

DOI: 10.11779/CJGE201708011

# 三向应力状态下冻融岩石损伤本构模型

张慧梅<sup>1</sup>, 谢祥妙<sup>1,2</sup>, 彭川<sup>1</sup>, 杨更社<sup>3</sup>, 叶万军<sup>3</sup>, 申艳军<sup>3</sup>

(1. 西安科技大学力学系, 陕西 西安 710054; 2. 广西建工集团基础建设有限公司, 广西 南宁 530001;

3. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 充分考虑岩石材料缺陷随机性的特点, 基于连续损伤力学理论, 建立了考虑围压影响的冻融荷载作用损伤模型; 根据红砂岩变形破坏曲线的几何条件, 采用全微分方法确定了仅含岩石基本特征参量的模型参数表达式; 通过红砂岩冻融循环力学特性试验, 验证了模型的合理性。研究表明: 红砂岩以裂纹为主导的细观力学响应与宏观变形破坏特性相一致; 随着冻融循环次数的增加, 岩石损伤程度加剧, 宏观上表现为材料力学性能的劣化。但在变形中后期, 相同损伤程度时岩石应变增加, 塑性特性增强; 围压可改善岩石受力状态, 因而随着围压的增加, 岩石损伤程度减小, 宏观上表现出材料抵抗破坏能力的增强和塑性变形的增加。

**关键词:** 围压; 冻融循环; 试验; 损伤本构模型; 模型参数

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)08-1444-09

**作者简介:** 张慧梅(1968-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事力学与岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: zhanghuimei68@163.com。

## Constitutive model for damage of freeze-thaw rock under three-dimensional stress

ZHANG Hui-mei<sup>1</sup>, XIE Xiang-miao<sup>1,2</sup>, PENG Chuan<sup>1</sup>, YANG Geng-she<sup>3</sup>, YE Wan-jun<sup>3</sup>, SHENG Yan-jun<sup>3</sup>

(1. Department of Mechanics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Infrastructure Construction Co., Ltd.,

Guangxi Construction Engineering Group, Nanning 530001, China; 3. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of

Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Considering the random characteristics of defects of rock materials, the model for damage of freeze-thaw and loaded rock considering the influence of confining pressure is established based on the theory of continuum damage mechanics. According to the geometric condition of the deformation and failure curve of red sandstone, the expressions for model parameters containing only the basic characteristic parameters of rock are determined. The rationality of the model is verified by the experiments on mechanical characteristics of rock under freeze-thaw cycles. It is shown that the crack-dominated micro mechanical response of the red sandstone is consistent with the macroscopic deformation and failure characteristics. The damage degree of sandstone, which is shown as the deterioration of the mechanical properties of the materials in the macroscopic performance, increases with the increase of the number of freeze-thaw cycles. But the strain of rock increases and the plastic property increases with the same damage degree at the later stage of deformation. The confining pressure can improve the stress state of rock, so the damage degree decreases with the increase of the confining pressure, which is shown as the strength of the materials to resist damage and the increase of plastic deformation.

**Key words:** confining pressure; freeze-thaw cycle; experiment; damage constitutive model; model parameter

## 0 引言

中国寒区分布面积广泛, 蕴藏着丰富的矿产、森林及土地等资源, 占全国陆地总面积的 75%, 主要分布在中国西部地区。随着寒区资源开发及工程建设的加剧, 冻融岩石的力学特性研究成为冻融灾害防治急需解决的关键科学问题<sup>[1-2]</sup>。

寒区工程结构岩石总是处于一定的应力场中, 且

承受着季节及昼夜更替的冻融循环作用, 这样的赋存环境对岩石的力学性质有重要影响<sup>[3]</sup>。由于岩石是在地质作用下形成的多种矿物颗粒的集合体, 受赋存环

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (11172232, 41272340, 41302228, 41672305); 中国博士后科学基金项目 (2014T70931); 陕西省重点科技创新团队计划项目 (2014KCT-30)

**收稿日期:** 2016-05-08

境的影响,内部微观缺陷扩展、聚集,材料连续损伤,从而使岩石受力性能劣化并导致破坏<sup>[4]</sup>。因此,必须从损伤本质特性的角度进行研究。

近年来,冻融岩石的力学特性研究十分活跃。Park等<sup>[5]</sup>分别进行了饱水闪长岩,玄武岩,凝灰岩的冻融循环试验,研究冻融岩石的物理力学特性,并采用CT扫描和SEM技术分析岩石冻融循环过程中微结构的变化;Yavuz等<sup>[6]</sup>对12种碳酸盐岩进行试验,研究岩石在冻融循环作用下物理力学特性指标的变化,采用多元回归分析得出了能够预测岩石特性劣化的模型方程;Prick<sup>[7]</sup>运用膨胀法研究岩石在冻融循环过程中的体积变化规律;Yavuz<sup>[8]</sup>对经历冻融循环和热冲击循环后的安山岩进行波速、硬度和抗压强度等物理力学特性测试;Bayram<sup>[9]</sup>通过对土耳其寒区9个区域石灰岩的冻融循环及单轴压缩试验研究,得到能够预测岩石强度损失的统计模型;林战举等<sup>[10]</sup>对采自青藏铁路边坡的岩石进行了循环冻融单轴压缩试验,分析冻融岩石的物理力学特性;葛修润等<sup>[11]</sup>利用CT扫描研究岩石细观损伤扩展及破坏规律;周科平等<sup>[12]</sup>、李杰林等<sup>[13]</sup>开展了冻融花岗岩核磁共振及物理特性试验,并对花岗岩冻融损伤机制进行探讨;张慧梅等<sup>[14-15]</sup>开展了砂岩和页岩的冻融循环及单轴压缩试验,建立了单向应力状态下冻融岩石的损伤模型;陈有亮等<sup>[16]</sup>、刘松明等<sup>[17]</sup>通过冻融循环及单轴压缩试验,建立了不同环境条件下岩石的损伤表达式,并分析初始损伤对岩石冻融的影响。

纵观目前国内外研究现状,在试验层面上对冻融岩石进行宏观力学特性的研究较多,通过建立冻融损伤模型进行损伤力学特性的研究较少,且多数只限于单向应力状态下,没有考虑围压的作用;同时,模型参数多以试验数据拟合为主,因而既缺乏明确的物理意义,又无法反映冻融损伤的内在机制与所选物理量的一般变化规律。随着岩石开挖规模的持续扩大和不断向纵深发展,在研究岩石冻融损伤特性时,考虑围压的作用具有实际工程意义。

本文建立了考虑围压影响的冻融荷载作用下岩石损伤本构模型,推导出模型参数与岩石变形破坏特征参量的理论关系,采用冻融受荷总损伤演化方程描述岩石细观损伤演变及其宏观性能响应,预测其变形破坏规律,最后通过试验验证模型的合理性。

## 1 冻融荷载作用下岩石损伤模型

基于Lemaitre<sup>[18]</sup>提出的应变等价性原理,岩石损伤本构基本关系式为

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\}(1-D) \quad (1)$$

式中,  $[C]$  为材料弹性矩阵,  $D$  为损伤变量,  $\{\sigma\}$  为名义应力矢量,  $\{\varepsilon\}$  为名义应变矢量。

岩石力学性质具有明显的复杂性和随机性,难以用单一的特征变量来描述。若将岩石离散,视为由无数基元体组成,则可用Weibull分布表示岩石基元体强度的统计分布规律:

$$P\{F\} = \frac{m}{F_0} \left(\frac{F}{F_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \quad (F \geq 0) \quad (2)$$

式中,  $F$  为微元强度随机分布变量,  $F_0$ ,  $m$  为Weibull统计分布参数。

在荷载的作用下,岩石微缺陷不断扩展,材料连续损伤,岩石发生变形破坏。损伤参量  $D$  正是基元体破坏累积效应的宏观表述,可表示为

$$D = \int_0^F P(F) dF = 1 - \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \quad (3)$$

式中,  $D$  为受荷损伤变量。

在冻融循环的作用下,岩石损伤引起材料受力性能的劣化,宏观物理量得到响应。弹性模量即可作为度量材料内部损伤的基准。定义岩石冻融损伤变量为

$$D_n = 1 - \frac{E_n}{E_0} \quad (4)$$

式中,  $E_0$ ,  $E_n$  分别为冻融之前和经历  $n$  次冻融循环之后岩石的弹性模量。

从损伤的观点看,冻融及荷载以不同的力学机制使材料黏聚力进展性减弱,且诱发的2种损伤相互耦合,呈现出明显的非线性特性。其总损伤效应可根据作者在文献[14]中推导的总损伤变量表示:

$$D_m = D + D_n - DD_n \quad (5)$$

式中,  $D_m$  为岩石冻融荷载作用总损伤变量。

式(5)表明,岩石经历冻融荷载作用后的总效应可使其损伤加剧,但耦合作用会使总损伤有所弱化。

将式(3)、(4)代入式(5),得到冻融荷载作用下岩石的总损伤演化方程:

$$D_m = 1 - \frac{E_n}{E_0} \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] \quad (6)$$

由式(1)、(6)可得冻融受荷岩石损伤本构模型

$$\sigma_i = E_n \varepsilon_i \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right] + \mu(\sigma_j + \sigma_k) \quad (7)$$

式中,  $(i, j, k) = (1, 2, 3)$ ,  $\mu$  为泊松比,  $\sigma_{i,j,k}$  和  $\varepsilon_{i,j,k}$  分别为第(1, 2, 3)主应力和主应变。

由式(7)可得出常规三向应力状态下岩石本构模型为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= E_n \varepsilon_1 \exp \left[ - \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right] + 2\mu\sigma_3, \\ \sigma_3 &= E_n \varepsilon_3 \exp \left[ - \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right] / (1-\mu) + \mu\sigma_1 / (1-\mu). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

基于岩石 D-P 破坏准则, 则岩石微元强度随机分布的分布变量为

$$F = \alpha_0 I_1 + \sqrt{J_2}, \quad (9)$$

式中,  $I_1$  为应力张量第一不变量,  $J_2$  为应力偏量第二不变量,  $\alpha_0$  为与岩石力学特性有关的参数。相关表达式为

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \sigma_1^* + \sigma_2^* + \sigma_3^* = \frac{E(\sigma_1 + 2\sigma_3)\varepsilon_1}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3}, \\ \sqrt{J_2} &= \sqrt{\frac{1}{6}(\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_1^* - \sigma_3^*)^2} \\ &= \frac{E(\sigma_1 - \sigma_3)\varepsilon_1}{\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)}, \\ \alpha_0 &= \frac{\sin \varphi}{\sqrt{9+3\sin^2 \varphi}}. \end{aligned} \right\}$$

其中,  $\sigma_1^*$  为轴向有效应力,  $\sigma_3^*$  为侧向有效应力,  $\sigma_1$  为轴向名义应力,  $\sigma_3$  为侧向名义应力,  $\varphi$  为内摩擦角。

将  $I_1$  和  $\sqrt{J_2}$  的表达式代入式 (9), 可得式 (8) 中关于主应变  $\varepsilon_1$  的分布变量  $F$  的表达式:

$$F = \frac{E_n \sin \varphi (\sigma_1 + 2\sigma_3)}{\sqrt{9+3\sin^2 \varphi} (\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)} \varepsilon_1 + \frac{E_n (\sigma_1 - \sigma_3)}{\sqrt{3} (\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)} \varepsilon_1. \quad (10)$$

同理可得到式 (8) 中关于  $\varepsilon_3$  的随机分布变量  $F$  的表达式。

上面所建立的冻融受荷岩石损伤统计模型, 确定模型参数  $m$  和  $F_0$  成为关键。为了使模型具有通用性, 必须确定模型参数与岩石变形破坏参量的理论关系, 较好地反映和刻画材料的力学行为。

## 2 模型参数的确定

当岩石经历  $n$  次冻融循环后, 若用  $\sigma_{cn}$  表示某一特定围压下的应力峰值,  $\varepsilon_{cn}$  表示应力峰值处对应的应变, 则在应力-应变破坏曲线峰值点处, 满足以下几何条件: 当①  $\varepsilon_1 = \varepsilon_{cn}$  时,  $\sigma_1 = \sigma_{cn}$ ; ②当  $\varepsilon_1 = \varepsilon_{cn}$  时,  $\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} = 0$ 。

将几何条件①代入式 (8) 中, 得参数  $F_0$  和  $m$  的表达式:

$$\sigma_{cn} = E_n \varepsilon_{cn} \exp \left[ - \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right] + 2\mu\sigma_3. \quad (11)$$

为了利用条件②得到另一个关于  $F_0$  和  $m$  的表达式, 将  $\sigma_i (i=1,3)$  视为关于  $\varepsilon_i (i=1,3)$  和  $n$  的函数<sup>[19]</sup>, 采用多元函数求全微分的方法求解。

$\sigma_1$  的全微分可写成如下形式:

$$d\sigma_1 = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} d\varepsilon_1 + \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_3} d\varepsilon_3 + \frac{\partial \sigma_1}{\partial n} dn. \quad (12)$$

对式 (8) 分别求全微分得到:

$$\left. \begin{aligned} d\sigma_1 &= A_1 d\varepsilon_1 + A_2 dF + A_3 dm + A_4 dF_0 + \\ &\quad A_5 dE_n + 2\mu d\sigma_3, \\ d\sigma_3 &= B_1 d\varepsilon_3 + B_2 dF + B_3 dm + B_4 dF_0 + \\ &\quad B_5 dE_n + \mu/(1-\mu) d\sigma_1, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中,  $A_1 = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1}$ ,  $A_2 = \frac{\partial \sigma_1}{\partial F}$ ,  $A_3 = \frac{\partial \sigma_1}{\partial m}$ ,  $A_4 = \frac{\partial \sigma_1}{\partial F_0}$ ,

$A_5 = \frac{\partial \sigma_1}{\partial E_n}$ ,  $B_1 = \frac{\partial \sigma_3}{\partial \varepsilon_3}$ ,  $B_2 = \frac{\partial \sigma_3}{\partial F}$ ,  $B_3 = \frac{\partial \sigma_3}{\partial m}$ ,  $B_4 = \frac{\partial \sigma_3}{\partial F_0}$ ,

$B_5 = \frac{\partial \sigma_3}{\partial E_n}$ 。

由式 (10) 可知, 式 (13) 中  $dF$  还可以进一步求全微分, 使其化为仅含  $d\varepsilon_1$ ,  $d\varepsilon_3$ ,  $d\sigma_1$ ,  $d\sigma_3$ ,  $dn$  项的形式:

$$\left. \begin{aligned} dF &= F_{11} d\varepsilon_1 + F_{12} d\sigma_1 + F_{13} d\sigma_3 + F_{14} dn, \\ dF &= F_{21} d\varepsilon_3 + F_{22} d\sigma_1 + F_{23} d\sigma_3 + F_{24} dn. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

假定  $F_0$ ,  $m$  和  $E_n$  仅为应力  $\sigma_3$  和  $n$  的函数<sup>[19]</sup>, 则有

$$\left. \begin{aligned} dF_0 &= F_3 d\sigma_3 + F_n dn, \\ dm &= m_3 d\sigma_3 + m_n dn, \\ dE_n &= E_3 d\sigma_3 + E_m dn, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中,  $F_3 = \frac{\partial F_0}{\partial \sigma_3}$ ,  $F_n = \frac{\partial F_0}{\partial n}$ ,  $m_3 = \frac{\partial m}{\partial \sigma_3}$ ,  $m_n = \frac{\partial m}{\partial n}$ ,

$E_3 = \frac{\partial E_n}{\partial \sigma_3}$ ,  $E_m = \frac{\partial E_n}{\partial n}$ 。

将式 (14)、(15) 代入到式 (13) 并替换得到

$$\left. \begin{aligned} U_1 d\sigma_1 + U_2 dn + U_3 d\sigma_3 + U_4 d\varepsilon_1 &= 0, \\ W_1 d\sigma_1 + W_2 dn + W_3 d\sigma_3 + W_4 d\varepsilon_3 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中,  $U_1 = A_2 F_{12} - 1$ ,  $U_2 = A_2 F_{14} + A_3 m_n + A_4 F_n + A_5 E_m$ ,  $U_3 = A_2 F_{13} + A_3 m_3 + A_4 F_3 + A_5 E_3 + 2\mu$ ,  $U_4 = A_1 + A_2 F_{11}$ ,  $W_1 = B_2 F_{22} + \mu/(1-\mu)$ ,  $W_2 = B_2 F_{24} + B_3 m_n + B_4 F_n + B_5 E_m$ ,  $W_3 = B_2 F_{23} + B_3 m_3 + B_4 F_3 + B_5 E_3 - 1$ ,  $W_4 = B_1 + B_2 F_{21}$ 。

解方程组 (16), 消去  $d\sigma_3$  可得到  $d\sigma_1$  的表达式, 再与式 (12) 比较, 条件②等价于

$$A_1 + A_2 F_{11} \Big|_{\varepsilon_1 = \varepsilon_{cn}} = 0, \quad (17)$$

式中,  $A_1 = E_n \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right]$ ,  $A_2 = \frac{-E_n m \varepsilon_1}{F} \left(\frac{F}{F_0}\right)^m$ .

$$\exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right], F_{11} = \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_1} = \frac{F}{\varepsilon_1}.$$

解式 (17) 可得

$$\left(\frac{F_c}{F_0}\right)^m = \frac{1}{m}, \tag{18}$$

式中,  $F_c$  为当  $\varepsilon_1 = \varepsilon_{cn}$  时对应的  $F$  值。

由式 (11)、(18) 得到

$$m = \frac{1}{\ln\left[E_n \varepsilon_{cn} / (\sigma_{cn} - 2\mu\sigma_3)\right]}, \tag{19}$$

$$F_0 = F_c (m)^{\frac{1}{m}}. \tag{20}$$

式 (19)、(20) 即为模型参数与岩石力学特征参数的关系式。参数表达式中所包含的岩石宏观力学量均极易从常规力学特性试验中得到。特别在因试验条件限制难以获得岩石全应力应变曲线的情况下, 仍可得出反映岩石破坏全过程的本构模型。

由式 (6)、(10)、(19)、(20) 可得岩石总损伤演化方程为

$$D_m = 1 - \frac{E_n}{E_0} \cdot \exp\left\{\frac{E_n \cdot \left(\alpha_0 + \frac{\sqrt{3}}{3}\right) \cdot \varepsilon_1 + \left(2(\mu+1) \cdot \alpha_0 + \frac{\sqrt{3}}{3}(2\mu-1)\right) \cdot \sigma_3}{E_n \cdot \left(\alpha_0 + \frac{\sqrt{3}}{3}\right) \cdot \varepsilon_{cn} + \left(2(\mu+1) \cdot \alpha_0 + \frac{\sqrt{3}}{3}(2\mu-1)\right) \cdot \sigma_3}\right\} \cdot \ln\left(\frac{\sigma_{cn} - 2\mu\sigma_3}{E_n \varepsilon_{cn}}\right). \tag{21}$$

这样就获得了损伤演化与岩石本构状态变量的关系, 因而可以真正从损伤力学的本质特性上分析岩石的变形破坏, 揭示细观成因在宏观上的表现。

由式 (21) 可得, 当岩石的应力状态、应变和冻融循环次数变化时, 其总损伤率演化方程为

$$\dot{D}_m = (1 - D_n) \frac{\partial D}{\partial \varepsilon_1} + (1 - D_n) \dot{\sigma}_3 \frac{\partial D}{\partial \sigma_3} + (1 - D) \dot{n} \frac{\partial D_n}{\partial n}. \tag{22}$$

式 (22) 表明, 岩石的总损伤沿着应变、围压及冻融循环的演化途径发展, 且 3 种演化途径对材料的损伤力学行为相互耦合、相互影响。

3 模型验证

3.1 岩石冻融循环力学特性试验

为了验证本文推导的损伤模型, 特进行红砂岩冻融循环力学特性试验。将红砂岩加工成直径 50 mm, 高 100 mm 的圆柱体试样, 先进行饱水冻融循环试验, 设置待岩样经历 0 次、5 次、10 次、20 次及 40 次冻融循环后, 再分别进行 4 种围压 (0, 2, 4, 6 MPa) 下的三轴压缩试验。试验仪器分别采用美国 XTM605 快速冻融试验机和 MTS815 岩石力学试验系统。

设置冻融循环温度变化周期为 +20℃ → -20℃ → +20℃, 并在 1 标准岩样中心置放热敏电阻温度传感器, 以保证试样内部的温度达到设定值, 并按温度控制循环时间。三轴压缩试验时, 垂直方向采用 1000 kN 的力传感器测试轴向载荷, 分别采用轴向引伸计和链式环向位移引伸计测试岩样的轴向与横向变形。试验得到岩石内摩擦角为 38.3995°, 各种冻融次数及围压下岩石的力学参数见表 1~5。

表 1 0 次冻融循环次数下红砂岩的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of red sandstone without freeze-thaw cycle				
围压 /MPa	极值应力 /MPa	极值应变	弹性模量 /GPa	泊松比
0	4.230	0.004	1.260	0.260
2	14.572	0.011	1.387	0.258
4	19.652	0.013	1.628	0.255
6	24.866	0.016	1.649	0.254

表 2 5 次冻融循环次数下红砂岩的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of red sandstone under 5 freeze-thaw cycles				
围压 /MPa	极值应力 /MPa	极值应变	弹性模量 /GPa	泊松比
0	4.020	0.005	0.867	0.268
2	13.101	0.011	1.295	0.259
4	19.132	0.013	1.452	0.257
6	24.347	0.017	1.565	0.255

表 3 10 次冻融循环次数下红砂岩的力学参数

Table 3 Mechanical parameters of red sandstone under 10 freeze-thaw cycles				
围压 /MPa	极值应力 /MPa	极值应变	弹性模量 /GPa	泊松比
0	3.800	0.005	0.761	0.271
2	12.701	0.011	1.156	0.262
4	18.910	0.015	1.289	0.260
6	23.519	0.019	1.325	0.259

表 4 20 次冻融循环次数下红砂岩的力学参数

Table 4 Mechanical parameters of red sandstone under 20 freeze-thaw cycles				
围压 /MPa	极值应力 /MPa	极值应变	弹性模量 /GPa	泊松比
0	3.749	0.006	0.529	0.279
2	11.356	0.012	0.890	0.268
4	18.100	0.018	1.066	0.264
6	22.903	0.021	1.240	0.260

表 5 40 次冻融循环次数下红砂岩的力学参数  
Table 5 Mechanical parameters of red sandstone under 40 freeze-thaw cycles

围压 /MPa	极值应力 /MPa	极值 应变	弹性模量 /GPa	泊松比
0	3.301	0.006	0.515	0.280
2	10.570	0.015	0.710	0.277
4	17.121	0.019	0.917	0.273
6	21.274	0.025	0.932	0.269

3.2 岩石损伤特性分析

利用表 1~5 所示的试验结果, 根据式 (21) 计算得到冻融荷载作用下砂岩的损伤演化曲线。图 1 为一定围压下, 不同冻融循环次数时砂岩的总损伤演化曲线; 图 2 为一定冻融循环次数时, 砂岩不同围压下的总损伤演化曲线。

图 1, 2 显示, 随着应变的增加, 冻融荷载总损伤变量呈增大趋势。岩石在受荷初期处于损伤弱化阶段, 其内部微裂纹、微孔隙受压逐渐闭合; 随着轴向荷载的增大, 微缺陷进一步压密闭合并呈现相对滑动的趋势, 但裂纹并未扩展, 没有产生新的损伤, 应力应变为线弹性状态; 之后, 当荷载增加到一定值时, 较弱颗粒边界处萌生新裂纹, 材料产生屈服, 岩石损伤真正开始演化及稳定扩展; 荷载继续增加, 损伤加速, 微裂纹不断发展、对接, 贯通为宏观裂纹并汇合形成主破裂面, 此时, 岩石应力突然释放, 产生破坏, 总损伤变量趋于 1。

从图 1 可知, 随着冻融循环次数的增加, 红砂岩的总损伤劣化程度加剧。这是由于当温度降低, 岩石矿物晶粒收缩而孔隙水冻结膨胀, 对于不同的矿物晶粒, 其膨胀系数及各结晶方向的热力学性质各异, 从而使跨颗粒边界的胀缩不协调, 产生极大的冻胀力, 造成岩石损伤; 温度升高, 岩石孔隙冰融化, 冻结应力释放, 水分发生迁移。随着冻融循环的进行, 岩石经历反复加载卸载, 裂纹持续扩展, 岩石损伤加剧。但随着应变的增加, 同一围压不同冻融循环次数下的损伤演化曲线相继相交, 相交后呈现出在相同应变值下, 总损伤值随着冻融循环次数的增加反而减小, 这又表现为在相同损伤程度时, 红砂岩的应变随着冻融次数的增加而增加。这是由于在变形后期, 岩石的塑性变形特性变得更为明显。

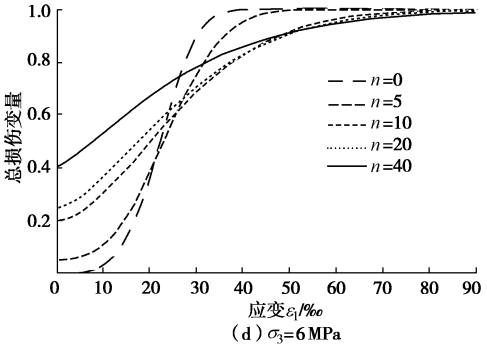
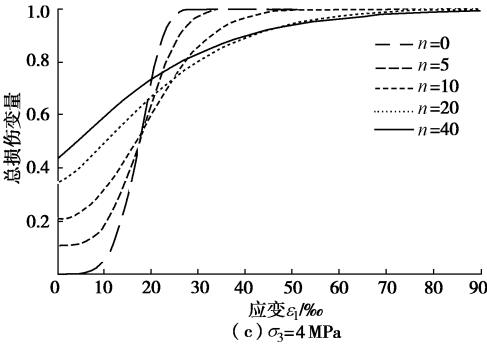
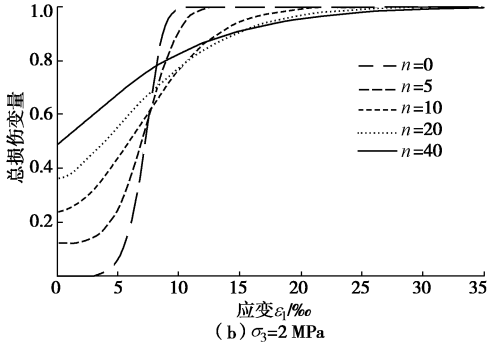
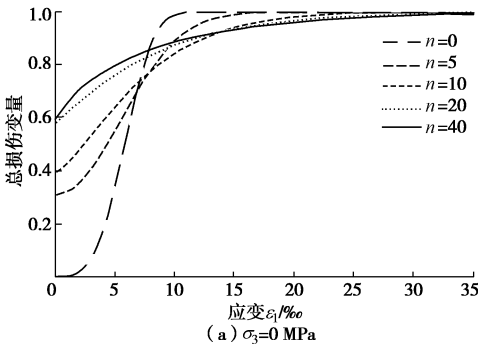
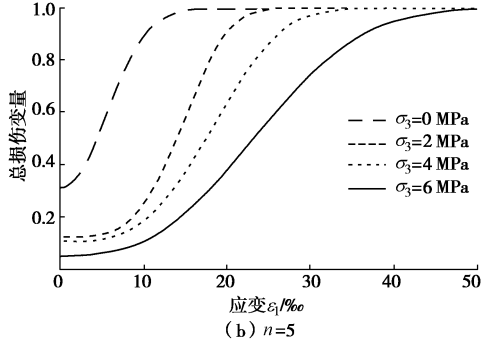
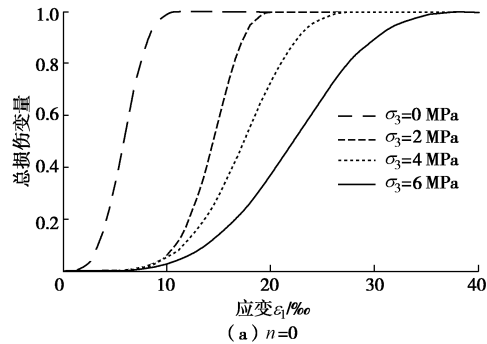


图 1 不同围压下红砂岩的损伤演化曲线  
Fig. 1 Evolution curves of damage of red sandstone under different confining pressure



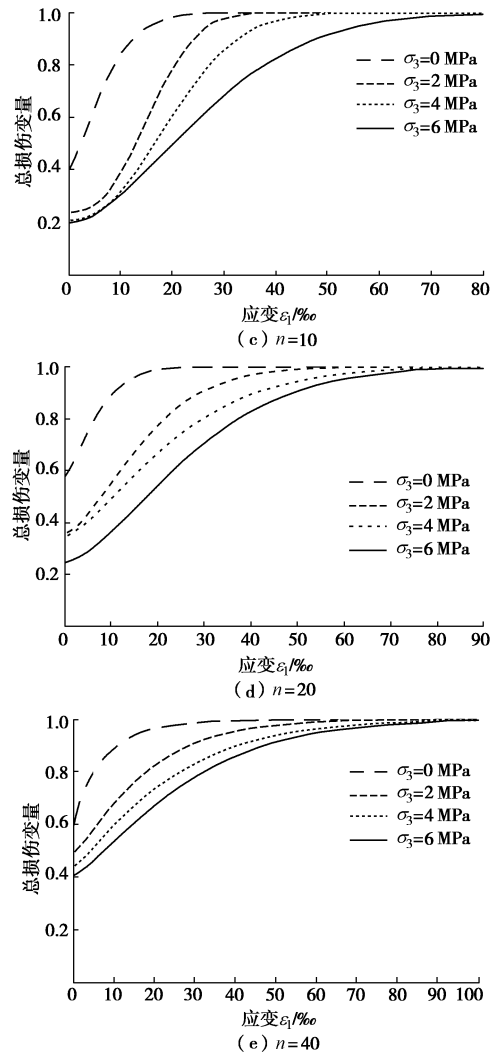


图2 不同冻融循环条件下红砂岩的损伤演化曲线

Fig. 2 Evolution curves of damage of red sandstone under different freeze-thaw cycles

因而随着冻融循环次数的增加,岩石越在变形的后期产生破坏,但其总损伤劣化程度仍在加剧。

由图2可知,随着围压的增加,岩石达到相同应变时的损伤因子减小,说明应力状态能够影响红砂岩的损伤劣化过程。这是因为围压使岩石内部微裂隙、微孔隙得到压密或闭合,红砂岩的性质得到改善,且主压力之差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )随着围压 $\sigma_3$ 的增加在减小,岩石抵抗损伤或破坏的能力增大,在宏观上表现出岩石强度提高;当围压继续增加,岩石的损伤累积速度随应变的增长趋势逐渐变缓,即当岩石达到相同损伤程度时,其应变在增加。说明随着围压的增加,岩石晶粒间的滑移与位错加剧,从而使应变恢复能力减弱,岩石塑性增强。

利用表1~5所示的试验结果,根据式(22)计算得到冻融荷载作用下砂岩的总损伤演化率曲线。图3为围压一定时,不同冻融循环次数下的损伤演化率曲线;图4为冻融循环次数一定时,不同围压下的损

伤演化率曲线。

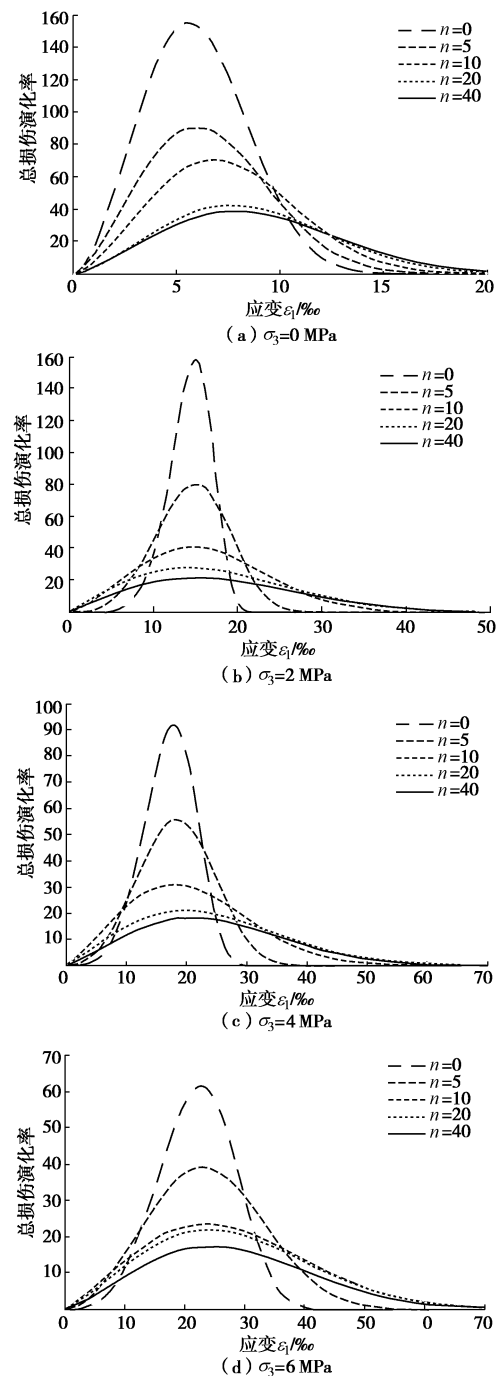
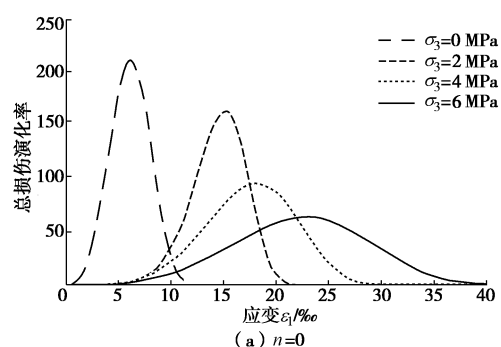


图3 不同围压下红砂岩损伤演化率曲线

Fig. 3 Evolution curves of damage ratio of red sandstone under different confining pressures



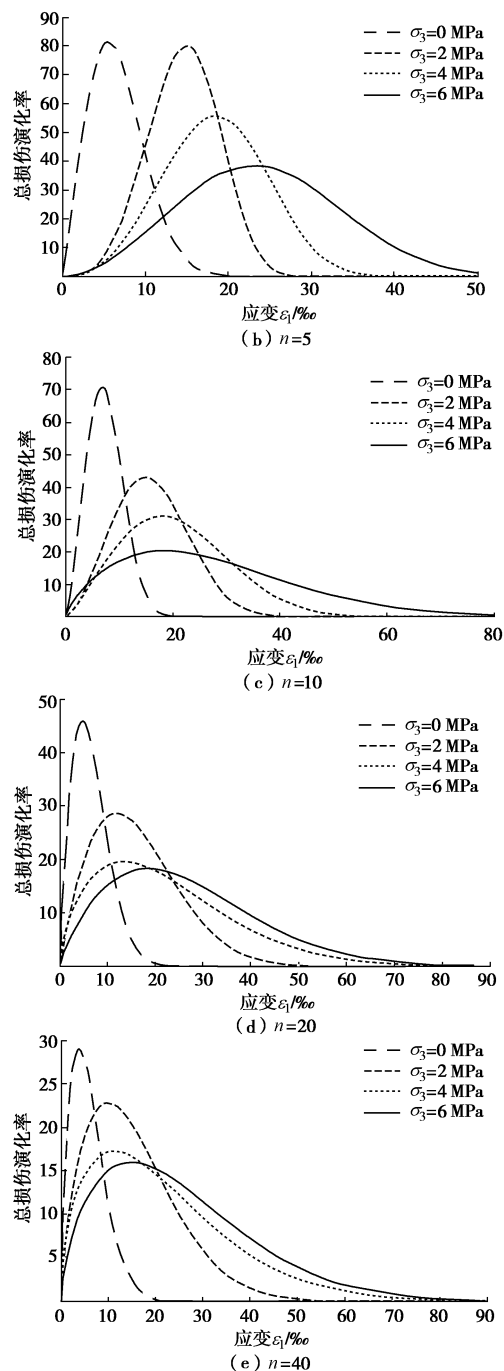


图4 不同冻融循环次数下红砂岩损伤演化率曲线

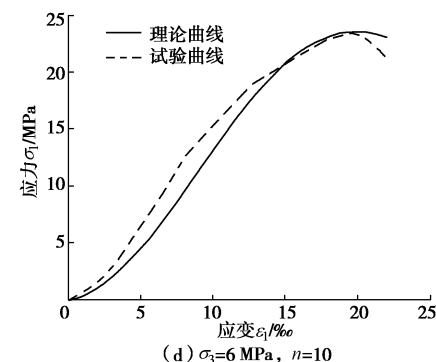
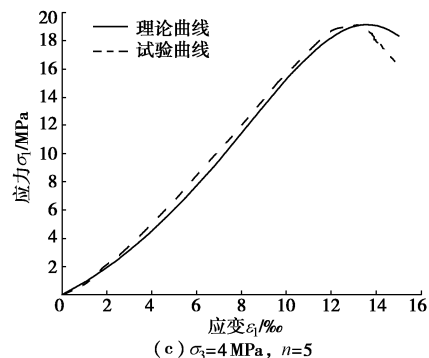
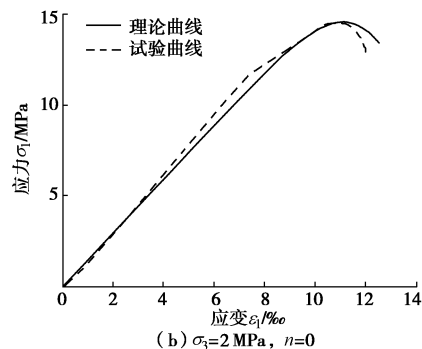
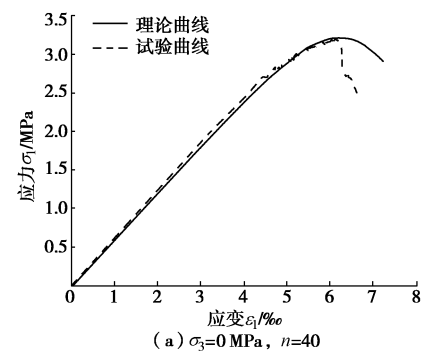
Fig. 4 Evolution curve of damage ratio of red sandstone under different freeze-thaw cycles

从图3, 4可以看出, 冻融循环和围压作用并不改变损伤演化率曲线的形状。在一定的冻融循环和围压条件下, 红砂岩的总损伤演化率随着应变的增加呈现出先增加、到达峰值后再减小的趋势。反映了在变形初期, 岩石内部强度较低的小量基元体首先破坏; 在变形中期, 大量基元体破坏, 此阶段岩石达到平均强度值, 宏观破坏特性最明显; 在变形后期, 少量强度较大的基元体继续承受着变形破坏。图3, 4中损伤演化率曲线围成的面积正好为损伤变量值。随着冻融循环次数的增加或围压的升高, 岩石损伤率演化曲线的

峰值点逐步降低, 峰后下降段变缓, 但演化率曲线峰值点对应的应变在增大, 进一步说明岩石塑性增强, 延性破坏特性渐趋明显。

图5是利用表1~5所示的冻融循环力学试验结果, 由式(8)、(10)、(19)、(20)计算得到各种围压及冻融循环条件下红砂岩的损伤本构模型理论曲线, 并与试验曲线进行比对。

由图5可知, 本文所建立的砂岩损伤本构模型理论曲线与试验数据吻合较好, 能够较好地反映各种围压及冻融循环次数下岩石的力学行为, 从而验证了本构模型的合理性。



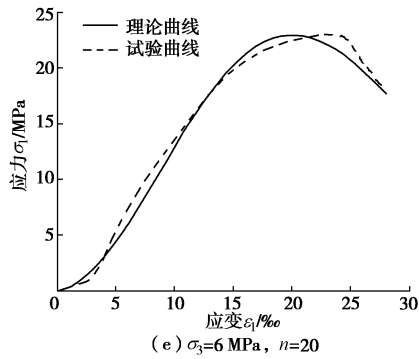


图5 红砂岩本构模型理论曲线与试验曲线比较

Fig. 5 Comparison between experimental and theoretical curves of damage constitutive model for sandstone

## 4 结 论

(1) 充分考虑红砂岩材料非均匀性和随机性的特点, 基于连续损伤力学理论, 建立了考虑围压影响的红砂岩冻融荷载作用损伤模型, 分析了红砂岩的变形破坏特征, 确定了仅含红砂岩基本特征参量的模型参数表达式, 使模型的适应性极大增强。

(2) 岩石在受荷初期, 微缺陷压密并趋于闭合, 损伤弱化; 荷载进一步增加, 微缺陷继续压密并呈现相对滑动的趋势, 损伤呈稳态; 之后, 新的裂纹出现, 材料屈服, 损伤开始演化发展; 随着微裂纹扩展、搭接、贯通, 损伤加速至损伤变量趋于 1。这种以裂纹为主导的岩石细观力学响应与压密、弹性增长、塑性屈服及变形破坏的宏观过程相一致。

(3) 在冻融循环的作用下, 岩石矿物的不均匀肿胀与水冰相变, 导致微缺陷持续扩展, 损伤程度随冻融循环的增加而加剧, 表现为岩石物理力学性质不可逆劣化; 但在变形的中后期, 岩石表现出明显的塑性特性, 即随着冻融循环次数的增加, 相同损伤程度下, 其应变在增加; 同时, 损伤演化率曲线峰值点降低, 峰后下降段变缓。

(4) 围压可抑制岩石微裂纹的扩展, 改善其受力状态, 因而砂岩的损伤劣化程度随着围压的增加而减小, 在宏观上表现出岩石强度的增大; 同时, 当围压增加时, 岩石的损伤累积速度随着应变的发展明显变缓, 损伤演化率曲线峰后段的下降势态变缓, 岩石应变恢复能力减弱, 从而使塑性增强。

## 参考文献:

[1] 李 宁, 程国栋, 谢定义. 西部大开发中的岩土力学问题[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(3): 268 - 272. (LI Ning, CHENG Guo-dong, XIE Ding-yi. Geomechanics development in civil construction in Western China[J].

Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(3): 268 - 272. (in Chinese))

[2] CHENG G D, MA W. A research review of international permafrost engineering[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, **25**(3): 303 - 308.

[3] 陈卫忠, 谭贤君, 于洪丹, 等. 低温及冻融环境下岩体热、水、力特性研究进展与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(7): 1318 - 1336. (CHEN Wei-zhong, TAN Xian-jun, YU Hong-dan, et al. Advance and review on thermo-hydro-mechanical characteristics of rock mass under condition of low temperature and freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(7): 1318 - 1336. (in Chinese))

[4] 王 利. 岩石损伤演化理论与数值模拟[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2015. (WANG Li. Theory of rock damage evolution and numerical simulation[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2015. (in Chinese))

[5] PARK J, HYUN C U, PARK H D. Changes in microstructure and physical properties of rocks caused by artificial freeze-thaw action[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, **74**(2): 555 - 565.

[6] YAVUZ H, ALTINDAG R, SARAC S, et al. Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, **43**(5): 767 - 775.

[7] PRICK A. Dilatometrical behaviour of porous calcareous rock samples subjected to freeze-thaw cycles[J]. Catena, 1995, **25**(2): 7 - 20.

[8] YAVUZ H. Effect of freeze-thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2011, **70**(2): 187 - 192.

[9] BAYRAM F. Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, **83**(12): 98 - 102.

[10] 林战举, 牛富俊, 刘 华, 等. 循环冻融对冻土路基护坡块石物理力学特性的影响[J]. 岩土力学, 2011, **32**(5): 1369 - 1376. (LIN Zhan-ju, NIU Fu-jun, LIU Hua, et al. Influences of freezing-thawing cycles on physico-mechanical properties of rocks of embankment revetments in permafrost regions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(5): 1369 - 1376. (in Chinese))

[11] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩石细观损伤扩展规律的



- CT 实时试验[J]. 中国科学(E 辑), 2000, **30**(2): 104 - 111. (GE Xiu-run, REN Jian-xi, PU Yi-bin. et al. Primary study of CT real-time testing of fatigue meso-damage propagation law of rock[J]. Science in Chinese (Series E), 2000, **30**(2): 104 - 111. (in Chinese))
- [12] 周科平, 李杰林, 许玉娟, 等. 冻融循环条件下岩石核磁共振特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(4): 731 - 737. (ZHOU Ke-ping, LI Jie-lin, XU Yu-juan, et al. Experimental study of NMR characteristics in rock under freezing and thawing cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(4): 731 - 737. (in Chinese))
- [13] 李杰林, 周科平, 张亚民, 等. 冻融循环条件下风化花岗岩物理特性的实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, **45**(3): 798 - 802. (LI Jie-lin, ZHOU Ke-ping, ZHANG Ya-min, et al. Experiment study on physical characteristics in weathered granite under freezing-thawing cycles[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2014, **45**(3): 798 - 802. (in Chinese))
- [14] 张慧梅, 杨更社. 冻融与荷载耦合作用下岩石损伤模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(3): 471 - 476. (ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Research on damage model of rock under coupling action of freeze-thaw and load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(3): 471 - 476. (in Chinese))
- [15] 张慧梅, 杨更社. 冻融岩石损伤劣化及力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, **38**(10): 1756 - 1762. (ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Experimental study of damage deterioration and mechanical properties for freezing-thawing rock[J]. Journal of China Coal Society, 2013, **38**(10): 1756 - 1762. (in Chinese))
- [16] 陈有亮, 代明星, 刘明亮, 等. 含初始损伤岩石的冻融损伤试验研究[J]. 力学季刊, 2013, **34**(1): 74 - 80. (CHEN You-liang, DAI Ming-xing, LIU Ming-liang, et al. Experimental investigation on freezing damage characteristics of granite with initial damage[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2013, **34**(1): 74 - 80. (in Chinese))
- [17] 刘松明, 陈有亮, 杜曦, 等. 酸侵蚀区白砂岩冻融损伤的影响因素研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, **25**(5): 127 - 131. (LIU Song-ming, CHEN You-liang, DU Xi, et al. Study on influences factor of freezing-thawing damage of white sandstone in acid erosion area[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, **25**(5): 127 - 131. (in Chinese))
- [18] LEMAITRE J. A course on damage mechanics[M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1992.
- [19] 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))