

深水环境试验技术综述

张帅, 杨敏, 吴静

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 系统总结了深水环境模拟试验装备的发展历程以及国内外发展状况, 介绍了深水环境模拟的 2 个关键技术——压力和温度环境模拟技术、测试技术与结构状态评估方法。对深水环境模拟试验技术的工程应用进行了归纳和总结, 对深水环境模拟试验技术的改进方向和发展趋势进行了展望。

关键词: 深水环境; 模拟装备; 压力控制; 水下测试; 状态评估

中图分类号: TJ01

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)05-0041-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.007

Review of the Test Technology for Deep Sea Environment

ZHANG Shuai, YANG Min, WU Jing

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: This paper systematically summarizes the development history and domestic and international development status of deep sea environment simulation test equipment, and introduces two key technologies of deep sea environment simulation: pressure and temperature environment simulation technology, testing technology and structural state evaluation method. The improvement direction and development trend of deep sea environment simulation test technology are prospected.

KEY WORDS: deep sea environment; simulation experiment device; pressure control; measurement in underwater; condition assessment

对鱼雷、潜艇、水下滑翔机等海上武器装备而言, 深水环境是必须经历的正常使用寿命环境。对一些战略武器和常规武器而言, 深水环境是在其生命周期内有可能会遭受的一种异常环境。极端的自然环境条件、事故或人为操作失误等, 都有可能导致武器装备在运输、训练、使用过程中异常坠入深海。以战略武器为例, 从 20 世纪 50 年代美、苏等国开始陆续装备核武

器以来, 出现过多起核武器沉入海底事故^[1-2]。例如, 1965 年 12 月 5 日, 美国海军“提康德罗加”号航空母舰上一架 A-4E“空中之鹰”强击机从航母的升降平台滑入大海, 机上一枚 B43 型 100 万吨氢弹与飞机一起沉入 4850 m 深的海底。1986 年 10 月 6 日, 苏联一艘 Y 级核潜艇在美国东海岸巡逻时, 因一枚导弹发动机故障而发生爆炸, 该艇的 2 个核反应堆和 32 枚

收稿日期: 2021-04-02; 修订日期: 2021-04-17

Received: 2021-04-02; Revised: 2021-04-17

基金项目: 总体工程研究所科技专项资助项目 (2019KJZ05)

Fund: Supported by Science and Technology Special Item of Institute of Systems Engineering (2019KJZ05)

作者简介: 张帅 (1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为环境试验模拟技术。

Biography: ZHANG Shuai (1987—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: environmental test simulation technology.

通讯作者: 杨敏 (1977—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为环境试验模拟技术。

Corresponding author: YANG Min (1977—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: environmental test simulation technology.

引文格式: 张帅, 杨敏, 吴静. 深水环境试验技术综述[J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 041-048.

ZHANG Shuai, YANG Min, WU Jing. Review of the test technology for deep sea environment[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(5): 041-048.

核弹头随艇沉没于 5500 m 深底。另外,一些常规武器、高新装备、放射性物质货包等也面临深水异常环境。如反舰导弹超低空掠海飞行时,海浪引起的高度测定误差可使其坠海^[3]。

水深每增加 100 m,压力增加约 1 MPa。深度每增加 1000 m,温度下降 1~2 °C,2000 m 以下的海水温度几乎就恒定在冰点以上几度范围内。在压力、温度、海水成分的共同作用下,深水环境对武器装备的影响主要体现在以下几方面:引起结构变形,甚至破坏;密封失效,高压海水进入内部,引起电子系统破坏、含能部件的化学反应或其内部组件损坏;长时间浸泡导致结构出现锈蚀或腐蚀,间接导致结构破坏。

对水下武器装备而言,深水环境试验成为水下武器装备研制的必经环节,只有通过开展深水环境适应性试验,才能验证和考核其水下功能、性能是否满足要求。对于面临深水异常环境的武器装备而言,为避免在异常环境下发生损坏、误动作而造成严重后果,需要在系统设计时采取切实可靠的安全保护措施,使得武器能以可预见的安全方式对异常环境作出反应,保持足够的安全性。对这些武器装备开展深水环境异常安全性试验,掌握武器装备在下沉、打捞上浮及长时间超高压海水浸泡过程中可能会出现变形、锈蚀、损坏、密封失效等关键信息,可为相关武器装备的安全性设计、防护与评估工作提供支撑。综上所述,无论是深水环境适应性试验还是异常安全性试验,都对武器装备研制具有重要的作用和意义。

文中对深水环境试验技术进行了综述。首先,介绍了国内外深水环境模拟装备的发展和现状。其次,从压力和温度环境模拟、测试技术与结构状态评估方法两方面对深水环境模拟的关键技术进行了介绍。再次,对深水环境模拟试验技术的工程应用进行了归纳和总结。最后,对深水环境模拟试验技术的改进方向和趋势进行了展望。

1 深水环境模拟试验装备

依托于自然水下环境(湖、海)进行的外场深水环境试验,需配有船只、吊装等设备,还需考虑水域深度、天气、环保等诸多因素的影响,人力、物力成本较高。实验室开展深水环境试验,需要以深水环境模拟试验装备为前提。有了深水环境模拟装备,才能够开展室内耐压结构强度检测、水密性检测、抗疲劳性检验以及异常安全性试验。深水环境模拟试验装备研制过程中,不仅要考虑压力筒的容积和工作压力等参数,而且应根据不同需求,考虑压力筒是否具有可视、可听、温度控制、循环试验、极限卸压和数据采集等功能,以及系统加卸压速率、水密连接器数量和压力精度等参数是否满足要求。深水环境模拟试验装备是高度集成的大型设备,涉及到材料、机械、自动化控制、流体控制等

多个学科领域,不仅是军工领域的重要装备,其应用还可推广到其他深海环境及生物研究、地质勘探等领域。深海环境模拟试验装备的研制以及深水异常环境模拟试验技术的发展,对提升深海战略装备与科技的核心竞争力具有推动作用^[4-5]。

目前,深水环境模拟试验装备在国内外已较为常见。在国外,深水环境模拟装备研制起步较早,美国、日本、意大利、俄罗斯等国家相继利用所研制的深水压力环境模拟试验装备,开展了耐压结构密封检测、水密性检测、抗疲劳检验等研究工作。国内在深水压力模拟装备研制上也取得了长足进步,包括中国科学研究院、中国船舶科学研究中心、上海交通大学、哈尔滨工程大学、天津大学等机构。

1.1 国外深水环境模拟装备

早在 1912 年,意大利制造出了世界上第一个压力容器式的海洋模拟装置,该装置长 71.7 m,内径为 7.93 m,可模拟 91.5 m 的水深,可用于长 61 m、质量为 400 t 的潜水艇的压力试验研究^[6]。

1951 年和 1968 年,美国相继建造了舱体内径为 9.15 m、长度为 22.9 m、试验压力为 4.1 MPa 和内径为 9.15 m、长度为 22.9 m、最大静水压力约为 84 MPa 的试验舱,可用于潜水艇壳体的耐压和疲劳试验。2001 年,美国西南研究院研制的深海模拟器,内径为 1.27 m、长为 7.3 m,可用于测试耐压箱、海底阀等各种近海零部件的性能。目前,美国国家锻造公司已经实现了直径为 0.5~1.0 m,最高压力为 100 MPa 的压力舱的产业化生产。

为了模拟最深的海洋深度,日本 JAMSTEC (Japan Marine Science & Technology Center) 于 1976 年研制的深水模拟高压舱(见图 1),直径为 1.4 m,长度为 3.0 m,最高工作压力为 147 MPa,可用于水下机电设备、壳体、各类材料结构强度及疲劳强度、密封及高压条件下带压操作运动试验^[7-8]。2003 年,日本国家海洋研究所成功研制了多功能深海高压试验系统(见图 2),不仅可以对深海仪器设备进行耐压性能测试,并且实现了温度、二氧化碳和 pH 等多



图 1 日本 JAMSTEC 高压舱水槽本体
Fig.1 JAMSTEC deep-sea high pressure simulator in Japan

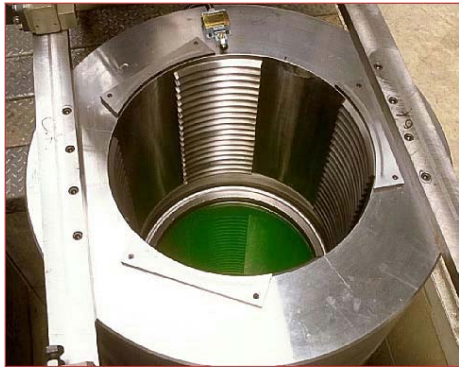


图 2 日本国家海洋研究所多功能深海高压试验系统
Fig.2 Multifunctional deep-sea high pressure at Institute of ocean in Japan

种参数的模拟实验研究^[9]。
俄罗斯的 Krylov 造船研究所于 2012 年开发的深海压力模拟试验装置，内径为 1.8 m，长度为 5.5 m，最高模拟压力可达 150 MPa^[10]。巴西 CENPS 中心高压舱实验室的高压舱（见图 3），长 6 m，直径为 2 m，最大压力为 30 MPa，操作温度为 3~60 ℃。高压舱内设有导轨，用于运送待测海下设备至高压舱内，通过舱壁上的接口进行控制和监测。

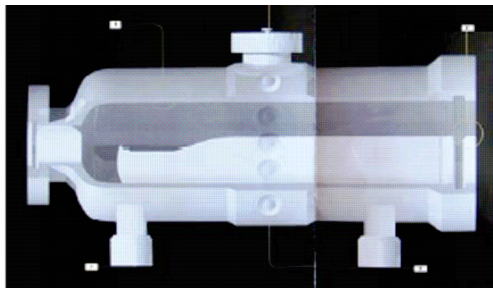


图 3 巴西 CENPS 中心高压舱内部结构
Fig.3 Inner structure of high pressure simulator at CENPS center in Brazil

1.2 国内深水环境模拟装备

自 20 世纪 70 年代末，我国在深水环境模拟装备研制方面也取得了诸多成果。中国船舶科学研究中心，为了研究外压结构物的疲劳问题，研制了水下耐压结构外压疲劳试验系统，并利用该系统开展了疲劳循环试验，得到了许多宝贵的试验数据。2010 年，又成功研制了最高工作压力为 40 MPa，稳压时间长达 180 d 的深海环境模拟试验装置^[11]。在国家 863 计划支持下，沈阳自动化研究所成功研制了内径为 0.5 m，长 2 m，最大压力为 72 MPa 的水压试验系统^[12]，如图 4 所示。中船重工 702 研究所自主研发了内径为 1.5~3 m，压力为 7~90 MPa 的 915 系列水压模拟装置（见图 5），针对石油勘探的壳体结构完成了深水耐压试验^[13]。部分研究机构的深水环境模拟试验装备及其主要指标见表 1^[14-16]。



图 4 沈阳自动化研究所的卧式高压舱
Fig.4 Horizontal type high pressure simulator at Shenyang institute of automation



图 5 中船重工 702 研究所的 915 压力舱
Fig.5 915 pressure simulator at China ship scientific research center

表 1 国内深水环境模拟试验装备			
Tab.1 Test equipment of domestic deep sea environment			
所在单位	最高压力/MPa	内径/m	长度/m
中科院深海所	180	2.8	4
国家海洋基地	90	3	4
哈尔滨工程大学	80	0.6	1.5
上海海洋大学	180	0.3	3
浙江大学	60	3	4
天津大学	43	1.6	11.5
上海交通大学	40	1.0	3.7
同济大学	90	1.5	2.9
中物院总体所	15	1.8	4.5

2 深水环境模拟的关键技术

2.1 压力和温度环境模拟技术

武器装备坠入海水或水下装备升潜过程中，在重力、浮力和流体阻力的作用下，坠落速度动态变化。因此，若要模拟下沉、上浮运动，不仅要求深水环境模拟装备的压力控制系统能够模拟特定深度对应的静态压力环境，还应能够模拟连续变化的动态压力环境。为了模拟海洋不同深度的物理特性，国内多家科研单位在深水环境模拟装备的压力、温度控制方面同步开展了大量的研究工作。

哈尔滨工业大学的李天^[10]采用基于模糊控制理论设计了模糊 PID 控制器,对试压罐内压力突变及缓变的情况进行了仿真实验验证,并采用模糊 PID 控制方法对试压罐内压力的控制进行了实验研究。哈尔滨工程大学的张雷^[17]对因实验试件发生爆破造成系统压力突降而无法快速恢复到目标值的问题,研制了基于气体式蓄能器作为关键元件的压力快速补偿模块,通过仿真分析优化了 PID 控制参数,从而改善该模块的响应速度和跟踪精度,以提高模拟实验装置的压力动态控制性能。张强等^[18]研制了一套模拟压力可以大范围连续变化的实验装置,针对其压力动态控制模块滞后特性问题,提出了相位补偿算法予以解决。

浙江大学的李世伦^[19]针对高温高压超临界极端环境条件下的精细流量水压控制要求,提出了微流量循环流动开放式模拟系统。基于电液比例控制技术,对组成系统的各关键元件的结构设计和特性进行了分析和研究,重点解决了密封与压力增益大的难点。建立了单釜系统的数学模型,并进行了仿真与实验研究。分析了加热控制系统的组成环节与大时滞特点,设计了温度控制系统和控制算法,进行了仿真与实验研究。聂勇等^[20]设计并建立了包含压力传递装置、电液力控制系统等部分的较大密闭容腔水压控制系统。通过分析系统的数学模型,提出“Fuzzy+PID”复合控制策略进行水压控制,获得了较高压力控制精度和压力无失真斜坡跟踪最大速率。

华中科技大学的吴金波^[21]等人研制了一套适用于超大容积压力筒压力控制的加压方案,以体积约为 6 m^3 的高压蓄气罐作为高压流量源,通过高压定量泵向其容腔注水,并对高压气体进行压缩储存能量,通过合理控制注水流量阀以及排水流量阀的开启和关闭实现对压力筒内压力进行控制。实现了对容积约 75 m^3 的大型压力筒 $0\sim 12\text{ MPa}$ 的动态加压实验,加压精度不低于 0.2% 。孙小辉等^[22]针对压力控制的快速性和高精度控制要求,设计了模糊 PID 控制器,并试验验证了所设计控制器具有良好的动、静态压力控制精度。

青岛科技大学的魏晓^[23]在压力舱体外部设置冷却设备,将压力介质冷却完毕后,再泵入容器内部,实现了深海环境下的低温温度模拟。西南交通大学的陈春俊等^[24]设计了一套压力高达 180 MPa 的深海超高压模拟试验装置卸压控制系统,模拟深海设备上升过程中受到的海水载荷作用。建立了模拟试验装置的流体系统模型,通过迭代学习优化算法,对卸压系统进行了仿真模拟,获得了较好的压力追踪结果。中国工程物理研究院总体工程研究所的吴静等^[25]提出了一种深水压试验压力加载过程中的恒温实现方法,设计了一种适用于深水压试验的传压隔热装置,实现了深水压环境模拟试验中压力载荷同步条件下液体温度小范围恒定功能。

2.2 水下测试技术与结构状态评估方法

对于深水异常环境试验,被试对象置于深水环境模拟装置内部,若缺少相应测试技术和结构状态评估技术手段,则无法及时获知被试对象在试验过程中的安全状态。因此,建立适用于深水环境的测试技术和结构状态评估方法,实现对被试对象进行实时监测和评估,是开展武器装备深水异常环境安全性试验的关键环节,具有十分重要的意义。然而,深水异常环境试验可能涉及被试对象内部的多点应力应变、温度、位移、湿度、气压、图像等信号的长时间采集、存储,及其外部的多点应力应变、温度、图像等信号的在线采集、传输。目前,国内外尚没有一套成熟的深水异常环境的测试技术,是有待提升的难点技术。

在水下测试技术方面,由于水的导电性和高压水的强渗透性,水下测试传感器在结构、工艺接口、电缆接口及供电要求等方面不同于常规传感器,需要在密封性、耐压性等方面进行专门设计。另外,受到深水环境模拟舱的密闭性制约,多参量测试信号的在线传输也至关重要。若采用传统台式仪器处理多参量信号,存在测试线缆繁杂、线缆密封防护困难、测试可靠性差等问题^[26]。目前,关于深水异常环境下的测试技术的研究文献和应用案例较少,已经开展的工作有:1)选用抗水压能力好的应变片,采用水下密封绝缘处理,进行深海压力环境模拟装置筒体内部或水下装备外部应变测量^[15,27-28];2)利用电气石激波传感器和高速摄影进行水下爆炸压力测量^[29];3)运用基于拉曼散射的感温光纤,通过泄漏点温度变化实现对泄漏点的定位^[30];4)适用于深水环境的照明和摄像系统的研制^[31-32]。

在结构状态评估方面,将切实可行的传感元件集成到结构中,在线实时地获取与结构健康状态相关的信息(如应力、应变、温度、振动等),结合一定的信号处理方法和结构建模方法,识别引起结构功能降低的损伤或退化,从而评估结构安全与否。目前,常规环境下的监测和评估手段多种多样,包括电阻应变、光纤光栅、振动测试、声发射等,已应用于大型建筑、飞机、船舶等多个领域。其中,应变监测技术是应用最为广泛的结构状态监测技术,可用于承受动载和静载对象,是评估结构安全状态最直接的方法,也是深水异常环境下结构状态监测和评估的最主要方法^[46]。由于传感器是结构状态在线监测与评估系统的最前端,其性能的好坏直接影响到测量结果的准确性和可靠性。传感器一旦出现故障,容易造成试验人员对结构安全状态的误判。然而,应变测量结果不仅受传感器本身性能影响,还受粘贴剂性能、贴合度、潮湿等因素的影响。对于研究锈蚀程度与结构耐压失效关系的长时间深水异常环境试验,应变片在安装或使用一段时间后,其测量准确性难以判定,如何消除因传感器失效造成结构状态评估误判的现象,也是尚

待研究的问题。

如上所述,武器装备深水异常环境试验的监测手段目前十分有限。武器装备在深水异常环境下,壳体萌生裂纹,继而裂纹生长问题,结构变形导致的密封失效问题等,均无成熟的监测和评估方法可循,未见相关研究报道。进一步建立完善的监测技术和探索相应的评估方法,对于完善武器装备深水异常环境试验技术具有重要意义。

3 深水环境模拟试验技术的工程应用

虽然武器装备的深水环境试验方法及关键技术与国家国防安全相关,相关资料很少报道,但是,国内外相关行业依托深水环境模拟装备和试验技术开展的多项研究工作可以作为参考。主要工程应用包括以下几个方面:

1) 水下设备的耐压试验。深海耐压结构失效的形式主要有两种,即屈服和失稳破坏。其中失稳是由结构稳定性不足造成的,而屈服破坏则是由结构强度不足造成的。利用深水环境模拟装备,可以为相关深水设备的研制提供一个稳定的静水压力环境,为其结构设计提供试验验证手段。国内外许多学者针对柱形、球形等耐压潜水器结构,开展了耐压理论、仿真和试验研究^[33-36]。中国工程物理研究院总体工程研究所在战斗部组件设计过程中,基于深水环境试验装备,对某些部组件开展了一些水压试验,检测特定压力下的结构耐压强度和密封性能。一些学者对多种因素影响下深海石油管道屈曲问题开展了研究,对深海石油勘探设备进行了深海环境模拟试验^[37-39]。另外, HY 016.15—1992《海洋仪器基本环境试验方法 水静压力试验》、HY 021.11—1992《海洋仪器基本环境试验方法 水静压力试验导则》、Q/702J1211—2009《水下工程产品耐压及密封性能试验规程》等文件对一些海洋仪器设备的静水压力试验方法作出了规定。

2) 潜艇、水下电机等结构的外压疲劳试验。外压疲劳试验是实现周期性外压的加、卸载,可为潜艇、水下机电设备进行高压条件下的疲劳试验^[40-41]。

3) 放射性物品水浸异常环境试验。根据 GB 11806—2004《放射性物质安全运输规程》及国际原子能机构(IAEA)的《放射性物质安全运输条例》(TS-R-1),放射性物质运输货包首次使用前需经过验证货包经受运输正常条件能力和事故条件能力的试验,其中就包括水浸异常环境试验^[42-43]。上述2个标准对水浸异常环境试验的内容、试验压力和持续时间进行了规定。国内外对放射性物质运输货包均开展过水浸异常环境试验^[44-46]。

4) 水下爆炸试验。利用深水模拟装备开展不同药量、不同加压条件下的水下爆炸试验,通过水下爆炸高速摄影和输出性能测试,研究有限水域的压力边

界对试验结果产生的影响,从而为水下爆炸毁伤性能评估提供依据^[47]。

5) 深海微生物生存特性研究和深海腐蚀特性研究。该类试验多依托于超高压、小容积的深海极端环境模拟装置^[5,19,48-49]。

4 发展趋势及展望

虽然,利用深水环境模拟试验装置,国内外已经开展了很多的研究工作,但笔者认为,深水环境模拟试验技术的改进方向和发展趋势主要有以下几个方面:

1) 深水环境模拟装备的高性能、多功能、智能化和高可靠性。通过建立更高压力、更大容积的深水环境模拟装备,从而满足安全性试验的更高需求。现有深海环境模拟装备以实现对一定水深下的水压和水温模拟为主,系统功能局限在检测设备的耐压性或水密性,未来将向模拟水流扰动、海水成分、pH、二氧化碳及溶解氧含量等多功能方向发展,从而更真实地模拟深海环境。同时,会向着试验状态可视化、自动化、系统高可靠性等高新技术方向发展。

2) 测试手段的多样化。在深水异常环境下的安全性试验测试需求的驱动下,武器装备深水异常环境试验的测试手段和状态评估方法将更加丰富,未来能够实现长周期的稳定测试及结构状态在线监测,实时传输与分析测试系统采集的各种数据,对武器装备的安全性作出准确评估。

3) 试验方法的规范化。随着深水异常环境试验不断受到重视,现有静水压力试验方法已不能满足武器装备的发展需求,试验过程中存在着诸多问题。例如试验压力系数、试验压力下持续时间等参数如何确定,迫切需要开展典型事故场景下的试验条件研究,并开展武器装备的深水异常环境试验方法和标准研究。

4) 试验领域的拓展。国内外对领海安全防务工作和海洋科学研究活动日益重视,鱼雷、水下滑翔机、潜航器等水下武器装备快速发展。目前,对这些水下装备工作过程中排水运动、升潜运动的考核主要在自然宽阔水域完成,所对应的动态压力环境实验室研究较少。原因在于,现有深水环境模拟装备的容积和泄压速率有限,再加上水的压缩性非常小,实验室模拟的边界条件无法与开阔水域的边界条件等效。如何消除压力边界不等效的影响,使得现有试验方法能够应用于水下武器装备的水下动作考核,是未来的研究方向之一。

5 结语

一方面,开展武器装备的深水环境试验,对所关

心的参数进行测量、分析和评估,可以对武器装备的结构设计优化和安全性评估提供支撑,从而为武器装备安全性设计提供试验数据。另一方面,大力发展深水环境模拟试验方法和试验技术,丰富和完善现有实验室水压试验能力,从而替代外场试验,能够降低人力、时间成本,节省开支,且不受外场条件制约,具有显著的经济效益。因此,继续在模拟装备制造、深水环境测试技术、结构状态评估方法等方面开展研究工作,完善现有深水环境试验技术具有重要现实意义。

参考文献:

- [1] 李力钢. 大洋深处的核威胁[J]. 航海, 1993(3): 25.
LI Li-gang. The nuclear threat in the deep ocean[J]. Navigation, 1993(3): 25.
- [2] KRISTENSEN H M, Norris R S. US nuclear forces, 2015[J]. Bulletin of the atomic scientists, 2015, 71(2): 107-119.
- [3] 张金春, 叶振北. 海浪引起的反舰导弹坠海概率分析[J]. 战术导弹技术, 2010(6): 29-32.
ZHANG Jin-chun, YE Zhen-bei. Falling probability analysis of anti-ship missile caused by sea wave[J]. Tactical missile technology, 2010(6): 29-32.
- [4] 高艳波, 李慧青, 柴玉萍, 等. 深海高技术发展现状及趋势[J]. 海洋技术, 2010, 29(3): 119-124.
GAO Yan-bo, LI Hui-qing, CHAI Yu-ping, et al. The development of deep ocean high technology[J]. Ocean technology, 2010, 29(3): 119-124.
- [5] 侯继伟. 深海极端环境模拟平台电液比例压力控制技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
HOU Ji-Wei. Research on the electro-hydraulic proportional pressure control technique of the simulating platform for deep-sea extreme environment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [6] 李超. 深海超高压环境模拟系统的可靠性分析[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2013.
LI Chao. Reliability analysis of deep-sea ultra-high pressure environment simulation system[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, 2013.
- [7] 沈国鉴, 胡勇, 殷俊, 等. 2000m 多用途深海环境模拟装置的可靠性分析[J]. 上海交通大学学报, 1990, 24(4): 17-25.
SHEN Guo-jian, HU Yong, YIN Jun, et al. Reliability analysis of multi-purpose 2000m deepsea environment simulation equipment[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1990, 24(4): 17-25.
- [8] MCINROY J E, NEAT G W, O'BRIEN J F. A robotic approach to fault-tolerant. Precision pointing[J]. IEEE robotics & automation magazine, 1999, 12(6): 24-31.
- [9] 刘淮. 国外深海技术发展研究[J]. 船艇, 2006, 10(258): 6-22.
LIU Wie. Research on development of overseas deep ocean technologies[J]. Ships & yachts, 2006, 10(258): 6-22.
- [10] 李天. 深海压力环境模拟试验装置及其恒压控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LI Tian. Research on the deep-sea pressure environmental simulation test device and its constant pressure control system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [11] 耿立平. 大型压力筒的压力控制试验系统研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
GENG Li-ping. Development of a experimental system for the pressure control of a large pressure cylinder[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [12] 刘福康. 72 MPa 深海模拟试验压力装置研制成功[J]. 船舶工业技术经济信息, 1995(1): 5.
LIU Fu-kang. The 72 MPa deep-sea pressure simulator has been successfully developed[J]. Technology and economy information of shipbuilding, 1995(1): 5.
- [13] 吴世伟, 李国骥, 宋祥春. 深海高压试验罐制造技术[J]. 压力容器, 2008, 25(6): 35-36.
WU Shi-wei, LI Guo-ji, SONG Xiang-chun. Technics investigation of high-pressure test pot in blue-water[J]. Pressure Vessel Technology, 2008, 25(6): 35-36.
- [14] 张海龙, 钟国睿, 朱志伟. 深海装备的静水压力试验技术[J]. 船舶与海洋工程, 2019, 35(5): 14-19.
ZHANG Hai-long, ZHONG Guo-rui, ZHU Zhi-wei. Hydrostatic pressure test technology for deep-sea equipment[J]. Naval architecture and ocean engineering, 2019, 35(5): 14-19.
- [15] 赵洪洋. 深海压力环境模拟装置水压试验研究[J]. 无线互联科技, 2018(6): 104-110.
ZHAO Hong-yang. Research on the hydrostatic test of deep-sea pressure environmental simulation device[J]. Wireless Internet Technology, 2018(6): 104-110.
- [16] 吴建美. 深海压力模拟试验装置的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
WU Jian-mei. Research on the deep-sea pressure simulation test device[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [17] 张雷励. 深海环境模拟试验技术研究及试验装置研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
ZHANG Lei-li. Research on simulation technology of deep sea environment and development of simulation experiment device[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [18] 张强, 张雷励, 张铭均. 深海环境模拟实验装置及压力动态控制技术[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(11): 1565-1572.
ZHANG Qiang, ZHANG Lei-li, ZHANG Ming-jun. Experiment devices for simulating a deep-sea environment and dynamic pressure control technology[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(11): 1565-1572.
- [19] 李世伦. 深海超临界高温高压极端环境模拟与监控技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

- LI Shi-lun. Research on simulating and control techniques for deep-sea high-temperature and high-pressure extreme environment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [20] 聂勇, 王庆丰, 唐建中. 较大密闭容腔的高精度水压控制[J]. 浙江大学学报, 2011, 45(10): 1811-1826.
- NIE Yong, WANG Qing-feng, TANG Jian-zhong. High precision pressure control in large closed water volume[J]. Journal of Zhejiang University, 2011, 45(10): 1811-1826.
- [21] 吴金波, 梅洪, 李维嘉. 基于增益调度的大压力筒压力跟踪控制[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(6): 9-14.
- WU Jin-bo, MEI Hong, LI Wei-jia. Pressure tracking control of a large pressure chamber based on gain-scheduling[J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(6): 9-14.
- [22] 孙小辉, 李维嘉, 曹和云. 基于模糊 PID 的压力筒动态保压系统[J]. 中国舰船研究, 2014, 9(1): 127-131.
- SUN Xiao-hui, LI Wei-jia, CAO He-yun. A dynamic pressure packing system based on fuzzy PID[J]. Chinese journal of ship research, 2014, 9(1): 127-131.
- [23] 魏晓. 深海高压环境模拟系统的设计与研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2014.
- WEI Xiao. The design and research of the deep ocean simulation system[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2014.
- [24] 陈春俊, 周建容, 杨槐, 等. 深海超高压模拟装置卸压系统设计与仿真[J]. 中国测试, 2018, 44(2): 67-71.
- CHEN Chun-jun, ZHOU Jian-rong, YANG Huai, et al. Design and simulation of deep sea ultrahigh pressure simulator pressure relief system[J]. China measurement & test, 2018, 44(2): 67-71.
- [25] 吴静, 张帅, 汤朋朋, 等. 一种适用于深水压试验的传压隔热装置设计[J]. 装备环境工程, 2019, 16(2): 12-15.
- WU Jing, ZHANG Shuai, TANG Peng-peng, et al. Design of pressure transmission and heat insulation device for deepsea pressure test[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(2): 12-15.
- [26] 陈栋, 郑宾, 郭慧斌. 某载体水下存储测试系统的设计[J]. 工业技术创新, 2015, 2(5): 538-541.
- CHEN Dong, ZHENG Bin, GUO Hui-bin. Design of underwater vehicle storage test system[J]. Industrial technology innovation, 2015, 2(5): 538-541.
- [27] CHEUNG Yin-nee, ZHU Yun, CHENG Ching-hsiang, et al. A novel fluidic strain sensor for large strain measurement[J]. Sensors and actuators A, 2008, 147: 401-408.
- [28] 赵政飞. 焊接式水下应力测量方法及装置的研究[D]. 广西: 广西大学, 2012.
- ZHAO Zheng-fie. Research on weldable method and device for stress measurement in underwater[D]. Guangxi: Guangxi University, 2012.
- [29] 曹慧军, 崔航, 胡欣, 等. 海底管道在线监测技术及水下光纤的应用[J]. 石油矿场机械, 2014, 43(8): 73-77.
- CAO Hui-jun, CUI Hang, HU Xin, et al. On-line monitoring technology of subsea pipeline and its installation of subsea optic fiber[J]. Oil field equipment, 2014, 43(8): 73-77.
- [30] 张彦敏, 谢仁富, 陈兵. 水下高速摄像与照明系统[J]. 船舶科学技术, 2013, 35(6): 109-112.
- ZHANG Yan-min, XIE Ren-fu, CHEN Bing. Development of the underwater high-speed camera and lighting system[J]. Ship science and technology, 2013, 35(6): 109-112.
- [31] 张东霄, 李波, 范勇, 等. 深海高清摄像系统及多金属结核图像处理与统计[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(34): 227-232.
- ZHANG Dong-xiao, LI Bo, FAN Yong, et al. Camera system in deep sea and image processing system for seabed mineral resources[J]. Science technology and engineering, 2016, 16(34): 227-232.
- [32] 杨伟华. 深海耐压结构健康监测与在线评估技术研究[D]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2018.
- YANG Wei-hua. Structural health monitoring and online assessment of deep sea pressure structure[D]. Wuxi: China Ship Research & Development Academy, 2018.
- [33] 高杰. 深海球形耐压壳力学特性及试验研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
- GAO Jie. Investigation on mechanical properties of deep sea spherical pressure hull and experimental study[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017.
- [34] 张建, 高杰, 王纬波, 等. 深海球形耐压壳力学特性研究[J]. 中国造船, 2015, 56(4): 129-140.
- ZHANG Jian, GAO Jie, WANG Wei-bo, et al. Investigation on mechanical properties of deep sea spherical pressure hull[J]. Shipbuilding of China, 2015, 56(4): 129-140.
- [35] 李文跃, 王帅, 刘涛, 等. 大深度载人潜水器耐压壳结构研究现状及最新进展[J]. 中国造船, 2016, 57(1): 210-221.
- LI Wen-yue, WANG Shuai, LIU Tao, et al. Current status and progress on pressure hull structure of manned deep submersible [J]. Shipbuilding of China, 2016, 57(1): 210-221.
- [36] 陈猛. 耐压壳体结构的静动力学计算与可靠性分析[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2015.
- CHEN Meng. Static and dynamic calculation and reliability analysis of pressure shell structure[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2015.
- [37] 余建星, 卞雪航, 余杨, 等. 深水海底管道全尺寸压溃试验及数值模拟[J]. 天津大学学报, 2012, 45(2): 154-159.
- YU Jian-xing, BIAN Xue-hang, YU Yang, et al. Full-scale collapse test and numerical simulation of deepwater pipeline[J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(2): 154-159.
- [38] CORONA E, KYRIAKIDES S. On the collapse of inelastic tubes under combined bending and pressure[J]. International journal of solids and structures, 1988, 24(5): 505-535.
- [39] SAKAKIBARA N, KYRIAKIDES S, CORONA E. Col-

- lapse of partially corroded or worn pipe under external pressure[J]. International journal of mechanical sciences, 2008, 50(12): 1586-1597.
- [40] 谢锡南, 潘森涛, 沈永新, 等. 水下耐压结构外压疲劳试验系统研制[J]. 船舶力学, 2000, 4(2): 44-50.
XIE Xi-nan, PAN Shen-tao, SHEN Yong-xin, et al. Development of experimental system for external pressure fatigue tests of underwater pressure structures[J]. Journal of ship mechanics, 2000, 4(2): 44-50.
- [41] 王欣. 水下结构物环境载荷分析及疲劳损伤机理研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
WANG Xin. Study on fatigue damage evolution of offshore platform structures under ocean environmental loads[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [42] GB 11806—2004, 放射性物质安全运输规程[S].
GB 11806—2004, Regulations for the safe transport of radioactive material[S].
- [43] TS-G-1.1 (ST-2), Advisory material for the iaea regulations for the safe transport of radioactive material[S].
- [44] 汪佳明. 解读《放射性物质安全运输规程》GB 11806—2004 中的货包试验[J]. 辐射防护, 2009, 29(5): 346-351.
WANG Jia-ming. Summing-up and explanation of package tests in GB 11806—2004 "Regulations for the safe transport of radioactive material"[J]. Radiation protection, 2009, 29(5): 346-351.
- [45] 张建岗, 李国强, 孙洪超, 等. 放射性物品运输容器试验验证经验总结[J]. 辐射防护, 2018, 38(5): 422-427.
ZHANG Jian-gang, LI Guo-qiang, SUN Hong-chao, et al. Safe test experience on radio active material transport packages[J]. Radiation Protection, 2018, 38(5): 422-427.
- [46] 李国强, 王学新, 赵兵. 美国放射性物质货包试验技术简介[J]. 辐射防护, 2008, 28(5): 329-334.
LI Guo-qiang WANG Xue-xin, ZHAO Bing. American test technology for the transport of radioactive packages[J]. Radiation protection, 2008, 28(5): 329-334.
- [47] 李琳娜. 水介质爆炸容器动力响应分析与实验研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2013.
LI Lin-na. Dynamic responses analysis and experimental study on the water medium explosion vessels[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2013.
- [48] PEKKA P. Effect of deep sea environment on corrosion of some aluminum alloys[R]. Finland VTT Offsetpaino: Espoo Research Reports 724, 1991.
- [49] 董贤信, 蒋凯, 陈杭, 等. 深海极端环境模拟装置设计[J]. 热带海洋学报, 2014, 33(2): 101-108.
DONG Xian-xin, JIANG Kai, CHEN Hang, et al. A design of deep-sea extreme environment simulator[J]. Journal of tropical oceanography, 2014, 33(2): 101-108.