

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

冻融岩石蠕变特性及孔隙结构演化特征研究

宋勇军, 孟凡栋, 毕 冉, 张 琨, 张 君

Research on creep characteristics and pore structure evolution characteristics of freezing-thawing rocks SONG Yongjun, MENG Fandong, BI Ran, ZHANG Kun, and ZHANG Jun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211026

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

锦屏大理岩单轴压缩过程中的微结构演化

A study of mineral compositions and micro-structure characteristics for the Jinping marble 封陈晨, 李傲, 王志亮, 王浩然 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 90-96

冻融循环作用下花岗岩损伤的宏微观尺度研究

A study of granite damage in the macro and microscopic scales under freezing-thawing cycles 戚利荣, 王家鼎, 张登飞, 张永双, 李贞孝, 孙嘉兴, 马剑飞 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 65-73

冻融作用下污泥固化轻质土动力特性及结构演化

Dynamic and structural characteristics of sludge solidified light soil under freezing-thawing action 杨爱武, 王斌彬, 钟晓凯 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 57-65

基于断裂及高温损伤的岩石蠕变模型研究

A study of the creep model of rock considering fractures and thermal damage 李修磊,李起伟,李倩 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 46–56

红层砂岩高温后效蠕变试验研究

Creep tests of red-bed sandstone after high temperature 李畅, 任光明, 孟陆波, 代晗, 张晓东, 李科 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 71-71

冻融作用下纤维加筋固化盐渍土的抗压性能与微观结构

Compressive properties and microstructure of saline soil added fiber and lime under freezing-thawing cycles 柴寿喜, 张琳, 魏丽, 田萌萌 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 96-105



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211026

宋勇军, 孟凡栋, 毕冉, 等. 冻融岩石蠕变特性及孔隙结构演化特征研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 69-79. SONG Yongjun, MENG Fandong, BI Ran, *et al.* Research on creep characteristics and pore structure evolution characteristics of freezingthawing rocks[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 69-79.

冻融岩石蠕变特性及孔隙结构演化特征研究

宋勇军,孟凡栋,毕 冉,张 琨,张 君 (西安科技大学建筑与土木工程学院,陕西西安 710054)

摘要:寒区露天岩体面临着循环冻融和长期荷载共同作用引起的时效性损伤的考验。为探究寒区环境对岩体稳定性的影响,以陕北某工程的红砂岩为研究对象,从冻融岩石的宏观蠕变特性及细观结构的演化特征着手,通过冻融岩石的加卸载 蠕变试验,并配合核磁共振检测,对冻融红砂岩蠕变过程中的宏观力学指标及细观参数的演化进行定量分析。结果表明: 应力水平在 0.3*σ*ues ~ 0.5*σ*ues 时,孔径分布在一个较小范围内波动,当应力水平增高至 0.5*σ*ues ~ 0.6*σ*ues 时,小孔(横向弛豫时间 *T*₂<10 ms)占比下降,大孔(*T*₂>10 ms)占比上升;冻融加剧了蠕变阶段孔隙度的增长,高应力水平下冻融对孔隙度增长的影响 更为显著。引入分形理论表征孔隙结构的复杂程度,发现大孔有明显分形特征,而小孔分形特征不明显,总孔分维 *D*_T与孔 隙度呈正相关;孔隙结构的复杂程度仅在孔隙度较大时才明显影响岩石的蠕变力学特性。建立了有关冻融作用影响及蠕 变损伤的冻融-损伤蠕变模型,模型曲线可以很好地反映冻融岩石的蠕变破坏特征,且与试验曲线吻合良好。本研究可为 冻融环境下的岩体工程建设提供理论依据。

关键词:蠕变试验;冻融循环;核磁共振;孔隙度;分形维数;蠕变模型

中图分类号: TU458; P642.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2023)06-0069-11

Research on creep characteristics and pore structure evolution characteristics of freezing-thawing rocks

SONG Yongjun, MENG Fandong, BI Ran, ZHANG Kun, ZHANG Jun (School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The rock mass of open pit in cold regions is often affected by freezing-thawing cycles and long-term loads. In order to explore the influence of cold region environment on the stability of rock mass, the red sandstone of a project in northern Shaanxi is taken as the research object, starting with the macroscopic creep characteristics and meso-structure evolution characteristics of freezing-thawing rocks. The evolution of macro-mechanical indexes and meso-parameters during the creep process of freezing-thawing red sandstone is quantitatively analyzed through the loading and unloading creep test of freezing-thawing rock and the NMR detection. The results show that the pore size distribution fluctuates in a small range when the stress level is between $0.3\sigma_{ues}-0.5\sigma_{ues}$, and when the stress level increases to $0.5\sigma_{ues}-0.6\sigma_{ues}$, the proportion of small holes ($T_2 < 10$ ms)

收稿日期: 2022-11-08; 修订日期: 2023-02-16 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(11972283; 42277182)

第一作者:宋勇军(1979-),男,博士,教授,主要从事岩石力学与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: songyj79@xust.edu.cn

通讯作者: 孟凡栋(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: wy1065203655@163.com

decreases and the proportion of large holes (T_2 >10 ms) increases, and freezing-thawing aggravates the increase of porosity in the creep stage, and the effect of freezing and thawing on porosity growth is more significant at high stress levels. The fractal theory is introduced to characterize the complexity of pore structure. It is found that the large pores have obvious fractal characteristics, while the fractal characteristics of small pores are not obvious. The total pore fractal dimension D_T is positively correlated with porosity. The complexity of pore structure only affects the creep mechanical properties of rock when the porosity is large. The freezing-thawing-damage creep model of freezing-thawing effect and creep damage is established. The model curve can well reflect the creep characteristics of the freezing-thawing rock, which is in good agreement with the experimental curve. This study can provide a theoretical basis for rock engineering construction in freezig-thawing environment.

Keywords: creep test; freezing-thawing cycle; NMR; porosity; fractal dimension; creep model

寒区工程岩体处于恶劣的环境及复杂的应力状态下,通常会伴随冻融和长期荷载的共同作用。在寒 区露天岩体工程施工过程中则表现为冻融、长期加载 和卸载的综合作用,为保证工程建设的安全运营,必 须同时考虑冻融与加卸载蠕变共同作用引起的时效 损伤对工程岩体强度的影响。

目前,在岩石力学特性和冻融环境下岩石破坏机 理的研究方面,国内外学者都有诸多重要贡献。例 如,Liu等¹¹对红砂岩进行室内单轴抗压强度和纵波 速度测试,探讨了冻融环境下含水饱和度对岩石力学 性质的影响; Shi 等[2] 通过冻融循环和三轴压缩试验, 分析了冻融次数和围压对红砂岩力学性能的影响; Huang 等³¹将岩石的冻融损伤用弹性模量来表示,建 立了冻融和荷载共同作用下的损伤本构模型,并将其 应用于寒冷地区热-水-机械耦合条件下隧道的稳定性 分析;张峰瑞等[4]建立了花岗岩的冻融剪切蠕变本构 模型,通过对蠕变参数的敏感性分析,研究了蠕变参 数对花岗岩蠕变变形的影响。上述工作主要是对冻 融岩石物理力学特性的研究,但从本质上看,岩石的 宏观形变和破坏是许多细观、晶粒尺度的裂缝贯通和 孔洞坍塌造成的^[5-6]。为更加清晰地认识冻融岩石蠕 变特性,必须分析其细观孔隙结构,从细观层面来阐 释冻融岩石的蠕变特性。

核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)作为 一种无损测试技术, 是测定岩体内部结构演化的主要 方法之一, 可系统获得流体在样品中赋存及迁移的相 关参数, 例如渗透率、孔隙度、T₂ 谱分布(T₂ 为横向弛 豫时间)等。目前这一技术已被广泛用于冻融岩石细 观结构评估^[7], 周科平等^[8]、李杰林等^[9] 对不同冻融岩 石进行核磁共振测试和成像分析, 对冻融岩石的细观 损伤与宏观力学特性之间的联系进行了研究, 得出了 岩石在冻融作用下孔隙结构的演化及扩展规律;陈国 庆等^[10]对不同温差冻融后的石英砂岩、变质砂岩及红 砂岩进行核磁共振检测,探讨了各类砂岩在不同温差 冻融作用下的孔隙结构发展规律。以上研究为冻融 岩石细观结构表征积累了丰富的资料,但将核磁共振 技术应用于冻融岩石加卸载蠕变试验中,从细观角度 描述弹性后效特征与蠕变力学特性联系的研究却十 分罕见。岩石内部结构具有较强的分形特征^[11-13],因 此,利用分形理论可以定量描述岩石细观结构的复杂 性^[14]。另外,利用分形维数来描述加卸载蠕变过程中 冻融岩石孔隙结构复杂程度的变化,探讨其与细观参 数及宏观特性之间关系的研究同样罕见。

基于此,本文通过对不同冻融次数的红砂岩岩样 进行分级加卸载蠕变试验,并配合核磁共振检测,同 时引入分形理论,探究冻融后红砂岩在蠕变过程中细 观参数、孔隙结构复杂程度与蠕变力学特性之间的关 系,并建立了考虑冻融对岩石蠕变损伤影响的本构模型。

1 试验方法

1.1 试样制备

试验所用岩石采自陕北某工程岩体,是以长石、 石英、蒙脱石等成分为主的中细粒红砂岩。首先, 按国际岩石力学学会试验规程^[15]将岩块加工成直径 50 mm、高度 100 mm、端面不平整度不超过 0.02 mm 的圆柱体(图 1);然后烘干岩样,待其冷却后测得其干 密度和纵波波速;最后将岩样饱和,测得其饱和质量, 进而获得岩样的饱和密度、饱和含水率和孔隙度。岩 样物理性质具有良好的相似性,表1为岩样基本物理 参数的平均值。依据纵波波速和干密度相近的原则, 将岩样分为 I、II两组(表 2),每组3个岩样对应不同 的冻融次数。将组 I 岩样用于抗压强度试验,组 II 岩 样用于蠕变试验。



图 1 红砂岩岩样尺寸及安装示意 Fig. 1 Rock sample size and installation instructions

Tabla 1	Maan nh	veteral managementance of the work same
	表 1	各项物理参数的平均值

物理参数	纵波波速	干密度	饱和密度	饱和含水率 孔隙度		
	$/(m \cdot s^{-1})$	$/(g \cdot cm^{-3})$	$/(g \cdot cm^{-3})$	/%	/%	
平均值	2 781	2.21	2.67	7.05	15.59	

表 2 岩样分组 Table 2 Grouping of the rock samples

组别	冻融0次	冻融30次	冻融60次
Ι	A-1	B-1	C-1
П	A-R	B-R	C-R

1.2 试验方案

试验主要包括 3 个方面: 冻融循环试验、核磁共 振检测、单轴分级加卸载蠕变试验。

(1)冻融循环试验

首先在压力值为-0.1 MPa的真空饱和仪中放入 岩样,使岩样饱和,持续时间 24 h,然后将饱和红砂岩 岩样放入冻融循环试验箱中,进行冻融循环试验。冻 融循环温度及高低温持续时间按照《工程岩体试验方 法标准》(GBT 50266—2013)^{116]}设定,冻结温度设定为 -20℃,融解温度设定为 20℃,冻结和融解时间均为 12 h,每 24 h 为一个冻融循环周期,按表 2 分组进行冻 融循环试验。

(2)核磁共振检测

采用磁感应强度为(0.3±0.05)T的 NMC12-010V 核磁共振测试分析系统进行检测。岩样在进行核磁 共振检测前,通过真空抽气的方式进行强制饱和处 理,完毕后,再从水中取出,将表面水分擦干,包上保 鲜膜后检测。

(3)单轴分级加卸载蠕变试验

采用 TAW-1000 型岩石力学试验机,首先完成组

I 中岩样的单轴抗压强度试验,获得不同冻融岩样的 单轴抗压强度 σ_{ues},然后根据组 I 岩样的试验结果确定 组 Ⅱ 岩样的各级加载应力值。用加载应力水平来表 示预设加载应力与抗压强度的比值,不同冻融次数岩 样的各级应力水平加载值如表 3 所示。加卸载方式 采用应力控制,加载速率为 0.01 MPa/s,每级荷载持续 时间 12 h 后完全卸载至 0,卸载速率为 0.01 MPa/s,待 变形趋于稳定后(约 5 h)卸除岩样并进行核磁共振检 测,得到该级加载比条件下岩样的核磁共振弛豫 T₂ 谱 和孔隙度等数据,然后进行下一级加载,依次循环,加 载方式如图 2 所示。

表 3 单轴蠕变试验中不同冻融岩样各级应力加载值 Table 3 Stress loading values at various levels in the uniaxial creep test of sandstone under different freezing-thawing conditions

冻融循环 岩 次数/次 约	岩样	冻融后T ₂ 谱面积	加载应力/MPa					
	编号		第一级	第二级	第三级	第四级	第五级	
0	A-R	10 668.82	10.01	13.34	16.68	20.01	23.35	
30	B-R	11 584.31	9.71	12.95	16.19	19.42	22.66	
60	C-R	11 348.65	8.40	11.20	14.00	16.79	19.59	



Fig. 2 Graded loading and unloading creep stress loading method of freezing-thawing rock

2 试验结果

2.1 冻融岩石蠕变力学性质

2.1.1 单轴强度试验

图 3 为单轴抗压强度试验的应力-应变曲线,表4 为试验结果。曲线中, OA 是压实阶段, AB 是线弹性 阶段, BC 是塑性发展阶段^{117]}。据表4可知, 抗压强度 和弹性模量随冻融次数的增加而减小: 冻融次数从 0 次增加到 30 次时, 降幅分别为 2.99% 和 4.69%; 冻融 次数从 30 次增加到 60 次时, 降幅分别为 13.53% 和 17.38%, 较前者变化明显。这表明, 岩样的力学性能 受冻融循环作用的影响较大,其主要原因是岩样孔隙 结构在受冻胀应力的反复作用时,内部孔隙的连续扩 张和微裂纹的不断扩展。



2.1.2 蠕变行为

图 4 为不同冻融岩样的单轴分级加卸载蠕变试验 曲线,根据图中数据可得到除最后一级外不同加载条

表 4 组 | 中不同冻融岩样的力学参数

 Table 4
 Mechanical parameters of different freezing-thawing rock samples in group I

会教	-	冻融次数/次	
参奴	0	30	60
抗压强度/MPa	33.37	32.37	27.99
弹性模量/GPa	39.65	37.79	31.22

件下的稳态蠕变速率和塑性应变,如图 5 所示。当应 力水平在 0.3*σ*ucs ~ 0.5*σ*ucs 时,二者均随应力水平的提升 近似线性增长,当应力水平增高至 0.6*σ*ucs 时,二者均急 剧增大。此外,冻融作用使得岩样内部颗粒间的黏结 作用减弱^[18],故冻融次数越多,这一现象更为显著。 例如,当应力水平从 0.5*σ*ucs 提升至 0.6*σ*ucs 时,对于冻融 0次的岩样,塑性应变量从 0.942 1×10⁻³ 增加到 0.114 9× 10⁻²,增幅为 22.01%;然而,冻融 30 次岩样的塑性应变 量从 0.341 9×10⁻² 增加到 0.597 4×10⁻²,增幅为 74.75%, 冻融 60 次岩样的塑性应变量从 0.630 7×10⁻² 急剧增加 到 1.204 3×10⁻²,增幅为 90.95%。



Fig. 4 Creep curves of different freezing-thawing rock samples

隙视为大孔。



loading ratio

2.2 蠕变过程中冻融岩石孔隙结构细观参数演化

2.2.1 孔径分布变化特征 孔径分布可由 T₂曲线的核磁共振信号强度来表 征^[19]。具体来说,孔隙数量随着信号强度的增加而 增加^[20],孔隙越大其弛豫时间 T₂越长,且其表面积(S) 与体积(V)之比越小,反之亦然^[21]。根据核磁共振理 论^[22],本文将 T₂<10 ms 的孔隙视为小孔, T₂>10 ms 的孔

冻融 0 次, 30 次和 60 次后的岩样在不同应力水 平的 T₂ 分布曲线如图 6 所示, 孔径分布占比如图 7 所 示。可见, T₂ 谱面积随应力水平的提高而增长, 且冻 融次数越多趋势越明显, 这是冻融循环削弱了内部颗 粒间的黏聚力和摩擦力导致的。试验后岩样大孔(T₂> 10 ms)占比约为小孔($T_2 < 10$ ms)的 1.5 倍。当应力水 平在 $0.3\sigma_{ues} \sim 0.5\sigma_{ues}$ 之间变化时,应力水平对孔径分布 的变化没有明显影响,孔径分布在一个较小的范围内 波动。由于岩样内部微小孔隙的萌生、扩展和连通是 导致其孔隙结构变化的重要因素^[23],所以孔径分布的 变化是随机的。然而,当应力水平在 0.5σ_{ucs} ~ 0.6σ_{ucs} 之 间变化时,小孔占比均突然下降,大孔占比均突然上 升。其原因在于高应力水平下,岩样内部损伤愈发严 重,原来的小孔演化为大孔,导致大孔占比增加,小孔 占比减少。







图 7 蠕变过程中红砂岩的孔径分布占比 Fig. 7 Proportion of pore size distribution of rock samples during creep

2.2.2 孔隙度的演化规律

图 8 为随应力水平提升,不同冻融岩石孔隙度增量的变化情况。为量化孔隙度增量与应力水平间的关系,对图 8 中数据进行拟合,发现孔隙度增量与应力水平间存在良好的指数关系,指数方程可以表示为 $y = y_0 + Ae^{-x/t}$ 。

对于冻融后的岩样, 当应力水平在 0.3*σ*ues ~ 0.5*σ*ues 时, 岩样孔隙度增量逐渐增大, 但增幅较小, 岩样内部 仍以弹性变形为主, 在力的作用下, 内部颗粒之间胶 结较弱的区域因失衡而破坏, 产生新的裂隙^[24]。孔隙 度增量在应力水平增长到 0.6*σ*ues 时迅速增加, 冻融 0 次、30次和 60次的岩样分别增加 10.65%、17.98% 和 23.75%, 岩样进入以塑形变形为主的阶段, 胶结较弱 的区域基本破坏, 此时在外力作用下, 原有的孔隙会继 续扩展或多个孔隙发生贯通,表现为裂隙的扩展^[25]。 以上现象表明,随着应力水平提高,岩样内部孔隙结 构不断劣化,在应力水平达到并超过 0.6σ_{ues} 时,蠕变阶 段岩石内部损伤愈发严重。

图 8 中应力水平为 0.6*σ*_{ues} 时, 冻融 30 次和 60 次岩 样孔隙度增量的增幅明显高于冻融 0 次岩样, 为进一 步探讨冻融循环次数与孔隙度增量的关系, 对蠕变阶 段不同冻融岩样孔隙度增量的变化情况进行分析, 如 图 9 所示。可以看出, 随着冻融循环次数增多, 孔隙 度增量近似线性增长, 说明在扩大孔隙和裂隙方面, 冻融循环发挥了一定的推动作用; 此外, 高应力水平 下冻融作用对孔隙度增量的影响更为明显, 这是由于 冻融过程中水冰相变不仅增加了孔隙体积, 同时也使 得岩石基质之间的胶结性质降低。









2.2.3 蠕变过程中的分形特征

$$S_{\rm V} = \frac{r^{3-D} - r_{\rm min}^{3-D}}{r_{\rm max}^{3-D} - r_{\rm min}^{3-D}} \tag{1}$$

式中:r---孔隙半径/µm;

$$r_{max}$$
——孔隙半径最大值/ μ m;
 r_{min} ——孔隙半径最小值/ μ m;
 S_V ——半径小于 r 的孔的累积体积分数;
 D ——分形维数。
由于 $r_{min} << r_{max}$,故式(1)可由式(2)表示为:

$$S_{\rm V} = \left(\frac{r}{r_{\rm max}}\right)^{3-D} \tag{2}$$

在核磁共振测试中,横向弛豫时间 *T*₂可用来反映 孔隙大小,因此可以将式(2)转换成式(3):

$$S_{\rm V} = \left(\frac{T_2}{T_{2\rm max}}\right)^{3-D} \tag{3}$$

式中: T2max——最大横向弛豫时间/ms。

对式(3)两边取对数,可得:

$$\lg S_{\rm V} = (3-D) \lg T_2 + (3-D) \lg T_{\rm 2max}$$
(4)

本文利用式(4)来计算分形维数。

在孔径分类的基础上,利用式(4)在相应范围内 线性拟合计算出小孔和大孔的分形维数 D₁和 D₂。此 外,通过对整个孔径范围的线性拟合,得到总孔隙的 分形维数 D_r。由于篇幅限制,这里仅给出冻融 0 次岩 样第一级应力加载后分形维数的线性拟合计算过程, 如图 10 所示。



Fig. 10 Fractal dimension calculation process

图 11 是随应力水平变化的不同冻融岩样分形维数的变化趋势。随着应力水平的提升,小孔的分形维数 *D*₁ 在 2 附近上下波动。这表明小孔在蠕变过程中无分形特征。

大孔的分形维数 D₂ 与应力水平呈正相关,其数值 范围在 2~3之间, D₂ 在相同应力水平下,冻融次数越 多其值越大。此外,当冻融次数从 0次增加到 60次 时, D₂ 与应力水平的线性拟合曲线斜率随着冻融次数 的增多,从 0.056 增加到 0.194,增幅为 255.6%。这可 能与冻融和长期荷载对岩样孔隙结构的共同作用 有关,受冻融作用越强的岩样内部骨架越松散,在长 期荷载的作用下其大孔孔隙结构复杂程度变化更为 剧烈。



Fig. 11 Evolution of fractal dimension of freezing-thawing red sandstone with stress level

总孔隙分形维数 $D_{\rm T}$ 随应力水平的变化趋势与孔 隙度的变化趋势一致,呈现出先缓慢上升、应力水平 到达 $0.6\sigma_{\rm ues}$ 后急剧上升的趋势。在应力水平较低时, 岩样抵抗变形的能力较强,长期荷载并没使得孔隙结 构的复杂程度出现较大增长,但随着应力水平的提 升,损伤不断积累,当作用于岩样的长期荷载接近其 屈服强度时,大量裂缝产生并合并,岩样抵抗变形的 能力变弱,孔隙体积和孔隙网络复杂性大大增加,导 致分形维数 $D_{\rm T}$ 急剧增大。同时,冰的反复冻胀与融 缩使得岩样内部颗粒间的黏聚力和胶结强度逐步降 低,微小孔隙不断萌生和融合,进而导致内部缺陷和 损伤增加,故受冻融损伤越严重的岩样在应力水平分 界点($0.6\sigma_{\rm ues}$)处 $D_{\rm T}$ 变化更为显著。

对图 12 中的数据进行线性拟合,发现冻融岩石 的孔隙度与 *D*_T 呈正相关,且拟合曲线的相关系数(*R*²) 均大于 0.87,表明孔隙度与 *D*_T之间高度相关。因此, 随着分形维数的增加,冻融岩石的孔隙度增大,即分 形维数越大,其孔隙网络的发育程度就越大。



3 冻融岩石细观结构演化对宏观特性的影响

为探究冻融岩石的孔隙度及孔隙结构复杂程度 双因素共同作用对其宏观蠕变力学行为的影响,绘制 塑性应变量及稳态蠕变速率分别与孔隙度和 D_r 的三 维关系图(图 13)。由于篇幅有限,这里仅给出冻融 30次岩样的三维关系图。由图 13(a)可知,岩样的塑 性应变量随孔隙度的增大而增大,当孔隙度较小时, 分形维数对塑性应变量的影响较小,当孔隙度较大 时,随着分形维数的增加,塑性应变量增加。因此,冻 融岩石孔隙结构的复杂程度只在孔隙度较大时才对 塑性应变量产生明显影响,在孔隙度相同的情况下, 分形维数越大,冻融岩石的塑性应变量越大。由图 13 (b)可知, 冻融岩石稳态蠕变速率受孔隙度及分形维数的影响与塑性应变量相似。因此, 对于受长期荷载作用的冻融岩石, 在其蠕变阶段, 随着时间的推移, 次 生裂纹逐渐萌生, 孔隙度随之增长, 孔隙结构逐渐复杂, 进而影响了冻融岩石的宏观蠕变力学行为。



图 13 双因素共同作用对蠕变力学行为的影响 Fig. 13 Influence of two factors on creep mechanical behavior

4 冻融岩石蠕变模型

4.1 冻融岩石损伤黏性元件

当施加的荷载达到或超越一定值时,岩石内部会 有损伤产生,应考虑荷载产生的损伤对蠕变参数造成 的影响^[28],本文仅考虑加速蠕变阶段应力产生的损 伤,因为减速蠕变阶段和稳定蠕变阶段岩石内部损伤 程度较小^[29]。引入损伤变量(*D*_o)来描述加速蠕变阶 段,受冻融作用影响岩样的黏性系数损伤劣化,图 14 为冻融条件下的损伤黏性元件。

Abel 黏壶^[30] 的本构关系为:

$$\sigma = \frac{\eta_2^{\gamma} d^{\gamma} \varepsilon(t)}{dt^{\gamma}}$$
(5)



图 14 冻融损伤黏性元件 Fig. 14 Freezing-thawing damage viscous element

式中: σ——加载应力/MPa;

γ——阶数;

t----时间/h。

当 y=0 时,上式表示理想弹性体;当 y=1 时,上式 表示牛顿体;当0≤y≤1时,上式可表达介于理想弹性 体和牛顿体之间的材料。

变系数 Abel 黏壶的本构关系:

$$\eta_2^{\gamma} = \eta_2^{\gamma}(D_c) = \eta_2^{\gamma}(1 - D_c) \tag{6}$$

式中:D。——黏性系数的劣化。

冻融岩样在蠕变过程中的损伤与时间呈负指数 函数关系[29],即:

$$D_{\rm c} = 1 - {\rm e}^{-\alpha t} \tag{7}$$

式中: *α*——与红砂岩性质及冻融次数相关的系数/h⁻¹。

变系数 Abel 黏壶的本构关系, 可结合式(5)-(7) 得到:

$$\sigma = (\eta_2^{\gamma} e^{-\alpha t}) \frac{d^{\gamma} [\varepsilon(t)]}{dt^{\gamma}}$$
(8)

式中: ŋ^x,e^{-at}——与冻融次数相关且随时间演化的黏性 系数/(GPa·h)。

当应力保持不变时,有:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\eta_2^{\gamma}} t^{\gamma} \sum_{K=0}^{\infty} \frac{(\alpha t)^K}{\Gamma(\gamma + 1 + K)}$$
(9)

式中:K——累加次数;

Γ——伽马函数。

4.2 蠕变模型的建立

由上文可知,不同冻融岩样依次经历减速、稳 态和加速蠕变阶段,且冻融次数、应力状态和加载时 间均影响岩样的蠕变特性。经典的 Poyting-Thomson 模型能较好地反映岩样蠕变的减速蠕变和稳态蠕变 阶段,却无法反映加速蠕变阶段。因此,本文在 Poyting-Thomson 模型基础上串联一个由变系数 Abel 黏壶和 塑性元件并联组成的黏塑性体表示加速蠕变阶段。

图 15 为改进的 Poyting-Thomson 模型,其中 E₁, E₂ η_1 是与冻融次数相关的参数, σ_s 为长期强度。其本 构方程为:

当 σ<σ。时:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_2(N)} \left(1 - \frac{E_1(N)}{E_1(N) + E_2(N)} e^{-\frac{E_1(N)E_2(N)}{[E_1(N) + E_2(N)]\eta_1} t} \right)$$
(10)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_2(N)} \left(1 - \frac{E_1(N)}{E_1(N) + E_2(N)} e^{-\frac{E_1(N)E_2(N)}{(E_1(N) + E_2(N))\eta_1}t}\right) + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2^{\nu}(N)} t^{\nu} \sum_{K=0}^{\infty} \frac{(\alpha t)^K}{\Gamma(\gamma + 1 + K)}$$
(11)



图 15 改进的 Poyting-Thomson 模型 Fig. 15 Improved saturated Poyting-Thomson model

4.3 模型验证及参数辨识

当 $\sigma \ge \sigma$ 、时:

依据上文蠕变试验数据,采用1stOpt软件内置的 通用全局优化算法识别模型参数,得到各应力水平下 的模型参数及拟合结果。由于篇幅限制,这里仅列出 了冻融 30 次岩样的模型参数及拟合结果,分别如表 5 和图 16 所示。不同冻融岩样的模型拟合结果相似, 均与试验结果吻合良好,能够同时描述瞬时变形、减 速蠕变、稳态蠕变和加速蠕变过程。

表 5 蠕变模型参数 Table 5 Creep model parameters

加载等级	E_1	E_2	η_1	η_2	24	41	-2
	/GPa	/GPa	/(GPa·h)	/(GPa·h)	Ŷ	α/h ·	R^2
第一级	129.969	19.024	2.245	_	—	—	0.97
第二级	89.972	13.931	1.568	—	—	—	0.95
第三级	52.979	12.401	1.496	_	_	_	0.98
第四级	22.135	9.671	1.054	—	—	—	0.93
第五级	10.973	8.066	0.809	0.001 3	0.161	0.169	0.91
注·"一"表示此处为空。							

5 结论

(1) 当应力水平在 0.3*σ*ues ~ 0.5*σ*ues 间变化时, 应力 水平对孔径分布的变化没有明显影响,所有岩样的孔 径分布在一个较小的范围内波动,孔隙度增幅较小; 当应力水平在 0.5σ_{ues} ~ 0.6σ_{ues} 间变化时, 大孔占比均突 然增加,小孔占比均突然降低,孔隙度增幅迅速增大, 且冻融加剧了这一现象。

(2)小孔没有明显的分形特征, D₂与应力水平之 间呈正相关, D_T 随应力水平的提升先缓慢增大, 然后 在 0.6σ_{ucs} 处突增, 且 D_T 与孔隙度间的关系可用正线性



函数描述。

(3)孔隙结构复杂程度仅在孔隙度较大时才对冻 融岩石蠕变特性产生明显影响,分形维数越大,蠕应 变量和蠕变速率在相同孔隙度下越高;孔隙结构复杂 程度和孔隙度越大,岩石受损越严重。

(4)在 Poyting-Thomson 模型的基础上,根据冻融 岩石的蠕变特性,串联一个改进的黏塑性体,建立考 虑了冻融影响的蠕变模型。经验证,蠕变模型的拟合 结果与试验结果吻合良好,能准确反映不同冻融岩样 各加载阶段的蠕变状态。

参考文献(References):

- LIU Yanzhang, CAI Yuantian, HUANG Shibing, et al. Effect of water saturation on uniaxial compressive strength and damage degree of clay-bearing sandstone under freeze-thaw[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(4): 2021 – 2036.
- [2] SHI Lei, LIU Yang, MENG Xiangzhen, et al. Study on mechanical properties and damage characteristics of red sandstone under freeze-thaw and load[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 1 – 13.
- [3] HUANG Shibing, LIU Quansheng, CHENG Aiping, et al. A statistical damage constitutive model under freeze-thaw and loading for rock and its engineering application[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 145: 142 – 150.
- 【4】 张峰瑞,姜谙男,杨秀荣,等. 冻融循环下花岗岩剪切 蠕变试验与模型研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 112. [ZHANG Fengrui, JIANG Annan, YANG Xiurong, et al. Study of shear creep experiment and model of granite under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil

Mechanics, 2020, 41(2): 1 - 12. (in Chinese with English abstract)]

- [5] WONG T F, BAUD P. The brittle-ductile transition in porous rock: A review[J]. Journal of Structural Geology, 2012, 44: 25 - 53.
- [6] WU Xiang yang, BAUD P, WONG T F. Micromechanics of compressive failure and spatial evolution of anisotropic damage in Darley Dale sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(1/2): 143 160.
- [7] 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 Gengshe, SHEN Yanjun, JIA Hailiang, 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 with English abstract)]
- [8] 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试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4):731-737. [ZHOU Keping, LI Jielin, XU Yujuan, 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 with English abstract)]
- [9] 李杰林,周科平,柯波. 冻融后花岗岩孔隙发育特征 与单轴抗压强度的关联分析 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1783 - 1789. [LI Jielin, ZHOU Keping, KE Bo. Association analysis of pore development characteristics and uniaxial compressive strength property of granite under freezing-thawing cycles[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1783 - 1789. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 陈国庆,万亿,孙祥,等.不同温差冻融后砂岩蠕变特 性及分数阶损伤模型研究 [J]. 岩石力学与工程学 报,2021,40(10):1962 - 1975. [CHEN Guoqing, WAN Yi, SUN Xiang, et al. Research on creep behaviors and fractional order damage model of sandstone subjected to freeze-thaw cycles in different temperature ranges[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021,40(10): 1962 - 1975. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 彭瑞东,鞠杨,谢和平.灰岩拉伸过程中细观结构演 化的分形特征 [J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2579 -

2582. [PENG Ruidong, JU Yang, XIE Heping. Fractal characterization of meso-structural evolution during tension of limestone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12): 2579 – 2582. (in Chinese with English abstract)]

- [12] 高峰,谢和平,巫静波. 岩石损伤和破碎相关性的分形分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 503 506. [GAO Feng, XIE Heping, WU Jingbo. Fractal analysis of the relation between rock damage and rock fragmentation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 503 506. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 卢波,陈剑平,葛修润,等.节理岩体结构的分形几何研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(3):461-467. [LU Bo, CHEN Jianping, GE Xiurun, et al. Fractal geometry study on structure of jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3):461 467. (in Chinese with English abstract)]
- [14] TAN Hao, SONG Yongjun, GUO Xixi. Analysis of porosity, permeability, and anisotropy of sandstone in freeze-thaw environments using computed tomography and fractal theory[J]. Fractals, 2021, 29(8): 2150239.
- [15] 郑虹, 冯夏庭, 陈祖煜. 岩石力学室内试验 ISRM 建议 方法的标准化和数字化 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2456 - 2468. [ZHENG Hong, FENG Xiating, CHEN Zuyu. Standardization and digitization for isrm suggested methods of rock mechanics laboratory tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2456 - 2468.(in Chinese with English abstract)]
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.工程岩体试验方法标准:GB/T 50266—2013[S].北京:中国计划出版社,2013. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of engineering rock mass: GB/T 50266—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)]
- [17] 刘超,袁伟,路军富,等.某铁路隧道底鼓段粉砂质泥 岩微宏观物理力学特性研究 [J].水文地质工程地 质,2020,47(5):108-115. [LIU Chao, YUAN Wei, LU Junfu, et al. A study of the micro-macro-physical and mechanical properties of silty mudstone in the bottom drum section of a railway tunnel[J]. Hydrogeology &

Engineering Geology, 2020, 47(5): 108 – 115. (in Chinese with English abstract)]

- [18] MOMENI A, ABDILOR Y, KHANLARI G R, et al. The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of granitoid hard rocks[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 75(4): 1649-1656.
- [19] 何攀,许强,刘佳良,等.基于核磁共振与氮吸附技术的黄土含盐量对结合水膜厚度的影响研究[J].水文地质工程地质,2020,47(5):142-149.[HE Pan, XU Qiang, LIU Jialiang, et al. An experimental study of the influence of loess salinity on combined water film thickness based on NMR and nitrogen adsorption technique[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 142 149. (in Chinese with English abstract)]
- [20] HE Xinxin, CHENG Yuanping, HU Biao, et al. Effects of coal pore structure on methane-coal sorption hysteresis: An experimental investigation based on fractal analysis and hysteresis evaluation [J]. Fuel, 2020, 269: 117438.
- [21] DUNN KJ, BERGMAN DJ, LATORRACA GA. Nuclear magnetic resonance: Petrophysical and logging applications [M]. New York: Elsevier, 2002.
- [22] TANG Zongqing, ZHAI Cheng, ZOU Quanle, et al. Changes to coal pores and fracture development by ultrasonic wave excitation using nuclear magnetic resonance[J]. Fuel, 2016, 186: 571 – 578.
- [23] 戚利荣,王家鼎,张登飞,等. 冻融循环作用下花岗岩 损伤的宏微观尺度研究 [J].水文地质工程地质, 2021, 48(5): 65 - 73. [QI Lirong, WANG Jiading, ZHANG Dengfei, et al. A study of granite damage in the macro and microscopic scales under freezing-thawing cycles[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 65 -73. (in Chinese with English abstract)]
- [24] CHEN Longxiao, LI Kesheng, SONG Guilei, et al. Effect of freeze-thaw cycle on physical and mechanical properties and damage characteristics of sandstone[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 12315.
- [25] 周科平,胡振襄,李杰林,等.基于核磁共振技术的大理岩卸荷损伤演化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊2):3523-3530. [ZHOU Keping, HU Zhenxiang, LI Jielin, et al. Study of marble damage evolution laws under unloading conditions based on nuclear magnetic resonance technique[J]. Chinese Journal

of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup 2): 3523 – 3530. (in Chinese with English abstract)]

- ZHANG Jian, DENG Hongwei, DENG Junren, et al. Fractal analysis of pore structure development of sandstone: A nuclear magnetic resonance investigation[J].
 IEEE Access, 2019, 7: 47282 - 47293.
- [27] 封陈晨,李傲,王志亮,等. 锦屏大理岩单轴压缩过程中的微结构演化 [J].水文地质工程地质,2022,49(6):90-96. [FENG Chenchen, LI Ao, WANG Zhiliang, et al. A Study of mineral composition and micro-structure characteristic for Jinping marble[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6):90-96. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 李安润,邓辉,王红娟,等.水-岩作用下粉砂质泥岩含水损伤本构模型[J].水文地质工程地质,2021,48(2):106-113.
 [LI Anrun, DENG Hui, WANG Hongjuan, et al. Constitutive model of water-damaged silty mudstone under water-rock interactions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 106 113. (in

Chinese with English abstract)

- [29] 周宏伟, 王春萍, 段志强, 等. 基于分数阶导数的盐岩 流变本构模型 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42(3): 310 - 318. [ZHOU Hongwei, WANG Chunping, DUAN Zhiqiang, et al. Time-based fractional derivative approach to creep constitutive model of salt rock[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2012, 42(3): 310 - 318. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 刘东燕,赵宝云,朱可善,等.砂岩直接拉伸蠕变特性及 Burgers 模型的改进与应用[J].岩土工程学报,2011,33(11):1740 1744. [LIU Dongyan, ZHAO Baoyun, ZHU Keshan, et al. Direct tension creep behaviors of sandstone and improvement and application of Burgers model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1740 1744. (in Chinese with English abstract)]

编辑:刘真真