

污水管气囊封堵清淤一体化施工技术研究与应用

许莹

(广东省建筑工程机械施工有限公司, 广东 广州 510500)

摘要: 针对传统封堵技术效率低且无法同步清淤的问题, 提出一种气囊封堵清淤一体化施工技术, 旨在解决城市管网改造中高动态排水、淤积与内涝等难题。通过缩比模型试验, 研究气囊在水压梯度下的变形特性与失效机制, 结合管道沉积物分布特征, 构建气囊内压动态调控模型。结果表明: 当气囊内压等于扣除沉积物厚度后的满管流水压时, 可有效实现封堵; 上游水位超限时触发底部泄流, 避免内涝; 施工后期增压蓄水并释放气囊, 利用水力冲刷实现清淤, 清淤率达90%以上。该技术应用于广州城中村管网改造工程后, 单点封堵效率提升40%, 施工成本降低32%, 工期缩短30%, 且水力冲刷替代机械清淤可降低能耗65%。研究证实, 精准调控气囊内压是封堵-泄压-清淤一体化的核心, 为城市排水系统改造提供了高效、低碳的创新解决方案。

关键词: 气囊封堵; 清淤; 一体化施工; 合流制管道; 水力冲刷; 动态调控; 管网改造

中图分类号: TU992.05

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0346-04

Research and Application of Integrated Construction Technology for Airbag Blocking and Dredging of Sewage Pipes

XU Ying

(Guangdong Architectural Engineering Machinery Construction Co., Ltd., Guangzhou 510500, China)

Abstract: Aiming at the low efficiency of traditional blocking technology and the inability to clear silt simultaneously, an integrated construction technology of airbag blocking and dredging is proposed to solve the problems of high dynamic drainage, silting and waterlogging in the reconstruction of urban pipe network. Through the scaling model test, the deformation characteristics and failure mechanism of the airbag under water pressure gradient are studied. Combined with the distribution characteristics of pipeline sediment, the dynamic control model of the internal pressure of the airbag is established. The results show that when the internal pressure of the airbag is equal to the full pipe flow pressure after deducting the sediment thickness, the blocking can be effectively achieved. When the upper water level exceeds the limit, the bottom discharge is triggered to avoid waterlogging. At the later stage of construction, the water is pressurized and the airbag is released. The dredging is achieved by hydraulic scouring, with a dredging rate of over 90%. After the application of this technology in Guangzhou Village-in-City Pipeline Network Reconstruction Project, the single-point blocking efficiency can be increased by 40%, the construction cost reduced by 32%, the construction period shortened by 30%, and the hydraulic scouring instead of mechanical dredging can reduce energy consumption by 65%. The research confirms that the precise control of the internal pressure of the airbag is the core of the integration of blocking, pressure relief and dredging, which provides an efficient and low-carbon innovative solution for the reconstruction of urban drainage system.

Keywords: airbag blocking; dredging; integrated construction; combined system pipe; hydraulic scour; dynamic control; pipe network reconstruction

0 引言

气囊与管道内壁之间的摩擦阻力能够实现对管道介质的封堵^[1-3], 气囊封堵技术被广泛应用于管道、隧道等施工作业辅助或抢险应急等情况^[4-6]。与其他封堵技术相比, 气囊封堵技术安装方便、施工速

度快^[7], 并且能够循环利用, 有效节约施工成本和工期^[7-8]。因而, 气囊封堵技术的应用主要分为两种, 一种是用于矿井、隧道灾变的紧急封堵^[9], 主要利用了气囊封堵技术的迅速, 为灾变应急争取时间^[10-11]; 另一应用领域为施工辅助作业, 主要集中于混凝土结构加工辅助^[12]和市政管道的修复与更新, 利用气囊施工的便捷特性。但是, 气囊封堵施作前, 需要对上游来水进行改排, 临时封堵时间不超过5 h。这就大大局限了气囊封堵技术在排水压力较大的城市管

收稿日期: 2025-02-26

作者简介: 许莹(1992—), 女, 硕士, 从事市政路桥工程施工工作。

网升级改造中的应用,尤其对于华南等雨水充沛地区,老旧管道多为合流制,水流流速大,水流量变化大,改迁麻烦^[13],上游迅猛来水不仅对管道封堵设施产生较大压力,还容易导排不及时,产生内涝灾害,并且,淤积物情况复杂,潜水摸查,采用传统封堵技术施作过程中安全隐患多,效率低。另外,对于老旧管道,还需考虑疏通清淤问题,避免污水管网体系的某个环节出现问题,产生的连锁反应^[14-15],进而影响污水管网改造项目工程的截污工程效果。

为进一步发挥气囊封堵技术的优势,本文在已有研究成果的基础上,结合城市管网升级改造工程的窘境,通过缩比模型试验,研究气囊在水压作用下的变形特性和封堵失效机制,综合考虑管道清淤的需求,革新优化传统气囊封堵技术,开发污水管气囊封堵清淤一体化施工技术,为华南地区城中村管道升级工程顺利开展奠定基础。

1 气囊封堵清淤一体化施工技术研究

1.1 气囊封堵原理分析研究

针对气囊封堵技术,建立模型进行分析研究,研究气囊在水压作用下的变形特性和封堵失效机制。假定管道断面为圆形,忽略气囊材料在拉力作用下的延展性及气囊自重,进行缩比模型试验^[16],得到在水压不断增大情况下气囊状态变化过程,见图1。

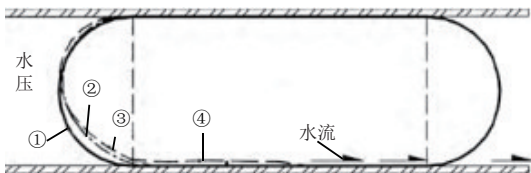


图1 试验过程气囊变化示意图^[16]

气囊充气膨胀初始状态如①;气囊左端水压逐渐增大,但管底水压仍小于气囊内压时,气囊左端下部受压最大,最薄弱,气囊有上移趋势,水从气囊底部缓慢浸入,气囊右端有滴水,但没有形成贯通水流,气囊依然紧贴管道内壁,如图状态②;当水压继续增大至等于气囊内压时,气囊左端曲线底部与直线段相切,达到变形极限状态,如图状态③,此时为气囊堵水临界状态;当水压继续增大,并且大于气囊内压时,气囊底部形成贯通水流,堵水失效,如图状态④。

1.2 气囊封堵-泄流模式切换的构想与研讨

基于上述模拟试验,若假设管道内水流刚好充满整个管道断面,只要控制气囊内压比气囊底部水压大,并且使气囊充气膨胀至与管道内壁紧贴,就能

够实现封堵效果。污水管道中的水流量时刻变化,且为非满管流,设计充满度一般为0.7,当气囊内压等于满管流管道底部水压力时,气囊能够有效堵水。

当遇到下雨或封堵时间过长,上游来水积存到一定程度时,即被封堵的管道中水压增大,直至管底水压大于气囊内压时,气囊底部泄压,形成流水,产生泄流,实现气囊的封堵-泄流模式切换。但在实际施工中,污水管道中还存在沉积物,沉积物状态和分类见图2^[14]。考虑管道沉积物后,实际的污水管道充满水的时候,管底压力小于纯水时的压力。为了发挥气囊封堵自泄排水模式的切换,使实际应用过程更贴近模拟试验过程,在进行CCTV摸查管道时,需要充分了解管道沉积物的平均厚度,在计算满水管底内压时需要扣除沉积物厚度。

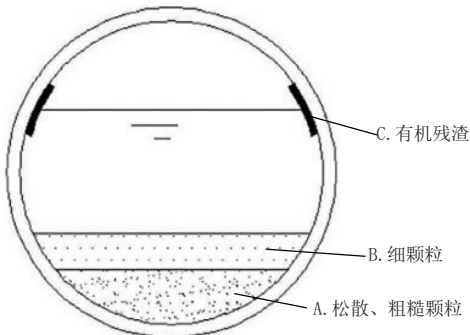


图2 管道沉积物示意图

综上,通过灵活控制气囊内压,能够调整气囊的工作模式,使其发挥不同的作用,实现气囊的封堵-泄流模式切换。为此,需要构建更贴合实际的模型,用以验证气囊工作模式切换的条件。

1.3 气囊内压动态调控模型的分析与验证

本研究通过构建气囊-水压-沉积物耦合模型,见式(1),揭示了封堵失效临界条件:

$$P_{cr} = \frac{\rho g H - \mu \varepsilon}{1 + \beta \Delta t} \tag{1}$$

式中: ρ 为流体密度; μ 为沉积物摩擦系数; β 为气囊形变速率因子。缩比试验表明,当实际水压 P_{water} 不小于 $1.2 P_{cr}$ 时,气囊底部泄流触发,与理论值误差小于5%。

利用气囊封堵-泄流模式切换的原理,可用气囊既实现管道的封堵,又能在需要的时候令气囊实现自动泄流效果,防止上游水满外溢。同时,考虑到管道施工后还需要清淤,气囊封堵管道之时可蓄水,泄流过程可对管道产生一定的冲刷。

1.4 封堵清淤一体化施工技术研发

根据上述模型与原理的研究,构建气囊封堵清

淤一体化施工技术框架:

(1)摸查沉积物情况,控制气囊充气内压等于管道内扣除沉积物厚度后满管流时管底的水力压力大小,气囊充气封堵管道。当上游管道来水积存到一定程度,或突遇降雨,使上游管道水位迅速上涨时,管道底部水压大于气囊内压时,气囊封堵失效,积水能够从气囊底部泄流,使气囊自动实现上游来水降压,及时排除上游来水,再用抽水设备从工作井中把泄流出来的积水抽排出去,避免上游来水积存而导致内涝灾害,同时无需对上游污水进行改排,有效增长气囊封堵时间。

(2)综合考虑工作井中新旧结构连通接入施工的进度,在临近恢复旧管道前,提前增大气囊内压,使其远大于管道底部水压大小,即使气囊自泄功能失效实现完全封堵,使上游水位升高,充分利用上游管段和检查井等构筑物的蓄水能力。当蓄水达到一定程度,并且工作井内施工完成且撤场后,使气囊迅速排气,利用上游水压将气囊推出管道回收,并通过上游蓄水的压力,增大水流对管道沉积物的冲刷能力,实现水力冲刷清淤的目的,再把冲刷出来的沉积物抽排出井。

通过灵活控制气囊内压为管道断面满流时管底水压大小,使气囊在满足封堵工艺要求的情况下,还能适应老旧管道排水压力大的情况,无需停运或对上游来水进行改道或提前抽排,满流即自动泄水。再结合井室作业进度,提前增大气囊内压使上游管段蓄水,在井室作业完成后,迅速回收气囊,实现管道的水力冲刷疏通清淤,使一套气囊装备满足封堵、清淤的一体化施工。

2 气囊封堵清淤一体化技术应用效果与经济性分析

2.1 施工应用效果

气囊封堵清淤一体化施工技术首次成功应用于广州市多个城中村污水治理工程。其中,某项目新建成两大污水管网的污水管道总长度共为 801 490 m (包含不同管径的污水管道),平均每个管道口封堵生效耗时 3.25 h,提高了施工效率,亦无需对上游来水进行改道或抽排而增加相邻管道的排水压力。结合井室施工作业工期,增加气囊内压,使上游管段蓄水,利用上游水体压力回收气囊,对管道冲刷,实现一套气囊装备达到多个施工目的的一体化施工技术,满足城中村条件下截污工程的施工要求,施工便

捷高效。

2.2 经济分析

相较于常规的砌墙封堵施工和绞车清淤,气囊封堵清淤一体化施工技术单点封堵效率提升 40%,施工成本降低 32%。一体化技术减少设备投入,工期缩短 30%。水力冲刷替代机械清淤可降低能耗 65%,经济性与环保效益显著。

3 结 语

本研究通过缩比模型试验与工程实践,系统探究了气囊封堵清淤一体化技术的核心机理与应用效果,得出以下结论:

(1)基于气囊封堵失效机制与管道沉积物分布特征,提出了气囊内压动态调控模型。通过精准控制气囊内压为满管流水压(扣除沉积物厚度),可在非满管流条件下实现稳定封堵;当上游水位超限时,降低内压触发底部泄流,有效避免内涝风险;施工后期增压蓄水,利用水力冲刷实现清淤,清淤率达 90%以上,形成“封堵-泄压-清淤”一体化技术闭环。

(2)该技术成功应用于广州城中村管网改造工程,单点封堵效率提升 40%,施工成本降低 32%。与传统砌墙封堵及绞车清淤工艺相比,一体化技术减少设备投入,工期缩短 30%,水力冲刷替代机械清淤可降低能耗 65%,经济性与环保效益显著。

(3)通过灵活调控气囊内压,该技术无需对上游来水改排或停运,适应高动态排水管网复杂工况,解决了老旧合流制管道升级改造中的淤积与内涝难题,为城市排水系统高效低碳改造提供了创新解决方案。

综上,气囊封堵清淤一体化技术兼具理论创新性与工程实用性,可显著提升施工效率、降低成本并降低环境负荷,具有广泛的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 曾强. 管道封堵气囊在管道检修中的应用[J]. 水利建设与管理, 2015, 35(9): 176-177.
- [2] 许恒涛. 浅谈堵水气囊在市政排水中的应用[J]. 中国设备工程, 2021(20): 237-238.
- [3] 韩传军, 费一栗, 张芹芹, 等. 管道封堵气囊结构与密封性能研究[J]. 润滑与密封, 2023, 48(2): 123-128.
- [4] 江庆海. 地下管道施工及疏通维修工程气囊封堵施工技术[J]. 黑龙江科技信息, 2013(22): 258.
- [5] 宋启广. 膨胀气囊内注浆法应急封堵井筒技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [6] 刘光明. 组合封堵气囊治理回风隅角瓦斯技术[J]. 陕西煤炭, 2024, 43(7): 43-48.

[7] 龙桂华,汤志明,杨山青,等.高水头、大直径污水管道气囊封堵及地面塌陷快速修复技术探讨[J].建筑施工,2022,44(2):356-359.

[8] 童天海,杜庆梅,张建斌,等.市政污水管道气囊封堵施工技术[J].安装,2019(12):47-49.

[9] 陈静,闫澍旺,钟晓凯.隧道中封堵气囊在外压作用下工作机理的有限元研究[J].现代隧道技术,2021,58(2):135-144;181.

[10] 王悦,荆亚东,李峰,等.矿井灾变时期气囊密闭技术的研究与优化[J].煤炭技术,2024,43(6):178-182.

[11] 李小冬,杨启,胡勇.气囊封堵在水利工程中的应用现状及发展趋势[J].中国水运,2023(4):83-85.

[12] 胡贺松,唐孟雄,周治国,等.随钻跟管桩侧注浆气囊封堵工艺模型试验研究[J].广州建筑,2025,53(1):8-13.

[13] 冯慧,胡健健,郭伟河,等.大型污水新旧管网接驳井施工技术应用与研究[J].广州建筑,2023,51(2):84-87.

[14] 刘志长.合流制排水管道沉积物的沉积状况及控制技术研究[D].长沙:湖南大学,2011.

[15] 刘腾飞,陆斌,王逊,等.水下盲区管道封堵技术研究[J].中国环保产业,2023(2):62-66.

[16] 陈静,闫澍旺,孙立强,等.不同直径匹配度封堵气囊的工作机理和试验验证[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(6):130-137.

(上接第 345 页)

研究[J].交通科技与管理,2024,5(23):55-57.

[7] 周晨.浅谈钢板桩围堰在实际施工过程中的应用[J].城市道桥与防洪,2015(8):160-162.

[8] 周广忠.水利工程围堰施工技术研究[J].河南科技,2025(3):55-58.

[9] 夏成,张世伟.一种不良地质条件深埋式承台组合围堰设计和施工技术[J].建筑机械,2025(2):55-60.

[10] 王晓雨.淤泥地质层条件下的水中墩承台深基坑施工技术[J].交通世界,2024(7):145-147.

[11] 刁洋洋.河道工程施工围堰技术与实施要点分析[J].科技创新与应用,2024(11):181-184.

[12] JGJ 120—2012,建筑基坑支护技术规程[S].

[13] 张率兵.深水桥墩钢板桩围堰施工技术分析[J].运输经理世界,2024(11):100-102.

[14] GB/T51295—2018,钢围堰工程技术标准[S].

[15] 毛耀延.江山双龙大桥钢结构主墩承台围堰设计研究[J].中国水运,2025(1):98-100.

[16] 谢德宽,江晓阳,赵文龙,等.深厚淤泥夹层索塔承台围堰方案比选与优化[J].施工技术(中英文),2025(3):1-8.

[17] 罗安邦,陈睿基,李晓敏.河道筑岛拉森钢板桩围堰设计与施工关键技术[J].西部交通科技,2024(4):112-115.