

橡子粉对速冻馒头面团加工特性及品质的影响

曹蒙, 付文军, 黄卉卉, 李佳, 周枫, 李建芳*
(信阳农林学院食品科学与工程学院, 河南信阳 464000)

摘要: 为了改善对速冻馒头的食用品质, 该研究将不同质量分数(0%、4%、8%、12%、16%、20%)橡子粉代替面粉制备橡子馒头, 对橡子面团的糊化特性、流变学特性、水分分布和馒头的白度、比容、质构和感官特性进行分析, 并探究不同速冻温度(-25、-29、-33、-37、-41℃)对橡子馒头的比容、持水率、失水率、水分含量和水分分布的影响。结果表明: 橡子粉质量分数为8%时, 混合面团的峰值黏度最低1 884 Pa, 回生值为1 214 Pa, T22值为174.735 ms; 馒头感官评分最高为88分, 比容为2.40 mL·g⁻¹, 白度值为55.05, 弹性为3.82 mm、硬度为27.6 N。在-33℃速冻下, 质量分数8%橡子馒头的T23为335.16, 总峰面积为5 315.92, 均显著高于其他试验组。在-29℃速冻时, 比容为2.207 mL·g⁻¹, pH值为6.913, 水分含量为39.31%, 持水率为5.20%, 比普通速冻馒头相比提高0.09 L·g⁻¹、0.21、降低了0.04%、0.11%。因此, 质量分数8%的橡子馒头在-29~-33℃条件下速冻, 可以很好的保持橡子馒头品质。该研究为橡子粉在冷冻馒头加工中品质提升方面的应用奠定了理论基础。

关键词: 橡子粉; 馒头; 速冻; 糊化特性; 水分迁移

文章编号: 1673-9078(2026)5-257-267

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.5.0119

Effects of Acorn Flour on the Processing Properties and Quality of Quick-frozen Steamed Bun Dough

CAO Meng, FU Wenjun, HUANG Huihui, LI Jia, ZHOU Feng, LI Jianfang*

(Faculty of Food Science and Engineering, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, China)

Abstract: The improvement of the quality of quick-frozen steamed buns was investigated by partially substituting wheat flour with different proportions of acorn flour (0%, 4%, 8%, 12%, 16%, 20%). The gelatinization properties, rheological properties, and water distribution of acorn dough were analyzed, along with the whiteness, specific volume, texture, and sensory characteristics of the resulting steamed buns. In addition, the effects of different quick-freezing temperatures (-25℃, -29℃, -33℃, -37℃, -41℃) on specific volume, water retention, water loss, moisture content, and water distribution were evaluated. The results showed that when the mass fraction of acorn flour was 8%, the composite dough showed a minimum peak viscosity of 1,884 Pa, a setback value of 1 214 Pa, and a T22 relaxation time of 174.735 ms. Under these conditions, the steamed buns achieved the highest sensory score (88 points), a specific volume of 2.40 mL·g⁻¹, a whiteness value of 55.05, an elasticity of 3.82 mm, and a hardness of 27.6 N. When quick-frozen at -33℃, the T23 relaxation time of steamed buns containing 8% acorn flour was 335.16 ms, and the total peak area reached 5 315.92, both of which were significantly higher than those of the other experimental groups. When quick-

引文格式:

曹蒙,付文军,黄卉卉,等.橡子粉对速冻馒头面团加工特性及品质的影响[J].现代食品科技,2026,42(5):257-267.

CAO Meng, FU Wenjun, HUANG Huihui, et al. Effects of acorn flour on the processing properties and quality of quick-frozen steamed bun dough [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(5): 257-267.

收稿日期: 2025-01-24; 修回日期: 2025-04-09; 接受日期: 2025-04-15

基金项目: 河南省科技攻关项目(252102110108); 河南省高等学校重点科研项目(22B550015); 河南省教育厅项目(25B550012); 信阳农林学院青年基金项目(QN2023030)

作者简介: 曹蒙(1994-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 粮食深加工及转化, E-mail: caom8977@163.com

通讯作者: 李建芳(1979-), 女, 硕士, 教授, 研究方向: 食品微生物与生物保鲜, E-mail: ljf002@163.com

frozen at $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$, the specific volume was $2.207\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, the pH value was 6.913, the moisture content was 39.31%, and the water retention was 5.20%. These values were 0.09 $\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$, 0.21, 0.04%, and 0.11% higher, respectively, than those of conventional quick-frozen steamed buns. Overall, the quality of steamed buns containing 8% acorn flour was well maintained when quick-frozen at temperatures between $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$. This study provides a theoretical basis for improving the quality of quick-frozen steamed buns through the incorporation of acorn flour.

Key words: acorn flour; steamed bun; quick-freezing; gelatinization properties; water migration

信阳大别山地区盛产橡子,因形似蚕茧,又称栗茧,外表硬壳,棕红色,内仁如花生仁,含有 60% 左右的淀粉,5%~10% 的膳食纤维,还含有 7% 左右的蛋白质、2%~5% 的脂肪及多种生物活性物质及各类微量元素^[1,2]。由于其营养价值较高,可保护人体的身心健康,提高人体的免疫力和儿童的智力和发育水平,可以制作出美食,也有药用价值^[3]。橡子粉经过加工后可作为日常食品食用,已经制作成橡子挂面、粉丝、豆腐等,是一项具有较高利用价值的野生植物资源^[4]。馒头是中国历史悠久的主食,制作简单、食用方便、经济实惠^[5]。随着社会的发展和生活水平的不断提高,精细加工的馒头口感好但缺乏营养,已经无法满足消费者对馒头品质和营养价值的要求。Wu 等^[6]研究表明,在馒头中加入质量分数 20% 的青稞粉,能明显增加多酚和黄酮类物质的含量,并使馒头的体外淀粉消化率降低。张贞炜等^[7]研究发现,添加 2% 的竹笋粉制作出的馒头综合品质较好,馒头的硬度适中,不会影响馒头面团结构。

冷冻馒头技术可以有效克服新鲜馒头货架期短,馒头贮存于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下可有效保持馒头的质感,能够将馒头中的部分水分冻结,降低水分活度,同时能够抑制微生物的生长以及各种导致馒头变质的生物化学反应的发生^[8]。Zhao 等^[9]对不同贮藏温度下馒头品质的影响进行了研究,结果表明:馒头在冻藏过程中会出现水分损耗、pH 值下降,淀粉老化等品质劣变,而 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温降低了馒头品质劣变。速冻技术可以很好地解决生鲜馒头的保质期短,不支持远距离的运输问题,但目前,市场上冷冻馒头品种单一,国内外研究学者都集中探究速冻面团,对速冻杂粮馒头的探究涉及较少。

为此,本研究以信阳本地橡子为原料,并以不含橡子粉的面团作为对照组,通过探究橡子粉质量分数对面团和馒头的糊化特性、流变学特性、水分分布和馒头品质的影响,并将制好的馒头在 -25 、 -29 、 -33 、 -37 、 $-41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行速冻,全面评估其食用品质,为橡子粉速冻馒头的工业化发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

小麦粉,金沙河集团食品有限公司;白砂糖,购于信阳农林学院好又多超市;野生橡子粉(淀粉 65%、蛋白质 8%、脂肪 2%、水分 70%、钠 1%),购于河南信阳;耐高糖高活性干酵母,安琪酵母股份有限公司;百钻无铝害双效泡打粉,安琪酵母股份有限公司。

1.2 仪器与设备

ZF01L46-8 荣事达电汽两用蒸饭柜,山东省电器有限公司;H-3C 雷磁计,上海仪电科学仪器股份有限公司;BT457 电子天平,深圳市博途电子科技有限公司;HH3030MMULVR 发酵箱,上海跃纳实业有限公司;GW-2016H 离心机,上海山连实验设备有限公司;G-080S 干燥箱,深圳市歌能清洗设备有限公司;100 目标准筛,绍兴市上虞区华丰五金仪器有限公司;TYF-30ED 质构仪,北京盈盛恒泰科技有限公司;BX-08 超低温速冻冰箱,上海江凯机械有限公司;NMI20-040V-1 核磁共振成像分析仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;CR8 色差仪,上海山连实验设备有限公司;Tec Master 快速黏度分析仪,澳大利亚新港科学仪器有限公司;UNI-T 热电偶,优利德科技(中国)股份有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 橡子馒头的制作

以面粉质量(100%)为基数,准确称取质量分数为 0%、4%、8%、12%、16%、20% 的橡子粉、质量分数 10% 白砂糖、质量分数 1% 酵母,质量分数 1% 泡打粉,质量分数 60% 水。

橡子面团的制备:先用蒸馏水($38\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 mL)将酵母和白糖活化 10 min,面粉、泡打粉放入和面机中,先低速均匀搅拌,再缓慢均匀地加纯净水搅拌 3 min,再用高速搅拌 4 min,将面粉成团,静置 10 min 后揉

成光滑面团；将面团分成 30 g，保鲜膜密封，置于恒温培养箱在 37 ℃醒发 30 min。

橡子馒头的制备：将面团放入蒸箱蒸 20 min，冷却 5 min 后取出馒头；将蒸好的馒头放在常温下，放入自封袋中密封，分别放入 -25、-29、-33、-37 和 -41 ℃进行速冻至馒头中心温度为 -18 ℃后；将馒头在室温解冻 2 h 后进行指标测定^[10]。

1.3.2 糊化特性测定

将橡子粉和面粉按照一定比例混合，精确称重 3.0 g 后，将其装入 RVA 铝盒中，准确地加 25 mL 的蒸馏水，置于快速黏度测定仪上进行面团峰值黏度、最低黏度、衰减值、最终黏度、回升值、糊化温度^[11]。

1.3.3 流变学特性测定

取橡子面团 2 g，放置于旋转流变仪帕尔贴平板上，静置 5 min，进行流变特性测定。实验采用平板夹具，直径为 25 mm，温度为 25 ℃，频率扫描范围为 0.1~80 Hz，剪切应变幅值为 1%。每组样品重复测定 3 次^[12]。

1.3.4 水分迁移的测定

将橡子面团或速冻的橡子馒头切成 20 mm×20 mm×40 mm 大小，放置 18 mm 的核磁共振管内，然后用探头密封。在 32 ℃的条件下，测定其横向弛豫时间。参数设置如下：检测样品点数 TD=80 010，采样点数回波个数 NECH 为 2 000，样品检测隔时间 TW=4 000 ms；重复次数 NS=64。每种橡子面团平行测定三次取平均值^[13]。

1.3.5 馒头速冻曲线测定

将馒头装入自封袋内，在馒头中间插入热电偶探针，然后在 -25、-29、-33、-37 和 -41 ℃下速冻至 -18 ℃，每间隔 1 min 测量一次，记录中心温度并绘制成速冻曲线。

1.3.6 质构的测定

将橡馒头放于质构仪的载物台上，75% 的压缩比，0.8 mm·s⁻¹ 的测试速度，5 g 的触发力，压缩的时间间隔为 2 s。测定馒头的硬度、弹性、胶黏性、内聚性、咀嚼性，每次测五次，取平均值^[14]。

1.3.7 比容的测定

将小米倒满量筒并且用筷子把多余的小米排出，使小米与量筒成为一个平面，将量筒里面的小米倒入烧杯的一小半，把橡子馒头放入烧杯中继续把量筒里的小米倒入烧杯中，并且要求小米与烧杯成为一个平面，读取量筒的质量，做三组平行实验。用电子秤称取馒头的质量，保留一位小数^[15]。

$$S = \frac{V}{m} \quad (1)$$

式中：

S ——比容；

V ——体积，mL；

m ——质量，g。

1.3.8 pH值测定

选取 10 g 馒头瓤作为样品置于烧杯内，加入 100 g 纯净水充分摇晃 5 min 后，静置 10 min，采用 pH 计测定其 pH 值^[16]。

1.3.9 持水力的测定

取 10 g 馒头瓤加入纯净水中，浸泡 40 min，4 500 μg·g⁻¹ 离心 10 min，测定沉淀物中的含水量^[17]。计算按照如下公式计算：

$$WHC = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

WHC ——持水力，%；

m_0 ——样品质量，g；

m_1 ——离心管的质量，g；

m_2 ——离心后离心管的质量。

1.3.10 失水率的测定

分别称量冷冻前的面团质量和冻藏后面团的质量，对面团的失水率进行计算。

$$WL = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

WL ——馒头失水率，%；

m_0 ——馒头速冻前质量，g；

m_1 ——馒头速冻后的质量，g。

1.3.11 水分含量的测定

称取 2 g 馒头，在 105 ℃下烘 4 h，放入干燥器内冷却。在 105 ℃再次干燥 1 h 左右，将其取出，冷却 0.5 h，称量。重复两次上述步骤，即为恒重。水分含量计算公式如下：

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

X ——水分的含量，%；

m_1 ——称量瓶和式样的质量，g；

m_2 ——称量瓶和式样烘烤后的质量，g；

m_3 ——称量瓶的质量，g。

1.3.12 色泽的测定

将蒸熟的馒头放在室温下，切成 5 cm 的厚片，选择不同部位进行色泽测定，计算馒头白度 (W)。

$$W = 100 - [(100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2}。$$

1.3.13 感官评定

选取 10 位本专业学生从外观状态、内部结构、弹性、色泽和食味等五个方面对橡子馒头进行综合评价^[18]，取三次平均值，评分标准见表 1。

表 1 橡子馒头的感官评分标准

Table 1 Sensory scoring criteria for acorn steamed bread		
项目	评分标准	评分
外观状态（20 分）	表面光滑，有球感	13~20
	皱缩、塌陷、有气泡	7~13
	大块烫斑、扁平不对称	1~7
内部结构（20 分）	气孔细小而均匀	13~20
	气孔过密不均匀	7~13
	气孔大、结构粗糙	1~7
弹性（20 分）	回弹快、能复原、可压缩	13~20
	手指按压回弹弱或不回弹	7~13
	手指按压困难，较硬	1~7
色泽（20 分）	表面自然色	13~20
	颜色适中	7~13
	发暗或过浅	1~7
食味（20 分）	具有橡子的香味，无异味	13~20
	味道平淡，无异味	7~13
	有异味	1~7

1.4 数据统计分析

每组试验 3 次重复，结果取平均值 ± 标准偏差。使用 Excel 2019、SPSS 软件进行数据处理以及显著性分析， $P<0.05$ 为差异显著，采用 Origin 9 软件进行数据处理和作图。

2 结果与讨论

2.1 橡子粉质量分数对面团糊化特性的影响

淀粉的糊化特性与面制品品质密切相关，在加热过程中，淀粉会吸收水分，同时会有直链淀粉析出，最后形成糊状物质^[19]。由表 2 可知，随着橡子粉质量分数的增加，混合粉的峰值黏度呈先上升后下降趋势，差异不显著 ($P>0.05$)。当橡子粉质量分数在 0%~12% 之间，峰值黏度无明显变化，当添加质量分数为 8% 时，峰值黏度最低为 1 844 Pa，当添加质量分数超过 16% 时，峰值黏度最高为 2 041 Pa，这是由于橡子中含有大量的淀粉，质量分数越大增加了混合粉中的淀粉含量，淀粉的颗粒吸水膨胀，导致在加热过程中混合粉易于糊化，峰值黏度增高，同时，混合粉中的蛋白质可延缓淀粉颗粒破裂，延长糊化时间，从而提升峰值粘度。混合粉的衰减值随着橡子粉质量分数的增加由 519 Pa 增大到 692 Pa，表明橡子粉的质量分数添加使混合粉淀粉颗粒强度减小、热糊稳定性下降。随着橡子粉质量分数质量分数增大，回升值从 1 172 Pa 升高至 1 386 Pa，差异显著 ($P<0.05$)。随着橡子粉质量分数的增加会使混合粉的冷糊稳定性逐渐减小，回升值增大，加速淀粉老化。随着淀粉含量的增加，糊化粉中淀粉分子重新排列能力增大，这是由于面粉中非淀粉组分的减少所致。非淀粉成分可以通过淀粉分子的竞争吸附，阻止其发生交联重组，进而延缓淀粉老化^[20]。

表 2 橡子粉质量分数对面团糊化特性的影响

Table 2 Effect of acorn powder mass fraction on gelatinization characteristics of dough						
橡子粉质量分数/%	峰值黏度/Pa	谷值黏度/Pa	衰减值/Pa	最终黏度/Pa	回升值/Pa	糊化温度/℃
0	1 977.21 ± 2.61 ^b	1 458.23 ± 2.65 ^a	519.12 ± 2.61 ^c	2 530.54 ± 3.12 ^c	1 172.43 ± 2.75 ^c	89.65 ± 2.45 ^a
4	1 921.53 ± 2.73 ^b	1 307.45 ± 2.64 ^b	614.19 ± 2.46 ^b	2 551.14 ± 2.95 ^b	1 244.72 ± 2.63 ^b	83.1 ± 2.57 ^b
8	1 884.09 ± 2.44 ^c	1 343.41 ± 2.41 ^b	541.62 ± 2.69 ^c	2 557.84 ± 2.09 ^b	1 214.49 ± 2.66 ^b	83.95 ± 2.72 ^b
12	1 971.12 ± 2.63 ^b	1 325.19 ± 2.34 ^b	646.38 ± 2.37 ^b	2 613.69 ± 3.01 ^b	1 288.62 ± 2.65 ^b	82.30 ± 2.41 ^c
16	2 041.32 ± 2.74 ^a	1 326.25 ± 2.71 ^b	715.51 ± 2.62 ^a	2 698.39 ± 1.98 ^a	1 372.45 ± 2.63 ^{ab}	82.35 ± 2.62 ^b
20	1 990.71 ± 2.70 ^{ab}	1 298.31 ± 2.83 ^c	692.37 ± 2.74 ^b	2 684.34 ± 2.65 ^{ab}	1 386.29 ± 2.58 ^a	81.40 ± 2.56 ^d

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P<0.05$)，下同。

表 3 橡子粉添加量对面团水分迁移的影响

Table 3 Effect of acorn powder addition on water migration in dough					
橡子粉添加量/%	T21/ms	T22/ms	A21/%	A22/%	总峰面积
0	14.175 ± 1.022 ^a	151.991 ± 0.783 ^b	99.307 ± 0.632 ^{ab}	0.693 ± 0.823 ^b	1 028.977 ± 2.354 ^a
4	14.175 ± 0.655 ^a	200.923 ± 1.235 ^a	99.645 ± 12.548 ^a	0.335 ± 1.542 ^d	1 050.878 ± 1.095 ^{ab}
8	12.328 ± 0.579 ^b	174.753 ± 0.683 ^b	99.453 ± 1.523 ^{ab}	0.547 ± 0.309 ^c	1 078.085 ± 2.135 ^a
12	14.175 ± 0.265 ^b	174.753 ± 0.954 ^c	99.651 ± 0.397 ^{ab}	0.349 ± 0.407 ^b	1 071.832 ± 3.123 ^b
16	12.328 ± 0.741 ^b	114.976 ± 0.850 ^d	98.819 ± 0.638 ^b	1.181 ± 0.981 ^{ab}	1 048.369 ± 2.147 ^{ab}
20	9.326 ± 0.328 ^c	100.000 ± 0.386 ^d	98.438 ± 0.401 ^b	1.562 ± 0.649 ^a	1 014.175 ± 3.002 ^c

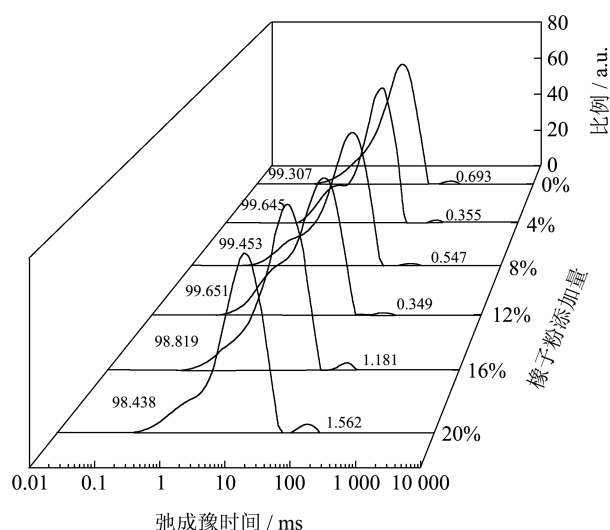


图 1 橡子粉质量分数对面团水分分布的影响

Fig.1 Effect of acorn powder mass fraction on water distribution in dough

2.2 橡子粉质量分数对面团水分迁移的影响

由图 1 和表 3 可知,面团中 T21 为多深层结合水,能够与面筋蛋白紧密结合;T22 代表一种在深结合水与游离水之间的流动的保留水^[21]。橡子粉加入致使混合面团的水分重新分布,总峰面积呈下降趋势,混合面团的吸水性下降,部分结合水更加牢固。随着橡子粉质量分数增加,T21 呈减小趋势,当质量分数在 0%~16% 时,面团的深结合水逐渐降低,当橡子粉质量分数达到 20% 时,深结合水最低仅为 9.326 ms,说明面团中结合水结合更牢固。当橡子粉质量分数在 0%~8% 时,面团中的横向弛豫时间 T22 值增加,表明此时面团的半结合水流动性增加,水分进行重新分布,当质量分数超过 8% 时,T22 值减小,T22 降低说明不易流动水结合牢固了。当橡子粉质量分数为 8% 时与空白对照的 T22 值相同为 174.753 ms,说明添加橡子粉后的自由水和中弱结合水的结合能力增大。主要是由于橡子粉中含的蛋白质和淀粉与面粉中的蛋白质和淀粉竞争水分,从而影响面团的水分吸收,导致面团更难吸水,这与汪磊^[22]研究结果相似。

2.3 橡子粉质量分数对面团流变学特性的影响

不同质量分数的橡子粉面团的 G' 均高于 G'' , $\tan\delta$ 都小于 1,表明面团是一种非流动性的,它是一种以弹性为主的假塑性流体特征,具有固态特性^[23]。由图 2 可以看出,随着角频率的增加, G' 与 G'' 也表现增加的趋势,这显示橡子面团具有典型的黏弹特性。随着橡子粉质量分数增加,均能使 G' 和 G'' 升高,当

橡子粉质量分数为 20% 时,面团的整体弹性和黏性均为最高,空白馒头的黏弹性最低,这可能是由于橡子粉的加入改善了面团的持水性,同时橡子粉中所含的蛋白质与膳食纤维争夺吸收水分,增加了面团粘弹性。在相同频率下,面团的 $\tan\delta$ 随橡子粉质量分数增大而减小,说明橡子粉质量分数添加后面团仍然是固态的。已有研究发现,面团的黏弹性能差,饼干烘烤中容易断裂,面团黏性高,会使饼干的形态收缩,使饼干酥脆度不佳^[24]。当橡子粉质量分数为 12% 时,弹性为 26 784 Pa,黏度为 12 319 Pa,能够很好地改善面筋蛋白的流变特性,面团的黏弹性适中,研究结果与申茹晓等^[25]研究结果相似。

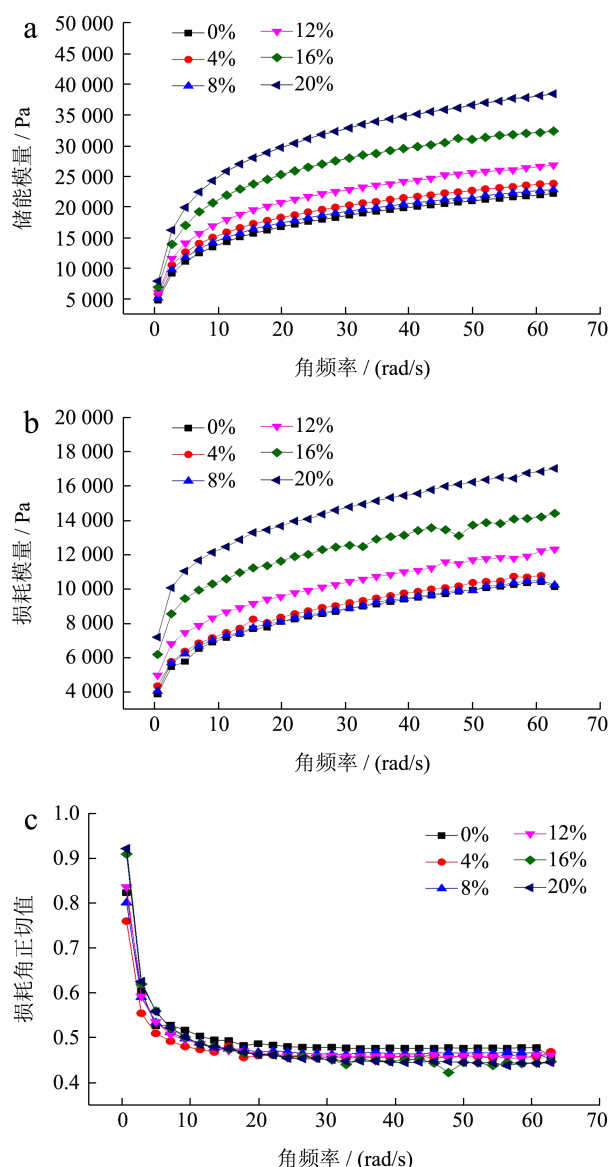


图 2 橡子粉质量分数对面团动态流变特性的影响

Fig.2 Effect of mass fraction of acorn powder on dynamic rheological properties of dough

2.4 橡子粉质量分数对馒头品质的影响

由图3可知,随着橡子粉质量分数的增加,馒头感官评分呈先上升后下降的趋势,橡子粉质量分数为0%~8%时,感官评分整体呈上升趋势,当质量分数为8%时,感官评分最高为88分,当橡子粉质量分数继续增加,感官评分显著下降($P<0.05$),当橡子粉质量分数为20%时,感官评分仅为70分。这主要是首先橡子粉中含有鞣酸,添加量过多会使馒头出现涩感;其次,橡子粉中淀粉较高,面筋蛋白较少,加入面粉中后会使面筋蛋白含量逐步降低,从而使馒头生坯没有足够面筋网络结构支撑,降低了馒头的品质;最后橡子粉添加量过高,面团糊化温度降低,导致馒头芯出现硬芯,吸水能力下降,使制得馒头组织太密,口感较硬。

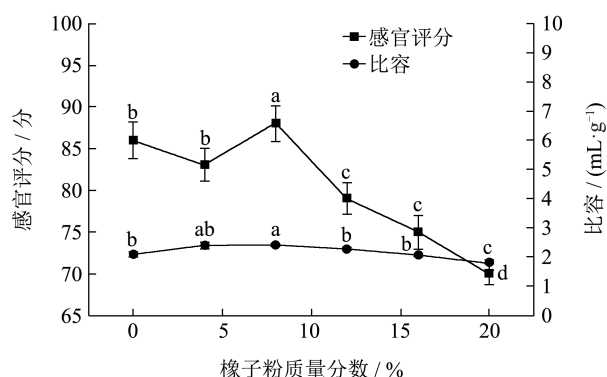


图3 不同橡子粉质量分数对馒头感官评价和比容的影响

Fig.3 Effects of different acorn meal supplemental levels on sensory evaluation and specific volume of steamed buns

注: 图中不同的小写字母表示差异显著($P<0.05$), 相同的小写字母表示差异不显著($P>0.05$), 下同。

馒头的比容范围为 $1.81\sim 2.40\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,符合国家标准要求^[26]。随着橡子粉质量分数的增加,馒头的比容呈先升高后降低的趋势,未添加橡子粉的馒头内部空洞较大,形成了均匀致密的微观结构,比容为 $2.08\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 。当橡子粉质量分数为8%时,馒头的比容最大为 $2.40\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,由于橡子粉中含有的淀粉增加了混合面团的淀粉含量,使馒头能够进一步锁住水分,更好地形成面筋结构,馒头气孔更加均匀、蓬松。当质量分数超过8%时,比容逐渐下降,这是由于橡子粉破坏了面筋网络,影响了面筋的弹性和膨胀度,导致橡子馒头的比容急速下降。

2.5 橡子粉质量分数对馒头色度品质的影响

色泽是影响人们对馒头选择的重要因素,其中白度值越大馒头样品的颜色更加亮白。通过图4可知,随着橡子粉添加量增加,馒头的白度值呈下降趋势,

差异显著($P<0.05$)。当橡子粉添加量为4%时,馒头的白度值为61.79,当橡子粉添加量为20%时,馒头的白度值为43.88,白度值与亮度值变化趋势一致。 a^* 和 b^* 随着橡子粉添加量的增加,呈增大趋势,这是由于橡子粉中含有较高的类胡萝卜素和多酚类物质,随着添加量的增加导致 a^* 和 b^* 值增大。因此,随着橡子粉质量分数过大,橡子馒头颜色变暗,颜色偏黄褐色,橡子粉质量分数越多,对馒头的色泽影响越大。综合分析可知,橡子粉质量分数在4%~8%时馒头的外观更容易被消费者所接受。

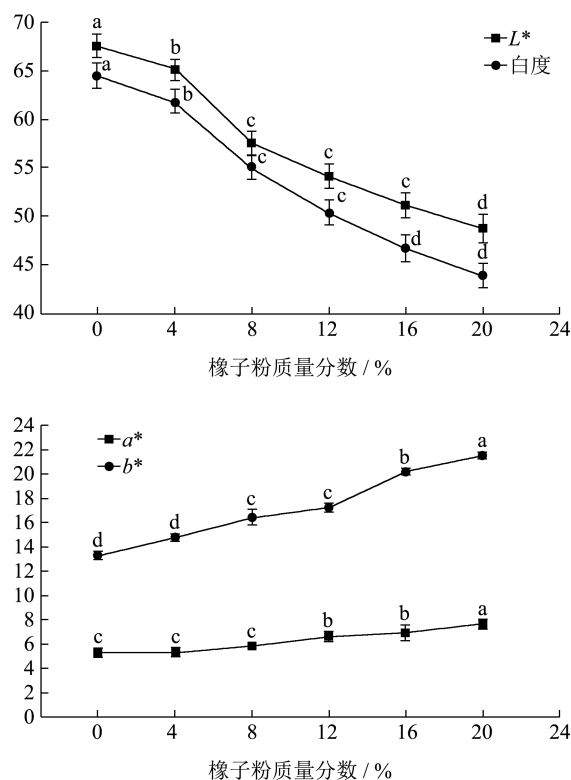


图4 不同橡子粉质量分数对馒头色泽的影响

Fig.4 Effects of different acorn meal additions on the color of steamed buns

2.6 橡子粉对馒头质构特性的影响

由图5的质构表明,橡子粉对馒头的硬度、咀嚼性、弹性、胶黏性及内聚性均有明显的影响($P<0.05$)。随着橡子粉质量分数的增加,馒头的硬度、咀嚼性和胶粘性均有明显的提高,且其硬度及咀嚼性之间存在极强的相关性,这主要是因为橡子粉添加后减少了面筋蛋白的含量,导致蓬松度降低。当橡子粉质量分数为0%时,馒头硬度、咀嚼性较低,橡子粉质量分数为20%时,馒头的硬度、咀嚼性和胶黏性最高。馒头的硬度随着橡子粉的质量分数明显增加,这可能是橡子中的淀粉糊化不充分或淀粉在糊化后发生逆转变导致硬度增加。橡子粉的质量分数使馒头的

弹性呈先上升后下降的趋势,内聚性无明显差异。橡子粉的质量分数会影响到馒头的质构性能,橡子粉添加量为8%时,能够提高馒头的品质,但是添加过多,会导致馒头品质严重下降。

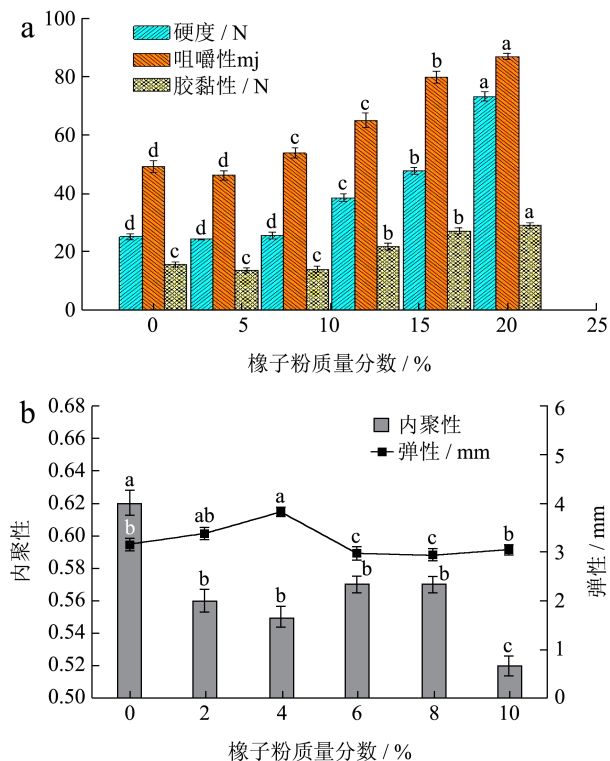


图5 不同橡子粉质量分数对馒头质构特性的影响

Fig.5 Effects of different acorn meal supplemental levels on the texture characteristics of steamed buns

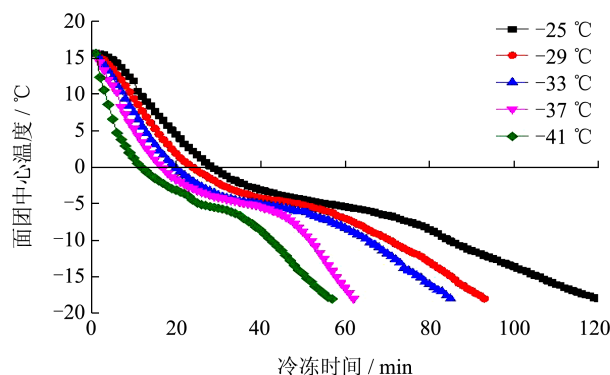


图6 速冻温度的冻结时间对面团中心温度的变化

Fig.6 The freezing temperature is the change of the freezing time to the dough center temperature

2.7 馒头速冻曲线测定的变化

速冻是使食品快速冷冻的一种方法,主要是为了保持食品的口感和新鲜度。它是将食品通过降低温度来抑制冰晶的形成。第一阶段冷却,第二阶段冰晶形成,

中心温度变化较为缓慢,水在结晶的过程中释放热能,使曲线较为平缓。第三阶段冻结完成阶段,曲线陡度跟冷却阶段相似。从图6可以看出馒头在-25、-29 °C速冻曲线趋势相似,当速冻在第一阶段时,由于速冻温度低使冻结曲线较为陡峭,但当到第三阶段时由于速冻温度较高,导致冻结曲线较为平缓,但-25 °C的平缓程度远远高于其他冷冻温度。而-29、-33 °C速冻曲线在第三阶段冻结速率相似,-37、-41 °C速冻曲线在第三阶段速冻曲线下降较快,当速冻温度在-41 °C时速冻曲线下降最快。过低的速冻温度可能导致面制品中的水分结冰,从而破坏组织结构,使面制品品质下降,速冻温度越低,面制品中水分结冰的速度越快,形成冰晶越小。

2.8 速冻温度对橡子馒头水分迁移的变化

由图7可知,不同温度橡子粉质量分数的馒头对结合水弛豫时间(T21)无显著影响。在-25 °C速冻温度下,随着橡子粉质量分数的增大,质量分数为0%的馒头的弛豫时间(T22)和游离水弛豫时间(T23)最长,说明普通馒头的中弱结合水和自由水的氢质子数量高于其他橡子馒头。随着橡子粉质量分数的增加,速冻橡子馒头中深结合水相对含量降低,弱结合水含量呈上升趋势,自由水相对含量呈不规则变化,当橡子粉质量分数为12%时,总峰面积为6 227.52,显著高于其他质量分数,橡子馒头品质最佳。在-29 °C速冻下,橡子粉质量分数的增加,自由水呈先上升后下降的趋势,4%质量分数橡子馒头总峰面积最高为4 346.64。在-33 °C速冻下,质量分数为8%橡子馒头的T23为335.16,总峰面积为5 315.92,均显著高于其他试验组。在-37和-41 °C速冻条件下,质量分数为8%橡子馒头的峰值面积分别为5 889.65、5 132.54,自由水含量呈显著下降趋势。当橡子粉质量分数在8%时,不同速冻温度的橡子馒头水分呈现不同变化趋势,速冻温度为-37 °C时,T23弛豫时间最大,说明-37 °C时橡子馒头中的弱结合水和游离水中氢质子迁移的程度在降低。在冻结期间,冰晶的生成可能会引起蛋白质的变性,从而使面筋网络中较疏水性的部分显露出来,从而降低了水分吸收性能^[27]。通过分析不同组分中水分子的变化,得到了冷冻馒头中水的迁移规律。A22峰面积占总峰面积80%左右,A21占总峰面积10%左右,说明馒头中的水分以弱结合水和结合水为主,自由水含量较少。

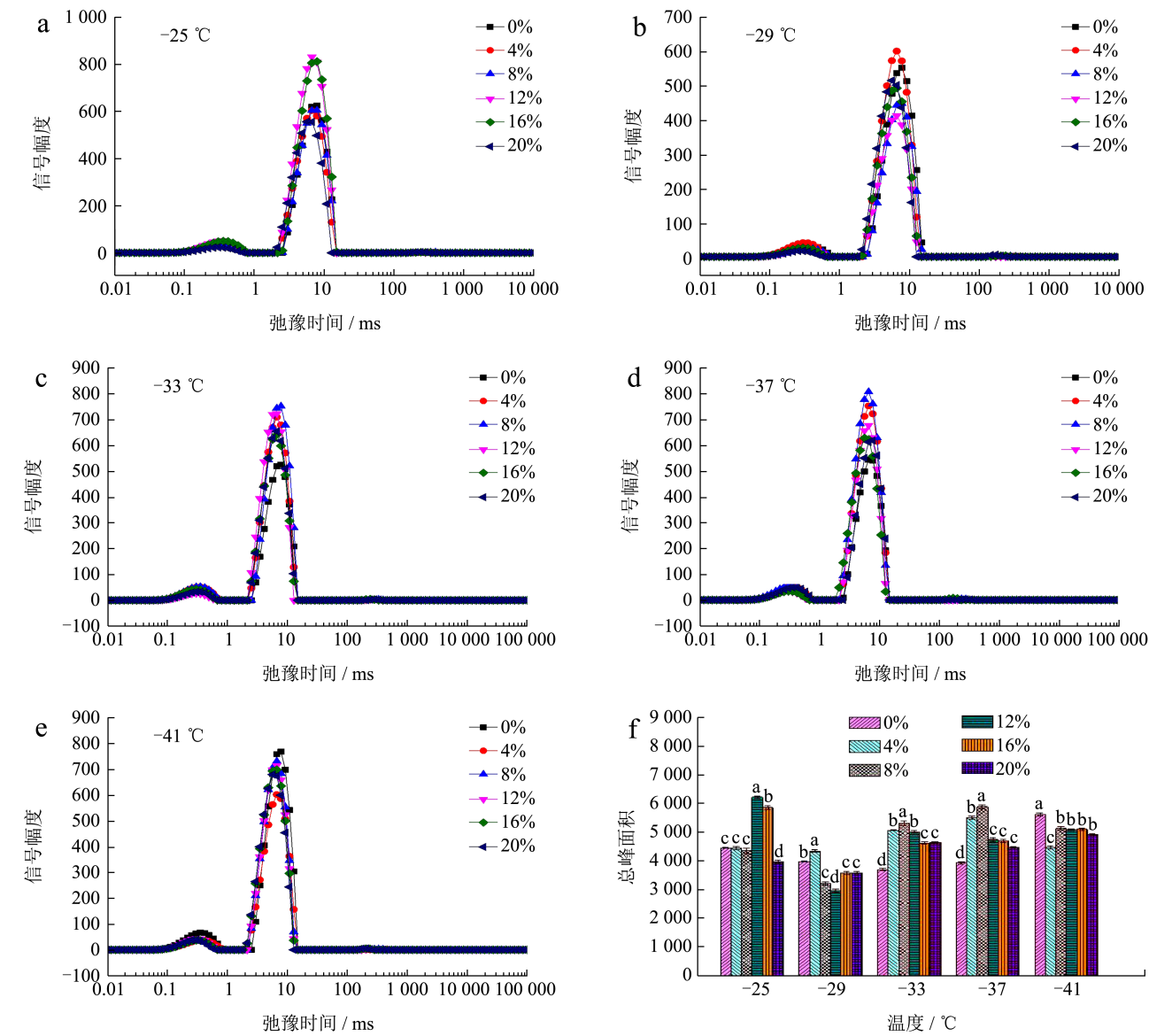


图 7 速冻温度对橡子馒头水分迁移的变化

Fig.7 Changes of quick-freezing temperature on water migration of acorn steamed bun

2.9 速冻温度对橡子馒头的比容影响

在图 8 中发现，不同质量分数的橡子粉对速冻馒头比容差异显著 ($P<0.05$)，质量分数 8% 橡子馒头在 $-41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 速冻时比容最高为 $2.33\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ，质量分数 20% 的橡子馒头在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 速冻时馒头比容最低为 $1.44\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 。当温度为 $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，质量分数 4% 橡子馒头比容最高，为 $2.28\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ，当质量分数超过 8% 时，馒头比容整体降低，差异显著 ($P<0.05$)。橡子粉的加入会导致面粉中蛋白质含量下降，同时会影响馒头的网络结构，从而导致面团在冷藏过程中容易被破坏。在速冻馒头中加入橡子粉，会降低馒头的饱满度，在速冻保藏时对面筋蛋白网络结构影响较大，因此橡子馒头的比容影响较小^[28]。

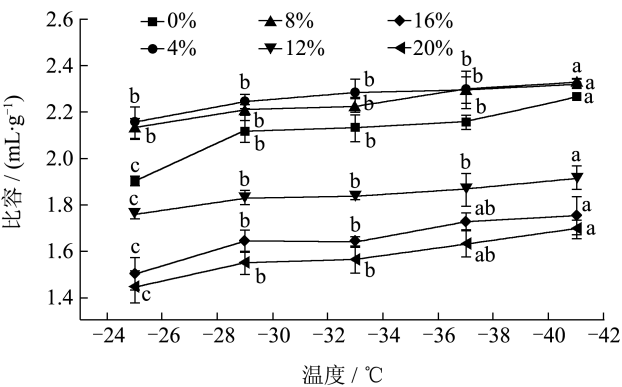


图 8 速冻温度对橡子馒头比容的变化

Fig.8 Changes of quick freezing temperature on specific volume of acorn steamed bun

2.10 速冻温度对橡子馒头pH值的影响

pH 值是研究馒头质量的重要指标之一, 馒头的 pH 值大约为 5.6~7.2。新鲜的馒头几乎没有细菌, 但是在冷却时容易被污染^[29]。由图 9 可知, 随着橡子粉质量分数的增加, 馒头的 pH 值呈下降趋势, 随着速冻温度的降低, pH 值呈先升高后下降的趋势, 差异显著 ($P<0.05$)。当贮藏温度为 $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 质量分数 4% 的橡子馒头 pH 值最高为 7.09, 质量分数为 20% 时, pH 值为 6.43, 这是由于橡子粉中含有较高的鞣酸, 随着橡子粉添加量增加, 单宁酸会释放在馒头中, 导致 pH 值下降。当橡子粉添加量为 4% 时, 在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下 pH 值为 6.71, 在 $-41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下为 6.51, 这是由于当橡子粉添加量一致时, 橡子粉在低温条件下可能发生水解同时产生大量酸性物质, 从而降低了 pH 值。当质量分数 20% 橡子馒头在 $-41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, pH 值仅为 6.06, 橡子馒头的适口性较差, 这是由于低温贮藏时, 馒头中的水分冰晶破坏细胞结构, 释放细胞酸性物质, 促进微生物代谢及氧化反应, 导致橡子馒头中的酸性物质积累, 最终表现为 pH 值降低。

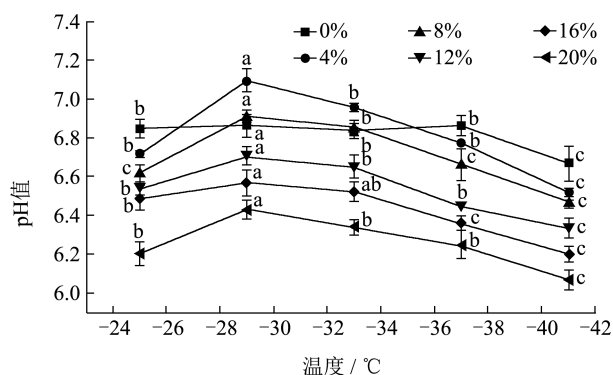


图 9 速冻温度对橡子馒头 pH 值的变化

Fig.9 Change of pH value of acorn steamed bread by quick-freezing temperature

2.11 速冻温度对橡子馒头水分含量的变化

由图 10 可知, 在不同温度下橡子馒头的水分含量, 橡子馒头随着温度降低呈先上升后下降趋势, 质量分数 4% 橡子馒头在 $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 速冻时的水分含量最高为 40.28%, 橡子粉质量分数在 4%~8% 时, 水分含量变化趋势显著, 橡子粉质量分数在 7%~20% 时, 橡子馒头随着不同的速冻温度的变化水分含量的变化趋势较为显著。当速冻温度在 $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 橡子馒头的水分含量显著高于其他速度温度, 随着冻藏温度的降低, 水分含量下降显著。这可能是速冻温度能使馒头内部冰晶形成的速度越快, 冰晶越小, 对馒头细胞结构的破坏越小, 也有助于保持馒头的水分含量。随着温度

继续下降, 使馒头内部水分子的运动减缓, 水分子之间的相互作用力增强, 导致部分水分子被排出馒头表面, 从而降低了馒头的水分含量。

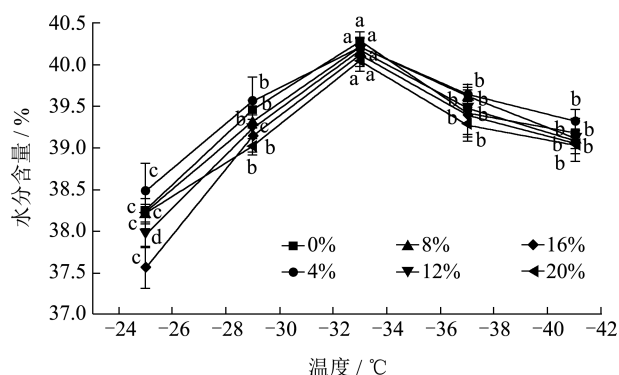


图 10 速冻温度对橡子馒头水分含量的变化

Fig.10 Change of moisture content of acorn steamed bread

2.12 速冻温度对橡子馒头失水率和持水力的变化

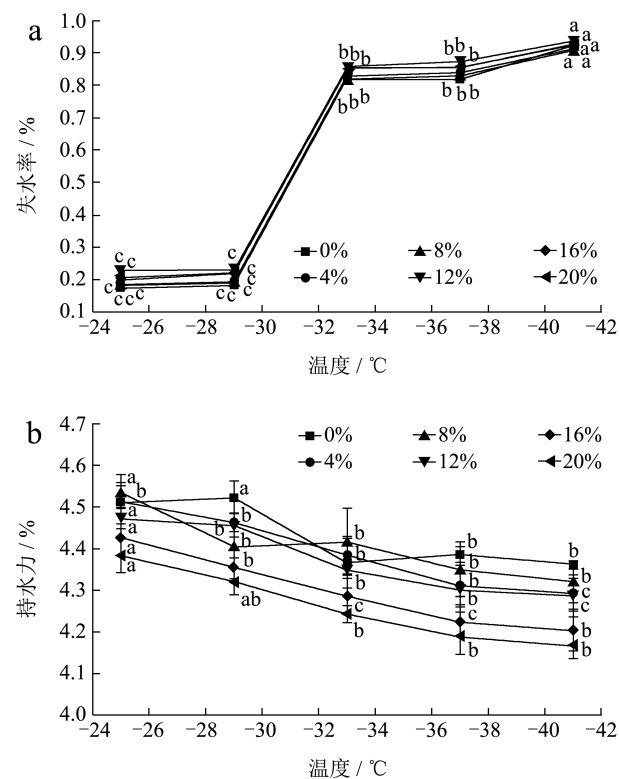


图 11 速冻温度对橡子馒头失水率和持水力的变化

Fig.11 The change of water loss rate and hydraulic power in acorn steamed buns

由图 11 可知, 不同质量分数的橡子速冻馒头持水力和失水率变化呈相反趋势, 橡子粉馒头持水力随着温度降低呈下降趋势, 橡子粉质量分数越大, 馒头的持水率越低。当速冻温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 质量分数 8% 橡子馒头的持水能力较强为 4.53%, 质量分数 20% 橡

子馒头的持水力最低, 仅为 4.38%。持水力随着速冻温度的降低而下降, 速冻温度在 $-25\sim-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时差异较显著 ($P<0.05$)。橡子馒头里的结合水与游离水相互转换, 水分流失, 面筋蛋白使持水力下降, 从而使持水力下降。持水力降低之后会使馒头表面出现裂痕, 馒头的内部经过速冻时馒头内部蒸汽与冰晶会蒸发, 从而失水率增加。失水率随着橡子粉的增加而减少, 当速冻温度降低时, 失水率增加。速冻温度 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 空白馒头的失水率最低为 0.175 4%, 质量分数 12% 橡子馒头失水率最高为 0.23%。这可能是由于橡子粉的添加破坏了面筋网络和改变面团结构, 导致馒头的持水力和失水率呈现非线性变化, 质量分数 12% 的橡子粉添加是对面筋网络破坏的临界点, 而质量分数 20% 橡子粉进一步加剧了结构疏松和孔隙形成, 导致失水率最高。速冻温度为 $-29\sim-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 馒头失水率呈直线上升趋势, $-32\sim-41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时橡子馒头失水率变化不显著。随着冷冻温度的降低, 冰晶晶体体积增大, 使蛋白质的氢键、疏水键和离子键等结构发生改变, 在加工过程中损坏的淀粉释放了截留的水, 导致馒头的水分迁移和水分损失^[30]。

3 结论

本研究通过探究不同质量分数橡子粉 (0%~20%) 及速冻温度 ($-25\sim-41\text{ }^{\circ}\text{C}$) 对速冻馒头品质的影响, 当橡子粉质量分数为 8% 时, 混合面团的糊化特性最优, 面团中自由水与中弱结合水的结合能力增强, 制作的橡子馒头品质较佳, 感官评分最高。橡子馒头在 $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 速冻时, 橡子馒头的 T23 为 335.16, 总峰面积为 5 315.92, 均高于其他试验组, 表明橡子馒头的水分结合能力较佳。在 $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 速冻时, 橡子馒头的比容 $2.207\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, pH 值 6.913, 水分含量 39.31%, 持水率 5.20%, 品质较佳。综上所述, 橡子粉质量分数 8% 的馒头在 $-29\sim-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 速冻条件下, 能有效维持面团结构稳定性和水分分布, 延缓淀粉老化, 保持良好的质构、色泽和感官特性。该研究为橡子粉在冷冻馒头加工中品质提升方面的应用奠定了理论基础, 有助于推动功能性杂粮速冻馒头的工业化生产。

参考文献

- [1] VINHA F, BARREIRA J C M, COSTA A S G, et al. A new age for Quercus spp. fruits: review on nutritional and phytochemical composition and related biological activities of acorns [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2016, 15(6): 947-981.
- [2] KORUS J, WITCZAK M, ZIOBRO R, et al. The influence of acorn flour on rheological properties of gluten free dough and physical characteristics of the bread [J]. European Food Research and Technology, 2015, 6:1135-1143.
- [3] 杨文雪,利杰梅,兰慧娟,等.穆子粉对面条质构、蒸煮及消化特性的影响[J].现代食品科技,2024,40(11):325-331.
- [4] 张亚亭,李德海,包怡红.橡子壳色素抗氧化活性研究[J].北京林业大学学报,2017,39(4):94-100.
- [5] FENG W, MA S, HUANG J, et al. Recent advances in the technology of quick-frozen baozi: A review [J]. Int J Food Sci, 2022, 57(3): 1493-1507
- [6] WU D, YU L, GUO L, et al. Effect of highland barley on rheological properties, textural properties and starch digestibility of Chinese steamed bread [J]. Foods, 2022, 11(8): 1091.
- [7] 张贞炜,蒋静,谢跃,等.添加竹笋粉的面制品品质及其功能特性[J].现代食品科技,2024,40(12):271-280.
- [8] MENG K, GAO H, ZENG J, et al. Effect of subfreezing storage on the quality and shelf life of frozen fermented dough [J]. J Food Process Pres, 2021, 45(3): e15249.
- [9] ZHAO B B, FU S J, LI H, et al. Effect of storage conditions on the quality of frozen steamed bread [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(1): 695-704.
- [10] 秦跃奇.冷冻和贮藏温度对馒头品质的影响及机理研究[D].新乡:河南科技学院,2022.
- [11] 曹蒙,柳诚刚,周舟,等.猴头菇半干面配方的优化及其品质分析[J].食品研究与开发,2023,44(11):166-174.
- [12] 王晓,郑学玲,王晓曦,等.不同酸面团发酵对麦麸膳食纤维馒头品质的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2025,46(3):9-19.
- [13] YANG Y X, XU H M, TANG S, et al. Study on the thermal and water migration of Chinese steamed buns during cooling process after steam cooking [J]. LWT, 2021, 145: 111377.
- [14] GUO X N; GAO F; ZHU K X. Effect of fresh egg white addition on the quality characteristics and protein aggregation of oat noodles [J]. Food Chemistry, 2020, 330: 1-8.
- [15] 王璧莹,白莉,李湘奎,等.不同竹笋粉添加量的面团特性及面包品质的变化[J].现代食品科技,2023,39(6):195-203.
- [16] 盛琪.馒头的常温保鲜研究[D].无锡:江南大学,2015.
- [17] 马亚茹.豌豆皮膳食纤维在面条中应用特性的研究[D].天津:天津商业大学,2020.
- [18] PHIMOLSIRIPOL Y, SIRIPATRAWAN U, CLELAND D J. Weight loss of frozen bread dough under isothermal and fluctuating temperature storage conditions [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 106(2): 134-143.
- [19] 付苗苗.小麦淀粉对面团微观结构及冷冻面团馒头品质的影响[J].食品研究与开发,2023,44(19):74-79.
- [20] CHEN W K, CHAO C, YU J L, et al. Effect of protein-fatty acid interactions on the formation of starch -lipid -protein complexes [J]. Food Chemistry, 2021, 364: 130390.
- [21] LIANG J, MAEDAA T, TAO X L, et al. Physicochemical properties of Pueraria root starches and their effect on the improvement of buckwheat noodle quality [J]. Cereal Chemistry Journal, 2017, 94(3): 554-559.

[22] 汪磊.燕麦 β -葡聚糖对面粉、面团特性及馒头品质的影响和机制[D].重庆:西南大学,2017.

[23] SHI M, CHENG Y C, WANG F, et al. Rheological properties of wheat flour modified by plasma-activated water and heat moisture treatment and *in vitro* digestibility of steamed bread [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 850227.

[24] 葛飞.制粉与挤压改性对青稞粉理化特性及饼干食用品质改良研究[D].南京:南京财经大学,2023.

[25] 申茹晓,唐浩国,杨同香,等.白芸豆粉对面团及饼干品质特性的影响[J].食品工业科技,2025,46(14):136-143.

[26] GB/T 21118-2007,食品安全国家标准 小麦粉馒头[S].

[27] JIA R, JIANG Q, KANDA M, et al. Effects of heating processes on changes in ice crystal formation, water holding capacity, and physical properties of surimi gels during frozen storage [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 90: 254-265.

[28] KONDAKCI T , ZHANG J W , ZHOU W. Impact of flour protein content and freezing conditions on the quality of frozen dough and corresponding steamed bread [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(9): 1877-1889.

[29] ZHAO B B, FU S J, LI H, et al. Effect of storage conditions on the quality of frozen steamed bread [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2022, 57(1): 695-704.

[30] JIA R, JIANG Q Q, KANDA M, et al. Effects of heating processes on changes in ice crystal formation, wate holding capacity, and physical properties of surimi gels during frozen storage [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 90: 254-265.