

· 水工岩石力学 ·

DOI:10.12454/j.jsuese.202500005



本刊网刊

基于损伤统计的砂岩三维蠕变本构模型

王流凯^{1,2}, 蔡国军^{1,2*}, 赵伟平^{1,2}, 胡 星^{1,2}

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 四川 成都 610059;
2. 成都理工大学 地质工程国家级实验教学示范中心, 四川 成都 610059)

摘要: 岩体蠕变对工程长期稳定性至关重要, 岩石是岩体的组成部分, 本构模型最能反映岩石蠕变过程的力学特征和变形规律, 利用 MTS-815 岩石刚性试验机和 STAC600-600 型岩石三轴流变试验机开展砂岩常规三轴压缩试验和分级蠕变试验, 借助 SMP 准则和 Weibull 分布函数建立损伤统计模型, 并验证模型准确性。采用损伤改进西原模型并引入裂隙塑性体, 建立砂岩三轴蠕变条件下的本构模型, 对模型参数进行优化并与其他本构模型进行对比。结果表明: 1) 利用 SMP 准则与 Weibull 分布函数推导的损伤变量能够有效描述砂岩三轴压缩与三轴蠕变条件下的损伤演化过程, 且损伤演化参数 u 、 m 与围压有着明显函数关系; 2) 将围压对本构模型相关变量的影响纳入构建的损伤变量后, 模型拟合结果与砂岩分级蠕变过程能够高度契合; 3) 本构模型中的相关参数 (包括泊松比等) 均推广至三维应用形式, 且裂隙塑性体的引入使模型不单适用于完整岩石。该模型在工程中具有一定实用性, 对其他类型岩石也具有参考价值。

关键词: 岩石蠕变; SMP 准则; 损伤变量; Weibull 分布; 西原模型

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)01-0145-11

岩石蠕变是应力和温度不变的情况下, 变形随时间增长的现象^[1]。深部工程中围岩的应力场和应变分布表现出显著的时间相关性。研究岩石蠕变特性具有重要意义, 本构关系能直观反映岩石变形破坏和力学响应, 建立适合的蠕变本构模型具有重要价值。

已有的本构模型强调对岩石加速蠕变阶段的描述, 主要分为 3 种。1) 采用非线性元件代替线性元件进行描述, 如康永刚等^[2]采用非正常黏壶替换模型中的定常黏壶, 提出了一种非正常 Burgers 模型; 王春萍等^[3]采用分数阶黏弹性元件替换 Burgers 模型中的黏性元件, 并在黏弹性元件上叠加损伤, 建立了裂隙花岗岩的非线性蠕变本构模型。2) 组合非线性元件与线性元件来描述, 如刘东燕等^[4]用串联的手段组合 Kelvin 模型与 Burgers 模型, 构建一种新的黏弹塑性模型; 齐亚静等^[5]通过在西原模型中串联一个具备应变触发特性的非线性黏壶, 提出一种改进版的西原模型, 并将其成功拓展应用于三维蠕变模型中; 康永刚等^[6]提出一种改进的岩

石蠕变模型, 采用非牛顿黏壶替代传统 Kelvin 模型中的牛顿黏壶, 更精确地刻画岩石的衰减蠕变和稳态蠕变特性。3) 在元件中融入损伤变量使模型参数非线性化, 如于冰冰等^[7]将以时间相关的损伤因子引入弹性和黏性元件中, 并采用裂隙塑性体改进 Bingham 模型; 宋战平等^[8]采用时效非线性损伤体改进 Burgers 模型, 并通过反向传播 (BP) 神经网络对参数辨识过程进行优化; 刘文博等^[9]对加速蠕变阶段的时间微分处理, 推导了受时间、应力双重影响的蠕变参数时效性劣化型蠕变本构模型。

在上述模型中, 损伤型模型最契合岩石力学特征, 前人对损伤型本构模型的研究已取得了诸多成果, 包括在水化学损伤^[10]、干湿循环损伤^[11]、高温损伤^[12-13]等条件下开展的一系列研究, 并建立了对应的本构模型。但较多模型考虑参数时不够全面, 一些经验模型虽借助深度分析^[14]完成了结果的优化, 但未消除模型本身由于忽略某些参数带来的影响。

收稿日期: 2025-01-02 修回日期: 2025-03-28 网络出版日期: 2025-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41202209; 41977255); 国家重点实验室自主课题 (SKLGP2019Z017); 四川省科技计划项目 (2019YJ0403)

作者简介: 王流凯 (2000—), 男, 硕士。研究方向: 岩石蠕变与岩石循环荷载。E-mail: 2443557698@qq.com

* 通信作者: 蔡国军, 正高级实验师, E-mail: caiguojun@cdut.cn

为建立考虑岩石原生裂隙和围压影响的三维蠕变本构模型,本文依托砂岩常规三轴与分级蠕变试验结果分析了岩石损伤随压缩进程的关系,借助 SMP 准则推导了 Weibull 分布形式的损伤并叠加至西原模型元件,最后串联一个裂隙塑性体用于表征原生裂隙影响,构建了能描述岩石蠕变全过程的损伤本构模型,将泊松比影响纳入模型进行优化,并对比分析了其他模型。

1 概率密度函数与强度准则

1.1 Weibull 分布函数

岩石强度失效是组成岩石的介质产生损伤并不断累积的结果,概率分布能表征岩石材料非均质强度特性。概率密度函数形式多样,各有优劣。正态分布函数^[15]能反映岩石变形全过程但模型参数需查询正态分布表;幂函数^[16]无法反映岩石的峰后变形特性;Weibull 分布函数能反映后期变形特征却无法反映岩石加载初期的变形特征^[17-19],而岩石损伤也不存在于加载初期,因此它能够契合岩石的损伤演化规律。

岩石变形破坏过程中,内部的裂隙随机分布,根据损伤发育的随机性,采用 Weibull 分布函数^[20]描述岩石的强度特征:

$$P(F) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{F}{u}\right)^m\right) \quad (1)$$

$$p(F) = \frac{m}{u} \left(\frac{F}{u}\right)^{m-1} \exp\left(-\left(\frac{F}{u}\right)^m\right) \quad (2)$$

式中, F 为岩石的强度, u 为基元体力学属性, m 为均匀性系数, $p(F)$ 为统计分布密度, $P(F)$ 为统计分布函数。

若定义损伤变量 D 为损伤微元数 n 占全岩石微元数 N 的比例,那么:

$$D = \frac{n}{N} \quad (3)$$

岩石所受偏应力 σ 在区间 $(0, \sigma)$ 上时,若破坏的微元数服从 Weibull 概率分布,根据积分,损伤微元数 n 可表示为:

$$n = \int_0^\sigma Np(\sigma)d\sigma = NP(\sigma) \quad (4)$$

联立式(1)、(3)、(4)可将损伤表示为:

$$D = 1 - \exp\left(-\left(\frac{F}{u}\right)^m\right) \quad (5)$$

1.2 SMP 准则

随着对岩石力学的深度探索,岩石研究中产生了许多新的强度准则,传统 Mohr-Coulomb 准则^[21-22]是以最大和最小主应力来构建的二元摩擦准则,Hork-Brown 准则^[23]可以反映出岩石与岩体的固有非线性破

裂模式,并且适合解释各向异性的岩体,但这种方式没有考虑到中间主应力的作用。

SMP 准则即 Shao、Matsushima 和 Ping 准则^[24-25],它考虑了中间主应力的影响,能更准确地描述岩石的三维力学特性。其表达式为:

$$\frac{I_1 I_2}{I_3} = 8 \tan^2 \varphi + 9 \quad (6)$$

式中: I_1 、 I_2 、 I_3 为应力第 1、2、3 不变量,可通过最大、最小和中间主应力求取; φ 为内摩擦角。

Satake 等^[26]拓展了 SMP 准则,提出新的黏结应力定义即 $\sigma_0 = C \cot \varphi$,其中, σ_0 为黏结应力, C 为黏聚力。

SMP 准则强度公式为:

$$F = \frac{\sigma_1 + \sigma_0}{\sigma_3 + \sigma_0} \quad (7)$$

式中, σ_1 、 σ_3 分别为最大、最小主应力。

2 三轴条件下的岩石损伤统计

2.1 损伤参数求取

岩石内部未产生损伤时,可视为弹性体,根据广义 HOOK 定律弹性体本构关系三维形式,可将应变 ε_{ij} 表示为:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} s_{ij} + \frac{1}{3K} \sigma_m \delta_{ij} = \frac{1}{E} \left((1 + \mu) s_{ij} + (1 - 2\mu) \sigma_m \delta_{ij} \right) \quad (8)$$

式中: G 为剪切弹性模量; K 为体积模量; s_{ij} 为应力偏张量; σ_m 为平均应力; δ_{ij} 为 Kronecker 记号; E 为弹性模量; μ 为泊松比; i, j 为弹塑性力学指标符号, $i, j=1, 2, 3$ 。

常规三轴压缩条件下有以下关系:

$$\sigma_2 = \sigma_3 \quad (9)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (10)$$

$$s_{ij} = \sigma_1 - \sigma_m = \frac{2}{3} (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (11)$$

式(9)中, σ_2 为中间主应力。

联立式(8)、(10)、(11)可得:

$$E\varepsilon_1 = \sigma_1 - 2\mu\sigma_3 \quad (12)$$

式中, ε_1 为轴向应变。

联立式(7)、(12),强度 F 可表示为:

$$F = \frac{E\varepsilon_1 + 2\mu\sigma_3 + \sigma_0}{\sigma_3 + \sigma_0} \quad (13)$$

根据 Lematrick 应变等价假说^[27],假设岩石产生的损伤满足式(3)、(4)所作假设,则有效主应力 σ'_i 与主应力 σ_i 满足以下关系:

$$\sigma'_i = \frac{\sigma_i}{1 - D} \quad (14)$$

将式(12)中主应力 σ_1 、 σ_3 替换为有效主应力并联立式(14)可获得损伤条件下的应力-应变本构关系:

$$\frac{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3}{1 - D} = E\varepsilon_1 \quad (15)$$

联立式(5)、(15)可得:

$$\varepsilon_1 E \exp\left(-\left(\frac{F}{u}\right)^m\right) = \sigma_1 - 2\mu\sigma_3 \quad (16)$$

将应力-应变曲线峰值点 $(\sigma_{1c}, \varepsilon_{1c})$ 代入式(16),此时轴向应力 σ_1 对轴向应变 ε_1 的偏导数为0,可表示为:

$$\lim_{\substack{\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_{1c} \\ \sigma_1 \rightarrow \sigma_{1c}}} \frac{\partial(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)}{\partial\varepsilon_1} = 0 \quad (17)$$

将式(13)代入式(16),并在峰值点 $(\sigma_{1c}, \varepsilon_{1c})$ 处求偏导数,即:

$$\frac{\partial(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)}{\partial\varepsilon_1} = E \left(1 - \frac{mE\varepsilon_{1c}}{(\sigma_3 + \sigma_0)u} \left(\frac{F_c}{u}\right)^{m-1} \right) \exp\left(-\left(\frac{F_c}{u}\right)^m\right) \quad (18)$$

式中, F_c 为式(13)中应变取 ε_{1c} 对应的强度值。

联立式(16)~(18)可解出 u 和 m :

$$\left(\frac{F_c}{u}\right)^m = \frac{(\sigma_3 + \sigma_0)F_c}{mE\varepsilon_{1c}} = \ln \frac{E\varepsilon_{1c}}{\sigma_{1c} - 2\mu\sigma_3} \quad (19)$$

$$m = \frac{(\sigma_3 + \sigma_0)F_c}{E\varepsilon_{1c} \ln \frac{E\varepsilon_{1c}}{\sigma_{1c} - 2\mu\sigma_3}} \quad (20)$$

$$u = \frac{F_c}{\exp\left(\ln\left(\ln \frac{E\varepsilon_{1c}}{\sigma_{1c} - 2\mu\sigma_3}\right)\right)} \quad (21)$$

2.2 损伤演化规律验证

用MTS-815岩石刚性试验机对砂岩试样进行常规三轴压缩试验,砂岩的基础物理力学参数见表1。

表1 砂岩基础物理力学参数

Tab. 1 Basic physical and mechanical parameters of sandstone

编号	σ_3/MPa	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	μ	E_d/GPa	$(\sigma_1 - \sigma_3)/\text{MPa}$	C/MPa	$\varphi/(\circ)$
S4-1	0	2.51	0.29	8.52	39.11		
S4-2	4	2.54	0.28	8.61	62.67		
S4-3	8	2.43	0.26	8.67	68.22		
S4-4	12	2.40	0.25	8.58	72.54	12.2	33.6
S4-5	16	2.59	0.24	8.76	86.33		
S4-6	20	2.47	0.23	8.82	93.55		

将试验所得应力-应变关系曲线与损伤演化曲线(图1)进行对比,发现损伤发育与否与施加轴向偏应力和屈服应力的关系密切,施加轴向偏应力大于屈服应力时,损伤才发展,并在接近峰值应力时加剧,最终导致岩石破坏。损伤统计模型能有效描述三轴压缩条件下砂岩的累进性破坏规律,其模型参数见表2。

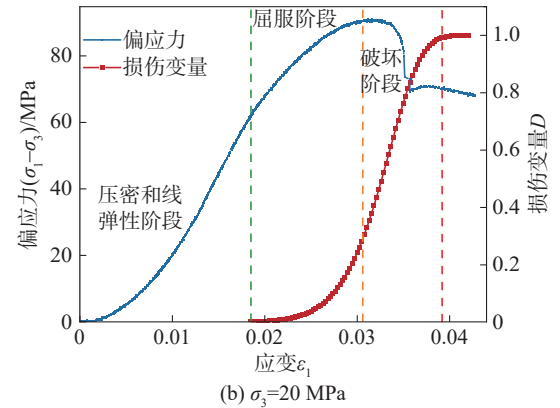
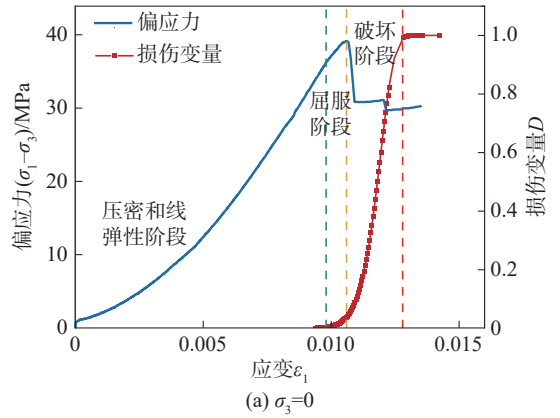


图1 应力-应变曲线与损伤演化曲线

Fig. 1 Stress-strain curves and damage evolution curves

表2 损伤统计模型参数

Tab. 2 Statistical model parameters of damage

围压/MPa	σ_0/MPa	F_c/MPa	u	m
0		3.13	7.50	25.35
4		3.80	7.11	21.38
8	18.36	3.59	7.34	16.69
12		3.39	8.15	15.35
16		3.51	8.45	13.34
20		3.44	9.88	10.73

3 考虑原生裂隙的岩石塑性变形

大多数岩石在形成、演化过程中及改造作用下会形成一定的天然裂隙。图2反映了裂隙的受压变形示意图。图2中,对岩石施加荷载时,其裂隙表面并不平整且伴随剪切位移产生^[28],即便应力释放后,裂隙也无法完全闭合。

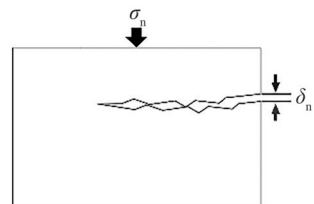


图2 裂隙塑性体示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the fracture plastron

文献[29]揭示了非充填粗糙结构面的法向应力 σ_n 与法向变形 δ_n 的关联,描述为:

$$\sigma_n = \frac{\delta_n}{a - b\delta_n} \quad (22)$$

式中, a 和 b 分别代表结构面几何特征和岩石力学属性。岩石未遭受完全破坏时,其内部所有裂隙具有非贯通性。如想保持一定的张开状态,需要克服张开回弹力 σ_c ,当法向应力 σ_n 达到闭合门槛值 σ_D 时,有以下关系:

$$\sigma_n + \sigma_c = \frac{\delta_n}{a - b\delta_n}, \sigma_n \geq \sigma_D \quad (23)$$

对式(23)进行变形处理,裂隙闭合产生的法向塑性变形表示为:

$$\delta_n = \frac{a\sigma_c + a\sigma_n}{1 + b\sigma_c + b\sigma_n} \quad (24)$$

对于裂隙岩石,假设原生裂隙对应的损伤为 D_0 ,根据 Lemaitre 应变等价假说,作用于岩石的应力可用有效应力 σ' 表示:

$$\sigma' = \frac{\sigma}{1 - D_0} \quad (25)$$

根据文献[30],裂隙面的法向应力和裂隙岩石沿载荷方向的塑性应变分别表示为:

$$\sigma_n = \sigma' \cos \alpha \quad (26)$$

$$\varepsilon_p = \frac{\delta_n \cos \alpha}{V_R b} \quad (27)$$

式中, α 为裂隙面法向与受载方向的夹角, V_R 为裂隙体积, ε_p 为原生裂隙闭合产生的塑性变形。

联立式(25)~(27), ε_p 可表示为:

$$\varepsilon_p = \frac{a \cos \alpha}{V_R b} \left(1 - \frac{1}{1 + b\sigma_c + \sigma' b \cos \alpha} \right) \quad (28)$$

令 $Q = \frac{a \cos \alpha}{V_R b}$, $W = b\sigma_c$, $R = \frac{b \cos \alpha}{1 - D_0}$, 则式(28)简化为:

$$\varepsilon_p = \begin{cases} 0, \sigma < \sigma_D; \\ Q \left(1 - \frac{1}{1 + W + R\sigma} \right), \sigma \geq \sigma_D \end{cases} \quad (29)$$

4 岩石蠕变损伤本构模型

4.1 蠕变模型结构与蠕变方程

西原模型^[31]综合考虑了岩石的弹性、黏弹性和黏塑性,能有效地刻画岩石蠕变过程的前两个阶段,但在描述岩石的非线性变形特性时存在局限。可利用损伤对西原模型进行改进并串联一个裂隙塑性体,使模型能够描述岩石的整个蠕变过程。

西原模型由虎克体、开尔文体和理想黏塑性体组成,如图3所示。图3中, E_0 、 E_1 分别为弹性、黏弹性模量, η_1 、 η_2 为黏滞系数, σ_Y 为屈服应力。西原模型一维条件下的本构方程为式(30),式中 t 为加载时间。

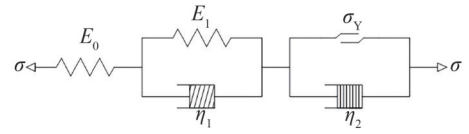


图3 西原模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Nishihara mode

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_1 t}{\eta_1}\right) \right), \sigma < \sigma_Y; \\ \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_1 t}{\eta_1}\right) \right) + \frac{\sigma - \sigma_Y}{\eta_2} t, \sigma \geq \sigma_Y \end{cases} \quad (30)$$

三维条件下,采用由 E_0 和 μ 确定的弹性剪切模量 G_0 和体积模量 K 替代弹性模量 E_0 ,采用黏弹性剪切模量 G_1 替代黏弹性模量 E_1 ,替换后的西原模型本构方程为:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right), \sigma < \sigma_Y; \\ \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right) + \frac{\sigma - \sigma_Y}{\eta_2} t, \sigma \geq \sigma_Y \end{cases} \quad (31)$$

采用损伤对西原模型进行改进并增加一个裂隙塑性体,本文最终的本构方程可表示为:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right), \sigma < \sigma_D; \\ \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right) + \varepsilon_p, \sigma_D \leq \sigma < \sigma_Y; \\ \frac{1}{1 - D} \left(\frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right) + \frac{\sigma - \sigma_Y}{\eta_2} t \right) + \varepsilon_p, \sigma \geq \sigma_Y \end{cases} \quad (32)$$

4.2 模型特性

本构模型结构如图4所示。该结构由3部分组成,第1、2部分为损伤改进的西原模型,第3部分为带应力开关的裂隙塑性体。

当 $\sigma < \sigma_D$, 本构模型简化至广义开尔文模型,该模型会展现出瞬时弹性变形与稳定蠕变的特性。其中,瞬时应变与偏应力之间呈现出线性相关关系。

当 $\sigma_D \leq \sigma \leq \sigma_Y$, 损伤变量 D 失效,该情形下,裂隙塑

性体会参与到蠕变过程中。此时的模型会出现瞬时塑性变形,并呈现稳定的蠕变状态。同时,瞬时应变和偏应力之间存在非线性关系。

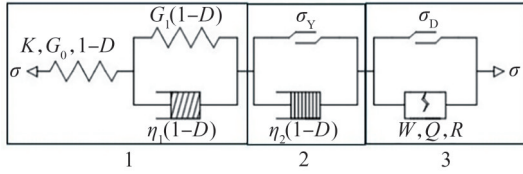


图 4 岩石蠕变损伤本构模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the constitutive model of rock creep damage

当 $\sigma > \sigma_Y$, 损伤变量 D 和黏塑性体生效, 由于损伤量为强度 F 的函数, F 由应力 σ 和应变 ϵ 决定, 黏塑性变形随时间增加, 损伤增加并作用于各元件, 模拟加速蠕变。

4.3 模型参数确定

模型参数包括 $K, G_0, G_1, \eta_1, \eta_2, W, R, Q$, 根据蠕变曲线特点判断施加应力所处区间后, 通过以下方式分别求取:

1) 当瞬时应变与偏应力呈线性关系时, $\sigma < \sigma_D$, 联立两组蠕变曲线可求解 K, G_0 。随后岩石发生黏弹性变形, 通过函数拟合可获得 G_1, η_1 。

2) 当瞬时应变与偏应力呈非线性关系且不发生加速蠕变时, $\sigma_D \leq \sigma \leq \sigma_Y$ 。蠕变曲线的起始点, 有瞬时应变 $\epsilon_{i1}, \epsilon_{i2}, \epsilon_{i3}, \dots, \epsilon_{il}$, l 为恒载等级, 这些瞬时应变可被视为独立的瞬时弹性应变和塑性应变, 减去弹性应变后, 存在塑性应变 $\epsilon_{p2}, \epsilon_{p2}, \epsilon_{p3}, \dots, \epsilon_{pl}$, 参数 W, R, Q 可以通过式(29)采用最小二乘法估计。

3) 当岩石发生蠕变破坏时, $\sigma > \sigma_Y$ 。取蠕变曲线直线段, 其斜率倒数即为 η_2 。蠕变破坏仅能在试验后获得, 本文选取能表征弹塑性模型塑性屈服面的屈服准则(式(33))判定加速蠕变发生的应力区间。

$$f(\sigma_{ij}, \alpha_p) = q - \alpha_p(\gamma_p)R_c \sqrt{A \left(C_s + \frac{p}{R_c} \right)} = 0 \quad (33)$$

式中: p 为平均应力; q 为偏应力, 即 $\sigma_1 - \sigma_3$; $\alpha_p(\gamma_p)$ 为塑性硬化函数, 值域为 $[1, 2)$; γ_p 为塑性应变; R_c 为单元的强度; C_s 为内聚力系数; A 为内摩擦有关系数; σ_{ij} 为主应力。

5 模型验证与本构参数优化

5.1 蠕变试验设计

为了确认模型的有效性, 采用 STAC600-600 型号的岩石三轴流变试验机(图 5)进行分级蠕变试验。该设备通过设置 5 阶段的轴向压力值来模拟相当于不同围压下峰值强度 50%~90% 的偏应力条件, 即设置 5 级恒定轴向荷载, 每级荷载持续时间 48 h 以上, 试验前后的试件状态如图 6 所示。

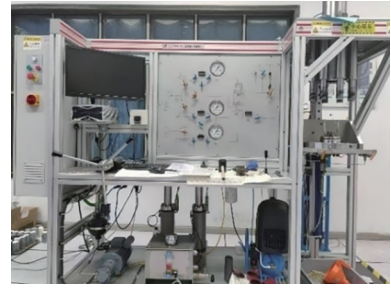


图 5 岩石三轴流变试验机

Fig. 5 Rock triaxial rheological testing machine



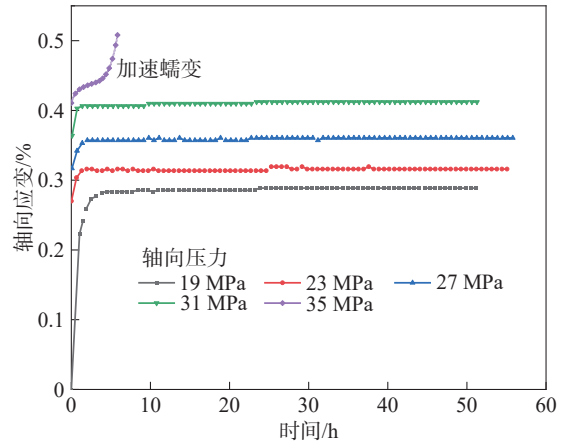
(a) 试验前 (b) 试验后

图 6 分级蠕变试验前后试件状态

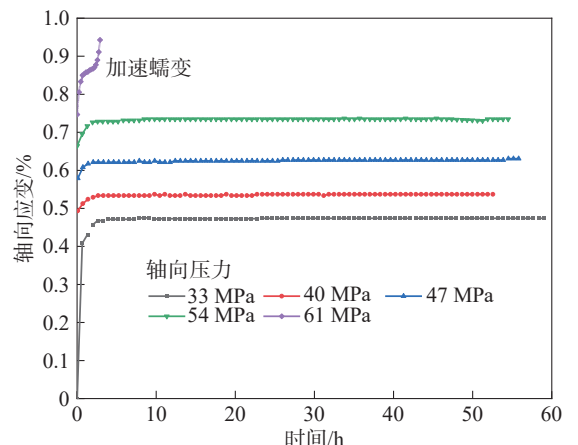
Fig. 6 State of specimens before and after stepwise creep test

5.2 蠕变试验结果与特征分析

图 7(a) 和 (b) 分别为 0 和 8 MPa 围压下的分级加载结果。围压和偏应力提升时, 砂岩的累积蠕变变形显著



(a) S5-1 岩样 ($\sigma_3=0$)



(b) S5-2 岩样 ($\sigma_3=8$ MPa)

图 7 砂岩轴向蠕变变形曲线

Fig. 7 Axial creep deformation curves of sandstone

增加;相较于0围压,8 MPa围压下岩石最大破坏上升58.94%;围压升高时,岩石破坏特征从脆性向延性转变,且破裂面与荷载方向夹角增大,围压为0时夹角为13°,围压为8 MPa时夹角为36°。

5.3 模型应用与验证

根据三轴压缩试验数据,借助屈服准则表达式(34)拟合获得屈服面(图8),拟合参数见表3,通过屈服函数可获取不同围压下的屈服应力,结合第4.3节判断各级蠕变曲线所在应力区间。

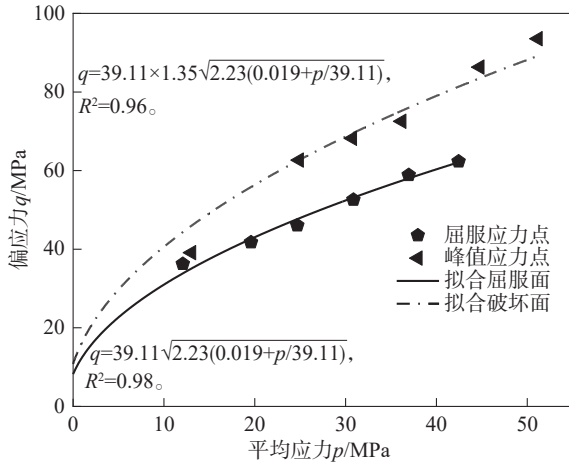


图8 拟合屈服面和破坏面

Fig. 8 Fit yield and failure surfaces

表3 物理参数拟合结果

Tab. 3 Physical parameter fitting results

物理参数	数值
单元强度 R_c	39.11
内摩擦有关系数 A	2.23
内聚力系数 C_s	0.019
塑性硬化函数 $\alpha_p(\gamma_p)$	1.35

分别采用加入裂隙塑性体前后的改进西原模型A、B对试验曲线进行拟合,结果见表4、5。表4中相同围压下体积模量 K 和剪切弹性模量 G_0 存在一定波动,该现象可能与岩石内部的天然裂隙有一定联系,试验所用砂岩为微风化砂岩,原生裂隙影响较小,对比不强烈,对风化程度为强风化甚至全风化的岩石,裂隙塑性体作用会更显著。

采用最终确定的蠕变损伤本构模型(对应图5的模型结构和式(32)的模型方程)对不同围压下发生蠕变破坏的蠕变变形进行拟合,结果见图9。围压为0时拟合效果较好,但在围压为8、12、20 MPa条件下破坏阶段拟合曲线有明显前移迹象,可能是损伤建立过程忽略了不同围压下泊松比的改变,进而影响损伤的计算结果并导致拟合偏差。因此,建立损伤统计模型时需要将泊松比也视作变量,进一步优化模型参数。

表4 改进西原模型A拟合参数

Tab. 4 Fitting parameters of improved Nishihara model A

σ_3/MPa	q/MPa	K/GPa	G_0/GPa	G_1/GPa	$\eta_1/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	$\eta_2/(\text{GPa}\cdot\text{h})$
	19	6.76	3.30	148.22	62.25	
	23	6.80	3.32	167.36	70.67	
0	27	6.89	3.36	194.64	83.55	
	31	7.09	3.46	171.56	76.35	
	35	6.94	3.39	163.95	80.50	219.25
	33	7.03	4.02	382.88	132.65	
	40	6.79	3.88	299.29	272.73	
8	47	6.38	3.65	266.35	155.96	
	54	6.21	3.55	257.70	257.90	604.56
	61	6.17	3.53	178.22	280.65	328.79

表5 改进西原模型B拟合参数

Tab. 5 Fitting parameters of improved Nishihara model B

σ_3/MPa	K/GPa	G_0/GPa	W	Q	R
0	6.91	3.38	1.042	0.023	-0.135
8	6.39	3.72	1.073	0.018	-0.161

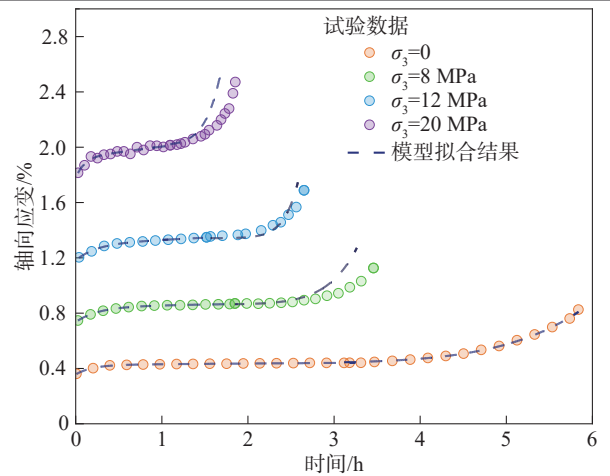


图9 蠕变损伤本构模型拟合结果

Fig. 9 Fitting results of creep damage constitutive model

5.4 模型参数优化

为精确模拟各种围压条件下的试验结果,需要获取砂岩泊松比与围压之间的关系曲线,各围压下泊松比的研究确定方法参照文献[32]。不同围压下砂岩泊松比如图10所示。图10中, x 为当前围压,随着围压的提升,砂岩泊松比呈现阶梯式下降。

确定单轴压缩条件下的泊松比函数后,围压与泊松比的关系可表示为:

$$\mu_x^* = \frac{\mu_0^*}{h + \frac{g\sigma_3}{4}} \quad (34)$$

式中: μ_x^* 为某围压下三轴压缩条件的泊松比函数; μ_0^* 为单轴压缩条件下的泊松比函数; g, h 为拟合参数,本文取值分别为 1 和 0.06。考虑泊松比影响之后的修正模型拟合结果如图 11 所示,该模型对于三轴条件下的砂岩加速蠕变曲线拟合效果有明显改善,8、12 和 20 MPa 围压下拟合度 R^2 分别较修正前提高了 0.06、0.02 和 0.04。

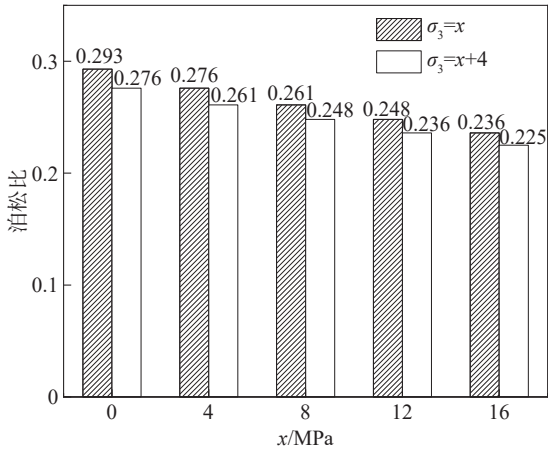


图 10 不同围压下的砂岩泊松比

Fig. 10 Poisson's ratio of sandstone under different confining pressures

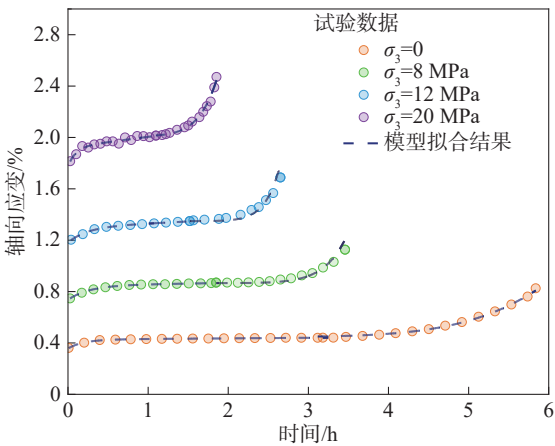


图 11 修正的模型拟合结果

Fig. 11 Modified model fitting results

优化的实质是采用函数 μ_x^* 替代式 (13) F 表达式中的常量 μ , 凡是与围压相关的参数 (如屈服应力、泊松比、弹性模量等) 均被作为损伤变量 D 的内变量或影响因素, 通过影响损伤变量进而影响模型元件达到拟合非线性变形的目的, 该过程是通过 SMP 准则和 Weibull 分布函数共同实现的。

根据图 12 损伤参数拟合曲线, 三轴条件下计算损伤的重要参数 u, m 与围压 σ_3 分别呈二次函数和直线关系, $u=7.44-0.09\sigma_3+\sigma_3^2, m=24.18-0.70\sigma_3, u$ 和 m 均能通过拟合关系式获得。因此, 获得了岩石的基本物理参数后, 该模型对蠕变过程的拟合较为简便。

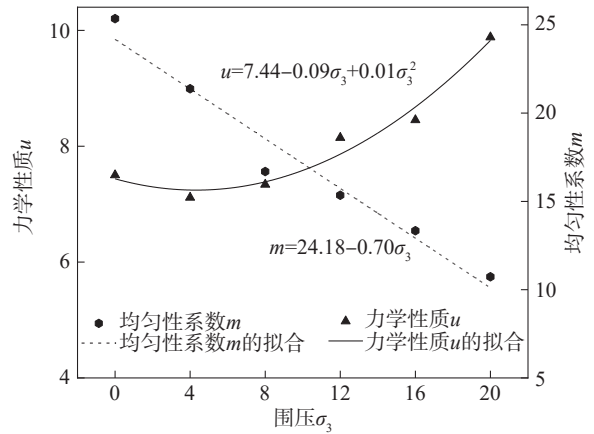


图 12 损伤参数拟合曲线

Fig. 12 Damage parameter fitting curves

5.5 模型应用对比

本文所建立的蠕变损伤本构模型适用性获得了验证。为进一步证明该本构模型相较于其他本构模型的优缺点, 选取另外两种结构的蠕变本构模型在已有试验的基础上进行对比分析。

1) 带非线性黏壶的改进 Burgers 模型, 即在 Burgers 模型上串联一个非线性黏塑性体, 该本构模型结构如图 13 所示, 本构方程为式 (35)。

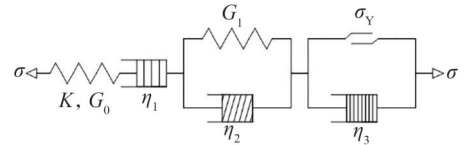


图 13 改进 Burgers 模型示意图

Fig. 13 Schematic diagram of improved Burgers model

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\eta_1} t + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_2}\right) \right), \sigma < \sigma_Y; \\ \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\eta_1} t + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_2}\right) \right) + \frac{\sigma - \sigma_Y}{\eta_3} \exp(vt), \sigma \geq \sigma_Y \end{cases} \quad (35)$$

式中, v 为拟合参数。

在参数求取与拟合过程中, 需要将时间分段并获取加速流变的起始时间 t_2 , 这需要首先分析流变速率 s 与偏应力 q 的代数关系, 拟合并找到流变速率曲线的转折点, 该转折点的确定有很大的主观性。因此, 该模型对加速蠕变阶段拟合精度较低, 但处理过程较为简便。

2) 时效损伤改进的经典弹塑性本构模型, 该类模型将损伤直接与时间联系, 属经验型模型, 同样对时间依赖性极强。以时效损伤的西原模型为例, 其示意图如图 14 所示, 本构方程为式 (36)、(37)。

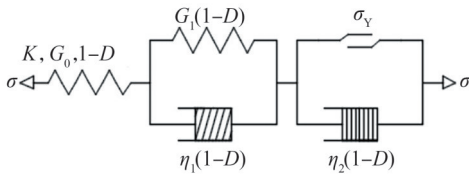
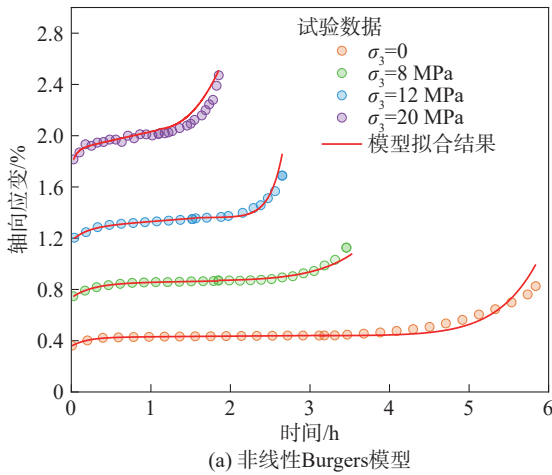


图 14 改进 Nishihara 模型示意图

Fig. 14 Schematic diagram of improved Nishihara model

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \cdot \\ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{G_1}{\eta_1} t\right) \right), \sigma < \sigma_Y; \\ \frac{1}{1-D} \left(\frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_0} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \cdot \right. \\ \left. \left(1 - \exp\left(-\frac{G_1}{\eta_1} t\right) \right) + \frac{\sigma - \sigma_Y}{\eta_2} t \right), \sigma \geq \sigma_Y \end{cases} \quad (36)$$



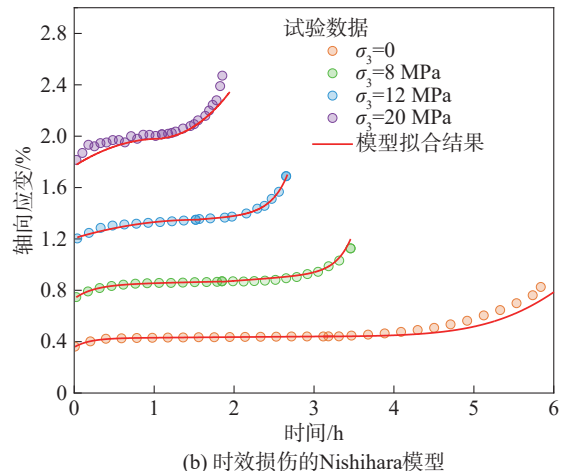
(a) 非线性 Burgers 模型

$$D = 1 - w\sigma^z \quad (37)$$

式中, w 和 z 为拟合参数。

该模型的缺点与带非线性黏壶的改进 Burgers 模型相同,但运用随机森林、神经网络等算法能将拟合精度提升至一定水平。

两种模型的拟合结果如图 15 所示,在不采用其他手段修正的情况下,拟合精度相较于本文所建立的本构模型偏低。总的来说,本文建立的本构模型优点在于将时间变量剔出了模型参数的求取过程,减少误差的产生来源,并且将一维参数都拓展为三维形式,获得基本参数后具备完整的拟合系统,除特定的应用场景外,该模型考虑的影响因素较全面。缺点在于损伤变量求取及本构模型的建立过程比较复杂,前期参数计算比较烦琐。



(b) 时效损伤的 Nishihara 模型

图 15 两种不同蠕变本构模型拟合结果

Fig. 15 Fitting results of two different creep constitutive models

6 结论

本研究综合运用室内实验与理论分析的方法,得出以下主要结论:

1) 将 SMP 准则作为强度准则,结合 Weibull 分布函数构建损伤变量能够有效描述砂岩常规三轴压缩过程与蠕变过程的损伤演化过程,表明了该准则下该形式损伤变量的适用性。

2) 损伤变量中的重要参数 u 、 m 与围压有着明显的函数关系,由于本文损伤变量是基于强度 F 建立的, F 又为主应力与黏结应力的表达式,因此获取任意岩石的 u 、 m 与围压关系曲线后,能直接采用应力表达损伤。

3) 采用加入裂隙塑性体的改进西原模型对砂岩蠕变过程进行拟合时,效果较好,但围压不为 0 时,加速变形曲线前移,考虑泊松比的影响能有效解决这一问题。

4) 本构模型中的相关参数(如泊松比、屈服应力等)在三维应力状态下得到了扩展,同时裂隙塑性体的引入使模型不仅适用于完整岩石,还能够描述带有

裂隙或结构面的岩石。因此,除特殊环境,该模型适用于一些常见的工程条件,且对其他岩石类型也具有重要的参考价值,但某些物理量,如泊松比随着压缩进程也会发生改变,应当继续本研究并建立更加科学严谨的模型。

5) 对比 3 种形式的本构模型拟合结果发现,本文所建立的泊松比函数修正的蠕变损伤本构模型拟合精度优于另外两种本构模型,且损伤与时间独立,规避了人为处理时间因素的误差,但前期处理较烦琐。

参考文献:

[1] Sun Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1081-1106. [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.]

[2] Kang Yonggang, Zhang Xiue. A non-stationary model for rock creep based on Burgers model[J]. Rock and Soil Me-

- chanics, 2011, 32(S1): 424–427. [康永刚, 张秀娥. 基于 Burgers 模型的岩石非定常蠕变模型[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 424–427.]
- [3] Wang Chunping, Liu Jianfeng, Chen Liang, et al. Nonlinear creep constitutive model of fractured granite and its parameters analysis[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(4): 141–149. [王春萍, 刘建锋, 陈亮, 等. 裂隙花岗岩非线性蠕变本构模型及参数分析[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(4): 141–149.]
- [4] Liu Dongyan, Xie Linjie, Tuo Xiaofeng, et al. Study on creep characteristics and nonlinear viscoelastic-plastic model of sandstone under different confining pressures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(S2): 3705–3712. [刘东燕, 谢林杰, 庾晓峰, 等. 不同围压作用下砂岩蠕变特性及非线性黏弹塑性模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S2): 3705–3712.]
- [5] Qi Yajing, Jiang Qinghui, Wang Zhijian, et al. 3d creep constitutive equation of modified nishihara model and its parameters identification[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(2): 347–355. [齐亚静, 姜清辉, 王志俭, 等. 改进西原模型的三维蠕变本构方程及其参数辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 347–355.]
- [6] Kang Yonggang, Zhang Xiue. Nonstationary parameter fractional Burgers model of rock creep[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(11): 3237–3241. [康永刚, 张秀娥. 岩石蠕变的非定常分数伯格模型[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3237–3241.]
- [7] 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. [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.]
- [8] Song Zhanping, Wang Bowen, Fan Shengyuan, et al. Nonlinear creep intrinsic modeling of hard rock considering aging damage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(10): 2368–2380. [宋战平, 王博文, 范胜元, 等. 考虑时效损伤的硬岩非线性蠕变本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(10): 2368–2380.]
- [9] Liu Wenbo, Zhang Shuguang, Sun Boyi. Time-dependence of creep parameter degradation and variable parameter creep model[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(1): 104–112. [刘文博, 张树光, 孙博一. 蠕变参数劣化的时效性及变参数蠕变模型[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(1): 104–112.]
- [10] Chen Youliang, Chen Qijian, Xiao Peng, et al. A true triaxial creep constitutive model for rock considering hydrochemical damage[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(1): 159–168. [陈有亮, 陈奇键, 肖鹏, 等. 考虑水化学损伤的岩石真三轴蠕变本构模型[J]. 力学学报, 2023, 55(1): 159–168.]
- [11] Hou Di, Xu Zhen, Mo Zhikun, et al. Research and application of rock creep constitutive model under different dry-wet cycles[J]. *Yangtze River*, 2023, 54(12): 218–224. [侯迪, 许珍, 莫至坤, 等. 干湿循环条件下岩石蠕变本构模型研究及应用[J]. 人民长江, 2023, 54(12): 218–224.]
- [12] Meng Lubo, Zhang Shan, Li Tianbin, et al. Study on the creep constitutive model of layered rock considering anisotropic and damage factors after high temperature exposure[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2025, 34(3): 520–541.
- [13] Shi Sheng, Zhu Fengjin, Zhu Jiancai. Investigation on damage creep constitutive model of rock under the coupled effect of freeze-thaw cycles and loading[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2024, 47(4): 1281–1299.
- [14] Wang Junbao, Song Zhanping, Zhao Baoyun, et al. A study on the mechanical behavior and statistical damage constitutive model of sandstone[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2018, 43(10): 5179–5192.
- [15] Ma Qiufeng, Qin Yueping, Zhou Tianbai, et al. Constitutive model of rock compaction stage based on contact theory[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(8): 1941–1948. [马秋峰, 秦跃平, 周天白, 等. 基于颗粒接触理论的岩石压密阶段本构模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(8): 1941–1948.]
- [16] Ji Ming, Sun Zhongguang, Liu Wenpeng, et al. Study on sandstone damage constitutive model based on power function distribution[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 55(3): 324–331. [季明, 孙中光, 刘文朋, 等. 基于幂函数分布的砂岩损伤本构模型研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(3): 324–331.]
- [17] Zheng Dong. Research on statistical damage constitutive model of rocks under high-temperature and high confining pressure conditions based on Weibull distribution of element strength[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering, 2024. [郑栋. 基于单元强度 Weibull 分布的高温高压岩石统计损伤本构模型研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2024.]
- [18] Bai Yu, Zhao Kangpu, Liu Yi, et al. Shale dynamic damage constitutive model based on Weibull distribution under variable confining pressure[J]. *Engineering Blasting*, 2023, 29(6): 61–67. [白宇, 赵康朴, 刘依, 等. 基于 Weibull 分布页岩围压下的动态损伤本构模型研究[J]. 工程爆破, 2023, 29(6): 61–67.]

- [19] Jiang Haopeng, Jiang Annan, Yang Xiurong. Statistical damage constitutive model of high temperature rock based on Weibull distribution and its verification[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(7): 1894–1902. [蒋浩鹏, 姜谔男, 杨秀荣. 基于 Weibull 分布的高温岩石统计损伤本构模型及其验证[J]. *岩土力学*, 2021, 42(7): 1894–1902.]
- [20] Zhang Zongtang, Gao Wenhua, Zhang Zhimin, et al. Evolution of particle disintegration of red sandstone using Weibull distribution[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(3): 877–885. [张宗堂, 高文华, 张志敏, 等. 基于 Weibull 分布的红砂岩颗粒崩解破碎演化规律[J]. *岩土力学*, 2020, 41(3): 877–885.]
- [21] Gu Qiuxin, Zhang Qiang, Dai Wanli, et al. A novel statistical damage constitutive model of rock joints considering normal stress and joint roughness[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2025, 34(2): 326–351.
- [22] Zhang Chao, Yu Jin, Bai Yun, et al. Statistical damage constitutive model of rock brittle-ductile transition based on strength theory[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(2): 307–316. [张超, 俞缙, 白允, 等. 基于强度理论的岩石脆延转化统计损伤本构模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(2): 307–316.]
- [23] Wei Chao, Zhao Cheng, Zhao Chunfeng, et al. Statistical damage constitutive model for rocks considering temperature effects and its validation[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2024, 55(3): 1056–1067. [魏超, 赵程, 赵春风, 等. 考虑温度作用的岩石统计损伤本构模型及验证[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2024, 55(3): 1056–1067.]
- [24] Shi Lei, Hou Kepeng, Sun Huafen. Damage softening model of freeze-thaw loaded rock based on SMP criterion[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(4): 1658–1664. [史磊, 侯克鹏, 孙华芬. 基于 SMP 准则的冻融受荷岩石损伤软化模型[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(4): 1658–1664.]
- [25] Zhu Jianming, Cheng Haifeng, Yao Yangping. Statistical damage softening model of fractured rock based on SMP failure criterion and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(S2): 3160–3168. [朱建明, 程海峰, 姚仰平. 基于 SMP 准则的破裂岩石统计损伤软化模型及其应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(S2): 3160–3168.]
- [26] Satake M. Stress-deformation and strength characteristics of soil under three difference principle stresses (Discussion)[J]. *Proc. of Japan Society of Civil Engineers*, 1976, 246: 137–138.
- [27] Chen Song, Cao Xiuling, Yang Zhao. Three dimensional statistical damage constitutive model of rock based on Griffith strength criterion[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021, 39(8): 5549–5557.
- [28] Wang Lei, Liang Weiguo. Experimental study on cracking initiation and fracture propagation of supercritical CO₂/clean water fracturing coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(S1): 2680–2689 [王磊, 梁卫国. 超临界 CO₂/清水压裂煤体起裂和裂缝扩展试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(S1): 2680–2689.]
- [29] Barton N, Bandis S, Bakhtar K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1985, 22(3): 121–140.
- [30] Wang Qihu, Ye Yicheng, Liu Yanzhang, et al. A creep constitutive model of rock considering initial damage and creep damage[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S1): 57–62. [王其虎, 叶义成, 刘艳章, 等. 考虑初始损伤和蠕变损伤的岩石蠕变全过程本构模型[J]. *岩土力学*, 2016, 37(S1): 57–62.]
- [31] Jia Baoxin, Chen Guodong, Liu Fengpu. Damage constitutive model of rock under high temperature and its verification[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(S2): 63–73. [贾宝新, 陈国栋, 刘丰溥. 高温下岩石损伤本构模型及其验证[J]. *岩土力学*, 2022, 43(S2): 63–73.]
- [32] Zhao Pan. Research and application of basic performance parameters of sandstone under confining pressure[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016. [赵攀. 围压下砂岩基本性能参数扩展研究及应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.]

Three-dimensional Creep Constitutive Model of Sandstone Based on Damage Statistics

WANG Liukai^{1,2}, CAI Guojun^{1,2*}, ZHAO Weiping^{1,2}, HU Xing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. National Geological Engineering Experimental Teaching Demonstration Center, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract:

Objective The creep of rock mass is very important for long-term project stability, and the constitutive model best reflects the mechanical characteristics and deformation patterns of the rock creep process. In recent years, extensive studies on creep characteristics of rocks have been conducted, and many creep constitutive models have been derived from classical elastoplastic mechanics. These models reveal the creep behavior of specific rocks, but they often do not sufficiently take the influence of creep parameters into account, or they overlook the certain factors during re-

searches, so establishing a model that comprehensively incorporates parameters and accurately reveals the creep mechanical behavior of rocks is of significant value.

Methods The Nishihara model in the classical elastoplastic framework was selected, and damage was introduced to compensate for its inability to reveal the nonlinear creep characteristics of rocks. The Weibull distribution function was applied as the damage statistical function, and the SMP criterion was adopted as the strength criterion of sandstone to derive the damage variables under three-dimensional conditions. A conventional triaxial compression test was conducted using the MTS-815 rock rigidity testing machine, and the applicability of the damage statistical model was verified by comparing the compression test results with the damage evolution curve. The yield function was applied to fit the yield surface of sandstone to determine the yield stress under each confining pressure, and a fracture plastic body was incorporated to represent the plastic deformation of the primary fracture. The components of each part of the model were then integrated to derive the constitutive equation in accordance with the mechanical boundary. The STAC600-600 rock rheology testing machine was utilized to perform the rock classification rheological test, and the fitting results of the creep model were analyzed. The model parameters were optimized to improve the fitting accuracy. Finally, the fitting results of this model were compared to those of other models to analyze the advantages and disadvantages of the approach.

Results and Discussions The damage variables derived from the SMP criterion and Weibull distribution function showed strong consistency with the rock deformation behavior under conventional triaxial compression. Damage did not develop during the early loading stage, and when the deviator stress exceeded the yield stress, damage developed rapidly until destruction of whole rock was happened. The damage evolution trend indicated that the fracture unit of the rock accumulated rapidly once the deviator stress reached the yield limit, and the rate of damage accumulation varied under different confining pressures, with lower confining pressure leading to a faster accumulation rate. The improved Nishihara model was applied to fit the creep deformation curve and produced satisfactory results; however, the fitting results of the accelerated creep curve under 8, 12, and 20 MPa confining pressures all shifted forward. The Poisson ratio μ was refitted as a function related to confining pressure, and the accuracy improved significantly. An algebraic relationship existed between the key model parameters u and m and the confining pressure, and the constitutive parameters under each confining pressure were obtained after establishing this relationship. Compared to the fitting results of the other two models, the fitting accuracy of this model was higher, and the variable “time”, which often caused errors, did not participate in the parameter calculation. The damage parameters were directly related to stress and strain, which improved accuracy to a certain extent.

Conclusions The results indicate that the damage statistical creep constitutive model accurately fits the creep deformation characteristics of rocks under three-dimensional conditions, expands the range of influencing factors for constitutive parameters, and provides practical guidance for related engineering applications.

Key words: rock creep; SMP criterion; damage variables; Weibull distribution; Nishihara model

(编辑 陈雪)

引用格式: Wang Liukai, Cai Guojun, Zhao Weiping, et al. Three-dimensional creep constitutive model of sandstone based on damage statistics[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2026, 58(1): 145–155. [王流凯, 蔡国军, 赵伟平, 等. 基于损伤统计的砂岩三维蠕变本构模型[J]. *工程科学与技术*, 2026, 58(1): 145–155.]