



声学测量系列

含泥沙水介质 声吸收与声散射特性研究

HANNISHA SHUIJIEZHI SHENGXISHOU YU SHENGSA NSHE TEXING YANJIU

刘永伟 著

HEUP

哈尔滨工程大学出版社

含泥沙水介质吸收与 声散射特性研究

刘永伟 著

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

由于浅海环境的特征及体积混响的特性,很难利用常规的水声设备进行低频段体积混响的试验测量。针对这一问题,本书研制了一套由模拟接收板、控制板和 PCI 总线通信板组成的数据采集器,并在此基础上,设计并构建了一套含泥沙海水散射特性测量实验系统。

本书适用于声学测量方向的研究人员和该方向的研究生。

图书在版编目(CIP)数据

含泥沙水介质声吸收与声散射特性研究/刘永伟著.
—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2017.1
ISBN 978-7-5661-1458-7

I. ①含… II. ①刘… III. ①海水-声吸收-研究 ②
海水-水声散射-研究 IV. ①P733.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 020393 号

选题策划 付梦婷
责任编辑 张忠远 付梦婷
封面设计 恒润设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787 mm×960 mm 1/16
印 张 9
字 数 194 千字
版 次 2017 年 1 月第 1 版
印 次 2017 年 1 月第 1 次印刷
定 价 25.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

序言

大面积的混浊海水水域和复杂的海底底质地貌是我国海洋环境的重要特征。由于我国海域的海水中含有大量泥沙、藻类、浮游生物等各类悬浮物,其水色较深,我国海水的透明度较小,声吸收和声散射特性比纯净海水有所增加,这样的海水也称为混浊海水。本书主要研究了混浊海水的声吸收与声散射特性,即悬浮的泥沙颗粒对海水声吸收和声散射特性的影响。

本书共分六章。

(1)绪论。本章综述了混浊海水声吸收和声散射特性的研究背景、国内外的研究现状以及本书的研究内容等。

(2)声吸收原理与测量方法。本章简述了均匀介质中声吸收的基本原理、海洋中的声吸收起因、海水的化学组成等,以明确如何对混浊海水的声吸收特性进行研究;阐述了测量海水声吸收的方法。

(3)混响桶内声场研究与分析。首先,研究了混响桶内的声场、混响桶特性的修正、桶内简正频率的分布、桶内的瞬态响应(混响)、混响桶测量水介质声吸收的原理;其次,通过实验研究气泡、电缆所引起的声吸收对实验测量的影响,混响时间的测量方法对声吸收系数测量误差的影响,仿真分析了温度、盐度、压强和泥沙颗粒的粒径分布等对混浊海水声吸收特性的影响。

(4)声吸收实验研究。本章对混浊海水的声吸收特性进行了实验测量,阐述了声吸收实验测量的难点、声吸收测量系统的构成(包括混响桶设计、真空除气设计、系统隔声隔振设计及保温设计等);实验研究了混浊海水的声吸收系数随频率、悬浮泥沙颗粒浓度的变化规律,定量地给出了低频段、低悬浮泥沙颗粒浓度混浊海水的声吸收系数,当混浊海水达到光学混浊时,并没有同步引起声学混浊。本章利用混浊海水中的悬浮泥沙颗粒粒度分析的数据,结合现有的声吸收公式,提出了快速预报混浊海水声吸收系数的方法。

(5)海洋中声散射。本章介绍了海洋中的声散射、混响的种类、体积混响的理

论及测量方法等。

(6) 声散射试验研究。本章对混浊海水声散射特性进行了试验测量;阐述了混浊海水声散射试验测量的难点、声散射测量系统的构成;通过海试获得的声散射强度随频率、悬浮物浓度、盐度、温度、浊度等的变化规律。

著 者

2016 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究概况	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 主要研究内容	11
参考文献	12
第 2 章 声吸收原理与测量方法	22
2.1 均匀介质声吸收	22
2.2 海洋中的声吸收	33
2.3 海水化学组成	38
2.4 声吸收测量方法	40
参考文献	44
第 3 章 混响桶内声场研究与分析	46
3.1 桶内简正波	46
3.2 桶特性修正	48
3.3 桶内简正频率分布	49
3.4 桶内瞬态效应(混响)	50
3.5 混响桶测量水介质声吸收原理	53
3.6 混响桶中声场研究	58
3.7 水中气泡对声吸收的影响	60
3.8 传感器对测量的影响	62
3.9 MgSO_4 盐对声吸收的影响	66
3.10 混响时间测量方法对声吸收的影响	69
3.11 温、盐、深对含泥沙海水声吸收的影响	75
参考文献	85
第 4 章 声吸收实验研究	87
4.1 声吸收研究难点	87

4.2	声吸收测量系统	87
4.3	含泥沙海水声吸收实验测量	95
4.4	含泥沙海水声吸收预报方法	101
4.5	海试	113
	参考文献	115
第5章	海洋中声散射	116
5.1	混响种类	116
5.2	散射强度	117
5.3	等效平面波混响级	118
5.4	体积混响	118
	参考文献	119
第6章	声散射试验研究	120
6.1	声散射研究难点	120
6.2	测量系统	121
6.3	海试	125
6.4	海试数据分析	129
	参考文献	131
附录A	声吸收测量系统	134
附录B	声散射测量系统	135

第 1 章 绪 论

1.1 研究概况

由于江河携带泥沙注入及水土流失等原因,我国的大部分近海海域(北起渤海湾,南到伶仃洋的领海)都属于混浊水海域。在此类海水中含有大量的泥沙颗粒、藻类、浮游生物等悬浮物,海水的透明度小,这种海水被称为混浊海水。在此类海域中,水体本身对声波有较强的吸收和散射效应。此外,由于此类海水处于近岸浅海区,潮流比较湍急,海底地形、地貌与底质类型非常复杂,强烈跃变层及其相关的高频内波和孤立子现象极为多发,繁忙的海运与各类海洋生物群所带来的海洋环境噪声比远海一般要高 20 ~ 30 dB。因此,常规的水声设备在含泥沙水海域工作时,其性能将受到较大的影响。

声波在纯净海水中传播时,沿传播方向声能衰减。除了几何扩展之外,介质吸收和粒子散射也是衰减的两种主要机理。当声波在含泥沙海水中传播时,因悬浮泥沙颗粒的存在,产生了另外两种不同的声吸收机理:粘滞吸收和散射吸收。由于悬浮泥沙颗粒与水的密度不同,当声波在其中传播时,悬浮泥沙颗粒与水质点的运动速度会不同,两者间将产生相对运动。悬浮泥沙颗粒的运动与水质点的运动相比,其相位滞后,导致在悬浮泥沙颗粒表面会产生具有速度梯度的边界层。由于粘滞性的存在,这种速度梯度将使得声能转变为热能而引起声吸收,称其为粘滞吸收。同时,水中悬浮的泥沙颗粒会使声波向各个方向散射,也会产生声吸收,称其为散射吸收。

在含泥沙海水中除泥沙颗粒、海洋生物等大量的散射体外,还存在其他散射体,如气泡、水中温度局部不均匀性所造成的冷热水团等。而且,不平整的海面和海底也是声波的散射体,因此,当声波在含泥沙海水中传播时,会产生散射过程:一部分入射的声波继续按原来的方向传播;另一部分声波则向四周散射,形成散射声场,这也是导致声波沿传播方向声能衰减的原因之一。逆声波入射方向的声散射,统称为体积混响,是主动声呐的主要背景干扰,它限制了此类声呐的作用距离和参数估计能力。同时,体积混响也是影响近海底、沉底目标探测的主要因素之一。

为了提高水声设备在含泥沙水海域中的探测能力,常用的有效途径是降低工作频率(介质对声波的吸收与频率的平方成正比,而散射强度与频率的关系比较复杂,与散射体的种类、尺度及分布等有关),但降低工作频率对水声探测设备来说也

不是一件简单的事情。当工作频率降低后,若要保持相同的功率和指向性,发射换能器的尺寸也要相应地增大,空间分辨能力也要作一定的牺牲。频率降低的多少,则取决于对含泥沙海水声吸收和声散射特性的认识。

因此,若能对含泥沙海水声吸收与声散射的特性进行深入研究,将为含泥沙水海域声传播理论建模、声呐系统设计、沉底目标探测等提供相应的技术支持,以满足今后含泥沙水域中新装备制造的技术和理论需求。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 声吸收研究现状

对于水介质、电解质溶液、海水声吸收的测量可以追溯到 19 世纪。

1. 国外对声吸收的研究

1938 年, Vern O. Knudsen 和 Edwin F. Fricke 对 101.325 kPa、22 °C 时的 CO_2 声吸收进行了测量,证实了“碰撞”可导致异常声吸收^[1]。1948 年, Charles J. Burton 利用光衍射法测量了水和乙醇、乙二醇、乙二醇乙醚二元混合溶液在 5 ~ 25 MHz 范围内的声吸收和声速^[2]。1948 年, L. N. Liebermann 测量了水和海水在 120 kHz ~ 1 MHz 内的声吸收系数^[3]。1950 年, Richard K. Cook 和 S. Edelman 给出了测量声吸收系数混响室的定义^[4]。1951 年, M. C. Smith, R. E. Barrett 和 R. T. Beyer 测量了 MgSO_4 溶液在 3 ~ 43 MHz 范围内的声吸收系数^[5]。1951 年, O. B. Wilson Jr. 和 R. W. Leonard 利用混响法测量了 MgSO_4 溶液的声吸收系数^[6]。1953 年, Frank L. Mcnamara 和 Robert T. Beyer 制造了可用来测量液体声吸收系数的仪器^[7]。1954 年, O. B. Wilson JR. 和 Robert W. Leonard 测量了大约 50 ~ 500 kHz 内,不同温度的海水、醋酸镁、硫酸锌、硫酸铋溶液的声吸收系数。他们发现此类溶液的声吸收系数是非常小的,只有采用实验室的方法才能可靠地测量出低频水、水溶液的声吸收系数^[8]。

1954 年, John Karpovich 采用共振 - 混响法研究了 20 ~ 600 kHz 内液体的声吸收,测量了 44 种液体的声吸收系数,并提出可在固体中利用共振 - 混响法测量声吸收的技术^[9]。1955 年, T. A. Litovitz 和 E. H. Carnevale 测量了压强增至 202.650 MPa 下水的声吸收^[10]。1955 年, E. H. Carnevale 和 T. A. Litovitz 在 202.650 MPa 下,测量了乙基苯酚、甲烷基、N - 丙烷基和 N - 丁基乙醇的声吸收和声速^[11]。1956 年, W. J. Toulis 提出了常压下圆柱形容器的谐振理论,以及声速绝对值与泥沙样品衰减常数之间的关系^[12]。1956 年, J. E. Piercy 发现了在临界混合

区超声频率处,几种二元液体混合物的声吸收系数存在较大的值。他认为中等浓度处的声吸收最大值可归因于分子的缔合^[13]。

1956年,Leonard Liebermann 推导出了压力与液体声吸收之间的关系^[14]。1957年,P. D. Edmonds 和 J. Lamb 提出了通过测量轴向、径向模态的传播时间的衰减来计算声吸收系数的方法,该方法适用于 $(9.87 \sim 444.11) \times 10^{-3} \text{ Hz/Pa}$ 。1958年,S. R. Murphy, G. R. Garrison 和 D. S. Potter 在深水湾进行了一系列的声传播实验,测量了高频处海水的声吸收系数^[16]。1959年,F. H. Fisher 在 500 kHz 处,对掺有水合二氧杂环乙烷(二氧杂环乙烷占 25%)的 0.5 mol/L 硫酸镁溶液进行了声吸收的实验测量^[17]。1960年,F. H. Fisher 在 100 ~ 500 kHz、25 °C 时,研究了当 0.5 mol/L 硫酸镁溶液中含有不同溶剂时,压强和介电常数对其声吸收的影响^[18]。1962年,M. Schulkin 和 H. W. Marsh 结合已公开发表的声吸收系数与在北大西洋测量的 2 ~ 25 kHz 的声吸收数据,推导出海水的声吸收与频率、温度、盐度和压强之间关系的公式^[19]。1962年,John. P. Beam 推导出 Lieberman 声吸收公式 $\alpha = \beta f^2 + (A f_0 f^2)/(f_0^2 + f^2)$ 中的量 A 与温度、盐度的关系^[20]。1965年,Gordon Atkinson 和 S. K. Kor 在 25 °C 时,测量了硫酸锰水溶液、硫酸锰二氧杂环乙烷溶液、硫酸锰甲醇溶液的声吸收系数^[21]。

1970年,John G. Powell 和 John J. Van Houten 提出用猝发音测量材料法向入射声吸收系数的方法,并在 500 Hz ~ 10 kHz 时,利用该方法测量了几种吸声体的声吸收系数^[22]。1972年,T. J. Schultz 总结了在使用稳态法测量设备的辐射声功率和房间的声吸收中的一些进展,指出了该方法在测量中需要注意的问题^[23]。1972年,F. H. Fisher 和 H. F. Bezdek 观测到在 75 kHz 且压强增大时,海水的声吸收大约减小为 Eigen 和 Tamm 公式计算值的两倍,发现硫酸镁是海水中声吸收的主要盐类。该研究表明压强对硫酸镁声吸收的影响是很小的^[24]。1973年,W. M. Madigosky 在 5 MHz ~ 200 MHz、-80 °C ~ 25 °C 处,测量了二甲基亚砷混合液的声吸收系数^[25]。1973年,Ernest Yeager, F. H. Fisher, John Miceli 和 Robert Bressel 利用温度跃变法揭示了海水在 9.7 °C 存在一个弛豫时间为 $1.5 \times 10^{-4} \text{ s}$ 的弛豫机理。该机理源自硼酸,并与长距离声传播时发现的 $\propto 1 \text{ kHz}$ 的弛豫机理符合良好。结果表明: $\text{B(OH)}_3 - \text{B(OH)}_4^-$ 之间平衡的变化导致了硼酸的弛豫过程^[26]。1974年,R. G. Harlow 和 P. R. Street 在 298 ~ 401 K 内,对 O_2 和水蒸气的混合液进行了声吸收的实验测量^[27]。

1975年,V. P. Simmons 和 F. H. Fisher 在实验室利用 200 L 的球形玻璃共振器进行的实验表明:在 1 kHz 以下,存在较大的声吸收,这与以前海洋中测量的结果一样,即声吸收是由海水中的硼酸引起的^[28]。1975年,G. R. Garrison, R. E.

Francois 和 E. A. Pence 在接近阿拉斯加·巴罗浮冰区进行了 10 ~ 60 kHz 内的声传播实验,测量了海水的声吸收系数^[29]。1975 年,F. H. Fisher 和 V. P. Simmons 在 200 L 的球形玻璃共振器中进行的声学测量表明:海水中由硼酸引起的声吸收要比预报值大了约十倍。采用化学动力学中的温度跃变法测量了硼酸的弛豫频率,并利用三态的化学反应假设,定量地分析了声吸收与弛豫频率之间的关系^[30]。1976 年,G. R. Garrison, E. W. Early 和 T. Wen 在接近阿拉斯加·巴罗的浮冰区进行了 7 kHz, 13 kHz, 20 kHz, 30 kHz 和 60 kHz 的声吸收测量实验。他们发现在 36 ± 3 kHz 处存在硫酸镁弛豫引起的声吸收,但吸收系数小于 Schulkin - Marsh 公式的计算值^[31]。1976 年,R. H. Mellen 和 D. G. Browning 发现低于 1 kHz 的海水声吸收系数存在明显的地区差异性。例如,北大西洋的声吸收系数约为北太平洋声吸收系数的两倍。实验室测量结果表明:硼酸弛豫是引起低频声吸收的原因,且声吸收与 pH 值之间存在单调递增的函数关系^[32]。

1977 年,Robert H. Mellen 和 David G. Browning 研究表明:硼酸、硼酸盐的弛豫是引起低频声吸收的原因。在海洋中的 pH 值(7.5 ~ 8.2)内,声吸收系数约是 pH 值的指数增函数^[33]。1977 年,G. A. Atkinson, E. Enwall 和 H. Endo 模拟了(Mg^{2+} , SO_4^{2-} , CO_2 , H_2O)海水中的声吸收。除了低频(小于 10kHz)逾量声吸收可认为是 $\text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ 离子对弛豫引起的,主要声吸收是由 $\text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ 离子对弛豫引起的,还观测到硼酸 - 硼酸盐过程弛豫引起的声吸收^[34]。1977 年,F. H. Fisher 和 V. P. Simmons 推导出与频率、温度和压强呈函数关系的海水声吸收公式^[35]。1977 年,Dan Chang, F. D. Shields 和 H. E. Bass 制造了可测量湿度与空气声吸收之间关系的仪器,范围从 4 ~ 100 kHz^[36]。1977 年,Jacques Rouch, C. C. Lai 和 Sow - Hsin Chen 在液体、过冷水中进行的高频声速和声吸收的测量表明:在大约 228 K 温度处,存在着热动力奇点,并确定了单一的临界指数^[37]。1979 年,Ryusuke Kono, Toshihiko Yamaoka 和 Haruyo Yoshizaki John McGinness 给出了水合 20% 的二乙胺黑色素纵向和剪切弛豫机理的数据^[38]。

1979 年,R. H. Mellen, V. P. Simmons 和 D. G. Browning 在对引起海水声吸收的主要化学弛豫,即高频(弛豫频率 f_r 接近 100 kHz)的硫酸镁和低频(f_r 接近 1 kHz)的硼酸化学弛豫进行研究时,发现了第三个化学弛豫——镁和碳酸的化学弛豫^[39]。1979 年,F. H. Fisher 发现在 3 kHz(或者更高)处海水中存在着第三个化学弛豫而引起声吸收。在 4 °C 时, $\alpha\lambda_{\max} = 0.26 \times 10^{-5}$ ^[40]。1980 年,R. H. Mellen, V. P. Simmons 和 D. G. Browning 对利用共振器法测量的硼酸盐水溶液声吸收系数进行的研究表明:低频海水的声吸收应该包括 Mg、Ca 和 CO_2 的声吸收^[41]。1980 年,G. Carini, M. Cutroni, G. Maisano, P. Migliardo 和 F. Wanderlingh 测量了 CdCl_2 水溶液

的声吸收系数^[42]。1981年, R. H. Mellen, V. P. Simmons 和 D. G. Browning 利用共振器对硼酸溶液声吸收进行的测量表明: 低频海水的声吸收应包括镁、钙、碳酸盐的声吸收^[43]。1981年, Allan J. Zuckerwar 和 William A. Griffin 在 297 K、当频率/声压 (f/P) 在 $9.87 \times 10^{-7} \sim 2.47 \times 10^{-2}$ Hz/Pa 之间变化时, 对 $N_2 - H_2O$ 两种混合液体的声吸收系数进行了测量^[44]。

1981年, R. H. Mellen, D. G. Browning 和 V. P. Simmons 认为不能把海水中的化学声吸收看作是互不相关弛豫过程的总和。可把 $MgCO_3$ 、 $MgB(OH)_4^+$ 的弛豫的耦合效应解释为简单的缓冲反应, 即快速的化学平衡和缓慢的化学反应^[45]。1982年, Harumi Endo 通过假设水结构的动态变化为双弛豫机理, 推导出弛豫机理和瞬时热力学参数之间的关系^[46]。1982年, R. E. Francois 和 G. R. Garrison 认为在 10 kHz ~ 1 MHz 时, 海水的声吸收是纯水和硫酸镁的声吸收之和^[47]。1982年, R. E. Francois 和 G. R. Garrison 认为海水的声吸收是由三部分组成的, 即纯水、硫酸镁和硼酸的声吸收, 其他化学反应对声吸收的贡献很小, 可忽略不计, 给出了一个在 200 Hz ~ 1 MHz 内适用于所有海洋条件的海水声吸收公式^[48]。1982年, D. J. Whelan 认为低频 (1 ~ 100 kHz) 和中频 (50 ~ 500 kHz) 范围内的海水声吸收可用一系列的弛豫现象来解释。低于 5 kHz 时, 声吸收的主要机理可归因于硼酸盐、镁/碳酸盐的弛豫。在 5 ~ 50 kHz 之间的声吸收可归因于海水中硫酸镁离子对的弛豫^[49]。1983年, C. C. Hsu 和 F. H. Fisher 在 25 °C 时, 对 0.011 mol/L 的 $CaSO_4$ 水溶液的声吸收系数进行了测量^[50]。1983年, F. H. Fisher 分析了 Kurtze 和 Tamm 的 $MgSO_4 - HCl$ 和 $MgSO_4 - H_2SO_4$ 混合水溶液的声吸收数据。他认为不能用离子对理论来解释当酸加入 0.05 mol/L 的 $MgSO_4$ 溶液时引起的声吸收减少现象^[51]。

1983年, G. R. Garrison, R. E. Francois, E. W. Early 和 T. Wen 在 1979 年 4 月、1980 年 3 月和 1980 年 12 月测量的接近冰冻的海水声吸收系数的基础上提出了一个逾量声吸收公式^[52]。1983年, R. H. Mellen, D. G. Browning 和 V. P. Simmons 认为海水中低频硼酸的弛豫机理是 $B(OH)_3/B(OH)_4^-$ 和 HCO_3^-/CO_3^{2-} 之间平衡的酸碱交换^[53]。1984年, V. P. Simmons 分析了大型球共振器测量的声吸收数据和温度跳变法测量的弛豫频率数据, 表明在低于 1 kHz 时海水中存在增大的声吸收, 该机理可认为是由 $B(OH)_3$ 的化学弛豫引起的^[54]。1988年, Udo Kaatze 和 Bernd Wehrmann 介绍了可测量液体声吸收系数的共振器技术^[55]。1998年, Simon D. Richards 研究了温度、压强、盐度对含有悬浮固体粒子海水的声衰减系数的影响^[56]。1998年, Michael A. Ainslie 和 James G. McColm 提出了预报海水声吸收的简单公式, 并验证了该公式的准确性^[57]。

1998年, Niven R. Brown, Timothy G. Leighton, Simon D. Richards 和 Anthony D.

Heathershaw 利用混响法测量了在 50 kHz ~ 150 kHz 内由悬浮颗粒物质引起的粘滞声吸收系数。当浓度在 $0.5 \sim 2 \text{ kg/m}^3$ 之间变化时,球形玻璃珠悬浮液的声吸收系数的测量值与理论计算值吻合较好^[58]。2001 年, Frederick H. Fisher 研究表明在 100 kHz 以下,硫酸镁产生的声吸收系数要比纯水的声吸收系数大 30 倍;在 1 kHz 以下,硼酸引起了逾量的声吸收。在 101.325 kPa 且 10 kHz ~ 300 MHz 时,可用 Eigen 和 Tamm 的四态离解模型解释硫酸镁的声吸收;可用 Simmons 基于三态离子对的模型解释硼酸的声吸收^[59]。2001 年, F. H. Fisher 和 C. C. Hsu 利用 100 L 的钛球(可加压至 30.4 MPa),研究了压强对硫酸镁溶液声吸收的影响。他们发现钛球引起的声吸收可由纯水校准,而且指出了测量中需注意的问题,如压强、温度、频率的变化以及液体的除气等^[60]。2001 年, Harumi Endo 和 Kazuyuki Honda 从浓度涨落扩散方程中引入了弛豫时间的分布函数 [DFRT, $F(\tau)$]。他们对 1-丙醇、t-丁醇和三乙基-丁氨乙二醇与水混合液的声吸收进行的计算表明:计算的曲线和测量值可进行很好的拟合^[61]。

2001 年, J. F. Ternon, C. Oudot, V. Gourlaouen 和 D. Diverres 详细研究了大西洋赤道处 pH_T 的分布。他们提出的多元线性回归模型可使 pH_T 直接与水文参数和营养素相关联^[62]。2002 年, F. H. Fisher 用 100 L 的钛球研究了盐酸加入硫酸镁溶液后声吸收的变化,并利用 Eigen 和 Tamm 的四态离解模型解释了该实验结果^[63]。2003 年, Simon D. Richards, Timothy G. Leighton 和 Niven R. Brown 利用混响法测量了两种非球形粒子(圆盘状的高龄土和粒状的 CaCO_3 粒子)悬浮液的声吸收。他们发现若把用重力沉降法、离心沉降法得到的粒子尺寸分布表示为扁球状粒子的尺寸分布,则可使预报的扁平状高龄土粒子的声吸收系数与测量结果符合较好^[64]。

2004 年, Emi Toyoda, Shinichi Sakamoto 和 Hideki Tachibana 基于射线声学理论,研究了材料吸声系数的测量结果与混响室中声场扩散性的关系^[65]。2005 年, Steve Vanlanduit, Joris Vanherzeele, Patrick Guillaume 和 Gert De Sitter 提出了一种当声波法向入射时,测量声学材料反射系数和吸收系数的方法。利用该方法测量的吸声材料(玻璃纤维绒和地毯)的吸声系数,可与材料库中的数据吻合较好^[66]。2007 年, T. Yamaguchi, T. Matsuoka 和 S. Koda 提出了电解质溶液因离子的相对运动(含离子对的形成)而产生声吸收的理论^[67]。2007 年, T. Yamaguchi, T. Matsuoka 和 S. Koda 理论证明了 MgSO_4 溶液在 100 kHz、1 GHz 附近存在着弛豫过程^[68]。

2. 国内对声吸收的研究

1962 年,钱祖文用化学热力学方法推导出的弛豫吸收公式和唯象理论的假定,表明用 $\text{MgSO}_4 \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$ 来阐述 MgSO_4 溶液的弛豫吸收是不够恰当的^[69]。1984 年,裘辛方、蒋济良、万世敏用圆柱形共振器法研究了三种混合水溶液



的声吸收与 pH 值的关系。他们发现在 $B(OH)_3/CO_3/Ca/Mg/NaCl$ 溶液中还存在一个由 $MgHCO_3^+$ 引起的弛豫频率为 3.5 kHz 的低频弛豫^[70]。1985 年,裘辛方、蒋济良、万世敏通过共振器法研究了硼酸的弛豫频率、最大波长吸收与 $B(OH)_3$ 及 $NaHCO_3$ 浓度之间的关系^[71]。1987 年,裘辛方、韩嗣康利用 27 个不同温度下(4 ~ 29 °C)测得的天然海水声吸收数据,给出了 $MgSO_4$ 弛豫频率及最大波长吸收与温度关系的公式^[72]。1988 年,方彦军、唐懋官提出了一种新的声吸收系数测试方法——“面积比值法”,测量了不同质量浓度下的三种悬浮液的声吸收系数,所得结果与 Urick 的理论和实验相符合^[73]。

1989 年,裘辛方、蒋济良、万世敏用共振器法测量了天然海水低频声吸收与 pH 值的关系,表明若用一个公式较准确地预估低频、高频处海水的声吸收,该公式应包括 $MgCO_3$, $MgHCO_3^+$ 的吸收项^[74]。1989 年,裘辛方提出了一个预报海水声吸收的计算公式,此式包含 $MgSO_4$, $B(OH)_3$, $MgCO_3$, $Mg(HCO_3)_2$ 、硼酸镁化学弛豫吸收和纯水的吸收,并用此公式编制了 100 Hz ~ 1 MHz 的海水声吸收系数表^[75]。1991 年,裘辛方计算了 $B(OH)_3$ 弛豫的 $(\alpha\lambda)_r$ 和 f_r 对压力、温度、pH 及盐度之间的依赖关系^[76]。

2007 年,徐禹擎、胡浩浩推导出高频下悬浊海水的声衰减公式,通过对悬浮颗粒物的粘滞吸收的数值计算,初步研究了悬浮颗粒物引起的声衰减对声呐性能的影响^[77]。2008 年,胡浩浩、彭临慧、张学刚、韩晶利用 R. J. Urick 混浊水声衰减模型得到了混浊海水声衰减的一般规律:悬浮颗粒物的散射吸收可以忽略不计^[78]。2008 年,彭临慧、王桂波通过对悬浮颗粒物粘滞性声吸收的分析,指出了能对声传播产生影响的悬浮颗粒物参数的范围^[79]。2008 年,彭临慧、王桂波对中国近海实际海域悬浮颗粒物海水声波衰减进行了计算分析,给出了悬浮颗粒物海水达到声学混浊的估计判据^[80]。

1.2.2 声散射研究现状

对于体积混响的研究,最早始于 20 世纪 40 年代,多数以海上的实验测量为主,极少见实验室研究。

1. 国外声散射研究现状

1948 年,Carl F. Eyring, Ralph. J. Christensen 和 Russell W. Taitt 研究表明当海面风浪较大、距离小于 457.2 m 时,海面混响掩盖了体积混响;超过 914.4 m 时,体积混响掩盖了海面混响;在浅海环境中,海底混响(其强度决定于海底是石头、沙子、泥沙或泥)是所观测到的主要混响^[81]。1961 年,Herbert R. Carleton 提出了任意压力波声散射的模型,利用该模型可得到体积混响的主要特征^[82]。1961 年,

Benjamin F. Cros 和 William R. Schumacher 从理论上研究了与单频脉冲回波相关的幅度、相位起伏,并在百慕大海域进行了体积混响、海面回波、海底回波的实验^[83]。1964 年,G. R. Lund 和 R. J. Urick 从垂直阵中相距 4.57 m 的水听器输出的互相关数据中,得到了混响的相干性和指向性,该研究结果可用于设计抑制混响的基阵^[84]。1964 年,R. J. Urick 和 G. R. Lund 认为可用混响的时延相关图表明深海不同地区混响的相干性程度,并发现了共振频率为 1.6 kHz 的深水散射层^[85]。

1966 年,Barry A. Gold 在拿骚以东大约 402.334 m 处,进行了体积混响的测量^[86]。1967 年,David Middleton 提出了混响及其一阶散射场的理论,详细地揭示了混响过程的非平稳性,并推导出混响过程的二阶统计特性^[87-88]。1967 年,W. E. Batzler 和 R. J. Vent 在 12 kHz 处,西太平洋 $5^{\circ} \sim 45^{\circ} \text{N}$ 、 $115^{\circ} \sim 175^{\circ} \text{E}$ 范围内的 14 个深水区域进行了体积声散射的测量,得到了体积散射系数(散射强度)与深度的关系^[89]。1967 年,Victor C. Anderson 测量了太平洋海域中 12 个站点的体积混响,结果表明沿深度方向,散射体在构成上有很大的变化^[90]。1967 年,R. S. Thomas 采用 CW 脉冲作为信号源,利用近海面的窄波束换能器接收反向散射声能的方法在深海进行了实验。体积混响的测量表明:随着深度的改变,海流会随之切变^[91]。

1967 年,Peter Van Schuyler 在北大西洋、墨西哥湾西部的三个站位上,进行了体积混响的测量,数据表明 3.2 kHz 处散射强度的昼夜变化最大^[92]。1967 年,W. E. Batzler 和 R. J. Vent 研究了圣迭哥西南大约 321.87 km 处 609.6 m 区域内的体积声散射,表明 12 kHz 处的散射层在黑夜是向表面移动的^[93]。1967 年,R. H. Adlington 在百慕大、波多黎各之间间距约为 120.7 km 的 11 个站位上进行了体积混响的测量^[94]。1968 年,John J. Keane 研究了 15.4 kHz 处的体积混响。该研究表明:体积混响与脉冲长度成非线性相关,与声源级线性相关^[95]。1968 年,R. H. Adlington, A. E. Robison 和 R. P. Chapman 在哈利法克斯和波多黎各、哈利法克斯和直布罗陀、圣约翰和挪威海之间研究了深水散射层的声学特性,给出了深水散射层在白天和黑夜的柱散射强度^[96]。

1968 年,R. J. Urick 针对海洋中散射体的分布以及简单的假定,推导出一个简洁的表达式。该表达式中的混响级是随着声源的发射脉冲而变化的,等于声源强度与介质和散射体脉冲响应的卷积^[97]。1971 年,J. C. Nickles 和 R. K. Johnson 研制了可研究深海声散射的试验仪器,获取了水下 1.6 km 深度处、4 ~ 25 kHz 内的声散射数据^[98]。1971 年,M. Hall 在南中国海和近赤道印度洋东部海域处,测量了 3.5 kHz, 6 kHz, 8 kHz, 12 kHz 的体积反向散射强度,并在其中一个站的 1.7 km 深度处,发现了共振频率为 3.5 kHz 的深水散射层^[99]。1972 年,R. J. Vent 在东太平洋的深水海域,测量了 3.5 kHz, 5.0 kHz 和 12.0 kHz 的体积反向散射强度,计算了



柱散射强度^[100]。1973年,William John Jobst利用 Carleton 和 Middleton 的模型以及波动方程的迭代解,推导出新的体积混响模型,并在南加利福尼亚海岸进行了实验^[101]。1973年,J. M. Ross 和 C. Brochu 利用 9.5 kHz 发射 CW 脉冲的窄波束换能器获得了混响的数据。在浅水域环境下,海面、体积、海底都是主要的散射体^[102]。1973年,M. Hall 在 2.5 ~ 16 kHz 内,测量了塔斯曼海、珊瑚海和印度洋东北部地区的几个站位的体积混响。他的研究表明体积混响是由生活在海洋中层鱼的鱼鳔引起的^[103]。

1973年,R. K. Johnson 在 3 ~ 30 kHz 内,分析了加利福尼亚洋流以上 600 m 处体积混响的昼夜变化规律,认为此变化是由共振、非共振散射体的垂直移动引起的^[104]。1972年,William J. Jobst 和 I. Smits 在美国加利福尼亚的州 San Clemente 岛屿进行的深水实验表明:体积混响主要是由离散的散射体形成的^[105]。1974年,Paul T. McElroy 测量了纽芬兰岛到亚述尔群岛、葡萄牙和爱尔兰之间的 34 个站位在 1 ~ 31.5 kHz 处的体积反向散射强度^[106]。1975年,Richard H. Love 把从鱼统计数据得到的体积混响模型应用到与深度相关的散射强度的定量预报中^[107]。1975年,Brett D. Castile 在 330 kHz 处,测量了广阔海域的体积混响^[108]。1978年,Barry A. Gold 和 Wayne E. Renshaw 在大西洋的西部,获取了体积混响和生物学的数据。在 1.0 ~ 20.0 kHz 的范围内,按 1/3 倍频程给出了白天和黑夜的散射强度^[109]。

1978年,Richard H. Love 提出了可对鱼的共振频率、声学横截面进行预报的有鳔鱼的模型,该模型更适用于那些鱼鳔壁张力能少许影响其共振散射强度的鱼^[110]。1986年,Timothy K. Stanton 和 Clarence S. Clay 通过分析回波起伏的本质,对鱼和海底粗糙度进行了分类,提出了确定鱼尺寸、频率分布、毛解剖特性及鱼密度的方法^[111]。1992年,L. Goodman, J. Oeschger 和 D. Szargowicz 介绍了 1 MHz、1 个周期的发射脉冲时,由薄片浮力卷流产生的温度不规则场而引起的声散射实验^[112]。1992年,Cynthia B. Straney 和 Michael J. Forbes 仿真计算了测量体积混响的主动声呐系统的发射-接收响应。该仿真计算结果与测量的硬球簇的散射强度符合很好^[113]。1993年,Dale D. Eillis 提出了计算浅海混响的模型^[114]。

1993年,Tuncay Akal, Robert K. Dullea, Guido Guidi 和 John H. Stockhausen 提出了一种可测量低频宽带体积混响的实验技术,并在北大西洋进行了实验^[115]。1993年,Richard H. Love 在挪威海和大不列颠西部海域进行了 0.8 kHz 和 5 kHz 的体积混响的测量试验,发现蓝白垩是大不列颠海域的主要散射体,而蓝白垩和鲑是挪威海中的主要散射体^[116]。1994年,Peter M. Ogden 和 Fred T. Erskine 进行了低频(70 Hz ~ 1 kHz)海面反向散射强度的测量,同时,发现体积混响主要是由鲑鱼形成的^[117]。1996年,Tokuo Yamamoto 对 10 个海底的声学 X 射线断层照片和沙芯的谱

进行了分析,发现泥沙引起体积散射的主要机理是由于其密度的变化^[118]。1997年,Redwood W. nero, Charles H. thompson 和 Richard H. love 在俄勒冈州、北加利福尼亚沿岸的大陆架和深海进行了体积混响的测量实验,发现了一个峰值频率在 2 kHz、深度大于 1 km 的散射层,表明在大陆架和深海处普遍存在着长度为 20 ~ 68 cm,密度接近 0.004 ind/m² 的长尾鳕^[119]。

1997年,Francine Desharnais 和 Dale D. Ellis 把 SACLANT 海下研究中心测量的混响数据与 DREA 简正方式混响模型中 OGOPOGO 估计的结果进行了比较^[120]。1997年, Peter H. Wiebe, Timothy K. Stanton, Mark C. Benfield, David G. Mountain 和 Charles H. Greene 利用高频(120 kHz、420 kHz)声测量了 George 浅滩水域的体积混响。他们除了对生物声散射体(浮游生物、弱泳生物)进行观测,也观测了来自内波和悬浮泥沙的声散射^[121]。2000年, Kevin D. LePage, Henrik Schmidt 对粗糙海面、体积反向散射机理进行了建模,以研究海底混响的机理和特征,并提出了一种表示海底散射的算法^[122]。

2002年, Timothy C. Gallaudet 和 Christian P. de Moustier 对在墨西哥东北部湾的 200 m 处的深水域,环形体积探测声呐(TVSS)采集的实验数据进行了分析。他们认为体积声散射是由与光合作用有关的浮游动物集群而引起的^[123]。2003年, Timothy C. Gallaudet 和 Christian P. de Moustier 从环型体积探测声呐(TVSS)采集的数据中得到了体积、边界声散射的包络起伏^[124]。2003年, Richard H. love, Charles H. thompson 和 Redwood W. nero 在墨西哥的东部港湾进行了试验测量,以研究体积混响从深海到大陆架再到浅水区的变化规律。散射模型表明:低频峰值可能是由 12 ~ 15 cm 的竹荚鱼和青鱼引起的^[125]。2004年, V. E. Sklyarov 和 A. V. Berezutskii 对海洋中的温盐微细结构、中尺度涡过程的声图像进行了实验研究。实验室结果和海洋研究表明:在 0 ~ 2 000 m、10 ~ 160 kHz 内,利用声呐直接从海洋表面去探测和定位海洋中的微细结构以及中尺度涡的形成是有可能的^[126]。

2. 国内声散射研究现状

1986年,李玉昕、杨颐华、李志宽、董仲奎在南海首次进行了深水散射层的实验,认为该海区的散射层是由尺寸为几厘米的有鳔鱼群体构成的^[127]。1986年,孙瀛用聚焦换能器阵对鱼体各部分进行了声散射的测量^[128]。1995年,包青华、柴心玉分析了夏季黄海温跃层中浮游生物垂直分布对声散射信号的影响,阐明了因浅海浮游生物空间随机不均匀分布而引起的声散射^[129]。1998年,时钟、张叔英和 L. J. Hamilton 应用声散射器研究了河口近底细颗粒悬沙的运动,表明声学技术可成功观测河口高时空分辨率的悬沙浓度垂向分布^[130]。1999年,裘辛方、张仁和、殷业利用频率为 200 kHz 的垂直鱼探仪对黄海中部夏季反向体积声散射进行了测