

供排水企业运行及管理成果专栏

胡红卫, 林睿, 赵庆礼, 等. 污水管道及输配构筑物内防腐材料的应用 [J]. 净水技术, 2025, 44(12): 190–197.

HU H W, LIN R, ZHAO Q L, et al. Application of internal anticorrosion materials in sewage pipelines and diversion distribution structures [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(12): 190–197.

污水管道及输配构筑物内防腐材料的应用

胡红卫, 林睿*, 赵庆礼, 胡露骞, 金伟, 戚凌凡

(杭州市排水有限公司, 浙江杭州 310009)

摘要 【目的】 污水管道及输配构筑物腐蚀缺陷一直是污水设施运营管理的一大难题,而防腐涂料的应用是缓解腐蚀,延长使用年限的重要手段。本文研究污水设施防腐应用现状,为防腐涂料的应用提供技术与理论支撑。【方法】 本文基于某市城区近年来污水管道及输配构筑物内防腐应用现状,探索市政污水性质,分析防腐材料效果,结合案例归纳防腐材料类型、用量、配比的应用情况。【结果】 污水设施的腐蚀常常发生在固、液分离界面以上位置,需重点关注压力释放口处污水设施的腐蚀情况;腐蚀性指标在水体中存在一定程度的相互抑制、相互转换,S、N元素主要以硫酸根、氨氮形式存在;无机砂浆类在输配构筑物应用最广,占比高达63.16%,其主要的防腐方式为人工涂抹,有机高分子材料喷涂后易脱落,可通过施打钢钉、钢筋网等方式增强整体黏结力;93.75%防腐工艺防腐层厚度控制在10 cm以内,而高分子材料厚度最低,基本为0.5 cm,可采用双快水泥、混凝土等在增加污水设施基层厚度后再喷涂防腐材料而降低成本。【结论】 综合考虑,小口径污水管道防腐宜采用防腐内衬类,大口径污水管道及泵站输配构筑物防腐宜采用A80防腐砂浆,重要污水设施及压力释放口可采用高分子有机涂料。

关键词 污水管道 输配构筑物 内防腐 无机砂浆 高分子材料 防腐内衬

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)12-0190-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.12.022

Application of Internal Anticorrosion Materials in Sewage Pipelines and Diversion Distribution Structures

HU Hongwei, LIN Rui*, ZHAO Qingli, HU Luqian, JIN Wei, QI Lingfan

(Hangzhou Drainage Co., Ltd., Hangzhou 310009, China)

Abstract [Objective] Corrosion defects in sewage pipelines and pump station transmission and distribution structures have always been a major challenge in the operation and management of sewage facilities, and the application of anti-corrosion materials is an important means to alleviate corrosion and extend their service life. This paper studies the current status of anti-corrosion applications in sewage facilities and provide technical and theoretical support for the application of anti-corrosion materials. [Methods] This paper was based on the current situation of anti-corrosion application in sewage pipelines and transmission and distribution structures in a certain urban area in recent years, exploring the properties of municipal sewage, analyzing the effectiveness of anti-corrosion materials, and summarizing the application of anticorrosion material types, quantities, and ratios through case studies. [Results] Corrosion of sewage facilities often occurs above the solid-liquid separation interface, and special attention should be paid to the corrosion of sewage facilities at the pressure release port. Corrosive indices had a certain degree of mutual inhibition and conversion in wastewater, and S and N elements mainly exist in the form of sulfate, ammonia nitrogen. Inorganic mortar was the most widely used in transportation and

[收稿日期] 2024-06-07

[作者简介] 胡红卫(1972—),男,高级工程师,主要从事市政排水技术研究及抢修管理等工作,E-mail:5385741@qq.com。

[通信作者] 林睿(1995—),男,主要从事市政排水技术研究及抢修管理等工作,E-mail:linrui0320@163.com。

distribution structures of wastewater, accounting for 63.16%. Its main anti-corrosion method was a manual application, and organic polymer materials were prone to detachment after spraying. The overall bonding force could be enhanced by applying steel nails, steel mesh, and other method. 93.75% of the anti-corrosion process controlled the thickness of the anti-corrosion layer within 10 cm, while the thickness of polymer materials was the lowest, basically 0.5 cm. Quick-setting cement, concrete, etc. could be used to increase the thickness of the sewage facility base before spraying anti-corrosion materials to reduce costs. [Conclusion] Considering all factors, the anticorrosion lining should be used for small-diameter sewage pipelines, and A80 anti-corrosion mortar should be used for large-diameter sewage pipelines and pump station transmission and distribution structures, while high polymer organic coatings can be used for important sewage facilities and pressure release ports.

Keywords sewage pipeline diversion and distribution structure internal anticorrosion inorganic mortar polymer material anticorrosion lining

市政污水管道及输配构筑物一般埋置于地下,腐蚀程度主要受环境因素和材料的影响,其所受腐蚀包括外部腐蚀(土壤和地下水)和内部腐蚀(污水腐蚀)。研究^[1]表明,污水设施内部腐蚀程度远超于外部腐蚀,在固液界面附近腐蚀程度最为严重。污水腐蚀可以看作是物理化学腐蚀、电化学腐蚀、微生物腐蚀等因素综合作用的结果,其对于管道的腐蚀破坏主要包括2类:硫循环造成的腐蚀破坏和其他原因造成的腐蚀破坏,其中硫循环是污水设施腐蚀破坏的主要原因^[2-4]。姜晓东等^[5]对硫循环的各个阶段进行研究,发现硫循环过程中的3个主要物质分别对合流污水管道混凝土有硫化氢直接腐蚀、硫酸腐蚀及硫酸盐侵蚀作用,从而降低排水管道混凝土强度,进一步腐蚀钢筋。

表面喷涂防腐材料防护是对污水管道腐蚀性缺陷的重要修复手段,其原理是降低污水腐蚀离子的渗透速率,达到隔绝或减轻污水腐蚀物质对管材的作用。同时,还可以减少微生物附着和抑制微生物的繁殖,减少微生物的腐蚀作用^[6-8]。广州市大坦沙污水处理1#泵站采用4cm新型特种无机防腐砂浆对出水池进行全面修复,大大延长泵站结构寿命^[9]。马男等^[4]采用新型氢氧化镁凝胶作为特种防腐涂层,提高了排水管道的抗腐蚀性能。内衬多点锚固高密度聚乙烯(HDPE)板防腐新技术也在国内的管道新、改建工程中逐渐应用^[10]。

目前,对于市政污水腐蚀的研究多停留在污水腐蚀性机理和新型防腐材料研发与生产,对于城镇内污水设施防腐应用现状的研究很少。某市城区大管径、特大管径污水管道、泵站进出水管及构筑物多为钢筋混凝土,抗腐蚀性能较差,因其建设年限久远均存在一定程度上的表层脱落、腐蚀、露筋等问题。

相较于污水管道及输配构筑物的改建、新建,采用防腐施工技术延缓上述污水设施腐蚀性缺陷具有重大的综合经济效益,其在某市城区的应用已达20余年。故本文基于某市近年来市政污水设施的防腐施工案例,探索市政污水性质,分析防腐材料效果,并结合案例归纳防腐材料类型、用量、配比的应用情况,为污水管道及输配构筑物防腐涂料的应用提供技术与理论支撑。

1 污水水质与防腐调研

1.1 污水水质调研

市区内市政污水主要为生活污水,其流量、成分和腐蚀物浓度与居民生活习惯、用水量有关,具有水质相对稳定、周期性变化等特点。根据水质特点、污水泵站分布情况及污水设施防腐现状选择起点泵站、终点泵站、长距离压力管、短距离压力管、防腐施工点作为水质取样点位,上述取样点的污水设施材质均为钢筋混凝土。根据污水腐蚀性机理选择水质物理指标[水温、pH、悬浮物(SS)、化学需氧量(COD)]、腐蚀性化学指标[硫酸盐(SO₄²⁻)、硫化物、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、氨氮]进行分析,委托某监测公司对指标进行取样检测。

1.2 防腐材料调研

对市区防腐材料和所用防腐方式进行调研,选择典型污水管道、污水泵站防腐施工案例进行防腐材料效果分析。根据防腐材料的性质成分,现有防腐材料主要可分为无机防腐砂浆类、有机涂料类、防腐内衬类3类,防腐方式主要为人工涂抹、专用设备喷涂、人工涂抹联用设备喷涂3种。

1.3 防腐案例调研

收集整理市区内近8年对于污水管道、污水泵站输配构筑物主要防腐施工案例,对防腐材料的应

用进行研究。本次共收集样本 16 例,统计各项案例中污水设施的缺陷等级、防腐类型、防腐材料、防腐厚度、防腐方式、防腐面积及费用,通过各防腐材料案例数量所占案例样本总数中的比例作为材料类型应用分析,各案例中材料使用厚度作为防腐材料用量应用分析,各案例中存在防腐材料配合情况作为防腐材料配比应用分析。

2 结果和讨论

2.1 市政污水性质分析

由表 1 可知,该市区水质指标、腐蚀性化学指标与取样点有关。从各指标来看,腐蚀性化学指标与水质指标呈现一定正相关,分析其原因水体碳、氮元素丰富的情况下微生物菌种、数量更为丰富,代谢会产生更多的硫化物、 SO_4^{2-} 、铵盐^[11]。从取样点位来看,A 泵站、H 施工点相较而言水质 COD、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、硫化物、SS 指标远高于城区 E 压力释放口、F 压力释放口,起点泵站较终点泵站来说数据更不稳定、多变。从腐蚀性指标浓度来看,压力释放口出水硫化物指标浓度更高,如 D 长距离释放口硫化物出水质量浓度为 2.40 mg/L,G 压力释放口硫化物出水质量浓度高达 4.59 mg/L,而终端泵站的硫化物相较稳定,为 0.81~1.06 mg/L。这是由于紊动、飞溅和跌水产生水滴,大大增加了液体与气体接触表面积,提高了硫元素液相与气相间的转化速率,使释放口更易累积硫元素^[5,12]。污水腐蚀性指标在水体中存在一定程度的相互抑制、相互转换^[13],研究^[1,5,14]表明:水体中溶解氧(DO)浓度较低时,污水中蛋白质、含硫氨

基酸等有机硫化物在异养微生物的作用下会矿化分解形成 H_2S 、 $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$ 等简单硫化物,当污水中包含了充分的 DO 或硝酸盐,水中的硫化物可重新氧化为硫酸盐,形成水体内部的小循环;同时,溢出的 H_2S 会在好氧环境下被管道内壁上的硫氧化细菌氧化生成 H_2SO_4 。根据《污水排入城市下水道水质标准》(CJ 3082—1999), SO_4^{2-} 最高允许排放质量浓度为 600 mg/L,硫化物最高允许排放质量浓度为 1 mg/L。各采样点 SO_4^{2-} 质量浓度为 15.9~56.4 mg/L,在污水排入城市下水道水质标准内,而硫化物质量浓度为 0.37~7.19 mg/L,可以推测部分硫化物浓度过高的原因为 DO 浓度等因素而使硫元素在污水中发生了转换。

综上可知,污水偏弱酸性,污水中腐蚀性指标硫、氮元素主要以 SO_4^{2-} 、氨氮形式存在($\text{SO}_4^{2-} >>$ 硫化物,氨氮 $>>\text{NO}_3^-$ -N $>\text{NO}_2^-$ -N),因此,存在酸腐蚀、氮盐分解腐蚀,需重点关注压力释放口处污水设施的腐蚀情况,提高防腐施工质量及标准。

2.2 防腐材料的效果分析

根据防腐材料调研结果,将防腐材料类别、优缺点及其防腐方式归纳总结如表 2 所示。

由表 2 可知,目前城区主要防腐材料主要有双快水泥、A40 铝酸盐防腐砂浆、A80 铝酸盐防腐砂浆、改性聚脲脂、IPN8710 和玻纤内衬,A80 无机砂浆使用最多,主要因为其性价比较高(市场价约为 8 000 元/t),且其抗腐蚀能力优于 A40 铝酸盐防腐砂浆(市场价约为 5 000 元/t)、双快水泥等,因

表 1 某市政污水常见防腐蚀性指标及浓度

Tab. 1 Common Anticorrosion Indices and Concentrations of Municipal Wastewater in a City

分类	点位	pH 值	水温/ ℃	SS/ (mg·L ⁻¹)	COD/ (mg·L ⁻¹)	$\text{SO}_4^{2-}/$ (mg·L ⁻¹)	硫化物/ (mg·L ⁻¹)	NO_3^- -N/ (mg·L ⁻¹)	NO_2^- -N/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)
起点泵站	A 泵站	6.01	14.2	320	349	26.8	7.19	0.423	0.020	51.3
终点泵站	B 泵站	6.85	13.8	76	297	56.4	1.06	<0.064	0.011	29.6
	C 泵站	6.29	14.1	112	184	24.5	0.81	0.395	0.008	25.9
长距离压力管	D 压力释放口	6.54	14.0	124	263	27.3	2.40	0.655	<0.003	39.8
	E 压力释放口	6.43	13.9	88	220	29.8	0.97	0.126	<0.003	23
短距离压力管	F 压力释放口	6.62	14.1	131	180	39.2	0.88	0.550	<0.003	42.8
	G 压力释放口	6.74	14.2	99	283	33.8	4.59	0.506	<0.003	43.6
防腐点	H 某重力管施工点	6.21	14.0	149	466	20.3	1.96	0.465	<0.003	53.9
	I 某泵站高位井	6.23	13.8	123	421	15.9	3.58	0.357	0.010	46.3
	J 某重力管施工点	6.84	13.7	159	165	26.8	0.37	0.224	0.003	33.8

表 2 主要防腐材料的技术、经济对比
Tab. 2 Technical and Economic Comparison of Main Anticorrosion Materials

防腐材料类型	防腐材料名称	技术层面	经济层面	防腐方式
无机防腐砂浆类	快干水泥	微膨胀、低温条件强度发挥正常,凝结硬化快,小时强度高,抗腐蚀能力一般	价格低,市场价约为4 000 元/t	人工涂抹
	A40 铝酸盐防腐砂浆	可在潮湿面进行施工,较高的黏结力以及较强的防水防腐效果	价格较低,市场价约为5 000 元/t	人工涂抹、专业设备喷涂
	A80 铝酸盐防腐砂浆	良好的耐候性、耐久性、抗渗性、极高的黏结力以及较好的防水、防腐效果	价格一般,市场价约为8 000 元/t	人工涂抹、专业设备喷涂
有机涂料类	改性聚脲脂	固化迅速,对环境要求低,强度高,防腐性能极强	价格极高,0.3 cm 为2 000 元/m ²	专业设备喷涂
	IPN8710	具有优良的防腐、防水、防渗效果,附着力强,耐候性好	价格高	人工涂抹、专业设备喷涂
防腐内衬类	玻纤内衬	施工作业环境要求低、施工时间短、灵活性高,防腐性能强	价格高,0.3 cm 为1 500~1 800 元/m ²	

此,常常作为泵站井室、进出水管的防腐材料,有机涂料常用的有高分子改性聚脲脂,0.3 cm 厚度市场价为2 000 元/m²,费用远远高于无机防腐材料。而对于防腐内衬类,光固化玻璃纤维内衬为主要方式,这是由于污水管道的腐蚀往往是整体性缺陷。因污水设施不规则、作业环境复杂、施工作业面受限等原因,防腐设备的应用难以具有普适性,防腐喷涂设备多用于有机防腐材料。例如,对于小面积设施、中小口径管道以及水泥砂浆材料主要防腐喷涂方式为人工涂抹,具有技术要求低、成本低、可控性高等优势,但存在粗糙度高、喷涂效率低等缺点,对于大型泵站井室、大型管道、高分子材料应用通常采用专业的喷涂机进行防腐喷涂工作,喷涂机具有工作效率高、连续性好等

优势。

为了进一步探索防腐材料的应用效果,图1为典型污水管道、污水泵站防腐施工前后的对比图。

图1(a)~图1(d)为某DN2200污水管道防腐施工前后的对比图,图1(e)~图1(h)为某泵站高位井防腐施工前后的对比图。图1(a)中污水管道整体腐蚀严重,腐蚀厚度为5.0~17.5 cm,且表面非常粗糙,对污水过流能力存在一定影响。施工中采用内钢套、钢筋网片密布加固并喷射5~12 cm混凝土增加管道整体结构强度及表面平整度,后分3次涂抹3 cm厚度A80铝酸盐防腐砂浆以增强管道防腐性能。图1(e)中泵站高位井常水位界面上下呈现出一道明显的

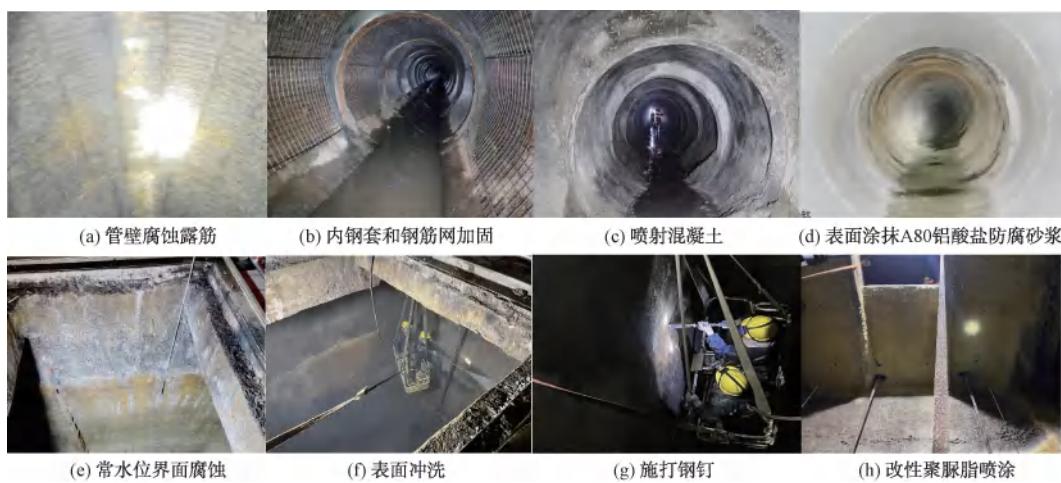


图 1 典型污水管道、污水泵站防腐施工前后的对比

Fig. 1 Comparison of Typical Sewage Pipelines and Pump Stations before and after Anticorrosion Construction

分界线,上方呈现出不连续黄色点状腐蚀情况,常水位以下呈现出较为光滑、均匀的灰色水泥面层。施工中按高压冲洗、烘干机吹、钢钉密布、机械喷涂的流程进行作业。高压冲洗确保黏结力较差的表面杂质脱落,烘干机长时间鼓热风确保壁面充分干燥,施打钢钉能加强改性聚脲脂的整体黏结能力,从而更好地抵御水力冲击。喷涂范围包括常水位以上 4 m 及盖板这种易受到腐蚀性气体、液体侵蚀的位置。

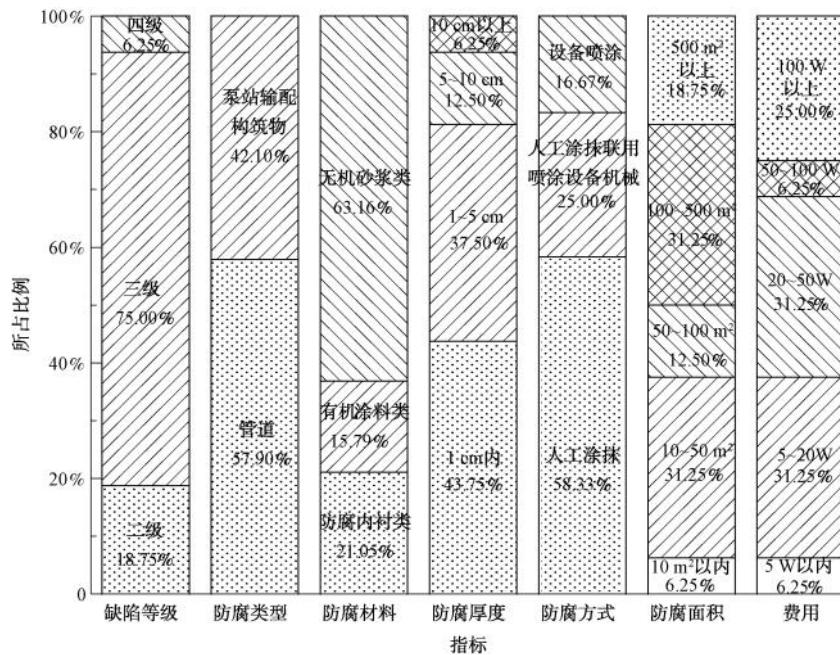


图 2 污水设施缺陷及防腐材料选用占比

Fig. 2 Proportion of Defects in Sewage Facilities and Selection of Anti-corrosion materials

由图 2 可知,污水设施防腐是当污水管道出现表层脱落、锈迹及露筋一、二级缺陷时,为防止缺陷进一步加剧而进行的加固处理,占比高达 93.75% 以上,多数是对于污水管道及泵站。从防腐材料可知,无机防腐砂浆使用占比最高。这主要是防腐砂浆成本低于有机涂料及防腐内衬类,因此在泵站输配构筑物防腐处理时使用广泛。从防腐厚度及防腐方式来看,93.75% 防腐工艺防腐层厚度控制在 10 cm 以内,而人工涂抹是最主要的防腐方式,占比达 58.33%,进一步说明防腐设备的应用并不广泛。100 m² 以上的大面积防腐施工最常见,主要是防腐基本是对于污水构筑物整体修复,因此费用成本也偏高。

为了进一步探索防腐材料类型的选用情况,将防腐材料各小类及其在处理不同污水设施的使用情

2.3 防腐材料类型的应用分析

防腐案例调研结果显示:污水设施的腐蚀常常发生在固、液分离界面以上位置,而污水设施常水位以下部分基本鲜有严重腐蚀现象,可以推测流动的水体很难积聚腐蚀性离子,同时厌氧、流动环境条件不利于多数微生物生存。相反,常水位干湿交替界面以上部分更容易受到气蚀,且水体中残留的营养物质为微生物的繁殖提供了良好的生存条件,化学、生物腐蚀严重^[6,15]。图 2 为防腐案例数据的统计分析。

况进行讨论,如图 3 所示。

由图 3 可知,无机砂浆使用占比最高,尤其是在泵站输配构筑物,双快水泥主要用于局部防腐处理(污水顶部小范围),而在污水管道中,防腐内衬类占有较高比例,这是由于对于 DN ≤ 800 mm 的小口径管道,因作业空间受限,使无机或有机防腐材料使用受限,而对于大口径和特大口径污水管道可采用无机防腐砂浆或是有机涂料进行内表面防腐处理。IPN8710 主要应用于钢管表层的防腐处理,改性聚脲脂主要用于污水及泵站进出水压力管释放口,其抗腐蚀能力最强。

2.4 防腐材料用量的应用分析

图 4 为污水管道防腐案例中防腐材料使用厚度。图 5 为泵站输配构筑物防腐案例中防腐材料使用厚度。

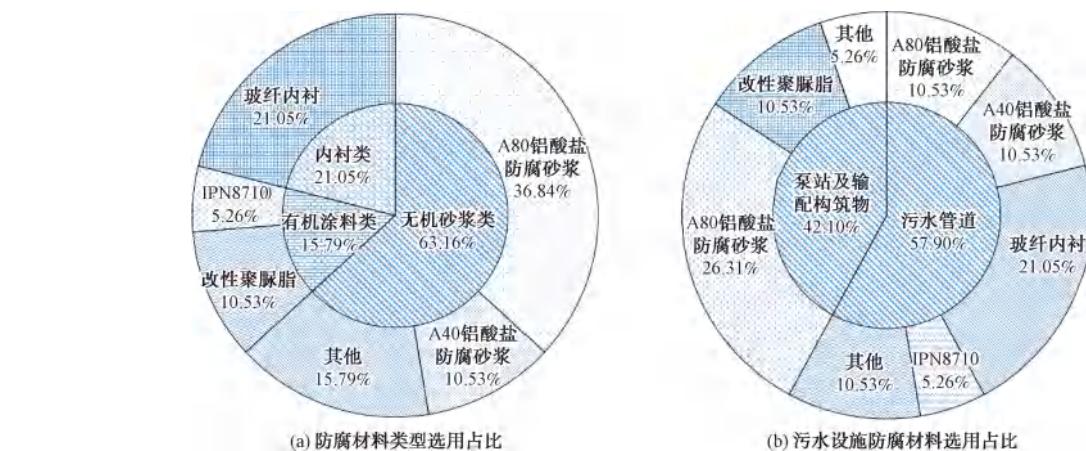


图3 防腐材料类型的选用占比

Fig. 3 Proportion of Anticorrosion Material Type

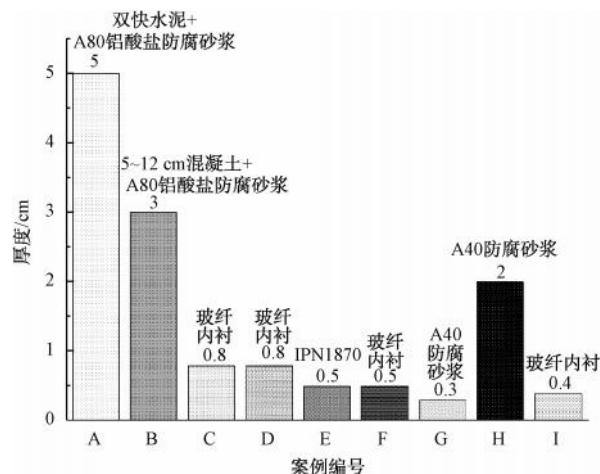


图4 污水管道防腐用量分析

Fig. 4 Analysis of Anticorrosion Materials Consumption for Sewage Pipelines

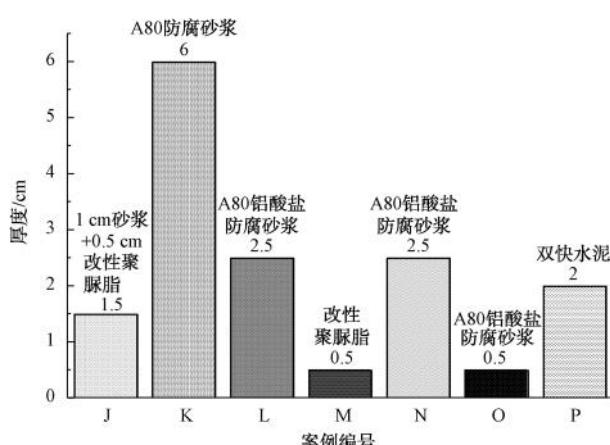


图5 泵站输配构筑物防腐用量分析

Fig. 5 Analysis of Anticorrosion Materials Consumption for Pump Station Structures

由图4、图5可知,对于改性聚脲脂、IPN8710等高分子材料,厚度基本为0.5 cm,主要由于高分子材料成本较高,性能较好,不适用于高厚度的涂抹,一般为0.5~1.0 cm,且厚度随着母管的增大而增大。对于防腐砂浆,厚度基本高于高分子材料,通常厚度为1~10 cm,具体厚度与污水设施腐蚀程度有关,例如图5 K案例中某污水泵站出水渠腐蚀严重,A80铝酸盐防腐砂浆涂抹的平均厚度高达6 cm。

2.5 防腐材料配比的应用分析

在防腐材料的应用中,不同防腐材料复合使用并不常见。一是因污水设施腐蚀情况非常严重,管道或构筑物厚度缩减较多,需要混凝土、水泥等材料补充污水设施结构厚度,二是在非重点设施选择一些成本较低的防腐材料可以降低污水设施修复成本。表3是较为典型的复合防腐材料的案例。

表3 防腐材料配比的效用分析
Tab. 3 Utility Analysis of Anticorrosion Materials Ratio

项目名称	污水设施	防腐材料	配合比
A 污水管道	D1000 管道	双快水泥、A40 防腐砂浆	7 : 5
B 污水管道	D2200 管道	混凝土、A80 防腐砂浆	5 : 3~10 : 3
C 污水检查井	检查井	A80 铝酸盐防腐砂浆、改性聚脲脂	2 : 1

A污水管道采用双快水泥与防腐砂浆以7:5的比例加水拌合,主要是因为上游泵站停泵时间仅有4 h,双快水泥能防止防腐砂浆养护过程中发生脱落,减少防腐砂浆养护时间,同时还能减少成本。B为2.1节中DN2200污水管道。C污水检查井使用防腐砂浆及改性聚脲脂因该处检查井腐蚀严重,且位于泵站压力释放口,A80防腐砂浆+改性聚脲脂能

加强防腐效果的同时减少成本。

3 结论

(1) 污水腐蚀性指标在水体中存在一定程度的相互抑制、相互转换,污水中腐蚀性指标硫、氮元素主要以 SO_4^{2-} ($15.9 \sim 56.4 \text{ mg/L}$)、氨氮 ($23.0 \sim 53.9 \text{ mg/L}$) 形式存在,起点泵站较终点泵站来说数据更不稳定、多变,需重点关注压力释放口处污水设施的腐蚀情况。

(2) 污水设施的腐蚀常常发生在固、液分离界面以上位置,而污水设施常水位以下部分基本鲜有严重腐蚀现象。防腐喷涂前需对防腐区域严格进行凿毛处理、高压冲洗、烘干,以避免防腐材料黏结力不够而成片脱落,高分子材料尤其在压力释放口的应用时需施打钢钉、钢筋网等方式增强整体黏结力。对于腐蚀导致厚度严重损失的污水设施可密布内钢套、钢筋王网片后喷射混凝土增强结构强度,后表面涂抹防腐材料。

(3) 防腐材料使用情况为无机砂浆类 (63.16%) > 内衬类 (21.05%) > 高分子材料 (15.79%)。93.75% 防腐工艺防腐层厚度控制在 10 cm 以内,而高分子材料厚度最低,基本为 0.5 cm。防腐工程多数为大面积、高成本的项目,为了降低成本、增加结构性强度,可采用双快水泥、混凝土等在增加污水设施基层厚度后再喷涂防腐材料。

(4) $\text{DN} \leq 800 \text{ mm}$ 污水管道防腐方式推荐采用防腐内衬, $\text{DN} > 800 \text{ mm}$ 污水管道防腐应视腐蚀面积及程度选择防腐砂浆或是整体内衬,污水泵站输配构筑物防腐推荐采用 A80 防腐砂浆。对于重要污水设施及泵站释放口等腐蚀性强的区域可采用 0.5 cm 高分子材料。

(5) 防腐喷涂具有重大的综合社会效益与经济效益,建议对现有防腐项目进行长期追踪,探索不同防腐材料在应用于不同构筑物长期抗腐蚀效果。同时,在污水设施的新建、改建中,对于重要污水设施重点部位(尤其是管道压力释放口,泵站输配构筑物常水位干湿交替界面)建议采用内衬多点锚固 HDPE、内喷防腐砂浆、高分子材料等措施以保障污水设施的运维工作年限。

参考文献

- [1] 高向玲,王丽娜,刘威. 混凝土排水管道内部腐蚀研究 [J]. 结构工程师, 2020, 36(2): 71-79.
- [2] 陈进,李建军,闻宝联. 城市污水处理构筑物钢筋混凝土腐蚀研究 [J]. 科技资讯, 2008(8): 81-99.
- [3] CHEN J, LI J J, WEN B L. Research on corrosion of reinforced concrete in urban sewage treatment structures [J]. Science & Technology Information, 2008(8): 81-99.
- [4] TULLIANI J, MONTANARO L, NEGRO A, et al. Sulfate attack of concrete building foundations induced by sewage waters [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32: 843-849. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00752-9.
- [5] 马男,徐禅,谢宇铭. 氢氧化镁凝胶涂层强化排水管道抗腐蚀性能 [J]. 净水技术, 2019, 38(s2): 90-93.
- [6] MA N, XU C, XIE Y M. Corrosion resistance of magnesium hydroxide gel coating on drainage pipes [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(s2): 90-93.
- [7] 姜晓东,余凯华,鲍月全,等. 大口径合流污水管道硫腐蚀的初步分析 [J]. 净水技术, 2016, 35(6): 37-44.
- [8] JIANG X D, YU K H, BAO Y Q, et al. Preliminary analysis of effect of sulfur corrosion on large diameter combined sewage pipes [J]. Water Purification Technology, 2016, 35(6): 37-44.
- [9] 陈朝晖,黄河,何强,等. 生活污水对城市排水管道的腐蚀作用研究 [C]. 中国力学学会结构工程专业委员会. 第十二届全国结构工程学术会议论文集第 I 册, 2003.
- [10] CHEN C H, HUANG H, HE Q, et al. Research on the corrosive effects of domestic sewage on urban drainage pipelines [C]. Structural Engineering Committee of the Chinese Society of Mechanics. Proceedings of the 12th National Structural Engineering Academic Conference, Volume I, 2003.
- [11] 张健. 天津市生活污水环境下混凝土耐腐蚀性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [12] ZHANG J. Study on corrosion resistance of concrete under domestic sewage environment Tianjin [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [13] 袁辉洲,汪小雄,袁佳佳. 南方某城市市政排水管道事故分析及预防措施研究 [J]. 给水排水, 2021, 57(7): 112-116.
- [14] YUAN H Z, WANG X X, YUAN J J. Analysis and prevention measure of municipal drainage pipeline in south city of China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(7): 112-116.
- [15] 梁冠华,胡冲. 一种新的污水管网腐蚀结构修复方案 [J]. 净水技术, 2016, 35(s1): 155-158.
- [16] LIANG G H, HU C. A new structure rehab solution for municipal sewer corrosion [J]. Water Purification Technology, 2016, 35(s1): 155-158.
- [17] 张翕照. 内衬多点锚固 HDPE 板防腐技术在大型钢筋混凝土排水管道中的应用 [J]. 海河水利, 2021(5): 118-120.
- [18] ZHANG X Z. Application of anti corrosion technology of HDPE

- plate with multi point anchorage of inner lining in large reinforced concrete drainage pipeline [J]. *Haihe Water Resources*, 2021 (5): 118–120.
- [11] 阎富杰. 市政混凝土污水输送管道内部腐蚀及防腐的研究 [J]. *城市道桥与防洪*, 2019(8): 305–308.
- YAN F J. Study on internal corrosion and anticorrosion of municipal concrete sewage conveying pipeline[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2019(8): 305–308.
- [12] 刘华平, 李田. 上海市排水管道硫化氢腐蚀的探索与分析 [J]. *给水排水*, 2005, 31(6): 91–94.
- LIU H P, LI T. Exploration and analysis of hydrogen sulfide corrosion in drainage pipelines in Shanghai [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2005, 31(6): 91–94.
- [13] 姜晓, 张志伟. 地下污水管线腐蚀性评价体系的构建及应用 [J]. *低温建筑技术*, 2021, 43(10): 138–141.
- JIANG X, ZHANG Z W. Construction and application of corrosion evaluation system for underground sewage pipelines [J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2021, 43 (10): 138–141.
- [14] 佐藤匡良, 杨玮, 马水成. 日本污水处理构筑物钢筋混凝土结构的腐蚀及防护 [J]. *工程质量*, 2015, 33(5): 51–55.
- SATO M, YANG W, MA S C. Japan's sewage treatment structures of reinforced concrete structure corrosion and protection [J]. *Construction Quality*, 2015, 33(5): 51–55.
- [15] 周富春. 生活污水对砼管道的腐蚀性机理研究 [J]. *重庆交通大学学报*, 2002, 21(1): 125–128.
- ZHOU F C. Research on the corrosion mechanism of domestic sewage on concrete pipelines[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2002, 21(1): 125–128.

(上接第 130 页)

- [28] 王靖霖, 王东升, 苑宏英, 等. 指纹图谱技术与人工智能在污染物溯源解析中的应用研究 [J]. *环境保护科学*, 2022, 48(6): 130–137.
- WANG J L, WANG D S, YUAN H Y, et al. Research and application of fingerprint technology and artificial intelligence in pollutant tracing and analysis [J]. *Environmental Protection Science*, 2022, 48(6): 130–137.
- [29] LÜ Q, XU S Q, GU J Q, et al. Pollution source identification of water body based on aqueous fingerprint-case study [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(8): 2590.
- [30] CHENG C, WU J, YOU L D, et al. Novel insights into variation of dissolved organic matter during textile wastewater treatment by fluorescence excitation emission matrix [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 335(10): 13–21.
- [31] ALEXANDER L, MARSMAN M, WAGENMAKERS E J. Analytic posteriors for pearson's correlation coefficient [J]. *Statistica Neerlandica*, 2018, 72(1): 4–13.
- [32] 张然, 王晨波, 董圆媛, 等. 汛期连云港市重点断面污染来源调查研究 [J]. *中国环境监测*, 2022, 38(2): 114–122.
- ZHANG R, WANG C B, DONG Y Y, et al. Investigation on pollution sources of key sections in flood season in Lianyungang City [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022, 38(2): 114–122.
- [33] MUKAKA M M. Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research [J]. *Malawi Medical Journal*, 2012, 24(3): 69–71.
- [34] 刘传旸, 柴一荻, 徐宪根, 等. 南方某河水质荧光指纹特征及污染溯源 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(7): 2142–2147.
- LIU C Y, CHAI Y D, XU X G, et al. Aqueous fluorescence fingerprint characteristics and discharge sourceg identification of a river in southern China [J]. *Spectroscopy and Spectral Analisis*, 2021, 41(7): 2142–2147.
- [35] MAITY S, PARSHI N, PRODHAN C, et al. Characterization of a fluorescent hydrogel synthesized using chitosan, polyvinyl alcohol and 9 – anthraldehyde for the selective detection and discrimination of trace Fe^{3+} and Fe^{2+} in water for live-cell imaging [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 193: 119 – 128. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.03.073.
- [36] DERRIEN M, YANG L Y, HUR J. Lipid biomarkers and spectroscopic indices for identifying organic matter sources in aquatic environments: A review [J]. *Water Research*, 2017, 112: 58–71. DOI: 10.1016/j.watres.2017.01.023.