

# 基于声发射法的油炸马铃薯片脆性测量及油炸工艺优化

杨镒静<sup>1,2</sup> 吴中华<sup>1,2</sup> 刘 静<sup>1</sup> 胥慧丽<sup>1</sup> 王薏博<sup>1</sup>

(1. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300457; 2. 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津 300222)

**摘要:** [目的] 为定量和全面地测量油炸食品脆性, 研究油炸过程中马铃薯片脆性变化规律, 并优化马铃薯片的油炸工艺。[方法] 采用食品脆性机械—声发射综合测量装置, 以质构仪测得的最大机械压缩应力和声发射仪检测到的最大声发射能量为指标参数, 测量油炸马铃薯片脆性; 并研究油炸过程中马铃薯片脆性变化规律, 同时利用单因素试验和响应面优化分析法寻找最佳油炸工艺条件。[结果] 马铃薯片油炸过程中, 最大机械压缩应力和最大声发射能量在含水率 80%~22% 时先小幅增加, 在含水率 22%~7% 时快速增加; 其后最大机械压缩应力随着含水率降低仍快速增加, 而最大声发射能量保持不变。优化后的油炸工艺条件为: 油炸温度 160 °C、油炸时间 21 min、切片厚度 1 mm。在此条件下, 响应值最大机械压缩应力和最大声发射能量分别为 17.13 N 和 0.154 mV·s。[结论] 机械—声发射综合检测方法可用于油炸食品脆性测量及油炸工艺优化。

**关键词:** 油炸食品; 马铃薯; 脆性; 声发射; 应力

## Brittleness measurement and process optimization of fried potato chips based on the acoustic emission method

YANG Yijing<sup>1,2</sup> WU Zhonghua<sup>1,2</sup> LIU Jing<sup>1</sup> XU Huili<sup>1</sup> WANG Yibo<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;  
2. Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry and Food Machinery and Equipment, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** [Objective] To quantitatively and comprehensively measure the fried food brittleness, to study the changing law of potato chip brittleness during the frying process, and to optimize the frying process of potato chips. [Methods] A food brittleness mechanical-acoustic emission comprehensive measurement device is employed to measure the brittleness of fried potato chips, taking the maximum mechanical compressive stress measured by the texture analyzer and the maximum acoustic emission energy detected by the acoustic emission instrument as the index parameters. Additionally, the changing law of potato chip brittleness during the frying process is investigated, while single-factor test and response surface optimization are used in search of the optimal process conditions for frying. [Results] During potato chip frying, the maximum mechanical compressive stress and the maximum acoustic emission energy increase slightly at the moisture content of 80% to 22% and then increase rapidly at the moisture content of 22% to 7%. Then, the maximum mechanical compressive stress increases rapidly with the decrease of moisture content, while the maximum acoustic emission energy remains unchanged. The optimal frying conditions are a frying temperature of 160 °C, a frying time of 21 min, and a slice thickness of 1 mm, under which the maximum

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号: 31471618)

通信作者: 吴中华(1977—), 男, 天津科技大学教授, 博士。E-mail: wuzhonghua@tust.edu.cn

收稿日期: 2024-10-22 改回日期: 2025-05-25

引用格式: 杨镒静, 吴中华, 刘静, 等. 基于声发射法的油炸马铃薯片脆性测量及油炸工艺优化[J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 203-210.

Citation: YANG Yijing, WU Zhonghua, LIU Jing, et al. Brittleness measurement and process optimization of fried potato chips based on the acoustic emission method[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 203-210.

mechanical compressive stress and the maximum acoustic emission energy are 17.13 N and 0.154 mV·s, respectively. [Conclusion] The mechanical-acoustic emission compressive detection method can be used for fried food brittleness measurement and frying process optimization.

**Keywords:** fried food; potato; brittleness; acoustic emission; stress

油炸食品如炸马铃薯片、炸香蕉片、炸虾片、炸丸子等,由于口感酥脆、香气浓郁、制作简单、价格低廉等优点深受大众喜爱<sup>[1]</sup>。对于油炸食品,脆性是衡量其质构品质的一个重要指标,也是油炸类食品重要研究方向之一<sup>[2-3]</sup>。食品脆性主要表现为消费者进食时,牙齿咬合食品时的触觉感受(力学)和食物破裂时发出声音的听觉感受(声学)<sup>[4-6]</sup>。

目前食品脆性测量方法主要包括感官评定法、机械法和声学法<sup>[7]</sup>。感官评定法是评价者对测试产品的主观打分评价,一般产品质地的感官评价包括视觉、口感、声音等特征。但这需要一定量有经验的评价员,耗时长且具有主观性。机械法是模拟牙齿咬合最常用的方法,是通过使用探针、测试机或质构分析仪对样品施加一定的外力,使样品发生形变破损来分析脆性。机械法操作简单,所需时间较短,但只能分析力学属性(反映了牙齿咬合食品时的触觉感受),不能反映食物破裂时发出声音的听觉感受(声学)。声学法通过记录挤压食物时所产生的声音来检测脆性<sup>[8-9]</sup>。目前测量声学信号的仪器主要有示波器、声音传感器以及声压计,但其灵敏度低,数据采集频率为千赫兹级别,测量过程中容易丢失声音信号<sup>[10-11]</sup>。

材料在应力作用下产生变形,当应力足够大时将产生局部断裂。伴随着断裂,变形能量将以弹性波形式向外释放,这种现象称为声发射(acoustic emission, AE)<sup>[12-13]</sup>。声发射法灵敏度高,并且数据采集频率达到兆赫兹级别,能够更多地采集到食物在被压缩时产生的声音信号。目前声发射技术已被广泛应用于大型化工装置、储罐、桥梁等内部微小裂纹检测,但在食品方面的应用研究未见报道。武旭瑶等<sup>[2]</sup>曾尝试利用自建的机械一声发射综合测量装置,测量热风干燥后果蔬片的脆性,结果表明,声发射技术可以应用于干燥果蔬脆性测量。在此基础上,研究拟将该技术应用拓展到油炸食品脆性测量。通过自建油炸食品脆性力学和声学综合测量装置,即利用质构仪对物料进行挤压同时用声发射仪记录声音信号,对油炸产品脆性进行力学和声学综合测量,并基于产品脆性优化油炸马铃薯片的制备工艺条件,以期更全面和定量地分析油炸食品的脆性,为油炸类食品开发提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 试验材料

食用油:大豆油,益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司;

马铃薯:市售。

#### 1.1.2 主要仪器设备

质构仪:CT-3型,美国博勒飞公司;

全波形声发射信号分析仪:DS5-8B型,北京声华兴业科技有限公司;

数显恒温油浴锅:JXX1-HH-6型,北京海富达科技有限公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 马铃薯片油炸工艺

马铃薯→切片(直径为 30 mm 的圆片)→护色(0.5% 柠檬酸溶液中浸泡 3 min)→热烫(沸水中热烫 30 s)→沥水→油炸→沥油

1.2.2 油炸马铃薯片脆性测定 课题组自制的油炸马铃薯片脆性力学和声学综合检测装置,主要包括两个部分:声发射仪和质构仪<sup>[14]</sup>。试验时,在质构仪载物台上放置一块不锈钢的载物圆盘,将油炸后的马铃薯片放到质构仪载物盘中央,同时将一个声发射探头用耦合剂耦合在质构仪的载物盘上,收集物料声发射信号,另一个探头放置在载物盘旁环境中,作为对照组,收集环境噪声。质构仪和声发射仪同步开始测试,质构仪探头压缩马铃薯片产生力学和声学信号,力学信号经 Texture Pro CT 软件采集处理,显示在连接质构仪的计算机上,可以得到应力-压缩时间关系图。压缩马铃薯片产生的声发射信号,经声发射探头采集,并经声发射软件处理后,可以得到声发射信号脉冲图。质构仪参数设计:选用直径为 35 mm 的 TA 35 探头,测试速率 2 mm/s,触发力设置为 0.049 N。相同油炸工艺的马铃薯片测试 30 次,取平均值。

#### 1.2.3 单因素试验

(1) 油炸温度对马铃薯片脆性的影响:固定油炸时间 27 min,切片厚度 2 mm,油炸温度分别设定为 100, 120, 140, 160, 180 °C。以质构仪对油炸马铃薯片挤压的最大机械压缩应力,声发射仪记录声音的最大声发射能量为指标,判定油炸马铃薯片的最佳炸制温度。

(2) 油炸时间对马铃薯片脆性的影响:固定油炸温度 140 °C,切片厚度 2 mm,油炸时间分别设定为 18, 21, 24, 27, 30 min。以质构仪对油炸马铃薯片挤压的最大机械压缩应力,声发射仪记录声音的最大声发射能量为指标,判定油炸马铃薯片的最佳炸制时间。

(3) 切片厚度对马铃薯片脆性的影响:固定油炸时间 24 min,油炸温度 140 °C,切片厚度分别设定为 1, 2, 3, 4, 5 mm。以质构仪对油炸马铃薯片挤压的最大机械压缩应力,声发射仪记录声音的最大声发射能量为指标,判定油炸马铃薯片的最佳切片厚度。

1.2.4 Box-Behnken 试验 以油炸过程中的油炸温度、油炸时间、切片厚度为 3 个因素,每个因素设定 3 个水平,以质构仪对油炸马铃薯片挤压的最大机械压缩应力和声发射仪记录的最大声发射能量为响应值,采用 Box-Behnken 试验优化油炸工艺条件。

1.2.5 含水率计算 马铃薯片初始含水率为 81.27%,将油炸后的马铃薯片放入电热鼓风干燥箱中,温度调至 105 °C,干燥 13 h 后,取出马铃薯片称重,记录马铃薯片的干物质质量。按式(1)计算含水率。

$$R = \frac{m_t - m_d}{m_t} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

$R$ ——油炸后马铃薯片的含水率,%;

$m_t$ ——油炸后马铃薯片的质量,g;

$m_d$ ——油炸后马铃薯片的干物质质量,g。

1.2.6 含油率测定 按 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的索氏抽提法执行。

### 1.3 数据分析与处理

采用 Design Expert 8.0.6 软件进行响应面试验设计,运用 Origin 9.0 软件绘图。试验数据采用 SPSS 19.0 软件进行处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 油炸马铃薯片脆性测量及变化规律

2.1.1 单样本马铃薯片脆性测量 在油炸温度 140 °C、马铃薯切片厚度 1 mm 条件下,炸制不同时间的马铃薯片的外观变化如图 1 所示。油炸时间为 3~15 min 时马铃薯片出现不规则的变化,炸制 15 min 后形状基本固定。此外,油炸时间为 3~12 min 时,马铃薯片的颜色较浅;油炸时间为 15~27 min 时,马铃薯片的颜色逐渐加深,呈金黄色;炸制 27 min 后马铃薯片逐渐变焦。

在油炸温度 120 °C、马铃薯切片厚度 1 mm、油炸时间 24 min 条件下,油炸马铃薯片的应力随压缩时间的变化

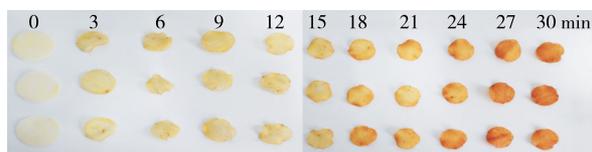


图 1 140 °C 炸制过程中马铃薯片的外观变化图

Figure 1 Appearance changes in potato chips fried at 140 °C

见图 2。从图 2 可以看出,油炸马铃薯片的应力随压缩时间增加整体呈先增大后减小趋势,其最大应力峰出现在压缩时间为 0.44 s 时,最大机械压缩应力为 17.5 N,此时马铃薯片局部被压碎。压缩过程中出现多个小的压缩应力中间峰,是由油炸马铃薯片内部的多孔结构和间隙破裂所致。

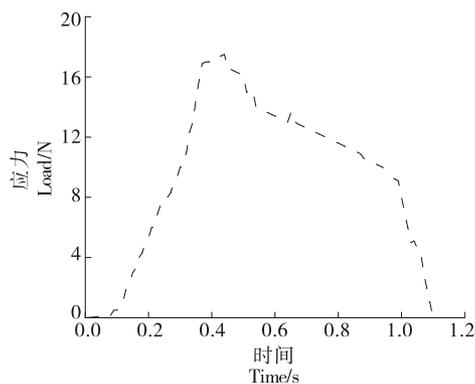


图 2 油炸马铃薯片的压缩应力随压缩时间的变化

Figure 2 Changes in the compressive stress with time for fried potato chips

如图 3 所示,油炸马铃薯片样品(油炸温度 120 °C、马铃薯切片厚度 1 mm、油炸时间 24 min)被质构仪压缩过程中,声发射仪采集到的声发射脉冲信号图中出现 4 个明显的声发射脉冲信号。在此基础上,通过累积单位时间内声发射脉冲信号强度值,可以得到声发射能量。

通过绘制声发射能量—压缩时间图,并与图 2 中的应力—压缩时间图同步初始采集时间,可以得到油炸马铃薯片在机械压缩过程中应力和声发射能量变化图,见图 4。从图 4 可以看出,在油炸马铃薯片压缩过程中,存在多个应力峰,说明马铃薯片发生多次破裂;每一个应力峰值都对一个大的声发射能量值,说明马铃薯片压缩过程中破碎所需的应力和声发射能量之间存在关联。以食品压缩过程中的最大机械压缩应力作为表征食品脆性的力学参数,以反映牙齿咬合食品时的触觉感受;以最大声发射能量作为表征食品脆性的声学参数,以反映食物破裂时发出声音的听觉感受。从图 4 中可以得到,脆性的力学参数值为 17.5 N,声学参数值为 0.055 mV·s。上述两个

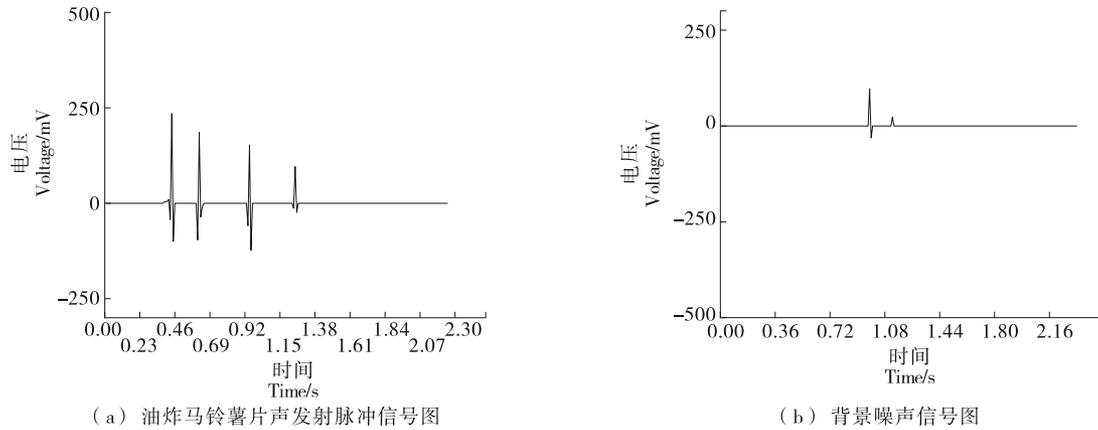


图 3 油炸马铃薯片机械压缩过程声发射全波形图  
Figure 3 Acoustic emission full waveform for the fried potato chips during mechanical compression

参数值测试采集时间仅 1.2 s,可见自制脆性力学和声学检测装置可以快速、定量测量食品脆性。后期在进行响应面优化时,以最大机械压缩应力和最大声发射能量为指标来反映油炸马铃薯片的脆性。马铃薯片在被压缩过程中,压缩物体所需的应力越小,采集到的声发射能量越大,其脆性越好。

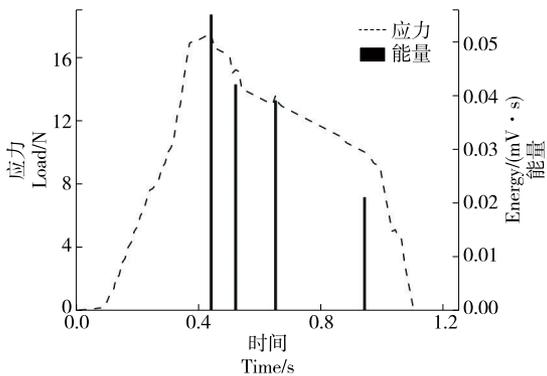


图 4 油炸马铃薯片应力和声发射能量随时间的变化  
Figure 4 Changes in the stress and acoustic emission energy with time for the fried potato chips

2.1.2 油炸过程中马铃薯片脆性变化规律 图 5 显示了油炸温度 140 °C、马铃薯切片厚度 1 mm 条件下,马铃薯片含水率、含油率及脆性参数随油炸时间的变化规律。从图 5 可以看出,马铃薯片含水率随着油炸时间增加呈降低趋势:油炸时间为 0~18 min 时,马铃薯片含水率从初始值快速下降至 9%;油炸时间为 18~30 min 时,变化不明显。马铃薯片含油率随着油炸时间增加呈升高趋势:油炸时间为 0~18 min 时,马铃薯片含油率从初始值快速升高至 29%;油炸时间为 18~30 min 时,缓慢升至 33%。由此可见,马铃薯片在油炸过程中,含油率和含水率之间存在负

相关<sup>[15]</sup>。油炸时间为 0~9 min(含水率为 80%~24%)时,最大机械压缩应力值先小幅升高,达到 6.61 N 后基本保持不变;最大声发射能量也先小幅升高,达到 0.018 mV·s 后保持不变。此阶段马铃薯片受热失去部分自由水,但其内部微结构仍保持不变,马铃薯片收缩等形变小,因而破碎时所需的最大机械压缩应力和最大声发射能量保持不变<sup>[16-17]</sup>。油炸时间为 9~21 min(含水率 24%~7%)时,随着马铃薯片继续失水,薯片体积收缩,内部微结构变得紧密,因而最大机械压缩应力值,最大声发射能量分别快速增大至 14.79 N 和 0.127 mV·s。油炸时间超过 21 min 后,最大机械压缩应力仍快速增加,但最大声发射能量保持不变。这可能是由于此阶段为过度油炸阶段,薯片内部过热结焦,造成应力增加<sup>[18]</sup>。

## 2.2 马铃薯片油炸工艺优化

### 2.2.1 单因素试验

(1) 油炸温度对马铃薯片脆性的影响:如图 6(a)所

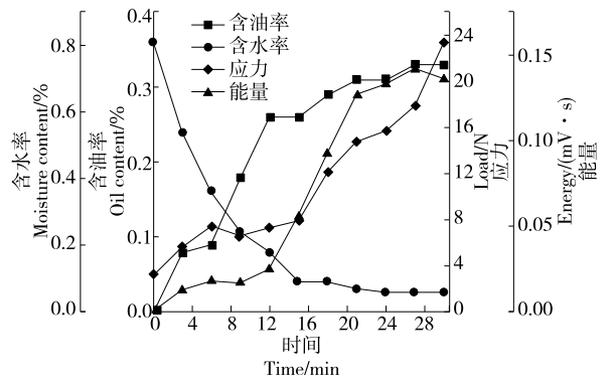


图 5 油炸过程中马铃薯片脆性参数、含油率与含水率的变化  
Figure 5 Changes in brittleness, oil content, and moisture content of potato chips during the frying process

示,马铃薯片的最大机械压缩应力及声发射仪采集的最大声发射能量均随油炸温度的升高而增加。油炸温度为120℃时,最大机械压缩应力为26.94 N,最大声发射能量为0.094 mV·s。当油炸温度继续升高时,最大机械压缩应力增加,但最大声发射能量变化不明显。因此,确定120℃为该固定条件下最佳油炸温度。

(2) 油炸时间对马铃薯片脆性的影响:如图6(b)所

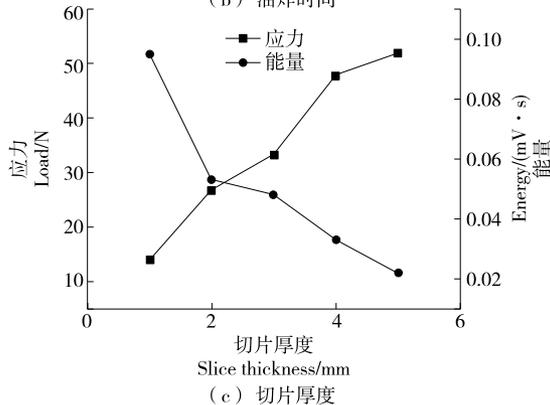
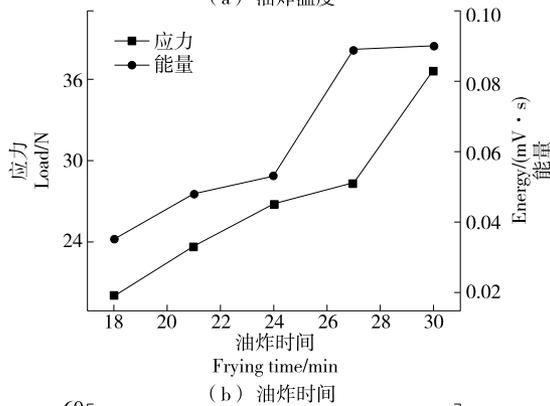
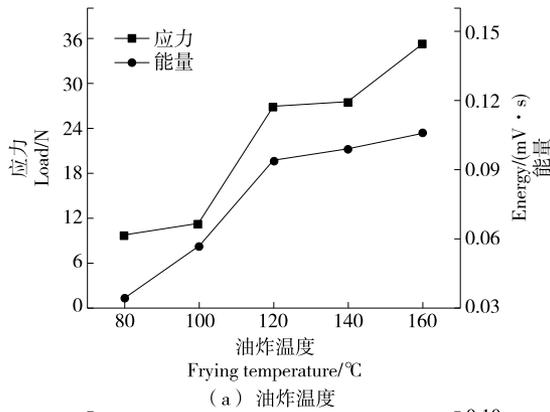


图6 油炸温度、油炸时间及切片厚度对马铃薯片最大机械压缩应力和最大声发射能量的影响

Figure 6 Effects of frying temperature, frying time, and slice thickness on maximum mechanical compressive stress and maximum acoustic emission energy of potato chips

示,马铃薯片的最大机械压缩应力及最大声发射能量均随油炸时间的增加而增加,炸制27 min时最大声发射能量基本达到了最大值。因此,选择27 min为最佳油炸时间。

(3) 切片厚度对马铃薯片脆性的影响:如图6(c)所示,当切片厚度为1 mm时,马铃薯片的最大机械压缩应力为13.87 N,此时声发射仪采集到的最大声发射能量为0.095 mV·s。随着切片厚度的增加,质构仪所需的最大机械压缩应力增大,而最大声发射能量减小。因此,选择1 mm为最佳切片厚度。

### 2.2.2 Box-Behnken 试验

(1) 试验设计及结果:根据单因素试验结果,确定油炸温度、油炸时间、切片厚度的因素水平见表1,试验设计及结果见表2。

表1 响应面设计因素与水平

水平	A 油炸温度/°C	B 油炸时间/min	C 切片厚度/mm
-1	120	21	1
0	140	24	2
1	160	27	3

表2 响应面试验设计及结果

试验号	A	B	C	$Y_1$ 最大机械压缩应力/N	$Y_2$ 最大能量/(mV·s)
1	-1	-1	0	11.34	0.068
2	1	-1	0	20.92	0.076
3	-1	1	0	26.94	0.094
4	1	1	0	35.36	0.106
5	-1	0	-1	17.76	0.070
6	1	0	-1	20.25	0.152
7	-1	0	1	35.78	0.075
8	1	0	1	49.12	0.024
9	0	-1	-1	15.76	0.127
10	0	1	-1	21.96	0.142
11	0	-1	1	35.63	0.047
12	0	1	1	55.78	0.116
13	0	0	0	27.84	0.064
14	0	0	0	26.66	0.063
15	0	0	0	21.96	0.058
16	0	0	0	26.81	0.053
17	0	0	0	24.36	0.064

(2) 模型方程的建立与显著性检验:根据试验结果,采用 Design Expert 8.0.6 软件对试验结果进行多元回归模拟,得回归方程:

$$Y_1 = 25.53 + 4.23A + 7.05B + 12.57C - 0.29AB + 2.71AC + 3.49BC - 1.72A^2 - 0.17B^2 + 6.92C^2, \quad (2)$$

$$Y_2 = 0.06 + 0.006A + 0.017B - 0.029C + 0.001AB - 0.033AC + 0.014BC - 0.001A^2 - 0.027B^2 + 0.021C^2. \quad (3)$$

由表 3 和表 4 可知,对于最大机械压缩应力和最大声发射能量两个响应值,模型的  $P$  值均小于 0.000 1,说明模型极显著;模型失拟项  $P$  值均大于 0.05,判定模型失拟项不显著;模型响应值最大机械压缩应力和最大声发射能量的决定系数  $R^2$  分别为 0.985 7, 0.987 8,校正后  $R^2$  分别为 0.967 2, 0.972 1,表明该模型的实际值和预测值相关性较高;模型的变异系数均小于 10%,信噪比均大于 4,说明试验有较高的可信度和精确度<sup>[19-20]</sup>。因此,可以用此模型对油炸食品的脆性进行分析和预测。模型中  $F$  值表示单因素对结果的影响顺序,通过表 3 和表 4 可知,所选因素对响应值最大机械压缩应力和最大声发射能量的影响大小均为:切片厚度>油炸时间>油炸温度。

方差分析中的  $P$  值表示自变量对因变量影响的显著性。油炸温度、油炸时间、切片厚度对响应值最大机械压缩应力的影响极显著( $P < 0.01$ );油炸时间、切片厚度对响应值最大声发射能量的影响极显著( $P < 0.01$ ),油炸温度的影响显著( $P < 0.05$ )。

表 3 回归模型方差分析(最大机械压缩应力)<sup>†</sup>

Table 3 Analysis of variance for the regression model (maximum mechanical compressive stress)

方差来源	平方和	自由度	均方	$F$ 值	$P$ 值	显著性
模型	2 093.07	9	232.56	53.49	<0.000 1	**
A	143.06	1	143.06	32.90	0.000 7	**
B	397.48	1	397.48	91.42	<0.000 1	**
C	1 264.54	1	1 264.54	290.84	<0.000 1	**
AB	0.34	1	0.34	0.08	0.788 9	
AC	29.43	1	29.43	6.77	0.035 3	
BC	48.65	1	48.65	11.19	0.012 3	*
A <sup>2</sup>	12.46	1	12.46	2.87	0.134 3	**
B <sup>2</sup>	0.12	1	0.12	0.03	0.875 2	**
C <sup>2</sup>	201.74	1	201.74	46.40	0.000 3	**
残差	30.44	7	4.35			
失拟项	8.07	3	2.69	0.48	0.712 9	
纯误差	22.37	4	5.59			
总和	2 123.51	16				

†  $R^2=0.985 7$ ,校正后  $R^2=0.967 2$ ,变异系数为 7.47%,信噪比为 27.10。

表 4 回归模型方差分析(最大声发射能量)<sup>†</sup>

Table 4 Analysis of variance for the regression model (maximum acoustic emission energy)

方差来源	平方和	自由度	均方	$F$ 值	$P$ 值	显著性
模型	0.02	9	$2.17 \times 10^{-3}$	62.87	<0.000 1	**
A	$3.25 \times 10^{-4}$	1	$3.25 \times 10^{-4}$	9.39	0.018 2	*
B	$2.45 \times 10^{-3}$	1	$2.45 \times 10^{-3}$	70.74	<0.000 1	**
C	$6.55 \times 10^{-3}$	1	$6.55 \times 10^{-3}$	189.26	<0.000 1	**
AB	$4.00 \times 10^{-6}$	1	$4.00 \times 10^{-6}$	0.12	0.743 9	
AC	$4.42 \times 10^{-3}$	1	$4.42 \times 10^{-3}$	127.68	<0.000 1	**
BC	$7.29 \times 10^{-4}$	1	$7.29 \times 10^{-4}$	21.05	0.002 5	**
A <sup>2</sup>	$4.86 \times 10^{-6}$	1	$4.86 \times 10^{-6}$	0.14	0.718 9	
B <sup>2</sup>	$2.99 \times 10^{-3}$	1	$2.99 \times 10^{-3}$	86.50	<0.000 1	**
C <sup>2</sup>	$1.84 \times 10^{-3}$	1	$1.84 \times 10^{-3}$	53.23	0.000 2	**
残差	$2.42 \times 10^{-4}$	7	$3.46 \times 10^{-5}$			
失拟项	$1.49 \times 10^{-4}$	3	$4.97 \times 10^{-5}$	2.14	0.238 5	
纯误差	$9.32 \times 10^{-5}$	4	$2.33 \times 10^{-5}$			
总和	0.02	16				

†  $R^2=0.987 8$ ,校正后  $R^2=0.972 1$ ,变异系数为 7.15%,信噪比为 27.42。

(3) 交互作用分析:以最大机械压缩应力、最大声发射能量为响应值,依据回归方程建立响应面如图 7 所示。响应面图越陡峭说明因素交互作用对响应值的影响越大。由图 7 可知,对于响应值最大机械压缩应力,油炸时间与切片厚度交互作用影响最显著,其次是油炸温度与切片厚度,而油炸温度与油炸时间交互作用影响不显著;对于响应值最大声发射能量,油炸温度与切片厚度交互作用影响最大,其次是油炸时间与切片厚度,而油炸温度与油炸时间的交互作用影响不显著,与方差分析一致。

(4) 验证实验:根据 Design Expert 8.0.6 软件分析结果,设置最大机械压缩应力为最小值、最大声发射能量为最大值,此时可以得到最佳油炸马铃薯片参考工艺条件为油炸温度 160 °C、油炸时间 21.00 min、切片厚度 1.15 mm,此时最大机械压缩应力为 16.08 N、最大声发射能量为 0.153 mV·s。结合实际情况对参考工艺进行修正,最终的优化条件为:油炸温度 160 °C、油炸时间 21 min、切片厚度 1 mm,在此条件下进行 3 次验证实验,最终得到的马铃薯片的最大机械压缩应力平均值为 17.13 N,最大声发射能量平均值为 0.154 mV·s,与预测值相接近,说明该优化模型具有较高的可靠性。

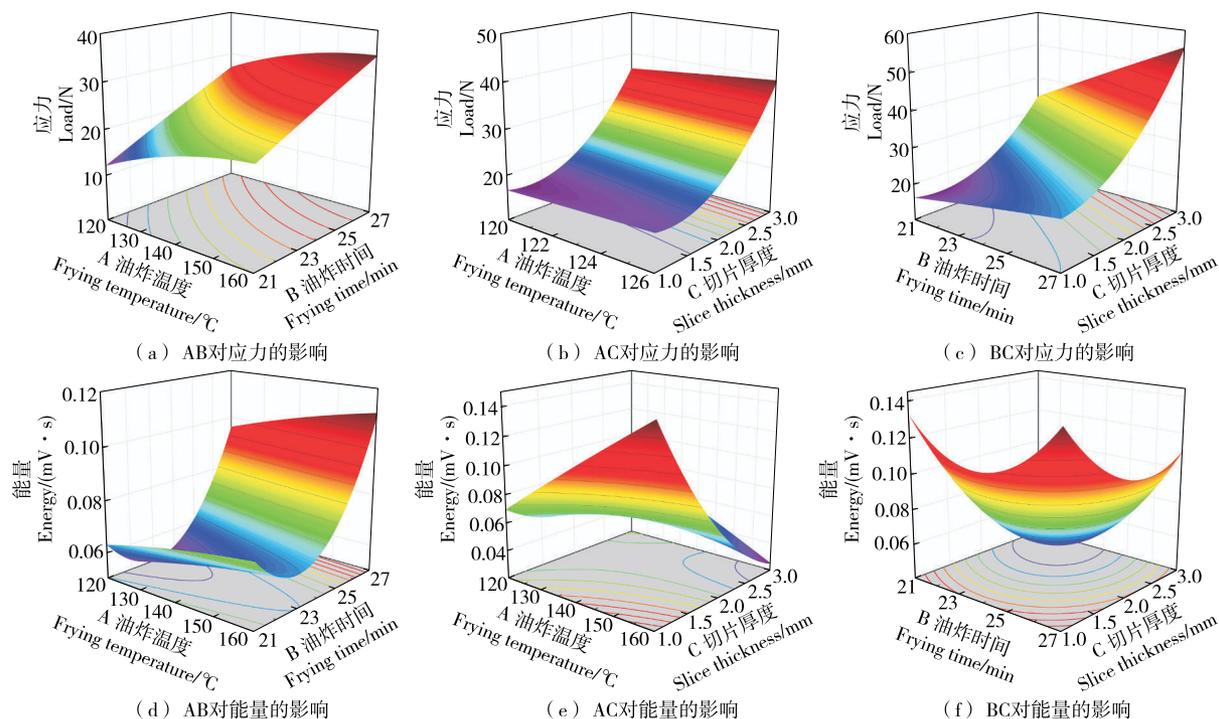


图7 各因素交互作用对响应值应力、能量的影响

Figure 7 Effects of interaction of factors on response value stress and energy

### 3 结论

(1) 食品脆性力学和声学测量装置能够快速、定量测得油炸马铃薯片脆性。试验条件下,脆性测量采集时间约为1.2 s,可定量测得脆性参数——最大机械压缩应力和最大声发射能量。

(2) 油炸过程中马铃薯片脆性变化规律为最大机械压缩应力随油炸时间先小幅增加后快速增加,最大声发射能量随油炸时间增加后保持不变。马铃薯片油炸过程中,最大机械压缩应力和最大声发射能量在含水率80%~22%时先小幅增加,在含水率22%~7%时快速增加;其后随着含水率进一步降低,最大机械压缩应力仍快速增加,而最大声发射能量保持不变。

(3) 从食品脆性角度优化的马铃薯片油炸工艺条件为:油炸温度160℃、油炸时间21 min、切片厚度1 mm。此工艺条件下得到的马铃薯片的最大机械压缩应力和最大声发射能量分别为17.13 N和0.154 mV·s。

#### 参考文献

[1] 徐健,刘琳,姜红,等.炸薯条和薯片的风味物质及影响因素[J].中国马铃薯,2023,37(1): 62-69.  
XU J, LIU L, JIANG H, et al. Flavor substances and influencing factors of french fries and potato chips[J]. Chinese Potato, 2023, 37(1): 62-69.

[2] 武旭瑶,马有川,黄文英,等.热风干燥过程中果蔬片脆性变化规律[J].食品与机械,2022,38(9): 22-28.  
WU X Y, MA Y C, HUANG W Y, et al. Variation of food brittleness of the fruit and vegetable slices during hot air drying process[J]. Food & Machinery, 2022, 38(9): 22-28.

[3] CHEN J S. Food oral processing: a review[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(1): 1-25.

[4] 于泓鹏,曾庆孝.脆度的研究方法及其控制参数[J].食品与发酵工业,2004,30(3): 85-89.  
YU H P, ZENG Q X. Crispness study methods and its controlling parameters[J]. Food and Fermentation Industries, 2004, 30(3): 85-89.

[5] 孙钟雷,张长平,段建礼,等.咀嚼脆裂声音与食品脆性的关系研究[J].食品科技,2017,42(6): 95-98.  
SUN Z L, ZHANG C P, DUAN J L, et al. The relationship for the voice chewing embrittlement and food brittleness[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(6): 95-98.

[6] 赵阿丹,谢静,张秋亮,等.食品酥脆质地的评定与表征[J].食品工业,2015,36(1): 188-192.  
ZHAO A D, XIE J, ZHANG Q L, et al. Assessment and characterization of food crispy texture[J]. The Food Industry, 2015, 36(1): 188-192.

[7] 马鑫,马有川,李媛,等.不同加工工艺香蕉片脆性的量化与比较[J].天津科技大学学报,2023,38(1): 48-54.

- MA X, MA Y C, LI Y, et al. Quantitative analysis and comparison of the brittleness of banana chips processed by different technologies[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2023, 38(1): 48-54.
- [8] IWATANI S I, AKIMOTO H, SAKURAI N. Acoustic vibration method for food texture evaluation using an accelerometer sensor[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115(1): 26-32.
- [9] TANIWAKI M, SAKURAI N, KATO H. Texture measurement of potato chips using a novel analysis technique for acoustic vibration measurements[J]. Food Research International, 2010, 43(3): 814-818.
- [10] ENDO H, INO S, FUJISAKI W. The effect of a crunchy pseudo-chewing sound on perceived texture of softened foods [J]. Physiology & Behavior, 2016, 167: 324-331.
- [11] LIU X Q, TAN J L. Acoustic wave analysis for food crispness evaluation[J]. Journal of Texture Studies, 1999, 30 (4): 397-408.
- [12] 邢鸿雁, 张旭鹏, 齐刚. 钛镍形状记忆合金拉伸过程的声发射特征研究[J]. 功能材料, 2018, 49(3): 3 146-3 151.
- XING H Y, ZHANG X P, QI G. Research on acoustic emission characteristics of Ti-Ni shape memory alloy during tensile process[J]. Journal of Functional Materials, 2018, 49(3): 3 146-3 151.
- [13] 李雪换, 底月兰, 王海斗, 等. 基于声发射技术的热障涂层损伤行为[J]. 材料导报, 2018, 32(19): 3 368-3 374.
- LI X C, DI Y L, WANG H D, et al. Failure behavior of thermal barrier coatings based on acoustic emission technique[J]. Materials Reports, 2018, 32(19): 3 368-3 374.
- [14] 胥慧丽, 吴中华, 董晓林, 等. 马铃薯片脆性的力学和声学测量[J]. 食品科学, 2020, 41(21): 22-27.
- XU H L, WU Z H, DONG X L, et al. Mechanical and acoustic measurement of potato chip crispness[J]. Food Science, 2020, 41(21): 22-27.
- [15] 殷玲, 常诗洁, 赵立艳, 等. 低温油炸与冷冻干燥生产草菇脆片的特性[J]. 食品科学, 2017, 38(22): 192-199.
- YIN L, CHANG S J, ZHAO L Y, et al. Quality characteristics of straw mushrooms (*Volvariella volvacea*) chips prepared by low-temperature vacuum frying and vacuum freeze drying[J]. Food Science, 2017, 38(22): 192-199.
- [16] 李耀, 刘海波, 金雪冻, 等. 不同品种马铃薯干片及其油炸脆片品质的比较[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(12): 152-159.
- LI Y, LIU H B, JIN X D, et al. Comparative study on the qualities of dried slices and fried crisps made from different potato varieties[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48 (12): 152-159.
- [17] 郑苗苗, 徐佳璐, 曹哲, 等. 油炸食品中丙烯酰胺的控制研究进展[J]. 中国调味品, 2022, 47(8): 216-220.
- ZHENG M M, XU J L, CAO Z, et al. Research progress on control of acrylamide in fried food[J]. China Condiment, 2022, 47(8): 216-220.
- [18] 应桦. 真空油炸马铃薯脆片的工艺[J]. 食品工业, 2019, 40 (11): 141-144.
- YING H. The technology of vacuum fried potato chips[J]. The Food Industry, 2019, 40(11): 141-144.
- [19] 刘芸, 苏平, 宋思圆. 响应面法优化黄秋葵籽油中亚油酸的共轭转化率[J]. 食品工业科技, 2015, 36(24): 273-277.
- LIU Y, SU P, SONG S Y. Optimization of conjugate conversion rate of linoleic acid in okra seed oil by response surface method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(24): 273-277.
- [20] AKINPELU O R, IDOWU M A, SOBUKOLA O P, et al. Optimization of processing conditions for vacuum frying of high-quality fried plantain chips using response surface methodology (RSM) [J]. Food Science and Biotechnology, 2014, 23(4): 1 121-1 128.