

真空和面过程中面团关键组分的变化规律 及其在面制品中的应用研究进展

吕玉昌¹ 易翠平¹ 吴娜娜² 谭斌²

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 国家粮食和物资储备局科学研究院粮油加工研究所, 北京 100037)

摘要:真空和面技术作为一种创新的面制品加工方法,通过调控低压环境优化面团结构形成与品质特性,近年来受到广泛关注。文章系统综述了真空和面过程中面团关键组分(蛋白质、淀粉和水分)的变化规律及其作用机制,并探讨了该技术在各类面制品中的应用效果。真空处理通过促进面筋蛋白交联、优化水分分布与状态转变、抑制淀粉过度溶胀,显著增强面团的流变特性及冻融稳定性。此外,真空和面与过热蒸汽、冻融等辅助工艺协同,可有效抑制脂质氧化、改善产品质构并延长货架期。

关键词:真空和面;面筋网络;工艺协同;水分迁移

Research progress on variation laws of key dough components during vacuum dough mixing process and application of vacuum dough mixing technology in flour products

LU Yuchang¹ YI Cuiping¹ WU Nana² TAN Bin²

(1. School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha,

Hunan 410114, China; 2. Grain and Oil Processing Research Institute, Academy of National Food

and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

Abstract: As an innovative method in flour product processing, vacuum dough mixing technology has attracted widespread attention in recent years for its ability to optimize the structure formation and quality characteristics of dough through the regulation of a low-pressure environment. The variation laws and underlying mechanisms of key dough components, including proteins, starch, and moisture, during the vacuum dough mixing process were systematically reviewed, and the application effects of this technology in various flour products were examined. Vacuum treatment significantly enhanced the rheological properties and freeze-thaw stability of dough by promoting gluten protein cross-linking, optimizing moisture distribution and state transitions, and inhibiting excessive starch swelling. Furthermore, the synergy between vacuum dough mixing and auxiliary processes such as superheated steam and freeze-thaw could effectively inhibit lipid oxidation, improve product texture, and extend shelf life.

Keywords: vacuum dough mixing; gluten network; process synergy; moisture migration

基金项目:“十四五”国家重点研发计划课题(编号:2022YFF1100503);国家自然科学基金项目(编号:32072266)

通信作者:易翠平(1973—),女,长沙理工大学教授,博士。E-mail:yicp963@csust.edu.cn

吴娜娜(1981—),女,国家粮食和物资储备局科学研究院研究员,博士。E-mail:wnn@ags.ac.cn

收稿日期:2025-01-19 **改回日期:**2025-10-10

引用格式:吕玉昌,易翠平,吴娜娜,等. 真空和面过程中面团关键组分的变化规律及其在面制品中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(12): 193-199.

Citation: LU Yuchang, YI Cuiping, WU Nana, et al. Research progress on variation laws of key dough components during vacuum dough mixing process and application of vacuum dough mixing technology in flour products[J]. Food & Machinery, 2025, 41(12): 193-199.

真空技术通常用于各个行业,例如化工、电气、食品加工、冶金,并在许多学科中发挥着关键作用^[1]。20 世纪 80 年代日本学者率先将真空混合技术引入食品工业,标志着该领域工艺创新的重要里程碑。在食品工业中,真空技术借助气压环境的调控,主要实现两大核心功能:① 高效脱气,即利用负压条件脱除食品中截留的气体以及溶解氧,例如溶解气体可在低压沸腾时逸散;② 物料输送,通过驱动气力输送系统,实现谷物、粉末及液态食品的无污染转移。该技术的核心优势在于能够精准控制气压,从而优化传质过程并抑制氧化反应。其典型应用包括真空冷冻干燥,通过降低气压加速冰晶升华传质,实现高效脱水;以及真空发酵,借助创造缺氧环境抑制杂菌繁殖,提升产物纯度。这些工艺的共性在于利用真空环境定向调控水分相变(如气—固迁移)与微观结构重组,为食品组分相互作用创造低氧、低水分活度的稳定体系^[2]。近年来,真空和面技术逐步被应用于面制品加工,其低压环境可抑制面团搅拌过程中的脂质氧化,同时通过改变气液界面张力加速水分渗透,促进面筋蛋白的定向交联^[3]。然而,相较于真空冷冻干燥、真空发酵等成熟工艺,真空和面的作用机制研究仍存在显著空白,特别是蛋白质构象调控与淀粉—水分协同演化的动态关联尚未明晰。作为真空技术在食品加工中的典型应用,真空和面工艺通过降低环境压力实现物料的高效均质化。其工业化应用不仅提高了面筋网络的形成效率,还为后续技术迭代奠定了基础。它利用真空泵将和面机内的气体抽出,使得面粉颗粒可以充分膨胀,与水分子更充分结合,从而改善面筋网络结构,提高面制品品质^[4]。

当前真空和面技术研究集中于工艺参数(真空度、搅拌速度)对宏观质构的线性影响,但对其分子机制与设备适配性关注不足。日本学者通过工业化设备验证了真空和面可提升乌冬面弹性^[5],但未揭示面筋网络重构的分子驱动机制;中国则受限于实验室设备密封性能不足,难以实现真空度动态调控^[4]。最新研究^[6]表明,真空和面参数(如压力波动幅度、保压时间)的微小偏差会导致面筋交联度显著差异,揭示其工艺敏感性远超传统和面。此外,在无麸质食品领域,真空环境虽能促进米粉、豌豆蛋白的界面融合,但缺乏面筋支撑导致网络结构脆弱,亟需开发适配性工艺^[7]。上述瓶颈表明,真空和面技术亟需从“经验式参数调整”向“多尺度机制解析—设备协同设计”的范式转变。研究拟系统综述真空和面过程中蛋白质构象转变、水分迁移规律及淀粉溶胀行为的动态演变机制,以期真空和面技术在面制品中的应用提供理论依据。

1 真空和面设备原理

真空混合设备运行时,预配比的面粉—水体系被导

入密闭混合仓,通过电机驱动的桨叶或搅拌装置实现动态均质化。此过程中,负压环境显著降低气体夹带,促进物料界面间的充分接触。在搅拌过程中,面粉和水的混合是一个动态变化的过程,混合箱内的物料状态会随着搅拌时间的增加而发生改变,从最初的固液分离状态转变为固液混合的流体状态。在搅拌过程中,会有杂质颗粒、空气粉尘以及水汽混合物等的多种介质进入搅拌混合箱体的密封间隙,增大密封的难度。密封性能是真空混合设备的核心技术指标,直接关系产品质量稳定性。针对轴端密封的工程挑战,吴昌坤^[8]研发了一种复合式磁性流体密封结构,通过优化材料耐压性与动态转速适应性,有效解决了压差诱导的泄漏问题,显著提升了设备运行可靠性及使用寿命。该创新设计通过多物理场耦合优化,同步抑制了高转速工况下的密封失效与物料泄漏风险,在提高密封界面稳定性的同时,将设备耐久性提升至工业化生产标准。

真空和面是面团制作过程中的第一步,也是关键步骤之一^[9],混合工艺参数(包括混合器构型、剪切速率、作用时长及真空度)的协同调控是决定物料分散均一度与分子间作用强度的关键变量^[10]。系统优化此类参数可显著提高加工效率,并通过多尺度结构调控实现产品功能特性的定向设计。

2 真空和面过程中谷物组分的变化

2.1 蛋白质分子结构的变化

真空和面技术显著促进了麦谷蛋白大聚体(GMP)的形成,这些聚体在盐、醇和水中的不溶性增强。同时,该技术提高了高相对分子质量蛋白质的含量,降低了游离巯基含量,并缩小了面筋网络的孔隙尺寸,淀粉颗粒在真空混合过程中被更紧密地包裹^[11]。Wang 等^[12]研究表明,麦谷蛋白的引入显著增强了面筋网络的刚性,并提高了冷冻熟面条(FCN)的结构致密性,使 FCN 具有多层水分分布。麦醇溶蛋白的添加增加了 FCN 的拉伸距离,限制了冻藏过程中水分的迁移,增加了面筋网络的膜状结构以包裹淀粉颗粒。根据相对分子质量的不同,麦谷蛋白可以分为高相对分子质量和低相对分子质量的麦谷蛋白亚基。麦谷蛋白是由蛋白质亚基通过化学键连接而成的聚合物。麦谷蛋白亚基中的硫醇基团在氧化条件下发生脱氢反应,生成稳定的二硫键,从而增强蛋白质网络的稳定性^[13]。二硫键在 GMP 的形成中起关键作用,其含量与大聚体的数量呈显著正相关。

真空和面过程中蛋白分子发生了一系列变化。Zhang 等^[14]研究发现,在真空和面的初始阶段,单体蛋白的数量增加,而多蛋白体系的比例则减少,随着混合时间的延长,GMP 含量显著减少,粒度分布趋于细化,蛋白质

的相对分子质量分布也相应降低。当面筋混合时间从5 min延长至10 min时,随着GMP颗粒粒径增大,其蛋白质聚集程度与相对分子质量呈正相关。但过度延长混合时间将降低GMP含量,同时粒径分布呈现单峰集中趋势,并伴随游离巯基水平显著上升,聚合蛋白比例减少。值得注意的是,蛋白质亚基的组成在整个过程中保持稳定。Shao等^[15]系统比较了传统、手工及真空和面工艺对冷冻热面条特性的影响,发现手工和面组可冻结水分含量较高,而真空和面组在质构特性(如弹性和延展性)上表现最优,这与其形成的致密面筋网络密切相关。真空和面技术通过抑制氧化反应有效延缓面团褐变,显著改善成品面条的色泽。此外,真空环境可诱导面筋蛋白定向聚集,形成均匀连续的蛋白基质,同时抑制淀粉颗粒的过度溶胀,从而减少蒸煮过程中的结构塌陷。因此,在混合过程中,真空和面有助于形成均匀且连续的蛋白质基质,显著增强面筋网络对淀粉颗粒的包裹能力,从而提升面制品的冻融稳定性和质构特性。

真空和面对面团中蛋白质的二级结构也有影响。Liu等^[16]通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析发现,真空和面组中 α -螺旋及 β -折叠的占比分别为16.54%~28.59%与41.04%~42.71%,较常压和面组(α -螺旋:16.17%~17.38%; β -折叠:33.71%~41.21%)显著提升,表明真空环境可调控蛋白质二级结构的重排。上述结果表明,真空负压通过增强氢键与疏水相互作用,驱动蛋白质二级结构向热力学稳定的 α -螺旋及 β -折叠构象转化。其中, α -螺旋因依赖密集分子内氢键维系,其含量升高可显著提升面筋蛋白的抗变性能力,进而形成高度有序的三维网络结构。Zhang等^[17]进一步对比发现,真空和面组中无规卷曲(13.00%~15.63%)与 β -转角(15.19%~26.80%)的占比均低于常压和面组(分别为15.65%~17.20%与25.76%~32.92%),印证了真空工艺可减少蛋白质无序结构的形成,促进其有序伸展。

真空和面过程中, α -螺旋和 β -折叠比例的增加显著增强了面筋网络的机械强度。 α -螺旋结构依赖于密集分子内氢键,其含量的提升增强了面筋蛋白的刚性,从而提高了网络结构的抗变形能力。同时, β -折叠结构通过分子间氢键的形成,促进了面筋蛋白链间的有序排列,进一步巩固了三维网络的稳定性。真空和面工艺诱导面筋蛋白动态交联机制研究表明,面筋大分子在水分塑化作用下发生构象伸展,通过分子内与分子间二硫键的定向组装实现拓扑交联,进而形成稳定的三维网状结构。Yang等^[18]研究发现,真空和面组面筋蛋白游离巯基含量(5.49 $\mu\text{mol/g}$)较常压对照组(5.81 $\mu\text{mol/g}$)显著降低($P<0.05$),证实真空环境能够促进巯基的氧化偶联,增强蛋白质分子间的共价交联强度。Liu等^[19]进一步探讨了

加水量对巯基含量的影响,发现常压和面组在加水量为35%时,巯基含量降至5.81 $\mu\text{mol/g}$,表明氧化反应显著,二硫键生成量增加。由此可见,真空和面不仅提升了面团的持水性,还通过优化促进游离巯基向二硫键的转化效率,强化了面筋网络结构。

2.2 水分及其与面团结合状态的变化

真空和面技术通过增强蛋白质的水合作用,促进了水分的高效吸收,从而优化了面筋网络的形成。Laurent等^[20]的试验数据显示,加水量为30%和35%时,真空和面组的水分溶化焓变值分别达到31.04,43.78 J/g,显著高于常压组的(26.92,40.20 J/g)。通过低场核磁技术进一步检测发现,真空环境可有效抑制低加水量面团的水分蒸发,使自由水向可冻结态转化比例提升12.3%,非结合水含量降低9.8%。这种水分相态转变与真空负压促进水分子向蛋白质疏水区域的渗透作用密切相关。Zhu等^[21]在高加水量(45%)体系中的研究发现,真空处理使非冻结水占比提高5.6%,这归因于高压差环境增强了面筋蛋白的 β -折叠构象转变,促使更多水分子通过氢键与麦谷蛋白亚基结合。在高加水量(45%)体系中,真空和面技术显著提升了非冻结水比例(较常压组增加5.6%),这一现象源于:蛋白质水合作用增强,真空负压促使水分子加速渗透至麦谷蛋白的极性基团(如谷氨酰胺侧链),形成稳定的单层水合界面。分子动力学模拟表明,此类结合水通过氢键网络与蛋白质形成刚性锚定,显著抑制自由水的迁移^[22]。该技术通过调控水合动力学过程,使结合水比例提升至62.4%,显著改善面团的黏弹性模量($P<0.05$)。以上差异表明,真空和面对水分状态的调控存在明显的加水量阈值效应,其作用机制涉及蛋白质构象变化与水分子迁移的双重调控路径。

真空和面技术诱导面团中水分结合状态发生显著相变重组。Masbarnat等^[23]的试验数据显示,常压和面过程中结合水含量从19.34%降至13.73%,而真空处理组下降至13.19%,降幅较常压组仅减少0.54个百分点。同时,真空组的自由水含量从0.92%降至0.20%,较常压组(从0.92%降至0.36%)增加0.16个百分点,表明真空环境加速了自由水向结合态的转化。Jian等^[24]研究发现,这种相态转变规律在高加水量体系中更为显著,当加水量达到45%时,真空和面组的弱结合水占比达85.05%,较常压组提升1.45个百分点($P<0.05$);加水量增至50%时,该指标继续增长至86.61%。动力学分析表明,真空负压产生的空化效应使水分子动能提升3.2倍,驱动结合水与自由水向中间态的相态迁移。分子层面揭示,这种转化源于水分子与麦醇溶蛋白的极性基团形成更多氢键(键能增加12.7 kJ/mol),从而优化了面团的三维网络稳定性。

和面过程中水—蛋白相互作用的关键机制,在面团

体系由限制性水合向过水合状态转变的过程中,加水量从 30% 增至 50%,分子动力学模拟显示疏水相互作用能值从 -15.6 kJ/mol 降至 -8.3 kJ/mol ,而氢键密度由 4.65 mol/nm^3 提升至 6.81 mol/nm^3 [25]。这种水合作用转变在真空条件下尤为显著:傅里叶变换红外光谱分析表明,真空和面组的氢键形成速率常数(k)达 0.42 s^{-1} ,较常压组提高 38% [26]。分子层面机制显示,真空负压(-0.08 MPa)促使水分子渗透能降低 2.3 kJ/mol ,加速其与谷蛋白极性残基(如谷氨酰胺侧链)的结合,形成稳定的三体氢键网络。真空环境对蛋白质二级结构的重构具有双重效应。圆二色光谱数据表明, β -折叠占比从 21.7% 增至 26.4%, α -螺旋含量同步提升 3.2 个百分点 [27]。这种构象转变与疏水作用减弱密切相关。分子对接模拟显示,在 -0.1 MPa 条件下,麦胶蛋白疏水核心的溶剂可及表面积增加 28%,导致疏水结合自由能(ΔG)下降 5.6 kJ/mol 。该现象可归因于:过水合作用使蛋白质表面 zeta 电位降低 12 mV ,削弱疏水缔合;负压环境使疏水腔体积膨胀 9%,破坏非极性基团的空间匹配。这些发现为调控面制品流变特性提供了理论依据。

2.3 淀粉的变化

真空和面技术调控淀粉-蛋白协同作用的动态机制,水分作为关键介质驱动了二者相界面的重构,相较于常压环境,真空条件促使面筋网络形成更致密的拓扑结构,其中麦谷蛋白通过增强二硫键交联构建三维骨架,而醇溶蛋白则作为弹性连接体填充网络间隙 [28]。Yang 等 [29] 研究发现,当加水量处于 30% 阈值时,显微结构分析显示淀粉颗粒呈现致密堆积形态,导致拉伸强度达到峰值但弹性响应受限,此时受限的水分分布使面筋蛋白的 β -折叠构象占比不足,网络延展性显著降低。随着加水量提升至 45%,真空环境诱导的毛细管效应促使水分均匀渗透,淀粉颗粒进入有序溶胀阶段。此时面筋网络的黏弹性发生本质转变,麦胶蛋白疏水区的重构显著增强其对淀粉颗粒的界面吸附能力 [30],当加水量超过 50% 临界值时,体系进入过水合状态,流变学特征表现为黏性主导模式。此阶段面筋网络的连续相结构逐渐解离,淀粉颗粒在过量水分介导下形成流体状分散体系,导致产品质构特性发生根本性转变 [31]。这种水分梯度响应机制为精准调控面制品感官品质提供了理论支撑。

真空和面过程中淀粉-蛋白体系的结构演化规律,真空和面过程中淀粉-蛋白协同作用的动态机制与淀粉颗粒溶胀度变化密切相关,在加水量为 45% 的体系中,真空环境使淀粉颗粒溶胀度(SP)从常压组的 $(8.7 \pm 0.3) \text{ g/g}$ 提升至 $(10.2 \pm 0.5) \text{ g/g}$ ($P < 0.05$),表明负压促进水分渗透至淀粉颗粒的无定形区,加速其溶胀 [32]。当淀粉与蛋白质处于适宜配比时,二者通过互穿网络结构实现水分动

态平衡,形成理想的面团基质 [33]。真空环境通过调控微尺度相行为,促使面筋网络形成连续致密结构,电镜观察显示其能有效包裹淀粉颗粒并消除孔隙缺陷 [34],这种效应源于双重机制:负压加速水分定向迁移,促进蛋白构象有序排列;同时诱导淀粉表面形成稳定水化界面,增强与面筋的协同作用。体系的结构均质化特征表现为面筋网络连续性和淀粉分布的同步优化 [35]。真空条件通过动态调控水合过程,促使蛋白质构象转变并重构疏水-亲水平衡,最终形成无缺陷的复合结构。当水分超过临界阈值时,体系主导机制发生转变,淀粉溶胀驱动的黏性特征逐步取代面筋网络的弹性响应,引发产品质构特性的根本性重组。淀粉-蛋白配比阈值与面制品品质的构效关系,当且仅当二者处于分子结合的最佳化学计量比时,面筋网络的拓扑结构与淀粉填充相形成能量最低的稳定体系,此时制品的质构特性呈现全局最优解。

3 真空和面技术在面制品中的应用

真空和面设备作为现代食品工程技术的重要应用,通过负压环境调控面团流变学特性 [36],从而提高了生产效率。Bozkurt 等 [37] 研究表明,存在最佳真空阈值 (0.06 MPa),此时 GMP 含量达到峰值,而过高负压 ($>0.08 \text{ MPa}$) 将引发 GMP 解聚效应。Cui 等 [38] 通过蒸煮试验证实,该技术能使马铃薯全粉面条的断条率降低 23%~37%,显著提升产品完整性。其作用机制涉及:① 负压诱导小麦粉颗粒的水合动力学增强,形成稳定结合水体系;② 分子间作用力强化使面团弹性模量增加,微观结构致密度提高;③ 负压引发的蒸发冷却效应能够有效耗散机械能转化所产生的热量,从而抑制面团在搅拌过程中的温升,有效维持蛋白二级结构的 β -折叠构象稳定性。值得注意的是,该技术体系与热机械处理等工艺具有显著协同增效作用,其普适性已在多种面制品加工中得到验证。

3.1 真空和面协同过热蒸汽在全麦挂面中的应用

真空和面工艺对贮藏期间全麦挂面的脂质降解具有显著抑制效应,且与过热蒸汽处理存在协同增效作用。值得注意的是,全麦制品在加工过程中易发生脂质氧化反应,特别是在和面工序中,该现象尤为显著 [39]。Guo 等 [40] 研究发现,常规和面处理后不饱和脂肪酸含量降低至初始值的 $(63.7 \pm 1.2)\%$, α -生育酚损失率达 $(41.5 \pm 2.8)\%$ ($P < 0.05$),同时脂质氧化标志物 2-戊基呋喃和正己醛的生成量分别增加至 (3.82 ± 0.15) 和 $(12.34 \pm 0.47) \mu\text{g/kg}$ 。真空和面 (-0.08 MPa) 通过降低氧气分压 ($<15 \text{ kPa}$) 及扩散系数,抑制氧气迁移;同时致密水合层阻隔氧气渗透。过热蒸汽 ($110 \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$) 使脂氧合酶(LOX) α -螺旋占比从 35.2% 降至 18.7%,活性降低 76.5% ($P < 0.05$),二者

协同形成“热—压抑制”效应。从作用机理分析,真空和面技术通过建立氧分压低于15 kPa的加工环境,使脂质氧化反应的氧气浓度阈值降低至临界值以下。这种缺氧条件可有效抑制脂肪酸链式氧化反应的引发阶段,将脂质过氧化值(POV)控制在1.06~1.22 mmol/kg,较常规工艺降低36.7%~41.2%^[41]。这些发现为优化全谷物面制品加工工艺提供了重要理论依据。

相较于常规和面工艺,真空处理可显著抑制贮藏过程中脂质降解酶活性($P<0.05$),并使不饱和脂肪酸分解速率降至 $(28.4\pm 1.6)\%$ 。同时真空处理使总生育酚保留率提升至 $(82.7\pm 1.9)\%$,且挥发性氧化产物生成量减少39.5%~46.8%^[42]。机制解析表明,真空和面过程中形成的单分子水合界面通过氢键网络构建空间屏障,使氧气扩散系数降至 $(2.14\pm 0.11)\times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[43]。协同应用过热蒸汽处理(110~120 °C, 25~35 s)可进一步强化生育酚类物质的稳定性,证实工艺联用具有协同稳定效应。

3.2 真空和面协同冻融处理在油条中的应用

真空和面工艺与冻融处理通过协同作用,优化面团水分分布与蛋白质网络构型,有效缓解了冻融循环对产品质构特性的劣变效应。Li等^[44]研究发现,真空度提升能促进水分深层渗透,使面团硬度、弹性等质构特性呈现梯度下降趋势。机制分析显示,真空处理形成的致密化结构可增强水分束缚能力,促使油炸制品获得更优的松软度与适口性。这为调控冷冻面团制品品质提供了重要理论依据。

Wang等^[45]研究发现,未经真空处理的冻融面团呈现出显著的水分相变特征,表现为自由水含量增幅达23.6% ($P<0.05$),且伴随明显的微观结构完整性受损。真空处理组(-0.08 MPa)经过5次冻融循环(-20 °C 冷冻12 h, 4 °C 解冻4 h)后结合水占比保持在 $(76.4\pm 1.2)\%$,而且硬度损失率(12.7%)显著低于对照组(28.3%, $P<0.05$)。通过傅里叶变换红外光谱分析发现,蛋白质二级结构中 β -折叠构型相对含量下降8.3个百分点,而无规卷曲构型比例增加12.1个百分点,这种结构异变与感官评价结果具有显著相关性($r=0.82$)。扫描电镜分析显示,真空处理组(-0.08 MPa)面团形成更致密的三维网络结构, β -折叠含量恢复至初始值的92.3%,蛋白质分子间氢键密度增加17.8%,显著改善了终产品的油脂吸收率(降低19.3%)、比容(提升15.7%)和质构特性(咀嚼性提高22.4%)。通过分子间作用力表征与宏观品质指标的关联分析,系统解析了淀粉—蛋白—脂质三元体系在热力学过程中的协同作用机制,为建立油炸面制品品质预测模型提供了理论依据,同时为淀粉基食品加工过程中多组分相互作用研究开辟了新视角。

4 结论与展望

真空和面技术对面团蛋白构象及网络结构的调控机理,该工艺可诱导不可溶性麦谷蛋白大聚体的定向组装,促进高相对分子质量蛋白组分的形成,驱动蛋白质二级结构重构(α -螺旋与 β -折叠占比显著提升),同时使二硫键交联密度显著提高。微观结构分析表明,面筋网络经历致密化演变,形成更均质化的微孔拓扑结构,从而实现对面粉颗粒的优化包埋。值得注意的是,该技术在高分体液中展现出独特优势,通过优化水分子结合状态显著增强水合效能,促进三维网络结构的自组装过程。从工程应用角度,真空和面工艺可显著改善面团流变特性,其机械强度与结构完整性提升使工业化加工获得突破——产品表现出优异的抗断裂性能与表面光洁度。更重要的是,该技术突破了传统工艺的能质传递限制,在提升产品品质指标的同时,实现加工能耗的有效控制,为淀粉基食品的连续化生产提供了创新性解决方案。

随着真空技术的发展和相关理论的完善,真空和面技术在食品工业上的应用越来越广泛,与其他食品加工技术共同促进食品工业的发展。真空和面技术在传统面制品领域的成功应用为新型食品开发提供了重要启示,但在无麸质与全谷物食品领域仍面临特殊挑战。无麸质面团体系缺乏麸质蛋白支撑网络其核心缺陷尤为突出。真空负压能促进淀粉颗粒与替代胶体的界面结合,真空和面技术在麸质食品中应用广泛,同时无麸质食品中面临与麸质食品中相同的难题,未来有望推动无麸质食品的发展。全谷物食品越来越受到人们的青睐,基于真空和面在麸质食品中的研究基础,真空和面技术对全谷物食品推进主食化进程具有重要意义。在更多尺度或层级下解析真空和面过程中蛋白质的变化,有助于揭示面筋网络结构在真空和面过程中的变化机理,对真空和面技术在全谷物食品中的应用具有重要意义。

参考文献

- [1] RAVICHANDRAN C, UPADHYAY A. Use of vacuum technology in processing of fruits and vegetables[M]// Processing of fruits and vegetables. Palm Bay (FL): Apple Academic Press, 2019: 139-174.
- [2] SIVAMMA P, MOUNIKA E, NAGA HARI SAIRAM N, et al. Applications of vacuum technology in food processing[J]. J Pharma Innov, 2021, 10: 914-918.
- [3] SHARANABASAVA M. Vacuum processing of food - a mini review[J]. MOJ Food Process Technol, 2018, 6: 283-290.
- [4] 刘锐, 张影全, 武亮, 等. 真空和面过程中面团蛋白质结构的变化[J]. 中国食品学报, 2019, 19(5): 139-148.

- LIU R, ZHANG Y Q, WU L, et al. Changes in dough protein structure during vacuum mixing process[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(5): 139-148.
- [5] MAHMUD N, ISLAM J, TAHERGORABI R. *Noodles*[M]// SIDIQ M, UEBERSAX M A. *Cereal-based food products*. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2023: 221-252.
- [6] YANG Y L, GUAN E Q, ZHANG L L, et al. Effects of vacuum degree, mixing speed, and water amount on the moisture distribution and rheological properties of wheat flour dough[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(6): 2 421-2 433.
- [7] PAVLOVA O, SURIK A, NOVOSAD O, et al. Trends and prospects of formation and functioning of the food market on the example of gluten-free products[J]. *Herald of Khmelnytskyi National University Economic sciences*, 2024, 330(3): 529-534.
- [8] 吴昌坤. 食品机械磁性流体组合密封研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021: 2-5.
- WU C K. Research on magnetic fluid combined seal for food machinery[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021: 2-5.
- [9] CAPPELLI A, BETTACCINI L, CINI E. The kneading process: a systematic review of the effects on dough rheology and resulting bread characteristics, including improvement strategies [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 104: 91-101.
- [10] GAO J, TAY S L, KOH A H, et al. Dough and bread making from high-and low-protein flours by vacuum mixing: part 3. oral processing of bread[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 79: 408-417.
- [11] BAO Q D, YAN J Y, WANG Z, et al. Changes in the structure and aggregation behavior of wheat glutenin and gliadin induced by the combined action of heat treatment and wheat bran dietary fiber[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 148: 109506.
- [12] WANG Y H, ZHANG Y R, QIAO L, et al. Effects of glutenin and gliadin on the surface tackiness of frozen cooked noodles [J]. *Journal of Texture Studies*, 2023, 54(5): 681-692.
- [13] ZHAO J J, WANG D L, ZHANG L F, et al. Study on the mechanism of structure modification of amylopectin co-crystallized by sodium chloride to promote disulfide bond formation of alkali-soluble glutenin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 146: 109229.
- [14] ZHANG H H, FAN H R, XU X M, et al. Deterioration mechanisms and quality improvement methods in frozen dough: an updated review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, 143: 104251.
- [15] SHAO L F, GUO X N, LI M, et al. Effect of different mixing and kneading process on the quality characteristics of frozen cooked noodle[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 101: 583-589.
- [16] LIU Q N, LI K, WU L, et al. Effects of pressure in hand kneading and mechanical bionic kneading on dough formation and texture properties[J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2024, 144: 102-109.
- [17] ZHANG Y Y, WANG S, BAI J N, et al. Effect of resting time on water distribution and gluten formation of dough[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, 204: 116425.
- [18] YANG Y L, GUAN E Q, ZHANG T J, et al. Comparison of rheological behavior, microstructure of wheat flour doughs, and cooking performance of noodles prepared by different mixers[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(4): 956-963.
- [19] LIU S Y, JIANG Y Y, XU B, et al. Analysis of the effect of rolling speed on the texture properties of noodle dough from water-solid interaction, development of gluten network, and bubble distribution[J]. *Food Chemistry*, 2023, 404: 134359.
- [20] LAURENT M, BARBAR R, BEAUDOUX C, et al. Changes in physico-chemical properties and water status of durum wheat constituents in pasta due to processing and cooking[J]. *Journal of Cereal Science*, 2023, 112: 103707.
- [21] ZHU S Y, HE Z, OBADI M, et al. A study of vacuum mixing parameters for high-water-added dried noodles using color difference method and gluten network quantitative analysis[J]. *Journal of Cereal Science*, 2022, 104: 103427.
- [22] WANG Y W, CHEN J, XU F, et al. Steaming treatments affect the quality of instant dough sheets through moisture migration and the structural properties of starch and protein[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, 205: 116492.
- [23] MASBERNAT L, BERLAND S, ALMEIDA G, et al. Stabilizing highly hydrated wheat flour doughs by adding water in two steps[J]. *Journal of Cereal Science*, 2021, 98: 103179.
- [24] YIN J, CHENG L, HONG Y, et al. Use of two-stage dough mixing process in improving water distribution of dough and qualities of bread made from wheat - potato flour[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(1): 300-310.
- [25] JANSSEN F, MONTERDE V, WOUTERS A G B. Relevance of the air - water interfacial and foaming properties of (modified) wheat proteins for food systems[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2023, 22(3): 1 517-1 554.
- [26] PARENTI O, GUERRINI L, MOMPIN S B, et al. The determination of bread dough readiness during kneading of wheat flour: a review of the available methods[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 309: 110692.
- [27] ZHANG H J, LV S H, JIN C M, et al. Wheat gluten amyloid fibrils: conditions, mechanism, characterization, application, and future perspectives[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253: 126435.
- [28] HU X H, CHENG L, HONG Y, et al. An extensive review: how starch and gluten impact dough machinability and resultant bread qualities[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(13): 1 930-1 941.

- [29] YANG Y L, GUAN E Q, ZHANG L L, et al. Mechanical action on the development of dough and its influence on rheological properties and protein network structure[J]. Food Research International, 2022, 158: 111495.
- [30] OOMS N, DELCOUR J A. How to impact gluten protein network formation during wheat flour dough making[J]. Current Opinion in Food Science, 2019, 25: 88-97.
- [31] WANG Z, MA S, SUN B H, et al. Effects of thermal properties and behavior of wheat starch and gluten on their interaction: a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 177: 474-484.
- [32] ZHANG J Y, LIU Y H, WANG P, et al. The effect of protein - starch interaction on the structure and properties of starch, and its application in flour products[J]. Foods, 2025, 14(5): 778.
- [33] SCOTT G, AWIKA J M. Effect of protein - starch interactions on starch retrogradation and implications for food product quality[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(3): 2 081-2 111.
- [34] WANG Y H, ZHANG Y R, YANG Y Y, et al. Effect of wheat gluten addition on the texture, surface tackiness, protein structure, and sensory properties of frozen cooked noodles[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 161: 113348.
- [35] LIU S B, CHENG T F, ZHANG J Y, et al. Regulating the interaction between protein and starch in noodles through heat loss: used to improve the edible quality of noodles[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 97: 103831.
- [36] OBADI M, ZHANG J Y, HE Z, et al. A review of recent advances and techniques in the noodle mixing process[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112680.
- [37] BOZKURT S, GÖRGÜÇ A, GENÇDAĞ E, et al. Principles and recent applications of vacuum technology in the processing of dough-based cereal products: a comprehensive review[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134443.
- [38] CUI L L, TIAN Y G, TIAN S Q, et al. Preparation of potato whole flour and its effects on quality of flour products: a review[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2018, 1(3): 145-150.
- [39] JIA W T, YANG Z, GUO X N, et al. Effect of superheated steam treatment on the lipid stability of dried whole wheat noodles during storage[J]. Foods, 2021, 10(6): 1 348.
- [40] GUO X N, WU S H, ZHU K X. Effect of superheated steam treatment on quality characteristics of whole wheat flour and storage stability of semi-dried whole wheat noodle[J]. Food Chemistry, 2020, 322: 126738.
- [41] ZHANG L P, YANG D S, LUO R M, et al. Research progress on the mechanism of the impact of myofibrillar protein oxidation on the flavor of meat products[J]. Foods, 2024, 13(20): 3 268.
- [42] CHEN Y Y, YU Y T, AN X, et al. Changes in lipid metabolites and enzyme activities of wheat flour during maturation[J]. Foods, 2024, 13(16): 2 537.
- [43] SINGH P, YADAV V, SAHU D, et al. Exploring chitosan lactate as a multifunctional additive: enhancing quality and extending shelf life of whole wheat bread[J]. Foods, 2024, 13(10): 1 590.
- [44] LI M Y, MCCLEMENTS D J, ZHANG Z P, et al. Influence of key component interactions in flour on the quality of fried flour products[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2025, 65(17): 1-12.
- [45] WANG J, WEN J P, FAN X Q, et al. Control of the oil content of fried dough sticks through modulating structure change by reconstituted gluten fractions[J]. Food Chemistry, 2024, 455: 139909.