

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.05.024

# 北虫草干燥特性与粉碎工艺试验\*

官元娟 孟繁壮 秦军伟 林静

(沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866)

**【摘要】** 北虫草经过热风干燥、真空干燥和真空冷冻干燥后,利用图像处理技术分析干燥方法对表面积收缩率的影响,并结合干燥后北虫草的剪切和压碎力学特性,确定适宜粉碎的干燥方式;以通过200目标准检验筛的粉体质量分数为评价指标,通过分析干燥后北虫草的剪切粉碎和球磨粉碎工艺,确定北虫草的最优粉碎工艺参数。结果表明,真空冷冻干燥后的北虫草面积收缩率、剪切力和压碎力均最小,真空冷冻干燥为北虫草粉碎最适宜的干燥方法;剪切粉碎最优工艺参数为:粉碎时间3 min,物料填充率25%,物料含水率3%,此时粉碎效率为68.5 g/h,耗电量为0.46 kW·h/kg;球磨粉碎最优工艺参数为:粉碎转速266 r/min,粉碎时间60 min,介质填充率23%,物料填充率15%,此时粉碎效率为36.5 g/h,耗电量为2 kW·h/kg。

**关键词:** 北虫草 干燥特性 粉碎工艺 试验

**中图分类号:** R282.4; TQ028.6<sup>+</sup>7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0142-05

## Dry Characteristics and Grinding Technology for North Cordyceps

Gong Yuanjuan Meng Fanzhuang Qin Junwei Lin Jing

(College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

### Abstract

After dried by the hot-air drying, the vacuum drying and the vacuum freezing drying, the area shrinkage percentage of North Cordyceps was analyzed by the digital image processing technology, and combined the shearing and the crushing mechanic characteristics, the suitable drying technology was chosen. Considering the powder quantity percent passing through the 200 mesh standard sieve, the processing of the shearing method and the ball milling method were investigated, the optimal processing parameters of the dried North Cordyceps were confirmed. The results show that the area shrinkage percentage, the shearing stress and the crushing stress of the freeze-dried North Cordyceps are the smallest, so the vacuum freeze drying technology is chosen as the suitable drying treatment method. The optimal processing parameters of the shearing grinding are as follows: the grinding time is 3 min, the material filling rate is 25%, the material moisture content is 3%, under these conditions, the grinding efficiency is 68.5 g/h, the energy consumption is 0.46 kW·h/kg. The optimal ball milling parameters are as follows: the milling speed is 266 r/min, the milling time is 60 min, the medium filling rate is 23%, the material filling rate is 15%, under these conditions, the grinding efficiency is 36.5 g/h, the energy consumption is 2 kW·h/kg.

**Key words** North Cordyceps, Dry characteristics, Grinding technology, Experiment

### 引言

北虫草的化学成分和药理功能与冬虫夏草非常

相似,其主要功能和活性物质含量方面优于天然的冬虫夏草,被视为冬虫夏草的最佳替代品<sup>[1]</sup>。然而新鲜的北虫草不易储存,必须对其进行深加工,北虫

收稿日期:2011-07-22 修回日期:2011-09-08

\* 辽宁省教育厅科学技术研究项目(2009A636)

作者简介:官元娟,教授,主要从事农产品加工研究,E-mail: yuanjuangong@163.com

草经干燥后微粉碎,能够实现营养成分的全效利用<sup>[2]</sup>。然而,北虫草适宜粉碎的干燥方法以及粉碎形式、粉碎工艺方面的研究尚未见报道。

本文利用图像处理技术分析北虫草干燥前后面积收缩率,以面积收缩率为评价指标研究北虫草热风干燥、真空干燥、真空冷冻干燥的干燥特性<sup>[3-6]</sup>;进而分析干燥后北虫草的剪切和压碎力学特性,确定北虫草的适宜粉碎方式。然后对北虫草剪切粉碎和球墨粉碎对比分析,确定适宜的粉碎工艺,以实现北虫草微粉碎的高效率和低耗能。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与设备

新鲜北虫草,平均湿基含水率为85.7%。

101-OA型数显式电热恒温干燥箱(上海阳光实验仪器有限公司)、ZF6090型真空干燥箱(上海精宏仪器厂)、LG-0.2型真空冷冻干燥机(沈阳新阳速冻设备制造有限公司)、CM7-8102型微机电子万能试验机(美特斯工业系统(中国)有限公司)、DWF-1088型多功能粉碎机(扬州市文峰电器有限公司)、XQM-0.4L型变频行星球磨机(南京科析实验仪器研究所)、CP423S型电子天平(0.001 g,北京赛多利斯天平有限公司)、数码相机、图像处理软件Photoshop 8.0。

### 1.2 试验方法

#### (1) 干燥特性

采用真空冷冻干燥、真空干燥、热风干燥3种方法对北虫草进行干燥,干燥后含水率在5%以内,采集北虫草干燥前后图片,用以计算北虫草干燥前后面积收缩率,从而分析其干燥特性。

#### (2) 剪切和压碎力学特性

设定微机电子万能试验机的入口力为0.1 N,试验速度为10 mm/min。将经过热风干燥、真空干燥、真空冷冻干燥后的北虫草置于电子万能试验机上进行剪切、压缩试验,分析北虫草的粉碎力学特性。

#### (3) 剪切粉碎和球墨粉碎对比试验

以粉碎时间、物料填充率和物料含水率为剪切

粉碎试验3个因素,粉碎时间分别为2、3、4 min,物料填充率分别为20%、25%、30%,物料含水率分别为3%、5%、7%,用多功能粉碎机进行剪切粉碎试验。本次试验选用 $L_9(3^4)$ 正交表进行三因素三水平正交试验<sup>[7]</sup>。

以粉碎速度、粉碎时间、介质填充率、物料填充率4个因素为球磨粉碎的试验因素,用XQM-0.4L型变频行星球磨机进行球磨粉碎试验,根据四因子二次回归正交试验理论,安排27次试验<sup>[7]</sup>。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 北虫草干燥特性分析

北虫草干燥过程实际面积收缩率测定比较复杂,本文采用与其相关的投影面积收缩率作为指标。投影面积收缩率是原鲜物料投影面积与干燥后物料投影面积之差与原鲜物料投影面积的百分比,即

$$R = (1 - S_d/S_w) \times 100\% \quad (1)$$

式中  $S_d$ ——干燥后物料的投影面积

$S_w$ ——原鲜物料投影面积

利用Matlab图像处理功能,可以分析图像中各个不同特征(如颜色等)点的像素个数。本试验用北虫草干燥前后的像素和来确定北虫草投影面积收缩率。以真空干燥后的北虫草为例,北虫草面积的测量过程见图1。

将鲜北虫草以黑色为背景拍摄照片,如图1a所示。干燥后北虫草如图1b所示。对干燥前的北虫草图像进行处理,应用Matlab程序将图1a转换成图1c,求得该图片像素和为1 831 031。用Photoshop软件将图1c中的参照图片擦掉得到图1d,应用Matlab程序测得图1d像素和为1 664 490。图1d和图1c两次像素和之差即为参照图片像素和,已知参照图片的面积,再根据参照图片与北虫草像素和的比值,可以得到北虫草干燥前的投影面积。由于试验要确定的是投影面积收缩率,所以只需计算像素和的比值即可。真空干燥、热风干燥、真空冷冻干燥面积收缩率分别为46%、52.4%、7.6%。

结果表明:不同干燥方法对北虫草面积收缩变化的影响不同,按面积收缩率变化由小到大的顺序

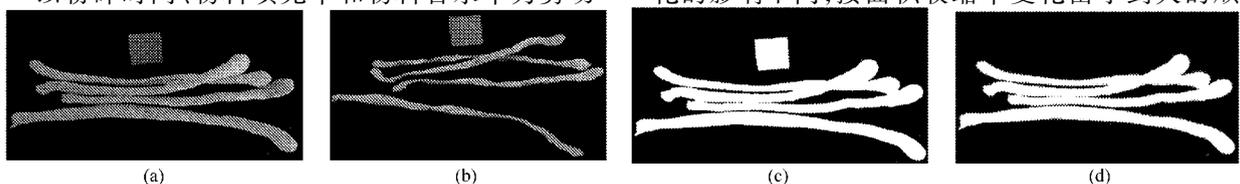


图1 北虫草面积测量图像

Fig. 1 Image of North Cordyceps area measurement

(a) 真空干燥前北虫草 (b) 真空干燥后北虫草 (c) 图1a Matlab处理后图片 (d) 图1c去掉参照图图片

依次为:真空冷冻干燥、真空干燥、热风干燥;热风干燥和真空干燥后北虫草的组织结构均发生了明显的变形、收缩、皱缩和塌陷;而经冷冻干燥后的北虫草能够保持物料原有的多孔结构和鲜物料的形状。

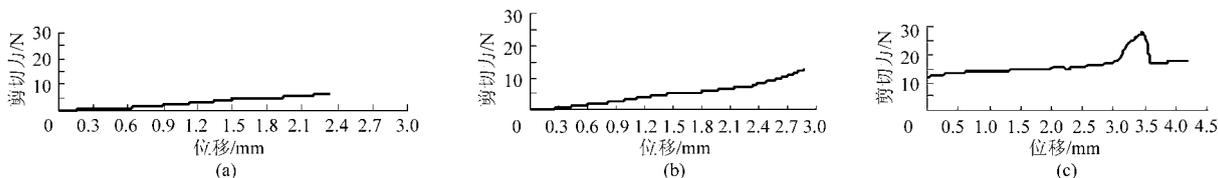


图2 北虫草剪切力与位移关系曲线

Fig.2 Shear stress and displacement of North Cordyceps

(a) 真空冷冻干燥 (b) 真空干燥 (c) 热风干燥

从图2中可以看出,经过真空冷冻、真空和热风干燥后的北虫草需要的剪切力分别为6.5、12.7、27.6 N,按力从小到大的顺序为:真空冷冻干燥、真空干燥和热风干燥。

2.2.2 3种干燥方式北虫草压缩试验比较

分别把经过热风干燥、真空干燥、真空冷冻干燥后的北虫草置于电子万能试验机上进行压缩力试验,压缩力与位移的关系曲线如图3所示。从图3

2.2 北虫草粉碎力学特性分析

2.2.1 3种干燥方式北虫草剪切试验比较

分别把经过热风干燥、真空干燥、真空冷冻干燥后的北虫草放在微机控制电子万能试验机上进行剪切试验,剪切力与位移的变化如图2所示。

中可以看出,真空冷冻干燥、热风干燥、真空干燥后压缩破碎力分别为12.9、51.6、57.2 N。结果表明:经过热风干燥和真空干燥后的北虫草面积具有较大的收缩率,硬度大,需要较大的破碎力。而真空冷冻干燥物料在升华脱水前经预冻处理,形成稳固的骨架,冰晶升华后,固体骨架维持不变,因此北虫草经冷冻干燥后能够保持其原有的多孔结构和鲜物料的形状,且其内部形成多孔的海绵状,因此只要较小的破碎力<sup>[8-10]</sup>。

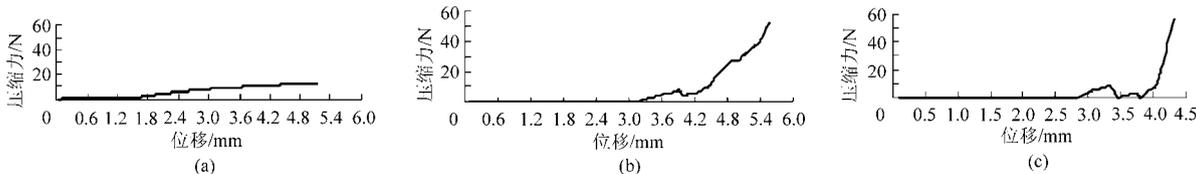


图3 北虫草压缩力与位移关系曲线

Fig.3 Compression stress and displacement of North Cordyceps

(a) 真空冷冻干燥 (b) 真空干燥 (c) 热风干燥

2.3 剪切粉碎工艺参数分析

试验分析表明,影响剪切粉碎效率的主要因素有粉碎时间、物料填充率和物料含水率。因此以上述3个因素作为试验因素进行正交试验,以通过200目标准检验筛的粉体质量分数M为评价粉碎效率指标,M越大,粉碎效率越高,因素水平及结果见表1、2。

表1 剪切粉碎试验因素水平

Tab.1 Factors and levels of the shearing grinding test

水平	因素		
	粉碎时间 A/min	物料填充率 B/%	物料含水率 C/%
1	2	20	3
2	3	25	5
3	4	30	7

表2 剪切粉碎试验安排与结果

Tab.2 Shearing and grinding test and results

试验序号	A	B	C	M/%
1	1	1	1	15.7
2	1	2	2	17.4
3	1	3	3	16.3
4	2	1	2	16.6
5	2	2	3	20.7
6	2	3	1	18.7
7	3	1	3	16.5
8	3	2	1	19.9
9	3	3	2	18.7
$k_1$	16.46	16.28	18.15	
$k_2$	18.68	19.33	17.57	
$k_3$	18.38	17.90	17.82	
极差 R	2.22	3.05	0.58	
较优水平	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	

极差分析结果表明,试验影响因素的主次顺序为:B、A、C,最优水平组合为A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>1</sub>,即粉碎时间3 min、物料填充率25%、物料含水率3%时为最优

组合。

2.4 球磨粉碎工艺参数分析

研究资料表明<sup>[11]</sup>,影响球磨粉碎效率的主要因

素有粉碎速度、粉碎时间、介质填充率、物料填充率，本研究以上述4个因素为试验因素，以通过200目标标准检验筛粉体质量分数  $M$  为评价指标。采用二次正交旋转组合设计分析指标与各个因素间的量化关系，将各因素按其水平及其取值范围进行编码，得到因素水平编码如表3所示。根据四因子二次回归正交试验设计理论，安排了27次试验。试验结果如表4所示。 $x_1 \sim x_4$  表示各因素真实值； $X_1 \sim X_4$  表示各因素编码值。

表3 球磨粉碎试验因素水平编码

Tab.3 Coding of the factors and levels of the optimal ball milling parameters

编码	因素			
	粉碎速度	粉碎时间	介质填充率	物料填充率
	$x_1 / r \cdot \min^{-1}$	$x_2 / \min$	$x_3 / \%$	$x_4 / \%$
1.547	302	106	23	21
1	280	90	20	18
0	240	60	15	13
-1	200	30	10	8
-1.547	178	14	7	5

根据27次试验所得的试验结果，用Excel中数据分析工具，计算分析得各试验因素  $X_i$  与粉碎中通过200目标标准检验筛粉体质量分数  $M$  之间的回归数学模型为

$$M = 33.7005 + 4.6172X_1 + 2.0569X_2 + 3.7983X_3 + 1.9986X_4 + 1.4494X_1X_2 - 0.9544X_1X_3 - 0.2094X_1X_4 - 1.7156X_2X_3 - 0.7706X_2X_4 - 0.3694X_3X_4 - 2.3832X_1^2 - 5.5171X_2^2 - 0.7075X_3^2 - 1.9836X_4^2 \quad (2)$$

利用计算机规划求解分析方法，对模型进行优化求解，得出北虫草超微粉碎最佳工艺参数为粉碎速度266 r/min，粉碎时间60 min，介质填充率23%，物料填充率15%。

### 2.5 粒度分布比较

在剪切粉碎和球磨粉碎最佳工艺参数条件下进行超微粉碎试验，剪切粉碎3 min，球磨粉碎60 min，剪切粉碎和球磨粉碎的粒度分布见表5。

从表5中可以看出，粒度在200目以上时，球磨粉碎要比剪切粉碎的粒度分布大。

### 2.6 粉碎效率和能耗比较

在粉碎工艺参数最优的条件下进行剪切粉碎和球磨粉碎试验，结果表明，剪切粉碎的粉碎效率为65.8 g/h，耗电量为0.46 kW·h/kg；球磨粉碎的粉碎效率为36.5 g/h，耗电量为2 kW·h/kg，可见，剪切

表4 球磨粉碎试验安排与结果

Tab.4 Test results of the optimal ball milling parameters

试验序号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$M/\%$
1	1	1	1	1	42.5
2	1	1	1	-1	38.5
3	1	1	-1	1	39.1
4	1	1	-1	-1	39.4
5	1	-1	1	1	40.1
6	1	-1	1	-1	36.8
7	1	-1	-1	1	31.5
8	1	-1	-1	-1	20.9
9	-1	1	1	1	32.4
10	-1	1	1	-1	29.3
11	-1	1	-1	1	24.8
12	-1	1	-1	-1	18.6
13	-1	-1	1	1	33.5
14	-1	-1	1	-1	27.6
15	-1	-1	-1	1	21.5
16	-1	-1	-1	-1	15.7
17	1.547	0	0	0	41.3
18	-1.547	0	0	0	34.5
19	0	1.547	0	0	32.2
20	0	-1.547	0	0	28.6
21	0	0	0	1.547	45.1
22	0	0	0	-1.547	38.6
23	0	0	0	0	39.7
24	0	0	0	0	37.9
25	0	0	0	0	39.9
26	0	0	0	0	40.3
27	0	0	0	0	39.9

表5 剪切粉碎和球磨粉碎的粒度分布

Tab.5 Particle size distribution of shear grinding and ball milling parameters

筛分粒度/目	粉体质量分数/%	
	剪切粉碎	球磨粉碎
≤80	13.43	9.07
80~120	9.96	17.84
120~160	32.78	16.20
160~200	23.24	13.69
≥200	20.86	43.20

粉碎效率高、耗电量小。

## 3 结论

(1) 利用图像处理技术分析北虫草干燥前后面

积收缩率,以面积收缩率为评价指标研究北虫草经过热风干燥、真空干燥、真空冷冻干燥的干燥特性,进而分析干燥后的北虫草的剪切和压碎力学特性。结果表明真空冷冻干燥后的北虫草面积收缩率、剪切力和压碎力均为最小,真空冷冻干燥为北虫草粉碎最适宜的干燥方法。

(2)北虫草剪切粉碎最佳工艺参数为:粉碎时间3 min,物料填充率25%,物料含水率3%,此时通

过200目标筛的质量分数为20.86%,粉碎效率为68.5 g/h,耗电量为0.46 kW·h/kg。

(3)行星式球磨机粉碎北虫草最佳工艺参数为:球磨机转速266 r/min,研磨时间60 min,介质填充率23%,物料填充率15%,此时通过200目粉体质量分数为43.2%,粉碎效率为36.5 g/h,耗电量为2 W·h/kg。

#### 参 考 文 献

- 倪贺,李海航,黄文芳,等.北虫草及其活性成分的研究与开发[J].科技导报,2007,25(15):75~79.  
Ni He, Li Haihang, Huang Wenfang, et al. Research and product development of cordyceps militaris and its bioactive substances [J]. Science & Technology Review, 2007, 25(15):75~79. (in Chinese)
- 宫元娟,曾程,王强,等.胡萝卜微粉物理特性和营养成分的影响因素[J].农业机械学报,2009,40(11):124~128.  
Gong Yuanjuan, Zeng Cheng, Wang Qiang, et al. Influence factors on physical properties and nutrient component for carrot micro-powder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11):124~128. (in Chinese)
- 陈廉清,高立国,陈永清.基于图像处理的微小塑料齿轮轮廓优化[J].农业机械学报,2008,39(6):166~169.  
Chen Lianqing, Gao Liguang, Chen Yongqing. Contour optimization of the micro plastic gears based on computer vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6):166~169. (in Chinese)
- 贾爱莲,张淑娟.基于Matlab的植物叶面积数字摄影图像处理[J].山西农业大学学报,2006,26(1):80~82.  
Jia Ailian, Zhang Shujuan. Processing of leaf area measurement using digital photographic image based on Matlab [J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2006, 26(1):80~82. (in Chinese)
- 梁凌云,程玉来,张佰清.真空冷冻干燥和微波干燥在切花月季干燥中的应用[J].农业机械学报,2005,36(1):71~74.  
Liang Lingyun, Cheng Yulai, Zhang Baiqing. Study on the application of freeze drying and microwave drying to cut flowers [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(1):71~74. (in Chinese)
- 宫元娟,于永伟,秦军伟,等.以图像计算收缩率优化香菇真空缓苏干燥工艺[J].农业工程学报,2010,26(12):352~357.  
Gong Yuanjuan, Yu Yongwei, Qin Junwei, et al. Optimization of shiitake mushroom vacuum tempering drying process based on imaginary calculation of its shrinking rate [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(12):352~357. (in Chinese)
- 李云雁,胡传荣.试验设计与数据处理[M].北京:化学工业出版社,2004.
- 崔清亮,郭玉明,郑德聪.基于干燥动力学特性的冷冻干燥过程判别[J].农业机械学报,2010,41(4):124~127.  
Cui Qingliang, Guo Yuming, Zheng Decong. Judgment of freeze-drying process based on drying dynamical characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4):124~127. (in Chinese)
- 张丽华,徐怀德,李顺峰.不同干燥方法对木瓜干燥特性的影响[J].农业机械学报,2008,39(11):70~74.  
Zhang Lihua, Xu Huaide, Li Shunfeng. Effects of different drying methods on drying characteristic of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11):70~74. (in Chinese)
- 宋洪波,毛志怀.干燥方法对植物产品物理特性影响的研究进展[J].农业机械学报,2005,36(6):117~121.  
Song Hongbo, Mao Zhihui. Review of drying methods on the physical characteristics of plant materials [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(6):117~121. (in Chinese)
- 宫元娟,张本华,李成华.牛蒡微粉加工工艺参数试验研究[J].农业工程学报,2007,23(9):256~258.  
Gong Yuanjuan, Zhang Benhua, Li Chenghua. Experimental study on technological parameters for burdock fine pulverizing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(9):256~258. (in Chinese)