

影响冷冻面团因素及其品质改良研究进展

张娜*, 武娜, 杨杨, 范婧, 任丽琨, 贺殷媛, 边鑫, 陈凤莲, 刘晓飞, 俞德慧, 刘琳琳, 郭晓雪

(哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150076)

摘要: 冷冻面团技术作为一种面制品加工工艺, 具有防止产品老化, 便于冷藏和运输等优势, 因此在国内得到广泛应用。然而, 在冷冻面团生产和贮藏过程中存在一系列问题, 例如: 面筋结构完整性丧失、酵母细胞失活以及淀粉结构被破坏等, 这些都导致了面制品品质的劣变。本文综述了影响冷冻面团品质的主要因素, 总结了提高冷冻面团品质特性的有效方法, 改良剂的添加不仅可以提高酵母的耐冻性, 而且可以保持面团的流变学特性。基因工程技术修饰可以提高酵母的耐冻性和发酵能力。通过优化冷冻和储存条件, 确保酵母的活性和面团的网络结构, 使冰晶造成的冻害最小化。此外, 新型冷冻技术的应用如超声波辅助冷冻可以在加速冷冻过程的同时生成均匀的冰晶, 从而保护面团的网络结构。以期改善冷冻面团品质以及为开发新型的冷冻面团技术提供理论依据。

关键词: 冷冻面团; 品质改良; 面筋结构; 研究进展

文章编号: 1673-9078(2022)10-320-328

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.10.1383

Identifying Factors That Influence Dough Quality to Improve Frozen Doughs

ZHANG Na*, WU Na, YANG Yang, FAN Jing, REN Likun, HE Yinyuan, BIAN Xin, CHEN Fenglian, LIU Xiaofei, YU Dehui, LIU Linlin, GUO Xiaoxue

(School of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China)

Abstract: Freezing of dough, as a technique for processing pasta products, has been used in the food industry worldwide to prevent product aging and to facilitate refrigeration and transportation. However, the production and storage of frozen doughs faces many challenges, such as loss of gluten structural integrity, loss of gluten, reduction of yeast activity, and reduction and destruction of dough structure. These challenges can cause deterioration of pasta product quality. This paper reviews the main factors affecting the quality of frozen doughs and summarizes methods that effectively improve the quality characteristics of frozen doughs. The use of additives can now improve the freezing tolerance of yeast and maintain the rheological properties of doughs. Genetic engineering technology can improve the freezing tolerance and fermentation ability of yeast. By optimizing freezing and storage conditions, the yeast activity and network structure of the dough can be maintained within reasonably good ranges, and the damages caused by ice crystals can be minimized. Novel technologies such as ultrasonic-assisted freezing can ensure ice crystal uniformity while accelerating the freezing process, thus protecting the network structure of the dough. Therefore, the main factors affecting the quality of frozen doughs, and effective methods to improve characteristics of frozen dough quality, are summarized in this paper to provide a theoretical basis for improving frozen dough quality and for developing new frozen dough preservation technologies.

Key words: frozen dough; quality improvement; gluten structure; research progress

引文格式:

张娜,武娜,杨杨,等.影响冷冻面团因素及其品质改良研究进展[J].现代食品科技,2022,38(10):320-328

ZHANG Na, WU Na, YANG Yang, et al. Identifying factors that influence dough quality to improve frozen doughs [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(10): 320-328

收稿日期: 2021-12-09

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2021YFD2100902-3); 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项资助 (2020ZX08B02); 国家自然科学基金项目 (32072258); 哈尔滨商业大学“青年创新人才”支持计划 (2020CX26; 2019CX06); 中央财政支持地方高校发展专项资金优秀青年人才支持计划项目
作者简介: 张娜(1979-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学, E-mail: foodzhangna@vip.163.com

冷冻面团技术是 20 世纪 50 年代发展起来的, 用于休闲速冻面制品加工工艺中, 它的出现降低了产品的成本和损耗, 提高了运输便利, 延长了食品货架期, 为消费者提供了品质更好、更新鲜的面制品。因此, 冷冻面团在工业生产中发挥了重要的作用, 但仍然存在一些不足。面团经过长时间的冷冻贮藏和连续的冻融循环使其产品品质下降, 从而降低了其经济效益也

限制了它的广泛应用, 因此阐明冷冻面团在加工贮藏过程中品质变化的机理, 从根本上解决冷冻面团品质劣变问题是至关重要的。本文基于当前冷冻面团的研究现状, 分析了引起冷冻面团品质劣变的主要因素, 并综述了提高冷冻面团品质的方法, 包括改良剂的添加、基因工程的应用、适当的冷冻及贮藏条件以及新型冷冻技术等, 以期为后续开发出品质更好的冷冻面团产品提供理论基础。

1 影响冷冻面团品质的主要因素

面团在冷冻和冻藏过程中冰晶的形成以及重结晶所引起面团关键组分的劣变是影响冷冻面团品质的主要原因^[1], 包括面筋蛋白网络结构的破坏, 酵母细胞的失活以及淀粉结构的损伤。

1.1 面筋蛋白网络结构的破坏

面筋蛋白具有独特的粘弹性、起泡性和持水性, 对面团的面筋强度、延伸性等具有决定性作用, 是影响冷冻面团品质劣变最主要的因素之一。

在水分子参与下, 面筋蛋白通过揉捏形成粘弹性网络结构, 将淀粉等成分固定在面团内部, 形成以二硫键和其他非共价键(氢、离子和疏水键)相互作用下维持稳定的三维网络结构^[2]。面团在冷冻过程中, 体系中的水通过结晶作用形成冰晶, 在随后冻藏阶段, 小冰晶会逐渐聚集使得界面最小化来达到相对稳定状态, 诱导大冰晶的形成, 破坏了面筋蛋白网络结构(图1)^[3]。此外, 冰晶形成过程中产生的微作用力导致面筋蛋白结构变化, 部分 α -螺旋结构会转变为 β -转角和 β -折叠结构, α -螺旋本身的有序化结构是形成面筋的“骨架”, 随着 α -螺旋减少, 网络结构的无序化程度增加^[4]。此外, 蛋白质分子量的变化也可以反映冷冻对面筋结构的影响。面团在冷冻和冻藏过程中, 谷蛋白的高分子聚合物(GMP)发生不同程度的解聚, 导致冷冻面团的弹性及持气性下降, 这可能是由于GMP组分链外二硫键断裂所引起的^[5]。Yi等^[6]研究表明, 面筋蛋白的解聚作用随着冻藏时间的增加而加剧, 反复冻融则会加快面筋蛋白的解聚。

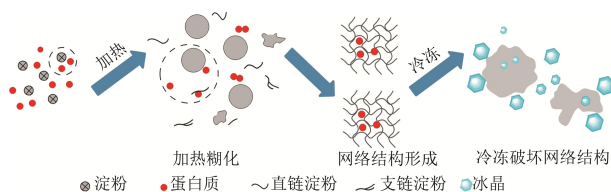


图1 面筋蛋白网络结构在冻藏过程中的破坏

Fig.1 The disruption of gluten network structure during freezing and storage

1.2 酵母细胞的失活

酵母细胞的失活是发酵型冷冻面团品质劣变的主要原因之一, 面团冷冻过程中体系中的水逐渐形成冰晶, 导致细胞内部渗透压增加, 使其处于脱水状态, 从而降低了酵母活性^[7]。随着外界温度波动, 冰晶重结晶速率加快, 酵母细胞被不断生长的冰晶刺破而死亡(图2)^[8], 释放出的大量还原性物质, 如谷胱甘肽等, 能将面筋蛋白中的二硫键还原成巯基, 从而削弱面筋蛋白结构^[9]。

Wang等^[10]研究发现, 细胞内功能性物质的积累是目前冷冻面团中增强酵母活性的重要方法。在面团冷冻和冻藏过程中, 酵母通常会在其细胞内积累大量的保护性物质, 如脯氨酸, 精氨酸和甘油等, 来增强对冷冻条件下的抵抗力。海藻糖可以通过减缓聚谷氨酰胺介导的蛋白聚集速率, 防止蛋白质变性, 在冰晶形成的压力之下, 能够帮助酵母细胞维持其完整性^[11]。脯氨酸可以与细胞内的游离水结合形成氢键, 这与高水平的超氧化物歧化酶有关, 它降低了活性氧的水平, 避免了细胞内物质的氧化^[12]。甘油通过平衡细胞内与环境之间的渗透压来防止脱水, 在预发酵面团中添加甘油(2%, 以面粉为基础), 与对照样相比, 其可冻结水比例降低了14%~16%, 防止了面团在冷冻和冷藏过程中形成冰晶, 从而提高了酵母的活性和存活率, 改善了面团的发酵能力, 缩短了其冷冻-解冻后的发酵时间^[13]。此外, 可以通过基因工程技术, 开发专用酵母菌株, 用于商业冷冻面制品的生产。

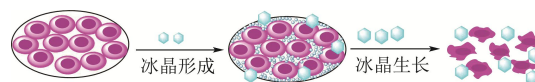


图2 酵母细胞的破坏示意图

Fig.2 Schematic diagram of the destruction of yeast cells

1.3 淀粉结构的损伤

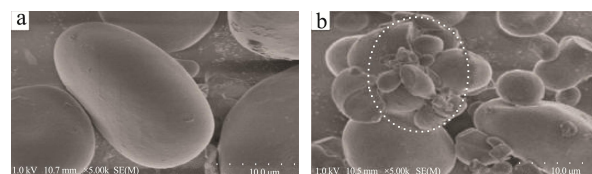


图3 淀粉结构破坏示意图

Fig.3 Schematic diagram of the disruption of starch structure

注: (a) 原淀粉; (b) 冻藏后淀粉^[14]。

淀粉是冷冻面团中占比最多的成分, 其变化也会影响面团的品质。原淀粉颗粒表面光滑且完整, 但是冻藏处理使得冰晶形成过程中产生的作用力会破坏淀粉的完整结构, 使淀粉表面出现凹陷, 孔洞变大, 颗粒形态被严重破坏等现象(图3)^[14]。就小麦淀粉而

言,其B型淀粉比A型淀粉更容易被破坏,这是因为B型淀粉颗粒小,对外界温度的变化更敏感。此外,随着冻融循环处理的增加,淀粉的破损程度和相对结晶度增加,蛋白质、脂肪和支链淀粉等含量显著降低,其膨胀力和糊化温度也呈下降趋势,由此可见,冻藏对淀粉的理化特性以及颗粒形态均有一定的影响^[15]。Yang等^[16]研究发现,淀粉颗粒的破坏程度与面团形成时间以及其拉伸性能呈显著相关性,随着冻藏时间的延长,其淀粉的破坏程度加剧,所以加工成的面团持

气性差,体积小,塌陷现象严重。

2 改良剂对冷冻面团品质的影响

添加改良剂是目前改善冷冻面团最普遍的方法并且效果好。在工业生产中常用到的改良剂主要有亲水胶体、乳化剂、酶制剂、氧化剂和抗冻保护剂等(表1),通过不同的作用方式去强化面筋网络结构,抑制冰晶生长,从而改善冷冻面团的品质,进一步提高冷冻面制品的产品质量^[17]。

表1 不同改良剂对冷冻面团品质改良的机理

Table 1 Effects of different improvers on the quality of frozen dough

添加剂种类	作用原理	参考文献	
亲水胶体	羟丙基甲基纤维素		
	海藻酸钠	1、增强面筋网络之间的交联,增加面筋强度	[23,25]
	阿拉伯胶	2、与淀粉之间相互作用延缓面筋的老化	
	黄原胶	3、降低水分的迁移,抑制冰晶的生长从而减少	
	卡拉胶	对面筋结构和酵母的破坏	
刺槐豆胶			
乳化剂	双乙酰酒石酸单(双)甘油酯	1、与淀粉复合,阻止淀粉分子之间的缔合,	[28,31]
	硬脂酰乳酸钠	从而延缓淀粉的老化	
	山梨醇酐单硬脂酸酯	2、与面筋蛋白络合,强化面筋结构,	
	大豆磷脂	增强面筋韧性	
酶制剂	蔗糖脂肪酸酯		[33,34]
	谷氨酰胺转氨酶	促进蛋白质之间的交联,增强面筋网络结构	
	葡萄糖转氨酶		
	纤维素酶		
	脂肪酶		
氧化剂	木聚糖酶		[46,47]
	淀粉酶		
	聚丙烯酸钠	1、将面筋蛋白中的-SH氧化成-S-S-,	
	抗坏血酸	增强面筋蛋白中分子间的缔合	
抗冻蛋白 (AFPs)	偶氮甲酰胺	2、减少谷胱甘肽等还原性物质对面筋结构的破坏	[48,54]
	过氧化钙		
	胡萝卜		
	植物AFPs冬小麦		
	燕麦		
抗冻蛋白 (AFPs)	昆虫类AFPs云杉卷叶蛾	1、降低体系的冰点	[48,54]
	黄粉虫	2、吸附冰晶,抑制冰晶的生长和重结晶,	
	鱼类AFPs美绒杜父鱼等I型	减弱对面筋结构的破坏	
	海渡鸭等II型		
	真菌及细菌AFPs北极酵母		
	南极细菌		

2.1 亲水胶体

亲水胶体通常是指能溶解或分散在水中的多糖分

子,因其高亲水基团含量,易与水结合形成粘稠的溶液或凝胶^[18],作为增稠剂、凝胶剂、稳定剂等添加到食品中,改善产品的品质特性。

亲水胶体能够抑制面团在冷冻贮藏中的水分迁移,避免冰晶大量形成,进而减弱冰晶对酵母细胞以及面筋网络的破坏^[19,20]。此外,亲水基团还可以与面团中的蛋白质、淀粉等分子发生相互作用,形成高分子复合体,使最终产品在加热阶段,形成更加稳定的面筋网络结构(图4)^[21-23]。吴西芝等^[24]通过测定34种添加剂对冷冻面团持水性的影响发现,瓜尔豆胶对于提高发酵面团及非发酵面团的持水性效果最好,与空白面团相比,持水能力分别提高了33.82%和34.11%,发挥了很好的水分滞留作用,防止了面团的脱水收缩。此外,羟丙基甲基纤维素(HPMC)对冷冻面团也有很好的作用效果,HPMC的添加增加了面团的吸水率,但降低了面团的冻结水含量,这可能是因为HPMC自身含有大量的亲水基团,具有较强的持水和保水能力,不仅可以吸收水分还能抑制水分流失,从而增加了面包体积,同时也降低了其硬度和咀嚼性^[25]。此外,一些亲水胶体,如卡拉胶、阿拉伯胶、刺槐豆胶等,都能不同程度上改善冷冻面团的特性,并获得品质更好的面制品。

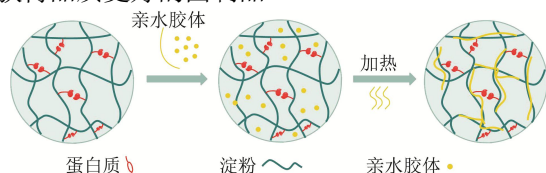


图4 亲水胶体对蛋白质网络结构的影响

Fig.4 Effect of hydrophilic colloids on protein network structure



图5 乳化剂对冷冻面团的作用机理

Fig.5 Mechanism of action of emulsifier on frozen dough

2.3 酶制剂

酶是从生物体(包括动物、植物、微生物)中提取出来且具有生物催化活性的一类蛋白质^[33],其安全性高,被广泛用于面制品的品质改良,在冷冻面团中的研究也有很好的发展前景,常被单独或组合添加到冷冻面团中,以降低冷冻对面团造成的结构和酵母损伤。食品工业中常用到的酶制剂有谷氨酰胺转氨酶(TG)、葡萄糖氧化酶(GOD)、脂肪酶、环糊精糖基转移酶以及淀粉酶等^[34]。

谷氨酰胺转氨酶作为一种催化酰基反应的酶,是

2.2 乳化剂

乳化剂是冷冻面团品质改良中常用的添加剂,其本质是两亲分子,即在同一分子上具有亲水基团和亲油基团^[26]。面团加入乳化剂,其亲水基团与面筋蛋白中的麦醇溶蛋白结合,亲油基团与麦谷蛋白结合,促进了乳化剂与蛋白质之间的相互作用,形成了更稳定的结构体系^[27,28](图5)。此外,乳化剂还能与淀粉分子相互作用在凝胶化期间与螺旋直链淀粉分子形成复合物,阻止淀粉之间发生缔合形成重结晶,降低面团表面张力,形成更小的冰晶结构,削弱对面筋蛋白的破坏^[29],使冷冻面团制品保持更好的品质特性。

乳化剂在新鲜面团中研究很多,但在冷冻面团及其烘烤制品中的研究还较少。目前用于冷冻面团中的乳化剂包括双乙酰酒石酸单(双)甘油酯(DATEM)、大豆磷脂、山梨醇酐单硬脂酸酯、蔗糖脂肪酸酯等。其中,DATEM是冷冻面团中使用最广泛的一类乳化剂,能将冷冻面团加工成的面包硬度降低,减少冷藏对面筋结构的破坏^[30]。Ribotta等^[31]研究发现,DATEM能降低冷冻面团加工成面包的硬度,当DATEM添加量为0.5%,在-18℃冷冻储藏60d后其面包显示出更大的体积以及更低的硬度,这可能是由于DATEM使面团成分充分混匀并增加了与空气结合的总数,促进了面筋形成。此外,当DATEM和蔗糖脂肪酸酯复配使用时,其对冷冻面团的改善效果要优于单一乳化剂的使用^[32]。

以蛋白质中谷氨酰胺残基的 γ -酰胺基为供体^[35],赖氨酸残基的 ϵ -氨基为受体,在分子间或分子内形成 ϵ -(γ -谷氨基)lys共价键使蛋白质分子间发生交联^[36-38],以稳定面筋结构,增强面筋蛋白的筋力。Steffolan^[39]等通过比较谷氨酰胺转氨酶和脂肪酶对冷冻面团的影响发现,两者均可以有效提高面团的发酵能力以及冻藏过程中的持水性,得到比容更高且硬度更低的面包产品。此外,当两者同时使用时,整体的感官评价要高于单一使用的酶制剂^[40]。Tang等^[41]研究发现,谷氨酰胺转氨酶和中华根霉脂肪酶两者同时使用时具有很好的协同作用,可以抑制冷冻过程中GMP的解聚,对

于在-18℃条件下保存35d的面团也可以发挥很好的增效作用。

葡萄糖氧化酶(GOD)在冷冻面团中起到氧化作用,如图6所示,面团混揉过程中,在氧气的参与下,葡萄糖氧化酶被氧化成葡萄糖酸和过氧化氢,过氧化氢作为一种强的氧化剂可以将体系中的巯基(-SH)氧化成二硫键(-S-S-),从而增强面筋的网络结构^[42]。所以,当冷冻面团中加入葡萄糖氧化酶后,可以改善冷冻面团的面筋结构,对面包的品质和感官特性都有显著的改善效果^[43]。此外,葡萄糖氧化酶还能在一定程度上增加冷冻面团的弹性以及面包的体积、质地和面包屑的柔软性,同时也降低了面包的硬度和咀嚼性,这说明葡萄糖氧化酶能有效提高冷冻面团的弹性,提高其产品的品质。研究发现,当酶制剂和亲水胶体同时加入到冷冻面团中,可以得到观察到更连续的网络结构以及更好的储存效果^[44]。

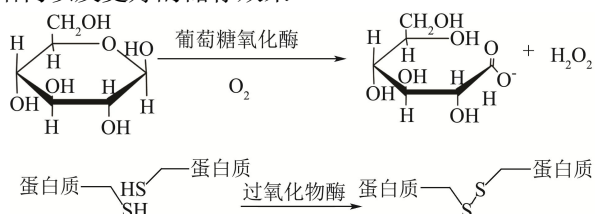


图6 葡萄糖氧化酶反应机理

Fig.6 Glucose oxidase reaction mechanism

2.4 氧化剂

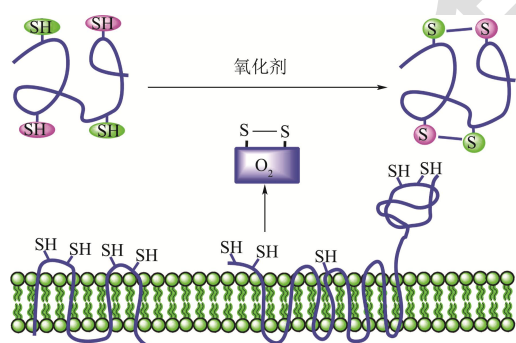


图7 氧化剂对冷冻面团作用机理

Fig.7 Mechanism of action of oxidizing agent on frozen dough

氧化剂作为一种常见的食品添加剂,在冷冻面团中的报道还较少。其作用机理主要是可以将面筋蛋白中的巯基氧化成二硫键,以提高面团的持气性和筋力,达到强化面筋蛋白网络结构的效果(图7)^[45]。此外,还可以进一步氧化由酵母细胞被破坏后释放出的大量还原性物质谷胱甘肽,以减少对冷冻面团的破坏^[46]。抗坏血酸由于其安全性高且不会对面筋结构造成破坏而被广泛使用。Meerts等^[47]研究发现,抗坏血酸它可以增加面包的体积,提高抗拉伸能力,使面包内部结构更完整,也可以抑制冷冻面团中水分迁移,使面包

保持蓬松的结构,延缓老化,延长货架期。此外,当抗坏血酸和巯基氧化酶同时使用时,可以显著提高冷冻面团的冻融稳定性。

2.5 抗冻蛋白

抗冻蛋白(AFPs)又被称为冰结构蛋白,是一种保护生物免受冻伤的蛋白质,目前根据来源不同,可以将AFP分为鱼类,昆虫类,细菌类和植物类^[48]。AFP对生物在寒冷环境中生存具有很好的保护作用,它的保护功能源于其独特的性质,其中最重要的是其热滞活性和抑制冰晶的能力^[49]。

热滞活性是AFP的重要特性之一,它是溶液熔点和冰点之间的差值。AFP以非依数性的形式降低了溶液的凝固点,从而使溶液冰点低于熔点,冰晶必须在更低的温度环境下才能生长,其差值越大则抗冻活性越大(图8)^[50]。目前在很多物种中都发现了具有热滞活性的AFP,其中,鱼类和昆虫类是含量最高的,最先发现的极地地区的海洋硬骨鱼其体液在遇到结冰的海水时可以避免冻结,从而可以在寒冷的季节里生存。但是,相对于鱼类AFP的中度热滞活性,昆虫类尤其是黄粉虫的淋巴提取物中拥有更高的热滞活性。最高能够降低溶液冰点10℃左右^[51]。抑制重结晶是AFP另一个重要特性,小的冰晶自由能高,其热力学稳定性更低,所以随着外界温度的变化,冰晶之间会重新分配形成更大的冰晶,即发生重结晶^[52]。结晶的形成不仅会对细胞膜造成机械伤害,还会对周围的组织造成结构损伤。AFP的添加可以吸附在冰晶表面,起到抑制冰晶继续生长的作用,被AFP覆盖的冰晶表面停止生长,而未被AFP覆盖的表面则继续向上生长形成一个弧形(图9),当冰晶的表面积与体积之比超过冰晶自发的热力学值时,则冰晶生长完全终止^[53]。

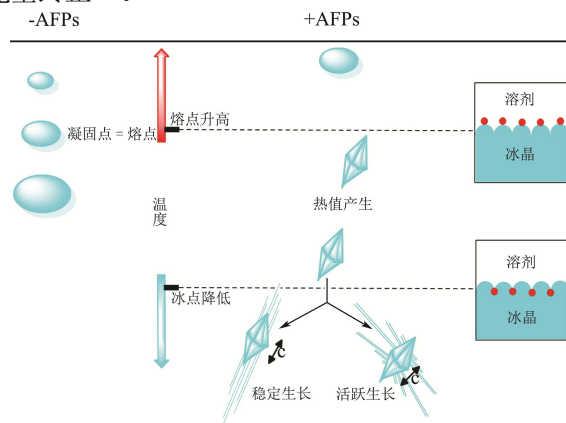


图8 抗冻蛋白热滞活性示意图

Fig.8 Anti-freeze protein thermal hysteresis activity

植物类AFP因其具有强抑制重结晶能力且作用

效果要高于其他类抗冻蛋白从而使其在冷冻面制品工业被广泛应用^[54]。燕麦抗冻蛋白是一种最常见的植物蛋白,张艳杰等^[55]发现,燕麦抗冻蛋白它可以有效改善酵母活性,降低面筋基质被破坏程度,从而增加冷冻面团的产气性能,得到比容更好且质地更细腻的面包产品。此外,Liu等^[56]在胡萝卜中提取到的抗冻蛋白也具有相同的作用,它可以通过降低酵母的死亡率提高其发酵能力,并可以缩短醒发时间,提高面包的比容和质构特性。

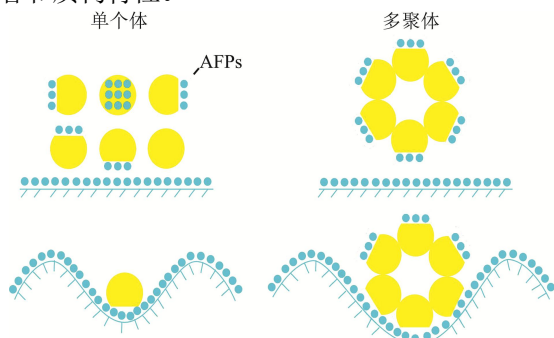


图9 抗冻蛋白抑制冰晶示意图

Fig.9 Anti-freeze protein inhibits ice crystals

3 运用改良技术

3.1 基因工程

目前关于基因工程在冷冻面团酵母细胞上的应用比较少。研究表明,酵母活力与细胞内化合物的含量有关,其中,海藻糖和脯氨酸被认为是影响酵母耐冻性的主要因素。细胞内海藻糖和脯氨酸的浓度可以通过酵母中的合成酶和水解酶来控制^[57]。合成酶的增加和水解酶的降低都可以提高酵母中海藻糖和脯氨酸的含量。海藻糖的水解由NTH1基因控制,其合成则由MAL62和TSP1基因控制。酵母中单一基因(MAL62或TSP1)的过表达会增加海藻糖的积累,从而促进酵母在冷冻条件下的生存能力^[58]。NTH1基因的缺失可以进一步增强酵母的耐冻性,提高发酵性能。此外,PUT1基因的缺失也表现出较高的耐冻性和较好的发酵性能^[59]。

3.2 冷冻及贮藏条件

冷冻速度和贮藏条件会影响冷冻面团的品质,主要是由于影响了酵母的活性以及冰晶的成核和生长。在冷冻过程中,缓慢的冷冻速度会形成巨大的冰晶,对组织细胞造成严重损害。相反,快速冷冻可以减少对面团网络结构的破坏,但是快速冷冻可能对酵母活性产生负面影响^[60]。研究表明,酵母活性随冷冻速率的增加呈现先升高后降低的趋势,所以,适当的

冷冻速率是必要的,保证酵母活性的同时也确保形成更小的冰晶来保护面筋结构^[61]。

贮藏温度和时间会影响冷冻面团冰晶的生长和重结晶的发生。随着外界温度的波动小冰晶反复冻融,水分迁移速率加快,使面团孔隙吸附大量的水分子,形成更大的冰晶,导致面团的弹性及延展性变差,从而影响了酵母的活性。Phimolsiripol等^[62]研究表明,冻藏温度的波动使CO₂的持气性能降低,从而降低了面团的品质特性。通常情况下,冷冻面团的最适储存温度是-18~-22℃。

3.3 新型冷冻技术

超声辅助冷冻(UAF)是目前新型的冷冻技术,它不仅可以促进冰成核以及起到控制面团冷冻过程中冰晶的形成和分布等作用。也可以降低过冷度,提高传热效率,从而使产生的冰晶细小且分布均匀,降低对冷冻面团的破坏^[63]。

李银丽^[64]通过分析超声辅助冷冻技术对面团品质的影响发现经UAF处理可加快面团冷冻速率,减少水的流动性,使其更接近新鲜产品的状态。Hu等^[65]进一步研究发现,经过288W和360W不同UAF水平下处理的面团其冷冻时间减少了11%以上,得到弹性更好且感官特性更佳的产品,这可能是由于UAF减弱了冰晶的形成。此外,UAF在-4~-2℃范围内可以提高乳酸菌细胞的活力,在冷冻期间可以进一步提高酵母活性以及面团的持气性^[66]。由于UAF是一种新兴的冷冻技术,所以,其在面团冷冻中的应用非常有限,需要进行更深入的研究。

4 结语

本文从面团在冻藏过程中面筋网络结构,酵母活性以及淀粉的结构3个方面对冷冻面团的劣变规律进行了总结,并且综述了提高冷冻面团品质的方法,尽管冷冻面团的生产还面临着许多问题和挑战,但是仍然有许多研究发现了其中的改善方法和机理,大多数研究都是通过对冰晶的抑制以及加强面筋蛋白的网络结构,其中具有代表性的一些方法技术,包括改良剂的添加,例如亲水胶体、乳化剂、酶制剂、氧化剂及抗冻蛋白等,基因工程技术,控制适当的冷冻速率和温度以及超声辅助冷冻法等,都已经被证实对改善冷冻面团的品质有很好的效果。

参考文献

- [1] Selomulyo V O, Zhou W B. Frozen bread dough: Effects of freezing storage and dough improvers [J]. Journal of Cereal

- Science, 2007, 45(1): 1-17
- [2] ZHU Yunping, WANG Yu, LI Jinlong, et al. Effects of water-extractable arabinoxylan on the physicochemical properties and structure of wheat gluten by thermal treatment [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(23): 4728-4735
- [3] Esselink E F, Van A H, Maliepaard M, et al. Long-term storage effect in frozen dough by spectroscopy and microscopy [J]. Cereal Chemistry, 2016, 80(4): 396-403
- [4] Bgne F, Ferrero C, Puppo M C. Effect of freezing and frozen storage on mesquite-wheat dough for panettone-like breads [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(6): 2853-2861
- [5] Zhang B, Omedi J O, Zheng J, et al. Exopolysaccharides in sourdough fermented by *Weissella confusa* QS813 protected protein matrix and quality of frozen gluten-red bean dough during freeze-thaw cycles [J]. Food Bioscience, 2021, 43: 101180
- [6] ZHAO Lei, LI Lin, LIU Guoqing, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the molecular weight and size distribution of gluten [J]. Food Research International, 2013, 53(1): 409-416
- [7] 郭璐楠. 面团冻藏过程中酵母稳定性变化及其对面团品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2021
- [8] Kontogiorgos V, Goff H D. Calorimetric and microstructural investigation of frozen hydrated gluten [J]. Food Biophysics, 2006, 1(4): 202-215
- [9] Brooks J, Lefebvre D D. Optimization of conditions for cadmium selenide quantum dot biosynthesis in *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2017, 101(7): 2735-2745
- [10] WANG Pei, XU Lei, 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
- [11] Stefanello R F, Machado A, Cavalheiro C P, et al. Trehalose as a cryoprotectant in freeze-dried wheat sourdough production [J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 11(11): 1-32
- [12] Yu S, Haitani Y, Hashida K, et al. Simultaneous accumulation of proline and trehalose in industrial baker's yeast enhances fermentation ability in frozen dough [J]. Journal of Bioscience & Bioengineering, 2012, 113(5): 592-595
- [13] Varmola E, Bbedade D, Deshaware S, et al. Evaluation of baking conditions for frozen doughs [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(4): 3307-3317
- [14] 陶晗. 小麦淀粉在冻藏过程中品质劣变机理及其对面团品质影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017
- [15] Ban C, Yoon S, Han J, et al. Effects of freezing rate and terminal freezing temperature on frozen croissant dough quality [J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 73: 219-225
- [16] YANG Zixuan, YU Wenjie, XU Dan, et al. Impact of frozen storage on whole wheat starch and its A-type and B-type granules isolated from frozen dough [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 223: 115142
- [17] 周舟, 杜险峰. 冻藏过程中面团组分的变化及改良剂的研究进展[J]. 食品科技, 2020, 45(12): 144-149
- [18] Manik L, Nur M. The recent development of gluten-free bread quality using hydrocolloids [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 733(1): 012101
- [19] Mahmood K, Kamilah H, Shang P L, et al. A review: Interaction of starch/non-starch hydrocolloid blending and the recent food applications [J]. Food Bioscience, 2017, 19(23): 110-120
- [20] 叶晓枫, 赵黎平, 曹蓉. 冷冻非发酵面团冻藏过程中化学成分及物理特性的变化[J]. 食品科学, 2014, 35(6): 219-223
- [21] Liu Y, Zhang X, Ding B, et al. Effect of hydrocolloids on physical, thermal and microstructure properties of par-baked baguette during frozen storage [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 1866-1874
- [22] CHEN Jingsi, PENG qiongyao, Thundat T, et al. Stretchable, injectable and self-healing conductive hydrogel enabled by multiple hydrogen bonding toward wearable electronics [J]. Chemistry of Materials, 2019, 31(12): 1-40
- [23] Estela P L, Jimenezp L. Effect of different proportions of brea gum in the functional characteristics of wheat flour starch: impact on the physical quality of bread [J]. Food Science and Technology, 2016, 36(1): 83-89
- [24] 吴酉芝, 刘宝林, 樊海涛. 低场核磁共振分析仪研究添加剂对冷冻面团持水性的影[J]. 食品科学, 2012, 33(13): 21-25
- [25] Lorenzo G, Zaritzky N E, Califano A N. Rheological characterization of refrigerated and frozen non-fermented gluten-free dough: Effect of hydrocolloids and lipid phase [J]. Journal of Cereal Science, 2009, 50(2): 255-261
- [26] XIN Chen, NIE Linjie, CHEN Hongliang, et al. Effect of degree of substitution of carboxymethyl cellulose sodium on the state of water, rheological and baking performance of frozen bread dough [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 80: 8-14
- [27] YAN Chi, Maclements D J, ZOU Liqiang, et al. Fabrication

- of OSA starch/chitosan polysaccharide-based high internal phase emulsion via altering interfacial behaviors [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(39): 10937-10946
- [28] Bao Y R, Wang X L, Ren S C. Influence of emulsifiers on the quality of frozen dough [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 343-344: 423-429
- [29] TAO Han, XIAO Yingda, WU Fengfeng, et al. Optimization of additives and their combination to improve the quality of refrigerated dough [J]. *LWT*, 2017, 89: 482-488
- [30] WANG Hongwei, XU Ke, LIU Xingli, et al. Understanding the structural, pasting and digestion properties of starch isolated from frozen wheat dough [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 111: 106168
- [31] Ribotta P D, Perez G T, Leon A E, et al. Effect of emulsifier and guar gum on micro structural, rheological and baking performance of frozen bread dough [J]. *Food Hydrocolloids*, 2004, 18(2): 305-313
- [32] Kumar K A, Sharma G K. The effect of surfactants on multigrain incorporated short biscuit dough and its baking quality [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2018, 12(2): 1360-1368
- [33] Wang Wei, Zhou Hongxian, YANG Hong, et al. Effects of salts on the freeze-thaw stability, gel strength and rheological properties of potato starch [J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2016, 53(9): 3624
- [34] Z S A, M M B, M K A, et al. Modification of dough characteristics and baking quality based on whole wheat flour by enzymes and emulsifiers supplementation-Science Direct [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2020
- [35] 王佳玉,陈凤莲,汤晓智.谷氨酰胺转氨酶对全麦面团特性及微观结构的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(4): 51-57
- [36] Luisa A, Gaspar C, De Goes-Favoni S P. Action of microbial transglutaminase (MTGase) in the modification of food proteins: A review [J]. *Food Chemistry*, 2015, 171(15): 315-322
- [37] Tang X, Wang F, Huang W, et al. The combination of *Rhizopus chinensis* lipase and transglutaminase affects the rheology and GMP properties of frozen dough [J]. *Cereal Chemistry*, 2016, 93(4): 377-385
- [38] HAN Yixuan, WANG Fang, LIA Kaixin, et al. Effect of transglutaminase on rennet-induced gelation of skim milk and soymilk mixtures [J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2018, 99(4): 1820-1827
- [39] Steffolan M E, Ribotta P D, Perez G T, et al. Use of enzymes to minimize dough freezing damage [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2012, 5(6): 2242-2255
- [40] Sang S K. The effects of transglutaminase and refrigerated storage on the physicochemical properties of whole wheat dough and noodles [J]. *Foods*, 2021, 10(7): 1-18
- [41] TANG Xiaojuan, WANG Feng, HUANG Weining, et al. The combination of *Rhizopus chinensis* lipase and transglutaminase affects the rheology and glutenmacropolymer properties of frozen dough [J]. *Cereal Chemistry*. 2016, 93(4): 377-385
- [42] Sahnoun M, Kriaa M, Besbes S, et al. Optimization of *Aspergillus oryzae* S2 α -amylase, ascorbic acid, and glucose oxidase combination for improved french and composite ukrainian wheat dough properties and bread quality using a mixture design approach [J]. *Food Science & Biotechnology*, 2016, 25(5): 1291-1298
- [43] Cao Y, Jiang L, Suo W, et al. Influence of emulsifiers and enzymes on dough rheological properties and quality characteristics of steamed bread enriched with potato pulp [J]. *Food Chemistry*, 2021, 360(5): 130015
- [44] Bonet A, Rosell C M, Caballerob P A, et al. Glucose oxidase effect on dough rheology and bread quality: A study from macroscopic to molecular level [J]. *Food Chemistry*, 2006, 99(2): 408-415
- [45] Sevier C S, Kaiser C A. Formation and transfer of disulphide bonds in living cells [J]. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2002, 3(11): 836-847
- [46] LU Lu, XING Junjie, YANG Zhen, et al. Influence of ϵ -poly-l-lysine treated yeast on gluten polymerization and freeze-thaw tolerance of frozen dough [J]. *Food Chemistry*, 2020, 343(19): 128440
- [47] Meerts M, Ammel H V, Meeus Y, et al. Enhancing the rheological performance of wheatflour dough with glucose oxidase, transglutaminase or supplementary gluten [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2017, 10(1-2): 2188-2198
- [48] Wong J H, Ng T B, Cheung R. Antifreeze proteins from diverse organisms and their applications: An overview [J]. *Current Protein & Peptide Science*, 2016, 18(3): 262-283
- [49] Flores A, Quon J C, Perez A F, et al. Mechanisms of antifreeze proteins investigated via the site-directed spin labeling technique [J]. *European Biophysics Journal*, 2018, 47(6): 611-630
- [50] CHEN Xu, SHI Xiaodan, CAI Xixi, et al. Ice-binding proteins: a remarkable ice crystal regulator for frozen foods [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 17:

- 1-14
- [51] Graham L A, Boddington M E, Holmstrup M, et al. Antifreeze protein complements cryoprotective dehydration in the freeze-avoiding springtail *Megaphorura arctica* [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1-12
- [52] Bensaid S, Fino D, Russo N, et al. Role of ice structuring proteins on freezing-thawing cycles of pasta sauces [J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(12): 1-8
- [53] Arthur L. The role of antifreeze glycopeptides and peptides in the freezing avoidance of Antarctic fishes [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry, 1988, 90(3): 611-621
- [54] DING Xiangli, ZHANG Hui, WANG Li, et al. Effect of barley antifreeze protein on thermal properties and water state of dough during freezing and freeze-thaw cycles [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 47: 32-40
- [55] 张艳杰,张垚,崔悦,等.燕麦抗冻蛋白对面筋蛋白冻融稳定性的影响[J].中国粮油学报,2020,35(3):7
- [56] LIU Mei, LIANG Ying, WANG Yanan, et al. Effects of recombinant carrot antifreeze protein from *Pichia pastoris* GS115 on the physicochemical properties of hydrated gluten during freeze-thawed cycles [J]. Journal of Cereal Science, 2018, 83: 245-251
- [57] Zhao Y, Moon Y, Bae W, et al. Effects of added water amount and yeast type in formulation on the quality of fermented frozen dough of pocket bread with red bean paste [J]. 2019, 35(3): 389-398
- [58] SUN Xi, ZHANG Jun, FAN Zhihua, et al. MAL62 overexpression enhances freezing tolerance of baker's yeast in lean dough by enhancing tps1 activity and maltose metabolism [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(32): 8986-8993
- [59] DING Jian, CHEN Didi, WANG Guanglu, et al. Improving freeze-tolerance of baker's yeast through seamless gene deletion of NTH1 and PUT1 [J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2016, 43(6): 817-828
- [60] Gerardo-Rodríguez J E, Ramírez-Wong B, Ledesma-Osuna A I, et al. Management of freezing rate and trehalose concentration to improve frozen dough properties and bread quality [J]. Food Science & Technology, 2017, 37(1): 59-64
- [61] Ayati S V, Hamdami N, Alain L B. Frozen Sangak dough and bread properties: Impact of pre-fermentation and freezing rate [J]. International Journal of Food Properties, 2016, 20(4): 782-791
- [62] Phimolsiripol Y, Siripatrawan U, Tulyathan V, et al. Effects of freezing and temperature fluctuations during frozen storage on frozen dough and bread quality [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(1): 48-56
- [63] CHENG Xinfeng, ZHANG Min, Adhikari. Effect of ultrasound irradiation on some freezing parameters of ultrasound-assisted immersion freezing of strawberries [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 44: 49-55
- [64] 李银丽.超声辅助冷冻对面团加工品质的影响及其作用机制研究[D].合肥:郑州轻工业大学,2019
- [65] HU Songqing, LIU Guang, LI Lin, et al. An improvement in the immersion freezing process for frozen dough via ultrasound irradiation [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 114(1): 22-28
- [66] Kiani H, SUN Dawen, ZHANG Zhihang, et al. Ultrasound-assisted freezing of *Lactobacillus plantarum* subsp. *plantarum*: The freezing process and cell viability [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies Ifset, 2013, 18: 138-144