DOI：10.16285/j.rsm.2022.0670

裂隙砂岩注浆前后渗流特性及注浆后力学特性试验研究

张培森[1,2]，许大强[1,2]，李腾辉[3]，胡　昕[4]，赵成业[1,2]，侯季群[1,2]，牛　辉[1,2]

（1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地，山东 青岛 266590；2. 山东科技大学 矿业工程国家级实验教学示范中心，山东 青岛 266590；3. 济南城建集团有限公司，山东 济南 250031；4. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司 陕西 西安 710075）

摘　要：为探究裂隙砂岩注浆前后渗流特性及注浆后力学特性变化规律，利用 Rock Top 多场耦合试验仪在不同围压下以 0.02 mm/min 的恒定速率对砂岩进行三轴压缩试验得到裂隙砂岩并进行渗流试验，进而采用自主研制的注浆加固系统对裂隙砂岩进行注浆加固，再利用 Rock Top 多场耦合试验仪对注浆后的裂隙砂岩在不同围压下进行三轴压缩渗流试验。结果表明：（1）裂隙砂岩注浆后的渗透率相对于注浆前显著降低，下降幅度在 24.26%～96.55%之间，但均大于原岩渗透率；（2）裂隙砂岩注浆前、后的渗透率随静水压等梯度增加呈现出不同的阶段性变化规律，并且当静水压达 40 MPa 及以上时，5 MPa 以内的渗透压差对渗透率影响较小，渗透率曲线趋于水平；（3）裂隙砂岩注浆后仅在 10 MPa 围压下表现出同原岩类似的脆性破坏特征，在 20～60 MPa 围压下则失去了原岩的脆性破坏特征，表现出很强的延性破坏，并在峰后出现塑性流动现象；（4）裂隙砂岩注浆后的峰值强度、峰值应变皆随围压的增大而增大，并呈现出满足二次函数关系的非线性变化特征，其峰值强度介于原岩峰值强度的 44%～59%之间；（5）裂隙砂岩注浆后的破坏形式以滑移剪切破坏为主，低围压下会伴随有新破坏形式产生，随着围压增大，破坏程度减弱；（6）岩−浆界面电镜扫描试验表明，钙矾石与 C-S-H（水化硅酸钙）凝胶相互搭接形成了稳定的水化产物，从而提升了岩石承载力。

关　键　词：裂隙砂岩；注浆加固；渗透特性；力学特性；电镜扫描

中图分类号：TU451　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000－7598 (2023) 增刊－0012－15

Experimental study of seepage characteristics before and after grouting and mechanical characteristics after grouting of fractured sandstone

ZHANG Pei-sen[1,2]，　XU Da-qiang[1,2]，　LI Teng-hui[3]，　HU Xin[4]，
ZHAO Cheng-ye[1,2]，　HOU Ji-qun[1,2]，　NIU Hui[1,2]

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Mining Engineering Education, Qingdao, Shandong 266590, China; 3. Jinan Urban Construction Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250031, China; 4. China Power Engineering Consulting Group Northwest Electric Power Design Institute Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: This study aims to explore the seepage characteristics of fractured sandstone before and after grouting and the change rule of mechanical properties after grouting. Firstly, Rock Top multi-field coupling tester was used to conduct triaxial compression test on sandstone under different confining pressures at a constant rate of 0.02 mm/min to obtain fractured sandstone and conduct seepage test. Then, the self-developed grouting reinforcement system was used to reinforce the fractured sandstone, and the Rock Top multi-field coupling tester was used to conduct the triaxial compression seepage test on the fractured sandstone under different confining pressures. The results show that: (1) The permeability of fractured sandstone decreases significantly after grouting compared with that before grouting, with a decrease range of 24.26%-96.55%, but it is greater than the original rock permeability. (2)

收稿日期：2022-05-07　　录用日期：2022-08-28
基金项目：国家重点研发计划资助项目（No.2018YFC0604702）；国家自然科学基金资助项目（No.51379119）；山东省自然科学基金项目（No.ZR2021ME086）。
This work was supported by the National Key Research and Development Program Sub-task (2018YFC0604702), the National Natural Science Foundation of China (51379119) and the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2021ME086).
第一作者简介：张培森，男，1977 年生，博士，教授，主要从事岩石力学与采矿工程等方面的研究。E-mail：peisen_sky@163.com
通讯作者：许大强，男，1997 年生，硕士研究生，主要从事岩石力学与煤矿防治水等方面的研究。E-mail：840684859@qq.com

The permeability of fractured sandstone before and after grouting shows different periodic changes with the increase of hydrostatic pressure. When hydrostatic pressure reaches 40 MPa or above, the permeability difference within 5 MPa has a little effect on permeability, and the permeability curve tends to be horizontal. (3) After grouting, the fractured sandstone only exhibits brittle failure characteristics similar to the original rock only under 10 MPa confining pressure, but loses the brittle failure characteristics of the original rock under 20−60 MPa confining pressure, showing strong ductility failure and plastic flow phenomenon after the peak. (4) The peak strength and strain of the fractured sandstone after grouting both increase with the increase of confining pressure and show nonlinear variation characteristics satisfying the quadratic function relation. The peak strength ranges from 44% to 59% of the peak strength of the original rock. (5) The failure mode of fractured sandstone after grouting is mainly slip-shear failure, and new failure modes will appear under low confining pressure. With the increase of confining pressure, the failure effect weakens. (6) Scanning electron microscopy test on rock-slurry interface shows that ettringite and C-S-H (calcium silicate hydrate) gel are bonded to form stable hydration products, thus improving the bearing capacity of rock.

Keywords: fractured sandstone; grouting reinforcement; permeability characteristics; mechanical properties; scanning electron microscope

1　引　言

岩体在自然状态下常伴有节理、裂隙等尺寸不一、形态复杂的软弱结构面，这些结构面严重影响着岩体结构的稳定性[1-2]。在矿山、隧道、水利等地下工程领域建设中，岩体受工程扰动影响使其软弱结构面进一步发育、扩展，进而对岩体力学特性和岩体中流体流动产生重要影响，严重威胁工程建设安全[3-8]。为避免上述问题的发生，在工程实践中一般采用注浆加固的方法促使松散破碎岩体胶结成整体，通过提高岩体黏聚力与内摩擦角，从而改善裂隙岩体力学性能以达安全建设目的[9-11]。

砂岩是广泛分布于地壳中的一种沉积岩，也是地下工程领域常见的岩石类型之一。目前，诸多专家学者基于裂隙砂岩注浆加固力学特性开展了一系列研究工作。例如，王志等[12]对裂隙砂岩进行注浆加固并探究注浆加固体的疲劳损伤规律，发现注浆后岩石强度、韧性、抗疲劳性能均明显改善，注浆加固后的应变及损伤量仍然符合三阶段变化规律；宗义江等[13]采用自制注浆系统对裂隙砂岩承压注浆加固力学特性进行了试验研究，结果表明裂隙砂岩注浆后，其强度较砂岩残余强度有较大提高，且能够促进注浆加固体变形由脆性向延性转化，使侧向变形、轴向变形趋于协调，与高延法[14]、王汉鹏[15]等研究结果类似；卢海峰等[16]对注浆砂岩开展了不同法向压力下的直剪试验，分析得到注浆可以增大结构面间黏聚力，同时改变结构面三维形貌特征，使抗剪强度增大；陆银龙等[17]通过开展注浆砂岩结构面宏观直剪、微观浆−岩黏结界面扫描电子显微镜（scanning electron microscope，简称 SEM）扫描及纳米压痕试验，得到注浆砂岩结构面宏观剪切力学强度参数、剪切破坏模式、浆−岩黏结界面微观结构特征及浆−岩界面过渡区的力学性质。此外，也有学者对裂隙辉绿岩[18]、裂隙泥岩[19]、裂隙煤岩[20]、裂隙石灰岩[21]、裂隙大理岩[22]等开展了注浆加固力学特性试验研究，并取得了相应的研究成果。上述研究为岩石力学理论发展及实际工程应用起到了极大的推动作用，但关于裂隙岩样注浆后的围压效应却鲜有文献涉及。

关于裂隙砂岩渗流特性研究方面，惠冰等[23]采用数值模拟方法研究了不同注浆压力下渗流场演化规律及涌水区域水流速度变化情况，结果表明随着注浆压力提高，浆液不断驱替砂岩中的孔隙水，能有效封堵过水通道，从而降低砂岩渗透率；周晓敏等[24]建立了注浆加固渗流场与应力场耦合的数学模型，推导了渗流场及应力场解析表达式。此外，刘奇等[25]围绕影响注浆加固效果的关键因素，对注浆前、后充填介质开展变质量渗流试验，发现注浆作用提高了溶腔充填介质的抗渗流稳定性，延缓了孔隙度演化，推迟了“突水”爆发阶段的出现时间；杨志斌等[26]基于压水试验定量评价注浆封堵效果，发现灰岩注浆后阻水性能呈现高阻弱渗的特点，较注浆前渗透性能显著变弱；袁敬强等[27]对不同浆液填充率的全风化花岗岩注浆试样进行了渗透试验，结果表明渗透系数呈负指数型减小；魏建平等[28]对注浆前后煤样分别进行 CT 扫描观测以及渗透率试验测定，指出浆液渗流扩散作用使煤样裂隙内浆液颗粒逐渐扩散并沉积，导致裂隙煤样渗透率不断下降。上述关于裂隙岩样渗流特性方面的研究取得了较多实质性成果，对实际岩土工程安全问题具有指导意义，但研究大都集中于裂隙岩样注浆后的渗流特性，并未深入探究裂隙岩样注浆前、后及注浆后再破坏 3 种状态下的渗透率关系，研究内容略显局限。

总体来说，以上研究成果也为本文顺利开展裂隙砂岩注浆前后渗流特性及注浆后力学特性试验研

究提供了重要参考，但针对裂隙岩样制备问题，由于工程地质条件复杂，原岩裂隙产状具有不确定性，使原岩裂隙岩样取样困难[29]，众多学者在研究裂隙岩样注浆时多采用人工预制的裂隙岩样或是采用数值模拟手段预制裂隙岩样，其普遍问题在于人为主观因素影响较大，不能切实反映实际裂隙岩样的裂隙形态。本文为解决裂隙岩样取样困难问题，所选裂隙砂岩是经三轴压缩试验所制作得到，人为主观因素干扰较小，相对更贴近于实际裂隙砂岩。基于此，为进一步探究实际工程裂隙砂岩注浆后的稳定性、阻隔水能力以及注浆后再次受工程扰动而导致裂隙砂岩二次破坏后的阻隔水性能，反映实际工程裂隙砂岩注浆加固效果，本文借助 Rock Top 多场耦合试验仪及自主研制的注浆加固系统对裂隙砂岩开展了注浆前后渗流特性及注浆后力学特性试验研究，以期为实际岩土工程安全问题提供重要参考和理论依据。

2 试验概况

2.1 材料选取

试验选用材料为均质性较高、离散性较小的云南红砂岩，外观呈红褐色，取芯自完整岩块相邻部位，通过对随机选取的砂岩薄片进行 SEM 电镜扫描、岩样粉末 X 射线衍射全岩分析及黏土检测，最终鉴定结果为细粒石英砂岩，显微结构描述为细粒砂状结构，块状构造，孔隙式胶结，其矿物含量见表 1，岩性参数见表 2[30]，平均孔隙度为 0.167，平均体积密度为 2 396 kg/m^3，依据《工程岩体试验方法标准》(GB/T50266－99)[31]制备了标准岩石试样，其尺寸为 Φ50 mm×H100 mm，经打磨后外观均匀细密、两端平整，无可见天然裂纹。试验前采用真空抽气法对所用砂岩进行 6 h 强制饱水处理，并对强制饱水后的砂岩采用 JSR-DPR 300 超声波设备进行声波测试，剔除波速异常砂岩，挑选差异性较小砂岩进行试验，从而尽可能排除砂岩离散性对试验结果的影响。

表 1 岩石矿物含量

Table 1 Mineral content of rock

岩屑物含量/%					黏土矿物含量/%
石英	钾长石	斜长石	方解石	赤铁矿	
64.5	2.2	12.4	13.3	1.1	6.5

2.2 裂隙砂岩制备

注浆所用裂隙砂岩（见图 1）是基于 Rock Top 多场耦合试验仪在 10、20、30、40、50、60 MPa 围压下采用位移控制 0.02 mm/min 的恒定速率加载至岩样峰值强度所制作得到[32]，原因在于经三轴压缩试验下的岩石破断面更接近岩石在实际工程扰动下形成的破断面，尽可能地避免了人为主观因素干扰。Rock Top 多场耦合试验仪见图 2，仪器具体介绍请参见文献[30，32]，岩样封装及传感器布置见图 3。

表 2 岩性参数

Table 2 Physical parameters of rock

体积密度/(kg·m^{-3})	孔隙度	单轴抗压强度/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
2 316～2 457	0.15～0.18	123	32.04	34.15	21.42	0.24

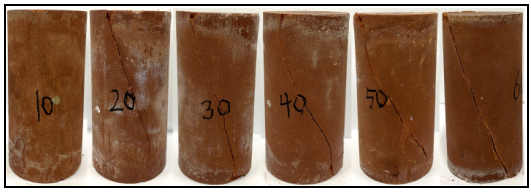


图 1 裂隙砂岩试样

Fig.1 Fractured sandstone specimen

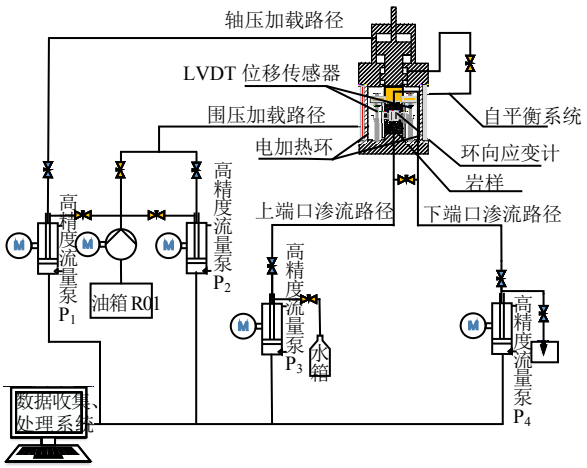


图 2 Rock Top 多场耦合试验仪

Fig.2 Rock Top multi-field coupling tester

2.3 裂隙砂岩注浆

本试验所用室内模拟注浆加固系统（见图 4）主要由注浆泵、储浆罐、注浆加固试验装置、液压泵、溢浆储存缸和抽浆泵 6 部分组成。该系统可以控制注浆压力及围压大小，实现“注–抽”相结合的新型注浆工艺，提高注浆效率。注浆加固试验装置为该套系统核心组成部分，详细构造见图 5。

2.3.1 注浆参数

试验采用的注浆浆液为自行配置的低黏度高强度新型注浆浆液[33]，其中主要原料的化学成分见表 3。

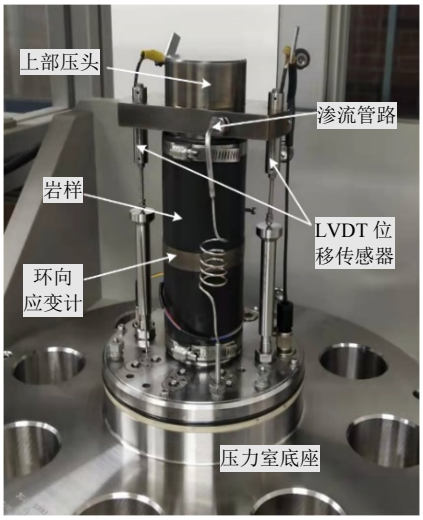


图 3　岩样封装及传感器布置图

Fig.3　Rock sample package and sensor layout

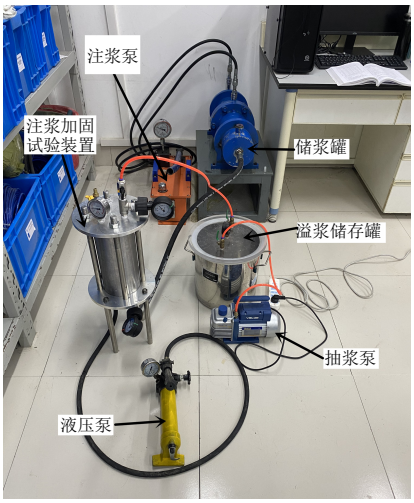


图 4　室内模拟注浆加固系统

Fig.4　Simulated grouting reinforcement system

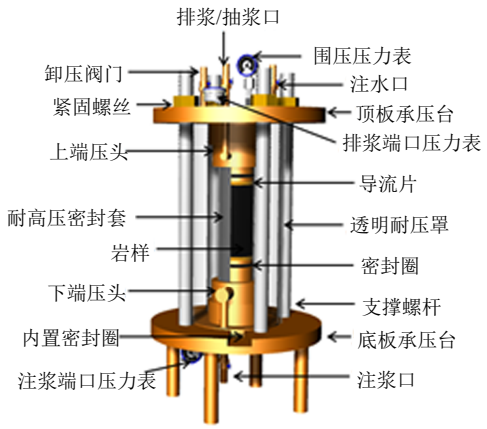


图 5　注浆加固试验装置

Fig.5　Grouting reinforcement test device

2.3.2 注浆过程

将制备的裂隙砂岩放入注浆加固试验装置中密封，先进行密封性测试，检测密封性良好后，开展注浆加固试验，注浆加固试验具体步骤如下：

表 3　新型注浆浆液主要原料的化学成分

Table 3　Chemical composition of main raw materials of new grouting grout

材料	质量分数/%						
	SiO_2	CaO	SO_3	MgO	Al_2O_3	Fe	Cl^-
超细水泥	18.64	63.77	2.7	3.2	5.26	—	0.015
硅粉	96.52	—	—	—	—	—	0.006
超细粉煤灰	45.1	5.6	2.1	—	24.2	0.85	0.015

（1）将配置好的浆液倒入储浆罐中，利用注浆泵将浆液泵入注浆管中（此时注浆管与注浆加固试验装置未连接）；

（2）待注浆管排出浆液时，将注浆管与注浆加固试验装置连接并打开液压泵调节围压；

（3）出浆管连接注浆加固试验装置与溢浆储存罐，溢浆储存罐与抽浆泵相连接并打开抽浆泵使溢浆储存罐为负压状态，利用溢浆储存罐对浆液进行收集；

（4）利用注浆泵持续加压使注浆压力至设定值后停止注浆，此时若观察到注浆端口压力表数值减小，则继续加压维持注浆端口压力；

（5）观察排浆端口浆液渗流量变化，若在较长一段时间内渗流量基本稳定，则可结束注浆。

注浆完成后将注浆后的裂隙砂岩取出，并在恒温恒湿养护箱中养护 28 d，如图 6 所示。



图 6　注浆后的裂隙砂岩养护图

Fig.6　Curing diagram of fractured sandstone after grouting

2.4　试验原理及过程

为获取裂隙砂岩注浆前、后及注浆后再破坏 3 种状态在不同静水压下的渗透率变化规律，本次试验采用稳态法测其渗透率。稳态法测试计算原理一般是根据达西定律，表达式[34]如下：

$$K_i = \frac{\mu L \cdot \Delta Q_i}{A \cdot \Delta P \cdot \Delta t_i} \tag{1}$$

式中：K_i 为砂岩在 Δt_i 时间内的平均渗透率（m^2）；Δt_i 为记录点间隔时间（s）；μ 为流体黏滞系数，取

$\mu=1.005\,0\times10^{-3}$ Pa·s（水温 20 ℃）；ΔQ_i 为 Δt_i 时间内通过砂岩试样的水流体积（m^3）；L 为水流渗流长度，即试样高度（m）；A 为试样横截面面积（m^2）；ΔP 为试样渗流上、下游渗透压差（本文 $\Delta P=P_3-P_4$，P_3 和 P_4 分别为渗流上、下游压力）（P_a）。

煤层底板含水层受补给水源水头位置的影响将产生不同水压，且含水层上方不同位置底板岩层所受含水层水压也会有所不同，因此，根据何满潮等[35]的研究成果，确定本次试验最高渗透压差取 5 MPa，即渗流上游（岩样下端）与下游（岩样上端）水压差 ΔP 取 1、2、3、4、5 MPa；本次试验设定静水压分别为 10、20、30、40、50、60 MPa，每个围压梯度下开展了 3 组平行试验，但为保证平行试验中每个砂岩试样的裂缝三维几何尺寸的相似性以及保证单一变量控制原则，本文主要从材料选取（见 2.1 节）和试验条件两方面进行约束。试验条件方面：静水压加载过程，围压室与自平衡腔室连通，围压室与自平衡腔室等压，通过轴压室自平衡活塞压头可对试件进行三向等压的静水压加载；轴压加载过程，此时 P_1（轴压泵）开始工作，轴向压头不断下压，在围压腔室和自平衡腔室联动作用下，围压室内受到挤出效应的围压油进入机械自平衡腔室，此举减弱了围压的压力波动，系统将自动维持围压的稳定性，同时因三轴压缩造成岩样扩容效应而产生的围压波动也将减弱；轴压卸荷过程，P_2（围压泵）保持稳压，P_1 泵开始降压至 0 MPa，恢复至静水压状态（P_2 泵通过自平衡系统提供三向等压的压力值）；静水压卸载过程，相当于传统设备试验中轴压和围压同时等量降低，即该条件下的静水压卸荷过程实际上是三向同时卸压的过程，仅通过 P_2 泵单独工作，整个设备压力装置利用自平衡系统在其内部实现了压力协调平衡，从而使卸压过程趋于稳定。综上可知，Rock Top 多场耦合试验仪稳定性好，使得相同条件下经三轴压缩试验制备的裂隙砂岩试样的破断面倾角、粗糙度及破坏程度较为稳定，几乎不存在明显差异。具体试验过程示意图见图 7。

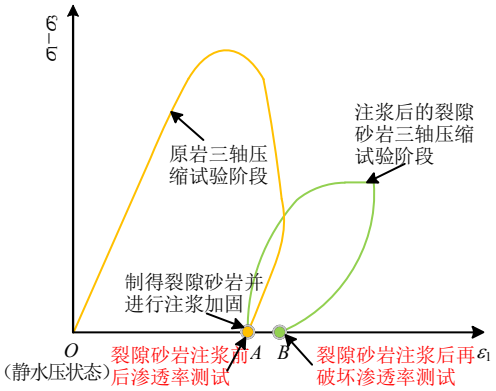


图 7 试验过程示意图

Fig.7 Schematic diagram of the test process

如图 7 所示，本试验整体可分为 3 个过程，即原岩三轴压缩试验（OA）、裂隙砂岩注浆加固、注浆后的裂隙砂岩三轴压缩试验（AB），其中，裂隙砂岩注浆加固介于原始三轴压缩与注浆后的裂隙砂岩三轴压缩试验之间。OA、AB 具体试验过程及操作见表 4。

3 试验结果与分析

3.1 裂隙砂岩注浆前后渗透特性分析

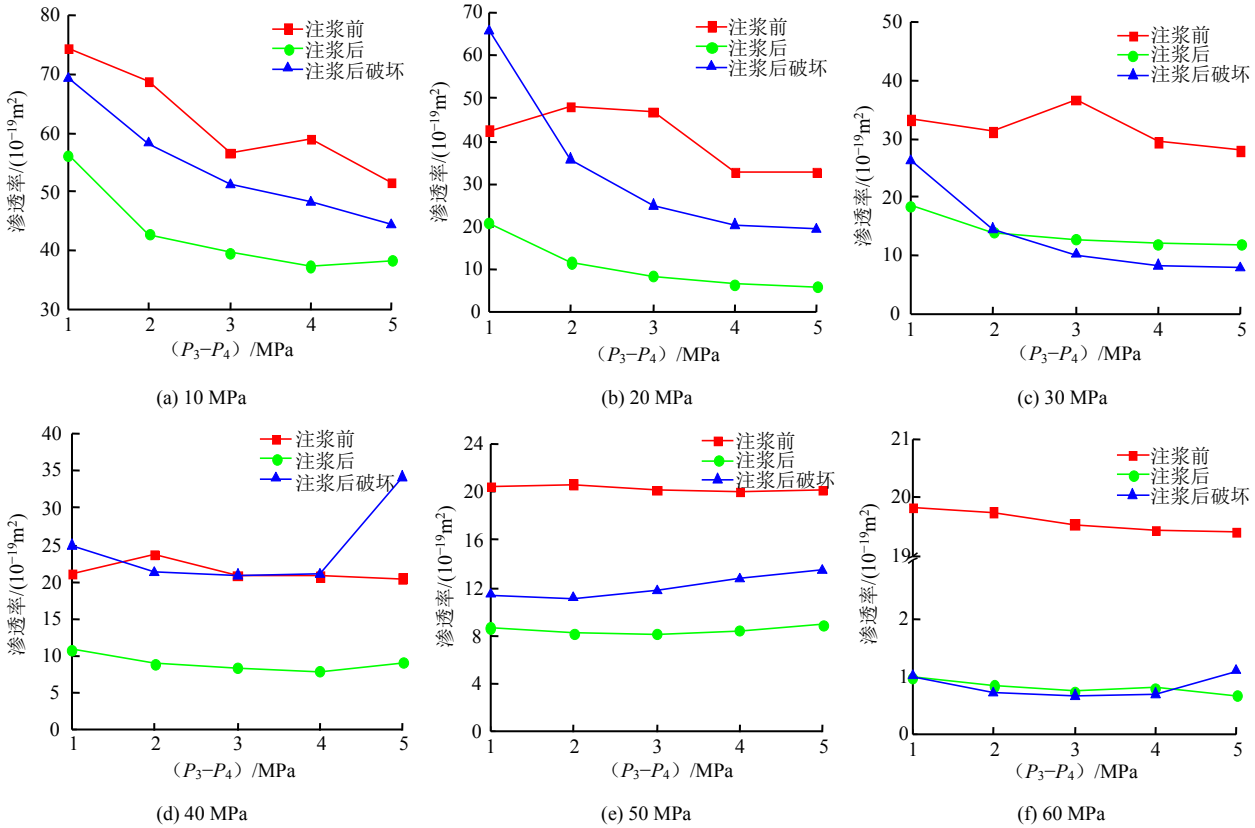
本次渗流试验仅在静水压下进行，即轴压泵不工作，只加载围压的条件下，通过打开自平衡系统

表 4 试验过程及操作

Table 4 Test process and operation

试验过程	试验仪器	自平衡系统	加/卸载方式	加/卸载速率	加/卸载目标	备注
原岩三轴压缩试验阶段（OA）	Rock Top 多场耦合试验仪	打开	静水压加载	1.00 MPa/min	预定静水压	—
		打开	轴压加载	0.02 mm/min	峰值强度	—
		打开	轴压卸载	2.00 MPa/min	预定静水压	保持该状态静水压并测其渗透率，即为裂隙砂岩注浆前的渗透率（A 点状态）
		打开	静水压卸载	2.00 MPa/min	0	静水压卸载至 0 MPa，取出岩样，获得裂隙砂岩试样
注浆后的裂隙砂岩三轴压缩试验阶段（AB）	Rock Top 多场耦合试验仪	打开	静水压加载	1.00 MPa/min	预定静水压	保持该状态静水压并测其渗透率，即为裂隙砂岩注浆后的渗透率（A 点状态）
		打开	轴压加载	0.02 mm/min	峰值强度	—
		打开	轴压卸载	2.00 MPa/min	预定静水压	保持该状态静水压并测其渗透率，即为裂隙砂岩注浆后再破坏的渗透率（B 点状态）
		打开	静水压卸载	2.00 MPa/min	0	静水压卸载至 0 MPa，取出岩样，完成一个岩样的整个试验过程 更换岩样改变试验条件，开始新的试验

实现三向等压的静水压状态。考虑到不同围压下砂岩的破坏模式及裂隙发育程度均存在差异，但由于制作裂隙砂岩所施加的围压与裂隙砂岩注浆后再破坏所施加的围压是相同的，并在对应的静水压状态下测其渗透率，因此，可通过渗透率大小直接反映不同状态下裂隙砂岩的损伤破坏情况。图 8 根据渗透率计算公式（1），给出了不同静水压下裂隙砂岩注浆前、后及注浆后再破坏 3 种状态下的渗透率曲线，发现随着静水压增大，3 种状态下的渗透率曲线整体由下降型向平缓型转化，静水压为 50、60 MPa 时，曲线基本趋于水平。分析认为，静水压越大，岩石所受挤压效果越显著，岩石颗粒之间密实度增加，岩石渗流通道变窄，渗流受阻，5 MPa 以内的渗透压差相与静水压的比值逐渐减小，其影响程度逐渐减弱，进而出现静水压越大，渗透压差对渗透率影响越小。



(a) 10 MPa　(b) 20 MPa　(c) 30 MPa

(d) 40 MPa　(e) 50 MPa　(f) 60 MPa

图 8　不同静水压下裂隙砂岩 3 种状态下的渗透率曲线

Fig.8　Permeability curves of fractured sandstone in three different states under different hydrostatic pressures

由图 8 可知，裂隙砂岩注浆前、后及注浆后再破坏 3 种状态下的渗透率存在明显差异，裂隙砂岩注浆前到注浆后的渗透率由 19.41×10^{-19}～74.37×10^{-19} m^2 下降至 0.67×10^{-19}～56.33×10^{-19} m^2，下降幅度介于 24.26%～96.55%之间，表明裂隙砂岩注浆后的渗透率较注浆前显著降低；裂隙砂岩注浆后再次破坏的渗透率为 0.67×10^{-19}～69.30×10^{-19} m^2，其渗透率小于裂隙砂岩注浆前，大于裂隙砂岩注浆后。分析认为，浆液在渗流扩散作用下，浆液颗粒逐渐扩散并沉积[28]，浆液的封堵填充效应使得岩石在一次破坏作用下产生的裂隙大部分被浆液弥合，浆液与裂隙面胶结为一个整体，进而有效阻碍了流体渗流，导致裂隙砂岩注浆后的渗透率较注浆前显著降低，注浆堵水作用效果显著，然而，注浆后的裂隙砂岩在经历二次破坏后，岩石产生了一些新的损伤，岩石渗流通道变多，导致渗透率出现回升，高于裂隙砂岩注浆后的渗透率，但不会达到裂隙砂岩注浆前的渗透率，原因在于岩石裂隙面在轴向载荷的持续作用下发生相对挤压滑动，岩石碎屑及浆液结石颗粒堵塞原有渗流通道，导致裂隙砂岩注浆后再次破坏的渗透率低于裂隙砂岩注浆前。以上对裂隙砂岩注浆前、后及注浆后再破坏 3 种状态下的渗透率关系进行了详细阐述，但相对于原岩渗透率关系如何还未曾得知，因此表 5[36]给出了不同静水压与渗透压差下的原岩渗透率，以做进一步对比分析。

由表 5 数据知，同一静水压下，裂隙砂岩注浆前、后及注浆后再破坏 3 种状态下的渗透率明显大

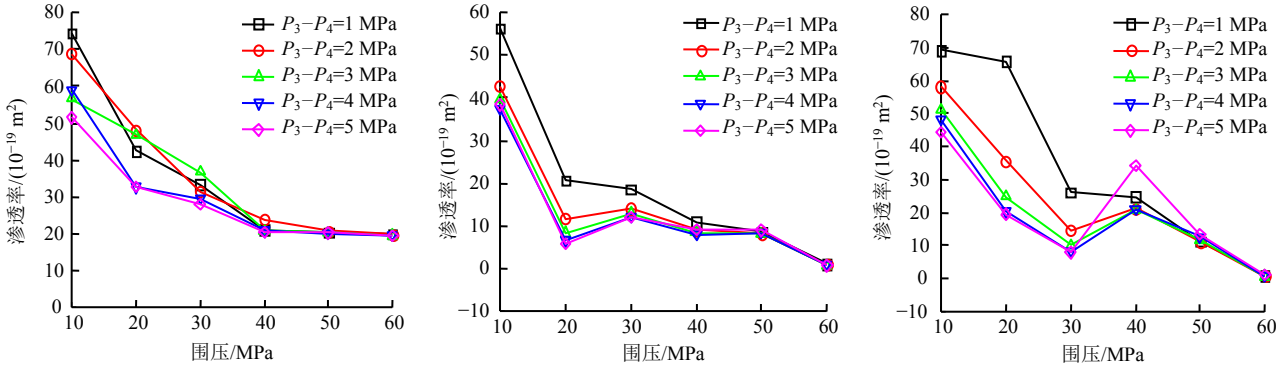
于原岩渗透率。上述现象说明裂隙砂岩注浆作用效果虽然较为显著但也有一定限度，虽然可以有效降低裂隙砂岩渗透率，但无论如何也不会大于原岩渗透率水平。

表 5 不同静水压与渗透压差下的原岩渗透率

Table 5 Permeability of original rock under different hydrostatic pressure and osmotic pressure difference

方法	(P_3-P_4) /MPa	渗透率（10^{-20} m^2）		
		静水压为 20 MPa	静水压为 30 MPa	静水压为 40 MPa
稳态法	1	8.04	6.35	3.94
	2	7.97	6.08	3.42
	3	7.61	5.71	2.75
	4	7.37	5.72	3.16
	5	6.73	5.41	3.14

裂隙砂岩注浆前、后及注浆后再破坏 3 种状态下的渗透率随静水压增大呈现出不同的阶段性变化特点，并非简单线性降低趋势（见图 9）。由图 9(a)知，裂隙砂岩注浆前的渗透率随静水压增大呈现快速下降—趋于稳定的变化趋势，说明随静水压增大，试样宏观破断面被逐渐压密挤实，岩石颗粒之间摩擦力与黏结力增大，渗流通道断面减小，岩石阻渗能力增大，当静水压由 40 MPa 升至 60 MPa 时，裂隙砂岩注浆前的渗透率近似呈现出一条水平直线，原因在于 40 MPa 及以上高静水压下，岩石宏观破断面及其内部原生微裂隙、孔隙闭合速率随静水压增大而降低，机械压实作用使岩石骨架压缩密实，岩石发生不可逆转的体积减小，渗流通道严重受阻，对压力敏感性降低，渗透率受静水压影响逐渐变小。由图 9(b)知，裂隙砂岩注浆后的渗透率随静水压增大呈现出快速下降−缓慢回升−趋于平稳的变化趋势，当静水压由 20 MPa 升高至 30 MPa 时，渗透率出现回升现象，分析认为，裂隙砂岩注浆后浆液填充弥合的同时也改变了其原有破裂面形态，受到 30 MPa 静水压挤压时，宏观破裂面进一步受压闭合，由于两个破裂面之间始终有填充浆液阻隔，当破裂面之间间距小于浆液结石体颗粒高度时，在进一步压缩过程中浆液结石体压缩路径无法实现同注浆前纹路一样完全吻合，从而在适应静水压升高过程中浆液结石体会对接触面产生一定损伤，从而导致裂隙砂岩注浆后的渗透率出现回升现象。由图 9(c)可知，裂隙砂岩注浆后再破坏的渗透率随静水压的增大呈现出快速下降—大幅回升—稳定下降的变化趋势，静水压为 40 MPa 时出现了大幅上升，原因在于试样在二次破坏时，浆液结石体受到持续挤压摩擦，使部分结石体出现削减并填充至新裂隙及破碎区，经“打磨”后的浆液结石体体积减小，受到 40 MPa 静水压挤压时，结石体与原有及新生破裂面相接触挤压，持续的压力作用下，结石体始终无法与原有及新生破裂面纹路相吻合，从而使接触面产生较大挤压损伤破坏，导致渗透率出现大幅回升现象，当静水压达到 50、60 MPa 时，浆液结石体逐渐适应静水压升高过程，对岩石内部裂隙再次压密挤实，岩石渗流通道受阻，其阻渗能力再一次增大，渗透率持续降低。



(a) 注浆前 (b) 注浆后 (c) 注浆后破坏

图 9 裂隙砂岩 3 种状态下的渗透率演化规律

Fig.9 Permeability evolution of fractured sandstone in three states

3.2 裂隙砂岩注浆后力学特性分析

裂隙岩石注浆就是利用浆液将岩石破裂面进行充实、胶结，增加岩石密实度[37]，进而改善其力学性能，提高固结后裂隙岩石强度[38-39]，因此，图 10 给出了注浆后的裂隙砂岩与原岩在不同围压下的全应力−应变曲线，ε_1、ε_3、ε_v 分别为轴向应变、侧向应变和体积应变，$\varepsilon_{3/v}$、$\varepsilon_{1/v}$ 表示 ε_3 或 ε_v、ε_1 或 ε_v。由图 10 可知，原岩具有明显脆性特征，但随着围压增大，原岩脆性降低且延性增强。原岩应力−应变曲线可分为 5 个阶段[40]：Ⅰ（OA_1）阶段为原

生微裂隙压缩闭合阶段、Ⅱ（A_1B_1）阶段为线弹性变形阶段、Ⅲ（B_1C_1）阶段为微裂纹稳定发展阶段、Ⅳ（C_1D_1）阶段为裂纹快速发展阶段、Ⅴ（D_1E_1）阶段为峰后变形破坏阶段。注浆后的裂隙砂岩在不同围压下的破坏形式由弹−脆性破坏转变为弹−塑性破坏，仅在 10 MPa 围压下，注浆后的裂隙砂岩表现出一定的脆性破坏特征，其应力−应变曲线与原岩应力−应变曲线具有类似变化特点；20 MPa 及以上围压下，注浆后的裂隙砂岩在加载后期均表现出明显延性破坏特征，并在峰后出现塑性流动现象，其应力−侧向/体积应变曲线呈现出明显“7”字型。分析认为，注浆后的裂隙砂岩逐渐趋于一个整体，受浆液黏结性影响，当施加轴向载荷时，注浆后的裂隙砂岩在破坏前就已产生较大变形，从而起到让压、缓慢释放能量的作用[14]，从实质上讲，岩石变形破坏是能量耗散与能量释放的结果，岩石失稳破坏是岩石中能量瞬时释放的结果[41]。因此，在轴向载荷作用下伴随着能量缓慢释放，使得岩石不会呈现明显脆性破坏特征，并且随围压增大，岩石所受束缚作用增强，导致注浆后的裂隙砂岩在峰后出现塑性流动现象。

现有研究表明，完整岩石强度与围压呈线性[42-45]或非线性[46]增大趋势，然而关于注浆加固体强度与围压之间的关系却鲜有文献提及，注浆加固效果与围压的关系还尚不明晰，注浆加固体峰值强度与围压变化关系是否与原岩具有一致性还需进一步

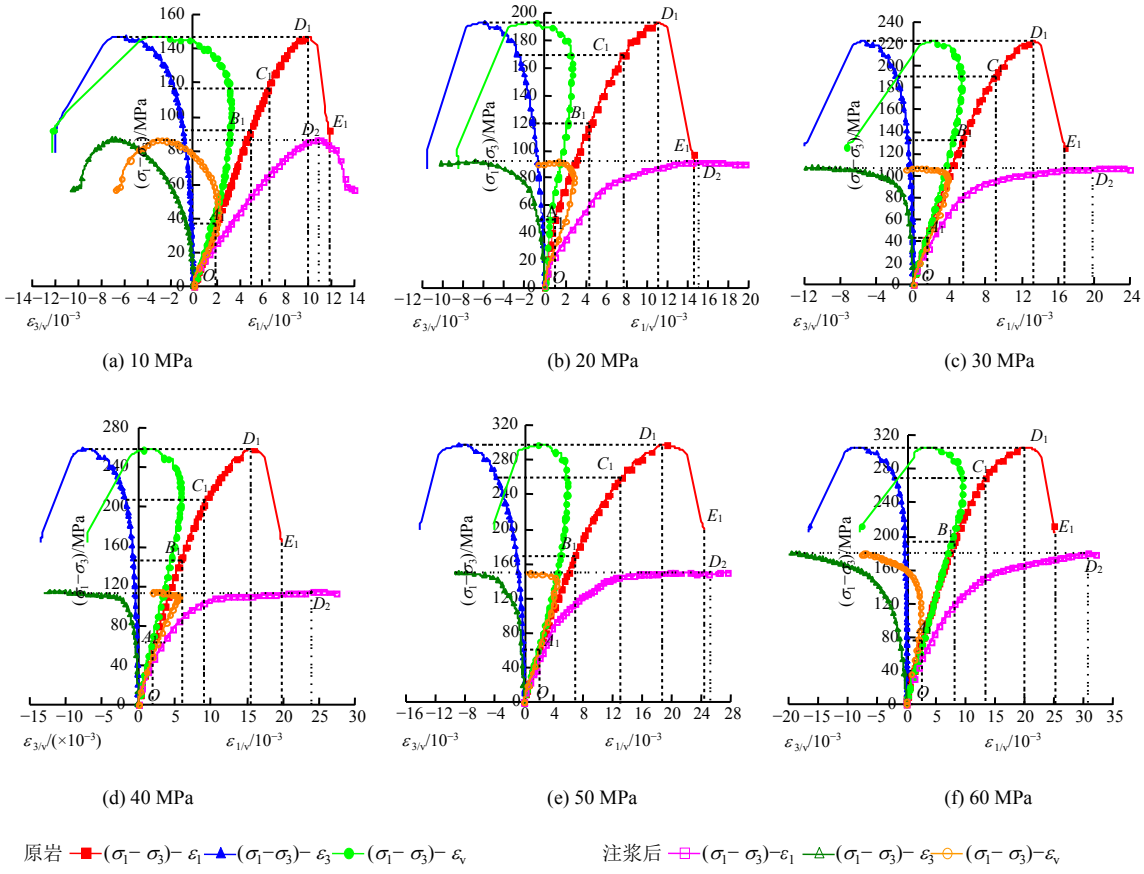


图 10　不同围压下注浆后的裂隙砂岩与原岩全应力−应变曲线

Fig.10　Total stress-strain curves of fractured sandstone and original rock after grouting under different confining pressures

探讨，因此，图 11 给出了不同围压下注浆后的裂隙砂岩与原岩峰值强度对比。由图 11 可知，注浆后的裂隙砂岩峰值强度与原岩峰值强度皆随围压的增大而增大，但强度比（注浆后的裂隙砂岩峰值强度与原岩峰值强度之比）呈先下降后上升的特点，其中，10～40 MPa 围压下，原岩峰值强度受围压影响较大，峰值强度随围压增大而显著提升，注浆后的裂隙砂岩随围压增大也有所提升，但提升幅度并不明显，导致强度比呈下降趋势，40～60 MPa 围压下，随围压增大原岩峰值强度提升幅度变缓，而注浆后的裂隙砂岩峰值强度提升幅度变大，导致强度比呈上升趋势。分析认为，围压束缚作用可使岩石内部微裂隙、孔隙压缩闭合，提高岩石内部摩擦力[47]，低围压下岩石内部微裂隙、孔隙压密程度小，外力作用下易形成应力集中[48]，导致岩石强度低、易破坏，高围压下岩石内部微裂隙、孔隙闭合程度大，

外力作用下不易出现应力集中，裂隙扩展困难，岩石强度高、不易破坏，但当围压达到一定值后，微裂隙、孔隙基本被压密挤实，继续增大围压裂隙受压闭合路径变小，闭合密度增长不明显[49-50]，对围压的敏感性降低，导致岩石峰值强度提升幅度变缓；注浆后的裂隙砂岩受浆液充实、胶结作用，力学性能得以改善，一定程度上限制了岩–浆胶结面发生较大剪切滑移变形，同时围压束缚作用也增大了其内部颗粒之间的挤压摩擦，使得岩石内部孔隙、裂隙进一步压密，从而一定程度上提升了注浆后裂隙砂岩的承载能力，但由于注浆后的裂隙砂岩破坏面大多发生于沿岩–浆界面，破坏面相对粗糙[29]，低围压下，对岩石压缩作用较小，浆液结石体与岩石破断面逐渐开始接触，易产生应力集中，高围压下，挤压效果显著，浆液结石体与破断面逐渐融合为一个整体，由点接触逐渐向面接触转变，应力集中现象减弱，裂隙发育、扩展困难，对围压的敏感性增强，导致注浆加固体峰值强度提升幅度变大。

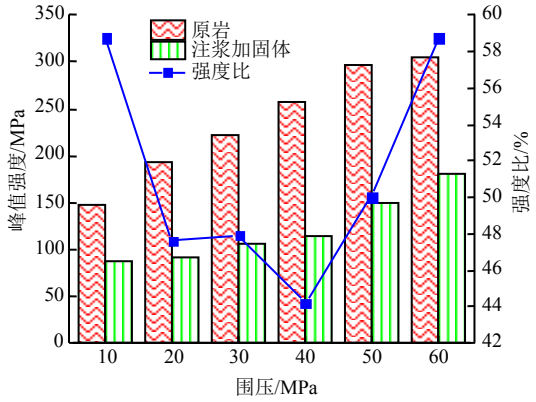


图 11 注浆后的裂隙砂岩与原岩的峰值强度对比

Fig.11 Comparison of peak strength between fractured sandstone after grouting and original rock

综上，10～60 MPa 围压下，注浆后的裂隙砂岩峰值强度占原岩峰值强度 44%～59%，即强度比为 44%～59%，此结果与金爱兵等[51]研究结果较为接近，这表明注浆加固具有较好的改性作用，注入裂隙岩石中的浆液与岩石裂隙面黏结效果较好，岩石承载强度由原来弱势面间的摩擦力转变为摩擦力和浆液黏结强度共同承担，从而有效阻止了裂隙发育及岩块间的滑移、错动，使岩石的完整性和承载能力得到一定程度恢复。

图 12、13 分别给出了不同围压下注浆后的裂隙砂岩与原岩的峰值强度、应变演化规律。由图 12 可知，无论线性拟合还是非线性拟合，原岩拟合效

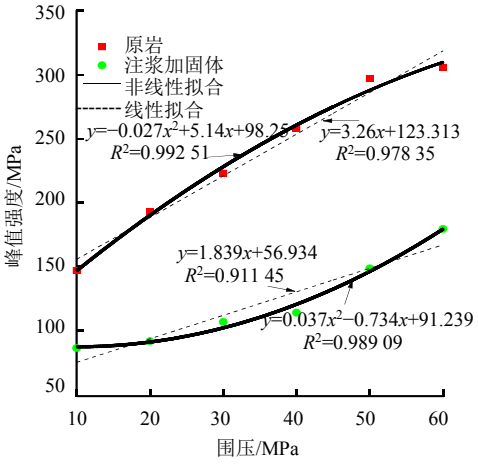


图 12 注浆后的裂隙砂岩与原岩峰值强度演化规律

Fig.12 Peak strength evolution of fractured sandstone and original rock after grouting

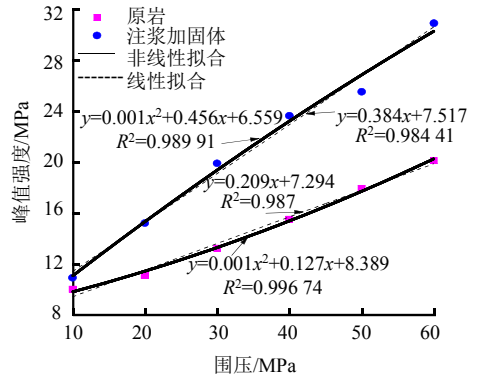


图 13 注浆后的裂隙砂岩与原岩峰值应变演化规律

Fig.13 Peak strain evolution of fractured sandstone and original rock after grouting

果均优于注浆后裂隙砂岩的拟合效果，分析认为，由于注浆后的裂隙砂岩受到一次破坏影响，岩石产生宏观贯通裂隙的同时也产生了诸多微小裂隙，即使进行注浆加固处理，注浆后的裂隙砂岩也无法恢复至原岩状态，导致其性质具有一定差异性，拟合效果不能达到原岩水平。注浆后的裂隙砂岩与原岩峰值强度随围压增大均呈现正相关，其中非线性拟合程度更高，峰值强度随围压增大满足二次函数关系；由线性拟合可知，注浆后的裂隙砂岩与原岩拟合线斜率分别为 1.839 与 3.260，可知注浆后的裂隙砂岩峰值强度随围压增大而增长缓慢，原岩峰值强度随围压增大而增长迅速，以此规律，注浆后的裂隙砂岩与原岩峰值强度比应满足随围压增大而增大，但这与图 11 所得结论相不符；同理，由非线性拟合知，注浆后的裂隙砂岩与原岩拟合曲线斜率分别表现为先大后小与先小后大的变化规律，对应峰值强度增长情况分别为先快后缓与先缓后快的趋势，从而使得强度比呈现先减小后增大的规律，

与图 11 所得结论一致。由此可见，围压与岩石峰值强度关系并非简单线性关系，而是更符合非线性关系。由图 13 知，不同围压下注浆后的裂隙砂岩与原岩的峰值应变演化规律与图 12 完全一致，并且拟合程度更高。

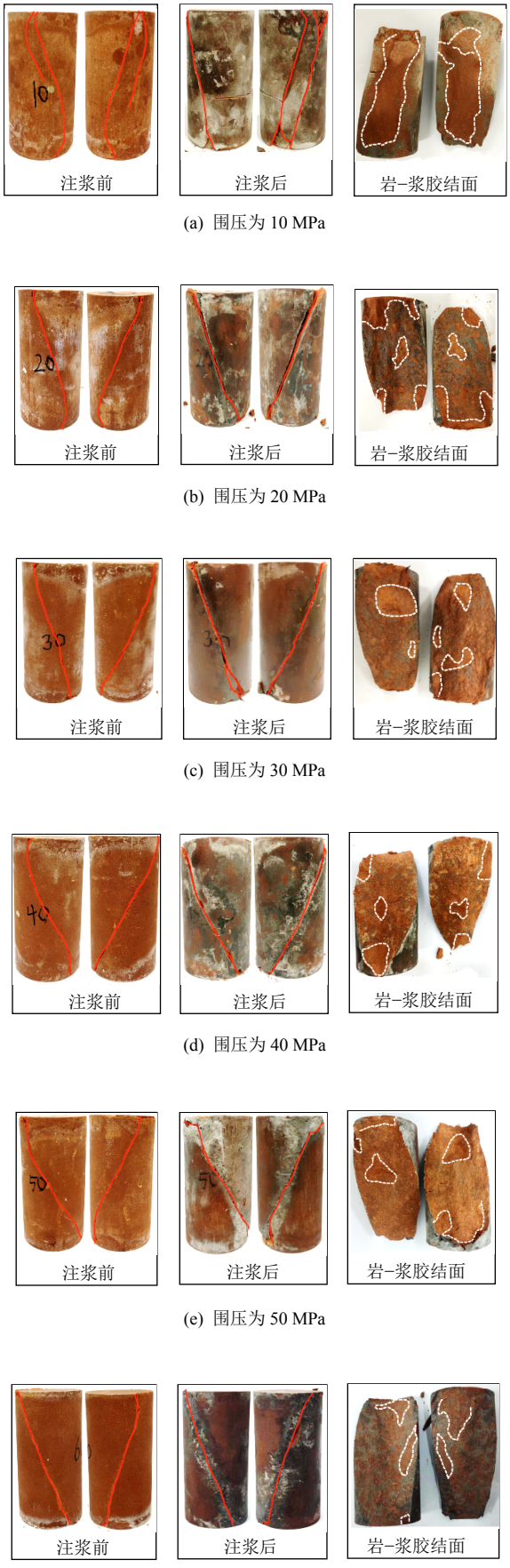
综上，可得出结论，注浆后的裂隙砂岩较原岩拟合效果较差，围压与峰值强度、峰值应变均呈现出满足于二次函数关系的非线性变化特征，其中围压与峰值应变的拟合效果优于围压与峰值强度的拟合效果。

3.3　裂隙砂岩注浆前后宏-微观结构对比

不同围压下经三轴压缩试验得到裂隙砂岩注浆前后裂隙发育情况，如图 14(a)～14(f)所示。经分析发现，注浆后的裂隙砂岩经三轴压缩试验后，试样沿两侧胶结面发生剪切滑移破坏，两侧胶结面产生相对剪切位移，围压为 10 MPa 时，在原贯通剪切裂隙附近有一条平行贯通裂隙产生，此围压状态岩样破坏最为严重，围压为 20～60 MPa 时，试样在原破坏基础上，伴随有微小裂隙或局部破碎区域产生，破坏程度相对较小。此现象表明，围压束缚作用在提升岩石承载能力的同时也会抑制裂隙进一步扩展发育，岩石破坏程度相对减小。此外，浆液虽然可以填充进入岩石内部裂隙并与其进行胶结，进而使岩石强度得以发生一定程度恢复，但此填充胶结作用并不能彻底改变岩石弱势面，其弱势面仍主要为岩–浆胶结面，因此，在轴向载荷作用下，裂隙砂岩注浆后主要破坏仍为剪切滑移破坏并依旧发生在岩石胶结面处。

从图 14 可以看到岩–浆胶结面上附着有大量浆液，因此，为验证浆液对裂隙的填充效果及浆液与裂隙砂岩胶结情况，对岩–浆胶界面进行了电镜扫描试验分析。电镜扫描试验针对注浆后同一块裂隙砂岩样品位置依次放大 2 000、3 000、5 000、10 000 倍，观察分析其胶结填充情况，岩–浆界面电镜扫描图见图 15。

如图 15(a)～15(c)所示，部分浆液填充进入岩石内部微小裂隙，使裂隙砂岩逐渐趋于完整，但大面积浆液以吸附黏结方式附着在岩石胶结面上，浆液与裂隙砂岩表面接触更加紧密，黏结效果较好；图 15(d)中可观察到浆液在固化凝结后形成了致密网络骨架，其组成主要是由钙矾石与 C-S-H（水化硅酸钙）凝胶相互搭接形成复合凝胶产物[52]，说明注浆材料之间反应效果良好，未出现较多未反应的水泥和粉煤灰颗粒，胶固料加水后易形成稳定的水化产物，提升了岩石承载能力。



(a) 围压为 10 MPa

(b) 围压为 20 MPa

(c) 围压为 30 MPa

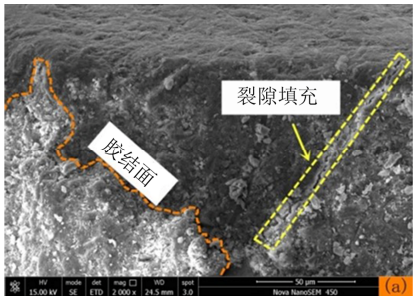
(d) 围压为 40 MPa

(e) 围压为 50 MPa

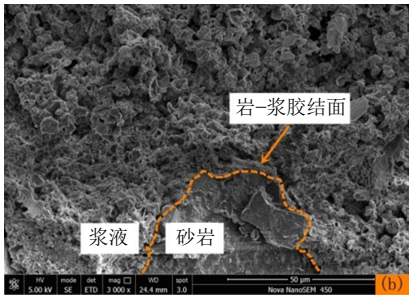
(f) 围压为 60 MPa

图 14　不同围压下注浆前后裂隙发育对比

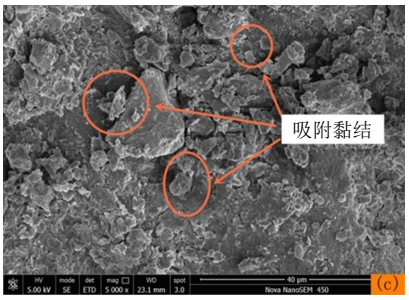
Fig.14　Comparison of fracture development before and after grouting under different confining pressures



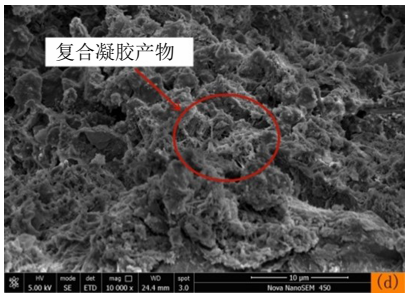
(a) ×2 000



(b) ×3 000



(c) ×5 000



(d) ×10 000

图 15 岩–浆界面电镜扫描图

Fig.15 Scanning electron microscopy of rock-slurry interface

4 结 论

利用 Rock Top 多场耦合试验仪和自主研制的注浆加固系统，开展了裂隙砂岩注浆前后渗流特性及注浆后力学特性试验研究，主要取得了以下研究成果：

（1）不同静水压下，裂隙砂岩注浆后的渗透率相对于注浆前显著降低，下降幅度在 24.26%～96.55%之间，裂隙砂岩注浆后再破坏的渗透率介于注浆前与注浆后之间，但均小于原岩渗透率；裂隙砂岩注浆前、后及注浆后再破坏 3 种状态下的渗透率随静水压增大呈现出不同的阶段性变化特点，且渗透率曲线由下降型向平缓型转化，当静水压达 40 MPa 及以上时，5 MPa 以内的渗透压差对渗透率影响较小，渗透率曲线趋于水平。

（2）10 MPa 围压下，裂隙砂岩注浆后表现出类似原岩的脆性破坏特征，20～60 MPa 围压下，裂隙砂岩注浆后失去了原岩的脆性破坏特征，而是表现出很强的延性破坏，并且在峰后出现塑性流动现象；注浆后的裂隙砂岩与原岩峰值强度、峰值应变皆随围压增大而增大，并呈现出满足于二次函数关系的非线性变化特征，峰值强度比随围压增大呈现出先下降后上升的特点，强度比介于 44%～59%之间。

（3）裂隙砂岩注浆后的破坏形式主要以滑移剪切破坏为主，低围压下会伴随有新破坏形式产生，随围压增大，破坏效果减弱；岩–浆界面电镜扫描试验表明，大面积浆液以吸附黏结方式附着在岩石胶结面上，浆液固结形成的稳定水化产物是提升岩石承载能力的重要标志，其主要是由钙矾石与 C-S-H（水化硅酸钙）凝胶相互搭接而成。

参 考 文 献

[1] 陈卫忠, 王鲁瑀, 谭贤君, 等. 裂隙岩体地下工程稳定性研究发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 1945-1961.
CHEN Wei-zhong, WANG Lu-yu, TAN Xian-jun, et al. Trends in the study of the stability of underground engineering in rift rock bodies[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2021, 40(10): 1945-1961.

[2] 王东亮, 郝兵元, 梁晓敏. 基于流固耦合的单一裂隙浆液扩散规律研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(1): 104-112.
WANG Dong-liang, YAN Bing-yuan, LIANG Xiao-min. Study on the diffusion law of a single fissure slurry based on fluid-solid coupling[J]. **Journal of Mining and Rock Control Engineering,** 2021, 3(1): 104-112.

[3] 张进鹏, 刘立民, 刘传孝, 等. 深部裂隙岩体硅质自应力注浆加固机制与试验[J]. 煤炭学报, 2020, 45(增刊 2): 755-765.
ZHANG Jin-peng, LIU Li-min, LIU Chuan-xiao, et al. The reinforcement mechanism and test of silicon self-stress injection slurry in deep fissure rock bodies[J].

Journal of China coal society, 2020, 45(Suppl.2): 755-765.

[4] 高明忠, 王明耀, 谢晶, 等. 深部煤岩原位扰动力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2691-2703.
GAO Ming-zhong, WANG Ming-yao, XIE Jing, et al. Research on in situ perturbation mechanical behavior of deep coal rock[J]. **Journal of China Coal Society,** 2020, 45(8): 2691-2703.

[5] 黄润秋, 黄达, 段绍辉, 等. 锦屏Ⅰ级水电站地下厂房施工期围岩变形开裂特征及地质力学机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 23-35.
HUANG Run-qiu, HUANG Da, DUAN Shao-hui, et al. Study on deformation and cracking characteristics and geomechanical mechanism of surrounding rock during construction of underground powerhouse of Jinping Ⅰ hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2011, 30(1): 23-35.

[6] 江权, 樊义林, 冯夏庭, 等. 高应力下硬岩卸荷破裂:白鹤滩水电站地下厂房玄武岩开裂观测实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1076-1087.
JIANG Quan, FAN Yi-lin, FENG Xia-ting, et al. Hard rock cracking under high stress: a case study of basalt cracking in underground powerhouse of Baihetan hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2017, 36(5): 1076-1087.

[7] 徐栋栋, 邬爱清, 李聪, 等. 破裂全过程模拟的改进非连续变形分析方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1169-1178.
XU Dong-dong, WU Ai-qing, LI Cong, et al. Improved discontinuous deformation analysis method for whole process simulation of fracture[J]. **Rock and Soil Mechanics,** 2019, 40(3): 1169-1178.

[8] WANG Qi, GAO Hong-ke, YU Heng-chang, et al. Method for measuring rock mass characteristics and evaluating the grouting-reinforced effect based on digital drilling[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering,** 2019, 52: 841-851.

[9] LI C C. Field observations of rock bolts in high stress rock masses[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering,** 2010, 43(4): 491-496.

[10] MORTAZAVI A, MAADIKHAH A. An investigation of the effects of important grouting and rock parameters on the grouting process[J]. **Geomechanics and Geoengineering,** 2016, 11(3): 1-17.

[11] BOBET A, EINSTEIN H H. Tunnel reinforcement with rockbolts[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology,** 2011, 26(1): 100-123.

[12] 王志, 李龙.含裂隙岩石注浆加固后的弯曲疲劳性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1823-1832.
WANG Zhi, LI Long. Experimental study on bending fatigue behavior of grouting reinforced rock with fracture[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2018, 37(8): 1823-1832.

[13] 宗义江, 韩立军, 韩贵雷. 破裂岩体承压注浆加固力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4): 483-488.
ZONG Yi-jiang, HAN Li-jun, HAN Gui-lei. Experimental study on mechanical properties of fractured rock mass reinforced by compressive grouting[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering,** 2013, 30(4): 483-488.

[14] 高延法, 范庆忠, 王汉鹏. 岩石峰值后注浆加固实验与巷道稳定性控制[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 1):21-24.
GAO Yan-fa, FAN Qing-zhong, WANG Han-peng. Experimental study on grouting reinforcement after rock peak value and stability control of tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Suppl.1): 21-24.

[15] 王汉鹏, 高延法, 李术才. 岩石峰后注浆加固前后力学特性单轴试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007(1): 27-31, 39.
WANG Han-peng, GAO Yan-fa, LI Shu-cai. Uniaxial test on mechanical properties of rock before and after post-peak grouting reinforcement[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering,** 2007(1): 27-31, 39.

[16] 卢海峰, 朱晨东, 刘泉声. 不同注浆材料作用下结构面剪切力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1803-1811.
LU Hai-feng, ZHU Chen-dong, LIU Quan-sheng. Study on shear mechanical properties of structural planes grouted with different materials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(9): 1803-1811.

[17] 陆银龙, 贺梦奇, 李文帅, 等. 岩石结构面注浆加固微观力学机制与浆–岩黏结界面结构优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9): 1808-1818.
LU Yin-long, HE Meng-qi, LI Wen-shuai, et al. Micromechanical mechanisms of grouting reinforcement in rock joints and microstructure optimization of grout-rock bonding interfaces[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2020, 39(9): 1808-

1818.

[18] 沈君, 刘保国, 陈景, 等. 辉绿岩裂隙注浆体力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊 1): 2804-2817.
SHEN Jun, LIU Bao-guo, CHEN Jing, et al. Experimental study on mechanical properties of diabase fracture grouting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2020, 39(Suppl.1): 2804-2817.

[19] 刘泉声, 周越识, 卢超波, 等. 含裂隙泥岩注浆前后力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(3): 509-514,520.
LIU Quan-sheng, ZHOU Yue-shi, LU Chao-bo, et al. Experimental study on mechanical properties of mudstone fracture before and after grouting[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering,** 2016, 33(3): 509-514,520.

[20] 李文洲, 康红普, 姜志云, 等. 深部裂隙煤岩体变形破坏机理及高压注浆改性强化试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 912-923.
LI Wen-zhou, KANG Hong-pu, JIANG Zhi-yun, et al. Deformation failure mechanism of fractured deep coal-rock mass and high-pressure grouting modification strengthening testing[J]. **Journal of China Coal Society**, 2021, 46(3): 912-923.

[21] 韩立军, 宗义江, 韩贵雷, 等. 岩石结构面注浆加固抗剪特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2570-2576, 2622.
HAN Li-jun, ZONG Yi-jiang, HAN Gui-lei, et al. Study of shear properties of rock structural plane by grouting reinforcement[J]. **Rock and Soil Mechanics,** 2011, 32(9): 2570-2576,2622.

[22] 张妹珠, 江权, 王雪亮, 等. 破裂大理岩锚注加固试样的三轴压缩试验及加固机制分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3651-3660.
ZHANG Mei-zhu, JIANG Quan, WANG Xue-liang, et al. Triaxial compression test and reinforcement mechanism analysis of fracture marbles reinforced by anchoring injection[J]. **Rock and Soil Mechanics,** 2018, 39(10): 3651-3660.

[23] 惠冰, 张庆松, 张立, 等. 高孔隙率砂岩涌水渗流场特征与注浆治理[J]. 煤炭学报, 2014, 39(增刊 1): 184-190.
HUI Bing, ZHANG Qing-song, ZHANG Li, et al. Study on the seepage field characteristics and plugging of high porosity sandstone inflow under grouting[J]. **Journal of China coal society,** 2014, 39(Suppl.1): 184-190.

[24] 周晓敏, 徐衍, 刘书杰, 等. 金矿超深立井含水围岩注浆加固的应力场和渗流场研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(8): 1611-1621.
ZHOU Xiao-min, XU Yan, LIU Shu-jie, et al. Research on stress and seepage fields of surrounding rock grouting of ultra-deep shafts of goldmines[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2020, 39(8): 1611-1621.

[25] 刘奇, 陈卫忠, 袁敬强, 等. 基于渗流-侵蚀理论的岩溶充填介质注浆加固效果评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 572-580.
LIU Qi, CHEN Wei-zhong, YUAN Jing-qiang, et al. Evaluation of grouting reinforcement effect for karst filling medium based on seepage-erosion theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2020, 39(3): 572-580.

[26] 杨志斌, 董书宁. 压水试验定量评价注浆效果研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 2021-2028.
YANG Zhi-bin, DONG Shu-ning. Study on quantitative evaluation of grouting effect by water pressure test[J]. **Journal of China Coal Society,** 2018, 43(7): 2021-2028.

[27] 袁敬强, 陈卫忠, 黄世武, 等. 全风化花岗岩注浆加固特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 2876-2882.
YUAN Jing-qiang, CHEN Wei-zhong, HUANG Shi-wu, et al. Experimental study on reinforcement characteristics of fully weathered granite by grouting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2016, 35(Suppl.1): 2876-2882.

[28] 魏建平, 姚邦华, 刘勇, 等. 裂隙煤体注浆浆液扩散规律及变质量渗流模型研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 204-212.
WEI Jian-ping, YAO Bang-hua, LIU Yong, et al. Grouting fluid diffusion law and variable mass seepage model for fractured coal[J]. **Journal of China Coal Society,** 2020, 45(1): 204-212.

[29] 刘泉声, 雷广峰, 卢超波, 等. 注浆加固对岩体裂隙力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊 1): 3140-3147.
LIU Quan-sheng, LEI Guang-feng, LU Chao-bo, et al. Experimental study on the effect of grouting reinforcement on mechanical properties of rock mass fractures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2017, 36(Suppl.1): 3140-3147.

[30] 张培森, 赵成业, 侯季群, 等. 不同初始卸荷水平下红砂岩波速变化及能量耗散规律试验研究[J]. 煤炭学报,

2021, 46(增刊 1): 157-173.
ZHANG Pei-sen, ZHAO Cheng-ye, HOU Ji-qun, et al. Experimental study on wave velocity variation and energy dissipation law of red sandstone under different initial unloading levels[J]. **Journal of China Coal Society,** 2021, 46(Suppl.1): 157-173.

[31] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50266－99 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
The National Standards Compilation Group of Peoples Republic of China. GB/T50266－99Standard for tests method of engineering rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.

[32] 张培森, 赵成业, 李腾辉, 等. 红砂岩三轴加载过程中波速变化及能量演化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(7): 1369-1382.
ZHANG Pei-sen, ZHAO Cheng-ye, LI Teng-hui, et al. Experimental study on wave velocity variation and energy evolution of red sandstone during triaxial loading process[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2021, 40(7): 1369-1382.

[33] 张培森, 李腾辉, 赵成业, 等. 高强度低黏度注浆材料配比试验研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(3): 145-150.
ZHANG Pei-sen, LI Teng-hui, ZHAO Cheng-ye, et al. Experimental study on the ratio of high strength and low viscosity grouting materials[J]. **Coal Engineering,** 2021, 53(3): 145-150.

[34] 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 Ru-bin, XU Bo, XU Wei-ya, et al. Experimental study on the influence of different unloading paths on the evolution of sandstone permeability[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2019, 38(3): 467-475.

[35] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2005, 24(16): 2803-2813.

[36] 张培森, 侯季群, 赵成业, 等. 不同围压不同损伤程度红砂岩渗流特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2405-2415.
ZHANG Pei-sen, HOU Ji-qun, ZHAO Cheng-ye, et al. Experimental study on seepage characteristics of red sandstone with different confining pressures and different damage degrees[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2020, 39(12): 2405-2415.

[37] JORNE F, HENRIQUES F M A, BALTAZAR L G. Influence of super plasticizer, temperature, resting time and injection pressure on hydraulic lime grout injectability. Correlation analysis between fresh grout parameters and grout injectability[J]. **Journal of Building Engineering,** 2015, 4: 140-151.

[38] 胡毅夫, 董燕军. 地下硐室锚注围岩的变形分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1814-1818.
HU Yi-fu, DONG Yan-jun. Analysis of reinforcing effect and distortion of subsurface-excavation with grouted rock bolts[J]. **Rock and Soil Mechanics,** 2004, 25(11): 1814-1818.

[39] 张农, 侯朝炯, 陈庆敏, 等. 岩石破坏后的注浆固结体的力学性能[J]. 岩土力学, 1998, 19(3): 50–53.
ZHANG Nong, HOU Chao-jiong, CHEN Qing-min, et al. Mechanical properties of broken rock after grouting reinforcement[J]. **Rock and Soil Mechanics,** 1998, 19(3): 50-53.

[40] 张培森, 赵成业, 侯季群, 等. 高温与不同水压下深部砂岩渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1117-1128.
ZHANG Pei-sen, ZHAO Cheng-ye, HOU Ji-qun, et al. Experimental study on permeability characteristics of deep sandstone under high temperature and different water pressures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2020, 39(6): 1117-1128.

[41] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2603-2608.
XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang, et al. On energy analysis of rock failure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2005, 24(15): 2603-2608.

[42] 赵军, 郭广涛, 徐鼎平, 等. 三轴及循环加卸载应力路径下深埋硬岩变形破坏特征试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1521-1530.
ZHAO Jun, GUO Guang-tao, XU Ding-ping, et al. Experimental study of deformation and failure characteristics of deeply-buried hard rock under triaxial and cyclic loading and unloading stress paths[J]. **Rock and Soil Mechanics,** 2020, 41(5): 1521-1530.

[43] 周家文, 杨兴国, 符文熹, 等. 脆性岩石单轴循环加卸载试验及断裂损伤力学特性研究[J]. 岩石力学与工程

学报, 2010, 29(6): 1172-1183.
ZHOU Jia-wen, YANG Xing-guo, FU Wen-xi, et al. Experimental test and fracture damage mechanical characteristics of brittle rock under uniaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2010, 29(6): 1172-1183.

[44] 刘波, 马永君, 盛海龙, 等. 不同围压与冻结温度下白垩系红砂岩力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(3): 455-466.
LIU Bo, MA Yong-jun, SHENG Hai-long, et al. Experimental study on mechanical properties of Cretaceous red sandstone under different freezing temperatures and confining pressures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2019, 38(3): 455-466.

[45] 朱永建, 任恒, 王平, 等. 含单一贯通破裂面岩石注浆试验及加固机制分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(12): 3221-3230.
ZHU Yong-jian, REN Heng, WANG Ping, et al. Grouting test and reinforcement mechanism analysis of rock with single penetrated fracture surface[J]. **Rock and Soil Mechanics,** 2022, 43(12): 3221-3230.

[46] 杨圣奇, 许帅博, 刘振. 深部盐水环境下砂岩力学及渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(2): 292-304.
YANG Sheng-qi, XU Shuai-bo, LIU Zhen. Experimental study on mechanical and permeability behaviors of sandstone under deep saline environments[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2022, 41(2): 292-304.

[47] 郑晓娟, 王云飞. 不同围压黄砂岩强度与峰值频率特征[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(7): 2241-2247.
ZHENG Xiao-juan, WANG Yun-fei. Characteristics of strength and peak frequency of yellow sandstone under different confining pressures[J]. **Bulletin of the Chinese Ceramic Society,** 2020, 39(7): 2241-2247.

[48] 王云飞, 王立平, 焦华喆, 等. 不同围压下砂岩的变形力学特性与损伤机制[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(4): 63-68.
WANG Yun-fei, WANG Li-ping, JIAO Hua-zhe, et al. Mechanical characteristics of deformation and damage mechanism of sandstone under different confining pressure[J]. **Coal Geology & Exploration,** 2015, 43(4): 63-68.

[49] 王传乐, 杜广印, 李二兵, 等. 北山深部花岗岩常规三轴压缩条件下的强度参数演化及能量耗散[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2238-2248.
WANG Chuan-le, DU Guang-yin, LI Er-bing, et al. Evolution of strength parameters and energy dissipation of Beishan deep granite under conventional triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2021, 40(11): 2238-2248.

[50] 王钦亭, 王云飞, 韩宪军. 粗砂岩不同围压下的变形力学特性与损伤特征[J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(4): 43-45,71.
WANG Qin-ting, WANG Yun-fei, HAN Xian-jun. Study on deformation mechanical characteristics and damage property of gritstone under different confining pressures[J]. **Mining Research and Development,** 2014, 34(4): 43-45,71.

[51] 金爱兵, 王志凯, 明世祥. 破裂岩石加固后力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 3395-3398.
JIN Ai-bing, WANG Zhi-kai, MING Shi-xiang. Experimental investigation on mechanical property of reinforced fractured rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,** 2012, 31(Suppl.1): 3395-3398.

[52] 阎培渝, 韩建国. 复合胶凝材料的初期水化产物和浆体结构[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(2): 202-206.
YAN Pei-yu, HAN Jian-guo. Early-age hydrates and paste structure of complex binders[J]. **Journal of Building Materials,** 2004, 7(2): 202-206.