

海水抽水蓄能电站防污方案研究

陈满¹, 彭鹏¹, 麻建超¹, 刘超^{2,3,4}, 段继周^{2,3,4}, 黄彦良^{2,3,4}

(1. 南方电网调峰调频发电有限公司, 广州 510635; 2. 中国科学院海洋研究所 海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071; 4. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋腐蚀与防护开放工作室, 山东 青岛 266237)

摘要: 为了给未来建设海水抽水蓄能电站提供防污解决方案, 分析了海洋污损生物的附着过程及特点, 以及海水抽水蓄能电站需要防污的部位, 比较国内外现有的海洋污损生物的治理技术。得到了海水抽水蓄能电站水工建筑物、管道、水泵水轮机组及其辅助系统的防污方案。通过分析国内海水抽水蓄能电站防污的现状、存在的不足, 展望了未来重点研究的方向, 为国内海水抽水蓄能电站的建设提供参考。

关键词: 海水; 抽水蓄能电站; 生物污损; 防污方案

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.10.010

中图分类号: U698.7 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)10-0060-07

Antifouling Strategies for Seawater Pumped Storage Power Plant

CHEN Man¹, PENG Peng¹, MA Jian-chao¹, LIU Chao^{2,3,4}, DUAN Ji-zhou^{2,3,4}, HUANG Yan-liang^{2,3,4}

(1. CSG Power Generation Co., Ltd, Guangzhou 510635, China;

2. CAS Key Laboratory of Marine Environmental Corrosion and Bio-fouling, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

3. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071, China;

4. Open Studio for Marine Corrosion and Protection, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

ABSTRACT: To provide antifouling solutions for the future construction of seawater pumped storage power station. In this paper, the adhesion process and characteristics of marine fouling organisms were analyzed, the parts where seawater pumped storage power station required antifouling were determined and the existing antifouling technologies prevented marine fouling organisms in the word were compared. Antifouling solutions for hydraulic structures, pipelines, pump turbine units and their auxiliary systems in seawater pumped storage power plant were obtained. Status, shortages and research direction of antifouling technologies in domestic seawater pumped storage power station were obtained. It provides reference for construction of domestic seawater pumped storage power plant.

KEY WORDS: seawater; pumped-storage power plant; biofouling; antifouling solution

海水抽水蓄能电站是一种解决沿海或海岛地区电网高峰、低谷之间供需矛盾的储能方式, 通常以大

海作为下水库, 在沿海合适的山地上修建上水库, 利

用海水作为流动介质。与以淡水为介质的抽水蓄能电站一样, 海水抽水蓄能电站运行灵活, 可以与风电、太阳能等其他新能源联合使用, 承担灵活调峰、调相、

收稿日期: 2018-07-13; 修订日期: 2018-08-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0903700; 2017YFB0903702)

作者简介: 陈满(1973—), 男, 广东遂溪人, 高级工程师, 主要从事抽水蓄能电厂电气设备检修及电池储能技术研究工作。

通讯作者: 黄彦良(1966—), 男, 辽宁人, 博士, 研究员, 主要研究方向为海洋环境腐蚀与生物污损。

调频、事故备用等任务。与陆上淡水抽水蓄能电站相比,海水抽水蓄能电站不需要建设下水库,水量和水位几乎不受季节变化、雨季等的影响,有利于发电水泵水轮机的稳定运行^[1-3]。海水抽水蓄能电站虽然具有诸多优点,但由于海洋环境的特殊性,存在海水的腐蚀、生物污损、环境等问题。其中,生物污损问题在淡水抽水蓄能电站中也存在,但与淡水环境不同的是,海洋中具有更加丰富的海洋生物,其中大部分都可以成为污损生物,丰度也比淡水中高很多,海洋生物污损问题将更严重。近年来淡水抽水蓄能电站中爆发的淡水壳菜生物污损问题已经引起了广泛关注^[4-7]。海水抽水蓄能电站的生物污损问题必须要未雨绸缪。

在未经任何处理的海洋结构物上很容易被海洋生物附着。与淡水环境不同,海洋中生物种类多样、数量多。目前已知的约 4000 多种海洋生物都可以成为污损生物,其固着生长在船壳水线下、海洋石油钻井平台、人工码头、养殖网具等各类海洋构筑物上,给人类的生活、生产经营活动带来负面的影响^[8]。

海洋污损生物主要分为软性污损生物(如海绵)和硬性污损生物(如藤壶)。其中给人类生活、生产经营活动造成较大危害的主要是营固着生活、具有坚硬石灰质外壳或骨架的硬性污损生物,包括双壳类软体动物(如贻贝)、无柄蔓足类(如纹藤壶)和苔藓虫^[9]。通常,污损生物的环境适应能力强,目前的治理手段尚不能完全进行有效控制。文中将对海水抽水蓄能电站关键部位的污损生物防治对策进行初步探讨,以期对建设海水抽水蓄能电站和生态环境的保护提供科学依据。

1 生物污损对海水抽水蓄能电站的危害

海水抽水蓄能电站是一种解决沿海城市或地区,尤其是海岛电力稳定的重要手段。然而,藤壶、贻贝、苔藓虫等海洋污损生物的幼虫会随海水进入循环水管道系统,附着、生长、繁殖,形成生物群落,从而产生生物污损危害。目前在运转滨海电厂的经验表明,严重的生物污损会缩小管径,增大流道损失,降低生产效率,甚至会完全阻塞管道。附着不牢、脱落的污损生物还会导致阀门无法关严甚至阻塞,更为严重的会损坏设备仪表,引发严重的安全事故,造成巨大的经济损失^[10-12]。此外,生物污损还会加速金属的腐蚀。在日本冲绳海水抽水蓄能电站的真机实验中发现,不锈钢材质的转轮、活动导叶、顶盖、以及下环过流面上都确认了点蚀的发生,同时发现在每一个部件表面都附着有碳酸钙,并且其上覆盖有粘液(果冻状的海洋微生物)^[13]。因此,在海水抽水蓄能电站的设计和建设过程中,海洋生物污损问题需要特别加以注意。

2 海洋污损生物附着过程及其特点

研究表明,海洋生物污损的形成通常要经历一个较为复杂的过程。浸入海水中的新鲜物体表面首先被粘膜(Condition film)覆盖,这个过程通常时间很短,几分钟到几个小时的时间。粘膜主要由表面物理吸附的蛋白质、多糖等有机大分子组成。随后,受物体表面粘膜上营养物质的吸引,游离在海水中的细菌等会不断粘附到粘膜上生长,以几何级数的速率不断繁殖,形成细菌群落,并不断分泌胞外多糖,形成初级生物膜。与此同时,单细胞的硅藻等原生物也附着在物体表面,生长,几何级数繁殖,生物群落组成更加丰富,形成更大的生物膜。同时,捕获海洋中漂浮的富含营养物质的海泥,形成黏膜(Slime)。接着,海洋中游离的大型污损生物的孢子和幼虫(如绿藻孢子、藤壶的腺介幼虫)接近被黏膜所覆盖的物体表面,发生如下过程:表面接触—表面滑动—寻找合适位置—分泌粘液增强附着—变态生长并固着于浸海物体表面—不断繁殖生长扩大形成群落,从而导致材料表面的生物污损^[14]。

通常,以藤壶为代表的污损生物具有很强的繁殖能力和环境适应能力,能够适应输水管道中阴暗潮湿、高水流冲刷和低溶解氧的环境条件。已有研究表明,附着在海水输送管道内壁、拦污栅或过滤网的污损生物主要是滤食性的双壳类和无柄蔓足类。其中,双壳类以贻贝为代表。紫贻贝多在北方温带海域产生严重危害,而在南方的亚热带或热带海域则以翡翠贻贝为优势种。无柄蔓足类主要是各种藤壶,如钟巨藤壶、致密藤壶、网纹藤壶、象牙藤壶等种类,南北方海域均存在,优势种类不同而已。管栖多毛类通常是龙介虫,华美盘管虫在某些海域是优势物种。另外,还会有牡蛎和蛤等种类出现。腔肠动物主要是筒螅、蕈枝螅以及长钟螅,具体种类与地理位置有关。苔藓虫仅在海水管道系统的进水口和滤水池或拦污栅等有光照的部位有附着^[15-17]。

研究表明,海水流速会影响污损生物的附着。如海洋污损生物的代表藤壶在流速约为 5 m/s 时就会产生附着,在 1~2 m/s 时最容易附着^[13]。除了地理位置、海水的流动速度,污损生物的种类和数量还与季节、海水温度和盐度、海水中营养物质的浓度、pH 值、光照等因素有关。此外,浸水材料本身的物理化学性质如材料的化学组成(如含铜合金),材料的表面性能(如表面浸润性、表面自由能)均可对海洋生物产生一定的影响,从而影响海洋生物的附着^[18-20]。

3 海水抽水蓄能电站需要防污的典型部位

海水抽水蓄能电站的基本工作原理如图 1 所示。

通常,电站以海洋作为下水库,在地形合适的山体修建上水库。在电网电力使用不紧张时,即电能充足时,可以用富余的电能驱动海水泵或可逆式水泵水轮机组将下水库的海水输送到上水库储存起来,即电能转化为水的势能。在电网电力使用紧张时,即电能匮乏时,利用储存的高水位海水驱动水轮机组发电,将水的势能重新转化为电能。

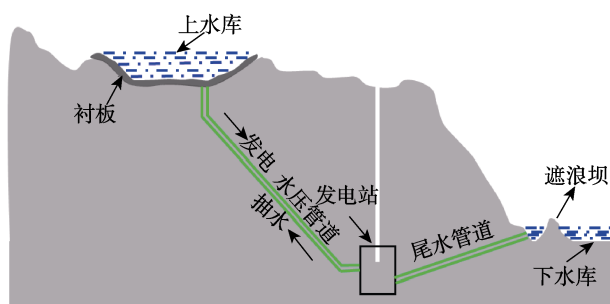


图1 海水抽水蓄能电站系统工作原理

海水抽水蓄能电站需要防污的部位主要包括疏海水输水管道(如X70钢管、混凝土水渠和玻璃纤维增强聚酯管等)、拦污栅或过滤网、阀门、机组(水轮机、泵组的管道系统、辅助系统等)、尾水管等^[13,21-23]。其中,藤壶、牡蛎等在输水管道、水泵水轮机过流面、管道阀门等部件上的附着是导致流道损失、工作效率降低及管路阻塞的重要原因,因此,要特别注意输送系统中易于形成沉淀的部位及管路,比如弯头、阀门、尾水管路、机组的蜗壳等部件。

4 国内外生物污损的治理方法

海洋生物污损是人类从事海洋活动以来一直面临的问题,其在全球范围内给人们的海事活动造成了各种各样的危害。人们也对生物污损开展了广泛的研究和试验,不断探索并开发出了许多治理方法,根据其作用机理主要分为物理方法、化学方法和生物方法。

4.1 物理方法

物理防污方法,一般是指采用物理手段来达到防除污损生物的目的。主要有人工或机械清除法、水喷射流法、过滤法、控制水流速度法、超声波法、光学方法等^[7,24-25]。

人工或机械清除法通常需要工人借助特制的清除工具,对附着在船壳或海洋构筑物表面上的大型污损生物如藤壶、海草等进行铲除,是一种古老且传统的防污损生物的方法。随着时代的进步,也发展了利用大型机械(如装载机在干船坞清理船壳表面)或水下机器人进行清除。在条件允许时,也可以先使用淡水使海生物死亡,再进行机械清除。机械清除的优点

是操作简单,对清除大型污损生物效果好。但这种方法通常要停工停产,而且耗费时间久,经济性差,并且只能清除,不能防止污损生物的再次附着。此外,在清除过程中,还会损坏船体或海洋构筑物表面,带来腐蚀等其他问题。因此,在实际应用中,应尽量减少机械防除方法使用频率。

水喷射流法是利用高压水枪喷射出的水射流冲击表面产生的剪切应力来清除污损生物。常见用于涂刷有低表面涂料的船壳的清洗,因为低表面能涂料具有较好的延展性,在高压水流冲击时,会发生一定的形变,吸收能量而不会被损坏。此种清除方法具有较好的清除效果,对涂层的破坏小,但对设备要求高,成本较高。

过滤法通常在将海水引入海水输送管道之前,设置海水过滤系统,利用过滤系统中的土壤、沙子或过滤网拦截大部分污损生物的虫卵、孢子、幼虫等。这种方法的优点是操作简单、成本低、能够滤掉大部分污损生物或其幼虫等,在一定程度上能抑制污损生物。但过滤法不能100%地过滤掉所有生物,“漏网”的孢子或幼虫进入管道后会迅速生长繁殖,导致生物污损。

控制水流速度法是利用海洋污损生物附着对水流速度的敏感性,在条件允许的情况下,通过加大管道中水流的速度来达到防污的目的。此方法的优点是易于实施、成本较低,缺点是应用受限,适用于直行且较宽的管道系统,对弯头较多或狭窄的管道系统,容易造成堵塞。

超声波法是利用电子装置产生一定频率的超声波,扰乱污损生物赖以生存的环境。此方法优点是易于实施,有一定防污效果。然而,制造超声波通常需要消耗大量的能量,成本高。此外,所用超声波的频率对现场工作人员、海洋构筑物和其他仪器的影响尚需要研究。

光学方法是利用特定波长的光来趋避、抑制污损生物幼虫的附着、生长或杀死污损生物,达到防污的目的。采用较多的紫外线,因其能改变某些生物分子的化学性质,从而抑制污损生物的生长发育。这一方法的最新研究进展是,阿克苏诺贝尔旗下的海洋涂料公司IP开发出了基于紫外发光二极管(UV-LED)的海洋防污系统,该系统将UV-LED与海洋防污涂料融为一体,达到协同防污目的。

物理方法具有较好的清除效果,并且对周围环境影响小,但是其往往需要大量的人力物力(如机械清除法),甚至需要较高的技术要求(如超声波法),因此,物理方法不适用于大规模的污损生物防治。

4.2 化学方法

化学防污方法是指利用特定的化学手段或杀生

剂对污损生物及其幼体进行趋避、抑制甚至是毒杀,达到抑制或完全阻止附着,大大降低附着密度或强度,从而达到防污的目的。化学防污方法简单、经济、高效,是目前工业及航运业应用最广泛的方法。根据实施化学手段的不同,化学防污方法主要分为直接加入化学药剂法(加药法)、电解防污法、涂装防污涂料法和铜合金包覆法。

4.2.1 加药法

加药法是指直接向待处理海水中投放一定量单一的或复配的具有趋避或毒性的化学物质,趋避或抑制污损生物幼体的附着及生长发育,或直接杀死游离的或附着的污损生物。加药法实施简便、效果显著、见效快,适用于封闭系统、海水循环管道等的污损生物防治。

一般加药法采用的化学物质按杀生机理分为氧化型和非氧化型杀生剂。其中氧化型杀生剂主要有次氯酸钠溶液、液氯、氯胺、氯气、二氧化氯、双氧水、臭氧等;非氧化型杀生剂常见的则有季胺盐、金属盐溶液(如铜离子盐溶液)、烷芳基胺(如 MEXEL 432)等。与液氯等相比,臭氧的杀生作用更强、效率更高、污染小,显得更有前途^[26]。此外,采用非氧化性杀生剂和氧化性杀生剂交替使用在滨海电厂的实践中也取得了良好的控制污损生物生长的效果。

4.2.2 电解防污法

电解防污技术是指利用特定的电极,通过电化学方法生成的化学物质来抑制或杀死污损生物及其幼体。电解防污方法操作简便、自动化程度高、相对安全可靠。既可适用于滨海电厂的循环水系统防污,也可应用于船舶及海洋平台的防污。电解防污法主要分为电解海水防污法和电解重金属防污法。

电解海水防污法是利用特制的电极(如钎钛阳极)电解海水产生有效氯,如 HClO^- 、 ClO^- 、 Cl_2 ,这些电解产物对海洋污损生物或其孢子、幼虫具有很强的杀伤作用,从而达到防污的目的。后来发展的电解涂层的方法是电解海水方法的延伸,在被保护结构表面涂覆一层导电涂料,然后在涂层上施加微弱的电流,涂层表面附近的海水电解,形成 $10\ \mu\text{m}$ 厚的次氯酸根离子层,抑制海洋污损生物的附着^[27]。但电解涂层的方法应用受限,目前实践中广泛应用的还是电解海水的方法。

电解重金属防污法是利用电解产生的重金属离子(主要是铜离子)对海洋污损生物的细胞毒性达到防污的目的。目前,电解铜-铝(铁)防污技术和电解氯-铜防污技术是电解重金属防污法常用的两种技术。其中,电解铜-铝防污技术的原理是:在电解槽中,同时施加直流电给铜阳极和铝阳极,铜阳极电解生成有毒的铜离子(杀生剂),铝阳极电解生成三价的铝离子,与海水中的氢氧根离子形成氢氧化铝絮凝

物,作为铜离子的载体,起到缓释的作用。而电解氯-铜防污技术的阳极是由金属铜和析氯活性阳极组成,当电流通过阳极时,铜阳极表面生成铜离子,而析氯活性阳极电解生成氯气,与阳极表面的海水作用产生次氯酸根离子,两种有毒物质协同作用,增强防污效果。

电解重金属的优点是投资小、运行成本低、安装简单;其缺点是产生重金属离子,对海水环境污染较大。

4.2.3 涂装防污涂料法

涂装防污涂料法是指在海洋构筑物(如船壳)与海水接触的表面上涂装防污涂料的一种方法。目前,防污涂料主要分为两大类:一类是含防污剂(化学毒性物质)的防污涂料;另一类是不含防污剂的污损释放涂料。其中,含防污剂的防污涂料主要依靠有毒的防污剂缓慢释放到海水中,抑制海洋污损生物附着和生长,达到防污目的。污损释放涂料具有光滑、低表面能、低弹性模量的表面,其本身不防污,海洋污损生物可以在其表面生长,但附着不牢固,在外界作用力或水流剪切作用下,很容易从涂层表面去除掉。

涂装防污涂料的优点是简便、成本低、维护周期长、应用广泛。缺点是构成防污涂料的大多数树脂降解慢,会导致海洋微塑料污染;有毒防污剂会对非目标生物造成威胁,破坏海洋生态环境。

随着研究的深入和科技的发展,近年来,生物可降解树脂、海水中快速降解防污剂和新型无毒防污涂料不断涌现。

4.2.4 铜合金包覆法

利用铜或铜合金在海水中缓慢腐蚀以及铜离子对海洋污损生物的细胞毒性,将铜或铜合金制成薄片或筛网,覆于被保护物体的表面,通过铜或铜合金在海水中的缓慢溶解、不断释放有毒的铜离子,从而达到抑制海洋污损生物附着的目的。

4.3 生物方法

生物防污方法是指利用自然界中的生物活性物质来防止海洋污损生物附着的一种方法。一般地,自然界中具有防污活性的天然化合物主要包括:无机酸、有机酸、大环内酯类、萜类、酚类、甾醇类和吡啶类等。人们已从海洋生物和陆地生物中提取到了一系列具有防污活性的天然化合物,初步研究结果表明,这些化合物具有良好的防污活性^[28]。其中,海洋细菌、海绵、柳珊瑚、石莼、牡丹皮、辣椒、苦楝树等都进行了较深入的研究。天然产物来源广泛,可自然分解,不会导致生物富集是其优点,但是,其大批量生产问题、在涂料中长久保持活性以及在海水中缓释的问题目前尚没有解决好。因此,基于天然活性物质的生物防污法尚处于实验室研究阶段。

5 海洋污损生物防除对策

5.1 水工建筑物的防污防护

海水抽水蓄能电站的主要水工建筑物包括上水库、输水系统、厂房以及尾水渠等结构。其中,需要进行防污防护的部位主要是上下水库的进出水口、压力管道、尾水渠^[29]。

对于上水库的进水口(海水抽入上水库),可以采取耐污合金和涂刷防污涂料结合的方法,同时配合管道的电解海水防污,期望达到较好的防污效果。对于上水库的出水口(海水流出上水库),应设计拦污栅或过滤网,同时增设二次滤网。因为粗拦污栅的栅条间距通常较宽(如50 mm),只能清除水流中粗大的污物、集中污物和漂浮物,而旋转滤网因自身结构特点,容易出现喷射系统出力不够、密封不严等问题,导致垃圾进入净侧。因此,在做好粗拦污栅、旋转滤网选用耐污材料、涂刷防污涂料和电解海水防污等工作后,为了达到更好的防污效果和更长久的检修期,建议增设二次滤网^[30]。

对于压力管道,一般采用钢管作为海水的输水管道,材质通常采用X70管线钢。同时,考虑到海水腐蚀的影响,通常会做防腐处理,常常采用防腐涂料和阴极保护措施。但这些防腐措施不会阻止生物的附着,因此,也要考虑其防污问题。

对于大管径大流量的管道,在经防腐涂料处理过的钢管上,涂刷防污涂料通常比较经济实用。目前的无锡长效自抛光防污涂料已经广泛应用在海洋船舶的防污处理上,通过调节涂料的自抛速率以及所含防污剂的渗出速率,自抛光防污涂料可以达到5年以上的防污效果^[31]。与船舶不同的是,海水抽水蓄能电站管道中海水的流速可能没有船舶的速度快,还有就是抽蓄是间歇性工作,会出现干湿交替。海水虽然经过拦污栅或过滤网,但是仍然会含有泥沙,海水在管道中的流动会对管壁有一定的冲刷作用。防污剂的过度排放也会影响海洋环境以及非目标生物等。因此,在设计海水抽水蓄能电站管道自抛光防污涂料配方时,要充分考虑到耐干湿交替、耐冲刷、防污剂的渗出等因素。此外,污损释放型防污涂料(也叫低表面能防污涂料)技术正受到各个国家的重视,如将其涂刷于管道内壁,不仅海洋污损生物很难附着,而且水流的作用力还可以使附着不牢的生物脱落。为了达到绿色环保、高效的防污,需要综合采用电化学的防污技术。通过电解海水或电解重金属,借助产生的次氯酸盐或重金属离子,达到防除污损生物、降低防污剂使用量和保护海洋环境的目的。电解防污方法操作简便、自动化程度高、相对安全可靠,配合防污涂料使用,可以达到良好的协同防污的效果。其中,电解海

水法所取得原料是源源不断的海水,便于长期投资和管理,产生的次氯酸盐可以随海水的流动到达管道内的各个部位,有效地杀死污损生物或其幼虫。

对于小管径小流量的技术供水系统,如各种仪表接管。涂刷防污涂料往往是不现实的,这就需要首先从选材上选择耐污性强的材料,比如青铜等含铜的合金。另一方面,也可以从设计上考虑,采取易于更换的设计方案。次之,采用电化学防污方法或其他物理的方法如超声波法等,但要综合考虑成本、施工等的可操作性。

另外,适当提高海水的流速也能一定程度上达到降低污损生物附着的效果,这是因为污损生物的幼虫的附着对流速有一定的要求。如华美盘管虫幼虫仅在海水流速为1.7~9.1 cm/s的范围内能够附着,而多室草苔虫则扩至53.0 cm/s,最适宜藤壶幼虫附着的流速为10.6 cm/s^[16, 32]。因此,设计时选择合适的水流速在一定程度上可减轻或避免海洋污损生物的附着。

尾水渠通常采取钢筋混凝土水渠,采用涂刷有机防污涂料的方法可取得较好的防污效果。

5.2 水泵水轮机组的防污防护

由于海洋生物的多样性和海洋环境的复杂性,海水水泵水轮机的生物附着问题一直困扰着人们。由于机组系统管道较多,且多弯头和缝隙,蜗壳空间狭小,这些部件都较容易形成沉淀,发生生物污损。同时,流经这些部件的海水流速较大,且多湍流,摩擦较大,因此,机组不适合涂刷有机防污涂料,因为有机防污涂料的附着强度和机械强度都经不起如此高强度的海水冲刷和磨蚀。为了达到较好的防污效果,多种防污方法结合使用往往比单一方法更为有效,海水泵水轮机的防污应该优先采用电化学方法和化学加药法,同时在成本控制允许的条件下,配合选用有一定耐污性能的材料(如含铜合金)制作相应的部件。不过,这些方法的可行性均需要通过进一步的实验研究来验证。

5.3 其他部位的防污

对于引水管、进水口的拦污栅或过滤网,通常位于水深约20~50 m的海底,此处阳光较少,溶解氧也较少,海水比较干净,海洋污损生物理论上会比较少。此处的防污可以从材料的选材角度出发,选择耐污的铜合金等,另外结合涂刷防污涂料的方法。

对于涂料易磨损或冲刷的地方,如阀门、闸槽等,可采用耐污铜合金(如青铜)和电解防污、热处理技术^[33]、使用化学药剂等方法相结合进行综合防污。

需要说明的是,对于这些易于发生污损的部件,采取合理的设计方案和及时有效的机械清除或人工清污也是有必要的。

6 结论

1) 海水电站循环水系统的大型污损生物主要是贻贝为代表的双壳类、藤壶为代表的无柄蔓足类和华美盘管虫为代表的管栖多毛类,附着行为则与地理位置、海水介质的流速、材料本身的性质等有关。

2) 大管径大流量的管道内的污损生物可以采用控制海水流速、涂装自抛光防污涂料和低表面能防污涂料,并采用电化学技术增强防污。

3) 小管径小流量的管道、不容易涂刷防污涂料的部件以及防污涂料易脱落的部件(如阀门),可以采用选材(如含铜合金)、电化学技术、热水法以及超声波法等进行综合防污处理。

4) 海洋环境复杂,生物物种多样,考虑到每种生物均具备独特的生物学特性,未来的工作不仅要侧重防污技术的开发,还应对海洋污损生物展开调查,了解其种类分析鉴定、群落结构特征、优势种的附着特点,更应对污损生物幼虫的附着机理展开系统的研究。加强物理、化学、生物、材料、环境、工程等学科的交叉和渗透,开发更为高效环保的防污体系。

参考文献:

- [1] 石文辉, 查浩, 罗魁, 等. 我国海水抽蓄电站发展初探[J]. 中国能源, 2015, 37(12): 36-40.
- [2] 钱钢粮. 海水抽水蓄能电站站点资源综述[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, 3(5): 1-6.
- [3] HIRATSUKA A, ARAI T, YOSHIMURA T. Seawater Pumped-Storage Power Plant in Okinawa Island, Japan[J]. Engineering Geology, 1993, 35(3): 237-246.
- [4] 于丹丹, 唐洪武, 徐梦珍, 等. 抽水蓄能电站中淡水壳菜幼虫密度日波动机制[J]. 水力发电学报, 2016, 35(6): 74-79.
- [5] BOLTOVSKOY D, XU M Z, NAKANO D. Impacts of *Limnoperna Fortunei* on Man-Made Structures and Control Strategies: General Overview[J]. Limnoperna Fortunei, 2015, 4(10): 375-393.
- [6] XU M Z, DARRIGRAN G, WANG Z Y, et al. Experimental Study on Control of *Limnoperna Fortunei* Biofouling in Water Transfer Tunnels[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2015, 9(2): 248-258.
- [7] 华丕龙, 单凤霞. 广州蓄能水电厂淡水壳菜生境调查及防治初探[J]. 水力发电, 2014, 40(11): 82-85.
- [8] DÜRR S, Thomason J C. Biofouling[M]. Oxford (UK): Wiley-Blackwell, 2010.
- [9] 黄宗国, 蔡如星. 海洋污损生物及其防除(上册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1984.
- [10] 范永春. 滨海电厂厂内循环水系统防污防腐[J]. 电力勘测设计, 2006(4): 69-72.
- [11] 吴贵德. 滨海电厂循环水防污设备投入时段的研究[C]// 第四届火电行业化学(环保)专业技术交流会论文集. 余不详, 2013.
- [12] 赵生俊. 滨海电厂抗海生物附着防污涂料的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [13] 大岛胜宏, 松浦润, 关存良. 海水抽水蓄能技术及其展望[J]. 水利水电技术, 2002(1): 71-73.
- [14] 宋永香, 王志政. 海洋生物及其黏附机理——微生物、小型海藻、巨型海藻、贻贝[J]. 中国胶粘剂, 2002, 11(4): 48-52.
- [15] 杨天笑, 胡煜峰, 陈池, 等. 海水管线常见污损生物及研究展望[J]. 广东化工, 2014, 41(22): 88-89.
- [16] 严涛, 胡煜峰, 王建军, 等. 海水管道系统大型污损生物特点与防除对策[J]. 工业安全与环保, 2013, 39(3): 43-45.
- [17] 严涛, 张慧, 李韵秋, 等. 污损性管栖多毛类生态特点及研究展望[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6049-6057.
- [18] VIDELA H A, CHARACKLIS W G. Biofouling and Microbially Influenced Corrosion[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 1992, 29(3/4): 195-212.
- [19] ZHAO Q. Influence of Surface Energy of Modified Surfaces on Bacterial Adhesion[J]. Biophysical Chemistry, 2005, 117(1): 39-45.
- [20] YEBRA D M, KIIL S, Dam-Johansen K. Antifouling Technology—Past, Present and Future Steps Towards Efficient and Environmentally Friendly Antifouling Coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2004, 50(2): 75-104.
- [21] FUJIHARA T, IMANO H, OSHIMA K. Development of Pump Turbine for Seawater Pumped-Storage Power Plant[J]. American Society of Civil Engineers, 2013, 47(5): 199-202.
- [22] KATSAPRAKAKIS D A, CHRISTAKIS D G, STEFANAKIS I, et al. Technical Details Regarding the Design, the Construction and the Operation of Seawater Pumped Storage Systems[J]. Energy, 2013, 55(1): 619-630.
- [23] KATSAPRAKAKIS D A, CHRISTAKIS D G. Seawater Pumped Storage Systems and Offshore Wind Parks in Islands with Low Onshore Wind Potential. A Fundamental Case Study[J]. Energy, 2014, 66(4): 470-486.
- [24] 刘丽君, 尤作亮, 罗凤明, 等. 封闭缺氧法杀灭和去除管道中的淡水壳菜研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(3): 40-42.
- [25] 曹小武, 徐梦珍, 王兆印, 等. 泥沙落淤对输水工程中淡水壳菜污损的抑制作用[J]. 中国农村水利水电, 2014(8): 45-48.
- [26] 王丙玲, 边洪村, 于兰桂. 海水消毒净化技术开发与应用[J]. 海岸工程, 2001, 20(3): 65-68.
- [27] 胡维玲, 吴玲玲, 周静, 等. 利用导电涂膜直接电解海水法防护生物腐蚀. 1. 模拟和测量技术[J]. 电化学, 1999, 5(3): 299-303.
- [28] 吕振明. 海水养殖网具污损生物的防除技术[J]. 中国水产, 2002(7): 67-68.

- [29] 张皓天. 吴世东. 芮德繁, 等. 我国海水抽水蓄能电站示范项目选择及开发研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, 3(5): 7-10.
- [30] 邓麦. 水工建筑物拦污栅设计关键技术[J]. 科技传播, 2012(19): 172-173.
- [31] 赵旭. 张占平. 张景涛, 等. 环境友好型船体防腐防污涂料的研究及其发展趋势[J]. 上海涂料, 2017, 55(3): 24-28.
- [32] QIAN P Y. RITTSCHOF D. SREEDHAR B. Macrofouling in Unidirectional Flow: Miniature Pipes as Experimental Models for Studying the Interaction of Flow and Surface Characteristics on the Attachment of Barnacle, Bryozoan and Polychaete Larvae[J]. Marine Ecology Progress, 2000, 207(1): 109-121.
- [33] MASILAMON J G. NANDAKUMAR K. JESUDOSS K S. et al. Influence of Temperature on the Physiological Responses of the Bivalve Brachidontes Striatulus and Its Significance in Fouling Control[J]. Marine Environmental Research, 2002, 53(1): 51-63.