

不同粉碎方法对杏鲍菇超微粉体物化性质的影响

刘素稳, 常学东, 李航航, 高海生

(河北科技师范学院食品科技学院, 河北秦皇岛 066600)

摘要: 将杏鲍菇帽柄分开切成片干燥后, 分别采用三种不同的粉碎方式获得了六种粉体。比较研究了气流粉碎与研磨粉碎、剪切粉碎对菌粉的特性影响。与剪切和研磨粉碎相比, 气流粉碎更有效的减小粉体的粒径(帽 14.16 和柄 13.16 μm)。菌帽比菌柄拥有较高的灰分、脂肪和蛋白质(18.34 g/100 g, 干基)含量。相同材料(帽或柄), 和其他粉碎相比, 气流粉碎粉体的容积密度、比表面积、流动性、水溶性指数和蛋白质及多糖溶出率均较大($p < 0.05$), 但持水性和溶胀率较低。采用相同的超微粉碎方法获得的杏鲍菇帽的粉体比柄的粉体拥有更高水溶性指数、膨胀率、容积密度、多糖溶出率。相同的湿度环境下, 气流粉碎粉体的水分活度(A_w)小于研磨粉碎粉体和剪切粉碎粉体, 菌帽粉体比菌柄粉体 A_w 低。杏鲍菇不同粉体在 25 $^{\circ}\text{C}$ 时的等温吸湿曲线最优回归方程为 Oswin 模型, 其拥有最高的回归系数(0.9902~0.9943)和最低的误差。

关键词: 超微粉碎; 杏鲍菇; 粉体; 物理化学特性; 数学模型

文章编号: 1673-9078(2013)11-2722-2727

Effects of Micronization Methods on Physicochemical Properties of *Pleurotus eryngii* Powders

LIU Su-wen, CHANG Xue-dong, LI Hang-hang, GAO Hai-sheng

(Department of Food Engineering, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066600, China)

Abstract: The effects of micronization methods, such as shear pulverization, mechanical milling and jet milling, on the physicochemical properties of *Pleurotus eryngii* powders were investigated. Six powders from dried mushroom cap and stipe by the three grinding methods were prepared. Compared with shear pulverization and mechanical milling, jet milling effectively reduced particle size (cap 14.16 μm and stipe 13.16 μm) and brought about a narrow and uniform particle size distribution. Cap powders possessed higher protein (18.34 g/100 g, dry basis), fat and ash contents. With the same material (cap or stipe), powders from jet milling had higher values in specific surface area, bulk density, fluidity, water soluble index and solubility of protein and polysaccharide ($p < 0.05$), but lower values in the water holding and swelling capacities than other two processed powders. With the same grinding method, cap powders owned higher values in water soluble index, swelling capacity, bulk density, and solubility of polysaccharide than stipe powders. Under the same humidity environment, the water activity (A_w) of jet milling powder was less than the mechanical milling and shear pulverization powder, and a_w of cap was less than that of stipe. The Oswin model was considered as the optimal regression equation of moisture sorption isotherms within different kinds of *Pleurotus eryngii* powders at 25 $^{\circ}\text{C}$, with the highest value of regression coefficient (0.9902~0.9943) and lowest value of relative errors.

Key words: micronization; *Pleurotus eryngii*; milling Powder; physicochemical properties; mathematical model

杏鲍菇(*Pleurotus eryngii*), 又名刺芹侧耳, 在欧洲南部、亚洲中部和非洲南部有广泛栽培, 是近年来开发栽培成功的集食用、药用、食疗于一体的珍稀食用菌新品种^[1]。由于其良好的风味在亚洲东部成为很受欢迎的商业品种^[2]。其含水量较高(多数食用菌子实体大

于 85 g/100 g)^[3], 并富含蛋白质、碳水化合物、维生素及钙、镁、铜、锌等矿物质。杏鲍菇多糖在亚油酸模型系统中有抗氧化功能, 并具有抗癌、降血脂等作用^[4]。

物料经超微粉碎后能有效改善粉体的颗粒粒度及结晶结构, 因此超微粉体具有独特的物理和化学性质, 如良好的溶解性、分散性、吸附性、化学活性等, 是一种理想的食品加工手段^[5-6]。另外, 粉碎工艺和原料不同, 得到的粉体性质也有差异。超微粉碎有利于原料中营养成分的释放与吸收; 超微粉产品的食品品质及加工性能得到了显著的改善, 强化了功能性成分的溶出, 提高了吸收利用率^[7]。

收稿日期: 2013-07-22

基金项目: 唐山市科学技术研究与发展计划 (09120202A-7); 秦皇岛市科技支撑计划 (2012022A008)

作者简介: 刘素稳 (1981-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为农产品加工与食品营养

通讯作者: 常学东 (1967-), 男, 教授, 研究方向为农产品加工利用

目前,杏鲍菇的食用多集中在干制、腌渍、速冻和鲜食^[1]。为使杏鲍菇有更多的用途,加快其产业的发展,干制蘑菇还可以深加工成粉体,作为功能性食品添加剂加入到多种食品中。粉体的物理化学性质决定了其被综合利用的程度,而粉体的特性与粒度大小和成粉工艺紧密相关。粉碎工艺一般有普通粉碎和超微粉碎^[2],经超微粉碎后的杏鲍菇具有普通粉碎没有的特性,也许有更大的利用价值。因此,本实验在前人的研究基础上,研究了机械剪切、研磨和气流超微粉碎对杏鲍菇菌柄和帽的物理化学性质的影响,并加以比较,为杏鲍菇的加工技术研究和推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

杏鲍菇:购自农贸市场,新鲜(含水量达 $86\pm 2\%$ 以上),无虫害、菇柄洁白、菇形完整。

1.2 主要仪器

723型分光光度计:上海光谱仪器有限公司;8411型电动振筛机:浙江上虞市金鼎标准筛具厂;ZM100超离心研磨粉碎机,德国莱驰仪器设备;JFSD-70实验室粉碎磨,上海嘉定粮油有限公司;KYKY-2800SEM扫描电子显微镜,中国科学院北京科学仪器研究中心;LA-920型粒度仪,日本HORIBA公司;QLM-80K气流磨,浙江省上虞市和力粉体有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 超微粉体的制备



图1 杏鲍菇子实体分区照片

Fig.1 Photograph of the fruit body of *Pleurotus eryngii* and its divisions

选用新鲜、无虫害、完整的杏鲍菇,清洗去掉表面杂质,称重。然后将其帽和柄分开,见图1。均匀切成3 mm左右的薄片,放于恒温干燥箱中,45 °C烘13~16 h,至干燥到水分10%以下。将烘干的柄和帽分别用研磨、剪切、气流三种不同的方法粉碎,得到六种不同

的粉体分别记作MMS (mechanically milled stipe), MMC (mechanically milled cap), SPS (shear pulverized stipe), SPC (shear pulverized cap), JMS (jet milled stipe), JMC (jet milled cap)。

1.3.2 杏鲍菇化学成分测定

水分、粗蛋白,脂肪,灰分、总糖的测定采用AOAC法^[8],其编号分别为925.09、920.87、920.85、923.03和991.43。

1.3.3 粒度分析与微观结构观察

用激光粒度分析仪测定粉体粒度的大小和分布。粉体样品经导电处理(喷金)后于扫描电镜下放大1000倍,观察其表面结构^[9]。

1.3.4 容积密度的测定

称取六种不同样品粉体0.5 g (M)于10 mL量筒中,震荡直至粉体体积恒定,读取体积V^[10]。容积密度采用如下公式:

$$\rho = m/v \text{ (g/mL)}$$

1.3.5 休止角和滑角的测定

休止角的测定方法依照 Zhang et al.测定^[11]。将六种杏鲍菇粉体经漏斗垂直流至平板上,漏斗的底部与平板的垂直距离H为1 cm,流下来的蘑菇粉体在平板上形成圆锥体,测得直径2R,休止角为 $\alpha = \arctan H/R$ 。称取5 g粉体置于玻璃平板上,然后将平板倾斜至粉体移动,玻璃平板提起的高度为H,滑角为 $\beta = \arcsin H/L$ 。

1.3.6 水合性能的测定

1.3.6.1 持水性 (Water holding capacity)

持水性(WHC)测定^[3]:将干净的离心试管称重(M, g),倒入5 g (M₁, g)粉体样品,然后粉体与水以0.05/1 (m/V)的比例混匀,将混合好的溶液置60 °C水浴锅加热30 min,随后立即放入冰水浴冷却30 min,然后以5000 r/min速度离心20 min。离心后将上层液去掉重新称重(M₃, g),持水性采用如下公式: $WHC(g/g) = (M_3 - M)/M_1$

1.3.6.2 水溶性指数 (Water solubility index)

水溶性指数(WSI)测定参照Zhang^[3],称不同的粉体样品 (S₁, g),然后粉体与水以0.02/1 (m/V)的比例混匀,将混合好的溶液置80 °C水浴锅加热30 min,然后在6000 r/min速度下离心10 min。离心后将上层液放到蒸发皿中称重(S₂, g),在103±2 °C干燥,将干燥好的样品与皿称重(S₃, g),水溶性指数采用如下公式: $WSI(\%) = (S_3 - S_2)/S_1 \times 100\%$ 。

1.3.6.3 溶胀度 (Swelling capacity)

溶胀度(SC)测定参照Lecumberri^[12]。将1 g (M)粉体样品慢慢倒入量筒中,记体积V₁,倒入10 mL蒸馏

水用力摇晃直至混匀。将混匀的溶液置于25℃水浴锅中加热24 h,使粉末尽可能膨胀,记录湿粉的体积 V_2 ,溶胀度采用如下公式: $SC(\text{mL/g})=(V_2-V_1)/M$ 。

1.3.7 可溶性蛋白质与多糖溶出率的测定

称取样品0.5 g放于预先称重的离心管中,加入15 mL蒸馏水,摇匀。将混匀的溶液置于水浴锅中(蛋白质溶出率测定温度为60℃,多糖溶出率为80℃),分别于0、30、60、90、120 min取出试管,放冷、称重、补加蒸馏水减失的质量。静置后离心15 min(转速为5000 r/min),取上清液待用。上清液中蛋白质含量采用考马斯亮蓝法,多糖含量测定采用苯酚-硫酸法。蛋白质溶出率(%)为上层液中蛋白质含量占样品蛋白质的百分比,多糖溶出率为上层液中多糖含量占样品多糖的百分比^[3]。

1.3.8 水分吸湿等温线的测定

水分吸湿等温线的测定参考Lee and Lee^[3],样品前处理:将各超微粉样品在均湿器中放置48 h以达到水分均一,然后在康微皿外皿中各加10 mL蒸馏水,内皿中加入已经干燥好的超微粉体样品,涂上凡士林,密封好后统一放在25℃恒温箱中,每天测其水分含量和水分活度的变化。水分含量的测定采用直接烘干法,水分活度的测定采用扩散法。在预先准确称重的康微皿中,准确称取约1.0 g超微粉体,迅速放入康微皿内室中。在康微皿的外室中预先放入NaOH(A_w 0.070)、

MgCl₂(A_w 0.331)、Mg(NO₃)₂(A_w 0.528)、BaCl₂(A_w 0.752)、KBr(A_w 0.807)、NaCl(A_w 0.901)、K₂Cr₂O₇(A_w 0.986)标准饱和溶液,加盖密封。在25℃下放置2.5 h,然后取出,迅速称量,分别计算各样品每g质量的增减数。以各标准饱和溶液在25℃的 A_w 为横坐标,每克样品质量增减数为纵坐标在方格坐标纸上作图,将各点连成一条直线,此线与横轴的交点即为所测样品的 A_w 值。

1.4 统计分析

所有实验数据均进行三次重复,测定结果以平均值±标准偏差(SD)表示。不同平均值的比较采用新复极差法,采用SPSS 17.0统计分析软件。结果的显著性为 $p<0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 化学组分含量

杏鲍菇化学组分含量如表1所示。帽和柄除水分无明显差异($p>0.05$),其余组分含量差异显著($p<0.05$)。杏鲍菇帽中蛋白质含量显著高于柄,高达18.34%。帽中脂肪、和总糖含量显著高于柄,灰分含量也较高,这是因为帽中含有丰富的钾、钠、钙、镁、铁锌等矿物元素。因此可以得出,帽中营养成分优于柄。

表1 杏鲍菇粉基本化学组分($n\pm SD$)

Table 1 The composition of *Pleurotus eryngii* powders

| | 水分/(10 ⁻² g/g) | 脂肪/(10 ⁻² g/g) | 灰分/(10 ⁻² g/g) | 总糖/(10 ⁻² g/g) | 蛋白质/(10 ⁻² g/g) |
|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 杏鲍菇柄 | 7.06±0.164 ^a | 1.31±0.113 ^b | 6.16±0.388 ^b | 43.9±1.312 ^b | 13.05±0.117 ^b |
| 杏鲍菇帽 | 7.08±0.083 ^a | 1.95±0.451 ^a | 7.35±0.605 ^a | 47.7±2.984 ^a | 18.34±0.402 ^a |

注: a-b: 同一列中数值上不同的小写字母上标说明其差异性显著($p<0.05$), $n=3$; 表中数据除了水分,其他以干基计算。

2.2 粒度分析

表2 超微粉碎方法对杏鲍菇粉体粒径分布的影响

Table 2 Effect of grinding methods on particle size of *Pleurotus eryngii* powders^m

| 粉末 | D0.1/ μm | D0.5/ μm | D0.9/ μm | 比表面积/(cm ² /cm ³) | 跨度/span |
|-----|---------------------|---------------------|---------------------|--|---------|
| JMC | 4.28 | 14.16 | 35.81 | 6311.81 | 2.23 |
| JMS | 4.35 | 13.16 | 32.25 | 6532.23 | 2.12 |
| SPC | 13.20 | 24.23 | 50.42 | 3274.03 | 1.54 |
| SPS | 10.95 | 22.60 | 48.98 | 3375.52 | 1.68 |
| MMC | 11.96 | 24.43 | 50.54 | 3287.11 | 1.58 |
| MMS | 10.99 | 24.88 | 47.93 | 3231.34 | 1.48 |

注: 跨度=(D_{0.9}-D_{0.1})/D_{0.5}, m值为三次平均值。

表2为杏鲍菇六种不同粉体的粒度分析。其结果由D 0.1、D 0.5、D 0.9表示其分布特征(D 0.1、D 0.5、D 0.9分别表示粉体粒径小于某一值时累积率为10%、50%、90%)，其中D0.5表示中值粒径。

通过粒度分析仪可得相同材料(杏鲍菇帽或柄)采用气流粉碎所得粉体(D 0.5为14.16和13.16)具有比剪切粉碎、研磨粉碎所得粉体更小的中值粒径,同时具有较大的比表面积,这与蛋白质、多糖等的溶出率呈现正相关的关系。剪切粉碎和研磨粉碎粉体相比并无较大差异。另一方面,采用相同的粉碎方法,不同种原料(杏鲍菇帽或柄)的粉体,在中值粒径,比表面积等方面的差异相比不同粉碎方法的差距要小。结果显示,气流粉碎粉体粒度跨度较大(2.12和2.23),但多集中于25 μm 以下,减小颗粒粒度会使比

表面积增大。

2.3 扫描电镜分析

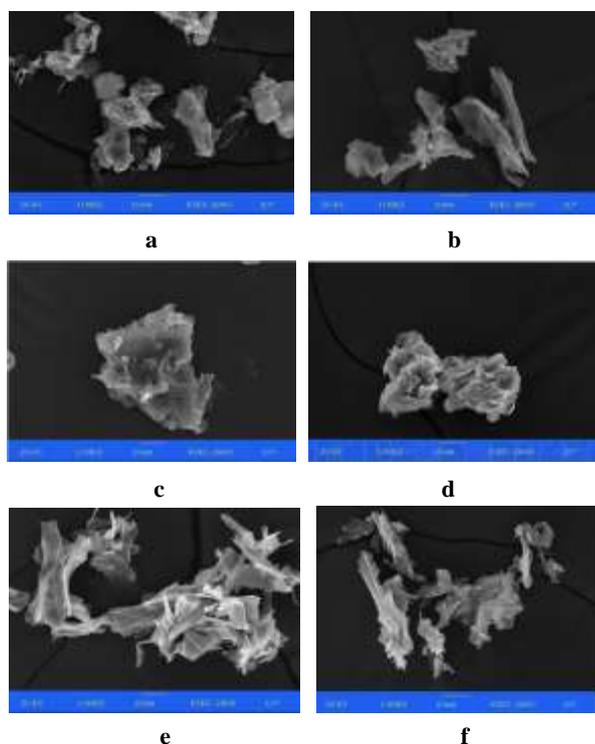


图2 杏鲍菇不同超微粉碎粉体扫描电镜图片

Fig.2 Scanning electron microscope photographs of grinding methods on *Pleurotus eryngii* powders

注：a-杏鲍菇 SPC 放大 1000 倍，b 杏鲍菇 SPS 放大 1000 倍，c-杏鲍菇 MMC 放大 1000 倍，d 杏鲍菇 MMS 放大 1000 倍，e-杏鲍菇 JMC 放大 1000 倍，f-杏鲍菇 JMS 放大 1000 倍。

图 2 为杏鲍菇帽和柄经剪切、研磨、和气流粉碎得到的放大 1000 倍的扫描电子显微镜图片。由图可以看出，气流粉碎比剪切、研磨粉碎得到的粉体表面更加崎岖，多层，比表面积较大，具有较强的聚合力和吸附能力，能有效的吸附在食品表面。剪切粉碎粉体表面层次较少，且研磨粉碎粉体较圆，这两者比表面积相对较小。这和表 2 的数据吻合。由相同粉碎方法粉碎帽与柄得到的粉体表面未观察到较大差别。

2.4 容积密度、休止角和滑角

不同粉碎方法获得的杏鲍菇粉体的容积密度、休止角和滑角如表3所示。相同材料（杏鲍菇柄或帽）经不同的粉碎方法获得的粉体容积密度存在显著差异（ $p < 0.05$ ），其顺序为研磨粉碎<剪切粉碎<气流粉碎。原因可能是由于较低的粒径与周围有较大的接触面和更加均匀的粒径，这将减少颗粒之间的孔隙空间而导致密度值增加^[14]。

休止角、滑角通常用来描述流动性粉体。由表 3

可以看出，气流粉碎与剪切粉碎和研磨粉碎所得样品粉体在休止角、滑角方面数值较小，同一种粉碎方法粉碎的不同粉体（帽或柄），菌帽粉体的休止角与滑角要优于菌柄粉体。气流粉碎制得的两种粉体在滑角方面有显著差异（ $p < 0.05$ ）。结合表 2，可得到这样的结论：粉末休止角越小，流动性越好，原因可能是由于粒径分布和跨度引起的，较小的粒子可以填充在一些较大的颗粒空隙中使流动性减弱^[3]。流动性越好，因而表面聚合力也越大，吸附性越好，产品质量更加稳定，混合均匀后不易分层。

表3 不同的粉碎方法对杏鲍菇超微粉体流动性的影响

Table 3 Effect of grinding methods on bulk density, repose and slide angles of *Pleurotus eryngii* powders^m

| 粉体 | 休止角/ $^{\circ}$ | 滑角/ $^{\circ}$ | 容积密度/(g/mL) |
|-----|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
| MMS | 47.70±0.821 ^a | 37.53±0.521 ^a | 0.26±0.019 ^c |
| SPS | 46.45±1.091 ^b | 34.88±0.372 ^{bc} | 0.25±0.014 ^c |
| JMS | 43.84±1.004 ^c | 31.33±0.632 ^d | 0.34±0.017 ^a |
| MMC | 47.98±2.042 ^a | 36.67±1.194 ^{ab} | 0.27±0.012 ^c |
| SPC | 48.47±1.284 ^a | 37.26±1.513 ^a | 0.31±0.008 ^b |
| JMC | 43.07±1.213 ^c | 34.06±0.371 ^c | 0.34±0.037 ^a |

注：a-b：同一列中数值上不同的小写字母上标说明其差异性显著（ $p < 0.05$ ），m 值为三次平均值±标准偏差。

2.5 水合性质

表4 不同粉碎方法对杏鲍菇粉体水合性质的影响

Table 4 Effect of grinding methods on hydration properties of *Pleurotus eryngii* powders^m

| 粉末 | 水合性质 | | |
|-----|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | WHC/(g/g) | WSI/% | SC/(mL/g) |
| SPS | 5.45±0.056 ^a | 39.71±3.290 ^c | 9.83±0.275 ^{ab} |
| MMS | 5.10±0.215 ^b | 43.47±2.661 ^b | 9.15±0.219 ^{cd} |
| JMS | 3.95±0.082 ^d | 51.47±1.478 ^a | 8.01±0.212 ^e |
| SPC | 4.99±0.141 ^b | 40.70±1.302 ^c | 9.95±0.536 ^a |
| MMC | 5.07±0.185 ^b | 43.86±3.857 ^b | 9.36±0.144 ^{bc} |
| JMC | 4.65±0.139 ^c | 52.25±1.577 ^a | 8.78±0.200 ^d |

注：a-b：同一列中数值上不同的小写字母上标说明其差异性显著（ $p < 0.05$ ），m 值为三次平均值±标准偏差。

超微粉体的水合性质主要包括表4中所给的持水性（WHC）、水溶性指数（WSI）、膨胀度（SC）。同一种材料（杏鲍菇帽或柄）经不同的粉碎方法得到的粉体，差异性显著（ $P < 0.05$ ）；气流粉碎粉体在持水性和膨胀度方面低于研磨粉碎和剪切粉碎，而在水溶性指数上显著高于剪切和研磨粉碎所得粉体（ $P < 0.05$ ）。在 WSI 方面剪切粉碎<研磨粉碎<气流粉碎。相同粉碎方法所得的杏鲍菇帽粉体和柄粉体在 WSI 方面无显著差

异 (P>0.05)。从整体来看,杏鲍菇菌帽粉体在WSI和SC方面明显高于菌柄。这和各粉体中所含的化学组分,特别是蛋白质及水溶性纤维素含量有紧密的联系。

2.6 可溶性蛋白质与多糖溶出率

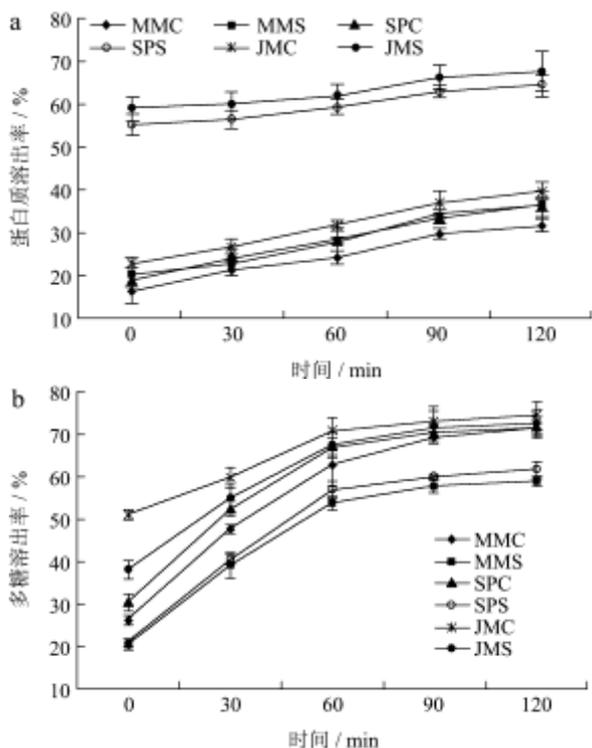


图3 不同粉碎方法对杏鲍菇蛋白质和多糖累积溶出率的影响

Fig.3 Effect of different grinding methods and soaking time on solubility of protein(A) and polysaccharide(B) of different *Pleurotus eryngii* powders

注: a: 蛋白质累积溶出率, b: 多糖累积溶出率。

图3表示不同粉体的蛋白质和多糖累计溶出率与浸泡时间的曲线图。由图3a和b可以看出,蛋白质的累计溶出率与浸泡时间基本呈线性关系。相同粉碎方法所获得不同(菌帽或柄)粉体菌柄粉体高于菌帽粉体的蛋白质溶出率 (P<0.05), 而多糖溶解性则相反, 原因可能是菌帽粉体多糖比菌柄粉体中多糖具有较好的溶解性, 而帽粉体蛋白质含量高于柄粉体, 造成提取浓度较大, 蛋白质的溶解性达到平衡时比蛋白质低的粉体中有更多的蛋白质剩余^[3]。对于不同粉碎方法所得相同材料的粉体, 蛋白质和多糖溶出率为气流粉碎>剪切粉碎>研磨粉碎, 表明溶出率与粉体比表面积呈现正相关关系, 粒度大小对溶出率有直接影响, 符合 Zhang 等^[3]人对香菇研究结果。

2.7 水分吸湿等温线

为给杏鲍菇粉体的干燥和贮藏条件的确定提供理论依据, 试验测定了其在室温(25℃)下的水分吸附

等温线。结果如图4所示, 同一种原料(帽或柄)经不同的粉碎方法得到的粉体, 在其含水量相同的情况下, 气流粉碎Aw小于研磨粉碎粉体和剪切粉体Aw; 使用同一种材料(帽或柄)在相同平衡湿度时, 菌帽粉体拥有更低的Aw, 这和Zhang等^[3]人研究的香菇一致, 原因可能是杏鲍菇帽和柄化学成分不同, 数据见表1。结果表明, 在储藏条件相同的情况下, 气流磨制得的粉体比研磨粉碎和剪切粉碎得到的粉体稳定, 耐储藏, 这和粉体粒度有关, 帽粉体较柄粉体耐储藏。

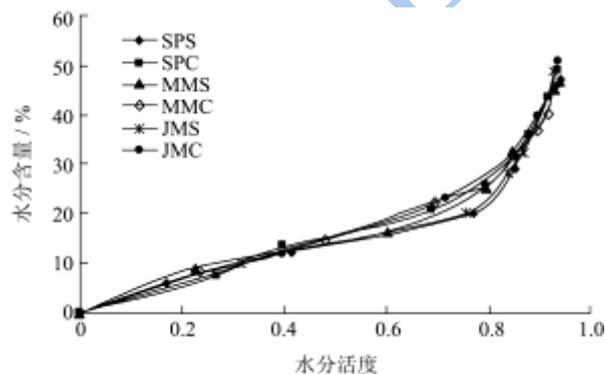


图4 不同粉碎方法对杏鲍菇帽和柄粉体水分吸湿等温线的影响

Fig.4 Effects of different grinding methods on moisture sorption isotherm characteristics of cap and stipe powders (*Pleurotus eryngii*)

表5 杏鲍菇粉体水分吸附等温方程拟合(相对湿度范围10~98%)

Table 5 Mathematical expressions, coefficients of the determination (R²), mean relative percentage errors (E) of selected sorption models for *Pleurotus eryngii* powders at a relative humidity range of 10~98 %^a

| 模型 | 数学表达式 | R ² | E% |
|---------|--|----------------|---------------|
| Halsey | $a_w = \exp(-a/m^n)$ | 0.9387~0.9832 | 4.26~16.47 |
| BET | $m = ab a_w / [1 + (b-2)a_w - (b-1)k^2]$ | 0.8083~0.9064 | 6.94~14.92 |
| Kuhn | $m = a / \ln a_w + b$ | 0.9382~0.9643 | 3.62~8.15 |
| Bradley | $m = \ln(1/a_w) / K_2 K_1$ | 0.9313~0.9684 | 3.88~17.12 |
| Caurie | $\ln m = \ln A - r a_w$ | 0.9313~0.9786 | 0.38~2.76 |
| Chung-p | $\ln a_w = -A \cdot \exp(-bm)$ | 0.9412~0.9799 | -3.46~(-0.73) |
| Oswin | $m = k_0 [a_w / (1 - a_w)]^{n_0}$ | 0.9902~0.9943 | -1.56~(-0.50) |

注: a: R²和E由下列公式确定:

$$R^2 = \frac{\sum (m_i - m_{pi})^2}{\sum m_i^2 \sum m_{pi}^2}, \quad E = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{m_{pi} - m_i}{m_i} \right)$$

n为实验观察的样品数量; m_i: 为样品水分含量, m_{pi}: 为模型预测值。

通过计算机软件(SPSS 17.0)处理上述试验数据获得了杏鲍菇不同粉体在25℃时的等温吸湿曲线的回归方程(见表5)。拟合优度采用回归系数(R²)和平

均值相对百分误差 (E) 表示, 这些模型是基于几个计算和描述食品吸附等温线的模型。研究发现, 除了 BET 模型外, 其他模型均显示了良好的拟合度, R^2 均超过 0.9313。在拟合这些等温吸湿曲线时发现, Bradley 和 Halsey 模型回归拟合曲线在两端的符合度明显降低, 而 R^2 值变化幅度却很小。综合考虑 R^2 和 E%, 选择模型 Oswin 为杏鲍菇 (帽和柄) 粉体的数学吸湿等温模型, 该数学模型对杏鲍菇粉体吸湿等温线有较高的拟合度和较低的误差, 不同杏鲍菇粉体在 Oswin 模型中 R^2 为 0.9902~0.9943。E% 值为 -1.56~(-0.498)。Oswin 回归模型的参数见表 6。这些回归方程也可以用于杏鲍菇粉体的 A_w 与含水量的插值计算。

表 6 不同杏鲍菇粉体的 Oswin 模型 ($m=k_0[a_w/(1-a_w)]^{n_0}$) 回归参数

Table 6 Nonlinear regression parameters of Oswin model ($m=k_0[a_w/(1-a_w)]^{n_0}$) for different *Pleurotus eryngii* powders

| 杏鲍菇粉 | 参数 | | |
|------|-------|-------|--------|
| | k_0 | n_0 | R^2 |
| SPS | 12.58 | 0.49 | 0.9902 |
| SPC | 15.19 | 0.44 | 0.9940 |
| MMS | 14.24 | 0.46 | 0.9943 |
| MMC | 15.56 | 0.42 | 0.9916 |
| JMS | 12.33 | 0.51 | 0.9934 |
| JMC | 13.36 | 0.48 | 0.9938 |

3 结论

本实验将杏鲍菇帽柄分开, 采用气流粉碎, 剪切粉碎、研磨粉碎三种不同粉碎方法, 得到六种不同的超微粉体, 比较了其理化性质。在物料特性中粒度起着主要作用, 杏鲍菇粉体的粒径越小, 比表面积越大, 其粉体流动性及水溶性指数等均有显著增加, 蛋白质, 多糖的溶出率等均有很大改善。气流粉碎相比剪切和研磨粉碎在减小杏鲍菇粒度方面占有优势, 应用于食品加工工艺中, 可以提高营养物质的利用率。杏鲍菇帽柄拥有更高的脂肪、灰分及蛋白质, 因此具有较高的营养价值。在储藏条件相同的情况下, 气流磨制得的粉体比研磨粉碎和剪切粉碎得到的粉体稳定, 耐储藏, 这和粉体粒度有关, 帽粉体较柄粉体耐储藏, 这些指标的改善加速了杏鲍菇在食品中的应用。

参考文献

[1] Yuki haru Ogawa, Akiko Miyazawa, Nami Yamamoto, et al. Compression properties of the fruit body of king oyster mushroom *Pleurotus eryngii* [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2012, 47: 2487-2492

[2] Mau J L, Lin Y P, Chen P T, et al. Flavor compounds in king oyster mushrooms *Pleurotus eryngii* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46: 4587-4591

[3] Zhang Zipei, Song Huige, Peng Zhen, et al. Characterization of stipe and cap powders of mushroom (*Lentinus edodes*) prepared by different grinding methods [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109: 406-413

[4] Ho Young Jung, In Young Bae, Suyong Lee, et al. Effect of the degree of sulfation on the physicochemical and biological properties of *Pleurotus eryngii* polysaccharides [J]. Food hydrocolloids, 2011, 25: 1291-1295

[5] Youna Hemery, Marc Chaurand, Ulla Holopainen. Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients, part I: Influence of ultra-fine grinding [J]. Journal of Cereal Science, 2011, 53: 1-8

[6] Wu Gang cheng, Zhang Min, Wang Yingqiang. Production of silver cap bone powder using superfine gring technology: suitable production parameters and its properties [J]. Journal of food engineering, 2012, 109: 730-735

[7] Chau C F, Wang Y T, Wen Y L. Different micronization methods significantly improve the functionality of carrot insoluble fiber [J]. Food Chemistry, 2007, 100: 1402-1408

[8] AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 16th ed. Washington DC, USA: AOAC International. 1995

[9] Zhao X Y, Ao Q, Du F L, et al. Surface characterization of ginger powder examined by X-ray photoelectron spectroscopy and scanning electron microscopy [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2010, 79: 494-500

[10] Bai Y X, Li Y F. Preparation and characterization of crosslinked porous cellulose beads [J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 64: 402-407

[11] Zhang M, Zhang C J, Shrestha S. Study on the preparation technology of superfine ground powder of *Agrocybe chaxingu* Huang [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 67: 333-337

[12] Lecumberri E, Mateos R, Izquierdo-Pulido M, et al. Dietary fibre composition, antioxidant capacity and physico-chemical properties of a fibre-rich product from cocoa (*Theobroma cacao* L.) [J]. Food Chemistry, 2007, 104: 948-954

[13] Lee J H, Lee J M. Moisture soption isotherm characteristics of chaga mushroom powder as influenced by particle size [J]. Food Science and Biotechnology, 2007, 16: 154-158

[14] Zhao X Y, Yang Z B, Gai G S, et al. Effect of superfine grinding on properties of ginger powder [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91: 217-222

现代食品科技