

文章编号: 1007-2993(2026)03-0459-09

# 不同 pH 值溶液冲刷侵蚀下凝灰岩孔隙结构及渗透率变化研究

朱帮义<sup>1</sup> 刘敬锋<sup>1</sup> 汤文岗<sup>2</sup> 黄献文<sup>3</sup>

(1. 江苏省岩土工程勘察设计研究院, 江苏镇江 212021; 2. 江苏省地质局第三地质大队, 江苏镇江 212021; 3. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏苏州 215000)

**【摘要】** 水溶液侵蚀下岩体性能劣化会引发一系列的工程安全问题。为进一步探究溶液冲刷侵蚀下凝灰岩内部孔隙结构特征及渗透率变化, 采用核磁共振(NMR)装置研究了溶液侵蚀下试件内部孔隙结构特征, 利用三轴试验装置对试件开展不同围压下的三轴压缩渗透试验, 分析溶液 pH 值、溶液流速对试件孔隙率、各孔径占比、孔隙分形维数及渗透率的影响规律。结果表明: (1) 凝灰岩试件内部孔隙以小孔、中孔为主, 溶液流速的增大使得试件孔隙率、内部孔隙直径及孔隙数目增加, 且增幅为酸性溶液>碱性溶液>中性溶液。(2) 凝灰岩试件内部中孔、大孔结构复杂程度要高于微孔、小孔, 溶液冲刷下试件各孔径孔隙分形维数均增大, 且微孔、小孔增幅要高于中孔、大孔。(3) 酸、碱性溶液及溶液流速的增大会对凝灰岩造成侵蚀, 增大试件渗透率, 围压的存在降低试件内部孔隙的连通性, 从而降低凝灰岩试件孔隙率。研究成果可为定量评价溶液冲刷下凝灰岩的性能提供参考依据。

**【关键词】** 化学溶液; 侵蚀冲刷; 孔隙率; 分形维数; 渗透率

**【中图分类号】** TU45

**【文献标识码】** A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2024-0592

## Changes of pore structure and permeability of tuff under erosion by solution with different pH values

ZHU Bangyi<sup>1</sup> LIU Jingfeng<sup>1</sup> TANG Wengang<sup>2</sup> HUANG Xianwen<sup>3</sup>

(1. Geotechnical Investigation and Design Institute of Jiangsu Province, Zhenjiang 212021, Jiangsu, China; 2. The Third Geological Brigade of Jiangsu Geological Bureau, Zhenjiang 212021, Jiangsu, China; 3. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215000, Jiangsu, China)

**【Abstract】** The deterioration of rock mass performance under aqueous erosion will lead to a series of engineering safety problems. To further explore the pore structure characteristics and permeability changes of tuff samples subjected to solution erosion, nuclear magnetic resonance (NMR) was used to study the pore structure characteristics of tuff samples subjected to solution erosion. Triaxial compression and penetration tests were carried out on specimens under different confining pressures with triaxial test device. The effects of pH value and velocity of solution on the porosity, the proportion of pore size, the fractal dimension of pore size and permeability were analyzed. The results show that: (1) the pore ratio of tuff specimens is mainly small and medium pores. The increase of solution flow rate increases the porosity of tuff specimens, and the diameter and number of internal pores increase, and the increase rate is acidic solution>alkaline solution>neutral solution. (2) The structure complexity of medium and large pores in tuff specimens is higher than that of micro and small pores. The fractal dimension of pores of each aperture increases under solution scouring, and the increase of micro and small pores is higher than that of medium and large pores. (3) The increase of acid, alkaline solution and solution flow rate will cause erosion of tuff, increase the permeability of the specimen, and the existence of confining pressure will reduce the connectivity of the internal pores of the specimen, thus reducing the porosity of the tuff specimen. The research results can provide reference for quantitative evaluation of the properties of tuff under solution erosion.

**【Key words】** chemical solution; erosion and scour; porosity; fractal dimension; permeability

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目(52308367); 国家自然科学基金面上项目(52174104); 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2024-YF094)

**作者简介:** 朱帮义, 男, 1984 年生, 大学本科, 高级工程师, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: zhubangyi409@163.com

**通信作者:** 黄献文, 男, 1994 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: huangxianwen194@163.com

## 0 引言

随着矿山工程的大力建设与开发, 矿山富水环境所引起的工程事故也愈加严重。众多研究成果表明水溶液侵蚀下工程岩体物理性能会产生劣化, 从而引发一系列的工程问题<sup>[1-6]</sup>。柳晶等<sup>[7]</sup>发现水的存在使得煤岩组合体强度及弹性模量均产生劣化, 荷载作用下饱水试件裂纹扩展程度较高。刘科等<sup>[8]</sup>针对水-岩作用下岸坡岩石性能劣化问题开展研究, 发现在水-岩周期作用下, 岩石的抗拉、抗压及抗剪强度均呈现降低趋势, 岩体内部结构由致密向疏松多孔及裂纹发展。王维等<sup>[9]</sup>对水岩循环下砂岩力学参数变化开展试验研究, 结果表明水岩循环下试件力学参数均会产生劣化。郭永春等<sup>[10]</sup>对水岩作用下钙芒硝盐岩强度衰减机理开展试验研究, 结果表明浸水环境下试件破坏模式从脆性破坏过渡为塑性破坏, 试件矿物成分的溶解、岩石结构溶蚀、结构连接弱化等造成其强度降低并发生软化。由于地质环境的不同, 部分工程岩体处于酸、碱或盐溶液中, 且溶液还伴随着流动, 溶液种类及流动性均会对岩体产生不同程度的影响<sup>[11-13]</sup>。凌斯祥等<sup>[14]</sup>在对酸性水侵蚀下页岩性能的研究中发现试件溶液 pH 值及浸泡时间均对试件纵波波速、质量及强度存在影响, pH 值越低, 试件劣化程度越高。苗胜军等<sup>[15]</sup>发现溶液 pH 值的降低、水流速度的增加均会加快花岗岩抗压强度、抗拉强度、弹性模量及黏聚力的损伤, 试件破碎形态由脆性向延性转化。水的存在对不同岩体力学性能及抵抗外荷载变形能力均会产生弱化作用, 且水流速度增大、pH 值变化对岩体劣化起到加速作用。

岩体宏观力学性能变化的本质是其内部微观结构的变化, 孔隙结构是影响岩体性质的一个重要影响因素。在对岩体孔隙结构的研究成果中, 尚晓吉等<sup>[16]</sup>发现低温环境使得试件中大孔形成贯通, 微裂纹发生扩展。王飞等<sup>[17]</sup>利用核磁共振装置对荷载-冻融损伤红砂岩孔隙结构开展研究, 结果表明荷载-冻融作用下岩体孔隙度增大、强度降低, 试件孔隙度增幅与其强度降幅呈正相关。张志镇等<sup>[18]</sup>利用压汞法测试技术对高温环境下花岗岩内部孔隙分形结构开展试验研究, 结果表明温度升高使得试件分形维数降低, 孔隙率增大。张娜等<sup>[19]</sup>利用核磁共振装置对水化泥岩孔隙结构演化开展试验研究, 结果表明溶液 pH 值越低, 试件水化损伤度越大, 孔隙结构变化幅度越高。水-岩作用下岩体微观孔隙结构同样会产生显著变化, 因此开展水侵蚀下岩体微观结构的研究对探究岩体发生损伤破坏机理具有重要意义。

本文依托某凝灰岩矿山开采工程, 探究不同 pH 值溶液冲刷侵蚀下凝灰岩孔隙结构及渗透性变化规律。工程位于浙江省舟山市, 现场岩体常年受雨水与海水冲刷侵蚀, 基于此, 对现场岩体开展不同流速、pH 的溶液冲刷侵蚀下的室内试验, 并结合三轴加载装置对试件开展不同围压下的三轴压缩渗透试验, 分析试件孔隙结构及渗透率随溶液 pH 值及流速变化规律。研究成果可为类似富水矿山开采工程提供试验依据。

## 1 试验

### 1.1 试件制备

试验用凝灰岩选自舟山市凝灰岩矿区, 在工程现场选取均匀规整且无明显裂纹损伤的岩块, 根据 ISRM 标准, 将岩样加工成直径 50 mm、高度 100 mm 的标准圆柱体试样<sup>[20]</sup>, 并将试件两端面打磨平整, 加工完成部分试件如图 1 所示。为减小离散性对后续试验结果的影响, 采用声波测试仪选取波速相近的试件开展后续试验<sup>[21]</sup>。



图 1 试验选用凝灰岩试件

Fig. 1 Tuff specimens were selected for the test

试件选取结束后, 分别配置酸性(pH=3)、中性(pH=7)、碱性(pH=11)三种不同溶液, 并在不同溶液中装置自吸泵来控制溶液流速, 经调试后将溶液流速  $v$  分别设置为 0, 0.3, 0.6, 0.9 m/s。将凝灰岩试件置于不同流速溶液中进行冲刷侵蚀 30 d, 试件处理结束后置于干燥箱内进行干燥处理, 冷却至室温之后进行后续试验。试验过程中每组试件选取 3 个平行试件, 选取具有代表性的试件进行结果分析。

### 1.2 试验装置与原理

采用核磁共振技术获取溶液冲刷侵蚀下试件孔隙结构变化规律, 其横向弛豫时间  $T_2$  近似表示为<sup>[22]</sup>:

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \frac{S}{V} \quad (1)$$

$$T_2 = \frac{r}{\rho_2 F_s} \quad (2)$$

式中:  $T_2$  为弛豫时间, ms;  $\rho_2$  为  $T_2$  表面弛豫强度,

$\mu\text{m/ms}$ ;  $\frac{S}{V}$  为每个孔隙比表面积,  $\mu\text{m}^{-1}$ ;  $F_s$  为几何形状因子, 对于球形孔隙,  $F_s=3$ , 对于柱状孔隙,  $F_s=2$ ;  $r$  为孔隙半径,  $\mu\text{m}$ 。

渗流试验加载装置选用 MTS 三轴试验机, 采用三种不同围压(4, 8, 12 MPa)测量试件在不同围压下渗透率变化规律, 待施加围压稳定后再施加 3 MPa 的恒定渗透水压, 根据达西定律得到渗透率  $k$  的计算公式为<sup>[23-25]</sup>:

$$k = \frac{\mu LV}{A \Delta p \Delta t} \quad (3)$$

式中:  $k$  为试件渗透率,  $\text{m}^2$ ;  $\mu$  为水的黏滞系数, 其值为  $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (水温  $20^\circ\text{C}$ );  $V$  为  $\Delta t$  时间内通过岩样的水体积,  $\text{m}^3$ ;  $L$  为试样自身高度,  $\text{m}$ ;  $A$  为试样横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $\Delta p$  为试样上下两端部渗透压差值,  $\text{Pa}$ ;  $\Delta t$  为所记录的时间间隔,  $\text{s}$ 。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 $T_2$ 图谱

$T_2$  图谱分布可反映岩石内部的孔隙结构,  $\text{pH}=7$  时不同溶液流速下试件  $T_2$  图谱曲线见图 2,  $v=0 \text{ m/s}$  时不同 pH 值溶液侵蚀下试件  $T_2$  图谱曲线见图 3。

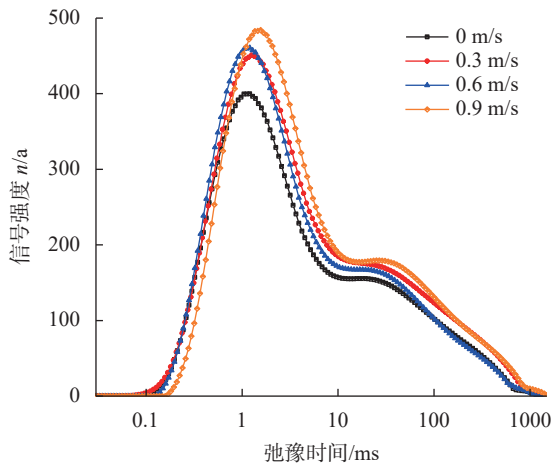


图 2 pH=7 时不同溶液流速下试件  $T_2$  图谱

Fig. 2  $T_2$  spectra of specimens at different solution flow rates when  $\text{pH}=7$

弛豫时间代表试件内部孔隙直径, 信号强度代表试件内部孔隙数目。由图 2 可知溶液冲刷侵蚀下试件  $T_2$  图谱呈双峰型, 且主峰高度显著大于次峰, 主峰的弛豫时间在  $0.08 \sim 14.5 \text{ ms}$ , 说明在此弛豫时间段试件所存在的孔隙数目最多。随着水流速度的增大, 试件  $T_2$  图谱曲线峰值增大且整体向右偏移, 说明溶液冲刷后试件内部孔隙数目最多, 孔隙直径增大。相较于  $v=0 \text{ m/s}$  的溶液侵蚀试件,  $v=0.3, 0.6, 0.9 \text{ m/s}$  时试件主峰峰值增幅为 13.02%, 15.40%, 21.15%, 次

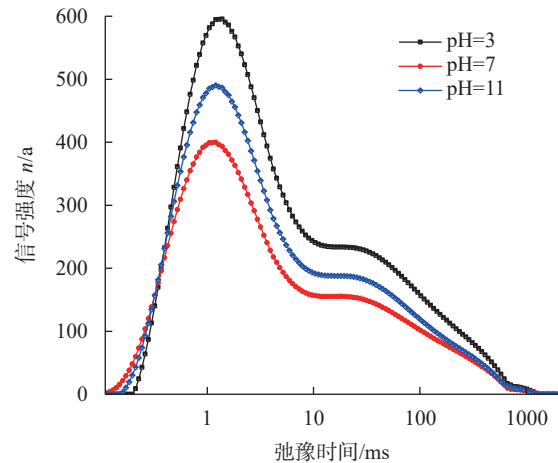


图 3  $v=0 \text{ m/s}$  时不同 pH 值溶液侵蚀下试件  $T_2$  图谱

Fig. 3  $T_2$  spectra of specimens under erosion by solutions with different pH values at  $v=0 \text{ m/s}$

峰峰值增幅为 12.55%, 7.64%, 15.64%, 溶液流速的增大使得试件内部孔隙数目增加, 孔隙直径增大, 这是由于试件内部存在可溶性物质, 在水的侵蚀下可溶性物质会逐渐产生溶解, 从而造成试件孔隙度增大, 且在动水流冲刷下溶解工程会加剧, 在长时间冲刷下还伴随着部分胶凝物质的分解, 这将进一步增大试件孔隙扩展程度, 且水流速度越大此过程表现得更加剧烈, 试件  $T_2$  图谱曲线峰值越大。

由图 3 可知,  $v=0 \text{ m/s}$  时不同 pH 值溶液侵蚀下试件  $T_2$  图谱存在不同, 其中  $\text{pH}=3$  溶液侵蚀下的试件图谱峰值最大,  $\text{pH}=11$  溶液侵蚀下的试件次之,  $\text{pH}=7$  溶液侵蚀下的试件最小, 其中相较于中性溶液, 酸性、碱性溶液侵蚀下试件主峰峰值增幅为 12.55%, 7.64%, 次峰峰值增幅为 12.55%, 7.64%, 说明酸性溶液侵蚀下试件内部孔隙增幅大于碱性溶液大于中性溶液。由于凝灰岩组分中含有大量  $\text{CaCO}_3$ , 在酸性环境中  $\text{CaCO}_3$  会与  $\text{H}^+$  发生化学反应, 从而生成可溶性的盐溶于水中, 物质在酸性溶液下的溶解使得试件内部新生孔隙量进一步增加, 同时凝灰岩属于火山碎屑沉积物, 自身也含有石英所形成的晶屑, 与碱性溶液间也能够发生化学反应<sup>[26]</sup>, 从而溶解部分岩体, 试件孔隙数目增多, 直径增大。对比三种不同溶液下试件  $T_2$  图谱曲线变化可知, 凝灰岩在溶液中反应剧烈程度为酸性溶液 > 碱性溶液 > 中性溶液。

### 2.2 孔径演化特征

为定量分析溶液冲刷侵蚀对试件孔隙结构及孔隙率的影响规律, 根据核磁共振试验结果对试件孔径分布及孔隙率进行计算,  $\text{pH}=7$  时不同溶液流速下试件孔径分布如图 4 所示, 不同溶液侵蚀下试件孔隙率随溶液流速的变化规律如图 5 所示。

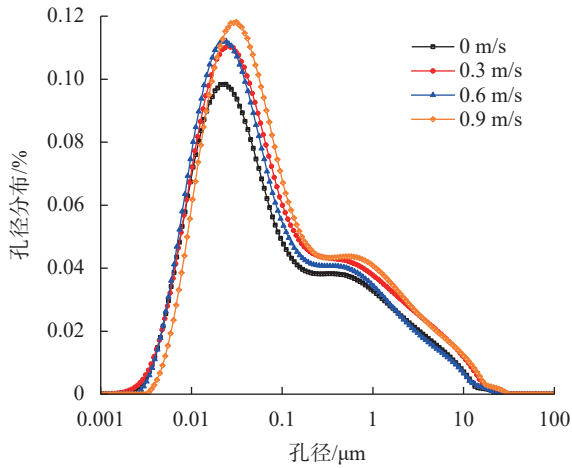


图4 pH=7 时不同溶液流速下试件孔径分布  
Fig. 4 Pore size distribution of specimens at different solution flow rates when pH=7

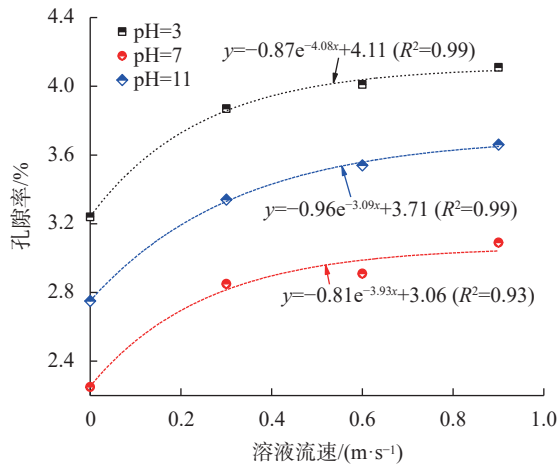


图5 不同溶液流速下试件孔隙率变化  
Fig. 5 Variation of porosity of specimens under different solution flow rates

由图4可见,不同溶液流速下试件孔径范围为0.0015~31.67 μm,孔径分布曲线与T<sub>2</sub>图谱曲线变化规律相吻合,溶液流速增大使得试件孔径增大,孔径分布范围增加。由图5可见,随着溶液流速的增大,试件孔隙率均随之增大,且前期增幅较大,后期增幅减缓,pH=7时,相较于溶液流速v=0 m/s,v=0.3,0.6,0.9 m/s时试件孔隙率增幅分别为26.22%,29.33%,37.33%,流速增大使得试件内部可溶性物质溶解速率增大,孔隙率随之增加。酸性溶液侵蚀下的试件孔隙率最大,碱性溶液次之,中性溶液最小。0 m/s时酸性、碱性溶液侵蚀下试件孔隙率分别是中性溶液的1.44、1.22倍,0.9 m/s时酸性、碱性溶液侵蚀下试件孔隙率分别是中性溶液的1.33、1.18倍。酸性溶液与凝灰岩反应程度更高,内部发生溶解程度更大,其孔隙率增幅最大,碱性溶液次之,中性水溶液最小。

为分析溶液流刷侵蚀下凝灰岩内部孔隙结构变

化规律,将侵蚀试件孔隙孔径R划分成微孔(R≤0.01 μm)、小孔(0.01 μm<R≤0.1 μm)、中孔(0.1 μm≤R≤1 μm)、大孔(R>1 μm)4个区间<sup>[27]</sup>。pH=7、v=0.9 m/s时试件孔径分布区间见图6。据此方法可求出侵蚀凝灰岩各孔径分布规律(见图7)。

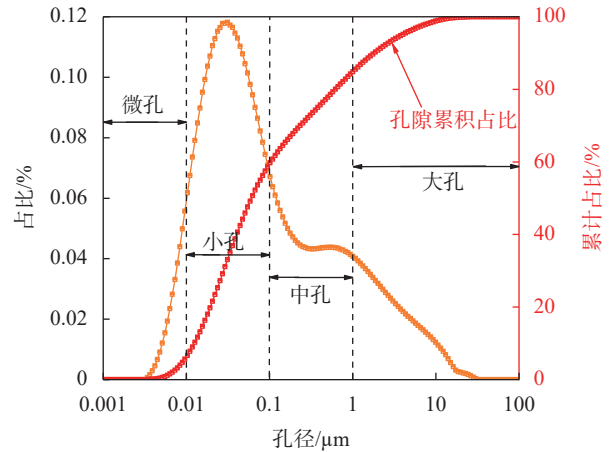
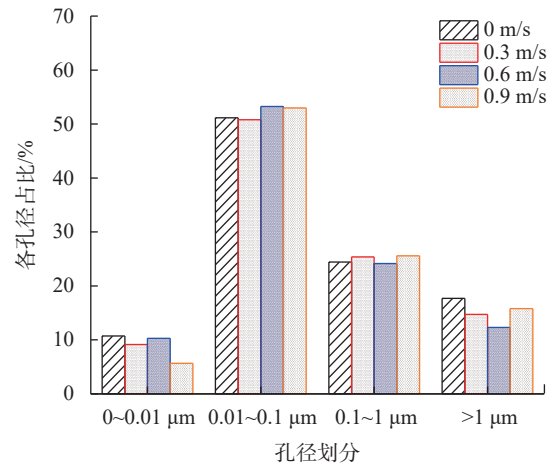
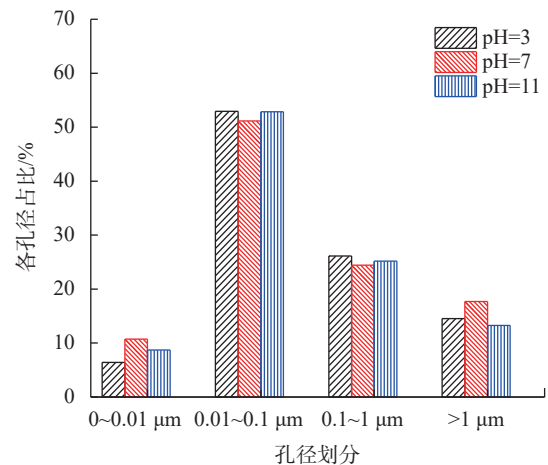


图6 侵蚀凝灰岩内部孔径划分  
Fig. 6 Internal pore size division of eroded tuff



(a) 不同溶液流速下孔径占比



(b) 不同pH值下试件孔径占比

图7 孔径占比分布规律

Fig. 7 The distribution law of aperture proportion

由图 7 可知, 溶液冲刷侵蚀下凝灰岩试件内部孔隙结构中小孔占比最高, 孔径占比均超过 50%, 其次为中孔占比, 达到 25% 左右, 再次为大孔, 而微孔占比最小。水流速度的增大对试件内部各孔径占比影响程度不大。相较于中性溶液, 酸、碱性溶液侵蚀下试件微孔及大孔占比减小, 而小孔及中孔占比均存在增大, 这是由于酸、碱性溶液侵蚀下试件反应程度更加剧烈, 更多的岩体产生溶解, 这将促使试件内部微孔向小孔、中孔转化, 从而使得两者占比增加, 且无论是何种溶液进行侵蚀, 凝灰岩内部孔隙结构仍以小孔及中孔占比为主。

### 2.3 孔隙分形维数

核磁共振分形维数主要用于描述复杂系统的非均匀性、自相似性及多尺度结构特征。岩石内部孔隙结构分形维数值越大表征岩石内部孔隙分布的非均质性越强, 孔喉的表面越粗糙, 反之孔隙分布均质程度越高, 孔喉的表面越光滑<sup>[28-29]</sup>。通过 NMR 试验得到溶液冲刷侵蚀下凝灰岩的细观孔隙结构特征, 其分形维数计算几何公式为:

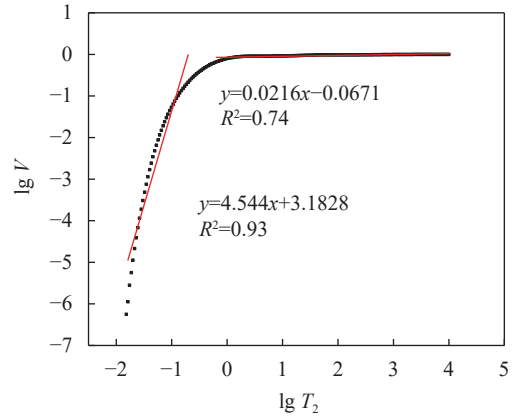
$$V = \left( \frac{T_2}{T_{2\max}} \right)^{3-D} \quad (4)$$

$$\lg V = (3-D)\lg T_2 + (D-3)\lg T_{2\max} \quad (5)$$

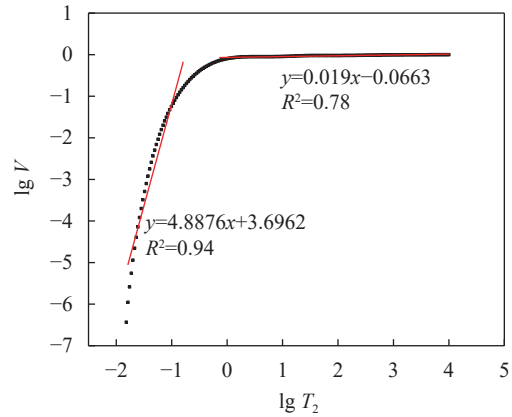
式中:  $T_2$  为横向弛豫时间, ms;  $T_{2\max}$  为最大横向弛豫时间, ms;  $V$  为小于  $T_2$  的横向弛豫时间的孔隙累积体积占总孔隙体积的百分比。

核磁共振分形维数可由前面推导公式  $\lg V$  和  $\lg T_2$  关系图(见图 8)斜率( $k_1, k_2$ )获得, 不同溶液流速下试件分形维数变化规律如图 9 所示, 分形维数计算结果如表 1 所示。

孔隙结构分布决定核磁共振分形维数的大小<sup>[30]</sup>。凝灰岩试件中微孔、小孔与比表面积有关, 而中孔、大孔贡献更多孔隙体积。分形维数  $D_{\min}$  则与凝灰岩的微孔比表面积和微孔体积呈正相关, 而分形维数  $D_{\max}$  与中、大孔比表面积和孔隙体积呈正相关。孔隙分形维数反映了试件内部孔隙结构不规则性和复杂性。孔隙分形维数越小, 表明孔隙结构的不规则程度越低, 孔隙结构越简单; 其值越大, 则孔隙结构的不规则程度越大, 孔隙结构越复杂。同时孔隙分形维数也表明了孔隙的结构特性, 在孔隙介质中的中孔、微孔越多, 孔表面的不平整和不规则程度越大, 造成孔隙结构的分形维数增大。结合表 1 及图 9 可知不同溶液侵蚀下试件  $D_{\min}$  在 1.544 ~ 2.388, 而  $D_{\max}$  在 2.977 ~ 2.993, 说明中、大孔比表面积和孔隙体积不规则程度



(a) pH=7,  $v=0$  m/s



(b) pH=11,  $v=0$  m/s

图 8 围压作用下试件孔隙分形维数计算

Fig. 8 Calculation of the pore fractal dimension of specimens under confining pressure

要高于微孔、小孔。随着溶液流速的增加, 不同溶液冲刷侵蚀下试件  $D_{\min}$  均呈增大趋势, 相较于  $v=0$  m/s 试件, pH=3 时,  $v=0.3, 0.6, 0.9$  m/s 时试件  $D_{\min}$  增幅分别为 8.50%、11.30%、30.99%; pH=7 时,  $v=0.3, 0.6, 0.9$  m/s 时试件  $D_{\min}$  增幅分别为 13.47%、9.39%、30.96%。溶液流速的增大增加了试件内部微孔、小孔孔隙数目, 同时也增强了试件内部孔隙结构不规则性和复杂性。 $D_{\max}$  整体也有增大的趋势, 但变化幅度及规律性不显著, 一方面是由于试件内部中、大孔自身的复杂程度本身较高, 另一方面溶液冲刷侵蚀下试件孔隙变化仍以小孔及中孔为主, 因此  $D_{\max}$  相较于  $D_{\min}$  整体变化幅度较小。

### 2.4 不同围压下渗透率变化

围压 4 MPa 试件渗透率随溶液流速的变化规律如图 10 所示, 溶液流速 0 m/s 时围压下试件渗透率变化规律如图 11 所示。

由图 10 可知, 随着溶液流速的增大, 不同溶液冲刷侵蚀下凝灰岩试件渗透率随之增大, 溶液流速与

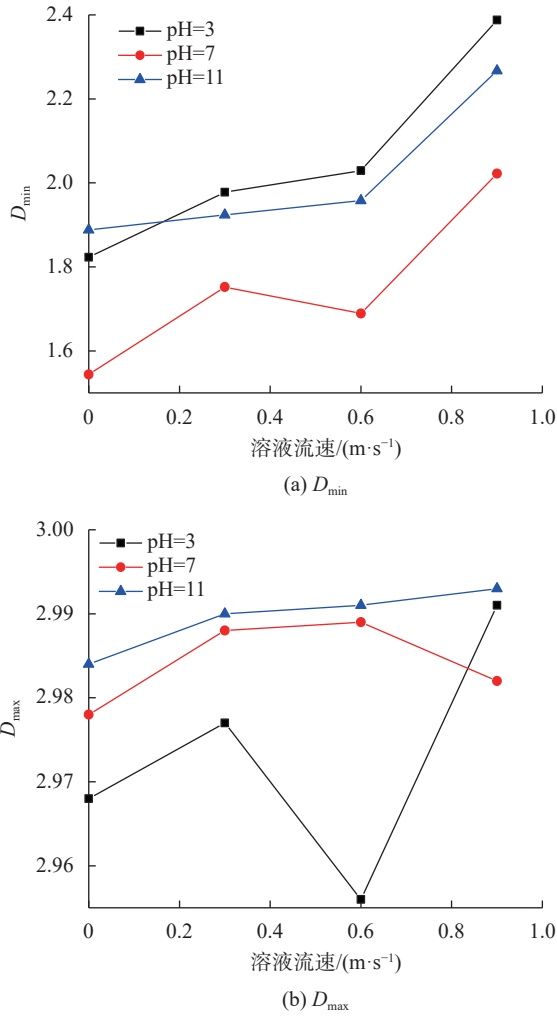


图9 不同溶液流速下试件分形维数

Fig. 9 Fractal dimension of specimens at different solution flow rates

渗透率间呈线性正相关。溶液流速的增大提高了试件内部可溶性物质的溶解速率,且内部孔隙数目及直径不断增大,这样使得试件内部孔隙间形成贯通,从而增强了试件的渗透率。对比相同流速下不同溶液pH值对试件渗透率的影响可知,溶液流速  $v=0$  m/s 时,相较于 pH=7 试件, pH=3, 11 试件渗透率增幅分别为 40.91%, 27.27%,  $v=0.6$  m/s 时试件渗透率增幅分别为 33.33%, 22.22%。酸性溶液侵蚀下凝灰岩试件渗透率最高,其次为碱性溶液。结合试件孔隙结构变化可知,酸性溶液侵蚀下试件孔隙率增幅最高,且内部微孔向小孔、中孔转化,试件内部孔隙连通性随之增加,因此试件自身渗透率随之增大。碱性溶液同样会使试件内部孔隙率增大,孔隙间连通程度增加,其渗透率也随之增大,但增幅小于酸性溶液的影响。

由图 11 可知,不同溶液下围压的增大使得试件渗透率随之减小。pH=3 时,相较于围压 4 MPa 试件,

表 1 基于核磁共振法计算的分形维数

Tab. 1 Fractal dimension calculated based on the nuclear magnetic resonance method

试样	$T_2 \leq T_{2c}$		$T_2 \geq T_{2c}$	
	$k_1$	$D_{min}$	$k_2$	$D_{max}$
NHY-3-0	4.823	1.823	0.032	2.968
NHY-3-0.3	4.978	1.978	0.023	2.977
NHY-3-0.6	5.029	2.029	0.044	2.956
NHY-3-0.9	5.388	2.388	0.009	2.991
NHY-7-0	4.544	1.544	0.022	2.978
NHY-7-0.3	5.752	1.752	0.012	2.988
NHY-7-0.6	4.689	1.689	0.011	2.989
NHY-7-0.9	5.022	2.022	0.008	2.982
NHY-11-0	4.888	1.888	0.016	2.984
NHY-11-0.3	4.924	1.924	0.010	2.990
NHY-11-0.6	4.958	1.958	0.009	2.991
NHY-11-0.9	5.267	2.267	0.007	2.993

注: NHY-3-0.6 中 NHY 表示凝灰岩试件, 3 表示溶液 pH=3, 0.6 表示溶液流速为 0.6 m/s。

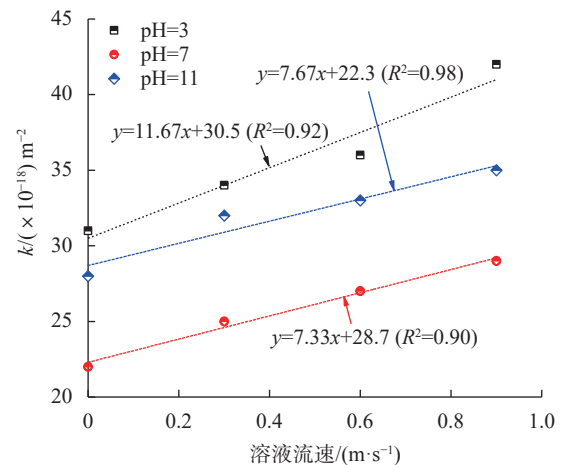


图 10 不同溶液流速下试件渗透率变化

Fig. 10 Variation of permeability of specimens under different solution flow rates

围压为 8, 12 MPa 试件渗透率降幅为 25.81%, 35.48%, pH=7 时试件渗透率降幅为 18.18%, 27.27%, pH=11 时试件渗透率降幅为 14.29%, 25.00%。围压会对试件形成“挤压”,从而使得试件内部孔隙收缩,从而减小孔隙间的连通性,减少试件的渗透路径,即减小试件渗透性,且围压越高孔隙收缩程度越大,溶液所能产生的渗透路径越少,试件渗透性越低。

### 3 结论

(1) 溶液冲刷侵蚀下试件的  $T_2$  图谱呈双峰型,主峰高度显著大于次峰。随着溶液流速的增大,试件的  $T_2$  图谱曲线峰值增大且整体向右偏移。凝灰岩在

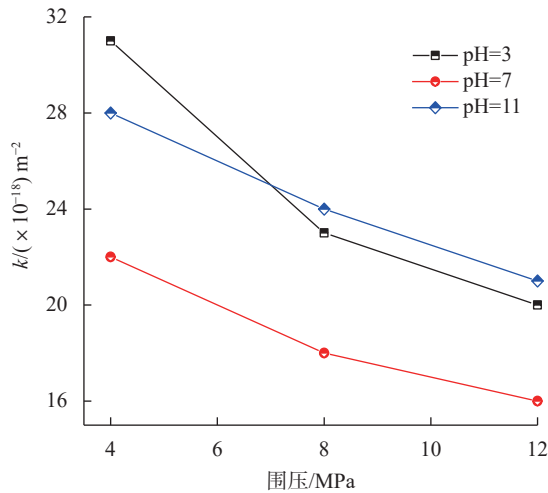


图 11 不同围压作用下试件渗透率变化

Fig. 11 Permeability variation of specimens under different confining pressures

溶液中反应的剧烈程度依次为:酸性溶液>碱性溶液>中性溶液。

(2)溶液流速的增大会导致试件孔隙率增加,试件内部孔隙占比以小孔、中孔为主,小孔占比超过50%,中孔占比超过25%。

(3)溶液流速的增大会导致试件分形维数增大,孔隙结构复杂程度增加。

(4)溶液性质影响试件渗透率,当溶液流速  $v=0$  m/s 时, pH=3、11 试件渗透率是 pH=7 试件的 1.41 倍和 1.27 倍,溶液性质对试件渗透率的影响程度依次为酸性溶液>碱性溶液>中性溶液。溶液流速增大会增大试件内部孔隙贯通度,渗透率随之增加。围压增大会导致试件渗透率降低。

#### 参 考 文 献

[ 1 ] 张景科,刘 盾,马雨君,等.弱胶结砂岩水岩作用机制——以庆阳北石窟为例[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(7):1019-1032,1064.(ZHANG J K, LIU D, MA Y J, et al. Water-rock mechanism of weakly consolidated sandstone: a case study of Qingyang north grottoes[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(7): 1019-1032,1064. (in Chinese))

[ 2 ] 陈 峰,孙晓明,杜世鹤.岩石吸水特性及水岩耦合力学特性试验[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):77-81,89.(CHEN F, SUN X M, DU S H. Experimental study on water absorption characteristics and water-rock coupling mechanical properties of rock[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 77-81,89. (in Chinese))

[ 3 ] 刘 驰,刘晓丽,张 东,等.软岩软化的水岩界面动力学模型及其演化规律[J].岩土工程学报,2022,44(12):

2280-2289. (LIU C, LIU X L, ZHANG D, et al. Dynamic model for water-rock interface of softening of soft rock and its evolution law[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(12): 2280-2289. (in Chinese))

- [ 4 ] 赵志宏.岩石裂隙水-岩作用机制与力学行为研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(S2):3063-3073.(ZHAO Z H. Study on water-rock interaction mechanisms and mechanical behaviors of single rock fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S2): 3063-3073. (in Chinese))
- [ 5 ] 孙治国,鲁海涛.水-岩化学腐蚀损伤作用下红砂岩蠕变特性试验研究[J].金属矿山,2021(4):83-89.(SUN Z G, LU H T. Experimental study on creep characteristics of red sandstone under water rock chemical corrosion damage[J]. Metal Mine, 2021(4): 83-89. (in Chinese))
- [ 6 ] 窦子豪,赵志宏,高天阳,等.水岩作用下花岗岩裂隙剪切力学特性演化规律[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(8):792-798.(DOU Z H, ZHAO Z H, GAO T Y, et al. Evolution law of water-rock interaction on the shear behavior of granite fractures[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(8): 792-798. (in Chinese))
- [ 7 ] 柳 晶,李根威.水-岩作用下不同强度煤岩组合体力学特性损伤规律研究[J].矿业研究与开发,2023,43(3):129-135.(LIU J, LI G W. Study on damage law of mechanical properties of coal-rock mass with different strength under water-rock interaction[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(3): 129-135. (in Chinese))
- [ 8 ] 刘 科,高阳阳,潘洪月,等.不同水-岩作用下岸坡岩石力学特性劣化试验研究[J].水电能源科学,2023,41(2):182-185.(LIU K, GAO Y Y, PAN H Y, et al. Experimental study on deterioration of rock mechanical properties of bank slope under different water rock interaction[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(2): 182-185. (in Chinese))
- [ 9 ] 王 维,顾 峰,何 刘,等.水岩循环作用下变质砂岩力学参数劣化试验研究[J].水资源与水工程学报,2022,33(2):179-185,193.(WANG W, GU F, HE L, et al. Experimental study on deteriorating characteristics of metamorphic sandstone mechanical parameters under the effect of wetting-drying cycles[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(2): 179-185,193. (in Chinese))
- [ 10 ] 郭永春,周其健,屈智辉,等.水岩相互作用下钙芒硝盐岩强度衰减机理[J].地下空间与工程学报,2021,17(4):1045-1051.(GUO Y C, ZHOU Q J, QU Z H, et al. Strength attenuation mechanism of the interaction

- between water and glauberite salt rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(4): 1045-1051. (in Chinese)
- [11] 左小鹏, 孙旭曙, 郭晓萍, 等. 水-岩作用下白云岩单裂隙渗流特性演化规律试验研究 [J]. 水电能源科学, 2023, 41(4): 186-189. (ZUO X P, SUN X S, GUO X P, et al. Experimental study on seepage characteristics evolution of dolomite single fracture under water-rock interaction[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(4): 186-189. (in Chinese))
- [12] 黄叶宁, 邓华锋, 李建林, 等. 水-岩作用下节理岩体剪切力学特性及本构模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 545-557. (HUANG Y N, DENG H F, LI J L, et al. Shear mechanical properties and constitutive model of jointed rock mass under water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 545-557. (in Chinese))
- [13] 王俊萍, 齐跃明, 杨雅琪, 等. 巷道灰岩顶板淋水的水化学特征及水岩作用研究 [J]. 煤炭技术, 2022, 41(3): 124-127. (WANG J P, QI Y M, YANG Y Q, et al. Research on hydrochemical characteristics and water-rock interaction of limestone roof splashing in roadway[J]. Coal Technology, 2022, 41(3): 124-127. (in Chinese))
- [14] 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 S X, WU X Y, SUN C W, 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))
- [15] 苗胜军, 蔡美峰, 冀东, 等. 酸性化学溶液作用下花岗岩力学特性与参数损伤效应 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 829-835. (MIAO S J, CAI M F, JI D, et al. Damage effect of granite's mechanical properties and parameters under the action of acidic solutions[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(4): 829-835. (in Chinese))
- [16] 尚晓吉, 杨维好, 王建国, 等. 不同低温下页岩渗透特征及孔隙结构试验研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(4): 808-816. (SHANG X J, YANG W H, WANG J G, et al. Experimental study on permeability characteristics and pore structure of shale at different low temperatures[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(4): 808-816. (in Chinese))
- [17] 王飞, 高明忠, 邱冠豪, 等. 初始损伤-载荷-冻融作用下红砂岩的孔隙结构及力学特性 [J]. 工程科学与技术, 2022, 54(6): 194-203. (WANG F, GAO M Z, QIU G H, et al. Pore structure and mechanical properties of red sandstone under the action of initial damage-load-freeze-thaw[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(6): 194-203. (in Chinese))
- [18] 张志镇, 高峰, 高亚楠, 等. 高温影响下花岗岩孔径分布的分形结构及模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2426-2438. (ZHANG Z Z, GAO F, GAO Y N, et al. Fractal structure and model of pore size distribution of granite under high temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2426-2438. (in Chinese))
- [19] 张娜, 王水兵, 严成钢, 等. 基于核磁共振技术的泥岩水化损伤孔隙结构演化试验 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(S1): 110-117. (ZHANG N, WANG S B, YAN C G, et al. Pore structure evolution of hydration damage of mudstone based on NMR technology[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S1): 110-117. (in Chinese))
- [20] HATHEWAY A W. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974—2006[J]. Environmental & Engineering Geoscience, 2009, 15(1): 47-48.
- [21] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 饱水度对砂岩纵波波速及强度影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1625-1631. (DENG H F, YUAN X F, LI J L, et al. Experimental research on influence of saturation degree on sandstone longitudinal wave velocity and strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1625-1631. (in Chinese))
- [22] 袁军伟, 夏静怡, 初绍飞. 冻融循环对煤体孔隙结构的改造特征 [J]. 煤矿安全, 2022, 53(2): 33-39. (YUAN J W, XIA J Y, CHU S F. Transformation characteristics of pore structure of coal by freezing-thawing cycle[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(2): 33-39. (in Chinese))
- [23] 王如宾, 徐波, 徐卫亚, 等. 不同卸荷路径对砂岩渗透性演化影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(3): 467-475. (WANG R B, XU B, XU W Y, et al. Experimental research of the influence of different unloading stress paths on permeability evolution of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(3): 467-475. (in Chinese))
- [24] 王伟, 徐卫亚, 王如宾, 等. 低渗透岩石三轴压缩过程中的渗透性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 40-47. (WANG W, XU W Y, WANG R B, et al. Permeability of dense rock under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 40-47. (in Chinese))
- [25] 侯宜峰, 吴小刚, 唐恺, 等. 不同围压下砂岩渗透性规律试验研究 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2020, 37(4): 385-389. (HOU Y F, WU X G, TANG K,

- et al. An experimental study of permeability of sandstone under different confining pressures[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2020, 37(4): 385-389. (in Chinese)
- [26] 姜春萌, 唐新军, 王 航, 等. 龄期与矿物掺合料对凝灰岩碱骨料反应的影响 [J]. *人民长江*, 2019, 50(6): 177-180. (JIANG C M, TANG X J, WANG H, et al. Influence of curing age and mineral admixture on tuff alkali aggregate reaction[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(6): 177-180. (in Chinese))
- [27] 马冬冬, 马芹永, 黄 坤, 等. 基于 NMR 的地聚合物水泥土孔隙结构与动态力学特性研究 [J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(3): 572-578. (MA D D, MA Q Y, HUANG K, et al. Pore structure and dynamic mechanical properties of geopolymer cement soil based on nuclear magnetic resonance technique[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(3): 572-578. (in Chinese))
- [28] 郝家旺, 李庆文, 乔 兰, 等. 高温作用后砂岩的孔隙分形特征与岩石本构模型研究 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2024, 52(2): 142-148. (HAO J W, LI Q W, QIAO L, et al. Study on pore fractal characteristics and rock constitutive model of sandstone after high temperature[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 52(2): 142-148. (in Chinese))
- [29] 刘立航, 胡海燕, 詹学锋, 等. 泸州区块龙马溪组深层页岩孔隙结构及 NMR 分形特征 [J]. *中国科技论文*, 2023, 18(5): 501-511. (LIU L H, HU H Y, ZHAN X F, et al. Pore structure and NMR fractal characteristics of deep shale of Longmaxi formation in Luzhou block, Sichuan basin[J]. *China Sciencepaper*, 2023, 18(5): 501-511. (in Chinese))
- [30] 孙浩然, 邹春霞, 薛慧君, 等. 模袋混凝土干湿-冻融侵蚀孔结构的分形特征 [J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(2): 124-130. (SUN H R, ZOU C X, XUE H J, et al. Fractal characteristics of dry-wet and freeze-thaw erosion pore structure of mold-bag concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(2): 124-130. (in Chinese))

收稿日期: 2024-12-18