

# 小米挤压膨化产品的吸湿动力学研究

赵学伟<sup>1,2</sup>, 魏益民<sup>3</sup>, 王章存<sup>1,2</sup>, 张 华<sup>1,2</sup>

(1. 郑州轻工业学院食品与生物工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南省食品生产与安全协同创新中心, 河南 郑州 450002; 3. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193)

**摘要:** 挤压膨化食品极易从周围环境中吸收水分, 导致脆性丧失; 对吸湿动力学过程的了解有助于选定合适的包装材料和存储环境。将4种形态的小米挤压膨化产品在不同温度、相对湿度下吸湿, 并对吸湿过程进行模拟分析。与扩散模型、Peleg模型相比, Weibull模型最能预测小米挤压膨化产品的吸湿行为。根据Weibull模型, 同一温度下, 初始吸湿速率随相对湿度增大而近似线性增大。同一相对湿度下, 总体吸湿速率随温度升高呈近似线性增大。温度越低、相对湿度越高, 平衡水分越高。不同样品间的平衡水分差异较小, 而吸湿速度差异明显, 尤其在低温—低相对湿度条件时。外层气孔结构的差异可能是样品间初始吸湿速率差异的主要原因。

**关键词:** 吸湿; 动力学; 挤压; 小米

中图分类号: TS 210.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2017)02-0011-06

## Research on moisture absorption kinetics of millet extruded products

ZHAO Xue-wei<sup>1,2</sup>, WEI Yi-min<sup>3</sup>, WANG Zhang-cun<sup>1,2</sup>, ZHANG Hua<sup>1,2</sup>

(1. College of Food & Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou Henan 450002; 2. Henan Collaborative Innovation Center for Food Production and Safety, Zhengzhou Henan 450002; 3. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193)

**Abstract:** Extruded-puffed foods absorb moisture extremely easily from environment to cause losing their unique texture characteristic of crispness. The knowledge of the moisture absorption kinetics can help to select proper package materials and storage conditions. Four kinds shape of millet extruded-puffed foods were allowed to absorb moisture from air with different relative humidity levels at different temperatures, and the processes were simulated. Compared with the Peleg and diffusion models, the Weibull model was more suitable for predicting water absorption behavior of millet extruded-puffed foods. At the same temperature, the initial water-absorbing rate approximately linearly increased with the relative humidity of air. At the same relative humidity, the general water-absorbing rate approximately linearly increased with temperature. The lower the temperature was, the higher the relative humidity and equilibrium moisture were. There were little differences in equilibrium moisture between the four samples, while significant differences in water-absorbing rates especially at lower temperature combined with lower relative humidity. The different external layer with pore structure of each sample were possibly the main reason of the various initial water-absorbing rates

**Key words:** moisture regain; kinetics; extrusion; millet

低水分的谷物挤压膨化食品由于其化学构成、多孔性以及淀粉以无定型状态存在而易从周围环境中吸湿<sup>[1]</sup>, 导致水分含量升高, 失去人们所期望的

脆性<sup>[2]</sup>。处于吸湿过程中的产品, 其水分含量与吸湿速率和吸湿时间有关。环境的相对湿度、温度以及产品自身特性决定吸湿的快慢。经过长时间的吸湿, 达到吸湿平衡。

前人就挤压膨化产品的吸湿及其引起的质构特

收稿日期: 2016-09-02

基金项目: 科技部农业科技成果转化资金(05EFN216900373)

作者简介: 赵学伟, 1969年出生, 男, 教授。

性变化进行了广泛研究,并建立了相应的模型<sup>[3-4]</sup>。在建立质构特性与水分含量的关系,以及水分含量与环境相对湿度、温度之间的关系之后,理论上讲就可以将这两个关系式耦合,根据环境的相对湿度和温度直接预测出吸湿平衡后样品的质构特性。这将有助于选择合理的储藏和包装条件<sup>[5]</sup>。

前人研究了谷物早餐在水或牛奶中的吸水过程<sup>[6-9]</sup>,而对挤压膨化食品从空气中吸湿的动力学过程缺乏研究。温度和相对湿度是影响吸湿动力学的两个重要外部因素。多孔性食品的孔结构特性会对水分扩散产生影响<sup>[10]</sup>。谷物挤压膨化产品作为多孔性食品,其产品形态不同,孔结构特性也不同。关于挤压膨化产品的形态如何对其吸湿速率产生影响,以及产生影响的机理,未见相关研究报道。

本实验采用4种形态的小米挤压膨化产品,测定其不同温度、相对湿度下水分含量的变化,旨在建立其吸湿动力学模型,并研究产品形态的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

小米样品(粗蛋白10.40%、粗脂肪1.96%、粗纤维1%、碳水化合物86.64%)。DSE-25双螺杆挤压机:德国Brabender公司,根据中心组合实验设计生产不同的小米挤压膨化产品。根据产品的外部形态可以将其分为4类,从每类中选出一个代表性样品。主要挤压条件和物理特性见表1和图1。

表1 4种挤压产品的直径和容积密度及挤压条件

样品编号	I	II	III	IV
物料水分/%	17	17	19	19
V区温度/℃	165	195	180	210
直径/mm	15.95	11.25	9.86	6.86
容积密度/(cm <sup>3</sup> /g)	4.73	3.29	4.02	5.57

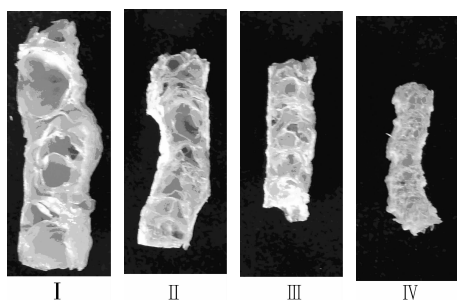


图1 4种挤压产品的轴向切面照片

由图1可以看出,样I的结构最粗糙,表现为气孔数量最少、气孔平均直径最大、孔壁最厚。样IV的气孔数量最多、气孔直径最小、孔壁最薄、气孔大小最均匀。另2个样品的结构处于上述两样品之间,其中样II的结构更接近样I的结构,样III的结构更接近样IV的结构。

### 1.2 吸湿动力学实验

将4种样品在40℃烘箱中干燥12h,每个样取2根(每根长约15cm)用于平行实验,记录初始质量。将盛有K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、KI、KCl饱和盐溶液的干燥器事先放入不同温度(15、25、35℃)的恒温箱中平衡温度2h后,将样品放入干燥器。每隔一定时间间隔取出样品,用万分之一天平快速称重后放回。当连续3次吸湿后的质量相差小于0.001g时,认为吸湿达到平衡。取出样品烘至衡重,计算出样品的初始水分。根据文献<sup>[11]</sup>确定不同温度下与3种饱和盐溶液平衡的空气中的相对湿度。

### 1.3 吸湿动力学模型

Peleg最早于1988提出经验模型,如式(1),用于描述奶粉和大米的吸湿动力学<sup>[12]</sup>。该模型后来被用于模拟膨化谷物早餐<sup>[6-8]</sup>的浸泡吸水过程。

$$\frac{M_t - M_0}{M_\infty - M_0} = \frac{t}{k + t} \quad (1)$$

式中, $M_0$ 、 $M_t$ 、 $M_\infty$ :分别为吸湿开始时、 $t$ 时的吸湿平衡时的水分含量; $k$ :常数。

Weibull分布函数是瑞典数学家Weibull于1937提出的一个分布函数,用于描述材料强度的分布情况,在很多领域得到广泛应用<sup>[13]</sup>。该函数的累计分布形式,如式(2),在食品干燥和吸湿动力学研究中经常被采用,已用于模拟膨化谷物早餐在水<sup>[6-9]</sup>、牛奶<sup>[7,9]</sup>中的吸水过程。

$$\frac{M_t - M_0}{M_\infty - M_0} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (2)$$

式中, $\beta$ :比例参数; $\alpha$ :形状参数。

吸湿过程也是水蒸气由湿空气传递到食品表面,再由表面向内传递的过程。内部扩散遵循Fick第二定律。可以把挤压膨化样品看作长圆柱,当水分扩散为吸湿的限速步骤时,通过对Fick第二定律求解可以得出方程(3)<sup>[14]</sup>,一般取级数的前1项或2项即可。有的研究者应用该模型模拟膨化谷物早餐浸泡过程中的吸水<sup>[9]</sup>,以及饼干吸湿过程中的水分传递<sup>[15]</sup>。

$$\frac{M_t - M_0}{M_\infty - M_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{b_n} \exp\left(-\frac{b_n^2 D_{eff} t}{r_c^2}\right) \quad (3)$$

式中,  $b_n$ : 0级贝塞尔方程的根;  $r_c$ : 圆柱体半径;  $D_{eff}$ : 有效扩散系数。

本实验采用这3种模型模拟小米挤压膨化食品从空气中吸收水蒸气的动力学过程。

### 1.4 模型评判方法

采用以下统计量判定模型与实验数据的拟合度<sup>[16]</sup>: 相关系数  $R$ 、剩余平方和  $RSS$ 、标准估计误差  $SEE$ 、平均相对偏差  $MRD$ 。  $R$  值越大,  $RSS$ 、 $SEE$ 、 $MRD$  越小说明模型的拟合度越高。

$$RSS = \sum_{i=1}^m (V - \bar{V})^2 \quad (4)$$

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (V - \bar{V})^2}{d_f}} \quad (5)$$

$$MRD = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|V - \bar{V}|}{V} \quad (6)$$

式中,  $V$ 、 $\bar{V}$ : 分别为水分含量测定值、预测值;  $d_f$ : 回归模型的自由度;  $m$ : 测定数据点的数量。采用 STATISTIC-6.0 数据处理软件中的非线性回归分析功能进行模型参数求解。

## 2 结果与分析

### 2.1 样品间的差异

图2给出了4种形态的小米挤压膨化产品在同一温度不同相对湿度下的吸湿过程。可以看出, 不同样品间的平衡水分略有差异。不同样品间的最明显差异表现在初始吸湿阶段, 在该阶段, 水分含量快速增大, 可以用该阶段曲线的斜率近似表示吸湿速度。样IV的初始吸湿速率最快, 样I的最慢, 决定吸湿速率的因素除传质动力外, 另一重要因素是水分传递的阻力, 其中水分在样品内的扩散阻力占主导。水分在不同样品内的扩散系数不同可能是造成样品间吸湿速度差异的主要原因。周围环境的相对湿度越高, 达到平衡所用时间越长。

### 2.2 不同模型比较

图3、图4分别给出了样IV在15℃和RH0.86、35℃和RH0.43条件下的吸湿过程和3种模型的拟合曲线。在35℃和RH0.43条件下3种模型基本上都能模拟整个吸湿过程, 但是扩散模型在吸湿开始一段时间后的估计值比实际值偏高, 而在吸湿后期估计值偏低。吸湿条件为15℃和RH0.86时, 扩散模型对开始和结束阶段的估计值偏低,

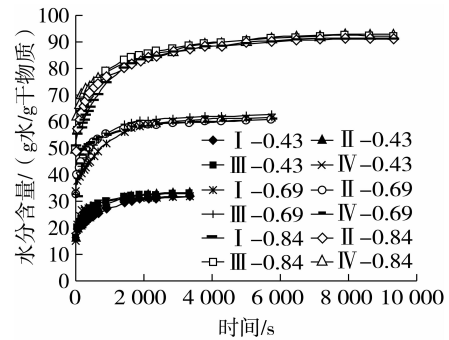


图2 在25℃下不同样品在3个相对湿度下的吸湿过程  
注: 为便于观察, 其中0.69相对湿度下的数据上移0.05, 0.84相对湿度下的数据上移0.1。

中间阶段偏高; Peleg模型在吸湿开始一段时间内估计值偏高, 随后的估计值又偏低; 只有Weibull模型在整个吸湿阶段的估计值与测定值基本一致。前人研究膨化谷物早餐在水中的吸湿动力学时, 发现Peleg模型对开始与结束阶段的估计值偏低, 而Weibull模型能够较好地模拟整个吸湿过程<sup>[6]</sup>。

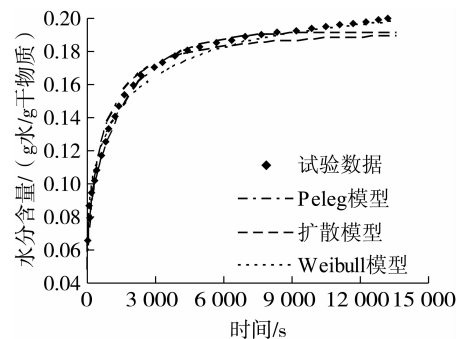


图3 样IV在15℃和RH0.86条件下的吸湿过程及模拟曲线

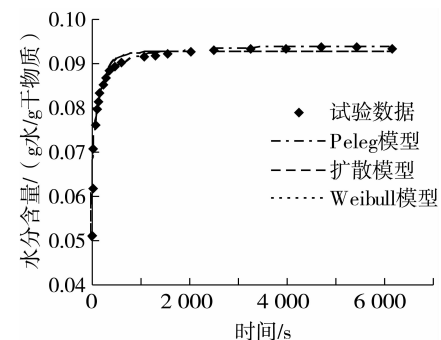


图4 样IV在35℃和RH0.43条件下的吸湿过程及模拟曲线

表2给出了采用3种模型模拟样IV吸湿过程的统计量值。通过比较可以发现, 3种模型的  $SEE$ 、 $RSS$ 、 $MRD$  值随温度升高、相对湿度增大而增大,  $R$  值则降低, 说明所有模型在高温—低相对湿度下的拟和度较高。

表2 采用3种模型对样IV吸湿过程的回归分析结果

相对湿度-温度/℃	模型	SEE ( $\times 10^{-3}$ )	RSS ( $\times 10^{-5}$ )	MRD ( $\times 10^{-3}$ )	R
0.43-15	Peleg	2.61	1.36	5.85	0.9990
	扩散	7.13	10.17	18.13	0.9928
	Weibull	2.73	2.24	7.77	0.9997
0.43-25	Peleg	3.25	2.11	7.44	0.9971
	扩散	6.23	7.77	16.52	0.9893
	Weibull	2.32	1.61	5.23	0.9978
0.43-35	Peleg	2.33	1.08	5.96	0.9980
	扩散	4.82	4.64	15.11	0.9910
	Weibull	2.62	2.06	9.70	0.9962
0.71-15	Peleg	8.71	15.12	15.82	0.9962
	扩散	15.52	48.18	30.64	0.9878
	Weibull	5.03	7.57	9.76	0.9981
0.69-25	Peleg	11.28	25.46	21.56	0.9891
	扩散	14.73	43.42	33.98	0.9814
	Weibull	6.63	1.12	1.49	0.9994
0.66-35	Peleg	5.54	6.14	12.19	0.9963
	扩散	10.57	22.36	27.17	0.9866
	Weibull	5.48	8.99	14.13	0.9946
0.86-15	Peleg	30.92	191.18	50.00	0.9819
	扩散	28.14	158.41	49.00	0.9850
	Weibull	6.45	12.48	10.46	0.9988
0.84-25	Peleg	35.04	245.52	60.16	0.9890
	扩散	27.19	147.82	52.99	0.9740
	Weibull	4.53	6.17	9.39	0.9991
0.83-35	Peleg	21.22	90.07	45.80	0.9795
	扩散	23.89	114.16	55.96	0.9739
	Weibull	7.30	15.98	16.64	0.9964

综合比较3种模型模拟结果可以发现,在所有实验条件下扩散模型的拟和度均最差,说明水分扩散不是吸湿的全部形式,Sacchetti等人关于挤压谷物早餐在牛奶中的吸水研究也有类似发现<sup>[17]</sup>。Peleg模型在吸湿条件为15℃和RH0.43以及35℃和RH0.43,35℃和RH0.66时与Weibull模型的拟和度相当或略高,而在其它吸湿条件下的拟和度均

低于Weibull模型的拟和度。对于其它3种形态的样品,也可得出类似的结论,为此推断,在全部实验条件范围内Weibull模型与实验数据的拟和度最高。

### 2.3 吸湿过程的Weibull模拟

以Weibull方程为回归模型,4种样品在不同吸湿条件下的回归参数见表3。 $\beta$ 值为吸湿完成63% ( $=1-1/e$ )时所需要的时间<sup>[7]</sup>,反映总体吸湿过程的快慢, $\beta$ 值越大说明吸湿越慢。由表3可以看出,对所有样品来说,在相同相对湿度条件下随温度升高 $\beta$ 值减小,说明总体吸湿速度加快。进一步分析显示,两者基本呈线性关系, $R^2$ 在0.9537~1之间。在相同温度条件下,RH由0.43增加到0.69左右时总体速度变化不大或略有升高,达到0.84左右时总体吸湿速度明显降低( $\beta$ 值增大),这种现象在低温时表现最为明显。RH变化对不同样品的总体吸湿速度影响也不同,样IV在RH达到0.84左右时总体吸湿速度明显降低,而样I则降低不明显。在RH=0.44、~0.69时,样I的总体吸湿速度最慢,样IV的最快,样II、样III的居中;RH=~0.84时,样IV的总体吸湿速度明显变慢,甚至低于样I的,不同样品间的差距也明显缩小。与RH相比,温度对总体吸湿速率的影响较大,为此,在存放过程中应十分注意对温度的控制。

与样I、样III相比,样II、样IV的 $\beta$ 值在相对湿度由0.69增大到0.84时,增幅很大,表明在高相对湿度下总体吸湿速度大幅下降。推测是由于这两个样品的挤压套筒温度较高(见表1),其熟化程度更彻底所致。谷物粉熟化后水分扩散系数降低<sup>[18]</sup>。

表3 4种样品在不同吸湿条件下的Weibull模型参数

样号	温度-平衡相对湿度	$M_{\infty}/\%$	$\beta/s$	$\alpha$	温度-平衡相对湿度	$M_{\infty}/\%$	$\beta/s$	$\alpha$	温度-平衡相对湿度	$M_{\infty}/\%$	$\beta/s$	$\alpha$
I	15℃-0.43	10.46	1451.00	0.96	25℃-0.43	9.73	908.73	0.94	35℃-0.43	9.20	349.89	0.99
	15℃-0.71	14.57	1374.45	0.90	25℃-0.69	13.56	878.02	0.856	35℃-0.66	12.38	366.59	0.86
	15℃-0.86	18.51	1655.14	0.84	25℃-0.84	17.30	1073.17	0.81	35℃-0.83	16.08	493.92	0.77
II	15℃-0.43	10.38	859.10	0.82	25℃-0.43	9.87	400.43	0.75	35℃-0.43	9.41	183.16	0.95
	15℃-0.71	14.06	787.05	0.72	25℃-0.69	13.32	447.57	0.60	35℃-0.66	11.92	231.56	0.70
	15℃-0.84	19.60	1729.40	0.63	25℃-0.84	17.98	911.10	0.54	35℃-0.83	16.63	416.91	0.58
III	15℃-0.43	10.79	963.57	0.80	25℃-0.43	10.34	602.05	0.76	35℃-0.43	9.58	224.59	0.92
	15℃-0.71	14.64	853.55	0.78	25℃-0.69	13.81	577.86	0.72	35℃-0.66	12.86	288.00	0.81
	15℃-0.86	19.21	1321.45	0.70	25℃-0.84	17.71	789.01	0.66	35℃-0.83	16.53	345.04	0.65
IV	15℃-0.43	10.48	437.24	0.58	25℃-0.43	9.61	212.70	0.53	35℃-0.43	9.28	112.24	0.73
	15℃-0.71	14.58	468.07	0.51	25℃-0.69	13.63	302.61	0.42	35℃-0.66	12.51	141.05	0.56
	15℃-0.86	21.33	1889.49	0.45	25℃-0.84	19.68	1141.90	0.38	35℃-0.83	17.42	474.61	0.40

$\alpha$  称为形状参数,反映初始吸湿速的大小,其值越大表示初始吸湿速率越小<sup>[7]</sup>。对所有样品来说,在 RH 不变时,在温度从 15 °C 上升到 25 °C 时  $\alpha$  值有所降低,35 °C 时反而升高,说明温度升高使吸湿初始速度降低了,这种现象在相对湿度较低时更加明显,且不同样品也存在差异,对样 I 来说,这种现象就不太明显。在相同温度条件下,初始吸湿速度随 RH 的升高而增大,且基本呈线性关系,决定系数  $R^2$  在 0.870 5 ~ 0.999 9 之间,在 35 °C 时的升高速度较快。不同样品间的差异为:样 IV 的初始吸湿速度最快,样 I 的最慢,样 II、样 III 的居中。 $M_{\infty}$  为根据模型求得的吸湿平衡水分的理论值,RH 越高、温度越低, $M_{\infty}$  值越大。

### 3 讨论

式(3)是在假设吸湿过程中样品的表面水分质量分数与环境的相对湿度始终保持平衡情况下,对 Fick 第二扩散方程求解的结果。在相对湿度较大时,这种平衡需要一定的时间,这是扩散模型的预测性能较差的主要原因。如果考虑样品表面与空气之间的对流传质,虽然也能给出 Fick 第二扩散方程的解析解,但是要确定扩散系数,将十分困难<sup>[14]</sup>。在环境的相对湿度较小时,更接近式(3)成立的假设前提,所以,在相对湿度较低(0.44)时,扩散模型的预测性能有所改善。此时,求得 15、25、35 °C 时的扩散系数分别为  $0.30 \times 10^{-8}$ 、 $0.59 \times 10^{-8}$ 、 $1.14 \times 10^{-8}$   $m^2/s$ 。可以验证:扩散系数与温度的关系基本符合普遍适用的 Arrhenius 方程。

对于所有样品来说,根据 Weibull 模型中的参数  $\alpha$ ,在温度由 25 °C 上升到 35 °C 时吸湿初始速度反而有所降低。而根据扩散模型给出的水分扩散系数值则能合理解释上述现象。看来,不能以理解温度如何影响对扩散系数的思路来理解温度对 Weibull 模型中参数  $\alpha$  的影响。 $\alpha$  应该是综合体现了外部以及内部阻力对吸湿速率的影响。

关于不同样品间  $\alpha$  值的差异。不同样品的部分横断面见图 5。可以看出样品的横断面结构是不均匀的,大致可分为内、外两层,内层气孔的孔径大

且孔壁厚,而外层的孔径小且孔壁薄。样 IV 的外层厚度最大,且气孔分布最致密、平均孔径最小;样 I 的外层厚度最小,且气孔数量最少;其它 2 个样的居中。由于外层的气孔并不是完全封闭的,当样品与湿空气接触时,样 IV 将有更大面积的孔壁与湿空气接触,因而单位质量的样品在单位时间内将吸附更多的水蒸气,体现在  $\alpha$  值(初始吸湿速率)较高。随吸湿的进行,吸附速率对吸湿速率的影响逐渐减弱,被吸附水分向内部的转移转变为吸湿的限速步骤。这时的吸湿速率(称为总体吸湿速率,由  $\beta$  值来体现)主要由产品的总体气孔结构特性以及基质自身的水分扩散特性所决定。

糊化淀粉中的水分扩散系数一般在  $10^{-10} m^2/s$  数量级上<sup>[18]</sup>,该值比上述根据扩散模型计算出的扩散系数小得多。实际上,上述结果只是表观扩散系数。而对于高度多孔性的挤压膨化食品,内部有很多空气。水分在空气中的传质速率要快得多,使得表观扩散系数较大。

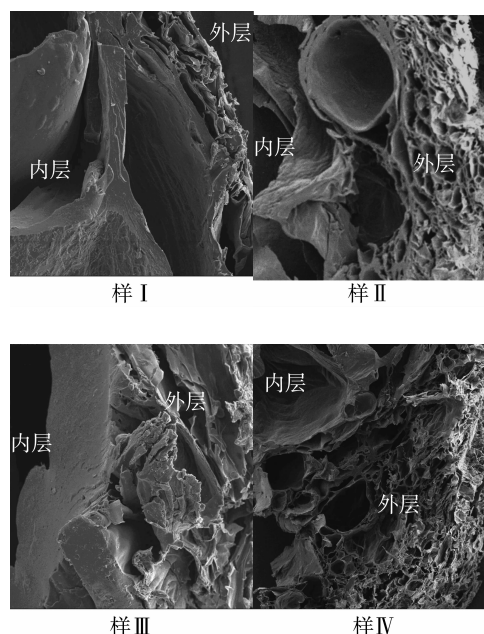


图5 样品部分横截面扫描电镜图( $\times 200$ )

### 4 结论

与 Peleg 模型和扩散模型相比,Weibull 模型更能模拟小米挤压膨化产品的吸湿动力学过程。同一温度下,初始吸湿速率随相对湿度增大而呈近似线性增大。同一相对湿度下,总体吸湿速率随温度升

高呈近似线性增大。不同样品间的平衡水分差异较小,而吸湿速度差异明显,尤其在低温—低相对湿度条件时,其中初始吸湿速率的差异更为明显。外层气孔结构的差异可能是样品间初始吸湿速率差异的主要原因。

#### 参考文献:

- [1] Colonna P, Doublier J P, Melcion F, et al. Extrusion cooking drum drying of wheat starch. I. Physical and macromolecular modifications [J]. *Cereal Chem*, 1984, 61(6): 538–541.
- [2] Nicholls R J, Appelqvist I A M, Davies A P, et al. Glass transition and fracture behavior of gluten and starches within the glassy state [J]. *J Cereal Sci*, 1995, 21(1): 25–36.
- [3] Heidenreich S, Jaros D, Rohm H, et al. Relationship between water activity and crispness of extruded rice crisps [J]. *J Text Stud*, 2004, 35(6): 621–633.
- [4] Zhao X, An G, Wang Z, et al. Modeling the mechanical texture of foxtail millet extrudates during hydrosorption with a modified Peleg–Fermi model [J]. *Adv J Food Sci Technol*, 2015, 8(6): 383–393.
- [5] Bell L N, Labuza T P. Moisture sorption: Practical aspects of isotherm measurement and use [M]. AACC Inc. USA, 2000, 70–98.
- [6] Machado M F, Oliveira F A R, Gekas V, et al. Kinetics of moisture uptake and soluble–solids loss by puffed breakfast cereals immersed in water [J]. *Int J Food Sci Technol*, 1998, 33(3): 225–237.
- [7] Machando M F, Oliveira F A R, Cunha L M. Effect of milk fat and total solids concentration on the kinetics of moisture uptake by ready–to–eat breakfast cereal [J]. *Int J Food Sci Technol*, 1999, 34(1): 47–57.
- [8] Solomon W K. Effect of barrel temperature on rehydration kinetics of direct–expanded *tef* flour breakfast cereal [J]. *J Food Proc Eng*, 2008, 31(4): 469–487.
- [9] Solomon W K. Hydration kinetics of direct expanded *tef* flour breakfast cereals in water and milk [J]. *Food Sci Nutr*, 2014, 2(1): 39–45.
- [10] Guillard V, Broyart B, Bonazzi C, et al. Moisture diffusivity in sponge cake as related to porous structure evaluation and moisture content [J]. *J Food Sci*, 2003, 68(2): 555–562.
- [11] Greenspan L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions [J]. *J Res Nat Bur Stand, Sect A: Physic Chem*, 1977, 81A(1): 89–96.
- [12] Peleg M. An empirical model for the description of moisture sorption curves [J]. *J Food Sci*, 1988, 53(4): 1216–1219.
- [13] Murthy D N P, Xie M, Jiang G R. Weibull Models [M]. New Jersey: Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [14] Crank J. The Mathematics of diffusion (2<sup>nd</sup> ed) [M]. London: Oxford University Press, 1975.
- [15] Guillard V, Broyart B, Guilbert S, et al. Moisture diffusivity and transfer modeling in dry biscuit [J]. *J Food Eng*, 2004, 64(1): 81–87.
- [16] Sun D–W, Byrne C. Selection of EMC/ERH isotherm equations for rapeseed [J]. *J Agri Eng Res*, 1998, 69(4): 307–315.
- [17] Sacchetti G, Pittia P, Pinnavaia G G. The effect of extrusion temperature and drying–tempering on both the kinetics of hydration and the textural changes in extruded ready–to–eat breakfast cereals during soaking in semi–skimmed milk [J]. *Int J Food Sci Tech*, 2005, 40(6): 655–663.
- [18] Saravacos G D, Karathanos V T, Marousis S N. Diffusion of water in starch materials. In: *Food Science and Human Nutrition* (Charalambous G, ed.) [M]. Elsevier Science Publishers, 1992: 329–340. 完