

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.07.013

# 水力冲洗应用于排水小管径倒虹吸管的效果与优化

姜明洁<sup>1</sup>, 夏 业<sup>2</sup>

(1. 北京城市排水集团有限责任公司 第四管网运营分公司, 北京 100032; 2. 北京北排智慧水务有限公司, 北京 100032)

**摘 要:** 为了延长污水管道的使用寿命、减少管道冲洗成本、降低人工养护风险、提高污水管网管理水平,设计了一种水力冲洗小管径倒虹吸管道的方法,并研究了倒虹吸管段流速与污泥沉淀量的关系、蓄水冲洗前后倒虹吸管段流速的变化、拦蓄水量与倒虹吸管段冲洗效果的关系、冲洗频率与倒虹吸管段沉淀量的关系。结果表明,随着流速的增大,污泥沉淀量出现逐渐降低的趋势;随着拦蓄盾拦蓄水位的升高,倒虹吸管段的流速也逐渐增大,超过 55 cm 时,流速上升趋势变缓;当拦蓄水位在 50 ~ 55 cm 之间时,倒虹吸管段污泥浓度的去除率明显升高,最优拦蓄水位为 55 cm;设备的最优冲洗频率为 3 次/d;自冲洗设备对管道中的漂浮物和悬浮物具有非常好的去除效果。

**关键词:** 污水管道; 管道养护; 自冲洗; 水力冲洗; 倒虹吸

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)07-0092-04

## Performance and Parameters Optimization of Hydraulic Flushing in Small Diameter Inverted Siphon

JIANG Ming-jie<sup>1</sup>, XIA Ye<sup>2</sup>

(1. No. 4 Network Operation Company, Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100032, China;  
2. Beijing BEIPAI Smart Water Co. Ltd., Beijing 100032, China)

**Abstract:** In order to extend service life of sewage pipelines, reduce pipeline flushing costs and the risk of manual maintenance, and improve the management level of sewage pipelines, a method for hydraulic flushing of small diameter inverted siphon was designed, and relationship between flow velocity of the inverted siphon pipeline and content of sludge sedimentation, variations in flow velocity of the inverted siphon pipeline before and after water storage and flushing, relationship between water storage and flushing performance of the inverted siphon pipeline, and relationship between flushing frequency and sedimentation content of the inverted siphon were explored. With the increase of flow velocity, the amount of sludge sedimentation tended to be a gradual decreasing trend. As the water storage capacity of the intercepting shield increased, the flow velocity of the inverted siphon pipeline gradually increased. When the water level exceeded 55 cm, the flow velocity increased slowly. When the interception water level was between 50 cm and 55 cm, the removal efficiency of sludge concentration in the inverted siphon pipeline increased obviously. Therefore, the optimal water level was 55 cm, and the optimal flushing frequency of the device was 3 times/day. Self-flushing equipment had a very good removal performance on floating and suspended matters in the pipeline.

**Key words:** sewage pipeline; pipeline maintenance; self-flushing; hydraulic flushing; inverted siphon

目前普遍采用定期高压冲洗或人工掏挖的方法进行城市排水管道的日常养护清淤,这些方法既费时费力又存在一定的安全作业风险。除此之外,高压冲洗还会给污水管道的结构带来不利影响,降低污水管道的使用寿命<sup>[1-2]</sup>。

利用新型拦蓄设备对污水管道进行水力自冲洗,可以连续、自动、有效地对中小型污水管道进行日常的养护清理<sup>[3]</sup>。该方法的主要原理是通过拦蓄管道内部自身水流至一定的液位高度,通过提高局部管段的水流速度,实现对下游管道进行冲洗的目的。

管道自冲洗可以降低污染物负荷、调节污水处理厂进水水质、延长污水管道的使用寿命、降低气味污染、减少管道冲洗的成本<sup>[4-5]</sup>。在国外,已经有上千个成功应用案例,其是一种非常完善、成熟的技术,未来在国内具有巨大的应用前景<sup>[6]</sup>。

在实际的污水管网中,倒虹吸管是一种比较特殊的管道,其运行的工况有别于普通重力流污水管道。笔者利用水力自冲原理冲洗养护倒虹吸管道,研究使用自冲洗设备进行冲洗的效果、频率和污泥去除率。

## 1 材料与方法

试验设备:为了真实客观地模拟倒虹吸管道现状,建立了倒虹吸管道物理模型,该模型以南旱河倒虹吸管线为基础,倒虹吸管管径为300 mm,管道长度按照一定比例进行设计,坡度完全按照原有管线

进行设计。同时,为了提高污泥的沉淀率,在管道模型的制作过程中,对倒虹吸管段做了拉毛处理,最大程度上接近于管道真实环境。拦蓄闸门采用电控拦蓄冲洗门,具有开启频率自由设定、远程实时控制与监控等优点。

试验地点及流程:试验在某污水泵站院内进行。通过安装于地下污水管道的潜污泵,将污水提升至模型进水井,在出水井处安装拦蓄冲洗门,最后冲洗水通过管道回流至地下污水管道。

测定项目和分析方法:主要常规测定指标包括倒虹吸管段流速及污泥沉淀量、进出水井水位、拦蓄水位及水量等。采用电磁流量计测定流速;污泥浓度使用烘干法(103~105℃)进行测定;水位使用标尺测量。

## 2 结果与讨论

试验主要分为四个阶段进行:第一阶段研究倒虹吸管段流速与污泥沉淀量的关系;第二阶段研究拦蓄前后倒虹吸管段流速的变化;第三阶段研究拦蓄水量与倒虹吸管段冲洗效果的关系;第四阶段研究拦蓄冲洗频率与管道冲洗效果的关系。

### 2.1 倒虹吸管段流速与污泥沉淀量的关系

控制倒虹吸管段流速分别为0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 m/s,进、出水采用循环方式运行,试验稳定运行6 d。从上午9点起,每隔2 h测定1次出水污泥浓度,共4次。污泥沉淀率随倒虹吸管段流速的变化见表1。

表1 污泥沉淀率随倒虹吸管段流速的变化

Tab.1 Change of sludge sedimentation rate with different flow velocity in inverted siphon pipeline

管道流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	进水污泥浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	出水污泥浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )				平均出水污泥浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	污泥沉 淀率/%
		第1次	第2次	第3次	第4次		
0.4	298	52	60	48	39	49.8	83.3
0.6	304	67	79	65	59	67.5	77.8
0.8	312	86	77	99	81	85.8	72.5
1.0	289	90	89	98	91	92.0	68.2
1.2	307	96	105	114	94	102.3	66.7
1.4	299	145	130	140	198	153.3	48.7

从表1可以看出,污泥沉淀率随着管道流速的增大而减小。在进水污泥浓度维持在300 mg/L左右的条件下,当倒虹吸管段流速为0.4 m/s时,污泥沉淀率达到83.3%;当倒虹吸管段流速为0.6 m/s时,污泥沉淀率达到77.8%;当倒虹吸管段流速为0.8 m/s时,污泥沉淀率达到72.5%;当倒虹吸管段流速为1.0 m/s时,污泥沉淀率达到68.2%;当倒虹

吸管段流速为1.2 m/s时,污泥沉淀率达到66.7%;当倒虹吸管段流速为1.4 m/s时,污泥沉淀率达到了48.7%。

### 2.2 蓄水前后倒虹吸管段流速的变化

设置管道自冲洗设备的蓄水高度分别为30、40、50、55、60 cm,试验稳定运行5 d,进、出水采用循环方式运行。倒虹吸管段流速随拦蓄水位的变化如

表2所示。

表2 倒虹吸管段流速随拦蓄水位的变化

Tab.2 Change of flow velocity in inverted siphon pipeline with different interception water level

蓄水高度/cm	拦蓄前水流流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	瞬时流速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )			平均出水流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
		第1次	第2次	第3次	
30	0.81	1.34	1.28	1.21	1.28
40	0.78	1.29	1.36	1.50	1.38
50	0.85	1.99	2.06	2.16	2.07
55	0.80	2.85	2.76	2.82	2.81
60	0.77	2.83	2.80	2.85	2.82

由表2可知,在拦蓄前倒虹吸管段流速基本为0.80 m/s左右的条件下,当拦蓄水位为30 cm时,拦蓄后平均出水流速为1.28 m/s,流速提高了

表3 倒虹吸管段污泥去除率随拦蓄水量的变化

Tab.3 Change of sludge removal rate in inverted siphon pipeline with different water storage

蓄水高度/cm	拦蓄水量/ $\text{m}^3$	倒虹吸管段污泥浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	出水污泥浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		平均出水污泥浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	污泥去除率/%
			第1次	第2次		
30	2.08	231.28	128.45	140.89	134.67	58.23
40	2.25	228.34	149.58	163.48	156.53	68.55
50	2.42	224.79	189.56	196.85	193.20	85.95
55	2.51	219.67	211.64	200.39	206.02	93.78
60	2.59	238.19	216.99	223.59	220.29	92.48

由表3可知,在倒虹吸管段污泥浓度为230 mg/L左右的条件下,当拦蓄水位为30 cm、拦蓄水量为2.08  $\text{m}^3$ 时,污泥去除率为58.23%;当拦蓄水位为40 cm、拦蓄水量为2.25  $\text{m}^3$ 时,污泥去除率为68.55%;当拦蓄水位为50 cm、拦蓄水量为2.42  $\text{m}^3$ 时,污泥去除率为85.95%;当拦蓄水位为55 cm、拦蓄水量为2.51  $\text{m}^3$ 时,污泥去除率为93.78%;当拦蓄水位为60 cm、拦蓄水量为2.59  $\text{m}^3$ 时,污泥去除率为92.48%。

#### 2.4 拦蓄冲洗频率与管道冲洗效果的关系

设定管道自冲洗装置合适的拦蓄水量,每天冲洗次数分别为1、2、3、4、5次。试验稳定运行5 d,进、出水采用循环方式运行,在试验稳定运行之后开始测量倒虹吸管段的污泥浓度,结果见表4。可知,在拦蓄水量约为2.50  $\text{m}^3$ 、倒虹吸管段污泥浓度约为220 mg/L的条件下,当拦蓄频率为1次/d时,倒虹吸管段的污泥去除率约为60.88%;拦蓄频率为2次/d时,倒虹吸管段的污泥去除率约为65.05%;拦蓄频率为3次/d时,倒虹吸管段的污泥去除率约为92.90%;拦蓄频率为4次/d时,倒虹吸管段的污泥

58.02%;当拦蓄水位为40 cm时,拦蓄后平均出水流速为1.38 m/s,提高了76.92%;当拦蓄水位为50 cm时,拦蓄后平均出水流速为2.07 m/s,提高了143.53%;当拦蓄水位为55 cm时,拦蓄后平均出水流速为2.81 m/s,提高了251.25%;当拦蓄水位为60 cm时,拦蓄后平均出水流速为2.82 m/s,流速提高了266.23%。可见,提高蓄水高度有助于提升出水流速。

#### 2.3 拦蓄水量与倒虹吸管段冲洗效果的关系

改变管道自冲洗设备的蓄水高度,分别为30、40、50、55、60 cm,相应拦蓄水量分别为2.08、2.25、2.42、2.51、2.59  $\text{m}^3$ 。试验稳定运行5 d,进、出水采用循环方式运行,稳定运行之后开始计算倒虹吸管段污泥去除率,结果见表3。

去除率约为91.17%;拦蓄频率为5次/d时,倒虹吸管段的污泥去除率约为93.17%。

表4 倒虹吸管段平均污泥浓度随冲洗频率的变化

Tab.4 Change of average sludge concentration in inverted siphon pipeline with different flushing frequency

冲洗频率/ (次·d <sup>-1</sup> )	拦蓄水量/ $\text{m}^3$	冲洗前平均污泥浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	冲洗后平均污泥浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
1	2.49	218.46	85.46
2	2.51	219.13	76.59
3	2.48	215.35	15.29
4	2.53	229.56	20.28
5	2.55	219.56	14.99

### 3 结论

① 随着流速的增加,污泥沉淀量出现逐渐降低的趋势。当倒虹吸管段水流流速达到1.4 m/s左右时,仍然有将近50%的污泥发生沉淀。

② 当自冲洗设备拦蓄管道水流至一定水位时,拦蓄闸门突然开启,拦蓄水的重力势能转变为动能,从而使流速增加。随着拦蓄闸门拦蓄水位的增加,倒虹吸管段的流速也逐渐增加,当拦蓄水位达到50~55 cm之间时,倒虹吸管段的水流流速明显升

高,但是当拦蓄水位达到 55 ~ 60 cm 时,倒虹吸管段的水流流速上升趋势变缓。

③ 当倒虹吸管段污泥浓度维持在 230 mg/L 左右时,随着拦蓄闸门拦蓄水位的增加,拦蓄水量也将逐渐增加。当拦蓄水位在 50 ~ 55 cm 之间时,倒虹吸管段污泥去除率明显升高,但是当拦蓄水位达到 55 ~ 60 cm 时,倒虹吸管段污泥去除率没有明显的升高。同时结合拦蓄水量与流速的关系,得出本试验最优拦蓄水位为 55 cm。

④ 将拦蓄水位设定在 55 cm、拦蓄水量约为  $2.50 \text{ m}^3$ 、倒虹吸管段污泥浓度在 220 mg/L 左右、冲洗频率为 3 次/d 时,污泥去除率达到 92.90%,继续增加冲洗频率后,污泥去除率升高不明显。因此结合设备维护、经济等方面综合考虑,设备的冲洗频率宜设定为 3 次/d。

#### 参考文献:

- [1] 付博文. 城市污水管道中污染物沉积特性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.  
FU Bowen. Research on Deposition Characteristics of Sewers Pollutants [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016 (in Chinese).
- [2] 李海燕,徐波平,徐尚玲,等. 北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究[J]. 环境科学,2013,34(3):919 - 926.  
LI Haiyan, XU Boping, XU Shangling, et al. Research on pollution load of sediments in storm sewer in Beijing District [J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 919 - 926 (in Chinese).
- [3] 卞晓峥. 城市污水管网污染物沉积与冲刷特性及水质变化规律研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2015.  
BIAN Xiaozheng. A Study on Characteristics of Pollutants Deposition and Erosion Release and Water Quality Variation Rules in Sewer Networks [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015 (in Chinese).
- [4] 贾朝阳. 雨水管道沉积物控制措施及其效果研究[D]. 北京:北京建筑工程学院,2012.  
JIA Chaoyang. Study on Control Measures and the Effect on Sewer Pipe Sediment [D]. Beijing: Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2012 (in Chinese).
- [5] 韩伟,支凤春,唐明. 球形自动反冲洗管道过滤器在核电站海水冷却系统中的应用[J]. 中国核电,2011,4(3):264 - 267.  
HAN Wei, ZHI Fengchun, TANG Ming. Spherical auto-flushing pipe filter used in the sea water cooling system of nuclear power plant [J]. China Nuclear Power, 2011, 4(3): 264 - 267 (in Chinese).
- [6] JI D Y. Analysis and research of Luo River inverted siphon structure [J]. Advanced Materials Research, 2013, 787: 808 - 811.

作者简介:姜明洁(1982 - ),男,北京人,研究生,高级工程师,主要研究方向为城市排水管网系统的运营、管理及智慧水务建设。

E-mail:55292866@qq.com

收稿日期:2020 - 09 - 28

修回日期:2020 - 11 - 25

(编辑:任莹莹)

大力推进水利薄弱环节建设,  
提高防灾减灾能力