

DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025811

引用格式:王秋玉,朱文政,薛盼盼,等.冻融循环对预醒发冷冻豆沙包品质的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(9):215-222.
WANG Qiuyu, ZHU Wenzheng, XUE Panpan, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the quality of pre-awakened frozen steamed bread with minced red bean [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(9): 215-222.

冻融循环对预醒发冷冻豆沙包品质的影响

王秋玉^{1,2}, 朱文政^{1,2}, 薛盼盼^{1,2}, 沙文轩^{1,2}, 苏嘉敏^{1,2}, 章海风^{1,2*}, 周晓燕^{1,2*}

1(扬州大学 旅游烹饪学院, 江苏 扬州, 225000) 2(江苏省淮扬菜产业化工程中心, 江苏 扬州, 225000)

摘要 为探究预醒发冷冻豆沙包在生产、运输、贮藏以及销售过程中引起的冻融循环对其品质的影响,利用低场核磁共振分析仪(low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)、差示量热扫描仪(differential scanning calorimetry, DSC)、质构仪与流变仪等对预醒发冷冻豆沙包生坯流变学特性、水分迁移变化以及面团热力学特性进行研究,并对由此面团蒸制成熟的豆沙包的水分分布、质构、色泽、比容和 pH 以及水分活度进行分析。结果表明:冷冻生坯面团的总水分中深层结合水以及半结合水不断散失;生坯面团弹性模量 G' 与黏性模量 G'' 等流变学特性两者趋势一致;起始温度(T_0)、终止温度(T_p)、峰值温度(T_c)和糊化焓(ΔH)等面团热特性差异显著;预醒发冷冻豆沙包蒸制成熟后其水分状态分布不稳定,蒸煮损失率上升,质构品质特性受到影响;色差品质、比容分别差异显著, pH 和水分活度也形成不稳定趋势变化。由此可见,从豆沙包生坯到蒸制成熟,两者的水分分布情况在 2 次冻融后,结合水均呈直线下降趋势,自由水均迅速上升,并且两者的水分发生迁移,所以对蒸煮损失率以及水分活度产生影响;冷冻豆沙包生坯的流变学特性与蒸制成熟的豆沙包的硬度线性相关。总而言之,预醒发冷冻豆沙包生坯面团经过 3 次冻融后各项品质指标大幅下降,并且由生坯蒸制成熟的豆沙包的品质也有所下降。因此,冻融循环对预醒发冷冻豆沙包生坯产生负面影响较大,该结果可为预醒发面制品在实际生产、运输、贮藏以及销售过程中温度的把控及科学品质控制提供理论依据。

关键词 冻融循环;预醒发;豆沙包;水分迁移;流变学;热力学特性

豆沙包是中国传统的发酵面食制品,在居民膳食结构中占有一定的地位。与馒头不同,豆沙包是以发酵面团结合富含多种营养素的豆沙馅心的产品^[1],具有松喧绵口、吃口细腻、皮薄馅多、营养丰富的特点,深受消费者喜爱^[2-3]。传统包子的生产很难保证产品质量的标准化。冷冻生坯面团技术的出现,可以有效延长冷冻生坯的货架期,与冷冻熟坯相比,能够保证产品的新鲜度,并且有望逐步取代传统工艺^[4]。但生坯面团在冷冻储藏过程中无法避免温度波动的影响,产品经常处在冻融循环条件下,而温度波动会使冰晶发生重结晶,对面团的网络结构造成进一步的破坏,降低酵母发酵活性,从而影响最终产品的质量^[5],因此温度把控环节显得尤为重要。

传统研究主要集中在冻融循环对冷冻非发酵面团的影响等方面^[6-7],而对冷冻带馅类发酵面制品少有报道。本文以预醒发冷冻豆沙包为研究对象,对多次冻融循环过程中的水分迁移、流变学、质构、形态和

热力学特性的变化进行分析,并阐述冻融循环条件对豆沙包产品品质影响的关联性。通过该研究,以期预醒发冷冻面制品在实际生产、运输、贮藏以及销售过程中的品质变化与精准控制的技术方案提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

金龙鱼麦芯粉(水分 14.0%、蛋白质 18.0%、淀粉 70.21%、脂肪 3%,均为质量分数),益海嘉里粮油食品工业有限公司;耐高糖活性干酵母,乐斯福酵母(上海)有限公司;玫瑰细沙、绵白糖,扬州市麦德龙超市。

1.2 仪器与设备

MK-HKM200 和面机,松下电器(中国)有限公司;DZM-180 型电动压片机,海鸥电器有限公司;MDF-U53V(N)速冻冰箱,伊莱克斯股份有限公司;MDF.us3vfN1 超低温冰箱,日本三洋公司;BS210S(1/10 000)分析天平,北京赛多利斯天平有限公司;

第一作者:硕士研究生(周晓燕教授和章海风副教授为共同通讯作者, E-mail: yzuxyz@163.com; yzuhfz@163.com)

基金项目:国家自然科学基金项目(31701634);四川省高等学校烹饪科学重点实验室开放课题(PRKX201913);烹饪科学四川省高等学校重点实验室资助项目(PRKX2020Z06)

收稿日期:2020-10-06, 改回日期:2020-11-30

SPI8. S 醒发箱, 珠海三麦机械有限公司; 气浴恒温振荡器, 上海平轩科学仪器有限公司; TMS—PRO 质构仪, 美国 FTC 公司; 哈克 MARSIII 流变仪, 赛默飞世尔科技公司; AccuFat-4050 磁共振分析仪, 江苏麦格迈有限公司; 差示扫描量热仪, 德国 NETZSCH 公司; 3nH 电脑色差仪, 深圳市三恩时科技有限公司; 雷磁 pH 计, 上海仪电科学仪器股份有限公司; HD-3A 型水分活度测定仪, 无锡市华科仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 预醒发冷冻豆沙包的制备

豆沙包生坯的制备按照朱在勤等^[8]的方法并稍作调整。

工艺流程: 面粉、干酵母、绵白糖用水溶化→和面(室温 18 ℃)→发酵(温度 38 ℃, 相对湿度 75%, 30 min)→压面机压制→制皮→包馅→成型。

预醒发工艺, 即将发酵好的产品放入速冻机内速冻至规定时间^[9]。豆沙包生坯的预醒发冷冻工艺参数: 成型后的豆沙包生坯→醒发 30 min (温度 38 ℃, 相对湿度 75%)→迅速置于 -38 ℃ 的速冻机中速冻 1 h→调至 -18 ℃ 冷冻 24 h。

1.3.2 冻融循环处理

冻融循环参数设置参考叶晓枫等^[6]的方法并稍作调整。将包子从 -18 ℃ 的冰箱中取出, 放置在恒温气浴振荡器中, 解冻至面团中心温度为 5 ℃, 取解冻好的包子样品, 记作第 0 次冻融循环(F0), 再将解冻的包子放入 -18 ℃ 冰箱中冷藏 1 d 后, 取出放置在恒温气浴振荡器中, 解冻至面团中心温度为 5 ℃, 记为第 1 次冻融循环(F1); 依次记至 F2、F3、F4、F5。恒温气浴振荡器参数设置: 温度 30 ℃, 振荡频率 60 Hz。

1.4 豆沙包生面坯品质测定及方法

1.4.1 水分分布与迁移情况

利用低场核磁共振分析仪(low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)测定冻融处理后包子面团中的水分分布。将冻融处理后的包子用镊子去除外皮和馅料, 准确称取 15 g 内部面团, 用聚四氟乙烯带小心包裹后置于专用核磁管中, 保鲜膜封口, 放在恒温核磁磁场的射频线圈中, 测每个面团样品的弛豫时间。采用 CPMG 脉冲序列测定样品中自旋-自旋弛豫时间 T_2 。样品采集参数设置: 接收增益 = 400 dB, 回波间隔 = 200 μ s, 采样点数 = 512 个, 扫描次数 = 32 次, 间隔时间 = 2 000 ms。每个样品重复测定 3 次, 取平均值进行反演、作图。

1.4.2 动态流变特性测定

将冻融处理后的包子用镊子去除外皮和馅料, 准确称取 3 g 内部面团, 利用动态流变仪测定弹性模量 G' 与黏性模量 G'' 。将样品置于直径为 35 mm 的平板上, 静置 3 min, 以使残留的压力松弛, 多余部分刮掉, 然后立刻在样品边缘涂上矿物油, 以防止水分蒸发。频率扫描测定条件: 间隙为 1 mm; 温度为 25 ℃; 频率扫描范围为 0.1 ~ 10 Hz, 每个样品重复测定 3 次。

1.4.3 DSC 的测定

参考 GAIKWAD 等^[10]的方法, 将冻融处理后的包子用镊子去除外皮和馅料, 准确称取 (10 ± 1) mg 内部面团, 放入密封的差示量热扫描仪(differential scanning calorimetry, DSC)锅中, 放到提前用钢校准的 DSC 仪器的样品支持器上, 用一个空平底锅作为参照物。制备了 2 个样品锅, 每个样品锅从 30 ℃ 加热到 150 ℃, 速率为 10 ℃/min。用软件 Universal Analysis 2000 分析了热力学参数: 起始温度(T_o)、终止温度(T_p)、峰值温度(T_c)和变性焓值(ΔH , J/g)。每个样品重复 3 次。

1.5 豆沙包熟面坯品质测定及方法

1.5.1 水分分布与迁移情况

参考 1.4.1 小节中的方法。

1.5.2 蒸煮损失试验评价

包子蒸制完成, 常温冷却 40 min 后开始测定豆沙包的蒸煮损失率、质量、体积。包子的体积采用油菜籽置换法测量, 根据比容等于体积与质量之比求出包子比容^[11]。

$$L/\% = \frac{m_1 \times (1 - w) - m_2}{m_1 \times (1 - w)} \quad (1)$$

$$\lambda / (\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}) = \frac{V}{M} \quad (2)$$

式中: L , 蒸煮损失率, %; m_1 , 样品蒸前质量, g; m_2 , 样品蒸后质量, g; w , 面团含水量, %; λ , 比容, mL/g; V , 样品蒸后体积, mL; M , 样品蒸后质量, g。

1.5.3 色差测定

参考王晓曦等^[12]方法, 采用电脑色差仪对包子样品表皮色泽进行测量。包子的色泽由亮度(L^*)、红度(a^*)、黄度(b^*)表示。每个样品测量 6 次, 结果用平均值 $\pm$ 标准差表示。

1.5.4 质构测定

采用质构仪测定包子坯皮内部的质构。将蒸好的包子冷却 40 min 后, 用镊子去除表皮和馅料, 用模具切成厚度为 10 mm, 直径为 30 mm 的均匀薄片, 取 3 片压制好的样品, 用压盘式 P35 测试探头进行质构

测试。具体的参数为:距离 20 mm,测试前速率 2 mm/s,测试速率 1 mm/s,测试后速率 1 mm/s,下压程度 60.00%,测试力 0.01 N,2 次压缩时间间隔 3 s。每个样品重复测定 4 次,求平均值。

1.5.5 pH 和水分活度测定

pH 值测定:参照王崇崇等^[13]的方法进行,待包子常温冷却 40 min 后,用镊子去除外皮和馅料,准确称取 10 g 内部面团于烧杯中,加入 100 mL 去离子水,用匀质机打浆 60 s,均质后测量。水分活度测定:参考李炜熠等^[14]方法并稍作修改,待制作的包子常温冷却 40 min 后,将其去除表皮和内部馅料,用镊子加工成碎屑状,采用水分快速测量仪在常温下测定芯部分的水分活度,读取平衡后的数据,每个样品测量 3 次,取平均值。

1.6 数据处理

数据取平均值,采用 Excel 软件进行处理,Origin 软件绘图,SPSS 23.0 软件进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 生面坯品质分析

2.1.1 冻融循环对预醒发豆沙包生坯面团水分分布的影响

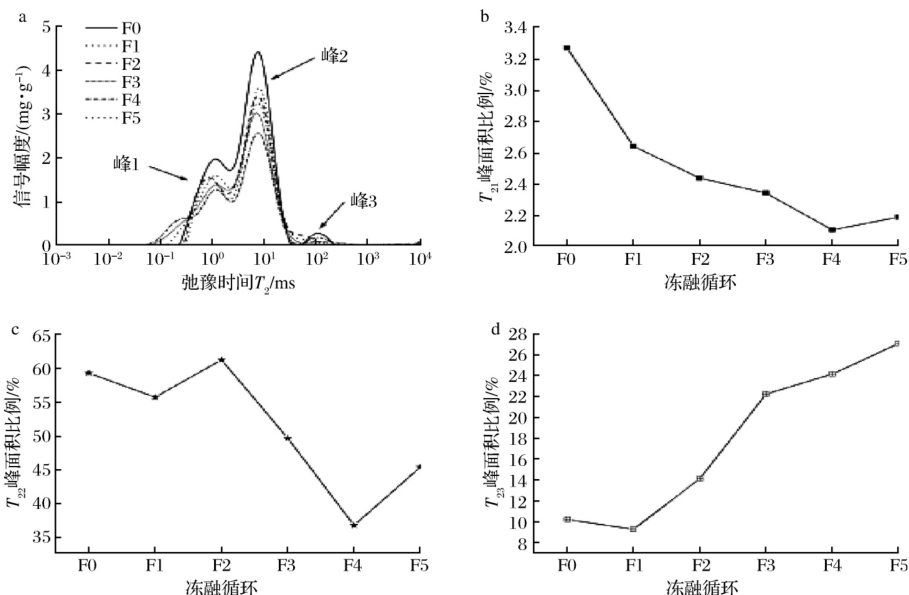


图1 生坯面团的水分横向弛豫时间 T_2 反演图

Fig.1 Water inversion results of transverse relaxation times T_2 in dough

2.1.2 冻融循环对预醒发豆沙包生坯面团动态流变特性的影响

图2反映了生坯面团样品的流变学特性的影响,

图1-a显示了典型的 T_2 弛豫时间分布曲线,3 个峰 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} ,分别代表深层结合水、弱结合水和游离水。 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 在冻融循环期间的峰面积比例分别如图1-b、图1-c 和图1-d 所示。从 F0 到 F4, T_{21} 迅速下降,这一趋势可能是由于冻融处理影响了面团的水分分布所致,虽然 T_{21} 结合强度较高,不受一般环境的影响,但是由于在冻融循环温度差别较大的条件下,强结合水也比较容易转化为弱结合水或自由水^[15-16]。而 F1 至 F4, T_{22} 呈升高又迅速下降最后又逐步上升的状态,上升则表明冻融处理使水向流动性更强的方向转移;而下降可能是由于面筋网络是弱结合水的主要存在形式^[17],冻融处理有利于冰晶的生长,影响了面团的水分流动性,从而使水分分布不稳定。在 F1 后, T_{23} 呈直线上升趋势,这一结果表明,冻融处理使水变得更具流动性,这与 PHIMOLSIRIPOL 等^[18]研究结果相一致:冷冻-解冻循环中的冰重结晶降低了面筋的交联度,从而削弱了面筋的保水能力。也有相关研究表明,水分流动性增强会加剧冷冻面团变质^[16]。总而言之,冻融循环处理增强了对面团水分流动性的影响,水分分布的变化对面团在储藏过程中起消极的作用。

结果表明,经过 F3、F4 的面团黏弹性都依次高于 F1、F2、F5,与叶晓枫等^[6]研究的冻融循环对冷冻非发酵面团流变的影响是有区别的,可能是由于包子面团经

过发酵或者是豆沙馅心的水分向外迁移促进了面团的吸水性所形成的。一般来说,面团中水分含量发生变化会导致面团黏弹性降低^[19-20],而 F1、F2、F5 此 3 组冻融处理的面团的黏弹性较低,可能是由于冰晶和重结晶导致面团中的面筋蛋白发生解聚、面团的网络结构被破坏造成的^[21]。所以冻融循环导致预醒发豆沙包生坯面团的流变特性没有随冻融次数发生规则性的变化,从而破坏了冷冻面团的稳定性。

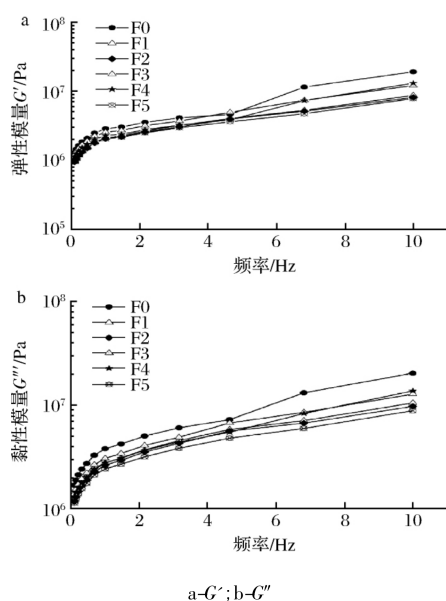


图2 冻融循环对冷冻预醒发豆沙包生坯面团弹性模量和黏性模量的影响

Fig. 2 Effects of freeze-thaw cycles on G' and G'' of frozen pre-awakened steamed bread with minced red bean

2.1.3 冻融循环对预醒发豆沙包生坯面团热力学特性的影响

表 1 和图 3 列出了冻融循环下预醒发豆沙包生坯面团的起始温度(T_o)、终止温度(T_p)、峰值温度(T_c)和糊化焓(ΔH)等热性质的变化。从图 3 可以清晰看到,在升温过程中,样品出现了 3 个放热峰;表 1 显示,在冻融循环下,面团的 T_o 、 T_p 、 T_c 也发生相应的变化,这有可能是在冻融条件下,温度变化幅度较大,面团内部水和冰结晶过程发生错位,引起直链淀粉和支链淀粉结构和排列的变化,导致糊化温度不同^[10]。除温度外,面团 3 个放热峰的热焓值 ΔH 随着冻融循环次数的增加而增加,这种趋势有可能是面团内部的冰晶发生了重结晶导致了水与其他组分的分离,冰晶的形成会引起面筋网络的恶化导致可冻水的增加^[22]。与多次冻融相比, F0 和 F1 的 ΔH 值较

低,说明游离水的含量较低,从而减缓了面团中的冰晶的形成,保持了面团内部面筋网络结构,这是与图 1-d 所呈现面团内部游离水含量比例趋势是相吻合的。

表 1 冻融循环对预醒发豆沙包生坯面团热特性的影响

Table 1 Effects of freeze-thaw cycles on thermal properties of frozen pre-awakened steamed bread with minced red bean

冻融 循环	峰	热特性			
		$T_o/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
F0	1	71.37 ± 2.44^a	81.23 ± 3.53^a	76.47 ± 2.77^a	0.40 ± 0.12^{ab}
	2	89.67 ± 1.78^a	101.93 ± 3.82^a	99.33 ± 1.23^{ab}	0.26 ± 0.02^b
	3	117.2 ± 3.36^a	128.73 ± 0.62^a	123.7 ± 1.07^{ab}	0.60 ± 0.01^b
F1	1	68.00 ± 4.24^a	73.70 ± 1.05^b	75.87 ± 1.71^a	0.54 ± 0.07^{ab}
	2	93.77 ± 3.8^a	104.00 ± 4.57^a	98.9 ± 3.04^{ab}	0.30 ± 0^b
	3	115.57 ± 2.43^a	128.43 ± 1.58^a	122.7 ± 1.89^{abc}	0.68 ± 0.17^b
F2	1	71.03 ± 1.71^a	78.33 ± 1.74^{ab}	73.93 ± 0.23^a	0.52 ± 0.03^{ab}
	2	90.47 ± 2.37^a	99.50 ± 3.74^a	97.47 ± 0.87^{ab}	0.27 ± 0.03^b
	3	112.2 ± 0.71^a	126.8 ± 0.66^{ab}	119.8 ± 1.00^c	1.26 ± 0.15^a
F3	1	75.50 ± 3.99^a	81.63 ± 2.33^a	76.9 ± 1.18^a	0.61 ± 0.10^b
	2	96.07 ± 2.23^a	99.53 ± 0.19^a	99.73 ± 0.41^{ab}	0.34 ± 0.01^b
	3	116.27 ± 0.74^a	129.53 ± 0.28^a	124.63 ± 0.95^a	0.81 ± 0.11^b
F4	1	66.43 ± 0.8^a	73.30 ± 0.20^b	75.87 ± 1.77^a	0.51 ± 0.04^{ab}
	2	91.00 ± 1.01^a	106.63 ± 2.27^a	101.00 ± 1.00^a	0.72 ± 0.06^a
	3	114.87 ± 0.19^a	127.63 ± 0.15^a	121.8 ± 0.50^{abc}	0.64 ± 0.02^b
F5	1	68.03 ± 2.23^a	80.90 ± 1.00^a	73.1 ± 0.67^a	0.60 ± 0.07^a
	2	89.63 ± 2.63^a	103.57 ± 1.52^a	95.4 ± 0.32^b	0.65 ± 0.1^b
	3	111.60 ± 0.67^a	124.83 ± 0.91^b	120.33 ± 0.78^{bc}	0.58 ± 0.21^b

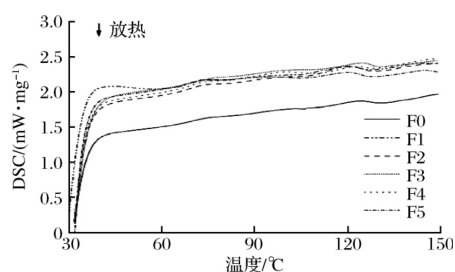


图3 冻融循环处理冷冻预醒发豆沙包生坯面团的 DSC 曲线

Fig. 3 DSC curves of frozen pre-awakened steamed bread with minced red bean by freeze-thaw cycles

2.2 豆沙包熟面坯品质分析

2.2.1 冻融循环对豆沙包熟面坯水分分布的影响

图 4 显示了不同冻融循环条件下熟面坯样品水分分布情况。如图 4 所示,随着冻融次数增加, T_{21} 、 T_{22} 呈现出迅速下降而又迅速升高最后又趋于平缓的状态,下降则表明冻藏过程中部分深层结合水在转变为弱结合水,这与冰晶的破坏导致部分深层结合水失去与蛋白质和淀粉的紧密结合,游离出来有关^[23]。 T_{21} 、 T_{22} 的含量比例在 F1、F2、F5 均小于其他的处理组,可从前面动态流变特性的研究中得到验证。除此

之外,也有可能是面团在蒸制过程中水分结合状态已

经发生其他变化,还有待进一步研究。

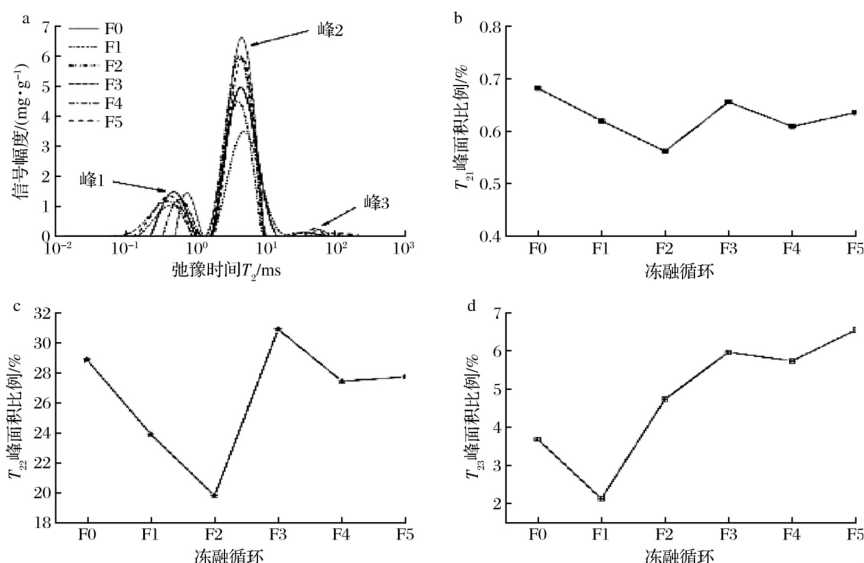


图4 熟坯面团的水分横向弛豫时间 T_2 反演图

Fig.4 Water inversion results of transverse relaxation times T_2 in cooked dough

2.2.2 冻融循环对豆沙包熟面坯蒸煮品质影响

图5表示预醒发冷冻豆沙包在冻融循环过程中的蒸煮品质以及比容的变化。如图5所示,在冻融期间的蒸煮损失率有显著变化,从F3开始,蒸煮损失率呈现显著上升-下降-上升-下降的趋势,并在F4时有了较大的升高,这可能是由于温度的起伏变化以及冰晶的形成与融化导致淀粉颗粒松散,从而使蒸煮损失增大^[23],这也能进一步的说明图4-b和图4-c的 T_{21} 、 T_{22} 的分布状态。而随着冻融次数的增加,豆沙包的比容是呈逐渐下降的趋势,可能是由于较多自由水分在蒸制过程中丢失以及部分淀粉吸水率降低,使得水分子的渗透性较低,从而导致水化能力较弱,从而体积变小^[24]。

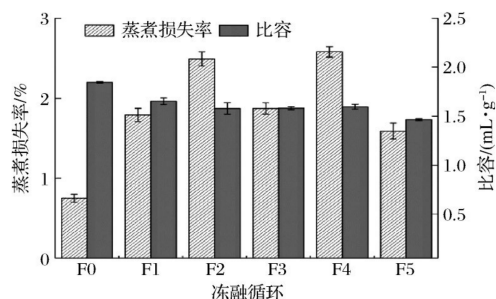


图5 冻融循环处理对熟面坯蒸煮品质的影响

Fig.5 Effect of freeze-thaw cycles treatment on Cooking quality of cooked samples

2.2.3 冻融循环对豆沙包熟面坯色泽的影响

冻融循环下预醒发冷冻豆沙包亮度、红度、黄度等色泽指标的影响,结果如表2所示。不同冻融循环显著影响样品的色泽品质,颜色分析结果表明,样品随冻融次数的增加其亮度、红度和黄度的变化无规律。与F0相比,冻融循环次数增加导致样品的亮度降低,可能是温度波动频率的增大对面筋网络结构有破坏作用,导致结构不再紧密,对光的反射变弱,颜色发暗^[26];此外,冻融循环也降低了样品的黄度。另一方面,红度呈直线上升的变化,有可能与豆沙馅心有直接的关系。温度波动幅度的增大,将会影响产品的色泽品质。

表2 冻融循环对豆沙包熟面坯色泽的影响

Table 2 Effect of freeze-thaw cycles on color quality of cooked samples

冻融循环	色泽		
	L^*	a^*	b^*
F0	39.29 ± 0.69^a	0.29 ± 0.05^c	6.59 ± 0.20^{ab}
F1	37.89 ± 1.28^a	0.40 ± 0.07^{bc}	6.86 ± 0.14^a
F2	35.24 ± 1.41^b	0.50 ± 0.04^b	6.45 ± 0.18^{ab}
F3	35.8 ± 0.45^b	0.41 ± 0.04^{bc}	6.41 ± 0.19^{ab}
F4	34.93 ± 1.01^b	0.75 ± 0.06^a	6.47 ± 0.23^{ab}
F5	34.77 ± 1.07^b	0.73 ± 0.06^a	6.13 ± 0.22^b

2.2.4 冻融循环对豆沙包熟面坯质构品质的影响

不同冻融条件下的豆沙包熟面坯质构特性值如表3所示,经过不同冻融处理后品质指标差异显著。从硬度和弹性角度分析,随着冻融次数增加,包子的硬度和弹性逐渐上升,但到第5次循环后,硬度下降;

冻融处理后样品的黏附性和咀嚼性也发生显著性变化,极其不稳定;而内聚性相较于较为平缓,无太大差异。OLIVERA 等^[26]观察到弹性模量 G' 和硬度之间存在一定的线性关系,从图 2-a 和表 3 可以看出, F1、F2、F5 的弹性模量 G' 和硬度值均小于 F3 和 F4。与

其他产品不同,包子由于其特点是棉柔喧软,所以硬度高并不代表产品的品质好,所以只有 F0、F2、F5 有较软的咀嚼性。因此,冻融循环对产品的品质特性有一定的负面影响。

表 3 冻融循环对豆沙包熟面坯质构品质的影响

Table 3 Effect of freeze-thaw cycles on texture quality of cooked samples

冻融循环	质构特性					
	硬度/N	黏附性/mJ	内聚性/Ratio	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/mJ
F0	17.69 ± 0.27 ^{ab}	0.27 ± 0.07 ^b	0.80 ± 0 ^a	12.74 ± 0.55 ^a	14.18 ± 0.99 ^{ab}	174.18 ± 1.23 ^{ab}
F1	19.23 ± 2.27 ^{ab}	0.29 ± 0.03 ^b	0.77 ± 0 ^b	17.95 ± 0.11 ^a	14.83 ± 0.13 ^{ab}	252.11 ± 27.95 ^{ab}
F2	19.17 ± 1.48 ^{ab}	0.19 ± 0.03 ^b	0.81 ± 0.01 ^a	15.56 ± 1.85 ^a	15.58 ± 1.94 ^{ab}	225.89 ± 13.76 ^b
F3	21.61 ± 2.08 ^{ab}	0.75 ± 0.06 ^a	0.75 ± 0.02 ^a	15.96 ± 2.78 ^a	16.31 ± 0.43 ^a	246.74 ± 59.13 ^{ab}
F4	24.15 ± 3.31 ^a	0.82 ± 0.02 ^a	0.73 ± 0.03 ^a	16.10 ± 0.70 ^a	17.59 ± 0.94 ^a	268.77 ± 42.43 ^a
F5	17.02 ± 0.45 ^b	0.16 ± 0 ^b	0.71 ± 0.03 ^a	16.29 ± 1.52 ^a	12.15 ± 0.86 ^b	200.17 ± 30.33 ^{ab}

2.2.5 冻融循环对豆沙包熟面坯 pH 和水分活度的影响

pH 值可以间接反映发酵面团的发酵速率和发酵程度^[13],由图 6 看出,多次冻融对面团的 pH 有一定的影响。随冻融次数的增加,冷冻面团的 pH 值有增加趋势,pH 值相对越大,而酸度相对较小,说明多次冻融影响了面团的发酵程度。不同冻融循环对样品水分活度的影响如图 6 所示。样品在经冻融循环处理后的水分活度和总水分含量变化趋于一致,冻融过程所形成的冰结晶破坏了面团蛋白质跟淀粉之间的网络结构,从而导致游离水含量增大^[14],这与前面的水分分布状态研究是相符合的。

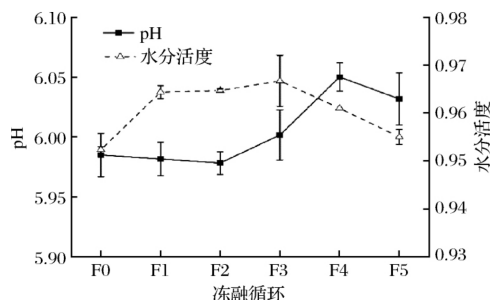


图 6 冻融循环处理对熟面坯 pH 和水分活度影响

Fig. 6 Effect of freeze-thaw cycles treatment on pH and water activity of cooked samples

3 结论

在冻融循环条件下,冷冻面团的总水分中深层结合水、弱结合水显著下降;随着冻融次数增加, ΔH 含量升高;生坯弹性模量 G' 与黏性模量 G'' 呈极显著正相关 ($R^2 = 0.983, P < 0.01$),均呈下降趋势。预醒

发冷冻豆沙包蒸制熟后其水分分布不稳定,硬度和胶黏性呈先上升后下降的趋势、弹性和咀嚼性显著上升;色泽品质下降;失水率和比容呈负相关 ($R^2 = -0.804$);pH 值呈上升趋势,水分活度与自由水密切相关呈上升又下降趋势,不稳定。生坯与熟坯两者的水分分布状态呈显著正相关 ($R^2 = 0.893, P < 0.01$);不仅如此,生坯的流变学特性也影响着熟坯的硬度值,生坯热力学特性的变化也对熟坯的水分分布与水分活度有着相关作用。

综上所述,冷冻贮藏、运输以及销售过程中的温度波动会造成生坯面团和豆沙包品质下降,当温度波动较大或冻融次数增加时,品质下降更明显。由于温度波动是不可避免的,因此建议冻融次数应不超过 3 次。本试验为冷冻带馅类发酵面制品提供一定的理论基础,对家庭、工业化制作的预醒发冷冻生坯包子贮藏及运输过程精准控制提供一定的指导。

参考文献

- [1] 武晓娟,薛文通,王小东,等. 红豆沙加工工艺及功能特性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2011, 32 (3): 453 - 455.
WU X J, XUE W T, WANG X D, et al. Research progress on processing and functional properties of red bean paste [J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32 (3): 453 - 455.
- [2] WANG P, TAO H, JIN Z Y, et al. The final established physicochemical properties of steamed bread made from frozen dough: Study of the combined effects of gluten polymerization, water content and starch crystallinity on bread firmness [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 63: 116 - 121.
- [3] 顾晗烨. 扬州包子坯皮面团速冻工艺优化及货架期研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
GU H Y. Study on quick freezing process optimization and shelf life of steamed bread dough in Yangzhou [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.

- versity, 2016.
- [4] LUO W H, SUN D W, ZHU Z W, et al. Improving freeze tolerance of yeast and dough properties for enhancing frozen dough quality—a review of effective methods [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 72: 25–33.
 - [5] YANG S, JEONG S, LEE S. Elucidation of rheological properties and baking performance of frozen doughs under different thawing conditions [J]. Journal of Food Engineering, 2020, 284: 110 084.
 - [6] 叶晓枫, 韩永斌, 赵黎平, 等. 冻融循环下冷冻非发酵面团品质的变化及机理 [J]. 农业工程学报, 2013, 29 (21): 271–278.
YE X F, HAN Y B, ZHAO L P, et al. Quality changes and mechanism of frozen non-fermented dough upon consecutive freeze-thaw cycles [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (21): 271–278.
 - [7] ZHANG Y Y, LI Y, LIU Y L, et al. Effects of multiple freeze-thaw cycles on the quality of frozen dough [J]. Cereal Chemistry, 2018, 95 (4): 499–507.
 - [8] 朱在勤, 崔慧. 扬州包子蒸制工艺研究 [J]. 扬州大学烹饪学报, 2014, 31 (2): 14–18.
ZHU Z Q, CUI H. Study on the steaming process of Yangzhou Baozi [J]. Culinary Science Journal of Yangzhou University, 2014, 31 (2): 14–18.
 - [9] 冯志强, 刘燕琪, 李梦琴, 等. 预醒发冷冻面团馒头工艺参数优化研究 [J]. 食品工业, 2017, 38 (9): 190–196.
FENG Z Q, LIU Y Q, LI M Q, et al. Study on the pre-proofed frozen dough steamed buns optimization of process parameters [J]. Food Industry, 2017, 38 (9): 190–196.
 - [10] GAIKWAD S, ARYA S S. Influence of frozen storage on quality of multigrain dough, Par baked and ready to eat thalipeeth with additives [J]. LWT, 2018, 96: 350–356.
 - [11] 范会平, 李瑞, 郑学玲, 等. 酵母对冷冻面团发酵特性及馒头品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2016, 32 (20): 298–305.
FAN H P, LI R, ZHENG X L, et al. Effect of yeast products on fermentation characteristics of frozen dough and quality of steamed bread [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (20): 298–305.
 - [12] 王晓曦, 范玲, 马森, 等. 麦麸酚基木聚糖对发酵面团特性和馒头品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2015, 31 (17): 302–307.
WANG X X, FAN L, MA S, et al. Effects of phenolic xylans from wheat bran on fermented dough properties and qualities of steamed bread [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (17): 302–307.
 - [13] 王崇崇, 马森, 谢宇航, 等. 麸皮对冷冻面团品质的影响 [J]. 河南工业大学学报 (自然科学版), 2017, 38 (1): 32–36.
WANG C C, MA S, XIE Y H, et al. Effect of wheat bran on qualities of frozen dough [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 38 (1): 32–36.
 - [14] 李炜昭. 冷冻蛋糕生产关键技术的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
LI W Z. Research on key technologies on frozen cake processing [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
 - [15] ASSIFAQI A, CHAMPION D, CHIOTELLI E, et al. Characterization of water mobility in biscuit dough using a low-field ^1H NMR technique [J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 64 (2): 197–204.
 - [16] DING X L, ZHANG H, WANG L, et al. Effect of barley antifreeze protein on thermal properties and water state of dough during freezing and freeze-thaw cycles [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 47: 32–40.
 - [17] CHEN X, WU J H, LI L, et al. The cryoprotective effects of anti-freeze peptides from pigskin collagen on texture properties and water mobility of frozen dough subjected to freeze-thaw cycles [J]. European Food Research and Technology, 2017, 243 (7): 1 149–1 156.
 - [18] PHIMOLSIRIPOL Y, SIRIPATRAWAN U, TULYATHAN V, et al. Effects of freezing and temperature fluctuations during frozen storage on frozen dough and bread quality [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84 (1): 48–56.
 - [19] DING X, ZHANG H, LIU W, et al. Extraction of carrot (*Daucus carota*) antifreeze proteins and evaluation of their effects on frozen white salted noodles [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7 (3): 842–852.
 - [20] 汤晓娟. 产胞外多糖酸面团发酵及其冷冻面团抗冻机理研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2019.
TANG X J. Sourdough fermented by exopolysaccharide forming strain: Application and mechanism studies in frozen dough [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
 - [21] BIGNE F, FERRERO C, PUPPO M C. Effect of freezing and frozen storage on mesquite-wheat dough for panettone-like breads [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13 (4): 2 853–2 861.
 - [22] JIA C L, YANG W D, YANG Z X, et al. Study of the mechanism of improvement due to waxy wheat flour addition on the quality of frozen dough bread [J]. Journal of Cereal Science, 2017, 75: 10–16.
 - [23] 刘倩, 郭晓娜, 朱科学. 黄原胶对冷冻熟面冻藏品质的影响 [J]. 中国粮油学报, 2019, 34 (9): 1–6.
LIU Q, GUO X N, ZHU K X. Effect of xanthan gum on the frozen storage quality of frozen cooked Noodles [J]. China of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34 (9): 1–6.
 - [24] CABUK B, YILMAZ B. Fortification of traditional egg pasta (eriste) with edible insects: Nutritional quality, cooking properties and sensory characteristics evaluation [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57 (7): 2 750–2 757.
 - [25] 郑子懿. 冷冻面条在储藏期间的品质变化研究 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2013.
ZHENG Z Y. Study on change of quality of frozen noodles during frozen storage [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013.
 - [26] OLIVERA D F, SALVADORI V O. Effect of freezing rate in textural and rheological characteristics of frozen cooked organic pasta [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90 (2): 271–276.

Effect of freeze-thaw cycles on the quality of pre-awakened frozen steamed bread with minced red bean

WANG Qiuyu^{1,2}, ZHU Wenzheng^{1,2}, XUE Panpan^{1,2}, SHA Wenxuan^{1,2},
SU Jiamin^{1,2}, ZHANG Haifeng^{1,2*}, ZHOU Xiaoyan^{1,2*}

1 (Tourism and Culinary Institute, Yangzhou University, Yangzhou 225000, China)

2 (Huaiyang Cuisine Industrialization Engineering Center of Jiangsu Province, Yangzhou 225000, China)

ABSTRACT This paper studies the effect of freeze-thaw cycles treatment on the quality of pre-awakened frozen steamed bread with minced red bean. The rheological properties, water transport and thermodynamic properties of dough, and analyzes the water distribution, texture, color, specific volume, pH and water activity of steamed bread with minced red bean cooked by steaming dough were explored by low field nuclear magnetic resonance analyzer, differential thermal analyzer, texture analyzer and rheometer. The results showed that the total moisture, deep bound water and semi-bound water of frozen dough were continuously lost, and the rheological properties of dough such as elastic modulus G' and viscous modulus G'' are the same, and the thermal properties of dough including start temperature (T_o), end temperature (T_p), peak temperature (T_c) and gelatinization enthalpy (ΔH) were significantly different. Moreover, after steaming, the water state distribution was unstable accompany with the cooking loss increases. In addition, the texture quality was affected and chromatic aberration quality and specific volume were significantly different. Besides, pH and water activity also became unstable. It could be seen that the bound water decreased linearly, the free water increased rapidly, and the water of both of them migrated after twice freezing and thawing treatment with the steamed bread with minced red bean. So it had an effect on cooking loss and water activity. And the rheological properties of frozen steamed bread dough with minced red bean were linearly related to the hardness. In a word, after three times treatment of freezing and thawing, the quality indexes of the pre-awakened frozen steamed bread dough with minced red bean decreased greatly, and the quality of samples steamed from dough also decreased. Therefore, the freeze-thaw cycles has a great negative impact on the samples, the experimental results can provide a theoretical basis for temperature control and scientific quality control of pre-waking noodle products in the actual production, transportation, storage and sales.

Key words freeze-thaw cycles; pre-awakening; steamed bread with minced red bean; water migration; rheology; thermodynamic properties