

“粮油真菌毒素控制与营养品质调控” 特约专栏文章之五

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2020.05.005

黑豆粉-小麦粉共混体系的线性和非线性蠕变-回复分析

范亭亭, 谢岩黎[✉], 王 晨, 赵文红, 杨玉辉, 谢东东

(河南工业大学 粮油食品学院, 河南省粮油食品安全检测与控制重点实验室, 河南 郑州 450001)

摘要: 利用蠕变-回复测试分析黑豆-小麦粉共混体系在线性和非线性黏弹性区域的流变特性。小麦粉添加黑豆粉后, 面团的吸水率、形成时间均有提高, 而面团的稳定时间呈现先增大后减小的趋势。蠕变-回复数据与 4-因素 Burgers 模型拟合良好 ($R^2 > 0.94$)。在蠕变时间 3、5、10、15 min 的范围内, 共混体系的 λ_c 、 μ_c 、 J_{cm} 、 J_{max} 逐渐增大, J_{ro} 和回复率逐渐减小, J_{co} 、 J_{ro} 、 J_{cm} 总体上呈减小的趋势; 形变后面团在 3、5、10、15 min 的回复时间内的回复率为 63.51%~73.6%; 在 150、250、500、1 000 Pa 的剪切应力下, 共混体系的 J_{co} 、 J_{cm} 、 J_{max} 逐渐增大, μ_c 、 J_{ro} 、 λ_r 逐渐减小, 回复率由 89.99% 降至 32.36%。当小麦粉中黑豆粉的添加量为 10% 时, 面团的弱化度最小, 稳定时间较长。线性蠕变-回复分析结果为面团经过 3 min 蠕变时间达到稳态形变, 继续延长蠕变时间, 影响面团的弹性回复和回复速度, 且面团的弹性网络会发生部分断裂; 回复时间 10 min 时面团的回复率是 73.6%。非线性蠕变-分析结果为面团在线性黏弹性区域外对剪切应力比较敏感, 但仍具有典型的黏弹特性, 提高剪切应力, 面团的稳态剪切黏度变小, 延迟弹性回复时间缩短。

关键词: 小麦粉; 黑豆粉; 蠕变-回复; 黏弹性; Burgers 模型; 弹性网络

中图分类号: TS214.9 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2020)05-0024-07

网络首发时间: 2020-08-20 10:28:52

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20200819.1817.004.html>

Linear and Nonlinear Creep-Recovery Analysis of Black Bean-Wheat Flour Blend System

FAN Ting-ting, XIE Yan-li[✉], WANG Chen, ZHAO Wen-hong, YANG Yu-hui, XIE Dong-dong

(College of Food Science and Technology, Henan Key Laboratory of Cereal and Oil Food Safety Inspection and Control, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: The creep-recovery test was used to analyze the rheological properties of black bean-wheat flour blends in linear and nonlinear viscoelastic regions. After adding black bean powder to wheat flour, the water absorption rate and development time of the dough were both increased, and the stable time of the dough showed a trend of increasing first and then decreasing. Creep and recovery data fitted well with the 4-element Burgers model ($R^2 > 0.94$). During the creep time of 3, 5, 10 and 15 min, the λ_c , μ_c , J_{cm} and J_{max} of the dough gradually increased, the J_{ro} and the recovery rate gradually decreased. J_{co} , J_{ro} , J_{cm} generally showed a decreasing trend. After the deformation, the recovery rate of the dough in the recovery time of 3, 5, 10 and 15 min

收稿日期: 2020-06-04

基金项目: 国家重点研发计划资助课题 (2016YFDO400203); 河南工业大学校属学科平台开放课题 (PL2017009)

作者简介: 范亭亭, 女, 1995 年出生, 硕士研究生, 研究方向为食品营养与安全。E-mail: 15538270639@163.com.

通讯作者: 谢岩黎, 女, 1971 年出生, 教授, 博士生导师, 研究方向为食品加工过程中安全及品质控制。E-mail: ylxie@haut.edu.cn.

was 63.51%~73.6%. Under the shear stress of 150、250、500 and 1 000 Pa, the J_{co} 、 J_{cm} and J_{max} of the dough gradually increased, μ_c 、 J_{r0} 、 λ_r and recovery rate dropped from 89.99% to 32.36%. When the amount of black bean flour added in wheat flour was 10%, the weakening of the dough was the smallest and the stable time was relatively longer. The Linear creep-response analysis results showed that the dough had reached steady shear during the creep time of 3 min, prolonging of the creep time affected the elastic recovery and recovery speed of the dough, and the elastic network of the dough was broken partially; the recovery rate of the dough was 73.6% at the recovery time of 10 min. The nonlinear creep-analysis results showed that the dough was sensitive to shear stress outside the linear viscoelastic region, but it still had typical viscoelastic properties, improved the shear stress, reduced the steady shear viscosity of the dough, and accelerated the delayed elastic recovery.

Key words: wheat flour; black bean powder; creep-recovery; viscoelasticity; Burgers model; elastic network

蠕变-回复分析是描绘材料黏弹性一种常用的方法。蠕变是在一定条件下对黏弹性体施加一定量的力(剪切应力)时,其形变(应变)随着时间的变化逐渐增加的现象^[1]。回复是指在某时刻剪切应力完全卸去后,引起应变中弹性分量的瞬时回复^[2]。在线性黏弹性区域内,面团的应变与剪切应力呈线性相关。但是线性黏弹性只能在较小应变或非常狭窄的剪切应力范围内施行,在加工过程中,面团经受大的应变和剪切速率,会超出面团线性弹性范围,施加较大的剪切应力或线性黏弹性以外的应变可用于评估烘焙食品的制作潜力^[3-4]。

小麦粉是制作烘焙食品的主要原料,面团的黏性、弹性和延展性之间的平衡能力限制着小麦粉的应用潜力^[5]。在和面、发酵和烤制过程中,面团经受不同的剪切应力发生形变,小麦粉的流变特性对面团的可加工性和烘焙制品的最终品质起着决定性的作用^[6]。黑豆中含有丰富的蛋白质、18种氨基酸、维生素和多种微量元素,黄酮及类黄酮化合物的量,要高于普通大豆5~7倍^[7]。从黑豆中提取的天然化合物,如多糖、蛋白质、黄酮、皂苷和多酚等生物活性物质,具有抗氧化、抗炎、保肝和预防心血管疾病的作用等^[8-9]。黑豆皮富含花青素,主要是矢车菊-3-葡萄糖苷以及少量的天竺葵素-3-葡萄糖苷和飞燕草素-3-葡萄糖苷,花青素具有抗炎、抗癌、抗氧化、有效清除自由基等生理活性,是疾病预防和健康促进的极好膳食来源^[10-12]。近年来,一直有研究者不断尝试将黑豆粉加入烘焙制品中,强化赖氨酸,提高花青素的摄入,提高焙烤食品的营养价值;另一

方面起到改善谷类产品流变品质和感官特性的作用^[13-14]。黑豆中含有酵母的优良营养物质,提高酵母活性,使发酵旺盛,从而起到改善面包和糕点品质的效果^[15]。本研究将黑豆粉添加到小麦粉中,通过蠕变-回复测试黑豆-小麦粉共混体系的黏弹性,考察蠕变时间、回复时间和剪切应力对面团蠕变-回复参数的影响,为黑豆粉在烘焙食品中的应用,丰富烘焙食品种类等奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

有机青仁黑豆(蛋白41.3%,脂肪19.8%,灰分3%,水分8.5%):上海颐生农产品有限公司;想念小麦特一粉(蛋白9.5%,脂肪1.3%,灰分0.61%):河南省康元粮油食品加工有限公司;其他化学试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

BLH-5601锤式旋风磨:英国伯利恒仪器有限公司;Farinograph-AT粉质仪:德国Brabender公司;海氏HM790和面机:中国海氏集团;HAAKE RheoStress 6000流变仪:Thermo Fisher Scientific。

1.3 方法

1.3.1 黑豆-小麦混粉的制备

黑豆清理后50℃烘干,粉碎过80目筛备用。按照一定比例(0%、5%、10%、15%、20%和25%)(w/w)将添加到小麦粉中,制成黑豆-小麦混粉。

1.3.2 粉质特性的测定

参见方法GB/T 14614—2019,利用Farinograph-AT粉质仪,分别测定黑豆粉添加量为0%、5%、10%、15%、20%和25%的粉质特性。

1.3.3 面团制备

取一定量的黑豆-小麦混粉，加入适量蒸馏水使面团的含水率为 42% (w/w)，放入密封袋中静置 20 min 后进行流变测试。

1.3.4 共混体系流变测试

利用 HAAKE RheoStress 6000 流变仪对所有样品进行流变学测定。将样品放置于直径为 35 mm 的铝制平板夹具上，实验过程中夹具间缝隙设定为 2.5 mm，并切去多余面团。为了防止水分的蒸发，在四周涂抹一层硅油密封，实验开始前静置 5 min 以消除剪切应力的影响^[16-17]。

1.3.4.1 线性黏弹区的确定 室温下，选择测量程序 Step Creep，分别设定初始剪切应力为 50、100、150 Pa，保持 180 s，撤去剪切应力后保持 300 s，确定样品的线性黏弹性区域。

1.3.4.2 蠕变-回复测定 在蠕变-回复试验中，施加一定的剪切应力于样品中，考察样品的蠕变柔量 (Pa⁻¹) 随蠕变时间的变化，剪切应力消除后，样品形变部分回复，回复的部分为样品的弹性部分 (瞬时弹性和延迟弹性)。在 50 Pa 的剪切应力下，分别探究面团在蠕变时间 (3、5、10、15 min) 和回复时间 (3、5、10、15 min) 下的线性黏弹性变化；设定蠕变时间 3 min，回复时间 10 min，考察面团在 150、250、500、1 000 Pa 的剪切应力下的非线性黏弹性变化。

1.3.5 黏弹性面团形变模型—Burgers 模型

黏弹性形变是黏性和弹性的混合形变，因此常用 Burgers 模型来描述黏弹性材料形变行为^[18]。用 Burgers 模型分析蠕变-回复数据可以量化不同类型的形变。

如图 1 所示，蠕变-回复曲线大致可细分为 5 个阶段：A-瞬时弹性 (键长、键角变化引起的普弹形变)；B-延迟弹性 (链段运动引起的高弹形变)；C-黏性形变 (塑性形变，相当于分子链的相互位移)；D-瞬时回复；E-延迟回复^[19]。

蠕变过程：

$$J_c(t) = J_{co} + J_{cm} \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\lambda_c}\right) \right) + \frac{t}{\mu_{co}} \quad (1)$$

回复过程：

$$J_r(t) = J_{max} - J_{ro} - J_{rm} \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\lambda_r}\right) \right) \quad (2)$$

$$\text{回复率: Recovery (\%)} = \frac{J_{ro} + J_{rm}}{J_{max}} \cdot 100 \quad (3)$$

式中： J_c 为蠕变柔量/Pa⁻¹； J_r 为回复柔量/Pa⁻¹； J_{io} 为瞬时柔量/Pa⁻¹； J_{im} 为延迟柔量/Pa⁻¹； μ_{co} 为稳态剪切黏度/Pa·s； λ_i 为延迟时间/s； t 为蠕变或回复时间/s； J_{max} 为蠕变阶段结束时的最大柔量/Pa⁻¹。

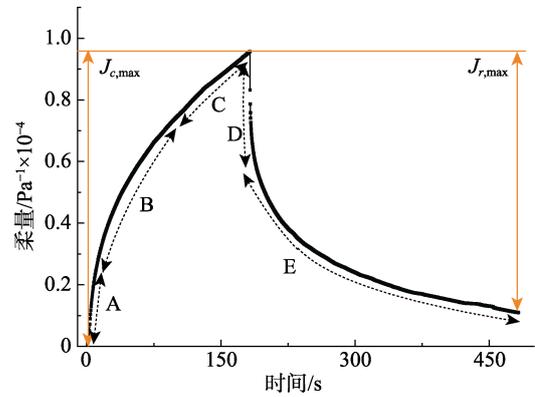


图 1 蠕变-回复特性的典型曲线

Fig. 1 Typical curve of creep-recovery characteristic

1.4 数据处理

利用 Origin 9.1 专业软件绘图，并通过拟合公式 (1) 和 (2) 对蠕变-回复数据进行非线性拟合得到 Burgers 模型参数。方差分析的显著性水平是 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 黑豆粉含量对小麦粉粉质特性的影响

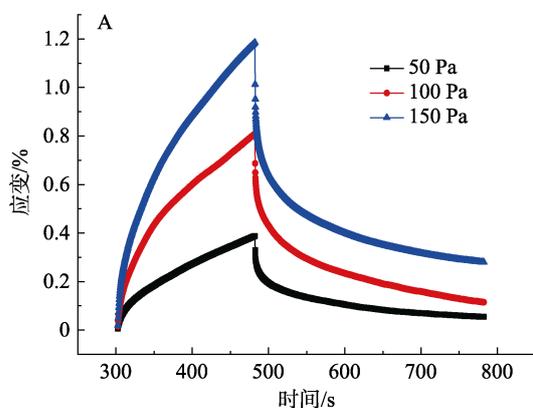
由表 1 可得，随着黑豆粉添加量的增加，面团的吸水率逐渐增大，这可能是由于黑豆中蛋白质高吸水性的特点，由于黑豆粉添加比例的升高，随着混合粉中蛋白质含量逐渐增大，混合粉的吸水率逐渐增大。在 5%~25% 的添加范围内，面团的稳定时间呈现先增大后减小的趋势，当添加比例为 5% 时，稳定时间最长，有研究报道黑豆显示出较高的脂肪氧化酶活性，酶的比活力为 750 U/mg^[20]，这说明一定量的脂肪氧化酶可进一步改善面团的性质，而添加比例较大时，黑豆粉对面筋蛋白的稀释作用较大，阻碍了面筋蛋白三级网络结构的形成，稳定时间会发生降低。弱化度反应了面团在搅拌过程中耐受机械搅拌的程度，面团的弱化度先降低后升高，弱化度值越大，其弹性变差，由表 1 得出黑豆粉在添加量为 10% 时，弱化度最小，稳定时间较长，品质最好。

表 1 黑豆粉含量对面粉粉质特性的影响
Table 1 The effect of black bean flour content on farinograph parameters of wheat flour

样品名称	吸水率/%	形成时间/min	稳定时间/min	弱化度 FU	粉质质量指数
空白	61.9	1.7	6.5	55	78
5%	62.2	1.8	9.5	47	100
10%	62.5	1.7	8.9	44	101
15%	63.6	5.7	7.7	70	95
20%	64.2	4.5	6.5	72	86
25%	65.3	4.9	4.4	82	82

2.2 黑豆-小麦粉共混体系线性黏弹性区域的确定

在黑豆粉添加量为 10% 的情况下, 测三种剪切应力条件下 (50、100、150 Pa) 混合面团的蠕



变-回复曲线 (图 2), 确定面团线性黏弹性区域。图 2-A 显示随着蠕变剪切应力的增加, 应变百分比随着剪切应力的增大而增大, 表明施加在面团上的剪切应力越大, 面团的形变程度越大。蠕变柔量 (J_c) 可用于描述黏弹性材料的硬度, 其值与硬度呈负相关, J_c 越小表示面团的刚性和硬度越大, 在一定程度上能有效地抵抗自身发生形变^[21]。图 2-B 为蠕变-回复的蠕变柔量曲线, 随着剪切应力在 50、100 至 150 Pa 的变化范围内, 蠕变柔量的变化相似且接近一条曲线^[22], 说明三种剪切应力条件都在黑豆粉-小麦粉面团的线性黏弹性区域内, 还可得出面团在线性黏弹性区域内, 面团的硬度不受剪切应力高低的影响。

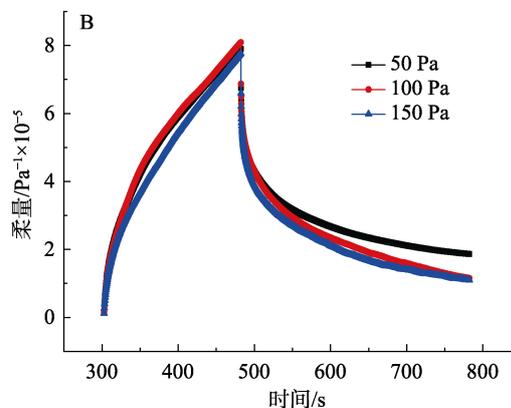


图 2 各剪切应力水平下面团的蠕变-回复曲线
Fig. 2 Creep-recovery curve of mixed dough at various stress levels

2.3 黑豆-小麦粉共混体系的线性蠕变-回复分析

2.3.1 蠕变时间对黑豆-小麦粉共混体系蠕变-回复特性的影响

研究蠕变时间对蠕变-回复特性的影响, 目的是评估面团在蠕变过程中何时达到稳态形变。如图 3 所示, 施加剪切应力, 面团在 3~15 min 的蠕变时间内蠕变柔量逐渐增加, 去除剪切应力后面团形变得到部分回复。蠕变曲线的线性增加被视为黏性流动, 回复阶段无黏性流动, 当蠕变形变主要受黏性流动控制时, 即达到稳态形变。 $J_{c,max}$ 随着蠕变时间的增加而线性增加, 这表明面团在短至 3 min 的蠕变时间内已达到稳态剪切条件。

为了更深入地了解蠕变时间对瞬时弹性, 延迟弹性和黏性形变的影响, 将四参数 Burgers 模型应用于蠕变-回复曲线 (非线性拟合数据见表 2)。蠕变时间的增加对蠕变和回复阶段的拟合参

数具有显著影响 ($P < 0.05$)。在 50 Pa 的剪切应力下, 面团的 J_{max} 在 3~15 min 的蠕变时间范围内逐渐增加, 表明面团的刚性减小, 即抗形变能力减弱。面团抵抗自身形变是需要耗能的, 蠕变时间越长, 损耗的能量就越多, 所需要的回复时间也

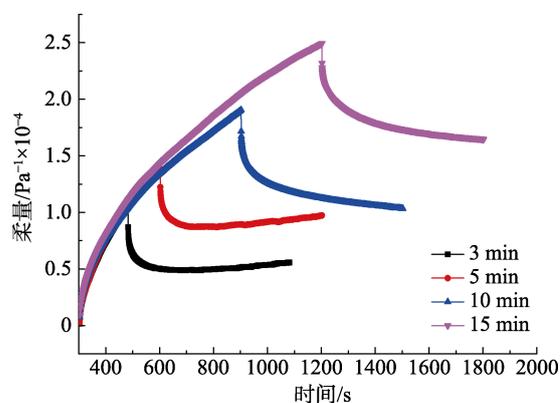


图 3 蠕变时间对蠕变-回复特性的影响
Fig. 3 Effect of creep time on creep-recovery characteristics of mixed dough

表 2 蠕变时间对 Burgers 模型各个参数的影响
Table 2 Effects of creep times on various parameters of the Burgers model for mixed dough

蠕变时间/min	蠕变						回复				回复率/%
	$J_{co}/10^{-7} \text{ Pa}^{-1}$	$J_{cm}/10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$	λ_c/s	$\mu_c/\text{Pa}\cdot\text{s}$	$J_{max}/10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$	R^2	$J_{ro}/10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$	$J_{rm}/10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$	λ_r/s	R^2	
3	68.32±0.05d	35.02±0.01d	38.01±1.04d	285.21±2.96d	140.73±1.01d	0.999 01	59.27±0.89a	30.31±0.01cd	23.38±0.64c	0.979 97	63.65
5	61.63±0.20c	47.27±0.15c	51.87±0.62c	354.83±1.47c	160.35±1.35c	0.999 70	39.64±0.45b	29.99±0.01c	16.80±0.84d	0.951 85	43.42
10	179.58±0.01b	66.71±0.25b	103.28±1.86b	566.88±4.07b	175.37±0.97b	0.999 17	24.63±0.24c	45.58±0.21b	146.67±1.64b	0.973 10	40.04
15	215.57±0.13a	86.22±0.07a	153.62±2.86a	620.20±4.36a	224.08±1.34a	0.999 16	10.01±1.32d	48.51±0.15a	152.50±1.21a	0.986 70	26.12

越长；在蠕变时间 10 min 和 15 min 时，瞬时柔量 (J_{co}) 大幅度增加，相应的延迟柔量 (J_{cm})，延迟时间 (λ_c)，稳态剪切黏度 (μ_c) 也有不同程度的增加，在去除剪切应力后面团的形变缓慢恢复；回复阶段蠕变时间从 5min 增加到 10min，延迟时间 (λ_r) 由 16.80 s 增加到 146.67 s；继续延长蠕变时间至 15 min，延迟时间 (λ_r) 增加到 152.50 s，较长的延迟时间表示较慢的弹性回复响应，表明加倍延长蠕变时间影响面团的弹性回复和回复速度。在回复过程中，瞬时柔量 (J_{ro}) 逐渐降低，延迟柔量 (J_{rm}) 先略有降低又继续增加，但是仍赶不上最大蠕变柔量 (J_{max}) 提高的速率，所以回复率从初始的 63.65% 降至 26.12%，意味着通过延长蠕变时间，面团的部分三维弹性网络结构断裂，并且断裂的键引起了永久形变^[23]。

2.3.2 回复时间对面团蠕变-回复特性的影响

施加 3 min 的蠕变剪切应力后，面团达到最大形变 (J_{max})，撤去剪切应力后，测定面团在 3、5、10、15 min 回复时间内的蠕变柔量 (如图 4 所示)。相关文献报道小麦粉面团在受外力发生形变后，回复时间在 60 s 到 12 h 之间不等^[24-25]。在 50 Pa 的剪切应力下，面团能从蠕变阶段的形变中

回复 (图 4)。回复时间 3、5 min 时面团的回复率分别是 63.51% 和 63.71%，10 min 时是 73.60%，说明面团的大部分回复发生在前 10 min，与 Van Bockstaele 等的研究结果相一致^[26]。图 4 所示，回复时间 3、5、10 min 时，蠕变柔量曲线仍在慢速下降，表明此时的面团一直处在恢复过程中，回复时间 15 min 时，蠕变柔量曲线达到平衡，得到回复的面团其内部结构已经稳定；若继续延长回复时间，回复率降低至 62.33%，其原因有待进一步研究分析 (表 3)。

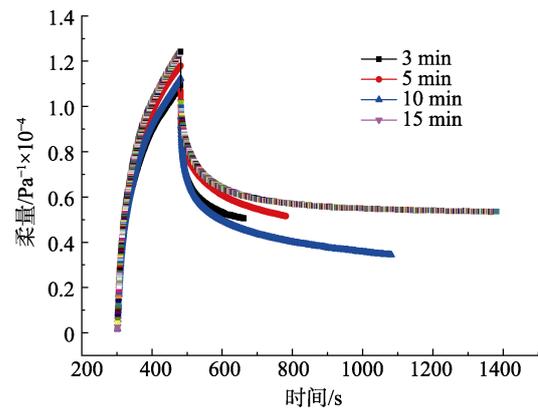


图 4 回复时间对面团蠕变-回复特性的影响
Fig. 4 Effect of recovery time on creep-recovery characteristics for mixed dough

表 3 回复时间对 Burgers 模型各个参数的影响
Table 3 Effect of recovery time on various parameters of the Burgers model for mixed dough

回复时间/min	蠕变						回复				回复率/%
	$J_{co}/10^{-7} \text{ Pa}^{-1}$	$J_{cm}/10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$	λ_c/s	$\mu_c/\text{Pa}\cdot\text{s}$	$J_{max}/10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$	R^2	$J_{ro}/10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$	$J_{rm}/10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$	λ_r/s	R^2	
3	29.29±0.01b	61.21±0.01d	23.65±0.34b	390.87±3.82b	141.86±1.30c	0.998 09	58.14±0.45b	31.96±0.17d	35.97±0.38d	0.970 08	63.51
5	37.45±0.03a	65.27±0.04c	22.86±0.34d	355.40±3.40c	144.14±0.56b	0.997 92	55.86±0.47c	35.97±0.15b	78.56±0.86c	0.976 19	63.71
10	25.89±0.06c	64.36±0.34b	24.73±0.35a	391.77±4.14a	137.26±0.44d	0.998 13	62.74±1.20a	38.28±0.22a	119.61±1.44a	0.962 89	73.60
15	23.37±0.13d	71.68±0.38a	23.58±0.30bc	354.12±3.26cd	145.33±0.89a	0.998 39	54.67±1.08d	35.92±0.21bc	91.82±0.85b	0.970 91	62.33

2.4 黑豆-小麦粉共混体系的非线性蠕变-回复分析

在 50、100 和 150 Pa 的剪切应力下蠕变柔量的测定证明 150 Pa 的剪切应力仍在非线性黏弹性区

域内 (图 2-B)。如图 5 所示，在 150 Pa 到 1 000 Pa 的剪切应力下黑豆粉-小麦粉面团的蠕变-回复曲线发生不同程度的变化，表明剪切应力超过 150 Pa

后是共混体系的非线性黏弹性区域。面团在线性黏弹性区域外仍具有典型的黏弹性体的特征，既表现出瞬时弹性和瞬时回复，又表现出延迟弹性和延迟回复（图 5）。由 Burgers 模型非线性拟合的蠕变-回复分析的详细结果见表 4。随着剪切应力的增大，在 150、250、500 和 1 000 Pa 下，面团在蠕变阶段 J_{co} 、 J_{cm} 、 J_{max} 逐渐增大， μ_c 逐渐减小，相比之下 λ_c 变化不大；回复阶段， J_{ro} 、 λ_r 逐渐降低。加大剪切应力导致面团的形变增大，稳态剪切黏度 (μ_c) 随之降低 (186.94 Pa·s 降至 101.72 Pa·s)。回复阶段，观察到延迟时间 (λ_r) 由 150.91 s 减少至 82.56 s，这意味着当面团在蠕变中经受的剪切应力越大，延迟的弹性回复越快发生。当剪切应力达到 1000 Pa 时， J_{co} 、 J_{cm} 、 J_{max}

急剧增大， J_{ro} 急剧减小，说明面团对剪切应力的变化比较敏感，此时面团仍有 32.36% 的回复率，表明 1 000 Pa 的剪切应力还未达到面团的屈服应力，未能完全破坏面团的弹性结构^[27]。

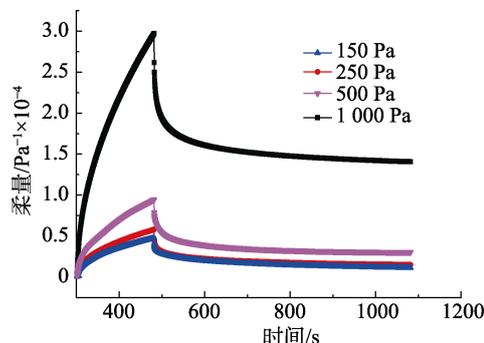


图 5 剪切应力对面团蠕变-回复特性的影响
Fig. 5 Effect of shear stress on creep-recovery characteristics of mixed dough

表 4 剪切应力对 Burgers 模型各个参数的影响
Table 4 Effect of shear stress on various parameters of the Burgers model for mixed dough

剪切应力/Pa	蠕变						回复				回复率/%
	$J_{co}/10^{-7} \text{ Pa}^{-1}$	$J_{cm}/10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$	λ_c/s	$\mu_c/\text{Pa}\cdot\text{s}$	$J_{max}/10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$	R^2	$J_{ro}/10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$	$J_{rm}/10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$	λ_r/s	R^2	
150	29.40±0.10d	18.47±0.13d	27.05±0.46a	686.94±4.61a	115.34±2.14d	0.998 97	84.66±0.57a	19.14±0.11c	150.91±1.52a	0.978 68	89.99
250	37.00±0.57c	21.34±0.16c	23.64±0.43cd	541.54±3.28b	117.28±2.03c	0.998 71	82.72±0.35b	18.87±0.10cd	119.08±1.39b	0.964 93	86.62
500	48.39±0.41b	32.03±0.36b	23.95±0.64c	306.58±2.34c	130.76±1.15b	0.997 85	69.24±0.24c	30.16±0.19b	85.26±0.94c	0.962 56	76.02
1000	154.32±0.01a	106.26±0.01a	26.55±0.46ab	101.72±0.59d	213.33±1.35a	0.999 09	1.68±0.04d	67.35±0.53a	82.56±1.14d	0.941 69	32.36

3 结论

黑豆粉含有丰富的蛋白质和花青素，在营养学上具有重要意义。黑豆粉的加入对面团的流变特性产生一定影响，本研究将黑豆粉添加到小麦粉中，通过蠕变-回复分析并探究黑豆粉-小麦粉面团在线性和非线性黏弹性区域的黏弹性，为黑豆粉的主食化提供基础理论依据。

粉质特性结果表明：添加黑豆粉后，面团的吸水率、形成时间均有提高，而面团的稳定时间呈现先增大后减小的趋势；黑豆粉的添加量 10% 时面团的品质最好，此时面团的弱化度最小，粉质质量指数最高。

蠕变-回复数据良好地拟合 4-因素 Burgers 模型 ($R^2>0.94$)。Burgers 模型各参数 J_{co} 、 J_{cm} 、 λ_c 、 μ_c 、 J_{max} 、 J_{ro} 、 J_{rm} 、 λ_r 和回复率在蠕变时间 (3、5、10、15 min)、回复时间 (3、5、10、15 min) 和剪切应力 (150、250、500、1 000 Pa) 下呈现不同程度的显著性变化 ($P<0.05$)。

线性蠕变-回复分析结果：蠕变时间 3 min 时内已达到稳态剪切条件，蠕变时间的延长会影响面团的弹性回复和回复速度；面团在 3~10 min 的回复时间内可回复 63.51%~73.6%，且面团的大部分回复发生在前 10 min，回复率是 73.6%。

非线性蠕变-回复分析结果：面团在线性黏弹性区域外对剪切应力比较敏感，回复率由 89.99% 降低至 32.36%，但仍呈现典型的黏弹性特征，加大剪切应力，面团形变增大，稳态剪切黏度 (μ_c) 随之降低，延迟弹性回复加快。

参考文献：

[1] HAYTA M, SCHOFIELD J D. Dynamic rheological behavior of wheat gluteins during heating[J]. Journal of the Science of Food, 2010, 85(12): 1992-1998. DOI: 10.1002/jsfa.2212.

[2] 吴伟都, 朱慧, 王雅琼, 等. 搅拌型酸乳蠕变恢复性能的研究[J]. 食品科技, 2018, 43(7): 90-93. DOI: 10.13684/j.cnki.spkj.2018.07.017.

[3] LEFEBVRE J. An outline of the non-linear viscoelastic behaviour of wheat flour dough in shear[J]. Rheologica Acta, 2012, 45(4): 525-538. DOI: 10.1007/s00397-006-0093-3.

- [4] MEERTS M, CARDINAELS R, OOSTERLINCK F, et al. The impact of water content and mixing time on the linear and non-linear rheology of wheat flour dough[J]. *Food Biophysics*, 2017, 12(2): 151-163. DOI: 10.1007/s11483-017-9472-9.
- [5] VANIN F M, LUCAS T, TRYSTRAM G, et al. Biaxial extensional viscosity in wheat flour dough during baking[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 236: 29-35. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2018.05.007.
- [6] LEFEBVRE J. Nonlinear, time-dependent shear flow behaviour, and shear-induced effects in wheat flour dough rheology[J]. *Journal of Cereal Science*, 2009, 49: 262-271. DOI: 10.1016/j.jcs.2008.10.010.
- [7] FERREIRA C D, ZIEGLER V, LINDEMANN I D S, et al. Quality of black beans as a function of long-term storage and moldy development: Chemical and functional properties of flour and isolated protein[J]. *Food Chemistry*, 2018, 246: 473-480. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.11.118.
- [8] FENG Z, DOU W, ALAXI S, et al. Modified soluble dietary fiber from black bean coats with its rheological and bile acid binding properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 62: 94-101. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.07.032.
- [9] JIANG L, JING W, YANG L, et al. Effects of ultrasound on the structure and physical properties of black bean protein isolates[J]. *Food Research International*, 2014, 62: 595-601. DOI: 10.1016/j.foodres.2014.04.022
- [10] AGUILERA Y, MOJICA L, REBOLLO-HERNANZ M, et al. Black bean coats: New source of anthocyanins stabilized by beta-cyclodextrin copigmentation in a sport beverage[J]. *Food Chemistry*, 2016, 212: 561-570. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.06.022.
- [11] GANESAN K, XU B. A critical review on polyphenols and health benefits of black soybeans[J]. *Nutrients*, 2017, 9(5): 455-471. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2006.12.011
- [12] YANG M, KOO S I, SONG W O, et al. Food matrix affecting anthocyanin bioavailability: review[J]. *Current Medicinal Chemistry*, 2011, 18: 291-300. DOI: 10.2174/092986711794088380.
- [13] CHAVEZ-SANTOSCOY R A, LAZO-VELEZ M A, SERNASALDIVAR S O, et al. Delivery of flavonoids and saponins from black bean (*Phaseolus vulgaris*) seed coats incorporated into whole wheat bread[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2016, 17: 222-235. DOI: 10.3390/ijms17020222.
- [14] PEREZ-RAMIREZ I F, BECERRIL-OCAMPO L J, REYNOSO-CAMACHO R, et al. Cookies elaborated with oat and common bean flours improved serum markers in diabetic rats[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(3): 998-1007. DOI: 10.1002/jsfa.8548.
- [15] STRUYF N, van der MAELEN E, HEMDANE S, et al. Bread dough and baker's yeast: An uplifting synergy[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2017, 16(5): 850-867. DOI: 10.1111/1541-4337.12282.
- [16] ANGIOLONI A, ROSA M D. Effects of cysteine and mixing conditions on white/whole dough rheological properties[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80: 18-23. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.04.050.
- [17] MARTINEZ M M, GOMEZ M. Rheological and microstructural evolution of the most common gluten-free flours and starches during bread fermentation and baking[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 197:78-86. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2016.11.008.
- [18] 刘继展, 白欣欣, 李萍萍. 番茄果实蠕变特性表征的 Burger's 修正模型[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(9): 249-255. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.09.032.
- [19] 谢岩黎, 王晨, 郝振宇. 抗性淀粉与小麦粉共混体系黏弹性的研究[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(2): 25-30.
- [20] 李茹. 黑豆脂氧合酶的制备及其酶学性质的鉴定[D].山西大学, 2016.
- [21] GHOSHAL G, SHIVHARE U S, BANERJEE U C. Rheological properties and microstructure of xylanase containing whole wheat bread dough[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2017, 54(7): 1928-1937. DOI: 10.1007/s13197-017-2627-3.
- [22] 杨述, 高昕, 许加超, 等. 不同硬度奶酪的质构及流变特性比较[J]. *食品科学*, 2010, 31(21): 50-53.
- [23] FITZSIMONS S M, TOBIN J T, MORRIS E R. Synergistic binding of konjac glucomannan to xanthan on mixing at room temperature[J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22: 36-46. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2007.01.023.
- [24] ROUILLÉ J, VALLE G D, LEFEBVRE J, et al. Shear and extensional properties of bread doughs affected by their minor components[J]. *Journal of Cereal Science*, 2005, 42:45-57. DOI: 10.1016/j.jcs.2004.12.008.
- [25] SASAKI T, YASUI T, KOHYAMA K. Influence of starch and gluten characteristics on rheological properties of wheat flour gel at small and large deformation[J]. *Cereal Chemistry*, 2008, 85(3): 329-334. DOI: 10.1094/cchem-85-3-0329.
- [26] van BOCKSTAELE F, de LEYN I, EECKHOUT M, et al. Non-linear creep-recovery measurements as a tool for evaluating the viscoelastic properties of wheat flour dough[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 107:50-59. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2011.06.001.
- [27] DOLZ M, HERNANDEZ M J, DELEGIDO J. Creep and recovery experimental investigation of low oil content food emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22:421-427. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2006.12.011.

备注：本文的彩色图表可从本刊官网（<http://lspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>）、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。

（审核：谭洪卓）