

# 海上换流站海水取水管道防腐蚀技术探讨

齐慧卿 韩强 史宁 韩雪 谢一鸣

山东电力工程咨询院有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i10.6587

**[摘要]**当前,我国能源结构正向着清洁化、低碳化的方向加速转型,海上风电凭借资源储量大、发电效率高、环境影响小等优势,已成为新能源开发的核心领域之一。海上换流站是海上风电并网传输的关键枢纽,海水取水管道作为海上换流站的重要组成部分,负责为换流阀、变压器等核心发热设备输送冷却用海水。当前,海水取水管道面临着腐蚀严重的问题,文章基于此,首先根据腐蚀机理,将腐蚀分为电化学腐蚀、冲刷腐蚀、空泡腐蚀、微生物腐蚀四类,继而剖析腐蚀的影响因素,并多维提出防腐技术。

**[关键词]**海上换流站;海水取水管道;防腐蚀技术

中图分类号: TU81 文献标识码: A

## Discussion on Anti-corrosion Technology of Seawater Intake Pipelines in Offshore Converter Stations

Huiqing Qi Qiang Han Ning Shi Xue Han Yiming Xie

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., LTD.

**[Abstract]**Currently, China's energy structure is accelerating its transformation towards clean and low-carbon directions. Offshore wind power, with its advantages such as large resource reserves, high power generation efficiency, and low environmental impact, has become one of the core areas of new energy development. Offshore converter stations are key hubs for the grid connection and transmission of offshore wind power. Seawater intake pipelines, as an important component of offshore converter stations, are responsible for delivering cooling seawater to core heat-generating equipment such as converter valves and transformers. At present, seawater intake pipelines are confronted with severe corrosion problems. Based on this, this article first classifies corrosion into four types according to the corrosion mechanism: electrochemical corrosion, erosion corrosion, cavitation corrosion, and microbial corrosion. Then, it analyzes the influencing factors of corrosion and proposes anti-corrosion technologies from multiple dimensions.

**[Key words]**Offshore converter station Seawater intake pipeline Anti-corrosion technology

## 引言

海水取水管道作为海上换流站冷却系统的核心部件,长期处于高盐、高湿、强腐蚀的海洋环境中,同时承受海流冲刷、生物附着、工况波动等多重严苛考验,易出现腐蚀问题。应结合腐蚀类型、影响因素,采取好防腐措施。

### 1 海上换流站海水取水管道取腐蚀类型与影响因素

#### 1.1 海水环境对取水管道的腐蚀机理

依据腐蚀机理的不同,海上换流站取水管道腐蚀主要包括电化学腐蚀、冲刷腐蚀、空泡腐蚀、微生物腐蚀四类。

电化学腐蚀是海水取水管道最主要的腐蚀形式,其核心是管道金属材料在海水电解质环境中形成原电池,发生氧化还原反应<sup>[1]</sup>。吸氧腐蚀是最普遍的类型,海水富含溶解氧,在管道表

面氧化膜缺陷处,氧气作为阴极接受电子发生还原反应,金属基体作为阳极发生氧化溶解,生成的产物结合后形成疏松铁锈层,无法对基体形成有效保护。氯离子腐蚀是海水环境特有的电化学腐蚀形式,海水盐度较高,氯离子浓度高且穿透性极强,能够破坏金属表面的钝化膜,形成点蚀核。

冲刷腐蚀是海流动力学与化学腐蚀协同作用的结果,主要发生在管道弯头、变径段、取水口等流场变化剧烈的区域。其作用机理是高速海流携带固相颗粒,对管道表面产生机械冲刷,破坏已形成的腐蚀产物膜和钝化膜,使新鲜金属表面持续暴露在海水中,加速电化学腐蚀。同时,颗粒的冲击作用会造成管道表面的机械磨损,形成冲刷-腐蚀耦合效应。冲刷腐蚀速率与流速呈指数关系,流速超过一定阈值后,腐蚀速率会急剧上升。采

用耐磨涂层可以有效降低冲刷腐蚀速率,管道表面粗糙度对冲刷腐蚀也有显著影响,粗糙表面易形成涡流,加剧颗粒冲击,其冲刷腐蚀速率远高于光滑表面。

空泡腐蚀主要发生在管道阀门、泵体出口等湍流剧烈的区域,其机理是海水在管道内流动时,若局部流场出现剧烈湍流,会导致局部压力降至海水饱和蒸气压以下,形成大量微小气泡。当气泡随水流运动至高压区域时,会迅速破裂产生瞬时冲击力,这种冲击力反复作用于管道表面,导致金属材料发生疲劳剥蚀,同时破坏表面钝化膜,加速电化学腐蚀。空泡腐蚀的破坏特征表现为管道表面出现蜂窝状凹坑,严重时会导致管道壁穿透。

微生物腐蚀主要由多种微生物在管道表面形成生物膜引发。硫酸盐还原菌是最典型的腐蚀微生物,其通过代谢硫酸盐产生硫化氢,硫化氢与管道表面的金属离子结合形成质地疏松的腐蚀产物,不仅无法保护基体,还会与金属基体形成电偶对,加速电化学腐蚀。

### 1.2 取水管道腐蚀的影响因素

取水管道腐蚀的影响因素主要包括海水理化性质、海洋生物附着、管道材质与表面状态、运行工况四点。

海水理化性质是调控腐蚀速率的核心环境因素,其中盐度、温度、pH值和溶解氧含量的影响最为显著。盐度直接决定海水的电导率,盐度增加会显著提高海水电导率,从而加速电化学腐蚀反应速率。温度对腐蚀速率的影响也十分明显,温度升高会加快电极反应动力学速度和离子扩散速率,使电化学腐蚀速率大幅提高,热带海域的管道腐蚀速率远高于温带海域。海水通常呈弱碱性,此时金属表面易形成氢氧化物保护膜;但当海洋生物大量繁殖或发生赤潮时,pH值会降低,酸性环境会溶解保护膜,加速腐蚀。溶解氧含量对吸氧腐蚀起决定性作用,表层海水溶解氧含量高,吸氧腐蚀剧烈,而深海或管道内部厌氧区域溶解氧含量低,则易发生厌氧菌引发的微生物腐蚀。

海洋生物附着是诱发局部腐蚀的重要因素,可分为微生物附着和大型生物附着。微生物附着形成的生物膜会改变管道表面的电化学环境,除直接引发微生物腐蚀外,还会导致局部氧浓差、pH值差异,形成电偶腐蚀<sup>[2]</sup>。大型生物附着会堵塞管道,导致流场紊乱,加剧冲刷腐蚀,同时其附着过程中分泌的酸性黏液会溶解金属保护膜。不同海域的生物附着强度差异显著,水温高、营养丰富的海域生物附着量远高于水温较低的海域。

管道材质的耐蚀性是决定腐蚀速率的内在因素,不同材质在海水中的腐蚀行为差异显著。碳钢成本低、强度高,但耐蚀性极差,在海水中腐蚀速率较高,通常需采取严格的防腐蚀措施。双相不锈钢因含有特定比例的铬、镍和钼,具有优异的耐氯离子腐蚀和点蚀性能,腐蚀速率远低于碳钢,但成本较高。钛合金的耐蚀性最优,在海水中几乎不发生腐蚀,但成本极高,仅用于关键部位。管道表面状态对腐蚀的影响主要体现在表面粗糙度、焊接缺陷和氧化膜质量。表面粗糙度越高,越易附着生物膜和泥沙,加剧冲刷腐蚀和微生物腐蚀。焊接过程中形成的气孔、夹渣、未焊透等缺陷,会形成局部腐蚀电池,成为点蚀的发源地,缺陷区

域的腐蚀速率远高于正常区域。表面经过抛光处理的管道,生物附着量减少,腐蚀速率显著降低。

运行工况通过改变流场状态及材料受力状态,间接调控腐蚀速率。流速是最关键的工况参数,过高或过低,均会加剧管道腐蚀风险。需合理设计流速范围,平衡防腐蚀和输送效率。压力波动会导致管道材料发生应力腐蚀,当管道内压力频繁波动时,金属材料会产生疲劳应力,加速腐蚀裂纹的扩展,频繁启停的压力管道易出现应力腐蚀裂纹。

## 2 海水取水管道防腐蚀技术分类与应用

### 2.1 材料防护技术

材料防护技术通过选用耐蚀基材或构建表面防护层,阻断腐蚀介质与管道基体接触,是防腐蚀基础保障,核心在于平衡耐蚀性、力学性能与经济性,主要包括材料选择和表面防护两个方向。耐腐蚀材料选择需匹配服役环境与成本需求。金属材料中,双相不锈钢含铬镍钼等合金元素,兼具韧性与强度,抗氯离子腐蚀能力优于普通不锈钢,在中高盐度海域易腐蚀部位应用广泛。钛合金耐蚀性极强,在严苛环境中性能稳定,但成本过高仅用于核心部位;铜镍合金耐蚀且抗生物附着,适合生物繁殖旺盛的海域。非金属材料中,玻璃钢管轻质耐蚀,重量仅为同口径碳钢四分之一,便于深水铺设。高密度聚乙烯管抗冲击、柔韧性好,内壁光滑不易结垢,适用于浅水区。FRP复合材料可灵活调控性能,施工便捷适合改造项目。复合管材实现优势互补,衬塑钢管以碳钢保强度、内衬防腐层隔绝介质,适用于高压力高盐度主管道;金属非金属层压管兼具刚性与耐蚀性,抗冲刷性优异,适合流场复杂区域。表面涂层镀层防护通过致密覆盖层隔绝腐蚀,适配基础材料强化防护。有机涂层中,环氧粉末涂层附着力强、耐冲刷,是外壁首选。聚脲弹性体柔韧性好、固化快,适合现场接口处理;氟碳涂料耐候耐化学腐蚀,适用于暴露段外防腐。无机涂层中,陶瓷涂层硬度高耐磨,适配取水口等冲刷严重部位。金属陶瓷复合涂层结合韧性与耐蚀性,避免纯陶瓷开裂问题。金属镀层通过牺牲阳极效应防护,锌铝镀层用于局部破损修复,镀层表面涂覆有机封闭剂形成复合结构,延长使用寿命<sup>[3]</sup>。

### 2.2 电化学防护技术

电化学防护技术通过调控管道金属电极电位抑制电化学腐蚀,是海水电解质环境专项技术,核心是将金属极化至免蚀区间,分为阴极保护和阳极保护,其中阴极保护应用更广泛。

阴极保护技术通过施加阴极电流使管道处于极化状态,可与涂层协同提升效果。牺牲阳极保护通过连接低电位阳极金属形成电流,锌合金阳极电位稳定成本低,适用于浅海短距离管道。铝合金阳极电流效率高且轻质,适配深海或大口径管道。该技术无需外接电源,安装维护便捷,关键在于根据管道材质、涂层状况等参数设计阳极布置,腐蚀风险高的部位需加密布置,阳极与管道间用绝缘支架固定并包裹滤布防堵塞。外加电流阴极保护通过外接直流电源形成强制电流回路,保护范围大且电位可精准调控,适合长距离大口径管道,尤其解决深海牺牲阳极电流衰减问题。钛基混合金属氧化物阳极电流效率高、耐蚀性强,

系统配备远程监控装置,可实时调整电流实现精准防护。设计重点在于阳极床布置与干扰控制,分布式布置确保电流均匀,深水采用锲式阳极。阳极保护通过施加阳极电流形成稳定钝化膜,适用于易钝化金属和局部高氧化性介质区域。核心是控制极化参数确保金属处于钝化区间,避免过钝化腐蚀。系统由直流电源、参比电极、辅助阴极和控制系统组成,参比电极监测电位,控制系统调节电流。

### 2.3 结构设计优化与海洋生物附着防控技术

结构设计优化以抑制流场紊乱、减少局部腐蚀为目标,能与材料、电化学防护形成互补,从源头减少腐蚀诱因。通过流场模拟与力学计算优化设计,流场优化针对弯头、变径等湍流区域,采用缓弯或偏心变径结构,取水口设置导流锥,降低流速与压力波动。壁厚采用差异化设计,划分高、中、低风险区,高风险区采用梯度壁厚并强化衬里防护,平衡防护与成本。连接方式优化聚焦缝隙腐蚀,法兰采用凹凸面密封配合耐蚀垫片并涂覆防锈油脂。焊接采用单面焊双面成形工艺,焊后打磨抛光并补涂涂层,显著降低接头腐蚀速率。支撑结构采用弹性支架减少应力,接触部位用绝缘材料隔离防电偶腐蚀。针对海洋生物附着导致的腐蚀,综合采用物理防控、化学防控、机械防控等手段。物理防控通过表面光滑处理降低粗糙度,减少附着锚定点,如内壁设置螺旋导流板,形成螺旋流抑制生物附着并优化流场。

### 2.4 监测与运行维护技术

完善的监测与维护机制,能够实时掌握取水管道的腐蚀状态并精准维护,实现全生命周期闭环管理,提升取水管道运行可靠性并降低生命周期成本。首先,做好腐蚀状态监测。构建融在线监控、离线分析于一体的监测机制。在线监测中,电阻探针连续监测腐蚀速率,超阈值自动报警。电化学阻抗谱可判断腐蚀类

型,用于评估涂层与基体状态。电位监测确保阴极保护电位处于有效区间。挂片测试直观可靠,用于校准其他手段。离线分析中,内壁内窥镜直观观察腐蚀与附着状态,定位局部缺陷。壁厚超声检测测量壁厚变化,评估剩余寿命。腐蚀产物成分分析通过理化手段反推腐蚀机理,为技术优化提供依据。其次,基于监测数据实施差异化管控。定期清洗去除污染物,高压水冲洗适用于松散附着,化学酸洗针对牢固腐蚀产物,酸洗后需中和钝化防二次腐蚀。及时修复可避免缺陷扩大引发泄漏,局部修复及时处理缺陷,涂层破损部位预处理后补涂,点蚀严重管段更换为耐蚀材料,牺牲阳极损耗超七成时及时更换。基于长期数据建立预测模型,评估剩余寿命并制定更换计划,平衡成本与安全,建立完整腐蚀管理档案,为后续项目提供经验参考,推动技术持续优化。

## 3 结语

取水管道腐蚀具有很大的危害性,应结合取水管道腐蚀的类型、影响因素,综合采用好材料防护、电化学防护、结构设计优化与海洋生物附着防控、监测与运行维护等技术,提高取水管道防腐能力。

## 【参考文献】

[1]雷林.浅谈海管立管腐蚀缺陷修复关键技术及质量控制措施[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024(9):96-98.

[2]郑中亮,徐振.油气管道腐蚀因素及防腐措施的研究[J].清洗世界,2023(04):92-94.

[3]许枫.长输管线中阴极保护防腐技术的应用策略[J].全面腐蚀控制,2024,38(7):185-187.

## 作者简介:

齐慧卿(1982--),女,汉族,山东昌邑人,硕士,高级工程师,从事电厂给排水系统研究。