热疗用聚焦超声换能器的研究

钱盛友[1,2]　邢达[2]　孙福成[3]　王鸿樟[3]

[1](湖南师范大学物理系　长沙 410081)
[2](华南师范大学激光生命所　广州 510631)
[3](上海交通大学生物医学工程系　上海 200030)

1999 年 4 月 21 日收到

摘要　本文通过数值计算及实际测量，研究了凹球面声透镜聚焦换能器及凹球面自聚焦换能器产生的声场，证实此两种聚焦方式均可获得理想的聚焦效果，但自聚焦方式更适合高强度聚焦超声 (HIFU) 加热治疗.

关键词　热疗，换能器，聚焦超声，声场

Study of focused ultrasonic transducers for hyperthermia

Qian Shengyou[1,2]　Xing Da[2]　Sun Fucheng[3]　Wang Hongzhang[3]

[1](*Department of Physics, Hunan Normal University, Changsha 410081*)
[2](*Institute of Laser Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631*)
[3](*Department of BME, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030*)

Abstract　Sound fields generated by transducers with concave spherical acoustic lens and by transducers with concave spherical piezo-electric ceramic are studied through numerical calculations and experiments in this paper. The results indicate: focusing effect can be obtained in either case, but the latter transducer is more adaptable for high intensity focused ultrasound(HIFU) therapy.

Key words　Hyperthermia, Transducer, Focused ultrasound, Sound field

1　引言

早在四十年代，Fry 就提出用聚焦超声进行外科手术。这一观点，受到了医学界及工程技术界的共同关注 [1]。至八十年代，高强度聚焦超声 (HIFU) 已被当作一种具有巨大潜力的、无损的、有效的肿瘤治疗手段加以研究 [2,3]。大量的动物组织烧伤实验及临床试验，使高强度聚焦超声加热治疗成为超声热疗研究中的热点。由于声聚焦可使组织温度在短时间内升至 70 ℃以上，而高温情况下正常组织和病变组织受损伤的差异消失，因而超声的聚焦效果是该技术用于临床的关键。将活塞声源加上声透镜和将压电陶瓷磨成凹面，是常用的两种聚焦方式。本文研究了凹球面声透镜聚焦换能器及凹球面自聚焦换能器产生的声场，分析了透镜材

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.ne

料及媒质特性对聚焦的影响，并对这两种换能器的聚焦效果进行了比较。

2 理论

2.1 凹球面声透镜聚焦场

平面声波经凹球面声透镜后，在空间产生的声场较复杂。为描述 HIFU 治疗中最关心的声焦点附近的声场分布，我们假定：声波经透镜后，传播方向偏移甚小；入射到紧靠透镜垂直于声轴的圆面上时，声束宽度不变。

如图 1 示，将圆面 σ 当做一类似活塞源的新振源，由 Hugen's 原理，则空间各点的声压可看做此圆面上各点产生的声波叠加的结果。与活塞源不同的是 [4]：声波到达 σ 面上时，因衰减及声程差异，幅度及相位均经过了调制，即 σ 面上各点的振动幅度、相位不同。

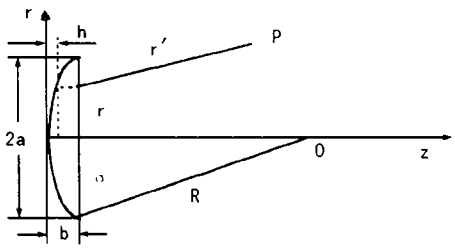

图 1 声透镜聚焦场

忽略声波在透镜表面的反射及折射造成的能量损失，则 σ 面上各点的振速幅值可表示为

$$u_\sigma = u_0 e^{-\alpha_0 h - \alpha(b-h)} \tag{1}$$

式中：u_0 为透镜平的一面的振速幅值，α_0、α 分别为透镜及媒质的衰减系数。相位调节项为

$$e^{-j\varphi} = e^{-jkb} \cdot e^{-j(k_0-k)h} \tag{2}$$

式中：k_0、k 分别为透镜及媒质中的波数。

据此，空间任一点 P 处的声压可表示为

$$p = j\rho f \int\int \frac{u_\sigma e^{-jkr'} \cdot e^{-j\varphi}}{r'} ds \tag{3}$$

2.2 凹球面自聚焦声场

假定凹面上各点均沿法向振动，振速幅值均为 u_0，且相位相同。由瑞利积分，凹面上任意微元 ds 在距其距离为 r' 的场点产生的声压为 [5]

$$dp = j\rho f u_0 \frac{e^{-jk_c r'}}{r'} ds \tag{4}$$

式中：ρ 为媒质密度，f 为超声频率；$k_c = -j\alpha + 2\pi f/c$，$c$ 为媒质的声速。要得到该点的总声压，则需对整个凹面求积分。

3 计算结果

3.1 透镜材料对聚焦的影响

在相同的几何焦距、透镜孔径条件下，对聚苯乙烯、有机玻璃、铝等三种材料制成的凹球面声透镜在水中形成的聚焦场进行了研究。聚苯乙烯、有机玻璃、铝等三种材料的声速分别为 2340、2720、6260m/s，衰减系数分别为 2.5、2.0、0.018dB/cm.MHz；水的声速为 1500m/s，衰减系数为 0.0022dB/cm.MHz。计算时，假定 u_0 为 1.0m/s(以下均同)，取透镜几何焦距为 3.5cm，半孔径为 1.0cm，超声频率为 1.0MHz，计算结果如表 1。

表 1 透镜材料对聚焦的影响

材料	声焦距 (cm)	焦点声压幅值 ($\times 10^6$pa)	轴向 3dB 宽 (cm)	侧向 3dB 宽 (cm)
聚苯乙烯	2.78	12.83	1.66	0.20
有机玻璃	2.83	11.40	1.87	0.20
铝	3.20	10.89	2.10	0.21

由材料参数可知，聚苯乙烯声速最小，铝的声速最大，有机玻璃居中；三者衰减系数的大小顺序刚好与此相反。由于透镜较薄，透镜材料的衰减作用很小。分析计算结果可以发现：透镜材料的声速越大，声焦距越大；焦点处声压幅值减小；轴向 3dB 宽度增大，但侧向 3dB 宽度几乎不变。三种声透镜在焦点以内的近场轴向起伏情况不同。与焦点声压幅值的大小顺序相反，铝透镜的近场声压幅值最大，聚苯乙烯透镜近场声压幅值最小。虽然铝透镜耐高温

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

性能很好，但从 HIFU 治疗角度来看，其聚焦性能并不理想。

3.2 媒质特性对聚焦的影响

声场分布与媒质特性有关。不考虑媒质衰减的情况下，对水中几何焦距为 3.5cm 、半孔径为 1.0cm 、超声频率为 1.0MHz 的有机玻璃透镜聚焦换能器及凹球面自聚焦换能器在变压器油、水及甘油中产生的声场进行了计算。透镜凹面的深度为 0.36cm ，变压器油和甘油的声速分别为 1425m/s 和 1880m/s ，计算结果如表 2 。

表 2 媒质特性对聚焦的影响

媒质	聚焦方式	声焦距 (cm)	焦点声压幅值与密度之比	轴向 3dB 宽 (cm)	侧向 3dB 宽 (cm)
变压器油	声透镜	2.76	12.34	1.69	0.20
	自聚焦	2.86	10.22	2.08	0.23
水	声透镜	2.83	11.92	1.87	0.21
	自聚焦	2.81	10.33	2.11	0.24
甘油	声透镜	3.24	9.64	2.96	0.31
	自聚焦	2.59	10.85	2.24	0.28

上述三种媒质的声速由小到大依次为：变压器油、水、甘油。由表可知：媒质声速越大，两种聚焦方式对应的轴向及侧向 3dB 宽度均增大，即焦斑增大。媒质声速增大时，声透镜聚焦方式的声焦距及焦点声压幅值与媒质密度之比减小，而自聚焦方式刚好相反，且声透镜聚焦时焦点声压幅值与媒质密度之比随声速变化更明显。换言之，媒质密度相同时，声透镜聚焦方式和自聚焦方式对应的最大声压随媒质声速变化的规律不同。由于计算时，两种聚焦方式对应的声源辐射功率不同，不便对其最大声压进行比较。声透镜聚焦时，焦点声压幅值不仅与媒质声速有关，还与媒质密度及透镜材料声速有关。同一透镜用于治疗不同生物组织时，其聚焦场特性不同。

3.3 两种聚焦方式的比较

假定超声频率为 1.0MHz ，透镜材料为有机玻璃，计算得到的凹球面声透镜聚焦和凹球面自聚焦声场的主要特征如表 3 。

表 3 声透镜聚焦与自聚焦的比较

聚焦方式	几何焦距 (cm)	换能器半径 (cm)	近场起伏次数	声焦距 (cm)	轴向 3dB 宽 (cm)	侧向 3dB 宽 (cm)
透镜	3.5	1.0	7	2.83	1.87	0.21
	7.0	2.0	8	6.38	2.4	0.24
自聚焦	3.5	1.0	5	2.81	2.11	0.24
	7.0	2.0	6	6.53	2.84	0.26

由上表可见：在相同的几何焦距及换能器孔径前提下，两种聚焦方式的声焦距非常相近；与想象中的结果相反，声透镜聚焦方式对应的焦斑更小；两种聚焦方式的声场沿轴向及声焦点处侧向分布的特征类似，但声透镜聚焦方式的近场区起伏更大。

4 测量结果

用自制的水听器实测了中心频率为

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.ne

1.056MHz 、几何焦距为 3.5cm 、半孔径为 1.5cm 的凹球面有机玻璃声透镜聚焦换能器及凹球面自聚焦换能器在水中产生的声场，结果如下。

表 4　两种换能器的主要聚焦特征的理论值与测量值

换能器	声焦距 (cm)		轴向 3dB 宽 (cm)		侧向 3dB 宽 (cm)		声焦点检测
	理论值	测量值	理论值	测量值	理论值	测量值	信号峰值 (V)
凹球面	3.30	3.23	1.24	1.35	0.16	0.16	2.30
声透镜	3.28	3.20	0.80	1.02	0.10	0.14	0.76

实测时，换能器以脉冲簇方式辐射；计算结果为单频声场。测量表明：当换能器每次发射的脉冲簇包含的完整正弦波数足够多、脉冲持续时间足够长时，声场的特征与连续波情况相同。凹球面自聚焦换能器和凹球面有机玻璃透镜聚焦换能器的声场特征非常接近，两者实测的声焦距几乎相同。有意思的是：用有机玻璃透镜聚焦时，测得的焦斑更小一些。这些结果与理论分析均一致。实验还发现：两换能器的激励电压均为 10V，但声焦点检测到的信号峰值相差很大，其中凹球面自聚焦换能器的辐射效率更高。

5　结论

通过数值计算及实际测量，我们发现凹球面声透镜聚焦换能器与凹球面自聚焦换能器的聚焦效果非常接近。虽然声透镜可使焦斑聚得很小，且加工也较易，但很难找到一种能兼顾到耐高温性能、阻抗匹配、衰减等因素的材料。高强度超声聚焦时，由于透镜本身的声吸收产生的高温，会使透镜变形。此外，声透镜的聚焦效果不仅与媒质有关，还与透镜材料有关；近场起伏更突出；界面反射及声透镜衰减会造成能量损失。基于上述原因，高强度聚焦超声加热治疗时选用自聚焦方式更合适。

参　考　文　献

1　程树群，周信达. 国外医学肿瘤学分册，1994.**21**(2): 74–77.

2　Yang R, Griffith S L, Rescorla F J. *J. Ultrasound in Med.*, 1992. (11): S37–43.

3　Vallancien G, Harouni M. *J. Endourol.*, 1992. (6): 173– 181.

4　高健波，张福成. 声学学报，1988. **13**(5): 369–375.

5　O'neil H T. *J.Acoust.Soc.Am.*, 1949. **21**: 516–526.

敬告作者

作为中国科技论文统计源之一的本刊，应邀于 2000 年开始加入中国科学技术信息研究所“万方数据资源系统 (ChinaInfo) 数字化期刊群”，因此凡在本刊发表的文章，将由编辑部统一纳入万方数据资源系统 (ChinaInfo)，进入因特网 (网址： http://www.chinainfo.gov.cn/periodical)。

本刊 E-mail: yysx@sina.com

特此告知。

(本刊启)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.ne