

张川,周建平,阮爱国,等.链式海底地震仪节点结构与试验[J].地震工程学报,2024,46(3):672-679.DOI:10.20000/j.1000-0844.20230330001

ZHANG Chuan,ZHOU Jianping,RUAN Aiguo,et al.Structural design and experiments of cabled ocean-bottom seismometer nodes[J].China Earthquake Engineering Journal,2024,46(3):672-679.DOI:10.20000/j.1000-0844.20230330001

链式海底地震仪节点结构与试验

张川^{1,2},周建平^{2,3,4},阮爱国^{1,2},翁利春⁵,段磊⁶,曾锦锋⁵,陈宁特²

- (1. 上海交通大学海洋学院,上海 200030; 2. 自然资源部第二海洋研究所,浙江 杭州 310012;
3. 自然资源部海洋智能观测技术创新中心,浙江 杭州 310012;
4. 江苏深远海洋信息技术与装备创新中心,江苏 常州 213001;
5. 杭州瀚陆海洋科技有限公司,浙江 杭州 311200; 6. 上海交通大学船建学院,上海 200240)

摘要:海底地震仪是一种重要的海洋地震观测设备。针对中国近岸浅海洋流噪声大和人类活动频繁的特点,提出链式地震观测方式并对链式海底地震仪节点进行机械结构设计。首先根据内部构件尺寸与布局对地震仪节点整体结构进行设计;然后通过理论计算与有限元仿真方式确定地震仪节点仓体的壳体厚度、端盖厚度和密封尺寸;最后通过压力试验验证所设计的地震仪节点结构的耐压和水密性能符合要求,通过地震观测对比试验验证其接收天然地震的能力。此链式海底地震仪未来将应用于浙江近海的实际地震观测,提供实时连续的地震观测数据。

关键词:链式地震仪;结构设计;仿真计算;压力试验;地震试验

中图分类号: P755.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)03-0672-08

DOI:10.20000/j.1000-0844.20230330001

Structural design and experiments of cabled ocean-bottom seismometer nodes

ZHANG Chuan^{1,2}, ZHOU Jianping^{2,3,4}, RUAN Aiguo^{1,2}, WENG Lichun⁵,
DUAN Lei⁶, ZENG Jinfeng⁵, CHEN Ningte²

(1. School of Oceanography, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, Zhejiang, China;

3. Marine Intelligent Observation Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resource, Hangzhou 310012, Zhejiang, China;

4. Jiangsu Far Reaching Marine Information Technology and Equipment Innovation Center, Changzhou 213001, Jiangsu, China;

5. Hangzhou Hanlu Ocean Technology Co., Ltd, Hangzhou 311200, Zhejiang, China;

6. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Ocean-bottom seismometers represent crucial marine seismic observation instruments. Considering the loud ocean currents and frequent human activities in China's offshore shallow waters, we proposed a chain seismic observation method and designed the mechanical structure of a cabled ocean-bottom seismometer node. First, the overall structure of the seismometer node was designed based on the dimensions and layouts of its internal components. Subsequently, the hull thickness, end cover thickness, and sealing dimension were determined based on theoretical calculations and finite element simulations.

收稿日期:2023-03-30

基金项目:上海交通大学“深蓝计划”基金(SL2020ZD205);自然资源部第二海洋研究所基本科研业务费专项资金(SL2020ZD205);国家自然科学基金(42127807,42076047);浙江省重点研发计划(2021C03016)

第一作者简介:张川(1996-),男,硕士,主要从事海洋地震仪结构设计研究工作。E-mail: zzzc10@sjtu.edu.cn。

Finally, a pressure test verified the pressure resistance and water tightness of the designed seismometer node structure, while a comparative seismic observation test validated the structure's ability to detect natural earthquakes. Considering these accomplishments, the designed cabled ocean-bottom seismometer is planned to be deployed for actual seismic observations in the offshore area of the Zhejiang Province to gather real-time and continuous seismic observation data.

Keywords: cabled seismometer; structural design; simulation calculation; pressure test; seismic test

0 引言

全球天然地震有 85% 发生在海洋区域,对海洋地震进行观测与研究具有重大意义。我国海域面积辽阔,沿海城市经济发达。以东海为例,东海是我国的东部近海,我国很多经济大省都与其相邻,东海大陆架宽广,浅水范围比较大,其中浙江近海岛礁区地貌复杂,海底水动力作用比较活跃^[1]。海底地震仪是一种直接把地震检波器放置在海底的地震观测仪器。在东海大陆架布放海底地震仪,可以对海洋地震进行监测与预警,保障我国东海大型海洋工程以及沿岸城市的安全^[2],也可以对地球深部构造研究提供数据支持^[3-4]。目前最常见的海底地震仪为自浮式地震仪,其通过将地震计封装在外壳内并投放到海底来接收地震信号。国际上美、德、英、法等国都有相对成熟的自浮式地震仪,国内中国科学院地质与地球物理研究所研制的 I-4C、I-7C 型地震仪^[5-6]以及南方科大研制的分体式地震仪磐鲸^[7]都已经成功应用。但是陆架浅海区域的海底洋流噪声以及水面船只和人类活动噪声较大,会影响到暴露在海底表面的仪器安全,因此,自浮式地震仪观测方式不能适应浅水区的长期观测要求。

为了在浅海大陆架区域进行长期地震观测,需要选择合理的地震观测方式。国际上,加拿大 Neptune^[8]海底观测网和美国 OOI^[9]海底观测网通过在光电缆上连接自浮式地震仪来进行海洋地震观测。近年来我国在自浮式地震仪的基础上也开展了一些改进研究。2015 年周建平等^①通过国家 863 计划“海底观测网试验系统”重大项目支持研究,在我国首次实现了深水远距离的基于陆基的光缆实时在线地震和地磁观测。从观测结果来看,即使在南海深海盆地,置放在海底表面的地震仪记录的水平噪声仍明显大于垂直噪声。2018 年郝天珧等^[10]在福建浯屿岛海底建立了地震观测台,利用光电缆把地震观测台数据实时传输到岸上的数据中心,但是此站点结构设计体积相对较大,难以埋在沉积物之下,仪器的降噪和生存安全难以保证。

链式海底地震观测是一种较为新型的地震观测

方式,其通过海底光电缆将一个个地震仪节点连接起来,每一个节点内部都有地震计,地震仪节点接收到的信号可以通过光电缆实时传回陆地基站,而陆地基站也可以通过光电缆给地震仪供电,这种在线式有缆地震观测方式可以对海洋地震开展实时连续观测。通过对链式地震仪进行合理设计与布放,可有效限制浅海噪声大的问题。在链式地震仪领域,日本走在前列,已经发展了一些比较成熟的链式地震观测系统,比如 DONET^[11]、S-net^[12]等。其中 DONET 观测系统布置有 20 个海底观测节点,节点之间相距 10~30 km 不等,每个节点搭载有地震仪、水听器、压力计等传感器,其中地震仪被埋设到海底 1 m 以下来减少环境噪声干扰。S-net 观测系统在全长 5 500 km 的海底光电缆上连接有 150 个观测节点,有些节点的布设水深超过了 7 000 m。

国外的相关技术并不对我国开放,为了实现对我国陆架浅海区域的地震观测,拟设计出一套能应用于浙江近海的链式地震观测系统。其需要满足可实时连续观测、噪声小、安装布设方便等特点,并且观测节点数不小于 3。考虑到近浅海海底的复杂环境以及频繁的渔业活动,拟将地震仪埋设布放,这种布放方式也能使地震仪与海底有更好的耦合从而接收到质量更好的地震信号。链式地震仪节点机械结构设计是整体设计的第一步也是比较关键的一步,其结构需要满足水密耐压、地震计良好耦合、低机械噪声和小型化轻型化等要求。本文对地震仪节点的整体结构和耐压壳体、端盖、水密等方面进行了设计与仿真分析,得到了符合要求的地震仪节点结构,并通过试验验证了所设计地震仪结构的有效性。

1 链式地震仪节点整体设计

研制的海底链式地震仪设备包括三个地震仪节点,节点之间通过水密接插件和光电缆串联并连接到陆地基站。除了地震仪壳体本身外,一个地震仪

① 国家高技术研究发展计划(863 计划)课题:“基于观测网的海底地球物理环境长期实时监测系统研发和集成(2012AA09A404)”技术报告,2016。

节点还包含三维地震计、姿态传感器、控制电路和水听器。除水听器外,耐压壳体可以为其他非水密构件提供水密性的安装空间。

海洋装备的耐压壳体外形一般选择球壳型或者圆柱壳型等规则的曲面薄壳结构^[13],这种结构的承压能力相对较高,且加工也相对容易。考虑到链式海底地震仪节点之间需要通过水密光电缆进行串连,圆柱形结构两端圆面是安装水密接插件的最佳选择,并且圆柱形结构也易于在海底进行埋设,所以本文所设计的耐压壳体选择圆柱壳型结构。

链式地震仪节点耐压壳体的尺寸取决于内部构件的尺寸及安装要求。在其他参数变化不大的前提下,选择体积较小的构件以满足小型化要求。地震计作为地震仪内部最重要的构件,其需要与壳体刚性连接,这样地面振动信号才能在不失真的前提下通过壳体传递到地震计。姿态传感器的作用是接收实时方位信息,其需要与地震计平行放置,即姿态传感器的 x 轴、 y 轴、 z 轴要分别平行于地震计的 x 轴、 y 轴、 z 轴,这样姿态传感器接收的姿态信息就是地震计的实时姿态。其他系统构件需要与地震计分开,以减弱机械噪声干扰,从而使地震计接收到质量较好的地震信号。综合考虑到地震仪节点内部各个构件的尺寸和安装要求,新研制的地震仪节点的耐压壳体圆筒内空长度 $L=400\text{ mm}$,耐压壳内径 $D_i=143\text{ mm}$,同时从光电缆到耐压壳体之间设计有过渡性结构。耐压壳体可以对内部元器件起到保

护作用,壳体两端的塑料锥套对耐压壳体外的相关构件起保护作用,同时对海底洋流起到缓冲作用,有利于地震计接收到良好的地震信号。

最后设计的链式地震仪节点结构的剖视图如图1所示。

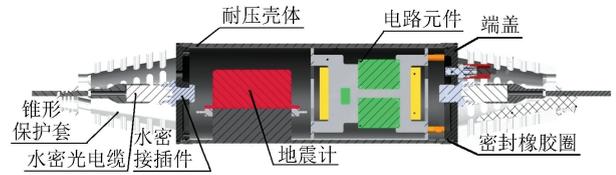


图1 链式地震仪节点结构剖视图

Fig.1 Sectional view of cabled seismometer node structure

2 地震仪节点耐压性能设计

中国近海陆架的最大水深约200 m,对应的海水压强约2 MPa。需要选择合适的壳体材料和壳体厚度来满足强度和稳定性要求。

2.1 耐压壳体材料选择

水下仪器的工作环境相对来说比较恶劣,耐压壳体材料的选择需要从抗压性能、耐腐蚀性、重量和体积等方面综合考虑。通常来说,增加壳体厚度或者选择高强度的材料都会使承压性能增加,但往往又会增加成本或者使地震仪重量增加。所以需要在满足承压要求的前提下选择最合适的材料、壳体厚度以及端盖厚度。可供选择的几种常见耐压壳体材料及其参数如表1所列。

表1 常见耐压壳体材料的基本参数

Table 1 Basic parameters of common pressure hull materials

材料名称	密度/(kg/m^3)	泊松比	弹性模量/MPa	屈服强度/MPa	耐腐蚀性能
铝合金 6061-T6	2 700	0.330	69 000	240	需表面处理
不锈钢 0Cr18Ni9	7 930	0.285	204 000	205	耐海水腐蚀
钛合金 TC4	4 550	0.340	113 000	860	耐海水腐蚀

从力学性能来看,三种材料屈服强度都比较高,选择合适厚度都能够满足200 m水深的压力条件。铝合金密度较小,易于加工制造,材料成本也比较低,经阳极氧化处理后耐腐蚀能力好;不锈钢虽然耐海水腐蚀,但是其密度较大,不符合轻型化设计;钛合金重量较轻并且耐海水腐蚀,非常适合于水下设备的制造,但是其材料和加工成本相对较高。

综合以上分析,我们研制的地震仪节点选择铝合金6061-T6作为耐压壳体材料,并进行表面阳极氧化处理来提高其抗腐蚀能力。

2.2 耐压壳体的设计与仿真

本研究按照解析公式法对耐压壳体进行计算与

校核,各种符号和国标规范^[14]保持一致。

外压圆筒的失效形式有两种:一种是筒体刚度不足发生失稳破坏;另一种是筒体强度不够而发生屈服失效^[15]。当圆筒外径与圆筒厚度比值大于20时,圆筒被视作薄壁圆筒,一般来说,对于薄壁圆筒周向失稳总是先于强度失效发生,所以在计算薄壁圆筒外压承载能力时只需关注稳定性问题。导致外压筒体发生失稳破坏的最小外部压力称为临界压力,以 P_{cr} 表示。根据设计经验,对于200 m水深工作环境,通常都设计为薄壁圆筒,在计算时需要重点考虑其稳定性。薄壁圆筒也有长圆筒和短圆筒之分,当圆筒长度 L 大于临界长度 L_{cr} 时就属于长圆

筒,反之则属于短圆筒。

临界长度 L_{cr} 的计算公式为:

$$L_{cr} = 1.17D_0 \sqrt{\frac{D_0}{\delta_e}} \quad (1)$$

式中: D_0 为圆筒的外径; δ_e 为圆筒的有效厚度。

根据式(1),无论厚度取值为多少, L_{cr} 计算结果都大于 400 mm。由于本文所设计的耐压壳体的圆筒长度小于临界长度,所以属于短圆筒。短圆筒的临界压力计算公式为:

$$P_{cr} = 2.59E \frac{\left(\frac{\delta_e}{D_0}\right)^{2.5}}{\left(\frac{L}{D_0}\right)} \quad (2)$$

式中: P_{cr} 为临界压力; D_0 为筒体的外直径; δ_e 为筒体的有效厚度; E 为材料的弹性模量。

实际情况下不允许外部压力接近或者等于临界压力,必须留有一定的安全裕度。实际允许的最大外压称为许用压力,用 $[P]$ 表示。 $[P]$ 的计算公式为:

$$[P] = \frac{P_{cr}}{m} \quad (3)$$

式中: m 为安全系数,主要是考虑到计算公式的可靠性、加工制造上的误差、材料性能存在的差异及操作工况的变化等因素,此处 m 取 3。

对于耐压壳体厚度的确定采用试算法。根据经验,选择 3 mm、4 mm、5 mm 及 7 mm 的厚度来进行稳定性校核。计算结果如表 2 所列。

表 2 不同厚度耐压壳体许用压力计算表

Table 2 Allowable pressure of pressure hull with different thickness

耐压壳厚度 δ_e /mm	临界压力 P_{cr} /MPa	许用压力 $[P]$ /MPa
3	3.829	1.276
4	7.705	2.568
5	13.025	4.342
7	29.443	9.814

根据此链式地震仪的使用需求,其最大工作水深 200 m,工作压力为 2 MPa。从表 2 可知,当耐压壳体厚度大于 4 mm 时都满足许用压力大于工作压力的使用要求,但是从壳体重量和设计成本考虑,最后确定的耐压壳体厚度为 4 mm。

使用 ABAQUS 有限元软件对设计的耐压壳体模型进行真实应力场仿真分析。为了简化计算,在 ABAQUS 中直接建立圆柱壳模型,圆柱壳外均布 2 MPa 海水压力,然后画网格求解计算,得到此海水压力下耐压壳体的应力云图(图 2)。

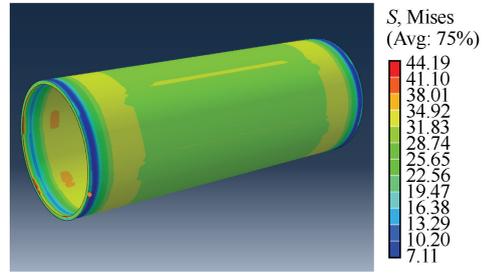


图 2 外压作用下耐压壳体应力云图

Fig.2 Stress cloud diagram of pressure hull under external pressure

从图 2 可以看出,耐压壳体在中间大部分区域的有效应力分布比较均匀,应力值在 30 MPa 左右;靠近两端的有效应力呈现出渐变特征,整个壳体上的应力最大值为 44.19 MPa,小于铝合金 6061-T6 的屈服强度 240 MPa,表明地震仪的耐压壳体强度满足设计需要。

2.3 端盖的设计与仿真

端盖的材料同样使用铝合金 6061-T6。端盖与耐压壳体之间通过螺栓连接。端盖总体上属于实心圆板,圆板端面承受均布载荷。

根据规范^[14],端盖的计算厚度 δ_p 按照式(4) 进行计算。

$$\delta_p = D_c \sqrt{\frac{K p_c}{[\sigma]'\varphi}} \quad (4)$$

式中: D_c 为圆板计算直径; K 为结构特征系数; p_c 为计算压力; $[\sigma]'$ 为设计温度下材料的许用应力; φ 为焊接接头系数。

根据结构的实际设计情况,此处 D_c 取 151 mm, K 取 0.25, p_c 取 6 MPa(取安全系数 3), $[\sigma]'$ 取 240 MPa, φ 取 1。代入式(4),得到端盖计算厚度为 11.94 mm,最终实际取的壳体两端端盖厚度 δ 为 15 mm。

同样,在 ABAQUS 中对端盖进行建模并求解计算,得到端盖的应力云图(图 3)。

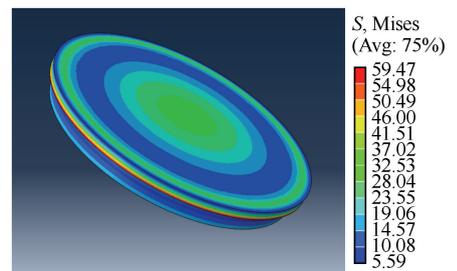


图 3 外压作用下端盖应力云图

Fig.3 Stress cloud diagram of end cover under external pressure

由图3可知,端盖受压面上的应力都在10 MPa以上,整个端盖上的最大应力位于端盖和耐压壳体相交处,最大应力为59.47 MPa,小于铝合金的屈服强度240 MPa,端盖的强度满足使用要求。

3 密封设计与仿真

可靠的密封设计是保证地震仪在海底正常工作的关键环节。在耐压壳体和上下端盖之间采用O形圈进行密封。O形圈在受到压力时会产生弹性变形,填充在耐压壳体和上下端盖之间的缝隙,从而起到密封作用。除了密封性能好以外,O形圈还具有结构简单、成本低、安装和拆卸方便等优点。

根据密封圈设计的国标规范^[6]对密封沟槽进行设计和计算,其中各种符号的表示和规范保持一致。

该地震仪在海底承受的压力基本属于静压力,采用径向密封的活塞密封沟槽形式。此密封形式如图4所示。

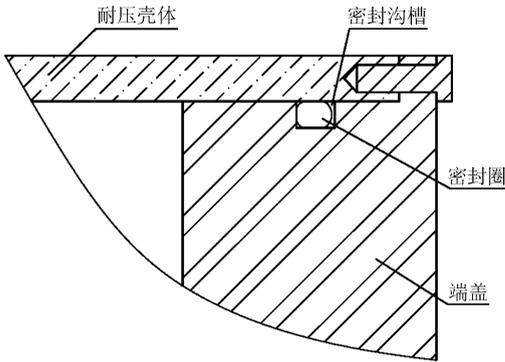


图4 耐压壳体与端盖之间的密封形式

Fig.4 Sealing form between pressure shell and end cover

选择O形圈活塞静密封的各项参数如表3所列。

表3 设计密封参数

Table 3 Design sealing parameters

设计参数	尺寸/mm(括号内为公差)
耐压壳体内径 d_4	143(H8)
活塞直径 d_9	143(f7)
沟槽槽底直径 d_3	137.6(h11)
O形圈内径 d_1	136
O形圈截面直径 d_2	3.55
O形圈沟槽宽度 b (无挡圈)	4.8
沟槽底圆角半径 r_1	0.4~0.8
沟槽棱圆角半径 r_2	0.1~0.3

密封圈选用硬度为70的丁腈橡胶材料。橡胶具有超弹性特性,在对其进行有限元仿真分析时需要选取合适的本构模型。对于橡胶类材料,本构模

型的选择有很多,如 Neo-Hookean 模型、Mooney-Rivlin 模型、Polynomial 模型、Ogden 模型和 Yeoh 模型等^[17-18]。相比于其他模型,Mooney-Rivlin 模型可以更准确地描述橡胶材料在发生大变形时的力学行为,所以本文选择 Mooney-Rivlin 模型。Mooney-Rivlin 模型的本构关系为^[19]:

$$W(I_1, I_2) = \sum_{i,j=0}^n C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (5)$$

式中: W 表示应变能密度; C_{ij} 为Rivlin系数; I_1, I_2 分别为第一和第二Green应变不变量。

本文采用两参数 Mooney-Rivlin 模型,式(5)变为:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (6)$$

式中: C_{10} 和 C_{01} 均为 Mooney-Rivlin 系数,对于特定材料而言,其值为正正常数。本文所使用的密封圈材料为丁腈橡胶,邵氏硬度为70, C_{10} 和 C_{01} 常数分别为1.074和0.054。

使用ABAQUS有限元软件建立的密封O形圈二维轴对称模型如图5所示。

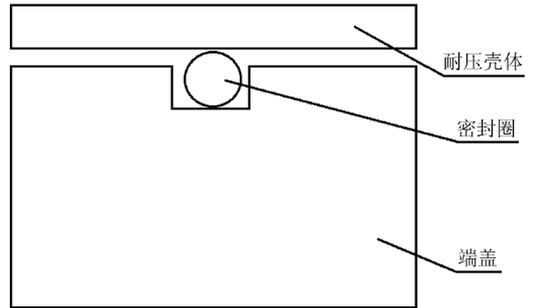


图5 密封O形圈轴对称模型

Fig.5 Axisymmetric model of sealing O-ring

与图4相对应,图5的模型分为三部分:上边为耐压壳体,中间圆形为O形圈,下边为端盖部分。在ABAQUS软件分析时定义两个载荷步:第一步,控制端盖和壳体之间间隙为1 mm,使O形圈处于预压缩状态;第二步,在O形圈右端施加均布载荷,模拟O形圈受到海水压力作用时的状态。

图6和7分别是2 MPa的海水压力作用下O形圈的应力云图和接触应力分布图。

从图6可以看出,O形圈中间的应力较大,四周应力较小,O形圈上的最大应力为3.30 MPa,小于橡胶圈的破坏应力,所以橡胶圈不会被破坏。而从图7(即密封压力图)可以看出,密封面的最大压力达到4.99 MPa,大于密封压力2 MPa。同时O形圈与沟槽左右端面接触紧密,没有被挤出沟槽,没有发生剪切破坏,证明密封是可靠的。

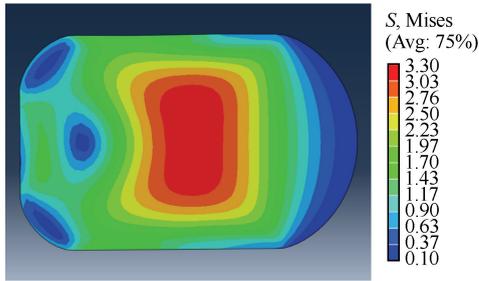


图 6 外压作用下 O 形圈应力云图

Fig.6 Stress cloud diagram of O-ring under external pressure

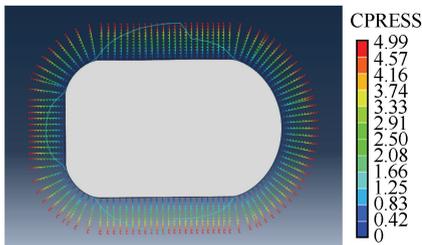


图 7 外压作用下 O 形圈接触应力分布图

Fig.7 Contact stress distribution diagram of O-ring under external pressure

4 试验验证

4.1 水密压力试验

设计好的地震仪壳体加工完成并组装好以后,在正式投入使用以前需要进行水密压力试验来检验其耐压能力和水密性能。其中,封装好的单个地震仪节点如图 8 所示。



图 8 地震仪节点实物图

Fig.8 Physical diagram of seismometer node

将上述封装好的地震仪壳体置于液压试验装置中,从 0 开始逐级加压到 5 MPa(大于实际工作压力)并保压 2 h,再逐渐泄压。整个试验过程的加压曲线如图 9 所示。

压力测试完成以后,地震仪壳体外部和内部均不见任何变形和破损,同时舱体内部也没有渗水现象,证明地震仪壳体设计满足耐压和水密要求。

4.2 地震台对比实验

海底地震仪作为接收海底地面振动信号的仪器,其设计完成以后需要进行天然地震接收试验来

得出其实际使用性能。

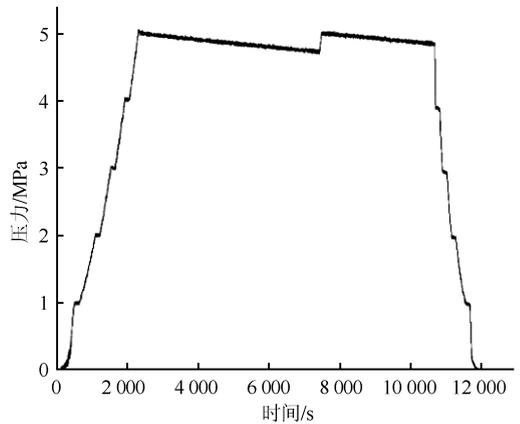


图 9 压力测试曲线

Fig.9 Pressure test curve

将封装好的链式地震仪三个节点投放到浙江湖州地震台山洞内的蓄水池中,进行地震观测试验并做好地震数据记录。选取试验期间(2022-09-09—29日)发生的大于 6.0 级的典型地震 13 个,分别对原始波形进行去均值、去趋势,重新采样(采样间隔为 0.01 s)和低通滤波(< 2 Hz)。对比地震仪三个节点和湖州台站(标准地震台站)记录的三分量地震波形,结果如图 10 所示,其中单个地震波形长度为 600 s。

从图 10 中可以看出,对于大多数典型地震,三个节点都能够有效记录其波形,验证了所设计的链式地震仪记录地震信号的能力。而部分地震波形的记录效果不好,这是由于链式地震仪所使用地震计的响应范围(1~300 Hz)的限制,对大地震低频成分(通常低于 1 Hz)的记录还原度不高。

5 结语

本文开展了对链式地震仪节点结构的设计与研究,主要工作内容与结论如下:

(1) 根据链式地震仪节点所包含的各种零部件,设计了符合条件的节点结构,设计的耐压壳体内径为 143 mm,长度为 400 mm;

(2) 选择了铝合金作为耐压壳体材料,并且通过理论计算和仿真分析得出合适的壳体厚度和端盖厚度,分别为 4 mm 和 15 mm,并按照规范进行了密封性能设计;

(3) 静水压力试验表明所设计的节点结构强度和耐压性能满足使用要求;

(4) 通过实际地震观测对比试验,验证了链式地震仪的地震观测效果。

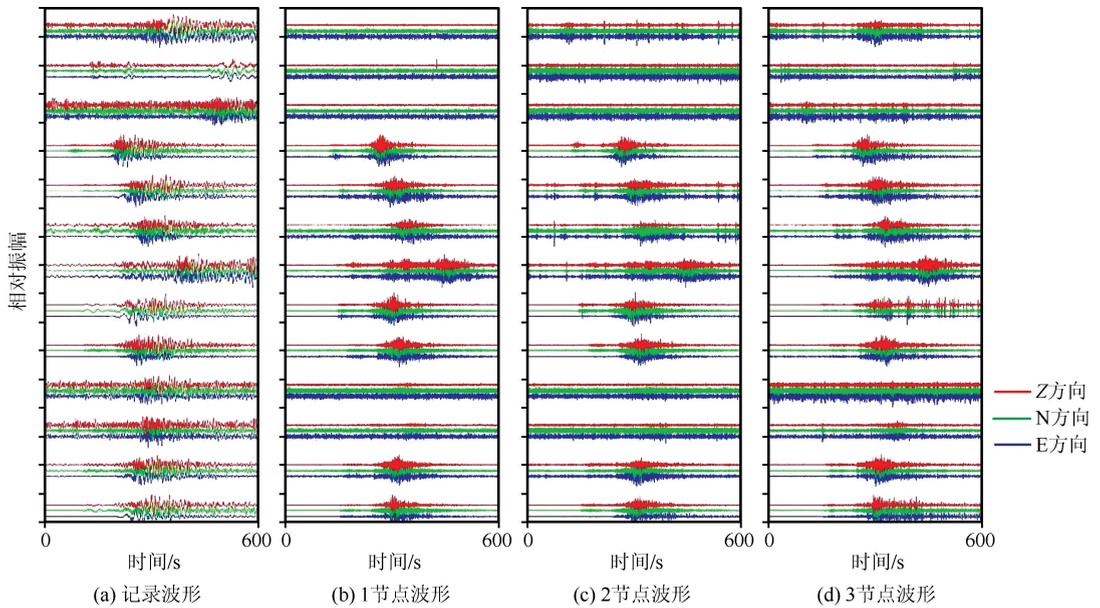


图 10 链式地震仪三个节点与湖州台站记录到的滤波后波形

Fig.10 Filtered waveforms recorded by three nodes of the cabled seismometer and Huzhou station

未来,本文所设计的链式地震仪将进一步优化设计并开展湖底试验,最后应用于浙江近海的地震观测。这有助于建立海底的天然地震监测组网,为海洋地震预警、大型海洋工程安全评估、海底构造研究和海洋资源开发提供帮助。

参考文献(References)

- [1] 张洪沙,陈庆,孙家淞.东海海底地貌特征研究[J].上海国土资源,2013,34(1):46-52,80.
ZHANG Hongsha, CHEN Qing, SUN Jiasong. Seafloor landforms in the East China Sea[J]. Shanghai Land & Resources, 2013, 34(1): 46-52, 80.
- [2] 王其,林鸿杰,李文惠,等.福建海洋地震观测网建设必要性研究[J].科学技术创新,2019(2):39-40.
WANG Qi, LIN Hongjie, LI Wenhui, et al. Study on the necessity of Fujian marine seismic observation network construction [J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(2): 39-40.
- [3] LI J B, JIAN H C, CHEN Y J, et al. Seismic observation of an extremely magmatic accretion at the ultraslow spreading Southwest Indian Ridge [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(8): 2656-2663.
- [4] 胡昊,阮爱国,游庆瑜,等.海底地震仪远震记录接收函数反演:以南海西南次海盆为例[J].地球物理学报,2016,59(4):1426-1434.
HU Hao, RUAN Aiguo, YOU Qingyu, et al. Using OBS teleseismic receiver functions to invert lithospheric structure: a case study of the southwestern subbasin in the South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(4): 1426-1434.
- [5] 阮爱国,李家彪,陈永顺,等.国产 I-4C 型 OBS 在西南印度洋中脊的试验[J].地球物理学报,2010,53(4):1015-1018.
RUAN Aiguo, LI Jiabiao, CHEN Yongshun, et al. The experiment of broad band I-4C type OBS in the Southwest India ridge [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(4): 1015-1018.
- [6] 郝天珧,游庆瑜.国产海底地震仪研制现状及其在海底结构探测中的应用[J].地球物理学报,2011,54(12):3352-3361.
HAO Tianyao, YOU Qingyu. Progress of homemade OBS and its application on ocean bottom structure survey [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(12): 3352-3361.
- [7] 刘丹,杨挺,黎伯孟,等.分体式宽频带海底地震仪的研制、测试和数据质量分析[J].地球物理学报,2022,65(7):2560-2572.
LIU Dan, YANG Ting, LI Bomeng, et al. Seismometer-detached broadband ocean bottom seismograph (OBS): development, test, and data quality analysis [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(7): 2560-2572.
- [8] 李建如,许惠平.加拿大“海王星”海底观测网[J].地球科学进展,2011,26(6):656-661.
LI Jianru, XU Huiping. NEPTUNE-Canada [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(6): 656-661.
- [9] ISERN A R. The ocean observatories initiative: wiring the ocean for interactive scientific discovery [C]//Proceedings of OCEANS 2006. Boston, USA: IEEE, 2006: 1924-1930.
- [10] 郝天珧,郭永刚,张艺峰,等.线缆式海底地震观测技术:以涠岛海底地震观测台为例[J].地球物理学报,2019,62(11):4323-4338.
HAO Tianyao, GUO Yonggang, ZHANG Yifeng, et al. Cabled seafloor observation technology: a case study of the submarine seismic station in Wuyu Island [J]. Chinese Journal of Ge-

- physics,2019,62(11):4323-4338.
- [11] NAKANO M, NAKAMURA T, KAMIYA S, et al. Intensive seismic activity around the Nankai trough revealed by DONET ocean-floor seismic observations[J]. *Earth, Planets and Space*, 2013, 65(1):5-15.
- [12] MOCHIZUKI M, KANAZAWA T, UEHIRA K, et al. S-net project: construction of large scale seafloor observatory network for tsunamis and earthquakes in Japan[J/OL]. *Geology, Environmental Science, Engineering*, 2016: 217154487[2023-03-30]. <https://www.semanticscholar.org/paper/S-net-project%3A-Construction-of-large-scale-seafloor-Mochizuki-Kanazawa/6f194fb9cc91571b7d1eda455c31b4fc42dfa866>.
- [13] LIANG C C, SHIAH S W, JEN C Y, et al. Optimum design of multiple intersecting spheres deep-submerged pressure hull[J]. *Ocean Engineering*, 2004, 31(2):177-199.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 压力容器 第 1 部分: 通用要求: GB/T 150.1—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. *Pressure vessels—part 1: general requirements: GB/T 150.1—2011*[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [15] 李金科, 张贤福, 刘韞砚. 外压圆筒的计算及数值计算稳定性分析[J]. *压力容器*, 2011, 28(7):35-39, 54.
LI Jinke, ZHANG Xianfu, LIU Yunyan. Calculation of cylindrical shells under external pressure and numerical computation of stability analysis[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2011, 28(7):35-39, 54.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 液气动用 O 形橡胶密封圈 沟槽尺寸: GB/T 3452.3—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. *Housing dimensions for O-ring elastomer seals in hydraulic and pneumatic applications: GB/T 3452.3—2005*[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [17] TSCHOEGL N W. Constitutive equations for elastomers[J]. *Journal of Polymer Science Part A-1: Polymer Chemistry*, 1971, 9(7):1959-1970.
- [18] YAMABE J, NISHIMURA S. Influence of fillers on hydrogen penetration properties and blister fracture of rubber composites for O-ring exposed to high-pressure hydrogen gas[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(4):1977-1989.
- [19] 刘萌, 王青春, 王国权. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型中材料常数的确定[J]. *橡胶工业*, 2011, 58(4):241-245.
LIU Meng, WANG Qingchun, WANG Guoquan. Determination of material constants for Mooney-Rivlin rubber model[J]. *China Rubber Industry*, 2011, 58(4):241-245.

(本文编辑:张向红)