

红层软岩软化的微-细-宏观界面关联过程与跨尺度级联效应

廖进^{1,2}, 兰春晖^{1,2}, 吴勇桃^{1,2}, 刘镇^{1,2}, 周翠英^{1,2}

(1. 中山大学 土木工程学院, 广东 广州 510275; 2. 中山大学 广东省重大基础设施安全工程技术研究中心, 广东 广州 510275)

摘要: 红层软岩灾变与水-岩界面作用过程密切相关, 研究微-细-宏观关联过程与级联效应对于揭示其灾变机制具有重要意义。目前对软岩软化的研究主要集中于细宏观水-岩界面的表现特征, 微-细-宏观界面关联特性及其跨尺度级联效应仍需进一步研究。针对这一问题, 通过对软岩软化界面反应过程的微观化学反应、细观物理特性与宏观力学作用进行分析, 建立水-岩界面的关联过程。依据能量流理论与级联概念, 对软岩破坏的跨尺度级联效应进行分析。结果表明, 水溶液阳离子浓度、软岩颗粒骨架外孔隙的占有比例和软岩崩解物质量3个因素, 可以很好地阐述水-岩界面的关联过程。软岩软化过程中微-细-宏观级联因子均呈现逐级递增的趋势。解决了红层软岩软化水-岩界面关联过程的不完善与级联效应的跨尺度问题, 为揭示软岩软化的深层次机制提供参考。

关键词: 岩石力学; 红层软岩; 软化; 微-细-宏观; 界面关联; 跨尺度; 级联效应

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2024)05-1241-14

Micro-meso-macro interface correlation processes and cross-scale cascade effects in red-bed soft rocks softening

LIAO Jin^{1,2}, LAN Chunhui^{1,2}, WU Yongtao^{1,2}, LIU Zhen^{1,2}, ZHOU Cuiying^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China; 2. Guangdong Engineering Research Centre for Major Infrastructure Safety, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract: The water-rock interaction at micro-meso-macro interface is closely related to the catastrophic changes in red-bed soft rocks. The study of the correlation process and cross-cascade effect at micro-meso-macro interface of water-rock interaction is of great significance to reveal the catastrophic mechanisms of soft rocks under water reaction. At present, the research on soft rock softening mainly focuses on the external characteristics of the meso-macro interface and its cascade effect. The correlation properties and cross-scale cascade effect of micro-meso-macro interface in red-bed soft rocks are in the exploration stage and still need further improvement. To address this problem, in this study, the correlation process of water-face interaction within red-beds soft rock is established by the analysis of micro-scale chemical reaction, meso-scale physical properties and macro-scale mechanical action of interface reaction process during soft rock softening. Based on the energy flow theory and the concept of cascade, the cross-scale cascade effect during the failure process of soft rocks was analyzed. The results show that the correlation process of water-rock interface can be well explained by three factors as follow: the cation concentration of aqueous solution, proportion of pores outside the framework of soft rock particles as well

收稿日期: 2023-07-31; **修回日期:** 2023-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42293354, 42293350, 42277131)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 42293354, 42293350 and 42277131)

作者简介: 廖进(1995-), 男, 2022年毕业于中山大学大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: liaoj37@mail2.sysu.edu.cn. 通讯作者: 周翠英(1963-), 女, 博士, 现任教授、博士生导师。E-mail: zhoucui@mail.sysu.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0620

as quality of soft rock disintegration. During the softening process of soft rock, the micro and macro cascade factors show a gradual increasing trend. The imperfect correlation process of water-rock interface and cross-scale problem of cascade effect during the process of soft rock softening was solved and the references for revealing the deep mechanism of soft rock softening was also provided.

Key words: rock mechanics; red-bed soft rocks; softening; micro-meso-macro; interfacial correlation; cross-scale; cascade effect

1 引言

红层软岩作为我国广泛存在的特殊岩体,遇水软化引发的地质灾害类型多、数量大,给工程建设带来了严重危害,其软化特性的研究对于灾害防治和工程安全保障至关重要。因此,软岩软化机制一直都是工程界和学术界关注和研究的焦点。软岩相与水相在接触界面处发生的微-细-宏观级联过程,是其软化破坏的重要因素。级联效应是在外界负载过大时,岩体遭到局部失效,引起这部分负载将进行二次传递与重分配,可能导致岩体其他部位负载增大而发生破坏,进而引起新一轮的负载传递与重分配,加速整个岩体的破坏^[1]。目前针对软岩软化的界面过程的研究已取得部分成果,但大多根据微-细-宏观界面外在特征进行定量表征,少有针对性对微观界面过程的研究,对于红层软岩遇水软化的界面关联过程与级联效应的表征存在较大困难。研究红层软岩软化机制,建立软岩软化的全过程,必须清楚微-细-宏观界面过程间的内在关联及其跨尺度的级联效应。这是红层软岩工程安全与灾害控制的关键所在。

红层软岩软化界面过程研究主要集中在微观、细观与宏观界面过程 3 个方面。微观研究主要可分为理论研究和试验研究。理论研究方面,宋延杰等^[2-6]通过双电层、离子迁移、非线性动力学等理论,对软岩-水表面界面的附加电性、界面离子吸附等进行研究,但未对界面过程中电荷量和离子的吸附定量表征;L. P. Qiao 等^[7-11]基于质量与电荷守恒,结合 PHREEQC 模拟,对水-岩界面中软岩的黏土矿物组分、表面电荷与水溶液的离子交换进行研究,以对软岩界面过程做出参考。值得指出的是,软岩中并不仅含单一的黏土矿物,不同的矿物、复杂的组合,为软岩软化的微观界面过程带来了重重障碍。试验研究方面,学者们主要通过离子色谱仪、pH 试剂、点位滴定等手段,对软岩浸水试验中溶液电解质浓度、表面电荷、双电层厚度等参量的性质和关系进行证明总结,为水-岩界面过程提供一定

参考^[12-19]。

细观研究同样集中在理论研究和试验研究。理论研究方面,周翠英等^[20-23]采用重整化群、分型、系统熵等理论,对软岩软化的界面过程进行定量表征,往往只能反应水-岩界面的唯象特征。水-岩界面中软岩细观组构的变化是软岩软化的主要原因^[24],其中涉及复杂的水-岩细观作用,因此,大量研究人员在软岩软化特性试验的基础上,采用 SEM 扫描电镜、核磁共振、微孔结构分析仪、数码照相、显微镜测量等方法,对浸水软化后的软岩试样的表面粗糙度、孔隙度、表面积、碎片粒度等参数进行测试,为定量评估水-岩界面过程中的软岩物理特性提供了新的思路,但缺点是较难获取到软岩的全部信息^[25-30]。

宏观研究主要分为理论研究和试验研究与数值模拟研究 3 个方面。理论研究方面,Y. Pan 等^[31-33]基于断裂力学、裂隙损伤有效应力、间接耦合法等理论,建立了软岩遇水宏观崩解的界面模型,对软岩界面过程中裂隙、裂纹的扩展进行定量表征,但并未深入揭示其与细观界面过程间相互关系;胡江春等^[34-36]结合能量耗散、经验力学强度准则、分子力学与电化学等理论,对软岩裂纹的宏观界面模型进行研究,测得了界面中裂隙对离子的吸附量变化,为建立与微观界面关联的过程做出初步指导。试验研究方面,邓华锋等^[37-39]基于软岩三轴试验、酸碱水浸泡试验、浸泡风化试验,对软岩软化界面过程中微观孔隙、细观缺陷与宏观力学等变化趋势及规律进行研究,对进一步研究软岩微-细-宏观界面过程具有指导意义及理论价值,但未深入揭示三者间的耦合关系;M. Huang 等^[40-42]采用 SEM、离子色谱仪等测试手段,对软岩界面过程中化学效应损伤与细观孔隙结构进行数理统计并关联,但未搭建与宏观界面过程的关系。数值模拟研究方面,于超云等^[43-46]主要通过 PFC, FLAC^{3D}, MIDAS, ANSYS 等模拟软件,对软岩界面过程中的微观成分及宏观力学性能的降低、细观裂纹演化破裂与宏观强度特征的关联性等方面进行研究,弥补了试验研究的时间局限性,但结果尚不能对界面过程中微-细-宏观相互作用机制进行展现,关联过程需要进一步研究。微观、细观、宏观单

一界面过程的研究均不能对软岩软化全过程进行有效阐释, 另外对软化界面过程也未做系统整理、分析。综上所述, 目前对软岩软化的界面过程研究, 多根据细-宏观界面外在特征进行定量表征, 少有针对微观界面过程的研究, 难以开展对软岩软化界面的微-细-宏观关联过程与跨尺度级联效应的分析与预测。要建立软岩软化的全过程, 必须清楚微-细-宏观界面过程间的内在关联。

针对上述问题, 本文以红层软岩软化过程的水-岩界面演化为贯穿线, 通过红层软岩软化的微观化学反应、细观物理作用与宏观力学损伤作用的界面过程分析, 旨在建立水-岩界面微-细-宏观关联过程。并依据能量流理论, 引入级联概念, 对红层软岩遇水破坏全过程微-细-宏观跨尺度级联效应进行分析。

2 研究思路与方法

本文以华南地区红层中典型的致灾岩层——粉砂质泥岩试样为研究对象, 对红层软岩微观、细观及宏观尺度的界面过程进行分析, 得出水-岩界面的微-细-宏观的关联过程, 进一步, 结合课题组试验研究成果, 对基于能量的红层软岩遇水破坏全过程微-细-宏观跨尺度级联效应进行探讨。通过构建红层软岩微观级联失效网络模型, 基于水-岩系统的能量演化分叉与混沌特性, 得到微观尺度级联效应的放大判据。基于能量对红层软岩遇水破坏全过程微-细-宏观跨尺度级联效应进行分析, 得到微-细-宏观跨尺度级联因子演变过程。具体研究内容及方法流程如图 1 所示。

本研究中, 红层软岩的尺度划分主要根据物理学中所选物体的尺寸而定^[47]:

微观尺度($<10^{-6}$ m): 主要研究官能团、矿物颗粒结构、溶液 pH 和离子浓度的变化过程。主要采用傅里叶变换显微红外光谱仪、离子色谱仪、pH 试剂等微量测试手段, 分析红层软岩的微观效应。

细观尺度($10^{-6} \sim 10^{-3}$ m): 表现为颗粒骨架之间的位错摩擦、颗粒之间的体积膨胀、孔隙裂纹的膨胀和累积等细观尺度损伤。主要可用光学显微镜或扫描电子显微镜观察其细观效应。

宏观尺度($>10^{-3}$ m): 主要包括室内红层软岩试样的机械损伤、膨胀、岩块脱落和崩解等。利用室内外试验设备对宏观尺度红层岩土体进行研究, 并对其变形和力学性能进行分析。

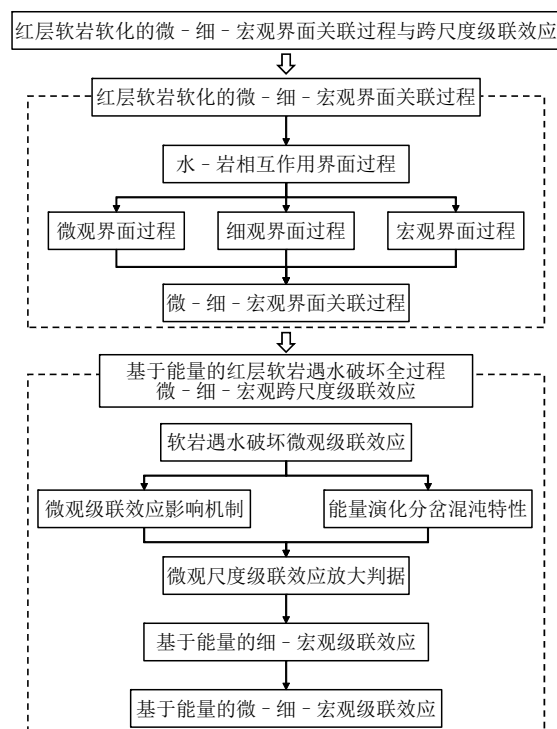


图 1 研究内容及方法流程图

Fig.1 Research content and method flowchart

3 红层软岩软化的微-细-宏观界面的关联过程

3.1 红层软岩软化的微观界面过程

红层软岩微观尺度的界面过程, 主要涉及水环境下软岩表面的微观尺度矿物-水反应、表面电荷分布和界面离子行为研究。概括为微观尺度为: 水-岩界面的离子迁移、吸附、黏土矿物的溶解过程。

3.1.1 微观尺度水-岩界面的离子迁移、吸附过程

在软化过程中, 流动的溶液会与软岩表面接触, 溶液中的离子会在浓度梯度下自动扩散, 这种现象称为离子迁移^[48](见图 2)。离子在水-岩两相上,

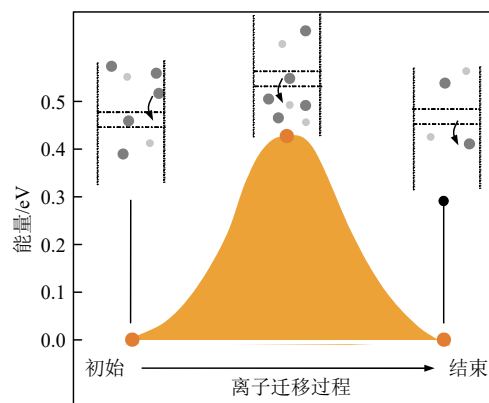


图 2 离子迁移过程(改自 Y. C. Yin 等^[49])

Fig.2 Ion migration process(modified from Y. C. Yin et al.^[49])

在浓度梯度的驱动下,自动浓集现象(溶液的浓度大于界面中的浓度)被称为离子的吸附。

微观尺度水-岩界面的离子吸附主要表现为软岩中的黏土矿物对离子的截留作用。根据表面络合吸附理论^[50],可将软岩表面视为聚和酸,其羟基可以脱去质子而成为碱,而阳离子可视为酸,因此在水-岩界面可发生表面络合吸附。

离子在微观尺度水-岩界面的阳离子吸附,由于黏土矿物表面的负电荷在水-岩界面被 Coulomb 力牵引吸附,形成表面双电层结构。在微观层面上,阳离子进入硅氧烷表面的六角网孔,与 Si-O 四面体中的 O 共价键结合。

通过微观尺度水-岩界面的离子吸附过程,水溶液中的阳离子聚集于水-岩界面中与软岩中黏土矿物接触等待离子的交换。

3.1.2 微观尺度水-岩界面的矿物溶解过程

根据 Z. Liu 等^[47, 51]矿物成分及化学成分分析的结果:浅黄色粉砂质泥岩的主要矿物为高岭石、伊利石、石英,次要矿物为绢云母、绿泥石、白云母、蒙脱石、铁质。黏土矿物含量约为 60%,碎屑矿物含量约为 40%。化学成分以 SiO_2 , Al_2O_3 为主, Fe_2O_3 , K_2O , TiO_2 次之。软岩的主要矿物成分遇水发生的化学反应主要有白云母晶体转化为钠长白晶体、钾钠长石的溶解、高岭石形成等^[47]。在水-岩界面,黏土矿物表面的负电产生电场,使得水溶液中的阳离子吸附作用在水-岩界面处并定向排列,通过水-岩界面处的化学反应产生溶于水的矿物,造成黏土矿物层微观结构丧失和矿物的溶解(见图 3)。

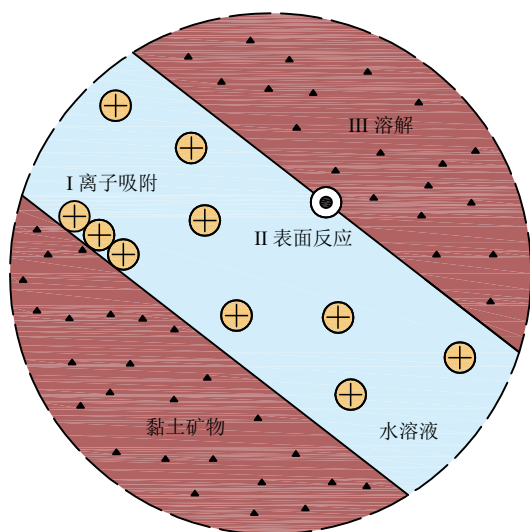


图3 黏土矿物在水-岩界面的溶解过程(改自 Z. Liu 等^[47])

Fig.3 The dissolution process of clay minerals at the water-rock interface(modified from Z. Liu et al.^[47])

3.2 红层软岩软化的微-细观界面关联过程

3.2.1 细观尺度水-岩界面的渗流过程

红层软岩试样表面有大量的微裂纹和微孔隙,为水溶液的渗流提供了运动空间。红层软岩细观软化过程中(见图 4),水溶液通过渗流进入软岩表面的微裂纹和微孔隙中,此时软岩的整体性是完整的,软岩和水溶液间存在明显的水-岩界面。

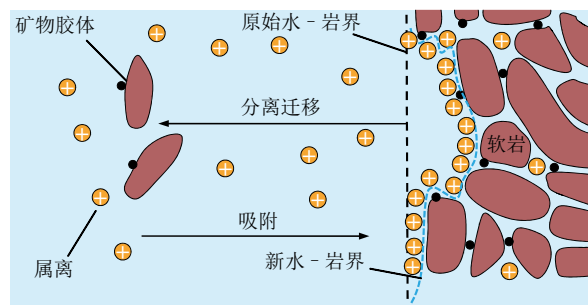


图4 细观水-岩界面渗流与黏土颗粒溶解脱落过程(改自 Z. Liu 等^[47])

Fig.4 The process of mesoscopic water-rock interface seepage and dissolution and detachment of clay particle (modified from Z. Liu et al.^[47])

将软岩试样看成由无数个软岩骨架颗粒组成的一个整体。裂纹-裂隙渗流的耦合过程主要是水溶液通过软岩试样的初始裂纹-裂隙渗入软岩骨架颗粒,通过浸润软岩骨架以改变其应力状态。对于每个骨架颗粒,周边的裂纹-裂隙环境也在不断发生变化。由此不断循环往复,积累扩大,进一步加深和拓宽了裂纹-裂隙的渗流通道。

3.2.2 细观尺度水-岩界面的黏土颗粒溶解脱落过程

通过上述水-岩界面的渗流过程,在水-岩界面处,阳离子与黏土矿物发生了离子交换的化学反应,生成了可溶性盐,导致黏土颗粒的逐渐溶解脱落,并释放到水溶液当中,使骨架颗粒的表面黏结力减弱(见图 4)。

根据 Z. Liu 等^[47, 51]试验结果发现,崩解型软岩遇水后会出现软岩碎片层层剥落的现象。随着黏土颗粒的不断溶解和脱落,引起软岩中骨架颗粒之间的黏结减少并分离,从而形成了新的水-岩界面。在新的水-岩界面,水溶液继续着上述渗流过程和黏土颗粒的溶解脱落过程,导致软岩进一步形成更多新的水-岩界面,级联往复,增加了水溶液中阳离子与骨架颗粒表面的接触面积,进一步加速了黏土颗粒的溶解和脱落过程。

综上,细观尺度红层软岩的界面过程主要涉及水溶液渗流过程、由表至里的层层剥落过程。概括为细观尺度水-岩界面的渗流、黏土颗粒溶解脱落

过程。

3.2.3 水-岩界面微-细观关联过程

红层软岩的微观结构主要针对黏土矿物, 细观结构主要针对颗粒骨架和空隙。当软岩试样未遇到水时, 试样能够保持自身结构的稳定性。当遇到水后, 渗流作用会导致软岩-水界面的微观结构和细观结构的不断变化。通过对上述水-岩界面微-细观过程的分析可以看出, 水-岩界面的微-细观过程之间必然存在着一定的关联性。

在水-岩界面的微-细观过程中, 由于微观尺度水-岩相互过程中, 黏土矿物与水溶液中阳离子两者的消耗量是正相关的, 因此可通过 Z. Liu 等^[47, 51]试验中阳离子浓度随软岩不同饱水时间的变化, 对软岩内部微观结构成分的变化进行分析。利用 SEM 扫描电镜得出软岩细观结构变化, 并进行了 Matlab 二值化分析(通过空隙率表征)。由此绘出微观总阳离子量占有与细观空隙率随水溶液饱和时间的变化规律曲线, 如图 5 所示。

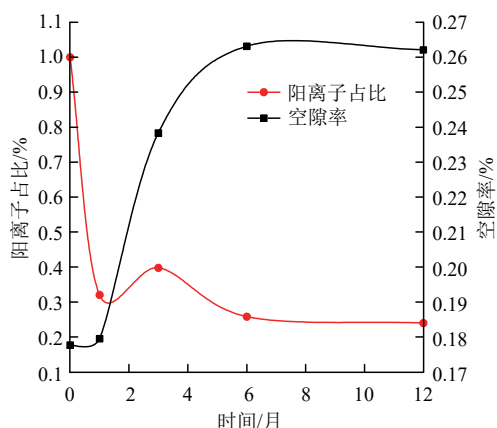


图 5 微观阳离子总量占有与细观空隙率随水时间的变化

Fig.5 Changes in mesoscopic total cation occupancy and microscopic voids with time under water conditions

水-岩界面中, 随着细观尺度水溶液中阳离子与黏土矿物之间离子交换的化学反应进程的加剧, 在细观尺度上, 软岩中的黏土颗粒不断发生溶解, 导致软岩中的空隙不断扩大, 即随着软岩细观空隙率的增加, 微观阳离子在水溶液中的总量占有率呈现近指数下降的趋势。

综上, 通过软岩内部细观空隙率与微观阳离子总量占有率 2 个因素, 可以较好地描述水-岩界面微-细观关联过程。

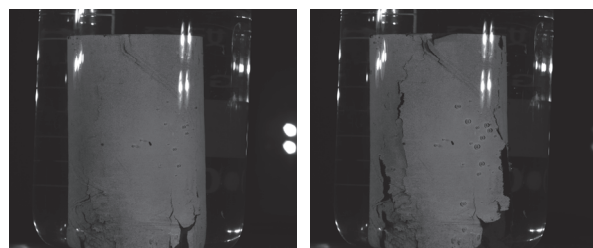
3.3 红层软岩软化的微-细-宏观界面关联过程

3.3.1 宏观尺度水-岩界面缺陷的产生与扩展过程

在渗流、黏土矿物的溶解和新矿物的生成以及黏土颗粒脱落等微-细观界面过程的影响下, 表面

的微裂纹-微裂隙控制着软岩内部渗透性的动态变化。因此, 宏观尺度水-岩界面缺陷的产生与扩展过程, 可以用软岩的渗透性及裂纹-裂隙的特征演化过程表征。

通过高速摄像机对泥岩试样浸水过程进行实时观测(见图 6), 为软岩宏观尺度水-岩界面缺陷的产生与扩展做出参考。



(a) 缺陷产生

(b) 缺陷扩展

图 6 宏观尺度水-岩界面缺陷的产生与扩展

Fig.6 The generation and propagation of defects at water-rock interface under macroscopic scale

浸水试验表明, 软岩的崩解过程可分为 3 个阶段: 裂纹-裂隙的闭合、产生和扩展。初始阶段, 软岩试样刚浸水, 微裂纹-微裂隙闭合, 软岩的渗透性略有下降; 随着浸水时间的增加, 试样表面不断产生新了裂纹-裂隙, 渗透率逐渐增加; 随着软岩表面更加酥松, 越来越多的裂纹-裂隙扩展, 导致软岩碎片脱落或松散拼搭在试样表面, 此时达到了渗透性峰值和缺陷扩展积累的临界阈值。

3.3.2 宏观尺度水-岩界面的软岩块体崩解过程

在上述缺陷不断加长和变宽并出现许多分支时, 软岩外表面出现了一片片岩块的脱落, 这是一个渐进破坏的过程。随着宏观尺度水-岩界面缺陷的产生与扩展进程的不断加深, 最终造成了软岩块体的崩解与岩体的破坏(见图 7)。

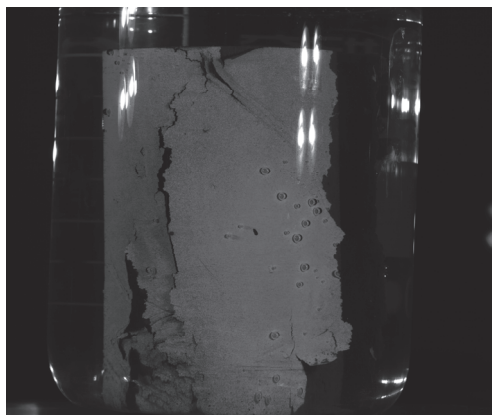


图 7 宏观尺度水-岩界面的软岩块体崩解

Fig.7 Collapse of soft rock blocks at water-rock interface under macro-scale

综上,红层软岩宏观尺度的界面过程主要涉及缺陷产生、扩展和软岩块体的崩解等灾害性结构损伤,概括为宏观尺度水-岩界面的缺陷产生与扩展、软岩块体的崩解过程。

3.3.3 水-岩界面的微-细-宏观关联过程

基于上述水-岩界面微-细观过程的关联,通过分析其与水-岩界面过程中宏观尺度相关变量的关系,旨在阐述水-岩界面的微-细-宏观关联过程。

红层软岩在饱水渗流过程中,水通过微裂纹-微裂隙渗入软岩内部结构,将阳离子从水溶液带至水-岩界面处(见图 8)。一方面,由于离子的交换吸附,软岩中亲水性黏土矿物的吸附水膜增厚膨胀,进一步扩大了裂纹-裂隙的宽度。另一方面,裂纹-裂隙宽度的加深使得软岩内部的应力重分布,比表面积的增加使得更多黏土矿物的发生溶解作用,促使了水溶液更多地侵入裂纹-裂隙中。阳离子在水-岩界面的吸附交换和矿物溶解进一步加快,缺陷进一步扩大。随着这种循环往复的次数的增加,水溶液继续侵入新老裂纹-裂隙,导致内部骨架颗粒不断脱落,缺陷扩大和积累,最终导致软岩块体从外部到内部崩解,直至破坏。

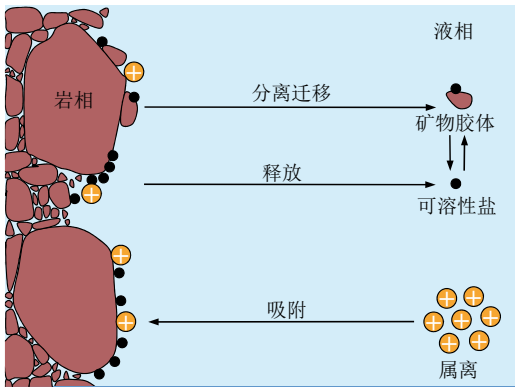


图 8 水-岩界面微-细-宏观关联过程(改自 Z. Liu 等^[47])

Fig.8 Correlation process at water-rock interface under micro-meso-macro scale(modified from Z. Liu, et al.^[47])

基于上文中微观结构、细观结构、宏观结构及水-岩界面微-细-宏观过程的分析,根据 Z. Liu 等^[47-51]试验结果,基于软岩随饱水时间的崩解物累计质量,采取用崩解率对软岩内部宏观结构的变化进行表示。最终得到微观总阳离子量占有率、细观空隙率及宏观软岩崩解率随时间变化曲线,如图 9 所示。

微观尺度,随着水-岩界面处的阳离子与黏土矿物间的化学反应进程的加剧,在细观尺度上软岩

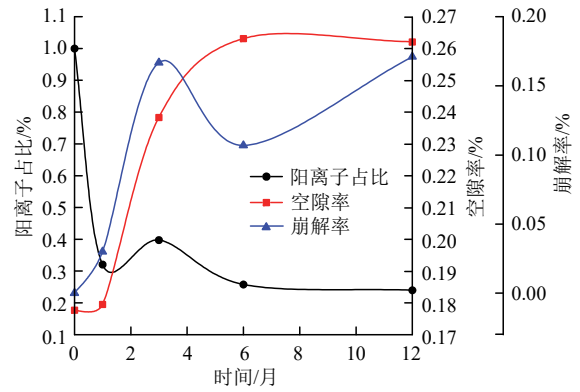


图 9 微观阳离子总量占有率、细观空隙率及宏观软岩崩解率随饱和时间的变化规律曲线

Fig.9 The variation curves of the total occupancy rate of micro-cations, meso-porosity, and macro soft rock disintegration rate with saturation time

中的黏土颗粒不断发生溶解,使软岩内部空隙扩大,引起了宏观尺度软岩块体之间的黏结不断减弱,最终崩解脱落,即水溶液中微观阳离子的总量占有率 A 随着软岩内部细观空隙率 B 、宏观崩解率 C 的增加呈近指数级下降。针对三者进行 Matlab 非线性曲面拟合,得到拟合方程及拟合曲面如图 10 所示,拟合效果可通过 R^2 来进行衡量, $R^2 = 0.996$,说明微观阳离子总量占有率 A 、细观空隙率 B 、宏观崩解率 C 三个元素的拟合效果较好:

$$C = -0.206 - 0.037A + 1.415B \quad (1)$$

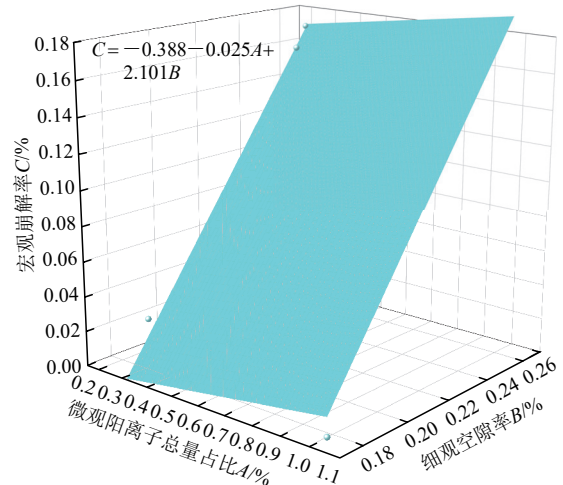


图 10 微观总阳离子量占有率 A 、细观空隙率 B 及宏观软岩崩解率 C 的拟合曲面

Fig.10 Fitting surfaces for micro total cation occupancy rate(A), meso porosity rate(B) and macro soft rock disintegration rate(C)

因此,在水-岩界面两侧,水溶液和软岩的组分和排列在微-细-宏观过程中发生了许多变化。微观尺度黏土矿物在水溶液中通过离子吸附和交换的化学反应不断溶解。细观尺度上,由于周边黏土

颗粒中的黏土矿物的不断溶解引起黏结力降低, 骨架颗粒不断脱落。宏观尺度软岩块体由于黏土矿物的不断水化和骨架颗粒间的黏结力的流失弱化, 最终导致软岩试样的持续崩解和破坏。

综上, 通过水溶液中阳离子浓度、软岩骨架颗粒外空隙的占有比例和软岩崩解物质量 3 个因素, 可以很好地阐述水-岩界面微-细-宏观的关联过程。为进一步揭示红层软岩软化的深层次机制提供参考, 为微-细-宏观跨尺度级联效应的研究提供理论指导。

4 基于能量的红层软岩遇水破坏全过程微-细-宏观跨尺度级联效应

4.1 基于能量的红层软岩遇水破坏的微观级联效应模型

(1) 基于能量的红层软岩微观级联失效网络模型

在红层软岩微观级联失效网络模型中, 黏土矿物被认为是由氢键、范式力、分子力和晶格固定等连接在一起的节点, 其中任何一个失效的黏土矿物节点都有可能独立地导致邻近的矿物节点的失效 (见图 11)。

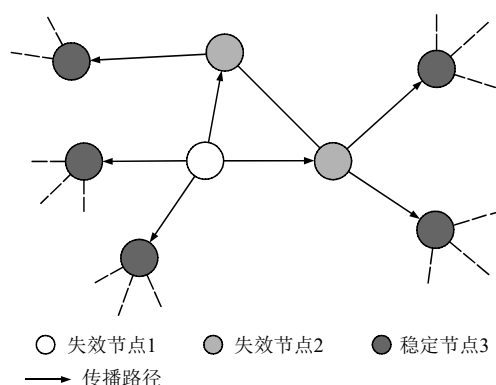


图 11 红层软岩微观级联失效网络模型

Fig.11 Microscopic cascading failure network model for red bed soft rock

(2) 红层软岩微观级联失效的节点负载-承载力

在微观尺度上, 能量作为负载作用于黏土矿物节点, 在每对节点间起作用, 并随着时间沿相关边缘传递。

节点的承载力是黏土矿物节点所能承受的最大能量负载, 在红层软岩微观级联失效过程中, 节点的能量负载是动态变化的, 特别是当红层软岩内部结构发生变化时, 会破坏平衡。此时, 每个节点的负载被重新分配, 如果重新分配的负载超过了节点的承载力, 则该节点将破坏失效, 而导致级联失效问题^[52]。

(3) 基于红层软岩黏土矿物节点失效的邻接节

点能量负载变化函数

针对上述红层软岩级联失效过程, 当节点能量负载超过其最大能量承载力时, 会对能量负载进行再分配, 形成级联效应的演化过程。

由于红层软岩级联失效的过程与其节点、边的度数或介数大小有关, 因此设置 $L_k = rS_i^\alpha$ 来表征软岩黏土矿物节点信息自我调整特性。其中, L_k 为软岩黏土矿物节点信息自我调整特性; k 为黏土矿物节点个数; S_i^α 为调节的黏土矿物节点强度表征函数; $r > 0$, $\alpha > 0$, 为调节参数。

基于能量负载表达式 $\lambda_j = C_j / \sum_{(n \in \Gamma_i)} C_n$ 描述的邻接软岩矿物节点 j 在节点 i 失效后的能量负载分配, 得出红层软岩节点失效的邻接节点 j 能量负载变化函数:

$$\Delta L_{ij} = \lambda_i L_i = \frac{C_j}{\sum_{(n \in \Gamma_i)} C_n} L_i \quad (2)$$

式中: ΔL_{ij} 为红层软岩节点 i 失效的邻接节点 j 能量负载变化函数, λ_i 为邻接软岩矿物节点 j 的能量负载分配, C_j 为邻接软岩矿物节点 j 的能量负载, C_n 为邻接软岩矿物节点 n 的能量负载, n 为邻接节点的个数, Γ_i 为邻接节点的集合。

上述建立的基于能量的红层软岩遇水破坏的微观级联失效网络模型, 其级联失效过程展现出了能量与熵演化的紊乱无序性, 因此需要找到一个临界判据, 界定其级联放大状态与破坏状态。

4.2 基于能量的红层软岩遇水破坏微观级联效应放大判据

4.2.1 基于能量的红层软岩遇水破坏微观级联效应过程的能量演化分叉与混沌特性

(1) 软岩混沌系统与非线性特征

混沌系统具有的不确定性、不可重复性和不可预测性, 对于描述软岩系统的演化十分合适。

红层软岩在没有外界干扰的情况下, 具有良好的力学性能, 但软岩在遇水后, 会迅速与水的化学效应。在这个过程中, 水-岩系统进行着能量的交换, 面对能量负载, 软岩首先储存能量, 当能量储存达到极限时, 就会破坏软岩的微观结构, 并以能量耗散的形式释放到水溶液中, 从而在软岩和水溶液之间形成能量流。此外, 在能量积累和耗散过程中, 软岩节点的能量负载抵抗和重分配是分叉的、周期与非周期纠缠的, 表现出时间离散性和行为的非线性。

(2) 软岩混沌系统的非周期性与不收敛性

基于一维混沌系统 logistic 映射: $x_{(n+1)} = \mu x_n (1 - x_n)$, 对软岩混沌系统的能量转化方程按虫口形式表征^[53-56]:

$$\eta_i^{j+1} = \mu \eta_i^j (1 - \eta_i^j) \quad (3)$$

式中: η_i^j 为某应力水平 σ_j 下的能量密度; η_i^{j+1} 为应力水平 $\sigma_{(j+1)}$ 下的能量密度; $\mu \in [0, 4]$, 为能量迭代增长因子。

软岩混沌系统的 logistic 映射方程的解依赖于 μ , 因此将其划分:

$$\left. \begin{aligned} \mu &\leq 3, \text{ 为稳定区域} \\ 3 < \mu &\leq 3.569\ 9, \text{ 为倍周期区域} \\ 3.569\ 9 < \mu &\leq 4, \text{ 为混沌区域} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

以 Z. Liu 等^[47, 51]软岩静态浸水试验为例, 以软岩 1 个月的饱水时间作为分界点, 解释软岩混沌系统的非周期性和不收敛性。0~1 月, 在微观尺度, 水-岩系统中以离子吸附为主, 水溶液仅物理渗透软岩, 对软岩影响不大, 即水-岩化学效应较弱, 化学能负载并未达到软岩的极限能量负载承载力, 此时为稳定状态。1~6 月, 水-岩系统中大部分被吸附聚集在水-岩界面的阳离子与黏土矿物之间发生化学效应, 随着化学效应的进行, 当能量负载超过软岩矿物节点的承载力时, 多个节点失效, 而能量负载被传递到邻近节点并重新分配负载, 呈现周期加倍的状态。随着软岩矿物节点的持续级联失效, 软岩宏观体现为大量骨架颗粒间黏结减弱而引起的流失导致块体的崩解脱落, 不断驱动软岩朝着远离平衡态, 往灾变方向的混沌态方向发展。

基于上述浸水试验结果, 建立微观总阳离子量占有率与软岩微观能量的变化关联性(见图 12), 据此对红层软岩遇水破坏过程的微观级联效应进行分析。

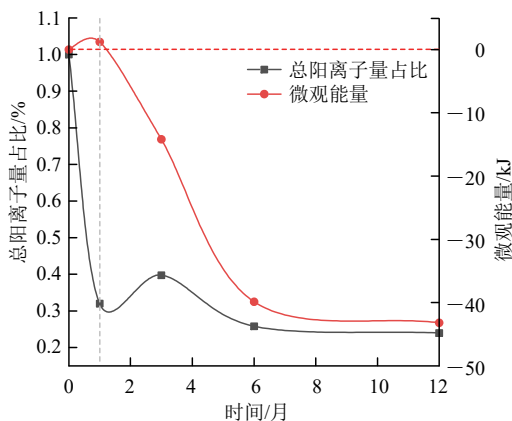


图 12 微观总阳离子量占有率和软岩静态浸水试验的微观能量关联性

Fig.12 Microscopic energy correlation between total cation occupancy rate and static immersion test of soft rock

红层软岩遇水破坏过程的微观级联效应分析。第 1 个月内, 总阳离子量变化幅度最大, 归结于离子在水-岩界面的迁移吸附所吸收的能量(吸附能), 此

时软岩-水系统近似稳定, 软岩黏土矿物节点稳定。在 1~6 个月, 水溶液中阳离子与黏土矿物的化学效应十分强烈, 与总阳离子量累计和能量大幅度变化对应。此时, 能量负载超出了软岩黏土矿物节点的承载力而失效, 导致了负载的重分配和传递。在此期间, 随着化学效应的加剧, 产生的化学能负载越来越大, 导致更多的黏土矿物节点的级联失效, 软岩-水系统处于倍周期与混沌区域。在 6 个月后, 软岩-水系统趋于稳定, 变化速率不大, 处于新的稳定状态。

4.2.2 基于能量的红层软岩遇水破坏微观尺度级联效应的放大判据

如节 4.2.1 所述, $\mu = 3.569\ 9$ 时节点处于软岩混沌系统的倍周期与混沌区域临界点。考虑到时间离散和非线性行为的复杂性, 因此, 有必要建立基于能量的微观尺度级联效应的放大判据。

以一维混沌系统中的 logistic 映射为例, 对红层软岩遇水破坏的微观尺度级联效应进行描述, 将每个失效节点作为级联因子, 连线作为级联路径, 如图 13 所示。

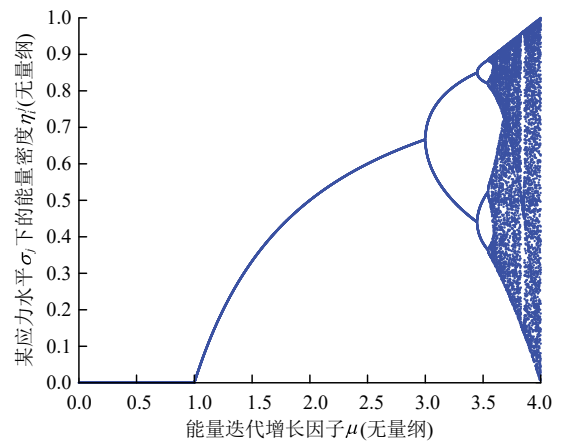


图 13 红层软岩遇水破坏的微观尺度级联效应 logistic 映射 (改编自 L. Moysis 等^[57])

Fig.13 The logistic mapping of water induced collapse of red bed soft rock under microscopic scale cascading effect (Modified from L. Moysis, et al.^[57])

选取任一个软岩薄弱矿物节点, 在能量负载作用下失效后, 以图 13 中级联效应模型进行分叉混沌演化。在 $\mu > 3$ 时, 进入倍周期状态, 节点失效数量成倍递增, 级联因子与级联路径不断增加, 软岩的破坏程度逐步加剧。因此, 级联效应的 2 个必要条件是级联因子的存在和能量负载大于软岩矿物节点的承载力。当 $3.569\ 9 < \mu \leq 4$ 时, 进入混沌状态, 此时软岩的级联因子经由倍周期阶段, 级联路径分叉得更加混乱, 级联因子进一步扩展, 最终软岩走向破坏。研究过程中比较关注的是软岩在级联失效过

程中的倍周期状态, 这是级联效应的放大区域, 由此对级联效应的放大判据进行表达^[1]:

$$Q_i \geq L_i \quad (5)$$

式中: $i \geq 1$, Q_i 为微观尺度黏土矿物 i 节点与水相互作用产生的化学能负载, L_i 为黏土矿物 i 节点的最大能量负载承载值。

通过上述建立的基于能量的红层软岩遇水破坏的微观级联失效网络模型及其放大判据, 为后续基于能量的红层软岩遇水破坏全过程微-细-宏观跨尺度级联效应的研究奠定基础。

4.3 基于能量的红层软岩遇水破坏全过程微-细-宏观跨尺度级联效应

4.3.1 基于能量的红层软岩遇水破坏过程的细-宏观尺度级联效应

结合 Z. Liu 等^[47, 51]得到的软岩物理力学性质随浸水时间变化的演化规律, 建立水-岩界面的微-细-宏观关联过程中细观空隙率、宏观崩解率和软岩静态浸水试验的细-宏观能量的关联性(见图 14, 15)。据此对基于能量的红层软岩遇水破坏过程的细-宏观尺度级联效应进行分析。

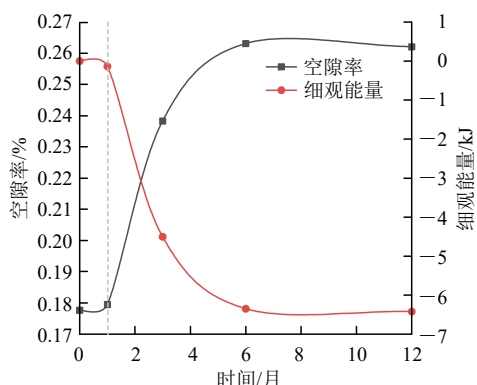


图 14 细观空隙率和软岩静态浸水试验的细观能量的关联性

Fig.14 Correlation between micro porosity and micro energy in static water immersion tests of soft rocks

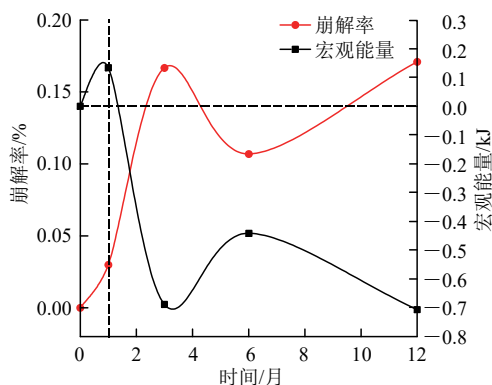


图 15 宏观崩解率和软岩静态浸水试验的宏观能量的关联性

Fig.15 Correlation between macroscopic disintegration rate and macroscopic energy of static immersion test of soft rock

第 1 个月, 细观尺度下, 软岩空隙率几乎未发生变化, 即势能和膨胀能基本不做功, 归结于此期间主要发生微观尺度的离子迁移吸附, 未对细观软岩骨架颗粒节点造成影响, 负载远小于骨架颗粒节点承载力, 此时软岩-水系统近乎稳定。从宏观上看, 软岩在第 1 个月的崩解率仅为总崩解率的 2.99%, 即几乎未发生软岩块体节点的失效, 所发生的能量变化可认为是应变能积累的结果, 能量负载小于软岩块体节点的承载力。然而, 在 1~6 月, 细观空隙率、宏观崩解率和能量的变化幅度巨大, 这是因为随着微观黏土矿物的持续溶解, 导致软岩裂纹与孔隙的积累、扩展, 引起了细观骨架颗粒的松散与流失; 进而引起了负载的重分配与传递, 导致更多骨架颗粒节点在负载下级联失效乃至脱落; 最终在宏观尺度下, 软岩块体节点无法承受更多的能量荷载而失效, 将负载传递到邻接块体节点并重新分配, 引起更多的块体节点在负载下级联失效与破坏。此时软岩-水系统处于倍周期与混沌区域。6 个月后, 整体趋于稳定, 变化速率小, 此时软岩-水系统处于新的稳定状态。

综上所述, 红层软岩遇水破坏过程中, 微-细-宏观尺度级联失效过程是相互影响、相互关联的, 因此, 应首先对其微-细-宏观结构的演化特征进行分析, 得到其微-细-宏观跨尺度级联效应。

4.3.2 红层软岩遇水破坏的微-细-宏观结构演变特征分析

水-岩作用早期, 水溶液通过渗流进入软岩表面的初始裂纹-裂隙, 在水-岩界面处发生离子交换吸附和黏土矿物的溶解的化学效应。水-岩作用中期, 软岩中黏土颗粒的不断溶解, 使骨架颗粒之间的黏结减弱、流失, 导致许多孔隙逐渐变形和破坏, 并将它们连通以形成贯通的渗流通道, 进一步加剧了水-岩界面的化学效应。渗流-化学-损伤过程是一个相互联系、相互促进、级联放大失效的过程。水-岩作用后期, 软岩内部出现大量肉眼可见的裂纹-裂隙, 伴随着剧烈的化学效应, 最终软岩块体逐步软化和崩解脱落, 直至整个软岩试样完全破坏(见图 16)。

综上所述, 在红层软岩遇水破坏的微-细-宏观结构演变过程中, 微观黏土矿物的溶解、细观骨架颗粒和宏观块体的脱落, 对其微-细-宏观结构的影响是显著的, 即微观阳离子量占比、细观空隙率和宏观崩解率, 可作为后续微-细-宏观跨尺度级联效应的研究的重要参数。

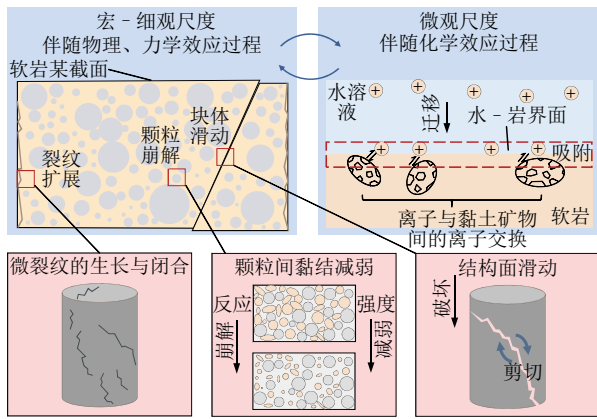


图 16 红层软岩遇水破坏的微-细-宏观结构演变特征分析(改自 Z. Liu 等^[47])

Fig.16 Analysis of the meso-micro-structural evolution characteristics of red bed soft rock under water induced damage(modified from Z. Liu, et al. ^[47])

4.3.3 基于能量的红层软岩遇水破坏全过程微-细-宏观跨尺度级联效应

综合软岩静态浸水试验中微观总阳离子量占有率和软岩静态浸水试验的微观能量的关联(见图 12), 细观空隙率和软岩静态浸水试验的细观能量的关联(见图 14)与宏观崩解率和软岩静态浸水试验的宏观能量的关联性(见图 15), 得到软岩微-细-宏观能量随饱水时间的演化规律(见图 17), 基于此, 对红层软岩遇水破坏全过程微-细-宏观跨尺度级联效应进行讨论分析。

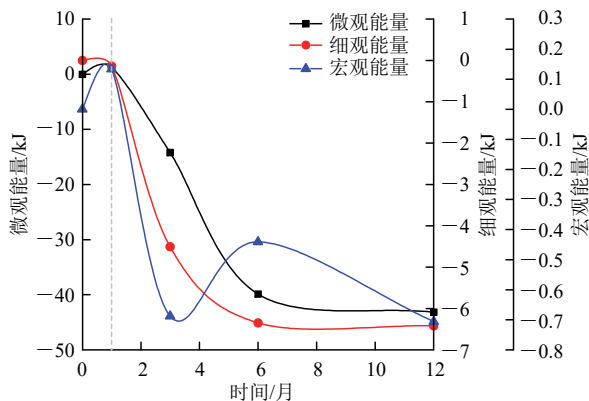


图 17 软岩微-细-宏观能量随饱水时间的演化规律

Fig.17 Evolution trends of micro-macroscopic energy of soft rock with saturation time

软岩初遇水时, 微观化学效应产生的化学能负载不足以破坏软岩的内部微观结构, 细-宏观软岩颗粒、块体的极限承载能力也均大于负载, 此时软岩处于近稳定状态, 几乎所有水溶液所传递的能量都以应变能的形式储存在软岩中, 使软岩内部矿物、颗粒及块体间更加紧密, 此时跨尺度级联效应尚未开始。

随着水-岩界面内聚集阳离子浓度越来越高, 阳离子与软岩中的黏土矿物反应产生大量化学热, 此时的能量负载可能大于某些软岩黏土矿物节点的最大负载能力而失效, 黏土矿物间的氢键、分子键等连接遭到破坏, 产生微观级联因子, 并将负载传递和重分配到邻近节点, 而邻近较弱节点相继失效, 产生更多的微观级联因子, 并通过级联路径不断扩散, 导致大片软岩黏土矿物节点的级联失效, 此为跨尺度级联效应的开始。细观尺度体现为软岩骨架颗粒间的胶结能力下降, 松散而级联失效并逐渐脱落。级联因子的存在表明, 骨架颗粒不再存储能量, 而是不断地通过级联路径传递能量, 并将其重分配到邻接颗粒节点。从宏观层面上看, 软岩表面出现肉眼可见裂纹, 通过力学损伤等方式将负载释放到水溶液中, 最终导致了软岩块体的脱落。上述微-细-宏观级联失效过程并不是独立进行的, 而是跨尺度、相互影响、相互关联的, 最后剩余的节点无法承受更大的能量负载, 导致软岩出现肉眼可见的急剧崩解破坏, 此时能量达到最大限度, 级联效应速率趋于平缓, 软岩通过耗散大量内聚能来达到跨尺度级联效应新的平衡状态。

4.3.4 基于能量的红层软岩遇水破坏微-细-宏观跨尺度级联因子演变过程

在微观尺度上, 化学能负载作用于软岩黏土矿物节点, 并超过其自身的承载能力, 此时黏土矿物之间的连接断开, 导致节点失效, 因此这些黏土矿物节点可作为微观尺度级联因子。对于细观尺度, 微观软岩黏土矿物的失效削弱了细观骨架颗粒间的胶结, 使得颗粒松散流失, 无法承受更多的能量荷载, 因此这些骨架颗粒节点可作为细观尺度级联因子。同时, 由于细观骨架颗粒的逐渐流失, 软岩块体间也出现肉眼可见的裂纹、裂隙, 最终导致崩解脱落, 即宏观尺度下, 软岩块体无法承受更多的能量荷载而失效, 将负载传递到邻接块体并重新分配, 因此这些软岩块体节点可作为宏观尺度级联因子(见图 18)。

假定微观尺度高岭石 XRD 图像中的衍射峰强度的累计变化量作为高岭石的参与反应量, 并将其累计变化量随时间的变化作为微观级联因子的变化。假定细观尺度软岩 SEM 二值化图像中的孔隙累计变化量作为细观颗粒的失效量, 并将其累计变化量作为细观级联因子的变化。假定宏观尺度软岩质量称重的累计变化量作为软岩块体的失效量, 并将其累计变化量作为宏观级联因子的变化, 最终得

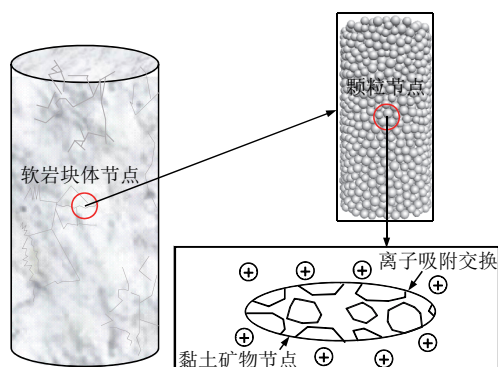


图 18 微-细-宏观级联因子示意图

Fig.18 Schematic diagram of cascade factors under micro-meso-macro scale

到微-细-宏观跨尺度级联因子随时间演变过程, 如图 19 所示。

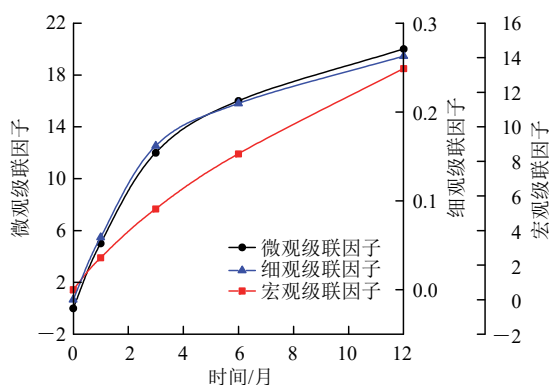


图 19 微细宏观跨尺度级联因子随时间演变过程

Fig.19 The evolution process of cascade factors under micro-macro-cross scale with time

可以看出, 微-细-宏观跨尺度级联因子数量均随着时间呈现逐级增大的趋势。随着软岩浸水时间的增加, 大多数微观软岩黏土矿物节点、细观骨架颗粒节点和宏观软岩块体节点在能量负载下失去连接并失效。一方面, 节点失效的同时, 部分能量负载耗散到水溶液中。另一方面, 通过连接和重新分配将能力负载传递到少部分邻接节点。这一小部分较弱节点在负载作用下再次失效, 进一步成为更多的级联因子, 并循环往复通过级联路径继续传递给邻接节点。因此, 虽然随着时间的推移, 级联因子的数目仍在不断增加, 但是速率在逐渐减慢, 并在最终达到节点与负载平衡的新稳定状态。

综上, 红层软岩遇水破坏的全过程中微观、细观、宏观级联因子, 均呈现逐级递增的趋势。

5 结 论

(1) 本文以红层软岩软化过程的水-岩界面演

化为贯穿线, 建立了微-细-宏观关联过程。依据能量流理论, 引入级联概念, 对红层软岩遇水破坏全过程跨尺度级联效应进行分析。解决了红层软岩软化的微-细-宏观界面的关联过程不完善与级联效应的跨尺度问题。

(2) 通过红层软岩软化的微观化学反应、细观物理作用与宏观力学损伤作用的界面过程的分析, 得到了软岩内部细观空隙率、微观阳离子总量占有率与宏观软岩块体崩解率 3 个因素的关联表征拟合方程, 拟合效果较好, 为揭示红层软岩软化的深层机制提供参考。

(3) 本文提出的红层软岩软化的微-细-宏观界面关联过程与跨尺度级联效应, 从不同层次及角度给滑坡等地质灾害机理研究提供了理论根据, 为红层软岩遇水破坏的全过程研究提了新的思路和方法。

参考文献(References):

- [1] 周翠英, 梁 宁, 刘 镇. 红层软岩压缩破坏的分形特征与级联失效过程[J]. 岩土力学, 2019, 40(增 1): 21 - 31.(ZHOU Cuiying, LIANG Ning, LIU Zhen. Fractal characteristics of compression failure of red soft rock and cascading failure process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(Supp.1): 21 - 31.(in Chinese))
- [2] 宋延杰, 郑 羽, 姜立捷. 混合泥质砂岩双电层电导率理论模型[J]. 测井技术, 2008, 32(3): 197 - 202.(SONG Yanjie, ZHENG Yu, JIANG Lijie. A theoretical model based on double layer conductivity of laminated and dispersed shaly sand[J]. Well Logging Technology, 2008, 32(3): 197 - 202.(in Chinese))
- [3] ZUDDAS P, CENSI P, INGUAGGIATO C, et al. The behaviour of zirconium and hafnium during water-rock interaction[J]. Applied Geochemistry, 2018, 94: 46 - 52.
- [4] OH Y S, JO H Y, RYU J H, et al. A microfluidic approach to water-rock interactions using thin rock sections: Pb and U sorption onto thin shale and granite sections[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 324: 373 - 781.
- [5] EANG K E, IGARASHI T, KONDO M, et al. Groundwater monitoring of an open-pit limestone quarry: water-rock interaction and mixing estimation within the rock layers by geochemical and statistical analyses[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28(6): 849 - 857.
- [6] TABBAGH A, COSENZA P. Effect of microstructure on the electrical conductivity of clay-rich systems[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2007, 32(1/7): 154 - 160.

- [7] QIAO L P, ANDA H, WANG Z C, et al. Alteration of minerals and temporal evolution of solution in reactive flow through granitic rock fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 123: 284 – 296.
- [8] 凌斯祥, 巫锡勇, 孙春卫, 等. 水岩化学作用对黑色页岩的化学损伤及力学劣化试验研究[J]. *实验力学*, 2016, 31(4): 511 – 524. (LING Sixiang, WU Xiyong, SUN Chunwei, et al. Experimental study of chemical damage and mechanical deterioration of black shale due to water-rock chemical action[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(4): 511 – 524.(in Chinese))
- [9] LENG X L, WANG C, PANG R, et al. Material preparation and geotechnical properties of transparent cemented soil for physical modeling[J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 8: 740388.
- [10] AOCHI Y O, FARMER W J. Effects of surface charge and particle morphology on the sorption/desorption behavior of water on clay minerals[J]. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2011, 374(1/3): 22 – 32.
- [11] 吴宏海, 刘佩红, 高 嵩, 等. 高岭石 – 水溶液的界面反应特征[J]. *地球化学*, 2005, 34(4): 410 – 416.(WU Honghai, LIU Peihong, GAO Song, et al. Characterization of interfacial reactions at kaolinite/water[J]. *Geochimica*, 2005, 34(4): 410 – 416.(in Chinese))
- [12] 周翠英, 苏定立, 刘 镇. 软岩渗流 – 化学 – 损伤软化过程中能量耗散机制[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(3): 477 – 486.(ZHOU Cuiying, SU Dingli, LIU Zhen. Discussion on energy dissipation mechanism in seepagechemical damage-softening process of soft rock[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(3): 477 – 486.(in Chinese))
- [13] 王晓强, 姚华彦, 代 领, 等. 皖南红层软岩崩解特性试验分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(3): 683 – 691.(WANG Xiaoqiang, YAO Huayan, DAI Ling, et al. Experimental study on slaking characteristics of red-bed soft rock in southern Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(3): 683 – 691.(in Chinese))
- [14] YAN L B, LIU P, PENG H, et al. Laboratory study of the effect of temperature difference on the disintegration of redbed softrock[J]. *Physical Geography*, 2019, 40(2): 149 – 163.
- [15] WALTER J, CHESNAUX R, CLOUTIER V, et al. The influence of water/rock-water/clay interactions and mixing in the salinization processes of groundwater[J]. *Journal of Hydrology-Regional Studies*, 2017, 13: 168 – 188.
- [16] LIU Z, HE X F, FAN J, et al. Study on the softening mechanism and control of red-bed soft rock under seawater conditions[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7(7): 235.
- [17] TONE K, KAMORI M, SHIBASAKI Y. Adsorbed cations and water film thickness on the kaolinitic clay surface[J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 1993, 101(12): 1 361 – 1 365.
- [18] ISRAELACHVILI J N, ADAMS G E. Measurement of forces between two mica surfaces in aqueous electrolyte solutions in the range 0 – 100 Nm[J]. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 1978, 74: 975 – 1 001.
- [19] 彭陈亮, 闵凡飞, 赵 晴, 等. 微细矿物颗粒表面水化膜研究现状及进展综述[J]. *矿物学报*, 2012, 32(4): 515 – 522.(PENG Chenliang, MIN Fanfei, ZHAO Qing, et al. A review: research status and progress on hydration layers near fine mineral particles[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2012, 32(4): 515 – 522.(in Chinese))
- [20] 周翠英, 黄思宇, 刘 镇, 等. 红层软岩软化的界面过程及其动力学模型[J]. *岩土力学*, 2019, 40(8): 3 189 – 3 196.(ZHOU Cuiying, HUANG Siyu, LIU Zhen, et al. The interface process and its dynamic model of red-bed soft rock softening[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(8): 3 189 – 3 196.(in Chinese))
- [21] 张 丹, 陈安强, 刘刚才. 紫色泥岩水热条件下崩解过程的分维特性[J]. *岩土力学*, 2012, 33(5): 1 341 – 1 346.(ZHANG Dan, CHEN Anqiang, LIU Gangcai. Disintegration characteristics of purple mudstone based on fractal dimension under hydrothermal condition[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(5): 1 341 – 1 346.(in Chinese))
- [22] 邓 涛, 黄 明, 詹金武. 不同 pH 环境下黏土类岩崩解过程分形演化规律[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2014, 42(10): 1 480 – 1 485.(DENG Tao, HUANG Ming, ZHAN Jinwu. Fractal evolution law of clay rock disintegration under different pH conditions[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2014, 42(10): 1 480 – 1 485.(in Chinese))
- [23] KINCAL C, KOCA M Y, OZDEN G, et al. Fractal parameter approach on weathering grade determination of ceayme(Izmir, Turkey) Tuffs[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2010, 69(4): 617 – 629.
- [24] 刘 镇, 周翠英, 朱凤贤, 等. 软岩饱水软化过程微观结构演化的临界判据[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 661 – 666.(LIU Zhen, ZHOU Cuiying, ZHU Fengxian, et al. Critical criterion for microstructure evolution of soft rocks in softening process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 661 – 666.(in Chinese))
- [25] WU X Y, 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.
- [26] AKESSON U, LINDQVIST J, GÖRANSSON M, et al. Relationship between texture and mechanical properties of granites, Central Sweden,

- by use of image-analysing techniques[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2001, 60(4): 277 - 284.
- [27] OGILVIE S R, GLOVER P W J. The petrophysical properties of deformation bands in relation to their microstructure[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 193(1/2): 129 - 142.
- [28] PRIKRYL R. Some microstructural aspects of strength variation in rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(5): 671 - 682.
- [29] ZHOU C, DENG Y, TAN X, et al. Research on the variation regularities of microstructures in the testing of interaction between soft rocks and water[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2003, 42(4): 98 - 102.
- [30] CHEN Y, CAO P, PU C, et al. Experimental study of effect of water-rock interaction on micro-topography of rock surface[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(11): 3 452 - 3 458.
- [31] PAN Y, LIU Z, ZHOU C Y. Experimental study of disintegration characteristics of red-bed soft rock within water and its interface model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(11): 3 231 - 3 239.
- [32] 张 磊, 刘 镇, 周翠英. 红层软岩浸水裂纹扩展试验与破裂机制分析[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2012, 51(6): 35 - 40. (ZHANG Lei, LIU Zhen, ZHOU Cuiying. Experiment of Crack Propagation of Red-Bed Soft Rock in Water and Micromechanical Mechanism of Crack Propagation[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2012, 51(6): 35 - 40.(in Chinese))
- [33] XIE J, ZHOU C, CHENG Y. Method of seepage-softening analysis and disaster mechanism in soft rock slope under rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(1): 197.
- [34] 胡江春, 王红芳, 祝彦知, 等. 深部岩石隐性裂纹的电化学检测机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(5): 1 048 - 1 055. (HU Jiangchun, WANG Hongfang, ZHU Yanzhi, et al. Destability mechanism of deep rock latent crack using electrochemical method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 1 048 - 1 055.(in Chinese))
- [35] GUAYACAN-CARRILLO L M, SULEM J, SEYEDI D M, et al. Analysis of long-term anisotropic convergence in drifts excavated in Callovo-Oxfordian Claystone[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(1): 97 - 114.
- [36] MINGJING J, ASEN L, HUANG W, et al. An empirical strength criterion for deep rock incorporating the effect of fracture intensity using distinct element method[C]// *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. UK: IOP Publishing, 2020, 570: 022060.
- [37] 邓华锋, 周美玲, 李建林, 等. 水-岩作用下红层软岩力学特性劣化规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(增 2): 3 481 - 3 491. (DENG Huafeng, ZHOU Meiling, LI Jianlin, et al. Mechanical properties deteriorating change rule research of red-layer soft rock under water-rock interaction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35: 3 481 - 3 491.(in Chinese))
- [38] 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(6): 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(6): 35 - 44.(in Chinese))
- [39] 冯学志, 秦 楠, 崔立桩, 等. 水化学-冻融循环作用下砂岩三轴蠕变及细观损伤试验研究[J]. *应用力学学报*, 2021, 38(4): 1 383 - 1 391. (FENG Xuezhi, QIN Nan, CUI Lizhuang, et al. Experimental study on triaxial creep behavior of yellow sandstone under the coupling of chemical solution and freeze-thaw cycle[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2021, 38(4): 1 383 - 1 391.(in Chinese))
- [40] HUANG M, XU C S, ZHAN J W. Assessments of the disintegrating behaviour of clay shale considering the effect of pH condition[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2020, 24(1): 97 - 109.
- [41] RIBEIRO R P, KOBELNIK M, PARIZOTTO J C V. Mineralogical and thermal characterization of soft rock from Campinas, Brazil[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 136(2): 483 - 492.
- [42] 陈福榜, 左清军, 吴友银, 等. 富水环境下板岩膨胀过程宏-细-微观机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(1): 126 - 137. (CHEN Fubang, ZUO Qingjun, WU Youyin, et al. Macro-meso-micro mechanisms of rich-water slate in the swelling process[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(1): 126 - 137.(in Chinese))
- [43] 于超云, 张慧慧, 唐春安. 龙游石窟 5 号洞室的破坏机理研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(1): 106 - 113. (YU Chaoyun, ZHANG Huihui, TANG Chun'an. Study on failure mechanism of cavern No.5 in Longyou Grottoes[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(1): 106 - 113.(in Chinese))
- [44] 李元海, 刘金杉, 唐晓杰, 等. 考虑裂隙的含孔洞软岩体力学特性模拟分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(3): 594 - 603. (LI Yuanhai, LIU Jinshan, TANG Xiaojie, et al. Simulation analysis of mechanical properties of the soft rock mass with holes and fractures[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2020, 37(3): 594 - 603.(in Chinese))
- [45] FARHADIAN H, KATIBEH H, HUGGENBERGER P, et al. Optimum model extent for numerical simulation of tunnel inflow in

- fractured rock[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 60: 21 – 29.
- [46] 郭宏云, 赵 健, 柳培玉. 深部软岩与水作用后的强度软化特性及化学分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(增 1): 3 374 – 3 381. (GUO Hongyun, ZHAO Jian, LIU Peiyu. Experimental Studies and Chemical Analysis of Water on Weakening Behaviors of Deep Soft Rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(Supp.1): 3 374 – 3 381.(in Chinese))
- [47] LIU Z, LIAO J, XIA C, et al. Micro-meso-macroscale correlation mechanism of red-bed soft rocks failure within static water based on energy analysis[J]. *Acta Geotechnica*, 2023. DOI: 10.1007/s11440 – 023 – 01893 – 6.
- [48] MAUGERI M, RAGUSA A, TORRISI M. Underground pollution: some solutions of the transport equation[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2003, 37(5/6): 583 – 587.
- [49] YIN Y C, WANG Q, YANG J T, et al. Metal chloride perovskite thin film based interfacial layer for shielding lithium metal from liquid Electrolyte[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1). 10.1038/s41467 – 020 – 15643 – 9.
- [50] ZHANG Z J, ZHOU Q, YUAN Z T, et al. Adsorption of Mg_2^+ and K^+ on the Kaolinite(001) surface in aqueous system: a combined dft and aimd study with an experimental verification[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 538. 10.1016/j.apsusc.2020.148158.
- [51] 朱凤贤. 特殊软岩软化机制与力学耦合效应研究[博士学位论文][D]. 广州: 中山大学, 2009.(ZHU Fengxian. Study on softening mechanism and mechanical coupling effect on specail soft rocks[Ph. D. Thesis][D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2009.(in Chinese))
- [52] SHUANG Q, ZHANG M Y, YUAN Y B. Performance and reliability analysis of water distribution systems under cascading failures and the identification of crucial pipes[J]. *Plos One*, 2014, 9(2). 10.1371/journal.pone.0088445.
- [53] 常景辉, 张雪锋. 混沌系统参数扰动方案及分析[J]. *计算机应用研究*, 2022, 39(2): 567 – 571.(CHANG Jinghui, ZHANG Xuefeng. Chaotic system parameter perturbation scheme and its performance analysis[J]. *Application Research of Computers*, 2022, 39(2): 567 – 571.(in Chinese))
- [54] 张晓东. 用虫口方程估计 b 值范围[J]. *西北地震学报*, 1989, (1): 70 – 72.(ZHANG Xiaodong. Application Logistic Formula Estimating Size of Seismological b Value[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 1989, (1): 70 – 72.(in Chinese))
- [55] KALABUSIC S, PILAV E. Bifurcations, permanence and local behavior of the plant-herbivore model with logistic growth of plant biomass[J]. *Qualitative Theory of Dynamical Systems*, 2022, 21(2). 10.1007/s12346 – 022 – 00561 – 6.
- [56] 张玉军. 核废物地质处置中热 – 水 – 应力耦合对迁移影响的三维有限元模拟[J]. *岩土力学*, 2009, 30(7): 2 126 – 2 132.(ZHANG Yujun. 3d Finite Element Simulation for Influence of Thermo-Hydro-Mechanical Coupling on Migration in Geological Disposal of Nuclear Waste[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(7): 2 126 – 2 132.(in Chinese))
- [57] MOYSIS L, VOLOS C, JAFARI S, et al. Modification of the logistic map using fuzzy numbers with application to pseudorandom number generation and image encryption[J]. *Entropy*, 2020, 22(4): 10.3390/e22040474.