

磁场辅助冻结对汤圆粉团品质的影响

潘治利^{1,2,3}, 申佳晋¹, 雷萌萌^{1,2}, 艾志录^{1,2,3}, 杨联芝⁴, 黄忠民^{1,2,3*}

(¹河南农业大学食品科学技术学院 郑州 450002

²国家速冻米面制品加工技术研发专业中心 郑州 450002

³河南省冷链食品工程技术研究中心 郑州 450002

⁴河南晶都笑脸食品有限公司 河南新乡 453000)

摘要 目的:为了探究磁场辅助冻结对汤圆粉团冻结品质的影响,开发新型辅助冻结方式在米面制品上的应用,研究不同磁场强度下辅助冻结对汤圆粉团品质变化。方法:采用平板冻结加磁场辅助的方式冷冻汤圆粉团,测定汤圆粉团冻结速率、失水率、色度、质构特性、糊化特性、可冻结水含量和水分结合状态等指标,揭示磁场辅助冻结对其品质的影响。结果表明,与对照组相比较,经磁场辅助冻结后汤圆粉团冻结速率、失水率、色度、质构特性、糊化特性和可冻结水含量等均存在显著性差异($P<0.05$)。磁场辅助冻结的汤圆粉团在 24 Gs 时冻结速率加快,进入最大冰晶生成带时间提前 4 min,使得冰晶体积变小;失水率降低了 37.57%,亮度提高了 3.63%,透光度提高了 14.92%和硬度下降了 11.74%。从水分结合状态上看,汤圆粉团的可冻结水含量明显低于对照组,在 24 Gs 时降低了 11.64%;然而,磁场辅助冻结后汤圆粉团的峰值黏度增加 7.81%,回生值增加 3.93%;水分结合状态上未见显著性差异。结论:在磁场强度为 24 Gs 时汤圆粉团的冻结品质最佳,可明显改善汤圆粉团的失水率、色度、硬度、可冻结水含量等品质指标。研究结果为磁场辅助冻结在米面制品上的应用提供了参考。

关键词 磁场; 汤圆粉团; 水分结合状态; 品质变化

文章编号 1009-7848(2024)03-0139-10 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2024.03.014

汤圆是我国由来已久的传统美食之一,市场需求量巨大,然而在产品保存方面存在各种各样问题,导致产品出现品质劣变^[1]。速冻技术的出现,有效缓减了食品品质劣变的进程,然而在冷藏过程中不免发生表皮开裂及食用品质差等质量问题。黄忠民等^[2]通过研究低温冰箱冻结、螺旋隧道冻结和液氮冻结 3 种方式,发现液氮冻结优于其它两种冻结方式,证明液氮冻结可使冻结速率提高,而且冻结品质也有所改善。

冻结对于储藏易变质食品来说,是一种比较方便的方法,可保持食品品质,延长食品的储藏期。然而,常用的冻结方法在冷冻过程中形成的冰晶体过大,很容易破坏淀粉颗粒结构,最后造成颗粒表面粗糙、不完美,导致直链淀粉、蛋白质、脂质等浸出液的释放,造成食品中营养物质丧失、口感

品质下降^[3]。近年来,以基本冻结方式为基础,外加物理场的保鲜技术不断出现,如,磁场辅助冻结、超声波辅助冻结、静电场辅助冻结等。磁场辅助冻结技术作为近年来新兴的非热技术,主要通过添加物理磁场的方式,在冷冻过程中扰乱水分子在食品内部的排列结构,抑制冰晶体积生长,在冷冻过程中避免淀粉颗粒结构受到冰晶的损害,保护细胞内的活性^[4]。磁场作为新兴的清洁性的能源之一,不会给环境带来任何污染,具有良好的环保性等特点。同时,在冻结过程中时添加微弱磁场可产生较明显的冻结效果,使产品品质提升,具有节能环保的优点^[5]。张艳艳等^[6]通过研究静电场辅助冻结对面筋蛋白的影响,得出施加电场后面筋蛋白的网络结构变得更加致密且均匀。Zhou 等^[7]研究磁场辅助冻结对冷冻面团的影响,发现增加磁场强度更有利于品质的保持。王亚会等^[8]通过探究磁场辅助冻结对西兰花品质的影响,比较得出添加磁场后在 36 Gs 处明显优于普通冻结的西兰花。顾思忠等^[9]主要利用磁场辅助冻结对豌豆品质进行研究,表明添加磁场后豌豆冻结品质相比于未添加的明显变好。Otero 等^[10]研究静磁场对马铃薯

收稿日期: 2023-03-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2100200, 2021YFD2100204);郑州市重大科技创新专项(2020CXZC0084)

第一作者: 潘治利,男,博士生,副教授

通信作者: 黄忠民 E-mail: zmhuang2000@163.com

的影响,发现添加磁场后马铃薯的过冷度、失水率、质构与色泽未产生显著性变化。柳萌萌等^[1]研究发现添加磁场辅助冻结后可有效降低樱桃番茄果实中的酸度。磁场作为一种清洁能源,具有绿色、低能耗的优点,可以优化食品冻结过程,更好地有利于食品品质的保持。磁场辅助冻结在水果蔬菜、肉制品,尤其是关于纯水冻结研究已经较为广泛,然而在面制品种方面的研究较少,且未见对汤圆粉团的研究。

本文采用静磁场作为物理辅助冻结手段,通过研究品质变化及水分分布来解释磁场辅助冻结对速冻汤圆粉团的影响,为速冻汤圆的品质控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

水磨白糯米粉,由江苏江南上一道科技股份有限公司提供;胶之素 SQ7101,由广西大新荃力淀粉有限公司提供。

1.2 仪器与设备

电子天平,上海浦春计量仪器有限公司;RC-4型单温度记录仪,江苏省精创电器股份有限公司;DigiEye 电子眼,上海韵鼎公司;TA-XAPLUS 型质构仪,英国 StableMicroSystems;HE53/02 快速水分测定仪,梅特勒托利多科技(中国)有限公司;HS-DSC-101 差示扫描量热仪,上海和晟仪器有限公司;RAV-4500 快速黏度分析仪,瑞典波通仪器公司;NMI20-60H-I 型低场变温核磁共振成像分析仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;BD/BC-213JDE 变温冷冻冷藏冰箱,浙江星星冷链集成股份有限公司;CHY15-50 型一维线圈、LD3003 型电源、CH-1600 高斯计、一维轴向探头,北京翠海佳诚磁电科技有限责任公司;C22-WT2202 型电磁炉,广州美的生活电器制造有限公司。

1.3 方法

1.3.1 汤圆粉团的制作 称取糯米粉 30 g,胶之素 3%和加水量 83%(以干基计),调制成面团,取 8 g 称量搓圆成型备用。

1.3.2 磁场辅助冻结汤圆粉团 将制作好的汤圆粉团放置于-30℃、型号相同且同一冷冻环境中的添加磁场辅助冻结和未添加磁场的冰箱中冷冻作

对比,根据磁场强度计算公式:

$$H = \frac{N \times I}{L_e} \quad (1)$$

式中: H ——磁场强度,A/m; N ——线圈匝数; I ——电流,A; L_e ——有效磁路长度,m。

通过调节电流大小确定磁场强度,电流大小分别设定为 0.444A,0.888A,1.333A,1.76A,使用高斯计测定各电流强度下的磁场强度分别为 8,16,24,32 Gs,当样品中心温度达到-18℃并稳定 30 min,取出样品。

1.3.3 汤圆粉团冻结曲线的测定 将制作好的汤圆粉团置于-30℃冰箱中冷冻,将温控器插入汤圆粉团的中心部位,每隔 1 min 记录汤圆粉团的中心温度,待中心温度降至-18℃时,得到冻结曲线。

1.3.4 汤圆粉团冻结失水率的测定 称量冷冻时单个汤圆的质量,将冻结前后汤圆粉团质量差值与冻结前质量的比值作为冻结失水率,与对照组作比较,每组试验重复 6 次。

$$\text{失水率} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_1 ——冷冻前质量,g; m_2 ——冷冻后质量,g。

1.3.5 汤圆粉团色度的测定 参考黄忠民^[2]的方法稍作修改,使用电子眼前校准参数, L^* 为亮度、 a^* 为红度、 b^* 为黄度,取不同磁场辅助冻结后的汤圆粉团于 100℃沸水中煮制 5 min 后,沥干汤圆粉团表面水分,进行色度测定。每组试验重复 6 次。

1.3.6 汤圆粉团汤汁透光率的测定 将 500 mL 蒸馏水置于锅内,待水沸腾,然后从冰箱中取出 5 颗冷冻汤圆粉团置于锅中煮制 5 min,待汤圆粉团浮起后捞出,煮制后的汤汁静置冷却到室温,定容到 500 mL。空白以蒸馏水为参照,在 620 nm 波长处测定汤汁透光率,每组试验重复 6 次。

1.3.7 汤圆粉团质构特性的测定 参考黄忠民等^[2]的方法稍作修改,取经过冷冻的汤圆粉团置于 100℃沸水中煮制 5 min,再于冷水内冷却 30 s 后,用水沥干表面水分,采用质构仪对其汤圆粉团的硬度、黏着性、内聚性、回复性、咀嚼性进行测试。TPA 试验参数: P50 探头,测试参数确定如下:测前速 2 mm/s;测中速 1 mm/s;测后速 2 mm/s;压缩比 60%;测定间隔时间 5 s,每组试验

重复6次。

1.3.8 汤圆粉团糊化特性的测定 参考潘治利等^[12]的方法稍作修改,取冷冻后的汤圆粉团于40℃下烘箱内烘干水分,快速干燥、破碎、过筛(100目)。测量时,糯米粉水分含量 $\leq 14\%$;准确称取样品:糯米粉(3.00 \pm 0.01)g,根据测定样品的水分含量计算所需要蒸馏水添加量。最后称取的蒸馏水与样品糯米粉充分混合均匀。测试程序为:测试前10 s内,搅拌速度960 r/min;测中转速160 r/min,50℃保持1 min,12℃/min升温至95℃,保持2.5 min后,12℃/min降温至50℃下保持2 min。测试过程为13 min,每组试验重复6次,通过软件读取并导出数据。

1.3.9 汤圆粉团可冻结水含量的测定 参考Zeng等^[13]的方法,精确称取10 mg左右的解冻后的汤圆粉团,将其密封于DSC铝制坩埚内,记录其质量。测量时,以空坩埚作为对照,以氮气作为载气。温度程序:10℃/min的降温速率从20℃降温至-40℃,保持5 min然后以10℃/min的速率升温至30℃,记录汤圆粉团熔融曲线。每组试验重复6次。

$$\text{可冻结水含量} = \frac{H_w}{H_i \times T_w} \times 100\% \quad (3)$$

式中: H_w ——样品中的焓值,J/g; H_i ——纯水结冰的融化焓值,335 J/g; T_w ——样品的水分含量,%。

1.3.10 汤圆粉团水分结合状态的测定 参考黄岩^[14]的方法稍作修改,将(3 \pm 0.1)g样品放入25 mm玻璃管中,测定水分分布的横向弛豫时间。将制备好的汤圆粉团置于永久磁场中心位置的射频线圈中心,进行CPMG脉冲序列扫描试验。测试程序:磁体探头:NIMI20-060H-I-25 mm;序列:CPMG采样频率:250 kHz;主频:21 MHz;射频延迟:0.002 ms;前放档位:2;等待时间:3 000 ms;90度脉宽:6 μ s,180度脉宽:12 μ s,累加次数:8;回波时间:0.10 ms,回波个数:3 000。扫描结束后利用T2-FitFrm软件中的CPMG序列反演得到各样品的波谱图和 T_2 值。每组试验重复6次。

深层结合水含量代表样品中的持水性,汤圆粉团的深层结合水含量越高,持水性越强,品质越好。通过以下深层结合水公式可以得出汤圆粉团的持水性,持水性越强,则汤圆粉团的品质越好。

根据公式:

$$\text{深层结合水含量} = \frac{\text{峰1面积}}{\text{峰1面积} + \text{峰2面积}} \times 100\% \quad (4)$$

1.4 数据处理

采用Excel软件和SPSS Statistics 16.0软件对试验数据进行分析处理,利用Qorigin2018软件进行作图,单因素方差分析运用Duncan多重比较法对试验数据进行显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 汤圆粉团的冻结曲线

食品的冷冻过程主要包括3个阶段:冷却、水分结晶和进一步降温,不同磁场强度的冻结环境条件会影响冰晶形成的大小。冰晶体形成的大小和晶核数目的多少均受冻结速率的影响,若冻结速率越快,则形成冰晶的时间短,晶核越小,冰晶体积越小,对汤圆粉团品质损伤和分子空间结构的破坏就越小^[15]。

由图1可知,磁场辅助条件下的降温速率大于对照组,冷冻曲线主要体现在水分结晶阶段^[16]。相比对照组,在磁场强度为24Gs时,进入了最大冰晶生产带的时间提前了4 min,依次是8,16,32Gs,由此可以看出,不同磁场强度辅助冻结均会影响通过进入最大冰晶生成区的时间,进而影响冰晶生成的大小,晶核体积越小、粉团内部结构破坏越小。磁场辅助冻结后,水分子的氢键在磁场下会变强,分布的更加均匀稳定,可以降低过冷度,延

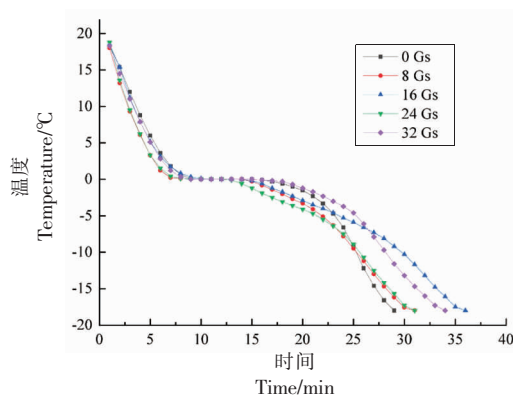


图1 不同磁场强度辅助冻结下汤圆粉团的冻结曲线
Fig.1 Freezing curve of glutinous rice balls under different magnetic field strength assisted freezing

长过冷状态、使冻结速率加快,减缓后期冰晶生长时间,有效抑制较大冰晶出现^[17]。

2.2 磁场辅助冻结对汤圆粉团冻结失水率的影响

汤圆粉团在冷冻过程中产生水分流失的现象,是由于氢键、疏水键和离子键等键合力遭受破坏,粉团内部结构发生变化,从而使得对水的束缚能力减弱。从图2可以看出,与对照组相比,失水率呈先下降后上升的趋势,添加磁场辅助冻结后样品失水率明显降低,且在24Gs下失水率最低,降低了37.57%。这可能是因为汤圆粉团表面冰晶升华后,水分子的氢氧离子会相互结合形成氢键,在磁场的作用下水分子会出现极化现象,氢氧原子在冷冻过程中会趋向于平行,但是在冷冻环境下添加磁场可能会使氢键遭受破坏,致使氢键结构重新排列,冰晶更加趋于均质化,减少水分子的流动,从而抑制大冰晶的形成,降低了水分的流失^[18-19]。

2.3 磁场辅助冻结对汤圆粉团色度的测定

色泽是判断汤圆粉团品质优劣的指标之一。 L^* 代表样品亮度, $+a^*$ 为红色, $-a^*$ 为绿色, $+b^*$ 为黄色, $-b^*$ 为蓝色。从表1中可以看出,与对照组相比,添加磁场辅助冻结后亮度会增加, L^* 值在24Gs下与其它组存在显著性差异, a^* 值与 b^* 值差异性不显著。其中,亮度最高的为24Gs下的 85.97 ± 0.58 ,亮度提高了3.63%,这可能与汤圆粉团内部的水分含量、淀粉回生程度有关。汤圆粉团内部形成冰晶大小,会影响粉团煮制后的色泽,可能因为形成冰晶体积增大,使淀粉之间网状结构受到了破坏,对光线的反射变弱,从而使对照组的亮度会降低^[20]。随着磁场强度的增加,亮度 L^* 值呈先增大后降低的趋势,可能是添加磁场辅助冻结后汤圆粉团内部形成了细小均匀的冰晶体,保护了淀粉之间的网状结构,亮度得到了提高。

2.4 磁场辅助冻结对汤圆粉团汤汁透光率的测定

汤汁透光率是指汤圆粉团在煮制过程中糯米粉的扩散和溶解程度^[21]。可能与冷冻过程中汤圆粉团的脱粉、塌陷等品质劣变有关,透光度反映汤圆粉团品质的好坏,汤越清晰代表沉淀物越少,透光度大,汤圆粉团品质就越好。由表2可知,随着

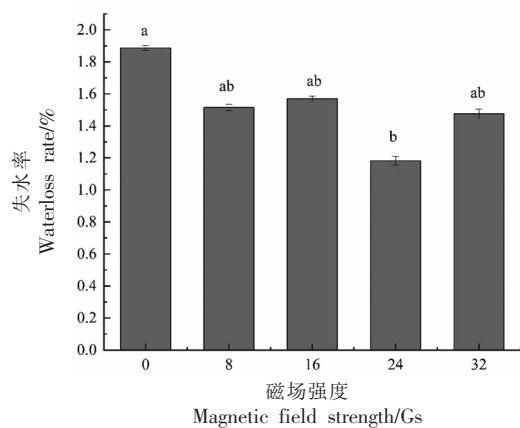


图2 不同磁场强度辅助冻结对汤圆粉团失水率的影响

Fig.2 Effect of different magnetic field strength assisted freezing on water loss rate of Tangyuan dough

表1 不同磁场强度辅助冻结对汤圆粉团色度的影响

Table 1 Effect of different magnetic field strength assisted freezing on the chromaticity of Tangyuan dough

冻结方式	亮度	红度	黄度
0 Gs	82.96 ± 0.80^b	2.14 ± 0.53^a	15.13 ± 0.62^{ab}
8 Gs	84.05 ± 1.80^b	1.10 ± 0.46^b	15.82 ± 1.25^a
16 Gs	84.74 ± 0.47^{ab}	1.23 ± 0.43^b	14.38 ± 0.08^b
24 Gs	85.97 ± 0.58^a	1.26 ± 0.16^b	15.30 ± 0.62^{ab}
32 Gs	84.49 ± 0.29^{ab}	1.44 ± 0.38^{ab}	15.56 ± 0.41^{ab}

注:数值采用平均值±标准差,同列数值的后缀字母不同,说明数据的差异性显著($P < 0.05$)。

表2 不同磁场强度辅助冻结对汤圆粉团汤汁透光率的影响

Table 2 Effect of different magnetic field strength assisted freezing on light transmittance of Tangyuan dumpling soup

冻结方式	透光率/%
0 Gs	22.25 ± 1.20^b
8 Gs	25.43 ± 2.03^a
16 Gs	25.57 ± 1.76^a
24 Gs	24.97 ± 0.47^a
32 Gs	25.23 ± 0.46^a

注:数值采用平均值±标准差,同列数值的后缀字母不同,说明数据的差异性显著($P < 0.05$)。

磁场强度的增加汤汁透光率呈先升高后降低的趋势,添加磁场辅助冻结后与对照组存在显著性差异。相比于对照组,透光率由22.25%增加到16Gs下的25.57%,透光率增加了14.92%。在蒸煮后透

光率下降,可能是因为煮制时汤圆粉团受热吸收热量,经过淀粉的水合吸水膨胀后,导致淀粉颗粒破裂,破坏了结晶区较弱的氢键后,汤圆粉团中部分直链淀粉会溶解到水中,从而溶出物变多^[2,22]。磁场辅助冻结后透光率高于对照组,可能是添加一定磁场强度在冷冻过程中,能够使冰晶颗粒均匀分布于粉团上。在煮制过程中,淀粉结构处于相对稳定的环境中,可溶性成分溶出物变少,降低了光散射的现象发生,会使其透光率增加。

2.5 磁场辅助冻结对汤圆粉团质构特性的测定

由表 3 可以看出,添加磁场辅助冻结的汤圆粉团与对照组存在显著性差异,黏着性在 24 Gs 下与其它组存在显著性差异,内聚性和回复性之

间不存在显著性差异。咀嚼性的磁场强度在 32 Gs 时与其它组之间存在显著性差异。分析样品组发现,硬度最小的是 24 Gs 的,下降了 11.74%,其次是 16,32,8 Gs,未添加磁场辅助冻结下,对照组的汤圆粉团硬度最大。磁场强度会影响样品的冻结速率,导致冰晶的形成时间、大小以及分布均存在差异,同时减少汤圆粉团中自由水能够降低冰晶的大小和数量,防止冰晶的生长对淀粉结构的破坏,最终影响质构、蒸煮等品质特性^[23]。这可能因为磁场辅助冻结形成的细小冰晶使汤圆粉团内部形成了致密的结构,不易水分流失。另外,从冻结失水率也可以看出,失水率越大,也会造成硬度的上升。

表 3 不同磁场强度辅助冻结对汤圆粉团质构特性的影响

Table 3 Effect of different magnetic field strength assisted freezing on texture characteristics of Tangyuan powder

冻结方式	硬度	黏着性	内聚性	回复性	咀嚼性
0 Gs	298.14 ± 22.00 ^a	190.53 ± 15.04 ^a	0.64 ± 0.00 ^a	0.29 ± 0.01 ^a	129.84 ± 13.65 ^b
8 Gs	285.94 ± 21.18 ^{ab}	189.89 ± 16.03 ^a	0.66 ± 0.01 ^a	0.28 ± 0.01 ^a	142.61 ± 19.38 ^b
16 Gs	265.80 ± 9.05 ^b	174.74 ± 8.50 ^{ab}	0.66 ± 0.01 ^a	0.28 ± 0.00 ^a	123.24 ± 8.36 ^{ab}
24 Gs	263.14 ± 9.93 ^b	171.70 ± 7.21 ^b	0.65 ± 0.01 ^a	0.29 ± 0.01 ^a	121.33 ± 10.57 ^{ab}
32 Gs	271.64 ± 12.40 ^b	177.29 ± 9.61 ^{ab}	0.65 ± 0.01 ^a	0.29 ± 0.01 ^a	125.77 ± 9.76 ^a

注:数值采用平均值±标准差,同列数值的后缀字母不同,说明数据的差异性显著($P < 0.05$)。

2.6 磁场辅助冻结对汤圆粉团糊化特性的测定

从表 4 可知,与对照组相比较,添加磁场辅助冻结后峰值黏度、最低黏度、崩解值、最终黏度、回生值和糊化温度等各指标之间均存在差异性显

著,峰值时间并未出现显著性差异。添加磁场辅助冻结后峰值粘度在 24 Gs 时提高了 7.81%,崩解值提高了 12.42%,回生值增加了 3.93%。

淀粉糊化的实质,当淀粉颗粒在水中被加热

表 4 不同磁场强度辅助冻结对汤圆粉团糊化特性的影响

Table 4 Effects of different magnetic field intensities on gelatinization characteristics of Tangyuan powder

冻结方式	峰值黏度/ mPa·s	最低黏度/ mPa·s	崩解值/ mPa·s	最终黏度/ mPa·s	回生值/ mPa·s	峰值时间/ min	糊化温度/ ℃
0 Gs	2 240.33 ± 21.73 ^{cd}	1 137.33 ± 5.13 ^c	1 103.00 ± 26.85 ^c	1 509.33 ± 3.79 ^c	372.00 ± 6.08 ^b	3.96 ± 0.08 ^a	68.57 ± 0.06 ^b
8 Gs	2 332.67 ± 28.04 ^b	1 171.33 ± 4.73 ^a	1 161.33 ± 25.32 ^b	1 535.67 ± 2.31 ^b	364.33 ± 2.52 ^{bc}	3.96 ± 0.04 ^a	68.82 ± 0.51 ^{ab}
16 Gs	2 274.00 ± 29.70 ^c	1 168.00 ± 9.90 ^{ab}	1 106.00 ± 19.80 ^c	1 526.50 ± 6.36 ^{ab}	358.50 ± 3.54 ^c	3.97 ± 0.05 ^a	69.35 ± 0.07 ^a
24 Gs	2 415.33 ± 4.73 ^a	1 175.33 ± 6.35 ^a	1 240.00 ± 10.15 ^a	1 562.00 ± 8.72 ^a	386.67 ± 2.52 ^a	3.93 ± 0.00 ^a	68.53 ± 0.08 ^b
32 Gs	2 212.00 ± 15.56 ^d	1 149.00 ± 5.66 ^{bc}	1 063.00 ± 9.90 ^c	1 513.50 ± 6.36 ^c	364.50 ± 0.71 ^{bc}	4.00 ± 0.00 ^a	69.35 ± 0.14 ^a

注:数值采用平均值±标准差,同列数值的后缀字母不同,说明数据的差异性显著($P < 0.05$)。

时,淀粉分子中的氢键被打破,淀粉颗粒吸水膨胀后结晶区消失,导致直链淀粉溶解到溶液中,从而使溶液的黏度增加^[24]。淀粉由于糊化的性质可能会对淀粉颗粒的吸水膨胀、膨胀颗粒的分数和淀粉链之间相互影响^[25]。不同磁场强度辅助冻结下形成冰晶产生的相变压力与微机械力,使淀粉中附着的脂质和蛋白质产生了变化,提高了糊化过程中的峰值黏度和最终黏度,使淀粉颗粒发生膨胀出现孔隙和裂缝,自由水更容易进入颗粒内部;也可能是因为受损淀粉的含量和淀粉的内部结构变化,促进了淀粉聚合物链之间的分子重排和相互作用^[26]。从崩解值可以看出,磁场可能对脂质和蛋白质变化产生影响,可能附着脂质越少,淀粉崩解值越大。从回生值可以看出,可能是因为冰晶生长会刺破淀粉结构造成糯米粉中直链淀粉之间容易重新结合,促进淀粉回生;也可能是冰晶的生长与形成对糯米粉会产生损伤,小分子颗粒形成致密的结构,抑制了蒸煮时水分的进入及热量的传递,会使破损淀粉吸水膨胀,最终导致峰值粘度、崩解值、最终黏度的变化。

2.7 磁场辅助冻结对汤圆粉团可冻结水含量的测定

在汤圆粉团的冷冻过程中,内部的水分可分成可冻结水和不可冻结水,可冻结水那部分将转化成冰晶,冰晶形成后,各组分之间的持水能力会受到不同程度的影响,持水性降低导致粉团内部的水分游离出来,冰晶数量体积的增加使冷冻后的品质受到影响^[27]。使用 DSC 测定汤圆粉团解冻后冰晶融化焓吸收热量,计算样品中可冻结水的含量。

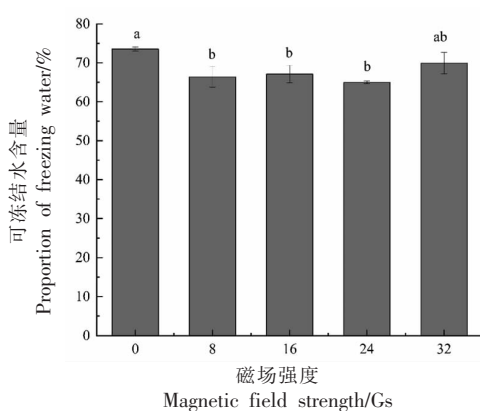


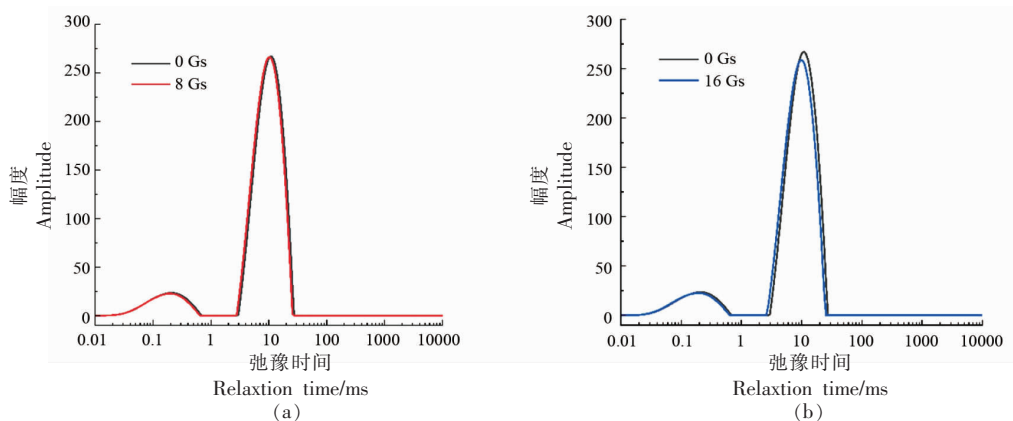
图3 不同磁场强度辅助冻结对汤圆粉团可冻结水含量的影响

Fig.3 Effect of different magnetic field strength assisted freezing on the freezing water content of glutinous rice balls

从图3可以看出,添加磁场辅助冻结后对粉团内部可冻结水含量有显著性影响。随磁场强度的增加,可冻结水含量呈先增大又减小、再增大的趋势,在24Gs时可冻结水含量最低。与对照组相比,可冻结水含量含量在24Gs时降低了11.64%,说明磁场辅助冻结抑制了大冰晶的形成,可减轻冰晶对粉团内部结构的损害。可冻结水含量(自由水和一部分的多层水)逐渐增加,是因为冻结过程中粉团内部结构遭到破坏,形成的冰晶致使结构受损,水分子受到的束缚力减少,导致粉团持水性下降^[28],水分松散析出,水分子流动性增加,致使粉团内部可冻结水含量逐渐增加。

2.8 磁场辅助冻结对汤圆粉团水分结合状态测定

从图4可以看出汤圆粉团中有强结合水和弱结合水,不存在流动性很强、完全自由的水,且结



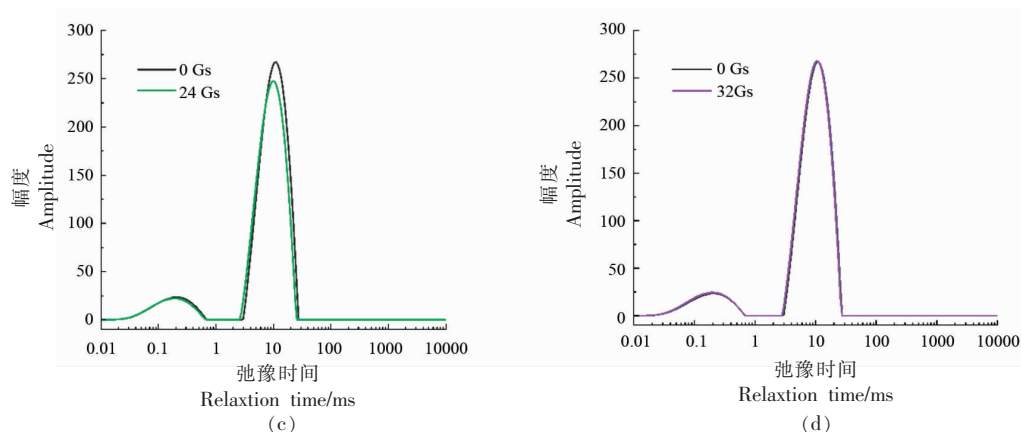


图 4 不同磁场强度辅助冻结汤圆粉团的水分迁移情况

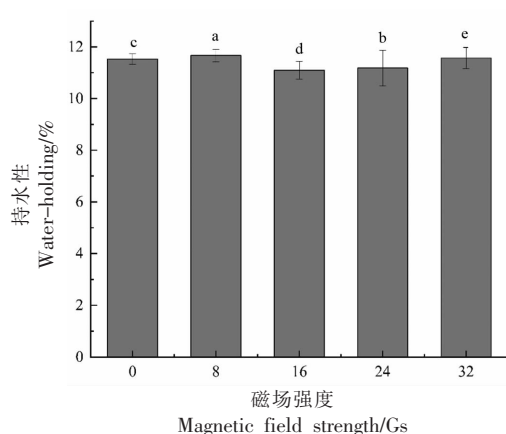
Fig.4 Water migration of Tangyuan dough with different magnetic field strength

合水部分会和高分子物质如淀粉、蛋白发生不同程度的结合,导致强结合水减少、弱结合水增加,很可能是由于淀粉链和水分子之间产生的相互作用,淀粉链之间的相互作用使回生性不断增加^[14,29]。但是,从图 4 中看出在不同磁场强度下,磁场对汤圆粉团水分分布的影响并不显著。

从图 5 可以看出,不同磁场强度下冻结的汤圆粉团未见显著性差异,但可以看出在 8Gs 的磁场强度下深层结合水含量最高。经过磁场辅助冻结后的深层结合水含量明显高于对照组。深层结合水的含量在一定程度上可用来衡量汤圆粉团的持水性^[14]。深层结合水含量越高,汤圆粉团的持水性越强。通过与对照组相比,添加磁场辅助冻结后可能会提高汤圆粉团的持水性,延缓冻藏期间的品质劣变;也可能是因为在磁场存在的情况下,水保持亚稳状态,可以产生高度过冷,抑制了冰晶的生长,形成的冰晶体比较均一,不易发生晶体分组的现象,使粉团的水分分布更加均匀^[30]。

3 结论

通过研究不同磁场强度辅助冻结对汤圆粉团品质变化规律,结果表明:不同磁场强度辅助冻结汤圆粉团在失水率、色度、质构特性、糊化特性和可冻结水含量等均存在显著性差异($P < 0.05$)。与对照组相比,随着磁场强度的增加,汤圆粉团的失水率呈失水率呈先下降后上升的趋势,且在 24 Gs 下失水率最低,降低了 37.57%,亮度提高了 3.63%,硬度降低了 11.74%,可冻结水含量降低了

图 5 不同磁场强度辅助冻结对汤圆粉团持水性的影响
Fig.5 Effect of different magnetic field strength assisted freezing on water holding capacity of Tangyuan dough

11.64%。

由此可知,添加磁场辅助冻结后汤圆粉团会降低失水率,提高亮度、减小硬度,导致峰值黏度提高、降低回生值,可冻结水含量变少,但未见对水分结合状态有明显变化。磁场作为一种新型的辅助冻结技术,将其引入米面制品中,可以更好地为速冻行业提供理论化参考,有利于品质的保持。

参 考 文 献

- [1] 李维,汪静心,杨芳,等.添加马铃薯全粉的汤圆工艺研究[J].农业与技术,2019,39(5):9-12.
LI W, WANG J X, YANG F, et al. Study on the technology of glutinous rice balls with potato powder [J]. Agriculture and Technology, 2019, 39(5): 9-

- 12.
- [2] 黄忠民, 赵蒙姣, 黄婉婧, 等. 不同冻结方式对汤圆品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 44-48.
HUANG Z M, ZHAO M J, HUANG W J, et al. Effect of freezing methods on quality characteristics of Tang-yuan[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(6): 44-48.
- [3] FENG W J, MA S, WANG X X. Recent advances in quality deterioration and improvement of starch in frozen dough[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2020, 3(4): 154-163.
- [4] 程丽林, 许启军, 刘悦, 等. 电磁场辅助冻结-解冻技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(2): 135-138, 146.
CHENG L L, XU Q J, LIU Y, et al. Research progress of electromagnetic field assisted freezing-thawing technology[J]. Storage and Process, 2018, 18(2): 135-138, 146.
- [5] 刘磊磊, 孙淑凤, 赵勇, 等. 磁场对冷冻过程影响的研究进展[J]. 低温与超导, 2017, 45(6): 83-87.
LIU L L, SUN S F, ZHAO Y, et al. Research progress in the effect of magnetic field on freezing process[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2017, 45(6): 83-87.
- [6] 张艳艳, 王冰蕊, 丁江涛, 等. 静电场辅助冷冻对面筋蛋白质及分子结构的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(9): 30-35.
ZHANAG Y Y, WANG B R, DING J T, et al. The effect of electrostatic field-assisted freezing on quality and molecular structure of gluten protein[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(9): 30-35.
- [7] ZHOU H L, JIN Y M, HONG T T, et al. Effect of static magnetic field on the quality of frozen bread dough[J]. LWT-Food Sci Technol, 2022, 154(15): 112670.
- [8] 王亚会, 邸倩倩, 刘斌, 等. 直流磁场辅助冻结对西兰花品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(21): 186-190.
WANG Y H, DI Q Q, LIU B, et al. Effect of direct-current magnetic-field-assisted freezing on the broccoli quality[J]. Food Research and Development, 2017, 38(21): 186-190.
- [9] 顾思忠, 刘斌, 宋健飞, 等. 直流磁场对豌豆冻结特性的影响[J]. 冷藏技术, 2017, 40(4): 23-26.
GU S Z, LIU B, SONG J F, et al. Effect of DC magnetic field on freezing characteristics of pea[J]. Cold Storage Technology, 2017, 40(4): 23-26.
- [10] OTERO L, POZO A. Effects of the application of static magnetic fields during potato freezing[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 316(3): 110838.
- [11] 柳萌萌, 方彦雯, 方志财, 等. 静磁场对成熟樱桃番茄口味的影响[J]. 植物生理学报, 2020, 56(6): 1259-1266.
LIU M M, FANG Y W, FANG Z C, et al. The effect of static magnetic field on taste of mature cherry tomato[J]. Plant Physiology Journal, 2020, 56(6): 1259-1266.
- [12] 潘治利, 骆洋翔, 艾志录, 等. 不同冻藏温度条件下速冻汤圆品质变化及其机制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 304-310.
PAN Z L, LUO Y X, AI Z L, et al. Quality change and mechanism of quick-frozen rice dumplings under different frozen temperatures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(21): 304-310.
- [13] ZENG J, GAO H, HUANG K, et al. Effects of different storage temperatures on the structure and physicochemical properties of starch in frozen non-fermented dough[J]. Food Science and Technology, 2022, 42(6): 19922.
- [14] 黄岩. 糯米粉特性与汤圆品质的相关性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
HUANG Y. Study on the correlation of characteristic of waxy rice flour and rice dough[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [15] 徐茂, 向敏, 王子涵, 等. 冻结速率对烤甘薯品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(13): 217-224.
XU M, XIANG M, WANG Z H, et al. Effect of freezing rates on quality of baked sweet potatoes[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(13): 217-224.
- [16] 马国骄, 金亚美, 杨哪, 等. 交变磁场对猪肉和牛肉冻藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 140-149.
MA G J, JIN Y M, YANG N, et al. Effect of alternating magnetic field on quality of frozen pork and beef[J]. Food and Machinery, 2021, 37(6): 140-149.
- [17] JIN H M, HER J Y, KANG T, et al. Effects of

- pulsed electric field (PEF) and oscillating magnetic field (OMF) combination technology on the extension of supercooling for chicken breasts [J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 196(3): 27–35.
- [18] 王凯旭, 丁江涛, 刘兴丽, 等. 静电场辅助冻结对水饺皮品质的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(9): 148–154.
- WANG K X, DING J T, LIU X L, et al. Effect of electrostatic storage assisted freezing on the quality of dumpling wrappers[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(9): 148–154.
- [19] YAN W, SLAB C, XY D, et al. Effect of germination on nutritional properties and quality attributes of glutinous rice flour and dumplings[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 108(5): 104440.
- [20] 雷萌萌, 赵蒙姣, 艾志录, 等. 冻藏条件对速冻黑芝麻汤圆品质的影响及预测模型构建[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(7): 241–250.
- LEI M M, ZHAO M J, AI Z L, et al. Quality changes and establishment of quality loss rate prediction model of quick-frozen black sesame tang-yuan at frozen conditions[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(7): 241–250.
- [21] 王艳. 亲水胶体对汤圆品质的影响规律及其相互作用机制研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022.
- WANG Y. Effect of hydrocolloids on the quality properties of glutinous dumpling and their interaction mechanism[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2022.
- [22] 周显青, 胡育铭, 张玉荣, 等. 汤圆粉团制作方法比较及其对蒸煮品质的影响[J]. *粮食与饲料工业*, 2014(4): 30–33, 7.
- ZHOU X Q, HU Y M, ZHANG Y R, et al. Comparison of sweet dumplings dough production methods and its effect on cooking quality[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2014(4): 30–33, 7.
- [23] 李佳, 吴娜娜, 谭斌, 等. 速冻及冷冻储藏对糯米制品水分变化及品质影响研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(3): 196–202.
- LI J, WU N N, TAN B, et al. Research progress on effects of quick freezing and frozen storage on moisture change and quality of waxy rice products[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(3): 196–202.
- [24] 郝宗围, 余振宇, 胡尧, 等. 冷冻球磨处理对糯米淀粉结构、特性及消化性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(11): 39–47.
- HAO Z W, YU Z Y, HU Y, et al. Effects of freezing ball milling treatment on the structure, properties and digestibility of waxy ricestarch [J]. *Food Science*, 2023, 44(11): 39–47.
- [25] KE X, CC D, ZSAB C, et al. Understanding how starch constituent in frozen dough following freezing–thawing treatment affected quality of steamed bread [J]. *Food Chemistry*, 2021, 366(1): 130614.
- [26] MEI L A, HAO M A, YING L B, et al. Effect of multiple freezing/thawing cycles on the physicochemical properties and structural characteristics of starch from wheat flours with different gluten strength [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 194(1): 619–625.
- [27] 钱晓洁. 冻藏对馒头品质的影响及机理研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020.
- QIAN X J. Research on the effect of frozen storage on the quality of steamed bread and its mechanism [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020.
- [28] 陈丽, 张影全, 魏益民, 等. 冻藏对非发酵面团水分状态及冰晶形态的影响[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(2): 77–87.
- CHEN L, ZHANG Y Q, WEI Y M, et al. Effects of frozen storage on water state and ice crystal form of non-fermented dough[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(2): 77–87.
- [29] XIA L, CHEN C, JY A, et al. Mechanistic studies of starch retrogradation and its effects on starch gel properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 120(11): 106914.
- [30] CHENG L, SUN D W, ZHU Z, et al. Emerging techniques for assisting and accelerating food freezing processes: A review of recent research progresses[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2017, 57(4): 769–781.

Effect of Magnetic Field Assisted Freezing on the Quality of Glutinous Rice Balls

Pan Zhili^{1,2,3}, Shen Jiajin¹, Lei Mengmeng^{1,2}, Ai Zhilu^{1,2,3}, Yang Lianzhi⁴, Huang Zhongmin^{1,2,3*}

(¹College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002

²National Research and Development Center of Quick Frozen Rice Products Processing Technology, Zhengzhou 450002

³Henan Provincial Cold Chain Food Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450002

⁴Henan Jingdu Smile Food Co., Ltd., Xinxiang 453000, Henan)

Abstract Objective: in order to explore the effect of magnetic field assisted freezing on the quality of glutinous rice balls, to develop a new type of auxiliary freezing method for rice flour products, and to study the effect of auxiliary freezing on the quality of glutinous rice balls under different magnetic field intensities. Methods: the method of plate freezing and magnetic field assisted freezing was used in this study. The freezing rate, water loss rate, chromaticity, texture characteristics, gelatinization characteristics, freezing water content and water binding state of Tangyuan powder were measured to reveal the influence of magnetic field assisted freezing on its quality change. The results showed that compared with the control group, there were significant differences in the freezing rate, water loss rate, chromaticity, texture characteristics, gelatinization characteristics and freezing water content of Tangyuan powder after magnetic field assisted freezing ($P<0.05$). It was found that the freezing rate of Tangyuan powder frozen by magnetic field was accelerated at 24 Gs, and the time of entering the maximum ice crystal formation zone was advanced by 4 min, making the ice crystal volume smaller; The water loss rate decreased by 37.57%, the brightness increased by 3.63%, the transmittance increased by 14.92% and the hardness decreased by 11.74%. From the water binding state, the frozen water content of Tangyuan powder was significantly lower than that of the control group, and decreased by 11.64% at 24 Gs; However, after the magnetic field assisted freezing, the peak viscosity of the dumplings increased by 7.81% and the retrogradation value increased by 3.93%; There was no significant difference in water binding state. Conclusion: when the magnetic field strength is 24 Gs, the frozen quality of Tangyuan powder is the best, which can obviously improve the quality indexes of Tangyuan powder, such as water loss rate, chroma, hardness and frozen water content, and provide a theoretical reference for the development of magnetic field assisted freezing on rice flour products in the future.

Keywords magnetic field; glutinous rice balls; water binding state; quality change