

一种适用于深水压试验的传压隔热装置设计

吴静, 张帅, 汤朋朋, 杨敏

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: **目的** 真实高效地进行深水压环境的温度模拟。**方法** 提出一种深水压试验压力加载过程中的恒温实现方法, 通过开展基于皮囊的结构设计、密封性设计、导热性研究等工作, 设计一种适用于深水压试验的传压隔热装置, 对其进行理论分析和仿真计算。**结果** 该装置可以实现液体温度在较长时间内基本恒定, 具有良好的传压隔热性能。**结论** 在建立的实验系统上进行了试验研究, 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, 该技术为深水压环境试验的相关技术研究提供了技术储备。

关键词: 深水压; 水压控制; 恒温模拟

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.02.003

中图分类号: TJ01

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)02-0012-04

Design of Pressure Transmission and Heat Insulation Device for Deepsea Pressure Test

WU Jing, ZHANG Shuai, TANG Peng-peng, YANG Min

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: **Objective** To simulate deep water pressure environment realistically and effectively. **Methods** A method for realizing the constant temperature in the pressure loading process of deepsea pressure test was proposed to simulate the temperature of deepsea pressure environment. A device with the function of pressure transmission and heat insulation for deepsea pressure test was designed, based on the study of structure design, sealability design and thermal conductivity of the bladder. The theoretical analysis and simulation calculations of the device were carried out. **Results** The device could achieve the basic constant temperature of the liquid for a long time, and had good pressure transmission and heat insulation performance. **Conclusion** The experimental research is carried out on the established test system to realize a small range of constant liquid temperature under the condition of pressure load synchronization in the deep water pressure environment simulation test. This technology provides technical reserves for related technical research in deep water pressure environmental test.

KEY WORDS: deepsea pressure; water pressure control; constant temperature simulation

随着深海探索技术的发展, 深海作业设备面临着海洋环境的考验, 其安全性和可靠性要求不容忽视。通过深水压力环境试验检测设备的性能是目前最常用的测试方法。海洋环境中, 海水压力随深度的增加而增加, 而海水温度随深度的增加而下降。为了真实地再现物体入海所承受的压力和温度, 需开展深水环境试验压力动态加载和温度控制技术研究。文中设计

了一种适用于深水压试验的传压隔热装置, 以实现深水压力环境模拟试验中在压力载荷同步条件下液体温度小范围恒定功能。

1 传压隔热装置设计

深水压环境模拟试验装置主要由试验舱(压力

收稿日期: 2018-11-23; 修订日期: 2019-01-04

基金项目: 中物院总体所创新与发展基金(2017cxj41)

作者简介: 吴静(1989—), 女, 四川人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电气控制、环境试验技术等。

舱)、增压系统、数据采集控制系统组成。试验件置于试验舱内,控制系统通过增压装置对试验舱进行注水加压,由于试验舱容积大,且存在温度耗散大、效率低的弱点,导致对整个试验舱进行水温控制难度较大。文中设计的传压隔热装置可根据被试件的体积进行设计,将试验件和传压隔热装置整体置于试验舱中进行深水压模拟试验,如图 1 所示。

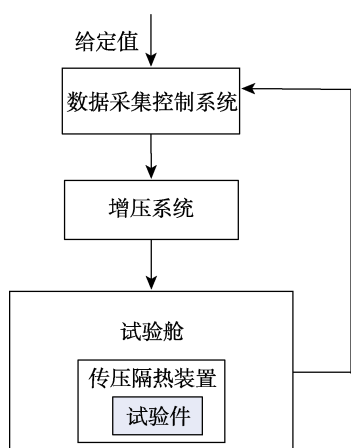


图 1 水压控制系统总体结构

1.1 压力传递装置结构设计

压力传递装置主要将试验舱中的压力传递给被试件,实现压力传递作用的同时起到隔离作用。结构如图 2 所示,该压力传递装置由圆筒状开口皮囊与端盖构成。皮囊具有柔韧性好,弹性变形内可迅速恢复,且压力传递时不易产生振动等特点,因此选用皮囊作为压力传递装置的主要介质。端盖材质为 45#钢,可用于被试件的固定安装,端盖表面设置进水孔、测试信号线穿舱孔、吊装孔等。圆筒状开口皮囊和端盖的设计形式具有被试件安装可靠、内部空间能得到充分利用等优点,皮囊与端盖之间通过法兰夹持实现密封性设计。

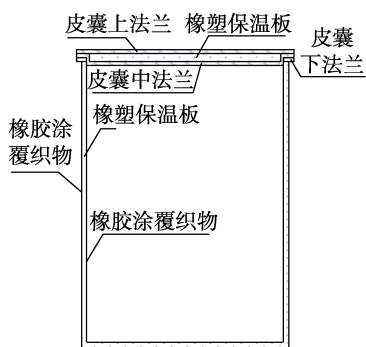


图 2 压力传递装置结构

1.2 皮囊分析与选型

水的体积弹性模量很大,几乎不可压缩。将皮囊

内注满液体并密封,试验时压力传递装置为一闭式容腔。皮囊作为压力传递的弹性敏感单元,当试验舱加压时,即皮囊外部压力大于内部压力,皮囊收缩,皮囊内压力升高,直到与外压平衡;反之,当试验舱降压时,皮囊内压力也随之降低,直到与外压相等。试验压力加载过程中,皮囊本身几乎不承受压力。皮囊自身具有减震性能,压力传递精度高、无冲击。

皮囊容腔内介质的体积变化量计算公式为:

$$\Delta V = \frac{\Delta p \cdot V}{E_c} \quad (1)$$

式中: ΔV 为闭式容腔内液体的体积变化量; Δp 为压力变化量; V 为闭式容腔内液体的总体积; E_c 为容腔内液体的有效弹性模量。其中,容腔内液体的有效弹性模量 E_c 计算公式为:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_l} + \frac{V_g}{V} \frac{1}{E_g} \quad (2)$$

式中: E_l 为容腔内液体的体积弹性模量(自来水为 2100 MPa); V_g 为容腔内液体所含的气体(自来水 $V_g/V=3 \times 10^{-5}$); E_g 为气体的绝热体积弹性模量($E_g=1.4p$)。

若取试验初始压力 $p=0.1$ MPa, 试验最大压力为 8 MPa, 皮囊容腔有效体积为 118 L, 介质为自来水, 由式(1)、式(2)可计算得皮囊容积变化 ΔV 约为 0.6 L (0.5%)。

皮囊材质采用氯磺化聚乙烯橡胶材料,它是一种以聚乙烯为主链的饱和弹性体,具有优异的耐臭氧性、耐热性、难燃性、耐水性、耐油性、耐磨性等。在皮囊内注满液体并密封的情况下,8 MPa 外压力下不会发生破坏,能够起到传压的作用。

此外,皮囊内的液体介质不限于自来水,可以根据试验要求进行更换,试验介质的灵活性增加,可为被试件提供更真实的模拟环境。

2 保温设计

皮囊本身的保温能力有限,且金属端盖的导热性能较强。为提高传压装置的隔热性能,圆筒状皮囊和端盖均设计为三明治结构,分别在皮囊和端盖中间夹层中填充保温材料。保温材料应满足以下要求:低导热系数;具有一定的柔性和强度,不能影响压力传递效果;经济实惠、无毒无害、易塑形、易加工等特点。

2.1 保温材料

橡塑保温材料是弹性闭孔弹性材料,具有柔软、耐寒、耐热、阻燃、导热系数低、减震等优良性能,已被广泛应用于建筑、化工、冶金、车辆、电器等行业,能达到降低冷损和热损的效果,是高品质的绝热保温材料。

2.2 工程传热计算

该隔热装置可等效为多层平壁传热计算,令平壁的厚度为 δ ,平壁两侧温度为 t_1 的热流体和 t_2 的冷流体,则热量从热流体传到冷流体的过程为:热流体与壁面的对流换热、平壁内部的热传导、壁面至冷流体的对流换热。当传热过程稳定后,平壁传热可表示为^[1]:

$$Q_e = F(t_1 - t_2) / R_e \quad (3)$$

其中,热阻 R_e 为:

$$R_e = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (4)$$

式中: α_1 和 α_2 为内、外壁面对流换热系数; δ_1 、 δ_2 、 δ_3 分别为皮囊(橡胶)、保温层(橡塑)、端盖(钢板)的厚度; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为对应的传导系数。具体参数见表1。

表1 传压隔热装置材料组成及其参数

材料	厚度/m	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	比热/ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)
橡塑	0.02	45	0.035	1004
橡胶	0.0015	1100	0.21	1700
45#钢	0.02	7850	50.2	460

3 仿真分析

文中利用 ANSYS 进行传压隔热装置瞬态热分析计算。该热传导问题看似是一个三维问题,但由对称性可简化为二维的轴对称问题,因此选用 PLANE55 单元。所建立的瞬态热分析有限元模型如图3所示。施加的初始条件为传压隔热装置内部初始温度 25°C 、外部温度 15°C 、对流换热系数 $650 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

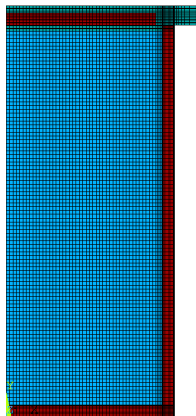


图3 传压隔热装置瞬态热分析有限元模型

通过求解计算得到3 h后传压隔热装置的温度分

布如图4所示。内部水温变化为 1.62°C ,说明所设计装置中的保温材料起到了良好的隔热效果。

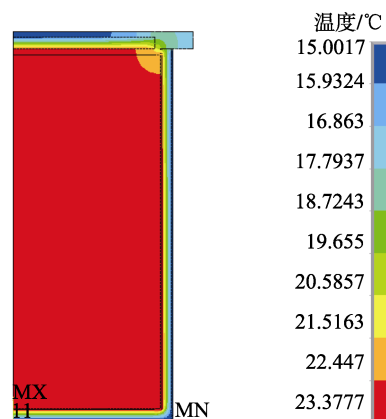


图4 温度分布云图($t=3 \text{ h}$)

4 试验验证

为验证上述传压隔热装置的有效性,构建实验样机,在图1所述的深水压环境模拟试验装置中开展相关试验验证。压力舱实物如图5所示,其中舱盖中央有一个可拆卸的法兰盘,通过对法兰盘的穿舱设计,实现对罐体内的加温和温度测量。



图5 深水压试验舱

传压隔热装置三维模型如图6所示,经过耐压设计的加热棒和铠装热电偶通过压力舱的法兰盘穿舱,实现对皮囊内液体的温度控制与测量。加热棒和热电偶均采用端面密封的形式来实现与压力舱的密封。连接件用于连接传压隔热装置和舱盖。通过注水口将皮囊充满水后,整体吊入压力舱内进行试验。传压隔热装置的实物如图7所示。

试验过程中,通过加热棒将传压隔热装置中的水加温到 25°C ,再对整个压力舱加压到 1 MPa 。皮囊内水温变化如图8所示,可以看出,压力载荷同步条件下,3 h后皮囊内水温约 23.3°C (下降了 1.7°C)。试验结果与仿真结果有较好的一致性,随着时间的增长,温度下降趋势变快。

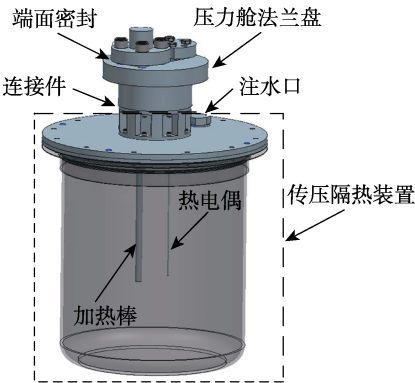


图 6 传压隔热装置三维模型



图 7 传压隔热装置

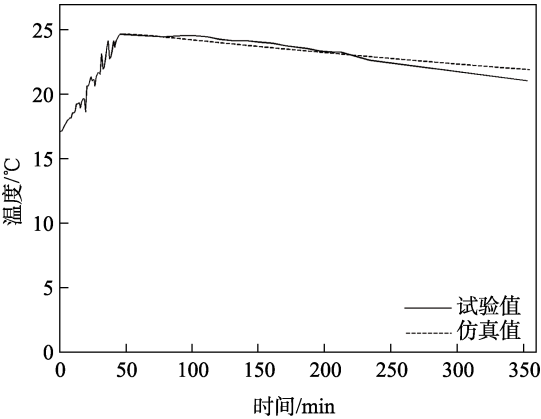


图 8 温度随时间变化曲线

5 结语

为了真实高效地进行深水压环境的温度模拟，文中提出一种深水压试验压力加载过程中的局部恒温实现方法。基于橡胶和橡塑材料的三明治结构，设计了相应的传压隔热装置。实现了压力载荷条件下液体温度在较长时间内基本恒定，解决了深水压力环境试验舱容积大，对整个试验舱内水温调节效率低的问题。仿真和试验结果表明，文中设计的传压隔热装置，具有良好的隔热性能。此外，该装置具有良好的密封性能，通过该装置实现了试验件与试验舱内水的隔离，皮囊内的液体介质不限于自来水，可以根据试验要求进行更换，增加试验介质的灵活性。该研究工作可为深水压力环境试验提供技术储备。

参考文献：

[1] 胡志强. 环境与可靠性试验应用技术[M]. 北京: 中国质检出版社, 2016.

[2] 朱贤辉. 国内外深海环境模拟装置的现状与发展趋势研究[J]. 无线互联科技, 2017(16): 61-64.

[3] 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): 1821-1826.

[4] 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: 哈尔滨工程大学, 2013.

[5] 吴建美, 王勇, 刘正士. 高精度深海压力模拟装置的分析[J]. 机床与液压, 2015, 43(10): 73-75.

[6] 沈永春, 万正权, 蔡新钢. 深海环境模拟试验装置的研制[C]// 海洋钢结构分会 2010 年学术会议, 河南: 中国钢结构协会, 2010.

[7] 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.

[8] 白福岩. 压力容器水压试验控制[J]. 科技创新与应用, 2015(21): 129.

[9] 霍英涛, 李珠, 刘元珍, 等. 玻化微珠保温砂浆外保温系统有限元分析[J]. 中国科技论文, 2015, 10(15): 1845-1849.

[10] 程晓敏, 梅丽君, 吴兴文, 等. 基于 ANSYS 的储热室隔热性能数值模拟[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(4): 519-521.