

文章编号: 1673-3363-(2012)02-0232-07

岩体突水通道形成过程中应力-渗流-损伤 多场耦合机制

李利平^{1,2}, 李术才¹, 石少帅¹, 周宗青¹, 郭明¹, 王庆瀚¹

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061;

2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要 突水通道形成的渐进性破坏过程是煤矿突(透)水机理研究的关键问题, 采动扰动和地下水双重作用下岩体的持续渗流-损伤行为导致破裂通道最终形成。采用可考虑地下水作用下岩体拉剪和压剪双重破坏准则的计算程序, 真实再现承压含水层与巷道之间隔水岩体的采动裂隙萌生、扩展、贯通直至破裂通道形成的灾变演化过程, 通过对岩体应力场、渗流场和损伤场的耦合演化过程进行分析, 实现了对突水通道形成轨迹的准确定位, 揭示了突水通道形成过程中岩体应力-渗流-损伤的耦合机制。数值实验结果表明: 采动影响下持续的应力-渗流-损伤耦合作用诱发岩体强度降低导致突水通道最终形成, 隔水岩体历经了群裂纹萌生、扩展和贯通的渐变过程; 通道贯通前, 岩体破裂损伤能量激增, 通道部位岩体剪应力急剧下降, 渗透系数和流量则急剧上升, 各物理场均孕育了不同程度的突水前兆信息。

关键词 煤矿; 突水通道; 渐进性破坏过程; 多场耦合机制; 损伤能量; 仿真分析

中图分类号 TP028.8 **文献标识码** A

Multi-Field Coupling Mechanism of Seepage Damage for the Water Inrush Channel Formation Process of Coal Mine

LI Li-ping^{1,2}, LI Shu-cai¹, SHI Shao-shuai¹, ZHOU Zong-qing¹,
GUO Ming¹, WANG Qing-han¹

(1. The Research Center of Geotechnical Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract Gradualness failure formation process of water inrush channel is the key problem for study on water inrush mechanism of mining, sustained coupling effect of seepage damage induced by double effect of groundwater and mining disturbance finally leads to the formation of rupture channel. Calculation program considering the double failure criterion of tension shear and compression shear for rock mass under the groundwater effect, in order to get the catastrophe evolution process of crack initiation, propagation, transfixion and channel formation for surrounding rock of water insulation under mining influence, coupling effect of stress and seepage damage for the catastrophe evolution process has been

收稿日期: 2011-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51139004, 51009085); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金项目(2011490806); 山东省自然科学基金项目(ZR2010EQ033); 山东省博士后创新专项项目(201002032)

作者简介: 李利平(1981-), 男, 河北省鸡泽县人, 讲师, 从事地下工程围岩稳定性及灾害控制方面的研究。

E-mail: yuliyangfan@163.com

Tel: 0531-88395027

analyzed, and the formation trajectory of water inrush channel has been accurately located. Based on the calculation results of numerical experiment, water inrush channel finally forms due to strength decreased of rock mass induced by the sustained coupling effect of stress and seepage damage, and surrounding rock of water insulation experiences group crack initiation, propagation and transfixion, when the water inrush channel of group cracks suddenly connects to each other, rupture damage energy of rock mass increases sharply, shearing stress of rock mass near the channel suddenly drops, permeability coefficient and discharge increase sharply, precursor information of water inrush has been pregnant with the different physical field of rock mass at the channel path.

Key words coal mine; water inrush channel; gradualness failure process; multi-field coupling mechanism; damage energy; simulation analysis

在深部工程活动的扰动下, 赋存在断续节理裂隙岩体中的岩溶水在高压作用下驱动裂隙扩展、贯通直至形成破裂通道, 涌入开挖临空面急剧释放能量, 造成突水、涌泥等严重的地质灾害^[1-5]。在突水的灾变演化过程中, 突水通道的形成具有强烈的突发性和不可预见性, 动力卸荷条件下裂隙岩体的应力-渗流-损伤耦合效应是突水破裂通道形成的关键科学问题, 但目前尚无确定性的方法来反映岩体损伤演化及其耦合效应对突水通道形成过程的影响, 岩体破坏前后群裂纹性态的力学演化过程中的应力-渗流-损伤机制成为亟待解决的关键科学技术难题。

大量岩石实验研究证明^[6-9], 在加载和卸荷条件下岩体的渗流特性与应力的关系完全不一样。在加载的情况下, 裂隙渗透能力迅速减少, 而在卸荷条件下其渗透能力逐渐回升, 但回升的速度比加载减少的速度缓慢。因此, 卸荷时裂隙渗透系数随应力的变化关系不是加载时的简单逆过程, 而与其逆过程具有较大区别。许多学者进行了岩石变形与损伤及其破裂过程中渗透率演化规律的试验研究, 发现不同的岩石或者相同类型但不同孔隙率的岩石, 其损伤过程中渗透率的变化差异较大^[10]。此外, 部分学者通过开展岩石变形、损伤及破裂过程的声发射测试, 获得了岩石破裂的全过程曲线及其伴随的渗透性和声发射事件数的发布情况, 并进一步证实了声发射事件率与岩石损伤及渗透性演化之间的一致性。在岩体渗流-损伤耦合机制的模拟方面, 一般都是基于 ABAQUS, FLAC, UDEC 等商业程序或弹塑性、断裂和损伤数值模型, 引入介质断裂、损伤判断准则, 并在计算过程中嵌入描述介质破坏膨胀区渗透性-损伤演化方程^[11-13]。基于传统的弹塑性理论和有限元方法的数值模型, 大多通过建立塑性变形和渗透率的关系方程来分析应力-渗流的演化机

制, 讨论围岩的弹性区和塑性区^[14-16]; 基于断裂力学理论的数值分析模型, 通过计算应力强度因子与岩石的断裂韧性作比较来判断裂纹的萌生^[17-18]。实质上, 岩体的损伤贯穿于自然状态、工程扰动及其构建完成的整个时间尺度中, 且破坏前后及演化过程中岩体渗流的变化存在较大的时间和空间上的差异性。上述方法不能充分考虑岩石损伤及其后续演化过程对岩体渗流的影响, 难以清晰描述岩体破裂通道形成过程中应力、渗流及损伤的耦合效应。

1 岩石破裂突水过程的多场耦合特征

1.1 渗流场演化特点

突水破裂通道形成过程中, 岩体的渗透性质是一个与宏观裂纹萌生、扩展、贯通及其细观损伤演化密切相关的过程, 且不同的岩性或孔隙结构不同的同一岩性均差别较大, 尤其是渗透率在岩体峰值线弹性变形阶段的响应。大量实验研究发现^[19-21], 很多岩石的渗透率峰值出现在破坏之后的应力软化阶段, 往往滞后于强度峰值, 且岩体体积应变-渗透率的关系呈近似指数关系函数, 可较好的反应岩石损伤过程中整体渗透率的演化规律, 见下式^[21]

$$k(\sigma, p) = \xi k_0 e^{-\beta \left(\frac{\sigma_{ii}/3 - ap}{H} \right)} \quad (1)$$

式中: k 为渗透系数; p 为孔隙水压力; ξ 为渗透率突跳系数; β 为耦合系数; σ_{ii} 为平均应力; H 为 Biot 常数; a 为孔隙水压力系数, 即岩体渗透率是应力及其诱发的损伤变量的函数。

显然, 在岩石加载变形破坏过程中, 其内部细观结构的变化是导致渗透率发生显著变化的根本原因, 且岩石峰后的渗透率普遍大于峰前, 最高值出现在岩石峰后软化段, 呈现明显“突跳”现象。因此, 可认为在弹性阶段, 岩石应力和渗透率呈负指数关系, 损伤后考虑渗透性的突跳增大, 通过岩体

单元弹模刚度退化和渗流-损伤耦合迭代的方式来反应突水通道形成过程中群裂纹演化的渗流-损伤耦合现象。

1.2 应力-损伤场演化特点

在突水破裂通道的群裂纹萌生或扩展之前，由于岩体是低渗透的，破裂通道及其附近岩体的应力-渗流耦合效应并不明显。但随着采动扰动和地下水压力的持续作用，新的损伤点不断出现，直接影响群裂纹的扩展、贯通直至突水通道形成的整个过程，应力-渗流-损伤的耦合效应极为明显。因此，为充分反应岩体损伤后渗透系数的急剧增大特征，可将其视为带有残余强度的弹脆性材料，且其加载和卸载过程的应力-损伤场演化规律符合弹性损伤理论，采用 Mohr Coulomb 准则和最大拉伸强度准则作为损伤阈值对单元进行损伤判别^[22]。

当单元达到抗拉强度 f_t 的损伤阈值时，损伤变量

$$D = \begin{cases} 0 & \varepsilon_{t0} \leq \varepsilon \\ 1 - \frac{f_{tr}}{E_0 \varepsilon} & \varepsilon_{t0} \leq \varepsilon < \varepsilon_0 \\ 1 & \varepsilon \leq \varepsilon_{t0} \end{cases} \quad (2)$$

此时，对应的单元的渗透系数为

$$k = \begin{cases} k_0 e^{-\beta(\sigma_3 - \alpha p)} & D = 0 \\ \xi k_0 e^{-\beta(\sigma_3 - \alpha p)} & 0 < D < 1 \\ \xi' k_0 e^{-\beta(\sigma_3 - p)} & D = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中： f_{tr} 为抗拉残余强度； ξ' 为单元破坏时渗透系数的增大系数。

当单元剪应力达到损伤阈值时，损伤变量

$$D = \begin{cases} 0 & \varepsilon < \varepsilon_{c0} \\ 1 - \frac{f_{cr}}{E_0 \varepsilon} & \varepsilon_{c0} \leq \varepsilon \end{cases} \quad (4)$$

此时，对应的单元渗透系数为

$$k = \begin{cases} k_0 e^{-\beta(\sigma_1 - \alpha p)} & D = 0 \\ \xi k_0 e^{-\beta(\sigma_1 - \alpha p)} & D > 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中： f_{cr} 为抗压残余强度； ε_{c0} 为最大压应变， ε_r 为残余应变。

通过以上判别和计算，岩石破裂过程中地下水

压力传递通过单元渗流-损伤耦合迭代来实现，可寻求和追踪破裂通道起始点及其延伸轨迹，从而记录整个通道形成的演化过程。实质上，岩石的有效应力与变形和破坏均密切相关，岩石发生损伤不但改变了其渗透性，其有效应力方程也应予以修正，不再累述。

2 突水通道形成过程的数值实验

2.1 分析模型及参数

1) 计算模型

据实际资料，巷道左上方存在一水源持续补给承压水体，计算模型平面尺寸为 160 m×200 m，自上而下由强风层、弱风化层、微风化层和基岩四部分组成。

模型周边均设为隔水边界，顶部自由面，左右边界位移约束，底部固定，水体为承压 1 MPa 的含水层，半径取 10 m，巷道半径取 5 m，埋深 150 m。监测线 L 为水体和巷道中心连线的垂直平分线，自下至上以 1 m 为单位平分 8 段，依次编号为 1~8 号单元，分别代表突水通道的不同位置，见图 1。

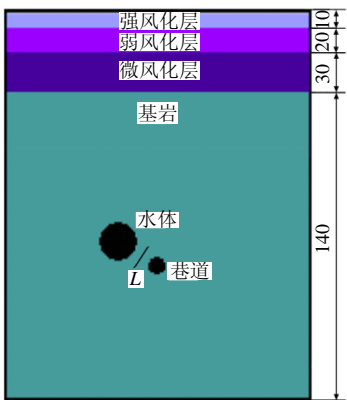


图 1 数值计算模型 (m)

Fig.1 Numerical model for simulation

2) 计算参数

基于尺寸效应和计算速度考虑，模型划分 32 000 个细观单元，反映材料力学性质均匀程度的参数 m 取为 2，岩体只承受自重应力和水压力，各岩层基本力学参数见表 1。

表 1 计算模型基本力学参数

Table 1 Mechanical parameters employed in calculation

岩层	弹模 E/GPa	抗压强度 σ_c /MPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	泊松比 μ	容重 $\gamma/(\text{kN m}^{-3})$	渗透系数 $K/(\text{m d}^{-1})$	孔隙压力系数 α
强风化	0.73	10	20	0.35	2 060	0.22	0.65
弱风化	2.50	15	25	0.32	2 220	0.20	0.61
微风化	3.60	25	27	0.31	2 380	0.12	0.55
基岩	5.50	30	30	0.28	2 590	0.10	0.50

2.2 计算结果分析

1) 应力-渗流演化特征

巷道开挖前, 水体附近已形成稳定的应力场与渗流场; 卸荷诱发围岩应力场与渗流场的急剧变化, 尤其在水体与巷道之间的部位; 随着渗流-损伤的逐

渐加剧, 围岩不断发生裂纹萌生、扩展与贯通行为, 逐渐改变了裂隙水渗流与贮存的条件, 从而加剧了渗流的灾变进程。图2为突水通道形成过程中, 通道部位围岩剪应力与渗流场的变化规律。

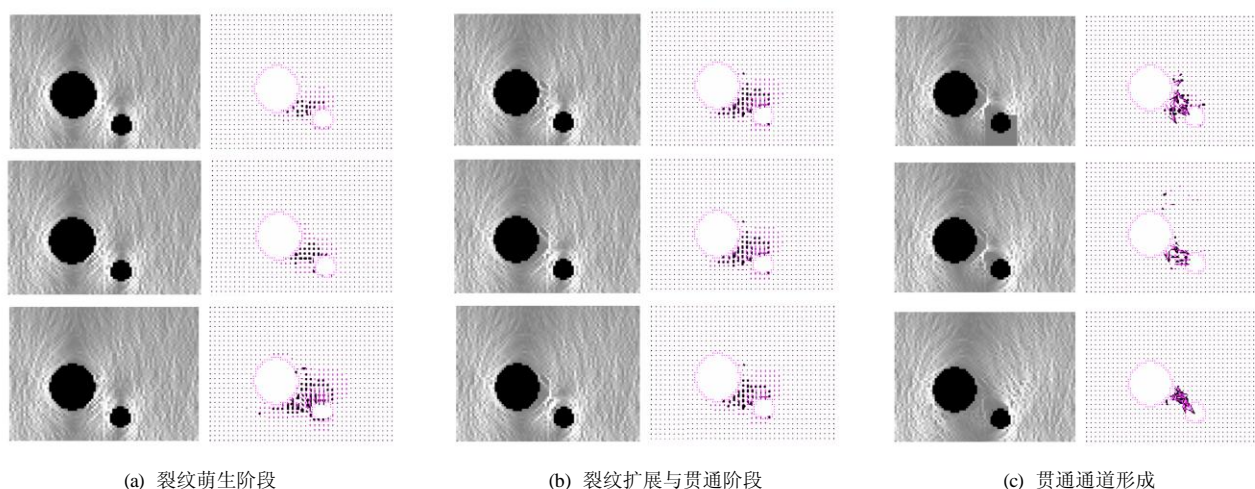


图2 应力-渗流耦合演化特征

Fig.2 Coupling evolution characteristics of stress and seepage

在突水通道形成的过程中, 通道及其附近围岩的剪应力均发生规律性变化, 通道附近围岩由于受渗流-损伤的影响很小, 其剪应力分布曲线具有一致性(第1~16步计算); 而通道部位的围岩由于损伤程度的不断累积, 剪应力在通道贯通阶段与之前裂纹的萌生与贯通阶段呈现相反的变化规律, 在第24步计算中, 4~7号单元的剪应力急剧减小, 表明压剪和拉剪破坏的裂纹已贯通成形, 在水压的作用下逐渐被冲刷运移, 直至形成最后的突水通道。由截面单元的剪应力变化曲线, 可初步定位突水通道的大体发育部位, 即3~7号单元。为进一步确定其具体位置, 可对其截面单元的渗透系数变化曲线进行分析。

单元渗透性质的变化具有一致性, 在突水通道形成的过程中整体处于上升趋势。巷道围岩卸荷诱发渗流场初始调整, 随着裂纹的萌生、扩展与贯通, 损伤区单元的渗透系数逐渐变大, 在贯通瞬间发生突跳。从3~7号单元渗透系数的变化曲线来看, 4~7号单元应为通道形成的主要部位, 见图3和图4。

2) 渗流-损伤演化特征

在卸荷初期, 围岩尚未出现明显的损伤破坏, 未能出现能量释放的声发射事件; 在第6步计算中, 随着卸荷与渗流双重作用的显现, 岩石内部逐渐萌

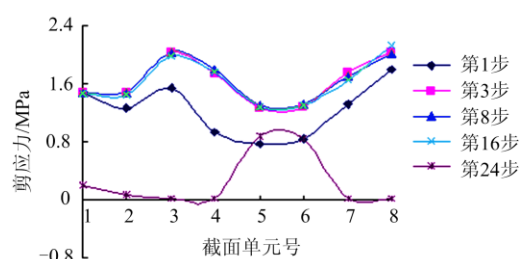


图3 通道区剪应力变化曲线

Fig.3 Shear stress change characteristic in passage region

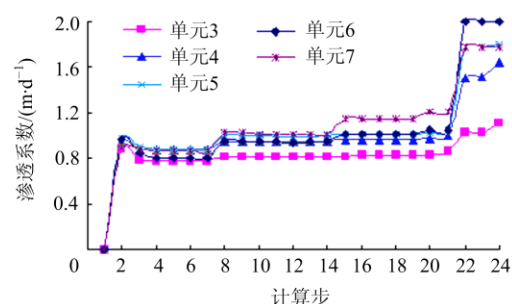


图4 主损伤区渗透系数变化曲线

Fig.4 Permeability coefficient change in main damage zone

生大量的微裂纹, 并开始以弹性能的形式释放损伤破裂能量; 在第15~20步中, 岩石内部处于裂纹扩展与贯通的稳定增长阶段, 损伤破裂能量上升比较缓慢; 但在第21步, 破裂能量突然增加, 表明岩石

内部损伤区已逐渐贯通，聚集了大量水流，已濒临突变边界；第 24 步是损伤破裂能量的主要增长期，单步声发射事件 165 次，通道已被完全贯通，巷道与水体之间已形成稳定的突水路径，具体见图 5。

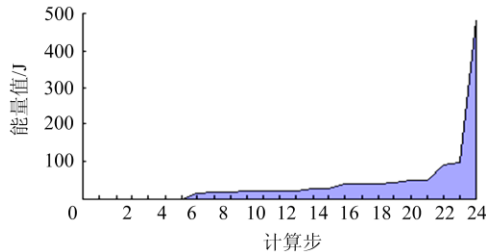


图 5 通道形成的能量释放图
Fig.5 Energy release for the passage formation of water-inrush

在损伤破裂能量的释放过程中，单元的渗透性在不断发生变化，但在裂纹萌生和扩展的过程中变化比较平稳，渗透作用的增大又不断促进岩石的持续损伤破坏，岩石内部萌生的微裂纹不断扩展、贯通，逐渐积聚了大量的能量。随着损伤破坏程度的增加，在第 24 步计算中，局部单元的渗透系数发生突跳，流量瞬间变大，破裂岩石被贯通，形成突水通道。通过对潜在通道截面单元流量曲线的对比分析，并结合剪应力变化曲线可以定位通道的具体形成位置，单元 4~6 为突水路径的主要通道，附近的 1，2，7 和 8 号单元的流量基本保持不变，表明该部位的岩体未产生明显的损伤破坏，属通道形成的边界部分，具体见图 6。

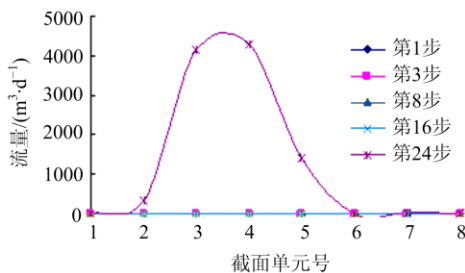


图 6 主损伤区流量变化曲线
Fig.6 Water flow rate change in main damage zone

3) 渗流-损伤演化特征

在渗压和围岩卸荷的双重影响下，巷道与水体之间部位的岩体不断发生裂纹萌生、贯通的渗流-损伤行为，随着贯通尺度的增加最终形成连接水源与巷道破裂面的突水通道。实质上，突水通道的形成过程也是岩体内部能量释放的过程，拉破坏或剪破坏发生时产生的声发射事件记录了通道演化的形

成轨迹，见图 7。

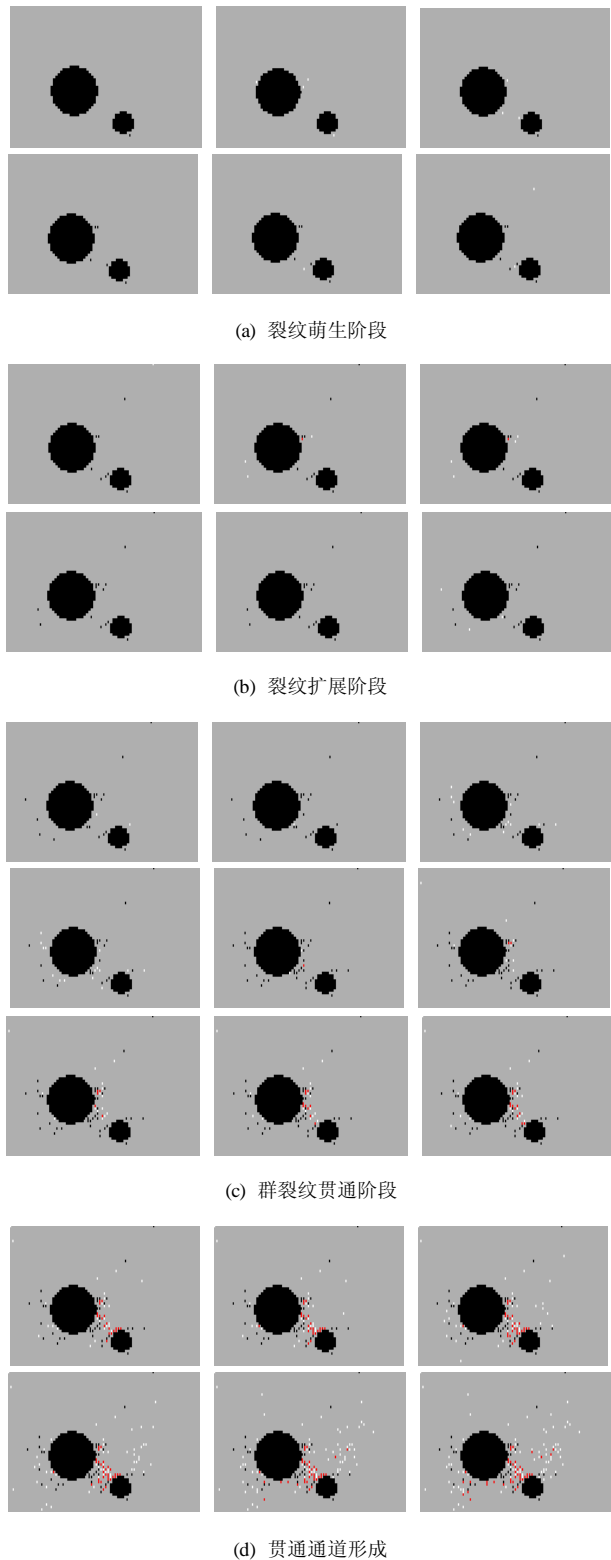


图 7 突水通道的演化过程
Fig.7 Evolution process of water-inrush passage

在裂纹萌生阶段：由于围岩卸载的影响，巷道周边围岩最早出现压剪破坏，尤其在与水体连接方

向上表现更为明显。同样, 水体周边围岩也呈现同样的破坏规律, 但大量微裂纹的产生均由压剪破坏引起, 主要受围岩卸荷影响, 与渗流-损伤的关系不大。

在裂纹扩展阶段: 随着巷道围岩卸载的进一步影响, 巷道周边微裂纹的数量开始增加, 并逐步向水体方向扩展, 大部分裂纹的尖端在水压的作用下开始萌生出多条不规则的裂纹, 并形成稳定扩展。同时, 水体周边局部围岩开始出现拉剪破坏, 但整体破坏仍然以压剪破坏为主。

在群裂纹贯通阶段: 由于水体为无穷持续补给水源, 其水压值保持不变, 渗流的持续作用诱发岩体发生大面积损伤, 在巷道与水体连接方向上产生大量发生压剪和拉剪破坏的裂纹, 水流不断向裂纹汇集, 在渗流-损伤的持续作用下, 相临裂纹逐渐贯通形成尺寸更大的新裂纹, 并逐渐向附近优势裂纹扩展贯通。

在通道贯通阶段: 随着裂纹的进一步贯通, 拉剪破坏的裂纹逐渐占据了主导地位, 在巷道与水体连接方向上已汇集成线, 并且在巷道左拱腰部位发生了大面积的拉剪破坏。此时, 仅在水压的持续作用下, 突水通道即可形成。

3 结 论

1) 基于大量突水案例及相关研究成果的系统总结分析, 认为采动扰动和地下水双重作用下岩体的持续渗流-损伤效应是导致破裂通道最终形成的主导因素, 采用岩体渗透系数的两阶段特征函数及其损伤演化方程来表征渗流-损伤的持续耦合行为, 可真实再现隔水岩体破裂通道形成的灾变演化过程。

2) 在采动扰动和持续的渗流-损伤作用下, 隔水岩体历经了群裂纹萌生、扩展、贯通直至破裂通道形成的渐变过程, 表现在通道区剪应力、渗透系数以及流量的规律性变化上, 通道及其附近围岩的破裂能量值与之相对应, 通过捕捉和记录损伤点可真实描绘出突水通道形成的历史演化轨迹。

3) 在突水通道形成的不同阶段, 通道及其附近围岩的力学状态呈现规律性变化, 基本上均经历了平缓变化期、快速变化期和急剧变化期。在通道贯通瞬间, 岩体破裂损伤能量激增, 通道部位岩体剪应力急剧下降, 渗透系数和流量则急剧上升, 各物理场均孕育了不同程度的突水前兆信息。

参考文献:

- [1] 谢兴华, 速宝玉, 高延法. 矿井底板突水的水力劈裂研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 987-993.
XIE Xing-hua, SU Bao-yu, GAO Yan-fan. Numerical study on water inrush above a confined aquifer in coal mining using hydro-fracturing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 987-993.
- [2] 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 Li-ping, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, Study of mechanism of water inrush induced by hydraulic fracturing in karst tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 523-528.
- [3] 赵阳升, 胡耀青. 承压水采煤理论与技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004: 1-3.
- [4] 李顺才, 陈占清, 缪协兴, 等. 破碎岩体中气体渗流的非线性动力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1372-1380.
LI Shun-cai, CHEN Zhan-qing, MIAO Xie-xing, et al. Nonlinear dynamic study on gas flow in broken rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1372-1380.
- [5] 李利平. 高风险岩溶隧道突水灾变演化机理及其应用研究[D]. 济南: 山东大学岩土与结构工程研究中心, 2009.
- [6] 刘先珊, 林耀生, 孔建. 考虑卸荷作用的裂隙岩体渗流应力耦合模型[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 193-196.
LIU Xian-shan, LIN Yao-sheng, KONG Jian. Study of hydro-mechanical coupling of fractured rock masses considering unloading effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Supp): 193-196.
- [7] 艾万民. 岩体卸荷应力场-渗流场耦合试验研究及数值分析[M]. 重庆: 重庆大学土木工程学院, 2005.
- [8] 张黎明, 王在泉, 孙辉, 等. 岩石卸荷破坏的变形特征及本构关系[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1626-1631.
ZHANG Li-ming, WANG Zai-quan, SUN Hui, et al. Failure characteristics and constitutive model of rock under unloading condition [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1626-1631.
- [9] 李燕, 杨林德, 董志良. 各向异性软岩的变形与渗流耦合特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1231-1236.
LI Yan, YANG Lin-de, DONG Zhi-liang. Experimental research on characteristic of deformation and hydromechanical coupling of anisotropic rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1231-1236.
- [10] SCHULZE O, POPP T, KEM H. Development of damage and permeability in deforming rock salt [J]. Engineering

- Geology, 2001, 61: 163-180.
- [11] 杨天鸿, 唐春安, 谭志宏, 等. 岩体破坏突水模型研究现状及突水预测预报研究发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 268-277.
- YANG Tian-hong, TANG Chun-an, TAN Zhi-hong, et al. State of the art of inrush models in rock mass failure and developing trend for prediction and forecast of groundwater inrush [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 268-277.
- [12] WANG J A, PARK H D. Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress-strain process [J]. Engineering Geology, 2002, 63(2): 291-300.
- [13] 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 290-297.
- LI Lian-chong, TANG Chun-an, LIANG Zheng-zhao, et al. Numerical analysis of pathway formation of groundwater inrush from faults in coal seam floor [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 290-297.
- [14] 王星华, 章敏, 王随新. 考虑渗流及软化的海底隧道围岩弹塑性分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3267-3272.
- WANG Xing-hua, ZHANG Min, WANG Sui-xin. Elastoplastic analysis of surrounding rocks of subsea tunnel with consideration of seepage and material softening [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3267-3272.
- [15] 张金才, 王建学. 岩体应力与渗流的耦合及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1981-1989.
- ZHANG Jin-cai, WANG Jian-xue. Coupled behavior of stress and permeability and its engineering applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 1981-1989.
- [16] 文建华. 隧道结构稳定性及其流固耦合损伤研究[D]. 武汉: 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 2009.
- [17] 赵延林. 裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合理论及应用研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2009.
- [18] WOLKERSDORFER C, BOWELL R. Contemporary reviews of mine water studies in Europe [J]. Mine Water and the Environment, 2004, 23: 161-162.
- [19] 杨天鸿, 徐涛, 冯启言. 脆性岩石破裂过程渗透率演化试验[J]. 东北大学学报, 2003, 24(10): 974-977.
- YANG Tian-hong, XU Tao, FENG Qi-yan. Experimental investigation on permeability evolution of brittle rock in failure process [J]. Journal of Northeastern University, 2003, 24(10): 974-977.
- [20] 刘洪磊, 杨天鸿, 于庆磊, 等. 凝灰岩破坏全过程渗流演化规律的实验研究[J]. 东北大学学报, 2009, 30(7): 1030-1033.
- LIU Hong-lei, YANG Tian-hong, YU Qing-lei, et al. Experimental study on fluid permeation evolution in whole failure process of tuff [J]. Journal of Northeastern University, 2009, 30(7): 1030-1033.
- [21] 杨天鸿, 唐春安, 李连崇, 等. 非均质岩石破裂过程渗透率演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 758-762.
- YANG Tian-hong, TANG Chun-an, LI Lian-chong, et al. Study on permeability evolution in failure process of inhomogeneous rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 758-762.
- [22] 李连崇, 杨天鸿, 唐春安, 等. 岩石水压致裂过程的耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1060-1066.
- LI Lian-chong, YANG Tian-hong, TANG Chun-an, et al. Coupling analysis on hydraulic fracturing process of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1060-1066.