

赵红,董玉杰,李晓宁,等.泥岩毛细吸水特性及吸水量时程模型研究[J].水利水电技术(中英文),2025,56(3):222-235. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.018

ZHAO Hong, DONG Yujie, LI Xiaoning, et al. Study on capillary water absorption characteristics and time course modeling of water absorption in mudstone [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 222-235. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.018

泥岩毛细吸水特性及吸水量时程模型研究

赵红^{1,2}, 董玉杰³, 李晓宁⁴, 沈灿¹, 凌斯祥⁵, 冯俊杰⁵

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621000; 2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621000; 3. 西藏自治区地质矿产勘查开发局第五地质大队, 青海 格尔木 816000; 4. 西华大学 应急管理学院, 四川 成都 610039; 5. 西南交通大学 地球科学与环境学院, 四川 成都 611756)

摘要:【目的】研究红层泥岩毛细吸水特性及吸水量随时间变化规律,提出泥岩的吸水量预测方法,并据此开展吸水量临界值的计算,为地下水条件下红层泥岩吸水量预测、吸水软化特性的理论、试验研究及致灾机理分析提供参考。【方法】取四川雅安第三系名山组、四川简阳白垩系灌口组、甘肃成县白垩系鸡山组红层泥岩,开展毛细吸水试验,结合X射线衍射测试、压汞测试、接触角测试和扫描电镜测试,对红层泥岩的微观矿物成分、孔隙结构、毛细吸水前后的微观结构变化、毛细吸水规律特征曲线及其影响因素进行分析。【结果】结果显示:不同地区红层泥岩的毛细吸水特性有一定差异,毛细吸水速率不断减小;毛细吸水系数与吸水率均呈正相关;毛细吸水高度与时间的平方根呈现良好的线性关系。基于L-W方程和多孔介质毛细吸水理论,考虑矿物成分对毛细吸水量的影响,提出毛细吸水量时程模型;毛细吸水率与石英含量呈负相关($R^2=0.79$)、与黏土矿物含量呈正相关($R^2=0.80$)。【结论】泥岩毛细吸水特性及影响因素具有一定的规律性,并将红层泥岩毛细吸水在微观层面划分为水分吸附阶段和水分迁移阶段;所提出的毛细吸水量时程模型能够有效进行红层泥岩的吸水量预测,且误差较小。

关键词: 红层泥岩; 毛细吸水试验; 毛细吸水特性; 吸水量; 时程误差较小模型; 影响因素; 扫描电镜测试; 微观结构

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.018

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)03-0222-14



Study on capillary water absorption characteristics and time course modeling of water absorption in mudstone

ZHAO Hong^{1,2}, DONG Yujie³, LI Xiaoning⁴, SHEN Can¹, LING Sixiang⁵, FENG Junjie⁵

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, Sichuan, China; 2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province,

收稿日期: 2024-08-09; 修回日期: 2024-10-22; 录用日期: 2024-10-24; 网络出版日期: 2024-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072721); 四川省中央引导地方科技发展专项项目(23ZYZYTS0476); 四川省重点研发计划项目(23ZDYF2283)

作者简介: 赵红(1998—),男,硕士,主要从事特殊岩土工程性质方面研究。E-mail: 1778924359@qq.com

通信作者: 李晓宁(1980—),女,教授,博士,主要从事交通廊道山地灾害与风险、特殊岩土工程性质等研究。E-mail: swustlxn@126.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Mianyang 621000, Sichuan, China; 3. No. 5 Geological Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Golmud 816000, Qinghai, China; 4. School of Emergency Management, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China; 5. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: [Objective] To study the capillary water absorption characteristics of red mudstone and the change rule of water absorption with time, to put forward the prediction method of water absorption of mudstone, and to carry out the calculation of the critical value of water absorption accordingly, so as to provide references for the prediction of water absorption, theoretical and experimental research on the softening characteristics of water absorption and the analysis of disaster-causing mechanism of red mudstone under the condition of groundwater. [Methods] The red mudstone of the Tertiary Mingshan Formation of Yaan, Sichuan, the Cretaceous Guankou Formation of Jianyang, Sichuan, and the Cretaceous Jishan Formation of Chengxian, Gansu, were taken to carry out the capillary water absorption test, and combined with the X-ray diffraction test, the pressurized mercury test, the contact angle test, and the SEM test, to analyze the micromineral compositions of the red mudstone, the pore structure, the microstructural changes before and after capillary water absorption, the characteristic curves of capillary water absorption law and its influencing factors. [Results] The results show that: the capillary water absorption characteristics of the red bedded mudstone in different regions have some differences, and the capillary water absorption rate is decreasing; the capillary absorption coefficients are positively correlated with the absorption rates; the absorption heights show a good linear relationship with the square root of time; based on the L-W equation and the theory of capillary water absorption in porous media, and considering the influence of mineral composition on the capillary water absorption, a time course model of capillary water absorption is proposed; the capillary water absorption rate is negatively correlated with the content of quartz ($R^2 = 0.79$) and positively correlated with the content of clay minerals ($R^2 = 0.80$). [Conclusion] The capillary water absorption characteristics and influencing factors of mudstone have certain regularity, and the capillary water absorption of red bedded mudstone is divided into water adsorption phase and water migration phase at the microscopic level; the proposed time-course model of capillary water absorption can effectively carry out the prediction of the water absorption of red bedded mudstone, and the error is small.

Keywords: red bedded mudstone; capillary water absorption test; capillary water absorption characteristics; water absorption; time-course modeling; influencing factors; scanning electron microscopy testing; microstructure

0 引言

红层是一种外观以红色为主色调的陆相碎屑沉积地层,由砂岩、粉砂岩、泥岩组成^[1],主要矿物成分包括碎屑石英矿物和蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物,使其物理力学性质对环境水分变化具有一定的敏感性^[2],易导致基坑开挖卸荷引起开裂、沉降以及承载力不足等严重病害^[3-6]。

红层泥岩吸水后的物理、力学性质的劣化^[7-11]对灾害的发展起着重要作用。众多学者针对红层泥岩的吸水特性开展了诸多研究工作,主要包括:郝耐等^[12]通过模拟泥岩的毛细吸水过程,表明吸水率随时间变化可用指数函数进行拟合,吸水速率及毛细上升速率随时间减小;柳培玉等^[13-14]将泥岩吸水过程划分为减速吸水和等速吸水阶段,吸水过程曲线拟合均呈幂指数函数变化趋势,并从微观角度分析了前期吸水速率较高,后期吸水速率均匀这一试验现象;杨晓杰等^[15]将泥岩的吸水过程分为两个阶段:非线性等速吸水和等速吸水;FENG等^[16]认为在完全浸没条

件下,泥岩吸水速率可分为三个阶段:快速吸水、缓速吸水和稳定吸水阶段;何满潮等^[17]通过泥岩吸水宏观试验和微观试验,提出使用负指数函数表述减速吸水阶段和线性函数描述等速吸水阶段,并得出吸水率影响因素涉及泥岩的孔隙率、黏土矿物含量、黏土矿物种类等;冒海军等^[18]从微观结构揭示了泥岩吸水微观机理;周翠英等^[19]认为水分从泥岩表面开放孔隙、微裂隙进行内部,并在层状黏土矿物颗粒之间形成极化水分子层,不断吸水使层间距加大,导致泥岩膨胀;纪文栋等^[20]、INCE等^[21]认为岩石的微观孔隙结构决定了岩石的吸水量和吸水速率;张娜等^[22]、WANG等^[23]研究发现孔隙度越大,泥岩的吸水率越大;GUO等^[24]认为泥岩的黏土矿物含量越高,吸水率越大;LAI等^[25]发现岩石孔隙的平均孔径对岩石的吸水性影响较大。

综上所述,红层泥岩吸水过程中的崩解软化效应、宏微观结构变化是目前研究泥岩吸水特性和机理的主要内容,针对特定吸水条件下,泥岩的吸水量预

测方法的研究, 并据此开展吸水量临界值的计算尚未系统掌握。为此, 本文选取三类红层泥岩试样, 开展了一系列宏微观试验, 探讨模拟地下水条件下, 红层泥岩的毛细吸水特性, 提出了红层泥岩毛细吸水量时程模型。研究成果可为开展泥岩吸水软化特性的半定量研究提供参考。

1 试验样品与方法

1.1 试验样品

试验通过钻孔取样, 选取深度在 17~26 m 之间的四川雅安天全第三系名山组红层泥岩 (MS-1、MS-2、MS-3)、四川简阳白垩系灌口组红层泥岩 (GK-4、GK-5、GK-6)、甘肃成县地区白垩系鸡山组红层泥岩 (JS-7、JS-8、JS-9); 岩样吸水前 MS-1、MS-2、MS-3 岩样呈紫红色, 泥质胶结, GK-4、GK-5、GK-6 岩样呈浅砖红色、暗紫红色, JS-7、JS-8、JS-9 岩样呈棕红色、紫红色, 岩样结构均较为致密。为减小所取岩样水分蒸发, 使用塑料薄膜进行包裹装箱, 运至实验室并进行圆柱干钻切割, 再进行磨样处理, 根据试验规范^[26]制成直径 50 mm、高度 100 mm 的表面平滑的圆柱体如图 1 所示, 岩样编号与基本物理性质如表 1 所列。红层泥岩的干密度均值为



图 1 泥岩标准样

Fig. 1 Standard sample of mudstone

表 1 岩样基本物理性质

Table 1 Physical characteristics of red-bed mudstones

| 岩样编号 | 取样深度 /m | 干密度 /g·cm ⁻³ | 天然密度 /g·cm ⁻³ | 天然含水率/% |
|------|-----------|-------------------------|--------------------------|---------|
| MS-1 | 20.3~25.5 | 2.50 | 2.54 | 5.23 |
| MS-2 | 20.3~25.5 | 2.49 | 2.56 | 5.64 |
| MS-3 | 20.3~25.5 | 2.51 | 2.58 | 5.78 |
| GK-4 | 19.5~23.5 | 2.42 | 2.51 | 2.51 |
| GK-5 | 19.5~23.5 | 2.36 | 2.60 | 2.57 |
| GK-6 | 19.5~23.5 | 2.47 | 2.55 | 2.65 |
| JS-7 | 17.3~20.6 | 2.51 | 2.58 | 3.20 |
| JS-8 | 17.3~20.6 | 2.59 | 2.56 | 3.32 |
| JS-9 | 17.3~20.6 | 2.45 | 2.63 | 3.41 |
| 平均值 | | 2.48 | 2.57 | 3.81 |

为 2.48 g/cm³; 天然密度均值为 2.57 g/cm³, 天然含水率均值为 3.81%。

对三组岩样进行 X 射线衍射测试 (XRD), 结果如图 2 所示和表 2 所列, 主要矿物有石英、方解石、赤铁矿、长石、白云母、蒙脱石、伊利石和高岭石。

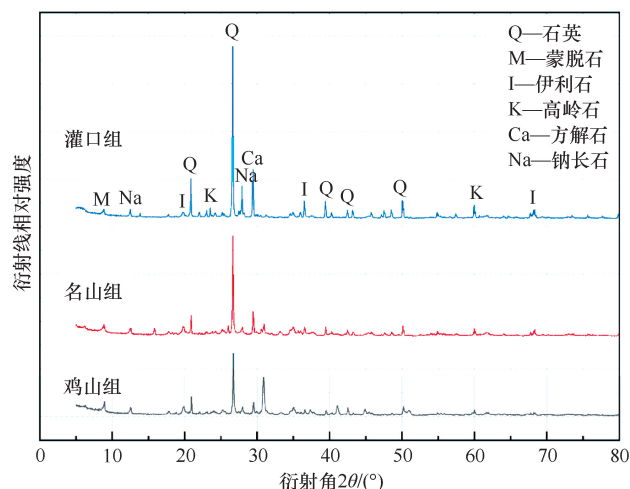


图 2 X 射线衍射图

Fig. 2 X-ray diffraction pattern

1.2 岩石吸水试验装置研发

目前, 岩石吸水装置多为测试岩石的毛细吸水和

表 2 红层泥岩矿物成分

Table 2 Mineral composition of red bedded mudstone

| 岩样编号 | 岩石矿物成分及含量 | | | | | | | |
|------|-----------|------|-----|------|------|-----|------|------|
| | 石英 | 方解石 | 赤铁矿 | 长石 | 白云母 | 蒙脱石 | 伊利石 | 高岭石 |
| MS-1 | 30.3 | 7.2 | 2.1 | 19.1 | 11.3 | 9.3 | 12.8 | 9.2 |
| MS-2 | 26.5 | 16.9 | 1.6 | 12.7 | 17.1 | 8.2 | 9.2 | 10.1 |
| MS-3 | 31.0 | 6.5 | 1.5 | 12.6 | 8.0 | 8.6 | 10.7 | 9.5 |
| GK-4 | 42.3 | 11.6 | 0.2 | 12.1 | 10.8 | 1.7 | 3.8 | 11.9 |
| GK-5 | 46.8 | 13.0 | 0.3 | 13.5 | 11.1 | 1.2 | 2.8 | 11.5 |
| GK-6 | 45.3 | 14.3 | 0.7 | 6.8 | 12.7 | 2.0 | 3.2 | 12.1 |
| JS-7 | 37.4 | 9.6 | — | 13.7 | 10.1 | 3.8 | 12.8 | 11.1 |
| JS-8 | 36.2 | 5.2 | 0.5 | 16.4 | 6.3 | 2.7 | 15.6 | 11.2 |
| JS-9 | 36.7 | 7.2 | — | 12.9 | 8.7 | 2.2 | 13.9 | 10.9 |

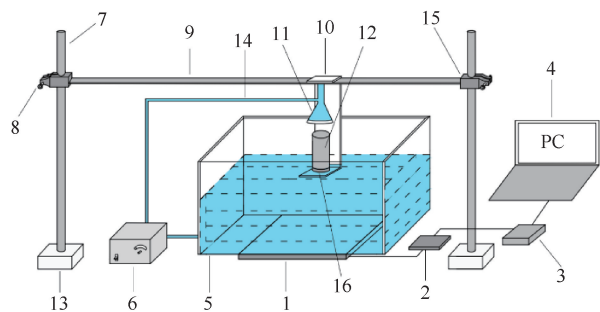
有压吸水,模拟岩石在地下水环境下的吸水特性时,不能调节和准确设定岩石吸水时的不同浸润深度;模拟岩石在降雨条件下水的渗流时,不能精确调节渗流量的大小。为此,开展了岩石毛细吸水量实时测量装置的自主设计,该装置可更准确地模拟岩石在自然环境中的吸水情况,并通过调节水泵和固定螺丝实现岩石与地下水和雨水渗流同时接触并发生水岩反应。岩石在吸水过程中通过称重模块、数据传输模块、数据记录模块实现岩石吸水量的实时测量和记录,得到更精确的岩石吸水规律曲线,有效减小了试验误差。

岩石吸水量实时测量装置如图3所示。

(1)吸水部分:可通过螺钉调节试件高度位置,实时模拟岩石的浸润高度。

(2)环境模拟部分:可模拟岩石在不同环境条件下的吸水方式。

(3)数据采集部分:可对岩石实时吸水量进行高精度测量并记录。



1—压力传感器;2—转换器芯片HX711;3—数据模块Arduino;
4—PC端;5—水箱;6—水泵;7—支座;8—松紧螺钉;9—横梁;
10—透明亚克力板;11—花洒组成;12—试件;13—底座;
14—橡胶软管;15—固定器;16—透水石

图3 岩石吸水实时测量装置

Fig. 3 Real-time measurement device for rock water absorption

该试验装置可通过模拟降雨条件进行有压吸水:

(1)打开高精度实验室水泵(根据降雨情况,设

计可调节流速范围为40~260 mL/min),多档位精确稳定调节水泵的抽水量,通过橡胶软管传导至分流花洒,同时可调节花洒档位控制水流大小,更为准确模拟在降雨环境下不同渗流量时岩石的吸水情况。

(2)将称重模块置于亚克力板与横梁之间,对泥岩的吸水量进行直接测量,并使用水泵进行水循环,可进行岩石长时间的吸水试验。

为模拟红层泥岩在地下水条件下的毛细吸水过程,基于该试验装置设计了红层泥岩毛细吸水试验:

(1)将标准圆柱体岩样置于105℃烘箱中干燥24 h,烘干后取出置于干燥皿中冷却至室温。

(2)将适量蒸馏水注入水箱,水面与定制亚克力板底部齐平。

(3)将烘干后的岩样置于定制亚克力板中,岩样下方放置透水石,对水箱顶部进行封闭处理,打开电脑端的数据记录软件,设置数据记录时间为10 min记录一次。

(4)通过调整松紧螺丝进而精确调整横梁的高度,将高度调节至水面刚好没过透水石顶面,模拟岩石在与地下水接触时的吸水情况。

(5)当岩样开始进行毛细吸水时,测量水箱整体的水分减少量,采用C3高精度(0.001 g)称重测量装置,通过Arduino传感器实现每10 min记录一次岩石吸水数据,实时监测岩石的吸水量,避免间接测量吸水量所造成的试验误差。

2 试验结果与讨论

2.1 红层泥岩毛细吸水特征

三组红层泥岩岩样的毛细吸水试验结果如表3所列,采用吸水率-时间曲线表征其吸水趋势,吸水率定义为红层泥岩的吸水质量与样品的干燥质量之比,由毛细吸水试验得到三组红层泥岩试样的毛细吸水率随时间变化的动态曲线如图4所示。

表3 红层泥岩毛细吸水情况

Table 3 Capillary water absorption of red bedded mudstone

| 岩石样品 | 干燥质量/g | 吸水时间/min | 吸水量/g | 吸水率/% | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>R</i> ² |
|------|--------|----------|-------|-------|----------|-----------|----------|-----------------------|
| MS-1 | 488.21 | 4 320 | 95.39 | 19.54 | -23.052 | 4 222.771 | 26.342 | 0.975 |
| MS-2 | 492.40 | 4 320 | 77.80 | 15.23 | -16.170 | 2 635.583 | 17.931 | 0.981 |
| MS-3 | 490.74 | 4 320 | 59.47 | 12.12 | -13.520 | 3 971.940 | 16.040 | 0.954 |
| GK-4 | 475.12 | 4 320 | 27.31 | 5.75 | -5.099 | 1 450.520 | 5.704 | 0.980 |
| GK-5 | 462.20 | 4 320 | 15.20 | 3.29 | -3.167 | 1 503.645 | 3.317 | 0.982 |
| GK-6 | 423.96 | 4 320 | 30.44 | 7.18 | -6.820 | 962.570 | 6.860 | 0.990 |
| JS-7 | 494.11 | 4 320 | 97.70 | 19.77 | -19.422 | 1 921.756 | 21.138 | 0.988 |
| JS-8 | 490.00 | 4 320 | 75.70 | 15.45 | -15.681 | 2 034.533 | 16.694 | 0.991 |
| JS-9 | 493.53 | 4 320 | 93.00 | 18.84 | -17.352 | 1 214.083 | 18.174 | 0.992 |

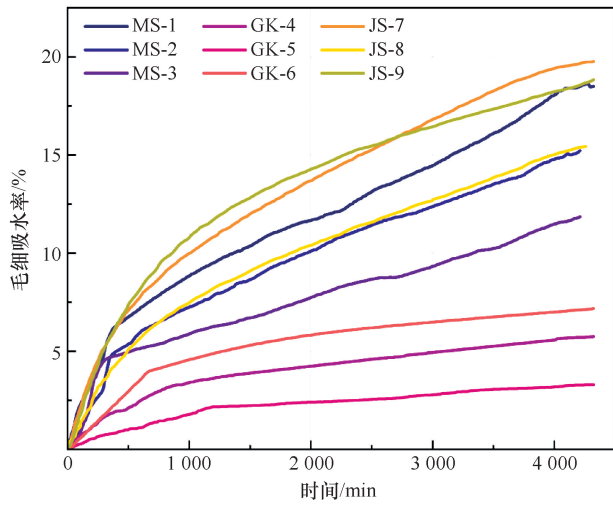


图4 红层泥岩毛细吸水率-时间曲线

Fig. 4 Capillary water absorption rate-time curve for red bedded mudstone

由毛细吸水动态变化曲线可知,三组岩样的吸水率虽然有较大差异,但其随时间变化趋势具有相似性,均为吸水率不断增加,最后趋于稳定。将红层泥岩的毛细吸水率变化分为两个阶段:(1)快速吸水阶段(500~1 300 min):该阶段内毛细吸水率增长较快,吸水特征曲线呈上凸;(2)缓速吸水阶段:该阶段内毛细吸水率不断增加,但吸水率的增长速度减慢,最终保持稳定不变,即岩样吸水达到饱和状态。因此,红层泥岩的毛细吸水速率随着时间的增长由快转慢。

三组岩样的毛细吸水动态趋势一致,但是其吸水率却有较大差异。其中,灌口组岩样的快速吸水阶段持续时间较长,持续750~1 300 min左右进入缓速吸水阶段,且缓速吸水阶段持续时间很短,随即快速进入饱和状态;名山组岩样的快速吸水阶段持续时间最短,在500 min左右进入缓速吸水;鸡山组岩样在750 min左右由快速吸水阶段转入缓速吸水阶段。鸡山组岩样吸水率最大,平均吸水率为18.02%;名山组岩样次之,平均吸水率为15.63%;灌口组岩样吸水率最低,平均吸水率为5.35%。

2.2 红层泥岩吸水特征函数

对红层泥岩的毛细吸水率-时间($w-t$)曲线进行回归分析,其负指数回归拟合函数为

$$w(t) = ae^{(-t/b)} + c \quad (1)$$

式中, $w(t)$ 为泥岩的吸水率; t 为泥岩的吸水时间; a 、 b 、 c 分别为岩石吸水率相关的拟合参数,相关拟合参数如表3所列。

由上式可知,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $w(t)$ 将趋于 c ,即为

岩石的饱和吸水率。对 $w(t)$ 基于时间 t 求导,可得红层泥岩的毛细吸水速率为

$$\frac{dw(t)}{dt} = -\frac{a}{b}e^{-t/b} \quad (2)$$

由式(2)可知红层泥岩的毛细吸水率基于时间的导数大于0,即毛细吸水率随着时间的增大而增大。对式(2)继续求得

$$\frac{d^2w(t)}{dt^2} = \frac{a}{b^2}e^{-t/b} \quad (3)$$

由式(3)可知,红层泥岩的毛细吸水率二阶导数小于0,即毛细吸水速率随着时间的增长逐渐减慢,最终趋于0,即红层泥岩毛细吸水将进入稳定状态。

黏土矿物与微观孔隙结构等多种因素综合影响下,毛细吸水机制随吸水时间发生变化。在快速吸水阶段,水分主要填充岩样内部孔径较大的连通孔隙,并与吸水性最强的黏土矿物相结合,此时毛细吸水速率最大;而在缓速吸水阶段,吸水量随时间逐步增加,未被水填满的孔隙空间逐渐变小,孔隙通道也变得更狭窄和曲折,导致水分在岩样内的运移难度加大。因此,红层泥岩毛细吸水速率随时间增加而逐渐下降^[17]。

2.3 红层泥岩毛细吸水系数分析

毛细吸水试验中,通常采用毛细吸水系数评估不同研究对象的毛细吸水性。本文使用单位面积累积吸水量(kg/m^2)与时间平方根($\text{s}^{1/2}$)的比值定量评估红层泥岩的毛细吸水特性,如图5所示。对于理想的多孔材料,单位面积累积吸水量(kg/m^2)与时间平方根($\text{s}^{1/2}$)的关系曲线可分为两个阶段:快速增长阶段和缓慢增长阶段。前人已提出多种方法计算多孔材料的毛细吸水系数,本文根据Lucas Washburn(L-W)方程进行了优化^[27],表达式为

$$\frac{m_i - m_d}{A} = A_{cap}k \left(0.5103 - 1.3849e^{-\frac{1}{k^2-1}} \right)^{0.3403} + k_1 \quad (4)$$

式中, k 、 k_1 分别为与材料相关的拟合参数; A_{cap} 为多孔材料的毛细吸水系数。

该模型通过拟合毛细吸水量试验数据,从具有不规则毛细管吸收形状的材料中获取毛细吸水系数。经过拟合,名山组岩样的毛细吸水系数 A_{cap} 分别为:12.643、7.668、7.225;灌口组岩样的毛细吸水系数分别为:0.841、0.522、1.026;鸡山组岩样的毛细吸水系数分别为:4.477、3.080、4.135。如图6所示,不同地区红层泥岩的毛细吸水系数与毛细吸水率呈现良好的正相关性。因此,可通过研究红层泥岩毛

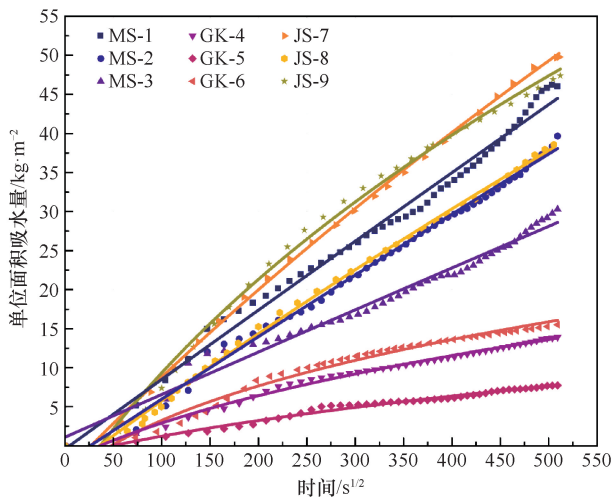


图5 红层泥岩毛细吸水量-时间关系

Fig. 5 Capillary water uptake of red bedded mudstone-time plot

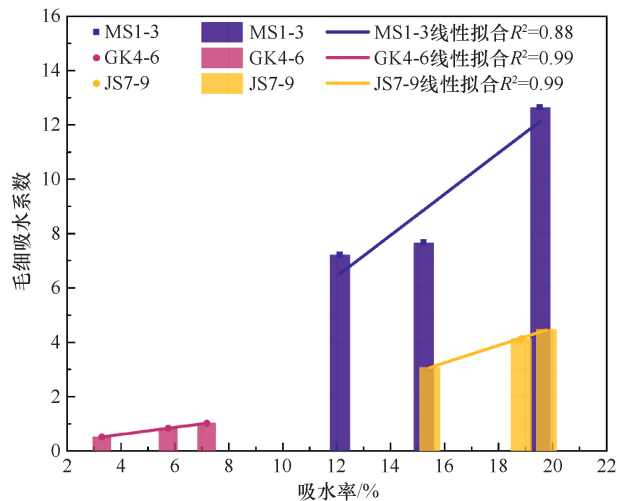


图6 红层泥岩毛细吸水率与吸水系数关系

Fig. 6 Relationship between capillary water absorption and absorption coefficient of red bedded mudstone

细吸水系数与毛细吸水率的关系, 进行毛细吸水率预测。

2.4 红层泥岩毛细吸水高度分析

如图7所示, 显示了不同地区红层泥岩随时间变化的毛细吸水高度情况。随着时间的增长, 红层泥岩毛细吸水过程中的润湿锋呈现不规则增长。红层泥岩

中的黏土矿物与水接触后, 产生非均匀膨胀, 导致其在毛细吸水过程中产生不均匀裂缝。

黏土矿物主要以伊利石和蒙脱石为主。其中, 蒙脱石表面的电荷作用会吸附水分子, 使其表面形成具有一定厚度的水膜, 且晶胞与晶胞之间以 O^{2+} 接触, 不够紧密, 可以吸收无定量的水分子, 导致矿物体积



图7 红层泥岩毛细吸水高度

Fig. 7 Height of capillary water absorption of red bedded mudstones

增大。伊利石具有很大的比表面积, 在伊利石表面的水分子会受到其表面电荷的吸引作用, 从而在表面形成一层吸附水膜^[28]。如图 8 所示, 在红层泥岩的毛细吸水过程中, 尽管不同红层泥岩润湿峰到达顶峰的时间不同, 但毛细吸水高度随时间的平方根的变化呈现良好的线性关系为

$$h \propto s^{1/2} \quad (5)$$

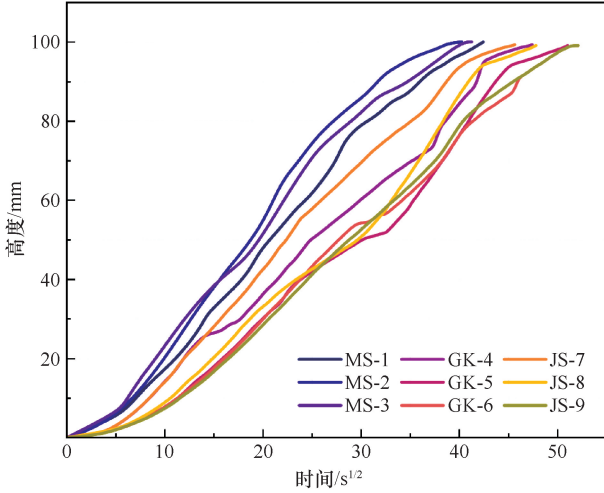


图 8 红层泥岩毛细吸水高度变化

Fig. 8 Variation of capillary water absorption height in red mudstone

3 毛细吸水量时程模型

3.1 泥岩毛细吸水量时程模型

目前, 针对不同类别多孔材料的吸水模型, 主要包括混凝土、土壤等^[29], 针对泥岩毛细吸水模型的研究较少。与时间相关的流体吸收定律的一般表达式^[30]为

$$m = K\sqrt{t} \quad (6)$$

式中, m 为单位面积多孔材料的吸水质量; K 为该材料的毛细吸水系数。该公式代表了毛细吸水过程中的基本动力学, 表示多孔材料每单位面积经过时间的平方根增加所吸收水的质量。

毛细吸水系数 K 是评价多孔材料吸水能力的关键性指标^[31]。为了评估毛细吸水系数 K , 采用多孔材料单位面积的累计吸水量 (kg/m^2) 与时间的平方根的比值来定量评价泥岩的毛细吸水能力。对于理想的多孔材料, 毛细吸水曲线可以分为两个阶段, 即快速吸水阶段和缓速吸水阶段。而多孔材料的毛细吸水系数为快速吸水阶段直线的斜率, 材料的毛细吸水系数为

$$K = \frac{m_t - m_0}{A\sqrt{t}} \quad (7)$$

式中, m_t 为多孔材料 t 时刻的吸水质量; m_0 为材料吸水前的质量; A 为材料与水接触面的表面积。

在研究多孔材料的毛细吸水时, 一般假设直圆管中的流体流动是稳定的层流, LUCAS 和 WASHBURN 分析了影响单个等截面气体饱和管中毛细管渗吸的动力学因素, 并推导出经典的 L-W 方程。其假设为: 通过考虑静水压力 P_h 、不平衡大气压力 P_a 和毛细管压力 P_c 的相互作用, 不可压缩牛顿流体遵循哈根-泊肃叶定律。

其中 L-W 方程是定量分析多孔材料中毛细水上升的基础, 但该方程所计算的毛细水上升高度与试验观察所得具有一定差距。为此, 本文通过考虑矿物成分对毛细吸水量的影响, 提出基于 L-W 方程的红层泥岩的毛细吸水量时程模型。

岩石毛细吸水时的体积流量 q 可用 Hagen-Poiseuille 方程表示为

$$q = \frac{\pi r^4 P_c}{8\mu L} \quad (8)$$

式中, P_c 为毛细管压力; r 为毛细管半径; L 为毛细管的长度; μ 为水的黏度。

假设毛细管是均匀和圆形的, 根据 YANG-LAPLACE 方程, P_c 表示为

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (9)$$

式中, θ 为岩石与水的接触角; σ 为液体的表面张力。

基于上述方程, 毛细管中的液体的吸收高度 h 和时间的关系为

$$h(t) = \sqrt{\frac{r\sigma \cos \theta}{2\mu} t} \quad (10)$$

将岩石的多孔性表示为一束相同半径 r 的毛细管。然后考虑到 L-W 的毛细水上升方程, 在时间 t 被这些毛细管吸收的水的质量可以由下式计算

$$m = \phi \rho \sqrt{\frac{r\sigma \cos \theta}{2\mu} t} \quad (11)$$

式中, ϕ 为材料孔隙率; ρ 为液体密度。

基于式(6)和式(7), 则毛细吸水系数为

$$K = \phi \rho \sqrt{\frac{r\sigma \cos \theta}{2\mu}} \quad (12)$$

研究中发现, 岩石中的黏土矿物含量与岩石的吸水性具有较高的相关性, 且对于岩石的吸水有较好的促进作用, 故对于岩石的毛细吸水方程需考虑黏土矿物含量的影响, 则岩石基于孔隙和黏土矿物含量的吸水量时程模型为

表4 红层泥岩试样物理参数

Table 4 Physical parameters of red bedded mudstone specimens

| 物理参数 | MS-1 | MS-2 | MS-3 | GK-4 | GK-5 | GK-6 | JS-7 | JS-8 | JS-9 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 有效孔隙率/% | 16.97 | 13.74 | 12.25 | 5.32 | 4.15 | 6.27 | 20.35 | 10.21 | 16.24 |
| 中值孔半径/ μm | 0.96 | 0.87 | 0.92 | 1.61 | 1.12 | 1.43 | 0.25 | 0.12 | 0.65 |
| 接触角/ $^{\circ}$ | 30.15 | 30.17 | 30.21 | 32.98 | 33.15 | 31.25 | 31.12 | 32.39 | 31.67 |
| 黏土矿物含量/% | 33.23 | 29.11 | 31.42 | 21.88 | 19.41 | 17.91 | 29.63 | 25.30 | 27.32 |

$$m = \alpha\lambda\sqrt{t} + \rho\phi\sqrt{\frac{r\sigma\cos\theta}{2\mu}t} \quad (13)$$

式中, α 为与岩石岩性相关的参数; λ 为岩石的黏土矿物含量。

根据式(13), 岩石吸水过程中随时间增长的吸水量为

$$m_t = \alpha\lambda S\sqrt{t} + S\rho\phi\sqrt{\frac{r\sigma\cos\theta}{2\mu}t} \quad (14)$$

式中, S 为岩石与水的接触面积。

3.2 模型参数

在试验环境温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, 水的物理参数为: 水的密度 ρ 为 0.998 g/cm^3 , 水的表面张力 σ 为 $72.7\times 10^{-3}\text{ N/m}$, 则液体的黏度 μ 为 $1.002\times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

岩石的孔隙率为

$$\phi_i = \frac{V_i}{V_s + V_i} \quad (15)$$

岩石有效孔隙率为

$$\phi = \frac{V_e}{V_s + V_i} \quad (16)$$

式中, V_i 为岩石内部孔隙体积; V_s 为岩石固体体积; V_e 为岩石内部有效孔隙体积。

采用压汞测试和接触角测试得到红层泥岩物理参数如表4所列。当孔隙直径小于 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 时, 孔隙类型为微毛细管孔隙, 其特点是: 在正常地层条件下流体不易在其中流动。因此大于 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 的孔径为有效吸水孔径, 故将孔径 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 作为吸水孔径的界限点。

压汞测试中毛细管半径与汞压力的关系为

$$P = \frac{-2\sigma_1\cos\theta_i}{r} \quad (17)$$

式中, σ_1 为汞表面张力; θ_i 为汞与固体材料的接触角; P 为入汞压力; r 为毛细孔隙的半径。

通过泥岩与水接触角测试, 测量水分与泥岩表面的接触角, 来探究其亲水性, 如图9所示。其中MS-1、MS-2、MS-3泥岩的平均接触角为 30.18° , GK-4、GK-5、GK-6泥岩平均接触角为 32.46° , JS-7、JS-8、JS-9泥岩的平均接触角为 31.73° 。

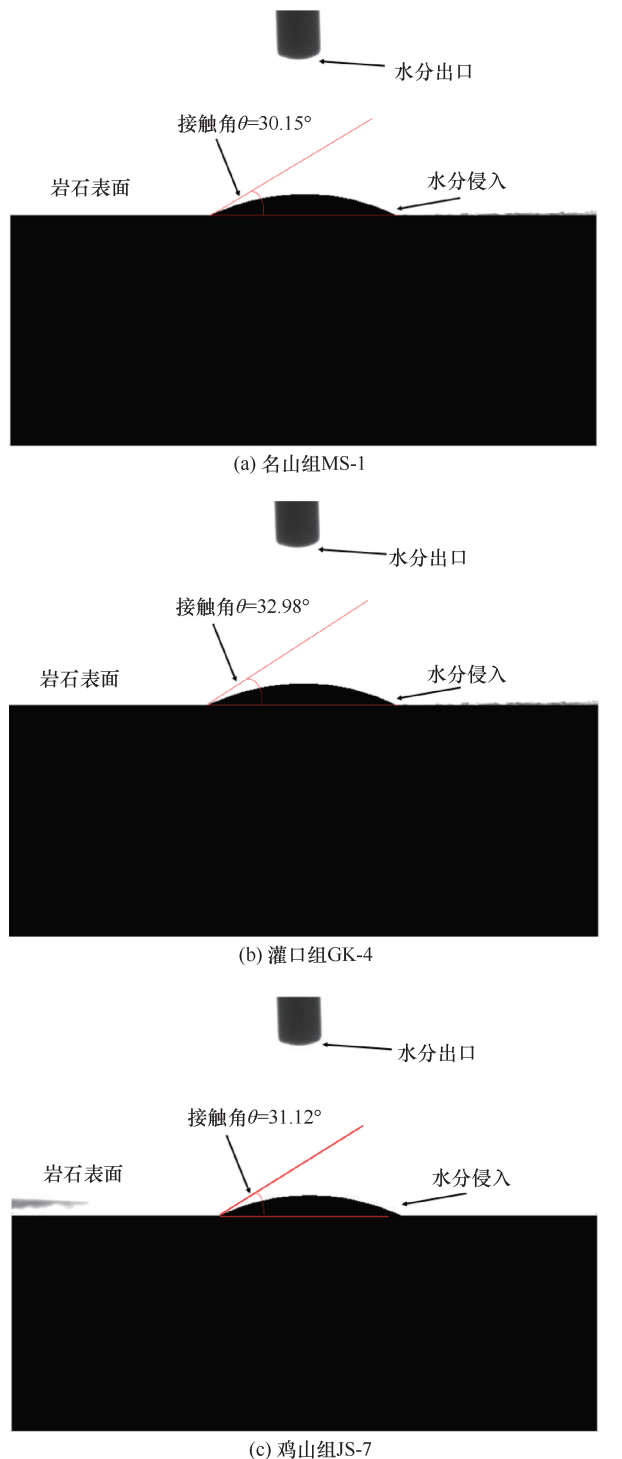


图9 红层泥岩接触角测试图像

Fig.9 Contact angle test image of red bedded mudstone

3.3 模型验证

研究发现, 模型参数与岩石的矿物含量及岩性有一定关系, 故与岩石的吸水性也有一定的相关性。基于上述试验数据, 对红层泥岩的毛细吸水性 $m-t$ 曲线进行拟合并验证。

如图10—图12所示, 基于模型分别对MS-1和MS-2、GK-4和GK-5、JS-7和JS-8试验数据进行拟合, 效果均为优秀, 分别取 α 平均值为 -2.55×10^{-4} 、 -2.69×10^{-4} 、 2.87×10^{-4} , 并分别代入MS-3、GK-6、JS-9得到 m 的预测值分别为 2.91 g/cm^2 、 2.91 g/cm^2 、 4.95 g/cm^2 , 误差分别为3.6%、4.1%、5.2%, 效果较为良好。

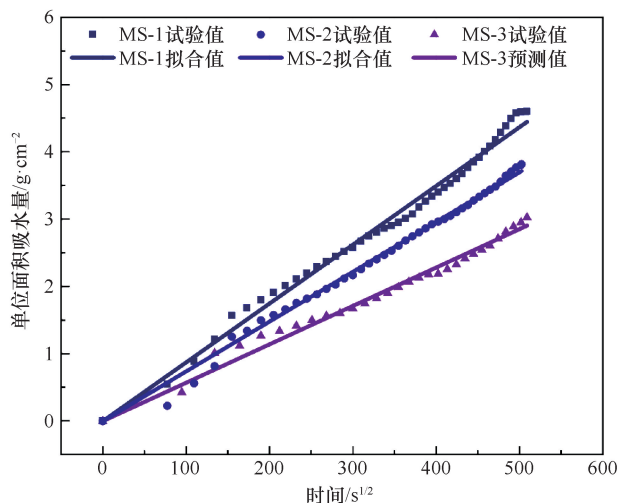


图10 名山组毛细吸水拟合

Fig. 10 Capillary water absorption fits for Mingshan formation

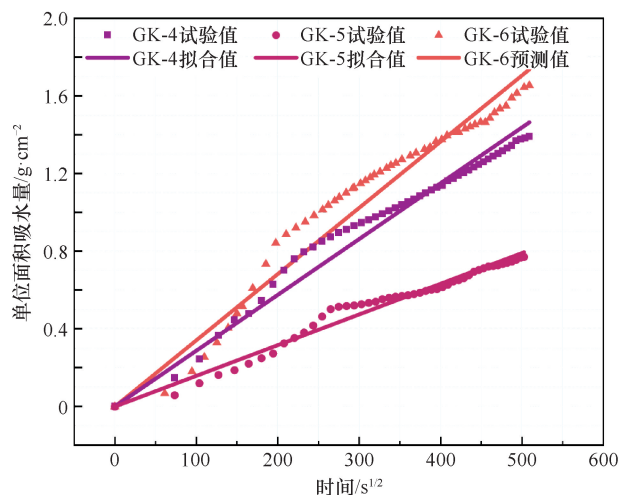


图11 灌口组毛细吸水拟合

Fig. 11 Capillary water absorption fits for Guankou formation

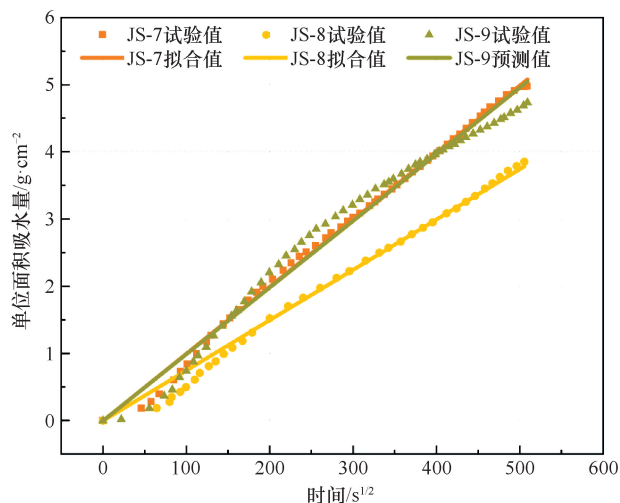


图12 鸡山组毛细吸水拟合

Fig. 12 Capillary water absorption fits for Jishan formation

对比研究发现: 鸡山组、名山组和灌口组三组不同地区红层泥岩毛细吸水试验数据和模型预测数据具有较好的相关性, 故该模型能够有效进行不同地区红层泥岩的毛细吸水曲线拟合以及吸水量预测。

4 红层泥岩毛细吸水特性影响因素

4.1 红层泥岩微观结构变化

分别在进行毛细吸水前后的红层泥岩岩样上, 选取距毛细吸水面三分之一高度位置, 且成岩结构良好和表面无明显裂隙的区域进行径向切片制样, 然后通过扫描电镜测试(SEM), 并选取2 000倍条件下的微观图像进行对比分析, 观察毛细吸水前后的微观孔隙变化, 如图13所示。

名山组红层泥岩毛细吸水前, 试样表面存在层状结构, 有部分平片状矿物, 表面凹凸不平, 存在较为明显的孔隙分布, 且主要以粒间孔为主, 有少量粒缘孔; 毛细吸水后, 出现贯通性微裂缝, 大孔隙存在于裂缝之中, 伴随着片状矿物的膨胀, 矿物层间吸水后水膜增厚, 使矿物之间的间距增大, 层状矿物间发生分离, 致使微观结构发生破坏。

灌口组红层泥岩毛细吸水前, 孔隙结构较为松散, 表面有较大固体颗粒分布、若干微小固体颗粒成碎屑状散落分布和若干微孔隙, 该孔隙主要以气胀孔为主, 少量粒缘孔; 毛细吸水后, 孔隙内部及边界上的部分填充物流失, 致使微孔隙变成大孔隙, 矿物与水接触之后, 矿物间发生了层间分离, 并无明显的新孔隙产生, 结构破坏性较小。

鸡山组红层泥岩毛细吸水前, 胶结状态良好, 结构较为致密, 呈现片状骨架结构, 属于平片叠聚体单

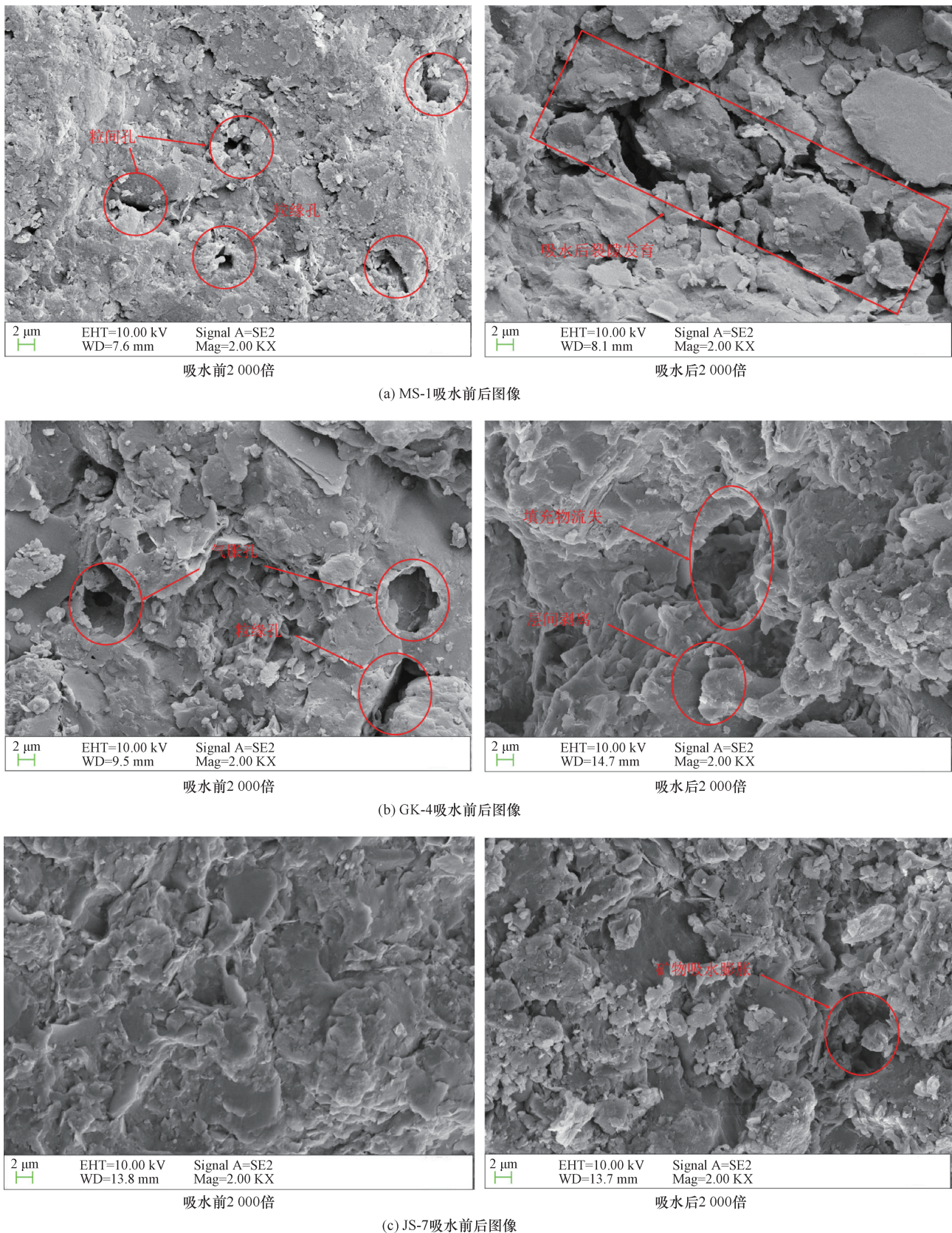


图 13 红层泥岩毛细吸水前后微观结构特征

Fig. 13 Microstructural characteristics of red bedded mudstone before and after capillary water absorption

元, 片状单元呈现微卷曲状; 毛细吸水后, 整体变得

更加松散, 部分矿物吸水膨胀, 导致矿物间产生若干

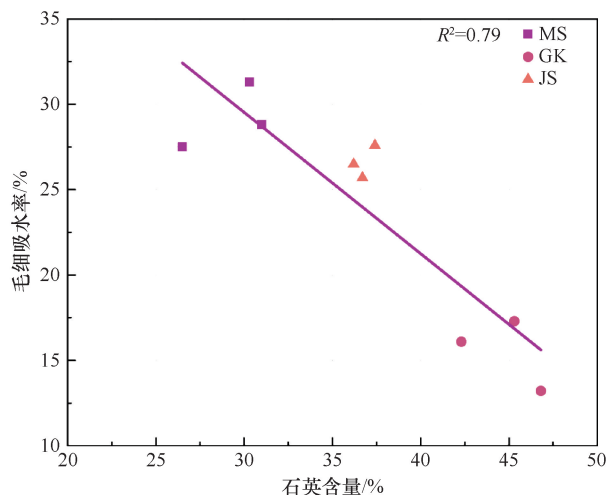
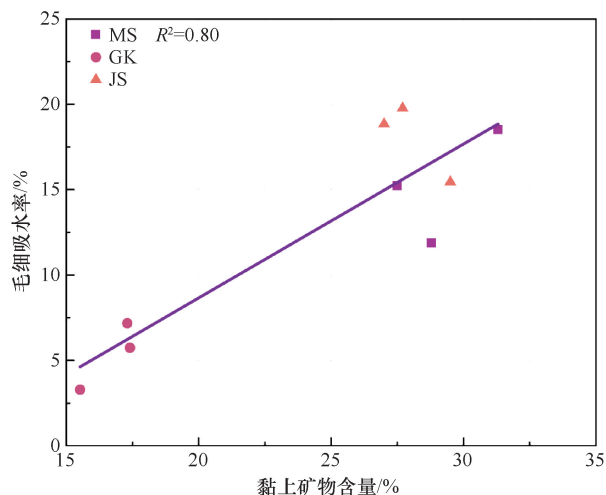


图 14 红层泥岩毛细吸水率与矿物成分关系

Fig. 14 Relationship between capillary water absorption and mineralogical composition of red bedded mudstone

不规则形状的微裂隙与微孔隙, 试样表面分布了少量碎屑颗粒, 且由致密结构变成絮状结构, 红层泥岩的微观孔隙结构被破坏。

4.2 红层泥岩吸水特性与矿物成分相关性

基于 XRD 测试结果, 针对红层泥岩毛细吸水状态下, 吸水率与黏土矿物含量、石英含量的相关性进行详细分析, 如图 14 所示。

红层泥岩中黏土矿物含量 ($R^2=0.80$) 与毛细吸水率呈现良好的正相关性, 而石英含量 ($R^2=0.79$) 与毛细吸水率之间呈现负相关性, 具有一定的抑制效果。这表明黏土矿物会促进红层泥岩进行毛细吸水, 且在红层泥岩所含矿物中, 黏土矿物是影响其毛细吸水特性的关键因素。当黏土矿物与水接触后, 水分之间交换阳离子的作用较强, 水分子更容易进入矿物晶格。水分进入黏土矿物后, 其微观内部结构发生变化并伴随一定的膨胀性, 继而在矿物的各个方向上产生不均匀膨胀应力, 致使红层泥岩内部产生长短不一的微裂隙, 为水分增加了传输通道, 导致毛细吸水率上升。当红层泥岩中石英含量较高时, 水分很难与石英发生反应, 故而石英对红层泥岩毛细吸水的抑制作用随其含量增多而增强。

毛细吸水条件下, 三组岩样的黏土矿物含量与吸水率有一定的相关性, 如图 15 所示。蒙脱石含量 ($R^2=0.59$)、伊利石含量 ($R^2=0.75$) 与毛细吸水率均呈现较好的正相关性, 具有一定的促进作用, 且伊利石的促进作用强于蒙脱石。而高岭石含量 ($R^2=0.66$) 与红层泥岩毛细吸水率呈现负相关性, 具有一定的抑制效果。

4.3 红层泥岩毛细吸水微观机理

如图 16 所示, 红层泥岩吸水阶段可分为水分吸附和水分迁移两个阶段: 水分吸附阶段为水分由红层泥岩中开口孔隙进入内部, 与黏土矿物进行接触和吸附; 水分迁移阶段为黏土矿物吸水膨胀产生的各向异性膨胀应力、毛细作用和部分闭口孔破坏, 导致微裂隙和有效空隙增加, 导致水分大量迁移、侵入。

水分吸附阶段, 当岩样与水接触后, 毛细吸水时的驱动力主要由毛细作用力、重力和渗透压力组成。但是由于毛细管通道的曲折性和吸收水分不均匀分布在岩样内部, 毛细吸水时的重力影响可忽略不计。水分通过岩样底部的开口孔隙自下而上进入并充满内部, 且与黏土矿物接触时会在矿物表面形成一层吸附水膜: 蒙脱石与伊利石吸附水分于晶体内部, 当矿物表面积较大时, 表面会产生吸附水膜, 造成晶体膨胀; 高岭石主要吸附水分于表面, 产生厚厚的吸附水膜后, 矿物体积膨胀。

水分迁移阶段, 由于黏土矿物膨胀会产生各向异性膨胀应力, 因此在吸水过程中会产生某一方向上的拉应力, 导致黏土基质内产生新的孔隙与次生裂隙; 由于毛细作用, 水分不断增加, 各矿物之间的相互作用减弱, 黏土矿物表面吸附水膜也逐渐增厚; 岩样部分闭口孔会由于难以抵抗逐渐增强的作用力而发生破坏。由于微裂隙的增加、毛细作用和部分闭口孔的破坏, 水分迁移通道和空间增加, 导致水分大量迁移、侵入, 直至红层泥岩中有效孔隙与微裂隙填充水分达到饱和。

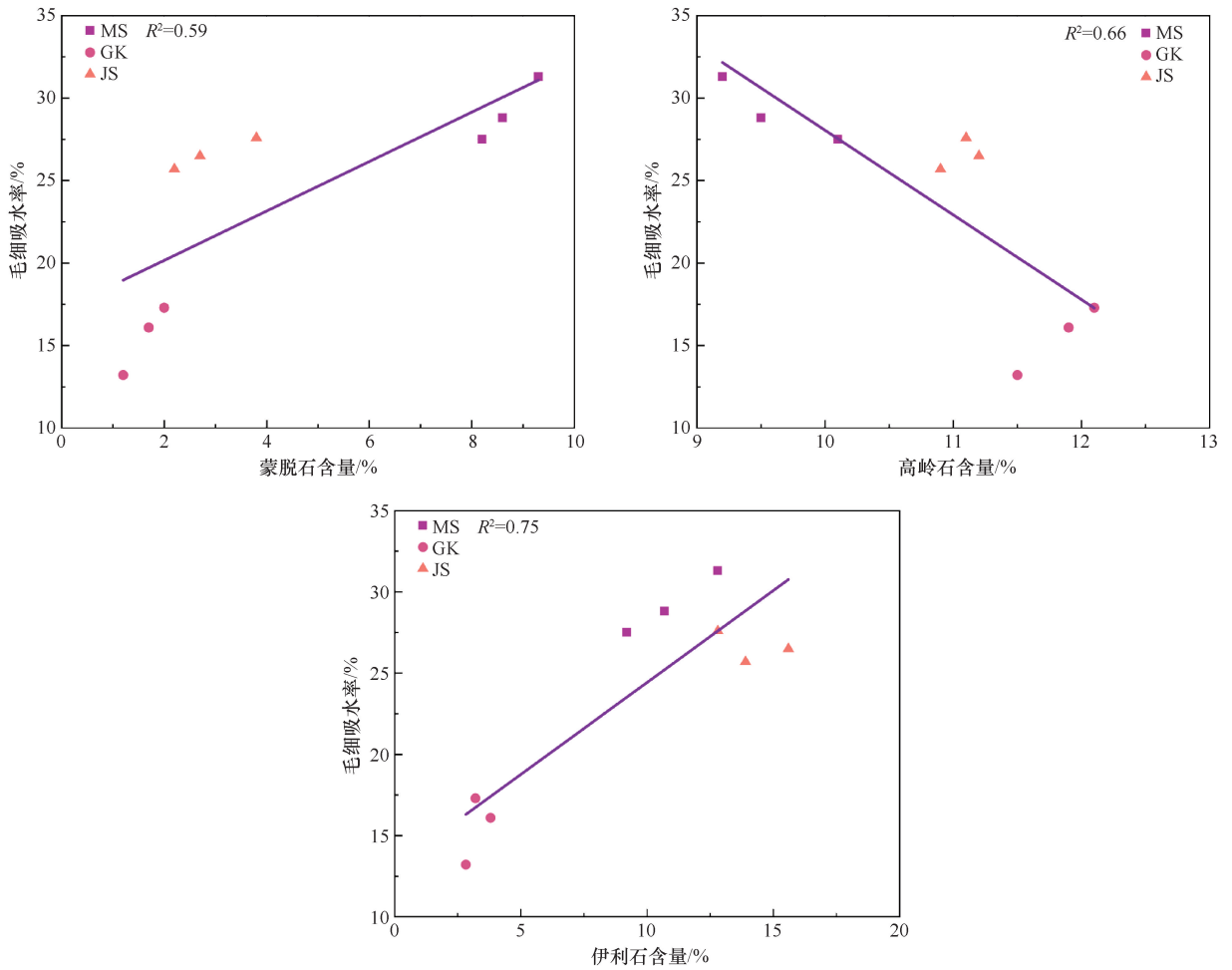


图 15 红层泥岩毛细吸水率与不同黏土矿物关系

Fig. 15 Capillary water absorption of red bedded mudstone in relation to different clay minerals

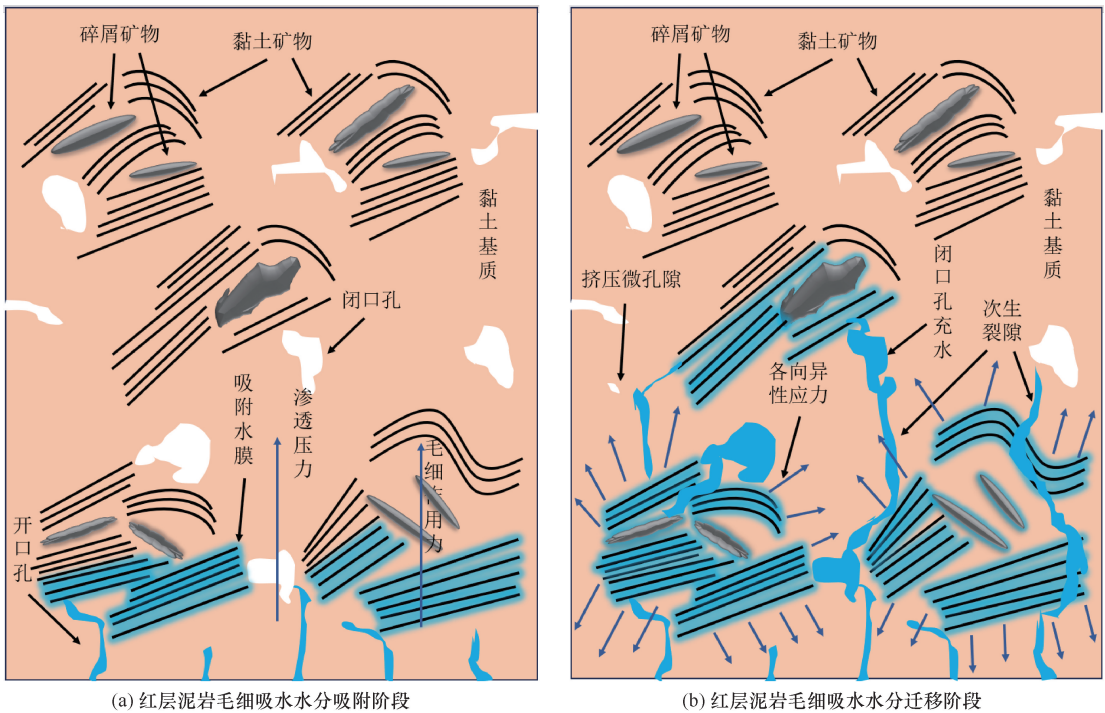


图 16 红层泥岩毛细吸水示意(剖面)

Fig. 16 Schematic representation of capillary water absorption in red bedded mudstone (section)

5 结论

(1) 毛细吸水试验表明, 不同地区红层泥岩的毛细吸水规律及趋势是一致的。毛细吸水速率不断减小, 分为快速吸水和缓速吸水两个阶段, 采用负指数函数可有效拟合红层泥岩的毛细吸水曲线。

(2) 通过红层泥岩毛细吸水试验拟合得到毛细吸水系数, 发现毛细吸水系数与毛细吸水率呈正相关性。通过监测红层泥岩毛细吸水时的湿润峰变化, 发现毛细吸水高度与时间的平方根呈现良好的线性关系。

(3) 基于 L-W 多孔介质理论方程和多孔介质毛细吸水理论, 考虑矿物成分对毛细吸水量的影响, 提出红层泥岩的毛细吸水量时程模型。经验证, 该模型能有效对红层泥岩的毛细吸水量进行实时预测, 可为相关研究提供参考。但对于模型中关于红层泥岩毛细吸水性的参数, 还需进一步研究。

(4) 水分进入红层泥岩后, 主要吸附于黏土矿物表面, 并产生不同方向上的不均匀应力, 造成微观结构的破坏, 结构由致密状态转变为松散状态。相关性分析结果表明, 石英($R^2=0.79$)、高岭石($R^2=0.66$)对其毛细吸水率起抑制作用, 蒙脱石($R^2=0.59$)和伊利石($R^2=0.75$)起促进作用。

(5) 水分吸附阶段, 水分接触黏土矿物后, 在表面形成一层吸附水膜; 水分迁移阶段, 吸附水膜变厚导致黏土矿物发生膨胀, 产生膨胀应力和拉应力, 导致黏土基质内产生新的孔隙和次生裂隙, 并在毛细作用下, 减小矿物间的作用, 增加吸水量。

参考文献 (References):

[1] 张永安, 李峰, 陈军. 红层泥岩水岩作用特征研究[J]. 工程地质学报, 2008(1): 22-26.
ZHANG Yongan, LI Feng, CHEN Jun, et al. Analysis of the interaction between mudstone and water[J]. Journal of Engineering Geology, 2008(1): 22-26.

[2] 张海康, 肖曦, 王展, 等. 红层河谷区泥岩水化损伤特性试验及本构模型研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(2): 147-150+175.
ZHANG Haikang, XIAO Xi, WANG Zhan, et al. Experiment of water-rock damage characteristics of red mudstone in foundation pit and construction of constitutive model[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(2): 147-150+175.

[3] 王智猛. 红层泥岩及其改良土壤筑高速铁路路基适应性及工程技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
WANG Zhimeng. Study on Applicability and Technology for Filling Subgrade Using Red-mudstone and Improved Soil in High-speed Railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.

[4] 李明洪. 成安渝高速公路斜坡地段红层填料路基病害发生机理

与治理措施[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.

LI Minghong. Disease Mechanism and Treatment Measures of Red Filling Subgrade in the Declivity Sections of Chengdu-Anyue-Chongqing Expressway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.

[5] 黄宏伟, 车平. 泥岩遇水软化微观机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007(7): 866-870.
HUANG Hongwei, CHE Ping. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of mudstone [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007(7): 866-870.

[6] 王骑虎. 甘肃红层工程地质特性与边坡稳定性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
WANG Qihu. Study on Engineering Geological Characteristics and Slope Stability of Red Beds in Gansu Province[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.

[7] 刘杰. 矿物组分对泥岩物理力学性质影响研究及工程应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
LIU Jie. Effect of Mineral Composition on Physical and Mechanical Properties of Mudstone and Its Engineering Application [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.

[8] 刘昌栋. 隧道工程泥岩膨胀劣化机理及数值模拟方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2023.
LIU Changdong. Research on Mechanism and Numerical Simulation Method of Mudstone Expansion and Deterioration in Tunnel Engineering[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2023.

[9] 李明. 新近系膨胀性泥岩单线铁路隧道变形规律与防控措施研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
LI Ming. Research on Deformation Law and Prevention And Control Measures of Neogene Expansive Mudstone Single Track Railway Tunnel[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.

[10] 刘雨欣. 干湿循环-渗流联合作用下巴东组粉砂质泥岩强度劣化机理研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2023.
LIU Yuxin. Experimental Research on the Mechanism of Strength Deterioration of Silty Mudstone of Badong Formation Under the Combined Action of Wet-Dry Cycles and Seepage [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2023.

[11] 孟朕, 吴琼, 鲁莎, 等. 基于 CT 扫描的巴东组易滑岩组微观结构劣化研究[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(4): 11-23+45.
MENG Zhen, WU Qiong, LU Sha, et al. Investigation on microstructure deterioration of sliding-prone formation in Badong Formation based on CT scanning [J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(4): 11-23+45.

[12] 郝耐, 王永亮, 秦新展, 等. 莫高窟泥岩吸水特性及盐分富集试验研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(7): 308-310.
HAO Nai, WANG Yongliang, QIN Xinzhan, et al. Experimental study on water absorption characteristic and salt enrichment of mudstone at Mogao Grottoes[J]. Coal Technology, 2018, 37(7): 308-310.

[13] 柳培玉. 辽宁大强煤矿深部软岩气态水吸附实验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.
LIU Peiyu. Experimental Study on Water Vapor Sorption of Deep Soft Rock of Daqiang Coal Mine in Liaoning [D]. Beijing: China

- University of Mining and Technology (Beijing), 2012.
- [14] 柳培玉, 张娜, 何满潮, 等. 平庄煤矿砂质泥岩吸水特性试验研究[J]. 金属矿山, 2011, (9): 49-53.
LIU Peiyu, ZHANG Na, HE Manchao, et al. Experimental study on water absorption processes of sandy mudstone in Pingzhuang Coal Mine[J]. Metal Mine, 2011, (9): 49-53.
- [15] 杨晓杰, 王嘉敏, 张秀莲, 等. 深井泥岩吸水软化规律实验研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(9): 1-3.
YANG Xiaojie, WANG Jiamin, ZHANG Xiulian, et al. Experiment study on water absorption and strength softening of mudstone in deep roadway[J]. Coal Technology, 2017, 36(9): 1-3.
- [16] FENG Z Y, XU Q, LUO X Y, et al. Microstructure, deformation characteristics and energy analysis of mudstone under water absorption process[J]. Energies, 2022, 15(20): 7511-7511.
- [17] 何满潮, 周莉, 李德建, 等. 深井泥岩吸水特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 199(6): 1113-1120.
HE Manchao, ZHOU Li, LI Dejian, et al. Experimental study on water absorption characteristics of mudstone in deep wells[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 199(6): 1113-1120.
- [18] 冒海军, 郭印同, 王光进, 等. 黏土矿物组构对水化作用影响评价[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2723-2728.
MAO Haijun, GUO Yintong, WANG Guangjin, et al. Evaluation of impact of clay mineral fabrics on hydration process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2723-2728.
- [19] 周翠英, 谭祥韶, 邓毅梅, 等. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(3): 394-400.
ZHOU Cuiying, TAN Xiangshao, DENG Yimei, et al. Research on softening micro-mechanism of special soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(3): 394-400.
- [20] 纪文栋, 杨春和, 刘伟, 等. 层状盐岩细观孔隙特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 2036-2044.
JI Wendong, YANG Chunhe, LIU Wei, et al. Experimental investigation on meso-pore structure properties of bedded salt rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (10): 2036-2044.
- [21] INCE I. Relationship between capillary water absorption value, capillary water absorption speed, and capillary rise height in pyroclastic rocks[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2021, 38: 841-853.
- [22] 张娜, 何满潮, 郭青林, 等. 敦煌莫高窟围岩吸水特性及其影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 222-229.
ZHANG Na, HE Manchao, GUO Qinglin, et al. Analysis of water absorption characteristics of surrounding rocks and their influencing factors in Dunhuang Mogao Caves [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(1): 222-229.
- [23] WANG S, HAN L J, MENG Q B, et al. Investigation of pore structure and water imbibition behavior of weakly cemented silty mudstone[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(6): 1-13.
- [24] GUO H Y, LI B, ZHANG Y M, et al. Hydrophilic characteristics of soft rock in deep mines[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(2): 177-183.
- [25] LAI F P, LI Z P, ZHANG T T, et al. Characteristics of microscopic pore structure and its influence on spontaneous imbibition of tight gas reservoir in the Ordos Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 72: 23-31.
- [26] 中华人民共和国交通部. 公路工程岩石试验规程: JTG E41—2005[S]. 北京, 人民交通出版社, 2017.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Rock Test Specification for Highway Engineering: JTG E41—2005 [S]. Beijing, China Communication Press, 2017.
- [27] FENG C, JANSSEN H. Hygric properties of porous building materials (III): Impact factors and data processing methods of the capillary absorption test[J]. Building & Environment, 2018, 134: 21-34.
- [28] 马丽娜. 高速铁路路基低黏土矿物泥岩膨胀机理及影响研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
MA Lina. Research on Expansion Mechanism and Influence of Low Clay Mineral Mudstone on High-speed Railroad Roadbed [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [29] WU Y, ZHAO Y X, LI P. Effect of the heterogeneity on sorptivity in sandstones with high and low permeability in water imbibition process [J]. Processes, 2019, 7(5): 260.
- [30] 刘小林. 冻融作用下再生混凝土毛细吸水性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.
LIU Xiaolin. Study on Capillary Water Absorption of Recycled Concrete Under Freeze-thaw Cycle[D]. Xi'an: Xi'an University of Science And Technology, 2021.
- [31] JANETTI M B, WAGNER P. Analytical model for the moisture absorption in capillary active building materials [J]. Building and Environment, 2017, 12698-106.

(责任编辑 王海锋)