

岩溶隧道突水灾害形成机理及发展趋势¹⁾

李术才^{*,2)} 王康^{*} 李利平^{*,†,3)} 周宗青^{*} 石少帅^{*} 柳尚^{*}

^{*}(山东大学岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

[†](国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 济南 250061)

摘要 岩溶隧道突水灾害具有“强突发、高水压、大流量、多类型”等显著特点, 其灾变演化过程复杂、动力失稳规律尚不清楚. 本文系统提出了不同类型突水灾害的发生条件、判据及安全厚度分析方法, 剖析了近期研究进展及发展趋势. 首先, 给出了隧道突水灾害的概念、类型及构成三要素, 从系统论角度分析了隧道突水的灾变过程; 其次, 总结了隧道突水灾害致灾机理、力学模型、失稳判据和最小安全厚度等方面的近期研究成果; 最后, 从构成三要素角度分析了隧道突水致灾机理方面的现状与问题, 并提出了今后的发展趋势与方向, 主要有: (1) 灾害源固液气三相置换机制与释能模式, (2) 突水通道多相物质迁移与流态演化规律, (3) 隔水阻泥结构动力灾变演化机理, (4) 突水通道破裂形成过程的模拟分析方法等.

关键词 岩溶隧道, 突水突泥, 力学机理, 发展趋势

中图分类号: U45 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-16-345

MECHANICAL MECHANISM AND DEVELOPMENT TREND OF WATER-INRUSH DISASTERS IN KARST TUNNELS¹⁾

Li Shucui^{*,2)} Wang Kang^{*} Li Liping^{*,†,3)} Zhou Zongqing^{*} Shi Shaoshuai^{*} Liu Shang^{*}

^{*}(Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China)

[†](Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Land and Resources, Jinan 250061, China)

Abstract The water-inrush disasters in karst tunnels are commonly characterized by strong outburst, high water pressure, mass flow and multi-type, and its evolutionary process and dynamic instability is very complex and still unclear. The occurrence condition, criterion and safety thickness of different types of water inrushes are proposed, and the development trend of water inrush mechanism are analyzed in the present study. Firstly, the conception, type and three constituted elements of water inrush are introduced. Secondly, currently research achievements of mechanical mechanism and model, instability criterion and the minimum safety thickness of water inrush are summarized. Finally, the current situation and problems of water-inrush mechanism are analyzed from the point of the three constituted elements. The development trend and research are proposed, including (1) solid-liquid-gas replacement mechanism and energy-releasing pattern of the sources of water inrush disasters, (2) multiphase material migration and evolution law of flow regime in water-inrush

2016-11-25 收稿, 2016-11-28 录用, 2016-12-03 网络版发表.

1) 国家重点基础研究发展计划 (973) (2013CB036000)、国家自然科学基金 (51479106, 51679131)、国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室开放基金 (KF2015-4)、山东省自然科学基金 (ZR2014EEM019)、中国博士后科学基金 (2015M572039) 和山东大学基本科研业务费专项资金 (2016GN026) 资助项目.

2) 李术才, 教授, 主要研究方向: 隧道突水突泥灾害预报、预测预警理论与控制技术. E-mail: lishucui@sdu.edu.cn

3) 李利平, 教授, 主要研究方向: 隧道突水突泥致灾机理与预测预警技术. E-mail: yuliyangfan@163.com

引用格式: 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理及发展趋势. 力学学报, 2017, 49(1): 22-30

Li Shucui, Wang Kang, Li Liping, Zhou Zongqing, Shi Shaoshuai, Liu Shang. Mechanical mechanism and development trend of water-inrush disasters in karst tunnels. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(1): 22-30

passage, (3) dynamic catastrophe mechanism of water-proof structures, and (4) analysis method for simulating the formation of water-inrush passage.

Key words karst tunnel, water-inrush, mechanical mechanism, development trend

引言

隧道涉及交通工程(铁路、公路隧道)、水利水电工程(地下厂房、输水隧洞)等领域,是国家基础设施工程建设的控制性工程.进入 21 世纪后,一大批交通工程、水利水电工程等重大基础工程陆续提上建设日程,极大地促进了隧道工程的建设.随着国家科技战略发展规划的逐步实施,交通路网向遍布崇山峻岭的西部山区和岩溶地区纵深拓展,将出现一批具有“大埋深、长洞线、高应力、强岩溶、高水压、构造复杂、灾害频发”等显著特点的隧道工程.以贵广铁路为例,全长 857 km,隧道 216 座,占线路总长的 53.9%,高风险岩溶隧道 8 座,其中 3 座超过 10 km.正在修建的成兰铁路,隧道占线路总长度的 67.07%,且多次穿越活动断裂带和可溶岩区域,隧道最大埋深达到 1 900 m,最长达 15 km.上述隧道位于高山峡谷区,强富水、强岩溶和高地应力的环境造成的突水灾害威胁日趋严重,具有“强突发、高水压、大流量、多类型”等显著特点,成为岩溶隧道安全建设的巨大挑战.灾害一旦发生,将导致重大人员伤亡、经济损失与工期延误,甚至被迫停建或改线.此外,突水灾害若不能有效治理,极易诱发岩溶地区的水资源枯竭、地表塌陷等次生环境灾害,严重威胁社会稳定与经济发展^[1-6].

隧道突水是一个多尺度的多场相互作用的复杂系统,具有“强隐蔽性、强复杂性、强突发性、强破坏性”四大基本特征.突水突泥灾害的控制技术面临的共性关键问题主要有:(1)由于突水灾害源的强隐蔽性,其孕灾地质环境、致灾构造等不明确;(2)由于突水灾害源的强隐蔽性和强复杂性,其地球物理响应规律不清楚;(3)由于突水灾变过程的强复杂性,灾变过程的动力学规律不清楚;(4)由于突水灾害的强突发性和强破坏性,尚未形成有效的灾变信息的获取、辨识与预警理论与技术.

针对隧道工程突水突泥地质灾害预防和治理工作,国内外学者在隧道突水突泥灾害的构造与水文地质特征及条件、不良地质地球物理探测理论及方法、突水突泥灾害致灾机理、地质灾害预测预警机制与控制对策等方面进行了有益的探索,取得了重要

进展.本文就隧道突水突泥致灾机理与预测预警技术的研究现状进行总结,阐述课题组在此方面的研究进展,预测未来的发展方向和趋势,为隧道突水突泥灾害的防治提供参考.

1 隧道突水灾害概念与构成要素

突水灾害是指隧道及地下工程施工过程中大量水体或泥水混合物沿岩体节理、断层等结构面以及岩溶管道、地下暗河等不良地质构造瞬时涌入隧道内的一种地质灾害现象.按突水方式可将其划分为瞬时突水型、稳定涌水型以及季节性突涌水型;按突水灾害源类型可将其划分为裂隙型突水、断层型突水、溶洞溶腔型突水、管道及地下暗河型突水;按隔水阻泥结构可将其划分为隔水岩体破裂突水和充填结构失稳突水,前者主要体现为动力扰动和高渗透压条件下的水力劈裂,后者可分为局部渗透失稳和整体滑移失稳两种.

隧道突水灾害由灾害源、突水通道与隔水阻泥结构三部分组成(见图 1):①灾害源是源动力,即由一定空间内的水体、堆积体及空腔构成的混合体,具有明显的储能特征.灾害源是突水灾害发生的首要因素.②突水通道是灾害源的优势运移通道,即地下水、泥砂等混合物耦合演化的运移途径场所.突水通道是突涌水灾害发生的必要条件.③隔水阻泥结构是灾害源进入隧道的最后屏障,即最终突水破裂口所在结构,其破裂突水是由前端灾害源运移和掌子面施工扰动共同诱发的动力破坏过程.

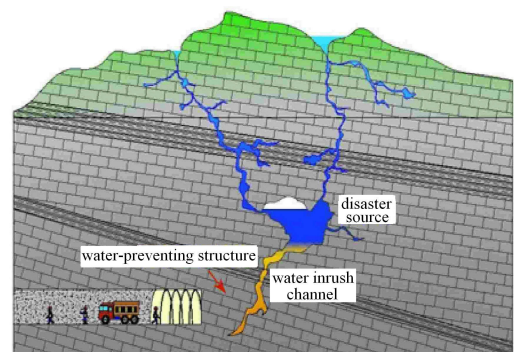


图 1 突水灾害示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water-inrush

2 隧道突水灾害力学判据与最小安全厚度

基于隔水阻泥结构的破坏模式将突水类型划分为隔水岩体破裂突水和充填结构失稳突水两类。

2.1 隔水岩体破裂突水

西部岩溶山区隧道通常具有强岩溶、强渗透压、高地应力等特征,对于裂隙岩体,其突水类型通常为岩体高压水力劈裂型,突水通道的形成机制主要表现为高压裂隙水作用下岩体裂隙的扩展、贯通直至破裂的渐进过程。从断裂力学角度出发,主要有拉剪破坏或压剪破坏两种。在含裂纹的岩体模型中,闭合裂纹受远场地应力 σ_1 和 σ_3 的作用,裂纹与最大主应力 σ_1 之间的夹角为 α ,裂纹内作用岩溶孔隙水压力 P_w ,假定水压力沿裂纹各个方向作用力相等^[7]。

当裂纹法向应力 σ_n 为拉应力时,裂隙岩体发生拉剪破坏的突水模式,属断裂力学中 I、II 型复合型裂纹问题。当裂纹法向应力 σ_n 为压应力时,裂纹在压应力作用下将发生闭合压紧、剪切扩容的过程,闭合后的裂纹均匀接触并能传递正应力和剪应力,裂纹上的有效剪应力剪切破坏导致裂隙岩体发生压剪破坏突水。相应的突水判据如下^[7]。

拉剪破坏突水判据

$$P = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha + \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \right| + \frac{K_I}{\sqrt{\pi a}} \quad (1)$$

压剪破坏突水判据

$$P = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha - \frac{1}{\tan \phi} \left(\frac{K_{IIc}}{\sqrt{\pi a}} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \right) \quad (2)$$

式中, P 为水压力, σ_1 为最大主应力, σ_3 为最小主应力, α 为裂纹与最大主应力 σ_1 之间的夹角, ϕ 为裂纹面上的内摩擦角, K_{IIc} 为岩石压缩状态 II 型断裂韧度值, K_I 为 I 型断裂韧度值。

若假设岩体完整性好,裂隙亦不发育,可将隔水岩体视为岩柱、岩板结构,将发生挤压剪切破坏型突水。对于层状隧道的突水模型,李利平^[8]建立了隔水岩体失稳的尖点突变和双尖点突变模型。

2.1.1 尖点突变模型

根据隔水岩体与隧道的空间位置关系,建立了灾害源-隔水岩体系统简化模型,见图 2。

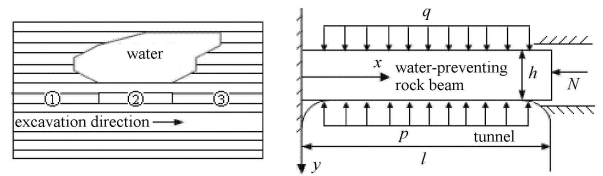


图 2 含水构造-隔水岩体系统简化模型^[8]

Fig. 2 A simplified model of water-bearing structure and water-proof rock mass^[8]

根据隔水岩体边界的力学约束条件(图 2 中①②③处岩性条件),可将隔水岩体视为硬岩-硬岩-硬岩、硬岩-软岩-硬岩、硬岩-硬岩-破碎岩、硬岩-硬岩-软岩四类^[7]。应用突变理论,推导得出了灾害源-隔水岩体系统失稳突水的判别条件如下。

硬岩-硬岩-硬岩

$$8 \left[\frac{L}{2\pi} \sqrt{\frac{L}{EI}} \left(\frac{4EI\pi^2}{L^2} - N \right) \right]^3 + 27 \left[\frac{L^2}{2\pi} \sqrt[4]{\frac{4L}{EI\pi^2}} (p - q) \right]^2 = 0 \quad (3)$$

硬岩-软岩-硬岩

$$8 \left[\frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{L}{EI}} \left(\frac{EI\pi^2}{L^2} - N \right) \right]^3 + 27 \left[\frac{4L^2}{\pi^2} \sqrt[4]{\frac{L}{EI\pi^2}} (p - q) \right]^2 = 0 \quad (4)$$

硬岩-硬岩-破碎

$$8 \left[\frac{2L}{\pi} \sqrt{\frac{L}{EI}} \left(\frac{EI\pi^2}{4L^2} - N \right) \right]^3 + 27 \left[\frac{4(\pi - 2)L^2}{\pi^2} \sqrt[4]{\frac{4L}{EI\pi^2}} (p - q) \right]^2 = 0 \quad (5)$$

硬岩-硬岩-软岩

$$8 \left[2 \frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{2L}{461EI}} \left(\frac{41EI\pi^2}{4L^2} - 5N \right) \right]^3 + 27 \left[\frac{32L^2}{3\pi^2} \sqrt[4]{\frac{2L}{461EI\pi^2}} (p - q) \right]^2 = 0 \quad (6)$$

式中, L 为隔水岩体跨距, h 为隔水岩体厚度, E 为隔水岩体弹性模量, I 为隔水岩体惯性矩, N 为边界约束力, p 为支护力, q 岩溶水压均布荷载。

2.1.2 双尖点突变模型

对于隔水性能较好的隔水岩体,由于不存在明显的渗流灾变过程,高水压作为主要荷载是导致隔水岩体破断的主要源动力,开挖、爆破等外力干扰是

主要的诱发因素. 此时, 动力学模型如图 3 所示, 相应的动力失稳判据为

$$4 \left[16(3k_0^2 \Omega^2 - p^2) / 27a^2 \right]^3 + 27 \left\{ 16 \left[8p(p^2 + 9k_0^2 \Omega^2) + 81aF^2 \right] / 729a^3 \right\}^2 = 0 \quad (7)$$

式中, k_0 为阻尼比; a 和 Ω_0 分别为隔水岩体结构系数和自振频率; F 为隔水岩体振幅、自振频率等的函数; p 为隔水岩体频率、结构系数等的函数.

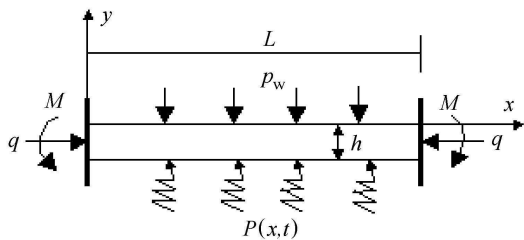


图 3 隔水岩体动力学模型^[7]

Fig. 3 Dynamical model of water-proof rock mass^[7]

2.2 最小安全厚度

隧道掌子面发生突水的隔水岩体最小安全厚度主要由三部分构成: 掌子面附近岩体扰动区、开挖方向附近岩体破坏区与两区之间的完整岩体保护区, 其力学模型^[7]如图 4, 安全厚度计算公式为

$$h_s \geq h_1 + \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{1.12p_w} \right)^2 + h_3 \quad (8)$$

式中, h_s 为岩石保护厚度; h_1 为施工引起的松弛厚度区; h_3 为裂隙带区, 物探和钻探方法确定; K_{IC} 为岩石断裂韧度; p_w 为裂隙水压.

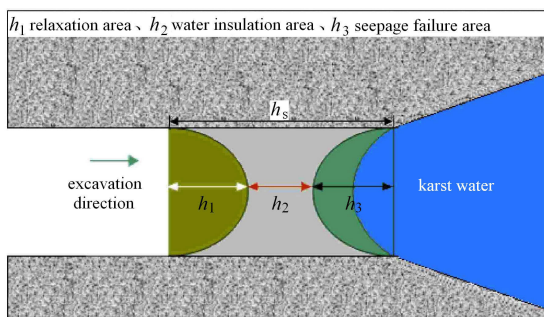


图 4 掌子面前方隔水岩体最小安全厚度

Fig. 4 The minimum safety thickness of water-proof rock mass in the front of tunnel face

2.3 充填结构失稳突水

对于宽大裂隙、断层、岩溶管道等充填型不良地质构造, 其内部充填介质的渗流灾变导致突水通道

形成, 出如断层活化突水、岩溶管道充填物渗透失稳突水等, 即为充填结构失稳突水. 从充填物的渗透特性来看, 可将突水模式分为两大类, 即充填介质的渗透失稳与充填体的滑移失稳突水.

2.3.1 充填介质的渗透失稳

对于强渗透性充填型地质构造, 当附近存在大型灾害源时, 充填构造就成为突水的优势通道. 在强渗透压力与开挖扰动作用下, 地质构造内的充填介质被不断潜蚀, 根据属性的不同可发生管涌、流土等失稳现象. 当力学状态满足一定条件时, 地质构造内的充填物被迅速冲跨形成突水通道, 比如渗透性较好的夹层充填结构、裂缝充填结构以及充填型断层、岩溶管道等等. 强渗流作用下充填介质的渗透失稳力学模型见图 5 和图 6.

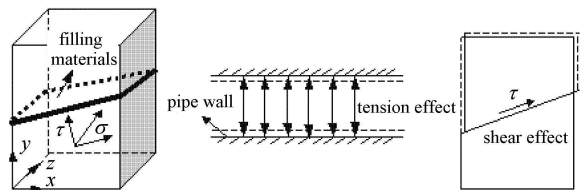


图 5 充填型扁状岩溶管道渗流的力学效应^[8]

Fig. 5 Mechanical effect of seepage characteristics for flat-shape karst conduit^[8]

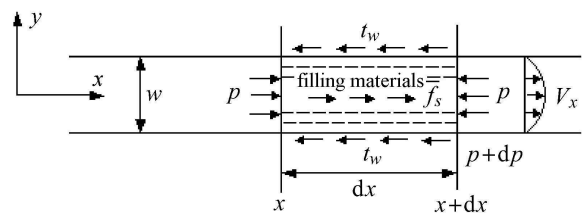


图 6 充填型圆状岩溶管道渗流的力学模型^[8]

Fig. 6 Mechanical model of seepage characteristics for circular karst conduit^[8]

2.3.2 充填体的整体滑移

对于弱透水或不透水的充填型地质构造, 当附近存在大型灾害源时, 充填构造具有阻水和充水双重特征, 其充水性能受地质构造运动、地下水径流条件、管道空间形状、充填介质属性以及水压大小等多种条件与因素的控制和影响. 对于比较稳定的充填结构, 其充填物呈密实、非均质结构, 整体结构中不存在潜在突水通道的形成条件, 其透水性比较差甚至完全不透水, 具有很高的阻水性能. 这种结构发生整体滑移失稳. 强渗流作用下充填体滑移失稳突水模型如图 7.

充填物处于平衡状态时的力学表达式为

$$\frac{4}{D} \left(\frac{K_0 \gamma_0 L^2}{2} \tan \varphi + cL \right) \sin \beta = \gamma_0 L + \frac{4G_r}{\pi D^2} + \gamma_w (h_0 + L \sin \beta) + \frac{3V^2 \gamma_w L \sin \beta}{4dg} + q \quad (9)$$

式中, D 为充填物厚度, β 为充填物倾角, L 为充填物长度, K_0 为安全系数, γ_0 为充填物重度, γ_w 为水的重度, φ 为内摩擦角, c 为内聚力. 左侧为抗滑力 $F_{抗}$, 右侧为致滑力 $F_{致}$, 若取安全系数为 $K = F_{抗}/F_{致}$, 则当 $K < 1$ 时, 岩溶管道充填物滑移失稳, 发生突水; $K = 1$ 时, 充填物处于极限平衡状态, 轻微扰动将诱发突水; $K > 1$ 时, 岩溶管道充填物保持稳定, 不会发生突水.

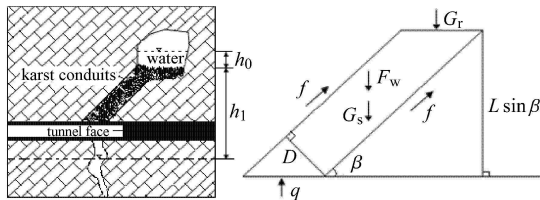


图7 充填物滑移失稳力学模型^[8]

Fig. 7 Mechanical model of slippage failure of filling materials^[8]

3 隧道突水致灾机理发展动态分析

3.1 突水灾害源赋存规律与灾变特征发展趋势

岩溶地层经常赋存有大量突水地质灾害源, 可将其划分为溶洞溶腔型、断裂构造型及岩溶管道型三类, 如充水溶洞、富水溶腔以及夹泥断层等, 其规模大小与充填性质决定突水的灾害量级. 对于岩溶管道型灾害源, 岩溶地层岩性较纯、单层厚度较大的灰岩和白云岩易发育大型岩溶管道或暗河系统, 且水量充沛, 储存大量势能. 溶洞溶腔型灾害源则往往储蓄大量静态水^[9-10], 瞬间突涌水量较大. 断裂构造型灾害源则主要发育在断层破碎带、岩性接触带等中, 尤其是大断裂带和区域性断层, 极易形成大型突水通道. 突水灾害源具有高水压、大体量特征, 其充填储能特性与能量释放过程极其复杂. 目前研究大多局限于地质认识层面, 缺乏对其储能、释放等灾变模式的系统研究^[11-14].

实质上, 突水灾害源是由固、液、气三相混合体组成的复杂介质系统, 尤其是深部灾害源固液气三相混合特征更加显著, 具有明显的高压、大体量和三

相混合充填特征, 释能模式和灾变特征趋于复杂. 如溶洞溶腔, 内部通常充满大量水和泥砂等充填物, 其顶部可能存在气体, 若内部压力很高, 一旦施工揭露便诱发地下水、淤泥以及气体大量喷薄涌出^[15-16], 发生大型突水灾害. 此外, 岩溶管道水在快速流中也夹杂大量气体和固相物质, 突水过程实质上是固液气三相介质耦合演化过程. 总体来讲, 灾害源体内气体以两种方式存在, 一是降雨时通过包气带雨水渗入; 二是季节性水位变化上升将溶洞内空气封存, 或地下水位下降出水口处于半管状态时吸入空气.

隧道突涌水是储存能量释放的过程. 若溶洞等灾害源充满水和泥砂, 储能特征明显, 一旦突然涌入洞内则溶洞顶部瞬间形成负压效应, 溶洞周围岩体赋存的水和气体被快速吸入洞内置换. 若溶洞等大体量灾害源顶部封存空气, 且具有压力, 则初期会助推充填的水和泥砂涌入隧道, 之后形成负压再转化至平衡状态.

以往研究通常将其视为固液两相混合体, 未考虑释能过程和灾变演化过程中气体影响. 因此, 如何通过深部充填型溶洞溶腔、断裂构造型和岩溶管道重大灾害源赋存规律与储能特性的研究, 揭示释能过程中固液气三相体的置换机制, 建立高压大体量灾害源储能与释放的灾变模式, 对于重大突水涌泥灾害发生条件与影响因素的认识具有重要的地质基础与理论意义.

3.2 突水通道孕育过程耦合演化机理发展动态

突水灾害源进入优势突出通道后转化为灾变体, 突出通道的形成实质上是灾变体固液气耦合演化过程, 通常表现为两种演化模式, 即高压水力劈裂突水和充填介质失稳突水^[17-20], 后者更易形成瞬间喷薄式高压大体量突水灾害. 但以往研究多集中在水力劈裂的流固耦合效应上, 对充填型通道形成过程中灾害源多物质迁移与流态转换机制认识不清, 尤其是对于充填介质从固态到流塑态再向多相流转化的机制, 尚无合理反映混合流动多介质耦合特性的表征方法, 难以有效分析和描述突水通道形成过程及其对隔水阻泥结构的影响.

在数值模拟方面, 相关研究大多基于有限差分法、有限体积法、离散单元法等商业程序, 通常采用弹塑性、断裂和损伤模型, 引入介质断裂、损伤判断准则分析通道孕育演化的渗流-损伤行为, 通过判断塑性区或变形引起渗透性改变来定义广义突水通道^[21-25], 见图8. 此外, 颗粒流数值方法可以较好

反映涌泥的演化过程, 见图 9, 在跟踪洞内水体和颗粒堆积物动态变化方面具有优势^[26-27]. 而关于突水过程中固液气耦合仿真的研究尚一直未见相关报道. 图 9 中颗粒代表充填结构内部的充填介质, 其中蓝色颗粒表示充填介质在渗流作用下的可动颗粒. 由图 9 可知, 蓝色颗粒在渗流作用下逐渐向模型上部移动, 表明充填介质在渗流作用下发生失稳, 可动颗粒逐步流失, 并最终导致充填物的失稳突水.

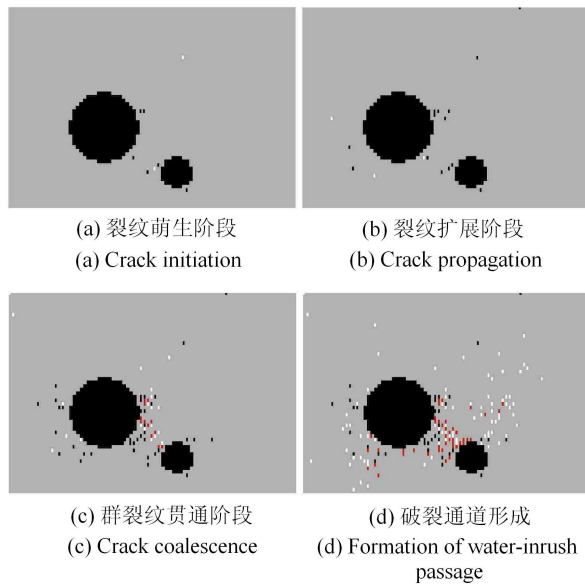


图 8 渗流-损伤诱发突水通道形成的灾变演化图^[8]

Fig. 8 Evolution process of water-inrush passage induced by coupling seepage-damage effect^[8]

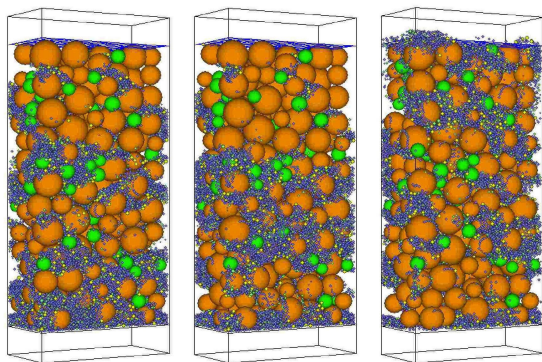


图 9 充填介质渗透失稳突水过程模拟分析^[27]

Fig. 9 Simulation analysis of water-inrush process induced by seepage failure^[27]

在室内试验与物理模拟研究方面, 前者仍局限于岩体两相耦合性能测试, 如剪切渗流耦合试验、瓦斯吸附试验等. 相似模型试验方面取得一定进展, 在固液、固气耦合相似试验上突破了相似材料崩解、

监测技术亲水性等一系列技术难题. 近些年来, 山东大学、中国矿业大学等^[28-33]等针对上述问题开展了大量研究, 先后研制 PSTO 型、SCVO 型和 CBCS 型等多种流固耦合相似材料, 可满足岩石密度、强度与渗透性的相似模拟; 研制了多套适合矿山、隧道及水电站工程的大型二维和三维流固耦合试验系统, 可用于不同工况下地下工程突水的物理模拟. 先后完成青岛胶州湾海底隧道涌水量预测、东庞矿岩溶陷落柱涌水等一系列流固耦合相似模型试验. 同时, 在试验系统方面, 研发了水体自动布设、溶腔自溶生成等试验工艺, 通过增设滚珠式滑动墙、玻璃观察窗以及内窥装置等方法, 提高了试验的真实性和可视化程度, 推动了突涌水相似模型试验技术的进步. 但对于突涌水过程的固液气耦合模拟, 一直存在多相体耦合相似材料、注气抽放模拟工艺等一系列难以解决的技术难题, 极大程度上制约和限制了模拟的真实性和试验的可靠性.

总而言之, 岩体结构的固液气耦合机制极其复杂, 其演化特性更难以寻求合理的数学表征关系, 大多通过固液气三相耦合数学模型分析多相体系的作用机制, 包括三相体相互作用的物理化学过程、动力学演化过程等, 且多集中在煤瓦斯共采和油气开采等方面^[33-34], 尚没有关注突水涌泥灾变演化过程中水、泥、气等混合体相互作用机制的研究, 其固态向流塑态转换、渗透失稳模式以及多相体流动特性极其复杂. 此外, 在固液气三相介质物理模拟试验方面^[35-38], 煤、水、瓦斯三相介质耦合作用试验和 MSW 固液气相互作用试验初步取得了成功, 在介质耦合特征提取、耦合边界条件处理以及试验水注气封工艺等方面, 为深长隧道突水涌泥过程固液气耦合物理模拟试验提供了有益的借鉴和参考.

突水通道的孕育演化是外力扰动下充填介质固液气三相体的相互作用过程, 其灾变演化过程难以准确描述. 因此, 如何有效分析并掌握充填介质的力学特性与渗流特征, 建立可描述突涌水孕育过程中多相物质迁移与状态转换的分析方法, 揭示突水通道形成过程中充填介质的耦合模式与流态演化规律, 为突水灾害状态判断、前兆信息提取以及预警阈值的确定提供合理的理论支撑, 对深长隧道突水灾害预测预警具有重要的意义.

3.3 隔水阻泥结构破裂形成突水通道发展动态

通常来讲, 突水通道中灾变体水泥气涌入隧道的最后一道屏障即隔水阻泥结构, 其安全厚度大小

直接决定灾害发生与否. 实质上, 隔水阻泥结构两端分别受灾变体动力冲击和施工扰动作用, 其破坏具有明显的动力特征. 以往研究多侧重于隔水阻泥结构的流固耦合效应与结构稳定性, 大多局限于静力学范畴, 较少考虑动力破坏参数, 大多将隔水阻泥结构视为单纯结构体, 采用结构力学、断裂力学等推算失稳判据与最小安全厚度值, 诸如止水岩柱受拉破坏、裂隙面受剪破坏、裂隙水力扩张破坏以及关键岩块失稳等分析方法^[39-41].

然而, 上述方法均未有效考虑突水过程中隔水阻泥岩体结构应力与渗流耦合损伤效应, 忽略了开挖、灾变体动力冲击等影响, 无法反映隔水阻泥结构渐进破坏过程. 相关研究表明^[42], 隔水阻泥结构的稳定不但与自身性质、水压、地应力等岩体参数有关, 还受爆破等动载的影响, 尤其是滞后性突水灾害. 但由于隔水阻泥结构破坏动态演化的复杂性, 其动力失稳准则参数的确定方法仍未获得突破, 动力失稳判据与安全厚度计算方法仍涉及较多难以直接获取和推演的力学参数, 诸如损伤破坏区、渗透突跳系数以及动载频率等, 少有的动力判据与安全厚度确定方法无法直接应用工程实际, 缺乏有效描述隔水阻泥结构渐进性破裂演化与突涌水通道形成的分析方法, 尚不能真正应用到实际工程突水灾害的预测和预警.

因此, 研究隔水阻泥结构突水破裂通道形成过程中围岩应力、位移和渗流多场信息的演化规律, 提出其动力失稳的启动条件、演化模式与破坏形态, 最终建立隔水阻泥结构动力失稳启动、状态演化与破裂口形成的分析方法, 有效确定突水动力判据与安全厚度, 对于深长隧道突涌水灾害防治具有重要的科学意义与工程价值.

4 总结与展望

综上所述, 研究人员应用断裂力学分析了隔水岩体高压水力劈裂的破坏条件, 建立了隔水岩体破坏的尖点突变和双尖点突变力学模型, 提出了高压水力劈裂、岩柱岩板结构剪切断裂的突水判据. 对于隔水岩体的防突厚度, 建立了由掌子面附近岩体扰动区、开挖向附近岩体破坏区与两区之间的完整岩体保护区组成的最小安全厚度分析方法. 此外, 建立了强渗流作用下充填介质的渗透失稳力学模型和充填体滑移失稳突水模型.

隧道高压大型突涌水灾害难以遏制的根本原因

在于极端复杂的灾害源特性及其动力灾变演化过程. 今后需对以下几个方面进行系统深入的研究: (1) 灾害源固液气三相置换机制与释能模式; (2) 突水通道多相物质迁移与流态演化规律; (3) 隔水阻泥结构动力灾变演化机理; (4) 突水通道破裂形成过程的模拟分析方法等.

参 考 文 献

- 李术才, 刘斌, 孙怀凤等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090-1113 (Li Shucai, Liu Bin, Sun Huaifeng, et al. State of art and trend of advanced geological prediction in tunnel construction. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(6): 1090-1113 (in Chinese))
- 李术才, 李树忱, 张庆松等. 岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 217-225 (Li Shucai, Li Shuchen, Zhang Qingsong, et al. Forecast of karst-fractured groundwater and defective geological conditions. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(2): 217-225 (in Chinese))
- 李术才, 薛翊国, 张庆松等. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1297-1307 (Li Shucai, Xue Yuguo, Zhang Qingsong, et al. Key technology study on comprehensive prediction and early-warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(7): 1297-1307 (in Chinese))
- Li LP, Lei T, Li SC, et al. Risk assessment of water inrush in karst tunnels and software development. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 8(4): 1843-1854
- Li, LP, Zhou, ZQ, Li, SC, et al. An attribute synthetic evaluation system for risk assessment of floor water inrush in coal mines. *Mine Water and the Environment*, 2015, 34(3): 288-294
- Li LP, Lei T, Li SC, et al. Dynamic risk assessment of water inrush in tunnelling and software development. *Geomechanics and Engineering*, 2015, 9(1): 57-81
- 李利平, 李术才, 张庆松. 岩溶地区隧道裂隙水突出力学机制研究. 岩土力学, 2010, 31(2): 523-528 (Li Liping, Li Shucai, Zhang Qingsong. Study of mechanism of water inrush induced by hydraulic fracturing in karst tunnels. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(2): 523-528 (in Chinese))
- 李利平. 高风险岩溶隧道突水灾变演化机制及其应用研究. [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2009 (Li Liping. Study on catastrophe evolution mechanism of karst water inrush and its engineering application of high risk karst tunnel. [PhD Thesis]. Jinan: Shandong University, 2009 (in Chinese))
- 林传年, 李利平, 韩行瑞. 复杂岩溶地区隧道涌水预测方法研究. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1469-1476 (Lin Chuannian, Li Liping, Han Xingrui. Research on forecast method of tunnel water inrush in complex karst areas. *Chin J Rock Mech Eng*, 2008, 27(7): 1469-1476 (in Chinese))
- 王国斌. 沪蓉西高速公路乌池坝岩溶隧道涌水成灾机理研究. [博

- 士论文]. 武汉: 中国地质大学, 2012 (Wang Guobin. Study on catastrophe evolution mechanism of karst water inrush in Wuchiba Tunnel of Hurong Expressway. [PhD Thesis]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012 (in Chinese))
- 11 Zhao H, Ma F, Guo J. Regularity and formation mechanism of large-scale abrupt karst collapse in southern China in the first half of 2010. *Natural Hazards*, 2012, 60(3): 1037-1054
 - 12 郭纯青. 中国岩溶生态水文学. 北京: 地质出版社, 2007 (Guo Chunqing. China Karst Ecological Hydrology. Beijing: Geological Publishing House, 2007 (in Chinese))
 - 13 He KQ, Yu GM, Lu YR. Palaeo-karst collapse pillars in northern China and their damage to the geological environments. *Environmental Geology*, 2009, 58(5): 1029-1040
 - 14 王遇国. 岩溶隧道突水灾害与防治研究. [博士论文]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2010 (Wang Yugu. Study on scourge and prevention of karst tunnel water inrush. [PhD Thesis]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2010 (in Chinese))
 - 15 聂志凌. 水压充填型岩溶隧道突水机理及衬砌结构力学特性研究. [硕士论文]. 成都: 西南交通大学, 2009 (Nie Zhiling. Analysis for water burst mechanism and study on mechanical features of tunnel lining in water filled karst area. [Master Thesis]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009 (in Chinese))
 - 16 吕涛. 基于流固耦合岩溶管道对水工隧洞围岩影响数值分析研究. [硕士论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2011 (Lü Tao. Numerical simulation of the influence of karst pipeline on hydraulic tunnels surrounding rock based on the fluid-solid coupling. [Master Thesis]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011 (in Chinese))
 - 17 马栋. 深埋岩溶对隧道安全影响分析及处治技术研究. [博士论文]. 北京: 北京交通大学, 2012 (Ma Dong. Study on impact mechanism of deep buried karst to tunnel safety and the treatment technique. [PhD Thesis]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012 (in Chinese))
 - 18 Tang JH, Bai HB, Yao BH, et al. Theoretical analysis on water-inrush mechanism of concealed collapse pillars in floor. *Mining Science and Technology (China)*, 2011, 21(1), 57-60
 - 19 孙玉杰. 裂隙岩体渗流应力耦合机制研究及突水数值模拟. [博士论文]. 武汉: 长江科学院, 2009 (Sun Yujie. Study on the coupling mechanism of stress and fluid flow in fractured rock mass and the numerical simulation of the sudden inflow of water. [PhD Thesis]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, 2009 (in Chinese))
 - 20 He K, Zhang S, Wang F, et al. The karst collapses induced by environmental changes of the groundwater and their distribution rules in North China. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 61(5): 1075-1084
 - 21 李利平, 李术才, 石少帅等. 岩体突水通道形成过程中应力-渗流-损伤多场耦合机制. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(2): 232-238 (Li Liping, Li Shucui, Shi Shaoshuai, et al. Multi-field coupling mechanism of seepage damage for the water inrush channel formation process of coal mine. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(2): 232-238 (in Chinese))
 - 22 李连崇, 唐春安, 梁正召等. 含断层煤层底板突水通道形成过程的仿真分析. 岩石力学与工程学报, 2009, 02: 290-297 (Li Lian-chong, Tang Chun'an, Liang Zhengzhao, et al. Numerical analysis of pathway formation of groundwater inrush from faults in coal seam floor. *Chin J Rock Mech Eng*, 2009, 02: 290-297 (in Chinese))
 - 23 Shi SS, Li SC, Li LP, et al. Multi-physical field information comprehensive analysis and application of tunnel water-bearing structure. *International Journal of Environment and Pollution*, 2013, 51(3): 156-165
 - 24 李利平, 李术才, 石少帅等. 基于应力-渗流-损伤耦合效应的断层活化突水机理研究. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 3295-3304 (Li Liping, Li Shucui, Shi Shaoshuai, et al. Water inrush mechanism study of fault activation induced by coupling effect of stress-seepage-damage. *Chin J Rock Mech Eng*, 2011, 30(S1): 3295-3304 (in Chinese))
 - 25 Shi TT, Chen ZH, Luo ZH, et al. Mechanism of groundwater bursting in a deep rock salt mine region: a case study of the Anpeng Trona and Glauber Mines, China. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(1): 229-239
 - 26 王媛, 陆宇光, 倪小东等. 深埋隧洞开挖过程中突水与突泥的机理研究. 水利学报, 2011, 42(5): 595-601 (Wang Yuan, Lu Yuguang, Ni Xiaodong, et al. Study on the mechanism of water inrush and mud in the process of excavation of deep tunnel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(5): 595-601 (in Chinese))
 - 27 周宗青. 隧道充填型致灾构造突水突泥灾变演化机理及工程应用. [博士论文]. 济南: 山东大学, 2016 (Zhou Zongqing. Evolutionary mechanism of water inrush through filling structures in tunnels and engineering applications. [PhD Thesis]. Jinan: Shandong University, 2016 (in English))
 - 28 李术才, 周毅, 李利平等. 地下工程流-固耦合模型试验新型相似材料的研制及应用. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1128-1137 (Li Shucui, Zhou Yi, Li Liping, et al. Development and application of a new similar material for underground engineering fluid-solid coupling model test. *Chin J Rock Mech Eng*, 2012, 31(6): 1128-1137 (in Chinese))
 - 29 陈红江, 李夕兵, 刘爱华等. 水下开采顶板突水相似物理模型试验研究. 中国矿业大学学报, 2010, 39(6): 854-859 (Chen Honghong, Li Xibing, Liu Aihua, et al. Physical simulation modeling of roof water inrush in underwater mining. *J China U Min Techno*, 2010, 39(6): 854-859 (in Chinese))
 - 30 李利平, 李术才, 李树忱等. 松散承压含水层下采煤的流固耦合模型试验与数值分析研究. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 679-690 (Li Liping, Li Shucui, Li Shuchen, et al. Numerical analysis and fluid-solid coupling model tests of coal mining under loose confined aquifer. *Chin J Geo Eng*, 2013, 35(4): 679-690 (in Chinese))
 - 31 刘爱华, 彭述权, 李夕兵等. 深部开采承压水机制相似物理模型试验系统研制及应用. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1335-1341 (Liu Aihua, Peng Shuquan, Li Xibing, et al. Development and application of similar physical model experiment system for water inrush mechanism in deep mining. *Chin J Rock Mech Eng*, 2009, 28(7): 1335-1341 (in Chinese))
 - 32 李术才, 宋曙光, 李利平等. 海底隧道流固耦合模型试验系统的研制及应用. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 883-890 (Li Shucui, Song Shuguang, Li Liping, et al. Development on subsea tunnel model test system for solid-fluid coupling and its application. *Chin J Rock Mech Eng*, 2013, 32(5): 883-890 (in Chinese))
 - 33 张时音. 煤储层固-液-气相间作用机理研究. [博士论文]. 徐州:

- 中国矿业大学, 2009 (Zhang Shiyin. Study on the interaction mechanism of solid-liquid-gas in coal reservoir. [PhD Thesis]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009 (in Chinese))
- 34 陈小奎. 煤层水力压裂三相耦合数值模拟研究. [硕士论文]. 合肥: 安徽理工大学, 2008 (Chen Xiaokui. Numerical simulation of coal seam hydraulic fracturing three phases coupling research. [Master Thesis]. Hefei: Anhui University of Science & Technology, 2008 (in Chinese))
- 35 Bai H, Ma D, Chen Z. Mechanical behavior of groundwater seepage in karst collapse pillars. *Engineering Geology*, 2013, 164: 101-106
- 36 曹建涛, 来兴平, 张坤等. 急斜煤层综放开采中固-液-气耦合作用模拟试验. 煤炭科学技术, 2010 (2): 6-9 (Cao Jiantao, Lai Xingping, Zhang Kun, et al. Simulation experiment on solid-liquid-gas coupling function in fully mechanized top coal caving mining in steep inclined seam. *Coal Science and Technology*, 2010 (2): 6-9 (in Chinese))
- 37 谢焰. 城市生活垃圾固液气耦合压缩试验和理论研究. [博士论文]. 杭州: 浙江大学, 2006 (Xie Yan. One-dimensional compression theory based on solid-liquid-gas interactions of municipal solid waste. [PhD Thesis]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006 (in Chinese))
- 38 Du Z, Guo X, Zhang Y, et al. Gas-liquid-solid coupled flow modeling in fractured carbonate gas reservoir with high H₂S-content//International Oil Conference and Exhibition in Mexico. Society of Petroleum Engineers, 2006
- 39 孙谋, 刘维宁. 高风险岩溶隧道掌子面突水机制研究. 岩土力学, 2011, 32(4): 1175-1180 (Sun Mou, Liu Weining. Research on water inrush mechanism induced by karst tunnel face with high risk. *Rock Soil Mech*, 2011, 32(4): 1175-1180 (in Chinese))
- 40 曹茜. 岩溶隧道与溶洞的安全距离研究. [硕士论文]. 北京: 北京交通大学, 2010 (Cao Qian. Study on safe thickness for rock between tunnel and karst cave in karst region. [Master Thesis]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010 (in Chinese))
- 41 Wang X, Wang M, Zhang M, et al. Theoretical and experimental study of external water pressure on tunnel lining in controlled drainage under high water level. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23(5): 552-560
- 42 左宇军, 李术才, 秦泗凤等. 动力扰动诱发承压水底板关键层失稳的突变理论研究. 岩土力学, 2010, 31(8): 2361-2366 (Zuo Yujun, Li Shucan, Qin Sifeng, et al. A catastrophe model for floor water-resisting key stratum instability induced by dynamic disturbance. *Rock Soil Mech*, 2010, 31(8): 2361-2366 (in Chinese))