

# 关于声致发光机理研究

钱祖文

(中国科学院声学研究所 声场、声信息国家重点实验室, 北京 100080)

中图分类号: O426.3 文献标识码: A

## On the mechanism of sonoluminescence

QIAN Zu-wen

(National Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

### 1 引言

近年来声致发光已成为热门课题, 其机理研究已取得重要进展。由于其马赫数较大, 微扰法无法利用, 故借助于数值方法来求解。在求解实际气泡内的方程组的过程中, 将气泡表面的振动方程作为动态边界条件, 而用得最多的是 Rayleigh-Plesset 方程, 简称 R-P 方程。本文将就此方程的可靠性作一探讨。此外, 还对高温粘滞及热传导系数及等离子体物理问题作一些讨论。

### 2 气泡的有限振幅振动

流体中的欧拉体系的方程组为

$$\rho_j \frac{d\vec{u}}{dt} = -\nabla p + (\zeta + \frac{4}{3}\eta) \nabla \nabla \cdot \vec{u} + \eta \nabla^2 \vec{u}$$

$$\frac{d\rho_j}{dt} + \rho_j \nabla \cdot \vec{u} = 0$$

$$p = p(\rho_j, s, x_i)$$

式中  $\zeta, \eta$  是流体的两个黏滞系数,  $\rho_j$  是流体的密度, 当下标  $j = w$  时, 表示液体, 当  $j = g$  时表示气体。s 是熵,  $x_i$  为内部变量。对于理想的不可压缩流体作径向运动时, 气泡表面的非线性振动方程为:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{p(R) - p_0 + p_m \sin \omega t}{\rho_{w0}}$$

式中  $\rho_{w0}$  是气泡外液体的静态密度, Plesset 等人得到了上述方程。值得提一下, 径向运动和不可压缩两个假定并不相容, Trilling、Herring 和 Flynn 去掉不可压缩假定, 但引入了发散势  $\varphi$

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + c_w \frac{\partial}{\partial r} \right) (r\varphi) = 0$$

满足上式的 THF 假定得到气泡振动方程为:

$$R \left[ 1 - \frac{2U}{c_w} \right] \frac{dU}{dt} + \frac{3}{2} U^2 \left[ 1 - \frac{4}{3} \frac{U}{c_w} \right] = \frac{R}{\rho_w U} \left[ \frac{U}{c_w} - \frac{U^2}{c_w^2} + \frac{U^3}{c_w^3} \right] \frac{dp}{dt} + \frac{R}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial r} \frac{dr}{dt}$$

$$U = \frac{dR}{dt}$$

$$p = p_g - \frac{2\sigma}{R} - 4\eta \frac{U}{R} + p_s - p_0 - p_m \sin \omega t$$

式中  $p_g$  是气体压力,  $p_s$  为饱和蒸气压,  $\sigma$  是表面张力系数。显然, 仅当马赫数  $M = U/c_w$  很小, 忽略表面张力及饱和蒸气压时, 于是有:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{R}{\rho_w c_w} \frac{dp}{dt} + \frac{P}{\rho_w} - \frac{4\eta}{\rho_w R} \frac{dR}{dt}$$

这即为熟知的(R-P)方程, 由此可见, 仅当马赫数较小时, R-P 方程成立, 但对绝大多数声致发光的气泡而言,  $M > 1^{[5,7]}$ 。另外, 我们还不知道 THF 假定是否成立?

由于泡内气体具有粘滞和热传导, 它们对温度很敏感。在声致发光时, 泡内温度很高 ( $10^4\text{K} - 10^5\text{K}$ ), 这时无测量数据可以利用, 只能应用理论估算结果。经典的分子运动论给出,  $\eta, \kappa \sim T^{1/2}$ , 而对于等离子体,  $\eta, \kappa \sim T^{5/2}$ , 也有些作者选取线性关系。不幸的是, 到目前为止, 尚没有实验数据来验证和指导我们如何选取它们, 从而给定量研究声致发光带来麻烦。

### 3 关于等离子体物理的基本条件

作者所知, 应用等离子体物理的三个基本条件为:

$$\lambda_D \ll L, \quad N_D = N \lambda_D^3 \gg 1, \quad \omega \tau > 1$$

式中  $\lambda_D$  为等离子体的德拜长度,  $L$  是等离子体的尺

收稿日期: 2000-01-21; 修订日期: 2000-05-15

国家自然科学基金资助项目

作者简介: 钱祖文(1933-), 男, 江苏人, 研究员。

度,  $\omega$  是电子振荡频率,  $\tau$  是碰撞时间。对于发光气泡而言,  $N \sim 10^{28} \text{m}^{-3}$ ,  $T \sim 10^4 \text{K} - 10^5 \text{K}$ , 很易算得,  $N_D \sim 1$ , 不满足第二个条件, 即德拜屏蔽条件不满足。

#### 4 结 论

(1) R-P 方程仅在马赫数较小时成立。但用数值方法研究声致发光机理时, 马赫数往往大于 1;

(2) 缺乏很高温度情况下的粘滞、热传导系数的测量数据;

(3) 对于声致发光气泡而言, 等离子体的德拜屏蔽条件不满足。

#### 参考文献:

[ 1 ] 钱祖文. 非线性声学[M], 北京: 科学出版社, 1992, 13, 14 章.  
[ 2 ] Z. W. Qian, Jet formation of bubble in cavitation field

[ C ], 15<sup>th</sup> ISNA, Goettingen: Sep 1999.  
[ 3 ] C. C. Wu and Paul Roberts. [ J ]. Phys. Rev. Lett., 1993, 70: 3424.  
[ 4 ] William C. Moss, et al. [ J ]. Phys. Fluids, 1994, 6: 2979.  
[ 5 ] Zhi-xing Xie, Wei-zhong Chen, and Rong-jue Wei, [ J ]. Chinese Phys. Lett, 1998, 15: 813.  
[ 6 ] Ning Xu, Long Wang and Xiwei Hu. [ J ]. Phys. Rev. 1998, E57: 1616.  
[ 7 ] L. Kondic, et al. [ J ]. Phys. Rev, 1995, E52: 4976  
[ 8 ] F. F. Chen, Introduction to Plasma Physics[ M ]. Plenum Press, 1974.  
[ 9 ] Robert J. Goldston and Paul H. Rutherford, Introduction to Plasma Physics[ M ], Institute of Physics Publisher Bristol and Philadelphia, 1995.  
[ 10 ] Macintyre F. [ J ]. Ultrasonics sonochemistry, 1997, 4: 85-93.  
[ 11 ] Ning xu, Long wang, and Xiwei Hu. [ J ]. Phys. Rev. Lett., 1999, 83: 2441.

## 新产品与新技术报道

### ‘超声多普勒血流信号的多参数分析及应用’验收和技术成果鉴定

由同济大学声学所所长刘镇清教授为主任, 上海大学生物医学工程系严壮志教授为副主任等 8 位专家组成的成果鉴定委员会, 于 2000 年 5 月 16 日在上海市科委主持下, 对复旦大学汪渊源教授承担的上海市启明星计划项目“超声多普勒血流信号的多参数分析及应用”进行了验收和技术成果鉴定。验收和鉴定委员会在听取了研制报告、技术报告, 审查了测试报告、使用报告和查新报告等技术文件后, 经讨论一致认为:

血管疾病会引起血流多普勒信号特征的变化, 因此准确提取高灵敏度的多普勒信号特征, 对诊断和动态监控疾病有十分积极的意义。

本项目的研究内容包括方法的研究和系统的研制。其中方法上的主要创新点表现在:

- (1) 提出时变滤波器和基于物理模型两种多普勒信号模拟方法, 前者计算简单, 后者可模拟较为真实的血流情况(包括涡流、湍流等复杂的血流情况);
- (2) 提出多普勒信号频谱分析的两种新方法: 平稳性提高法和频谱宽度校正法;
- (3) 提出了利用小波变换对多普勒信号进行降噪, 提高了信号的信噪比;
- (4) 提出了声谱图包络及其特征点自动提取的两种方法: 数学形态法和小波变换法, 使声谱参数的自动计算成为可能;
- (5) 首次将分形特征、零极点特征和  $T_{\text{eager}}$  特征用于对音频多普勒信号的分析;
- (6) 用多参数分析法代替单纯的声谱参数法, 并用于对脐动脉血流信号的分析。

研制的系统由多普勒检测单元和基于 PC 机的医学信号处理单元组成, 实现了多普勒血流信号的声谱、分形、零极点和  $T_{\text{eager}}$  等参数的自动提取及其分类决策。

经上海医科大学妇产科医院 71 例胎儿脐动脉多普勒血流信号的分析, 表明: 该系统为临床提供了较目前常规的声谱参数法更多的信息, 提高了诊断胎儿发育异常的准确性。

经上海科技情报中心检索和鉴定组认定, 项目组已超额完成了计划任务书要求的各项指标, 取得的技术成果属国内领先, 达国际先进水平, 有较大的应用前景。

建议进一步积累其他病种的病例, 推广应用, 以取得更大的社会效益。

鉴于本项目取得了良好的成果及临床上的应用背景, 建议上海市科委启明星计划继续对该项目组进行资助。

(本刊讯)