

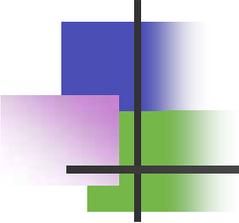
第六章 超声空化

李发琪

重庆医科大学生物医学工程系
重庆医科大学医学超声工程研究所
省部共建超声医学工程国家重点实验室

教学目的与要求

1. 重点掌握基本概念：空化、超声空化、空化阈值、空化核、稳态空化、瞬态空化
2. 掌握发生空化的条件
3. 熟悉几种空化核
4. 熟悉检测空化的方法
5. 掌握影响超声空化的物理参数、如何影响？
6. 了解声场中空化泡的运动

- 
- 超声空化是一个十分重要而又非常复杂的物理现象。从物理学讲，超声空化属于非线性声学的研究范围，但它又具有许多独特的现象，且有着越来越重要的应用。

历史

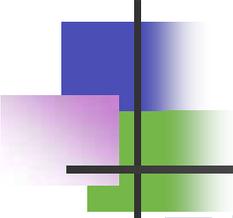
19世纪末，英国海军建造出第一艘驱逐舰，在初期试验时发现，螺旋桨推进器在水中会引起剧烈振动象。Thornycroft和Barnaby认为这种振动是由于螺旋桨的旋转产生了大气泡（空穴），而这些大气泡又在水的压力下随即发生内爆而产生的。这是第一次对空化现象物理本质的描述。

振动问题



浸蚀问题

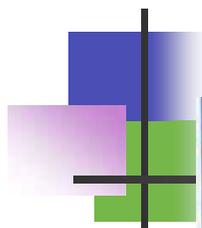




于是正式邀请Rayleigh勋爵来研究这个问题。1917年，Rayleigh 发表了题为“液体中球形空腔崩溃时产生的压力”的著名研究论文，对空化现象的理论研究做出了重大突破，为一个多世纪以来的一切有关空化理论研究奠定了基础。

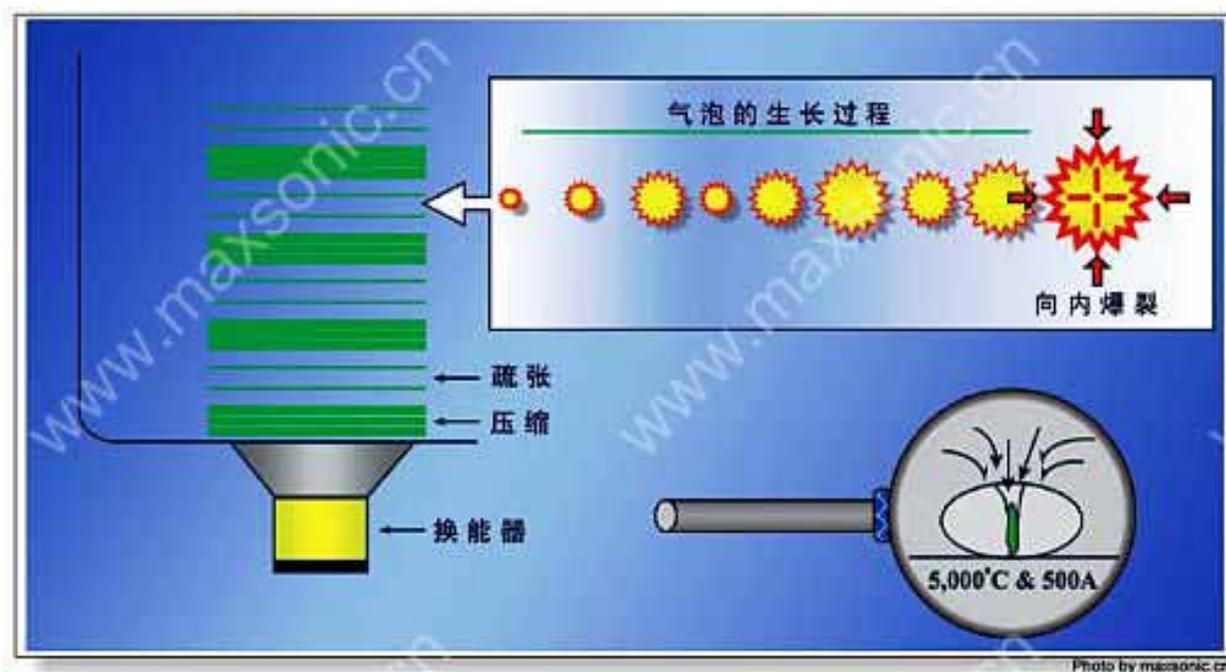
 **19 世纪末，声学研究工作由瑞利勋爵以他的两卷巨著《声的理论》。总结了 300 年的重要成就，集声学理论的大成，至今仍为经典，引用不绝。**

超声治疗学——Chap.6



一、空化阈值与空化核

- 空化 (cavitation)：液体中由于某些原因形成局部气体或蒸汽空穴及其成长与破灭的现象。
- 超声空化：液体中的微小泡核在超声波作用下被激活，它表现为泡核的振荡、生长、收缩及崩溃等一系列动力学过程。



P128 现象描述

一、空化阈值与空化核

- 空化阈值：当负压达到某一临界值时，液体中便产生空化。这种能将液体拉断的临界负压值就称为空化阈值（cavitation threshold）。这一阈值若由声压表示，就称为空化的声压阈值；若由声强表示，则称为空化的声强阈值。
- 当液体中含有半径为 R_0 的空化核时，其空化阈值 P_B 为：

$$P_B = P_0 - P_v + \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{2\sigma}{R_0}\right)^3 \left(P_0 - P_v + \frac{2\sigma}{R_0}\right)}$$

P_0 ：液体中的静压强； P_v ：气泡内的蒸汽压； σ ：表面张力系数、 P_B 也称为Blake 阈值压强。

一、空化阈值与空化核

当 $\frac{2\sigma}{R_0} \ll P_0$, 且 $P_v \ll P_0$ 时, 上式近似为:

$$P_B = P_0 + 0.38 \sqrt{\left(\frac{2\sigma}{R_0}\right)^3 / P_0}$$

对于较大的空化核, 空化阈值主要取决于液体中的静压强 P_0 。

当 $\frac{2\sigma}{R_0} \gg P_0$, 且 $P_v \ll P_0$ 时, 上式近似为:

$$P_B = P_0 + 0.77 \frac{\sigma}{R_0}$$

对于较小的空化核, 空化阈值主要取决于液体表面张力 $\frac{2\sigma}{R_0}$

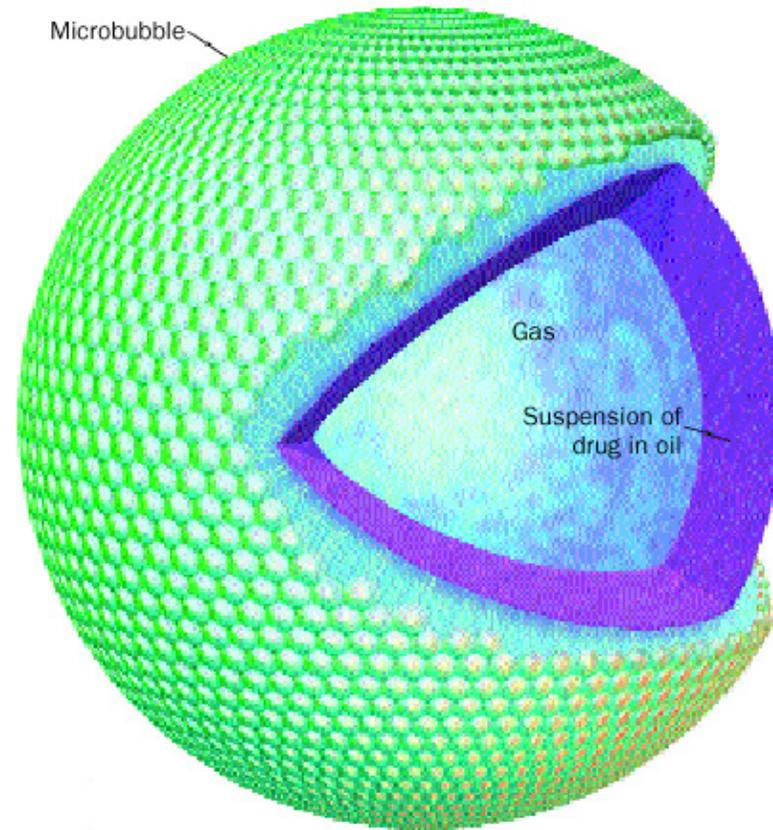
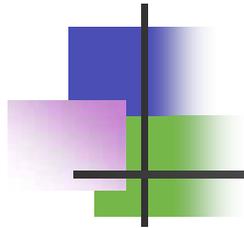
一、空化阈值与空化核

- 对于纯净液体（不含气体、杂质颗粒等），空化阈值的理论值相当高。以水为例，按热力学统计物理计算，在常温下空化阈值超过-100MPa（相当于-1000atm）。然而，实验表明，几乎所有实际液体，例如自来水、江、湖、海水等的空化阈值，仅为-1MPa左右；即使经过除气、过滤、去离子等专门处理的液体，也只有-30MPa。
- 理论和实验研究表明，这是由于实际液体中总是存在许多微小气泡构成液体的“薄弱环节”，因而在相当低的负压下即可首先在这些地方将液体拉断而产生空化。这种微小气泡称为“空化核”（cavitation nuclei）。常见的空化核可以是液体中半径小于0.1mm的气泡或蒸汽泡（半径大于0.1mm的气泡会因浮力升至液面而破灭）；也可以是固态粒子的裂缝或表面附着的微小气泡等等。

一、空化阈值与空化核

几种空化核：

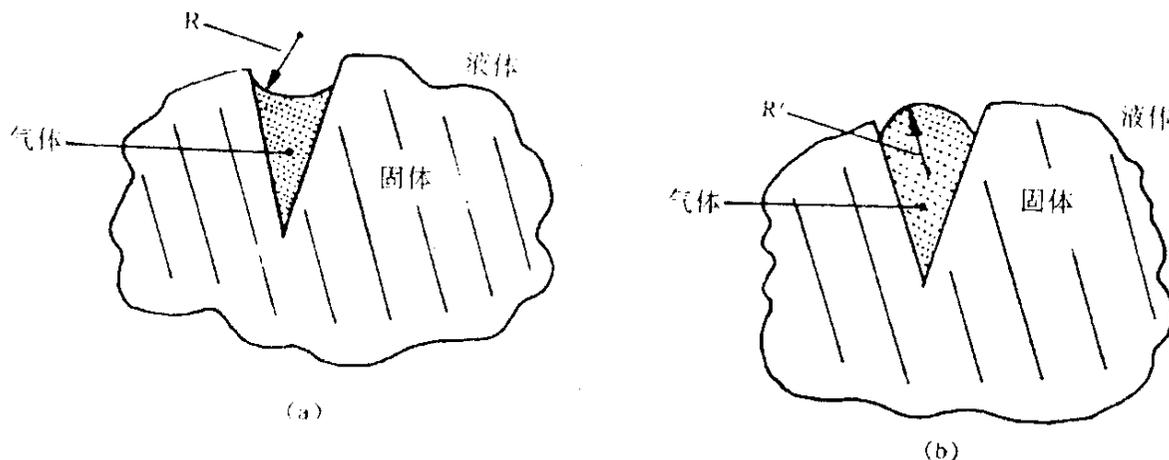
- 液体因热起伏，不断产生小的蒸汽泡。这种蒸汽泡在液体中存在的条件是，泡内的蒸汽压与表面张力和液体的静压力相平衡，由此构成稳定的蒸汽空化核。
- 带有薄的有机物外壳的小尺寸气泡（一般指 $R_0 < 0.01\text{mm}$ ），由于这层有机膜的存在阻碍泡内气体向外扩散，并能抗拒表面张力，所以能形成稳定的空化核。而在足够强的声波作用下，可打破此有机层外壳产生空化。近年来，大量声学造影剂引入医学应用，其中大多属于这种类型的空化核。



一、空化阈值与空化核

几种空化核：

- 高能离子流，如宇宙线、中微子流或激光脉冲等照射液体，产生微小气泡。这已得到实验研究结果的有力支持。
- 液体中浸润性固体悬浮颗粒裂缝中陷附的小气泡。在通常情况下，它的内凹表面形成的表面张力，抵消外界压力而稳定存在；在足够强的负声压作用下，泡形变为外凸而被拉出，形成空化核。



固体颗粒裂缝空化核的形成原理

(a) 常态下缝内气泡状态 (b) 负声压作用下的气泡状态

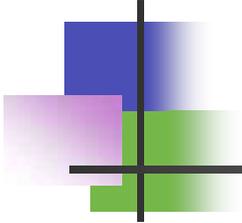
二、空化泡崩溃需要的时间

液体中存在一个球形空化泡，它在外力作用下发生崩溃所需要的时间。从动力学原理可以推导得出，所需时间为：

$$\tau \approx 0.915 R_{\max} \sqrt{\frac{\rho}{P_0}}$$

式中 R_{\max} 为空化泡的最大半径值， ρ 为空化泡周围液体密度， P_0 为液体中的静压强。

- ✓ 忽略了空化泡的表面张力和泡内可能存在的气/汽的压力，也未考虑声场的作用。



→ 在水中取 $R_{\max} = 10^{-5} \text{m}$, $\rho = 10^3 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 设 $P_0 = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 。计算得到 $t = 1 \mu\text{s}$ 。如果 , 我们作用以 20kHz 的超声波 , 其周期为 $50 \mu\text{s}$, 压缩相为 $25 \mu\text{s}$, 则空化泡崩溃时间仅为其 $1/25$ 。因此 , 可以讲 , 空化泡在崩溃过程中 , 其外力作用变化甚微。反之 , 如果作用的超声波频率升至 1MHz , 其周期亦为 $1 \mu\text{s}$, 空化泡则来不及发生崩溃。

三、声场中空化泡的运动

气泡动力学理论提供描述液体中半径 R_0 的单个气泡在声场作用下行为的运动方程，即著名的Rayleigh-Plesset方程，其形式如下：

$$\rho R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \rho \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = P_{i0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} + P_v - P_0 - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4}{R} \frac{dR}{dt} - P_A \sin \omega t$$

式中， R 是气泡某时刻的半径； $\frac{dR}{dt}$ 和 $\frac{d^2 R}{dt^2}$ 分别是泡壁径向运动的振动速度和加速度； ρ 和 η 分别是液体的密度和粘滞系数； γ 是泡内气体的比热容比； P_A 代表声压幅值； $\omega = 2\pi f$ 代表声波的角频率，其中 f 是声波频率； $P_{i0} = \frac{2\sigma}{R_0} + P_0 - P_v$ 代表静态时泡内气体压强，其中 $\frac{2\sigma}{R_0}$ 为气泡半径为 R_0 时的表面张力， σ 是表面张力系数， P_0 为液体中静压强， P_v 为泡内蒸气压。

三、声场中空化泡的运动

若对此方程作一定线性近似，即假定液体无粘滞性，即 $\eta = 0$ ；气泡半径变化较小，即 $R = R_0 + r$ ，且 $r < R_0$ 。则可推导出此情况下，气泡的半径变量 r 随时间的变化关系：

$$r = \frac{P_A}{R_0(\rho c^2 - \rho_0 c_0^2)} \left(\sin \omega_r t + \frac{1}{r} \sin \omega_r t \right)$$

式中的 ω_r 是在推导过程中确定的气泡共振角频率。由 $\omega_r = 2\pi f_r$ 关系式，则可得到半径为 R_0 的气泡共振频率为：

$$f_r = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{1}{\rho} \left[3 \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) - \frac{2\sigma}{R_0} \right]}$$

三、声场中空化泡的运动

由于一般情况下，单原子气体，多数双原子气体或空气， $\gamma > 1$ ，故常有 $\frac{2\sigma}{R_0} \ll 3 \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right)$ ，故此式可近似为：

$$f_r \approx \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3}{\rho} \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right)}$$

与此频率相对应的气泡半径 R_r 称为共振半径，故可把上式改写为下面形式：

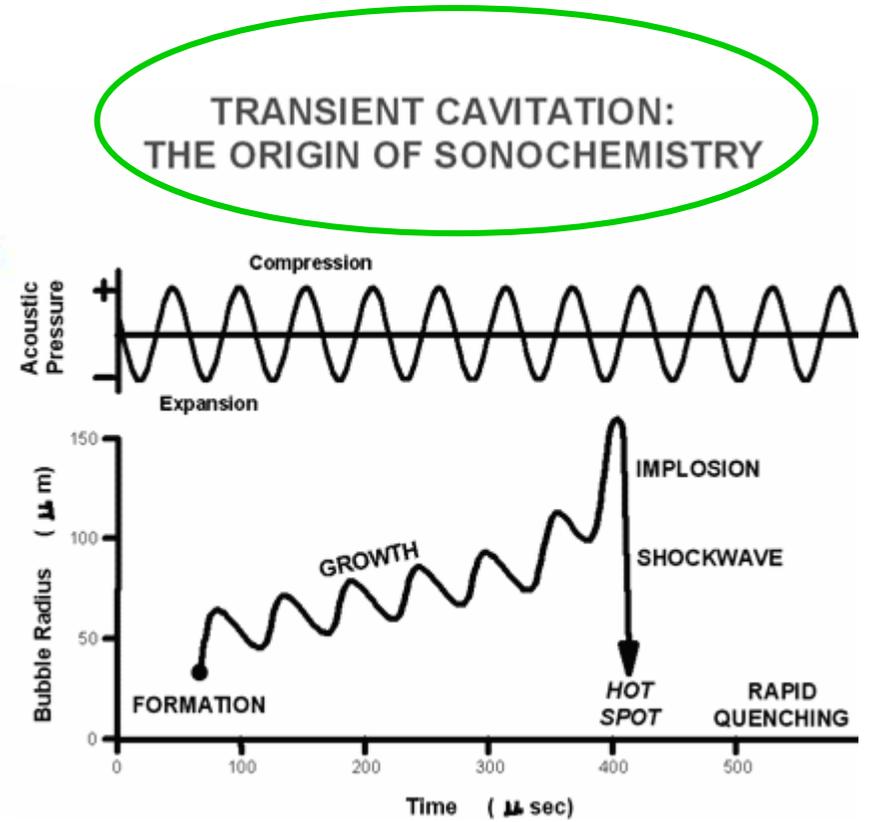
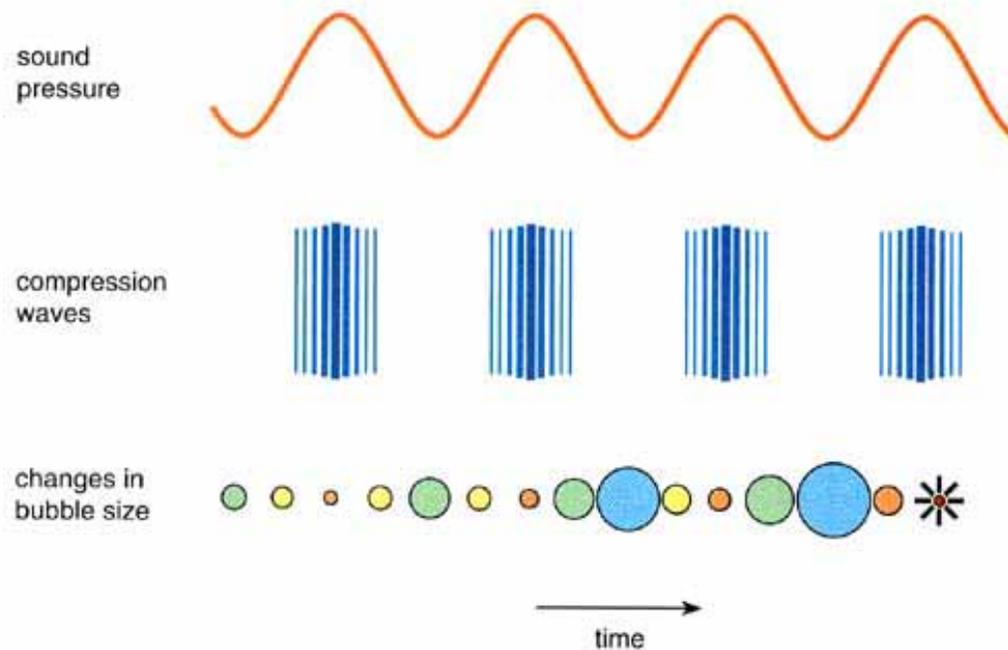
$$R_r \approx \frac{1}{2\pi f_r} \sqrt{\frac{3}{\rho} \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right)}$$

→ 若水中气泡半径 $R_0 = 0.1\text{mm}$ ，则算出其共振频率 $f_r \approx 33\text{ kHz}$ 。

四、稳态空化与瞬态空化

稳态空化(Steady cavitation / non-inertial cavitation)

瞬态空化(Transient cavitation / inertial cavitation) ——P130)



四、稳态空化与瞬态空化



瞬态空化——当用强度较高的超声波辐照液体时，声场中气泡的动力学过程变得更为复杂和激烈。在声波的负压半周期内空化核（微小气泡）迅速膨胀，随后又在声波正半周期内气泡被压缩以至崩溃。

→ 利用气泡动力学方程6-5。

1. 气泡崩溃时达到的泡壁最大压缩速度

$$U_{\max} \approx \sqrt{\frac{2}{3\rho} \frac{P(-1)}{Q} \left[\frac{P(-1)}{Q} \right]^{-1}}$$

式中： $P = P_0 + P_A$ P_0 为气泡的外界压强； Q 为气泡半径为 R_0 时泡内的压强（气压、蒸汽压与表面张力的总压力）。

四、稳态空化与瞬态空化

2. 气泡压缩到最小半径 R_{\min} 时泡内气体的温度

$$T_{\max} \approx T_0 \frac{p(\gamma - 1)}{Q}$$

式中： T_0 为气泡内的初始温度（绝对温度K）。

举例（P131 SL sonoluminescence）

3. 气泡崩溃时泡内达到的最大压强

$$P_{\max} \approx Q \left[\frac{P(\gamma - 1)}{Q} \right]^{-1}$$

举例(P131)

四、稳态空化与瞬态空化

4. 气泡崩溃后冲击波的最大压强

气泡崩溃时，由于高速运动的液体突然被制动，泡内积聚的能量将瞬间转化为向外辐射的冲击波。当忽略泡内气体压强，即假设 $Q = 0$ 时，可得液体中产生冲击波的最大压强近似式为

$$P'_{\max} \approx 4^{-\frac{4}{3}} P \left(\frac{R_{\max}}{R_{\min}} \right)^3$$

举例（P132）

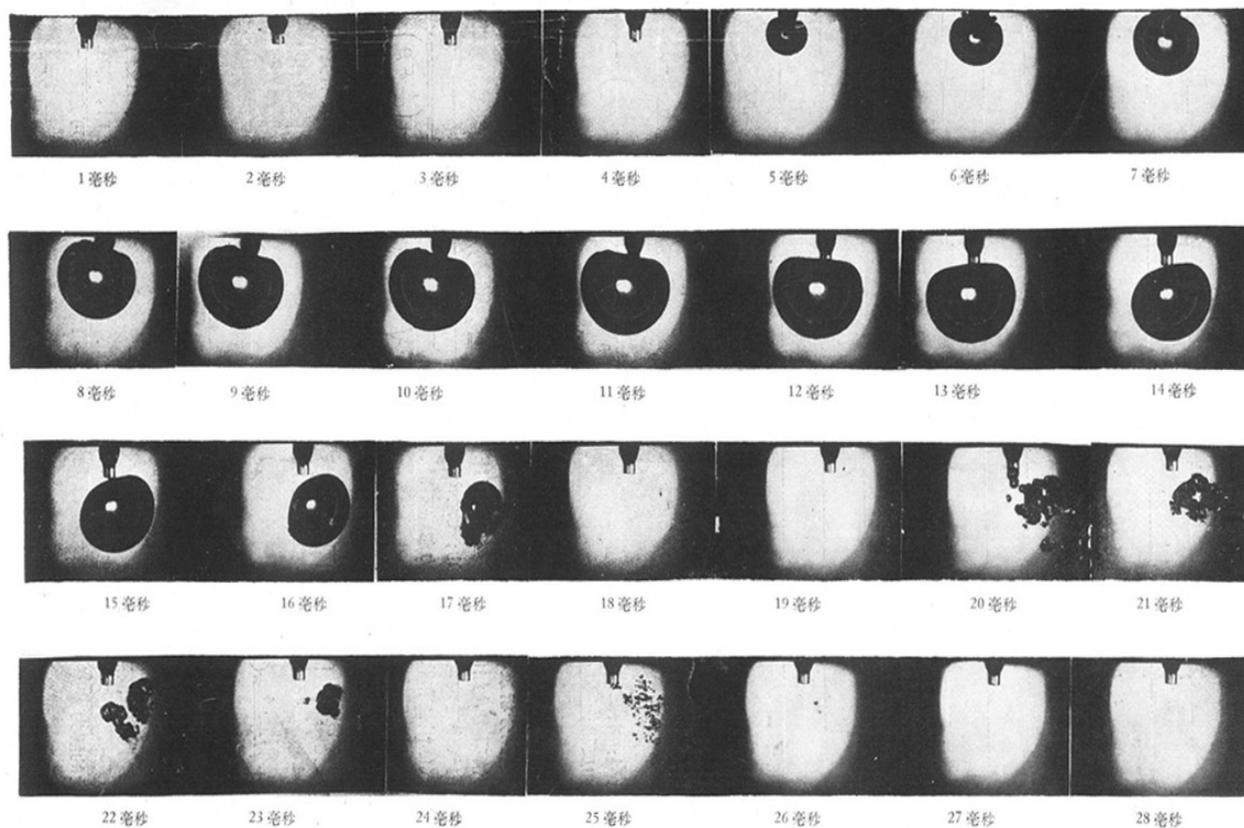
四、稳态空化与瞬态空化

5. 气泡对界面形成的高速射流

当气泡在某种界面邻近处崩溃时，由于界面的吸附作用，正在快速压缩的气泡便失去球形，使气泡的压缩过程成为不对称的。以固体界面为例，此时，靠近表面一侧的泡壁被压扁；而另一侧泡壁凸入泡内形成一股高速射流，穿过气泡喷射向固体表面，对表面产生极大冲击。

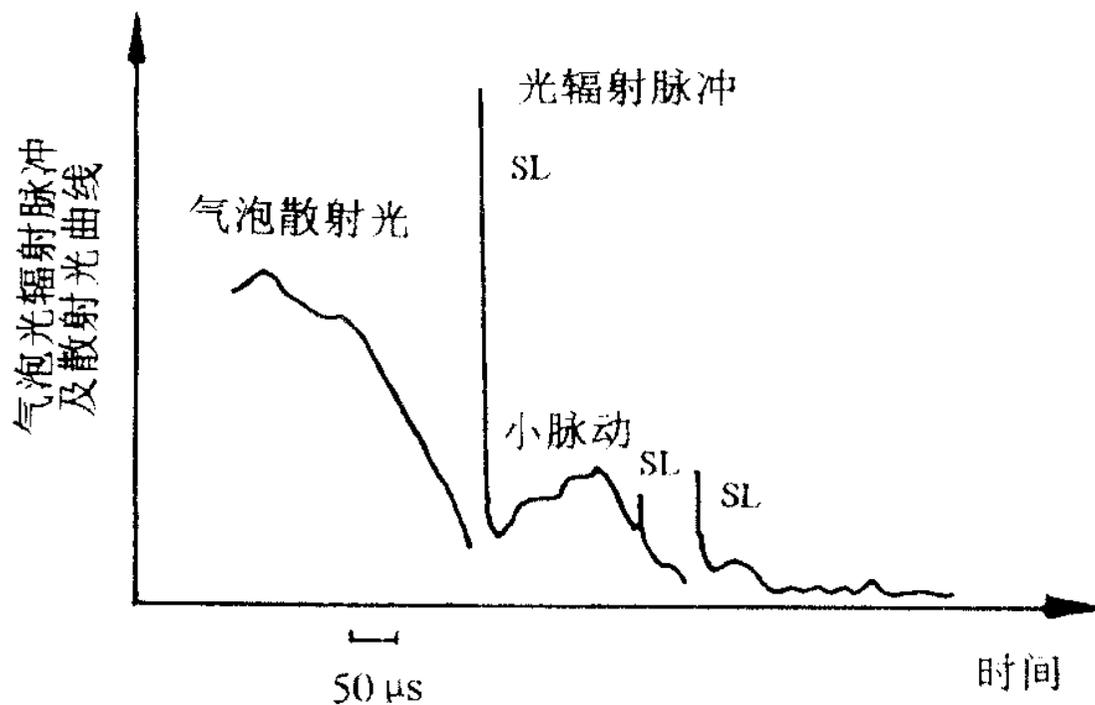
- ✓ 估算并经实验证明：这种高速射流的流速可达100m/s的量值。可以想象，这么高的冲击速度和强度，必将使固体表面遭受空化腐蚀。

四、稳态空化与瞬态空化



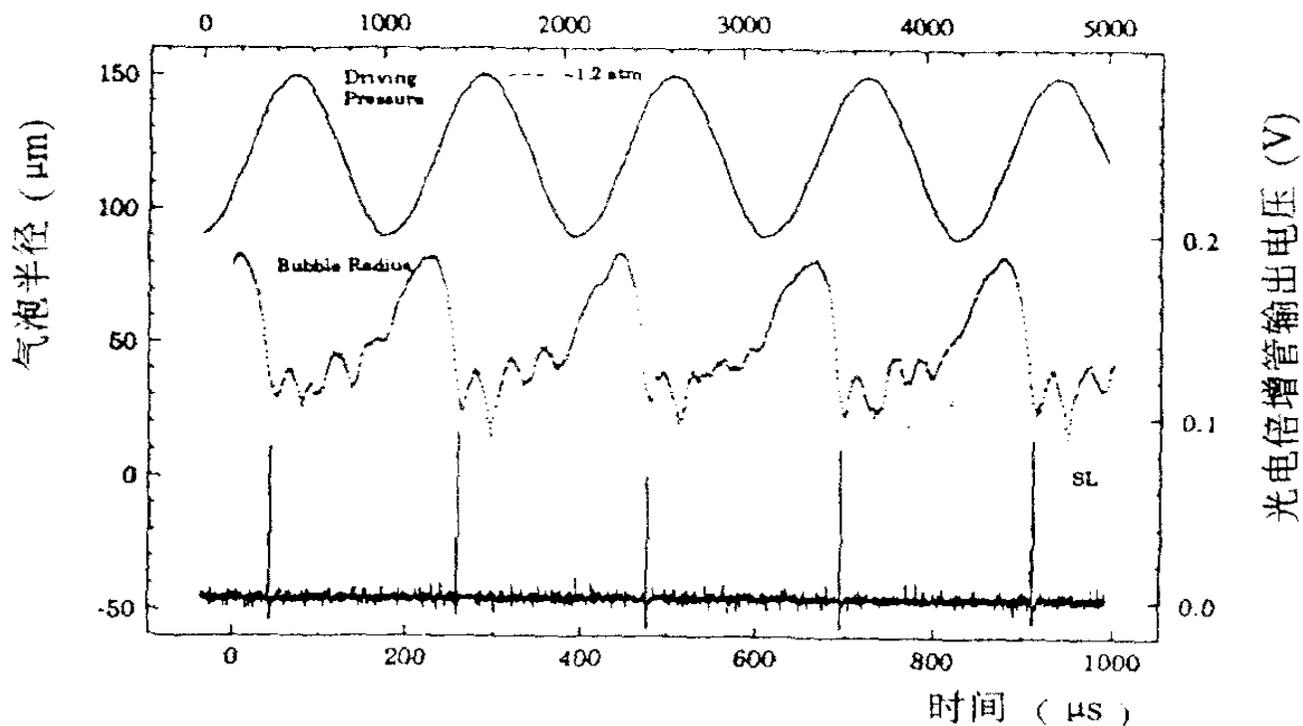
水中单个气泡空化过程的延时采样照片

四、稳态空化与瞬态空化



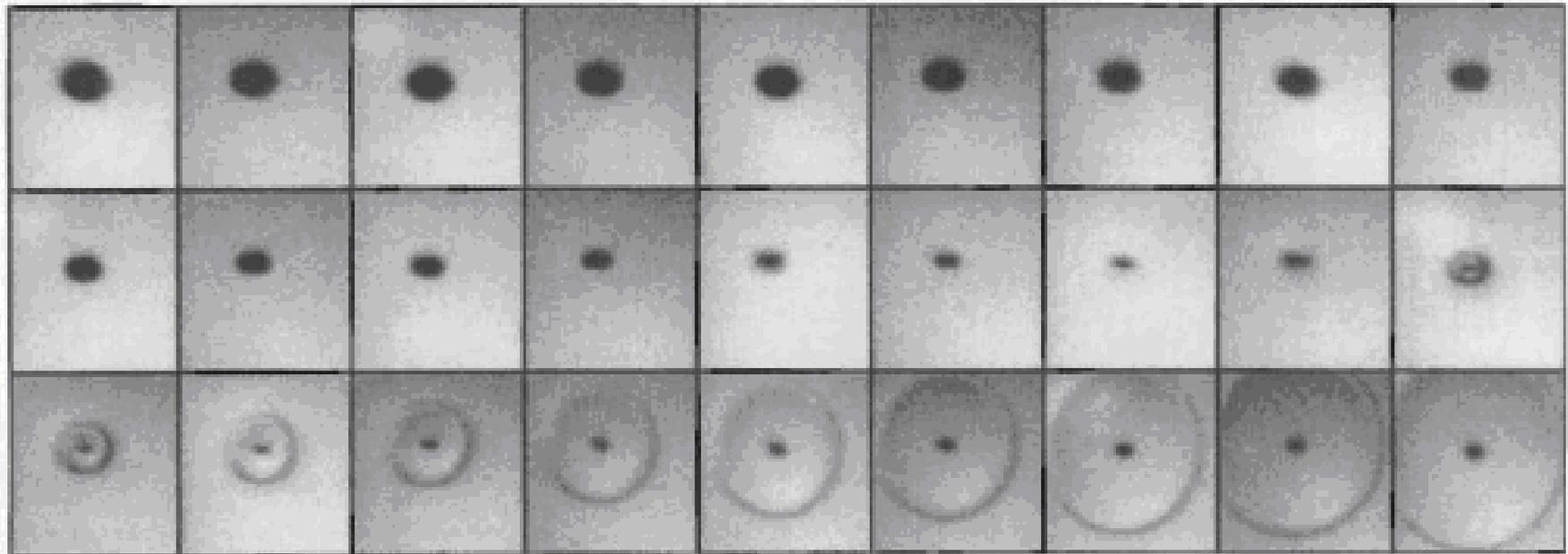
水中单个气泡崩溃瞬间产生的光辐射脉冲

四、稳态空化与瞬态空化



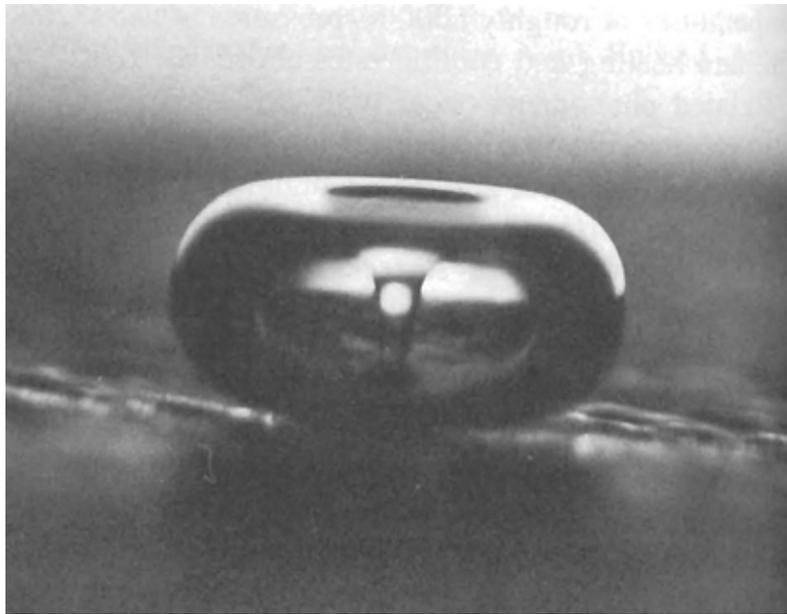
声悬浮单泡运动及其发光实验结果
上面曲线为声压波形，
中间为气泡的R-t曲线，下面为发光脉冲

四、稳态空化与瞬态空化

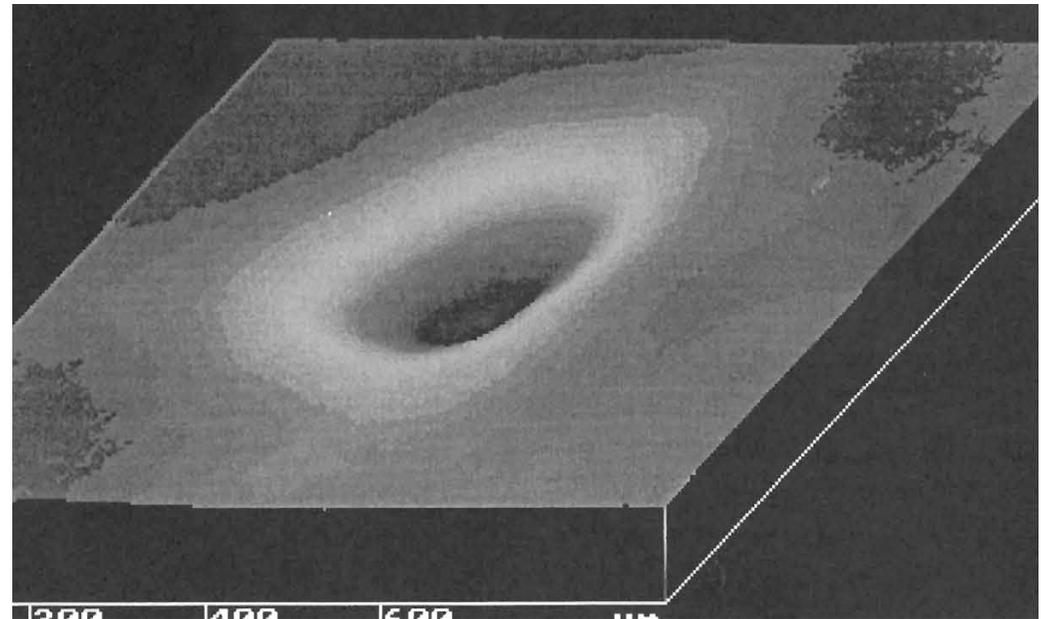


单个气泡崩溃时产生冲击波的高速摄影照片

四、稳态空化与瞬态空化

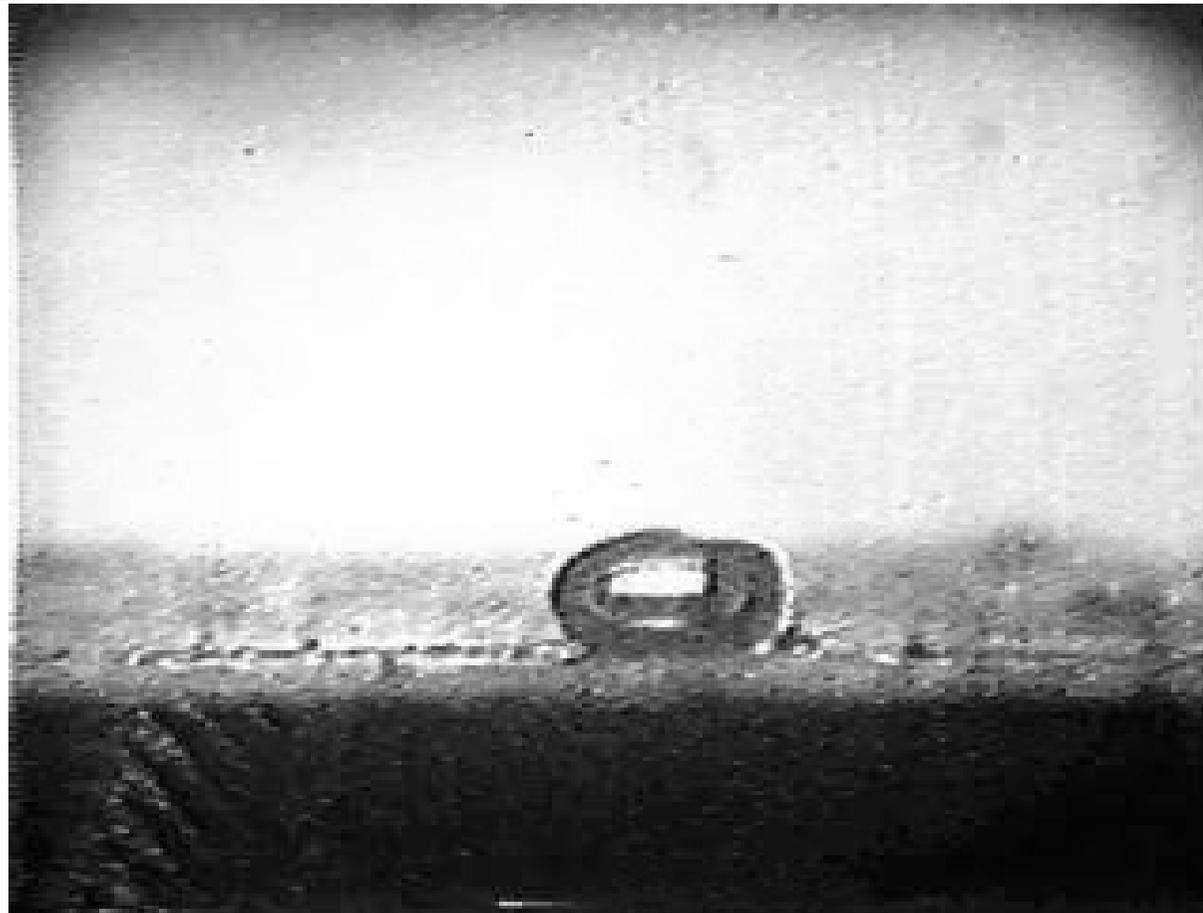
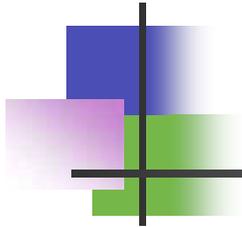


气泡在固体表面引起高速射流



铝箔(厚度为1 μm)的空化腐蚀

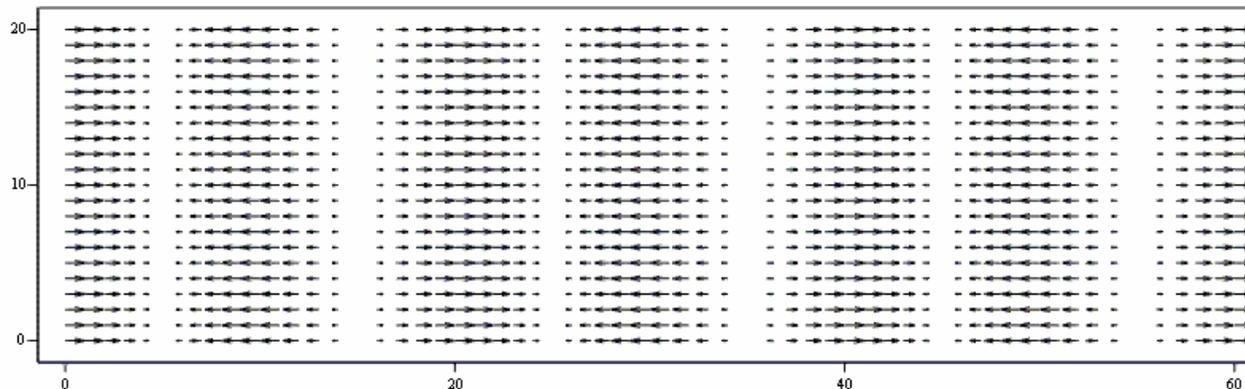
气泡在固体表面引起高速射流及其对铝箔空化腐蚀的照片

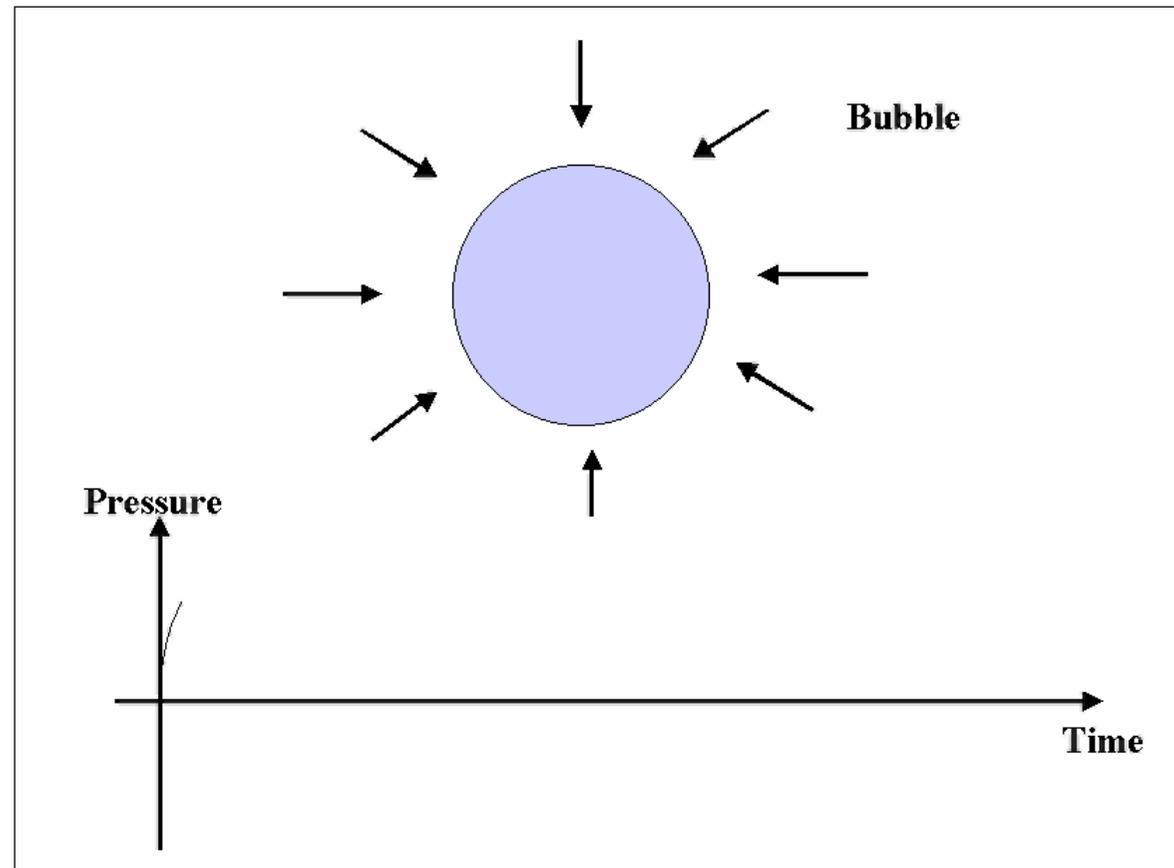
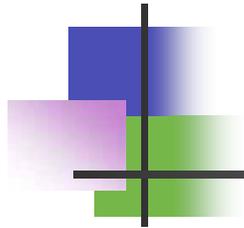


四、稳态空化与瞬态空化

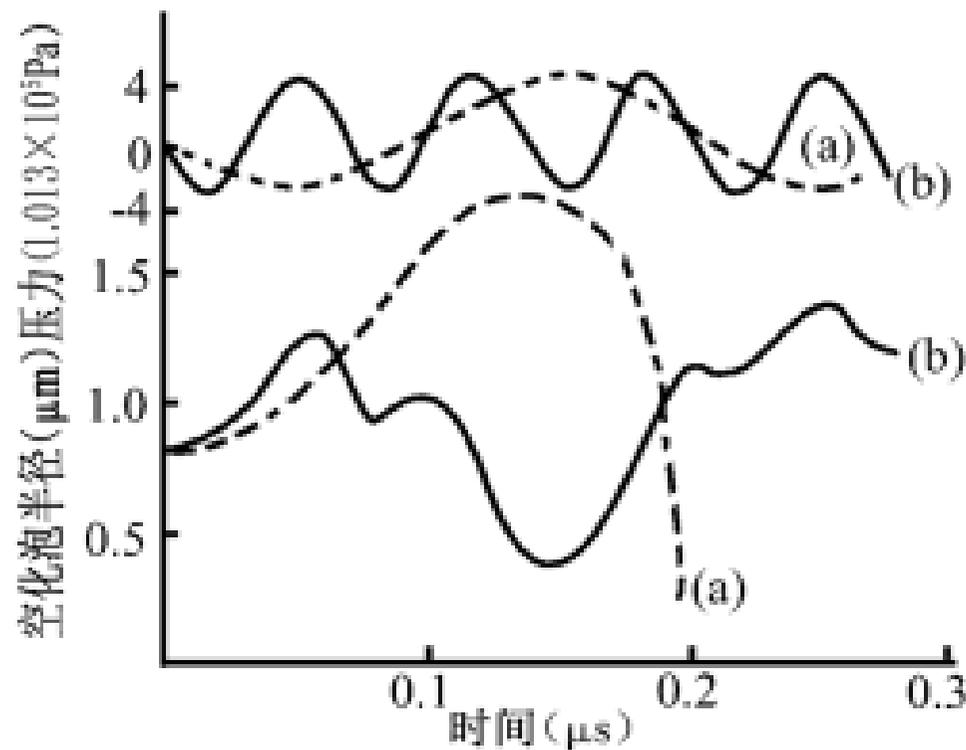
稳态空化(Steady cavitation / non-inertial cavitation) ——
P130)

这类空化气泡的具体振荡形式，取决于初始气泡状态、声场参数和媒质特性。其动力学行为可由 (6-6) 式描述 ($r - t$)。





超声治疗学——Chap.6
模拟参数见P134



水中空化气泡的半径——时间曲线

(a) $f_a=5MHz$ (b) $f_b=15MHz$

图的上方为声压的波形；下方为 $R-t$ 曲线

✓就稳态空化泡而言，只有当空化泡的共振频率 f_r 与声波频率 f 相等的，才发生最大的能量耦合，产生明显的空化效应。如果 $f > f_r$ ，气泡将作复杂的持续振荡；而当 $f < f_r$ 时，则可能发生崩溃。

✓可以看出，液体中一旦空化核形成，它在声场作用下的命运如何，是维持稳定振荡，还是迅速发生崩溃，将取决于许多有关物理因素的影响。

四、稳态空化与瞬态空化

在稳态空化情况下，当气泡半径远小于其共振半径，即 $R_0 \ll R_r$ 时，气泡先被声波激活，在声波作用下进行脉动，每次脉动的膨胀阶段，泡内气压降低，液体中的溶解气体向泡内挥发；而在压缩阶段，泡内气压增高，泡内气体又向液体中扩散。但因膨胀时气泡表面积大于压缩时表面积，故泡内气体总是趋向于增加，即形成所谓“**整流扩散**”过程。在这一过程中，气泡逐渐增大。当增大到其共振半径 R_r 时，若声压够大，它有可能与声波发生强烈共振而形成瞬态空化。这个从小到大所需时段被称为“**等待时间**”。一般情况下等待时间 $< 1 \text{ ms}$ 。当然，若声压较弱，则气泡也有可能继续增长，直到浮上水面而逸出。这就形成**超声除气**过程。

四、稳态空化与瞬态空化

稳态气泡转向瞬态气泡而发生崩溃的过程，由于泡内气体的缓冲作用，其崩溃的激烈程度要比强声压下的崩溃缓和。但泡内温度也会发生相当的变化。其泡内可达到的最高温度可用下式计算：

$$\frac{T_{\min}}{T_{\max}} = \left\{ 1 + Q \left[\left(\frac{P_0}{P_m} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \right\}^{3(-1)}$$

式中 T_{\min} 取环境温度； $P_m = P_a + P_0 + \frac{2\sigma}{R_0}$ 为气泡受到的总压强； Q 为气泡的共振振幅与静态振幅之比；

✓ 举例——P135。

✓ 毫无疑问，在共振气泡附近产生的巨大应力亦将是许多破坏性机械效应的原因。

五、空化的检测

光学方法 用肉眼或光学仪器直接观察空化发光。

声学方法 用耳朵可以直接听到空化时发出的嘶嘶声，使用声学仪器可以检测到空化噪声，谐波，次谐波等。

化学方法 如检测空化自由基的电子自旋共振（ESR）法，TA(对苯二甲酸)荧光检测法，碘释放法。

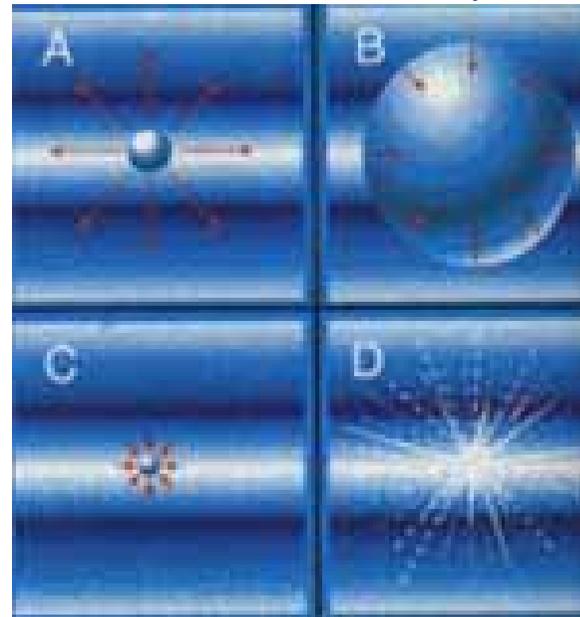
生物学法 通过细胞溶解、生物大分子断裂等进行检测。

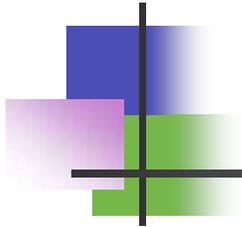
此外，还可以从改变实验环境压力对实验结果的影响来判断空化现象，因为在同样条件下，环境压力增大时，空化则难以发生，反之亦然。

五、空化的检测

光学方法

声致发光（sonoluminescence）是指液体中声空化过程伴随发生的一种光的弱发射现象。早在四、五十年代人们就已经发现，声致发光是离散闪烁过程，对应每一个声波周期闪烁一次，有时两次。大多数液体的声致发光光谱是从红外区一直扩展到紫外区，利用高速摄影技术直接观测发现，在低频超声空化下，发光主要是发生在空化泡崩溃的后期。



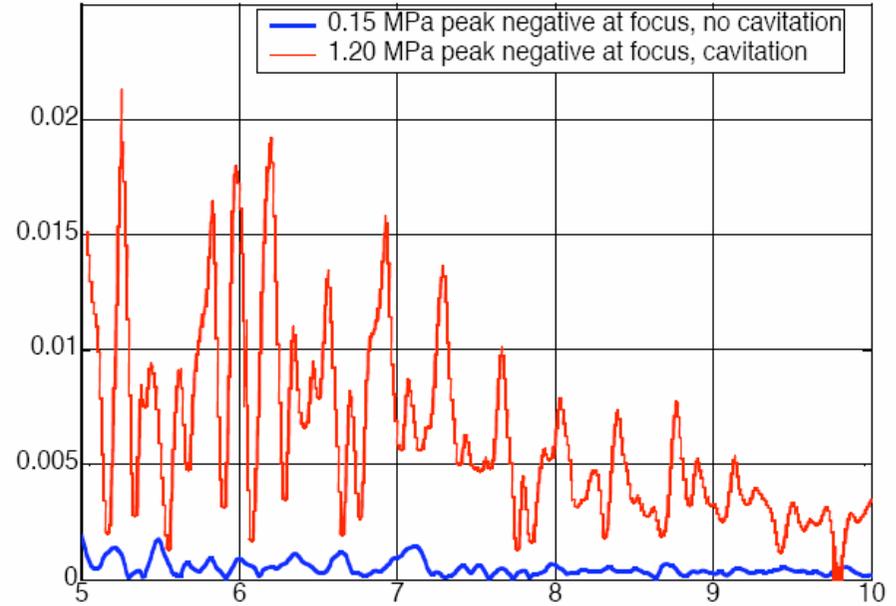
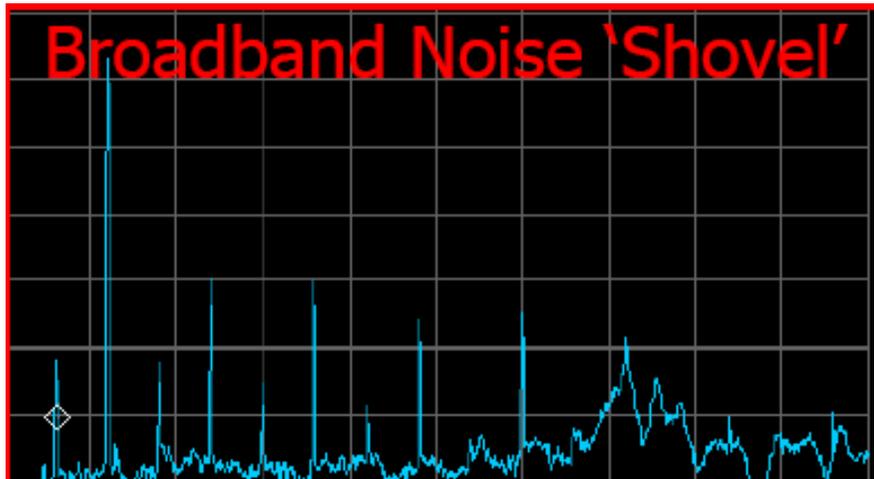
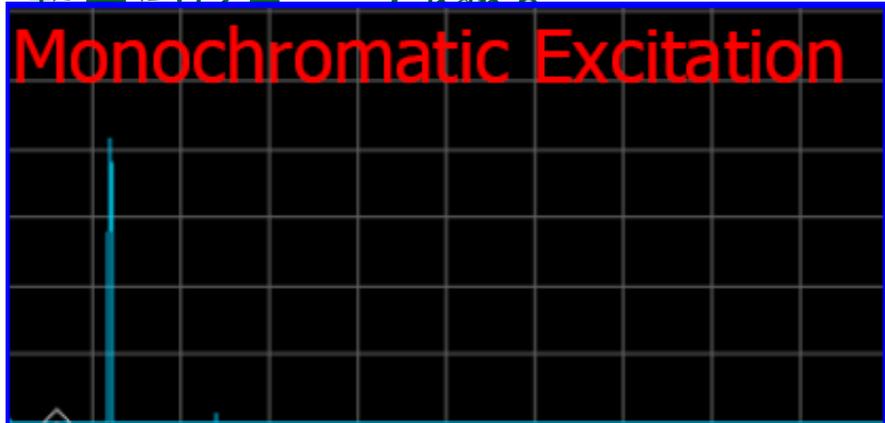


Multiple pulse by HIFU

五、空化的检测

声学方法

研究表明超声空化过程中伴随产生次谐波和高次谐波等。用声学仪器可以检测到空化噪声、谐波和次谐波。国际上一般认为如能监测到HIFU治疗过程中产生 $1/2$ 基频波的次谐波，就可以认为发生空化反应。



五、空化的检测

化学方法

空化泡溃灭时在局部产生瞬时的高温、高压，足以打开结合力强的化学键，引发复杂的化学效应。利用空化能量打开水分子的O-H键，使水分解为·OH和·H，由于自由基含有未配对电子，化学性质活泼，很容易发生自由基反应，从而引发一系列化学反应效应。通过检测水溶液中是否有·OH产生，可以判断系统是否发生了空化。通过检测·OH数量可以反映空化发生的强度。

- ✓ 碘释放法
- ✓ 电子自旋共振(ESR)技术
- ✓ TA(对苯二甲酸)荧光光谱技术

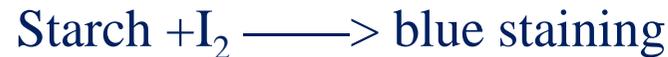
五、空化的检测

碘释放法

在超声空化作用下，组织产生自由基，与碘化钾溶液发生反应生产单质碘；



I_2 与淀粉溶液发生反应变蓝，用紫外可见分光光度计可以测得生成碘的量，以此推出空化产额。



六、影响超声空化的物理参数

液体的物理参数的影响

1 粘滞系数

在有粘滞性的液体中，为形成空腔或充汽空腔，除了要克服液体分子间的内聚力之外，还要克服粘滞力，因此，在粘滞性大的液体中空化比较难发生。此时，空化阈值 P_B 与液体粘滞系数 之间的关系，可用下面的经验公式近似表示：

$$P_B=0.8(1g \quad +5)$$

六、影响超声空化的物理参数

液体的物理参数的影响

1 粘滞系数

表 7-1 不同液体的空化阈值声压幅值(P_A)(25°C 1.013×10^5 Pa)

液 体	η (poise)	P_A (1.013×10^5 Pa)
海 狸 油	6.3	3.9
橄 榄 油	0.84	3.6
玉 米 油	0.63	3.1
亚麻子油	0.38	2.4
四氯化碳	0.01	1.8

表中数据表明， η 值大， P_B 值亦大。如海狸油的粘滞系数是玉米油的10倍，空化阈值声压增大了30%。

六、影响超声空化的物理参数

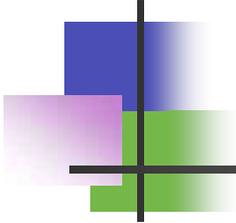
液体的物理参数的影响

2 表面张力系数()

与粘滞系数 相似，液体的 增大，意味空化泡收缩力增大，随之必然要求空化阈值增高。

$$P_B = P_0 - P_v + \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{2\sigma}{R_0}\right)^3 \left(P_0 - P_v + \frac{2\sigma}{R_0}\right)}$$

但是一旦液体中发生空化，其崩溃时伴随产生的Tmax与Pmax值也随之增高。



六、影响超声空化的物理参数

液体的物理参数的影响

3 蒸汽压 (P_v)

液体的蒸汽压高，其空化效应则减弱。

六、影响超声空化的物理参数

液体的物理参数的影响

4 温度

一般来说，温度升高，空化阈值下降。

因此，为获得尽可能大的声空化效应，应该在尽可能低的温度条件下工作。

$$T_{\max} \approx T_0 \frac{p(\gamma - 1)}{Q} \quad P_{\max} \approx Q \left[\frac{P(\gamma - 1)}{Q} \right]^{-1}$$

5 液体中含气的种类与数量

气体的 γ 值越大，由空化效应获得的温度越高，压力越大。因此，使用单原子气体（He、Ar、Ne）要比使用双原子气体（N₂，空气及O₂等）为好。但应该指出，只考虑气体的 γ 值影响还不够，还需考虑气体导热性对空化效应的影响，如果气体的导热系数大，那么在空化泡崩溃过程中所积累的热量将更多地传向周围液体，从而使T_{max}值降低。

液体中气体含量的增加将导致超声空化阈值声压下降（见图6-8，P137）及空化泡崩溃时形成的冲击波强度减弱。阈值下降是由于液体中空化核（亦即液体中的结构弱点处）增多，而空化强度的减弱则是由于空化泡内气体含量大，使“缓冲”效应增大的缘故。

六、影响超声空化的物理参数

声场参数的影响

超声频率 随着频率增高，空化过程会变得难以发生。

声强阈值随频率升高而增加，还可看出，在同一频率下，适当提高声强，就可使含更小气泡的液体发生空化。

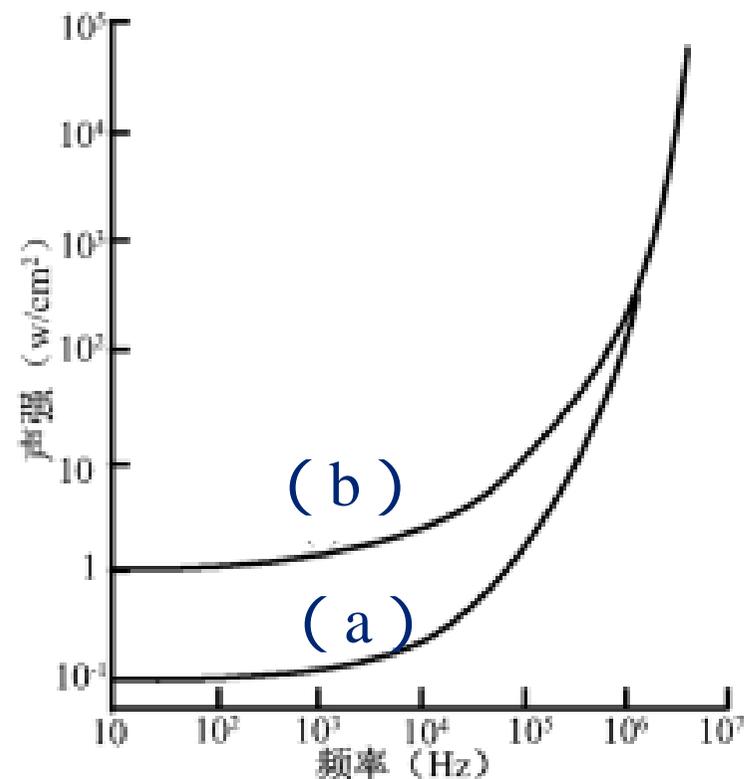


图 5 空化的阈值声强随超声频率的变化

(a)含空气的水 (b)除气水

六、影响超声空化的物理参数

声场参数的影响

声强 提高超声强度会使空化效应增强。

脉冲宽度的影响 为了获得稳定的空化强度，需要足够的脉冲宽度；在一定范围的脉冲宽度下，空化强度呈现极大值现象。

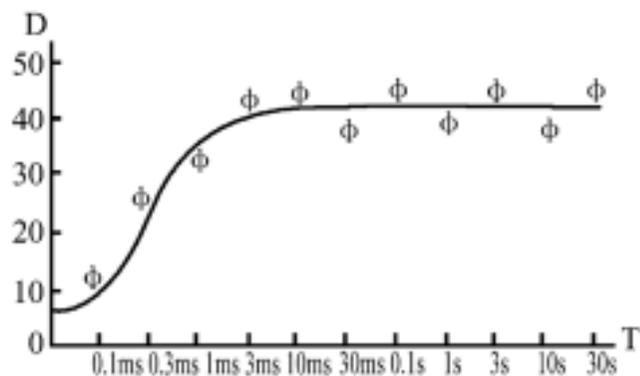


图6 化学产额与辐照超声脉宽的关系
○为9组实验数据的平均值 I为标准差范围
—为理论分析曲线

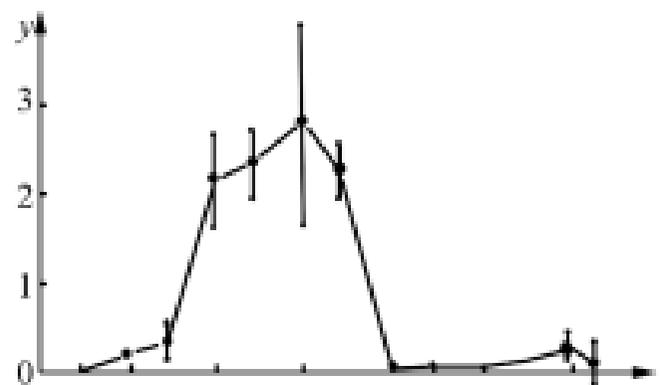


图7 荧光值随脉冲宽度的变化曲线(8°C 6min)
 $I=0.578W/cm^2$
•为6组测量数据的平均值, I标准差范围

六、影响超声空化的物理参数

声场参数的影响

两束超声辐照的空化增强效应

研究表明，当两束超声（它们的频率可以相差很大或接近），相互垂直配置，同时辐照时，那么被辐照系统中产生的总空化强度或其效应，总是明显大于各束超声分别单独辐照时所产生的效应之和。

六、影响超声空化的物理参数

声场参数的影响

两束超声辐照的空化增强效应

可能的解释(P140)

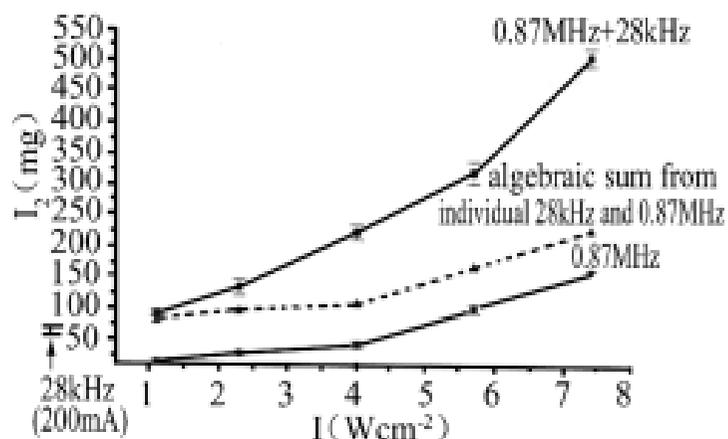


图8 28kHz与0.87MHz超声辐照时的碘释放量
(6次实验的平均结果)

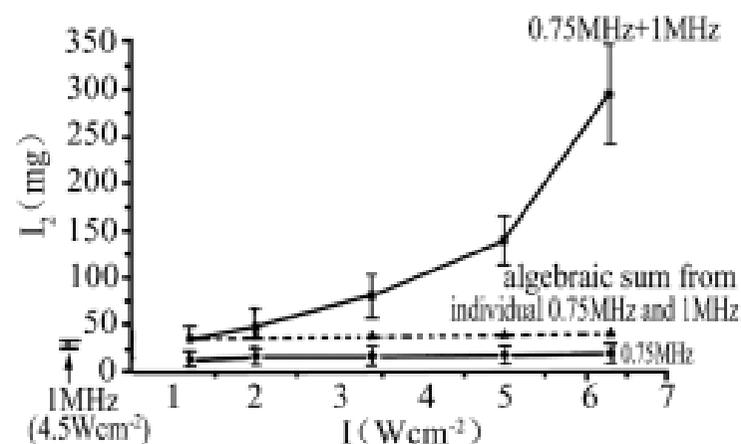


图9 1MHz与0.75MHz超声辐照时的碘释放量
(6次实验的平均结果)

六、影响超声空化的物理参数

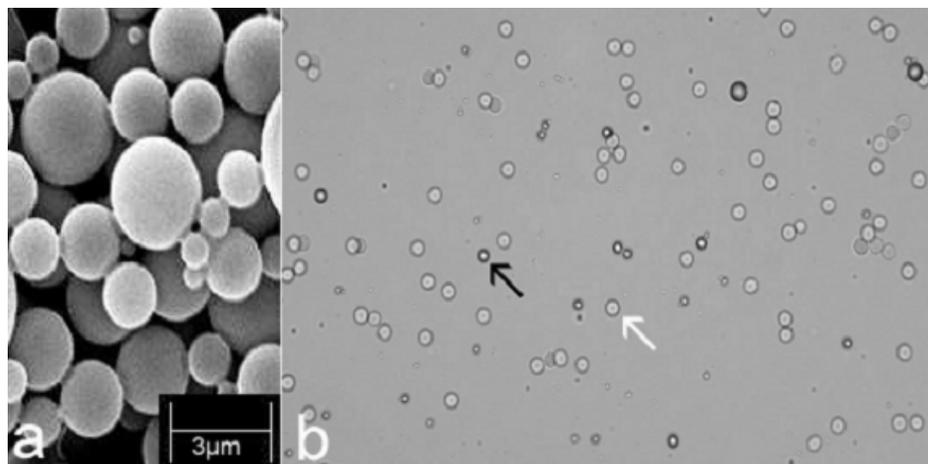
环境压强的影响

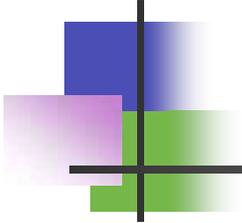
增加外界环境压强 p_0 将导致空化阈值增高和空化泡崩溃程度加剧。

热 点

人们对声空化的理论研究发现，声空化伴随发生的局部高温有可能引发热核反应！即所谓“声致核聚变”。这对国际科技界是一个具有震撼性的事件。

各种微泡造影剂（microbubble contrast agent）被广泛用作人造“空化核”引入医学研究和应用，从而开创了医学超声的第三次技术革命。





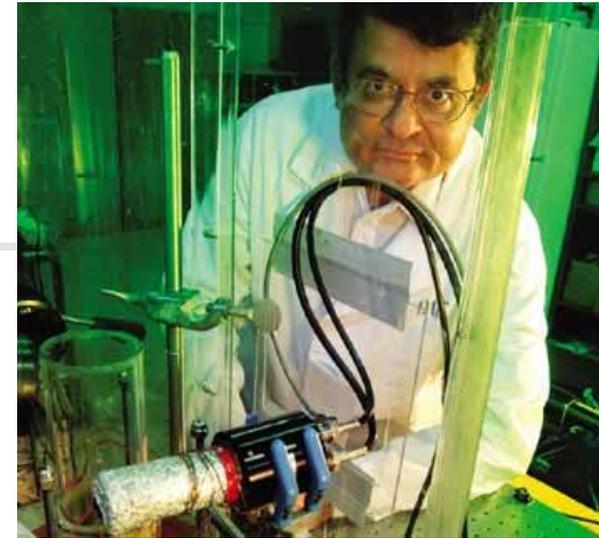
美国 Oak Ridge 国家实验室的 R.P. Taleyarkhan 和俄国科学院的 R. I. Nimatulin 等人合作研究，先后于 2002 年 3 月和 2004 年 4 月两次在美国《科学》等杂志上发表文章，宣称他们在实验室通过超声波在小烧杯液体里引发的微气泡空化，观察到了核聚变反应！

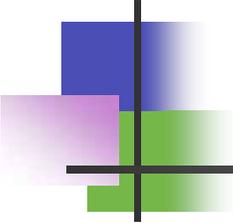
- ✓ 液体中氘变成了氦（氢的另一种同位素）
- ✓ 释放出了大到 2.5×10^6 eV 的中子能，此量级与氘核聚变应该释放的中子能量相当。

空化研究中的重要事件

“气泡核聚变”

美国Oak Ridge国家实验室R.L.Nimatulin等人合作研究，先后于2002年3月和2004年4月两次在美国《科学》等杂志上发表文章，宣称他们在实验室通过超声波在小烧杯液体里引发的微气泡空化，观察到了核聚变反应。





空化研究中的重要事件

声化学

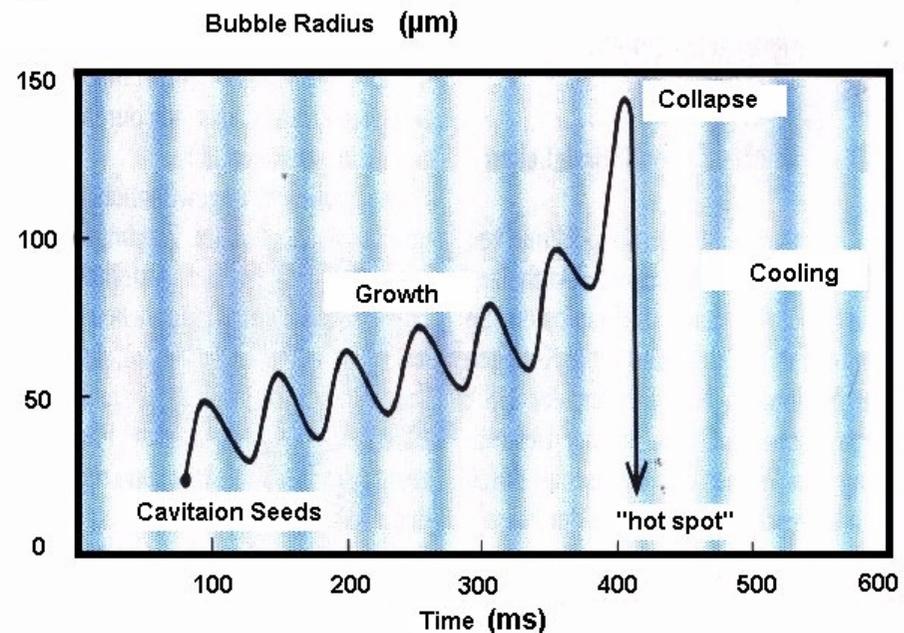
超声化学的发展历史

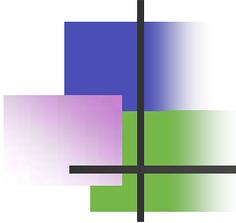
- 1895年, Thormycroft和Barnaby观察到潜水艇螺旋桨凹陷被侵蚀时发表了第一个关于空化的报告.
- 1927年,Loomis首次报道超声在化学和生物方面加快反应速率的效应.
- 1934年,发现超声能加大电解水的速率.
- 1944年,Harvery等引入了校正扩散的概念,即微气泡的成长是由于气泡振动过程中跨过界面非等量的传质引起的.
- 1950年,Noltingk和Neppiras对模拟空化气泡第一次用计算机进行了计算.
- 1964年,Flynn提出了“瞬态空化”和“稳态空化”的术语.
- 1980年, Neppiras首次在声空化的综述中使用了超声化学(sonochemistry)的术语.
- 1982年,Milino等人用自旋捕获和电子自旋共振谱(ESR)验证了在水超声裂解中形成氢自由基和羟基自由基.
- 1994年第一个学术刊物《Ultrasonics Sonochemistry》出版.

超声化学(Sonochemistry)的定义

利用功率超声的空化现象加速和控制化学反应，
提高反应率和引发新的化学反应

80年代兴起的边缘交叉学科，具有加速化学反应、降低反应条件、缩短反应诱导时间和能进行有些传统方法难以进行的化学反应等特点。是声能量与物质间的一种独特的相互作用

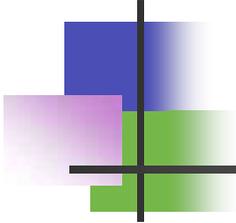




空化研究中的重要事件

加工纳米材料的有效手段

研究表明，纳米材料在电子学、光子学以及生物技术方面有巨大的应用潜力。而在加工纳米材料的各种技术中，超声空化技术显示出一系列的优点。因此，科学技术专家预测，在不久的将来，超声空化技术将会在加工纳米材料和生物材料中大显身手。



复习思考题

1. 定义：超声空化、空化阈值、空化核、稳态空化、瞬态空化。
2. 发生空化的条件，几种空化核。
3. 空化泡崩溃时间、共振频率与外部条件关系
4. 检测空化的方法
5. 影响超声空化的物理参数、如何影响？