

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.103



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



考虑孔隙冰的岩石统计损伤本构模型

龙海平¹, 张浩扬², 闵庆华³, 姜谔男², 郑福²

(1. 南昌轨道交通集团有限公司, 南昌 330038; 2. 大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026; 3. 中建交通建设集团有限公司, 北京 100053)

摘要:人工冻结作为地下空间工程中穿越富水软岩层的重要地层加固与止水技术,其施工安全性与冻结壁的力学性能密切相关,而研究冻结壁的力学特性时需综合考虑其内部孔隙冰含量及冻结温度的影响。为此,基于细观力学混合律理论和 Weibull 统计分布函数,通过对岩石骨架与孔隙冰的力学参数进行等效化处理,并引入 Drucker-Prager 准则描述微元损伤概率,建立考虑孔隙冰作用的岩石统计损伤本构模型。结合不同冻结温度下砂岩三轴压缩试验结果对模型进行验证,结果表明,该模型在全应力-应变曲线的拟合精度较常规模型提高约 7.22%。随温度降低,模型特征参数 m 和 F 均呈递增趋势,表明孔隙冰在一定饱和度范围内提高了岩体均质性及微元平均强度,而在饱和度超过 50% 且温度低于 -10°C 时,砂岩临界损伤度下降速率减缓,脆性破坏趋势增强。

关键词:人工冻结法;孔隙冰;细观力学;Weibull 分布;冻结岩石;本构模型

中图分类号: TU94 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Statistical damage constitutive model for rock considering pore ice

LONG Haiping¹, ZHANG Haoyang², MIN Qinghua³, JIANG Annan², ZHENG Fu²

(1. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Nanchang 330038, P. R. China; 2. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, P. R. China; 3. China Construction Communications Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100053, P. R. China)

Abstract: Artificial freezing is a crucial reinforcement and water-sealing technique for excavations in water-rich and weak rock formations during underground space construction. The safety of artificial freezing operations depends closely on the mechanical behavior of the frozen wall, which is influenced by both the ice content within the pore space and the freezing temperature. To capture these effects, a statistical damage constitutive model for frozen rock was developed based on micromechanical homogenization theory and the Weibull statistical distribution function. The mechanical parameters of the rock skeleton and pore ice were homogenized to obtain equivalent material properties, and the Drucker-Prager criterion was introduced to describe the damage probability of microelements. The model was validated against triaxial compression test results of sandstone samples under various freezing temperatures. The results indicate that the proposed model improves the fitting

收稿日期: 2025-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(52578465)

作者简介: 龙海平(1978-),男,高级工程师,主要从事地下空间工程研究, E-mail: 858525595@qq.com。

张浩扬(通信作者),男,博士生, E-mail: zhy9602@163.com。

Received: 2025-05-15

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52578465)

Author brief: LONG Haiping (1978-), senior engineer, main research interest: reinforced underground space engineering, E-mail: 858525595@qq.com.

ZHANG Haoyang (corresponding author), PhD candidate, E-mail: zhy9602@163.com.

accuracy of the complete stress - strain curve by approximately 7.22% compared with conventional models. With decreasing temperature, both characteristic parameters m and F show an increasing trend, suggesting that pore ice enhances the homogeneity and mean strength of rock microelements within a certain saturation range. However, when the saturation exceeds 50% and the temperature drops below $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, the reduction rate of the critical damage variable decreases, and the rock exhibits more pronounced brittle failure behavior. The proposed model provides a theoretical basis for predicting the mechanical parameters of frozen walls and optimizing the design of artificial freezing -based tunnels and shafts.

Keywords: artificial freezing method; pore ice; meso-mechanics; Weibull distribution; frozen rock; constitutive model

随着国家基础设施建设逐步向高海拔和高纬度地区推进,工程建设不可避免地处于多相介质耦合作用下的复杂岩体力学环境中^[1-3]。特别是在穿越构造裂隙发育的富水岩层时,地下水引发的围岩强度劣化严重威胁着工程结构的稳定性^[4-6]。人工冻结法采用低温相变胶结技术对井筒围岩实施定向冻结改良,形成具有低渗透性的止水帷幕结构(即人工冻结壁),以有效抵抗提升岩层的整体抗渗性能,现已成为复杂水文地质条件下隧道工程建设的核心工法^[7-11]。在冻结法施工质量控制中,冻结壁的力学特性是工程可靠度设计的决定性参数,但岩石在冻结状态下的力学特性往往与常温下存在显著差异^[12-14]。因此,对于岩石在低温作用下力学特性研究显得愈加重要。

岩石本构模型研究是揭示岩石非线性力学行为的关键理论工具^[15-18]。统计损伤本构理论通过构建基于微元强度统计分布的损伤表征体系,采用概率统计方法半定量地描述岩石内部缺陷的损伤演化程度(即损伤变量)。将这一具有物理意义的损伤变量嵌入岩石本构方程中,可建立能够参数化表征岩石渐进破坏过程的力学模型^[15]。Gu等^[19]、Chen等^[20]、Cheng等^[21]、贾宝新等^[22]将连续损伤力学和统计强度理论结合,基于岩石微元强度服从 Weibull 分布的概率密度函数特征,构建了考虑围压作用的岩石统计损伤本构模型,该模型不仅准确描述岩石全应力应变过程,还能有效反映峰后应变软化与残余强度特征。针对传统模型在复杂环境场下的适用局限性,Tian等^[23]将损伤力学与热损伤机制相结合,建立了考虑温度-应力耦合效应的脆性岩石的损伤本构模型。Wang等^[24]通过对大理岩进行渗流-应力耦合作用下三轴压缩试验,构建了考虑渗透压和初始变形的统计损伤本构模型,揭示了渗透压与岩石强度参数的非线性规律。张慧梅等^[25]、张二锋等^[26]分别基于不同温湿度条件下的冻融试验和单轴压缩试验,建立了考虑初始损伤累积效应的岩石损伤本构模型。现有统计损伤模型研究多集中于常

规条件下,且对于低温环境下的岩石统计损伤模型,通常仅考虑岩石骨架的力学特性,未能充分表征岩石颗粒与孔隙冰形成复合体系的物理特征,这与低温环境下富水岩体的实际承载过程存在差异。

笔者通过细观力学中的混合律理论对岩石骨架与孔隙冰的力学参数等效化处理,采用 Weibull 统计分布表征冻结岩石的非均质性,并基于 Drucker-Prager 强度准则,建立了考虑孔隙冰的岩石统计损伤本构模型。该模型综合考虑了冻结岩石在受载过程中孔隙冰与岩石骨架共同受力机制,通过将理论曲线与试验数据进行对比,验证了模型在冻结岩体损伤演化规律方面的有效性和工程适用性。

1 本构模型构建

1.1 冻结岩石的弹性本构关系

岩石内部水分的分布通常被划分为结合水、自由水和毛细水。在低温梯度作用下,这3种水分的冻结行为表现出明显的差异:即温度降低时,毛细水首先被冻结,其次是自由水,最后是结合水。相关研究表明,饱和岩石在设定温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下保持12 h,其内部约96%的毛细水和自由水被冻结,剩余未冻水主要为结合水^[27]。

假定冻结岩石中的岩石颗粒为骨架,其内部冰颗粒作为填充物,且岩石颗粒与冰颗粒之间存在完全黏结^[28-29]。分别定义岩石(下标s)与孔隙冰(下标i)的弹性参数为:体积模量 K_s 、 K_i ,剪切模量 G_s 、 G_i ,泊松比 ν_s 、 ν_i 。基于细观力学混合律理论,推导得到复合介质的等效体积模量 K 和等效剪切模量 G 为

$$K = \phi_s K_s + \phi_i K_i \quad (1)$$

$$G = \phi_s G_s + \phi_i G_i \quad (2)$$

式中: ϕ_s 和 ϕ_i 分别为岩石和孔隙冰的体积分数,且满足关系式: $\phi_s + \phi_i = 1$ ^[28]。

根据各向同性材料弹性参数之间的关系,体积模量 K 和剪切模量 G 与弹性模量 E 和泊松比 ν 的转换关系为

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

$$E = \frac{[\phi_s E_s (1-2\nu_i) + \phi_i E_i (1-2\nu_s)] [\phi_s E_s (1+\nu_i) + \phi_i E_i (1+\nu_s)]}{\phi_s E_s (1+\nu_i)(1-2\nu_i) + \phi_i E_i (1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \quad (5)$$

$$\nu = \frac{\phi_s E_s \nu_s (1+\nu_i)(1-2\nu_i) + \phi_i E_i \nu_i (1+\nu_s)(1-2\nu_s)}{\phi_s E_s (1+\nu_i)(1-2\nu_i) + \phi_i E_i (1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \quad (6)$$

通过调整岩石和冰的体积分数,可获得不同饱和度和条件下冻结岩石的等效复合参数。需要注意的是,由于结合水的存在,岩石内部的未冻水分在低温作用下始终存在,且在相同温度下冰水相变过程基本保持恒定^[29]。必要时可在冰的体积分数中引入描述冰水相变过程的方程。假设特定温度下冰与水之间的相互转化可忽略不计。

1.2 损伤变量与本构关系的建立

根据相关文献,Weibull 统计分布函数可与损伤力学相结合,用于描述岩石在加载过程中的损伤演化过程,特别是在微裂纹萌生和扩展的统计特性方面,能够为损伤模型提供有效的概率基础^[15]。因此,假定冻结岩石的微元应力水平服从 Weibull 函数分布,可得密度函数为

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

对式(7)积分,可得分布函数 $F(x)$ 为

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{F} \right)^m \right] \quad (8)$$

式中: x 为微元体强度随机分布变量; m 和 F 分别为关于 Weibull 分布函数的形状参数和尺度参数。形状参数 m 表征岩石微元强度的离散程度或岩石内部的非均质性,而尺度参数 F 则表征岩石微元强度的平均水平^[15, 30]。

冻结岩体的损伤演化可表征为多相介质内部缺陷的渐进扩展过程,其细观结构呈现为由非均质颗粒组成的随机分布微元体系。当荷载产生的等效应力超过特征阈值时,微元体将发生渐进式破坏,宏观表现为强度劣化现象,即岩石发生损伤。因此,冻结岩石的损伤变量 D 可由式(9)给出^[17]。

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

式中: N_f 为恒定荷载下冻结岩石微元体累计破坏的数目; N 为冻结岩石微元体总数。

设微元体的临界应力值为 σ , 则冻结岩石微元体累计破裂的数量 N_f 为

$$N_f = \int_0^\sigma N f(\sigma) d\sigma = N \int_0^\sigma f(\sigma) d\sigma \quad (10)$$

通过弹性参数转换关系,可以建立冻结岩石等效化弹性模量 E 和等效化泊松比 ν , 表达式为

式中: σ 为应力值。

根据式(9)和式(10)得到总损伤为

$$D = \frac{N_f}{N} = \frac{N \int_0^\sigma f(\sigma) d\sigma}{N} = \int_0^\sigma f(\sigma) d\sigma \quad (11)$$

将式(7)代入式(11)中的 $f(\sigma)$, 并对 σ 积分可得

$$D = 1 - \exp \left[- \left(\frac{f(\sigma)}{F} \right)^m \right] \quad (12)$$

基于 Lemaitre 应变等价原理^[31], 三维各向同性损伤状态下有效应力张量 σ' 与名义应力张量 σ 满足关系

$$\sigma' = \frac{\sigma}{1-D} \quad (13)$$

式中, σ 为名义应力矩阵, σ' 为有效应力矩阵, D 为损伤矩阵。

根据广义胡克定律

$$\epsilon'_i = \frac{1}{E} [\sigma'_i - \nu(\sigma'_j + \sigma'_k)], (i, j, k = 1, 2, 3) \quad (14)$$

式中: ϵ_i 为应变值, ν 为等效泊松比, E 为等效弹性模量。

将式(13)代入到式(14)中可得

$$\epsilon_i = \frac{1}{E(1-D)} [\sigma_i - \nu(\sigma_j + \sigma_k)] \quad (15)$$

将式(12)代入式(15), 并整理可得

$$\sigma_i = \epsilon_i E \exp \left[- \left(\frac{f(\sigma)}{F} \right)^m \right] + \nu(\sigma_j + \sigma_k) \quad (16)$$

1.3 微元体强度的确定

冻结岩石微元体是用于细观损伤分析的基本单元, 相当于连续介质力学中的质点。微元体遵循 Weibull 统计分布, 通过参数调整能够准确描述缺陷的统计分布, 反映岩石不同部位力学性能的差异, 从而更准确地模拟岩石的整体力学行为。

引入 Drucker-Prage 准则作为岩石微元体的破坏依据^[32], 即

$$f(\sigma') = (\alpha_0 I_1 + \sqrt{J_2}) \quad (17)$$

式中: $\alpha_0 = \sin \varphi / \sqrt{9 + 3 \sin^2 \varphi}$, φ 为冻结岩石的内摩擦角; I_1, J_2 分别为应力张量的第一不变量和应力偏

量的第二不变量。

应力张量的第一不变量和应力偏量的第二不变量的表达式为

$$I_1 = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3 \quad (18)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2] \quad (19)$$

据三轴压缩试验条件 $\sigma_2 = \sigma_3$, 由式(13)和(14)求解式(18)和(19)可得

$$I_1 = \frac{E\epsilon_1(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{\sigma_1 - 2\nu\sigma_3} \quad (20)$$

$$\sqrt{J_2} = \frac{E\epsilon_1(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\nu\sigma_3)} \quad (21)$$

将式(20)和式(21)代入式(17)中, 可得

$$f(\sigma) = \alpha_0 \frac{E\epsilon_1(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{\sigma_1 - 2\nu\sigma_3} + \frac{E\epsilon_1(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\nu\sigma_3)} \quad (22)$$

1.4 统计损伤本构模型

岩石在受荷破坏过程中, 其内部裂隙系统呈现的演化特征主要包括压密闭合、渐进扩展和网络贯通 3 个典型阶段^[33]。初始加载阶段, 外部载荷主要作用于岩石内部原生裂隙的闭合过程, 此时材料呈线弹性响应, 对应应力-应变曲线呈线性特征。当荷载持续增大至临界值时, 裂隙进入稳定扩展阶段, 材料开始呈现显著损伤特性, 这一临界值即为阈值应力 σ_{ci} 。Martin 等学者^[34]通过花岗岩三轴压缩试验建立了具有工程应用价值的阈值应力计算方法, 其定义式为

$$\sigma_{ci} = (25 \sim 40\%) \sigma_c \quad (23)$$

式中: σ_c 为峰值应力。

基于孔隙冰填充岩石骨架的基本假设, 选取 Martin 方法中理论计算上限值(取峰值强度 40%)作为阈值应力基准, 其对应的轴向应变参数定义为阈值应变 ϵ_{ci} 。通过将式(5)、式(6)和式(22)联立代入本构关系式(16), 可建立后阈值阶段的岩石损伤本构模型

$$\sigma_1 = \epsilon_1 E \exp\left[-\left(\frac{f(\sigma)}{F}\right)^m\right] + 2\nu\sigma_3 \quad (24)$$

式中: E 、 ν 和 $f(\sigma)$ 分别由式(5)、(6)和(22)确定。

需特别说明的是, 冻结岩石本构行为呈现显著阶段特征。后阈值阶段(损伤发展阶段)由式(24)表征其非线性力学响应; 前阈值阶段(弹性变形阶段)则采用二次多项式拟合方法构建本构关系。根据应力-应变曲线必通过坐标原点(0, 0)的边界条件, 该阶段本构函数可设定为

$$\sigma_1 = A\epsilon_1^2 + B\epsilon_1 \quad (25)$$

式中: A 、 B 分别为二次函数的拟合系数。

结合式(24)、(25)可得

$$\sigma_1 = \begin{cases} A\epsilon_1^2 + B\epsilon_1, & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{ci} \\ \epsilon_1 E \exp\left[-\left(\frac{f(\sigma)}{F}\right)^m\right] + 2\nu\sigma_3, & \epsilon \geq \epsilon_{ci} \end{cases} \quad (26)$$

式中: E 和 ν 分别为由细观力学混合律修正后冻结岩石的等效弹性模量与等效泊松比。

2 本构模型参数确定

2.1 求解参数 m 和 F

为确保本构建模准则的物理明确性, 模型参数辨识需满足: 其一需严格遵循边界条件, 其二须与岩石宏观力学参数(等效弹性模量 E 、等效泊松比 ν 等)关联。基于三轴试验可获取表观应力 σ_1 、 σ_3 及应变 ϵ_1 等试验参数。采用多元线性回归方法进行参数反演, 可将式(24)重构为^[31]

$$\frac{\sigma_1 - 2\nu\sigma_3}{E\epsilon_1} = \exp\left[-\left(\frac{f(\sigma_1)}{F}\right)^m\right] \quad (27)$$

对式(27)两边分别取对数

$$Y = mX - m \ln F \quad (28)$$

其中

$$X = \ln f(\sigma_1) \quad (29)$$

$$Y = \ln\left[\ln\left(\frac{E\epsilon_1}{\sigma_1 - 2\nu\sigma_3}\right)\right] \quad (30)$$

通过试验数据进行线性拟合可得 m , 进而求得 F 。

2.2 求解参数 A 和 B

岩石的破坏过程是内部裂隙不断调整的过程。在宏观力学特性上, 岩石的应力-应变曲线在弹性阶段与损伤演化阶段的交界处应保持连续性, 即在阈值点附近的模型曲线应无间断, 可得出

$$E\epsilon_{ci} \exp\left[-\left(\frac{f(\sigma_{ci})}{F}\right)^m\right] + 2\nu\sigma_3 = A\epsilon_{ci}^2 + B\epsilon_{ci} \quad (31)$$

将式(31)两边除以 ϵ_{ci} , 并整理可得

$$E \exp\left[-\left(\frac{f(\sigma_{ci})}{F}\right)^m\right] + \frac{2\nu\sigma_3}{\epsilon_{ci}} = A\epsilon_{ci} + B \quad (32)$$

此外, 岩石在阈值应力附近的破坏速率, 即裂隙调整速率, 也应保持连续性。因此, 基于一阶导数的概念, 阈值点附近模型的一阶导数曲线也应连续, 可得

$$\left.\frac{\partial \sigma_1}{\partial \epsilon_1}\right|_{\epsilon=\epsilon_{ci}} = 2A\epsilon_{ci} + B \quad (33)$$

令

$$\begin{cases} X = E \exp\left[-\left(\frac{f(\sigma_{ci})}{F}\right)^m\right] + \frac{2\nu\sigma_3}{\epsilon_{ci}} \\ Y = \left.\frac{\partial \sigma_1}{\partial \epsilon_1}\right|_{\epsilon=\epsilon_{ci}} \end{cases} \quad (34)$$

求解方程组(34)可得

$$\begin{cases} A=(Y-X)/\epsilon_{ci} \\ B=2X-Y \end{cases} \quad (35)$$

3 模型验证及分析

3.1 试验验证

为验证模型的准确性,基于不同冻结温度下砂岩三轴试验结果对模型进行验证。试验样本取自四川某隧道工程砂岩层,首先采用自动取芯机获取岩芯,再经双端面磨石机加工形成标准圆柱体试件(直径50 mm、高度100 mm),精度控制在直径(50±0.3)mm、高度(100±5)mm范围内(见图1)。为降低试验样本离散性影响,完成制备的试件均须通过质量和波速筛选,基本物理参数详见表1。

表 1 试样基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of samples

温度/℃	干密度/ (g/cm ³)	饱和密度/ (g/cm ³)	孔隙率/%	纵波波速/ (m/s)
-1	2.54	3.16	19.6	5 340
-5	2.52	3.12	19.2	5 046
-10	2.53	3.13	19.2	5 131
-20	2.54	3.15	19.3	5 286

低温作用下室内三轴压缩试验采用大连海事大学与长春朝阳试验机厂联合研制的RLW-2000型低温岩石三轴试验系统,如图1所示。该设备轴向最大加载能力为2 000 kN,围压最高可达80 MPa,最低可控温度为-30 ℃,可实现应力控制与位移控制等多种加载模式,测控精度控制在0.01%以内。该系统包含两个核心功能模块:1)伺服控制三轴压力室系统,包括:压力室、下承压头、上承压头、标准试样、环形密封垫片(聚四氟乙烯材质)、压力室基座(与主机连接)、刚性垫块、伺服活塞(位移控制精度±0.1 mm);2)全自动低温循环装置,包括:防冻液储液筒、比例调节阀、保温层、冷浴室、出液管路、进液管路、冷却机、温度传感器。

表 2 不同冻结温度下的三轴试验数据

Table 2 The triaxial test data at various freezing temperatures

温度/℃	峰值应力 σ_c /MPa	峰值应变 $\epsilon_c/10^{-3}$	弹性模量 E /MPa		泊松比 ν		围压/MPa	m	F
			岩石	冰	岩石	冰			
-1	42.25	7.80	6157	407	0.172	0.023	5	1.759	51.636
-5	46.68	8.81	6679	462	0.191	0.028		2.016	57.270
-10	48.62	9.02	6753	559	0.211	0.035		2.164	58.423
-20	52.86	11.44	6881	1 319	0.226	0.041		2.257	61.276

不同冻结温度条件下砂岩的本构模型曲线与试验结果对比分析如图2和表2所示。结果表明,砂岩的弹性模量和峰值强度随温度降低呈显著递



图 1 RLW-2000 岩石三轴仪及冷却系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of RLW-2000 rock triaxial instrument and cooling system

基于冻结法施工的温度历程特征,试验设定-1、-5、-10、-20 ℃等四个温度工况。低温三轴试验按以下步骤进行:1)对通过波速筛选的试件进行真空加压饱和处理,确保达到完全饱和状态;2)完成三轴压力室装样与传感器布设后,启动低温控制系统以10 ℃/h速率进行梯度降温,待温度稳定至设定值后维持恒温12 h;3)采用应力控制模式分级施加围压至5 MPa;4)切换为位移控制模式施加轴压,加载速率控制在0.05 mm/min。根据试验结果及模型参数的求解过程,采用参数辨识方法确定了各温度工况下模型参数取值如表2所示。其中,孔隙冰的力学参数参考文献[35]的试验数据,但该文献中未设定-1 ℃的温度条件,因此-1 ℃的孔隙冰力学参数通过经验拟合计算得到。随后采用式(26)计算模型应力-应变曲线,并与试验数据对比验证,结果如图2所示。

增趋势,这主要归因于低温相变过程中孔隙水结晶有效填充了岩石骨架的微观孔隙结构,并且在颗粒接触界面形成了胶结作用,从而显著增强了岩石颗

粒间的黏聚强度^[14]。需要注意的是,砂岩的峰值强度与弹性模量在温度由 -1°C 降至 -5°C 区间的增幅高于 -5°C 至 -20°C 区间。砂岩的峰值应变随温度降低同样呈现增长的趋势,由 -1°C 时的7.80增加至

-20°C 时的11.44。相关研究表明^[35],孔隙冰的刚度随温度降低而增加,从而延缓砂岩试件的破坏阈值,但在 -10°C 以下低温环境中,试件破坏时会呈现脆性断裂特征。

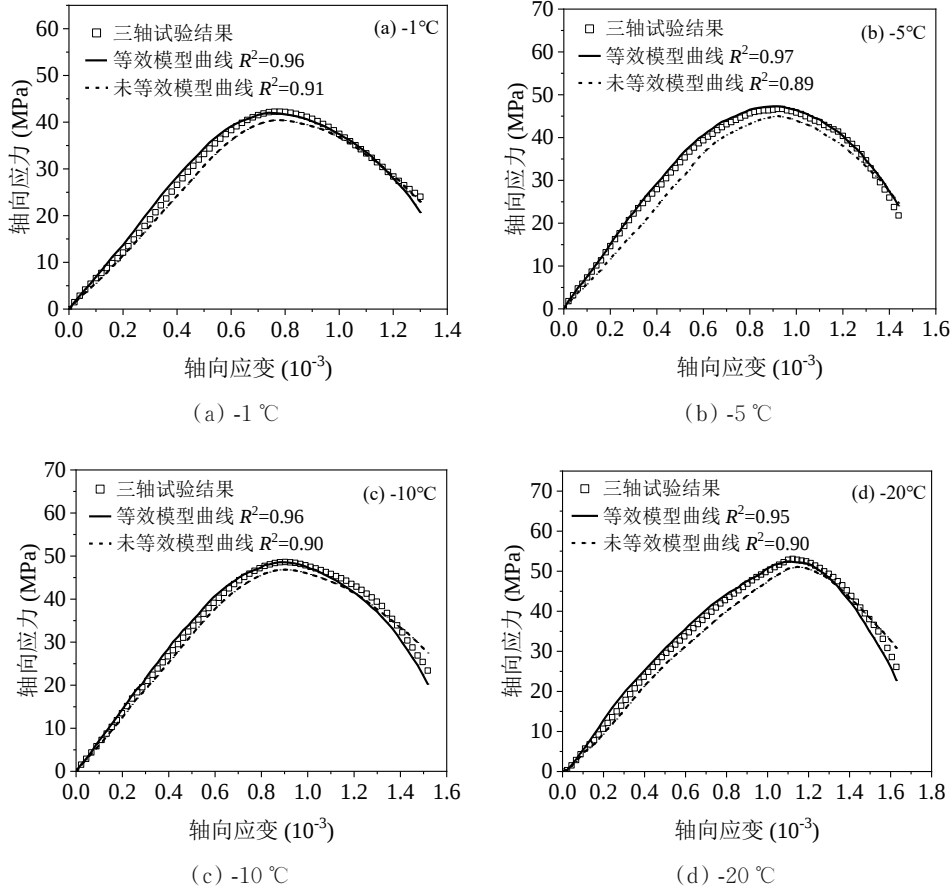


图2 不同冻结温度下的模型曲线与试验对比结果

Fig.2 Comparison of model curves versus experimental results at various freezing temperatures

通过图2的对比分析可以发现,基于岩石-孔隙冰力学参数等效化方法构建的本构模型,相较于未考虑孔隙冰的常规模型,在宏观力学响应方面呈现出更早的损伤演化起始特征,表明孔隙冰充填岩石初始孔隙后,缩短了砂岩应力-应变曲线中的初始压实阶段。等效化模型展现出更高的拟合精度,其拟合系数 R^2 在 -1°C 、 -5°C 、 -10°C 、 -20°C 时分别达到0.96、0.97、0.96、0.95,较常规模型(平行条件下 R^2 为0.91、0.89、0.90、0.90)有所提升。此外,虽然两类模型的峰前应力-应变曲线形态差异较小,但在峰后软化阶段,等效化模型展现出与试验数据更高的拟合度。这种提升源于细观力学混合律的应用,使模型能够准确表征孔隙冰与岩石骨架共同承载的力学特性,从而更真实地反映冻结岩体的渐进损伤过程。

3.2 低温砂岩的损伤演化过程

根据三轴试验结果确定本构模型参数后,采用

式(12)计算得出不同冻结温度和饱和度下砂岩的损伤演化曲线,分别如图3和图4所示。

由图3可知,可对冻结岩石的损伤过程进行3阶段划分:1)初始压实阶段:损伤变量趋近于零值,主要为含未冻水的孔隙结构在低应力状态下的压

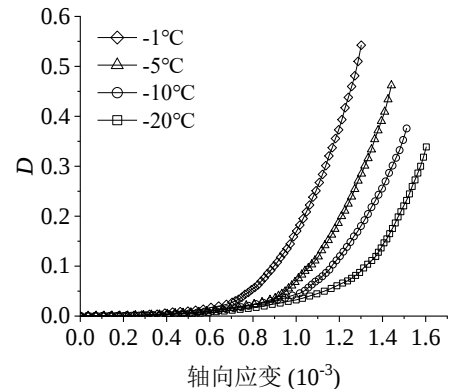


图3 不同冻结温度下砂岩的损伤演化曲线

Fig.3 Damage evolution curve of sandstone with various freezing temperature

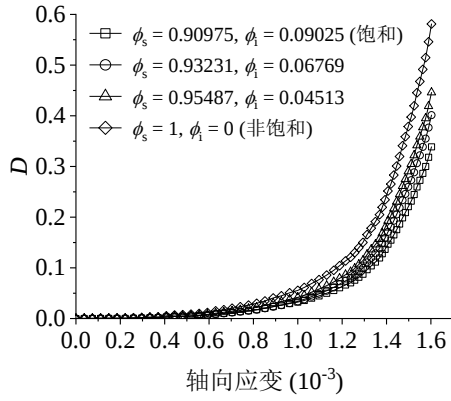


图4 不同含水率下砂岩的损伤演化曲线

Fig.4 Damage evolution curve of sandstone with various saturations

密过程;2)损伤发展阶段:随着轴向应力超过压密临界值,岩石骨架与孔隙冰开始发生共同损伤,此时损伤演化曲线呈现上升趋势,其斜率随温度降低呈递减规律;3)临界破坏阶段:当加载水平达到阈值应力后,损伤演化曲线呈现凹形加速上升趋势,且损伤值随温度降低呈递减规律。这表明低温环境形成的孔隙冰充填效应可有效抑制裂隙扩展,通过降低损伤累积速率提升砂岩平均强度。对比分析图4中不同饱和度砂岩的损伤演化曲线可知,饱和度降低导致砂岩损伤阈值呈现单调递增趋势,其损伤发展速率随饱和度下降显著加快,这证实孔隙冰对砂岩损伤进程具有抑制作用。但在一定的饱和度区间内,砂岩的损伤阈值增长有限,说明该区间孔隙冰的抑制效应趋于弱化。结合微观冻胀理论^[11],在较低的温度下,孔隙冰膨胀产生的附加应力将加剧砂岩脆性破坏倾向。因此,在人工冻结法工程设计中,需综合考虑温度梯度与饱和度的协同调控,通过优化参数组合实现冻胀抑制与强度提升的平衡。

此外,王伟等^[30]定义临界损伤度为峰值应力时的应变对应的损伤变量 D_c ,即

$$D_c = 1 - \exp \left[- \left(\frac{f(\sigma_c)}{F} \right)^m \right] \quad (36)$$

式中: $f(\sigma_c)$ 为峰值应力对应的微元强度。

基于临界损伤度与岩石强度参数的相关性分析,该指标可有效表征岩石材料的破坏临界状态。图5为不同温度与饱和度下砂岩临界损伤度的演化规律。

由图5(a)可知,临界损伤度随温度降低呈降低趋势,二者大致呈线性关系。结合相关研究^[35]可知,孔隙冰的刚度与胶结强度随温度降低而增加,可有效延缓砂岩的损伤阈值,改善岩石在等效损伤条件

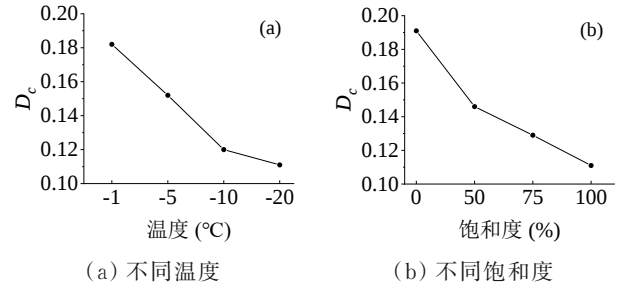


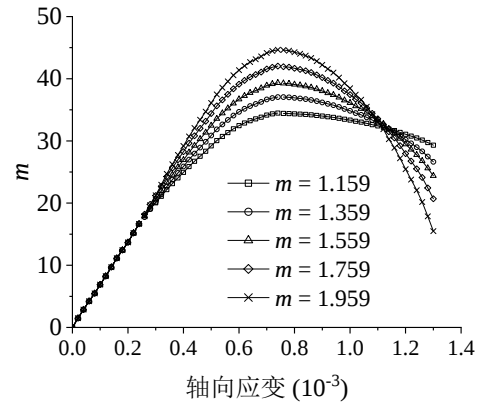
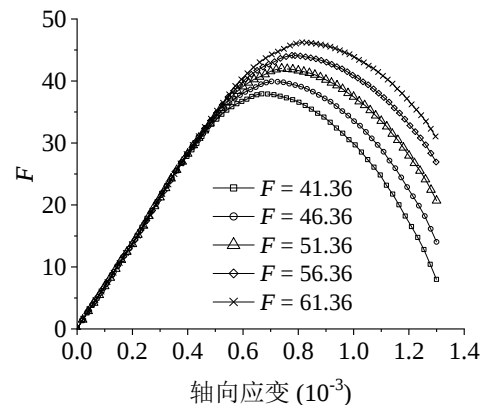
图5 不同温度和饱和度下砂岩的临界损伤度

Fig.5 Critical damage in sandstone at various temperatures and saturations

下的承载特性。在饱和度方面,由图5(b)可知,临界损伤度随饱和度升高呈现降低趋势。这说明高饱和度砂岩在破坏时具有更低的损伤阈值,而低饱和度砂岩因孔隙冰胶结作用减弱,更易发生结构失稳。

3.3 参数对模型曲线的影响

在表征岩石强度及破坏行为时,形状参数 m 和尺度参数 F 的取值决定了模型曲线的形态特征。当饱和度保持恒定且冻结温度设定为 -1°C 时,通过调整 m 和 F 参数的取值组合,可获得如图6和图7所示的全应力-应变曲线演变规律。

图6 损伤模型随 m 变化关系Fig.6 Relation of damage model along with parameter m 图7 损伤模型随 F 变化关系Fig.7 Relation of damage model along with parameter F

由图6和图7可知,模型全应力-应变曲线随参数取值变化的演化规律呈现分段性特征。在峰前初始变形阶段,曲线形状几乎不受 Weibull 参数的影响。当岩样达到极限强度后,参数 m 和 F 取值的增加使曲线产生上移趋势。值得注意的是,两参数对曲线趋势的调控作用主要集中体现在峰后软化阶段。如图6所示,参数 m 从 1.159 增至 1.959 时,岩石峰值强度增加 29.55%,残余强度则降低 47.18%,同时峰后曲线斜率呈增大趋势。这反映 m 值增大提升了岩石内部的均匀性,宏观表现为峰值强度升高,同时加速了损伤局部化发展,即残余强度降低且应变软化速率加快。不同 m 值对应的曲线组在峰值强度与残余强度区间均存在交点,且全应力-应变曲线在峰值点附近的曲率变化与 m 值呈正相关,表明 m 是影响岩石非均质性和损伤演化模式的关键参数。^[15]图7结果表明,当 F 值由 41.36 增至 61.36 时,岩石峰值强度增加 21.88%,对应的临界应变值同步增加 12.74%。这反映 F 值增大提高了岩石微元强度的平均水平,宏观表现为岩石整体承载能力增强,达到峰值强度所需的应变增大。在此参数变化范围内,各曲线组在峰后阶段保持近似平行关系,整体呈现向右上方偏移趋势,表明 F 是表征岩石宏观统计平均强度的量值^[30]。

3.4 低温对模型参数的影响

形状参数 m 的值与岩石脆性特征相关,其宏观力学响应表现为砂岩试件破坏模式脆性化加剧,且破坏阈值向高应力区域迁移。与之相对应,尺度参数 F 作为强度基准量,其物理意义为材料宏观承载能力的强化程度,具体表现为相同约束条件下材料临界破坏应力的提升。基于此,图8与图9分别给出参数 m 和 F 随冻结温度变化的演化规律。

由图8和图9可知,参数 m 和 F 的演化特征与冻结温度呈负相关关系,其数值均随温度降低呈现单调递增趋势。两参数的增长趋势与试件力学参数的增长趋势相同,即在 -1℃至-5℃区间的增幅高于 -5℃至-20℃区间。结合参数 m 和 F 的物理意义可知,温度降低使得砂岩内部微元强度分布更加集中,岩石的均质性增强,进而提高了岩石微元强度的平均水平。这种变化规律的机理在于孔隙冰的

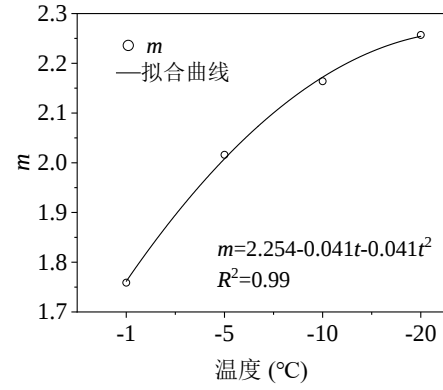


图8 参数 m 与温度的关系

Fig.8 Relationship between m versus temperature

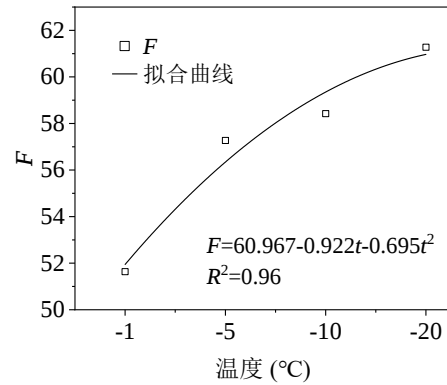


图9 参数 F 与温度的关系

Fig.9 Relationship between F versus temperature

填充与强化作用:砂岩试件内部孔隙水多数于 -5℃之前被冻结,在达到冻结温度 -5℃后,岩石内部的冻结自由水和冻结毛细水快速填充了岩石颗粒骨架,减少了贯通孔隙,并在颗粒接触界面形成冰胶结,提升了岩石骨架的连续性。这导致微元强度分布范围变窄(m 值增大),同时孔隙冰本身提供额外的强度和刚度,共同提升了微元强度的平均值(F 值增大)。根据图8和图9的参数 m 和 F 的分布趋势,得到两参数随冻结温度的变化关系拟合关系式

$$m = 2.254 - 0.041t - 0.041t^2 \quad (37)$$

$$F = 60.967 - 0.922t - 0.695t^2 \quad (38)$$

将式(37)和(38)代入式(24),得到基于经验公式的低温砂岩统计损伤本构方程,其完整表达式如式(39)所示。该方程可经试验验证后,为冻结壁设计参数优化提供理论依据,也可用于成孔施工阶段的冻结壁稳定性评估。

$$\sigma_1 = \varepsilon_1 E \exp\left(\frac{f(\sigma)}{60.967 - 0.922t - 0.695t^2}\right)^{2.254 - 0.041t - 0.041t^2} + 2\nu\sigma_3 \quad (39)$$

4 结论

1) 基于细观力学混合律理论建立岩石-冰复合介质力学参数的等效化方法,结合 Weibull 分布函

数与 Druck-Prager 强度准则,构建了考虑孔隙冰的岩石本构模型,并提出系统化的参数确定流程。

2) 通过室内三轴试验验证了等效化本构模型的准确性,该模型在应力-应变曲线形态特征方面与

试验结果的拟合精度较常规模型提高约 7.22%。

3) 形状参数 m 和尺度参数 F 均随着温度降低均呈增长趋势,表明孔隙冰的填充与胶结作用提升了砂岩的均质性与微元平均强度,宏观上对应为砂岩峰值强度的提升。

4) 低温在一定饱和度范围内对砂岩力学性能具有强化作用,但饱和度超过 50% 且温度低于 -10°C 时,砂岩临界损伤度的下降速率降低,脆性破坏倾向增强。因此,人工冻结法工程需综合控制温度与饱和度的临界阈值,以实现冻胀抑制与强度提升的平衡,优化冻结壁设计。

参考文献

- [1] ZHOU Y F, HUANG H Y, LIU M, et al. Frost heave model and frost heaving force analysis of permafrost tunnel based on segregated ice [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 147: 105715.
- [2] WANG T T, NIU L L, LIU K, et al. Failure behaviour of frozen rock with double ice-filled flaws under Brazilian splitting tension [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 304: 110124.
- [3] SWEIDAN A H, NIGGEMANN K, HEIDER Y, et al. Experimental study and numerical modeling of the thermo-hydro-mechanical processes in soil freezing with different frost penetration directions [J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(1): 231-255.
- [4] 文彦鑫, 伍旺, 郭治岳, 等. 富水砂卵石地层地铁联络横通道人工冻结数值分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(6): 63-74.
WEN Y X, WU W, GUO Z Y, et al. Numerical simulation of artificial ground freezing for cross passage of subway in water-rich sandy cobble stratum [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(6): 63-74. (in Chinese)
- [5] CHEN A D, LI Z Q, NIE L C, et al. Deformation identification and treatment measures for a TBM tunnel crossing a fault zone: A case study [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 162: 106681.
- [6] HUANG K, HUANG S L, DING X L, et al. Study on the deformation and failure mechanism of tertiary water-rich soft rock tunnels based on the moisture migration-fracture coupling model [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 163: 106715.
- [7] 王长虹, 魏永青, 张海东, 等. 地铁车站下水水平冻结过程中冻胀的热-水-力耦合模型研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(9): 2775-2785, 2796.
WANG C H, WEI Y Q, ZHANG H D, et al. Thermo-hydro-mechanical coupling model of frost heave during horizontal freezing under subway station [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(9): 2775-2785, 2796. (in Chinese)
- [8] 刘爽, 李晓康, 李旭, 等. 渗流作用下粗粒土冻结壁交圈规律及预测模型探索[J]. 冰川冻土, 2024, 46(1): 247-259.
LIU S, LI X K, LI X, et al. Closure law and prediction model exploration of freezing wall for coarse grained soil under seepage action [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024, 46(1): 247-259. (in Chinese)
- [9] FU Y, HU J, LIU J, et al. Finite element analysis of natural thawing heat transfer of artificial frozen soil in shield-driven tunnelling [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(1): 2769064.
- [10] SEMIN M A, LEVIN L Y, ZHELNIN M S, et al. Natural convection in water-saturated rock mass under artificial freezing [J]. Journal of Mining Science, 2020, 56(2): 297-308.
- [11] 夏才初, 陈钊浩, 李强. 封闭和开放的单向冻结条件下饱和砂岩冻胀变形对比试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(9): 101-108.
XIA C C, CHEN T H, LI Q. Comparative experimental study on frost heave deformation of saturated sandstone under closed and open unidirectional freezing conditions [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2021, 40(9): 101-108. (in Chinese)
- [12] WU W, YAN Q X, LIU C Y, et al. Experimental research on microscopic and macroscopic damage evolution of artificial frozen sandy gravel [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(4): 103.
- [13] LI D W, ZHANG C C, DING G S, et al. Fractional derivative-based creep constitutive model of deep artificial frozen soil [J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 170: 102942.
- [14] 杨更社, 魏尧, 申艳军, 等. 冻结饱和砂岩三轴压缩力学特性及强度预测模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 683-694.
YANG G S, WEI Y, SHEN Y J, et al. Mechanical behavior and strength forecast model of frozen saturated sandstone under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 683-694. (in Chinese)
- [15] XUE Y, MIAO F S, WU Y P, et al. Probabilistic assessment of constitutive model parameters: Insight from a statistical damage constitutive model and a simple critical state hypoplastic model [J]. Journal of Earth Science, 2025, 36(2): 685-699.
- [16] WANG L, SU H M, QIN Y, et al. Study on dynamic constitutive model of weakly consolidated soft rock in western China [J]. Shock and Vibration, 2020, 2020(1): 8865013.
- [17] ZHAO Y H, ZHANG M Y, GAO J. Research progress of constitutive models of frozen soils: A review [J]. Cold

- Regions Science and Technology, 2023, 206: 103720.
- [18] XIE S J, HAN Z Y, CHEN Y F, et al. Constitutive modeling of rock materials considering the void compaction characteristics [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2022, 22(2): 60.
- [19] GU Q X, ZHANG Q, DAI W L, 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.
- [20] CHEN Y Q, ZHOU B, ZHANG C, et al. A statistical damage constitutive model of hydrate-bearing sediments based on DEM tests with flexible membrane boundaries [J]. Mechanics of Solids, 2023, 58(5): 1667-1689.
- [21] CHENG H M, YANG X B, LU J, et al. Statistical damage constitutive model based on energy conversion for rocks [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2025, 34(1): 186-210.
- [22] 贾宝新, 陈国栋, 刘丰涛. 高温下岩石损伤本构模型及其验证[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊2): 63-73.
- JIA B X, CHEN G D, LIU F P. Damage constitutive model of rock under high temperature and its verification [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(Sup 2): 63-73. (in Chinese)
- [23] TIAN H, ZIEGLER M, KEMPKA T. Physical and mechanical behavior of claystone exposed to temperatures up to 1 000 °C [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 70: 144-153.
- [24] WANG Z L, WANG S M, WANG J G. Hydro-mechanical coupling behavior and statistical damage constitutive model of deep marble with disturbance [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2023, 32(7): 889-913.
- [25] 张慧梅, 谢祥妙, 彭川, 等. 三向应力状态下冻融岩石损伤本构模型[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1444-1452.
- ZHANG H M, XIE X M, PENG C, et al. Constitutive model for damage of freeze-thaw rock under three-dimensional stress [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1444-1452. (in Chinese)
- [26] 张二锋, 刘慧, 康跃明, 等. 冻融受荷砂岩力学性能劣化与统计损伤模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 84-91.
- ZHANG E F, LIU H, KANG Y M, et al. Study on deterioration of mechanical properties and statistical damage model of freeze-thaw loaded sandstone [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 84-91. (in Chinese)
- [27] 宋勇军, 张君, 陈佳星, 等. 裂隙砂岩未冻水含量演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 575-584.
- SONG Y J, ZHANG J, CHEN J X, et al. Study on evolution characteristics of unfrozen water content in fractured sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 575-584. (in Chinese)
- [28] 杜善义, 王彪. 复合材料细观力学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- DU S Y, WANG B. Mesomechanics of composite materials [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [29] 宁建国, 朱志武. 含损伤的冻土本构模型及耦合问题数值分析[J]. 力学学报, 2007, 39(1): 70-76.
- NING J G, ZHU Z W. Constitutive model of frozen soil with damage and numerical simulation of the coupled problem [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39(1): 70-76. (in Chinese)
- [30] 王伟, 田振元, 朱其志, 等. 考虑孔隙水压力的岩石统计损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2): 3676-3682.
- WANG W, TIAN Z Y, ZHU Q Z, et al. Study on statistical damage constitutive model of rock considering pore water pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup 2): 3676-3682.
- [31] 李天斌, 高美奔, 陈国庆, 等. 硬脆性岩石热-力-损伤本构模型及其初步运用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1477-1484.
- LI T B, GAO M B, CHEN G Q, et al. A thermal-mechanical-damage constitutive model for hard brittle rocks and its preliminary application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1477-1484. (in Chinese)
- [32] SHI Z M, LI J T, WANG J, et al. Experimental and numerical study on fracture characteristics and constitutive model of sandstone under freeze-thaw-fatigue [J]. International Journal of Fatigue, 2023, 166: 107236.
- [33] KANG J, LIU E L, SONG B T, et al. Study on mechanical properties and constitutive model for polycrystalline ice samples [J]. Environmental Earth Sciences, 2023, 82(24): 585.
- [34] 蒋浩鹏, 姜谏男, 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.
- JIANG H P, JIANG A N, YANG X R. 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. (in Chinese)
- [35] 白瑶. 含冰裂隙红砂岩力学特性及蠕变本构模型试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
- BAI Y. Experimental research on mechanical properties and creep constitutive model of ice-filled fractured red sandstone [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2019. (in Chinese)