

# 高外水压力现场测试技术研究现状综述

刘云谦

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年9月8日; 录用日期: 2026年9月28日; 发布日期: 2026年10月10日

## 摘 要

高外水压力是深埋水工隧洞、海底隧道及富水山岭隧道设计和施工中的关键控制因素, 其现场测试结果直接影响衬砌水荷载取值、排水系统设计、注浆圈参数优化以及突涌水风险评估。近十年研究表明, 外水压力现场测试已由单点水压观测逐步发展为孔内分层监测、洞内衬砌背后水压监测、光纤传感、水力层析反演、排水系统性能监测和数值反馈分析相结合的综合技术体系。本文在梳理近十年国内外文献的基础上, 归纳高外水压力测试对象、测试方法、传感装备、模型试验与工程应用的研究进展, 比较不同技术的适用条件和局限性, 并讨论复杂地质体表征、多场耦合监测、传感器长期可靠性和监测数据深度利用等共性问题。综述认为, 未来高外水压力现场测试将向多源感知、三维反演、实时反馈和智能预警方向发展, 其核心不再是单纯获得水压力数值, 而是构建能够服务于设计校核、施工调整和运营安全管理的全过程测试-分析闭环。

## 关键词

高外水压力, 现场测试, 隧洞衬砌, 光纤传感, 水力层析反演

# A Review of Current Research on Field Testing Technologies for High External Water Pressure

Yunqian Liu

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: September 8, 2026; accepted: September 28, 2026; published: October 10, 2026

## Abstract

High external water pressure is a key controlling factor in the design and construction of deep-buried hydraulic tunnels, subsea tunnels, and water-rich mountain tunnels. Its field test results directly affect

文章引用: 刘云谦. 高外水压力现场测试技术研究现状综述[J]. 土木工程, 2026, 15(10): 1-7.  
DOI: 10.12677/hjce.2026.1510232

the determination of lining water loads, drainage system design, optimization of grouting ring parameters, and water-inrush risk assessment. Studies over the past decade show that field testing of external water pressure has gradually evolved from single-point water pressure observation into an integrated technical system combining multi-level borehole monitoring, measurement of water pressure behind the tunnel lining, fiber-optic sensing, hydraulic tomography inversion, drainage system performance monitoring, and numerical feedback analysis. Based on a review of domestic and international literature over the past decade, this paper summarizes research progress in testing objects, testing methods, sensing equipment, model tests, and engineering applications for high external water pressure, compares the applicability and limitations of different technologies, and discusses common issues such as the characterization of complex geological bodies, multi-field coupling monitoring, long-term sensor reliability, and in-depth utilization of monitoring data. This review concludes that future field testing of high external water pressure will develop toward multi-source sensing, three-dimensional inversion, real-time feedback, and intelligent early warning. Its core objective is no longer merely to obtain water pressure values, but to establish a full-process testing-analysis closed loop that can serve design verification, construction adjustment, and operational safety management.

## Keywords

High External Water Pressure, Field Testing, Tunnel Lining, Fiber-Optic Sensing, Hydraulic Tomography Inversion

Copyright © 2026 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

高外水压力通常指作用于地下工程结构外部、足以显著改变围岩渗流状态和衬砌受力状态的地下水压力。对于深埋水工隧洞、富水山岭隧道和海底隧道而言，外水压力不仅表现为衬砌外侧的静水荷载，还与围岩渗透性、补给边界、注浆圈质量、排水系统能力和开挖扰动引起的损伤演化共同作用。若外水压力被低估，可能导致衬砌开裂、仰拱上浮、渗漏和突涌水；若被过度估计，则可能造成结构设计过于保守，增加工程投资。因而，现场测试技术是连接水文地质认识、衬砌水荷载取值和施工运营风险控制的关键环节。

与一般地下水监测相比，高外水压力现场测试具有三个突出特点。第一，测试环境更极端，深埋或富水构造中常伴随高水头、高地应力、强渗流和高腐蚀性介质，对传感器量程、密封性、耐久性和数据稳定性提出更高要求。第二，测试对象不是单一水位或水压值，而是围岩-注浆圈-排水系统-衬砌共同构成的压力传递链。第三，测试结果需要服务于动态决策，即在设计、施工和运营阶段不断校核外水压力折减规律、排水衰减效应和结构安全储备。

近十年相关研究一方面沿着传统水压力确定、模型试验和水害预警方向深化，另一方面快速吸收光纤传感、水力层析、数值反演和机器学习等方法。本文将高外水压力现场测试研究划分为理论支撑与测试对象、直接水压测试、传感与分布式监测、水力层析与反演、模型试验和工程反馈、共性挑战与发展策略六个方面进行综述。

## 2. 国内外研究现状

### 2.1. 高外水压力测试的理论支撑与对象界定

高外水压力测试首先依赖于对压力形成机制的认识。外水压力并非简单等同于天然水头，而是在围

岩渗透性、注浆圈阻水能力、初期支护与二次衬砌渗透性、排水盲管通畅性以及运营期堵塞衰减共同作用下形成的有效水荷载。黄威等对深埋隧洞高外水压力研究进展进行了综述,指出高外水压力问题应从地质补给、围岩渗流、衬砌结构和排水条件的耦合关系中理解[1]。刘立鹏等针对高压富水地层水工隧洞提出了衬砌外水压力确定与应对方法,强调应将允许排放量、排水系统能力和衬砌结构安全统一考虑[2]。张振杰从高外水压作用下大埋深隧洞围岩稳定分析出发,进一步说明现场测试数据应同时服务于渗流场和应力场校核[3]。

在理论计算方面,近年来研究更加关注非圆形断面、深埋复杂边界、排水系统退化和防排水层设计对外水压力的影响。张志恩围绕高压富水隧道衬砌外水压力折减规律和施工缝抗水压能力开展研究,强调注浆圈、施工缝和排水孔布置是压力传递链中的关键环节[4]。王志杰等通过富水大断面公路隧道水压模型试验揭示了衬砌薄弱部位和水压作用下结构响应规律[5]。相关英文研究也从模型试验和非圆形断面理论解等角度补充了外水压力计算框架[6][7]。这些研究共同说明,现场测试不应只布设水压计,还要围绕计算模型中的关键不确定参数开展监测,包括围岩渗透系数、排水系统效率、注浆圈厚度和衬砌背后实际水压力。

## 2.2. 孔内与洞内水压力直接量测技术

直接量测仍是高外水压力现场测试的基础。常用方法包括地表深孔或洞内钻孔渗压计、封隔器分段水压测试、衬砌背后水压力计、排水孔流量-水压联合监测以及施工期水位恢复观测。其优点是物理意义清晰、工程人员容易解释,适用于初始水头确定、渗流边界识别和衬砌水荷载校核。杨跃辉等从测试系统柔度角度分析了水压致裂法确定最大水平主应力的误差,说明深孔高压测试必须重视测试系统本身对结果的影响[8]。Bao 等通过不同排水系统水力退化试验指出,排水能力衰减会显著提高衬砌水压力,说明现场测试需要长期跟踪排水系统状态,而不能仅依赖施工期初始观测[9]。

水压直接量测的主要局限在于空间代表性不足。深部岩体裂隙网络具有强非均质性,单孔或少量测点往往只能反映局部通道压力,难以刻画三维渗流场。同时,高压封隔、孔壁密封和长期传感器漂移会导致测试误差。陈军涛等和刘学伟等关于裂隙岩体注浆前后力学特性及影响因素的试验研究表明,裂隙数量、注浆质量和材料性质会改变渗流通道与结构承载能力[10][11]。因此,近年研究趋势是将直接压力测量与排水量、温度、应变、微震和数值反演联合使用,提高对压力空间分布和演化过程的识别能力。

## 2.3. 光纤传感与分布式监测技术

光纤传感技术是近年高外水压力现场测试的重要发展方向。分布式光纤传感可沿隧洞轴向连续获取应变、温度或振动信息,适合识别渗漏、衬砌开裂、排水系统异常和围岩变形。洪博诚等提出推挽式高灵敏 FBG 水压传感器,在水压测试灵敏度和温度补偿方面取得进展,为高压环境下的实时监测提供了新型无源方案[12]。Zhang 等对隧道分布式光纤传感监测进行了综述,指出其优势在于长距离、连续化和抗电磁干扰,但工程应用仍受传感光缆-结构界面耦合、数据解释和耐久性影响[13]。

对于水压力本身,光纤布拉格光栅(FBG)压力传感器具有无源、耐腐蚀、抗电磁干扰和可多点组网等优点。Xu 等综述了 FBG 压力传感器的结构形式和灵敏度提升策略[14]。不过,FBG 水压传感器在隧洞现场应用仍需解决封装耐久性、长期零漂、温度-压力交叉敏感、施工安装保护和与传统渗压计数据一致性等问题。因此,光纤传感更适合作为高外水压力测试体系中的连续感知层,与传统渗压计、排水量监测和结构应变监测共同使用。

## 2.4. 水力层析与多源反演技术

高外水压力现场测试的难点不仅在于测得压力值,还在于由有限测点反演三维渗流场。水力层析技

术通过多孔抽水、注水、周期扰动或 slug test 激发含水介质响应，并结合多点水头观测反演渗透系数和储水参数空间分布。Paradis 等研究了周期性水力层析信号对含水层参数分辨率的影响[15]，Nefzi 等进一步开展现场周期 slug test 水力层析试验，验证了该方法识别各向异性含水层参数的潜力[16]。虽然这些研究对象多为含水层而非隧洞围岩，但其思想对高外水压力测试具有直接启示：通过可控水力扰动和多点响应观测，可以由“点状监测”转向“场域反演”。

在隧洞工程中，水力层析可与超前钻孔、排水孔、泄水洞、压水试验和衬砌背后水压计结合，用于识别富水断裂、注浆圈缺陷和排水通道连通性。其工程化应用仍面临扰动源布置受限、施工噪声强、边界条件复杂和反演非唯一性等问题。因此，未来更可行的路线是将水力层析作为综合测试框架的一部分，与地质雷达、钻孔电视、微震、分布式光纤和数值模型联合，形成多源约束的压力场反演。

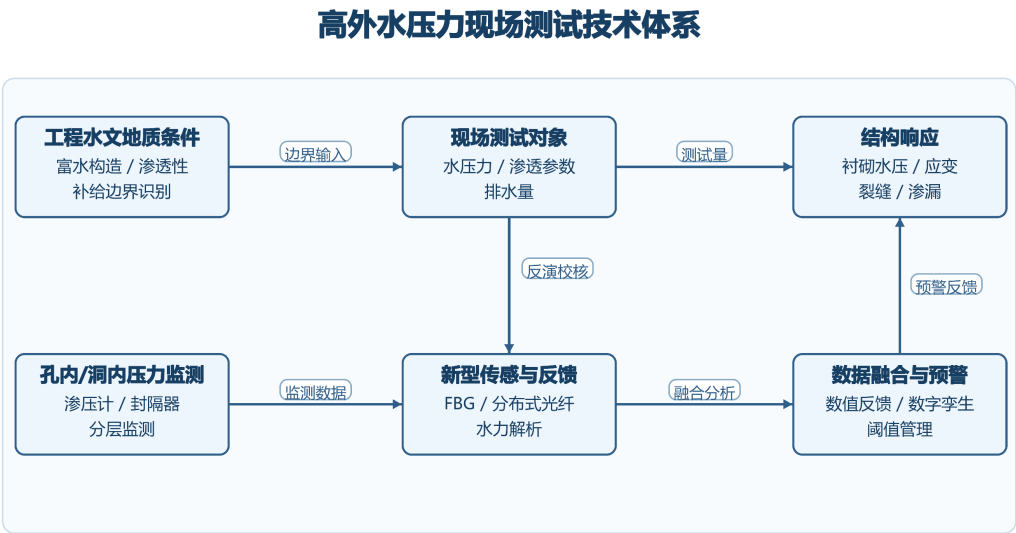
2.5. 模型试验、数值模拟与现场反馈

高外水压力现场测试通常无法覆盖全部工况，模型试验和数值模拟因此成为解释现场数据的重要工具。王志杰等的富水大断面公路隧道水压模型试验为衬砌薄弱部位判别提供了量化依据[5]。张振杰将物理模型、应力 - 非达西流耦合分析和工程应用相结合，说明高地应力与高渗压共同作用下围岩变形和衬砌渗压分布具有显著非线性[3]。Xue 等开展了断层穿越深埋隧道在水力 - 力学耦合条件下的开挖与支护地质力学模型试验，Wang 等针对深埋引水隧洞开展协同渗控地质力学模型试验，进一步从国际期刊角度补充了模型试验方法[17] [18]。

模型试验的价值在于提供可控边界下的机制认识，数值模拟则可将局部测试结果外推到全断面和全线范围。当前较有前景的方法是“现场测试 - 模型校正 - 设计反馈”：施工期通过孔压、排水量、衬砌应变和渗漏数据识别外水压力变化；数值模型据此修正渗透参数和边界条件；再将修正结果用于支护、排水和注浆方案调整。这一闭环可以降低单一经验折减系数的主观性，也能提高运营期风险预警的针对性。

2.6. 排水系统监测与水务预警应用

在实际工程中，高外水压力风险往往通过排水系统衰减、衬砌背后水压抬升、局部渗漏和突涌水表



注：图示根据近年文献归纳绘制，突出“测试-反演-反馈-预警”的现场测试闭环。

Figure 1. Schematic diagram of technical system of field testing for high external water pressure  
图 1. 高外水压力现场测试技术体系示意图

现出来。刘立鹏等提出的水工隧洞衬砌外水压力确定与应对措施，实质上强调了测试、排水控制和结构设计之间的联动关系[2]。近年中文工程文献[19]-[25]还从富水地层防渗、高水压注浆堵水、地质风险识别、长距离引水隧洞 TBM 风险控制、防排水系统病害、反坡排水和超前钻探等方面提供了大量工程经验。这些研究表明，外水压力现场测试需要从结构荷载测试扩展到水害过程监测，关注水压、流量、浊度、裂隙扩展和围岩变形的协同变化。

近年来，排水系统优化和智能预警研究也在增多。相关研究普遍认为，防排水系统的长期通畅性直接决定衬砌背后水压力恢复速度和运营期风险水平[23][24]。因此，现场测试不仅是获取参数的手段，也是检验防排水系统是否长期有效的依据。

综合上述研究，高外水压力现场测试已形成以工程水文地质条件为边界输入，以压力监测和新型传感为数据基础，并通过反演分析实现结构响应评估与预警反馈的技术体系，具体流程见图 1。

当前主要现场测试技术在测试对象、主要优势及适用条件方面的对比见表 1。可以看出，各方法并不存在绝对替代关系：直接水压量测提供基准值，光纤和结构监测提供连续响应，水力层析和数值反演提供空间解释，排水系统监测则面向运营安全。

**Table 1.** Comparison of main field testing technologies for high external water pressure  
**表 1.** 高外水压力主要现场测试技术对比

| 技术类型        | 主要测试对象             | 优势                 | 局限与适用条件                     |
|-------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|
| 孔内/洞内渗压监测   | 水头、孔隙水压力、衬砌背后水压    | 物理意义清晰，便于设计校核和施工反馈 | 空间代表性有限，受封孔质量、长期漂移和传感器耐久性影响 |
| 封隔器、压水/抽水试验 | 分层渗透参数、裂隙连通性、水力边界  | 可获得原位水文地质参数，适合补充勘探 | 测试扰动明显，解释依赖边界假设和反演模型        |
| FBG 与分布式光纤  | 压力、应变、温度、渗漏与结构变形响应 | 可长距离、多点或连续监测，抗电磁干扰 | 封装、温度补偿和光缆-结构耦合仍需工程验证       |
| 水力层析与多源反演   | 三维渗透性、储水性、富水通道和压力场 | 可由点测量扩展为场域识别       | 布孔和扰动源受施工条件限制，反演存在非唯一性      |
| 排水系统性能监测    | 排水量、排水衰减、衬砌水压恢复    | 直接服务防排水设计和运营维护     | 需长期观测，易受堵塞、沉积和施工扰动影响        |

3. 共性挑战和应对策略

总体来看，高外水压力现场测试已形成较清晰的技术谱系，但在工程推广中仍面临若干共性挑战。其一，复杂地质体表征不足。深部围岩裂隙网络和富水断层具有明显空间非均质性，有限测点难以反映压力场整体分布。应对策略是从单点水压观测转向多孔、多层和多物理量联合布设，并引入水力层析与数值反演。其二，多场耦合同步监测不足。外水压力变化常与应力重分布、围岩损伤和排水退化同步发生，仅监测水压力容易误判风险来源。应将孔压、流量、应变、温度、微震和渗漏信息纳入统一数据库。

其三，极端环境下传感器长期可靠性仍是薄弱环节。高水压、强腐蚀、施工冲击和大变形环境会导致传感器失效或漂移，应加强高量程、抗腐蚀、可更换和可校准传感器研发，并在关键部位设置冗余测点。其四，数据解释和阈值体系尚不成熟。不同工程地质条件下同一水压值的风险意义并不相同，因此预警阈值不能简单移植。更合理的做法是结合设计模型、安全系数、排水能力和历史监测数据，建立分级阈值与动态修正机制。

综上，高外水压力现场测试在空间非均质性、水-力-损伤耦合、传感器耐久性、监测数据利用及

测试标准化等方面面临的主要挑战与相应对策见表 2。

**Table 2.** Common challenges and countermeasures in field testing of high external water pressure  
**表 2.** 高外水压力现场测试的共性挑战与应对策略

| 挑战           | 表现                  | 建议策略                    |
|--------------|---------------------|-------------------------|
| 空间非均质性       | 少量测点难以代表三维压力场       | 多孔分层测试、水力层析、地质 - 水力联合建模 |
| 水 - 力 - 损伤耦合 | 水压变化与围岩变形、裂隙扩展相互影响  | 孔压、应变、微震、排水量同步监测        |
| 传感器耐久性       | 高压、腐蚀、施工扰动导致漂移或失效   | 冗余布设、定期校准、光纤无源传感与保护封装   |
| 数据利用不足       | 监测数据停留在报警和记录层面      | 模型实时校正、数字孪生和风险趋势预测      |
| 标准化不足        | 不同工程测试口径、量程和评价指标不统一 | 形成测试布设、数据质量控制和评价指标规范    |

4. 总结

高外水压力现场测试技术的研究重点正在从“测得一个水压值”转向“识别压力形成机制并服务全过程风险控制”。近十年研究表明，直接水压监测仍是工程应用的基准技术，模型试验和数值模拟为解释水 - 力耦合机制提供支撑，光纤传感、水力层析和多源反演则推动现场测试由局部测点向连续感知和三维识别发展。

当前较成熟的工程思路是以孔内和洞内水压测试为基础，以排水系统性能监测和衬砌结构响应为校核，以数值模型和反演方法解释空间分布，并将测试结果反馈至设计、施工和运营维护。未来应重点突破三方面：一是建立适用于深埋富水隧洞的多源监测布设方法；二是研发高量程、高耐久、低漂移的水压与多参数传感器；三是形成面向风险预警的动态阈值与数字孪生模型。只有将测试、反演、设计和处治形成闭环，高外水压力现场测试技术才能真正支撑复杂地下工程的安全建设与长期运行。

参考文献

[1] 黄威, 孙云, 张建平, 等. 深埋隧洞高外水压力研究进展[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(5): 1-11.

[2] 刘立鹏, 汪小刚, 段庆伟, 付睿智, 姜龙. 高压富水地层水工隧洞衬砌外水压力确定与应对措施[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(8): 1549-1557.

[3] 张振杰. 高外水压作用下大埋深隧洞围岩稳定分析方法及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(11): 2858-2872.

[4] 张志恩. 高压富水隧道衬砌外水压力折减规律及施工缝抗水压能力研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2023.

[5] 王志杰, 雷飞亚, 侯伟名, 等. 富水大断面公路隧道水压模型试验及衬砌结构力学行为研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(8): 108-118.

[6] He, B.G., Zhang, Y., Zhang, Z.Q., Feng, X.T. and Sun, Z.J. (2021) Model Test on the Behavior of Tunnel Linings under Earth Pressure Conditions and External Water Pressure. *Transportation Geotechnics*, **26**, Article 100457. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100457>

[7] Duan, S.Q., Jiang, X.Q., Jiang, Q., et al. (2023) Theoretical Solution and Failure Analysis of Water Pressure on Lining of Deep-Buried Non-Circular Hydraulic Tunnel Based on the Equivalent Hydraulic Radius Method. *Engineering Failure Analysis*, **148**, Article 107163. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107163>

[8] 杨跃辉, 孙东生, 秦向辉, 等. 基于测试系统柔度分析的水压致裂法确定最大水平主应力误差分析与讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S1): 3385-3396.

[9] Bao, T., Zhang, S., Liu, C. and Xu, Q. (2022) Experimental Study on the Effect of Hydraulic Deterioration of Different

- Drainage Systems on Lining Water Pressure. *Processes*, **10**, Article 1975. <https://doi.org/10.3390/pr10101975>
- [10] 陈军涛, 喻军健, 李果, 等. 含不同裂隙数量砂岩注浆前后力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(7): 1767-1781.
- [11] 刘学伟, 刘云豪, 刘滨, 等. 注浆裂隙岩体力学特性影响因素试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(7): 1782-1799.
- [12] 洪博诚, 吴崇健, 于淼, 常天英, 姜海明, 崔洪亮. 推挽式高灵敏光纤光栅水压传感器研究[J]. 光学精密工程, 2025, 33(14): 2178-2187.
- [13] Zhang, X.H., Zhu, H.H., Jiang, X. and Broere, W. (2024) Distributed Fiber Optic Sensors for Tunnel Monitoring: A State-of-the-Art Review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **16**, 3841-3863. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.01.008>
- [14] Xu, S.Y., Li, X.Z., Wang, T.Y., et al. (2023) Fiber Bragg Grating Pressure Sensors: A Review. *Optical Engineering*, **62**, 1-25. <https://doi.org/10.1117/1.oe.62.1.010902>
- [15] Paradis, D., Lefebvre, R. and Nefzi, A. (2024) Parameter Resolution of Simulated Responses to Periodic Hydraulic Tomography Signals in Aquifers. *Advances in Water Resources*, **190**, Article 104734. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2024.104734>
- [16] Nefzi, A., Paradis, D., Lefebvre, R., Bour, O. and Lavenant, N. (2025) Field Deployment and Analysis of Hydraulic Tomography Experiments with Periodic Slug Tests in an Anisotropic Littoral Aquifer. *Journal of Hydrology*, **653**, Article 132747. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132747>
- [17] Xue, T.E., Zhang, Q.Y., Zhang, Z.J., et al. (2024) Geo-Mechanical Model Test on Excavation and Support of Deep Tunnel Crossing a Fault under Hydro-Mechanical Coupled Condition. *Acta Geotechnica*, **19**, 2063-2082. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-02001-4>
- [18] Wang, P.F., Zhang, Q.Y., Duan, K. and Lin, H.X. (2025) Geo-Mechanical Model Test on Synergistic Seepage Control in a Deeply Buried Water Diversion Tunnel under Hydro-Mechanical Coupling Conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **159**, Article 106516. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106516>
- [19] 周文朋. 富水地层隧道防渗施工技术[J]. 城市建筑与发展, 2024, 5(23): 181-183.
- [20] 张博, 刘夕奇. 高水压条件下水利隧洞注浆堵水施工工艺优化[J]. 水利电力技术与应用, 2026, 8(6): 55-57.
- [21] 覃自龙. 隧道工程地质风险识别与超前预报技术研究[J]. 工程建设, 2026, 9(5): 74-77.
- [22] 杨润飞, 李梅洁, 杨泽许. 长距离引水隧洞 TBM 掘进施工风险识别与应对策略[J]. 现代工程项目管理, 2026, 5(8): 49-51.
- [23] 周文豪. 公路隧道防水排水系统常见问题及治理方案[J]. 现代交通与路桥建设, 2026, 5(3): 49-51.
- [24] 于照宸. 浅谈特长隧道反坡排水施工技术[J]. 工程技术与质量管理, 2026, 2(7): 202-204.
- [25] 白丛林. 适用于深埋隧道的 TBM 机载超长距离超前钻探技术集成与工程应用研究[J]. 机械与电子控制工程, 2026, 8(9): 82-84.