

DOI: 10.11779/CJGE20240449

一种新的岩石各向异性蠕变-渗透率模型

刘雪莹^{1,2}, 俞 缙^{*1}, 周先齐³, 姚 玮³, 任崇鸿¹, 蔡燕燕¹

(1. 华侨大学福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021; 2. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;

3. 厦门理工学院土木工程与建筑学院, 福建 厦门 361024)

摘 要: 地下工程服役期较长, 富水环境下围岩蠕变变形加剧, 三向应力下围岩渗透性各向异性特征凸显, 为了描述围岩蠕变过程中渗透率各向异性特征, 将岩石简化为立方体模型, 结合蠕变曲线特征分阶段建立岩石正交各向异性蠕变-渗透率模型。黏弹性阶段定义裂隙与岩石的黏滞系数比、引入侧向影响系数表示侧向应力对裂隙开度影响, 黏塑性阶段引入表示裂隙对渗流通道影响的修正系数, 结合岩石各向异性蠕变损伤模型、立方定律、含裂隙岩石渗透率方程, 建立岩石正交各向异性蠕变-渗透率模型。利用真三轴条件下岩石蠕变-渗流试验结果对各向异性蠕变-渗透率模型进行验证, 模拟了不同条件下渗透率演化。结果表明: 与传统 Kozeny-Carman(K-C)模型及已有各向异性蠕变-渗透率模型相比, 提出的正交各向异性蠕变-渗透率模型精度更高, 可以描述黏弹性阶段渗透率因岩石孔裂隙逐渐被压密而逐渐降低、加速蠕变阶段渗透率在裂隙逐渐汇聚影响下突增的变化趋势。对正交各向异性蠕变-渗透率模型的关键参数进行了敏感性分析, 随着裂隙与岩石的黏滞系数比增加, 渗透率衰减越快, 渗透率稳定值越低, 随着侧向影响系数越高渗透率初始衰减速率越高, 渗透率稳定值越低; 黏塑性阶段修正系数越高, 加速蠕变阶段渗透率开始大幅增加。

关键词: 蠕变-渗流; 蠕变损伤模型; 渗透率模型; 正交各向异性

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)02-0275-09

作者简介: 刘雪莹(1992—)女, 博士, 讲师, 主要从事岩土力学与地下工程方面研究工作。E-mail: lxy_920818@163.com。

An anisotropic creep-permeability model for rock

LIU Xueying^{1,2}, YU Jin¹, ZHOU Xianqi³, YAO Wei³, REN Chonghong¹, CAI Yanyan¹

(1. Fujian Engineering Technology Research Center for Tunnel and Underground Space, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 3. School of Civil Engineering and

Architecture, Xiamen Institute of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: The service life of underground engineering is so long that the creep deformation of the surrounding rock can be intensified in the water environment. The permeability shows an anisotropic trend under the three-dimension stresses. The rock is simplified as a cube model, and a rock creep permeability model is established in stages based on the creep characteristics. At the viscoelastic stage, the ratio of viscosity coefficients between cracks and rocks is defined, and a lateral influence coefficient is introduced to represent the influence of lateral stress on crack opening. In the viscoplastic stage, a correction coefficient is defined to represent the influences of cracks on seepage channels. An anisotropic creep-permeability model is established combined with the anisotropic creep damage model for rock, cubic law, and the permeability model for fractured rock. The creep-seepage tests under true triaxial conditions are performed, and the anisotropic creep-permeability model is validated. The parameters can be determined and the permeability evolution under different conditions is analyzed. The proposed model shows the higher accuracy by comparing with the traditional K-C model and the previously anisotropic creep-permeability model. It can be used to describe the trend that the permeability decreases due to the gradual compaction of pores and cracks at the viscoelastic stage, and it increases suddenly caused by the gradual convergence of cracks at the accelerated creep stage. The sensitivity analysis is conducted on the parameters in the anisotropic creep-permeability model. As the viscosity coefficient ratio increases, the permeability decays fast and the stable permeability decreases. As the viscosity coefficient increases, the initial decay rate of permeability increases, and the stable permeability decreases. At the accelerated creep stage, as the correction coefficient increases, the permeability increases significantly.

Key words: creep-seepage; creep model; permeability model; orthogonal anisotropy

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (V2444220); 国家自然科学基金项目 (52374090, 42077254); 福建省科技计划项目 (2022Y0029, 2022J0014)

收稿日期: 2024-05-09

*通信作者 (E-mail: bugyu0717@163.com)

0 引言

大量地下工程由于围岩随时间推移产生较大蠕变变形而出现失稳破坏,富水环境下围岩更易发生蠕变变形^[1],并导致渗透性变化,诱发渗漏水事故,因此研究蠕变过程中渗透率演化规律对防治地下工程灾害有重要理论与工程意义。

国内外学者从试验角度针对蠕变、渗透率演化开展了深入研究。Liu 等^[2-3]、Zhang 等^[4]、王如宾等^[5]、张玉等^[6]分别研究了泥岩、碎屑砂岩、变质角砾岩、破碎带砂岩蠕变过程中渗透率演化规律。蔡婷婷等^[7]研究了不同温度与应力水平条件下煤岩蠕变过程中渗流规律,指出温度升高引起煤岩蠕变起始阈值降低、并加剧煤岩蠕变变形。Xu 等^[8]、Yang 等^[9]研究指出蠕变过程中渗透率与体应变具有较好一致性,并将二者随时间变化过程划分了 4 个阶段。马丹等^[10]针对断层破碎带开展了蠕变-冲蚀耦合试验,研究结果表明突水可分为初始期、冲蚀主控期、蠕变主控期,蠕变主控期间岩体变形导致围岩失稳。王凯等^[11]开展了不同路径下含瓦斯复合煤岩体渗透率演化规律。岳少飞等^[12]开展了不同加载速率条件下无烟煤的分级加载蠕变试验,研究了硬化损伤特征。

在理论方面,于冰冰等^[13]根据时间与应力将蠕变曲线划分为瞬时蠕变、减速蠕变、等速蠕变及加速蠕变阶段,引入瞬时塑性体、村山体、CYJ 体建立了一维及三维非线性蠕变模型以描述蠕变各阶段特征。程爱平等^[14-15]针对胶结充填体开展了分级蠕变试验,并监测了超声波变化规律,利用波速定义了损伤,构建了考虑硬化-损伤特征的蠕变本构模型。Liu 等^[16]基于统计损伤理论,提出了真三轴各向异性蠕变模型。康红普等^[17]将改进的伯格斯体、黏塑性体和应变软化塑性体串联,以描述围岩稳定与非稳定蠕变、流变损伤和流变扩容特征。贾善坡等^[18]通过开展室内试验分析了蠕变过程中黏土岩渗透率变化规律,基于 K-C 方程提出了渗透率表达式,并将该公式应用至实际地下工程进行了数值计算。李祥春等^[19]研究了蠕变过程中煤岩渗透率变化规律,提出了以轴向应变为自变量的渗透率经验表达式,参数较少但缺少一定理论参考。Zhou 等^[20]分析了煤岩卸围压蠕变过程中渗透率变化规律,基于 K-C 方程以体应变为自变量建立了渗透率表达式,具有较高精度,但由于以应变为自变量难以反映其对应的应力状态。Zhou 等^[21]考虑了基质与裂隙间相互作用,并引入内膨胀系数,建立了黏弹性阶段渗透率模型。刘帅奇等^[22]考虑了裂缝蠕变变形对渗透率影响,得到非线性黏弹塑性模型下裂隙面刚度表达

式,推导出渗透率随时间的演化规律。张雷等^[23]结合考虑体积蠕变的分数阶蠕变模型,考虑了黏塑性变形与裂隙开度关系,基于火柴棍模型,建立了考虑蠕变影响的渗透率模型。王路军等^[24]通过相似模拟试验与三轴循环加卸载渗流耦合试验,提出了突渗和拓扑的力学定义,建立了突渗的逾渗模型。元宪寅^[25]提出了各向异性蠕变-渗透率模型,该模型将蠕变段视为初始值,且仅考虑了黏弹性阶段,适用范围有限。

现有蠕变-渗透率模型多基于各向同性假设,以孔隙度、轴向应变、体变为自变量。实际上三向应力下渗透率呈各向异性特征,忽略渗透率各向异性变化易造成渗流路径预测不准,诱发渗漏水事故。蠕变应力与时间是渗透率变化的间接原因,二者引起岩石内部孔/裂隙结构闭合或连接、贯通进而渗流通道演化是渗透率各向异性变化的直接原因。因此,本文首先建立各向异性蠕变损伤模型以描述岩石蠕变特征,再以应变为桥梁,从三向应力下裂隙开度变化出发,建立正交各向异性蠕变-渗透率模型,为预测渗流路径、渗流量提供理论基础,对地下工程设计、施工及长期稳定有重要意义。

1 各向异性蠕变损伤模型

典型蠕变曲线一般包括三阶段,瞬时蠕变、稳定蠕变、加速蠕变,西原模型能描述蠕变各阶段特征而被广泛使用,本节基于西原模型,建立岩石各向异性蠕变损伤模型。对于应力引起的瞬时应变,根据广义胡克定律,瞬时应变为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^{\text{ins}} = \mathbf{C}_{ijkl} \boldsymbol{\sigma}_{kl} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^{\text{ins}}$ 为瞬时应变张量; $\mathbf{C}_{ijkl}$ 为弹性刚度矩阵; $\boldsymbol{\sigma}_{kl}$ 为应力张量。

对于黏弹性阶段,提出黏弹性参数具有各向异性特征,黏弹性阶段蠕变应变张量为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^{\text{e}} = \frac{\mathbf{S}_{ij}}{2G_{ij}^{\text{e}}} \left[1 - \exp \left(-\frac{G_{ij}^{\text{e}}}{\eta_{ij}^{\text{e}}} t \right) \right] \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^{\text{e}}$ 为黏弹性应变张量; $\mathbf{S}_{ij}$ 为应力偏张量; G_{ij}^{e} , η_{ij}^{e} 分别为黏弹性阶段剪切模量和黏滞系数。

当蠕变应力水平较高甚至超过长期强度,蠕变曲线呈典型非线性特征,西原模型仅能描述黏塑性阶段线性变化,而 Pernzyna 过应力理论能较好描述蠕变非线性趋势^[26-27],因此,本文采用 Pernzyna 过应力理论定义黏塑性应变以代替经典西原模型中黏塑性元件模型,其黏塑性应变率表达式为

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij}^{\text{p}} = \frac{1}{\eta_{ij}^{\text{p}}} \langle f \rangle \frac{\partial Q}{\partial \boldsymbol{\sigma}_{ij}} \quad (3)$$

式中, $\langle f \rangle = \begin{cases} \left(\frac{f}{f_0}\right)^a & f > 0 \\ 0 & f \leq 0 \end{cases}$, 其中, f_0 为屈服函数的初

始值, 可取为 1; a 为常数, 且一般取 1。 f 为过应力, 与屈服函数相关, 常用的屈服函数有主要有 Mohr-Coulomb、Hoek-Brown(H-B)、Drucker-Prager(D-P)、Mogi-Coulomb 等。其中, Mohr-Coulomb 与 H-B 准则忽略了中间主应力的影响, D-P 准则考虑了中间主应力但偏保守, Mogi-Coulomb 的适用性较好^[28], 其具体表达式如下:

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{\sqrt{2} \sin \varphi}{3} (\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{2\sqrt{2}}{3} c \cos \varphi \quad (4)$$

式中, τ_{oct} 为八面体剪应力,

$$\tau_{\text{oct}} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} / 3 \quad (5)$$

式(3)中 $\frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}}$ 体现了流动方向, Q 为势函数,

为便于计算采用关联流动法则, 即 $Q=f$ 。

在黏塑性阶段, 岩石裂隙萌生、发育、汇聚、连通, 损伤程度逐渐加剧, 变形随之发展。因此引入蠕变损伤变量表示岩石内部损伤累积, 考虑损伤的黏滞系数为:

$$\eta_{ij}^p(D_{ij}^p) = (1 - D_{ij}^p) \eta_{ij}^p \quad (6)$$

式中: η_{ij}^p , $\eta_{ij}^p(D_{ij}^p)$ 分别为初始及考虑损伤的黏滞系数。

统计损伤理论是通过引入代表性微元体概念, 假设岩石内部孔裂隙呈非均匀分布, 采用损伤微元体数量与微元体总量描述材料损伤程度。假设岩石微元体强度服从 Weibull 分布, 概率密度函数为^[29-32]

$$f(F) = \frac{m}{F_0} \left(\frac{F}{F_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \quad (7)$$

式中: m , F_0 为分布参数; F 为微元体强度, 可选取不同强度准则, 考虑到采用应变表示的便利性, 本文以应变作为分布变量定义损伤变量, 概率密度函数表示为

$$f(\varepsilon) = \frac{m}{\varepsilon_0} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m\right] \quad (8)$$

微元体不断破坏引起了岩石材料损伤, 将荷载作用下破坏的微元体数量记为 N_f , 损伤变量可以表示为破坏的微元体数量与微元体总量的比:

$$D = \frac{N_f}{N} \quad (9)$$

式中: D 为损伤变量; N 为总微元体数量。

在任意区间 $[\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon]$, 破坏的微元体数量为 $Nf(\varepsilon)d\varepsilon$, 当加载至任意应力水平, 破坏的微元体数量

为

$$N_f = \int_0^\varepsilon Nf(\varepsilon)d\varepsilon = N \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m\right) \right] \quad (10)$$

损伤变量表示为

$$D = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m\right) \quad (11)$$

三轴压缩条件下侧向应变为张拉应变, 一般表示为负值, 为保证分布变量为正值, 以各向黏塑性应变的绝对值作为分布变量, 具体表示为

$$D_{ij}^p = 1 - \exp\left(-\left(\frac{|\varepsilon_{ij}^p|}{\varepsilon_{ij0}^p}\right)^{m_{ij}^p}\right) \quad (12)$$

式中: D_{ij}^p 为蠕变损伤变量; m_{ij}^p , ε_{ij0}^p 分别为蠕变分布参数。

式(12)不便于积分求解蠕变应变, 文献[27]指出可采用多项式近似表示蠕变应变, 各向蠕变应变表示为

$$\varepsilon_{ij}^p(t) = a_{ij0} + a_{ij1}t + \cdots + a_{ijn}t^n \quad (13)$$

式中: n 为多项式幂指数; a_{ijn} 为常数。

对于稳定蠕变阶段, 蠕变速率衰减至稳定, 式(13)简化为

$$\varepsilon_{ij}^p(t) = a_{ij0} \quad (14)$$

对于加速蠕变阶段, 式(13)简化为

$$\varepsilon_{ij}^p(t) = a_{ij0} + a_{ij1}t \quad (15)$$

将式(6), (12), (15)代入式(3), 则黏塑性应变率为

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{\langle f \rangle \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}}{\eta_{ij}^p \exp\left[-\left(a_{ij0}/\varepsilon_{ij0}^p + a_{ij1}t/\varepsilon_{ij0}^p\right)^{m_{ij}^p}\right]} \quad (16)$$

令式(16)中 $a_{ij0}/\varepsilon_{ij0}^p = \alpha_{1,ij}$, $a_{ij1}/\varepsilon_{ij0}^p = \alpha_{2,ij}$, 式(16)可改写为

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{\langle f \rangle \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}}{\eta_{ij}^p \exp\left[-(\alpha_{1,ij} + \alpha_{2,ij}t)^{m_{ij}^p}\right]} \quad (17)$$

综上, 岩石各向异性蠕变损伤模型为

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} \varepsilon_{ij}^{\text{ins}} + \frac{S_{ij}}{2G_{ij}^e} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_{ij}^e}{\eta_{ij}^e} t\right) \right] & (f \leq 0) \\ \varepsilon_{ij}^{\text{ins}} + \frac{S_{ij}}{2G_{ij}^e} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_{ij}^e}{\eta_{ij}^e} t\right) \right] + \int \frac{\langle f \rangle \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}}{\eta_{ij}^p \exp\left[-(\alpha_{1,ij} + \alpha_{2,ij}t)^{m_{ij}^p}\right]} dt & (f > 0) \end{cases} \quad (18)$$

2 各向异性蠕变-渗透率模型

岩石由基质与内部大量孔/裂隙构成,有学者将其视为双重介质,认为其具有两种渗透率与孔隙率,也有学者认为基质渗透率太低,因此忽略基质渗透率,仅考虑裂隙渗透率。本节围绕渗透率各向异性特征,仅考虑裂隙渗透率,假设应力、应变、渗透率主轴重合,建立正交各向异性蠕变-渗透率模型。

如图 1 所示,将岩石简化为立方体模型,基质被正交裂隙均匀分割为正方体形式的单元体,基质单元初始宽度为 a , 各向裂隙宽度分别为 b_x , b_y , b_z 。

岩石初始孔隙率可表示为

$$\phi_0 \approx \frac{b_{x0}}{a} + \frac{b_{y0}}{a} + \frac{b_{z0}}{a} \quad (19)$$

式中: ϕ_0 为初始孔隙率, b_{x0} , b_{y0} , b_{z0} 为初始裂隙宽度。对于初始各向同性岩石, $b_{x0}=b_{y0}=b_{z0}=b_0$ 。

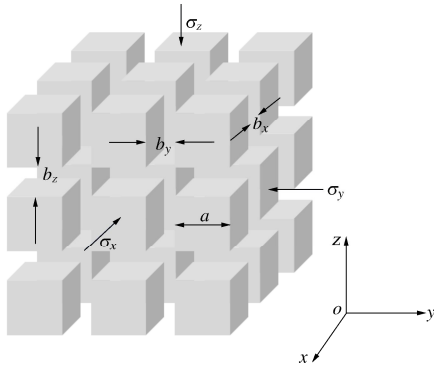


图 1 岩石简化示意图

Fig. 1 Simplified schematic diagram of rock

2.1 黏弹性阶段渗透率模型

以单裂隙为例推导三向应力下裂隙开度变化, σ_y 为该裂隙的法向应力, σ_x 与 σ_z 为侧向应力, 此处定义裂隙压缩为正、拉伸为负, 如图 2 所示。

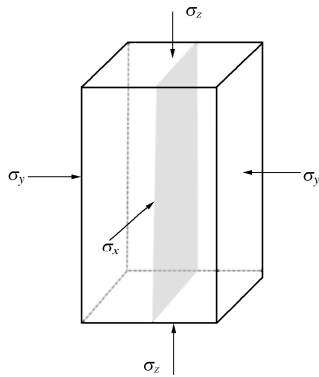


图 2 三维应力状态下裂隙渗流模型

Fig. 2 Seepage model for a fracture under 3D stress
在法向应力 σ_y 作用下裂隙开度为^[33]

$$b_y = b_0 \exp(-\varepsilon_y^f) = b_0 \exp\left(-\frac{\sigma_y}{E^f}\right) \quad (20)$$

式中: b_y 为在法向应力作用下的裂隙开度; b_0 为初始裂隙开度; E^f 为裂隙弹性模量; ε_y^f 为法向应力作用下裂隙法向应变。将裂隙弹性模量与岩石弹性模量建立联系, 表示为

$$E^f = E / \xi^E \quad (21)$$

式中: ξ^E 为裂隙与岩石的弹性模量比。

式 (20) 中裂隙法向应变可以用岩石应变表示:

$$\varepsilon_y^f = \frac{\sigma_y}{E^f} = \xi_y^E \varepsilon_y \quad (22)$$

将该线性关系推广至蠕变阶段, 黏弹性阶段裂隙法向应变为

$$\varepsilon_y^{fe} = \xi_y^E \varepsilon_y^e \quad (23)$$

式中: ε_y^{fe} 为黏弹性阶段裂隙法向应变; ξ_y^E 为黏弹性阶段裂隙与岩石应变比值; ε_y^e 为黏弹性阶段岩石蠕变应变。

参考文献[34]的双重介质蠕变模型, 可证明式 (23) 合理性。裂隙的黏弹性应变张量表示为

$$\varepsilon_{ij}^{fe} = \frac{S_{ij}}{2G_{ij}^{fe}} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_{ij}^{fe}}{\eta_{ij}^{fe}} t\right) \right] \quad (24)$$

式中: G_{ij}^{fe} , η_{ij}^{fe} 分别为裂隙黏弹性剪切模量及黏滞系数。

根据式 (2), (24), 裂隙与岩石蠕变应变比值表示为

$$\frac{\varepsilon_{ij}^{fe}}{\varepsilon_{ij}^e} = \frac{\frac{S_{ij}}{2G_{ij}^{fe}} \left(1 - \exp\left(-\frac{G_{ij}^{fe}}{\eta_{ij}^{fe}} t\right) \right)}{\frac{S_{ij}}{2G_{ij}^e} \left(1 - \exp\left(-\frac{G_{ij}^e}{\eta_{ij}^e} t\right) \right)} \quad (25)$$

对式 (25) 中指数项进行一阶泰勒展开, 即

$$1 - \exp\left(-\frac{G_{ij}^{fe}}{\eta_{ij}^{fe}} t\right) \sim \frac{G_{ij}^{fe}}{\eta_{ij}^{fe}} t \quad (26)$$

将其代入式 (25), 化简得

$$\frac{\varepsilon_{ij}^{fe}}{\varepsilon_{ij}^e} = \frac{\eta_{ij}^e}{\eta_{ij}^{fe}} = \xi_{ij}^e \quad (27)$$

式 (27) 与式 (23) 一致, 可知参数 ξ_{ij}^e 有明确物理意义, 表示裂隙与岩石的黏滞系数比。

此处以 y 方向为例, 式 (27) 可表示为

$$\frac{\varepsilon_y^{fe}}{\varepsilon_y^e} = \frac{\eta_y^e}{\eta_y^{fe}} = \xi_y^e \quad (28)$$

综上, 黏弹性阶段法向应力作用下裂隙开度的变化量为

$$\Delta b_y^e = -b_0 \left[1 - \exp(-\xi_y^e \varepsilon_y^e) \right] \quad (29)$$

侧向应力作用下泊松效应使岩石产生法向膨胀变形, 裂隙受到挤压、开度减小。学者对于侧向应力对

裂隙开度影响尚未形成统一认识。有学者将侧向应力等效为法向应力, 认为其直接作用于裂隙, 可以根据应力引起基质、岩石应变求解得到裂隙应变^[35], 文献^[36]指出侧向应力能够引起法向应变但不会产生等效法向应力。有学者根据弹性力学分别计算应力引起的基质与岩体应变, 根据二者关系求解裂隙开度变化, 这一方法目前比较常见, 忽略基质泊松比与岩石泊松比的差异, 得到渗透率随侧向应力增加而增加的趋势, 引起较大误差并且难以解释试验现象。实际上, 侧向应力增加引起渗透率下降。文献^[37]认为侧向应力引起的岩石闭合类似于吸附膨胀引起的裂隙内闭合, 引入影响系数以体现骨架变形对裂隙变形的影响。

综上, 笔者认为侧向应力对裂隙开度影响与法向应力类似, 引入表示侧向应力对裂隙开度的侧向影响参数, 侧向应力下裂隙开度变化量为

$$\Delta b_{sy}^e = -a\beta_y^e(\varepsilon_x^e + \varepsilon_z^e) \quad (30)$$

式中: Δb_{sy}^e 为黏弹性阶段侧向应力影响下裂隙开度变化量; β_y^e 为侧向影响系数; ε_x^e 和 ε_z^e 分别为 x , y 方向的黏弹性应变。

在侧向应力下裂隙的法向应变为

$$\varepsilon_{sy}^e = \frac{\Delta b_{sy}^e}{b_0} = -\frac{3\beta_y^e}{\phi_0}(\varepsilon_x^e + \varepsilon_z^e) \quad (31)$$

根据立方定律, 得 z 方向黏弹性阶段渗透率表达式为

$$\frac{k_z}{k_{z0}} = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{\Delta b_x}{b_x} \right)^3 + \left(1 + \frac{\Delta b_y}{b_y} \right)^3 \right] \quad (32)$$

将式(28), (31)代入式(32), 可得黏弹性阶段各向渗透率表达式为

$$\frac{k_z}{k_{z0}} = \frac{1}{2} \left\{ \left[\exp(-\xi_x^e \varepsilon_x^e) - \frac{3\beta_x^e}{\phi_0}(\varepsilon_y^e + \varepsilon_z^e) \right]^3 + \left[\exp(-\xi_y^e \varepsilon_y^e) - \frac{3\beta_y^e}{\phi_0}(\varepsilon_x^e + \varepsilon_z^e) \right]^3 \right\}, \quad (33)$$

$$\frac{k_x}{k_{x0}} = \frac{1}{2} \left\{ \left[\exp(-\xi_y^e \varepsilon_y^e) - \frac{3\beta_y^e}{\phi_0}(\varepsilon_x^e + \varepsilon_z^e) \right]^3 + \left[\exp(-\xi_z^e \varepsilon_z^e) - \frac{3\beta_z^e}{\phi_0}(\varepsilon_x^e + \varepsilon_y^e) \right]^3 \right\}, \quad (34)$$

$$\frac{k_y}{k_{y0}} = \frac{1}{2} \left\{ \left[\exp(-\xi_x^e \varepsilon_x^e) - \frac{3\beta_x^e}{\phi_0}(\varepsilon_y^e + \varepsilon_z^e) \right]^3 + \left[\exp(-\xi_z^e \varepsilon_z^e) - \frac{3\beta_z^e}{\phi_0}(\varepsilon_x^e + \varepsilon_y^e) \right]^3 \right\} \quad (35)$$

2.2 黏塑性阶段渗透率模型

当蠕变进入黏塑性阶段, 岩石内部裂隙萌生、发

育、连通。部分裂隙与主裂隙间连通性较差, 如图3中的死裂隙, 对形成有效渗流通道贡献较少; 而一些裂隙与其他裂隙连通, 如图3中融合裂隙, 形成有效连通裂隙, 是主要渗流通道。因此, 引入修正系数表示裂隙开度对渗流通道的影响, 基于岩石黏塑性应变与裂隙开度的密切关系^[23], 建立黏塑性阶段渗透率模型。

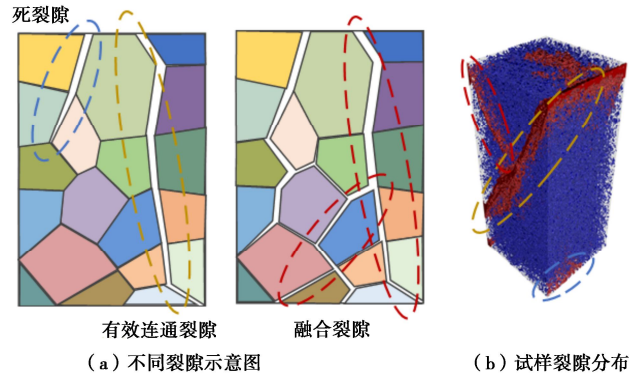


图3 不同类型裂隙

Fig. 3 Different types of cracks

黏塑性阶段裂隙开度的变化量表示为

$$\Delta b_y^p = \frac{b_y^p \omega_y^p \varepsilon_y^p}{\phi_0} \quad (36)$$

式中: ω_y^p 为修正系数; ε_y^p 为岩石黏塑性应变; Δb_y^p 为黏塑性阶段裂隙开度变化量。

黏塑性阶段裂隙应变表示为

$$\varepsilon_y^p = \frac{\omega_y^p \varepsilon_y^p}{\phi_0} \quad (37)$$

式中: ω_y^p 为修正系数; ε_y^p 为黏塑性阶段裂隙应变。

根据立方定律, 黏塑性阶段的渗透率表示为

$$\frac{k_x}{k_{x0}} = \frac{1}{2} \left\{ \left[\exp(-\xi_y^e \varepsilon_y^e) - \frac{3\beta_y^e}{\phi_0}(\varepsilon_x^e + \varepsilon_z^e) \right]^3 + \left[\exp(-\xi_z^e \varepsilon_z^e) - \frac{3\beta_z^e}{\phi_0}(\varepsilon_x^e + \varepsilon_y^e) \right]^3 \right\} + \frac{1}{2} \sum_{n=y,z} \left(1 + \frac{\omega_n^p \varepsilon_n^p}{\phi_0} \right)^3, \quad (38)$$

$$\frac{k_y}{k_{y0}} = \frac{1}{2} \left\{ \left[\exp(-\xi_x^e \varepsilon_x^e) - \frac{3\beta_x^e}{\phi_0}(\varepsilon_y^e + \varepsilon_z^e) \right]^3 + \left[\exp(-\xi_z^e \varepsilon_z^e) - \frac{3\beta_z^e}{\phi_0}(\varepsilon_x^e + \varepsilon_y^e) \right]^3 \right\} + \frac{1}{2} \sum_{n=x,z} \left(1 + \frac{\omega_n^p \varepsilon_n^p}{\phi_0} \right)^3, \quad (39)$$

$$\frac{k_z}{k_{z0}} = \frac{1}{2} \left\{ \left[\exp(-\xi_x^e \varepsilon_x^e) - \frac{3\beta_x^e}{\phi_0}(\varepsilon_y^e + \varepsilon_z^e) \right]^3 + \left[\exp(-\xi_y^e \varepsilon_y^e) - \frac{3\beta_y^e}{\phi_0}(\varepsilon_x^e + \varepsilon_z^e) \right]^3 \right\} + \frac{1}{2} \sum_{n=x,y} \left(1 + \frac{\omega_n^p \varepsilon_n^p}{\phi_0} \right)^3$$

$$\left[\exp(-\xi_y^e \varepsilon_y^e) - \frac{3\beta_y^e}{\phi_0} (\varepsilon_x^e + \varepsilon_z^e) \right]^3 + \frac{1}{2} \sum_{n=x,y} \left(1 + \frac{\omega_n^p \varepsilon_n^p}{\phi_0} \right)^3 \quad (40)$$

3 渗透率模型应用分析

3.1 渗透率模型验证

为了验证各向异性蠕变-渗透率模型有效性,笔者以砂岩为研究对象,开展了真三轴条件下蠕变-渗流试验,采用逐级加载方式,渗透压力为 3 MPa,具体应力水平设置、蠕变损伤模型参数详见文献[16]。

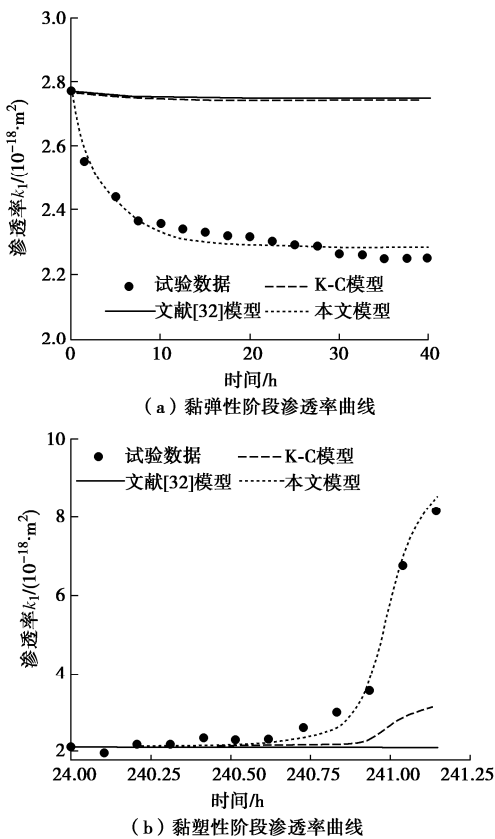


图 4 不同渗透率模型对比图

Fig.4 Comparison among different permeability models

利用通用全局优化算法,根据蠕变曲线确定蠕变损伤模型参数,再根据渗透率曲线确定其他参数,如表 1 所示。为了对比本文提出的各向异性渗透率模型与现有渗透率模型优劣,将本文模型与经典的 K-C 模型[18]及文献[25]中考虑蠕变的各向异性渗透率模型对比,以 $\sigma_3=5$ MPa, $\sigma_2=20$ MPa 条件下最大主应力方向渗透率 k_1 、中间主应力方向渗透率 k_2 为例,模型对比结果如图 4。在黏弹性、黏塑性阶段,根据 K-C 模型与文献[25]考虑蠕变的各向异性渗透率模型计算得到的理论值与试验值偏差较大,而本文提出的各向异

性蠕变-渗透率模型能较好描述黏弹性、黏塑性阶段渗透率响应变化,体现了本文提出的各向异性蠕变-渗透率模型优势显著。

表 1 $\sigma_3=5$ MPa, $\sigma_2=20$ MPa 条件下渗透率模型参数

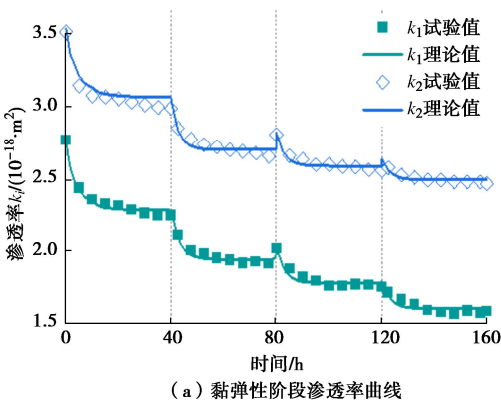
Table 1 Parameters of permeability model under $\sigma_3=5$ MPa and $\sigma_2=20$ MPa

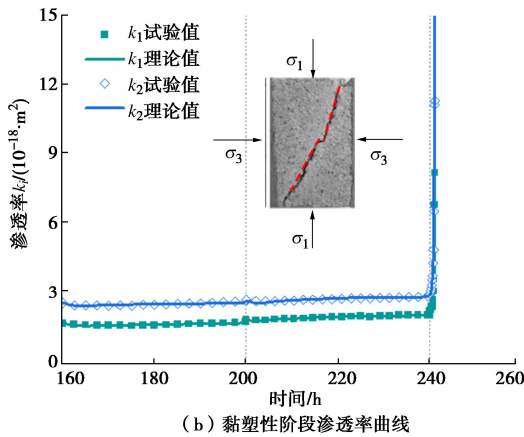
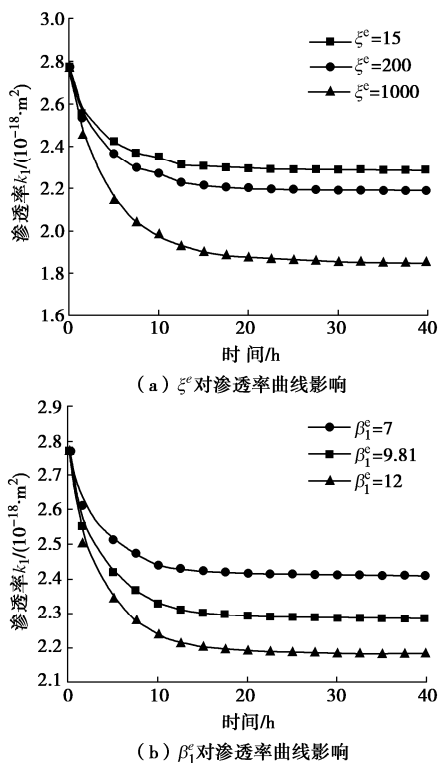
蠕变应力比	ξ^e	β_1^e	β_2^e	β_3^e	ω_1^p	ω_2^p	ω_3^p
0.4	18	9.81	9.81	9.81	11.01	13.85	13.85
0.5		4.18	4.95	4.95			
0.6		2.06	4.30	4.30			
0.7		0.94	3.37	3.37			
0.8							
0.9					8.72	8.72	8.72
0.95					0.81	2.11	2.11

从图 5 中可以看出,黏弹性阶段蠕变应力比为 0.4 时,渗透率理论值 k_1 , k_2 分别从 2.77×10^{-18} , 3.54×10^{-18} m^2 降低至 2.28×10^{-18} , 3.07×10^{-18} m^2 ; 当蠕变应力比为 0.7 时,渗透率理论值 k_1 , k_2 分别从 1.8×10^{-18} , 2.6×10^{-18} m^2 降低至 1.6×10^{-18} , 2.5×10^{-18} m^2 ,侧向影响系数 β_1^e 从 9.81 降低至 0.94, β_1^e 从 9.81 降低至 3.37。当 $\beta > 0$, 进入黏塑性蠕变阶段,中主应力方向上黏塑性应变相对较小,对渗透率贡献较小,假设该方向黏塑性应变对渗透率影响参数与最小主应力方向影响参数相同,即 $\omega_2^p = \omega_3^p$ 。当蠕变应力比为 0.8 时,渗透率理论值 k_1 , k_2 分别由 1.75×10^{-18} , 2.62×10^{-18} m^2 增加至 1.93×10^{-18} , 2.74×10^{-18} m^2 ,加速蠕变阶段时,裂隙迅速发展、形成宏观破裂面,渗透率理论值 k_1 、 k_2 急剧增加,由 2.11×10^{-18} , 2.85×10^{-18} m^2 增加至 1.7×10^{-17} , 2.3×10^{-17} m^2 ,增大了一个数量级,修正系数 ω_1^p , ω_2^p , ω_3^p 随着蠕变应力比增加而降低。本模型可以描述黏弹性阶段由于裂隙闭合致使渗透率减小的趋势以及黏塑性阶段也由于裂隙连通引起的渗透率激增趋势,并且模型也能够描述渗透率各向异性特征。

3.2 渗透率模型参数敏感性分析

以 $\sigma_3=5$ MPa, $\sigma_2=20$ MPa 条件为例,分析渗透率模型黏弹性阶段参数 ξ^e 、 β_1^e 黏塑性阶段修正参数 ω_1^p 对渗透率演化曲线影响,如图 6, 7 所示。



图5 $\sigma_3=5$ MPa, $\sigma_2=20$ MPa 蠕变条件下渗透率曲线Fig.5 Permeability curves under of $\sigma_3=5$ MPa and $\sigma_2=20$ MPa图6 黏弹性阶段参数 ζ^e , β_1^e 对渗透率演化曲线影响Fig. 6 Effects of parameters ζ^e and β_1^e on permeability curves at viscoelastic stages

从图6(a)中可以看出,随着 ζ^e 增加,裂隙黏滞系数越小,在三向应力下裂隙更容易发生变形,促使裂隙闭合程度增加,抑制了岩石中水的流动,渗透率衰减越快,蠕变末时刻稳定渗透率从 $2.32 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 减小至 $1.85 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 。本节以侧向影响系数 β_1^e 为例讨论侧向应力对渗透率演化曲线的影响,从图6(b)可以看出 β_1^e 越高渗透率初始衰减速率越高,稳定渗透率越低,表明侧向压力对渗透率的影响越大,随着 β_1^e 从7增加至12,稳定渗透率从 $2.41 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 降低至 $2.15 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 。在黏塑性阶段,以修正系数 ω_1^p 为例分析 ω_1^p 对渗透率影响,结果如图7所示。 ω_1^p 越高,稳定蠕变阶段渗透率增加幅度不大,随着岩石进入加速蠕变

阶段渗透率开始大幅增加,随着 ω_1^p 从7.81增加至11.81破坏时渗透率从 $7.2 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 增加至 $17.5 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 。

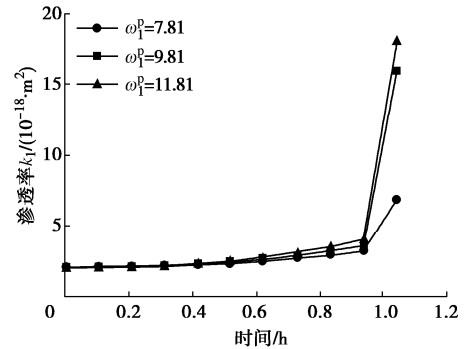


图7 黏塑性阶段修正系数对渗透率演化曲线影响

Fig. 7 Effects of correction parameter on permeability curves at viscoplastic stages

4 结 论

通过结合各向异性蠕变损伤模型、立方定律,建立了正交各向异性蠕变-渗透率模型,并验证模型的准确性,分析模型关键参数影响,得出以下3点结论。

(1) 黏弹性阶段分别考虑法向应力与侧向应力对裂隙开度的影响,引入黏滞系数比、侧向应力影响系数,模型能够描述渗透率因裂隙闭合呈衰减至稳定的趋势。

(2) 黏塑性阶段考虑裂隙连通程度影响有效渗流通道形成,引入修正系数,模型能够描述蠕变进入黏塑性阶段缓慢上升的趋势及加速蠕变阶段渗透率突增趋势。

(3) 对各向异性蠕变-渗透率模型参数进行了敏感性分析。黏弹性阶段黏滞系数比增加,渗透率衰减越快,渗透率稳定值越低;侧向影响系数越高,渗透率初始衰减速率越高,渗透率稳定值越低。黏塑性阶段修正系数越大,加速蠕变阶段渗透率突增趋势越剧烈。

参考文献:

- [1] 赵阳升. 岩体力学发展的一些回顾与若干未解之百年问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(7): 1297-1336. (ZHAO Yangsheng. Retrospection on the development of rock mass mechanics and the summary of some unsolved centennial problems[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(7): 1297-1336. (in Chinese))
- [2] LIU Z B, SHAO J F, XIE S Y, et al. Gas permeability evolution of clayey rocks in process of compressive creep test[J]. Materials Letters, 2015, 139: 422-425.
- [3] LIU Z B, SHAO J F. Strength behavior, creep failure and permeability change of a tight marble under triaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(3): 529-541.
- [4] ZHANG Y, SHAO J F, XU W Y, et al. Creep behaviour and

- permeability evolution of cataclastic sandstone in triaxial rheological tests[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2015, **19**(4): 496-519.
- [5] 王如宾, 徐卫亚, 王伟, 等. 坝基硬岩蠕变特性试验及其蠕变全过程中的渗流规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(5): 960-969. (WANG Rubin, XU Weiya, WANG Wei, et al. Experimental investigation on creep behaviors of hard rock in dam foundation and its seepage laws during complete process of rock creep[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(5): 960-969. (in Chinese))
- [6] 张玉, 徐卫亚, 赵海斌, 等. 渗流-应力-流变耦合作用下破碎带砂岩渗透演化规律试验研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, **38**(4): 154-161. (ZHANG Yu, XU Weiya, ZHAO Haibin, et al. Experimental investigation on permeability evolution of sandstone from fractured zone under coupling action of hydro-mechanical-creep[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, **38**(4): 154-161. (in Chinese))
- [7] 蔡婷婷, 冯增朝, 姜玉龙, 等. 不同温度应力下煤体蠕变中的渗流规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, **37**(增刊2): 101-107. (CAI Tingting, FENG Zengchao, JIANG Yulong, et al. Seepage evolution in coal creep under different temperatures and different stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, **37**(S2): 101-107. (in Chinese))
- [8] XU P, YANG S Q. Permeability evolution of sandstone under short-term and long-term triaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, **85**: 152-164.
- [9] YANG S Q, HU B. Creep and permeability evolution behavior of red sandstone containing a single fissure under a confining pressure of 30 MPa[J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1): 1900.
- [10] 马丹, 段宏宇, 张吉雄, 等. 断层破碎带岩体突水灾害的蠕变-冲蚀耦合力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, **40**(9): 1751-1763. (MA Dan, DUAN Hongyu, ZHANG Jixiong, et al. Experimental investigation of creep-erosion coupling mechanical properties of water inrush hazards in fault fracture rock masses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, **40**(9): 1751-1763. (in Chinese))
- [11] 王凯, 郭阳阳, 王刚, 等. 真三轴路径下含瓦斯复合煤岩体渗流及力学破坏特性[J]. *煤炭学报*, 2023, **48**(1): 226-237. (WANG Kai, GUO Yangyang, WANG Gang, et al. Seepage and mechanical failure characteristics of gas-bearing composite coal-rock under true triaxial path[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, **48**(01): 226-237. (in Chinese))
- [12] 岳少飞, 王开, 张小强, 等. 不同加载速率无烟煤蠕变特性及能量演化规律[J]. *煤炭学报*, 2023, **48**(8): 3060-3075. (YUE Shaofei, WANG Kai, ZHANG Xiaoqiang, et al. Creep properties and energy evolution of anthracite coal with different loading rates[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, **48**(8): 3060-3075. (in Chinese))
- [13] 于冰冰, 李清, 赵桐德, 等. 基于应力与时间双阈值的岩石全时态非线性蠕变损伤模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, **42**(8): 1928-1944. (YU Bingbing, LI Qing, ZHAO Tongde, et al. Full-time nonlinear creep damage model of fractured rock mass based on stress-time double threshold[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, **42**(8): 1928-1944. (in Chinese))
- [14] 程爱平, 付子祥, 刘立顺, 等. 胶结充填体蠕变硬化-损伤特征及非线性本构模型[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, **39**(3): 449-457. (CHENG Aiping, FU Zixiang, LIU Lishun, et al. Creep hardening-damage characteristics and nonlinear constitutive model of cemented backfill[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, **39**(3): 449-457. (in Chinese))
- [15] 程爱平, 戴顺意, 舒鹏飞, 等. 考虑应力水平和损伤的胶结充填体蠕变特性及本构模型[J]. *煤炭学报*, 2021, **46**(2): 439-449. (CHENG Aiping, DAI Shunyi, SHU Pengfei, et al. Creep characteristics and constitutive model of cemented backfill considering stress and damage[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, **46**(2): 439-449. (in Chinese))
- [16] LIU X Y, YU J, ZHANG J Z, et al. Anisotropic time-dependent deformation and damage constitutive model of rock under true triaxial compression[J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2024, **28**: 2177-2203.
- [17] 康红普, 伊康. 深部软岩巷道围岩扩容与流变特性模拟研究及应用[J]. *煤炭学报*, 2023, **48**(1): 15-33. (KANG Hongpu, YI Kang. Simulation study on dilatant and rheologic properties of soft rocks surrounding deep roadway and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, **48**(1): 15-33. (in Chinese))
- [18] 贾善坡, 陈卫忠, 于洪丹, 等. 泥岩隧道施工过程中渗流场与应力场全耦合损伤模型研究[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(1): 19-26. (JIA Shanpo, CHEN Weizhong, YU Hongdan, et al. Research on seepage-stress coupling damage model of Boom clay during tunneling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(1): 19-26. (in Chinese))
- [19] 李祥春, 张良, 赵艺良. 常规三轴压力下含瓦斯煤蠕变-渗流演化规律[J]. *工程科学与技术*, 2018, **50**(4): 55-62. (LI Xiangchun, ZHANG Liang, ZHAO Yiliang. Evolution of gas-filled coal creep-seepage under conventional triaxial compression[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, **50**(4): 55-62. (in Chinese))

- [20] ZHOU H W, WANG L J, RONG T L, et al. Creep-based permeability evolution in deep coal under unloading confining pressure[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, **65**: 185-196.
- [21] ZHOU H W, ZHANG L, WANG X Y, et al. Effects of matrix-fracture interaction and creep deformation on permeability evolution of deep coal[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, **127**: 104236.
- [22] 刘帅奇, 马凤山, 郭捷, 等. 致密页岩缝网蠕变-渗流耦合规律研究[J]. *工程地质学报*, 2020, **28**(增): 9-18. (LIU Shuaiqi, MA Fengshan, GUO Jie, et al. Study on the rules of creep-seepage coupling of dense shale fracturing network[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, **28**(S): 9-18. (in Chinese))
- [23] 张雷, 周宏伟, 王向宇, 等. 考虑蠕变影响的深部煤体分数阶渗透率模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(8): 1516-1524. (ZHANG Lei, ZHOU Hongwei, WANG Xiangyu, et al. Fractional permeability model for deep coal considering creep effect[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(8): 1516-1524. (in Chinese))
- [24] 王路军, 曹志国, 程建超, 等. 煤矿地下水库坝基层间岩体破坏及突渗力学模型[J]. *煤炭学报*, 2023, **48**(3): 1192-1208. (WANG Lujun, CAO Zhiguo, CHENG Jianchao, et al. Failure analysis of rock strata between upper and lower coals under underground reservoir in coal mine and its critical percolation model of jumping permeability[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, **48**(3): 1192-1208. (in Chinese))
- [25] 亓宪寅. 各向异性煤岩气-固耦合机理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017. (QI Xianyin. Study on Gas-Solid Coupling Mechanism of Anisotropic Coal and Rock[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese))
- [26] 刘文博, 张树光, 李若木. 一种基于能量耗散理论的岩石加速蠕变模型[J]. *煤炭学报*, 2019, **44**(9): 2741-2750. (LIU Wenbo, ZHANG Shuguang, LI Ruomu. Accelerated creep model of rock based on energy dissipation theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, **44**(9): 2741-2750. (in Chinese))
- [27] 沈才华, 张兵, 王文武. 一种基于应变能理论的加速蠕变本构模型[J]. *煤炭学报*, 2014, **39**(11): 2195-2200. (SHEN Caihua, ZHANG Bing, WANG Wenwu. A new accelerated creep constitutive model based on the strain energy theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, **39**(11): 2195-2200. (in Chinese))
- [28] 蒋邦友, 谭云亮, 王连国, 等. 基于 Mogi-Coulomb 准则的弹塑性损伤本构模型及其数值实现[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, **48**(4): 784-792. (JIANG Bangyou, TAN Yunliang, WANG Lianguo, et al. Development and numerical implementation of elastoplastic damage constitutive model for rock based on Mogi-Coulomb criterion[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, **48**(4): 784-792. (in Chinese))
- [29] REN C H, YU J, CAI Y Y, et al. A novel constitutive model with plastic internal and damage variables for brittle rocks[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, **248**: 107731.
- [30] REN C H, YU J, LIU X Y, et al. Cyclic constitutive equations of rock with coupled damage induced by compaction and cracking[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, **32**(5): 1153-1165.
- [31] REN C H, YU J, LIU S Y, et al. A plastic strain-induced damage model of porous rock suitable for different stress paths[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, **55**(4): 1887-1906.
- [32] YAO W, YU J, LIU X Y, et al. Experimental and theoretical investigation of coupled damage of rock under combined disturbance[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, **164**: 105355.
- [33] COOK N G W. Natural joints in rock: Mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1992, **29**(3): 198-223.
- [34] 张玉军, 琚晓冬. 双重孔隙-裂隙岩体中地下洞室稳定性的瞬弹-黏弹-黏塑性二维有限元分析[J]. *中国科学*, 2016, **46**(3): 276-285. (ZHANG Yujun, JU Xiaodong. 2D transient elastic-viscoelastic-viscoplastic FEM analyses for stability of underground cavern located in dual-pore-fracture rock mass[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2016, **46**(3): 276-285. (in Chinese))
- [35] 刘才华, 陈从新. 三轴应力作用下岩石单裂隙的渗流特性[J]. *自然科学进展*, 2007, **17**(7): 989-994. (LIU Caihua, CHEN Congxin. Seepage characteristics of rock single fracture under triaxial stress[J]. *Progress in Natural Science*, 2007, **17**(7): 989-994. (in Chinese))
- [36] 孔洋, 朱珍德, 阮怀宁. 三向应力作用下节理岩体渗流-应力耦合特性[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(6): 2008-2016. (KONG Yang, ZHU Zhende, RUAN Huaining. Stress-seepage coupling characteristics of jointed rock mass under three principal stresses[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(6): 2008-2016. (in Chinese))
- [37] 蒋长宝, 余塘, 段敏克, 等. 瓦斯压力和应力对裂隙影响下的渗透率模型研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, **49**(2): 115-121. (JIANG Changbao, YU Tang, DUAN Minke, et al. Study on permeability model under the influence of gas pressure and stress on fracture[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, **49**(2): 115-121. (in Chinese))