

直墙拱形砂岩隧洞破坏特征及破坏前兆研究

朝文文¹, 高 剑², 郭得福³

¹青岛理工大学理学院, 山东 青岛

²中石油华东设计院有限公司, 山东 青岛

³中铁隧道集团一处有限公司, 重庆

收稿日期: 2023年3月12日; 录用日期: 2023年4月13日; 发布日期: 2023年4月20日

摘 要

为研究地下洞库岩体的破坏特征, 开展含孔洞真实砂岩模型双轴压缩试验, 同时结合声发射系统从岩石内部分析裂纹的演化过程及破坏前兆信息。试验结果表明, 洞口拱脚处由于应力集中最先出现裂纹, 裂纹沿着尖端向拱肩发展。洞室内部出现板裂现象, 两侧直墙岩体受裂纹切割掉落至拱底。加载前期声发射信号微弱, 随着裂纹的萌生及扩展, 声发射活动逐渐变得活跃。即将到达隧洞峰值荷载时, 声发射信号突然下降进入平静期, 达到峰值荷载时声发射特征参数跃升均达到最大值, 声发射平静期能够作为岩体破坏的预兆信息。

关键词

直墙拱形, 砂岩隧洞, 裂纹扩展, 双轴压缩试验, 破坏征兆

Study on Failure Characteristics and Failure Precursor of Arch Sandstone Tunnel with Straight Wall

Wenwen Chao¹, Jian Gao², Defu Guo³

¹School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong

²CNPC East China Design Institute Co., Ltd., Qingdao Shandong

³The First Construction Division Co., Ltd., China Railway Tunnel Group, Chongqing

Received: Mar. 12th, 2023; accepted: Apr. 13th, 2023; published: Apr. 20th, 2023

Abstract

In order to study the failure characteristics of underground cavern rock mass, the biaxial com-

pression test of real sandstone model with holes was carried out, and the evolution process of crack and failure precursor information was analyzed from inside the rock with acoustic emission system. The test results show that the crack appears first at the arch foot of the opening due to stress concentration, and the crack develops along the tip to the spandrel. Slab cracking occurs in the cave, and the rock mass on both sides of the straight wall is cut by cracks and falls to the bottom of the arch. At the early stage of loading, the AE signal is weak, and the AE activity becomes active gradually with the initiation and propagation of cracks. When the tunnel is about to reach the peak load, the AE signal suddenly drops into the quiet period, and the AE characteristic parameters jump to the maximum value when the peak load is reached. The quiet period of AE can be used as the precursor information of rock mass failure.

Keywords

Sandstone Tunnel, Straight Wall Arch, Crack Propagation, Biaxial Compression Test, Sign of Destruction

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国经济的快速发展, 诸如土木水利、隧道交通、矿山开发等地下工程活动正在增加。在岩体力学领域, 受到外部荷载的作用, 岩体内部缺陷(孔洞)容易引起裂纹的萌生、扩展和贯通, 从而造成岩体的局部破坏, 从而影响整个工程的稳定性[1]。

为了探究含孔洞岩石的失稳破坏的特性, 针对含孔洞岩石的室内压缩破坏试验备受学者们的青睐。郑颖人等[2] [3] [4]通过室内模型试验研究发现从浅埋隧洞到深埋隧洞, 围岩呈现从拱顶转向侧壁的破坏规律。杨圣奇等[5] [6]在含孔洞岩石力学特性方面做了大量的研究, 进行岩石裂纹细观试验与单轴压缩模拟, 研究了孔洞对岩石力学性质的影响, 以及发现孔洞直径、缺陷分布和填充物性质对岩石的力学参数存在不同程度的影响。李地元等[7]开展两侧含有方形孔洞的花岗岩室内破坏试验, 研究了裂纹的萌生及扩展全过程。杜明瑞等[8] [9]开展含预制椭圆形孔洞板状砂岩岩样进行单轴试验, 研究了石膏充填及椭圆长短轴之比等因素对岩样的力学强度和变形破坏的影响。宫凤强等[10] [11] [12]开展含孔洞花岗岩和红砂岩隧洞模型试验, 研究了不同应力状态下的隧洞围岩板裂破坏特征。

岩体在破坏过程中伴随着声发射现象, 声发射活动蕴含着岩石内部破坏过程的丰富信息, 有助于研究岩石的破坏机制。纪洪广等[13]开展不同围压下花岗岩破坏过程声发射试验发现, 岩石破坏的前兆信息在声发射信号峰值频率分布中呈现为峰频主频段增多的特征。魏嘉磊等[14]对含圆孔岩样进行双轴加载过程的声发射观测实验, 研究了岩石破坏的声发射前兆信息。李元辉等[15]研究岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形维数的演化过程, 发现岩石临近失稳破坏时, b 值和分形维数均快速下降。虽然学者对岩体破坏预兆进行了一些研究, 选取合适的岩石破坏预兆的声发射参数的相关研究较少。

以上研究多集中于圆形或椭圆形孔洞类岩石强度、变形特征的研究, 但是现场实际工程中, 在岩块尺度上赋存着形态各异的微孔洞, 而目前对于预制特殊几何形状孔洞的真实岩样的岩石强度特性研究较少[16]。因此, 以大尺寸的砂岩块体为材料制作直墙拱形隧洞模型, 设计均匀加载的应力路径进行双轴压缩试验, 并结合声发射系统分析砂岩隧洞表面宏观裂纹的扩展过程, 以及通过声发射现象分析砂岩隧洞的破坏前兆特征。

2. 室内试验介绍

2.1. 试样制备

隧洞模型的材料选取至某地下工程质地均匀、无明显裂隙的真实砂岩，现场采集岩样后由石材工厂进行加工，切割打磨成长方体板状岩样，模型内孔洞用高压水刀切割而成，拱顶高为 20 mm，直墙高为 60 mm，拱底长为 80 mm，加工制作过程较精确，待加工完后形成一个光滑的孔洞边界，如图 1。

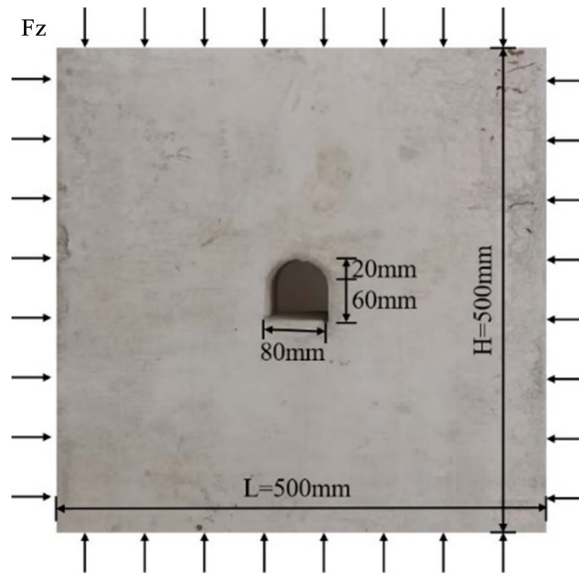


Figure 1. Model of sandstone tunnel

图 1. 砂岩隧洞模型

2.2. 试验设备

室内双轴压缩试验通过岩石三轴试验机、高速摄像设备和声发射监测系统采集多组数据，对隧洞进行多物理场分析，试验系统如图 2 所示。

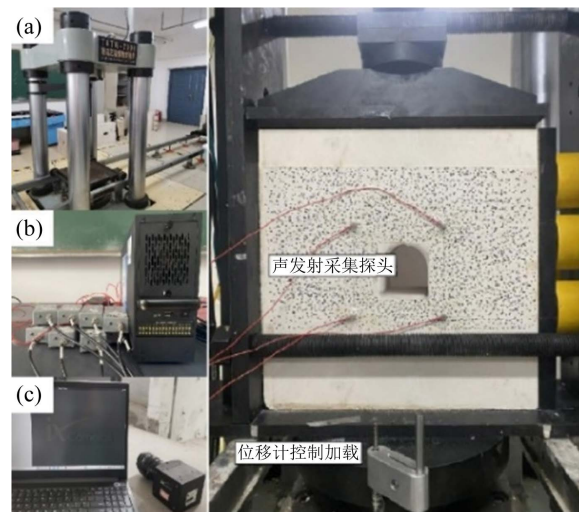


Figure 2. Biaxial compression test system for sandstone tunnels

图 2. 砂岩隧洞双轴压缩试验系统

(1) 如图 2(a)所示, 在隧洞模型的左、右两侧各放置一块 2 cm 厚的钢压板并与液压泵相连, 液压泵对隧洞施加侧向压力以模拟围岩受初始围压的影响。模型的上、下两侧各放置一块承压钢板, 保证模型能够在加载过程稳定不会掉落。为了减小模型与试验机之间的摩擦力的影响, 在模型的上、下、左、右四个侧面均匀涂抹一层凡士林, 试验过程中防止隧洞偏心受载, 须保证模型孔洞的中心与竖向加压柱处于同一竖直线上。

(2) 声发射监测系统如图 2(b)所示, 采用 PCI-2 声发射监测设备记录加载试验过程中隧洞内部的声发射信号。为了实现既过滤外界信号的干扰, 又能较好地记录砂岩隧洞破坏过程的声发射信号, 在试验开始前用断铅的方式不断调整系统的内置采集参数。本次试验中声发射阈值设置为 32 dB, 前置放大器 2/4/6 型号的阈值设置为 40 dB, 采样频率为 1 MHz。

(3) 为记录隧洞破坏过程裂纹的扩展情况, 在隧洞模型的前、后方各放置一台高速摄像机, 如图 2(c)所示, 拍摄速率为 1 fps/s。

2.3. 加载方案及试验流程

根据现场工程的地质勘察情况以及文献[17], 地下洞库建设场地的水平地应力为 1.9 MPa~3.0 MPa, 因此设计室内试验的最大水平应力为 3 MPa。由于隧洞开挖过程中, 隧洞前方围岩均处于短时蠕变状态, 并且, 伴随隧道掌子面的推进, 其围岩所处应力水平呈逐级增加的变化趋势, 所以竖向荷载采用均匀加载的形式, 具体试验步骤为:

(1) 预加载: 利用岩石三轴试验机对隧洞模型竖向加压, 加载方式采用荷载控制, 加载速率为 500 N/s。隧洞水平方向采用液压泵加载, 当水平和竖向荷载达到 150 kN (3 MPa)时停止竖向加载并保持液压泵施加的荷载不变;

(2) 竖向均匀加载: 清零上一步预加载时的声发射系统的结果, 对隧洞模型进行竖向均匀加载, 采用位移控制方式, 加载速率为 0.02 mm/min, 直至隧洞发生破坏后停止试验;

(3) 开启观测设备: 高速摄像系统在水平荷载加压完成后, 开始施加竖向荷载时立即启动, 同步监测变形全过程试验数据;

(4) 卸载: 待隧洞围岩出现大范围破坏或从试验机监测数据发现峰值荷载突降时, 停止试验;

(5) 结束: 保存并导出数据, 关闭设备, 拆卸模型, 如图 3 所示。

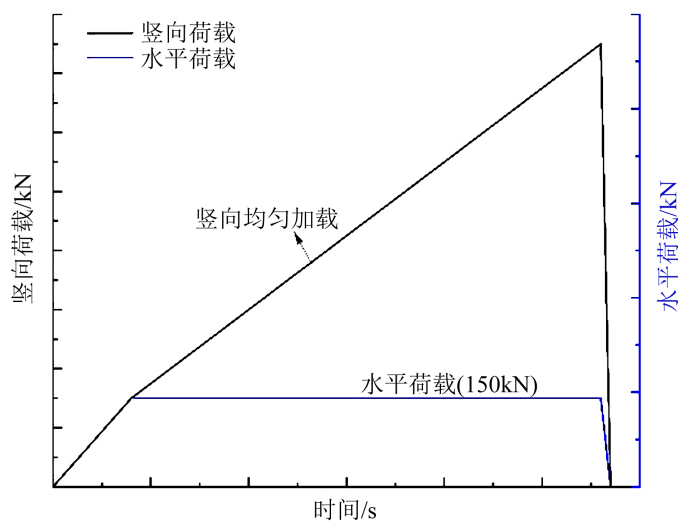


Figure 3. Tunnel biaxial compression test stress path
图 3. 隧洞双轴压缩试验应力路径

3. 试验结果分析

3.1. 砂岩隧洞荷载 - 时间曲线特征分析

直墙拱形隧洞的竖向荷载与时间关系曲线如图 4 所示, 隧洞破坏过程大致经历 4 个阶段:

隧洞内部孔隙压密阶段(OA 段), 隧洞内部原有的微小孔隙逐渐被压密, 荷载 - 时间曲线呈现凹型。弹性变形阶段(AB 段), 荷载 - 时间曲线呈线性变化, 无肉眼可见的新生裂纹出现。裂纹稳定扩展阶段(BC 段), 荷载 - 时间曲线从 C 点开始偏离直线, 曲线表现出凸型, 隧洞产生宏观裂纹并发生不断扩展, 最终到达峰值荷载点 D 点。裂纹不稳定阶段(CD 段), 隧洞承载能力迅速下降, 内部裂纹贯通, 表面岩体剥落, 隧洞岩体出现大面积破坏, 短暂时间后隧洞整体发生破坏, 发出巨大声响。

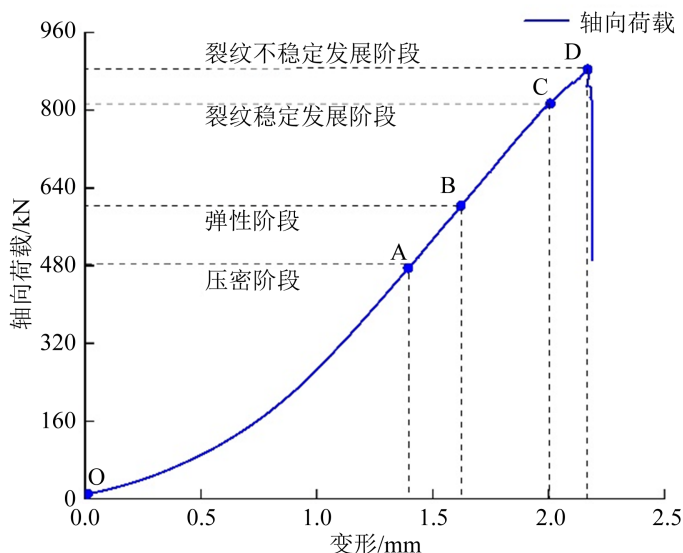


Figure 4. Tunnel load-deflection curve

图 4. 隧洞荷载 - 变形曲线

3.2. 隧洞裂纹扩展演化过程

砂岩隧洞加载破坏过程中宏观裂纹的扩展过程如图 5 所示。加载至 $t = 1503$ s ($F_z = 351.7$ kN) 时, 隧洞表面拱底萌生一条向右下方 15° 倾斜发展的细长裂纹 1, 长度约为 10 cm (图 5(a))。

加载至 $t = 2440$ s ($F_z = 520.6$ kN) 时, 隧洞表面裂纹 1 无明显变化, 洞室左上方拱肩处萌生一条长约 8 cm 的斜向右上发展的裂纹 2a, 同时在洞室左下方拱脚处萌生了一条长约 1 cm 的竖向裂纹 2b, 并沿着洞室的进深方向往岩体内部发展(图 5(b))。

加载至 $t = 2755$ s ($F_z = 572.2$ kN) 时, 隧洞表面裂纹 1 宽度变窄, 长度缩短约为 8 cm。裂纹 2a 斜向左下扩展, 裂纹 2b 向上发展, 两者几乎相连, 此外, 在洞室右下方出现一条远端裂纹 3, 长度约 5 cm, 同时拱底出现厚度约为 1 mm~2 mm 的板裂岩片层(图 5(c))。

加载至 $t = 4464$ s ($F_z = 817.5$ kN) 时, 裂纹 2a 继续向上扩展, 裂纹 2b 切割岩体向临空面鼓起, 裂纹 3 无明显变化, 裂纹 4 斜向左上方扩展至约 13 cm, 同时在洞室左拱脚出现一条斜向右下发展的裂纹 5 (图 5(d))。

$T = 4726$ s ($F_z = 858.2$ kN) 时, 隧洞表面裂纹无明显变化, 在洞室右直墙脚出现细小岩块剥落现象(图 5(e))。

加载至 $t = 4787$ s ($F_z = 884.8$ kN) 时, 裂纹 2a 向上扩展路径上出现些许小岩块剥落, 裂纹 3 扩展至洞

室右直墙脚, 裂纹 4 未发生扩展, 但裂纹下端切割小岩块掉落。裂纹 5 发生闭合, 在裂纹 2a 下侧出现一条斜向左下扩展的裂纹 6, 长度约 16 cm。洞室内部两侧直墙处岩体成块剥落掉至拱底, 形成中间厚两边薄的棱锥剥落体, 隧洞整体受力达到峰值, 发生脆性破坏(图 5(f))。

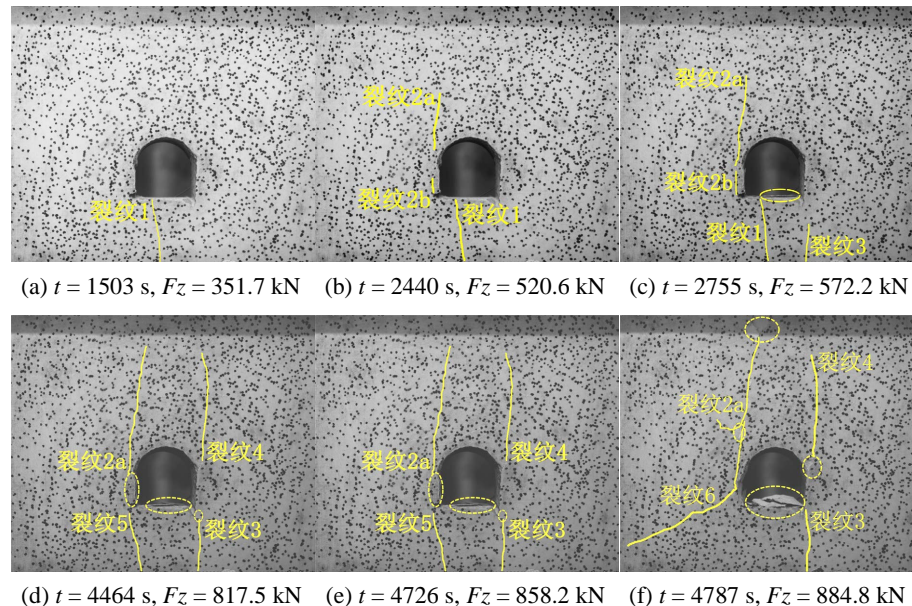


Figure 5. Tunnel cracking evolution

图 5. 隧洞裂纹演化过程

3.3. 隧洞破坏过程声发射特征

微隧洞破坏过程中声发射振铃计数、幅值随时间的变化曲线如图 6、图 7 所示, 声发射活动的整个过程可以分为初始期、发展期、平静期和活跃期。

加载初期, 声发射活动十分微弱。

当 $t = 1503$ s ($F_z = 351.7$ kN) 时, 声发射振铃计数和幅值出现第一次跃升(图 6、图 7 标号①), 分别为 265 次、66 dB, 表明砂岩隧洞在压密阶段裂纹萌生、扩展现象不明显, 当岩石表面出现裂纹时, 声发射活动开始增强。

当 $t = 2440$ s ($F_z = 520.6$ kN) 时, 声发射振铃计数和幅值出现第二次跃升(图 6、图 7 标号②), 分别为 212 次、94 dB。此时, 隧洞表面出现新裂纹。

当 $t = 2755$ s ($F_z = 572.2$ kN) 时, 声发射振铃计数和幅值出现第三次跃升(图 6、图 7 标号③), 分别为 188 次、79 dB。此时隧洞表面已有裂纹在扩展且萌生新裂纹。

当 $t = 4464$ s ($F_z = 817.5$ kN) 时, 声发射振铃计数和幅值出现第四次跃升(图 6、图 7 标号④), 分别为 476 次、91 dB。隧洞表面裂纹在不断扩展, 且出现岩块剥离的现象。

当 $t = 4500$ s~4600 s 时, 隧洞表面宏观裂纹无明显变化, 声发射信号进入平静期, 振铃计数和能量率降低至只有零星信号。

当 $t = 4787$ s ($F_z = 884.8$ kN) 时, 隧洞即将达到其极限承载能力, 隧洞表面出现大的破坏, 岩块掉落。声发射振铃计数、幅值表现为量值高、分布密集的特点。振铃计数、幅值急剧跃升(图 6、图 7 标号⑤), 分别达到各自的峰值, 振铃计数最高可达 811 次, 幅值最高可达 106 dB。

总之, 振铃计数和幅值与时间的曲线变化趋势具有一致性。声发射振铃计数和幅值跃升几乎同时出

现，第一次跃升时，对应新的裂纹产生；第二次到第四次跃升时，对应岩石内部大量微裂纹的扩展、表面岩体鼓起以及宏观裂纹的形成，第四次跃升和第五次跃升之间出现平静期能够为岩石完全破坏前兆提供有效的信息。由声发射累计振铃计数曲线可以看出声发射活动呈现阶段性，伴随裂纹的发展，声发射活动逐渐活跃起来。

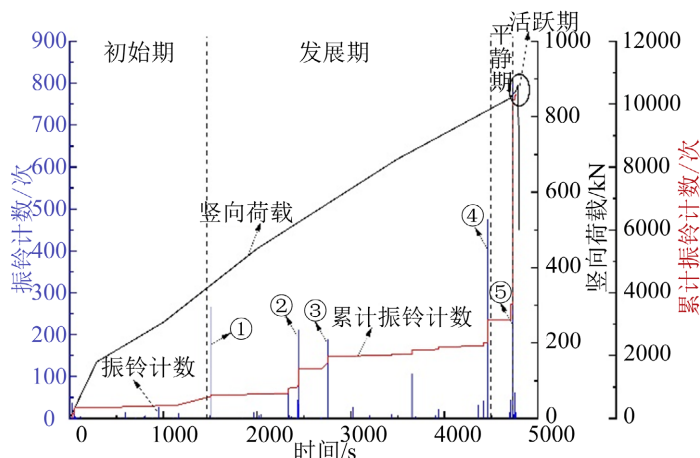


Figure 6. Tunnel acoustic emission ringing counts as a function of time
图 6. 隧洞声发射振铃计数 - 时间曲线

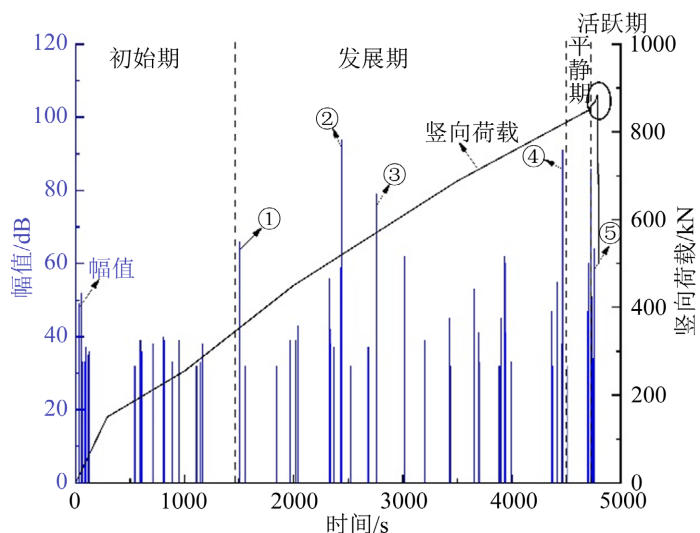


Figure 7. Variation curve of tunnel acoustic emission amplitude with time
图 7. 隧洞声发射幅值 - 时间曲线

4. 结论

(1) 直墙拱形砂岩隧洞裂纹演化过程为：裂纹首先自直墙脚开始萌生并逐渐扩展至起拱线。随荷载的增大，隧洞直墙处岩石碎屑开始剥落，当接近隧洞峰值荷载时，洞室内部两侧直墙被裂纹切割成块掉落，剥离体中间厚两边薄的片状岩块。

(2) 隧洞双轴压缩破坏全过程声发射的演化过程，分为初始期、密集期、平静期和活跃期 4 个阶段。

(3) 初始期隧洞的声发射振铃计数和幅值较微弱；荷载不断增大时，声发射活动进入密集期，振铃计数和幅值逐渐活跃起来；临近峰值荷载，岩体的声发射活动突然减弱进入平静期；进入活跃期，振铃计

数和幅值突然急剧增长至最大值, 隧洞发生破坏。

(4) 岩石塑性变形前期声发射活动较活跃, 应力转移后, 岩体卸载时声发射事件减少也有可能出现平静。但从隧洞双轴声发射试验结果发现, 由于声发射平静期出现在临近峰值荷载处, 可将其作为破坏的预警信号, 对工程现场岩体稳定性的声发射监测有一定指导意义。

参考文献

- [1] 崔嘉慧. 含孔洞类岩石材料力学特性试验与数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 绍兴: 绍兴文理学院, 2019.
- [2] 郑颖人, 朱合华, 方正昌, 等. 地下工程围岩稳定分析与设计理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012: 304-330.
- [3] 郑颖人, 王永甫, 王成, 等. 节理岩体隧道的稳定分析与破坏规律探讨——隧道稳定性分析讲座之一[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4): 649-656.
- [4] 郑颖人, 丛宇. 隧道稳定性分析与设计方法讲座之二: 隧道围岩稳定性分析及其判据[J]. 隧道建设, 2013, 33(7): 531-536.
- [5] 杨圣奇, 吕朝辉, 渠涛. 含单个孔洞大理岩裂纹扩展细观试验和模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(6): 774-781.
- [6] 杨圣奇, 刘相如, 李玉寿. 单轴压缩下含孔洞裂隙砂岩力学特性试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3539-3546.
- [7] 李地元, 李夕兵, 李春林, 等. 单轴压缩下含预制孔洞板状花岗岩试样力学响应的试验和数值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1198-1206.
- [8] 杜明瑞, 靖洪文, 苏海健, 等. 含预制椭圆形孔洞砂岩强度及破坏特征试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1164-1171.
- [9] 杜明瑞, 靖洪文, 苏海健. 椭圆形孔洞对砂岩试样强度及变形特征影响研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(1): 141-147.
- [10] 宫凤强, 罗勇, 刘冬桥. 深部直墙拱形隧洞围岩板裂破坏的模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1091-1100.
- [11] 宫凤强, 伍武星, 李天斌, 等. 深部硬岩矩形隧洞围岩板裂破坏的试验模拟研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2085-2098.
- [12] 宫凤强, 罗勇, 司雪峰, 等. 深部圆形隧洞板裂屈曲岩爆的模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1634-1648.
- [13] 纪洪广, 卢翔. 常规三轴压缩下花岗岩声发射特征及其主破裂前兆信息研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 694-702.
- [14] 魏嘉磊, 刘善军, 吴立新, 等. 含孔岩石双轴加载过程声发射多参数特征对比分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(6): 1017-1025.
- [15] 李元辉, 刘建坡, 赵兴东, 等. 岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形特征研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2559-2563.
- [16] 杜明瑞, 靖洪文, 苏海健, 等. 孔洞形状对砂岩强度及破坏特征的影响[J]. 工程力学, 2016, 33(7): 190-196+219.
- [17] 孙叶, 谭成轩. 中国现今区域构造应力场与地壳运动趋势分析[J]. 地质力学学报, 1995(3): 1-12.