

## 超微粉碎与普通粉碎对裂褶菌粉体理化特性及营养成分含量的影响

罗晓莉, 杨宁, 周镭, 曹晶晶, 张沙沙, 孙达锋

### Effects of Ultrafine and Conventional Pulverization on Physicochemical Characteristics and Nutrient Content of *Schizophyllum commune* Powder

LUO Xiaoli, YANG Ning, ZHOU Pei, CAO Jingjing, ZHANG Shasha, and SUN Dafeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050244>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

不同干燥和粉碎方式对玉木耳粉体特性和营养成分的影响

Effects of Different Drying and Grinding Methods on the Powder Characteristics and Nutritional Components of *Auricularia nigricans* Powder

食品工业科技. 2021, 42(1): 96-100,109 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030158>

超微粉碎对花椒籽粉品质特性的影响

Effect of Superfine Grinding Technology on the Quality Characteristics of *Zanthoxylum bungeanum* Seed Powder

食品工业科技. 2024, 45(8): 67-74 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023040017>

超微粉碎处理对八宝粥粉理化特性及功能特性的影响

Effects of Superfine Grinding Treatment on the Physicochemical and Functional Properties of Mixed Congee Powder

食品工业科技. 2022, 43(18): 21-28 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021090335>

超微粉碎对方竹笋全粉理化特性及微观结构的影响

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

食品工业科技. 2021, 42(24): 40-47 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040079>

气流超微粉碎对香菇柄粉末理化及溶出特性的影响

Effects on Physicochemical and Dissolution Characteristics of *Lentinus edodes* Stem Powder by Jet Milling

食品工业科技. 2023, 44(23): 101-109 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023030091>

超微粉碎后粒径对大麦全粉品质特性的影响

Effects of Different Particle Sizes on the Quality of Barley Flour after Superfine Grinding

食品工业科技. 2022, 43(10): 80-86 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080063>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

罗晓莉, 杨宁, 周镭, 等. 超微粉碎与普通粉碎对裂褶菌粉体理化特性及营养成分含量的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 104–110. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050244

LUO Xiaoli, YANG Ning, ZHOU Pei, et al. Effects of Ultrafine and Conventional Pulverization on Physicochemical Characteristics and Nutrient Content of *Schizophyllum commune* Powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 104–110. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050244

· 研究与探讨 ·

# 超微粉碎与普通粉碎对裂褶菌粉体理化特性及营养成分含量的影响

罗晓莉<sup>1</sup>, 杨宁<sup>2</sup>, 周镭<sup>1</sup>, 曹晶晶<sup>1</sup>, 张沙沙<sup>1</sup>, 孙达锋<sup>1,\*</sup>

(1. 中华全国供销合作总社昆明食用菌研究所, 云南昆明 650221;

2. 云南省食用菌产业发展研究院, 云南昆明 650221)

**摘要:** 为探究不同粉碎处理对裂褶菌粉体理化特性及营养成分含量的影响, 本研究分别采用超微粉碎和普通粉碎两种粉碎方法, 制备了不同粉碎强度的裂褶菌粉 (CG-60、CG-100、CG-150、SG-20、SG-40), 并对粉体的色泽、流动性、填充性、水合性质等理化特性和粗蛋白、粗多糖、膳食纤维等营养成分含量进行了测定和比较分析。结果表明: 超微粉碎使裂褶菌粉体的振实密度降低, 滑角、休止角增加, 虽流动性、填充性变差, 但粉体色泽更为白亮。与普通粉碎的 CG-60 相比, 经超微粉碎的 SG-40 的膨胀力、持水力、持油力分别提高了 77.27%、6.74%、11.63%, 水溶性指数达到 CG-60 样品的 4 倍以上, 水合性质得到显著改善 ( $P<0.05$ ), 粗蛋白、粗多糖、可溶性膳食纤维等营养成分含量分别达到 13.10、10.47、4.27 g/100 g, 与普通粉碎粉体相比均显著增加 ( $P<0.05$ )。综上所述, 超微粉碎处理可改善裂褶菌粉体的水合性质, 提高营养成分的溶出, 粉体质地更为细腻、颜色更为白亮, 但在一定程度上降低了裂褶菌粉的流动性和填充性。

**关键词:** 超微粉碎, 普通粉碎, 裂褶菌, 粉体特性, 营养成分

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)08-0104-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050244



本文网刊:

## Effects of Ultrafine and Conventional Pulverization on Physicochemical Characteristics and Nutrient Content of *Schizophyllum commune* Powder

LUO Xiaoli<sup>1</sup>, YANG Ning<sup>2</sup>, ZHOU Pei<sup>1</sup>, CAO Jingjing<sup>1</sup>, ZHANG Shasha<sup>1</sup>, SUN Dafeng<sup>1,\*</sup>

(1. Kunming Edible Fungi Institute of All China Federation of Supply and Marketing Cooperatives, Kunming 650221, China;

2. Yunnan Academy of Edible Fungi Industry Development, Kunming 650221, China)

**Abstract:** To investigate the effects of different grinding treatments on the physicochemical properties and nutritional component contents of *Schizophyllum commune* powders, two grinding methods—superfine grinding and ordinary grinding—were employed in this study. Powders with varying grinding intensities (CG-60, CG-100, CG-150, SG-20, SG-40) were prepared. The color, flowability, bulk density, hydration properties, and other physicochemical characteristics, as well as the contents of crude protein, crude polysaccharides, dietary fiber, and other nutritional components, were measured and comparatively analyzed. Results showed that ultrafine pulverization reduced the tapped density and increased the angles of slide and repose. Although flowability and fillability decreased, the ultrafine powder had a whiter and brighter color. Compared to the conventionally pulverized CG-60 powder, the SG-40 powder obtained through ultrafine pulverization

收稿日期: 2024-05-27

基金项目: 云南省科技人才与平台计划 (202305AD160044)。

作者简介: 罗晓莉 (1981-), 女, 硕士, 研究员, 研究方向: 食用菌贮藏与加工, E-mail: lxiaoli81@163.com。

\* 通信作者: 孙达锋 (1977-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食用菌资源开发利用, E-mail: sdafeng@163.com。

showed 77.27%, 6.74%, and 11.63% higher swelling capacity, water holding capacity, and oil holding capacity, respectively. The water solubility index of SG-40 was observed to be over four times higher than that of CG-60, and the hydration properties were significantly improved ( $P<0.05$ ). The crude protein, crude polysaccharides, and soluble dietary fiber contents were measured at 13.10, 10.47, and 4.27 g/100 g, respectively, which were significantly higher than those in the conventionally pulverized powder ( $P<0.05$ ). In conclusion, the hydration properties and nutrient release of *S. commune* powder were enhanced by ultrafine pulverization. A finer texture and a whiter, brighter color were observed in the powder, although its flowability and fillability were reduced by ultrafine pulverization.

**Key words:** ultrafine pulverization; conventional pulverization; *Schizophyllum commune*; powder characteristics; nutrient content

裂褶菌(*Schizophyllum commune* Fr.)又叫白参、八担柴,隶属于蘑菇目(Agaricales)裂褶菌科(Schizophyllaceae),是一种既能野生于腐木上,又能进行人工栽培的食药同源食用菌<sup>[1-2]</sup>。裂褶菌营养丰富,蛋白质和膳食纤维含量高、脂肪含量低,还含有人体必需的多种氨基酸、维生素、矿物质等营养成分,是高蛋白、高纤维、低脂肪的理想食物来源;同时还含有多糖等功能活性成分,具有提高细胞免疫功能、抗肿瘤、抗癌等作用<sup>[3-4]</sup>。目前国内外对裂褶菌的研究大多集中于裂褶菌的生物学特性、营养成分差异、食药价值、人工驯化栽培、多糖的提取及功能活性、液体发酵等方面<sup>[5]</sup>。除此之外,对裂褶菌的产品开发及加工利用方面还鲜有文献报道。裂褶菌的菌肉薄、韧,老熟子实体菌肉革质化严重,新鲜幼嫩子实体口感脆嫩、气香味美,常与鸡蛋、肉类一起蒸食或炒食,市场上多以鲜品和普通干品销售为主,深加工产品少,老熟子实体的菌肉革质化导致了其口感柴韧,也限制了消费群体的扩大。因此,要提高裂褶菌的综合利用率,迫切需要借助更多的现代食品加工技术,研发出更多的产品形式。

粉状食品体积小、包装轻便,具有更高的营养功能价值,是最常见的食品原料及产品形式<sup>[6]</sup>。超微粉碎作为一种新型的加工技术,与普通粉碎技术相比,其通过碾磨、冲击、剪切等物理粉碎方法克服物料内部结合力,实现了粉末粒径的微米化甚至纳米化,赋予了粉末更小的粒径、更大的比表面积,改善了粉体的理化和营养功能特性<sup>[7]</sup>。目前,关于超微粉碎对裂褶菌粉体的理化特性和营养成分含量的影响尚未见报道。

本文研究了超微粉碎与普通粉碎对裂褶菌粉体理化特性和营养成分含量的影响,并对粉体色泽、流动性、填充性、水合性质、营养成分进行了测定和比较分析,以期对裂褶菌的产品开发及加工利用提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

新鲜裂褶菌 朵形似菊花,颜色呈灰白色,大小均一,购于云南木水花农贸市场;金龙鱼精炼一级菜籽油 市售;硫酸铜、硫酸钾、氢氧化钠、硫酸、苯酚、95%乙醇、丙酮等 均为分析纯,购自上海阿拉

丁生化科技股份有限公司。

5HG-0.3CK 果蔬烘干机 云南种业集团有限责任公司热能科技分公司;SC-80C 全自动色差计 北京康光光学仪器有限公司;SPECORD 50PLUS 紫外可见分光光度计 德国耶拿分析仪器股份有限公司;K1100 凯氏定氮仪 济南海能仪器股份有限公司;FW-400A 倾斜式高速万能粉碎机 北京中兴伟业仪器有限公司;TYM2011-30 型超微粉碎机 济南天宇专用设备有限公司;AB204-S/FACT 分析天平 METTLER TOLEDO 公司;JJ-1B 恒温电动搅拌机 金坛区西城新瑞仪器厂;5430R 台式高速冷冻离心机 德国 Eppendorf 公司;DZKW-S-8 恒温水浴锅 北京市永光明医疗仪器有限公司;DGG-9070A 型电热恒温鼓风干燥箱 上海森信实验仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 不同粉碎处理裂褶菌粉体制备 将新鲜裂褶菌撕瓣后,采用果蔬烘干机烘干至水分含量到 10% 以下(空气湿度 40%,干燥时间 20 h)。该水分含量来自于前期预实验,且符合 GB 7096-2014《食用菌及其制品》中对食用菌干制品的水分规定。干燥后分别进行粉碎,一部分用高速万能粉碎机粉碎,分别过 60 目(孔径:0.250 mm)、100 目(孔径:0.150 mm)、150 目(孔径:0.106 mm)标准筛,得到普通粉碎裂褶菌粉,分别命名为 CG-60、CG-100、CG-150;另一部分采用-10℃ 以下低温超微粉碎机,分别粉碎 20、40 min,得到超微粉碎裂褶菌粉,分别命名为 SG-20、SG-40。干燥后的菌粉密封,避光保存备用。

1.2.2 色度值测定 参考石芳等<sup>[8]</sup>的方法略作改动。通过全自动色差计测定不同粉碎处理的裂褶菌粉体的色泽,应用  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值表示色泽,每个样品重复测定 3 次,取其平均值。 $L^*$  值是反映白度和亮度的综合值,称为明度指数,该值越大表明被测物质越白亮。 $a^*$ 、 $b^*$  值称为彩度指数,它们共同决定物质的色调。 $a^*$  值表示红绿之间的色泽,为正值表示偏红,负值表示偏绿,绝对值越大表示偏向越严重; $b^*$  值表示黄蓝之间的色泽,为正值表示被测物质偏黄,负值表示被测物质偏蓝。

### 1.2.3 粉体流动性和填充性测定

1.2.3.1 休止角测定 参考王维涛等<sup>[9]</sup>的方法略作



改动。将玻璃漏斗用铁架台垂直固定在桌面上,下放一块玻璃平板,使漏斗底端距离下面水平放置的玻璃平板 2 cm 处,分别取 5 g 不同粉碎处理的裂褶菌粉体经漏斗垂直流至玻璃平板上,测量形成的圆锥体的高度  $h$  和底面圆形半径  $r$ 。按照公式(1)计算休止角  $\alpha$ 。

$$\alpha = \arctan \frac{h}{r} \quad \text{式 (1)}$$

式中:  $r$  表示圆锥体的半径, cm;  $h$  表示圆锥体的高度, cm。

1.2.3.2 滑角测定 参考蒋丽娜等<sup>[10]</sup>的方法并略作改动。分别称取 5 g 不同粉碎处理的裂褶菌粉体,均匀分布在一块玻璃平板的固定位置上,缓缓向上提起玻璃板的一侧,待裂褶菌粉体开始向下滑动,借助游标卡尺记录玻璃平板长度  $L$  和玻璃平板顶部距桌面的垂直距离  $h$ 。按照公式(2)计算滑角  $\alpha$ 。

$$\alpha = \arcsin \frac{h}{L} \quad \text{式 (2)}$$

式中:  $h$  为玻璃平板距离桌面的垂直距离, cm;  $L$  为玻璃平板的长度, cm。

1.2.3.3 振实密度测定 参考寇福兵等<sup>[11]</sup>的方法并略作改动。分别称取 2 g 不同粉碎处理的裂褶菌粉体于 10 mL 量筒中,振荡直至粉体体积不再变化,读取体积  $V$ ,此时测得的松密度为振实密度。按照公式(3)计算振实密度  $\rho$ 。

$$\rho(\text{g/mL}) = \frac{m}{v} \quad \text{式 (3)}$$

式中:  $m$  为样品的质量, g;  $v$  为粉体体积不变后的体积, mL。

#### 1.2.4 粉体水合性质测定

1.2.4.1 膨胀力测定 参考唐明明<sup>[12]</sup>的方法并略作改动。准确称取 3 g 裂褶菌粉体样品慢慢倒入 50 mL 量筒中,记录体积  $V_1$ ,然后倒入 45 mL 蒸馏水,振荡摇匀,20 °C 下静置 24 h 后,记录粉末吸水后的体积  $V_2$ 。按照公式(4)计算膨胀力。

$$\text{膨胀力}(\text{mL/g}) = \frac{V_2 - V_1}{m} \quad \text{式 (4)}$$

式中:  $m$  为样品的质量, g;  $V_1$  表示样品的原体积, mL;  $V_2$  表示样品吸水后的体积, mL。

1.2.4.2 水溶性指数(WSI)测定 参考罗白玲<sup>[13]</sup>的方法并略作改动。分别称量不同粉碎处理的裂褶菌粉体样品( $m_1$ , g),然后粉体与水以 1:50 的质量比例混匀,将混合好的溶液置于 80 °C 水浴锅上加热 30 min,取出冷却后然后在 5000 r/min 速度下离心 10 min。离心后将上层液放到已恒重好的蒸发皿中称重( $m_2$ , g),在 105 °C 恒温干燥箱中干燥至恒重。冷却至室温后将干燥好的样品与蒸发皿一起称重( $m_3$ , g),按照公式(5)计算水溶性指数。

$$\text{WSI}(\%) = \frac{m_3 - m_2}{m_1} \times 100 \quad \text{式 (5)}$$

式中: WSI 表示水溶性指数, %;  $m_1$  为样品的质量, g;  $m_2$  为蒸发皿重量, g;  $m_3$  为烘干后样品与蒸发皿的总重, g。

1.2.4.3 持水力(WHC)测定 参考张亚坤<sup>[14]</sup>的方法并略作改动。分别称取 1 g 不同粉碎处理的裂褶菌粉体放入离心管中,称重  $W_1$ ,加入 40 mL 蒸馏水混合,然后置于 90 °C 的水浴锅中加热 20 min。然后将离心管冷却至室温并用离心机在 5000 r/min 的条件下离心 20 min,倾去上清液,称量样品和离心管一起的质量  $W_2$ 。按照公式(6)计算持水力。

$$\text{WHC}(\text{g/g}) = \frac{W_2 - W_1}{W} \quad \text{式 (6)}$$

式中: WHC 为样品持水力, g/g;  $W$  为样品质量, g;  $W_1$  为样品和离心管总重, g;  $W_2$  为沥干水分之后样品和离心管总重, g。

1.2.5 持油力(OHC)测定 参考张亚坤<sup>[14]</sup>的方法并略作改动。分别称取 5 g 不同粉碎处理的裂褶菌粉体放入离心管中并称重  $W_1$ ,加入 100 mL 金龙鱼菜籽油,再将二者的混合物置于 90 °C 的水浴锅中加热 20 min。然后将离心管冷却至室温并在 4000 r/min 的条件下离心 20 min,倾去上清液,沥干油分后称量样品和离心管一起的质量  $W_2$ 。按照公式(7)计算持油力。

$$\text{OHC}(\text{g/g}) = \frac{W_2 - W_1}{W} \quad \text{式 (7)}$$

式中: OHC 为样品持油力, g/g;  $W$  为样品质量, g;  $W_1$  为样品和离心管总重, g;  $W_2$  为沥干油分之后样品和离心管总重, g。

1.2.6 粉体营养成分测定 粗蛋白的测定参照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》;粗多糖的测定参照 NY/T 1676-2023《食用菌中粗多糖的测定 分光光度法》;总膳食纤维、可溶性膳食纤维的测定参照 GB 5009.88-2023《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》。

### 1.3 数据处理

所有实验均重复 3 次,结果表示为平均值±标准差,采用 Excel 2007 和 SPSS 20.0 对实验数据进行处理和 ANOVA 显著性分析,当  $P < 0.05$  时为差异显著,采用 GraphPad Prism 8 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同粉碎处理对裂褶菌粉体色度值的影响

色泽是裂褶菌粉体的重要感官指标之一,是吸引消费者注意的第一指标。不同的粉碎处理方式带来产品色泽的差异。由全自动色差计测得的裂褶菌粉体色度值如表 1 所示。 $L^*$ 值是反映样品白度和亮度的综合值,随着粉碎程度的深入,裂褶菌粉体的  $L^*$ 值总体呈现增加趋势, $a^*$ 、 $b^*$ 值呈下降趋势。超微

表 1 不同粉碎处理裂褶菌粉体的色度值  
Table 1 Chrominance of *Schizophyllum commune* powder with different pulverization methods

样品	亮度 $L^*$	红度 $a^*$	黄度 $b^*$
CG-60	62.90±0.07 <sup>e</sup>	5.72±0.23 <sup>a</sup>	16.11±0.02 <sup>a</sup>
CG-100	65.71±0.26 <sup>d</sup>	5.46±0.18 <sup>ab</sup>	15.31±0.19 <sup>b</sup>
CG-150	71.47±0.04 <sup>c</sup>	4.47±0.51 <sup>b</sup>	14.71±0.22 <sup>bc</sup>
SG-20	80.48±0.24 <sup>a</sup>	3.30±0.42 <sup>c</sup>	13.91±0.31 <sup>c</sup>
SG-40	79.34±0.29 <sup>b</sup>	3.40±0.52 <sup>c</sup>	14.14±0.44 <sup>c</sup>

注: 不同小写字母表示同一指标数据差异显著( $P<0.05$ ), 表2同。

粉碎粉体相比普通粉碎粉体的  $L^*$  值显著增加 ( $P<0.05$ ),  $a^*$  值之间也有显著差异 ( $P<0.05$ ), 而  $b^*$  值之间差异不显著 ( $P>0.05$ )。王维涛等<sup>[9]</sup> 在研究香菇柄粉末色度值、Phat 等<sup>[15]</sup> 在研究猴头菇粉末色度值时都得到了类似的研究结果。可能是由于超微粉碎通过减小粉体颗粒粒径增大了比表面积, 从而能够反射更多的光, 导致白亮度增加<sup>[16]</sup>; 也可能是随着粒径的减小, 增加了内部物质(纤维素、半纤维素等)的暴露, 从而影响了粉末的颜色<sup>[17]</sup>。超微粉碎 40 min 的粉体 SG-40 和超微粉碎 20 min 的粉体 SG-20 相比, 其  $a^*$ 、 $b^*$  值没有显著差异, 而  $L^*$  值却显著减小 ( $P<0.05$ ), 说明粉体亮度的提升可能存在最佳的粉碎时间范围, 并不是超微粉碎的时间越长越好。

2.2 不同粉碎处理对裂褶菌粉体流动性与填充性的影响

2.2.1 休止角、滑角 粉体的流动性与粒子的形状、大小、表面状态、松密度等有关, 一般用休止角和滑角等指标对粉体的流动性进行评价, 通常其值越小粉体的流动性越好。不同粉碎处理对裂褶菌粉体的休止角和滑角的影响如图 1 所示。超微粉碎与普通粉碎相比, 其粉体的休止角和滑角均显著增大 ( $P<0.05$ ), 且随着粉体粒径的减小, 休止角和滑角普遍呈现增大趋势。但超微粉碎处理时间对滑角影响显著 ( $P<0.05$ ), 却未显著影响裂褶菌粉体的休止角 ( $P>0.05$ )。CG-60 的休止角小于  $35^\circ$ , CG-100 与 CG-

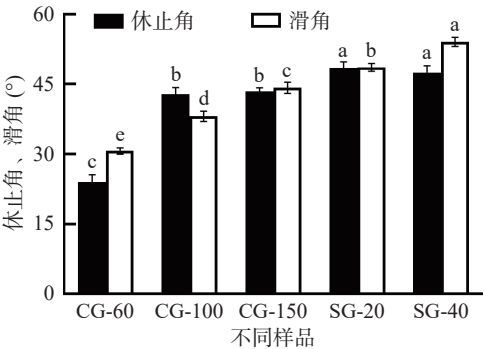


图 1 不同粉碎处理裂褶菌粉体的休止角和滑角  
Fig.1 Repose and slide angles of *Schizophyllum commune* powder with different pulverization methods

注: 不同小写字母表示同一指标数据差异显著 ( $P<0.05$ ), 图2~图5同。

150 的休止角均在  $35^\circ\sim45^\circ$  之间, 而超微粉碎的粉体 SG-20 和 SG-40 的休止角均大于  $45^\circ$ 。根据 Carr (1976) 规则, 休止角小于  $35^\circ$  表示自由流动性较好;  $35^\circ\sim45^\circ$  表示粉体有一定的粘结性;  $45^\circ\sim55^\circ$  表示粉体粘结性较大<sup>[18]</sup>。说明超微粉碎处理的裂褶菌粉体颗粒之间具有更强的粘附性和凝聚特性, 从而使得流动性变差。

2.2.2 振实密度 粉体填充性的研究在片剂、胶囊剂的填充过程中具有重要意义, 一般以振实密度作为评价填充性的常见指标, 振实密度越大说明粉体的填充性能越好、粉体越容易压片成型。由图 2 可知, 超微粉碎处理显著降低了裂褶菌粉体的振实密度 ( $P<0.05$ ), 可由 CG-60 的  $0.63\text{ g/mL}$  下降到 SG-20 的  $0.37\text{ g/mL}$ ; 并随着粉碎粒径的减小, 裂褶菌粉体的振实密度逐渐下降, 并在 150 目后呈现出显著性降低 ( $P<0.05$ ), 这可能是由于随着粉体颗粒粒径的减小, 比表面积增大, 表面聚合能增加, 颗粒流动性变差, 更容易团聚成假的大颗粒使得粉体之间空隙率增大, 从而因为体积的增大导致振实密度减小。但超微粉碎处理时间对振实密度的影响差异不显著 ( $P>0.05$ )。郝竞霄等<sup>[19]</sup> 在茶树菇超微粉体中也得出了类似的结论, 但孟庆然<sup>[20]</sup> 在西兰花粉中的试验结果却相反, 说明粉体填充性的优劣除了跟粉碎粒径有关之外, 可能跟原料某些成分差异和吸湿性也有关系。

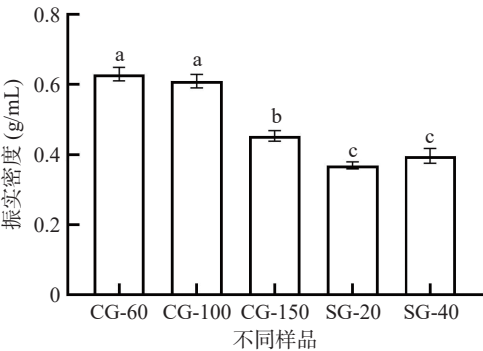


图 2 不同粉碎处理裂褶菌粉体的振实密度  
Fig.2 Tapped density of *Schizophyllum commune* powder with different pulverization methods

2.3 不同粉碎处理对裂褶菌粉体水合性质的影响

2.3.1 膨胀力 膨胀力又叫溶胀能力 (Swelling capacity, SC), 可以反映粉末的吸水能力<sup>[12]</sup>。不同粉碎处理的裂褶菌粉体的膨胀力如图 3 所示。普通粉碎处理的 CG-60、CG-100、CG-150 膨胀力分别为  $5.06$ 、 $5.47$  和  $5.74\text{ mL/g}$ , CG-60 和 CG-100、CG-100 和 CG-150 之间膨胀力差异不显著 ( $P>0.05$ ), 而裂褶菌超微粉 SG-20 和 SG-40 的膨胀力分别为  $8.71$ 、 $8.97\text{ mL/g}$ , 与普通粉之间有显著差异 ( $P<0.05$ )。可能是由于超微粉碎处理的粉体具有更大的比表面积和疏松的微观结构, 导致大量的亲水基团暴露出来, 这些亲水基团更易与水结合, 导致水合能力的提高,

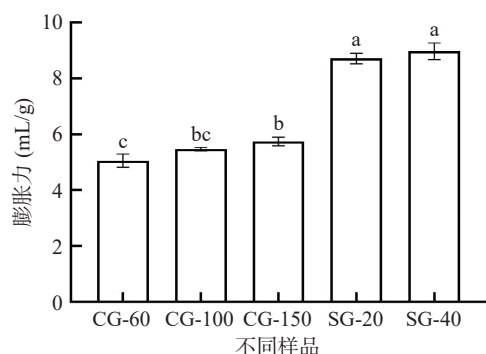


图3 不同粉碎处理裂褶菌粉体的膨胀力

Fig.3 Swelling capacity of *Schizophyllum commune* powder with different pulverization methods

从而增加超微粉的膨胀力<sup>[21-22]</sup>。随着膨胀力的增加,可以防止水分散失、改善质地以及提高冲调性,故裂褶菌超微粉体在固体饮料、固体调味料、功能性食品的开发中具有潜在的应用前景。

**2.3.2 水溶性指数** 水溶性指数 (Water solubility index, WSI) 与粉体中可溶性物质含量和溶解性有关。水溶性指数越大,其可溶性物质含量越大,溶解性越好。如图4所示,随着粉碎程度的深入及粉碎时间的延长,裂褶菌粉体的 WSI 显著增大 ( $P < 0.05$ ),普通粉碎 150 目的粉体 CG-150 的水溶性指数为 7.5%,而超微粉碎 40 min 的粉体 SG-40 的水溶性指数达到了 17%,表明超微粉碎处理可以显著促进纤维素、半纤维素等的降解,显著提高裂褶菌粉体中可溶性物质的含量,从而提高溶解性。

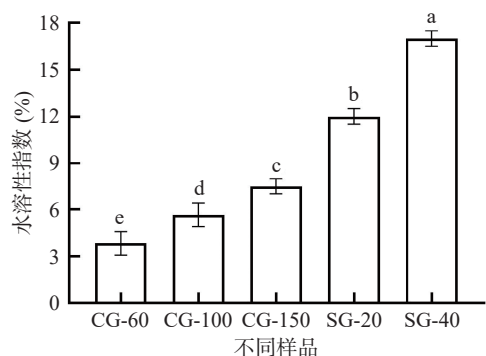


图4 不同粉碎处理裂褶菌粉体的水溶性指数

Fig.4 Water solubility index of *Schizophyllum commune* powder with different pulverization methods

**2.3.3 持水力、持油力** 持水力 (Water holding capacity, WHC)、持油力 (Oil holding capacity, OHC) 是体现粉体水合性质的两个重要指标。持水力/持油力可以用来评估粉末在受到外部离心力时粉末保持水分/油分的能力。如图5所示,普通粉碎的 CG-150 持水力为 4.79 g/g,持油力为 1.21 g/g,而超微粉碎的 SG-20 持水力达到 6.12 g/g,持油力达到 1.56 g/g。超微粉碎与普通粉碎相比,均显著增加了粉末的持水力、持油力 ( $P < 0.05$ )。一方面,可能由于超微粉碎的粉体粒径更小、比表面积更大,更易与水/油分子接

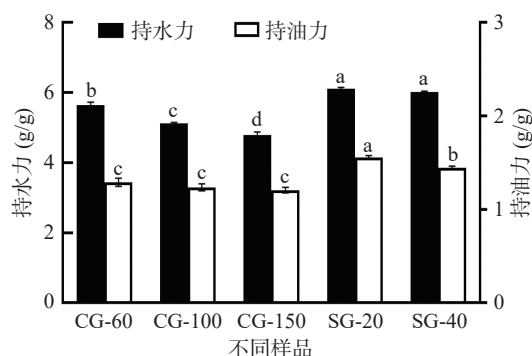


图5 不同粉碎处理裂褶菌粉体的持水力和持油力

Fig.5 Water holding capacity and oil holding capacity of *Schizophyllum commune* powder with different pulverization methods

触;另一方面,超微粉碎在破坏细胞结构时,亲水/亲油基团更充分暴露,膳食纤维的分子微晶结构在超微粉碎过程中也会发生一定程度的断裂,进而增强了持水/油能力。这与施建斌等<sup>[23]</sup>、薛淑静等<sup>[24]</sup>所得结果一致,但与史早等<sup>[25]</sup>、Zhao 等<sup>[26]</sup>的试验结果相反,与夏晓霞<sup>[27]</sup>的试验结果部分一致,这可能是由于试验材料营养成分含量的差异,尤其是富含不溶性膳食纤维和蛋白质的材料,超微粉碎可能破坏不溶性膳食纤维中的多糖链,也增加了蛋白质等的溶出率,从而导致了水合性质的差异。值得注意的是,超微粉碎的 SG-40 和 SG-20 相比,持水力、持油力均呈下降趋势,但持水力下降不显著 ( $P > 0.05$ ),说明超微粉碎对粉体水合性质的影响具有双面性,过度的超微粉碎是否利于粉体水合性质的改善尚待进一步研究。

## 2.4 不同粉碎处理对裂褶菌粉体营养成分的影响

对普通粉碎不同目数 (CG-60、CG-100、CG-150) 和超微粉碎不同时间 (SG-20、SG-40) 的裂褶菌粉体进行基本营养成分的测定,结果如表2所示。不同粉碎处理的裂褶菌粉体粗蛋白含量在 10.70~13.10 g/100 g 之间,粗多糖含量 3.27~10.47 g/100 g 之间,以超微粉碎的粗蛋白、粗多糖含量高于普通粉碎,且存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ),说明随着粉碎程度的深入,细胞结构被破坏,细胞内容物溶出效果增强。这与 Zhang 等<sup>[28]</sup>在香菇粉中蛋白质和多糖的溶出试验结果一致。随着粉碎程度的深入,不同粉碎处理的裂褶菌粉体总膳食纤维 (Total dietary fiber, TDF) 含量逐渐降低,且超微粉碎与普通粉碎之间存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ),超微粉中总膳食纤维含量显著低于普通粉碎,这可能是由于在物理剪切作用下造成大分子断裂造成的<sup>[16]</sup>。同时,随着超微粉碎时间的延长,裂褶菌粉体的可溶性膳食纤维 (Soluble dietary fiber, SDF) 含量显著增加,超微粉碎的 SG-40,其可溶性膳食纤维占总膳食纤维的比例达到了 6.44%,远远高于普通粉碎的 CG-60 中可溶性膳食纤维所占的比例 (0.21%),说明超微粉碎处理导致了部分不溶性膳食纤维 (Insoluble dietary fiber, IDF) 向 SDF 转化。Alam 等<sup>[29]</sup>及郭晓娟<sup>[30]</sup>分别在研究黑麦麸皮、



表 2 不同粉碎处理裂褶菌粉体的营养成分  
Table 2 Nutrient contents of *Schizophyllum commune* powder with different pulverization methods

样品	粗蛋白 (g/100 g)	粗多糖 (g/100 g)	总膳食纤维 (g/100 g)	可溶性膳食纤维 (g/100 g)
CG-60	10.70±0.11 <sup>d</sup>	3.59±0.07 <sup>c</sup>	77.0±0.87 <sup>a</sup>	0.16±0.02 <sup>c</sup>
CG-100	11.70±0.09 <sup>c</sup>	3.27±0.02 <sup>d</sup>	75.40±1.37 <sup>ab</sup>	0.17±0.01 <sup>c</sup>
CG-150	12.10±0.14 <sup>b</sup>	3.58±0.09 <sup>c</sup>	74.60±0.89 <sup>b</sup>	0.22±0.01 <sup>c</sup>
SG-20	12.90±0.13 <sup>a</sup>	9.17±0.07 <sup>b</sup>	68.30±1.11 <sup>c</sup>	1.42±0.09 <sup>b</sup>
SG-40	13.10±0.09 <sup>a</sup>	10.47±0.12 <sup>a</sup>	66.30±0.92 <sup>d</sup>	4.27±0.13 <sup>a</sup>

紫玉米的超微粉碎处理中,也得出了类似结论。超微粉碎后的裂褶菌粉作为一种高蛋白、高多糖、高膳食纤维的原料,在功能性产品的开发方面具有显著前景。

3 结论

本文采用超微粉碎和普通粉碎技术制备了不同粉碎强度的裂褶菌粉,系统探究了不同粉碎处理裂褶菌粉体的理化特性及营养成分含量。结果表明:通过超微粉碎处理,改善了粉体色泽及理化特性,粉体色泽更为白亮,超微粉碎后粉体振实密度降低,滑角、休止角增加,虽流动性变差,但仍属流动粉体。与普通粉碎粉体对比,超微粉碎粉体的膨胀力、持水力、持油力、水溶性指数得到显著提高( $P<0.05$ ),水合性质得到明显改善。同时,通过超微粉碎处理,粉体的粗蛋白、粗多糖、可溶性膳食纤维含量都得到了显著的增加( $P<0.05$ ),极大地提高了粉体的营养功能特性。但需注意过度超微粉碎会对粉体的色泽、流动性、填充性和水合性质产生负面影响,需在兼顾营养成分溶出的基础上,根据开发产品的需求进行适当强度的超微粉碎。综上,超微粉碎技术通过改善粉体的理化特性、促进营养成分的溶出,提升了加工和营养功能特性,研究结果可为裂褶菌资源综合开发利用提供一定的科学参考。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] 杨祝良, 王向华, 吴刚. 云南野生菌[M]. 北京: 科学出版社, 2022: 146. [YANG Z L, WANG X H, WU G. Mushrooms of Yunnan[M]. Beijing: Science Press, 2022: 146.]

[2] 马维, 狄红梅, 杨佼, 等. 不同品种裂褶菌营养品质分析[J/OL]. 分子植物育种: 1–15[2024-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230508.1655.020.html>. [MA W, DI H M, YANG J, et al. Analysis of nutritional quality of different varieties of *Schizophyllum commune*[J/OL]. Molecular Plant Breeding: 1–15 [2024-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230508.1655.020.html>.]

[3] 李朝东, 马布平, 陈孟迪, 等. 栽培裂褶菌与野生裂褶菌的营养效价研究[J]. 食药菌, 2019, 27(3): 180–184. [LI C D, MA B P, CHEN M D, et al. Study on nutritional efficacy of cultivated and wild *Schizophyllum commune* Fr.[J]. Edible and Medicinal

Mushrooms, 2019, 27(3): 180–184.]

[4] 贺凤, 黄龙花, 刘远超, 等. 裂褶菌多糖的研究进展[J]. 食用菌学报, 2016, 23(2): 88–93. [HE F, HUANG L H, LIU Y C, et al. Progress in *Schizophyllum commune* research[J]. Acta Edulis Fungi, 2016, 23(2): 88–93.]

[5] 马布平, 罗祥英, 刘书畅, 等. 裂褶菌研究进展综述[J]. 食药菌, 2017, 25(5): 303–307, 322. [MA B P, LUO X Y, LIU S C, et al. Advances in the research of *Schizophyllum commune* Fr.[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2017, 25(5): 303–307, 322.]

[6] BARBOSA-CÁNOVAS G V, ORTEGA-RIVAS E, JULIANO P, et al. Food powders: Physical properties, processing, and functionality[M]. Rivas: Springer Science & Business Media, 2006.

[7] 陈如. 超微粉碎对苹果全粉及其膳食纤维物化性质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. [CHEN R. Effect of ultra-fine grinding on the physicochemical properties of apple powder and its dietary fiber[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.]

[8] 石芳, 李瑶, 杨雅轩, 等. 不同干燥方式对松茸品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 141–147. [SHI F, LI Y, YANG Y X, et al. Effect of different drying methods on the quality of *Tricholoma matsutake*[J]. Food Science, 2018, 39(5): 141–147.]

[9] 王维涛, 牛犇, 刘瑞玲, 等. 气流超微粉碎对香菇柄粉末理化及溶出特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(23): 101–109. [WANG W T, NIU B, LIU R L, et al. Effects on physicochemical and dissolution characteristics of *Lentinus edodes* stem powder by jet milling[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(23): 101–109.]

[10] 蒋丽娜, 张秀清, 裴海生, 等. 超微粉碎对花椒籽粉品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 67–74. [JIANG L N, ZHANG X Q, PEI H S, et al. The effect of superfine grinding technology on the quality characteristics of *Zanthoxylum bungeanum* seed powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(8): 67–74.]

[11] 寇福兵, 夏晚霞, 薛艾莲, 等. 超微粉碎对板栗粉理化特性及结构特征的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(13): 155–162. [KOU F B, XIA X X, XUE A L, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical properties and structural characteristics of Chinese chestnut powder[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(13): 155–162.]

[12] 唐明明. 水芹的漂烫、超微粉碎及具有降血糖活性的固体饮料的工艺研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020. [TANG M M. Study on blanching, superfine grinding of water dropwort and processing technology of solid beverage with Hypoglycemic activity[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.]

[13] 罗白玲. 超微粉碎对咖啡果皮不溶性膳食纤维加工和功能特性的影响研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2021. [LUO B L. Effect of ultrafine grinding on processing and functional properties of insoluble dietary fiber from coffee peel[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.]

[14] 张亚坤. 银耳全粉的理化性质及加工特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017. [ZHANG Y K. Studies on the physicochemical and processing properties of *Tremella fuciformis* powder[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.]

[15] PHAT C, LI H, LEE D U, et al. Characterization of *Herici-um erinaceum* powders prepared by conventional roll milling and jet milling[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 145: 19–24.

[16] KANG M J, KIM M J, KWAK H S, et al. Effects of milling methods and cultivars on physicochemical properties of whole-wheat flour[J]. Journal of Food Quality, 2019, 2019: 3416905.

- [17] GAO W, 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: 2222–2255.
- [18] CARR R. Powder and granule properties and mechanics[J]. *Chemical Engineering*, 1976, 8: 13–88.
- [19] 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 processing[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(3): 95–100.]
- [20] 孟庆然. 超微粉碎对天然可食植物组织理化性质及营养素释放效率影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019. [MENG Q R. Study on the effects of superfine grinding on physicochemical properties and nutrients release efficiency of natural edible plant tissues[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.]
- [21] SOWBHAGYA H, SUMA P F, MAHADEVAMMA S, et al. Spent residue from cumin—a potential source of dietary fiber[J]. *Food Chemistry*, 2007, 104(3): 1220–1225.
- [22] MING J, CHEN L, HONG H, et al. Effect of superfine grinding on the physico-chemical, morphological and thermogravimetric properties of *Lentinus edodes* mushroom powders[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(12): 2431–2437.
- [23] 施建斌, 隋勇, 蔡沙, 等. 麦麸及麦麸膳食纤维常规粉碎和超微粉碎物化特性比较[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(1): 150–156. [SHI J B, SUI Y, CAI S, et al. Comparison of physicochemical properties of wheat bran and its dietary fiber subjected to conventional crushing and superfine grinding[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(1): 150–156.]
- [24] 薛淑静, 叶佳琪, 杨德, 等. 不同粒度香菇柄主要组分变化及与理化性能相关性研究[J]. *食品科技*, 2020, 45(6): 65–69. [XUE S J, YE J Q, YANG D, et al. Correlation analysis between key compositions and physicochemical properties of *Lentinula edodes* stipe with different particle size[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(6): 65–69.]
- [25] 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. [SHI Z, ZHANG F S, YANG J L, 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.]
- [26] ZHAO Y, WU X, WANG Y, et al. Comparing physicochemical properties of hawthorn superfine and fine powders[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(2): e12834.
- [27] 夏晓霞. 超微粉碎枣粉理化性质、结构特性及吸湿特性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2023. [XIA X X. Study on physicochemical properties, structural characteristics and moisture absorption characteristics of superfine jujube powder[D]. Chongqing: Southwest University, 2023.]
- [28] ZHANG Z, SONG H, PENG Z, et al. Characterization of stipe and cap powders of mushroom (*Lentinus edodes*) prepared by different grinding methods[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 109(3): 406–413.
- [29] ALAM S A, JÄRVINEN J, KIRJORANTA S, et al. Influence of particle size reduction on structural and mechanical properties of extruded rye bran[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(7): 2121–2133.
- [30] 郭晓娟. 低温冲击磨中紫玉米的粉碎机理及品质调控机制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024. [GUO X J. Study on the pulverization and quality control mechanism of purple corn in low temperature impact mill[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.]