

超声波辅助提取过程中声场的数值模拟研究

王轲, 马海乐, 王洋

(江苏大学食品与生物工程学院, 国家农产品加工技术装备研发分中心, 江苏镇江 212000)

摘要: 本研究建立了超声波辅助提取过程的多物理场耦合模型, 将超声提取设备在一定功率不同频率下的声场分布可视化。探索不同超声频率和换能器布阵方式对声场均匀性的影响; 通过比较不同频率大豆蛋白的提取率验证仿真模型的可靠性。仿真结果表明: 圆筒状五频超声设备可以通过调频改善声场的均匀性, 但绝对声压会随之减小; 筛选出低频 20 kHz 及共振频率 28 kHz、35 kHz 处易发生空化效应, 预测提取的效果较好。实验结果表明: 超声处理能显著提高大豆蛋白的提取率 ($p < 0.05$) 且随着频率的升高效果逐渐减弱; 相同条件下, 20 kHz、28 kHz 及 35 kHz 超声处理蛋白的提取率比传统碱提分别提高了 28.75%、26.78% 及 18.28%。本研究提出工业生产中换能器矩形布阵并在共振频率处进行提取的作用效果较好。数值模拟降低了试验成本, 为频率筛选、工艺优化和设备改进提供了一种新方法。

关键词: 超声波; 蛋白质; 数值模拟; 声场; 均匀性

文章编号: 1673-9078(2019)09-210-218

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.9.027

Numerical Simulation of Acoustic Field during Ultrasound-assisted Extraction

WANG Ke, MA Hai-le, WANG Yang

(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, National Agricultural Products Processing Technology and Equipment Research and Development Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: In this study, a multi-physics coupling model of ultrasound-assisted extraction (UAE) was established, to visualize the acoustic field distribution of the ultrasonic extraction equipment set at a certain power but different frequencies. The effects of different frequencies and transducer arrays on the uniformity of acoustic field were studied. The reliability of the model was verified by comparing the extraction rates of soybean protein at different frequencies. The simulation results showed that the uniformity of the acoustic field could be improved *via* frequency modulation by the cylindrical 5-frequency ultrasonic device, but the absolute sound pressure decreased accordingly. A low frequency of 20 kHz and resonance frequencies of 28 kHz and 35 kHz would easily cause cavitation effects, indicating an increased extraction rate. The experimental results showed that the extraction rate of soybean protein was significantly increased ($p < 0.05$) by the ultrasonic treatment, and the increase of frequency led to a gradual decrease of extraction rate. Under the same conditions, the extraction rate of proteins sonicated at 20 kHz, 28 kHz or 35 kHz was 28.75%, 26.78% and 18.28%, respectively, higher than that obtained by traditional alkali extraction. This study also proposed that when transducers were arranged in a rectangular shape and extraction was performed at a resonant frequency, the outcome of extraction was more desirable. Numerical simulation reduces testing costs and provides a new method for frequency screening, process optimization and equipment improvement.

Keywords: ultrasonic; protein; numerical simulation; acoustic field; uniformity

大豆饼粕是豆腐、豆乳等大豆制品的副产物, 蛋白含量高达 50%。大豆蛋白主要为优质球蛋白, 具有

收稿日期: 2018-12-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0700100); 江苏省重点研发计划 (现代农业重点项目) (BE2018368)

作者简介: 王轲 (1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品物理加工装备多物理场仿真研究

通讯作者: 马海乐 (1962-), 男, 教授, 研究方向: 食品物理加工技术及装备、食品功能成分提取及其活性评价的研究

较高的营养价值。常见蛋白的提取方法包括: 碱溶酸沉、酶提酸沉、超声碱提法等^[1]。超声辅助碱提法虽然提取率高, 但大规模应用到工业化生产中还存在放大设计的难题^[2]。主要原因包括: (1) 目前对超声辅助提取系统缺乏有效的评价标准; (2) 超声场中的驻波效应会导致声场分布不均匀^[3], 使空化效应难以发生, 直接影响有效组分的传质速率、提取进程和提取产率^[4]。目前, 国内外学者对蛋白超声提取工艺进行了广泛的研究, 曲文娟等^[5]发现交替双频超声提取条

斑紫菜蛋白相比于传统碱提法,其蛋白得率提高了168%,时间缩短了64%;相比于单频超声,其蛋白得率提高了50%,时间缩短了18%。研究者普遍认为不同的超声模式产生了不同的空化效应,但对于超声作用机理及其性能评价没有深入研究。李珂昕等^[6]为研究超声提取米渣蛋白的机理,建立了提取过程中声场和流场的仿真模型,发现声辐射力对流体介质产生扰动,从而加速提取过程的传质混合。Qiang Tang等^[7]利用有限元方法对矩形腔体内声流场的多样性进行研究,发现激励源的频率、距离以及相位差产生多样化的声冲流,且随着温度的增加,涡流角速度单调增大,主声流的流速先减小后增大,这为提取过程中声流场的控制提供了理论指导。

为研究超声波作用机理以促使大面积空化效应的发生,本文建立了超声波辅助提取过程的多物理场耦合模型,将超声提取设备在一定功率不同频率下的声场分布可视化,研究不同超声频率和换能器布阵方式对提取过程中声场均匀性的影响,得到声场的分布规律并预测超声提取的作用效果;通过比较不同频率大豆蛋白的提取率来验证仿真模型的可靠性。模型通过线性本构方程将固体力学方程中的应力应变与静电方程中的电位移耦合来模拟压电效应。在已有的研究中,声场的激励通常定义为点声源^[8],本文创新性地将压电振子结构加速度的法向分量作为声场中的激励,能够更加真实地反映实际声场的分布状况。数值模拟降低了实验室中反复试验的时间和成本,为频率筛选、工艺优化和设备改进提供了一种新方法,对于研发高效超声辅助提取装备及实现功率超声工业化应用具有重要的理论和实践指导意义。

1 材料与方法

1.1 原料

大豆饼粕(蛋白质量分数为43.33%),产自江苏省镇江市中储粮粮油有限公司。

1.2 主要仪器设备

圆筒状五频超声波辅助提取设备,课题组自主研发;LM3100高速粉碎机,瑞典波通仪器公司;智能型蠕动泵,上海之信仪器有限公司;HH-S2数显恒温水浴锅,金坛市医疗仪器厂;PHSJ-4F型实验室pH计,上海雷磁有限公司;T6紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限公司;DL-5C低速离心机,上海安亭科学仪器厂;Think Center M720工作站,联想中国公司。

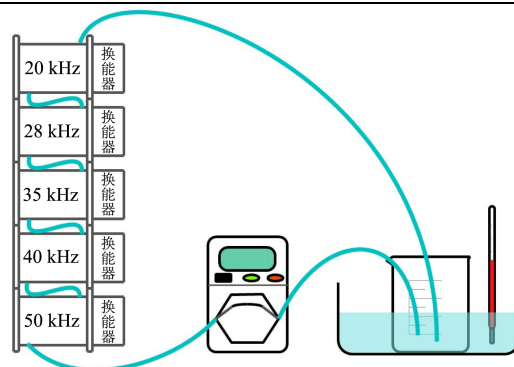


图1 圆筒状五频超声波辅助提取设备

Fig.1 Cylindrical five-frequency ultrasound-assisted extraction equipment

1.3 方法

1.3.1 大豆蛋白的提取及分析方法

提取方法:大豆饼粕→烘干(50℃烘箱处理48h)→粉碎→过筛(40目)→调pH至10.0→超声处理→冷却至室温→4000 r/min离心15 min→取上清液→福林酚法分析测定

提取率计算方法:

$$\text{大豆蛋白提取率}(\%) = \frac{\text{提取液中蛋白质含量}}{\text{原料中粗蛋白含量}} \times 100\% \quad (1)$$

在单因素和正交试验优化得到的最佳工艺条件下进行模型验证试验,最佳超声提取工艺条件为:粉碎细度40目、料液比25:1、pH 10.0、提取温度45℃、提取时间60 min、功率密度120 W/L。

1.3.2 数值模拟计算方法

1.3.2.1 仿真模型构建

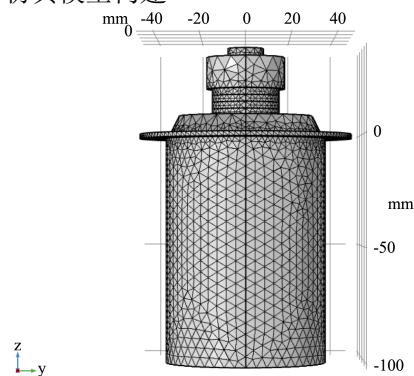


图2 仿真模型及其网格划分

Fig.2 Simulation model and mesh generation

本研究建立的仿真模型及其网格划分如图2所示,模型几何参数如下:超声波换能器部分匹配层半径 R_1 为34 mm,匹配层厚度 L_1 为8 mm,背衬半径 R_2 为17.5 mm,背衬厚度 L_2 为14 mm,压电圆环半径 R 为15 mm,压电圆环厚度 L_e 为12 mm,反应腔体半径为35.75 mm,反应腔体深度为100 mm。模型材料参数如下:匹配层材料为Aluminum 压电圆环材料为

Lead Zirconate Titanate (PZT-4), 螺栓头和尾部材料为 Steel AISI 4340, 振板压板材料为 304 钢。

表 1 模型相关参数

参数	水平
溶液初始温度 T	45 °C
溶液背景流速 v_0	2.82 cm/s
超声频率 f	20 kHz~52 kHz (步长 1 kHz)
超声功率 P	60 W
动力粘度 μ	1.79×10^{-5} Pa·s
衰减系数 α	5 dB/m
碱性溶液阻抗 Z	1.48×10^6 kg/(m ² ·s)
碱性溶液密度 ρ	1.53×10^3 kg/m ³
碱溶液中声速 v_s	1500 m/s

1.3.2.2 压电方程

本模型四周为固定边界, 其力学边界条件是截止的, 选择应变分量 S 作为方程的自变量; 电学边界条件是电场方向垂直于压电晶体的振动方向 $\partial E_i / \partial x_j = 0$, 选择电场强度 E 作为方程的自变量。根据力学和电学边界条件, 选择 e 型压电方程作为理论建模的出发点。

压电振子的应变方程:

$$\begin{cases} S_{11} = \frac{\partial u}{\partial r} - z \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \\ S_{22} = \frac{u}{r} - z \frac{\partial w}{r \partial r} \end{cases} \quad (2)$$

压电振子的应力方程:

$$\begin{cases} T_{11} = c_{11}S_{11} + c_{12}S_{22} - e_{13}E_3 \\ T_{22} = c_{12}S_{11} + c_{11}S_{22} - e_{13}E_3 \end{cases} \quad (3)$$

微单元体受到的应力有 $T_{11}, T_{22}, T_{33}, T_{23}, T_{13}, T_{12}$, 其中 z 方向应力应变都为 0, $T_{33}=0$; 由于压电振子的对称性, $T_{12}=T_{23}=0$; T_{11}, T_{12} 不仅在 z 方向上积分产生合力, 并且在中面上合成弯矩:

$$\begin{cases} N_{11} = \int_{z_2}^{z_0} T_{11} dz \\ N_{22} = \int_{z_2}^{z_0} T_{22} dz \\ M_{11} = \int_{z_2}^{z_0} T_{11} z dz \\ M_{22} = \int_{z_2}^{z_0} T_{22} z dz \end{cases} \quad (4)$$

T_{13} 只能合成剪切力, 用下述公式表示:

$$Q_{13} = \frac{dM_{11}}{dr} + \frac{M_{11} - M_{22}}{r} \quad (5)$$

将应力方程 (3) 代入合成弯矩方程 (4), 应变方

程 (2) 代入剪切力方程 (5) 进行整理, 并统一公式中所使用的符号。用 $T_{11}^{(0)}, T_{22}^{(0)}$ 代替 N_{11}, N_{22} 表示单元体所受的力, 用 $T_{11}^{(1)}, T_{22}^{(1)}$ 代替 M_{11}, M_{22} 表示单元体所受到的弯矩, 用 $T_{13}^{(0)}$ 代替 Q_{13} 表示单元体所受到的剪切力, 得到换能器微单元体受力方程组:

$$\begin{cases} T_{11}^{(0)} = C_{11}^{(0)} \frac{\partial u}{\partial r} + C_{12}^{(0)} \frac{u}{r} - C_{11}^{(1)} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} - C_{12}^{(1)} \frac{\partial w}{r \partial r} - \sigma e_{31} E_3 h_{PZT} \\ T_{22}^{(0)} = C_{12}^{(0)} \frac{\partial u}{\partial r} + C_{11}^{(0)} \frac{u}{r} - C_{12}^{(1)} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} - C_{11}^{(1)} \frac{\partial w}{r \partial r} - \sigma e_{31} E_3 h_{PZT} \\ T_{11}^{(1)} = C_{11}^{(1)} \frac{\partial u}{\partial r} + C_{12}^{(1)} \frac{u}{r} - C_{11}^{(2)} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} - C_{12}^{(2)} \frac{\partial w}{r \partial r} - \frac{1}{2} \sigma e_{31} E_3 (z_0^2 - z_1^2) \\ T_{22}^{(1)} = C_{12}^{(1)} \frac{\partial u}{\partial r} + C_{11}^{(1)} \frac{u}{r} - C_{12}^{(2)} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} - C_{11}^{(2)} \frac{\partial w}{r \partial r} - \frac{1}{2} \sigma e_{31} E_3 (z_0^2 - z_1^2) \\ T_{13}^{(0)} = C_{11}^{(1)} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + C_{11}^{(1)} \frac{\partial u}{r \partial r} - C_{11}^{(1)} \frac{u}{r^2} - C_{12}^{(1)} \frac{\partial^3 w}{\partial r^3} + C_{11}^{(2)} \frac{\partial^2 w}{r \partial r^2} - C_{12}^{(2)} \frac{\partial w}{r^2 \partial r} \end{cases} \quad (6)$$

引入薄板振动的经典理论^[9], 整理简化得到换能器运动方程:

$$\begin{cases} -C_{11}^{(1)} \frac{\partial^3 w}{\partial r^3} - C_{11}^{(1)} \frac{\partial^2 w}{r \partial r^2} + C_{11}^{(1)} \frac{\partial w}{r^2 \partial r} + C_{11}^{(0)} \frac{\partial^2 u}{\partial r} + C_{11}^{(0)} \frac{\partial u}{r \partial r} - C_{11}^{(0)} \frac{u}{r^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \\ C_{11}^{(1)} \frac{\partial^3 u}{\partial r^3} + C_{11}^{(1)} \frac{2 \partial^2 u}{r \partial r^2} - C_{11}^{(1)} \frac{\partial u}{r^2 \partial r} + C_{11}^{(1)} \frac{u}{r^3} - C_{11}^{(2)} \frac{\partial^4 w}{\partial r^4} + C_{11}^{(2)} \frac{2 \partial^3 w}{r \partial r^3} - C_{11}^{(2)} \frac{\partial^2 w}{r^2 \partial r^2} + C_{11}^{(2)} \frac{\partial w}{r^3 \partial r} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \end{cases} \quad (7)$$

在压电振子两电极之间施加驱动电压 V_0 作为电学边界条件; 在背衬和振板四周施加固定约束 $u=0$ 作为力学边界条件。

1.3.2.3 波动方程

声振动本身是一种宏观的物理现象, 必然满足牛顿第二运动定律、质量守恒定律以及物态方程三个基本物理定律^[10]。基于此可以得到声波的三维波动方程:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}) \quad (8)$$

本模型基于频域建模, 得到频域下的压力声学方程^[11]:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \bar{q}) \right) - \frac{\omega^2 p}{\rho_0 c^2} = \bar{Q} \quad (9)$$

其中: ρ_0 是流体介质密度, p 是声压, \bar{q} 是偶极源, ω 是角频率, c 是流体介质声速, \bar{Q} 是单极源。

1.3.2.4 驻波

根据叠加原理, 两列平面波沿相反方向行进合成声场的声压:

$$p = p_i + p_r = 2p_{ra} \cos kx e^{j(\omega t + (p_{ia} - p_{ra}))} e^{j(\omega t - kx)} \quad (10)$$

可见合成声场由两个部分组成, $2p_{ra} \cos kx e^{j\omega t}$ 代表驻波场, 不同位置的质点作同相位的振动, 其振幅随位置变化。当 $kx = n\pi$, 即 $x = n \frac{\pi}{2} (n=1, 2, \dots)$ 时,

声压振幅最大,称为声压波腹;而当 $kx = (2n-1)\frac{\pi}{2}$,

即 $x = (2n-1)\frac{\lambda}{4} (n=1,2,\dots)$ 时,声压振幅为零,称为

声压波节。 $(p_{ia}-p_{ra}) e^{j(\omega t-kx)}$ 代表向 x 方向行进的平面行波,其振幅为原先两列波的振幅之差。由此可知,如果存在沿相反方向行进的波的叠加,则空间中合成声压的振幅将随位置变化出现极大极小的变化。

1.3.2.5 吸收系数

当超声波在悬浮液中传播时,声能逐渐衰减并转化为热能,这种现象称之为声衰减或声吸收^[12]。本文仅考虑吸收衰减,超声波在介质中的吸收系数可表示为:

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2}{\rho c^3} \left(\frac{4}{3} \eta + \frac{\gamma-1}{c_p} k \right) \quad (11)$$

其中, η 是粘滞系数, k 是热传导系数, c_p 是定压比热, γ 是比热比,比热比是定压比热和定容比热的比值。对于固体和液体而言,定压比热与定容比热的差别很小,所以比热比 γ 近似为 1,所以公式(11)可以简化为:

$$\alpha = \frac{8\eta\pi^2 f^2}{3\rho c^3} \quad (12)$$

1.3.2.6 超声场分布的均匀性量化

本研究采用绝对声压相对标准差描述声场的均匀性,绝对声压相对标准差越小,声场就越均匀。绝对声压相对标准差公式:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{p_i - \bar{p}}{\bar{p}} \right)^2}{n-1}} \quad (13)$$

其中, n 是数据的总个数, p_i 是第 i 个声压数据, \bar{p} 是声压平均值,即:

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_i| \quad (14)$$

1.3.3 数据统计分析

数据采用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析,采用 Duncan 检验,显著性水平在 $p < 0.05$ 条件下进行分析,用不同字母代表差异显著。图表采用 Origin 9.0 绘制,数据用三次测定的平均值和标准误差的形式表示,重复试验三次。

2 仿真结果与验证

2.1 仿真结果与分析

2.1.1 超声场的模拟结果与分析

图3是28 kHz数值模拟声压分布图以及染色法实验结果图。染色图与模拟图声压分布具有高度地一致性,声场中存在明显的驻波效应且驻波场含有四个波腹。离声源最近的波腹声压幅值最大且随着深度的增加逐渐减弱,这是由于超声波传播过程中的衰减效应引起的。超声波在流体介质的传播过程中存在多个正负压强的交替周期,引起媒质分子以平衡位置为中心的振动。在正压相位时,超声波对媒质分子挤压,分子间距减小,使溶液密度增大;而在负压相位时,超声波对媒质分子拉伸,分子间距增大,使溶液密度减小^[13]。此时绝对声压达到 3.59×10^4 Pa,分子间的平均距离增大以至超过极限距离,破坏媒质结构的完整性,导致空穴的形成^[7]。空穴在声波的作用下,将保持径向振荡或继续增长至崩溃,从而产生局部的高温高压、微射流^[10]、冲击波等并形成更多的空化气泡。圆筒状腔体内虽然存在驻波效应导致声场分布不均匀,但整个腔体内的绝对声压较大,可以达到空化阈值,促使大面积空化效应的发生^[14]。仿真和试验结果具有一致性,但也有一定的区别,这是由于试验中流体流动和试验材料本身会对声场分布也有一定的影响。

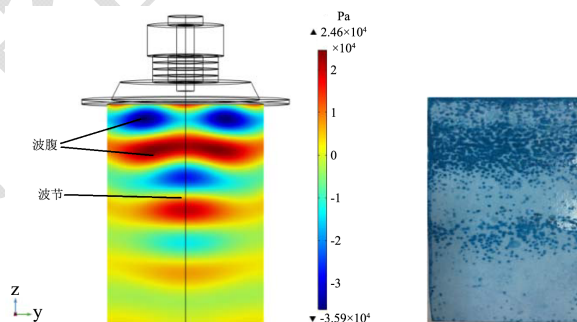


图3 28kHz数值模拟与染色法声压截面图

Fig.3 Sound pressure cross section diagram of numerical simulation and dyeing method

2.1.2 超声场特点分析

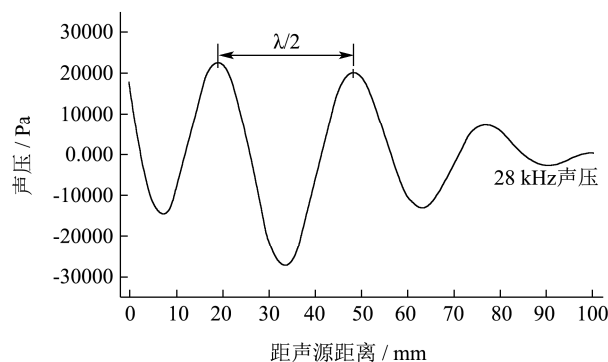


图4 28 kHz中轴线压力变化图

Fig.4 Central axis sound pressure at 28 kHz

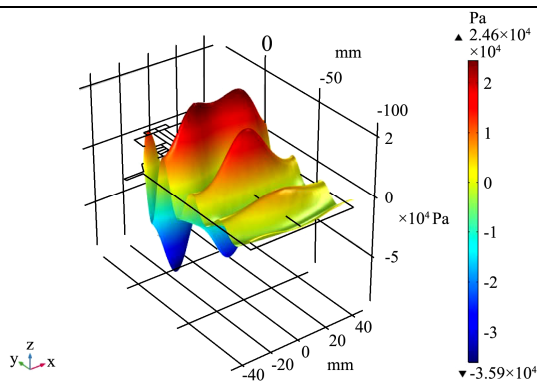


图 5 28 kHz 中轴线 3D 压力变化图

Fig.5 Central axis 3D sound pressure at 28 kHz

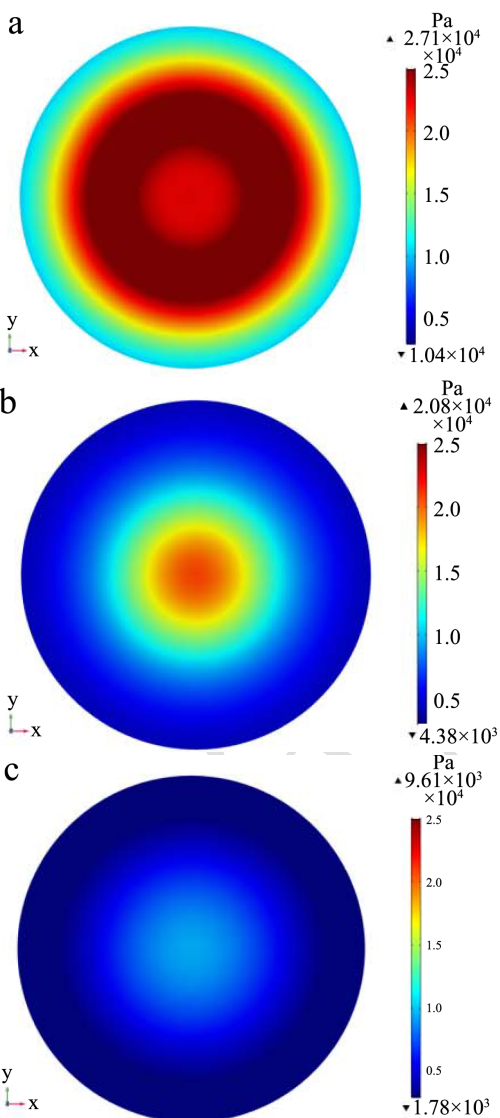


图 6 Z=19 mm (a)、48 mm (b)、76 mm (c) 处数值模拟水平截面声压分布图

Fig.6 Sound pressure horizontal cross section diagram of numerical simulation at 19 mm (a), 48 mm (b), 76 mm (c)

图 4 和图 5 为声场中换能器轴向声压的变化图，在距离声源 0 mm 处声压值为 17749 Pa，表明压电振子激励的初始声压为 17749 Pa。随着深度（沿 z 轴方

向）的增加，声压值呈规律性的变化，在 19 mm、48 mm、76 mm 处分别有三个极大值点，这是由于反应腔体较小，入射波与反射波叠加形成了驻波^[15]，极大值点为驻波波腹，零声压点为驻波波节，极大值的间距为 28 mm，约为超声波波长 λ 的一半，与文献所述的理论相符^[16]。

在波腹处即在 19 mm、48 mm、76 mm 处的水平截面（xy 截面）仿真结果如图 6 所示，在 19 mm，48 mm 处声压集中在中部，其中 19 mm 处声压分布的均匀性最差，中心声压极大而四周声压较小；48 mm 和 76 mm 处声压分布较为分散，均匀性较好。

图 7 为声压绝对值的等值面图，等值面的层数被设置为 15 层。从水平方向（沿 z 轴）观察，声波以球面波的形式向外辐射；从竖直方向（沿 x 轴）观察，等值面大致呈现喇叭形状，中部和底部的声压较为分散，变化较小。从图中清楚地观察到圆筒状五频超声设备的工作盲区为驻波场的波节位置和中下层区域（草绿色和黄色声压作用区域）。

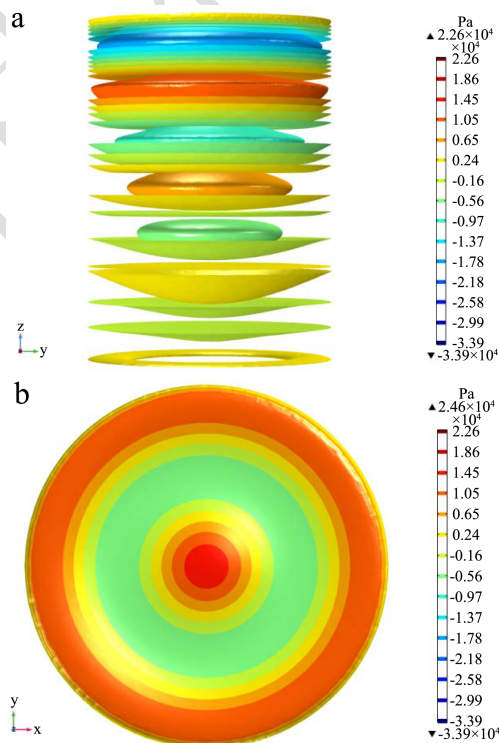


图 7 YZ (a), XY (b) 方向声压等值面图

Fig.7 Sound pressure isosurface in YZ (a) and XY (b) directions

2.1.3 频率变化对声场均匀性的影响

本文从声学角度出发，探究不同频率对声场均匀性的影响。在其他条件（功率密度、换能器布阵方式）不变的情况下，对 20 kHz~52 kHz 频率范围内的所有频率进行仿真计算并统计声场数据，分析声场均匀性和绝对声压的变化情况，为有效组分超声提取过程中频率的筛选提供模型支撑。

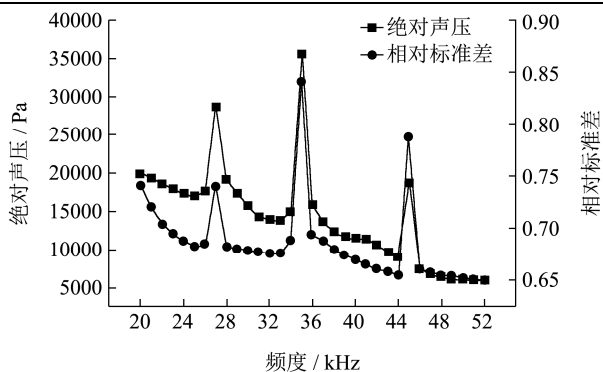


图 8 绝对声压和相对标准差随频率的变化

Fig.8 Variation of absolute sound pressure and relative standard deviation with frequency

绝对声压表示不同频率垂直(沿z轴)截面所有节点声压绝对值的均值,由于不同声场的平均声压幅值差别较大,若直接使用标准差描述声场的均匀程度不能准确评价声场分布特性,因此,本文使用相对标准差消除均值的影响。如图8所示,绝对声压和相对标准差随声波频率同时增大或减小,说明若要提高绝对声压,则声场均匀性变差;若要改善声场均匀性,则绝对声压变小^[17]。圆筒状五频超声设备随着频率的升高,绝对声压不断降低,声场分布趋于均匀,但空化阈值不断升高,空化效应越来越难以发生^[18],使超声提取的作用效果变差。定性的理解为:随着频率的升高,声波膨胀相的时间逐渐缩短,空化核已经来不及增长到可以产生空化效应的空化泡^[19]。此外,28 kHz、35 kHz以及45 kHz处存在共振点,有极大的绝对声压和相对标准差,此时声场声强极大但分布极不均匀;虽然不均匀的声场难以产生大面积的空化,但大幅度提高声强,空化效应仍能发生,从而有效提高产率^[18]。综上所述,圆筒状五频超声设备可以通过调频改善声场的均匀性,但绝对声压会随之减小。通过数值模拟计算,预测低频20 kHz及共振频率28 kHz、35 kHz处超声提取的作用效果较好。

2.2 试验结果与验证

由图9可见,大豆蛋白的提取率随超声时间的增加而不断提高,在10~20 min内蛋白的提取率有比较明显的上升趋势,28 kHz处理样品20 min时,蛋白的提取率达到54.35%,显著高于对照组($p < 0.05$),超声处理40 min后,曲线缓慢上升趋于稳定,这是由于可溶性蛋白大部分已经被提取出来;有趣的是,35 kHz、40 kHz及50 kHz处理样品50 min时提取率相对于40 min分别降低了9.09%、5.51%及3.75%,这是由于35 kHz、45 kHz是共振频率,声强极大且声场不均匀,共振频率及其附近频率处极易发生“空化屏

蔽”导致提取率不同程度地降低,陈伟中等^[20]认为“空化屏蔽”的物理机理是高声压导致强空化,空化泡吸收驱动能量辐射高次谐波,高频声波更容易被液体吸收,最终形成更低的远场声压。相同条件下,20 kHz和28 kHz超声处理大豆蛋白的提取率比传统碱提分别提高了28.75%、26.78%;而40 kHz和50 kHz蛋白的提取率比传统碱提只提高了13.77%和10.38%,超声处理能显著提高大豆蛋白的提取率($p < 0.05$)且缩短提取的时间,但随着频率的升高超声的影响逐渐减弱,这是由于虽然声场分布更加均匀,但空化阈值不断升高,声强不断降低,空化效应愈来愈难以发生,导致超声提取的效果变差,这与数值模拟结果具有一致性。孔娜等^[21]使用圆筒状五频超声设备在不同频率下提取玛咖多糖,结果发现随着频率的增加,超声的效果逐渐减弱;王珂等^[22]也发现28 kHz菊粉的提取率显著高于其他频率的提取率,研究结果都与本研究的结果相一致。

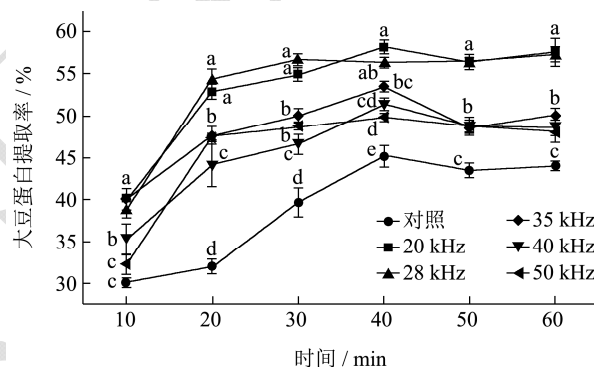


图 9 不同频率下大豆蛋白提取率随时间的变化

Fig.9 Variation of extraction rate of Soybean protein with time at different frequencies

3 结构优化设计与方法应用

3.1 换能器阵列的布阵方式对声场均匀性的影响

在工业化应用中,通常需要若干个压电换能器组成换能器阵列,其布阵方式也会对声场的均匀性产生影响。通过相对标准差评价声场的均匀性,选择最佳的换能器阵列的布阵方式,为超声提取工业化应用提供参考。本文对比了四种布阵方式:线形、矩形、圆形以及环形。

如图10所示,线形阵列间距S为25 mm;矩形阵列间距S为37.5 mm;圆形阵列间距S为37.5 mm;环形阵列间距S为37.5 mm。不同阵列由220 V驱动电压激励且单个换能器物理属性一致(匹配层半径R,

为 12.5 mm，压电振子半径 R 为 7.5 mm，背衬半径 R_2 为 10.5 mm，匹配层厚度 L_1 为 5 mm，压电振子厚度 L_e 为 12 mm，背衬厚度 L_2 为 8 mm)。

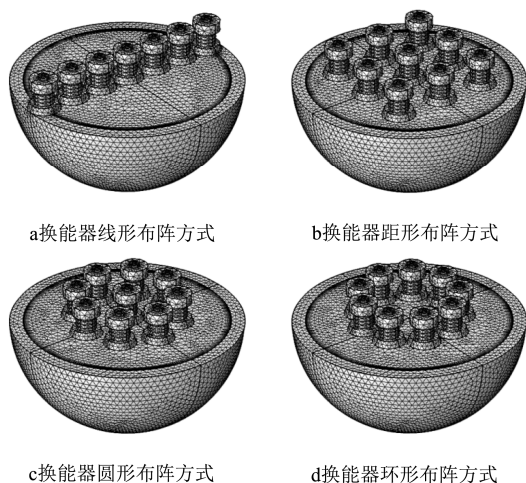


图 10 不同布阵方式的几何模型及网格划分

Fig.10 Geometric models and mesh generation of arrays with different shapes

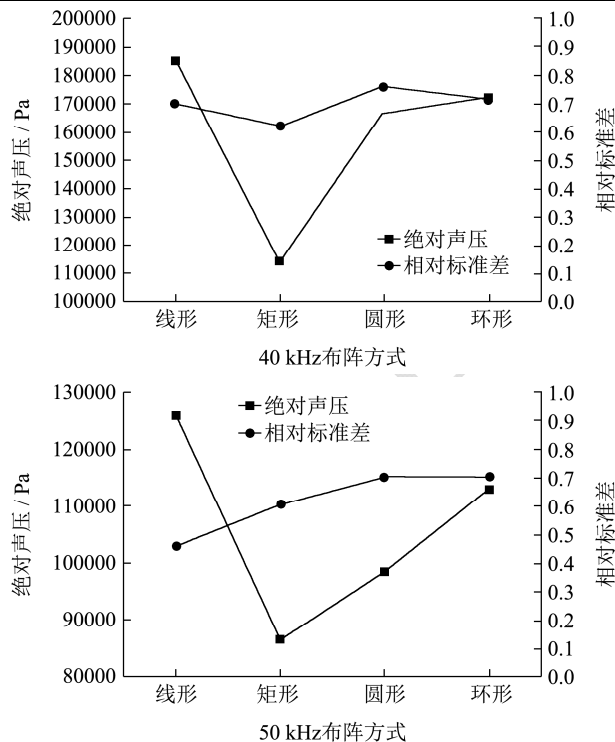
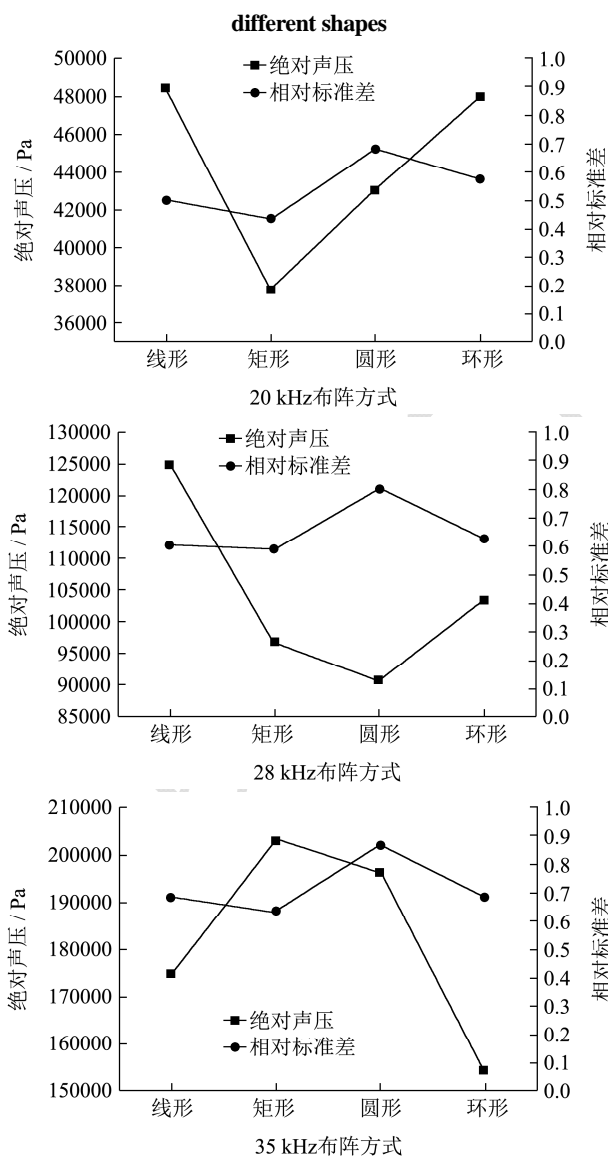


图 11 不同频率阵列的绝对声压及相对标准差

Fig.11 Absolute sound pressure and relative standard deviation of different arrays at different frequencies

采用圆筒状五频超声设备的有限元分析方法，建立几何模型、输入材料参数、定义边界条件以及网格划分，计算 20 kHz、28 kHz、35 kHz、40 kHz、50 kHz 情况下不同布阵方式声场的分布特性。

由图 11 和图 12 可知，20 kHz 线形、环形阵列的绝对声压明显大于其他两种布阵方式。圆形、环形阵列反应腔的中上部呈现“花瓣”状，有旁瓣产生；矩形阵列反应腔内虽然存在明显的正负压区，但两个区域的绝对声压差别较小，声场分布更加均匀。由此可见，20 kHz 线形阵列绝对声压最大，矩形阵列声场的均匀性最好。

28 kHz 线形阵列的绝对声压明显大于其他三种布阵方式，其反应腔上部 and 下部存在强负压区，煤质在此受到较大的拉力，气泡核迅速胀大；矩形、圆形及环形阵列反应腔体中心存在极大正压区被极大负压区包围的现象，且环形阵列现象最为明显。圆形阵列声场分布最不均匀，线形、矩形及环形阵列声场分布都比较均匀。

35 kHz 矩形阵列的绝对声压最大，环形阵列的绝对声压最小。矩形阵列腔体底部虽然出现了极大正压区，但整体的相对标准差最小，声场分布最为均匀；圆形、环形阵列反应腔体内出现明显的驻波现象，声场分布极不均匀。

40 kHz 圆形、环形布阵时，反应腔内正压负压区

域交替出现,存在明显的驻波现象,声场分布不均匀;矩形布阵绝对声压较小,声场分布最为均匀。

50 kHz 线性阵列的绝对声压最大,矩形阵列的绝对声压最小。矩形阵列的声压呈现离散状分布,声场

分布较为均匀;圆形、环形阵列存在明显的驻波现象,声场分布不均匀。

综上所述,工业生产中应该优先考虑矩形阵列布阵方式。

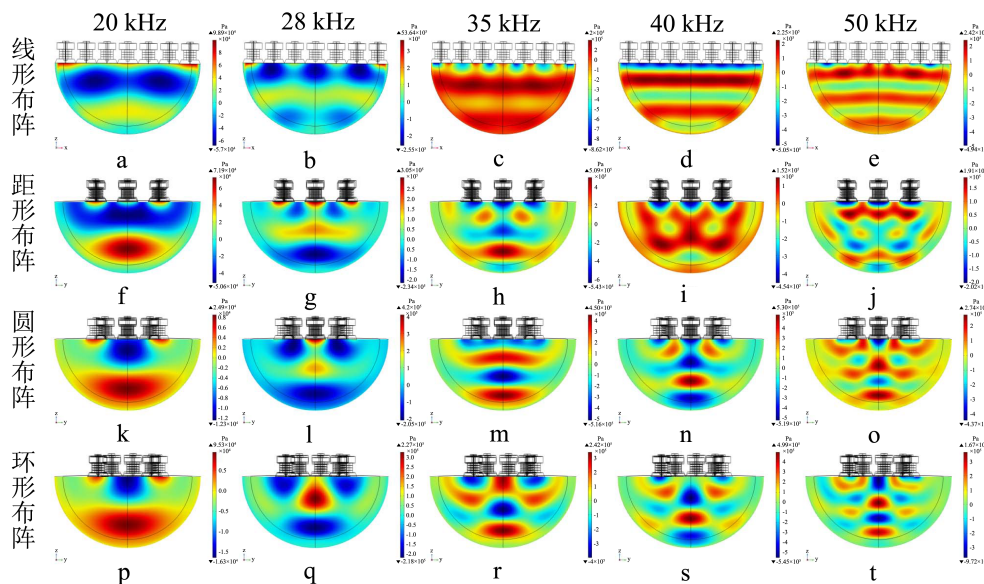


图 12 线形、矩形、圆形以及环形阵列不同频率的声场分布

Fig.12 Acoustic field distribution of linear, rectangular, circular and annular arrays at different frequencies

3.2 换能器不同布阵方式绝对声压和声场均匀性随频率的变化

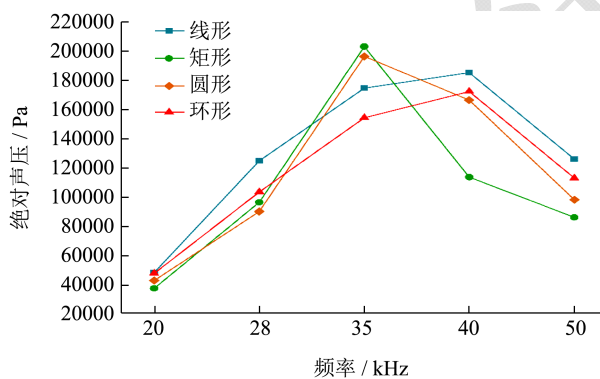


图 13 不同布阵方式绝对声压随频率的变化

Fig.13 Variation of absolute sound pressure with frequency under different arrays

绝对声压和相对标准差随频率同时增大或减小,与前述结论一致。35 kHz 时矩形、圆形阵列产生共振,声场分布极不均匀且最大声压达到 0.2 MPa; 40 kHz 时线形、环形阵列产生共振,声场分布极不均匀且最大声压达到 0.185 MPa。相同条件下,线形阵列声场的均匀性优于环形阵列,圆形阵列声场的均匀性最差,矩形阵列声场的均匀性最好。选择矩形阵列布阵方式并在共振频率 35 kHz 处进行超声提取,可以有效地提高提取产率,为工业生产提供指导。

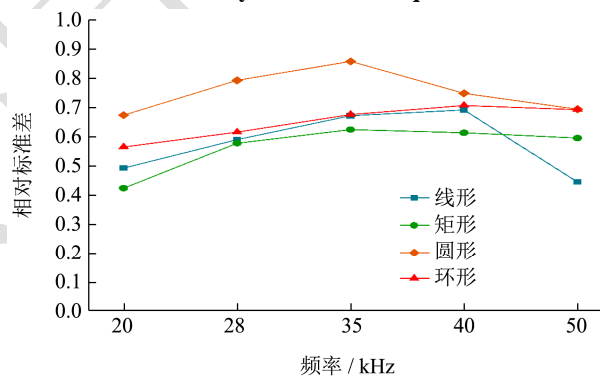


图 14 不同布阵方式相对标准差随频率的变化

Fig.14 Variation of relative standard deviation with frequency under different arrays

4 结论

通过数值模拟将超声提取装备在一定功率不同频率下的声场分布可视化,采用相对标准差评价声场的均匀性。结果表明,声场的均匀性与绝对声压之间存在竞争关系,声压绝对值的均值会随均匀性的优化而减小;筛选出圆筒状五频超声设备在低频 20 kHz 以及共振频率 28 kHz、35 kHz 处易发生空化效应并通过超声提取试验验证数值模拟方法的可靠性;同时发现工业生产中选择矩形阵列布阵方式并在共振频率 35 kHz 处进行超声提取,可以有效地提高提取产率。本研究使用的数值模拟方法可以作为超声提取频率筛选的新方法,其对研发高效超声辅助提取装备及实现功

率超声工业化应用具有重要的理论和实践指导意义。

参考文献

- [1] Preece K E, Hooshyar N, Zuidam N J. Whole soybean protein extraction processes: A review [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 43: 163-172
- [2] Wen C, Zhang J, Zhang H, et al. Advances in ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from cash crops-A review [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 48: 538-549
- [3] Qiu S, Ma X, Huang B, et al. Numerical simulation of single bubble dynamics under acoustic standing waves [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 49: 196-205
- [4] Zhang L, Zhou C, Wang B, et al. Study of ultrasonic cavitation during extraction of the peanut oil at varying frequencies [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 37, 106-113
- [5] 曲文娟,马海乐,王婷,等.交替双频逆流超声辅助提取条斑紫菜蛋白和多糖[J].*农业工程学报*,2013,29(1): 285-292
QU Wen-juan, Ma Hai-le, WANG Ting, et al. Alternating two-frequency countercurrent ultrasonic-assisted extraction of protein and polysaccharide from *Porphyra yezoensis* [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1): 285-292
- [6] 李珂昕,马海乐,李树君,等.超声波辅助提取米渣蛋白的仿真模拟[J].*中国粮油学报*,2018,33(7):92-98
LI Ke-xin, MA Hai-le, LI Shu-jun, et al. The study on computer simulation of counter-current ultrasound-assisted extraction processing [J]. *Journal of The Chinese Cereals and Oils Association*, 2018, 33(7): 92-98
- [7] Tang Q, Hu J. Diversity of acoustic streaming in a rectangular acoustofluidic field [J]. *Ultrasonics*, 2015, 58: 27-34
- [8] Lu Z-H, Zhang Z-H, Gu J-N. Numerical Calculation of seafloor synthetic seismograms caused by low frequency point sound source [J]. *Defence Technology*, 2013, 9(2): 98-104
- [9] Li J, Xue Y, Li F, et al. Active vibration control of functionally graded piezoelectric material plate [J]. *Composite Structures*, 2019, 207: 509-518
- [10] Trujillo F J, Knoerzer K. A computational modeling approach of the jet-like acoustic streaming and heat generation induced by low frequency high power ultrasonic horn reactors [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(6): 1263-1273
- [11] Lais H, Lowe P S, Gan T-H, et al. Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 45: 7-16
- [12] Dokumaci E. On attenuation of plane sound waves in turbulent mean flow [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 320(4): 1131-1136
- [13] 张永元.声化学反应器中声场均匀性研究[D].*陕西师范大学*,2005
ZHANG Yong-yuan. Study on the distribution of sound field in the sonochemical reactor [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2005
- [14] Thanh Nguyen T, Asakura Y, Koda S, et al. Dependence of cavitation, chemical effect, and mechanical effect thresholds on ultrasonic frequency[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 39: 301-306
- [15] Juliano P, Balczyk F, Swiergon P, et al. Extraction of olive oil assisted by high-frequency ultrasound standing waves[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 38: 104-114
- [16] Doinikov A A, Thibault P, Marmottant P. Acoustic streaming induced by two orthogonal ultrasound standing waves in a microfluidic channel [J]. *Ultrasonics*, 2018, 87: 7-19
- [17] 单鸣雷,杨云楼,朱益鹏,等.声源分布和超声频率对清洗声场均匀性的优化[J].*应用声学*,2018,37(4):475-480
SHAN Ming-lei, YANG Yun-lou, ZHU Yi-peng, et al. Optimization of clean sound field uniformity by sound source distribution and ultrasonic frequency pairs [J]. *Applied Acoustics*, 2018, 37(4): 475-480
- [18] 魏鑫.声化学反应器内声场的研究[D].*陕西师范大学*,2012
WEI Xin. Study on sound field in sonochemical reactor [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2012
- [19] 闫晶.不同激励方式对矩形声场均匀性的影响[D].*陕西师范大学*,2015
YAN Jing. Effect of different excitation modes on the uniformity of rectangular sound field [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2015
- [20] 陈伟中.声空化泡对声传播的屏蔽特性[J].*应用声学*, 2018,37(5):675-679
CHEN Wei-zhong. Cavitation bubbles screen the acoustic propagation [J]. *Applied Acoustics*, 2018, 37(5): 675-679
- [21] 孔娜.玛咖多糖的多模式超声辅助提取及其过程原位监测与免疫活性评价[D].*江苏大学*,2017
KONG Na. Effect of Multi-mode ultrasonic-assisted extraction on polysaccharide from Maca and in-situ monitoring the process and evaluating the immune activity [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017

(下转第 109 页)