



“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代声学科学与技术丛书

声空化物理

陈伟中 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代声学科学与技术丛书

声空化物理

陈伟中 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书围绕声空化介绍相应的物理学知识和应用技术。在连续介质力学的理论框架里,介绍均匀流体中的声传播理论、不同流体中的界面行为以及振动表面的声辐射问题等。重点介绍 Rayleigh 气泡动力学模型的建立、修正和求解。阐述过程由浅入深、循序渐进,从无阻尼、无驱动的小幅脉动气泡开始,然后引入阻尼、驱动,得到描述声空化泡脉动的 Rayleigh-Plesset 方程,最后把理论推广到可压缩流体和非球对称情形。非线性是气泡动力学的一个重要特征,为此,本书介绍空化泡脉动的周期、倍周期、多周期和混沌特征,以及气泡动力学方程的数值求解。

声空化是一种强声效应,围绕强超声波的激发,本书介绍材料的弹性、介电性和压电性,以及超声波电源相关的电路理论;而作为强声产生的效应,专门介绍当前热门课题声致发光;最后,介绍进入各行各业的声空化应用技术,其中包括超声清洗、超声粉碎、超声灭菌、超声萃取、声化学、超声治疗学和包膜微气泡及其临床应用。

本书可供声学专业的高年级本科生、研究生做为教材使用,也可做相关科研人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

声空化物理/陈伟中著. —北京:科学出版社, 2014.8

(现代声学科学与技术丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-041810-4

I. ①声… II. ①陈… III. ①空化-声源-研究 IV. ①O427.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014) 第 207757 号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:朱光兰

责任印制:赵德静/封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年8月第一版 开本:720×1000 1/16

2014年8月第一次印刷 印张:29 1/4

字数:570 000

定价:169.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“现代声学科学与技术丛书”编委会

主 编：田 静

执行主编：程建春

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 陈伟中 | 陈 宇 | 邓明晰 | 侯朝焕 |
| 李晓东 | 林书玉 | 刘晓峻 | 吕亚东 |
| 马远良 | 钱梦騷 | 邱小军 | 孙 超 |
| 王威琪 | 谢菠荪 | 杨德森 | 杨士莪 |
| 张海澜 | 张仁和 | 张守著 | |

前 言

声空化是一种发生在液体中的强声现象，几乎所有液体中的强声技术都和声空化有关。声空化的应用最早出现在化学领域，目前已经发展成一个新的交叉学科——声化学。物理上的最普遍的应用是超声清洗，超声清洗机已经成为家用电器之一。由于声学学科的外向性特征，声空化的应用也已经或者正在渗入各个自然和工程学科。一个古典物理效应和形成众多应用技术的事实，并不意味着人们对声空化的物理机理有充分的理解。事实上，由于声空化产生的微气泡（空化泡）通常只有微米尺度，而且随着超声场高速脉动，其内部或者周围发生的过程人们所知甚少。空化过程、空化效应，乃至强超声的激发和传播所涉及的知识非常广泛，它与物理学的流体理论、波动理论、热力学理论、光学理论和凝聚态理论密切相关，还与化学、电子学、生物学等学科交叉。这为学习者和研究人员深入理解声空化现象带来不便。

我国功率超声和强声学领域从业人员众多，他们的学术背景多数来自于电子学或者是物理学，凭借他们已有的基础知识，深刻理解声空化是有困难的。在国际上，也鲜有专门介绍声空化的书籍，我们熟悉的可能只有 T. G. Leighton 编著的 *The Acoustic Bubble* 等。在国内，未见专门介绍声空化相关物理知识的书籍出版。作者应“现代声学科学与技术丛书”编委会的邀请，承蒙国家科学技术学术著作出版基金的资助，将从事声空化工作近 20 年所获得的一些心得体会整理成册，奉献给读者，以激发读者对声空化研究的兴趣，从而推动我国声空化研究的发展。

从内容上，本书可分为两个部分。第一部分是本书的主要部分，是围绕声空化介绍相关的物理学背景知识，也涉及部分电子学和化学内容。第二部分是介绍当前声空化领域的研究热点和主要应用技术，这部分是为进入声空化研究和声空化技术开发的读者而准备，其中罗列了大量的参考文献，介绍了最新科研成果。本书的知识起点是大学物理和高等数学，可供高年级本科生、研究生和声空化领域研究人员参考。通过阅读本书，可以深入了解声空化及其效应的物理本质，很快进入声空化研究和技术开发的前沿。

陈伟中

2013 年 6 月于南京大学声学楼

目 录

前言

| | |
|---------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 第 2 章 液体中的声波 | 5 |
| 2.1 理想流体中的声波理论 | 6 |
| 2.1.1 Euler 方程 | 7 |
| 2.1.2 Bernoulli 方程 | 9 |
| 2.1.3 连续性方程 | 11 |
| 2.1.4 守恒形式的流体力学基本方程 | 12 |
| 2.1.5 物态方程 | 13 |
| 2.1.6 过程方程 | 14 |
| 2.1.7 理想气体的绝热指数 | 17 |
| 2.2 声波方程的求解及其简单解 | 20 |
| 2.2.1 声波方程的微扰展开 | 20 |
| 2.2.2 线性化声波方程 | 22 |
| 2.2.3 边界条件和初始值 | 25 |
| 2.2.4 线性声波方程的简单解 | 27 |
| 2.3 声场的能量 | 30 |
| 2.3.1 能量 | 31 |
| 2.3.2 能量密度 | 32 |
| 2.3.3 能流和能流密度 | 33 |
| 2.4 声波在界面上的行为 | 37 |
| 2.4.1 衔接条件 | 37 |
| 2.4.2 反射定律和折射定律 | 38 |
| 2.4.3 声全反射 | 40 |
| 2.4.4 反射系数和透射系数 | 41 |
| 2.4.5 声阻抗 | 43 |
| 2.5 声辐射 | 45 |
| 2.5.1 球面声辐射理论 | 46 |
| 2.5.2 辐射声波的强度 | 48 |

| | | |
|--------------|------------------------------|-----------|
| 2.5.3 | 声辐射阻抗 | 50 |
| 2.6 | 黏性流体中的声波 | 50 |
| 2.6.1 | 流体中的应力张量 | 50 |
| 2.6.2 | Navier-Stokes 方程 | 55 |
| 2.6.3 | 曲线坐标系中的微分运算 | 58 |
| 2.6.4 | 球坐标下的 Navier-Stokes 方程 | 70 |
| 2.7 | 场和物质运动 | 72 |
| 2.7.1 | Euler 体系流体理论 | 72 |
| 2.7.2 | Lagrange 体系流体理论 | 74 |
| 2.7.3 | Euler 体系和 Lagrange 体系之间的相互转换 | 78 |
| 2.7.4 | Euler 体系和 Lagrange 体系的物理量的区别 | 80 |
| 第 3 章 | 电-超声波能量转换 | 82 |
| 3.1 | 晶体压电性的微观机理 | 82 |
| 3.2 | 晶体的弹性 | 84 |
| 3.2.1 | 应力张量和应变张量 | 84 |
| 3.2.2 | 广义 Hooke 定律 | 89 |
| 3.2.3 | 六维矢量表示的应力和应变张量 | 91 |
| 3.2.4 | Young 模量、切变模量和 Poisson 比 | 96 |
| 3.2.5 | 弹性体中的弹性能量密度 | 97 |
| 3.3 | 晶体的介电性 | 99 |
| 3.3.1 | 极化的量子微观机理 | 99 |
| 3.3.2 | 极化率张量 | 105 |
| 3.3.3 | 介电常数张量 | 106 |
| 3.3.4 | 电介质中的电能量密度 | 107 |
| 3.4 | 晶体的压电性 | 109 |
| 3.4.1 | 压电效应和逆压电效应 | 109 |
| 3.4.2 | 压电常数 | 110 |
| 3.4.3 | 压电方程 | 112 |
| 3.4.4 | 压电晶体中的能量密度 | 114 |
| 3.4.5 | 机电耦合系数 | 114 |
| 3.5 | 超声换能器 | 116 |
| 3.5.1 | 电声转换元件 | 116 |
| 3.5.2 | 变幅杆原理 | 120 |
| 3.5.3 | 超声换能器 | 124 |
| 3.5.4 | 压电换能器的等效电路 | 125 |

| | | |
|--------------|------------------|------------|
| 3.5.5 | 压电换能器的阻抗频率特性 | 128 |
| 3.5.6 | 压电换能器的阻抗匹配 | 129 |
| 3.6 | 超声功率放大器 | 131 |
| 3.6.1 | 放大器的种类和特性 | 132 |
| 3.6.2 | D 类放大器 | 134 |
| 3.6.3 | 频率跟踪电路 | 135 |
| 3.6.4 | 超声波发生器 | 137 |
| 第 4 章 | 液体的空化 | 140 |
| 4.1 | 空化阈值 | 142 |
| 4.1.1 | 理想空化和有核空化 | 142 |
| 4.1.2 | 空化泡的形状 | 144 |
| 4.1.3 | 表面张力 | 145 |
| 4.1.4 | 弯曲液体表面的附加压力 | 147 |
| 4.1.5 | 空化核 | 152 |
| 4.1.6 | 有核空化和 Blake 空化阈值 | 154 |
| 4.2 | 声空化 | 161 |
| 4.2.1 | 超声空化 | 161 |
| 4.2.2 | 水力空化 | 163 |
| 4.2.3 | 水翼空化 | 167 |
| 4.2.4 | 螺旋桨空化 | 170 |
| 4.2.5 | 水锤空化 | 173 |
| 4.3 | 空化效应 | 178 |
| 4.3.1 | 空蚀现象 | 179 |
| 4.3.2 | 空化噪声 | 181 |
| 4.4 | 空化强度 | 190 |
| 4.4.1 | 驱动声压描述空化强度 | 191 |
| 4.4.2 | 空化效应描述空化强度 | 193 |
| 4.4.3 | 空化强度表 | 200 |
| 第 5 章 | 气泡动力学 | 204 |
| 5.1 | 线性气泡动力学 | 204 |
| 5.1.1 | 气泡的自由运动 | 207 |
| 5.1.2 | 有阻尼的气泡运动 | 215 |
| 5.1.3 | 有驱动有阻尼的气泡运动 | 227 |
| 5.2 | Rayleigh 气泡动力学 | 231 |
| 5.2.1 | 有限幅度脉动的自由气泡 | 231 |

| | | |
|--------------|--------------------------|------------|
| 5.2.2 | Rayleigh 方程 | 232 |
| 5.2.3 | Rayleigh-Plesset 方程 | 235 |
| 5.2.4 | 可压缩流体的气泡动力学方程 | 236 |
| 5.3 | Rayleigh 方程的线性化 | 242 |
| 5.4 | 气泡的参数振动 | 243 |
| 5.4.1 | 强迫振动和参数振动 | 244 |
| 5.4.2 | 气泡的线性参数振动 | 248 |
| 5.5 | 非球形气泡动力学理论 | 249 |
| 5.5.1 | 非球形的初始气泡 | 250 |
| 5.5.2 | 非球形的驱动压力 | 253 |
| 5.6 | Rayleigh-Plesset 方程的数值求解 | 256 |
| 5.6.1 | Euler 方法 | 258 |
| 5.6.2 | 预报-校正方法 | 261 |
| 5.6.3 | Runge-Kutta 积分 | 263 |
| 5.6.4 | 步长控制和方法 | 265 |
| 5.6.5 | 气泡动力学的数值解 | 267 |
| 5.7 | 气泡脉动的测量 | 272 |
| 5.7.1 | Mie 散射技术 | 272 |
| 5.7.2 | 差频积分成像技术 | 277 |
| 5.7.3 | 数字移相频闪成像技术 | 278 |
| 5.7.4 | 双路 Mie 散射技术 | 282 |
| 第 6 章 | 声致发光 | 287 |
| 6.1 | 多泡声致发光 | 287 |
| 6.1.1 | 多泡声致发光的实验观察 | 288 |
| 6.1.2 | 多泡声致发光光谱 | 294 |
| 6.1.3 | 多泡声致发光特征光谱的参数相关性 | 297 |
| 6.1.4 | 多泡声致发光的温度相关性 | 300 |
| 6.1.5 | 表面活性剂对多泡声致发光的影响 | 301 |
| 6.1.6 | 多泡声致发光的机理 | 303 |
| 6.2 | 超声悬浮 | 305 |
| 6.2.1 | 声悬浮现象 | 306 |
| 6.2.2 | 声辐射压力 | 307 |
| 6.2.3 | 液体中空化泡的声悬浮 | 316 |
| 6.3 | 单泡声致发光 | 320 |
| 6.3.1 | 声谐振腔 | 321 |

| | | |
|--------------|----------------|------------|
| 6.3.2 | 工作液体的除气和溶气 | 332 |
| 6.3.3 | 单泡声致发光的实验观察 | 335 |
| 6.3.4 | 单泡声致发光的脉冲形状 | 336 |
| 6.3.5 | 单泡声致发光的连续光谱 | 345 |
| 6.3.6 | 单泡声致发光的特征光谱 | 347 |
| 6.3.7 | 单泡声致发光的时间相关光谱 | 349 |
| 6.3.8 | 单泡声致发光的参数相关性 | 353 |
| 6.4 | 声致发光机理 | 361 |
| 6.4.1 | 单泡声致发光的可能机理 | 361 |
| 6.4.2 | 单泡和多泡声致发光 | 364 |
| 6.5 | 非直接的声光效应 | 364 |
| 6.5.1 | 声致荧光 | 365 |
| 6.5.2 | 声致化学发光 | 368 |
| 第 7 章 | 声空化应用技术 | 371 |
| 7.1 | 超声清洗 | 371 |
| 7.2 | 超声粉碎 | 374 |
| 7.2.1 | 超声细胞粉碎 | 375 |
| 7.2.2 | 与传统细胞粉碎技术的比较 | 376 |
| 7.2.3 | 超声细胞粉碎的样品相关性 | 377 |
| 7.3 | 超声灭菌和空化灭菌 | 380 |
| 7.3.1 | 超声灭菌 | 380 |
| 7.3.2 | 空化灭菌 | 382 |
| 7.3.3 | 组合灭菌 | 384 |
| 7.4 | 超声萃取 | 385 |
| 7.4.1 | 萃取原理 | 386 |
| 7.4.2 | 萃取过程 | 388 |
| 7.4.3 | 超声液液萃取 | 389 |
| 7.4.4 | 超声固液萃取 | 392 |
| 7.5 | 声化学 | 396 |
| 7.5.1 | 声化学反应器 | 396 |
| 7.5.2 | 声化学的作用机理 | 397 |
| 7.5.3 | 水相声化学反应 | 399 |
| 7.5.4 | 有机声化学反应 | 401 |
| 7.6 | 超声治疗学 | 404 |
| 7.6.1 | 体外冲击波碎石 | 405 |

| | |
|-------------------------|-----|
| 7.6.2 高强度聚焦超声刀 | 408 |
| 7.7 包膜气泡及其在医学中的应用 | 411 |
| 7.7.1 超声造影剂 | 412 |
| 7.7.2 包膜气泡模型 | 413 |
| 7.7.3 超声靶向给药 | 421 |
| 参考文献 | 424 |
| 索引 | 439 |

第1章 绪 论

声波在液体中传播，在时空上产生压力起伏，出现低于静态压力的负压状态。当液体处于负压状态时，分子间受到较小的压力或者是拉力的作用。此时，液体内部原有的结构缺陷（空化核）会逐渐成长，形成肉眼可见的空腔，这种现象就是声空化（acoustic cavitation）^[1]。由于声波就是压力波，广义地讲，一切由于压力变化而引起的液体中出现气泡的过程，都是声空化。因此，声空化现象是一种非常常见的物理现象，不只是在实验室里出现。例如，当我们把一瓶矿泉水摔到桌子上时，水中出现气泡；高速转动的舰船螺旋桨，出现气泡尾流；医院里，超声波碎石机的电弧激发超声波，聚焦到人体结石处，实现体外碎石。这些都和声空化有关。实际上，在自然界中，声空化现象也比比皆是。例如，高山流水、雨打湖面等都会出现声空化现象，甚至连深海明虾的大鳌的高速闭合也会产生声空化^[2]。

由于表面张力的作用，空化泡的形状几乎是球形的，半径越小，非球度越小。在声波作用下，气泡仍能保持完好的球对称性，做几乎纯径向的脉动。这意味着声波正在驱动一个三维的活塞对气泡内气体做功。活塞系统通常是一维的，如我们熟悉的打气筒、注射器等。在运动过程中，活塞截面保持不变，只有高度发生变化，因此这是一个一维的活塞。当我们压缩一维活塞时，气体的高度减少，体积也随之减少，如果高度压缩 10 倍，体积也压缩 10 倍。但是，我们的空化泡不是一维的。当声波对一个球形气泡压缩时，气泡半径减少，气泡体积也随之减少。10 倍的半径压缩比，将产生 1000 倍的体积压缩比。因此，空化泡是一个三维的活塞系统。三维活塞系统所产生的物理效应，在通常的一维活塞中是难以看到的，这是出乎我们的意料的。对一个孤立系统，压缩体积，意味着气泡内能量密度上升，因此空化泡具有很强的空间聚能能力。更有意思的是，即使在单频简谐声波的驱动下，空化泡的脉动也是高度非线性的。这一点已经通过对气泡演化过程的测量以及对它的动力学方程的数值求解得到证明。结果显示，气泡脉动并不像驱动声压那样，半周期压缩，半周期膨胀，而是经过缓慢膨胀之后的急剧压缩。通常，膨胀时间在几十微秒量级，而急剧压缩的过程只有纳秒量级。可见，在时间上，空化泡脉动也具有显著的能量积聚能力。实验表明，在常规声压，例如，幅度为一个大气压（ $1\text{atm}=1.013 \times 10^5\text{Pa}$ ）、频率为 25kHz 的超声波驱动下的一个水中空化泡，半径压缩比可以高达 100 倍，空间压缩比达到 10^6 ，而时间压缩比也高达 10^5 ，最终导致空化泡内气体的能量密度提升 11 个量级！它是在 3+1 维时空里罕见的能量汇聚系统。当空化泡被压缩至最小半径前后，空化泡内部有数万度的高温和数千个

大气压的高压, 气泡壁的运动速度数十倍于液体的声速, 其加速度达到数千个重力加速度, 形成了宏观系统难以实现的极端高温高压。与此同时, 声空化泡的脉动和破裂导致周围液体中出现声微流、声喷注和冲击波等强声效应。

空化泡内部的极端物理条件和在其周围液体中出现的强声效应, 导致一系列的物理效应、化学效应和生物效应等。最典型的是声光能量的转换, 即声致发光 (sonoluminescence) 现象^[3]。所谓声致发光, 指的是声波驱动下的空化泡发射可见光的现象。虽然物理学告诉我们, 不同形式的能量可以相互转换, 但是我们通常见到的光多数是来自核能 (太阳光)、电能 (电灯, 雷电) 和化学能 (燃烧)。声致发光是声能 (机械能) 直接转换成光能的一个事例。我们知道, 原子能级是 eV 量级, 可见光的光子能量也在 eV 量级。如果光子是由于高温产生, 那么只有 10000K 的高温才能辐射一个 eV 能量的光子。换言之, 声致发光现象表明, 空化泡内部温度达到万度量级。对于一个宏观系统, 上万度的高温是很难实现的, 但是在一个小气泡里实现了。人们还尝试进一步提高驱动声压, 探索声致聚变 (sonofusion)^[4,5]。尽管声空化泡内能否实现热核聚变是一个有争议的问题^[6,7], 但内部存在罕见的极端物理条件却已经是一种共识。除了声致发光以外, 声空化在不同场合的出现产生不同的空化效应, 并逐渐发展为各种现代技术, 如超声清洗、超声粉碎、超声灭菌、超声萃取、超声体外碎石和超声手术刀等。可以这样说, 声空化的研究历史也就是声空化应用技术的发展史。

尽管声空化效应及其应用是当前声学、物理学中的一个热门课题, 回顾科学史, 声空化却是一个古老的问题。早在 19 世纪末, J. Thornycroft 和 S. W. Barnaby^[8] 在观察到经过短时间航行后的潜艇螺旋桨推进器的空蚀现象之后, 第一次提出了空化的概念。这是一个水力空化的事例, 是一种广义的声空化现象。1917 年, Rayleigh 爵士^[9]发表了一篇论文, 解释空蚀现象。文中给出了第一个关于不可压缩流体中的空化泡的数学模型, 现在称为 Rayleigh 气泡动力学模型。10 年后的 1927 年, W. T. Richards 和 A. L. Loomis^[10] 首次报道了声空化的化学和生物学效应的研究成果, 使人们意识到, 声空化可能在促进化学反应过程中有用武之地。历史上, 第一个声空化应用事例的研究简报发表在 1937 年的 *Nature* 杂志上。在这篇不到半个页面的论文中, 报道了作者利用超声空化降解来自于蜗牛的血蓝蛋白^[11]。此后, 声空化在化学和生命科学领域的应用引起了人们的高度关注, 利用声空化促进化学反应成为一个热门的研究课题。目前, 已经形成一个利用声空化促进化学过程的交叉学科——声化学。人们已在高分子聚合物的合成^[12]、提升化学反应速率^[13]、石油的乳化^[14] 以及化学和生物污染的降解^[15] 等方面成功地使用超声波, 并取得了丰硕的成果。

关于声空化数学模型方面的研究始于 Rayleigh 气泡动力学模型^[9], 这是一个关于球形气泡半径的时间演化方程。最初形式的 Rayleigh 方程是非常简单的, 气液

界面的表面张力作用、液体的黏性等都被忽略。由于是针对空蚀现象，远处声压被假设为常数，是一种无驱动的气泡动力学模型。1949 年，M. S. Plesset 对 Rayleigh 方程进行了一次修正^[16]。之后，B. E. Noltingk^[17]和 E. A. Neppiras^[18]又在 Rayleigh 方程中添加了表面张力附加压力修正，H. Poritsky^[19]则添加了液体黏性的修正。至此，当前常用的空化泡动力学模型已经建立，人们将其称为 Rayleigh-Plesset 气泡动力学模型。当然，随着时间的推移，气泡动力学理论也是不断发展的，人们进一步对模型进行液体的可压缩性修正、声辐射修正、气泡的非球形修正等。

1933 年，N. Marinenco 和 J. J. Trillat^[20]在实验中发现水溶液在声场作用下可以使照相乳胶板产生云雾状感光。他们认为，这是声场与乳胶分子间的直接相互作用的结果。次年，H. Frenzel 和 H. Shultes^[21]指出空化泡发出的弱光导致乳胶板的感光，并且这些空化泡在声驱动下不断产生和破灭，从而否定了超声波直接作用于乳胶分子导致感光的观点。1939 年，E. N. Harvey^[22]将这种空化泡发光现象命名为声致发光。声致发光现象发现后，引起了声学、物理学界对声空化的兴趣。1939 年，P. Paounoff^[23]首次使用光谱仪对声致发光光谱进行了拍摄。由于光谱仪灵敏度不高，曝光时间长达 12~48h。使用的液体是水，水里饱和的是空气、氧气、氮气等，结果得到从 445~558nm 的连续谱。到了 1957 年，人们使用先进的光电管 (photocell) 拍摄了声致发光的紫外光谱，波长范围为 190~280nm，液体仍然是水，但饱和的是稀有气体，包括氙气、氪气、氙气、氡气和氦气。结果显示，光谱强度以饱和氙气为最亮，饱和氪气、氙气、氡气和氦气依次下降^[24]。P. Günther 等对声致发光光谱进行系统观察时，发现有时可以探测到所研究液体的特征光谱，包括线状光谱 (line) 和带状光谱 (band)^[25]。

早期发现的声致发光来自于云雾状的空化泡群，是一种大量随机产生和破灭的空化泡发光现象，现在称为多泡声致发光。大量随机的空化泡参与发光，虽然不影响光谱的测量，却影响了气泡动力学的测量。因此，早期的声空化物理研究多侧重于光谱的测量。1989 年，D. F. Gaitan 等在除气水中，利用超声悬浮技术，实现单一气泡的空间上定位、时间上周期的稳态脉动声致发光^[26,27]，现在称为单泡声致发光。单泡声致发光的发现，特别是单气泡的声悬浮技术，允许人们对空化泡大小随时间演化的规律进行测量。空化泡动力学测量开始成为声空化研究的另一个重要实验手段。然而，对于高速脉动的微米量级空化泡的动力学测量，是具有挑战性的。通常，单泡声致发光使用超声频率为 25kHz 附近，对应的声波周期是 40 μ s。因此，可用于空化泡实时拍摄的高速相机至少是兆赫兹量级的，即每秒可拍摄 100 万帧。目前兆赫兹和 10MHz 的高速相机是成熟的，然而，通常高速相机一次只能记录几张到十几张，不能像普通录像机一样边拍摄边记录。更为困难的是，由于声致发光的空化泡很小，肉眼几乎不可见，拍摄相机前必须加装长距离显微镜头。经过显微镜头之后，相机的进光量显著减少，即使使用激光照明，高速成像仍是有困

难的。而且,照明激光的能量密度是有限制的,过强的激光会破坏空化泡。到目前为止,基于高速相机的实时成像技术进展缓慢。目前,多采用 Mie 散射技术^[28]、脉冲 Mie 散射技术^[29]、差频积分成像技术^[30]和数字锁相积分技术^[31]等对空化泡进行动力学测量。结果显示,空化泡的脉动是高度非线性的,体积压缩比达到 10^6 等。该结果能和声致发光的光谱测量、声化学效应测量结果相互支持,为揭示空化泡的聚能机制提供直接证据。

声学是一个外向性学科,声空化的研究和应用充分体现了这个特性。它始于舰艇螺旋桨的空蚀,首先在化学领域中得到广泛应用,目前与它相关的技术已经进入各个自然学科。声空化问题不是单纯的声学问题,它紧密联系着流体力学、热力学、光学、固体物理等,还涉及电子学、化学和生命科学等。声空化的外向性特征成了读者进入该领域研究和工作的一个障碍,不利于声空化研究的开展。目前,国际上有关声空化的专著也少有出版,国内几近空白。

本书的宗旨是向具备大学物理和高等数学知识的读者,系统展示声空化现象中所涉及的物理问题和解决方法。本书共分 7 章。第 1 章,阐述声空化的一些基本概念、历史背景、取得的重大进展和当前的研究动态。第 2 章,介绍声空化相关的物理学知识,重点阐述流体中的声波问题,这是本书的理论基础,对非声学专业的读者尤为重要。第 3 章,围绕着超声换能器激发超声波的各个主要环节,介绍相应的物理学原理和相关技术,其中包括晶体的弹性、介电性和压电性、振动幅度变换等内容。第 4 章,先理论上阐述产生空化现象的临界物理条件;再介绍各种常见的空化现象,如声空化、水力空化、水翼空化、螺旋桨空化和水锤空化等;然后介绍两种直接的声空化效应,即空蚀和空化噪声;最后介绍声空化强度的表征。第 5 章,介绍描述空化泡脉动的理论模型、数学求解和实验测量。具体的步骤是:从最简单的球形气泡动力学模型——Rayleigh 方程的推导开始,顺序渐进,逐步完善,给出当前普遍使用的 Rayleigh-Plesset 方程,并延伸到可压缩流体和非球对称情形;然后,介绍气泡动力学方程的线性化近似求解和计算机数值求解;最后,介绍空化泡脉动的实验测量技术。第 6 章,介绍声空化的重要效应——声致发光现象及其物理特性,这部分内容多数是取自于最近 10 年来的科研成果报道,它是进入声空化物理研究的主要文献资料。第 7 章,介绍声空化的一些重要应用或者有潜在应用的基于声空化的超声技术,其中包括超声清洗、超声粉碎、超声萃取、声化学、高强度聚焦超声刀以及医用超声造影剂等。通过阅读本书,可以深刻理解声空化的物理本质,从而快速进入声空化研究行列。

第 2 章 液体中的声波

声是一种机械波，是振动在弹性介质中的传播。介质内要形成声波，需要具备两个特性，一是组成介质的质点具有惯性，二是质点之间具有弹性。声波是惯性和弹性共同作用的结果。图 2.1 给出的一维弹簧振子链，就是最简单的弹性介质模型，通过这个简单模型我们可以看到声波的形成过程。在链的左端有一个振动（声源），使得紧邻连接的弹簧变形，弹力作用导致右边紧邻质量的振动；它的振动又引起它紧邻弹簧的变形，进而推动下一个质量的振动……这样，声源就在弹簧振子系统里形成声波。从图 2.1(a) 可以看到，声波传播方向是从左到右（水平方向），而质点振动的位移方向也是水平的，这种声波称为纵波 (longitudinal wave)。纵波导致介质质量的疏密变化，因此也称为密度波。而图 2.1(b) 显示的声波，质点振动方向是垂直的，但声波传播方向依然是水平的，这种波动模式称为横波 (切波, shear wave)。在空气和理想流体里，声波都是纵波。而在固体和黏性液体里，不仅可以有纵波，还可以存在横波。我们知道，电磁波是一种横波，而固体中的声波既有纵波又有横波，固体中的声波理论比电磁波更为复杂。

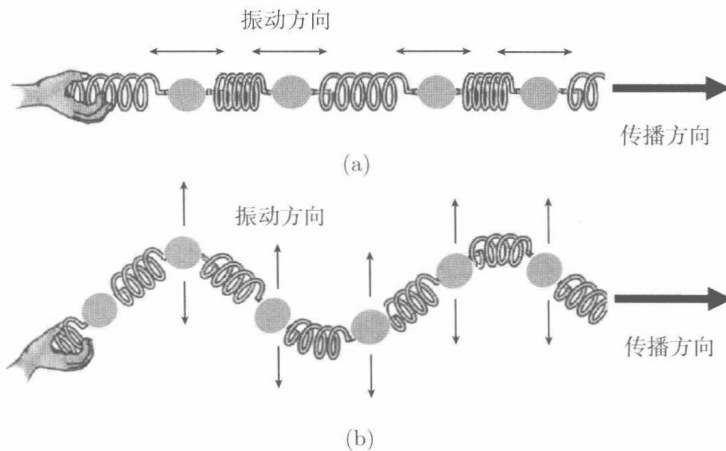


图 2.1 弹簧振子链中的声传播示意图

(a) 纵波; (b) 横波

声波根据振动频率可以划分为次声 (infrasound)、音频声 (audio)、超声 (ultrasound)，如图 2.2 所示。



图 2.2 声波

(1) **次声**指的是低于人类听觉范围的低频声，就是低于 20Hz 的声波。在自然界中大量存在次声，特别是一些灾难性气候会引发高强度次声，如地震和海啸。当然，一些高能量的人类活动也会激发次声，如核弹爆炸。人耳不能感觉次声，但高强度的次声对人类能造成头晕、呕吐等生理反应。

(2) **音频声**指人类听觉范围内的声波，这类声波和人类最为密切，涉及我们生活的各种领域。例如，交流的语言，动听的音乐，当然还有恼人的噪声。

(3) **超声**泛指高于人类听觉范围的声波，即高于 20kHz 的声波。根据目前技术水平，人们能够产生高于 GHz，达到 100GHz 的特高频超声。由于特高频超声在许多物理特性上不同于相对低频的超声，目前已形成了新的学科分支，称为微波声学 (microwave acoustics)。这里的微波指的是电磁波的微波波段，即 300MHz~300GHz 频段。但由于声速比光速小 5 个量级，因此，微波超声的波长远短于微波波长，进入亚微米量级。

本书的宗旨是介绍声空化现象，它是低频超声进入液体之后所产生的一种物理效应，通常使用的超声波频率在 20kHz~100MHz。因此，我们所指的超声不包括微波超声。

作为本书的理论基础，本章先介绍声波在液体中的传播问题。在声传播研究中，液体和气体具有类似的性质，它们内部的分子都可以任意移动，统称为流体。下面就介绍声波在流体中的传播问题。

2.1 理想流体中的声波理论

最简单的流体是理想流体，所谓理想，指的是：

(1) **连续性假设**，假设流体是充分连续的，即声波波长远大于流体内部分子间的间距；

(2) **无耗散假设**，组成流体的分子可以在流体内部自由移动而不消耗能量。

虽然理想流体是一种简化的流体模型，和实际流体有一定的区别，但它给出了流体的一些最为重要的流体性质，以它为介质来研究声波在流体中传播的基本规律是非常合适的，既简单又突出重点。下面我们先研究理想流体中的声传播问题，