

◇ 研究报告 ◇

# 圆柱形超高静水压水听器设计与测试

何 涛<sup>†</sup>

(杭州应用声学研究所 杭州 311400)

**摘要** 该文介绍了一种应用于 20 Hz ~ 20 kHz 频段、最大工作深度 5000 m 的超高静水压水听器。水听器敏感元件采用厚壁压电陶瓷圆管, 高强度复合泡沫去耦, 通过对敏感元件及水听器结构进行合理设计, 保证水听器具有高的耐压强度。测试了水听器在常压及不同压力下的接收灵敏度。测试结果表明, 水听器常压下接收灵敏度响应平坦, 在常压到 50 MPa 压力范围内, 水听器低频接收灵敏度最大变化小于 2 dB, 表明该型水听器具有良好的压力稳定性, 可在深海资源勘测、深海通讯等方面获得广泛应用。

**关键词** 圆柱形, 超高静水压, 水听器, 设计, 测试

中图法分类号: TB556 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2019)06-1033-04

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.06.017

## Design and test of cylindrical high hydrostatic pressure hydrophone

HE Tao

(Hangzhou Applied Acoustic Institute, Hangzhou 311400, China)

**Abstract** This paper introduces a high hydrostatic pressure hydrophone which is used in the 20 Hz–20 kHz band and the maximum depth is 5000 meters. The sensor uses thick wall piezoelectric circular tube and high strength composite foam to decouple. Through reasonable design of the structure, the hydrophone has high pressure resistance. The sensitivity of the hydrophone under normal and different pressures is tested. The test results show that the sensitivity of the receiver at atmospheric pressure is flat. In the 0.1 MPa–50 MPa pressure range, the maximum change of the sensitivity of hydrophone at low frequency is less than 2 dB, which indicates that the hydrophone has good pressure stability. It can be widely applied in deep resource survey and deep sea communication.

**Key words** Cylindrical, High hydrostatic pressure, Hydrophone, Design, Test

2019-01-14 收稿; 2019-05-27 定稿

作者简介: 何涛 (1976-), 男, 四川宜宾人, 高级工程师, 研究方向: 标准水听器及水听器测试。

<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail: hetao96@sina.com

## 0 引言

21世纪海洋产业的开发是国民经济的重要组成部分。我国领海广阔,海洋中蕴含着丰富的财富,通过“蛟龙号”、“深海勇士号”等载人潜水器平台,我国在深海资源勘测中取得了诸多重要成果。水声技术是进行海洋环境动态变化监测、深水通信、深海定位等十分有效的手段之一,在深海资源勘探、水声通信中,大量稳定性好的深水换能器、水听器被广泛应用<sup>[1]</sup>。随着我国海军由近海向外海挺进,海洋探测活动不断向深海发展,深海空间站等军民融合技术的发展,需要对安装在水声设备以及换能器、声学材料等开展声学性能测试和评价工作。目前最高10 MPa的工作静水压已不能满足当前发展的需要,需要研究更高静水压水声声压的计量技术。如果缺乏在高静水压下性能稳定的标准水听器,那么,检测深水换能器的电声参数就难以得到准确、可靠的保证,甚至还会造成严重差错。因此,耐超高静水压水听器的研制和测试技术研究就显得十分紧迫和必要,本文将报道一种20 Hz ~ 20 kHz频段、最大工作深度5000 m的超高静水压水听器。

在国外,丹麦B&K公司研制的8105型和8106型标准水听器,最大工作深度1000 m;美国Teledyne RESON公司研制的多型标准水听器能在1000 m静水压力下工作,极限深度2000 m;美国HighTech公司具有多型深水水听器产品,最大工作深度6000 m。在国内,耐超高静水压宽频带的水听器公开报道较少,一般最大使用深度为1000 m左右,与外国存在较大差距。文献[2]对半球形压电水听器灵敏度随静水压变化进行了探讨,对水听器结构设计及计算并未涉及。文献[3]对高静水压下水听器静态电容变化进行了试验研究,对该变化对灵敏度影响进行了分析并提出解决方案。在水听器实际使用中,不同静水压下的接收灵敏度是用户非常关心的性能参数,目前,国防科技工业水声一级计量站“高静压水声声压耦合腔标准装置”可实现水听器最高10 MPa下低频灵敏度测试。

## 1 超高静水压水听器设计

### 1.1 敏感元件选择

敏感元件是水听器的核心,其性能对水听器主要性能起决定性作用。硫酸锂晶体是一种高灵敏

度、高稳定性的材料,它是体积膨胀型材料,在晶体表面不需空气腔或橡皮之类的压力释放材料,有高的温度、压力和时间稳定性,是理想的耐高压水听器敏感元件的材料,它在USRD研制的标准水听器中被大量使用,研制成功的H52型水听器最大使用深度5200 m。

美国科学家Krueger等<sup>[4]</sup>分别对PZT-4、PZT-5、陶瓷B和钛酸钡铅四种陶瓷材料在高静水压下的性能影响进行了试验研究,在四种陶瓷材料中,PZT-4受压力作用时间影响较小,静水压下性能变化最小,因此更加适合作为接收换能器使用。

两种方案比较,硫酸锂晶体具有高的压力稳定性,但水听器结构复杂,高频指向性起伏较大,压电陶瓷PZT-4压力稳定性良好,水平全向,获取容易,因此最终选用压电陶瓷作为高静水压水听器敏感元件。

文献[3]对一种薄壁球形压电陶瓷和一种圆柱形压电陶瓷在不同静水压下静态电容进行了试验研究,试验结果如表1所示。

表1 水听器静态电容随静水压变化

Table 1 Static capacitance of hydrophones with static pressure

序号	静水压/MPa	球形静态电容/nF	圆柱静态电容/nF
1	0	1.61	1.58
2	10	1.22	1.54
3	20	1.02	1.52
4	30	0.90	1.47
5	40	0.85	1.38
6	50	0.81	1.30
7	55	0.77	1.25

从表1可以看出,随着静水压升高,径向极化的球形水听器和圆柱形水听器静态电容降低,球形水听器电容变化率大于圆柱形水听器。当水听器连接一定长度电缆后,其接收灵敏度会发生衰减。如该球形水听器带15 m电缆后,高静压下和常压下由于电缆衰减不同,灵敏度相差3.1 dB。对于柱形压电陶瓷,经计算,常压与50 MPa相比较,电缆引起的灵敏度变化为0.9 dB,因此选用厚壁的圆柱形压电陶瓷,水听器压力稳定性更好。

## 1.2 元件耐压及灵敏度计算

压电陶瓷在高静压下会发生退极化, 根据相关资料, 退极化静压在100 MPa以上<sup>[5]</sup>, 因此在最高50 MPa时不会引起材料退极化。从机械强度考虑, 压电圆管在外压作用下, 压力过高会发生周向弹性和塑形失效, 其结构会受到破坏, 从而引起水听器失效。对于本文选用的压电陶瓷圆管, 规格为 $\Phi 25 \text{ mm} \times \Phi 19 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ , 其最大许用外压可表示为<sup>[6]</sup>

$$p = \frac{p_{cr}}{m} = KE \left( \frac{\delta_e}{D_0} \right)^3 / m, \quad (1)$$

式(1)中,  $p$ 为圆管许用外压;  $m$ 为安全系数, 通常取3;  $K$ 为圆管特征系数, 取2.2;  $E$ 为材料弹性模量;  $\delta_e$ 为圆管厚度;  $D_0$ 为圆管外径。

经计算该规格元件能承受最高静水压为96.9 MPa, 因此在最高50 MPa条件下使用具有较高的安全性。

对压电圆管的振动模态分析, 已经有较多科研人员进行了研究<sup>[7]</sup>。为保证接收灵敏度平坦, 水听器工作频率范围应远离谐振频率, 一般使用频率上限小于谐振频率的0.7倍。对于本文选用的压电陶瓷圆管, 因圆管高度小于圆管直径, 其径向谐振频率可以用公式(2)进行近似计算:

$$f_s = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{1}{s_{11}^E \times \rho}}, \quad (2)$$

式(2)中,  $a$ 为圆管的平均半径,  $s_{11}^E$ 为压电陶瓷的柔顺常数,  $\rho$ 为压电陶瓷密度。

经计算, 压电陶瓷圆管空气中谐振频率为47.2 kHz。利用3532-50 LCR测试仪对压电圆管G-B进行测试, 实测谐振频率为48.75 kHz, 远高于最高使用频率20 kHz。

对于径向极化的压电陶瓷圆管, 其低频接收灵敏度可用公式(3)进行计算<sup>[8]</sup>:

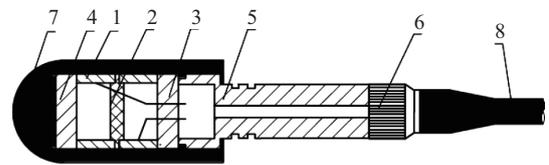
$$m = r_2 \cdot \left( g_{31} + \frac{1 - r_1/r_2}{1 + r_1/r_2} \times g_{33} \right), \quad (3)$$

式(3)中,  $r_2$ 为圆管外半径,  $r_1$ 为圆管内半径,  $g_{31}$ 、 $g_{33}$ 为压电陶瓷压电电压常数。

经计算并采用分贝表示, 水听器低频接收灵敏度约为-200.6 dB, 两个圆管串联, 理论接收灵敏度-194.6 dB。

## 1.3 水听器结构设计

根据1.1节的实验结果, 水听器敏感元件采用厚壁PZT-4压电陶瓷圆管, 两个陶瓷元件串联。高静水压水听器结构设计需要解决3个关键技术。(1) 盖板及支撑杆等结构强度设计。本文采用强度较高的无极性陶瓷作为盖板, 强度较高的钛合金作为支撑结构, 并增加材料厚度以提高抗压强度, 以满足50 MPa高静水压下使用安全。(2) 高静压去耦材料合理选用。软木橡胶、硬质聚氨酯泡沫等常规去耦材料, 最大耐静水压力一般不大于10 MPa, 超过最大工作深度, 性能急剧变差, 本文选用高强度复合泡沫作为元件间的去耦, 该材料密度仅为0.7 g/cm<sup>3</sup>, 压缩强度大于90 MPa, 是一种理想的高静压去耦材料。(3) 水听器结构与高静水压测量设备的配合。水听器制作完成后, 其高静水压下的低频接收灵敏度需在腔体内测试, 本文水听器支撑结构直径与测量腔体开孔尺寸相同, 采用两道径向密封圈实现密封, 便于水听器性能测试, 设计完成的水听器剖面结构示意图如图1所示。



1. 压电陶瓷圆管; 2. 高强度复合泡沫; 3. 电连接器; 4. 前盖板; 5. 支撑结构; 6. 锁紧螺母; 7. 透声橡胶; 8. 耐高静压电缆

图1 水听器结构示意图

Fig. 1 Diagram of hydrophone structure

## 2 水听器性能测试

### 2.1 水听器常压下测试结果

制作完成的水听器, 在振动液柱及中低频消声水池中进行测试, 测试频率范围20 Hz ~ 20 kHz, 测试参数为常压下接收灵敏度, 测试结果见图2。

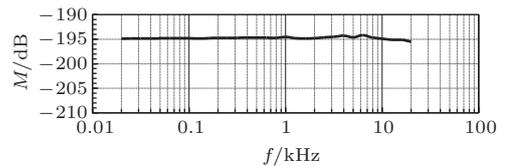


图2 接收灵敏度曲线

Fig. 2 Receiving sensitivity frequency response

从图2中可以看出,在20 Hz ~ 20 kHz 频率范围内,水听器常压下接收灵敏度平坦,电缆末端低频接收灵敏度为-195 dB,与理论计算符合较好。

## 2.2 高静水压下接收灵敏度测试结果

利用自行研制的高静水压耦合腔对水听器高静水压下低频接收灵敏度进行测量,该腔体为圆柱形,内部尺寸为 $\Phi 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ ,厚度75 mm,最高静水压50 MPa。采用三换能器互易法进行校准,频率范围20 Hz ~ 1000 Hz,静水压分别为5 MPa、10 MPa、20 MPa、30 MPa、40 MPa、50 MPa,测试结果如图3所示。

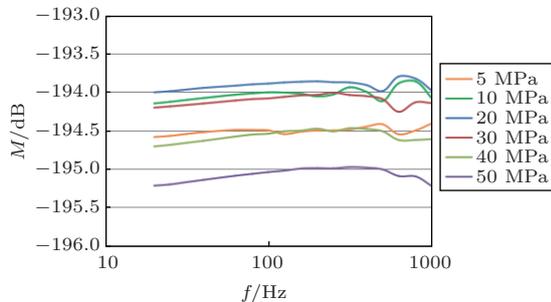


图3 高静水压下低频接收灵敏度曲线

Fig. 3 Frequency response of sensitivity under different hydrostatic pressure

从图3可以得到水听器低频接收灵敏度随静水压变化趋势如下:

(1) 随着静水压增大,水听器低频接收灵敏度逐渐升高,在压力为20 MPa时达到最大;

(2) 在接收灵敏度达到最大值后,随着静压力的进一步增大,接收灵敏度开始下降,静水压越大,接收灵敏度越低;

(3) 在20 Hz ~ 1000 Hz 频率范围,5 MPa ~ 50 MPa 水听器接收灵敏度最大变化为1.5 dB,说明该水听器具有良好的压力稳定性。

## 3 结论

本文介绍了一种频率范围在20 Hz ~ 20 kHz 的圆柱形超高静水压水听器,突破了高静水压水听器设计制作及高静水压性能测试的关键技术,给出了该水听器常压下的接收灵敏度以及低频接收灵敏度随压力变化趋势。测试结果表明该水听器接收灵敏度随压力变化较小,5 MPa ~ 50 MPa 压力范围内20 Hz ~ 1000 Hz 频带水听器接收灵敏度起伏最大为1.5 dB,具有良好的压力稳定性,有望在超高静水压校准、深海资源勘测、深海通信等方面获得广泛应用。

## 参 考 文 献

- [1] 肖今新, 丁训权, 蔡志恂. 深水宽频带收发换能器[J]. 应用声学, 1990, 9(6): 24-28.  
Xiao Jinxin, Ding Xunquan, Cai Zhixun. Deepwater broadband transducer[J]. Applied Acoustics, 1990, 9(6): 24-28.
- [2] 刘振江. 半球形压电陶瓷水听器灵敏度随静水压变化的探讨[J]. 应用科技, 1993, 73(2): 51-59.
- [3] 何涛. 高静压下静态电容变化对接收灵敏度影响分析[C]. 2017年西安-上海声学学会第五届声学学术交流会议论文集, 2017.
- [4] Krugger H H A, Berlincourt D. Effects of high stress on the piezoelectric properties of transducer materials[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1961, 33(10): 1339-1344.
- [5] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 2004: 81-83.
- [6] 中国石化集团上海工程有限公司. 承压容器[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 93-94.
- [7] 周心一, 黄建平, 谢可夫. 压电圆管换能器振动特性的薄壳理论分析[J]. 应用声学, 2003, 22(4): 11-15.  
Zhou Xinyi, Huang Jianping, Xie Kefu. Vibration characteristics of piezoelectric cylindrical shell transducers[J]. Applied Acoustics, 2003, 22(4): 11-15.
- [8] 路德明. 水声换能器原理[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 2001: 347-353.