

# 加工方式对面筋蛋白结构及性质影响的研究进展

## Research progress on the effects of processing methods on gluten protein structure and properties

崔国庭<sup>1,2</sup> 王 缙<sup>1,2</sup> 郭金英<sup>1,2</sup> 任国艳<sup>1,2</sup>

CUI Guoting<sup>1,2</sup> WANG Duan<sup>1,2</sup> GUO Jinying<sup>1,2</sup> REN Guoyan<sup>1,2</sup>

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 食品加工与安全国家级教学示范中心, 河南 洛阳 471023)

(1. College of Food & Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. National Teaching Demonstration Center for Food Processing and Safety, Luoyang, Henan 471023, China)

**摘要:**面筋蛋白是面类食品中重要的组成成分。常见的面类食品加工方法,如加热、冷冻、机械处理及发酵工艺会破坏面筋蛋白的二级结构,面筋蛋白的疏水性、二硫键发生变化,面筋蛋白会发生变性、聚集等复杂的物理化学变化,进而影响面制品的质构与风味。文章主要介绍了加热、冷冻、粉碎、揉面、挤压及发酵工艺等加工方式对面筋蛋白的结构、性质影响的研究现状,并展望了面筋蛋白未来的研究方向。

**关键词:**面筋蛋白;热加工;冷冻;机械处理;发酵;蛋白质结构

**Abstract:** Steamed bread, noodles, deep-fried dough sticks and other noodle foods are an important part of our diet, and gluten protein is an important component of noodle foods. Common food processing techniques used to prepare noodles, including heating, freezing, mechanical processing, fermentation, and electric field treatment, alter the hydrophobic disulfide bond of the protein, denature and aggregate the protein, and cause other intricate physical and chemical changes, all of which have an impact on the texture and flavor of the finished noodle product. This paper mainly introduces the current research status of the influence of processing methods such as heating, freezing, crushing, kneading, extrusion, fermentation, and electric field processing on the structure and properties of the gluten protein.

**Keywords:** gluten protein; thermal processing; freezing; mechanical treatment; fermentation; protein structure

面筋蛋白又称为贮藏蛋白,主要由麦醇溶蛋白和麦谷蛋白组成,面筋蛋白约占小麦蛋白总量的 80%。面筋蛋白形成三维空间网状结构受到原料中麦谷蛋白和麦醇溶蛋白比例、外源添加物、加工方式、冷冻变性等因素的影响。馒头、面条、油条等面制品通常需要进行冷冻冷藏、酵母发酵、蒸煮、油炸等处理,经过这些物理或生物加工处理,面筋蛋白的结构会发生改变,进而影响面筋蛋白的功能性质以及面制品的品质。国内外学者广泛研究了加工条件对面筋蛋白结构和功能性质的影响,文章拟综述物理和生物等加工手段对面筋蛋白结构与功能性质的影响,以期对面制品等相关食品领域研究提供依据。

### 1 热加工技术对面筋蛋白的影响

以小麦为基础的面制品的生产过程中,经常需要经过蒸煮、焙烤、油炸或微波等热加工工艺。适宜的热加工能提高面制品的感官特性,改变面筋蛋白相对分子质量、麦谷蛋白与麦醇溶蛋白比例、面筋蛋白分子高级结构,延长面制品的保质期,其功能特性如溶解度、持水力、乳化性、起泡性以及致敏性/抗原性等理化性质亦随之改变<sup>[1]</sup>。

蒸煮是面条等面制品常用的热加工方法之一。面筋蛋白经过高温高湿处理,面筋蛋白分子高级结构趋向于紊乱,理化性质发生改变(见表 1)。麦醇溶蛋白分子中的  $\beta$ -折叠比例下降,无规卷曲比例上升,随着温度增加至 100 °C 后结构出现紊乱;麦谷蛋白在低于 80 °C 加热过程中逐步展开分子链,加热温度高于 80 °C,麦谷蛋白重新折叠、聚合,其聚体质量分数显著升高、粒径增大、 $\alpha$ -螺旋和  $\beta$ -折叠等有序结构比例降低,无规卷曲等无序结构比例上升。随着加热时间的延长,麦谷蛋白占比增高、麦醇溶蛋白则相反,面筋蛋白网络中的孔隙增大<sup>[2]</sup>,蛋白质分

基金项目:河南省科技攻关计划(编号:14202110038)

作者简介:崔国庭(1978—),男,河南科技大学讲师,博士。

E-mail: cuiguoting1978@163.com

收稿日期:2023-01-29 改回日期:2023-12-04

表 1 温度对面筋蛋白结构与性质的影响

Table 1 Effects of temperature on structure and properties of gluten protein

加工方式	加工条件	结构与功能性质的变化	变化机理	参考文献
蒸煮	加热温度 100 °C; 加热时间 60~1 000 min; 加热湿度 (85±5) %	面筋蛋白变性, 溶解性降低, 面筋蛋白网络空隙变大	面筋蛋白受热变性, 暴露的基团导致谷蛋白与醇溶蛋白相互作用, 聚合进而引起溶解性降低; 麦醇溶蛋白分子间通过二硫键缔合, 生成高分子量的麦谷蛋白	[2]
	加热温度 121 °C; 加热时间 15 min	醇溶蛋白致敏性降低	醇溶蛋白的抗原表位由于水分子或其他因素发生了变化, 形成新的抗原表位	[3]
	加热温度 50~90 °C; 加热时间 15~60 min	醇溶蛋白中 $\beta$ -折叠含量减少, 无规卷曲含量增加, 粒子直径、溶解度、起泡能力、泡沫稳定性增加	高温破坏了醇溶蛋白内部的氢键, 导致蛋白分子链伸展, 分子表面电荷发生改变, 静电引力增加, 造成蛋白聚合, 粒径增大	[4]
油炸	油炸温度 190 °C; 油炸时间 60 s	二级结构发生改变, $\alpha$ -螺旋和 $\beta$ -转角含量显著降低, $\beta$ -折叠和无规卷曲含量显著升高	高温油炸造成面筋蛋白分子断裂, 破坏了维系蛋白质二级结构的氢键、二硫键和疏水相互作用等作用力	[5-6]
	油炸温度 (190±3) °C; 油炸时间 120 s	麦醇溶蛋白含量下降, 面筋网络结构增强	麦谷蛋白和麦醇溶蛋白之间以二硫键、疏水相互作用聚合, 形成麦谷蛋白聚合体; 糊化淀粉与面筋蛋白结合, 强化了面筋网络结构	[7-8]
	油炸温度 180 °C, 油炸时间 90 s	面筋蛋白效率降低, 安全性降低	蛋白质的氨基酸残基与还原糖发生美拉德反应, 生成丙烯酰胺	[9]
焙烤	焙烤温度 150~230 °C; 焙烤时间 25~45 min	面筋蛋白消化率降低	麦谷蛋白大聚体含量增加, 面筋蛋白参与美拉德反应	[10]
微波	微波功率 100~800 W, 微波处理时间 1~4 min	二级结构中 $\alpha$ -螺旋含量降低, $\beta$ -折叠、 $\beta$ -转角和无规卷曲含量上升; 面筋蛋白的网状结构变得稀疏	微波的热作用破坏了蛋白质分子结构的共价键和分子间作用力如二硫键、氢键、范德华力等作用力, 巯基、二硫键含量降低, 造成面筋蛋白的空间结构发生变化	[11]
	微波功率 600, 800, 1 000 W; 微波处理时间 1 min	面筋蛋白表面疏水性提高, 水合能力降低; 面筋蛋白粒径减小、静态流变表观黏度降低, 网状结构受到破坏	微波作用导致面筋蛋白分子亲水基团之间作用, 使面筋蛋白分子发生交联; 微波的热效应破坏了面筋蛋白分子内、分子间的非共价、二硫键等作用力, 改变了面筋蛋白的亚基结构, 降低了亚基间的相互作用	[12]
	微波功率 700 W, 微波处理时间 90 s	改善面筋蛋白的持水力和凝胶性质、微观结构	微波作用提高了面筋蛋白体系中的疏水相互作用、促使面筋蛋白形成更致密、均匀的三维空间网状结构	[13]
	微波功率 1 000 W, 微波处理时间 4 min	面筋消化率随微波处理时间显著降低	微波加热促进了面筋蛋白分子间的交联, 影响了胃蛋白酶、胰蛋白酶对面筋蛋白分子的酶解	[14]

子链伸展、柔性增加, 分子中的二硫键断裂、暴露出大量的疏水性基团, 导致其表面的疏水性增高、起泡能力和泡沫稳定性增加, 溶解度下降; 此外, 热处理还会导致麦醇溶蛋白分子聚集, 降低其致敏性<sup>[3]</sup>; 热变性的会使麦醇溶蛋白暴露不同的功能基团, 使其抗原特性降低 64%, 降低了醇溶蛋白被免疫球蛋白识别的概率<sup>[4]</sup>。

油炸是油条等面食常用的另一种热加工方法。油炸能够影响面筋蛋白的分子结构、含量、增强面筋网络结

构、降低面筋蛋白的营养<sup>[5]</sup>。维系面筋蛋白网络稳定性的因素主要为二硫键和疏水相互作用, 高温油炸造成面筋蛋白分子断裂, 破坏了维系蛋白质二级结构的氢键、二硫键和疏水相互作用等作用力, 显著改变了面筋蛋白的二级结构。油炸之后, 面筋蛋白中的  $\alpha$ -螺旋和  $\beta$ -转角含量显著降低,  $\beta$ -折叠和无规卷曲含量显著升高<sup>[6]</sup>, 高温油炸造成面筋蛋白分子断裂, 再以二硫键、疏水相互作用进行聚合, 形成了分子量更高的麦谷蛋白聚合体。张媛<sup>[7]</sup>

认为在高温油炸过程中,蛋白分子发生高温热聚形成麦谷蛋白聚合体,是面筋网络结构得到增强的原因之一; $\alpha$ -螺旋含量降低、 $\beta$ -折叠含量增加,是面筋网络结构增强的另一个原因。此外,还有学者<sup>[8]</sup>认为,面筋网络结构的增强是由于糊化后的淀粉与面筋蛋白相结合,形成了强度和弹性更高的结构,从而增强了面筋网络结构。油炸过程中,面筋蛋白的氨基酸残基与还原糖发生美拉德反应,在提高面制品香气与色泽的同时,蛋白质的消化率降低、生成具有健康威胁的化合物丙烯酰胺<sup>[9]</sup>。

烘烤是食品工业常用的另一种热加工工艺。烘烤食品种类繁多,蛋白质经过烘烤与还原糖进行美拉德反应,增加了食品的风味、色泽,降低了蛋白质的营养价值。有研究<sup>[10]</sup>显示,经过烘烤处理,增加了麦谷蛋白大聚体分子之间的二硫键,降低了面筋蛋白的消化率。目前研究烘烤对蛋白质结构影响文献报道较少,且主要集中在烘烤对于面筋蛋白质消化率的影响,烘烤对于面筋蛋白质结构的影响有待研究者继续深入探索。

微波以其高效的热加工效率逐渐被应用于食品加工中。微波加热之后,面筋蛋白的二级结构被破坏、面筋网络结构增强、面筋蛋白消化率下降(见表1)。刘海波等<sup>[11]</sup>研究发现,面筋蛋白经100~800 W的微波处理,其二级结构被破坏, $\alpha$ -螺旋含量显著降低, $\beta$ -折叠、 $\beta$ -转角和无规卷曲含量上升,可能是微波的热作用破坏了蛋白质分子间的二硫键、氢键、范德华力等作用力,导致了面筋蛋白的空间结构的改变;张海华等<sup>[12]</sup>使用200~1 000 W微波处理面筋蛋白,微波的热效应引起面筋蛋白二级结构 $\beta$ -折叠结构、扩展结构、 $\alpha$ -螺旋和 $\beta$ -转角结构的形成。陆毅等<sup>[13]</sup>使用微波预处理面筋蛋白,发现面筋蛋白的凝胶强度得到显著提高,微波改善了面筋蛋白体系中的疏水相互作用、促使面筋蛋白形成更致密、均匀的三维空间网状结构。Xiang等<sup>[14]</sup>的研究还显示,使用1 000 W微波处理5 min后,面筋蛋白在体外消化4 h的消化率仅为

空白对照组面筋蛋白的34%,消化率显著下降;面筋蛋白的消化率随微波处理时间延长或微波功率增大而下降。其下降原因可能是微波处理促进了面筋蛋白分子间的交联,并且随着微波功率和处理时间的增加,面筋蛋白分子间交联程度也随之上升,从而影响了胃蛋白酶和胰蛋白酶与面筋蛋白分子的接触,导致消化率下降。

## 2 冷冻对面筋蛋白的影响

随着冷冻食品快速发展,冷冻面团以其加工方便、工业化、标准化程度高等优点,在面制品市场中越来越受到广泛的关注和应用<sup>[15]</sup>。但是冷冻面团存在一些问题,如冻藏破坏了面筋蛋白的网络结构,造成面团醒发时间长,面制品黏弹性变差、感官评价下降等问题<sup>[16]</sup><sup>98-119</sup>(见表2)。为克服这个问题,国内外对面筋蛋白在冻融过程中的结构和理化特性等方面的变化进行了大量的研究。

面筋蛋白在冷冻及冻融过程中的结构变化是冷冻面制品品质下降的主要原因,其结构变化主要体现在面筋蛋白二级结构的改变<sup>[20]</sup>。面筋蛋白在冷冻过程中蛋白的二级结构变化受到冷冻温度和时间的影响。在-18℃条件下冻藏时间高于90 d,易溶于SDS的面筋蛋白中 $\alpha$ -螺旋含量相对于冻藏初期降低了10%、 $\beta$ -折叠含量上升了7.9%、 $\beta$ -转角增加了1.9%;难溶于SDS的面筋蛋白中 $\alpha$ -螺旋和无规卷曲含量分别上升了10.7%和3.2%, $\beta$ -折叠降低了12.6%、 $\beta$ -转角下降了1.4%。面筋蛋白在冷冻贮藏过程中分子量降低、二硫键比例下降、游离巯基含量升高,面筋蛋白分子表面疏水性增加,面筋蛋白网络结构变得破碎,从而引起面筋蛋白的起泡性、黏弹性、热稳定性等功能性质发生变化,导致冷冻面制品品质劣化<sup>[21]</sup>。面筋蛋白相对分子质量在冻融过程中随着冷冻时间的延长(10~120 d)而降低,可能是蛋白质分子内、分子间的二硫键断裂、巯基含量增加,二硫键比例下降引起的,这与面筋蛋白在冻融过程中温度的波动有关<sup>[22]</sup>。

表2 冷冻对面筋蛋白结构与性质的影响

Table 2 Effects of freezing on structure and properties of gluten protein

加工方式与条件	结构与功能性质的变化	变化机理	参考文献
-18℃冻藏90 d以上;-18℃冻藏10 d,升温至0℃保持12 h,降温至-18℃冻融冻藏,60 d以上	易溶部分中 $\alpha$ -螺旋转化为 $\beta$ -折叠和无规卷曲,难溶部分中 $\beta$ -折叠和 $\beta$ -转角转化为 $\alpha$ -螺旋和无规卷曲	水分在冻藏过程中发生迁移和重结晶,面筋蛋白高聚物发生解聚,二硫键的断裂,自由巯基含量增加,面筋蛋白解聚生成小分子的蛋白质使其网络结构疏松,热稳定性下降	[16] <sup>98-119</sup>
-18℃冻藏0~120 d	面筋蛋白的网络状结构变得疏松,热稳定性下降		
-18℃冻藏45~60 d	面筋蛋白起泡性降低,热稳定性升高	冷冻降低了面筋蛋白结合水的能力,导致起泡性下降;冻藏中面筋蛋白分子链内部的疏水性基团暴露,表面疏水性升高,热变性温度升高	[17-19]

面筋蛋白结构与相对分子质量的改变导致了面筋蛋白起泡性、流变特性和热稳定性等功能性质的变化。面筋蛋白的气泡能力和黏弹性随冻藏时间的延长而下降, Wang 等<sup>[17]</sup>研究显示, 冻藏 45 d 后, 醇溶蛋白的气泡体积降低了 26.18%, 可能是由于冷冻破坏了面筋蛋白的结构, 导致小麦面筋蛋白表面疏水性提高、水合能力下降。面筋蛋白在冻藏过程中黏性模量( $G''$ )、弹性模量( $G'$ )及损耗角( $\tan\delta$ )均呈下降趋势, 这主要是冻藏过程中冰晶破坏了面筋蛋白网络结构造成的结果<sup>[18]</sup>。面筋蛋白冻藏 60 d 的热变性温度由冻藏前的 52.95 °C 增加至 60.35 °C, 可能是在冻藏过程中面筋蛋白分子链伸长, 内部的疏水性基团暴露引起蛋白质的疏水性增加, 面筋蛋白表面疏水性上升, 导致了其热变性温度升高<sup>[19]</sup>。在冻藏初期面筋蛋白的表面光滑、组织紧密, 冻藏后期(120 d)表面粗糙、结构部分碎片化, 可能是在冻藏期间冰晶对面筋蛋白的结构造成了破坏, 从而在微观上表现出结构的变化<sup>[16]100-105</sup>。

### 3 机械处理对面筋蛋白的影响

粉碎、揉面、挤压等机械处理对面筋蛋白结构及其理化性质有重要的影响。超微粉碎技术是一类利用机械作用力粉碎物料的加工技术, 采用超微粉碎技术处理之后,

面筋蛋白的粒度、二级结构发生显著变化, 总巯基含量降低, 分子柔性、起泡性和乳化性显著提高(见表 3)。经超微粉碎面筋蛋白粒度由 109.35  $\mu\text{m}$  减小到 3.60  $\mu\text{m}$ , 二级结构中  $\beta$ -折叠和无规卷曲结构占比上升,  $\alpha$ -螺旋和  $\beta$ -转角含量显著下降, 面筋蛋白的起泡能力、泡沫稳定性、乳化活性和乳化稳定性分别提高了 50.0%, 20.0%, 6.0%, 1.1%。当面筋蛋白粒度为 5  $\mu\text{m}$  左右时, 面筋蛋白柔性显著增加、溶解度及消化性能得以提高<sup>[23]</sup>。球磨技术是一种新型的超微粉碎技术, 物料在球磨处理过程中, 受到碰撞、剪切、摩擦等机械作用, 粒径减小、蛋白质分子结构受到破坏、功能特性发生改变<sup>[24]</sup>。Liu 等<sup>[25]</sup>采用球磨处理小麦之后, 面筋蛋白的结构和功能性质均有不同程度的改变。面筋蛋白的二级结构呈现有序向无序的转变趋势,  $\alpha$ -螺旋和  $\beta$ -折叠含量降低,  $\beta$ -转角含量上升; 随着研磨时间的延长( $\geq 20$  min), 面筋蛋白分子链进一步展开、二硫键含量显著降低, 蛋白质表面疏水性、发泡能力和溶解度持续增高。通过扫描电镜观察, 发现球磨处理后的面筋蛋白破碎、表面粗糙、呈碎片状结构, 球磨处理破坏了面筋蛋白的表面结构。

揉面是制作面条、馒头、油条等食品的关键工艺, 对面制品的品质有决定性的影响。揉面可以促进面筋蛋白

表 3 机械处理对面筋蛋白结构与性质的影响

Table 3 Effects of mechanical treatment on structure and properties of gluten protein

加工方式与条件	结构与功能性质的变化	变化机理	参考文献
超微粉碎 气流压力(0.80±0.5) MPa, 气流温度 10~10 °C, 气流粉碎电机转速 3 000 ~ 15 000 r/min, 粉碎 1~6 次	面筋蛋白粒度减小, $\beta$ -折叠和无规卷曲结构占比上升, $\alpha$ -螺旋和 $\beta$ -转角含量下降; 溶解度、起泡能力、泡沫稳定性、乳化活性和稳定性提高	超微粉碎降低了小麦面筋蛋白的粒度, 破坏了面筋蛋白分子的二级空间结构, 暴露了蛋白质分子内部的巯基, 在氧气下使巯基转化为分子间或分子内二硫键	[23]
球磨机以 400 r/min 研磨 20~60 min	面筋蛋白颗粒变小, 二级结构 $\alpha$ -螺旋和 $\beta$ -折叠含量降低, $\beta$ -转角含量上升; 分子链展开, 二硫键含量降低, 面筋蛋白表面疏水性、发泡能力和溶解度增高, 面筋蛋白表面粗糙、破损	球磨处理产生的高碰撞力、剪切力以及摩擦力破坏了面筋蛋白分子中原有的氢键; 暴露了埋藏在蛋白质分子内部的基团, 促使蛋白质分子链由刚性向柔性转变	[24-25]
揉面 揉面 2~15 min	$\beta$ -折叠含量增加、无规卷曲降低, 面筋蛋白交联程度增加	揉面中的挤压作用促进面筋蛋白分子链伸展, 分子间以疏水相互作用、二硫键交联	[26-27]
挤压 挤压温度 140~180 °C, 螺杆转速 180 r/min	面筋蛋白质相对分子质量增加; $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -折叠和无规卷曲含量降低, $\beta$ -转角含量升高	挤压产生高温、高压, 破坏稳定二级结构的氢键, 蛋白质分子链暴露出内部疏水性基团、硫醇基团, 分子间二硫键、疏水相互作用使蛋白质聚集、交联, 分子量增加	[28-30]
挤压 挤压温度 155~175 °C, 螺杆转速 400 r/min	面筋蛋白聚集、变性, 致敏性和溶解性降低、消化率增高	挤压产生高压和高温, 促使面筋蛋白质伸展、变性, 暴露内部的疏水性氨基酸残基及酶分解位点	[31-34]

的交联,稳定面筋网络的结构,提高面团硬度、弹性和黏性。揉面初期、中期(0~8 min),面团中二硫键含量增加、水合作用增强、疏水作用力显著下降,二级结构中 $\beta$ -折叠含量增加32.34%、无规卷曲降低56.52%,蛋白质二级结构趋于稳定,随着揉面时间延长,面筋蛋白交联程度不断增加。揉面后期(10~15 min)各个指标趋于稳定,或有不同程度的升高或降低<sup>[26-27]</sup>。

挤压技术是一种常见的食品加工技术,其是在高温、高压条件下,经过剪切处理,形成一定形状或组织状态产品的加工技术。挤压技术具有成本低、能耗少、工艺简单等特点,适合连续、高效的工业化生产,在谷物类、豆类农产品加工中被大量应用<sup>[35-36]</sup>。天然蛋白质受到挤压时,其蛋白质分子会呈现链伸展、团聚、聚集、交联等微观结构的变化。

面筋蛋白在挤压过程中由于受到高温、高压和剪切力的作用,蛋白分子的高级结构、溶解性降低、消化率和致敏性等性质均会发生改变。对小麦面筋蛋白进行挤压处理,其二级结构中部分 $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -折叠和无规卷曲含量降低, $\beta$ -转角含量升高,可能是在挤压过程中部分二级结构发生了转化<sup>[28]</sup>。二硫键是稳定蛋白质三级结构的主要作用力之一,面筋蛋白分子中的二硫键含量随挤压温度(140~180 °C)升高而降低、自由巯基含量则随温度的升高而增大,表明面筋蛋白的三级结构随挤压温度的升高而加速改变<sup>[29]</sup>。面筋蛋白经挤压处理之后会发生蛋白质聚集反应,其机理在于:面筋蛋白质在挤压过程中受到压力、热的作用,破坏了维系蛋白质二级结构稳定性的作用力,如氢键、范德华力等,使蛋白质分子链伸展,暴露出疏水性基团、硫醇基团,然后通过分子间二硫键使蛋白质形成聚集体并逐渐增大<sup>[30]</sup>。在挤压过程中,面筋蛋白与其他成分如淀粉、脂质等形成复合物,产生新的结构如挤压过程中蛋白质与脂肪形成脂肪-蛋白复合体、面筋蛋白-淀粉复合体,形成了紧密的结构,提高了产品的品质<sup>[37-38]</sup>。面筋蛋白挤压后溶解性降低,有学者<sup>[31]</sup>认为是挤压造成面筋蛋白质变性,蛋白质表面的疏水性氨基酸残基由内部暴露后增加,降低了面筋蛋白的溶解性;Raffael等<sup>[32]</sup>和Liu等<sup>[33]</sup>认为,是挤压使面筋蛋白分子聚集、相对分子量增加造成的。挤压处理后面筋蛋白消化率的增加,可能是面筋蛋白在挤压过程中高级结构被破坏,蛋白质伸展、变性,增加了蛋白酶分解的位点,提高了消化率<sup>[34]</sup>;Shivendra等<sup>[39]</sup>推测,挤压处理破坏了面粉中的抗营养因子,尤其是蛋白酶抑制剂的失活,进而提高了面筋蛋白的消化率。

目前,国内关于挤压对于面筋蛋白的研究聚焦于挤压加工工艺的优化、挤压对面制品品质的影响方面,对于面筋蛋白的结构、性质的影响还需进一步研究。

## 4 发酵对面筋蛋白的影响

面团发酵是一类利用乳酸菌、酵母菌等微生物在增殖过程中产生氨基酸、短链脂肪酸等各类代谢产物、改善面制品的营养风味与质构等品质的传统加工技术<sup>[40]</sup>。发酵引起面筋蛋白分子的水解,改变了面筋蛋白的二级结构和面筋网络结构、水合能力和面团的持气性。Siddiqi等<sup>[41]</sup>和Carlo等<sup>[42]</sup>研究发现,在乳酸菌或酵母菌发酵过程中产酸,降低了环境的pH,活化了内源性蛋白酶天冬氨酸蛋白酶、羧肽酶,将蛋白水解产生多肽、寡肽、氨基酸等活性成分,蛋白的水解程度与发酵时间呈正相关。韩红超等<sup>[43]</sup>研究发现,随着发酵时间的延长(60~90 min),麦醇溶蛋白二级结构中的无规卷曲含量下降, $\beta$ -转角含量增加, $\alpha$ -螺旋和 $\beta$ -折叠含量相对稳定;麦谷蛋白中的 $\beta$ -折叠含量先升后降, $\beta$ -转角含量则呈相反的变化(见表4)。面筋网络结构也随着面团适度发酵(1.0 h)变得稳定<sup>[44]</sup>。面筋蛋白在面团发酵初期形成粗糙、疏松、不连续、不均匀的面筋网络结构,随着发酵时间的延长,面筋蛋白进一步展开、聚集,面筋网络强度、稳定性、延展性和黏弹性均得到增加,从而提高了面团的强度和黏弹性<sup>[48-49]</sup>。然而在长时间(12 h)发酵后,微生物发酵产生的酸化造成面筋蛋白网络结构被破坏,降低了面筋蛋白网络结构强度,导致湿面筋无法洗出;随着发酵时间的延长,面筋蛋白中二硫键含量呈先升后降,游离巯基含量呈上升趋势,二硫键的断裂造成面筋含量与质量的降低<sup>[50]</sup>。面筋蛋白网络结构强度减弱,提高了面团的持气性<sup>[51-52]</sup>。许可等<sup>[44]</sup>研究发现,发酵能够提高面筋蛋白的水合能力,麦醇溶蛋白的水合能力在发酵60~90 min范围内得到增强。目前国内外聚焦于面筋网络结构和面筋蛋白与其他组分的相互作用研究,关于面筋蛋白在新型发酵加工工艺中的结构与性质的变化规律还有待于进一步探索。

## 5 展望

面筋蛋白在加工过程中的变化是影响面制品品质的关键,面筋蛋白分子链伸展、面筋蛋白分子内、分子间二硫键和疏水相互作用是形成面筋空间网状结构的主要因素,能影响这些因素的加工方式均与面筋的形成性质相关。如:油炸能促进面筋蛋白分子断裂后再以二硫键、疏水相互作用进行聚合,增强面筋蛋白的网络结构;蒸煮、油炸、焙烤、微波处理、揉面和挤压加工均能促进面筋的形成;冷冻和发酵则破坏面筋的形成。面筋蛋白经不同的加工处理,能提高或降低面筋蛋白的功能性质,因此研究面筋蛋白在不同加工条件下的变化机理及调控方法对于改善、提高面制品品质有重要的意义。

目前国内外有关面筋蛋白的研究主要聚焦于加工方式、共存成分、外源添加物对面筋蛋白结构、性质以及面制品品质的影响,随着加工技术方法的革新,未来关于面

表 4 发酵对面筋蛋白结构与性质的影响

Table 4 Effects of fermentation on structure and properties of gluten protein

加工方式与条件	结构与功能性质的变化	变化机理	参考文献
发酵温度 35 ℃,相对湿度 70%,发酵 60~100 min	醇溶蛋白的无规卷曲含量降低,β-转角升高;麦谷蛋白中 β-折叠相对含量先升后降,β-转角相对含量先降后升;蛋白的水合能力和面筋蛋白网络结构增强	醇溶蛋白中无规卷曲转化为 β-转角;麦谷蛋白中 β-折叠与 β-转角相互转化	[43]
	发酵时间延长,麦谷蛋白水合作用减弱、醇溶蛋白的水合作用增强	亲水基团遭到破坏、相邻亲水基团联结在一起,导致水合作用减弱;水分活度增加,醇溶蛋白中的亲水基团暴露,引起水合作用增大	
发酵温度 30 ℃,发酵相对湿度 80%,发酵时间 1~2 h	无规卷曲含量升高、α-螺旋含量降低;β-折叠含量先上升后下降;面筋网络结构的稳定性降低、有序化构象被破坏	发酵过程中产生的有机酸和蛋白酶破坏了稳定蛋白质二级结构的作用力	[44]
	面筋网络强度、稳定性、延展性和弹性提高	面筋蛋白分子中的巯基暴露后被氧化成二硫键,使弹性和黏性改善	
发酵温度 35 ℃,相对湿度 80%,发酵时间 0~15 h	面筋蛋白网络结构被破坏,蛋白网络强度下降,面团持气性增加	发酵过程中产生的酸性物质和蛋白酶破坏了面筋蛋白分子间的二硫键	[45]
发酵温度 30 ℃,发酵时间 0~10 h	随着发酵时间延长,面筋蛋白降解,多肽、小分子肽、游离氨基酸含量增加	乳酸菌发酵过程中促进大相对分子质量蛋白降解为多肽、小分子肽、游离氨基酸	[46-47]
发酵温度 35 ℃,发酵时间 0~19 h			

筋蛋白的研究可以从以下方向进行:① 新的加工方法对于面筋蛋白结构、性质与面制品品质的影响;② 不同加工技术对于面筋蛋白与共存成分的相互作用、对面筋蛋白营养与安全的影响机制,以及相应的调控方法和手段;③ 深入研究加工方法影响面筋蛋白结构和功能的机理,建立加工方法、面筋蛋白结构与性质、面制品品质调控方法三者之间的联系,用于指导面制品加工。

参考文献

[1] WIESER H. Chemistry of gluten proteins[J]. Food Microbiology, 2007, 24(2): 115-119.

[2] 周小玲, 李娜, 张冬生. 高温高湿处理对小麦中蛋白质性质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 7-13.

ZHOU X L, LI N, ZHANG D S. Effects of high-temperature and high-humidity treatment on the properties of the proteins from wheat flour[J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 7-13.

[3] 王娜, 孟利军, 黄忠民, 等. 加工方式对非发酵面团小麦醇溶蛋白致敏性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 292-299.

WANG N, MENG L J, HUANG Z M, et al. Effects of different processing on allergenicity of wheat gliadin in non-fermented dough[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 292-299.

[4] NICOLETA S, IULIANA B, CARMEN B, et al. Structural and antigenic properties of thermally treated gluten proteins[J]. Food Chemistry, 2018, 267: 43-51.

[5] BORDIN K, TOMIHE K M, KAZUE A K, et al. Changes in food caused by deep fat frying: A review[J]. Archivos Latinoamericanos de Nutricion, 2013, 63(1): 5-13.

[6] ZHOU R X, SUN J, QIN H F, et al. Effect of the frying process on the properties of gluten protein of you-tiao[J]. Food Chemistry, 2020, 310: 1-8.

[7] 张媛. 小麦蛋白和淀粉加工性质变化及其对油条品质的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016: 21-30.

ZHANG Y. Changes of wheat protein and starch during the processing in relation to the You-tiao's quality [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016: 21-30.

[8] 安红周, 薛文通, 李盘欣, 等. 小麦粉对我国传统食品—油条品质影响的探讨[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(6): 51-55.

AN H Z, XUE W T, LI P X, et al. Effects of different wheat flours on quality of Youtiao[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2008, 23(6): 51-55.

[9] 李超文, 郭晓娜, 朱科学. 油条风味物质组成分析及添加麦麸对其影响的研究[J]. 中国粮油学, 2015, 30(5): 6-10.

LI C W, GUO X, ZHU K. Analysis of flavor composition of fried bread stick and study of the effect of wheat branon aroma profile[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(5): 6-10.

[10] OGILVIE O, ROBERTS S, SUTTON K, et al. The effect of baking time and temperature on gluten protein structure and celiac peptide digestibility[J]. Food Research International, 2021, 140: 1-9.

[11] 刘海波, 廖超, 郑万琴, 等. 微波处理小麦面粉对淀粉及蛋白

- 性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(14): 91-97.
- LIU H, LIAO C, ZHENG W Q, et al. Effect of microwave treated wheat flour on starch and protein properties [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(14): 91-97.
- [12] 张海华, 朱科学, 陈晔, 等. 微波处理对小麦面筋蛋白结构的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(5): 65-69.
- ZHANG H H, ZHU K X, CHEN Y, et al. Effect of microwave treatment on structure of wheat gluten protein[J]. Food Science, 2011, 32(5): 65-69.
- [13] 陆毅, 穆冬冬, 罗水忠, 等. 微波预处理对热诱导小麦面筋蛋白凝胶性质和微观结构的影响[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(11): 14-19.
- LU Y, MU D D, LUO S Z, et al. Effect of microwave pretreatment on gel properties and microstructure of heat-induced wheat gluten [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(11): 14-19.
- [14] XIANG S Y, ZOU H F, LIU Y H, et al. Effects of microwave heating on the protein structure, digestion properties and Maillard products of gluten[J]. J Food Sci Technol, 2020, 57(6): 2 139-2 149.
- [15] 张艳艳, 王冰蕊, 丁江涛, 等. 静电场辅助冷冻对面筋蛋白品质及分子结构的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(9): 30-35.
- ZHANG Y Y, WANG B R, DING J T, et al. Effect of electrostatic field-assisted freezing on the quality and molecular structure of gluten protein [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(9): 30-35.
- [16] 赵雷. 冻藏对面筋蛋白分子量、链结构及聚集态影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- ZHAO L. Study on effect frozen storage on molecular weight and distribution, chain conformation and aggregated state structure of gluten [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [17] WANG P, XU L, NIKOO M, et al. Effect of frozen storage on the conformational, thermal and microscopic properties of gluten: Comparative studies on gluten-, glutenin- and gliadin-rich fractions [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35: 238-246.
- [18] JIA C, HUANG W, PATRICIA R D, et al. Hydration, polymerization and rheological properties of frozen gluten-water dough as influenced by thermostable ice structuring protein extract from Chinese privet (*Ligustrum vulgare*) leaves[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 59(2): 132-136.
- [19] XUAN Y F, ZHANG Y, ZHAO Y Y, et al. Effect of hydroxypropyl methylcellulose on transition of water status and physicochemical properties of wheat gluten upon frozen storage [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 35-42.
- [20] 邹敏, 杨润强, 顾振新, 等. 冻藏对面团中面筋蛋白分子结构及功能特性影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(19): 347-352.
- ZOU M, YANG R Q, GU Z X, et al. Research progress in the effect of frozen storage on molecular structure and functional properties of gluten proteins in dough[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(19): 347-352.
- [21] 赵雷, 于亚楠, 胡卓炎, 等. 恒温冻藏对面筋蛋白结构及热力学特性的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(5): 161-166, 78.
- ZHAO L, YU Y N, HU Z Y, et al. Effect of the duration of frozen storage on the structure and thermodynamic properties of gluten protein[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(5): 161-166, 78.
- [22] 赵雷, 胡卓炎, 刘国琴, 等. 冻融对面筋蛋白结构及面粉粉质特性的影响[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2016, 48(3): 122-127.
- ZHAO L, HU Z Y, LIU G Q, et al. Effects of frozen-thaw cyclic storage on the molecular structure of hydrated gluten and farinograph properties of the dough[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2016, 48(3): 122-127.
- [23] 郭武汉, 关二旗, 卞科. 超微粉碎处理对小麦面筋蛋白性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(5): 13-18.
- GUO W H, GUAN E Q, BIAN K. Effects of superfine grinding treatment on the properties of wheat gluten [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(5): 13-18.
- [24] 谭文, 张钦俊, 万鹏宇, 等. 球磨处理对鸡蛋清蛋白结构、性质及起泡性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(11): 124-129.
- TAN W, ZHANG Q J, WANG P Y, et al. Effect of ball-milling treatment on protein structure and physicochemical and foaming properties of egg white[J]. Food Science, 2021, 42(11): 124-129.
- [25] LIU Z Q, ZHENG Z, ZHU G B, et al. Modification of the structural and functional properties of wheat gluten protein using a planetary ball mill[J]. Food Chemistry, 2021, 363: 1-8.
- [26] 孟莲, 周惠明, 朱科学, 等. 揉面过程中面团面筋蛋白结构的变化[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 19-24.
- MENG L, ZHOU H M, ZHU K X, et al. Study on the changes of dough gluten protein structure during kneading [J]. Food & Machinery, 2020, 36(2): 19-24.
- [27] 邵丽芳, 朱科学, 郭晓娜. 和面及揉面方式对冷冻熟面品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(11): 28-32.
- SHAO L F, ZHU K X, GUO X N. Effects of different mixing and kneading methods on the quality of frozen cooked noodles[J]. Food & Machinery, 2017, 33(11): 28-32.
- [28] 马宁, 朱科学, 郭晓娜, 等. 挤压组织化对小麦面筋蛋白结构影响的研究[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(1): 60-64.
- MA N, ZHU K X, GUO X N, et al. Study on the influence of textured extrusion on the structure of wheat gluten protein [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(1): 60-64.
- [29] FISCHER T. Effect of extrusion cooking on protein modification in wheat flour[J]. European Food Research and Technology, 2004, 218(2): 128-132.
- [30] 李淑静, 张波, 魏益民, 等. 挤压能量作用对蛋白质分子质量的影响研究进展[J]. 食品科学, 2013, 34(21): 399-402.
- LI S J, ZHANG B, WEI Y M, et al. A review on effect of extrusion energy on protein molecular weight [J]. Food Science, 2013, 34(21): 399-402.

- [31] 杜双奎, 魏益民, 张波. 挤压膨化过程中物料组分的变化分析[J]. 中国粮油学报, 2005(3): 39-43, 47.  
DU S K, WEI Y M, ZHANG B. Changes of material components during extrusion[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2005(3): 39-43, 47.
- [32] RAFFAEL O, SIMONET, PETER E, et al. Effect of high moisture extrusion cooking on protein-protein interactions of pea (*Pisum sativum* L.) protein isolates[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 50(6): 1 390-1 396.
- [33] LIU K S, HSIEH F H. Protein-protein interactions in high moisture-extruded meat analogs and heat-induced soy protein gels[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2007, 84(8): 741-748.
- [34] 刘宗浩, 张高鹏, 孙立娜, 等. 挤压对谷物蛋白的微观结构和功能特性影响的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(6): 158-165.  
LIU Z H, ZHANG G P, SUN L N, et al. Effects of microstructure and functional properties of cereal proteins by extrusion[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(6): 158-165.
- [35] 张百汝, 王斌, 王琨, 等. 挤压处理对豌豆蛋白功能特性及结构的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(1): 32-37.  
ZHANG B R, WANG B, WANG K, et al. Effect of extrusion treatment on the functional properties and structure of pea protein[J]. Food & Machinery, 2022, 38(1): 32-37.
- [36] 戚明明, 彭慧慧, 宋佳琳, 等. 挤压和酶解挤压对豌豆粉淀粉体外消化率、蛋白质结构和流变特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(1): 76-82.  
QI M M, PENG H H, SONG J L, et al. Effects of extrusion and enzymatic hydrolysis on the in vitro starch digestibility, protein structure and rheological properties of pea flour[J]. Food Science, 2022, 43(1): 76-82.
- [37] MARIO M, BONASTREE O, MANUEL G. Effect of the addition of extruded wheat flours on dough rheology and bread quality[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 57(3): 424-429.
- [38] FRANCISCO C C, ANA M C D B, ALMA R I R, et al. Molecular rearrangements in extrusion processes for the production of amaranth-enriched, gluten-free rice pasta[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 47(2): 421-426.
- [39] SHIVENDRA S, SHIRANI G, LARA W. Nutritional aspects of food extrusion: A review[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2007, 42(8): 916-929.
- [40] SUN X, WU S, LI W, et al. The effects of cooperative fermentation by yeast and lactic acid bacteria on the dough rheology, retention and stabilization of gas cells in a whole wheat flour dough system: A review[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108212.
- [41] SIDDIQI A, SOGI D S, SEHAJPAL P K. Effect of short-term sourdough fermentation on wheat protein[J]. Cogent Food & Agriculture, 2016, 2(1): 1-10.
- [42] CARLO G R, JOSÉ A C, LUANA N, et al. Use of fungal proteases and selected sourdough lactic acid bacteria for making wheat bread with an intermediate content of gluten[J]. Food Microbiology, 2014, 37(2): 59-68.
- [43] 韩红超, 李文钊, 周航, 等. 发酵时间对馒头品质及面筋蛋白结构的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(12): 15-19.  
HAN H C, LI W Z, ZHOU H, et al. Effects of fermentation time on steamed bread quality and gluten structure[J]. Food Science, 2018, 39(12): 15-19.
- [44] 许可, 王宏伟, 苏东民, 等. 发酵时间对面团加工特性及饅饼品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(10): 8-15.  
XU K, WANG H W, SU D M, et al. Effects of fermentation time on dough processing characteristics and quality attributes of nang[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(10): 8-15.
- [45] 刘长虹, 拱姗姗, 韩丹丹, 等. 深度发酵过程面团面筋蛋白的变化[J]. 食品科技, 2015(2): 204-207.  
LIU C H, GONG S S, HAN D D, et al. Changes of dough gluten in the depth of the fermentation process[J]. Food Science and Technology, 2015(2): 204-207.
- [46] 王金水, 杨森, 贾峰, 等. 酸面团发酵过程中蛋白质分解及多肽形成的变化规律[J]. 现代食品科技, 2015, 31(10): 69-73.  
WANG J S, YANG S, JIA F, et al. Patterns of protein degradation and peptide formation during sourdough fermentation[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(10): 69-73.
- [47] 胡莉萍. 乳酸菌和酵母共同发酵对面团和饼干品质特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2022: 17-44.  
HU L P. Effect of lactic acid bacteria and yeast co-fermentation on quality characteristics of dough and cracker[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022: 17-44.
- [48] 王香玉. 馒头制作过程中蛋白交联行为及其对品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 16-49.  
WANG X Y. Cross-linking of protein during production of Chinese steamed bread and its effect on quality thereof[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016: 16-49.
- [49] WANG X Y, GUO X N, ZHU K X. Polymerization of wheat gluten and the changes of glutenin macropolymer (GMP) during the production of Chinese steamed bread[J]. Food Chemistry, 2016, 201: 275-283.
- [50] 卫娟, 洪静, 郑学玲. 酸面团发酵过程中面团流变及面筋蛋白降解变化研究[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 129-134.  
WEI J, HONG J, ZHENG X L. Research on the change of dough rheology and gluten protein degradation during sourdough fermentation[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(3): 129-134.
- [51] BELÉN C, THIBAUT N, STÉPHANE G, et al. Interactions between *Kazachstania humilis* yeast species and lactic acid bacteria in sourdough[J]. Microorganisms, 2020, 8(2): 1-20.
- [52] 李萌, 徐一涵, 张建华. 乳酸菌发酵对淀粉类食品品质的影响[J]. 中国酿造, 2020, 39(2): 13-18.  
LI M, XU Y H, ZHANG J H. Effect of lactic acid bacteria fermentation on the quality of starchy foods[J]. China Brewing, 2020, 39(2): 13-18.