

## 海洋结构物摩擦学问题的研究进展

周婷婷<sup>1,2</sup>, 牟明磊<sup>1,2</sup>, 白秀琴<sup>1,2</sup>, 严新平<sup>1,2</sup>, 袁成清<sup>1,2\*</sup>

(1. 武汉理工大学 能源与动力工程学院可靠性工程研究所, 湖北 武汉 430063;

2. 武汉理工大学 船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430063)

**摘要:**海洋结构物主要包括海上钻井平台、油气开采平台、FPSO、海底输油管线及海上大型储油罐等大型海上结构物。海洋结构物总是处于波浪、海流、风暴、海冰等严峻海洋环境中,并受到海生物污损、海洋腐蚀、磨损等多方面因素相互作用的影响,摩擦学问题无处不在。论文针对海洋平台结构、流体处理及运输设备、定位设备及作业设备四方面的摩擦学问题进行论述,主要介绍了海洋平台结构、管道系统及海水泵、锚链及螺旋桨、钻井套管及电潜泵等海工设备的工作特点,概述了国内外关于这类海工设备的摩擦学问题的研究现状,并对海洋结构物的摩擦学研究重点进行了展望。

**关键词:**海洋平台结构;管道系统;锚链;螺旋桨;钻井套管;泵;摩擦;磨损

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2013)04-0420-09

## Research Progress in Tribological Problems of Ocean Structure

ZHOU Ting - ting<sup>1,2</sup>, MU Ming - Lei<sup>1,2</sup>, BAI Xiu - qin<sup>1,2</sup>,

YAN Xin - ping<sup>1,2</sup>, YUAN Cheng - qing<sup>1,2\*</sup>

(1. Reliability Engineering Institute, School of Energy and Power Engineering,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

2. Key Laboratory of Marine Power Engineering & Technology,

(Ministry of Transport), Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** The offshore structure includes the offshore drilling platform, oil and gas exploitation platform, FPSO, the submarine pipeline and the large oil tank, etc. The offshore structure is affected by the severe ocean environment (such as the wave, ocean current, windstorm, the frigid sea ice) and suffered the biofouling and the ocean corrosion. The tribological problems of the offshore platform structure, fluid handling and transporting equipment, the locator device and operation equipment were discussed in this paper. The tribological characteristics of the marine equipments (such as the offshore platform structure, the pipeline system and sea water pump, the mooring chain and propeller, the well casing and electric submersible pump) were presented. The overseas and domestic research status about the tribological problems of the marine equipments were summarized, the main tribological problems of ocean structure were prospected and presented in the paper.

**Key words:** offshore platform structure, pipeline system, mooring chain, propeller, well casing, pump, friction, wear

摩擦学问题在各个领域都存在,只要是两个相互接触的物体发生相对运动,就会产生摩擦。随着海

洋石油的不断勘探,海洋平台、浮式生产储存卸货装置(FPSO)等大型海上结构物发展迅速,由于海洋环

Received 9 November 2012, revised 28 December 2012, accepted 27 February 2013, available online 28 July 2013.

\* Corresponding author. E-mail: ycq@whut.edu.cn, Tel: +86-27-86554969.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51079116) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2012-11-018).

国家自然科学基金(51079116)和中央高校基本科研业务费专项资金(2012-11-018)资助。

境的恶劣性,人们对这类海工装备的性能要求越来越高.此类海工装备在作业期间常常伴随着摩擦学问题,诸如海洋平台结构与海流、海冰、海沙间的摩擦;钻采设备套管与钻杆间的摩擦,电潜泵叶轮及轴承与沙粒间的摩擦;系泊链环间的摩擦;运输设备中的泵、阀、管道间的流体摩擦;乃至结构连接件和钢缆绳在振动情况下发生的微动摩擦,这些摩擦问题往往导致结构、设备的磨损和疲劳损坏,而它们又长期处于腐蚀性很强的海洋环境下,磨损和腐蚀的协同作用严重威胁到它们的安全可靠性.所以研究海洋结构物的摩擦学问题具有重要的现实意义.

## 1 海洋平台结构摩擦学问题

海洋平台是海洋结构物之一,其结构与风浪、海流、泥砂、海冰相互接触,发生相对运动,存在着摩擦;结构与连接件之间紧密接触,在遭受激烈振动后也会发生微动磨损,目前国内外研究的海洋绿色防污也是绿色摩擦学的范畴,虽然这些摩擦学问题在海洋平台上表现并不突出,但不可否认它们的存在.目前国内外针对海洋环境荷载下的平台结构疲劳损伤研究较多,关于摩擦引起的损伤很少提到.

### 1.1 海冰与结构物间的摩擦磨损

在风和海流的驱使下,海冰将产生运动,使得位于南极区或靠近南极区的固定式海上结构物受到浮冰或大面积冰块的作用力.海冰与结构物之间发生相对运动时产生摩擦力,有时候,风和海流的作用使碎冰可能发生沿结构上爬的现象,这样结构物较容易产生磨损.对于海洋结构物设计来说,冰对结构物的直接作用力必须考虑进去,同时也应该考虑结构物的磨损,保证结构物在寿命期间达到某种可接受的机械力水平.

国内外海冰与结构物间的摩擦磨损问题研究较少,国外研究人员积极研究冰与近海结构物相互作用机制,Sodhi在顺应式结构物和淡水冰盖间进行小比例的压痕测试.在冰与结构物表面安装网格触觉式传感器测量两物体相互作用期间形成的压力,认为这种压痕测试与实际条件下的冰结构物相互作用机制类似<sup>[1]</sup>.Moslet进行了中比例的冰挤压测试,认为结构物的形状是限制冰作用力的重要影响因素,通过数值模型的敏感性分析,得出冰与结构物间的摩擦系数对冰荷载影响很大,认为滑动阻力会产生张力导致冰荷载降低<sup>[2]</sup>.有人针对混凝土结构与冰之间的磨损现象进行研究,指出磨损的形成条件是碎冰层的运动,通常在结构物与冰的接触面上观察

得到.但是由于冰对结构物的压力,碎冰层又会被挤出接触区域<sup>[3]</sup>.而这种运动主要受制于结构物与冰之间的摩擦状况,对于混凝土结构来说,摩擦状况是混凝土对冰块本身的摩擦和混凝土的磨损.从测试中可以看出混凝土接触表面的磨损部位,同时也反映了冰块的摩擦状况<sup>[4]</sup>.为了更精确描述混凝土结构磨损特性,Bruno进行了精确摩擦测试,缩小混凝土结构和冰块的尺寸,将Portland CEM I 42.5黏合剂、0.2~0.6 mm晶粒大小的细砂、3~5 mm的粗砂和水按照不同比例混合,制成175 mm×150 mm×15 mm的混凝土板,并在低温条件用水制成直径60 mm、高90 mm的冰块,旨在研究混凝土结构光滑和粗糙表面上的冰摩擦特性和混凝土结构与冰接触面的物理机制.研究结果认为混凝土结构的磨损有两种机制:一种是普通磨损,即在磨损颗粒沿着表面运动过程中,混凝土结构里的水泥浆和小型聚合物会渐渐受到侵蚀.另一种是灾难性磨损,经过普通磨损后,水泥浆和聚合物的粘合性减弱,聚合物突然从表面喷出.针对海冰包覆环境,该实验用材简单,易于观察,可以反映出结构磨损状况与混凝土结构聚合物性质紧密相关,但是冰块与结构物的接触状况还需进一步研究,需要获取更为精确的磨损过程认证<sup>[5-6]</sup>.

### 1.2 桩腿与连接件间的微动磨损

在自升式钻井平台桩腿的设计中,桩腿接头中的连接螺栓是装卸桩腿中的重要组成部分,普通螺栓与螺栓孔之间有间隙,它是靠结合面间的摩擦力来承受工作载荷的.工作时,只有当结合面间的摩擦力足够大才能保证连接件之间不会发生相对滑动.螺栓联接采用三角形螺纹时,由于标准螺纹升角比较小,而当量摩擦角较大,联接具有自锁性.在静载荷作用下,工作温度变化不大时,这种自锁性可以防止螺母松脱.如果联接是在冲击、振动、变载荷作用下或工作温度变化很大时,螺栓联接则可能松动,联接松脱往往会造成严重事故<sup>[7]</sup>.

实际上,螺栓在振动情况下很容易发生较小的滑移运动,虽然在平台结构设计中已充分考虑了螺栓的预紧力,但是长期处于振动环境下,螺栓与桩腿之间发生反复的轻微运动,这样很容易发生微动磨损.在含有腐蚀性介质的海洋环境下,海浪容易溅入间隙中,引起桩腿和螺栓的内部腐蚀.腐蚀与微动磨损两者的协同作用,很可能导致螺栓疲劳断裂,严重威胁到桩腿的稳定性.

20世纪70年代Waterhouse<sup>[8]</sup>就提出了微动疲

劳破坏极限的概念,将微动损伤分为微动磨损、微动疲劳和微动腐蚀 3 种基本形式.认为微动作用通常使材料疲劳极限降低 20% ~ 50%.微动疲劳是铆接件和榫槽等紧配合部件的常见失效形式.然而,在螺栓的疲劳失效破坏中,由于材质或加工缺陷导致其失效的现象较为多见,而对于螺栓孔与连接件接触面上由微动作用引发疲劳失效的研究报道较少.王胜霞等<sup>[9]</sup>对某构件进行疲劳性能试验,结果连接螺栓发生断裂,通过断口宏微观观察、金相组织检查、硬度及化学成分检测发现连接螺栓的断裂性质为微动疲劳.北京航空工程技术研究中心吕凤军和傅国如通过观察某飞机的对接螺栓裂纹及其断口特征,发现靠近螺栓头内端面的表层裂纹为微动疲劳裂纹,接触表面摩擦力引起的切向应力是微动疲劳裂纹萌生和扩展的主要原因<sup>[10]</sup>.Ibrahima 在文献[11]中提到结构物节点可以看做是接触表面发生相对运动时的能量消耗的最初来源,各部件间发生剪切和扭转时产生的摩擦应力是由螺栓的张力和摩擦系数决定的.这也是引起结构物磨损和能量损失的根本原因.

国内周仲荣和朱旻昊在微动摩擦领域具有较高的成就,主要致力于航空、铁路、生物领域微动摩擦的研究工作,总结了机械工程领域的微动磨损理论,这为海洋平台结构连接件的微动疲劳及磨损的研究奠定了基础.

### 1.3 海生物附着导致的界面摩擦学问题

新建造的海洋石油平台在下海后很快就会附着上大量的海洋污损生物,污损生物的附着、生长不仅增加了导管架平台桩腿的体积和粗糙度,显著增大波浪所引起的动力载荷效应,而且由于改变了原有的界面状态,在风暴和风浪条件下,其界面的摩擦磨损行为也大大改变.同时,还能改变金属的腐蚀过程,引起局部腐蚀或穿孔腐蚀<sup>[12-13]</sup>,在摩擦磨损的协同作用下,导致严重的腐蚀磨损问题.因此,要防止海生物附着引起的界面摩擦学问题,其关键是解决海洋平台的污损生物附着问题.

研究表明,污损生物附着过程大致分为 4 个阶段<sup>[14]</sup>:第一个阶段是蛋白质、多糖等可溶性有机碳在材料表面吸附形成条件膜;第二个阶段是细菌等原核微生物的附着和生物膜的形成;第三个阶段是真菌和藻类等生物的附着;最后是大型污损生物藤壶、牡蛎和贻贝等的附着.条件膜的形成不仅改变材料表面的物理化学性质,也影响后期细菌和微藻等的附着<sup>[15]</sup>;生物膜在材料表面的形成情况及性质

决定了后续大型生物的附着情况<sup>[16]</sup>.若前期生物膜演替过程被阻止则后续大型污损生物的附着将被阻止.为了防控材料表面初期微生物污损,Bongaerts 等致力于抗蛋白质表面涂层的研究,这种涂层具有耐磨损、耐降解和良好的水润滑特点.他们认为含有聚二甲硅氧烷(PDMS)表面的壳聚糖和透明质酸的聚合电解质可以形成较好的润滑膜,从人类唾液获得的多层润滑膜比疏水和亲水性 PDMS 表面更能耐磨,防止蛋白质吸附效果更好.在水润滑条件下覆有多层 PDMS 涂层基质间的边界摩擦系数非常低,大约 0.01.这层膜能强烈抵制干摩擦和水润滑条件下几小时的摩擦试验.他们还发现当将负磷酸盐离子加入水中时,带负电荷的亲水 PDMS 表面的界面润滑特性降低,即从一个数量级降到 0.01.这为生物润滑提供了一个新思路,壳聚糖和透明质酸聚合电解质多层膜具有较低的摩擦系数,较好的防污和耐磨损特性<sup>[17]</sup>.

抗蛋白质表面涂层大都应用于生物产品和医药机械中,海洋工程领域应用广泛的还是低表面能防污涂料.低表面能防污涂料指基于氟碳树脂及有机硅化合物的低表面能防污涂料.其共同的特点是不含毒料,表面能都非常低.目前国内中国科学院兰州化学物理研究所田军等、中国海洋大学、中国科学院福建物质结构研究所二部、武汉材料保护研究所等高校及企业都在研究低表面能海洋防污涂料,并发明了许多新型专利.国外美国海军研究室、美国道化学公司的 Schmidt 及其合作者近年来也在研究新型的低表面能防污涂料<sup>[18]</sup>.

随着仿生学的发展,结构仿生防污技术应运而生.目前,结构防污技术的仿生对象大都局限在鲨鱼、海豚等大型海洋动物上.研究的重点和热点主要集中在寻找防污高分子材料,通过对鲨鱼等大型海洋动物表皮形态进行抽象、放大和简化仿形加工出各种人工表面几何形貌.国内邵静静等<sup>[19]</sup>致力于鲨鱼皮仿生防污研究,武汉理工大学可靠性工程研究所白秀琴等<sup>[20]</sup>进行了基于贝壳表面形貌仿生的船舶绿色防污研究,国防科学技术大学钱斯文<sup>[21]</sup>提出了一种低表面能与表面微结构相结合的仿生防污新方法,据此开展了新型仿生防污涂料的研究工作.国外 Hills 研究小组设计了一系列的人工表面,分析模拟大型海洋动物表皮.

## 2 流体处理及运输设备摩擦学问题

在海洋环境下,管道、海水泵、叶轮、阀门、热交

换器以及其他流体处理及运输设备常常遭受严重的腐蚀磨损,调查显示,这类腐蚀磨损在油气工业腐蚀比例中位于第五.造成腐蚀磨损的原因是流体夹带着的沙粒磨损和气泡空穴腐蚀.企业每年要花大量资金去减轻这类腐蚀磨损引起的损坏.国内外相关人员也为此纷纷展开研究.

### 2.1 管道系统腐蚀磨损

海上油气生产系统中的不同部件常常遭受来自海水、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  和砂粒的侵蚀,侵蚀很可能发生在含有砂粒或固体颗粒的系统某部位,砂粒或固体颗粒的速度决定了侵蚀程度.对于含有高速流动的气体凝析物系统来说,在弯管处很可能发生凝液侵蚀. DNV RP O501 – REVISION 4.2 – 2007 文件对光滑管道和垂直管、弯管、焊缝节点、三通、变径管和集流管等部位的砂粒磨损率进行了评估,强调气体速度不应高于  $70 \sim 80 \text{ m/s}$ ,如图 1 和图 2 所示为一些部件磨损区域<sup>[22]</sup>.

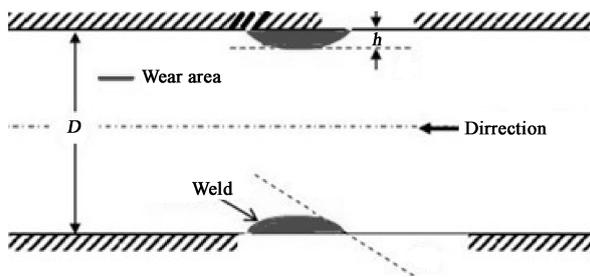


Fig. 1 Schematic drawing of wear area in a welded joint<sup>[22]</sup>

图1 焊缝磨损区域示意图<sup>[22]</sup>

流体对管道上的阀内件(阀座、阀芯)的磨损、侵蚀一般有以下 4 种形式:颗粒性介质的磨粒磨损、腐蚀性介质的侵蚀、高流速液体的冲击损坏以及液体发生气蚀和闪蒸时造成的毁坏.张景轩和石磊<sup>[23]</sup>对常见的控制阀内件磨损现象进行了总结,着重分析了高压差气蚀及腐蚀性介质场合的阀件磨损.

大量科学研究表明,腐蚀介质中的固体颗粒以及介质流速对材料的腐蚀磨损性能有较大影响.根据固体颗粒对基体材料切削或微切削的作用以及固体颗粒对材料冲击的情况,人们提出了各种模型. Sundararajan 对此作了深入研究,并提出了固体颗粒形状、含量、冲击速度和冲击角对腐蚀磨损影响的复合模型<sup>[24]</sup>.

### 2.2 海水泵污染磨损

为满足大深度海洋石油开采的需要,水下作业常使用海水泵,海水泵是海水液压系统中的关键元件,它是海水液压系统中的执行器,海水泵性能的优劣直接影响海水液压系统的工作可靠性.

由于海水是一种复杂的多种盐类的平衡溶液,黏度低、腐蚀性强、汽化压力高,海水泵的关键摩擦副发生污染磨损的现象很普遍,这种现象可能是气蚀、腐蚀、颗粒磨损等相互影响及加剧的磨损过程.华中科技大学机械学院电液所晏小伟和杨曙东<sup>[25]</sup>采用多信息综合的方法,将海水杂质的重要磨损尺寸、特征参数和海水泵关键运动摩擦副间隙状况以及海水泵的污染磨损控制有机地结合起来,对海水泵污染磨损机理进行研究.文献[26]提到海水泵滑靴副的磨损机理主要是黏着磨损、磨粒磨损、冲蚀以及腐蚀磨损等,后三种磨损形式是因海水中污染物引起的,统一归属于污染磨损,在海水泵滑靴副磨损失效中起主导作用.控制污染磨损是海水泵滑靴副设计成败的关键.实践初步证明,通过合理的选材、结构设计以及污染控制措施是可以有效解决海水泵滑靴副面临的严重污染磨损这个难题的. He 等<sup>[27]</sup>主要研究适用于水下作业的海水液压活塞泵,为了提高活塞和套筒在海水润滑下的耐磨损和耐腐蚀性能,将碳纤维增强聚醚醚酮注入到套筒内部,合成 WC 用于活塞,以此提高其表面硬度.并在试验台上进行了泵的基本性能和可靠性试验,轴部件被证实达到非常好的平衡效果.在  $10 \text{ MPa}$  的额定压力和

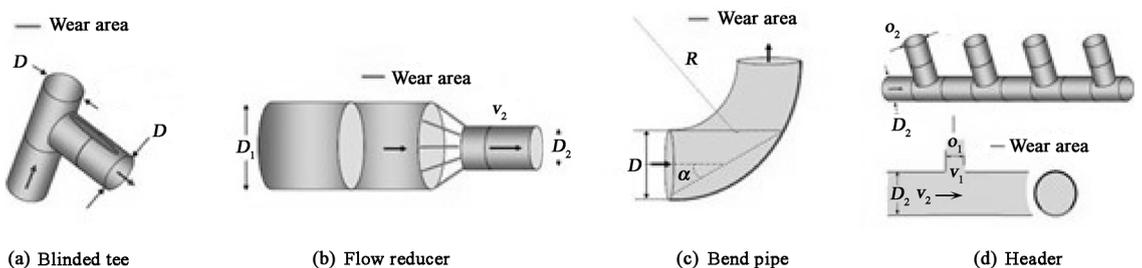


Fig. 2 Schematic drawing of wear area in blinded Tee, flow reducer, bend pipe, header<sup>[22]</sup>

图2 三通,流量减压器,弯管,集流管磨损区域示意图<sup>[22]</sup>

14 MPa 的最大压力情况下,泵具有相对较高的效率.经过 300 h 的耐久性试验,活塞和套筒和其他的部件也一样并没发现过度磨损,而且也没有明显的性能退化.

目前水压传动技术正在向中高压方向发展,适应深海苛刻环境下海水泵的发展要求,端面配流、摩擦副海水润滑的轴向柱塞泵已成为主导型式.具有耐蚀、强度高,特别是摩擦性能好的工程材料是海水泵摩擦件材料的发展方向.

### 3 定位设备摩擦学问题

#### 3.1 系泊链的摩擦磨损

随着海洋资源的开发,海洋工程平台、大型海洋工程辅助船舶及相关产业得到快速发展.海洋工程平台、船舶与舰艇在海况十分复杂、深达数百米至数千米的海洋中固定,世界各国都是采用抛系泊链停泊固定,主要方式是系泊链系泊,柔性固定<sup>[28]</sup>.

系泊链都是由许多链环相接而成的,工作环境特别恶劣,除承受平台的静载荷作用外,还承受环境载荷作用,如风力、波浪力和海流力.在这些力的作用下,链环的磨损形式具有多样性,其最重要的磨损机制如图 3 所示,按接触体划分为一体磨损、二体磨

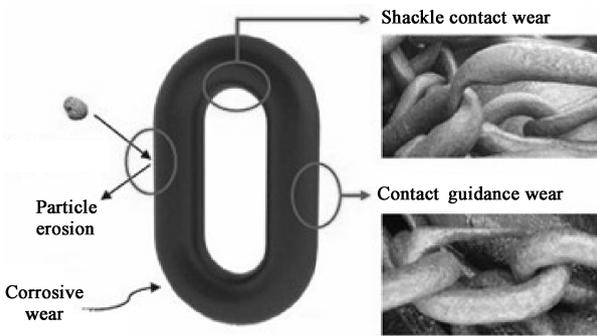


Fig. 3 Chain wear mechanisms<sup>[29]</sup>

图 3 链条磨损机制<sup>[29]</sup>

损和三体磨损,这些磨损机制取决于接触体的数量<sup>[29]</sup>.一体磨损是指小颗粒冲击链环引起的颗粒侵蚀.由于频繁冲击,链环最终发生磨损.影响这种磨损因素有多种,如钩环硬度,颗粒冲击角等.当某种硬性物体猛撞软性系泊链时,则发生磨粒二体磨损,产生这种情况的原因是一系列正常力作用使这些物体发生相对运动.在船舶行业中当链条固定于海床时,这种磨损机理就转化为接触诱导磨损.如果高应力和低应力同时作用在类似的材料上,则会产生黏

着二体磨损.由于较高的接触压力,微型焊接处很容易出现这种磨损现象,再加上相对运动,材料表面将发生退化.在链条的钩环间接触区很容易产生这类磨损.三体磨粒磨损是指一个硬性颗粒夹杂在两个物体之间发生的磨损现象,物体的相对运动和正常作用力使得硬性颗粒转变成剪切性材料.对于链条来说,当沙粒和岩石碎片夹杂在两个钩环之间时,在钩环接触处则易发生三体磨损.还有一种磨损机理是由于环境作用而导致的腐蚀磨损,链条一般都处于海水中,容易发生腐蚀磨损.如果腐蚀磨损与另外任一种磨损发生协同作用,链条将发生严重磨损,极大地减少链条寿命.

为适应国际大市场及国内市场需求,我国部分企业积极开发高级别系泊链,正茂集团就是在国内率先进行相关高级别系泊链的企业之一,正茂集团与江苏科技大学联合申请了江苏省科技成果转化专项资金“海洋工程用高级别系泊关键技术开发与产业化”,江苏科技大学负责高级别系泊链研制的基础研究工作.毛振东<sup>[30]</sup>对系泊链 22MnCrNiMo 钢的热处理工艺、静摩擦磨损性能和动摩擦磨损性能进行了比较系统的研究.喻济兵<sup>[31]</sup>采用冲击滑动磨损试验装置研究系泊链 22MnCrNiMo 钢在冲击载荷作用下的磨损特性,并用电子分析天平、扫描电子显微镜、能谱仪等手段分析材料的磨损规律以及磨痕表面的形貌,认为 22MnCrNiMo 钢在冲击载荷的作用下磨损机制主要为剥层磨损.

比利时根特大学 Steenkistede 等<sup>[29]</sup>分析比较了主要的链条磨损机制和不同试验装置的优缺点,介绍了几种新型试验装置的设计概念.与传统的试验装置相比,这类新型装置具有普遍性,可以改变各种参数,如链环大小,作用力,侵蚀介质等,这样能更好地模拟沙粒和海水环境共同作用下的链条磨损.他们认为二体接触诱导磨损和三体钩环接触磨损对链条来说更为重要,由于接触诱导磨损机理很容易利用盘销式试验台研究出来,新型试验装置应该集中于磨粒三体钩环接触磨损.同时,新型试验装置可以进行多功能的链条试验,通过改善链条的参数设置(如几何形状和材料性能)以达到降低链条磨损率的效果.

#### 3.2 钢缆绳的微动磨损

随着海上石油工业的不断发展,越来越多地使用钢缆绳来固定海洋平台,但是钢缆绳在海洋大气、盐雾、风雨和海水侵蚀的恶劣环境下,很容易被腐蚀.同时,钢缆绳经受反复拉升和弯曲及动态载荷,

钢丝之间经受不同振幅的微动磨损.因此,研究钢缆绳在海洋环境下的微动腐蚀磨损具有重要现实意义.

对于海洋环境下的钢缆绳微动磨损,国内研究较少,国外较早就重视到海上钢缆绳存在微动磨损现象,对海水环境下的钢缆微动磨损做了大量实验研究<sup>[32-33]</sup>.但是近十年内尚没有相关报道.1984年Waterhouse和他的同事调查研究了在空气和BS3900组成的海水条件下单钢丝绳微动磨损行为.他们认为在微动腐蚀中,金属材料的总损失分别是机械作用损失、电化学损失和机械与电化学协同作用损失,而在机械和电化学协同作用下损失最大.他们又在不同介质、一定范围内的接触载荷下对光亮钢丝绳进行一系列微动腐蚀磨损试验,结果表明:在不含 $\text{Na}_2\text{SO}_3$ 的无氧海水中的钢丝绳磨损率可以降低到无电解液空气中的磨损率水平;海水含氧量越高,磨损率越高,海水中的钢丝绳磨损量会随着接触载荷增大而增大,但比磨损量几乎不受接触频率和接触载荷的影响.此外,Waterhouse还提出抑制海水环境下钢丝绳微动腐蚀磨损行为的三种方法:镀锌涂层、阴极保护和润滑,并分析了这三种方法对微动磨损的影响.Chaplin<sup>[34]</sup>对海洋结构物系泊绳和近海自升降绞拧提升绳的几种失效机制进行描述,提出相应的维修和检查方法,认为吊机的钢丝绳发生失效通常是疲劳退化的表现.钢丝绳存在不易看见的内部疲劳,内部疲劳会使得钢丝绳的应力接受水平降至实际张力水平,造成这种情况的机理是在绳索的第一层和第二层之间发生高角度交叉接触,造成微动磨损和微动疲劳.在暴露于空气、盐水交换的腐蚀性环境下,近海吊机提升绳的内部疲劳退化会进一步加快.控制和避免发生这种失效有以下4种方法<sup>[35]</sup>:①使用耐腐蚀镀锌绳索;②使用有效的再润滑系统,优先使用压力润滑;③对于已经服役很长时间的绳索,采用“滑动和削减”维修方式,主要用于重要部位,设备内部检查和修复区域测试;④采用可视化的电磁NDT系统监测内部退化状况.近年来,国内的王泽爱和周仲荣<sup>[36]</sup>综述了油、脂润滑减缓微动磨损的条件、作用机制,以及油、脂性能对微动磨损的影响等基础研究的进展.这为钢缆绳正确使用润滑油、脂降低微动磨损指明了方向.

### 3.3 动力定位系统螺旋桨磨损

为了满足深海地域定位作业的要求,动力定位系统将渐渐地取代传统的锚泊定位系统,其优点是定位成本不会随着水深增加而增加,并且操作也比

较方便,动力定位系统的研究越来越具有现实意义<sup>[37]</sup>.动力定位系统一般由位置及艏向测量系统、控制系统和推进系统组成,然而由于推进系统中的螺旋桨长期浸泡在海水中运转,遭受气蚀问题和海水中各种杂质的腐蚀磨损作用,经常会发生裂纹、磨损、腐蚀和折断等故障.动力定位系统中的设备一旦失控将产生严重后果.所以动力定位系统的螺旋桨涉及到的摩擦磨损问题应当引起人们的重视.

大连海事大学朱新河等<sup>[38]</sup>采用油液监测技术中的光谱分析和铁谱分析技术对船舶油润滑螺旋桨轴的磨损情况进行了监测研究,得到了螺旋桨轴正常状态下主要磨损元素的浓度和主要磨损类型磨粒的显微特征.日本三菱重工、下关船厂、长崎大学等机构的研究人员<sup>[39-40]</sup>2007年联合发表了系列文章,分析了铜质螺旋桨轴套的腐蚀性磨损问题,进行了海水与淡水的对比性腐蚀试验,并在实船中运用阴极保护法解决这一问题.印度的一家信息方案公司推出一项螺旋桨专利<sup>[41]</sup>,螺旋桨由空心筒组成,空心筒具有很薄的圆锥表面,重量很轻.薄筒的上部由转轮组成,转轮的上表面焊接叶片.利用螺旋桨滚筒连接叶片的优势是当转轮叶片由于气蚀问题发生磨损和裂纹后可以完整地取下来,然后换新.这为螺旋桨的维修管理提供便利.

## 4 作业设备的摩擦学问题

### 4.1 套管磨损问题

钻井隔水导管是从海上钻井平台下到海底浅层的套管,是钻井作业中要下入的第一层管柱,并且在后期钻井作业中一直起到提供循环通道、支撑井口防喷器、提供油气并经井下到海面通道的作用,隔水导管自身的安全和经济性对钻井作业有很大影响.在海上进行表层钻井时,由于隔水导管的振动加上海流的作用,钻柱与钻井隔水导管之间相互敲击,以致在弃井回收钻井隔水导管时发现个别导管的接头处发生严重的偏磨,磨损深度达10~20 mm.

隔水导管与钻柱的摩擦问题十分普遍.对这类实际问题的研究,国内大多采用杆柱的振动频率以及杆柱的弹性稳定性研究方法<sup>[42]</sup>,开展钻柱套管之间的谐振问题的研究,采用和选配合理的钻井参数,以期达到在钻井作业过程中保护套管不致产生过度磨损.董小钧等<sup>[43]</sup>总结了国内外套管磨损的研究进展.国内关于套管磨损研究大多集中于深井、超深井及大位移井套管磨损机理及预测技术<sup>[44-46]</sup>,中国石油大学(北京)在国内外首次研制成功了全尺寸动

载套管磨损试验机,实现了对套管与钻杆接头之间多种磨损工况的模拟,为开展深井超深井的套管磨损试验研究奠定了可靠基础<sup>[47]</sup>.国外先后对陆地钻井套管和海洋钻井隔水管的磨损开展了大量的实验室研究和现场试验研究,并在此基础上开发出了 CWEAR、WEAR2000 和 Grant Jardine 等套管磨损预测软件,得到了较成功的应用.

#### 4.2 电潜泵的磨损问题

海洋石油采油平台大量使用潜油电泵,它是一种最早用于采油的人工举升设备,是提高采液速度、实现油井继续稳产的有效途径,现已成为国内外人工举升采油的第二大设备.潜油电泵由潜油电机和多级离心泵组成,其结构特点是细而长,沉没于深 1 000 ~ 2 000 m 左右井下油气水的三相混合液中,将液体举升到地面.

在电潜泵抽含砂井液时泵的轴承会因砂粒冲蚀而发生径向磨损,导致生产管柱振动,造成泵的补偿器和电动机发生故障.泵的扩压管和叶导轮受到砂粒冲蚀也会降低泵系统的排液效率,导致泵的排液量低于优选值.刘新岩等<sup>[48]</sup>对高含砂油井电潜泵进行机组解剖,认为泵的磨损类型有径向磨损、轴向磨损和侵蚀磨损三种.并从泵的结构、材料和机组整体防砂工艺两个方面综合考虑,提出了在高含砂油井中减轻磨损进而延长电潜泵工作寿命的改进方案.瑞士苏尔寿泵业公司的 Susanne Kruger,瑞士联邦洛桑高等工业大学的 Nicolas Martin 和 Philippe Dupont 等<sup>[49]</sup>对泵的叶轮磨损进行评估预测.在设计泵时尽可能预测泵的磨损情况,认为固体颗粒参数包括硬度和形状大小,材料结构、硬度、流动形式在泵的磨损设计中起到很大的作用,最关键的是避免涡旋流和二层流的发生.考虑到泵的整体流动形式涉及计算流体动力学的相关理论,他们提出采用 CFD 技术来预测泵的磨损情况,对比了实验和仿真情况下泵的叶轮磨损状况,探讨了颗粒浓度、冲击角度、颗粒速度、湍流动能和湍流形式等影响因素.结果表明在叶轮片的前缘,颗粒浓度和冲击角度在冲击过程中起到很大作用,而在叶轮片机翼后缘、叶尖间隙和侧衬板上,流动形式对摩擦磨损过程影响很大.此方法只能对泵的磨损状况进行定性预测,对材料的硬度和软化度等复杂的物理行为以及边界层的分辨情况在摩擦磨损的定性预测中均受到限制.

## 5 结束语

目前,海洋结构物摩擦学问题的研究并未统一,

不论是平台结构还是设备的摩擦问题均需考虑海洋环境的特殊性,由于海洋环境的作用是一个复杂的过程,国内外关于海洋平台结构及设备的摩擦学问题研究较少,较为突出的摩擦问题是钻井套管、作业泵和管件的腐蚀磨损,一般都是进行大量现场实验,采用仿真技术,建立数学模型,在不同设备的腐蚀磨损机制研究和预测评估中取得一些突破性的进展.

随着深海石油的开采,浮式平台结构得到广泛应用,定位系统也应运而生,传统的锚泊定位和动力定位系统的摩擦问题也较为突出,国内对链钢及钢缆系泊的摩擦问题研究主要停留在链钢材料的摩擦磨损试验阶段,动力定位系统的摩擦问题尚未展开研究.在海水下面作业的设备除了遭受海泥、海沙和海水等污染物质的冲刷及磨损外,还会面临海水超高压作用下的摩擦副密封失效等问题.在一些极区海域,关于海冰对海洋结构物的摩擦问题的研究在国内尚未见报道.所以,针对海洋环境的特殊性,有必要开展海洋结构物摩擦学问题的系统研究.最后从以下三方面对海洋结构物的摩擦学问题研究进行展望.

(1) 努力开展极区海域冰块对结构物的摩擦磨损机理研究工作;加强海上石油开采设备中关键性的典型机械零部件的微动损伤研究;加强定位设备的摩擦磨损及微动腐蚀磨损研究.

(2) 大力发展海洋钻采及输送设备的磨损预测和检测技术,制定全面的安全评估体系和预防措施.

(3) 系统展开海洋环境下结构物及设备材料的摩擦磨损及微动摩擦试验研究;加强钻井套管防磨材料防磨措施和仪器的研究,研制出高密度、高分子耐磨材料;加强超高压海水介质润滑下材料的磨损特性研究;积极研发经济、高效和绿色的防污涂层材料,以此推动海洋绿色摩擦学的发展.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Sodhi D S. Crushing failure during ice - structure interaction [ J ]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68: 1 889 - 1 921.
- [ 2 ] Moslet P O. Medium scale ice - structure interaction [ J ]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 54: 143 - 152.
- [ 3 ] Tuhkuri J. Experimental observations of the brittle failure process of ice and ice - structure contact [ J ]. *Cold Regions Sci Technol*, 1995, 23: 265 - 278.
- [ 4 ] Singh S K, Jordaan I J, Xiao J, *et al.* The flow properties of crushed ice [ J ]. *J Offshore Mech Arctic Eng*, 1995, 117(4): 276 - 282.
- [ 5 ] Fiorio B. Wear characterisation and degradation mechanisms of a

- concrete surface under ice friction [J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 19:366-375.
- [6] Fiorio B, Meyssonier M, Boulon M. Experimental study of the friction of ice over concrete under simplified ice - structure interaction conditions [J]. *Can J Civil Engineering*, 2002;9:347-359.
- [7] Guo Y. Design assembled legs for offshore jacket platform [D]. China University of Petroleum, 2010(in Chinese)[郭燕. 自升式钻井平台装配式桩腿的设计[D]. 中国石油大学, 2010].
- [8] Zhou Z R. Recent development in fretting research [J]. *Tribology*, 1997, 17(3):272-280(in Chinese)[周仲荣. 微动摩擦学的发展现状与趋势[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(3):272-280].
- [9] Wang S X, Dou S B, Li Y P. Failure analysis of connecting bolt [J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2009, 4(4):225-228(in Chinese)[王胜霞, 窦松柏, 李艳萍. 连接螺栓的失效分析[J]. 失效分析与预防, 2009, 4(4):225-228].
- [10] Lv F J, Fu G R. Fretting fatigue crack analysis of aircraft connecting bolt [J]. *Equipment Environment Engineering*, 2011, 8(5):74-76(in Chinese)[吕凤军, 傅国如. 某型飞机对接螺栓微动疲劳裂纹分析[J]. 装备环境工程, 2011, 8(5):74-76].
- [11] Ibrahima R A, Pettit C L. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 279:857-936.
- [12] Brito L V R, Coutinho R, Cavalcanti E H S, et al. The influence of macrofouling on the corrosion behaviour of API 5L X65 carbon steel [J]. *Biofouling*, 2007, 23(3):193-201.
- [13] Sun H Y, Ma S D, Hou B R, et al. Mathematical analysis of long term fouling corrosion in sea water [J]. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 2003, 38(3):223-227.
- [14] Duan D X. The adhesive strategies of fouling organism and application of enzyme in antibiofouling [J]. *Marine Science*, 2011, 35(7):107-112(in Chinese)[段东霞. 污损生物附着机理及酶在生物防污中的应用[J]. 海洋科学, 2011, 35(7):107-112].
- [15] Jain A, Bhosle N B. Biochemical composition of the marine conditioning film: implications for bacterial adhesion [J]. *Biofouling*, 2009, (25):13-19.
- [16] Zardus J D, Nedved B T, Huang Y, et al. Microbial biofilms facilitate adhesion in biofouling invertebrates [J]. *the Biological Bulletin*, 2008, 214(1):91-98.
- [17] Bongaerts J H, Cooper-White J J, Stokes J R. Low biofouling chitosan - hyaluronic acid multilayers with ultra - low friction coefficients [J]. *Biomacromolecules*, 2009, 10(5):1287-1294.
- [18] Kang Y, Chai X J. Low surface energy antifouling coatings [J]. *Coating and Plating*, 2010, (6):13-15(in Chinese)[康永, 柴秀娟. 低表面能涂料[J]. 涂装与电镀, 2010, (6):13-15].
- [19] Shao J J, Lin G C, Zhang J W. Study on shark skin's bionical and antifouling properties [J]. *Paint & Coatings Industry*, 2008, 38(10):39-41(in Chinese)[邵静静, 蔺存国, 张金伟. 鲨鱼皮仿生防污研究[J]. 涂料工业, 2008, 38(10):39-41].
- [20] Bai X Q, Yuan C Q, Yan X P. Research on green bionic ship antifouling techniques based on surface morphology of shell [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, 33(1):75-78(in Chinese)[白秀琴, 袁成清, 严新平. 基于贝壳表面形貌仿生的船舶绿色防污研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(1):75-78].
- [21] Qian S W. Antifouling technology of low surface energy and bio - inspired microstructure [D]. National University of Defense Technology, 2008(in Chinese)[钱斯文. 低表面能及仿生表面微结构防污技术[D]. 国防科学技术大学学位论文, 2008].
- [22] Det Norske Veritas. Erosive wear in piping system[S]. DNV RP O501, Revision 4.2, 2007.
- [23] Zhang J X, Shi L. The wear analysis of the control valve internals [J]. *Automation in Petro - Chemical Industry*, 2006(5):85-88(in Chinese)[张景轩, 石磊. 控制阀内件磨损分析[J]. 石油化工自动化, 2006(5):85-88].
- [24] Sundararajan G. A comprehensive model for the solid particle erosion of ductile materials [J]. *Wear*, 1991, 149:111-127.
- [25] Yan X W, Yang S D. Pilot study about the contaminant sensitivity of seawater hydraulic pumps [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2004(5):62-63(in Chinese)[晏小伟, 杨曙东. 海水泵污染磨损机理的初步研究[J]. 液压与气动, 2004(5):62-63].
- [26] Zhao J S, Yang S D. Research on the contamination wear and its control of piston shoe pairs in hydraulic piston pumps [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2005(4):68-70(in Chinese)[赵继松, 杨曙东. 海水泵滑靴副污染磨损及控制方法研究[J]. 液压与气动, 2005(4):68-70].
- [27] He X, Zhu B, Liu Y, Jiang Z. Study on a seawater hydraulic piston pump with check valves for underwater tools [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power and Energy*, 2012, 226:151-160.
- [28] Hua Z P. Thought on development strategy of offshore oil in China[N]. *China Petroleum Daily*, 2006:10-13(in Chinese)[华贲澎. 我国海洋石油发展战略思考[N]. 中国石油报, 2006:10-13].
- [29] Steenkiste D V, Plasschaert S, De Baets P. Abrasive wear of link chains [J]. *Sustainable Construction and Design*, 2011:388-396.
- [30] Mao Z D. Research on frictional wear and property resistance of mooring chain steel [D]. Jiangsu University of Science and Technology, 2011(in Chinese)[毛振东. 系泊链钢的摩擦磨损与性能研究[D]. 江苏科技大学, 2011].
- [31] Yu Q B. Dynamic friction wear of mooring chain in marine engineering [J]. *Marine Electric & Electronic Engineering*, 2011, 31(7):70-74(in Chinese)[喻济兵. 海洋工程用系泊链钢的动摩擦磨损研究[J]. 船电技术, 2011, 31(7):70-74].
- [32] Pearson B R, Waterhouse R B. The fretting of steels in seawater

- [C]. Proceedings of Seminar on Tribology Offshore, Institution of Mechanical Engineers, London, 1984 - 5.
- [33] Pearson B R, Waterhouse R B. The Fretting corrosion in seawater of materials used in offshore structures [C]. Proceedings of 9th international Congress on Metallic Corrosion, Toronto, 1984 - 6.
- [34] Chaplin C R. Failure mechanisms in wire ropes [J]. Engineering Failure Analysis, 1995, 2(1):45 - 57.
- [35] Chaplin C R, Smith I H. Maintenance, inspection and discard of diving bell hoist ropes [C]. Health & Safety Offshore Technology Report OTH 91388, HMSO, London, 1993.
- [36] Wang Z A, Zhou Z R. The research progress on palliation of fretting wear with lubricants [J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(8):100 - 104 (in Chinese) [王泽爱, 周仲荣. 润滑剂减缓微动磨损研究进展[J]. 润滑与密封, 2009, 34(8):100 - 104].
- [37] Zhou L, Wang L, Chen H. Review on the study of dynamic positioning control system for vessels [J]. Ship & Ocean Engineering, 2008, 37(2):86 - 91 (in Chinese) [周利, 王磊, 陈恒. 动力定位控制系统研究[J]. 船海工程, 2008, 37(2):86 - 91].
- [38] Zhu X H, Yan Z J, Wang H Z. Research on the condition monitoring of screw shaft [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2000, 26(4):14 - 16 (in Chinese) [朱新河, 严志军, 王宏志, 等. 船舶螺旋桨轴油液监测的研究[J]. 大连海事大学学报, 2000, 26(4):14 - 16].
- [39] Yano A, Hirayama Y, Sakanishi A, *et al.* Corrosive wear of bronze propeller shaft sleeve (part 1: Investigation of the sleeve used and fundamental corrosive wear test) [J]. Tribology Transactions, 2007, 50(1):1 - 12.
- [40] Yano A, Hirayama Y, Sakanishi A, *et al.* Corrosive wear of bronze propeller shaft sleeve (part 2: Wear control by cathodic protection and application to an actual ferry) [J]. Tribology Transactions, 2007, 50(1):13 - 24.
- [41] Athena Information Solutions Pvt. Ltd. Indian inventor develops microlight propeller hydroturbine; Indian, 443224651 [P]. 2010, 04, 14.
- [42] Jiang W. Study on critical load and elastic stability of drilling riser [J]. China Offshore Oil and Gas (Engineering), 2006, 18(6):403 - 406 (in Chinese) [姜伟. 钻井隔水导管临界载荷及其弹性稳定性研究[J]. 中国海上油气(工程), 2006, 18(6):403 - 406].
- [43] Dong X J, Yang Z F, He W T. Study and development of casing wear [J]. Oil Field Equipment, 2008, 37(4):32 - 36 (in Chinese) [董小钧, 杨作峰, 何文涛. 套管磨损研究进展[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(4):32 - 36].
- [44] Tan C J, Gao D L, Tang H X, *et al.* Method of casing wear prediction for Liuhua mega - extended - reach wells in South China Sea [J]. ODPT, 2006, 28(3):1 - 3 (in Chinese) [覃成锦, 高德利, 唐海雄, 等. 南海流花超大位移井套管磨损预测方法[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(3):1 - 3].
- [45] Liu S J, Xie R J, Liu X L. Research and application of casing wear prediction for extended reach well [J]. ODPT, 2010, 32(6):1 - 3 (in Chinese) [刘书杰, 谢仁军, 刘小龙. 大位移井套管磨损预测模型研究及其应用[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(6):1 - 3].
- [46] Sun L Z, Gao D L, Zhu K L. Models & tests of casing wear in drilling for oil & gas [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012, (4):44 - 47.
- [47] Chu S L, Fan J C, Zhang L B, *et al.* The development for a new type of sliding impact wear test machine for petroleum casing in real size [J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(7):125 - 128 (in Chinese) [储胜利, 樊建春, 张来斌. 全尺寸石油套管冲击滑动复合磨损试验机的研制[J]. 润滑与密封, 2007, 32(7):125 - 128].
- [48] Liu X Y, Li F M, Zhang Z L. The mode of damage and improvement measure of electric submersible pump influenced by drilling fluids concluding amounts of sand and oil [J]. China Petroleum Machinery, 2006, 34(3):63 - 65 (in Chinese) [刘新岩, 李飞明, 张祖良. 高含砂油井液对电潜泵的破坏形式及改进措施[J]. 石油机械, 2006, 34(3):63 - 65].
- [49] Susanne K, Nicolas M, Philippe D. Assessment of wear erosion - in impellers [C]. Proceedings of the twenty - sixth International pump users symposium, 2010:51 - 56.