

热风-真空复合工艺干燥玉米力学特性研究

盛韶阳¹ 吴敏² 胡纯秋¹ 王国秀¹ 陈文军¹

(1. 安徽医科大学公共卫生学院, 合肥 230032; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 传统的玉米干燥工艺效率低,干燥后的玉米品质不好,在加工过程中,玉米会产生破损。进行了玉米自然干燥、热风干燥和热风-真空复合干燥,考察了3种干燥方式下的玉米力学特性和表观形态。力学特性测试结果发现,50℃热风+45℃真空复合干燥的玉米应变最大。自然干燥中,应力松弛曲线达到的最大应力为0.0455 MPa,三元件Maxwell模型能很好地拟合应力松弛测试结果,决定系数均达到0.977以上。玉米籽粒储能模量和损耗模量均随频率增大而增大,储能模量大于损耗模量,意味着干燥后的玉米表现出的弹性大于粘性。表观形态测试结果发现,相比于热风干燥,复合工艺干燥的玉米籽粒中淀粉颗粒更为饱满,玉米品质更好。干燥后的玉米结晶形态均为A形模式。热风-真空复合工艺干燥玉米的力学特性研究,可以为玉米加工、储藏等相关设备的研制提供实验基础。

关键词: 玉米; 热风-真空干燥; 力学特性; 表观形态

中图分类号: S513; TS210.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S1-0476-07

Mechanical Properties of Maize Kernel Dried by Hot-air – Vacuum Compound Process

SHENG Shaoyang¹ WU Min² HU Chunqiu¹ WANG Guoxiu¹ CHEN Wenjun¹

(1. School of Public Health, Anhui Medical University, Hefei 230032, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The efficiency of traditional maize drying is low and the quality of dried maize kernel is not good. Maize will be damaged during processing. Natural drying, hot-air drying and hot-air – vacuum combined drying of maize kernel were carried out, and the mechanical properties and apparent morphology of maize kernel dried by three methods were investigated. The test results of mechanical properties showed that the maize kernel dried by 50℃ hot-air + 45℃ vacuum had the largest deformation. In hot-air drying, the creep curve of maize kernel dried at 65℃ was the highest, and that of maize kernels dried at 75℃ was the lowest. Among three drying methods, the stress achieved by the stress relaxation curve of natural drying was the largest, and its value was 0.0455 MPa. In compound drying, the stress achieved by the stress relaxation curve of 50℃ hot-air + 65℃ vacuum was the largest, and its value was 0.0414 MPa. The three-element Maxwell model could fit the stress relaxation test results well, and the coefficients of determination were all above 0.977. Both the storage modulus (G') and loss modulus (G'') of maize kernel were increased with the increase of frequency. The storage modulus was greater than loss modulus, and the dominant position was occupied by elasticity. The elasticity of dried maize kernel was greater than its viscosity. The results of the apparent morphology test showed that the starch granules in maize kernels dried at high temperature were relatively drier and shriveled, while those in maize kernels dried at low temperature were rounder and plumper. At the same temperature, the starch granules dried by compound process were plumper than those dried by hot-air. The quality of the maize kernel dried by compound process was better. The maize kernel structure exhibited A-type crystalline pattern. The characteristic peaks of maize kernel dried by hot-air appeared at about 13.7°, 15.7°, 16.4° and 21.5° (2θ). Among them, single peaks appeared at 13.7° and 21.5°, and double peaks

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-08-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701801)、安徽医科大学博士科研资助项目(XJ201623)和安徽医科大学校科研基金项目(2017xkj009)

作者简介: 盛韶阳(1989—),男,讲师,博士,主要从事农产品加工研究,E-mail: shengshaoyang@163.com

appeared at 15.7° and 16.4°. In compound drying, only 50°C hot-air + 55°C vacuum and 50°C hot-air + 65°C vacuum were basically the same as natural drying. Their characteristic maize peaks appeared at about 14.8°, 16.9°, 17.8° and 22.8° (2 θ). The mechanical properties of maize kernel dried by hot-air - vacuum compound process could provide an experimental basis for the development of maize processing and storage related equipment.

Key words: maize; hot-air - vacuum drying; mechanical properties; morphology

0 引言

玉米是人类以及动物的重要食粮之一,是我国重要的经济作物和粮食作物,同时对我国国民经济的建设具有极大的促进作用^[1]。

收获后的成熟玉米,其含水率范围为 25% ~ 35%^[2]。含水率高的玉米呼吸作用旺盛,容易酸败变质,不宜长期储存^[3]。粮食干燥是粮食生产中最重要的一环^[4],我国在玉米干燥方面的研究起步较晚,玉米在干燥之后,品质常常不能得到保障,而且干燥工艺落后,热效率低^[5]。真空干燥技术是在负压、低温条件下进行,故干燥后物料品质优良^[6]。真空干燥时,由于物料内部与表面的压差大,压力梯度与水分传输方向一致,水分可以很快移到表面,并且表面不会出现开裂与硬化,同时真空干燥可以提高干燥速率、降低生产费用^[7]。目前,为了提高干燥效率与节约能源,经常采用热风与真空相结合的方式干燥。

目前,农业物料较多需要长途运输、储藏及深加工,这些环节中物料间的随机碰撞、挤压及机械作用会造成物料发生一定程度的机械损伤,降低产品质量^[8]。玉米籽粒在收获、干燥、脱粒和加工等过程中存在诸多生物力学问题。如果玉米籽粒有裂纹,玉米的安全储藏期会受到影响,发芽率会降低^[9]。玉米的力学特性是相关机械设计的基础,动态力学特性是力学特性的重要部分。目前动态力学特性研究主要集中在材料领域,例如碳纤维/环氧树脂复合材料^[10]、木单板塑料复合材料^[11]、纤维素涂层玻璃/芳纶环氧复合层压板^[12]、不饱和聚酯复合材料^[13],也有应用于生物质资源,例如秸秆-淀粉共混膜^[14]、燕麦茎秆^[15],应用于食品领域中较少。

本文主要研究自然干燥、热风干燥和热风-真空复合干燥的玉米力学特性和表观形态,以期对玉米加工和储藏提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

实验样品为“农大 86”玉米,籽粒为半马齿型。其初始含水率为 27% 左右(初始含水率采用 130°C 干燥 24 h 的方法测定^[16])。实验前,将玉米放入双

层自封袋中,并置于 4°C 冰箱内保存,玉米短时间低温存放不会影响其品质。

1.2 仪器与设备

电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司; AB204 - S(0.0001)型十万分之一分析天平,瑞士 Mettler Toledo 公司; DZ - 3BC 型真空干燥箱,北京格拉威科科技有限责任公司; GTR - 800E 型单粒水分测量仪,日本 Shizuoka Seiki 公司; Q800 型动态力学分析仪,美国 TA 公司; PRO - MAX 型数字游标卡尺,美国 TA 公司; XD - 2 型 X 射线衍射仪,北京普析通用仪器有限责任公司; S3400 型扫描电子显微镜,日本 Hitachi 公司。

1.3 方法

1.3.1 玉米自然干燥

将玉米放在直径约 20 cm 的培养皿中,平铺一层,铺满 6 个培养皿,放在室内阴凉处。使用单粒水分测量仪测定其实时含水率,直到玉米含水率降至 13% 为止。然后将玉米放入双层自封袋中,置于 4°C 冰箱内保存。

1.3.2 玉米热风干燥

将干燥箱温度分别设定为 35、45、55、65、75°C 加热,使其达到预设温度并保持 0.5 h 以上,以使干燥箱内温度和湿度分布均匀。将玉米放在直径约 20 cm 的培养皿中,平铺一层,铺满 6 个培养皿,将其放入干燥箱干燥。使用单粒水分测量仪测定实时含水率,直到玉米含水率降至 13% 为止。干燥结束后,将玉米取出,在室温(20°C)下缓苏 30 min,使其水分均匀。然后将玉米放入双层自封袋中,不同温度干燥的玉米做上标记,置于 4°C 冰箱内保存。

1.3.3 玉米热风-真空复合干燥

将干燥箱温度设定为 50°C,加热至预设温度并保持 0.5 h 以上,以使干燥箱内温度和湿度分布均匀。将真空箱中加热板的温度分别设定为 35、45、55、65、75°C,真空度设定为 0.1 MPa,开启真空加热使其达到预设温度,并保持 0.5 h 以上。将玉米放在直径约 20 cm 的培养皿中,平铺一层,铺满 4 个培养皿,放入干燥箱干燥。使用单粒水分测量仪测定实时含水率,直到玉米含水率降至 18% 为止。然后,将玉米取出,放入真空干燥箱中继续进行干燥,直到玉米含水率降至 13% 为止。干燥结束后,将玉

米取出,在室温下缓苏 30 min,使其水分均匀。然后将玉米放入双层自封袋中,不同温度干燥的玉米做上标记,置于 4℃ 冰箱内保存。

1.3.4 玉米力学特性测试

(1) 3 次重复蠕变-恢复测试

MENARD^[17] 提出,重复进行蠕变-恢复测试可以较为真实地模拟材料在现实生活中的情况。本实验中,将蠕变-恢复测试设置为重复 2 次,以观察复合工艺干燥的玉米籽粒在受到反复应力作用时表现出的力学特性。使用 Q800 型动态力学分析仪,将预载力设定为 0.1 N,应力设定为 0.1 MPa。具体程序如下:①将温度升到 30℃,平衡 1 min。②蠕变 3 min,恢复 3 min。③重复步骤②两次。

(2) 应力松弛测试

对于自然干燥和复合工艺干燥的玉米,将预载力设定为 0.1 N,应变设定为 0.5%;对于热风干燥的玉米,将预载力设定为 0.05 N,应变设定为 0.8%。具体程序如下:①将温度升到 30℃,平衡 1 min。②应力松弛 5 min。

使用三元件 Maxwell 模型对玉米籽粒的应力松弛结果进行描述,公式为

$$P = E \exp(-t/\tau) + E_c \quad (1)$$

式中 P ——任意时刻 t 时的弛豫应力,MPa

E ——弹性模量,MPa

τ ——弛豫时间,s

E_c ——平衡弹性模量,MPa

t ——加载时间,s

(3) 频率扫描测试

生产线或运输车辆中农产品的振动频率范围为 1~50 Hz,人类咀嚼食物时的频率约为 10 Hz。因此,使用 1~50 Hz 进行线性频率扫描,取 50 个点,将预载力设定为 0.1 N,具体程序如下:①将温度升到 30℃,平衡 1 min。②频率扫描。

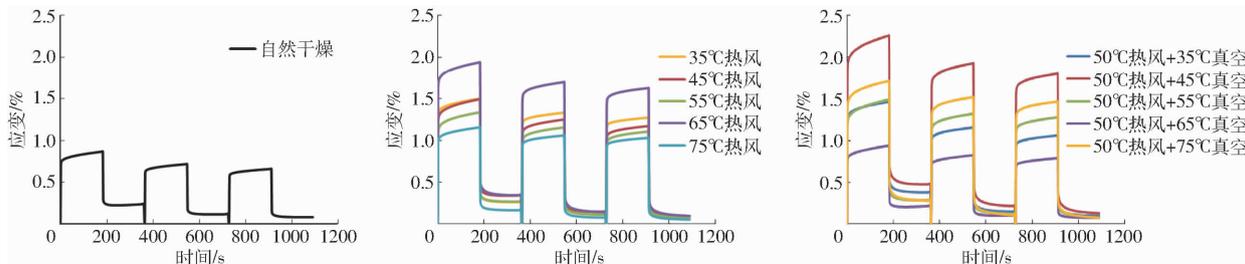


图1 自然干燥、复合干燥及热风干燥的玉米 3 次重复蠕变图

Fig.1 Strain as function of time for maize kernels dried by nature, hot-air - vacuum and hot-air

2.2 应力松弛测试结果分析

图 2 和图 3 显示的是自然干燥、复合干燥及热风干燥玉米籽粒的应力随时间变化的情况。如图中所示,不同方式干燥的玉米籽粒应力松弛曲线具有

1.3.5 X 射线衍射测试

将 3 种方式干燥的玉米籽粒磨成粉末,放进玻璃样品槽中压实,设定工作电流为 20 mA,工作电压 36 kV,扫描角度间隔为 0.02(°)/min,扫描速率为 1(°)/min,起始角为 5°,终止角为 40°。

1.3.6 扫描电子显微镜测试

将 3 种方式干燥的玉米籽粒沿纵轴用小刀轻轻切开,取其中一半放置在样品台上,真空条件下进行喷金,然后置于扫描电镜中,15 kV 加速电压下观察并拍摄其显微图像(放大倍数为 400 倍和 1 000 倍)^[18]。

1.3.7 数据分析

分析软件为 TA Instrument's Universal Analysis 2000 Software Version 4.3 和 SPSS 17.0,数据用平均值±标准偏差表示。

2 结果与讨论

2.1 3 次重复蠕变-恢复测试结果分析

图 1 显示的是经过自然干燥、复合干燥及热风干燥的玉米籽粒的应变随时间变化的情况。从图中可以看出,应变在第 1 个周期最大,在第 2 个周期次之,在第 3 个周期最小。这是因为玉米是粘弹性材料,粘性使得玉米籽粒在每个周期中都产生了不可恢复的形变。此外,蠕变越容易发生,材料的粘弹性越差^[19]。复合干燥中,50℃ 热风 + 45℃ 真空的应变最大,它也是所有干燥方式中应变最大的,这说明 50℃ 热风 + 45℃ 真空复合干燥的玉米粘弹性较差。除了 50℃ 热风 + 65℃ 真空的应变比自然干燥的应变小以外,其他方式的应变均比自然干燥的高。在热风干燥中,65℃ 干燥的玉米应变最大,其他 4 个温度的应变随温度升高而降低,即 75℃ 的应变最小。这说明 65℃ 干燥的玉米粘弹性较差,75℃ 干燥的玉米粘弹性较好。

相似的趋势,即:刚开始应力突然升到很高,随着时间的推移,应力逐渐下降,并最终达到一个平衡值。

图 2 中,自然干燥的应力松弛曲线达到的最大应力为 0.045 5 MPa。复合干燥中,50℃ 热风 + 65℃

真空达到的应力最大,为 0.041 4 MPa。其他组的最大应力按从高到低的顺序为:0.034 6、0.032 2、0.018 1、0.016 5 MPa。为了保证恒定的应变,自然干燥的玉米需要的应力最大,说明相比于复合干燥,自然干燥的粘弹性较小。图 3 中,除 65℃ 以外,应力松弛曲线随干燥温度增加呈现下降态势。其最大应力依次为:0.077 2、0.061 2、0.049 8、0.046 6、0.044 4 MPa。

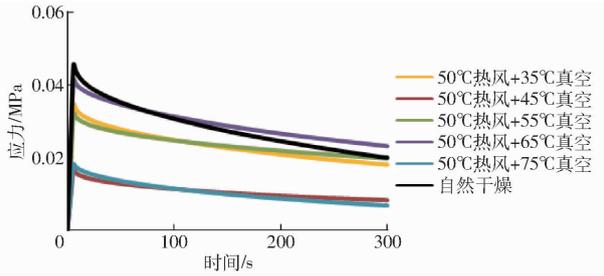


图 2 自然干燥与复合干燥的玉米应力松弛图

Fig. 2 Stress as function of time for maize kernels dried by nature and hot-air - vacuum

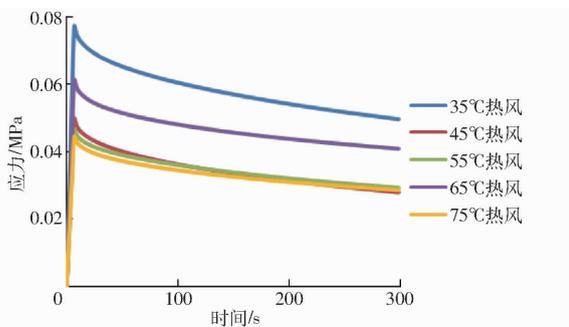


图 3 热风干燥的玉米应力松弛图

Fig. 3 Stress as function of time for maize kernels dried by hot-air

采用三元件 Maxwell 方程对应力松弛曲线进行非线性回归分析,得到的参数如表 1(自然干燥和复合干燥)和表 2(热风干燥)所示。表 1、2 中 R^2 均达到 0.977 以上,拟合效果很好。

从表 1 可以看出,自然干燥的 E 最大,50℃ 热风 + 45℃ 真空的 E 最小,各种干燥方式的 E 大小顺序与图 2 应力松弛曲线最大应力大小顺序一致,这也是图 2 曲线高低的原因。同样的规律在表 2 与图 3 中也有显示。表 2 中,35℃ 热风的 E_c 最大,这可以解释图 3 中 35℃ 热风的应力松弛曲线在趋于平衡时为各组中最高现象。

2.3 频率扫描测试结果分析

图 4 为不同方式干燥的玉米籽粒储能模量 G' 、损耗模量 G'' 、损耗角正切值 $\tan\delta$ 与频率的关系图。从图中可以看出,所有方式干燥的玉米的 G' 和 G'' 均随频率增大而增大。 G' 随频率增大而增大是因为玉米籽粒弹性形变松弛效应逐渐减弱,从而表现出了

表 1 玉米籽粒的应力松弛参数(自然干燥和复合干燥)

Tab.1 Stress-relaxation parameters of maize kernels (natural drying and hot-air - vacuum drying)

干燥方式	E /MPa	E_c /MPa	τ /s	R^2
自然干燥	0.025 ±	0.022 ±	133.473 ±	0.987
	0.001	0.006	7.296	
50℃ 热风 + 35℃ 真空	0.015 ±	0.018 ±	125.643 ±	0.985
	0.002	0.001	2.725	
50℃ 热风 + 45℃ 真空	0.007 ±	0.007 ±	99.472 ±	0.983
	0.001	0.001	7.758	
50℃ 热风 + 55℃ 真空	0.015 ±	0.019 ±	132.699 ±	0.984
	0.004	0.001	22.936	
50℃ 热风 + 65℃ 真空	0.020 ±	0.022 ±	136.180 ±	0.987
	0.001	0.001	16.478	
50℃ 热风 + 75℃ 真空	0.010 ±	0.007 ±	116.670 ±	0.983
	0.002	0.001	8.734	

表 2 玉米籽粒的应力松弛参数(热风干燥)

Tab.2 Stress-relaxation parameters of maize kernels (hot-air drying)

干燥方式	E /MPa	E_c /MPa	τ /s	R^2
35℃ 热风	0.026 ±	0.051 ±	111.697 ±	0.983
	0.001	0.003	0.383	
45℃ 热风	0.019 ±	0.025 ±	100.405 ±	0.982
	0.002	0.004	9.139	
55℃ 热风	0.016 ±	0.028 ±	107.831 ±	0.981
	0.001	0.002	3.967	
65℃ 热风	0.020 ±	0.050 ±	94.078 ±	0.977
	0.003	0.012	2.397	
75℃ 热风	0.013 ±	0.025 ±	105.906 ±	0.980
	0.001	0.005	6.888	

更多的弹性。 G'' 也随频率增大而增大,这是因为频率越大单位时间内克服分子间滑移损耗的能量越多^[20]。此外,OUIS^[21] 研究发现,所有的固体材料都具有动态弹性模量随频率增大而增大的特性,其理论解释可以用 Kramers - Kronig 关系来说明。从图中还可以看出,所有方式干燥的玉米 G' 均大于 G'' ,这说明弹性占据主导地位,干燥后的玉米表现出的弹性大于粘性。自然干燥的玉米 G' 及 G'' 与复合工艺干燥玉米的 G' 及 G'' 差异较大。 $\tan\delta$ 的范围为 0.05 ~ 0.2,变化范围较小,这是因为所有样品的 G' 与 G'' 的变化趋势接近。

2.4 扫描电子显微镜测试结果分析

图 5 显示的是不同方式干燥的玉米籽粒粉质胚乳在 400 倍(左侧)和 1000 倍(右侧)放大倍数下的表观形态,图 6 显示的是不同方式干燥的玉米籽粒角质胚乳在 400 倍(左侧)和 1000 倍(右侧)放大倍数下的表观形态。图 5 中淀粉颗粒结合较为松散,颗粒之间的空隙很大,图 6 中淀粉颗粒结合较为

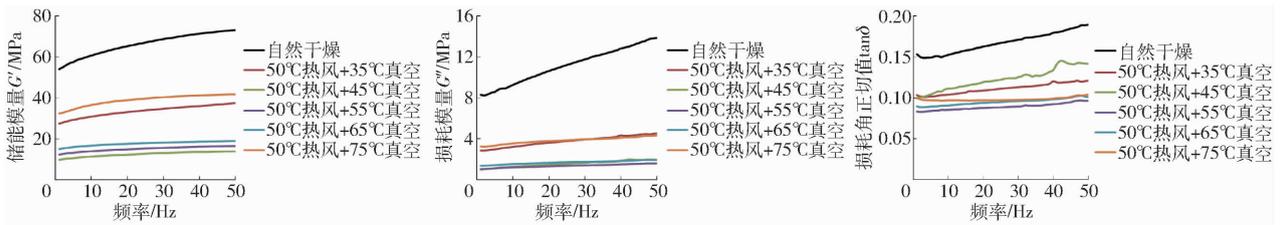


图4 不同方式干燥的玉米储能模量、损耗模量、损耗角正切值与频率的关系

Fig. 4 Variation of storage modulus, loss modulus and $\tan\delta$ as function of frequency for maize kernels dried by different methods

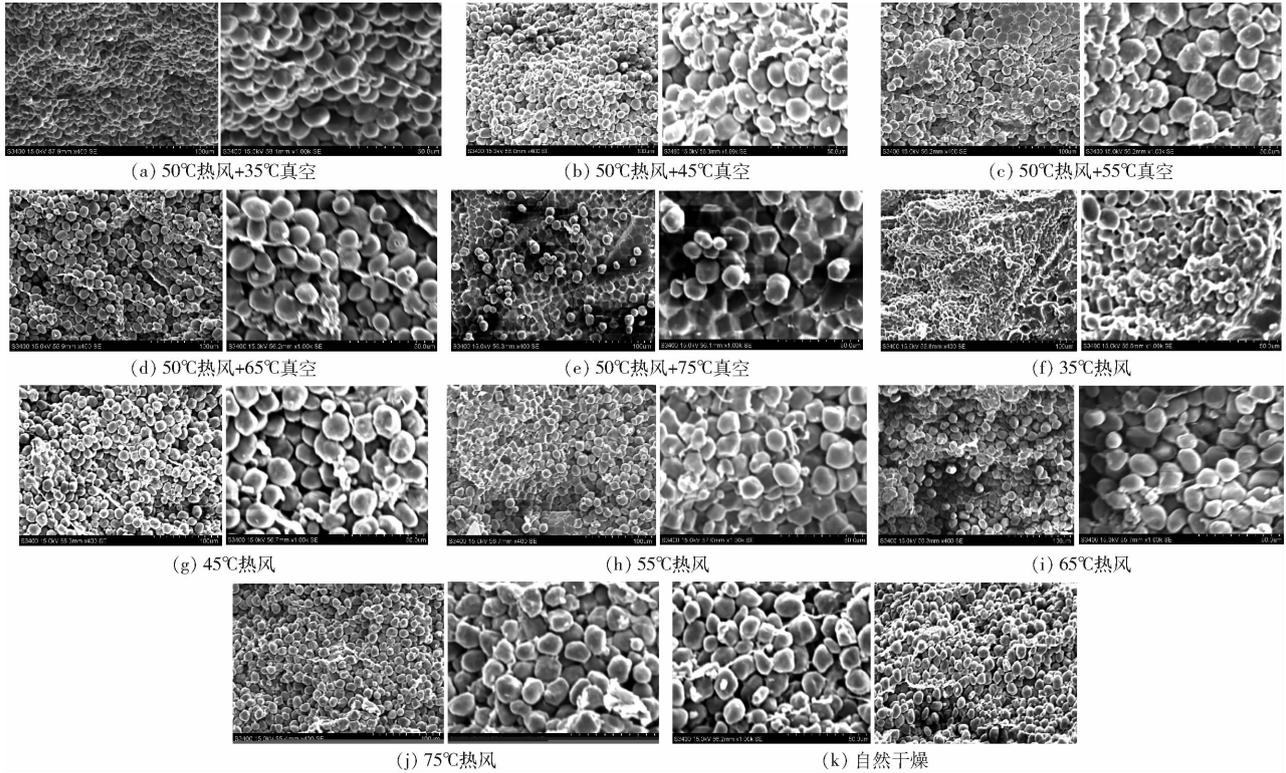


图5 不同方式干燥的玉米籽粒切面扫描电子显微镜图(粉质胚乳)

Fig. 5 SEM microphotographs of cut section of maize kernels dried by different methods (silty endosperm)

致密。

从图5可以看出,对于粉质胚乳,自然干燥的玉米中淀粉颗粒近似为椭球型。当真空干燥温度为35℃时,淀粉颗粒更接近球型,棱角相对较少。热风干燥和复合工艺干燥中,高温干燥的玉米中淀粉颗粒较为干瘪,低温干燥的较为圆润饱满。温度相同的情况下,真空干燥的玉米中淀粉颗粒比热风干燥的更为饱满。这是因为真空干燥采用的是将气压降低进行干燥的方法,由于气压减小,水的沸点降低,水分可以在较低的温度下蒸发。同时,低温对玉米的品质影响较小。而对于热风干燥,由于水的沸点没有降低,要达到真空干燥的效率需要更高的温度,而高温会影响玉米的品质。因此,真空干燥的玉米品质更好。从图6可以看出,对于角质胚乳,随着温度升高,由于失水,淀粉颗粒逐渐变得干瘪。高温干燥时,玉米失水较快,淀粉颗粒受热较高,颗粒出现的凹处较多。而低温干燥时,玉米失水较慢,淀粉颗

粒受热较低,颗粒较为饱满。

2.5 X射线衍射结果分析

图7为自然干燥、热风干燥和复合干燥的玉米X射线衍射图。从图中可以看出,玉米中结晶形态为A形模式。自然干燥的玉米特征峰大约出现在 14.9° 、 17.0° 、 17.8° 、 22.6° (2θ)。其中,在 14.9° 和 22.6° 出现单峰,在 17.0° 和 17.8° 出现双峰。热风干燥的玉米特征峰大约出现在 13.7° 、 15.7° 、 16.4° 、 21.5° (2θ)。其中,在 13.7° 和 21.5° 出现单峰,在 15.7° 和 16.4° 出现双峰。复合干燥中,35、45、75℃真空干燥的特征峰大约出现 13.9° 、 15.9° 、 16.8° 、 21.9° (2θ)。但是55℃和65℃真空干燥的特征峰大约出现在 14.8° 、 16.9° 、 17.8° 、 22.8° (2θ),这与自然干燥的结果基本一致。此外,图7中的图谱与玉米淀粉衍射图谱接近^[22],这是因为淀粉在玉米籽粒中占比最大(大于70%)。

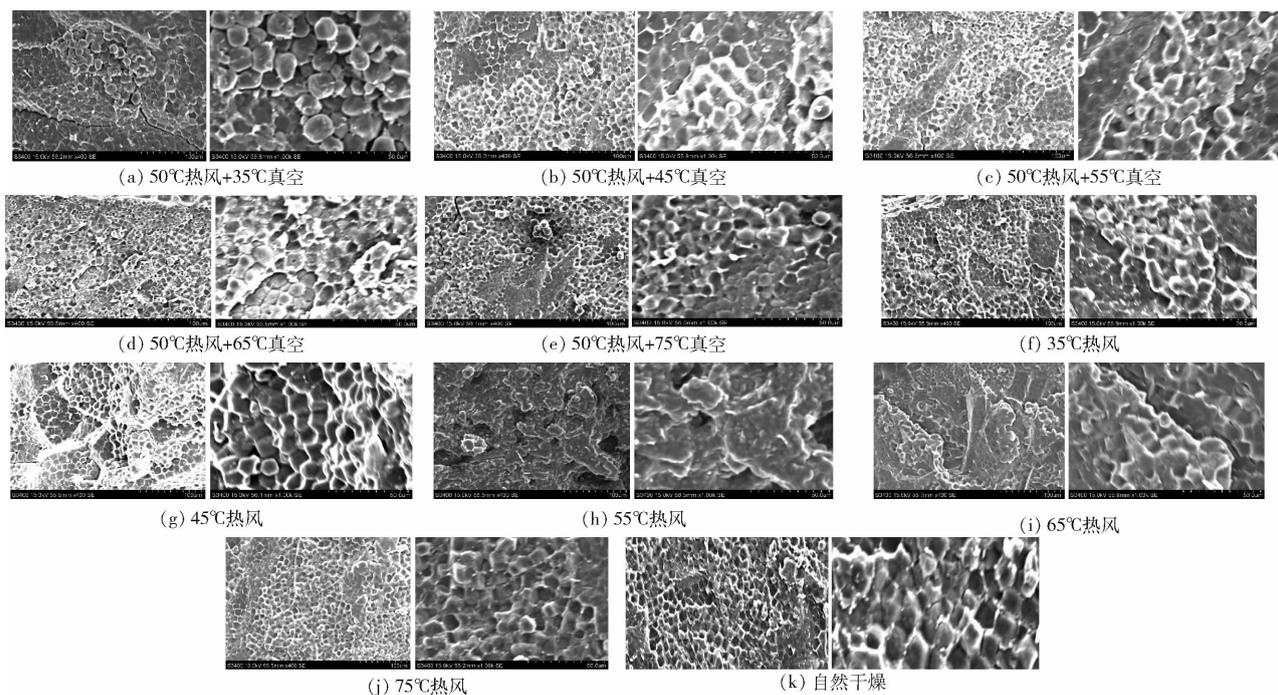


图 6 不同方式干燥的玉米籽粒切面扫描电子显微镜图(角质胚乳)

Fig. 6 SEM microphotographs of cut section of maize kernels dried by different methods (horny endosperm)

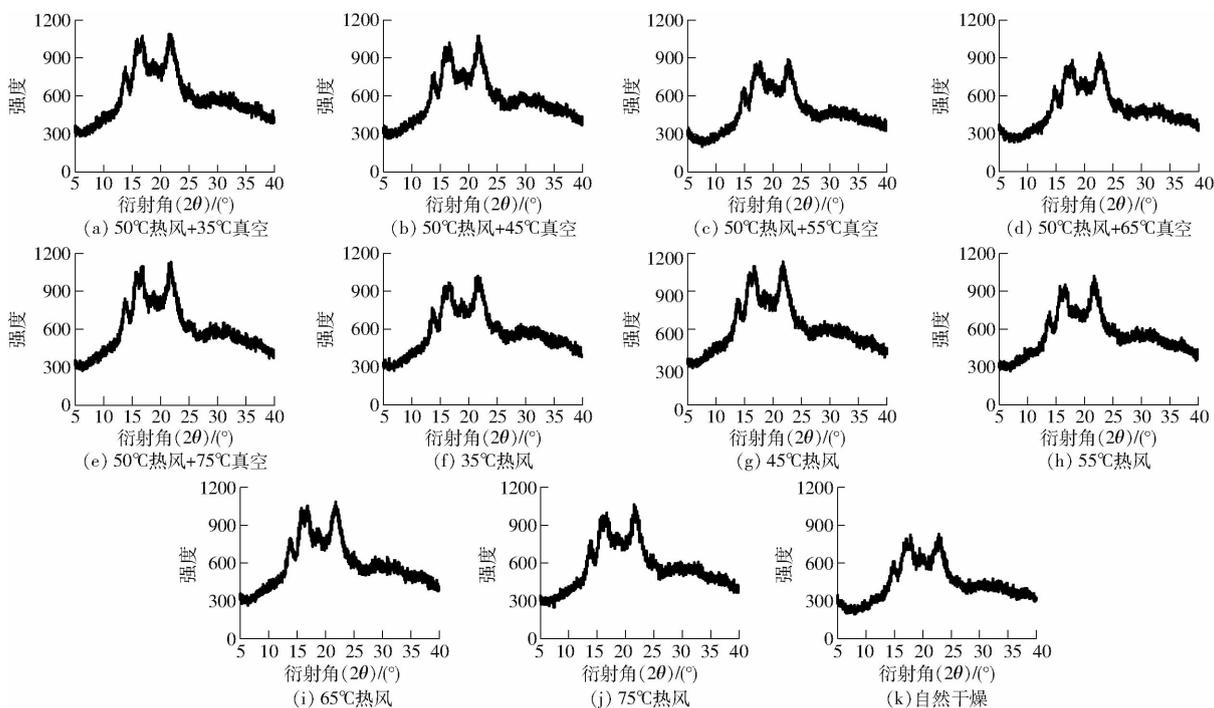


图 7 不同方式干燥的玉米籽粒 X 射线衍射图

Fig. 7 X-ray diffraction patterns of maize kernels dried by different methods

3 结论

(1) 3 次重复蠕变-恢复测试结果发现, 50°C 热风 + 45°C 真空复合干燥的玉米应变最大, 说明其粘弹性较差。热风干燥中, 65°C 干燥的玉米应变最大, 75°C 干燥的应变最小, 说明 65°C 干燥的玉米粘弹性较差, 75°C 干燥的玉米粘弹性较好。

(2) 应力松弛测试结果发现, 相比于复合干燥,

自然干燥的玉米应力松弛曲线达到的应力较大, 为 0.045 5 MPa, 说明自然干燥的玉米粘弹性较小。三元件 Maxwell 模型能很好地拟合应力松弛测试结果 (决定系数均达到 0.977 以上)。

(3) 在频率扫描试验中, 干燥后的玉米 G' 均大于 G'' , 说明干燥后的玉米表现出的弹性大于粘性, 弹性占据主导地位。

(4) 扫描电镜结果发现, 高温干燥的玉米中淀

粉颗粒较为干瘪,低温干燥的较为圆润饱满。温度相同的情况下,真空干燥的玉米中淀粉颗粒比热风干燥的更为饱满,真空干燥的玉米品质更好。

(5) X射线衍射试验结果发现,干燥后的玉米结晶形态均为A形模式。热风干燥的玉米特征峰大约出现在 13.7° 、 15.7° 、 16.4° 、 21.5° (2θ)。其中,

在 13.7° 和 21.5° 出现单峰,在 15.7° 和 16.4° 出现双峰。复合干燥中,只有 50°C 热风+ 55°C 真空和 50°C 热风+ 65°C 真空与自然干燥基本一致,它们的特征峰大约出现在 14.8° 、 16.9° 、 17.8° 、 22.8° (2θ)。玉米籽粒衍射图谱同玉米淀粉衍射图谱接近,这是因为淀粉在玉米籽粒中占比最大(大于70%)。

参 考 文 献

- [1] 王利润. 我国玉米生产现状及发展趋势[J]. 山西农经, 2015(3): 8-9.
- [2] MARQUES DA SILVA J R, SILVA L L. Relationship between distance to flow accumulation lines and spatial variability of irrigated maize grain yield and moisture content at harvest[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 94(4): 525-533.
- [3] 吕秋瑾, 斯美绮. 高水分玉米密封储藏[J]. 现代化农业, 1988(10): 37-38.
- [4] 曹崇文, 何金榜. 国外谷物干燥设备的发展趋势[J]. 现代化农业, 2002(1): 40-43.
- [5] 蒋五洋, 赵武云, 张大龙. 玉米烘干设备的研究进展[J]. 中国农机化, 2012(5): 17-22.
JIANG Wuyang, ZHAO Wuyun, ZHANG Dalong. Progress of research in equipment of corn drying[J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2012(5): 17-22. (in Chinese)
- [6] 尹丽妍. 玉米低温真空干燥特性及数学模型的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
YIN Liyan. Research on property and model of the corn low temperature vacuum drying[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [7] 董鹏飞. 粮食红外低温真空干燥实验研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2012.
DONG Pengfei. Experiment research of low temperature vacuum infrared drying the grain[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [8] 刘影. 稻米力学特性与碾磨食味品质研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2011.
LIU Ying. Study on mechanical property and milling and tasting quality of rice[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [9] 陈孝海. 基于ANSYS的挤搓式玉米脱粒行为力学特性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
CHEN Xiaohai. Research on the mechanical characteristics of extruding-rubbing type corn thresher behavior based on ANSYS software[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [10] MURALIDHARA B, KUMARESH BABU S P, SURESHA B. Studies on dynamic mechanical and thermal properties of boron carbide filled carbon fiber/epoxy composites[J/OL]. *Materials Today: Proceedings*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.204>.
- [11] NAGAMADHU M, VIJAY KUMAR S, RAVI KUMAR S, et al. Dynamic mechanical analysis and thermal stability of neem wood veneer plastic composites[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 24: 2265-2273.
- [12] JOSHI A, SAVNUR S, UPPIN V S, et al. Viscoelastic behavior of cellulose coated glass/kevlar epoxy composite laminates using dynamic mechanical analyzer[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(11): 25486-25493.
- [13] HALIM Z A A, YAJID M A M. Comparison of dynamic mechanical properties and thermal conductivity of unsaturated polyester composites filled with plain SiO_2 aerogel and core-shell SiO_2 aerogel[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 17: 686-693.
- [14] 尹冬敏, 吴敏, 李栋. 超微粉碎玉米秸秆微观结构与秸秆淀粉共混膜蠕变特性[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 297-304.
YIN Dongmin, WU Min, LI Dong. Microstructure of ball milling cornstalk and creep behavior of corn starch-based films[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(Supp.): 297-304. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s046&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.046. (in Chinese)
- [15] 吴敏, 潘虹宇, 赵东林, 等. 燕麦茎秆理化组分分析与动态力学特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 447-455.
WU Min, PAN Hongyu, ZHAO Donglin, et al. Analysis of physicochemical composition and dynamic mechanical properties of avena sativa stalk[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(Supp.): 447-455. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s061&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.061. (in Chinese)
- [16] ASABE Standards. Density, specific gravity, and mass-moisture relationships of grain for storage: ANSI/ASAE D241.4[S]. St. Joseph: ASABE, 2008.
- [17] MENARD K P. Chapter 3: rheology basics: creep-recovery and stress relaxation[M]//MENARD K P. *Dynamic mechanical analysis: a practical introduction*. Boca Raton: CRC Press, 1999: 51-60.
- [18] SHENG S Y, WANG L J, LI D, et al. Viscoelastic behavior of maize kernel studied by dynamic mechanical analyzer[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 112: 350-358.
- [19] TIAN Z H, DUAN L, WU L, et al. Rheological properties of glutaraldehyde-crosslinked collagen solutions analyzed quantitatively using mechanical models[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2016, 63: 10-17.
- [20] 赵朋, 颜浩, 马诗雯, 等. PA66/GF/PPO 共混材料的动态流变性能[J]. 工程塑料应用, 2014(10): 64-68.
ZHAO Peng, YAN Hao, MA Shiwen, et al. Dynamical rheological behavior of PA66/GF/PPO blends[J]. *Engineering Plastics Application*, 2014(10): 64-68. (in Chinese)
- [21] OUIS D. On the frequency dependence of the modulus of elasticity of wood[J]. *Wood Science and Technology*, 2002, 36(4): 335-346.
- [22] CHI H, XU K, WU X L, et al. Effect of acetylation on the properties of corn starch[J]. *Food Chemistry*, 2008, 106(3): 923-928.