

基于亚临界裂纹扩展的岩石蠕变-冲击 变形破裂特征

张广超¹, 周泽森¹, 周广磊¹, 徐 涛², Heinz KONIETZKY³, 赵西坡⁴, 黄 贺⁴, 刘宇航¹

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 东北大学 岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 沈阳 110819; 3. 弗莱贝格工业大学 岩土工程系, 弗莱贝格 09599, 德国; 4. 兖矿能源集团股份有限公司, 山东 济宁 272000)

摘 要:在深部资源开采过程中, 深部岩石长期承受高应力及动载扰动, 冲击地压、岩爆等动力灾害频发, 严重制约了深部资源的安全高效生产。为研究深部岩石在蠕变和冲击载荷共同作用下的变形破坏机制, 基于亚临界裂纹扩展理论及断裂力学理论建立了岩石蠕变模型, 通过统一时间尺度的方式实现了蠕变和冲击 2 个不同应变率范围载荷的统一求解, 并基于二维块体离散元软件 UDEC 开发了岩石在蠕变和冲击共同作用下的数值模型, 在验证该模型的基础上, 研究了不同蠕变应力水平和不同冲击载荷对岩石变形破裂特征的影响。研究表明: 基于亚临界裂纹扩展理论的岩石蠕变-冲击模型能较好地描述岩石初始蠕变、稳态蠕变和加速蠕变 3 个阶段, 且该数值模型可以准确地模拟冲击载荷后蠕变应变增加及蠕变破坏时间缩短的效应; 随着亚临界裂纹常量 B 增大或应力腐蚀指数 n 减小, 岩石稳态蠕变阶段应变率增大, 岩石稳态蠕变阶段及蠕变破坏寿命缩短; 随着蠕变应力水平的增加, 岩石瞬时弹性应变及稳态蠕变阶段相同冲击载荷引起的瞬时应变随蠕变应力水平的增加而增加, 且岩石在蠕变和冲击的作用下的破坏时间具有明显的非线性特征; 随着冲击载荷增加, 岩石的瞬时应变明显增大, 在高冲击载荷下具有更快的增长率, 且岩石失稳破坏时间随冲击载荷的变化差异明显, 在高冲击载荷下, 岩石试样失稳破坏时间明显缩短。

关键词:亚临界裂纹扩展; 蠕变; 冲击; 离散元数值模拟; 破裂模式

中图分类号: TD315 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)03-1527-14

Deformation and fracture characteristics of rock under creep-impact loading based on subcritical crack growth

ZHANG Guangchao¹, ZHOU Zesen¹, ZHOU Guanglei¹, XU Tao², Heinz KONIETZKY³, ZHAO Xipo⁴, HUANG He⁴, LIU Yuhang¹

(1. School of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Center for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Geotechnical Institute, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg 09599, Germany; 4. Yankuang Energy Group Co., Ltd., Jining 272000, China)

Abstract: During deep resources extraction, deep rock is subjected to high stress and dynamic disturbances, leading to frequent dynamic disasters such as coal rock bursts that severely restrict the safe and efficient production of deep resources.

收稿日期: 2024-11-06 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1357

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52204098); 山东省自然科学基金优秀青年基金资助项目 (ZR202211070181); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2022QE123)

作者简介: 张广超 (1987—), 男, 山东泰安人, 教授, 博士。E-mail: zgchao2015@163.com

通讯作者: 周广磊 (1990—), 男, 山东滕州人, 副教授, 博士。E-mail: guangleizhou@sdust.edu.cn

引用格式: 张广超, 周泽森, 周广磊, 等. 基于亚临界裂纹扩展的岩石蠕变-冲击变形破裂特征[J]. 煤炭学报, 2025, 50(3): 1527-1540.

ZHANG Guangchao, ZHOU Zesen, ZHOU Guanglei, et al. Deformation and fracture characteristics of rock under creep-impact loading based on subcritical crack growth[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(3): 1527-1540.



移动阅读

To investigate the deformation and failure mechanisms of deep rock under the combined effects of creep and impact loadings, a rock creep model was established based on subcritical crack growth theory and fracture mechanics. The model provides unified solutions for creep and impact loadings across different strain rate ranges using a unified time scale approach. Additionally, the numerical model for rock under the combined effects of creep and impact was developed using the two-dimensional discrete element software UDEC. Based on the validation of this model, the influence of different creep stress levels and impact loadings on the deformation and fracture characteristics of rock was simulated and studied. The study reveals the following key findings: The rock creep-impact model based on subcritical crack growth theory can effectively describe the three stages of primary creep, steady creep and accelerated creep. The numerical model can accurately simulate the effects of increased creep strain and the shortened time-to-failure in creep after impact loading. As the subcritical crack constant B increases or the stress corrosion index n decreases, the strain rate during the steady creep stage increases, resulting in a shortening of the steady creep stage and the creep failure lifespan. Increasing creep stress levels leads to higher instantaneous elastic strain and the instantaneous strain caused by the same impact loading in the steady creep stage. And the failure time of rock under the action of creep and impact has obvious nonlinear characteristics. With an increase in impact loadings, the instantaneous strain of the rock increases significantly, showing a faster growth rate under high impact loadings. The time-to-failure of the rock varies significantly with changes in impact loading, with a notably shorter time-to-failure under high impact loadings.

Key words: subcritical crack growth; creep; impact; discrete element numerical simulation; fracture mode

0 引 言

深部资源空间的开发与利用已成为我国中长期科技发展规划的战略方向,千米级乃至更深的矿产资源开采已成为常态。在深部岩体工程中,一方面,随着开采深度的增加,深部岩体处于高地应力环境,自重应力和构造应力场共同构成了深部高应力场,高应力作用下岩石蠕变具有显著的非线性变形及强时效特征;另一方面,深部岩体在开采过程中易受到冲击载荷的影响,例如矿山开采和巷道隧洞掘进过程中,高能级的冲击地压、岩爆及矿震(能量 $> 10^5$ J)、爆破震动(能量介于 $10^3 \sim 10^5$ J)、周期来压(能量介于 $10^2 \sim 10^5$ J)、巷道掘进震动(能量 $< 10^2$ J)等现象都会使巷道围岩受到冲击载荷的影响,强扰动下岩石破坏过程中能量释放具有非稳态破坏及瞬时性特征。深部煤岩体在高静载和强烈的开采扰动等复杂力学环境下,煤岩体力学特性的时间效应与非线性非稳定变形更加显著,使得巷道围岩蠕变型、扰动型冲击地压等深井动力灾害频发。

深部岩体在高静载和强扰动共同作用下的性能,不仅取决于岩体的蠕变性能或冲击载荷性能,也取决于蠕变和周期冲击载荷下的共同作用,需综合考虑蠕变和冲击 2 个应变率下的损伤累积和能量演化过程。岩石的蠕变特性是评价深部岩体长期稳定性的重要依据。针对岩石的蠕变问题,许多学者提出了反映岩石流变特性的理论模型,如经验模型、元件组合模型、损伤断裂流变模型、内时流变模型、亚临界裂纹扩展

蠕变模型等。其中,经验模型和元件组合模型应用最为广泛,但这 2 种模型皆基于唯象理论,仅能拟合出材料的蠕变变形曲线,但不能反映材料蠕变变形破坏本质。近年来,国内外研究人员开展了大量基于亚临界裂纹扩展理论的岩石蠕变变形规律研究。赵延林等^[1]利用双轴压缩试验证实了类岩石裂纹流变断裂现象,得出类岩石裂纹的亚临界扩展条件是裂纹尖端应力强度因子大于亚临界裂纹的门槛值且小于断裂韧度值。MENG 等^[2]通过 DC 电压波动法实时监测裂纹扩展全过程并测量裂纹扩展速率,得到了亚临界裂纹扩展包括裂纹潜伏阶段、稳态裂纹扩展阶段及加速裂纹扩展阶段 3 个阶段。王思青等^[3]采用双扭试验研究得到了岩石试样亚临界裂纹扩展速度与应力强度因子之间的关系。曹平等^[4]对含裂隙岩石进行了双轴加载流变断裂试验,得出岩石裂纹在压剪应力条件下的流变断裂扩展存在微裂纹扩展 3 种模式。近年来,数值模拟分析方法已经成为分析岩石亚临界裂纹扩展行为的重要手段。KEMENY^[5]利用亚临界裂纹扩展理论建立了岩石节理黏聚力随时间劣化的断裂力学模型,并预测了含不连续面的岩体随时间变化的行为。胡光辉等^[6]通过在 PFC 软件中引入应力腐蚀理论,建立了细观尺度岩石蠕变变形破裂颗粒数值模型,并开展了不同应力水平下的蠕变失稳机理研究。CHEN 等^[7]建立了一种基于块体离散元软件,模拟了时效与非时效性的岩石损伤演化过程,分析了砂岩试样中应力腐蚀引起的单边时效裂纹扩展行为。FU 等^[8]考虑岩石亚临界裂纹扩展理论基于三维颗粒离散元方法

建立了岩石时效变形三维模型研究岩石的时效变形破裂过程及机理。LI 等^[9-10]根据亚临界裂纹扩展理论、线弹性断裂力学和 Charles 方程, 建立了含初始微裂纹岩石试样在恒定载荷作用下的寿命预测模型。黄达等^[11]基于亚临界裂纹扩展理论, 通过 FLAC 建立了具有初始微裂纹的岩石裂隙时效扩展数值模型。赵伦洋等^[12]考虑了应力腐蚀作用下的微裂纹亚临界扩展, 结合时效损伤演化准则, 建立了多尺度损伤蠕变本构模型。以上研究阐明了亚临界裂纹扩展与岩石蠕变变形行为的关系, 并通过数值模拟分析了微裂纹从微观扩展到宏观层面形成岩石破坏裂纹的过程。

岩石的流变扰动效应^[13-14]最早由高延法教授提出, 而后许多学者针对蠕变和冲击 2 个应变率下岩石材料的变形和损伤破坏特征开展了大量的研究。① 范庆忠^[15]利用岩石三轴扰动蠕变仪和弯曲试验机, 对岩石进行单轴压缩蠕变、四点弯曲蠕变及蠕变扰动效应等一系列试验, 研究了岩石对扰动载荷敏感的邻域范围和强度极限邻域内的蠕变扰动效应。王青元等^[16-17]利用流变-扰动试验机对绿砂岩试样进行单次和多次循环落锤冲击蠕变试验, 并利用 COMSOL 在幂函数蠕变方程和损伤力学理论的基础上建立岩石蠕变损伤模型, 研究不同初始蠕变变形和冲击能量下冲击扰动对岩石蠕变特性的影响。李少华^[18]利用流变-扰动试验机对完整绿砂岩和含初始损伤的绿砂岩开展蠕变-冲击试验, 研究了初始损伤、蠕变应力及扰动能量对岩石变形行为的影响。王吉^[19]利用蠕变-冲击试验机研究了不同应力水平下动态扰动对处于剪切蠕变状态的岩石蠕变行为的影响。王波等^[20]利用 RRTS-IV 型岩石流变扰动效应试验系统, 对不同围压和轴压作用下的流变岩体进行扰动冲击试验, 研究了不同围压条件下“敏感邻域”范围的变化情况。胡斌等^[21]通过进行不同能量和不同冲击次数的剪切蠕变试验, 分析了泥页岩在冲击扰动下的蠕变力学特性。② 李晓照等^[22]通过分析动力载荷对岩石蠕变失效的扰动机理, 建立了动力扰动下脆性岩石蠕变宏细观力学模型, 研究了岩石在动力扰动下的蠕变失效特性。YANG 等^[23]采用蠕变损伤模型在 COMSOL 上再现了岩石在动力扰动作用下的蠕变损伤演化过程, 从时间空间和能量 3 个方面分析了动力扰动对岩石蠕变行为的影响。吉东亮等^[24]基于冲击扰动下岩石的蠕变损伤模型, 利用 PFC 进行了参数敏感性分析, 并研究了不同冲击能量对不同初始蠕变应力下煤岩体的蠕变破坏影响。学者们在岩石同时受冲击扰动和蠕变应力影响上做了大量试验研究, 并建立了岩石蠕变-冲击数值模型, 分析了岩石流变扰动变形破坏规律,

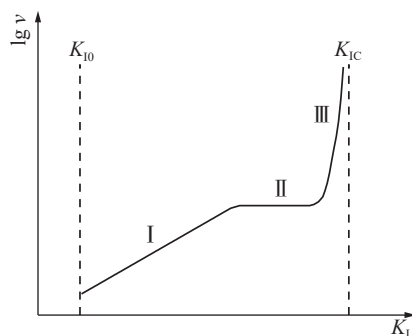
但大多数蠕变模型皆采用经验模型和元件组合模型, 尚未通过亚临界裂纹扩展理论建立岩石蠕变-冲击数值模型, 且没有从细观角度揭示岩石蠕变-冲击失稳破坏机理。

基于此, 笔者在二维块体离散元 (UDEC) 软件中引入岩石亚临界裂纹扩展理论, 建立基于块体离散元方法的岩石蠕变-冲击变形破坏数值模型, 并采用此模型分析岩石蠕变-冲击载荷作用下的变形破坏特征, 从细观角度揭示岩石蠕变-冲击变形破坏机理, 以期深部岩体在高静载和冲击载荷共同作用下长期稳定性分析提供理论指导。

1 蠕变-冲击数值模型

1.1 亚临界裂纹扩展理论

传统的线弹性断裂力学认为, 材料中存在固有裂纹缺陷, 当这些裂纹尖端应力强度因子 K_I 超过材料的断裂韧性 K_{IC} (也称为临界应力强度因子) 时, 裂纹尖端才会开始加速扩展, 如图 1 中阶段 III 所示; 如果未满足裂纹扩展准则, 即 $K_I < K_{IC}$, 则裂纹保持稳定状态。实际上, ATKINSON^[25]通过对多种材料进行试验后发现, 由于应力腐蚀的作用, 在应力强度因子 K_I 值远低于其临界值 K_{IC} 时, 裂纹也会有显著的扩展, 如图 1 中阶段 I 和 II 所示, 这种现象被称为亚临界裂纹扩展。



注: K_{I0} 为亚临界扩展的应力强度因子门槛值。

图 1 亚临界裂纹扩展速度 v 与应力强度因子 K_I 的关系

Fig.1 Relationship between subcritical crack growth velocity v and stress intensity factor K_I

亚临界裂纹扩展理论后被大量的岩石材料力学试验验证^[9, 25-26], 认为亚临界裂纹扩展理论是岩石材料时效破坏行为的关键因素。岩石是由矿物颗粒、胶结材料及各种裂纹、孔洞等缺陷组成的非均质材料, 在外部载荷的作用下, 岩石中微裂纹并不是静止的, 而是在外部应力的作用下, 微裂纹发生缓慢的亚临界裂纹扩展。在基于亚临界裂纹扩展的应力腐蚀理论中, 适合岩石材料的是 Charles 理论。针对亚临界裂纹扩展, CHARLES^[27]采用幂律依赖性关系进行描述,

提出了应力强度因子与亚临界裂纹扩展速度的关系式:

$$v = v_0 K^n e^{(-H/RT)} \quad (1)$$

式中: v 为裂纹扩展速度, m/s; v_0 为材料常量, m/s; K 为应力强度因子, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; n 为亚临界裂纹扩展指数或应力腐蚀指数; H 为活化焓, J/mol; R 为气体常数; T 为绝对温度, K。

对于同一种岩石材料, 当温度和环境一定时, $A = v_0 e^{(-H/RT)}$ 为常量, m/s。因此, 式 (1) 可进一步简化为

$$v = AK^n \quad (2)$$

1.2 基于亚临界裂纹扩展理论的蠕变模型

典型的脆性材料不可避免地包含大量的亚微观缺陷、微裂纹或其他不连续点, 这些缺陷、微裂纹或其他不连续点在材料的整个体积中随机分布。在建立基于亚临界裂纹扩展理论的蠕变模型前, 为了模拟亚临界裂纹扩展行为, 首先需要对材料中的微裂纹进行表征。在采用 UDEC 软件进行建模时, 采用 UDEC 软件内置的泰森多边形算法, 将试件离散成泰森多边形块体。然后, 将虚拟的初始微裂纹均匀分布泰森多边形块体每一条接触上, 如图 2 所示。每条微裂纹长度为 $N_r L$, L 为接触的长度, N_r 为随机产生的数值并且遵循均匀分布。实际上是将微裂纹长度作为参数引入接触的索引中, 不会直接对原接触模型产生影响, 同时实现了接触的刚度劣化, 使得模型适用于动静耦合的模拟。

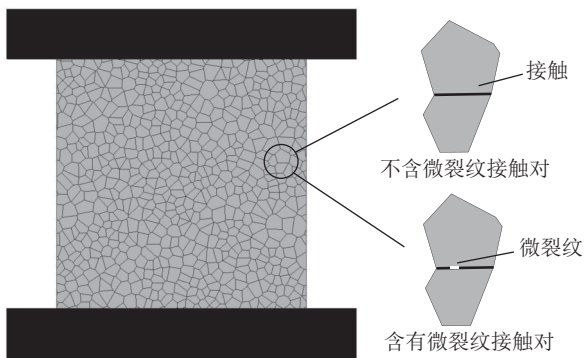


图 2 UDEC 中微裂纹示意

Fig.2 Schematic diagram of microcracks in UDEC

为了模拟亚临界裂纹扩展和预测岩石与时间相关的损伤过程, 本研究使用 Charles 幂律关系式, 并基于离散元软件做出 3 点假设: ① 应力腐蚀只影响接触, 而不影响岩石基质, 亚临界裂纹只能沿着泰森多边形块体边缘传播; ② 亚临界裂纹长度的增加会导致对应接触的抗拉强度和剪切强度随时间的变化而降低;

③ 当微裂纹长度增长至对应的接触长度, 或当应力强度因子达到断裂韧度时, 该处的接触失效破坏。

在内置的微裂纹中, 裂纹的速度由裂纹尖端的应力腐蚀速率控制, 将式 (1) 进行简化, 可以得到 I 型加载模式的关系表达式:

$$v_1 = A_1 K_1^{n_1} \quad (3)$$

式中: v_1 为 I 型亚临界裂纹扩展速度, m/s; A_1 为常量, m/s; K_1 为 I 型加载模式下的应力强度因子, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; n_1 为应力腐蚀指数, 是材料在特定环境下对应力腐蚀的敏感性度量值。

由于不同材料具有不同断裂韧度 K_{IC} , 因此采用下式将其应力强度因子和临界值归一化:

$$A_1 = B_1 / K_{IC}^{n_1} \quad (4)$$

式中: B_1 为亚临界裂纹扩展常量, m/s; K_{IC} 为材料的 I 型断裂韧度, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

合并式 (3)、式 (4) 可得到式 (5), 即 I 型加载模式下亚临界裂纹扩展速度的常用经验幂律关系式:

$$v_1 = B_1 \left(\frac{K_1}{K_{IC}} \right)^{n_1} \quad (5)$$

式 (5) 描述的是纯拉伸载荷作用下裂纹沿原平面扩展的情况, 而在岩体中, 混合模式的加载条件更加常见, 如二维情况中出现最多的拉伸剪切混合加载模式。ATKINSON^[28]指出没有明显的物理化学原因可以用来解释描述亚临界裂纹扩展的本构方程的形式, 其形式取决于裂纹尖端的位移模式。因此, 纯剪切的 II 型加载模式的亚临界裂纹扩展模型也可以以纯拉伸的 I 型加载相似的方式进行, II 型加载模式下的裂纹速度表达式为

$$v_2 = B_2 \left(\frac{K_{II}}{K_{IIC}} \right)^{n_2} \quad (6)$$

式中: v_2 为 II 型亚临界裂纹扩展速度, m/s; B_2 为亚临界裂纹扩展常量, m/s; K_{II} 为 II 型加载模式下的应力强度因子, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; K_{IIC} 为材料的 II 型断裂韧度, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; n_2 为应力腐蚀指数。

由于亚临界裂纹扩展速度不受物理化学因素的影响, 结合前文的假设可知, 接触强度是随着微裂纹扩展而逐渐劣化, 其劣化情况是一个线性的过程。通过建立微裂纹长度和接触之间的关系, 得到了接触抗拉强度及接触黏聚力强度的劣化方程及破坏判别标准式^[7, 10, 29]:

$$\begin{cases} J_i^T = \lambda_{1i} (L_i - a_i) \\ J_i^C = \lambda_{2i} (L_i - a_i) \end{cases} \quad (7)$$

式中: J_i^T 为接触 i 的瞬时抗拉强度, MPa; J_i^C 为接触 i 的瞬时黏聚力强度, MPa; λ_{1i} 为接触 i 的抗拉强度的接触劣化常数; λ_{2i} 为接触 i 的黏聚力强度的接触劣化常数; L_i 为接触 i 的长度, m; a_i 为接触 i 上的微裂纹长度, m。

考虑时间关系的微纹扩展速度, 对式 (5) 和式 (7) 进行微分处理, 得到新的方程:

$$v_1 = \frac{da}{dt} = B_1 \left(\frac{K_{Ii}}{K_{IC}} \right)^{n_1} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \frac{dJ_i^T}{dt} = -\lambda_{1i} \frac{da_i}{dt} \\ \frac{dJ_i^C}{dt} = -\lambda_{2i} \frac{da_i}{dt} \end{cases} \quad (9)$$

将式 (8) 代入式 (9), 可以得到 I 型亚临界裂纹扩展模式:

$$\begin{cases} \frac{dJ_i^T}{dt} = -\lambda_{1i} B_1 \left(\frac{K_{Ii}}{K_{IC}} \right)^{n_1} \\ \frac{dJ_i^C}{dt} = -\lambda_{2i} B_1 \left(\frac{K_{Ii}}{K_{IC}} \right)^{n_1} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $K_{Ii} = \bar{\sigma}_i \sqrt{\frac{\pi a_i}{2}}$, MPa · m^{1/2}; $\bar{\sigma}_i = \frac{F_{ni}}{L_i - a_i}$, MPa; F_{ni} 为接触 i 上的法向力, kN/m。

同样的, II 型亚临界裂纹扩展模式:

$$\begin{cases} \frac{dJ_i^T}{dt} = -\lambda_{1i} B_2 \left(\frac{K_{IIi}}{K_{IIC}} \right)^{n_2} \\ \frac{dJ_i^C}{dt} = -\lambda_{2i} B_2 \left(\frac{K_{IIi}}{K_{IIC}} \right)^{n_2} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $K_{IIi} = \bar{\tau}_i \sqrt{\frac{\pi a_i}{2}}$, MPa · m^{1/2}; $\bar{\tau}_i = \frac{F_{si}}{L_i - a_i}$, MPa; F_{si} 为接触 i 上的剪切力, kN/m。

在二维平面中, 微裂纹长度 a 为 I 和 II 型扩展长度的总和^[30]。因此, I、II 型亚临界裂纹扩展模式结合即为混合模式:

$$\begin{cases} \frac{dJ_i^T}{dt} = -\lambda_{1i} \left[B_1 \left(\frac{K_{Ii}}{K_{IC}} \right)^{n_1} + B_2 \left(\frac{K_{IIi}}{K_{IIC}} \right)^{n_2} \right] \\ \frac{dJ_i^C}{dt} = -\lambda_{2i} \left[B_1 \left(\frac{K_{Ii}}{K_{IC}} \right)^{n_1} + B_2 \left(\frac{K_{IIi}}{K_{IIC}} \right)^{n_2} \right] \end{cases} \quad (12)$$

式中: $K_{Ii} = \bar{\sigma}_{mi} \sqrt{\frac{\pi a_i}{2}} \sin^2 \beta_i$, MPa · m^{1/2}; $K_{IIi} = \bar{\sigma}_{mi} \times \sqrt{\frac{\pi a_i}{2}} \sin \beta_i \cos \beta_i$, MPa · m^{1/2}; $\bar{\sigma}_{mi} = \frac{\sqrt{F_{ni}^2 + F_{si}^2}}{L_i - a_i}$, MPa; β_i 为接触 i 的倾角, (°)。

当亚临界裂纹长度扩展至临界裂纹长度, 或应力强度因子达到断裂韧度时, 裂纹以极快的速度扩展并使接触发生失效破坏, 即接触的抗拉强度和黏聚力强

度减至 0。当某一接触发生破坏后, 其周围的应力会重新分布, 进而导致局部应力集中, 加速周边接触的强度劣化。接触破坏的判别标准如下:

$$\begin{cases} a_i \geq L_i \\ \text{or, } K_{Ii} \geq K_{IC} \\ \text{or, } K_{IIi} \geq K_{IIC} \end{cases} \quad (13)$$

1.3 冲击模型及时间尺度统一方法

深部围岩所受的冲击载荷频率高、波长短, 且总作用时间短, 一般为几十至几百毫秒。在数值模拟中, 为了模拟冲击载荷对岩石试件的影响, 本文将冲击应力波简化为正弦波形来模拟冲击载荷。冲击载荷波形函数为

$$\sigma_{\text{imp}} = \frac{1}{2} \sigma_{\text{max}} \left[1 + \sin \left(\frac{2\pi t}{T_p} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (14)$$

式中: σ_{imp} 为随时间变化的冲击载荷, MPa; σ_{max} 为冲击应力峰值, MPa; t 为时间, s; T_p 为冲击时间周期, s。

由于蠕变和冲击属于 2 个不同应变率范畴, 冲击所用的求解时间步长与蠕变时间步长量级差异较大, 在数值模拟中如何将这 2 个不同应变率范围的载荷统一求解, 是蠕变-冲击耦合数值模拟的关键。UDEC 软件在计算过程中采用动态松弛法将静力学问题转化为动力学问题进行求解, 相比于传统的静力学分析, 在进行动力学计算时更具优势, 可以准确地计算材料在动载下的行为和响应。因此, 采用 UDEC 软件计算岩石材料的蠕变和冲击时, 冲击作用时间可与载荷真实作用时间相匹配, 而蠕变时间则需要通过试验数据进行校正。

在进行数值计算时, 岩石蠕变时间步长根据最大不平衡力变化动态调整, 当不平衡力比率超过设置的阈值时, 降低蠕变时间步长, 当不平衡力比率持续小于阈值时, 则增大蠕变时间步长。将累加起来的蠕变时间步长与实验室岩石蠕变破坏时间比对, 通过设置蠕变时间步长系数, 将模拟蠕变时间拟合为实际蠕变时间。

在进行蠕变和冲击的模拟中还需要解决蠕变时间步长和冲击时间步长差异大的问题。由于蠕变时间步长与冲击时间步长相差的数量级过大, 在实际过程中难以实现精确地控制冲击作用时间节点。简单地蠕变应力叠加冲击应力容易导致冲击应力施加时间不精确, 或冲击应力无法作用于模型, 因为蠕变时间步长过大会使累计时间直接跳过冲击作用起始至结束整个阶段, 无法准确模拟冲击过程。因此, 在施加冲击载荷前, 需要通过逐级降低时间步长的方法以实现蠕变作用到蠕变冲击作用的过渡。在施加冲击

载荷后,模型继续进行蠕变过程的模拟。

假设最大蠕变时间步长为 1 s/步,冲击时间步长为 1×10^{-8} s/步,则当累计时间 t_{sum} 达到冲击作用起始时间 t_{imp}^s 前 1~10 s 时,时间步长设置为 0.1 s/步,当累计时间 t_{sum} 达到冲击作用起始时间 t_{imp}^s 前 0.01~1.00 s 时,时间步长设置为 0.001 s/步,直至时间步长逐级递减至冲击时间步长的量级。因此,动态变化的时间步长 Δt_i 在各阶段的取值(默认步长、蠕变阶段、过渡阶段以及冲击阶段)可由下式表达:

$$\Delta t_i = \begin{cases} \Delta t_{\min}, \text{默认步长} \\ \begin{cases} \Delta t_{\min}, F_u > F_{\text{thr}} \\ \min(2^{m_{i+1}} \Delta t_{\min}, \Delta t_{\max}), F_u \leq F_{\text{thr}} \end{cases}, \text{蠕变阶段} \\ \begin{cases} 1 \times 10^{-1}, t_{\text{imp}}^s - 10 \leq t_{\text{sum}} < t_{\text{imp}}^s - 1 \\ \dots \\ 1 \times 10^{-8}, t_{\text{imp}}^s - 1 \times 10^{-6} \leq t_{\text{sum}} < t_{\text{imp}}^s \end{cases}, \text{过渡阶段} \\ \Delta t_{\text{imp}}, t_{\text{imp}}^s \leq t_{\text{sum}} < t_{\text{imp}}^e, \text{冲击阶段} \end{cases} \quad (15)$$

$$m_{i+1} = m_i + 1, F_u \leq F_{\text{thr}} \quad (16)$$

式中: F_u 为最大不平衡力, kN/m; F_{thr} 为最大不平衡力阈值, kN/m; t_{imp}^s 、 t_{imp}^e 分别为冲击作用起始和结束时间, s; m_i 为与时间步相关的时间扩大系数指数。

1.4 块体接触本构模型

岩石由大量的矿物颗粒和胶结物组成,为了反映岩石材料的细观结构,本文采用泰森多边形块体建立数值模型。泰森多边形块体之间接触的力学性质决定了试件整体的宏观力学行为,本文泰森多边形块体本构模型采用不可破坏的线弹性模型,块体接触本构模型(如图 3 所示)采用库仑滑移模型,根据最大拉应力准则和摩尔-库仑准则来判断接触面的拉伸和剪切破坏。

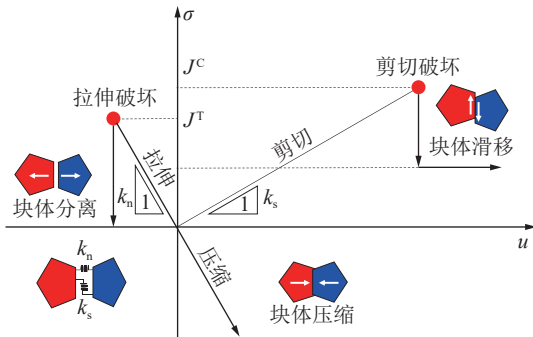


图 3 块体接触本构模型

Fig.3 Block contact constitutive model

如图 3 所示,采用库仑滑移模型的接触在发生破坏前,其受到的应力和位移关系呈线性。对于拉伸行为,接触受到的法向应力 σ_n 和法向位移 u_n 的关系由法向刚度 k_n 控制,当法向应力 σ_n 达到抗拉强度 J^T 时,

接触失效,此时残余抗拉强度 J_r^T 设置为 0,其表达式为

$$\begin{cases} \sigma_n = -k_n u_n, \sigma_n \geq -J^T \\ \sigma_n = J_r^T = 0, \sigma_n < -J^T \end{cases} \quad (17)$$

对于剪切行为,接触受到的剪切应力 τ 和剪切位移 u_s 的关系由剪切刚度 k_s 控制,当剪切应力 τ 达到剪切强度 τ_{max} 时,接触发生软化,其黏聚力 J^C 和摩擦角 φ 分别设置为残余值 J_r^C 和 φ_r ,其表达式如下:

$$\tau_{\text{max}} = J^C + \sigma_n \tan \varphi \quad (18)$$

$$\begin{cases} \tau_s = k_s u_s, |\tau_s| < \tau_{\text{max}} \\ \tau_s = \text{sign}(\Delta u_s) (J_r^C + \sigma_n \tan \varphi_r), |\tau_s| \geq \tau_{\text{max}} \end{cases} \quad (19)$$

1.5 蠕变-冲击耦合数值解法

岩石在蠕变和冲击耦合作用下,其失稳破坏过程受控于 2 个时间尺度差异巨大的载荷。因此,在进行岩石在蠕变和冲击共同作用下数值求解时,需统一蠕变和冲击载荷作用时间,并耦合蠕变和冲击作用下岩石的变形和损伤,实现 2 个应变率下岩石材料变形破坏的耦合求解。蠕变-冲击耦合模型计算流程如图 4 所示,数值模型中具体的求解步骤如下:① 基于岩石基础力学试验和数值模拟试验拟进行细观力学参数标定。将拟合校准后的岩石参数赋予到块体和接触上,利用系数时程曲线耦合蠕变与冲击应力,并将其载荷施加到顶部压板;② 遍历所有的接触,在接触上定义虚拟的微裂纹,令各接触上都含有不同长度的初始微裂纹;③ 进行模型的求解,每步求解后,先通过遍历接触,判断接触是否发生破坏;如果接触未破坏,则通过判断接触的受力情况,代入不同模式下的微裂纹增长式和接触强度劣化式进行微裂纹长度的计算;④ 判断接触对应的微裂纹长度、应力强度因子、接触强度是否满足破坏条件,当满足破坏条件时,将当前接触的黏聚力、抗拉强度、摩擦角分别设置为 0 和残余值;⑤ 当试样模型的应变变量或破坏时间达到预设值时,停止程序。

2 模型验证

为了验证基于亚临界裂纹扩展理论的岩石蠕变冲击数值模型的正确性,本文主要通过岩石单轴压缩试验、岩石单轴蠕变试验和岩石单轴蠕变冲击试验 3 个算例来进行说明,对 ZHU 等^[31]开展的动力扰动对砂岩蠕变影响的试验进行模拟,以验证本文所建模型的准确性。

2.1 参数标定及模型验证

室内试验采用 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 岩样进行岩石单轴压缩试验及蠕变冲击试验,试验中岩石的宏观力

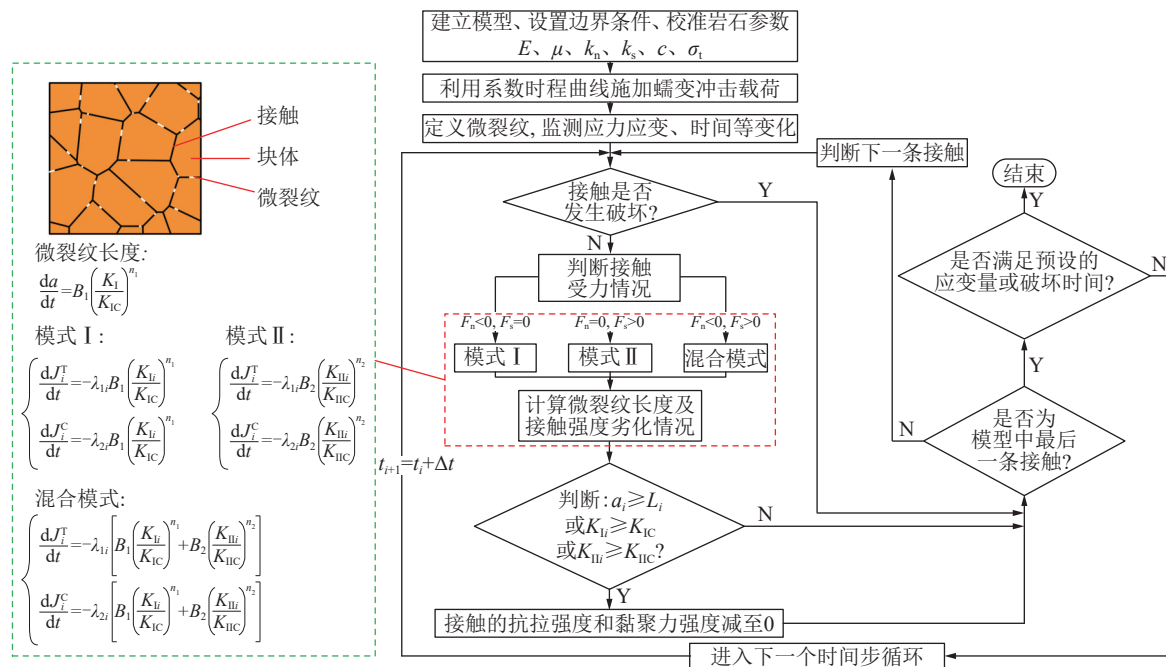


图4 蠕变-冲击耦合模型计算流程

Fig.4 Calculation flow chart of creep-impact coupling model

学参数为: 弹性模量 8.4 GPa, 泊松比 0.29, 密度 2.17 g/cm³, 黏聚力 5.92 MPa, 内摩擦角 27.39°, 抗拉强度 2.27 MPa, 轴向抗压强度 33.11 MPa。根据文献 [31] 中试验试件尺寸, 通过 UDEC 建立 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的块体作为岩石试样, 并将其上下的矩形块体设置为刚性体, 视为压板。采用 UDEC-Voronoi 模型对岩石试样进行随机多边形划分, 模拟砂岩晶粒几何形状和裂纹的不规则性, 反映砂岩的细观物理结构。为了平衡计算精度和时间成本, 本文建立的模型包含 688 个泰森多边形块体, 忽略孔隙率对模型力学性质的影响。本文的块体本构模型采用不可破坏的线弹性模型, 接触本构模型采用库仑滑移模型。在岩样顶底部各放 3 个位移监测点, 计算其平均值得到岩样的轴向应变, 构建的模型及监测点位置如图 5 所示。模拟中边界条件为顶部压板施加固定位移 (单轴压缩试验) 或载荷 (蠕变及冲击), 底部压板固定, 两侧为自由边界。

在采用离散元软件进行数值模拟时, 材料的宏观物理量 (强度、弹性模量、密度等) 根据试验结果赋值。但由于离散元软件 (UDEC、3DEC、PFC 等) 材料的宏观力学性质受细观尺度上块体与块体之间的细观参数所控制, 而这些细观参数无法由实验室获得。因此, 本文在进行数值模拟之前需要对模型进行细观参数的校准及模型的验证。在进行参数校准和模型验证时, 本文分别进行了单轴压缩试验、蠕变试验及蠕变冲击试验, 反复对参数进行校准直至能够完全拟合试验结果。基于亚临界裂纹扩展理论所建立的蠕变模型中的参数, 结合 KO 等 [32]、RIJKEN [33]、MA 等 [34] 通

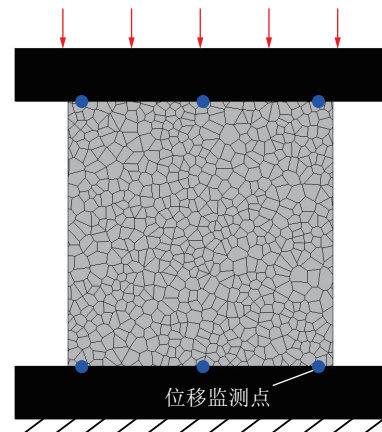


图5 岩石数值模型边界条件及位移监测点

Fig.5 Boundary conditions and displacement monitoring points of rock numerical model

过双扭试验得出的砂岩亚临界裂纹扩展参数范围, 最终标定亚临界裂纹扩展常量 $B_1 = 5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, $B_2 = 8 \times 10^{-23} \text{ m/s}$, 应力腐蚀指数 $n_1 = 30$, $n_2 = 25$, 断裂韧性 $K_{IC} = 0.906 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $K_{IIIc} = 1.358 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 其他标定后的参数见表 1。

单轴压缩数值模拟结果与室内试验结果对比如图 6 所示, 数值模拟的岩石单轴抗压强度为 33.00 MPa, 对应的应变为 0.48×10^{-2} , 数值模拟结果与室内试验结果基本一致。与试验结果不同的是, 由于数值模拟采用了弹性本构块体模型和库仑滑移接触模型, 在模拟过程中未出现岩石在压缩应力下的压密阶段。

在进行蠕变试验验证时, 模拟了 60%、70% 及

表 1 实验室试样参数与模拟拟合参数比较

Table 1 Comparison between laboratory sample parameters and simulated fitting parameters

参数	试验值	模拟值
弹性模量 E/GPa	8.40	9.83
泊松比 μ	0.29	0.29
密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.17	2.17
接触法向刚度 k_n/GPa	—	12 000
接触切向刚度 k_s/GPa	—	6 600
黏聚力 C/MPa	5.92	12.42
抗拉强度 σ_b/MPa	2.27	6.21
内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	27.39	27.39
残余内摩擦角 $\varphi_r/(\text{^\circ})$	—	16

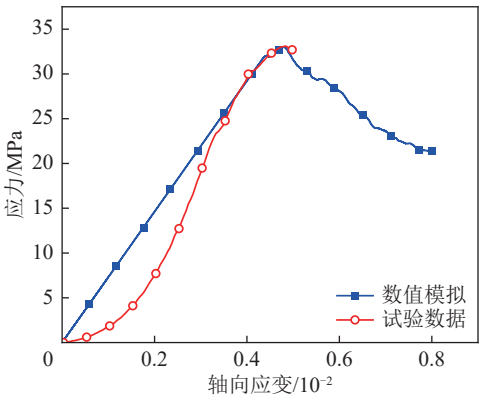


图 6 岩石单轴压缩试验应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of rock uniaxial compression test

80% 单轴抗压强度下的岩石单轴压缩蠕变试验, 试验结果如图 7 所示。如图 7 所示, 在 60% 和 70% 应力水平下, 岩石蠕变经历初始蠕变阶段和稳定蠕变阶段并保持长期稳定。在施加 80% 岩石单轴抗压强度的条件下, 蠕变曲线呈现了典型的岩石蠕变 3 个阶段。

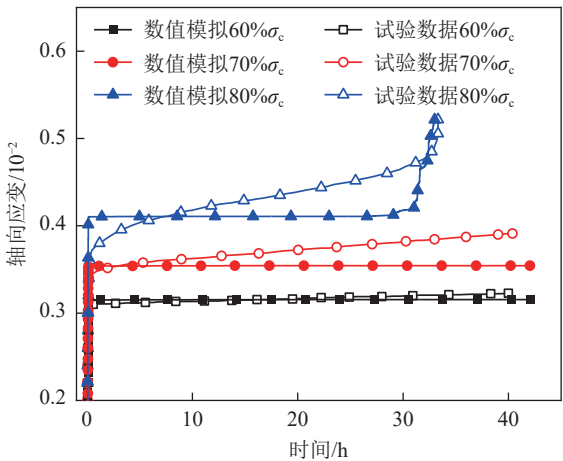


图 7 岩石单轴蠕变试验应变-时间曲线

Fig.7 Strain-time curves of rock uniaxial creep test

通过比较数值模拟曲线和试验曲线可以得出, 在蠕变载荷作用下, 基于亚临界裂纹扩展的蠕变模型能较好的描述砂岩蠕变变形的各个阶段, 且与试验曲线拟合效果良好, 验证了该模型模拟岩石蠕变模型的合理性。

2.2 蠕变冲击试验验证

在验证了岩石单轴压缩试验及蠕变试验的基础上, 进一步开展了岩石蠕变冲击试验验证。根据文献[31]中落锤产生的动态扰动形式, 本文采用正弦波模拟砂岩蠕变过程中的冲击载荷, 将 3 次冲击应力峰值为 20.12 MPa 的冲击载荷叠加 19.8 MPa 的蠕变应力水平施加于模型顶板处。在模拟蠕变冲击应力过程中, 基于 2.3 节中的时间尺度统一方法, 蠕变的时间步长根据不平衡力大小动态调整, 其范围介于最小时间步长 $\Delta t_{\min}=0.000\ 1\ \text{s}$ 和最大时间步长 $\Delta t_{\max}=4.27\ \text{s}$ 之间。对于冲击阶段的时间步长 Δt_{imp} , 采用模型自适应的实际时间步长 $2.804 \times 10^{-8}\ \text{s}$, 完整的蠕变冲击应力-时程曲线如图 8 所示。

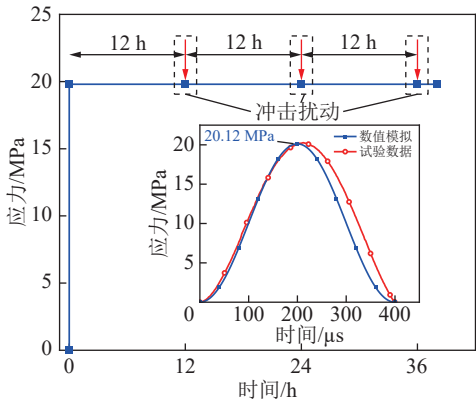


图 8 单次冲击应力曲线及蠕变冲击应力时程曲线

Fig.8 Single impact stress curve and creep impact stress time-history curves

岩石蠕变冲击应变-时间关系曲线数值模拟结果和试验结果如图 9a 所示, 结果表明在校正岩石单轴压缩试验和蠕变试验的基础上, 本模型可以准确地模拟蠕变-冲击试验过程, 且数值模拟中准确地模拟了冲击载荷施加后, 蠕变应变增大的现象。蠕变冲击试验破坏效果如图 9b 所示, 破坏后的岩石试样包括 2 个锥形体和一些剥落的块体, 岩石试样最终的破坏为沿着两个锥形体的剪切面剪切破坏。图 9c 为蠕变冲击作用下数值模拟结果破坏效果图。由图 9c 可见, 数值模拟结果和试验结果一致, 试样的最终破坏均是剪切破坏, 侧面印证了数值模拟结果的可靠性。

2.3 参数敏感性分析

在验证了岩石蠕变冲击数值模型的有效性的基础上, 为进一步探讨亚临界裂纹扩展参数对岩石蠕变

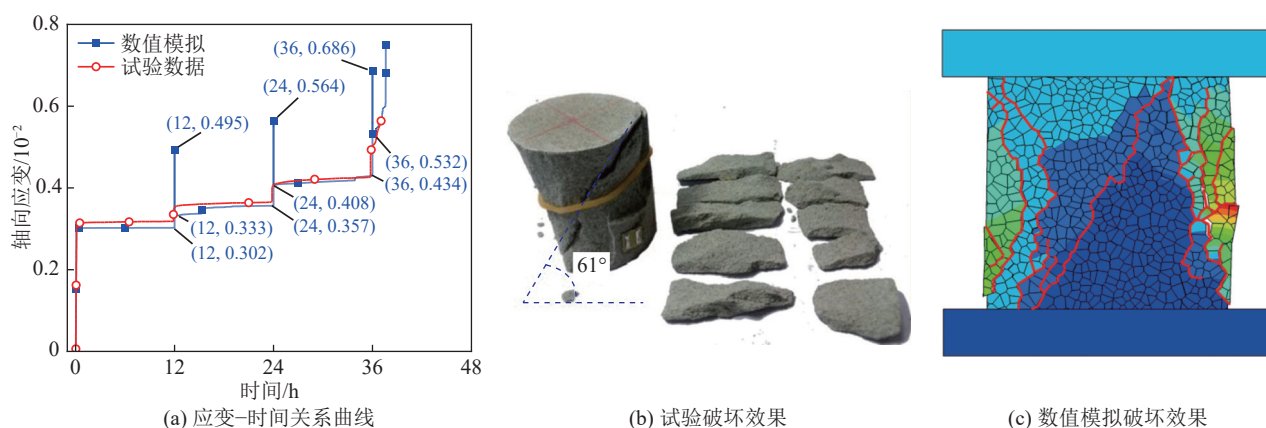


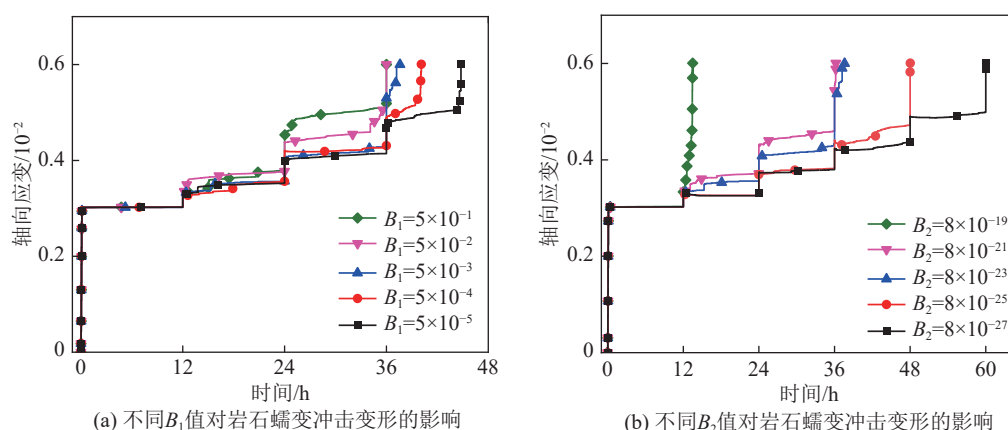
图9 岩石单轴蠕变冲击应变-时间试验与模拟结果

Fig.9 Experimental and numerical strain-time curves of rock in uniaxial creep impact test

变形的影响,提高数值模型的模拟精度,对亚临界裂纹扩展常量 B 及应力腐蚀指数 n 进行敏感性分析。

针对亚临界裂纹扩展常量 B_1 、 B_2 ,为了研究它们对岩石蠕变变形的影响,在其他参数不变的情况下,取 B_1 分别为 5×10^{-1} 、 5×10^{-2} 、 5×10^{-3} 、 5×10^{-4} 、 5×10^{-5} ,其蠕变曲线如图 10a 所示;取 B_2 分别为 8×10^{-19} 、 8×10^{-21} 、 8×10^{-23} 、 8×10^{-25} 、 8×10^{-27} ,结果如图 10b 所示。

通过分析图 10 中的蠕变应力-时间曲线可得,随着亚临界裂纹常量 B_1 和 B_2 的增大,岩石初始应变率基本相同,但冲击对岩石稳定蠕变阶段应变率的影响逐渐增大,相同冲击载荷下更容易提前进入加速蠕变阶段,发生失稳破坏,岩石蠕变冲击寿命变短。

图10 不同 B 值下岩石蠕变冲击应变-时间曲线Fig.10 Strain-time curves of rocks creep impact with different B values

为研究应力腐蚀指数 n_1 、 n_2 对岩石蠕变变形的影响,保持其他参数不变,取 n_1 分别为 10、20、30、40、50,其蠕变曲线如图 11a 所示;取 n_2 分别为 21、23、25、27、29,结果如图 11b 所示。通过图 11 分析可得,当应力腐蚀指数 n 减小时,岩石初始应变率基本相同,但相同冲击载荷下岩石稳定蠕变阶段的应变率增大,稳定蠕变时间缩短,岩石发生蠕变破坏的时间大幅减小。

3 岩石蠕变-冲击特征分析

深部岩石受力情况复杂,不同的地质条件及工况构成了多种动静载组合情形,这些复杂的应力状态和环境条件导致岩体在时间和空间尺度上的力学行为

差异显著,增加了预测其变形和破裂特征的难度。为探究蠕变和冲击载荷共同作用对深部岩石性能的影响,本节开展了不同蠕变应力水平、不同冲击载荷下岩石变形破坏过程数值模拟,分析其不同蠕变应力水平、不同冲击载荷下的变形及破裂特征。

3.1 不同蠕变应力下岩石变形破裂特征

在岩石蠕变冲击模型验证的基础上,为进一步研究不同蠕变应力水平下岩石受蠕变冲击作用的变形破裂特征,选取 50%、55%、60%、65%、70% 岩石单轴抗压强度作为蠕变应力水平,所施加的冲击载荷是峰值为 20.12 MPa 的入射应力波,每 12 h 对岩石进行一次冲击,模拟方案见表 2。

不同蠕变应力水平下岩石应变-时间曲线如

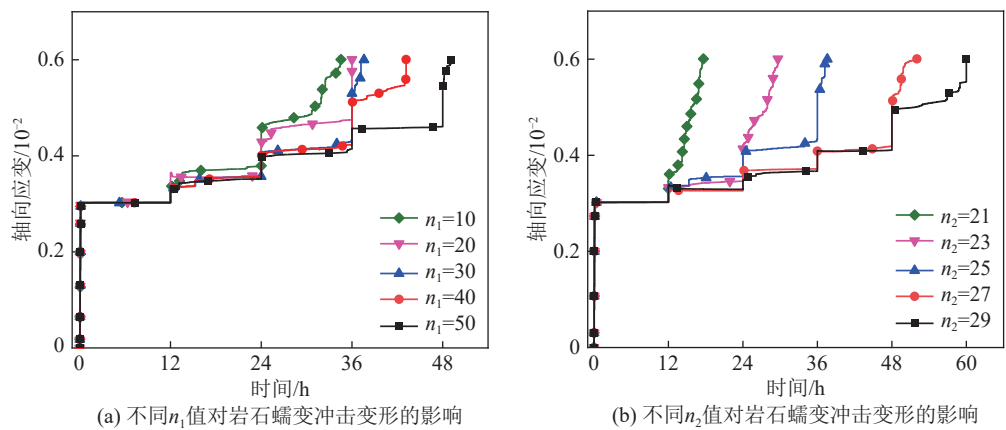


图 11 不同 n 值下岩石蠕变冲击应变-时间曲线
Fig.11 Strain-time curves of rocks creep impact with different n values

表 2 不同蠕变应力水平模拟方案

Table 2 Simulation schemes of different creep stress levels			
试样编号	蠕变应力/MPa	冲击应力峰值/MPa	冲击作用时间/ μ s
1-1号	16.50	20.12	400
1-2号	18.15	20.12	400
1-3号	19.80	20.12	400
1-4号	21.45	20.12	400
1-5号	23.10	20.12	400

图 12 所示,需要说明的是,图 12 中仅显示了蠕变阶段的应变,为了方便分析未显示冲击引起的瞬时应变。由图 12 可见,在蠕变和冲击的共同作用下,不同蠕变应力水平的岩石应变-时间关系曲线出现典型的初始蠕变、稳态蠕变和加速蠕变 3 阶段特征。数值模拟试样 1-1~1-5 号在初始蠕变阶段应变量分别为 0.259×10^{-2} 、 0.281×10^{-2} 、 0.302×10^{-2} 、 0.324×10^{-2} 、 0.345×10^{-2} ,在较低的应力水平下(蠕变应力为 $50\%\sigma_c$ 时),岩石试件的瞬时弹性应变较小,随着岩石蠕变应力水平的提高,岩石的瞬时弹性应变逐渐

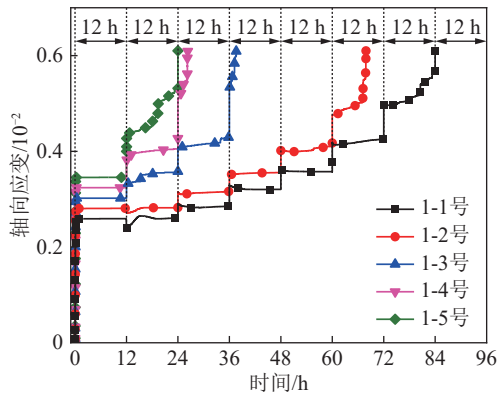


图 12 不同蠕变应力水平下岩石应变-时间曲线
Fig.12 Strain-time curves of rocks under different creep stress levels

增大。

在稳定蠕变阶段,每次冲击扰动所引起的应变增加有明显的不同。以第 1 次冲击为例,施加第 1 次冲击后,试样 1-1~1-5 号在冲击载荷作用下所引起的瞬时应变分别为 -0.019×10^{-2} 、 -0.010×10^{-2} 、 0.030×10^{-2} 、 0.056×10^{-2} 、 0.083×10^{-2} ,与蠕变应力水平呈明显正相关。因此,随着蠕变应力水平的升高,岩石稳态蠕变阶段相同冲击载荷引起的瞬时应变随蠕变应力水平的增加而增加。且试样 1-1 号和 1-2 号则在第 1 次冲击后,出现了明显的应变回弹的现象,即冲击载荷施加后岩石应变先降低至低于冲击之前的应变然后再逐渐升高。这是由于冲击完成后应力卸载弹性能释放,而此时蠕变应力水平较低,难以抑制弹性能所产生的应变回弹现象。

图 13 为不同蠕变应力水平下岩石破坏时间与应力水平的关系曲线。由图 13 可知,数值模拟试样 1-1~1-5 号的破坏时间分别为 84.00、67.84、37.60、26.20、24.00 h,在 12 h/次的冲击载荷作用下,岩石寿命与蠕变应力水平呈负相关关系。因此,在不同蠕变

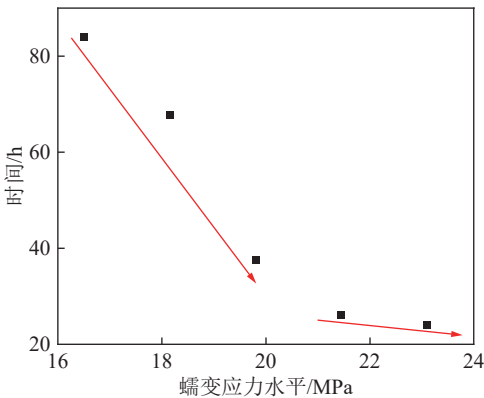


图 13 不同蠕变应力水平下岩石蠕变冲击破坏时间
Fig.13 Creep impact failure time of rock under different creep stress levels

应力水平下,岩石的失稳破坏时间差异明显,蠕变应力水平越大,失稳破坏时间越短。且由图13可以看出,在 $50\%\sigma_c$ 、 $55\%\sigma_c$ 、 $60\%\sigma_c$ 的应力水平下,岩石的失稳破坏时间呈线性降低,而当应力水平达到65%、70%单轴抗压强度时,蠕变失稳破坏时间差异较小。笔者分析认为在蠕变和冲击的共同作用下,岩石的非线性变形和破坏更加明显,其破坏时间具有明显的非线性特征。

图14所示为55%单轴抗压强度蠕变应力水平下岩石蠕变曲线及裂纹随时间演化曲线。图14中,岩石在蠕变冲击载荷作用下,5次冲击引起的瞬时应变分别为 -0.010×10^{-2} 、 0.032×10^{-2} 、 0.036×10^{-2} 、 0.048×10^{-2} 和 0.061×10^{-2} ,裂纹增量分别为107、254、227、204、242条,瞬时应变随冲击次数的增加而增加,但裂纹数量随冲击次数的增加变化并不明显。剪切型、拉伸型和混合型3种扩展模式的裂纹发育情况如图15所示,在蠕变冲击载荷作用下,拉伸裂纹数量在前36 h保持最高水平,5次冲击载荷作用下,拉伸裂纹数量分别增长了82、102、46、19、57条,相对前2次冲击,后3次冲击的拉伸裂纹增量较为平缓;5次冲击引起的拉剪裂纹数量增长分别为16、129、150、158、158条,后4次冲击引起的拉剪裂纹增长较为明显,同时,在第3次冲击后,拉剪裂纹数量超过了拉伸裂纹数量;此外剪切型裂纹的数量始终保持在最低水平,冲击引起的裂纹增长也较少。模拟结果中剪切裂纹比拉伸裂纹数量少,主要由本文所建模型块体离散方式导致。本文数值模拟中采用泰森多边形块体对试样进行离散,这种模型内部矿物颗粒之间全接触的形式,更能有效地、真实地反映岩石的泊松比、拉压比例及矿物颗粒之间内锁问题^[35]。相对于 UDEC 中的三角形块体,多边形颗粒更能现实地模拟岩石内部的矿物颗粒,反映矿物颗粒的微观结构特征。但采用泰森多边形块体和三角形块体时会产生明显的破坏效果

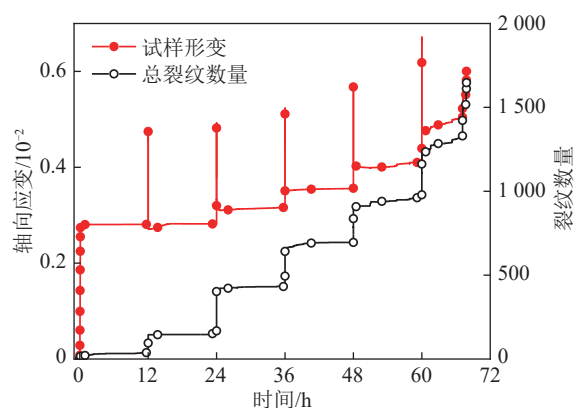


图14 1-2号试样蠕变冲击曲线及裂纹随时间演化曲线
Fig.14 Creep impact curves and crack evolution curve with time of 1-2 sample

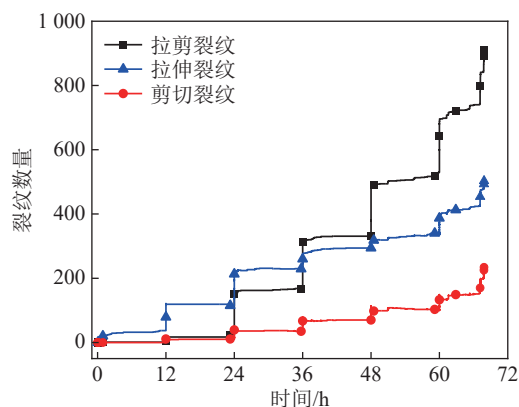


图15 1-2号试样中3种裂纹发育情况

Fig.15 Development of three kinds of cracks in 1-2 sample
差异。当岩石块体采用三角形构建时,其破坏路径较为光滑,岩石模型倾向于剪切开裂;当岩石块体采用泰森多边形时,其破坏边缘相对不规则,岩石更容易出现张拉破坏^[36]。

如图16所示为试样裂纹发育图及位移场云图,1-2号试样在第1次冲击之前属于微裂纹萌生阶段,裂纹数量较少;在第1次冲击后,增加了较多的微裂纹,但呈随机分布状态。在第2次冲击之前,微裂纹

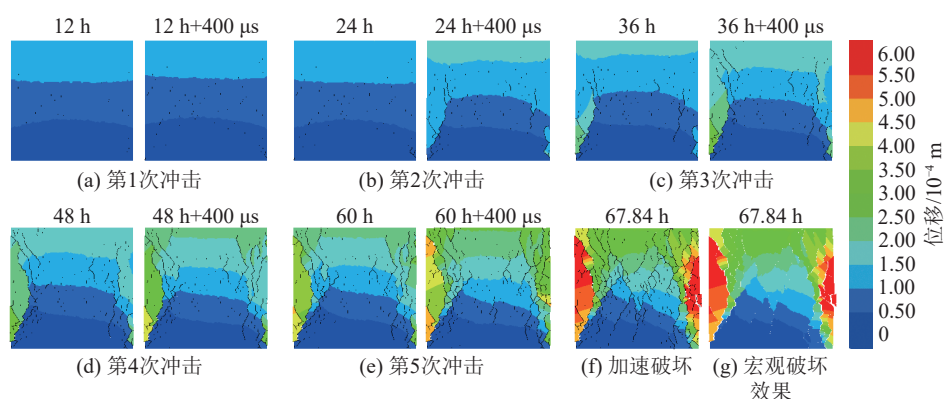


图16 1-2号试样裂隙发育图及位移场云图

Fig.16 Development map of crack and nephogram of displacement field of 1-2 sample

数量及分布变化并不明显,可见在当前应力水平下,岩石处于蠕变第 2 阶段,相对保持稳定;在第 2 次冲击后,微裂纹增长数量较大,且微裂纹集中在岩体的两侧,逐渐呈集中的趋势;结合图 15 可知,岩石内部未形成贯通裂纹前,岩石损伤主要由拉伸裂纹引起,在开始贯通裂纹后,拉剪裂纹数量增速加快,逐渐成为主要的损伤因素。在第 3 次冲击前,岩石中心部位开始产生裂纹集中,且此时岩石蠕变应变量较大,岩体开始处于不稳定状态;在第 3 次冲击后,微裂纹不断贯通合并,裂纹形态逐渐演化为共轭双曲线。在第 4 次冲击后,此时冲击对瞬时应变影响最大,冲击后微裂纹分布更加散乱,岩石破碎程度加剧;在第 5 次冲击后,岩石瞬时应变突增,微裂纹数量进一步增加,试样发生共轭剪切破坏。

由数值模拟结果可以看出,在不同蠕变应力水平下相同冲击载荷对岩石试样的影响主要表现在 3 个方面:一是随着蠕变应力水平的增加,引起岩石在蠕变初始阶段瞬时弹性应变随蠕变应力水平的增加而增加;二是岩石稳态蠕变阶段相同冲击载荷引起的瞬时应变随蠕变应力水平的增加而增加,且低蠕变应力水平下发生应变回弹现象;三是在低蠕变应力水平下,冲击载荷对岩石影响较小,当蠕变载荷达到强度阈值时,岩石在冲击载荷的影响下极容易发生失稳破坏。

3.2 不同冲击载荷下岩石变形破裂特征

为研究不同冲击载荷下岩石蠕变冲击变形破坏特征,选择 60% 岩石单轴抗压强度作为蠕变应力水平,每 12 h 对岩石试样进行冲击,冲击载荷峰值分别取 16.12、18.12、20.12、22.12、24.12 MPa,模拟方案见表 3。

表 3 不同冲击载荷模拟方案

Table 3 Simulation schemes of different impact disturbance

试样编号	蠕变应力/MPa	冲击应力峰值/MPa	冲击作用时间/ μ s
2-1号	19.80	16.12	400
2-2号	19.80	18.12	400
2-3号	19.80	20.12	400
2-4号	19.80	22.12	400
2-5号	19.80	24.12	400

不同冲击载荷下岩石应变-时间曲线模拟结果如图 17 所示。由图 17 可知,在相同的蠕变应力水平,不同的冲击载荷下,每次冲击引起的瞬时应变及最终的破坏时间有着明显的不同。第 1 次冲击后,试样 2-1~2-5 号在冲击作用下产生了较大的瞬时应变,分别为 -0.012×10^{-2} 、 -0.011×10^{-2} 、 0.031×10^{-2} 、 $0.039\times$

10^{-2} 和 0.046×10^{-2} ,瞬时应变随冲击载荷的增加而增加;在第 2 次冲击后,岩石尚处于稳定状态,其应变亦随冲击载荷的增加呈增加趋势,分别为 -0.007×10^{-2} 、 0.031×10^{-2} 、 0.052×10^{-2} 、 0.067×10^{-2} 、 0.079×10^{-2} ;在第 2 次冲击后,试样 2-5 号首先发生失稳破坏,在第 3 次冲击后,试样 2-4 号和 2-3 号也先后发生失稳破坏,时间间隔仅为 1.6 h;最终,试样 2-2 号在第 4 次冲击后发生失稳破坏,而试样 2-1 号在第 6 次冲击后,继续发生蠕变变形近 12 h 后发生失稳破坏。

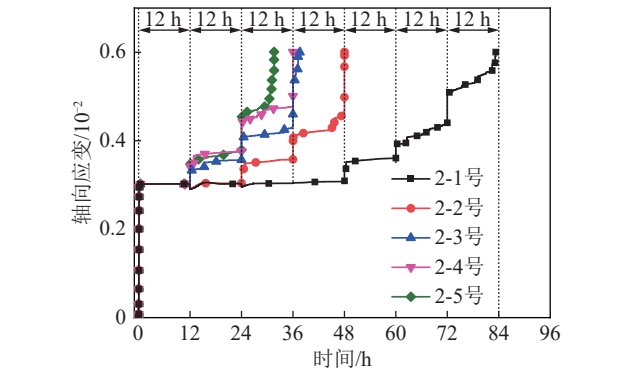


图 17 不同冲击载荷下岩石应变-时间曲线
Fig.17 Strain-time curves of rocks with different impact disturbances

图 18 所示为不同冲击载荷下冲击引起的瞬时应变随冲击次数变化的规律。由图 18 可知,在相同的蠕变应力水平下,冲击载荷越大,瞬时应变越大,且瞬时应变与冲击次数的关系在高冲击载荷下具有更快的增长率,表明岩石蠕变变形对高冲击载荷更敏感。不同冲击载荷下岩石失稳破坏时间与冲击载荷峰值的关系如图 19 所示。由图 19 可知,试样 2-1~2-5 号的破坏时间分别为 83.29、48.04、37.60、36.00、31.60 h,在相同蠕变应力水平作用下,岩石失稳破坏时间与冲击应力峰值呈负相关,随着冲击应力峰值的增加,岩石寿命呈现指数下降的趋势。当冲击载荷在小于等

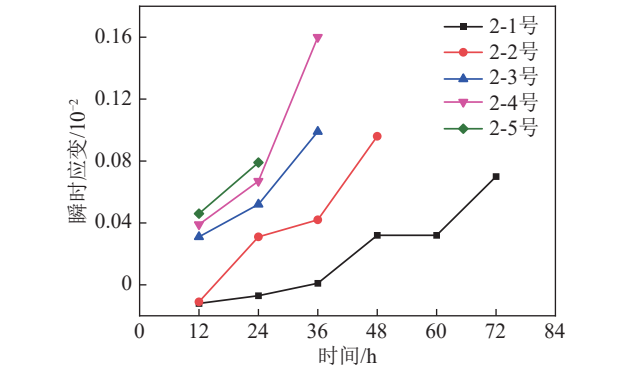


图 18 不同冲击载荷与岩石瞬时应变的关系
Fig.18 Relationship between different impact loads and instantaneous strain of rock

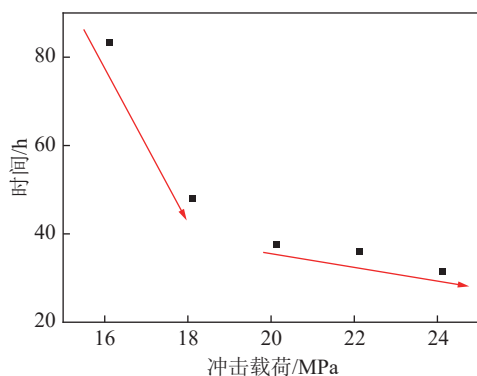


图19 不同冲击载荷下岩石蠕变冲击破坏时间

Fig.19 Creep impact failure time of rock with different impact loadings

于 18.12 MPa 时, 岩石失稳破坏时间受冲击载荷影响较大; 当冲击载荷大于 18.12 MPa 时, 岩石失稳破坏时间趋于稳定。结果表明, 当冲击载荷较小时, 岩石失稳破坏时间差异明显, 但当冲击载荷超过一定强度阈值时, 岩石极容易在冲击载荷的作用下发生失稳破坏。

由不同冲击载荷下岩石变形破坏过程数值模拟结果可以看出, 在不同冲击载荷下相同蠕变应力对岩石试样的影响主要表现在 2 个方面: 一是随着冲击载荷增加, 瞬时应变明显增大, 且在高冲击载荷下具有更快的增长率; 二是岩石失稳破坏时间与冲击应力峰值呈负相关, 且当冲击载荷超过一定强度阈值时, 岩石试样极容易发生失稳破坏。

4 结 论

1) 采用幂律依赖性关系描述了 I 型和 II 型条件下应力强度因子与亚临界裂纹扩展速度的关系式, 建立了基于亚临界裂纹扩展理论的岩石蠕变模型, 将冲击应力波简化为正弦波形来模拟冲击载荷, 实现了蠕变和冲击 2 个不同应变率范围载荷的统一求解。

2) 随着亚临界裂纹常量 B 增大及应力腐蚀指数 n 减小, 岩石稳态蠕变阶段应变率增大, 岩石稳态蠕变阶段及蠕变破坏寿命缩短。

3) 随着蠕变应力水平的增加, 岩石瞬时弹性应变及稳态蠕变阶段相同冲击载荷引起的瞬时应变随蠕变应力水平的增加而增加, 且岩石在蠕变和冲击的作用下的破坏时间具有明显的非线性特征。

4) 随着冲击载荷增加, 岩石的瞬时应变明显增大, 在高冲击载荷下具有更快的增长率, 且岩石失稳破坏时间随冲击载荷的变化差异明显, 在高冲击载荷下, 岩石试样失稳破坏时间明显缩短。

参考文献(References):

[1] 赵延林, 万文, 王卫军, 等. 类岩石裂纹压剪流变断裂与亚临界扩展

实验及破坏机制[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1050-1059.

ZHAO Yanlin, WAN Wen, WANG Weijun, et al. Compressive-shear rheological fracture of rock-like cracks and subcritical crack propagation test and fracture mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1050-1059.

[2] MENG T, YUE Y, MA J W, et al. Use of DC voltage fluctuation method to investigate real-time Mode I and Mode II subcritical crack growth behavior in gypsum rock[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 234: 107104.

[3] 王思青, 李江腾, 王聪聪. 横观各向同性岩石亚临界裂纹扩展实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(6): 1607-1614.

WANG Siqing, LI Jiangteng, WANG Congcong. Experimental study for subcritical crack growth of transverse isotropy rock[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(6): 1607-1614.

[4] 曹平, 曹日红, 赵延林, 等. 岩石裂纹扩展-破断规律及流变特征[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(8): 1737-1762.

CAO Ping, CAO Rihong, ZHAO Yanlin, et al. Propagation-coalescence and rheologic fracture behavior of rock cracks[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(8): 1737-1762.

[5] KEMENY J. The time-dependent reduction of sliding cohesion due to rock bridges along discontinuities: A fracture mechanics approach [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2003, 36(1): 27-38.

[6] 胡光辉, 徐涛, 陈崇枫, 等. 基于离散元法的脆性岩石细观蠕变失稳研究[J]. 工程力学, 2018, 35(9): 26-36.

HU Guanghui, XU Tao, CHEN Chongfeng, et al. A microscopic study of creep and fracturing of brittle rocks based on discrete element method[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(9): 26-36.

[7] CHEN W, KONIETZKY H, ABBAS S M. Numerical simulation of time-independent and-dependent fracturing in sandstone[J]. Engineering Geology, 2015, 193: 118-131.

[8] FU T F, XU T, HEAP M J, et al. Mesoscopic time-dependent behavior of rocks based on three-dimensional discrete element grain-based model[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 121: 103472.

[9] LI X, KONIETZKY H. Simulation of time-dependent crack growth in brittle rocks under constant loading conditions[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 119: 53-65.

[10] LI X, KONIETZKY H. Numerical simulation schemes for time-dependent crack growth in hard brittle rock[J]. Acta Geotechnica, 2015, 10(4): 513-531.

[11] 黄达, 刘富兴, 杨超, 等. 一种岩体裂隙时效扩展的数值模拟方法及验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1623-1633.

HUANG Da, LIU Fuxing, YANG Chao, et al. A numerical simulation method for time-dependent growth of cracks in rocks and its validation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1623-1633.

[12] 赵伦洋, 赖远明, 牛富俊, 等. 硬脆性岩石多尺度损伤蠕变模型及长期强度研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(8): 3071-3080.

ZHAO Lunyang, LAI Yuanming, NIU Fujun, et al. Multi-scale damage creep model and long-term strength for hard brittle rocks[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(8): 3071-3080.

- [13] 高延法, 范庆忠, 崔希海, 等. 岩石流变及其扰动效应试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [14] 高延法, 肖华强, 王波, 等. 岩石流变扰动效应试验及其本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 3180–3185.
GAO Yanfa, XIAO Huaqiang, WANG Bo, et al. Experimental study on rheological disturbance effect of rock and its constitutive relationship[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 3180–3185.
- [15] 范庆忠. 岩石蠕变及其扰动效应试验研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2006: 73–90.
FAN Qingzhong. Experimental study on rock creep and its disturbance effect[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2006: 73–90.
- [16] 王青元. 落锤冲击扰动下绿砂岩单轴压缩蠕变特性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016: 65–90.
WANG Qingyuan. Study on creep characteristics of green sandstone under uniaxial compression under falling hammer impact disturbance[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016: 65–90.
- [17] 王青元, 刘杰, 王培涛, 等. 冲击扰动诱发蠕变岩石加速失稳破坏试验[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 781–788, 798.
WANG Qingyuan, LIU Jie, WANG Peitao, et al. Experimental investigation of accelerated failure of creep rock induced by impact disturbance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 781–788, 798.
- [18] 李少华. 单轴蠕变-冲击载荷下初始损伤绿砂岩力学特性实验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018: 35–126.
LI Shaohua. Experimental study on mechanical properties of green sandstone with initial damage under uniaxial creep-impact load[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018: 35–126.
- [19] 王吉. 动态扰动下齿状节理岩石剪切蠕变试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019: 59–85.
WANG Ji. Experimental study on shear creep of dentate jointed rock under dynamic disturbance[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019: 59–85.
- [20] 王波, 田志银, 马世纪, 等. 流变扰动条件下红砂岩敏感邻域范围试验研究[J/OL]. 煤炭学报, 1–12 [2024–02–21]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1609>.
WANG Bo, Tian Zhiyin, Ma Shiji, et al. Experimental study on sensitive neighborhood range of red sandstone under rheological disturbance condition[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1–12 [2024–02–21]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1609>.
- [21] 胡斌, 曹建军, 王泽祺, 等. 冲击扰动下泥页岩剪切蠕变试验及蠕变损伤模型研究[J/OL]. 煤炭学报, 1–10 [2024–02–21]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1018>.
HU Bin, CAO Jianjun, WANG Zeqi, et al. Shear creep test and creep damage model study of mud shale under impact disturbance[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1–10 [2024–02–21]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1018>.
- [22] 李晓照, 张骐烁, 柴博聪, 等. 动力损伤后的脆性岩石静力蠕变断裂模型研究[J]. 力学学报, 2023, 55(4): 903–914.
LI Xiaozhao, ZHANG Qishuo, CHAI Bocong, et al. A static creep fracture model after dynamic damage in brittle rocks[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(4): 903–914.
- [23] YANG Z, ZHU W C, GUAN K, et al. Influence of dynamic disturbance on rock creep from time, space and energy aspects[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2022, 13(1): 1065–1086.
- [24] 吉东亮, 程辉, 赵洪宝, 等. 冲击扰动下岩石蠕变损伤演化与失稳诱发机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(S1): 197–207.
JI Dongliang, CHENG Hui, ZHAO Hongbao, et al. Creep damage evolution and instability induction mechanism of the rock under impact disturbance[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S1): 197–207.
- [25] ATKINSON B K. Subcritical crack propagation in rocks: Theory, experimental results and applications[J]. Journal of Structural Geology, 1982, 4(1): 41–56.
- [26] 赵延林, 曹平, 万文, 等. 岩石裂纹亚临界扩展实验与压剪流变断裂模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(1): 276–286.
ZHAO Yanlin, CAO Ping, WAN Wen, et al. Rock cracks subcritical propagation test and compression-shear rheological fracture model[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(1): 276–286.
- [27] CHARLES R J. Static fatigue of glass. I[J]. 1958, 29(11): 1549–1553.
- [28] ATKINSON B K. Subcritical crack growth in geological materials [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1984, 89(B6): 4077–4114.
- [29] LI X, KONIETZKY H. Time to failure prediction scheme for rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(4): 1493–1503.
- [30] WU C H, MANTELL S C, DAVIDSON J H. Mixed-mode subcritical crack growth in orthotropic polymers[J]. Polymer Engineering & Science, 2008, 48(11): 2216–2223.
- [31] ZHU W C, LI S H, LI S, et al. Influence of dynamic disturbance on the creep of sandstone: An experimental study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(4): 1023–1039.
- [32] KO T Y, KEMENY J, MOON H K. Determination of subcritical crack growth parameters using double torsion test[J]. Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering, 2008, 45(6): 601–609.
- [33] RIJKEN M C M. Modeling Naturally Fractured Reservoirs: From Experimental Rock Mechanics to Flow Simulation[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2005: 21–88.
- [34] MA J Y, LI D Y, GONG H, et al. Subcritical crack growth and fracture behavior of three rocks containing quartz under wet and dry conditions[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 126: 103948.
- [35] WANG X, CAI M. Modeling of brittle rock failure considering inter- and intra-grain contact failures[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 101: 224–244.
- [36] 胡小川, 丁学正, 苏国韶, 等. 基于 UDEC-GBM 的矿物晶粒解理特征对硬岩石破坏过程的影响[J]. 工程科学学报, 2022, 44(7): 1160–1170.
HU Xiaochuan, DING Xuezheng, SU Guoshao, et al. Effect of cleavage characteristics of mineral grains on the failure process of hard rock based on UDEC-GBM modeling[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(7): 1160–1170.