

Research on the Imbibition Characteristics of Red Sandstone Considering the Characteristics of Pore Microstructure

Bifeng Zhou¹ Ying Zhou¹ Ruichuan Tian² Fei Gan^{3*}

1. Chongqing Jiangjin District Planning and Natural Resources Bureau, Chongqing, 402260, China

2. Chongqing Shutong Geotechnical Engineering Co., Ltd., Chongqing, 401120, China

3. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou, 550025, China

Abstract

In order to study the influence of microscopic pore structure on capillary water migration characteristics of red sandstone, low-field nuclear magnetic resonance equipment was used to test T_2 spectrum, then obtain pore size distribution and fractal characteristics as well as pore number. Water absorption mass of red sandstone within 14 d was tested, and the gap between the capillary water absorption mass considering pore distribution and the experimental value was compared. The results show that there is a huge difference in the distribution of pore number in red sandstone, and the ratio of pore number is 4406:69:1 (small pore:medium pore:large pore), and the fractal dimension of large pore is larger than that of medium pore. The distribution of large pore is more complicated, and the small pore does not have fractal characteristics. At the same time, the change of capillary water absorption mass is a power function of $M(t)=1.1078t^{0.6577}$ in the first 24 h and time, and the change is slight after 24 h. In addition, the capillary water absorption mass calculated by summation method is basically consistent with the experimental value, so the pore size distribution characteristics should be fully considered when calculating the capillary water absorption mass, and it can not be simply assumed that the pore size is calculated.

Keywords

imbibition; absorption quality; pore microstructure characteristics; NMR; red sandstone

考虑孔隙微观结构特征红砂岩自渗吸特性的研究

周毕锋¹ 周颖¹ 田瑞川² 干飞^{3*}

1. 重庆市江津区规划和自然资源局, 中国·重庆 402260

2. 重庆蜀通岩土工程有限公司, 中国·重庆 401120

3. 贵州大学土木工程学院, 中国·贵州 贵阳 550025

摘要

为微观孔隙结构对红砂岩毛细水迁移特征的影响, 论文采用低场核磁共振设备测试红砂岩的 T_2 谱, 进而获得红砂岩孔径分布和分形特征以及孔隙数量, 并测试红砂岩吸14 d内吸水质量, 同时比较了考虑孔隙分布的毛细吸水质量与实验值差距。结果表明: 红砂岩孔隙数量分布差距巨大, 数量比达到4406:69:1(小孔:中孔:大孔), 且大孔分形维数大于中孔, 大孔分布较为复杂, 微孔不具有分形特征。同时, 红砂岩毛细吸水质量变化前24h与时间呈 $M(t)=1.1078t^{0.6577}$ 的幂函数变化, 24h之后变化微小。另外, 毛细吸水质量采用累加法计算与实验值基本吻合, 故在计算毛细吸水质量时应充分考虑孔径分布特征, 不能简单假设作为一种孔径进行计算。

关键词

自渗吸; 吸水质量; 孔隙微观结构特征; NMR; 红砂岩

1 引言

多孔介质材料中的自渗吸现象在自然界及工程中广泛

存在^[1], 它对岩石干湿风化起关键作用^[2,3], 还会引发建筑材料劣化^[4]、文物风化^[5]等问题。而水分传输能力与孔隙结构密切相关^[6], 因此研究微观孔隙特征对试件毛细水传输能力以及传输特征具有重要意义。

【基金项目】国家自然科学基金(项目编号: 52164001)。

【作者简介】周毕锋(1987-), 男, 中国重庆人, 本科, 工程师, 从事地质研究。

【通讯作者】干飞(1987-), 男, 中国贵州贵阳人, 博士, 副教授, 从事岩土力学研究。

岩石中的毛细水迁移受液体性质^[7,8]、孔隙结构^[6]、环境因素^[9]影响。其中, 孔隙结构对毛细吸水的影响尤为重要^[1], Young-Laplace方程解释了毛细管中液体上升的动力来源^[10], Bell和Cameron发现水迁移高度与时间的平方根成正比^[11], Lucas-Washburn(LW)方程考虑了孔隙半径对

毛细吸水过程的影响^[12,13]，许多学者试图通过考虑毛管孔隙的几何特征来改进 LW 方程^[14,15]。随着科技发展，电阻率层析成像 (ERT)^[16]、核磁共振成像 (MRI)^[17]、X 射线计算机断层扫描 CT^[18]、红外热成像 (IRT)^[19] 等技术用来监测毛细吸水过程。以上研究具有重要现实指导意义。

论文通过核磁共振 (NMR) 测试标准柱状红砂岩的 T_2 谱表征红砂岩微观孔隙特征，然后进行自渗吸实验观测试样内部毛细水传输现象，最后采用理论计算毛细吸水质量并与实验数据做分析比较，从微观角度分析了微观特征对试样毛细水迁移的影响。

2 实验

为研究红砂岩微观及毛细吸水特性，论文选用直径为 50mm，高度为 100mm 红砂岩进行以下实验：①试样抽 6h 真空后以 15MPa 水压饱水 24h，称试样饱水质量，随后放入 NMR 设备中测 T_2 ；②将试样放入烘箱中以 105℃ 烘干 24h，记录干重；③将试样上表面及侧面镀蜡，记录初始质量，随后放入水槽中进行吸水实验，吸水端置于液面下 1cm；④测试并记录试件在浸水 20min、40min、1h、2h、4h、6h、9h、1d、3d、5d 的质量。实验过程及设备如图 1 所示。

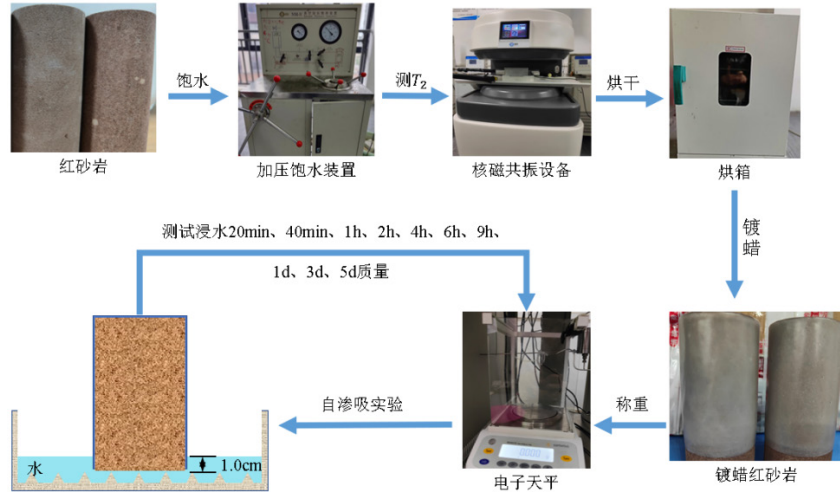


图 1 设备及实验过程

3 实验结果分析

3.1 孔隙微观特征

红砂岩孔隙度通过称重法按式 (1) 计算得 7.7%^[20]，如下所示：

$$V_V = \frac{m_s - m_d}{\rho} \quad (1a)$$

$$\phi = \frac{V_V}{V - V_V} \quad (1b)$$

红砂岩 T_2 谱分布如图 2 所示，将红砂岩孔隙分为微孔 (0.01~1ms)、中孔 (10~10ms)、大孔 (10~1000ms)^[20,21]。

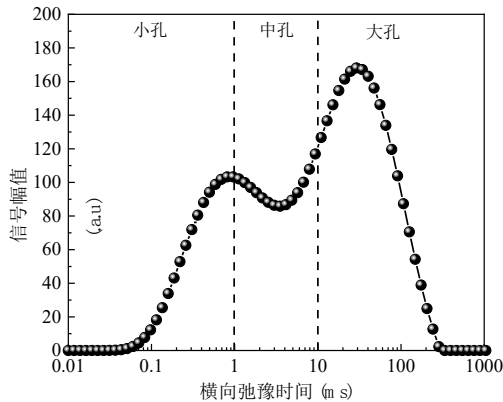


图 2 红砂岩 T_2 谱

孔隙半径 r 和横向弛豫时间 T_2 (单位为 ms) 之间呈线性关系^[22]：

$$r = CT_2 \quad (2)$$

式中， C 为转换系数，在 0.01~0.15 $\mu\text{m}/\text{ms}$ ^[23]，论文中取 10nm/ms。

T_2 谱峰面积和含水量之间呈线性关系，结合式 (2) 红砂岩平均孔隙半径 \bar{r} 表示为：

$$\bar{r} = C \frac{\sum SH_i T_{2i}}{\sum SH_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中， T_{2i} 为孔隙半径 r_i 对应的横向弛豫时间； SH_i 为 T_{2i} 对应的峰面积与总峰面积之比； C 为转换系数，取 10nm/ms。

根据式 (3) 计算得整体平均孔隙半径为 264.6nm，小孔、中孔、大孔平均半径分别为 5.495 nm、49.674nm、526.692nm。

红砂岩孔隙同样具有分形特征，其分形维数 D_f 为：

$$\ln(S_v) = (3 - D_f) \ln(T_2) - (3 - D_f) \ln(T_{2max}) \quad (4)$$

式中， S_v 为孔隙半径小于 r 的累计孔隙占比：

$$S_v = \frac{r^{3-D_f}}{r_{max}^{3-D_f}} = \frac{T_2^{3-D_f}}{T_{2max}^{3-D_f}} \quad (5)$$

红砂岩分形维数由式 (4) 和式 (5) 计算得：小孔为 -0.814，不具有分形特征，而大孔 (为 2.807) 大于中孔 (为 2.674)，孔隙分布越复杂，其分形维数越接近 3，故大孔分

布复杂程度远大于中孔。

3.2 毛细吸水质量

t 时刻试样质量为 $M_n(t)$ ，干燥质量为 M_0 ，则试件毛细吸水质量为^[24]，如下所示：

$$M(t) = M_n(t) - M_0 \quad (6)$$

红砂岩毛细吸水质量变化如图3所示，吸水质量前24 h内快速增加，24 h后基本不变。重力及顶部石蜡阻碍了水分迁移，故24 h后吸水质量基本不变。

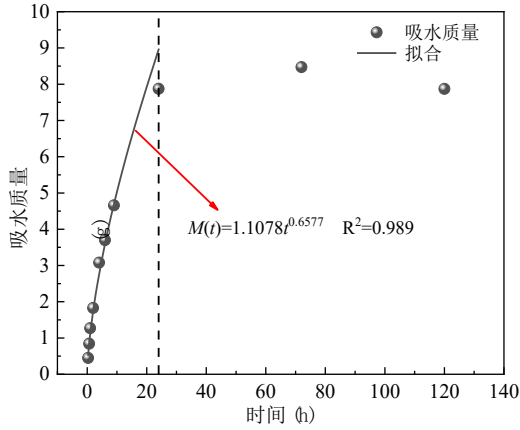


图3 红砂岩吸水质量

前24 h吸水质量与吸水时间呈式(9)所示幂函数关系：

$$M(t) = 1.1078t^{0.6577} \quad (7)$$

由式(7)可见毛细吸水质量受重力等因素影响，与 $t^{0.6577}$ 呈线性关系变化。

3.3 毛细吸水质量理论分析

根据L-W方程可得多孔介质毛细吸收高度 H 与时间 t 关系^[1,14]，如下所示：

$$H(t) = \left(\frac{t\sigma r \cos \theta}{2\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

毛细吸水质量为：

$$M(t) = n\rho\pi r^2 \left(\frac{t\sigma \cos \theta}{2\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中， σ 为表面张力； μ 为粘度系数； θ 为接触角； n 为孔隙数量。

当温度为20℃时， $\sigma=0.07275$ N/m， $\mu=1.003 \times 10^{-3}$ Ns/m²^[25]，石英与水之间接触角为33°^[26]。

试样截面内孔隙数量 n 为：

$$n = \frac{\phi S}{\pi r^2} \quad (10)$$

式中， ϕ 为孔隙度， $\phi=7.7\%$ ； S 为试样截面积， $S=0.0019635$ m²。

式(9)中的孔隙半径并不是一个固定值，故进行简化计算：选择整体等效平均半径($\bar{r}=264.6$ nm)计算；或是取小、

中、大孔平均孔径按照式(9)计算，并将计算结果相加得毛细吸水质量，孔隙数量为：

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{c\phi S}{\pi \bar{r}_1^2} \\ n_2 &= \frac{d\phi S}{\pi \bar{r}_2^2} \\ n_3 &= \frac{e\phi S}{\pi \bar{r}_3^2} \end{aligned} \quad (11)$$

式中， n_1 、 n_2 、 n_3 分别为小、中、大孔孔隙数量； \bar{r}_1 、 \bar{r}_2 、 \bar{r}_3 分别为小、中、大孔平均孔隙半径； c 、 d 、 e 为小、中、大孔孔隙占比，由各孔隙 T_2 峰面积与总体峰面积比获得。

式(11)计算得孔隙红砂岩中三种孔隙数量之比为4406 : 69 : 1(小孔 : 中孔 : 大孔)，可见砂岩中小孔数量远多于中孔及大孔。

两种方式计算的毛细吸水质量变化如图4所示，按照不同类型孔隙进行计算所得毛细吸水质量与实验数据在前24 h内十分接近，而采用整体等效平均孔隙半径计算结果远小于实验值，故进行自渗吸计算应充分考虑孔径分布，不能等效为一种孔径。

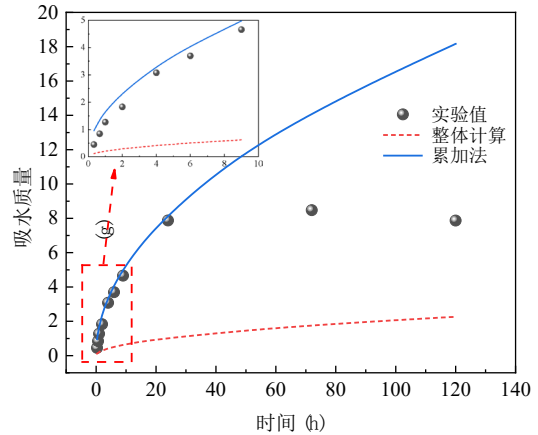


图4 红砂岩理论及实验吸水质量比较

4 结论

①红砂岩小孔不具有分形特征，而中孔及大孔具有明显分形特征，且大孔分形维数大于中孔，表明大孔分布复杂程度大于中孔，且微孔孔隙数量远大于中孔及大孔，数量比达到4406 : 69 : 1(小孔 : 中孔 : 大孔)。

②受重力及毛细水迁移通道影响，红砂岩毛细吸水质量变化具有明显两阶段特征，以吸水24 h为界限，第一阶段毛细吸水质量与时间呈 $M(t)=1.1078t^{0.6577}$ 的幂函数关系变化，拟合度为0.989。

③采用累加法计算毛细吸水质量与实验值基本吻合，在计算毛细吸水质量时应充分考虑试样微观孔隙的孔径分布特征。

参考文献

- [1] Jia H, Dong B, Wu D, et al. Capillary Imbibition in Layered Sandstone[J]. *Water*,2023,15(4):737.
- [2] Zhao F, Sun Q, Zhang W. Combined effects of salts and wetting–drying cycles on granite weathering[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*,2020,79(7): 3707-3720.
- [3] Jiang Q, Deng H, Li J, et al. The degradation effect and mechanism by water-rock interaction in the layered sandstone in the Three Gorges reservoir area[J]. *Arabian Journal of Geosciences*,2019,12(23).
- [4] Lin Yang D G Y Z. Relationship between sorptivity and capillary coefficient for water absorption of cement-based materials: Theory analysis and experiment[J]. *Royal Society Open Science*,2019,6(6):190112.
- [5] Zhang Y, Zhang Y, Huang J. Experimental study on capillary water absorption of sandstones from different grotto heritage sites in China[J]. *Heritage Science*,2022,10(1).
- [6] Van Belleghem B, Montoya R, Dewanckele J, et al. Capillary water absorption in cracked and uncracked mortar –A comparison between experimental study and finite element analysis[J]. *Construction and Building Materials*,2016(110):154-162.
- [7] Oguchi C T, Yu S. A review of theoretical salt weathering studies for stone heritage[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*,2021,8(1).
- [8] Cárdenes V, Mateos F J, Fernández-Lorenzo S. Analysis of the correlations between freeze–thaw and salt crystallization tests[J]. *Environmental earth sciences*,2014,71(3):1123-1134.
- [9] Grant S A, Bachman J, Raats P A C, et al. Effect of temperature on capillary pressure[J]. *Environmental Mechanics*,2002(129): 199-212.
- [10] Arbatan T, Shen W. Measurement of the Surface Tension of Liquid Marbles[J]. *Langmuir*,2011,27(21):12923-12929.
- [11] Bell J M, Cameron F K. The flow of liquids through capillary spaces[J]. *The Journal of Physical Chemistry*,2002(10):658-674.
- [12] Washburn E W. The dynamics of capillary flow[J]. *Physical Review Journals Archive*,1921(17):273.
- [13] Zhang S, Pei H. Rate of capillary rise in quartz nanochannels considering the dynamic contact angle by using molecular dynamics[J]. *Powder Technology*,2020(372):477-485.
- [14] Leventis A, Verganelakis D A, Halse M R, et al. Capillary imbibition and pore characterisation in cement pastes[J]. *Transport in porous media*,2000,39(2):143-157.
- [15] Hammecker C, Jeannette D. Modelling the capillary imbibition kinetics in sedimentary rocks; role of petrographical features[J]. *Transport in porous media*,1994,17(3): 285-303.
- [16] Liang K, Zeng X, Zhou X, et al. Investigation of the capillary rise in cement-based materials by using electrical resistivity measurement[J]. *Construction and Building Materials*,2018, (173):811-819.
- [17] 何娅兰,宁麟,李炆,等.基于核磁共振技术对水泥砂浆高温后孔隙结构及水分迁移特征的研究[J].*硅酸盐通报*,2023,42(7):2336-2343.
- [18] Standnes D C. Spontaneous imbibition of water into cylindrical cores with high aspect ratio: Numerical and experimental results[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*,2006,50(2):151-160.
- [19] Romero E. A microstructural insight into compacted clayey soils and their hydraulic properties[J]. *Engineering Geology*,2013(165):3-19.
- [20] Bi J, Du C, Zhao Y, et al. Characterization of shear behavior and damage mechanism of periodic thermal loading sandstone based on NMR technique[J]. *Engineering Geology*,2023(325):107272.
- [21] Jin P, Hu Y, Shao J, et al. Influence of Temperature on the Structure of Pore–Fracture of Sandstone[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*,2020,53(1):1-12.
- [22] Zhao H, Qin X, Liu J, et al. Pore structure characterization of early-age cement pastes blended with high-volume fly ash[J]. *Construction and Building Materials*,2018(189):934-946.
- [23] 李海波,朱巨义,郭和坤.核磁共振T2谱换算孔隙半径分布方法研究[J].*波谱学杂志*,2008(2):273-280.
- [24] van der Heijden G H A, Huinink H P, Pel L, et al. One-dimensional scanning of moisture in heated porous building materials with NMR[J]. *Journal of Magnetic Resonance*,2011,208(2):235-242.
- [25] Zhao H, Ding J, Huang Y, et al. Experimental analysis on the relationship between pore structure and capillary water absorption characteristics of cement-based materials[J]. *Structural Concrete*,2019,20(5): 1750-1762.
- [26] Englert A H, Rodrigues R T, Rubio J. Dissolved air flotation (DAF) of fine quartz particles using an amine as collector[J]. *International Journal of Mineral Processing*,2009,90(1-4): 27-34.