

秦鹏飞, 赵亚敏, 宋梦, 等. 隧道突泥涌水致灾机理及防控技术研究[J]. 中国岩溶, 2025, 44(2): 359-369.

DOI: 10.11932/karst20250213

隧道突泥涌水致灾机理及防控技术研究

秦鹏飞, 赵亚敏, 宋梦, 王文菁

(黄河科技学院工学部, 河南 郑州 451000)

摘要: 隧道突水灾害具有“大流量、强突发、高水压、多类型”等特点, 是多尺度、多物理场耦合的复杂灾害现象, 分析不良地质构造特征、发育形态及水压作用下的破坏趋势, 有利于深刻揭示突泥涌水致灾机理。文中从灾害水源、水流补给通道及隔水岩体三者性能状态演变着手, 分析了突泥涌水的动力灾变过程, 并基于弹性力学、断裂力学和工程水力学理论, 探讨了压剪、拉剪型破坏的致灾机理。将隧道掘进面与灾害水源间的岩层, 分作隧道开挖引起的应力松弛区、完整岩体保护区及裂隙带区3个区域, 提出了突泥涌水的有效保护厚度。最后从注浆理论、注浆材料等方面阐释了灾害防控的技术措施, 以期对保障隧道施工安全起到一定借鉴作用。

关键词: 深埋隧道; 突泥涌水; 工程灾害; 注浆技术; 防控研究

创新点: 基于弹性力学、断裂力学和工程水力学理论, 探讨压剪、拉剪型破坏的致灾机理, 从灾害水源、水流补给通道及隔水岩体三者性能状态演变角度阐述隧道施工安全。

中图分类号: U457.2 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2025) 02-0359-11

开放科学(资源服务)标识码 (OSID):



0 引言

当前, 我国高铁、公路等交通基础设施正在大量修建, 由于地貌差异大、地质状况复杂, 交通设施建设不可避免地需要修建大量穿越山岭隧道^[1-2]。如西成高铁途经秦岭—大巴山系高山丘陵地区, 全线穿越隧道76座, 隧道长度占线路总长的88%; 贵南高铁依次穿越黔桂高原、桂西岩溶洼地及峰林平原等地区, 地质条件复杂, 岩溶发育强烈, 桥隧占比高达70%以上。预计至2030年我国隧道运营总里程将超过15万km, 其中大部分处于地形陡峭、构造复杂、水量丰富的山岭岩体中^[3-5]。

隧道工程属于高风险建设工程, 隧道工程一般具有“埋深大、应力高、洞线长、地质复杂”的特征。地下水是隧道勘测设计、施工需慎重考虑的致灾因

素, 体量大、压力高的不明水源, 在隧道钻掘中可能出现失衡、失控, 导致突泥涌水、塌方等灾害的发生。据统计2015—2022年, 我国公路、铁路隧道项目建设过程中, 突泥涌水事故共发生164起, 造成了严重的经济损失和人员伤亡^[6-8]。随着交通客运量的增加和隧道建设标准的日趋严苛化, 隧道涌水灾害逐渐呈现“高水压、强突发、大流量、多类型”的特点, 成为困扰隧道施工安全的技术难题(图1)。

隧道突泥涌水是多尺度、多物理场耦合的复杂灾害现象, 西南、华南地区的建设实践表明, 突泥涌水灾害隐蔽性较强、破坏性大, 且可预测性较差。致灾结构形态、构造形式是揭示突泥涌水水力学机理的研究基础, 深刻剖析致灾结构形态、构造形式, 有利于科学预测突泥涌水灾害发生的时空分布, 进行针对性的灾害治理和防控, 以降低施工机械、生产材料

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62003313); 河南省自然科学基金项目 (252300420053)

第一作者简介: 秦鹏飞(1985—), 男, 博士、副教授, 主要从事地基处理方面的研究。E-mail: 929163723@qq.com。

收稿日期: 2023-12-22



(a) 突泥涌水 Foundation pit pouring

(b) 巷道涌水 Subway tunnel inrush

(c) 注浆加固 Grouting reinforcement

图 1 突泥涌水及灾害防治

Fig. 1 Prevention and control of mud and water inrush

和现场人员面临的安全风险^[9-10]。为此,本文从灾害水源、水流补给通道及隔水岩体三者性能状态演变着手,分析突泥涌水的动力灾变过程,并基于弹性力学、断裂力学和工程水力学理论,探讨压剪、拉剪型破坏的致灾机理,最后从注浆理论、注浆材料及注浆工艺等方面阐释灾害防控的技术措施,以期对保障隧道施工安全,实现突涌水灾害的主动防控起到一定作用。

1 突泥涌水要素构成

突泥涌水是隧道等地下硐室开挖掘进过程中,隔水岩体受施工扰动影响力学性能退化,不明承压水沿贯通裂隙击穿隔水构造,巨大水压瞬间得到释放的过程。突泥涌水发生机理应从灾害水源、水流补给通道及隔水岩体三者性能状态演变着手分析。天然条件下裂隙岩体处于三向应力平衡中,灾害源不足以对隧道施工造成威胁,当隧道掘进至灾害源一定距离时,岩体应力场、渗流场平衡状态被打破,潜在不明水源此时演变为恶性能量^[11-13]。由此可见,

突泥涌水灾害是水流迁徙、岩体裂隙扩展贯通,围岩应力平衡破坏的动力过程(图 2),当开挖临空面接近不明水体时,存储在岩体内的承压水能量急剧释放,固相充填物喷涌而出,围岩失稳破坏。突泥涌水常发生在节理岩体、断层及岩溶管道、地下暗河等不良构造处,突泥突水往往伴随着隧道结构的坍塌、岩屑等固相颗粒的涌出^[14-15]。

突水涌泥灾害是人类工程活动与不良地质构造综合作用产生的结果,人类工程活动是灾害产生的外因,不良地质构造则是灾害产生的内因。其中,灾害水源是灾害产生的重要因素,灾害水源储存了巨大的破坏能量,在高水压作用下推动岩体裂隙萌生、扩展、贯通。初期涌水发生后,水流推动裂隙进一步扩张、蔓延,致使隔水岩体物理力学性能持续下降,当涌水量、裂隙贯通量及隧道掘进尺寸达到极限状态时,隧道围岩动力失稳、急剧破坏。系统、深刻的突泥涌水致灾机理,需结合工程地质学、水力学、弹性力学及断裂力学等理论进行分析、揭示。

2 突泥涌水致灾机理分析

不良地质构造主导着地下水的分布、流动和汇合,并决定着突泥涌水灾害的等级、规模,因而分析不良地质结构构造特征、发育形态,有利于研究水压作用下岩体的失稳、破裂过程,揭示突泥涌水致灾机理。裂隙岩体等不良地质结构、构造,受高水压、高应力等极端条件作用,会在岩体内部产生水力劈裂等破坏现象,这是突泥涌水灾害出现的重要原因。伴随着裂隙的扩展、蔓延和贯通,岩体最终呈现拉剪-压剪等破坏形态,隧道围岩结构整体失稳、垮塌^[16-18]。

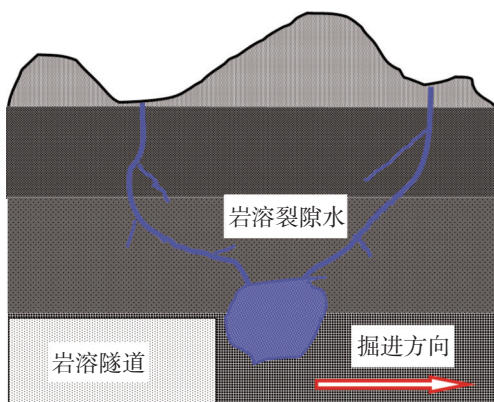


图 2 岩溶隧道灾害机理

Fig. 2 Disaster mechanisms of karst tunnels

2.1 灾害机理

裂隙发育的硬质岩和较软岩中, 岩体内部分布着大量的闭合裂纹, 这些裂纹承受岩块间的挤压、张拉作用。假定某裂纹处于三向应力状态, 承受的最大、最小主应力分别为 σ_1 、 σ_3 , 裂隙内部分布超高压

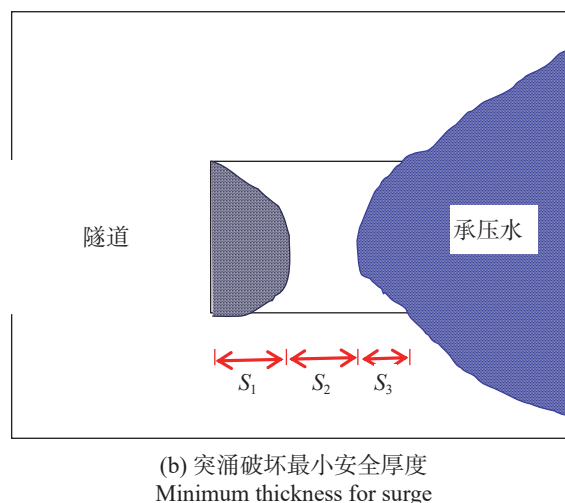
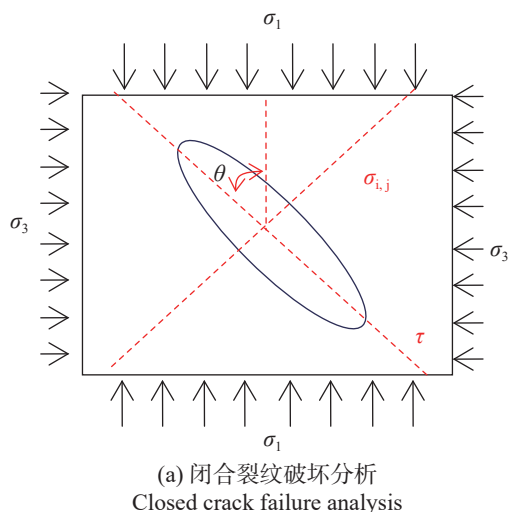


图3 突泥涌水灾害机理

Fig. 3 Disaster mechanisms of mud and water inrush

由工程水力学及断裂力学理论, 拉剪、压剪型突泥涌水临界应力分别为:

$$F_1 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta + \frac{\sqrt{2}Q_1}{\sqrt{\pi}l} \quad (1)$$

$$F_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta - \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta + \frac{\sqrt{2}Q_2}{\sqrt{\pi}l} \right) \frac{1}{\tan \delta} \quad (2)$$

式中: F_1 、 F_2 为拉剪、压剪性破坏的临界水压力 (Pa); θ 为裂纹走向与最大主应力 σ_1 之间的夹角 ($^\circ$); Q_1 、 Q_2 为岩体 I 型、II 型断裂韧度值 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$); l 为闭合裂纹长度 (m); δ 为裂隙岩体内摩擦角 ($^\circ$)。

隧道掘进面与灾害水源间的岩层分作 3 个区域, 即隧道开挖引起的应力松弛区、完整岩体保护区及裂隙带区 (图 3b)。随着开挖作业向前推进, 岩体应力松弛区不断往裂隙带区和灾害水源区延伸, 当开挖突破最小安全厚度时, 岩体保护失效, 突水发生^[22-24]。突涌破坏最小安全厚度为

$$s_0 \geq s_1 + \frac{1}{\pi} \left(\frac{Q_{1c}}{1.27U} \right)^2 + s_3 \quad (3)$$

压力 (图 3a)。当该裂纹法向应力为拉应力时, 依据断裂力学, 裂隙岩体将产生拉剪破坏形式; 当法向应力为压应力时, 裂纹压紧闭合并传递正应力和剪应力, 裂隙岩体产生压剪破坏形式^[19-21]。

式中: s_0 为岩石有效保护最小厚度 (m); s_1 为开挖作业引起的松弛厚度, 一般为 1~3 m; s_2 为未扰动岩体厚度, $s_2 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{Q_{1c}}{1.27U} \right)^2$; s_3 为裂隙带区厚度 (m), 由物探或钻探方法确定; Q_{1c} 为岩石断裂韧度 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$); U 为裂隙水压力 (Pa)。

2.2 工程地质模式

岩石断层受挤压、升降等复杂地质作用, 断层破碎带内裂隙发育, 储存大量的承压水或潜水, 极易引发突泥涌水灾害, 而石灰岩、白云岩、泥灰岩等可溶岩, 受地下水侵蚀岩溶发育强烈, 也极易引发突泥涌水灾害。此外岩层的侵入接触、不整合接触产生的薄弱区域, 也是突泥涌水的重灾区。涌水地质模式分类见表 1。

突泥涌水致灾机理与灾害预警、控制, 是隧道工程建设面临的重大挑战。未来应致力于灾害水源的超前探测、定量识别研究, 揭示不同地形地貌、地质构造条件下, 突泥涌水的孕灾模式、演变机理, 并建立科学准确的预警、控制理论与技术体系, 这样才能精准、高效实现隧道突泥涌水, 重大灾害的防控、治理。

表 1 突泥涌水地质模式
Table 1 Geological model of mud and water inrush

地质条件	具体类型	灾害特征	地质条件	具体类型	灾害特征
断层	导水断层型	大量涌水	其他	层间裂隙型	突泥涌水, 稀泥石流
	富水断层型	突泥涌水, 含大量颗粒介质		侵入接触型	突泥涌水, 含大量岩屑
	阻水断层型	突泥涌水, 含少量颗粒介质		不整合接触型	大量涌水
	溶洞溶腔型	突泥涌水, 浓泥石流		差异风化型	突泥涌水, 浓泥石流
岩溶	溶蚀裂隙型	突泥涌水, 稀泥石流		特殊类型	突泥涌水, 成分复杂
	地下暗河型	突泥涌水, 含大量颗粒介质			

3 注浆防控技术

通过注浆可以显著改善岩体的物理力学性质, 有效提升岩土介质的防渗、承载性能^[25-27]。破碎岩

体、全风化岩注浆, 浆液主要表现为渗透扩散方式, 而泥化夹层、微裂隙岩体注浆, 浆液主要表现为劈裂—压密扩散方式(图 4)。

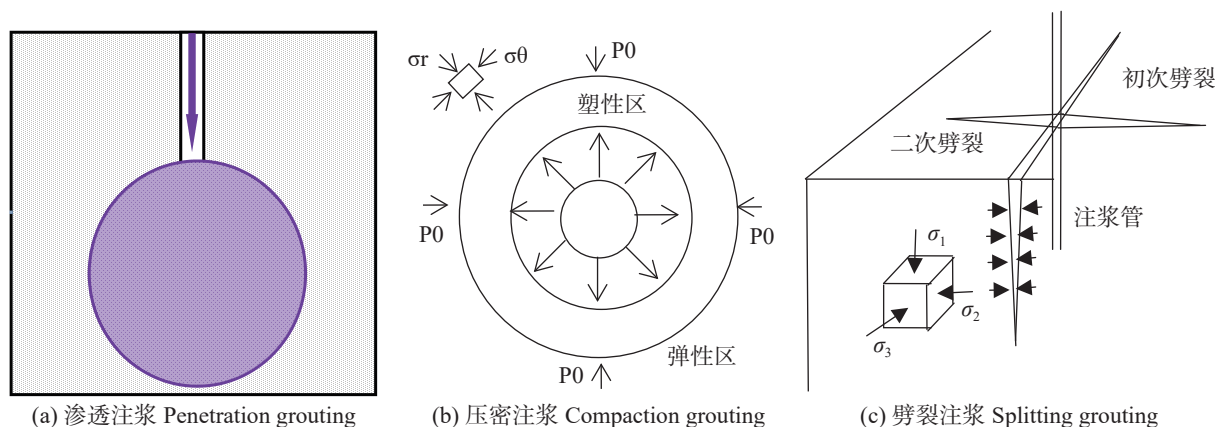


图 4 注浆浆液扩散机理

Fig. 4 Diffusion mechanisms of grouting fluid

3.1 注浆理论

宾汉流体、幂律流体在非完整岩、软质岩等, 防渗透加固方面日益得到广泛应用。宾汉流体、幂律流体渗透扩散微分方程为:

$$v = \frac{\lambda a^2}{8\mu} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2\tau_0/a}{\lambda} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2\tau_0/a}{\lambda} \right)^4 \right] \quad (4)$$

$$\Delta p = \frac{2^{1-n} \sqrt{\Gamma} c}{1-n} \left(\frac{3n+1}{tn} \right)^n \left(\frac{\varphi}{8\mu\theta k} \right)^{\frac{n+1}{2}} (R^{1-n} - r^{1-n}) R^{2n} \quad (5)$$

式中: v 为浆液流速 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$); a 为裂隙管道半径 (cm); μ 为浆液塑性黏度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); τ_0 为宾汉流体屈服应力 (Pa); λ 为启动压力梯度 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$); Δp 为浆液扩散压力差 (kPa); n 为幂律流体流变指数; Γ 为迂曲度, $\Gamma = (R/r)^2$; c 为稠度参数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$); Φ 、 k 、 θ 分别为孔隙率、渗透系数 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) 及水的黏度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); R 为浆液扩散距离 (cm); r 为注浆孔半径 (cm)。

劈裂注浆是压密—劈裂—压密—劈裂的动态作用过程, 劈裂扩散发生时伴随有压密和渗透等其他方式^[28-30]。裂隙岩体劈裂注浆时, 浆液—岩体界面存在复杂的动态耦合作用(图 5), 裂隙壁面受浆液压力影响向两侧扩张(式 6)。

$$h = \begin{cases} h_0 \\ h_0 + \lambda(p - p_{cr}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: h_0 为裂隙初始开度 (cm); h 为浆液压力影响下裂隙开度 (cm); p 为裂隙通道内浆液压力 (Pa); p_{cr} 为扩张临界压力 (Pa); λ 为岩体法向弹性系数 ($\text{m} \cdot \text{Pa}^{-1}$)。

浆液—岩土应力耦合作用下, 注浆压力的沿程分布规律为:

$$p = \sqrt[4]{\frac{24\mu q}{\pi M^3} \ln\left(\frac{l}{r}\right)} + \sigma_3 \quad (7)$$

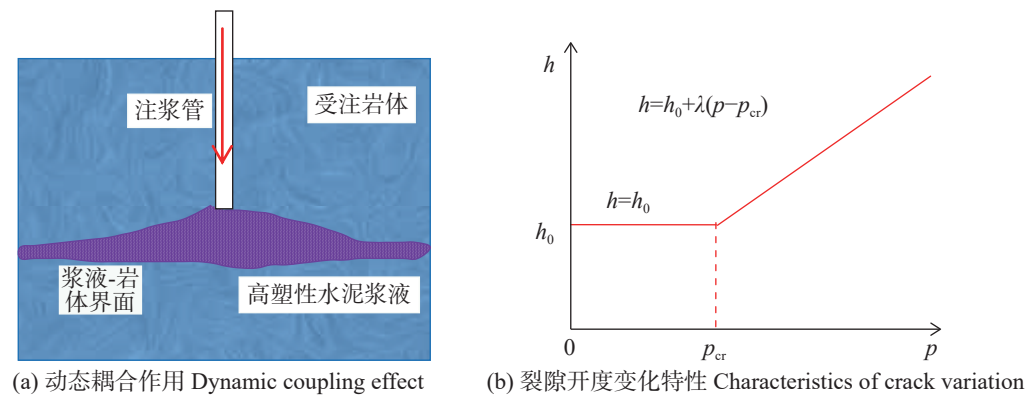


图 5 劈裂注浆机制分析

Fig. 5 Analysis of grouting mechanism in fractured rock mass

式中： p 为扩散路径上的浆液压力 (Pa)； q 为注浆速率 ($\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$)； M 为岩体力学性能参数 ($\text{m}\cdot\text{Pa}^{-1}$)； l 为浆液极限扩散距离 (m)； σ_3 为岩层最小主应力 (Pa)。

3.2 注浆材料

注浆材料是注浆防控技术的关键环节，水泥类浆材目前主要有复合水泥浆、超细水泥浆和水泥黏土浆等^[31-35]，化学类浆材主要有水玻璃、地聚物、环

氧树脂、聚氨酯等，生物类材料则主要有巴氏芽孢杆菌 (*Sporosarcina pasteurii*) 和梭杆菌 (*Fusobacterium*) 等。

3.2.1 高分子聚合物

双组份发泡聚氨酯高分子材料近年来发展迅速，逐渐受到科研人员的广泛关注。聚氨酯材料膨胀性高、耐久性好，且快凝早强、轻质环保，在涌水封堵等工程领域具有巨大的优势^[36]。高聚物浆材性能见表 2。

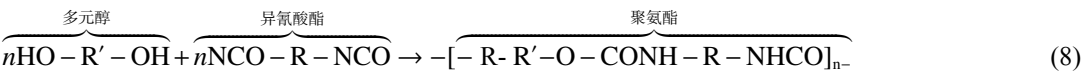
表 2 高聚物注浆材料主要性能

Table 2 Main properties of polymer grouting materials

表面干燥时间/s	自由膨胀密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^3$	强度达到90%的时间/min	自由膨胀抗压/抗拉强度(3d)/MPa	收缩率	低毒残留率	技术优势
12~47	≥ 48	≤ 10	$\geq 0.41/\geq 0.31$	$\leq 0.5\%$	符合正常饮用标准	材料自膨胀、环境友好

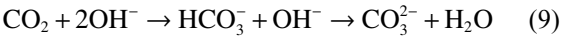
与水泥注浆等常规注浆技术不同，有机高分子材料的反应-扩散机理非常复杂，普通浆液流动扩散主要依靠源头施加的注浆压力，而高聚物浆液的流动扩散主要依靠化学反应产生的膨胀力。高分子材料混合后，组分间产生剧烈的聚合化学反应 (式 8)，

聚合反应生成大量的闭孔胶体，悬浮、充填于不良地质的孔隙通道内。随着化学反应进程的持续和环境压力的升高，浆体体积不断膨胀，驱动浆体流动 (图 6)。胶体结石后与周围介质融合成整体，达到灾害治理的目标^[37]。



3.2.2 微生物菌液

微生物诱导方解石沉淀 (MICP) 技术，在当前“碳达峰”、“碳中和”目标愿景下有其重要现实意义，MICP 通过脲酶菌水解尿素产生碳酸根离子，实现溶岩、碎石等不良岩土介质的加固。微生物矿化晶体沉积过程经历 3 个阶段：无定形碳酸钙 (Amorphous calcium carbonate, ACC)→球霏石 (Vaterite) 或文石 (Aragonite)→晶型方解石 (Calcite)，见式 (9)、(10)。



微生物矿化反应是生物-化学-水力 (BCH) 耦合作用过程，加固机理与微生物行为动力学、弥散理论及生物化学等紧密相关。MICP 加固需采取适宜的注浆压力和注浆工艺，注浆压力控制在 100 kPa 以下，可避免对岩土结构的破坏，采用分步灌注法、电渗灌注法等工艺，则可有效减轻碳酸钙晶体的拥堵，改善加固效果。此外通过添加高岭土、粉煤灰、膨润

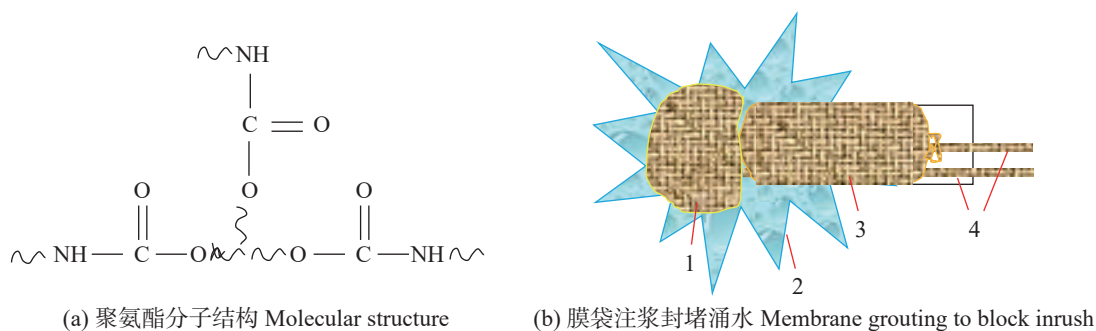


图6 高聚物材料工程特性

1.高聚物 2.涌水 3.土工膜袋 4.注浆管

Fig. 6 Engineering properties of polymer materials

1.polymer 2.water intrush 3.membrane bag 4.grouting pipe

土及钢纤维等材料,可以辅助矿化反应成核,提高加固岩体的整体强度(图7)。

微生物加固岩土受拉压、剪切或循环荷载作用时,岩土介质间的胶结作用退化,加固土应力-应变

呈现软化和剪胀趋势。当胶结完全破坏后,附着在岩土介质表面的碳酸钙,会使得剪胀角和内摩擦角增加,保持加固体基本静-动力学特性不变^[38-40]。

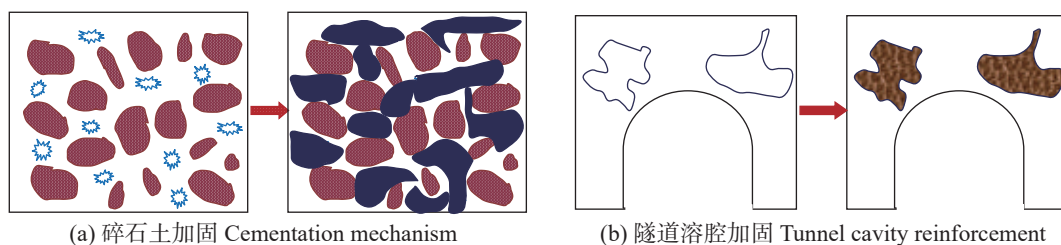


图7 微生物加固技术

Fig. 7 Microbial reinforcement technology

3.2.3 地聚物

地聚物(Geopolymer)是近十余年来国际上研究非常活跃的建筑材料,可应用于隧道工程的突泥涌水治理中。地聚物是由强碱激发硅铝酸盐矿物形成的网状聚合物,基本结构单元为 $[\text{AlO}_4]$ 和 $[\text{SiO}_4]$ 四面体。与普通硅酸盐水泥(OPC)相比,地聚物生产能耗低、碳排放量低,力学性能优异,未来有可能取代普通水泥材料^[41-42]。

地聚物制备中通常选取氢氧化钠(NaOH)、氢氧化钾(KOH)或水玻璃(Na_2SiO_3),作为碱激发溶液。地聚物凝胶机理为,偏高岭土、矿渣或粉煤灰中的硅铝质成分在强碱环境中发生解聚,硅铝质材料中的 $(-\text{O}-\text{Al}-)$ 、 $(-\text{Si}-\text{O}-)$ 共价键破坏、断裂, Si、Al 单体向溶液溶出,经结晶、重组后形成以 Si-O-Al 键、Si-O-Si 键支撑的三维网状结构^[43-44]。缩聚过程中掺入水玻璃,可以调整 SiO_2 和 Al_2O_3 的生成比例,提高聚合物的聚合度。采用水玻璃碱激发粉煤灰制备地聚物

砂浆,经测试其抗压强度、抗弯强度可达 87.6 MPa、18.4 MPa,分析发现地聚物砂浆强度与水玻璃浓度、水相含量(H_2O 与 Na_2O 质量比)有关,其关系为

$$\begin{cases} u = -127.39v^2 + 312.37v - 153.51 \\ u = -11.71w + 114.09 \end{cases} \quad (11)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为地聚物砂浆抗压强度,水玻璃模数及水相含量。研究发现,地聚物材料较普通水泥材料具有更显著的干缩和自收缩特性,掺加适量的减缩剂、高反应性 M_gO 、石膏或纳米 SiO_2 ,则可以有效改善地聚物材料的耐久性,提高其长期服役性能^[45-46]。

3.3 注浆工艺

科学合理的注浆施工工艺,有利于节约材料、提升加固效果。脉动注浆、洞外钻注已被证实为高效精准的施工工法,在隧道涌水灾害治理中得到了应用。

恒压注浆作用下,浆液易沿软弱结构面、岩层缺

陷处产生持续劈裂,使得注浆加固的整体性和均一性受到影响。与恒压注浆相比,脉动注浆加固机制则更健全合理,加固质量也明显比恒压注浆优异^[47]。恒压注浆条件下,岩土颗粒间产生法向和切向接触力,浆液压力传递扩散中,介质骨架内产生强、弱应力链,而脉动注浆施加的是脉冲荷载,岩土介质骨架内的强、弱应力链无法形成,浆液扩散更加匀称,有利于地层变形控制(图8)。

隧道施工往往是在有限作业面内展开,注浆、开

挖等施工操作受有限隧道空间制约,突泥涌水灾害发生时,将进一步加剧作业难度。硐外钻注不占用隧道空间和资源,通过在硐外施展灾害防控预案,可由表及里精准实现不良地质的加固治理(图9)。随着钻探技术和机械科学技术的发展进步,硐外钻注联合硐内处治,成为突涌水灾害防控的重要方法。硐外钻注作业空间自由,且浆液胶凝、调节时间充裕,对高效能装备布设与工序搭配、衔接,保证隧道施工安全具有重要意义^[48]。

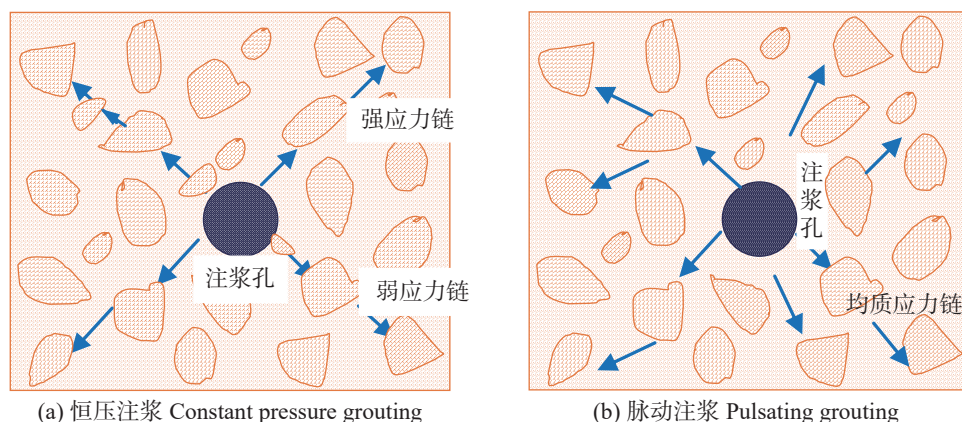


图8 脉动/恒压注浆机理分析

Fig. 8 Analysis of the mechanisms of pulsating and constant pressure grouting

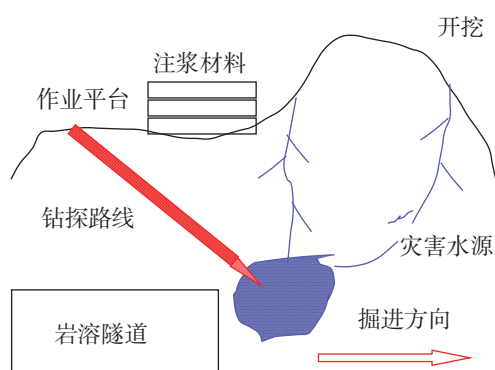


图9 硐外钻注工艺分析

Fig. 9 Analysis of drilling and injection process outside the tunnel

3.4 研究趋势

高聚物材料反应速度快、轻质高强,适宜于流量大、水头高的应急抢险工程,高聚物材料在富水环境中的耐久性能、动力性能则是其未来科研攻关的重要方向;微生物注浆材料黏度低、流动性好,利于微细裂隙岩体的修复、加固,微生物体的低温适宜性、矿化成核的均匀性以后应予重点关注;地聚物原材

料丰富,工艺简单,适宜于全~中风化岩、破碎带的加固处理,此后需致力于地聚物材料的收缩、徐变及抗冻融等基本特性的研究。注浆工艺与岩层的匹配性、机械设备的先进性,则有利于促进施工工法的改良、进步。

4 结 语

隧道突泥涌水隐蔽性较强、破坏性大,且可预测性较差,随着工程量的增加,近年来隧道涌水呈现高压、强突发、大流量、多类型的特征。本文分析了水流迁徙、岩体裂隙扩展贯通,及围岩应力平衡破坏的动力灾变过程,并基于断裂力学和工程水力学,探讨了压剪、拉剪型突泥涌水的致灾机理。指出注浆技术是突水灾害防控的有力措施,从注浆理论、注浆材料与注浆工艺等方面阐述了防控原理和工程应用,以期对保障隧道施工安全起到借鉴作用。

参考文献

- [1] 刘昭京, 蒋小珍, 冯涛, 黄胜平, 周富彪, 伊小娟. 湘桂铁路二塘

- 车站路基岩溶塌陷成因与防治对策[J]. 中国岩溶, 2023, 42(1): 109-118.
- LIU Zhaojing, JIANG Xiaozhen, FENG Tao, HUANG Shengping, ZHOU Fubiao, YI Xiaojuan. Formation mechanism and prevention countermeasures for karst collapse in Ertang railway station, Guilin[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(1): 109-118.
- [2] WANG Wei, GAO Shiming, LIU Lingfeng, WEN Wushuang, LI Ping, CHEN Jianping. Analysis on the Safe Distance between Shield Tunnel through Sand Stratum and Underlying Karst Cave[J]. *Geosystem Engineering*, 2019, 22(2): 81-90.
- [3] Li L P, Zhou Z Q, Li S C, Xue Y G, Xu Z H, Shi S S. An attribute synthetic evaluation system for risk assessment of floor water inrush in coal mines[J]. *Mine Water and the Environment*, 2015, 34(3): 288-294.
- [4] 窦金熙, 赵卫全, 路威, 周建华. 引水隧洞复杂裂隙围岩高压灌浆浆液扩散过程研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2023, 21(6): 565-573.
- DOU Jinxi, ZHAO Weiquan, LU Wei, ZHOU Jianhua. Study on high-pressure grouting fluid diffusion process in complex fractured surrounding rock of water diversion tunnel[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2023, 21(6): 565-573.
- [5] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 聂利超, 钟世航, 苏茂鑫, 李貅, 许振浩. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090-1113.
- LI Shucai, LIU Bin, SUN Huaifeng, NIE Lichao, ZHONG Shihang, SU Maoxin, LI Xiu, XU Zhenhao. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(6): 1090-1113.
- [6] Li L P, Lei T, Li S C, Xu Z H, Xue Y G, Shi S S. Dynamic risk assessment of water inrush in tunnelling and software development[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2015, 9(1): 57-81.
- [7] MOFFAT R, FANNIN R J. A hydro-mechanical relation governing internal stability of cohesionless[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 48(3): 413-419.
- [8] 蔣立元, 韩立军, 冉军林, 杨圣奇, 郑春梅. 阳灵隧道充填溶洞综合预报及突泥事故治理[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(6): 1256-1267.
- YU Liyuan, HAN Lijun, RAN Junlin, YANG Shengqi, ZHENG Chunmei. Comprehensive geological prediction of filling cavity and treatment of mud inrush for Yangling tunnel[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2016, 24(6): 1256-1267.
- [9] 李术才, 王康, 李利平, 周宗青, 石少帅, 柳尚. 岩溶隧道突水灾害形成机制及发展趋势[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 22-30.
- LI Shucai, WANG Kang, LI Liping, Zhou Zongqing, Shi Shaoshuai, Liu Shang. Mechanical mechanism and development trend of water-inrush disasters in karst tunnels[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(1): 22-30.
- [10] 汤振, 蒋小珍, 陈立根, 雷明堂, 马骁, 吴晟堂. 龙门县某石灰岩采石场帷幕止水工程及注浆效果评价[J]. 中国岩溶, 2022, 41(1): 47-58.
- TANG Zhen, JIANG Xiaozhen, CHEN Ligen, LEI Mingtang. Groundwater sealing by grouting curtain technique and its grouting effect evaluation of a limestone quarry in Longmen county[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(1): 47-58.
- [11] 石少帅. 深长隧道充填型致灾构造渗透失稳突涌水机制与风险控制及工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- SHI Shaoshuai. Study on seepage failure mechanism and risk control of water inrush induced by filled disaster structure in deep-long tunnel and engineering application[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [12] 李术才. 隧道突水突泥灾害源超前地质预报理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- LI Shucai. The theory and method of geological prediction for the disaster source of water and mud inrush in tunnels[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [13] SHAN Renliang, ZHANG Xiaonan, LU Man. Numerical Application of Safe Thickness between a Tunnel and Surrounding Concealed Caves[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018, 36(1): 95-104.
- [14] ISRAR J, INDRARATNA B. Study of critical hydraulic gradients for seepage-induced failures in granular soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, 2019, 145(7): 04019025.
- [15] LI M, FANNIN R J. A theoretical envelope for internal instability of cohesionless soil[J]. *Géotechnique*, 2012, 62(1): 77-80.
- [16] 肖前丰, 李文龙, 符文熹, 文丽娜, 袁星宇, 叶飞. 富水构造区圆形隧道抗突体最小安全厚度解析解[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(3): 159-168.
- XIAO Qianfeng, LI Wenlong, FU Wenxi, WEN Lina, YUAN Xingyu, YE Fei. Analytical Solution to the Minimum Safe Thickness of Circular Tunnel Anti-inrushing Structure in Water-rich Area[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(3): 159-168.
- [17] HUANG Xin, LI Shucai, XU Zhenhao, Guo Ming, Liu Lang. An Attribute Recognition Model for Safe Thickness Assessment between Concealed Karst Cave and Tunnel[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 26(4): 955-969.
- [18] 李术才, 许振浩, 黄鑫, 林鹏, 赵晓成, 张庆松, 杨磊, 张霄, 孙怀凤, 潘东东. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1041-1069.
- LI Shucai, XU Zhenhao, HUANG Xin, LIN Peng, ZHAO Xiaocheng, ZHANG Qingsong, YANG Lei, ZHANG Xiao, SUN Huaifeng, PAN Dongdong. Classification, Geological Identification, Hazard Mode and Typical Case Studies of Hazard-causing Structures for Water and Mud Inrush in Tunnels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(5): 1041-1069.
- [19] 王明年, 江勇涛, 于丽, 董宇苍, 段儒禹. 砂性土细颗粒起动临界水力坡降计算方法[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2515-2524.

- WANG Mingnian, JIANG Yongtao, YU Li, DONG Yucang, DUAN Ruyu. Analytical solution of startup critical hydraulic gradient of fine particles migration in sandy soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(8): 2515-2524.
- [20] 房忠栋, 杨为民, 王旌, 石锦江, 巴兴之, 王浩. 深埋隧道前方承压溶洞隔水岩体最小安全厚度研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(8): 2805-2816.
- FANG Zhongdong, YANG Weimin, WANG Jing, SHI Jinjiang, BA Xingzhi, WANG Hao. Study on the minimum Safe thickness of water-proof rock mass in front of deep-buried tunnels[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(8): 2805-2816.
- [21] 杨磊, 张耀磊, 唐明秀, 李让杰, 徐真浩, 尹贺. 富水软弱围岩劈裂型注浆加固体力学性能与破坏模式[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2024, 55(2): 649-664.
- YANG Lei, ZHANG Yaolei, TANG Mingxiu, LI Rangjie, XU Zhenhao, YIN He. Mechanical properties and failure modes of splitting grouting combined with solid in water rich and weak surrounding rock[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2024, 55 (2): 649-664.
- [22] 潘东东, 李术才, 许振浩, 李利平, 路为, 林鹏, 黄鑫, 孙尚渠, 高成路. 岩溶隧道承压隐伏溶洞突水模型试验与数值分析[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(5): 828-836.
- PAN Dongdong, LI Shucai, XU Zhenhao, LI Liping, LU Wei, LIN Peng, HUANG Xin, SUN Shangqu, GAO Chenglu. Model Tests and Numerical Analysis for Water Inrush Caused by Karst Caves Filled with Confined Water in Tunnels[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(5): 828-836.
- [23] Xu Z H, Wu J, Li S C, Zhang B, Huang X. Semianalytical Solution to Determine Minimum Safety Thickness of Rock Resisting Water Inrush from Filling-type Karst Caves[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(2): 04017152.
- [24] 潘旭东, 李鸿钊, 郭焱旭, 刘人太, 何万里. 海洋环境下注浆加固体的力学性能演化[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2023, 53(5): 112-120.
- PAN Xudong, LI Hongzhao, GUO Yanxu, LIU Rentai, HE Wanli. Mechanical properties of grouting reinforced body in the seawater environment[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2023, 53(5): 112-120.
- [25] Liu H L, Charles W W, Fei K. Performance of a geo-grid reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay: Case Study[J]. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, ASCE, 2022, 133(12): 1483-1493.
- [26] XU Z H, HUANG X, LI S C, et al. A New Slice-based Method for Calculating the Minimum Safe Thickness for a Filled-type Karst Cave[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(2): 1097-1111.
- [27] Kitazume M, Maruyama K. Collapse failure of group column type deep mixing improved ground under embankment[C]//*Proceedings of the International Conference on Deep Mixing* 2021. US: ASCE, 2005: 245-254.
- [28] 秦鹏飞, 钟宏伟, 刘坚, 苏丹娜, 孙卓宇. 考虑浆土应力耦合作用的劈裂注浆机理分析[J]. *西南交通大学学报*, 2023, 58(3): 584-591.
- QIN Pengfei, ZHONG Hongwei, LIU Jian, SU Danna, SU Zhuoyu. Analysis of Splitting Grouting Mechanism Considering the Coupling Effect of Grout Soil Stress [J] *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2023, 58 (3): 584-591.
- [29] 沙飞, 李术才, 刘人太, 张庆松, 李召峰, 刘浩杰. 富水砂层高效注浆材料试验与应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(7): 1413-1422.
- SHA Fei, LI Shucai, LIU Rentai, ZHANG Qingsong, LI Zhaoqiang, LIU Haojie. Performance and engineering application of effective microfine cement-based grout(EMCG) for water-rich sand strata[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(7): 1413-1422.
- [30] 李保亮, 霍彬彬, 尤南乔, 朱国瑞, 陈春, 张亚梅. 不同养护条件下钢渣/矿渣复合水泥胶砂的耐硫酸盐侵蚀性能[J]. *东南大学学报*, 2019, 49(6): 1144-1152.
- LI Baoliang, HUO Binbin, YOU Nanqiao, ZHU Guorui, CHENG Chun, ZHANG Yamei. Sulfate resistance of steel slag blended /GGBFS blended cement mortars under different curing conditions[J]. *Journal of Southeast University*, 2019, 49(6): 1144-1152.
- [31] 严国超, 白龙剑, 张志强, 杨涛, 刘金海. PU 改性硫铝酸盐水泥注浆材料试验与应用[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S2): 747-754.
- YAN Guochao, BAI Longjian, ZHANG Zhiqiang, YANG Tao, LIU Jinhai. Experimental and applied study on PU modified sulpho-aluminate cement grouting material[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 747-754.
- [32] 付宏渊, 姚杰, 邱祥. 铜尾矿改性水泥基聚合物注浆材料性能与机理分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2024, 55(3): 1107-1119.
- FU Hongyuan, YAO Jie, QIU Xiang. Performance and mechanism analysis of copper tailings modified cement-based geopolymer grouting materials[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2024, 55(3): 1107-1119.
- [33] 周茗如, 彭新新, 苏波涛, 樊乐涛. 普通水泥与超细水泥注浆性能分析及其黄土注浆效果对比研究[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(5): 1673-1678.
- ZHOU Mingru, PENG Xinxin, SU Botao, FAN Letao. Grouting Performance of Ordinary Cement and Superfine Cement and Comparison of Grouting Effect in Loess[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(5): 1673-1678.
- [34] Pantazopoulos I A, Markou I N, Christodoulou D N, Droudakis A I, Atmatzidis D K, Antiohos S K, Chaniotakis E. Development of microfine cement grouts by pulverizing ordinary cements[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2019, 35(5): 593-603.
- [35] Kang S P, Kwon S J. Effects of red mud and Alkali-activated slag cement on efflorescence in cement mortar[J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 133: 459-467.

- [36] 王复明, 李嘉, 石明生, 郭成超. 堤坝防渗加固新技术研究与应用[J]. 水力发电学报, 2016, 35(12): 1-11.
WANG fuming, Li Jia, SHI Mingsheng, GUO Chengchao. New seepage-proof and reinforcing technologies for dikes and dams and their applications[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(12): 1-11.
- [37] 李晓龙, 陈灿, 王贻森, 张蓓, 钟燕辉. 自膨胀高聚物浆液劈裂注浆仿真方法研究[J]. 土木工程学报, 2023, 40(11): 419-427.
LI Xiaolong, CHEN Can, WANG Yisen, ZHANG Bei, ZHONG Yanhui. Simulation method for fracture grouting of expansible polymer in soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 40(11): 419-427.
- [38] 刘鹏, 邵光辉, 黄容聘. 微生物沉积碳酸钙胶结砂土力学特性及本构模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 720-726.
LIU Peng, SHAO Guanghui, HUANG Rongpin. Mechanical properties and constitutive model of MICP-cemented sand[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2019, 49(4): 720-726.
- [39] 徐宏殷, 练继建, 闫玥. 多试验因素耦合下 MICP 固化砂土的试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(5): 517-526.
XU Hongyin, LIAN Jijian, YAN Yue. Experimental Study of MICP Solidified Sand Under the Coupling of Multiple Test Factors[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2020, 53(5): 517-526.
- [40] 张鑫磊, 陈育民, 张喆, 丁甸晨, 徐盛明, 刘汉龙, 王志华. 微生物灌浆加固可液化钙质砂地基的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1023-1031.
ZHANG Xinlei, CHEN Yumin, ZHANG Zhe, DING Xuanchen, XU Shengming, LIU Hanlong, WANG Zhihua. Performance evaluation of liquefaction resistance of a MICP-treated calcareous sandy foundation using shake table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1023-1031.
- [41] Pepper R A, Couperthwaite S J, Millar G J. Comprehensive examination of acid leaching behaviour of mineral phases from red mud: Recovery of Fe, Al, Ti, and Si[J]. Minerals Engineering, 2021, 99: 8-18.
- [42] 杨世玉, 赵人达, 靳贺松, 李福海, 胡丁涵. 粉煤灰地聚物砂浆早期强度的影响参数研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(6): 162-169.
YANG Shiyu, ZHAO Renda, JIN Hesong, LI Fuhai, HU Dinghan. Research on Influence Parameters of Early Strength of Fly Ash-based Geopolymer Mortar[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(6): 162-169.
- [43] 李召峰, 刘超, 王川, 张健, 王衍升, 高益凡. 赤泥-高炉矿渣-钢渣三元体系注浆材料试验研究[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(1): 203-211.
LI Zhao Feng, LIU Chao, WANG Chuan, ZHANG Jian, WANG Hengsheng, GAO Yifan. Experimental Study on Grouting Material of Red Mud-blast Furnace Slag-steel Slag Ternary System[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(1): 203-211.
- [44] 赵彦旭, 向俊燃, 吕擎峰, 单小康, 陈懿. 碱激发剂对地聚物固化黄土工程特性的影响[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(6): 636-643.
ZHAO Yanxu, XIANG Junran, LV Qingfeng, SAN Xiaokang, CHEN Yi. Effect of Alkali Activator on Engineering Properties of Geopolymer-solidified Loess[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(6): 636-643.
- [45] Dhami N K, Reddy M S, Mukherjee A. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review[J]. Frontiers in Microbiology, 2013, 4: 314.
- [46] 尹黎阳, 唐朝生, 谢约翰, 吕超, 蒋宁俊, 施斌. 微生物矿化作用改善岩土材料性能的影响因素[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2525-2546.
YIN Liyang, TANG Chaosheng, XIE Yuehan, LYU Chao, JIANG Ninjun, SHI Bin. Factors affecting improvement in engineering properties of geomaterials by microbial-induced calcite precipitation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7): 2525-2546.
- [47] 窦金熙, 张贵金, 张熙, 范伟中, 宋伟. 砂质土体脉动注浆浆-土耦合动力响应分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 3315-3327.
DOU Jinxi, ZHANG Guijin, ZHANG Xi, FAN Weizhong, SU Wei. Dynamic response analysis of slurry-soil coupling in sandy soil based on pulsating grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(1): 3315-3327.
- [48] 李术才, 李利平, 孙子正, 刘知辉, 李梦天, 潘东东, 屠文锋. 超长定向钻注浆装备关键技术分析及发展趋势[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 1-30.
LI Shucai, LI Liping, SUN Zizheng, LI Zhihui, LI Mengtian, PAN Dongdong, TU Wenfeng. Key technology analysis and development trend of the equipment for ultra-long directional drilling and grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1): 1-30.

Research on the mechanism and prevention technologies of mud and water inrush disasters in tunnels

QIN Pengfei, ZHAO Yamin, SONG Meng, WANG Wenjing

(*Department of Engineering, Huanghe University of Science and Technology, Zhengzhou, Henan 451000, China*)

Abstract Tunnel water inrush disasters are characterized by large flow, strong bursts, high water pressure, and various types, making them complex phenomena that involve multi-scale and multi-physical-field coupling. Analyzing the characteristics of adverse geological structures, their development patterns, and damage trends under water pressure is conducive to profoundly revealing the disaster mechanisms caused by mud and water inrush.

This study was focused on the evolution of the performance and states of three key elements, water sources, water supply channels, and impermeable rock masses. The dynamic process of disaster evolution of mud and water inrush was firstly analyzed. Based on theories of elasticity, fracture mechanics, and engineering hydraulics, this study then explored the disaster mechanism of compression shear and tensile shear failures. The rock layers between the tunnel excavation face and the water sources were divided into three areas: the stress relaxation zone caused by tunnel excavation, the protection zone of intact rock masses, and the fissure zone. This study proposed optimal protective thickness against mud and water inrush. Additionally, it discussed the technical measures for disaster prevention and control from the perspectives of grouting theory and grouting materials, aiming to enhance the safety of tunnel construction.

Tunnel mud and water inrush in tunnels is a complex phenomenon involving multi-scale and multi-physical-field coupling. Such disasters are characterized by substantial concealment, high destructive potential, and low predictability. The structural morphology and constructive forms of the disaster mechanisms are the foundation for revealing the mechanical principles of mud and water inrush. A comprehensive analysis of these structural morphologies and forms facilitates the scientific prediction of the spatial and temporal distribution of such disasters. This enables targeted disaster management and prevention strategies, thereby reducing safety risks for construction machinery, production materials, and personnel on-site.

Key words deep-buried tunnel, mud and water inrush, engineering disaster, grouting technology, research on prevention and control

(编辑 张玲)