聂宇嫦, 张司雨, 李慧凝, 等. 蒸制时间对不同面筋蛋白含量猪肉包子皮结构特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 63−71. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120037
NIE Yuchang, ZHANG Siyu, LI Huining, et al. Effect of Steaming Time on Structural Characteristics of Pork Steamed Stuffed Bun Wrapper with Different Gluten Content[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 63−71. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120037

· 研究与探讨 ·

蒸制时间对不同面筋蛋白含量猪肉包子皮结构特性的影响

聂宇嫦, 张司雨, 李慧凝, 曹雪慧, 朱丹实, 杨立娜*
（渤海大学食品科学与工程学院, 辽宁锦州 121013）

摘　要: 包子工业化生产过程常面临着汽蒸制熟后面皮干硬、起泡等问题，为了深入了解蒸制过程对包子皮结构特性的影响，本文以 8%、10%、12% 蛋白含量的面粉为原料，通过质构、低场核磁共振、傅里叶红外光谱、荧光光谱、X 射线衍射、电子扫描显微镜等实验方法，分析其在不同蒸制时间点下包子皮的质构特性、水分分布、二级结构、三级结构及微观结构等结构特性。结果表明：随着蒸制时间和蛋白含量的增加，包子皮的比容、弹性、咀嚼度增加；包子皮结合水和自由水含量增加并且水流动性增强；二硫键增加，二硫键发生了由反-扭-反（t-g-t）结构和扭-扭-反（g-g-t）结构向扭-扭-扭（g-g-g）结构转变的变化；包子皮蛋白含量 12% 时，随着蒸制时间的增加，*β*-折叠和 *β*-转角分别增加 4.58% 和 8.36%；蒸制时间为 16 min 时，随着蛋白含量的增加，*β*-折叠和 *β*-转角分别增加 0.31% 和 5.06%；面筋蛋白三级结构随蒸制时间增加变得更紧密；同时非共价相互作用参与了淀粉-蛋白质网络的形成，并且随着蒸制时间的增加各非共价键作用力增强；淀粉颗粒结晶度降低，衍射峰强度降低；随着蒸制时间的增加，淀粉颗粒变得越来越小，并紧密地嵌入在被破坏的面筋基质中，形成了淀粉-面筋蛋白网络体系；而且，面筋蛋白含量越大，淀粉颗粒与面筋蛋白结合越紧密。为解决包子皮干硬、起泡奠定了理论基础，为优化包子工艺参数和工业化生产提供数据支撑。

关键词: 汽蒸时间, 面筋蛋白含量, 包子皮, 结构特性
中图分类号: TS213.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)01−0063−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120037　　本文网刊:

Effect of Steaming Time on Structural Characteristics of Pork Steamed Stuffed Bun Wrapper with Different Gluten Content

NIE Yuchang, ZHANG Siyu, LI Huining, CAO Xuehui, ZHU Danshi, YANG Lina*
（College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, China）

Abstract: The industrial production of steamed stuffed bun frequently encounters challenges such as dry wrapper and foaming after steaming. To further investigate the influence of the steaming process on the structural characteristics of steamed stuffed bun, this study utilized flour with protein contents of 8%, 10%, and 12% as raw materials. A combination of experimental techniques, including texture analysis, low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), fluorescence spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM), was employed to analyze the structural characteristics, water distribution, secondary structure, tertiary structure, and microstructure of steamed stuffed bun wrapper at various steaming time points. The results demonstrated that the specific volume, elasticity, and resilience of the steamed stuffed bun wrapper increased with both the extension of steaming time and the increase in protein content. Additionally, the levels of bound water and free water rose, enhancing water fluidity. With the rise in disulfide bond content, the disulfide bonds transitioned from t-g-t and g-g-t structures to g-g-g structures. When

收稿日期: 2024−12−04
基金项目: “十四五”国家重点研发计划资助（2022YFD2100302）。
作者简介: 聂宇嫦（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: 2489646130@qq.com。
*** 通信作者:** 杨立娜（1987−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 粮油产品精深加工与食品营养, E-mail: 398510872@qq.com。

the protein content of the steamed stuffed bun wrapper reached 12%, the β-sheet and β-turn structures increased by 4.58% and 8.36%, respectively, as steaming time progressed. At a steaming time of 16 minutes, the β-sheet and β-turn structures increased by 0.31% and 5.06%, respectively, with increasing protein content. The tertiary structure of gluten proteins became more compact as steaming time increased. Simultaneously, non-covalent interactions contributed to the formation of a starch-protein network, with non-covalent bonding forces strengthening as steaming time extended. The crystallinity of starch particles decreased, along with a reduction in the intensity of diffraction peaks. As cooking time increased, starch particles diminished in size and became increasingly embedded within the damaged gluten matrix, forming a starch-gluten protein network system. Furthermore, higher gluten proteins content resulted in tighter integration between starch particles and gluten proteins. These findings provide a theoretical basis for addressing issues related to the hardness and foaming of steamed stuffed bun and offer data support for optimizing process parameters and industrial production.

Key words: steaming time; gluten content; steamed stuffed bun wrapper; structural characteristic

包子是中国传统发酵类主食之一，由于营养性好、易消化、具有较好的质构和感官品质[1]，因此备受人们的喜爱。但是包子工业化生产过程常面临着汽蒸制熟后包子皮起泡、泛白、皱缩等问题，严重影响感官和食用品质。

导致包子皮品质劣变的因素很多，如面粉种类、醒发时间等[2]。但是，目前的研究大多集中在面粉的种类和醒发条件优化等方面，对汽蒸过程中包子皮的结构特性变化研究较少。王晓曦等[3]研究发现高筋面团的发酵活力高于低筋面团，所以用高筋粉制作的包子品质好于低筋粉。张剑等[4]研究表明大多数小麦品种的蛋白质和粉质指标对馒头的比容具有显著影响，蛋白质含量显著影响馒头的弹性和黏性，而沉降值则对馒头内部结构的形成具有重要影响。刘长虹等[5]研究发现，当醒发时间为 35 min 左右、醒发温度在 35 ℃ 左右、醒发湿度在 80% 左右时馒头的品质最佳。汽蒸是一种传统热加工工艺，制作出的成品质地湿润、柔软，是面筋蛋白网络结构形成的重要过程。而面筋网络结构的形成与持水能力，很大程度上取决于原料中面筋蛋白的含量，进而改变包子皮的感官与食用品质。

因此，本文以不同面筋蛋白含量的小麦粉制作包子皮，探究包子皮在不同蒸制时间点的水分分布和结构特性变化，明确包子皮最佳生产工艺，为提高包子工业化生产质量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

低筋小麦粉、高筋小麦粉　益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司；中筋小麦粉　江苏新良面粉有限责任公司；酵母　安琪酵母股份有限公司；猪肉馅　苏州旭方食品科技发展有限公司；总淀粉试剂盒　北京索莱宝科技有限公司。

TA-XT plus 质构仪　上海瑞玢智能科技有限公司；MesoMR23-040H-I 低场核磁共振分析仪　苏州纽迈分析仪器股份有限公司；IRTracer-100 傅里叶变换红外光谱仪　日本岛津仪器有限公司；Ultima IV 粉末 X-射线衍射仪　日本理学仪器有限公司；Regulus 8100 电子显微镜　日本日立仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 猪肉包子的制备　猪肉包子的制备按照朱在勤等[6]的方法并稍作调整。在室温下将 500 g 面粉（蛋白含量 8%、10%、12%）、5 g 酵母、260 g 水倒入和面机搅拌 10 min，用压面机在 5 mm 辊距下压面 10 次，将面团均分为 30 g，用擀面杖将压扁的面团从边缘向内擀制成面皮，再包入制作好的多汁馅心 20 g，放入温度 37 ℃，相对湿度 75% 的醒发箱 40 min，上锅分别蒸制 0、8、16、24 min，3 min 后取出包子盖上纱布冷却 30 min，用于包子比容测定。剥取包子皮用于质构和水分分布的测定。将包子皮冻干、磨粉和过 100 目筛，得到猪肉包子皮冻干粉用于游离巯基、拉曼光谱、FT-IR、荧光特性、表面疏水性、分子间作用力、XRD、微观结构的测定。

1.2.2 猪肉包比容测定　将冷却 30 min 的猪肉包子整个称重，并通过菜籽置换法测量包子体积[7]。

$$\text{包子比容}(\text{mL/g}) = \text{体积}/\text{质量}$$

1.2.3 猪肉包子馅心蒸煮损失　参考 O'Neill 等[8]的方法并稍作修改，记录猪肉包子馅心蒸制前后的重量，计算猪肉包馅心蒸煮损失。计算公式：

$$\text{馅心蒸煮损失}(\%) = (\text{蒸制前的重量} - \text{蒸制后的重量}) \times 100/\text{蒸制前的重量}$$

1.2.4 猪肉包子皮质量测定　参考 O'Neill 等[8]的方法并稍作修改，用电子秤记录包子皮蒸制 0、8、16、24 min 时重量，得出猪肉包子皮质量变化。

1.2.5 猪肉包子皮质构测定　参考 Curti 等[9]的方法并稍作修改，将冷却后的猪肉包子用镊子去除外表皮和馅心，将包子皮切割成 1 cm×1 cm×1 cm 立方体，用圆柱形探头（P/50）进行质构测试。测试参数：距离 30 mm，测试前速率 3 mm/s，测试速率 1 mm/s，测试后速率 1 mm/s，下压程度 60%，测试力 0.08 N，2 次压缩时间间隔 3 s，测定包子皮的硬度、粘附性、弹性、咀嚼度，每个样品重复测量三次。

1.2.6 猪肉包子皮水分分布测定　参考 Yang 等[10]的方法并稍作修改，将冷却后的猪肉包子用镊子去除外表皮和馅心，将包子皮切割成 1 cm×1 cm×1 cm 立方体，置于 25 mm 的线圈中进行测试，工作频率为

1 Hz，共振频率为 21 MHz。采用 CPMG 脉冲序列检测弛豫时间 T2。测试参数：射频延时 0.04 ms，前放档位 2 档，等待时间 500 ms，累加次数 4 次，回波个数 18000，回波时间 0.2 ms。

1.2.7　猪肉包子皮游离巯基的测定　150 mg 猪肉包子皮冻干粉加入 1 mL Tris-Gly 缓冲液（pH8.0），涡旋混匀，再加入 4.7 g 盐酸胍，Tris-Gly 缓冲液定容至 10 mL，涡旋混匀。取 1 mL 加入 4 mL 溶液（8 mol/L 脲+5 mol/L 盐酸胍）和 0.1 mL Ellman's 试剂，涡旋混匀后于 412 nm 测吸光值 A，计算巯基含量[11]。

$$-SH(\mu mol/g) = 73.53A_{412}D/C$$

式中，A_{412} 为 412 nm 处的吸光值，D 为稀释因子 5.02，C 为样品浓度（mg（干物）/mL），本实验为 15 mg/mL，比色皿光程为 10 mm。

1.2.8　猪肉包子皮拉曼光谱检测　拉曼光谱的检测参考Ørskov 等[12] 的方法并稍作修改。将猪肉包子皮冻干粉置于载玻片上，然后用激光光源进行激光聚焦。激光测试波长为 633 nm，功率为 10 mW，扫描范围为 400~600 cm^{-1}，分辨率为 2 cm^{-1}，数据采集时间为 5 s，扫描次数为 3 次。

1.2.9　猪肉包子皮 FT-IR 测定　采用 FT-IR 测定包子皮的红外光谱特性[13]。将猪肉包子皮冻干粉和 KBr 按 1∶100 的比例研磨。扫描波数范围 4000~500 cm^{-1}，扫描 64 次，分辨率 4 cm^{-1}。

1.2.10　猪肉包子皮荧光特性的测定　将 150 mg 猪肉包子皮冻干粉溶于 30 mL 0.1 mol/L PBS 缓冲液（pH7.0）中，4000 r/min 离心 20 min，取上清液测定荧光光谱[14]。测试参数：激发波长 260 nm，发射起始波长 270 nm，发射终止波长 450 nm，激发狭缝宽度 2.5 nm，发射狭缝宽度 5.0 nm。

1.2.11　猪肉包子皮表面疏水性的测定　将 10 mg 猪肉包子皮冻干粉溶于 1 mL 0.02 mol/L PBS 缓冲液（pH7.0）中，加入 200 μL 1 mg/mL 溴酚蓝指示剂。室温下摇床振荡 10 min，4000 r/min 离心 10 min。取上清，稀释 10 倍，加入 96 孔板，每孔 200 μL，酶标仪 595 nm 处测定其吸光度 A[15]，以不加样品的试剂作为空白对照，溴酚蓝的结合量与表面疏水性成正比。

$$溴酚蓝结合量(\mu g) = 200\times(A_{空} - A_{样})/A_{空}$$

1.2.12　猪肉包子皮分子间作用力的测定　参考 Li 等[16] 的方法并略作修改，称取 2.5 g 包子皮冻干粉，将其与去离子水 1∶3 混合得到面糊，将面糊分别置于 30 mL 浓度为 2%（w/w）的 NaCl、SDS、尿素试剂中，涡旋 5 s 混匀，得到浓度 25%（w/w）的溶液。在 25 ℃、200 r/min 下振荡 4 h 后，4000 r/min 离心 5 min，弃去上清液，用去离子水分 3 次洗沉淀，每次洗沉淀都以 4000 r/min 离心 5 min，将沉淀物在 40 ℃下烘箱干燥 24 h，过 100 目筛网，采用总淀粉测定试剂盒测定淀粉含量，参考 GB 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》中凯氏定氮法测定蛋白质含量。沉淀中的淀粉和蛋白含量与分子间相互作用力成反比。

1.2.13　猪肉包子皮 XRD 测定　将包子皮冻干粉过 100 目筛网，取适量粉末置于 XRD 衍射仪上，工作电流为 27 mA，电压为 50 kV。扫描速度为 4°/min，衍射角 θ 的扫描范围为 5°~50°[17]。

1.2.14　猪肉包子皮微观结构观察　将包子皮冻干粉固定在观察台，真空下喷金，15 kV 加速电压下，通过电子扫描显微镜放大 1500 倍观察其微观结构。

1.3　数据处理

所有数据均进行 3 次重复，以 $\bar{x}\pm s$ 表示，应用 SPSS 23.0 软件对数据进行单因素方差分析，以 $P<0.05$ 为差异显著，Origin 2023 对数据作图处理，通过 OMNIC 和 PeakFit 软件进行数据分析。

2　结果与分析

2.1　猪肉包子皮的质构特性和品质

如表 1 所示，随着蒸制时间的增加，包子皮的比容、硬度、粘附性、弹性和咀嚼度均显著增加（$P<0.05$），并在 16 min 后趋于稳定，均未出现收缩现象。

表 1　猪肉包子皮的比容和质构特性

Table 1　Specific volume and texture characteristics of pork steamed stuffed bun wrapper

蛋白含量(%)	蒸制时间(min)	比容(mL/g)	硬度(g)	粘附性(N·S)	弹性	咀嚼度(g)
8	0	0.52 ± 0.00^{Bc}	246.48 ± 22.55^{Bd}	0.43 ± 0.07^{Bc}	0.40 ± 0.16^{Ba}	42.97 ± 20.00^{Bd}
	8	1.02 ± 0.05^{Cb}	987.39 ± 107.95^{Ac}	0.78 ± 0.06^{Ab}	0.26 ± 0.05^{ABa}	205.12 ± 62.85^{Ac}
	16	1.12 ± 0.05^{Ba}	1548.78 ± 25.81^{Ab}	0.91 ± 0.07^{Aa}	0.35 ± 0.01^{Ba}	487.02 ± 24.44^{Ab}
	24	1.13 ± 0.03^{Ca}	1735.22 ± 69.77^{Aa}	0.92 ± 0.03^{Aa}	0.44 ± 0.07^{Ba}	697.74 ± 69.92^{Ba}
10	0	0.59 ± 0.03^{Ac}	316.56 ± 62.80^{Bc}	0.67 ± 0.03^{Ab}	0.82 ± 0.16^{Aa}	175.32 ± 60.42^{Ab}
	8	1.11 ± 0.02^{Bb}	526.30 ± 60.13^{Bb}	0.34 ± 0.03^{Bc}	0.31 ± 0.09^{Ab}	55.22 ± 9.41^{Bb}
	16	1.17 ± 0.01^{Ba}	819.26 ± 67.22^{Ca}	0.79 ± 0.05^{Aa}	0.83 ± 0.11^{Aa}	543.26 ± 121.93^{Aa}
	24	1.20 ± 0.02^{Ba}	924.11 ± 32.16^{Ba}	0.82 ± 0.06^{Ba}	0.90 ± 0.02^{Aa}	682.41 ± 63.55^{Ba}
12	0	0.53 ± 0.03^{Bc}	476.99 ± 68.44^{Ac}	0.35 ± 0.03^{Bc}	0.21 ± 0.03^{Bc}	35.27 ± 7.71^{Bc}
	8	1.24 ± 0.02^{Ab}	887.69 ± 227.00^{Ab}	0.32 ± 0.01^{Bc}	0.18 ± 0.01^{Bc}	50.82 ± 12.95^{Bc}
	16	1.37 ± 0.02^{Aa}	1053.46 ± 131.21^{Bb}	0.68 ± 0.02^{Bb}	0.79 ± 0.07^{Ab}	556.30 ± 31.46^{Ab}
	24	1.37 ± 0.03^{Aa}	1480.08 ± 305.35^{Aa}	0.75 ± 0.02^{Ba}	0.97 ± 0.04^{Aa}	1067.82 ± 165.23^{Aa}

注：不同小写字母代表相同蛋白含量包子皮在不同蒸制时间下差异显著（$P<0.05$），不同大写字母代表相同蒸制时间下不同蛋白含量面皮差异显著（$P<0.05$），表2、表3同。

在蒸制时，包子皮内部温度不断升高，无定形的面筋蛋白网络逐渐形成蛋白凝胶网络结构，硬度增加[18]；淀粉颗粒糊化，粘附性增加[19]；蒸制前酵母菌快速生长繁殖，产生大量 CO_2，包子皮形成气孔，随着蒸制时间的增加，气孔体积增大，使包子比容增大，包子皮富有弹性[20]。同一蒸制时间时，随着蛋白含量的升高，面皮的硬度先降低后升高，粘附性降低，而比容、弹性、咀嚼度逐渐增加。8% 蛋白含量的包子皮硬度和粘附性高，弹性和咀嚼度低，可能因为面筋蛋白含量低、结构松散、猪肉馅心质量减少，汤汁和水蒸气易渗入包子皮（如图 1b、c 所示），使得其面筋网络结构稳定性变差，持气能力降低，硬度增加。12% 蛋白含量的包子皮硬度和粘附性适中，弹性和咀嚼度高，可能因为面筋蛋白含量高、网络结构稳定、水分逸出缓慢，赋予包子皮丰富的弹性结构，更耐咀嚼。因此，12% 蛋白含量蒸制 16 min 有助于提高猪肉包子皮的质构特性。

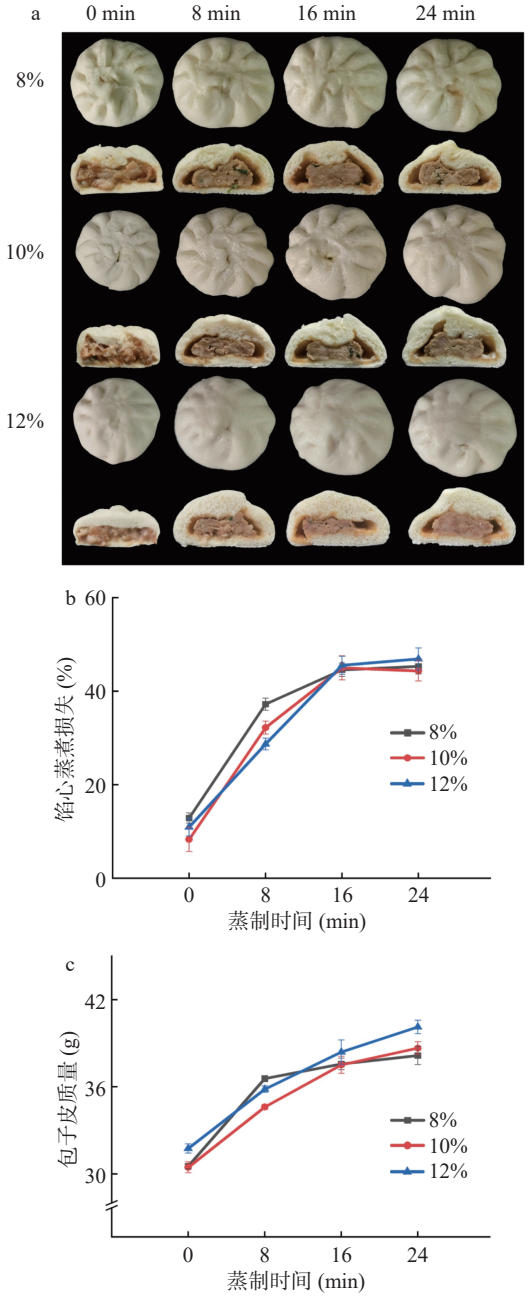


图 1　猪肉包俯视图、横截面图（a）、馅心蒸煮损失（b）和包子皮质量变化（c）

Fig.1　Top view and cross-sectional view of pork buns (a), loss of filling core (b) and quality change of pork steamed stuffed bun wrapper (c)

2.2　猪肉包子皮的水分分布

T2 代表水的迁移能力，T2 值越小，这部分水的流动性越弱，与其他组分的结合越紧密。猪肉包子皮 T2 主要有三个峰，T21 峰（0.1~1 ms）视为强结合水，是以共价键形式与面筋蛋白和淀粉结合的水，流动性弱；T22 峰（6~20 ms）视为弱结合水，是存在于蛋白和淀粉分子间的水，流动性较强；T23 峰（60~200 ms）视为自由水，流动性更强[21]。如图 2 所示，蒸制 8 min 时，各组包子皮均呈现 T21、T22 显著增加和 T23 显著降低（$P<0.05$）。可能是由于加热导致水的运动加剧，面筋蛋白、淀粉的强结合水和弱结合水流动性增强；蒸制 8~24 min 时，各组包子皮面筋蛋白网络体系逐渐形成，淀粉糊化，水分流动性减弱。T21 和 T22 组分的面积占比大于 90%，说明水分主要以结合水状态存在。随蒸制时间增加，A21 没有明显变化，A22 增加最为明显，A23 缓慢增加，可能是因为淀粉胀润和面筋的形成过程吸收水分，而且蒸制过程一部分水汽和馅心汤汁进入面团内部存在于淀粉-蛋白凝胶框架的内部空间，提高了弱结合水和自由水含量[22]。不同蛋白含量的面皮呈现相同的水分变化趋势。

2.3　猪肉包子皮的游离巯基与二硫键含量

二硫键的形成与游离巯基含量呈负相关，影响淀粉-面筋蛋白网络结构的稳定[23]。如表 2 所示，蒸制时间从 0 min 到 16 min，包子皮中游离巯基呈现增加趋势，包子皮中的面筋蛋白发生变性从而展开，游离巯基含量增加[24]。蒸制时间为 24 min 时，游离巯基含量下降，随着温度的上升，包子皮中的游离巯基发生氧化还原反应生成了二硫键[25]。包子皮蛋白含量对游离巯基含量基本未见影响。

在拉曼光谱中波段为 500~550 cm^{-1} 的特征峰是二硫键的特征谱带，其中 510 cm^{-1} 附近为扭-扭-扭（g-g-g）结构、527 cm^{-1} 附近为扭-扭-反（g-g-t）结构、546 cm^{-1} 附近为反-扭-反（t-g-t）结构，其中 g-g-g 结构最稳定[26]。二硫键结构的稳定性与吸收频率有关，随着吸收频率的增加，二硫键稳定性降低[27]。如表 2 所示，随着蒸制时间的增加，二硫键中 g-g-g 结构含量增加，t-g-t 结构降低，包子皮中的二硫键由 t-g-t 结构和 g-g-t 结构向 g-g-g 结构转变，二硫键的稳定性增加。因此，包子皮中淀粉-面筋蛋白的网络结构增强。不同蛋白含量的包子皮呈现相同的二硫键变化趋势。

2.4　猪肉包子皮的二级结构

图 3 为不同蒸制时间下猪肉包子皮的 FTIR 光

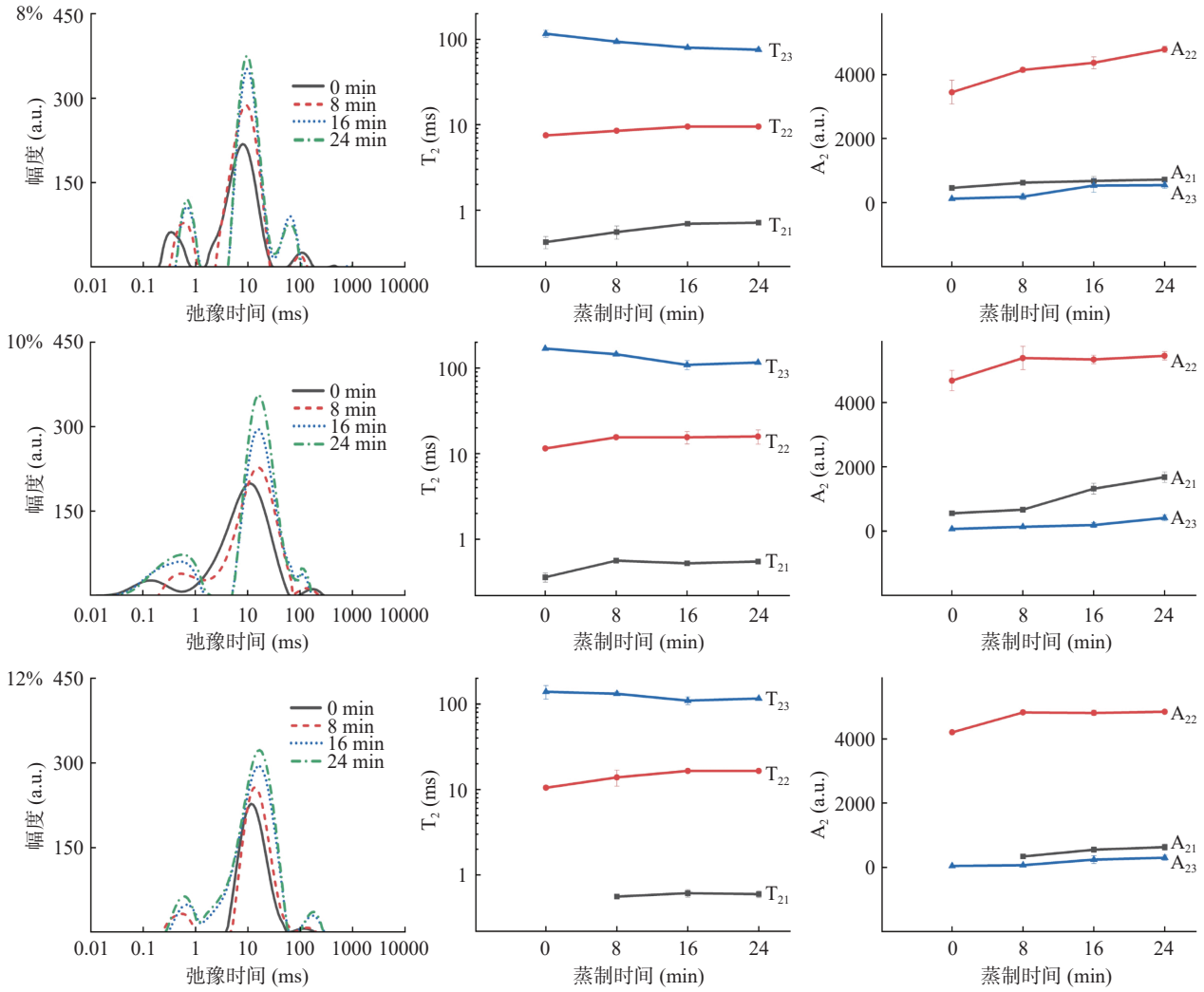


图 2　猪肉包子皮的 T_2 分布曲线、T_2 弛豫时间和峰面积 A_2

Fig.2　T_2 distribution curve, T_2 relaxation time and peak area A_2 of pork steamed stuffed bun wrapper

表 2　猪肉包子皮的巯基和二硫键(500~550 cm^{-1})含量

Table 2　Contents of sulfhydryl group and disulfide bond (500~550 cm^{-1}) in pork steamed stuffed bun wrapper

蛋白含量(%)	蒸制时间 (min)	游离巯基 (μmol/g)	扭-扭-扭 (%)	扭-扭-反 (%)	反-扭-反 (%)
8	0	13.43 ± 0.08^{Bc}	15.98 ± 0.07^{Ab}	30.60 ± 0.02^{ABb}	53.42 ± 0.05^{Aa}
	8	16.32 ± 0.48^{Ab}	25.86 ± 0.11^{Ab}	53.22 ± 0.11^{Aa}	20.9 ± 0.08^{Ab}
	16	20.56 ± 0.89^{Aa}	50.31 ± 0.05^{Aa}	33.72 ± 0.07^{Ab}	15.96 ± 0.07^{Ab}
	24	14.27 ± 1.02^{Ac}	58.17 ± 0.02^{Aa}	25.86 ± 0.05^{Ab}	15.97 ± 0.06^{Ab}
10	0	14.50 ± 0.62^{Ac}	18.13 ± 0.05^{Ac}	24.36 ± 0.01^{Bc}	57.51 ± 0.05^{Aa}
	8	16.02 ± 0.13^{Ab}	33.18 ± 0.05^{Ab}	50.51 ± 0.03^{Aa}	16.31 ± 0.03^{Ab}
	16	20.95 ± 0.92^{Aa}	62.26 ± 0.04^{Aa}	22.76 ± 0.01^{Ac}	14.98 ± 0.05^{Abc}
	24	13.67 ± 0.62^{Ac}	60.41 ± 0.03^{Aa}	32.56 ± 0.06^{Ab}	7.03 ± 0.03^{Ac}
12	0	14.37 ± 0.09^{Ac}	13.81 ± 0.04^{Ac}	34.19 ± 0.08^{Ab}	52.00 ± 0.10^{Aa}
	8	16.01 ± 0.12^{Ab}	29.51 ± 0.02^{Ab}	55.34 ± 0.08^{Aa}	15.15 ± 0.06^{Ab}
	16	21.34 ± 0.33^{Aa}	60.28 ± 0.11^{Aa}	27.04 ± 0.10^{Ab}	12.68 ± 0.06^{Ab}
	24	13.09 ± 0.05^{Ad}	50.48 ± 0.11^{Aa}	34.86 ± 0.07^{Ab}	14.66 ± 0.08^{Ab}

谱，各组包子皮在 3600~3000 cm^{-1} 处均有一个强且宽的吸收峰，是-OH 的特征，随着蒸制时间的增加，此吸收峰强度逐渐变弱，可能是由于淀粉分子的 O-H 基团发生了交联缩合[28]。

1600~1700 cm^{-1} 是酰胺 I 带吸收峰的范围，反映蛋白的二级结构[29]。α-螺旋特征峰出现在 1646~1664 cm^{-1}，与面团弹性呈负相关；β-折叠特征峰集中在 1600~1637 cm^{-1} 和 1682~1700 cm^{-1}，影响面筋蛋白的稳定性；β-转角特征峰集中在 1664~1682 cm^{-1}，与面团的延展性和黏性有关；而无规卷曲特征峰出现在 1637~1645 cm^{-1}，与面筋蛋白的不稳定性相关[30]。随着蒸制时间的增加，α-螺旋和无规则卷曲减小，β-折叠和 β-转角含量增加，这可能是面筋蛋白分子链在加热过程中展开，发生了二硫键、氢键和疏水相互作用的重排[29]，使包子皮弹性和黏性增加。

不同面筋蛋白含量的面粉制作而成的包子皮蛋白的二级结构也不同，随着蛋白含量的增加，α-螺旋相对含量降低，β-折叠和 β-转角相对含量增多，无规则卷曲相对含量无明显变化。说明面筋蛋白聚集程度越高，形成的面筋网络结构越致密，面皮的筋力越强，面筋结构的稳定性越强，与淀粉结合程度越高。

2.5　猪肉包子皮的荧光特性与疏水性

色氨酸常作为内源荧光探针来检测蛋白质三级结构变化[31]。由图 4 可知，蒸制 16 min，包子皮中面筋蛋白的荧光光谱发生明显红移，蒸制 16~24 min，

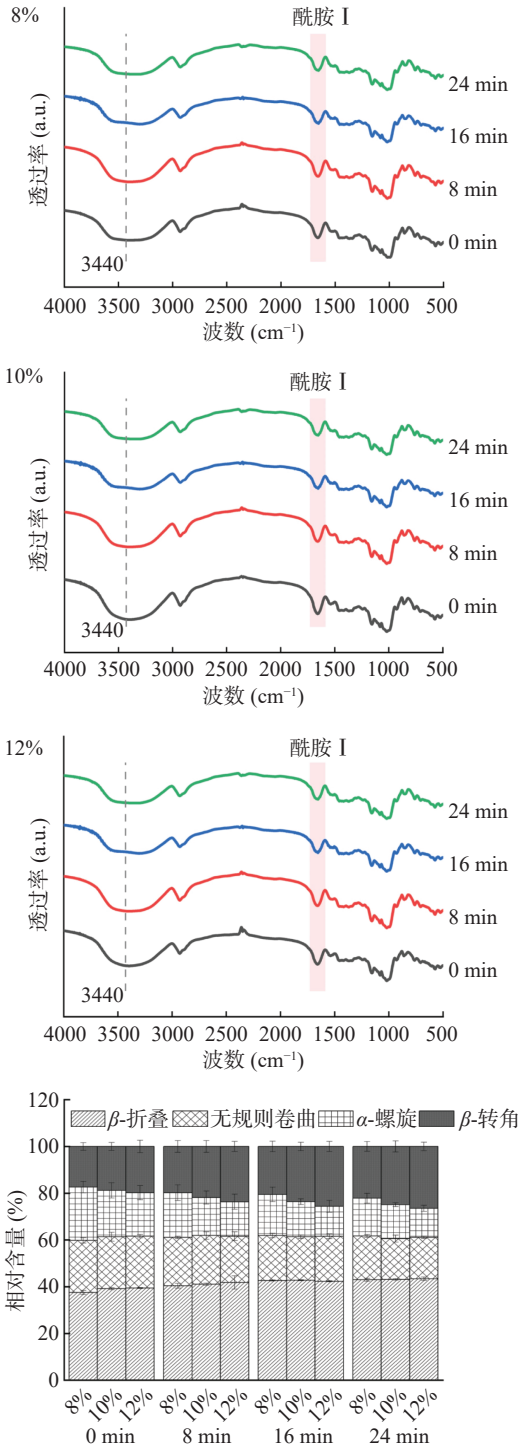


图 3 猪肉包子皮的 FTIR 光谱和二级结构

Fig.3 FTIR spectra and secondary structure of pork steamed stuffed bun wrapper

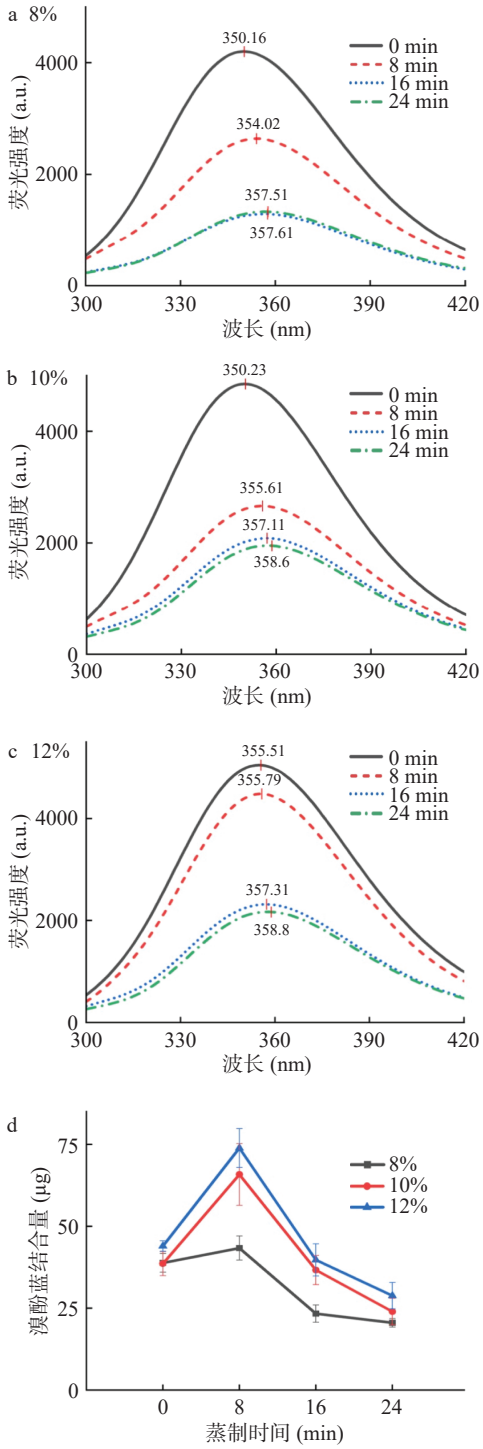


图 4 猪肉包子皮的内源荧光和表面疏水性

Fig.4 Endogenous fluorescence and surface hydrophobicity of pork steamed stuffed bun wrapper

荧光光谱红移减弱，荧光强度随着蒸制时间的延长而降低。在加热过程中色氨酸残基暴露增多，随后色氨酸可能与其他侧链氨基酸发生聚集和交联，促进面筋蛋白聚集，三级结构逐渐紧密，进而导致荧光强度降低[32]。荧光强度随着包子皮中蛋白含量的增加而增加，但不同蛋白含量的包子皮荧光光谱峰没有发生位移。

蛋白表面疏水性反映了蛋白分子表面疏水基团的数量和蛋白三级结构的变化[32]。由图 4d 可以看出包子皮表面疏水性随蒸制时间的增大呈现先增加后降低的趋势，蒸制 8 min 时，表面疏水性最高，面筋蛋白分子链展开，疏水区暴露[33]；同时色氨酸残基暴露于亲水环境，迫使疏水基团相互结合[34]，面筋蛋白聚集，包子皮表面疏水性降低。蛋白含量从 8% 增加到 12%，包子皮的表面疏水性增大，面皮结构稳定性增强。

2.6 猪肉包子皮的分子间作用力

猪肉包子皮的三级结构、交联聚集程度受淀粉

与面筋蛋白的分子间非共价键影响，主要包括氢键、静电作用、疏水作用等[35]。尿素会破坏氢键，NaCl 会影响静电作用，SDS 会影响疏水性[16]。如表 3 所示，随着蒸制时间的增加，未添加试剂的包子皮蛋白和淀粉含量增加，可能是因为蒸制后的淀粉-面筋蛋白分子间作用力增强，溶解度降低；尿素和 SDS 的添加导致包子皮中蛋白质和淀粉含量降低，并且随着蒸制时间的增加降低越多，可能是因为尿素和 SDS 的添加分别破坏了氢键和疏水性[36]，从而促进蛋白和淀粉浸出到溶液中，导致沉淀物中二者含量降低；在蒸制初期，添加 NaCl 后包子皮的蛋白质和淀粉含量高于未添加试剂的包子皮（除蛋白含量 8% 组），可能是因为蛋白质中可电离的氨基酸残基较少，离子间相互作用较弱[37]。因此，非共价键参与了淀粉-蛋白网络的形成。而且，面皮的蛋白含量从 8% 增加到 12%，会导致沉淀样品中蛋白含量增加，淀粉含量减少。

2.7　猪肉包子皮的结晶度和微观结构

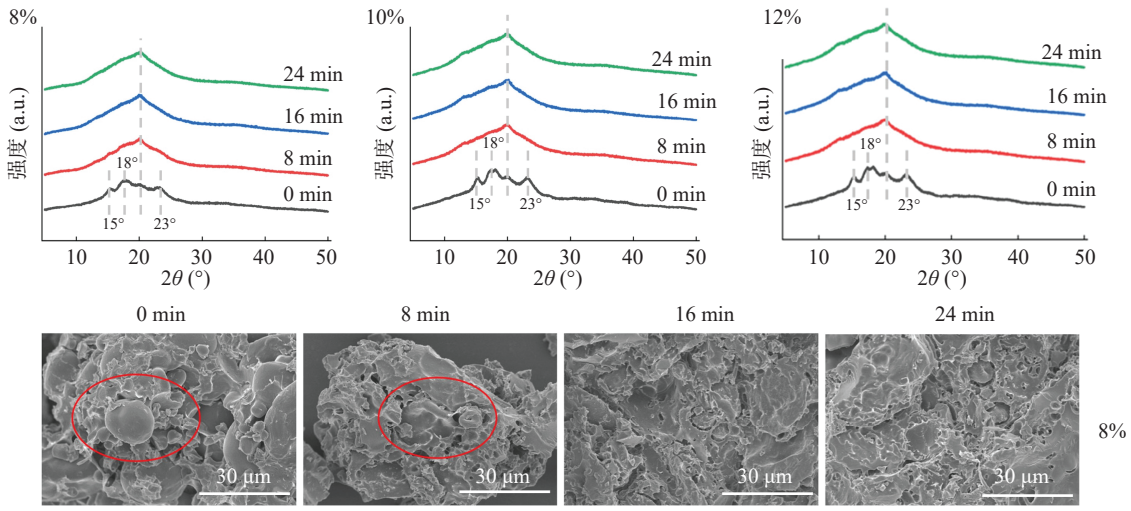
包子皮弹性和结晶度呈负相关[38]。如图 5 所示，0 min 时包子皮在 15°、18°、20°和 23°处出现峰，呈 a 型晶体结构[21]，随着蒸制时间的增加，15°、18°和 23°处的衍射峰消失，可能是因为淀粉颗粒在

表 3　不同处理方法下猪肉包子皮的淀粉和蛋白质含量（%）

Table 3　Starch and protein content in pork steamed stuffed bun wrapper under different treatment methods (%)

蛋白含量(%)	样品	蒸制时间(min)	Ctrl	NaCl	Urea	SDS
8%	沉淀蛋白	0	6.81±0.18^{Cc}	6.17±0.18^{Ca}	5.32±0.18^{Ca}	5.43±0.32^{Ca}
		8	7.24±0.18^{Cb}	5.64±0.18^{Cb}	4.89±0.19^{Ca}	5.32±0.18^{Ca}
		16	7.77±0.18^{Ca}	5.53±0.18^{Cbc}	3.62±0.18^{Cb}	4.26±0.49^{Cb}
		24	7.87±0.18^{Ca}	5.21±0.18^{Cc}	3.51±0.32^{Bb}	3.73±0.18^{Cb}
10%		0	8.62±0.00^{Bd}	9.15±0.18^{Ba}	6.92±0.18^{Ba}	7.55±0.18^{Ba}
		8	8.94±0.00^{Bc}	8.73±0.18^{Bab}	5.85±0.49^{Bb}	6.92±0.18^{Bb}
		16	9.26±0.00^{Bb}	8.41±0.18^{Bb}	4.89±0.18^{Bc}	6.49±0.18^{Bc}
		24	9.79±0.18^{Ba}	7.77±0.37^{Bc}	3.30±0.18^{Bd}	6.17±0.18^{Bc}
12%		0	10.11±0.18^{Ac}	10.53±0.32^{Aa}	8.30±0.32^{Aa}	9.15±0.18^{Aa}
		8	10.43±0.18^{Ac}	10.00±0.18^{Aa}	7.45±0.18^{Ab}	8.72±0.18^{Ab}
		16	11.38±0.18^{Ab}	10.53±0.32^{Aa}	6.17±0.18^{Ac}	8.19±0.18^{Ac}
		24	11.92±0.18^{Aa}	10.11±0.18^{Aa}	5.53±0.18^{Ad}	7.77±0.18^{Ad}
8%	沉淀淀粉	0	63.89±0.69^{Ad}	84.11±1.44^{Aa}	55.19±0.12^{Ca}	62.32±0.07^{Aa}
		8	65.39±0.65^{Ac}	78.85±0.72^{Ab}	54.86±0.19^{Ab}	61.37±0.72^{Aa}
		16	70.61±0.12^{Ab}	77.65±0.07^{Ab}	52.37±0.07^{Ac}	59.83±0.68^{Ab}
		24	74.75±0.50^{Aa}	73.13±0.07^{Ac}	51.67±0.07^{Ad}	59.04±0.00^{Ab}
10%		0	62.40±0.12^{Bd}	70.27±0.07^{Ba}	55.98±0.07^{Aa}	60.04±0.12^{Ca}
		8	65.34±0.07^{Ac}	65.47±0.07^{Bb}	52.08±0.00^{Bb}	53.91±0.59^{Cb}
		16	70.07±0.72^{Ab}	60.04±0.65^{Bc}	49.60±0.65^{Bc}	52.91±0.26^{Cb}
		24	71.19±0.07^{Ba}	57.55±0.00^{Bd}	47.78±0.61^{Bd}	50.88±0.80^{Bc}
12%		0	61.53±0.00^{Cd}	68.87±0.57^{Ba}	55.77±0.07^{Ba}	60.54±0.22^{Ba}
		8	62.32±0.07^{Bc}	63.81±0.07^{Cb}	51.84±0.12^{Bb}	55.52±0.40^{Bb}
		16	69.03±0.14^{Bb}	59.21±0.07^{Cc}	49.97±0.00^{Bc}	54.16±0.07^{Bc}
		24	70.98±0.12^{Ba}	56.15±0.07^{Cd}	48.19±0.79^{Bd}	51.46±0.00^{Bd}

注：Ctrl为未添加试剂的包子皮，NaCl为浸泡氯化钠的包子皮，Urea为浸泡尿素的包子皮，SDS为浸泡十二烷基硫酸钠的包子皮。



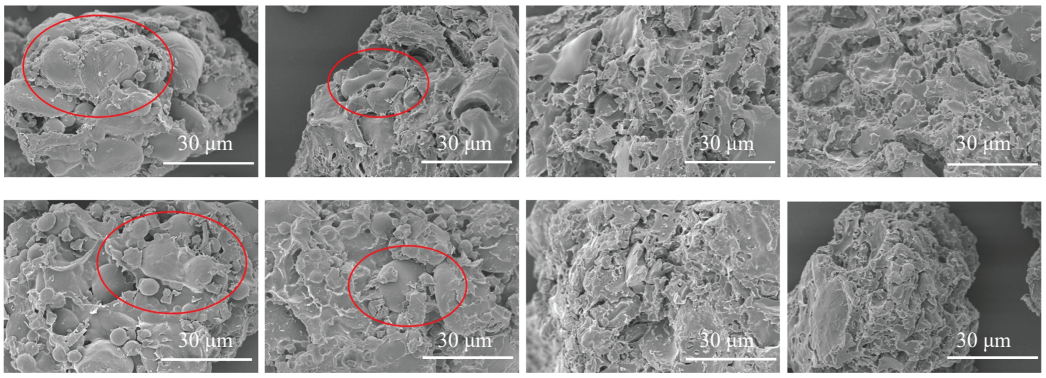


图 5 猪肉包面皮的 XRD 和 SEM 图

Fig.5 XRD and SEM of pork steamed stuffed bun wrapper

蒸制过程中糊化。在蒸制 0~8 min 时，淀粉颗粒呈 a 型晶体结构保持不变。蒸制 8 min 之后，包子受热逐渐增加，15°、18°和 23°处衍射峰消失，淀粉颗粒结晶度降低，衍射峰强度降低[39]。

猪肉包子皮的微观结构如图 5 所示，蒸制 0 min 时，淀粉颗粒呈现球状并且被面筋蛋白包裹；蒸制 8 min 时，部分淀粉颗粒糊化，蛋白分子变性，淀粉-蛋白网络体系初步形成；随着蒸制时间增加至 16 min，蛋白分子进一步变性，淀粉糊化完全，并紧密地嵌入被破坏的面筋基质中，形成淀粉-面筋蛋白网络体系；蒸制 24 min 时，包子皮的形貌没有明显的变化。蛋白含量越大，淀粉颗粒与面筋蛋白结合得越紧密。

3 结论

随着蛋白含量和蒸制时间的增加，包子皮的结构特性和品质得到改善，其中蛋白含量为 12% 的包子蒸制 16 min 时，包子皮的质构特性最佳。随着蒸制时间和蛋白含量的增加，包子皮的比容、弹性增加，包子皮的品质提高。蒸制过程为包子皮提供了能量和水蒸气。同时，随着蒸制时间的增加，蒸制温度上升，面筋蛋白发生变性从而展开，游离巯基含量增多，促进了二硫键的生成。随着蒸制时间的增加，β-折叠和 β-转角含量增加，面皮面筋蛋白结构稳定性增强；包子皮三级结构随蒸制时间增加而逐渐紧密。同时非共价键参与了淀粉-蛋白质网络的形成，并且随着蒸制时间的增加各非共价键作用力增强，提高了淀粉-面筋蛋白结构的稳定性，进而提高了包子皮的品质。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] MA Sen, LI Li, WANG Xiaoxi, et al. Effect of mechanically damaged starch from wheat flour on the quality of frozen dough and steamed bread[J]. Food Chemistry, 2016, 202: 120−124.

[2] 黄敏胜, 李汴生, 叶久东, 等. 影响冷冻面团质量的因素[J]. 食品工业科技, 2006, 27(3): 188−191. [HUANG Minsheng, LI Biansheng, YE Jiudong, et al. Factors influencing the quality of frozen dough[J]. Science and Technology of Food Industry, 2006, 27(3): 188−191.]

[3] 王晓曦, 刘亚楠, 董秋晨, 等. 小麦粉糊化特性与冷冻面团(馒头)品质关系研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(17): 77−80. [WANG Xiaoxi, LIU Yanan, DONG Qiuchen, et al. Study on the relationship between gelatinization properties of wheat flour and quality of frozen dough (Steamed Buns)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(17): 77−80.]

[4] 张剑, 李梦琴, 李林叶, 等. 小麦蛋白质和粉质特性对馒头品质的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2007, 28(3): 64−67,76. [ZHANG Jian, LI Mengqin, LI Linye, et al. The influence of protein and rheological properties of wheat dough on the quality of steamed bread[J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2007, 28(3): 64−67,76.]

[5] 刘长虹, 常冬冬, 李志建, 等. 醒发条件对北方馒头品质的影响[J]. 粮食加工, 2012, 37(6): 28−30. [LIU Changhong, CHANG Dongdong, LI Zhijian, et al. Effect of proofing conditions on the quality of north steamed bread[J]. Grain Processing, 2012, 37(6): 28−30.]

[6] 朱在勤, 陈霞, 毛羽扬, 等. 扬州包子的工艺标准化研究[J]. 农产品加工(学刊), 2006(12): 8−12. [ZHU Zaiqin, CHEN Xia, MAO Yuyang, et al. Research on the technological standardization of Yangzhou baozi[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2006(12): 8−12.]

[7] SIM S Y, NOOR AZIAH A A, CHENG L H. Characteristics of wheat dough and Chinese steamed bread added with sodium alginates or konjac glucomannan[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 951−957.

[8] O'NEILL C M, CRUZ-ROMERO M C, DUFFY G, et al. Comparative effect of different cooking methods on the physico-chemical and sensory characteristics of high pressure processed marinated pork chops[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 54: 19−27.

[9] CURTI E, CARINI E, TRIBUZIO G, et al. Bread staling: Effect of gluten on physico-chemical properties and molecular mobility[J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 59(1): 418−425.

[10] YANG Yuexi, XU Hongmei, TANG Shuai, et al. Study on the thermal and water migration of Chinese steamed buns during cooling process after steam cooking[J]. LWT, 2021, 145: 111377.

[11] 徐茹. 马铃薯全粉面团中巯基和二硫键的形成与转化及熟制面条的研发[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. [XU Ru. Construction and conversion of hydrosulphonyl and disulfide bond in potato flour Pasta and development of cooked potato noodles[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.]

［12］ ØRSKOV K E, CHRISTENSEN L B, WIKING L, et al. Detecting interactions between starch and casein in imitation cheese by FTIR and Raman spectroscopy[J]. Food Chemistry Advances, 2023, 2: 100322.
［13］ LI Yong, SHI Wentao. Steaming time effects on the moisture migration and structural properties of Chinese Northern-style steamed bread[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(4): 2435−2443.
［14］ ZHANG Yanyan, WANG Bingrui, WANG Wentao, et al. Study on the mechanism of ultrasonic treatment impact on the dough's fermentation capability[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 100: 103191.
［15］ CHELH I, GATELLIER P, SANTÉ-LHOUTELLIER V. Technical note: A simplified procedure for myofibril hydrophobicity determination[J]. Meat Science, 2006, 74(4): 681−683.
［16］ LI Zhenni, WANG Li, CHEN Zhengxing, et al. Impact of binding interaction characteristics on physicochemical, structural, and rheological properties of waxy rice flour[J]. Food Chemistry, 2018, 266: 551−556.
［17］ LI Nannan, NIU Meng, ZHANG Binjia, et al. Effects of concurrent ball milling and octenyl succinylation on structure and physicochemical properties of starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 155: 109−116.
［18］ WANG Pei, ZOU Min, LIU Kexin, et al. Effect of mild thermal treatment on the polymerization behavior, conformation and viscoelasticity of wheat gliadin[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 984−992.
［19］ CHENG Li, WANG Xu, GU Zhengbiao, et al. Effects of different gelatinization degrees of starch in potato flour on the quality of steamed bread[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 209: 144−152.
［20］ YANG Bailu, ZHANG Yining, YUAN Jiayi, et al. Impact of different frozen dough technology on the quality and gluten structure of steamed buns[J]. Foods, 2022, 11(23): 3833.
［21］ LI Zhijian, DENG Cui, LI Haifeng, et al. Characteristics of remixed fermentation dough and its influence on the quality of steamed bread[J]. Food Chemistry, 2015, 179: 257−262.
［22］ 闫泽华, 张乐道, 王霞. 马铃薯全粉和小麦粉对莜面面团水分的影响[J]. 农产品加工, 2024(14): 5−12. ［YAN Zehua, ZHANG Ledao, WANG Xia. Effects of potato flour and wheat flour on the moisture of oat flour dough[J]. Farm Products Processing, 2024(14): 5−12.］
［23］ ZHOU Yun, ZHAO Dan, FOSTER T J, et al. Konjac glucomannan-induced changes in thiol/disulphide exchange and gluten conformation upon dough mixing[J]. Food Chemistry, 2014, 143: 163−169.
［24］ BAO Qingdan, YAN Jingyao, MA Sen. Effect of heat treatment on conformation and aggregation properties of wheat bran dietary fiber-gluten protein[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127164.
［25］ LIU Rui, SHI Chunyue, SONG Yingshi, et al. Impact of oligomeric procyanidins on wheat gluten microstructure and physicochemical properties[J]. Food Chemistry, 2018, 260: 37−43.
［26］ 向宇, 周爱晖, 王思翔, 等. 基于拉曼光谱的羊毛二硫键及构象含量分析[J]. 纺织学报, 2024, 45(2): 45−51. ［XIANG Yu, ZHOU Aihui, WANG Sixiang, et al. Analysis of disulfide bonds and conformational content of wool based on Raman spectroscopy[J]. Journal of Textile Research, 2024, 45(2): 45−51.］
［27］ ACKERMANN K R, KOSTER J, SCHLÜCKER S. Conformations and vibrational properties of disulfide bridges: Potential energy distribution in the model system diethyl disulfide[J]. Chemical Physics, 2009, 355(1): 81−84.
［28］ WANG Jing, ZHAO Siming, MIN Guang, et al. Starch-protein interplay varies the multi-scale structures of starch undergoing thermal processing[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 175: 179−187.
［29］ GAO Xin, LIU Tianhong, YU Jing, et al. Influence of high-molecular-weight glutenin subunit composition at Glu-B1 locus on secondary and micro structures of gluten in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 1184−1190.
［30］ 张康逸, 康志敏, 王继红, 等. 青麦粉添加对馒头面团及面筋蛋白结构的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(2): 82−88,162. ［ZHANG Kangyi, KANG Zhimin, WANG Jihong, et al. Effect of adding green wheat flour on the dough of steamed bread and structure of its gluten protein[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(2): 82−88,162.］
［31］ LADOKHIN A S. Fluorescence spectroscopy in peptide and protein analysis[J]. Encyclopedia of Analytical Chemistry, 2000: 5762−5779.
［32］ WANG Pei, ZOU Min, TIAN Mengqi, et al. The impact of heating on the unfolding and polymerization process of frozen-stored gluten[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 85: 195−203.
［33］ ZHANG Ziye, YANG Yuling, ZHOU Peng, et al. Effects of high pressure modification on conformation and gelation properties of myofibrillar protein[J]. Food Chemistry, 2017, 217: 678−686.
［34］ FAN Xiangqi, LIU Chong, LI Limin, et al. Impact of salt and homogenization on yield, aggregation, and mechanical characteristics of wheat gluten separated by batter procedure[J]. Journal of Cereal Science, 2023, 109: 103623.
［35］ WANG Pei, CHEN Haiying, MOHANAD B, et al. Effect of frozen storage on physico-chemistry of wheat gluten proteins: Studies on gluten-, glutenin- and gliadin-rich fractions[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 39: 187−194.
［36］ BENNION B J, DAGGETT V. The molecular basis for the chemical denaturation of proteins by urea[J]. PNAS, 2003, 100(9): 5142−5147.
［37］ WANG Pei, ZOU Min, GU Zhenxin, et al. Heat-induced polymerization behavior variation of frozen-stored gluten[J]. Food Chemistry, 2018, 255: 242−251.
［38］ GUO Lunan, XU Dan, FANG Fang, et al. Effect of glutathione on wheat dough properties and bread quality[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 96: 103116.
［39］ ZHAO Beibei, FU Shijian, LI Hua, et al. Quality evaluation of steam reheated frozen steamed bread[J]. LWT, 2021, 150: 112074.