

预应力钢丝缠绕的框架式技术在深海压力试验装置中的运用

蒋磊¹, 辛洋^{1, 2}, 杨槐³, 吴国庆⁴

- (1. 中国科学院深海科学与工程研究所, 海南三亚 572000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 四川航空工业川西机器有限责任公司, 四川雅安 625000;
4. 中国船舶科学研究中心, 江苏无锡 214082)

摘要: 本文介绍了预应力钢丝缠绕的框架式技术在我国深海压力试验装置中的首次运用。中科院深海科学与工程研究所与四川航空工业川西机器有限责任公司利用该技术成功研制了一套 200MPa 中型超高压试验装置, 该装置为国内相关科研机构研制的钛合金载人球壳缩比件、浮力材料及无人潜水器开展了相关的压力测试, 取得了良好的运用效果, 表明预应力钢丝缠绕的框架式技术相比传统的一体式压力筒在大容积、超高压装备研制方面具有明显的技术优势。

关键词: 预应力钢丝缠绕; 深海; 压力试验装置

中图分类号: TH137

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2016)06-0577-05

引言

地球上的海洋有接近 90% 的面积是水深超过 1000 米的深海, 深海中蕴藏着丰富的油气、矿产、生物等战略资源。随着科学技术水平的发展, 人类已经越来越认识到海洋 (特别是深海) 是人类社会实现可持续发展的战略空间和资源宝库。我国也已充分意识到开展海洋科学研究、发展海洋技术的重要性, 党的“十八大”已经把建设海洋强国上升为国家战略。

海洋环境的特殊性, 使人类认识和开发利用海洋必须依赖探测技术和运载装备。深海环境最重要的特征之一就是存在高静水压力, 水深每增加 10 米则压力增加 1 个大气压。这一特征决定了深海探测及运载仪器和装备与运用于陆地、太空的各类技术装备不同, 其研制和运用过程必须考

虑到压力的影响, 因此压力试验是深海仪器设备研发中至关重要的一环, 深海压力试验装置作为专门的实验设备, 是开展深海技术与装备研究中必不可少的支撑系统。以最具代表性的深海运载设备载人潜水器为例, 其核心关键技术——载人球壳必须通过与设计工作深度相匹配的压力试验, 才能符合运用要求。

1 深海压力试验装置的技术现状

国外在深海压力试验系统方面的研究起步比较早, 检测技术水平相对较高, 其中代表性的国家有美国、日本、俄罗斯、法国等, 这些国家针对各类深水作业装备的压力测试需求开展了海洋压力模拟实验装备的研制。

美国于 1951 年研制了一套规格较大的压力装置, 该装置长 22.9m, 内径 9.15m, 试验压力

4.2MPa。1970 年左右,美国海军船舶研究与发展中心的安纳波利斯实验室研制了一套深海模拟试验装置,长 8.22m,内径 3.0m,最大工作压力 83MPa。日本对深海的研究与开发也比较早,最具代表性的是日本科学技术中心于 2010 年研制的压力试验装置,有效高度 3.0m,内径 1.4m,最大工作压力 147MPa。俄罗斯 Krylov 造船研究院拥有一系列深海压力试验装置,包括前期曾承担了我国“蛟龙号”载人潜水器载人球壳耐压试验的装置,其 DK-600 型装置有效长度 9.5m,内径 3.2m,最大试验压力 100MPa,属于国际海洋领域内较大型的压力试验装置^[1-4]。

国内在深海模拟试验装置方面的研究起步相对较晚,但是发展速度较快。我国对深海压力模拟装置研究的主要机构包括中国船舶重工集团公司、上海交通大学、中国科学院、哈尔滨工程大学等。

中国船舶重工集团公司第七〇二研究所(简称 702 所)是我国较早从事深海压力环境模拟装置的研制和应用的单位,其深海压力环境模拟装置的规格以及技术能力均处于国内领先水平。2010 年,702 所联合其他单位,为国家深潜基地研制了内径 1.6m、高 3.0m、工作压力 90MPa 的深海压力环境模拟实验系统。“十二五”期间,在国家 863 计划的支持下,702 所建成了目前国内综合试验能力最强的超高压试验装置(内径 3.0m、最大工作压力 90MPa)^[5]。

综观国外的深海模拟试验装置,不难发现,主要深海技术强国都建立了与深海技术装备同步发展的试验装置,保障了深海技术装备压力测试的需求。然而,前述海洋强国的压力试验装置均研制于 20 世纪,多采用与框架式相区别的筒体整体成型焊接的方式(俗称一体式压力筒)。

2 深海压力试验装置的需求趋势

近年来,随着海洋工程技术的进步,地球最神秘未知的领域——海斗深渊正在成为国际地球

科学尤其是海洋科学最新的研究前沿。海斗深渊简称深渊,专指海洋中深度大于 6000 米的海沟区域,它们是迄今人类知之极少、难以企及的海底区域^[6]。深渊体系被认为是驱动地球系统地质、生命、环境演化的关键一环,也被认为是最有可能出现重大科学突破的研究领域^[7-9]。

美国、日本、英国、法国、新西兰等国已提出了相应的深渊研究计划(例如,日本和英国资助的 HADEEP 计划、美国基金会支持的 HADES 计划等),并正在持续地投入研究^{[8][10]}。基于深渊科学研究计划的需求,日本、美国、英国等发达国家也在同步开展全海深载人潜水器的技术攻关,特别是日本现已进入冲刺阶段,极有可能在近几年就完成全海深潜水器的研制工作。

在新一轮的深海前沿国际竞争中,我国与国际同行正处在同一起跑线上。2014 年 4 月,中国科学院启动了先导专项(B)“海斗深渊前沿科技问题研究与攻关”(简称海斗深渊先导专项),是我国首个系统的深渊科技研究计划,计划中明确提出了开展全海深关键瓶颈技术研究的任务。2016 年 6 月,科技部正式发布了国家重点研发计划“深海关键技术与装备”重点专项,计划重点突破制约我国在深海领域发展能力的深海运载、探测、战略资源开发等核心共性关键技术,并计划在“十三五”期间实现全海深载人及无人潜水器的下潜。

学界一般将全球海洋最深处(马里亚纳海沟的挑战者深渊)的水深视为全海深,简化换算后的模拟实验压力为 110MPa。不同深海仪器装备的压力测试其安全系数取值不同,如果参照 1.5 倍的安全系数,则压力试验装置的工作压力至少需要达到 165 MPa 才能完全满足全海深测试的需要。

然而,通过系统梳理国际上已经研制的深海压力试验装置,尚未发现工作压力超过 160MPa、同时容积能满足科考型潜水器载人球壳的设备。分析其原因,一方面国际上全海深载人潜水器的研制近年来才被提上日程(詹姆斯·卡梅隆 2012

年试验的 DEEP CHALLENGE 属于单人探险性潜水器,其载人球舱的体积和技术要求均低于科考型载人潜水器),因此相应配套的大容积、超高压试验装置尚未立项研制。另外一方面,从技术角度出发,目前海洋工程领域传统的筒体整体成型焊接的结构形式,在研制大容积、超高压力的试验装置时具有较高的技术风险:1)难以克服应力集中的问题,特别是端盖与筒体的密封连接处,不管是抱箍式、卡环式,还是抗剪切环式等密封方式,均可能存在超过一定工作压力时连接处受力断裂的风险;2)根据力学计算,设计的工作压力越高则筒体的厚度越大,超过一定的厚度范围则一体式压力筒的锻造、焊接均存在很高的技术风险和难度。

因此,为了满足全海深背景下大容积、超高压力的测试需求,如何将新的超高压技术引入海洋技术领域已经成为学界共同关注的问题。

3 预应力钢丝缠绕的框架式技术简介

如将视野不局限于筒体整体成型焊接的技术方式,则预应力钢丝缠绕的框架式技术在大型深海超高压试验装置的研制方面非常具有借鉴意义。预应力钢丝缠绕的框架式技术最早出现于20世纪初期,采用该项技术生产的压力装备主要运用于硬质合金、钨钼难熔材料、耐火材料、石墨碳素、陶瓷材料等粉末制品的受压成型,在食品杀菌、中医药提炼等方面也具有一定的运用潜力^[11]。

这类设备的工作原理是基于帕斯卡定律,即:作用在静态液体或气体上的外力所产生的静压力将均匀地在各个方向上传递。为了与传统的机械模压工艺(如六面顶压机)相区别,业内一般称其为“等静压机”。根据传压介质的工作温度不同,使用常温液态传压介质的设备被称为冷等静压机,使用高温气态传压介质的设备被称为热等静压机^[12]。实际上,海洋工程领域传统的一体式压力筒的工作原理与冷等静压机并无区别,均使用液体传压介质以实现受压物体各相均匀承压,只是在主机的力学

结构上存在区别(图1)。因此,为与一体式压力筒相区别,海洋工程领域使用“预应力钢丝缠绕的框架式技术”,而不用“等静压”这一名称。

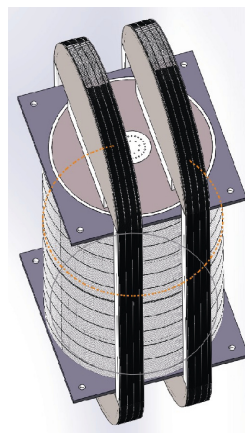


图1 预应力钢丝缠绕的框架式技术结构示意图

如图1所示,框架式结构的主体部分由筒体和框架构成,装置承压被分解成两部分,筒体承受径向压力,框架承受轴向力,这就极大地简化了筒体的受力状况,而一体式压力筒既承受径向压力又承受轴向压力,在同样的容积条件下,预应力钢丝缠绕的框架式结构具有更高的承压潜力。此外,图1所示装置的筒体、框架均采用了预应力钢丝缠绕的结构,即利用预应力钢丝对筒体、框架按设计要求的载荷逐层缠绕,最后在筒体、框架立柱、半圆梁形成了所需要的预加应力。预加应力使得超高压装置即使处于最高工作压力状态,其筒体和框架仍存在残余压应力,处于压应力状态,不会出现拉应力。以上技术特点,决定了预应力钢丝缠绕的框架式超高压装置在工作过程中的应力变化幅值小,筒体、框架的承载能力强、疲劳抗力高且结构紧凑、重量轻。

4 预应力钢丝缠绕的框架式技术在深海压力试验装置中的运用

在预应力钢丝缠绕的框架式技术领域,目前世界上仅有少数几个工业强国具备研制生产大吨位、大规格超高压装置的技术能力,如美国

AVURE 技术公司、比利时 EPSI 公司、日本神戸制钢所、俄罗斯第一重型机械厂和德国迪芬巴赫公司。美国 AVURE 公司（原瑞典 ASEA 公司，是国际上最早开始相关技术研究和运用的企业）是全球相关装备制造行业的标杆企业^[12]，中国的四川航空工业川西机器有限责任公司（简称川西公司）是国内综合实力最强的单位。

经过充分的技术论证，在中国科学院战略性先导科技专项（B 类）项目课题“控温式压力试验装置”的支持下，中国科学院深海科学与工程研究所（简称深海所）决定将预应力钢丝缠绕的框架式技术引入到海洋工程技术领域，替代传统的一体式压力筒结构形式，联合川西公司开展了中型超高压试验装置的技术攻关，试验装置的主要技术指标为内径 0.8m、有效筒深 2.5m、最高工作压力 200MPa（图 2）。2015 年年底，该装置通过了第三方验收，最高试验压力达到 220MPa，整体技术组合指标达到国内最高水平。



图 2 中科院深海所与川西公司联合研制的 200MPa 中型超高压试验装置

该装置采用了预应力钢丝缠绕的框架式结构技术来设计主机系统，但与粉末成型等工业领域的运用需求不同，深海压力试验装置有其自身的特殊要求。因此，设备研发过程中对于传压介质、保压时间、信号采集等技术环节进行了相应的调整和技术改进（表 1）。

目前该装置已为中国科学院金属研究所研制的 500mm 钛合金载人球舱缩比件开展了 200MPa

（图 3）的静水外压试验^[13]，也为中国科学院理化所、沈阳自动化所研制的浮力材料及全海深无人潜水器开展了相关的压力测试^[14]，均取得了良好的运用效果。

表 1 200MPa 中型超高压试验装置与传统冷等静压机的区别

技术环节	传统冷等静压机	200MPa 中型超高压试验装置
传压介质	油、乳化液	淡水
保压时间	短	根据测试需要，24h 或更长
加卸载系统	加压速率高	加卸载过程中可分段设定压力台阶数、加卸载速率、保压压力、保压时间，系统自动按设定程序完成加压过程
筒体内信号引出	无	通过水密连接器引出
高压阀件及管路	普通耐压钢材	不锈钢材料
其他	上端盖与筒体间距较短	根据测试需要进行调整



图 3 钛合金载人球舱缩比件静水外压试验

5 结语

预应力钢丝缠绕的框架式技术是国际工业领域在大容积超高压装置研制方面的一项成熟技术，但主要被运用于粉末成型等工业领域。中科院深海所与川西公司联合，首次将该技术运用到了海洋工程领域，研制的 200MPa 中型超高压试验装置取得了良好的运用效果，证明了该技术在 大容积、超高压的深海模拟试验装备研制方面具有明显的技术优势和运用潜力。在此基础上，为

了保障“十三五”期间全海深载人潜水器研制任务的完成,国家重点研发计划“深海关键技术与装备”重点专项中设置了“深海大型超高压模拟试验装置”项目,将利用预应力钢丝缠绕的框架式技术研制更大型的壓力試驗裝置(內徑2.8m,有效高度4.0m,工作壓力180MPa),為全海深潛水器載人球殼的壓力測試提供支撐。預應力鋼絲纏繞的框架式技術在深海壓力試驗設備研製中的成功運用也揭示了打破行業壁壘、開展學科交流對於技術創新的重要意義。

参考文献

- [1] 刘淮. 国外深海技术发展研究[J]. 船艇, 2006, 10: 6-22.
- [2] 徐芑南, 张海燕. 蛟龙号载人潜水器的研制及应用[J]. 科学, 2014, 66: 11-13.
- [3] 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: 35-36.
- [4] 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.
- [5] 卞如冈, 潘广善, 沈永春, 等. “深海超高压环境模拟与检测装置”技术总结报告[J]. 科技咨询, 2016, 3: 170.
- [6] Wolff T. The concept of the hadal or ultra-abyssal fauna[J]. Deep-sea Research, 1970, 17: 983-1003.
- [7] Jamieson A J, Fujii T. Hadal trenches: the ecology of the deepest places on Earth[J]. Trends In Ecology & Evolution, 2010, 25: 190-197.
- [8] Jamieson A J, Fujii T. Trench connection[J]. Biology Letters, 2011, 7: 641-643.
- [9] Ohara Y, Reagan M K, Fujikura K, et al. A serpentinite-hosted ecosystem in the Southern Mariana Forearc[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109: 2831-2835.
- [10] Jamieson A J, Fujii T, Solan M, et al. HADEEP: Free-Falling Landers to the Deepest Places on Earth[J]. Marine Technology Society Journal, 2009, 43: 151-157.
- [11] 朱志斌, 田雪冬. 等静压技术的运用与发展[J]. 现代技术陶瓷, 2010, 123: 7-24.
- [12] 刘慧渊, 何如松, 周武平. 热等静压技术的发展与运用[J]. 新材料产业, 2010, 11: 12-17.
- [13] 雷家峰, 马英杰, 杨锐, 等. 全海深载人潜水器载人球壳的选材及制造技术[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2016, 8: 179-184.
- [14] 王平, 严开祺, 潘顺龙, 等. 深水固体浮力材料研究进展[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2016, 8: 223-229.

Application of Pre-stressed Steel Wire-winding Frame Technology in Deep-sea Hydrostatic Pressure Testing Equipment

Jiang Lei¹, Xin Yang^{1,2}, Yang Huai³, Wu Guoqing⁴

(1. Institute of Deep-sea Science and Engineering, CAS, Sanya, Hainan 572000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Sichuan aerospace industry Chuanxi machine Co., Ltd, Ya'an, Sichuan 625000, China;

4. China Ship Scientific Research Center, Wuxi, Jiangsu 214082, China)

Abstract: This paper introduces the first application of the technology of pre-stressed steel wire-winding frame in constructing hydrostatic pressure testing equipment for the environment simulation of deep-sea. In December 2015, a 200 MPa medium size ultrahigh pressure cylinder (0.8 m in diameter, 2.5 m in height) was tested experimentally, and the technical indicators met the requirements, which was operated by institute of deep-sea science and engineering, CAS and Sichuan aerospace industry Chuanxi machine Co., Ltd. Then it provided full ocean depth pressure testing support for scaled model of titanium alloy personnel hull, buoyancy material and unmanned underwater vehicle. The results of all the experiments show that the technology of pre-stressed steel wire-winding frame has apparent advantages in constructing large volume and ultrahigh pressure testing equipment compared with traditional technology.

Keywords: pre-stressed steel wire-winding; deep-sea; hydrostatic pressure testing equipment