

# 面团组分及环境因素对面团二硫键形成的影响研究现状

赵金金, 周 雨, 郭俊杰, 连喜军\*

(天津商业大学, 生物技术与食品科学学院, 天津市食品生物技术重点实验室, 天津 300134)

**摘 要:** 面包、馒头、面条等面制品加工过程的本质是小麦面粉中蛋白与水相互作用形成包裹有淀粉和脂肪的面筋网络结构, 该结构加热后转变为形态固定的食品。面团中二硫键的形成量对面筋网络结构的质量和最终食品的品质起着决定性的作用, 而面团中的蛋白、淀粉等组分和环境因素影响面团中二硫键的形成量。本文综述了近年来面筋蛋白组成、淀粉组成及种类、面团 pH、发酵以及面团成熟温度等环境因素对面团中二硫键形成的影响, 提出了未来这方面研究的可能探索方向及相关产业的可能发展趋势, 以期为研究人员和食品生产者分析面制品品质变化提供理论支持, 促进提高面团品质、面制品质量的二硫键调控理论的形成和创建。

**关键词:** 二硫键; 面筋; 面团; 淀粉; 环境因素

## Status of research on the influence of dough composition and environmental factors on the formation of disulfide bonds in dough

ZHAO Jin-Jin, ZHOU Yu, GUO Jun-Jie, LIAN Xi-Jun\*

(Tianjin Key Laboratory of Food Biotechnology, School of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

**ABSTRACT:** The essence of processing flour products such as bread, steamed bread and noodles is that the protein in wheat flour interacts with water to form a gluten network structure coated with starch and fat, which is transformed into a fixed form of food after heating. The amount of disulfide bond formation in dough plays a decisive role in the quality of gluten network structure and the quality of final food, while the protein, starch and other components in dough and environmental factors affect the amount of disulfide bond formation in dough. This paper reviewed the effects of gluten protein composition, starch composition and types, environmental factors such as dough pH, fermentation and dough ripening temperature on the formation of disulfide bonds in dough in recent years, and put forward the possible exploration direction of this research in the future and the possible development trend of related industries. This review provided theoretical support for researchers and food producers to analyze the quality change of flour products. Also, the review will promote the formation and establishment of disulfide bond regulation theory to improve the quality of dough and flour products.

**KEY WORDS:** disulfide bond; gluten; dough; starch; environmental factors

基金项目: 国家自然科学基金项目(31871811、12172255、31571834)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31871811, 12172255, 31571834)

\*通信作者: 连喜军, 博士, 教授, 主要研究方向为淀粉回生、谷朊粉深加工、功能食品开发。E-mail: lianxijun@tjcu.edu.cn、lianliu2002@163.com

\*Corresponding author: LIAN Xi-Jun, Ph.D, Professor, Tianjin Key Laboratory of Food Biotechnology, School of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China. E-mail: lianxijun@tjcu.edu.cn, lianliu2002@163.com

## 0 引言

面包、面条等小麦产品是人们日常饮食中的传统主食,在世界范围内的生产和消费中占有重要地位。小麦粉具有形成面团的独特性质,这主要跟揉面过程形成面筋蛋白有关,而二硫键的形成是面筋形成的基本条件,对面筋蛋白的网络结构有重要影响<sup>[1]</sup>。目前许多学者开展了二硫键对面筋蛋白作用的研究。VOGEL 等<sup>[2]</sup>分析可溶于 60%乙醇的含半胱氨酸的  $\alpha$ -和  $\gamma$ -麦醇溶蛋白通过硫醇-二硫键交换反应与不溶于乙醇的麦谷蛋白结合形成面筋。石长硕<sup>[3]</sup>研究发现,水解大豆蛋白更容易通过二硫键与麦谷蛋白形成低分子量聚合物,抑制麦谷蛋白之间的二硫键连接,从而阻止面筋网络结构的形成。热诱导的巯基(SH)-二硫化物交换反应影响除不含半胱氨酸的  $\omega$ -醇溶蛋白外的所有面筋蛋白,醇溶蛋白-麦谷蛋白二硫键交联的过程形成了一个三维结构<sup>[4]</sup>。在微碱性条件下,由面筋中的二硫键形成的高度聚合的蛋白质网络减少嵌入结构中的淀粉颗粒的脱落,减弱了直链淀粉和支链淀粉的流动性<sup>[5]</sup>。但面团中各个组分对二硫键形成的相关研究较少<sup>[6]</sup>。本文综述了面筋中二硫键形成机制、影响面团中二硫键形成的面筋蛋白组成、淀粉组成及种类、面团 pH、发酵以及面团成熟温度等诸多因素,探讨了这类研究未来可能发展的方向,以更好地为相关科研人员和食品生产者提供参考理论。

## 1 面团中二硫键形成机制

揉面过程中面团中的醇溶蛋白和麦谷蛋白通过二硫键的交联形成面筋网络结构,其中醇溶蛋白主要形成分子内二硫键,麦谷蛋白分子间以二硫键连接为主。研究表明<sup>[7-8]</sup>,二硫键是维持面团结构的主要作用力,由半胱氨酸(Cys)的巯基交联形成。面筋蛋白中半胱氨酸含量很少( $\approx 2\%$ ),大部分的半胱氨酸以氧化的形式存在,在小麦籽粒成熟、碾磨、面团加工过程中形成蛋白质分子内或分子间的二硫键。图 1 为蛋白中二硫键形成示意图及其促进和抑制环境条件。面团形成过程中,面筋之间发生巯基-二硫键(SH-SS)交换反应,而 SH 氧化(其中两个巯基脱氢形成一个二硫键),以及 SH 和 SS 键的交换反应都会产生新的 SS 键,从而将同一条肽链不同部位或者不同肽链的氨基酸残基聚拢起来,形成的网络结构中蛋白质分子的排列更有序,从而稳定蛋白质的构象<sup>[7,9]</sup>。如图 1 所示,促进二硫键形成条件包括蛋白质构象变化、氧化试剂(如碘、二甲基亚砷、二胺和铁氰化钾)、分子内半胱氨酸反应(二硫化试剂如胱氨酸、氧化谷胱甘肽或二硫苏糖醇)、pH、温度、离子强度、共溶剂、促折叠发生剂,而抑制二硫键形成条件有不利折叠、折叠中间体、动力学阻碍、聚集、沉淀<sup>[10]</sup>。对于一个含有 6 个半胱氨酸的多肽,其二硫键的形成的可

能方式就有 15 种。半胱氨酸处于非折叠结构的蛋白典型浓度范围为 0.001~0.1 mol/L<sup>[7]</sup>,只有在此结构下半胱氨酸才能发生氧化形成二硫键,因此,调控蛋白质半胱氨酸在此浓度附近才有利于面筋蛋白二硫键的形成。

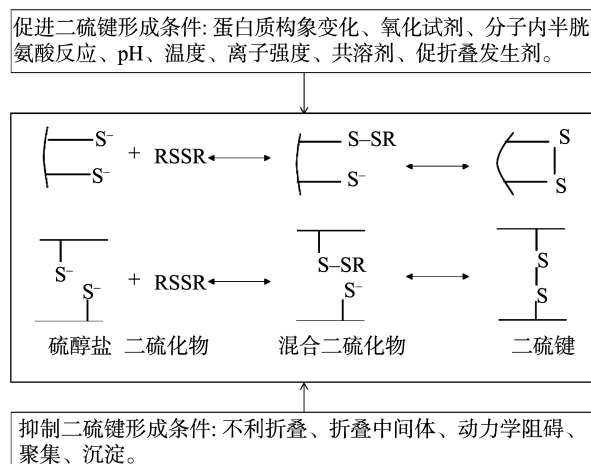


图 1 蛋白中二硫键形成示意图及其促进和抑制环境条件  
Fig.1 Schematic diagram of disulfide bond formation in protein and its promoting and inhibiting environmental conditions

## 2 面团中影响二硫键形成的因素

### 2.1 面筋蛋白组成

小麦面筋是小麦面团中去除淀粉颗粒后剩下的一种黏弹性物质。1907 年,奥斯本-门德尔(Osborne -Mendel)根据溶解特性将小麦籽粒中的蛋白质分成清蛋白(albumin)、球蛋白(globulin)、麦醇溶蛋白(也称麦胶蛋白, gliadin)、麦谷蛋白(glutenin)以及未被抽提的剩余蛋白(例如糖蛋白和脂蛋白)<sup>[11]</sup>。麦醇溶蛋白通常占小麦籽粒蛋白质的 80%~85%,它们在水或稀盐溶液中的溶解度很低。这是由于它具有电离侧链的氨基酸含量低,而非极性氨基酸和谷氨酰胺含量高<sup>[12]</sup>。在揉面团的过程中,麦醇溶蛋白分子相互靠近,相邻的巯基(-SH)被氧化形成二硫键,二硫键相互连接形成高分子纤维的聚合,也就是面团的“骨架”,使面团呈网状空间结构,具有良好的可塑性和可加工性<sup>[13]</sup>。醇溶蛋白是一种多相的蛋白质混合物,可溶于酒精介质,其特征是分子量在 30000 到 80000 之间。它们可分为  $\alpha$ -、 $\beta$ -、 $\gamma$ -和  $\omega$ -醇溶蛋白。 $\alpha$ -、 $\beta$ -、 $\gamma$ -麦醇溶蛋白是富硫蛋白,分别存在 6 和 8 个半胱氨酸残基,这些残基均参与分子内二硫键。相比之下, $\omega$ -醇溶蛋白缺少半胱氨酸残基<sup>[12]</sup>。而突变型  $\gamma$ -麦醇溶蛋白中的游离半胱氨酸可与麦谷蛋白形成分子间二硫键,参与麦谷蛋白的组成,形成更好的面筋网络,从而增加了紧实度、弹性和咀嚼性<sup>[14]</sup>。

麦谷蛋白聚合物由高分子量麦谷蛋白亚基(high molecular weight-glutenin subunits, HMW-GS)和低分子量

麦谷蛋白亚基(low molecular weight-glutenin subunits, LMW-GS)组成,它们通过 HMW-GS 中的 1 个残基和 LMW-GS 上的 1 个残基交联形成的 S-S 键连接在一起,并在还原条件下释放<sup>[9,14]</sup>。麦谷蛋白能够形成链间和链内二硫键以及面筋蛋白的高度互连结构,并充当面筋蛋白网络的骨架<sup>[15]</sup>。根据其在十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)溶液中的溶解度,麦谷蛋白可进一步分为 SDS 可溶性麦谷蛋白和 SDS 不溶性麦谷蛋白(麦谷蛋白高分子, gluten polymer, GMP)。GMP 是最大的面筋聚合物,通过二硫键高度聚合,对面团性质的贡献最大<sup>[16-17]</sup>。麦谷蛋白和麦醇溶蛋白的比例决定了弹性和黏度的平衡,直接影响面筋蛋白质量<sup>[18-20]</sup>。麦谷蛋白含有低水平的巯基(SH),表明大多数半胱氨酸残基参与分子内或分子间的二硫键<sup>[12]</sup>。麦谷蛋白也可以与类燕麦蛋白中游离的半胱氨酸残基形成分子间二硫键,显著提高面团强度<sup>[21]</sup>。

麦醇溶蛋白和麦谷蛋白与小麦粉筋力呈极强的正相关性<sup>[22]</sup>,MOAYEDI 等<sup>[23]</sup>研究表明,清蛋白和球蛋白与小麦粉的筋力呈现负相关性。并且二硫键还与其高低筋有关系。高筋小麦面筋蛋白含有较高的二硫键,而低筋小麦面筋蛋白游离巯基含量高。此外,高筋小麦面筋蛋白具有较高比例的 $\alpha$ -螺旋结构,而低筋小麦面筋蛋白具有高比例的 $\beta$ -折叠和无规则卷曲结构<sup>[24]</sup>。增加面筋、麦谷蛋白和 HMW-GS 的含量会使粗面粉-水面团在流变测试中更加坚固,而增加麦醇溶蛋白和 LMW-GS 的含量则具有相反的效果。麦醇溶蛋白和 LMW-GS 都可以通过形成二硫键来严重损害面筋网络,这些影响可能会改变淀粉消化率<sup>[25]</sup>。如果麦谷蛋白含量过高,面食的延展性也会有明显的提升。分析表明,低麦谷蛋白含量时,麦醇溶蛋白通过分子内二硫键的形成和少量麦谷蛋白聚合物之间的疏水相互作用被填充,增加面条黏性和延展性,但在麦谷蛋白含量高时,大量的黏弹性网状结构也可以代替麦醇溶蛋白的作用,赋予面条更好的延展性<sup>[14]</sup>。

## 2.2 淀粉组成及种类

淀粉分为直链淀粉(amylose)和支链淀粉(amylopectin)。直链淀粉仅由 D-葡萄糖单位以 $\alpha$ -1,4-糖苷键连接并成卷曲、呈螺旋形的线状大分子,形成每个螺旋有 6~8 个葡萄糖基。直链淀粉分子比较小,聚合度约 100~6000 之间,(聚合度系指组成直链淀粉分子的葡萄糖单位数目)。支链淀粉是一种分枝很多的高分子多糖,分子比直链淀粉大,聚合度在 1000~3000000 之间,一般在 6000 以上。整个分子由很多较短的 $\alpha$ -1,4-糖苷键连接的直链,再以 $\alpha$ -1,6-糖苷键为分枝点,相连接成高度分枝状的大分子。其分子中 90%为 $\alpha$ -1,4-键,10%为 $\alpha$ -1,6-键,在分子的分枝处。支链淀粉是一种膨胀性的物质,置于水中加热时,便膨胀成为一种胶黏的糊状物。淀粉糊的黏度高,主要是由于存在支链淀粉<sup>[26]</sup>。

支链/直链淀粉含量高,膨胀势高,可以促进面筋蛋白形成更多的二硫键等共价键来增加面团强度。因此改善面团品质,可从直链淀粉和支链淀粉比例入手,即降低直链淀粉含量,提高支链淀粉含量<sup>[27]</sup>。赵军轻<sup>[28]</sup>研究发现,当淀粉发生降解时,淀粉长链链段(DP $\geq$ 37)被打断为短链链段(DP $\leq$ 12),直链淀粉和支链淀粉相对分子量降低,面筋网络结构的二硫键受到破坏,游离巯基含量增加,导致面筋网络结构松散。近年来,国内外学者研究淀粉成分对面团品质及面制品的影响较为丰富,但直支链淀粉对二硫键的影响尚未有详细阐述,因此需要开展更多深入研究。

## 2.3 面团 pH

面团的 pH 对面筋二硫键的断裂和形成有明显的影 响。酸性 pH 会促进面筋二硫键的断裂,与对照组相比,酸化混合面团的游离巯基含量增加,添加 0.3%的苹果酸(malic acid, MA)、富马酸(fumaric acid, FA)和柠檬酸(citric acid, CA)的面团比 0.1%乙酸(acetic acid, AA)、0.4%乳酸(lactic acidosis, LA)的面团游离巯基含量较高<sup>[29]</sup>,说明这些有机酸在应用浓度范围内对麦谷蛋白 SS 键具有破坏作用,MA、FA 和 CA 比 AA/LA 的破坏作用更强,面团系统中的 H<sup>+</sup>浓度在 SS 键的断裂中起着至关重要的作用。但低浓度乳酸会促进面团二硫键的形成,乳杆菌 LB-1 加入面团发酵形成的酸性环境,使面团的游离巯基含量从 0 h 到 3 h 显著下降并趋于稳定在 8.90  $\mu$ mol/g 的水平,有利于二硫键的形成,从而使面团变硬<sup>[30]</sup>。

陈玉<sup>[31]</sup>发现碱的加入诱导了面筋中的-SH 在和面及压延过程中氧化为 S-S,或是更多的-SH 通过交换反应生成 S-S,导致-SH 减少、S-S 增加。面粉中添加 1.0% kansui(日本一种食品添加剂,主要成分为碳酸钠和碳酸钾,类似中国兰州拉面中的草木灰)增强了面食面团的弹性和强度,但烹饪质量几乎没有改变。这些后果可能归因于巯醇(SH)/二硫化物(SS)交换或其他非氧化还原反应/相互作用,通过引入 kansui 将更多的聚合麦谷蛋白纳入网络,这已通过十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(sodium dodecylsulfate-polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE)、傅里叶变换红外光谱法(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)和高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)结果得到证实<sup>[32]</sup>。曹涵等<sup>[33]</sup>将碱性盐揉进面团中在(25 $\pm$ 1) $^{\circ}$ C的恒温恒湿培养箱中储藏 0、24、48 h,每组样品的游离巯基含量与对照组相比均有所降低,二硫键含量显著增加,这说明碱性盐的加入可以促进蛋白质间交联的形成,并诱导游离巯基与二硫键发生交换反应,从而促进二硫键的形成。贾淑琪<sup>[34]</sup>将 0.6%碳酸钾加入到面团中,与对照组相比二硫键含量增加而游离巯基含量降低,因此可以判定一定量的碳酸钾对面团的稳定性有促进作用,面团中的游离巯基可转化为二硫键。当面团中加入 2.0%碳酸钾时,

二硫键含量降到最低, 与任佳影等<sup>[35]</sup>的结论一致, 适量的食用碱能促进二硫键的形成, 增强面筋分子的结合力; 然而, 添加过量的碱会造成介质的 pH 升高, 从而导致二硫键断裂并形成巯基。

在 500~550  $\text{cm}^{-1}$  区域可见二硫化物 S-S 的拉曼位移, 为研究二硫化物带的结构变化提供了甄别手段。根据 C-S-S-C 原子的不同构象, 将 500~550  $\text{cm}^{-1}$  原子分别划分为 gauche-gauche-gauche (g-g-g) 构象(510  $\text{cm}^{-1}$ )、gauche-gauche-trans (g-g-t) 构象(525  $\text{cm}^{-1}$ )和 trans-gauche-trans (t-g-t) 构象(540  $\text{cm}^{-1}$ ), 吸收频率越高, 二硫键结构越不稳定<sup>[34,36]</sup>。面筋蛋白的二硫键构型基本上是 g-g-g 构象, 约占 55%, g-g-t 构象约占 30%, t-g-t 构象约占 15%。随着 pH 的升高, 面筋蛋白中 g-g-g 和 g-g-t 构象的含量先增加后减少, t-g-t 构象的含量先减少后增加。g-g-t 构象是典型的链内二硫键构型, 而 g-g-g 型是主要的链间二硫键构象<sup>[6]</sup>。酸性条件下面筋蛋白的链间二硫键含量较大, 碱性条件下面筋蛋白中链内二硫键含量较大。添加 0.6% 的碱性碳酸钾时, g-g-g 含量增加 9.02%, g-g-t 和 t-g-t 分别降低 4.38%、4.63%, 表明碳酸钾具有促进 g-g-t 和 t-g-t 构象转化为更稳定的 g-g-g 构象的能力。但过量的碳酸钾又会瓦解这种能力, 破坏二硫键的稳定性<sup>[34]</sup>。

## 2.4 面团发酵

面团发酵是一种极其复杂的生化反应, 改变某些成分会导致面团的流变特性发生变化, 从而影响产品的质量<sup>[37]</sup>。刘长虹等<sup>[38]</sup>的实验证明, 如果面团发酵到一定程度, 分泌的酶会削弱大分子之间的结合, 从而将面筋中的二硫键还原为游离的巯基, 降低其含量。卫娟<sup>[37]</sup>讨论了以酿酒酵母、保加利亚乳杆菌和短乳杆菌作为起始菌株对面团发酵后发现, 面团中麦谷蛋白大聚体中的二硫键断裂, 游离巯基含量增加。PEI 等<sup>[39]</sup>测定酵母发酵的面团中的游离巯基含量从 8.13  $\mu\text{mol/g}$  增加到 9.60  $\mu\text{mol/g}$ 。这是由于酵母在发酵面团中产生还原物质, 二硫键被还原为游离的巯基, 导致面筋强度减弱。同理, 加入还原剂如半胱氨酸, 它通过减少分子间二硫键来削弱面团结构<sup>[40]</sup>。

发酵也会促进面团中二硫键的生成。在发酵过程中, 分布在蛋白质-淀粉颗粒表面的水分逐渐渗入分子内部, 逐渐达到平衡状态; 同时, 面粉中的面筋蛋白在水和氧的作用下发生水合作用, 形成新的二硫键。然而, 面筋的形成受到添加的水量的限制, 这些面筋是不连续的<sup>[41]</sup>。WU 等<sup>[42]</sup>发现, 发酵和微波处理后面团的二硫键含量也相对较高, 分别为 14.09 和 12.25  $\mu\text{mol/g}$ 。张媛<sup>[43]</sup>同样观察到小麦面团经发酵静置后, 面筋不断发生结合, 主要是因为蛋白质分子不断发生着巯基和二硫键的相互转化, 二硫键不断生成。为减少麦麸对面筋网络的破坏, ZHANG 等<sup>[44]</sup>采用酵母和乳酸菌共发酵或木聚糖酶水解预处理麦麸的方法使其

改性, 与原麦麸相比, 改性麦麸显著( $P < 0.05$ )提高了面筋蛋白的二硫键含量(5.8%~13.9%)。梁丽婷<sup>[45]</sup>用发酵猕猴桃制备面包面团, 总膳食纤维和不可溶性膳食纤维含量减少, 这种发酵部分地阻止了纤维与面筋之间形成新的氢键, 保持了二硫键的结构稳定性, 降低了游离巯基的水平, 提高了二硫键的水平。以普通醒面和超声醒面两种醒面方法测定 0~20 min 内巯基含量, 长时间的超声波分解产生的氧化环境和自由基的传递, 这有助于形成非天然二硫键, 因此, 普通醒面和超声波醒面都会造成巯基含量降低<sup>[46-47]</sup>。超声波醒面 10 和 20 min 的两个时间段巯基含量无显著差异, 这可能是由于长时间在超声波的机械作用下形成的二硫键被破坏, 导致巯基含量不变<sup>[47]</sup>。张洪新<sup>[48]</sup>对超声后的二硫键区域进行分析, 超声处理后面筋蛋白的二硫键 g-g-g 构象和 t-g-t 构象相对减少, 说明超声后的面筋中链内二硫键断裂。YANG 等<sup>[49]</sup>研究了植物乳杆菌(*L. plantarum*)诱导大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI)凝胶形成过程中蛋白质结构和分子间相互作用的变化, 由于 SPI 的分子聚集, 表面疏水性降低了 62.31% ( $P < 0.05$ )。相应地, 游离巯基含量下降了 58.48%。这些结果表明, 维持发酵诱导面筋形成的主要分子间相互作用是疏水相互作用和二硫键。

## 2.5 加热对面团二硫键形成的影响

在面包烘焙过程中, 两种类型的反应对蛋白质网络的形成非常重要: (1)游离巯基(SH)氧化为 SS 键, 这会增加麦谷蛋白聚集体的分子量; (2) SH-SS 交换反应, 涉及 SS 键的断裂和重组。后者由低分子量 SH 化合物或面筋蛋白中的游离 SH 基团引发。热诱导的 SH/SS 交换反应在 50°C 温度开始, 此温度下过量水中分离的面筋麦谷蛋白之间产生分子间形成 SS 键。在较高温度下, 醇溶蛋白和麦谷蛋白之间也会发生 SH/SS 交换反应。在面包烘焙过程中, 温度超过 70°C 和 90°C 时甚至达到 100°C 发生这些反应<sup>[50]</sup>。WANG 等<sup>[51]</sup>也证实, 高温环境引起醇溶蛋白链内二硫键的开放, 致使谷蛋白网络系统链间二硫键形成的可能性增加。LAGRAIN 等<sup>[10]</sup>对此做出解释, 二硫键使面筋蛋白聚合的过程主要分为两个阶段: (1)在加热到临界温度(90°C)之前, 面筋中的游离巯基暴露出来, 形成的二硫键导致聚合反应形成; (2)加热到临界温度后, 麦谷蛋白通过 SH/SS 交换反应与麦醇溶蛋白结合, 所产生的游离 SH 基团可以与麦醇溶蛋白或麦谷蛋白进一步相互作用。

通过测定加热过程面团 SH 含量变化可以反映蛋白质样品中 SS 键的交联活动<sup>[52]</sup>。45°C 时疏水性的变化表明面筋聚合物的展开, 暴露了疏水基团并降低了其溶解性, 从而固定面筋并消除其弹性; 然而, 位于蛋白质亚单位上的 SH 基团没有完全暴露。当温度达到 60°C 时, 新鲜面筋中的游离 SH 含量略有降低, 当温度升高到 90°C 时, SH 含量显著降低<sup>[53]</sup>。这一发现表明, 当加热温度超过 60°C 时, 热

诱导的蛋白质变性赋予埋藏的 SH 基团可接近性, 导致 SH 或 SH/SS 交换相互作用的氧化, 从而在蛋白质分子之间形成 SS。值得注意的是, 通过 SS 参与蛋白质聚合的醇溶蛋白的行为不同于麦谷蛋白。具体而言, 醇溶蛋白单体在 60°C 时不参与蛋白质聚合反应<sup>[54]</sup>。面筋蛋白的游离 SH 含量通常在 60°C 以下稳定, 并随着温度从 60°C 升高到 95°C 而显著降低<sup>[53]</sup>。加热到 90°C 会导致面筋的构象变化, 暴露出以前不存在的区域, 可能含有更多的游离 SH 基团<sup>[55]</sup>。从黄美琳<sup>[56]</sup>的实验图中可以看到, 在高于 60°C 的温度下, 小麦蛋白展开, 游离巯基易于氧化并产生分子间或分子内二硫键, 且在 70°C 下二硫键含量保持在较高的水平。WAGNER 等<sup>[57]</sup>证明, 温度从 60°C 升高到 90°C 会导致单体蛋白质减少, 大聚合蛋白质和缓慢消化/不可消化聚合麦谷蛋白增加。因此, 热处理增加了蛋白质连接性并形成额外的 SS 键, 从而增加了蛋白质聚集。面筋的 SH 基团埋在天然分子的三级结构中。加热引起麦谷蛋白变性和氨基酸非极性侧链的暴露, 疏水力变得更强, 促进了 SS 键的形成<sup>[58-59]</sup>。

### 3 结束语

环境因素对面团二硫键形成影响方面研究较为系统, 面团组分对二硫键形成研究中蛋白种类和含量、碱性物添加等对二硫键形成有初步研究, 但淀粉对面团二硫键形成的影响方面研究较浅。面团形成过程淀粉对面筋蛋白二硫键形成的影响可从以下几个方面开展深入研究: 一是面团形成过程淀粉球中析出直链淀粉、支链淀粉性质及其对面筋蛋白二硫键形成的影响; 二是面团形成过程环境温度和 pH 对蛋白疏水键暴露的影响规律及其与二硫键形成的关联; 三是面团发酵对小麦淀粉球破坏及析出直支链淀粉性质的影响规律及其与二硫键形成的关联。另外, 面团中少量脂肪和加工中外部添加脂肪对面团二硫键形成影响方面文献极少, 有必要加强这方面基础研究。总之, 面筋蛋白组成、淀粉组成及种类、脂肪含量、面团 pH、发酵以及面团成熟温度等均能影响面团二硫键的形成, 进而对面制食品的品质产生影响。现有有关面团二硫键形成理论为改善面团品质、促进面制品研究的发展提供了理论指导, 为开发高品质面制品生产技术奠定了理论基础。

### 参考文献

- [1] DELCOUR JA, JOYE IJ, PAREYT B, *et al.* Wheat gluten functionality as a quality determinant in cereal-based food products [J]. *Annu Rev Food Sci Technol*, 2012, 3(1): 469-492.
- [2] VOGEL C, SCHERF KA, KOEHLER P. Effects of thermal and mechanical treatments on the physicochemical properties of wheat flour [J]. *Eur Food Res Technol*, 2018, 244(8): 1367-1379.
- [3] 石长硕. 大豆蛋白与面筋蛋白相互作用机制的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.
- [4] SHI CS. Study on the interaction mechanism between soybean protein and gluten protein [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021.
- [5] LAGRAIN B, BRIJS K, VERAVERBEKE WS, *et al.* The impact of heating and cooling on the physico-chemical properties of wheat gluten-water suspensions [J]. *J Cere Sci*, 2005, 42(3): 327-333.
- [6] 贾方圆. 不同浓度复合碱和沙蒿胶对鹰嘴豆-小麦复合粉面条的影响及机制研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020.
- [7] JIA FY. Effects and mechanism of different concentrations of compound alkali and *Artemisia sphaeraegis* gum on chickpea and wheat compound noodles [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2020.
- [8] 唐宇. pH、氯化钠对小麦面筋蛋白与羧甲基纤维素相互作用的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [9] TANG Y. Effects of pH and sodium chloride on the interaction between wheat gluten protein and carboxymethyl cellulose [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [10] BULAJ G. Formation of disulfide bonds in proteins and peptides [J]. *Biotechnol Adv*, 2005, 23(1): 87-92.
- [11] LAMACCHIA C, BAIANO A, LAMPARELLI S, *et al.* Study on the interactions between soy and semolina proteins during pasta making [J]. *Food Res Int*, 2010, 43(4): 1049-1056.
- [12] BRUNEEL C, LAGRAIN B, BRIJS K, *et al.* Redox agents and N-ethylmaleimide affect the extractability of gluten proteins during fresh pasta processing [J]. *Food Chem*, 2011, 127(3): 905-911.
- [13] LAGRAIN B, THEWISSEN BG, BRIJS K, *et al.* Mechanism of gliadin-glutenin cross-linking during hydrothermal treatment [J]. *Food Chem*, 2008, 107(2): 753-760.
- [14] SNYDER H. The proteins of the wheat kernel [J]. *Science*, 1907, 26(677): 865-865.
- [15] JANSSENS KJA, LAGRAIN B, ROMBOUTS I, *et al.* Effect of temperature, time and wheat gluten moisture content on wheat gluten network formation during thermo molding [J]. *J Cere Sci*, 2011, 54(3): 434-441.
- [16] 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.
- [17] XU R. Formation and transformation of sulfhydryl and disulfide bonds in potato dough and research and development of cooked noodles [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [18] 陆启玉. 小麦面粉中主要组分对面条特性影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [19] LU QY. Study on the influence of main components in wheat flour on noodle characteristics [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [20] FALCÃO-RODRIGUES MM, MOLDÃO-MARTINS M, BEIRÃO-DA-COSTA ML. Thermal properties of gluten proteins of two soft wheat varieties [J]. *Food Chem*, 2005, 93(3): 459-465.
- [21] WANG P, JIN Z, XU X. Physicochemical alterations of wheat gluten proteins upon dough formation and frozen storage-A review from gluten, glutenin and gliadin perspectives [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2015, 46(2): 189-198.
- [22] LIU Z, ZHENG Z, ZHU G, *et al.* Modification of the structural and functional properties of wheat gluten protein using a planetary ball mill [J]. *Food Chem*, 2021, 363: 130251.

- [18] MOHAMMED I, AHMED AR, SENGE B. Dough rheology and bread quality of wheat-chickpea flour blends [J]. *Ind Crop Prod*, 2012, 36(1): 196–202.
- [19] PÉREZ GT, RIBOTTA PD, STEFFOLANI ME, *et al.* Effect of soybean proteins on gluten depolymerization during mixing and resting [J]. *J Sci Food Agric*, 2008, 88(3): 455–463.
- [20] ZHANG Y, GUO X, SHI C, *et al.* Effect of soy proteins on characteristics of dough and gluten [J]. *Food Chem*, 2020, 318: 126494.
- [21] CHEN XY, CAO XY, ZHANG YJ, *et al.* Genetic characterization of cysteine-rich type-b avenin-like protein coding genes in common wheat [J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 30692.
- [22] 贾峰, 周晓配, 秦梦梦, 等. 一种微量有效检测小麦面粉筋力的方法 [J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(1): 1–4.  
JIA F, ZHOU XP, QIN MM, *et al.* A micro-effective method for detecting wheat flour strength [J]. *J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed)*, 2016, 37(1): 1–4.
- [23] MOAYEDI S, OHM JB, MANTHEY FA. Relationship between cooking quality of fresh pasta made from durum wheat and protein content and molecular weight distribution parameters [J]. *Cere Chem*, 2021, 98(4): 891–902.
- [24] 张令文, 李欣欣, 王雪菲, 等. 不同品种小麦面筋蛋白的功能性质[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(12): 77–83.  
ZHANG LW, LI XX, WANG XF, *et al.* Functional properties of wheat gluten protein of different varieties [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(12): 77–83.
- [25] ARAVIND N, SISSONS M, FELLOWS C. Can variation in durum wheat pasta protein and starch composition affect *in vitro* starch hydrolysis? [J]. *Food Chem*, 2011, 124(3): 816–821.
- [26] 阚建全. 食品化学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.  
KAN JQ. *Food chemistry* [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006.
- [27] 杨学举. 小麦蛋白成分和淀粉特性对面包品质的影响及品质改良应用 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.  
YANG XJ. Effect of wheat protein composition and starch characteristics on bread quality and application of quality improvement [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.
- [28] 赵军轻. 电子束处理对小麦储藏性能及加工品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2017.  
ZHAO JQ. Effect of electron beam treatment on storage performance and processing quality of wheat [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [29] SU X, WU F, ZHANG Y, *et al.* Effect of organic acids on bread quality improvement [J]. *Food Chem*, 2019, 278: 267–275.
- [30] CAPUANI A, BEHR J, VOGEL RF. Influence of lactic acid bacteria on redox status and on proteolytic activity of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) sourdoughs [J]. *Int J Food Microbiol*, 2013, 165(2): 148–155.
- [31] 陈玉. 七成苦荞挂面的加工品质改良及其机制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.  
CHEN Y. Research on processing quality improvement of 70% tartary buckwheat flour and its mechanism [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [32] CHEN G, LI Y. Aggregation behavior of semolina gluten during dough production and fresh pasta cooking upon kansui treatment [J]. *Food Chem*, 2019, 278: 579–586.
- [33] 曹涵, 刘伯业, 陈复生, 等. 碱性盐对鲜湿面储藏期间理化特性、组分变化的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(3): 8–15, 23.  
CAO H, LIU BY, CHEN FS, *et al.* Effect of alkaline salts on physicochemical properties and component changes of fresh wet surface during storage [J]. *J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed)*, 2021, 42(3): 8–15, 23.
- [34] 贾淑琪. 碳酸钾、高静压和大豆油对面团流变学特性的影响及作用机制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.  
JIA SQ. Effect and mechanism of potassium carbonate, high static pressure and soybean oil on rheological properties of dough [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022.
- [35] 任佳影, 陈洁, 张九魁. 碱面团在和面过程中面筋网络结构变化的影响[J]. *食品工业*, 2019, 40(8): 155–158.  
REN JY, CHEN J, ZHANG JK. Effect of alkali dough on the changes of gluten network structure during flour blending [J]. *Food Ind*, 2019, 40(8): 155–158.
- [36] ZHOU Y, ZHAO D, FOSTER TJ, *et al.* Konjac glucomannan-induced changes in thiol/disulphide exchange and gluten conformation upon dough mixing [J]. *Food Chem*, 2014, 143: 163–169.
- [37] 卫娟. 酸面团发酵过程中淀粉和面筋蛋白变化对面团流变学特性的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.  
WEI J. Effect of starch and gluten protein changes on rheological properties of sour dough during fermentation [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021.
- [38] 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, 40(2): 204–207.  
LIU CH, GONG SS, HAN DD, *et al.* Changes of gluten protein in dough during deep fermentation [J]. *Food Sci Technol*, 2015, 40(2): 204–207.
- [39] PEI F, SUN L, FANG Y, *et al.* Behavioral changes in glutenin macropolymer fermented by *Lactobacillus plantarum* LB-1 to promote the rheological and gas production properties of dough [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(11): 3585–3593.
- [40] OOMS N, PAREYT B, JANSSENS KJA, *et al.* The impact of redox agents on further dough development, relaxation and elastic recoil during lamination and fermentation of multi-layered pastry dough [J]. *J Cere Sci*, 2017, 75: 84–91.
- [41] 师俊玲. 蛋白质和淀粉对挂面及方便面品质影响机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2001.  
SHI JL. Study on the effect mechanism of protein and starch on the quality of noodles and instant noodles [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2001.
- [42] WU Y, YE G, LI X, *et al.* Comparison of quality characteristics of six reconstituted whole wheat flour with different modified bran [J]. *LWT*, 2022, 153: 112543.
- [43] 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.  
ZHANG Y. Changes of processing properties of wheat protein and starch and their effects on the quality of fried dough sticks [D]. Hefei: Hefei

- University of Technology, 2016.
- [44] ZHANG H, ZHANG X, CAO XR, *et al.* Semi-solid state fermentation and enzymatic hydrolysis impeded the destroy of wheat bran on gluten polymerization [J]. *LWT*, 2018, 98: 306–313.
- [45] 梁丽婷. 乳酸菌发酵猕猴桃及其面包的营养与风味特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.  
LIANG LT. Study on nutrition and flavor characteristics of Kiwifruit and its bread fermented by lactic acid bacteria [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [46] ABADÍA-GARCÍA L, CASTAÑO-TOSTADO E, OZIMEK L, *et al.* Impact of ultrasound pretreatment on whey protein hydrolysis by vegetable proteases [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2016, 37: 84–90.
- [47] 张毅. 制面过程小麦面团特性及面筋网络结构影响机理的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.  
ZHANG Y. Study on the characteristics of wheat dough and the influence mechanism of gluten network structure in flour making process [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021.
- [48] 张洪新. 多频超声改性面筋蛋白对其面条品质的影响和机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.  
ZHANG HX. Study on the effect and mechanism of multi-frequency ultrasonic modification of gluten protein on the quality of noodles [D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [49] YANG X, SU Y, LI L. Study of soybean gel induced by *Lactobacillus plantarum*: Protein structure and intermolecular interaction [J]. *LWT*, 2020, 119: 108794.
- [50] OOMS N, JANSENS KJA, PAREYT B, *et al.* The impact of disulfide bond dynamics in wheat gluten protein on the development of fermented pastry crumb [J]. *Food Chem*, 2018, 242: 68–74.
- [51] WANG Z, MA S, SUN B, *et al.* Effects of thermal properties and behavior of wheat starch and gluten on their interaction: A review [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 177: 474–484.
- [52] LUO Y, LI M, ZHU KX, *et al.* Heat-induced interaction between egg white protein and wheat gluten [J]. *Food Chem*, 2016, 197: 699–708.
- [53] WANG P, ZOU M, TIAN M, *et al.* The impact of heating on the unfolding and polymerization process of frozen-stored gluten [J]. *Food Hydrocolloid*, 2018, 85: 195–203.
- [54] JOHANSSON E, MALIK AH, HUSSAIN A, *et al.* Wheat gluten polymer structures: The impact of genotype, environment, and processing on their functionality in various applications [J]. *Cere Chem*, 2013, 90: 367–376.
- [55] STĂNCIUC N, BANU I, BOLEA C, *et al.* Structural and antigenic properties of thermally treated gluten proteins [J]. *Food Chem*, 2018, 267: 43–51.
- [56] 黄美琳. 小麦粉在加工过程中受热对其品质的影响及机理研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020.  
HUANG ML. Study on the effect of heat on the quality of wheat flour during processing and its mechanism [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020.
- [57] WAGNER M, MOREL MH, BONICEL J, *et al.* Mechanisms of heat-mediated aggregation of wheat gluten protein upon pasta processing [J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59: 3146–3154.
- [58] WANG JJ, LIU G, HUANG YB, *et al.* Role of N-terminal domain of HMW 1Dx5 in the functional and structural properties of wheat dough [J]. *Food Chem*, 2016, 213: 682–690.
- [59] WANG JJ, LIU GY, LIU G, *et al.* The soluble recombinant N-terminal domain of HMW 1Dx5 and its aggregation behavior [J]. *Food Res Int*, 2015, 78: 201–208.

(责任编辑: 张晓寒 黄周梅)

## 作者简介



赵金金, 硕士研究生, 主要研究方向为食品科学方面的研究。

E-mail: 1445733767@qq.com

连喜军, 博士, 教授, 主要研究方向为淀粉回生、谷朊粉深加工、功能食品开发。

E-mail: lianxijun@tjcu.edu.cn, lianliu2002@163.com