



医学超声中的超声空化

冯若 宁新宝 李化茂

(南京大学信息物理系) (吉安师专物理系)

1989年10月19日收到

本文全面地介绍了医学超声与超声空化的关系,综述了医学超声各个应用领域中有关超声空化的最新研究进展,讨论了超声空化在医学超声中的作用及研究超声空化对发展医学超声的重要意义。

一、前言

频率大于 20 000Hz 的声波称为超声波。超声波因其波长短、束射性强而便于控制。超声波具有波动与能量二重属性。在医学超声中,超声波的波动属性被用来作为探查与负载诊断信息的载体,从而形成了超声诊断;超声波的能量属性可被用于作用或影响人体组织、产生生物效应、以达到一定的医疗目的,这便是超声医疗。超声诊断和超声医疗组成了现代超声医学的内容^[1]。

医学超声的应用是多分面的,迄今,至少在实验室研究中已经证明,在这些应用中的大多数都与超声空化有关。因此,近年来在医学超声基础研究中,有关医学超声空化的研究十分活跃^[2]。

超声空化是指,在超声场中,液体中微小气核(常称为空化核)的生长,振荡及崩溃等一系列动力学过程。一般液体中都含有微小气核,它们或以气泡形式悬浮在液体中,或附着在固体悬浮粒子及界面表面上。这些小气核对超声作用的响应可能是十分激烈的,也可能是较为缓和的,这取决于声场情况及其他一系列条件,相应的则分为瞬态空化与稳态空化。稳定空化是指气泡在平衡尺寸附近的振荡可持续几个周期,而且常常表现出非线性特点;而瞬态空化只在一个声波周期内发生与完成,当声强足够大

时,在声压变化为负半周时,液体受到较大拉力,则气核迅速膨胀,可扩大到原来尺寸的数倍,而在进入随之而来的声压正半周时,气泡迅速收缩至猛烈爆炸,解裂成许多小气泡,构成新的空化核。在气泡迅速收缩时,气泡内的气体或蒸汽被压缩、导致温度急剧增高,可达 5500℃ 类似于太阳表面的高温,造成局部《热点》。由于热点范围极小,热量将以 10^9℃/sec 的速率向周围扩散^[3]。瞬态空化在气泡崩溃一瞬间,会伴有自由基、发光、射流、冲击波及声发射等一系列激烈的物理、化学现象发生、对周围媒质产生严重的破坏作用。相比之下,稳态空化过程一般较为缓和,但当气泡增长到使共振半径为平衡半径整数倍时,振荡幅度显著增大^[4],也会伴有较强的声流,自由基及发光等激烈过程发生^[5],对周围媒质造成损伤。事实上,在声场作用下,稳态空化气泡也可能通过定向扩散增长向瞬态空化过渡^[6],所以有时要严格区分稳态空化与瞬态空化是比较困难的。

二、医学超声中的超声空化

1. 超声诊断 超声诊断是医学超声应用最多的领域。诊断超声频率为几兆赫量级;一般使用短脉冲超声波,如在 B 超成像中使用的超声脉冲宽度只包含 1—2 个周期,而为获得多普勒信息的超声脉冲略长些;时间平均声强小于 100mw/cm^2 ,但其负声压峰值却可大到 20—

30 个大气压。

Flynn H. G.^[7] 及 Apfel R. E.^[8] 相继从理论上证明, 诊断超声级的短脉冲可在含气核液体中诱发瞬态空化。这一理论预言最近已在一系列水溶液的实验室研究中得到了证实^[9-11]。但是, 对于活体哺乳动物组织中是否存在有空化核的问题似乎还没有足够的资料做出肯定结论。尽管有文献^[4]说“哺乳动物组织内存在空化核, 甚至在胎儿内也是如此”, 但至今尚无实验证明诊断超声在活体组织中可引起空化, 这或许意味着这些空化核数目太少, 或尺寸太小。对这一问题的进一步研究是目前产科超声剂量学十分感兴趣的问题^[12]。

2. 超声理疗 大量实验研究与临床应用都已证明, 应用连续或长脉冲超声波作用于人体病变部位可获得医疗效果^[13]。理疗超声频率多为 800 KHz; 使用脉冲波时, 脉冲宽度为 1ms 量级; 时间平均声强为 $1\text{w}/\text{cm}^2$ 量级, 在这样强度下, 声压峰值明显低于诊断超声, 约为 1 个大气压。超声理疗效果大部可用热效应来解释, 但近年研究表明, 似乎若干情况下不能用热效应来解释^[14-15], 而且 ter Haar G.^[16] 已证明, 治疗级超声可以在活体哺乳动物组织中激活气泡, 这就为治疗超声可能在人体组织内产生空化给与了有力的支持。

3. 超声外科 即用超声刀发射的超声能量代替通常的手术刀来切割人体病变组织进行临床外科治疗。超声刀主要由磁致伸缩或电致伸缩换能器及变辐杆聚能器组成, 聚能器端部如元珠笔尖大小, 取楔形或微锯齿形, 视不同应用而定。超声刀已广泛应用于脑外科、骨外科、眼外科、矫形外科等, 并在摘除肿瘤、息肉等病变组织的手术中得到成功应用。超声外科多用 20—40 KHz 的连续超声波, 声强为几 w/cm^2 到十几 w/cm^2 。据报导, 超声刀切割软组织比常规手术刀省力 3—5 倍, 而功效却提高 8—10 倍; 在切割骨质组织时, 切割速度可提高数十倍, 而且手术质量高、恢复时间短^[17]。在牙科中利用超声振动能清除牙垢及其他沉积物, 国外亦广为应用。有关研究证明, 这类仪器产生

的超声波可导致气泡强烈振荡, 从而产生自由基及自由基辐射重组时发射出荧光^[17]。但据信, 在手术中起主要作用的是与气泡振荡相联系的声流及《锉刀》(file) 作用。超声刀在工作时, 要不断地向其端部喷射水流, 除冲洗、冷却作用之外, 还可以提供水中空化的条件, 以增加切割速度。尽管目前对这类仪器声空化机理的细节的了解还很不充分, 但声空化却被认为是其成功应用的首要原因。

4. 体外冲击波碎石 80 年代初 Chaussy 教授研制成功体外冲击波碎石机。高强度的冲击波是由水中放电方法产生的, 其能量经金属椭圆球面反射集中到人体内结石处, 在不损伤周围组织的情况下粉碎结石, 使之自然排除体外。体外碎石术问世之后, 发展非常迅速。据报导^[6], 用通常外科手术方法摘除结石, 术后死亡率约达 2%, 而近 10 年来经体外碎石术治疗的患者, 按最保守估计已逾 50 万人, 术后死亡率几乎为零, 而且恢复快。

在文献^[18]中, 用双片 PVF₂ 水听器在碎石机焦点处测量到的压力信号——延续 $1\mu\text{s}$ 宽、峰值为 1000 个大气压的正压信号, 随后是 5—10 μs 的峰值为 100 个大气压的负压信号, 这可能是因为一般液体不能承受更大的拉力。

对于冲击波碎石的物理机制, Chaussy 认为是由于冲击波对结石前表面压力及在后表面上反射造成的^[17]。但最近的一系列研究却证明, 超声空化在碎石过程中起着重要作用^[20-21]。较为典型的实验是由 Church C. C. 等人完成的^[18], 他们把铝箔和铝板放在碎石机的焦点处, 经碎石机的冲击波作用后, 用扫描电子显微镜观察到明显的空化型损伤, 据信损伤主要是由瞬态空化气泡崩溃时发射出的冲击波 (其声压达 1 千个大气压以上) 及高速射流造成的。他们还从非线性气泡动力学方程出发, 对冲击波引起空化过程进行了理论研究, 得到的理论分析结果在定性上与上述的实验观察结果完全一致。这一结论同样在活体条件下也取得了有力的证明, 他们在对胆结石进行碎石过程中, 用 B 超图像进行监测, 观察到在一个碎石冲击波发

射后, B 超图像上立刻出现强回声亮点, 大约在 1sec 左右之后消失。这些回声亮点有力地提示了空化气泡的发生。

三、结 论

1. 在医学超声的大部份应用中都伴有声空化过程发生或具有发生超声空化的潜在可能性。超声空化在某些应用中是不希望发生的, 而在另外一些应用中又是希望发生的。

2. 在超声诊断情况下, 为确保诊断安全, 不希望有任何超声空化发生。特别在产科超声诊断中, 尤其如此。美国超声物理学家 Carstensen 教授 1987 年曾撰文说^[22]《已有报告说, 某些超声诊断仪输出的最大声强可达到 $1000\text{w}/\text{cm}^2$, 这是一个足以在含有空化核的生物体系中产生瞬态空化的强度。倘若产生瞬态空化, 其生物效应可能是很局部的, 只会损伤靠近爆炸空腔的周围少数细胞……。很难看出, 在人体的大多数器官和生物流体中损伤几个细胞会对人体健康产生多大影响, 然而, 一个可能的例外, 是涉及到人体的生殖细胞, 或是处在发育灵敏期的胚胎及胎儿。如果在这种情况下产生空化, 那么即便是只损伤几个细胞, 其后果也是很难令人容忍的》。

3. 在超声理疗中主要是利用超声的热效应和机械作用, 倘若诱发空化过程, 将会产生自由基引起有毒的化学反应, 从而影响细胞活性、损害健康, 特别当化学反应发生在细胞膜组份中, 其作用尤甚。

4. 在超声外科及体外冲击波碎石术中, 超声空化过程的发生起着重要的作用, 因此是人们所期待的。尽管目前对于超声空化在这些应用过程中的活动细节还不甚清楚, 但它已被认为是超声成功应用的首要的或者是重要的原

因。

5. 从人体组织内部的生理条件与外部施用的超声场条件两个方面进一步研讨在活体组织内产生超声空化的条件及规律性, 以便在医学超声的应用中, 最有效地扬其利而避其害, 无疑是今后医学超声基础研究中的重要课题。

参 考 文 献

- [1] 冯若, 百科知识 7(1987)64—66.
- [2] 冯若, 李化茂, 应用声学 8-1(1989)30—33.
- [3] Suslick K. S., Scientific American feb. (1989) 62—68.
- [4] Crum L. A., Proceedings of 13th ICA, Belgrade 4 (1989) 153—156.
- [5] Gaitan D. F., J. Acoust. Soc. Am. 1986 Suppl. 1, 80. 24.
- [6] Bjorno L., Proceedings of 13th ICA, Belgrade 1 (1989) 77—89.
- [7] Flynn H. G., J. Acoust. Soc. Am. 72-6(1982) 1926—1932.
- [8] Apfel R. E., IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 33-2(1986) 139—142.
- [9] Carmichael A., J. et al., Ultrasonics, 25-1(1987) 31—34.
- [10] Fowlkes J. B and Crum L. A., J. Acoust. Soc. Am. 83(1988) 2190.
- [11] Archley A. A. et al., Ultrasonics, 26(1988) 280.
- [12] 冯若, 中国医学影像技术, 2(1986)3—5.
- [13] 冯若, 生物医学超声, 南京大学出版社, 1987, 138—142.
- [14] Nyborg W. L. et al., NCRP Report 74(1983) 94—101.
- [15] Mortimer A. J. and Dyson M., Ultrasound Med. Biol. 14(1988) 499.
- [16] ter Haar G. et al., IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 33-3(1986) 162—164.
- [17] Coleman A. J. et al., Ultrasound Med. Biol. 13 (1987) 69.
- [18] Church C. C. and Crum L. A., Proceedings of 13th ICA, Belgrade 4(1989) 205—208.
- [19] Chaussey C., Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy (Basle: Karger) 1982.
- [20] Crum L. A., J. Urol. 140(1988) 1587.
- [21] Delius M. et al., J. Acoust. Soc. Am. 83(1988) 588.
- [22] Carstensen E. L., Ultrasound Med. Biol. 13-1(1987) 597—606.