DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2024.07.029

挤压对小麦面筋蛋白构象变化和功能特性影响的研究进展

郭远 [1,2,3],翟晓娜 [1,2],裴海生 [1,2],江利华 [3],李媛媛 [1,2]*

(1. 农业农村部规划设计研究院,北京 100125;2. 农业农村部农产品产地初加工重点实验室,北京 100121;3. 河北工程大学 生命科学与食品工程学院,河北 邯郸 056038)

摘 要:小麦面筋蛋白是丰富的蛋白质资源之一,挤压处理是小麦面筋蛋白常见的改性方式之一。研究小麦面筋蛋白在挤压过程中的构象变化和功能特性的影响机理,对促进小麦面筋蛋白类产品加工的创新开发具有重要意义。该文从小麦面筋蛋白的组成和功能出发,分析挤压处理中挤压剪切力、挤压温度和调制剂的添加对面筋蛋白构象变化和功能特性变化规律,为面筋蛋白的开发利用提供参考。

关键词:挤压处理;小麦面筋蛋白;构象变化;功能特性;调制剂

Effect of Extrusion on Conformational Changes and Functional Properties of Wheat Gluten: A Review

GUO Yuan[1,2,3], ZHAI Xiaona[1,2], PEI Haisheng[1,2], JIANG Lihua[3], LI Yuanyuan[1,2]*

(1. Academy of Agricultural Planning & Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 2. Key Laboratory of Agro-Products Primary Processing, Academy of Agricultural Planning and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100121, China; 3. School of Life Sciences and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China)

Abstract: Wheat gluten is an abundant protein resource, and extrusion treatment is a common modification method of wheat gluten. Thus, it is significant to study the impact mechanism underlying the conformational changes and functional properties of wheat gluten during extrusion and promote the innovative development of wheat gluten processing. Based on the composition and function of wheat gluten, this paper analyzed the conformational changes and functional properties of wheat gluten during extrusion from extrusion shear force, extrusion temperature and regulating agent, which provided reference for the development and utilization of wheat gluten.

Key words: extrusion treatment; wheat gluten; conformational changes; functional properties; regulating agent

引文格式:

郭远,翟晓娜,裴海生,等 . 挤压对小麦面筋蛋白构象变化和功能特性影响的研究进展[J]. 食品研究与开发,2024,45(7):210-216.

GUO Yuan, ZHAI Xiaona, PEI Haisheng, et al. Effect of Extrusion on Conformational Changes and Functional Properties of Wheat Gluten: A Review[J]. Food Research and Development, 2024, 45(7): 210-216.

蛋白质提供必需氨基酸以供人体合成激素、酶和抗体等,是人体所需营养素之一[1]。蛋白质除了具有营养价值外,还具有重要的食品工业应用价值,可开发利用其不同的功能特性如乳化性和凝胶性等以满足食

基金项目:农业农村部农产品加工装备重点实验室开放课题(KLAPPE 2022-01);农业农村部规划设计研究院“农规英才计划”项目(QNYC-2021-10)

作者简介:郭远(2000—),男(汉),研究生,研究方向:加工副产物高值化利用。

*通信作者:李媛媛(1992—),女(汉),工程师,博士,研究方向:加工副产物高值化利用。

品生产的实际需求。小麦面筋蛋白作为淀粉生产中的副产物，来源广泛，价格便宜，主要应用在面粉、肉制品和一些非食品如饲料加工中，是人类获得能量、蛋白质的主要来源[2]。国家统计局数据显示，2021 年我国小麦总产量为 13 694.45 万 t，小麦面筋蛋白原料充足。2010 年我国小麦面筋蛋白的年产量已达 30 万 t，年消费量 10 万 t 以上，传统领域对小麦面筋蛋白的需求已趋于饱和[2]。根据小麦面筋蛋白结构和功能特性，利用改性方法，深度加工利用小麦面筋蛋白，将其开发应用在新领域中是小麦面筋蛋白加工业的重要方向和研究热点。

目前，关于小麦面筋蛋白的改性加工方法有诸多报道，挤压加工技术是集混合、搅拌、破碎、加热、蒸煮、杀菌、膨化以及成型等过程为一体的新型蛋白改性技术，具有设备成本低、能源消耗低、工艺操作简化等特点，以及产品口感好、可钝化不良因子等优势，广泛应用于蛋白改性领域[3]。近几年来，国内外对于小麦面筋蛋白挤压过程中的微观结构和性质变化均有一定研究，小麦面筋蛋白在挤压过程中的变性机理为挤压机内蛋白质受到高温、高压和剪切力的影响，维持蛋白质高级结构的结合力会变弱，失去其本身球形结构和三维空间结构，从折叠状态伸展开来，蛋白质分子链重组，分子间的相互作用力如氢键、二硫键等会发生断裂，使蛋白质变性[4-7]。通过挤压加工小麦面筋蛋白，使小麦面筋蛋白的微观结构改变，进而改变蛋白质的物理、化学和营养性质，改性后的小麦面筋蛋白在某些方面相较之前有更大的优势，从而有更好的利用价值[8]。

基于此，本文从小麦面筋蛋白的组成和功能出发，综述了挤压处理中挤压剪切力、挤压温度和调制剂的添加对面筋蛋白构象变化和功能特性影响的研究进展，以期为小麦面筋蛋白的加工利用提供参考，指导小麦面筋蛋白类食品的开发。

1 小麦面筋蛋白的组成和功能

小麦籽粒中蛋白质含量为 9%~15%，根据溶解特性可分为溶于水的清蛋白、溶于稀盐溶液的球蛋白、溶于醇溶液的麦醇溶蛋白、溶于稀酸或稀碱的麦谷蛋白，未被溶解的残存蛋白也可归为麦谷蛋白。其中，清蛋白和球蛋白是小麦籽粒的酶蛋白，主要参与各种代谢；麦醇溶蛋白和麦谷蛋白是小麦籽粒的储藏蛋白，合称为小麦面筋蛋白（gluten），约占小麦籽粒中总蛋白的 80%[9-10]。

麦醇溶蛋白具有单体结构，根据其氨基酸序列不同，分为 ω5（相对分子质量为 49 000~55 000 Da，分别占麦醇溶蛋白含量的 3%~6%）、ω1，2（相对分子质量为 39 000~44 000 Da，分别占麦醇溶蛋白含量的 4%~7%）、α/β（相对分子质量为 28 000~35 000 Da，分别占麦醇溶蛋白含量的 28%~33%）和 γ-醇溶蛋白（相对分子质量为 31 000~35 000 Da，分别占麦醇溶蛋白含量的 23%~31%）。由于缺乏半胱氨酸，大多数 ω-醇溶蛋白不可能形成二硫键，而 γ-醇溶蛋白和 α/β-醇溶蛋白分别含有 8 个和 6 个半胱氨酸残基，可分别形成 4 个和 3 个链内交联物[11-14]。

麦谷蛋白为一种由亚基通过分子间二硫键相连形成的聚集体蛋白，相对分子质量在 500 000 Da 到 10 000 000 Da 之间。亚基根据氨基酸序列和分子量不同，分为低分子量麦谷蛋白亚基（low molecular weight gluten subunit，LMW-GS）和高分子量麦谷蛋白亚基（high molecular weight gluten subunit，HMW-GS）。LMW-GS 含量约占整个面筋蛋白的 19%~25%，相对分子质量在 32 000~39 000 Da。HMW-GS 含量约占整个面筋蛋白的 10%[15]。根据氨基酸序列和分子量的不同，HMW-GS 可以进一步分为 x 类型和 y 类型，相对分子量分别为 83 000~88 000 Da 和 67 000~74 000 Da，LMW-GS 和 HMW-GS 分别由 8 个和 11 个（x-HMW）-12（y-HMW）-半胱氨酸残基组成[16-17]。

面筋蛋白及其亚基是植物蛋白的重要组成部分，它们可以在凝胶和可食性薄膜生产中形成起主导作用的网络，产生稳定乳液和泡沫的界面薄膜[13]。然而，麦醇溶蛋白能够溶解于 70% 乙醇水溶液中，而不能溶解在水中，这限制了麦醇溶蛋白在实际食品生产中的应用[18]。另外，关于既不溶于乙醇溶液也不溶于水的麦谷蛋白应用的研究仍然较少，如要综合利用小麦面筋蛋白，就需要针对其蛋白特性，利用改性方法，扩展面筋蛋白及其组分在食品加工中的应用。

2 挤压对面筋蛋白构象变化和功能特性影响的研究进展

挤压过程依赖于高温、压力、螺杆转速、剪切力、模具形状和水分含量，使小麦面筋、淀粉等动植物资源生成大量具有膨胀特性和低密度特征的产品。小麦面筋蛋白中隐藏氨基酸的暴露以及蛋白质分子之间疏水相互作用和二硫键的生成提供了与其他食物成分相互作用的可能性。通过挤压处理，食品的质构特性、消化性和持水性、美拉德反应和其他功能显著增强。因此，从挤压过程中小麦面筋蛋白构象变化出发，探究挤压剪切力、温度和调制剂在挤压过程中对小麦面筋蛋白的影响。

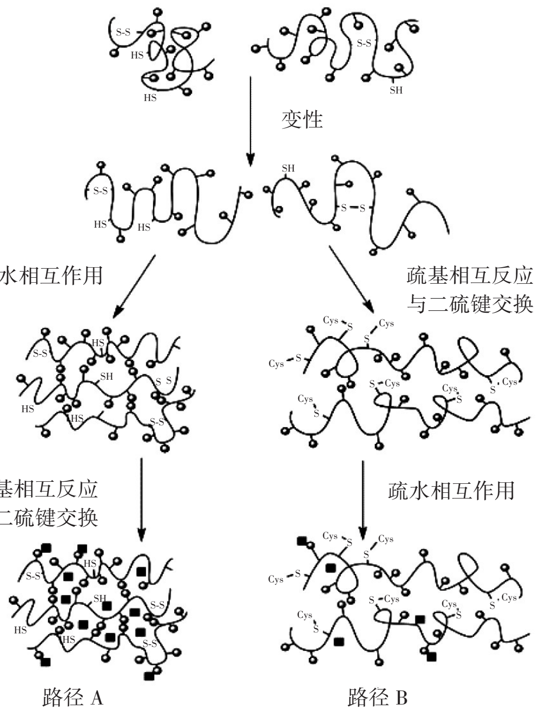
2.1 挤压处理（剪切和温度组合）对面筋蛋白构象变化和功能特性影响的研究进展

小麦面筋蛋白在挤压处理过程中，由于异肽聚集、美拉德反应和自由基引发的交联，对结构变化和聚合反应产生了重大影响；挤压加工过程中的聚集和降解导致蛋白质的二级、三级或四级结构发生改变。蛋白

质聚集的发生主要伴随着 α-螺旋的消失和反平行 β-折叠的增加。由于挤压导致小麦面筋蛋白结构发生变化，进而对小麦面筋蛋白功能性产生影响。

2.1.1　挤压处理（剪切和温度组合）对面筋蛋白构象变化的影响

挤压过程中面筋蛋白发生变性、解离和碎裂过程，使变性的蛋白质分子沿剪切方向排列[19]。挤压过程中，面筋蛋白质分子的变化见图 1。



路径 A. 小麦粉中不添加半胱氨酸；路径 B. 小麦粉中添加半胱氨酸。

图 1　蛋白质分子在挤压加工过程中通过疏水相互作用和二硫键与另一种蛋白质或半胱氨酸分子变性、排列和交联的示意图

Fig.1　Schematic diagrams of denaturation, arrangement and cross-linking of protein molecules with another protein or cysteine molecules through hydrophobic interactions and disulfide bonds during extrusion

由图 1 中路径 A 可知，变性蛋白通过疏水作用相互聚集后，相关蛋白质中的巯基相互反应和/或与二硫键交换，产生链间二硫键。然而，当添加的半胱氨酸的含量（>1.5%）高于蛋白质二硫键和巯基时，半胱氨酸中的巯基能够打破面筋蛋白间二硫键网络结构，产生蛋白质—S—SH 或蛋白质—SS—半胱氨酸，极大地降低面筋蛋白的相对分子质量（图 1 路径 B）[20]。此外，在挤压过程中，半胱氨酸与蛋白质之间的相互作用阻止了蛋白质与蛋白质之间的二硫键交联。由于蛋白质分子间的交联度降低，面筋蛋白网络结构弱化[21]。

Rahaman 等[22]报道，剪切（500、1 000、1 500 s^{-1}）不能单独影响小麦面筋蛋白的构象变化；然而，与低剪切速率（500 s^{-1}）相比，当剪切速率增加到 1 000 s^{-1} 和 1 500 s^{-1} 时，疏水性增强。这可能归因于剪切力诱导的面筋分子的构象变化、机械解离和解体，导致疏水相互作用的破坏和某些疏水残基的暴露[23]。Grabowska 等[24]对小麦面筋蛋白和大豆分离蛋白的浓缩混合物同时施加简单剪切变形和加热（95 ℃），以产生具有新型半固体纤维或层状织构的剪切诱导结构。当两相在剪切单元中水平和垂直排列时，分别形成纤维状和层状结构[25]。Redl 等[26]研究表明外加机械剪切应力对共价键聚合和断裂的影响取决于剪切应力的范围。当剪切不能对聚合物作出足够的解缠时，较高的剪切应力有助于将面筋聚合物分解为较小的分子量。Jansens 等[27]研究发现，随着挤压剪切时间的延长，胱氨酸含量降低，同时伴随着 DHA、半胱氨酸衍生物（lanthionine，LAN）和游离巯基含量的增加。DHA 可以与一些氨基酸反应，生成共价键、LAL 和/或蛋白质链之间的键，从而促进面筋蛋白聚合。

2.1.2　挤压处理（剪切和温度组合）对面筋蛋白功能特性的影响

在挤压过程中，由于水分含量、剪切速率、螺杆速度和进料速度等机械应力的作用，会发生小麦面筋共价键断裂和/或小麦面筋聚合等现象，影响面筋蛋白的功能特性。

Wang 等[28]在剪切速率为 500 s^{-1} 的情况下，研究水分含量对小麦面筋蛋白聚集行为的影响。研究发现水分含量在 10%~55% 适合于小麦面筋蛋白食品的挤压加工。挤出物表现出较高的水溶指数、较低的吸水指数、较低的膨胀率、较高的密度和较高的硬度。对于高水分（>55%）挤压工艺，较大的水分含量促进了面筋蛋白网络的形成[22]。在 145 ℃的挤出机温度下，样品的内部结构表现为各向异性，质地不均匀，面筋蛋白网络强度不一致，出现流动取向的断裂行为；而在 110 ℃的挤出机温度下，挤出物的断裂行为表现为各向同性，缺乏特征的流动模式[29]。因此，挤压下流变特性与小麦面筋分子结构的变化直接相关。

Redl 等[26]发现螺杆转速从 180 r/min 增加到 800 r/min，挤出物的密度和硬度略有下降，可溶性蛋白含量显著降低。随着螺杆转速增加，麦醇溶蛋白-麦谷蛋白交联度逐渐降低，面筋蛋白网络致密性减弱，观察到挤出物断裂的现象。Pietsch 等[29]通过改变螺杆配置和模具长度，研究了机械能输入从 32~206 kJ/kg，剪切率高达 50 s^{-1} 的机械应力，以及 1.5~3.5 MPa 的挤出机压力对小麦面筋蛋白的影响。在研究范围内，未观察到上述条件对面筋蛋白共价键的产生以及聚合和/或裂解反应有显著影响，然而，挤出机温度在 90~160 ℃时，聚集行为会发生显著变化。研究发现，挤压过程中的剪切应变水平也会影响蛋白质的聚集和降解。在 7% 的剪切应变下，两种反应的活化能相同；而在 70%

的剪切应变下，降解反应的活化能较低。事实上，在高温和巨大的剪切应变下，面筋蛋白的降解需要重点关注。此外，大量研究发现挤压协同温度会显著改善面筋蛋白的结构和功能，因此，本文重点关注挤压温度对面筋蛋白品质特性的影响。

2.2 挤压温度对面筋蛋白构象变化和功能特性的调节作用

在挤压过程中，受挤压温度的影响，蛋白逐渐展开原有的天然结构进而发生重排，这是小麦面筋蛋白结构改变的契机，包括离子、氢键和二硫键以及静电和疏水作用。挤压温度决定蛋白变性的剧烈程度，较低温度下挤压使蛋白变性后会发生局部的聚集，而温度过高则会造成聚集体重新展开，甚至影响如β-折叠等肽链间的作用从而改变二级结构相对含量。挤压会改变小麦面筋蛋白在水中的溶解程度，改变蛋白中的分子质量分布，不同亚基形成的聚集体其溶解状态也不尽相同。通常高温高压条件可促使小麦面筋蛋白变性和聚集，从而降低蛋白溶解度，然而，过高螺杆转速和过高温度又会破坏形成的蛋白聚集体。因此，本文重点综述挤压温度对面筋蛋白构象变化和功能特性的调节作用。

2.2.1 挤压温度对面筋蛋白构象的调节作用

挤压过程中的进料温度通过各种化学作用导致谷物蛋白构象的变化，包括离子、氢键和二硫键以及静电和疏水作用，因此，在热诱导挤压过程中，小麦面筋蛋白既有聚集又有碎裂[30]。Wang 等[28]研究发现，热诱导挤压过程导致面筋的二级、三级或四级结构发生改变，伴随着α-螺旋的消失和β-折叠的增加。小麦面筋蛋白的热诱导聚合反应包括谷蛋白亚基之间分子内二硫键的形成，麦醇溶蛋白和麦谷蛋白亚基之间通过分子间二硫键或氧化的分子间交联链，在挤压温度大于 90~120 ℃下由胱氨酸衍生的交联链[31-33]。

Pietsch 等[29]研究发现，当挤压温度升高到 120 ℃和 160 ℃时，挤出物中可溶性二硫键水平分别从 127.1、61.7 nmol/mg 大幅下降；不溶性二硫键的含量从 44.6 nmol/mg 增加到 145.5 nmol/mg。然而，当挤压临界温度升高至 160 ℃时，超声（5 W，20 kHz，60 s）可使挤出物中可溶性二硫键的含量分别从对照的 126.6 nmol/mg 降至 47.5 nmol/mg；不溶性二硫键的含量从对照组的不可检测水平增加到挤出物中的 138.3 nmol/mg。Chen 等[34]研究表明随着挤压温度的升高，小麦面筋蛋白的游离基减少，二硫键增加，小麦面筋蛋白通过二硫键交联促进了聚集。此外，在挤压过程中，温度的升高通过增加巯基—二硫键交换促进了面筋的聚集。

Rombouts 等[35]研究表明，在挤压过程中应用极端条件（160 ℃、180 s）存在二硫键（从 75 ℃到 170 ℃）和美拉德反应的共价键（>110 ℃）。由于半胱氨酸中的游离巯基氧化成二硫键，挤压处理后半胱氨酸的含量与对照相比显著降低，半胱氨酸、酪氨酸、蛋氨酸、精氨酸、丙氨酸、甘氨酸和异亮氨酸的损失大于 5.0% 是美拉德反应发生的依据[29,36]。此外，在还原的聚丙烯酰胺凝胶电泳的顶部出现了新的条带，这意味着形成了新的大分子，挤出物的相对分子质量太大而无法进入凝胶[28]。由于整个二硫键在还原的条件下被分解，上述大分子可能不是来自二硫键的形成，而是潜在地归因于美拉德产物或异肽键的发生。麦醇溶蛋白和麦谷蛋白亚基已被证明在大于 120 ℃的温度下通过硫醇—二硫键交换反应产生分子间交联链[37]。然而，异肽聚集、美拉德反应和自由基引发的交联也可能在聚合理论中发挥重要作用。热加工过程中的非剪切面筋聚合由反应图 2（a）表示，其中二硫键是由作为蛋白质骨架中的两个官能团的两个—SH 相互作用而形成的[35]。总体而言，在非还原条件下，由于形成二硫键和异肽键等共价键，处理时间和温度的增加导致十二烷基硫酸钠可提取的蛋白质减少。

（a）
HS—蛋白质(—SH)—SH + HS—蛋白质(—SH)—SH → HS—蛋白质(—SH)—S—S—蛋白质(—SH)—SH

（b）
HS—蛋白质(—SH)—S—S—蛋白质(—SH)—SH → HS—蛋白质(—SH)—SH + HS—蛋白质(—SH)—SH

（a）无剪切面筋聚合-解聚模型；（b）剪切面筋聚合-解聚模型。

图 2 挤压过程中有剪切和无剪切面筋聚合-解聚模型

Fig.2 Polymerization-depolymerization model of gluten with and without extrusion shear

2.2.2 挤压温度对面筋蛋白功能特性的调节作用

Fischer 等[38]研究表明挤压温度升高经历两步过程：1）面筋蛋白变性、结构展开、疏水基团和分子反应位点暴露；2）由分子间二硫键和非特异性疏水相互作用诱导的蛋白质-蛋白质相互作用。Pietsch 等[29]研究发现，当挤压临界温度在 60~160 ℃内，挤压物中蛋白质几乎不溶于提取液，因此表现出较低的溶解性。当挤压温度升高到 160 ℃时，挤出物中可溶性二硫键水平显著降低；不溶性二硫键的含量显著增加。当挤压临界温度升高至 160 ℃时，超声（5 W，20 kHz，60 s）可使挤出物中可溶性二硫键的含量分别进一步降低；不溶性二硫键的含量明显增加。由于蛋白质的分子量可以决定其在加热蛋白质中的溶解度，在挤压加工过程中蛋白质的聚集引起的蛋白质分子量的增加反过来导致蛋白质的溶解性降低。在挤压过程中，当挤压温度达到 120 ℃时，非共价键的作用力有助于小麦蛋白质的聚集，然而，超声可使膨化产物中的大部分不溶性蛋白质（相对分子质量>42 000）溶解；而膨化产物中的大部分不溶性蛋白质在 160 ℃的模压下不能被超声溶解，而是溶于十二烷基硫酸钠-巯基乙醇水体系，这表明小麦蛋白质可能形成了共价交联，这种共价交联不

能被超声影响。

Abedi 等[20]研究表明极端温度(185 ℃)对膨化产物的溶解度有正向影响,在水、0.5 mol/L 氯化钠、0.05 mol/L 磷酸二氢钠缓冲溶液、0.01 mol/L 氢氧化钠、0.1 mol/L 盐酸和 70% 乙醇等溶剂中的溶解度略大于 160 ℃和 170 ℃挤压温度时的溶解度,这是由于面筋蛋白聚集力的破坏和蛋白质相对分子质量的降低所致。较高的挤压温度加速了共价键(S—S 键、肽键)和非共价键(静电力、疏水力、氢键)的断裂,降低了蛋白质的相对分子质量。同样,Jansens 等[27]研究发现麦谷蛋白和醇溶蛋白的结构区域随着挤压温度从 160 ℃增加到 185 ℃而明显断裂,表现出增加的表观黏度。分子量在 45 000~67 000 Da 之间的麦醇溶蛋白受到高温挤压过程的影响较小,可能是因为它们含有很少的半胱氨酸残基和/或很少的疏水氨基酸。

2.3 调制剂在挤压过程中对面筋蛋白构象变化和功能特性的调节作用

挤压机作为小麦蛋白反应容器,蛋白质分子在套筒内经历聚合和解聚过程。蛋白质分子在挤压过程中相互作用力主要包括有共价键和非共价键交联,其中共价键包括有二硫键和非二硫键的共价键交联,非共价键包括由疏水相互作用和氢键等。小麦蛋白在挤压过程中,增加分子间的相互作用力,诱导蛋白质聚合成更大分子量的聚合体,从而使蛋白质的拉丝强度增强,挤压产品的品质提高。为改变蛋白质之间的相互作用,提高产品品质,通常在挤压过程中添加调制剂,主要分为氧化还原类、酸碱类和其他等。

2.3.1 调制剂在挤压过程中对面筋蛋白构象变化的调节作用

在小麦蛋白挤压过程中加入的氧化还原类型的调制剂一般为溴酸钾、亚硫酸钠、半胱氨酸等。加入氧化还原剂的原因是为了改变小麦蛋白在挤压过程中聚合状,从而探究小麦蛋白的聚合对组织化蛋白的影响[39]。挤压过程中加入亚硫酸钠,蛋白质分子间二硫键被打断,蛋白质以小聚体或者单体状态存在,氧化还原剂的加入可调控组织化蛋白中二硫键的含量[40]。Wang 等[28]研究表明,当挤压过程中小麦粉中 L-半胱氨酸的添加量为 1.5% 时,二硫键的数量增加了一倍。

通过改变挤压过程中的酸碱度,能改变蛋白质表面的电荷分布,使维持蛋白质分子构象的次级化学键发生改变,从而影响了蛋白质在挤压套筒内的变性程度[39]。Li 等[41]在挤压条件相同的情况下,添加碱性调制剂,在挤压过程中小麦蛋白处于碱热的环境中,可诱导小麦蛋白发生 β-消除反应,蛋白质聚集成分子量更大的聚合体,然而,Ding 等[42]发现,低碱含量更有利于基于面筋蛋白的产品生产。

挤压过程中添加的其他类调制剂主要有氯化钠、磷酸盐、多糖、乳化剂等。Zhao 等[43]通过研究温度调控羧甲基纤维素与小麦面筋蛋白相互作用对面筋蛋白流变特性和结构的影响,结果表明添加羧甲基纤维素后小麦面筋蛋白的 β 结构发生明显转变;温度促进了羧甲基纤维素与面筋蛋白相互作用,蛋白质-多糖结合物是通过共价作用发生的,且蛋白质-多糖结合物的含量随温度升高而增加。

Wang 等[28]研究了在挤压过程中加入三聚磷酸钠、焦磷酸钠和六偏磷酸(0%~2%),研究其对小麦组织化蛋白品质的改性机制。三聚磷酸钠的添加显著提高了小麦组织化蛋白的品质,焦磷酸钠和六偏磷酸钠起着相反的作用。蛋白质聚合行为结果分析表明:三聚磷酸钠降低了游离巯基含量,提高了蛋白质中二硫键和 β-折叠相对含量以及蛋白质的热稳定性;相反,焦磷酸钠和六偏磷酸钠降低了蛋白质的聚合程度,降低了大分子蛋白质的含量。Zhang 等[44]研究表明低水平(1% 以下)果胶的添加降低了面筋蛋白的 α-螺旋含量,但增加了面筋的 β-折叠和 β-转角结构,影响面筋蛋白的水合水平。Chen 等[45]研究发现 $KHCO_3$ 降低了醇溶蛋白与谷蛋白的比例,改变了面团的二级结构,增强了面筋的聚集性。在挤压处理过程中,添加各类调制剂通过对蛋白质中的二硫键、β-折叠相对含量和次级化学键产生影响,进而改变蛋白质之间的相互作用力[28]。

2.3.2 调制剂在挤压过程中对面筋蛋白功能特性的调节作用

在双螺杆挤压过程中,小麦面筋蛋白的保水性能明显提高,氮溶指数降低,这可能归因于新的二硫键生成和非共价相互作用[28]。Koh 等[46]在挤压过程中添加对苯二酚抑制面筋蛋白的交联,结果表明对苯二酚添加后显著抑制了蛋白质交联,但对面筋蛋白的氨基酸组成没有显著的影响。此外,面筋蛋白挤出物形状较不规则,稍有膨化,面筋纤维状结构粗糙。Jia 等[47]研究了维生素 C 对小麦面筋蛋白结构和功能特性的影响,结果表明维生素 C 可以通过改变面筋中二硫键的含量,降低面筋的乳化特性和乳化稳定性,增加面筋的溶解度,改善面团的动态黏度。

Wang 等[28]研究表明,当挤压过程中小麦粉中 L-半胱氨酸的添加量为 1.5% 时,小麦面筋蛋白黏度的降低。这归因于面筋蛋白质的不稳定性以及半胱氨酸和半胱氨酸、蛋白质和半胱氨酸以及蛋白质和蛋白质之间的巯基基团的氧化。然而,挤压协同热处理影响了面筋蛋白的聚合反应和分子间相互作用,面筋蛋白网络致密性减弱,显著降低麦醇溶蛋白-麦谷蛋白交联度,表现出膨化产物的含水率显著降低,黏度增加,挤出物的断裂性能和弹性显著降低。热处理和机械处理影响面筋蛋白的聚合反应和分子相互作用,增加黏度,除了共价键,非共价分子相互作用也有助于在热机械

处理过程中复杂黏度的演变[25]。在碱性挤压条件下，由于蛋白质的交联性增强，挤出物的硬度、回复性和咀嚼性能高于对照样品；然而，低碱含量有利于以面筋蛋白为基础的质构产品的生产。Li等[41]通过加入碳酸氢钠、碳酸钠以及氢氧化钠来改变谷朊粉在挤压套筒中的挤压环境，小麦组织化蛋白的咀嚼性、黏弹性显著增加，内部的拉丝效果提高。在挤压条件相同的情况下，添加碱性调质剂，在挤压过程中小麦蛋白处于碱热的环境中，可诱导小麦蛋白发生β-折叠反应，蛋白质聚集成分子量更大的聚合体，从而提高小麦组织化蛋白的品质。

挤压过程中添加的其他类调质剂主要有氯化钠、磷酸盐、多糖、乳化剂等。多糖的加入会加剧蛋白质在挤压套筒内的美拉德反应，从而使挤出物的颜色加深。Zhao等[43]通过温度诱导与羧甲基纤维素间的相互作用对小麦面筋蛋白流变特性和结构的影响表明添加0.5%羧甲基纤维素，增强了面筋网络，改善了面筋的黏弹性行为。相反，加入1.0%的羧甲基纤维素钠，导致网络被破坏和稳定。低浓度的氯化钠添加量对于高水分挤压成型的小麦组织化蛋白品质提升有着促进作用，而高浓度添加下蛋白质溶解度降低，阻碍蛋白质结构的展开，不利于蛋白质分子之间的交联。三聚磷酸盐的添加，增加了小麦面筋蛋白的溶解度和黏度，从而改善了其乳化性、起泡性、热稳定性和流变性[48]，增加产品的硬度、咀嚼性以及回复力，对小麦蛋白组织化产品品质的提升具有促进作用[49]。Wang等[28]发现海藻酸钠、单甘酯和三聚磷酸钠均可提高小麦面筋蛋白的持水性，其中三聚磷酸钠的作用最显著。

3　总结与展望

小麦面筋蛋白是丰富的蛋白质资源之一，挤压处理是小麦面筋蛋白常见的改性方式之一。在挤压过程中涉及面筋蛋白的聚集和降解，显著影响面筋蛋白二级和三级结构，进而影响其加工成为面团独特的流变性和功能性以及烘焙品质，因此，明确挤压过程、挤压温度、调制剂加入对面筋蛋白品质特性的影响，利用挤压技术改善谷物蛋白的功能特性，从而拓宽谷物蛋白的开发利用，在未来食品领域前景非常广阔。

随着研究的不断深入，挤压技术和其他生产技术结合的新产品的开发逐渐成为研究热点，未来研究中，可考虑挤压协同超高压、超声波等技术联合使用改善小麦面筋蛋白构象和功能特性，这对促进小麦面筋蛋白类产品加工的创新开发、实现环境友好和资源保护、提高小麦产品价值链、促进小麦产业升级具有重要的意义。

参考文献：

[1] 叶姝. 补充蛋白质在人体运动中的应用[J]. 四川体育科学, 2020, 39(4): 36-38, 62.
YE Shu. Application of protein supplementation in human sports[J]. Sichuan Sports Science, 2020, 39(4): 36-38, 62.

[2] 刘海荣, 沈益荣, 舒满夫. 小麦面筋蛋白结构、改性及应用现状[J]. 粮食与饲料工业, 2021(4): 5-9.
LIU Hairong, SHEN Yirong, SHU Manfu. Research status on the structure, modification and application of wheat gluten protein[J]. Cereal & Feed Industry, 2021(4): 5-9.

[3] 王旭, 于寒松, 代伟长. 大豆蛋白挤压组织化的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(4): 7-9.
WANG Xu, YU Hansong, DAI Weichang. Research progress on the extrusion texturizatio of soybean protein[J]. Cereals & Oils, 2020, 33(4): 7-9.

[4] 刘剑颖, 宋宇康, 熊晓辉, 等. 小麦面筋蛋白糖基化改性研究进展[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(6): 194-202.
LIU Jianying, SONG Yukang, XIONG Xiaohui, et al. Advances in glycosylation modification of wheat gluten protein[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(6): 194-202.

[5] 李振源, 刘伯业, 张静思, 等. 小麦面筋蛋白改性技术的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(5): 17-20.
LI Zhenyuan, LIU Boye, ZHANG Jingsi, et al. Research progress of modification technology for wheat gluten[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(5): 17-20.

[6] 张国治, 王慧洁, 刘忠思, 等. 小麦面筋蛋白的组成、功能特性及产业化应用[J]. 粮食加工, 2019, 44(3): 1-4.
ZHANG Guozhi, WANG Huijie, LIU Zhongsi, et al. Composition, functional characteristics and industrial application of gluten protein in wheat[J]. Grain Processing, 2019, 44(3): 1-4.

[7] 王建中, 尹红娜. 小麦谷朊粉改性新技术综述[J]. 轻工学报, 2017, 32(2): 20-25.
WANG Jianzhong, YIN Hongna. Research progress of modification new technologies for wheat gluten[J]. Journal of Light Industry, 2017, 32(2): 20-25.

[8] 付晓航, 李赫, 曹金诺, 等. 挤压加工对植物组织蛋白功能性影响的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(6): 179-183.
FU Xiaohang, LI He, CAO Jinnuo, et al. Research progress on the effects of extrusion processing on the functionality of textured vegetable protein[J]. Food Research and Development, 2021, 42(6): 179-183.

[9] 王康君, 孙中伟, 郭明明, 等. 小麦营养品质的研究进展与展望[J]. 农业与技术, 2020, 40(7): 7-12.
WANG Kangjun, SUN Zhongwei, GUO Mingming, et al. Research progress and prospect of nutritional quality of wheat[J]. Agriculture and Technology, 2020, 40(7): 7-12.

[10] 魏倩, 张莹莹, 阎欣, 等. 豆类蛋白和谷物蛋白的功能性对比[J]. 粮食加工, 2018, 43(1): 36-41.
WEI Qian, ZHANG Yingying, YAN Xin, et al. Comparation of the functional properties between cereal protein and legume protein[J]. Grain Processing, 2018, 43(1): 36-41.

[11] 佟臻, 高彦祥. 基于麦醇溶蛋白递送体系研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 448-456.
TONG Zhen, GAO Yanxiang. Research progress based on gliadin delivery systems[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 448-456.

[12] ABEDI E, MAJZOOBI M, FARAHNAKY A, et al. Effect of ionic strength (NaCl and $CaCl_2$) on functional, textural and electrophoretic properties of native and acetylated gluten, gliadin and glutenin[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 2035-2047.

[13] MAJZOOBI M, ABEDI E. Effects of pH changes on functional properties of native and acetylated wheat gluten[J]. International Food Research Journal, 2014, 21: 1183-1188.

[14] MAJZOOBI M, ABEDI E, FARAHNAKY A, et al. Functional properties of acetylated glutenin and gliadin at varying pH values[J]. Food Chemistry, 2012, 133(4): 1402-1407.
[15] JOYE I J, LAGRAIN B, DELCOUR J A. Use of chemical redox agents and exogenous enzymes to modify the protein network during breadmaking-A review[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 50(1): 11-21.
[16] DELCOUR J A, JOYE I J, PAREYT B, et al. Wheat gluten functionality as a quality determinant in cereal-based food products[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2012, 3: 469-492.
[17] WANG P, JIN Z Y, XU X M. Physicochemical alterations of wheat gluten proteins upon dough formation and frozen storage-A review from gluten, glutenin and gliadin perspectives[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 46(2): 189-198.
[18] 郭兴凤, 张莹莹, 任聪, 等 . 小麦蛋白质的组成与面筋网络结构、面制品品质关系的研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2018, 39(6): 119-124.
GUO Xingfeng, ZHANG Yingying, REN Cong, et al. Progresses about the relationship between the composition of wheat proteins and gluten network and their correlation with the quality of wheat flour foods[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 39(6): 119-124.
[19] MOREL M H, REDL A, GUILBERT S. Mechanism of heat and shear mediated aggregation of wheat gluten protein upon mixing[J]. Biomacromolecules, 2002, 3(3): 488-497.
[20] ABEDI E, POURMOHAMMADI K. Physical modifications of wheat gluten protein: An extensive review[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(3): e13619.
[21] POMMET M, MOREL M H, REDL A, et al. Aggregation and degradation of plasticized wheat gluten during thermo-mechanical treatments, as monitored by rheological and biochemical changes[J]. Polymer, 2004, 45(20): 6853-6860.
[22] RAHAMAN T, VASILJEVIC T, RAMCHANDRAN L. Shear, heat and pH induced conformational changes of wheat gluten - Impact on antigenicity[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 180-188.
[23] LAGRAIN B, ROMBOUTS I, BRIJS K, et al. Kinetics of heat-induced polymerization of gliadin[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(5): 2034-2039.
[24] GRABOWSKA K J, TEKIDOU S, BOOM R M, et al. Shear structuring as a new method to make anisotropic structures from soy-gluten blends[J]. Food Research International, 2014, 64: 743-751.
[25] EMIN M A, SCHUCHMANN H P. A mechanistic approach to analyze extrusion processing of biopolymers by numerical, rheological, and optical methods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 60: 88-95.
[26] REDL A, GUILBERT S, MOREL M H. Heat and shear mediated polymerisation of plasticized wheat gluten protein upon mixing[J]. Journal of Cereal Science, 2003, 38(1): 105-114.
[27] JANSENS K J A, LAGRAIN B, ROMBOUTS I, et al. Effect of temperature, time and wheat gluten moisture content on wheat gluten network formation during thermomolding[J]. Journal of Cereal Science, 2011, 54(3): 434-441.
[28] WANG K Q, LI C, WANG B Z, et al. Formation of macromolecules in wheat gluten/starch mixtures during twin-screw extrusion: Effect of different additives[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(15): 5131-5138.
[29] PIETSCH V L, KARBSTEIN H P, EMIN M A. Kinetics of wheat gluten polymerization at extrusion-like conditions relevant for the production of meat analog products[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 85: 102-109.
[30] WIESER H. Chemistry of gluten proteins[J]. Food Microbiology, 2007, 24(2): 115-119.
[31] PIETSCH V L, EMIN M A, SCHUCHMANN H P. Process conditions influencing wheat gluten polymerization during high moisture extrusion of meat analog products[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 198: 28-35.
[32] PIETSCH V L, SCHÖFFEL F, RÄDLE M, et al. High moisture extrusion of wheat gluten: Modeling of the polymerization behavior in the screw section of the extrusion process[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 246: 67-74.
[33] LAGRAIN B, DE VLEESCHOUWER K, ROMBOUTS I, et al. The kinetics of β-elimination of cystine and the formation of lanthionine in gliadin[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(19): 10761-10767.
[34] CHEN Y, LIANG Y, JIA F, et al. Effect of extrusion temperature on the protein aggregation of wheat gluten with the addition of peanut oil during extrusion[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 166: 1377-1386.
[35] ROMBOUTS I, LAGRAIN B, BRIJS K, et al. β-Elimination reactions and formation of covalent cross-links in gliadin during heating at alkaline pH[J]. Journal of Cereal Science, 2010, 52(3): 362-367.
[36] LANGSTRAAT T D, JANSENS K J A, DELCOUR J A, et al. Controlling wheat gluten cross-linking for high temperature processing[J]. Industrial Crops and Products, 2015, 72: 119-124.
[37] SINGH H, MACRITCHIE F. Changes in proteins induced by heating gluten dispersions at high temperature[J]. Journal of Cereal Science, 2004, 39(2): 297-301.
[38] FISCHER T. Effect of extrusion cooking on protein modification in wheat flour[J]. European Food Research and Technology, 2004, 218(2): 128-132.
[39] 彭晶 . 小麦蛋白组织化改性及口腔加工特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
PENG Jing. Study on tissue modification and oral processing properties of wheat protein[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
[40] 苏笑芳 . 挤压组织化蛋白原料的理化特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
SU Xiaofang. Study on physical and chemical properties of extruded textured protein raw materials[D].Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
[41] LI T, GUO X N, ZHU K X, et al. Effects of alkali on protein polymerization and textural characteristics of textured wheat protein[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 579-587.
[42] DING Q B, AINSWORTH P, PLUNKETT A, et al. The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73(2): 142-148.
[43] ZHAO L, WANG K, ZHU J, et al. Temperature-induced interaction with carboxymethyl cellulose affected the rheological properties and structure of wheat gluten[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 133: 109993.
[44] ZHANG X, LI J H, ZHAO J Y, et al. Aggregative and structural properties of wheat gluten induced by pectin[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 100: 103247.
[45] CHEN G J, HU R J, LI Y H. Potassium bicarbonate improves dough and cookie characteristics through influencing physicochemical and conformation properties of wheat gluten[J]. Food Chemistry: X, 2020, 5: 100075.
[46] KOH B K, LIM S T. Effects of hydroquinone on wheat gluten extrusion[J]. Food Science and Biotechnology, 2000, 9(6): 341-345.
[47] JIA F, YE K C, ZHANG C F, et al. Effects of vitamin C on the structural and functional characteristics of wheat gluten[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2022, 5(2): 79-86.
[48] ZOU P R, HU F, NI Z J, et al. Effects of phosphorylation pretreatment and subsequent transglutaminase cross-linking on physicochemical, structural, and gel properties of wheat gluten[J]. Food Chemistry, 2022, 392: 133296.
[49] HU F, ZOU P R, ZHANG F, et al. Wheat gluten proteins phosphorylated with sodium tripolyphosphate: Changes in structure to improve functional properties for expanding applications[J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 1342-1351.

加工编辑:张岩蔚
收稿日期:2023-03-16