

长距离输水工程海生物防治方案研究

肖建群, 李鹏

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]海生物在输水系统的附着和生长,会缩小输水管线的有效直径,减小输送海水的流量。为保证正常输水,需对海生物进行防治处理。[方法]以某核电厂为例,通过对取水口海生物的现场调查分析和动态模拟试验,来研究长距离输水海生物防治方案。[结果]试验结果得出,多点交替投加 NaClO 和非氧化性杀生剂,海生物防治效果良好。[结论]旨在为将来类似工程海生物防治提供可借鉴的方案。

关键词: 长距离输水工程; 海生物防治; 动态模拟试验; NaClO; 非氧化性杀生剂

中图分类号: TM621; TL4

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)04-0113-05

Research on the Marine Organisms Control Scheme of Long-Distance Water Transfer Project

XIAO Jianqun, LI Peng

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] The attachment and growth of Marine organisms in the water transfer system reduces the effective diameter of the water pipeline and the flow of seawater. In order to ensure the normal water transfer, it is necessary to prevent and control Marine organisms. [Method] Take a nuclear power plant as an example, this paper studied the Marine organisms control scheme of long-distance water transfer project through the field investigation and analysis of Marine organisms at the water intake and the dynamic simulation test. [Result] The results show that NaClO and non-oxidizing biocide add alternately at multiple points, and the control effect of Marine organisms is good. [Conclusion] The purpose of this paper is to provide a reference for the future Marine organisms control of similar projects.

Key words: long-distance water transfer project; marine organisms control scheme; dynamic simulation test; NaClO; non-oxidizing biocide

海洋污损生物或附着生物简称海生物,是生长在海上设施表面和船底的微生物、植物和动物,主要包括粘附微生物(细菌、真菌和硅藻等)、附着生物(海藻类等)、固着生物(牡蛎、藤壶类等)和吸营生物(海葵、贻贝等)^[1-2]。海生物在海水输水系统和海水循环系统中的附着和生长,会缩小输水管道或隧洞的有效直径,减小输送海水的流量,给设施带来腐蚀问题^[3-5]。

为了防止海生物对海水输水系统和海水循环系统设施带来的危害,需对海水进行杀生灭藻处理,控制海生物的附着和生长。对厂外海水输水系统海生物的防治措施主要有:取水口设置过滤装置、合

理选择输水方式及管材、对输水管道或隧洞涂刷防污涂漆或加杀生剂。对厂内海水循环系统海生物的防治措施主要就是加杀生剂,应用较多的加杀生剂方案有:电解海水制取次氯酸钠加药、加工业次氯酸钠(NaClO)、加非氧化性杀生剂^[3-5]。目前海水循环系统加杀生剂方案已非常成熟,各电厂一般根据厂址海水水质情况(是否有合适的海水资源可利用)、药品外购和输送的难易程度,就可选择出适合自己电厂的加杀生剂方案。而在海水输水工程尤其是长距离输水海生物防治方案的选择上,一般需根据各自电厂的实际情况,通过动态模拟试验来研究确定合适有效的防治方案。

某核电厂海水输水管线长约 25.30 km,在目前国内电厂输水管线中属于距离较长的。本文以该厂海水输水工程为例,来探讨长距离输水系统海生物防治方案。

收稿日期: 2019-04-30 修回日期: 2019-06-19

基金项目: 中国能建广东院科技项目“滨海电厂循环冷却水系统防腐、防垢、抑制微生物物理方法及防止海洋生物卷载的措施技术的研究”(EX02021W)

1 工程概述

某核电厂输水工程是向厂内海水循环系统冷却塔提供补水,为海水淡化提供原水,为厂内电解海水制氯系统提供海水。取水口布置在黄骅港综合港区一港池西北角,港池取水,取水量约为 $12.10\text{ m}^3/\text{s}$ 。取水头部采用钢筋混凝土结构的矩形箱式结构,取水输水管线长约 25.30 km 。

该核电厂海水循环系统拟采用在厂内设置电解海水制氯的加杀生剂方案,厂外输水系统只需控制输水末端余氯值在 0.5 mg/L 即可。根据该厂的实际情况,长距离输水工程海生物防治方案初步确定为:

1)在取水口设置格栅和旋转滤网,可以阻止大体积海生物等异物进入输水管线。

2)采用隧洞输水方式,设置2条内径为 3.5 m 盾构隧洞(海水流速约为 1.26 m/s),隧洞截面较大,不易被海生物堵塞。

3)在输水隧洞中加杀生剂,由于取水口和输水隧洞沿线无法取得 6 kV 和 10 kV 电压,不考虑电解海水制取次氯酸钠加药方式,只考虑投加外购杀生剂的方式。

由于本工程输水距离长,具体的加杀生剂药品种类、加药点的设置、加药频率及加药量等,均需通过相关试验来研究确定。2016年4月,业主和设计方委托天津海水淡化与综合利用研究所作为试验单位,开展相关实验室研究及动态模拟试验研究。

2 取水海域海生物组成分布及季节变化

某核电厂所处海域属于渤海湾海域,试验单位在对本工程取水海域海生物进行现场调查和分析监测前,对渤海湾海域海生物的优势种群进行了文献资料调研。通过对相关文献的分析,认为渤海湾海域海生物的主要优势种有致密藤壶、泥藤壶、牡蛎、鲍枝螽、肠浒苔、大室棘膜苔虫、曼氏皮海鞘等,上述优势种因地点不同而有所差异。渤海海生物的附着期季节性强,多数种类在夏、秋季水温较高的月份出现,旺盛期在 $6\sim 9$ 月(水温 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 以上); $12\sim 3$ 月由于沿岸结冰,水温在 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 以下,基本无生物附着^[6-8]。

2016年6月~2017年5月期间,试验单位在本工程取水口附近海域进行实海挂板实验,进行了

全年12个月海生物组成分布及季节变化分析监测等工作,取样观察分析频率为每月一次。全年共挂放76块水泥试板,通过观察挂板附着生物层发现:2016年10月至2017年4月挂板上基本没有生物附着;2017年5月和2016年6月挂板上附着生物较少,主要有苔虫、海鞘和少量牡蛎;2016年7月、8月和9月挂板上附着生物较多,主要为白脊藤壶、牡蛎、软丝藻,还有少量盘管虫和苔虫。本次调查结果显示,白脊藤壶、牡蛎、藻类是本工程取水海域海生物优势种,附着旺盛期在7月~9月^[9]。

3 动态试验杀生剂的筛选

根据试验单位对本工程取水海域海生物进行的现场挂板实验调查和分析监测结果以及相关文献资料,本工程选定白脊藤壶、牡蛎、海洋细菌和海洋藻类作为试验受试生物,开展杀生剂对海生物的杀灭试验。本次4种受试生物均从黄骅港综合港区一港池西北角处采集,白脊藤壶和牡蛎在堤坝处的防护堤和礁石上采集,海洋细菌和藻类从海水中富集培养获得。

3.1 杀生剂初选

本工程杀生剂考虑外购工业次氯酸钠(NaClO)和非氧化性杀生剂,非氧化性杀生剂主要包括铵盐类、有机硫类和DBNPA(2,2-二溴-3-次氨基丙酰胺)。国内商品化铵盐类杀生剂牌号包括EGD、QAS、CT1300、KC-740、RENATUR1103等。有机硫类杀生剂主要有SW303^[10]。

根据目前国内非氧化性杀生剂市场和应用情况,确定以SW303、EGD、QAS和DBNPA作为非氧化性杀生剂,以 NaClO 作为氧化性杀生剂,开展5种杀生剂对海生物的杀灭试验。

3.2 杀生剂对海生物杀灭试验效果

本次杀生剂对海生物的杀灭试验参照《海水冷却水处理药剂性能评价方法第3部分:菌藻抑制性能的测定》(GB/T 34550.3—2017)进行。^[11]

本次杀灭试验结果:

1)5种杀生剂对白脊藤壶的50%半致死浓度 LC_{50} 为 $0.74\sim 14.18\text{ mg/L}$,90%致死浓度 LC_{90} 为 $1.28\sim 20.95\text{ mg/L}$,且 LC_{50} 和 LC_{90} 都随作用时间的延长而降低,说明作用时间越长,杀生剂对白脊藤壶的杀灭效果越好。5种杀生剂对白脊藤壶的杀灭效果从高到低的顺序是 $\text{SW303} > \text{NaClO} >$

EGD > QAS > DBNPA。

2) 5种杀生剂对牡蛎的50%半致死浓度 LC_{50} 为40.88~3161.42 mg/L, 90%致死浓度 LC_{90} 为126.77~167105 mg/L, 且 LC_{50} 和 LC_{90} 都随作用时间的延长而降低, 说明作用时间越长, 杀生剂对牡蛎的杀灭效果越好。5种杀生剂对牡蛎的杀灭效果从高到低的顺序是SW303 > QAS > DBNPA > EGD > NaClO。

3) 5种杀生剂对海洋细菌的最小抑菌浓度MIC为0.15~256.66 mg/L, 杀生剂对海洋细菌的MIC随作用时间的延长而降低, 说明作用时间越长, 杀生剂对海洋细菌的杀灭效果越好。5种杀生剂对海洋细菌的杀灭效果从高到低的顺序是SW303 > NaClO > DBNPA > QAS > EGD。

4) 5种杀生剂对海洋藻类的最小抑菌浓度MIC为11.76~1521.28 mg/L, 杀生剂对海洋藻类的MIC随作用时间的延长而降低, 说明作用时间越长, 杀生剂对海洋藻类的杀灭效果越好。5种杀生剂对海洋藻类的杀灭效果从高到低的顺序是SW303 > NaClO > EGD > DBNPA > QAS。

3.3 杀生剂的选择

综上5种杀生剂对本工程取水海域海生物优势种的杀灭试验效果, 4种非氧化性杀生剂中SW303杀灭效果最优, 其次为QAS、EGD和DBNPA。考虑到QAS、EGD和DBNPA的市场价格高于SW303, 对藤壶和牡蛎的杀灭效果低于SW303, 且SW303在浙江宁海电厂和山东魏桥电厂都有较好的实际应用案例, 本工程选用SW303作为海生物防治动态模拟试验的非氧化杀生剂^[9]。如只采用一种杀生剂, 会有杀生品种单一、易使海生物产生抗药性、杀生剂投加量大的缺点^[3,10]。在广东, 目前珠江电厂、湛江电厂、平海电厂和惠来电厂均采用了交替冲击投加NaClO与非氧化性杀生剂的方案, 有效地控制了海生物的附着和生长^[12]。因此本工程选用NaClO和SW303作为动态模拟试验的杀生剂, 交替冲击投加。

4 海生物防治动态模拟试验

试验单位利用自制的动态模拟试验装置, 开展海生物防治动态模拟试验。该装置包括试验装置、温控系统、加药装置、监测系统和支撑结构。其中, 试验装置包括依次连接的蓄水箱、变频式循环

水泵、AB双试验管及管道、阀门和连接构件; 温控系统包括设置于蓄水箱内的不锈钢盘管式热交换器和循环冷却器; 加药装置包括布设于管道上的加药阀和外置蠕动泵及储液瓶; 监测系统包括设置于蓄水箱内的水质监测探头、设置于管道系统上的温度计、流量计等在线监测仪器和取样阀; 支撑结构包括不锈钢支架和PVC铺板^[9]。

本次试验水采集自本工程取水口的海水, 杀生剂的定量投加借助加药装置来完成, 加药阀均匀布设于管道上, 可实现多点加药。设置AB两种管径试验管, 目的在于:

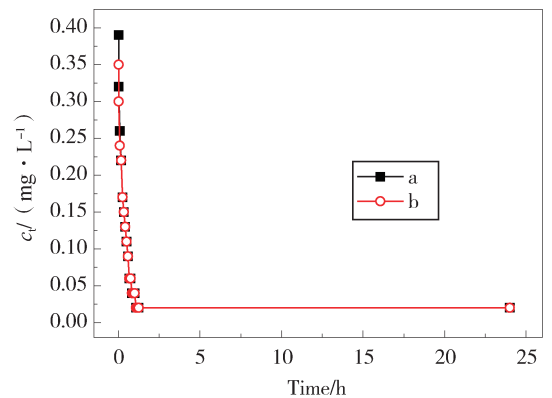
1) 通过管径大于管道的A试验管, 研究大型污损生物附着情况, 大管径便于放置水泥试板;

2) 通过管径与管道相同B试验管, 观察细菌、藻类等微型海生物沉积贴壁生长状况。本试验装置设置了多点取样, 实现对杀生剂衰减速度的监测, 以预测杀生剂的残留浓度。

本次试验运行条件: 流速为1.26 m/s, 模拟夏季水温29℃左右连续运行24 h, 控制隧洞末端余氯值在0.5 mg/L。本工程输水隧洞全长约25.30 km, 当海水流速设置为1.26 m/s时, 海水流经全程输水隧洞将耗时5.58 h。

4.1 投加NaClO的加药点及加药量

NaClO溶液采用间歇式冲击投加, 投加浓度 c_0 初步设为2.63 mg/L(以有效氯计, 下同)。在本次试验运行条件下, NaClO在海水中的衰减趋势如图1所示:



注: a: 投加点后; b: 投加点后9 m。

图1 NaClO在海水中的衰减趋势

Fig. 1 The attenuation trend of NaClO in seawater.

对图1中的衰减曲线进行线性拟合, 得到的降解动力学方程如表1所示:

表1 NaClO 在海水中的降解动力学方程

Tab. 1 Kinetic equation of NaClO degradation in seawater

模拟季节	一级动力学方程	r
夏季	$\ln(c_t/c_0) = 0.2079t^2 - 2.0971t - 1.2271$	0.9944

利用表1中的拟合方程,分别根据输水隧洞总长度、三分之一长度、四分之一长度、五分之一长度和六分之一长度,计算达到末端余氯值0.5 mg/L时的药剂投加浓度,结果如表2所示。

表2 不同隧洞长度所需 NaClO 的投加浓度

Tab. 2 Concentration of NaClO required for different tunnel lengths

加药点位置	长度/km	流速/ $m \cdot s^{-1}$	至末端耗时/h	投加浓度 $c_0/(mg \cdot L^{-1})$
L	25.30	1.26	5.6	318
$1/3L$	8.43	1.26	1.9	41
$1/4L$	6.33	1.26	1.4	21
$1/5L$	5.06	1.26	1.1	14
$1/6L$	4.22	1.26	0.9	10

从表2可知,要控制输水隧洞末端余氯值达到0.5 mg/L,若只在输水隧洞起始端设置1个加药点时,所需NaClO的投加浓度 c_0 约为318 mg/L。若除在起始端设置1个加药点外,沿途再均布设置2个加药点时,每个加药点NaClO的投加浓度 c_0 约为41 mg/L;沿途再均布设置3个加药点时,每个加药点NaClO的投加浓度 c_0 约为21 mg/L;沿途再均布设置4个加药点时,每个加药点NaClO的投加浓度 c_0 约为14 mg/L;沿途再均布设置5个加药点时,每个加药点NaClO的投加浓度 c_0 约为10 mg/L。随着输水隧洞沿途加药点数量的增加,投加浓度 c_0 呈下降趋势。

试验结果得出,除输水隧洞起始端设置1个加药点外,沿途再均布设置4个加药点,共设置5个加药点的方案经济可行。每天冲击投加NaClO溶液1~2次,每次投加时间2~4 h,每个加药点的NaClO投加量12.2~48.8 t/d^[9]。

4.2 交替投加 SW303 的加药点及加药量

交替投加SW303的加药点设置数量与投加NaClO一致,试验结果得出,SW303的投加浓度在3.3~4 mg/L之间,投加量在144~174 kg/h之间。采用交替冲击投加SW303溶液时,每7~15 d投加一次,每次投加时间0.5~3 h,每个加药点的SW303投加量72~522 kg/次^[9]。

5 长距离输水工程海生物防治方案结论

针对某核电厂长距离输水工程的实际情况,并根据试验单位对取水海域海生物的现场调查分析结果、杀生剂的筛选试验结果和动态模拟试验结果,该厂长距离输水系统拟采用如下海生物防治方案:

1)在取水口设置格栅和旋转滤网,可以阻止大体积海生物等异物进入取水输水管线。

2)采用隧洞输水方式,设置2条内径为3.5 m盾构隧洞(海水流速约为1.26 m/s),隧洞截面较大,不易被海生物堵塞。

3)在输水隧洞沿途交替冲击投加外购工业次氯酸钠(NaClO)和非氧化性杀生剂(SW303):共设置5个加药点,除输水隧洞起始端设置1个加药点外,沿途再均布设置4个加药点。夏季和秋季每天冲击投加NaClO溶液1~2次,每次投加时间2~4 h,每个加药点的NaClO投加量12.2~48.8 t/d;每7~15 d交替冲击投加SW303一次,每次投加时间0.5~3 h,每个加药点的SW303投加量72~522 kg/次。春季和冬季可根据海生物实际生长情况适当减少加药量和加药频率。

参考文献:

- [1] 蔡如星,黄宗国.海洋污损生物的危害性及其防除[J].东海海洋,1983(3):65-68.
CAI R X, HUANG Z G. The harmfulness and prevention of marine fouling organisms [J]. Donghai Marine Science, 1983 (3): 65-68.
- [2] 张玉忠,彭晓敏.浅谈海水循环冷却处理技术[J].工业水处理,2004,24(8):14-17.
ZHANG Y Z, PENG X M. Treatment technology of seawater as circulating cooling water [J]. Industrial Water Treatment, 2004, 24(8): 14-17.
- [3] 黄运涛,彭乔.海洋生物污损的防治方法及研究进展[J].全面腐蚀控制,2004,18(1):3-5.
HUANG Y T, PENG Q. The prevention method and research development of marine fouling [J]. Total Corrosion Control, 2004, 18(1): 3-5.
- [4] 宋伟伟,贾思洋,周晓光,等.滨海电厂循环水系统海生物污染防治[J].全面腐蚀控制,2013,27(3):17-19+67.
SONG W W, JIA S Y, ZHOU X G, et al. Marine biofouling control in circulating water system of coastal power plant [J]. Total Corrosion Control, 2013, 27(3): 17-19 +67.
- [5] 侯纯扬,武杰,赵楠,等.海水直流冷却水系统金属腐蚀、污损生物附着及其对策[J].海洋技术,2002,21(4):41-45.

- HOU C Y, WU J, ZHAO N, et al. Biological adhesion of metal corrosion and fouling in seawater direct current cooling water system and its countermeasures [J]. *Ocean Technology*, 2002, 21(4): 41-45.
- [6] 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.
YANG T X, HU Y F, CHEN C, et al. Common fouling species in seawater pipelines and suggestions for future study [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2014, 41(22): 88-89.
- [7] 严涛, 曹文浩. 黄、渤海污损生物生态特点及研究展望 [J]. *海洋学研究*, 2008, 26(3): 107-118.
YANG T, CAO W H. The ecological characteristics and research prospect of pollution in Yellow sea and Bohai sea [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2008, 26(3): 107-116.
- [8] 陈长春, 项凌云, 刘汉奇. 海洋污损生物藤壶的附着与防除 [J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(4): 621-624.
CHEN C C, XIANG L Y, LIU H C. Adhesion mechanism and prevention of marine biofouling barnacle [J]. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(4): 621-624.
- [9] 李亚红. 河北某核电厂取排水工程长距离输送取水系统海生物防治最终成果报告 [R]. 天津: 天津海水淡化与综合利用研究所, 2019.
- [10] 董晓晖. 循环水处理杀菌剂的种类及其发展 [J]. *化工中间体*, 2006(10): 13-14 +18.
DONG X H. The classification and development of bactericides for industry circulating cooling water treatment [J]. *Chemical Intermediates*, 2006(10): 13-14 +18.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海水冷却水处理药剂性能评价方法 第3部分: 菌藻抑制性能的测定: GB/T 34550.3—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社出版, 2017.
- Standardization administration of China. Method for evaluation of cooling seawater treatment agents-Part 3: Determination of inhibiting microbes performance: GB/T 34550.3—2017 [S]. Standards Press of China, 2017.
- [12] 刘敏杰. 非氧化性杀菌剂与氧化性杀菌剂交替使用在珠江电厂冷却水处理中的应用 [J]. *热力发电*, 2010, 39(8): 61-63.
LIU M J. Application of alternate use of non-oxidizing biocides and oxidizing biocides in cooling water treatment of Zhujiang power plant [J]. *Thermal Power Generation*, 2010, 39(8): 61-63.

作者简介:



XIAO J Q

肖建群(通信作者)

1977-, 女, 江西永新人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司高级工程师, 武汉水利电力大学环境工程学士, 主要从事发电厂水化学控制、工业给水和污水处理、垃圾渗滤液处理、海水淡化处理技术研究及设计(e-mail) xiaojianqun@gedi.com.cn。

李鹏

1979-, 男, 宁夏银川人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司院高级工程师, 武汉大学应用化学学士, 主要从事发电厂水化学控制、工业给水和污水处理、垃圾渗滤液处理、海水淡化处理技术研究及设计(e-mail) lipeng2@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)



电厂取水海域海生物(牡蛎、藤壶)