

添加不同粉碎处理香菇粉对面团流变学特性的影响

张月巧¹, 陈 龙¹, 卢可可¹, 明 建^{1,2,*}

(1. 西南大学食品科学学院, 重庆 400715; 2. 西南大学 国家食品科学与工程实验教学中心, 重庆 400715)

摘 要: 本实验以香菇为原材料, 研究4种不同粉碎处理香菇伞粉和柄粉对面团流变学特性的影响。结果表明: 超微粉碎能显著提高香菇伞粉和柄粉中的可溶性膳食纤维含量。与对照组相比, 混合面团的吸水率和弱化度升高, 形成时间、稳定时间和粉质质量指数减少, 使面团出品率上升, 面筋筋力下降; 香菇粉的添加量越大, 对面团粉质特性的弱化程度越大; 在相同添加量下, 香菇粉的粒径越小, 面团的形成时间和稳定时间越长。与对照面团的拉伸特性相比, 混合面团的能量、延伸性下降, 恒定变形拉伸阻力、拉伸比例上升, 说明香菇粉的添加对于面团的拉伸特性有较强的负面作用。综合比较, 添加0.25%纳米超微粉碎香菇粉的面团拉伸特性最优。

关键词: 香菇粉; 面团; 超微粉碎; 流变学特性

Effects of Addition of *Lentinus edodes* Powders Processed by Different Grinding Methods on Rheological Properties of Wheat Dough

ZHANG Yueqiao¹, CHEN Long¹, LU Keke¹, MING Jian^{1,2,*}

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. National Food Science and Engineering Experimental Teaching Center, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In this study, the rheological properties of wheat doughs made with the addition of *Lentinus edodes* powders were evaluated. The results showed that the content of soluble dietary fiber in the cap and stalk was significantly increased by superfine grinding. Compared with the control group (with no added *Lentinus edodes* powder), the water absorption and weakening degree of the mixed dough were increased while the dough development time and stability time, and farinograph quality number were decreased. In addition, an increase in dough yield and a decrease in gluten strength were observed. The larger the addition amount of *Lentinus edodes* powders was, the worse dough farinograph characteristics were. At the same amount of *Lentinus edodes* powders, when the powder particle size was smaller, the dough development and stability time were longer. Compared with the control group, the energy and extensibility of the mixed dough were decreased while the tensile resistance and stretching ratio were increased. Therefore, addition of *Lentinus edodes* powders had a strong negative effect on dough extensograph characteristics. However, addition of 0.25% nano-micronized powder had the most beneficial effect.

Key words: *Lentinus edodes* powders; wheat dough; ultrafine comminution; rheological properties

中图分类号: TS231.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2015) 03-0012-06

doi:10.7506/spkx1002-6630-201503003

香菇 (*Lentinus edodes* (Berk.) sing) 又名香蕈、冬菇、花菇等, 素有“山珍”之称, 香菇中 (特别是香菇柄) 含有丰富的膳食纤维, 具有很高的食用和药用价值^[1-4], 香菇柄占香菇总质量的30%左右^[5], 但因其粗韧难嚼而没有被充分地开发和利用。现代食品加工技术, 特别是超微粉碎技术的应用, 能很好地解决这一难题。

超微粉碎技术是利用机械或流体动力对物料进行碾磨、冲击、剪切等, 将3 mm以上的物料颗粒粉碎至10~25 μm以下的微细颗粒^[6]。应用超微粉碎技术加工香菇不仅不会破坏其中原有的营养成分, 还可使香菇颗粒粒度更加微小, 使其具有一定的表面活性, 呈现出高溶解性、高吸附性、高流动性等流变学特性^[7-8]。食品流变

收稿日期: 2014-10-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863计划) 项目 (2011AA100805-2); 国家自然科学基金面上项目 (31271825); 重庆市科技攻关计划项目 (CSTC 2011AC1010)

作者简介: 张月巧 (1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品化学与营养学。E-mail: 1275801891@qq.com

*通信作者: 明建 (1972—), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品化学与营养学。E-mail: mingjian1972@163.com

学是研究食品原料、半成品以及成品的变形和流动的科学,主要解决和处理表现上连贯的黏性物质的变形问题^[9-10]。而面团流变学一直是食品工业领域研究的重点。

本实验以香菇伞和香菇柄为原料,研究添加普通粉碎、剪切超微粉碎、气流超微粉碎和纳米超微粉碎4种不同粉碎处理后的香菇伞粉和柄粉对面团粉质特性和拉伸特性的影响,反映面团流变学特性的变化,为香菇功能面制品的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜香菇,购于重庆市北碚区天生农贸综合批发市场;小麦面粉(A4),购于重庆顶益食品有限公司。

氯化钠、硫酸铜、硫酸钾、氢氧化钠(分析纯) 成都科龙化工试剂厂;浓硫酸、无水乙醇、盐酸、乙酸(分析纯) 重庆川东化工有限公司;石油醚(分析纯) 天津市致远化学试剂有限公司;硅藻土(化学纯) 上海市奉贤奉城试剂厂;高温 α -淀粉酶、蛋白酶、糖化酶 美国Sigma公司;2-(N-吗啉代)乙烷磺酸(分析纯) 北京拜尔迪生物技术有限公司。

1.2 仪器与设备

DHG-9140A型电热恒温鼓风干燥箱 上海齐欣科学仪器有限公司;JYL-C012型高速粉碎机 九阳股份有限公司;YSC-701型超微粉碎机 北京燕山正德机械有限公司;LNJ-120型气流粉碎机 绵阳流能粉体设备有限公司;CJM-SY-B型高能纳米冲击磨 秦皇岛市太极环纳米制品有限公司;FA-2004型电子天平 上海恒平科学仪器有限公司;HH-4型数显恒温水浴锅 常州澳华仪器有限公司;KjeL Flex K-360型全自动凯氏定氮仪 瑞士Büchi公司;JH-722型可见分光光度计 上海菁华科技仪器有限公司;Farinograph-E粉质仪、Extensograph-E拉伸仪 德国Brabender公司。

1.3 方法

1.3.1 超微香菇伞粉和柄粉的制备

将鲜香菇切分成伞和柄,参考实验室建立的香菇干燥方法^[11]将其烘干,经高速粉碎机粉碎,过100目筛,得到粗粉碎的香菇伞粉(coarse milled cap, CMC)和香菇柄粉(coarse milled stipe, CMS),密封备用。

剪切超微香菇伞粉和柄粉的制备:将香菇伞和香菇柄粗粉分别置于超微粉碎机中粉碎20 min,制得剪切超微香菇伞粉(mechanical milled cap, MMC)和剪切超微香菇柄粉(mechanical milled stipe, MMS),经检测,香菇伞粉和柄粉平均粒径分别为36.09 μm 和26.55 μm ,密封备用。

气流超微香菇伞粉和柄粉的制备:将香菇伞和香菇柄粗粉分别置于气流粉碎机中粉碎2 h,制得气流超微香菇伞粉(jet milled cap, JMC)和气流超微香菇柄粉(jet milled stipe, JMS),香菇伞粉和柄粉平均粒径分别为7.00 μm 和7.05 μm ,密封备用。

纳米超微香菇伞粉和柄粉的制备:将香菇伞和香菇柄粗粉分别置于高能纳米冲击磨中进行粉碎处理,粉碎腔体为不锈钢材质,粉碎磨介为氧化锆球,5~35 $^{\circ}\text{C}$ 调频,粉碎时间6 h,最后制得纳米超微香菇伞粉(nano-micronized cap, NMC)和纳米超微香菇柄粉(nano-micronized stipe, NMS),香菇伞粉和柄粉平均粒径分别为0.54 μm 和0.46 μm ,密封备用。

1.3.2 香菇粉基本成分的测定

水分含量的测定采用直接干燥法,参照GB 5009.3—2010《食品中水分的测定》。灰分含量的测定采用高温灼烧法,参照GB 5009.4—2010《食品中灰分的测定》。粗蛋白含量的测定采用凯氏定氮法,参照GB 5009.5—2010《食品中蛋白质的测定》。粗脂肪含量的测定采用索氏抽提法,参照GB/T 5009.6—2003《食品中脂肪的测定》。膳食纤维含量的测定采用中性洗涤剂测定法,参照GB/T 5009.88—2008《食品中膳食纤维的测定》。

1.3.3 面团粉质特性的测定

利用Farinograph-E粉质仪测定面团的吸水量、形成时间、稳定时间、弱化度和粉质质量指数,方法参照GB/T 14614—2006《小麦粉 面团的物理特性 吸水量和流变学特性的测定 粉质仪法》。

1.3.4 面团拉伸特性的测定

利用Extensograph-E拉伸仪测定面团在醒发时间45、90、135 min时的能量、拉伸阻力、延伸性、拉伸比例^[12-13],方法参照GB/T 14615—2006《小麦粉 面团的物理特性 流变学特性的测定 拉伸仪法》。

1.4 数据分析

所有实验处理进行3次重复测定,测定数据以 $\bar{x} \pm s$ 的形式表示。方差分析采用SPSS 19.0(SAS Institute, NC, USA)软件的Duncan法作多重比较分析,检验的显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 面粉和不同粉碎处理香菇粉基本成分分析

由表1可知,除总糖和总膳食纤维(total dietary fiber, TDF)外,不同粉碎处理的香菇伞粉水分(5.58%~6.79%)、灰分(5.60%~6.01%)、蛋白质(15.86%~17.50%)和脂肪(1.99%~2.08%)含量均显著高于柄粉($P < 0.05$,下同),说明香菇伞粉的营养价值高于柄粉。超微粉碎处理能使样品中水不溶性的

纤维素、半纤维素及木质素发生降解,促使总膳食纤维中的不溶性成分向可溶性成分转化,使可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)含量上升^[14-15]。本实验中不同粉碎处理香菇柄粉的TDF含量(27.15%~29.22%)显著高于伞粉, SDF含量(2.88%~12.55%)又显著低于伞粉,说明超微粉碎技术更有利于伞粉SDF的溶出。相对于普通粉碎的香菇伞粉和柄粉,3种超微粉碎方式都能显著提高样品中SDF的含量,使SDF的含量普遍高于10%,最高可达15.45%。Wang等^[16]的研究结果也证实了微细化处理可使菱角可溶性纤维类的含量得到提高。

表1 面粉和不同粉碎处理后香菇粉的基本成分

Table 1 Basic compositions of wheat flour and *L. edodes* powders as affected by different grinding methods

样品粉末	水分含量	灰分含量	蛋白质含量	脂肪含量	总糖含量	TDF含量	SDF含量
面粉	13.72±0.32	0.67±0.03	12.58±0.54	1.64±0.09		4.37±0.15	
CMC	5.61±0.25 ^a	5.60±0.10 ^a	17.26±0.76 ^{ab}	2.04±0.14 ^{ab}	43.07±0.148 ^d	24.37±0.23 ^c	3.53±0.12 ^f
MMC	6.79±0.38 ^a	5.79±0.06 ^a	17.50±0.46 ^a	1.99±0.06 ^{ac}	38.90±0.58 ^f	27.02±0.10 ^f	10.77±0.43 ^d
JMC	6.30±0.38 ^b	5.91±0.04 ^b	16.65±0.41 ^b	2.04±0.04 ^{ab}	41.18±0.30 ^f	26.52±0.31 ^d	14.56±0.32 ^b
NMC	5.58±0.28 ^b	6.01±0.04 ^a	15.86±0.53 ^c	2.08±0.03 ^a	46.36±0.85 ^c	23.61±0.30 ^f	15.45±0.35 ^a
CMS	4.47±0.11 ^c	3.60±0.02 ^a	12.15±0.24 ^d	1.92±0.05 ^{bc}	48.73±0.63 ^{ab}	27.31±0.17 ^e	2.88±0.10 ^g
MMS	5.08±0.07 ^c	3.99±0.05 ^a	11.61±0.23 ^d	1.63±0.05 ^c	47.88±0.17 ^b	28.16±0.20 ^b	7.94±0.24 ^e
JMS	4.81±0.17 ^{ab}	3.79±0.06 ^a	11.64±0.22 ^d	1.76±0.07 ^d	47.58±0.11 ^b	29.22±0.17 ^a	10.37±0.47 ^d
NMS	4.95±0.07 ^a	3.93±0.03 ^a	11.37±0.25 ^d	1.89±0.05 ^c	49.17±0.42 ^a	27.15±0.20 ^e	12.55±0.36 ^c

注:表中数据均以干质量计;同列上标小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

2.2 添加不同粉碎处理香菇粉对面团粉质特性的影响

表2 不同粉碎处理的香菇伞粉对面团粉质特性的影响

Table 2 Effects of *L. edodes* cap powders processed with different grinding methods on wheat dough farinograph parameters

样品	添加量/%	吸水率/%	形成时间/min	稳定时间/min	12 min弱化度/FU	粉质质量指数
对照	0.00	62.7±0.1	8.8±0.2	14.2±0.1	58±1	164±4
	0.25	63.4±0.1	8.0±0.1	9.1±0.1	127±3	109±3
CMC面团	0.50	64.1±0.2	6.8±0.2	6.7±0.2	158±3	86±3
	1.00	64.8±0.1	5.3±0.1	4.8±0.2	187±2	69±2
	0.25	63.8±0.1	8.0±0.2	10.0±0.3	112±3	118±4
MMC面团	0.50	64.0±0.1	7.2±0.2	7.1±0.1	146±2	91±3
	1.00	64.4±0.1	5.7±0.1	5.7±0.2	165±3	75±2
	0.25	63.1±0.0	8.0±0.2	10.5±0.1	103±3	121±2
JMC面团	0.50	63.6±0.1	7.2±0.1	7.3±0.1	147±3	91±2
	1.00	63.6±0.2	6.2±0.1	4.8±0.2	183±3	75±2
	0.25	62.6±0.1	8.0±0.1	11.5±0.1	77±1	140±4
NMC面团	0.50	63.1±0.1	8.2±0.2	10.7±0.2	104±2	127±3
	1.00	63.5±0.1	8.0±0.1	8.9±0.1	125±3	110±3

注:吸水率为校正至500 FU。下同。

由表2、3可知,香菇粉的添加能增大面粉的吸水率(>62.7%)。与对照组相比,不同粉碎处理的香菇粉在相同添加量下,对面团的吸水率随着粉碎粒径的减小(普通粉碎、剪切超微粉碎、气流超微粉碎、纳米超微粉碎粉

碎粒径依次减小)呈现出先增长后下降的趋势,有研究表明^[17]面团蛋白质含量高会促使吸水率增加,香菇粉的添加增大了混合面粉的总蛋白含量,所以面团吸水率变大;其次面团的吸水率也受膳食纤维结构的影响^[18],在经过普通粉碎和剪切超微粉碎后,其膳食纤维结构中有更多的亲水基团暴露出来,使其吸水率有明显的提高,而经过气流超微粉碎和纳米超微粉碎的香菇粉,由于其膳食纤维结构受到过度粉碎而破坏,吸水率有所下降。同种粉碎处理后的香菇粉,随着添加量的增大,面团的吸水率逐渐升高,这也归因于面团中总蛋白和总膳食纤维含量的增大。

表3 不同粉碎处理的香菇柄粉对面团的粉质特性的影响

Table 3 Effects of *L. edodes* stipe powders processed with different grinding methods on wheat dough farinograph parameters

样品	添加量/%	吸水率/%	形成时间/min	稳定时间/min	12 min弱化度/FU	粉质质量指数
对照	0.00	62.7±0.1	8.8±0.2	14.2±0.1	58±1	164±4
	0.25	63.8±0.1	8.8±0.1	8.6±0.2	118±3	113±4
CMS面团	0.50	64.2±0.2	6.8±0.3	6.7±0.2	152±3	85±3
	1.00	65.2±0.1	5.3±0.1	6.2±0.2	168±2	70±2
	0.25	63.7±0.2	8.5±0.2	12.2±0.2	89±2	133±4
MMS面团	0.50	63.9±0.1	7.8±0.2	9.7±0.1	138±2	102±2
	1.00	64.6±0.1	6.5±0.1	6.2±0.2	175±3	82±2
	0.25	63.6±0.1	8.2±0.3	9.9±0.1	131±3	110±3
JMS面团	0.50	63.9±0.1	7.0±0.1	7.8±0.1	149±3	86±2
	1.00	64.6±0.1	5.9±0.3	6.2±0.2	178±3	70±3
	0.25	62.9±0.1	7.7±0.1	13.3±0.2	66±1	150±5
NMS面团	0.50	63.3±0.1	8.3±0.2	12.1±0.2	83±2	135±3
	1.00	63.8±0.0	8.3±0.2	10.9±0.2	100±3	122±3

与对照相比,添加了香菇粉的混合面团的形成时间(<8.8 min)均有不同程度减少;除纳米超微粉碎外,其他3种粉碎方式的香菇粉随着添加量的增加,面团的形成时间逐渐降低。有研究表明^[19],面团的形成时间与面粉的面筋含量和质量有关,由于香菇蛋白不同于面粉蛋白,随着香菇粉添加量的增大,致使混合面粉的面筋蛋白含量相对下降,这就不利于面筋网络的充分形成,使面团中面筋强度降低,因而面团的凝聚性和膨胀力降低,形成时间缩短。粒径越小的粉越容易嵌入到面筋的网络结构中,不仅不会破坏面筋的形成,面筋网络还能够充分地伸展膨胀^[20],因此香菇粉的粒径越小,面团的形成时间越长。

添加香菇粉的混合面团稳定时间变化规律和形成时间相似,与对照组相比,各混合面团稳定时间明显缩短,且均随香菇粉添加量的增大逐渐降低,即面团的加工特性随添加量的增加而下降。我国馒头专用粉质量指标要求^[21],面团稳定时间应大于3 min,品质比较好的馒头粉的稳定时间在6.0~7.5 min。当添加1%的香菇伞粉的时,大部分混合面团稳定时间已低于6 min,说明香菇伞粉的添加对面团的稳定性有很弱的劣化作用。

随着香菇粉添加量的增加,面团的弱化度(>58 FU)不断上升,粉质质量指数(<164)不断下降。这说明香菇粉的添加使混合面粉面筋蛋白的含量下降,面筋强度降低,面团更易流变塌陷。香菇伞粉和柄粉粉碎得越细,粉质质量指数较高,说明超微粉碎处理能在一定程度上减小香菇伞粉添加带来的负面影响,提高其添加比例,扩大其应用范围。

2.3 添加不同粉碎处理香菇粉对面团拉伸特性的影响

添加不同粉碎处理的香菇粉对面团拉伸特性的影响见表4~7。当添加量为0.25%时,随着醒发时间的增加,4种混合面团的能量值普遍呈先增后减趋势,与对照面团类似;恒定变形拉伸阻力、拉伸比例和最大拉伸比例普遍升高。当添加量为0.50%和1.00%时能量值普遍呈递减趋势,添加纳米超微粉碎香菇粉的面团恒定变形拉伸阻力、拉伸比例和最大拉伸比例呈上升趋势,其他3种面团普遍呈先增后减趋势,与对照面团一致。表明醒发时间对面团拉伸特性各项指标影响不大,大部分指标的变化趋势与对照一致。在各醒发时间内,面团的延伸特性随着不同粉碎香菇粉的添加量增加而呈现降低趋势。

表4 普通粉碎香菇粉对面团拉伸特性的影响
Table 4 Effects of coarsely milled *L. edodes* powders on wheat dough extensograph parameters

醒发时间/min	指标	香菇粉添加量							
		0.00%	0.25%		0.50%		1.00%		
			伞粉	柄粉	伞粉	柄粉	伞粉	柄粉	
45	E^*/cm^2	120±13	114±7	115±11	113±3	105±23	86±6	84±0	
	R_{90}/BU	354±33	428±18	406±26	592±4	627±4	948±11	1005±2	
	R_m/BU	552±28	598±33	598±35	722±1	741±35	963±21	1009±2	
	E_x/mm	169±6	149±1	150±4	123±3	111±8	83±12	76±1	
	R_{90}/E_x (BU/mm)	2.1±0.1	2.9±0.1	2.7±0.1	4.8±0.1	5.8±0.1	11.5±1.8	13.3±0.1	
	R_m/E_x (BU/mm)	3.3±0.1	4.0±0.1	4.0±0.1	5.9±0.1	6.7±0.2	11.7±1.9	13.4±0.2	
	E^*/cm^2	136±5	138±8	132±8	84±7	101±4	64±13	66±4	
	R_{90}/BU	448±22	668±28	672±26	1218±18	1388±54	907±44	717±14	
90	R_m/BU	679±33	839±35	886±35	1279±57	1500±11	966±79	1036±26	
	E_x/mm	156±8	131±0	123±1	68±6	67±4	61±1	62±1	
	R_{90}/E_x (BU/mm)	2.9±0.3	5.1±0.3	5.5±0.1	15.1±2.8	20.9±0.3	14.2±1.4	12.4±1.2	
	R_m/E_x (BU/mm)	4.4±0.4	6.4±0.3	7.2±0.2	19.1±2.6	22.6±1.1	15.9±0.9	16.7±0.8	
	E^*/cm^2	116±21	115±11	115±12	69±8	65±11	62±1	53±5	
	R_{90}/BU	392±18	808±37	822±38	856±55	960±14	700±32	583±57	
	R_m/BU	595±51	944±43	955±1	889±52	1123±11	807±16	824±49	
	E_x/mm	154±13	108±13	104±6	69±4	59±8	77±4	65±2	
135	R_{90}/E_x (BU/mm)	2.6±0.1	7.5±1.2	7.9±0.1	11.6±2.7	13.2±1.9	9.1±0.8	9.1±1.3	
	R_m/E_x (BU/mm)	3.9±0.0	8.8±1.4	9.2±0.6	14.9±1.5	19.1±2.5	10.5±0.7	12.9±1.2	

注: E^* 为能量,即拉伸曲线面积; R_{90} 为恒定变形拉伸阻力; R_m 为最大拉伸阻力; E_x 为延伸性; R_{90}/E_x 为拉伸比例; R_m/E_x 为最大拉伸比例。下同。

由表4可知,随着普通粉碎香菇粉添加量的增加,混合面团的能量和延伸性在整个醒发期间均呈递减趋势,而恒定变形拉伸阻力、拉伸比例和最大拉伸比例在醒发时间为45 min时,随添加量的增大呈递增趋势,在醒发时间90、135 min时随添加量的增大呈先增后减的趋势。

说明普通粉碎香菇粉的添加弱化了面团的拉伸能量和延伸性,同时增大了拉伸阻力和拉伸比例,使面团变硬,面筋网络结构变得更加牢固,制成的面制品难于成形,不易醒发,体积小。这可能是由于香菇粉的添加阻塞了面筋形成的空间网络结构,其填充作用使面团变硬,流散性变差,进而导致拉伸阻力增大,延伸度减小。香菇粉所含蛋白对面筋蛋白具有稀释作用^[22-23],这可能是面团能量减小的原因。

表5 剪切超微粉碎香菇粉对面团拉伸特性的影响
Table 5 Effects of mechanically milled *L. edodes* powders on wheat dough extensograph parameters

醒发时间/min	指标	香菇粉添加量							
		0.00%	0.25%		0.50%		1.00%		
			伞粉	柄粉	伞粉	柄粉	伞粉	柄粉	
45	E^*/cm^2	120±13	116±12	121±1	122±1	123±8	89±7	103±5	
	R_{90}/BU	354±33	438±10	412±14	578±1	462±2	1049±32	671±17	
	R_m/BU	552±28	614±32	605±21	751±6	646±10	1051±32	776±8	
	E_x/mm	169±6	148±9	157±4	151±16	149±9	77±7	109±4	
	R_{90}/E_x (BU/mm)	2.1±0.1	3.0±0.1	2.6±0.1	3.9±0.4	3.1±0.1	13.7±1.8	6.2±0.4	
	R_m/E_x (BU/mm)	3.3±0.1	4.1±0.1	3.9±0.2	5.1±0.5	4.4±0.4	13.8±1.8	7.1±0.3	
	E^*/cm^2	136±5	127±33	139±1	72±6	142±17	66±1	88±4	
	R_{90}/BU	448±22	739±4	565±10	873±77	881±55	749±43	1183±49	
90	R_m/BU	679±33	895±81	772±15	1268±60	1059±29	1038±66	1401±18	
	E_x/mm	156±8	120±21	144±4	70±3	116±11	65±3	64±1	
	R_{90}/E_x (BU/mm)	2.9±0.3	6.2±1.1	3.9±0.1	15.3±1.3	7.7±0.2	11.6±1.3	18.6±0.7	
	R_m/E_x (BU/mm)	4.4±0.4	7.5±0.6	5.4±0.2	19.1±0.8	9.2±0.6	16.0±0.3	22.0±0.1	
	E^*/cm^2	116±21	104±1	139±2	77±2	95±9	57±4	68±1	
	R_{90}/BU	392±18	1006±52	628±16	942±47	1198±2	657±45	836±26	
	R_m/BU	595±51	1068±26	844±29	1101±11	1209±18	763±54	1041±20	
	E_x/mm	154±13	90±4	137±6	70±5	75±3	71±2	61±1	
135	R_{90}/E_x (BU/mm)	2.6±0.1	11.2±1.1	4.6±0.3	13.6±1.6	16.0±0.6	9.2±0.4	13.8±0.4	
	R_m/E_x (BU/mm)	3.9±0.0	11.9±0.8	6.2±0.4	16.0±1.2	16.2±0.4	10.7±0.5	18.1±0.6	

由表5可知,在发酵45 min时,面团的拉伸能量随剪切超微粉碎香菇粉添加量的增加先增大后减小,在发酵90、135 min时,面团的能量值随添加量的增加普遍下降。恒定变形拉伸阻力、拉伸比例和最大拉伸比例随添加量的变化趋势与添加普通粉碎香菇粉一致。

与添加普通粉碎香菇粉相比,添加剪切超微粉碎香菇粉的混合面团的能量和延伸性数据值较高,拉伸比例和最大拉伸比例较低,说明添加剪切超微粉碎香菇粉的面团比添加普通粉碎香菇粉的面团的面筋筋力、网络膨胀能力较强,抗拉伸阻力和延伸性之间的平衡较好。

由表6可知,添加了气流超微粉碎香菇粉的混合面团的能量值、恒定变形拉伸阻力、拉伸比例和最大拉伸比例随添加量的变化趋势与添加普通粉碎香菇粉一致。

与添加普通粉碎和剪切超微粉碎香菇粉相比,添加气流超微粉碎香菇粉的混合面团的能量值较低,在醒发45、90 min时,恒定变形拉伸阻力、拉伸比例和最大拉

伸比例较高，在醒发135 min时，恒定变形拉伸阻力、拉伸比例和最大拉伸比例较低。说明气流超微粉碎香菇粉的添加，弱化了面团的能量，在醒发前期和中期增大了拉伸比例，使面团结构变牢固，不易胀大；在醒发后期面团的拉伸比例较低，说明醒发时间的延长，有助于该面团粉质特性的改善和提高。

表6 气流超微粉碎香菇粉对面团拉伸特性的影响
Table 6 Effects of jet milled *L. edodes* powders on wheat dough extensograph parameters

醒发 时间/min	指标	香菇粉添加量						
		0.00%	0.25%		0.50%		1.00%	
			伞粉	柄粉	伞粉	柄粉	伞粉	柄粉
45	E'/cm^2	120±3	116±6	112±2	102±1	104±3	101±1	82±6
	R_{90}/BU	354±33	464±10	388±24	837±16	530±5	893±48	1 088±41
	R_{100}/BU	552±28	630±20	563±13	937±21	669±5	942±40	1 088±41
	E_t/mm	169±6	150±10	157±6	92±5	124±4	92±4	69±1
	R_{90}/E_t (BU/mm)	2.1±0.1	3.1±0.3	2.5±0.3	9.8±1.5	4.3±0.1	9.7±0.9	15.9±0.2
	R_{100}/E_t (BU/mm)	3.3±0.1	4.2±0.4	3.6±0.3	10.3±0.8	5.4±0.1	10.2±0.8	15.9±0.2
90	E'/cm^2	136±5	133±4	126±15	69±26	102±10	78±1	64±2
	R_{90}/BU	448±22	636±9	559±7	1 283±37	1 462±8	1 042±22	690±11
	R_{100}/BU	679±33	829±6	766±24	1 333±16	1 472±4	1 102±21	1 080±22
	E_t/mm	156±8	131±7	127±4	63±10	69±1	66±8	57±3
	R_{90}/E_t (BU/mm)	2.9±0.3	4.9±0.2	4.8±0.7	14.4±6.2	20.5±0.3	16.0±2.4	11.3±1.9
	R_{100}/E_t (BU/mm)	4.4±0.4	6.3±0.4	6.1±0.4	21.5±3.0	20.6±0.2	16.9±2.5	18.9±1.2
135	E'/cm^2	116±21	106±5	131±19	61±12	75±10	61±2	64±4
	R_{90}/BU	392±18	717±46	729±33	833±3	861±6	669±5	635±18
	R_{100}/BU	595±51	823±59	920±5	1 035±6	1 152±42	769±31	769±47
	E_t/mm	154±13	107±4	117±21	67±1	68±9	67±7	57±11
	R_{90}/E_t (BU/mm)	2.6±0.1	6.7±0.7	6.8±2.1	10.1±3.0	11.2±0.7	10.1±1.1	9.7±0.5
	R_{100}/E_t (BU/mm)	3.9±0.0	7.7±0.8	8.0±1.5	15.4±0.4	17.2±1.7	11.6±1.8	14.5±0.8

表7 纳米超微粉碎香菇粉对面团拉伸特性的影响
Table 7 Effects of nano-micronized *L. edodes* powders on wheat dough extensograph parameters

醒发 时间/min	指标	香菇粉添加量						
		0.00%	0.25%		0.50%		1.00%	
			伞粉	柄粉	伞粉	柄粉	伞粉	柄粉
45	E'/cm^2	120±13	115±6	113±2	119±2	111±14	113±1	110±13
	R_{90}/BU	354±33	449±8	424±2	436±13	420±23	430±4	398±23
	R_{100}/BU	552±28	631±21	603±10	629±21	594±43	583±0	564±50
	E_t/mm	169±6	142±2	146±1	148±2	145±7	147±1	150±6
	R_{90}/E_t (BU/mm)	2.1±0.1	3.0±0.0	2.9±0.0	2.9±0.1	2.9±0.0	2.9±0.1	2.7±0.1
	R_{100}/E_t (BU/mm)	3.3±0.1	4.5±0.1	4.1±0.0	4.3±0.2	4.0±0.1	4.0±0.1	3.8±0.2
	90	E'/cm^2	136±5	147±6	135±1	144±10	138±11	147±13
R_{90}/BU		448±22	608±12	560±15	590±4	580±2	688±11	600±18
R_{100}/BU		679±33	824±39	779±18	831±10	781±0	878±25	786±21
E_t/mm		156±8	143±2	141±1	141±7	140±8	133±11	127±5
R_{90}/E_t (BU/mm)		2.9±0.3	4.2±0.1	4.0±0.1	4.2±0.1	4.2±0.3	5.2±0.6	4.7±0.4
R_{100}/E_t (BU/mm)		4.4±0.4	5.7±0.2	5.5±0.1	5.9±0.2	5.6±0.4	6.6±0.4	6.2±0.4
135		E'/cm^2	116±21	140±2	129±9	126±1	145±7	118±0
	R_{90}/BU	392±18	618±13	554±18	625±31	600±21	762±15	631±33
	R_{100}/BU	595±51	850±47	768±2	826±29	820±11	897±3	866±2
	E_t/mm	154±13	135±1	137±6	126±5	142±5	112±0	130±1
	R_{90}/E_t (BU/mm)	2.6±0.1	4.6±0.1	4.0±0.1	5.0±0.5	4.2±0.0	6.8±0.1	4.8±0.2
	R_{100}/E_t (BU/mm)	3.9±0.0	6.3±0.4	5.6±0.2	6.5±0.5	5.8±0.1	8.0±0.1	6.7±0.1

由表7可知，添加了纳米超微粉碎香菇粉的混合面团在整个醒发期间能量随添加量的增大变化不大，在醒发45 min时，恒定变形拉伸阻力、拉伸比例和最大拉伸比例随添加量的增大普遍下降，在醒发90、135 min时，恒定变形拉伸阻力、拉伸比例和最大拉伸比例随添加量的增大普遍上升。

与添加普通粉碎、剪切超微粉碎和气流超微粉碎香菇粉相比，添加纳米超微粉碎香菇粉的混合面团的能量和延伸性较高，恒定变形拉伸阻力、拉伸比例和最大拉伸比例较低。说明添加纳米超微粉碎香菇粉的面团拉伸特性最优，且添加量为0.25%时，拉伸比例和最大拉伸比例普遍较低，醒发中后期能量值较大。说明此时面筋筋力和网络膨胀能力最好，面团易于成形，且体积较大。

纳米超微粉碎粉体具有特殊的纳米结构和纳米效应^[24]，经纳米粉碎后的香菇粉不仅不会阻碍面团面筋网络的形成，反而会如胶粒般填充于面筋网络内，使其更加紧密，同时较高的持水力使面团本身也表现出更适宜的弹性性质。

3 结 论

通过研究不同粉碎方式对香菇基本成分的影响，香菇伞粉的营养价值比香菇柄粉高，超微粉碎更有利于其可溶性膳食纤维的溶出。与普通粉碎相比，剪切超微粉碎、气流超微粉碎和纳米超微粉碎3种超微粉碎方式均能显著提高样品中SDF的含量。

通过研究不同粉碎香菇粉对面团粉质特性的影响，超微粉碎香菇粉可以提高面团的吸水率(>62.7%)，同时缩短面团形成时间(<8.8 min)和稳定时间(<14.2 min)，增大了弱化度(>58 FU)，降低了粉质质量指数(<164)，说明超微粉碎有利于改善面制品的出品率，但不利于面筋强度较高的面制品的加工。同种粉碎处理后的香菇粉随着添加量的增加，面团的吸水率、弱化度不断上升；稳定时间和粉质质量指数不断下降；除了纳米超微粉碎外，其他3种粉碎方式的香菇粉随着添加量的增加，面团的形成时间逐渐降低。说明香菇粉的添加量越大，面团粉质特性的弱化程度越大。在相同添加量下，香菇粉的粒径越小，面团的形成时间和稳定时间越长，吸水率先增大后减小。

通过研究不同粉碎香菇粉对面团拉伸特性的影响，超微粉碎香菇粉的添加使面团的能量、延伸性下降，同时提高了面团恒定变形拉伸阻力、最大拉伸阻力、拉伸比例和最大拉伸比例，说明超微粉碎对于面团的拉伸特性有较强的负面作用。在相同添加量下，纳米超微粉碎香菇粉的面团拉伸特性最为突出，能量和延伸性较高，恒定变形拉伸阻力、拉伸比例和最大拉伸比例较低。且

当添加量为0.25%时, 拉伸特性最优。其次是添加剪切超微粉碎香菇粉的面团, 其能量、延伸性比气流超微粉碎和普通粉碎普遍较高, 拉伸比例和最大拉伸比例比二者普遍较低; 添加气流超微粉碎和普通粉碎香菇粉的混合面团, 各项拉伸特性指标差异不大, 弱化了面团的拉伸能量和延伸性, 同时增大了拉伸阻力和拉伸比例。

综合来看, 不同粉碎处理香菇粉的添加对面团流变学特性的影响还是以负面作用为主, 但在较低添加比例下 (<1.0%) 对面团流变性能影响较小。将其用作面制品的生产时, 需要添加一定比例的增强面筋能力的面粉改良剂, 如氧化酶类和转移酶类等^[25], 从而可以适当地提高香菇粉的添加量, 使混合面团既具有较好的营养功能特性, 又不影响其感官品质和加工性能。

参考文献:

- [1] BISEN P S, BAGHEL R K, SANODIYA B S, et al. *Lentinus edodes*: a macrofungus with pharmacological activities[J]. *Current Medicinal Chemistry*, 2010, 17(22): 2419-2430.
- [2] JAYAKUMAR T, THOMAS P A, SHEU J R, et al. *in-vitro* and *in-vivo* antioxidant effects of the oyster mushroom *Pleurotus ostreatus*[J]. *Food Research International*, 2001, 44(4): 851-861.
- [3] CARBONERO E R, GRACHER A H P, KOMURA D L, et al. *Lentinus edodes* heterogalactan: antinociceptive and anti-inflammatory effects[J]. *Food Chemistry*, 2008, 111(3): 531-537.
- [4] SIVAM A S, SUN-WATERHOUSE D, QUEK S Y, et al. Properties of bread dough with added fiber polysaccharides and phenolic antioxidants: a review[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(8): 163-174.
- [5] 林雯, 黄茂坤, 张凤玉, 等. 香菇柄膳食纤维酶法改性及功能特性研究[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(3): 92-95.
- [6] 高福成. 现代食品工程高新技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 21-56.
- [7] 王会党. 香菇超微粉制作菇精调味品的工艺及其应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
- [8] ZHANG Zipei, SONG Huige, ZHEN Peng, 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.
- [9] 吕军仓. 面团流变学及其在面制品中的应用[J]. *粮油加工与食品机械*, 2006(2): 66-68.
- [10] XIE Fengwei, YU Long, SU Bing, et al. Rheological properties of starches with different amylose amylopectin ratios[J]. *Journal of Cereal Science*, 2009, 49(3): 371-377.
- [11] GUO Xiaohui, XIA Chunyan, TAN Yurong, et al. Mathematical modeling and effect of various hot-air drying on mushroom (*Lentinus edodes*)[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(1): 207-216.
- [12] MANOHAR R S, RAO P H. Interrelationship between rheological characteristic of dough and quality of biscuits; use of elastic recovery of dough to predict biscuit quality[J]. *Food Research International*, 2002, 35(9): 807-813.
- [13] ROSELL C M, ROJAS J A, BENEDITO de BARBER C. Influence of hydrocolloids on dough rheology and bread quality[J]. *Food Hydrocolloids*, 2001, 15(1): 75-81.
- [14] MANZI P, GAMBELLI L, MARCONI S, et al. Nutrients in edible mushrooms: an inter-species comparative study[J]. *Food Chemistry*, 1999, 65(4): 477-482.
- [15] ZHU Kexue, HUANG Sheng, PENG Wei, et al. Effect of ultrafine grinding on hydration and antioxidant properties of wheat bran dietary fiber[J]. *Food Research International*, 2010, 43(4): 943-948.
- [16] WANG C C R, CIOU J Y, CHIANG P Y, et al. Effect of micronization on functional properties of the water caltrop (*Trapa taiwanensis* Nakai) pericarp[J]. *Food Chemistry*, 2009, 113(4): 970-974.
- [17] MOHAMMED I, AHMED A R, SENGE B, et al. Dough rheology and bread quality of wheat-chickpea flour blends[J]. *Industrial Crops and Products*, 2012, 36(1): 196-202.
- [18] KETHIREDDIPALLI P, HUNG Y C, PHILLIPS R D, et al. Evaluating the role of cell material and soluble protein in the functionality of cowpea (*Vigna unguiculata*) pastes[J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(1): 53-59.
- [19] NINDJIN C, AMANI G N, SINDIC M, et al. Effect of blend levels on composite wheat doughs performance made from yam and cassava native starches and bread quality[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 86(4): 1637-1645.
- [20] HERA E D L, MARTINEZ M, OLIETE B, et al. Influence of flour particle size on quality of gluten-free rice cakes[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(9): 2280-2288.
- [21] 汤卫东, 吴敬涛, 赵丹. 麦麸超微粉对面团特性及制品品质的影响[J]. *食品科学*, 2010, 31(9): 204-208.
- [22] 李向阳, 刘传富, 刁恩杰, 等. 大豆分离蛋白对面团特性及挂面品质的影响研究[J]. *中国粮油学报*, 2009, 24(9): 19-22.
- [23] NOORT M W J, HAASTER D V, HEMERY Y, et al. The effect of particle size of wheat bran fractions on bread quality-evidence for fibre-protein interactions[J]. *Journal of Cereal Science*, 2010, 52(23): 59-64.
- [24] SOWBHAGYA H B, FLORENCE SUMA P, MAHADEVAMMA S, et al. Spent residue from cumin-a potential source of dietary fiber[J]. *Food Chemistry*, 2007, 104(3): 1220-1225.
- [25] 张充, 陆兆新. 小麦面粉强筋改良酶制剂研究进展[J]. *食品科学*, 2013, 34(9): 324-329.