

设计经验

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.24.012

# 城市综合管廊真空排水系统模型试验及设计技术研究

赫明水<sup>1</sup>, 王长祥<sup>1</sup>, 吕 杨<sup>1</sup>, 何士忠<sup>1</sup>, 李凤祥<sup>2</sup>

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074; 2. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300350)

**摘 要:** 针对目前地下综合管廊常规排水方式由于集水坑内长期无水, 潜水泵长期不运行而导致其故障率高、使用寿命降低的问题, 研究采用真空排水方式解决常规低点设置集水坑和潜水泵排水方式存在的问题, 从而降低整个排水系统的工程投资, 减少潜水泵后期检修维护工作量, 大大提高管廊内排水系统的可靠性。通过建立地下综合管廊真空排水系统试验模型, 模拟不同条件下真空排水系统运行工况, 得出综合管廊真空排水系统的适用条件(包括系统最大高差、高差允许范围内的最大服务距离、集水能力或最大排水量、排水水质等)和相关设计要点(包括真空管路、真空泵站和真空收集箱等), 以及系统最优设计参数(包括真空管路、真空泵站和真空收集箱等)。

**关键词:** 综合管廊; 真空排水系统; 模型试验; 适用条件; 设计要点

**中图分类号:** TU990.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)24-0066-06

## Research on Model Test and Design Technology about the Vacuum Drainage System of Utility Tunnel

HE Ming-shui<sup>1</sup>, WANG Chang-xiang<sup>1</sup>, LÜ Yang<sup>1</sup>, HE Shi-zhong<sup>1</sup>, LI Feng-xiang<sup>2</sup>

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** Due to the long-term lack of water in the sump, the conventional drainage mode of utility tunnel causes the long-term non-operation of the submersible pump, which leads to the high failure rate and short service life of the submersible pump. The vacuum drainage mode of utility tunnel was applied to solve the problems existing in the conventional drainage mode, which can reduce the engineering investment of the whole drainage system and the later maintenance work, and improve the reliability of drainage system in utility tunnel. The vacuum drainage system test model was established, and the operation conditions of the vacuum drainage system under different conditions were simulated. The applicable conditions (including the maximum elevation difference of the system, the maximum service distance within the allowable range of the elevation difference, the catchment capacity or maximum discharge, and the drainage quality) and relevant design points (including vacuum pipeline design, vacuum pump station design and vacuum collection tank design), and the optimal design

parameters( including vacuum pipeline, vacuum pump station and vacuum collection tank ) of the vacuum drainage system of utility tunnel were obtained.

**Key words:** utility tunnel; vacuum drainage system; model test; applicable conditions; design points

近些年,全国综合管廊建设全面展开,对于管廊内一些关键技术的研究也在不断深入。目前地下综合管廊内自动排水系统一般均采用低点设置集水坑和潜水泵的排水方式<sup>[1]</sup>,此种排水方式在实际工程中由于集水坑内长期无水而使潜水泵长期不运行,导致潜水泵故障率高,使用寿命降低,影响管廊内排水系统的正常运转,给综合管廊的安全运行带来隐患。而采用真空排水系统方案能够解决以上问题,可降低整个排水系统的工程投资,减少潜水泵后期检修维护工作量,大大提高管廊内排水系统的可靠性。

真空排水( 又称负压排水)起源于 19 世纪的欧洲,是重力排水的补充。真空排水的原理是由真空泵在密闭的排水管网中形成真空条件,通过各收集箱中的真空阀控制,利用真空负压产生的压差来实现污水流向污水罐,最后排至市政污水管网或污水处理设备<sup>[2]</sup>。

本研究通过建立地下综合管廊真空排水系统试验模型,模拟不同条件下真空排水系统运行工况,得出综合管廊真空排水系统的适用条件和相关设计要点,摸索最优设计参数。

1 大型场地试验模型构建

本研究场地试验模型主要由真空泵站、真空管路和真空收集箱 3 部分组成。系统运行由可编程逻辑控制器( PLC)控制。试验模型设置 10 个 25 L 的水桶,管道总长度 450 m,管道直径 5 cm,管材为 PPR,真空罐容积 0.6 m<sup>3</sup>,真空泵 50 m<sup>3</sup>/h。

1.1 真空泵站

真空泵站由真空罐、真空泵、污水泵、进排水管及自控装置组成。真空罐用于保证真空和收集污水,罐内下部 1/3 的空间收集污水,上部余下的 2/3 的空间用于保证真空。当罐内负压低于设定下限时,真空泵开启,当罐内负压达到设定上限时,真空泵自动停止。在真空泵和收集罐之间安装有止回阀,真空泵停止运行时,止回阀自动关闭,保证罐内气体不倒流。在污水泵口也安装有止回阀,当污水泵停止运行时,止回阀自动关闭,防止污水倒流。真

空收集罐顶部还安装有安全阀,防止真空泵或污水泵工作时,罐内压力过大。

1.2 真空管路

真空管路由主管、支管、真空排出管、检查管组成。真空管道在上坡和水平地势时采用锯齿形敷设方式,两个相邻锯齿形提升段之间的坡度 ≥ 0.2%<sup>[3]</sup>,保证具有足够的重力水头,弯头 45°角。其中上坡锯齿单元长度 2 ~ 3 m,水平管道锯齿单元长度 < 100 m。锯齿单元垂直高度在 200 ~ 450 mm 范围内。在不同的气液流速下,液体会以连续的形式( 层流、破浪流、柱塞流)或气液混合物的形式被输送<sup>[4]</sup>,通过间歇运行,分段输送至真空泵站。

1.3 真空收集箱

共设置 10 个 25 L 的真空收集箱。收集箱采用 PVC 材质。一旦真空收集箱收集的污水量达到预设值时,控制器随即打开真空阀门,污水从收集箱全部进入真空管路并高速流向真空泵站。

真空排水试验模型主要设备材料见表 1,真空排水模型系统见图 1,试验现场照片见图 2。

表 1 真空排水试验模型主要设备材料

Tab. 1 Main equipment and materials of vacuum drainage test model

项 目		规格型号	数量
工 艺 设 备 材 料	PPR 管及管件	DN50	450 m
	电磁阀		11 个
	水桶	25 L 塑料桶	10 个
	真空罐	0.6 m <sup>3</sup>	1 个
	真空泵	50 m <sup>3</sup> /h	1 台
电 气 设 备 材 料	触摸屏	DOP - B03S211	1 台
	PLC	DVP60ES200T	1 台
	扩展模块	DVP - 04AD - E2	1 台
	中间继电器	RCL424024 + SRC 2CO ECO + RIM3 一整套	11 套
	断路器	NXB - 63 3PD10A	1 套
	断路器	NXB - 63 2PD6A	2 套
	接触器	CJX2 - 1210	1 套
	浮球液位开关	LKS001M10HK	10 套
	压力变送器	SMC 压力开关	1 套
	接线端子	SAKDK 4N	30 片
	单芯线缆 及护套线		300 m

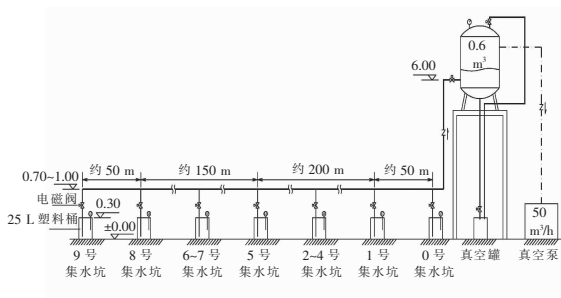


图1 真空排水模型系统

Fig.1 System diagram of vacuum drainage model



图2 真空排水模型试验现场

Fig.2 Test site of vacuum drainage model

## 2 真空排水系统试验内容

### 2.1 工作压力确定试验

试验对真空排水系统管道末端压力进行了分析。通过试验分析确定系统工作压力。根据文献和既有研究成果,确定-30、-45、-60 kPa为试验工作压力梯度。选择系统最远9号集水坑作为研究对象,以确保最远点的运行工况。各工作压力下9号集水坑完成排水的压力变化及时间见图3。

从不同压力下最远集水坑的抽水时间和压力变化情况来看,在-30 kPa情况下由于压力不够,抽水速度过慢,选择-60 kPa工作压力,能够为系统提供排水能力冗余,在较短时间内完成排水。

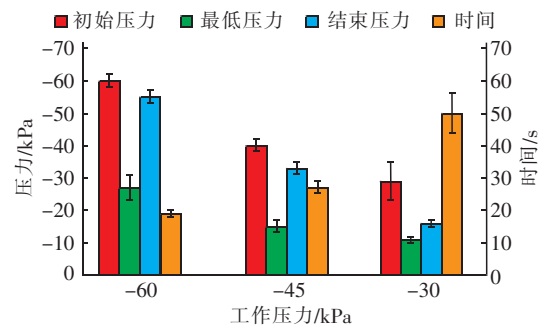


图3 各工作压力下9号集水坑完成排水的压力变化及时间

Fig.3 Pressure change and time for completion of drainage of No.9 sump under each working pressure

### 2.2 待机压力分析

试验系统真空罐容积为0.6 m³,真空泵抽气量50 m³/h,标准大气压条件下,启动真空泵,真空罐-30、-45和-60 kPa真空生成时间分别为13.88、25.24和41.77 s。因此得出:①选用抽速较小的真空泵可以完成真空生成任务;②实践工程上选用真空罐3~6 m³,真空泵抽速50 m³/h,标准大气压条件下,启动真空泵,估算真空罐-60 kPa真空会在约10 min内完成,计算管道系统容积,全系统-60 kPa真空会在0.5 h内生成。

综合管廊真空排水系统排放的目标废水主要为管廊渗漏水,水量产生速度较慢,因此建议实际工程中,真空排水系统内平时可以保持标准大气压待机,集水坑出现蓄水时,可以临时启动真空排水系统排水,这样可以降低设备使用率,节约电能和运行费用。

### 2.3 真空罐与管道末端压力分析

试验检测分析了-30、-45和-60 kPa真空工作压力下,真空罐、管道初端和末端完成最远集水坑排水工作前后压力变化,结果见图4。

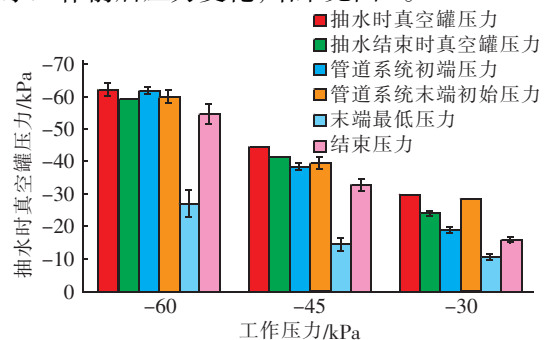


图4 各工作压力下真空罐与9号集水坑完成排水压力变化

Fig.4 Drainage pressure change of vacuum tank and No. 9 sump under each working pressure



结果显示:

① 在 $-30$ 、 $-45$ 和 $-60$  kPa真空工作压力下,真空罐和末端在完成最远集水坑排水工作后,都会产生压力损失;

② 在 $-30$ 、 $-45$ 和 $-60$  kPa真空工作压力下,真空罐和末端在完成最远集水坑排水工作后,产生压力损失呈递减趋势;

③ 管道初端压力和管道末端初始压力与真空罐初始压力相关。这一结果说明系统内部压力从真空罐到管道末端呈现递减趋势;排水量较大时, $-60$  kPa真空工作压力可以满足多个集水坑排水任务。

#### 2.4 高程及集水坑距离对真空排水压力的影响

本部分研究以 $-60$  kPa为工作压力,以真空罐起始压力、抽水结束压力、抽水工作后管道初端压力为研究对象,分析集水坑到真空罐高差对这些压力的影响。本研究分析的高差包括2、3、4、5和6 m等5种工况,以1、5和9号集水坑为研究目标。泵站高差对9号集水坑排水工作压力影响见图5。

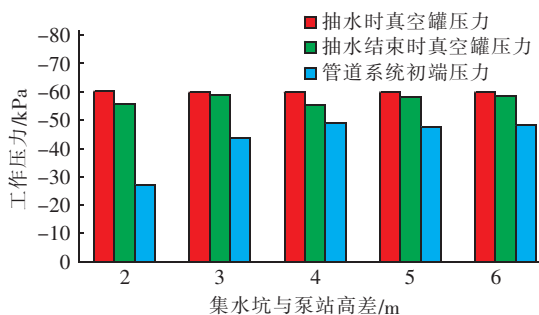


图5 泵站高差对9号集水坑排水工作压力影响

Fig. 5 Influence of pumping station elevation difference on drainage working pressure of No. 9 sump

研究结果显示:

① 集水坑到真空罐高差在4~6 m区间内,不论对1、5或者9号哪个集水坑排水,对真空罐工作压力损失影响均不显著。这与前述研究结论一致,即 $-60$  kPa的工作压力,受排水工作影响较小,压力下降少。

② 管道前端压力在集水坑到真空罐高差在2~3 m区间内,下降明显,这主要是因为泵站与管道系统连接的真空软管在较低高差时,真空软管平铺,导致存水较多,影响了排水后压力的恢复;高差较大时真空软管竖起,真空软管不存水,排水后压力恢复快。

③ 集水坑与泵站间管道长度对真空罐起始压

力、抽水结束压力、抽水工作后管道初端压力影响均不显著。

因此,真空排水系统对泵站到集水坑高差适应能力强,且管道汽水混合物相对于水,其密度已经极大降低,水头损失大大降低。

#### 2.5 污水SS对真空排水效果的影响

本部分试验采用 $-30$ 、 $-45$ 和 $-60$  kPa工作压力,以9号集水坑为研究对象,分析污水和清水排水工况。本试验采用500 mg/L高岭土悬浊液模拟污水。其他参数与前述试验保持一致。试验结果见图6。可见,在 $-30$ 、 $-45$ 和 $-60$  kPa不同工作压力条件下,真空排水系统对清水和污水的排水效果基本一致,也就是污水中一定量的悬浮物,对真空排水效果没有显著影响。

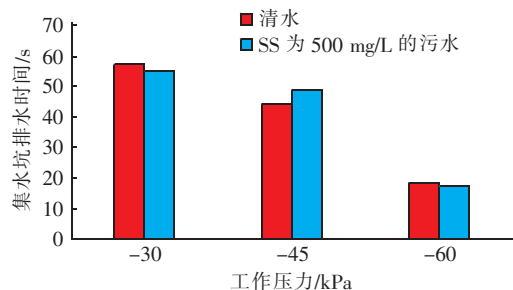


图6 9号集水坑排水水质与时间响应对比

Fig. 6 Comparison of drainage quality and response time of No. 9 sump

因此,真空排水系统可以用于较清排水的收集排放,也可以用于一定条件下浊度较高的排水收集排放。

#### 2.6 两个(或多个)集水坑同时排水效果研究

以 $-60$  kPa为工作压力,集水坑与泵站高差在3~5 m范围内,试验分析同时完成两个集水坑排水的效果,一组是1号和2号(较近)集水坑同时排水,一组是5号和6号(较远)集水坑同时排水。两个集水坑同时排水时的系统压力变化和排水时间见表2。

研究结果显示:

① 集水坑与泵站高差对排水效果影响不显著,在3 m高差时,排水时间相对较长。

②  $-60$  kPa工作压力条件下,较近和较远两个集水坑同时排水,真空罐压力下降不显著。

③ 距离较远的2个集水坑,完成排水时间明显高于较近2个集水坑完成排水时间,可见,管道越远的集水坑,完成排水时间越长。

表2 两个集水坑同时排水时的系统压力变化和排水时间

Tab.2 Change of system pressure and drainage time when two sumps drain at the same time

与泵房 高差/ m	1、2号集水坑						5、6号集水坑					
	真空罐/kPa			管道初 端压力/ kPa	排水时间/s		真空罐/kPa			管道初 端压力/ kPa	排水时间/s	
	初始 压力	结束 压力	压降		1号坑	2号坑	初始 压力	结束 压力	压降		5号坑	6号坑
5	-59.8	-58.5	1.3	-30	9.88	14.32	-60.2	-58.4	1.8	-50	27.73	36.19
4	-60.2	-59.0	1.2	-28	11.95	13.32	-60.2	-58.9	1.3	-40	15.83	20.26
3	-60.1	-55.8	4.3	-18	21.32	80.98	-60.2	-50.0	10.2	-36	38.53	180.20

### 3 主要试验结论

#### 3.1 高差允许范围内的最大服务距离

通过工况实测分析,9号集水坑距离泵站450 m,排水时间与高差和初始压力关系不大;观察发现抽水速度主要受管道末端压力大小的影响,末端压力较大时抽水速度较快。在地势平坦区域,单个真空泵站的服务半径可达4 km<sup>[4]</sup>。

#### 3.2 真空泵站与最低集水点的最大高差

真空泵站与最低集水点的最大高差与管道系统长度变化有相关性,但集水坑到真空罐高差在2~6 m区间内,不论对1、5或者9号哪个集水坑排水,真空罐工作压力损失不显著。在实际工程中,为留有一定的安全余量,建议真空主管爬坡累积高度不宜大于5 m。

#### 3.3 多舱管廊的应用

真空排水模拟系统的反复运行表明,在-30 kPa时,系统排水性能已经不能很好满足要求。-45 kPa时,已能正常排水,本研究设定-60 kPa,保证排水能力冗余,更高真空度可能带来高能耗。真空罐保持恒定真空度,由真空泵补偿负压损失。这种运转模式下,真空罐提供系统排水动力。因此,在保证真空管路密闭的情况下,可以由一套真空泵站完成单舱、双舱、多舱综合管廊排水。

#### 3.4 集水能力或最大排水量的适用条件

本次研究集水坑实际存水25 L,真空罐容积600 L,以真空罐1/3容积作为储水上限,最大排水量为200 L,这个过程需要真空泵不断补充负压损失,排水泵不断排出真空罐内存水。

在实际工程中,可根据工程实际需要选择与最大排水能力相匹配的真空管路、真空罐及真空泵和排水泵,但一般不宜通过真空排水系统排出大量管廊内积水,真空泵功率一般不大于15 kW,当需要排出大量积水时,可以考虑与常规潜水泵重力排水方式结合。

#### 3.5 单个真空收集箱的最大排水量

本次试验研究采用的是25 L集水容器,真空罐200 L工作存水容积在真空罐不排水的情况下,一次可同时驱动4个集水坑排水。实际工程中,真空收集箱为成型产品,收集箱排水量按不大于4 L/s选择,真空收集箱配套真空阀开启压力不宜大于-15 kPa。

#### 3.6 对管廊内排水水质要求

本次研究以高岭土悬浊液模拟污水,配制SS为500 mg/L。排水试验结果表明,水质SS的增加,没有对排水时间产生显著性影响。相对于本研究模拟试验操作,实际工程在长期运行下,当真空排水系统需要排放高SS污水时,可能存在液位计探头钝化,阀门关闭不严,进而影响系统真空保持时间的问题,体现出来的现象可能是真空泵频繁启动保持负压、能耗增加等问题。

### 4 真空排水系统设计

#### 4.1 管路设计

真空管道由主管、支管、真空排出管、检查管组成。真空管道的敷设方式考虑上坡、下坡和水平运输污水。在上坡和水平地势时采用锯齿形敷设方式,建立固定间隔锯齿单元提供涡旋,形成汽水混合物,污水在管道中为柱塞波浪状运动,通过间歇运行,分段输送至真空泵站,实现排水功能;两个相邻锯齿形提升段之间的坡度 $\geq 0.2\%$ ,保证具有足够的重力水头,弯头45°角。其中上坡锯齿单元长度为2~3 m,水平锯齿管道锯齿单元长度 $< 100$  m。锯齿单元垂直高度在200~450 mm的范围内。真空管道管材通常采用UPVC管或HDPE管。根据流量和部位,真空管路主干管管径宜控制在10~20 cm范围。

#### 4.2 真空泵站设计

真空泵站主要由真空收集罐、真空泵、污水泵和自控装置组成。真空泵用于维持真空管负压;真空泵不直接决定排水管道系统排水效能,可以综合考

虑成本、能耗和安装等条件选择。真空收集罐和真空管道连接,真空管道的接入口一般在罐体的中部。罐内的负压由真空泵产生。

真空站使用前要进行密封试验。真空罐内一般维持压力在 $-70 \sim -60$  kPa。单台真空泵功率一般不大于15 kW。污水泵启动频率 $\leq 12$ 次/h。

#### 4.3 真空收集箱设计

综合管廊污水先通过重力排水至真空收集点,通过真空收集箱与真空管网连接。真空收集箱可采用成型产品,由污水收集室、真空阀、控制器、感应管、箱体等组成。箱体一般采用聚乙烯材质。当排水量 $\leq 4$  L/s时,宜设单个真空阀的收集箱;当排水量 $> 4$  L/s时,宜采用两个真空阀的收集箱<sup>[5]</sup>。

#### 5 结语

通过场地模型试验验证了综合管廊真空排水技术的可行性,并对真空泵站、真空管路和真空收集箱等设计要点和主要技术参数进行了分析研究,提出了适用于城市综合管廊真空排水设计的技术要求及主要技术参数范围。

#### 参考文献:

- [1] GB 50838—2015,城市综合管廊工程技术规范[S]. 北京:中国计划出版社,2015.  
GB 50838 - 2015, Technical Code for Urban Utility Tunnel Engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2015(in Chinese).
- [2] 左光应. 浅谈室外真空排水系统[J]. 工程设计与建设,2005,37(3):33-35.  
Zuo Guangying. Discussion on vacuum sewerage system outside building [J]. Engineering Design and Construction,2005,37(3):33-35(in Chinese).
- [3] 范翔,武迪,韩宝平,等. 综合管廊内排水对象分析及排水系统的选择[J]. 给水排水,2018,44(2):99-103.

Fan Xiang, Wu Di, Han Baoping, et al. Analysis of drainage object and optimization of drainage system in utility tunnel [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018,44(2):99-103(in Chinese).

- [4] 张健,聂璋义,李萌. 负压(真空)排水流体摩擦阻力的计算分析与探讨[J]. 中国给水排水,2012,28(24):14-17.

Zhang Jian, Nie Zhangyi, Li Meng. Analysis and discussion on calculation of fluid friction resistance in negative pressure (vacuum) drainage system[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(24):14-17(in Chinese).

- [5] CECS 316:2012,室外真空排水系统工程技术规程[S]. 北京:中国计划出版社,2012.

CECS 316:2012, Technical Specification for Outdoor Vacuum Sewage System Engineering[S]. Beijing: China Planning Press,2012(in Chinese).



作者简介:赫明水(1978-),男,黑龙江伊春人,本科,高级工程师,主要从事给排水工程设计工作。

E-mail:25859237@qq.com

收稿日期:2020-07-01

贯彻执行《中华人民共和国水法》