

泥水盾构工程尾水处理利用技术研究综述

龙浩宇¹, 钱勇进², 杨亦文²

¹河海大学里尔学院, 江苏 南京

²河海大学土木与交通学院, 江苏 南京

收稿日期: 2025年6月18日; 录用日期: 2025年8月25日; 发布日期: 2025年9月4日

摘要

泥水盾构掘进过程中产生大量的废弃泥浆, 废弃泥浆的处理过程中减量化处理后产生大量尾水。在工程施工环保化要求下, 对泥水盾构尾水处理利用技术进行分析及总结具有重要的意义。从泥水盾构尾水的分类及基本性质出发, 按产生方式将盾构尾水分为含石灰尾水、含絮凝剂尾水和掺入地下盐水或海水的尾水3种类型, 重点分析了三类盾构尾水的主要性质。认为盾构尾水的处理核心为无害化, 其主要处理方法有自然沉淀分解处理、化学中和处理、反渗透膜处理等, 目前最常用的仍是自然沉淀分解处理和化学中和处理。盾构尾水利用的主要方式有盾构泥浆用水、场地清洁及抑尘用水、胶凝材料养护用水等。目前泥水盾构尾水的处理利用主要存在产生量大且处理效率低、处理后的尾水利用难、尾水处理的新技术少等问题, 未来我国的盾构尾水处理利用仍有较大的研究及发展空间。

关键词

泥水盾构, 泥浆, 盾构尾水, 处理, 利用

Review of Tailwater Treatment and Utilization Technologies in Slurry-Shield Tunneling

Haoyu Long¹, Yongjin Qian², Yiwen Yang²

¹Institut Hohai-Lille, Hohai University, Nanjing Jiangsu

²College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu

Received: Jun. 18th, 2025; accepted: Aug. 25th, 2025; published: Sep. 4th, 2025

Abstract

In slurry-shield tunneling, large volumes of waste slurry are generated, and the volume-reduction treatment of this waste slurry produces substantial amounts of tailwater. Given the stringent

environmental protection requirements in construction projects, analyzing and summarizing the technologies for treating and utilizing slurry-shield tailwater is highly important. Based on their generation mechanisms, tailwater from slurry-shield tunneling can be classified into three types: lime-containing tailwater, flocculant-containing tailwater, and tailwater mixed with underground brine or seawater. The main properties of each type are analyzed. The core objective of tailwater treatment is to render the tailwater harmless. The primary treatment methods include natural sedimentation (with decomposition), chemical neutralization, and reverse osmosis (RO) membrane treatment. Currently, natural sedimentation and chemical neutralization remain the most commonly used methods. Treated tailwater can be reused in several ways, including recycling it as slurry makeup water for the shield machine, using it for site cleaning and dust suppression, and employing it for curing cementitious materials. However, current tailwater treatment and utilization face challenges such as the large volume generated, low treatment efficiency, difficulty in reusing the treated tailwater, and a lack of innovative treatment technologies. Therefore, significant research and development efforts remain necessary in China to improve tailwater treatment and utilization in slurry-shield tunneling.

Keywords

Slurry-Shield Tunneling, Slurry, Shield Tailwater, Treatment, Utilization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着我国城市地铁及水下隧道建设规模不断扩张,泥水盾构工法被广泛应用,泥浆加压向地层渗透形成微透水泥膜平衡开挖面上的土水压力。泥水盾构技术作为隧道工程的重要施工方法,在工程建设中发挥着不可替代的作用。其发展历程可追溯至 19 世纪末,早期泥水盾构技术主要依赖于简单的机械结构和基础的泥浆循环系统。随着 20 世纪中期材料科学等技术的发展,泥水盾构技术迎来了重要突破,不仅提高了施工效率和质量,还减少了对周围环境的影响。然而泥水盾构在掘进过程中会产生大量高含水率的废弃泥浆和渣土,常用絮凝沉淀、机械脱水等方法处理。处理后不可避免地产生大量泥浆滤液(盾构尾水),其性质复杂,工程面临较大的处理和排放压力。在工程施工低碳环保化的背景下,盾构尾水如何高效地处理及利用已成为目前工程中需要解决的重要难题。本文针对盾构尾水的处理利用难的问题,首先阐述了盾构尾水的分类及性质,对目前盾构尾水的处理及利用技术进行总结分析,并指出盾构尾水处理及利用的问题,为后续盾构尾水的研究提供一定的思考。

2. 泥水盾构尾水产生及性质

2.1. 盾构尾水的产生

“尾水”这一词源最早出现在 19 世纪英国工业革命时期,初期表述为“tail race”,指水轮机排水通道。随着工业的发展尾水一词已从单纯的水工学术语扩展到涉及水利科学、环境科学、矿业科学等多专业跨学科的常用名词。尾水按其产生途径可以分为养殖尾水、生活尾水、矿产尾水和工程尾水等。

在我国,泥水盾构技术在水下隧道工程中应用广泛并取得了显著成就(图 1),尤其是在长距离、大直径隧道建设中展现了其独特优势。以南京长江隧道为例[1]-[3],该隧道是我国长江上首条采用泥水盾构技术建设的大型水下隧道,全长约 3.9 公里,盾构直径达 14.93 米。工程成功克服了复杂的地质条件和高水

压挑战。上海长江隧道[4]-[6]作为我国典型大直径盾构隧道，全长 8.95 公里，盾构直径达 15.43 米，采用泥水盾构技术成功克服了长距离软土地基和高水压等掘进难题。广深港高铁狮子洋隧道[7]是我国首条水下铁路隧道，全长 10.8 公里，采用泥水盾构技术成功穿越珠江口复杂的地质环境[8]。随着泥水盾构开挖直径越来越大，距离越来越长，盾构尾水产量非常大，大规模、持续性的尾水产生对工程施工组织提出了严峻挑战，若不及时对尾水进行处理处置，其会占用大量土地，因此尾水的合规处理处置成为制约工程进度的关键因素之一。

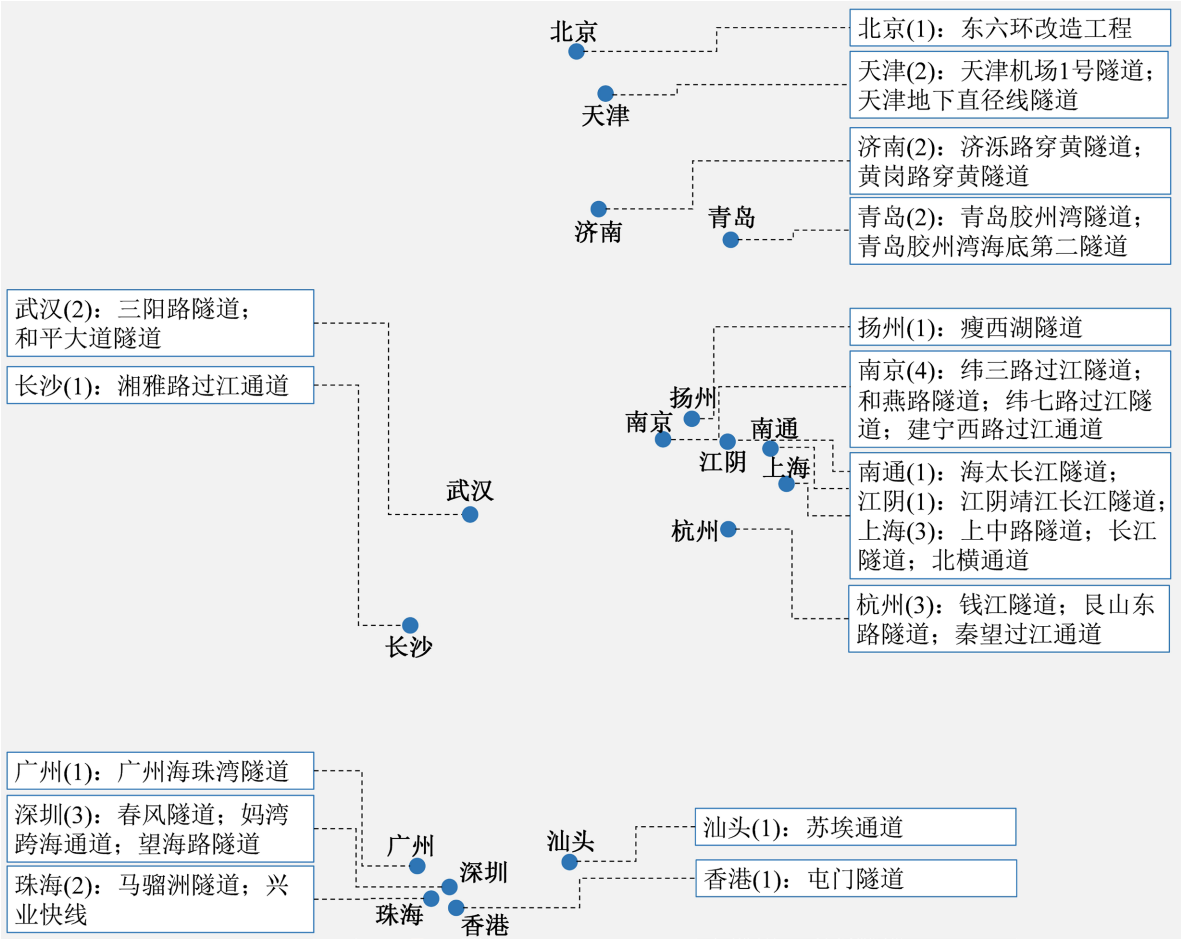


Figure 1. Distribution of underwater tunnels constructed by the slurry shield method in China

图 1. 我国典型泥水盾构工法修建的水下隧道分布图

2.2. 盾构尾水的分类

由于盾构尾水是泥浆处理后的产物，不同地质情况的差异以及泥浆处理方式的不同，使得盾构尾水的成分及性质存在较明显的差异。根据部分泥水盾构工程泥浆处理后尾水现场取样分析(图 2)，盾构尾水按照地下水的差异及泥浆脱水处理方式的不同，可以较笼统地分为三类：含石灰尾水、含絮凝剂尾水和掺入地下盐水或海水的尾水。

2.2.1. 含石灰尾水

含石灰尾水是由盾构掘进产生的废弃泥浆经机械脱水后产生。废弃泥浆的初始含水率可达 150%~250%，为实现废浆的减量脱水，工程上通常先掺入一定量的石灰(CaO)作为调理剂，CaO 的添加改

善了泥浆脱水性能，最终产出含水率小于 40%的泥饼和大量含石灰的尾水[9]。

2.2.2. 含絮凝剂尾水

含絮凝剂尾水是由废弃泥浆经过离心机离心脱水后产生。盾构掘进产生的高含水率废弃泥浆需经过三级处理流程：初级筛分、化学絮凝及离心脱水[10]。在离心脱水前，常在废浆中加入絮凝剂(PAM, PAC)使泥浆絮凝成团，提升脱水效率，而高分子的絮凝剂会通过长链结构的架桥作用连接带负电的黏土颗粒，以溶解态或胶体态进入到尾水当中。

2.2.3. 渗入地下盐水或海水的尾水

盾构隧道在掘进的过程中，地层中的地下水会沿开挖面渗入到盾构泥水舱的泥浆中，一些地区的地下水含大量的盐离子及阴离子如 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} ，在穿越特殊地层时还会掺入微量重金属，如 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 等。在沿海地区或跨海隧道掘进中，海水也会混入泥浆[11]，因而泥浆处理后产生的尾水中会掺入盐离子。

2.3. 盾构尾水的性质

常见的尾水性质评价主要有尾水的 pH 值、悬浮物浓度(吸光度)、化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)、离子浓度、盐分含量等指标。图 2 为笔者在天津及青岛等地进行盾构尾水相关测试，详细试验步骤参考罗国兵[12]、李国刚[13]等的研究。盾构尾水由于其复杂性不仅在其化学成分多样上，还体现在其物理性质的差异性上，因处理方法的不同而存在显著差异。对笔者所取不同来源的盾构尾水产生原因进行整理，并对其 pH、离子浓度等指标进行测试，结果如表 1 所示。



Figure 2. Property test of the tail water
图 2. 尾水性质测试

对于含石灰尾水，其主要特点是呈现典型的强碱性特征(表 1)，pH 值多分布于 11.5~12.8 区间，溶解性 Ca^{2+} 浓度较高。高 pH 尾水直接排放将破坏水体的酸碱平衡，对后续的处理利用产生较大的影响。而对于含絮凝剂尾水，其残留 PAM 浓度可达几十至几百 mg/L。该类尾水可能破坏土壤微团聚体结构[14]。对于渗入地下水和海水的尾水，其中的离子成分和海水中的盐分会影响水的酸碱度等性质，不宜直接排放

处置，需要采取相应的措施处理后排放或利用。

Table 1. Properties of the tail water
表 1. 尾水性质

尾水类型	产生原因	性质特点
含石灰尾水	废弃泥浆脱水过程中加入石灰作为调理剂	pH 高(11~13) Ca ²⁺ 浓度高(800~1500 mg/L)
含絮凝剂尾水	废弃泥浆脱水过程中加入絮凝剂来提高脱水效率	絮凝剂残留(APAM, CPAM)
渗入地下水/海水尾水	地层中地下水/海水沿地层开挖面孔隙渗入	阴离子(Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻)、 金属离子等渗入(Fe ²⁺ , Mn ²⁺ , Zn ²⁺)

3. 泥水盾构尾水的处理与利用

3.1. 盾构尾水的处理

盾构工程中废弃泥浆处理技术的核心目标为减量化，而尾水的处理核心在于无害化，通过对尾水的基本性质的分析，借助一定的处理方法对其进行无害化处理后进行资源化利用，满足环保及经济性需求。目前常见的尾水处理按机理大致可分为三类：(1) 自然沉淀分解处理：依托日晒及重力作用在尾水池内实现尾水中部分颗粒沉积及有害物质的分解，期间也伴随着大量水分的蒸发，这种方式具有成本低廉优势的优点，但也存在尾水中颗粒沉淀及有害物质分解时间周期长的缺点；(2) 化学中和处理：通过掺入一定量的中和药剂调节尾水中的 pH，同时使尾水中金属离子及盐离子沉淀，该方法适用于污染物浓度较高的尾水，但存在使用药剂量较大的缺点；(3) 反渗透膜处理：借鉴了海水淡化方面的技术，采用半渗透膜将尾水中的盐离子及重金属离子等溶质截留下来，仅过滤出淡水溶剂，该技术能够有效解决自然沉淀处理周期长及化学中和药剂量大等问题，具有处理量大，处理效率高的优点。针对大量性质复杂的盾构尾水，其无害化处理再利用亟需开展大量的研究[14]-[16]。

3.2. 盾构尾水的利用

随着泥水盾构技术在城市地下工程中的广泛应用，盾构尾水的资源化利用开始成为行业绿色施工转型的关注点。目前，国内外工程实践中已逐步探索尾水回收利用技术，但系统化、标准化、规范化的应用仍面临一些挑战。

3.2.1. 泥浆用水

针对尾水排放量大与泥水盾构配制掘进泥浆淡水消耗量大的问题，若能将尾水资源化利用用于泥浆配制，既可显著降低生产成本，又能实现水资源的循环利用，产生可观的环境经济效益。以济南市某穿黄隧道工程为例，项目采用“提浓压滤”技术，利用密度差的原理，实现盾构尾水的固液分离，尾水回用率达 100%，循环浆液调制效率提升 50% [17]。但其大规模推广仍受限于尾水中残留化学物质对泥浆影响。

3.2.2. 其他工程用水

除了做泥浆用水，参考其他领域尾水利用的经验，基于尾水几乎无污染的原理，盾构尾水在工程中其他用水方面具有多种潜在用途。首先，盾构工程中混凝土养护及现场场地清洁需要大量的用水，经过适当处理后，盾构尾水不仅能做混凝土养护用水，同时可用于施工现场场地的清洁及抑尘洒水。其次，现场有大量的工程设备需要用水冷却或清洁以维持机械的正常运转，若尾水化学物质较少可进一步作为工程中普通机械的冷却用水或清洁用水[18]。

4. 泥水盾构尾水处理及利用的问题与思考

4.1. 盾构尾水的产生及处理量大

目前国内越来越多地在建设中泥水盾构工程产生大量的盾构尾水,随着人们环保意识的提高,待处理的尾水量越来越多。尤其是在沿海地区及地下水丰富的地区,随着泥水盾构不断掘进,产生的待处理的盾构尾水量越来越大,若不对这些尾水进行处理,会对周边的环境及地下水造成一定的影响。如何在盾构泥浆处理过程中减少尾水的产生,盾构尾水如何高效处理,是一个急需解决的问题。目前急需在泥浆处理设备的自动化、智能化及大规模化方面进行发展和升级。

4.2. 盾构尾水的利用困难

由于盾构尾水的性质较为复杂,当前工程实践中,尾水利用技术的难点主要体现在以下两方面:一是尾水回用配制盾构泥浆的适用机制不明确,以广州某机场工程为例,但尾水配制的泥浆在断裂带地层无法快速成膜。二是尾水中残留添加剂(如石灰)的长效作用机理研究滞后[19]。目前针对盾构尾水的使用量、利用方式等方面的研究还相对较少,在进行大规模应用还存在许多的问题需要解决。建议尽快建立泥浆尾水利用的规范或导则,进一步提高尾水的利用途径及效率。

4.3. 尾水处理新技术少

虽然有部分泥水盾构工程针对其尾水性质特点进行了处理利用尝试,取得了一定研究和实践成果,但这些处理技术推广使用难度较大。在养殖尾水、矿产尾水以及海水淡化方面的处理技术能否应用到盾构尾水处理中,目前多处在试验阶段。仍需不断尝试在盾构尾水处理使用新技术,并不断推广到大范围的工程应用中[20]。基于此建议政府能够制定尾水资源化利用相关的政策,鼓励企业对尾水的资源化利用进行深入研究。

5. 结语

(1) 泥水盾构工程中产生的尾水量非常大,盾构尾水受到地下水及泥浆处理的影响,其性质复杂,差异性显著,按照泥浆处理方式进行分类,可将盾构尾水分为:含石灰尾水、含絮凝剂尾水和掺入地下盐水或海水的尾水。含石灰尾水 pH 达 12 以上,钙离子浓度可达 1500 mg/L;含絮凝剂尾水中絮凝剂浓度达几百 mg/L;掺入地下盐水或海水的尾水含有大量的金属离子及盐离子。

(2) 盾构尾水的处理核心在于无害化,其主要处理方法有自然沉淀分解处理、化学中和处理、反渗透膜处理等,目前最常用的仍是自然沉淀分解处理和化学中和处理。盾构尾水利用的主要方式有盾构泥浆用水、场地清洁及抑尘用水、材料养护用水等,目前最常利用的方式仍是盾构泥浆用水。

(3) 目前盾构尾水处理利用存在的主要问题有产生量大且处理效率低、处理后的尾水利用难、尾水处理的新技术少等,同时盾构尾水的处理利用缺乏统一的规范或标准进行指导,未来我国的盾构尾水处理利用仍有较大的研究及发展空间。

基金项目

本文作者感谢国家自然科学基金(No. 52078189)对研究的支持。

参考文献

- [1] 郭信君, 闵凡路, 钟小春, 等. 南京长江隧道工程难点分析及关键技术总结[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 2154-2160.
- [2] 张智博. 南京长江隧道大型泥水盾构施工风险分析及对策[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(6): 65-69.

- [3] 许满吉. 南京长江隧道泥浆处理技术分析[J]. 铁道建筑技术, 2012(11): 70-72.
- [4] 黄宏伟, 彭铭, 胡群芳. 上海长江隧道工程风险评估研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 182-187.
- [5] 原华, 张庆贺, 胡向东, 等. 大直径越江盾构隧道各向异性渗流应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(10): 2130-2137.
- [6] 余暄平, 沈永东, 凌宇峰, 等. 上海长江隧道工程盾构施工技术[J]. 上海建设科技, 2007(4): 47-50+53.
- [7] 肖明清, 姚捷, 黄盾, 等. 广深港高铁狮子洋隧道列车所致环境振动实测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3527-3534.
- [8] 陈馈, 冯欢欢. 武汉三阳路公铁合建超大直径盾构隧道设计方案研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(4): 168-177.
- [9] Wang, Z., Ding, W., Zhu, Z., Liu, R., Wang, C., Yu, W., *et al.* (2022) Experimental Study on Rheological Behaviors of Na-Bentonite Slurries under Seawater Intrusion. *Construction and Building Materials*, **357**, Article 129369. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129369>
- [10] 张亚洲, 夏鹏举, 魏代伟, 等. 南京纬三路过江通道泥水处理及全线路废弃土再利用技术[J]. 隧道建设, 2015, 35(11): 1229-1233.
- [11] Qin, S., Zhou, W.H. and Xu, T. (2023) Effects of Seawater on the Infiltration Behavior of Bentonite Slurry into Sand. *Construction and Building Materials*, **371**, Article 130759. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130759>
- [12] 罗国兵. 水体化学需氧量的检测方法[J]. 岩矿测试, 2013, 32(6): 860-874.
- [13] 李国刚, 王德龙. 生化需氧量(BOD)测定方法综述[J]. 中国环境监测, 2004(2): 54-57.
- [14] 张旭坡. 狐尾藻—微生物膜深度处理城镇污水厂尾水试验研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北科技大学, 2018.
- [15] 陈莉荣, 李玉梅, 杜明展. 改性粉煤灰吸附稀土废水中的氨氮[J]. 环境工程学报, 2013, 7(2): 518-522.
- [16] 黄海明, 晏波, 陈启华, 等. 化学沉淀法去除稀土废水中氨氮试验[J]. 环境化学, 2008(6): 775-778.
- [17] 秦方方. 济南市黄岗路穿黄隧道总体设计与关键技术[J]. 城市道桥与防洪, 2024(6): 138-144+20-21.
- [18] 苏清贵, 翟志国, 邓亨义. 泥水盾构施工废弃泥浆的环保处理技术[J]. 隧道建设, 2012, 32(S2): 222-226.
- [19] 梅振斌, 韩俊. 基于空铁联运背景的综合交通枢纽设计研究——以广州白云机场 T3 项目为例[C]//中国铁道学会, 西南交通大学, 中铁二院工程集团有限责任公司. 第三届中国铁路发展论坛学术论文集. 北京: 中国铁道出版社, 2022: 182-190.
- [20] Cui, W., Liu, D., Song, H.F., *et al.* (2020) Experimental Study of Salt-Resisting Slurry for Undersea Shield Tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **98**, Article 103322. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103322>