

真空碱溶液润麦处理对全麦粉稳定性和品质特性的影响

Effects on stability and qualities of whole wheat flour by treatment of vacuum tempering with alkaline solutions

王明莹^{1,2} 郭晓娜^{1,2} 朱科学^{1,2}

WANG Ming-ying^{1,2} GUO Xiao-na^{1,2} ZHU Ke-xue^{1,2}

(1. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品安全与质量控制协同创新中心, 江苏 无锡 214122)

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Collaborative Innovation Center for Food Safety and Quality Control, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:为了得到低脂肪酶活性、高稳定性的全麦粉,将小麦在不同真空度(-0.04, -0.07 MPa)下用不同浓度 Na_2CO_3 溶液(0.10%, 0.25%, 0.50%)润麦处理,利用低场核磁共振技术(LF-NMR)探究真空润麦过程中水分迁移情况,测定不同浓度 Na_2CO_3 溶液润麦下小麦中脂肪酶的相对活性。将润麦后的小麦制成全麦粉后,测定重组全麦粉的储藏稳定性和品质特性。结果表明:润麦过程中小麦籽粒的 A_{21} 值持续上升,结合水含量增加;真空碱溶液润麦可以降低小麦籽粒中脂肪酶活性,增加全麦粉贮藏稳定性,当 Na_2CO_3 溶液浓度为 0.5% 时脂肪酶活性最低;对全麦粉的粉质特性、RVA 和面团流变学分析表明,真空碱溶液润麦能显著延长全麦粉的稳定时间,增强面团中面筋筋力,提高全麦粉的糊化特性,增加全麦面团的黏弹性, Na_2CO_3 溶液润麦可有效改善全麦粉的品质特性。

关键词:真空润麦; Na_2CO_3 溶液; 全麦粉; 核磁共振

Abstract: To produce the whole wheat flour which has lower enzyme activity and higher stability, the wheat was tempered with Na_2CO_3 solution (0.10%, 0.25%, 0.50%) in vacuum condition (-0.04, -0.07 MPa). LF-NMR was used to observe the water transfer process in kernel and the activity of Lipase was evaluated. Then milled the wheat and produced the whole wheat flour, the stability and quality characteristics of whole wheat flour were studied. The results showed that the value of A_{21} was increased during tem-

pering, and tempered in vacuum condition with alkali solution could inhibit the activity of lipase in wheat kernel, improve the stability of whole wheat flour. Results of farinograph properties, RVA and rheological properties in whole wheat flour illustrated that tempered in vacuum condition with alkali solution could increase all properties of whole wheat flour, and improve the qualities of whole wheat flour effectively.

Keywords: vacuum tempering; Na_2CO_3 solution; whole wheat flour; NMR

研究^[1]表明全麦粉中的麸皮可以有效地降低患糖尿病、心脏病、肥胖和某些癌症的风险。然而全麦粉中含有较多的麸皮,麸皮中含 4% 左右的脂肪和较高活性的脂肪酶,能催化脂肪水解成脂肪酸^[2],引起全麦粉的劣变;并且麸皮的加入会弱化面团中的网络结构,降低了其加工性质^[3];同时麸皮中含有大量的微生物,这也会对全麦粉稳定性产生影响。

研究表明,盐溶液润麦可以降低小麦粉中的微生物含量^[4];碱溶液润麦可以降解赤霉病麦中 DON 毒素含量^[5];金属离子溶液润麦可以有效降低麸皮中脂肪酶活性,从而延长全麦粉的保质期^[6];真空润麦能缩短润麦时间,减少微生物的生长,增加经济效益^{[7]3-4}。低场核磁共振技术(LF-NMR)是一种新兴的无损、快速的检测技术^[8],用来研究食品的冷冻、干燥、老化、凝胶等过程^{[9]3-6[10]},可以描述水分子的运动状态和存在状态。本研究采用较为温和的真空润麦方式生产高贮藏稳定性和较高品质特性的全麦粉,利用核磁共振技术构建润麦过程中水分迁移模型,添加食品配方中较为常见的、消费者接受度高的 Na_2CO_3 溶液为酶活抑制剂,测定不同浓度 Na_2CO_3 溶液在不同真空润麦条件下对小麦中脂肪酶活性的影响,并对全麦粉的储藏稳定性和品质特性进行研究。

基金项目:中国博士后科学基金面上项目(编号:2014M560396);江苏省博士后科研资助计划项目(编号:1402072C);江苏省“现代粮食流通与安全协同创新中心”资助项目

作者简介:王明莹,女,江南大学在读硕士研究生。

通信作者:郭晓娜(1978—),女,江南大学副教授。

E-mail: xiaonaguo@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2016-12-24

1 材料与方法

1.1 主要材料

小麦:加拿大小麦(硬麦),水分含量 10.81%,手工除杂后备用,中粮集团有限公司提供;

Na_2CO_3 :分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器设备

真空干燥箱:DZF-6050型,上海精宏实验设备有限公司;

自动实验磨粉机:MLU202型,布勒(无锡)机械制造有限公司;

核磁共振分析仪:NMI-20 Analyst型,上海纽迈电子科技有限公司;

差示扫描量热仪:Q200型,美国TA仪器有限公司;

粉质仪:Farinograph-E型,德国Brabender公司;

快速粘度分析仪:RVA-4500型,波通澳大利亚分公司;

旋转流变仪:AR-G2型,美国TA仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 小麦调质方法 润麦目标水分是 16%, Na_2CO_3 溶液浓度是以 14%含水量的小麦粉为基准进行计算。称取 200 g 小麦样品,放入自封袋中,加入水或不同浓度的碱溶液,使其水分含量达到 16%。混合搅拌均匀,放置在真空干燥箱中,保持 30 °C 环境中润麦。对样品进行不同真空时间的润麦:0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 h,其中真空度分别为 -0.04, -0.07 MPa。对照组为水溶液润麦,在正常大气压下润麦 24 h。

1.3.2 T_2 的采集及反演 T_2 的反演图是以横向弛豫时间为横坐标,以 NMR 信号值为纵坐标绘制图谱,由反演图谱可得出样品中不同组分的水分弛豫时间和各组分的面积值(用 A_2 表示)。试验采用多脉冲回波序列(CPMG)来测量样品的弛豫时间 T_2 及弛豫信号强度。

CPMG 序列参数设为:采样点数 $TD = 249\ 612$,主频 $SW = 200\ \text{kHz}$,回波时间 $TE = 0.2\ \text{ms}$, $TW = 1\ 500\ \text{ms}$,累加次数 $N = 8$ 。采用 Excele 和 Origin 软件处理和分析数据。

在普通润麦过程中,随机选取几粒样品进行 T_2 采集。每次称取大约 1 g 小麦放于核磁共振试管中,鉴于润麦过程中水分变化状况前快后慢,所以设置不同的取样间隔。真空润麦过程中的 T_2 采集方法同上,在润麦结束后对小麦进行核磁共振测定。

1.3.3 小麦中脂肪酶活性的测定 按 GB/T 5523—2008 执行。

1.3.4 小麦制粉及重组全麦粉的制备 根据小麦中酶活性的测定结果,确定润麦条件为 -0.07 MPa 下 0.5% Na_2CO_3 溶液润麦 2 h,用布勒实验磨制粉,分别得到小麦粉和麸皮。将麸皮粉碎,分别过 40 目筛和 80 目筛,以 20% 的回添量回添到小麦粉中,制成相应的全麦粉。空白对照组为水溶液正常大气压下润麦 24 h 后所制成的两种不同回添粒径的全麦粉。

1.3.5 全麦粉加速贮藏试验 将全麦粉置于温度 37 °C,湿

度 85% RH 的环境中,每隔 5 d 测一次脂肪酸值^[11]。脂肪酸值以中和 100 g 干物质所需要的 KOH mg 数表示。

1.3.6 重组全麦粉粉质特性的研究 采用 Farinograph-E 型粉质仪,根据 AACC 方法 54-21-02^[12]测定。

1.3.7 重组全麦粉糊化特性的研究 采用快速粘度分析仪(RVA),根据 AACC 方法 76-21-01^[13]测定。

1.3.8 重组全麦粉面团黏弹特性的研究 将重组全麦粉和成面团,用保鲜膜包裹,静置 10 min 后,用旋转流变仪测定面团的黏弹性,先进行应力扫描,确定合适应力后进行频率扫描,频率扫描范围选取 0.1~10.0 Hz^[14]。

2 结果与分析

2.1 真空水润麦对小麦 T_2 的影响

用 CPMG 序列对不同状态下的小麦进行扫描,小麦中的 H 质子信号主要来源于籽粒中的水质子。水质子所处的化学环境不同时,其反馈的弛豫时间和信号幅度也会有所不同。一般来说,弛豫时间越短即 T_2 值越小,水质子所处的环境化学键比较强,结合的紧密,水分子的自由度较低。弛豫信号的幅度越大即 A_2 值越大,该种状态的水分子含量也越多^[15]。

由图 1(a)可知,拟合得到了 3 个不同的自旋-自旋弛豫时间 T_2 ,这说明在小麦籽粒中存在着三种不同流动状态的水,由小到大分别是结合水弛豫时间(T_{21})、中间状态水弛豫时间(T_{22})和自由水弛豫时间(T_{23})。结合水弛豫时间(T_{21})表示的组分是与其他非水组分紧密结合的部分,其流动性较差;中间状态水的弛豫时间(T_{22})表示的组分的流动性介于自由水和结合水之间;自由水弛豫时间(T_{23})是指以游离状态存在的自由水的横向弛豫时间^[16]。将这 3 个峰分别积分,得到其面积分别表示为 A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} ,它们表示小麦中不同状态的水分子含量的多少。

小麦润麦就是水分由麸皮以三维网络状方式^[17]慢慢渗入到致密的胚乳中的过程。随着润麦时间的增加,水分子从疏松多孔的小麦麸皮进入到由大量淀粉颗粒和蛋白质基质致密填充着的胚乳内部^[18],水分子与胚乳中大分子物质结合,从自由水变为结合水,使胚乳的强度降低,同时增加皮层的韧性,改变小麦的结构力学特性,使小麦利于研磨^[19]。因此,小麦润麦过程可以用结合水含量(即 A_{21})的变化趋势直观地表现出来。

如图 1(b)所示, A_{21} 变化曲线表示正常大气压下 24 h 润麦过程中小麦籽粒中结合水的含量变化。 A_{21} 值在前 13 h 增加显著,结合水含量上升,信号幅度达到 2 108,之后有小幅震荡,上升速度变缓。说明在润麦过程中,随着调质时间的增加,小麦籽粒中结合水含量不断上升,水分不断由外部麸皮渗入到胚乳中,与胚乳中的亲水集团,如淀粉和蛋白质等,通过氢键结合,由自由水转变为结合水,从而使胚乳的结构变得柔软,利于小麦的研磨。

将小麦分别置于 -0.04, -0.07 MPa 真空度下润麦,发现小麦籽粒中 A_{21} 值在前 2 h 中呈上升状态。小麦 A_{21} 值分别在 -0.07 MPa 下润麦 2 h 后和 -0.04 MPa 下润麦 3 h 后

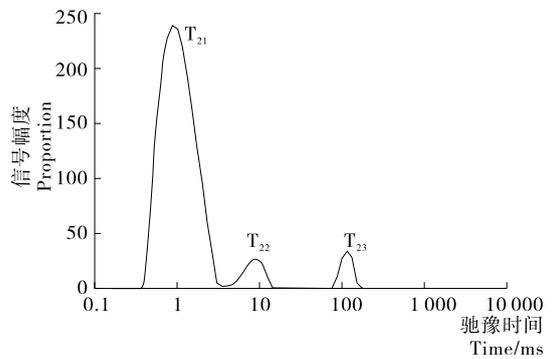
趋于稳定,信号幅度分别达到 2 115 和 2 193,表明此时小麦籽粒中结合水含量趋于稳定,大部分自由水已转变为结合水,水分渗入运动减缓,小麦籽粒内部的水分分布状态与正常大气压润麦 24 h 时的小麦籽粒状态相似,润麦过程结束。从图 1(c)中可以得到真空润麦可以加速小麦内部水分扩散速度,这与郭倩倩^{[7]46-47}的结论相同,真空润麦可以加快小麦润麦速度。

2.2 真空碱溶液润麦对小麦中脂肪酶活性的影响

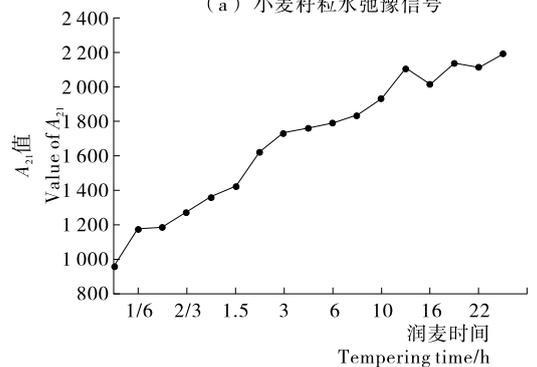
为了让小麦利于研磨,保证润麦过程较为完全,水分充分渗透进胚乳中,结合真空润麦的 A_{21} 变化趋势,选择润麦条件见表 1。随着润麦时间、润麦真空度和 Na_2CO_3 溶液浓度的增加,小麦中脂肪酶的相对活性呈下降趋势,真空碱溶液润麦可以抑制小麦中脂肪酶的活性。在 -0.07 MPa 真空度润麦 3 h 的条件下,随着润麦溶液浓度的增加,小麦中脂肪酶相对活性在 0.5% Na_2CO_3 溶液润麦时下降明显,脂肪酶相对活性从 42.16% 降低为 24.48% ,说明高浓度的碱溶液对小麦中脂肪酶活性有较强的抑制作用。Doblado-Maldonado 等^[6]的研究表明金属离子溶液能很好地抑制小麦中脂肪酶的活性。Munshi 等^[20]的研究表明将盐溶液喷涂于米糠上也能很好地抑制种子中脂肪酶的活性。在 0.5% Na_2CO_3 溶液润麦时,润麦条件为 -0.04 MPa 下润麦 3 h 和 -0.07 MPa 下润麦 2 h 和 3 h 时,小麦中脂肪酶相对活性都呈现出较低的数值,分别为 25.15% , 28.38% , 24.48% 。出现这种现象的原因可能与小麦润麦程度有关,此时小麦润麦完全,碱溶液均匀分布于各个籽粒中并完全渗透进胚乳中,充分抑制了集中在糊粉层中的脂肪酶活性,所以此时酶活性较低,验证了真空水润麦下小麦内 A_{21} 变化的结论。综合比较脂肪酶活性的抑制程度和润麦过程中水分迁移情况,选取润麦条件为: 0.5% Na_2CO_3 , -0.07 MPa 真空度下润麦 2 h,作为后续试验的润麦参数。

2.3 真空碱溶液润麦对全麦粉贮藏稳定性的影响

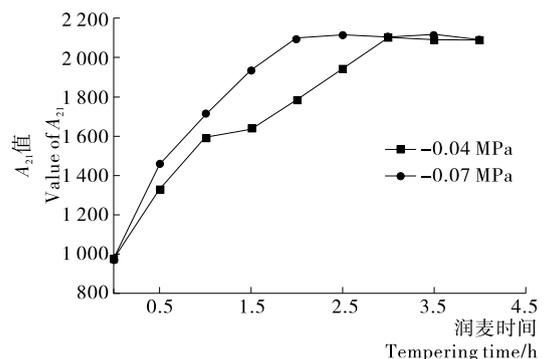
由图 2 可知,随着贮藏天数的增加,全麦粉的脂肪酸值呈上升趋势,对照组的全麦粉脂肪酸值迅速升高,在 17 d 时就以超过中国 LS/T 3244—2015 中规定的全麦粉脂肪酸值上限 ($116\text{ mg KOH}/100\text{ g}$),在加速贮藏 30 d 时其脂肪酸值达到 $179\text{ mg KOH}/100\text{ g}$ (40 目)和 $186\text{ mg KOH}/100\text{ g}$ (80 目)。而真空碱溶液润麦后得到的重组全麦粉的脂肪酸值增加缓慢,在加速贮藏 30 d 后脂肪酸值仅为 $39\text{ mg KOH}/100\text{ g}$ (40 目)和 $42\text{ mg KOH}/100\text{ g}$ (80 目),说明真空碱溶液润麦得到的全麦粉具有较高的贮藏稳定性,这与真空碱溶液润麦会抑制小麦籽粒脂肪酶活性的结论一致。其中回添 80 目麸皮的全



(a) 小麦籽粒水弛豫信号



(b) 正常大气压润麦



(c) 真空润麦

图 1 润麦过程中小麦 A_{21} 值的变化

Figure 1 Variations of A_{21} of wheat during tempering

麦粉的脂肪酸值略高于回添 40 目麸皮的,但是效果并不显著 ($P>0.05$)。

2.4 真空碱溶液润麦对全麦粉粉质特性的影响

面团形成时间和稳定时间可以反映面团筋力的强弱。由表 2 可知,与对照组的全麦粉相比,真空碱溶液润麦可使全麦粉的面团形成时间、稳定时间和粉质质量指数显著增加 ($P<0.05$),说明真空碱溶液润麦可以增强面团中面筋的筋力,可能是碱的加入促使了面团中的蛋白通过一些物理作用

表 1 真空碱溶液润麦下小麦中脂肪酶的相对活性[†]

Table 1 Relative Lipase activity of wheat tempered with vacuum condition

润麦条件	%					
	-0.04 MPa			-0.07 MPa		
	1 h	2 h	3 h	1 h	2 h	3 h
0.10% Na_2CO_3	89.08 ± 1.75^a	80.38 ± 0.67^b	70.32 ± 0.15^d	88.43 ± 0.11^a	78.31 ± 0.26^c	51.57 ± 0.23^e
0.25% Na_2CO_3	86.62 ± 0.36^a	74.65 ± 0.17^b	50.29 ± 0.28^d	85.47 ± 2.11^a	63.43 ± 1.35^c	42.16 ± 0.22^e
0.50% Na_2CO_3	82.42 ± 0.34^a	72.64 ± 0.23^b	25.15 ± 0.10^d	81.62 ± 1.05^a	28.38 ± 0.58^c	24.48 ± 0.34^d

[†] 同行中不同字母表示有显著性差异 ($P<0.05$)。

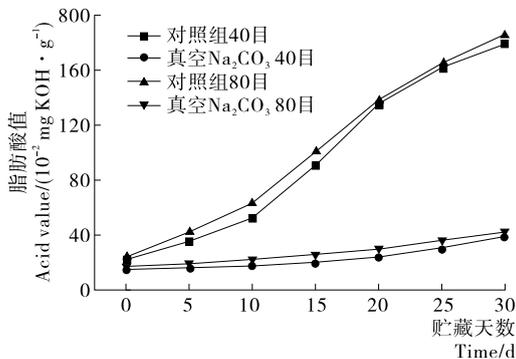


图2 加速贮藏下全麦粉中脂肪酸值的变化
Figure 2 Variations of fatty acid value of whole wheat flour during accelerating storage

力(如疏水键,离子键,氢键)产生了交联^[21],从而增强了其面筋蛋白的网络结构。弱化度表示面团在搅拌过程中对机械搅拌的承受能力,弱化度越大,面筋越弱,面团易塌陷变形,真空碱溶液润麦可以显著降低全麦面团的弱化度($P < 0.05$),见表2。与对照组相比,真空碱溶液润麦会增加面团的吸水率(表2),Moss等^[22]研究也表明碱溶液可以增加小麦面团的吸水率。

随着麸皮回添粒径的减小,全麦粉的吸水率增大(表2),可能是小粒径麸皮与水直接接触面积的增加,暴露在面粉中的麸皮所含的大量羟基与水结合的机率增大,因此面团吸水率增加^{[9]38}。随着麸皮回添粒径的减小,面团形成时间、弱化度都在较小,面团稳定时间显著延长($P < 0.05$),可能是小粒径的麸皮能更好的填充在淀粉-蛋白质基质中,对面筋网络状结构的形成影响相对较小;而大粒径的麸皮吸水后膨胀,阻碍面筋蛋白网络状形成,弱化面筋筋力,稳定性时间随之降低^[23]。

2.5 真空碱溶液润麦对全麦粉糊化特性的影响

由表3可知,经真空碱溶液润麦得到的全麦粉的峰值黏

度、衰减值、最终黏度有显著增加($P < 0.05$)。峰值黏度的增加表明淀粉颗粒在破裂前溶胀程度增大,可能是 CO_3^{2-} 会与淀粉中特定的位点结合并形成大的水合球体^[24],从而增加了其黏性。随着麸皮回添粒径的减小,全麦粉的峰值黏度、衰减值、最终黏度都有显著增加($P < 0.05$)。回生值是淀粉老化的指示,回添大粒径的全麦粉回生值较小,淀粉不易老化,可能是较大粒径的麸皮与淀粉相互作用,阻碍了直链淀粉的重排,降低全麦粉老化的速率,而小粒径麸皮对淀粉相互作用影响较小。

2.6 真空碱溶液润麦对全麦粉黏弹性的影响

面团的黏弹性既能表征面团的耐揉性等物理性能,又决定着最终面制品的弹性、硬度等品质,其中贮能模量 G' 反映面团的弹性,损耗模量 G'' 反映面团的黏性。由图3可知,与对照组面团相比,真空碱溶液润麦会使全麦面团的贮能模量 G' 和损耗模量 G'' 增加。贮能模量 G' 的增加说明了真空碱溶液润麦会使面团的弹性增强,加固了全麦面团中蛋白的网络结构。真空碱溶液润麦增加了损耗模量 G'' (图3),可能是真空碱溶液润麦增加了面团的吸水率(表2),从而使全麦面团的黏度增加,损耗模量 G'' 值增大。随着麸皮回添粒径的减小,全麦面团的贮能模量和损耗模量都有显著降低($P < 0.05$),可能是回添小粒径麸皮的全麦粉吸水率较高,面团体系的持水力高,从而导致面团的流动性降低。

3 结论

本试验利用核磁共振技术检测真空润麦过程中小麦内水分分布情况,探究较为合适的真空润麦条件,并测定不同浓度 Na_2CO_3 溶液在不同真空润麦条件下对小麦中脂肪酶活性的影响,并对全麦粉的储藏稳定性和品质特性进行研究。结果表明,随着真空润麦时间的增加,小麦中 A_{21} 值不断上升,−0.07 MPa下润麦2 h时 A_{21} 值趋于稳定;真空碱溶液

表2 真空碱溶液润麦对全麦粉的粉质特性的影响[†]

Table 2 Effects of vacuum tempering wheat with alkaline solution on farinograph characteristics of whole wheat flour

样品	吸水率/%	面团形成时间/min	稳定性/min	弱化度/FU	粉质质量指数
对照组 40 目	74.6±0.2 ^c	7.30±0.05 ^c	10.2±0.3 ^d	58.0±0.8 ^a	140.0±5.5 ^d
真空 Na ₂ CO ₃ 40 目	76.3±0.2 ^b	10.70±0.15 ^a	12.6±0.2 ^b	48.0±0.5 ^{bc}	178.0±2.5 ^b
对照组 80 目	76.9±0.3 ^a	6.90±0.25 ^c	11.4±0.8 ^c	54.0±2.5 ^{ab}	149.0±1.6 ^c
真空 Na ₂ CO ₃ 80 目	77.4±0.5 ^a	9.90±0.60 ^b	14.0±0.7 ^a	46.0±1.5 ^c	184.0±1.3 ^a

[†] 同列中不同字母表示有显著性差异($P < 0.05$)。

表3 真空碱溶液润麦对全麦粉的糊化特性的影响[†]

Table 3 Effects of vacuum tempering wheat with alkaline solution on pasting properties of recombined whole wheat flour

样品	峰值黏度/cP	衰减值/cP	最终黏度/cP	回生值/cP	峰值时间/min
对照组 40 目	2 212±9 ^d	545±6 ^d	2 574±18 ^c	901±3 ^b	6.60±0.035 ^c
真空 Na ₂ CO ₃ 40 目	2 308±12 ^c	609±3 ^c	2 690±2 ^b	991±5 ^b	6.76±0.035 ^b
对照组 80 目	2 275±26 ^b	647±31 ^b	2 578±23 ^c	946±1 ^b	6.60±0.015 ^a
真空 Na ₂ CO ₃ 80 目	2 508±8 ^a	757±23 ^a	2 995±16 ^a	1 260±32 ^a	6.84±0.035 ^{ab}

[†] 同列中不同字母表示有显著性差异($P < 0.05$)。

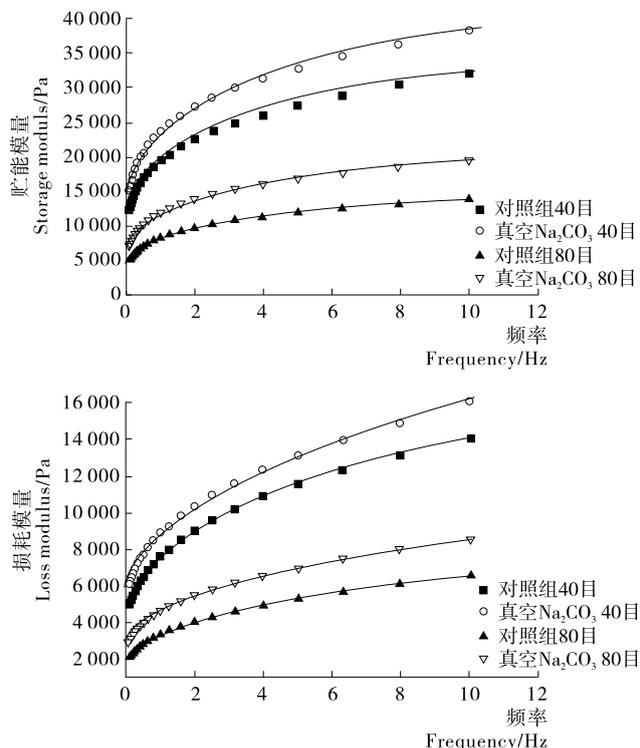


图 3 真空碱溶液润麦对全麦面团黏弹特性-弹性模量的影响

Figure 3 Effects of vacuum tempering wheat with alkaline solution on dough rheology of whole wheat flour

润麦可以抑制小麦中脂肪酶相对活性,并且随着碱溶液浓度、真空度和润麦时间的增加其抑制效果增强,在 -0.07 MPa 、 0.5% Na_2CO_3 、润麦 3 h 时,脂肪酶相对活性达到 24.48%;真空碱溶液润麦可以显著改善全麦粉的贮藏稳定性,增加全麦粉的吸水率,延长稳定时间,提高全麦粉的峰值黏度、衰减值、最终黏度、回升值,提高全麦面团的黏弹性。

参考文献

[1] 张丽娜, 赵文红, 谢岩黎, 等. 全麦粉对实验性糖尿病大鼠血糖控制效应的影响[J]. 食品科技, 2015, 4(11): 134-138.

[2] GALLIARD T. Hydrolytic and oxidative degradation of lipids during storage of wholemeal flour: Effects of bran and germ components[J]. Journal of Cereal Science, 1986, 4(2): 179-192.

[3] 刘宏, 汪丽萍, 刘明, 等. 稳定化全麦粉的品质评价[J]. 食品与机械, 2012, 28(2): 6-8.

[4] SABILLÓN L, STRATTON J, ROSE D J, et al. Reduction in Microbial Load of Wheat by Tempering with Organic Acid and Saline Solutions[J]. Cereal Chemistry, 2016, 93(6): 209-216.

[5] 张恒达, 赵国邦, 马从新. 碱性化学试剂润麦对赤霉病麦中 DON 毒素的影响[J]. 现代面粉工业, 2014(4): 12-18.

[6] DOBLADO-MALDONADO A F, ARNDT E A, ROSE D J. Effect of salt solutions applied during wheat conditioning on lipase activity and lipid stability of whole wheat flour[J]. Food Chemistry, 2013, 140(1/2): 204-209.

[7] 郭倩倩. 真空调质对小麦制粉特性的影响及工艺设计[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.

[8] 齐银霞, 成坚, 王琴. 核磁共振技术在食品检测方面的应用[J]. 食品与机械, 2008, 26(6): 117-120.

[9] 黄丽. 低分辨脉冲核磁共振技术及其应用[D]. 长春: 吉林大学, 2000.

[10] DAY L, XU M, HOOBIN P, et al. Characterisation of fish oil emulsions stabilised by sodium caseinate[J]. Food Chemistry, 2007, 105(2): 469-479.

[11] 杨磊, 郭晓娜, 彭伟, 等. 稳定化处理方式对麦胚的贮藏稳定性、抗氧化活性和总酚含量的影响[J]. 中国油脂, 2013, 38(6): 31-34.

[12] RAVI R, MANOHAR R S, RAO P. H. Use of Rapid Visco Analyser (RVA) for measuring the pasting characteristics of wheat flour as influenced by additives[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 1999, 79(12): 1 571-1 576.

[13] BATEY I L, CURTIN B M. Effects on Pasting Viscosity of Starch and Flour from Different Operating Conditions for the Rapid Visco Analyser[J]. Cereal Chemistry, 2000, 77(6): 754-760.

[14] 魏晓明, 郭晓娜, 彭伟, 等. 谷氨酰胺转氨酶对荞麦面条品质的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 188-192.

[15] GLIDEWELL S M. NMR imaging of developing barley grains [J]. Journal of Cereal Science, 2006, 43(1): 70-78.

[16] CORNILLON P, SALIM L C. Characterization of water mobility and distribution in low- and intermediate-moisture food systems[J]. Magnetic Resonance Imaging, 2000, 18(3): 335-341.

[17] 时予新, HARELAND G A, D'APPOLONIA B L. 利用荧光染色跟踪水份在润麦时进入小麦颗粒的路径[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2001, 22(2): 17-20.

[18] GHOSH P K, JAYAS D S, SMITH E A, et al. Mathematical modelling of wheat kernel drying with input from moisture movement studies using magnetic resonance imaging (MRI), Part I: Model development and comparison with MRI observations[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(3): 389-400.

[19] MAŁGORZATA Warechowska, AGNIESZKA Markowska, JÓZEF Warechowski, et al. Effect of tempering moisture of wheat on grinding energy, middlings and flour size distribution, and gluten and dough mixing properties[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 69: 306-312.

[20] MUNSHI S K, NEENA B, SEKHON B S, et al. Inactivation of rice bran lipase with metal ions[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2007, 57(2): 169-174.

[21] SHIAU S Y, YEH A I. Effects of alkali and acid on dough rheological properties and characteristics of extruded noodles [J]. Journal of Cereal Science, 2001, 33(1): 27-37.

[22] MOSS H J, MISKELLY D M, MOSS R. The effect of alkaline conditions on the properties of wheat flour dough and cantonese-style noodles[J]. Journal of Cereal Science, 1986, 4(3): 261-268.

[23] 王玮. 超微粉碎麸皮的功能特性及应用研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.

[24] MISTRY A H, ECKHOFF S R. Characteristics of alkali-extracted starch obtained from corn flour[J]. Cereal Chemistry, 1992, 69(3): 296-303.