

冻融过程对速冻油条水分分布与品质相关性的研究

康志敏, 张康逸, 高玲玲, 温青玉, 宋范范, 盛威

(河南省农业科学院农副产品加工研究中心, 河南郑州 450008)

摘要: 以无铝油条预混粉为原料制作速冻油条, 研究速冻油条经反复冻融过程对油条水分分布与品质之间的关系, 分别测定了油条的水分含量、低场核磁 T_2 弛豫时间、色泽、比容、感官品质及质构品质, 并进行了相关性分析。结果表明: 随冻融次数增加, T_{21} 与瓤的水分含量、比容、感官评分呈极显著负相关 ($p < 0.01$), T_{21} 、 a^* 值、 b^* 值与硬度呈极显著正相关 ($p < 0.01$), T_{22} 与咀嚼性呈极显著负相关 ($p < 0.01$); 随冻融次数增加, 油条内部水分与蛋白质、淀粉的结合变疏松, 瓤的水分含量减少、油条比容及感官评分降低, 油条表面色泽变暗, 红度、黄度增加, 硬度增加。因此, 反复冻融会造成油条内部水分损失, 影响水分分布, 造成油条比容、品质改变, 影响油条产品的最终品质。

关键词: 冻融循环; 低场核磁共振; 水分分布; 品质; 速冻油条

文章编号: 1673-9078(2018)02-182-188

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.2.029

Study on the Correlation between Water Distribution and Quality of Frozen Twisted Dough-stick in Freeze-thaw process

KANG Zhi-min, ZHANG Kang-yi, GAO Ling-ling, WEN Qing-yu, SONG Fan-fan, SHENG Wei

(Center of Agricultural Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: Using non-aluminum twisted dough-stick premixed powder as raw material to make frozen twisted dough-stick, the relationship between water distribution and the quality of frozen twisted dough-stick by freeze-thaw cycles was investigated. The water content, low-field nuclear magnetic T_2 relaxation time, color, specific volume, sensory and structure properties were carried out a correlation analysis. The results showed that with the increasing of the freeze-thaw cycles, T_{21} was negatively correlated with the moisture content of the pulp, specific volume and sensory properties at $p < 0.01$, while T_{21} , a^* and b^* were positively correlated with the hardness at $p < 0.01$, and T_{22} was negatively correlated with chewiness at $p < 0.01$; Accompanied with the increase of the number of freeze-thaw cycles, the combination of water, protein and starch became loosened, the moisture content of the pulp reduced the specific volume and sensory score decreased, the surface color and luster of frozen twisted dough-stick turned to dim, the redness and yellowness increased, the hardness increased. Therefore, repeated freeze-thaw will result in internal water loss of frozen twisted dough-stick, affecting the distribution of water, resulting in the changes of specific volume and quality, affecting the final quality of the product.

Key words: freeze-thaw cycles; low-field nuclear magnetic resonance; water distribution; quality; frozen twisted dough-stick

油条作为我国传统食品, 外酥里嫩, 鲜香适口^[1], 速冻油条是一种在传统油条加工基础上经冷冻加工制作而成的速冻面制食品, 它继承了油条的传统风味, 食用时只需复热, 具有方便、快捷和性价比高等优点, 是中国传统食品工业化的最佳切入点之一, 然而在实际生产、冷藏、运输和销售过程中可能由于管理不善

收稿日期: 2017-07-17

基金项目: 河南省重大科技专项 (151100111300); 2016 年河南省产粮大省奖励资金农业科技创新项目 (ycm201513116)

作者简介: 康志敏 (1986-), 女, 助理研究员, 硕士, 研究方向: 农产品加工研究

通讯作者: 张康逸 (1981-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 农副产品加工研究

等因素造成温度波动, 使速冻油条常出现冻融循环现象, 反复冻融会使速冻面制品水分不断散失、蛋白质含量及弹性下降、粘性增大、颜色和风味改变^[2], 严重影响其品质。

油条品质在反复冻融过程中变化的主要原因是水分的反复迁移和重新分布的结果。低场核磁共振 (Low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 技术是研究水分结合状态的一种有效手段, 它通过向恒定在低于 0.5 T 磁场强度的样品施加射频脉冲, 使氢质子发生共振, 测定样品中的弛豫时间、质子密度和水分子之间的流动性等参数, 从而分析产品的功能状态和结构特征^[3,4]。面制品主要由蛋白质、淀粉和水等组分组成, 可以根据弛豫时间反映分子间氢质子状态

的差异,分析面制品的内部结构信息^[5],LF-NMR 技术已经被广泛应用到面制品加工及贮藏过程中。

LF-NMR 技术已在面包、面条及糕点等食品中得到应用。Lucas 等^[6]利用 LF-NMR 技术分析了面包在冷冻过程中水分迁移及结合状态变化,发现可以利用核磁共振技术来区分不同状态的水分,在冷冻过程中水分状态会发生不同的变化。His-Mei Lai 等^[7]利用 LF-NMR 技术分析了面条内部和外部水分在贮藏过程中迁移速率及结合状态变化,证实了面条的硬化是由水分的迁移引起的。王召君等^[8]利用 LF-NMR 技术通过研究南酸枣糕烘干过程中水分的迁移和分布,发现其质子密度与水分含量相关系数高达 0.9906。目前还没有文献报道利用 LF-NMR 技术分析反复冻融过程对油条品质影响的机理研究。

本文利用 LF-NMR 技术分析反复冻融过程中油条皮和瓢不同状态的水分之间的互相转化,研究冻融过程对油条水分分布状态的影响及不同状态的水分与油条品质间的关系,建立速冻油条冻融过程的品质劣变规律,可以更好地掌握速冻油条的贮藏工艺,为其产业化过程中油条的冷冻保藏和运输提供品质维护及理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

无铝油条预混粉,河南省农科院农副产品加工研究所;金龙鱼食用调和油,益海嘉里食品营销有限公司。

DW-86W420 速冻机,海尔集团;BCD-202TD 冰箱,海信电器;TMS-PRO 质构仪,美国 FTC 公司;DHG-9240A 鼓风干燥箱,上海精宏设备有限公司;电子天平,梅特勒-托利多仪器有限公司;艾格丽恒温油炸锅,湖北香江电器股份有限公司;SH-X 多路温度测试仪,东莞市联仪仪器有限公司;Hunter color Flex EZ 型色差仪,美国 Hunter lab;Micro-MR-CL-I 核磁共振食品农业成像分析仪,苏州(上海)纽迈电子科技。

1.2 实验方法

1.2.1 无铝速冻油条的制作

无铝油条预混粉→加水 and 面→饧发→切条→预炸→成型→预冷→冷冻→成品→贮藏

操作要点:取 200 g 无铝油条预混粉^[9]放入和面机,加 140 g 水搅打 3 min 成光滑面团,38 ℃ 饧发 1 h。将面团放置案板上拉伸,用手轻按成宽 8 cm,厚 0.5 cm

的面片,切成宽约 2.5 cm 的面胚,将两个面胚叠放,中间按压,用手捏住两端,拉伸至 20 cm^[10],190~200 ℃ 预炸 30 s 成型,预冷速冻,-18 ℃ 冷藏。解冻,放入油锅内复炸,炸至色泽金黄^[11]。

1.2.2 反复冻融实验

将速冻后的油条样品取出置于 25 ℃ 恒温箱中解冻 3 h,记作第 0 次冻融(对照),再将油条装入保鲜袋中密封后放入-25 ℃ 冰箱中冻藏 24 h,取出于 25 ℃ 恒温箱中解冻 3 h,记为第 1 次冻融;依次进行第 2 次、第 3 次和第 4 次冻融,复炸冷却后测定不同冻融次数油条皮和瓢的含水量、质构特性、比容和感官品质。

1.2.3 速冻油条品质的测定

1.2.3.1 油条皮和瓢湿基含水量的测定

采用 GB 50093-2010^[13]中的直接干燥法,测定不同冻融次数后油条皮、瓢的水分,每个样品测三次平行,两个数据误差不超过 2%,取其平均值,用 $w_{皮}$ 、 $w_{瓢}$ 分别代表皮和瓢的湿基含水率,公式如下:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: w -湿基含水率,%; m_1 -湿样品质量,g; m_2 -干样品质量,g。

1.2.3.2 应用 LF-NMR 测定水分的动态分布(T_2 的测定)

分别称取一定量冻融后的油条样品于 15 mm 的核磁管中,用保鲜膜封口,然后放置于核磁共振成像仪中,利用 CPMG (Carr-Purcell-Meiboom-Gill) 序列测定横向弛豫时间 T_2 ,对于每一个样品,测定时自动扫描 16 次,每次扫描重复时间间隔为 2 s。测定后每个样品的 T_2 ,通过 CONTIN 软件进行反演,反映出相应的弛豫时间 (T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23}) 及峰面积 (A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23})^[14]。

1.2.3.3 油条色泽的测定

使用色差仪测定油条皮的 L^* 值(油条的亮度)、 a^* 值(油条的红绿色值,正值偏红,负值偏绿)和 b^* 值(油条的黄蓝色值,正值偏黄,负值偏蓝), a^* 和 b^* 值越大,颜色越深。每个样品测五组平行数据,结果取平均值。

1.2.3.4 油条质构特性的测定

质构分析(texture profile analysis, TPA)可以将感官品质质量化,减少主观评判造成的误差,是食品评价的重要因素。本文采用如下条件测定油条质构指标:将速冻后的油条复炸 30 s,室温冷却 10 min,用质构仪进行测试;取油条成品中间一段,进行质构特性测定^[15]。

TPA 试验: 采用 p50 探头, 测前速率: 1.0 mm/s, 测试速率: 1.0 mm/s; 测后速率 1.0 mm/s; 触发力: 5 N; 压缩比 30%, 两次压缩时间间隔: 1 s。分别测定不同冻融次数的油条硬度、弹性、粘性和咀嚼性^[16,17]。

1.2.3.5 油条比容的测定

油条比容是反映油条膨胀度的量化指标, 将速冻油条复炸后室温冷却 10 min, 采用菜籽置换法测定其

比容^[18]。

1.2.3.6 速冻油条感官品质的测定

感官评定是食品最直接最重要的评定方法^[19], 直接反映人们对食品的喜好程度。将速冻油条复炸后室温冷却 10 min, 选择 10 名感官评价员分别对不同条件的油条进行感官评定, 参照油条感官评价标准^[20]进行打分, 去除最大值和最小值, 取平均值计算总分。

表 1 油条感官评分标准

Table 1 Sensory score criteria of twisted dough-stick

项目	分值	评分标准
色泽	15	指油条的色泽和亮度。金黄色、深黄色为 11 分~15 分; 黄白色为 6 分~10 分; 色泽白色或发灰发暗为 1 分~5 分
外观状态	20	指油条的外观形状和膨发性。外观形状整齐, 对称、光滑、膨胀度好为 16~20 分; 一般为 10 分~15 分; 形状不整齐、不对称、表面粗糙膨发性较差为 1 分~9 分。其中比容为 3.5 mL/g~4.5 mL/g, 膨胀度好; 比容为 2.5 mL/g~3.5 mL/g, 膨胀度一般; 比容为 1.5 mL/g~2.5 mL/g, 膨胀度最差。
适口性	15	指用于咬掉一根油条所需的力。酥脆爽口, 咬力适中为 11 分~15 分; 较费力或一般为 6 分~10 分; 咬劲差或不易咀嚼为 1 分~5 分
黏性	10	指咀嚼过程中, 油条的粘牙程度。咀嚼时爽口, 不粘牙为 8 分~10 分; 较爽口为 4 分~7 分; 不爽口为 1 分~3 分
油腻性	5	表皮干爽, 咬时无油流出为 4 分~5 分; 表皮油滑, 咬时基本无油流出为 2 分~3 分; 表皮含油多, 咬时有油流出为 0 分~1 分
组织结构	10	指纵切面气孔均匀度和孔壁厚薄程度。气孔多而细密, 孔壁薄为 8 分~10 分; 内部气孔较少且大小不均匀, 或孔大壁厚为 4 分~7 分; 内部气孔少, 孔壁厚, 结构坚实为 1 分~3 分
香气	10	有油炸香味和麦香味, 无异味为 8 分~10 分; 无油炸香味, 基本无异味为 4 分~7 分; 无香味, 有异味 1 分~3 分
食味	15	口感细腻, 外酥脆内细软, 咸香适口为 11 分~15 分; 口感较粗糙, 表皮绵软不酥脆, 咸味较浓或无咸味为 6 分~10 分; 口感粗糙, 表皮硬脆, 有异味为 1 分~5 分

1.3 数据统计与分析

采用 OriginPro 8.0 软件绘图。采用 SPSS 16.0 统计分析实验数据, 每组实验均重复 3 次, 取平均值, 数据结果以平均值±标准偏差表示, 并进行单因素方差分析和相关性分析, 采用 *t* 检验, 当 $p < 0.05$ 时, 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 冻融过程对油条皮、瓤水分含量的影响

油条各层水分含量是评价其品质的重要因素, 如果水分含量控制不合理, 可能会造成油条冻裂、变硬口感变差等质量问题。

由表 2 可知, 冻融过程中油条瓤的水分含量逐渐减少, 油条皮的水分含量先减小后增加, 2 次冻融油条皮水分含量最少; 不同冻融次数油条皮和瓤的水分含量变化显著 ($p < 0.05$)。

在冻融过程中, 冻融 2 次后, 油条皮会出现明显的结霜现象, 这可能是由于油条表面温度和外界温度

形成气压差, 导致内部水分转移, 同时, 由于外界温度的较大变化, 使得油条内部水分出现重结晶现象, 促使冰晶体颗粒增大, 破坏油条内部组织结构, 导致水分在面筋网络间隙做不定向运动, 使得对水分的束缚能力减弱, 造成水分散失^[21]。

表 2 冻融过程对油条各层水分含量的影响

Table 2 Effects of freeze-thaw process on the moisture content of each layer in twisted dough-stick

冻融次数/次	皮水分含量/%	瓤水分含量/%
0	36.23±0.32 ^a	84.18±0.84 ^a
1	33.75±0.42 ^b	81.85±0.79 ^b
2	29.87±0.41 ^c	79.40±0.42 ^c
3	31.53±0.47 ^d	75.28±0.50 ^d
4	32.72±0.37 ^c	74.01±0.46 ^c

注: 同列若字母相同, 表明差异不显著 ($p > 0.05$), 若字母都不相同, 表明差异性显著 ($p < 0.05$)。下同。

2.2 冻融过程对 (T_2 弛豫时间) 水分子动态分布的影响

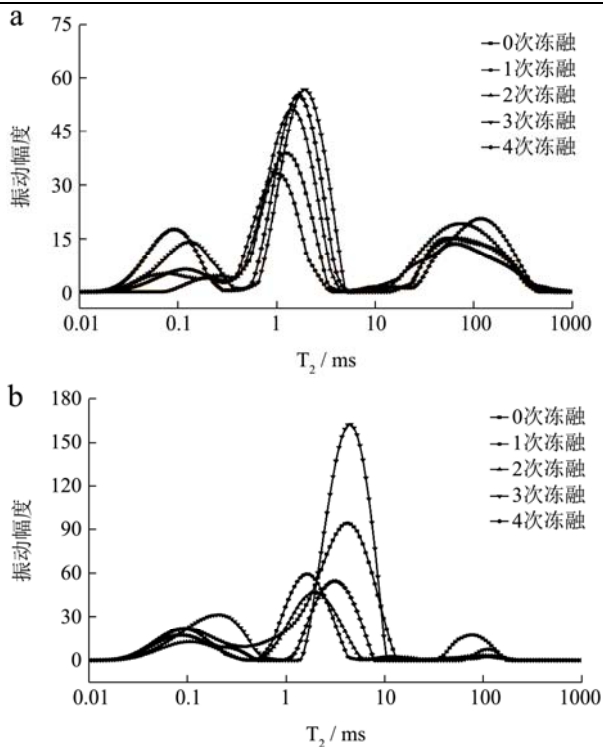


图1 不同冻融次数油条 T₂弛豫时间的分布

Fig.1 Spin-spin relaxation time T₂ of twisted dough-stick at different freeze-thaw cy

注: a 表示皮, b 表示瓢。

图1和图2表示核磁共振脉冲序列测定油条皮和瓢的弛豫时间过程中的信号拟合曲线。横坐标代表呈对数分布的横向弛豫时间, 纵坐标代表不同弛豫时间相应的振动信号量, 每个弛豫时间所对应的振动信号量与组分含量间呈正相关, 信号量的大小代表样品内不同状态水分的含量, 每个峰的峰面积代表水分含量

的多少。

由图1和图2可知, 油条在不同冻融次数下的皮和瓢 T₂谱图中均检测到了3个峰, 这说明油条中共存在三种不同状态的水分。根据 Doona 的研究, 根据检测到的顺序将三种不同状态的水分依次定义为结合水、束缚水、自由水^[22]。其中结合水主要与蛋白质、淀粉等大分子物质结合, 自由度最小, 对应积分面积 A₂₁; 束缚水在油条中以中间态存在, 自由度适中, 对应积分面积 A₂₂; 自由水在油条中以游离态存在, 自由度最大, 对应积分面积 A₂₃。对于油条皮, 2个主峰 T₂₂ 弛豫时间集中在 0.93~1.87 ms, T₂₃ 弛豫时间集中在 53.5~118.5 ms, 束缚水所占的比例最多, 对应积分面积 A₂₂, 达 90%; 其次是自由水, 对应积分面积 A₂₃; 对于油条瓢, 2个主峰 T₂₁ 弛豫时间集中在 0.09~0.22 ms, T₂₂ 弛豫时间集中在 1.63~4.64 ms, 束缚水所占的比例最多, 对应积分面积 A₂₁, 达 90%, 其次是结合水, 对应积分面积 A₂₂, 占比最少的是自由水。

由表4可知, T₂₁ 弛豫时间和峰面积显著增大, 表示水与底物结合随冻融次数的增加变疏松, 差异显著 (p<0.05); T₂₂ 弛豫时间和峰面积逐渐减小, 表明油条内部束缚水减少, 这可能是由于随着冻融次数的增加, 油条瓢水分逐渐转移; 由表3可知, 随冻融次数增多, T₂₂ 先减少后增加, 对应的 A₂₂ 先减少后增加, 不同冻融次数弛豫时间和峰面积差异显著 (p<0.05), 这可能是由于瓢中的部分束缚水向皮转移, 导致油条皮的水分增加, 这与测的的油条皮的含水量变化一致; T₂₃ 弛豫时间变短, 相对应得 A₂₃ 值也明显变小, 表明随冻融次数增加, 油条皮的自由水水分含量下降。

表3 不同冻融次数对油条皮 T₂弛豫时间的影响

Table 3 Effects of different freezing and thawing time on the T₂ relaxation time of twisted dough-stick

冻融次数/次	T ₂₂ /ms	A ₂₂ /%	T ₂₃ /ms	A ₂₃ /%
0	4.57±2.50 ^a	640.2±11.30 ^c	480.5±0.00 ^a	555.7±11.90 ^a
1	3.65±0.60 ^b	580.5±7.80 ^d	464.6±0.00 ^b	525.5±4.60 ^b
2	3.49±1.60 ^c	569.4±18.10 ^e	429.6±0.60 ^b	447.4±13.80 ^b
3	4.37±7.60 ^d	954.8±9.20 ^a	409.1±0.10 ^c	377.1±7.40 ^c
4	3.91±3.10 ^e	918.8±5.20 ^b	391.7±0.80 ^d	354.9±10.50 ^d

表4 不同冻融次数对油条瓢 T₂弛豫时间的影响

Table 4 Effects of different freezing and thawing time on the T₂ relaxation time of twisted dough-stick

冻融次数/次	T ₂₁ /ms	A ₂₁ /%	T ₂₂ /ms	A ₂₂ /%
0	0.36±0.09 ^e	560.4±22.90 ^e	15.33±1.60 ^a	2241.4±26.60 ^a
1	0.39±0.01 ^d	571.5±21.96 ^d	9.63±0.30 ^b	1032.5±27.90 ^b
2	0.40±0.08 ^c	580.3±15.70 ^c	8.41±0.30 ^c	895.2±21.00 ^c
3	0.52±0.05 ^b	594.5±34.20 ^b	7.40±0.70 ^{cd}	858.6±13.00 ^c
4	0.55±0.05 ^a	598.0±22.30 ^a	6.87±0.30 ^d	713.0±9.80 ^d

2.3 冻融过程对油条色泽的影响

表5 冻融过程对油条色泽的影响

Table 5 Effects of freeze-thaw process on the color of twisted dough-stick

冻融次数/次	L*	a*	b*
0	62.02±0.23 ^a	10.18±0.42 ^c	38.43±0.34 ^c
1	59.59±0.67 ^b	11.16±0.04 ^b	38.73±0.08 ^{bc}
2	58.38±0.97 ^c	11.69±0.74 ^b	39.75±0.80 ^{ab}
3	57.34±0.12 ^d	12.46±0.10 ^a	40.06±0.28 ^a
4	55.93±0.40 ^e	13.17±0.36 ^a	40.57±1.01 ^a

食品都有比较固定的颜色,颜色是食品的主要外观特征之一。长期以来人们已经对食品的颜色有了固有的观念,因此颜色对人的影响不仅仅是视觉上的,而且赋予人们对食品品种、品质优劣、新鲜与否的联想。油条的表皮颜色直接影响其可接受性。由表5可知,随着反复冻融次数的增加,L*值显著降低

($p<0.05$),表明油条色泽变暗,亮度降低;冻融2次后,a*值、b*值显著增加($p<0.05$),表明油条红度、黄度增加,说明油条在反复冻融过程中,油条色泽视觉效果变差,可接受程度变差。

2.4 冻融过程对油条感官品质和比容的影响

由表6可知,反复冻融过程中,油条的比容、组织结构评分及总分随冻融次数的增加逐渐降低,油条色泽、感官评分随冻融次数的增加呈下降趋势,这与色差测定结果一致,其中0次冻融、1次冻融与2次冻融、3次冻融、4次冻融的感官指标有显著不同($p<0.05$),0次冻融与1次冻融油条感官指标之间无显著差异($p>0.05$);油条经2次冻融,复炸后色泽、适口性、表观状态、组织结构和食味品质变化明显,色泽变暗,油条不易咀嚼,外观不伸展,组织结构有皱缩,香气散失较多,冻融3次后,油条综合品质差严重,感官评分低至70.67分,可食用性差。

表6 冻融过程对油条感官品质和比容的影响

Table 6 Effects of the freeze-thaw process on the sensory evaluation and specific volume of twisted dough-stick

冻融次数/次	比容/(mL/g)	色泽	表观状态	适口性	黏性
0	2.36±0.09 ^a	13.33±0.58 ^a	15.33±0.58 ^a	13.00±1.00 ^a	8.33±0.58 ^a
1	2.28±0.19 ^a	12.00±1.00 ^a	15.00±1.00 ^a	13.00±0.00 ^a	8.00±0.00 ^{ab}
2	2.21±0.18 ^a	11.67±1.53 ^a	14.00±1.00 ^a	12.33±0.58 ^{ab}	8.00±0.00 ^{ab}
3	2.11±0.30 ^a	11.67±1.53 ^a	14.00±1.00 ^a	10.67±1.53 ^{ab}	7.33±0.58 ^{bc}
4	2.03±0.13 ^a	10.00±1.00 ^a	13.33±1.53 ^a	9.33±1.53 ^{ab}	6.67±0.58 ^c

冻融次数/次	油腻性	组织结构	香气	食味	总分/分
0	4.00±0.00 ^a	8.67±0.58 ^a	8.00±1.00 ^a	12.33±0.58 ^a	83.00±1.00 ^a
1	4.00±0.00 ^a	8.00±1.00 ^{ab}	8.00±1.00 ^a	12.00±1.00 ^{ab}	80.00±1.73 ^a
2	3.67±0.58 ^a	7.67±1.15 ^{ab}	7.00±1.00 ^a	11.33±1.53 ^{ab}	75.67±2.52 ^b
3	4.00±0.00 ^a	7.33±0.58 ^{ab}	6.67±0.58 ^a	9.00±1.00 ^{ab}	70.67±3.51 ^{bc}
4	4.00±0.00 ^a	7.00±0.00 ^b	5.33±0.58 ^a	8.00±0.56 ^{ab}	64.67±1.53 ^c

表7 冻融过程对油条质构特性的影响

Table 7 Effects of the freeze-thaw process on the texture properties of twisted dough-stick

冻融次数/次	硬度/N	弹性	粘性/N	咀嚼性
0	12.96±0.61 ^c	3.58±0.17 ^a	3.93±0.55 ^b	23.96±0.86 ^c
1	13.53±0.25 ^{bc}	3.46±0.04 ^{ab}	3.96±0.23 ^b	27.52±0.73 ^b
2	13.96±0.81 ^b	3.26±0.22 ^{bc}	4.45±0.34 ^{ab}	28.00±0.10 ^b
3	14.96±0.35 ^a	3.07±0.13 ^{cd}	4.50±0.18 ^{ab}	28.27±1.55 ^{ab}
4	15.50±0.26 ^a	2.95±0.05 ^d	4.67±0.23 ^a	30.02±0.40 ^a

2.5 冻融过程对油条质构特性的影响

由表7可知,反复冻融过程中,油条质构特性硬度、粘性、咀嚼性、剪切力逐渐增加,弹性逐渐减小,这与感官评价中适口性、粘性结果一致;0次冻融与1次冻融后油条硬度、弹性、粘性指标之间无显著差异

($p>0.05$),3次冻融与4次冻融后油条硬度、弹性、粘性、咀嚼性指标之间无显著差异($p>0.05$),其中0次冻融、1次冻融、2次冻融与3次冻融、4次冻融的质构特性有显著不同($p<0.05$),不同冻融次数油条剪切力指标有显著差异($p<0.05$)。这可能是由于反复冻融过程中,冰晶的生长和重结晶作用对油条内部网络

结构造成一定的机械破坏,油条内部水分发生迁移散失,引起淀粉回生,从而导致面制品的硬度、咀嚼性和弹性等发生变化,油条表皮结霜,表皮结合水分降低,影响感官品质。这与 Smail 等^[23]研究结果一致。

2.6 油条瓢弛豫时间与速冻油条水分含量及品质的相关性

由表 8 可知, T_{21} 与瓢的水分含量、比容、感官评分呈极显著负相关 ($p<0.01$), T_{21} 、 a^* 值、 b^* 值均与硬度呈极显著正相关 ($p<0.01$), T_{22} 与咀嚼性呈极显

著负相关 ($p<0.01$), 与其他指标无极显著的线性相关性, 意味着 T_{21} 弛豫时间增大, 则水与蛋白质、淀粉结合随冻融次数的增加变疏松, 瓢的水分含量、比容及感官评分降低, 油条硬度变大; T_{22} 弛豫时间越大, 则油条咀嚼性越小。由上述研究可知, 反复冻融会改变油条内部结合水分的存在状态, 束缚水发生迁移, 自由水向表皮移动, 反复冻融会损失部分水分, 影响水分分布, 造成油条比容、品质改变; 说明反复冻融过程可以通过水分含量变化预测油条的组织结构和品质, 进而判断对油条的品质破坏程度。

表 8 油条瓢弛豫时间与速冻油条水分含量及品质相关性分析

Table 8 Correlation analysis between T_2 relaxation time of twisted dough-stick pulp and water content of frozen twisted dough-stick quality

指标	T_{21}	T_{22}	瓢水分含量/%	L*	a^*	b^*	比容	感官评分	硬度/N	弹性	粘性/N
T_{22}	-0.765	1									
瓢水分含量/%	-0.971**	0.872	1								
L*	-0.902*	0.949*	0.967**	1							
a^*	0.944*	-0.913*	-0.986**	-0.993**	1						
b^*	0.901*	-0.861	-0.971**	-0.962**	0.968**	1					
比容	-0.963**	0.875	0.993**	0.980**	-0.996**	-0.975**	1				
感官评分	-0.961**	0.829	0.981**	0.962**	-0.984**	-0.972**	0.995**	1			
硬度/N	0.981**	-0.852	-0.995**	-0.965**	0.989**	0.961**	-0.997**	-0.992**	1		
弹性	-0.954*	0.869	0.996**	0.972**	-0.988**	-0.988**	0.995**	0.988**	-0.991**	1	
粘性/N	0.851	-0.820	-0.938*	-0.924*	0.927*	0.991**	-0.938*	-0.939*	0.920*	-0.963**	1
咀嚼性	0.795	-0.972**	-0.878	-0.969**	0.941*	0.876	-0.906*	-0.879*	0.881*	-0.884*	0.826

注: $p<0.05$, 显著“*”; $p<0.01$, 极显著“**”。

3 结论

本文利用核磁共振技术研究了反复冻融过程中油条皮和瓢不同状态的水分之间的互相转化, 研究冻融过程对油条水分分布状态的影响及不同状态的水分与油条品质间的关系。由油条皮和瓢的含水率、水分迁移及分布、色泽、质构特性及感官品质的变化可知, 随冻融次数增加, 油条内部水分与蛋白质、淀粉的结合变疏松, 瓢的水分含量减少、油条比容及感官评分降低, 硬度增加, 油条表面色泽变暗, 红度、黄度增加, 4 次冻融后油条感官评分降低至 65 分以下, 可食用性差。可见, 反复冻融会使油条内部水分损失, 影响水分分布, 造成油条比容、品质改变。结合相关性分析可知反复冻融过程对油条品质的影响主要是由于油条内部水分的变化造成的。因此, 反复冻融过程可以通过水分含量变化预测油条的组织结构和品质, 进

而判断对油条的品质破坏程度, 为油条的冷冻保藏和运输提供品质维护及理论依据。

参考文献

- [1] 董少华, 张国治, 韩燕, 等. 无铝油条膨松剂配方的优化[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2005, 26(2): 33-35
DONG Shao-hua, ZHANG Guo-zhi, HAN Yan, et al. Optimization of the bulking agent without aluminum of dough-strips [J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2005, 26(2): 33-35
- [2] 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 Xiao-feng, HAN Yong-bin, ZHAO Li-ping, 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
- [3] 周凝,刘宝林,王欣.核磁共振技术在食品分析检测中的应用[J].食品工业科技,2011,32(1):325-329
ZHOU Ning, LIU Bao-lin, WANG Xin. Application of nuclear magnetic resonance technology in food analysis and detection [J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(1): 325-329
- [4] Day. Characterisation of fish oil emulsion stabilized by sodium caseinate [J]. Food Chemistry, 2007, 105: 469-479
- [5] Pearce K L, Rosenvold K, Andersen H J, et al. Water distribution and mobility in meat during the conversion of muscle to meat and ageing and the impacts on fresh meat quality attributes-A review [J]. Meat Science, 2011, 89(35): 111-124
- [6] Lucas T, Ray D L, Davenel A. Chilling and freezing of partbaked bread. an MRI signal analysis [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 70: 139-149
- [7] Hsi-Mei Lai, San-Chao Hwang. Water Status of Cooked White Salted Noodles Evaluated by MRI [J]. Food Research International, 2004, 37: 957-966
- [8] 王君君.南酸枣糕烘干过程中水分的迁移和分布[J].食品与机械,2014,1:156-160
WANG Zhao-jun. Characterization of water mobility and distribution in choerospondias axillaris pastilles during dry by nuclear magnetic resonance [J]. Food & Machinery, 2014, 1: 156-160
- [9] 康志敏,张康逸,高玲玲,等.无铝添加油条预混粉膨松剂的研究[J].粮食科技与经济,2015,40(5):60-63
KANG Zhi-min, ZHANG Kang-yi, GAO Ling-ling, et al. Research on leavening agents of non-aluminum dough sticks flour mix [J]. Grain Science and Technology Economy, 2015, 40(5): 60-63
- [10] 张康逸,康志敏,侯传伟,等.油条专用粉配粉方法的研究[J].农产品加工,2012,9:77-80
ZHANG Kang-yi, KANG Zhi-min, HOU Chuan-wei, et al. Study on the production method of twisted dough-strips special powder [J]. Agriculture Products Processing, 2012, 9: 77-80
- [11] 鞠国泉,米思.无铝复合膨松剂在油条制作中的应用研究[J].中国粮油学报,2010,25(7):110-112
JU Guo-quan, MI Si. Applying non-aluminum composite leavening agent for making deep-fried dough stick [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(7): 110-112
- [12] 张康逸,康志敏,温青玉,等.预冷冷冻过程对速冻油条加工品质的影响[J].食品科学,2017,25(7):110-112
ZHANG Kang-yi, KANG Zhi-min, WEN Qing-yu, et al. Effects of pre-cooling and freezing processing on the quality of the fried bread [J]. Food Science, 2017, 25(7): 110-112
- [13] GB 50093-2010,食品安全国家标准食品水分的测定[S]
GB 50093-2010, National food safety standard Determination of moisture in foods [S]
- [14] Aursand I G, Gallart-Jornet L, Erikson U, et al. Water distribution in brine salted cod (*Gadus morhua*) and Salmon (*Salmo salar*): A low-field 1H NMR study [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(15): 6252-6260
- [15] 李子廷,赵建新,傅琼颖,等.无铝中式油条配料开发及其面团流变学性质研究[J].吉林农业大学学报,2011, 33(1): 99-105
LI Zi-ting, ZHAO Jian-xin, FU Qiong-ying, et al. Development of no-alum ingredients of chinese fried fritter and mechanism of dough on rheological dimensions [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2011, 33(1): 99-105
- [16] Demirkesen I, Kelkar S, Campanella O H, et al. Characterization of structure of gluten-free breads by using X-ray microtomography [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 36: 37-44
- [17] 崔丽琴,崔素萍,马平,等.豆渣粉对小麦面团、馒头质构特性及馒头品质的影响[J].食品科学,2014,35(5):85-88
CUI Li-qin, CUI Su-ping, MA Ping, et al. Effect of soybean dregs powder on sensory evaluation of chinese steamed bread(CSB) and textural properties of wheat dough and CSB [J]. Food Science, 2014, 35(5): 85-88
- [18] Mandala I G. Physical properties of fresh and frozen stored, microwave-reheated breads, containing hydrocolloids [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66(3): 291-300
- [19] Liu C, Chang Y, Li Z, et al. Effect of ratio of yeast to Jiaozi on quality of Chinese steamed bread [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 12(B): 1203-1207
- [20] 康志敏,郭祯祥,孙冰华,等.运用模糊数学方法建立油条感官评价体系[J].农产品加工,2012,3:70-78
KANG Zhi-min, GUO Zhen-xiang, SUN Bing-hua, et al. Established a sensory evaluation system for twisted dough-strips using fuzzy mathematics [J]. Agriculture Products Processing, 2012, 3: 70-78
- [21] Yuthana P, Ubonrat S, Donald J C. Weight loss of frozen bread dough under isothermal and fluctuating temperature storage conditions [J]. Journal of Food Engineering, 2011,106 (2): 134-143
- [22] Doona C J, Baik M Y. Molecular mobility in model dough

systems studied by time-domain nuclear magnetic resonance spectroscopy [J]. Journal of Cereal Science, 2007, 3: 257-262
[23] Smail M, Irina I, Jordane J, et al. Effects of freezing

treatments on the fermentative activity and gluten network integrity of sweet dough [J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 46(1): 118-126

