

DOI: 10.11779/CJGE202107016

# 基于TOUGHREACT的岩石水力损伤耦合数值模型研究

刘 武<sup>1, 2</sup>, 过申磊<sup>1</sup>, 陆 倩<sup>1</sup>, 郑连阁<sup>3</sup>, 袁文俊<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学土木水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;  
3. 劳伦斯伯克利国家实验室, 伯克利 94701)

**摘要:** 从细观力学角度出发, 充分考虑水-力耦合条件下岩石细观特征及其演化, 结合热力学理论, 建立基于TOUGHREACT的岩石细观水力损伤耦合数值模型。模型可较好地考虑任意微裂纹滑移剪胀、损伤扩展和法向压缩闭合等细观力学行为对岩石宏观变形破坏、渗透性演化和水流运动过程的影响。采用室内煤岩注水破坏试验成果对数值模型的正确性和有效性进行验证, 进而开展现场尺度下岩石注水响应的应用模拟研究。模拟结果表明, 注水引起的岩石损伤与压力增高区的分布同时受注入流量、现场应力水平与初始微裂纹各向异性分布等因素的影响。岩石宏观水力耦合响应的模拟有赖于内部微裂纹结构的准确表征。研究成果对深化岩石水力耦合研究具有一定参考意义。

**关键词:** 岩石力学; 水力损伤耦合; 渗透性演化; 数值分析; 细观力学

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)07-1306-09

作者简介: 刘 武(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩体水力耦合分析方面的研究工作。E-mail: liuwu168@hfut.edu.cn。

## Numerical model for hydro-mechanical-damage coupling of rocks based on TOUGHREACT

LIU Wu<sup>1, 2</sup>, GUO Shen-lei<sup>1</sup>, LU Qian<sup>1</sup>, ZHENG Lian-ge<sup>3</sup>, YUAN Wen-jun<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education, Yichang 443002, China; 3. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley 94701, America)

**Abstract:** For better modelling the microscopic characteristics and evolution of materials under hydro-mechanical coupling conditions, a TOUGHREACT-based hydro-mechanical-damage coupled numerical model for saturated rocks is established by using the microscopic homogenization method and the thermodynamics theory. The proposed model well accounts for the influences of sliding dilatancy, damage propagation and normal compression of arbitrary microcracks on the macroscopic deformation and failure characteristics, permeability evolution and fluid flow process. The numerical method is successfully validated through the experimental data of water injection tests on coal sample at the laboratory scale and then used to carry out application simulations of water injection responses at the field scale. The numerical simulation results demonstrate that the distributions of injection-induced rock damage and elevated pressure are affected by the injection rate, in-situ stresses and anisotropic distribution of the initial microcracks, and they are more developed in the directions with larger in-situ stress and dominant development of microcracks. Better simulations of the macroscopic hydro-mechanical responses of rocks depend on the accurate characterization of the internal microscopic structures. The research may provide a useful reference for deepening the study on hydro-mechanical coupling of rocks.

**Key words:** rock mechanics; hydro-mechanical-damage coupling; permeability evolution; numerical analysis; micromechanics

## 0 引言

岩石水力耦合作用研究在地下资源开采、核废料地质处置、地热能开发、深埋水工隧洞建设、二氧化碳地质封存等诸多工程的安全或性能评价中得到广泛关注<sup>[1-4]</sup>。受岩石结构及其所处工程地质环境的复杂与不确定性影响, 水力耦合问题一直是一项极具挑战的科学问题。在水力耦合作用下, 岩石发生变形与损伤

累积, 内部微裂纹萌生、扩展与贯通, 并产生张开或闭合变形, 导致岩石宏观力学与渗透特性发生改变, 进而引起水流流动过程产生变化; 与此同时, 水流流

基金项目: 国家自然科学基金项目(51709072); 安徽省自然科学基金项目(1808085QE145); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放基金项目(2018KDJZ07); 中央高校基本科研业务费和国家留学基金项目  
收稿日期: 2020-08-20

动过程的改变进一步通过水压力变化影响岩石变形和损伤过程。开展岩石水力损伤耦合研究对于深入理解岩石损伤演化过程中水流运动与变形破坏耦合响应具有重要意义。

基于细观力学的损伤建模方法是一种可将材料宏观力学响应与细观结构演化联系起来的损伤分析手段, 获得越来越多研究人员青睐<sup>[5-8]</sup>。岩石内部微裂纹萌生扩展、滑移剪胀以及法向压缩等细观行为对宏观力学特性的影响可以很好地通过细观损伤模型体现。以细观损伤模型为基础, 微裂纹细观结构变化引起的渗透性演化可以较好地被反映<sup>[9-11]</sup>。水力耦合条件下进一步考虑微裂纹水压力作用的损伤模型也得到了广泛研究。Dormieux 等<sup>[12]</sup>采用细观力学方法建立了饱和含张开微裂纹岩石的自由能函数和细观损伤力学模型。Xie 等<sup>[13]</sup>认为岩石由孔隙弱化的弹性基质和随机分布的微裂纹组成, 分别推导了饱和岩石内微裂纹呈张开与闭合状态时的宏观自由能表达式。陈益峰等<sup>[1]</sup>研究了热水力耦合条件下饱水岩石的细观损伤力学模型以及损伤诱发的渗透性演化模型, 并分析了渗透性下限估计模型的不足。Zhu<sup>[14]</sup>通过基于均匀化的单侧损伤-摩擦耦合分析推导了干燥岩石强度方程, 并拓展研究了饱水条件下岩石的强度。朱其志等<sup>[15]</sup>从细观力学角度出发通过水力耦合分析, 研究了不排水条件下饱水岩石的损伤本构模型与常规三轴加载时的强度表达式。然而上述研究主要都局限于对岩石力学响应的模拟, 基于细观力学的岩石水力损伤耦合全过程的模拟研究目前还较欠缺, 值得深入研究。

TOUGHREACT 是一款由 TOUGH2 发展而来的开源代码, 广泛用于模拟地下工程中多相与多组分流体流动、热传输以及反应运输过程<sup>[16]</sup>。通过采用 TOUGHREACT 进行流体流动过程模拟, 本文从细观力学角度出发, 根据饱和岩石细观损伤模型和损伤岩石渗透性演化方程, 建立了基于 TOUGHREACT 的岩石水力损伤耦合数值模型。采用室内岩石注水破坏试验对模型进行了验证, 并在现场尺度岩石注水响应模拟中研究了注入流量, 现场应力水平与初始微裂纹分布等因素对水力损伤耦合过程的影响。

## 1 岩石水力损伤耦合模型

在水力损伤耦合环境中, 岩石损伤伴随着水力耦合过程的发展而累积, 而损伤演化又通过改变岩石内部微裂纹或孔隙结构的几何形态及网络特征影响岩石变形和水流流动过程。岩石水力损伤耦合分析主要包括 3 个过程的分析: ①应力和水压力共同作用下岩石变形与损伤破坏过程; ②岩石损伤破坏诱发的渗透性

演化过程; ③考虑渗透性变化的水流流动过程。

在此提出了基于 TOUGHREACT 的岩石水力损伤耦合数值模拟方法, 如图 1 所示, 主要包括水流流动和力学损伤 (M-D) 耦合两个计算模块。水流流动计算采用广泛应用的 TOUGHREACT 多场多相流体模拟程序<sup>[16]</sup>; 力学损伤耦合计算则通过将自主研发的细观损伤力学程序<sup>[11]</sup>延拓到考虑水力耦合荷载作用来实现。值得注意的是, TOUGHREACT 计算得到的水压力计算结果位于单元中心点, 在进行力学过程求解时需通过单元中心的水压力插值得到单元节点的值。

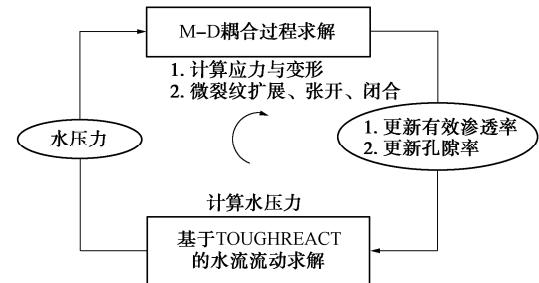


图 1 基于 TOUGHREACT 的水力损伤耦合模拟

Fig. 1 TOUGHREACT-based H-M-D coupled simulation

### 1.1 饱和岩石细观损伤力学模型

考虑一岩石表征单元体, 其由各向同性线弹性固体基质和任意分布的钱币型微裂纹所组成。在水力耦合荷载作用下微裂纹的萌生、扩展及连接是导致岩石力学性质与渗透特性变化的主要诱因。根据利用细观力学方法获得的饱水含微裂纹材料的自由能表达式<sup>[1, 13]</sup>, 可采用 Legendre-Fenchel 变换<sup>[8]</sup>得到宏观应力  $\Sigma$  与孔隙水压力  $p$  共同作用下基于 Mori-Tanaka 均匀化方法的饱水岩石自由焓表达式:

$$W^* = \frac{1}{2}(\Sigma + pB) : S^s : (\Sigma + pB) + \Sigma : E^c - \frac{1}{8\pi} \oint \frac{H_0}{d} \beta^2 + \frac{H_1}{d} \gamma(n) \cdot \gamma(n) dS + p\delta : E^c + \frac{p^2}{2N} \quad (1)$$

式中  $E^c = \frac{1}{4\pi} \oint \beta n \otimes n + \gamma(n) \otimes n dS$  为微裂纹产生的宏观应变, 其中  $\beta$  和  $\gamma$  代表微裂纹张开与滑移的内变量,  $\otimes$  为求两个向量并矢积对称分量的符号;  $S^s = \{n \parallel n = 1\}$  为用来反映微裂纹任意方向分布的单位球面,  $n$  为微裂纹的单位法向量;  $S^s$  为各向同性固体基质的弹性柔度张量, 由基质弹性模量  $E^s$  和泊松比  $\nu^s$  确定, 可通过预先对孔隙弱化固体基质采用均匀化方法获得;  $d = \mathcal{N}a^3$  为岩石细观损伤的内变量, 其中,  $\mathcal{N}$  为微裂纹密度, 表示单位体积的微裂纹数量,  $a$  为微裂纹的平均半径; 常数  $H_0 = 3E^s / \{16[1 - (\nu^s)^2]\}$ ,

$H_1 = H_0(1 - \nu^s/2)$ ;  $\boldsymbol{\delta}$  为二阶单位张量;  $\mathbf{B}$  和  $N$  为与岩石有效刚度张量相关的 Biot 系数张量和 Biot 模量<sup>[1]</sup>, 为简化计算采用各向同性的 Biot 系数张量<sup>[13, 17]</sup>, 则有  $\mathbf{B} = b_0\boldsymbol{\delta}$ ,  $1/N = 3(1 - 2\nu^s)(b_0 - \phi_0)/E^s$ , 其中,  $b_0$  和  $\phi_0$  为岩石各向同性 Biot 系数和初始孔隙率。

对式(1)中岩石自由焓关于  $\boldsymbol{\Sigma}$  和  $p$  求导, 可得水力耦合条件下饱水岩石的本构方程:

$$\mathbf{E} = \partial W^*/\partial \boldsymbol{\Sigma} = \mathbf{S}^s : (\boldsymbol{\Sigma} + p\mathbf{B}) + \mathbf{E}^c , \quad (2)$$

$$\phi - \phi_0 = \partial W^*/\partial p = \mathbf{B} : \mathbf{S}^s : (\boldsymbol{\Sigma} + p\mathbf{B}) + \boldsymbol{\delta} : \mathbf{E}^c + p/N . \quad (3)$$

式中  $\phi$  为微裂纹的孔隙率。式(2)右端第一项为岩块基质在有效应力  $(\boldsymbol{\Sigma} + p\mathbf{B})$  作用下的弹性应变, 第二项为微裂纹产生的非弹性应变。本构方程中的内变量  $d$ ,  $\beta$  和  $\gamma$  的演化根据其对应的共轭热力学力  $F^d$ ,  $F^\beta$  和  $\mathbf{F}^\gamma$  确定, 其表达式根据热力学理论得到:

$$F^d(\mathbf{n}) = \partial W^*/\partial d = [H_0\beta^2 + H_1\gamma(\mathbf{n}) \cdot \gamma(\mathbf{n})]/2d^2 , \quad (4a)$$

$$F^\beta(\mathbf{n}) = \partial W^*/\partial \beta = \boldsymbol{\Sigma} : \mathbf{n} \otimes \mathbf{n} - H_0\beta/d + p , \quad (4b)$$

$$\mathbf{F}^\gamma(\mathbf{n}) = \partial W^*/\partial \gamma = \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\Sigma} \cdot (\boldsymbol{\delta} - \mathbf{n} \otimes \mathbf{n}) - H_1\gamma(\mathbf{n})/d . \quad (4c)$$

式(4a)~(4c) 中热力学力  $F^\beta$  和  $\mathbf{F}^\gamma$  实质上代表微裂纹的局部法向和切向有效应力。当微裂纹张开时, 有  $F^\beta = 0$  和  $\mathbf{F}^\gamma = \mathbf{0}$ , 此时可直接根据式(4b)和(4c)确定  $\beta$  和  $\gamma$ 。当微裂纹呈闭合状态时 ( $F^\beta < 0$ ) 确定  $\beta$  和  $\gamma$  时需考虑微裂纹的剪切滑移和法向压缩闭合效应<sup>[5]</sup>, 采用关联的 Mohr-Coulomb 准则,  $F = |\mathbf{F}^\gamma| + F^\beta \tan \phi_c$ , 模拟微裂纹的滑移剪胀变形, 而法向闭合变形则利用双曲线模型表征,  $\beta = -F^\beta \beta_0 / (k_0 \beta_0 - F^\beta)$ , 其中,  $\phi_c$ ,  $\beta_0$  和  $k_0$  分别为微裂纹的内摩擦角、最大闭合量和初始法向刚度。内变量  $d$  的演化采用如下的微裂纹损伤演化准则:

$$f(F^d, d) = F^d - V(d) = \begin{cases} F^d - V(d_c) \frac{2d/d_c}{1 + (d/d_c)^2} & (d < d_c) \\ F^d - V(d_c) & (d \geq d_c) \end{cases} \quad (5)$$

式中  $V(d)$  为微裂纹损伤扩展抵抗力, 在损伤变量达到临界值  $d_c$  时取最大值  $V(d_c)$ ,  $d_c$  与峰值应力对应的非弹性应变有关<sup>[18]</sup>, 为简化计算取为一常数。考虑到  $V(d)$  值随损伤演化的变化过程可用来描述岩石的强度包线<sup>[19]</sup>, 式(5)中  $V(d)$  值在达到最大值  $V(d_c)$  后保持不变, 故采用式(5)确定的岩石强度包线在峰后保持不变, 不考虑峰后应变软化现象, 这对提高数值计算稳定性有利。

## 1.2 损伤诱发渗透特性演化

在水力耦合过程中, 岩石有效渗透特性的变化主要由内部微裂纹损伤扩展和已有微裂纹张开或闭合变形所引起。考虑到渗透性下限估计模型的不足, 对含

微裂纹岩石的有效渗透性采用 Liu 等<sup>[11]</sup>提出的基于 Voigt 上限模型建立的渗透张量演化方程进行估计:

$$\mathbf{K} = (1 - \phi)k^s\boldsymbol{\delta} + \frac{1}{4\pi} \int_{S^2} k_0^c \left( \frac{d}{d_0} \right)^{\chi-4/3} \frac{\beta^3}{\beta_0^2} (\boldsymbol{\delta} - \mathbf{n} \otimes \mathbf{n}) dS . \quad (6)$$

式中  $k^s$  为基质的各向同性渗透率;  $k_0^c$  为初始损伤和体积率分别为  $d_0$  和  $\beta_0$  时微裂纹的渗透率; 参数  $\chi$  用于表征微裂纹连通性随损伤演化的变化<sup>[11]</sup>, 随着微裂纹损伤累积, 参与渗流的微裂纹数量越来越多, 其值可通过岩石渗透性演化试验数据反算确定。

由式(6)可知, 岩石有效渗透性演化由内变量  $d$  和  $\beta$  的变化所决定, 而  $d$  和  $\beta$  的演化则通过 1.1 节中提出的岩石细观损伤本构方程确定。式(6)给出的岩石渗透张量模型可较好地考虑水力耦合过程中微裂纹滑移剪胀、损伤扩展和法向压缩闭合等细观力学行为对宏观有效渗透性的影响。

## 1.3 TOUGHREACT 中流体运动控制方程

TOUGHREACT 是一款可较好地进行地质介质中多相和多组分流体流动、热传输以及反映运输过程模拟的开源程序<sup>[16]</sup>。TOUGHREACT 中流体运动控制方程为各组分的质量守恒方程, 其一般表达形式为

$$\frac{\partial M_\kappa}{\partial t} = q_\kappa - \nabla F_\kappa . \quad (7)$$

式中  $M_\kappa$  为单位体积组分  $\kappa$  的质量,  $M_\kappa = \phi \rho_1 X_1^\kappa$ ,  $\rho_1$  为流体密度,  $X_1^\kappa$  为液相组分  $\kappa$  的质量分数;  $q_\kappa$  为组分  $\kappa$  的单位体积质量源汇项;  $F_\kappa$  为组分  $\kappa$  的质量通量, 采用达西定律描述:

$$F_\kappa = -\rho_1 X_1^\kappa \frac{\mathbf{K}}{\mu_1} (\nabla p_1 - \rho_1 \mathbf{g}) , \quad (8)$$

式中,  $\mu_1$  为液相的黏滞系数,  $\mathbf{g}$  为重力加速度。

TOUGHREACT 中对式(7)进行求解时, 首先采用基于有限差分的积分格式进行空间离散, 时间离散则采用一阶有限差分法, 然后利用 Newton-Raphson 方法对离散后的各组分质量守恒方程进行数值求解<sup>[16]</sup>。

## 2 模型验证及应用

岩石水力损伤耦合模型存在强烈的非线性特征, 宜采用双场交叉迭代算法进行数值求解。在每个时间步  $\Delta t$  内, 先采用 TOUGHREACT 进行水流流动过程模拟, 确定水压力分布结果, 然后采用自主研发地基预测-校正算法的有限元代码<sup>[11]</sup>进行考虑水压力影响的力学损伤过程的计算, 更新 TOUGHREACT 模拟所需的岩石有效渗透率和孔隙率参数。其中, 反映岩石内微裂纹任意分布的单位球面  $S^2$  上的数值积分采用 33 点高斯积分计算<sup>[20]</sup>。

表1 注水试验模拟的计算参数

Table 1 Parameters used in water injection experiment

$E^s/\text{GPa}$	$V(d_c)/\text{MPa}$	$b_0$	$k^s/\text{m}^2$	$\chi$	$v_s$	$d_c$	$\beta_0$	$k_0^c/\text{m}^2$	$\Delta t/\text{s}$
4.0	$3 \times 10^{-4}$	0.8	$1.0 \times 10^{-18}$	1.5	0.3	1.0	0.01	$1.4 \times 10^{-15}$	30

为了验证本文提出的岩石水力损伤耦合数值分析方法与计算程序的正确性和有效性, 在此首先对室内岩石注水破坏试验进行模拟分析, 然后在现场尺度对注入流量, 现场应力水平与初始微裂纹非均匀分布等影响岩石注水响应的因素开展数值模拟研究。

## 2.1 煤岩注水破坏试验模拟

采用Wu等<sup>[21]</sup>开展的煤岩注水开裂试验成果对本文提出的数值模型进行验证。试验过程中, 通过往外边界施加围压的立方体试样中心圆孔连续注水, 监测试样注水压裂过程中注水压力和声发射事件的演化规律。根据试样结构尺寸, 建立如图2所示的有限元计算模型, 模型边长为0.3 m, 中间设置半径为0.004 m的注水圆孔, 整体单元数为3200, 节点数为6560。

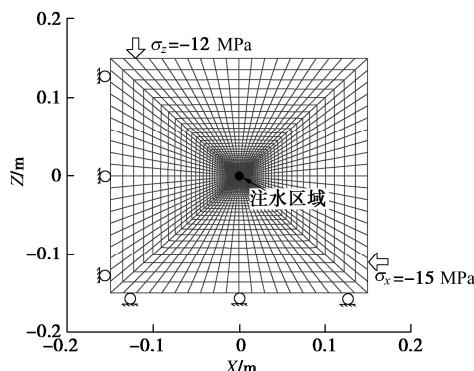


图2 岩石注水试验模拟的有限元网格模型

Fig. 2 Finite element mesh used in simulation of water injection tests

根据试验条件, 对计算模型施加如下的边界条件: 模型左侧和底部边界施加法向约束, 顶部和右侧边界分别施加12, 15 MPa的法向压力。初始时整个计算区域饱和, 水压力为0.1 MPa。考虑到试验系统本身的压缩效应<sup>[22]</sup>, 在数值模拟前120 s内采用较小的注水流量0.0075 mL/s, 之后以试验预定的恒定流量0.15 mL/s通过中心孔边界对岩石注水。数值模拟计算参数如表1所示, 其中弹性常数参照煤岩注水试验成果确定, 其他参数根据相关经验进行选取<sup>[11, 15, 23-24]</sup>, 煤岩初始各向同性, 有效渗透率为 $1 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 。

实测注水压力随时间的变化过程曲线与数值模拟预测结果的对比如图3所示。注入压力在开始缓慢增长后急剧增加, 缓慢增长阶段基本无声发射现象。模型预测的注水压力在前300 s增加到17 MPa左右, 此时试样开始破裂, 之后基本保持不变。模型预测的注

入压力变化过程与试验结果吻合较好。虽然受试样非均匀性、模型参数不确定性等因素的影响, 试验结果振荡起伏与预测结果相比有一些差异, 但数值模拟基本可很好地反映注水压力的变化规律。由图3可知, 当不考虑力学损伤过程时, 模型预测值与实测值差异明显, 这说明岩石注水响应模拟中考虑水力损伤耦合过程非常重要, 本文提出的模型是有效的。

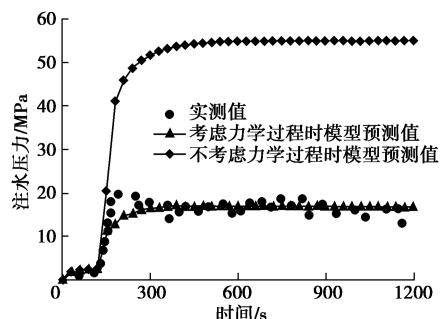


图3 实测与预测的注水压力随时间的变化过程

Fig. 3 Measured and predicted injection pressures with time

图4给出了数值模拟最后注水孔周围损伤岩石的渗透性分布规律。越靠近注水孔区域, 岩石渗透性增加越明显, 损伤越严重。虽然在明确表征注水结束时试样内多组不连续、随机发育的宏观裂隙时有所欠缺, 但数值模拟得到的岩石损伤沿注水孔向四周各个方向连续扩展, 并在水平方向(较大边界应力方向)更发育的特征与声发射分布规律相似。此外, 随着模型参数更为准确和全面的标定, 数值模拟结果有望进一步改善。由此可见, 本文提出的数值模型基本可较好地对岩石注水响应进行模拟。

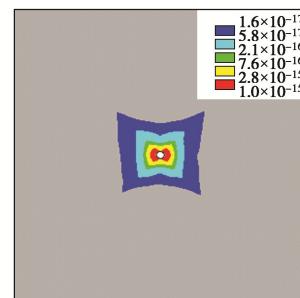


图4 岩石损伤诱发的渗透性变化的分布规律

Fig. 4 Distribution of change of damage-induced permeability by proposed model

## 2.2 现场尺度注水响应的模拟研究

本节进一步采用所提出的数值模型开展现场尺度

表 2 现场尺度注水响应模拟的计算参数

Table 2 Parameters used for water injection modeling in field scale

$E^s/\text{GPa}$	$V(d_c)/\text{MPa}$	$b_0$	$k^s/\text{m}^2$	$\chi$	$v_s$	$d_c$	$\beta_0$	$k^c/\text{m}^2$	$T/\text{s}$
10.0	$3 \times 10^{-4}$	0.8	$1.0 \times 10^{-16}$	1.9	0.3	0.5	0.01	$1.4 \times 10^{-13}$	480

下岩石注水响应模拟研究，并重点分析注入流量，现场应力水平与初始微裂纹非均匀分布等因素对水力损伤耦合过程的影响。

数值模型计算区域如图 5 所示，其截面尺寸为 50 m×50 m，厚 1 m，有限元单元数为 1681，节点数为 3528。初始水平和竖直现场应力为 14, 10 MPa，水压力为 2 MPa。计算区域中心注水点恒定流量为 0.4 L/s，注水时长为 480 s。计算参数如表 2 所示，考虑到实际损伤密度和损伤诱发渗透率不会无限增加，最大损伤密度取为临界值  $d_c$  的两倍。假设岩石内部初始微裂纹在各个方向均匀分布，各向同性渗透率为  $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。

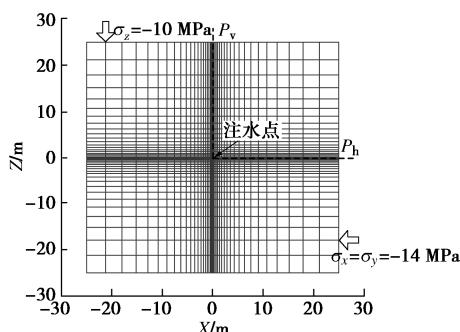


图 5 现场尺度注水响应模拟的计算区域与有限元网格

Fig. 5 Computational domain and finite element mesh for water injection simulation in field scale

### (1) 注入流量的影响

选取 0.2, 0.4, 0.8 L/s 三种不同注入流量研究其对现场注水响应的影响。图 6 为不同注入流量下注水压力的变化过程曲线。由图 6 可知，注水压力均在注水初期增长较快，然后逐渐趋于稳定。随着注入流量的增加，注水压力不断增大。注水结束时，0.2, 0.4, 0.8 L/s 三种不同注入流量工况的最终注水压力分别为 20.1, 23.8, 29.7 MPa。

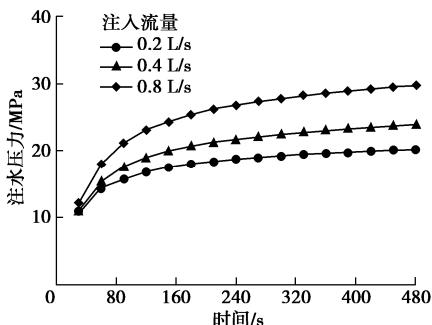


图 6 不同注入流量下注水压力变化过程曲线

Fig. 6 Evolution of injection pressure with different injection rates  
注入流量为 0.4 L/s 时注水点周围岩石破坏演化

过程如图 7 所示。由图 7 可知，损伤区域随着注入时间增长而扩大，空间上呈椭圆形分布，在水平方向（较大现场应力方向）的尺寸大于垂直方向，表明微裂隙在较大现场应力方向损伤扩展时所需的水压力更小。图 8 为不同注入流量下最终时刻的计算区域内损伤分布规律，随着注入流量的增加，椭圆形损伤区域的范围逐渐扩大，表明提高注入流量可有效增大注水引起的损伤破坏区域。考虑到地下资源开采时往往破坏区域越大资源开采产量越高，故实际应用中应在作业设备能力允许下，尽量采用较大的注入流量。

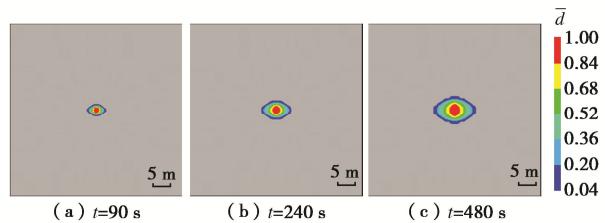


图 7 注入流量为 0.4 L/s 时下损伤分布随时间的演化过程

Fig. 7 Evolution of damage distribution with time at injection rate of 0.4 L/s

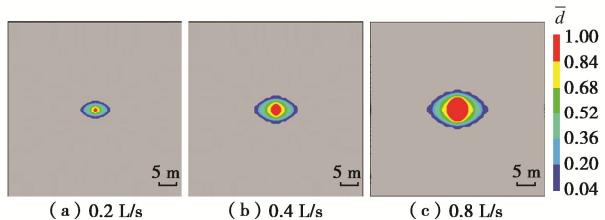


图 8 不同注入流量下最终时刻的损伤分布

Fig. 8 Distribution contours of damage at final injection time with different injection rates

图 9 分别给出了 3 种不同注入流量下最终时刻压力和损伤沿剖面  $P_h$  和  $P_v$  (位置见图 5) 的变化规律，其中， $d$  为损伤密度， $p$  为水压力。随着注入流量的提高，沿剖面  $P_h$  和  $P_v$  的流体压力和损伤密度均不断增加。在相同注入流量下，损伤密度和水压力均随着距注水点的距离的增大而迅速减小，且沿  $P_v$  剖面减小的更快。在 0.2 L/s 注入流量下，损伤区域沿剖面  $P_h$  和  $P_v$  的范围分别为 5.2, 2.9 m, 0.4 L/s 注入流量时增大到 6.3, 4.3 m, 0.8 L/s 注入流量时增大到 9.0, 6.3 m。注水引起的压力增高区域随损伤区域的增大而增大，但其范围较损伤区域更大，说明注水引起的压力增高效应也延伸到未破坏区域。上述分析表明，注入流量对岩石损伤与压力增高响应影响明显。

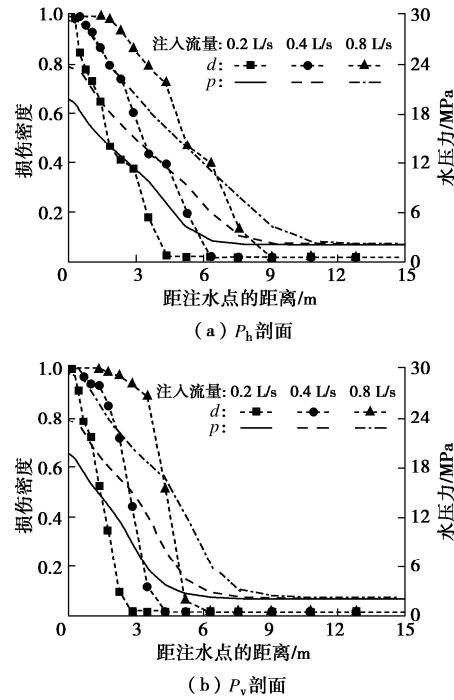


图 9 不同注入流量下注水点周围压力与损伤的变化规律  
Fig. 9 Variation of pressure and damage around injection point with different injection rates

## (2) 现场应力水平的影响

本节通过进一步选取不同的竖直现场应力(12, 14 MPa), 在注入流量为0.4 L/s的情况下, 分析现场应力水平对注水响应的影响。不同现场应力下模拟的注入点压力变化过程如图10所示。随着竖直现场应力的增加, 注入压力也不断增大。竖直现场应力由10 MPa增加到14 MPa, 最终时刻注入压力从23.8 MPa增加到26.7 MPa。

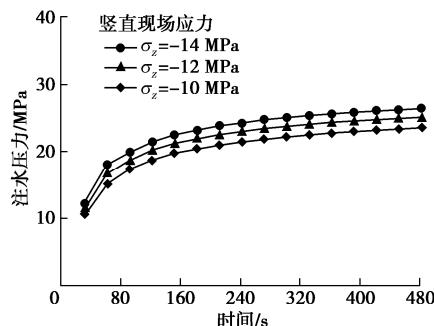


图 10 不同现场应力下注水压力变化过程曲线  
Fig. 10 Evolution of injection pressure with different in-situ stresses

不同现场应力下注水结束时刻计算区域的损伤与压力分布规律如图11所示。压力增高区和损伤区均在较大现场应力方向范围更大。随着现场应力的增加, 损伤区逐渐减小, 这是由于围压增加抑制微裂纹损伤扩展所致。竖直应力为14 MPa时(初始各向同性应力状态), 注水引起的岩石损伤几乎沿各个方向均匀扩展, 压力增高区和损伤区近似为圆形。现场应力条件

影响着损伤和压力增高区的各向异性分布特征。

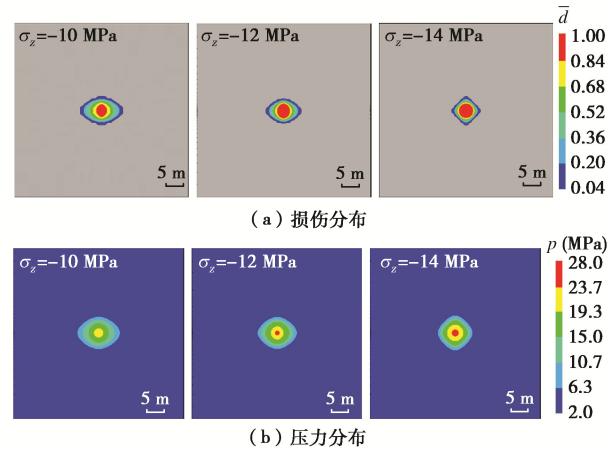


图 11 不同现场应力下最终时刻损伤与压力分布  
Fig. 11 Distribution contours of damage and pressure at final injection time with injection rates

图12给出了不同现场应力下最终时刻压力和损伤沿剖面 $P_h$ 和 $P_v$ 的变化规律。由图12(a)可知, 随着竖直现场应力的增大, 沿剖面 $P_h$ 的损伤区域逐渐减小, 这是因为正应力增大引起水平方向损伤扩展被限制。水压力沿剖面 $P_h$ 随距注水点距离的变化规律也受现场应力影响, 竖直现场应力越大, 水压力下降越迅速。而沿剖面 $P_v$ , 由于水平现场应力未变, 不同情况下损伤分布较为接近。由此可见, 注水引起的岩石损伤与压力增高响应受由地质条件决定的现场应力水平的影响。

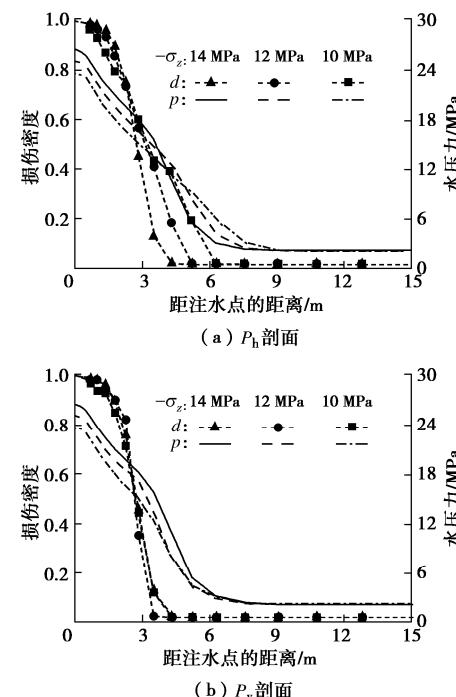


图 12 不同现场应力下注水点周围压力与损伤的变化规律  
Fig. 12 Variation of pressure and damage around injection point with different in-site stresses

### (3) 初始微裂纹各向异性分布的影响

初始微裂纹分布对岩石的初始力学特性和渗透性有重要影响。受构造作用影响, 岩石内部微裂纹可能不呈初始各向同性分布, 而优先沿某一方向分布。为此, 本节对初始微裂纹优先呈水平分布的情况开展了研究, 注入流量为 0.4 L/s, 现场水平与竖直应力分别为 14, 10 MPa。受初始微裂纹优先水平发育影响, 岩石初始渗透性各向异性特征显著, 水平方向渗透率为  $1.5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ , 而垂直方向渗透率为  $1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 。

图 13 给出了初始微裂纹优先呈水平分布时注水压力随时间的变化过程曲线。由图 13 可知, 初始微裂纹分布特征对注水压力影响较大, 初始微裂纹优先水平发育时注水压力计算值明显大于各向同性发育的情况。注水结束时, 考虑初始微裂纹优先水平发育的计算区域损伤与压力分布规律如图 14 所示。受初始微裂纹优先水平发育影响, 岩石损伤与压力增高区各向异性特征明显, 主要沿水平方向发展, 表明注入流体主要沿微裂纹优先发育方向流动并导致岩石破坏。与各向同性情况结果(图 11)相比, 初始微裂纹各向异性分布对流体注入引起的岩石损伤与压力增高的各向异性响应影响显著。

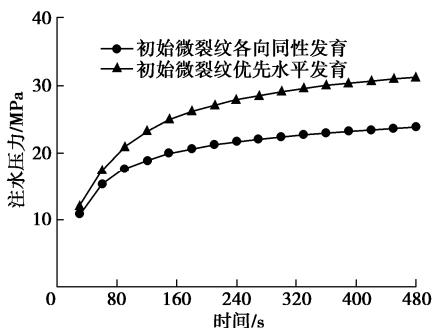


图 13 初始微裂纹分布对注水压力变化过程的影响

Fig. 13 Evolution of injection pressure with influences of distribution of initial microcracks

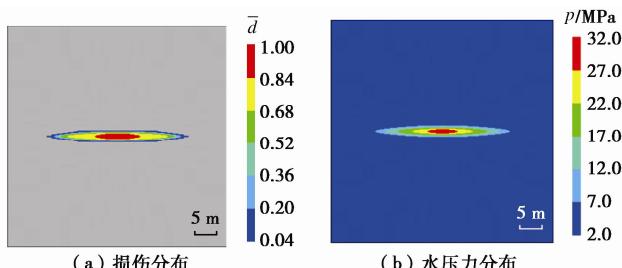


图 14 初始微裂纹优先水平发育时最终时刻损伤与压力分布

Fig. 14 Distribution contours of damage and pressure at final time with initial preferentially horizontally developed microcracks

初始微裂纹优先水平发育情况下注水最终时刻压力和损伤沿剖面  $P_h$  和  $P_v$  的变化规律如图 15 所示。由图 15 可知, 随着距注水点距离的增大, 损伤密度和增

高的水压力沿剖面  $P_v$  迅速减小, 而沿剖面  $P_h$  减小则明显变缓。损伤区域沿剖面  $P_h$  的范围(约 17.9 m)明显大于剖面  $P_v$ (约 1.8 m), 初始微裂纹优先水平发育明显增强岩石水压致裂沿水平方向的发展。由此可见, 准确表征岩石内部微裂纹等细观结构的分布特征对更好地模拟岩石的注水响应非常重要。

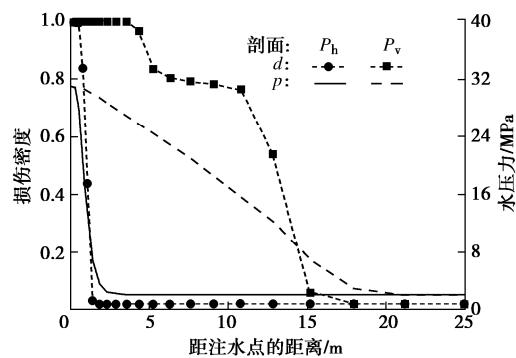


图 15 初始微裂纹水平发育时注水点周围压力与损伤变化规律

Fig. 15 Variation of pressure and damage around injection point with initial horizontally developed microcracks

## 3 结 论

本文根据水力耦合作用下岩石的细观损伤本构模型与损伤诱发渗透性演化方程, 建立了基于 TOUGHREACT 的岩石水力损伤耦合数值模型, 并采用已有岩石注水试验成果进行了验证, 同时对现场尺度下影响岩石注水响应的因素进行了应用模拟研究, 得到以下两点结论。

(1) 同时考虑微裂纹滑移剪胀、损伤扩展和法向压缩闭合等细观力学行为, 岩石水力损伤耦合模型可较好地反映岩石内部微结构变化对宏观力学与有效渗透性以及水流流动过程的影响。

(2) 岩石注水响应数值模拟研究表明, 本文提出的数值模型可较好地模拟岩石注水响应。注水引起的岩石损伤与压力增加响应受注入流量、现场应力水平以及初始微裂纹分布的影响。各向异性现场应力条件下, 呈椭圆形的损伤和压力增高区均在较大现场应力方向发育范围更大, 且随着注入流量增加而迅速增大。而现场应力各向同性时, 损伤与压力增高区在空间上近似呈圆形分布。初始微裂纹各向异性分布可明显增强流体注入引起的岩石损伤与压力增高沿微裂纹优势方向发展, 岩石内部细观结构准确表征非常重要。

本文提出的岩石细观水力损伤耦合模型可很好地用于开展深部工程岩体水力损伤耦合全过程数值仿真模拟研究, 揭示岩石内部细观结构特征及水力损伤耦合效应对围岩工程扰动效应的影响, 为工程安全与性能评价提供支撑。此外, 考虑 TOUGHREACT 软件的

长处,研究成果还可进一步延扩开展考虑非等温条件下多场和多组分流体流动影响的耦合研究。

## 参考文献:

- [1] 陈益峰,胡冉,周创兵,等.热-水-力耦合作用下结晶岩渗透特性演化模型[J].岩石力学与工程学报,2013,32(11): 2185 - 2195. (CHEN Yi-feng, HU Ran, ZHOU Chuang-bing, et al. A permeability evolution model for crystalline rocks subjected to coupled thermo-hydro-mechanical loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2185 - 2195. (in Chinese))
- [2] WU G J, CHEN W E, RONG C, et al. Elastoplastic damage evolution constitutive model of saturated rock with respect to volumetric strain in rock and its engineering application[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 97: 103284.
- [3] 姚池,姜清辉,位伟,等.复杂裂隙岩体水-力耦合模型及溶质运移模拟[J].岩石力学与工程学报,2013,32(8): 1656 - 1665. (YAO Chi, JIANG Qing-hui, WEI Wei, et al. Numerical simulation of hydro-mechanical coupling and solute transport in complex fractured rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1656 - 1665. (in Chinese))
- [4] 胡亚元.基于混合物理论的饱和岩石弹塑性模型[J].岩土工程学报,2020,42(12): 2161 - 2169. (HU Ya-yuan. Elastoplastic model for saturated rock based on mixture theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(12): 2161 - 2169. (in Chinese))
- [5] 陈益峰,李典庆,荣冠,等.脆性岩石损伤与热传导特性的细观力学模型[J].岩石力学与工程学报,2011,30(10): 1959 - 1969. (CHEN Yi-feng, LI Dian-qing, RONG Guan, et al. A micromechanical model for damage and thermal conductivity of brittle rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 1959 - 1969. (in Chinese))
- [6] JIANG T, SHAO J F, XU W Y, et al. Experimental investigation and micromechanical analysis of damage and permeability variation in brittle rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(5): 703 - 713.
- [7] ZHU Q Z, SHAO J F. Micromechanics of rock damage: Advances in the quasi-brittle field[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(1): 29 - 40.
- [8] 刘武.考虑多尺度结构的贯通节理岩体损伤摩擦耦合模型[J].岩土工程学报,2018,40(1): 147 - 154. (LIU Wu. Coupled damage and friction model for persistent fractured rocks considering multi-scale structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 147 - 154. (in Chinese))
- [9] CHEN Y F, HU S H, ZHOU C B, et al. Micromechanical modeling of anisotropic damage-induced permeability variation in crystalline rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(5): 1775 - 1791.
- [10] 胡大伟,朱其志,周辉,等.脆性岩石各向异性损伤和渗透性演化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(9): 1822 - 1827. (HU Da-wei, ZHU Qi-zhi, ZHOU Hui, et al. Research on anisotropic damage and permeability evolutionary law for brittle rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1822 - 1827. (in Chinese))
- [11] LIU W, CHEN Y F, HU R, et al. A two-step homogenization-based permeability model for deformable fractured rocks with consideration of coupled damage and friction effects[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 89: 212 - 226.
- [12] DORMIEUX L, KONDO D. Micromechanics of damage propagation in fluid-saturated cracked media[J]. Revue Européenne De Génie Civil, 2007, 11(7/8): 945 - 962.
- [13] XIE N, ZHU Q Z, SHAO J F, et al. Micromechanical analysis of damage in saturated quasi brittle materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(6): 919 - 928.
- [14] ZHU Q Z. Strength prediction of dry and saturated brittle rocks by unilateral damage-friction coupling analyses[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 73: 16 - 23.
- [15] 朱其志,王岩岩,仇晶晶,等.准脆性岩石水力耦合不排水多尺度本构模型[J].河海大学学报:自然科学版,2018,46(2): 165 - 170. (ZHU Qi-zhi, WANG Yan-yan, QIU Jing-jing, et al. Multiscale hydro-mechanical constitutive model for quasi-brittle rocks under undrained condition[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2018, 46(2): 165 - 170. (in Chinese))
- [16] XU T F, SPYCER N, SONNENTHAL E, et al. TOUGHREACT Version 2.0: a simulator for subsurface reactive transport under non-isothermal multiphase flow conditions[J]. Computers & Geosciences, 2011, 37(6): 763 - 774.

- [17] HU C, LEMARCHAND E, DORMIEUX L, et al. Quasi-isotropic Biot's tensor for anisotropic porous rocks: experiments and micromechanical modelling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, **53**(19): 4031 - 4041.
- [18] CHEN Y F, WEI K, LIU W, et al. Experimental characterization and micromechanical modelling of anisotropic slates[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, **49**(9): 3541 - 3557.
- [19] ZHU Q Z, SHAO J F. A refined micromechanical damage-friction model with strength prediction for rock-like materials under compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2015, **60/61**: 75 - 83.
- [20] BAZANT Z P, OH B H. Efficient numerical integration on the surface of a sphere[J]. ZAMM Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1986, **66**(1): 37 - 49.
- [21] WU C F, ZHANG X Y, WANG M, et al. Physical simulation study on the hydraulic fracture propagation of coalbed methane well[J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, **150**: 244 - 253.
- [22] GAO Q, GHASSEMI A. Three dimensional finite element simulations of hydraulic fracture height growth in layered formations using a coupled hydro-mechanical model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, **125**: 104137.
- [23] YI L P, LI X G, YANG Z Z, et al. A fully coupled fluid flow and rock damage model for hydraulic fracture of porous media[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, **178**, 814 - 828.
- [24] 刘 武, 张振华, 叶晓东, 等. 层状岩体渗透特性多尺度演化模型研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊 2): 68 - 72.  
(LIU Wu, ZHANG Zhen-hua, YE Xiao-dong, et al. Multi-scale permeability evolution model for layered rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S2): 68 - 72. (in Chinese))

### 彩色插图索引

- DOI: 10.11779/CJGE202107002 一文彩色插图 ..... (后插 1)
- DOI: 10.11779/CJGE202107004 一文彩色插图 ..... (后插 2)
- DOI: 10.11779/CJGE202107005 一文彩色插图 ..... (后插 3)
- DOI: 10.11779/CJGE202107011 一文彩色插图 ..... (后插 4)
- DOI: 10.11779/CJGE202107012 一文彩色插图 ..... (后插 5)
- DOI: 10.11779/CJGE202107014 一文彩色插图 ..... (后插 5)
- DOI: 10.11779/CJGE202107015 一文彩色插图 ..... (后插 7)
- DOI: 10.11779/CJGE202107016 一文彩色插图 ..... (后插 8)