

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.09.012

聚焦超声振动球壳的声压数值仿真及测量研究*

王中旺^{1,2}, 李 华^{1,2*}, 汪帮富^{1,2}, 谢 鸥^{1,2}, 任 坤^{1,2}

(1. 苏州科技大学 机械工程学院, 江苏 苏州 215000; 2. 苏州市高效
与精密加工技术重点实验室, 江苏 苏州 215000)

摘要:为了解决高强度聚焦超声的声压场测量复杂、能量损失等问题,设计出了新型聚焦超声振动球壳装置,采用精确、便捷的测量方法,研究了聚焦超声振动球壳装置的声压场分布规律。建立了开口直径 60 mm 的聚焦超声振动球壳声压计算模型,计算了聚焦超声声压平面内垂直于声压轴方向上的声压理论值,分析了不同聚焦超声球壳孔径对声压轴处声压分布的影响;同时利用 COMSOL 软件对聚焦超声球壳的声压级进行了数值模拟,搭建了探针式水听器测量系统,通过实验验证了聚焦超声振动球壳的声压场分布。研究表明:随着聚焦超声振动球壳开口半径的增加,焦点附近主瓣的声压增加,其焦斑变小,声压在焦点处增大,声能量比较集中,聚焦超声振动球壳系统具有显著的聚焦特性;聚焦超声振动球壳比以往的高强度聚焦超声的声焦距更符合几何焦距,且误差较小,数值仿真结果与实验测量基本一致。

关键词:超声聚焦;聚焦声场;声压测量;探针式水听器

中图分类号:TH774;TB565

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)09-0949-05

Numerical simulation and measurement of acoustic pressure of focused ultrasonic vibration spherical shell

WANG Zhong-wang^{1,2}, LI Hua^{1,2}, WANG Bang-fu^{1,2}, XIE Ou^{1,2}, REN Kun^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215000, China;
2. Suzhou Key Laboratory of Precision and Efficient Machining Technology, Suzhou 215000, China)

Abstract: In order to solve the problems of complex measurement of sound pressure field and energy loss in high intensity focused ultrasound, a new type of focused ultrasonic vibration spherical shell was designed. The distribution of sound pressure field in focused ultrasound vibration spherical shell by precise and convenient measurement method was studied. The model for calculating the sound pressure field of focused ultrasonic vibration spherical shell with opening diameter of 60 mm was established. The sound pressure perpendicular to the axis in the focal plane of focused ultrasound was calculated theoretically. The influence of the different aperture of focused ultrasound spherical shell on the distribution of the sound pressure at the axis of sound pressure was analyzed. At the same time, the sound pressure level of focused ultrasonic spherical shell was simulated by COMSOL. Secondly, probe hydrophone measurement system was built to verify the distribution of sound pressure field of focused ultrasonic vibration spherical shell. The results show that the acoustic pressure of the main flap near the focal point increases with the increase of the opening radius of the focused ultrasonic vibrating spherical shell. When the opening radius increases, the focal spot become smaller, the sound pressure increases at the focal point, and the acoustic energy is more concentrated. The focused ultrasonic vibration spherical shell system has remarkable focusing characteristics. The acoustic focal length of focused ultrasound vibration spherical shell is more in line with the geometric focal length and the error is smaller than that of high intensity focused ultrasound. Numerical simulation is basically consistent with experimental measurement.

Key words: ultrasound focusing; focused sound field; sound pressure measurement; probe hydrophone

收稿日期:2019-02-20

基金项目:江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX18_2552)

作者简介:王中旺(1994-),男,江苏泰州人,硕士研究生,主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: maxwang_zw@126.com

通信联系人:李华,男,教授,硕士生导师。E-mail: Lihua@mail.usts.edu.cn

0 引言

高强度聚焦超声(HIFU)是一种新型的医学治疗技术,采用超声具有热效应可以对病人病灶进行定点治疗,超声能量汇聚于一点时会产生高温,可以让肿瘤凝固坏死^[1]。由于聚焦超声振动加工技术拥有功率大、阻抗低、结构简单等优点,现在已经广泛应用在制造等领域^[2-3]。超声振动球壳依据其本身的物理聚焦性能,从而将能量迅速聚集在焦点处,但是实际作用时会有其他因素形成焦域。聚焦超声振动球壳的焦距、焦域尺寸、声压、声强等都能够来描述其聚焦声场的性能。超声振动球壳的声压场能达到 MPa 级数,所以会造成声空化或者非线性效应的现象发生,从而影响声压场的实际测量^[4-5]。

查阅文献可知,超声振动球壳的声压场测量方法有声光衍射法、声光偏折效应成像法和光纤水听器法等方法^[6-7]。林成等人^[8]针对高强度聚焦超声的声场建立了有限元模型,并计算出了水中声压场的分布,但是未进行实际声场数据测量;于群等人^[9]针对聚焦声场的特性,利用近场测量法对聚焦换能器的聚焦区域进行了声压扫描测量,并结合理论计算的声功率和声强分布进行了误差分析;赵小策等人^[10]从声压分布入手,探测了聚焦超声换能器的温度场分布,通过搭建光纤水听器自动扫描系统,利用光纤水听器测量了材料焦斑区域的声场和温度的分布,研究了高强度聚焦超声对人体组织的影响;李伟东等人^[11]利用声光偏折效应,设计了一种测量球壳型换能器辐射聚焦声场焦点峰值声压的方法,通过测定聚焦声场焦域的最大光偏折量,获得了球壳型聚焦换能器的焦点峰值声压。

但是声光衍射法所使用的数学模型比较复杂,而且其光强的分布会被影响,在一般的实际测量声场中不太适用。此外,成像法是采用光折射的方法来对声压场定性测量。现在常用来检测超声的声压场的设备是光纤水听器,但是检测的时候需要把探头安放在介质中,从而影响检测精度和容易造成光纤探头的损伤^[12]。另外,国内外学者未曾考虑高强度聚焦超声装置的背面超声反射损伤。

本文在现有基础上,优化设计其反射端面,增加超声波的反射,从而增强其声场特性,采用探针式水听器来对其声压进行实际数据的测量。

1 聚焦超声振动球壳的聚焦原理

本研究设计的聚焦超声振动球壳装置系统如图 1 所示。

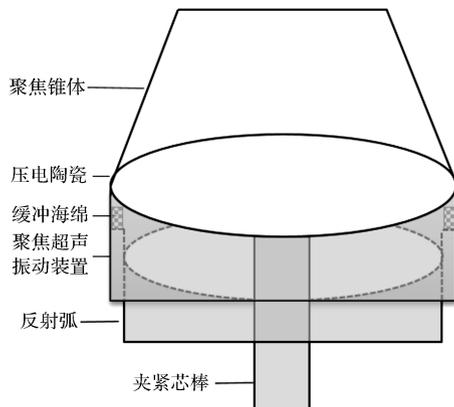


图 1 聚焦超声振动球壳装置系统

该系统是由 PZT 球壳厚度振动,球壳后端装配反射端进行反射超声波。根据超声振动理论和凹球面换能器的国内外研究,自聚焦超声换能器发生厚度振动将超声能量汇聚在前方狭小的区域(也就是声场焦域),其焦区深度的大小为:

$$F_e = 8.16\lambda \left(\frac{F}{D}\right)^2 \quad (1)$$

式中: λ —波长; F —焦距; D —自聚焦换能器的开口直径。

为了确定聚焦超声振动球壳系统的谐响应特性和球壳端面的振幅,本文利用 TH2826 型高频 LCR 数字电桥(20 Hz—5 MHz,10 mHz 步进 0.1%)和多普勒激光测振仪,对系统进行性能测试和工作参数优化。

2 聚焦超声振动球壳的声场研究

2.1 聚焦声压的计算模型

通常的超声聚焦装置往往是会产生圆柱型或者球型的波阵面,从而可以达到声压的聚焦和能量的区域化聚集。本文中聚焦超声振动球壳装置是轴对称的图形,同时其理论焦距远远大于波长,所以可以不考虑换能器的边缘衍射。

聚焦超声振动球壳的计算坐标示意图如图 2 所示。

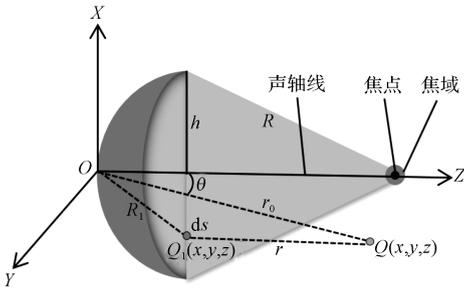


图2 聚焦超声振动球壳的计算坐标图

R —聚焦超声振动球壳的曲率半径; h —聚焦球壳的孔径半径; r_0 —坐标原点 O 到声场中点 $Q(x, y, z)$ 的距离; θ — r_0 与 Z 轴的夹角; r —面积元 ds 上点 $Q_1(x_1, y_1, z_1)$ 到 $Q(x, y, z)$ 的距离; R_1 —坐标原点到 Q_1 的距离

根据图2所示的计算坐标进行坐标变换,可以得到 $ds = R_1 dR_1 d\varphi$, 即^[13]:

$$p(r_0, \theta) = p_0 \int_0^{2\pi} \int_0^b q(R_1) \frac{e^{-jkr}}{r} R_1 dR_1 d\varphi$$

$$\uparrow$$

$$p_0 = if\rho u_0$$

$$r = [r_0^2 - 2r_0 R_1 \sqrt{1 - \frac{R_1^2}{4R^2} \sin^2 \theta \cos^2 \varphi} + R_1^2 (1 + \frac{r_0 \cos \theta}{R})]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: f —超声的频率; ρ —传播介质的密度; ds —辐射面元; R_1 —辐射面元 ds 到坐标原点 O 的距离; k —声波在介质中传播的波数($k = 2\pi f/c$, c —介质中的声速); u_0 —辐射面上振速的最大幅值; $q(R_1)$ —归一化系数。

聚焦超声振动球壳的声压场的焦平面声压分布服从贝塞尔函数,并且其辐射面作均匀振动,即 $q(R_1) = 1$ 。取 $z = R$ 的焦平面上声压分布为:

$$p(r) = p_0 \left(\frac{2\pi^2 h^2}{R\lambda} \right) \times \left[\frac{2J_1(khr/R)}{khr/R} \right] \quad (3)$$

式中: $J_1()$ —一阶贝塞尔函数。

本文研究的聚焦超声振动球壳装置的曲率半径 R 和声学焦距 f 是基本上相等的,也就是 $R = f$,说明在理论上聚焦超声振动球壳的几何焦距和声学焦距是基本上相同的。

根据惠更斯原理,可得换能器的声场声轴线方向的声压分布为:

$$p(z) = p_0 \left(\frac{2\pi^2 a^2}{R\lambda} \right) \text{sinc} \left[\frac{a^2}{2z\lambda} \left(\frac{z}{R} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

式中: $\text{sinc}x = \frac{\sin \pi x}{\pi x}$ 。

不同的聚焦超声振动球壳半径的声压轴处声压分布如图3所示。

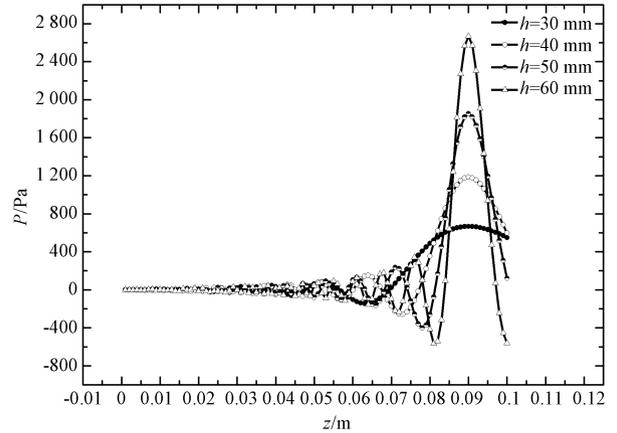


图3 不同聚焦超声振动球壳半径的声压轴处声压分布

从图3中可以看出:

随着聚焦超声振动球壳的开口孔径的半径增加,焦点附近主瓣的声压增加,横向的宽度减小,声能量比较集中;随着半径的增加,声压沿纵轴的分布处的声压变大,纵向的宽度变小,声能量比较集中。

根据公式推导,后经 Matlab 仿真得到结论:随着聚焦超声球壳的半径增大,其焦斑变小,焦点处的声压变大,声能量比较集中,聚焦效果比较好。

2.2 聚焦性能的仿真模拟

本文采用 COMSOL 软件来对聚焦超声振动球壳装置的声压级进行数值模拟。因为该装置是二维轴对称图形,以 Z 轴为对称轴建立模型。设置好完美匹配层,防止声波的反射对模拟的结果有影响,功效如吸声材料,其次促进声波在水域更好地传递。

聚焦超声振动球壳的直径是 60 mm,本研究通过设置边界参数来驱动压电陶瓷球壳发生振动,从而形成声压场,数值模拟出其声压场的声压级在 140 dB ~ 200 dB 之间。

3 实验测量系统设计及方法

3.1 焦域声压的测量系统

为了验证聚焦超声振动球壳装置的声场特性,本研究对其声场进行实际数据的测量。实验所使用的聚

聚焦超声振动球壳装置的曲率半径是 90 mm, 开口直径是 60 mm, 谐振频率是 1 MHz。

焦域声压的测量系统示意图如图 4 所示。

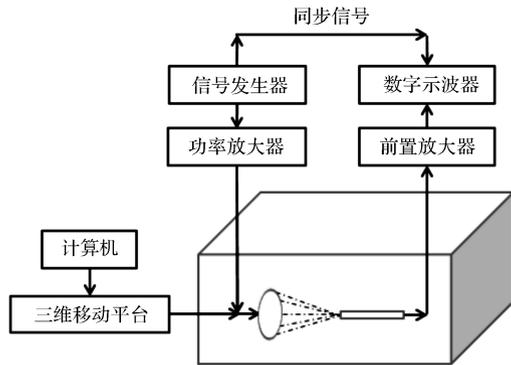


图 4 聚焦超声振动球壳其声压测量系统示意图

图 4 中, 系统主要由 3 部分组成: 聚焦超声发射装置、声场数据采集装置、三维精密移动平台。自聚焦超声发射装置由自聚焦换能器、信号发生器、功率放大器组成; 声场数据采集装置由探针式水听器、前置放大器、示波器组成。

笔者采用本研究自行设计的聚焦超声振动球壳装置, 用信号发生器和功率放大器产生激励信号作用装置。聚焦超声振动球壳装置固定在三维精密移动平台上, 通过电脑程序控制聚焦超声振动球壳的位置移动, 同时采用探针式水听器进行声压信号采集, 水听器接收到信号后传递至前置放大器, 并将系统解调的电压信号传送到示波器来作为声压测量信号。

进行聚焦超声振动球壳的声压场测量试验前, 首先本研究将探针式水听器固定在三维精密移动平台的一端, 信号发生器输出正弦信号至功率放大器后激励作用在聚焦超声振动球壳上。示波器检测激励信号的作用频率是 1.0 MHz、峰峰电压是 400 mVpp, 经过功率放大器增益至 39 dB; 随后根据水听器接受信号值的大小, 移动三维精密移动平台来调节聚焦超声振动球壳的几何尺寸中心轴和水听器同轴, 并将装置移至几何焦平面上。采集数据时要求聚焦超声振动球壳每移动一次位置, 就需要采集一次水听器的声压值, 最后把采集数据用计算机进行数值拟合, 从而生成声压场。

3.2 声场实验结果分析

聚焦超声振动球壳装置和高强度聚焦超声的实际声压轴声压分布比较如图 5 所示。

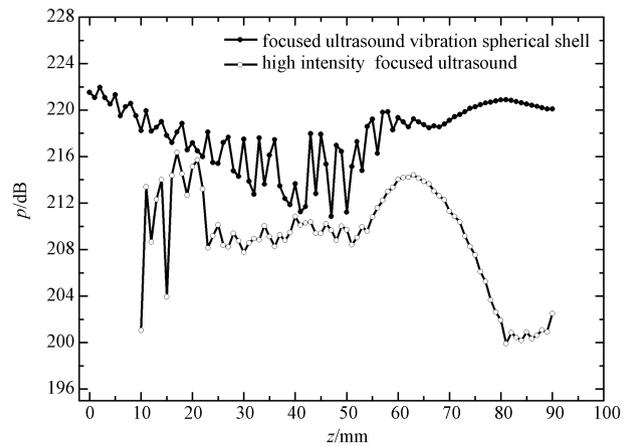


图 5 聚焦超声振动球壳装置和高强度聚焦超声的实际声压轴声压分布比较图

从图 5 中可以看出:

聚焦超声振动球壳装置的声压场比较吻合理论计算的一般规律, 声压场中声压的最大值出现在声压轴 80 mm 附近, 由于测量基准面是球壳开口端面, 也就是声焦距是 90 mm, 满足几何焦距 90 mm。并且在近场测量中显示焦点处的声压达到最大, 理论模拟和实际测量比较吻合。

实验结果表明: 新型聚焦超声振动球壳装置满足在声场中沿着声压轴方向上, 声束宽度比较小, 并且其旁瓣高度也适中, 验证聚焦超声振动球壳具有显著的聚焦特性以及其声压场是聚焦声场。

聚焦超声振动球壳装置的焦平面内垂直声压轴上的声压变化如图 6 所示。

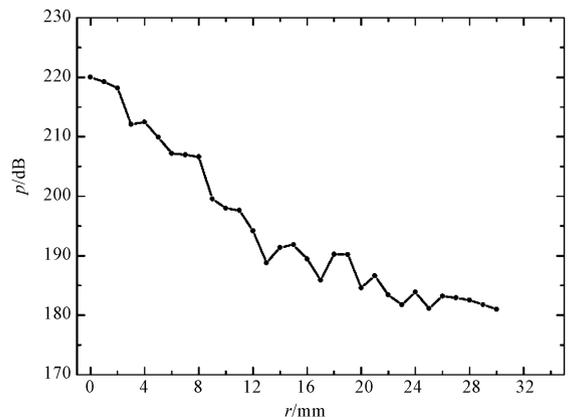


图 6 聚焦超声振动球壳装置焦平面内垂直声压轴上声压变化图

由图 6 知:

本文设计的聚焦超声振动球壳比以往的高强度聚焦超声的声焦距更符合几何焦距, 且误差较小; 聚焦超声振动球壳在焦点处的声压比高强度聚焦超声

更大,在近声压场中,聚焦超声振动球壳的声压均比高强度聚焦超声的声压要大,这是因为新型聚焦超声振动球壳装置后面增加了同曲率半径的反射曲面,增强超声波在声压场中的反射,减少超声波折射损失。

所以聚焦超声振动球壳装置更适用工程材料加工,因为优化其结构可以得到更大的声压场,从而声辐射力更大。

但是高强度聚焦超声的声束宽度更小,其旁瓣高度也较小,聚焦效果在相同频率和开口半径下更好。

4 结束语

本文根据超声理论优化设计出开口直径 60 mm 的新型聚焦超声振动球壳,对其声场进行了数值模拟,理论分析了聚焦超声球壳在同一频率下、不同半径时,声场在声压轴上的分布趋势以及其声场随不同开口半径的变化规律,发现了其几何焦距和声焦距的位置一致性;

本研究采用 Matlab 数值分析,得出随着开口半径的增加,其焦斑变小,声压在焦点处增大,声能量比较集中,聚焦超声振动球壳系统具有显著的聚焦特性;

本研究采用探针式水听器测量系统,实验验证了所设计的聚焦超声振动球壳比以往的高强度聚焦超声的声焦距更符合几何焦距,且误差较小;并且新型聚焦超声振动球壳在焦点处的声压更大,满足声场沿声压轴方向时声束宽度更大、旁瓣高度适中,符合聚焦效果。

参考文献 (References):

[1] 丁佳萍,张鞠成,王志康. HIFU 治疗系统焦域温度的检测

方法[J]. 中国医疗器械杂志,2015,39(2):118-121.

[2] 冯 若. 超声手册[M]. 南京:南京大学出版社,1999.

[3] 曹 洋,李 华,任 坤,等. 纵振驱动球面弯曲振动超声聚焦系统的聚焦特性[J]. 应用声学,2018,37(2):273-280.

[4] NEIGHBORS T H, MAYER W G, RUF H G, et al. Acousto-optic imaging of focused ultrasound pressure fields [J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 1995, 98 (3):1751-1756.

[5] BUTTERWORTH I, SHAW A. Realtime acousto-optical QA methods for high intensity fields[C]. Ultrasonic Industry Association Symposium, Cambridge: IEEE, 2010.

[6] 李武军,王晓颖. 声光 Naman-Nath 衍射特性的研究[J]. 大学物理,2009,28(9):25-27.

[7] PITTS T A, GREENLEAF J F. Three-dimensional optical measurement of instantaneous pressure [J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 2000, 108 (6):2873-2883.

[8] 林 成. 基于有限元的高强度聚焦超声声场的研究[J]. 科技与创新,2017(8):21-23.

[9] 于 群,王月兵,曹文旭等. 聚焦换能器声强和声功率测量方法研究[J]. 中国测试,2017,43(1):27-32.

[10] 赵小策. 光纤水听器测量聚焦换能器声压和温度分布 [J]. 北京化工大学学报:自然科学版,2016,43(5):84-88.

[11] 李伟东. 声光偏折效应球壳型换能器聚焦焦点峰值声压的测量[J]. 中国计量大学学报,2017,28(3):269-273.

[12] KOLB J. LOEBER A P. The study of a sound field by means of optical refraction effects [J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 1954, 26 (2):249-251.

[13] 张德俊. 高强度聚焦超声换能器 [J]. 中国超声诊断杂志,2000,1(2):1-4.

[编辑:程 浩]

本文引用格式:

王中旺,李 华,汪帮富,等. 聚焦超声振动球壳的声压数值仿真及测量研究[J]. 机电工程,2019,36(9):949-953.

WANG Zhong-wang, LI Hua, WANG Bang-fu, et al. Numerical simulation and measurement of acoustic pressure of focused ultrasonic vibration spherical shell [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(9):949-953.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>