

# 排水管渠内壁腐蚀评判方法

梁恽祯, 姜晓东, 李树平, 谢予婕

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 排水管渠在多年使用过程中,由于受到污水水质、管道材料老化等作用,内壁出现腐蚀现象,影响排水系统的安全运行。内壁腐蚀状况评判是进行排水管渠防护的基础。首先根据相关理论和规范要求,提出三种内壁腐蚀评判方法(数值评判法、水位评判法和 pH 评判法)。然后根据某干线水质数据、水量数据和管网拓扑数据,运用三种方法进行相关评判,并与检测点的监测结果进行对比。结果表明,三种方法相互配合,对评判排水管渠内壁腐蚀情况具有合理可行性。

**关键词:** 排水管渠; 内壁腐蚀; 评判方法

**中图分类号:** TU992.4 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)04-0032-04

## Evaluation Method of Inner Wall Corrosion of Drainage Pipes

LIANG Yi-zhen, JIANG Xiao-dong, LI Shu-ping, XIE Yu-jie

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Due to the effects of sewage quality and pipe material aging in the course of years of usage, the inner wall of drainage pipes is corroded, which affects the safe operation of the drainage system. The inner wall corrosion degree assessment is the basis of the protection of drainage pipes. Firstly, three kinds of inner wall corrosion evaluation methods are proposed according to the relevant theories and specification requirements: numerical evaluation method, water level evaluation method and pH evaluation method. And then, according to water quality data, water quantity data and pipe network topology data, three methods are used for evaluation. The evaluation results of check points are compared with monitoring results. The results showed it was reasonable and feasible to cooperate the three methods with each other for evaluating the inner wall corrosion of the drainage pipes.

**Key words:** drainage pipes; inner wall corrosion; evaluation methods

排水管渠作为城市排水系统的重要基础设施,承担着确保城市污水有序收集、输送和治理的重要任务。排水管渠在日常运行管理中面临的重要问题之一是腐蚀。因此,研究排水管渠腐蚀速率,评估管渠使用年限,确定管渠修复对象及顺序,对保证管渠安全运行和减少污染事故发生具有重要意义。

### 1 评判方法

#### 1.1 数值评判法

数值评判法是以《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008)对排水管道混凝土耐腐蚀性的要求为基础建立的,评判过程分两步:

① 根据水中硫酸盐浓度和 pH 值划定环境作用等级,划分标准如表 1 所示。

表 1 水中硫酸盐和酸类物质环境作用等级

Tab. 1 Environmental effect levels of sulphates and acids in water

环境作用等级	水中 $\text{SO}_4^{2-}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	水中 pH 值
V - C	200 ~ 1 000	5.5 ~ 6.5
V - D	1 000 ~ 4 000	4.5 ~ 5.5
V - E	4 000 ~ 10 000	< 4.5

对于存在腐蚀性气体或液体的环境,需根据气体或液体浓度重新划定腐蚀等级:接触腐蚀性介质

(如硫化氢)的混凝土管道,环境作用等级为V-E级;若作用程度较轻,则确定为V-D级。

② 根据环境作用等级和混凝土标号,利用表2判定管道的建议使用年限;结合工程建设资料,评判排水管渠是否超期服役,按超期服役时间的长短安排修复顺序。

表2 满足耐久性要求的混凝土最低强度等级

Tab.2 Minimum strength grade of concrete satisfying the durability requirements

环境作用等级	混凝土最低强度等级		
	100年使用 设计年限	50年使用 设计年限	30年使用 设计年限
V-C	C45	C40	C40
V-D	C50	C45	C45
V-E	C55	C50	C50

## 1.2 水位评判法

排水管渠腐蚀程度受水位和充满状态影响,水位评判法可依据水位和充满状态,评判管渠腐蚀的潜在性。

### 1.2.1 管渠腐蚀规律

#### ① 长期非满管流

a. 水面以上区域。管壁温度一般比管内污水温度低,使得管中空气形成对流,即被管壁冷却的空气下降,污水中逸出的较暖气体上升,从而导致管顶附近空气中硫化氢浓度较高,通常可达0.000 2%以上;含硫化氢的湿气在管壁上结露,当氧气和二氧化碳充足时可生成硫酸。含较高浓度硫酸的露水沿管壁流下,对管壁造成腐蚀。

b. 气液交界区域。研究表明<sup>[1,2]</sup>,该区域不仅受硫酸腐蚀,还受硫酸盐侵蚀、盐结晶破坏、碳化反应、碱骨料反应的共同作用,腐蚀情况较严重。

c. 水面以下区域:硫杆菌代谢产物中带负电荷的羧基和羟基可与钙形成络合物,导致混凝土基体中钙浸出,使混凝土劣化<sup>[1]</sup>;同时较严重的碱骨料反应造成混凝土膨胀破坏<sup>[2]</sup>;但由于该区域的生物膜和沉积物等对水流冲刷破坏起一定保护作用,故该区域腐蚀程度较轻。

#### ② 满管流和非满管流交替

此种工况下排水管渠处于非满管流状态时会存在“水面以上区域”,生成的硫酸量低于“长期非满管流”工况;当排水管渠处于满管流状态时,管顶及侧壁受到冲刷腐蚀作用,但破坏程度低于长期非满管流工况的硫酸腐蚀;此外,该工况无明确的气液交

界区域。综上,该工况整体腐蚀程度低于“长期非满管流”工况。

#### ③ 长期满管流

微生物厌氧代谢产物腐蚀和碱骨料反应导致混凝土强度降低,在水流冲刷作用下发生破坏。由于不存在硫酸腐蚀,所以该工况的腐蚀程度远低于长期非满管流及满管流和非满管流交替工况。

研究表明<sup>[3]</sup>,排水管渠的高湍流区腐蚀严重。在排水管渠中,支管泵入主管道、倒虹管、跌水井处常发生液体紊动,造成硫化氢气体极易从液相中释放出来,故这些位置的腐蚀程度显著高于其他区域。

### 1.2.2 腐蚀程度分级

以管渠腐蚀规律为基础,依据水位和满管时间的不同,将腐蚀程度定性分为I~V级,其中I级腐蚀最为严重,V级最轻。对于支管泵入主管道、倒虹管、跌水井等特殊位置处,腐蚀等级提高到前一级。

a. I级腐蚀:长期非满管流工况,水位长期位于 $(1/3 \sim 2/3)D$ 范围( $D$ 为管径)。

b. II级腐蚀:长期非满管流工况,水位长期低于 $D/3$ 或高于 $2D/3$ 。水位长期高于 $2D/3$ 时管渠内氧气浓度较低,水位长期低于 $D/3$ 时管渠内二氧化碳浓度较低,均不利于硫化氢氧化为硫酸,故将长期非满管流工况分为两级。

c. III级腐蚀:满管流和非满管流交替工况,满管时间 $< Y/2$ ( $Y$ 为统计时间)。

d. IV级腐蚀:满管流和非满管流交替工况,满管时间 $> Y/2$ 。满管时间越长,产生硫酸的时间就越短,越不利于腐蚀,故根据统计的满管时间是否大于一半将满管流和非满管流交替工况分为两级。

e. V级腐蚀:长期满管流工况。由于同一排水干线的各段管渠内污水水质差异不大,但水位差异较大,故可定性评判同一干线各段管渠的腐蚀差异。

### 1.3 pH评判法

pH评判法以硫化氢气液转化模型、硫化氢氧化模型和腐蚀速率模型为基础,可依次计算空气中硫化氢浓度、硫化氢氧化速率和混凝土年均腐蚀速率。但该法仅适用于长期非满管流工况,可计算硫酸腐蚀条件下的管渠寿命。由于该法的评判依据是管渠液面以上内壁表面的年平均pH值,故需将收集到的基础数据整理为年平均值,再利用模型逐步推求年平均pH值,从而计算年均腐蚀速率。

#### ① 模型一:硫化氢气液转化模型

由亨利定律得到硫化氢在空气中和溶液中的摩尔分数之间的关系:

$$p_g = \frac{H}{P_T} x_g = \frac{e^{\frac{-884.94}{T} + 5.703}}{P_T} x_g \quad (1)$$

式中  $p_g$ ——硫化氢气体在空气中的摩尔分数, mol 气体/mol 空气

$P_T$ ——硫化氢总压强, 通常为 1 atm (1 atm =  $10^5$  Pa, 以下同)

$x_g$ ——硫化氢气体在水中的摩尔分数, mol 气体/(mol 气体 + mol 水)

$H$ ——亨利定律常数,  $\ln H = \frac{-A}{T} + B$ , 其中  $T$  为开氏温度,  $A$ 、 $B$  为经验常数, 硫化氢的  $A$ 、 $B$  值分别取 884.94 和 5.703

## ② 模型二: 硫化氢氧化模型

在氧气和二氧化碳充足的条件下, 特定表面的  $H_2S$  氧化速率公式为<sup>[4]</sup>:

$$r = k_n P_{H_2S}^n \frac{V_g}{A_p} \frac{P}{RT_{abs}} 10^{-3} M_w \quad (2)$$

式中  $r$ ——特定表面的  $H_2S$  氧化速率, 以单位时间单位面积上硫的消耗量进行衡量, mgS/( $m^2 \cdot h$ )

$k_n$ ——氧化速率常数, 混凝土取 0.022 64%, 塑料取 0.000 96%

$n$ ——反应级数, 一般取试验结果的中值, 混凝土取 0.54, 塑料取 0.61

$P_{H_2S}$ —— $H_2S$  气体分压, 取 0.000 1%

$V_g$ ——反应器内的气体体积,  $m^3$

$A_p$ ——暴露在气相中的管道面积,  $m^2$

$P$ ——压力, atm

$R$ ——理想气体常数

$T_{abs}$ ——绝对温度, K

$M_w$ ——硫的摩尔质量, 32 g/mol

根据管渠尺寸、年均水位、年均水温、管渠内压力以及模型一所求的空气中硫化氢浓度, 利用模型二可计算硫化氢氧化速率。其中, 管渠尺寸根据物探或工程竣工资料确定; 年均水位通过历年监测数据或模型的水力模拟确定; 管渠内压力一般取 1 atm (该法仅考虑非满管流状态)。

## ③ 模型三: 腐蚀速率模型

根据 Miller 等<sup>[5]</sup>对混凝土表面在不同 pH 条件下年腐蚀量的研究, 总结出混凝土腐蚀速率公式:

$$v = -0.889 \ln pH + 3.581 8 \quad (3)$$

式中  $v$ ——混凝土腐蚀速率, mm/a

pH——管渠液面以上内壁表面年均 pH 值

式(3)中,  $pH = -\lg[H^+]$ , 其中  $[H^+]$  为内壁表面液膜中的氢离子浓度 (mol/L)。求解方法为: 将模型二得到的  $H_2S$  氧化速率 [mgS/( $m^2 \cdot h$ )] 转化为单位时间 (s) 单位面积 ( $dm^2$ ) 液膜中  $H_2SO_4$  的量  $r_{转}$  [mol/( $dm^2 \cdot s$ )], 再引入累计反应时间常数  $t$  和液膜厚度  $a$  两个参数, 即  $H_2SO_4$  生成量 [mol/(L · s)] =  $r_{转}/(a \times t)$ , 其中液膜厚度  $a$  取 0.01 dm, 累计反应时间常数  $t$  的初始值取 1, 取值间隔为 0.5, 利用若干个监测点处的相关数据进行 pH 值的试算, 将每一组试算结果与实测数据进行对比, 两者差距最小的一组试算结果所采用的累计反应时间常数即可选取为模型三的参数值。

利用模型三所求的年均腐蚀速率, 根据规范给定的不同管径 (尺寸) 管渠的保护层厚度, 可计算管渠的建议使用年限; 根据管渠服役时间, 可计算管渠腐蚀量, 确定修复顺序。

## 2 案例分析

根据某排水干线相关数据, 分别运用三种方法进行评判, 并将评判结果与实际监测结果对比, 验证三种方法的可行性。

### 2.1 数值评判法

采用统计学的方法, 对某排水干线沿线 5 座泵站 2010 年—2015 年的逐月水质监测数据进行分析, 得到污水的 pH 值为 6.67 ~ 7.60, 硫酸盐浓度为 98 ~ 132 mg/L, 硫化物浓度为 0.159 ~ 4.397 mg/L。根据相关设计资料, 管渠混凝土标号为 C23。

当污水的 pH 值为 7.1 时, 水中硫氢根离子 ( $HS^-$ ) 和硫化氢分子  $H_2S$  的比例关系近似为 50/50, 即有一半硫化物具有离开液相的可能性; 若 pH 值降低, 则有更多的硫化氢可转化为气态形式。由排水干线水质数据可知管渠内存在一定浓度的硫化氢气体。根据水质数据、混凝土等级和管线内存在硫化氢等条件, 确定干线内环境等级为 V-D 级, 管渠建议使用年限 < 30 年。

干线内检测点“4#YLJ”、“BZGL”断面的情况如表 3 所示。2 个断面所在的管渠服役 46 年, 超过建议使用年限 16 年以上; 2 个断面顶部保护层均腐蚀完毕, 粗骨料外露, 内层钢筋不同程度缺失, 无法满足规范要求, 故管道属于超龄服役。



表 3 受检断面情况

Tab. 3 The condition of the detection sections

断面名称	使用时间/a	混凝土损坏情况	钢筋腐蚀情况
4#YLJ	46	顶板原设计板厚为 280 mm,目前剩余板厚为 233 ~ 253 mm,粗骨料外露	板底部分区域纵横筋缺失
BZGL	46	顶板原设计板厚为 250 mm,目前剩余板厚为 186 ~ 215 mm,粗骨料外露	板底部分区域纵横筋缺失

2.2 水位评判法

干线管渠内存在一定浓度的硫化氢气体,可利用水位评判法判断不同断面的腐蚀程度差异。根据排水干线“1#~3#提升泵站”段 2015 年逐日水量数据和管网拓扑数据,构建干线的 SWMM 模型,获取污水水位信息。

检测点“4#YLJ”断面位于 W11 段,“BZGL”断面位于 W22 段。模拟结果表明,W11 满管时间比例为 5.12%,由于位于支管泵入主管道处,其故腐蚀等级为Ⅱ级;W22 属于长期非满管流管道,常水位范围为(1/3~2/3)D,故其腐蚀等级为Ⅰ级。根据表 3 可知,“BZGL”断面的顶板腐蚀厚度占总壁厚的 14%~26%,“4#YLJ”断面的顶板腐蚀厚度占总壁厚的 10%~17%,故“BZGL”断面腐蚀较严重,与水位评判法评判结果相符。

2.3 pH 评判法

检测点“BZGL”断面的腐蚀速率计算信息如下:管径 DN2 400,管道内气压 1 atm,液膜厚度为 1 mm,累计反应时间常数为 3,污水年均硫化氢浓度为 0.94 mol/L,年均水温为 17.6℃,年均水位为 1.2 m。根据式(1)~(3)及规范中混凝土保护层厚度要求,计算出检测点“BZGL”断面液面以上内壁表面 pH 值为 3.60,腐蚀速率为 0.978 4 mm/a,建议使用年限为 30.66 年,故该管道属于超龄服役。由表 3 可以看出,BZGL 断面顶板的实际腐蚀速率为 0.760 9~1.391 3 mm/a,平均值为 1.076 mm/a,故计算结果与实际监测结果近似。

3 结语

数值评判法和水位评判法分别从水质和水力方面评判管渠腐蚀状况。由于同一排水干线各段管渠污水水质差异不大,而水位差异大,故对于同一干线数值评判法仅可确定建议使用年限,无法评判各断面腐蚀程度差异;水位评判法可定性判断各断面差异,给出修复顺序,但无法确定建议使用年限,且数据获取过程较复杂。pH 评判法综合考虑水质和水力因素,可计算管渠腐蚀速率,并根据规范中的保护层厚度,计算建议使用年限,其评判结果更全面,但

数据需求多于数值评判法和水位评判法,且仅适用于长期非满管流,不利于广泛应用。因此,在实际工程中,三种评判方法协同使用,可根据获取数据的不同选用不同方法,并互相修正,从而获得最佳腐蚀评判结果,为管渠防护提供参考依据。

参考文献:

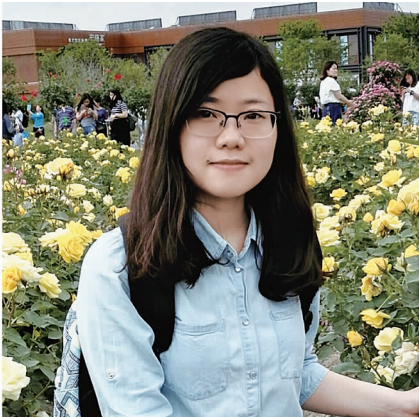
[1] 姜晓东,余凯华,鲍月全,等. 大口径合流污水管道硫酸腐蚀影响的初步分析[J]. 净水技术,2016,35(6):37-44.

[2] 闻宝联. 城市污水环境下混凝土腐蚀及耐久性研究[D]. 天津:天津大学,2005.

[3] Vincke E,Boon N,Verstraete W. Analysis of the microbial communities on corroded concrete sewer pipes – a case study[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2001, 57(5/6): 776-785.

[4] Nielsen A H,Vollertsen J,Jensen H S,et al. Influence of pipe material and surfaces on sulfide related odor and corrosion in sewers[J]. Water Res, 2008, 42(15): 4206-4214.

[5] Miller T M. Corrosion Protection in Concrete Sanitary Sewers[P]. USA:US5834075A,1998-11-10.



作者简介:梁恽祯(1994-),女,广西柳州人,硕士研究生,研究方向为给水排水管网优化控制。

E-mail:2863523613@qq.com

收稿日期:2017-07-10