

环北部湾广东水资源配置工程 PCCP 管线土壤 腐蚀性调查分析

秦永坤¹, 李开岩², 张慈沁², 李岩^{1*}, 么振东³, 徐宁¹, 李军¹

(1.南京水利科学研究院, 南京 210024; 2.广东粤海粤西供水有限公司, 广东 湛江 524000;
3.广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 广州 510635)

摘要: **目的** 调查分析环北部湾广东水资源配置工程湛江分干线的预应力钢筒混凝土管(PCCP)沿线土壤腐蚀性等级, 为PCCP阴极保护设计提供依据。**方法** 通过土壤电阻率、pH值、氧化还原电位、Cl⁻含量测试, 综合评价土壤对钢结构以及混凝土中钢筋的腐蚀性。**结果** 湛江分干线PCCP埋管段土壤绝大部分测点的pH值在4.5~7.3, 以弱酸性土壤为主。土壤氧化还原电位普遍在400 mV以上。鹤合段土壤电阻率大部分在100 Ω·m以上, 合雷段和雷徐段土壤电阻率处于20~50 Ω·m的比例显著增加。对于土壤中Cl⁻含量, 鹤合段大部分数值在100 mg/kg左右, 合雷段数值在50~450 mg/kg, 雷徐段95%以上数值小于250 mg/kg。**结论** 湛江分干线PCCP沿线土壤腐蚀性总体上呈由北向南略为增大趋势, 对钢结构的腐蚀性强、中、弱、微4个等级均有, 中、强腐蚀等级占比为41%, 对混凝土中钢筋的腐蚀性为微、弱腐蚀。

关键词: 水资源配置工程; 湛江分干线; PCCP; 土壤腐蚀; 腐蚀等级; 阴极保护

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)03-0105-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.03.012

Investigation and Analyses of Soil Corrosion in PCCP Pipeline of Guangdong Water Resources Allocation Project around Beibu Gulf

QIN Yongkun¹, LI Kaiyan², ZHANG Ciqin², LI Yan^{1*}, YAO Zhendong³, XU Ning¹, LI Jun¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Guangdong Yuehai Yuexi Water Supply Co., Ltd., Guangdong Zhanjiang 524000, China; 3. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510635, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate and analyze the soil corrosion level along Prestressed Concrete Cylinder Pipeline (PCCP) of Zhanjiang Branch of Guangdong Water Resources Allocation Project around Beibu Gulf to provide a basis for the cathodic protection design of PCCP. Parameters such as soil resistivity, pH value, oxidation reduction potential and chlorine ion

收稿日期: 2024-07-23; 修订日期: 2025-01-09

Received: 2024-07-23; Revised: 2025-01-09

基金项目: 环北部湾广东水资源配置工程复杂环境条件下PCCP管道提质升级关键技术研究专题(Hj422013); 复杂环境下PCCP管道阴极保护与智能监测预警成套技术研究(Y418009)

Fund: Key Technologies Research Topic of PCCP Pipeline Quality Improvement and Upgrading under Complex Environmental Conditions of Guangdong Water Resources Allocation Project Around Beibu Gulf (Hj422013); Research on Cathodic Protection and Intelligent Monitoring and Early Warning Technology of PCCP Pipeline under Complex Environment (Y418009)

引文格式: 秦永坤, 李开岩, 张慈沁, 等. 环北部湾广东水资源配置工程PCCP管线土壤腐蚀性调查分析[J]. 装备环境工程, 2025, 22(3): 105-111.

QIN Yongkun, LI Kaiyan, ZHANG Ciqin, et al. Investigation and Analyses of Soil Corrosion in PCCP Pipeline of Guangdong Water Resources Allocation Project around Beibu Gulf[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(3): 105-111.

*通信作者(Corresponding author)

content were detected to evaluate the corrosion level of soil to steel structure and rebar in concrete. The results showed that the pH value was in a range of 4.5-7.3 for a vast majority of measure points, which implied that most of the soil was weakly acidic. The oxidation reduction potential was generally higher than 400 mV. For the soil resistivity, the majority data of He-He segment was above 100 $\Omega\cdot\text{m}$, however, a higher proportion of the data in a range of 20-50 $\Omega\cdot\text{m}$ was presented for He-Lei segment and Lei-Xu segment. In addition, most of the soil chlorine ion contents of He-He segment were around 100 mg/kg, and the ones of the He-Lei segment were in a range of 50-450 mg/kg. In special, a proportion of 95% of the chlorine ion contents was below 250 mg/kg for the Lei-Xu segment. In general, the soil corrosion level along PCCP of Zhanjiang Branch shows a slightly increase trend from north to south, involving a fact that the corrosion to steel structure is in the level of high, medium, weak and micro, wherein the proportion of medium and high corrosion is 41%. The level of micro and weak corrosion is exhibited to the rebar in concrete.

KEY WORDS: Water Resources Allocation Project; Zhanjiang Branch; PCCP; soil corrosion; corrosion level; cathodic protection

环北部湾广东水资源配置工程是国务院批准的150项重大水利工程项目之一,对有效缓解粤西地区缺水情势,大幅提高区域供水安全保障能力发挥重要作用。该工程从云浮市西江干流取水,向粤西地区的湛江、茂名、阳江、云浮4市供水,工程设计引水流量为110 m^3/s ,工程等别为I等,工程规模为大型(1)型。输水线路总长度490.33 km,其中输水分干线工程分为云浮分干线、茂名阳江分干线和湛江分干线3部分,长度为288.65 km。湛江分干线是关键节点工程,从鹤地水库取水,自北向南按鹤合段(鹤地水库至合流水库段,设计流量为27 m^3/s)、合雷段(合流水库至雷州南渡河段,设计流量为20 m^3/s)和雷徐段(雷州南渡河至徐闻段,设计流量为13 m^3/s)布线,直至大水桥水库,长度达170 km。据设计资料统计,湛江分干线的引水管道设计采用钢管、球墨铸铁管及预应力钢筒混凝土管(PCCP)3种材质,其中PCCP埋管总长度达134 km,约占湛江分干线管道长度的79%,包括DN2200~DN4000多种管径。

通常认为,PCCP的钢筒和预应力钢丝表面被混凝土或砂浆覆盖,混凝土的碱性环境会促进钢表面钝化膜的形成,从而减少PCCP在土壤和地下水环境中腐蚀发生^[1]。然而,对于处在土壤环境中的PCCP,碳化作用、硫酸盐的作用、某些酸性环境作用以及管道输/停交替运行等,都会造成PCCP中混凝土微环境(pH等)和微结构(孔隙、缺陷等)的改变,加快钢丝结构表面由钝化状态转入活化状态^[2-3]。尤其是土壤中的 Cl^- 容易渗透破坏钢丝表面的钝化膜,致使氧或氢离子扩散到预应力钢丝表面发生去极化反应,诱发预应力钢丝腐蚀,萌生应力腐蚀裂纹,增大PCCP爆管失效的风险^[4-6]。对PCCP施加阴极保护是控制新建或已建管道腐蚀的有效措施之一,特别是当管道存在局部破坏、腐蚀,或长时间遭受杂散电流干扰的情况时^[7-9]。在PCCP施加阴极保护时,存在因保护电位过负诱发预应力钢丝氢脆的风险,因此PCCP阴极保护系统设计应选择合适的保护电位极

限值^[5,10-11]。

在土壤环境中,土壤的理化性质,如电阻率、pH、氯离子含量、氧化还原电位等是决定其腐蚀性的主要参数,进一步会影响PCCP极化电位、阳极发生电流等阴极保护效果参数的选择和控制在^[12-14]。环北部湾广东水资源配置工程湛江分干线南北贯穿雷州半岛,属于长距离引水工程,沿线区域土壤环境的差异性较大,造成管道腐蚀的不均匀性。此外,该区域处于高温、高湿的气候环境,部分滨海地区大气具有高盐雾的特点,潮湿、多雨季节的大量降水会造成土壤理化性质的动态变化,腐蚀发生更为复杂^[15]。因此,在未结合沿线土壤环境特点计算分析的情况下,对于复杂环境下PCCP管线简单地采用标准化成套牺牲阳极设计,很难保证全线的阴极保护效果,而采用较大的安全系数,又会造成经济成本增加或过保护现象^[16]。

文中针对环北部湾广东水资源配置工程湛江分干线工程,在施加阴极保护前,全面调查了湛江分干线PCCP埋管沿线土壤的电阻率、pH值、氧化还原电位、 Cl^- 含量等理化参数的分布特点,结合测试数据评价沿线土壤腐蚀特性,从而为PCCP阴极保护的优化设计提供数据支撑,有助于保障管道的安全、经济运行。

1 测试方法

1.1 土壤腐蚀参数测试

按照规范要求,在PCCP实施阴保设计前,应该检测土壤的电阻率、氧化还原电位(ORP)、pH值和 Cl^- 含量等参数^[10]。结合湛江分干线PCCP埋管段管线现场情况,每3~4 km内布置1个测点进行电阻率、氧化还原电位、pH值的现场测量,并按管线桩号做好数据记录。利用Fluke土壤电阻率测试仪,按四电极等距法测定管道沿线土壤电阻值,并按式(1)计算得出0~7 m深度的平均土壤电阻率^[17]。

$$\rho = 2\pi aR \quad (1)$$

式中: ρ 为被测区土壤电阻率, $\Omega \cdot m$; a 为相邻测试电极间距, 其值与测试土壤的深度相同, 本次测量 $a=7 m$; R 为仪器示值, Ω 。

采用便携式 pH 计测量管线上方表层土壤的 pH 值。将 LD-QX6530P 型氧化还原电位仪的铂电极和参比电极插入待测土壤中, 待数据稳定后读取氧化还原电位值, 并结合 pH 值换算成相对于标准氢电极的氧化还原电位。

在工程地质勘测阶段, 从湛江分干线管道沿线处于地下水位以下的土层中钻取原状土样, 进行 Cl^- 含量测定。结合相关地勘资料^[18], 选取本次测点桩号附近区域的 Cl^- 含量数据, 分析其对混凝土中钢筋的腐蚀性。

1.2 腐蚀性评级

参照《岩土工程勘察规范》^[19], 分别根据土壤电阻率、氧化还原电位和 pH 值对钢结构的腐蚀等级进行评定, 取各指标中腐蚀等级最高者作为土壤的腐蚀等级。按照土中 Cl^- 含量评价土壤对混凝土中钢筋的

腐蚀等级。

2 结果与分析

2.1 对钢结构的腐蚀性

湛江分干线分为鹤合段、合雷段和雷徐段 3 段, 各段 PCCP 埋管长度分别为 45.66、47.91、40.51 km, 沿线分别布置 12、14、13 处测点, 共计 39 个。湛江分干线 PCCP 沿线土壤 pH 值的测量结果如图 1 所示。可以看出, 鹤合段的土壤 pH 值除 HH46+870 处为 5.2 外, 其他测点 pH 值均不低于 5.5, 最大值 7.3, 对钢结构的腐蚀性以微腐蚀为主。合雷段的土壤 pH 值大部分低于 5.5, 对钢结构表现为弱腐蚀, 不过在 HL3+300 处 pH 值为 4.3, 达到中腐蚀等级。雷徐段的土壤 pH 值在 4.9~6.3, 以弱腐蚀为主。对比来看, 湛江分干线沿线土壤以弱酸性土壤为主, 并且沿管线从北到南土壤 pH 值略微降低。通常, 较低的 pH 值会降低 PCCP 外壁水泥砂浆层的碱性, 影响预应力钢丝表面钝化膜的生成^[20]。

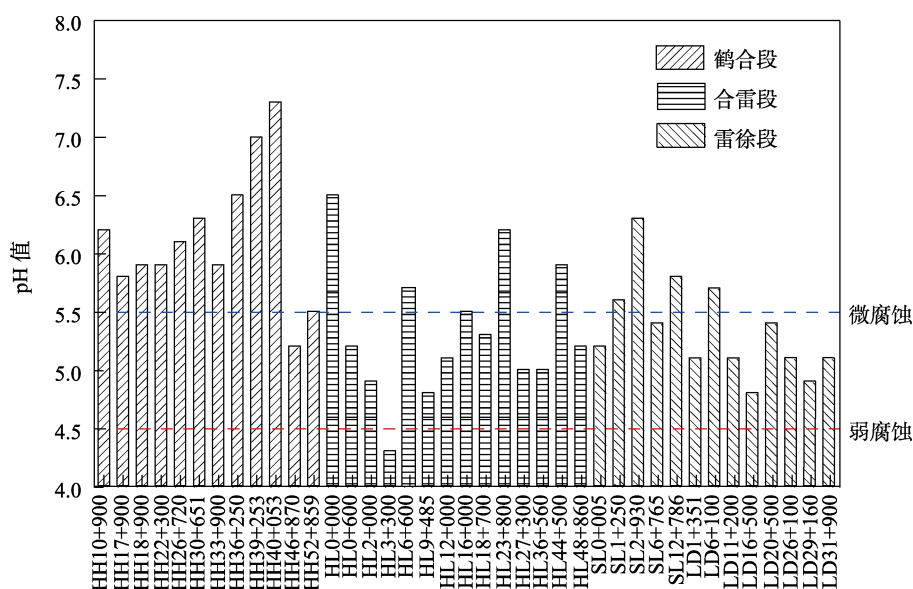


图 1 湛江分干线 PCCP 埋管段土壤 pH 值测量结果

Fig.1 Test results of pH value of soil along PCCP in Zhanjiang Branch

通过对湛江分干线 PCCP 沿线土壤测试发现, 各测点除雷徐段的 LD6+100 桩号 (ORP 约为 221 mV) 处为弱腐蚀外, 其他测点的土壤 ORP 均大于 400 mV, 对钢结构的腐蚀表现为微腐蚀。进一步测量湛江分干线沿线土壤电阻率, 结果如图 2 所示。对于鹤合段, HH39+253 和 HH40+053 桩号处土壤的电阻率分别为 20、66 $\Omega \cdot m$, 分别属于强腐蚀和弱腐蚀; 其他各测点的土壤电阻率普遍高于 100 $\Omega \cdot m$, 土壤电阻率最大值达 768 $\Omega \cdot m$, 对钢结构的腐蚀等级均为微腐蚀。对于合雷段和雷徐段, 土壤电阻率处于中腐蚀等级 (20~

50 $\Omega \cdot m$) 的测点比例显著增加, 尤其合雷段沿线土壤中腐蚀测点达 70% 以上。

2.2 对混凝土中钢筋的腐蚀性

湛江分干线 PCCP 沿线土壤氯离子含量的测量结果如图 3 所示。从图 3a 可以看出, 鹤合段土壤的 Cl^- 质量浓度大部分在 100 mg/kg 左右, 小于 250 mg/kg, 对混凝土中钢筋表现为微腐蚀, 仅 HH10+326 测点处的 Cl^- 质量浓度略高, 约为 421 mg/kg, 腐蚀等级为弱腐蚀。对于合雷段, 沿线土壤 Cl^- 的质量浓度在

50~450 mg/kg, 均未超过 500 mg/kg, 对钢筋的腐蚀等级为微、弱腐蚀。在雷徐段, 对不同土质层的原状土测试表明 (如图 3b 所示), 95%以上的取样土壤的 Cl^- 质量浓度在 250 mg/kg 以下, 对混凝土中的钢筋表现为微腐蚀; 部分⑥-1 层杂色黏土和 V 层全风化土

的 Cl^- 质量浓度最大值达 467 mg/kg, 处于弱腐蚀等级。总体上, 合雷段和雷徐段沿线土壤的 Cl^- 含量略高于鹤合段, 这可能是由于其地理位置更偏向雷州半岛南部, 降水等因素给该区域土壤提供了较多的氯离子来源。

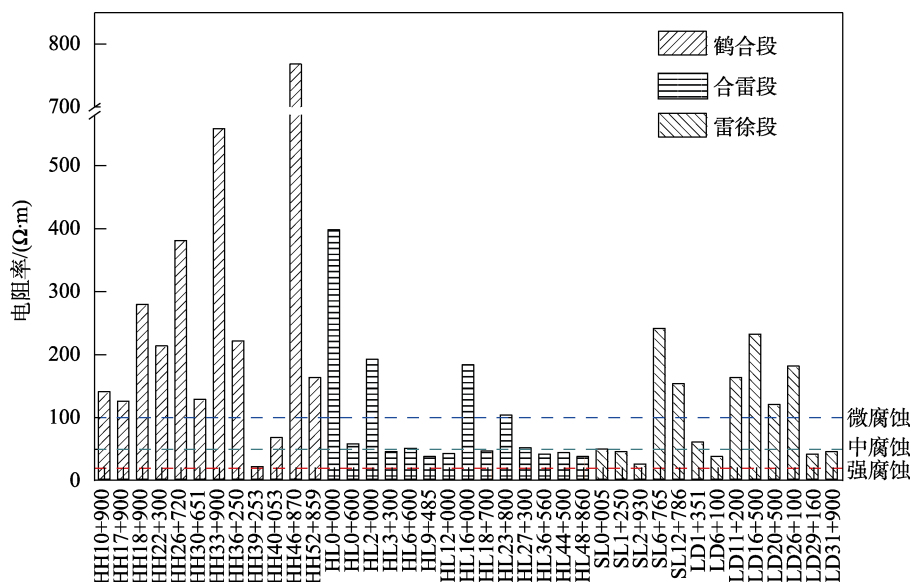


图2 湛江分干线 PCCP 埋管段土壤电阻率测量结果

Fig.2 Test results of soil resistivity along PCCP in Zhanjiang Branch

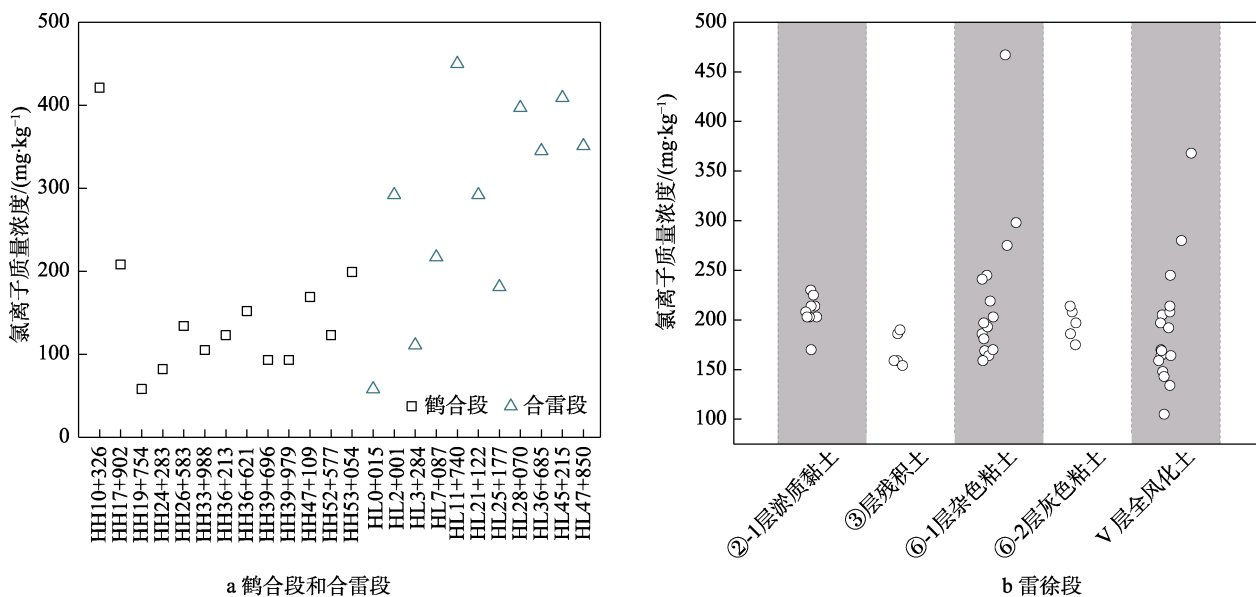


图3 湛江分干线 PCCP 埋管段土壤氯离子含量测量结果

Fig.3 Test results of chlorine ion content of soil along PCCP in Zhanjiang Branch:

a) He-He segment and Ge-Lei segment; b) Lei-Xu segment

2.3 土壤腐蚀性分析

综合湛江分干线 PCCP 沿线土壤测点处 pH 值、氧化还原电位及电阻率 3 个因素, 按腐蚀性等级最高者作为该测点的腐蚀等级。从图 4 可以看出, 湛江分干线 PCCP 沿线土壤微、弱腐蚀测点比例为 59%, 中

腐蚀测点比例约为 38%, 主要分布合雷段和雷徐段, 尤其合雷段的中腐蚀测点比例高达 64%, 而鹤合段 HH39+253 区域土壤电阻率较小 (约 $20 \Omega \cdot \text{m}$), 为强腐蚀。结合图 2 可以发现, 沿线中、强腐蚀区域普遍存在偏低的土壤电阻率, 因此土壤电阻率对其腐蚀性等级评定起决定性影响。土壤电阻率是土质、含水量、

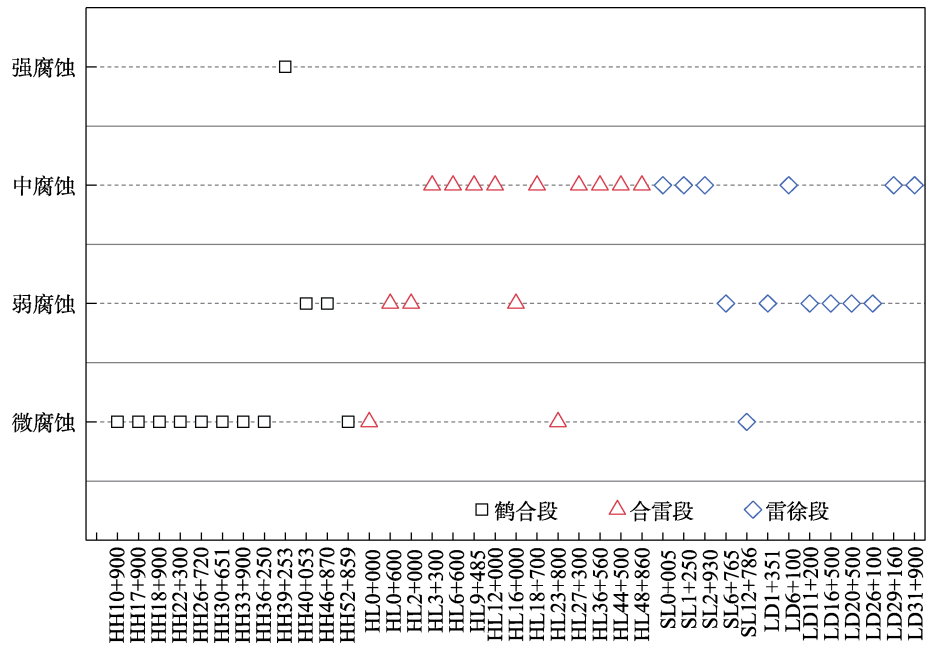


图 4 湛江分干线 PCCP 沿线土壤腐蚀性等级统计
Fig.4 Corrosion level of soil along PCCP in Zhanjiang Branch

含盐量等的综合体现,一般认为,潮湿土壤有助于钢表面阳极区和阴极区之间导电液膜的形成,土壤电阻率偏低的情况下,增加液膜的导电性,进而会促进阴、阳极区的电化学反应,导致金属腐蚀速率增大^[21]。

除土壤 pH、氧化还原电位、电阻率外,自然腐蚀电位、土壤质地、含水率、含盐量和 Cl⁻含量也是土壤腐蚀性综合评估的重要参数^[22]。通过对湛江分干线 PCCP 埋管沿线的钢对地电位($E_{c,vs\ CSE}$)测试发现,鹤合段的钢对地电位值在-537~-386 mV,合雷段和

雷徐段的数值整体上稍负于鹤合段,分别在-554~-438 mV 和 -544~-392 mV,如图 5 所示。一般金属对地电位越负,土壤腐蚀性越强,说明湛江分干线 PCCP 沿线土壤的腐蚀性从北到南略微增高。

结合现场检测和地勘数据,参照 GB/T 39637—2020 对土壤电阻率、氧化还原电位、自然腐蚀电位、pH 值和 Cl⁻含量几项参数分别评分,结果见表 1。可以看到,由于沿线土壤的 ORP 普遍大于 400 mV,其对土壤腐蚀性的影响非常微弱,3 段分干线的 ORP

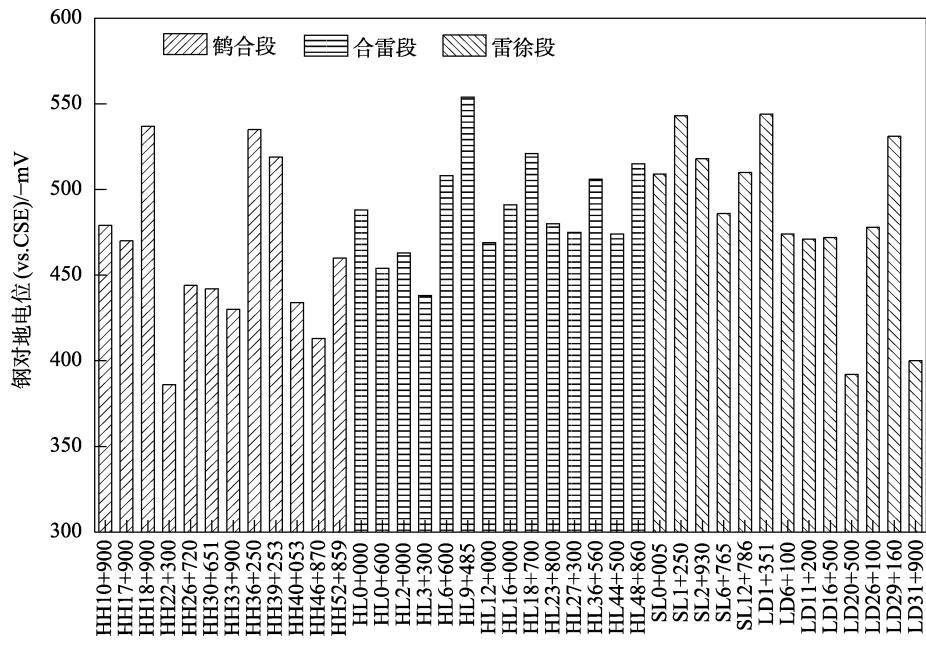


图 5 湛江分干线 PCCP 埋管段钢对地电位测量结果
Fig.5 Test results of steel/soil corrosion potential along PCCP in Zhanjiang Branch

评分均为0。整体上,各参数对土壤腐蚀性评估的影响为 pH>自然腐蚀电位>土壤电阻率>Cl⁻含量。对于鹤合段,其主要影响参数为 pH 值和自然腐蚀电位,结合图 2 分析,该段土壤电阻率绝大多数在 100 Ω·m 以上,属于微腐蚀等级,普遍评分为 0,平均评分值仅为 0.25。对于合雷段和雷徐段,其主要影响参数为 pH 值、自然腐蚀电位和土壤电阻率,且合雷段各参数的评分值略高于雷徐段,这与合雷段中腐蚀等级测点比例高于雷徐段的结果基本一致(如图 4 所示)。

表 1 土壤腐蚀性单项指标评价分数平均值
Tab.1 Average value of single index evaluation score of soil corrosion

分干线	土壤电阻率	ORP	$E_{c,vs\ CSE}$	pH 值	Cl ⁻ 含量
鹤合段	0.25	0	2.00	2.25	1.00
合雷段	1.93	0	3.14	3.61	1.00
雷徐段	1.38	0	2.69	3.38	1.00

总体看来,在对钢结构的腐蚀方面,合雷段、雷徐段沿线土壤中腐蚀等级比例高于鹤合段,不同区域有强、中、弱的腐蚀等级变化;在对混凝土中钢筋的腐蚀方面,合雷段、雷徐段沿线土层中 Cl⁻含量略高于鹤合段,腐蚀等级为微、弱腐蚀。不过,在 PCCP 工程建设和实际运行中,土壤环境通常会发生动态变化,造成腐蚀环境更为复杂。在管道回填覆土施工时,一般会剔除大直径块石及砖瓦,使用原状土回填,土壤透气性和排水性的改变,会对土壤氧化还原电位造成影响^[23]。另一方面,土壤含水量、含盐量是影响电阻率变化的重要因素。环北部湾广东水资源配置工程湛江分干线处于雷州半岛,常年受到高温、高湿、盐雾大气环境的影响^[24],加上管道运行期存在的季节交替变化,尤其广东地区在雨季时期,大量降水会造成土壤电阻率降低和氯离子的进入,加剧土壤的腐蚀倾向。因而,PCCP 埋管作为长距离结构,穿过多种土壤层,不同区域土壤的含水量、含盐量、含氧量等物理化学性质差异影响钢对地电位,从而造成结构电位差,形成浓差原电池,加大电位较负的阳极区的腐蚀风险^[25]。

3 结论

1) 湛江分干线 PCCP 沿线土壤的腐蚀性总体上呈由北向南略为增大趋势,对钢结构的腐蚀性强、中、弱、微 4 个等级均有,以弱、中腐蚀为主,局部区域为强腐蚀,中、强腐蚀比例达 41%,对混凝土中钢筋的腐蚀性为微、弱腐蚀。

2) 考虑管道回填覆土后以及运行中土壤腐蚀性加剧的可能性,建议全线 PCCP 采用阴极保护防腐措施,并在施工期和运维期间持续监测土壤腐蚀性参数变化。

参考文献:

- [1] 李晶, 邹翔, 王相民, 等. 预应力钢筒混凝土管腐蚀机理与防护措施[J]. 全面腐蚀控制, 2016, 30(6): 69-73.
LI J, ZOU X, WANG X M, et al. The Corrosion Mechanism and Protection Measure of Prestressed Concrete Cylinder Pipe[J]. Total Corrosion Control, 2016, 30(6): 69-73.
- [2] 叶国文. 长距离大流量输水管道的防腐研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
YE G W. Study on Anticorrosion of Long-Distance and Large-Flow Water Pipeline[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009.
- [3] 王东黎, 郑征宇, 胡少伟, 等. 超大口径 PCCP 管道结构安全与质量控制研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 26-31.
WANG D L, ZHENG Z Y, HU S W, et al. Study on Structural Safety and Quality Control of Large Diameter PCCP[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 26-31.
- [4] 胡士信, 窦宏强, 张本革, 等. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)的阴极保护[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(12): 912-916.
HU S X, DOU H Q, ZHANG B G, et al. Cathodic Protection for Prestressed Concrete Cylinder Pipe(PCCP)[J]. Corrosion & Protection, 2009, 30(12): 912-916.
- [5] HARTT W, LEWIS R O. Cathodic Protection Shorting Strap Induced Corrosion and Failure of Prestressed Concrete Pressure Pipe[J]. Corrosion, 2002, 2256:1-9.
- [6] GUMMOW R.A. Corrosion and cathodic Protection of Prestressed Concrete Cylinder Pipe[J]. Materials Performance, 2005(5): 32-33.
- [7] 楚学勇. 三湾水利工程中预应力钢筒混凝土管道的腐蚀与阴极保护[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(5): 444-447.
CHU X Y. Corrosion and Cathodic Protection of Prestressed Concrete Cylinder Pipe in the Sanwan Water Conservancy[J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(5): 444-447.
- [8] 孙仁兴, 李良, 孙长坤. 牺牲阳极法阴极保护在南水北调预应力钢筒混凝土管道上的应用[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(11): 828-829.
SUN R X, LI L, SUN C K. Application of Cathodic Protection by Sacrificial Anode to PCCP in South-to-North Water Transfer Project[J]. Corrosion & Protection, 2009, 30(11): 828-829.
- [9] HALL S C. Does My Pressure Pipeline Need Cathodic Protection?[J]. Pipelines, 2020(8): 65-71.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 埋地预应力钢筒混凝土管道的阴极保护: GB/T 28725—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Cathodic Protection for Buried Prestressed Concrete Cylinder Pipelines: GB/T 28725—2012[S]. Bei-

- jing: Standards Press of China, 2013.
- [11] 曲兴辉, 侯佩成. PCCP 管道阴极保护试验研究[J]. 水利水电技术, 2010, 41(10): 48-52.
QU X H, HOU P C. Experimental Study on Cathodic Protection for PCCP Pipeline[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(10): 48-52.
- [12] 韩成. 浅析土壤介质对 PCCP 管道阴极保护效果的影响研究[J]. 水利技术监督, 2017, 25(5): 19-21.
HAN C. Study on the Influence of Soil Medium on Cathodic Protection Effect of PCCP Pipeline[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2017, 25(5): 19-21.
- [13] 刘文亮, 王银娜, 陈家丽. 土壤环境性质分析对于埋地管道设计管理的意义研究[J]. 化学工程与装备, 2013(5): 34-36.
LIU W L, WANG Y N, CHEN J L. Study on the Significance of Soil Environmental Property Analysis for the Design and Management of Buried Pipelines[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2013(5): 34-36.
- [14] 王亚楠, 李自力, 刘建国, 等. 高土壤电阻率地区管道牺牲阳极保护季节性优化研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(1): 35-40.
WANG Y N, LI Z L, LIU J G, et al. Seasonal Optimization of Sacrificial Anode Protection for Pipelines in Regions with Soil of High Resistivity[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(1): 35-40.
- [15] 容宇媚, 张际标, 陈春亮, 等. 热带滨海景观设施的腐蚀特征及其影响因素简析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(7): 62-69.
RONG Y M, ZHANG J B, CHEN C L, et al. Corrosion Characteristics of Tropical Coastal Structures and Analyses of Their Influencing Factors[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(7): 62-69.
- [16] 杨超, 韩庆, 王艺璇, 等. 多因素影响下管道阴保 IR 降的计算方法[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(1): 58-62.
YANG C, HAN Q, WANG Y X, et al. Calculation Method of IR Drop of Pipelines under the Influence of Multiple Factors[J]. Corrosion & Protection, 2023, 44(1): 58-62.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 埋地钢质管道腐蚀防护工程检验: GB/T 19285—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Inspection of Corrosion Protection for Buried Steel Pipelines: GB/T 19285—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [18] 李振嵩, 张浩然, 赵晖, 等. 环北部湾广东水资源配置工程初步设计报告(第三篇工程地质)[R]. 广东: 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 2022.
- LI Z S, ZHANG H R, ZHAO H, et al. Preliminary Design Report of Guangdong Water Resources Allocation Project around Beibu Gulf (Part 3 Engineering Geology)[R]. Guangdong: Zhongshui Pearl River Planning Survey and Design Co., Ltd., Guangdong Hydropower Planning & Design Institute Co., Ltd., 2022.
- [19] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for Investigation of Geotechnical Engineering: GB 50021—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [20] 蔺卿. 多源腐蚀环境下 PCCP 管道阴极保护方案优化[J]. 水利技术监督, 2023, 31(5): 117-119.
LIN Q. Optimization of Cathodic Protection Schemes for PCCP Pipelines in Multiple Source Corrosion Environments[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2023, 31(5): 117-119.
- [21] 李海坤, 朱凤艳, 娄月霞, 等. 不同电阻率土壤中管线钢的自腐蚀速率分布[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(8): 598-601.
LI H K, ZHU F Y, LOU Y X, et al. Distribution of Free Corrosion Rate of Pipeline Steel in Soil with Different Resistivity[J]. Corrosion & Protection, 2017, 38(8): 598-601.
- [22] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属和合金的腐蚀: GB/T 39637—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Corrosion of metals and alloys—Classification of soil corrosivity: GB/T 39637—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [23] 王光雍. 自然环境的腐蚀与防护: 大气·海水·土壤[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997.
WANG G Y. Corrosion and Protection of Natural Environment: Atmosphere, Seawater and Soil[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1997.
- [24] 马长李, 马瑞萍, 白云辉. 我国沿海地区大气环境特征及典型沿海地区大气腐蚀性研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(8): 65-69.
MA C L, MA R P, BAI Y H. Characteristics of Atmospheric Environment in China's Coastal Areas and Atmospheric Corrosion in Typical Coastal Regions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(8): 65-69.
- [25] 于宁. 直埋热力管道土壤腐蚀与防护(四)[J]. 管道技术与设备, 2002(4): 45-46.
YU N. Soil Corrosion and Protection of Directly Buried Thermal Pipeline (IV)[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2002(4): 45-46.