

考虑岩石微元强度呈对数正态分布的 冻融岩石损伤特性

罗勇¹, 杨更社^{*1}, 刘慧¹, 郁金捷¹,
刘杰², 蔺江昊¹, 贡烨辉¹

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 西安 710054; 2. 西安科技大学 理学院, 西安 710054)

摘要:冻融环境下准脆性岩石损伤力学特性对寒区工程建设有重要影响。由于准脆性岩石存在特征长度,其尺度效应不再符合 Weibull 尺度效应统计理论。本文以准脆性岩石为研究对象,考虑准脆性岩石微元强度服从对数正态分布的条件下,依据 D-P 破坏准则,运用损伤力学理论建立了围压作用下冻融准脆性岩石的损伤本构模型,对冻融准脆性岩石损伤力学特性进行了探讨。研究表明,(1) 采用对数正态分布建立的冻融准脆性岩石损伤力学本构模型与试验结果一致,该模型反映出冻融环境下准脆性岩石总损伤沿应变、围压和冻融循环路径相互作用,能够揭示出准脆性岩石损伤演化的本质特征。(2) 冻融与围压共同作用下,准脆性岩石应力-应变变化关系可划分为线弹性阶段、非线性强化阶段、应力减弱阶段以及应变衰退阶段。(3) 当准脆性岩石所受围压一定时,冻融次数是使准脆性岩石冻融受荷总损伤增大的关键因素。冻融循环次数对准脆性岩石的损伤劣化起促进作用;当准脆性岩石所受冻融循环次数不变时,冻融受荷总损伤随围压增大而减小,即围压对准脆性岩石力学性能劣化起抑制作用。相关研究成果对寒区岩体工程安全稳定性评价有一定的理论参考价值。

关键词:冻融循环;围压;准脆性岩石;对数正态分布;损伤特性

中图分类号: TU528; O346.5

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2023)01-0043-09

1 引言

随着西部丝绸之路经济带战略的推进,中巴、中蒙俄和中国-中亚-西亚等经济走廊建设的开启,在西部寒区面临众多寒区岩石工程建设难题^[1-3]。在这些寒区基础设施建设及矿产资源开发中,受昼夜和季节性冻融循环作用影响,岩石内部的天然微细观缺陷在水冰相变过程中不断扩展,对寒区岩土工程结构稳定性产生重要影响。冻融环境下岩石损伤力学特性研究成为寒区岩体工程建设的关键问题。其中,寒区岩石损伤本构模型是寒区岩石工程稳定性评价的核心内容,近年来众多学者开展了一系列研究^[4-9],并取得了丰硕的研究成果。江权等^[10]运用统计分析和假设检验的原理,从多种角度(Weibull 分布、正态分布和类 Weibull 分布)出发,对岩石特性的最优概率分布形式进行研究分析;张慧梅等^[11]运用 D-P 破坏准则和 Weibull 分布

规律,推导出考虑残余强度特性的冻融岩石损伤演化方程;杨涛等^[12]运用 Weibull 分布定律和损伤力学的基本原理,建立了冻融循环下砂岩的损伤本构模型。目前已有模型多以岩石微元强度服从 Weibull 分布为基础进行力学本构关系研究,但 Weibull 分布函数的尺度效应使得统计理论的范围存在一定的局限性,并不能适用于所有岩石岩性,尤其是准脆性岩石^[13-19]。

由于岩石细观损伤扩展而诱发的宏观非线性力学行为本质是由岩石的细观非均匀性造成的,确定岩石细观单元的物理力学性能的概率分布,以形成损伤演化分析的典型单元体,是进行准脆性岩石损伤分析的基础。对数正态分布能够反映准脆性岩石内部结构的不均匀性^[20]。因此,对于岩石和混凝土等准脆性材料中产生的细观非均匀性损伤引发的宏观非线性力学损伤,宜采用对数正态分布描述。

鉴于此,以西部寒区准脆性岩石为对象,假定准脆性岩石微元强度服从对数正态分布,并依据 D-P 破坏准则,建立了冻融准脆性岩石在围压作用下的损伤本构模型。探讨寒区冻融准脆性岩石在围压作用下的损伤力学特性。

收稿日期:2021-09-16;修改稿收到日期:2021-12-05.

基金项目:国家自然科学基金(42177144;51774231;41702339);
陕西省自然科学基金(2020JZ-53)资助项目.

作者简介:杨更社^{*}(1962-),男,博士,教授
(E-mail: yanggs@xust.edu.cn).

2 冻融与荷载作用下准脆性岩石损伤模型

准脆性岩石是一种具有原生缺陷的晶体损伤材料^[21],内部骨架晶体中随机分布的各种形状和大小的微裂纹和微孔常用作准脆性岩石的初始损伤,在冻融与荷载共同作用下,准脆性岩石内部微裂隙逐渐挤压并缓慢闭合,而后扩展直至贯通破坏。因此,冻融环境下准脆性岩石在外荷载作用下的损伤破坏特性呈现出复杂的非线性。

2.1 准脆性岩石的损伤变量

准脆性岩石作为一种天然非均质多孔脆性介质材料,内部具有许多随机分布的缺陷,而各种缺陷的力学性质也有很大的差异,这使得准脆性岩石的力学性质很难用单一的特征变量来精确描述。若将准脆性岩石分割成无数岩石基元体,则可认为准脆性岩石强度是由大量因素综合作用的结果。由于准脆性岩石内部结构的非均匀性,每个准脆性岩石单元具有不同的强度。考虑准脆性岩石破坏过程中的损伤是一个连续的过程,假设

(1) 准脆性岩石基元体的材料性质为各向同性。

(2) 准脆性岩石基元体在破坏前服从胡克定律。

(3) 准脆性岩石各基元体破坏强度服从概率分布,随 $f(\sigma')$ 分布密度是 $P[f(\sigma')]$,则定义损伤变量为破坏概率^[22]

$$D = \int_{-\infty}^{f(\sigma')} P[x] dx \quad (1)$$

在荷载作用下,准脆性岩石连续累积损伤,内部微缺陷不断发生扩展直至变形破坏。因此,准脆性岩石的损伤主要是由岩石局部微元体的不均匀性和破坏效应引起的。鉴于此,以对数正态分布作为准脆性岩石单元的强度分布函数,即

$$P[F] = \frac{1}{FS_0\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln F - F_0}{S_0}\right)^2\right] \quad (2)$$

式中 F 为微元强度随机分布变量, S_0 和 F_0 为对数正态分布参数,反映的是准脆性岩石物理力学性质的参数。

由式(1,2)可得准脆性岩石的损伤变量 D ^[23] 为

$$D = \int_{-\infty}^F P[x] dx = \int_{-\infty}^F \frac{1}{xS_0\sqrt{2\pi}} \times \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln F - F_0}{S_0}\right)^2\right] dx = \phi\left[\frac{F - F_0}{S_0}\right] \quad (3)$$

式中 $\phi[(\ln F - F_0)/S_0]$ 为标准正态分布函数, D 值的大小反映了准脆性岩石材料内部损伤的程度。

当 $D = 0$ 时,说明准脆性岩石没有损伤;当 $D = 1$ 时,说明准脆性岩石已经断裂破坏;当 $0 < D < 1$ 时,说明准脆性岩石受到损伤,但尚未断裂。因此损伤变量是在 $0 \sim 1$ 之间取值。

2.2 冻融与荷载作用下准脆性岩石的损伤本构模型

准脆性岩石在冻融循环作用下的破坏主要影响因素为,一是冻融循环条件,准脆性岩石由于外界温度的变化而遭到破坏;二是冻融循环次数,准脆性岩石经过若干次冻融循环后岩石的内部损伤具有累积性。准脆性材料的微观缺陷损伤演化随冻融次数的增加而复杂化,准脆性岩石宏观力学参数的抗压强度和弹性模量均有不同程度的降低。准脆性岩石材料的损伤和退化可以通过宏观物理量的变化来反映,弹性模量的测量相对方便,因此,将弹性模量的变化作为描述准脆性岩石冻融损伤的物理量,则冻融循环作用下准脆性岩石损伤变量 D_n 可表示为

$$D_n = 1 - E_n/E_0 \quad (4)$$

式中 E_0 和 E_n 分别为冻融之前和经历 n 次冻融循环之后准脆性岩石的弹性模量。

准脆性岩石在冻融循环和外部荷载的共同作用下,内部损伤相互影响。为了确定冻融循环作用和围压作用下准脆性岩石的总损伤变量 D_m ,做如下假设。

(1) 冻融循环之前,准脆性岩石的初始损伤为 0。

(2) 冻融环境下岩石的损伤仅考虑冻融次数对冻融岩石的损伤影响,其余因素(温度梯度等)暂不做考虑。

依据 Lemaitre 的应变等价理论,准脆性岩石的损伤本构基本关系式为

$$\{\epsilon\} = [c]\{\sigma'\} = [c]\{\sigma\}/(1 - D) \quad (5)$$

式中 $\{\epsilon\}$ 为应力矢量, $[c]$ 为弹性柔度矩阵, $\{\sigma\}$ 为名义应力矢量, $\{\sigma'\}$ 为有效应力矢量。

根据张全胜等^[24]推广后的应变等价计算原理,并结合式(1,4,5)可得冻融循环和外部荷载作用下准脆性岩石总损伤变量为

$$D_m = D + D_n - D_n D \quad (6)$$

式中 D_m 为准脆性岩石在冻融与荷载作用下的总损伤变量。

式(6)表明,冻融循环和外荷载分别作用下,均

会加剧准脆性岩石的损伤劣化,而两者共同作用时会削弱准脆性岩石的总损伤。

将式(3,4)代入式(6),得到冻融和荷载共同作用下准脆性岩石的总损伤演化方程

$$D_m = 1 - \frac{E_n}{E_0} \left[1 - \phi \left(\frac{\ln F - F_0}{S_0} \right) \right] \quad (7)$$

由式(5,8)可求得反映准脆性岩石在冻融与荷载共同作用下全过程的损伤本构模型,具体模型为

$$\sigma_1 = E_n \epsilon_1 (1 - D) + 2\mu\sigma_3 = E_n \epsilon_1 \left[1 - \phi \left(\frac{\ln F - F_0}{S_0} \right) \right] + 2\mu\sigma_3 \quad (8)$$

式中 E_n 为经历过 n 次冻融循环之后准脆性岩石的弹性模量, μ 为泊松比, σ_1 为轴向名义应力, σ_3 为侧向名义应力, ϵ_1 为轴向应变。

假定准脆性岩石的破坏服从 Drucker-Prager 准则,则在三轴试验中能够测得准脆性岩石的应力 σ_1, σ_2 和 σ_3 ($\sigma_2 = \sigma_3$) 及应变 ϵ_1 , 在这里不为 0 的有效应力为 σ'_1, σ'_2 及 σ'_3 ($\sigma'_2 = \sigma'_3$), 即随机分布的准脆性岩石微元强度分布变量可表示为

$$F = f(\sigma') = \alpha_0 I_1 + J_2^{1/2} = \alpha_0 \frac{E_n(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3} \epsilon_1 + \frac{E_n(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)} \epsilon_1 \quad (9)$$

$$\alpha_0 = \sin \phi / \sqrt{9 + 3\sin^2 \phi} \quad (10)$$

式中 c 为粘聚力, ϕ 为内摩擦角, I_1 为应力第一不变量, J_2 为应力偏量第二不变量。

上述冻融与荷载共同作用下准脆性岩石损伤本构模型的计算关键在于确定参数 S_0 和 F_0 。为了反映和描述准脆性岩石的力学行为,需要确定模型参数与岩石断裂、变形和破坏参数之间的理论关系,使模型更具通用性。

2.3 本构模型参数 S_0 和 F_0 的确定

准脆性岩石经历 n 次冻融循环后岩石全应力-应变破坏曲线上峰值点 $(\sigma_{1p}, \epsilon_{1p})$ 满足以下几何条件, (1) 当 $\epsilon_1 = \epsilon_{1p}$ 时, $\sigma_1 = \sigma_{1p}$; (2) 当 $\epsilon_1 = \epsilon_{1p}$ 时, $\partial \sigma_1 / \partial \epsilon_1 = 0$ 。

根据式(8,9)并考虑以上两个几何条件,联立求解可推导出模型的两个参数表达式

$$S_0 = \exp \left[-\frac{1}{2} X^2 - L n \left(\sqrt{2\pi} \frac{\sigma_{1p} - 2\mu\sigma_{3p}}{E_n^2 \epsilon_{1p}^2 A_c} \right) - \ln F_p \right] \quad (11)$$

$$F_0 = X S_0 + \ln F_p \quad (12)$$

式中 σ_{1p} 为特定围压下的应力峰值, ϵ_{1p} 为应力峰值处对应的应变, $X = (F_0 - \ln F_p) / S_0$ 。

式(11,12)是模型参数与岩石力学特性参数之间的关系,参数表达式中包含的准脆性岩石的宏观力学性质是通过常规力学性能试验得到的。

由式(7,9,11,12)可得冻融和荷载共同作用下准脆性岩石的总损伤演化方程为

$$D_m = 1 - \frac{E_n}{E_0} \phi \left\{ X + \frac{\sqrt{2\pi}(\sigma_{1p} - 2\mu\sigma_{3p})}{\exp\left(-\frac{1}{2}X^2\right)\epsilon_{1p}E_n} \times \ln \frac{[a_0(\sigma_{1p} + 2\sigma_{3p}) + \sqrt{3}/3(\sigma_{1p} - \sigma_{3p})](\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)\epsilon_{1p}}{(\sigma_{1p} - 2\mu\sigma_{3p})[a_0(\sigma_1 + 2\sigma_3) + \sqrt{3}/3(\sigma_1 - \sigma_3)]\epsilon_1} \right\} \quad (13)$$

根据式(13)分析冻融环境下准脆性岩石损伤特性,发现准脆性岩石的总损伤沿应变、围压和冻融循环路径演化并相互作用,并最终揭示准脆性岩石演化的本质特征。因此,所建模型能够描述准脆性岩石的损伤特性。

3 模型的验证

根据文献[25]中八宿花岗岩的试验数据对模型进行验证,其中,八宿花岗岩的内摩擦角 $\phi = 56.075^\circ$,泊松比平均值 $\mu = 0.31$,弹性模量 $E = 20 \text{ GPa} \sim 35 \text{ GPa}$,随冻融次数增加而显著降低。根据式(7,13,23,24)求得冻融与荷载共同作用下八宿花岗岩损伤本构模型的对数正态分布参数值,列入表 1。

表 1 损伤本构模型的对数正态分布参数
Tab. 1 Lognormal distribution parameters of damage constitutive model

围压 σ_3/MPa	冻融次数 n	F_0/MPa	S_0
0	0	4.637201	2.27E-06
	10	4.555036	0.013469
	20	4.456556	0.059327
	40	4.42989	1.53E-06
5	0	5.451623	0.274867
	10	5.168082	0.151767
	20	4.961123	0.117363
	40	4.801469	1.74E-06
10	0	5.752206	0.351452
	10	5.550749	0.271512
	20	5.430443	0.239342
	40	5.073696	1.86E-06
15	0	6.020959	0.417216
	10	5.94226	0.436029
	20	5.787546	0.323851
	40	5.56363	0.044072

将表1的参数值代入式(7)计算可得到冻融与荷载共同作用下八宿花岗岩损伤本构模型对应的

理论曲线。将八宿花岗岩的理论曲线与文献[25]中八宿花岗岩的试验曲线对比,如图1所示。

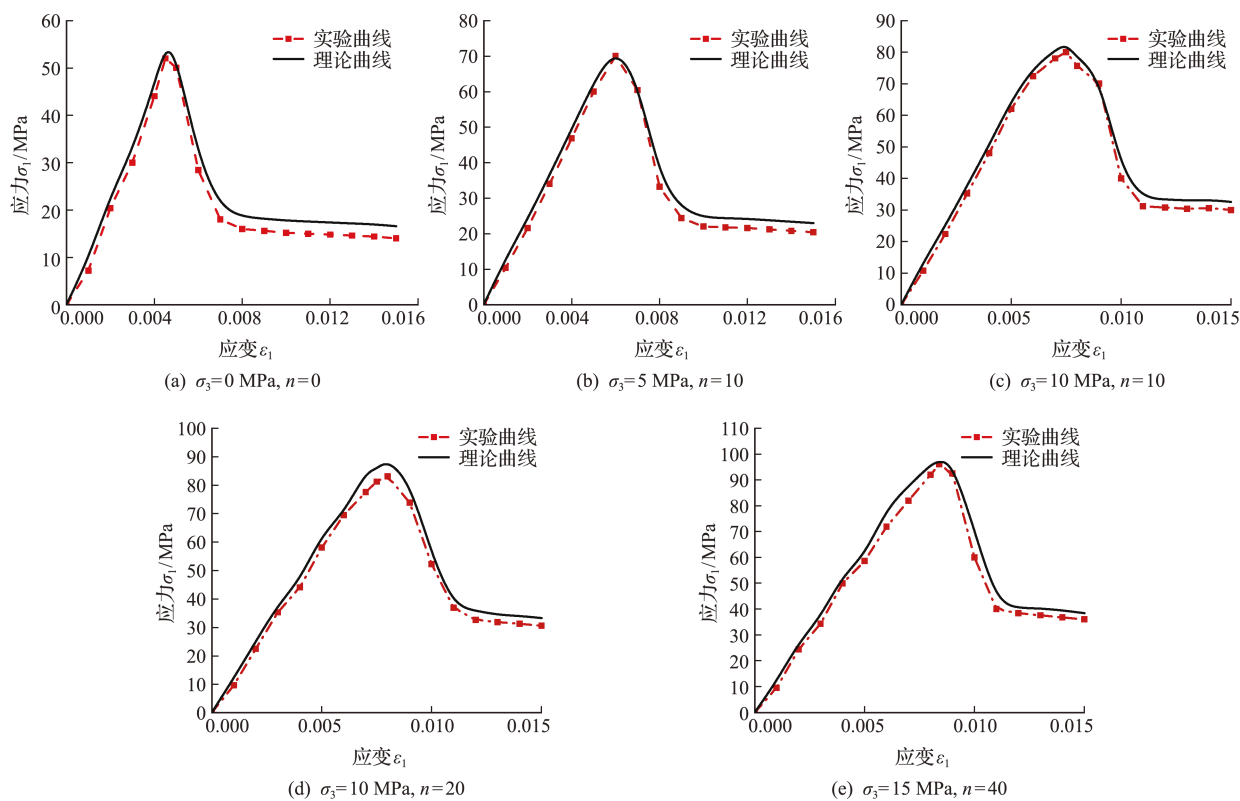


图1 八宿花岗岩理论曲线与实验曲线的比较

Fig. 1 Comparison of theoretical curve and experimental curve of Bajou granite

图1八宿花岗岩的实验曲线与理论曲线的比较表明,实验曲线和理论曲线有较好的吻合性。验证了推导的本构模型的正确性,其能够描述准脆性岩石变形破坏的全过程。

仅能描绘准脆性岩石破坏前的应力-应变变化过程,而本文的本构模型却能描绘准脆性岩石应力-应变变化全过程,说明本文模型对准脆性岩石的损伤全过程特性分析更具有针对性。

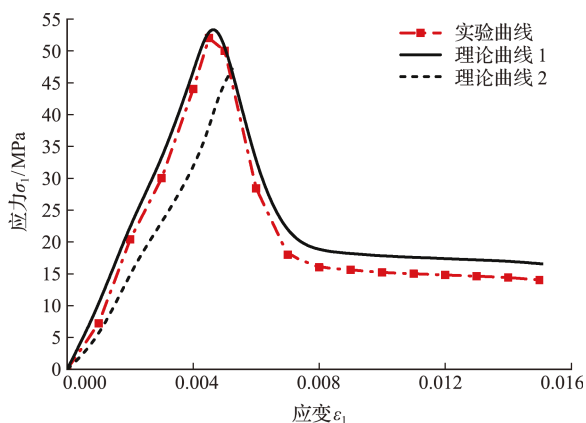


图2 实验曲线与不同理论曲线的比较

Fig. 2 Comparison between experimental curves and different theoretical curves

将文献[25]八宿花岗岩实验数据代入文献[5]中损伤本构模型后所得的理论曲线2与本文理论曲线1对比(图2),经对比可知,文献[5]本构模型

根据推导的模型对在冻融与荷载共同作用下准脆性岩石的损伤特性进行理论分析的结果(图1),在不同环境下,冻融八宿花岗岩应力-应变曲线呈现出相同的变化规律,(1)线弹性阶段,初期受荷期间,岩石内部的微裂纹和微孔隙由于压应力存在逐渐闭合;(2)非线性强化阶段,荷载逐渐增加,岩石内部的微裂隙和微裂纹进一步闭合,同时呈现相对滑动趋势,此时岩石内部裂纹并未扩展,应力应变呈非线性弹性变化;(3)应力减弱阶段,当荷载超过岩石的应力峰值后,颗粒胶结较弱区域萌生新裂纹,岩石出现损伤并稳定扩展;(4)应变衰退阶段,随着轴向荷载的继续增加,岩石损伤加速,内部的微裂纹不断扩展,直至裂纹相互贯通并形成主破裂面,此时,岩石应力突然释放,产生破坏。

综上,可将冻融与围压共同作用下准脆性岩石应力-应变变化关系划分为线弹性阶段、非线性强化阶段、应力减弱阶段以及应变衰退阶段。为研究冻融岩石破坏特征及破坏前兆信息提供判据。

4 岩石损伤特性分析

4.1 不同冻融循环次数下损伤特性分析

将表1参数值代入式(25)可计算得到一定围压下不同冻融循环次数时八宿花岗岩的总损伤演化曲线,如图3所示。

图3为八宿花岗岩在不同冻融循环次数下总损伤变量与轴向应变之间的关系曲线,分析可知,

(1) 八宿花岗岩初始损伤变量随冻融循环次数增加逐渐增加。这是由于冻融循环的过程中,当温度下降时八宿花岗岩内部晶粒收缩,孔隙水冻结而膨胀,对于不同矿物晶粒而言,膨胀系数和各结晶方向的热力学特性各不相同,颗粒受热后出现不均匀膨胀,产生冻胀力,造成八宿花岗岩损伤;当温

度上升时,岩石内部发生水冰相变,冻结应力释放,损伤变形不可恢复。反复的冻融循环导致岩石内部结构损伤不断累积,损伤变量增大。

(2) 外部荷载的作用使得八宿花岗岩的总损伤呈阶段性变化。从图3可以看出,在加载全过程中,加载初期八宿花岗岩内部的微裂纹不断发展和对接,损伤变量逐渐增加;到达屈服强度时,内部的微裂纹不断扩展,直至其相互贯通为宏观裂纹,损伤变量增长较快,在峰值强度后岩石应力突然释放,产生破坏,总损伤变量趋于1。

(3) 八宿花岗岩的损伤程度随冻融循环次数的增加而增加。从图3可以看出,当围压恒定时,冻融循环次数增加会导致八宿花岗岩损伤不断增加。这是由于在冻融循环过程中八宿花岗岩内部产生冻融损伤,而冻融损伤促使八宿花岗岩中的微裂缝扩展,八宿花岗岩的抗压能力减弱但变形能力增强,即八宿花岗岩塑性加强。

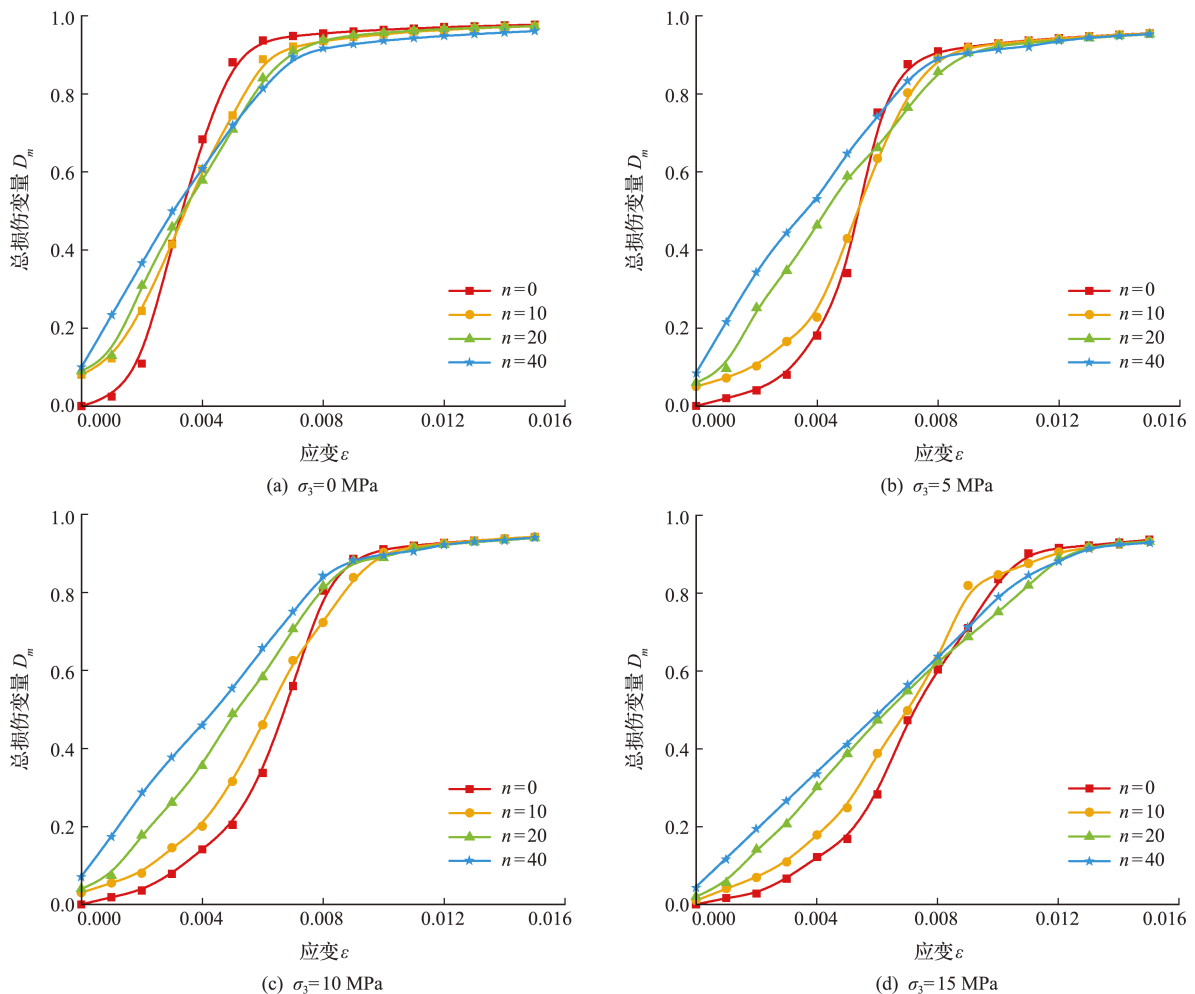


图3 不同冻融循环次数下八宿花岗岩的损伤演化曲线
Fig. 3 Damage evolution curve of Baisu granite under different freeze-thaw cycles

4.2 不同围压条件下损伤特性分析

将表1参数值代入式(25)可计算出一定冻融循环次数下不同围压时八宿花岗岩的总损伤演化曲线,如图4所示。

图4是八宿花岗岩在不同围压条件下的总损伤变量与轴向应变之间的关系曲线,分析可知,

(1) 冻融循环次数相同时,八宿花岗岩的损伤变量随围压增大而减少。其原因是在围压作用下八宿花岗岩内部的微孔隙和微裂隙逐渐压密,颗粒之间的距离逐渐减小,八宿花岗岩自身密实度提高。

(2) 围压作用对八宿花岗岩的损伤累积速率起抑制作用。在不同围压下,随着轴向应变的增

加,八宿花岗岩的损伤变量从初始值损伤变量经由S型斜拉最终阶段趋于1,而八宿花岗岩损伤累积速率随应变增长而逐渐缓慢。原因在于随着围压增加,八宿花岗岩内部晶粒之间的滑动和位错加大,从而使得八宿花岗岩的应变恢复能力降低,即八宿花岗岩的塑性提高。

(3) 围压的增加降低了八宿花岗岩损伤劣化速率。当冻融循环次数一定时,随着围压的增加,八宿花岗岩发生完全破坏时的应变在逐渐增大。其原因是在围压作用下,八宿花岗岩的微裂纹和微孔隙逐渐闭合或压实,从而改善了八宿花岗岩的性质,且八宿花岗岩抵抗损伤或破坏的能力有所提高,即宏观表现为八宿花岗岩的强度增高。

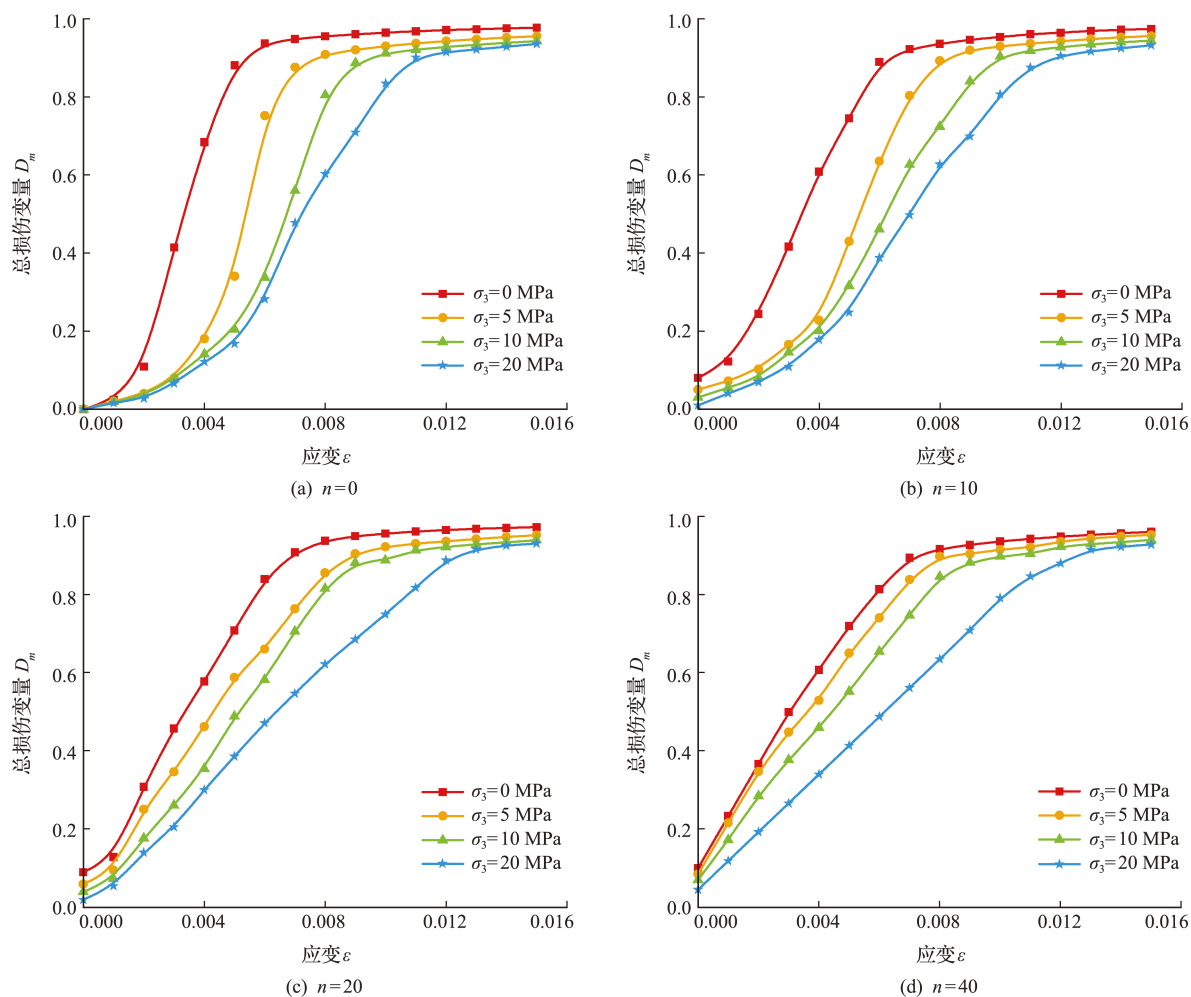


图4 不同围压下八宿花岗岩的损伤演化曲线
Fig. 4 Damage evolution curve of Baisu granite under different confining pressures

5 结 论

本文以寒区准脆性岩石为研究对象,依据损伤力学理论,考虑岩石微元强度呈对数正态分布的条件下,建立了冻融循环与外荷载共同作用下准脆性

岩石损伤本构方程,并对冻融循环作用下准脆性岩石的三轴压缩过程及损伤演化特性进行分析,主要结论如下。

(1) 运用连续介质损伤力学理论,引入统计学方法,在考虑准脆性岩石的微单元强度服从对数正

态分布的情况下,根据D-P强度破坏准则,采用全微分法对应力-应变曲线峰值处的特征值进行模型参数求解,构建了冻融准脆性岩石的损伤本构模型。冻融环境下,准脆性岩石的总损伤沿应变、围压和冻融循环不同路径演化,且准脆性岩石的损伤受冻融循环与荷载耦合作用影响。建立的模型真实地反映了准脆性岩石在围压作用下损伤特性及应力-应变状态,并揭示了准脆性岩石演化路径发展的本质特征,为寒区岩体工程安全评价提供了理论依据。

(2) 根据建立的冻融-受荷准脆性岩石损伤本构模型,考虑低温环境冻融循环作用,完成了寒区花岗岩在不同冻融循环次数和围压下损伤力学特性的理论分析。冻融准脆性岩石应力-应变关系曲线可分为线弹性、非线性强化、应力减弱以及应变衰退四个阶段。冻融循环次数加剧了准脆性岩石的损伤程度。

(3) 冻融与荷载共同作用下,围压对准脆性岩石损伤劣化起抑制作用,围压的增大降低了准脆性岩石的损伤速率。

参考文献(References):

- [1] 刘 慧,杨更社,贾海梁,等. 裂隙(孔隙)水冻结过程中岩石细观结构变化的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(12): 2516-2524. (LIU Hui, YANG Geng-she, JIA Hai-liang, et al. Experimental study on meso-structure of rock in the process of crack (pore) water freezing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(12): 2516-2524. (in Chinese))
- [2] 杨更社,申艳军,贾海梁,等. 冻融环境下岩体损伤力学特性多尺度研究及进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(3): 545-563. (YANG Geng-she, SHEN Yan-jun, JIA Hai-liang, et al. Research progress and tendency in characteristics of multi-scale damage mechanics of rock under freezing-thawing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, **37**(3): 545-563. (in Chinese))
- [3] 申艳军,杨更社,王 铭,等. 冻融-周期荷载下单裂隙类砂岩损伤及断裂演化试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(3): 709-717. (SHEN Yan-jun, YANG Geng-she, WANG Ming, et al. Experiments on the damage characteristics and fracture process of single-joint quasi-sandstone under the cyclic freezing-thawing and cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, **37**(3): 709-717. (in Chinese))
- [4] 闻 磊,李夕兵,吴秋红,等. 花岗斑岩 Holmquist-Johnson-Cook 本构模型参数研究[J]. 计算力学学报, 2016, **33**(5): 725-731. (WEN Lei, LI Xi-bing, WU Qiu-hong, et al. Study on parameters of Holmquist-Johnson-Cook ontogenetic model for granite porphyry[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2016, **33**(5): 725-731. (in Chinese))
- [5] 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 Hui-mei, XIE Xiang-miao, PENG Chuan, 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))
- [6] 张慧梅,彭 川,杨更社,等. 考虑冻融效应的岩石损伤统计强度准则研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, **46**(5): 1066-1072. (ZHANG Hui-mei, PENG Chuan, YANG Geng-she, et al. Study of damage statistical strength criterion of rock considering the effect of freezing and thawing[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, **46**(5): 1066-1072. (in Chinese))
- [7] 王 震,朱珍德,陈会官,等. 冻融作用下岩石力-热-水耦合本构模型研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(7): 2608-2616. (WANG Zhen, ZHU Zhen-de, CHEN Hui-guan, et al. A thermo-hydro-mechanical coupled constitutive model for rocks under freeze-thaw cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(7): 2608-2616. (in Chinese))
- [8] 陈 松,乔春生,叶 青,等. 冻融荷载下节理岩体的复合损伤模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, **51**(2): 100-108. (CHEN Song, QIAO Chun-sheng, YE Qing, et al. Composite damage model of jointed rock mass under freezing and thawing load[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, **51**(2): 100-108. (in Chinese))
- [9] 孟祥振,张慧梅,康晓革. 含孔隙冻融岩石的损伤本构模型[J]. 西安科技大学学报, 2019, **39**(4): 688-692. (MENG Xiang-zhen, ZHANG Hui-mei, KANG Xiao-ge. Damage constitutive model of porous rock under freeze-thaw [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2019, **39**(4): 688-692. (in Chinese))
- [10] 江 权,崔 洁,冯夏庭,等. 玄武岩力学参数的随机性统计与概率分布估计[J]. 岩土力学, 2017, **38**(3):

- 784-792. (JIANG Quan, CUI Jie, FENG Xia-ting, et al. Stochastic statistics and probability distribution estimation of mechanical parameters of basalt [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, **38**(3): 784-792. (in Chinese))
- [11] 张慧梅, 孟祥振, 彭 川, 等. 冻融-荷载作用下基于残余强度特征的岩石损伤模型[J]. *煤炭学报*, 2019, **44**(11): 3404-3411. (ZHANG Hui-mei, MENG Xiang-zhen, PENG Chuan, et al. Rock damage constitutive model based on residual intensity characteristics under freeze-thaw and load [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, **44**(11): 3404-3411. (in Chinese))
- [12] 杨 涛, 霍树义, 金坎辉, 等. 冻融循环下砂岩损伤演化及本构模型[J]. *地质与勘探*, 2020, **56**(4): 826-831. (YANG Tao, HUO Shu-yi, JIN Kan-hui, et al. Damage evolution and constitutive model under freeze-thaw cycles [J]. *Geology and Exploration*, 2020, **56**(4): 826-831. (in Chinese))
- [13] 王学滨, 潘一山, 杨小彬. 准脆性材料试件应变软化尺度效应理论研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, **22**(2): 188-191. (WANG Xue-bin, PAN Yi-shan, YANG Xiao-bin. Size effect analysis on strain softening of quasi brittle materials considering strain gradient effect [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, **22**(2): 188-191. (in Chinese))
- [14] 张 明, 李仲奎, 苏 霞. 准脆性材料弹性损伤分析中的概率体元建模[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(23): 4282-4288. (ZHANG Ming, LI Zhong-kui, SU Xia. Probabilistic volume element modeling in elastic damage analysis of quasi brittle materials [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(23): 4282-4288. (in Chinese))
- [15] 张当俊, 韩素平. 准脆性材料(岩石)结构的尺度效应[J]. *山西煤炭管理干部学院学报*, 2007, **20**(4): 145-147. (ZHANG Dang-jun, HAN Su-ping. Scale effect of quasi brittle material (rock) structure [J]. *Journal of Shanxi Coal-Mining Administrators Cadre College*, 2007, **20**(4): 145-147. (in Chinese))
- [16] Zhou H, Jia Y, Shao J F. A unified elastic-plastic and viscoplastic damage model for quasi-brittle rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008. Doi:10.1016/j.ijrmms.2008.01.004.
- [17] 于庆磊, 杨天鸿, 唐春安, 等. 基于真实细观结构的准脆性材料三维建模及应用初探 [J]. *计算力学学报*, 2010, **27**(5): 887-894. (YU Qing-lei, YANG Tian-hong, TANG Chun-an, et al. Actual meso-structure based-three-dimensional modeling method for quasi-brittle material and its primary application[J]. *Journal of Computational Mechanics*, 2010, **27**(5): 887-894. (in Chinese))
- [18] Xie N, Zhu Q Z, Xu L H, et al. A micromechanics-based elastoplastic damage model for quasi-brittle rocks[J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, **38**(8): 970-977.
- [19] 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 Sciences)*, 2018, **46**(2): 165-170. (in Chinese))
- [20] 张 明, 卢裕杰, 杨 强. 准脆性材料的破坏概率与强度尺寸效应[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(9): 1782-1789. (ZHANG Ming, LU Yu-jie, YANG Qiang. Failure probability and strength size effect of quasi-brittle materials [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(9): 1782-1789. (in Chinese))
- [21] 冯西桥, 余寿文. 准脆性材料细观损伤力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. (FENG Xi-qiao, YU Shou-wen. *Meso Damage Mechanics of Quasi Brittle Materials* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese))
- [22] 徐卫亚, 韦立德. 岩石损伤统计本构模型的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, **21**(6): 787-791. (XU Wei-ya, WEI Li-de. Study on statistical damage constitutive model of rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, **21**(6): 787-791. (in Chinese))
- [23] 曹文贵, 赵明华, 唐学军. 岩石破裂过程的统计损伤模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2003, **25**(2): 184-187. (CAO Wen-gui, ZHAO Ming-hua, TANG Xue-jun. Study on simulation of statistical damage in the full process of rock failure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, **25**(2): 184-187. (in Chinese))
- [24] 张全胜, 杨更社, 任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, **22**(1): 30-34. (ZHANG Quan-sheng, YANG Geng-she, REN Jian-xi. New study of damage variable and constitutive equation of rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, **22**(1): 30-34. (in Chinese))

[25] 郭长宝,周家作,刘筱怡,等. 青藏高原东部冻融作用下花岗岩力学性质弱化机理研究[J]. 现代地质, 2017, **31**(5):943-955. (GUO Chang-bao, ZHOU Jia-zuo, LIU Xiao-yi, et al. Research on the weakening

mechanism of the mechanical behavior for the granite in the eastern Qinghai-Tibet Plateau under the condition of freezing-thawing cycles[J]. *Geoscience*, 2017, **31**(5):943-955. (in Chinese))

Damage characteristics of freezing-thawing rock with lognormal distribution of microelement strength are considered

LUO Yong¹, YANG Geng-she^{*1}, LIU Hui¹, YU Jin-jie¹,
LIU Jie², LIN Jiang-hao¹, YUN Ye-hui¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of science, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The mechanical properties of quasi-brittle rocks damage in freeze-thaw environments have important implications for engineering construction in cold regions. Due to the presence of characteristic lengths in quasi-brittle rocks, its scale effects no longer conform to the statistical theory of Weibull scale effects. The article takes quasi-brittle rocks as the research object, based on the micro-unit strength of quasi-brittle rocks obeying a log-normal distribution, based on the D-P damage criterion, the damage mechanics theory is used to establish the intrinsic damage model of freeze-thaw quasi-brittle rocks under the action of surrounding pressure, and the damage characteristics of freeze-thaw quasi-brittle rocks are discussed. This research shows: (1) The constitutive damage model of quasi brittle rocks based on lognormal distribution is consistent with the experimental results. The model reflects the interaction of total damage of quasi brittle rocks along strain, confining pressure and freeze-thaw cycle path under a freeze-thaw environment, and can reveal the essential characteristics of damage evolution of quasi brittle rocks. (2) The stress-strain relationship of quasi brittle rocks under freeze-thaw and confining pressure can be divided into linear elastic stage, nonlinear strengthening stage, stress weakening stage and strain decline stage. (3) When the confining pressure of quasi brittle rocks is constant, the number of freezing and thawing is the key factor to increase the total damage of quasi brittle rocks. The number of cycles of freeze-thaw is a factor for promoting the damage degradation of brittle rocks. When the number of cycles of freeze-thaw is constant, the total damage of frozen thaw load decreases with the increase of confining pressure, that is, the deterioration of mechanical properties of the quasi brittle rocks under confining pressure plays a role in inhibiting the deterioration of mechanical properties. The research of this paper has a certain role in promoting the theoretical analysis of the safety and stability of rock mass engineering in cold regions.

Key words: freeze thaw cycle; confining pressure; quasi brittle rock; lognormal distribution; damage characteristics

引用本文/Cite this paper:

罗 勇,杨更社,刘 慧,等. 考虑岩石微元强度呈对数正态分布的冻融岩石损伤特性[J]. 计算力学学报, 2023, **40**(1):43-51.

LUO Yong, YANG Geng-she, LIU Hui, et al. Damage characteristics of freezing-thawing rock with lognormal distribution of microelement strength are considered[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2023, **40**(1):43-51.