

超微粉碎对方竹笋全粉理化特性及微观结构的影响

史 早, 张甫生, 杨金来, 吴良如, 郑 炯

Effect of Superfine Grinding on Physicochemical Properties and Microstructure of *Chimonobambusa quadrangularis* Shoot Powder

SHI Zao, ZHANG Fusheng, YANG Jinlai, WU Liangru, and ZHENG Jiong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040079>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超微粉碎对竹笋壳粉理化性质的影响

Effect of Ultrafine Grinding on Physical and Chemical Properties of Bamboo Shell Powder

食品工业科技. 2019, 40(1): 34-39

超微粉碎技术在豆腐加工中的研究进展

Research Progress of Superfine Grinding Technology in Tofu Processing

食品工业科技. 2018, 39(20): 324-329

方竹笋营养配方粉优化和理化分析

Formula optimization and physicochemical analysis of nutritious formula powder of bamboo shoots of *Chimonobambusa quadrangularis*

食品工业科技. 2018, 39(1): 208-213,220

微粉碎对百香果皮纤维粉理化性质及功能活性的影响

Effect of Grinding on the Physicochemical and Functional Properties of the Passion Fruit Peel Residue

食品工业科技. 2021, 42(16): 28-36

超微粉碎对竹粉膳食纤维功能特性的影响

Effect of superfine pulverizing on properties of bamboo powder dietary fiber

食品工业科技. 2017(17): 50-55

超微粉碎处理对木薯淀粉结构及消化特性的影响

Effect of Micronization on the Structure and Digestibility of Tapioca Starch

食品工业科技. 2019, 40(7): 30-34,40



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

史早, 张甫生, 杨金来, 等. 超微粉碎对方竹笋全粉理化特性及微观结构的影响 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(24): 40-47. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040079

SHI Zao, ZHANG Fusheng, YANG Jinlai, et al. Effect of Superfine Grinding on Physicochemical Properties and Microstructure of *Chimonobambusa quadrangularis* Shoot Powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(24): 40-47. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040079

超微粉碎对方竹笋全粉理化特性及 微观结构的影响

史 早¹, 张甫生¹, 杨金来², 吴良如^{2,*}, 郑 炯^{1,*}

(1. 西南大学食品科学学院, 食品科学与工程国家级实验教学示范中心, 重庆 400715;

2. 国家林业和草原局竹子研究开发中心, 浙江杭州 310012)

摘要: 以方竹笋为原料, 超微粉碎不同时间 (10、20、30 min) 得到 3 种超微粉碎方竹笋全粉, 探究微粉的理化特性及微观结构。结果表明, 与对照组相比, 超微粉碎 30 min 时方竹笋全粉的蛋白质和总糖含量分别提高 7.48% 和 44.76%; 持水力、持油力和膨胀力分别下降 29.34%、26.43% 和 22.87%, 粉体平均粒径达到最小, 为 17.15 μm 。超微粉碎处理使全粉的滑角和休止角分别增加 38.24% 和 20.63%, L^* 值增加 13.93%, a^* 值和 b^* 值分别下降 24.21% 和 16.51%, 粉体的流动性变差但粉体更为细腻, 色泽更加均匀、白亮。超微粉碎未改变方竹笋全粉的官能团, 但破坏了全粉中的纤维素, 部分长链变为短链, 热稳定性降低。扫描电镜观察到超微粉碎破坏了方竹笋全粉的表面结构, 使得样品更加微小均匀和碎片化。综上所述, 超微粉碎技术可有效改善方竹笋全粉的感官性质、功能及加工特性, 研究结果可为方竹笋利用率的提升及应用范围的拓展提供理论依据。

关键词: 超微粉碎技术, 方竹笋全粉, 粒径, 热重分析, 微观结构

中图分类号: TS202.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)24-0040-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040079



本文网刊:

Effect of Superfine Grinding on Physicochemical Properties and Microstructure of *Chimonobambusa quadrangularis* Shoot Powder

SHI Zao¹, ZHANG Fusheng¹, YANG Jinlai², WU Liangru^{2,*}, ZHENG Jiong^{1,*}

(1. National Demonstration Center for Experimental Food Science and Engineering Education,

College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. China National Bamboo Research Center, Hangzhou 310012, China)

Abstract: To explore the effect on the physicochemical properties and microstructure of *Chimonobambusa quadrangularis* shoot powder (CQSP), superfine grinding of dried *Chimonobambusa quadrangularis* was conducted for different grinding time (10, 20 and 30 min). Results showed that when superfine grinding for 30 min, compared with the coarse powder control group, the protein and total sugar content of CQSP increased by 7.48% and 44.76% respectively, the water holding capacity, oil holding capacity and swelling capacity decreased by 29.34%, 26.43% and 22.87% respectively, and the average particle size of the powder reached the minimum of 17.15 μm . After superfine grinding, the slip angle and repose angle of CQSP increased by 38.24% and 20.63% respectively, the brightness value increased by 13.93%, the red green value and yellow blue value decreased by 24.21% and 16.51%, respectively. The fluidity of the powder became poor, but the powder was more delicate, the color was more uniform and bright. Superfine grinding would not change the functional groups of CQSP, but destroy the cellulose in powder, part of the long chain would become short chain, and reduce the thermal stability. Scanning electron microscopy (SEM) showed that the surface structure of the CQSP was destroyed via

收稿日期: 2021-04-09

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目 (cstc2020jcyj-msxmX0392); 重庆市科技兴林项目 (2021-8); 贵州省 2020 年特色林业产业研发项目 (特林研 2020-28); 中央高校基本科研业务费重点项目 (XDJK2020B045)。

作者简介: 史早 (1999-), 女, 本科, 研究方向: 果蔬加工与综合利用, E-mail: 2211235379@qq.com。

* 通信作者: 吴良如 (1965-), 男, 本科, 研究员, 研究方向: 竹笋精深加工, E-mail: bamshoots@163.com。

郑炯 (1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 果蔬加工基础理论与技术应用, E-mail: zhengjiong_swu@126.com。

superfine grinding, making the samples tiny, uniform and fragmented. In conclusion, the superfine grinding technology could effectively improve the sensory properties, functions and processing characteristics of CQSP, and would provide a theoretical basis for improving the utilization rate and expanding the application.

Key words: superfine grinding technology; *Chimonobambusa quadrangularis* shoot powder; particle size; thermogravimetric analysis; microstructure

方竹(*Chimonobambusa quadrangularis*)因其竹笋呈现方形而得名,属于禾本科竹亚科寒竹属植物,方竹在我国主要分布在贵州、重庆以及云南等地的高海拔山区,其中,主要生长在黔北大娄山一带的金佛山方竹被誉为“竹类之冠”^[1]。方竹笋秋后出笋,肉质鲜美、口感清脆,含有丰富的膳食纤维、蛋白质、氨基酸和多种矿物元素^[2]。目前,方竹笋主要被加工为清水笋、发酵笋和笋干等产品,但在加工过程中笋头、笋脚等部分经常被丢弃,全笋利用率较低,造成环境污染。因此,亟需寻找新的策略来提高方竹笋的利用率并拓展其在食品领域中的应用。

超微粉碎技术(Superfine grinding technology)作为一种新型的精细粉碎加工技术,可以将物料粉碎至微米级,是一种良好的物料改性技术^[3]。与普通粉碎技术相比,超微粉碎技术会显著地改变粉体的持油力、膨胀度以及流动性等理化特性,使得物料更加适应生产加工的需要^[4-5]。近年来,超微粉碎技术已广泛应用在果蔬^[6-9]、小麦^[10]、玉米和豆类^[11-12]等食品及一些中药材^[13-16]的加工中。研究表明,竹笋经超微粉碎处理后,可以在一定程度上改善老化纤维的粗糙口感,从而拓展竹笋原料的用途,可作为主食改良剂、膳食纤维补充剂及食品原料应用于食品行业中^[17-19]。然而,目前采用超微粉碎技术处理方竹笋全粉的研究报道较少,处理后方竹笋全粉的理化特性及微观结构如何变化尚不清楚。因此,本研究应用超微粉碎技术对方竹笋进行微细化处理,测定处理前后竹笋全粉营养成分、粒径、持水力、持油力、膨胀力等理化特性及微观结构的变化,以期对方竹笋利用率的提高及工业化应用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

金佛山方竹笋 采自重庆市特珍食品有限公司;硫酸钾、无水硫酸铜、硼酸、石油醚、硫脲 分析纯,成都市科隆化学品有限公司;氢氧化钠、浓硫酸、乙醇、葡萄糖 分析纯,重庆万盛川东化工有限公司;萘酮、KBr 等 分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;红蜻蜓一级菜籽油 重庆红蜻蜓油脂有限责任公司。

FW100 高速万能粉碎机 北京科伟永兴仪器有限公司;LHL 型流化床式气流粉碎机 山东潍坊正远粉体工程设备有限公司;K9840 自动凯氏定氮仪 济南海能仪器股份有限公司;G210 滤袋式全自动脂肪测定仪 上海晟声自动化分析仪器有限公司;马

弗炉 河南奥菲达仪器设备有限公司;UV2800A 紫外可见分光光度计 江苏迅迪仪器科技有限公司;Mastersizer 3000 马尔文帕纳科激光粒度仪 马尔文帕纳科公司;Ultra Scan PRO 分光测色仪 美国 Hunter Lab 公司;Spectrum100 傅里叶红外光谱仪 美国 PerkinElmer 公司;TGA55 热重分析仪 美国 TA 公司;Phenom Pro 扫描电镜 荷兰 Phenom World 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备 将新鲜金佛山方竹笋剥壳洗净,切成适宜的块状,沸水烫漂 8 min,于 60 ℃ 烘箱中烘干。将笋干置于万能粉碎机中粉碎 10 min 得到粗粉。再将粗粉置于气流粉碎机中,分别粉碎 10、20、30 min 后得到不同的超微粉碎方竹笋全粉(Superfine grinding on *Chimonobambusa quadrangularis* shoot powder, CQSP-SG),分别命名为 CQSP-SG10、CQSP-SG20 和 CQSP-SG30。同时将方竹笋粗粉作为对照组(CK)。

1.2.2 理化性质的测定

1.2.2.1 方竹笋全粉主要营养成分的测定 水分含量测定:参照 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》;蛋白质含量测定:参照 GB 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》;膳食纤维含量测定:参照 GB 5009.88-2014《食品中膳食纤维的测定》;脂肪含量的测定:参照 GB/T 5009.6-2016《食品中脂肪的测定》;总灰分含量的测定:参照 GB 5009.4-2016《食品中灰分的测定》;总糖含量的测定:采用萘酮比色法测定^[20]。

1.2.2.2 粒径的测定 方竹笋全粉的粒径分布采用激光粒度分析仪在蒸馏水折射率 1.33 的测量条件下进行测定。取适量样品于烧杯中充分振荡混匀,用滴管将其缓慢加入装有 500 mL 水的烧杯中,同时采用 2500 r/min 转速将其搅拌均匀直到显示的遮光度在测量范围内缓慢波动时,停止滴加样品。

1.2.2.3 持水力、持油力和膨胀力的测定 参考周晚霞等^[10]、李凤^[21]的方法。

1.2.2.4 滑角和休止角测定 参考刘颖等^[11]、易甜等^[22]的方法。

1.2.2.5 色度测定 方竹笋全粉的色度采用色差仪测定,开机后首先用黑白板校正,矫正完成后测定样品,测定参数为 L^* 、 a^* 和 b^* ,其中 L^* 表示亮度值; a^* 表示红绿值; b^* 表示黄蓝值,以 CK 作为标准对照品,按式(6)计算样品的色差(ΔE)。 $\Delta E < 1.5$ 表示颜色与未

处理组差异小; $1.5 \leq \Delta E \leq 3.0$ 表示差异明显; $\Delta E > 3.0$ 表示差异极显著。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}$$

式中: ΔE 表示超微粉碎方竹笋全粉的色差; L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 表示 CK 组值; L^* 、 a^* 、 b^* 表示超微粉碎处理组值。

1.2.3 微观结构的测定

1.2.3.1 红外光谱分析 参考李璐等^[23]的方法,分别取 2 mg 适当干燥的方竹笋全粉加入 200 mg 充分干燥的 KBr 粉末于玛瑙研钵中研磨,压片,然后放入仪器中扫描。条件:扫描波数 $400 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$,扫描次数 32 次,扫描分辨率 4 cm^{-1} 。

1.2.3.2 热重分析 根据汪楠等^[24]的方法并稍加改动,取 3~5 mg 的方竹笋全粉用同步热分析仪进行热重分析,样品的热力学性质采用热重法(TG)和微分热重分析法(DTG)测定。测量条件:充 N_2 ,升温速率为 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,测定范围为室温至 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.2.3.3 微观形态观察 将方竹笋全粉进行固定,再用离子溅射仪对样品表面进行镀金使其具有导电性,将样品置于扫描电子显微镜下观测表现形态。扫描电镜电压为 15 kV,放大倍数为 1000 倍。

1.3 数据处理

数据处理运用 Excel 2019 进行,结果采用 $\bar{x} \pm s$ 表示;绘图运用 Origin2019 进行;差异显著性分析运用 SPSS20.0 进行, $P < 0.05$ 为差异显著;所有试验均重复 3 次及以上。

2 结果与分析

2.1 超微粉碎对方竹笋全粉理化性质的影响

2.1.1 方竹笋全粉营养成分 表 1 是超微粉碎对方

竹笋全粉营养成分的影响。由表 1 可知,与 CK 相比,超微粉碎处理后方竹笋全粉的营养成分呈现出不同的变化规律。其中,水分含量逐渐降低,可能是超微粉碎过程中摩擦生热,促使部分水分蒸发^[25]。粉碎后样品灰分含量在 7.74%~7.82% 之间,脂肪含量在 2.40%~2.59% 之间,二者均无显著变化($P > 0.05$)。随着粉碎时间的增加,方竹笋全粉膳食纤维含量有所下降,而蛋白质和总糖含量增加,其中 CQSP-SG30 组的蛋白质和总糖含量均最高,分别为 33.98% 和 9.25%,较 CK 分别提高 7.48% 和 44.76%。这可能是由于超微粉碎处理使样品中纤维素、半纤维素的部分分子链断裂,分子聚合程度减弱,部分小分子糖溶出,导致总糖含量增加^[26]。此外,方竹笋全粉蛋白质和纤维素含量大约占了方竹笋全粉的 70%,是方竹笋全粉的主要成分,因此可将方竹笋全粉可作为高蛋白、高膳食纤维的食品原辅料应用于食品工业中。

2.1.2 粒径分布 超微粉碎对粉体的作用能力可以用粒径大小来衡量^[27]。超微粉碎对方竹笋全粉粒径的影响如表 2 所示。由表可知,超微粉碎处理会显著影响全粉的粒径大小($P < 0.05$)。随着粉碎时间的增加,粉体的 $D_x(10)$ 、 $D_x(50)$ 、 $D_x(90)$ 均显著减小($P < 0.05$),其中, CQSP-SG30 组较 CK 组分别减小 74.15%、92.07% 和 88.42%。这表明超微粉碎产生的剪切、冲击力等作用使得粉体颗粒得到细化,且处理时间越长,细化的程度越高,这与郝竞霄等^[4]的研究结果一致。与 CK 相比,样品的体积平均粒径和表面积平均粒径均显著减小($P < 0.05$),其中, CQSP-SG30 组的体积平均粒径下降了 89.21%;表面积平均粒径下降了 81.26%,说明处理后粉体粒径更小、分布更均匀。

2.1.3 持水力、持油力和膨胀力 持水力良好的粉

表 1 超微粉碎对方竹笋全粉营养成分的影响(%)

Table 1 Effect of superfine grinding on basic ingredients of CQSP (%)

样品	营养成分					
	水分	蛋白质	膳食纤维	灰分	脂肪	总糖
CK	7.35±0.15 ^a	37.01±0.22 ^c	30.15±0.14 ^a	7.78±0.10 ^a	2.45±0.07 ^a	6.39±0.33 ^c
CQSP-SG10	6.84±0.17 ^b	37.93±0.18 ^b	29.54±0.24 ^b	7.82±0.16 ^a	2.59±0.24 ^a	8.34±0.09 ^b
CQSP-SG20	6.78±0.26 ^b	38.24±0.09 ^b	28.54±0.10 ^c	7.82±0.08 ^a	2.51±0.21 ^a	8.74±0.21 ^b
CQSP-SG30	6.61±0.17 ^b	39.78±0.30 ^a	27.23±0.13 ^d	7.74±0.09 ^a	2.40±0.12 ^a	9.25±0.18 ^a

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$);表2~表4同。

表 2 超微粉碎对方竹笋全粉粒径的影响

Table 2 Effect of superfine grinding on particle size of CQSP

样品	粒径(μm)					
	$D_x(10)$	$D_x(50)$	$D_x(90)$	体积平均粒径	表面积平均粒径	
CK	21.97±0.19 ^a	216.25±0.83 ^a	624.08±1.36 ^a	268.72±1.74 ^a	66.97±0.32 ^a	
CQSP-SG10	11.62±0.05 ^b	86.74±0.41 ^b	163.40±1.01 ^b	87.40±0.92 ^b	30.33±0.20 ^b	
CQSP-SG20	9.91±0.10 ^c	53.30±0.27 ^c	138.36±0.71 ^c	63.76±0.57 ^c	23.21±0.38 ^c	
CQSP-SG30	5.68±0.02 ^d	17.15±0.04 ^d	72.29±0.29 ^d	29.36±0.16 ^d	12.55±0.07 ^d	

注: $D_x(10)$ 、 $D_x(50)$ 和 $D_x(90)$ 表示累计粒度分布数达到10%、50%和90%时所对应的粒径; $D_x(50)$ 也代表平均粒径。

表 3 超微粉碎对方竹笋全粉持水力、持油力和膨胀力的影响
Table 3 Effect of superfine grinding on the WHC, OHC and SC of CQSP

样品	持水力($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	持油力($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	膨胀力($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)
CK	4.09±0.07 ^a	1.40±0.07 ^a	5.29±0.16 ^a
CQSP-SG10	3.83±0.12 ^b	1.29±0.04 ^b	4.91±0.06 ^b
CQSP-SG20	3.38±0.08 ^c	1.17±0.05 ^c	4.50±0.21 ^c
CQSP-SG30	2.89±0.04 ^d	1.03±0.04 ^d	4.08±0.13 ^d

体能够增加排便、降低肠道癌等疾病几率^[28], 持油力良好的粉体能够吸附油脂进而使人体的油脂摄入量大大减少。表 3 为超微粉碎对方竹笋全粉持水力、持油力和膨胀力的影响, 由表 3 可知, 超微粉碎处理后, 全粉的持水力和持油力均显著低于 CK ($P<0.05$), 而且随着粉碎时间的增加, 持水力和持油力均呈显著下降趋势 ($P<0.05$)。其中 CQSP-SG30 组的持水和持油力分别为 2.89 和 1.03 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 较 CK 分别下降了 29.34% 和 26.43%。可能是方竹笋中的膳食纤维经超微粉碎之后, 其含量减少, 对水的束缚能力减弱, 更不易吸收水分^[29]; 同时超微粉碎处理之后, 一些基团被破坏, 表面性质发生了变化, 吸水能力降低^[21], 与赵萌萌等^[5] 所得结果一致, 但与刘颖等^[11] 和陈如等^[9] 所得结果相反。说明不同来源的实验原料, 由于其膳食纤维含量及比例不同, 超微粉的持水力等特性也会有所差异。持油性主要是粉体中亲油性物质所决定, 粗粉由于粒径大, 形状不规则, 离心后的孔隙较大, 从而使油脂很好的填充其中; 而超微粉在离心后结构则变得更加紧密, 颗粒孔隙减小, 因此持油力逐渐减低^[28-29]。CQSP-SG30 组的膨胀力为 4.08 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 比 CK 降低了 22.87%。超微粉碎组中全粉的粒径越小, 膨胀力越小。

2.1.4 滑角和休止角 粉体的滑角和休止角是反映其流动加工性能的重要指标, 通常滑角和休止角越小, 其流动性也越好^[5]。超微粉碎对方竹笋全粉滑角和休止角的影响如图 1 所示, 与 CK 相比, 超微粉碎后方竹笋全粉的滑角和休止角均存在显著性增大 ($P<0.05$), 其中, 滑角从 41.27° 增加到 57.05°, 增加了 38.24%; CQSP-SG10、CQSP-SG20 和 CQSP-SG30

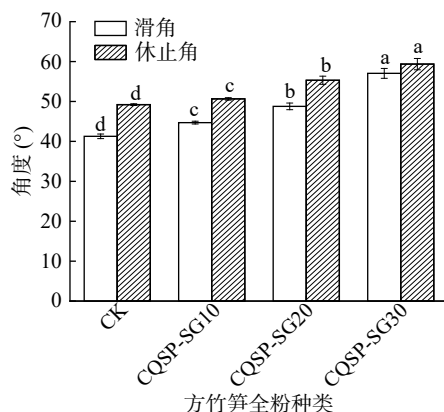


图 1 超微粉碎对方竹笋全粉滑角和休止角的影响

Fig.1 Effects of superfine grinding on measurement results of CQSP slip angle and repose angle

组的休止角分别为 50.65°、55.32°和 59.36°, 休止角均大于 45°, 这一结果与锦橙皮渣^[22] 和青稞麸皮^[5] 超微粉碎的变化特征相似。这可能是超微粉碎减小了方竹笋全粉的粒径, 增加了粉体的比表面积, 使得其表面能增加, 进而提高粉体之间的吸附能力, 导致粉体的流动性能变差^[30-31]。

2.1.5 色度 色度是表征粉体感官品质的一项重要指标。图 2 是超微粉碎方竹笋全粉的外观颜色图, 由图 2 可知, 与 CK 相比, 超微粉碎后方竹笋全粉存在肉眼可辨的色差, 随着超微粉碎时间的增加, 方竹笋粉体的颜色愈加白亮。采用色差仪对方竹笋全粉进行色度值测定, 结果如表 4 所示。由表 4 可知, L^* 值从 75.09 增加到 85.55, 增加了 13.93%; a^* 值从 7.64 降低到 5.60, 下降了 24.21%; b^* 值从 22.86 下降到 16.51, 下降了 27.78%, 表明超微粉碎后方竹笋全粉的亮度增加, 红度和黄度降低。超微粉碎组中样品的色差值均大于 3.0, 表明处理后方竹笋全粉与粗粉的颜色差异极显著 ($P<0.01$), 且随着超微粉碎时间的增加, 色差逐渐增大, 这一结果与之前的外观颜色图结果一致^[27]。说明超微粉碎技术能较好地改善方竹笋全粉偏黄偏暗、颜色不均等问题。

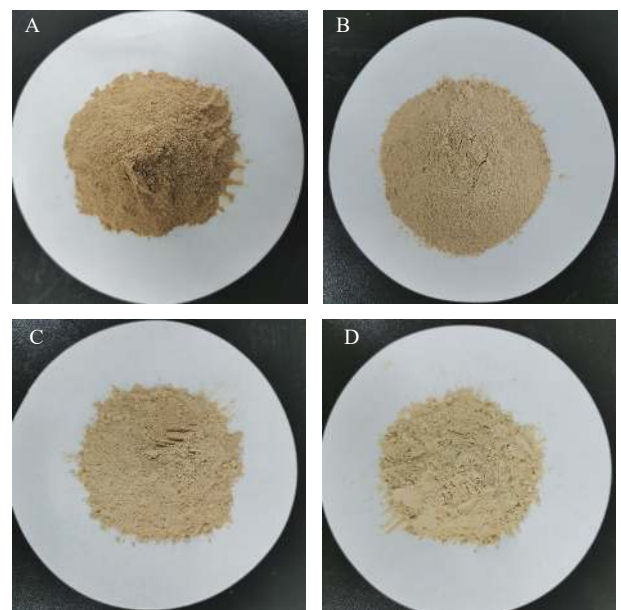


图 2 超微粉碎方竹笋全粉的外观颜色

Fig.2 Appearance color of CQSP-SG

注: A: CK; B: CQSP-SG10; C: CQSP-SG20; D: CQSP-SG30; 图 4 同。

2.2 超微粉碎对方竹笋全粉结构特征的影响

2.2.1 红外光谱分析 红外光谱中吸收峰位置及强

表4 超微粉碎对方竹笋全粉色度的影响

Table 4 Effect of superfine grinding on chrominance of CQSP

样品	色度测量值			
	L^*	a^*	b^*	ΔE
CK	75.09±0.07 ^d	7.64±0.08 ^a	22.86±0.08 ^a	-
CQSP-SG10	82.13±0.08 ^c	6.54±0.03 ^b	21.70±0.17 ^b	6.73±0.11 ^c
CQSP-SG20	83.52±0.08 ^b	6.15±0.04 ^c	20.43±0.09 ^c	8.43±0.09 ^b
CQSP-SG30	85.55±0.10 ^a	5.60±0.05 ^d	16.51±0.04 ^d	11.99±0.19 ^a

度的变化与原子振动频率及其化学组成、化学键类型有着密切的关系^[23]。超微粉碎方竹笋全粉红外光谱如图3所示。超微粉碎后,方竹笋全粉的峰位置和形状基本与CK相似,只是强度出现差异,说明超微粉碎对方竹笋全粉中的官能团没有明显影响。在波长 3328 cm^{-1} 处,超微粉与CK均出现一个强烈且圆滑的吸收峰,这是由纤维素或半纤维素的O-H的伸缩振动产生的^[23,32]。 2924 cm^{-1} 处的吸收峰产生于多糖类亚甲基上的C-H的收缩振动^[23]。 1644 cm^{-1} 是由酯化的C=O的非对称伸缩振动所产生的^[23,33],与CK相比较,超微粉的该吸收峰强度逐渐增强,表明超微粉碎可能增加了全粉中醛基或羧基。 1544 cm^{-1} 是仲酰胺基的酰胺II吸收带^[5]。 1400 cm^{-1} 处是由N-H的弯曲振动引起的吸收峰,是木质素芳族化合物中苯环的拉伸或特征弯曲而引起的^[23,33]。 1053 cm^{-1} 处出现的强吸收峰是由于纤维素和半纤维素中C-O的伸缩振动以及O-H的变角振动形成的糖环C-O-C和C-O-H所致^[23,34]。 897 cm^{-1} 处的特征吸收峰为 β -吡喃糖C-H变角的振动吸收峰,说明粗粉及微粉中均含有 β -吡喃糖^[23-24],且超微粉碎处理后,该峰强度增强,这可能是超微粉碎处理后,方竹笋全粉中的部分小分子糖溶出,糖类特征吸收峰增强^[26]。

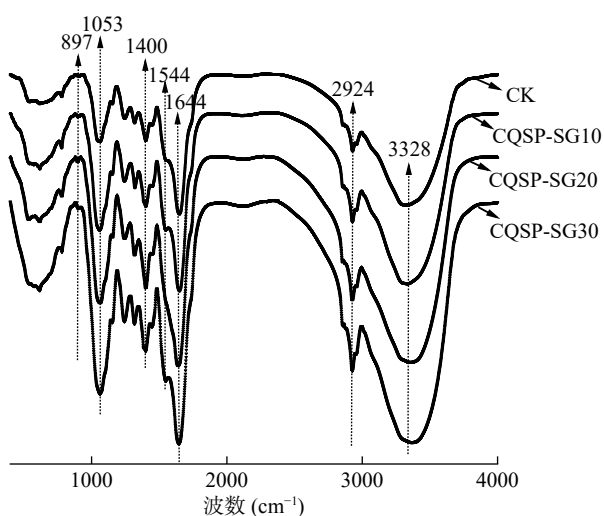


图3 超微粉碎方竹笋全粉红外光谱图
Fig.3 FTIR spectra of CQSP-SG

2.2.2 热重分析 图4是超微粉碎方竹笋全粉热重分析。由图可知,方竹笋全粉的热分解过程可分成3个阶段。第1阶段温度为 $100\sim 170\text{ }^\circ\text{C}$,该阶段方竹笋全粉主要失去自由水、结晶水以及小分子碳氢

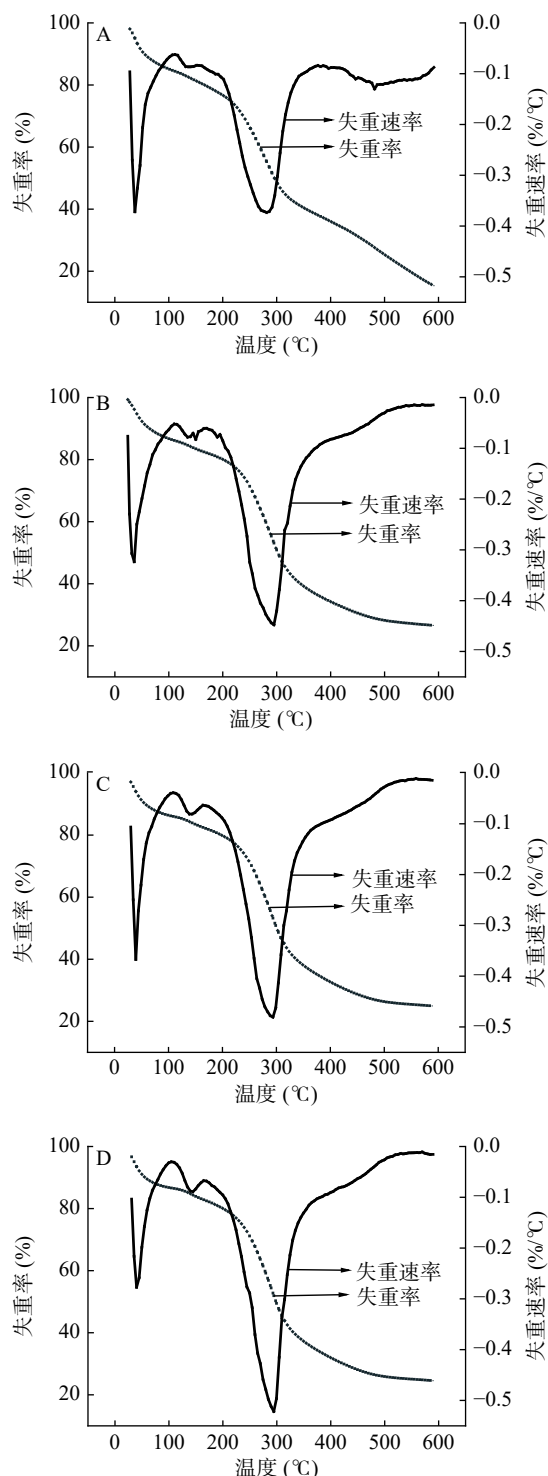


图4 超微粉碎方竹笋全粉热重分析

Fig.4 Scanning electron microscope (SEM) images of CQSP-SG

化合物^[23,35], 150 °C 达到最大失重速率。第 2 个失重阶段是热分解过程的主要阶段, 温度为 200~400 °C, 在此阶段, 方竹笋全粉的失重率和失重速率均显著增加($P<0.05$), 这是由于方竹笋全粉的主要组成成分纤维素、半纤维素和木质素发生降解以及蛋白质高温分解而造成的^[36]。290 °C 左右时, 各微粉均出现一个明显的峰, CQSP-SG30 失重速率和失重率都达到最大, 这可能是因为超微粉碎处理后, 粉体粒径减小, 颗粒的受热面积增大, 受热更加均匀, 从而使分解速率加快^[23]。400 °C 之后, 方竹笋全粉热分解进入平缓的第 3 阶段, 此阶段主要是少量木质素和热解残余物缓慢分解产生碳和灰分^[36]。综上, 说明超微处理对方竹笋全粉的热稳定产生影响, 且微粉的粒径越小, 其热稳定性就越差, 这可能是因为超微粉碎使得方竹笋全粉的纤维素破坏, 部分长链变为短链, 减少了断键所需的能量, 使热分解更易进行^[23,37]。

2.2.3 扫描电子显微镜形态观察 图 5 为超微粉碎方竹笋全粉扫描电子显微镜形态观察图。由图 5 可知, CK 具有较为平坦的表面, 其结构也较为规整, 呈现出致密的球形或椭球形结构, 颗粒较大但不均一, 同时, 周围还存在一些较小的颗粒。微粉 CQSP-SG10 颗粒虽较 CK 有所减小, 但颗粒结构仍较为完整。超微粉碎处理 20 min 后, 样品颗粒明显变小, 形状变得更加不规则, 但其大小变得较为均匀, 一些片状、棒状、球状的碎片也相对均匀地分布在较大颗粒四周。进一步延长处理时间后, 样品 CQSP-SG30 变得更加微小均匀和碎片化, 不规则的结构出现了团聚和吸附现象^[36,38], 与杨荣等^[25]的研究结果相似。扫描电镜结果进一步印证了超微粉碎明显降低了粉体的粒径, 破坏粉体表面结构, 导致粉体的持水持油、膨胀力等理化特性发生改变, 最终影响粉体的加工性能。

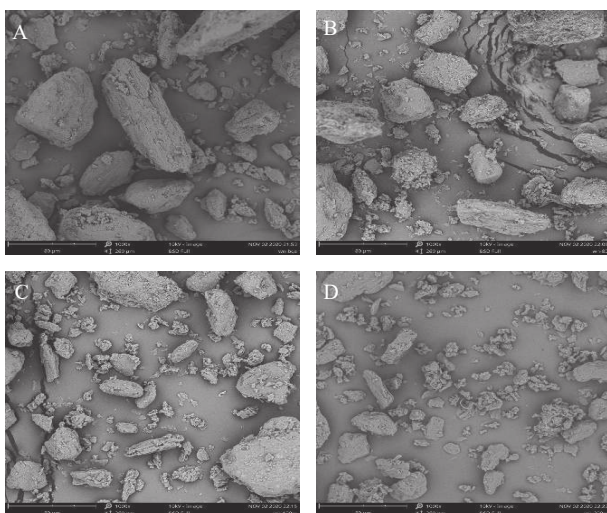


图 5 超微粉碎方竹笋全粉 SEM 图(1000×)

Fig.5 Scanning electron microscope observation of CQSP-SG (1000×)

3 结论

方竹笋是富含膳食纤维和蛋白质的食品原料,

经超微粉碎后, 方竹笋全粉的蛋白质和总糖含量分别提高 7.48% 和 44.76%; 持水力、持油力和膨胀力分别下降 29.34%、26.43% 和 22.87%。超微粉碎能够有效降低粉体粒径, 超微粉碎 30 min 时, 粉体平均粒径达到最小, 较 CK 组降低了 92.07%。超微粉碎处理后方竹笋全粉的滑角和休止角分别增加 38.24% 和 20.63%, 粉体的流动性变差; 超微粉碎使方竹笋全粉亮度值增加 13.93%, 红绿值及黄蓝值分别下降 24.2% 和 16.51%, 粉体色泽更加均匀、白亮。超微粉碎未改变方竹笋全粉的基本结构和官能团, 但降低了样品的热稳定性, 破坏了表面结构, 使其更加微小均匀。综上所述, 超微粉碎技术可改善了方竹笋全粉的理化特性、感官品质及加工特性, 研究结果为方竹笋全粉在固体饮料、咀嚼片、饼干等食品领域中的应用奠定了基础。

参考文献

- [1] 鲍丽然, 贾中民, 李瑜, 等. 南川金佛山方竹笋营养安全品质和立地土壤评价[J]. 物探与化探, 2018, 42(5): 1089-1094.
- [2] 张喜, 张佐玉, 王先华. 林地覆盖糠壳对金佛山方竹笋量的影响[J]. 竹子研究汇刊, 1997(3): 50-53. [ZHANG X, ZHANG Z Y, WANG X H. Effect of chaff-cover on bamboo stand land on shoot yield of *Chimonobambusa utilis*[J]. Journal of Bamboo Research, 1997(3): 50-53.]
- [3] 杨春瑜, 柳双双, 梁佳钰, 等. 超微粉碎对食品理化性质影响的研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(1): 220-224. [YANG C Y, LIU S S, LIANG J Y, et al. Effects of superfine grinding technology on physical and chemical properties of food[J]. Food Research and Development, 2019, 40(1): 220-224.]
- [4] 郝竞霄, 石福磊, 惠靖茹, 等. 普通粉碎与超微粉碎对茶树菇粉体加工物理特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(3): 95-100. [HAO J X, SHI F L, HUI J R, et al. Effects of common grinding and ultrafine grinding on physical properties of *Agrocybe cylindracea* powder[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(3): 95-100.]
- [5] 赵萌萌, 党斌, 张文刚, 等. 超微粉碎对青稞麸皮粉微观结构及功能特性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 278-286. [ZHAO M M, DANG B, ZHANG W G, et al. Effects of ultrafine crushing on microstructure and functional properties of highland barley bran powder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 278-286.]
- [6] 张一鸣, 陈义伦, 葛邦国, 等. 超微粉碎对银杏果粉特性及成分的影响[J]. 中国果菜, 2020, 40(11): 28-33. [ZHANG Y M, CHEN Y L, GE B G, et al. Effects of ultrafine smashing on the characteristics and components of ginkgo biloba fruit powder[J]. China Fruit & Vegetable, 2020, 40(11): 28-33.]
- [7] YANG C, KAMESHWAR A K S, ZHANG J N, et al. Ultrafine grinding a promising method for improving the total die-

- tary fiber content and physico-chemical properties of potato peel waste [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2020, 11(4): 3057–3070.
- [8] GAO W J, CHEN F, ZHANG L F, et al. Effects of superfine grinding on asparagus pomace. Part I: Changes on physicochemical and functional properties[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(6): 1827–1833.
- [9] 陈如, 何玲. 超微粉碎对苹果全粉物化性质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(13): 150–154. [CHEN R, HE L. Effect of superfine grinding on physicochemical properties of apple powder[J]. *Food Science*, 2017, 38(13): 150–154.]
- [10] 周晚霞, 黎怡红, 陈炎, 等. 不同粒径小麦全粉的营养及加工特性比较[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(9): 172–180. [ZHOU W X, LI Y H, CHEN Y, et al. Comparison of nutrition and processing characteristics of whole wheat flours with different particle sizes[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(9): 172–180.]
- [11] 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(9): 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(9): 168–173.]
- [12] WANG F, SUKMANOV V, ZENG J. Effect of ultrafine grinding on functional properties of soybean by-products[J]. *Food Technology*, 2019, 8(4): 687–698.
- [13] ZHANG J T, DONG Y S, NISAR T, et al. Effect of superfine-grinding on the physicochemical and antioxidant properties of *Lycium ruthenicum* Murray powders[J]. *Powder Technology*, 2020, 372(C): 68–75.
- [14] ZHAO X Y, DU F L, ZHU Q J, et al. Effect of superfine pulverization on properties of *Astragalus membranaceus* powder[J]. *Powder Technology*, 2010, 203(3): 620–625.
- [15] SHI H, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Effects of superfine grinding on the properties and qualities of *Cordyceps militaris* and its spent substrate[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(11): 14169.
- [16] LU M Q, YAN L, WANG B, et al. Effect of vibrating-type ultrafine grinding on the physicochemical and antioxidant properties of Turkish galls in Uyghur medicine[J]. *Powder Technology*, 2018, 339: 560–568.
- [17] 李洁丽, 蒋纬, 胡颖. 超微竹笋粉酸乳的研制[J]. *食品科技*, 2017, 42(5): 90–94. [LI J L, JIANG W, HU Y. The development of the superfine bamboo shoot powder yogurt[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(5): 90–94.]
- [18] 王晓芳, 邓瑶琦, 龚霄, 等. 竹笋超微粉无矾木薯粉条加工技术[J]. *热带农业工程*, 2016, 40(C1): 27–28. [WANG X F, DENG Y J, GONG X, et al. Cassava vermicelli processing technology of ultrafine powder bamboo shoots without alum[J]. *Tropical Agricultural Engineering*, 2016, 40(C1): 27–28.]
- [19] 周倩, 孙汉巨, 王静, 等. 竹笋复合固体饮料的工艺研究[J]. *农产品加工(学刊)*, 2012(12): 75–79. [ZHOU Q, SUN H J, WANG J, et al. Technology of bamboo shoots compound solid beverage[J]. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2012(12): 75–79.]
- [20] 张耀雷, 黄立新, 张彩虹, 等. 不同干燥方式对壶瓶枣粉品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(1): 76–79. [ZHANG Y L, HUANG L X, ZHANG C H, et al. Effects of different drying methods on the quality of *Ziziphus jujube* Mill. cv. Hupingzao[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(1): 76–79.]
- [21] 李凤. UHP 处理对小麦膳食纤维的改性研究[J]. *食品科学*, 2007, 28(9): 96–98. [LI F. Study on modifying wheat dietary fiber by ultra high pressure treatment[J]. *Food Science*, 2007, 28(9): 96–98.]
- [22] 易甜, 崔文文, 王明锐, 等. 锦橙皮渣膳食纤维微粉化及其功能特性分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(10): 8–14. [YI T, CUI W W, WANG M R, et al. Functional and structural properties of micronized dietary fiber powder extracted from peel and pomace of jincheng sweet oranges[J]. *Food Science*, 2019, 40(10): 8–14.]
- [23] 李璐, 黄亮, 苏玉, 等. 超微化雷竹笋膳食纤维的结构表征及其功能特性[J]. *食品科学*, 2019, 40(7): 74–81. [LI L, HUANG L, SU Y, et al. Structural characterization and functional properties of ultrafine dietary fiber from phyllostachys praecox[J]. *Food Science*, 2019, 40(7): 74–81.]
- [24] 汪楠, 黄山, 张月, 等. 高温蒸煮协同纤维素酶改性竹笋膳食纤维[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(4): 13–18. [WANG N, HUANG S, ZHANG Y, et al. Modification of bamboo shoot dietary fiber by high temperature cooking combined with cellulase[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(4): 13–18.]
- [25] 杨荣, 王素雅, 曹崇江, 等. 超微粉碎对竹笋壳粉理化性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(1): 34–39. [YANG M, WANG S Y, CAO C J, et al. Effect of ultrafine grinding on physical and chemical properties of bamboo shell powder[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(1): 34–39.]
- [26] 朱怡婷, 李状, 黄晓兵, 等. 超微粉碎对毛竹笋微观结构及营养成分的影响[J]. *热带作物学报*, 2015, 36(5): 937–941. [ZHU Y T, LI Z, HUANG X B, et al. Effect of superfine grinding on microstructure and nutrients of *Phyllostachys pubescens* shoot[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2015, 36(5): 937–941.]
- [27] 李状, 朱德明, 李积华, 等. 振动超微粉碎对毛竹笋干物化特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(3): 259–263. [LI Z, ZHU D M, LI J H, et al. Influence of micronization on physicochemical properties of dried moso-bamboo shoots[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(3): 259–263.]
- [28] MIN Z, ZHANG C J, SHRETHA S. Study on the preparation technology of superfine ground powder of *Agrocybe chaxingu* Huang[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 67(3): 333–337.
- [29] WANG T, SUN X Y, ZHOU Z X, et al. Effects of microfluidization process on physicochemical properties of wheat bran[J]. *Food Research International*, 2012, 48(2): 742–747.
- [30] AHMED J, AL-ATTAR H, ARFAT Y A. Effect of particle size on compositional, functional, pasting and rheological properties of commercial water chestnut flour[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52: 888–895.

- [31] 李菁, 吴聪聪, 叶沁, 等. 不同处理方法对豆渣膳食纤维结构和降血糖性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(15): 178–184. [LI Q, WU C C, YE Q, et al. Different treatments on structure and hypoglycemic properties of okara dietary fibers[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(15): 178–184.]
- [32] YAN X, YE R, CHEN Y. Blasting extrusion processing: The increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble-fiber polysaccharides from wheat bran[J]. *Food Chemistry*, 2015, 180: 106–115.
- [33] CHANG S C, HSU B Y, CHEN B H. Structural characterization of polysaccharides from *Zizyphus jujuba* and evaluation of antioxidant activity[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2010, 47(4): 445–453.
- [34] SONI B, HASSAN E B, MAHMOUD B. Chemical isolation and characterization of different cellulose nanofibers from cotton stalks[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 134(10): 581–589.
- [35] 董文成. 柑橘果实膳食纤维物化特性及其性能表征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. [DONG W C. Study on the physico-chemical properties and characteristics of citrus fruit dietary fiber[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.]
- [36] 张洪勋, 李林. 纤维素类生物质热解技术研究进展[J]. 北京联合大学学报(自然科学版), 2004(1): 16–19. [ZHANG H X, LI L. Research progress in cellulosic biomass pyrolysis[J]. Journal of Beijing Union University, 2004(1): 16–19.]
- [37] ZHAO X Y, YANG Z B, GAI G S, et al. Effect of superfine grinding on properties of ginger powders[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 91(2): 217–222.
- [38] MING J, CHEN L, HONG H, et al. Effect of superfine grinding on the physic-chemical, morphological and thermogravimetric properties of *Lentinus edodes* mushroom powders[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(12): 2431–2437.