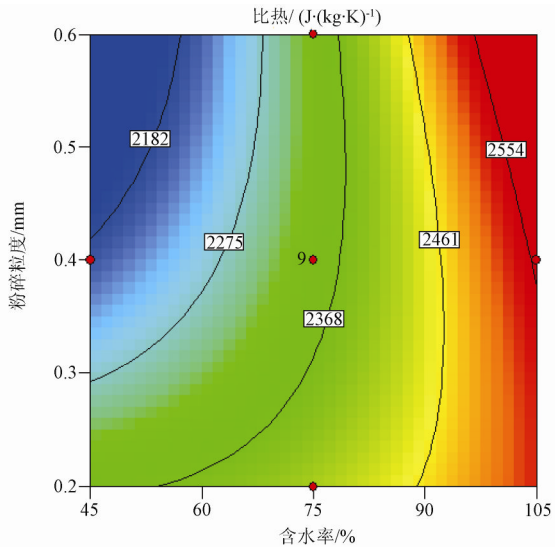
注:粉碎粒度为 0.4 mm。

图 5 含水率和烘干温度对玉米比热的影响

Fig.5 Effect of moisture content and drying temperature on corn specific heat



a. 响应面图



b. 等高线图

注:质量含水率为 14%。

图 6 粉碎粒度和烘干温度对玉米比热的影响

Fig.6 Effect of granularity and drying temperature on corn specific heat

### 3) 含水率和粉碎粒度的交互作用

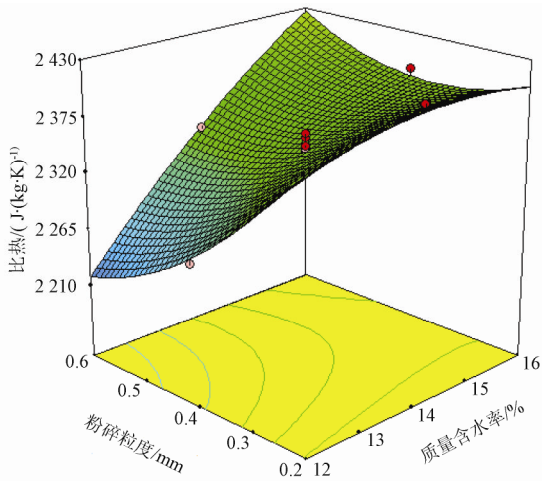
将烘干温度  $X_1$  固定在 0 水平,得到另外 2 个因素交互作用对玉米比热的影响模型,并根据模型绘制三维曲线图及等高线图。如图 7 所示。含水率在粉碎粒度低于 0.4 mm 时,对玉米比热的影响较弱;在粉碎粒度高于 0.4 mm 时,随着含水率的增加,玉米比热明显增大。含水率小于 14%时,粉碎粒度对玉米比热的影响较明显,粉碎粒度增加,玉米比热减小;含水率高于 14%时,粉

碎粒度对玉米比热呈负相关,但影响较弱。

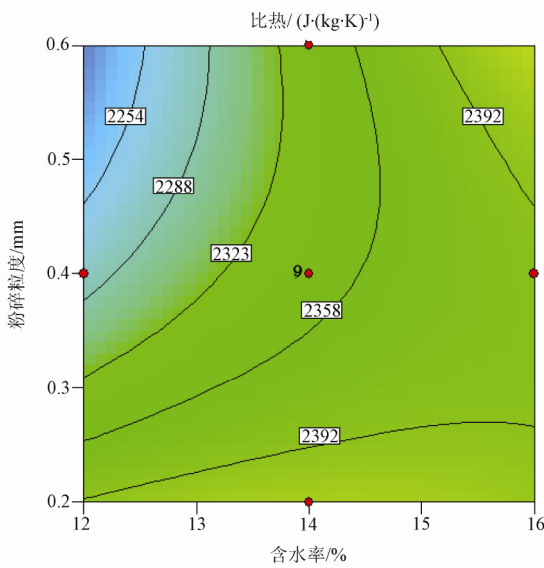
### 2.5 最佳条件验证

采用上述优化后工艺条件,即玉米烘干温度为 45℃、含水率为 12%、粉碎粒度为 0.6 mm 进行 3 次重复验证试验,测得玉米的比热平均值为 2051 J/(kg·K),这与理论预测值 1947 J/(kg·K)的相对误差为 0.05,说明响应面的分析结果与实际所测结果相近,按照建立的模型进行预测在实践中是可行的。





a. 响应面图



b. 等高线图

注：烘干温度为 75℃。

图 7 粉碎粒度和含水率对玉米比热的影响

Fig.7 Effect of granularity and moisture content on corn specific heat

## 2.6 成本分析及应用前景

利用本文得到的回归方程，一方面可以实现对不同处理工艺下玉米比热值的预测，为以玉米为配方原料的饲料在调质过程中所需的能量值提供了量化计算数据，从而确定饲料加工中调质工艺的蒸汽添加量，提高能源的有效利用和利用效率，降低成本。同时 DSC 的应用越来越广泛，其标配仪器可用来测定不同物料的熔点、淀粉糊化度以及对食品的品质进行控制，在用于测定比热时，只需在原有标配设备上安装一个比热测定软件，费用 1 万元左右，并且测定一个样品，仅需要 3 个坩埚（5 元/个，易耗品，一次性的，3 个平行），样品测试成本可以接受。另一方面，经过优化的工艺参数，如玉米烘干温度、含水率等，对指导玉米的产地烘干处理参数的确定有指导意义，也进一步证实了低温烘干处理有利于玉米的后期高效利用。另外，本文的试验参数如烘干温度、含水率、粉碎粒

度等均是饲料工业化生产过程中的参数控制范围为基础的，故试验结果可以用于工业化生产过程。

## 3 结论

1) 单因素试验结果表明，自然干燥和人工烘干条件下玉米比热随加热温度的变化趋势一致，均随着加热温度的升高而增加，但总体趋势上自然干燥的玉米比热比人工烘干的玉米比热要小。同时人工烘干的玉米比热还随着烘干温度的升高而增大，随着含水率的升高而增大，随着粉碎粒度的增大而减小。响应面法试验结果显示影响玉米比热的各因素主次顺序为：烘干温度 > 含水率 > 粉碎粒度。交互作用的主次顺序为：烘干温度和粉碎粒度的交互作用 > 含水率和粉碎粒度交互作用 > 烘干温度和含水率的交互作用。

2) 在调质温度范围内（70~80℃），得到玉米不同前处理条件下比热基于烘干温度、含水率和粉碎粒度的回归方程。方程表明：人工烘干条件下，玉米比热与其含水率呈正相关；与其烘干温度和粉碎粒度呈负相关。

3) 通过响应面分析法优化了用于饲料加工的玉米人工烘干前处理得到最小比热的加工工艺参数，并进行了验证，其优化条件为：烘干温度为 45℃、含水率为 12%、粉碎粒度为 0.6 mm，在该条件下的玉米比热最小值为 2 051 J/(kg·K)。

## [参 考 文 献]

- [1] 林云鉴, 蒋蕴珍, 谢正军, 等. 制粒工艺参数对造料过程性能的影响[J]. 无锡轻工大学学报, 2004, 23(3): 5-9.  
Lin Yunjian, Jiang Yunzhen, Xie Zhengjin, et al. Effect of pelleting conditions on the process performance[J]. Journal of Wuxi University of Light Industry, 2004, 23(3): 5-9. (in Chinese with English abstract)
- [2] 周祖鄂. 农业物料学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- [3] 杨洲, 罗锡文, 李长友. 稻谷热特性参数的试验测定[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 76-78.  
Yang Zhou, Luo Xiwen, Li Changyou. Measurement of thermal properties of rough rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4): 76-78. (in Chinese with English abstract)
- [4] 宗力, 彭小飞. 混合法测定颗粒饲料比热的初步研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 201-204.  
Zong Li, Peng Xiaofei. Determining heat capacity of pellet feed by mixing technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(3): 201-204. (in Chinese with English abstract)
- [5] Kong T, Jamil A, Omari K, et al. Effect of heating rate and sample geometry on the apparent specific heat capacity: DSC applications[J]. Thermochimica Acta, 2011, 519(1/2): 59-64.

- [6] 张素文, 张懋, 孙金才. 冷藏和冷冻温度下西兰花表观比热容的测定[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(16): 4724—4726, 4749.
- [7] Zhang Suwen, Zhang min, Sun Jincai. Testing the apparent specific heat capacity of broccoli at frozen and refrigerant temperature with DSC[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(16): 4724—4726, 4749. (in Chinese with English abstract)
- [8] Jin Hu, Osmann Saril, Sara Eicher, et al. Determination of specific heat of milk at different fat content between 1°C and 59°C using micro DSC[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(3): 395—399.
- [9] Murata S, Tagawa A, Ishibashi S. The effect of moisture content and temperature on specific heat of cereal grains measured by DSC[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1987, 46(6): 547—554.
- [10] Tang J, Sokhansanj S, Yannacopoulos Y. Specific heat capacity of lentil seeds by Differential Scanning Calorimetry[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34 (2), 517—522.
- [11] Singh K K, Goswami T K. Thermal properties of cumin seed[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 45(4): 181—187.
- [12] Avlara N A, Haque M A. Moisture dependence of thermal properties of sheanut kernel[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 47(2): 109—113.
- [13] Singh K K, Goswami T K. Physical properties of cumin seed[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 64(2): 93—98.
- [14] 叶兴乾, 刘东红, 张贵平. 不同干燥方法对栗粉的理化性质与功能特性的影响[J]. 农业工程学报, 2001, 17(4): 95—98.
- Ye Xingqian, Liu Donghong, Zhang Guiping. Effect of drying methods on the physicochemical and functional properties of chestnut flour[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2001, 17(4): 95—98. (in Chinese with English abstract)
- [15] Chen Kunjie, Gong Hongju, Ji Changying. Determination on heat capacity of short paddy grain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(5): 27—30.
- [16] 刘书成, 张常松, 张良, 等. 罗非鱼片的超临界 CO<sub>2</sub> 干燥动力学及模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 264—268.
- Liu Shucheng, Zhang Changsong, Zhang Liang, et al. Dynamics and model for supercritical carbon dioxide drying of tilapia fillet[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(4): 264—268. (in Chinese with English abstract)
- [17] 宋春风, 王红英, 李书红. 乳猪颗粒饲料加工工艺对产品品质影响的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2010, (6): 38—40.
- Song Chunfeng, Wang Hongying, Li Shuhong. Effect of processing technology for piglet pellet feed on the product quality[J]. Cereal and Feed Industry, 2010, (6): 38—40. (in Chinese with English abstract)
- [18] 董洪全. 玉米精细烘干工艺参数确定与优化[D]. 吉林: 吉林农业大学, 2004.
- Dong Hongquan. Ascertainment and Optimism of Maizes Fine Drying Technics parameters[D]. Jilin: Jilin Agriculture University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李云飞. 食品物性学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005: 147—150.
- [20] 郭健. 浅析差示扫描量热法测定材料的比热容[J]. 太原科技, 2007, 165(10): 19—20.
- Guo Jiang. Superficially analyze that differential scanning calorimetry mensurates the specific heat capacity of the material[J]. Taiyuan Science and Technology, 2007, 165(10): 19—20. (in Chinese with English abstract)
- [21] 杨长生, 马沛生, 夏淑倩. DSC 法测定醋酸-水溶液的比热[J]. 高校化学工程学报, 2002, 16(5): 479—483.
- Yang Changsheng, Ma Peisheng, Xia Shuqian. The specific heats of aqueous mixtures of acetic acid with water measured with DSC[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2002, 16(5): 479—483. (in Chinese with English abstract)
- [22] 徐朝芬, 傅培舫, 陈刚, 等. 差示扫描量热法测定煤比热容的实验研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(2): 24—26.
- Xu Chaofen, Fu Peifang, Chen Gang, et al. Experimental study on DSC measurement of the specific heat capacity of coal[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(2): 24—26. (in Chinese with English abstract)
- [23] Yang Jie, Wang Hongying, Gao Yang, et al. Influence of hot air and natural drying on extrusion properties of maize[J]. ASABE Paper, 2011, 8.
- [24] 肖红伟, 高振江. 干燥对玉米饲用和加工品质影响的研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 290—295.
- Xiao Hongwei, Gao Zhenjiang. Research progress in the effects of drying on feeding maize and processing quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(7): 290—295. (in Chinese with English abstract)
- [25] 黄钰香, 庞承焕, 林木良. DSC 检测过程影响因素的探讨研究[J]. 广州化工, 2008, 36(5): 1—6.
- Huang Yuxiang, Pang Chenghuan, Lin Muliang. A study on factors influencing the result of differential scanning calorimeter[J]. Guangzhou Chemical Industry. 2008, 36(5): 1—6. (in Chinese with English abstract)

## Effects of different pretreatments on specific heat of forage maize

Wang Hongying, Li Niwei, Gao Rui, Yang Jie, Kang Hongbin

(College of Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to determine the heat and mass transfer properties of corn-based feedstuffs during the process of conditioning, extrusion and cooling, the effects of drying temperature (45-105°C), moisture content (12%-16%) wet basis, particle size (0.2-0.6 mm) on the specific heat of corn grain were investigated using a continuous differential scanning calorimeter (DSC) method. The experiments in three factors with five levels were designed by quadratic orthogonal rotation approach. A model of specific heat of corn grain versus dry temperature, moisture content and particle size was established by regression analysis and response surface methodology (RSM). The results showed that the minimum specific heat of corn grain was obtained(2051 J/(kg·K)) under the processing condition of drying temperature 45°C, moisture content 12% wet basis, and particle size 0.6 mm. This model can be used to evaluate the specific heat of corn grain processing in different conditions and to provide a reference for thermal processing of similar feedstuffs.

**Key words:** specific heat, drying, moisture, pre-treatment, corn grain, feed processing