

应力与水-岩耦合作用下灰岩蠕变特征及劣化机理

骆祚森^{1,2}, 何鹏娟^{1,2}, 朱作祥^{*1,2}, 李建林^{1,2}, 邓华锋^{1,2}, 杨超^{1,2}

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 三峡库区岸坡消落带岩体劣化问题一直是相关领域关注的热点。针对三峡库区碳酸盐岩岸坡消落带岩体劣化现象, 重点考虑上覆岩层重力和库水位周期性升降变化耦合作用过程的模拟, 设计开展应力与水-岩耦合下消落带灰岩的蠕变试验及微观结构测试, 分析其蠕变特征及劣化机理。结果表明: (1) 应力与水-岩耦合作用下灰岩蠕变过程中, 随着轴向应力水平和水-岩作用周期的增加, 灰岩试样蠕变变形特性逐渐增强; (2) 在应力水平 $R \leq 0.75$ 下, 试样历经较短水-岩周期后, 变形趋于稳定, 且应力水平越高, 变形达到稳定历经的水-岩周期越长; 在 $R \geq 0.8$ 下, 试样最终发生失稳破坏, 且应力水平越高, 发生变形破坏所历经的水-岩周期越短; (3) 灰岩微观结构测试表明, 应力与水-岩耦合作用下, 灰岩试样内部结构逐渐劣化, 空隙逐渐增多、结构逐渐松散; (4) 水-岩作用、裂隙扩展、应力状态调整三者间的循环促进作用控制着灰岩的劣化进程。相关研究成果可为库岸边坡长期变形稳定分析提供理论支撑。

关键词: 岩石力学; 水-岩作用; 蠕变; 微观特征; 劣化机理

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号:

作者简介: 骆祚森(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: lzs@ctgu.edu.cn。

Creep characteristics and deterioration mechanism of limestone under stress and water-rock coupling

LUO Zuosen^{1,2}, HE Pengjuan^{1,2}, ZHU Zuoxiang^{*1,2}, LI Jianlin^{1,2}, DENG Huafeng^{1,2}, YANG Chao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education (China Three Gorges University),

Yichang 443002, China; 2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The deterioration of rock mass in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir area has always been a hot topic in related fields. In view of the deterioration of rock mass in the hydro-fluctuation belt of carbonate rock bank slope in the Three Gorges Reservoir area, the simulation of the coupling process between the gravity of overlying strata and the periodic fluctuation of reservoir water level is mainly considered. The creep test and microstructure test of limestone in the hydro-fluctuation belt under the coupling of stress and water-rock are designed and carried out to analyze its creep characteristics and deterioration mechanism. The results indicate that: (1) During the creep test of limestone under the coupling effect of stress and water-rock, the creep deformation characteristics of limestone samples gradually increase with the increase of axial stress level and water-rock interaction period. (2) Under the stress level $R \leq 0.75$, the deformation tends to be stable after the sample undergoes a short water-rock cycle, and the higher the stress level, the longer the water-rock cycle through which the deformation reaches stability; under the condition of $R \geq 0.8$, the sample finally fails, and the higher the stress level, the shorter the water-rock cycle experienced by the deformation and failure. (3) The test results of limestone microstructure show that under the coupling of stress and water-rock, the internal structure of limestone samples gradually deteriorates, the voids gradually increase, and the structure gradually loosens. (4) The deterioration process of limestone samples is controlled by the cyclic promoting effect among water-rock interaction damage, crack propagation and stress state adjustment. The relevant research results can provide theoretical support for the long-term deformation stability analysis of reservoir bank slope.

Key words: rock mechanics; water-rock interaction; creep; microscopic features; deterioration mechanism

0 引言

三峡工程自从 2008 年试验性蓄水以来, 库水位常年在 145m-175m 之间周期性升降变化, 在两岸形成了高达 30m 的消落带。多年来, 消落带岩体的持

续劣化, 导致岸坡向不稳定方向发展, 诱发了大量的滑坡、崩塌等地质灾害问题^[1-2], 对长江航道及库区居民的生命财产安全造成了巨大威胁。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (U22A20600); 国家自然科学基金重点项目 (U2034203); 国家自然科学基金面上项目 (42177132)

收稿日期: 2024-**-**

三峡库区岸坡消落带岩体劣化问题一直是相关领域关注的热点，众多学者对库水位周期性升降作用下各类岩石的劣化问题开展了大量研究。刘新荣等^[3]提出采用“饱水-风干”的干湿循环过程模拟库岸边坡消落带的水-岩作用，发现砂岩的抗剪强度随着“饱水-风干”次数的增加而降低；在此基础上，相关学者对砂岩^[4-6]、泥岩^[7-9]、灰岩^[10-12]等开展了一系列干湿循环试验，发现岩石的劣化程度随干湿循环次数成正比，且对岩石产生了不可逆的渐进性损伤，与长期浸泡相比，强度降低的程度更大；此外，邓华锋等^[13-15]开展了考虑库水涨落过程中水压力升降变化的浸泡-风干循环试验，结果表明：水压力的变化对岩石的物理力学特性劣化规律影响明显，其劣化趋势比常规的干湿循环作用明显要大。上述研究为库区地质灾害防治提供了很好的技术支撑。

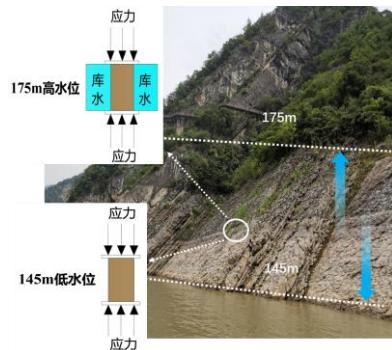


图 1 三峡库区典型消落带岩体劣化图

Fig. 1 Rock mass deterioration map of typical water-fluctuation zone in Three Gorges Reservoir area

对于消落带岩体而言，一方面受到库水位周期性升降变化的影响，处于浸泡-风干循环的水-岩作用下；另一方面还承受上覆岩层重力作用（如图 1 所示），即消落带岩体劣化受到应力和水-岩耦合作用的影响。针对岩体工程中应力和水-岩耦合作用问题，部分学者^[16-22]利用自制的水-应力耦合试验系统开展了较多的试验和理论研究，发现应力对水-岩作用影响显著，应力的存在能影响水-岩作用进程，而水-岩作用劣化效应也会造成岩体中应力场的重分布，二者相互影响并促进岩石的劣化进程。因此，在消落带岩体水-岩作用试验研究中，应该考虑上覆岩层应力的影响。目前消落带岩体水-岩作用的模拟方法还没有综合考虑上覆岩层应力和库水位周期性升降变化耦合作用的影响，这与岩体的实际赋存环境条件还存在一定差距。因此，有必要开展应力与水-岩耦合作用下消落带岩体的劣化机理研究。

近年来，三峡库区秭归段、巴东段和巫峡段出现了大量碳酸盐岩岸坡消落带劣化现象，部分岸坡岩体出现了较大的变形甚至破坏迹象，并且表现出明显的时效特征。鉴于此，本文以典型碳酸盐岩岸

坡消落带灰岩为研究对象，重点考虑上覆岩层重力和库水位周期性升降变化耦合作用过程的模拟，开展应力与水-岩耦合下消落带灰岩的蠕变试验及微观结构测试，分析其蠕变特征及劣化机理。

1 应力与水-岩耦合作用试验方案

1.1 试样制备

在三峡库区巴东段碳酸盐岩岸坡消落带现场，采集大型完整灰岩块体。将取回的新鲜完整岩块，按照《工程岩体试验方法标准》（GB/T 50266-2013）要求，采用钻孔岩心制备成 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ （直径 \times 高度）的标准圆柱状试样，如图 2 所示。根据试样的密度、纵波波速进行筛选，剔除离散性较大的试样。灰岩试样的自然密度均值为 2.73g/cm^3 ；颗粒密度均值为 2.805g/cm^3 ；孔隙率均值为 2.99% ；波速均值为 6257m/s 。

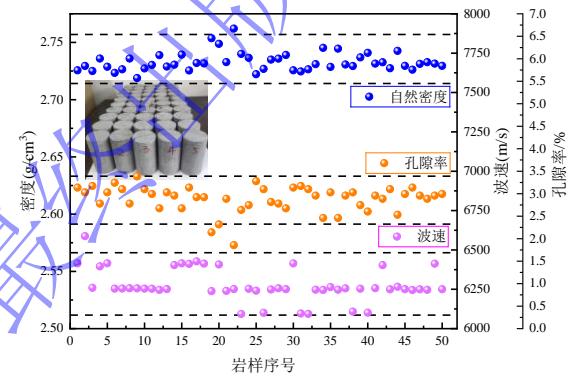


图 2 标准灰岩试样的密度、孔隙率和波速分布图

Fig. 2 The density, porosity and wave velocity distribution of standard limestone samples

岩样主要矿物成分为方解石 (CaCO_3 ，占 86.3%) 和白云石 ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ，占 13.7%)，具体 X 射线衍射测试结果如图 3 所示。

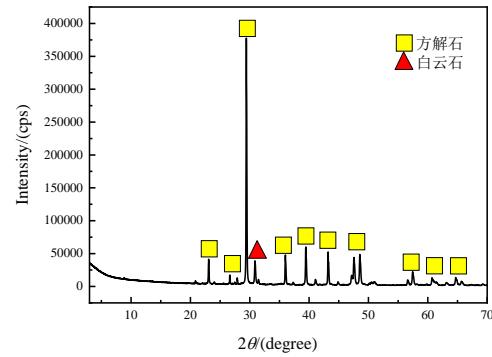


图 3 X 射线衍射分析结果

Fig. 3 X-ray diffraction analysis results

1.2 试验方案

应力与水-岩耦合作用试验方案，具体如下：

(1) 恒定轴向应力的施加，用来模拟试样所受上覆岩层重力。定义应力水平 R 为轴向应力 σ 与饱水试样单轴抗压强度 $\sigma_w=148.08\text{MPa}$ 的比值， $R=\sigma/\sigma_w$ 。实际工程中，劣化强烈的消落带岩体多位

于已经进入时效变形阶段的岸坡^[23]。根据前期基础试验结果, 饱水状态灰岩试样的长期强度对应的应力水平为 $R=0.82$, 因此, 试验设定长期强度附近的应力水平 $R=0.6$ 、0.7、0.75、0.8、0.85(见图 4)。在风干环境下(考虑到夏季库水位处于 145m, 因此使用设定温度为 60°, 模拟库水降至 145m 后消落带岩体裸露的风干过程), 对自然状态试样施加恒定轴向应力, 至试样变形达到稳定。

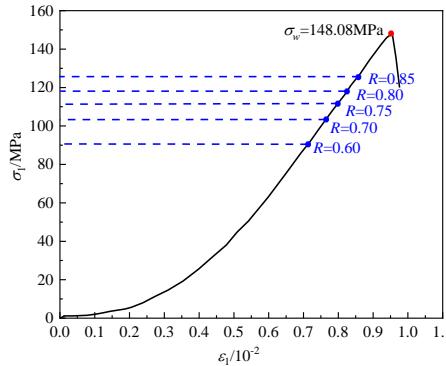


图 4 饱水灰岩单轴压缩曲线及应力水平

Fig. 4 Uniaxial compression curve and stress level of saturated limestone

(2) 试样变形达到稳定后, 施加“浸泡-风干”循环的水-岩作用。根据三峡库区水位的升降变化规律, 设计“浸泡-风干”循环的水-岩作用过程。每个循环周期考虑库水浸泡阶段及风干阶段。其中, 浸泡阶段和风干阶段持续时间均以变形达到稳定为依据, 经多次预试验, 确定了浸泡阶段持续时间 $\Delta t_1=46\text{h}$, 风干阶段持续时间 $\Delta t_2=2\text{h}$ 。浸泡阶段: 先注入库水至试件高度的 1/4 处, 之后每隔 2h 分别注水至试件高度的 1/2 和 3/4 处, 6h 后全部浸没试件, 试件完全浸没在水中 40h, 模拟库水浸泡作用, 持续时间 Δt_1 ; 风干阶段: 在上文设定的风干条件下, 持续风干时长 Δt_2 。上述为 1 个应力-水岩耦合作用周期。每组应力水平下试样最终变形稳定或破坏时, 结束试验。



图 4 岩石应力和水-岩耦合作用试验系统

Fig. 4 Rock stress and water-rock coupling test system

应力与水-岩耦合作用试验在自制的岩石应力和水-岩耦合作用试验系统(图 4)中开展, 系统采用计算机控制试验整个过程, 自动控制水压力、风干温度、搅拌时间; 自动控制加载速率、恒定载荷; 自动采集载荷、变形、水压力、温度等参数。

2 应力与水-岩耦合作用下灰岩蠕变特征分析

2.1 灰岩蠕变变形特征分析

应力与水-岩耦合作用下灰岩轴向应变-时间全过程曲线如图 5 所示。

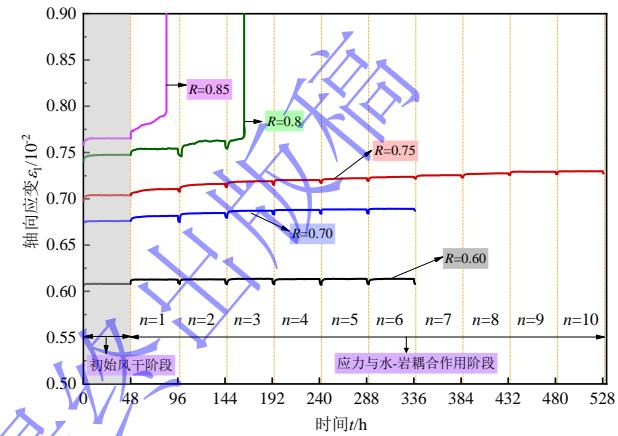


图 5 应力与水-岩耦合作用下灰岩应变-时间全过程曲线

Fig. 5 The whole process curve of limestone strain-time under stress and water-rock coupling

根据图 5 可以看出, 在初始风干环境下, 灰岩经历短时的衰减蠕变变形后, 进入等速蠕变变形, 最终变形均趋于稳定。随后进入应力与水-岩耦合作用过程, 在浸泡和风干环境循环变化的影响下, 原本变形稳定的灰岩, 出现了多阶段蠕变特征: ①浸泡环境下灰岩快速吸水, 并产生瞬时应变, 随后出现衰减蠕变阶段至变形趋稳, 最终进入等速蠕变阶段。②风干环境下, 灰岩快速失水, 出现变形恢复现象, 随着风干程度增大, 应变不断减小, 直至灰岩不再失水后应变趋于稳定。③随着应力与水-岩耦合作用周期的增加, 浸泡和风干环境下变形稳定后的应变较初始风干环境下的最终应变, 呈累积增大的趋势, 造成这种现象的原因是浸泡过程中发生了应力与水岩耦合作用和干湿循环过程造成了不可逆的渐进性劣化。

比较而言, 不同应力与水-岩耦合作用下灰岩应变-时间曲线又存在如下差异: ①当应力水平 $R \leq 0.75$, 灰岩受到的应力与水-岩的耦合作用和干湿循环劣化还不足以使灰岩发生加速蠕变破坏, 因此在经历应力与水-岩耦合作用周期后最终变形趋于稳定。②当应力水平 $R \geq 0.8$, 灰岩在经历应力与水-岩耦合作用周期后最终发生变形破坏。

为了进一步分析应力与水-岩耦合作用对灰岩蠕变变形特征的影响, 定义应力水平 R 一定时, 应力与水-岩耦合作用下灰岩 累积应变增量与周期 n 关系如下:

$$\Delta\epsilon_{wn} = \epsilon_{wn} - \epsilon_0 \quad (1)$$

式中, ϵ_0 为初始风干条件下变形达到稳定时的应变, ϵ_{wn} 为第 n 个周期浸泡阶段变形稳定时的应变。

应力与水-岩耦合作用下, 每个周期结束后, 灰岩累积应变增量 $\Delta\epsilon_{wn}$ 如图 6 所示。

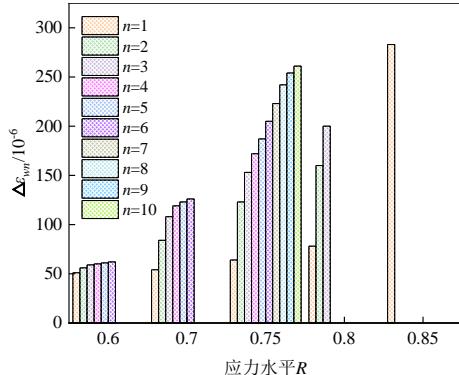


图 6 应力与水-岩耦合作用下应变累积增量 $\Delta\epsilon_{wn}$ 统计图

Fig. 6 Statistical figure of strain accumulation increment under stress and water-rock coupling

由图 6 可知, ①当应力水平 $R \leq 0.75$, 随着应力水平的增大, 灰岩受应力与水-岩的耦合作用和浸泡-风干劣化影响越大, 达到变形稳定所需的应力与水-岩耦合作用周期越长, 最终累积变形越大。 $R=0.6$ 、 0.7 、 0.75 时, 分别经历了 2、5、8 个周期后变形趋于稳定, 与之对应的累积应变增量分别为 59×10^{-6} 、 123×10^{-6} 、 254×10^{-6} 。②当应力水平 $R \geq 0.8$, 随着应力水平的增加, 试样发生蠕变变形破坏所历经的周期越短。 $R=0.8$ 时, 随着水-岩周期的增加, 灰岩的蠕变应变逐渐增长, 在周期 $n=3$ 的浸泡阶段, 由于浸泡-风干循环的劣化加上应力与水-岩的耦合作用, 在应力水平低于长期强度 $R=0.82$ 的情况下出现非线性加速变形阶段, 发生失稳破坏, 这也是导致部分稳定岸坡的岩体在水库蓄水后发生破坏的原因。 $R=0.85$ 时, 由于应力与水-岩耦合作用导致了断裂更易发生, 加速了灰岩的劣化, 在 $n=1$ 的浸泡阶段便发生了失稳破坏。

2.2 灰岩蠕变变形速率分析

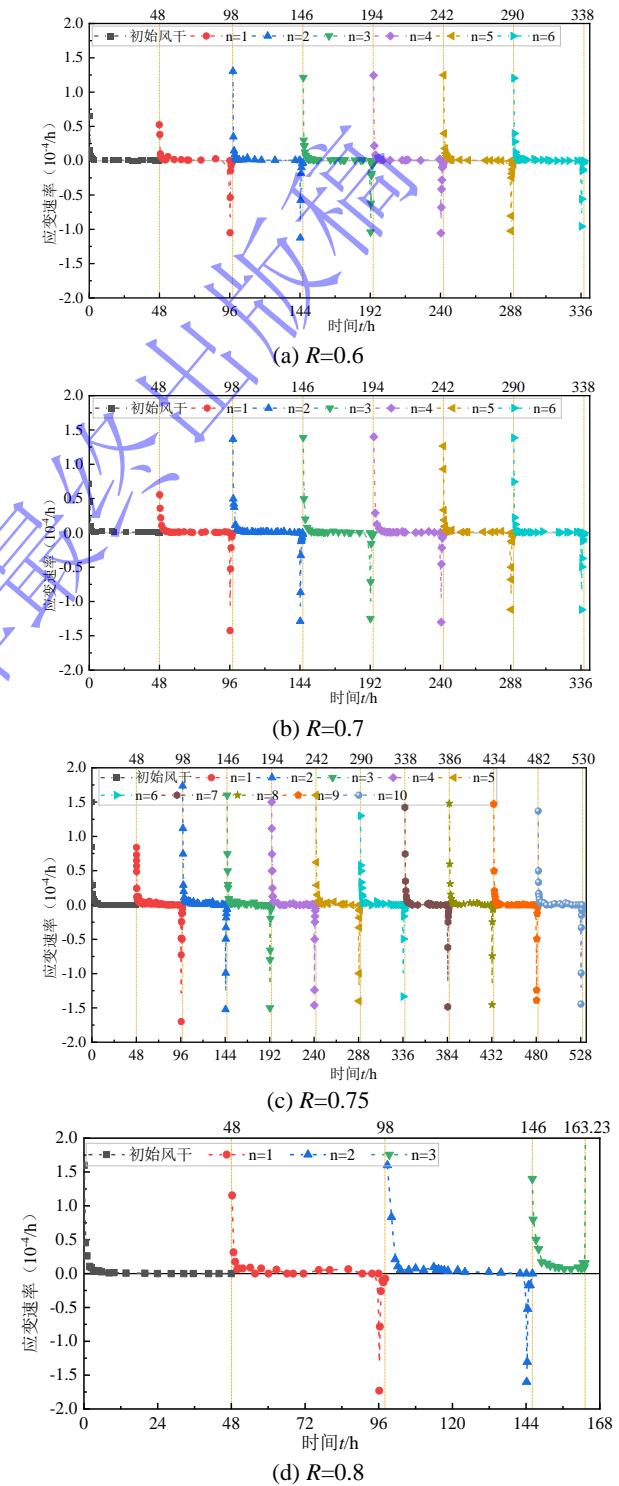
不同应力水平下灰岩应变速率-时间曲线, 如图 7 所示。可以看出, 灰岩蠕变应变速率有以下特征:

(1) 初始风干环境下, 灰岩的初始应变速率随应力水平增加而增大, 并在减速蠕变阶段发生快速减小至趋近于 0, 随后进入等速蠕变阶段。

(2) 从初始风干环境进入浸泡环境后, 灰岩蠕变速率瞬间增大, 但低于初始风干环境下初始蠕变

速率。 $R=0.6$ 、 0.7 、 0.75 时, 应变速率逐渐减小至趋近于 0, 进入等速蠕变变形阶段; $R=0.8$ 、 0.85 时, 灰岩除了发生减速蠕变阶段和等速蠕变阶段, 还出现了加速蠕变阶段。

(3) 从浸水环境进入风干环境后, 应变速率瞬间降低至负值, 之后衰减至趋近于 0, 这是由于灰岩失水和升温造成其弹模的恢复和体积膨胀, 从而导致轴向应变速率的变化和变形的部分恢复。



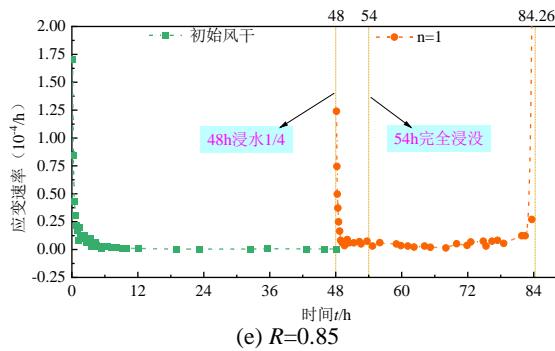


图 7 不同应力水平下灰岩应变速率-时间关系曲线

Fig. 7 Strain rate-time curves of limestone under different stress

表 1 浸泡-风干循环初期应变速率 ($R=0.75$)Table 1 Initial strain rate of wetting-drying cycles ($R=0.75$)

周期	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$	$n=8$	$n=9$	$n=10$
浸泡初期应变增长速率 ($10^{-4}/h$)	0.839	1.728	1.984	1.568	1.621	1.368	1.424	1.481	1.470	1.372
风干初期应变恢复速率 ($10^{-4}/h$)	-1.708	-1.523	-1.461	-1.506	-1.462	-1.337	-1.449	-1.456	-1.389	-1.444

根据表 1 可知:

(1) $n=1$ 时, 浸泡阶段的应变增长速率明显低于其他周期, 试样从自然状态转变到浸水状态的应变增长速率要低于干燥状态转变到浸水状态; $n=1$ 时, 风干阶段的应变恢复速率也明显高于其他周期, 表明灰岩初始浸泡造成的可恢复变形要大于其它周期。

(2) $n=2\sim 5$ 时, 灰岩浸泡初期的应变增长速率主要集中在 $1.55\sim 1.99\times 10^{-4}/h$, 灰岩风干初期的应变恢复速率主要集中在 $-1.46\sim -1.53\times 10^{-4}/h$; $n=6\sim 10$ 时, 灰岩浸泡初期的应变增长速率主要集中在 $1.36\sim 1.49\times 10^{-4}/h$, 试样风干初期的应变恢复速率主要集中在 $-1.33\sim -1.545\times 10^{-4}/h$ 。可以发现, 随着水-岩作用周期的增大, 灰岩浸泡初期段的初始应变增长速率有减小趋势, 说明灰岩试样的延性逐渐增强。

3 应力与水-岩耦合作用下灰岩劣化规律及劣化机理

3.1 应力与水-岩耦合作用下灰岩力学特性的劣化

灰岩在应力水平 $R=0.6$ 、 0.7 、 0.75 下, 分别经历了 $n=6$ 、 6 、 10 个应力与水-岩耦合作用后变形趋于稳定。对上述应力与水-岩耦合作用结束后的灰岩开展自然含水状态下的单轴压缩试验, 试验前后灰岩的应力-应变曲线如图 8 所示。初始天然状态灰岩和经历 $n=6$ ($R=0.6$)、 $n=6$ ($R=0.7$)、 $n=10$ ($R=0.75$) 后的天然状态灰岩的宏观力学参数, 如表 2 所示。

($R=0.6$)、 $n=6$ ($R=0.7$)、 $n=10$ ($R=0.75$) 后的天然状态灰岩的宏观力学参数, 如表 2 所示。

整体来看, 水-岩作用周期一定时, 轴向应力越高, 浸泡环境下减速变形阶段的初始应变速率越大, 进入稳定变形阶段的耗时越长; 应力水平一定, $R\leq 0.75$ 时, 随着水-岩作用周期的增大, 进入稳定变形阶段的耗时越短, 而 $R\geq 0.8$ 时, 耗时逐渐增加, 并且在破坏周期中的稳定变形阶段的应变速率明显高于其它周期。

为了详细分析应力与水-岩耦合作用过程中试样轴向应变速率特征, 统计应力水平 $R=0.75$ 浸泡和风干初期的应变增长和恢复速率如表 1 所示。

表 1 浸泡-风干循环初期应变速率 ($R=0.75$)Table 1 Initial strain rate of wetting-drying cycles ($R=0.75$)

周期	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$	$n=8$	$n=9$	$n=10$
浸泡初期应变增长速率 ($10^{-4}/h$)	0.839	1.728	1.984	1.568	1.621	1.368	1.424	1.481	1.470	1.372
风干初期应变恢复速率 ($10^{-4}/h$)	-1.708	-1.523	-1.461	-1.506	-1.462	-1.337	-1.449	-1.456	-1.389	-1.444

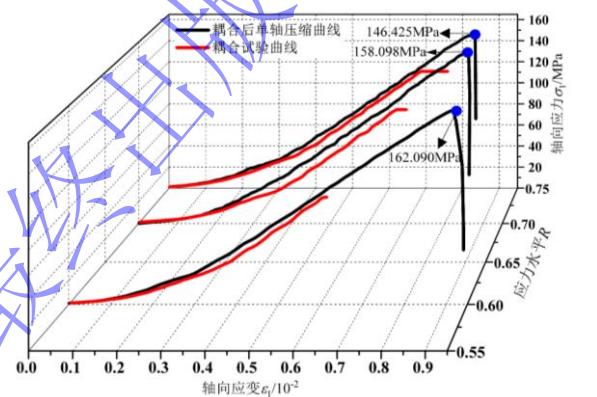


图 8 应力与水-岩耦合作用试验前后试样的应力-应变曲线

Fig. 8 The stress-strain curves of the specimens before and after the stress and water-rock coupling test

表 2 不同工况灰岩单轴抗压强度及弹性模量

Table 2 Uniaxial compressive strength and elastic modulus of limestone under different working conditions

工况	初始	耦合作用后(自然)		
	(自然)	($R=0.6$)	($R=0.7$)	($R=0.75$)
单轴抗压强度/MPa	166.931	162.090	158.098	146.425
弹模/GPa	25.351	25.345	25.339	25.310

由图 8 和表 2 可以看出:

(1) 对比应力与水-岩耦合作用灰岩蠕变试验中轴向应力-应变曲线, 灰岩在经过耦合作用后的单轴压缩应力-应变曲线, 压密段缩短, 弹性阶段的起始应变减小, 弹性阶段近乎平行, 弹性模量相近。

(2) 较初始自然状态的灰岩试样, 耦合作用后试样的单轴抗压强度明显降低; 并且随着耦合作用工况中轴向应力水平的增加, 抗压强度呈现降低的趋势。应力水平 R 从 0.6 增加到 0.75 后, 抗压强度由 162.090MPa 降至 146.425MPa; 而弹性模量变化较小。

上述试验结果表明, 不同应力与水-岩耦合作用对灰岩单轴抗压强度造成了不同程度的劣化。一方面,

在轴向应力作用下，灰岩会产生一定程度的裂纹萌生和扩展；另一方面，新产生的裂纹、裂隙增加了水-岩作用范围，加剧了周期性的水-岩作用对试样造成的渐进性累积劣化损伤，使得应力与水-岩耦合作用后的劣化比单一的水-岩作用劣化程度更大。

不同应力与水-岩耦合作用后单轴压缩灰岩试样的破坏形态如图9所示。总体来看，应力与水-岩耦合作用后，自然状态灰岩试样的单轴压缩破坏均呈现出明显的张拉破坏特征。试样的端部基本都出现了岩石粉末状破坏，试样表面的裂缝基本平行于轴向，内部存在“X”状交叉破裂面，主要为张拉断面，存在少量剪切断面。比较而言，随着应力水平的增加，应力与水-岩耦合作用后灰岩试样表面裂纹逐渐增多，破坏程度逐渐加剧。



图9 不同工况作用后灰岩单轴压缩破坏形态

Fig. 9 Uniaxial compression failure mode of limestone after different working conditions

分析其原因，主要是由于应力与水-岩耦合作用导致灰岩试样内部缺陷增多、力学性能下降，试样在受到单轴压缩的轴向荷载作用下，孔隙和裂隙的扩展发育加快；耦合作用后，试样内再生裂隙逐渐增加，力学性能和内部结构劣化程度加剧，造成灰岩试样单轴压缩破坏程度和表面裂纹逐渐增加。

3.2 应力与水-岩耦合作用下灰岩浸泡溶液离子浓度变化规律

通过测试不同应力与水-岩耦合作用下每一周期浸泡阶段结束后溶液中的钙离子(Ca^{2+})和镁离子(Mg^{2+})浓度，分析应力与水-岩耦合作用的进程。测试结果显示浸泡溶液中 Ca^{2+} 浓度变化明显，但无 Mg^{2+} ，表明岩样中溶解的矿物主要为方解石。具体 Ca^{2+} 浓度变化曲线如图10所示。

分析图10可知， Ca^{2+} 浓度变化有如下规律：

(1) 水-岩作用周期一定时，随着应力水平的增加， Ca^{2+} 浓度呈上升趋势。典型的， $n=1$ ， $R=0.6$ 、 0.7 、 0.75 、 0.8 、 0.85 时， Ca^{2+} 的浓度依次为 38.400 、 43.392 、 46.464 、 49.536 、 62.672mg/L 。

(2) 不同应力水平下， Ca^{2+} 浓度随水-岩作用周

期变化规律有所差异。①在 $R=0.6\sim0.75$ ，随着水-岩作用周期 n 的增加， Ca^{2+} 浓度逐渐下降，呈现出稳定的趋势。②在 $R=0.8$ ，随着水-岩作用周期的增加， Ca^{2+} 浓度呈现上升趋势，在试样发生蠕变破坏的周期($n=4$)， Ca^{2+} 浓度出现激增的现象。 Ca^{2+} 浓度与周期 n 大致呈指数函数关系。

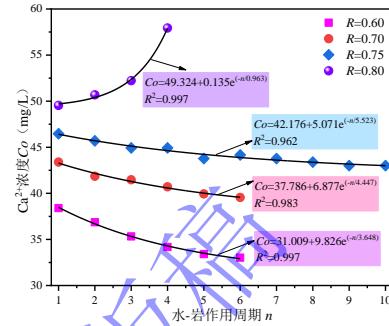


图10 Ca^{2+} 浓度变化曲线

Fig. 10 Ca^{2+} concentration change curve

水溶液中 Ca^{2+} 浓度的改变不单是方解石(CaCO_3)在水环境中发生化学反应的结果，还因为应力腐蚀的存在加剧了化学反应速度。灰岩在应力与水-岩耦合作用下，存在应力腐蚀机制。恒定荷载导致裂纹的产生，促使水不断从岩石表面进入到内部孔隙、裂隙之中，增大了孔隙、裂隙处的孔隙水压力，引起裂纹尖端应力强度因子增大，加剧了岩石内部的裂纹扩展；反过来，岩石内部裂纹增多又为水的进入提供了更多通道和空间，加剧了水的物理化学反应作用。

3.3 应力与水-岩耦合作用下灰岩空隙变化规律

为探究不同应力与水-岩耦合作用对灰岩内部孔隙和裂隙(统称为空隙)分布的影响规律，使用低场核磁共振分析仪对应力与水-岩耦合作用试验后未发生蠕变破坏的灰岩试样($R=0.6$ 、 0.7 、 0.75)进行核磁共振扫描，获取试样 T_2 谱。为分析应力与水-岩耦合作用下灰岩试样次生空隙率(空隙率为空隙体积与总体积的比值)的变化情况，将同一试样在耦合作用试验前后的 T_2 谱分布进行对比分析，不同应力水平试验前后灰岩 T_2 谱分布如图11所示。

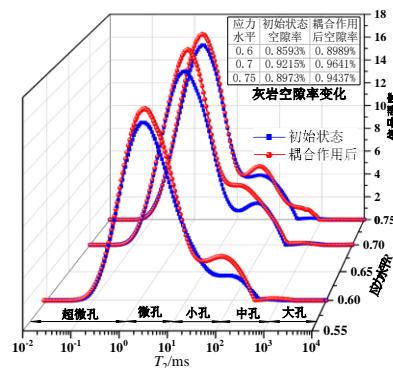


图11 不同应力水平蠕变试验前后灰岩 T_2 谱分布

Fig. 11 T_2 spectrum distribution of limestone before and after creep test under different stress levels

根据图 11 可以得出：

(1) 应力与水-岩耦合作用后灰岩试样的 T_2 谱信号幅度出现明显的增长, T_2 谱分布曲线中的两个峰的峰值和面积增长, 整个 T_2 谱的面积增加, 空隙率增长, 表明应力与水-岩耦合作用造成灰岩试样空隙率增加。随着应力水平的增加, 灰岩试样中空隙率增长量逐渐增加, 空隙逐渐增长。应力水平 $R=0.6$ 时, 空隙率增加了 4.61%, 应力水平 $R=0.7$ 时, 空隙率增加了 4.62%, 应力水平 $R=0.75$ 时, 空隙率增加了 5.17%。

(2) 在应力水平 $R=0.6$ 和 $R=0.7$ 下, 灰岩试样空隙的变化的主要为微孔和小孔数量增加, 空隙分布范围未发生改变, 在应力水平 $R=0.75$ 下, 灰岩中空隙分布范围增加: 最小孔径未发生改变, 最大孔径从 4um 扩展到了 9um, 灰岩试样空隙数量的变化的主要表现在微孔、小孔和中孔的增加。应力与水-岩耦合作用试验过程中, 施加应力和水-岩作用产生的空隙最小孔径为 0.001um, 在应力水平 $R<0.7$, 试样中小孔的发育连通集中在微孔和中孔, 不会有较大孔形成; 在应力水平 $R>0.75$, 还会出现空隙连通的现象, 造成更大的空隙形成。

从微观层面来说, 岩石是由矿物、填隙物和胶结物质由一定的规律积聚而成的含有孔隙、裂隙等缺陷的非均质性固体。处于水环境中的岩石, 水会进入岩石内的微观孔隙和裂隙, 连接岩石矿物颗粒的胶结物质也会被水溶解。当轴向应力增大时, 岩石内部的微观孔隙和裂隙会扩张得更大, 部分岩石矿物颗粒变得松散甚至剥落, 微观空隙的增大会增加水与岩石矿物颗粒反应的接触面积, 促进水-岩作用的进程, 同时也会造成空隙率的增加。

在应力与水-岩耦合作用下, 灰岩的内部逐渐损伤, 当上覆应力大于某一强度时会导致灰岩发生整体破坏, 当上覆应力小于这一强度时则不会导致灰岩发生整体破坏。经典损伤力学中, 材料损伤可认为是材料有效承载面积不断减小引起的。因此, 在上覆应力保持不变和浸泡-风干循环的条件下, 灰岩的有效应力 $\tilde{\sigma}$ 是逐渐增大的。有效应力^[24]的计算公式为:

$$\begin{cases} \tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-w} \\ w = 1 - \frac{\tilde{A}}{A} \end{cases} \quad (2)$$

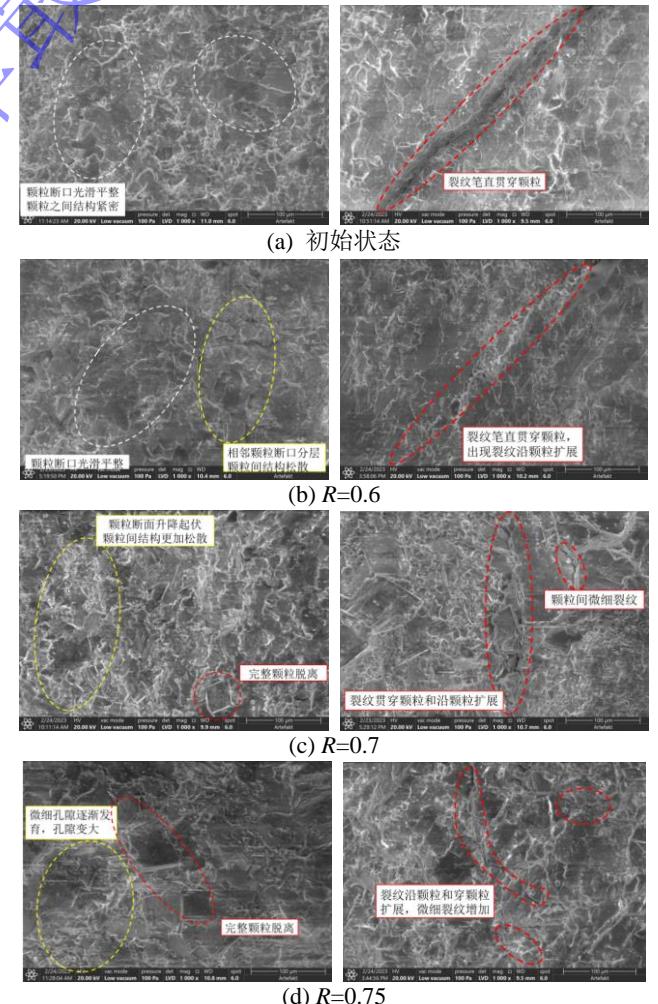
式中 $\tilde{\sigma}$ 为有效应力, σ 为表观应力, w 为损伤变量, \tilde{A} 和 A 分别为有效承载面积和总截面面积($\tilde{A}=A-A_D$, A_D 为缺陷面积)。假设缺陷形状具有各向同性且均匀分布, 则可通过空隙率 p 计算灰岩试样的有效应力 $\sigma'=\sigma/(1-p)$ 。

由于初始状态灰岩本身存在为缺陷(微裂纹和微

孔隙), 导致其实际的有效承载面积 \tilde{A} 减小, 从而造成有效应力减小, 通过图 11 可知, 在应力水平 $R=0.6$ 、0.7 和 0.75 下, 灰岩的初始有效应力分别为 89.570、104.563 和 112.005MPa, 在应力与水-岩耦合作用损伤稳定后的有效应力分别为 89.605、104.609 和 112.057 MPa, 有效应力分别增长了 0.040%、0.043% 和 0.0467%, 随着应力水平的增加, 蠕变稳定时的有效应力增量逐渐增加, 但均未达到长期强度条件下对应的有效应力, 因此最终未发生破坏。

3.4 应力与水-岩耦合作用下灰岩微观结构特征

采用核磁共振技术能够很好的了解灰岩内孔隙与裂隙整体的变化趋势, 扫描电镜(SEM)可以观测到灰岩局部结构, 能够从局部揭示孔隙与裂隙结构的变化。通过对不同轴向应力与水-岩耦合作用后试样破坏断面进行电镜扫描, 分析研究试样在不同应力水平下水-岩作用后微观结构的变化特征。为了对比分析, 统一取试样放大 1000×倍数的照片, 典型试样破坏断面(左)和断裂裂隙(右)的 SEM 照片如图 12 所示。图(a)~(d) 为未经耦合作用和在轴向应力水平 $R=0.6$ 、0.7、0.75 耦合作用后的试样单轴压缩破坏断面, 图(e)为应力水平 $R=0.8$ 耦合作用下破坏试样的断面。



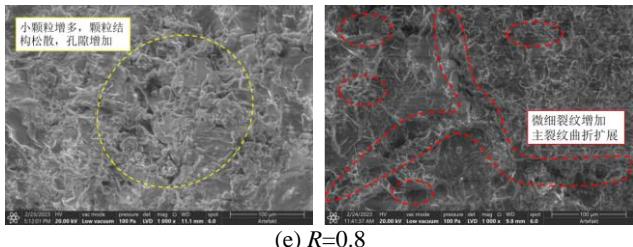


图 12 典型断裂面和裂纹 SEM 照片 (1000×)
Fig. 12 SEM photos of typical fracture surfaces (1000×)

从图 12 中可以看出：

(1) 灰岩试样在未进行应力与水-岩耦合作用的初始状态，断面整体完整平齐，断面破坏形式主要为穿晶断裂；晶粒断口光滑平整，相邻晶粒断口平齐，晶粒之间结构紧密，边缘棱角分明，主要以面面接触为主，仅存在少许微细孔隙。破坏断裂面内裂纹笔直贯穿晶粒，裂纹主要分布在晶粒内部。试样内部结构密实，试样的破坏依赖于应力的作用，裂纹沿最大受力方向扩展。

(2) 随轴向应力增加，晶粒断口逐渐变得粗糙，相邻晶粒断口角度发生改变，造成断裂面向升降起伏状变化；晶粒之间结构逐渐松散，部分晶粒直接从断面脱离，发生沿晶断裂；微细孔隙逐渐发育，孔隙变大，造成断面整体完整性逐渐变差。同时，破坏断裂面内逐渐出现裂纹绕开晶粒的现象，裂纹扩展逐渐曲折，存在穿晶、沿晶和两种混合的扩展形式。晶粒间的胶结结构逐渐劣化，受力时易发生断裂产生裂纹。

总体来看，在不同应力与水-岩耦合作用下，灰岩试样的微观结构发生了明显的变化。在未受耦合作用的初始条件下，主要发生穿晶断裂，晶粒断口光滑平整，相邻晶粒断口平齐，晶粒之间结构紧密，边缘棱角分明，仅存在少许微细孔隙。随着轴向应力的增大，晶粒断口不再光滑平整，断裂面起伏交替，晶粒之间部分结构松散，微细孔隙逐渐增多，出现沿晶断裂的破坏形式，断面内裂隙由未受耦合作用状态的笔直贯穿，变为蜿蜒曲折。

结合核磁共振结果分析可知，随着轴向应力的不断增大，灰岩胶结物软化现象越明显，发生较多的穿晶断裂，晶粒之间结构更加松散，微小孔隙贯穿相互连通形成大的孔隙，岩体内空隙率出现明显的增长。

3.5 应力与水-岩耦合作用下灰岩劣化机理分析

水-岩作用过程中，水与岩石之间主要存在物理、化学和力学作用。一方面灰岩中的方解石和白云石矿物具有较强亲水性，矿物颗粒和钙质胶结物在吸水后发生软化，造成颗粒间黏结降低，水分子如同润滑剂一样对灰岩进行润滑作用，方解石具有一组发育完全的解理、白云石具有一组发育不完全的解理，当二者遇水时，水分子会沿解理侵入，使颗粒更容易沿解理

面发生断裂，造成灰岩骨架软化。另一方面，灰岩中的方解石矿物和颗粒间钙质胶结物在水溶液中与 CO_2 和 H^+ 发生溶解反应。灰岩表面和空隙边界这些直接与水溶液接触部分，容易发生溶解-扩散，应力作用导致灰岩内空隙增多，反应界面增加，加剧了矿物的溶解反应。水溶液中 CO_2 和 H^+ 浓度控制着溶解反应的进程，浸泡-风干循环过程中不断向水溶液中补充 CO_2 和 H^+ ，使灰岩中方解石颗粒发生持续的溶解-扩散。在风干阶段，随着水溶液排出，灰岩试样从外表面开始逐渐风干，同时渗入灰岩试样内部的水溶液从空隙中向外渗出，浸泡过程中溶解产生的粒子随水溶液运移离开，为下一周期灰岩的浸泡溶解提供条件。应力和水-岩作用造成试样表面出现不稳定颗粒（与试样主体的连接出现裂纹），在风的拖曳作用和温度升高的热胀作用下，这些不稳定颗粒的连接胶结物发生断裂，晶粒脱落。

应力与水-岩耦合作用过程中，灰岩试样受应力场、化学场和渗流场的耦合作用。一方面，外部荷载造成灰岩内裂纹的产生，促使水不断从岩石表面进入到内部孔隙、裂隙之中，增大了孔隙、裂隙处的孔隙水压力，引起裂纹尖端应力强度因子增大，加剧了岩石内部的裂纹扩展；另一方面，灰岩中的矿物与水接触，造成了水-岩作用损伤，导致灰岩内部孔隙、裂隙的增多，使得灰岩内部应力状态调整，特别是裂纹尖端的应力状态，从而进一步促进试样内部裂隙的萌发和孔隙的发育扩展，为水-岩作用提供更多的渗流通道和新的溶解反应界面，加剧水-岩作用损伤的进程。如图 13 所示。

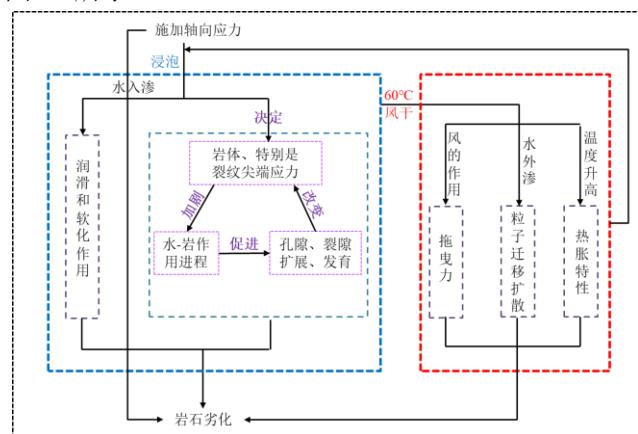


图 13 应力与水-岩耦合作用下灰岩劣化机理示意图
Fig. 13 Deterioration mechanism of limestone under stress and water-rock coupling

4 结 论

本文以三峡库区典型消落带灰岩为研究对象，针对消落带岩体所处的应力与库水环境条件，设计应力与水-岩耦合作用下灰岩蠕变试验，并对应力与水-岩耦合作用后的灰岩试样进行微观测试分析，得到以

下相关结论及成果：

(1) $R \leq 0.75$ 应力水平下, 试样历经较短水-岩周期后, 变形趋于稳定。随着应力水平的增加, 试样变形达到稳定历经的水-岩周期逐渐增加, 轴向应变量逐渐增长。在 $R=0.6$ 、 0.7 、 0.75 下, 试样轴向变形达到稳定依次历经 2、5、8 个水-岩周期, 轴向应变增量分别为 0.002%、0.008%、0.018%。在 $R=0.8$ 、 0.85 下, 试样分别历经了 3 个和 1 个水-岩周期后发生了蠕变破坏, 表明随着应力水平的增加, 试样蠕变破坏所需历经的水-岩周期逐渐减小。

(2) 应力与水-岩耦合作用造成试样宏观物理力学性质下降, 单轴压缩应力-应变曲线的压密段缩短, 弹性阶段的起始应变减小, 单轴抗压强度降低, 试样破碎程度增大。微观观上则表现为, 随着应力水平的增加, 浸泡溶液中 Ca^{2+} 浓度逐渐上升, 灰岩孔隙逐渐增多, 微观结构从晶粒断口光滑平整、晶粒之间结构紧密、存在少许微细孔隙向晶粒断口粗糙曲折、晶粒之间部分结构松散、微细孔隙增多的方向发展。

(3) 应力与水-岩耦合作用对灰岩性质劣化的主要原因: 一方面, 恒定荷载导致裂纹的产生, 促使水不断从岩石表面进入到内部孔隙、裂隙之中, 增大了孔隙、裂隙处的孔隙水压力, 引起裂纹尖端应力强度因子增大, 加剧了岩石内部的裂纹扩展; 另一方面, 岩石内部裂纹增多又为水的进入提供了更多通道和空间, 加剧了水的物理化学反应作用。消落带岩体水-岩作用损伤劣化与其赋存的应力、库水条件密切相关, 水-岩作用损伤、节理裂隙扩展、应力状态调整三者间的循环促进作用控制着消落带岩体损伤劣化进程。

参考文献:

- [1] 刘新荣, 景瑞, 缪露莉, 等. 巫山段消落带岸坡库岸再造模式及典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(07): 1321-1332. (LIU Xinrong, JING Rui, MIAO Luli, et al. Reconstruction models and typical case analysis of the fluctuation belt of reservoir bank slopes in Wushan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(07): 1321-1332. (in Chinese))
- [2] 张国栋, 夏文中, 何钰铭, 等. 三峡库区碳酸岩岸坡消落带岩体劣化特性[J]. 山地学报, 2024, 42(01): 70-80. (ZHANG Guodong, XIA Wenzhong, HE Yuming, et al. Rock mass deterioration in the hydro-fluctuation belt of carbonate riverside in the Three Gorges Reservoir of the Yangtze River, China[J]. Mountain Research, 2024, 42(1): 70-80. (in Chinese))
- [3] 刘新荣, 傅晏, 王永新, 等. (库)水-岩相互作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(09): 1298-1302. (LIU Xinrong, FU Yan, WANG Yongxin, et al. Deterioration rules of shear strength of sand rock under water-rock interaction of reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(09): 1298-1302. (in Chinese))
- [4] 宋朝阳, 纪洪广, 刘志强, 等. 干湿循环作用下弱胶结岩石声发射特征试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(04): 812-819. (SONG Zhaoyang, JI Hongguang, LIU Zhiqiang, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of weakly cemented granular rocks affected by dry-wet cycling process[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(04): 812-819. (in Chinese))
- [5] MENG J, LI C D, ZHOU J Q, et al. Multiscale evolution mechanism of sandstone under wet-dry cycles of deionized water: From molecular scale to macroscopic scale[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15: 1171-1185.
- [6] 杨圣奇, 荆晓娇. 盐水干湿循环后砂岩物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(10): 2165-2171. (YANG Shengqi, JING Xiaojiao. Experimental study on physical and mechanical properties of sandstone after drying-wetting cycles of brine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(10): 2165-2171. (in Chinese))
- [7] LIU H Y, LI Z Y, ZHANG Y S, et al. The weakening mechanisms of the rock mechanics of marlite bank slopes under water-rock interaction conditions[J]. Carbonates and Evaporites, 2020, 35(60): 1-11.
- [8] 陈纪昌. 库区红层泥岩化特性及干湿循环作用下的渐进损伤研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(03): 143-147+152. (CHEN Ji-chang. Research on the Hydration Characteristics and Progressive Damage of Red Bed Mudstone under Dry-wet Cycle in Reservoir Areas[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(3): 143-147, 152. (in Chinese))
- [9] WU W, LIU Y X, TANG H M, et al. Experimental study of the influence of wetting and drying cycles on the strength of intact rock samples from a red stratum in the Three Gorges Reservoir area[J]. Engineering Geology, 2023: 314: 107013.
- [10] 闫国强, 黄波林, 代贞伟, 等. 三峡库区巫峡段典型岩体劣化特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(04): 62-72. (YAN Guoqiang, HUANG Bolin, DAI Zhenwei, et al. A study of the deterioration effect of limestone bank slope rock mass at the Wuxia section of the Three Gorges Reservoir area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(04):

- 62-72. (in Chinese))
- [11] GU D, LIU H, GAO X, et al. Influence of cyclic wetting-drying on the shear strength of limestone with a soft interlayer[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021(9).
- [12] 王林峰, 程平, 夏万春, 等. 化学及干湿循环作用下泥灰岩损伤劣化特性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(05): 976-985. (WANG Linfeng, CHENG Ping, XIA Wanchun, et al. Analysis of Damage and Deterioration Characteristics of Marl under Chemical and Dry-wetting Cycles[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(05): 976-985. (in Chinese))
- [13] 邓华锋, 李建林, 朱敏, 等. 饱水-风干循环作用下砂岩强度劣化规律试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3306-3312. (DENG Huafeng, LI Jianlin, ZHU Min, et al. Experimental research on strength deterioration rules of sandstone under “saturation-air dry” circulation function[J]. Rock and Soil Mechanic, 2012, 33(11): 3306-3312. (in Chinese))
- [14] LUO Z X, ZHU Z X, JIANG Q et al. Study on the evolution law of sandstone porosity under soaking-drying cycles[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(1): 25-34.
- [15] 骆祚森, 朱作祥, 苏卿, 等. 基于平行黏结模型的水-岩作用下砂岩蠕变模拟及损伤机制研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(08): 2445-2457. (LUO Zuosen, ZHU Zuoxiang, SU Qing, et al. Creep simulation and deterioration mechanism of sandstone under water-rock interaction based on parallel bond model[J]. Rock and Soil Mechanic, 2023, 44(08): 2445-2457. (in Chinese))
- [16] 冯夏庭, 丁梧秀. 应力-水流-化学耦合下岩石破裂全过程的细观力学试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(09): 1465-1473. (FENG Xiating, DING Wuxiu. Meso-mechanical experiment of microfracturing process of rock under coupled mechanical-hydrological-chemical environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(09): 1465-1473. (in Chinese))
- [17] SUITS L D, SHEAHAN T C, SILVESTRO G. Model footing load tests on soft rocks[J]. Geotechnical Testing Journal, 2009, 32(3): 262-272.
- [18] 黄书岭, 冯夏庭, 周辉, 等. 水压和应力耦合下脆性岩石蠕变与破坏时效机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3441-3446+3451. (HUANG Shuling, FENG Xiating, ZHOU Hui, et al. Study of aging failure mechanics and triaxial compression creep experiments with water pressure coupled stress of brittle rock[J]. Rock and Soil Mechanic, 2010, 31(11): 3441-3446+3451. (in Chinese))
- [19] 周翠英, 苏定立, 邱晓莉, 等. 红层裂纹软岩在水-应力耦合作用下的变形破坏试验[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2019, 58(06): 35-44. (ZHOU Cuiying, SU Dingli, QIU Xiaoli, et al. Experimental study of cracked soft rock with hydro-mechanical coupling effect[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2019, 58(06): 35-44. (in Chinese))
- [20] 邬爱清, 范雷, 钟作武, 等. 现场裂隙岩体水力耦合真三轴试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2161-2171. (WU Aiqing, FAN Lei, ZHONG Zuowu, et al. Development of an in situ hydro-mechanical coupling true triaxial test system for fractured rock mass and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(11): 2161-2171. (in Chinese))
- [21] 肖欣宏, 王静, 谢小帅, 等. 水岩作用下红层泥岩蠕变特性[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(9): 96-101+109. (XIAO Xinhong, WANG Jing, XIE Xiaoshuai, et al. Creep characteristics of red mudstone under water-rock interaction[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(9): 96-101+109.(in Chinese))
- [22] TANG S B, LI J M, DING S, et al. The influence of water-stress loading sequences on the creep behavior of granite[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81: 482.
- [23] 陈小婷, 黄波林, 李滨, 等. 三峡水库碳酸盐岩区岩溶作用与斜坡破坏 [J]. 中国岩溶, 2020, 39(04): 567-576. (CHEN Xiaoting, HUANG Bolin, LI Bin et al. Karstification and slope failure in carbonate areas of Three Gorges Reservoir[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(04): 567-576. (in Chinese))
- [24] LEMAITRE J. How to use damage mechanics[J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 80(2): 233-245.