DOI：10.16285/j.rsm.2022.1330

基于平行黏结模型的水−岩作用下砂岩蠕变模拟及损伤机制研究

骆祚森[1,2]，朱作祥[1,2]，苏 卿[3]，李建林[1,2]，邓华锋[1,2]，杨 超[1,2]

（1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室，湖北 宜昌 443002；
2. 三峡大学 土木与建筑学院，湖北 宜昌 443002；3. 武昌理工学院 智能建造学院，湖北 武汉 430223）

摘 要：为探明库水位周期性升降作用下消落带岩体蠕变损伤机制，基于 PFC 中的平行黏结模型（parallel bond model, PBM），考虑水−岩作用对黏结的弱化和材料特性随时间的变化，提出水−岩作用下砂岩蠕变的离散元模拟方法，并在室内试验基础上开展水−岩作用下砂岩蠕变模拟。研究结果表明：在破坏应力水平下，试样微裂纹扩展与蠕变应变规律相似，可分为衰减扩展阶段、稳定扩展阶段、加速扩展阶段，且随水−岩作用周期增加，加速扩展阶段的耗时占总耗时的比例增大；试样蠕变破坏时，随水−岩作用周期增加，剪切裂纹占比逐渐增加，微裂纹倾角分布逐渐分散，倾角分布在 65°和 115°附近的微裂纹逐渐增加，试样的张性破坏减弱，剪性破坏增强；水−岩作用下，试样能储存的最大胶结能不断降低，且储存相同胶结能时对应的应变不断增大，与实际岸坡在水−岩作用下岩体整体承载能力降低、变形增大的规律一致。提出的水−岩作用下砂岩蠕变模拟方法具有较好的可行性，为库岸边坡岩石在库水位升降影响下的模型研究提供理论基础。

关 键 词：岩石力学；水−岩作用；蠕变试验；离散元法；细观参数劣化

中图分类号：TU 451 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2023) 08－2445－13

Creep simulation and deterioration mechanism of sandstone under water-rock interaction based on parallel bond model

LUO Zuo-sen[1,2], ZHU Zuo-xiang[1,2], SU Qing[3], LI Jian-lin[1,2], DENG Hua-feng[1,2], YANG Chao[1,2]

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. College of Intelligent Construction, Wuchang University of Technology, Wuhan, Hubei 430223, China)

Abstract: To clarify the creep damage mechanism of rock mass under the periodic variation of reservoir water level in the hydro-fluctuation belt, by considering the weakening effect of the water-rock interaction on the bond and the variation of material properties with time, we proposed a new discrete element method based on the parallel bond model in particle flow code (PFC) and implemented the creep simulation of water-rock interaction based on laboratory tests. The results indicate that under the failure stress level, the micro-crack growth behavior of the samples is similar to the creep strain and it consists of three stages: attenuation growth stage, stable growth stage, and accelerated growth stage. The ratio of the accelerated growth stage's time to the total time of the micro-crack growth process increases with the period of the water-rock interaction. When the sandstone is damaged in the creep process, the proportion of shear cracks gradually increases with the period of the water-rock interaction and the distribution of inclination angles of micro-crack gradually scatters. The micro-cracks in the areas near the inclination angles of 65° and 115° increase, the tensile strength of the samples weakens and the shear strength increases. Under the water-rock interaction, the maximum cementation energy stored in the samples decreases and the strain with the same cementation energy stored in the samples increases, which is consistent with the rules observed in the field that the overall bearing capacity of the rock mass decreases and the deformation of rock mass increases. Because the method is feasible to simulate sandstone creep process under water-rock interaction, the study can provide theoretical support for the model study of reservoir bank slope rocks under the influence of reservoir water

收稿日期：2022-10-05 录用日期：2023-03-15
基金项目：国家自然科学基金联合基金重点项目（No. U2034203）；湖北省自然科学基金青年项目（No. 2021CFB191）；宜昌市自然科学研究项目（No. A21-3-005）。
This work was supported by the Key Project of the Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China (U2034203)；the Youth Program of Hubei Natural Science Foundation (2021CFB191) and the Yichang Natural Science Research Project (A21-3-005).
第一作者简介：骆祚森，男，1989 年生，博士，讲师，主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail：lzs@ctgu.edu.cn

level fluctuation.

Keywords: rock mechanics; water-rock interaction; creep test; discrete element method; meso-parameter deterioration

1 引 言

在恒定应力作用下，岩石应变随时间增长而增大的现象称为岩石的蠕变。蠕变作为岩石重要的变形特性，对工程岩体的长期稳定性具有重要影响[1]。而实际岩石工程中，蠕变不仅受应力水平的影响，往往还会受到复杂环境的影响[2-3]，如水库岸坡岩石的蠕变就会显著受到库水环境的影响[4]。

大型水库建成蓄水后，为满足防洪、发电等要求，库水位常常会发生周期性升降变化，在两岸形成一定高度的库水消落带。消落带岩体受库水位升降的影响，将经历周期性干湿交替状态，导致岩石的蠕变特性发生改变[5]。典型的有三峡水库，自 2010 年首次蓄水至 175 m 以来，库水位常年在 145 m 至 175 m 升降变化，形成了 30 m 的消落带。受库水位升降的影响，部分岸坡岩体出现了较大的蠕变变形，并且表现出强烈的时效特征。大量研究表明[5-7]，消落带岩石的蠕变变形与滑坡等灾害密切相关，严重影响水库岸坡的长期稳定性。近年来我国相继修建了三峡、溪洛渡、白鹤滩、乌东德等一批大型水库，其在运行期内均存在库水位升降条件下岸坡蠕变失稳的风险。因此迫切需要研究库水位升降条件下岸坡岩石的蠕变变形破坏机制，为大型水库岸坡的长期稳定运行提供理论依据。

针对库水位周期性升降条件下消落带岩体的劣化问题，考虑到水位变化引起的干湿交替作用，刘新荣等[8]通过干湿循环试验模拟岸坡消落带的水−岩作用，发现干湿循环作用下岩石发生了不可逆的渐进性损伤，且损伤程度与干湿循环次数成正比。考虑到库水升降过程中存在水压力的变化，邓华锋等[9]开展了水压力升降变化的浸泡−风干循环试验，发现水压力升降变化对岩石损伤劣化趋势比常规的干湿循环作用更加明显。上述的水−岩作用试验较好地模拟了消落带岩体赋存的库水环境，为水−岩作用导致的消落带岩体劣化研究奠定了良好基础。目前，关于干湿循环（浸泡−风干循环）作用对岩石蠕变特性影响方面的研究还相对较少。秦哲[10]、马芹永[11]、王玮玮[12]等开展了干湿循环作用下的蠕变试验，研究了蠕变参数与干湿循环次数的关系，认为蠕变是在干湿循环影响下的渐进性累积破坏过程；骆祚森[5]开展了考虑水压力变化、浸泡−风干循环作用影响下的蠕变试验，发现其蠕变特性劣化趋势比常规的干湿循环作用更加明显。目前，关于干湿循环（浸泡−风干循环）作用下岩石蠕变的研究主要集中在宏观力学性质劣化上，对干湿循环作用下的蠕变特性细观损伤机制还有待进行深入研究。

从细观层面分析岩石损伤演化特性是揭示岩石蠕变损伤机制的有效途径之一，以颗粒流程序 PFC 为代表的离散元数值模拟在分析岩石细观损伤演化方面具有较大优势。刘新荣[8]、张梁[13]、Zhang[14]、刘万荣[15]、胡训健[16]等基于水−岩作用的宏细观测试结果，利用 PFC^{2D} 进行模拟，发现水−岩作用促进了岩石内部裂纹拓展，改变了岩石颗粒间的接触网络及受力时的力链分布，揭示了水−岩作用下岩石劣化的细观机制；Potyondy[17]基于平行黏结模型提出岩石应力腐蚀模型（parallel-bond stress corrosion model, PSC），实现了岩石蠕变全过程的 PFC 模拟，后续学者借助 PSC 模型，从细观层面研究了岩石蠕变的变形特征及破裂特征[18-19]。上述研究成果为研究水−岩作用和岩石蠕变的 PFC 模拟提供了较好基础，但基于 PFC 模拟岩石在水−岩作用下的蠕变试验较少，需要进一步探讨研究。

鉴于此，本文在考虑水压力变化、浸泡−风干循环影响的水−岩作用室内蠕变试验的基础上，采用颗粒流 PFC，从颗粒间的接触状态与变化特征出发，提出水−岩作用下岩石蠕变细观损伤过程的模拟方法。通过与水−岩作用下砂岩蠕变室内试验结果的对比，验证所建立方法的准确性。利用该方法，对水−岩作用下砂岩的裂纹起裂、扩展和贯通及能量演化规律等进行详细模拟分析，揭示其蠕变损伤机制。

2 水−岩作用下砂岩蠕变试验方案

以三峡库区消落带典型砂岩为对象，开展水−岩作用下砂岩蠕变室内试验，为后续蠕变模拟的参数标定等提供基础。首先将砂岩制备成 50 mm（直径）×100 mm（高度）的标准圆柱形试样，依次开展如下试验：

（1）水−岩作用试验。根据三峡库区库水位变化规律（见图 1），设计考虑库水位升降的水压力变化和浸泡−风干循环的水−岩作用方案：每个周期浸泡时间为 30 d，风干时间为 5 d；浸泡阶段前 10 d 模拟库水位上升的过程，水压力从 0 MPa 均匀上升至 0.3 MPa；中间 10 d 模拟库水位稳定阶段，水压力稳定在 0.3 MPa 保持不变；最后 10 d 模拟库水位下降阶段，水压力从 0.3 MPa 均匀降至 0；之后控制计算机将压力室内的水抽干，进行风干试验，风干

试验阶段持续 5 d，为了模拟库区夏天库水位下降时的温度，将风干温度设置为 35 ℃。水-岩作用试验以最终水-岩作用趋于稳定为止，结合前期水-岩作用试验的经验[5, 9]，水-岩作用 6 个周期后，岩样力学特性劣化的幅度逐渐减小并逐渐趋于稳定，因此本次水-岩作用试验共设计了 $n=10$ 个周期。

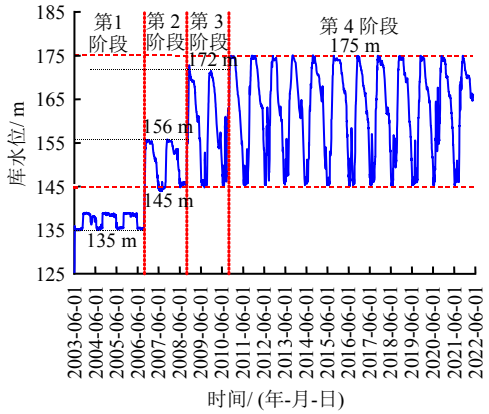


图 1　三峡库区库水位变化规律图

Fig.1　Water level change patterns in Three Gorges reservoir area

（2）三轴压缩试验。分别在初始状态和 $n=1$、2、4、6、8、10 时，开展围压为 10 MP 的三轴压缩试验。

（3）三轴蠕变试验。同样取初始状态和 $n=1$、2、4、6、8、10 时的试样，开展围压为 10 MPa 的蠕变试验。轴向采用分级加载的方式，轴向应力分多级加载至试样破坏，初始轴向应力取极限抗压强度的 60%左右。水-岩作用过程中，随着岩样强度的降低，在每期岩样蠕变试验加载时调整了初始轴向应力和分级加载应力大小，具体各岩样的轴压加载过程如表 1 所示。

表 1　三轴压缩蠕变试验分级加载方案

Table 1　Step loading schemes in triaxial compression creep test

水-岩作用周期	轴向应力分级加载/ MPa						
	1	2	3	4	5	6	7
0	125.0	140.0	155.0	170.0	177.5	—	—
1	120.0	135.0	150.0	157.5	165.0	—	—
2	120.0	130.0	140.0	150.0	160.0	—	—
4	120.0	130.0	140.0	150.0	155.0	—	—
6	120.0	130.0	140.0	150.0	—	—	—
8	118.0	128.0	138.0	148.0	—	—	—
10	118.0	126.0	134.0	138.0	142.0	144.0	146.0

水-岩作用试验采用 YRK-2 岩石浸泡风干仪[5, 9]，三轴压缩及三轴蠕变压缩试验则在 RLW-2000 型岩石蠕变试验系统上开展。三轴压缩试验每组开展 3 个平行试验，三轴蠕变试验每组开展 2 个平行试验。

3　水-岩作用下砂岩蠕变模拟方法

3.1　砂岩细微观结构与 PBM 本构特性

图 2 为初始状态砂岩扫描电镜结果，可以看出，砂岩内矿物颗粒间由胶结物填充黏结，虽然存在一些细小的原生裂隙和孔隙，但整体相对密实。

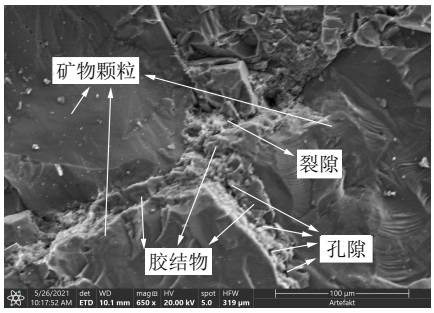


图 2　初始状态砂岩扫描电镜图

Fig.2　SEM image of sandstone in initial state

PFC 中的平行黏结模型（parallel bond model, PBM）由线性模型与平行键组成，可较好模拟岩石内部矿物颗粒间的胶结。其中线性模型可描述颗粒间的本构特性，平行键可描述胶结物的本构特性，二者平行作用。平行键相当于一个截面 $\overline{A}=2\lambda R$（厚度 $\overline{t}=1$、直径 $\overline{D}=2\lambda R$）、长度为两颗粒中心距离 L、可以传递力与力矩的矩形梁，如图 3 所示。

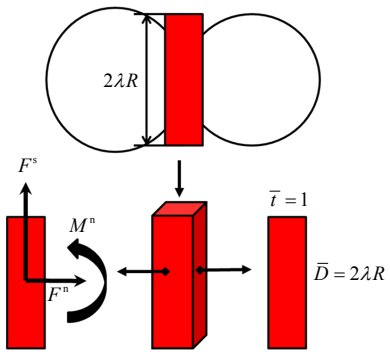


图 3　平行键示意图

Fig.3　Diagram of parallel bond

在外部荷载作用下，颗粒间平行键传递的力与力矩的计算公式为[20]

$$\left.\begin{aligned} F_i^{\mathrm{n}} &= \overline{F}_i^{\mathrm{n}} + 2\lambda R_i(\overline{E}/L)\Delta\delta_i^{\mathrm{n}} \\ F_i^{\mathrm{s}} &= \overline{F}_i^{\mathrm{s}} + 2\lambda R_i(\overline{E}/\overline{k}L)\Delta\delta_i^{\mathrm{s}} \\ M_i^{\mathrm{n}} &= \overline{M}_i^{\mathrm{n}} + \frac{2}{3}\lambda^3 R_i^3(\overline{E}/L)\Delta\theta_i^{\mathrm{n}} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

平行键承受的应力：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_i &= -\frac{F_i^{\mathrm{n}}}{2\lambda R_i}+\frac{3\left|M_i^{\mathrm{n}}\right|}{2\lambda^2 R_i^2}\\ \tau_i &= \frac{\left|F_i^{\mathrm{s}}\right|}{2\lambda R_i}\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

平行键断裂条件：

$$\left.\begin{aligned}&\sigma_i > \sigma_{\mathrm{c}}\\ &\tau_i > \tau_{\mathrm{c}} = c-\sigma_i\tan\varphi\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中：$\overline{F}_i^{\mathrm{n}}$、$\overline{F}_i^{\mathrm{s}}$、$\overline{M}_i^{\mathrm{n}}$为第 i 个接触在时步更新前平行键的法向接触力、切向接触力、法向力矩；F_i^{n}、F_i^{s}、M_i^{n}为第 i 个接触上平行键的法向接触力、切向接触力、法向力矩；λ为平行黏结半径乘数；R_i为第 i 个接触的平行黏结半径；$\overline{E}$、$\overline{k}$为平行黏结模量、刚度比；σ_i、τ_i为第 i 个接触上平行键的法向应力、切向应力；σ_{c}、τ_{c}为平行键抗拉强度、抗剪强度；c、φ分别为平行键的黏聚力和内摩擦角。

可以看出，平行键具有传递力与力矩的特性，其可用于表现砂岩相对密实的胶结物连接；平行键在达到承载极限后发生断裂，则可用于表现砂岩胶结物的承载极限特性。

3.2 水-岩作用下的 PBM 模型

由于水-岩作用会导致砂岩颗粒间黏结弱化，利用 PBM 模型重点需要考虑的是如何建立水-岩作用下细观参数变化与宏观力学参数改变之间联系的问题。

根据式（1）～（3）可知，PBM 模型中最重要的两个细观参数是平行黏结半径乘数 λ 和平行黏结模量 $\overline{E}$，其可用于表征岩石的强度和变形特征，文献[21]指出，岩石的峰值强度 σ 和变形模量 E 与 λ，变形模量 E 与 $\overline{E}$ 均呈线性正相关的关系（见式(4)～(6)）。因此，本文试图通过减小 λ 和 $\overline{E}$ 来实现水-岩作用下砂岩宏观强度、变形模量的降低。

$$\sigma = a\lambda + b \tag{4}$$

$$E = c\lambda + d \tag{5}$$

$$E = e\overline{E} + f \tag{6}$$

式中：a、b、c、d、e 和 f 为细观参数与宏观参数的关系系数。

定义水-岩作用 n 个周期后 λ 与 $\overline{E}$ 的劣化度 D_λ 和 $D_{\overline{E}}$ 分别为

$$D_\lambda = 1-\frac{\lambda_n}{\lambda_0} \tag{7}$$

$$D_{\overline{E}} = 1-\frac{\overline{E}_n}{\overline{E}_0} \tag{8}$$

式中：λ_0、$\overline{E}_0$ 分别为初始状态；λ_n、$\overline{E}_n$ 则分别为水-岩作用 n 个周期后的平行黏结半径乘数与平行黏结模量。已有研究[20]表明，砂岩宏观强度与变形模量的劣化度均与 n 呈幂函数关系。因此假定细观参数 λ 和 $\overline{E}$ 随 n 同样呈幂函数关系：

$$D_\lambda = A(1-\mathrm{e}^{-n/B}) \tag{9}$$

$$D_{\overline{E}} = C(1-\mathrm{e}^{-n/D}) \tag{10}$$

式中：A、B、C、D 为与水-岩作用相关的材料参数。当 $n=0$ 时，D_λ、$D_{\overline{E}}$ 均为 0，模型未发生劣化；A 和 C 分别代表水-岩作用所能造成 λ 和 $\overline{E}^*$ 劣化的最大程度，当 n 趋于无穷时，$D_\lambda = A$、$D_{\overline{E}} = C$；B 和 D 代表水-岩作用下材料劣化速率相关的参数，B 和 D 越大材料劣化速率越小。通过试验得到宏观参数 σ 和 E，根据式（4）～（6）获得 n 个周期后的 λ_n 和 $\overline{E}_n$，联立式（7）、（9）以及式（8）、（10）便可计算出材料参数 A、B、C 和 D。

3.3 基于 PBM 模型的蠕变模拟方法

由于 PBM 模型无法实现恒定荷载下材料特性随时间变化的模拟，Potyondy[17]在 PBM 的基础上结合应力腐蚀理论与岩石裂纹亚临界扩展理论，提出了岩石蠕变的模拟方法。借鉴此方法，基于水-岩作用下的 PBM 模型，参照断裂力学中 K_{I} 型张拉裂纹的亚临界扩展速率的概念，定义黏结的损伤速率 v_{t}（见图 4），使黏结半径乘数 λ_n 随时间不断减小，并编写 Fish 函数完成 PFC 接触蠕变模型的二次开发，最终实现水-岩作用下砂岩蠕变的模拟。

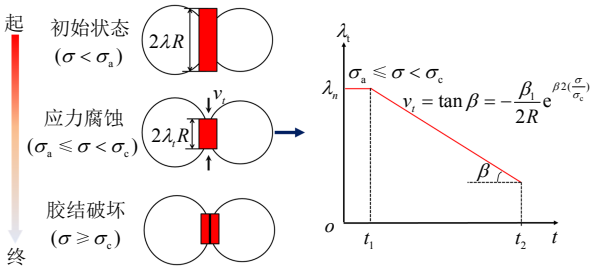


图 4 接触蠕变模型黏结半径减小速率

Fig.4 Decreasing velocity of creep model's bond radius

PFC 接触蠕变模型主要思路是：当颗粒间接触上的拉应力 $\bar{\sigma}$ 超过亚临界阈值 σ_{a}（启裂强度）并小于胶结强度 σ_{c} 时，平行黏结半径乘数 λ_n 随时间不断减小，具体计算公式为

$$\lambda_t = \begin{cases}\lambda_n, & (\bar{\sigma}<\sigma_{\mathrm{a}})\\ \lambda_n-\dfrac{\beta_1}{2R}\mathrm{e}^{\beta_2\left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_{\mathrm{c}}}\right)}t, & (\sigma_{\mathrm{a}}\leqslant\bar{\sigma}<\sigma_{\mathrm{c}})\\ 0, & (\bar{\sigma}\geqslant\sigma_{\mathrm{c}})\end{cases} \tag{11}$$

式中：t 为蠕变时间；β_1、β_2 为材料蠕变参数；λ_t 为蠕变进行 t 后的半径乘数。其中，当 $\bar{\sigma}<\sigma_a$，$\lambda_t=\lambda_n$，黏结未发生损伤；当 $\sigma_a\leqslant\bar{\sigma}<\sigma_c$，$\lambda_t$ 以 $(\beta_1/2R)\mathrm{e}^{\beta_2\left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_c}\right)}$ 的速度呈指数减小；当 $\bar{\sigma}\geqslant\sigma_c$，$\lambda_t=0$，黏结瞬间断裂并产生裂纹。

β_1、β_2、σ_a 是控制模型蠕变速率的主要参数，β_1、β_2 越大，σ_a 越小，蠕变速率越大，破坏孕育时间越短[22-23]。若保持起裂强度（$\sigma_a=F_a/2\lambda R$）不变，水-岩作用造成 λ 逐渐减小，接触起裂拉力 F_a 逐渐降低，符合砂岩起裂阈值随水-岩作用周期下降的规律；β_1 和 β_2 是依赖于温度和化学环境的材料常数，选择单一变量可以反映蠕变劣化规律。因此固定 β_2、σ_a，劣化单一参数 β_1 来考虑水-岩作用对砂岩蠕变参数的影响。

$$D_{\beta_1}=1-\frac{\beta_1^n}{\beta_1^0} \tag{12}$$

式中：D_{β_1} 为水-岩作用 n 个周期后 β_1 损伤度；β_1^0 和 β_1^n 为初始和水-岩作用 n 个周期后的 β_1。

上述接触蠕变模型在宏-细观上均有完整的物理力学意义。在细观上体现为，单个 PBM 的接触发生时效损伤，黏结半径随时间以指数减小，黏结强度降低；当接触应力超过黏结强度时，接触断裂并产生微裂纹。在宏观上体现为，多个 PBM 的断裂，引起材料中的裂纹发生扩展，同时裂纹尖端的强度因子也随之增大。当裂纹尖端的强度因子小于材料断裂韧度，裂纹最终将停止扩展；当裂纹尖端的强度因子大于材料断裂韧度，裂纹进入失稳扩展阶段（即加速蠕变阶段），最终形成宏观破坏。

4　PFC 模拟与室内试验结果对比验证

4.1　砂岩 PFC 模型的建立及细观参数标定

室内试验所用砂岩实际粒径约为 0.24～0.41 mm，因此在建立 50 mm×100 mm 标准尺寸砂岩 PFC 模型时，设定颗粒的最小半径为 0.12 mm、最大最小颗粒半径比为 1.66，在半径范围内均匀分布生成颗粒。最终建立的模型如图 5 所示，模型共含颗粒 55 132 个，颗粒间接触 138 411 个。

根据室内试验结果，可得 n 个周期水-岩作用后岩石的宏观强度和变形劣化度 D_σ 和 D_E：

$$D_\sigma=1-\frac{\sigma_n}{\sigma_0} \tag{13}$$

$$D_E=1-\frac{E_n}{E_0} \tag{14}$$

式中：σ_0、E_0 分别为初始状态；σ_n、E_n 则分别为水-岩作用 n 个周期后岩石三轴压缩强度与变形模量。

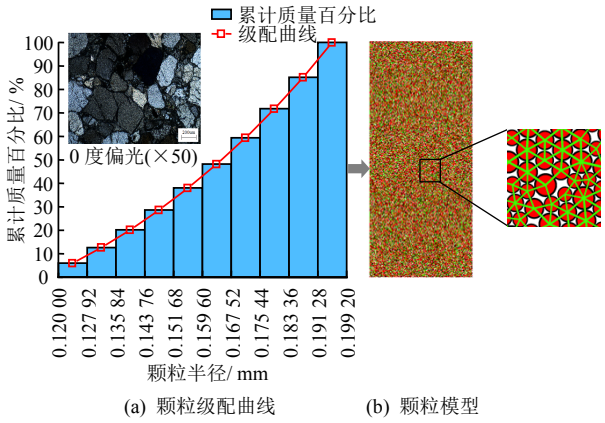


图 5　砂岩试样 PFC 模型

Fig.5　PFC model of sandstone sample

根据室内三轴试验结果（见表 2），即可绘制宏观力学参数劣化度随水-岩作用周期变化曲线，如图 6 所示。砂岩强度劣化度、变形模量劣化度均与水-岩作用周期呈幂函数关系，随水-岩作用周期增加，砂岩强度与变形模量在前 6 次水-岩作用下的降低最为显著，6 个水-岩作用周期后趋于稳定。

根据未经过水-岩作用的砂岩（$n=0$）三轴压缩室内试验结果，对 PFC 模型进行细观参数标定，具体如表 3 所示。

表 2　不同水-岩作用周期下室内三轴试验结果

Table 2　Laboratory triaxial test results under different water-rock interaction cycles

n	0	1	2	4	6	8	10
σ_n / MPa	202.1	191.5	180.9	168.4	161.4	155.6	151.2
E_n / GPa	14.3	11.5	10.4	8.8	8.4	7.6	6.9

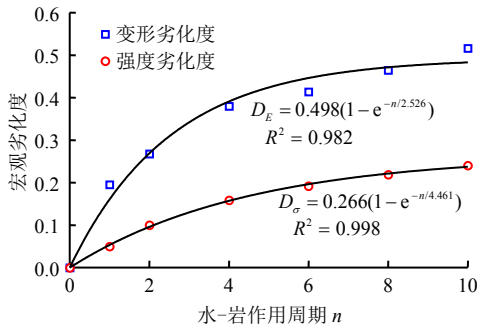


图 6　宏观参数劣化度与水-岩作用周期关系

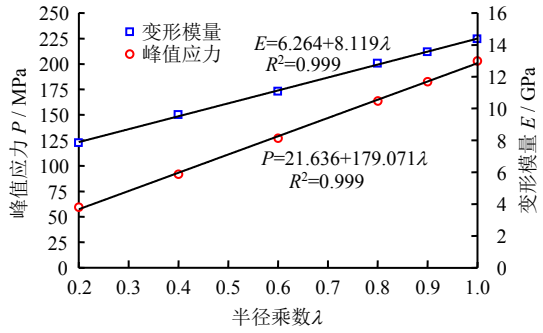
Fig.6　Relationships between deterioration degree of macroscopic parameters and water-rock interaction cycles

表 3 砂岩模型细观参数（n=0）

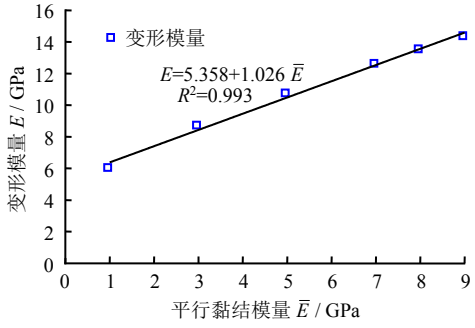
Table 3 Mesoscopic parameters of sandstone model (n=0)

颗粒密度 / (kg·m^{-3})	最小粒径 / mm	粒径比	孔隙度	接触间隙 / mm	颗粒接触模量 / GPa	颗粒刚度比	颗粒摩擦系数	平行黏结半径乘数	平行黏结模量 / GPa	平行黏结刚度比	平行黏结抗拉强度 / MPa	平行黏结黏聚力 / MPa	平行黏结内摩擦角 / (°)
2 500	0.12	1.66	0.10	0.024	9.00	3.00	0.50	1.00	9.00	3.00	118.00	59.00	30.00

根据 $n=0$ 期砂岩模型对 λ 和 $\bar{E}$ 的参数敏感性分析结果（见图 7），确定式（4）～（6）中 $a=179.071$、$b=21.636$、$c=8.119$、$d=6.264$、$e=1.026$、$f=5.358$。



(a) λ



(b) $\bar{E}$

图 7 细观参数敏感性分析

Fig.7 Sensitivity analysis of mesoscopic parameters

结合表 2 中砂岩的宏观参数 σ_n 和 E_n，通过式（4）～（6）确定细观参数 λ_n 和 $\bar{E}_n$；再联立式（7）、（9）以及式（8）、（11）计算出砂岩模型中与水-岩作用相关的材料参数 $A=0.393$、$B=4.579$、$C=0.697$、$D=2.401$，从而获得不同周期砂岩模型中细观劣化度如表 4 所示，图 8 为细观参数劣化度与水-岩作用周期关系。

表 4 不同周期 λ_n 和 $\bar{E}_n$ 劣化度

Table 4 Deterioration degrees of λ_n and $\bar{E}_n$

n	0	1	2	4	6	8	10
λ_n 劣化度 D_λ	0.00	0.07	0.15	0.23	0.28	0.32	0.36
$\bar{E}_n$ 劣化度 $D_{\bar{E}}$	0.00	0.28	0.40	0.55	0.59	0.65	0.75

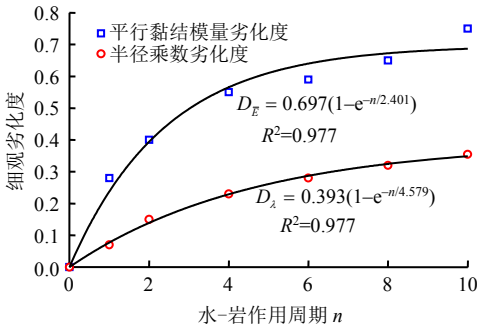


图 8 细观参数劣化度与水-岩作用周期关系

Fig.8 Relationships between deterioration degree of mesoscopic parameters and n

采用表 3、4 中的细观参数，建立 7 个不同水-岩作用周期的砂岩模型，并进行三轴压缩试验模拟，且计算条件保持一致。对比模拟与试验得出应力-应变曲线（见图 9），可以看出模拟与试验结果相近，且统计得出峰值应力相对误差在 1%以内，变形模量相对误差在 3%以内。

由于室内蠕变试验用时较长，且实际时间单位（秒）和计算机运行单位（时步）不一致，为了缩减模拟的计算用时和统一单位，将时步与实际时间进行等效转化，即数值模拟运行的 1 步等效于室内试验 1 s。

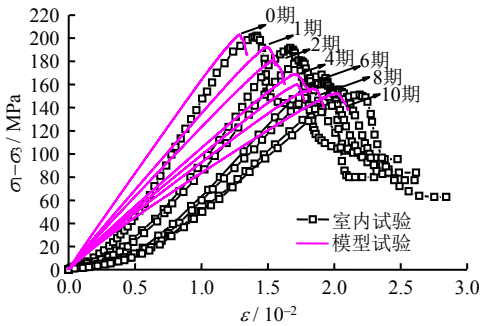


图 9 PFC 模拟与室内试验三轴压缩曲线对比

Fig.9 Comparisons of simulated results with laboratory triaxial compression test data

根据 $n=0$ 时砂岩室内试验结果确定蠕变参数 $\beta_1^0=10^{-10}$ m/s、$\beta_2=23$、$\sigma_a=0.6\sigma_c$，确定不同水-岩作用周期后蠕变参数 β_1 的劣化度（见表 5），并开展蠕变试验模拟。

表 5　不同周期 β_1 劣化度

Table 5　Deterioration degrees of β_1

n	0	1	2	4	6	8	10
β_1 劣化度 $D_{\beta 1}$	0.000 0	0.400 0	0.600 0	0.988 0	0.940 0	0.990 0	0.998 8

4.2　水-岩作用下蠕变应变-时间曲线对比验证

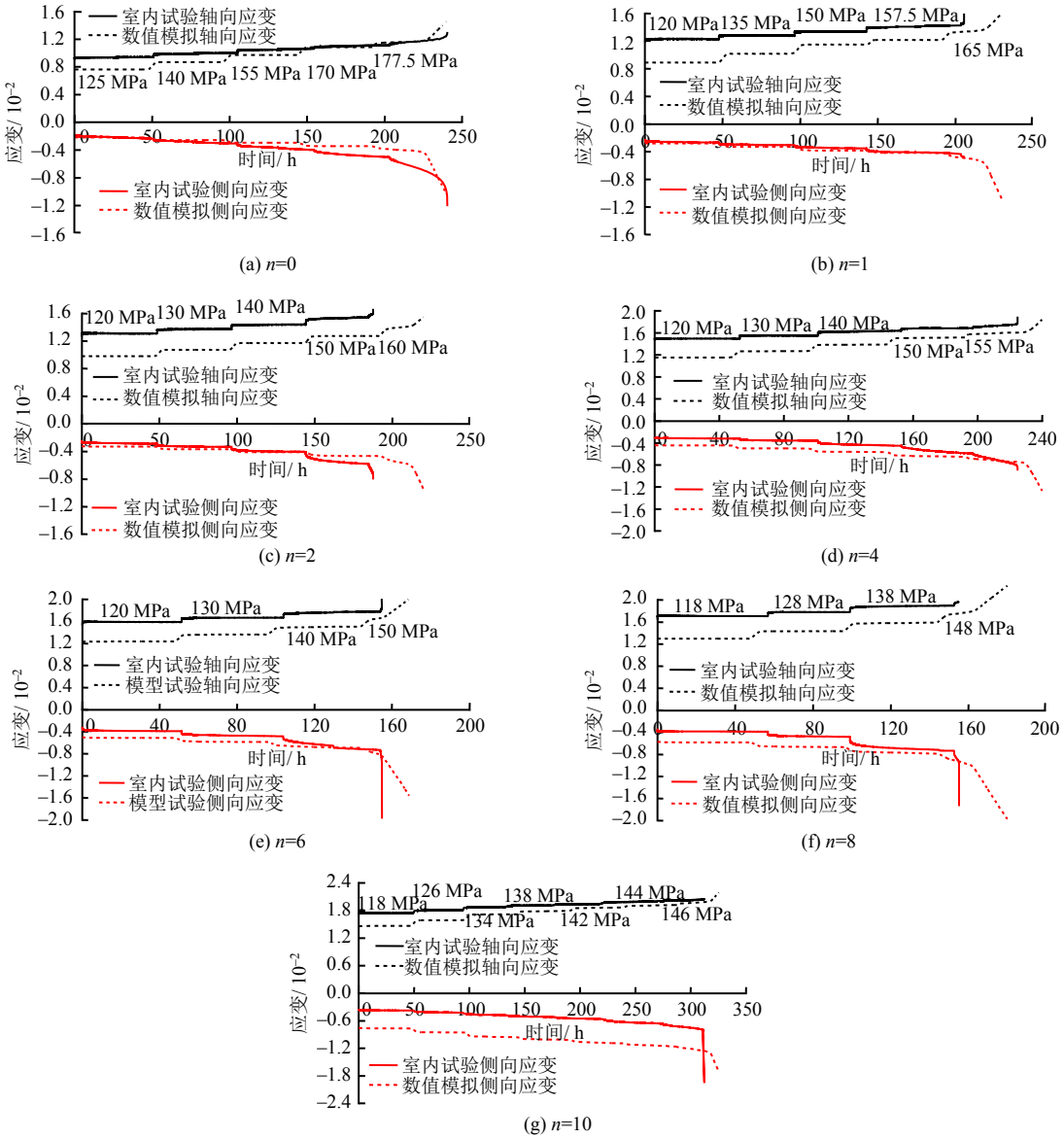
图 10 为 PFC 模拟与室内试验的蠕变曲线。可以看出：

（1）室内蠕变试验的应变-时间曲线表明：①在各级应力水平下试样都存在明显蠕变变形特征，在低应力水平时，仅包含衰减蠕变阶段以及稳定蠕变阶段，并且随着轴向应力水平增大，衰减蠕变阶段持续时间相应增长；②破坏应力水平下，包含衰减蠕变阶段、稳态蠕变阶段和加速蠕变阶段，并且在加速蠕变阶段具有历时短、蠕变变形大、破坏快速等特点；③当轴向应力水平相同时，随着水-岩作用周期的增大，瞬时变形、蠕变变形均呈增大趋势，表明其蠕变特性增强，发生蠕变破坏可能性增大。

（2）数值模拟的蠕变应变-时间曲线能较好地描述不同水-岩作用周期下试样的衰减、稳定及加速蠕变阶段，且与室内试验结果表现出一致的规律性。但相同应力条件下数值模拟的轴向应变略低于室内试验值，造成这一偏差的原因为：对比图 8 中的应力-应变曲线，室内试验中砂岩在压缩过程中存在压密段而数值模拟中无压密段，数值模拟的弹性模量低于砂岩实际值，造成蠕变过程中相同轴向应力加载条件下，数值模拟的轴向应变低于室内试验值。

4.3　水-岩作用下砂岩蠕变破坏特征对比

图 11 为不同水-岩作用周期下室内试验、数值模拟试样的破坏形态图及微裂纹分布图（蓝色为张拉裂纹、红色为剪切裂纹）。



(a) n=0　(b) n=1　(c) n=2　(d) n=4　(e) n=6　(f) n=8　(g) n=10

图 10　蠕变模拟及试验结果对比

Fig.10　Comparisons of creep simulation results and test data

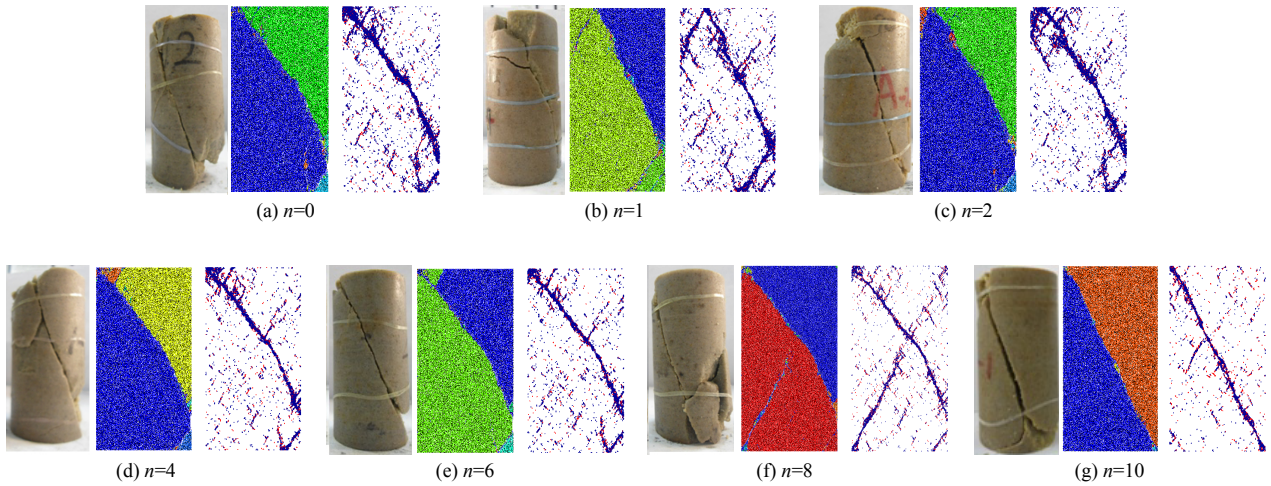


图 11 水-岩作用下蠕变试验及数值模拟的破坏形态图及微裂纹分布图

Fig.11 Failure patterns and microcrack distributions of samples in laboratory creep test and numerical simulation

由图 11 可知，室内蠕变试验与模拟蠕变试验试样的破坏形态存在少许差异，分析可能是因为 PFC 模型颗粒为圆盘，而实际砂岩颗粒形状各异，因此造成了两者微裂纹的扩展及最终破坏形态存在细微的偏差，但整体破坏形态及变化规律基本一致。

在不同水-岩作用周期下，数值模拟试样蠕变破坏均表现出现明显的剪切破坏特征，剪切面贯通试样，微裂纹扩展贯通形成剪切形式的主破裂面破碎集中在顶部和底部。但破坏模式随水-岩作用周期的增加，表现出以下变化规律：水-岩作用前期（$n=0$～2），试样的破裂面分布很不规整，破坏以剪破坏为主，张破坏为辅，破裂面发生粉碎性破坏程度较高；水-岩作用后期（$n=8$～10），岩样破坏的破裂面以剪破坏为主，剪切破裂面贯穿整个试样。表明随着水-岩作用周期的增长，砂岩的张性破坏不断减弱，剪性破坏不断增强。

综合数值模拟的蠕变应变-时间曲线及破坏模式结果，均与室内试验结果相近、规律一致。表明本文提出的水-岩作用下砂岩蠕变模拟方法具有较好的可靠性与可行性。

5 水-岩作用下砂岩蠕变损伤演化

5.1 水-岩作用下蠕变微裂纹扩展演化

在模型承受外部荷载时，部分接触所受应力达到承受极限发生断裂，产生微裂纹。微裂纹扩展反映了模拟试样在外部荷载作用下内部结构损伤的过程。为了分析不同水-岩作用周期下砂岩蠕变 3 阶段内部结构劣化特征，绘制模型在破坏应力水平下轴向应变-时间及微裂纹扩展-时间曲线，并标记试样失稳破坏时的裂纹数量，如图 12 所示。

由图 12 分析可知：

（1）破坏应力水平下，试样的裂纹数量随时间增长规律与轴向应变随时间的变化规律一致。微裂纹扩展可分为衰减扩展阶段、稳定扩展阶段、加速扩展阶段，分别和轴向蠕变变形过程中的衰减蠕变阶段、稳定蠕变阶段、加速蠕变阶段相对应，与胡光辉[22]、胡训健[24]等蠕变模拟结论一致。试样瞬时变形后，进入衰减蠕变试验阶段，微裂纹扩展进入衰减扩展阶段，微裂纹增长速率逐渐降低；微裂纹增长速率趋于稳定后，微裂纹扩展进入稳定扩展阶段；随着时间的增长，试样蠕变损伤程度加深，微裂纹增长速率逐渐增加，微裂纹扩展进入加速扩展阶段；之后微裂纹经过一段时间的发育、扩展、贯通，形成宏观裂纹，直至试样发生失稳破坏。

（2）不同水-岩作用周期下，微裂纹稳定扩展阶段历时相对较长，加速扩展阶段历时相对较短。随着水-岩作用周期的增大，破坏应力水平不断降低，加速扩展阶段的耗时占总耗时的比例呈增长趋势，轴向应变速率呈降低趋势，说明在持续的水-岩作用下，砂岩在裂纹加速扩展阶段变形的时效特征越来越强烈。

（3）统计试样失稳破坏时总裂纹、张拉裂纹、剪切裂纹数量，计算剪切裂纹与张拉裂纹的数量比，在水-岩作用前期（$n=0$～2）剪张裂纹比分布在 0.34～0.38，水-岩作用中期（$n=4$～6）剪张裂纹比分布在 0.45～0.55，水-岩作用后期（$n=8$～10）剪张裂纹比分布在 0.66～0.80。随着水-岩作用周期 n 增加，试样发生失稳破坏时，内部微裂纹中剪张比逐渐增加，剪切裂纹占比逐渐增加，表明在水-岩作用下，试样的张性破坏减弱，剪性破坏增强，与室内试验表现出的规律一致。

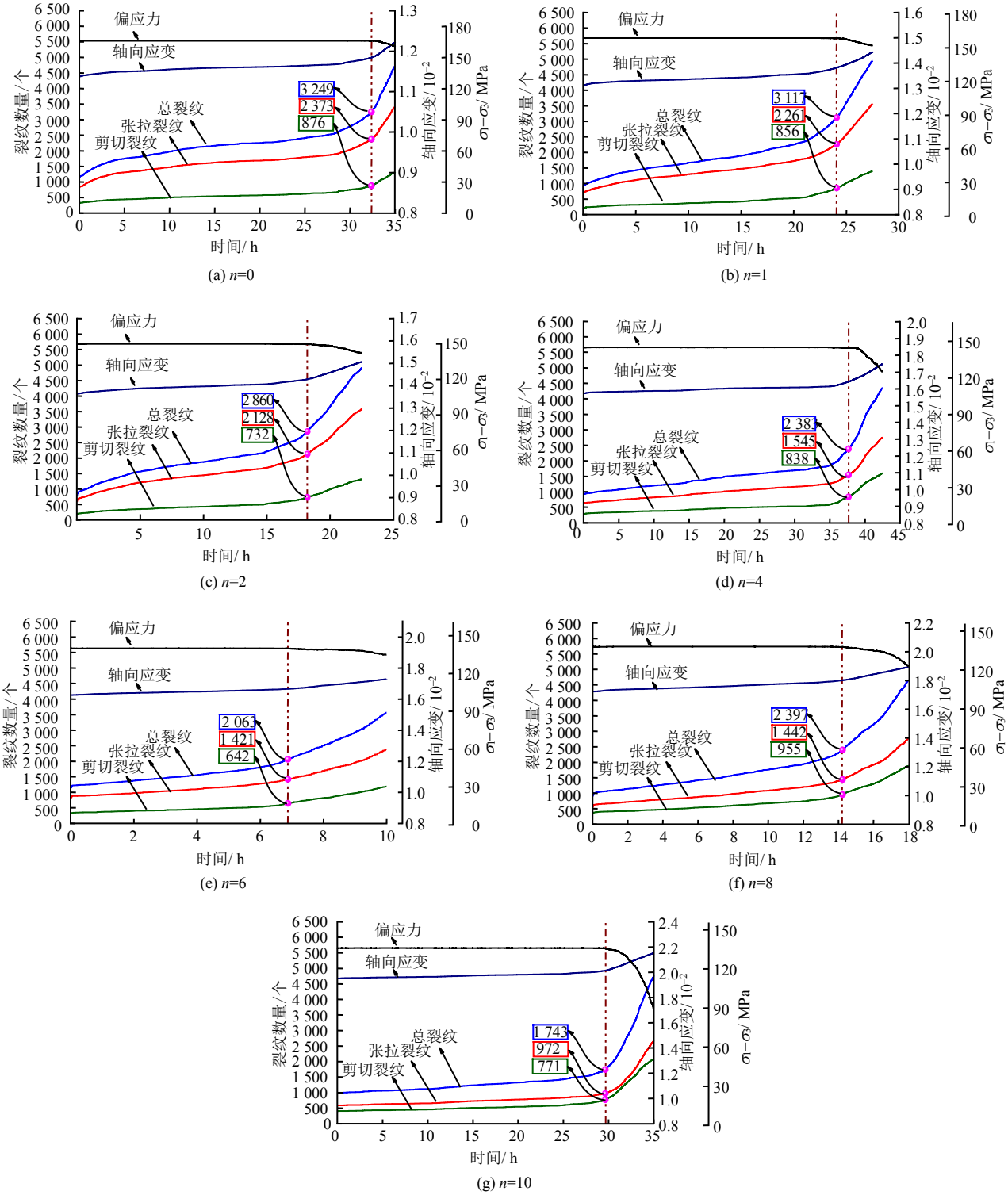


图 12　轴向应变及微裂纹数量随时间变化曲线

Fig.12　Variation curves of axial strain and number of microcracks with time

5.2　水-岩作用下砂岩蠕变微裂纹倾角演化

微裂纹倾角反映了试样在外部荷载作用下应力场的分布[15]。根据试样完全破坏时（轴向应变达到 2.2×10^{-2} ）的裂纹分布，对裂纹的倾角进行统计。倾角以 x 轴正方向为 0°，裂纹的倾角分布如图 13 所示。

由图 13 可知，微裂纹倾角如扇形分布，主要集中于近似平行轴向加载方向（80°～100°），在近乎水平方向（0°～10°、170°～180°）分布较少。这与宏观蠕变破坏时，裂纹倾角主要集中于轴向加载方向（80°～100°）和斜对角方向（50°～80°、100°～130°）的斜对角剪切、并伴随张拉的宏观破坏模式相符。

不同水-岩作用下，试样蠕变微裂纹倾角分布演

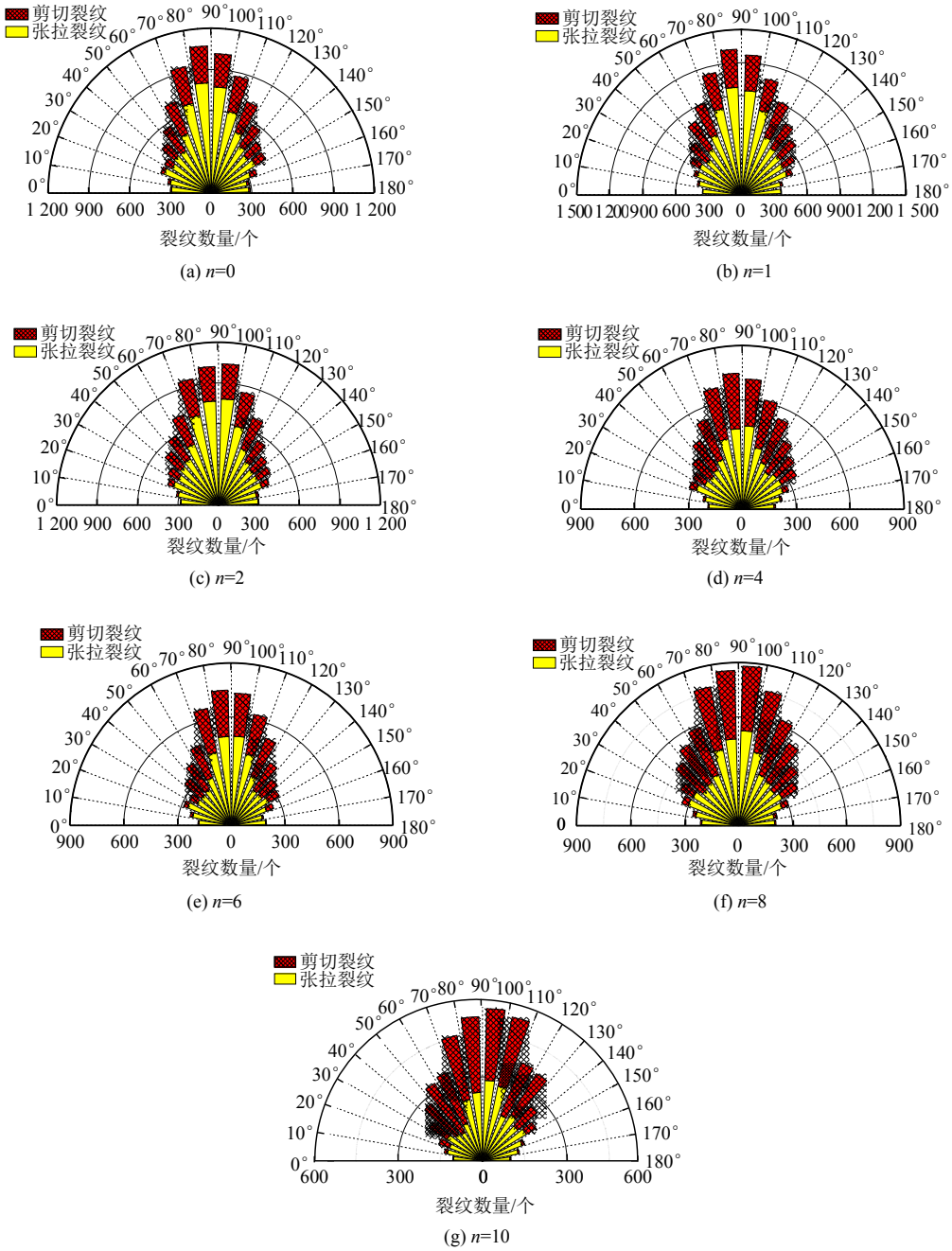


图 13 微裂纹倾角分布

Fig.13 Distributions of dip angle of microcracks

化为：初始状态试样的微裂纹倾角分布为较规则的扇形，剪切裂纹占 23.78%，倾角分布在 50°～80°、100°～130°的微裂纹占 42.65%；在 10 期水-岩作用下，剪切裂纹占 42.24%，倾角分布在 50°～80°、100°～130°的微裂纹占 45.64%。表明水-岩作用导致试样剪切裂纹逐渐增加，微裂纹倾角在 65°、115°附近的分布逐渐增加，造成试样的斜对角破坏形式更加明显。在不同水-岩作用周期下，试样的微裂纹倾角分布不同，这是由水-岩作用造成各接触的黏结面积、黏结模量发生了不同程度的劣化，在外部荷载作用下试样的应力场发生改变而造成的。

5.3 水-岩作用下砂岩蠕变能量演化

蠕变试验模拟过程中，墙体边界移动产生的输入边界能，主要转化为颗粒应变能、胶结能，并伴随有摩擦能、阻尼能以及耗散能等能量耗散。其中摩擦能主要由颗粒间的闭合摩擦产生，阻尼能以及耗散能主要由微裂纹成核扩展贯通和破裂面的相对错动造成。通过 FISH 函数实现试样加载过程中各能量（边界能、颗粒应变能、胶结能、摩擦能、阻尼能、耗散能）的监测记录，研究水-岩作用下试样蠕变过程中的能量演化规律。

为了研究试样蠕变过程中各能量的演化规律，

选取一组典型的监测结果进行分析，图 14 为第 4 周期数值模拟的能量-应变及偏应力-应变曲线。

由图 14 可以看出，试样在低应力水平下蠕变过程中的应变较小，在破坏应力下由于存在加速蠕变阶段，因此产生的应变较大。根据能量-应变曲线与偏应力-应变曲线的特点，将能量曲线分为加速蠕变破坏阶段前、加速蠕变阶段、蠕变破坏阶段进行分析。①加速蠕变阶段前，颗粒间胶结完好，颗粒应变能、胶结能的增速随着应变增大逐渐变大并达到稳定；此阶段能量耗散主要为颗粒间的摩擦闭合产生的摩擦能，以微小速率呈直线增加。②进入加速蠕变阶段后，胶结物加速断裂，造成部分颗粒之间无胶结，导致颗粒应变能增速骤减，由于试样未破坏，整体胶接完好，因此胶结能仍能稳定增大；此阶段胶结物的大量断裂，造成颗粒摩擦加剧、微裂纹成核扩展贯通和破裂面的相对错动增多，导致摩擦能、耗散能、阻尼能剧增，能量耗散加剧。③蠕变破坏时，胶结能达到峰值，之后由于贯穿性结构面的形成导致胶结能发生陡降，而颗粒应变能、摩擦能、耗散能、阻尼能仍稳定增长。

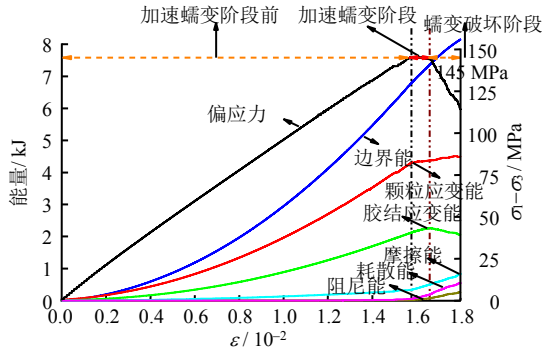


图 14　偏应力-应变曲线及能量演化过程（n=4）

Fig.14　Deviatoric stress-strain curve and energy evolution process (n=4)

PFC^{2D} 程序中平行黏结平行键的胶结能 $\overline{E_{ki}}$ 的计算方式为[21]

$$\overline{E_{ki}}=\frac{1}{2}\left(\frac{(F_i^{\mathrm{n}})^2L}{2\overline{E}\lambda R_i}+\frac{\left\|F_i^{\mathrm{s}}\right\|^2\overline{k}L}{2\overline{E}\lambda R_i}+\frac{3(M_i^{\mathrm{n}})^2L}{2\overline{E}\lambda^3R_i^3}\right)\tag{15}$$

根据式（9）、（10）、（15）可知，胶结能与 λ 和 $\overline{E}$ 相关，而 λ 和 $\overline{E}$ 为水-岩作用周期 n 的函数，因此胶结能与水-岩作用周期 n 相关。为分析水-岩作用下胶结能的演化规律，统计不同水-岩作用周期下胶结能随应变的演化过程，如图 15 所示。

由图 15 可知，随着水-岩作用周期 n 增大：①试样能储存的最大胶结能不断降低，在 n = 0、1、2、4、6、8、10 时胶结能峰值分别为 2 975.72、2 782.91、2 483.14、2 203.76、2 056.63、2 031.22、1 978.47 J；10 个周期总劣化幅度为 33.51%，而前 6 个水-岩作用周期的胶结能峰值劣化较快，劣化幅值为 30.89%，约占总劣化幅值的 92%，与试验得出的宏观力学参数劣化规律一致，这也可以较好地解释实际工程中大量岸坡失稳发生在水库蓄水初期[5-7]的原因。②试样储存相同胶结能时对应的应变不断增大，表明同等应力条件下其蠕变变形更大，与实际岸坡在水-岩作用下岩体整体承载能力降低、变形增大的规律一致。

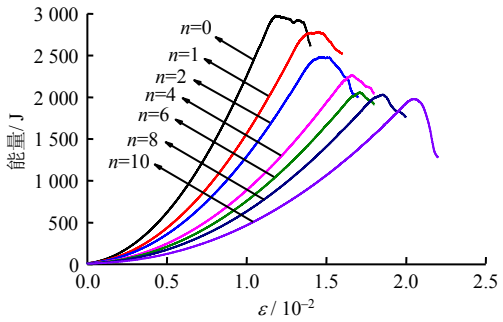


图 15　不同水-岩作用周期下试样胶结能演化过程

Fig.15　Evolution of cementation energy of samples under different water-rock interactions

6　结　论

本文基于 PBM 模型，考虑水-岩作用对黏结的弱化的同时，确定恒定应力作用下平行黏结半径乘数随时间的劣化关系，提出水-岩作用下砂岩蠕变的模拟方法；并在室内试验的基础上，建立了水-岩作用下砂岩蠕变模型，研究裂纹起裂、扩展、贯通的变化规律及能量演化过程，得出结论如下：

（1）数值模拟的蠕变应变-时间曲线能较好地描述试样在水-岩作用下的衰减、稳定及加速蠕变阶段，且室内蠕变试验与模拟蠕变试验试样的破坏特征规律变化一致，表明提出的水-岩作用下砂岩蠕变模拟方法具有较好的可靠性与可行性，可为库岸边坡岩石在库水位升降影响下的模型研究提供重要的理论基础。

（2）破坏应力水平下，试样微裂纹扩展与蠕变应变规律相似，可分为衰减扩展阶段、稳定扩展阶段、加速扩展阶段；微裂纹稳定扩展阶段历时相对比较长，加速扩展阶段历时相对比较短，且随着水-岩作用周期的增大，加速扩展阶段的耗时占总耗时的比例呈增长趋势，轴向应变速率呈降低趋势，说明在持续的水-岩作用下，砂岩在裂纹加速扩展阶段

变形的时效特征越来越强烈。

（3）试样蠕变破坏时，随水−岩作用周期增加，内部微裂纹中剪张比逐渐增加，剪切裂纹占比逐渐增加，微裂纹倾角分布逐渐分散，倾角分布在 65°、115°附近的微裂纹逐渐增加，试样的剪性破坏特征愈显著。上述规律表明，在水−岩作用下，试样的张性破坏减弱，剪性破坏增强，与宏观蠕变破坏模式变化规律一致。

（4）蠕变过程中，水−岩作用主要对试样胶结能产生影响，前 6 个水−岩作用周期最大胶结能的劣化效应尤为显著，约占总劣化幅值的 92%；试样储存相同胶结能时对应的应变不断增大，表明同等应力条件下其更易发生蠕变变形破坏，与实际岸坡在水−岩作用下岩体整体承载能力降低、变形增大的规律一致。

（5）在应力与库水位周期升降环境的共同影响下，岩石细观微裂纹的不断扩展，岩石颗粒胶结的不断减弱，会造成消落带岩石提前进入加速蠕变阶段发生蠕变破坏。因此，对于实际工程中的库岸边坡而言，应重点加强库水位周期升降作用下岸坡岩体的蠕变变形监测，及时采取加固支护、水文监测、排水和防渗等措施，避免岸坡蠕变失稳破坏的发生。

参 考 文 献

[1] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081-1106.
SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1081-1106.

[2] 朱珍德, 张勇, 徐卫亚, 等. 高围压高水压条件下大理岩断口微观机制分析与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 44-51.
ZHU Zhen-de, ZHANG Yong, XU Wei-ya, et al. Experimental studies and microcosmic mechanics analysis on marble rupture under high confining pressure and high hydraulic pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(1): 44-51.

[3] 谢小帅, 陈华松, 肖欣宏, 等. 水岩耦合下的红层软岩微观结构特征与软化机制研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 966-972.
XIE Xiao-shuai, CHEN Hua-song, XIAO Xin-hong, et al. Micro-structural characteristics and softening mechanism of red-bed soft rock under water-rock interaction condition[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2019, 27(5): 966-972.

[4] 王思敬, 马凤山, 杜永廉. 水库地区的水岩作用及其地质环境影响[J]. 工程地质学报, 1996, 4(3): 1-9.
WANG Si-jing, MA Feng-shan, DU Yong-lian. Water rock interaction and its geological environment impact in reservoir area[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1996, 4(3): 1-9.

[5] 骆祚森. 水库岸坡消落带水−岩作用下砂岩蠕变特性研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2019.
LUO Zuo-sen. Study on creep properties of sandstone under water-rock interaction in reservoir bank slope[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019.

[6] 毛添. 水−岩作用下库岸边坡岩石能量特征与蠕变特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
MAO Tian. Study on rock energy characteristics and creep characteristics of reservoir bank slope under water-rock action[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.

[7] 莫至坤. 干湿循环作用下水电工程高边坡长期变形分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
MO Zhi-kun. Analysis of long term deformation of high slope under dry-wet cycles of hydropower project[D]. Nanchang :Nanchang University, 2022.

[8] 刘新荣, 袁文, 傅晏, 等. 干湿循环作用下砂岩溶蚀的孔隙度演化规律[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 527-532.
LIU Xin-rong, YUAN Wen, FU Yan, et al. Porosity evolution of sandstone dissolution under wetting and drying cycles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(3):527-532.

[9] 邓华锋, 支永艳, 段玲玲, 等. 水−岩作用下砂岩力学特性及微细观结构损伤演化[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3447-3456.
DENG Hua-feng, ZHI Yong-yan, DUAN Ling-ling, et al. Mechanical properties of sandstone and damage evolution of microstructure under water-rock interaction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(9): 3447-3456.

[10] 秦哲, 付厚利, 程卫民, 等. 水岩作用下露天坑边坡岩石蠕变试验分析[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(3): 85-89.
QIN Zhe, FU Hou-li, CHENG Wei-min, et al. Experimental analysis of rock creep of open pit slope under the action of water and rock[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2017, 34(3): 85-89.

[11] 马芹永, 郁培阳, 袁璞. 干湿循环对深部粉砂岩蠕变特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 593-600.

MA Qin-yong, YU Pei-yang, YUAN Pu. Experimental study on creep properties of deep siltstone under cyclic wetting and drying[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(3): 593-600.

[12] 王玮玮, 刘新喜, 李盛南, 等. 干湿循环对炭质泥岩蠕变及损伤特性的影响[J].湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(9): 173-181.
WANG Wei-wei, LIU Xin-xi, LI Sheng-nan, et al. Study on effect of wetting and drying cycles on creep and damage characteristics of carbonaceous mudstone[J]. **Journal of Hunan University(Natural Sciences)**, 2022, 49(9): 173-181.

[13] 张梁. 酸性环境干湿交替作用下泥质砂岩宏细观损伤特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
ZHANG Liang. Study on macro-meso damage characteristics of argillaceous sandstone under dry-wet cycle in acidic condition[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

[14] ZHANG Yuan-yuan, SHAO Zhu-shan, WEI Wei, et al. PFC simulation of crack evolution and energy conversion during basalt failure process[J]. **Journal of Geophysics and Engineering**, 2019, 16(3): 639-651.

[15] 刘万荣, 殷志强, 袁安营, 等. 基于颗粒离散元法不同岩性巷道围岩声发射特性和能量演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2): 363-370.
LIU Wan-rong, YIN Zhi-qiang, YUAN An-ying, et al. Particle-discrete-element-method-based research on acoustic emission characteristics and energy evolution laws of surrounding rock in different lithologic roadway[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2017, 34(2): 363-370.

[16] 胡训健, 卞康, 刘建, 等. 基于平行黏结水弱化模型的页岩吸水软化离散元模拟[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 725-733.
HU Xun-jian, BIAN Kang, LIU Jian, et al. Discrete element simulation of shale softening based on parallel-bonded water-weakening model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(4): 725-733.

[17] POTYONDY D O. Simulating stress corrosion with a bonded-particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44(5): 677-691.

[18] SONG Z Y, HEINZ K, MARTIN H. Bonded-particle model-based simulation of artificial rock subjected to cyclic loading[J]. **Acta Geotech**, 2019, 14(4): 955-971.

[19] 刘宁, 张春生, 褚卫江. 深埋大理岩破裂扩展时间效应的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 1989-1996.
LIU Ning, ZHANG Chun-sheng, CHU Wei-jiang. Simulating time-dependent failure of deep marble with particle flow code[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(10): 1989-1996.

[20] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1329-1364.

[21] 石崇, 张强, 王盛年. 颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 263-268.
SHI Chong, ZHANG Qiang, WANG Sheng-nian. Particle flow(PFC5.0) numerical simulation technology and its application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018: 263-268.

[22] 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 Guang-hui, XU Tao, CHEN Chong-feng, 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.

[23] LI H, NGAHA T W, JAAK D, et al. A power function model for simulating creep mechanical properties of salt rock[J]. **Journal of Central South University**, 2020, 27(2): 578-591.

[24] 胡训健, 卞康, 刘建, 等. 细观结构的非均质性对花岗岩蠕变特性影响的离散元模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 2069-2083.
HU Xun-jian, BIAN Kang, LIU Jian, et al. Discrete element simulation study on the influence of microstructure heterogeneity on the creep characteristics of granite[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(10): 2069-2083.