

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.043

生物解离大豆膳食纤维对面团质构特性的影响

李 杨 钟明明 齐宝坤 曾 琪 李 红 王 欢

(东北农业大学食品学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为合理利用生物解离提油过程中产生的膳食纤维,利用超微粉碎技术改善生物解离大豆膳食纤维的功能特性,分别研究纤维粒度、纤维添加量及水分添加量对面团质构特性的影响,通过响应面法建立了上述3因素对面团延展率影响的模型。通过模型分析得出,3种因素对面团延展率的影响程度排序为:纤维添加量、水分添加量、纤维粒度。经优化得到的最佳工艺条件:纤维添加量为30%、水分添加量为4.5%、纤维粒度为300目,在此条件下进行试验,得到膳食纤维面团延展率为10.61。面团微观结构结果表明,面团质构特性发生变化是由于膳食纤维对面团中二硫键产生破坏,面团面筋断裂,淀粉颗粒暴露出面筋网络结构之外,当添加量为40%和50%时几乎看不到成片的面筋膜,面筋结构受到破坏进而影响面团质构特性。

关键词: 生物解离膳食纤维; 面团质构; 扫描电镜; 响应面

中图分类号: TS214.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0355-08

Effect of Biodissociation of Soybean Dietary Fiber on Texture Properties of Dough

LI Yang ZHONG Mingming QI Baokun ZENG Qi LI Hong WANG Huan
(College of Food Science and Technology, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Dietary fiber, the byproduct from enzyme-assisted aqueous extraction processing, was provided for rational use, superfine grinding technology was used to improve the functional properties of enzyme-assisted aqueous extraction processing of soybean dietary fiber, and the effects of the dietary fiber size, dietary fiber content and moisture content on dough texture characteristics, model of the above three factors affecting dough extension rate were established by response surface method. Through the model analysis, the influence degree of the three factors on the dough extension rate was as follows: dietary fiber addition, water addition, dietary fiber granularity. The optimal conditions obtained for dietary fiber content of 30% and moisture content of 4.5%, the dietary fiber particle size was 300 meshes, experiments were carried out under this condition, and the dietary fiber dough extensibility rate was got as 10.61. The results showed that the microstructure of dough, dough texture characteristics change was due to failure of two disulfide content of dietary fiber on dough group, dough gluten fracture, starch granules exposed outside the gluten network structure, when the content was 40% and 50%, there was almost no film can be seen into a piece of gluten, the gluten structure was damaged and dough texture characteristics were affected. And there was almost no piece of gluten film was visible, and the gluten structure was damaged and thus affected the texture of the dough. The results of this study can provide reference for the application of biodissociation dietary fiber in pasta products.

Key words: soybean dietary fiber; dough texture; scanning electron microscope; response surface

0 引言

生物解离技术是一种利用机械和酶解手段同步提取油脂和蛋白的绿色加工方式^[1]。据报道,该工艺生产1 L油脂会同时产生约28 L水解液及4.4 kg

的残渣^[2],经研究表明挤压膨化、酸度调节等处理方式使得生物解离豆粕颗粒细腻,可溶性膳食纤维含量较丰富^[3],且在蛋白酶酶解油脂体表面蛋白膜促进油脂释放的同时,大豆蛋白被水解为多肽游离于水解液中,故生物解离大豆所产生的残渣无需进

收稿日期: 2018-01-17 修回日期: 2018-03-01
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0401402)和霍英东教育基金项目(151032)
作者简介: 李杨(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事粮食、油脂及植物蛋白工程研究, E-mail: liyanghuangyu@163.com

一步改性和提取即可作为高品质膳食纤维粉直接利用。目前,脱脂豆粉及大豆膳食纤维在面制品中应用广泛,研究表明,膳食纤维具有较高的持水性,且其自身凝胶性也对面制品品质起到一定改良作用,但过量添加会稀释面筋蛋白、破坏面团结构^[4-6]。国内外关于膳食纤维在面制品中应用的研究主要集中在对膳食纤维进行改性处理,提高水溶性膳食纤维含量,并分析其对面粉的功能特性及面制品感官品质的影响^[7-14]。

超微粉碎技术近几年在膳食纤维改性方面应用广泛。本文以生物解离大豆膳食纤维为原料,通过单因素分析及响应面优化确定不同膳食纤维粒度及添加量对面团质构特性的影响,得到制备生物解离膳食纤维面团的最优工艺。测定面团中巯基/二硫键含量,判断膳食纤维对面团面筋结构形成的影响,并通过扫描电镜观察生物解离膳食纤维在面团中的存在形式及其对面筋结构的影响,为生物解离大豆膳食纤维在面制品中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大豆片、低筋面粉(蛋白质质量分数 9%),市售;2.4 L 碱性蛋白酶(1.2×10^5 U/mL),美国 Sigma 公司。其他常用化学试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

TG16-WS 型台式高速离心机,湖南湘仪离心机仪器有限公司;KC-701 型超微粉碎机,北京开创同和科技发展有限公司;Farinograph-E 型粉质仪,德国 Brabender 公司;KN204P 型烤箱,青岛金贝克机械有限公司;SHA-B 型数显恒温水浴振荡器,金坛市双捷实验仪器厂;TU-1810 型紫外-可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司。

1.3 试验方法

1.3.1 生物解离大豆膳食纤维的制备

将大豆片粉碎后进行挤压膨化处理^[15],大豆片含水率 12%,挤压膨化机套筒温度 60℃,螺杆转速 120 r/min,模孔孔径 30 mm,挤压膨化后的物料加水调节,液料比为 6 mL/g,加入 0.2% 2.4 L 碱性蛋白酶,酶解 3 h 后用 1 mol/L NaOH 调节 pH 值至 9,沸水浴 20 min 灭酶,4 500 r/min 离心分离至上层无游离油析出^[16],收集下层固体残渣,冷冻干燥后获得生物解离大豆膳食纤维粉(Enzyme-assisted aqueous extraction processing Okara, EO);将膳食纤维粉进行不同条件超微粉碎处理,超微粉碎后的物料(Enzyme-assisted aqueous extraction processing with ultrafine grinding Okara, EUGO)分别过 100、200、

300、500 目筛备用。

1.3.2 膳食纤维成分及功能性测定

膳食纤维粉中水分、灰分、粗蛋白和粗脂肪含量的测定根据 AOAC 方法^[17],膳食纤维含量的测定根据 AACC 方法^[18]。持水力、持油力和膨胀力的测定与李安平等^[19]研究方法相同。

1.3.3 大豆生物解离膳食纤维面团制备工艺单因素试验

利用大豆生物解离膳食纤维与面粉混合制成面团,单因素试验按照表 1 进行(纤维添加量和水分添加量为纤维和水占面粉质量的百分比),利用面团质构的各项指标作为标准进行评价。所有试验进行 3 次,试验结果取 3 次平均值。面团质构的测定采用物性测定仪,将面团制成高 4 cm、直径 5 cm 的圆柱形,选用 P50 型探头,测试前、中、后速度分别为 2、1、10 mm/s,应变位移 40 mm,引发类型为自动,数据采集速率 200 p/s。将对照和各混合粉平均分成 5 份,每份样品 200 g,在恒温条件下,将每份样品加入适量水进行揉和,将揉好的光滑、不黏手的面团以相同的揉和次数及揉和力度揉成圆形后,进行 TPA(质构分析)测试。从 TPA 试验曲线上可得到 3 个参数:硬度、弹性和胶黏性^[15]。

表 1 制备大豆生物解离膳食纤维面团单因素水平
Tab.1 Single factor experiment levels of EAEP
residue dough

水平	纤维粒度/目	纤维添加量/%	水分添加量/%
1	60	10	1
2	100	20	3
3	200	30	5
4	300	40	7
5	500	50	9

1.3.4 生物解离纤维面团制备工艺响应面优化

根据单因素测定结果,应用 Box-Behnken 设计原理,以纤维粒度、纤维添加量、水分添加量 3 因素作为影响因素,以生物解离膳食纤维面团延展率作为响应值,设计三因素三编码的响应面试验,优化生物解离膳食纤维面团制备条件。

1.3.5 面团巯基/二硫键测定

由响应面结果可知,膳食纤维添加量对面团质构影响较大,故以下试验将 TPA 测试后的面团经过真空冷冻干燥,用研钵粉碎并过 100 目筛,分别准确称取 150 mg 面团粉,与 1 mL Tris-Gly(0.086 mol/L Tris(氨基丁三醇),0.09 mol/L Gly(氨基乙醇),0.04 mol/L EDTA(乙二胺四乙酸),pH 值 8.0)缓冲溶液混匀后加 4.7 g 盐酸胍,用缓冲溶液定容至 10 mL,室温(20℃)下搅拌 30 min。吸取 1 mL 样品

液加入 5 mL 8mol/L Urea (尿素) 溶液, 再加入 0.04 mL Ellman's (DTNB, 即 5,5-二巯基双 2-硝基苯甲酸溶于 Tris - Gly 缓冲液, 4 mg/mL) 试剂, 迅速混合后在 25℃ 下保温反应 30 min, 测定在 412 nm 下吸光度 A_{412} ; 同时测定空白值 (以蒸馏水代替样品测定)。每组样品测定 3 次取平均值, 游离巯基摩尔质量浓度计算式为

$$S_h = 73.53A_{412}D/C \tag{1}$$

式中 D ——稀释系数, 取 5.02

C ——样品蛋白质最终质量浓度, mg/mL

测定总巯基含量时, 吸取 0.4 mL 样品液加入 2.0 mL 10 mol/L Urea 及 0.04 mL β -巯基乙醇, 25℃ 保温 60 min 后加入 10 mL 12% 三氯乙酸 (TCA), 保温 60 min 后 3 000 r/min 离心分离 15 min, 用 5 mL 12% 三氯乙酸洗涤沉淀后继续离心, 反复两次, 将沉淀物溶于 6 mL 8 mol/L Urea 中, 加入 0.06 mL Ellman's 试剂, 迅速混合后在 25℃ 下保温反应 30 min 后于 412 nm 处测定吸光度。总巯基摩尔质量浓度的计算式为

$$S_h + S_s = 73.53A_{412}D/C \tag{2}$$

式中 S_s ——被还原的巯基摩尔质量浓度

D ——稀释系数, 取 10

1.3.6 扫描电镜

每 100 g 面粉中分别添加 0、10%、20%、30%、40%、50% 生物解离大豆膳食纤维混匀后揉和成面团, 面团醒发 90 min 后拉伸搓圆, 从面团中取 3 ~ 5 mm³ 的小面团作为测试样, 立即浸泡于 0.2 mol/L pH 值 7.2 的磷酸缓冲液配置的 3% 戊二醛中, 在 4℃ 下固定 24 h。然后用 0.1 mol/L pH 值 7.2 的磷酸缓冲液清洗 3 次, 每次 5 min, 再依次用 30%、

50%、70%、90%、100% 的乙醇脱水, 每次 20 min。样品冻干后, 将其用双面胶带粘在样品台上, 经 IB-5 型离子溅射仪镀金后用 JEOL-JSM-6360LV 型扫描电镜观察拍照, 加速电压 15 kV, 照片放大倍数为 1 000 倍^[20]。

1.3.7 数据分析

本试验数据均为 3 个平行样的平均值, 结果采用 SPSS 分析软件和 Origin 8.0 进行处理分析。

2 结果与讨论

2.1 生物解离大豆膳食纤维成分及功能特性结果分析

表 2 所示为不同粒度膳食纤维 (表中纤维类别字母后的数字表示纤维粒度) 中可溶性纤维含量及膳食纤维粉的功能特性。膳食纤维粉中可溶性膳食纤维质量分数随着粒度的减小由 60.31% (100 目) 增加至 69.07% (500 目), 这可能是由于大豆膳食纤维长链断裂、亲水基团暴露, 从而使得水溶性物质的含量增加。此外生物解离膳食纤维粉的持水力、持油力及膨胀力随目数的增加呈现出先增大后减小的趋势, 最大值分别达到 7.62 g/g、8.24 g/g、12.02 mL/g。膳食纤维粉在小于 300 目时, 其功能特性随目数增大而增大, 这可能是由于在超微粉碎强力作用下, 水溶性膳食纤维增多的同时比表面积增大, 从而使持水力、膨胀力有所增大^[21]; 但当膳食纤维粉大于 300 目后, 超微粉碎破坏了豆渣粉中膳食纤维的组织结构, 虽然豆渣粉与水分的接触面积增大但对水分的束缚能力减小^[22], 故功能特性呈平缓趋势。因此, 超微粉碎可以改善生物解离大豆膳食纤维的功能特性。

表 2 不同粒度膳食纤维成分及功能特性分析

Tab.2 Composition and characteristics analysis of dietary fiber with different particle sizes

参数	纤维类别				
	EO60	EUGO100	EUGO200	EUGO300	EUGO500
可溶性膳食纤维质量分数/%	(49.37 ± 2.56) ^e	(60.31 ± 1.32) ^d	(63.54 ± 3.51) ^c	(67.65 ± 2.32) ^a	(69.07 ± 2.01) ^a
不可溶性膳食纤维质量分数/%	(50.63 ± 2.28) ^a	(39.69 ± 1.17) ^b	(36.46 ± 3.22) ^{bc}	(34.35 ± 2.14) ^c	(30.93 ± 2.07) ^d
持水力/(g·g ⁻¹)	(5.18 ± 0.12) ^e	(6.13 ± 0.85) ^b	(6.36 ± 0.14) ^b	(7.62 ± 0.41) ^a	(7.49 ± 0.71) ^a
持油力/(g·g ⁻¹)	(6.22 ± 0.12) ^d	(6.77 ± 0.04) ^c	(7.26 ± 0.71) ^b	(8.24 ± 1.56) ^a	(8.04 ± 0.91) ^a
膨胀力/(mL·g ⁻¹)	(8.45 ± 0.75) ^d	(9.15 ± 0.45) ^c	(10.49 ± 0.36) ^b	(12.02 ± 0.11) ^a	(10.43 ± 1.27) ^b

注: 同一行中上角标相同者表示无显著性差异, 不同者表示有显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.2 单因素试验结果与分析

2.2.1 纤维粒度

在纤维添加量 30%、水分添加量为 5% 条件下, 膳食纤维粒度对面团质构特性的影响如图 1 所示。随着膳食纤维粒度从 60 目增加至 500 目, 面团硬度逐渐减小, 弹性逐渐增大, 这与王帅阳^[12] 研究结果

一致。这可能是由于随着豆渣粒度的减小, 小粒度膳食纤维粉与水的接触面积增大, 且超微粉碎过程中大量的羟基暴露增大了与水结合的机率, 导致面团的吸水率增大, 面团硬度减小, 但同时黏度增高, 弹性降低。但当纤维粒度为 500 目时, 虽然与水接触面积进一步增大, 但膳食纤维结构遭到破坏对水

的束缚能力降低,从而导致吸水率的降低,这一结果与不同粒度膳食纤维功能特性的结果相一致,且面团硬度、弹性、黏度的变化趋势相吻合。从差异显著性角度分析,硬度随着目数的增加逐渐降低,在 60 目到 100 目之间变化不显著,直到增加到 500 目硬度有明显降低;弹性随目数的增加而增加,显著性变化与硬度相似;胶黏性随目数的增加而升高,但变化趋势不显著。综合考虑膳食纤维粒度对面团质构特性的影响,故在优化膳食纤维粒度时选择 300 目作为中心点。

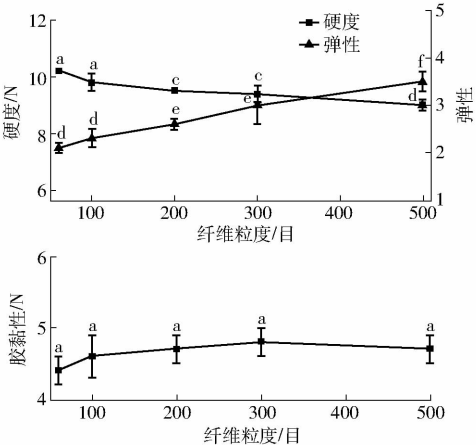


图 1 膳食纤维粒度对面团质构特性的影响
Fig. 1 Influence of dietary fiber size on texture properties of dough

2.2.2 纤维添加量

在纤维粒度为 300 目,水分添加量 5% 的条件下,纤维添加量对面团质构的影响如图 2 所示。由图 2 可知,随纤维添加量的不断增多,面团硬度逐渐增大,弹性不断减小,胶黏性呈现先增大后降低的趋势。从差异显著性角度分析,硬度随着膳食纤维添加量的增加而增强,在添加量 10% ~ 40% 之间硬度增强较显著,当添加量到达 50% 时,硬度增强不再

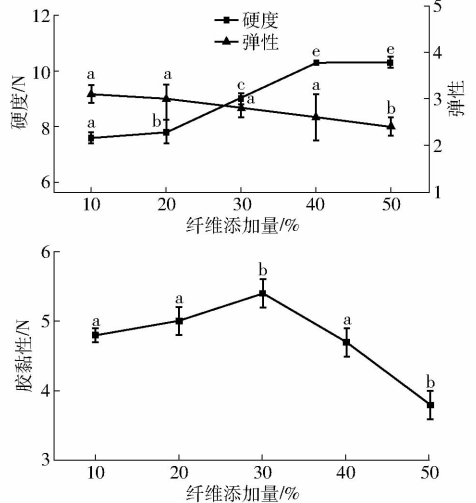


图 2 膳食纤维添加量对面团质构特性的影响
Fig. 2 Influence of dietary fiber addition amount on texture properties of dough

显著;弹性随着膳食纤维添加量的增加不断减小,但变化趋势并不显著;而胶黏性呈先增加后降低的趋势,在添加量为 30% 时达到最高。硬度的结果可能是由于膳食纤维添加量的增加,面团结合效果会受到影响,随着添加量的不断增加,会使面团失去原有的弹性,从而也导致弹性的不断降低。胶黏性的结果可能是由于膳食纤维自身的粘度会在添加初期使得面团粘度出现上升趋势,当添加量达到一定程度时,膳食纤维自身的粘度已不能弥补对面团的破坏,故呈现降低趋势。综合面团质构特性考虑,选择纤维添加量为 30% 作为试验中心点。

2.2.3 水分添加量

水分添加量是影响面团质构的一个重要因素,在纤维粒度为 300 目,纤维添加量为 30% 的条件下,水分添加量对面团质构的影响如图 3 所示。由图 3 可知,硬度随水分添加量的增加呈先增大后降低的趋势,水分添加量过低会影响面团结合度,硬度也会相对较高,但水分过多面粉则会容易溶解在水中不易成团,也会影响面团的质量,所以 5% 水分添加量效果最佳。从差异显著性角度分析,硬度随水分添加量的增加先增加后降低,水分添加量 1% ~ 3% 时硬度呈不显著增加趋势,3% ~ 9% 时呈显著降低趋势;弹性随水分添加量的增加先增强后降低,水分添加量 1% ~ 7% 时弹性增强,1% ~ 3% 时增强不显著,5% ~ 7% 时显著增强,添加量 9% 时弹性开始降低;胶黏性随着水分添加量的增加不断增强,添加量在 7% 时,增强较为显著。弹性与硬度的变化呈负相关,硬度越大弹性越小,所以从图中可以看出弹性随着水分添加量的增加也呈先增大后降低的效果。胶黏性则随水分的增加不断增大,淀粉溶于水会呈现一种胶黏状态,水分增多,黏性增

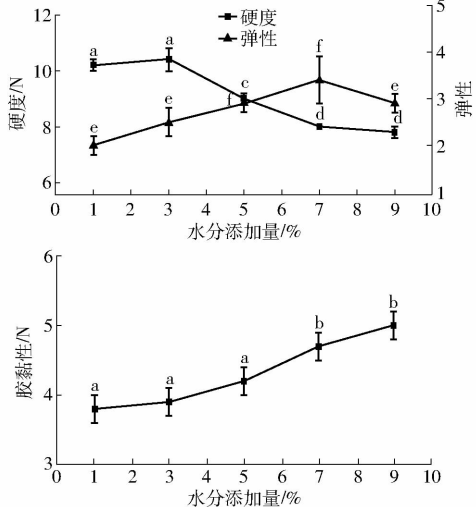


图 3 水分添加量对面团质构特性的影响
Fig. 3 Influence of water addition amount on texture properties of dough

强。综合考虑,在优化水分添加量时选择 5% 作为中心点。

2.3 生物酶法大豆膳食纤维面团制备参数响应面分析

延展率是判断面团质构的综合指标,在实际应用中起着重要作用。因此,本试验选择纤维粒度、纤维添加量、水分添加量 3 因素,采用 Box – Behnken 设计原理,进行响应面法优化分析。响应面试验因素与编码见表 3,试验设计方案与结果见表 4,表 4 中 X_1 、 X_2 、 X_3 为 x_1 、 x_2 、 x_3 的编码值。

表 3 大豆生物解离膳食纤维面团响应面试验因素和编码
Tab.3 Factors and levels for response surface analysis

编码	因素		
	纤维粒度 x_1 /目	纤维添加量 x_2 /%	水分添加量 x_3 /%
-1	250	25	3
0	300	30	5
1	350	35	7

表 4 Box – Behnken 试验设计与结果

Tab.4 Experimental design and corresponding results of Box – Behnken				
试验序号	X_1	X_2	X_3	延展率 W
1	1	-1	0	9.41
2	1	-1	0	9.42
3	-1	1	0	9.67
4	1	1	0	9.83
5	-1	0	-1	9.52
6	1	0	-1	9.53
7	-1	0	1	9.61
8	1	0	1	9.63
9	0	-1	-1	10.39
10	0	1	-1	10.48
11	0	-1	1	9.67
12	0	1	1	9.13
13	0	0	0	6.51
14	0	0	0	6.51
15	0	0	0	6.51
16	0	0	0	6.51
17	0	0	0	6.51

利用 Design-Expert 软件,对表 4 中试验数据进行多元拟合,得到延展率对纤维粒度、纤维添加量、水分添加量二次多项回归方程为

$$W=6.510+0.025X_1+0.130X_2+0.040X_3+0.038X_1X_2-0.0275X_1X_3+0.140X_2X_3+0.890X_1^2+0.180X_2^2+0.170X_3^2$$

(3)

进一步对该模型进行方差分析,分析结果见表 5。由表 5 分析结果可知,所得回归模型 $P<0.0001$,表明响应面回归模型极显著;失拟项 $P>0.05$,表明失拟项不显著。模型的决定系数 $R^2=0.9949$,说明有

99.49% 的响应值变化来源于所选因素,模型与实际试验拟合较好,利用该模型能够很好地对实际生物解离膳食纤维可食膜的生产进行分析和预测。由表 5 可知,一次项 X_2 影响显著 ($P<0.05$),说明膳食纤维添加量对面团延展率的线性影响显著,通过各因素回归系数的大小判断,三因素对可食膜面团延展率的影响次序为:纤维添加量、水分添加量、纤维粒度。交互项 X_2X_3 影响显著 ($P<0.05$),表明各参数对面团延展率的影响不仅是线性关系。 X_1^2 影响极显著, X_2^2 、 X_3^2 影响显著,说明水分添加量及纤维粒度这两个因素对面团延展率的曲面效应显著。

表 5 延展率的方差分析

Tab.5 Analysis of variance of extension rate					
方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	4.389 724	9	0.487 747	3.418 674	<0.000 1
X_1	0.005	1	0.005	0.035 046	0.048 6
X_2	0.006 05	1	0.006 05	0.042 405	0.032 4
X_3	0.441 8	1	0.441 8	3.096 626	0.053 2
X_1X_2	0.005 625	1	0.005 625	0.039 426	0.084 8
X_1X_3	0.002 5	1	2.5×10^{-3}	0.000 175	0.067 9
X_2X_3	0.099 225	1	0.099 225	0.695 479	0.041 8
X_1^2	2.220 796	1	2.220 796	15.565 81	0.005 6
X_2^2	0.612 007	1	0.612 007	4.289 623	0.027 8
X_3^2	0.644 533	1	0.644 533	4.517 603	0.031 6
残差	0.998 7	7	0.142 671		
失拟	0.797 7	3	0.265 9	5.291 542	0.070 6
纯误差	0.201	4	0.050 25		

通过响应面试验(图 4)分析生物解离大豆膳食纤维面团制备参数,发现纤维粒度在单因素试验中确定的 300 目处比 276 目处面团各项指标略有降低,但总体影响不大。纤维添加量也略有差值,模型预测最佳添加量为 30.52%,与单因素的 30% 相差甚微。水分添加量方面,模型结果将单因素试验的结果进一步细化,精确至 4.36%。在此条件下制备的面团具有最佳的延展率,而在实际试验中也进一步得到证实。

最终结果表明,利用回归方程预测,得到生物解离膳食纤维可食膜的最佳工艺参数为:纤维粒度为 276 目,纤维添加量为 30.52%,水分添加量为 4.36%,在此条件下制备的面团延展率为 10.73。考虑实际操作可行性,将上述条件修正为:纤维粒度为 300 目、纤维添加量为 30%、水分添加量为 4.5%,在此条件下进行试验,得到面团延展率为 10.61,与模型预测值较为接近,说明该模型预测结果与实际试验结果接近,具有一定参考价值,可用于实际生产加工中。

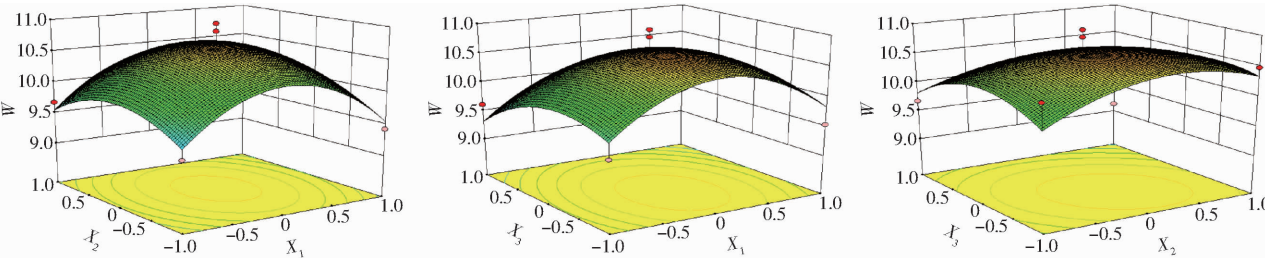


图 4 面团参数对面团延展率影响的响应曲面

Fig. 4 Response surfaces exhibiting effects of film formation parameters on water vapor permeability of edible films

2.4 生物解离大豆膳食纤维对面团二硫键/巯基含量的影响

根据图 5 可知,随着生物解离大豆膳食纤维添加量的增加,混合粉中总巯基及二硫键含量呈整体波动下降趋势,该变化主要是由小麦面筋蛋白中半胱氨酸残基的巯基变化引起,其中麦醇溶蛋白只含有分子内二硫键,水化之后赋予面团流变性,麦谷蛋白是大分子复合体,含有大量分子间二硫键,水化后使面团具有良好的弹性和延伸性,在面团形成过程中,蛋白质分子间以及分子内二硫键的形成受到面筋蛋白含量的影响,且膳食纤维的强亲水性使得面团中小麦面筋蛋白二硫键(—S—S—)部分断裂,面筋网络结构受到一定程度的破坏,面团筋力下降,多肽链形成多肽和小分子短链物质,从而引起总巯基、游离巯基含量以及二硫键含量的降低。此外,面粉的稳定时间越长说明面粉筋力越强韧性越好,麦谷蛋白的二硫键结合牢固不易断裂或处在恰当的位置,二硫键测定结果与小麦粉质特性结果相一致。小麦粉中麦谷蛋白和醇溶蛋白共同形成面筋,麦谷蛋白靠分子内和分子间二硫键连接,赋予面团弹性,醇溶蛋白主要为面团提供延展性。

2.5 生物解离大豆膳食纤维对面团微观结构影响

各样品面团的电镜扫描结果见图 6。在未添加大豆生物解离膳食纤维的空白对照中,面筋的网络结构连续,可以清晰地观察到面团中筋状、片状的面

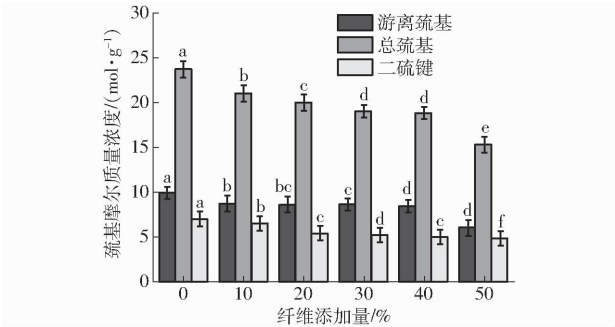


图 5 生物解离大豆膳食纤维对面团中二硫键含量的影响
Fig. 5 Effect of EAEP residues on content of disulfide bond in dough

筋蛋白。随着生物解离大豆膳食纤维添加量的增加,面团面筋开始断裂,出现不连续性,淀粉颗粒暴露在面筋网络结构之外,当添加量为 40% 和 50% 时几乎看不到成片的面筋膜,面筋结构受到严重破坏^[23]。这一现象能够更直观地说明生物解离大豆膳食纤维的添加破坏了面筋的网络结构,从而导致了上述面团质构特性的变化^[24]。但适量的大豆生物解离膳食纤维可以作为改良剂添加至面制品中,改善面制品的营养价值。

3 结论

(1)大豆生物解离膳食纤维面团的制备单因素试验表明,纤维粒度、纤维添加量及水分添加量 3 因素均对面团质构有较显著影响,其中面团的胶黏性随

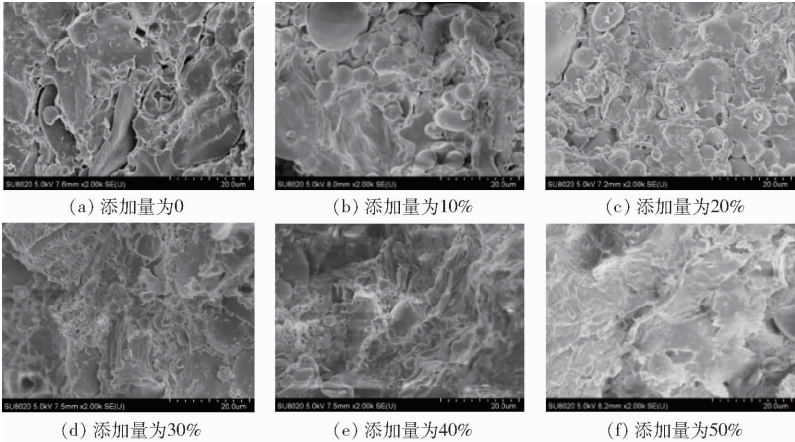


图 6 生物解离大豆膳食纤维对面粉微观结构的影响

Fig. 6 Effect of EAEP soybean dietary fiber on microstructure of wheat flour

着纤维粒度的增加缓慢增加,随纤维添加量的增多呈先升高后降低的趋势,随水分添加量的增加不断增加。

(2)在单因素试验基础上,通过响应面法建立了纤维粒度、纤维添加量及水分添加量 3 因素对面团延展率影响的模型。3 因素对面团延展率的影响程度由大到小排序为:纤维添加量、水分添加量、纤维粒度。经优化得到的最佳工艺条件为纤维粒度 300 目、纤维添加量 30%、水分添加量 4.5%,在此条件下进行试验,得到面团延展率为 10.61。

(3)通过二硫键测定结果可以看出,在最优工艺条件下制备的膳食纤维面团中仍存在较多的面筋结构。随生物解离大豆膳食纤维添加量的增加,面团面筋开始断裂,出现不连续性,淀粉颗粒暴露在面筋网络结构之外,当添加量为 40% 和 50% 时几乎看不到成片的面筋膜,面筋结构受到严重破坏,且随着生物解离大豆膳食纤维添加量的增加,混合粉中总巯基及二硫键含量呈整体波动下降趋势。

参 考 文 献

1 WU J, JOHNSON L A, JUNG S. Demulsification of oil-rich emulsion from enzyme-assisted aqueous extraction of extruded soybean flakes[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(2): 527 – 533.

2 SEKHON J K, JUNG S, WANG T, et al. Effect of co-products of enzyme-assisted aqueous extraction of soybeans on ethanol production in dry-grind corn fermentation[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 192(2): 451 – 460.

3 RAMBABU N, PANTHAPULAKKAL S, SAIN M, et al. Production of nanocellulose fibers from pinecone biomass: evaluation and optimization of chemical and mechanical treatment conditions on mechanical properties of nanocellulose films[J]. *Industrial Crops & Products*, 2016, 83: 746 – 754.

4 IDROVO ENCALADA A M, BASANTA M F, FISSORE E N, et al. Carrot fiber (CF) composite films for antioxidant preservation: particle size effect[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 136: 1041 – 1051.

5 王亚静. 绿豆皮纳米纤维素的制备及其在可食膜中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2016.

WANG Yajing. Preparation of mung bean skin nanocellulose and its application in edible films[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)

6 AZEREDO H M C, KONTOU-VRETTOU C, MOATES G K, et al. Wheat straw hemicellulose films as affected by citric acid[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 50: 1 – 6.

7 陈珊珊, 陶宏江, 王亚静, 等. 葵花籽壳纳米纤维素/壳聚糖/大豆分离蛋白可食膜制备工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(8): 306 – 314.

CHEN Shanshan, TAO Hongjiang, WANG Yajing, et al. Optimization of the preparation of edible films of sunflower seed hull nanocellulose/chitosan/soybean protein isolate[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(8): 306 – 314. (in Chinese)

8 YANG L, YAN Z, MEI W, et al. Simplex-centroid mixture design applied to the aqueous enzymatic extraction of fatty acid-balanced oil from mixed seeds[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2013, 90(3): 349 – 357.

9 DAUDT R M, AVENA-BUSTILLOS R J, WILLIAMS T, et al. Comparative study on properties of edible films based on pinhão (*Araucaria angustifolia*) starch and flour[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 60: 279 – 287.

10 高丹丹, 徐学玲, 江连洲, 等. 普鲁兰多糖-明胶可食性膜的特性[J]. *食品科学*, 2014, 35(1): 69 – 73.

GAO Dandan, XU Xueling, JIANG Lianzhou, et al. Properties of pullulan-gelatin edible film[J]. *Food Science*, 2014, 35(1): 69 – 73. (in Chinese)

11 BONILLA J, TALÓN E, ATARÉS L, et al. Effect of the incorporation of antioxidants on physicochemical and antioxidant properties of wheat starch-chitosan films[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 118(3): 271 – 278.

12 王帅阳. 添加剂对聚乙烯醇/木聚糖复合膜性能的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.

WANG Shuaiyang. Effects of additives on the properties of polyvinyl alcohol/xylan composite films[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)

13 王拓一. 改性大白菜纤维基蔬菜纸的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.

WANG Tuoyi. Study on modified Chinese cabbage fiber-based vegetable paper[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)

14 HASHEM M, SHARAF S, ABD EL-HADY M M, et al. Synthesis and characterization of novel carboxymethylcellulose hydrogels and carboxymethylcellulose-hydrogel-ZnO-nanocomposites[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 95(1): 421 – 427.

15 RÓZ A L D, ZAMBON M D, CURVELO A A S, et al. Thermoplastic starch modified during melt processing with organic acids: the effect of molar mass on thermal and mechanical properties[J]. *Industrial Crops & Products*, 2011, 33(1): 152 – 157.

16 OLIVATO J B, GROSSMANN M V E, BILCK A P, et al. Effect of organic acids as additives on the performance of thermoplastic starch/polyester blown films[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 90(1): 159 – 164.

17 ABDILLAHI H, CHABRAT E, ROUILLY A, et al. Influence of citric acid on thermoplastic wheat flour/poly(lactic acid) blends. II. Barrier properties and water vapor sorption isotherms[J]. *Industrial Crops & Products*, 2013, 50(10): 104 – 111.

18 VIEIRA M G A, SILVA M A D, SANTOS L O D, et al. Natural-based plasticizers and biopolymer films: a review[J]. European Polymer Journal, 2011, 47(3):254 – 263.

19 李安平,谢碧霞,钟秋平,等. 不同粒度竹笋膳食纤维功能特性研究[J]. 食品工业科技,2008,29(3):83 – 85.
LI Anping, XIE Bixia, ZHONG Qiuping, et al. Effect of particle sizes on functional properties of dietary fiber prepared from bamboo shorts[J]. Science and Technology of Food Industry,2008,29(3):83 – 85. (in Chinese)

20 WEBSTER F X. Spectrometric identification of organic compounds[J]. Journal of Chemical Education, 2015, 92(10):826 – 827.

21 SANYANG M L, SAPUAN S M, JAWAID M, et al. Effect of plasticizer type and concentration on tensile, thermal and barrier properties of biodegradable films based on sugar palm (*Arenga pinnata*) starch[J]. Polymers, 2015, 7(6):1106 – 1124.

22 刘鹏飞,孙圣麟,王文涛,等. 增塑剂甘油对甘薯淀粉膜性能的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 8(10):15 – 20.
LIU Pengfei, SUN Shenglin, WANG Wentao, et al. Effects of plasticizer glycerol on the performance of sweet potato starch film [J]. Chinese Journal of Oil and Gas, 2015, 8(10):15 – 20. (in Chinese)

23 PRANOTO Y, RAKSHIT S K, SALOKHE V M. Enhancing antimicrobial activity of chitosan films by incorporating garlic oil, potassium sorbate and nisin[J]. LWT—Food Science and Technology, 2005, 38(8):859 – 865.

24 孔令娟. 柠檬酸交联淀粉和小麦醇溶蛋白的研究[D]. 上海:东华大学, 2014.
KONG Lingjuan. Studies on cross-linked starch and wheat gliadins with citric acid[D]. Shanghai: Donghua University, 2014. (in Chinese)

25 BAGHERI L, YARMAND M, MADADLOU A, et al. Transglutaminase-induced or citric acid-mediated cross-linking of whey proteins to tune the characteristics of subsequently desolvated sub-micron and nano-scaled particles [J]. Journal of Microencapsulation, 2014,31(7):636 – 643.

26 OLSSON E, HEDENQVIST M S, JOHANSSON C, et al. Influence of citric acid and curing on moisture sorption, diffusion and permeability of starch films[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 94(2):765 – 772.

(上接第 400 页)

11 赵勇,丛大成,韩俊伟. 基于 FEL 的液压振动台加速度幅相控制[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2008,24(5):915 – 919.
ZHAO Yong, CONG Dacheng, HAN Junwei. Acceleration amplitude and phase controller based on the FEL applied to hydraulic vibration generator system[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science,2008,24(5):915 – 919. (in Chinese)

12 张辉,何景峰,韩俊伟. 油气悬架加载试验台正弦波复现控制方法[J]. 农业机械学报,2009,40(7):35 – 39.
ZHANG Hui, HE Jingfeng, HAN Junwei. Replication control method on hydro-pneumatic suspension force loading system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(7):35 – 39. (in Chinese)

13 YAO Jianjun, DIETZ M, XIAO Rui, et al. An overview of control schemes for hydraulic shaking tables[J]. Journal of Vibration and Control, 2016,22(12):2807 – 2823.

14 SHEN Gang, ZHU Zhencai, LI Xiang, et al. Experimental evaluation of acceleration waveform replication on electrohydraulic shaking tables: a review[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016,13(5):1 – 25.

15 SIRANOSIAN A A, KRSTIC M, BEMENT M. Generation and tracking of sinusoids for shake table control via extremum seeking [C]//Proceedings of 2007 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2007:117 – 126.

16 魏巍,杨志东,韩俊伟. 弓网振动试验系统的改进幅相自适应控制设计[J]. 哈尔滨工程大学学报,2015,36(5):702 – 706.
WEI Wei, YANG Zhidong, HAN Junwei. Modified amplitude-phase adaptive control in the pantograph-catenary vibration test system[J]. Journal of Harbin Engineering University,2015,36(5):702 – 706. (in Chinese)

17 YAO Jianjun, HU Shenghai, FU Wei, et al. Harmonic cancellation for electro-hydraulic servo shaking table based on LMS adaptive algorithm[J]. Journal of Vibration and Control,2011,17(12):1862 – 1868.

18 GAO Changhong, ZHENG Shutao, CONG Dacheng, et al. Modeling and control of the CSEEC multi-function testing system[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2018,22(2):257 – 280.

19 李洪人. 液压控制系统[M]. 北京:国防工业出版社,1990:224 – 232.

20 PLUMMER A R. Control techniques for structural testing: a review[J]. Proc. IMechE, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2007,221(2):139 – 169.