

近断层砂化白云岩隧洞突水涌砂演化过程及防突岩盘安全厚度研究

张延杰^{1,2}, 董家兴³, 周志强³, 周伦顺³, 米健⁴, 刘登学⁵

(1. 云南省滇中引水工程有限公司, 云南 昆明 650000; 2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

3. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500; 4. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021;

5. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 滇中引水工程砂化白云岩隧洞突水涌砂灾害频发, 严重制约工程进度并威胁着施工安全。通过施工跟踪、砂化白云岩隧洞突水涌砂案例统计、理论分析等手段, 总结富水洞段突水涌砂的成灾条件及灾变特征; 基于小扑隧洞典型近断层段的突水涌砂灾害原型, 采用 FLAC^{3D} 模拟突水涌砂过程渗流场、应力场、位移场的演化, 确定突水涌砂灾害的防突岩盘安全厚度临界判据, 并建立系统、可行的灾害防控体系。研究结果表明: (1) 突水涌砂通常发生在断层发育的富水强烈、剧烈砂化洞段; (2) 突水涌砂灾变演化过程中, 强烈、剧烈砂化白云岩孔隙水压力均存在漏斗效应, 剧烈砂化白云岩渗流量变化与强烈砂化白云岩相比存在时滞性, 并且剧烈砂化白云岩的渗流量明显比强烈砂化白云岩小; (3) 强烈砂化白云岩隧洞开挖至距离断层 4 m 时, 隧洞围岩应力出现突变现象, 剧烈砂化白云岩隧洞开挖至距离断层 8~9 m 时, 呈现出明显的拉应力区域; (4) 强烈砂化洞段拱顶最大沉降于开挖至距离断层 1 m 时出现, 而剧烈砂化洞段位移场演化无明显规律; (5) 确定了富水砂化白云岩隧洞防突岩盘安全厚度临界判据, 通过工程实例计算得到的最小安全厚度与实际工程预留接近。结合综合超前地质预报、富水砂化白云岩隧洞突水涌砂演化过程建立的隧洞施工期突水涌砂防控体系, 可为富水砂化白云岩地下工程易发频发的突水涌砂灾害防控提供借鉴。

关键词: 隧道工程; 富水砂化白云岩; 工程原型; 流固耦合; 演化过程; 防突岩盘安全厚度

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2024)03-0639-14

Water and sand inrush evolution and minimum safe thickness of waterproof-resistant slab in sandy dolomite tunnels near the faults

ZHANG Yanjie^{1,2}, DONG Jiaying³, ZHOU Zhiqiang³, ZHOU Lunshun³, MI Jian⁴, LIU Dengxue⁵

(1. Yunnan Dianzhong Water Diversion Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China; 2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 3. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China; 4. Yunnan Institute of Water and Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming, Yunnan 650021, China; 5. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: The frequent water and sand inrush disasters in the sandy dolomite tunnels of the water diversion project in central Yunnan seriously restrict the progress of the project and threaten the construction safety. In this paper,

收稿日期: 2023-11-24; **修回日期:** 2023-12-21

基金项目: 云南省重大科技专项计划(202002AF080003); 长江水利委员会长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2021882/KY); 云南省应用基础研究计划(202201AT070083)

Supported by the Key Science and Technology Special Program of Yunnan Province(Grant No. 202002AF080003), Open Research Fund of Yangtze River Scientific Research Institute of Yangtze River Conservancy Commission(Grant No. CKWV2021882/KY) and Applied Basic Research of Yunnan Province(Grant No. 202201AT070083)

作者简介: 张延杰(1989-), 男, 博士, 2018 年于西安建筑科技大学结构工程专业获博士学位, 现任正高级工程师、硕士生导师, 主要从事岩土工程与隧道理论及施工方面的研究工作。E-mail: yanjie_tm@163.com。通讯作者: 董家兴(1986-), 男, 博士, 现任副教授、硕士生导师。E-mail: djx-djx001@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.1127

the disaster conditions and characteristics of water and sand inrush in water-rich tunnel sections are summarized by means of construction tracking, case statistics and theoretical analysis of water and sand inrush in sandy dolomite tunnels. According to the typical disaster prototype of Xiaopu tunnel, the evolution of seepage field, stress field and displacement field in the process of water inrush and sand gushing is studied by FLAC^{3D} numerical simulation. The critical criterion of safety thickness of rock plate for preventing water and sand inrush disaster is determined by theoretical analysis. In the other hand, systematic and feasible disaster prevention and control system is established. The results show that: (1) water and sand inrush disasters usually occur in the severely completely sandy and water-rich section of the fault development. (2) In the evolution process of water and sand inrush disaster, the pore water pressure of intense and severe sandy dolomite has funnel effect. There is a time lag in the change of seepage flow of severe sandy dolomite compared with that of strong sandy dolomite, the seepage flow of intensely sandy dolomite is obviously smaller than that of intensely sandy dolomite. (3) When the severely sandy dolomite tunnel is excavated to a distance of 4 m from the fault, the stress of the surrounding rock of the tunnel shows a sudden change. When the completely sandy dolomite tunnel is excavated to a distance of 8 – 9 m from the fault, it shows an obvious tensile stress area. (4) The maximum settlement of the vault of the severely sandy tunnel section occurs when the excavation is 1 m away from the fault, while the evolution of the displacement field of the completely sandy tunnel section has no obvious law. (5) The critical criterion of safe thickness of outburst prevention rock plate in water-rich sandy dolomite tunnel is determined. The minimum safe thickness calculated by engineering example is close to the reserved in practical engineering. On the basis of the above research results, combined with the comprehensive advanced geological prediction and the evolution process of water and sand inrush in water-rich sandy dolomite tunnel, the prevention and control system of water and sand inrush in tunnel can be established, which can provide theoretical basis for the prevention and control of water and sand inrush disasters that are prone to occur in water-rich sandy dolomite underground engineering.

Key words: tunnel engineering; water-rich sandy dolomite; engineering prototype; fluid-solid coupling; evolution process; minimum safe thickness of outburst prevention rock plate

1 引言

砂化白云岩是原生沉积的白云岩经历多期构造运动的复杂地质构造环境下,受溶蚀和物理风化的共同作用而导致岩体强度降低,形成细砂状、砂砾状或碎块状岩石的一种特殊地质现象,将砂化白云岩按砂化程度由弱到强分为微砂化、弱砂化、强烈砂化、剧烈砂化 4 个等级^[1]。目前,砂化白云岩主要分布在我国西南地区的地下工程中,如交通隧道方面有:成昆铁路复线吉新隧道^[2-3]、玉蒙铁路秀山隧道^[4-5]、大瑞铁路营盘山隧道;水工隧洞方面:滇中引水工程^[6-7]、杞麓湖调蓄水隧洞工程、纳帕海泄洪隧洞。在砂化白云岩地层中修建地下工程时,常面临着掌子面失稳、顶拱塌方、突水涌砂等地质灾害频发的威胁,特别是富水洞段发生突水涌砂时,将导致施工设备淹没、损毁,造成经济损失和施工进度延缓等问题。

砂化白云岩隧洞的研究主要集中在围岩分类^[8]、施工工艺和灾害处置等方面,富水砂化白云岩隧洞

灾害模式及致灾机制的研究成果较少,且主要集中于吉新隧道。如,王志杰等^[2]通过 FLAC-PFC 耦合数值模拟,对吉新隧道砂化白云岩隧道掌子面的位移、应力及围岩黏结键破坏情况进行研究,揭示了隧道掌子面失稳机制;P. Zhou 等^[3]基于 FLAC^{3D} 研究了砂化白云岩隧道的塑性区、位移、应力变化规律,并基于 PFC 流固耦合对局部侵蚀砂化白云岩掌子面稳定性进行了分析。

突水涌砂演化机制方面,前人大多从理论分析、模型试验和数值模拟等角度开展研究。理论分析方面,李利平等^[9]总结了岩溶水和水压在裂隙岩体突水破坏过程中 4 种作用机制,分别提出最小安全厚度的求解公式。李术才等^[10]总结了不同隧道突水灾害发生条件、判据以及安全厚度分析方法。模型试验方面,王德明等^[11-12]研制了三维地质模型试验系统,并通过试验研究了断层破碎带影响下隧道突水突泥过程中,位移、渗压及突出物质量等的演化规律。黄震^[13]研制了渗流突水模型试验系统,研究了开挖扰动-渗流共同作用下的岩体内部裂隙扩展的时空演化规律。刘金泉等^[14]研制了可考虑质量迁移

和三向应力状态的试验系统。数值模拟方面，杨子汉等^[15-17]通过 FLAC, RFPA, DDA, PFC, COMSOL Multiphysics 等软件模拟研究了隧洞等地下工程的突水涌砂机制，取得了丰硕的研究成果。

在建的滇中引水工程玉溪段输水隧洞，小扑、老尖山、扯那苴、大塘子、螺峰山 5 个隧洞穿越砂化白云岩地层，截至 2023 年 12 月，砂化白云岩洞段累计开挖完成 16.452 km。非富水砂化白云岩洞段，围岩稳定性问题以塌方为主，而以小扑、扯那苴等为代表的富水隧洞，累计发生 17 次突水涌砂。隧洞突水导致工期延误，因施工风险极高，扯那苴隧洞出口段被迫改线。砂化白云岩隧洞突水涌砂具有隐蔽性、突发性、治理难度大、难以预测预报等特点，通过工程实践和科技攻关，在砂化白云岩隧洞的突水灾害防控方面，已积累了一定的工程经验，但对砂化白云岩隧洞的突水孕灾机制和灾害演化的认识不足，现有理论研究水平与灾害防控的需求矛盾突出。基于此，本文通过突水涌砂灾害案例分析，总结归纳出富水砂化白云岩隧洞突水涌砂的成灾条件

与灾变特征；以小扑隧洞 2#支洞上游主洞 YX6+595.2 实际发生的突水涌砂为灾害原型，建立流固耦合数值模型，对近断层砂化白云岩隧洞突水涌砂灾害演化过程进行研究，将数值模拟结果与隧洞突水涌砂灾害对比分析，验证数值模拟的准确性，提出防突岩盘安全厚度临界判据，并基于突水涌砂演化过程、防突岩盘安全厚度临界判据、综合超前地质预报，建立突水涌砂防控体系。研究成果可为砂化白云岩地下工程灾害防控提供理论指导及借鉴，具有重要的工程意义。

2 突水涌砂成灾条件

滇中引水工程玉溪段穿越砂化白云岩洞段时突水涌砂灾害频发，共计出现 17 次较大突水涌砂灾害，典型灾害情况统计见表 1。

2.1 地质条件

灾害案例分析表明，突水涌砂灾害主要发生在强烈、剧烈砂化白云岩隧洞揭露断层处。一方面，

表 1 小扑、扯那苴隧洞施工期典型突水涌砂灾害统计
Table 1 Disasters in sandy dolomite tunnel during construction period

隧洞	桩号	砂化等级	不良地质构造	地下水活动状态	灾害概况
小扑	YX6+595.2	剧烈夹强烈	断层	强	2021 年 5 月 1 日凌晨 4 点小扑 2#支洞上游主洞工作面 YX6+595.2 掌子面右侧起拱线至正拱顶出现涌砂，至上午 10:30 时，涌砂处出现小股线状水，导致突水涌泥。5 月 13 日 15:30 掌子面打设注浆孔对第一次突涌体进行注浆加固时，注浆孔出现涌泥，且涌泥压力巨大，截止下午 16:40 洞内涌泥已淹没隧洞 200 m(约 3 260 m ³ 涌泥量)
	YX6+747.0~YX6+741.0	剧烈夹强烈砂化	无	强	隧洞开挖后，由剧烈砂化白云岩颗粒被水流掏蚀、流失形成 1 个不规则空腔，右侧拱顶塌方处出现多点集中涌水
	YX6+769.8~YX6+763.2	剧烈砂化	断层	强	揭露断层破碎带后因剧烈砂化白云岩颗粒被水流掏蚀、流失形成 1 个不规则空腔，左侧拱顶塌方处出现多点集中涌水
	YX6+789.0~YX6+790.2	弱夹剧烈砂化条带	断层	强	揭露断层破碎带后因剧烈砂化白云岩颗粒被水流掏蚀、流失形成 2 个串通的不规则空腔，地下水集中在空腔底部内呈股流状外泄
	YX7+007.9~YX7+092.7	弱夹强烈剧烈砂化条带	无	强	出水点集中在 YX7+023.0 右侧拱脚处一股、YX7+063.9 左右两侧拱脚处各一股及 YX7+023.0 后左侧会车道内一股沿剧烈砂化条带涌水携带泥沙外流
	YX7+427.9~YX7+495.9	剧烈砂化	断层	中等	掌子面呈股状涌水，冲蚀掏蚀剧烈砂化条带和断层破碎带，垮塌严重，左侧形成较大空腔
	YX8+222.9	强烈夹剧烈砂化	无	弱~中等	左侧起拱线位置在流水冲刷作用下冲蚀孔洞，后续未采取措施，致使孔洞冲刷范围变大变广，沿洞轴线左侧小角度相交，呈带状冲刷，沿轴线掏蚀深度约 20 m
	YX23+378.3~YX23+380.7	弱砂化	无	弱~中等	在掌子面加深炮孔和水平勘探孔中出现突水，最大水量估算为 150 L/s，13 个小时 1 350 m 长的主洞水淹平均深约 2 m
	YX24+040.9~YX24+048.7	强烈夹弱+剧烈砂化条带	无	弱~中等	左侧壁围岩砂化掉块坍塌出现宽 3~5 m，高 3~5 m 的空腔；在空腔隧洞轴线下游方向左侧壁往左侧 1 m，起拱线下方 1 m 处有集中出水点，该点出现突水涌沙，出水量 3~4 L/s
	YX24+089.9	强烈夹剧烈砂化条带	无	弱~中等	剧烈砂化条带处出水量起初 1.0 L/s 随后出水量增大至 20 L/s，逐渐开始突水涌砂，涌沙形成泥石流，渣体堆积长度 15 m，堆渣方量约 200 m ³
扯那苴	YX49+061	强烈砂化	断层	强	第一次突水涌砂淤积泥沙长约 35 m，平均高度 1.3 m，涌泥量约 200 m ³ ，积水深度 65 cm。二次突水涌砂量约 2 238 m ³ ，涌水量 250 m ³ /h，洞内积水深度 1.6 m，洞内涌砂至长度约为 128 m
	YX51+718.1~YX51+703.7	强烈夹剧烈砂化	断层	强	隧洞开挖至砂岩、砂质页岩与白云岩接触带，同时揭露阻水断层，发生多次突水涌砂、塌方灾害，并在后期突水量基本稳定在 32 000 m ³ /d 左右
	YX48+469.0~YX48+415.6	强烈夹剧烈砂化	溶洞	强	隧洞开挖揭露强烈夹剧烈砂化白云岩，并在 YX48+428.0 揭露 2 个小型溶洞，在此期间多次发生坍塌、突水涌砂灾害
	YX48+499.6~YX48+469.0	强烈砂化	无	强	隧洞开挖至 YX48+499.6 砂岩与白云岩分界线时，右边墙发生突泥突水，突泥量约 200 m ³ ，涌出约 30 m，物质组成主要为强烈砂化白云岩碎块夹泥

断层破碎带位置大多为富水洞段,在围岩自重应力、构造应力、水压(动力)等多重作用下,形成具有较高势能灾害源;另一方面,受断层破碎带影响,围岩岩体结构破碎,密集发育的节理可为地下水的运移提供路径。此外,研究区的隧洞大多数位于地下水水位以下,地下水活动导致沿途携带着白云岩砂化后所形成的岩屑、粉末颗粒沿突涌通道运移,使突涌通道扩大,通道扩大后又促进地下水的运移速度,携带更多细颗粒运移。防突岩体是灾害源与突涌通道携带混合体突破岩体结构进入隧洞的最后屏障。强烈、剧烈砂化白云岩作为防突岩体,其力学性能与自稳性较差,在地下水的作用下极易失稳。因此,防突岩体厚度是突水涌砂灾害形成的关键因素。可见,断层破碎带、地下水条件、强烈、剧烈砂化白云岩是隧洞突水涌砂的地质条件。

2.2 施工扰动

砂化白云岩隧洞采用钻爆法施工,爆破振动将在瞬间产生巨大能量,极易造成强烈、剧烈砂化白云岩隧洞围岩损伤甚至破坏;同时,隧洞开挖会引起地应力释放与应力重分布,致使强烈、剧烈砂化白云岩隧洞内部围岩裂纹的萌生、扩展与贯通,进而诱发地下水突破防突岩层,发生突水涌砂灾害。当隧洞施工临近断层或岩性分界线位置,防突岩体预留长度不足,在爆破冲击作用下会产生变形,裂隙扩张,形成突水通道,最终诱发突水涌砂。因此,施工扰动是砂化白云岩隧洞突水涌砂灾害发生的直接诱因。

3 突水涌砂灾变特征

3.1 灾害前兆信息

突水涌砂灾害的发生是有过程的,一般历经灾害萌芽、缓慢发展期、快速发展期、灾害发生期,而在灾害发生前往往有预兆,是可预测预报的^[18]。通过大量灾害案例分析,突水涌砂灾害前兆信息主要包括:

(1) 对线路沿线进行地表地质钻孔或隧洞内超前水平探孔时,出现水流浑浊、钻进速度加快等异常信息时,可能存在空腔、空洞或水体。

(2) 掌子面前方出现“轰隆隆”的异常声响,且伴随掌子面开裂、掉块、塌方等现象。

(3) 在穿越岩层分界线时,隧洞洞身及掌子面围岩存在明显变化,出现湿化、软化加剧的现象,特别是在弱可溶岩过渡到强可溶岩的边界部位以及

砂化条带出现时这类现象愈发明显。

(4) 临近或揭露断层破碎带、向斜核部、岩溶管道等不良地质部位,隧洞围岩破碎程度逐渐加剧,这种现象在强烈砂化白云岩中体现较为明显。

3.2 灾害时空演化

根据突水涌砂灾害的发生时间可将灾害类型划分为直接型、渐进型、间歇型。直接型是指隧洞在开挖过程中直接揭露不良地质构造,充填介质混合体在重力和水压力作用下直接涌出,即刻发生突水涌砂灾害。典型案例如表 1 中扯那直隧洞开挖至 YX48+499.6 时,揭露砂岩与白云岩分界线,直接发生突水涌砂。

渐进型是指隧洞开挖过程中接近不良地质构造过程中,防突岩体内部产生裂隙、贯通,导致突水涌砂灾害发生,随着时间推移,防突岩体逐渐被完全破坏,突水涌砂灾害规模逐渐扩大。典型案例:如小扑隧洞在开挖至 YX24+089.9 掌子面时,起初在剧烈砂化条带处突水,出水量为 1 L/s,随后出水量增大至 20 L/s,逐渐发生突水涌砂灾害。

间歇型是指隧洞开挖过程中揭露不良地质后发生突水涌砂灾害后,因突涌通道被突涌物或现场封堵措施堵塞,突水涌砂现象减弱或停止,掌子面前方突涌介质混合体在突涌通道中再次汇聚,当水压积蓄至一定程度后再次突破堵塞体而发生突水涌砂灾害。典型案例:如小扑隧洞 2[#]支洞 YX6+595.2 掌子面于 2021 年 5 月 1 日凌晨 4:00 揭露断层后发生第一次突水涌砂灾害,采取相应措施后,于 2021 年 5 月 13 日 15:30 发生第二次突水涌砂灾害。

突水涌砂灾害的空间分布特征是指灾害发生位置与地质构造发育部位及隧洞不同工程部位。根据工程案例分析,突水涌砂灾害主要发生在断层破碎带、岩性分界线、向斜核部、岩溶管道、剪胀裂缝等不良地质构造部位,其中受断层影响发生突水涌砂灾害次数是最多的。另外,突水涌砂在隧洞拱顶、拱腰、边墙、底板位置均有发生,其中拱顶灾害发生频率最高。

4 突水涌砂演化过程流固耦合分析

4.1 工程原型

滇中引水工程玉溪段小扑隧洞埋深 90~240 m,最大埋深 334 m。隧洞于 YX6+595.2 处揭露王家湾断裂分支断裂 F32-2,产状 $330^{\circ} \angle 70^{\circ}$,断层宽度为 27 m 左右,地质剖面见图 1。

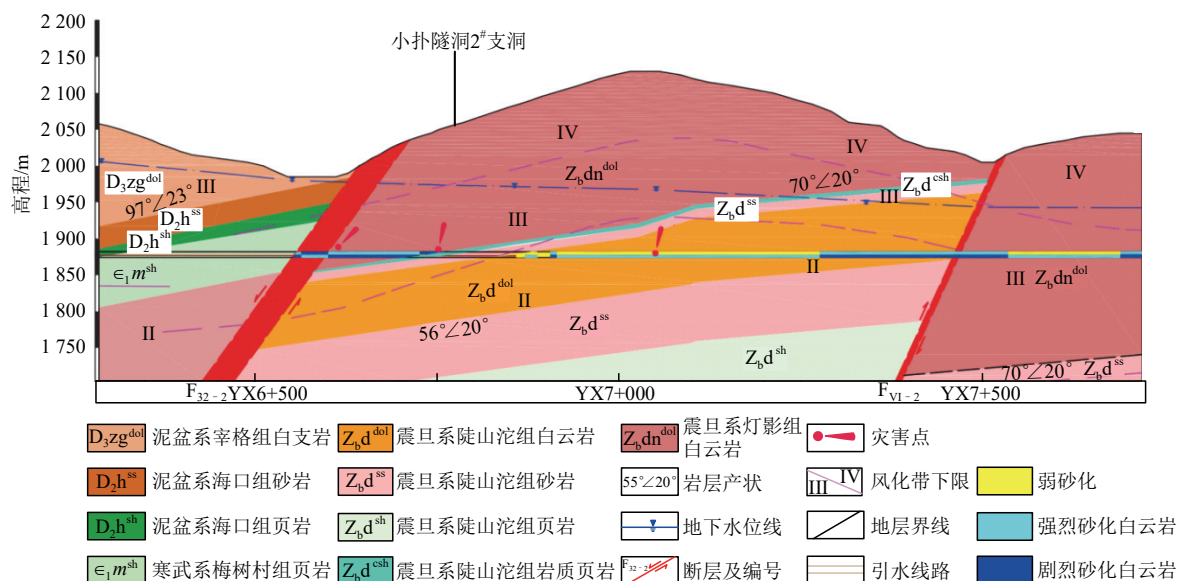


图 1 小扑隧洞 2#支洞上游段突水涌砂段工程地质剖面图

Fig.1 Section diagram of Xiaopu #2 branch tunnel

2021年5月1日凌晨4:00,小扑2#隧洞上游工作面YX6+595.2处(洞顶埋深120m),掌子面右侧起拱线至拱顶出现涌砂,此时掌子面未见较大股状流水;至上午10:30,涌砂处出现股状流水,导致突水涌泥,后续水流持续增大为15 L/s,截止中午13:40洞内涌泥已淹没隧洞70 m(约1300 m³涌泥量),掌子面坍塌并伴随轰鸣声,见图2(a)。灾害发生后,工程参建各方通过清淤、止浆墙施作、注浆加固等方式进行处置。5月13日15:30,掌子面打设注浆孔对第一次突涌体进行注浆加固时,注浆孔出现涌泥,且涌泥压力巨大,截止下午16:40,已淹没隧洞200 m(约3260 m³涌泥量),见图2(b)。



图2 小扑2#支洞 YX6+595.2 工作面突水涌砂灾害照片
Fig.2 Water and sand inrush disaster photos of YX6 + 595.2 working face in Xiaopu #2 branch tunnel

针对该洞段发生的突水涌砂灾害进行如下分析:工程地质条件方面,在灾害发生处揭露张性导水断层(F32-2),该断层还作为 Z_bdn 白云岩与 D_2h , $\in_{1m}$ 等岩层的分界线,多期构造运动作用下,断裂带的周边伴生大量次生断裂,断裂带结构破碎,岩性为 Z_bdn 青灰色薄层状剧烈砂化夹强烈砂化白云

岩,节理裂隙发育,呈散体结构。水文地质条件方面:隧洞穿越的鲁纳寺—牛恋村岩溶水系统与龙潭村岩溶水系统相互连通,地下水丰富,较高的地下水位为隧洞突水涌砂提供了较好的地下水动力条件。施工方面:未及时施作止浆墙并进行注浆加固,隧洞开挖揭露断层后灾害发生。

4.2 流固耦合数值模型

如前所述,滇中引水工程砂化白云岩隧洞突水涌砂主要发生在断层破碎带附近的富水强烈、剧烈砂化洞段,施工扰动改变了围岩渗流场、应力场、位移场,诱发灾害发生。本文以前述突水涌砂灾害为原型,通过流固耦合数值模拟,探究富水砂化白云岩隧洞在断层破碎带影响下的突水涌砂演化过程。

流固耦合模型尺寸为 $60\text{ m} \times 40\text{ m} \times 40\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高), 隧洞断面为城门洞形, 尺寸为 $5.902\text{ m} \times 5.742\text{ m}$ (宽 $\times$ 高), 断层位置位于隧洞前方 31 m 处, 断层宽度设置为 3 m , 倾角为 70° , 其中, 围岩及断层均采用 solid 实体单元进行模拟, 本构模型符合 Mohr-Coulomb 准则。需要说明的是, 因灾害发生初期不能查明断层具体规模, 该模型中断层规模与实际工程存在一定差异。据笔者课题组开展的相关试验, 本模型中的计算参数见表 2。

隧洞开挖力学边界条件为：底部边界约束竖向位移，四周边界约束其水平位移，顶部为自由边界。依据现场实际地下水位线位置，假定地下水位线位于模型顶部，围岩处于饱和地层中。渗流边界条件为：在隧洞开挖前仅模型顶部为透水边界，其余位

表 2 模型计算参数
Table 2 Calculation parameters

砂化等级	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	干密度 $\rho_d/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	孔隙率/%
强烈砂化	2.93	0.35	150	30.96	2 350	4.05×10^{-4}	30
剧烈砂化	0.8	0.39	60	19.29	1 950	2.90×10^{-5}	50
断层带	0.3	0.45	50	19.00	1 850	1.01×10^{-3}	50

置为不透水边界，隧洞开挖后其掌子面为透水边界。小朴隧洞现场揭露隧洞埋深 120 m，故选择在模型顶部施加 120 m 埋深对应的均布荷载模拟上覆岩土体。由于强烈、剧烈砂化白云岩强度极低，特别是剧烈砂化白云岩强度近乎为 0，故而选择抗拉强度设置为 0。

在隧洞开挖过程中，本文认为开挖过程是瞬间完成，所需计算时间远小于渗流扩散所需的时间，在力学计算过程中不考虑渗流的影响。本文的数值模拟主要分为 3 步进行：(1) 开启力学进程，关闭流体进程，完成第一次开挖及支护过程并求解至平衡；(2) 将已开挖洞段流体模型设置为 Null，孔隙水压力设置为 0，开启流体进程，关闭流体进程并采用流固耦合计算求解至平衡；(3) 最后关闭流体进程，开启力学进程，设置单元初始流体模量为 0，完成第一步开挖过程。随后不断重复步骤(1)，(2)，(3)以实现隧洞的连续开挖模拟。

总体上，该模型以 y 轴正向为开挖方向，分 40 步全断面开挖，每次进尺 1.0 m，隧洞开挖总进尺为 40 m，并仅考虑初期支护，不考虑二衬，并设立 6 个监测点(见图 3)，监测隧洞开挖过程中渗流场、应力场、位移场演化规律。

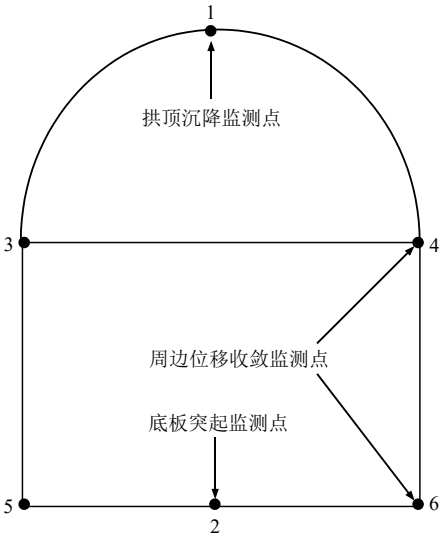


图 3 监测点布设示意图
Fig.3 Layout diagram of monitoring points

4.3 渗流场演化规律
(1) 孔隙水压力演化规律

强烈砂化白云岩隧洞开挖揭露断层过程中孔隙水压力演化过程如图 4 所示。隧洞开挖至 27 m 前孔隙水压力无明显变化，在临近断层约 3 m(开挖至 28 m)时，可观察到明显的渗流路径变化，掌子面顶拱位置水量逐渐增大，开挖至 29 m 时孔隙水压力发生改变，在隧洞周围形成降水漏斗，隧洞揭露断层时，突水点逐渐从拱顶往下部边墙、底板处转移，当穿过断层后，渗流通道贯通，掌子面涌水量较前段均发生了较大变化。

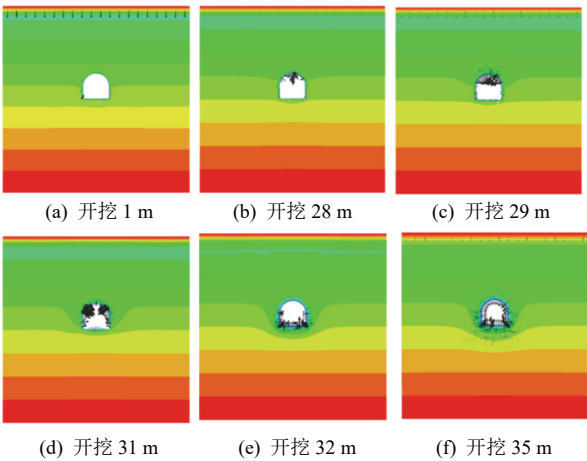


图 4 强烈砂化白云岩渗流场云图
Fig.4 Seepage field cloud diagram of strong sandy dolomite tunnel excavation

剧烈砂化白云岩隧洞开挖揭露断层过程中孔隙水压力演化过程如图 5 所示。剧烈砂化白云岩隧洞开挖初期时孔隙水压力就已形成较为明显的降水漏斗，在后续的开挖过程中水量逐渐增大。在隧洞开挖临近断层过程中，隧洞围岩孔隙水压力逐渐减小，

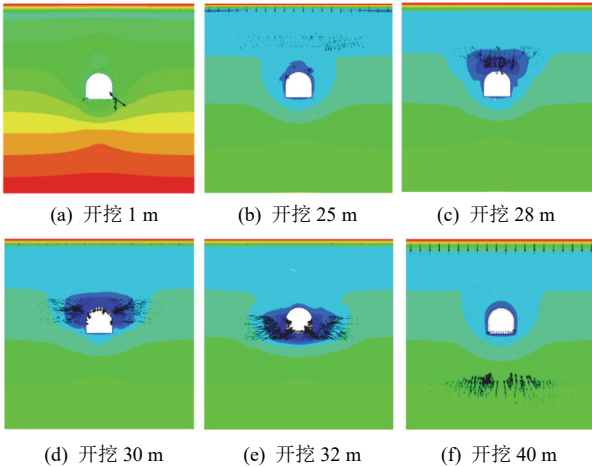


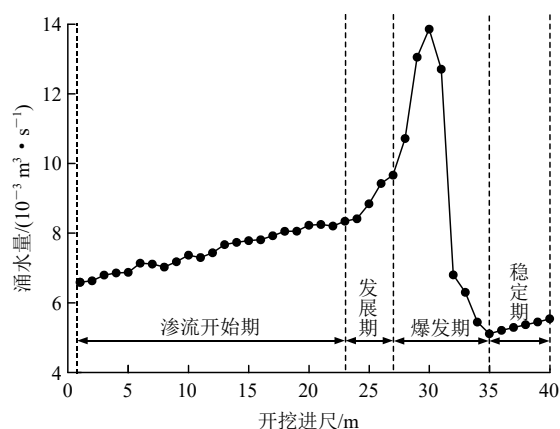
图 5 剧烈砂化白云岩隧洞开挖渗流场云图
Fig.5 Seepage field cloud diagram of violent sandy dolomite tunnel excavation

临近断层位置突然降低。在穿越断层后,隧洞围岩孔隙水压力虽有一定程度增加,但依旧维持着较低水平,渗流量在较长时间范围内保持较高水平。

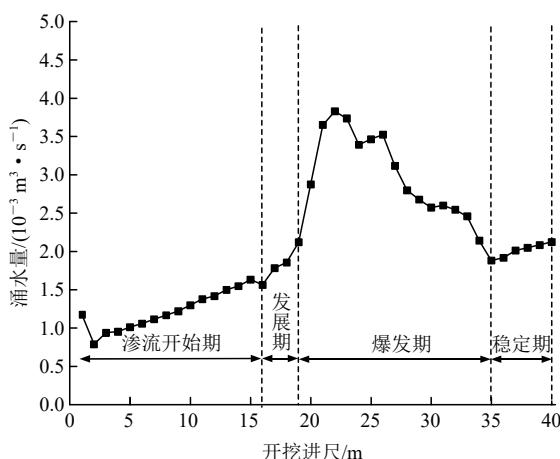
综上,隧洞在开挖过程中,渗流场变化较为明显,隧洞附近的孔隙水压力减小、流速增大,水位逐渐降低,整体上形成了以隧洞为中心的降水漏斗,且随着砂化程度的提升,降水漏斗影响越明显;考虑渗流作用下,隧洞开挖揭露断层时涌水点位置由拱顶→拱腰→拱脚→底板逐渐过渡,且断层对隧洞围岩孔隙水压力的影响随砂化程度的提升而增大。

(2) 渗流量

通过定义 Fish 函数对隧洞开挖过程中的渗流量进行监测,见图 6。



(a) 强烈砂化



(b) 剧烈砂化

图 6 隧洞开挖过程中涌水量监测情况

Fig.6 Monitoring of water inflow during tunnel excavation

隧洞在开挖初始阶段,掌子面涌水量保持着较低水平,强烈和剧烈砂化白云岩隧洞分别为 6.58×10^{-3} 和 $1.17 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 。随着开挖的进行,涌水量逐渐增加,且剧烈砂化白云岩隧洞涌水量明显小于强烈砂化白云岩隧洞。在强烈砂化白云岩隧洞开挖至 23 m

(距断层 8 m)和剧烈砂化白云岩隧洞开挖至 16 m(距断层 15 m)时,涌水量变化速率增加,强烈、剧烈砂化白云岩隧洞在分别开挖至 30 和 22 m 时,涌水量达到最高值,分别为 1.38×10^{-2} 和 $3.82 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$,随后迅速降低。在穿越断层后,涌水量保持一定的速率缓慢增加。依据涌水量变化速率特征,将隧洞涌水分为渗流开始期、发展期、突水爆发期、稳定期 4 个阶段。

综上,强烈砂化白云岩隧洞的涌水量高于剧烈砂化白云岩隧洞,原因在于剧烈砂化白云岩呈现粉砂状,岩体节理裂隙不发育,渗透性能远低于强烈砂化白云岩。随着砂化程度的增加,隧洞涌水的滞后效应表现越明显,强烈砂化白云岩隧洞自涌水量增加至最大值距离为 7 m,而剧烈砂化白云岩隧洞则为 15 m。

4.4 应力场演化规律

为获取富水砂化白云岩隧洞在开挖过程中隧洞围岩应力变化情况,对隧洞拱顶、拱腰、拱脚、底板布设监测点,进行应力变化监测,并绘制应力变化曲线图,如图 7 所示。

强烈砂化白云岩隧洞开挖揭露断层过程中应力场演化过程见图 7, 8。在强烈砂化白云岩隧洞开挖过程中,因底板区域未施作支护措施,故存在较大的拉应力,在渗流作用和断层影响的情况下,强烈砂化白云岩隧洞开挖至 22 m 时(距离断层 9 m),出现应力减小现象,在开挖至 27 m(距离断层 4 m)时,隧洞围岩应力出现突变现象。随着隧洞开挖,强烈砂化白云岩隧洞围岩应力状态逐步变化为拉应力,接近断层时,拉应力作用表现愈发明显。

剧烈砂化白云岩隧洞开挖揭露断层过程中应力场演化过程如图 7, 9 所示。在剧烈砂化白云岩隧洞开挖过程中,应力变化情况与强烈砂化白云岩隧洞情况稍有不同。剧烈砂化白云岩隧洞开挖至 22~33 m 时,呈现出明显的拉应力区域,且有越接近断层,拉应力值越大的现象。

综上可知:在断层影响下,隧洞围岩应力持续增大,临近断层后应力值急速减小。拱顶、拱腰位置因受超前支护影响而使得应力变化较小,而底板位置因未做支护措施,应力变化呈现出上下波动现象。随着砂化程度的增加,开挖过程中应力变化范围进一步扩大。在富水砂化白云岩隧洞施工过程中应格外注意拱腰、拱脚位置应力变化情况,防止因应力过大而导致围岩破坏。

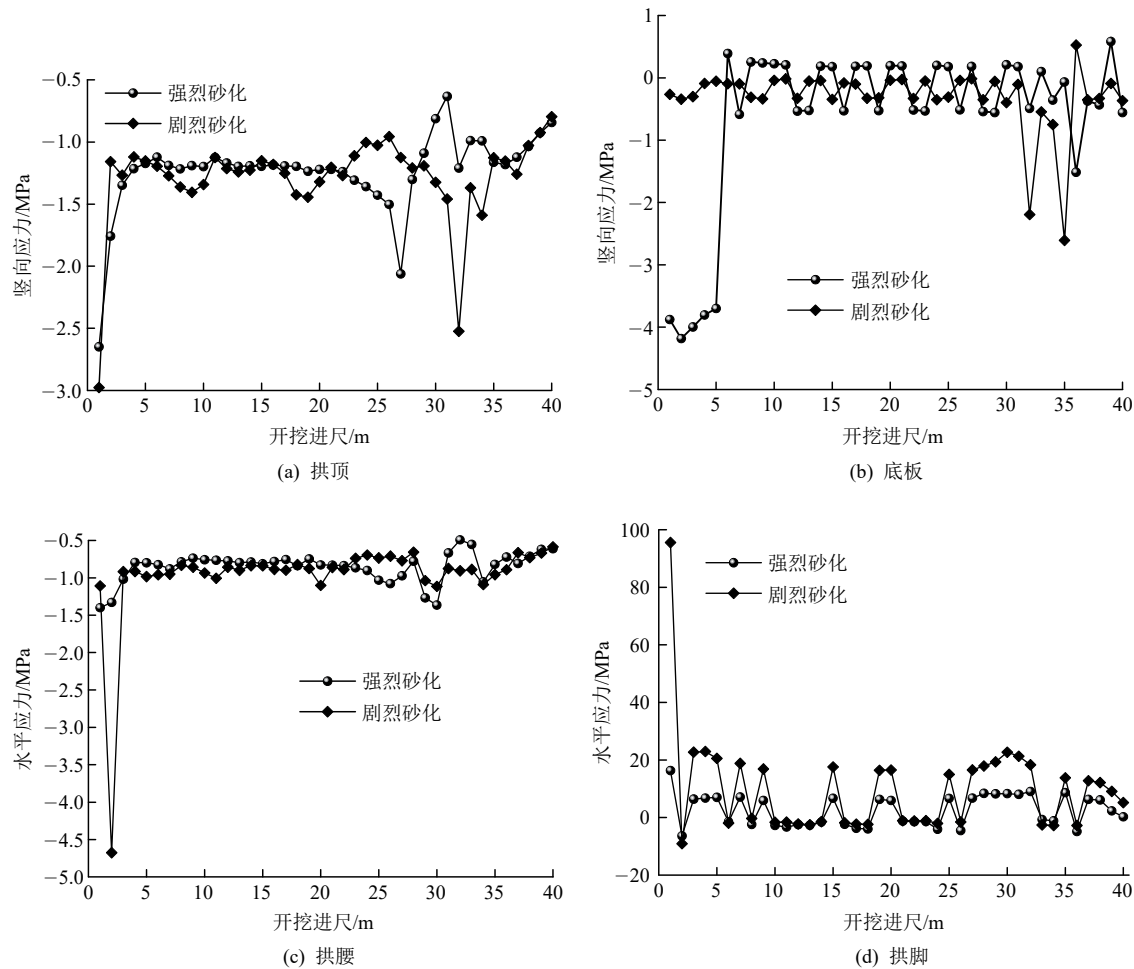


图 7 砂化白云岩隧洞开挖应力变化

Fig.7 Excavation stress variation diagram of sandy dolomite tunnel

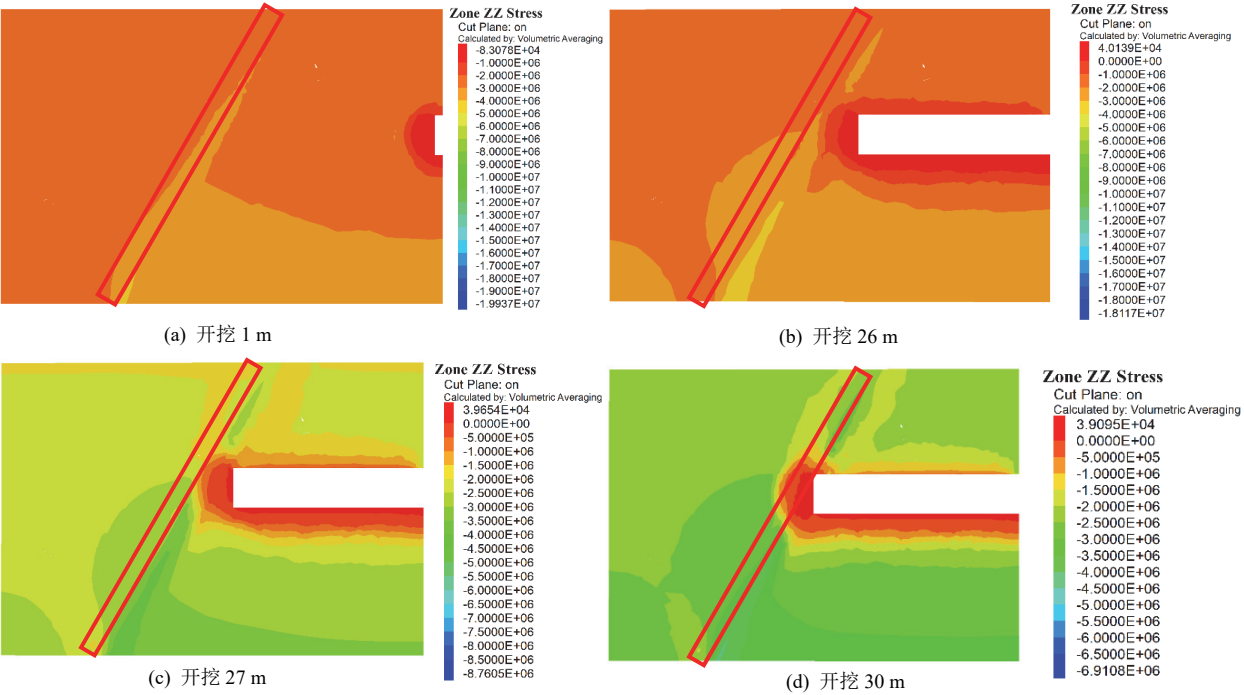


图 8 强烈砂化白云岩隧洞开挖应力云图(单位: Pa)

Fig.8 Excavation stress cloud diagram of strongly sandy dolomite tunnel(unit: Pa)

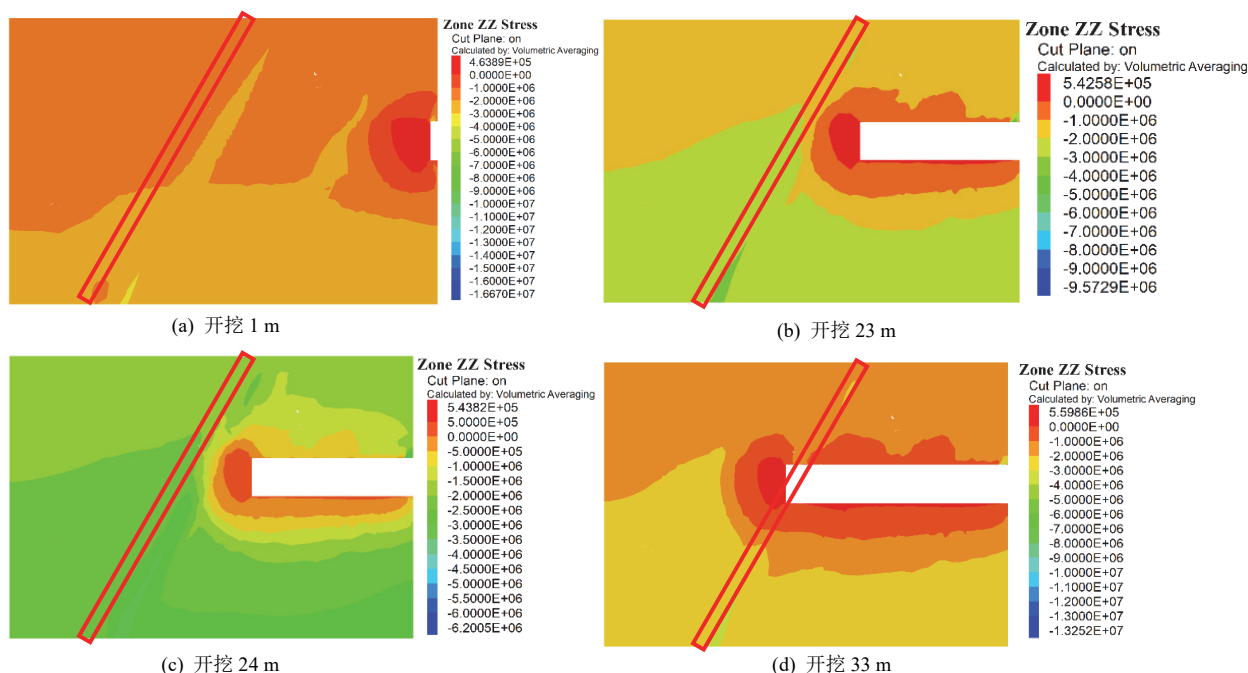


图 9 剧烈砂化白云岩隧洞开挖应力云图(单位: Pa)

Fig.9 Excavation stress nephogram of violent sandy dolomite tunnel(unit: Pa)

4.5 位移场演化规律

强烈、剧烈砂化白云岩隧洞开挖揭露断层过程中, 位移监测数据如图 10 所示, 位移场演化过程见图 11, 12。

由图 10(a), (b)和图 11 可知, 在强烈砂化白云岩隧洞开挖至 22~26 m 时, 拱顶出现沉降现象, 在开挖至 27~30 m 时, 拱顶沉降速率增加, 最大沉降发生于 30 m 位置, 沉降值约 5.28 cm。强烈砂化白云岩隧洞开挖至 26~29 m 时, 底板隆起出现隆起现象, 在 29~34 m 处底板隆起速率增加, 最大隆起发生于 34 m 位置, 隆起值约 11.97 cm。

由图 10(a), (b)和图 12 可知, 剧烈砂化白云岩隧洞开挖过程中, 拱顶沉降位移变化较大, 无明显规律特征, 在开挖至 32 m 处时发生了突变; 而底板在开挖初期出现峰值, 在临近断层时, 隆起位移降低, 揭露断层后位移均发生了突变。造成这种现象的原因在于隧洞施工过程中, 施作了超前大管棚, 间隔为 9 m, 超前支护的施工有效地降低了隧洞拱顶沉降、底板隆起。

根据图 10(c), (d)可知, 在强烈砂化白云岩隧洞开挖过程中, 水平收敛值较小, 且拱脚位置收敛值明显小于拱腰位置, 在开挖至 24 m 水平收敛位移开始增大, 至 31 m 揭露断层后达到峰值, 而拱脚部位滞后于拱腰 1 m 后达到峰值。剧烈砂化白云岩隧洞开挖过程中, 水平收敛情况与强烈砂化白云岩隧洞相似, 不同的是, 剧烈砂化白云岩隧洞位移变化较

大, 未呈现出明显的规律特征。原因在于剧烈砂化白云岩强度较低, 物理力学特性稍弱于断层破碎带, 隧洞位移变化波动较大。

4.6 工程验证

为了验证富水砂化白云岩隧洞突水涌砂灾害演化过程数值模拟结果, 特选择与数值模拟相同工况的突水涌砂案例进行对比分析。由于灾害发生的突然性, 难以全部获取灾害发生前后的应力场与位移场变化资料, 故本文的主要对比分析渗流场的演化结果。

剧烈砂化白云岩隧洞: 小扑隧洞在 YX6+786 揭露小规模断层并发生突水涌砂灾害, 围岩为剧烈砂化白云岩, 在灾害发生前, 隧洞掌子面出现渗水滴水、拱顶线状流水, 随后发生突水涌砂灾害, 但涌水量较小。灾害发生前后掌子面渗流量与剧烈砂化白云岩隧洞的渗流场演化相似, 在数值模拟中, 剧烈砂化白云岩隧洞在开挖初期渗流场变化明显, 但最终出水量较小。

强烈砂化白云岩隧洞: 扯那直隧洞于 YX49+061 揭露 F_{VI-88} 断层破碎带, 围岩岩性主要为强烈砂化白云岩岩屑、碎块。在灾害发生前掌子面出现渗水、滴水、拱部右上方出现股状浑水情况, 随后发生突水涌砂灾害, 涌水量约 240 m³/d。灾害发生前后掌子面渗流量与强烈砂化白云岩隧洞的渗流场演化相似, 在隧洞开挖接近断层破碎带时, 掌子面出现渗水滴水情况, 在揭露断层时, 渗流场发生突变, 且突水量相对于剧烈砂化白云岩隧洞大。

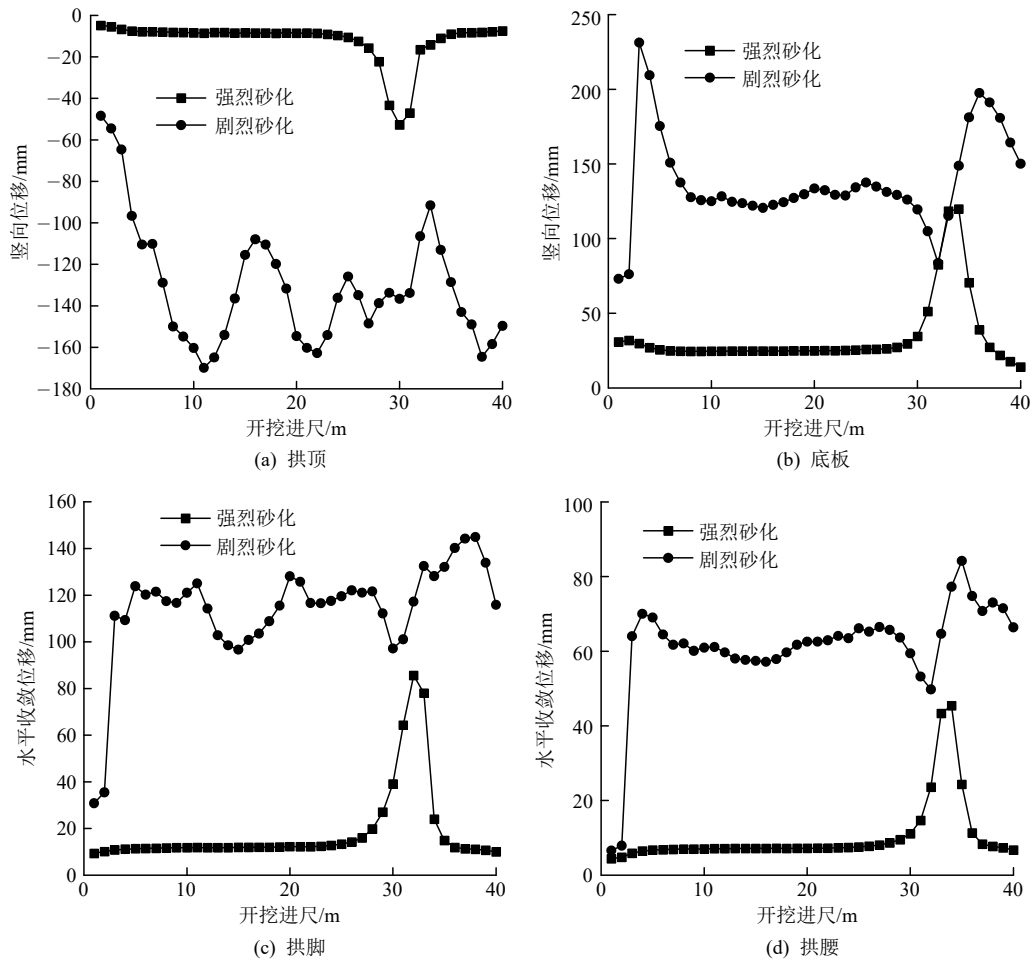


图 10 砂化白云岩隧洞开挖水平位移监测

Fig.10 Excavation displacement monitoring of sandy dolomite tunnel

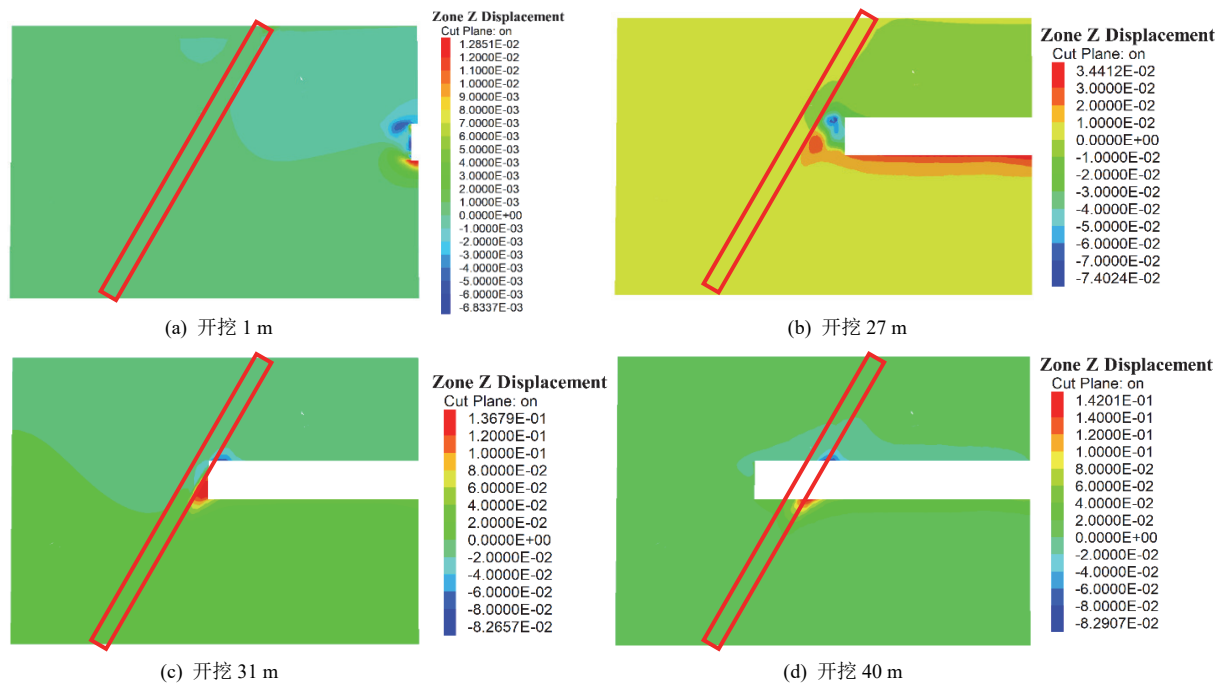


图 11 强烈砂化白云岩隧洞开挖位移云图(单位: m)

Fig.11 Strong sandy dolomite tunnel excavation displacement nephogram(unit: m)

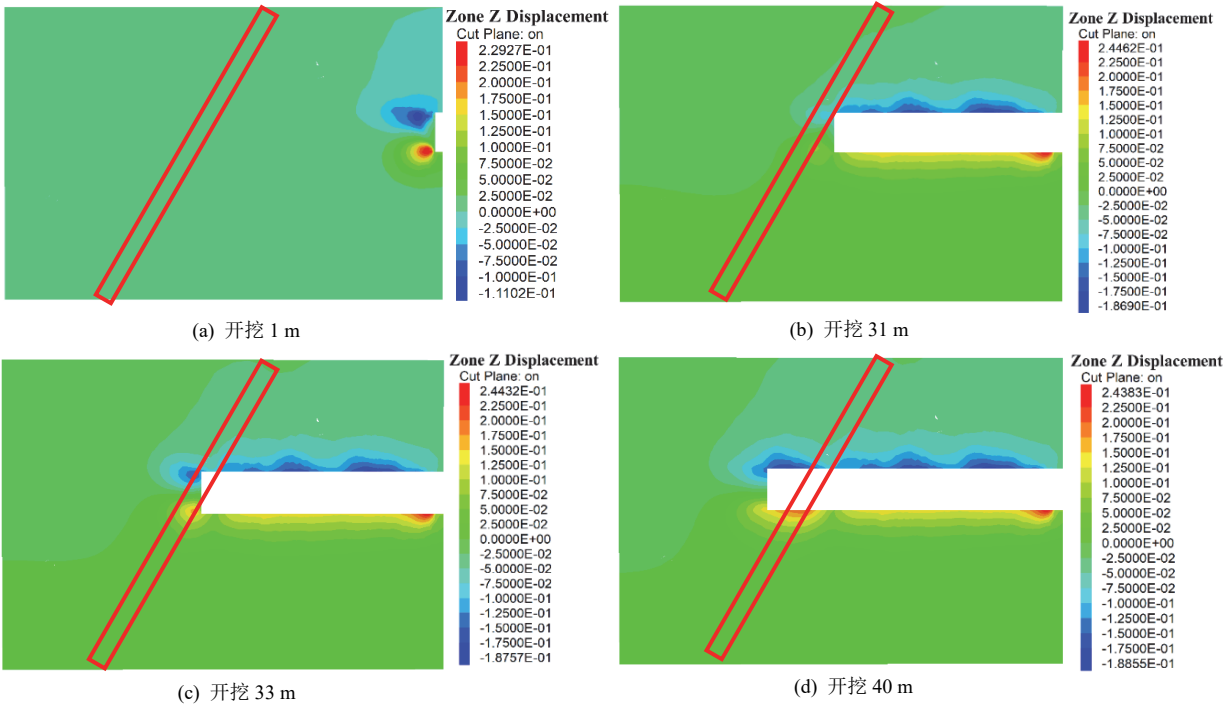


图 12 剧烈砂化白云岩隧洞开挖位移云图(单位: m)

Fig.12 Excavation displacement nephogram of violent sandy dolomite tunnel(unit: m)

综上，该流固耦合模型模拟的富水砂化白云岩隧洞突水涌砂演化过程是相对合理的，可为其突水涌砂灾害的防控提供依据。

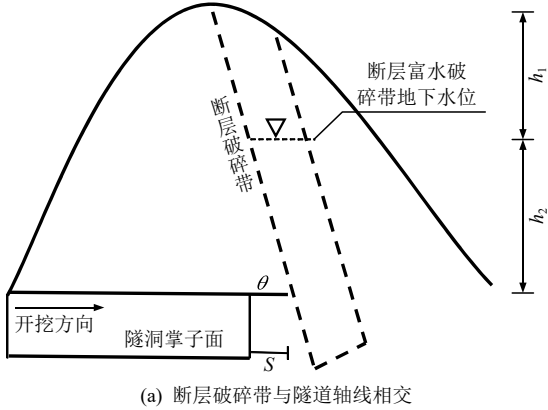
5 灾害防控依据与策略

5.1 防突岩盘安全厚度临界判据

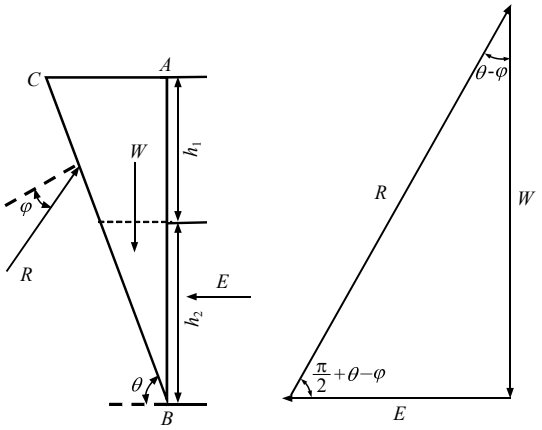
目前，富水砂化白云岩隧洞突水涌砂灾害频发，且多为断层破碎带引发的。因此，有必要对断层破碎带引发的突水涌砂灾害进行研究，建立防突岩盘安全厚度临界判据，为突水涌砂灾害防控提供理论依据。

本文结合李术才等^[19]的研究，可将由断层破碎带引发的富水砂化白云岩隧洞突水涌砂围岩破坏模式简化为力学模型分析。将富水砂化白云岩隧洞防突岩体简化成岩塞模型，破坏形式是极限平衡状态下的防突岩体发生剪切破坏，即防突岩体在水压力与地应力共同作用下发生渗透破坏，见图 13，14。

假设条件如下：(1) 砂化白云岩防突岩体为连续均匀的各向同性弹性体；(2) 断层破碎带岩体结构为散体状，为无黏性的有限岩体，断层破碎带岩体与岩盘之间的摩擦力复杂多变，难以计算，故本文模型假设时暂未考虑此摩擦力的影响，以简化模



(a) 断层破碎带与隧道轴线相交



(b) 有限土体受力简图

(c) 力矢分解

图 13 断层破碎带与隧洞轴线相交模式及断层受力分析图

Fig.13 The intersection mode of fault fracture zone and tunnel axis and the stress analysis diagram of fault

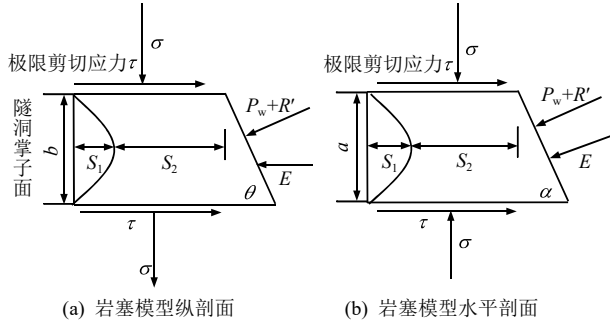


图 14 岩塞力学模型

Fig.14 Mechanical model of rock plug

型的计算过程; (3) 将断层破碎带对防突岩体的作用力简化成水压力 P_w 、后盘岩层应力 E 、以及断层破碎带对防突岩体的主动土压力 R' 、地应力 σ 、极限剪切应力 τ ; (4) 后盘岩层应力 E 为水平方向, 并垂直于断层破碎带岩盘, R 为断层岩盘对破碎带的支撑力; (5) 后盘岩层应力 E 、及断层破碎带对防突岩体的主动土压力 R' 通过优化张 筹等^[20]的研究计算所得; (6) 地应力 σ 通过全土柱理论计算所得, 不考虑隧洞洞门尺寸的影响, 其计算高度为隧洞埋深, 即为 $\sigma = (h_1 + h_2)\gamma''$, 其中 γ'' 为隧洞上覆盖岩层容重, 将地下水看作静水状态, 即 $P_w = \rho gh_2$, 其中 ρ 为水的密度。

对图 13(b)中的断层破碎带有限岩体受力分析时, 忽略水体的压力对岩体的影响, 仅考虑岩体受到地下水的浮力作用, 故其破碎带有限岩体的重力 W 表达式为

$$W = \frac{1}{2} h_2 \frac{h_2}{\tan \theta} \gamma' + \frac{1}{2} \left(\frac{h_2}{\tan \theta} + \frac{h_1 + h_2}{\tan \theta} \right) h_1 \gamma \quad (1)$$

式中: h_1 为地下水位线到地表的高度, h_2 为地下水位线到隧洞拱顶的高度, γ' 为断层破碎带浮重度, γ 为断层破碎带重度, θ 为断层破碎带倾角。

将图 13(b)中的破碎带有限岩体 ABC 看作整体, 根据其受力状态可绘制出图 13(c)的力矢分解图, 据此可得

$$\left. \begin{aligned} W &= R \cos(\theta - \varphi) \\ E &= R \sin(\theta - \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: φ 为断层破碎带内摩擦角。

考虑断层破碎带与隧洞相交情况, 建立岩塞力学模型, 如图 14 所示。

根据图 14 岩塞力学模型, 可推导得出作用在防突岩体的水平分力以及防突岩体所受阻力:

$$F_s = (R' + P_w) \sin \theta \sin \alpha + E \sin \alpha \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} F_H &= S_2 C \tau \\ \tau &= \sigma \tan \varphi' + c \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: R' 为断层破碎带对防突岩体的主动土压力, α 为隧洞与洞轴线夹角, S_2 为防突岩体抗剪切保护区厚度, C 为隧洞截面周长, φ' 为防突岩体内摩擦角, c 为防突岩体黏聚力, F_H 为防突岩体位移受到的阻力, τ 为防突岩体自身切应力。

通过式(3)和(4)可建立富水砂化白云岩隧洞突水涌砂力学判据, 即

$$\left[\frac{\gamma' h_2^2 + (h_1^2 + 2h_1 h_2) \gamma}{2 \tan \theta \cos(\theta - \varphi)} + \rho g h_2 \right] \sin \theta \sin \alpha + \frac{\gamma' h_2^2 + (h_1^2 + 2h_1 h_2) \gamma}{2 \tan \theta} \sin(\theta - \varphi) \sin \alpha = S_2 C [\gamma'' (h_1 + h_2) \tan \varphi' + c] \quad (5)$$

由式(5)可推出岩塞模型处于极限平衡状态时抗剪切保护区厚度:

$$S_2 = \left\{ \left[\frac{\gamma' h_2^2 + (h_1^2 + 2h_1 h_2) \gamma}{2 \tan \theta \cos(\theta - \varphi)} + \rho g h_2 \right] \sin \theta \sin \alpha + \frac{\gamma' h_2^2 + (h_1^2 + 2h_1 h_2) \gamma}{2 \tan \theta} \sin(\theta - \varphi) \sin \alpha \right\} / \{ C [\gamma'' (h_1 + h_2) \tan \varphi' + c] \} \quad (6)$$

因本文涉及的砂化白云岩隧洞多采用钻爆法施工, 此方法会对掌子面前方一定范围内的围岩损伤, 导致其岩体强度降低, 阻水能力大幅降低, 其损伤厚度可称为施工引起的松弛厚度区。富水砂化白云岩隧洞突水涌砂多发生在强烈、剧烈砂化洞段, 考虑到强烈、剧烈砂化白云岩岩体结构破碎, 强度低, 故在强烈~剧烈砂化白云岩洞段中施工引起的松弛厚度区 S_1 一般取 2~3 m, 因此, 最小安全厚度通常为: $S = S_1 + S_2$ 。

小扑隧洞洞顶埋深为 120 m, 地下水位线高于洞顶 110 m, 断层破碎带倾角 $\theta = 70^\circ$, 与洞轴线夹角 $\alpha = 50^\circ$, 隧洞断面周长 $C = 30.03$ m, 断层破碎带容重 $\gamma = 18.13$ kN/m³, 浮重度 $\gamma' = 9.6$ kN/m³, 内摩擦角 φ 为 20° , 防突岩体为强烈~剧烈砂化白云岩, 参照表 2, γ'' , φ' , c 分别为 19.6 kN/m³, 22° 和 100 kPa, 施工引起的松弛厚度区为 3 m。通过式(6)计算得出 $S_2 = 1.58$ m, $S_1 = 3$ m, 故砂化白云岩隧洞最小安全厚度为 4.58 m, 与在实际的工程中预留的安全厚度 5 m 很接近, 说明理论求解出的最小安全厚度具有一定的可靠性。

5.2 突水涌砂灾害防控策略

前文提及的滇中引水工程扯那直隧洞, 因突水涌砂风险极高被迫改线, 截至 2023 年 10 月, 改线段施工进展顺利, 改线相关经验可为类似工程的地质选线提供经典案例借鉴, 相关研究成果将另行撰

文发表。本文主要针对施工期突水涌砂灾害防控策略进行总结,以综合超前地质预报方法为基础,结合灾变前兆信息特征以及富水砂化白云岩隧洞突水涌砂演化过程、防突岩盘安全厚度临界判据建立突水涌砂防控体系,该体系分为灾害预警、临灾决策、灾害处置 3 个部分,如图 15 所示。

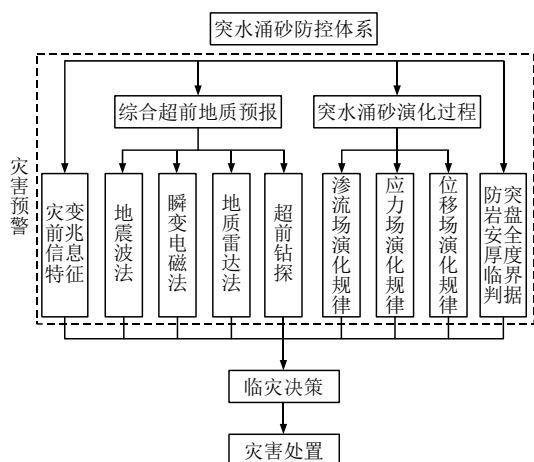


图 15 突水涌砂防突体系

Fig.15 Water and sand inrush prevention system

灾害预警是采用综合超前地质预报、灾变前兆信息特征和富水砂化白云岩隧洞突水涌砂演化过程、防突岩盘安全厚度临界判据 3 种方式相结合进行综合预测。综合超前地质预报是运用地震波法、瞬变电磁法、地质雷达法、超前钻探等多种方式相结合的综合超前地质预报方法对砂化白云岩隧洞掌子面前方围岩情况进行预测预报。富水砂化白云岩隧洞突水涌砂演化过程表明,在遇断层带引发的突水涌砂灾害前,隧洞渗流场、应力场、位移场均会出现相应变化。此时可结合前兆信息特征,结合工程现场监测、超前地质预报成果,并运用富水砂化白云岩隧洞突水涌砂防突岩盘安全厚度临界判据,对富水砂化白云岩隧洞突水涌砂灾害发生的可能性进行预测和验证。

临灾决策是以灾害预警为基础,对砂化白云岩隧洞有发生突水涌砂灾害风险的隧洞进行及时决策,在突水涌砂灾害发生前,采取相应的工程措施,往往能预防突水涌砂灾害的发生,避免造成经济损失以及延缓工程进度。

灾害处置是突水涌砂灾害发生后做出的处置措施。富水砂化白云岩隧洞突水涌砂演化过程与灾变时间特征表明,在首次发生突水涌砂灾害后往往具有一个短暂的稳定期,应抓住时机及时对突水涌砂灾害处置,避免突水涌砂灾害规模扩大或二次突水涌砂灾害的发生,最大程度地减小灾害造成的工程

损失。

6 结 论

(1) 富水砂化白云岩隧洞突水涌砂成灾条件包括地质条件及工程条件,其中地质条件包括断层破碎带、地下水、强烈、剧烈砂化白云岩。灾变特征包括灾害前兆信息、灾害时空演化。

(2) 突水涌砂演化过程中,孔隙水压力演化存在明显的漏斗效应,剧烈砂化白云岩渗流量演化规律与强烈砂化白云岩相比存在明显的时滞性;强烈砂化白云岩的应力场在开挖至距离断层 9 m,出现应力减小现象,在开挖至距离断层 4 m 时,隧洞围岩应力出现突变现象,剧烈砂化白云岩隧洞开挖至距离断层 8~9 m 时,出现明显的拉应力区域,有越接近断层,拉应力值越大的现象。

(3) 强烈砂化白云岩隧洞拱顶最大沉降发生于开挖至距离断层 1 m 时,沉降值约 5.28 cm,底板最大隆起发生于开挖至断层后盘(34 m)位置,隆起值约 11.97 cm;拱腰在开挖揭露断层时水平位移达到峰值约 8.56 cm,而拱脚部位滞后于拱腰 1 m 后达到;而剧烈砂化白云岩隧洞位移上下波动较大,无特别明显的规律。

(4) 确定了富水砂化白云岩隧洞防突岩盘安全厚度临界判据,通过工程实例计算得到最小安全厚度为 4.58 m,接近实际工程预留最小安全厚度 5 m。突水涌砂灾害防控需从地质选线、施工期超前地质预报、灾害预警技术、灾害处置技术等方面开展进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 董家兴, 张晟玮, 程 娟, 等. 模糊层次分析法在白云岩砂化等级划分中的应用[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(2): 109 - 114.(DONG Jiaying, ZHANG Shengwei, CHENG Juan, et al. Application of fuzzy AHP method to classification of dolomite sandification level[J]. Journal Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(2): 109 - 114.(in Chinese))
- [2] 王志杰, 杜逸文, 姜逸帆, 等. 砂化白云岩地层隧洞掌子面失稳机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增 2): 3 118 - 3 126.(WANG Zhijie, DU Yiwen, JIANG Yifan, et al. Study on instability mechanism of tunnel face in sandy dolomite strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(Supp.2): 3 118 - 3 126.(in Chinese))
- [3] ZHOU P, JIANG Y F, ZHOU F C, et al. Disaster mechanism of tunnel face with large section in sandy dolomite stratum[J]. Engineering

- Failure Analysis, 2022, 131: 105905.
- [4] 陆记霞, 刘向阳. 玉蒙铁路秀山隧道涌水涌砂地段施工技术[J]. 隧道建设, 2009, 29(3): 339 - 341.(LU Jixia, LIU Xiangyang. Construction techniques for water and sand gushing section in xiushan tunnel on yuxi-mengzi railway[J]. Tunnel Construction, 2009, 29(3): 339 - 341.(in Chinese))
- [5] 李 东. 秀山隧道水文地质特征分析研究[J]. 铁道工程学报, 2014, (4): 29 - 35.(LI Dong. Research on the hydrogeology characteristics of Xiushan tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, (4): 29 - 35.(in Chinese))
- [6] 张正全. 砂化白云岩突泥涌砂高风险隧道管束注浆质量控制[J]. 路基工程, 2022, (3): 218 - 221.(ZHANG Zhengquan. Quality control of tube bundle grouting for high-risk tunnel with mud and sand inrush in sandy dolomite[J]. Subgrade Engineering, 2022, (3): 218 - 221.(in Chinese))
- [7] 刘新有, 胡开富, 张文涛, 等. 滇中引水工程白云岩砂化隧洞涌水突泥处理研究[J]. 人民长江, 2022, 53(9): 102 - 108.(LIU Xinyou, HU Kaifu, ZHANG Wentao, et al. Study on the treatment of water and mud inrush in dolomite sandy tunnel of water diversion project in central Yunnan[J]. Yangtze River, 2022, 53(9): 102 - 108.(in Chinese))
- [8] 董家兴, 龚欣月, 米 健, 等. 砂化白云岩隧洞围岩分类方法 SHF 构建及应用[J/OL]. 地球科学, DOI: 10.3799/dqkx.2023.059.(DONG Jiaying, GONG Xinyue, MI Jian, et al. Structure and application of SHF classification method for surrounding rock of sandy dolomite tunnel[J/OL]. Earth Science, DOI: 10.3799/dqkx.2023.059.(in Chinese))
- [9] 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[J]. 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[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 523 - 528.(in Chinese))
- [10] 李术才, 王 康, 李利平, 等. 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, et al. 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.(in Chinese))
- [11] 王德明, 张庆松, 张 霄, 等. 断层破碎带隧道突水突泥灾变演化模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2 851 - 2 860.(WANG Deming, ZHANG Qingsong, ZHANG Xiao, et al. Model experiment on inrush of water and mud and catastrophic evolution in a fault fracture zone tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2 851 - 2 860.(in Chinese))
- [12] 张庆松, 王德明, 李术才, 等. 断层破碎带隧道突水突泥模型试验系统研制与应用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 417 - 426.(ZHANG Qingsong, WANG Deming, LI Shucai, et al. Development and application of model test system for inrush of water and mud of tunnel in fault rupture zone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(3): 417 - 426.(in Chinese))
- [13] 黄 震. 流固耦合作用下岩体渗流演化规律与突水灾变机制研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.(HUANG Zhen. Seepage evolution in rock masses and catastrophe mechanism of water inrush under liquid-solid coupling effect[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.(in Chinese))
- [14] 刘金泉, 陈卫忠, 郑卫华, 等. 考虑质量迁移的全风化花岗岩隧道突水突泥试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 190 - 196.(LIU Jinquan, CHEN Weizhong, ZHEN Weihua, et al. Test of water and mud inrush in completely weathered granite tunnels considering variable mass properties[J]. China Journal of Highway Transport, 2018, 31(10): 190 - 196.(in Chinese))
- [15] 杨子汉. 基于饱和与非饱和渗流隧道突水突泥研究[硕士学位论文][D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.(YANG Zhihan. The research on tunnel water and mud bursting phenomenon based on saturated and unsaturated seepage mechanism[M. S. Thesis][D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2013.(in Chinese))
- [16] WU Q, WANG M, WU X. Investigations of groundwater bursting into coal mine seam floors from fault zones[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41: 557 - 571.
- [17] 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[J]. 水利学报, 2011, 42(5): 595 - 601.(WANG Yuan, LU Yuguang, NI Xiaodong, et al. Study on the mechanism of water and mud inrush during the excavation of deep buried tunnel[J]. Hydraulic Journal, 2011, 42(5): 595 - 601.(in Chinese))
- [18] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 21(10): 1 945 - 1 956.(QIAN Qihu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 21(10): 1 945 - 1 956.(in Chinese))
- [19] 李术才, 李晓昭, 靖洪文, 等. 深长隧道突水突泥重大灾害致灾机制及预测预警与控制理论研究进展[J]. 中国基础科学, 2017, 19(3): 27 - 43.(LI Shucai, LI Xiaozhao, JING Hongwen, et al. Research development of catastrophe mechanism and forecast controlling theory of water inrush and mud gushing in deep long tunnel[J]. China Basic Science, 2017, 19(3): 27 - 43.(in Chinese))
- [20] 张 骞, 白松松, 高 昱, 等. 穿越破碎带隧道掌子面力学模型及最小安全厚度研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 141 - 149.(ZHANG Qian, BAI Songsong, GAO Yu, et al. Mechanics model to determine the minimum safe thickness of tunnel-face rock slab at a fracture zone[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 141 - 149.(in Chinese))