

扫频超声波提取对花生油脂氧化和流变特性的影响

张磊, 余筱洁, 周存山, 马海乐, 刘月桦

(江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 作为食品物理加工技术, 扫频超声能产生一个更有利于改善空化效果的声场, 提高了油脂得率, 但由于空化效应的存在, 导致油脂会发生一定程度的氧化, 影响油脂黏度, 因此, 有必要对油脂氧化和流变特性进行研究。本文中采用压电膜传感器对花生油脂提取过程中本征频率为 20 kHz、40 kHz 和 60 kHz 的扫频超声场进行实时监测, 根据国标检测油脂氧化性能, 利用旋转流变仪测量油脂流变特性。研究发现: 花生油脂提取的共振频率是 40 kHz, 对应的空化效应最显著; 当本征频率小于 40 kHz, 电压峰值、频谱振幅覆盖范围和油脂氧化性能值随频率增加而增大、黏度减小; 当本征频率大于 40 kHz, 电压峰值、频谱振幅覆盖范围和氧化性能值随频率增加而降低、黏度增大。共振频率对应的油脂黏度最小。该油脂是塑性流体, 流动特性为宾汉流动, 呈剪切稀化趋势。

关键词: 扫频超声提取; 空化; 电压波形; 流变

文章编号: 1673-9078(2017)8-228-234

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.8.033

Effects of Sweep Frequency Ultrasonic Extraction on the Oxidative and Rheological Properties of Extracted Peanut Oil

ZHANG Lei, YU Xiao-jie, ZHOU Cun-shan, MA Hai-le, LIU Yue-hua

(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Sweep frequency ultrasound is an important physical processing technique for food that can provide an acoustic field, which improves the cavitation effect and enhances the extraction yield of oils. However, oxidation may occur, and the viscosity is affected as a result of the cavitation effect. Therefore, it is necessary to study the oil oxidation and the rheological properties of this technique. In this study, a piezoelectric polyvinylidene fluoride (PVDF) sensor was used to monitor the sweep frequency ultrasonic fields with the eigenfrequencies of 20 kHz, 40 kHz, and 60 kHz during the entire process of oil extraction. The oxidative properties of the extracted oils were measured according to the national standards. The rheological properties of the samples were determined using a rotational rheometer. The results showed that the resonance frequency of the oil extraction was 40 kHz, and its cavitation effect was the most significant. When the ultrasonic eigenfrequency was less than 40 kHz, the peak voltage amplitude, frequency spectrum coverage range, and oxidative properties increased with the increment of eigenfrequency, and the viscosity decreased. The opposite effect was observed when the ultrasonic eigenfrequency was greater than 40 kHz, such that the voltage amplitude, frequency spectrum coverage range, and oxidative properties decreased with the increment of eigenfrequency, and the viscosity increased. The viscosity of the oils was the lowest at the resonance frequency. The extracted oils were plastic fluid with the flow characteristic of Bingham flow, and demonstrated a shear-thinning trend.

Key words: sweep frequency ultrasonic extraction; cavitation; voltage waveform; rheological property

超声波技术具有环境友好型且绿色的提取前景, 是食品物理加工技术中的重要手段之一。它是一种

收稿日期: 2017-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31471698、21676125); 国家重点研发计划 (2016YFD0400705-04); 中国博士后科学基金项目 (2015M581746); 江苏省自然科学基金项目 (BK20150492); 江苏省产学研合作项目 (BY2016072-03); 江苏省博士后科学基金项目 (1501105B); 江苏大学高级人才科研启动基金项目 (14JDG159)

作者简介: 张磊 (1987-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品物理加工

通讯作者: 周存山 (1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 物理场影响天然产物资源化及功能化研究

著的能量源, 能够促进提取过程, 降低提取时间, 提高提取得率^[1], 对于一些物料来说还能改善其品质^[2], 比较完整地保留物料内部的营养元素^[3], 超声波作用过程中无需引入也不会产生有毒物质, 造价相对便宜、维护费用低^[4], 广泛应用于物理加工领域。超声波提取的主要驱动力来源于空化效应, 而该效应源于超声波与物质之间的相互作用, 致使某些地方形成局部的暂时负压区, 微小的空化气泡萌生, 经历发展阶段, 最终溃灭, 同时伴随着许多理化效应, 增加流速、破坏颗粒, 具有高温高压特性, 某种情况下由于瞬间的高温高压, 产生自由基, 对物质化学结构产生一定改

变^[5]。

用超声波技术提取油脂,可改善油脂得率,促进功能性油脂开发,推动油脂工业的规模化发展。根据超声频率发射方式,分为定频和扫频。定频较为大众熟悉,是频率固定不变的超声波;扫频是指超声频率在一定的范围内,以设定的周期波动,即超声频率随着时间会发生变化。扫频超声波技术是国际上一种研究不多但有前景的技术,在媒介中传播会引起更强烈的振动,加速度高,这些作用能增大物质分子运动频率和速度,增加溶剂穿透力,加速物质元素进入提取溶剂^[6,7]。从声学角度来看,扫频超声波能产生一个更有利于改善空化效果的声场;但同时由于空化效应的存在,导致油脂氧化现象发生,降低油脂品质,缩短了货架期^[8],亟需对扫频超声波物理场作用下的空化氧化机理进行研究,以便能灵活控制空化氧化现象的发生;另外,不同的超声本征频率对应着不同的空化程度,直接影响到油脂黏度,黏度越高,扩散率越低,提取得率也就越低,即使进行高温提取,也不会改善油脂得率^[9],因此同时有必要对油脂的流变性能进行研究。

本文采用扫频超声波技术提取花生油脂,对扫频超声波物理场进行实时监测,研究不同本征频率的扫频超声波物理场作用过程,建立超声波物理场空化强度与氧化特性协同关系,完善超声空化机制。通过分析扫频超声波物理场中油脂的流变特性,掌握超声波物理场对油脂内部分子结构变化的影响趋势,为研究食品分子理论提供依据。

1 材料及方法

1.1 材料与设备

红皮花生 (*Arachis hypogaea* L.), 颗粒饱满, 无霉变, 无热损, 将花生分批次放入电热恒温鼓风干燥箱中, 55 °C 烘制, 待红衣可剥时, 冷却褪去红衣。试验用水为娃哈哈纯净水, 符合溶液配置对水的要求。具体试验试剂主要有: 正己烷 (分析纯)、乙醇 (分析纯)、氢氧化钠 (分析纯)、酚酞 (指示剂)、冰乙酸 (分析纯)、异辛烷 (分析纯)、碘化钾 (分析纯)、可溶性淀粉 (分析纯)、水杨酸 (化学纯)、对甲氧基苯胺 (化学纯) 和无水硫酸钠 (分析纯) 等均购自国药集团化学试剂有限公司。

主要试验设备有: 电热恒温鼓风干燥箱 (1010-3B, 上海实验仪器有限公司); 电子天平 (CPA1003P, 德国赛多利斯集团); 手提式高速中药粉碎机 (DFT-100, 温岭市林大机械有限公司); 离心机 (TDL-40B-II,

上海百典仪器设备有限公司); 旋转蒸发仪 (R-210, 瑞士步琪有限公司); 紫外分光光度 (UV-1801, 北京普析通用仪器有限责任公司); 示波器 (GDS-800, 台湾固纬电子实业股份有限公司); 旋转流变仪 (DHR-1, 美国 TA 仪器公司); 超声波设备为课题组自主研发的多模式超声波反应设备, 该扫频超声波在其本征频率 α 作用范围内按频率从小到大进行顺序扫动, 频率变化幅度 β 为: $0 \leq \beta \leq \alpha$, 带动溶液形成细微的回流, 促进传质过程, 扫频超声波本征频率 α 分别为: 20 kHz、40 kHz 和 60 kHz; 每种频率的超声换能器功率均为 300 W, 便于研究频率对油脂提取的影响。

1.2 油脂提取过程中扫频超声场电压波形的实时监测

1.2.1 油脂提取过程

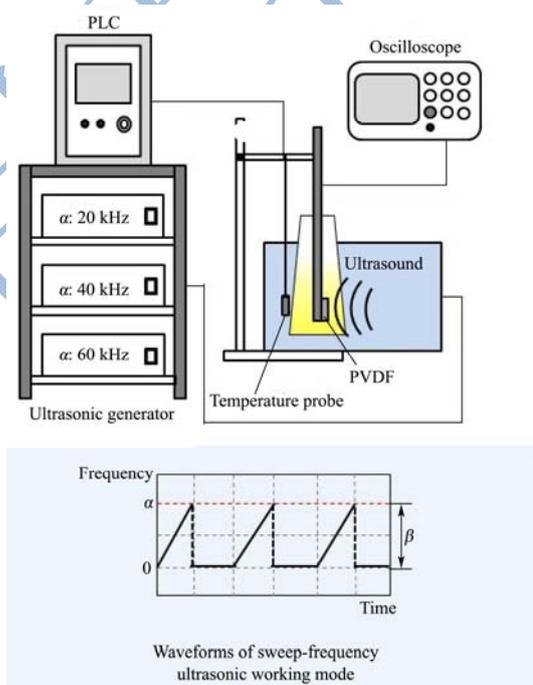


图1 油脂提取过程中监测扫频超声场的试验装置

Fig.1 Experimental apparatus to monitor the sweep frequency ultrasonic fields during oil extraction

本文中料液比采用 1/6 (g/mL), 称取 100 g 的花生仁, 放入粉碎机中制成花生粉, 量取 600 mL 正己烷溶液, 将花生粉与正己烷溶液混合均匀。随后, 将装有混合溶液的锥形瓶置于多模式超声波反应系统的反应容器中进行提取反应。随后, 将超声波处理后的溶液进行离心, 固液分层, 取上清液, 经旋转蒸发仪来去除其中的正己烷, 完成油脂提取工作, 试验装置如图 1 所示。

1.2.2 扫频超声场电压波形监测过程

在超声波提取试验过程中, 反应容器中的水为 2000 mL, 锥形瓶中溶液平面低于外部水面, 确保溶液充分受到超声波作用, 还可以减少其升温幅度; 功率密度恒定, 大小约为 115 W/L。温度探头监测容器中液体的当前温度, 试验在室温中完成。按照设备使用要求, 超声波反应系统以超声工作 3 s, 间歇 3 s 方式运行, 超声波反应系统总运行时间是 60 min。在油脂提取过程中, 分别对不同本征频率的扫频超声场进行实时监测, 获得超声空化电压波动信号, 采用的元件为聚偏氟乙烯(PVDF)压电膜传感器, 其有效面积为 10 mm×10 mm, 厚度为 30 μm, 灵敏度为 2×10⁻⁸ V/Pa; 测量时并联一个 50 Ω 的电阻, 提高噪声信号采集的稳定性且避免失真。瞬时压力经 PVDF 转化为电信号, 在示波器中以电压信号形式记录与存储。示波器为双信道数字存储示波器, 每一通道取样率均为 100 Msa/s, 频宽最高达 250 MHz。

1.3 油脂得率和氧化性能测试

油脂得率公式如下:

$$\text{油脂质量} = (m/m_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中, m 为提取后油脂质量, m₀ 为提取前油脂质量, 提

取前初始质量为花生样品质量 100 g。

采用国标方法对上述不同本征频率的扫频超声波提取的花生油脂进行氧化性能测定, 包括过氧化值^[10]、酸值^[11]、茴香胺值^[12]和总氧化值^[12]测定, 每个试验重复三次, 取平均值。

1.4 油脂流变特性测试

采用 DHR 流变仪进行流变性能测试, 测试温度为 25±1 °C, 测试模式为 Flow Ramp, 选用 40 mm 的平行板转子, 测试间距为 1000 μm, 剪切速率为 0.1~100 s⁻¹, 测试时间为 300 s; 采用线性方式取点进行数据采集, 采集数为 60; 每次测量前, 对仪器进行校正; 加样时保持试样的均匀性, 避免挤压而出现小气泡; 当转子转至修边高度时, 小心清除多余部分的试样, 避免边缘效应干扰, 每个试样重复测定三次。

2 结果与讨论

2.1 油脂提取过程中监测到的扫频超声场电

压波形

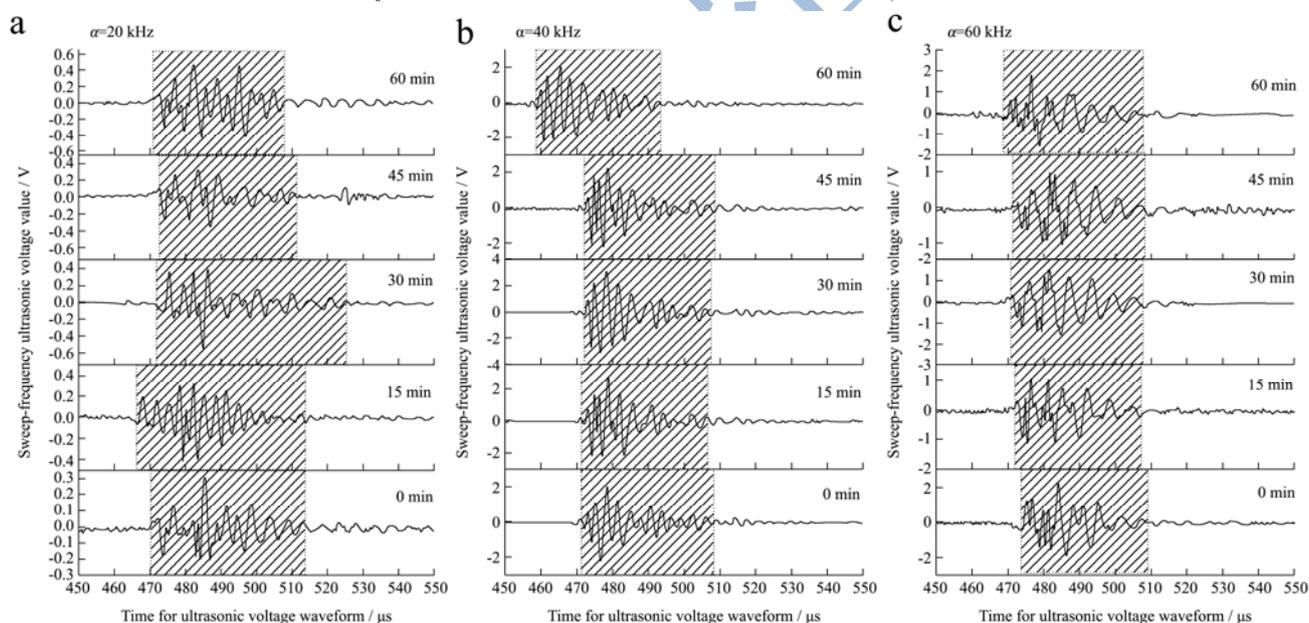


图 2 扫频超声场在油脂提取过程中的电压波形

Fig.2 Voltage waveform of sweep frequency ultrasound during oil extraction

注: a, 本征频率为 20 kHz; b, 本征频率为 40 kHz; c, 本征频率为 60 kHz。

图 2 表示的是油脂提取过程中监测到的不同本征频率的扫频超声场对应的电压波形图。空化效应是空化气泡生长和溃灭等波动形式的体现, 若空化气泡核能迅速长大直至溃灭的话, 综合表现出来的空化强度就较强。另外, 由于空化气泡溃灭会产生微射流, 作用到 PVDF 压电膜传感器上, 那么该压电膜传感器则

将该气泡溃灭瞬间产生的压力转化为电压信号。因此, 电压信号越明显, 说明气泡溃灭产生的压力越大, 对应的空化强度越强, 在超声场监测过程中所表现出来的就是获得的电压波形达到峰值状态。在一个电压振荡周期(T, 图 2 中斜杠区域)中, 本征频率为 40 kHz 扫频超声场获得的波形首波信号最强, 能立即达到该

电压峰值,说明空化作用明显且快速;而本征频率为 20 kHz 和 60 kHz 的扫频超声场波形首波信号较弱,其中前者对应的首波到达电压峰值所花费的时间最长,空化作用速度最慢。

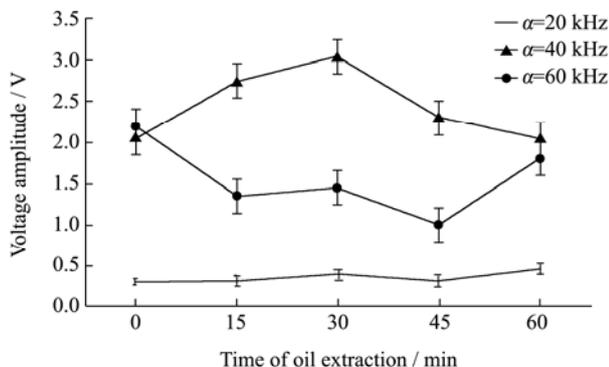


图3 扫频超声场在油脂提取过程中的电压峰值

Fig.3 Peak voltage amplitude of sweep frequency ultrasound during oil extraction ($p < 0.05$)

对油脂提取过程中扫频超声场进行电压峰值采集,得到图3所示的扫频超声场在油脂提取过程中获得的电压峰值图。通过比较发现,本征频率为 20 kHz 的扫频超声场中的电压峰值最小。空间峰值声强^[13]:

$$I_{SPTP} = \frac{U_L^2}{M_L^2 \rho c} \quad (2)$$

式中, U_L : 输出电压最大瞬时值, V; M_L : 仪器工作频率下的灵敏度, V/Pa; ρ : 溶液的密度, kg/m^3 ; c : 溶液中的声速, m/s。

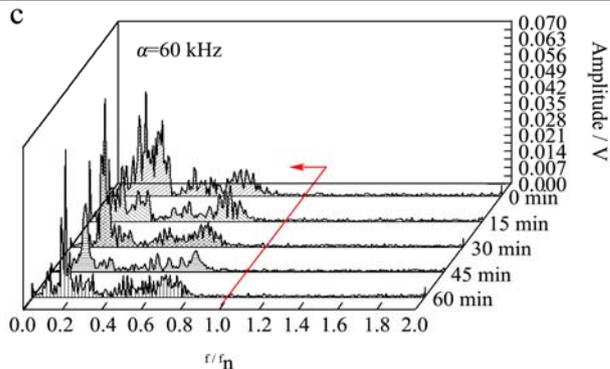
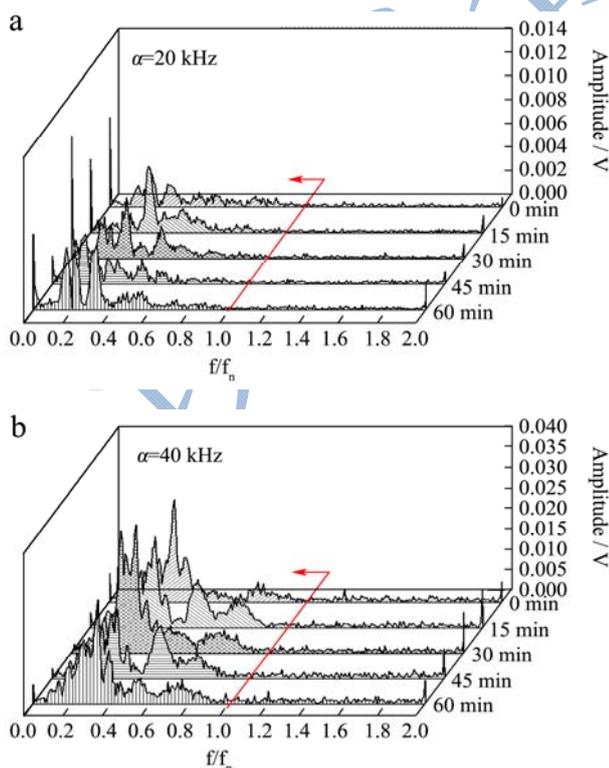


图4 油脂提取过程中电压波形的快速傅立叶转换(FFT)频谱图

Fig.4 FFT frequency spectrum of voltage waveform during oil extraction

注: a, 本征频率为 20 kHz; b, 本征频率为 40 kHz; c, 本征频率为 60 kHz。

由式(2)可以推断出超声场声强与其电压幅值有着正比关系。根据图3得出,在油脂提取过程中,本征频率为 40 kHz 扫频超声场中的电压峰值普遍最大,那么其对应的超声场声强最大,从而获得的空化强度就最大;另外,其电压幅值在 30 min 之前,随时间的增大而增加;超过 30 min 后,随时间的增大而减小。这是因为一开始,在超声空化作用下油脂提取顺利进行,随着空化气泡的脉动过程,空化强度愈来愈大;但当溶液中气泡经历生长溃灭的脉动过程之后,就会慢慢消耗掉不少空化气泡核,之后用于发生脉动过程的气泡数量越来越少,空化效应相对减弱,空化强度降低,因此电压幅值也随之减小,这也正好解释了采用空化强度大的超声场进行消泡的原因。

对上述图2时域中的扫频超声场电压波形进行快速傅立叶转换(FFT),得到图4油脂提取过程各个扫频超声场的频谱图。对比分析发现,在 $f/f_n = 0 \sim 1.0$ 频率范围内,本征频率为 40 kHz 扫频超声场的纵坐标(频谱振幅)与横坐标(频率比值)覆盖范围最广,频率特性比较稳定,能引起溶液中空化气泡强烈的脉动行为,空化强度最大。气泡脉动过程中周围的流体会产生剧烈的压力变化,从而发出噪声,相比较而言,本征频率为 20 kHz 扫频超声场中的频谱振幅覆盖范围最小,说明气泡脉动过程中辐射噪声频率小,空化强度低。

通过上述研究结果可以归纳出,当作用的超声本征频率小于本征频率 40 kHz 时,空化强度随着频率的增加而增加,当超过了 40 kHz 时,随着频率的增加,空化强度降低。理论上,超声本征频率越低,对应的空化强度越大,在本文中,却出现了这种分段变化。据有关文献^[14]记载,从液体中空化核尺寸的统计分布出发,设想液体中包含的空化气泡的气核满足 Gaussian 分布:

$$N(R)=A\exp[-(R-R_0)^2/2\delta] \quad (3)$$

式中, $N(R)$ 表示具有半径为 R 的空化核数, R_0 表示空化气泡核数最多的空化核半径, δ 为分布曲线的半宽高度, A 为常数。

则半径为 R_0 的空化气泡对应的频率为共振频率, 此时超声波本征频率与溶液中空化气泡固有频率相等, 气泡脉动振幅最大, 空化强度最强。因此, 推断出本文研究中 40 kHz 的本征频率为提取花生油脂时的共振频率。

2.2 扫频超声波提取对花生油脂氧化性能影响

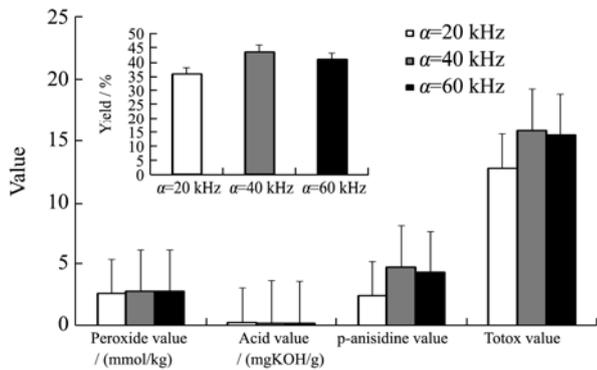


图5 扫频超声场中的油脂得率及氧化特性指标 ($p < 0.05$)

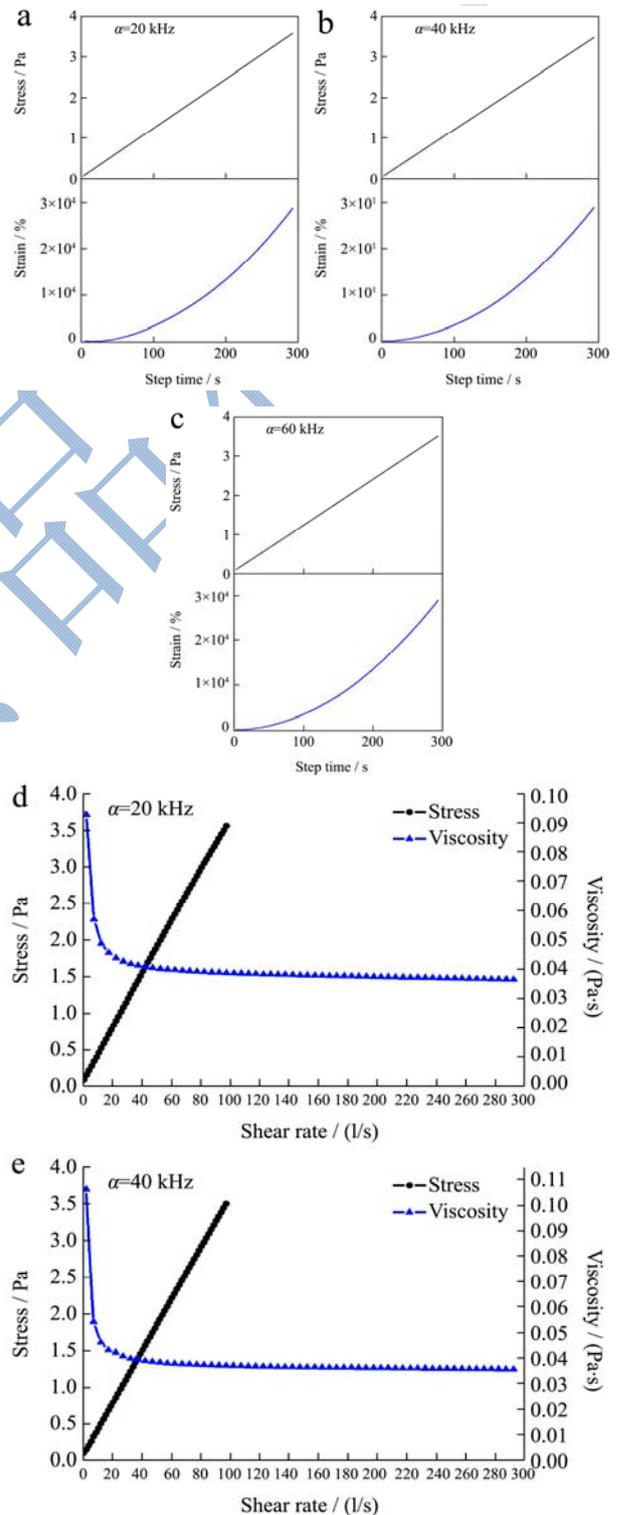
Fig.5 Oil extraction yields and the indicators of oxidative properties in the sweep frequency ultrasonic field ($p < 0.05$)

图5是各扫频超声作用下获得的油脂得率以及相应的氧化特性。总体来说, 超声提取的花生油脂其氧化特性指标如: 过氧化值、酸值、茴香胺值和总氧化值等, 都符合花生油的国标规定^[15]; 对比而言, 本征频率为 40 kHz 扫频超声波提取的油脂得率最高, 相应的氧化特性指标值也较高, 这种现象与 40 kHz 是共振频率且对应的空化强度最强是密不可分的。空化强度越强, 超声波在溶液中传播时就会引起更激烈的振动, 油脂分子进入提取溶液的速度加快了, 得率提高; 但由于瞬间产生的高温高压, 使得对应的油脂氧化特性值也增加。当小于共振频率 40 kHz 时, 随着本征频率的增加, 空化强度增强, 得率和氧化特性值增大; 反之亦然。另外, 超声本征频率也与空化阈值有着密切的关系, 超声频率越小, 空化阈值就越低, 空化越容易产生, 这是因为在低频情况下液体受到的压缩和稀疏作用有更长的时间间隔, 使空化气泡在崩溃前能生长到较大的尺寸, 增强了空化强度^[16], 促进了更多的油脂融入到提取溶液中。但是当小于共振频率 40 kHz 时, 溶液受到的压缩和稀疏作用的时间间隔太长, 使

得绝大多数时间都消耗在气泡萌生发展阶段, 气泡难以溃灭, 空化效应消失。

2.3 扫频超声波对花生油脂流变特性影响

图6表示的是不同扫频超声波提取的油脂流变特性, 从图6a~c中右上角小图可以看出, 油脂的变形是时间的函数, 属于黏弹性材料, 应变随时间延长而不断增加, 应变速率也在不断增加。



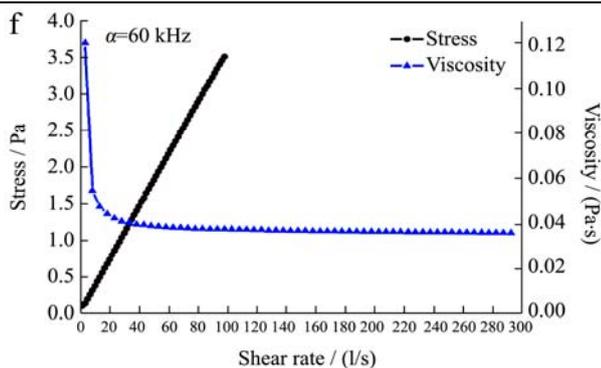


图6 扫频超声提取的油脂的流变特性

Fig.6 Rheological properties of oil extracted by sweep frequency ultrasound

注: a 和 d, 本征频率为 20 kHz; b 和 e, 本征频率为 40 kHz; c 和 f, 本征频率为 60 kHz.

从图6中还可以得出, 随着剪切速率增加, 应力增加, 油脂表观黏度减小, 因此表观黏度与剪切速率呈非线性反比关系, 符合 Sisko 模型。油脂表观黏度在低剪切速率时最高, 随着剪切速率的增加而减小, 表观黏度下降较快; 当剪切速率大于 60 s^{-1} 时, 表观黏度变化逐渐平缓并趋于常数。这可能由于剪切过程中, 剪切作用力会影响油脂内部分子结构, 随着剪切流速的增大, 在流层之间剪切应力的作用下, 分子构造破坏, 分子之间的结合力减小, 使得表观黏度下降, 当各个分子彼此独立存在时, 结合力忽略不计, 表观黏度不再变化。经分析, 该油脂应力与剪切速率符合赫谢尔-巴尔克莱(Herschel-Bulkley)流变模式^[17], 该模式是一种带静切应力的三参数流变模式, 能表示出常用的牛顿、宾汉和指数流变模式的特性。由此可以判断出, 扫频超声场提取出来的油脂属于塑性流体(非牛顿流体), 通过该流体的流动特性曲线发现, 曲线不通过坐标原点; 对于塑性流动来说, 当应力超过 σ_0 时, 若流动特性符合牛顿流动规律, 则为宾汉流动, 具有这种流动特性的液体称为宾汉流体, 呈现剪切稀化特性。

图7a 是不同本征频率的扫频超声场中得到的油脂的表观黏度最大值, 当小于共振频率 40 kHz 时, 随着本征频率增加, 表观黏度减小; 当大于 40 kHz 时, 随着本征频率增加, 表观黏度变大。在一定时间内, 超声波处理能使油脂表观黏度降低, 这是由于空化强度越大, 超声波使得油脂中某些元素成分降解, 表观黏度降低越明显。反之, 若空化强度减小, 气泡没有足够的时间和能量进行脉动, 则空化效应就不易产生, 油脂表观黏度就不会降低^[18]。因此, 扫频超声波若要产生明显的空化效应, 需要足够的时间和能量来完成空泡脉动过程。若能测得一系列不同超声频率对应的

表观黏度分布曲线, 那么我们就可以根据已测定的油脂黏度来推测对应的超声波本征频率^[19]。以共振频率为分界点, 当小于共振频率时, 对应的表观黏度变化幅度较大, 说明空化强度变化明显。无论是声压振幅、油脂得率、氧化特性或是流变特性等, 小于共振频率时对应的变化比大于共振频率时的变化要明显, 试验前后分析的结果一致。

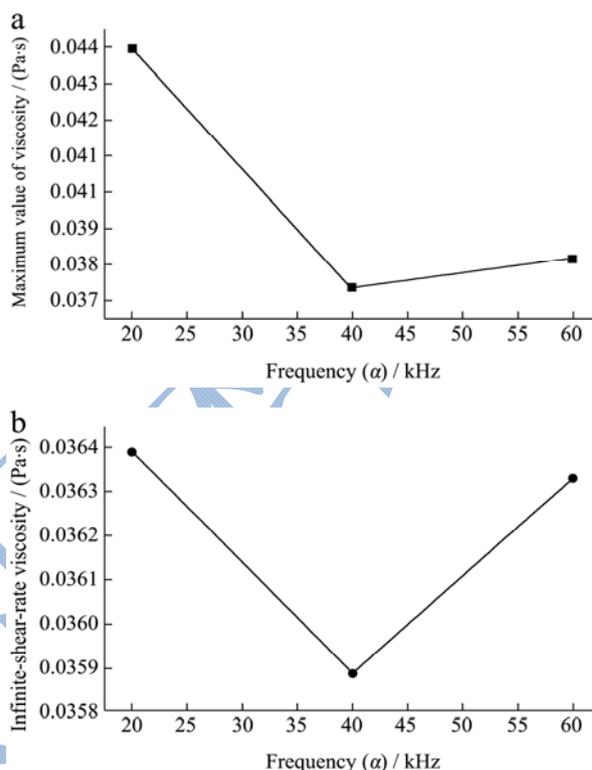


图7 不同本征频率的扫频超声波提取的油脂黏度

Fig.7 Viscosity of oil extracted by sweep frequency ultrasound

注: a, 表观黏度最大值; b, 无限剪切速度黏度。

从图6中可看出, 当处于极高剪切速率时, 黏度变化与剪切速率无关, 如同零剪切速度黏度般地接近另一个值, 即无限剪切速度黏度, 图7b 是不同本征频率对应的无限剪切速度黏度值。对于非牛顿流体来说, 黏度是剪切速率的函数, 对于有些高浓度的溶液或熔融液来说, 无限剪切速度黏度常无法测量到, 因为高分子裂解早已经在高剪切速率达到前就已发生, 造成分子量的改变及黏度永久性地减小。在扫频超声场的作用下, 溶液更易受到空化效应影响, 瞬间产生高温高压的极端环境, 促进油脂分子更好地融入有机溶剂中。而在一定范围内随着温度的升高, 溶液黏度会减小^[20], 另外, 超声波振幅和共振频率对黏度也会产生一定的影响^[21], 从图7b中可得出本征频率为 40 kHz 的扫频超声场提取出的油脂黏度最小, 进一步证明在本文研究条件下, 花生油脂超声波提取时的共振频率为 40 kHz, 所对应的空化效应最显著。

3 结论

本文采用 PVDF 压电膜传感器在花生油脂提取过程中对不同本征频率的扫频超声场进行实时监测,以建立扫频超声波物理作用机理,并获得扫频超声波物理场对油脂流变性能变化的影响,主要结果如下:

3.1 监测得到了不同本征频率的扫频超声场在时域和频域中的电压波形图以及相应的峰值电压,同时对各个扫频超声波提取到的花生油脂进行了氧化性能测试,获得扫频超声场作用下的花生油脂提取时的共振频率是 40 kHz,空化效应最明显,能迅速到达电压峰值,峰值电压最大,频谱振幅涵盖范围最广,得率和氧化特征值也最大。

3.2 判断出提取得到的花生油脂属于塑性流体,流动特性为宾汉流动,呈现剪切稀化趋势。不同本征频率的扫频超声波提取到的油脂黏度呈现一定变化趋势,共振频率时对应的黏度最小,拟合出了不同本征频率与黏度的数学关系式,可根据已测定的黏度推测对应的超声频率,为油脂的超声技术工业化生产提供了理论依据。

参考文献

- [1] Galanakis C M. Recovery of high added-value components from food wastes: Conventional, emerging technologies and commercialized applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2012, 26(2): 68-87
- [2] Chemat F, Rombaut N, Sicaire A G, et al. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 34: 540-560
- [3] Tiwari B K. Ultrasound: A clean, green extraction technology [J]. Trends in Analytical Chemistry, 2015, 71: 100-109
- [4] Rosello-Soto E, Galanakis C M, Brnčić M, et al. Clean recovery of antioxidant compounds from plant foods, by-products and algae assisted by ultrasounds processing. Modeling approaches to optimize processing conditions [J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 42(2): 134-149
- [5] Goula A M, Ververi M, Adamopoulou A, et al. Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids from pomegranate wastes using vegetable oils [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 34: 821-830
- [6] Ma H L, Huang L R, Peng L, et al. Pretreatment of garlic powder using sweep frequency ultrasound and single frequency countercurrent ultrasound: Optimization and comparison for ACE inhibitory activities [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 23: 109-115
- [7] Koubaa M, Barba F J, Grimi N, et al. Recovery of colorants from red prickly pear peels and pulps enhanced by pulsed electric field and ultrasound [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 37: 336-344
- [8] Chemat F, Grondin I, Costes P, et al. High power ultrasound effects on lipid oxidation of refined sunflower oil [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2004, 11(5): 281-285
- [9] Li Y, Fabiano-Tixier A S, Tomao V, et al. Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids based on the bio-refinery concept using sunflower oil as an alternative solvent [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(1): 12-18
- [10] GB/T 5538-2005,动植物油脂过氧化值测定[S]
GB/T 5538-2005, Animal and vegetable fats and oils-Determination of peroxide value [S]
- [11] GB/T 5530-2005,动植物油脂酸值和酸度测定[S]
GB/T 5530-2005, Animal and vegetable fats and oils-Determination of acid value and acidity [S]
- [12] GB/T 24304-2009,动植物油脂茴香胺值的测定[S]
GB/T 24304-2009, Animal and vegetable fats and oils-Determination of anisidine value [S]
- [13] 寿文德,钱德初.超声诊断中的脉冲声强测量及其意义[J].中国生物医学工程学报,1987,6(3):125-131
SHOU Wen-de, QIAN De-chu. Measurement of pulsed sound intensity in ultrasonic diagnosis and its significance [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 1987, 6(3): 125-131
- [14] Huang J L, Feng R, Zhu C P, et al. Low-MHz frequency effect on a sonochemical reaction determined by an electrical method [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1995, 2(2): S93-S97
- [15] GB 1534-2003,花生油[S]
GB 1534-2003, Peanut oil [S]
- [16] 李林.超声场下空化气泡运动的数值模拟和超声强化传质研究[D].成都:四川大学,2006
LI Lin. Numerical simulation on the motion equation of cavitation bubble and enhancement of mass transfer due to ultrasonic [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006
- [17] Kotzé R, Wiklund J, Haldenwang R. Optimisation of pulsed ultrasonic velocimetry system and transducer technology for industrial applications [J]. Ultrasonics, 2013, 53(2): 459-469
- [18] Wang Z J, Xu Y M, Gu Y T. Lithium niobate ultrasonic transducer design for enhanced oil recovery [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 27: 171-177
- [19] Yu H B, Lou L, Yuandong A G. Capacitive micromachined ultrasonic transducer (CMUT) based micro viscosity sensor

- [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2015, 227: 346-351
- [20] 山磊,田煜,孟永钢,等.分散介质和温度对纳米二氧化硅胶体剪切增稠行为的影响[J].*物理学报*,2015,64(6):68301
SHAN Lei, TIAN Yu, MENG Yong-gang, et al. Influences of medium and temperature on the shear thickening behavior of nano fumed silica colloids [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(6): 68301
- [21] 邵学鹏,解文军.声悬浮条件下黏性液滴的扇谐振荡规律研究[J].*物理学报*,2012,61(13):134302
SHAO Xue-peng, XIE Wen-jun. Sectorial oscillation of acoustically levitated viscous drop [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(13): 134302

现代食品科技