

文章编号: 1000-4750(2011)05-0161-05

冻融荷载耦合作用下岩石损伤力学特性

*张慧梅¹, 杨更社²

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

摘 要: 以寒区岩体工程为背景, 针对冻融受荷岩石, 从细观力学机理出发, 运用宏观唯象损伤力学和非平衡统计的概念和方法, 得到了以冻融循环次数和应变为损伤演化控制变量的损伤演化方程; 应用推广后的应变等价原理, 建立了较为真实的岩石冻融受荷损伤扩展本构关系; 探讨了岩石材料细观结构损伤及其诱发的材料力学性能演化途径。研究表明: 岩石的冻融损伤是一个疲劳损伤破坏过程; 冻融与荷载的双重作用对岩石损伤的影响表现出明显的非线性特征, 其耦合效应使总损伤有所弱化; 岩石的岩性、初始损伤状态确定冻融循环和应变对损伤扩展的影响特性。

关键词: 岩石; 冻融受荷; 耦合; 损伤模型; 力学特性

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A

DAMAGE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ROCK UNDER FREEZE-THAW AND LOAD COUPLING

*ZHANG Hui-mei¹, YANG Geng-she²

(1. Department of Mechanics, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The paper derives the damage evolution equation in terms of freeze-thaw cycle and strain for the freeze-thaw and loaded rock based on micro mechanical mechanism and using the methods of macro phenomenological damage mechanics and non-equilibrium statistics. The real damage propagation constitutive relation of the freeze-thaw and loaded rock is established by using the generalized theory of strain equality. And the evolutionary route of micro-structural damage and materials mechanical properties for the rock are discussed. It is shown that the damage of freeze-thaw rock is mainly caused by fatigue. The dual effect of the freeze-thaw and the load on the rock damage presents obvious nonlinear property, and the coupling effect weakens the whole damage. Moreover, the influence of freeze-thaw cycle and strain on the damage propagation is determined by the lithology and the initial damage state of the rock..

Key words: rock; freeze-thaw and load; coupling; damage model; mechanical characteristics

寒区矿山、铁路、公路、隧道等土木工程建设与营运过程中, 冻融灾害问题是工程地质和岩土工程的突出问题^[1]。含有各类微裂纹、微孔隙的岩石可视为连续地分布于材料内部的一种损伤场, 在冻融环境和荷载的作用下, 微缺陷会不断产生、扩展,

表现为岩体材料受力性能的劣化, 当这种细观结构变化达到一定程度就会导致材料的破坏^[2]。并且随着细观结构的劣化, 宏观物理性能均有响应。目前大量兴起的西部寒区工程建设, 越来越多地触及到处在温度交替变化条件下的受荷岩石, 所以建立冻

收稿日期: 2009-10-21; 修改日期: 2010-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(40872177, 50974102); 陕西省自然科学基金项目(SJ08A21); 陕西省教育厅专项基金项目(11JK0525)

作者简介: *张慧梅(1968—), 女, 山西大同人, 副教授, 博士, 主要从事岩土力学与固体力学的教学科研工作(E-mail: zhanghuimei68@163.com);

杨更社(1962—), 男, 陕西武功人, 教授, 博士, 博导, 主要从事岩土力学与岩土工程方面的教学与研究(E-mail: yanggs@xust.sn.cn).

融受荷岩石损伤模型,描述损伤的宏观表现及其对材料力学性能的影响,预测冻融破坏状况,必将对寒区工程稳定性评价具有重要的理论和现实意义。

近年来,国内外对岩石冻融方面的研究,多数集中在温度效应、冻融循环等自然条件下岩石基本性质及冻融破坏特性方面。Park^[3]通过试验研究了低温下岩石的热力学特性;徐光苗,刘泉声^[4]进行了岩石冻融力学试验研究;张继周,缪林昌等^[5]通过不同水化环境的冻融循环试验,研究了岩石冻融损伤劣化机制和力学特性。国内外在岩石损伤扩展力学特性方面的研究,多数集中在外荷载作用下的损伤力学特性,涉及温度效应、冻融循环条件下岩体的损伤扩展力学特性的研究不多。任建喜等^[6]对岩石损伤破坏特性进行了CT实验研究;李树春,许江等^[7]进行了循环荷载下岩石损伤的CT细观试验研究。杨更社等^[8]对不同冻结温度下的软岩进行CT扫描,并以CT数变化评价了冻融损伤扩展规律。而以岩石宏观非线性变形破坏行为与细观结构非均匀性和非连续性演化之间的联系为基础,考虑冻融与荷载的耦合作用,通过建立损伤模型,对岩石进行宏观损伤力学分析的研究未见报道。

本文将损伤力学的方法应用于冻融力学研究中,建立岩石冻融受荷损伤模型,研究冻融循环次数和应变对损伤扩展的影响,分析冻岩材料的损伤力学性质及扩展规律,并借助岩石冻融循环单轴压缩实验结果进行验证。

1 冻融荷载作用下岩石破坏过程分析

岩石冻融损伤的本质是组成岩石的水、冰、岩等多相介质具有不同的热物理性质,温度降低时,矿物晶粒体积收缩,而孔隙水成冰发生膨胀,由于各种矿物颗粒缩胀率的不同以及不同结晶方位的热弹性性质不同,引起跨颗粒边界的缩胀不协调,在矿物晶粒及微孔隙间产生了巨大的冻胀力,这种内应力相对于某些胶结强度较弱的岩石颗粒具有破坏作用,造成岩石内部出现局部损伤;温度升高时,岩石内部孔隙裂隙水融化,伴随着冻结应力的释放和水分的迁移,进而加速这种损伤。随着冻融循环次数的增加,内应力随外部温度循环交变地作用于岩体骨架上,循环往复导致岩体物理力学性质的不可逆劣化,因此岩体冻融损伤的过程是一个疲劳损伤破坏过程。外荷载的作用使岩石晶粒进一步滑移与错动,岩体中大量微裂纹萌生、扩展、形核,

局部损伤域逐步连通,最终汇合形成宏观裂纹,加剧了岩石的损伤断裂过程。

2 岩石冻融荷载耦合作用损伤模型

2.1 岩石损伤本构关系

在冻融循环的作用下,岩石的损伤引起材料微结构的变化和材料受力性能的劣化。根据宏观唯象损伤力学概念,岩石冻融损伤变量 D_n 可定义为:

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

式中: E_0 为岩石冻融前的初始弹性模量; E_n 为岩石经历 n 次冻融循环后的弹性模量。

根据Lemaitre提出的应变等价原理,全应力 σ 作用在受损材料上引起的应变与有效应力 σ' 作用在无损材料上引起的应变等价。因此,受损材料的本构关系可以从无损材料的本构方程导出,只要用有效应力来取代名义应力即可,则岩石材料内部损伤型本构关系为:

$$\sigma = (1 - D)E\varepsilon \quad (2)$$

式中: E 为无损材料的弹性模量; D 为受荷损伤变量。

由于大多数岩石都带有初始损伤,文献[9]将岩石的初始损伤状态定义为基准损伤状态,提出推广后的应变等价原理:在材料损伤扩展过程中,任取其中的两种损伤状态,则材料在第一种损伤状态下的有效应力作用于第二种损伤状态引起的应变等价于材料在第二种损伤状态下的有效应力作用于第一种损伤状态引起的应变,由此得到的损伤本构方程与传统本构方程(2)在形式上完全相同,但其中 E 取的是岩石在第一种损伤状态下的弹性模量。

由此,不妨将冻融损伤后的状态作为第一种损伤状态,冻融受荷引起的总损伤状态作为第二种损伤状态,则冻岩材料内部损伤型本构关系为:

$$\sigma = (1 - D)E_n\varepsilon \quad (3)$$

由式(1)和式(3)可得到用冻融和受荷损伤变量表示的岩石应力-应变关系为:

$$\sigma = (1 - D_m)E_0\varepsilon \quad (4)$$

式中: $D_m = D + D_n - DD_n$ (5)
 D_m 为岩石的冻融受荷总损伤变量。

式(5)表明,冻融与荷载的共同作用使岩石总损伤加剧,并表现出明显的非线性特征。冻融作用导致岩石内部出现局部损伤,而岩石晶粒在荷载作用下产生的滑移与错动,在一定程度上限制了孔隙水

成冰发生的膨胀, 表现为冻融与荷载的耦合效应使总损伤有所弱化。式中 DD_n 表示耦合项。

此处不涉及微损伤的具体机制而表现地把材料强度的相对降低量定义为总损伤 D_m , 但关键还在于找到损伤演化如何依赖于本构状态变量的函数关系, 即损伤演化规律。

2.2 岩石损伤演化规律

损伤对材料力学性能的影响是细观成因在宏观上的反映, 岩石材料内部的损伤演化将直接影响到岩石的力学性质或本构响应。基于岩石内部细观结构的非均质性, 组成材料的各基元体力学性质的分布是概率性的。既然材料的损伤程度与各基元体所包含的缺陷有关, 因此损伤参量 D 与基元体破坏的统计分布密度之间存在如下关系:

$$\frac{dD}{d\varepsilon} = \varphi(\varepsilon) \quad (6)$$

式中 $\varphi(\varepsilon)$ 是岩石在加载过程中基元体损伤率的一种度量, 基元体破坏的积累导致了岩石的宏观性能劣化^[10]。用双参数的 Weibull 分布表示岩石基元体强度的统计分布, 根据应力-应变关系的几何条件^[11], 由式(6)得到受荷岩石的损伤演化方程:

$$D = \int_0^\varepsilon \varphi(x) dx = 1 - e^{-\left[\frac{1}{m} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f}\right)^m\right]} \quad (7)$$

式中: ε_f 为应力峰值 σ_f 所对应的应变值; $m = 1 / \ln\left(\frac{E_0 \varepsilon_f}{\sigma_f}\right)$ 为表征材料损伤演化特征的材料参数。

由式(1)、式(5)及式(7)得到以冻融循环次数和应变为损伤演化控制变量的总损伤演化方程:

$$D_m = 1 - \frac{E_n}{E_0} e^{-\left[\frac{1}{m} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f}\right)^m\right]} \quad (8)$$

当冻融次数和应变变化时, 由式(8)可得岩石总损伤率的演化方程为:

$$\dot{D}_m = (1 - D_n) \frac{\partial D}{\partial \varepsilon} + (1 - D) \frac{\partial D_n}{\partial n} \quad (9)$$

式(9)表明, 岩石冻融受荷总损伤沿着冻融和应变两条演化途径变化, 反映了冻融循环次数和应变对材料损伤扩展相互耦合、相互影响的特性, 可较为真实地揭示冻岩材料损伤力学行为及损伤扩展规律。

将式(8)代入式(4)得到岩石冻融受荷的损伤本

构关系为:

$$\sigma = E_n e^{-\left[\frac{1}{m} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f}\right)^m\right]} \varepsilon \quad (10)$$

从上面的推导可以看出, 冻结岩石受荷后任意点的应力与冻融循环次数、冻融后的弹性模量、极限强度、应变峰值及该点的应变有关; 冻岩的损伤形状参数 m 与材料的性态有关, 并对岩石变形的非线性行为起决定性作用, 即 m 值越小, 冻岩越趋向于塑性破坏, m 值越大, 越趋向于脆性破坏。

3 计算实例及损伤扩展特性分析

文献[4]选取红砂岩和页岩两种岩石, 加工成 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的圆柱形试样, 饱水后进行冻融循环试验, 并对经历不同冻融循环次数后的岩样进行单轴压缩。图 1、图 2 是利用文献[4]提供的实测参数, 由式(8)计算得到的两种岩石冻融受荷损伤模型的理论曲线。两种岩石的力学参数见表 1。

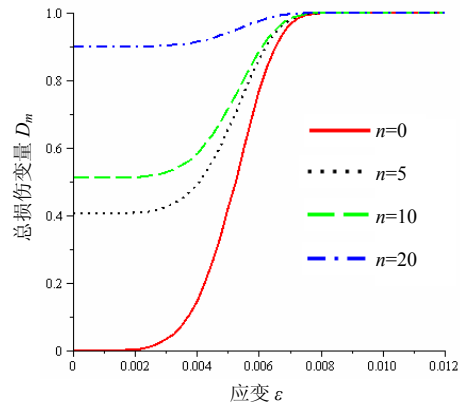


图 1 红砂岩冻融受荷损伤模型演化曲线

Fig.1 Evolution curve of freeze-thaw and loading damage model for red sandstone

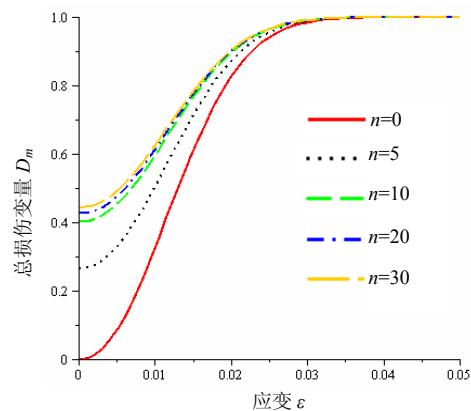


图 2 页岩冻融受荷损伤模型演化曲线

Fig.2 Evolution curve of freeze-thaw and loading damage model for shale

表 1 两种岩石力学参数

Table 1 The mechanical parameters of rock

岩性	ϵ_f	m	E_0/GPa	E_5/GPa	E_{10}/GPa	E_{20}/GPa	E_{30}/GPa
红砂岩	0.0041	5.439	7.95	4.72	3.88	0.79	/
页岩	0.0108	2.153	4.87	3.57	2.91	2.79	2.71

由图 1、图 2 可以看出，红砂岩的冻融损伤劣化程度随着冻融循环次数的增大急剧增大，尤其是在有无冻融循环的条件下，损伤程度差异显著。经历 20 次冻融循环后，红砂岩应变约 6‰ 时，损伤变量近乎为 1，表明此时红砂岩主要由于冻融影响接近崩解，其冻融耐久性很差。而页岩在 10 次冻融循环内，损伤随冻融循环次数的增大逐渐增大，强度有所降低，但在 10 次—30 次之间，损伤变量变化不大，冻融损伤趋于恒定，表明页岩在冻融循环达到一定次数后其力学性质趋于稳定。

相同冻融次数下，红砂岩和页岩的损伤随应变的增加而增加。冻融前的岩石在受荷的初始阶段为损伤弱化阶段，岩石微孔隙、微裂纹逐渐闭合，密度增大，强度提高；之后岩石处于线性阶段，当变形达到一定程度后，岩石损伤开始演化、稳定扩展，直至损伤加速发展，损伤变量趋于 1，伴随着岩石内部微裂纹萌生、扩展、汇合贯通，出现宏观裂纹的过程，最后岩石强度达到峰值，产生破坏。随着冻融循环次数的增大，两种岩石的压密段逐渐增大，且红砂岩的压密段明显于页岩。

相同损伤程度时，随着冻融循环次数的增加，两种岩石的应变值减小。不同冻融次数条件下，页岩损伤变量趋于 1 时的应变值非常接近，说明冻融次数对其强度极限影响不大，受荷损伤最终导致页岩破坏，而砂岩以冻融损伤为主。此结论可由文献[4]冻融循环试验数据所拟合的两种岩石冻融损伤值 D_n 与冻融次数 n 的关系曲线(图 3 所示)得到验证。其函数表达式为：

红砂岩：

$$D(n) = 0.038 + 0.042n - 9.88 \times 10^{-4} n^2 \quad (11)$$

页岩：

$$D(n) = 0.445 - 0.447e^{-0.198n} \quad (12)$$

图 4、图 5 是利用文献[4]提供的实测参数，由式(1)、式(7)及式(9)计算得到的红砂岩和页岩总损伤率演化曲线，式(11)、式(12)分别是式(9)中红砂岩和页岩的冻融损伤演化方程。

图 4 和图 5 中显示：冻融循环次数不影响损伤率的变化趋势，只影响其数值大小。相同应变条件下，随着冻融循环次数的增加，红砂岩损伤演化率

逐渐降低，表明红砂岩的塑性不断增大，而页岩在 10 次冻融循环内，损伤率随冻融次数的增大而增大，塑性有所提高，但在 10 次冻融之后，损伤演化率趋于恒定。

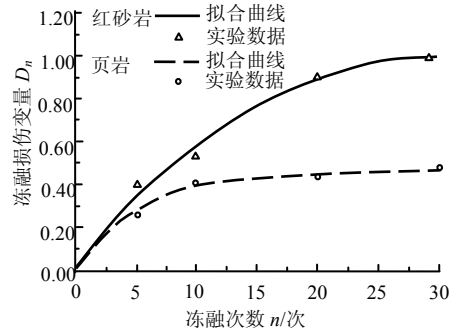


图 3 两种岩石冻融损伤值与冻融次数关系曲线

Fig.3 Relation curves between damage value and freeze-thaw cycles

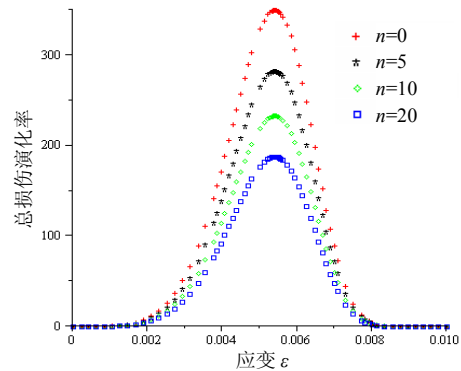


图 4 红砂岩损伤率演化曲线

Fig.4 Evolution curve of damage ratio for red sandstone

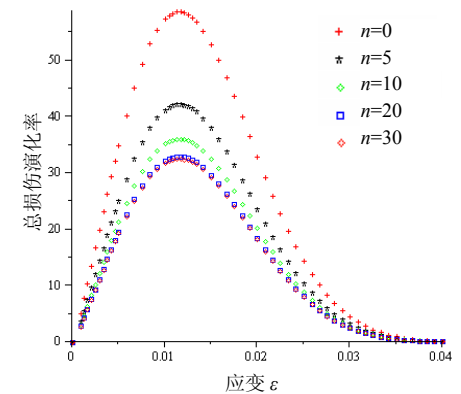


图 5 页岩损伤率演化曲线

Fig.5 Evolution curve of damage ratio for shale

相同冻融次数下，随着应变的增加，红砂岩和页岩的损伤率呈增加趋势，至峰值后逐渐减小。但红砂岩的损伤率初始时近乎为零，且增加缓慢，之后红砂岩的损伤率增速逐渐加快，其间应变值存在一介于 3‰—4‰ 的临界区域，当应变值低于区域下限时，损伤率增速缓慢；当应变值超出区域上限时，损伤率增速较快。相同冻融循环次数下，红砂岩损

伤率曲线峰后下降段较页岩陡,说明红砂岩的脆性大于页岩。

根据本文冻融受荷损伤模型得到的红砂岩和页岩细观结构损伤及其诱发的材料力学性能演化规律,与文献[4]的实验现象及分析结论非常符合,与岩石损伤特性相一致,说明本文提出的描述岩石冻融受荷的损伤演化模型比较合适,所建立的基于损伤的冻岩本构方程合理可行。

4 结论

(1) 用损伤力学的分析方法可将冻岩内部组成材料的力学行为与宏观的冻岩力学行为相结合,并可用冻融受荷数学模型表征岩石中冻融、荷载及损伤之间复杂的作用关系,为从细观损伤演化揭示宏观岩石冻融-荷载耦合破坏机制提供了一种新的分析方法。

(2) 冻融与荷载以不同的力学机理促使岩石中新裂纹的萌生及原生缺陷的二次扩展,由此诱发的损伤与冻融损伤相互耦合、相互影响,必将带来岩石力学特性的变化;冻融与荷载的共同作用可使岩石总损伤加剧,并呈现明显的非线性特征,而其耦合效应使总损伤有所弱化。

(3) 相同冻融受荷条件下,冻融循环对红砂岩损伤的影响明显大于页岩,红砂岩的冻融耐久性很差,受荷损伤最终导致页岩破坏。随着冻融循环次数的增加,红砂岩的塑性不断增大,而页岩开始时塑性有所提高,但在10次冻融之后趋于恒定。随着应变的增加,红砂岩损伤率初始时增加缓慢,但曲线峰后下降段较页岩陡,红砂岩的脆性大于页岩。

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 Guodong, Xie Dingyi. Geomechanics development in civil construction in Western China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 268-272. (in Chinese)
- [2] Lemaitre J. A course on damage mechanics [M]. Berlin: Springer Verlag, 1992.
- [3] Park C, Synn J H, Shin H S. Experimental study on the thermal characteristics of rock at low temperatures [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2004, 41(3): 81-86.
- [4] 徐光苗,刘泉声.岩石冻融破坏机制分析及冻融力学试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(17):3076-3082.

- Xu Guangmiao, Liu Quansheng. Analysis of mechanism of rock failure due to freeze-thaw cycling and mechanical testing study on frozen-thawed rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3076-3082. (in Chinese)
- [5] 张继周,缪林昌,杨振峰.冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(8):1688-1694.
Zhang Jizhou, Miao Linchang, Yang Zhenfeng. Research on rock degradation and deterioration mechanisms and mechanical characteristics under cyclic freezing-thawing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1688-1694. (in Chinese)
- [6] 任建喜,冯晓光,刘慧.三轴压缩单一裂隙砂岩细观损伤破坏特性CT分析[J].西安科技大学学报,2009,29(3):300-306.
Ren Jianxi, Feng Xiaoguang, Liu Hui. CT testing on meso-damage propagation mechanism of cracked-sandstone sample under triaxial compression loading [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(3): 300-306. (in Chinese)
- [7] 李树春,许江,杨春和.循环荷载下岩石损伤的CT细观试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(8):1604-1609.
Li Shuchun, Xu Jiang, Yang Chunhe. Study of CT meso-experiment of rock damage under cyclic load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1604-1609. (in Chinese)
- [8] 杨更社,张全胜,蒲毅彬.冻结温度影响下岩石细观损伤演化CT扫描[J].长安大学学报(自然科学版),2004,24(6):40-46.
Yang Gengshe, Zhang Quansheng, Pu Yibin. CT scanning test of meso-damage propagation of rock under different freezing temperature [J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2004, 24(6): 40-46. (in Chinese)
- [9] 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 Quansheng, Yang Gengshe, Ren Jianxi. 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)
- [10] 杨天鸿,屠晓利,於斌.岩石破裂与渗流耦合过程细观力学模型[J].固体力学学报,2005,26(3):333-337.
Yang Tianhong, Tu Xiaoli, Yu Bin. A micro-mechanical model for simulating the coupling of fracture and flow of rock [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2005, 26(3): 333-337. (in Chinese)
- [11] 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 Jianguo, Zhu Zhiwu. 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)