

开口凹球面聚焦声场分析

周 刚, 寿文德, 夏荣民

(上海交通大学生物医学工程系, 上海 200030)

摘 要: 高强度聚焦超声(HIFU)治疗局部肿瘤存在聚焦换能器和定位探头同时放置的问题, 考虑到实际工程中必须考虑 B 超探头的放置对聚焦声场的影响, 文章就此进行了研究。结果表明: 开口的凹球面会降低焦区声压幅度。随着开孔半径的变大, 焦区声压呈下降的趋势, 焦区越长, 越不利于聚焦; 随着开孔位置距轴线的距离变大, 焦区声压呈下降的趋势, 而焦区的位置变化不大。文章同时对相应的温度场也进行了相关的分析。

关键词: 高强度聚焦超声; 聚焦; 声场

中图分类号: TB559

文献标识码: A

Study of focused ultrasonic field of concave spherical transducer with a hole

ZHOU Gang, SHOU Wen-de, XIA Rong-min

(Department of Biomedical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In local cancer therapy with high intensity focused ultrasound (HIFU), there exists the problem of simultaneous positioning of the focusing transducer and the positioning probe in a B-scanner. The effect of a hole on the surface of the concave focusing transducer on the focal region in ultrasonic fields is studied. The result shows that the hole reduces the amplitude of acoustic pressure in the focal region. The larger the hole radius, the lower the acoustic pressure, and the longer the focal length. This is a disadvantage in focusing. Acoustical pressure decreases in the off axis region, while the focal region does not change substantially. The effect of the hole on the temperature field is also investigated.

Key words: high intensity focused ultrasound; focus; acoustic fields

高强度聚焦超声(HIFU)治疗局部肿瘤是近几年发展起来的局部高温治疗肿瘤的新技术, 它已成为治癌研究的新热点^[1-3], 它可将高功率的超声聚焦于肿瘤组织上, 在短时间内使瘤体内温度急剧升高, 达到破坏瘤组织的目的。目前, HIFU 的聚焦方式中有相控阵聚焦方式、声透镜聚焦方式、凹球面聚焦方式等, 不管采用哪一种方式, 都必须解决聚焦焦点的定位问题, 而 B 超定位是一种可行的方案。在我们研制的 HIFU 治疗系统中采用了 B 超定位的方案, 使用 B 超定位, 就必须解决 B 超探头的放置问题, 即如何在 HIFU 的聚焦探头中开孔来放置 B 超探头。开孔的大小、开孔的位置对聚焦声场有什么影响, 对焦区组织的温度分布有什么影响? 这关系到聚焦换能器的最优化设计问题, 关系到治疗的效果, 因此有必要进行专门的分析。本文研究了凹球面聚焦系统, 分析了开孔对焦区的位置、声压的幅

度以及温度的焦点和温升幅度的影响。

1 理论前提

对于高强度聚焦超声系统, 必然存在非线性现象。因此理论分析应采用非线性方程, 但根据前人对未开口的凹球面聚焦实验结果^[4], 该系统在小幅度声压源的情况下可采用线性的积分来研究。对开口的换能器而言, 它比未开口的多了一个内边界, 故边界条件比较复杂, 那能否还采用线性的积分来研究呢? 进行此问题的研究前, 有必要研究一下我们理论的正确性。因此我们测量了一个开口较大凹球面聚焦的换能器。该换能器的尺寸为: 换能器的缝宽 $a = 0.04\text{m}$, 压电晶片的曲率半径 $R = 0.066\text{m}$, 开孔的半径是 $r_0 = 0.015\text{m}$ 。图 1(a) 中离散的点元是当超声波频率为 1.5MHz 时的实验值, 而实线是采用抛物线近似计算的理论值。可以看出, 在开孔较大的情况下, 在焦点处理论和实验结果符合得仍很好。因此在下面的分析中我们将采用线性的积分来进行数值分析。

收稿日期: 2001-08-01; 修回日期: 2002-06-14

基金项目: 论文的课题由国家自然科学基金资助(39970209)

作者简介: 周刚(1977-), 男, 江西人, 硕士研究生, 研究方向: 医用超声声输出检测及新型水听器校准系统。

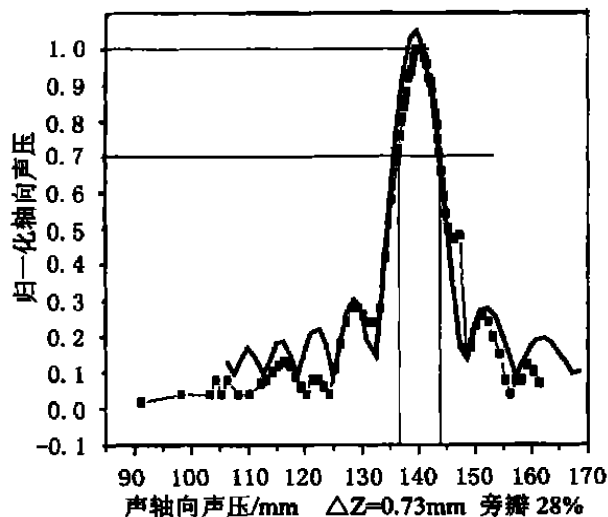


图 1(a) 声轴上的声压分布

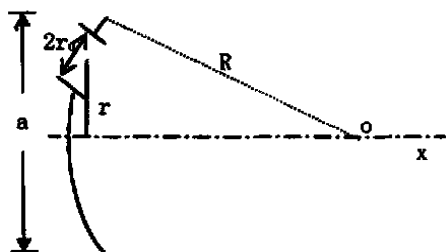
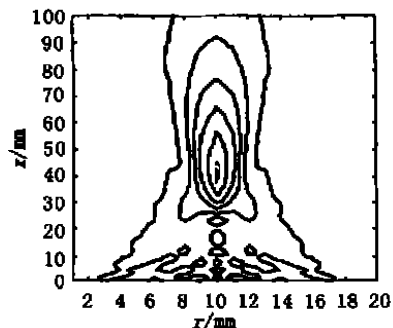


图 1(b) 凹球面过球心的截面示意图

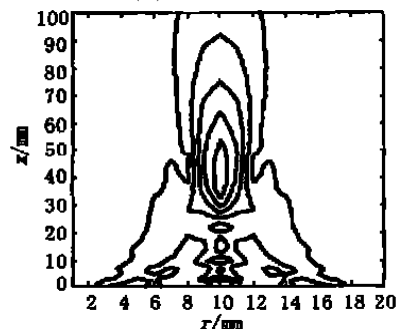
2 对声场的影响

凹球面的沿着过球心的截面示意图如图 1(b) 所示。在球面上开了一个半径为 r_0 的小孔, 以放置 B 超探头, 孔中心距声轴轴线的距离为 r 换能器的参数为: 换能器的缝宽是 $a = 0.02\text{m}$, 压电晶片的曲率半径为 $R = 0.06\text{m}$, 超声频率 f 为 1.0MHz ; 媒质假设为软组织, 其声特性为: 声速 1500m/s , 衰减系数 $0.8\text{dB/cm} \cdot \text{MHz}$ 。图 2 是孔心在轴线上, 开孔半径分别是: 没有开孔、 $r_0 = 2\text{mm}$ 以及 $r_0 = 6\text{mm}$ 的等值线图。

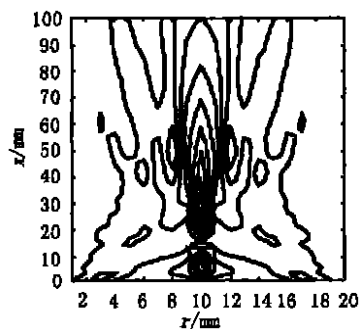
图 2(d) 是焦点的声压幅度随开孔半径的变化情况。从图中可以看出: 随着开孔半径的增大, 焦点向换能器方向移动, 焦区的声压在不断地减小(这一点可以从图 2(d) 看出); 另外开孔半径的增大会使得旁瓣增多, 不利于能量的聚焦。这些变化可以这样认为: 凹球面换能器聚焦声场可以看成两部分, 近轴区域和离轴区域, 其中近轴区域的声场波阵面接近于球面波; 而离轴区域的声场由于换能器的边缘效应, 能量向外扩散, 这部分的声场波阵面更接近于喇叭形。因此这两部分的焦点位置必定有所差异。



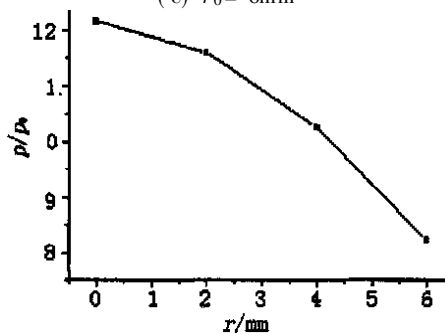
(a) $r_0 = 0\text{mm}$



(b) $r_0 = 2\text{mm}$



(c) $r_0 = 6\text{mm}$



(d) 焦点的声压幅度随开孔半径的变化曲线

图 2 开孔孔径改变后声场的等值图

(r 是孔心距轴线的距离, r_0 是开孔的半径, x 是轴线方向)
注: 考虑到等值图上加注影响图形, 所以采用文字说明。(a) 图的 3 个参数: 内圈声压为 $12P_0$ (P_0 是声源处的声压), 最外圈为 $2P_0$, 每圈相差 $2P_0$; 对(b) 图分别为 $10P_0$ 、 $2P_0$ 、 $2P_0$; 而对(c) 图, 分别为 $7P_0$ 、 P_0 、 P_0 。

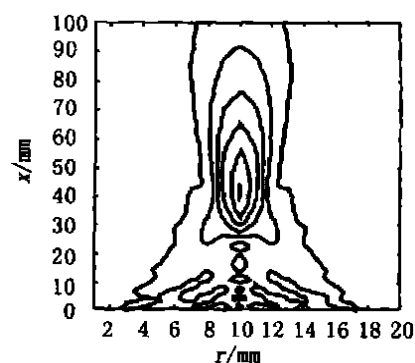
而实际焦点是由这两部分共同决定的, 所以开口半径的变化必然影响到焦点的位置。而在中心开口以后, 对于换能器来讲, 不再是只有一个外边界, 而且有一个内边界, 这样会使得换能器在边界处的衍射变大, 开口越大, 衍射现象越强, 旁瓣就会增多。比较图 2(a)、2(b), 可以看出它们只是在近场有所不同, 在焦区和远场基本相同, 尤其是在远场。因此可以得出: 对凹球面聚焦, 在球冠的中心开孔是可行的, 但开孔过大会使得焦深变浅, 焦区变长, 同时旁瓣增多, 不利于聚焦; 适当的孔径对焦区的大小、外型影响都可以接受, 只是声压的幅度会有所下降。在开孔大小较合适的情况下, 开孔的位置与焦区的声压又有怎样的影响呢? 这可以从图 3 中看出。图 3 研究了小孔半径为 2mm 时, 开孔的位置变化对声场的影响。图 3(a)~图 3(c) 非常清楚的表明: 开孔偏离中心后, 声场变得不对称了, 偏得越大, 越不对称。这一点也非常好理解。但观察焦区的情况, 开孔的位置变化对聚焦区域的形状变化不大, 只是声压幅度有所变化。因为对于一个球冠而言, 不管它上面是否有开口, 其圆点还是在同一点。根据叠加原理, 开口换能器的聚焦声场应该是由没有开口的换能器聚焦区域减去开口部分聚焦声场(当然应该是矢量相减), 因为开口部分也是一个球冠, 它的聚焦区域就应该与没有开口的换能器相似, 因此根据叠加原理, 在开口较小的情况下, 开口对聚焦区域的形状变化不大, 但声压幅度会有所下降, 如图 3(d) 所示。

3 对温度场的影响

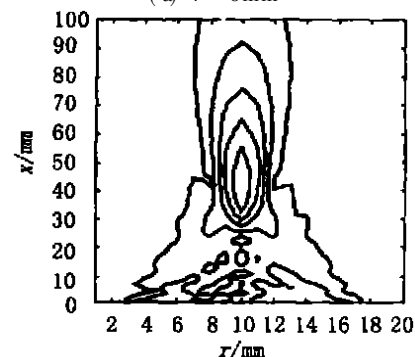
高强度聚焦超声对组织的治疗效果包括线性和非线性效应, 其中以线性效应为主。线性效应就是热效应, 即在短时间内, 使瘤体内温度急剧升高, 达到破坏瘤组织的目的。在上述声场分布的情况下, 组织中温度分布是怎样的呢? 怎样开孔效果最好? 为描述超声加热与组织内的热量产生和传递, 可采用生物热传导方程^[5]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T + q_p + q_m - \omega_b C_b (T - T_a) \quad (1)$$

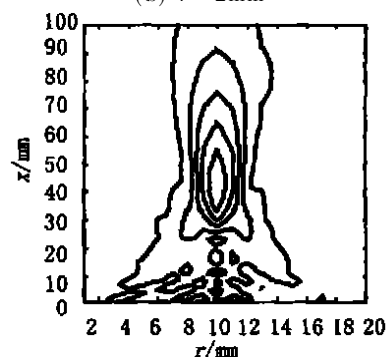
式中: T_a 是进入被加热区的血液温度; ω_b 是单位体积内组织的血液质量流动率; C_b 是血液的比热; T 、 ρ 、 C 和 κ 分别是温度、组织的密度、比热和导热系数; $q_p = 2\alpha I$ 是吸热率, 其中 I 是声强度, $\alpha = \alpha f^b$ 是组织的吸收系数, a 和 b 是组织中测定的常数, f 是频率; q_m 是由于新陈代谢在单位体积组织



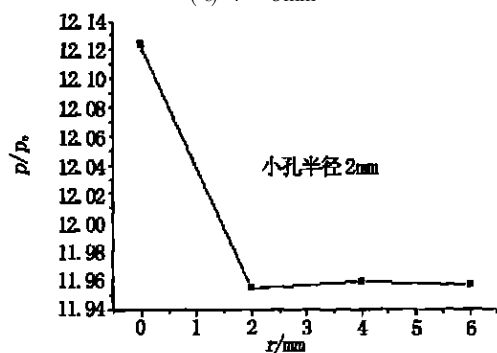
(a) $r = 0\text{mm}$



(b) $r = 2\text{mm}$



(c) $r = 6\text{mm}$

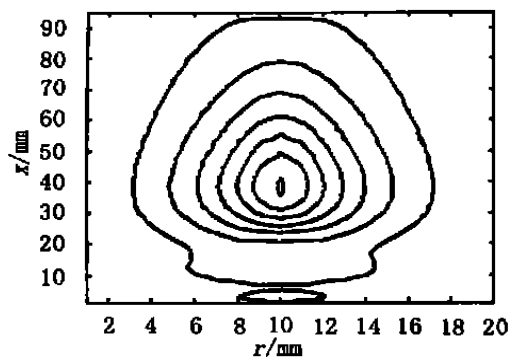


(d) 焦点的声压幅度随孔心位置的变化曲线

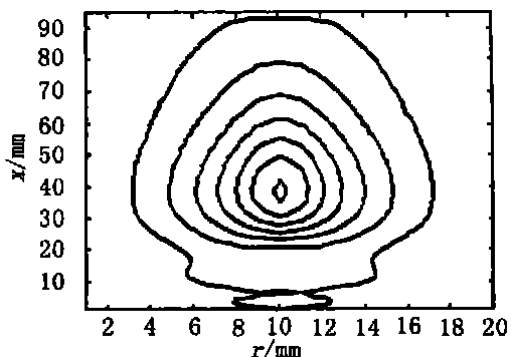
图 3 开孔的位置改变对声场的等值图

(开孔的半径为 2mm, r 是孔心的位置, x 是轴线方向)

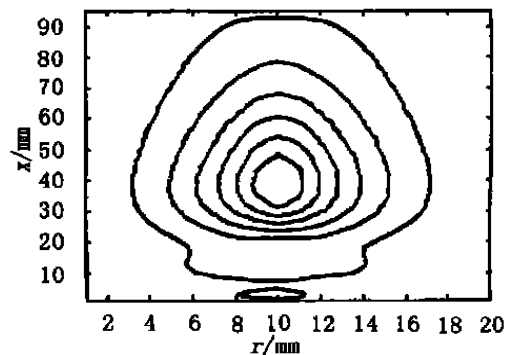
注: 图(a)的最内圈声压 $12P_0$, 最外圈为 $2P_0$, 每圈相差 $2P_0$, 图(b)与图(c)的分别为 $10P_0$, $2P_0$, $2P_0$ 。



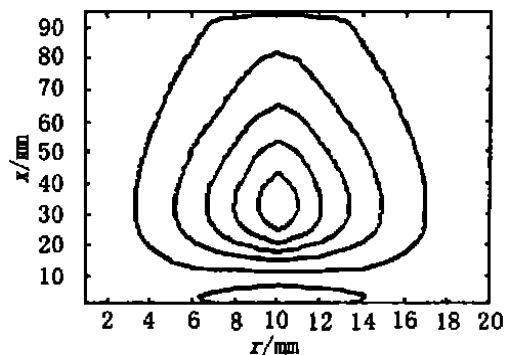
(a)



(a)



(b)



(b)

图 4 开孔半径为 2mm, 孔心距轴线的距离分别为 0mm、6mm 时焦区附近的温度分布图

(注: 最外圈温度都是 45℃, 每圈相差 5℃, (a) 图的内圈温度为 75℃, (b) 图的内圈是 70℃)

图 5 孔心在轴线上, 开孔半径分别为 0mm、6mm 时焦区附近的温度分布图

(注: 最外圈温度都是 45 度, 每圈相差 5 度, (a) 图的内圈温度为 75 度, (b) 图的内圈温度是 65 度)

中每秒产生的能量, 可表示为 $q_m = q_0 (1.1)^{T - T_0}$ 。计算中所用到的参数值, 我们设定为 $\rho = 1.050 \text{ g/cm}^3$; $C = 3.770 \text{ J/(g}^\circ\text{C)}$; $\omega_b = 7.0 \text{ g/(cm}^3\text{s)}$; $C_b = 3.770 \text{ J/(g}^\circ\text{C)}$; $K = 5 \text{ mw/(cm}^\circ\text{C)}$; $\alpha = 0.17 \text{ Np/cm}^\circ\text{MHz}$ 。将这些参数值代入式(1)可算出温度场的分布。图 4 给出了开孔半径为 2mm, 孔心距轴线的距离分别为 0mm、6mm 时焦区附近的温度分布图。在图 5 中我们作出了孔心在轴线上, 开孔半径分别为 0mm、6mm 时焦区附近温度分布的数值模拟结果。开孔变大时, 对温度场的影响是使得焦点前移, 焦斑扩散。开孔的位置变化会降低温升, 并使温升的焦点偏离轴线。

参考文献:

- [1] 王智彪, 伍烽, 王芷龙, 杜永洪, 刘川, 白晋, 陈迅, 赵卫华, 叶方伟, 刘渝根, 张哲. 聚焦声束超声对猴胎儿定位损伤及再孕的研究[J]. 中国超声医学杂志, 1999, 15(4): 241-243.
- [2] 杨悦, 孙福成, 萧翔麟, 钱盛友. 腔内高强度聚焦超声肿瘤治疗的实验研究[J]. 声学技术, 1999, 18(2): 70-73.
- [3] 伍烽, 陈文直, 白晋, 刘长安, 罗亿治, 邹建中, 徐昆, 朱辉, 王芷龙, 王智彪. 高强度聚焦超声治疗原发性肝癌的初步临床研究[J]. 中国超声影像学杂志, 1999, 8(4): 213-216.
- [4] 寿文德, 钱德初, 王一抗等. 聚焦超声的辐射力计算与高强度聚焦超声功率测量实验[J]. 声学技术, 1998, 17(4): 145-147.
- [5] 王鸿樟, 丁纛, 范华, 于洪斌. 治癌中超声加热引起的人体内温度场模拟[J]. 上海交通大学学报, 1995, 29(2): 119-125.

简 讯 中国声学学会功率超声分会关于召开2003年全国功率超声会议的通知

经分会研究决定, 在今年下半年召开“2003 年全国功率超声学术会议暨功率超声分会全体委员会议”。

学术会议主要进行学术交流。会议主题为回顾两年来国内外功率超声研究动态; 展望功率超声在可预见将来的发展趋势; 探讨中国加入 WTO 后国内功率超声业面临的机遇和挑战。

功率超声分会全体委员会议的主要议题为: 1. 上届委员会的工作总结; 2. 通报功率超声有关标准的制订情况; 3. 修订团体会员章程; 4. 分会的活动计划。

会议日期初步定在 2003 年 9 月或 11 月, 会期 3 天, 会议地点在厦门市。

为给企业提供一个交流窗口, 会议拟开辟展位, 供有关企业、厂家展出自己的产品和技术(适当收取费用), 欢迎各企业、厂家参展。

中国声学学会功率超声分会