

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.12412928

# 跨冰层声信号拾取装置中耦合腔的设计与研究\*

张子牧, 朱广平, 陈超日, 李磊

(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

**摘要:**针对现有极地冰层声学探测技术在探测带宽与布署便捷性的局限,围绕一种跨冰层水下声信号拾取装置耦合腔部分的设计与测试展开研究。此装置通过耦合腔,即一个包有声固耦合液的柔性外壳,将冰层中的弹性波转换为耦合液中的压力波,并通过浸于耦合液中的水听器接收声压信号。首先,通过理论分析确定将聚氨酯作为耦合腔的材料;然后,利用仿真软件模拟对耦合腔的几何参数进行了探究;最后,实施了水池实验和低温条件测试,并进一步确定了耦合腔的几何参数对跨冰层探测效果以及装置可靠性的影响。测试结果表明,耦合腔的侧壁厚度是影响装置的跨冰层水声信号拾取效果以及低温适应性的重要参数。

**关键词:** 耦合腔;跨冰层探测;声信号拾取;低温条件

中图分类号: TH825 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4

## Design and study of coupling cavity in trans-ice acoustic signal pick-up device

Zhang Zimu, Zhu Guangping, Chen Chaori, Li Lei

(College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In view of the limitations of the existing polar ice acoustic detection technology in terms of detection bandwidth and deployment convenience, this article focuses on the design and testing of the coupling cavity part of a cross-ice underwater acoustic signal pickup device. The device converts elastic waves in the ice into pressure waves in the coupling fluid through a coupling chamber, a flexible shell with an acoustic-solid coupling fluid, and receives the sound pressure signal through a hydrophone immersed in the coupling fluid. Firstly, the material of the coupling cavity is selected through theoretical analysis. Then, the geometric parameters of the coupling cavity are explored by simulation software simulation. Finally, the pool experiment and low-temperature condition test are carried out, and the influence of the geometric parameters of the coupling cavity on the trans-ice detection effect and the reliability of the device is further determined. The test results show that the thickness of the sidewall of the coupling cavity is an important parameter affecting the cross-ice underwater acoustic signal pickup effect and low-temperature adaptability of the device.

**Keywords:** coupling cavity; trans-ice detection; acoustic signal pickup; low temperature condition

## 0 引言

极地声学的研究于二战结束之后由美国开始,正越来越受人们的关注。我国对于极地声学的研究起步较晚,近年正逐渐受到重视<sup>[1]</sup>。极地声学涉及诸多内容,包括北极海洋环境噪声、冰下声信道以及极地声传播等。对于北极海洋环境噪声,有学者使稳定分布模型对北极环境噪声建模并且分析了冰下噪声的成因<sup>[2]</sup>;或者利用

航船轨迹以及极地海洋的环境数据对极地海洋噪声进行建模,分析航船噪声对海洋生物的影响<sup>[3]</sup>。有学者通过布放海底安装式海洋系泊设备采集北极的鲸鱼声,并通过频谱特性对其分类<sup>[4]</sup>。不论是环境噪声模型的建立,还是观测设备的布放,都可能受到极地海冰覆盖的影响。

极地环境与一般开放海域环境的不同,很大程度上是由于冰层覆盖,造成了海面边界条件的特殊性,也造就了极地海域独特的声场环境。刘胜兴等<sup>[5]</sup>在冰-水界面平整的假设下,将极地声传播模型简化为冰-水双层复

收稿日期: 2024-06-07 Received Date: 2024-06-07

\* 基金项目: 国家自然科学基金(52371347)、中国高等教育学会高等教育科学研究规划课题(23SZH0210)项目资助

合结构模型,推导了冰-水两层复合结构中导波频散方程并分析了导波频散特性。黄海宁等<sup>[6]</sup>提出了基于OASES-Bellhop耦合模型的冰下声信道多途结构快速分析方法,用来分析粗糙界面下的声传播问题。此外,也有学者提出了一种基于上述声场模型的北极冰下扩频通信技术,从而提高了冰下声信息传输的性能<sup>[7]</sup>。同时,极地海域的冰层覆盖也会导致水声信号检测设备的布署、回收难度有所增加,如海冰浮标<sup>[8]</sup>,其布放通常需要开凿冰层。而由于冰层对水声信号有良好的透射能力,所以在冰面上布放传感器是一种可行且相对便捷的方法。早在20世纪,Keohler<sup>[9]</sup>通过在冰面上布置检波器拾取声信号,分析研究冰层内声波传播特性。随着极地研究的深入,近年来此技术也有诸多应用,陈晟等<sup>[10]</sup>在冰层中布署三维检波器开展水下声信号小角度入射冰层的实验,分析了冰层对水下声信号跨冰层传输的影响。Reeder等<sup>[11]</sup>对冰面进行凿击,并利用冻结于冰层的加速度计获得振动信号,将其作频谱分析推测冰层厚度;Penhale等<sup>[12]</sup>利用了包含冰层检波器在内的传感器组合,测量并研究了声源的多途径传播(包含空气、冰、水)的传输损耗特性。Han等<sup>[13]</sup>利用地震检波器组成阵列进行短距离的跨冰层通信。除此之外,布放于冰面上的检波器阵列还可以用于研究水下目标方位定位等问题<sup>[14-15]</sup>。

跨冰层探测作为极区作业的一项重要技术,应用范围很大程度上决定于冰基传感器探测的频带宽度、低温下的工作性能、设备在冰区的布署复杂度等<sup>[16]</sup>。目前最为广泛应用的冰基传感器为地震检波器,通常将其应用于冰层探测表面振动加速度,通过调整接收方向能够分离不同振动方向的弹性波。然而,水声通信、定位的频段具有频率高、带宽大的特点,如水声通信常使用的20 Hz~20 kHz的频率范围。针对如此宽的带宽,设计同等探测能力的检波器更为复杂,且成本较高。而在这一频段内,基于声压的水听器灵敏度优于基于加速度的检波器,设计成本较低。

本文围绕一种冰基声信号拾取装置的声固耦合腔部分展开研究<sup>[17]</sup>,分析确定了声固耦合腔材料与耦合液的最佳选择,并通过仿真评估了耦合腔的几何参数对耦合效果的影响程度;最后,经过实验测试,研究并讨论了几何参数对装置拾取性能以及低温条件下可靠性的影响。

## 1 声固耦合腔简介

声固耦合腔是实现声固耦合的重要器件,也是整个装置的研究重点,其结构如图1所示。它位于该拾取装置的下部,是一个柔性圆柱外壳,其外部形状与标准冰层打孔设备所钻冰洞相吻合,有利于标准化快速布署。耦合腔顶部有一个方便拆卸的密封盖,作用除了防止耦合

液泄露与杂质进入腔体,还有固定换能器与保持其姿态的作用。声固耦合腔内部盛有声固耦合液,实现弹性波向压力波转化,最终由水听器接收。

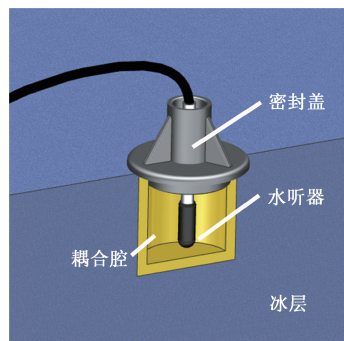


图1 耦合腔示意图

Fig. 1 Coupling cavity diagram

## 2 声固耦合腔的设计

### 2.1 耦合液的选择

声固耦合腔的设计需要满足两个关键点,即低温适应性以及声信号传输能力。为了保证弹性波向压力波的良好转化效率,声固耦合液应当与冰层特性阻抗尽量相近,并且冰点应当低于使用环境的低温,如选用以乙二醇为基液的耦合液。

根据装置工作环境的要求,耦合液要在-30℃保持液态,则溶液中乙二醇比例应当在45.6%~93%,此时,其特性阻抗于1.64~1.74 MRayl,而冰层的特性阻抗在3.2 MRayl左右。耦合液的特性阻抗与冰的特性阻抗有一定的差距,这会对声信号的传输造成一定影响。在这个浓度区间,特性阻抗变化幅度不到3%,对声传播影响不明显,可以忽略其对耦合性能的影响。

### 2.2 声固耦合腔材料的选择

为了保证装置低温下工作的可靠性以及使用安装时的便捷性,耦合腔外壳应当具有高强度、耐磨、抗低温的特性。同时为了便于布署,其形状应当易于改变以实现与冰层紧密的贴合,则材料应当具有良好的延展性。由于耦合液与冰层中声阻抗相差接近2倍,阻抗不匹配会影响声信号传播效果,匹配层的设计非常重要,这在换能器的设计当中较为常见<sup>[18-19]</sup>,能够增加声波在固-液界面上的透射率。耦合腔作为声匹配层,它的特性阻抗是一个关键的参数。由参考文献<sup>[9]</sup>可知冰层特性阻抗一般在3.2 MRayl左右。

由传统理论计算,将冰与耦合液按照半无穷处理,若冰层、耦合液声阻抗分别为 $Z_0$ 、 $Z_1$ ,那么声波透过匹配层的透射系数最大时,匹配层阻抗应当介于 $Z_0$ 和 $Z_1$ 之间,

并且当等于 $\sqrt{Z_0 Z_1}$ 时透射系数最大。

本文使用热塑性聚氨酯(TPU)作为外壳的加工材料,其拉伸模量在 $-20^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ 时约18 MPa,具有良好的延展性。同时,其特性阻抗约为3 MRayl,介于冰和耦合液之间,使得装置拥有良好的透声性能。

## 2.3 声固耦合腔几何参数的设计

### 1) 声固耦合腔模型的建立与仿真分析

对于圆柱形的耦合腔,需要确定的结构尺寸为外直径、侧壁和底部的厚度、高度以及水听器在耦合腔内部的位置。考虑通用性,将耦合腔外直径 $D$ 取为市面上较小的冰钻直径 $0.1\text{ m}$ ;对于耦合腔外壳的厚度、高度以及水听器的位置这些潜在的影响因素,需通过有限元仿真模拟并对比耦合腔对于20 Hz~20 kHz频段信号的耦合效果来优化耦合腔几何参数。

用COMSOL Multiphysics软件进行研究,建立两个二维轴对称模型。一个半径为1 m的半球体模拟冰层,剖面为冰与空气分界面,其中一个模型,在冰面正中间放置了耦合腔,为模型1,如图2(a)所示。另一个作为对照,只保留冰层,未放置耦合腔,为模型2,如图2(b)所示。冰层部分采用“固体力学”物理场组件。最外侧的半球壳为厚0.2 m的完美匹配层。冰层极厚的情况下,冰面只考虑与空气接触部分,也就是球的剖面,为自由边界。冰层设定为线弹性材料,在 $-20^{\circ}\text{C}$ 附近的物理参数参考文献[9]得出,其压力波速3 500 m/s,剪切波速1 600 m/s,密度 $900\text{ kg/m}^3$ 。冰层内有环形载荷,位置、尺寸与大小可调整。半径分别为0.40、0.60、0.80 m,深度都是0.36 m。模型1使用线弹性材料模拟耦合腔外壳,其拉伸模量18 MPa,密度 $1\,600\text{ kg/m}^3$ 。传输声信号时,耦合腔外壳

与耦合液接触传递微小振动,此多物理场耦合问题可以归结为声-结构相互作用。声-结构边界即耦合液与耦合腔外壳接触部分。耦合液由“压力声学,频域”物理场组件模拟,耦合液为52%浓度的乙二醇溶液,对应声速1 550 m/s,密度 $1\,080\text{ kg/m}^3$ 。而模型2作为对照,则在对称中心距离半圆剖面不同距离处放置探针,取应力幅值观测弹性波。其他参数设置与模型1相同。网格于完美匹配层设为扫掠,其余设为自由四面体网络,最大尺度应当不大于声波最小波长的1/6。

为了探究声波的传输效果,模型1中求边界探针压强平均值,得到水听器接收的声压幅频 $P(f)$ 。模型2取点探针处应力平均值,得到应力幅频 $T(f)$ 。用 $\eta(f)$ 表示声压与应力的比值:

$$\eta(f) = \frac{|P(f)|}{|T(f)|} \quad (1)$$

通过 $\eta(f)$ 曲线可以得知耦合腔的传输效果。

### 2) 声固耦合腔的高度与侧壁厚度对声信号传输效果的影响

为了放置bk8104水听器,耦合腔腔内高度不小于100 mm,并且,其选取与直径成1、1.5、2的比例关系。耦合腔的侧壁厚度为 $a$ ,取5、10、15 mm。底部厚度取6 mm,水听器接收面为从耦合腔顶部开始向下50 mm高度的圆柱面。冰层内环形载荷离耦合腔对称轴分别为0.40、0.60、0.80 m,深度都是0.36 m。仿真结果如图3所示。由图3可知,在低频情况下,耦合腔的高度对 $\eta(f)$ 的影响微弱;而在高频情况下出现了不同的峰值。但无论高度如何,总体上传输效果随频率变化的趋势较为一致。关于侧壁的厚度,无论是低频还是高频,在5~15 mm随着厚度的增加,传输效果都有所变差。

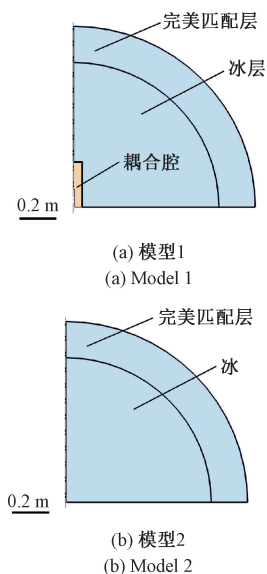
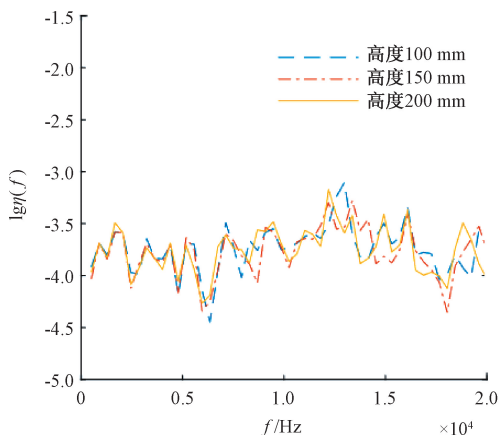


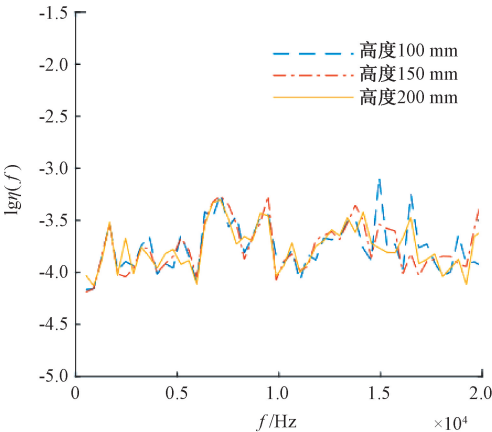
图2 仿真模型

Fig. 2 Simulation model

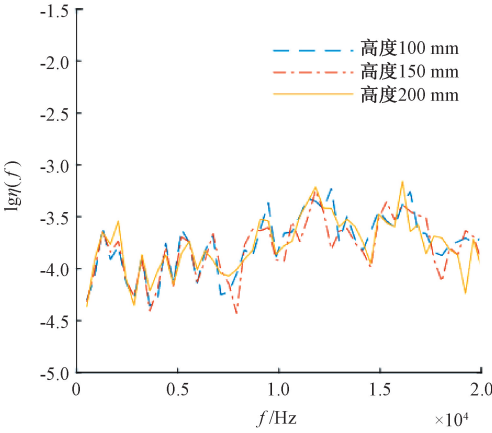


(a) 5 mm厚度下不同高度对应的 $\eta$ 幅频曲线

(a)  $\eta$  amplitude frequency curves corresponding to different heights at 5 mm thickness



(b) 10 mm厚度下不同高度对应的 $\eta$ 幅频曲线  
(b)  $\eta$  amplitude frequency curves corresponding to different heights at 10 mm thickness



(c) 15 mm厚度下不同高度对应的 $\eta$ 幅频曲线  
(c)  $\eta$  amplitude frequency curves corresponding to different heights at 15 mm thickness

图3 侧壁厚度与高度对传输效果的影响

Fig. 3 Effect of the sidewall thickness and height on the transmission effect

3) 声固耦合腔底部厚度对声信号传输效果的影响

底部厚度设置在2~6 mm,远小于耦合腔直径与高度,由此假设底部厚度造成的影响与其他参数的影响相互独立。设耦合腔高度 $H=100$  mm,直径 $D=100$  mm,侧壁厚度 $a=10$  mm。底部为2、4、6 mm这3组。仿真结果如图4所示,可以发现,其对弹性波的耦合效果影响远比侧壁厚度的小。这样,即使它与其他参数对声信号传输效果有交叉影响,也是可以忽略的。

4) 水听器位置对声信号传输效果的影响

在耦合腔内壳体位置附近,声压幅值随位置变化起伏明显,远离处则较为均匀。对水听器处于耦合腔内不同位置时的声信号传输效果进行比对。

在对照实验中,设耦合腔的直径 $D=100$  mm,高度为 $H$ ,其选取与直径成1和2的比例关系,由于底部厚度几乎无影响,取侧壁厚度 $a=10$  mm,底部都是2 mm。这种

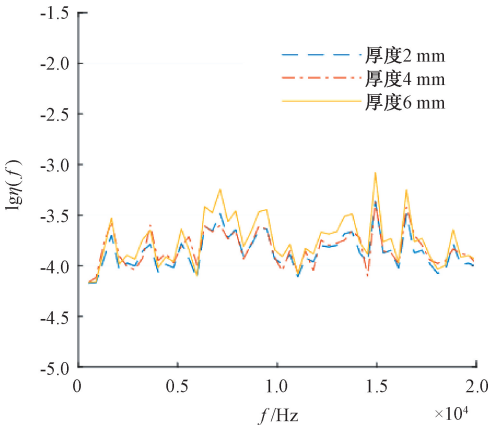
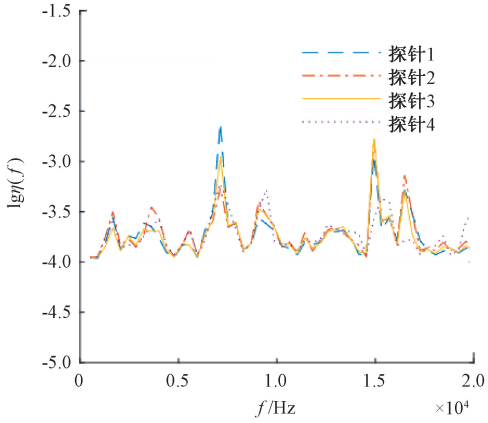


图4 不同底部厚度的效果

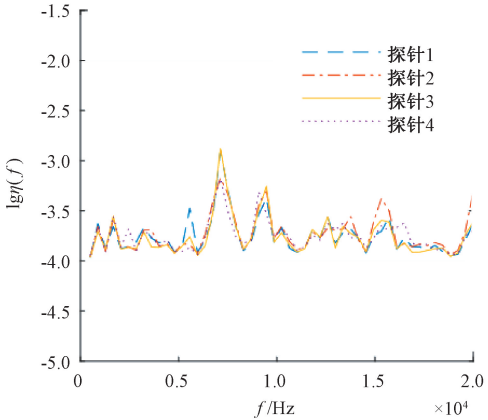
Fig. 4 Effect of different bottom thicknesses

情况下选取的边界探针1、2、3、4离耦合腔底部依次越来越远,最近距离分别为1、2、3、40 mm。

3个高度 $H$ 取值下,4个不同探针位置情况下的 $\eta(f)$ 幅度图如图5所示。可以看出,除了个别起伏有微小差别之外,在此频段水听器位置对性能几乎没有影响。



(a) 100 mm高度下不同位置的 $\eta$ 幅频曲线  
(a)  $\eta$  amplitude frequency curves at different positions at 100 mm height



(b) 150 mm高度下不同位置的 $\eta$ 幅频曲线  
(b)  $\eta$  amplitude frequency curves at different positions at 150 mm height



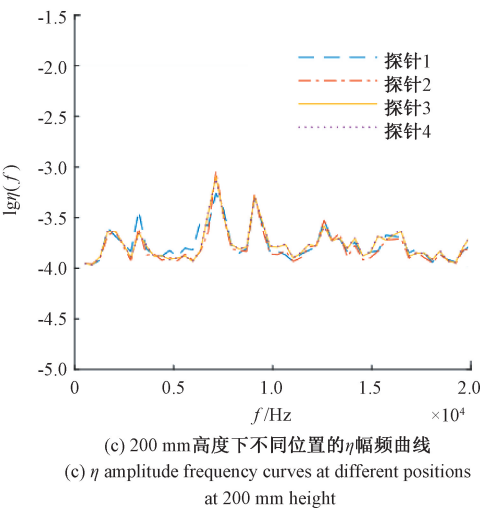


图 5 水听器位置对传输效果的影响

Fig. 5 Effect of the hydrophone position on the transmission effect

通过仿真,对不同的几何参数的影响效果进行了比对。可以看出,声信号传输效果对于侧壁厚度这一参数更加地敏感。侧壁厚度与底部厚度对耦合腔性能的影响将在低温条件测试与水池实验中进一步探究。

3 实 验

3.1 测试底部厚度对装置低温适应性的影响

为了测试声固耦合腔壁厚对于装置可靠性的影响,进行低温条件测试。制作耦合腔时,将聚氨酯圆片由耐低温 tpu 胶水粘贴至聚氨酯管底端,经测试验证,该方法简单可靠。对于底部的厚度,使用厚度分别为 2 和 6 mm 的聚氨酯圆片于侧壁为 10、20 mm 厚度的聚氨酯圆管底部使用 tpu 胶水进行粘贴,分为 b1、b2、c1、c2 组别,如表 1 所示。制作若干 670 mm×470 mm×250 mm 的冰块。上方保留直径 100 mm 坑洞,深度 100 mm,用于放置耦合腔,其与冰块接触部分灌入水排除间隙,然后冻结。将带有耦合腔的冰块滞留室外一周后取回观察(12 月 22 日~28 日哈尔滨市南岗区气温在-35℃~-9℃)。

表 1 低温条件测试参数选择

| Table 1 | Test parameters selection for low-temperature conditions |     |
|---------|----------------------------------------------------------|-----|
| 组别      | 侧壁厚                                                      | 底部厚 |
| b1      | 10                                                       | 2   |
| b2      | 10                                                       | 6   |
| c1      | 20                                                       | 2   |
| c2      | 20                                                       | 6   |

结束后经过观察,c2 组底部出现了少量脱胶,b2 组底部出现了脱胶趋势,这是由于耦合腔周围的冰在气温改变较大时发生了形变,尤其是在缝隙内灌水冻结过程中。对于较厚的底部,其延展性较差,在侧壁较厚时容易与聚氨酯管脱离,会导致耦合液泄露,严重影响装置性能并且造成污染。说明底部厚度对于耦合腔的牢固程度则更加重要。

3.2 测试侧壁厚度对装置性能的影响

进一步探究声固耦合腔的侧壁厚度对传输效果的影响,模拟跨冰层探测,将冻着耦合腔的冰块放入实验水池自然漂浮。冰块中心与声源水平距离为 1 m。由于冰层厚度限制,为了限制耦合腔底部冰层厚度误差产生的干扰,耦合腔高度设为 100 mm。根据耦合腔侧壁的厚度,将冰块分为 3 组,厚度分别为 10、15、20 mm。实验设备与测试系统如图 6 所示。

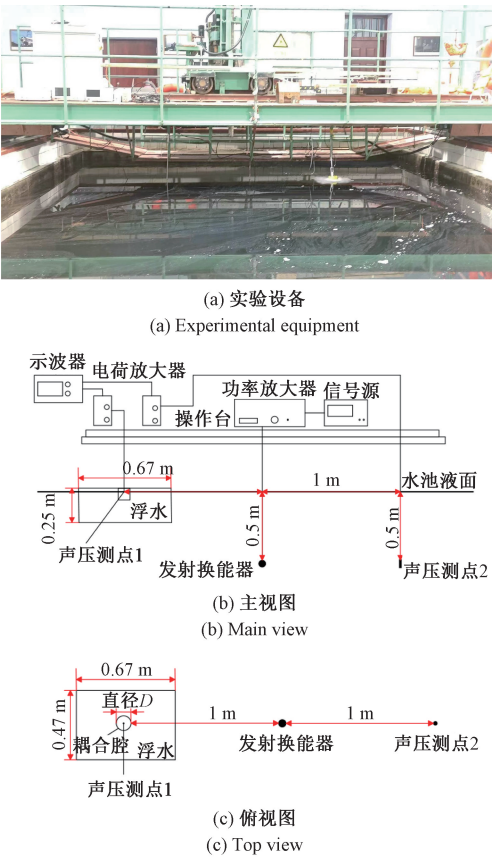


图 6 实验设备与测试系统示意图

Fig. 6 A schematic diagram of the experimental equipment and the test system

声固耦合腔内灌满 65% 的乙二醇混合液。水听器由操作台以及聚氨酯顶盖约束,放入耦合腔使之对称轴与圆柱对称轴重合,调整高度使之与耦合腔底部距离 50 mm,作为声压测点 1 用来接收转换后的压力波。

由于加速度传感器一般使用频带在 10 kHz 以下,超过 10 kHz 幅频响应衰减严重,响应时间通常在秒量级,而实验研究的频率最高达到了 20 kHz。所使用的水听器于 1~20 kHz 的灵敏度级为 205~210 dB,适合于本文实验的测量。另外,若以测量冰中加速度的方法观测弹性波,则至少需要 3 个方向的布放,较为复杂。因此,测量冰中弹性波幅值实现难度较大。所以,实验改用在水中放入水听器用于接收浮冰外的水声信号,中心于水面下 0.5 m,为声压测点 2。声源使用的是球形换能器,其中心于水面以下 0.5 m,在水池里发射 1~20 kHz 的单频信号,以 250 Hz 为步长扫频,记录两个水听器同等电荷放大倍数下的输出信号。本文实验使用的水听器型号一致。

实验所在水池尺度为 12 m×4 m×5 m,远大于冰块,所以忽略不同对照组的浮冰差别对池内混响的影响。使用的声压水听器在 1~20 kHz 的灵敏度约为 -205 dB,对耦合腔内水听器与水池中水听器在不同频率下的输出幅值作比,设为  $\beta(f)$ :

$$\beta(f) = \frac{|P_1(f)|}{|P_2(f)|} \quad (2)$$

式中:  $P_1(f)$ 、 $P_2(f)$  分别为声压测点 1 与声压测点 2 的测量值。得到 3 条幅频曲线,如图 7 所示。

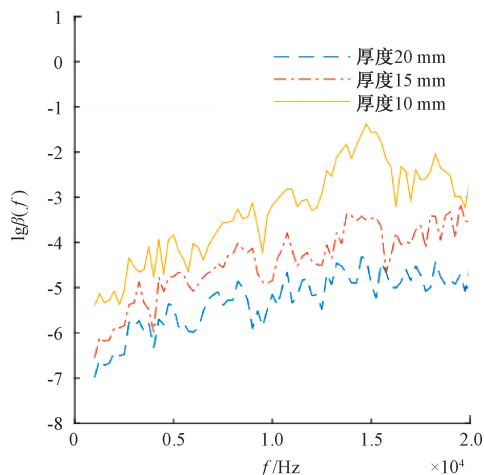


图 7 不同侧壁厚度对传输效果的影响

Fig. 7 Effect of different sidewall thicknesses on the transmission effects

由图 7 可知,随着侧壁厚度的增加,  $\beta(f)$  在所探测的频率范围总体上下降;对于 1.2~2 kHz 出现的峰值也随着壁厚的增加而逐渐消失;随着频率的增加,不同厚度对应的  $\beta(f)$  值总体上分布规律相似,都是上升趋势;对于厚度较大的组别,上升也更加缓慢。

### 3.3 实验结果分析

通过低温条件测试以及水池实验,获得了侧壁厚度

对跨冰层探测的影响与底部厚度对装置低温下牢固度的影响。由水池实验结果可以发现,在耦合腔外直径与高度一定的情况下,不论侧壁厚度如何,在 1~20 kHz,  $\beta(f)$  大小都与频率正相关,且有明显的极大、极小变化,这与仿真得到的规律有一定相似之处。在 3 个对照组中,组别之间的  $\beta(f)$  幅值大致相差 0~2 个数量级,即厚度大的组别传输效果更差。此外,随着侧壁厚度增加,  $\beta(f)$  曲线原本较大峰值被更多的起伏较小的峰值所取代,也就是拾取水声信号的畸变会较小。而且,通过低温条件测试,发现底部壁厚较大时,耦合腔对形变的适应性较差,底部更易损坏。

由此可知,耦合腔侧壁厚度较小时,装置对跨冰层水声信号的拾取能力较好,并且在冰层中更易存放,不易损坏;而对于对幅度曲线平坦程度要求较高的用途,例如水下声源的方位估,则应当适当增大侧壁厚度,但是这会牺牲一定的灵敏度,同时提高耦合腔损坏的风险,设计时应权衡。

## 4 结 论

本文针对跨冰层水下声信号拾取装置中的重要部件—声固耦合腔的设计,开展了理论和实验研究,通过理论分析确定了能够提高装置灵敏度的耦合腔合适材料为聚氨酯外壳以及乙二醇溶液耦合液后,仿真构建了冰层弹性波向耦合腔内压力波转换的声固耦合模型,以耦合腔作为匹配层,探究耦合腔选择不同几何参数下装置的传输效果的幅频曲线的变化,确定了侧壁厚度与底部厚度为敏感几何参数。随后通过水池实验与低温条件测试获得了对于 1~20 kHz 水声信号的拾取情况以及尺寸参数对于耦合腔低温下坚固性的影响,确定了侧壁厚度与底部厚度对于装置跨冰层探测性能以及可靠性的影响,为研制性能更优的跨冰层水下声信号拾取装置提供了耦合腔部分的设计思路和研制方案。

## 参考文献

- [1] 李启虎,王宁,赵进平,等. 北极水声学:一门引人关注的新型学科[J]. 应用声学,2014,33(6):471-483.  
LI Q H, WANG N, ZHAO J P, et al. Arctic underwater acoustics: An attractive new topic in ocean acoustics[J]. Journal of Applied Acoustics, 2014, 33(6): 471-483.
- [2] 谭靖骞,曹宇,黄海宁,等. 北极海域海洋环境噪声建模与特性分析[J]. 应用声学,2020,39(5):690-696.  
TAN J Q, CAO Y, HUANG H N, et al. Modeling and characterization of marine ambient noise in the Arctic[J]. Journal of Applied Acoustics, 2020, 39(5):

- 690-696.
- [3] HEANEY K D, VERLINDEN C M A, SEGER K D, et al. Modeled underwater sound levels in the Pan-Arctic due to increased shipping: Analysis from 2013 to 2019[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2024, 155(1): 707-721.
- [4] ZAHN M J, LADEGAARD M, SIMON M, et al. Accurate species classification of Arctic toothed whale echolocation clicks using one-third octave ratios[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2024, 155(4): 2359-2370.
- [5] 刘胜兴, 汤立国, 李整林. 北极冰-水耦合系统中声波传播特性[J]. *声学学报*, 2021, 46(4): 553-563.  
LIU SH X, TANG L G, LI ZH L. Propagation of acoustic waves in a coupled ice-water system for the Arctic ocean[J]. *Acta Acustica*, 2021, 46(4): 553-563.
- [6] 黄海宁, 刘崇磊, 李启虎, 等. 典型北极冰下声信道多途结构分析及实验研究[J]. *声学学报*, 2018, 43(3): 273-282.  
HUANG H N, LIU CH L, LI Q H, et al. Multipath structure of the typical under-ice sound channel in Arctic: Theory and experiment [J]. *Acta Acustica*, 2018, 43(3): 273-282.
- [7] 刘崇磊, 尹力, 普湛清, 等. 基于声场模型的北极冰下扩频通信性能研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(12): 255-264.  
LIU CH L, YI L, PU ZH Q, et al. Research on acoustic spread spectrum communication performance based on acoustic model in the Arctic [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(12): 255-264.
- [8] 王波, 李民, 刘世萱, 等. 海洋资料浮标观测技术应用现状及发展趋势[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(11): 2401-2414.  
WANG B, LI M, LIU SH X, et al. Current status and trend of ocean data buoy observation technology applications [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(11): 2401-2414.
- [9] KEOHLER R. Beobachtungen an profilen auf See-Eis[J]. *Z. Geophys*, 1929, 5: 314-316.
- [10] 陈晟, 杨燕明, 周鸿涛, 等. 北极水下声信号跨冰层变化分析[J]. *声学学报*, 2021, 46(3): 355-364.  
CHEN SH, YANG Y M, ZHOU H T, et al. Analysis of the variation on underwater acoustic signal across ice layer in the Arctic[J]. *Acta Acustica*, 2021, 46(3): 355-364.
- [11] REEDER D B, JOSEPH J E, HILL A M. Walking on snow-covered Arctic sea ice to infer ice thickness [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2022, 152(6): 3809-3818.
- [12] PENHALE M B, BARNARD A R, SHUCHMAN R. Multi-modal and short-range transmission loss in thin, ice-covered, near-shore Arctic waters[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 143(5): 3126-3137.
- [13] HAN X, YIN J W, CHEN W J, et al. Cross-ice acoustic communication by ice-mounted geophones: An initial experimental demonstration [J]. *Applied Acoustics*, 2019, 150: 302-306.
- [14] 陈晟, 杨燕明, 周鸿涛, 等. 北极跨冰层水中声源方位估计实验与分析[J]. *声学学报*, 2022, 47(2): 175-186.  
CHEN SH, YANG Y M, ZHOU H T, et al. Experiment and analysis on cross-ice bearing estimation for underwater acoustic source in the Arctic[J]. *Acta Acustica*, 2022, 47(2): 175-186.
- [15] DOSSO S E. Three-dimensional localization of transient acoustic sources using an ice-mounted geophone[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 135(1): 124-133.
- [16] 朱广平, 殷敬伟, 陈文剑, 等. 北极典型冰下声信道建模及特性[J]. *声学学报*, 2017, 42(2): 152-158.  
ZHU G P, YIN J W, CHEN W J, et al. Modeling and characterizing the typical under-ice acoustic channel for the Arctic[J]. *Acta Acustica*, 2017, 42(2): 152-158.
- [17] 殷敬伟, 唐胜雨, 朱广平, 等. 一种冰层声信号拾取装置: 中国 202210772138.8[P]. 2022-10-25.  
YIN J W, TANG SH Y, ZHU G P, et al. A device for picking up acoustic signals through ice layers: CN 202210772138.8[P]. 2022-10-25.
- [18] 卞加聪, 胡文祥, 周八妹. 多匹配层空气耦合压电超声换能器[J]. *应用声学*, 2018, 37(1): 96-100.  
BIAN J C, HU W X, ZHOU B M. Multi-matching layer air-coupled piezocomposite ultrasonic transducer [J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2018, 37(1): 96-100.
- [19] 王宏伟, 赵吉航. 带匹配层的复合材料多圆管同轴堆

叠换能器[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(7): 1029-1035.

WANG H W, ZHAO J H. Composite-material multi-tube coaxial stacking transducer with a matching layer[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(7): 1029-1035.

作者简介



张子牧, 现为哈尔滨工程大学本科生, 主要研究方向为水声工程。

E-mail: 1770581472@qq.com

**Zhang Zimu** is currently an undergraduate at Harbin Engineering University. His main research interest is underwater acoustic.



朱广平(通信作者), 2003 年于东北林业大学获得学士学位, 2009 年于哈尔滨工程大学获得博士学位, 现为哈尔滨工程大学副教授, 主要研究方向为海洋混响中主动声呐目标探测、极地声学技术。

E-mail: guangpingzhu@hrbeu.edu.cn

**Zhu Guangping** (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Northeast Forestry University in 2003, and received his Ph.D. degree from Harbin Engineering University in 2009.

He is currently an associate professor at Harbin Engineering University. His main research interests include active sonar target detection in ocean reverberation, polar acoustic technology.



陈超日, 2022 年于哈尔滨工程大学获得学士学位, 现为哈尔滨工程大学博士研究生, 主要研究方向为水声信号处理。

E-mail: chaorichen@hrbeu.edu.cn

**Chen Chaori** received his B.Sc. degree from Harbin Engineering University in 2022. He is currently a Ph.D. candidate at Harbin Engineering University. His main research interest is underwater acoustic signal processing.



李磊, 2002 年于哈尔滨工程大学获得学士学位, 2008 年于哈尔滨工程大学获得硕士学位, 现为哈尔滨工程大学高级实验师, 主要研究方向为水声测试技术和声学教育。

E-mail: lilei@hrbeu.edu.cn

**Li Lei** received his B.Sc. degree from Harbin Engineering University in 2002, and received his M.Sc. degree from Harbin Engineering University in 2008. He is currently a senior experimentalist at Harbin Engineering University. His main research interests include underwater acoustic testing techniques and acoustic education.