

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.023

# 豆渣-玉米粉挤压膨化分散体系流变特性\*

汪立君<sup>1</sup> 吴敏<sup>2</sup> 王勇<sup>3</sup> 石聪<sup>1</sup> 李栋<sup>2</sup>(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;  
3. 中粮营养健康研究院, 北京 100005)

**【摘要】** 为提高豆渣的利用率、拓宽豆渣在食品工业中的应用范围,研究了豆渣-玉米粉挤压膨化加工后所得分散体系的流变特性。分别考察了加工温度、喂料含水率和豆渣添加量对挤压产品分散体系流变特性的影响,并从频率扫描试验和蠕变及蠕变回复试验对豆渣-玉米糊进行了动态流变特性研究。频率扫描试验得到豆渣-玉米糊的流变特性符合幂律模型,蠕变及蠕变回复试验表明其蠕变特性符合伯格模型,且均拟合较好。

**关键词:** 豆渣 玉米粉 挤压膨化 流变

**中图分类号:** TS205 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)04-0119-07

## Rheological Properties of Extruded Okara-maize Blend Based on Extrusion Technology

Wang Lijun<sup>1</sup> Wu Min<sup>2</sup> Wang Yong<sup>3</sup> Shi Cong<sup>1</sup> Li Dong<sup>2</sup>

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Nutrition and Health Research Institute, COFCO, Beijing 100005, China)

### Abstract

The extruded okara-maize blend was studied on rheological properties to improve the usage of okara and expand the application range. The effects of process temperature, feed moisture, and okara concentration on the rheological properties of okara-maize blend were investigated. The sample was tested in both frequency sweep and creep-recovery test modes. The frequency sweep test data was regressed with power law model. The creep test data could be regressed with Burgers model. Both tests obeyed the corresponding model well.

**Key words** Okara, Maize blend, Extrusion, Rheology

### 引言

挤压膨化技术在现代谷物食品加工业中发挥着核心作用,可以有效地改善食品的质地、口感,并在一定程度上提高食品中营养成分的利用价值。玉米粉具有良好的挤压膨化特性,但需要提高其营养价值。添加豆科植物到谷物中可以提高所含物和混合物的蛋白质含量和品质<sup>[1]</sup>。豆渣中蛋白与加工前的大豆相比必需氨基酸组成变化不大,并且豆渣中的大豆纤维已经被证实具有明显的生理和医疗功

能<sup>[2]</sup>。

在豆渣-玉米混合物挤压中,淀粉发挥主要作用。挤压膨化淀粉基食品导致淀粉凝胶、结晶、结构部分或完全破坏,淀粉高分子的分子断裂<sup>[3-4]</sup>。蛋白质在挤压过程中,受到高温、高压和高剪切力的综合作用,蛋白质的三级和四级结构被破坏,蛋白质分子结构伸展、重组,表面电荷重新分布趋向于均匀化。分子间的氢键和二硫键等部分断裂,疏水基暴露表面,导致蛋白质的变性。目前关于挤压食品的研究多集中在产品物理化学性质的评价<sup>[5-6]</sup>。对

收稿日期: 2011-05-29 修回日期: 2011-09-10

\* 国家自然科学基金资助项目(31000813)和教育部基本科研业务费专项资金资助项目(2010JS080)

作者简介: 汪立君,副教授,博士生导师,主要从事食品科学与工程研究, E-mail: wlj@cau.edu.cn

挤压产物的流变特性研究较少,并多集中在稳态流变特性的研究。有报道关于大米和玉米-大豆混合物挤压后分散体系的静态黏度研究<sup>[4,7-8]</sup>。但研究主要集中在大豆粉的挤压膨化,或者分离蛋白与淀粉在挤压膨化过程中的交互作用上<sup>[9-10]</sup>,对于豆渣以及挤压产品的分散体系动态流变特性研究较少。豆渣和玉米粉作为两种混合物,其挤压膨化过程相比单一成分来说更具复杂性,并且对食品工业具有更实际的指导意义。因此,本文对挤压膨化产物分散体系的动态流变特性进行研究,为开发高品质的豆渣-玉米糊状食品提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验原料

试验用豆渣粉购于重庆,由重庆百奎食品有限公司提供,含水率为 $(10.54 \pm 0.29)\%$ 。玉米粉购于北京,由北京星华淀粉公司提供,含水率为 $(14.5 \pm 0.13)\%$ 。原料均在室温 $(25 \pm 2.5)^\circ\text{C}$ 下存放。

### 1.2 主要仪器设备

AR2000ex 型动态流变仪(TA 仪器公司,美国),SLG67-18.5 型双螺杆挤压膨化机(北京世联机械厂),101-3 型电热恒温鼓风干燥箱(上海路达实验仪器有限公司)。

### 1.3 豆渣-玉米粉挤压膨化加工及分散体系(豆渣-玉米糊)制备

采用单因素试验,在豆渣质量分数 25%、喂料含水率 16% (湿基,按照配制完成的样品计算比例)和螺杆转速 140 r/min 条件下考察加工温度为 105、120、135、150 和 165 $^\circ\text{C}$  时对豆渣-玉米糊流变特性的影响;在加工温度 135 $^\circ\text{C}$ 、豆渣质量分数 25% 和螺杆转速 140 r/min 条件下考察喂料含水率为 14%、16%、18%、20% 和 22% 时对豆渣-玉米糊流变特性的影响;在加工温度 135 $^\circ\text{C}$ 、喂料含水率 16% 和螺杆转速 140 r/min 条件下考察豆渣质量分数为 0%、10%、20%、30% 和 40% 时对豆渣-玉米糊流变特性的影响。挤压膨化加工采用同步旋转挤压膨化机,喂料输送机固定在喂料速度为 27.5 kg/h (湿基)下进行全部挤压试验。挤压膨化后的产品完全冷却后切成小段。

将不同挤压条件下得到的豆渣-玉米粉膨化产品粉碎过 60 目筛,在干燥箱 105 $^\circ\text{C}$  条件下干燥 12 h。在室温下,用 2 g 干燥的膨化粉末缓慢溶于 11.33 g 去离子水中,放置 1 h,制备质量分数为 15% 的豆渣-玉米糊。在静置和试验过程中用保鲜膜覆盖烧杯口,以最大限度地减少水分损失。

### 1.4 动态流变特性测定

动态流变特性测定采用 AR2000ex 型应力控制流变仪,装配一个铝平板夹具,夹具直径为 40 mm,测定样品厚度(夹具与样品台的间距)设定为 1 mm。将准备好的豆渣-玉米糊样品置于流变仪下平板上,然后操作流变仪的上平板将样品压紧,并移除多余样品。

#### (1) 频率扫描试验

试验温度是通过水浴装置连接主夹板上的 Peltier 系统控制的。每个样品在试验前移到流变仪平板上并保持 10 min,用以消除残余应力<sup>[11]</sup>。试验在同一个频率扫描模式下进行,应变为 0.5%、温度为 25 $^\circ\text{C}$ 、角频率范围为 1~100 rad/s。

#### (2) 蠕变及蠕变回复试验

蠕变试验在剪切应力为 7 Pa 和温度 25 $^\circ\text{C}$  条件下进行。试验将剪切应变作为响应值,测量时先施加应力 2 min,之后移除应力 2 min。上述步骤通过流变仪自动完成,并通过软件记录相关数据。

### 1.5 动态流变特性模型参数与统计分析

样品动态模量随频率变化的规律包括储能模量  $G'$  和损耗模量  $G''$  随频率变化的关系,可用幂律模型进行描述和拟合,幂律模型方程如下

$$G' = K' f^{n'} \quad (1)$$

$$G'' = K'' f^{n''} \quad (2)$$

式中  $K'$ 、 $K''$ ——常数  $n'$ 、 $n''$ ——频率的幂  $f$ ——角频率

$n'$  和  $n''$  值可以用来描述在限定的频率范围内样品弹性模量,用于有效地提供食品原料黏弹特性的信息<sup>[12]</sup>。

样品蠕变总应变与时间的关系可以用伯格模型方程来描述,即

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t + \frac{\sigma_0}{E_2} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right) \quad (3)$$

其中  $\tau_2 = \frac{\eta_2}{E_2}$

式中  $E_1$ ——瞬时弹性模量  
 $E_2$ ——迟缓弹性模量  
 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ ——黏性流动系数  
 $\tau_2$ ——延迟时间  
 $\sigma_0$ ——施加的固定应力

其中,参数  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $\eta_1$  和  $\tau_2$  可以利用 Datafit 8.2. x 软件(Oakdale Engineering Inc. Florida, US)通过试验数据由式(3)拟合得到<sup>[13]</sup>。

蠕变回复率用来表示挤压样品的蠕变回复百分比,计算式为

$$R_c = \frac{\varepsilon_T - \varepsilon_V}{\varepsilon_T} \times 100\% \quad (4)$$

式中  $\varepsilon_T$ ——总应变

$\varepsilon_V$ ——由黏性流动引起的永久应变

所有的测量重复 3 次取平均值,使用 SAS 软件利用 Duncan 方差分析评价显著性差异,显著性水平为 5%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 豆渣-玉米糊频率扫描

频率扫描试验中挤压样品的频率扫描曲线利用幂律模型进行拟合,拟合的幂律模型参数如表 1 所示。

表 1 豆渣-玉米糊频率扫描试验中幂律模型参数

Tab. 1 Power law model parameters of extruded okara-maize flour blends in frequency sweep tests

试验材料		$G' = K'f^{n'}$			$G'' = K''f^{n''}$		
参数	数值	$K'/\text{Pa}$	$n'$	$R^2$	$K''/\text{Pa}$	$n''$	$R^2$
加工温度/ $^{\circ}\text{C}$	105	580.75 ± 49.29 <sup>a</sup>	0.064 ± 0.012 <sup>a</sup>	0.975	45.30 ± 1.46 <sup>a</sup>	0.281 ± 0.031 <sup>a</sup>	0.948
	120	554.60 ± 19.80 <sup>a</sup>	0.059 ± 0.003 <sup>a</sup>	0.992	43.29 ± 2.82 <sup>a</sup>	0.290 ± 0.009 <sup>a</sup>	0.971
	135	531.45 ± 23.97 <sup>ab</sup>	0.059 ± 0.004 <sup>a</sup>	0.969	43.51 ± 2.77 <sup>a</sup>	0.280 ± 0.040 <sup>a</sup>	0.945
	150	503.75 ± 24.25 <sup>ab</sup>	0.059 ± 0.005 <sup>a</sup>	0.963	41.79 ± 3.24 <sup>a</sup>	0.273 ± 0.016 <sup>a</sup>	0.965
	165	449.20 ± 64.91 <sup>b</sup>	0.059 ± 0.006 <sup>a</sup>	0.981	48.69 ± 9.58 <sup>a</sup>	0.257 ± 0.022 <sup>a</sup>	0.961
喂料含水率/%	14	349.43 ± 37.53 <sup>d</sup>	0.075 ± 0.003 <sup>a</sup>	0.946	38.06 ± 5.05 <sup>d</sup>	0.238 ± 0.023 <sup>ab</sup>	0.920
	16	711.60 ± 154.86 <sup>c</sup>	0.054 ± 0.001 <sup>c</sup>	0.975	53.93 ± 6.25 <sup>c</sup>	0.266 ± 0.016 <sup>a</sup>	0.971
	18	818.55 ± 7.14 <sup>bc</sup>	0.064 ± 0.001 <sup>b</sup>	0.968	54.13 ± 1.50 <sup>bc</sup>	0.270 ± 0.015 <sup>a</sup>	0.980
	20	1003.43 ± 125.35 <sup>b</sup>	0.055 ± 0.003 <sup>c</sup>	0.977	63.28 ± 3.67 <sup>b</sup>	0.239 ± 0.010 <sup>ab</sup>	0.966
	22	1541.50 ± 309.01 <sup>a</sup>	0.046 ± 0.004 <sup>d</sup>	0.989	81.26 ± 1.40 <sup>a</sup>	0.222 ± 0.032 <sup>b</sup>	0.951
豆渣质量分数/%	0	328.63 ± 26.99 <sup>d</sup>	0.066 ± 0.006 <sup>b</sup>	0.990	25.25 ± 1.46 <sup>b</sup>	0.330 ± 0.018 <sup>a</sup>	0.966
	10	520.17 ± 44.20 <sup>bc</sup>	0.055 ± 0.001 <sup>c</sup>	0.973	41.55 ± 1.73 <sup>ab</sup>	0.279 ± 0.031 <sup>ab</sup>	0.946
	20	644.23 ± 164.06 <sup>ab</sup>	0.056 ± 0.010 <sup>bc</sup>	0.961	47.48 ± 7.01 <sup>a</sup>	0.283 ± 0.045 <sup>ab</sup>	0.944
	30	713.77 ± 15.07 <sup>a</sup>	0.056 ± 0.004 <sup>bc</sup>	0.978	52.53 ± 6.46 <sup>a</sup>	0.252 ± 0.013 <sup>bc</sup>	0.944
	40	440.30 ± 7.07 <sup>cd</sup>	0.084 ± 0.004 <sup>a</sup>	0.969	61.12 ± 22.37 <sup>a</sup>	0.215 ± 0.044 <sup>c</sup>	0.917

注:每个纵列的不同上标表示 Duncan 检验的不同显著性水平 ( $P < 0.05$ ), ± 表示正负偏差值,  $n = 3$ , 下同。

#### 2.1.1 加工温度

当加工温度从 105 $^{\circ}\text{C}$  增加到 165 $^{\circ}\text{C}$  时,  $K'$  从 580.75 Pa 下降到 449.20 Pa,  $K''$  先从 45.30 Pa 下降到 41.79 Pa, 然而在较高加工温度 (165 $^{\circ}\text{C}$ ) 时,  $K''$  增大到最大值 (48.69 Pa), 但是  $K''$ 、 $n'$  和  $n''$  均无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。所有的曲线均拟合良好 ( $R^2 > 0.95$ )。

图 1 表示加工温度对豆渣-玉米糊储能模量和损失角随角频率的变化规律。分析发现, 损耗模量与储能模量的变化规律类似 ( $G''$  试验数据在本文中未显示), 因此本文以储能模量为主要考察指标。

由图 1 可知, 储能模量随着角频率的增加而增加; 相同的角频率条件下加工温度越高储能模量越小, 这表明更高的加工温度会降低糊状食品的弹性。

损失角随角频率的增加而增加, 表明豆渣-玉米糊的黏弹性表现出更加接近流体的特性; 在角频率不变的情况下, 加工温度 165 $^{\circ}\text{C}$  对应的豆渣-玉米糊的损失角最大, 这说明黏弹性体此时更接近流体, 在振动中流动变得更加容易。分析原因可能是在高温情况下, 淀粉糊化和颗粒结构破裂程度加剧, 纤维素的降解增大, 导致糊中的水溶性物质增多, 使得糊的类固特性减弱。

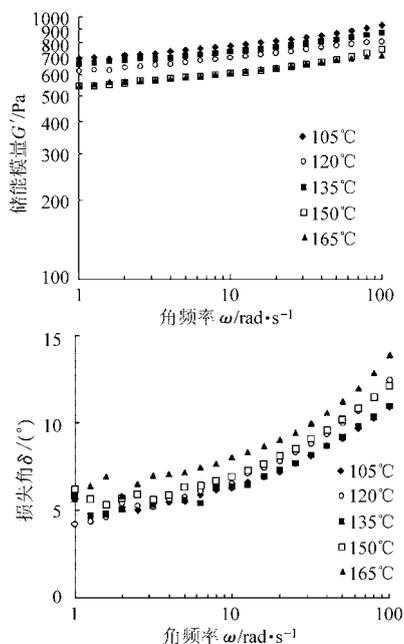


图 1 不同加工温度下角频率  $\omega$  对豆渣-玉米糊储能模量  $G'$  和损失角  $\delta$  的影响

Fig. 1 Influence of extrusion temperature on variation of storage modulus  $G'$  and phase angle  $\delta$  with angular frequency  $\omega$

#### 2.1.2 喂料含水率

喂料含水率对  $K'$ 、 $K''$  及  $n'$ 、 $n''$  都有显著影响, 随

着喂料含水率的增大,  $K'$  和  $K''$  呈上升趋势, 而  $n'$  呈下降趋势。所有的曲线均拟合良好 ( $R^2 > 0.95$ )。

图2为不同喂料含水率下豆渣-玉米糊储能模量和损失角随角频率的变化。由图可知, 所有样品的储能模量随着角频率的增加而增加。其他研究谷物基糊状样品也得到了相似的结果<sup>[14-15]</sup>。角频率不变时, 随着喂料含水率的增加, 储能模量呈显著上升趋势, 这表明豆渣-玉米糊的黏弹特性显著增强。分析原因可能是喂料含水率增大, 加速了淀粉的糊化和蛋白质变性, 使得淀粉颗粒膨润更加充分, 从而显著增强了混合糊的黏弹性。

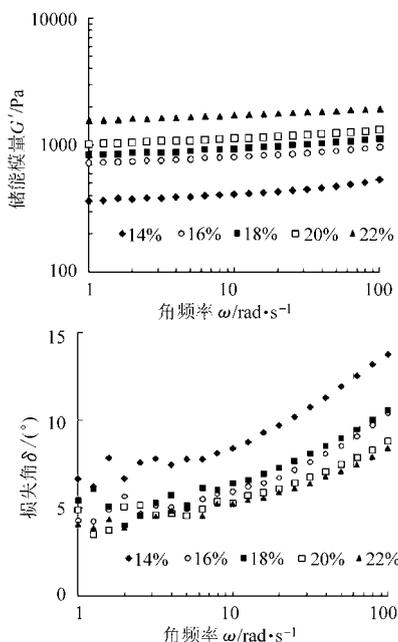


图2 不同喂料含水率下角频率  $\omega$  对豆渣-玉米糊储能模量  $G'$  和损失角  $\delta$  的影响

Fig.2 Influence of feed moisture content on variation of storage modulus  $G'$  and phase angle  $\delta$  with angular frequency  $\omega$

所用样品的损失角均随着角频率的增加而增加。角频率不变时, 随着喂料含水率增加, 损失角出现显著下降趋势, 尤其当喂料含水率为22%时损失角达到最小。这表明喂料含水率的增加使得混合糊表现出更强的类固特性, 从感官的角度来说, 糊的口感会更硬、更耐咀嚼, 即同样质量的速食粉可以加入更多的水, 调成更稀的浓度而获得良好的口感。

### 2.1.3 豆渣质量分数

豆渣质量分数对  $K'$ 、 $K''$  及  $n'$ 、 $n''$  均有显著影响; 随着豆渣质量分数的增大,  $K''$  呈上升趋势, 但豆渣质量分数在20%~40%时  $K''$  无显著差异。所有的曲线均拟合良好 ( $R^2 > 0.95$ )。

图3为不同豆渣质量分数下豆渣-玉米糊储能模量和损失角随角频率的变化。

从图3可以看出, 所有样品的储能模量随角频率的增加而增加。当角频率不变时, 随着豆渣质量

分数增加, 豆渣-玉米糊的储能模量增加, 即糊的弹性和黏性增大, 但增大的幅度却在不断减小。从图中曲线的疏密程度易知, 豆渣质量分数从0%~10%时储能模量的增大幅度比豆渣质量分数从10%~20%时的增大幅度要大得多, 豆渣质量分数30%~40%之间的增幅基本可以忽略不计。这说明向纯玉米粉中添加少量豆渣(质量分数10%)可以快速增大糊的黏弹性, 但是继续添加豆渣增加糊的黏弹性的效果逐渐减弱, 当豆渣质量分数达到30%时, 糊的黏弹性基本上不再变化。

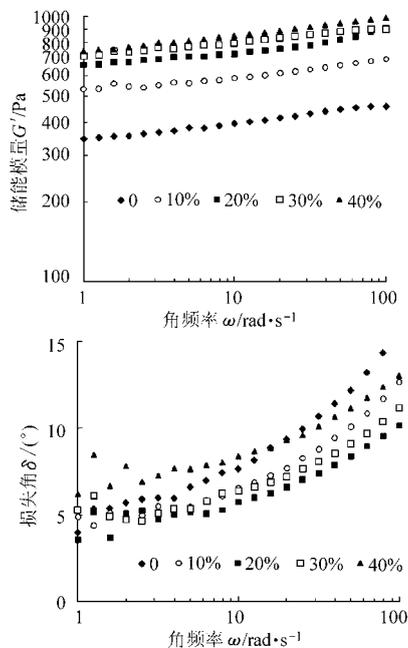


图3 不同豆渣质量分数条件下角频率  $\omega$  对豆渣-玉米糊储能模量  $G'$  和损失角  $\delta$  的影响

Fig.3 Influence of okara content on variation of storage modulus  $G'$  and phase angle  $\delta$  with angular frequency  $\omega$

从图3可以看出, 所用样品的损失角均随着角频率的增加而增加。当角频率不变, 豆渣质量分数小于20%时, 随着豆渣质量分数的增大, 损失角逐渐减小。这表明豆渣-玉米糊在振动情况下的流动性减弱, 黏弹性增强, 表现为类固特性。当豆渣质量分数为20%时, 豆渣-玉米糊的损失角最小, 类固特性最强。这说明在低豆渣质量分数情况下 ( $\leq 20\%$ ) 增强了豆渣-玉米糊的结构, 使其变得更加稳定, 当豆渣质量分数进一步增加 ( $> 20\%$ ), 豆渣-玉米糊的结构将会减弱。豆渣质量分数0%和40%的曲线随着角频率的增大出现了一个交叉现象, 这说明在低角频率下, 豆渣的加入给豆渣-玉米糊的黏弹性的增强效应表现不明显, 而超过一定角频率后, 豆渣-玉米糊的黏弹性增强, 变得不易流动。分析其原因豆渣质量分数较低时, 随着混合物中纤维素质量分数不断提高, 可溶性纤维也增大, 纤维素

在挤压作用下降解与糊化膨胀并破裂的淀粉颗粒随着淀粉的溶胀作用形成更为坚固的网状物;随着豆渣质量分数继续增加,混合物的可溶性纤维素的增幅变小,不可溶性纤维素增多,在熔融体中充当填充作用,阻碍了混合物中淀粉的糊化和蛋白质的变性。而且,随着纤维素的不断增加还可以导致产品较低的膨胀指数和吸水性指数。与此结果相似的研究还包括挤压木薯淀粉、麦麸与大豆粉的混合物<sup>[16]</sup>。

## 2.2 豆渣-玉米糊蠕变及蠕变回复

蠕变试验中挤压样品的蠕变曲线利用伯格模型进行拟合,拟合的伯格模型中参数如表2所示。从结果可以看出试验数据很好地拟合了伯格模型( $R^2 > 0.96$ )。在表2中, $E_1$ 反映了样品的瞬时弹性模量, $E_2$ 反映了样品的迟滞弹性模量。 $\eta_1$ 反映了样

品的黏性流动系数——在微小变形试验中样品所具有的最大黏度。延迟时间 $\tau_2$ 表示与样品黏弹行为相关的结构,其应变达到最大应变的 $1 - 1/e$ (大约为63%)时所必需的时间<sup>[13]</sup>。

由表2可知,喂料含水率和豆渣质量分数对 $E_1$ 有显著的影响,随着喂料含水率的增大或豆渣质量分数的增加, $E_1$ 随之增大。但随着加工温度的增加, $E_1$ 表现出先增大后减小的趋势。 $E_1$ 可以与食品的贮藏及口感特性建立联系,因此在考虑设计豆渣-玉米糊体系的产品时可以参考 $E_1$ 进行调整。

喂料含水率和豆渣质量分数对 $E_2$ 也有显著的影响,随着喂料含水率的增大或豆渣质量分数的增加, $E_2$ 随之增大。但加工温度对 $E_2$ 的影响规律不明显。

表2 豆渣-玉米糊蠕变及蠕变回复试验中的伯格模型参数

Tab.2 Parameters of Burgers model of extruded dispersions of okara-maize flour blends and recovery rate in creep-recovery test

试验材料		$E_1/\text{Pa}$	$E_2/\text{Pa}$	$\tau_2/\text{s}$	$\eta_1/\text{kPa}\cdot\text{s}$	$R^2$	$R_r/\%$
参数	数值						
加工温度/ $^{\circ}\text{C}$	105	750.5 ± 85.1 <sup>a</sup>	3 256.6 ± 26.4 <sup>b</sup>	3.804 ± 0.443 <sup>b</sup>	412.9 ± 12.0 <sup>b</sup>	0.982	89.1 ± 0.6 <sup>a</sup>
	120	641.9 ± 65.0 <sup>b</sup>	2 569.2 ± 328.9 <sup>bc</sup>	3.998 ± 0.316 <sup>b</sup>	315.7 ± 33.8 <sup>d</sup>	0.984	93.4 ± 2.4 <sup>a</sup>
	135	613.9 ± 101.5 <sup>c</sup>	2 900.3 ± 498.2 <sup>bc</sup>	3.987 ± 0.421 <sup>b</sup>	371.8 ± 38.7 <sup>bc</sup>	0.982	89.3 ± 8.2 <sup>a</sup>
	150	643.2 ± 61.2 <sup>b</sup>	2 805.2 ± 510.7 <sup>c</sup>	4.786 ± 0.482 <sup>a</sup>	332.6 ± 52.4 <sup>cd</sup>	0.986	94.5 ± 4.0 <sup>a</sup>
	165	834.6 ± 38.6 <sup>a</sup>	4 445.0 ± 246.8 <sup>a</sup>	3.634 ± 0.048 <sup>b</sup>	531.2 ± 06.6 <sup>a</sup>	0.976	91.9 ± 1.3 <sup>a</sup>
喂料含水率/ $\%$	14	465.5 ± 45.6 <sup>c</sup>	2 514.0 ± 204.2 <sup>d</sup>	4.241 ± 0.255 <sup>a</sup>	294.2 ± 41.2 <sup>c</sup>	0.989	91.5 ± 3.4 <sup>a</sup>
	16	834.7 ± 181.2 <sup>b</sup>	4 283.8 ± 949.3 <sup>bc</sup>	3.672 ± 0.151 <sup>a</sup>	544.3 ± 109.2 <sup>b</sup>	0.973	91.9 ± 3.9 <sup>a</sup>
	18	930.9 ± 57.4 <sup>ab</sup>	3 991.1 ± 606.8 <sup>c</sup>	3.186 ± 0.122 <sup>a</sup>	566.6 ± 64.5 <sup>b</sup>	0.982	92.4 ± 5.7 <sup>a</sup>
	20	1 037.0 ± 2.0 <sup>ab</sup>	5 201.8 ± 524.8 <sup>ab</sup>	3.442 ± 0.076 <sup>a</sup>	754.3 ± 54.2 <sup>a</sup>	0.967	84.2 ± 0.3 <sup>ab</sup>
	22	1 103.9 ± 208.2 <sup>a</sup>	5 385.9 ± 676.4 <sup>a</sup>	3.571 ± 0.119 <sup>a</sup>	720.4 ± 37.9 <sup>a</sup>	0.978	89.0 ± 0.4 <sup>b</sup>
豆渣质量分数/ $\%$	0	384.6 ± 66.6 <sup>d</sup>	1 886.8 ± 329.0 <sup>b</sup>	2.994 ± 0.023 <sup>d</sup>	232.4 ± 30.9 <sup>d</sup>	0.972	90.9 ± 1.1 <sup>a</sup>
	10	580.9 ± 47.8 <sup>c</sup>	3 495. ± 568.4 <sup>a</sup>	4.064 ± 0.088 <sup>a</sup>	395.9 ± 38.8 <sup>a</sup>	0.967	88.3 ± 1.6 <sup>ab</sup>
	20	689.6 ± 61.4 <sup>b</sup>	3 686.2 ± 295.1 <sup>a</sup>	3.897 ± 0.058 <sup>a</sup>	467.8 ± 00.9 <sup>a</sup>	0.972	91.1 ± 2.5 <sup>a</sup>
	30	762.0 ± 37.3 <sup>ab</sup>	3 817.8 ± 419.9 <sup>a</sup>	3.309 ± 0.295 <sup>b</sup>	470.2 ± 78.7 <sup>b</sup>	0.978	88.1 ± 1.2 <sup>ab</sup>
	40	800.0 ± 29.4 <sup>a</sup>	3 256.3 ± 141.3 <sup>a</sup>	3.265 ± 0.112 <sup>c</sup>	401.3 ± 22.1 <sup>c</sup>	0.985	86.2 ± 1.0 <sup>b</sup>

各因素对延迟时间 $\tau_2$ 的影响并未表现出明显的规律性。但综合考虑各因素可以发现,样品在较低喂料含水率(14%)、较高加工温度(150 $^{\circ}\text{C}$ )和较低的豆渣质量分数(30%)时具有相对较长的延迟时间,这表明在较低喂料含水率、较高加工温度和较低的豆渣质量分数条件下样品形成了较为脆弱的网络结构。

喂料含水率对 $\eta_1$ 也表现出线性影响, $\eta_1$ 随着喂料含水率的增加而增大。这是由于水分在膨化系统内起到增塑剂的作用。但随着豆渣质量分数的增加 $\eta_1$ 先增大后减小,而加工温度对 $\eta_1$ 并无明显规律。

从表2中还可看出,随着豆渣质量分数的增大,样品的回复率先增后降,在豆渣质量分数20%时回复率最大。这与前面得到的当豆渣质量分数为20%时,豆渣-玉米糊的损失角最小,类固特性最强的研究结论是一致的。这说明,一定的豆渣质量分数可以增强豆渣-玉米糊的抵抗变形能力,但豆渣质量分数过大又减弱豆渣-玉米糊的这种能力。加工温度对回复率无显著影响( $P > 0.05$ ),喂料含水率和豆渣质量分数对回复率有显著影响( $P < 0.05$ )。

不同挤压条件对豆渣-玉米糊蠕变特性的影响如图4所示。从图中可以看出,当施加应力超过

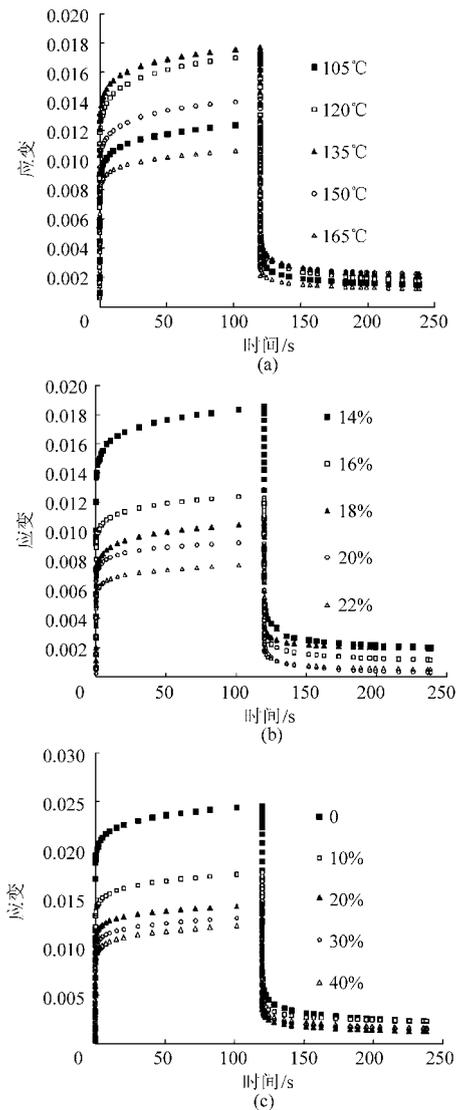


图4 不同挤压条件对豆渣-玉米糊蠕变特性的影响  
Fig.4 Influence of extrusion conditions on creep-recovery behaviors of okara-maize pastes

(a) 加工温度 (b) 饲料含水率 (c) 豆渣质量分数

50 s后(120 s之前)其应变的增加几乎呈线性增长,这表明这时间之后的应力、应变主要是由于物料的黏性流动。当载荷被移除之后,一部分应变被残留下来,这表明残留的应变是由于总应变中的黏性部分引起。但是蠕变回复的应变代表了总蠕变应变中的弹性部分。在同样的加载条件下,随着加工温度的升高样品糊的应变呈现先增大后减小的趋势(图4a)。其中135℃的样品的应变最大,165℃的样品的应变最小。这说明在中等温度加工条件下豆渣-玉米糊的流动特性最好,但如果要获得更稳定的样品结构则需较高或者较低的加工温度。

喂料含水率对样品的蠕变过程具有线性的影响,即随着含水率的增大,样品在同等条件下其应变逐渐减小(图4b)。其中喂料含水率为14%的样品应变最大,随着喂料含水率的增大,豆渣-玉米糊的应变减小,变得更加稳定。

豆渣质量分数对样品蠕变特性的影响与喂料含水率的影响一致,即随着豆渣质量分数的升高相应的应变随之减小(图4c)。其中纯玉米粉的样品的应变最大,豆渣的添加使得豆渣-玉米糊变得更加稳定,表现出更强的类固特性。因此,可以综合考虑水分和豆渣质量分数的影响,以调整出适宜的豆渣-玉米糊结构特征。但是也要注意,水分及豆渣质量分数存在影响趋势一致的特点,如需在水分和豆渣质量分数同时达到极值点处调整结构特性时,则可考虑改变挤压膨化过程的加工温度,以达到最优效果。在3个蠕变曲线中,当挤压条件为温度165℃、喂料含水率22%和豆渣质量分数40%时挤压样品表现为较小的蠕变应变和最大的应变抵抗能力。

### 3 结论

(1) 分别考察了加工温度、喂料含水率和豆渣质量分数对挤压产品分散体系流变特性的影响,并从频率扫描和蠕变特性角度对豆渣-玉米糊进行了动态流变特性研究。动态频率扫描试验得到豆渣-玉米糊的流变特性符合幂律模型,蠕变及蠕变回复试验表明其蠕变特性符合伯格模型,且拟合较好。

(2) 加工温度、喂料含水率和豆渣质量分数对样品的储能模量和损失角均有显著影响。其中喂料含水率的影响最为显著,豆渣质量分数的影响次之,加工温度的影响最小。向纯玉米粉中添加少量豆渣(质量分数10%)可以快速增大糊的黏弹性,但是继续添加豆渣对豆渣-玉米糊的黏弹性效果较弱,当豆渣质量分数达到30%时,豆渣-玉米糊的黏弹性基本上不再变化。

(3) 加工温度、喂料含水率和豆渣质量分数对应变均有显著影响。随着水分或豆渣质量分数的增加,应变均相应地随之减小。但随着加工温度的增加应变有先增加后减小的趋势。通过调整3个因素的适宜数值,可以获得样品特定的蠕变特性及结构特征。挤压条件为喂料含水率22%、加工温度165℃和豆渣质量分数40%时挤压样品表现为较小的蠕变应变和最大的应变抵抗能力。

### 参 考 文 献

- 1 Plahar W A, Okezie B O, Gyato C K. Development of a high protein weaning food by extrusion cooking using peanuts, maize and soybeans[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2003, 58(3): 1~12.

- 2 Villanueva M J, Yokoyama W H, Hong Y J, et al. Effect of high-fat diets supplemented with okara soybean by-product on lipid profiles of plasma, liver and faeces in Syrian hamsters[J]. Food Chemistry, 2011, 124(1): 72 ~ 79.
- 3 González R J, Torres R L, De Greef D M, et al. Effect of extrusion conditions and structural characteristics on melt viscosity of starchy materials[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(1): 96 ~ 107.
- 4 Peérez A A, Drago S R, Carrara C R, et al. Extrusion cooking of a maize/soybean mixture: factors affecting expanded product characteristics and flour dispersion viscosity[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87(3): 333 ~ 340.
- 5 Ruiz-Ruiz J, Martínez-Ayala A, Drago S, et al. Extrusion of a hard-to-cook bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and quality protein maize (*Zea mays* L.) flour blend[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(10): 1799 ~ 1807.
- 6 Chaiyakul S, Jangchud K, Jangchud A. Effect of extrusion conditions on physical and chemical properties of high protein glutinous rice-based snack[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(3): 781 ~ 787.
- 7 Hagenimana A, Ding X L, Fang T. Evaluation of rice modified by extrusion cooking[J]. Journal of Cereal Science, 2006, 43(1): 38 ~ 46.
- 8 Hagenimana A, Ding X L, Gu W Y. Steady state flow behaviours of extruded blend of rice flour and soy protein concentrate [J]. Food Chemistry, 2007, 101(1): 241 ~ 247.
- 9 Zhu L J, Shukri R, Mesa-Stonestreet N J D, et al. Mechanical and microstructural properties of soy protein-high amylose corn starch extrudates in relation to physiochemical changes of starch during extrusion[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(2): 232 ~ 238.
- 10 Chen L, Chen J, Ren J, et al. Modifications of soy protein isolates using combined extrusion pre-treatment and controlled enzymatic hydrolysis for improved emulsifying properties[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 887 ~ 897.
- 11 Bárcenas M E, O-Keller J D, Rosell C M. Influence of different hydrocolloids on major wheat dough components (gluten and starch) [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 94(3 ~ 4): 241 ~ 247.
- 12 Özkan N, Xin H, Chen X D. Application of a depth sensing indentation hardness test to evaluate the mechanical properties of food materials[J]. Journal of Food Science, 2002, 65(5): 1814 ~ 1820.
- 13 Wang Y, Li D, Wang L J, et al. Effects of drying methods on the functional properties of flaxseed gum powders [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 81(1): 128 ~ 133.
- 14 Hao C C, Wang L J, Li D, et al. Influence of alfalfa powder concentration and granularity on rheological properties of alfalfa-wheat dough[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(2): 137 ~ 141.
- 15 Çiftçi D, Kahyaoglu T, Kapucu S, et al. Colloidal stability and rheological properties of sesame paste[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87(3): 428 ~ 435.
- 16 Badrie N, Mellows W A. Soybean flour/oil and wheat bran effects on characteristics of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) flour extrudate[J]. Journal of Food Science, 1992, 57(1): 108 ~ 111.

(上接第 39 页)

#### 参 考 文 献

- 1 杨学军,严荷荣,徐赛章,等. 植保机械与施药技术的研究现状及发展趋势[J]. 农业机械学报,2002,33(6):129 ~ 132.  
Yang Xuejun, Yan Herong, Xu Saizhang, et al. Current situation and development trend of equipment for crop protection [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 129 ~ 132. (in Chinese)
- 2 何雄奎. 改变我国植保机械和施药技术严重落后的现状[J]. 农业工程学报,2004,20(1):13 ~ 15.
- 3 傅泽田,祁力钧. 国内外农药使用状况及解决农药过量使用问题的途径[J]. 农业工程学报,1998,14(2):7 ~ 12.
- 4 Ganzelmeier H, Osteroth H J. Sprayers for fruit crops—loss reducing equipment [J]. Gesunde Pflanzen, 1994, 46(7): 225 ~ 233.
- 5 Ade G, Molari G, Rondelli V. Vineyard evaluation of a recycling tunnel sprayer [J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(6): 2105 ~ 2112.
- 6 Ade G, Balloni S, Pezzi F. Field tests on a tunnel sprayer in vineyard [J]. Colture Protette, 2005, 55(6): 37 ~ 43.
- 7 Planas S, Solanelles F, Fillat A. Assessment of recycling tunnel sprayers in Mediterranean vineyards and apple orchards [J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(1): 45 ~ 52.
- 8 BS ISO 22866—2005 喷雾设备的野外漂移测量[S]. 2005.  
BS ISO 22866—2005 Equipment for crop protection—methods for field measurement of spray drift [S]. 2005. (in Chinese)
- 9 杜文勇,何雄奎,胡振方,等. 不同灌溉技术条件对冬小麦生产的影响[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(2):170 ~ 174.  
Du Wenyong, He Xiongkui, Hu Zhenfang, et al. Effect of different irrigation technology on production of winter wheat [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 170 ~ 174. (in Chinese)