

# 脱水蒜片干燥工艺的节能优化

张晶晶<sup>1</sup>, 曹鹏<sup>1,2</sup>, 乔旭光<sup>1\*</sup>

(1. 山东农业大学食品科学与工程学院, 泰安 271018; 2. 烟台出入境检验检疫局, 烟台 264000)

**摘要:** 为了减少脱水蒜片干燥过程的能量消耗, 该文选取干燥介质温度, 切片厚度、装料量 3 个因素, 运用二次正交旋转组合设计的方法, 对热风循环法生产脱水蒜片的工艺参数进行优化, 得到了生产条件与脱水蒜片能量消耗及产量之间的数学关系, 其最佳生产条件为干燥介质温度为 62.3℃, 切片厚度为 2.38 mm, 装料量为 2.69 kg/m<sup>2</sup>, 预测理论最小能耗 1.96 kWh/kg。按 62℃、2.4 mm、2.7 kg/m<sup>2</sup> 进行验证试验, 实际生产能耗 2.05 kWh/kg, 产量为 4.11 kg/h, 与国内一般生产的平均能耗相比较, 可节能 27% 左右。

**关键词:** 节能, 热风循环干燥, 干燥工艺, 优化, 脱水蒜片

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.050

中图分类号: TS205.1, S375, S633.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0279-04

张晶晶, 曹鹏, 乔旭光. 脱水蒜片干燥工艺的节能优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 279-282.

Zhang Jingjing, Cao Peng, Qiao Xuguang. Optimization of energy saving technology for drying dehydrated garlic slices[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 279-282. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

中国是世界上最大的大蒜生产国和消费国, 大蒜是中国传统的大宗出口产品<sup>[1]</sup>。近年来, 在出口贸易的带动下大蒜种植面积和产量迅速增加。2006 年, 中国大蒜种植面积为 83.7 万 hm<sup>2</sup>, 产量为 1 832 万 t<sup>[2]</sup>。出口数量逐年增长, 2006、2007 年分别出口 134.61 万 t 和 147.3 万 t<sup>[3]</sup>。中国大蒜产业在国际大蒜市场已具有举足轻重的地位, 成为中国出口创汇额最多的单宗农产品之一。脱水蒜片作为大蒜的深加工产品, 出口量正逐年上升。2007 年全国脱水蒜片产量约为 20 万 t。目前, 最常用的脱水蒜片生产方式是热风循环干燥, 但对其生产过程如何节约能耗缺乏研究<sup>[4-5]</sup>。本文针对目前脱水蒜片生产的现状, 对热风循环法生产脱水蒜片的影响因素及工艺参数进行研究, 旨在为脱水蒜片生产提供节能理论依据, 推动脱水行业良性发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

大蒜 (苍山蒲克), 市场购买。

### 1.2 试验设备

Adventure 电子天平 (奥豪斯国际贸易 (上海) 有限公司), DZF-6030A 型真空干燥箱 (上海一恒科技有限公司), RXH-14C 热风循环干燥箱 (湖北省黄石市医疗器械厂) SC69-02C 水分快速测定仪 (上海精密科学仪器有限公司)。

### 1.3 试验方法

每次处理蒜片 3 kg, 根据试验要求切片, 干燥前先

将热风循环干燥箱打开, 使用电加热, 使箱内达到所需干燥温度, 然后将蒜片平铺在干燥盘内, 风速保持在 0.8 m/s。开始 1 h 每 10 min 测定含水率并记录能耗, 1 h 后每 20 min 测量 1 次, 3 h 后每隔 40 min 测量 1 次, 研究干燥过程, 水分以干基含水率 (% , dry basis) 表示, 干燥持续至干基含水率为 8%。干燥结束后将蒜片冷却 15 min, 放入低密度聚乙烯塑料袋内保存。

### 1.4 水分测定方法

真空干燥箱法: 将玻璃皿先放入电热恒温箱中在 120℃ 下烘 30 min, 然后移入干燥器中冷却, 准确称取 A g 样品放入该玻璃皿中, 然后于真空干燥箱, 70℃, 85 kPa, 干燥 24 h (AOAC 美国分析化学家协会, 1990), 记录质量 a, 重复 3 次取平均。

$$\text{干基含水率} (\%, \text{d.b.}) = \frac{A-a}{a} \times 100$$

式中: A——称取的样品的质量, g; a——干燥后样品的质量, g。

### 1.5 二次正交旋转组合设计方法

以介质温度、切片厚度和装料量组成三因素试验, 以单位产品能耗、产量作为性能指标研究各干燥参数对脱水蒜片干燥能耗的影响, 确定最佳干燥工艺参数。实施情况为全面实施, 零水平试验次数 9 次。其变化范围及其编码如表 1。

表 1 因子水平编码表

Table 1 Coding for factor levels

编码值 $X_j$	介质温度 ( $Z_1/^\circ\text{C}$ )	切片厚度 ( $Z_2/\text{mm}$ )	装料量 ( $Z_3/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )
-1.682	45	1	1.5
-1	50	2	2.0
0	60	3	2.5
+1	70	4	3.0
+1.682	75	5	3.5

注:  $X_j = (Z_j - Z_{j0}) / \Delta Z_j$ , 式中,  $X_j$  为第  $j$  个因子 (参数值为  $Z_j$ ) 的编码值;  $Z_j$  为第  $j$  个因子的参数值;  $Z_{j0}$  为  $Z_j$  的零水平参数值;  $\Delta Z_j$  为  $Z_j$  的变化区间。

收稿日期: 2009-02-19 修订日期: 2009-06-26

作者简介: 张晶晶 (1983—), 女, 研究方向为果蔬加工。泰安 山东农业大学食品学院, 271018。Email: hpj2006@163.com

\*通信作者: 乔旭光 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为功能食品。泰安 山东农业大学食品学院, 271018。Email: xgqiao@sdau.edu.cn

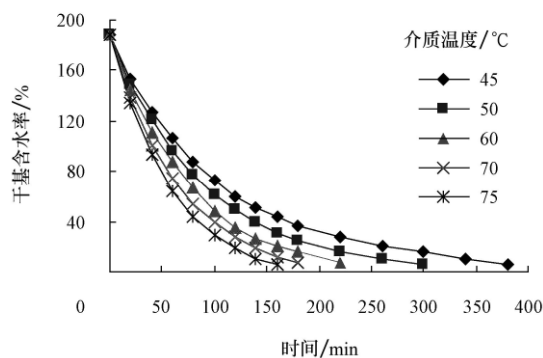
## 2 结果与分析

### 2.1 影响蒜片干燥特性的因素

Madamba 等在研究中发现, 介质温度和切片厚度对蒜片干燥速率的影响显著, 而干燥风速、干燥相对湿度对干燥的影响则不明显<sup>[6]</sup>。考虑到装料量直接影响到产量和单位产品能耗, 所以将装料量一同列为影响因素进行研究。

#### 2.1.1 介质温度对干燥特性的影响

切片厚度 3 mm, 装料量  $2.5 \text{ kg/m}^2$ , 介质温度变化范围为  $45 \sim 75^\circ\text{C}$  的条件下, 介质温度对蒜片干燥特性的影响如图 1 所示。从图中可以看出, 随着介质温度的增高, 干燥时间明显缩短, 这种趋势在脱水开始阶段特别明显。这是由于干燥温度的增加可以显著加速蒜片和干燥介质间的热交换, 很多学者的研究结果也显示干燥温度对干燥速率的影响最显著<sup>[7-12]</sup>。

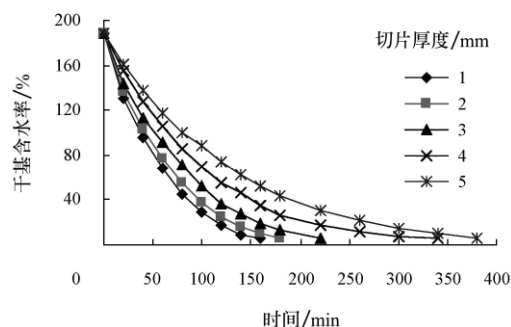


注: 切片厚度 3 mm, 装料量  $2.5 \text{ kg/m}^2$

图 1 介质温度对蒜片干燥特性的影响  
Fig.1 Effect of air temperature on dehydration characteristics of garlic slices

#### 2.1.2 切片厚度对干燥特性的影响

介质温度  $60^\circ\text{C}$ , 物料装料量  $2.5 \text{ kg/m}^2$ , 切片厚度变化范围为  $1 \sim 5 \text{ mm}$  的条件下, 切片厚度对蒜片干燥特性的影响如图 2 所示。从图中可以看出, 随着切片厚度的增加, 干燥时间明显增加。主要原因是随着切片厚度的增加, 水分迁移距离增加, 单位体积大蒜有效干燥面积减小<sup>[13-15]</sup>。

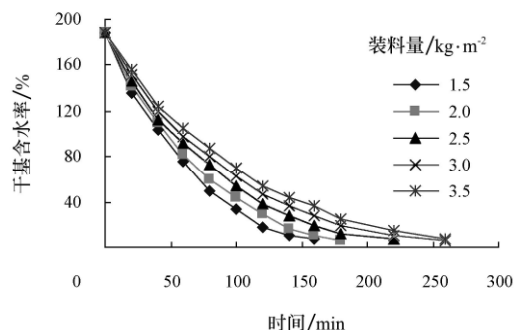


注: 介质温度  $60^\circ\text{C}$ , 装料量  $2.5 \text{ kg/m}^2$

图 2 切片厚度对蒜片干燥特性的影响  
Fig.2 Effect of sample thickness on dehydration characteristics of garlic slices

#### 2.1.3 装料量对干燥特性的影响

介质温度  $60^\circ\text{C}$ , 切片厚度 3 mm, 装料量变化范围为  $1.5 \sim 3.5 \text{ kg/m}^2$  的条件下, 装料量对蒜片干燥特性的影响如图 3 所示。从图中可以看出, 随着装料量的增加, 干燥时间随之增加。



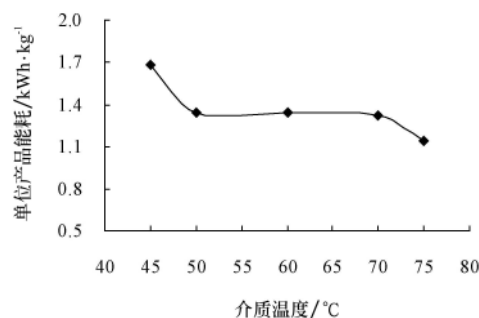
注: 介质温度  $60^\circ\text{C}$ , 切片厚度 3 mm

图 3 装料量对蒜片干燥特性的影响  
Fig.3 Effect of loading density on dehydration characteristics of garlic slices

## 2.2 影响干燥能耗的因素

### 2.2.1 单位产品能耗随介质温度的变化规律

切片厚度 3 mm, 装料量  $2.5 \text{ kg/m}^2$ , 介质温度变化范围为  $45 \sim 75^\circ\text{C}$  的条件下, 单位产品能耗随介质温度改变的变化规律如图 4 所示。从图中可以看出, 单位产品能耗随介质温度升高而降低。介质温度在  $45 \sim 50^\circ\text{C}$  和  $70 \sim 75^\circ\text{C}$  的范围内, 能耗变化显著。而介质温度  $50 \sim 70^\circ\text{C}$  的条件下能耗变化不显著, 在这个温度范围内, 可尽量选择较高温度, 以提高干燥效率。但干燥温度过高会明显破坏大蒜中的活性成分大蒜素, 并且会导致产品褐变<sup>[16-17]</sup>, 所以选择  $60^\circ\text{C}$  为零水平进行进一步优化试验, 温度取值范围  $45 \sim 75^\circ\text{C}$ 。



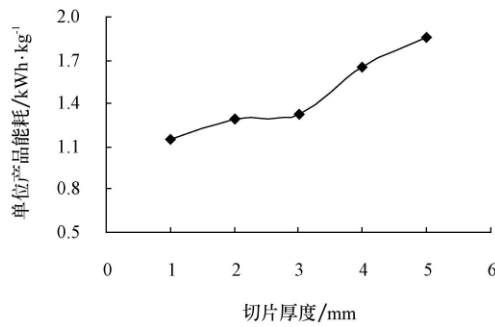
注: 切片厚度 3 mm, 装料量  $2.5 \text{ kg/m}^2$

图 4 能耗随介质温度的变化规律  
Fig.4 Effect of air temperature on energy consumption

### 2.2.2 单位产品能耗随切片厚度的变化规律

介质温度  $60^\circ\text{C}$ , 装料量  $2.5 \text{ kg/m}^2$ , 切片厚度变化范围为  $1 \sim 5 \text{ mm}$  的条件下, 单位产品能耗随切片厚度改变的变化规律如图 5 所示。从图中可以看出, 随着切片厚度的增加, 能耗逐渐增加。在切片厚度  $1 \sim 3 \text{ mm}$  时, 能耗增加不显著, 切片厚度  $3 \sim 5 \text{ mm}$  时, 能耗增加显著。考虑到切片对干燥的影响, 切片不宜太厚, 选择 3 mm 为

零水平进行进一步优化试验, 切片厚度取值范围 1~5 mm。



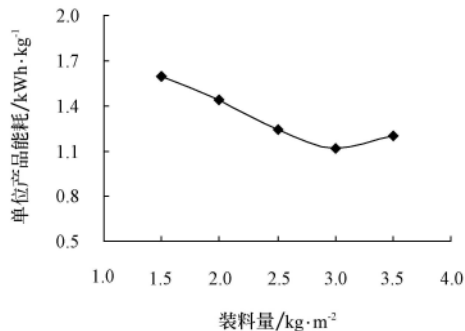
注: 介质温度 60℃, 装料量 2.5 kg/m<sup>2</sup>

图5 能耗随切片厚度的变化规律

Fig.5 Effect of sample thickness on energy consumption

### 2.2.3 单位产品能耗随装料量的变化规律

介质温度 60℃, 切片厚度 3mm, 装料量变化范围为 1.5~3.5 kg/m<sup>2</sup>的条件下, 单位产品能耗随装料量改变的变化规律如图 6 所示。由图可以看出, 随着装料量的增加, 能耗先下降后逐渐上升。但考虑到装料量对干燥时间的影响, 选择 2.5 kg/m<sup>2</sup>为零水平进行进一步优化试验, 装料量取值范围为 1.5~3.5 kg/m<sup>2</sup>。



注: 介质温度 60℃, 切片厚度为 3 mm

图6 能耗随装料量的变化规律

Fig.6 Effect of loading density on energy consumption

## 2.3 最佳节能工艺参数研究

最佳工艺参数试验研究的目的是降低单位产品能耗, 优化生产工艺, 所以根据单位能耗随各影响因素的变化规律, 确定比较适宜的试验水平范围。运用二次正交旋转组合设计的方法, 组成三因素试验, 试验结果如表 2。

表2 二次正交旋转试验设计及结果

Table 2 Design and results of quadratic orthogonal rotary experiment

试验号	Z <sub>1</sub> 介质温度 /℃	Z <sub>2</sub> 切片厚度 /mm	Z <sub>3</sub> 装料量 /kg·m <sup>-2</sup>	单位产品能耗 /kWh·kg <sup>-1</sup>	产量 /kg·h <sup>-1</sup>
1	70	4	3.0	2.74	3.76
2	70	4	2.0	3.696	2.79
3	70	2	3.0	2.099	4.91
4	70	2	2.0	2.877	3.58

5	50	4	3.0	3.491	2.26
6	50	4	2.0	4.398	1.67
7	50	2	3.0	2.374	3.37
8	50	2	2.0	2.640	2.59
9	45	3	2.5	3.332	2.26
10	75	3	2.5	2.489	4.48
11	60	1	2.5	2.091	4.22
12	60	5	2.5	3.710	2.42
13	60	3	1.5	3.942	2.28
14	60	3	3.5	2.276	3.49
15	60	3	2.5	2.312	3.41
16	60	3	2.5	2.435	3.72
17	60	3	2.5	2.451	3.32
18	60	3	2.5	2.278	3.66
19	60	3	2.5	2.475	3.32
20	60	3	2.5	2.372	3.52
21	60	3	2.5	2.270	3.67
22	60	3	2.5	2.380	3.31
23	60	3	2.5	2.431	3.62

### 2.3.1 回归模型

对试验结果用 SAS V9.0RSREG (Response Surface Regression) 程序进行分析, 建立了单位产品能耗和各影响因素之间的回归方程:

$$Y_1 = 2.3823 - 0.2831X_1 + 0.4467X_2 - 0.4129X_3 + 0.1981X_1^2 - 0.1072X_2X_1 + 0.1945X_2^2 - 0.0325X_3X_1 - 0.0003X_3X_2 + 0.3114X_3^2$$

对回归方程进行失拟性检验 ( $F_1$ ) 和拟合检验 ( $F_2$ )。失拟性检验  $F_1 = 1.34 < F_{0.05}(5, 8) = 3.69$ , 差异不显著, 认为模型适合, 可以直接进行显著性分析。  $F_2 = 148.0 > F_{0.01}(9, 13) = 4.17$ , 差异极显著, 说明该方程与实际情况拟合良好, 能够正确反映介质温度、切片厚度、装料量 3 个因素对单位产品能耗的影响。

产量和各影响因素之间的回归方程:

$$Y_2 = 3.4926 + 0.6998X_1 - 0.4630X_2 + 0.43623X_3 - 0.0769X_1^2 - 0.0730X_2X_1 - 0.0946X_2^2 + 0.0847X_3X_1 - 0.1003X_3X_2 - 0.2220X_3^2$$

对回归方程进行失拟性检验 ( $F'_1$ ) 和拟合检验 ( $F'_2$ )。失拟性检验  $F'_1 = 2.40 < F_{0.05}(5, 8) = 3.69$ , 差异不显著, 认为模型适合, 可以直接进行显著性分析。  $F'_2 = 32.11 > F_{0.01}(9, 13) = 4.17$ , 差异极显著, 说明该方程与实际情况拟合良好, 能够正确反映介质温度、切片厚度、装料量 3 个因素对产量的影响。

### 2.3.2 最佳工艺参数的确定及验证试验

用 SAS V9.0 对其最小值进行预测, 当  $X_1 = 0.2254$  (介质温度为 62.3℃)、 $X_2 = -0.6208$  (切片厚度为 2.38 mm)、 $X_3 = 0.3827$  (装料量为 2.69 kg/m<sup>2</sup>) 时, 生产单位产品能量消耗最小, 为 1.96 kWh/kg, 此时的产量为 4.08 kg/h。

按最佳工艺参数, 选择干燥介质温度 62℃、切片厚度 2.4 mm、装料量 2.7 kg/m<sup>2</sup>, 进行验证试验, 实际能耗为 2.05 kWh/kg, 产量为 4.11 kg/h, 与预测值差异极小, 说明回归方程与实际吻合较好, 能够较真实反映热风循环干燥中能量消耗的内在规律, 因此认为此优化工艺参

数可行。目前,国内生产脱水蒜片平均能耗为 2.8 kWh/kg,采用优化后的生产工艺可以节能 27% 左右。

### 3 结 论

试验研究了介质温度、切片厚度、装料量对蒜片干燥特性和能耗的影响,并通过三因素二次正交旋转试验,确定了热风循环干燥节能生产脱水蒜片的最佳工艺参数为:干燥介质温度为 62.3℃、切片厚度为 2.38 mm、装料量为 2.69 kg/m<sup>2</sup>,预测单位产品最小能耗为 1.96 kWh/kg。在干燥介质温度 62℃、切片厚度 2.4 mm、装料量 2.7 kg/m<sup>2</sup> 条件下进行验证试验,能量消耗为 2.05 kWh/kg,此时产量为 4.11 kg/h,节约能耗 27% 左右,产品质量符合生产要求,具有推广价值。

#### [参 考 文 献]

- [1] 黄星奕,魏海丽,赵杰文,等. 脱水蒜片在线分选技术及装置研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 278—279.  
Huang Xingyi, Wei Haili, Zhao Jiewen, et al. Online separating technique and device for dehydrated garlic slice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 278—279. (in Chinese with English abstract)
- [2] 农业部种植业管理司. 中国种植业信息网蔬菜数据库[EB/OL]. [http://zzys.agri.gov.cn/shucai\\_cx.asp](http://zzys.agri.gov.cn/shucai_cx.asp).
- [3] 商务部对外贸易司. 中国农产品出口月度统计报告—大蒜[EB/OL]. <http://wms.mofcom.gov.cn/aarticle/Nocategory/200609/20060903267070.html>, 2008-11-01
- [4] Aghbashlo M, Kianmehr M H, Samimi-Akhijahani H. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (*Berberidaceae*) [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(10): 2865—2871.
- [5] Mohamed L A, Kouhila M, Jamali A, et al. Single layer solar drying behavior of Citrus aurantium leaves under forced convection[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(9/10): 1473—1483.
- [6] Madamba P S, Robert H D, Ken A B. The thin-layer drying characteristics of garlic slices[J]. Journal of Food Engineering, 1996, 29(1): 75—97.
- [7] Sharma G P, Prasad S. Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 58(1): 23—32.
- [8] Demir V, Gunhan T, Yagcioglu A K. Mathematical modeling of convection drying of green table olives[J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(1): 47—53.
- [9] Kaya A, Aydin O, Demirtas C. Drying kinetics of red delicious apple[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(4): 517—524.
- [10] Agnieszka N, Adam F, Alicja Z K, et al. Drying kinetics and quality parameters of pumpkin slices dehydrated using different methods[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 94(1): 14—20.
- [11] Akpinar E, Bicer Y, Ylidiz C. Thin layer drying of red pepper[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 59(1): 99—104.
- [12] Doymaz I. Air-drying characteristics of tomatoes[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(4): 1291—1297.
- [13] Mortaza, Mohammad H K, Akbar A. Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer energy[J]. Conversion and Management, 2009, 50(5): 1348—1355.
- [14] Pezzutti A, Crapiste G H. Sorptional equilibrium and drying characteristics of garlic[J]. Journal of Food Engineering, 1997, 31(1): 113—123.
- [15] Ertekin C, Yaldiz O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 63(3): 349—359.
- [16] Sacilik K, Unal G. Dehydration characteristics of kastamonu garlic slices[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(2): 209—215.
- [17] Krest I, Glodek J, Keusger M. Cysteine sulfoxides and alliinase activity of some allium species[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(8): 3753—3760.

## Optimization of energy saving technology for drying dehydrated garlic slices

Zhang Jingjing<sup>1</sup>, Cao Peng<sup>1,2</sup>, Qiao Xuguang<sup>1\*</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

2. Yantai Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Yantai 264000, China)

**Abstract:** This study was carried out to investigate the energy saving technique of dehydrated garlic slices in heated-air circulate drying. The dehydration process of garlic slices was optimized by three factors quadratic orthogonal rotary design, and the quadratic regression equations were established and the predicted minimum energy consumption was 1.96 kWh/kg. The optimum technique parameters of air temperature, sample slice thickness and loading density were 62.3℃, 2.38 mm and 2.69 kg/m<sup>2</sup>, respectively. The verification test was carried out at air temperature of 62℃, sample slice thickness of 2.4mm, loading density of 2.7 kg/m<sup>2</sup>, the energy consumption was 2.05 kWh/kg, and the yield was 4.11 kg/h. Compared with the technique at present, the optimum technique can reduce by 27% of the energy consumption.

**Key words:** energy conservation, heated air circulate drying, drying technology, optimization, dehydrated garlic slice