

# 基于分形理论的粤式杏仁饼干干燥特性研究

阮征<sup>1,2</sup>, 洪漫兴<sup>1</sup>, 梁兰兰<sup>3</sup>, 李泮生<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)(2. 广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室, 广东广州 510640)(3. 广州城市职业学院食品系, 广东广州 510405)

**摘要:** 利用隧道干燥设备模拟工业化的焙烤环境, 测定粤式杏仁饼的干燥特性, 采用扫描电镜和图像分析法测定粤式杏仁饼的孔隙微观结构, 基于分形理论探究粉料粒度对粤式杏仁饼干干燥及其品质的影响。研究表明: 对于低水分含量的杏仁饼而言, 其内部为多孔结构, 具有明显的分形特征。随着粒度的减小, 杏仁饼孔隙结构变得更加复杂。在 100 °C 或 120 °C 下焙烤时, 140 目粉料制饼的干燥速率都明显高于 60 目和 100 目粉料制饼的干燥速率。成品质构分析表明, 随着粉料粒度的减小 (60 目→100 目→140 目), 杏仁饼的硬度、内聚性和咀嚼性都分别有显著减低 ( $p<0.05$ )。从感官评价结果来看, 140 目粉料制饼要优于 60 目、100 目粉料制饼。因此, 在制备杏仁饼粉料时, 在一定范围内减小粉料的粒度, 既可以提高干燥速率又可以保证产品品质。

**关键词:** 粤式杏仁饼; 粒度; 扫描电镜; 分形维数

文章编号: 1673-9078(2016)9-167-173

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.9.025

## Drying Characteristics of Cantonese Almond Cookie Based on Fractal

RUAN Zheng<sup>1,2</sup>, HONG Man-xing<sup>1</sup>, LIANG Lan-lan<sup>3</sup>, LI Bian-sheng<sup>1,2</sup>

(1.School of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2.Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Product Safety, Guangzhou 510640, China) (3.Department of Food, Guangzhou City Polytechnic, Guangzhou 510405, China)

**Abstract:** A tunnel drying equipment was used to simulate the industrial tunnel oven and determine the drying characteristics of Cantonese almond cookie. Scanning electron microscopy (SEM) followed by image analysis were done to determine the pore microstructure of almond cookie. The effect of particle size on the drying properties and quality of Cantonese almond cookie was explored based on fractal theory. The results showed that the almond cookie with low moisture content had an internal porous structure and an apparent fractal feature. The smaller the particle size was, the more complex the pore structure was. Under the same baking temperature of 100 °C or 120 °C, the drying rate of almond cookies made of 140-mesh powder were significantly higher than that of almond cookies made of 60-mesh and 100-mesh powders. Texture property analysis (TPA) indicated that with a decrease in particle sizes (60 mesh→100 mesh→140 mesh), the hardness, cohesiveness, and chewiness of almond cookies decreased significantly ( $p<0.05$ ). According to the sensory evaluation, the almond cookie made of 140-mesh powder had better quality than those made of 60 mesh and 100 mesh. Therefore, the drying rate and quality of Cantonese almond cookie can be improved by reducing particle size within a certain range during the production of almond cookie powder.

**Key words:** Cantonese almond cookie; particle size; scanning electron microscopy; fractal dimension

粤式杏仁饼是将绿豆经清洗、浸泡、萌发、杀青、脱壳、烘干、碾磨、过筛和静置等一系列复杂工序制成精制绿豆粉, 再配以适量糖、油、水分和其他配料, 经过成型、低温焙烤制成的, 湿基含水率低于 3% 的一类传统糕点<sup>[1-2]</sup>, 极具广东特色。此类产品的粉料在焙烤前由于经过高温杀青、长时间烘干等热处理, 其

收稿日期: 2015-08-08

基金项目: 广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室项目资助

作者简介: 阮征 (1972-), 女, 博士, 副教授, 主要从事食品加工与保藏, 传统食品产业化等研究

通讯作者: 李泮生 (1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事食品科学与工程, 食品加工与保藏等方面研究

中的淀粉、蛋白质等组成成分性质都已发生变化, 拌料过程中没有面筋形成; 同时混料成型后的杏仁饼饼坯含水率较低 (湿基含水率 $\leq 10\%$ ), 表现为低水分含量的多孔组织结构。目前对于杏仁饼的研究, 多集中在配方研究上面。

脱水干燥是杏仁饼焙烤过程的重要环节。影响干燥过程的因素除工艺、设备、环境等外部条件外, 还有杏仁饼自身的内部因素, 包括组成成分、规格大小、产品形状、比表面积、孔隙率和孔隙结构等, 其中饼体孔隙特性的影响显著。孔隙特性特征参数包括孔隙率, 孔隙截面边界和孔隙尺寸分布等。分形是指各个组成部分的形态以某种方式与整体相似的一类形体。

分形维数可以被用来描述孔隙分布的分形特征<sup>[3]</sup>。杏仁饼表现为低水分含量的多孔组织结构,内部孔隙结构比较复杂,粉料粒度的差异也会对杏仁饼内部孔隙结构造成影响,很难被定义和区分。目前有很多方法被用来描述孔隙结构,应用比较广泛的是图像分析法,如扫描电镜。分形理论在多孔介质中应用较多,大多数研究的对象都集中在建筑材料,如水泥基材料、碳酸盐岩储层<sup>[4]</sup>,污泥<sup>[5]</sup>,煤<sup>[6-7]</sup>和活性炭<sup>[8]</sup>中,在医用合金<sup>[9]</sup>上也有应用,研究均发现这些多孔介质有着明显的分形特征。但是对杏仁饼孔隙结构的研究几乎没有。

本文以粤式杏仁饼为研究对象,运用扫描电镜和图像分析技术测试分析杏仁饼的微观结构,测试不同粒度杏仁饼的孔隙基础结构、孔隙截面边界和孔隙尺寸分布分形维数,利用洞道干燥设备模拟工业化的焙烤环境,测定不同粒度粉料制粤式杏仁饼在100℃和120℃下的干燥特性曲线,从宏观和微观角度探究粒度对杏仁饼干燥及其品质的影响。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

绿豆、猪油、绵白糖等原辅料均购于广州五山正丰超市。

### 1.2 仪器和设备

10 g 杏仁饼模具; DFY-500 型摇摆式高速万能粉碎机,温岭市林大机械有限公司; PL 203 型电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; 国家标准检验筛,浙江省上虞市华丰五金仪器有限公司; TF-GZ/DD 型洞道干燥设备,湘潭市腾飞仪器科技有限公司; EVO 18 型扫描电镜,德国卡尔蔡司公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 不同粒度粉料的制备

绿豆粉的精制熟化: 绿豆→清洗→浸泡→萌发→沥干→杀青→脱壳→烘干→焙烤→碾磨

将碾磨后的绿豆熟粉用标准检验筛筛分成粒径为151~300 μm, 106~150 μm, 89~105 μm 三个粒级,分别定义为60目, 100目, 140目。

#### 1.3.2 杏仁饼制作

杏仁饼制作的工艺流程为: 绿豆熟粉+绵白糖+油+水(5:4:1:0.6)→充分混合均匀→用模具压模成型→焙烤→成品  
用60目、100目和140目的粉料制成了规格重量保持一致(±0.5 g)的三种杏仁饼试样,分别命名为

60目杏仁饼、100目杏仁饼和140目杏仁饼。

#### 1.3.3 样品扫描电镜拍摄

将焙烤后的杏仁饼在25℃环境中冷却15 min,用刀片将样品切成长宽高为4 mm×4 mm×3 mm的长方体,在SEM样品台上涂上一层导电胶,将切好的样品粘于此胶上,轻轻吹去多余的粉末,对样品横断面喷金后采用扫描电镜拍摄仪进行测试。加速电压为10 kV,选择放大×200倍拍摄显微照片。

#### 1.3.4 图像分析

将扫描电镜拍摄的×200倍显微照片转换为8级灰度图,运用Image J对其进行黑白二值处理和孔隙分析,计算出样品的平均孔隙面积、平均等效孔隙直径、平均孔隙周长、孔隙率和面积为1~100 μm<sup>2</sup>的孔隙所占比例。

#### 1.3.5 孔隙截面和截面边界分形维数

杏仁饼孔隙截面边界分形维数算法见式(1)<sup>[10]</sup>

$$\lg L(\xi) = D \lg \alpha_D(\xi) + \frac{D}{2} \lg A(\xi) = C + \frac{D}{2} \lg A(\xi) \quad (4)$$

式中:  $L$  为孔隙周长,  $A$  为孔隙面积,  $D$  为分形维数,  $C$  为常数。在杏仁饼电镜图片中分别测量每个孔隙的周长和面积,面积和周长的双对数绘图所得斜率的两倍即为截面边界分形维数  $D$  值。

#### 1.3.6 孔隙尺寸分布分形及分形维数

杏仁饼孔隙尺寸分布分形维数算法见式(2)

$$\lg N(r) = \lg \alpha - D \lg r \quad (2)$$

式中:  $r$  为孔隙的等效半径,  $N(r)$  为孔径大于  $r$  的孔隙个数,  $\alpha$  为常数。在杏仁饼电镜图片中分别测量每个孔隙的等效半径和孔径大于  $r$  的孔隙个数,等效半径和个数的双对数绘图所得斜率即为尺寸分布分形维数  $D$  值。

#### 1.3.7 水分指标测定<sup>[11]</sup>

干基含水率  $M_t$  的计算方法见式(3)

$$M_t (\text{kg水/kg干料}) = \frac{m_t - m_g}{m_g} \times 100 \quad (3)$$

式中:  $M_t$  为试样干燥至  $t$  时刻的干基含水率, g 水/100g 干料;  $m_t$ ,  $m_g$  分别为试样干燥至  $t$  时刻与绝干时的质量, g。

干燥速率  $D_r$  的计算方法见式(4)

$$D_r = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (4)$$

式中:  $D_r$  为干燥速率, g/(100g·h);  $M_t$ ,  $M_{t+\Delta t}$  分别为  $t$ ,  $t+\Delta t$  时刻的干基含水率, g 水/100g 干物质;  $\Delta t$  为干燥间隔时间, h。

#### 1.3.8 质构的测定

将焙烤后的杏仁饼在25℃环境中冷却15 min,采用TA-XT Plus物性分析仪进行测试。每个样品平行6次。测定参数: 采用P/36R探头,测前速率3.0 mm/s,测试速率3.0 mm/s,测试后速度5.0 mm/s,压缩20%,

触发力 5 g, 两次压缩时间间隔 5 s, 数据采集速 200 pps。测量指标包括硬度、内聚性和咀嚼性。

位评价员,按照国标 GB 19547-2004 的要求进行评价。样品的最终含水率控制在 3%以下,并在焙烤后统一置于室温下冷却 15 min,再供品评。

### 1.3.9 感官评价

制定粤式杏仁饼感官评价标准(表 1),挑选 10

表 1 杏仁饼感官评价标准

Table 1 Standards of sensory evaluation of almond cookies

| 评价指标 | 评分标准   |
|------|--|
| 表面颜色 | 颜色呈白色或焦黑(1~4),较黄或者欠黄(5~7),金黄色(8~10)                        |
| 底面颜色 | 颜色呈白色或焦黑(1~4),较黄或者欠黄(5~7),金黄色(8~10)                        |
| 表面碎屑 | 碎屑多,花纹很不清晰(1~4),碎屑少,个别地方有碎屑(5~7),表面无碎屑,花纹完整(8~10)          |
| 香味   | 有生味或者豆粉的腥味,或者严重烤焦味(1~4),有少许豆腥味,可接受焦味(5~7),适宜的焙烤香味(8~10)    |
| 滋味   | 有生味或者豆粉的腥味,或者严重烤焦味(1~4),有少许豆腥味,可接受焦味(5~7),适宜的焙烤香味(8~10)    |
| 油脂香味 | 油脂气味不愉快(1~4);油脂香味不明显(5~7);油脂香味明显(8~10)                     |
| 粉料口感 | 粉料太干或者过于油腻(1~4),粉料较干或者有少许油腻(5~7),合适的口感(8~10)               |
| 甜味   | 太甜或者不甜(1~4),较甜或者欠甜(5~7),合适的甜味(8~10)                        |
| 紧实度  | 太过松软或者咬不动(1~4),口感较好(5~7),合适的口感(8~10)                       |
| 颗粒感  | 颗粒度过于细腻或者粗糙,口感不佳(1~4),颗粒度细腻或者粗糙,口感较好(5~7),颗粒度适中,口感很好(8~10) |

### 1.4 数据处理

测定和分析结果采用 SPSS 19.0 Windows、Excel 2010 和 Origin 9.0 进行处理,图片处理采用 Photoshop CS5 和 Image J 处理,方差分析采用新复极差分析法 Duncan,取 95%置信区间( $p < 0.05$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 粉料粒度对杏仁饼干燥速率的影响

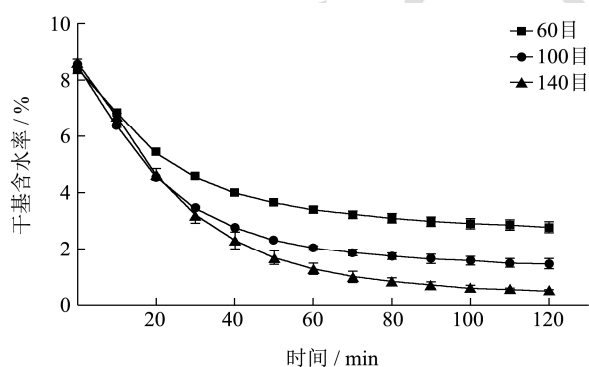


图1 不同粒度杏仁饼在100 °C的干燥曲线

Fig.1 Drying curve of almond cookie made of different particle sizes at the temperature of 100 °C

图 1 和图 2 分别为不同粒度杏仁饼在 100 °C 和 120 °C 的干燥曲线,显示了杏仁饼干基含水率与时间的关系。图 3 和图 4 分别为不同粒度杏仁饼在 100 °C 和 120 °C 的干燥速率曲线,显示了杏仁饼干燥速率与干基含水率的关系。

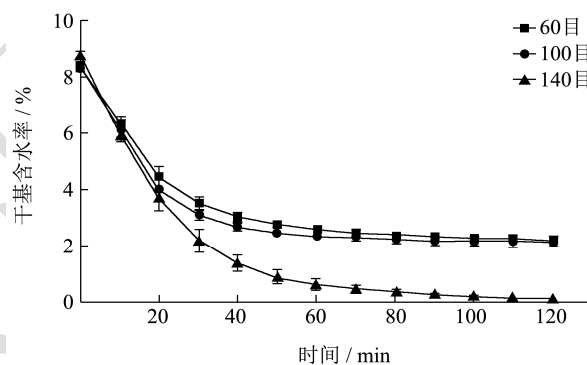


图2 不同粒度杏仁饼在120 °C的干燥曲线

Fig.2 Drying curve of almond cookie made of different particle sizes at the temperature of 120 °C

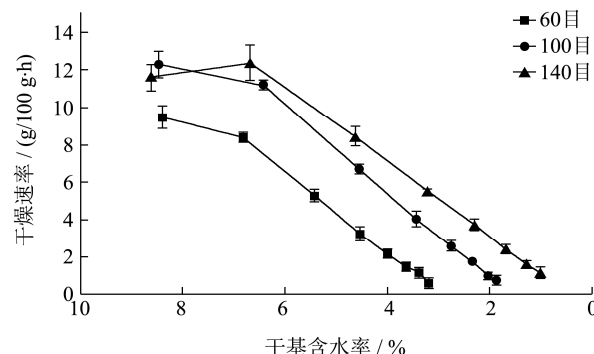


图3 不同粒度杏仁饼在100 °C的干燥速率曲线

Fig.3 Drying rate curve of almond cookie made of different particle sizes at the temperature of 100 °C

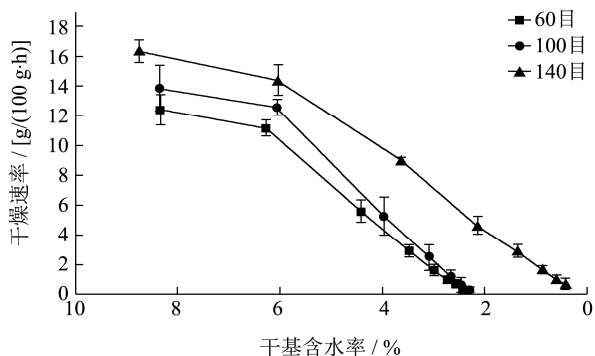


图4 不同粒度杏仁饼在120 °C的干燥速率曲线

Fig.4 Drying rate curve of almond cookie made of different particle sizes at the temperature of 120 °C

从图 1 和图 2 可以看出，随着粒度的减小，杏仁饼干燥速率加快。100 °C 时，初始水分含量相同的不同粒度杏仁饼要达到 3% 干基含水率，60 目、100 目和 140 目杏仁饼分别需要干燥 50 min、40 min 和 30 min。当粉料粒度为 140 目时，杏仁饼干燥速率最快，干燥效果最好。图 3 和 4 显示，杏仁饼干燥过程中没有恒速干燥阶段，几乎整个过程都在降速，随着干基含水率的降低干燥速率下降，这说明杏仁饼烘烤过程的水分迁移主要取决于内部水分扩散。相似的结论也在明胶、褐煤和硝酸盐等低水分含湿多孔介质干燥过程中发现。100 °C 烘烤时，60 目、100 目和 140 目杏

仁饼有效水分扩散系数分别为  $2.33 \times 10^{-7}$ 、 $3.74 \times 10^{-7}$ 、 $5.36 \times 10^{-7}$  和 120 °C 下，三种饼的有效水分扩散系数分别升高到了  $3.90 \times 10^{-7}$ 、 $4.30 \times 10^{-7}$  和  $8.03 \times 10^{-7}$ 。

## 2.2 粉料粒度对杏仁饼质构的影响

表 2 显示了不同粒度粉料对杏仁饼质构特性的影响，其中硬度表示杏仁饼的松软性，数值越高越硬；内聚性与杏仁饼的“紧实度”密切相关，数值越高越紧实，表明粉料颗粒间结合得更加紧密；咀嚼性表示将固体食品咀嚼到可吞咽状态时需做功的大小，数值越高越难咀嚼。

TPA 检测结果表明，随着粉料粒度的减小，杏仁饼硬度、内聚性和咀嚼性都呈下降趋势，但都在可接受范围内，60 目、100 目和 140 目杏仁饼在硬度、内聚性和咀嚼性方面都有显著差异 ( $p < 0.05$ )。这是由于粒度越小，杏仁饼孔隙截面边界和孔隙尺寸分布分形维数越大，孔隙率增大，即饼体内孔隙形状不规则程度增大，孔隙尺寸不统一，孔隙大小排列的无序性增大，孔隙增多，使得饼体内粉料结合得较为松散，因此粉料粒度越小，杏仁饼硬度减小，饼体较为疏松，内聚性降低。而颗粒粒度的增大，因为颗粒本身大小的关系，使得将饼体粉料咀嚼到可吞咽状态时所需要做的功越大，因此粒度越大，咀嚼性也越大。

表 2 粉料粒度对杏仁饼质构特性的影响

| Table 2 Effect of particle size of powder on the textural properties of almond cookie |                               |                         |                               |
|---|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 粉料粒度/目数   | 硬度/g                          | 内聚性                     | 咀嚼性/g                         |
| 60 目  | 35307.67±1186.63 <sup>a</sup> | 0.763±0.03 <sup>a</sup> | 19177.682±550.48 <sup>a</sup> |
| 100 目   | 27949.37±962.45 <sup>b</sup>  | 0.643±0.01 <sup>b</sup> | 15951.314±692.75 <sup>b</sup> |
| 140 目   | 20632.958±554.23 <sup>c</sup> | 0.431±0.01 <sup>c</sup> | 12975.870±274.04 <sup>c</sup> |

注：杏仁饼终产品含水率 3%；数值表示为均值±标准偏差，若有相同字母，表明差异不显著 ( $p > 0.05$ )；若字母都不相同，表明差异性显著 ( $p < 0.05$ )。

## 2.3 粉料粒度对杏仁饼感官品质的影响

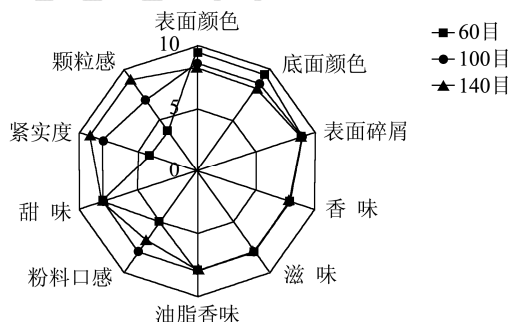


图 5 不同干燥温度下杏仁饼的感官品质

Fig.5 Sensory properties of almond cookies made of different particle sizes at different drying temperatures

不同粒度杏仁饼的感官品质如图 5 所示。不同粒

度粉料制成的杏仁饼成型性、颜色、香味、滋味都很好，几乎没有差异。口感方面，粒度越小，粉料越细腻，颗粒感越弱；实验中不同粉料采用的是同样的配方，同质量饼体内粒度大的粉料数目越少，因此粒度越大的粉料制成的饼会感觉到稍许油腻。粒度越小，饼的口感越酥松，这是因为粒度的减小使得饼体孔隙增多。就总体来看，140 目杏仁饼的感官品质要优于 60 目和 100 目杏仁饼。

## 2.4 基于分型理论的杏仁饼干燥特性分析

### 2.4.1 图像处理

典型的杏仁饼 SEM 原始图像及经黑白二值处理后的图像如图 6 所示。

孔隙是杏仁饼饼体内水分外逸的通道，图 6 显示，

随着粒度的减小(60目→100目→140目),杏仁饼孔隙增多,孔隙平均面积变小,孔隙更为分散。

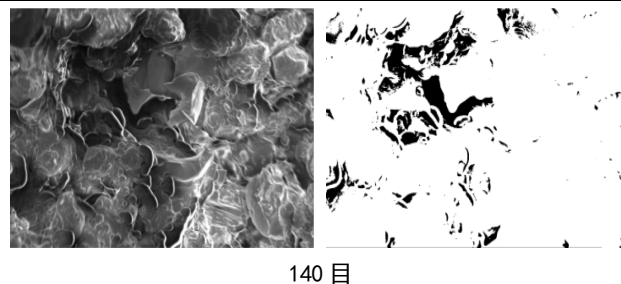
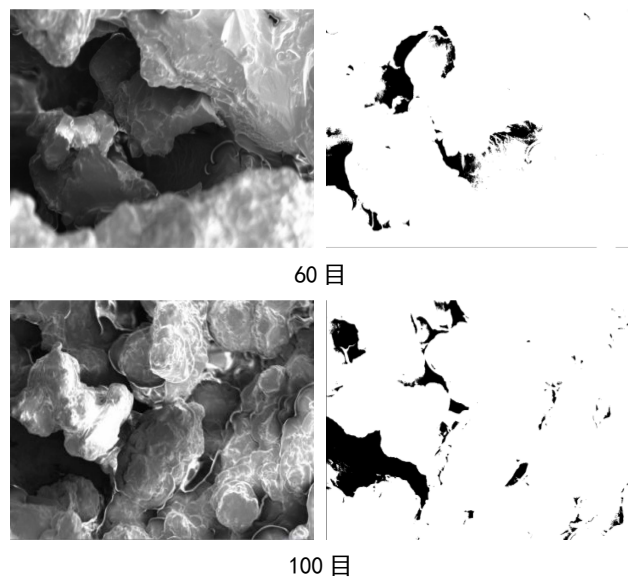


图6 典型的杏仁饼 SEM 原始图像及二值化处理后的图像

Fig.6 Typical SEM images of almond cookies and those after binary treatment

### 2.4.2 孔隙结构测试数据

运用 Image J 软件对黑白二值处理的 SEM 图片进行测试分析,包括平均孔隙面积、平均孔隙周长、平均孔隙直径、孔隙率和平均孔隙面积在 1~100  $\mu\text{m}^2$  的孔隙所占比例。孔隙直径为按等面积圆换算得到的截面等效直径。不同粒度杏仁饼的孔隙结构测试数据见表 3。

表 3 孔隙结构测试数据

Table 3 Measurement data of pore structure

| 粉料粒度/目数 | 平均孔隙面积                    | 平均孔隙周长                  | 平均孔隙直径                  | 孔隙率                    | 1~100 $\mu\text{m}^2$ 孔隙比例/% |
|---------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------|
| 60 目    | 546.31±34.84 <sup>a</sup> | 77.37±4.18 <sup>a</sup> | 14.43±0.78 <sup>a</sup> | 5.88±0.11 <sup>c</sup> | 59.75±0.37 <sup>c</sup>      |
| 100 目   | 439.86±4.93 <sup>b</sup>  | 73.46±2.33 <sup>a</sup> | 11.25±0.78 <sup>b</sup> | 6.28±0.26 <sup>b</sup> | 63.54±2.33 <sup>b</sup>      |
| 140 目   | 429.79±12.97 <sup>b</sup> | 67.64±1.47 <sup>b</sup> | 9.40±1.15 <sup>c</sup>  | 7.29±0.18 <sup>a</sup> | 71.00±1.32 <sup>a</sup>      |

注:数值表示为均值±标准偏差,若有相同字母,表明差异不显著( $p>0.05$ );若字母都不相同,表明差异性显著( $p<0.05$ )。

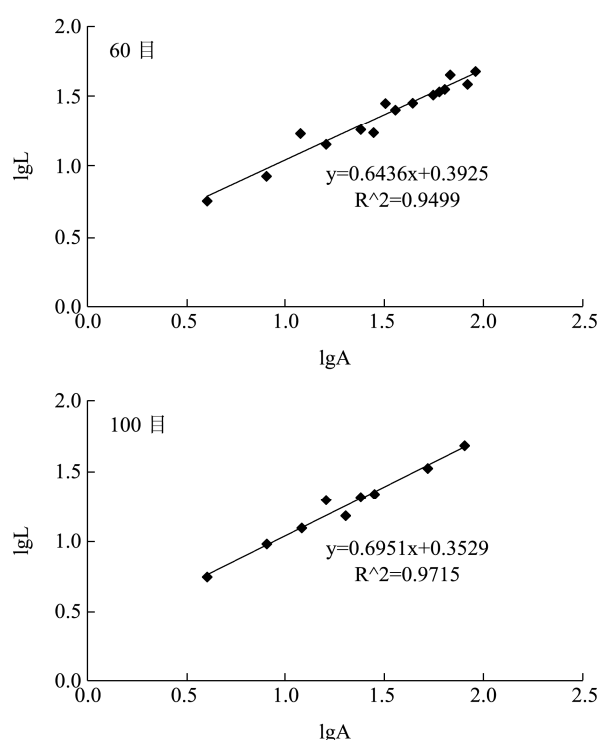
对于低水分含量的杏仁饼而言,其内部为多孔结构,具有明显的分形特征。从表 3 可以看出杏仁饼平均孔隙面积、平均孔隙周长、平均孔隙直径均随着粉料粒度的减小而减小。孔隙率和面积为 1~100  $\mu\text{m}^2$  的孔隙所占比例随着粉料粒度的减小而增大。这主要是因为同样体积饼体内颗粒数目随着粒度的减小而增多,粒度的减小使得饼体孔隙越多,饼体比重越小。粒径影响着其内部孔隙直径分布范围<sup>[12]</sup>,颗粒越大,饼体内孔隙面积和直径越大,与实际情况相符。分析比较得出,粒度对平均孔隙面积的影响要大于对平均孔隙周长和平均孔隙直径的影响。粉料粒度的减小,使得杏仁饼孔隙结构变得更加复杂,孔隙率增加。

### 2.4.3 孔隙截面边界分形维数

运用 Image J 软件对黑白二值处理的 SEM 图片进行测试分析,分别计算出各个试样的各个孔隙周长和面积,根据式(1),在面积和周长的双对数坐标中,运用 Origin 9.0 软件对图中散点数据回归,得到回归直线斜率。因为孔隙面积多在 1~100  $\mu\text{m}^2$  之间,为了结果的准确性,作图所选孔隙的面积都在 1~100  $\mu\text{m}^2$  之间,结果见图 7。

从图 7 可以看出,各试样的孔隙面积-周长双对数

均有良好的线性回归,其线性相关系数均在 0.94 以上,不同粒度杏仁饼的孔隙截面形状结构存在明显的分形特征。



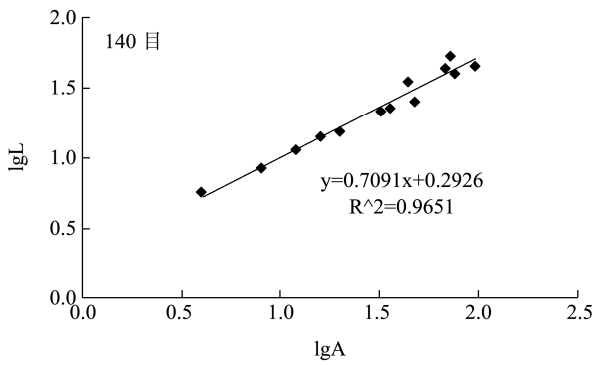


图7 孔隙截面边界分形维数计算

Fig.7 Calculation of fractal dimension for pore section edge

对每个试样的 SEM 图片分别进行测试计算及数据回归, 获得对应的几组孔隙截面边界分形维数, 每个试样的孔隙截面边界的平均分形维数取几组孔隙截面边界分形维数的平均值, 结果见表 4。

表 4 孔隙截面边界分形维数

Table 4 Fractal dimension for pore section edge

| 粉料粒度/目数 | 孔隙截面边界分形维数             |
|---------|------------------------|
| 60      | 1.28±0.01 <sup>b</sup> |
| 100     | 1.39±0.01 <sup>a</sup> |
| 140     | 1.42±0.02 <sup>a</sup> |

注: 数值表示为均值±标准偏差, 若有相同字母, 表明差异不显著( $p>0.05$ ); 若字母都不相同, 表明差异性显著( $p<0.05$ )。

孔隙截面边界分形维数是表征孔隙形状规则程度的物理量, 孔隙截面边界分形维数越大, 孔隙截面形状越不规则。而孔隙截面形状的规则程度会影响到内部水分的滞留程度, 孔隙形状越规则, 内部水分越易滞留。从表 4 可以看出, 随着粒度的减小, 杏仁饼孔隙截面边界分形维数变大, 60 目、100 目和 140 目杏仁饼孔隙截面边界分形维数分别为 1.28、1.39 和 1.42, 差异显著( $p<0.05$ )。说明粉料粉碎得越细, 颗粒形状越不规则, 导致颗粒间的契合度降低, 从而减小了对内部水分向外迁移的阻碍。

#### 2.4.4 孔隙尺寸分布分形维数

运用 Image J 软件对黑白二值处理的 SEM 图片进行测试分析, 分别计算出各个试样的每组图片中孔隙半径和孔隙半径个数, 根据式 (2), 在大于给定半径的孔隙个数和半径的双对数坐标图中, 对图中散点数据进行数据回归, 得到回归直线斜率, 因为孔隙面积多在 1~100  $\mu\text{m}^2$  之间, 为了结果的准确性, 作图所选孔隙的面积都在 1~100  $\mu\text{m}^2$  之间, 结果见图 8。根据数据回归直线斜率得到孔隙尺寸分布分形维数。

从图 8 可以看出, 各试样的大于给定孔隙面积的孔隙个数-孔隙面积双对数的线性回归十分明显。表明就杏仁饼孔隙尺寸分布而言, 不同粒度杏仁饼孔隙结

构同样存在明显的分形特征。

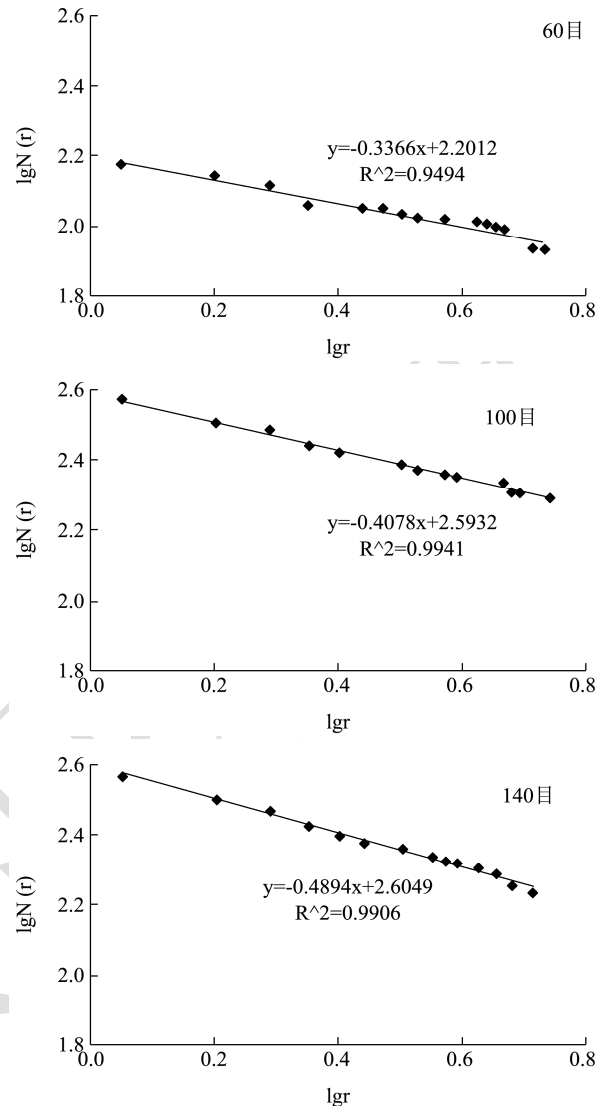


图 8 孔隙尺寸分布分形维数计算

Fig.8 Calculation of fractal dimension for pore size distribution

对每个试样的 SEM 图片分别进行测试计算及数据回归, 获得对应的几组孔隙尺寸分布分形维数, 每个试样的孔隙尺寸分布的平均分形维数取几组孔隙尺寸分布分形维数的平均值, 结果见表 5。

表 5 孔隙尺寸分布分形维数

Table 5 Fractal dimension for pore size distribution

| 粉料粒度/目数 | 孔隙尺寸分布分形维数             |
|---------|------------------------|
| 60      | 0.34±0.01 <sup>c</sup> |
| 100     | 0.42±0.03 <sup>b</sup> |
| 140     | 0.49±0.01 <sup>a</sup> |

注: 数值表示为均值±标准偏差, 若有相同字母, 表明差异不显著( $p>0.05$ ); 若字母都不相同, 表明差异性显著( $p<0.05$ )。

孔隙尺寸分布分形维数表征孔隙尺寸分布的均匀程度, 孔隙尺寸分布分形维数越大, 说明孔隙尺寸分布越不均匀, 孔隙尺寸差异性越大, 越能明显体现出

孔隙大小混杂特点。孔隙尺寸的差异可以使得水分不在同一处堆积,而是充分利用孔隙通道,从不同的孔道有规律地迁移,外逸速度加快。从表4可以看出,随着粒度的减小,杏仁饼孔隙尺寸分布分形维数变大,60目、100目和140目杏仁饼孔隙尺寸分布分形维数分别为0.34、0.42和0.49,差异显著( $p < 0.05$ )。说明粒度的减小使得孔隙尺寸分布越不均匀。这是因为粉料粉碎得越细,制饼时越易受到挤压变形,饼体内形成的孔隙越不规则,尺寸分布越没有规律。

另外,有研究指出在孔隙体积一定时,孔隙表面积随孔径减小急剧增大,140目杏仁饼比60目和100目杏仁饼的孔隙表面积增加,受热面积增大,内部升温更快,导湿温性对干燥的阻碍程度越小<sup>[13]</sup>。因此140目粉料制饼比100目和60目粉料制饼干燥速率快。由此可知粒度对杏仁饼孔隙基础结构、孔隙截面分形维数、孔隙尺寸分布维数都影响较大,粉料粒度是影响杏仁饼干燥效果的关键因素。

### 3 结论

对于低水分含量的杏仁饼而言,其干燥过程中没有恒速干燥阶段,几乎整个过程都在降速。干燥速率结果显示:140目粉料制饼比100目和60目粉料制饼的干燥速率要快。成品品质分析结果显示:随着粉料粒度的减小(60目→100目→140目),杏仁饼的硬度、内聚性和咀嚼性都分别有显著减低( $p < 0.05$ )。从感官评价结果来看,不同粒度粉料制成的杏仁饼成型性、颜色、香味、滋味都很好,140目粉料制饼在咀嚼性、颗粒感和疏松度方面要优于60目和100目粉料制饼。从孔隙微观结果分析来看:杏仁饼内部为多孔结构,60目、100目和140目杏仁饼的孔隙面积-周长双对数、大于给定孔隙面积的孔隙个数-孔隙面积双对数,均有良好的线性回归,其线性回归系数均在0.94以上,具有明显的分形特征。粉料粒度的减小,使得杏仁饼平均孔隙面积、平均孔隙周长、平均孔隙直径均减小,孔隙率、面积为1~100  $\mu\text{m}^2$ 的孔隙所占比例、孔隙截面边界分形维数和孔隙尺寸分布分形维数都增大。因此粉料粒度是影响杏仁饼干燥效果的关键因素,在制备杏仁饼粉料时,在一定范围内减小粉料的粒度,既可以提高干燥速率又可以保证产品品质。

### 参考文献

[1] 段文锋,彭亚锋,林毅侃.我国焙烤食品安全管理现状与建议[J].食品科学,2011,32(21):311-317  
DUAN Wen-feng, PENG Ya-feng, LIN Yi-kan. Current situation and suggestions for the management of baked food

safety in China [J]. Food Science, 2011, 32(21): 311-317

[2] 郭海雄,张延杰,吴小勇.改进杏仁饼产品质量的几个措施[J].现代食品科技,2008,24(7):701-703  
WU Hai-xiong, ZHANG Yan-jie, WU Xiao-yong. Methods for quality improvement of almond cookie [J]. Modern Food Science and Technology, 2008, 24(7): 701-703

[3] 唐红璞,唐仁骐.砂岩岩心孔隙结构分形特征的探讨[J].中国科学技术大学学报,2004,34:69-75  
TANG Hong-yong, TANG Ren-qi. Study on fractal characteristics of pore structure of sandstone core [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2004, 34: 69-75

[4] 胡罡.扫描电镜图像处理技术在储层孔隙结构研究中的应用[J].内蒙古石油化工,2011,37(6):95-98  
HU Gang. Application of scanning electron microscopy image technology in the research of reservoir pore structure [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2011, 37(6): 95-98

[5] Gao Z F, Liao-Sha L I, Zhao-Jin W U, et al. Effects of microwave heating on pore fractal properties of blast furnace sludge [J]. Journal of Iron & Steel Research International, 2013, 20(8): 27-33

[6] Liu C J, Wang G X, Sang S X, et al. Fractal analysis in pore structure of coal under conditions of CO<sub>2</sub> sequestration process [J]. Fuel, 2015, 139(139): 125-132

[7] Liu J Z, Zhu J F, Cheng J, et al. Pore structure and fractal analysis of Ximeng lignite under microwave irradiation [J]. Fuel, 2015, 146:41-50

[8] Macías-García A, Díaz-Díez M A, Cuerda-Correa E M, et al. Study of the pore size distribution and fractal dimension of HNO<sub>3</sub>-treated activated carbons [J]. Applied Surface Science, 2006, 252(17): 5972-5975

[9] Xu J L, Bao L Z, Liu A H, et al. Effect of pore sizes on the microstructure and properties of the biomedical porous NiTi alloys prepared by microwave sintering [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2015, 645: 137-142

[10] 王经洲,郑晓,宛农,等.基于扫描电镜图像分析的菜籽仁饼孔隙结构分形研究[J].农业工程学报,2008,24(3):16-20  
WANG Jing-zhou, ZHENG Xiao, WAN Nong, et al. Fractal character of the pore structure of dehulled rapeseed cake based on scanning electron microscopy image analysis [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 16-20

[11] 周厚源,李汴生,阮征,等.热风温度对湿腌肉鸡翅根干燥动力学及成品品质的影响[J].食品工业科技, 2014,35(1):91-97

- ZHOU Hou-yuan, LI Bian-sheng, RUAN Zheng, et al. Effect of air temperature on drying kinetics of broiler chicken wings and quality of end product [J]. *Food Industry Science and Technology*, 2014, 35(1): 91-97
- [12] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the mississippian barnett shale [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(11-12): 848-861
- [13] Chalmers G R L, Bustin R M. The organic matter distribution and methane capacity of the lower cretaceous strata of northeastern British Columbia, Canada [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 70: 223-239

现代食品科技