ICS 47.020.70
CCS N92

团 体 标 准

T/CSNAME 254— 2026

深海声学释放器可靠性测试方法

Reliability test method for deep-sea acoustic release devices

2026-11-06 发布 2026-02-06 实施

中国造船工程学会 发 布

目　　次

前言 II
引言 ..... 错误!未定义书签。
1　范围 1
2　规范性引用文件 1
3　术语和定义 1
4　测试项目 2
5　换能器测试 2
5.1　灵敏度测试 2
5.2　导纳曲线测试 4
6　控制电路测试 5
6.1　温度变化测试 5
6.2　恒定湿热测试 6
6.3　低温贮存测试 6
6.4　高温贮存测试 6
6.5　值班功耗测试 6
7　电池组测试 7
7.1　低温小功率放电测试 7
7.2　低温大功率放电测试 8
7.3　室温放电测试 8
7.4　外部短路测试 8
8　舱体和释放机构测试 9
8.1　盐雾测试 9
8.2　舱体无损检测 9
9　水面甲板单元测试 10
9.1　软件功能测试 10
9.2　发射换能器声源级测试 11
10　释放器整机测试 11
10.1　水压测试 11
10.2　振动测试 12
10.3　冲击测试 13
10.4　声源级测试 14
10.5　拉力测试 15
10.6　水池测试 16

前　言

本文件按照GB/T 1.1 — 2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国造船工程学会船舶标准化委员会提出。

本文件由中国造船工程学会归口。

本文件起草单位：海南省深海技术创新中心、哈尔滨工程大学三亚南海创新发展基地、哈尔滨工程大学、海南海意科技有限公司、浙江大学。

本文件主要起草人：彭小佳、刘淞佐、顾永维、陈荟竹、张轩野、王延意、陈晨、郭文肖、刘太元、王兴远、欧翔晟、乔志文、孙清、沈斌坚、张东升、李鹏、李航、陈浩、彭林、甘凯龙、焦倩雯、赵刚、张晏。

深海声学释放器可靠性测试方法

1 范围

本文件规定了对深海声学释放器可靠性进行实验室测试的方法，具体包含换能器、控制电路、电池组、舱体和释放机构、水面甲板单元及释放器整机的可靠性测试方法。

本文件适用于作业水深1000 m及以上的声学释放器。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 5193—2020 钛及钛合金加工产品超声检验方法

GB/T 7965—2002 声学水声换能器测量

GB/T 32065.1—2015 海洋仪器环境试验方法 第1部分：总则

GB/T 32065.3—2015 海洋仪器环境试验方法 第3部分：低温贮存试验

GB/T 32065.5—2015 海洋仪器环境试验方法 第5部分：高温贮存试验

GB/T 32065.6—2015 海洋仪器环境试验方法 第6部分：恒定湿热试验

GB/T 32065.8—2020 海洋仪器环境试验方法 第8部分：温度变化试验

GB/T 32065.10—2020 海洋仪器环境试验方法 第10部分：盐雾试验

GB/T 32065.14—2019 海洋仪器环境试验方法 第14部分：振动试验

GB/T 32065.15—2019 海洋仪器环境试验方法 第15部分：水压试验

GB/T 36276—2023 电力储能用锂离子电池

NB/T 47013.2—2015 承压设备无损检测 第2部分：射线检测

JJF 1146—2006 消声水池声学特性校准规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

声学释放器 acoustic release devices

通过声学信号远程控制释放机构释放，能够实现对多种水下仪器释放回收的装备。

注：通常包含换能器、控制电路、电池组、释放机构、耐压筒体、水面甲板单元等部分。

3.2

换能器 transducer

能够实现电能和声能相互转换的器件。

注：按转换方式分为发射型(电-声转换)、接收型(声-电转换)、收发兼用型三种，声学释放器的换能器通常为收发兼用型。

3.3

水面甲板单元 surface deck unit

发送声学信号控制声学释放器执行唤醒、查询、释放等作业的器件。

注：通常包括一个控制箱和一个发射换能器。

3.4

扫频 frequency sweep

分别在试验样品X 轴、Y 轴、Z 轴的受力方向按规定的频率范围往复。

3.5

检测点 monitoring point

和固定点成刚性连接，位于固定装置、冲击碰撞台或试验样品上的测量数据的点。

3.6

速度变化量 change in velocity

施加规定的加速度所造成的速度突然变化的绝对值。

3.7

电池模块 battery module

由电池单体采用串联、并联或串并联连接方式，且只有一对正负极输出端子的电池组合体。

3.8

额定放电能量 rated discharge energy

在规定试验条件和试验方法下，初始化充电的电池以额定放电功率放电至放电终止电压时的放电能量。

4 测试项目

深海声学释放器应进行的测试项目见表 1。

表1 声学释放器测试项目

序号	测试部件	测试项目
1	换能器	灵敏度测试
2		导纳曲线测试
3	控制电路	温度变化测试
4		恒定湿热测试
5		低温贮存测试
6		高温贮存测试
7		低温小功率放电测试
8	电池组	低温大功率放电测试
9		室温放电测试
10		外部短路测试
11		盐雾测试
12	舱体和释放机构	舱体无损检测
13		软件功能测试
14	水面甲板单元	发射换能器声源级测试
15		水压测试
16	释放器整机	振动测试
17		冲击测试
18		整机声源级测试
19		拉力测试
20		水池测试
21		低温小功率放电测试

5 换能器测试

5.1 灵敏度测试

5.1.1 测试条件

测试条件要求如下：

a） 测试区域内需注意温度、静水压、电接地、频率、声负载等条件保持恒定。

b） 测量区域内应保持信噪比始终大于20 dB。

c） 其余测试环境要求参照GB/T 7965—2002中6.2的规定进行。

5.1.2 测试设备

测试设备及要求见表2，其余测试设备要求按照GB/T 7965—2002中6.3的规定进行。

表2　换能器灵敏度测试设备及要求

序号	测试设备	要求
1	消声水池	消声水池实际声场与理想的自由场间的偏离不超过±1.0 dB。
2	试验功率源	可由通用信号源与功率放大器组合搭建，亦可采用专用发射机。功率源的工作频率范围应完全覆盖受试换能器的额定工作频段，输出信号形式满足换能器试验工况要求。
3	滤波放大器	综合带宽和频率选择性应使通过系统的总谐波信号幅值至少低于基波信号40 dB；进行脉冲信号测量时，系统带宽不应小于脉冲宽度倒数的2 倍。滤波放大器系统增益的最大允许误差不应大于±0.2 dB。
4	标准水听器	标准水听器的工作频率范围、自由场电压灵敏度及动态范围应满足受试换能器全工况试验需求，试验全过程中水听器需处于线性响应工作区间。标准水听器自由场电压灵敏度的扩展测量不确定度不应大于0.7 dB（k=2）
5	电压测量系统	输入阻抗为1 MΩ以上

5.1.3　测试前准备

测试前应进行以下准备工作：

a）　将三个换能器（发射换能器、待测换能器、标准水听器及其电缆的下水部分）表面进行清洗并在换能器的工作面上涂上浸润剂，以保证换能器放入水中后表面不产生气泡并与水介质间有良好的声耦合。

b）　将三个换能器浸入水池中放到所需测量的深度，浸泡 30 min 以上，使换能器表面得到充分浸润，使其与周围的水介质温度和静压力达到平衡，不应附有气泡，保证测量的稳定性。

c）　检验三个换能器的水平和垂直指向性图，以便选定校准方向。对于指向性水听器，应选其声轴方向作为它的校准方向。

d）　将发射换能器、标准水听器放入平面波自由场恰当的位置上，并固定好。按图 1 所示实施线路图连接好仪器。换能器的声轴在水平方向上，并且水声发射换能器和接收的标准水听器或待测换能器应处于同一深度上。

e）　按照 GB/T 32065.1—2015 中 6.1 的规定进行试验样品安装，发射换能器的安装支架应避免振动、声反射和散射等的影响，旋转时，换能器不抖动。

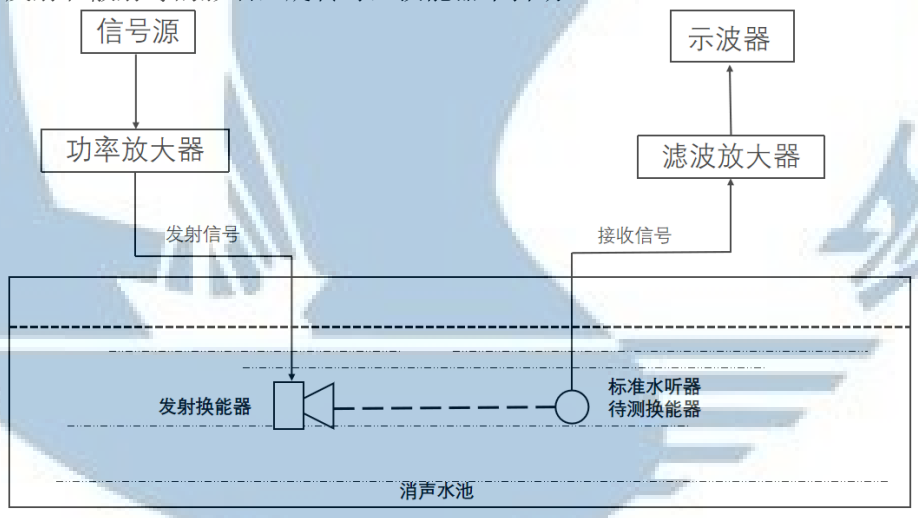


图1　换能器灵敏度测试仪器框图

5.1.4　测试步骤

测试具体步骤如下：

a）　接通电源，预热5　min。

b）　设置信号源输出电压为0.5　V，功放放大20　dB，测放放大20 dB～40 dB。

c） 分别调整信号源和滤波器频率值并保持二者一致，然后在各频率点上测量标准水听器的开路电压U_{OC}，并满足以下要求：

1） 测量频率点由用户指定，数量不少于 3 个；

2） 测量换能器的开路输出电压时必须要求所用仪表的输入阻抗比换能器的输出阻抗大 200 倍以上。

3） 换能器开路电压的测量是在换能器电缆的末端测得；

4） 如换能器所带电缆超过 20 m，则应考虑电缆的分布阻抗引起的输出电压的损失。

5） 在测量时，标准水听器必须放置在发射换能器声场的远场区，以获得近似的平面波声场，其间距需大于声远场最小距离的 5 倍。

d） 用待测换能器替换水中的标准水听器，再重复一遍步骤c)，测出其开路输出电压U_X，然后根据公式（1）求出待测换能器在各频率点上的灵敏度值，记录所有测量数据。

$$M_x = 20\,lg\frac{U_x}{U_{oc}} + M_0 \quad \cdots\cdots (1)$$

式中：

M_x——待测换能器自由场灵敏度级，单位为分贝（dB），基准值1 V/μPa；

U_x——待测换能器的开路输出电压，单位为伏特（V）；

U_{OC}——标准水听器的开路输出电压，单位为伏特（V）；

M_0——标准水听器自由场灵敏度级，单位为分贝（dB），基准值1V/μPa。

e） 将测试设备拆除，结束测试。

5.2 导纳曲线测试

5.2.1 测试条件

测试条件要求如下：

a） 标准大气压，环境温度稳定。

b） 测试环境无强电磁干扰、无振动冲击。

c） 其余测试条件要求参照GB/T 7965—2002中13.1的规定进行。

5.2.2 测试设备

测试设备及要求见表3。

表3 导纳曲线测试设备及要求

序号	测试设备	要求
1	深海超高压测试系统	最大工作压力不小于换能器设计压力，可实现压力加载、保压、泄压控制，压力试验系统波动度、压力表量程和准确度等级、试验介质温度满足GB/T 32065.15—2019中4.2要求。校准证书在有效期内。
2	精密阻抗分析仪	频率应覆盖测试频段范围，阻抗测量准确度满足被测换能器导纳参数测试需求，具备数据存储、曲线截屏输出功能。校准证书在有效期内。
3	压力罐内部工装框架	应能固定换能器试样，保证试样受压均匀，避免试验过程移位

5.2.3 测试前准备

测试前应进行如下准备工作：

a） 对待测耐压换能器进行外观目视检查，记录样品外观状态，确认换能器外壳、水密接插件无机械损伤。

b） 按照 5.1.3.1 要求对三个换能器进行测试准备工作。

c） 通过水密接插件将换能器与精密阻抗分析仪临时连接，常压下初步测试导纳，确认换能器电气通路正常，无开路、短路故障。

d） 将换能器可靠安装至压力罐内专用工装支架，按图 2 要求正确连接水密接插件，线缆引出压力罐，确认接插件锁紧到位，满足高压密封要求。压力罐水密线缆外部接口连接至精密阻抗分析仪，内部接口连接至待测换能器，确认接线无松动。

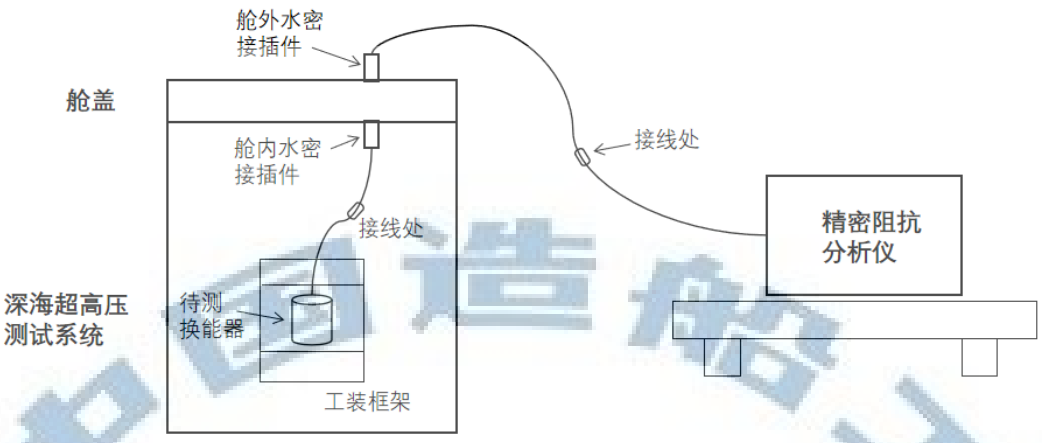


图2　导纳测试仪器框图

5.2.4　测试步骤

测试过程中换能器全过程保持通电状态，通过水密接插件引出电气接口用于导纳曲线测试，测试频段范围根据换能器设计频段范围确定（建议值为6 kHz～18 kHz），分别在常压静置、设计压力值保压阶段和卸压静置三个阶段采集电导G、电纳B并输出导纳曲线。

测试具体步骤如下：

a)　常压工况导纳测试：

1)　压力罐内处于常压状态，保持试样通电，静置完成 60 min 常压静置阶段。

2)　启动阻抗分析仪，在被测频段范围内扫描，记录各频点电导 G、电纳 B 原始数据，保存导纳-频率曲线截图，完成打压前常压状态测试。

b)　保压阶段导纳测试：

1)　启动超高压测试系统，以不超过 2 MPa/min 速率升压至设计压力值，进入 120 min 保压阶段，监控压力变送器读数，保证压力波动控制在±1.0 MPa 以内。

2)　保压时间至少达到 60 min 后，保持压力稳定，换能器维持通电，启动阻抗分析仪，完成测试频段范围的导纳扫描，记录电导、电纳数据表，保存曲线截图。

c)　卸压后常压工况导纳测试：

1)　超高压测试系统以不超过 20 MPa/min 速率将压力由设计压力值降至常压，压力罐泄压完成，打开缸体，试样仍保持通电状态。

2)　阻抗分析仪再次执行测试频段范围的导纳扫描，记录卸压后常压下电导、电纳数据，保存导纳曲线截图。

d)　试验结束后，断电，拆除水密接插件，取出换能器试样，目视检查换能器外观，观察是否存在形变、开裂、破损，记录外观检查结果。

6　控制电路测试

6.1　温度变化测试

6.1.1　测试条件

标准大气条件、试验温度稳定等应分别按照GB/T 32065.1—2015中4.2和6.2的规定进行。

6.1.2　测试设备

测试时需准备直流稳压电源（或电池组）、换能器、指示灯、电线、声学释放器水面甲板单元。测试设备要求按照GB/T 32065.8—2020中3.2的规定执行。

6.1.3　测试步骤

测试样品安装按照GB/T 32065.1—2015中6.1的规定进行。
测试步骤按GB/T 32065.8—2020中第5章执行。
测试中断处理按照GB/T 32065.1—2015中第7章的规定进行。

6.2 恒定湿热测试

6.2.1 测试条件

标准大气条件、试验温度稳定等应分别按照GB/T 32065.1—2015中4.2和6.2的规定进行。

6.2.2 测试设备

测试需准备直流稳压电源（或电池组）、换能器、指示灯、电线、声学释放器水面甲板单元。
通常在恒温恒湿试验箱中进行此项试验。
测试设备要求按照GB/T 32065.6—2015中3.2的规定进行。

6.2.3 测试步骤

测试样品安装按照GB/T 32065.1—2015中6.1的规定进行。
测试具体步骤按照GB/T 32065.6—2015中第4章的规定执行。
测试温度、湿度、试验持续时间按照GB/T 32065.6—2015中3.3章和3.4章的规定执行。

6.3 低温贮存测试

6.3.1 测试条件

试验的标准大气条件按照GB/T 32065.1—2015中4.2进行。

6.3.2 测试设备

控制电路单独测试需准备直流稳压电源（或电池组）、换能器、指示灯、电线、声学释放器水面甲板单元。测试设备要求按照GB/T 32065.3—2015中3.2的规定执行。

6.3.3 测试步骤

测试具体步骤按照GB/T 32065.3—2015中第4章的规定执行。
试验温度应根据用户实际需求从下列数值中选取：(0±3) ℃；(-20±3) ℃；(-40±3) ℃；(-55±3) ℃；(-65±3) ℃，测试温度稳定应按照GB/T 32065.1—2015中6.2的规定进行。
试验持续时间应根据用户实际需求从下列数值中选取：8 h；24 h。

6.4 高温贮存测试

6.4.1 测试条件

试验的标准大气条件按照 GB/T 32065.1—2015 中 4.2 进行。

6.4.2 测试设备

控制电路单独测试需准备直流稳压电源（或电池组）、换能器、指示灯、电线、声学释放器水面甲板单元，用于检测控制电路是否功能正常。测试设备应符合GB/T 32065.5—2015中3.2的规定。

6.4.3 测试步骤

测试具体步骤按照GB/T 32065.5—2015中第4章的规定进行。
测试温度应根据用户需求从下列数值中选取：(40±2) ℃；(55±2) ℃；(70±2) ℃，测试温度稳定应按照GB/T 32065.1—2015中6.2的规定进行。
试验持续时间为8 h。

6.5 值班功耗测试

6.5.1 测试条件

试验的标准大气条件按照GB/T 32065.1—2015中4.2进行。测试环境温度稳定，无强电磁干扰、无振动冲击。

6.5.2 测试设备

测试设备及要求见表4。

表4 值班功耗测试设备及要求

序号	测试设备	要求
1	直流稳压电源	量程满足值班功耗（通常值班功耗值≤10 mW，对应工作电流≤0.5 mA）测量要求，可稳定输出设备额定工作电压，供电精度满足测试要求。
2	电流测试模块设备	量程满足值班功耗（通常值班功耗值≤10 mW，对应工作电流≤0.5 mA）测量要求，具备μA级微小电流测试能力，测试精度不低于1 μA。
3	测试线缆及转接工装	连接可靠，无额外接触电阻

6.5.3 测试步骤

值班功耗测试测试过程无唤醒信号及外部指令输入，控制电路持续处于休眠值班状态。具体步骤如下：

a） 回路搭建。将电流测试模块串联于直流稳压电源与声学释放器供电回路，检查线路连接正确、无短路虚接。

b） 设备上电。通过直流稳压电源按释放器工作电压（工作电压范围根据产品手册确定）为控制电路供电，待控制电路完成初始化自检。

c） 稳态待机。控制电路初始化完成后，无任何外部信号激励，自动进入低功耗休眠值班状态，处理电路、功放电路断电，仅值班电路待机工作。

d） 数据采集。控制电路休眠状态稳定10 min后，开始读取并记录回路静态工作电流值，根据用户需求确定读取时长和读取间隔时间，并计算获得值班电流平均值，建议读取时间1 min，读取间隔时间为每1 s读取1次。

e） 功耗计算。根据电压和电流计算控制电路值班功耗。

f） 调整工作电压值。重新进行数据采集和功耗计算，直至完成工作电压范围内各指定测试电压值下的功耗测试，测试工作电压值根据用户需求确定，建议按间隔1 V选取。

g） 功能核验。测试完成后输入唤醒信号，控制电路应可正常唤醒、解调指令、发射应答信号；指令异常或应答完成后，试样可自动断电恢复休眠值班状态。

7 电池组测试

7.1 低温小功率放电测试

7.1.1 测试条件

测试条件按照GB/T 36276—2023中6.1.1的规定进行。

7.1.2 测试设备

测试设备要求如下：

a） 测试需要低温试验箱或恒温恒湿试验箱、充放电柜；

b） 试验场地应具备完善的消防和应急措施，试验人员应配备个人防护用具；

c） 其余试验装置按照GB/T 36276—2023中6.1.2的规定进行。

7.1.3 测试步骤

测试具体步骤如下：

a） 测试前，将电池组在室温(25±2) ℃下搁置 5 h。

b） 对电池组进行外观检查，确认无鼓包、漏液等不正常情况。

c） 电池组样品应在不通电状态，放入已稳定至(4±2) ℃的低温试验箱（室）内。
d） 电池模块在(4±2) ℃下搁置 20 h。
e） 在(4±2) ℃下，电池模块以释放器产品的值班电路功率（根据产品技术规格书确定）恒功率放电至电池模块的放电终止电压，静置 30 min；因低功耗下放电时间较长，测试方可根据用户需求指定放电时间进行测试，测试时间可选择 3 d、7 d、15 d、30 d、45 d、60 d。
f） 对电池模块进行外观检查，记录放电能量、放电时间、放电容量。放电能量不小于额定放电能量，且放电过程未出现着火、爆炸、鼓包、泄漏等异常情况。

7.2 低温大功率放电测试

7.2.1 测试条件

测试条件按照 GB/T 36276—2023 中 6.1.1 的规定进行。

7.2.2 测试设备

测试需要低温试验箱或恒温恒湿试验箱、充放电柜，其余试验装置按照GB/T 36276—2023中6.1.2的规定进行。

7.2.3 测试步骤

测试具体步骤如下：
a） 测试前，电池模块需在室温(25±2) ℃下搁置5 h。
b） 对电池模块进行外观检查，确认无鼓包、漏液等不正常情况。
c） 电池模块样品应在不通电状态，放入已稳定至(4±2) ℃的低温试验箱（室）内。
d） 电池模块在(4±2) ℃下搁置20 h。
e） 在(4±2) ℃下，电池模块以释放器产品的通信状态功率（根据产品技术规格书确定）恒功率放电至电池模块的放电终止电压，静置30 min。
f） 对电池模块进行外观检查，记录放电能量、放电时间、放电容量。放电能量不小于额定放电能量，且放电过程未出现着火、爆炸、鼓包、泄漏等异常情况。

7.3 室温放电测试

7.3.1 测试条件

测试条件按照GB/T 36276—2023中6.1.1的规定进行。

7.3.2 测试设备

测试需要高温试验箱或恒温恒湿试验箱、充放电柜，其余试验装置按照GB/T 36276—2023中6.1.2的规定进行。

7.3.3 测试步骤

电池模块室温放电测试具体步骤如下：
a） 测试前，电池模块需在室温(25±2) ℃下搁置 5 h，确认无异常后再开始放电测试。
b） 对电池模块进行外观检查，确认无鼓包、漏液等不正常情况。
c） 电池模块样品应在不通电状态，放入已稳定至(25±2) ℃的恒温恒湿或高温试验箱内。
d） 电池模块在(25±2) ℃下搁置 5 h。
e） 在(25±2) ℃下，电池模块以释放器产品的通信状态功率（根据产品技术规格书确定）恒功率放电至电池模块的放电终止电压，静置 30 min。
f） 对电池模块进行外观检查，记录放电能量、放电时间、放电容量。放电能量不小于额定放电能量，且放电过程未出现着火、爆炸、鼓包、泄漏等异常情况。

7.4 外部短路测试

7.4.1 测试环境

测试环境按照GB/T 36276—2023中6.1.1的规定进行。

7.4.2 测试设备

测试需要高温试验箱或恒温恒湿试验箱、短路测试柜，其余试验装置按照GB/T 36276—2023中6.1.2的规定进行。

7.4.3 测试步骤

电池模块外部短路测试具体步骤如下：

a） 测试前，电池模块需在室温(25±2) ℃下搁置 5 h 以上，确认无异常后再放入已稳定至(55±2) ℃的高温试验箱（室）内；
b） 对电池模块进行外观检查，确认无鼓包、漏液等不正常情况；
c） 电池模块样品应在不通电状态，放入已稳定至(55±2) ℃的高温试验箱（室）内；
d） 电池模块在(55±2) ℃下搁置 5 h，通过热电偶测量电池模块外壳温度稳定到 55 ℃；
e） 在(55±2) ℃下，对电池进行外部短路，外电路的总阻值应小于 0.1 Ω，持续短路至电池外壳温度回落到 55 ℃后至少再继续短路 1 h；
f） 继续观察被检样品 6 h，电池模块在检验之中以及在 6 h 的观察期内应不过热（不超过 170 ℃）、不爆炸、不着火。

8 舱体和释放机构测试

8.1 盐雾测试

8.1.1 测试条件

测试条件如下：

a） 标准大气压条件按照GB/T 32065.1—2015中4.2的规定进行。
b） 盐溶液配置按照GB/T 32065.10—2020中3.3.1的规定进行。
c） 试验温度和湿度按照GB/T 32065.10—2020中3.3.2的规定进行。
d） 盐雾的沉降率按照GB/T 32065.10—2020中3.3.3的规定进行。

8.1.2 测试设备

复合盐雾试验箱喷雾阶段的温度、沉降率等试验参数应满足试验要求并能保持至少24 h。
其余试验设备要求按照GB/T 32065.10—2020中3.2的规定进行。

8.1.3 测试前准备

测试前检查湿度传感器上的纱布湿度满足设备使用要求，若上一次试验温度超过85℃则本次试验必须更换湿球纱布。测试前需清除箱体内部杂质。
测试前应检查水箱液量，将纯水箱、盐水箱、试验箱、饱和空气桶内加满水。
测试前应将试验箱盖边缘添加少量水，将泄水阀塞紧，确保箱盖运行过程中气密性达到要求。

8.1.4 测试步骤

按照GB/T 32065.10—2020中第4章的规定进行。试验周期按照GB/T 32065.10—2020中3.3.4要求执行。如无特殊要求，释放器测试循环次数建议为10次。
测试时每8 h观察并记录水位，当水位低于2/3时及时补满。每24 h暂停试验并于5 min内补满饱和空气桶内用水，防止“饱和空气桶缺水”报警影响试验过程，暂停期间严禁打开试验箱门，暂停时间严禁超过5 min，避免对试验过程造成影响。

8.2 舱体无损检测

声学释放器舱体结构的无损检测需采用超声检测（UT）和X射线检测（RT）联合探伤的方法。超声检测（UT）按照GB/T 5193—2020中的规定进行。X射线检测（RT）按照NB/T 47013.2—2015中的规定进行。

9 水面甲板单元测试

9.1 软件功能测试

9.1.1 测试条件

软件可选择不同档位声源级：低声源级发射、中低声源级发射、中高声源级发射、高声源级发射。

9.1.2 测试设备

测试设备及要求见表5。

表5 水面甲板单元测试设备及要求

序号	测试设备	要求
1	消声水池	消声水池实际声场与理想的自由场间的偏离不超过±1.0 dB。
2	万用表	电压测量准确度等级不低于0.5级。

9.1.3 测试前准备

测试前进行以下准备工作：

a） 检查甲板单元、外壳、各接口无破损；
b） 检查锂电池电量，电量不小于 30%，电量不足时使用原配充电器充电；
c） 需要时接入 GPS 天线；
d） 确认 USB 接口、串口、调试接口无异物堵塞；
e） 水声通信试验前将换能器接头插入甲板单元“换能器”接口并锁紧；
f） 将声学释放器吊放至水下，换能器完全浸入水中 30 min 以上；
g） 记录释放器 ID，后续在甲板单元软件输入相同 ID；
h） 打开水面甲板单元电源开关，控制箱自动上电，确认软件主界面正常自动加载，无黑屏、无死机。

9.1.4 测试步骤

9.1.4.1 控制箱配套显示功能验证

观察硬件电量显示屏，确认电池百分比正常显示。

观察触摸屏主界面完整加载，确认界面包含：释放器ID选择区、功能选择下拉菜单、声源级档位选择、[发送]按钮、[关机]按钮等。

触摸各个屏幕区域，状态查询、释放、单次通信、数据传输功能菜单可正常选中，指令可以触发发送；发送指令后有日志时间戳、声源级档位、收发数据反馈显示。

确认触摸响应灵敏，无响应、卡顿、闪退现象。

9.1.4.2 声学释放器 ID 选择功能验证

在软件主界面，上下滑动ID选择条目。

输入/选择本次被测对应的释放器ID；确认界面可正常完成ID编辑、选择，选中ID可稳定留存。

9.1.4.3 声源级档位选择功能验证

在声源级选择下拉菜单，依次切换各个档位。每切换一档，确认界面正确显示当前选中声源级档位。下发指令后，在右侧日志反馈区确认记录对应的声源级档位信息。

9.1.4.4 状态查询功能验证

ID设置为水下实际释放器编号；功能选择下拉菜单选中[状态查询]。

确认子菜单包含状态查询等。

选择[状态查询]操作：先滑动再长按[发送]按钮，触发指令水声发送。

观察右侧反馈日志。情况1：通信正常：日志记录发送时间、释放器编号、声源级；接收返回数据，显示释放器状态、姿态、电量、距离。情况2：超时：日志提示接收数据超时，可再次点击发送重试。

记录测试现象，核对返回字段与产品手册定义字段是否一致。

9.1.4.5 释放指令功能验证

功能选择下拉菜单选中[释放]。

点击[发送]按钮；验证是否弹出确认弹窗，并提供[是][否]选项。

点击[否]：验证弹窗是否关闭，不发送释放指令；再次点击发送，弹窗出现，点击[是]，验证释放水声指令是否正常向外发送。

查看释放器状态是否显示：已释放/未释放。

9.1.4.6 关机功能验证

在主界面点击红色[关机]按钮，验证软件是否执行关机流程。软件退出，控制箱关机，验证电源开关可切断整机供电。

9.1.4.7 辅助接口菜单逻辑验证（USB、串口、调试接口）

USB接口用于程序更新，串口用于配件扩展，调试接口用于设备调试。确认软件菜单中对应接口相关功能可正常接入。

9.1.4.8 测试结束

关闭甲板单元电源；拆除换能器接头。

整理全部测试数据、软件界面截图、日志记录。

逐项对照合格判定要求，给出软件功能验证结论。

9.2 发射换能器声源级测试

发射换能器声源级测试与释放器整机的声源级测试方法相同，详见 10.4 相关要求。

10 释放器整机测试

10.1 水压测试

10.1.1 测试条件

测试条件要求如下：

a） 试验压力为试验样品实际工作压力的1.25倍（11000米级试验样品可按1.15倍考虑）。

b） 升压速率和降压速率按照GB/T 32065.15—2019中4.3.2的规定进行。

c） 释放器水压试验的标准大气压条件按照 GB/T 32065.1—2015中4.2的规定进行。

10.1.2 测试设备

测试设备要求如下：

a） 释放器水压测试需在深海超高压测试系统中进行；

b） 试验设备要求按照 GB/T 32065.15—2019 中 4.2 的规定进行。

10.1.3 测试前准备

测试前进行如下准备工作：

a） 将释放器样机放置在深海超高压测试系统实验室，使其达到室温稳定。

b） 对释放器进行外观检查、外形尺寸及重量测量、整机功能检测，并记录检测数据。

c） 将释放器连接至压力罐工装框架中，释放器上端连接在框架结构上。

d) 发射换能器与水面甲板单元通过水密连接器和压力罐舱盖的水密接头上下端分别进行电气连接，通过水面甲板单元确认电气连接的状态，确保状态良好。
e) 试验样品安装按照 GB/T 32065.1—2015 中 6.1 的规定进行。

10.1.4 测试步骤

具体测试步骤如下：
a) 配重。在释放器下端悬挂配重块，配重块单独与框架进行连接防止释放后坠落至压力罐底，同时可在压力罐工装框架上安装视频监控系统并固定，确保视频监控系统不会松动。
b) 放入压力罐。用门吊将释放器及框架放入深海低温超高压测试系统的压力罐内，固定好设备。
c) 加压前测试。根据加压前排查表进行测试，包括状态信息反馈、绝缘状态、漏水状态、视频成像等，如需实现压力罐内释放，则需在常压下先测试声学释放器在压力罐内能否实现释放功能；
d) 升压。以不超过 2 MPa/min 的速率将压力罐内压力升至测试压力，最大压力阶段保压不低于 120 min，升压过程可分阶段进行，每个压力值保压 5 min。
e) 保压。在试验压力下保压，持续时间应从下列数值中选取：1 h、2 h、4 h、8 h，通常单次水下作业时间在 2 年以内选取 1 h 或 2 h，单次水下作业时间在 2 年以上根据情况选取 2 h、4 h 或 8 h。
f) 试验过程中，深海低温超高压测试系统的压力表显示值应无异常波动，舱体应无进水、漏电、变形、爆炸等安全事故。考虑释放器实际布放回收频率，推荐设置水压试验循环次数为 2 次，可根据实际使用需求调整设置循环次数。
g) 此阶段可选择进行唤醒功能测试。操控水面甲板单元上发射唤醒信号，每发射一个信号记录完成保存好后切换发射信号，继续记录保存，记录水下释放单元的回应信号并保存，测试次数不低于 10 次。
h) 此阶段可选择进行释放功能测试，操控水面甲板单元上发射释放信号，释放器收到水面甲板单元发送的“释放”命令后，测试是否可正常完成释放动作。
i) 降压。以不超过 20 MPa/min 的速率将压力罐内压力降至 0 MPa。
j) 释放器取出。用门吊将释放器及框架从压力罐内吊出，并取下释放器。
k) 测试结束。对释放器舱体密封部位及关键结构进行外观检查、外形尺寸及重量测量、整机功能进行检测并记录，检测结果与初始数据对比应无差异。

10.2 振动测试

10.2.1 测试条件

试验的标准大气压条件按照GB/T 32065.1—2015中4.2的规定进行。

10.2.2 测试设备

测试设备要求如下：
a） 振动测试需振动试验系统、释放器夹具；
b） 试验设备要求按照GB/T 32065.14—2019中4.2的规定进行。

10.2.3 测试前准备

测试具体步骤如下：
a） 将声学释放器放置在标准大气条件下，使之达到温度稳定。
b） 对声学释放器进行外观检查以及功能检测，并记录检测数据。
c） 声学释放器放置于振动夹具上并系紧，振动夹具刚性固定在振动系统上；在三个互相垂直的轴线上依次振动；轴线的选择应使故障最容易被暴露；采用单点控制模式。
d） 试验样品安装按照GB/T 32065.1—2015中6.1的规定进行。

10.2.4 测试步骤

a) 按试验双方的约定选择频率范围、幅值和持续时间进行扫频，若需要，可将频率范围分成几段分别进行，但不能因此减少样品所受的应力，可根据表 6 推荐值选取：
b) 扫频振动的循环次数可选择 2、10 或 20。扫频频率应为连续变化，并且其频率随时间按指数规律变化。对数扫频的速率应不大于每分钟 1 个倍频程，容差为±10%。
c) 完成扫频耐久测试后，在最高频率点进行定频耐久测试，测试时施加的频率始终保持在相同频率上，定频持续时长可在 30 min、60 min、90 min 内选择。
d) 声学释放器在振动测试后需恢复 10 min 以上，使声学释放器处于与初始检测时相同的条件。
e) 对声学释放器进行外观检查，观察是否存在零件松动或脱落情况，对释放器进行功能检测并记录，与初始检测数据进行比较，功能异常时需取出释放器舱体内零部件进行逐项检查并记录。

表6 振动测试参数推荐值

参数类别	可选取值	推荐值
振动频率 Hz	下限：1 /2 /10 /16 /25/35 上限：10/16/35/50 /55 /60/80 /100/160	1）小型水面船舶：1～16； 2）小型高速船舶：10～35； 3）大型船舶：10～55； 4)一般地面车辆：10～150； 5)无特殊要求的声学释放器：10～55。
位移幅值 mm	0.35 /0.50 /0.75 /1.0 /1.6 /2.5	1）小型水面船舶：1.0； 2）小型高速船舶：0.5； 3）大型船舶：0.35～0.75； 4）一般地面车辆：0.035～1； 5）无特殊要求的声学释放器：0.5。
加速度幅值 m/s^2	5 /10/25 /40 /50 /100	1）小型水面船舶：10； 2）小型高速船舶：25； 3）大型船值：50～100； 4）一般地面车辆：5～50； 5）无特殊要求的声学释放器：10。

10.3 冲击测试

10.3.1 测试条件

试验的标准大气压条件按照GB/T 32065.1—2015中4.2的规定进行；

10.3.2 测试设备

测试设备要求如下：
a） 冲击测试需冲击测试系统或振动试验系统、释放器夹具。
b） 试验设备要求按照GB/T 32065.1—2015第5章的规定进行。

10.3.3 测试前准备

测试前进行如下准备：
a） 将声学释放器放置在标准大气条件下，使之达到温度稳定。
b） 对声学释放器进行外观检查、功能检测，并将检测数据记录。
c） 声学释放器应以不包装、不通电的状态刚性固定在冲击系统上。
d） 试验样品安装按照GB/T 32065.1—2015中6.1的规定进行。

10.3.4 测试步骤

具体测试步骤如下：
a) 声学释放器应在三个互相垂直的轴线上依次沿正反方向各实施 3 次冲击，共计 18 次，其余附属设施或线缆不得妨碍试验中的弹跳冲击现象。试验期间，声学释放器应处于工作状态。
b) 声学释放器冲击试验的冲击脉冲波形选择半正弦波，按照 GB/T 32065.14—2019 中 4.3 的规定进行。

c） 声学释放器冲击试验的峰值加速度、脉冲持续时间、试验波形和速度变化量按照 GB/T 32065.14—2019 中 4.4.1 的规定进行选取。
d） 声学释放器试验后需恢复 10 min 以上，以使其处于与初始检测时相同的条件。
e） 对声学释放器进行外观检查、功能检测，并与初始检测数据进行比较，记录数据。

10.4 声源级测试

10.4.1 测试条件

测试条件要求如下：
a） 测试区域内需注意温度、静水压、电接地、频率、声负载等条件保持恒定。
b） 测量区域内应保持信噪比始终大于20 dB。
c） 其余测试条件要求参照GB/T 7965—2002中6.2的规定进行。

10.4.2 测试设备

测试设备要求如下：
a） 测试设备需要功率源（或用信号源+功率放大器替代）、滤波放大器（或用滤波器+放大器替代）、示波器、标准水听器等。
b） 为提高测试精度，建议在消声水池中进行此试验。
c） 标准水听器可接收所需频率的声波，且有足够的灵敏度，在每个频率点上发射信号是稳定的，且不失真。
d） 待测换能器安装按照GB/T 32065.1—2015中6.1的规定进行。
e） 其余试验设备要求按照GB/T 32065.1—2015中第5章的规定进行。

10.4.3 测试前准备

测试前应进行如下准备工作：
a） 在实施测量前应对所用的两个换能器（待测换能器、标准水听器的表面（包括其电缆的下水部分））进行清洗并在换能器的工作面上涂上浸润剂，以保证换能器放入水中后表面不产生气泡并与水介质间有良好的声耦合；
b） 测量前应将两个换能器浸入水池中放到所需测量的深度，浸泡 30 min 以上，使换能器表面得到充分浸润，使其与周围的水介质温度和静压力达到平衡，不应附有气泡，保证测量稳定性；
c） 待测换能器的安装支架应避免振动、声反射和散射等的影响，旋转时，待测换能器不抖动。待测换能器的声轴在水平方向上，并且和标准水听器应处于同一深度上。
d） 测量应处于远场区，远场距离根据和以下要求确定：
1） 远场距离根据公式（2）确认；

$$\gamma_{远场}=\frac{D^2}{2\lambda} \quad (2)$$

式中：
$\gamma_{远场}$——远场起始距离，单位为米（m）；
D——换能器有效孔径，单位为米（m）；
λ——声波波长，单位为米（m）；
1） 若需测量 1 m 处的声源级（SL），且满足远场的最小距离 γmin 的 5 倍不大于 1 m，直接采用 1 m；
2） 若 5 倍 γmin 大于 1 m，需通过实测 γmin 处声压级换算至 1 m 处。
e） 确保选定距离处信噪比始终大于 20 dB，且消声水池边界反射干扰可忽略。
f） 检验两个换能器的水平和垂直指向性图，以便选定校准方向。对于指向性水听器，应选其声轴方向作为它的校准方向。

10.4.4 测试步骤

测试具体步骤如下：
a） 将待测换能器、标准水听器放入平面波自由场恰当的位置上，并固定好。

b） 按图 3 所示实施线路图连接好仪器，并将标准水听器与待测换能器固定在 1 m 的距离，接通电源，预热 5 min。

c） 调整待测换能器的发送电压的有效值 U 与发射频率，功放放大 20 dB，测放放大 20 dB～40 dB，滤波器为 1/3 倍频程档。

d） 调整滤波器频率值与待测换能器一致，然后在各频率点上测量标准水听器的开路电压。测量标准水听器的开路输出电压时必须要求所用仪表的输入阻抗比水听器的输出阻抗大 200 倍以上。通常选用的电压测量系统的输入阻抗为 1 MΩ 以上。另外标准水听器开路电压的测量是在水听器电缆的末端测得的。如果标准水听器所带电缆很长（20 m 以上）则还应考虑电缆的分布阻抗引起的输出电压的损失。

e） 根据所测数据和发送电压响应级的比较法求出待测换能器在各频率点上的声源级数据，记录所有数据。

f） 将测试设备拆除，结束测试。

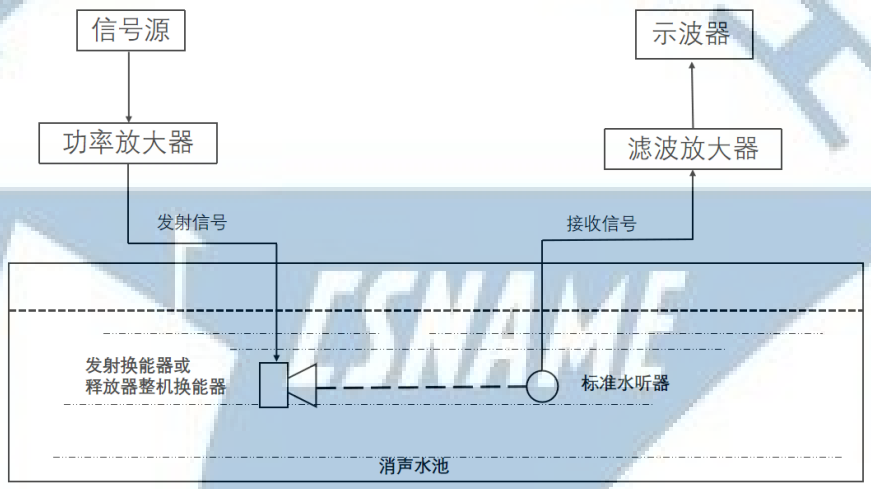


图3 声源级测试仪器框图

10.5 拉力测试

10.5.1 测试条件

测试条件要求如下：

a） 标准大气压条件按照GB/T 32065.1—2015中4.2的规定进行。

b） 测试开始前，需在测试人员与测试装备之间设置安全防护挡板防止试件断裂飞溅，并设定安全观测距离、设置明显的安全警示标志，保证测试人员安全。

10.5.2 测试设备

测试设备要求如下：

a） 拉力试验机，满足测试拉力要求；

b） 连接工装。需根据声学释放器的结构尺寸和设计拉力载荷以及拉力试验机夹头尺寸选用合适的连接工装，声学释放器换能器端通常以插销型式与拉力机顶端进行连接，声学释放器的释放机构端通常使用套环等工装连接释放器。

10.5.3 测试前准备

测试前应进行如下准备：

a） 初始检查。对声学释放器进行外观、缺陷等内容的检查以及试样尺寸的测量，并拍照记录试样初始状态，测试声学释放器是否能正常释放并记录。

b） 安装连接工装。释放器上端和下端释放机构与设备相连，通过绳索固定释放器，确保试件在试验框架中不会晃动。

c） 设定试验力零点。在试验加载链装配完成后，释放器两端被夹持之前，应设定力测量系统的零点。一旦设定了力值零点，在试验期间力值测量系统不应再发生变化。
d） 水面甲板单元的发射换能器提前固定在拉力试验机顶端合适位置，水面甲板单元的控制箱提前放置在安全观测距离之外的合适位置，方便人员操作并能保证测试人员安全。

10.5.4 测试步骤

测试具体步骤如下：
a） 向声学释放器施加不超过规定强度或预期屈服强度的5%相应的预拉力，确保声学释放器与拉力试验机夹头对中；
b） 逐步加载拉力至设计测试拉力，保持载荷2 min。在载荷施加和维持过程中，释放机构不出现变形、断裂、破损或提前释放等异常状况，释放舱体不出现变形、断裂、破损等异常状况。
c） 在拉力达到测试拉力的50%之前，可以采用任意试验速率。超过50%之后的试验速率应不超过10 kN/min或10 mm/min。
d） 到达2 min后，发送释放信号，释放机构能正常释放。
e） 根据用户实际需求可选择在拉力测试后对声学释放器舱体结构进行无损检测，检测方法参考8.2。

10.6 水池测试

10.6.1 测试条件

试验的标准大气压条件按照GB/T 32065.1—2015中4.2的规定进行。

10.6.2 测试设备

测试设备要求如下：
a） 水深至少 4 m 以上，应至少保证测试时释放器顶部在水面以下 1 m。试验水深建议从选择以下数值：2 m、4 m、6 m、10 m、15 m。根据水池情况选择合适深度，避免水面或水池墙壁声波反射影响。水池需配备水面甲板单元及摄像机，水面甲板单元的发射换能器在使用时应整体没入水面以下。
b） 吊机、耐压水下摄像机、耐压水下灯具、水面甲板单元、电压表等设备按照 GB/T 32065.1—2015 第 5 章的规定进行。
c） 设备安装按照 GB/T 32065.1—2015 中 6.1 的规定进行。

10.6.3 测试前准备

测试前进行如下准备：
a） 预处理。将试验样品放置在标准大气条件下，使之达到温度稳定。
b） 初始检测。对试验样品进行外观检查、初始功能检测，并记录。
c） 浸渍试验（可选项）。根据用户需求，在水池测试前将声学释放器浸入水池水面下1 m以下，浸渍时间可选择：1 d，2 d，7 d，浸渍后观察声学释放器是否存在进水或误触发情况。
d） 测试电池组电压，声学释放器高电压在高工作电压50%范围，低电压在低工作电压50%范围。

10.6.4 测试步骤

释放器整机水池测试具体如下：
a） 连接负载。将重物载荷与声学释放器下端进行连接，同时，为便于重物载荷回收，将重物载荷与声学释放器上端挂绳进行连接。
b） 安装和调整水下摄像机，确保释放器挂钩位置在摄像范围内。
c） 声学释放器吊放入水。吊放声学释放器入水，同时在声学释放器1 m以上水平距离之外的合适位置下放水面甲板单元的发射换能器，确保发射换能器与声学释放器之间无遮挡。

d） 唤醒测试。测试释放器能否正常唤醒，并记录，如未正常唤醒则重复发送唤醒信号，直至实现正常唤醒，连续5次不能实现正常唤醒则中止试验，并记录。

e） 释放功能测试。通过释放器水面甲板单元发送释放信号，通过水下摄像机观察和记录是否正常释放。

f） 恢复。恢复声学释放器挂钩，使试验样品处于与初始检测时相同的条件。

g） 循环测试。重复步骤a）～f），直至总唤醒测试次数和总释放测试次数满足以下要求：

1） 总唤醒测试次数在 10 次以上，根据用户需求可选择 10 次、20 次、25 次、33 次、50 次、100 次；

2） 总释放测试次数 10 次以上，根据用户需求可选择 10 次、20 次、25 次、33 次、50 次、100 次。

h） 测试结束。对试验样品进行外观检查、功能检测，与初始检测数据进行比较，并记录。