

技术专论

# 一种海洋气候环境-摩擦载荷耦合试验设备的研制

吴帅<sup>1,2</sup>, 张津<sup>1,2</sup>, 殷明<sup>3</sup>, 付航涛<sup>1,2</sup>, 王彬<sup>3</sup>, 肖勇<sup>3</sup>, 王晓辉<sup>3</sup>

- (1. 北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083;
- 2. 北京市腐蚀、磨蚀与表面技术重点实验室, 北京 100083 ;
- 3. 西南技术工程研究所, 重庆 400039)

**摘要:** **目的** 研制一台海洋气候环境-摩擦载荷耦合试验设备。**方法** 针对相对运动部件在海洋环境下的服役条件,为评价其材料腐蚀磨损性能,分析摩擦载荷与气候环境可能对运动部件造成的交互作用,从机械结构上进行创新,研制一台海洋气候环境-摩擦载荷耦合试验设备。**结果** 该设备可在一定范围内实行载荷、速度控制,利用传感器和数据采集系统完成对摩擦力、摩擦系数、温湿度的采集。设备包含6套下试样夹具,可实现6个样品轮转试验。**结论** 该设备适用于研究服役于海洋气候环境下的材料的腐蚀磨损性能。

**关键词:** 腐蚀磨损; 试验设备; 海洋气候环境; 摩擦磨损

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2015.02.015

**中图分类号:** TJ05; TH117.1      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2015)02-0070-05

## Development of a Marine Climate – Friction Load Coupling Test Equipment

WU Shuai<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin<sup>1,2</sup>, YIN Ming<sup>3</sup>, FU Hang-tao<sup>1,2</sup>, WANG Bin<sup>3</sup>,  
XIAO Yong<sup>3</sup>, WANG Xiao-hui<sup>3</sup>

- (1. Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
- 2. Beijing Key Lab for Corrosion, Erosion and Surface Technology, Beijing 100083, China;
- 3. No 59 Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT: Objective** To develop a marine climate-friction load coupling test equipment. **Methods** According to the service conditions of relatively moving parts in marine environment, in order to evaluate the corrosion-wear properties of the material and analyze the possible interaction caused by the friction load and climatic environment on the relatively moving parts, innovation was conducted in the mechanical structure, and a marine climate – friction load

收稿日期: 2014-12-01; 修订日期: 2015-01-05

Received: 2014-12-01; Revised: 2015-01-05

基金项目: 国防技术基础科研项目(GSJC2013209B057)

Fund: Supported by the Fundamental Research Project (GSJC2013209B057)

作者简介: 吴帅(1991—),男,湖南人,硕士,主要研究方向为海洋气候环境-摩擦载荷耦合试验技术。

Biography: WU Shuai(1991—), Male, from Hunan, Master, Research focus: marine climate-friction coupling test technology.

通讯作者: 张津(1963—),女,重庆人,博士,教授,主要研究方向为金属的腐蚀与防护处理。

Corresponding author: ZHANG Jin(1963—), Female, from Chongqing, Ph.D., Professor, Research focus: metal corrosion and protection.

coupling test equipment was designed and developed. **Results** The test machine could accomplish load and speed control in a certain range, and carry out the data acquisition of friction, friction coefficient, temperature and humidity with some sensors and a data acquisition system. The device consisted of six sets of sample clamps, with which the rotation test of 6 samples could be conducted. **Conclusion** The equipment was suitable for investigating the corrosion-wear properties of materials in the marine climate environment.

**KEY WORDS:** corrosion-wear; test machine; marine climate environment; frictional wear

随着工业的发展和科技水平的提高,我国的海洋开发事业有了突飞猛进的发展,海洋构筑物也越来越多,船舶、港口设施、海洋平台等数量众多<sup>[1-2]</sup>。大多数常用的金属材料、无机非金属材料、高分子材料在海洋环境服役过程中都受到不同程度的腐蚀和摩擦磨损。如船舶动力装置关键零部件、潮汐能和风能发电装置、石油天然气钻井作业工具和输送管道、海洋平台钢结构连接件等,这些装备关键零部件的腐蚀、摩擦磨损及其交互作用严重制约了海洋装备的工作效率和可靠性<sup>[3-4]</sup>。许多研究者对这些快速发展的海洋开发装备在苛刻的海洋环境下的服役性能(特别是摩擦学性能)给予了极大关注<sup>[5]</sup>,但大多仅从单方面对摩擦学性能进行了探讨,缺乏系统的研究,更没能全面考虑海洋环境与摩擦学系统的交互作用<sup>[6]</sup>。早期研究在海洋环境中材料的腐蚀磨损性能,往往通过单独的挂片腐蚀试验和摩擦磨损试验来分别研究材料的耐腐蚀性能、耐磨损性能<sup>[7]</sup>,或者是将样品先在选定的腐蚀介质中浸泡或预氧化,即在静态环境中制备腐蚀试样,再用这些试片去测定磨损量<sup>[7-9]</sup>。这些方法均不能真实、完整地表征材料的耐腐蚀-磨损性能。也有研究者<sup>[7,10]</sup>以定型的摩擦磨损试验机为基础进行改造,配加可以充入腐蚀气氛的环境室或一套电化学测试装置,借以研究模拟工况环境中材料的腐蚀磨损性能。瑞士联邦工学院<sup>[11]</sup>研制了一种用于腐蚀磨损研究的微区电化学测试设备,与常规腐蚀磨损试验机相比,可以研究材料组织或成分的不均匀性对腐蚀磨损性能的影响。Iwabuchi A等<sup>[12-13]</sup>研制了往复腐蚀磨损试验机,通过电位跃阶(Potential Pulse Method)方法来评价腐蚀磨损钝化膜的破坏面积以及腐蚀电流密度,进而计算腐蚀磨损交互作用,该方法能够用静态试验设备模拟磨蚀过程中的腐蚀行为。裴召辉等<sup>[14]</sup>研制了一台压力可控、适应多种气氛条件的摩擦磨损试验机,开展了聚四氟乙烯、填料改性聚四氟乙烯复合材料、超高分子量聚乙烯在5种气氛环境中的摩擦学研究,结果表明环境气氛对同一配副材料的摩擦系数有较大影响。据报道<sup>[15]</sup>,中交四航局在2013年成功研制了国内首台海洋环境与动荷载耦合试验设备,设备可

提供多种频率与加载方式的动荷载,可提供盐水浸泡、盐水涨落及盐雾喷洒环境,模拟海洋水下区、水位变动区及浪溅区等海洋环境特点。这些模拟工况的试验方法比较接近实际工况,但模拟环境与实际的高盐、高湿、高温差的海洋气候环境还是有较大差距。

从以上对该方向的研究现状来看,目前还缺乏真实环境下的海洋气候环境-摩擦载荷耦合试验设备。随着我国海洋经济的发展,急需一种试验设备对于复杂海洋大气环境(高盐、高湿、高温差)下具有相对运动的构件材料的寿命进行评估。针对此问题,设计研发了一种海洋气候环境-摩擦载荷耦合试验设备[专利申请号:201410444561.0],并利用该设备对材料在真实海洋大气环境下的摩擦磨损现象进行探索研究。

## 1 设备结构特点及工作原理

### 1.1 设备结构特点

该设备为立式结构试验机,主要技术参数为:销盘式摩擦磨损试验;旋转主轴转速为0~2000 r/min,无级可调;弹簧加载,加载范围为0~1000 N,负荷精度为±2%;摩擦力测量范围为0~300 N;整个设备由机械部分、电控部分以及恒温恒湿保持系统组成。机械部分包含上主轴驱动系统、下试样运动系统、下主轴压力及力矩测量系统、弹簧加载系统、摩擦副专用夹具系统;电控部分包含电机伺服控制和数据采集系统;恒温恒湿保持系统主要由工业空调及机箱组成。

海洋气候环境-摩擦载荷耦合试验设备机械部分结构如图1所示,试验机上主轴驱动系统主要由上主轴、伺服电机、同步带轮及圆弧齿同步带等组成;下试样运动系统由X轴线性导轨、Y轴线性导轨及控制它们的伺服电机组成;下主轴压力及力矩测量系统由下主轴、直线轴承、压力传感器和拉力传感器组成;弹簧加载系统主要由伺服电机、蜗杆、蜗轮、丝杆、弹簧、施力板等组成,其结构如图2所示;专用夹具系统由上试样夹具和下试样夹具组成。

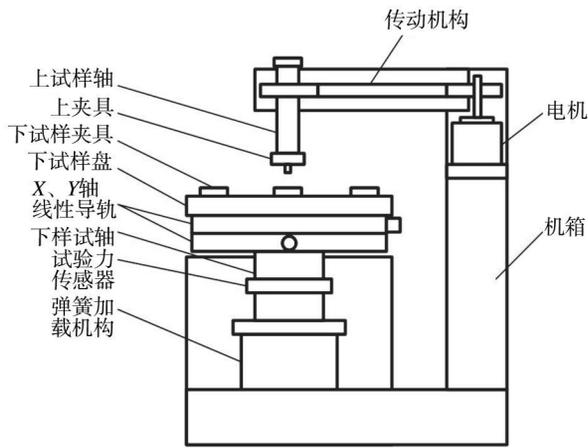


图1 海洋气候环境-摩擦载荷耦合试验设备机械部分结构  
Fig.1 Structure diagram of the mechanical part of the marine climate-friction load coupling test equipment

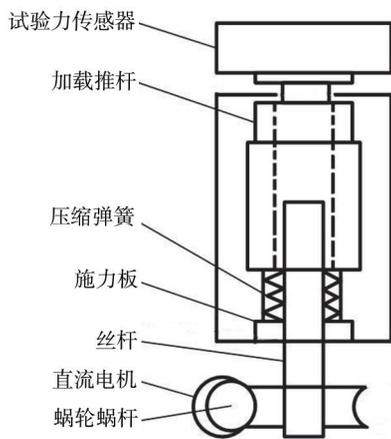


图2 弹簧加载系统结构  
Fig.2 Structure diagram of the spring loading system

设备的电控部分和机械部分、恒温恒湿保持系统处于分离状态,电控部分置于室内,通过线路连接远程控制;机械部分置于室外,除去专用夹具系统暴露于真实海洋大气环境下,其他系统均安装在密封的机箱内。通过恒温恒湿保持系统保持机箱内处于恒定温度和湿度,而暴露在海洋环境中的构件均采用重防腐保护,能保证试验机在高盐、高湿、高温差的海洋环境中连续稳定工作。设备包含6套下试样夹具,可同时进行6个样品的轮转试验,不仅可以真实模拟许多材料在海洋气候环境中长期暴露、间断磨损的工况,更能节约试验时间。设备下试样轴上安装的高精低速的X轴、Y轴线性导轨,可保证上试样销的精确定位,确保每个试样摩擦时工作状态完全相同;上主轴驱动系统及上夹具部分尺寸不大,布局恰当,可保证设备在工作时,其他自然暴露的试样不会被遮挡。

## 1.2 设备工作原理

设备工作时,上主轴驱动系统由伺服电机通过同步带轮带动上主轴,上试样安装在上试样夹具上随主轴同步转动,与相对静止的下试样组成摩擦副。外加载荷由直流电机通过蜗轮、蜗杆带动丝杆转动,丝杆带动施力板压缩弹簧以实现向下导向主轴施加向上的正压力,并由压力传感器反馈信号保证实验中当试样磨损后法向外载荷大小不变。下试样轴上安装有一个拉力传感器,用来测量上下试样间的摩擦阻力矩,力传感器输出的信号传送给计算机,通过数据采集系统进行处理,计算得到摩擦系数值。一个试样完成一个实验周期后,安装在下试样轴上的高精低速的X、Y轴线性导轨,通过计算机程序控制可实现试样之间的自动轮换,开始下一试样的实验。

设备的测试原理是利用上下试样之间的摩擦力所产生的力矩与下试样轴的扭矩相等,实现摩擦力和摩擦系数的测量。在该设备中,将摩擦扭矩转换成拉力进行测量。在下主轴上有一弦线盘,绕在弦线盘上的钢丝绳的另一端固定在拉力传感器上(如图3所示)。由于钢丝绳的张力克服下试样轴的扭转,通过传感器可测出钢丝绳的张力,并换算成摩擦力矩。即摩擦力矩值 $M$ 应符合公式 $M=P \cdot L$ ,其中 $P$ 为作用在拉力传感器上的力, $L$ 为弦线盘半径。按库仑定律 $F=\mu \cdot N$ ( $F$ 为摩擦力; $\mu$ 为摩擦系数; $N$ 为正压力),其中 $N$ 为试验时的负荷值,而 $F$ 乘试样回转半径 $R$ 就是计算机上显示的摩擦力矩值,所以 $\mu$ 的计算公式为 $\mu = F/N=M/(N \cdot R)$ 。

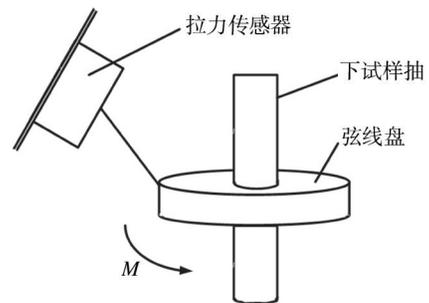


图3 摩擦力矩的测量原理  
Fig.3 Measurement principle of the friction torque

## 2 设备功能特点

该新型海洋气候环境-摩擦载荷耦合试验设备通过测控软件及伺服控制可实现自动加载、试样自动轮

转等,通过各类传感器可实现试验数据的自动采集,自动化程度高。设备下试样盘上沿圆周方向安装6套夹具,可夹持圆形或矩形试样,夹具大小可调,且能够保证在一试样摩擦时,其余试样自然暴露在海洋气候环境中。设备可针对试验材料需长期在海洋大气环境中不间断磨损的服役工况单独进行1个样品的试验,表征材料在使用工况下的使用性能。也可针对很多工作在海洋大气环境中的材料长期暴露、间断磨损的实际工况,同时进行6个样品的试验,试样轮换间隔时间及整个试验周期都可由实际工况择优选择。这种试验方式不仅可大为缩短试验周期,更重要的是能够真实地模拟材料的实际服役工况,真实表征工作在海洋大气环境中的材料的腐蚀磨损性能。

该设备可在一定范围内实行载荷、速度控制,利用传感器和数据采集系统完成对摩擦力、摩擦系数、温湿度的采集。相关信号进入采集模块,经信号调理电路对信号进行放大和滤波处理后输入到PLC控制器,PLC控制器将输入的模拟信号转换为计算机所需的数字信号,计算机按照设计程序将采集到的信号经计算分析处理后分别以数字形式和波形形式显示相关的测量结果。所有数据,如主轴转速、加载力、摩擦力、摩擦系数等由计算机记录在盘,供查阅和打印。

### 3 设备实用性分析

设备机械部分直接放置在高盐、高湿、高温差的海洋气候环境中,承受潮湿海盐粒子的侵蚀、冷热交替的变化等,环境条件十分恶劣。为了保证设备长期正常运转,除去专用夹具系统暴露于真实海洋大气环境下,其他系统均安装在密封的机箱内,通过恒温恒湿保持系统保持机箱内处于恒定温度和湿度。并且机箱外壳喷涂了重防腐涂层,专用夹具系统选用耐Cl<sup>-</sup>侵蚀性能优良的TC<sub>4</sub>钛合金制造。试样轮转选用高精低速的线性导轨确保每个试样的精确定位,轮转时间由计算机精确控制,因而能够确保各试样的最终试验条件相当,实验结果具有可比性。综上,新型研发的设备运转的稳定性及实验结果的可靠性都能得到保障。

原有的模拟海洋环境下的摩擦磨损试验无法真实模拟复杂多变的海洋气候环境,因而该设备直接放置于海洋大气环境中,腐蚀环境做到绝对真实。在结构设计时也充分考虑设备自身组件对试验样品的遮挡作用,在保证机械稳定性的前提下尽量缩减了上主轴驱动系统及上夹具部分的尺寸,确保试验

样品能够直接暴露在海洋气候环境中。该设备适用于研究工作海洋大气环境中承受磨损工况的材料,安装6套下试样夹具。可针对试验材料需长期在海洋大气环境中不间断磨损的服役工况单独进行1个样品的试验,也可针对很多工作在海洋大气环境中的材料长期暴露、间断磨损的实际工况用6个样品轮转试验。因而相对于传统的实验室模拟加速设备,该设备能更好地模拟海洋气候环境中材料的实际服役工况,评估材料的腐蚀磨损性能,其实验结果对于指导选材可参考性更强。

### 4 结语

该设备适用于评估服役于海洋气候环境中的材料的腐蚀磨损性能。利用该设备对材料在真实海洋大气环境下的摩擦磨损现象进行深入研究,对于丰富和发展摩擦学与腐蚀学相关理论具有重要的学术与理论价值。对应用与海洋气候环境下的装备、器械的设计、选材,提高装备与器械的性能与寿命、增强我国国防力量和工业实力等具有十分重要的现实意义和工程应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 陈光章,吴建华,许立坤,等. 舰船腐蚀与防护[J]. 舰船科学技术,2001(2):38—43.  
CHEN Guang-zhang, WU Jian-hua, XU Li-kun, et al. Corrosion of Ship and Protection[J]. Ship Science and Technology, 2001(2):38—43.
- [2] 白杨,邢路阔,李相波,等. 海洋环境防滑涂层技术研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术,2013,25(6):540—542.  
BAI Yang, XING Lu-kuo, LI Xiang-bo, et al. Progress of Research in Non-slip Coating under Marine Environmental[J]. Corrosion Science and Protection Technology,2013, 25(6):540—542.
- [3] 董从林,白秀琴,严新平,等. 海洋环境下的材料摩擦学研究进展与展望[J]. 摩擦学学报,2013(3):311—320.  
DONG Cong-lin, BAI Xiu-qin, YAN Xin-ping, et al. Research Status and Advances on Tribological Study of Materials under Ocean Environment[J]. Tribology, 2013(3):311—320.
- [4] 周婷婷,牟明磊,白秀琴,等. 海洋结构物摩擦学问题的研究进展[J]. 摩擦学学报,2013(4):420—428.  
ZHOU Ting-ting, MOU Ming-lei, BAI Xiu-qin, et al. Research Progress in Tribological Problems of Ocean Structure [J]. Tribology, 2013(4):420—428.
- [5] 王建章,阎逢元,薛群基. 几种聚合物材料在海水中的摩擦学行为[J]. 科学通报,2009(22):3558—3564.

- WANG Jian-zhang, YAN Feng-yuan, XUE Qun-ji. Tribological Behaviors of Some Polymeric Materials in Sea Water[J]. Chinese Science Bulletin, 2009(22):3558—3564.
- [6] 袁成清, 严新平, 白秀琴. 试论海洋摩擦学的内涵、研究范畴及其研究进展[J]. 机械工程学报, 2013(19):95—103.
- YUAN Cheng-qing, YAN Xin-ping, BAI Xiu-qin. Discussion on Connotation and Research Scopes of Ocean Tribology and Its Research Progress[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013(19):95—103.
- [7] 姜晓霞, 李诗卓, 李曙. 金属的腐蚀磨损[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- JIANG Xiao-xia, LI Shi-zhuo, LI Shu. Corrosive Wear of Metals[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [8] 任哲. KFRP 在盐水环境下腐蚀与摩擦磨损性能研究及寿命预测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- REN Zhe. The Research of Corrosion Friction and Wear Properties and Life Prediction of KERP Under Salt Water[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [9] KIM M H, RHEE K Y, PARK S J. Plasma Treatment and Its Effects on the Tribological Behavior of Basalt/Epoxy Woven Composites in a Marine Environment[J]. Polymers and Polymer Composites, 2011, (1): 29—34.
- [10] 陈君, 阎逢元, 王建章. 海水环境下 TC<sub>4</sub> 钛合金腐蚀磨损性能的研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(1):1—6.
- CHEN Jun, YAN Feng-yuan, WANG Jian-zhang. Corrosion Wear Properties of TC<sub>4</sub> Titanium Alloy in Artificial Seawater[J]. Tribology, 2012, 32(1):1—6.
- [11] ASSI F, BOHNI H. Study of Wear-Corrosion Synergy with a New Microelectrochemical Technique[J]. Wear, 1999 (1): 505—514.
- [12] IWABUCHI A, LEE J W, UCHIDATE M. Synergistic Effect of Fretting Wear and Sliding Wear of Co-alloy and Ti-alloy in Hanks' Solution[J]. Wear, 2007(1-6):492—500.
- [13] IWABUCHI A, SONODA T, YASHIRO H, et al. Application of Potential Pulse Method to the Corrosion Behavior of the Fresh Surface Formed by Scratching and Sliding in Corrosive Wear[J]. Wear, 1999(1): 181—189.
- [14] 裴召辉. 可控气氛摩擦试验机研制及聚合物材料在不同气氛中摩擦学性能研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2009.
- PEI Zhao-hui. Development of Atmosphere Controlled Tribometer and Study on Tribological Properties of Polymers in Different Gases[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2009.
- 
- (上接第 18 页)
- 1274.
- CHEN Hong-shan, HOU Ting-ting, FENG Yang-ping. Fractional Model for the Physical Aging of Polymers[J]. Scientia Sinica (Physica Mechanica & Astronomica), 2010, 40(10): 1267—1274.
- [9] 封先河. 蠕变动力学模型及其在弹簧蠕变中的应用[J]. 科学通报, 2012, 57(25):2354—2358
- FENG Xian-he. Creep Dynamic Model and Its Application to the Creep of Spring[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(25):2354—2358.
- [10] 封先河, 魏小琴. 压缩氟硅橡胶 O 形密封圈蠕变/老化行为研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44(5): 486—491.
- FENG Xian-he, WEI Xiao-qin. Creep/Aging Behavior Study of Compressed Fluorinated Silicone Rubber O Ring[J]. Scientia Sinica (Physica Mechanica & Astronomica), 2014, 44(5): 486—491.
- [11] 封先河. 环境作用动力学及其在武器装备定寿延寿中的应用[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4):23—28.
- FENG Xian-he. Dynamics of Environmental Effect and Its Application in Weapon Service Life Determination and Extension[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 23—28.
- [12] 王登霞, 李晖, 孙岩, 等. HNBR 自然老化规律及储存寿命预测研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6):23—28.
- WANG Deng-xia, LI Hui, SUN Yan, et al. Weather Aging of HNBR and Its Storage Life Prediction[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6):23—28.
- [13] 孙伟星, 刘山尖, 欧阳昕, 等. 橡胶隔振器寿命预测及加速试验研究进展[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1):57—60.
- SUN Wei-xing, LIU Shan-jian, OUYANG Xin, et al. Advances in Fatigue Life Prediction and Accelerated Test of Rubber Vibration Isolator[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1):57—60.
- [14] 陈宏善, 侯婷婷, 冯养平. 聚合物物理老化的分数阶模型[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学 2010, 40(10): 1267—1274.
- CHENG Hong-shan, HOU Ting-ting, FENG Yang-ping. Polymer Physics Aging Score Rank Model[J]. Scientia Sinica (Physica Mechanica & Astronomica), 2010, 40(10): 1267—1274.
- [15] GREENFIELD P. Creep of Metals at High Temperature[M]. London: Mills & Boon Ltd., 1972.
- [16] HOANG ERIC M, LOWE David. Lifetime Prediction of a Blue PE100 Water Pipe[J]. Polymer Degradation and Stability, 2008, 93:1496—1503.