

# 水声材料声学参数测试技术的进展

曹 钰<sup>1</sup>, 佟昊阳<sup>1</sup>, 易 燕<sup>1</sup>, 颜士玲<sup>2</sup>, 黄唯纯<sup>2</sup>,  
李 水<sup>1</sup>, 陈 毅<sup>1</sup>, 赵 涵<sup>1</sup>

(1. 杭州应用声学研究所 国防水声计量一级站, 浙江 杭州 311400)

(2. 南京大学 固体微结构物理国家重点实验室 现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210093)

**摘 要:** 水声材料是水下声系统能力形成和发展的基础, 其声学参数测试技术是确保水声材料构件功能实现的重要保障, 然而目前水声材料构件的测试技术面临着低频拓展及高压拓展等方面带来的技术挑战。水声材料构件的声管测试技术可分为驻波管法、脉冲管法和行波管法, 此 3 种方法在适用性方面相互补充, 但存在测试构件尺寸小难以阐明结构的整体特性、构件与管壁间的缝隙造成测量失准的问题。自由场测试技术及压力罐测试技术是大面积水声材料测试的有效手段, 但存在测试构件边缘衍射造成测量准确性降低的问题。对目前采用的水声材料测试技术及其研究现状进行了综述, 讨论了各类测试技术存在的困难和挑战, 并展望了水声材料构件测试技术未来的发展方向。

**关键词:** 水声材料; 声管; 自由场; 压力罐; 低频; 高压; 边缘衍射

**中图分类号:** TB565 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)01-0079-10

**引用格式:** 曹钰, 佟昊阳, 易燕, 等. 水声材料声学参数测试技术的进展[J]. 中国材料进展, 2024, 43(1): 79-88.

CAO Z, TONG H Y, YI Y, *et al.* Advances in Acoustic Parameter Testing Technology of Underwater Acoustic Passive Materials[J]. Materials China, 2024, 43(1): 79-88.

## Advances in Acoustic Parameter Testing Technology of Underwater Acoustic Materials

CAO Zeng<sup>1</sup>, TONG Haoyang<sup>1</sup>, YI Yan<sup>1</sup>, YAN Shiling<sup>2</sup>, HUANG Weichun<sup>2</sup>,  
LI Shui<sup>1</sup>, CHEN Yi<sup>1</sup>, ZHAO Han<sup>1</sup>

(1. Hangzhou Institute of Applied Acoustics, National Defence Underwater Acoustic Metrology Center, Hangzhou 311400, China)

(2. National Laboratory of Solid State Microstructures, College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Underwater acoustic material is the basis of underwater acoustic system capabilities, and its acoustic parameter testing technology is an important guarantee to ensure the functional realization of underwater acoustic material components. However, the current testing technology of underwater acoustic material components faces technical challenges brought by low frequency and high pressure. The acoustic tube testing of underwater acoustic material can be divided into the standing wave tube method, the pulse tube method and the traveling wave tube method. These three methods complement each other in terms of applicability. However, it is difficult to clarify the overall characteristics of the structure due to the small size of the test component, and the gap between the component and the pipe wall causes measurement inaccuracy. Free field test and

pressure tank test technologies are effective methods for large-area underwater acoustic material testing, but there is a problem that the measurement accuracy is reduced due to the edge diffraction of test components. In this paper, the currently used underwater acoustic material testing technologies and their research status are reviewed. The difficulties and challenges of various testing technologies are discussed, and the future development direction of underwater acoustic material components testing is prospected.

**Key words:** underwater acoustic materials; acoustic tube; free field; pressure tank; low frequency; high pressure; edge diffraction

收稿日期: 2022-07-27 修回日期: 2022-10-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3801800); 国家自然科学基金资助项目(92263207, 21674003, 91427304); 科技部“973”计划项目(2014CB643504)

第一作者: 曹 钰, 男, 1994 年生, 博士

通讯作者: 佟昊阳, 男, 1991 年生, 工程师,

Email: w2735981624@163.com

黄唯纯, 男, 1990 年生, 助理研究员,

Email: weichunhuang@nju.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202207035

## 1 前言

水声材料是指在水中具备声学功能的材料,是水下声系统能力形成和发展的基础,按材料是否具有电声转换功能分为有源材料 and 无源材料<sup>[1]</sup>。水声无源材料通常具备反声、透声、吸声、折声、去耦等各类声学功能,被制作为不同类型的水声构件,广泛应用于现代水声工程中,如潜艇隐身装备、水声换能器、声纳基阵、海洋仿生结构、海洋通讯、水声设备等(如图 1 所示),对促进工程科学、军事科学和海洋科学等多学科领域的研究至关重要<sup>[2-8]</sup>。例如,现代舰船、潜艇的隐身装备中广泛应用的消声瓦、去耦瓦、隔声瓦、抑振瓦、消声涂层等;近年来声隐身技术中应用的新型声学超材料(金属水、隐身衣等);声呐导流罩中应用的透声性能良好的透声窗;消声水池中的消声尖劈等。

在各领域应用的水声材料通常为各类粘弹性体材料,如天然或合成的橡胶、聚氨酯类材料、碳纤维材料等。这类材料制成的水声构件通常在不同的温度及不同的水压条件下具有不同性质,表现出不同的声学特性<sup>[9]</sup>。因此,为确保水声材料构件在其实际应用中功能的实现,需对其在水下不同工况下的声特性参数进行测量。

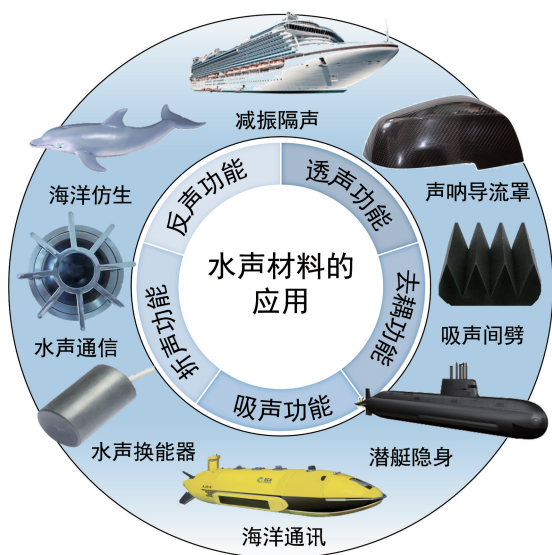


图 1 水声材料应用场景区

Fig. 1 Application scenes of underwater acoustic materials

### 1.1 水声材料测试的历史

水声材料测试的历史可以追溯至 1490 年, Leonardo Vinci 将一根长管插入水中,并听取远处行船产生的水下声响。1827 年, Daniel Collaton 和 Charles Sturn 在日内瓦湖中进行了人类历史上有记载以来的首次水声量值的测量<sup>[10]</sup>。自 20 世纪 70 年代以来,数字技术和计算机技术获得了极大的发展,水声测试技术获得了很大的进步,同时推动了

水声材料测试领域的发展<sup>[11]</sup>。空气声学领域众多材料测试技术进入水声领域,如双水听器法<sup>[12]</sup>、表面声压法<sup>[13]</sup>、近场声全息法<sup>[14, 15]</sup>、脉冲声测量技术<sup>[16, 17]</sup>等。1989 年, ONION 法被提出用于多层复合材料反射系数的测量,该方法于 1992 年由 Piquette 进一步修正,证明能较为准确地测量材料声反射与透射系数<sup>[18, 19]</sup>。这些经典方法以其简单方便的优势沿用至今。之后,在水声材料测试中,建立了众多的新方法和新技术,如传递函数法测量技术<sup>[20, 21]</sup>、时间反转技术<sup>[22, 23]</sup>、复移动加权指数平均技术<sup>[24, 25]</sup>、宽带压缩脉冲叠加技术<sup>[26]</sup>等,同时高压消声水池、密闭声管<sup>[27]</sup>等深水测试技术也获得了进一步发展,众多的更为先进的海上及湖上试验场、消声水池相继得以建设<sup>[28]</sup>。

### 1.2 水声材料参数概述

水声材料构件的声学性能构成很复杂,针对不同的声学表现,需要相应的水声特性参数来表征其声学特性。通过将水声构件置于已知的声场环境中,测量声场中的声压关系,来描述水声材料构件参数<sup>[29]</sup>。在水声材料领域,最常用的特征参数包括:表征反声功能的声压反射系数  $r_p$  或回声降低(echo reduction, ER),表征透声功能的声压透射系数  $\tau_p$  或插入损失 IL,表征材料吸声功能的吸声系数  $\alpha$ ,这些参数都能通过测量得到的入射声压  $p_i$ 、反射声压  $p_r$  和透射声压  $p_t$  计算获得:

$$r_p = \frac{p_r}{p_i} \quad (1)$$

$$ER = 20 \lg \frac{p_i}{p_r} \quad (2)$$

$$\tau_p = \frac{p_t}{p_i} \quad (3)$$

$$IL = 20 \lg \frac{p_i}{p_t} \quad (4)$$

$$\alpha = 1 - r_p^2 - \tau_p^2 \quad (5)$$

### 1.3 水声材料测试研究现状

水声材料的测试围绕测量安装水声构件后水下声场中的入射声压、反射声压及透射声压展开,进而获得水声构件的特定声学参数。

当前,基本形成了以天然水域、人工水池、密闭声管及腔体为基本测试载体,以射线传播理论、平面波展开理论等为理论方法,以发射换能器、水听器及数字信号处理系统为关键工具的水声材料测试体系,朝着不断拓宽测试频段范围(低频拓展趋势)、拓展高压及变温环境测试条件、提升测量精度的方向发展。一方面,得益于数字信号处理技术的发展,宽带脉冲压缩技术、宽带信号测量技术和多路径信号建模技术等方法降低了有限水域内材料测量的低频限。同时,随着材料制造技术的

不断进步, 高压及更精准的控温系统得以开发, 测试环境变化条件的实现使深水测试及复杂环境条件下的测试得到了长足发展。另一方面, 以光纤水听器、矢量水听器为代表的先进仪器走入水声材料测量领域, 通过获得更多的声场信息(声压和质点振速), 拓展了信号处理空间, 提升了测量的精度<sup>[30]</sup>。

#### 1.4 水声材料测试面临的困难

在水声材料测试方面, 国内外仍然面临许多亟待解决的困难。作者认为主要可归纳为以下两方面。

首先, 在低频拓展方面存在技术和理论方面的困难。一方面, 低频指向性发射换能器目前在国内仍存在众多技术及理论难题, 在国际上超远程探测声纳工作频段降至 100 Hz 左右的背景下, 我国在低频指向性发射换能器领域进展缓慢<sup>[31]</sup>。这是水声测量中普遍面临的问题, 也导致水声材料低频测试受发射换能器低频限制难以开展。另一方面, 超低频水声材料测量的测试环境存在一定的限制。超低频信号的波长较长, 为避免边缘衍射的干扰, 对被测样品的尺寸提出了更高的要求, 当前国内消声水池已无法满足测试需求, 通常需要在天然水域中进行测试。但在天然水域中进行水声材料测试定位精度低且易受外界噪声影响, 使低频测试的难度增加, 测量不确定度增大。因此, 需建设更大尺寸、更高消声标准的消声水池以适应超低频水声材料的测试需求。

其次, 在测试的更高压拓展方面存在技术方面的困难。深海环境(超高压, 7000~10 000 m 水深条件)的水声材料测试的测试条件在国内仍不能实现: 一方面, 密封技术仍有待进一步提升; 另一方面, 发射换能器及水听器等测试设备的超高压适应性研究仍应继续加强<sup>[31]</sup>, 以满足水声材料的超高压测试需求。

本文简要介绍了目前水声材料构件测试技术的研究进展, 并讨论了未来的发展方向。首先, 介绍了水声构件的声管测试技术, 对目前国内外常用的驻波管、脉冲管及行波管测试方法的适用范围和新技术进行了介绍, 并阐明了目前声管测试技术仍需解决的技术难点。其次, 介绍了水声构件的自由场法及压力罐法测试技术, 着重讨论了当前在解决自由场测试中水声构件边缘衍射方面的研究成果及存在的困难。

## 2 水声材料测试技术的研究进展

### 2.1 水声材料的声管测试技术

水声材料构件的声学特征参数是在平面波声场条件下被定义<sup>[10]</sup>。获取平面波声场的常用方法是使声波在波导管中传播, 这种波导管便称为声管。水声构件的声管测试技术基于声波导管理论将声学测量简化为一维问题, 通过在充满水的刚性壁面声管内发射平面波, 利用被测

水声构件的回波性质来计算其相关声学参数, 即通过分析声管中传播的入射声压  $p_i$ 、反射声压  $p_r$  及透射声压  $p_t$  间的关系获得材料特性, 如图 2 所示<sup>[32]</sup>。声管测试技术的频率范围受限于声管的尺寸。为确保声管中能形成稳定的简正平面波, 声管存在一个与管径  $r$  相关的上限频率, 即截止频率  $f_{\max}$ 。对于刚性壁充满水的声管, 截止频率则为<sup>[33]</sup>:

$$f_{\max} \approx 3.832 \frac{c_w}{2\pi r} \quad (6)$$

式中,  $c_w$  为水中声速。声管的下限频率  $f_{\min}$  与众多因素有关, 包括脉冲声管的有效长度、配套使用的换能器的低频限及相关的测量要求<sup>[10]</sup>。其中, 脉冲管法仅依据声管有效长度  $L$  获得的低频限可表示为式(7)<sup>[33]</sup>:

$$f_{\min} \approx \frac{2c_w}{L} \quad (7)$$

当前国内外典型的声管测试装备测试范围可从数十赫兹至数十千赫兹。根据声波信号分离方式及测试频率范围的差异, 声管测试技术可以分为脉冲管法、驻波管法和行波管法<sup>[34, 35]</sup>。

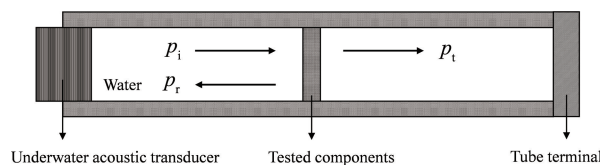


图2 水声材料参数声管法测试中声波入射、反射、透射示意图  
Fig. 2 Schematic of sound wave incidence, reflection and transmission in sound tube test for underwater acoustic materials

驻波管法利用发射换能器连续发射单频声波, 在管中形成由入射声波和经样品的反射声波组成的驻波场。驻波管法测量经过多年的发展形成了 2 种较为成熟的方式: 驻波比法和传递函数法。驻波比法是在声管中布置一个可沿着管轴移动的声源或探针水听器, 分析驻波声场中的极大声压值和极小声压值, 计算得到材料的反射系数, 如图 3a 所示<sup>[36, 37]</sup>。该方法具有操作简单的优势, 但可移动的声源终端在高压环境下密封和运动存在一定困难; 而可移动探针水听器需要在测试样品上设置一个中心孔, 这使测试材料的完整性被破坏, 在一定程度上会降低测试结果的准确性。为解决驻波比法存在的缺陷, 一种不需要移动水听器及声源终端的方法应运而生, 即传递函数法<sup>[20, 38, 39]</sup>。如图 3b 和 3c 所示, 该类声管测量装置预先在驻波管内固定位置布置多个水听器, 利用多个水听器测量管内驻波声场, 通过传递函数技术分离入射和反射声波, 并分析计算材料样品的反射系数。驻波管法为在管内形成稳定的驻波, 需要发射换能器发射连



续声波, 入射声波和反射声波较易分离, 该方法适用于处于水-材料-空气工况下的水声构件测试。

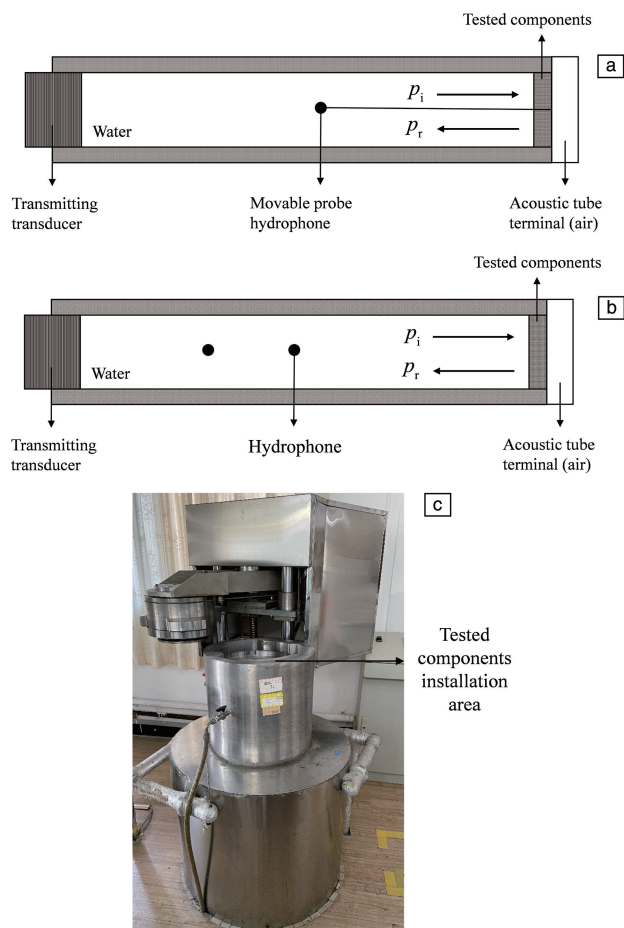


图 3 驻波管法测试示意图: (a) 驻波比法, (b) 传递函数法, (c) 杭州应用声学研究所基于传递函数法的  $\Phi 208$  驻波管测量装置

Fig. 3 Schematic of standing wave tube method for sound tube test: (a) standing wave ratio method, (b) transfer function method, (c) the  $\Phi 208$  standing wave tube equipment based on the transfer function method in Hangzhou Institute of Applied Acoustics

脉冲管法的测量原理是通过控制发射换能器发射声波的脉冲宽度, 实现声管中入射声波、反射声波及透射声波的分离, 可直接测量水声构件的反射系数、透射系数和吸声系数, 如图 4 所示<sup>[40-42]</sup>。脉冲管法是一种可直接在时域上分离 3 种声波的方式, 具有测试简单、可靠的优势。但该方法为避免声管内 3 种声波信号间的相互叠加干扰, 对发射声波的脉冲宽度及声管的长度存在较高的要求。发射脉冲的宽度与发射换能器的品质因素  $Q$  及谐振频率  $f_0$ 、水中声速  $c_w$ 、声管有效长度  $L$  和测量所要求的稳态正弦波数  $K$  密切相关, 这进一步限制了脉冲声管测量的下限频率 ( $f_{\min} \approx Kc_w f_0 / (2Lf_0 - Qc_w)$ )。相较于驻波管法, 脉冲管法技术难以实现低频 (1 kHz 以下) 要

求下水声构件的测试 (以杭州应用声学研究所  $\Phi 120$  脉冲管测量装置为例, 脉冲管长为 6 m, 测试的低频限为 2 kHz), 而驻波管法测量技术测量低频限可达数百赫兹。

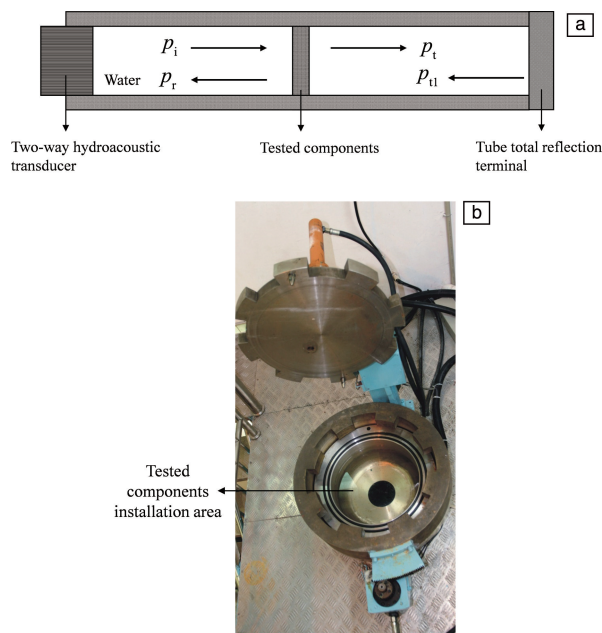


图 4 脉冲管法测试示意图 (a), 杭州应用声学研究所的  $\Phi 120$  脉冲管测量装置 (b)

Fig. 4 Schematic of pulse tube method for sound tube test (a), the  $\Phi 120$  pulse tube equipment in Hangzhou Institute of Applied Acoustics (b)

为解决脉冲管法低频测试的不足, 研究人员发展了行波管法测量技术, 如图 5 所示。该方法通过发射换能器发射单频连续信号, 在声管左半段形成由入射声波和反射声波组成的驻波声场, 在声管的右半段形成由透射声波组成的行波声场, 实现水声构件的反射系数、透射系数和吸声系数的分析与计算<sup>[43, 44]</sup>。早期的行波管为避免透射声波影响管左半段的驻波声场, 通常在管右半段终端铺设吸声尖劈等吸声措施, 但存在低频测量时尖劈尺寸过长的问题 (吸声尖劈的长度约为吸声截止频率的半波长, 吸声截止频率为 200 Hz 时, 尖劈的长度约为 7.5 m)。近年来, 有源消声的辅助换能器终端成为行波管法的主流发展方向, 该方法通过调整发射换能器和辅助换能器的幅度比和相位差, 实现透射声波的单向传播效果, 实现主动消声<sup>[43]</sup>。这也对水听器组的灵敏度、布放位置, 及换能器的电声响应灵敏度、声信号信噪比等提出了极高的要求。行波管法测试技术能够较好地解决低频要求下 ( $< 400$  Hz) 水声构件的反射系数、透射系数和吸声系数的测试<sup>[43]</sup>。

近年来, 水声构件的声管测试技术重点围绕解决低



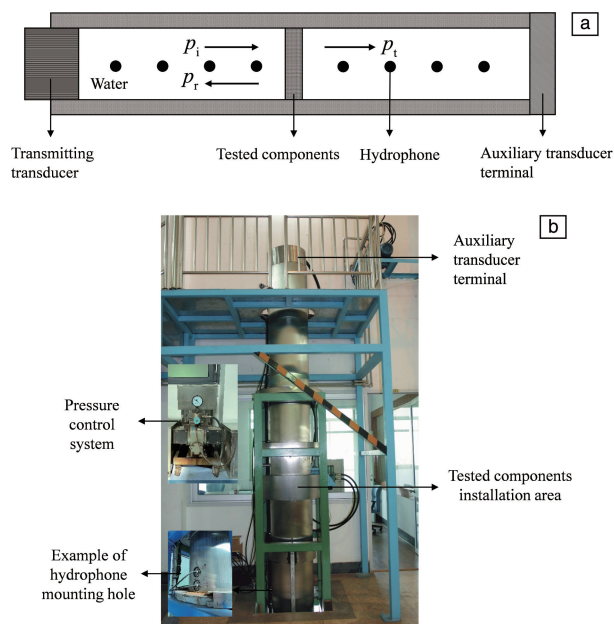


图5 行波管法测试示意图(a), 杭州应用声学研究所的 $\Phi 208$ 行波管测量装置(b)

Fig. 5 Schematic of traveling wave tube method for sound tube test (a), the  $\Phi 208$  traveling wave tube equipment in Hangzhou Institute of Applied Acoustics (b)

频要求下(1 kHz 以下)的测量问题, 并且不断朝着更低频(50 Hz 以下)、多样化的测试环境方向发展。一方面, 声管测试的低频化发展需求不断增加, 当前国内行波管的测量装置低频测试频率可达到 50 Hz, 进一步降低声管的测试低频限, 需要换能器、水听器等测试设备技术的进一步提升<sup>[35]</sup>。另一方面, 随着各类装备向深海、变温环境的发展, 声管测试技术也通过适配加压、控温设施来模拟不同的海洋环境。声管测试技术向更高压发展, 仍需提升声管制作材料、换能器、水听器等测量设备的高压适配性<sup>[45]</sup>。寻找兼顾材料强度及耐压性的超材料, 在不增加材料厚度、确保材料强度的条件下实现声管的高压测试, 是声管材料的发展方向。耐高静水压的水听器可通过结构设计加以解决, 如可在水听器外部加装耐压壳等。电动换能器技术具有低频发射响应高、方向性强的优势, 可利用它进一步降低声管测试的低频限制, 其高压适配性可通过压力补偿法加以解决。

声管测试技术的 3 种测量方法的适用条件及测试频率范围各不相同, 相互补充。截至目前, 声管测试技术仍存在一系列亟需解决的技术难题。一方面, 由于声管尺度的限制, 测试的水声构件被限制为小样品。相较于水声构件的原尺度及结构, 小样品水声构件的局部声学性能通常不能阐明结构的整体特性, 尤其对于具备周期结构、材料不均匀性等特质的复合材料或超构材料进行

测试时, 具有较高不确定性<sup>[46-48]</sup>。另一方面, 水声构件安装至声管后, 构件与管壁之间仍存在极小的缝隙, 这会引起构件边缘的绕射现象, 对测量的准确性造成一定影响。

## 2.2 水声材料的自由场法及压力罐法测试技术

对较大或全尺寸水声构件的测量通常使用自由场法测试技术。自由场法测试技术是将待测水声构件置于消声水池或开阔水域中, 在水声构件前侧布置水听器以接收入射声波和反射声波, 在水声构件后侧布置水听器接收透射声波, 如图 6 所示。

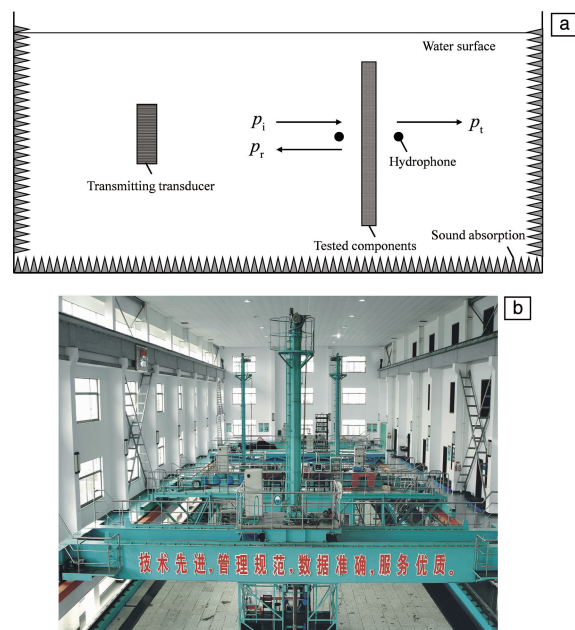


图6 自由场法测试示意图(a), 用于自由场法测试的杭州应用声学研究所的 50 m × 15 m × 10 m 中低频全消声水池(b)

Fig. 6 Schematic of free-field method test (a), 50 m × 15 m × 10 m mid-low frequency fully anechoic pool in Hangzhou Institute of Applied Acoustics for free-field method test (b)

水声材料的自由场法及压力罐法测试技术在使用过程中主要的限制来源于测试构件(板体)的边缘衍射。Zeqiri 等<sup>[49]</sup>通过扫描水声面板周围的水听器, 获得了脉冲信号到达板之前(图 7a)和与板相互作用后(图 7b)的波形, 可以清楚观察到面板附近的发射信号、透射信号及衍射信号。Szabo 等<sup>[50]</sup>通过试验测试详细说明了衍射信号对水声材料测试结果准确性的影响, 图 7e 为采用图 7c 所示的板安装构型对 3 种不同尺寸的板体结构测试得到的回声降低及插入损失及与理论值对比结果, 研究发现板体尺寸越小, 板体边缘衍射造成的测试结果与理论解的差别越大。在测试的声场中, 由于板体边缘会形成衍射, 衍射声波几乎与反射声波、透射声波同时到达水听器, 在时间上发生信号的混叠, 这造成测量的误差<sup>[51-53]</sup>。

为克服边缘衍射带来的测量误差问题,众多学者提出了一系列方法以消除或减小其造成的影响。首先,在测试中,要求测试样品的边长制作作为测试频率的水下波长的 2~5 倍,且水听器布置时尽可能地靠近板体。该方法对测试人员的测试经验带来了极大的考验,需要多次调试测量设备距离板体的位置以确定衍射影响是否消除,且水听器与板体距离过近时,极有可能带来入射信号与反射信号难以分离的问题。同时,在低频测试需求下,对测试板体的尺度要求较高(如测试频率要求为 1 kHz,板体边长最低要求为 3 m),对于一些比较昂贵的材料,测试样品的成本将变得极高。其次,各类信号处理方法被广泛应用于此类问题,如宽带脉冲压缩技术<sup>[26]</sup>、基于 Babinet 原理的理想波方法(the Dreamwave method)<sup>[54]</sup>、ONION 法<sup>[18, 19, 55]</sup>、修正 Prony 法<sup>[56]</sup>等。在自由场法中通常使用发射换能器发射足够短的脉冲声波,在同一发射条件下对水声构件存在与不存在时的声场进行测量,利用 2 次测量结果的差值来分离入射声波和反射声波<sup>[57]</sup>。在这种方法的基础上,杭州应用声学研究所李水等<sup>[26, 58, 59]</sup>在国内首次提出了基于宽带脉冲压缩技术的自由场测量方法,该方法应用逆滤波技术对声源信号预处理,压缩脉冲宽度,减小了样品边缘衍射的影响,

同时有效降低了标准测量的低频限(可测试频率低至 2 kHz),实现了材料的反射和透射系数的宽带测量。图 8 表明采用宽带脉冲压缩技术能够缩短脉冲的时间,频谱得到极大程度的改善。但该方法会使入射声波能量出现一定程度的损耗,可能造成测试中测试信号信噪比不足的问题。ONION 法是在后处理过程中通过未受边缘衍射影响的瞬态波获得稳态波,该方法适用于由已知材料制成的多层厚板<sup>[55]</sup>。

再者,参量阵技术以其高指向性的优势被用于降低板体边缘衍射的影响<sup>[60-62]</sup>。该技术使水声构件中心处的声波达到最大,而使边缘衍射声波降低。然而,参量阵技术中的低频声波通过高频波相互作用获得,这一过程具有极强的非线性,在测量中必须确保非线性效应不会影响其过程。同时,参量阵技术获得的差频波具有信噪比低的缺陷,如何提高该技术中的发射源级,获取满足测试要求的信噪比仍需研究<sup>[57, 63]</sup>。信号处理方法及参量阵技术应用时,仍不可避免地需要调整水声构件与测量水听器的位置以减少衍射声波的探测,可能使测量系统过于复杂。

近年来,在降低衍射影响的测量方式中也涌现了一系列的新方法。杭州应用声学研究所易燕等<sup>[64]</sup>对比了单

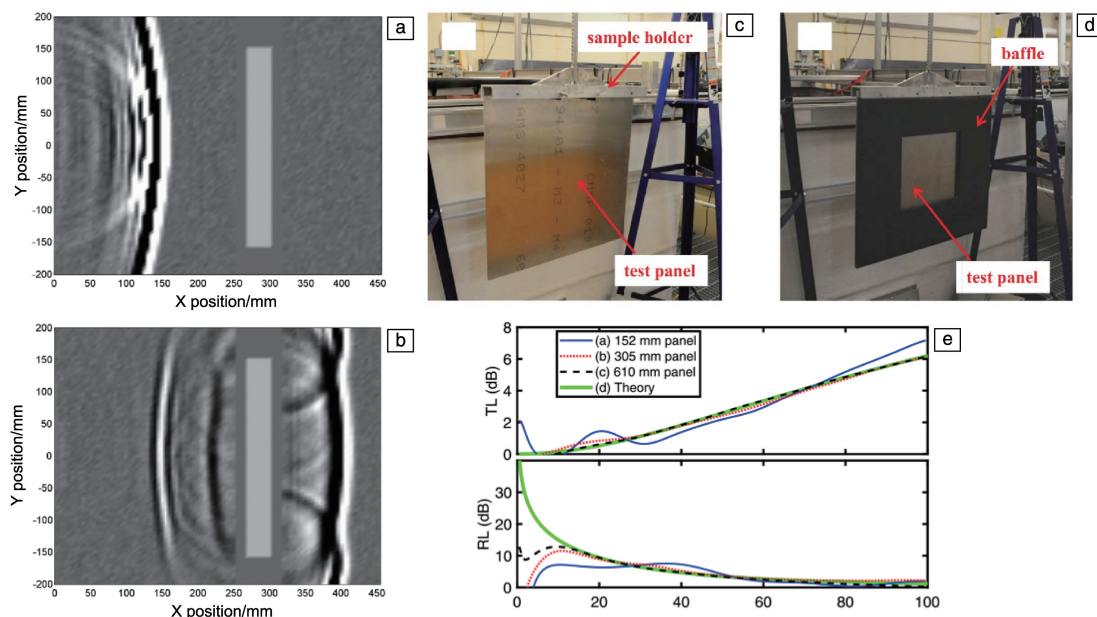


图 7 水声板构件的衍射对水声材料测量的影响<sup>[49, 50]</sup>: (a) 脉冲信号到达板之前的波形信号, (b) 脉冲信号与板相互作用后的波形信号, (c) 普通刚性障板, (d) 周围安装闭合孔聚乙烯泡沫材料的障板, (e) 按图 7c 方式安装的不同尺寸的板体结构的回声降低及插入损失及与理论值对比

Fig. 7 Influence of diffraction of underwater acoustic panel components on measurement of underwater acoustic materials<sup>[49, 50]</sup>: (a) the waveform signal before the arrival of the pulse signal to the board, (b) the waveform signal after the interaction of the pulse signal with the board, (c) ordinary rigid barrier, (d) barrier around with installed closed-hole polyethylene foam material, (e) results of echo reduction (return loss, RL) and insertion loss (transmission loss, TL) testing for structures of different board sizes with the form of fig. 7c and comparison with theoretical values

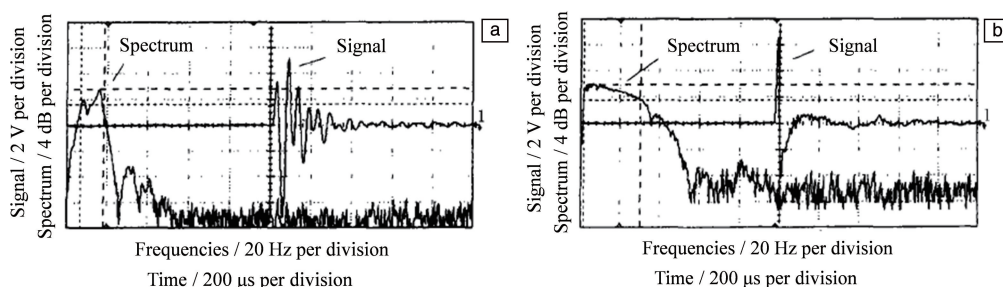


图8 采用宽带脉冲压缩技术得到尖锐脉冲波形<sup>[26]</sup>：(a)原输出波形与频谱，(b)压缩后的波形及频谱

Fig. 8 Sharp pulse waveform obtained by broadband pulse compression technique<sup>[26]</sup>：(a) original output waveform and spectrum, (b) compressed waveform and spectrum

水听器声压法、偶极子水听器声压法和双水听器声强法测量大面积水声构件的特点，发现偶极子水听器及双声强水听器具有指向性的特点，可极大程度地降低边缘衍射的影响。哈尔滨工程大学时胜国等<sup>[65, 66]</sup>利用矢量水听器的抗各向同性噪声、低频指向性好等优势降低了水声材料测试中多途干扰及样品边缘衍射效应的影响。Szabo等<sup>[50]</sup>通过在水声构件的周围安装由闭合孔聚乙烯泡沫材料组成的障板(图7d)，利用障板符合完全软材料的性质(反射系数为-1)，来降低边缘衍射的影响，但该方法在入射声波频率较低(<5 kHz)时，其结果与理论值仍

有一定偏差，如图9d所示。Roux等<sup>[67]</sup>提出了三点测量法来降低构件边缘衍射的影响，通过将总声压分解为入射声压、反射声压、透射声压及边缘衍射声压，利用水声构件前后水听器(图9a)，在前后各3处不同位置( $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ )分别测量以确定不同声压的贡献值(图9b)，研究表明该方法能够准确测定水声构件的反射和透射系数(图9c)。李建龙等<sup>[22, 23]</sup>将时间反转技术用于多途效应明显的波导环境中的水声材料测量，研究表明该技术可显著降低中低频段声波衍射对材料测量的影响。

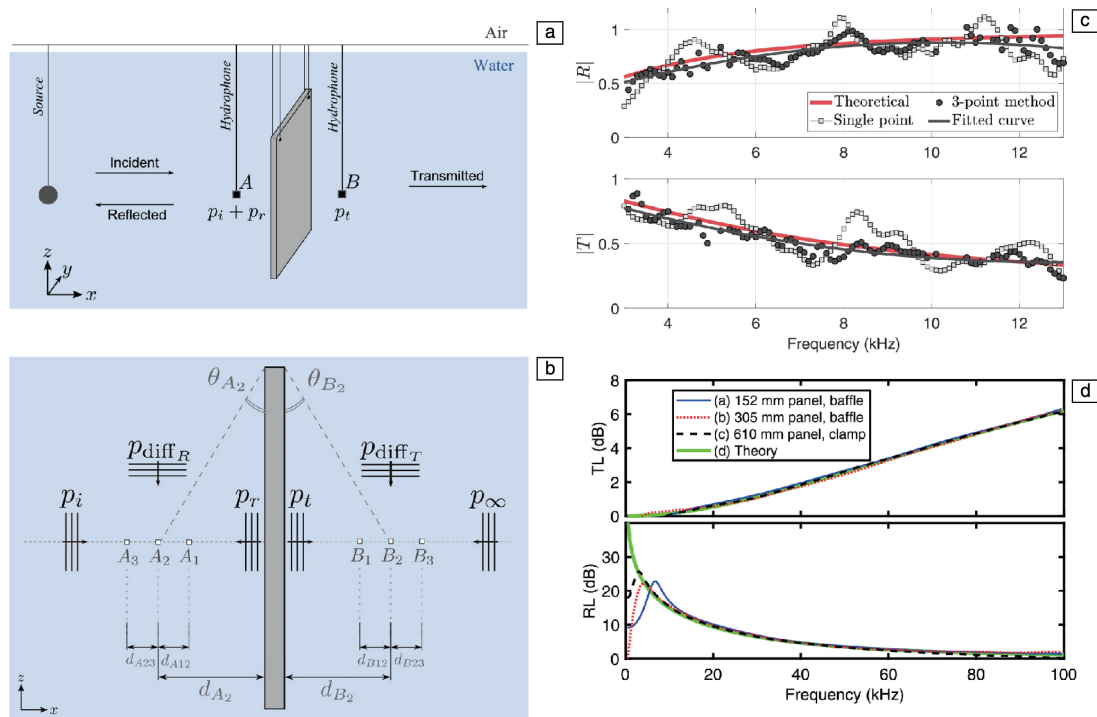


图9 采用三点法及障板降低边缘衍射影响：(a)三点测量法中水听器位置示意图，(b)三点测量法中测点位置示意图，(c)采用三点测量法获得的水声构件反射和透射系数曲线<sup>[67]</sup>；(d)按图7d形式安装闭合孔聚乙烯泡沫材料障板后的反射、透射系数曲线<sup>[50]</sup>

Fig. 9 Using three-point method and baffle to reduce the influence of edge diffraction：(a) arrangement schematic of hydrophones in the three-point measurement method, (b) schematic diagram of measurement point positions in the three-point measurement method, (c) reflection and transmission coefficient curves of underwater acoustic component obtained using the three-point measurement method<sup>[67]</sup>；(d) reflection and transmission coefficient curves of barrier with installed closed-hole polyethylene foam material with the form of fig. 7d<sup>[50]</sup>



随着高压及变温环境下水声材料测试需求的不断强化,压力罐法测试技术应运而生。将待测的水声构件置于压力罐(图 10)中,通过调节罐内静水压和温度以满足样品在不同环境条件下的测试需求<sup>[57]</sup>。压力罐测试方法由于其罐体本身尺寸的问题,通常只能对较高频率工况下的样品进行测试(罐体内尺寸  $\Phi 4\text{ m}\times 12\text{ m}$ ,最高静水压 4.5 MPa)<sup>[63]</sup>。压力罐法测试技术面临着与声管法测试技术同样的发展需求,即更高压、更低频的发展趋势,进一步提升压力罐法测试的适用性。解决压力罐法的更高压测试首先需解决高压环境条件下吸声尖劈吸声性能急剧下降的缺陷<sup>[68, 69]</sup>,当前迅速发展的超材料构件可能成为行之有效的方法,如局域共振晶体、复式晶格结构体、多孔泡沫材料等<sup>[70]</sup>。压力罐内的低频测试的发展可利用耐高压发射参量阵技术提高低频信号的指向性,及利用水听器接收阵列提高接收性能。

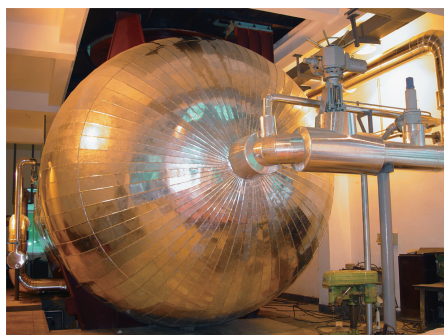


图 10 杭州应用声学研究所的 10 MPa 压力罐法测试装置

Fig. 10 10 MPa pressure tank test device in Hangzhou Institute of Applied Acoustics

水声材料的自由场法测试技术朝着不断降低甚至消除样品边缘衍射的影响、更低频的测试条件(低至 200 Hz)的趋势发展。实现更低频的测试条件已经成为亟需解决的问题。通常低频测试条件对消声水池的尺寸要求极高,或采用湖海测试的方式来满足低频大尺寸样品测试条件。但湖海测试中,常常受到风、浪、流噪声的影响,尤其在低频段测试中,会致使有效信号的信噪比极低,测试的有效性大打折扣。因此,基于自由场法的更低频测试的各类条件建设及新方式仍有待继续研究。

水声材料的自由场法测试中,降低边缘衍射可在进一步降低信号幅值、压缩信号长度、提高信号发射及接收指向性等方向开展研究,从信号发射源角度降低样品边缘衍射。在建设更大消声水池的基础上,发展基于数字孪生的数字水池是适应自由场法更低频测试趋势的发展方向。目前国内的消声水池最大长度在 50 m 以内,宽度在 25 m 以内,深度在 20 m 以内,满足不了水声材料低频的测试需求。测试频率为 200 Hz 时,为避免水池边

界等对材料测试的影响(回波干扰),水池的宽度及深度至少应在 25 m 以上,测试频率更低则需水池深度和宽度值更大。此时,可在消声水池内布设接收平面阵列,收集水池内声场分布信息,进而利用数字水池形成实物半实物仿真系统以满足更低频测试需求。

### 3 结 语

本文通过对目前水声材料构件的声管测试技术、自由场测试技术及压力罐测试技术研究的简要介绍,讨论了目前水声材料构件测试技术存在的困难和挑战,并展望了水声材料构件测试技术未来的发展方向。

水声材料构件的声管测试技术可分为驻波管法、脉冲管法和行波管法,这 3 种方法的测试频率范围、适用条件各不相同,互为补充。声管测试技术存在测试构件尺寸较小难以阐明整体结构的整体特性的问题,以及构件与管壁间的极小缝隙会造成测量失准的问题。同时,水声材料构件的自由场测试及压力罐测试技术是大面积水声材料测试的有效手段,但在应用过程中存在测试构件边缘衍射引起测量误差的问题,在未来仍需重点解决低频条件下的这一问题。

未来水声材料测试技术将朝着更高压、更低频方向发展。水声材料高压测试发展需重点解决声管制作材料、换能器、水听器、吸声尖劈吸声性能等方面技术难题。超材料的迅速发展及研究的深入,可为用于高压测试的声管制作材料及高压环境下吸声尖劈的吸声性能增强提供可能性。压力补偿法的出现为换能器的高压适配性提供了方向,结构的巧妙设计可为水听器的高压工作提供可能性。发展低频测试需在各类条件建设及新方式方面继续研究。压力罐内的低频测试拓展可借助参量阵技术及水听器阵列加以克服。自由场中的更低频测试拓展可在建设更大消声水池的基础上,发展基于数字孪生的数字水池。

### 参考文献 References

- [1] 郝浩琦, 罗马奇, 汲长远. 声学及电子工程[J], 2021(4): 1-7.  
HAO H Q, LUO M Q, JI C Y. Acoustics and Electronics Engineering[J], 2021(4): 1-7.
- [2] 张宏军, 邱伯华, 石磊, 等. 舰船科学技术[J], 2001(4): 6-10.  
ZHANG H J, QIU B H, SHI L, et al. Ship Science and Technology [J], 2001(4): 6-10.
- [3] 张文毓. 船舶[J], 2010, 21(6): 1-4.  
ZHANG W Y. Ship and Boat[J], 2010, 21(6): 1-4.
- [4] 费国强, 沈文苗. 声学及电子工程[J], 2012(2): 1-5.  
FEI G Q, SHEN W M. Acoustics and Electronics Engineering[J], 2012(2): 1-5.
- [5] 边汉林, 夏铁坚. 声学及电子工程[J], 2014(1): 31-33.

- BIAN H L, XIA T J. *Acoustics and Electronics Engineering* [J], 2014(1): 31-33.
- [6] 周成飞. 聚氨酯工业[J], 2004, 19(6): 1-4.
- ZHOU C F. *Polyurethane Industry* [J], 2004, 19(6): 1-4.
- [7] RUAN Y D, LIANG X, WANG Z Y, *et al.* *Applied Physics Letters* [J], 2019, 114(8): 81908.
- [8] RUAN Y D, LIANG X. *Acta Acustica* [J], 2022, 6: 12.
- [9] FERRY J D. *Viscoelastic Properties of Polymers* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [10] 陈毅, 赵涵, 袁文俊. 水下电声参数测量[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2017.
- CHEN Y, ZHAO H, YUAN W J. *Measurement of Underwater Electroacoustic Parameters* [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2017.
- [11] SEYBERT A F, ROSS D F. *The Journal of the Acoustical Society of America* [J], 1977, 61(5): 1362-1370.
- [12] ALLARD J F, BOURDIER R, BRUNEAU A M. *Journal of Sound Vibration* [J], 1985, 101(1): 130-132.
- [13] INGÅRD U, BOLT R H. *The Journal of the Acoustical Society of America* [J], 1951, 23(5): 509-516.
- [14] TAMURA M. *The Journal of the Acoustical Society of America* [J], 1990, 88(5): 2259-2264.
- [15] TAMURA M, ALLARD J F, LAFARGE D. *The Journal of the Acoustical Society of America* [J], 1995, 97(4): 2255-2262.
- [16] SUZUKI Y, ASANO F, KIM H Y, *et al.* *The Journal of the Acoustical Society of America* [J], 1995, 97(2): 1119-1123.
- [17] SUN L, HOU H. *Applied Acoustics* [J], 2014, 85: 106-110.
- [18] PIQUETTE J C. *The Journal of the Acoustical Society of America* [J], 1989, 85(3): 1029-1040.
- [19] PIQUETTE J C. *The Journal of the Acoustical Society of America* [J], 1992, 92(1): 468-477.
- [20] CHUNG J Y, BLASER D A. *The Journal of the Acoustical Society of America* [J], 1980, 68(3): 907-913.
- [21] CHUNG J Y, BLASER D A. *The Journal of the Acoustical Society of America* [J], 1980, 68(3): 914-921.
- [22] 李建龙, 闫孝伟, 孔祥东. *声学学报* [J], 2014, 39(2): 170-176.
- LI J L, YAN X W, KONG X D. *Acta Acustica* [J], 2014, 39(2): 170-176.
- [23] 李建龙, 何志光, 闫孝伟. *声学学报* [J], 2015, 40(1): 110-116.
- LI J L, HE Z G, YAN X W. *Acta Acustica* [J], 2015, 40(1): 110-116.
- [24] ISAEV A E, MATVEEV A N. *Measurement Techniques* [J], 2008, 51(12): 1329-1336.
- [25] 平自红. *南京大学学报(自然科学)* [J], 2015, 51(6): 1217-1222.
- PING Z H. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)* [J], 2015, 51(6): 1217-1222.
- [26] 李水, 缪荣兴. *声学学报* [J], 2000, 25(3): 248-253.
- LI S, MIU R X. *Acta Acustica* [J], 2000, 25(3): 248-253.
- [27] PAUL HAGELBERG M, CORSARO R D. *The Journal of the Acoustical Society of America* [J], 1985, 77(3): 1222-1228.
- [28] EUGENE MIKESKA E, BEHRENS J A. *The Journal of the Acoustical Society of America* [J], 1976, 59(6): 1294-1298.
- [29] BOBBER R J. *Underwater Electroacoustic Measurements* [M]. Florida, USA: Naval Research Laboratory, 1970.
- [30] 王敏, 杨平, 何龙标, 等. *计量科学与技术* [J], 2022, 66(4): 2-12.
- WANG M, YANG P, HE L B, *et al.* *Metrology Science and Technology* [J], 2022, 66(4): 2-12.
- [31] 莫喜平. *中国科学院院刊* [J], 2019, 34(3): 272-282.
- MO X P. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences* [J], 2019, 34(3): 272-282.
- [32] HARRIS C M. *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control* [M]. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [33] CARROLL N L, PAMLEY R J, SMITH J D. *Proceedings of Institute of Acoustics* [J], 1998, 20(3): 79-86.
- [34] DALMONT J P. *Journal of Sound and Vibration* [J], 2001, 243(3): 427-439.
- [35] 陈建平, 何元安, 黄爱根. *声学技术* [J], 2015, 34(2): 109-114.
- CHEN J P, HE Y A, HUANG A G. *Technical Acoustics* [J], 2015, 34(2): 109-114.
- [36] 童宪, 姚磊. *计量学报* [J], 2013, 34(3): 267-271.
- TONG X, YAO L. *Acta Metrologica Sinica* [J], 2013, 34(3): 267-271.
- [37] 全国声学标准化技术委员会. *声学 阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第1部分: 驻波比法: GB/T 18696.1—2004* [S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2004.
- National Acoustic Standardization Technical Committee. *Acoustics—Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes—Part 1: Method using Standing Wave Ratio: GB/T 18696.1—2004* [S]. Beijing: Standardization Administration of the People's Republic of China (SAC), 2004.
- [38] 李水, 沈建新, 唐海清, 等. *计量学报* [J], 2003, 24(3): 221-224.
- LI S, SHEN J X, TANG H Q, *et al.* *Acta Metrologica Sinica* [J], 2003, 24(3): 221-224.
- [39] 周城光, 白国锋, 刘碧龙, 等. *声学学报* [J], 2010, 35(2): 154-161.
- ZHOU C G, BAI G F, LIU B L, *et al.* *Acta Acoustics* [J], 2010, 35(2): 154-161.
- [40] 罗马奇, 李水. *声学电子工程* [J], 2006(4): 32-35.
- LUO M Q, LI S. *Acoustics and Electronics Engineering* [J], 2006(4): 32-35.
- [41] 侯宏, 孙亮, 董利英, 等. *计量学报* [J], 2010, 31(2): 101-105.
- HOU H, SUN L, DONG L Y, *et al.* *Acta Metrologica Sinica* [J], 2010, 31(2): 101-105.
- [42] 全国声学标准化技术委员会. *水声材料纵波声速和衰减系数的测*

- 量 脉冲管法: GB/T 5266-2006[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2006.
- National Acoustic Standardization Technical Committee. Pulse Tube Method for Measuring Longitudinal Wave Sound Velocity and Attenuation of Underwater Acoustic Materials: GB/T 5266-2006[S]. Beijing: Standardization Administration of the People's Republic of China (SAC), 2006.
- [43] 李水, 罗马奇, 范进良, 等. 声学学报[J], 2007, 32(4): 349-355.
- LI S, LUO M Q, FAN J L, *et al.* Acta Acoustics[J], 2007, 32(4): 349-355.
- [44] 罗马奇, 李水, 易燕, 等. 声学技术[J], 2009, 28(4): 59-62.
- LUO M Q, LI S, YI Y, *et al.* Technical Acoustics[J], 2009, 28(4): 59-62.
- [45] PIQUETTE J C, FORSYTHE S E. The Journal of the Acoustical Society of America[J], 2001, 110(4): 1998-2006.
- [46] RAY P. Acta Acustica united with Acustica[J], 1996, 82(3): 431-441.
- [47] 刘乐, 黄唯纯, 钟雨豪, 等. 中国材料进展[J], 2021, 40(1): 57-68.
- LIU L, HUANG W C, ZHONG Y H, *et al.* Materials China[J], 2021, 40(1): 57-68.
- [48] 陈应航, 陈键, 徐驰, 等. 人工晶体学报[J], 2021, 50(7): 1222-1233.
- CHEN Y H, CHEN J, XU C, *et al.* Journal of Synthetic Crystals[J], 2021, 50(7): 1222-1233.
- [49] ZEQUIRI B, SCHOLL W, ROBINSON S P. Metrologia[J], 2010, 47(2): S156.
- [50] SZABO J P, BENT A D. The Journal of the Acoustical Society of America[J], 2019, 145(2): 795-804.
- [51] SACHS D A. The Journal of the Acoustical Society of America[J], 1980, 68(S1): S85.
- [52] PIQUETTE J C. The Journal of the Acoustical Society of America[J], 1994, 95(6): 3090-3099.
- [53] PIQUETTE J C. The Journal of the Acoustical Society of America[J], 1991, 90(5): 2831-2842.
- [54] PIQUETTE J C. The Journal of the Acoustical Society of America[J], 1996, 100(5): 3227-3236.
- [55] PIQUETTE J C. The Journal of the Acoustical Society of America[J], 1987, 81(5): 1246-1258.
- [56] TRIVETT D H, ROBINSON A Z. The Journal of the Acoustical Society of America[J], 1981, 70(4): 1166-1175.
- [57] HUMPHREY V F, ROBINSON S P, SMITH J D, *et al.* The Journal of the Acoustical Society of America[J], 2008, 124(2): 803-814.
- [58] 李水, 缪荣兴. 计量学报[J], 1999, 20(4): 308-313.
- LI S, MIAO R X. Acta Metrologica Sinica[J], 1999, 20(4): 308-313.
- [59] 李水, 罗马奇, 易燕, 等. 声学学报[J], 2011, 36(5): 534-541.
- LI S, LUO M Q, YI Y, *et al.* Acta Acoustics[J], 2011, 36(5): 534-541.
- [60] HUMPHREY V F. Journal of Sound and Vibration[J], 1985, 98(1): 67-81.
- [61] HUMPHREY V F, BERKTAY H O. Journal of Sound and Vibration[J], 1985, 101(1): 85-106.
- [62] ZHOU H Y, HUANG S H, LI W. Sensors[J], 2020, 20(7): 2148.
- [63] 李水, 易燕, 张军. 声学学报[J], 2020, 45(2): 275-280.
- LI S, YI Y, ZHANG J. Acta Acoustics[J], 2020, 45(2): 275-280.
- [64] 易燕, 李水, 罗马奇, 等. 声学电子工程[J], 2009(3): 25-28.
- YI Y, LI S, LUO M Q, *et al.* Acoustics and Electronics Engineering[J], 2009(3): 25-28.
- [65] 时胜国, 王超, 胡博. 哈尔滨工程大学学报[J], 2021, 42(4): 491-496.
- SHI S G, WANG C, HU B. Journal of Harbin Engineering University[J], 2021, 42(4): 491-496.
- [66] 时胜国, 王超, 胡博. 西北工业大学学报[J], 2019, 37(5): 1036-1043.
- SHI S G, WANG C, HU B. Journal of Northwestern Polytechnical University[J], 2019, 37(5): 1036-1043.
- [67] ROUX L, POUILLE M, AUDOLY C, *et al.* The Journal of the Acoustical Society of America[J], 2020, 147(2): 1104-1112.
- [68] 王清华, 刘宏宇, 李效东, 等. 特种橡胶制品[J], 2008, 29(2): 23-25.
- WANG Q H, LIU H Y, LI X D, *et al.* Special Purpose Rubber Products[J], 2008, 29(2): 23-25.
- [69] 张燕妮, 陈克安, 郝夏影, 等. 科学通报[J], 2020, 65(15): 1396-1410.
- ZHANG Y N, CHEN K A, HAO X Y, *et al.* Chinese Science Bulletin[J], 2020, 65(15): 1396-1410.
- [70] 曹培政, 张宇, 刁顺, 等. 中国材料进展[J], 2021, 40(1): 7-21.
- CAO P Z, ZHANG Y, DIAO S, *et al.* Materials China[J], 2021, 40(1): 7-21.

(编辑 惠 琼)