

工程实例

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.24.016

淡水壳菜防治涂料对输水管涵糙率的影响及效益评价

郑航桅, 潘志权

(广东粤港供水有限公司, 广东 深圳 518021)

摘 要: 淡水壳菜附着于输水管涵内壁, 会侵蚀混凝土结构, 增大管壁糙率, 从而增加输水能耗和工程运行成本。选用物理法中的特种防护涂料保护法在某工程现场开展试验, 将 SBS、ZH2000B、GX-BIOX 和 G-II 等不同涂料对淡水壳菜的防护效果进行对比分析。试验结果表明, GX-BIOX 涂料防生物附着效果最佳, G-II、SBS 和 ZH2000B 涂料防护性相对较差。选择 GX-BIOX 涂料在该工程反虹涵进行应用, 通水运行一年后, 管涵无淡水壳菜附着, 防护效果良好, 且内壁表面光滑, 平均糙率从 0.017 2 降至 0.009 6, 大幅降低了输水能耗, 具有良好的经济效益、社会环境效益和生态效益。

关键词: 淡水壳菜; 防治涂料; 输水管涵

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)24-0087-06

Effect and Benefit Evaluation of Coating for Controlling *Limnoperna fortunei* on Culvert Roughness

ZHENG Hang-wei, PAN Zhi-quan

(Guangdong Yuegang Water Supply Co. Ltd., Shenzhen 518021, China)

Abstract: *Limnoperna fortunei* attached to the inner wall of culvert may cause concrete erosion and roughness increase, thus increasing the energy consumption and project operation cost. Herein, special protective coating was selected from physical measures to carry out tests in a project site, and the protective effects of different coatings such as SBS, ZH2000B, GX-BIOX and G-II on *Limnoperna fortunei* were compared. The results show that GX-BIOX coating has the best anti-biological adhesion effect, while G-II, SBS and ZH2000B coatings have poor protection. Application of GX-BIOX coating in the inverted siphon culvert realized no *Limnoperna fortunei* attachment and good protection effect after operating for one year. The culvert inner wall was smooth and the average roughness decreased from 0.017 2 to 0.009 6, which remarkably reduced water conveyance energy consumption and has good economic, social environmental and ecological benefits.

Key words: *Limnoperna fortunei*; control coating; water conveyance pipe culvert

管涵在长期的水环境中服役, 表面生长附着的水生物群落会对工程运行造成不同程度的影响, 即近些年逐渐引起关注的“水生物污损”“水生物侵蚀”问题。生物侵蚀是指由污损生物(包括动物、植物和微生物)生命活动引起或促进的材料性能劣化和破坏^[1-3]。目前, 全球已知的污损生物达 4 000

余种, 我国已记录的附着型污损生物约 600 种^[4-5], 主要包括: 藻类、海鞘、藤壶、淡水壳菜、水虱、水螅、外肛动物、苔虫、龙介虫等。据统计^[6-7], 20 世纪 70 年代德国建筑材料的破坏 10% ~ 20% 来源于生物侵蚀; 美国约 80 × 10⁴ km 的排污管道遭受不同程度的微生物侵蚀而需修复或更换, 我国近 5 年由生物

侵蚀导致的经济损失至少为 8 000 亿元/a。鉴于其危害严重性,国外早在 20 世纪 40 年代就开展了微生物侵蚀机理的研究,而国内对于这一问题目前还处于研究初期,该方面的文献报道较少。

淡水壳菜大量生长并附着于输水管涵混凝土过水面,产生的生物侵蚀作用是淡水壳菜、泥沙、藻类、细菌、真菌等构成的微生态体系的复合作用所致^[8-9]。淡水壳菜的蛋白足丝通过氢键或配位键与基底面连接,从而形成 4~8 N 的抗拔力,足丝侵入混凝土表层内部,其分泌物代谢有机酸腐蚀水泥砂浆,加速混凝土内壁碳化和粉化^[10],使碎石粗骨料露出、脱落,钢筋保护层厚度逐渐变小,从而降低水工建筑物的使用年限,危害性极大。此外,淡水壳菜通常在管壁、缝隙等处多个体稠密群聚簇生,使得管壁糙率增大,有效管径缩减,输水能力大幅降低,输水能耗抬升,工程运行成本加大,同时严重影响供水调度,限制优化调度空间,是输水工程的重大难题。

淡水壳菜防治有物理法、化学法、生物法等。针对某大型输水工程淡水壳菜侵蚀的实际情况,选择工程应用性强的物理法中的高性能涂料防护进行重点深入研究,主要分析淡水壳菜防治涂料对输水管涵糙率的影响,以及工程效益。

1 工程概况

该供水工程自建成以来,一直受到淡水壳菜滋生问题的困扰,尤其是在取水口附近的配套输水建筑内壁淡水壳菜等污损生物附着最为严重,附着厚度达 3~5 cm,尽管每年运行管理单位对管涵内壁的淡水壳菜进行人工清除(个别涵管每年清理 2 次),但通水后淡水壳菜仍周期性地继续生长。

本项目以该工程取水口的泵站反虹涵为工程应用段,反虹涵长 217.993 m(水平 217.402 m),结构型式为双孔,涵管单孔断面尺寸($B \times H$)为 4.0 m × 4.2 m,进、出口设检修闸,两闸室均长 11 m,进口底高程 0.70 m,出口底高程 0.00 m,穿越河床的水平段长 87.052 m,底部高程 -5.50 m,进口闸斜段坡度为 1:8.15,长 47.770 m(水平 47.410 m);出口闸斜段坡度为 1:11.43,长 61.171 m(水平 60.940 m)。项目位置见图 1。该泵站反虹涵在伴有淤泥沉积的附着区,淡水壳菜较易铲除,附着强度较差;而在泥沙沉积少的区域,淡水壳菜成团直接嵌入式附着于混凝土表面时,附着强度显著增大,难以铲除。经高压水枪清洗后,混凝土基面露出,可明显观

察到表面呈现凹凸不平、骨料外露的现状(见图 2)。



图 1 项目位置示意

Fig. 1 Project location



图 2 反虹涵输水混凝土面淡水壳菜侵蚀情况

Fig. 2 Erosion of *Limnoperna fortunei* on concrete surface of inverted siphon culvert

2 防治试验研究

针对生物腐蚀,国内外的防治技术主要有物理、化学和生物法。若从输水建筑的规模、结构、功能角度出发,物理法中的特种防护涂料保护法应用最为广泛。本项目在前期 100 多种涂料小面积试验基础上筛选出 SBS、ZH2000B、GX-BIOX 和 G-II 共 4 种防护涂料进行重点深化试验研究。4 种涂料类型及防护机理见表 1。

表 1 试验涂料类型及防护机理

Tab. 1 Test coating type and protection mechanism

涂料名称	类型	防护机理
SBS	水泥基渗透结晶防水型涂料	提高混凝土致密度,防止侵蚀介质的渗入
GX-BIOX	底漆环氧树脂 + 面漆氟碳树脂	低表面能 + 仿生生物柔软表层
ZH2000B	水泥基渗透结晶 + 有机硅烷	低表面能降低生物与基材的附着力 + 提高混凝土致密度
G-II	无机聚合物 + 有机硅烷	涂层高碱度不利于生物幼虫存活 + 提高混凝土致密度

防治现场试验定性统计分析涂覆有不同涂料的样板表面附着的淡水壳菜的面积比例,现场试验如图 3 所示,统计结果如表 2 所示。

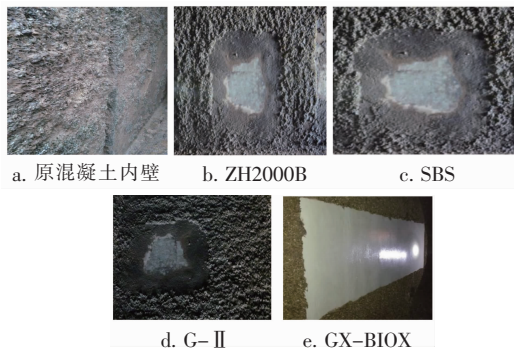


图3 不同涂层表面淡水壳菜附着情况

Fig. 3 Adhesion of *Limnoperna fortunei* on different coating surfaces

表2 不同涂层表面淡水壳菜附着量定性分析统计

Tab. 2 Qualitative analysis and statistics of *Limnoperna fortunei* adhesion on different coating surfaces

项 目	原混凝土内壁	ZH2000B	SBS	GX - BIOX	G - II
附着面积比例/%	100	38	37	0	35
附着数量/ (10^4 只· m^{-2})	4	1.6	1.5	0	1.4

根据现场统计结果分析可知,GX - BIOX 涂料表面淡水壳菜完全没有附着(持续5年有效防治),ZH2000B、G - II 和 SBS 涂料表面淡水壳菜的附着量较多,附着面积比例均超过30%,空白板表面淡水壳菜的附着量最多,附着面积几乎全覆盖。GX - BIOX 涂料的防生物附着腐蚀效果明显优于其他三种涂料,防生物附着效果分别为:GX - BIOX 最佳,G - II、SBS 和 ZH2000B 涂料防护性相对较差。

3 防治工程应用及效果

GX - BIOX 涂料为仿海洋动物体膜构造的仿生涂料,表层为平滑软膜,低表面能,接触角大,吸水率小,耐酸性好。低表面能的仿生软膜对于降低污损生物的初期附着作用较为明显。附着初期,微生物分泌的黏液对低表面能仿生软膜的润湿性差,从而接触角大,不利于初期微生物膜的形成,使生物在涂层表面的附着力减小,在同样大小的水流冲刷下更易脱落。吸水率低的防护涂料,可有效防止水分、有机酸等侵蚀介质的渗入,使混凝土与外界环境隔离开来,加上良好的耐酸性,使得 GX - BIOX 涂料软膜在使用中仍能较大程度地保持原涂料的特征(包括颜色、均匀性、完整性、平整度等)。

基于前期研究成果,2019年12月选择试验防

护效果优越且卫生及安全性检验合格的 GX - BIOX 涂料在该工程反虹涵左涵应用(约2500 m^2);2020年12月在反虹涵右涵应用(约2500 m^2)。

泵站反虹涵淡水壳菜防治工程施工前淡水壳菜清理见图4,施工后的效果见图5。通水运行一年后的防护效果见图6。施工后的反虹涵内壁光滑,表面反光。通水运行一年后,没有淡水壳菜附着,局部有淤泥污染,防护效果非常好。



图4 防治工程施工前淡水壳菜生长旺盛

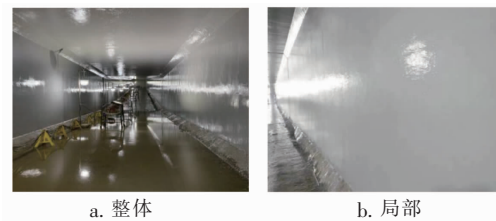
Fig. 4 Vigorous growth *Limnoperna fortunei* before the construction of the control project

图5 防治工程施工效果

Fig. 5 Construction effect of control works



图6 通水一年后 GX - BIOX 涂料的防护效果

Fig. 6 Protective effect of GX-BIOX coating after one year of water supply

4 工程应用对输水管涵糙率影响分析

淡水壳菜防治涂料表面糙率(n)值是影响输水管涵过流能力的关键因素。

4.1 糙率计算公式推导

根据《灌溉与排水渠系建筑物设计规范》(SL 482—2011)附录 C,进口渐变段末端至管道出口的总水面降落 ΔZ_2 由两部分组成:一是进口渐变段至倒虹吸进口间的连接段的水面降落($\frac{v^2 - v_2^2}{2g}$);二是

管道进口至出口的总水头损失(h_w)。

h_w 包括沿程水头损失(h_f)和局部水头损失(h_j),即:

$$h_w = h_f + h_j \quad (1)$$

h_f 按下式计算:

$$h_f = \left[\sum \frac{2gL_i}{C_i^2 R_i} \left(\frac{w}{w_i} \right)^2 \right] \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

$$C_i = \frac{1}{n} R_i^{\frac{1}{6}} \quad (3)$$

h_j 按下式计算:

$$h_j = \sum \xi_i \left(\frac{w}{w_i} \right)^2 \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

由式(1)~(4)可得 h_w , 见下式:

$$h_w = \left[\sum \xi_i \left(\frac{w}{w_i} \right)^2 + \sum \frac{2n^2 g L_i}{R_i^{\frac{4}{3}}} \left(\frac{w}{w_i} \right)^2 \right] \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

式中: h_f 为倒虹吸管沿程水头损失, m ; C_i 为管身计算段水流的谢才系数, 与糙率有关; R_i 为管身计算段水流的水力半径, m ; L_i 为管身计算段的管长, m ; w 为管道出口横断面面积, m^2 ; w_i 为管身计算段横断面面积, m^2 ; ξ_i 为某一局部水头损失系数, 如拦污栅、闸门槽、进水口、弯管、出水口等的局部水头

损失系数(不包括 ξ_1 和 ξ_2); n 为边壁糙率, 与边壁材料有关; v 为流速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 。

$h_w + \frac{v^2 - v_2^2}{2g} = \Delta Z_2$, 则可得糙率(n)计算公式为:

$$n = \sqrt{\frac{\Delta Z_2 - \frac{v^2 - v_2^2}{2g} - \sum \xi_i \left(\frac{w}{w_i} \right)^2 \frac{v^2}{2g}}{\sum \frac{v^2 L_i}{R_i^{\frac{4}{3}}} \left(\frac{w}{w_i} \right)^2}} \quad (6)$$

反虹涵全段断面面积相等, 即 $w = w_i$, 则式(6)可简化为:

$$n = \sqrt{\frac{\Delta Z_2 - \frac{v^2 - v_2^2}{2g} - \sum \xi_i \frac{v^2}{2g}}{\sum \frac{v^2 L_i}{R_i^{\frac{4}{3}}}}} \quad (7)$$

4.2 糙率现场测定

4.2.1 观测断面布置

本次测试布置了4个观测断面:A-A、B-B、C-C、D-D(见图7), 分别为反虹涵进口的闸门槽、进入孔和反虹涵出口的进入孔、闸门槽, 一个断面布置左右2个观测点, 在每个观测点现场测量水位, 并计算流速。

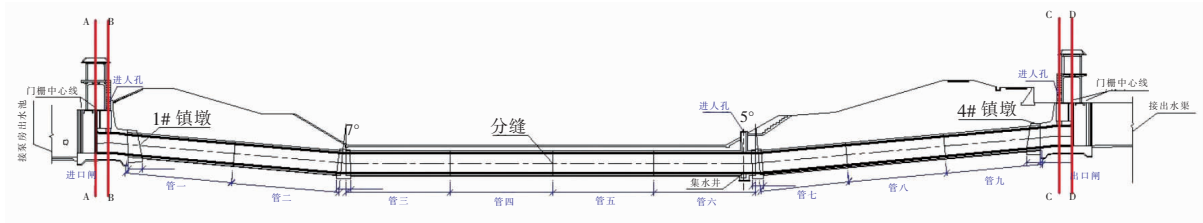


图7 现场观测断面布置

Fig.7 Site observation section layout

需要说明的是, 为了保证反虹涵糙率(n)现场测试数据准确、可信, 采用B、C点(反虹涵进入孔)的观测数据进行计算, 原因是观测点B、C水位较为稳定, 波动小, 而且选择该计算段(BC段)能避免局部水头损失计算中相关系数或经验值的选取差异对

反演计算的影响, 更能保证糙率(n)计算结果真实。此外, 再选取涵管AD段进行计算, 其结果与选取BC段的计算结果互相验证。

4.2.2 糙率计算

管壁糙率反演计算见表3。

表3 管壁糙率反演计算

Tab.3 Inverse calculation of pipe wall roughness

测量背景	上游水位/m	下游水位/m	过流流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	沿程水头损失/m	反演计算糙率(n)	备注
施工前	8.394	7.401	48	0.465	0.017 2	2019年12月5日测量, 此时反虹涵附着大量淡水壳菜
左涵施工后	8.122	7.334	48	0.145	0.009 53	2020年1月10日测量, 左涵刚完成防治涂料涂覆
右涵施工后	8.078	7.316	48	0.151	0.009 73	2021年1月6日测量, 左涵已涂覆防治涂料并通水一年; 右涵刚完成涂覆

4.3 对管壁糙率影响分析

从测流反演计算结果可以看出,淡水壳菜在2019年12月初生长密度达到顶峰,糙率(n)也为一年之中的最高值,达0.017 2,沿程水头损失为0.465 m;防生物污损涂料涂覆后,涵管平均糙率降至0.009 6,沿程水头损失为0.145~0.151 m,可见防贝涂料的糙率(n)非常小,既能有效防护淡水壳菜附着,又能大幅提升输水能力,降低输水能耗。

5 工程效益评价

工程效益包括经济效益和生态环境效益,其中经济效益包含直接节约的电费、供水优化调度效益和节约附着物清理的费用。该项目2020年度经济效益分析评价如下:

① 直接节约电费

2019年12月反虹涵单涵(左涵)淡水壳菜防治涂料工程完成后,反虹涵左涵过水面糙率大幅降低(见表3),2020年在高流量供水情况下左涵沿程水头损失降低约32 cm,导致泵站出水池水位平均降低约17 cm(因右涵没有涂覆涂料),泵站用电量相应减少。根据防护涂料涂覆后反虹涵运行水位连续观测、泵站耗电量、泵组效能数据等信息,2020年因出水池水位降低而直接节约电费95.69万元。

② 供水优化调度效益

供水优化调度效益计算见表4。其中峰期、平期、谷期的电价分别为0.993 568 75、0.613 068 75、0.320 368 75元/(kW·h);实际平均电价、调整后的平均电价分别为0.589 6、0.582 7元/(kW·h)(均未含附加费)。

表4 供水优化调度效益计算

Tab.4 Benefit calculation of optimal water supply dispatching

项目	平均最大过流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	用电量/ (kW·h)	用电量比例/%			节约电费/元
			峰期	平期	谷期	
实际	96	480 205 440	23.12	38.82	38.06	10 076 183.07
调整	100	480 205 440	22.53	37.83	39.65	13 386 785.37

计算结果表明,2019年投资176万元进行反虹涵左涵防贝损涂料涂覆后,提升了反虹涵的过流能力,消除了系统输水瓶颈,为供水生产提供了峰谷优化调度空间,产生效益约为331.1万元。

③ 节约淡水壳菜清理费用

反虹涵每年淡水壳菜清理费约7.3万元,防污损涂料有效防治淡水壳菜附着,每年可节省相关清理费用等。

④ 2020年度工程效益评价

2019年12月反虹涵左涵淡水壳菜防治工程完成后,2020年节约电量($149 \sim 151$) $\times 10^4$ kW·h,节省运行成本434.09万元(含优化调度效益331.1万元、直接节约电费95.69万元、节省清理费约7.3万元),解决了反虹涵输水能力的瓶颈问题,经济效益显著。同时有效防止淡水壳菜侵蚀,保护涵管结构安全,延长工程设施服役年限。

6 结论

① 输水工程淡水壳菜防治研究成果已成功进行工程应用。根据防治工程通水运行一年后现场检测结果,GX-BIOX有机硅仿生物特种涂料保持完好,能持续有效抑制淡水壳菜附着,保护结构安全,降低输水建筑物内壁糙率和输水能耗,防治效果显著。

② 淡水壳菜在每年12月初生长密度达到顶峰,反虹涵糙率(n)也达到一年之中的最高值(0.017 2),沿程水头损失为0.465 m;防生物污损涂料涂覆后,涂料涵管的平均糙率降至0.009 6,沿程水头损失为0.145~0.151 m。

③ 根据运行数据计算,2019年12月反虹涵左涵淡水壳菜防治工程完成后(投资176万元),2020年节约电量($149 \sim 151$) $\times 10^4$ kW·h,节省运行成本434.09万元(含优化调度效益331.1万元、直接节约电费95.69万元、节省清理费约7.3万元),同时解决了反虹涵输水能力的瓶颈问题,经济效益显著。

④ 该项目研究成果有效解决了困扰输水工程的一大难题,在保护输水结构免受淡水壳菜等生物侵蚀的同时,降低过水面糙率,节能减排效果显著,具有良好的社会环境效益和生态效益。

参考文献:

- [1] 张盾,王毅,王鹏,等. 海水环境生物腐蚀污损与防护[J]. 装备环境工程,2016,13(4):22-27.
ZHANG Dun, WANG Yi, WANG Peng, et al. Biocorrosion and biofouling in seawater and their protection[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016,13(4):22-27(in Chinese).
- [2] 段继周,侯保荣. 海洋工程设施生物腐蚀、污损和防护技术研究进展[J]. 公路交通科技,2010(增刊):118-121.
DUAN Jizhou, HOU Baorong. Research progress of

- biocorrosion, biofouling and their control techniques for marine steel and reinforced concrete infrastructure[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010(S1): 118 - 121 (in Chinese).
- [3] 张明明, 赵文, 于世超. 我国海洋污损生物的研究概况[J]. 水产科学, 2008, 27(10): 545 - 549.
ZHANG Mingming, ZHAO Wen, YU Shichao. Research progress of marine fouling organisms in China[J]. Fisheries Science, 2008, 27(10): 545 - 549 (in Chinese).
- [4] 严涛, 严文侠, 董钰, 等. 北部湾近海结构物污损生物研究[J]. 海洋学报, 2000, 22(4): 137 - 146.
YAN Tao, YAN Wenxia, DONG Yu, et al. Fouling communities on offshore structures in the Beibu Gulf[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000, 22(4): 137 - 146 (in Chinese).
- [5] 史航, 王鲁民. 海洋污损生物藤壶的附着机理及防除[J]. 广东农业科学, 2006(6): 72 - 73.
SHI Hang, WANG Lumin. Adhesion mechanism and prevention of marine biofouling barnacle[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2006(6): 72 - 73 (in Chinese).
- [6] 金晓鸿. 海洋污损生物防除技术和发展(II)——各种海洋设施的防污[J]. 材料开发与应用, 2005, 20(6): 44 - 46.
JIN Xiaohong. Technology and development of antifouling—antifouling of ships and electrolytic antifouling technology[J]. Development and Application of Materials, 2005, 20(6): 44 - 46 (in Chinese).
- [7] 严涛, 胡煜峰, 王建军, 等. 海水管道系统内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.
YAN Tao, HU Yufeng, WANG Jianjun, et al. Marine macro-fouling in seawater pipelines and its prevention [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2013, 39(3): 43 - 45 (in Chinese).
- [8] 蔡杰龙, 杨永民, 潘志权, 等. 淡水壳菜污损体系及其对输水建筑物侵蚀现状分析[J]. 人民珠江, 2019, 40(6): 111 - 116, 129.
CAI Jielong, YANG Yongmin, PAN Zhiquan, et al. Analysis on the fouling system of freshwater shell vegetable and its erosion to water conveyance building [J]. Pearl River, 2019, 40(6): 111 - 116, 129 (in Chinese).
- [9] 杨永民, 潘志权, 蔡杰龙, 等. 淡水壳菜对大型输水工程混凝土表面侵蚀及防护措施研究[J]. 广东水利水电, 2018(2): 50 - 56.
YANG Yongmin, PAN Zhiquan, CAI Jielong, et al. Study on erosion and protection measures of concrete surface in the large water delivery project by *Limnoperna fortunei* [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2018(2): 50 - 56 (in Chinese).
- [10] 潘志权, 蔡杰龙. 淡水壳菜模拟代谢酸对水泥基材料侵蚀机理研究[J]. 人民珠江, 2019, 40(10): 60 - 65.
PAN Zhiquan, CAI Jielong. Study on erosion mechanism of simulated *Limnoperna fortunei* metabolic acid on cement-based materials [J]. Pearl River, 2019, 40(10): 60 - 65 (in Chinese).

作者简介: 郑航桅(1974 -), 男, 北京人, 硕士, 高级工程师, 从事水利水电工程建设管理及运行管理工作。

E-mail: penguincey@163.com

收稿日期: 2021 - 09 - 08

修回日期: 2021 - 10 - 14

(编辑: 衣春敏)

幸福生活靠奋斗, 美丽河湖靠呵护