

# 高应力下岩石损伤破裂机制研究进展

周雨<sup>1\*</sup>, 刘恺德<sup>1#</sup>, 张旗<sup>2</sup>, 董鹏<sup>3</sup>, 王振林<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西京学院土木工程学院, 陕西 西安

<sup>2</sup>武汉大学土木工程学院, 湖北 武汉

<sup>3</sup>引汉济渭工程建设公司, 陕西 西安

收稿日期: 2023年12月5日; 录用日期: 2024年1月16日; 发布日期: 2024年1月25日

## 摘要

随着我国隧道和地下空间迅速向深部发展, 深入认识高应力下洞周围岩力学特性及损伤破裂机制对岩石地下工程施工设计和安全防护具有重要意义。从深埋岩石力学特性、声发射特征及损伤破裂机制等三个方面介绍了高应力下岩石损伤破裂机制研究进展, 表明: 1) 目前针对不同应力、加卸载速率等条件下的岩石变形、强度和破坏特征研究已相对成熟, 但针对多场耦合等复杂环境下岩石力学特性及微观破裂机制方面的研究还相对较少。2) 利用声发射特征参数变化规律来反演岩石破裂特征及前兆点预测的研究已较为成熟, 但针对岩石峰值后残余阶段的声发射特征研究及利用声发射特征参数反演岩石损伤理论的归一化研究尚处于一个不断完善的探索阶段。3) 目前所建立的岩石统计损伤本构模型考虑了岩石材料的各向异性, 使模型的计算结果更趋于实际, 但大多仍处于理论阶段, 有待结合室内或者现场试验验证。

## 关键词

高应力, 岩石力学特性, 声发射特征, 损伤机制

# Research Progress of Rock Damage Failure Mechanism under High Stress

Yu Zhou<sup>1\*</sup>, Kaide Liu<sup>1#</sup>, Qi Zhang<sup>2</sup>, Peng Dong<sup>3</sup>, Zhenlin Wang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei

<sup>3</sup>Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 5<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 16<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 25<sup>th</sup>, 2024

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 周雨, 刘恺德, 张旗, 董鹏, 王振林. 高应力下岩石损伤破裂机制研究进展[J]. 土木工程, 2024, 13(1): 56-64.  
DOI: 10.12677/hjce.2024.131009

## Abstract

With the rapid development of tunnels and underground space to the deep in China, it is of great significance to deeply understand the mechanical characteristics and damage and fracture mechanism of rock around caves under high stress for the construction design and safety protection of rock underground engineering. The research progress of rock damage and fracture mechanism under high stress is introduced from three aspects: mechanical properties, acoustic emission characteristics and damage and fracture mechanism of deep buried rock. 1) At present, studies on rock deformation, strength and failure characteristics under different stresses, loading and unloading rates have been relatively mature, but there are relatively few studies on rock mechanical properties and micro-fracture mechanisms under complex environments such as multi-field coupling. 2) The research on inversion of rock fracture characteristics and prediction of precursor points by using the variation law of acoustic emission characteristic parameters has been relatively mature, but the research on acoustic emission characteristics in the residual stage of rock after peak and the normalization of rock damage theory by using acoustic emission characteristic parameters are still in a constantly improving exploration stage. 3) Currently established rock statistical damage constitutive models take into account the anisotropy of rock materials, which makes the calculation results of the models more practical, but most of them are still in the theoretical stage and need to be combined with laboratory or field tests for verification.

## Keywords

High Stress, Mechanical Properties of Rock, Acoustic Emission Characteristics, Damage Mechanism

Copyright © 2024 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

随着我国经济建设需求快速增长和浅部资源逐渐枯竭矛盾的日益加剧，地下空间建设和深部资源开发不断向深地拓展，持续突破新的深度极限已成为必然趋势[1] [2]。深部资源开采或地下空间建设面临“三高—强扰动”的影响，即高应力的影响、高地温的影响、高渗透压的影响、工程剧烈扰动的影响，这些因素，与浅部相比，深埋岩石的损伤破裂特征更趋复杂，遭受的工程难题中存在的安全隐患更多，预测更难[3] [4]。因此，研究深埋岩石的损伤破裂机制，对维护深部资源安全高效开采和地下空间稳定可靠建设具有重要的指导意义[5] [6] [7] [8]。

谢和平等[9]根据深部岩体和围岩性质的应力状态和应力水平，将平均概念意义静水压力作为深浅分界线，从力学角度定义深度边界平均在 750~800 m 左右。多位学者对深部复杂环境下的岩石损伤破裂行为进行了探讨，刘月妙等[10]系统研究了甘肃北山深部完整岩石的基本物理力学性能和时温效应，发现围压为 10 MPa 和 30 MPa 时的弹性模量随温度升高而升高，至 70℃左右时达到最高值，此后随温度升高而稍有下降，裂纹损伤应力明显线性下降，而泊松比则明显线性上升。王春等[11]通过深部岩石的三维高静载频繁动态扰动试验和理论研究，显示所建立的岩石损伤本构方程拟合曲线与试验曲线有良好的一致性，验证了损伤本构模型的有效性。由爽等[12]研究了高应力高水压下深部花岗岩力学响应联动机制，揭示了

高围压、高水压下岩石损伤变量与渗透率之间的相关性。

可见,目前,国内外矿业和岩石力学界研究的焦点,都集中在深部采矿工程中产生的岩石损伤破裂等力学问题上[4]。本文综合分析高应力下岩石力学行为变异机制、声发射特征与破裂损伤理论研究现状、存在问题及发展趋势。

## 2. 深埋洞室围岩应力分布状态

在深埋洞室施工前,围岩处于初始应力状态,通常总是稳定的。开挖后,由于开挖卸荷作用,必然会打破围岩初始应力状态的平衡性,导致应力重分布,且地应力的自我调整往往产生相应位移[13] [14] [15]。其主要表现是切向应力( $\sigma_\theta$ )增大、径向应力( $\sigma_r$ )减小、开挖边界处应力( $\sigma_r$ )直接减小至0(见图1)。

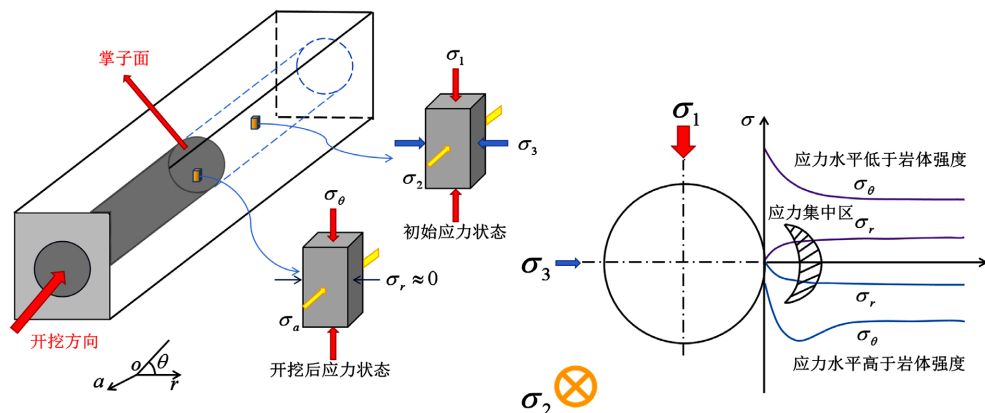


Figure 1. Stress distribution in rocks surrounding the tunnel [14]

图 1. 隧洞围岩应力分布[14]

但由于深部岩体往往具有复杂地质结构及构造运动等因素,在地下空间开挖前原岩应力并非完全处于静水压力的理想状态,因而3个主应力( $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ )通常大小不同,并且洞室轴向(开挖方向)一般沿平行于中主应力的方向布置(见图1)。同时,由于切向应力集中,洞周和开挖断面形成应力集中区,出现在该区域的部位与断面上最初的最大主应力方向密切相关,大致与最初的最大主应力和开挖切线方向相吻合,且总体表现为初始最大、最小主应力相差越大,应力集中现象越显著,影响范围越集中[14] [15] [16]。

应力集中区的分布主要受控于围岩应力水平及其强度之间的矛盾,当应力水平明显大于强度时,围岩处于屈服状态,应力水平随屈服强度的降低而降低,反之,当应力水平及位移小于岩体强度,即位移允许值时,围岩则处于弹性状态,仍然是稳定的[17] [18] [19] [20]。

## 3. 高应力下岩石力学特性

### 3.1. 岩石变形机制

在针对深埋岩石变形特征的研究中,众多学者发现了明显的围压效应。张传庆等[21]在对试验成果进行综合分析的基础上,揭示了大理岩弹性变形特性,变形和强度的围压效应以及脆延转换的破坏特征和机理,用以指导深埋隧洞围岩的支护设计。除基本物理力学性质以外,学者还将能量与围压效应结合进行研究,李泓颖等[22]对锦屏埋藏较深的大理岩进行常规三轴加压试验,在不同的初始围压下进行卸载卸载速率也不同,说明深埋大理岩在不同应力路径作用下的能量演化曲线阶段性明显,其中大理岩在渐进破坏时特征应力,特征能量都存在显著的围压影响,与25、50 MPa相比,在初始围压80 MPa处峰值弹

性能达到最大值。在高围压的情况下,岩石不仅遭受着高应力的影响,还有诸多内外在因素,杨圣奇等[23]开展了不同围压和节理粗糙度对岩石变形特征影响的常三轴压缩试验研究,研究发现,JRC在形态、数量和空间分布特征等方面对岩石破坏裂纹的影响很大,随着JRC的增大岩石试样也会由脆性破坏转变为延性破坏,低围压多以剪切滑移方式破坏,高围压多以拉切方式混合破坏,围压对岩石试样变形特征的影响也同样显著。

可见,目前在考虑围压效应、加载速率、节理粗糙度等条件下针对深埋岩石变形特征的研究已相对成熟,而对同时考虑应力、地温、渗流等多场耦合实际工况条件下的岩石变形特征的研究仍处于不断深化发展阶段。

### 3.2. 岩石强度机制

在深埋岩石开挖过程中,加载、卸荷同时发生,开展三轴加卸载试验是研究实际工况下岩石强度特征及其变化规律的常用手段。

通过三轴压缩试验,徐荣超等[24][25][26]分别指出,随着围压的增大,页岩、砂岩、花岗岩的起裂应力等呈均线性增大,如图2所示。考虑到深部环境复杂,常三轴试验并不能完全模拟深部环境,冯夏庭、李夕兵等团队[27]-[35]以深部洞室围岩破裂破坏为主线,对硬岩进行了一系列双轴,低主应力真三轴,真三轴和真三轴加卸载试验,分析了岩石在各种应力作用下的应力阈值,峰值强度,表明卸荷速率与岩石破坏对应的最大主应力呈现负相关,并特别提出中间主应力与峰值强度呈正相关关系。针对深部岩石的研究仅仅依靠试验研究远远不够,林大超等[36]基于Mohr-Coulomb准则力学模型中的能量描述,给出了应用单轴压缩试验对岩石压缩破坏强度进行估值的理论计算方法,该准则充分考虑了岩石变形开裂特性,其强度预测结果满足Hoek-Brown经验强度准则对试验数据进行最优拟合时的精度要求。岩石的宏观破坏及变形研究已经出现大量的成果,而从微观角度出发已然成为新的趋势,朱珍德等[37]利用深埋大理岩试样进行单轴压缩变形的细观结构演化过程数字化定量试验研究,对不同应力状态下岩石细观结构的变化进行了分析,并运用内变量热力学理论,从试验和理论两个方面探讨了单轴压缩过程中岩石试样的破坏机制,建立了由微裂纹引起的非弹性应变与应力的关系。

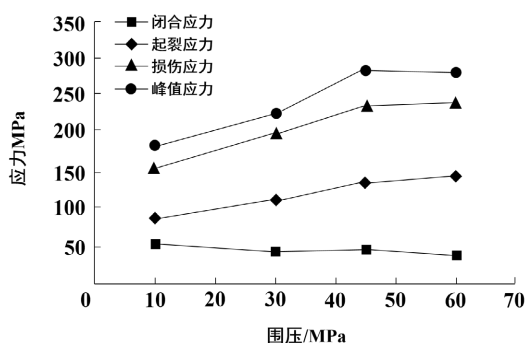


Figure 2. Curve of stress threshold value changing with confining pressure [24]

图 2. 应力阈值随围压变化曲线[24]

总体来看,目前针对高应力下岩石强度机制的研究主要集中在不同应力路径下的强度特征或破坏规律等方面,但在破坏机制的揭示方面,尤其对高应力下岩石微细观破裂机制及理论的研究还不够系统,有待进一步深化开展。

## 4. 岩石声发射特征研究

### 4.1. 声发射原理

声发射(Acoustic Emission, AE)是固体材料受力时局部应力和能量快速释放而产生瞬态弹性波的现象,声发射技术是指用仪器探测、记录、分析声发射信号和利用声发射信号分析声发射源的技术,声发射技术被广泛应用于分析揭示岩石的断裂破坏过程[38] [39] [40]。声发射信号特征参数及其含义如图 3 [40]所示:

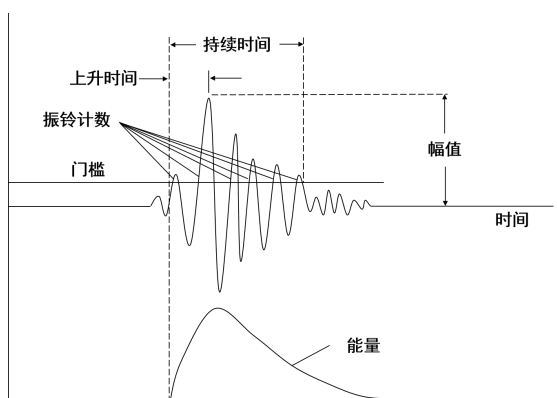


Figure 3. Schematic diagram of AE parameters [40]

图 3. 声发射各参数示意图[40]

### 4.2. 岩石声发射特征参数反演分析

利用声发射特征参数变化规律反演岩石损伤破裂特征是目前广泛采用的方法。

乔兰等[41]深部花岗岩损伤过程的声发射特征是利用微机伺服岩石三轴试验机和声发射监测系统对岩样压缩试验和声发射监测。姜德义等[42]对砂岩开展实验室条件下长时间及阶梯加载蠕变实验,采集整个蠕变过程中的声发射信号,发现长时间和阶梯加载蠕变过程中声发射信号形态类似,然而,阶梯式加载蠕变的声发速率比长期蠕变的结果明显提高,并且长期蠕变加载蠕变所导致的能量概率密度都是符合幂次分布的。近年来,通过对声发射信号时频、频谱等波形特征与裂纹尺寸、扩展速率等的关联性研究,分析预测岩石的破坏过程已成为焦点,张艳博等[43]通过对花岗岩进行单轴压缩声发射试验,提取花岗岩断裂过程中的声发射信号能量、频率幅值等参数,研究花岗岩断裂时不同破裂尺度的信号的演化规律,探究岩石破裂声发射前兆规律,研究花岗岩断裂时的破裂尺度与能量和频率三种耦合关系,其前兆特征主要体现在出现中高频低幅值信号稳定和低频高幅值信号非稳定现象。丁鑫等[44]岩石力学的相关理论,在监测不同夹子和原始裂隙煤岩受压损伤的基础上,结合数字信号分析,加入了小波变换的方法,深入分析了声发射的时频信号在煤岩损伤过程演化过程,构造了裂纹扩展过程中释放弹性能诱导应力波幅度和频率的力学表达,结果表明裂纹尺寸越大,应力波幅度越大,频率越高,裂纹扩展速率为确定应力波频率大小的主要参数。Moradian 等[45]针对含预存缺陷花岗岩柱状试样开展单轴压缩实验,采用声发射及高速视频成像技术监测其裂纹产生过程,对不同裂纹等级下声发射参数特征及裂纹序列演化规律进行分析,并在微观与宏观裂纹损伤基础上引入裂纹等级划分方法,更加细化了各个裂解水平下的声发射参数特征及裂解序列演化。

由上不难发现,目前利用声发射特征参数变化规律来反演岩石破裂特征及前兆点预测的研究已较为成熟,但针对岩石峰值后残余阶段的声发射特征尤其是高应力下研究还处于探索阶段,亟待完善。

### 4.3. 岩石声发射反演损伤理论研究

利用声发射撞击、计数、能量，或结合变形发展，检测确定不同的应力或断裂门槛值，定量研究、精细化描述岩石损伤过程，是当前研究的热点。Zhao 等[46] [47]获得了花岗岩岩样在压缩试验各加载阶段的声发射事件三维分布规律，并给出了客观确定裂纹起裂应力大小的新途径——累积声发射命中法，该方法结果与传统应力-应变法的结果具有一致性。Eberhardt 等[48]利用归一化声发射率导出描述黏聚力损失及随后引起不稳定裂纹扩展微裂缝开展情况的简化模型，并最终采用损伤控制循环加载试验考察累积断裂损伤效应及对岩石变形特性变化的影响，说明该方法能较好地量化岩石损伤。Kim 等[49]利用机械测量的应力-应变关系(裂纹体应变)成功地建立了 KURT 花岗岩的损伤参数关系，并与物理检测的声发射波的损伤参数进行了比较，以此为基础，应用裂纹体应变、 $b$  值、矩张量损伤参数和声发射能量几种方法导出了损伤定量演化过程，结果表明该方法不但对实际场地有适用性，而且其结果可靠。

综上所述，尽管目前在利用声发射特征参数反演岩石损伤理论的研究方面已取得了较多研究成果，但仍呈现散而不聚的状态，因此，通过声发射特征参数反演岩石损伤理论的归一化研究尚处于一个不断完善的探索阶段。

## 5. 岩石统计损伤模型

由于岩石内部包含大量随机分布的微裂隙等缺陷，使得岩石材料具有明显的各向异性和破坏性[50] [51]。近年来通过应变等效假设将连续损伤理论和强度统计方法相结合建立的岩石损伤本构模型已成为岩石本构关系的主流。

### 5.1. 应变等效假设

应变等效假设，即损伤材料的应变  $\varepsilon$  与未损伤材料的应变  $\bar{\varepsilon}$  等价(未损伤面积上的材料仍服从无损材料的应力-应变关系)。

对于损伤材料，有

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

对于无损材料，有

$$\bar{\sigma} = E_0\bar{\varepsilon} \quad (2)$$

根据应变等效假设，有

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} \quad (3)$$

比较上式子，并考虑  $\sigma$  与  $\bar{\sigma}$  的换算关系，有

$$d = \frac{E_0 - E}{E_0} \quad (4)$$

由应变等效假设构建的损伤表达式，其应用较简洁，物理意义较明确。

### 5.2. 岩石统计损伤模型研究

在考虑损伤阈值及微元体强度随机分布的影响前提下，以应变等效假设为基础，所建立的各种形式统计损伤本构模型，众多学者对其合理性和可行性进行了广泛研究，曹文贵等[52]一是基于统计损伤考虑损伤岩石损伤度量中的作用，从而建立统计损伤本构模型；二是根据峰值应变各自与围压的关系，针对岩石三轴试验曲线的特点，给出模型参数确定方法，进一步提出统计损伤本构模型，能够反映岩石不同的围压变形规律，所建模型既可以反映深部岩石变形过程又可以反映岩石强度随着围压的变化特征，具

有合理性和可行性。除加入损伤阈值的因素, 在高地温的环境下, 热损伤也被考虑进模型建立之中, ZHU 等[53]在 Lemaitre 应变等效理论的基础上, 考虑高温对岩石力学参数的影响, 引入热损伤变量  $DT$ , 以假设热处理岩石的细观单位强度服从威布尔随机分布为前提, 且基于修正的莫尔-库仑准则, 建立了统计热损伤本构模型, 并通过数值模拟验证了该模型的有效性。DENG 等[54]应用连续损伤力学理论且基于最大熵分布统计细观强度理论建立应变软化行为岩石统计损伤本构模型, 在损伤变量的基础上加入熵分布信息推导出新的本构模型, 利用常规三轴试验与岩石试件动力试验对模型进行验证, 模拟结果表明其具有很强的适用性与灵活性。CAO 等[55]假设岩石包括初始空洞部分与实心骨架部分, 根据统计损伤理论考虑了岩石宏观变形与两种不同局部微观变形, 建立了能模拟岩石变形破坏整个过程并考虑其初始压缩及残余强度特征的岩石全变形模型。王春等[11]开展三维高静载频繁动态扰动试验, 基于统计损伤等理论对深部岩石的损伤变量进行定义, 建立本构模型, 并且结合上述试验数据, 验证岩石损伤演化的规律, 结果表明所建立的本构模型可以预测在三维高静载频繁动态扰动条件下岩石的动力学特征。

目前所建立的岩石统计损伤本构模型将岩石材料的各向异性考虑到本构关系中, 使得本构模型的计算结果更接近于实际情况, 但从已建立的损伤统计本构模型中不难发现, 许多损伤模型涉及的参数较多, 许多需要通过试验才能确定, 因此, 许多损伤模型的结构之间存在着一定的联系, 而且在具体情况下提出的损伤变量并不具有普适性, 因此在实际项目中应用起来并不方便。此外, 大多数已有的损伤理论模型仍停留在理论阶段, 需要在室内外试验的结合下进一步验证。

## 6. 结论

本文从深埋岩石力学特性、声发射特征及统计损伤本构模型等方面分析了岩石损伤破裂机制研究进展, 结论如下:

1) 目前针对不同应力、加卸载速率等条件下的岩石变形、强度和破坏特征研究已相对成熟, 但针对多场耦合等复杂环境下岩石力学特性及微细观破裂机制方面的研究还相对较少。

2) 利用声发射特征参数变化规律来反演岩石破裂特征及前兆点预测的研究已较为成熟, 但针对岩石峰值后残余阶段的声发射特征研究, 亟待完善。利用声发射特征参数反演岩石损伤理论的归一化研究尚处于一个不断完善的探索阶段。

目前所建立的岩石统计损伤本构模型考虑了岩石材料的各向异性, 使模型的计算结果更趋于实际, 但大多仍处于理论阶段, 有待结合室内或者现场试验验证。

## 基金项目

陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JLM-48, 2023-JC-YB-396)。

## 参考文献

- [1] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [2] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(1): 1-8.
- [3] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [4] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [5] 钱七虎. 战略防护工程面临的核钻地弹威胁及连续介质力学模型的不适用性[J]. 防护工程, 2005, 26(5): 1-10.
- [6] 王明洋, 李杰. 爆炸与冲击中的非线性岩石力学问题 III: 地下核爆炸诱发工程性地震效应的计算原理及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 695-707.
- [7] 王明洋, 周泽平, 钱七虎. 深部岩体的构造和变形与破坏问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 448-455.

- [8] Li, X.B., Gong, F.Q., Tao, M., *et al.* (2017) Failure Mechanism and Coupled Static-Dynamic Loading Theory in Deep Hard Rock Mining: A Review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **9**, 767-782. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.04.004>
- [9] 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 535-542.
- [10] 刘月妙, 王驹, 谭国焕, 蔡美峰. 高放废物处置北山预选区深部完整岩石基本物理力学性能及时温效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(10): 2034-2042.
- [11] 王春, 唐礼忠, 程露萍, 陈源, 刘涛, 韦永恒. 三维高静载频繁动态扰动时岩石损伤特性及本构模型[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2286-2296+2305.
- [12] 由爽, 李飞, 纪洪广, 王洪涛, 张乘菡. 高应力高水压下深部花岗岩力学响应联动机制[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 219-229.
- [13] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [14] 翟少彬. 深埋隧洞岩爆及相关破坏的真三轴试验研究[D]: [博士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2022.
- [15] Read, R.S. and Martin, C.D. (1996) Technical Summary of AECL's Mine-By Experiment. Phase 1. Excavation Response.
- [16] Bäckblom, G. and Martin, C.D. (1999) Recent Experiments in Hard Rocks to Study the Excavation Response: Implications for the Performance of a Nuclear Waste Geological Repository. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **14**, 377-394. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(99\)00053-X](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(99)00053-X)
- [17] Read, R.S. (2004) 20 Years of Excavation Response Studies at AECL's Underground Research Laboratory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **41**, 1251-1275. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.012>
- [18] 黄达. 大型地下洞室开挖围岩卸荷变形机理及其稳定性研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- [19] 春生, 侯靖, 朱永生, 等. 深埋隧洞围岩应力分布与破坏机理[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(3): 7-13.
- [20] Vazaios, I., Vlachopoulos, N. and Diederichs, M.S. (2019) Assessing Fracturing Mechanisms and Evolution of Excavation Damaged Zone of Tunnels in Interlocked Rock Masses at High Stresses Using a Finite-Discrete Element Approach. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **11**, 701-722. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.02.004>
- [21] 张传庆, 张玲, 周辉, 邱士利. 深部硬岩的力学特性与支护要求[J]. 武汉工程大学学报, 2018, 40(5): 543-549.
- [22] 李泓颖, 刘晓辉, 郑钰, 肖文根. 深埋锦屏大理岩渐进破坏过程中的特征能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S2): 3229-3239.
- [23] 杨圣奇, 陆家炜, 田文岭, 等. 不同节理粗糙度类岩石材料三轴压缩力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(S1): 21-32.
- [24] 徐荣超, 靳一鼎, 李日运, 等. 龙马溪页岩应力-应变门槛值的各向异性特征研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(12): 2291-2299.
- [25] Zong, Y.J., Han, L.J., Wei, J.J., *et al.* (2016) Mechanical and Damage Evolution Properties of Sandstone under Triaxial Compression. *International Journal of Mining Science and Technology*, **4**, 601-607. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2016.05.011>
- [26] 孙雪, 李二兵, 韩阳, 等. 卸荷路径下花岗岩变形与破坏特征试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 665-679.
- [27] 陈景涛, 冯夏庭. 高地应力下岩石的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(8): 1537-1543.
- [28] Gao, Y.-H., Feng, X.-T., Zhang, X.-W., *et al.* (2018) Characteristic Stress Levels and Brittle Fracturing of Hard Rocks Subjected to True Triaxial Compression with Low Minimum Principal Stress. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **51**, 3681-3697. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1548-4>
- [29] Feng, X.-T., Kong, R., Zhang, X., *et al.* (2019) Experimental Study of Failure Differences in Hard Rock under True Triaxial Compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **52**, 2109-2122. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1700-1>
- [30] Kong, R., Tuncay, E., Ulusay, R., *et al.* (2021) An Experimental Investigation on Stress-Induced Cracking Mechanisms of a Volcanic Rock. *Engineering Geology*, **280**, Article ID: 105934. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105934>
- [31] Li, X., Du, K. and Li, D. (2015) True Triaxial Strength and Failure Modes of Cubic Rock Specimens with Unloading the Minor Principal Stress. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **48**, 2185-2196. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0701-y>
- [32] Li, X., Feng, F., Li, D., *et al.* (2018) Failure Characteristics of Granite Influenced by Sample Height-To-Width Ratios and Intermediate Principal Stress under True-Triaxial Unloading Conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*,



- 51, 1321-1345. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1414-4>
- [33] Li, Z., Wang, L., Lu, Y., *et al.* (2018) Experimental Investigation on the Deformation, Strength, and Acoustic Emission Characteristics of Sandstone under True Triaxial Compression. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2018**, Article ID: 5241386. <https://doi.org/10.1155/2018/5241386>
- [34] 尹光志, 李贺, 鲜学福, 等. 工程应力变化对岩石强度特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1987(2): 20-28.
- [35] 尹光志, 马波, 刘超, 等. 真三轴应力条件下加卸荷速率对砂岩力学特性与能量特征的影响[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 454-462.
- [36] 林大超, 徐谦, 王仲琦, 刘海波. 岩石压缩破坏强度的一种理论估值方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S1): 2603-2612.
- [37] 朱珍德, 黄强, 王剑波, 等. 岩石变形劣化全过程细观试验与细观损伤力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1167-1175.
- [38] Lockner, D. (1993) The Role of Acoustic Emission in the Study of Rock Fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **30**, 883-899. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)90041-B](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)90041-B)
- [39] Grosse, C.U. and Ohtsu, M. (2008) Acoustic Emission Testing. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69972-9>
- [40] Lei, X. and Ma, S. (2014) Laboratory Acoustic Emission Study for Earthquake Generation Process. *Earthquake Science*, **27**, 627-646. <https://doi.org/10.1007/s11589-014-0103-y>
- [41] 乔兰, 王旭, 李远. 深部花岗岩长岩破坏过程声发射及特征应力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 2773-2778.
- [42] 姜德义, 何怡, 欧阳振华, 等. 砂岩单轴蠕变声发射能量统计与断面形貌分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1436-1442.
- [43] 张艳博, 梁鹏, 田宝柱, 等. 花岗岩灾变声发射信号多参量耦合分析及主破裂前兆特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2248-2258.
- [44] 丁鑫, 肖晓春, 吕祥锋, 等. 煤岩破裂过程声发射时-频信号特征与演化机制[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10): 2999-3011.
- [45] Moradian, Z., Einstein, H.H. and Ballivy, G. (2016) Detection of Cracking Levels in Brittle Rocks by Parametric Analysis of the Acoustic Emission Signals. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **49**, 785-800. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0775-1>
- [46] Zhao, X.G., Cai, M., Wang, J., *et al.* (2013) Damage Stress and Acoustic Emission Characteristics of the Beishan Granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **64**, 258-269. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.09.003>
- [47] Zhao, X.G., Cai, M., Wang, J., *et al.* (2015) Objective Determination of Crack Initiation Stress of Brittle Rocks under Compression Using AE Measurement. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **48**, 2473-2484. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0703-9>
- [48] Eberhardt, E., Stead, D. and Stimpson, B. (1999) Quantifying Progressive Pre-Peak Brittle Fracture Damage in Rock during Uniaxial Compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **36**, 361-380. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00019-4](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00019-4)
- [49] Kim, J.-S., Lee, K.-S., Cho, W.-J., *et al.* (2015) A Comparative Evaluation of Stress-Strain and Acoustic Emission Methods for Quantitative Damage Assessments of Brittle Rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **48**, 495-508. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0590-0>
- [50] 杨宇生, 尹前锋, 丰丛杰, 等. 考虑损伤修正的岩石统计损伤本构模型研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2018, 38(4): 70-74.
- [51] Krajcinovic, D. and Silva, M.A.G. (1982) Statistical Aspects of the Continuous Damage Theory. *International Journal of Solids and Structures*, **18**, 551-562. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(82\)90039-7](https://doi.org/10.1016/0020-7683(82)90039-7)
- [52] 曹文贵, 戴笠, 张超. 深部岩石统计损伤本构模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 60-65.
- [53] Zhu, Z.N., Tian, H., Wang, R., *et al.* (2021) Statistical Thermal Damage Constitutive Model of Rocks Based on Weibull Distribution. *Arabian Journal of Geosciences*, **14**, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06730-2>
- [54] Deng, J. and Gu, D.S. (2011) On a Statistical Damage Constitutive Model for Rock Materials. *Computers & Geosciences*, **37**, 122-128. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.05.018>
- [55] Cao, W.G., Tan, X., Zhang, C., *et al.* (2019) Constitutive Model to Simulate Full Deformation and Failure Process for Rocks Considering Initial Compression and Residual Strength Behaviors. *Canadian Geotechnical Journal*, **56**, 649-661. <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0178>