

单频/双频狭缝超声设备压电-声-结构仿真模拟计算与试验

程宇^{1,2} 石小龙^{1,2} 伍娟^{2,3} 刘伟民² 马海乐^{1,3}

(1. 江苏大学农业工程学部, 镇江 212013; 2. 江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013;
3. 江苏大学食品物理加工研究院, 镇江 212013)

摘要: 超声是一种有工业应用前景的食品物理加工技术。为开发适合食品加工的超声设备,利用 COMSOL 多物理场仿真软件对狭缝式连续超声设备在单频(28、40 kHz)和双频(28/40 kHz)模式下的声场分布进行了数值模拟计算,并通过铝箔腐蚀试验对仿真模型计算的准确性进行了验证。仿真结果表明,单频超声声场在换能器正下方产生负相位声压,在换能器周围辐射交汇区域形成振动稳定的正相位声压。铝箔腐蚀结果证实铝箔表面在负相位声压区呈现不规则波浪形形变,在正相位声压区呈现颗粒状点蚀。通过仿真数据计算超声声场在换能器正下方以及换能器周围辐射区域绝对总声压的相对标准差得出 28 kHz 最低相对标准差为 0.764,40 kHz 最低相对标准差为 0.960,28/40 kHz 最低相对标准差为 0.658。28/40 kHz 双频超声最低相对标准差是 28 kHz 单频超声声场的 86.1%,是 40 kHz 单频超声声场的 68.5%。研究表明双频超声声场分布更为均匀。本研究可以为研发高效的食品超声加工装备提供依据,为狭缝连续式超声用于食品加工提供指导。

关键词: 双频超声; 铝箔腐蚀; 相位声压; 声场分布; 数值仿真

中图分类号: TS203 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)04-0493-08

OSID:



Piezoelectric-acoustic-structural Simulation Calculation Based on Mono- and Dual-frequency Slit Ultrasonic Equipment

CHENG Yu^{1,2} SHI Xiaolong^{1,2} WU Juan^{2,3} LIU Weimin² MA Haile^{1,3}

(1. Faculty of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
3. Institute of Food Physical Processing, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Ultrasound is a physical food processing technology with promising industrial application prospects. To develop an ultrasound device suitable for food processing, the COMSOL multiphysics simulation software was used to numerically simulate and calculate the sound field distribution of a slit-type continuous ultrasound device under single-frequency (28 kHz and 40 kHz) and dual-frequency (28/40 kHz) modes. The accuracy of the simulation model calculation was verified through an aluminum foil corrosion test. The simulation results showed that the single-frequency ultrasound sound field generated a negative-phase sound pressure directly below the transducer, and a positive-phase sound pressure with stable vibration was formed in the radiation intersection area around the transducer. The results of the aluminum foil corrosion test confirmed that the surface of the aluminum foil showed an irregular wavy deformation in the negative-phase sound pressure area and a granular pitting corrosion in the positive-phase sound pressure area. By calculating the relative standard deviation of the absolute total sound pressure of the ultrasound sound field directly below the transducer and in the radiation area around the transducer from the simulation data, it was obtained that the lowest relative standard deviation of 28 kHz was 0.764, the lowest relative standard deviation of 40 kHz was 0.960, and the lowest relative standard deviation of 28/40 kHz was 0.658. The lowest relative standard deviation of the 28/40 kHz dual-frequency ultrasound was 86.1% of that of the 28 kHz single-frequency ultrasound sound field and 68.5% of that of the 40 kHz single-frequency ultrasound sound field. The research result showed that the

distribution of the dual-frequency ultrasound sound field was more uniform, which can provide a basis for the research and development of efficient food ultrasound processing equipment and offer guidance for the application of slit continuous ultrasound in food processing.

Key words: dual frequency; aluminum foil corrosion; phase sound pressure; sound field distribution; numerical simulation

0 引言

超声波是频率大于 20 kHz 的弹性机械波,同时具有波动与能量双重性^[1]。超声波可分为低强度高频超声和高强度低频超声。

在食品工业中,低强度超声被用于食品质量和安全性的评价^[2],而高强度超声被用于食品功能特性的改善^[3]。高强度超声通过声空化过程中气泡的产生、生长和破裂,在液体内部局部范围内产生强烈的冲击波和微射流,诱导液体产生独特化学反应^[4-5],使超声作用对象的物质结构和组成形态发生改变,因此常被应用于蛋白改性、果蔬切割、提取、酶解、干燥、发酵等食品加工过程的研究^[4-8]。然而,目前国内外大部分食品超声加工研究使用的装备还停留在间歇式的超声洗槽和单频探头式超声细胞破碎仪上,而对于多频连续式超声加工装备的研究较少^[4-6]。

尽管已有研究报道了多套用于食品加工的多频超声设备^[4],但是大部分研究聚焦于超声物理场带来的应用效果^[4-5],对物理场自身的研究如超声场声压分布探讨不多,这可能导致实验室结果放大至中试时效果不理想。因而,在开发适合的超声装备时,关注其声压分布对超声技术在食品加工中的工业化应用十分重要。

文献[9]利用声强测量仪研究正八棱形套管连续式超声反应器,该研究聚焦腔体壁面轴向和径向声强,依据壁面声强幅值探究声场分布,但该研究并未对声场进行数值模拟,因此不能预测声波辐射过程中声场情况。文献[10]利用 COMSOL 软件对圆筒状五频超声频率影响声压分布的情况进行了数值模拟仿真,并研究了超声频率对大豆蛋白提取率的影响。但是,声场分布的数值仿真结果并未进行试验验证。文献[11]对狭缝状腔体的声场分布进行了仿真模拟,同样并未对数值仿真结果进行试验验证,而是通过核桃乳的超声乳化试验来评价仿真模拟结果。研究结果具有局限性,不利于仿真结果的应用。

本文以连续式圆柱状狭缝腔体结构为研究对象,以水为研究介质,利用蠕动泵实现介质在腔体内的连续流动,通过 COMSOL Multiphysics 6.2 仿真建模软件分析不同超声模式下腔体内超声声场分布情

况。通过铝箔腐蚀试验探究声场分布情况来验证数字建模和仿真分析的准确性和可靠性,以期为食品超声加工装备高效研发提供依据,为狭缝式连续超声用于食品加工提供指导。

1 试验与方法

1.1 材料与试剂

铝箔,厚度 h 为 20 μm ,购于麦德龙超市;去离子水,实验室自制。

1.2 仪器与设备

本研究使用的设备为实验室自行组装的双频超声物理加工设备,反应腔体为圆柱状,工作示意图如图 1 所示。超声设备工作腔体为直径 16 mm、宽度 20 mm 的 6 个狭缝状圆柱体,换能器在腔体两侧摆放,每侧摆放 3 个同频率的换能器;换能器排列呈正三角形形状,换能器中心距离 80 mm。28 kHz 单频、40 kHz 单频、28/40 kHz 双频超声换能器(单个功率 100 W),广东瀚宁超声设备有限公司。28、40 kHz 超声波发生器(额定功率 600 W),广东瀚宁超声设备有限公司。BT00-300 基本型蠕动泵,保定兰格恒流泵有限公司。

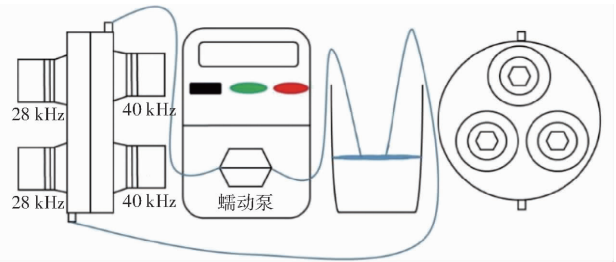


图 1 圆柱状狭缝双频超声加工流程示意图
Fig. 1 Schematic of dual-frequency ultrasonic equipment with cylindrical slit cavity

1.3 试验方法

通过更换腔体两侧超声换能器,设置 3 个超声处理组进行试验。第 1 组两侧均为 20 kHz 换能器,第 2 组两侧均为 40 kHz 换能器,第 3 组两侧分别为 28 kHz 和 40 kHz 换能器。试验开始前,更换所需换能器。然后将铝箔裁剪成与腔体大小相似的尺寸,通过螺栓机械夹持的方式将铝箔夹持固定在两片分割式腔体中间。铝箔靠近进出口位置附近划开直径 5 mm 小孔破坏其密闭性,使水流可以正常通过小口流入另一侧腔体,利用蠕动泵将水流充满腔体并实

现流体循环后,打开超声波发生器,在超声功率 300 W 下对流体介质中的铝箔处理不同时间(20、30、40、50、60、70 s)后取出编号。将取出的铝箔进行干燥后用扫描仪扫描图像保存,并观察分析铝箔腐蚀情况。每完成一个时间点的试验后,清洗腔体并更换新的铝箔进行下一个时间参数的试验。试验重复 3 次。

2 数值仿真计算

2.1 仿真模型构建

通过 COMSOL Multiphysics 6.2 仿真建模软件对模型整体进行网格划分,处理结果如图 2 所示。

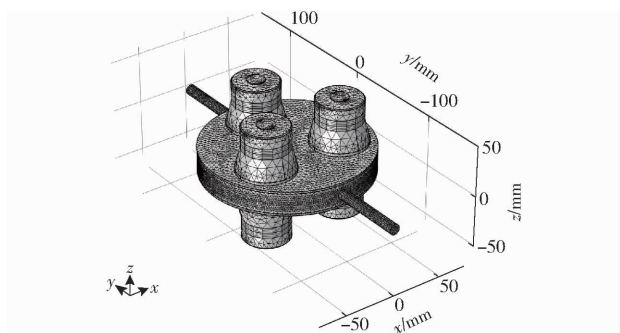


图2 工作腔体及压电超声换能器网格划分模型

Fig.2 Meshing model of working cavity and piezoelectric ultrasonic transducer

本研究模型几何参数如下:工作腔体为半径 80 mm、高度 20 mm 的圆柱;圆柱区域为超声处理对象流体域;流体域两侧为 304 号不锈钢盖板,厚度 h 为 1 mm;每一侧金属盖板按照正三角形中心对称的方式摆放 3 个同频率压电超声换能器,每个换能器中间间距为 80 mm;流体域圆柱体延伸出来两个半径 r 为 6 mm 的圆柱为腔体进出液口,并在距离端口 20 mm 处设置圆柱状完美匹配层。

模型材料参数如下:模型中间整体区域为 water;压电晶体圆环材料为 Lead zirconate titanate (PZT-4);流体域两侧盖板为 304 号食品级不锈钢;换能器螺栓头为 Steel AISI 4340;换能器辐射端及固定端为铝^[11]。

模型在超声条件下处理相关背景参数:水初始温度 t 为 20℃;流体背景流速 v_0 为 3 cm/s;超声频率 f 为 28、40、28/40 kHz;水的动力黏度 μ 为 1.01×10^{-3} Pa·s;水溶液中声速 v_s 为 1480 m/s;水的密度 ρ 为 1.0×10^3 kg/m³。

2.2 压电-结构有限元分析

压电方程可用压电圆环晶体的应变张量 S 、应力张量 T 、电位移 D 和电场强度 E 表示。本模型为封闭圆柱状模型,周围为固定边界。本设备腔体两端夹持换能器采用夹心式压电超声换能器,压电圆

环的振动方向与电场方向垂直,即 $\frac{\partial E_i}{\partial x_j} = 0$ 。选择电场强度 E 和应变张量 S 作为自变量,e 型压电方程^[12]作为理论建模出发点。

夹心式压电超声换能器压电晶体应变方程为

$$\begin{cases} S_{11} = \frac{\partial u}{\partial r} - Z \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \\ S_{22} = \frac{u}{r} - Z \frac{\partial w}{\partial r} \end{cases} \quad (1)$$

式中 u 、 w ——节点 r 处不同方向伸长、缩短的位移
将压电晶体应变方程代入 e 型压电方程

$$\begin{cases} T_h = c_{hk}^E S_k - e_{jh} E_j \\ D_i = e_{ik} S_k + \varepsilon_{ij}^S E_j \end{cases} \quad (2)$$

可以得到压电晶体的应力方程^[13]

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

式中 T_{11} 、 T_{22} ——应力场 T 中元素

ε_{ij}^S ——介电常数矩阵 ε^S 中元素

e_{13} ——压电耦合常数矩阵 e 中元素

c_{hk}^E ——压电材料的弹性刚度矩阵 $c^{E[13]}$ 中元素

电场强度 E 与电势 φ_E 的关系为

$$E = -\nabla \varphi_E \quad (4)$$

式(3)、(4)进行离散化处理^[14],可以得到超声压电-结构有限元方程^[15]

$$\begin{bmatrix} M_{UU} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{\Phi}_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{UU} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{\Phi}_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{UU} & K_{U\Phi} \\ K_{U\Phi}^T & K_{\Phi\Phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ \Phi_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ G \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 Φ_E ——节点电势

M_{UU} ——压电材料质量矩阵

K_{UU} ——压电材料弹性刚度矩阵

D_{UU} ——压电材料阻尼矩阵

$K_{U\Phi}$ ——压电耦合矩阵

$K_{\Phi\Phi}$ ——介电刚度矩阵

F ——总外加力矢量

G ——总外加电荷 U ——节点位移

2.3 声-结构有限元分析

压电超声换能器压电结构晶体振动在流体介质中产生声场,超声波声场产生的机械应力与声空化效应对结构产生反作用力,即流体与声场结构存在流固耦合。假设固体结构为弹性结构,满足弹性力学理论^[16-17],对象流体为无粘滞性、不可流动、可压缩介质满足波动方程^[18]。固体结构部分有限元方程

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU - QP = F \quad (6)$$

式中 P ——节点流体压力
 M ——结构质量矩阵
 C ——结构阻尼矩阵
 K ——结构刚度矩阵
 Q ——流固耦合面积矩阵

推导流体部分有限元方程

$$E_M \ddot{P} + A \dot{P} + H P - \rho Q^T \ddot{U} = 0 \tag{7}$$

式中 E_M ——等效流体质量矩阵
 A ——流体阻尼矩阵
 H ——流体刚度矩阵
 ρ ——流体密度

结合式(6)、(7),可以推导出流固耦合有限元方程

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ \rho Q^T & E_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{P} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{P} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -Q \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

2.4 波动方程

通过小振幅声波一维波动声场中,流体介质运动方程、连续性方程和物态方程可以得到声波三维波动方程^[19]

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad \left(\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \tag{9}$$

式中 p ——声压 c_0 ——声速

在频率基础上进行建模,可以得到频率下压力声学控制方程^[20]

$$\nabla \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla P - \bar{q}) \right) - \frac{\omega^2 p}{\rho_0 c^2} = \bar{Q} \tag{10}$$

式中 ρ_0 ——流体媒质密度
 $\bar{q}$ ——偶极源 ω ——角频率
 c ——声在流体媒质速度
 $\bar{Q}$ ——单极源

2.5 驻波分析

平面声波在有限宽度的狭缝中传播,一部分声波被负载吸收,一部分声波被负载反射^[21]。本文为狭缝两侧平面波沿相反方向合成声场,根据叠加原理可得合成声场声压为

$$p = p_i + p_r = 2p_{ra} \cos(kxe^{j\omega t}) + (p_{ia} - p_{ra})e^{j(\omega t - kx)} \tag{11}$$

式中, p_{ia} 为入射波的幅值, p_{ra} 为反射波的幅值。 $2p_{ra} \cos(kxe^{j\omega t})$ 表示狭缝超声腔体内不同位置质点作同相位振动,其振幅变化情况。当 $kx = n\pi$ ($n = 1, 2, \dots$), 即 $x = n \frac{\pi}{k}$ ($n = 1, 2, \dots$), 腔体内声压振幅取极大值,称为声压波腹,此时驻波腔共振频率定义驻

波最大振幅取极大值频率,其中驻波空间周期为 $\frac{\pi}{k}$; 而当 $kx = (2n - 1) \frac{\pi}{2}$, 即 $x = \frac{\pi}{2k} (2n - 1)$ ($n = 1, 2, \dots$), 腔体内声压振幅取极小值称为声压波节。 $(p_{ia} - p_{ra})e^{j(\omega t - kx)}$ 表示在一平面 x 方向上进行工作,其合成振幅为两侧平面波振幅差值。

2.6 声吸收系数

当声源产生的超声为谐波,且作用的对象流体为均匀介质时,流体中的超声声场分布可以用经典亥姆霍兹方程求解^[22-24],即

$$\nabla \left(\frac{1}{\rho} \nabla p \right) - \frac{\omega^2}{\rho_0 c^2} p = 0 \tag{12}$$

超声实际处理流体介质过程中会产生空化效应以及流体黏滞效应造成的声波衰减^[25]。令复波数 $k = \frac{\omega}{c} - i\alpha$, 其中 α 为声波衰减系数,流体黏滞效应引起的衰减系数为^[26]

$$\alpha = \frac{8\mu\pi^2 f^2}{3\rho c^3} \tag{13}$$

式中 f ——超声频率

2.7 超声场分布均匀性量化处理

声压常用来描述声场,超声作用于连续的流体介质可将连续的流体介质看作由无数个微单元组成。将每个微单元视为一个质点,将一个质点在某一时刻的静态压强记为 p_0 , 超声波作用于该质点产生的压强为 p_1 , 则超声作用产生的余压 $p = p_1 - p_0$, 称为声压^[27]。通过仿真结果可得到腔体内每个点位的绝对声压。可利用绝对声压的相对标准差来衡量声场的均匀性,相对标准差越小,声场越均匀。

3 仿真结果与验证

3.1 超声场仿真结果与数值分析

频率为 28、40 kHz 的单频超声在 zy 方向中轴切面和 zx 方向换能器正下方切面声压仿真结果分别如图 3、4 所示。图 3a 和图 4a 左侧两对换能器中间辐射部分和右侧一对换能器正下方均存在声压幅值最大的波腹,并逐步向两侧衰减,这是由于声波通过流体介质作用于不规则固体表面向两侧反射,并随着衰减效应逐渐减弱导致的。图 3b 和图 4b 在腔体两对换能器正下方以及换能器中间部分均存在较大声压幅值,在这个方向上超声波在流体介质传播存在稳定的正负压强交替周期。在超声波的正压相位时,超声波对媒质分子挤压,分子间的距离减小,改变了液体介质原来的密度,使其增大;而在负压相位时,使媒质分子稀疏,进一步离散,分子间距离增大,腔体内流体介质密度减小^[28-29]。此时,28 kHz 单

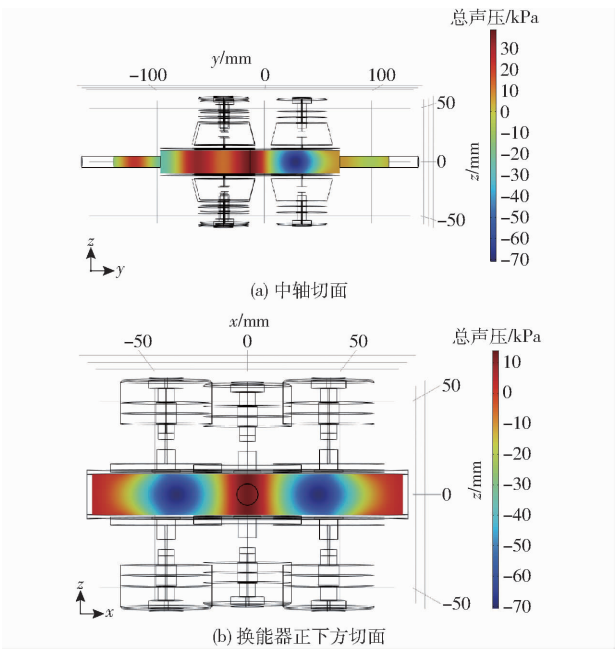


图3 28 kHz单频超声场中轴切面及换能器正下方切面声压仿真结果

Fig.3 Axial sectional plane and sectional plane directly below transducer in 28 kHz single-frequency ultrasonic field

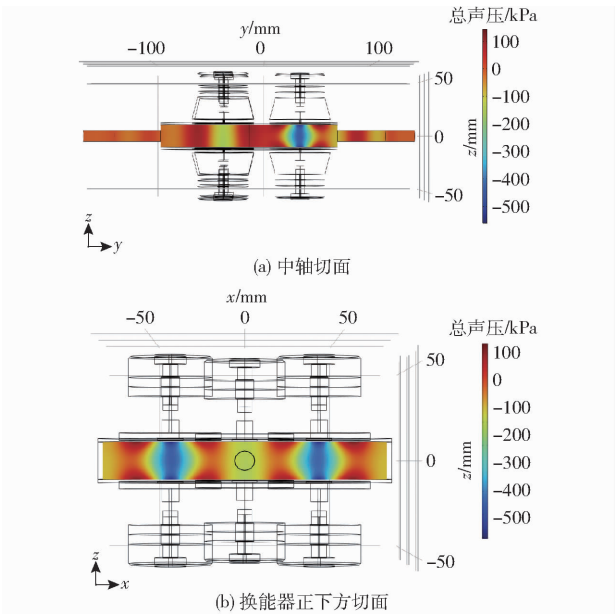


图4 40 kHz单频超声场中轴切面及换能器正下方切面声压仿真结果

Fig.4 Axial sectional plane and sectional plane directly below transducer in 40 kHz single-frequency ultrasonic field

频超声处理腔内最大绝对正相位绝对声压达到 3.87×10^4 Pa,最大负相位声压达到 5.66×10^4 Pa。40 kHz单频超声处理腔体内最大正相位绝对声压达到 1.54×10^5 Pa,最大负相位绝对声压达到 5.64×10^5 Pa。在负相位声压下,流体介质分子间距离增大甚至超过分子间极限距离,破坏流体介质结构完整性而造成空穴形成^[30]。

图5为28/40 kHz双频超声zy方向中轴切面和

zx方向换能器正下方切面声压仿真结果。图5a两侧两端换能器中间辐射部分和右侧一对换能器正下方大面积区域存在相对均匀的正相位声压声场,存在小面积绝对声压值较大的正相位声压场;图5b在腔体两侧两对换能器正下方存在面积较大且均匀的正相位声压声场,换能器中间部分存在小面积且均匀的负相位声压声场。这是由于腔体两端换能器的频率不同,辐射在流体介质超声波的波长也不同,避免腔体内波腹和波节位置保持不形成驻波。此时腔内最大正相位绝对声压达到 1.17×10^6 Pa,最大负相位绝对声压为 1.07×10^6 Pa。相较于图5a和图5b双频超声仿真结果,28、40 kHz单频超声场存在明显的驻波效应导致声场分布不均。28/40 kHz双频组合通过不同频率声场叠加,可以极大削弱驻波效应的影响,驻波声场的减少可以提高声场分布均匀性^[7]。

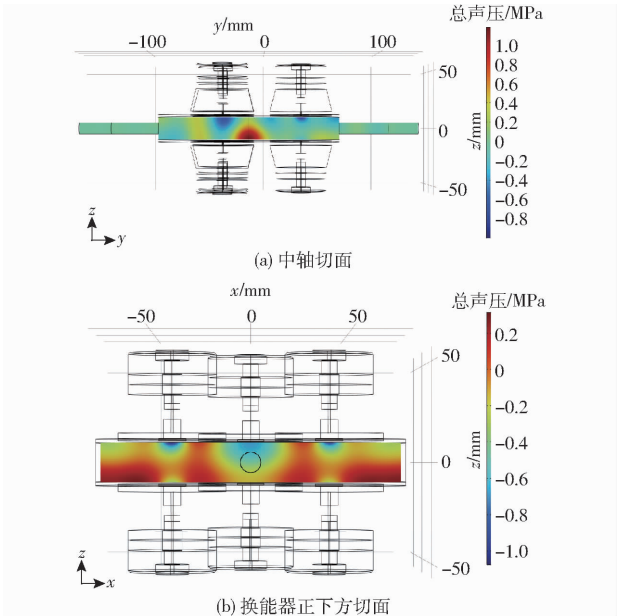


图5 28/40 kHz双频超声场中轴切面及换能器正下方切面声压仿真结果

Fig.5 Axial sectional plane and sectional plane directly below transducer in 28/40 kHz dual-frequency ultrasonic field

从图3a、4a、5a超声处理腔体内声压仿真切面图中线位置沿y轴方向均匀截取33个仿真数据,从图3b、4b、5b声压仿真切面图中线位置沿x轴方向均匀截取30个仿真数据。截取的仿真数据分别为单频28、40 kHz以及双频28/40 kHz超声场在截取位置的绝对声压。通过截取点位的绝对声压可以计算出该点位的相对声压标准差。绝对声压相对标准差可以作为衡量声场分部均匀性的判断依据。

图6和图7分别表示28、40 kHz以及28/40 kHz中轴线位置以及换能器正下方切面中线位置总声压数值情况。从图6中轴线位置可以看出,换能器两侧

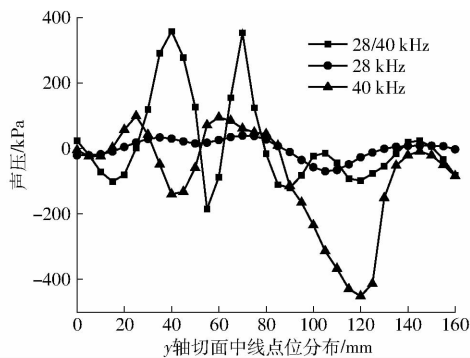


图 6 狭缝腔体中轴线位置总声压分布图
Fig. 6 Distribution of total generated pressure at central axis of slit cavity

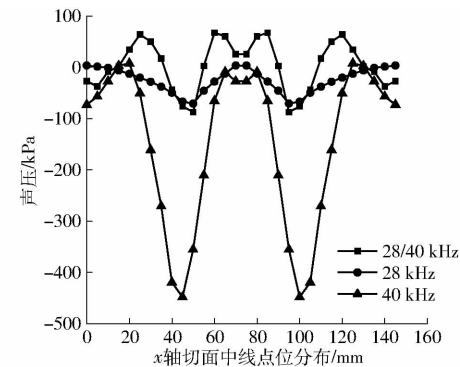


图 7 狭缝腔体换能器正下方位置总声压分布图
Fig. 7 Total sound pressure distribution at position directly below transducers

两对换能器中间辐射区域的声波在 0 附近。这是由相同频率声波在对称腔体内反射声波的能量趋于抵消造成的。从坐标轴 80 mm 处可以看到此处声压强度接近 0。从换能器摆放位置可以推测这个位置为声波辐射“盲点”。在 80 ~ 160 mm 范围内, 28、40 kHz 与 28/40 kHz 一对超声换能器正下方的狭缝均产生较大面积的负相位声压。

由于中轴线点位绝对声压很难分析声场分布的均匀情况, 可通过声压相对标准差来分析声场分布的均匀性。根据所取点位数据分别计算图 6 中 28、40、28/40 kHz 超声处理的声压相对标准差分别为 0.764、0.960、0.948。从相对标准差可以看出 28 kHz 单频超声在中轴线上声场分布较为均匀。但 28 kHz 超声在水中波长 λ 约 50 mm, 相邻两个波节为 $\lambda/2$, 波腹在两个相邻波节之间位置且为声波强度最高点。由于狭缝腔体高度为 20 mm, 与波腹位置高度重合, 因此频率相同方向相反的两侧超声波波腹数值高度相互抵消。40 kHz 超声在水中波长 λ 约 35 mm, 波腹位置并不相邻。28/40 kHz 双频超声由于频率不同, 波长也不相同, 在两侧两对换能器辐射的中间区域不存在声场抵消, 因此数值计算相对标准差表明 28/40 kHz 双频声场较优。

同理, 观察图 7 超声换能器正下方切面图中线可以看到, 声场声压分布呈轴对称分布, 这是因为整个腔体与换能器排布也是对称的, 数值仿真结果也可以表明这一点。由于狭缝腔体距离短且小于超声波在液体中传播的波长, 根据图 6、7 换能器正下方坐标横轴可以推断出 28、40 kHz 单频超声场两侧换能器中间位置存在较大面积负相位绝对声压。对于 28/40 kHz 双频超声, 根据线性声学叠加原理^[21], 固定相位差的声波叠加会发生干涉现象, 合成声场声压为两侧换能器在水中声场声压之和^[31]。由图 7 可以计算 28、40、28/40 kHz 超声场的声压相对标准差分别为 0.899、0.992、0.658。以上结果表明, 28/40 kHz 双频超声最低相对标准差是 28 kHz 单频超声声场的 86.1%, 是 40 kHz 单频超声声场的 68.5%, 双频超声在换能器下方形成的声场分布较为均匀。

3.2 试验验证

利用铝箔腐蚀程度可以探究不同超声条件对超声场空化效应分布的影响^[32]。可见, 铝箔腐蚀法可以用于探究超声波声场分布的情况。对铝箔超声处理超过 80 s 会出现铝箔大面积破碎, 不利于表面腐蚀的观察, 而超声 30 s 就已经有明显的处理效果。试验选取 28、40、28/40 kHz 超声处理 30 s 铝箔用于腐蚀结果分析。铝箔腐蚀试验结果如图 8 所示。图 8b~8d 中竖直红线标记的绝对声压数值与图 6 对应, 水平横线标记的绝对声压数值与图 7 对应。从横向切面两个标志位置铝箔腐蚀的情况可以看出, 经过超声处理的铝箔变形情况与上述仿真数值

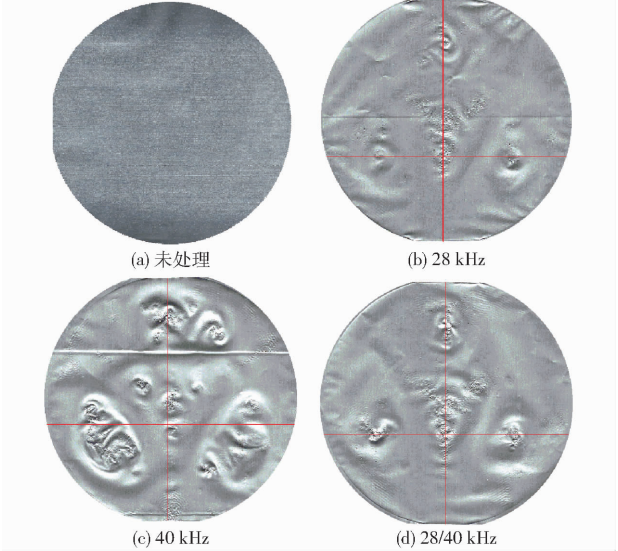


图 8 铝箔未经过超声处理以及经过 28、40 kHz 和 28/40 kHz 超声处理 30 s 的腐蚀情况
Fig. 8 Corrosion of aluminum foil without ultrasonic treatment and after ultrasonic treatment at 28 kHz, 40 kHz and 28/40 kHz for 30 s

有较好的相关性。28 kHz 超声由于波腹位置数值高度抵消,相同时间功率换能器正下方以及周围辐射区域发生的腐蚀程度均小于 40 kHz 和 28/40 kHz 超声。40 kHz 超声在换能器正下方负压相位数值较大,声场处于负压相位时作用于对象媒质有拉伸作用,易造成空穴效应,空穴效应下的声波将保持径向震荡^[19]。相较于 28 kHz 和 28/40 kHz 频率组合,40 kHz 超声换能器正下方铝箔变形情况更为剧烈,具体表现为拉伸撕扯现象的变形。铝箔腐蚀变形程度与不同频率组合 COMSOL 仿真数值差异所表现的效果具有高度一致性。

从图 7 数值结果分析图 8 中沿竖直红线铝箔腐蚀情况:图 7 从中心轴线 0 点位置沿 x 轴正方向,3 个不同频率声场声压在中心轴线上先是表现正负相位交替,到换能器正下方表现为负压相位,28/40 kHz 双频组合在两侧两对换能器交汇处有较大正压相位峰值。当声场声压处于正压相位,声压对媒质有挤压效果,这引起媒质分子在平衡位置附近振动^[10]。这与负压相位的拉伸效果不同,正相位声压附近易发生点蚀,具体表现为铝箔表面大面积颗粒状腐蚀现象。铝箔竖直中线上的正相位声压点蚀情况与中轴线不同频率组合仿真数值差异相对应。铝箔腐蚀试验表明,本研究建立的仿真模拟模型具有较高的准确性,可以

较好地模拟超声的实际声场分布。

4 结束语

通过 COMSOL 多物理场软件对狭缝叠加声场的声压分布进行仿真数值计算,分析了 28、40 kHz 单频以及 28/40 kHz 双频超声声场代表性位置的声场声压分布,并通过铝箔腐蚀试验进行了验证。狭缝状腔体可以减少声波在径向传播的衰减,这与狭缝腔体的径向尺寸小于超声在液体传播中的波长以及在换能器正下方以单一相位声压为主有关。单频超声换能器正下方以负相位声压为主,从换能器中心位置通过腔体内部向周围辐射,在辐射交汇区域形成正负声压交替周期变化。0 Pa 声波附近媒质分子在平衡位置附近振动,在单频超声铝箔未发生明显变化区域得到证实。从数值仿真和负相位声压拉伸铝箔以及正相位声压点蚀铝箔的面积来看,40 kHz 单频超声的声场避开波腹位置重合,声场声压在狭缝腔体内极大,在狭小区域内也能发生空化效应对铝箔进行腐蚀。通过数值计算绝对声压相对标准差,28/40 kHz 双频超声声场分布较为均匀,铝箔表面声波纹路可以证实这一结果。本研究采用理论与试验相结合探究超声场分布,可以为超声加工设备的设计和放大提供依据和指导。

参 考 文 献

[1] 陈青,程红梅,周涛涛,等.不同超声条件下结冷胶酸性凝胶的凝胶特性研究[J].农业机械学报,2021,52(10):402-408.
CHEN Qing, CHENG Hongmei, ZHOU Taotao, et al. Effects of high intensity ultrasound on acid induced gelation properties of gellan gels[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10):402-408. (in Chinese)

[2] 孙宗保,王天真,邹小波,等.基于超声成像技术的冷鲜与解冻牛肉鉴别方法[J].农业机械学报,2019,50(7):349-354.
SUN Zongbao, WANG Tianzhen, ZOU Xiaobo, et al. Discrimination of fresh and frozen-thawed beef based on ultrasound imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7):349-354. (in Chinese)

[3] 李杨,马召蕾,郑丽,等.超声联合酶处理下 TG 酶交联大豆分离蛋白凝胶特性研究[J].农业机械学报,2022,53(4):394-402.
LI Yang, MA Zhaolei, ZHENG Li, et al. Effect of ultrasonic combined with enzyme treatment on glutamine transaminase cross-linked soybean protein isolate gels[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4):394-402. (in Chinese)

[4] CHEN Wenqing, MA Haile, WANG Yaoyao. Recent advances in modified food proteins by high intensity ultrasound for enhancing functionality: potential mechanisms, combination with other methods, equipment innovations and future directions [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 85:105993.

[5] XU Baoguo, ESSODÉZAM T S, YAN Weiqiang, et al. Recent development in high quality drying of fruits and vegetables assisted by ultrasound: a review[J]. Food Research International, 2022, 152:110744.

[6] 张军,辛迪,蓝伟科,等.簇生番茄果梗超声切割过程仿真与试验[J].农业机械学报,2024,55(3):153-161.
ZHANG Jun, XIN Di, LAN Weike, et al. Simulation and experiment on ultrasonic cutting process of clustered tomato stems [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3):153-161. (in Chinese)

[7] 马海乐.食品物理加工技术及其基本框架[J].中国食品学报,2018,18(4):1-7.
MA Haile. Food physical processing technology and its basic framework[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(4):1-7. (in Chinese)

[8] HAO Jing, XU Haining, YAN Pengfei, et al. Effect of ultrasound-assisted fermentation on physicochemical properties and volatile flavor compounds of Chinese rice wine[J]. Food Physics, 2023, 1: 100006.

[9] 邹华生,周超,黎民乐.正八棱形套管连续式超声反应器声强分布研究[J].高校化学工程学报,2010,24(5):789-794.
ZOU Huasheng, ZHOU Chao, LI Minle. Study on the distribution of sound intensity in octangular double-tube continuous

- sonochemical reactor[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2010, 24(5):789–794. (in Chinese)
- [10] 王轲,马海乐,王洋. 超声波辅助提取过程中声场的数值模拟研究[J]. 现代食品科技, 2019, 35(9):210–218,109.
WANG Ke, MA Haile, WANG Yang. Numerical simulation of acoustic field during ultrasound-assisted extraction[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(9):210–218,109. (in Chinese)
- [11] 欧阳宁宁. 狭缝状超声波多物理场耦合仿真及核桃乳的超声乳化研究[D]. 镇江:江苏大学,2022.
OUYANG Ningning. Simulation of slit ultrasonic multi-physical field coupling and study on ultrasonic emulsification of walnut milk[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)
- [12] NEPPIRAS E A. Acoustic cavitation[J]. Physics Reports, 1980, 61(3):159–251.
- [13] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [14] BATHE K J. Finite element procedures[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.
- [15] 余南辉, 范吉军, KIM J H, 等. 压电水声换能器的声学特性分析[J]. 声学技术, 2009, 28(2):95–99.
YU Nanhui, FAN Jijun, KIM J H, et al. Dynamic analysis of piezoelectric underwater acoustic transducer[J]. Technology of Acoustics, 2009, 28(2):95–99. (in Chinese)
- [16] 王润富, 陈国荣. 弹性力学及有限单元法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005:175–177.
- [17] 余业龙. 清洗两个盘类零件条件下的超声波声场分布规律研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2020.
YU Yelong. Study on the distribution pattern of ultrasonic sound field under the condition of cleaning two disc parts[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020. (in Chinese)
- [18] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2004:10–17.
- [19] TRUJILLO J F, 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.
- [20] LAIS H, LOWE S P, GAN T, et al. Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 45:7–16.
- [21] 杜功焕. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2012: 148–150.
- [22] XU Z, YASUDA K, KODA S. Numerical simulation of liquid velocity distribution in a sonochemical reactor[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(1):452–459.
- [23] LOUISNARD O, COGNÉ C, LABOURET S, et al. Prediction of the acoustic and bubble fields in insonified freeze-drying vials [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015(26):186–192.
- [24] CAI J, LI X, LIU B, et al. Effect of cavitating flow on forced convective heat transfer: a modeling study[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(14):1580–1590.
- [25] 吴文华, 翟薇, 王建元, 等. 超声场中液体材料的空化和声流动力学研究进展[J]. 中国科学:技术科学, 2023, 53(1):2–27.
WU Wenhua, ZHAI Wei, WANG Jianyuan, et al. Progress of cavitation and acoustic streaming dynamics of liquid materials within ultrasonic field[J]. Chinese Science : Technical Science, 2023, 53(1):2–27. (in Chinese)
- [26] 程建春. 声学原理[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [27] 何琳等. 声学理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [28] 马立康, 暨勇策, 沈国清, 等. 超声空化现象影响因素的实验研究[J]. 应用声学, 2019, 38(6):999–1003.
MA Likang, JI Yongce, SHEN Guoqing, et al. Experimental study on the influencing factors of ultrasonic cavitation[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(6):999–1003. (in Chinese)
- [29] 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 Minglei, YANG Yunlou, ZHU Yipeng, et al. Optimization of clean sound field uniformity by sound source distribution and ultrasonic frequency pairs[J]. Applied Acoustics, 2018, 37(4):475–480. (in Chinese)
- [30] TANG Q, HU J. Diversity of acoustic streaming in a rectangular acoustofluidic field[J]. Ultrasonics, 2015, 58:27–34.
- [31] 王英鉴. 基于多通道 ANC 算法的飞机舱内降噪技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
WANG Yingjian. Research on noise control technology in aircraft cabin based on multi-channel ANC algorithm[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023. (in Chinese)
- [32] 郭璇, 杨艳玲, 李星, 等. 基于 Matlab 的超声空化场测量与可视化分析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(3):719–726.
GUO Xuan, YANG Yanling, LI Xing, et al. Measurement and visualization of ultrasonic cavitation field based on Matlab[J]. China Environmental Science, 2016, 36(3):719–726. (in Chinese)