 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i5.10261

Research on the Mechanism and Prevention Measures of Water Gushing in Rich-Soil Stratum Tunnels

Shuaitao Cheng

China Railway Sixth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Tianjin, 300308, China

Abstract

Water gushing in rich-soil stratum tunnels is a major hazard threatening engineering safety, and its occurrence is closely related to geological structure evolution, multi-phase medium hydraulic response, and hydrogeological boundary sudden changes. This paper analyzes the three major mechanisms of water gushing disasters and, based on this, proposes targeted prevention strategies, and constructs three technical systems: intelligent inversion of grouting parameters based on coupled flow field and stress field, targeted sealing and diversion of multi-scale structural planes, and real-time monitoring and dynamic warning of construction disturbances. Through this research, the aim is to transform the static preset of water gushing disasters in rich-soil stratum tunnels into dynamic control, providing theoretical references for the safety of tunnel construction in rich-soil strata.

Keywords

rich-soil stratum; tunnel water gushing disaster; prevention measures

富水地层隧道突涌水灾害机理与防控措施研究

程帅涛

中铁第六勘察设计院集团有限公司，中国·天津 300308

摘　要

富水地层隧道突涌水是威胁工程安全的重大隐患，其发生与地质构造演化、多相介质水力响应及水文地质边界突变密切相关。本文分析了突涌水灾害的三大机理，并在此基础上，提出针对性防控策略，构建渗流场-应力场耦合的注浆参数智能反演、多尺度结构面靶向封堵与导流协同、施工扰动实时监测与动态预警三大技术体系；通过本研究，旨在将富水层隧道突涌水灾害从静态预设到动态管控的转变，为富水地层隧道施工安全提供理论参考。

关键词

富水地层；隧道突涌水灾害；防控措施

1 引言

随着我国隧道工程向深部富水地层延伸，突涌水灾害频发，不仅造成人员伤亡与经济损失，还严重制约工程进度；富水地层地质条件复杂，渗流场与应力场耦合作用显著，突涌水通道演化、水力能量积聚及水文地质系统失稳等过程具有隐蔽性、突发性与复杂性。基于此，本研究推演富水地层隧道突涌水灾害机理，并提出适配工程实际的精细化防控策略，为工程实践提供指导。

2 富水地层隧道突涌水灾害机理

2.1 地质构造错动诱发的渗流路径动态演化

富水地层中，地质构造的长期活动为突涌水埋下了隐伏的“导水通道”。这些通道并非静态存在，而是在构造应力场持续调整过程中不断发生形态与连通性的变化。当隧道掘进接近或揭露这些区域时，原本被弱胶结物或破碎岩块填充的裂隙，会因开挖卸荷引发局部应力重分布，导致充填物发生蠕变松动甚至突然失稳。这种松动并非瞬间完成，而是表现为微破裂的萌生、扩展与贯通，使得原本孤立的孔隙或微裂隙逐渐连接成具有一定过流能力的优势渗流网络。随着施工推进，围岩因应力释放产生向洞内的位移，这将进一步拉张或剪切既有的构造裂隙，改变其开度与走向，从而动态调整着地下水的运移路径。地下水在压力驱动下，会优先选择这些新形成的、渗透性更强的路径汇集，当汇水量与压力达到某一临界状态时，便可能突破围岩的阻水能力，形成突涌 [1]。因此，突涌水通道的形成是一个由构造背景控制、受开挖扰动触发、并随围岩变形不断演化的动态渗流过程，其本质是地质体在人为工程干预下渗流场与应力场耦合作用的结果。

2.2 多相介质界面水力响应与能量积聚释放

富水地层常包含非均质的岩土组合，如砂层与黏土层

【作者简介】程帅涛（1990–），男，中国河南汝州人，本科，工程师，从事地下工程及隧道研究。

互层、断层破碎带与完整基岩接触等，这些不同介质的物理力学性质差异显著，构成了复杂的水力响应单元。在天然状态下，各介质层间的水力联系受到层理、界面阻抗等因素制约，水流运动相对缓慢。然而，隧道开挖打破了这种平衡，尤其是在高压富水条件下，水体的压缩性、岩土颗粒的骨架变形以及界面处的物理化学作用共同构成了一个复杂的水 - 力 - 能系统。当高速水流进入低渗透性介质层时，由于流动受阻，动能在界面处转化为压能，导致局部孔隙水压力急剧升高，形成“水垫”效应。同时，高流速水流对颗粒的拖曳力可能引发细颗粒的迁移与管涌，进一步改变介质的渗透特性，降低其阻水能力。这种能量的积聚并非线性发展，而是随着渗流路径的畅通和过流面积的扩大而呈非线性增长 [2]。一旦局部压力超过某薄弱界面的抗剪强度或隔水层的极限承载力，储存的能量便会以瞬态大流量、高速度的形式释放，表现为突涌水。此过程可视为一个由多相介质非均质性引发的能量转换与突变现象，其核心在于水力梯度驱动下的能量积聚突破了介质界面的储能阈值。

2.3 水文地质边界条件突变引发的系统失稳

隧道突涌水往往不是孤立事件，而是区域水文地质系统在特定条件下的剧烈响应。富水地层并非封闭系统，其与地表水体、深部含水层或其他径流通道之间存在复杂的补径排关系。隧道掘进改变了原有的地下水边界条件，例如切断了侧向补给通道、改变了排泄基准面或形成了新的汇水空腔。这种边界条件的突变，会迫使地下水系统重新调整其流场分布与水均衡状态。在调整初期，水流会试图寻找新的路径以适应新的边界，这一过程可能表现为局部水位波动或流量增大。若隧道所处的地质单元与强补给源之间存在水力联系，且隧道的阻隔效应导致上游水位壅高，则会形成一个动态的势能积累过程。随着壅水范围的扩大和水头差的持续增加，作用在隔水层或弱透水界面上的静水压力不断攀升。当系统无法通过缓慢的径流调整来释放这种过剩的水压力时，便会触发系统的失稳。这种失稳可能表现为既有隔水结构的击穿、断层带的活化导通或大规模岩溶管道的淹没溢流。因此，突涌水是水文地质系统在工程扰动下，因边界条件突变导致水动力失衡与水力梯度超限的综合产物，其发生标志着原有水文地质平衡状态的彻底崩溃与新径流模式的强制建立。

3 富水地层隧道突涌水灾害的防控策略

3.1 基于渗流场 – 应力场耦合的预控型注浆参数智能反演

在富水地层隧道建设过程中，突涌水灾害始终是威胁施工安全、制约工程进度的核心隐患，而预控型注浆作为前置性堵水加固手段，其设计合理性直接决定了突涌水风险的防控效果。当前工程实践中，传统注浆参数设计多依赖工程师的现场经验，或是仅依据单一地质指标进行静态设定，这种模式往往忽视了富水地层中渗流场与应力场相互交织、相互影响的复杂特性，难以适配不同地质区段的差异化需求，有时甚至会因参数不合理导致注浆效果不佳，无法有效阻断水通道，或过度注浆造成材料浪费、扰动围岩稳定性等问题。

针对这一工程痛点，研究团队提出了基于渗流场 - 应力场耦合的预控型注浆参数智能反演方法，核心目标是通过实时监测数据与动态反馈机制，实现注浆方案的精准优化，打破传统注浆设计的局限性。该方法的实施贯穿于工程前期勘察、施工过程控制的全过程闭环体系 [3]。在工程前期，研究人员依托超前地质预报技术，系统采集隧道掌子面前方的裂隙发育密度、连通性、地下水压力分布、围岩岩性等基础地质信息，以此为依据构建初始的渗流 - 应力耦合数值模型，通过模拟不同注浆压力、浆液黏度、扩散半径等关键参数组合下的围岩加固效果，初步筛选出适配当前地质条件的参数范围，为后续施工提供基础参考。

在实际工程应用中，这种智能反演方法展现出了良好的实用性，该方法最突出的优势的是，将传统静态预设的注浆模式转变为数据驱动的动态闭环控制，通过捕捉地质体与注浆工程措施之间的动态相互作用规律，从源头上降低突涌水灾害的发生风险，为富水地层隧道施工安全提供了可靠的技术支撑。

3.2 多尺度结构面水力效应的靶向封堵与导流协同技术

富水地层隧道施工中，突涌水灾害的发生往往是受到从微观孔隙到宏观断层等不同尺度结构面的共同控制，这些不同尺度的结构面在水力响应特性上存在显著差异，给突涌水防控带来了极大挑战。在当前的工程实践中，现有防控技术大多采用全域均匀注浆的封堵模式，或是简单采取排水降压措施，这种粗放式的治理方式难以兼顾不同尺度结构面的差异化治水需求，要么因封堵不精准导致水通道未被彻底阻断，要么因过度封堵或盲目排水引发围岩失稳，无法实现堵水与围岩保护的双重目标。

在微观层面，针对岩土颗粒间的微小孔隙及微裂隙这类导水能力较弱但分布广泛的通道，研究人员专门研发了具有纳米级填充能力的复合浆液。这种浆液能够借助分子吸附与桥接作用，深入填充岩土颗粒间隙与微裂隙，从源头堵塞微小渗流通道，有效减少基础漏水量，为后续中宏观尺度的治理奠定良好基础，避免微小渗流长期侵蚀导致围岩强度下降 [4]。在中观层面，面对节理、层理等中等规模的结构面——这类结构面往往是地下水渗流的主要通道，且分布具有一定规律性，研究团队采用可膨胀性材料或定向纤维增强浆液，结合超前地质预报获取的结构面产状、开度等参数，精准设计注浆角度与注浆压力，实现“点对点”的精准封堵，既保证封堵效果，又避免浆液浪费。

在宏观层面，对于大型断层破碎带、岩溶管道这类导水能力强、风险等级高的主通道，单纯封堵易导致地下水能

量积聚，引发二次灾害，因此研究团队采用超前管棚支护与内置导流管相结合的技术方案。在通过管棚支护增强围岩整体稳定性、阻断主导水通道的同时，借助内置导流管引导地下水沿预设路径缓慢释放，逐步降低地下水压力，避免能量突然释放引发突涌水。该技术的关键在于建立完善的结构面分级评价体系，研究人员通过综合分析不同尺度结构面的导水能力、分布特征及对围岩稳定性的影响程度，明确各尺度结构面的治理优先级与治理标准，实现差异化治理。

3.3 施工扰动响应的实时监测与风险阈值的动态预警

富水地层隧道突涌水防控是一项系统性工程，防控策略的最终有效性，不仅依赖于前期科学合理的方案设计、中期精准高效的工程处置，更离不开施工全过程中对风险的精准感知与快速应急响应能力。在富水地层隧道施工过程中，开挖、注浆等各类作业产生的微小扰动，都可能引发地下渗流场的滞后性响应，这种响应往往呈现渐进式累积特征，初期信号微弱、不易察觉，但随着扰动持续叠加，极易突破围岩承载极限，引发突涌水灾害。而传统预警模式多采用固定阈值设定，难以适配施工过程中地质条件、施工工况的动态变化，往往无法捕捉到这种渐进式的风险累积，导致预警滞后，错失最佳应急处置时机。

针对传统预警模式的局限性，研究团队构建了施工扰动响应的实时监测与风险阈值的动态预警系统，核心目标是实现对突涌水前兆信号的超前识别与精准预警，将风险隐患控制在萌芽状态。该系统集成微震监测、电阻率成像与地下水化学成分分析等多源监测技术，形成全方位、多维度的监测网络，确保能够全面捕捉施工扰动引发的地质体响应信号。

在实际监测过程中，研究人员通过微震监测设备捕捉围岩破裂产生的声发射信号，重点分析信号的频次、能级变化，以此判断围岩破碎程度与裂隙发育趋势；借助电阻率成像技术实时监测含水介质导电率的动态变化，间接反映地下水分布与渗流通道的演变情况；通过定期采集地下水样本，分析水中离子浓度的异常波动，捕捉地下水补给、径流路径的变化特征。通过对这三类数据的综合分析、交叉验证，研究人员能够精准判断突涌水孕育阶段的核心特征，避免单一指标监测带来的误判问题 [5]。

在此基础上，研究团队引入动态阈值算法，打破传统固定阈值的局限性，让预警指标临界值能够根据施工进度推进、地质条件变化及历史监测数据反馈，进行实时自适应调整。一旦监测数据触及动态设定的预警阈值，系统会即刻启动分级应急响应机制，根据风险等级自动触发对应处置措施，如暂停开挖作业、加强局部注浆加固或启动应急排水系统，快速遏制风险发展。这种预警策略的核心价值，是将防控重心从传统的“事后应对”彻底转向“过程管控”，其本质是通过深度解析施工扰动与地质体响应之间的复杂关联，建立具有自学习、自适应能力的智能预警体系，为高风险富水地层隧道施工提供实时、可靠的决策支持，进一步完善了突涌水防控的闭环管理。

4 结语

本文围绕富水地层隧道突涌水灾害，系统剖析了地质构造、多相介质及水文地质边界三大核心致灾机理，阐明突涌水从孕育、演化到爆发的动态过程，并基于机理分析提出的三大防控技术，弥补相关理论与方法，对保障深部富水隧道施工安全、推动隧道工程技术进步具有重要现实意义与应用价值。

参考文献

[1] 严少洋,高富强,王齐,等.富水花岗质混合岩深埋隧道突涌水灾变机制及防治措施[J].公路,2025(4).

[2] 杨昆光谢沃欧阳慕陈增稳.山岭隧道突涌水灾害风险评估及处治分析[J].2025.

[3] 潘毅,王思琪,谭家华,等.基于MOD FLOW- CFP模型的岩溶隧道涌水量预测[J].地质科技通报,2025,45(1):247-257.

[4] 康与超,王青松.复合地层隧道突涌水灾害机理及治理研究[J].北方交通,2025(1):91-94.

[5] 王洪涛,宣兆腾,孔令辉,等.基于塑性上限定理的承压水地层基坑底板抗突涌安全厚度研究[J].土木工程学报,2025(7).