基于核磁共振技术的石膏粉末型3D打印试样水理特性及裂隙渗流特性初探

储昭飞¹, 吴志军^{1,2*}, 刘泉声^{1,2}, 翁磊¹, 徐翔宇¹

1. 武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072;

2. 武汉大学岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 武汉 430072

* E-mail: zhijunwu@whu.edu.cn

收稿日期: 2021-10-22; 接受日期: 2021-11-04; 网络版发表日期: 2023-04-07

国家自然科学基金(批准号: 41941018, U21A20153, 42077246)资助项目

摘要 基于石膏粉末的3D打印技术目前在岩石力学领域及石油领域应用广泛. 为使该技术更广泛应用于有水条件下的岩石和油气工程, 对真空渗透固化改进的石膏粉末型3D打印试样进行了水理特性和裂隙渗流特性研究. 首先, 借助SEM和低场核磁共振技术(NMR)研究了该3D打印试样的微观结构特征和孔隙分布特征. 其次, 分别对试样在自然吸水和有压饱和条件下开展了吸水→饱和→干燥的干湿过程试验, 并借助NMR技术研究了试样干湿过程中的水分迁移特征. 在此基础上, 分别对干燥和饱和试样开展了单轴压缩试验, 研究试样遇水软化特征. 最后, 基于NMR岩石驱替渗流分析成像系统, 对4种含不同粗糙度(JRC)的裂隙打印试样开展了恒围压、渗透压的渗流试验, 借助实时核磁 T_2 谱和成像研究了试样的裂隙渗流规律. 结果表明, 渗透固化的石膏粉末型3D打印试样内部大小孔隙分布均匀且连通性好, 总孔隙度为18.4%; 试样自然吸水时以中、大孔隙充水为主, 有压饱和时其大、中和小三种孔隙均充水饱和; 试样的自然吸水率、饱和吸水率以及饱水系数分别为6.01%, 8.8%和0.68, 与一般砂岩很接近; 相比干燥时, 饱和试样的变形大、峰值强度降低明显, 其遇水软化系数 K_R 为0.75, 与一般沉积岩软化系数范围接近; 打印裂隙试样渗流时, 水分先在主裂隙和大孔隙中聚集, 随后逐渐形成主裂隙渗流通道, 最后在渗流趋于稳态时逐渐进入中、小孔隙中; 在围压5 MPa和渗透压1.3 MPa的条件下, 4个不同裂隙粗糙度的打印试样渗透系数在 $8 \times 10^{-7} \sim 1.3 \times 10^{-6}$ m/s之间, 略小于同条件下的裂隙黄砂岩.

关键词 岩石, 3D打印, 石膏粉末, 水理特性, 裂隙渗流, 核磁共振

1 引言

岩石作为一种天然含裂隙(孔)介质, 其渗流特性对于地下工程开挖、水库坝基防护以及地热资源开发等工程具有重要意义^[1,2]. 然而, 由于岩石材料微观和

宏观结构特征的复杂多变, 岩石试样的物理力学性质各不相同, 即使取自同一块岩石的试样, 其内部裂隙的形态及分布特征也很难实现均匀一致, 这使得与天然岩体水理、力学性质有关的室内试验具有不可重复性, 试验结果具有很大的离散性^[3,4]. 因此, 发展可替代

引用格式: 储昭飞, 吴志军, 刘泉声, 等. 基于核磁共振技术的石膏粉末型3D打印试样水理特性及裂隙渗流特性初探. 中国科学: 技术科学, 2023, 53
Chu Z F, Wu Z J, Liu Q S, et al. Preliminary investigation on the hydrophysical properties and fracture seepage characteristics of 3D-printed gypsum specimens based on nuclear magnetic resonance technology (in Chinese). Sci Sin Tech, 2023, 53, doi: 10.1360/SST-2021-0463

天然岩块的岩石模拟材料和相应模拟技术一直是岩石力学领域研究的热点^[5,6]。

目前,关于模拟岩石材料的研究很多,尤其是以水泥、石膏等为胶凝材料配制的颗粒型类岩石材料^[7,8]。以往学者通过选择不同骨料、胶凝剂、添加剂以及调整不同材料间的配比,已研制出针对各种岩石特性的类岩石材料,并将其成功应用于各类岩石节理剪切特性的研究^[9]。然而,受材料水化、搅拌和倒模等因素的影响,制作的类岩石试样精度较差、边界粗糙、内部细观结构不均一,导致试样个体间存在明显的差异性。并且,对于含三维交叉裂隙网络以及含内部复杂孔洞的试件,采用类岩石材料的方法往往很难实现。因此,考虑到3D打印技术具有精确可控、高效可重复的技术优点,近年来,一些学者将3D打印技术引入到岩石力学领域,并开展了一些初步的研究^[10~12]。

从原材料上来看,目前岩石力学领域采用的3D打印材料主要分为有机材料(如树脂、丙烯腈丁二烯苯乙烯(ABS)、聚乳酸(PLA))和无机材料(如水泥、石膏和砂粉等)^[13~17]。有机材料主要用来打印天然岩体的复杂空间裂隙网络或三维随机粗糙节理面模型,而无机材料主要用于模拟岩石材料本身^[16]。后者不仅能实现对岩体微孔(裂)隙的精细化模拟,同时还可重构复杂的岩体宏观裂隙网络和节理构型^[15,18,19]。因此,近年来对于3D打印无机材料的种类、配比、胶结剂和打印方式等均有学者研究^[20,21]。然而,对于岩石材料的模拟,目前最常见且应用最广泛的为石膏粉末型3D打印技术^[14]。这主要是由于石膏粉末打印试样在微观结构和变形破坏特性上与岩石均具有较好相似性,尤其适合于中低强度岩石^[18,21,22]。

针对石膏粉末型3D打印试样,国内外学者开展了一系列的测试。例如,王本鑫等人^[23]结合CT扫描和石膏粉末3D打印,研究了含非贯通节理的岩石试件的单轴压缩特征。Jiang等人^[24]基于石膏粉末打印了含内部孔洞和预制裂缝的岩体模型,并对其进行了力学试验,结果表明在单轴压缩试验下3D打印岩体试样力学特性与岩石类材料力学特性较为一致。Jiang等人^[10,18]对含预制裂隙的石膏打印试样开展了单轴压缩、巴西劈裂、三点弯曲和动力压杆冲击等试验,结果表明在动静不同载荷的加载路径下石膏试样的破裂形式均与天然岩样相一致。此外,Kong等人^[22,25,26]先后利用XCT和扫描电子显微镜(SEM)对石膏粉末3D打印试样开展了

力学和孔隙微观结构的研究,结果表明打印试样的表面孔隙率为5.8%,总孔隙率为21%。同时,其研究指出尽管石膏打印试样的力学性能和微观结构与天然岩石有一定的相似性,然而,由于石膏粉末颗粒间的胶结强度低,打印试样的强度也较低且延性较强,只适合于模拟强度很低的细粒砂岩^[18,27]。

为提高打印样品的强度,近年来,刘泉声等人^[27]研究了打印胶水浓度对3D试样强度的影响,并提出了最优化打印方案,使打印试样在强度和脆性方面均有很大提升。在此基础上,Wu等人^[21]提出了基于真空饱和和改进的后处理方法,即使用ColorBond™型渗透液对打印试样进行真空渗透固化处理,使得渗透液渗入石膏材料内部,增加试样强度。该方法使得试样的强度和脆性明显增强,最大单轴强度UCS可达到56.70 MPa,弹性模量 E 可达到6.75 GPa,使得石膏粉末型3D打印在力学特性上适合于模拟极软岩至中等强度范围的岩石。然而,在其后续的研究中^[28],也仅对该渗透固化的打印样品开展了常规干燥情况下的巴西劈裂和节理剪切的研究,未能对该打印试样本身微观特征和水理性质等进行研究。特别地,对于地下工程岩体,其大多处于富水环境中,因此为使该石膏粉末型3D打印技术更广泛应用于有水条件下的岩石工程中,有必要对石膏打印试样的水理特性及裂隙渗流特性开展研究。

本文在Wu等人^[21]研究基础上,将对真空饱和和渗透固化后的石膏粉末型3D打印试样的水理特性和裂隙渗流特性进行系统研究。研究中,首先借助SEM和低场核磁共振技术(NMR)对原始未渗透固化和渗透固化打印试样的表观结构特征和内部孔隙分布特征进行了对比分析。其次,为研究渗透固化试样的水理特征,分别对试样在常温常压和高压条件下开展了吸水→饱和→干燥过程的干湿试验,同时借助低场核磁共振系统,得到试样在该过程中核磁 T_2 谱曲线和核磁孔隙度变化,以此分析出试样干湿过程的水分迁移规律。之后,分别对干燥和饱和打印试样开展了单轴压缩试验,研究了试样泡水前后的软化特征。最后,基于核磁共振岩石驱替渗流在线分析与成像系统,对4种含不同粗糙度(JRC)的裂隙打印试样开展了恒围压、渗透压的渗流试验,实时得到渗流过程中试样的核磁 T_2 谱曲线、渗透系数和核磁共振图像等变化,以此研究了试样裂隙渗流的水分运移规律。本文研究结果为真空渗透固化处理后的石膏粉末型3D打印试样在有水环境和渗

流条件下模拟岩石材料提供了基础。

2 试验方法与过程

2.1 试验方案

为探究石膏粉末型3D打印试样的水理性质和裂隙渗流特性, 本研究将基于低场核磁共振岩石驱替渗流系统对两组试样依次开展水理性质测试和裂隙渗流试验。其中, 水理性质主要研究试样的吸水性和软化性。并且, 根据国际岩石力学试验规程^[29], 岩石的吸水性主要通过自然吸水率(W_a)、饱和吸水率(W_p)和饱水系数(W_a/W_p)来反映, 而软化性以软化系数(K_R)反映。因此, 本文中针对试样的水理特征, 将分别对试样的常温(25℃)自然吸水和有压吸水过程以及试样干燥和饱和的单轴抗压强度进行测试。对于试样的裂隙渗流特性, 本文将主要研究单裂隙不同裂隙粗糙度试样的渗流过程, 分析渗流过程中水分在试样内部的迁移特征。此外, 由于打印试样的水理特性和裂隙渗流特性与其细观结构构造紧密相关, 因此水力试验测试前, 将设置一组微观试验, 以研究打印试样渗透固化前后的微观空间结构和孔隙分布特征。

具体而言, 如表1所示, 针对不同试验需求, 本研究试样一共分为4组。其中, 组1~3每组包含两个试样, 每个试样均为高50 mm、直径25 mm的完整圆柱体, 分别用于研究试样的微观结构、试样干湿过程中的水理特性以及试样遇水软化特性。前三组的6个试样中, 一个为原始打印样, 编号记作空白(blank), 其他5个试样

都经过后续的真空饱和和渗透处理, 依次编号为a#, b#, c#, d#和e#。组4包含4个不同粗糙度(JRC)的裂隙试样, 用于研究试样的裂隙渗流特性。每个裂隙试样根据裂隙分为上下两部分, 上下合并后试样总体仍为高50 mm、直径25 mm的圆柱体, 编号依次为1#, 2#, 3#和4#。对应于Barton提出的标准JRC曲线^[30], 4个裂隙试样JRC值分别为JRC 6~8, JRC 10~12, JRC 14~16, JRC 18~20, 如图1所示。

2.2 试样制备

本研究岩石3D试样采用3D System公司生产的ProJet®860Pro石膏粉末型打印机打印制备^[27]。该打印机最大可打印构件尺寸为381 mm×508 mm×229 mm, 打印精度为0.1 mm, 分辨率为600×540 dpi, 采用注塑成型的方式打印。由于本打印机原材料固定, 试样打印时所采用的颗粒原材料为特制石膏粉末(粒径为0.01 mm), 黏结剂为VisiJet PXL Binder高性能胶水。其中, 石膏粉主要成分为半水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$), 其密度约为2.6 g/cm³, 水溶性为0.83% (3℃ in g/L)。

根据以上试验方案, 试样打印和制备的流程如下: (1) 将预打印岩样的3D模型数字文件(.stl file)导入软件系统; (2) 待接收到打印指令后, 打印机将自动逐层摊铺石膏粉末(层厚0.089~0.102 mm), 且在每层铺粉结束后, 打印喷头按试样特征在对应位置处将黏结剂喷涂至石膏粉末表面, 之后再次摊铺石膏粉末, 进行下一循环喷涂, 以此逐层铺筑直至完成整体试样打印; (3) 试样打印结束后, 将试样在模型箱内烘干固化2 h, 之

表 1 试样分组及试验方案

Table 1 Specimen grouping and experimental scheme

试样分组	编号	裂隙性状	试验	试验过程	备注
组1	blank	无	微观分析	先SEM表观分析, 再核磁测试孔隙分布	无渗透原始样 渗透固化样
	a#				
组2	b#		干湿过程	试样先干→湿, 再湿→干, 2#为自然吸水, 3#为压力渗透吸水	自然吸水率(W_a)、饱和吸水率(W_p)和饱水系数(W_a/W_p)
	c#				
组3	d#		单轴压缩	干燥 饱和	应力变形特性、软化系数
	e#				
组4	1#	JRC 6~8	裂隙渗流	围压5 MPa, 渗透压力1.5 MPa	孔隙度、渗透系数
	2#	JRC 10~12			
	3#	JRC 14~16			
	4#	JRC 18~20			

后参考Wu等人^[21]研究, 将试样进一步放入Color-Bond™型渗透液中进行真空渗透固化处理5 h, 使得渗透液完全渗入试样内部, 以增强试样强度, 最后将所有样品置于恒温40℃的干燥箱中干燥3天, 以确保其质量和物理性能稳定。最终, 处理完成后的打印试样如图2所示。

2.3 试验过程

试验时, 对于组1, 先对无渗透原始样(blank)和真空饱和和渗透固化样(a#)进行SEM微观结构扫描, 然后将两试样进行真空饱和48 h, 并利用核磁共振测得饱和和后试样的孔隙结构分布。其次, 为研究试样吸水性和失水特征, 对组2的试样b#和c#开展吸水→饱和→干燥的干湿过程试验。试验时, 利用岩石低场核磁共振系统测得整个干湿过程中试样内部的孔隙水分布及孔隙度变化。其中, 对于吸水饱和过程, 试样b#采用自然吸水, 以获得打印试样的自然吸水率; 而试样c#

为有压饱和(饱和水压为15 MPa), 以获得打印试样饱和和吸水率。上述吸水饱和过程以两个试样以各自质量和孔隙度在5 h内不再增加时停止, 且吸水饱和后, 两试样被放入干燥箱在温度50℃下进行逐步干燥脱水。此后, 为研究打印试样的遇水软化特性, 对组3的试样d#(干燥)和e#(饱和)开展单轴压缩试验, 测得打印试样干燥和饱和下单轴抗压强度。其中, 试样e#采用与试样b#相同的饱和方式。

最后, 为研究打印试样的裂隙渗流特性, 对组4的4个裂隙试样开展渗流试验, 试验采用苏州纽迈分析仪器股份有限公司生产的MacroMR12-150H-I型核磁共振岩石驱替渗流在线分析成像系统^[31](图3)。该试验系统主要由双缸恒压恒流驱替装置、围压系统、磁体、岩芯夹持器以及核磁共振分析仪组成。试验时, 先对试样施加5 MPa围压, 之后开启恒压驱替泵进行渗流试验, 夹持器入口处渗透水压设置为1.5 MPa。渗流过程中, 利用核磁共振岩石驱替渗流分析成像系统可实时对试样进行 T_2 氢谱采集和成像, 同时夹持器末端的高精度天平可实时记录排水流量变化。

图1 典型的Barton节理粗糙度曲线
Figure 1 Typical Barton joint roughness profiles.

图2 3D打印试样
Figure 2 3D-printed gypsum specimens.

3 结果与分析

3.1 微观结构特征

图4为原始无渗透试样(blank)和渗透固化样(a#)的SEM表面微观图。由图4(a)和(b)可看出, 该石膏粉末型3D打印试样在原始无渗透固化状态下内部是由5~50 μm范围内的石膏颗粒组成, 尽管通过打印胶水的粘连作用整体可成型, 但细部结构疏松, 颗粒间胶结弱。以往Kong等人^[14,22]对原始无渗透试样的力学性质测试表明, 原始未渗透试样的强度低, 遇水后易发生明显的崩解, 因此并不适合模拟岩石材料的渗流特性。相比之下, 由图4(d)和(e)可看出, 渗透后试样内部石膏颗粒间胶结良好, 固结形成整体团块状。团块之间以及块体内部仍存在一定孔隙, 孔径大小在0.1~200 μm之间分布且大孔隙连通性较好。对比图4(c)和(e)可见, 在放大10000倍率下, 试样渗透前后其内部石膏晶体的晶形和晶须并未改变, 仍呈扁长柱形, 并且渗透后胶水主要附着于晶体表面, 而非渗透入晶体之间。因此, 渗透液固化胶结主要作用于石膏颗粒团簇间界面, 而未渗透到石膏晶体截面之间。

图5为核磁共振测试得到的饱和原始无渗透打印

图 3 (网络版彩图)核磁共振岩石驱替渗流测试系统
Figure 3 (Color online) NMR-based rock seepage test system.

图 4 (网络版彩图)不同放大倍数下(×50, 500和10000倍)原始打印样(blank)和渗透固化打印样(a#)的SEM微观结构图
Figure 4 (Color online) Microstructure photos of the raw 3D-printed specimen (blank) and infiltration cured specimen (a#) taken by SEM.

试样(blank)和渗透固化后试样(a#)的 T_2 氢谱分布. 从图可看出, 原始无渗透试样的 T_2 谱只包含2个明显的峰

(峰包络), 其对应的弛豫时间 T_2 范围为0.01~1 ms和1~300 ms, 而渗透固化后试样a#的 T_2 谱包含3个明显的

图5 (网络版彩图) 3D打印试样真空渗透固化前后孔隙大小分布曲线。(a) 原始样(blank); (b) 渗透固化样(a#)

Figure 5 (Color online) Pore size distribution curves of 3D-printed specimens before and after vacuum saturation infiltration treatment. (a) Raw specimen (blank); (b) infiltration cured specimen (a#).

峰谱(峰包络), 对应的 T_2 值为0.01~1.2 ms (1号峰谱)、1.2~35 ms (2号峰谱)和35~1100 ms (3号峰谱), 这与大部分岩石材料的峰谱分布范围类似。根据核磁共振测试原理^[32], 试样的弛豫时间 T_2 值表征了孔隙尺寸分布, 即弛豫时间越短, 相应的孔径越小; 信号幅度表征了含水率大小, 即信号幅度越大, 含水率越高。本文中, T_2 值(ms)与孔径 $r(\mu\text{m})$ 间满足 $r=0.17T_2$ ^[31,32]。

一般而言, 对于岩石材料, 孔径小于0.1 μm 为微孔, 0.1~10 μm 为中孔, 10~100 μm 为大孔, 大于100 μm 为宏观孔裂隙, 且微孔和中孔主要是吸收孔, 而大孔和宏观孔为渗流通道^[33,34]。结合上述两个试样结果, 可看出原始无渗透试样孔隙度大, 为40.1%, 其内部主要以大孔为主(最大孔径为30 μm), 大孔比例占88.5%, 而中孔和微孔分别仅占8.8%和2.7%。相比之下, 渗透后试样孔隙度仅为18.4%, 且内部仍主要以大孔隙为主, 但其占比有所降低(65.9%), 中孔和微孔占比升高, 为17.5%和16.2%。特别地, 相比未渗透原始样, 渗透后试样的3号峰谱整体更趋于向右侧大孔隙分布, 且试样内的最大孔径达到了125 μm , 属于宏观孔隙。此外, 结合上述SEM图和孔隙尺寸分布可知, 原始无渗透试样内部大孔隙主要由于颗粒搭接间隙组成, 因此孔隙构造相对单一, 而渗透后试样整体更加致密, 但各种孔隙分布更加均匀, 其内部中、大孔隙主要由固结团块间孔隙构成, 微孔主要由晶间孔隙和团块局部微孔组成。并且, 由于渗透液的固化充填, 渗透后试样内形成了更大孔隙通道, 因此更适合模拟岩石渗流。

3.2 干湿特性

图6(a)和(c)分别显示了试样b#和c#分别在自然吸水和有压饱和过程中试样的核磁 T_2 谱变化。可知, 与一般岩石试样湿化饱和过程一致, 无论是自然吸水还是有压饱和过程, 试样的 T_2 谱均不断扩大直至浸泡90 h后趋于稳定。并且, 除了初始干燥状态, 吸水后试样峰谱对应的弛豫时间 T_2 范围也较为固定, 即1号峰为0.01~1 ms, 2号峰为1~30 ms, 3号峰为30~1100 ms。因此, 为便于对应试样 T_2 峰谱和其内部孔隙大小关系, 本文以下假定1号峰对应小孔隙, 2号峰为中孔隙, 3号峰为大孔隙, 3号峰外(>1100 ms)为宏观裂隙。

具体至干湿过程而言, 首先, 初始时干燥时试样的 T_2 谱表现出3个峰谱, 但弛豫时间范围较窄, 其中1号和2号峰谱对应的 T_2 值小, 为试样石膏晶体颗粒间的束缚水, 3号峰谱略大, 主要为试样初始时内部密闭大孔隙中残留的部分自由水。其次, 试样b#在自然吸水过程中, 1和2号峰谱的信号幅度增加较小, 而3号峰谱增加很大, 表明自然吸水时以大孔隙吸水为主。相比之下, 试样c#在有压饱和过程中2号和3号峰谱同步增加明显, 而1号峰谱略有增加, 表明有压饱和和作用下水除了进入到试样的大孔内, 也会进入微小孔中。此外, 两个试样泡水后, 其3个峰谱均随饱和时间逐渐右移增大的现象, 尤其是试样c#的3号峰谱, 右移明显。造成此现象的主要原因是, 泡水后试样内孔隙会产生一定吸水溶解, 因此孔隙直径有所增大, 这与常见砂岩等吸水饱和

图6 (网络版彩图)试样吸水饱和过程中核磁 T_2 谱、孔隙度和峰面积变化。(a), (b) 试样b#(自然吸水); (c), (d) 试样c#(有压饱和)

Figure 6 (Color online) Changes in NMR T_2 spectra, NMR porosity, and peak area of two specimens during water absorption. (a), (b) Specimen b# (natural water absorption); (c), (d) specimen c# (pressure saturation).

中孔隙增大现象一致^[35]。

图6(b)和(d)显示试样吸水饱和过程中核磁共振孔隙度和峰面积变化。可看出, 两试样在吸水过程中其核磁孔隙度逐渐增大, 与岩石试样类似^[36], 吸水过程呈现三阶段特征, 即急速吸水阶段、减速吸水阶段和等速吸水阶段。至两试样吸水饱和和结束时, 1号峰面积增长均较小, 2号和3号峰面积增加量明显, 即小孔隙吸水少, 中孔和大孔吸水明显。就总吸水量而言, 两试样的初始核磁孔隙度 n_0 为3.66%, 饱和后的核磁孔隙度 n_s 分别为13.7%和18.4%。因此, 根据孔隙度增量和试样干密度($\rho_s=1.67 \text{ g/cm}^3$)的关系: $(n_s-n_0)\rho_w/\rho_s$, 可计算出打印试样的自然吸水率(W_a)和饱和吸水率(W_p)分别为6.01%和8.8%。同时, 进一步得到试样饱水系数(W_a/W_p)为0.68。对比岩石试样三指标范围^[37,38]发现, 打印试样与一般砂岩很接近, 即: $W_a=2\%\sim 9.0\%$, $W_p=5\%\sim 12\%$ 以

及 $W_a/W_p=0.5\%\sim 0.75\%$ 。

与吸水饱和过程相反, 图7为试样c#在有压饱和后再干燥过程中的 T_2 谱、孔隙度以及峰谱面积变化情况。显然, 随着试样干燥时间增加, 试样总体含水量逐渐降低, 特别在干燥12 h后, 样体的核磁信号和孔隙度变化明显放缓, 表明试样失水已经趋于稳定。并且, 从试样 T_2 谱可看出, 在初始干燥2 h内主要为3号峰谱对应的大孔隙水丢失, 之后2~12 h内主要是2号峰谱对应的中孔内孔隙水降低。然而, 在该过程中, 1号峰谱却先增后减, 即微小孔隙含水量先增大后减小。造成微小孔隙水含量变化的原因主要是: 初始饱和时, 试样内微小孔因气体封闭未能完全饱和, 而初期干燥时, 中、大孔隙水被蒸发汽化后进入了微小孔隙凝结, 再至后期长时间干燥时, 这部分孔隙内水分又会被蒸发。此外, 对比试样干燥60 h后的状态和初始未泡水干燥状态可

知, 试样经历吸水→饱和→干燥过程之后, 其 T_2 谱基本恢复至原始干燥状态, 尽管第3号峰谱对应的大孔隙范围和幅度有所差别, 但1号峰(微小孔隙)的信号幅度和范围基本相同. 这表明, 渗透处理后的打印试样具有良好稳定水理特性.

3.3 软化特性

为进一步研究打印试样在浸水饱和后强度降低的特性(即软化性), 图8为试样d#(干燥)和e#(饱和)的单轴应力-应变曲线以及对应的破坏特征.

可看出, 首先在干燥状态下(图8(a)), 打印试样的单轴压缩应力-应变曲线与一般岩石试样相似, 表现为峰前近似弹性, 峰后有一定应变软化; 其单轴抗压强度

σ_c 为43.5 MPa, 且相应的轴向、径向峰值应变分别为0.87%和-0.58%, 这与大部分中、高孔隙砂岩试样的单轴压缩应力变形范围较为相近. 并且, 从体积变形来看, 该打印试样在加载过程中先被压密, 后逐渐出现剪胀, 最终发展为典型的压剪破坏(图8(b)). 因此, 渗透固化的石膏粉末型打印试样与岩石一样, 属于典型的摩擦性材料. 其次, 由泡水饱和后试样的应力-应变曲线可看出, 试样泡水后, 其轴向和径向的变形明显增大且延性增强, 特别对于径向, 其塑性变形尤为明显. 然而, 由于水的弱化效应, 试样与一般岩石材料一样, 饱和强度相比干燥时降低明显. 并且, 由试样饱和后的破坏模式可看出, 泡水后试样内部打印成型时的层间胶结被一定程度被溶解, 因此裂纹先沿试样中间

图 7 (网络版彩图) 试样c#在失水干燥过程中的核磁信号变化. (a) NMR T_2 谱; (b) 孔隙度和峰面积

Figure 7 (Color online) NMR signal changes of specimen c# during the drying process. (a) NMR T_2 spectrum; (b) porosity and peak area.

图 8 (网络版彩图) 干燥和饱和状态下打印试样的单轴压缩应力-应变曲线(a)以及破坏模式(b)

Figure 8 (Color online) Uniaxial compressive stress-strain curves (a) and failure modes (b) of the 3D-printed specimens in dry and saturated states.

劈裂, 后再被剪切破坏, 这同样与一般饱和砂岩的破坏模式和机制基本一致^[39].

表2总结了打印试样泡水和干燥下的变形和强度参数. E 和 ν 为弹性模量和泊松比, 损伤应力 σ_{cd} 为体积最小点处应力值, 其在干燥时约为峰值强度 σ_c 的80%, 而饱和后仅为 σ_c 的63%. 并且, 根据干燥饱和峰值强度得到打印试样的软化系数 K_R 为0.75. 对比一般岩石, 尤其是沉积岩, 其软化系数范围通常为0.5~0.95^[40,41], 因此, 打印试样软化特性符合一般岩石试验需求.

3.4 裂隙渗流特性

如前所述, 由于岩石的天然节理和裂隙具有随机性和不可重复性, 因此目前依据试验很难定量、重复地研究岩石材料的节理剪切和裂隙渗流行为. 相比之下, 3D打印试样因其可精确复制真实岩石节理裂隙的特性, 在揭示岩体节理裂隙的水力行为机理上具有广泛应用前景. 因此, 本节将在上述对打印试样的水理特性研究基础上, 进一步研究打印试样的裂隙渗流行为. 根据试验方案, 4种不同粗糙度的裂隙试样(1#, 2#, 3#, 4#)依次基于岩石低场核磁共振渗流驱替成像系统进行了恒定围压、恒定渗透水压的渗流试验. 由于试样1#和4#间的裂隙JRC值差距最大, 因此以下主要针对试样1#和4#渗流过程中核磁共振 T_2 谱进行对比分析.

首先对于试样1#(图9(a)), 由其 T_2 曲线变化可知, 从渗流开始(0 s)至渗流30 s, 试样 T_2 峰谱变化较小, 仅有大孔隙(3号峰谱)和宏观裂隙($T_2 > 1000$ ms)所对应的信号有一定增大, 表明试样刚被水浸入; 之后, 从30 s至90 s, 试样大孔隙和宏观裂隙对应的信号量增加尤

表2 试样干燥和饱和状态下的物理力学参数

Table 2 Petrophysical parameters of the 3D-printed specimens in the dry and saturated states

状态	σ_c (MPa)	σ_{cd} (MPa)	E (GPa)	ν	σ_{cd}/σ_c	K_R
干燥	43.5	34.9	5.41	0.26	0.80	0.75
饱和	32.4	20.3	3.62	0.32	0.63	

为显著, 而中、小孔隙相对增加量较小, 表明此过程试样主要是大孔隙和宏观裂隙被渗透; 然而, 在渗流90~120 s之间, 试样的宏观裂隙信号不再增加, 而其大、中、小孔隙信号量却稳步增加, 类似于第3.2节中吸水饱和过程. 这表明, 该过程中试样裂隙已经逐步形成稳态流, 且渗流过程中, 各孔隙开始逐渐充水. 同理, 对于试样4#(图9(b)), 其渗流过程基本与试样1#类似, 而不同的是, 由于其裂隙更为粗糙, 试样形成稳态渗流时间更长(渗流135 s后, 裂隙才形成稳态流), 产生的裂隙和孔隙信号更小, 特别是对于中、小孔隙, 其信号增加量远低于试样1#.

总体而言, 打印试样的渗流过程主要以流体在主裂隙和大孔隙中的流动为主, 具体表现为: 流体先以自由水的形态在主裂隙中聚集并形成主裂隙渗流通道, 同时扩散至大孔隙中, 最后渗流趋于稳态时自由水逐渐进入中、小孔隙内. 对比吴志军等人^[31]对裂隙黄砂岩的渗流试验, 可发现, 渗流过程中二者略有差别, 黄砂岩渗流过程中自由水路径为“裂隙入口→主裂隙→小孔隙→大孔隙”, 而基于打印试样渗流路径为“裂隙入口→主裂隙→大孔隙→小孔隙”. 造成不同的原因主要是, 砂岩内部主要以小孔隙为主, 裂隙水渗

图9 (网络版彩图) 渗流过程中试样的NMR T_2 谱. (a) 试样1#; (b) 试样4#

Figure 9 (Color online) NMR T_2 spectra of specimens during the seepage process. (a) Specimen 1#; (b) specimen 4#.

透时由于小孔毛细作用, 水会先被小孔吸收然后再饱和和充填在大孔隙。相比而言, 本文打印试样的小孔隙含量少、大孔隙多, 因此水会优先进入大孔隙后入小孔隙, 类似于大多数煤岩渗流过程^[33,42,43]。

图10(a)为4个试样渗流饱和过程中的体积含水率变化, 即根据核磁信号反演得到试样内总体含水量(包括宏观裂隙)。可看出, 4种裂隙试样体积含水率随时间均呈S型曲线变化, 且同一渗流时间试样裂隙粗糙度越大, 体积含水率越大。最终, 在稳态渗流下, 试样含水率依次为7.59%, 6.78%, 6.25%以及5.71%。图10(b)为稳态渗流后通过流量监测4个试样渗透系数变化。显然, 裂隙试样的渗透系数与裂隙粗糙度JRC成负相关。对于试样1#, 其JRC值最小, 因此渗透系数最大为 1.29×10^{-6} m/s, 而随着JRC增加, 试样2#, 3#, 4#的渗透系数分别为 1.10×10^{-6} , 9.53×10^{-7} 和 8.38×10^{-7} m/s。与试样1#相比, 降幅分别达6.36%, 19.07%及28.81%, 下降程度明显, 说明裂隙粗糙度对试样的渗流特性产生了显著影响。对比吴志军等人^[31]对黄砂岩同条件下的裂

隙驱替渗流试验, 可发现, 由于打印试样比砂岩致密, 打印试样的渗透系数略小于该砂岩试样。

此外, 图11(a)和(b)分别为上述打印试样1#和4#各自在渗流75 s时的共振成像。图中亮色区域代表流体填充的孔隙和裂隙, 像素点越密集, 灰度值越大, 表明孔隙和裂隙的含水量越多。显然, 同一驱替时间内, 试样1#主裂隙中像素点带密集高亮, 岩体基质部分像素点相对均匀, 分布面大, 表明试样1#中水流已经进入基质, 且在主裂隙中已经形成了完整的渗流通道。相比而言, 试样4#因其裂隙粗糙度大, 渗流路径长, 在渗流75 s时, 仅裂隙前半部分存在少量自由水, 而未形成贯通渗流通道, 同时试样基质部分像素点稀疏, 灰度值低, 表明此时主裂隙水未充分进入到岩体基质部分中。图11(c)为相同压力、相同驱替时间条件下的黄砂岩渗流成像图^[31], 可看出, 3D打印试样基质内信号相对弱但分布均匀, 而砂岩试样基质信号强, 但由于层理等原因, 基质孔隙信号分布不均匀。因此, 打印试样在模拟不同裂隙渗流时具有一定优势。

图 10 (网络版彩图)不同裂隙粗糙度试样的渗流试验结果. (a) 体积含水率曲线; (b) 渗透系数

Figure 10 (Color online) Seepage test results for the 3D-printed specimens with different fracture roughness. (a) Volumetric water content curves; (b) permeability coefficients.

图 11 (网络版彩图)三个裂隙试样的核磁共振成像. (a) 打印试样1#; (b) 打印试样2#; (c) 黄砂岩试样

Figure 11 (Color online) Magnetic resonance imaging (MRI) of three fracture specimens. (a) 3D-printed specimen 1#; (b) 3D-printed specimen 2#; (c) yellow sandstone.

4 结论

基于低场核磁共振岩石驱替渗流系统, 对真空饱和和渗透固化后的石膏粉末型3D打印试样微观结构特性、水理特性以及裂隙渗流特性进行了系统研究. 得到以下结论.

(1) 石膏粉末型3D打印原始试样的结构疏松, 内部孔隙单一, 主要以大孔隙为主, 孔隙度大(达40.1%), 且遇水易分解, 因此不适合模拟岩石材料的渗流特性. 相比之下, 渗透固化的石膏粉末型3D打印试样整体更加致密, 但孔隙分布更加均匀, 且孔隙连通性好, 试样总孔隙度为18.4%, 其中大孔、中孔和微孔占比为65.9%, 16.2%和17.5%, 适合于模拟岩石渗流.

(2) 与岩石试样类似, 渗透固化的石膏粉末型3D打印试样吸水饱和过程呈现三阶段特征, 且在自然吸水时以中、大孔隙充水为主, 而有压饱和时大、中、小三种孔隙均会充水饱和. 并且, 根据核磁 T_2 谱变化计算得到试样的自然吸水率(W_a)和饱和吸水率(W_p)分

别为6.01%和8.8%, 3D打印饱水系数(W_a/W_p)为0.68, 与一般砂岩很接近.

(3) 3D打印试样饱和后的轴向和径向的变形明显增大且延性增强, 特别对于径向, 其塑性变形尤为明显; 相比干燥时, 饱和试样的峰值强度降低明显, 遇水软化系数 K_R 为0.75, 与一般沉积岩软化系数范围接近; 单轴破坏时, 干燥试样为典型的压剪破坏, 而饱和试样先中间劈裂, 后发展成剪切破坏.

(4) 含3D打印裂隙3D打印试样的渗流过程主要以流体在主裂隙和大孔隙中的流动为主, 具体表现为: 流体先以自由水的形态在主裂隙和大孔隙中聚集, 随后逐渐形成主裂隙渗流通道, 最后当渗流趋于稳态时再逐渐进入中、小孔隙内, 然而该过程与同条件下裂隙黄砂岩渗流略有不同, 但与大多数煤岩渗流过程一致. 在围压5 MPa和渗透压1.3 MPa的条件下, 4个不同裂隙粗糙度的打印试样渗透系数在 $8 \times 10^{-7} \sim 1.3 \times 10^{-6}$ m/s之间, 略小于同条件下的黄砂岩.

参考文献

- 1 Fan L, Gao J, Du X, et al. Spatial gradient distributions of thermal shock-induced damage to granite. *J Rock Mech Geotech Eng*, 2020, 12: 917–926
- 2 Fan L F, Gao J W, Wu Z J, et al. An investigation of thermal effects on micro-properties of granite by X-ray CT technique. *Appl Thermal Eng*, 2018, 140: 505–519
- 3 Gao J, Fan L, Wan Z. Thermal cycling effects on the dynamic behavior of granite and microstructural observations. *Bull Eng Geol Environ*, 2021, 80: 8711–8723
- 4 Gao J, Xi Y, Fan L, et al. Real-time visual analysis of the microcracking behavior of thermally damaged granite under uniaxial loading. *Rock Mech Rock Eng*, 2021, 54: 6549–6564
- 5 Ju Y, Ren Z, Li X, et al. Quantification of hidden whole-field stress inside porous geomaterials via three-dimensional printing and photoelastic testing methods. *J Geophys Res Solid Earth*, 2019, 124: 5408–5426
- 6 Ju Y, Xie H P, Zheng Z M, et al. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 3109–3119 [鞠杨, 谢和平, 郑泽民. 基于3D打印技术的岩体复杂结构与应力场的可视化方法. *科学通报*, 2014, 59: 3109–3119]
- 7 Li S C, Zhou Y, Li L P, et al. Development and application of a new similar material for underground engineering fluid-solid coupling model test (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2012, 31: 1128–1137 [李术才, 周毅, 李利平, 等. 地下工程流-固耦合模型试验新型相似材料的研制及应用. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31: 1128–1137]
- 8 Shi X M, Liu B G, Xiao J. A method for determining the ratio of similar materials with cement and plaster as bonding agents (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2015, 36: 1357–1362 [史小萌, 刘保国, 肖杰. 水泥和石膏胶结相似材料配比的确定方法. *岩土力学*, 2015, 36: 1357–1362]
- 9 Chu Z F, Liu B G, Sun J L, et al. Research on rheological similar material of soft rock based on Burgers model (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2018, 37: 1185–1198 [储昭飞, 刘保国, 孙景来, 等. 基于Burgers模型的软岩流变相似材料的研究. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37: 1185–1198]
- 10 Jiang C, Zhao G F. A preliminary study of 3D printing on rock mechanics. *Rock Mech Rock Eng*, 2015, 48: 1041–1050
- 11 Feng X T, Gong Y H, Zhou Y Y, et al. The 3D-printing technology of geological models using rock-like materials. *Rock Mech Rock Eng*, 2019,

- 52: 2261–2277
- 12 Ma G W, Wang L, Ju Y. State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction. *Sci China Tech Sci*, 2018, 61: 475–495
- 13 Song R, Wang Y, Ishutov S, et al. A comprehensive experimental study on mechanical behavior, microstructure and transport properties of 3D-printed rock analogs. *Rock Mech Rock Eng*, 2020, 53: 5745–5765
- 14 Kong L, Ostadhassan M, Li C, et al. Can 3-D printed gypsum samples replicate natural rocks? An experimental study. *Rock Mech Rock Eng*, 2018, 51: 3061–3074
- 15 Ishibashi T, Fang Y, Elsworth D, et al. Hydromechanical properties of 3D printed fractures with controlled surface roughness: Insights into shear-permeability coupling processes. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2020, 128: 104271
- 16 Wang P T, Liu Y, Zhang L, et al. Preliminary experimental study on uniaxial compressive properties of 3D printed fractured rock models (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2018, 37: 364–373 [王培涛, 刘雨, 章亮, 等. 基于3D打印技术的裂隙岩体单轴压缩特性试验初探. 岩石力学与工程学报, 2018, 37: 364–373]
- 17 Gomez J S, Ardila N, Chalaturnyk R J, et al. Reservoir geomechanical properties characterization of 3D printed sandstone. In: *Poromechanics VI*, 2017. 952–960
- 18 Jiang C, Zhao G F, Zhu J, et al. Investigation of dynamic crack coalescence using a gypsum-like 3D printing material. *Rock Mech Rock Eng*, 2016, 49: 3983–3998
- 19 Suzuki A, Watanabe N, Li K, et al. Fracture network created by 3-D printer and its validation using CT images. *Water Resour Res*, 2017, 53: 6330–6339
- 20 Zhou T, Zhu J B. Identification of a suitable 3D printing material for mimicking brittle and hard rocks and its brittleness enhancements. *Rock Mech Rock Eng*, 2018, 51: 765–777
- 21 Wu Z, Zhang B, Weng L, et al. A new way to replicate the highly stressed soft rock: 3D printing exploration. *Rock Mech Rock Eng*, 2020, 53: 467–476
- 22 Kong L, Ostadhassan M, Li C, et al. Pore characterization of 3D-printed gypsum rocks: a comprehensive approach. *J Mater Sci*, 2018, 53: 5063–5078
- 23 Wang B X, Jin A B, Zhao Y Q, et al. Fracture law of 3D printing specimen with non-consecutive joints based on CT scanning (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2019, 40: 3920–3927, 3936 [王本鑫, 金爱兵, 赵怡晴, 等. 基于CT扫描的含非贯通节理3D打印试件破裂规律试验研究. 岩土力学, 2019, 40: 3920–3927, 3936]
- 24 Jiang Q, Liu X, Yan F, et al. Failure performance of 3DP physical twin-tunnel model and corresponding safety factor evaluation. *Rock Mech Rock Eng*, 2021, 54: 109–128
- 25 Kong L, Ostadhassan M, Liu B, et al. Multifractal characteristics of MIP-based pore size distribution of 3D-printed powder-based rocks: A study of post-processing effect. *Transp Porous Media*, 2019, 129: 599–618
- 26 Kong L, Ostadhassan M, Hou X, et al. Microstructure characteristics and fractal analysis of 3D-printed sandstone using micro-CT and SEM-EDS. *J Pet Sci Eng*, 2019, 175: 1039–1048
- 27 Liu Q S, He F, Deng P H, et al. Application of 3D printing technology in physical modelling in rock mechanics (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2019, 40: 3397–3404 [刘泉声, 何璠, 邓鹏海, 等. 3D打印技术在岩石物理力学试验中的应用. 岩土力学, 2019, 40: 3397–3404]
- 28 Zhang B. Experimental research on shear mechanical properties of rock joints based on gypsum-powder 3D printing technology (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Wuhan: Wuhan University, 2020. [张波. 基于石膏粉末型3D打印技术的岩石节理面剪切机理研究. 硕士学位论文. 武汉: 武汉大学, 2020]
- 29 ISRM(1979). Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. *Int J Rock Mech Mining Sci Geomech Abstracts*, 1979, 16: 105
- 30 Zheng B, Qi S. A new index to describe joint roughness coefficient (JRC) under cyclic shear. *Eng Geol*, 2016, 212: 72–85
- 31 Wu Z J, Lu H, Weng L, et al. Investigations on the seepage characteristics of fractured sandstone based on NMR real-time imaging (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2021, 40: 263–275 [吴志军, 卢槐, 翁磊, 等. 基于核磁共振实时成像技术的裂隙砂岩渗流特性研究. 岩石力学与工程学报, 2021, 40: 263–275]
- 32 Chu Z, Wu Z, Liu Q, et al. Evaluating the microstructure evolution behaviors of saturated sandstone using NMR testing under uniaxial short-term and creep compression. *Rock Mech Rock Eng*, 2021, 54: 4905–4927

-
- 33 Zhao Y, Liu T, Lin B, et al. Evaluation of compressibility of multiscale pore-fractures in fractured low-rank coals by low-field nuclear magnetic resonance. [Energy Fuels](#), 2021, 35: 13133–13143
- 34 Li J, Kaunda R B, Zhou K. Experimental investigations on the effects of ambient freeze-thaw cycling on dynamic properties and rock pore structure deterioration of sandstone. [Cold Regions Sci Tech](#), 2018, 154: 133–141
- 35 Song Y J, Zhang L T, Ren J X, et al. Study on damage characteristics of weak cementation stratum under dryingwetting cycles based on nuclear magnetic resonance technique (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2019, 38: 825–831 [宋勇军, 张磊涛, 任建喜, 等. 基于核磁共振技术的弱胶结砂岩干湿循环损伤特性研究. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38: 825–831]
- 36 Tang S B, Yu C Y, Heap M J, et al. The influence of water saturation on the short- and long-term mechanical behavior of red sandstone. [Rock Mech Rock Eng](#), 2018, 51: 2669–2687
- 37 Ngwenya B T, Main I G, Elphick S C, et al. A constitutive law for low-temperature creep of water-saturated sandstones. [J Geophys Res](#), 2001, 106: 21811–21826
- 38 Qiao L, Wang Z, Huang A. Alteration of mesoscopic properties and mechanical behavior of sandstone due to hydro-physical and hydro-chemical effects. [Rock Mech Rock Eng](#), 2017, 50: 255–267
- 39 Miao C Y, Yang L, Xu Y Z, et al. Study on strength softening experiment and micro-mechanism of sandstone based on nuclear magnetic resonance (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2021, 40: 394 [缪澄宇, 杨柳, 许永震, 等. 基于核磁共振监测的砂岩强度软化实验及微观机制研究. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40: 394]
- 40 Guo H Y, Zhao J, Liu P Y. Experimental studies and chemical analysis of water on weakening behaviors of deep soft rock (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2018, 37(Supp.1): 8 [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. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(Supp.1): 8]
- 41 Jia H L, Wang T, Xiang W, et al. Influence of water content on the physical and mechanical behaviour of argillaceous siltstone and some microscopic explanations (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2018, 37: 11 [贾海梁, 王婷, 项伟, 等. 含水率对泥质粉砂岩物理力学性质影响的规律与机制. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37: 11]
- 42 Liu Z, Yang H, Wang W, et al. Experimental study on the pore structure fractals and seepage characteristics of a coal sample around a borehole in coal seam water infusion. [Transp Porous Media](#), 2018, 125: 289–309
- 43 Lu Y, Wang L, Ge Z, et al. Fracture and pore structure dynamic evolution of coals during hydraulic fracturing. [Fuel](#), 2020, 259: 116272

Preliminary investigation on the hydrophysical properties and fracture seepage characteristics of 3D-printed gypsum specimens based on nuclear magnetic resonance technology

CHU ZhaoFei¹, WU ZhiJun^{1,2}, LIU QuanSheng^{1,2}, WENG Lei¹ & XU XiangYu¹

¹ School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

² The Key Laboratory of Safety for Geotechnical and Structural Engineering of Hubei Province, Wuhan University, Wuhan 430072, China

The gypsum powder-based three-dimensional (3D) printing technology is widely used in the field of rock mechanics and petroleum. In this study, the hydrophysical properties and the fracture seepage characteristics of 3D-printed gypsum specimens strengthened by vacuum saturation infiltration treatment were systematically investigated. First, the microstructural features and the pore size distribution characteristics of the printed specimens were analyzed through scanning electron microscopy and low-field nuclear magnetic resonance (NMR) technology. The wet and dry tests (i.e., water absorption → saturation → drying process) were performed with respect to natural water absorption and pressurized saturation conditions to investigate the hydrophysical properties of the printed specimens. Subsequently, uniaxial compression tests were conducted on the dry and saturated printed specimens to investigate their softening characteristics, which were caused by the water weakening effect. Finally, based on the NMR-based rock seepage test system, fracture seepage tests accounting for constant confining and fluid pressures were performed on four fractured 3D-printed specimens with different fracture roughness. The experimental results show that the investigated 3D-printed gypsum specimens have uniform pore distribution and good connectivity, with 18.4% total porosity. The medium and large pores in the specimens are saturated during natural water absorption, while all pores are saturated during the pressurized saturation. The water absorption rates under the natural and pressurized saturation conditions are 6.01% and 8.8%, respectively, and the corresponding saturation coefficient is 0.68, which is pretty close to that of sandstone. Compared with the dry state, the saturated specimens have a large deformation and a lower peak strength, and the softening coefficient K_R in water is 0.75, which is close to the ranges of the majority of sedimentary rocks. During seepage, water first accumulates in the main fissure and large pores in the specimen, then gradually forms the main seepage channel, and finally gradually enters the middle and small pores as the seepage reaches a steady state. The permeability coefficients of the four fractured specimens with different roughness range from 8×10^{-7} to 1.3×10^{-6} m/s under the confining pressure of 5 MPa and the fluid pressure of 1.3 MPa, which are slightly smaller than those of the yellow sandstone.

rock, 3D Printing, gypsum, hydrophysical property, fracture seepage, nuclear magnetic resonance

doi: [10.1360/SST-2021-0463](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0463)