

高效串型深海环境腐蚀试验技术

郭为民, 孙明先, 侯健, 逢昆, 邱日, 范林, 张彭辉, 丁康康, 许立坤

(海洋腐蚀与防护重点实验室 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 山东 青岛 266101)

摘要: 从海洋资源开发和军事应用等方面分析了发展材料深海环境腐蚀试验技术的紧迫性和必要性, 综述了美国、前苏联、印度、挪威等国家深海腐蚀的试验方法、技术和研究进展, 总结了深海环境腐蚀试验的发展概况。针对中国船舶重工集团公司第七二五研究所开发的高效串型深海环境试验装置, 对其结构、功能、水下静态受力状态以及试验方法进行了简要介绍, 同时阐述了深海环境腐蚀试验技术对我国的重要性以及未来发展前景。

关键词: 深海; 腐蚀; 试验技术

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.05.004

中图分类号: TJ04; TG172.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2016)05-0025-05

Highly Efficient Bunch-style Device for Corrosion Testing in Deep Sea Environment

GUO Wei-min, SUN Ming-xian, HOU Jian, PANG Kun, QIU Ri, FAN Lin,
ZHANG Peng-hui, DING Kang-kang, XU Li-kun

(State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang ship Material Research Institute, Qingdao 266101, China)

ABSTRACT: The urgent need and necessity of materials corrosion testing in deep sea environment are discussed based on marine resource exploitation and military perspectives. Corrosion testing in deep sea environment is summarized, and deep-sea corrosion testing methods developed by the United States, the former Soviet Union, India and Norway are reviewed. Luoyang Ship Material Research Institute has designed and developed the bunch-style device with high performance for corrosion testing in deep sea environment. We give the brief introduction on its structure, function, underwater static stress analysis and utilization for corrosion test. Furthermore, the importance and prospect of the deep sea corrosion testing technology for our country are also elucidated.

KEY WORDS: deep sea; corrosion; test method

深海蕴藏着丰富的油气和矿产资源, 这些资源分布在从几百米到几千米的深海海底。我国海洋石油储量非常丰富, 海洋石油开发正在走向深海。深海资源开发需要研发耐深海环境的开采装备, 美国、前苏联等国家早在 20 世纪 60, 70 年代便已开

展装备材料深海环境的腐蚀试验, 并已开始研发 3000 m 左右深海油气开采技术和装备。与发达国家相比, 我国深海资源开采技术和装备的研发起步较晚, 因此, 为实现我国“走向深海大洋”的战略目标, 研发具有自主知识产权的开采技术和装备具有

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-08-12

Received: 2016-08-05; Revised: 2016-08-12

作者简介: 郭为民 (1968—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为材料海洋环境适应性。

Biography: GUO Wei-min(1968—), Male, Senior engineer, Research focus: suitability of materials in sea environment.

通讯作者: 许立坤 (1965—), 男, 研究员, 主要研究方向为深海腐蚀。

Corresponding author: XU Li-kun(1965—), Male, Researcher, Research focus: deep sea corrosion.

重要意义。开采海洋资源的深海工程装备材料不仅受到海水的侵蚀,同时还受到海水的静压力作用,极易发生腐蚀失效问题。

潜艇下潜越深,越容易利用不同水层所形成的复杂声学结构来掩护^[1],从而具有有效的战略报复和二次打击能力,但材料在深海环境中的腐蚀问题严重制约着兵器装备的发展,走向深蓝的军事战略迫切需要我国开展相关深海装备设计和研发^[2-3]。因此,开展装备材料深海环境腐蚀试验,积累深海自然环境因素及材料深海环境适应性数据,深入分析材料在深海中自然腐蚀、电偶腐蚀、应力腐蚀规律以及涂层失效等方面的性能迫在眉睫。

1 试验及试验装置

世界上工业发达国家早在20世纪60年代便开始了材料深海腐蚀试验的研究^[4]。最早的深海腐蚀试验始于1961年,美国通用电器公司所属实验室联合Wood Hole公司在God海峡与百慕大之间进行了4~5000 m深的金属挂片试验。1962—1970年,美国海军开展了包括钢铁、铜、铝、钛、聚合物材料等在内的475种合金,2万片试样的深海试验^[5]。前苏联于1975年研究了6种金属材料在太平洋西北地区5500 m深海域的腐蚀规律。1982—

1999年,挪威船舶研究所和海洋技术研究所分别在北挪威大陆架和北挪威海进行了深海腐蚀试验。21世纪初,印度Sawant及其合作者在阿拉伯海和孟加拉湾进行了1000 m和2900 m的深海腐蚀试验^[6]。2006年,中国船舶重工集团公司第七二五研究所开始研制深海腐蚀试验装置,并进行制造和投放,成为我国最早开展材料深海腐蚀试验的单位。

近年来,随着海洋资源的开发,世界各国在开展深海试验研究工作的同时^[7-18],不断改进着深海腐蚀试验装置。根据现有资料^[19-24],深海腐蚀试验装置可以分为两种:一种以美国为代表,使用的是试样框架座底的潜式试验装置;另一种是借助于海洋水文浮标进行腐蚀试验的串挂式试验装置,以苏联、印度、挪威为代表。

试样框架座底潜式装置如图1a所示,其试验框架(称为STU)沉在海底,其上连接专门的回收尼龙绳索,回收绳索平铺于海底;另有一根较细的缆绳,顶端固定浮球,下部与沉块相连固定在海底,并与回收绳索相连。回收时,细缆绳与沉块脱离,浮球带细缆绳浮到水面,用细缆绳将打捞用的绳索拉到回收船上,借助于船上的绞车将框架拉到海面。这种装置结构稳定、试样丢失率低、布放深度准确,但要求试验场海底必须是面积较大的平坦硬质海泥,回收船也要有较大吨位。

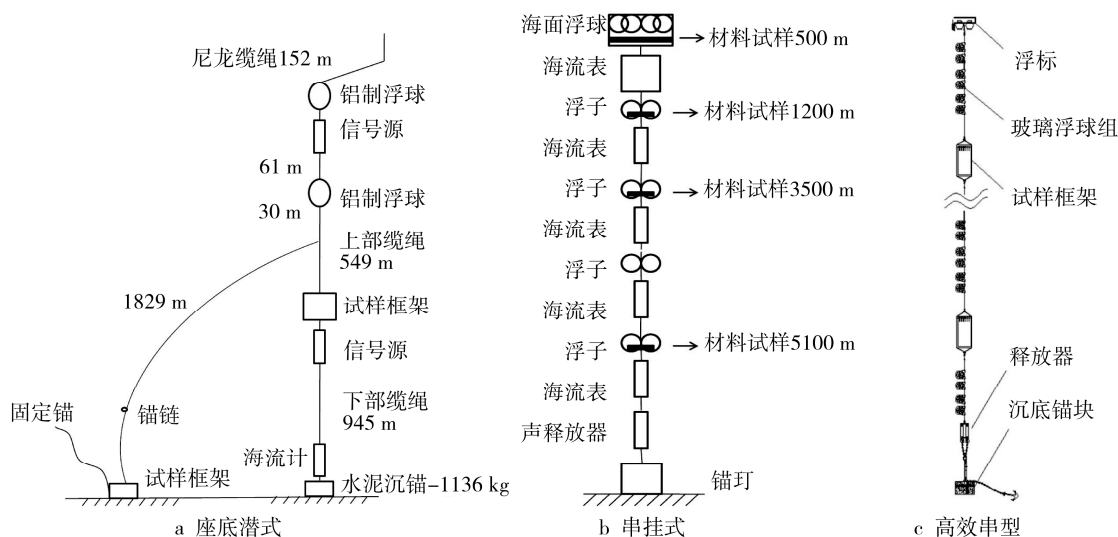


图1 试样框架试验装置

Fig.1 System for deep sea corrosion testing

串挂式试验装置是前苏联、印度、挪威等国家使用的腐蚀试验装置,除顶端有一大浮球外,其中间不同深度还固定有较小浮球,试样用绳索串挂在浮球上,投放时装置靠重力锚沉入海床,回收时靠

浮球浮力上升到海面,如图1b所示。串挂式试验装置对试验场面积要求不高,可同时测量多个深度试验数据,但其投放材料的种类和数量受到限制,一般每个深度只能投放几种,十几件试样,而且试

样尺寸小。装置的试样只适合安装金属失重试样,不能进行其他种类的腐蚀试验。

以上两种试验装置虽均适用于材料在深海海水中的腐蚀试验,但是,从试验效率和灵活性来说,均不满足日益增多的深海试验需求。为解决现有技术的不足,中国船舶重工集团公司第七二五研究所发明了一种高效串型深海环境试验装置,可于不同深度深海环境,进行长期环境暴露试验和金属材料多种形式的腐蚀老化试验,开展深海环境试验更为高效灵活,如图1c所示。该装置结构简单紧凑,将多个试样框架连接成一串,采用模块化设计,将电偶腐蚀、应力腐蚀、涂层耐环境老化等不同目的的试验装置进行标准化设计,使其均能适合试样框架安装,并且可以根据需要进行组合,同时完成多种形式的腐蚀试验。在需要部分更换试样时,可减少海上作业时间和作业强度,提高试验效率,试样框架间的距离可根据试验要求的暴露深度灵活调整。在使用过程中,能够利用小型船舶进行布放和回收,操作简便,节省试验费用和时间。

2 高效串型深海环境试验装置的结构

串型深海试验装置具有浮式试验样品承载框架,可实现整套装置的自动上浮和安全回收。主要分为六部分,分别为主浮标、试样框架、声学释放器、连接系统、浮力系统和沉底锚系等。其中主浮标位于装置的最上端,由框架、玻璃浮球、无线电信标等组成,作用是提供浮力和承载无线电信标。主浮标有较大的浮力,与沉锚共同作用使装置在水中呈紧绷状态,使整个沉底锚系系统存在一定的内张力,并且完成装置出水、发出无线电信号的功能。试样框架用于安装和固定试验样板,同时可承载小型环境因素检测设备。声学释放器将试验框架与锚系连接为一体,装置回收时,用于分离试验框架与沉底锚系之间的连接,实现装置的上浮。连接系统用于连接浮标、试验框架和锚系,包括Kevlar绳、卸扣等。浮力系统玻璃浮球采用分置方式安装,即除主浮体上装配4个浮球外,玻璃浮球配置的位置均在试样框架的上部,数量根据试样装载量的大小进行调整,利用浮球夹板(绳卡)将浮球外壳与Kevlar绳连接。沉底锚系由钢筋混凝土制成的沉锚和一辅助金属锚构成,用于整个装置的深海系留定位。沉底锚越大,装置在海底的稳定性越好,但是

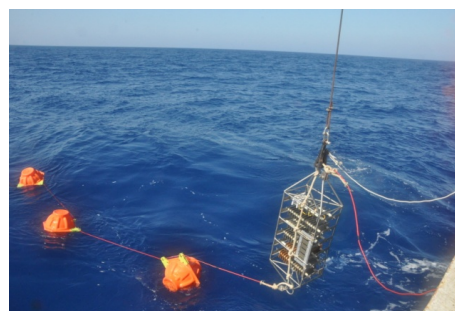
还必须考虑到整体的浮力和重力的比例。质量越大,装置下沉的速度越快。当沉底锚沉到海底时,其上方的释放器和试验框架由于惯性触底的危险性越高。

3 装置水下静态受力和姿态

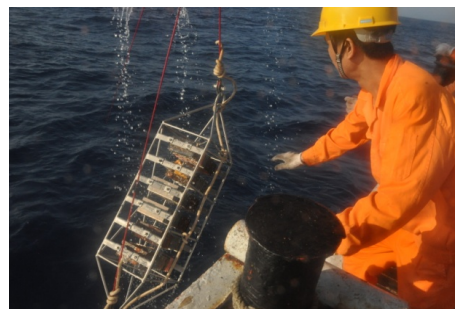
试验装置在水下会受到海流的作用产生偏转,各个试验框架的实际深度会发生变化^[25—29],海流的速度不同,偏转的程度不同。同时,装置中各个受力点的拉力也会发生变化,为保证其在深海环境中长期可靠的工作,保证样品投放深度的准确性,必须预先对系统进行水下受力和姿态估计^[30—32],从而保证主浮体在水下预定深度和所需姿态,并保证不走锚,确保装置在水下的安全性^[33—34]。

4 高效串型深海环境试验装置投放与回收

用船将装置运送到指定投放地点,预先将装置的各个部分连接好,作业船以0.5节以下的速度航行。从主浮标开始,按照图1c所示将各部件按由上向下的顺序依次投入海水中。由于装置的各部分均设计为正浮力,因此,整套装置均浮于海面,并



a 投放



b 回收

图2 深海试验装置的投放、回收现场

Fig.2 Resettlement and retrieval of the test installation

在船舶拉力和海流的作用下平铺于海面,避免缠绕和打结。当全部装置放完后,吊放水泥沉锚,利用沉锚的重量将装置固定在水下。随后利用GPS接收机和释放器的测距功能,测量投放点附近3个点的位置坐标和距离数据,进行三点GPS定位,确保样品回收时能准确找到装置。

回收时利用GPS三点定位获得的坐标,找到深海装置的试验区域,利用水声通讯设备将信号传输到海底,唤醒释放器,发出释放信号。释放器接收信号后,打开释放钩,锚链穿过圆环使装置,使上下两部分分离,抛弃水泥沉锚,装置回收部分上浮到海面,将上浮的试样框架回收船上,对试样进行初步的冲淡、干燥和包装处理,即完成深海试样的回收,在实验室进行详细的分析处理。

5 结语

当前,随着陆地资源短缺、人口膨胀、环境恶化等问题的日益严峻,各沿海国家纷纷把目光投向海洋,加快了对海洋的研究开发和利用,一场以开发海洋为标志的“蓝色革命”正在世界范围内兴起。我国“十三五”规划也将开展深海资源开发、建立深海空间站确立为重大科技项目。因此,开展材料深海腐蚀试验,积累不同材料在不同深度深海环境中的腐蚀行为规律,为海洋工程装备、潜艇等水下兵器提供基础技术支持具有重要意义。

参考文献:

- [1] 郭为民,李文军,陈光章.材料深海环境腐蚀试验[J].装备环境工程,2006,3(1):10—15.
GUO Wei-min, LI Wen-jun, CHEN Guang-zhang. Corrosion Testing in the Deep Ocean[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(1): 10—15.
- [2] 王佳,孟洁,唐晓,等.深海环境钢材腐蚀行为评价技术[J].中国腐蚀与防护学报,2009,27(1):1—7.
WANG Jia, MENG Jie, TANG Xiao, et al. Assessment of Corrosion Behavior of Steel in Deep Ocean[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2009, 27(1): 1—7.
- [3] 周建龙,李晓刚,程学群,等.深海环境下金属及合金材料腐蚀研究进展[J].腐蚀科学与防护技术,2010,22(1):47—51.
ZHOU Jian-long, LI Xiao-gang, CHEN Xue-qun, et al. Research Progress on Corrosion of Metallic Materials in Deep Sea Environment[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(1): 47—51.
- [4] 江洪,王微.全球深海材料研究概况[J].新材料产业,2013(11):7—10.
JIANG Hong, WANG Wei. Research Progress of Material in Deep Sea[J]. Advanced Materials Industry, 2013(11): 7—10.
- [5] 何筱珊,吕平,陈凯华,等.深海环境中金属腐蚀防护的研究新进展[J].上海涂料,2014,52(4):40—43.
HE Xiao-shan, LYU Ping, CHEN Kai-hua, et al. New Development about the Research on Corrosion and Protection of Metal Structures in Deep-sea Environment[J]. Shanghai Coatings, 2014, 52(4): 40—43.
- [6] SAWANT S S, VENKAT K, WAGH A B. Corrosion of Metals and Alloys in the Coastal and Deep Waters of the Arabian Sea and the Bay of Bengal[J]. Indian Journal of Technology, 1993, 31(12): 862—866.
- [7] 许立坤,李文军,陈光章,等.深海腐蚀试验技术[J].海洋科学,2005,29(7):1—3.
XU Li-kun, LI Wen-jun, CHEN Guang-zhang, et al. Deep Sea Corrosion Test Technique[J]. Marine sciences, 2005, 29(7): 1—3.
- [8] 郭为民,李文军.深海环境腐蚀试验装置研制取得重大进展[J].装备环境工程,2006,3(6):60—61.
GUO Wei-min, LI Wen-jun. Significant Progress has been Made in the Development of Deep Sea Environmental Corrosion Test Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(6): 60—61.
- [9] ULANOVSKII I. Corrosion of Metals in the Atlantic Ocean[J]. Protection of Metals, 1979, 15(6): 563—566.
- [10] ULANOVSKII I, EGOROVA V. Metal Corrosion at Different Depths in the Sea[J]. Protection of Metals, 1978, 14(2): 137—139.
- [11] VENKATESAN R, DWARAKADASA E S, RAVINDRAN M, et al. A Deep Sea Corrosion Study of Titanium and Ti6Al4V Alloy[J]. Corrosion Prevention and Control, 2004, 51(3): 98—103.
- [12] TRAVERSO P, CANEPA E. A Review of Studies on Corrosion of Metals and Alloys in Deep-sea Environment[J]. Ocean Engineering, 2014, 87:10—15.
- [13] VENKATESAN R, MUTHIAH M A, MURUGESH P, et al. Unusual Corrosion of Instruments Deployed in the Deep Sea for Indian Tsunami Early Warning System[J]. Marine Technology Society Journal, 2014, 48(6): 6—13.
- [14] CULLIMORE D R, PELLEGRINO C, JOHNSTON L, et al. RMS Titanic and the Emergence of New Concepts on Consortial Nature of Microbial Events[J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2001, 173: 117—141.
- [15] MILLER J D, WARREN B J, CHABOT L G, et al. Microbiologically Influenced Corrosion of Gulf of Mexico Mooring Chain at 6,000 Feet Depths[C]// ASME 2012 31st International Conference on Ocean. Rio de Janeiro, 2012: 649—658.
- [16] 侯健,郭为民,邓春龙,等.深海环境因素对碳钢腐蚀行为的影响[J].装备环境工程,2008,5(6):82—84.
HOU Jian, GUO Wei-min, DENG Chun-long, et al. In-

- fluences of Deep Sea Environmental Factors on Corrosion Behavior of Carbon Steel[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2008, 5(6): 82—84.
- [17] 刘杰, 李相波, 王佳, 等. 模拟深海压力对 2 种低合金钢腐蚀行为的影响[J]. *金属学报*, 2011, 47(6): 697—705.
LIU Jie, LI Xiang-bo, WANG Jia. Effect of Hydrostatic Pressure on the Corrosion Behaviors of Two Low Alloy Steels[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011, 47(6): 697—705.
- [18] 孙飞龙, 李晓刚, 卢琳, 等. 铜合金在中国南海深海环境下的腐蚀行为研究[J]. *金属学报*, 2013, 49(10): 1211—1218.
SUN Fei-long, LI Xiao-gang, LU Lin, et al. Corrosion Behavior of Copper Alloys in Deep Ocean Environment of South China Sea[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(10): 1211—1218.
- [19] 孙海静, 刘莉, 李瑛, 等. 深海静水压力环境下低合金高强度钢腐蚀行为研究[J]. *电化学*, 2013, 19(5): 418—419.
SUN Hai-jing, LIU Li, LI Ying, et al. Corrosion Behavior of a High Strength Low Alloy Steel under Hydrostatic Pressure in Deep Ocean[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2013, 19(5): 418—419.
- [20] 彭文才, 侯健, 郭为民, 等. 铝合金深海腐蚀研究进展[J]. *材料开发与应用*, 2010, 25(1): 59—62.
PENG Wen-cai, HOU Jian, GUO Wei-min, et al. Research Progress on the Corrosion of Aluminum Alloy in Deep Ocean[J]. *Development and Application of Materials*, 2010, 25(1): 59—62.
- [21] 黄雨舟, 董丽华, 刘伯洋, 等. 铝合金深海腐蚀的研究现状及发展趋势[J]. *材料保护*, 2014, 47(1): 44—47.
HUANG Yu-zhou, DONG Li-hua, LIU Bo-yang, et al. Current Status and Development Trend of Study on Corrosion of Aluminum Alloy in Deep Sea[J]. *Materials Protection*, 2014, 47(1): 44—47.
- [22] YANG Y, ZHANG T, SHAO Y, et al. Effect of Hydrostatic Pressure on the Corrosion Behaviour of Ni-Cr-Mo-V High Strength Steel[J]. *Corrosion Science*, 2010, 52(8): 2697—2706.
- [23] GRAY K O. Laboratory Simulation of the Deep-ocean Environment[J]. *Journal of Hydronautics*, 1971, 1(1): 54—59.
- [24] VENKATESAN R, VENKATASAMY M A, BHASKARAN T A, et al. Corrosion of Ferrous Alloys in Deep Sea Environments[J]. *British Corrosion Journal*, 2013, 37(4): 257—266.
- [25] 王明午. 海洋潜标系统的静力分析和姿态计算[J]. *海洋技术*, 2001, 20(4): 42—43.
WANG Ming-wu. Static Analysis and Attitude Calculation of Marine Submersible Buoy System[J]. *Ocean Technology*, 2001, 20(4): 42—43.
- [26] 郭为民, 樊洪, 尚拥军. 深海环境试验装置水下静态受力计算[J]. *装备环境工程*, 2008, 5(5): 5—8.
GUO Wei-min, FAN Hong, SHANG Yong-jun. Static Analysis and Calculation of Deep-sea Environment Testing System[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2008, 5(5): 5—8.
- [27] 王振, 刘振江, 崔浩, 等. 海洋潜标数据采集系统的设计实现与试验测试[J]. *海洋技术*, 2013, 32(4): 6—10.
WANG Zhen, LIU Zhen-jiang, CUI Hao, et al. Design and Experiment of Data Acquisition System of Submerged Buoy[J]. *Ocean Technology*, 2013, 32(4): 6—10.
- [28] 李飞权, 张选明, 张鹏, 等. 海洋潜标系统的设计和应用[J]. *海洋技术*, 2004, 23(1): 17—21.
LI Fei-quan, ZHANG Xuan-peng, ZHANG Peng, et al. The Design and Application of Marine Submersible Buoy System[J]. *Ocean Technology*, 2004, 23(1): 17—21.
- [29] 兰志刚, 杨圣和, 刘立维, 等. 深海剖面测流潜标系统设计及姿态分析[J]. *海洋科学*, 2008, 32(8): 21—24.
LAN Zhi-gang, YANG Sheng-he, LIU Li-wei, et al. The Design and Attitude Analysis of a Subsurface Buoy for Deep Sea Current Profiling[J]. *Marine Science*, 2008, 32(8): 21—24.
- [30] 王明午. 深海潜标系留系统的设计[J]. *海洋技术*, 1989, 8(1): 7—16.
WANG Ming-wu. The Design of Marine Submersible Buoy System[J]. *Ocean Technology*, 1989, 8(1): 7—16.
- [31] 马龙, 张洪欣, 张小波, 等. 深海潜标系统的姿态模拟计算分析及优化配置建议[J]. *海洋技术学报*, 2015, 34(6): 47—53.
MA Long, ZHANG Hong-xin, ZHANG Xiao-bo, et al. Attitude Simulative Analysis and Optimal Allocation Suggestions for the Deep-sea Submersible Buoy System[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2015, 34(6): 47—53.
- [32] 李文彬, 张选明, 李家军, 等. 实时传输潜标平台中的水上通信浮标设计[J]. *海洋技术学报*, 2014, 33(5): 47—51.
LI Wen-bin, ZHANG Xuan-ming, LI Jia-jun, et al. Design of the surface Communication Buoy of the Real-time Sub-surface Mooring System[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2014, 33(5): 47—51.
- [33] 倪佐涛, 姜静波, 徐永平, 等. 一种适用于石油平台的有缆潜标系统的设计与布放方法[J]. *海洋科学*, 2012, 36(12): 81—83.
NI Zuo-tao, JIANG Jing-bo, XU Yong-ping, et al. A Design and Deployment of Mooring Wired-buoy System for Offshore Jacket Platform[J]. *Marine Science*, 2012, 36(12): 81—83.
- [34] 徐如彦, 沈宁, 倪佐涛, 等. 自升式连体潜标测量系统的设计与实施[J]. *海洋科学*, 2014, 38(12): 93—97.
XU Ru-yan, SHEN Ning, NI Zuo-tao, et al. Design and Analysis of the Self-elevating Double Submerged Buoy Measurement System[J]. *Marine Science*, 2014, 38(12): 93—97.