

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.02.006

王凯, 刘晶, 刘敬科, 等. 超微粉碎对杂粮理化性质的影响及应用研究进展[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(2): 34-42.

WANG K, LIU J, LIU J K, et al. Research progress on the impact of superfine grinding on physicochemical properties and application of coarse cereals[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(2): 34-42.

超微粉碎对杂粮理化性质的影响及应用研究进展

王凯¹, 刘晶¹, 刘敬科², 张佳丽^{2,3}, 生庆海^{1,4,5}✉

1. 河北经贸大学 生物科学与工程学院, 河北 石家庄 050061;
2. 河北省农林科学院 生物技术与食品科学研究所, 河北 石家庄 050051;
3. 河北省农林科学院 谷子研究所, 国家谷子改良中心, 河北省杂粮研究实验室, 河北 石家庄 050035;
4. 河北农业大学 食品科技学院, 河北 保定 071001;
5. 河北省膳食组分交互与精准营养重点实验室, 河北 保定 071001)

摘要: 随着生活水平的提高, 杂粮因其含有丰富的营养物质和活性成分深受人们喜爱, 并对预防各类癌症、肿瘤、慢性疾病有着积极的作用。杂粮加工特性差等问题制约了杂粮产业的发展。超微粉碎作为发展迅速的高新技术之一, 可有效降低杂粮粉体粒径、提升加工适应性、改善加工制品口感。本文阐述了超微粉碎对杂粮淀粉、蛋白质及膳食纤维的影响, 超微粉碎对杂粮结晶特性、水合特性、糊化特性、流动性等理化性质的调控机制; 总结了杂粮超微粉在食品中的应用, 以期对相关研究人员与杂粮加工提供参考。

关键词: 超微粉碎; 杂粮; 理化性质; 应用

中图分类号: TS210.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2025)02-0034-09

网络首发时间: 2025-03-03 16:14:28

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20250303.1426.006>

Research Progress on the Impact of Superfine Grinding on Physicochemical Properties and Application of Coarse Cereals

WANG Kai¹, LIU Jing¹, LIU Jing-ke², ZHANG Jia-li^{2,3}, SHENG Qing-hai^{1,4,5}✉

- (1. College of Bioscience and Engineering, Hebei University of Economics and Trade, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 2. Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050051, China; 3. Institute of Millet Crops, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, National Foxtail Millet Improvement Center, Minor Cereal Crops Laboratory of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050035, China 4. College of food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China; 5. Hebei Provincial Key Laboratory of Dietary Component Interaction and Precision Nutrition, Baoding, Hebei 071001, China)

收稿日期: 2024-08-07; 修回日期: 2024-09-06; 录用日期: 2024-09-09

基金项目: 国家谷子高粱产业技术体系 (CARS-06-14.5-A29); 河北省省级科技计划资助“适合糖尿病人群的杂粮方便米饭关键技术研究与应用” (21327113D)

Supported by: CARS-Millet and Sorghum Industry Technology System (No. CARS-06-14.5-A29); S&T Program of Hebei “Research and Application of Key Technologies of Instant Rice from Coarse Cereals for Diabetes Population” (No. 21327113D)

第一作者: 王凯, 男, 1999年出生, 在读硕士生, 研究方向为粮油食品加工, E-mail: 502266545@qq.com

通信作者: 生庆海, 男, 1970年出生, 博士, 教授, 研究方向为功能食品开发, E-mail: 1951037151@qq.com

Abstract: With the improvement in living standards, coarse grains have become increasingly popular due to their rich nutritional content and bioactive ingredients, which contribute to the prevention of various cancers, tumors, and chronic diseases. However, issues such as the the poor processing characteristics of coarse grains have constrained their development of related products. As one of the rapidly developing high-tech techniques, superfine grinding can effectively reduce the particle size of coarse grain powder, enhance processing adaptability, and improve the texture of processed products. This paper provides an overview of superfine grinding, focusing on the effects on superfine grinding on the starch, protein, and dietary fiber of coarse grains; it also reveals the regulation mechanism of superfine grinding on the physical and chemical properties of coarse grains, such as crystallization, hydration, gelatinization, and fluidity. Finally, this paper reviews the impact of superfine ground coarse grains in food and its applications, with the aim of providing valuable insights for relevant researchers and the grain processing industry.

Key words: superfine grinding; coarse cereals; physicochemical properties; applications

杂粮通常被人们认为是除水稻、小麦、玉米、大豆、薯类以外的粮豆作物，谷类包括谷子、高粱、燕麦、荞麦等，豆类包括绿豆、红豆、芸豆、黑豆等。我国杂粮种类繁多，产量位于世界前列，被誉为“杂粮王国”。近 5 年来，杂粮市场的年均增长率达 10%，杂粮已逐渐成为提高农民收益的重要经济作物，对助力乡村振兴、共建农业强国有着重要意义。杂粮具有丰富的蛋白质、维生素、矿物质和膳食纤维，并且含有多酚、 β -葡聚糖、植物甾醇等活性成分，在预防各类癌症和肿瘤、改善心血管疾病、降低血糖和胆固醇水平、调节肠道微生态等方面有重要作用^[1]。但杂粮质地粗糙、口感差、难消化、不易深加工等问题制约着杂粮加工产业的发展。

粉碎作为一种改变物质形态的手段，能够使杂粮更易处理、混合或反应，目前，杂粮食品正在由粗加工向精加工发展^[2]。超微粉碎是近年来制作杂粮粉的一种新兴技术，与传统机械粉碎相比，其不仅有利于新产品的开发，同时具有速度快、可低温、粒度分布均匀等特点，其处理后的杂粮粉体粒度更小，表面性能更强，水溶性、分散性、吸附性提高，活性物质更易溶出，并且能在一定程度上改善杂粮食品的适口性和消化率，提高人们的可接受度。此外，超微粉碎技术能够充分利用杂粮资源，提高杂粮的附加值，更好地满足多元化的市场需求，但粉碎过度也可能会造成杂粮营养成分变性损失、氧化速度加快、影响

保质期、淀粉结构被破坏、理化性质不稳定、经济成本增加等不利影响^[3]。因此，超微粉碎技术还需要多方面发展，不仅包括技术本身的改进和创新，还有如何通过合理的加工方式改善杂粮粉理化特性、功能特性、感官特性等问题均应为我们目前的研究重点。

1 超微粉碎技术概述

21 世纪以来，超微粉碎技术成为发展迅速的高新技术之一，在生产微米级（1~100 μm ）、亚微米级（0.1~1 μm ）和纳米级（1~100 nm）粉末方面具有很大的潜在应用。其主要原理是利用空气分离、重压研磨、剪切的形式，克服固体内部分子凝聚力，从而达到粉碎效果^[4]。根据研磨介质不同，超微粉碎大致可分为干法粉碎和湿法粉碎。干法粉碎是实际生产中的主流工艺，具有操作简单、环保、成本低等优点，其缺点是粉碎效率低、容易造成粉尘飞扬，常见干法粉碎有气流式、高频振动式、球磨式等。湿法粉碎具有产品质量稳定、无粉尘污染等优点，生产成本低、所需设备复杂繁琐、排出废水污染严重等不足，湿法粉碎主要包括胶体磨、高压均质等^[5]。

2 超微粉碎对杂粮主要大分子物质的影响

超微粉碎会改变杂粮粉的理化性质，这主要与杂粮中的淀粉、蛋白质、膳食纤维结构的改变相关。

2.1 淀粉

淀粉是杂粮中一种主要的碳水化合物，其性质的改变对杂粮及其制品的品质有很大影响。杂粮淀粉经过超微粉碎后（图 1），微观结构和晶体结构被破坏，直链、支链和破损淀粉含量均发生一定变化。

杂粮淀粉在超微粉碎过程中一直暴露在强大的冲击力下，颗粒失去了原有的圆形和光滑形状，表面形成较为粗糙的新聚集体，同时淀粉结构被严重破坏，支链淀粉由于其高度分支的结构，在粉碎过程中易受到机械力的作用，使支链淀粉在 α -1,6分支点处断裂成较小的片段，从而降低了支

链淀粉的含量，释放出的长支链为线性的直链淀粉，导致表现直链淀粉含量增加^[6]。破损淀粉是决定粉体加工特性以及评价粉体质量的一个公认标准。超微粉碎使破损淀粉含量显著增加，一定量的破损淀粉可以改善粉体特性，使淀粉吸水率增加，更容易被酶解，并增加面团的强度和稳定性，使食品口感更好，但过多的破损淀粉会使面团过度吸水，导致面团结构松散^[7]。因此，超微粉碎显著改变了杂粮淀粉的微观与晶体结构，破坏其原有形态，形成粗糙的新聚集体。此外，淀粉晶体结构的改变进一步影响其糊化、吸水和溶解特性。

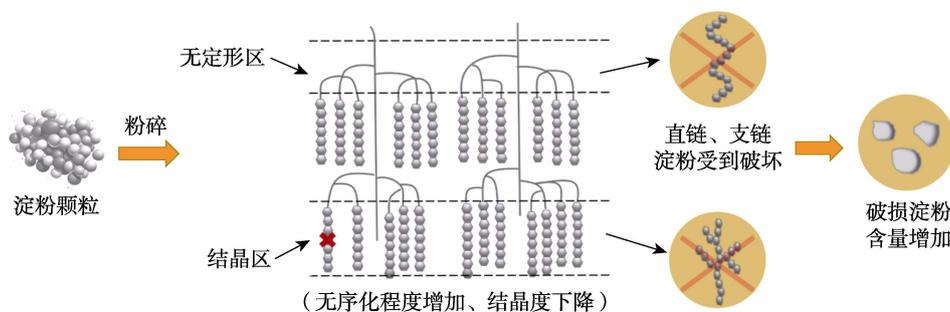


图 1 超微粉碎对淀粉的影响

Fig.1 Effect of superfine grinding on starch

2.2 蛋白质

蛋白对机体构建至关重要，可供能量。超微粉碎（图 2）通过外力改变杂粮蛋白结构与构象，提升其功能性质，展现出在蛋白改性与食品加工中的广阔前景。

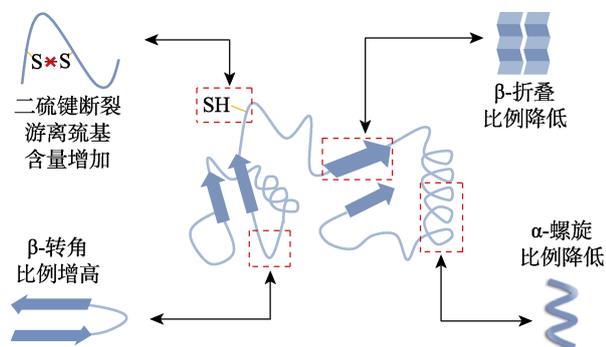


图 2 超微粉碎对蛋白质的影响

Fig.2 Effect of superfine grinding on protein

超微粉碎依靠机械力使细胞壁破碎，提高杂粮中蛋白质的溶出率，便于人体吸收其中的营养成分^[8]。然而，部分研究表明，燕麦超微粉蛋白

质含量出现下降，可能是由于粉碎与筛分过程中蛋白质流失^[9]。同时，超微粉碎对蛋白质结构及功能特性也有影响。经处理后蛋白质分子间氢键作用减弱，分子间分散性显著增大， α -螺旋结构和 β -折叠含量降低， β -转角比例增加，逐渐转变为无序结构，游离巯基含量因粉碎过度，二硫键断裂有增加的趋势^[10]。此外，蛋白质的乳化性、溶解性、起泡性等也受到不同程度的影响。研究还发现，粉碎可以降低豌豆分离蛋白的 β -折叠，蛋白质转变为空心球状，乳状液絮凝指数下降，蛋白质吸附量提高，显著改善了乳液稳定性^[11]。因此，超微粉碎不仅提高了杂粮中蛋白质的溶出率，还改变了蛋白质的高级结构及理化性质和功能特性。

2.3 膳食纤维

富含膳食纤维是杂粮一个主要特征，对杂粮营养价值和加工适应性有重要影响，具体可分为不溶性膳食纤维（Insoluble dietary fiber, IDF）和

可溶性膳食纤维 (Soluble dietary fiber, SDF)。

研究表明,超微粉碎后,杂粮中大分子部分结合键断裂,变成小分子,使膳食纤维中纤维成分重新分布,膳食纤维含量下降,但部分 IDF 被降解为小分子化合物, SDF 含量上升^[12]。超微粉碎还能够提高膳食纤维的溶解性,因此可以改善膳食纤维的口感和稳定性,从而提高其在食品中

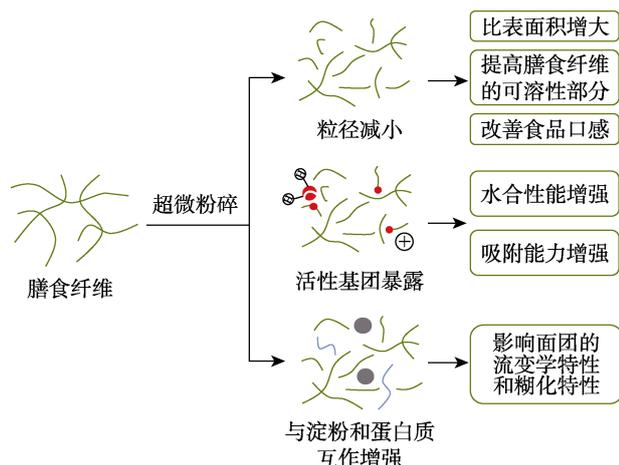


图 3 超微粉碎对膳食纤维的影响

Fig.3 Effect of superfine grinding on dietary fiber

的应用价值^[13]。此外,超微粉碎可使膳食纤维颗粒表面变得凹陷多孔,比表面积增加,暴露出更多的官能团,有助于改善吸附性能和活性物质的释放^[14]。IDF 能改变食品结构和咀嚼感,提供 stronger 的饱腹感,同时增加粪便体积,促进肠道蠕动,对控制体重和维持肠道健康有很大帮助^[15]。此外,还有研究指出,白芸豆皮经过超微粉碎,不仅改善了 IDF 质地粗糙口感差等问题,还能够被肠道微生物所酵解,产生短链脂肪酸,促进肠道菌群组成丰度^[16]。总的来说,超微粉碎促进了杂粮中 IDF 向 SDF 的转化,增加了 SDF 含量。同时,超微粉碎使膳食纤维理化性质和功能特性得到改善,有利于杂粮的烹饪和食用,但在实际应用中须掌握具体粉碎程度,过度粉碎会给杂粮带来一定负面影响。

3 超微粉碎对杂粮理化性质的影响

超微粉碎是一项被广泛应用的物理改性技术,其可以使杂粮表现出与大颗粒完全不同的特性,表 1 概述了超微粉碎对部分杂粮理化性质的影响。

表 1 超微粉碎对部分杂粮理化性质的影响

Table 1 Effect of ultra-micro crushing on physicochemical properties of some coarse cereals

性质	原料	粉碎方式	主要发现	参考文献
结晶特性	薏苡仁	振动磨	淀粉晶体受损,结晶度下降。	[17]
	高粱	球磨	晶体转变为无定形态。	[18]
水合特性	青稞麸皮	气流粉碎	持水力由 4.12 g/g 减小到 2.72 g/g。	[19]
	燕麦	行星式	膨胀性、溶解度增大。	[20]
糊化特性	黑米	气流粉碎	峰值粘度、最终粘度、衰减值、回生值、糊化温度下降。	[21]
	小米	气流粉碎	峰值粘度、最终粘度、衰减值、回生值先增大后减小,糊化温度上升。	[22]
密度及流动性	苦荞麸皮	球磨	休止角和滑动角增加,流动性下降。	[23]
	绿豆	气流粉碎	振实密度显著减小 56.1%。	[24]
功能特性	燕麦麸皮	振动磨	阳离子交换能力、胆固醇、胆酸钠和葡萄糖吸附能力提高。	[25]
其他特性	苦荞	气流粉碎	持油性: 呈先增加再降低的趋势。	[26]
	红小豆	振动磨	色度: 超微粉变的更亮,与常规粉色差有显著差异。	[27]

3.1 结晶特性

结晶度是衡量淀粉内部结晶程度和晶体结构完整性的指标。粉碎过程中,机械力的冲击导致淀粉颗粒空间排列紊乱,支链淀粉比直链淀粉更容易受到粉碎过程的影响^[28]。粉碎使支链淀粉及其支化点破坏,从而增加无定形结构域和直链淀粉比例,导致相对结晶度下降^[29]。例如高粱和薏苡仁淀粉的 A 型结晶结构随着球磨强度的

增加,结晶度下降^[17-18]。此外,这种结构变化对于淀粉合成过程、物化性质、工业应用等有着重要的影响,例如淀粉结构可能会对淀粉冷水溶解度、糊化特性等理化性质产生影响,这些现象可能均与淀粉结构被破坏有关^[30]。总的来说,超微粉碎会破坏杂粮淀粉晶体结构,但不同的粉碎方式并没有改变杂粮淀粉的晶体类型。同时,随着粉碎粒度的减小,淀粉无序化程度增加,相

对结晶度下降,其溶解性、稳定性等理化性质得到改善。

3.2 水合特性

水合特性是粉体食品生产利用的重要考虑因素,在这个过程中粉体与水分子相互作用,导致粉体表面吸附水分并形成水合层,从而影响粉体的物理特性。杂粮粉在经过超微粉碎后结构更为松散,比表面积增大,原有的不溶性大分子被破坏,更多的可溶性成分暴露于水中,利于水分的渗入,同时,淀粉晶体结构被破坏,水分子与直链淀粉和支链淀粉暴露的羟基建立氢键,使杂粮持水力、溶解度、膨胀性上升,从而提高杂粮粉的水合特性^[20]。然而,粉碎过程中剪切力会破坏膳食纤维的结构,也会导致持水力出现下降的情况^[31]。此外,除了粉体颗粒形状、大小、结构外,粉碎机制也影响杂粮的水合特性^[32]。研究发现,鹰嘴豆在两种超微粉碎与常规粉碎比较中,水合特性呈现相反趋势,行星式球磨粉的持水力、膨胀性、溶解度分别是碾轧式超微粉的1.49、1.50和1.43倍,这可能是由于较高温度使更多的基团和可溶性成分暴露于水中^[33]。总之,超微粉碎可以提高杂粮粉的水合特性,但也有研究指出不同粉碎方式对杂粮粉水合特性的影响不同。因此,推断杂粮粉的水合特性除受粒径影响外,和温度、成分也有密切关系,需进一步详细研究。

3.3 糊化特性

淀粉糊化这一过程对食品的最终质地和口感有决定性作用。峰值粘度和最终粘度反映了淀粉结合水的能力和冷却后形成凝胶的能力,与产品质量紧密相关。研究表明,杂粮超微粉的峰值粘度和最终粘度下降,可能与破损淀粉含量的增加和淀粉颗粒结构完整性的降低有关^[21-22]。回生值反映粉体抗老化程度。常与淀粉种类、冷却储藏温度和直、支链淀粉含量比有关。Gu等^[34]的研究表明,随着燕麦粉粒度的减小,回生值逐渐下降,抗老化性显著提高。衰减能能在一定程度上表征淀粉的耐剪切性能。研究指出,超微粉与粗粉相比衰减降低,意味着拥有更好的热稳定性和抗剪切性^[35]。相反,有研究表明随着小米粉粒度的

减小,衰减呈先上升后下降的趋势,这可能与超微粉碎使淀粉内部的纤维结构和分子排列发生改变有关^[22]。综上,超微粉碎通过增加比表面积,加速淀粉吸水 and 糊化,同时破坏杂粮结构,促进淀粉释放,进一步优化糊化特性。然而,超微粉碎对淀粉糊化特性的影响受到粉碎程度、粉碎工艺、淀粉种类等因素的制约。在实际应用中,可通过控制超微粉碎的条件,实现对淀粉糊化特性的调控。

3.4 密度及流动性

密度及流动性直接影响到食品加工过程中混合、填充、包装等步骤,超微粉碎可以有效改变杂粮粉的密度和流动性,提升杂粮加工的可操作性,从而应用于更多加工领域。休止角和滑动角是衡量物料颗粒流动性的重要指标。超微粉碎可以使粉体颗粒更细小、均匀,增加颗粒间的接触面积,降低表面粗糙度,增强颗粒间静电吸附力,从而提高了粉体的内聚力和摩擦力,导致休止角和滑动角增大,粉体流动性减弱^[36]。而一些研究指出,超微粉碎可以提高小米粉体的流动性,改善粉体表面的吸附力,可能是随着粉碎时间延长,颗粒间的吸附力小于重力,导致休止角与滑动角减小^[37]。松装密度是杂粮粉性能的综合体现,对杂粮生产工艺的稳定和产品质量控制至关重要。超微粉碎可能会导致杂粮颗粒形状不规则和表面粗糙、增加颗粒间的间隙,从而降低松装密度,使粉体更加疏松^[24]。因此,超微粉碎后杂粮粒径显著减小,比表面积增大,粉体间接触面积增大,吸附作用增强,流动性变差。在生产过程中需要综合考虑颗粒的大小、结构、表面特性、含水量等因素,以确保产品的质量和性能。

3.5 功能特性

与大宗谷物相比,杂粮因富含纤维、多酚、 β -葡聚糖、植物甾醇和皂苷等活性成分,展现出良好的生理功能。研究表明,超微粉碎破坏了绿豆粉的纤维网状结构,活性基团暴露,显著提高了对胆汁酸盐和亚硝酸盐的吸附能力,并增强了阳离子交换能力^[38]。Xu等^[39]在苦荞麸粉中发现,湿法粉碎能有效促进苦荞麸皮中芦丁的水解,从

而增强其抗氧化活性。此外,杂粮在降血糖和血脂方面也表现优异,主要体现在其较低的升糖指数,较细的杂粮粉抗性淀粉和慢消化淀粉含量较高,表明其抗酶水解能力更强^[40]。因此,超微粉碎能够改善杂粮粗糙的口感,并提高有效成分的溶出,增强其独特的功能特性,使杂粮的价值得到充分利用。

3.6 其他特性

超微粉碎还影响着杂粮粉的持油力和色度。超微粉碎使杂粮粒径减小,比表面积增大,颗粒原有的结构被改变,大量亲油基团暴露出来,同时提高了 SDF 含量,导致持油力显著提升^[41]。然而,过度粉碎会导致膳食纤维含量下降,多孔网状结构被破坏,降低油脂吸附能力^[42]。

改善颜色是一项至关重要的感官指标,可以增加产品的商业价值。亮度常与粉体粒径呈负相关,粒径越小,相对表面积越大,增强了反光效果与亮度值^[27]。此外,超微粉碎会破坏杂粮中的结构,使颗粒内部的色素更容易暴露在表面,发生氧化反应,这可能会导致颜色更加鲜艳或深浅不均^[43]。综上所述,超微粉碎对杂粮粉色度的影响是复杂的,对于一些特殊杂粮,保持其原有的颜色在食品应用中起着重要作用。

4 杂粮超微粉在食品中的应用

杂粮经过超微粉碎处理后粒径更小,分散性、吸附性和溶解性更好,同时最大程度释放杂粮原有的营养物质和生物活性成分,因此,杂粮在食品中得到广泛应用。

4.1 在蒸煮类食品中的应用

馒头和面条作为北方地区常见的主食,开发具有保健作用的杂粮食品对特殊疾病人群有着重要意义。杂粮超微粉对蒸煮类食品的影响主要体现在口感、营养价值、易于消化和降糖降脂效果等方面。研究表明,面粉中添加荞麦壳超微粉增加了面团的粘弹性和变形阻力,显著提高了淀粉糊化率并降低了凝胶稳定性,同时增加了蛋白质的 β -折叠,从而改善了面条质地^[44]。杂粮超微粉制作的馒头健康价值更高,口感优于普通杂粮馒头。研究发现,添加超微粉碎的黑青稞麸皮能改

善混合粉的糊化特性,延长货架期。且当添加量为 20% 时,对馒头综合品质的影响最小,同时赋予馒头特殊的香气和抗氧化、降血糖特性^[45]。但杂粮粉的添加降低了面筋蛋白含量,因此,在实际生产中,可以通过少量添加剂来改善杂粮食品的品质,从而进一步提升杂粮添加量,最终的效果取决于添加的杂粮种类、比例以及加工工艺的控制。

4.2 在烘焙类食品中的应用

杂粮不仅提升了面包和饼干的营养价值,在控制能量摄入和维持肠道健康方面也有良好表现。此外,杂粮由于特殊的颜色和香气,更利于多样产品的开发,提升消费者食欲。与传统面包相比,由于杂粮缺少面筋蛋白,过多添加杂粮会使面团变粘,面筋弹性、持气性变差,导致面包表皮坍塌,内部结构粗糙,因此需要适量添加杂粮超微粉。研究发现,苦荞超微粉拥有更细密的气孔结构,能够抑制储存过程中水分蒸发,并且在储藏过程中支链淀粉回生和淀粉重结晶效果更好,表明苦荞超微粉具有更好的防老化能力^[46]。此外,杂粮本身带有一定的香气和口感,可以为饼干添加独特的风味,使其更加香浓可口。超微粉碎使粉体粒径有效减小,利于内容物质释放,增加了饼干的营养价值和慢消化淀粉、抗性淀粉含量^[47]。研究表明,相同人工胃肠环境下,添加苦荞超微粉的饼干总黄酮含量提高到普通苦荞饼干的 2 倍,并且营养保健成分更易于消化吸收^[48]。因此,加入合适比例的杂粮超微粉可以制作出健康美味的杂粮饼干。

4.3 在饮料中的应用

杂粮超微粉在饮料中的应用可以带来多方面的好处,包括提升营养物质吸收、改善溶解性、稳定性和适口性,以及开发具有特定健康益处的新型饮料^[49]。研究发现,超微粉碎后的薏苡仁乳可溶性固形物、总黄酮、多糖含量均上升,悬浮液较为稳定,口感更加细腻,并且风味物质种类增加 7 种,说明粒径减小更利于风味物质释放^[50]。在对绿豆皮进行超微粉碎后,SDF 含量和黄酮提取率以及对胆固醇吸附能力均有所提升,当绿豆

皮添加量为 9% 时, 可以生产出组织状态良好以及口感适中的酸奶, 同时提高了 DPPH 和 ·OH 自由基清除能力^[51]。因此, 超微粉碎技术成为生产高品质饮料的新工具, 越来越多的消费者对此感兴趣。

5 总结与展望

近年来, 随着生活质量日益提高, 人们对饮食的追求逐渐超越了传统的大宗谷物, 愈发注重膳食结构的合理化与多样化, 杂粮具有丰富的功能特性, 用其制成的面食和饮料越来越受人们青睐。与传统粉碎相比, 超微粉碎技术能够有效减小杂粮粉的粒径、改变分子结构, 使营养物质和活性物质更容易被释放, 从而提高人体对营养的吸收, 并且粉碎后的杂粮质地更细腻, 改善了食品的口感。此外, 超微粉碎后的杂粮粉具有较大的比表面积, 有助于提高其吸附性、溶解性等物理性质和化学反应速度。这一技术的应用为杂粮深加工和功能食品开发提供技术支撑, 开拓了高端健康食品市场, 但从整体来看, 目前我国杂粮行业产业化程度不够, 技术创新能力有限, 深加工产品较少, 需要进行更多的基础及应用研究, 如不同杂粮适宜超微粉碎方式及程度不够明确, 超微粉碎对杂粮大分子物质的影响机理研究较少, 缺乏与其他技术的结合等, 今后需要更深层次的研究, 为杂粮加工行业提供更多的理论依据, 丰富杂粮产品市场。

参考文献:

- [1] FU J, ZHANG Y, HU Y C, et al. Concise review: Coarse cereals exert multiple beneficial effects on human health[J]. *Food Chemistry*, 2020, 325: 126761.
- [2] WU D, TU M L, WANG Z Y, et al. Biological and conventional food processing modifications on food proteins: Structure, functionality, and bioactivity[J]. *Biotechnology Advances*, 2019, 40: 107491.
- [3] 张琳, 张仁堂. 我国全麦食品品质改良研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2020, 28(2): 36-42.
ZHANG L, ZHANF R T, et al. Research progress on quality improvement of whole-wheat food in China[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2020, 28(2): 36-42.
- [4] GAO W J, CHEN F, WANG X, et al. Recent advances in processing food powders by using superfine grinding techniques: A review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(4): 2222-2255.
- [5] 胡龙彪, 翟晓娜, 李媛媛, 等. 超微粉碎技术在农副产品中的应用进展[J]. *食品科技*, 2023, 48(2): 92-99.
HU L B, ZHAI X N, LI Y Y, et al. Application progress of superfine grinding in agricultural and sideline products: A review[J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(2): 92-99.
- [6] JHAN F, GANI A, NOOR N, et al. Characterisation and utilisation of nano-reduced starch from underutilised cereals for delivery of folic acid through human GI tract[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 4873.
- [7] WANG Q F, LI L M, ZHENG X L. A review of milling damaged starch: generation, measurement, functionality and its effect on starch-based food systems[J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126267.
- [8] 朱爽, 宋莉莎, 张佰清, 等. 大麦超微粉的营养品质及物理特性分析[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(01): 289-295+93.
ZHU S, SONG L S, ZHANG B Q, et al. Analysis of nutritional quality and physical properties of barley ultrafine powder[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(01): 289-295+93.
- [9] 杨璐. 超微粉碎对燕麦粉品质影响及体外模拟消化研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
YANG L. Effects of ultrafine pulverization on quality and *in vitro* simulated digestion of oat flour[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [10] LI C H, MCCLEMENTS D J, DAI T T, et al. Enhancing the dispersibility of commercial pea protein ingredients using stirred media milling: potential mechanisms of action[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 145: 109130.
- [11] LIU Q Z, DAI Y Y, HOU H X, et al. Changes in the structure and emulsification properties of pea protein isolate during grinding[J]. *LWT*, 2020, 133: 110066.
- [12] 吴迪, 葛飞, 马红, 等. 不同磨粉方式对青稞全粉理化特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(3): 59-67.
WU D, GE F, MA H, et al. Effects of different milling methods on physicochemical properties of highland barley whole flour[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(3): 59-67.
- [13] ZHU F M, DU B, LI R F, et al. Effect of micronization technology on physicochemical and antioxidant properties of dietary fiber from buckwheat hulls[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2014, 3(3): 30-34.
- [14] YANG R H, YE Y, LIU W T, et al. Modification of pea dietary fibre by superfine grinding assisted enzymatic modification: Structural, physicochemical, and functional properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 267: 1-15.
- [15] LIU T, LEI H Y, ZHEN X Y, et al. Advancements in modifying insoluble dietary fiber: exploring the microstructure, physicochemical properties, biological activity, and applications in food industry—a review[J]. *Food Chemistry*, 2024, 458: 140154.
- [16] 金姝, 张斌, 高彤, 等. 粒径和含结合酚不溶性膳食纤维对白

- 芸豆皮体外发酵特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(1): 118-127.
- JIN S, ZHANG B, GAO T, et al. Effect of particle size and phenolics bounded-insoluble dietary fiber on the *in vitro* fermentation properties of white kidney bean skin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(1): 118-127.
- [17] ZHANG T, XIAO S Y, DING Z H, et al. Effects of superfine grinding on physicochemical properties and morphological structure of coix seed powders[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 102: 103361.
- [18] PALAVECINO P M, PENCI M C, RIBOTTA P D. Effect of planetary ball milling on physicochemical and morphological properties of sorghum flour[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 262: 22-28.
- [19] 王佳欣, 黎阳, 李再贵, 等. 不同粒径对青稞麸皮结构与功能特性及冲调稳定性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(3): 54-61.
- WANG J X, LI Y, LI Z G, et al. Effects of different particle sizes on the structure, functional properties and reconstitution stability of highland barley bran[J]. Food Science, 2022, 43(3): 54-61.
- [20] ZHANG M, LIANG Y, PEI Y, et al. Effect of process on physicochemical properties of oat bran soluble dietary fiber[J]. Journal of Food Science, 2009, 74(8): 72-80.
- [21] 易建华, 张志婕, 朱振宝, 等. 不同粒径对黑米粉理化性质的影响[J]. 陕西科技大学学报, 2021, 39(1): 39-44.
- YI J H, ZHANG Z J, ZHU Z B, et al. Impact of different grain sizes on physicochemical properties of black rice powder[J]. Journal of Shanxi University of Science & Technology, 2021, 39(1): 39-44.
- [22] 徐群英, 吕庆云, 常锦玉, 等. 不同粉碎粒度小米粉理化性质研究[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(9): 43-46.
- XU Q Y, LV Q Y, CHANG J Y, et al. Study on physicochemical properties of different grain size millet powder[J]. Cereals & Oils, 2018, 31(9): 43-46.
- [23] XIAO Y, ZHANG J, ZHANG L F. Effect of superfine grinding on physicochemical properties and endogenous enzyme induced flavonoid transformations of tartary buckwheat bran[J]. LWT, 2022, 162: 113420.
- [24] 梁雪梅, 林欣梅, 魏美霞, 等. 气流超微粉碎对绿豆芽物理特性与抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(11): 33-38.
- LIANG X M, LIN X M, WEI M X, et al. Effect of airflow ultrafine pulverization on physical properties and antioxidant activity of mung bean sprouts[J]. Food & Machinery, 2020, 36(11): 33-38.
- [25] 郝瑞霞. 超微粉碎燕麦麸皮对方便面品质的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- HAO R X. Effect of ultrafine grinding oat bran on the quality of instant noodles[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [26] 张雪, 张东杰, 张爱武. 气流超微粉碎对苦荞粉物化特性的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(8): 45-51.
- ZHANG X, ZHANG D J, ZHANG A W. Effect of jet milling on the physical and chemical properties of tartary buckwheat powder[J]. Food & Machinery, 2021, 37(8): 45-51.
- [27] 程晶晶, 王军, 肖付刚. 超微粉碎对红小豆全粉物化特性的影响[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(3): 13-16.
- CHENG J J, WANG J, XIAO F G, et al. Influence of superfine grinding on physicochemical properties of adzuki bean flour[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2016, 24(3): 13-16.
- [28] WANG N, LI C, MIAO D, et al. The effect of non-thermal physical modification on the structure, properties and chemical activity of starch: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 251: 126200.
- [29] BANGAR S P, SINGH A, ASHOGON A O, et al. Ball-milling: a sustainable and green approach for starch modification[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 237: 124069.
- [30] 吴娜娜, 李莎莎, 刘明, 等. 淀粉性质及米粉粒度对米制品品质影响研究进展[J]. 粮油食品科技, 2016(1): 6-9.
- WU N N, LI S S, LIU M, et al. Research progress for influence of starch properties and flour particle size on rice food quality[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2016(1): 6-9.
- [31] 赵愉涵, 陈庆敏, 岳凤丽, 等. 超微粉碎处理对五谷杂粮粉特性的影响[J]. 中国果菜, 2022, 42(7): 28-35.
- ZHAO Y H, CHEN Q M, YUE F L, et al. Effects of superfine grinding treatment on the properties of mixed powder of grains[J]. China Fruit & Vegetable, 2022, 42(7): 28-35.
- [32] 刘月瑶. 不同加工方式对藜麦营养品质及抗氧化性能影响的研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2020.
- LIU Y Y. Study on the effects of different processing methods on the nutritional quality and antioxidant properties of quinoa[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2020.
- [33] 王士佳, 张璐, 葛善赢, 等. 两种粉碎机机型对鹰嘴豆芽超微粉食用品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(20): 6699-6705.
- WANG S J, ZHANG L, GE S Y, et al. Effects of 2 types of crushers on eating quality of ultrafine powder of chickpea sprout[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(20): 6699-6705.
- [34] GU Y J, QIAN X J, SUN B H, et al. Nutritional composition and physicochemical properties of oat flour sieving fractions with different particle size[J]. LWT, 2022, 154: 112757.
- [35] 范美琪, 陈林, 权煜, 等. 低温超微粉碎对全麦粉面团品质特性的影响[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(4): 161-168.
- FAN M Q, CHEN L, QUAN Y, et al. Effect of low temperature ultrafine grinding on the quality characteristics of whole wheat flour dough [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 161-168.
- [36] 刘颖, 高帅, 张云亮, 等. 超微粉碎对大豆、玉米、发芽糙米

- 物化特性影响[J]. 食品科技, 2020, 45(09): 168-173.
- LIU Y, GAO S, ZHANG Y L, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical properties of soybean, corn and germinated rice[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(09): 168-173.
- [37] 王维浩, 张莉莉, 李文杰, 等. 超微粉碎对小米粉理化特性的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2015, 27(5): 123-127.
- WANG W H, ZHANG L L, LI W J, et al. Effects of superfine grinding on physicochemical properties of millet flour[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2015, 27(5): 123-127.
- [38] YU S B, WU Y C, LI Z J, et al. Effect of different milling methods on physicochemical and functional properties of mung bean flour[J]. Front Nutr, 2023, 10: 1117385.
- [39] XU Q L, HUANG R H, YANG P, et al. Effect of different superfine grinding technologies on the physicochemical and antioxidant properties of tartary buckwheat bran powder[J]. RSC advances, 2021, 11(49): 3391-3898.
- [40] ZHANG L X, APEA-BAH F B, CHEN X, et al. The physicochemical and structural properties and in vitro digestibility of pea starch isolated from flour ground by milling and air classification[J]. Food Chemistry, 2023, 419: 136086.
- [41] 王博, 姚轶俊, 李枝芳, 等. 超微粉碎对4种杂粮粉理化性质及功能特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 111-117.
- WANG B, YAO Y J, LI Z F, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical properties and functional properties of four kinds of coarse cereals[J]. Food Science, 2020, 41(19): 111-117.
- [42] ZHANG Y K, ZHANG M L, GUO X Y, et al. Improving the adsorption characteristics and antioxidant activity of oat bran by superfine grinding[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(1): 216-227.
- [43] XU Q, ZHENG F, CAO X, et al. Effects of airflow ultrafine-grinding on the physicochemical characteristics of tartary buckwheat powder[J]. Molecules, 2021, 26(19): 5841.
- [44] WANG L J, TANG H Q, YANG L, et al. Milling of buckwheat hull to cell-scale: Influences on the behaviors of protein and starch in dough and noodles[J]. Food Chemistry, 2023, 423: 136347.
- [45] 林燕菲. 添加黑青裸麸皮对馒头理化特性及淀粉体外消化的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- LIN Y F. Effect of purple highland barley bran on physicochemical properties and starch digestion *in vitro* of Chinese steamed bread[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
- [46] WANG L J, LI Y, GUO Z C, et al. Effect of buckwheat hull particle-size on bread staling quality[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134851.
- [47] YANG L P, WANG S Y, ZHANG W F, et al. Effect of black soybean flour particle size on the nutritional, texture and physicochemical characteristics of cookies[J]. LWT, 2022, 164: 113649.
- [48] 左蕾蕾, 罗西, 赵雪梅, 等. 超微苦荞饼干的研制与体外溶出研究[J]. 食品科技, 2017, 42(4): 138-142.
- ZUO L L, LUO X, ZHAO X M, et al. Preparation and in vitro dissolution of superfine grinding tartary buckwheat biscuit[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(4): 138-142.
- [49] MISHRA S, SINGH R, UPADHYAY A, et al. Emerging trends in processing for cereal and legume-based beverages: A review[J]. Future Foods, 2023, 8: 100257.
- [50] 肖仕芸, 林梓, 陈思奇, 等. 原料粉碎粒度对薏仁乳品质特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(9): 61-67.
- XIAO S Y, LIN Z, CHEN S Q, et al. Effect of crushed granularity of raw materials on quality characteristics of coix seed beverage[J]. Food Research and Development, 2019, 40(9): 61-67.
- [51] 马永哲. 绿豆皮酸奶的研发及其功能性影响[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.
- MA Y Z. Development and functional effects of mung bean yogurt[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2017. 完
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。