全应力-应变条件下注浆前后平行双裂隙灰岩的力学性质和渗透性演化规律研究*

罗曦明[1],赵延林[1],罗睿[1],谭哲[1],张英杰[1],张敏真[2],李天尧[2],刘钊[3]

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭市 411100;
2.北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;
3.湖南楚湘建设工程集团有限公司, 湖南 长沙 410114)

摘要:为了探究平行双裂隙灰岩在注浆前后全应力-应变渗流过程中的力学特性及渗透性演化规律,在围压为10 MPa、20 MPa、30 MPa条件下,对注浆前后45°倾角平行双裂隙灰岩开展全应力-应变渗流试验。试验结果表明:注浆前后平行双裂隙灰岩的强度均随围压增大呈现非线性上升趋势,但渗透率随围压的增大而减小;在围压条件相同的情况下,注浆后的试件强度相较于注浆前的有明显提升;注浆前平行双裂隙试件渗透率出现"双峰"现象,注浆后浆液充填试件裂隙,增强了裂隙面之间的黏结力,改变了裂隙的几何形态和力学性质,从而减少了"双峰"现象的出现;与注浆前试件相比,注浆后试件峰前渗透率降幅有限,但峰后渗透率显著下降;两类试件的5个关键渗透率值均随围压升高呈逐渐降低趋势,在相同围压条件下,注浆后试件的关键渗透率值均显著低于未注浆试件。

关键词:全应力-应变;注浆加固;平行双裂隙灰岩;力学性质;渗透率

中图分类号:TD313 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)08-0215-10

Study on the Mechanical Properties and Permeability Evolution of Limestone with Parallel Double Fissures Before and After Grouting Under Complete Stress-Strain Condition

Luo Ximing[1], *Zhao Yanlin*[1], *Luo Rui*[1], *Tan Zhe*[1], *Zhang Yingjie*[1], *Zhang Minzhen*[2], *Li Tianyao*[2], *Liu Zhao*[3]

(1.School of Resources Environment and Safety Engineering,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411100, China;
2.School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
3.Hunan Chuxiang Construction Engineering Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical properties and permeability evolution of limestone with parallel double fissures during complete stress-strain processes before and after grouting, the complete stress-strain seepage tests was carried out on limestone with 45° parallel double fissures before and after grouting under the confining pressure of 10 MPa, 20 MPa and 30 MPa. The test results show that the strength of limestone with parallel double fissures before and after grouting increases nonlinearly with the increase of confining pressure, but the permeability decreases with the increase of confining pressure. Under the same confining pressure conditions, the strength of the specimens after grouting is significantly improved compared with that before grouting. Before grouting, the permeability of parallel double fissures specimens showed a "double peak" phenomenon. After grouting, the grout filled the cracks of the specimens, enhanced the bonding force between the fissure surfaces, changed the geometric shape and mechanical properties of the fissures, thus reducing the occurrence of "double peak" phenomenon. Compared with the specimens before grouting, the pre-peak permeability of the specimens after grouting decreased slightly, but the post-peak permeability decreased significantly. The five key permeability values of the two types of specimens gradually decrease with the increase of confining pressure. Under the same confining pressure, the key permeability

* **收稿日期**:2025-08-13
基金项目:国家自然科学基金项目(52274118,52574143);湖南省研究生科研创新项目(CX20240864);芙蓉计划省企业科技创新创业团队支持项目
作者简介:罗曦明(1999—),男,湖南湘潭人,硕士,主要从事采矿工程与岩土工程方面的研究工作。E-mail:lxmedu@mail.hnust.edu.cn
通信作者:赵延林(1973—),男,湖南长沙人,博士,教授,主要从事采矿工程与岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail:yanlin8@163.com

values of the specimens after grouting are significantly lower than those of the ungrouted specimens.

Key words: Complete stress-strain, Grout reinforcement, Limestone with parallel double fissures, Mechanical property, Permeability

0 引言

天然岩体在地质演化与工程活动扰动下,易形成节理、裂隙等不连续结构面。这些结构面不仅削弱岩体的连续性、完整性及抗压强度,还使其呈现出非均质性与各向异性,增加工程结构失稳风险,尤其在水力耦合作用下,易加剧突水与渗流威胁[1-4]。注浆技术是加固岩体的重要手段,可通过强化破碎灰岩性能,实现矿山边坡稳定控制[5]、地下开挖工程加固及井筒支护防护等工程目标[6-7],其核心原理为:利用浆液与岩体界面的胶结效应封闭裂隙渗流通道[8],降低岩体渗透系数、提升围岩体物理力学性能[9-10],既能充分发挥岩体自身承载潜力,又通过改善抗渗能力保障复杂地质环境中工程结构的长期稳定性[11-12]。

相关研究中,曾一凡等[13]研究浆液扩散规律并预测注浆范围,可为采空区煤矸石基注浆充填工程的孔距设计、施工指导及密实度把控提供支撑,保障加固效果;陈军涛等[14]结合室内试验与数值模拟,探究不同围压下含不同裂隙数量砂岩的渗透率的变化情况,评估注浆处理对其渗流性能的影响,并通过三轴-渗流试验分析注浆前后砂岩的应力-应变与渗透率演化特征;钱自卫等[15]借助三维重构技术解析烧变岩内部空隙结构,结合渗流与注浆试验,揭示其渗流规律与注浆减渗机制;Zhao Y L 等[16-17]对不同围压下的单个岩石裂隙开展瞬态脉冲试验,提出多项式拟合数据分析方法,研究流速与水力梯度的关系,并通过 3D 激光扫描量化断裂面形态变化,此外,还通过水力耦合下砂岩峰后循环加卸载试验,揭示了砂岩峰后强度与变形之间的关系;刘旸等[18]基于宏观-缺陷耦合理念,构建注浆加固体渗流-蠕变本构模型,通过多场耦合试验明确不同注浆材料的加固效果,验证模型的合理性;许江等[19]通过渗流-力耦合蠕变试验探究砂岩流变与渗流特性,结合 3D-DIC 与 CT 扫描分析微裂纹演化、变形局部化及损伤特征;张培森等[20]利用多场耦合试验仪,在不同围压下对裂隙砂岩开展三轴压缩试验,经自主注浆系统加固后,再进行三轴压缩渗流试验,探究注浆前后裂隙砂岩的渗流与力学特性变化;余伟健等[21]通过单轴压缩试验,结合力学与声发射参数,分析次裂隙数目对红砂岩力学特性及破坏模式的影响,解析破坏演化过程;罗许林等[22]通过不同预制裂隙倾角砂岩的三轴水力耦合试验,揭示了砂岩渗透率演化微观机制;赵延林等[23-25]通过不同渗透压与围压组合的水-力耦合试验,研究裂隙灰岩全应力-应变过程中的力学与渗透特性,并定义了 6 个关键渗透率值,此外,还对比了水-力耦合与隔离状态下孔道砂岩的力学特性,揭示了水岩力学相互作用的差异性。

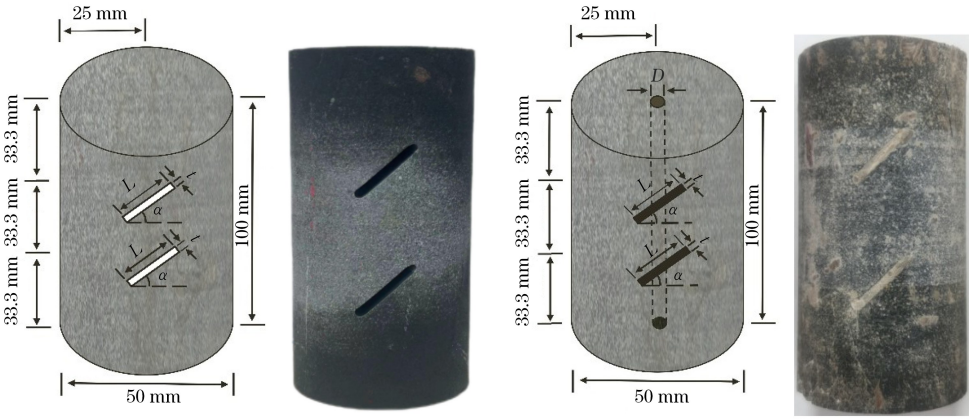
本研究聚焦裂隙岩体引发的岩崩与突水灾害,制备了裂隙倾角为 45° 的平行双裂隙灰岩试件。通过注浆前后的三轴渗流试验,探究应力-应变-渗透性三者间的关联机制,分析围压分别为 10, 20, 30 MPa 条件下平行双裂隙灰岩的力学演化规律与渗流行为。研究结果可为注浆加固与渗流控制提供关键设计参数,为类似岩土工程中的灾害防治与堵水工程提供理论支撑,在采矿工程领域具有较高的实用价值。

1 试件制备与试验方法

1.1 试件制备

本试验以灰岩岩块为原材料,首先采用钻孔取样机钻取岩芯样本,从中筛选表面不存在明显裂纹的岩芯作为待加工试件,随后对其端面进行打磨处理。加工过程严格参照国际岩石力学学会(ISRM)提出的规范要求,最终使试件达到三项标准:端面不平整度控制在 0.05 mm 以内,端面与试件轴线的偏差角度小于 0.25°,加工成直径为 50 mm、高度为 100 mm 的标准圆柱体试件。为降低后续试验数据的离散性,借助 RSM-SY5 声波测试仪对加工好的标准试件进行筛选,选取声波波速数值相近的试件用于试验。在试件分组处理中,一组灰岩试件在其高度 1/3 处预制两条贯穿性平行裂隙,其中裂隙长度 L 设定为 20 mm,裂隙宽度 t 为 2.0 mm,预制裂隙的倾角 α 取值 45°,该角度为岩体剪切破坏的典

型裂隙倾角，此倾角裂隙岩体在三轴压缩中易展现地下工程中灰岩常见的“裂隙扩展-贯通”失效模式，可有效避免因倾角过小或过大导致的力学响应单一化问题，确保试验结果对工程实际具有代表性；另一组灰岩试件的制备方法与上一组裂隙试件相同，区别在于需在试件圆心位置垂直钻取内孔，内孔直径 D 为 0.5 mm，具体结构如图 1 所示。



（a）注浆前　　（b）注浆后

图 1　裂隙灰岩试样

Fig.1　Fractured limestone specimens

本研究仅对浆液完全充填裂隙的场景进行模拟，试验所用设备为 Ztr-205 孔隙岩石注浆试验系统，该系统通过压力注浆方式对带内孔的裂隙试件进行注浆，可较容易地使浆液充满岩体裂隙。

注浆试件的制作流程如下：首先，采用热缩管对带内孔的裂隙试件进行环向包裹处理；然后将试件下端面通过压盘的下注浆口与外部注浆伺服系统连接；最后将连接完成的试件置于试验系统底座上，依次安装环向引伸计、轴向引伸计与注浆管。注浆试验共设置 3 种围压条件，分别为 10 MPa、20 MPa 与 30 MPa。注浆压力统一设定为 9 MPa，低于试验设定的最小围压，这样可有效规避注浆过程中试件产生新的裂隙，同时能够克服浆液在裂隙中的流动阻力，保证裂隙内浆液充填率达 95%以上。注浆作业结束后，将试件从试验系统中取出，采用保鲜膜对其进行包裹保护，并通过浇水方式养护 28 d。养护完成后，使用 HYS-4 型岩石渗透系数分析仪，对注浆前后的双裂隙灰岩试件采用真空抽气法进行强制饱水处理，饱水时长设定为 6 h，以确保试件达到完全饱水状态。

1.2　注浆材料

试验采用普通硅酸盐水泥，按水泥比 1∶1 配制成水泥浆液，其初凝时间为 90～130 min，养护 28 d 后单轴抗压强度约为 42.5 MPa，为确保浆液搅拌均匀，水泥浆液的搅拌时间应不少于 3 min。

1.3　试验装置与方法

基于岩石力学多功能试验系统（MTS-815）进行注浆前后平行双裂隙岩石全应力-应变过程中的力学及渗流特征研究试验，采用瞬态法测试岩石渗透率。试件分别为未注浆双裂隙试件与注浆双裂隙试件两类，设定的围压分别为 10，20，30 MPa，渗透压为 6 MPa。

对注浆前后平行双裂隙灰岩开展全应力-应变渗流试验。试验具体步骤如下：

（1）使用热缩管对岩样进行密封包裹，安装轴向与环向引伸计后，将其固定于试验机基座；

（2）向三轴压力室施加围压，待围压稳定至预设值（10 MPa、20 MPa 与 30 MPa）后维持恒定；

（3）试件上端为注水端，升高上端孔隙水压 P_1 至设定值 6 MPa，采用高精度液体流量计测定下端出水流量，渗透性测试首先在静水压力状态下进行，记录稳定流量值，并依据达西定律（见式（1））计算渗透系数，下端作为出水口连通大气压；

（4）以 0.005 mm/min 的极低速率施加轴向位移荷载，直至试样发生宏观破坏，试验全程实时采集轴向变形、环向变形及流量数据，采样间隔为 1.0 s；

（5）改变围压值，对下组岩样重复上述步骤，直到所有岩样都测试完毕。试验加载路径如图 2 所示。

$$K=\frac{Q\mu L}{A\Delta p_w} \tag{1}$$

式中:K 为渗透率,m^2;Q 为流量,m^3/s;μ 为流体的动力黏度,Pa·s;L 为试件的高度,m;Δp_w 为渗透压,Pa;A 为试件的横截面积,m^2。

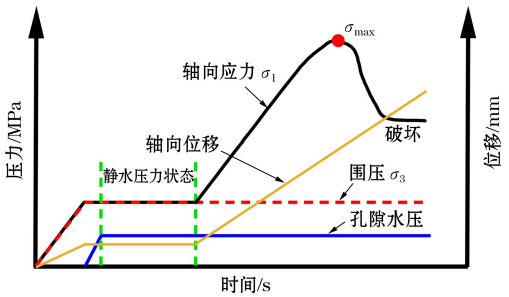


图 2 试验加载路径

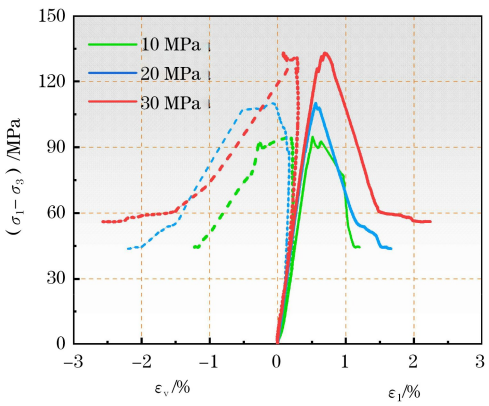
Fig.2 Test loading path

2 力学特性

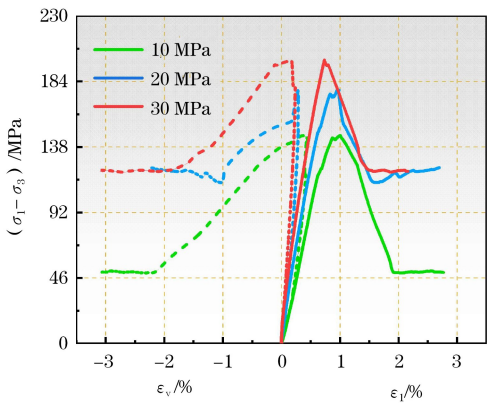
2.1 注浆前后不同围压下平行双裂隙灰岩变形特征

对注浆前后平行双裂隙灰岩的应力-应变曲线进行系统分析后发现,其变化规律均可细分为孔隙压密阶段、弹性变形阶段、屈服变形阶段和峰后破坏阶段这 4 个典型阶段。

在研究注浆前后不同围压对平行双裂隙灰岩力学特性的影响时,选取围压 σ_3 分别为 10 MPa、20 MPa 和 30 MPa 的工况进行分析,绘制了注浆前后平行双裂隙灰岩在不同围压下的全应力-应变曲线,如图 3 所示。其中,σ_1、σ_3、ε_1、ε_v 分别为轴向应力、围压、轴向应变和体积应变。



(a) 注浆前



(b) 注浆后

图 3 注浆前后试样在不同围压下的全应力-应变曲线

Fig.3 Complete stress-strain curves of specimens before and after grouting under different confining pressures

注浆前的双裂隙灰岩在低、中、高围压条件下,均以剪切破坏为主,呈现脆性破坏特征。因为受高渗透压作用,即便在 30 MPa 的高围压条件下,峰后破坏阶段的轴向应力仍急剧跌落,表现出典型的脆性破坏特征。

注浆后的裂隙灰岩试件在不同围压作用下,其破坏形式发生部分转变,从单纯的脆性破坏转变为一定范围的塑性-脆性复合破坏。这主要是因为裂隙中充填的水泥浆体以及逐渐增大的围压共同改变了裂隙灰岩的应力-应变关系。

2.2 注浆前后不同围压下平行双裂隙灰岩强度特征

注浆前后不同围压下平行双裂隙灰岩的强度见表 1。

表 1 注浆前后不同围压下平行双裂隙灰岩的强度

Table 1 Strength of limestone with parallel double fissures under different confining pressures before and after grouting

试件类型	围压/MPa	峰值强度/MPa	残余强度/MPa
注浆前	10	95	45
	20	110	43
	30	133	56
注浆后	10	146	50
	20	178	113
	30	199	123

为深入探究围压对注浆前后平行双裂隙灰岩强度特性的影响规律,绘制了注浆前后平行双裂隙灰岩峰值强度与围压之间的关系曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,注浆前后平行双裂隙灰岩的峰值强度

与围压之间存在密切的关联性。

未注浆状态下，平行双裂隙灰岩的峰值强度随围压增大而显著提升。当围压由 10 MPa 提升至 20 MPa 时，峰值强度从 95 MPa 增长至 110 MPa，增长增幅达到 15.8%。表明围压的增大有效抑制了裂隙的张开与扩展，增强了岩体内部的摩擦与咬合作用，从而显著提升了裂隙岩体的整体承载能力与峰值强度。

注浆后，在相同围压条件下，平行双裂隙灰岩的峰值强度较注浆前均有显著提升，充分体现了注浆加固的有效性。在 10 MPa 围压下，注浆后峰值强度从注浆前的 95 MPa 提高至 146 MPa，增幅为 53.7%；在 20 MPa 围压下，峰值强度则从注浆前的 110 MPa 跃升至 178 MPa，增幅高达 61.8%，这一显著增长表明注浆材料有效充填了原生裂隙空间，改善了岩体的结构完整性与连续性，增强了裂隙面间的力学传递效率，从根本上提升了裂隙岩体的承载能力与抗压强度极限。

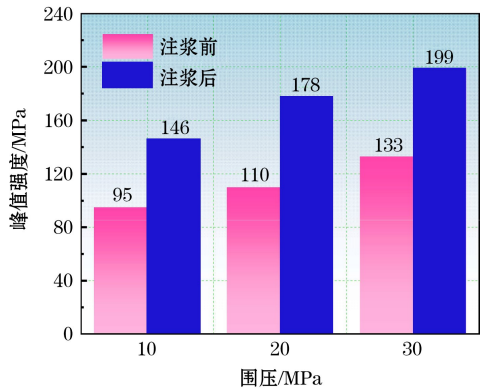


图 4　注浆前后平行双裂隙灰岩峰值强度对比

Fig.4　Peak strength comparison of limestone with parallel double fissures before and after grouting

3　渗流特性

3.1　渗透率与轴向应力-应变的关系

在注浆处理前后，平行双裂隙灰岩的全应力-应变过程中，其渗透率与轴向应力-应变关系呈现出典型的阶段性演化特征。

(1) 压密阶段，岩石初始孔隙及裂隙受压闭合，导致渗透率呈现降低趋势；

(2) 近线性变形阶段，微裂隙开始萌生，岩石体积扩容现象显现，渗透率随之升高；

(3) 屈服阶段，此阶段应力-应变曲线斜率减小，微裂隙加速扩展并汇聚，直至达到峰值强度点，在此过程中，岩石渗透率持续上升；

(4) 峰后阶段，宏观破裂面贯通形成，渗透率进一步增长并在达到最大值后，随峰后应变的发展呈现波动式衰减。

图 5 和图 6 分别展示了注浆前与注浆后双裂隙灰岩试件在 10 MPa、20 MPa、30 MPa 围压条件下，全应力-应变过程中渗透率与轴向应力-应变的演化关系。

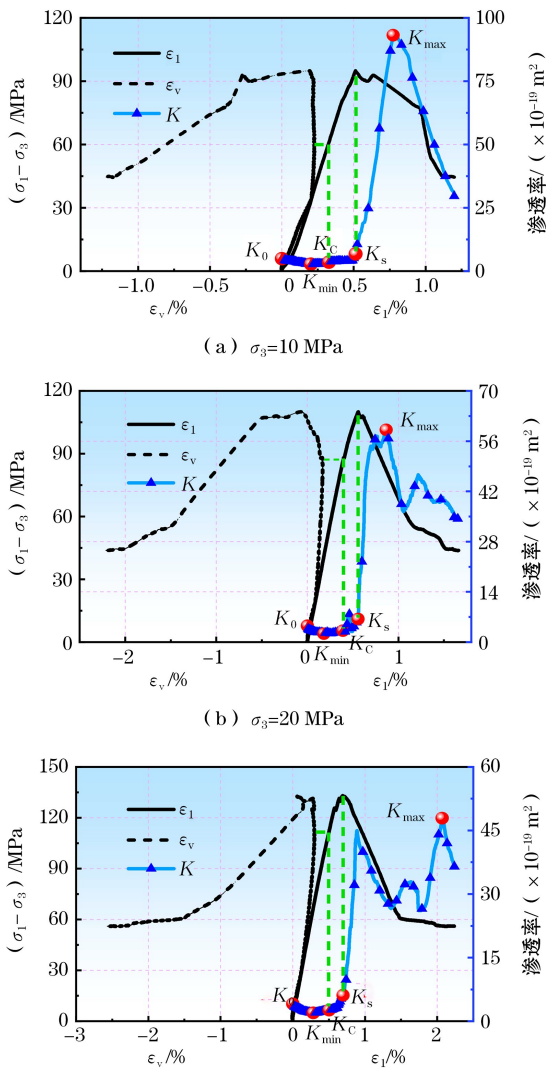
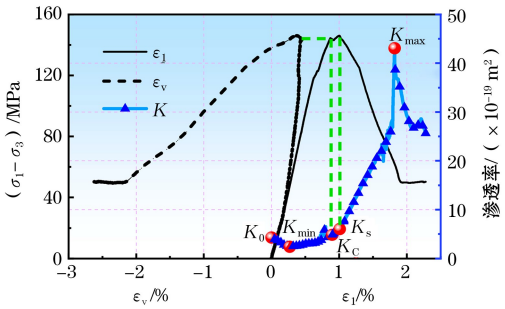
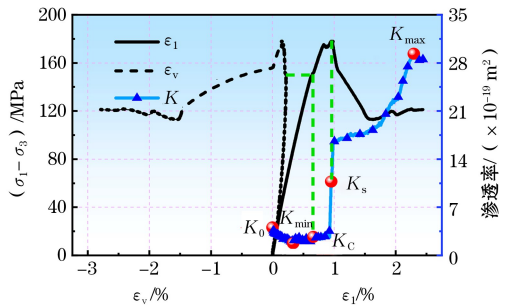


图 5　注浆前不同围压下平行双裂隙灰岩的渗透率与轴向应力-应变的关系

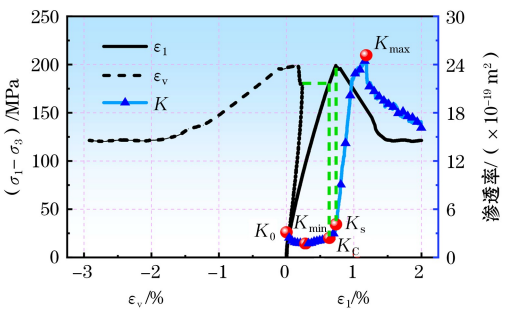
Fig.5　Relationship between permeability and axial stress-strain of limestone with parallel double fissures under different confining pressures before grouting



(a) σ_3=10 MPa



(b) σ_3=20 MPa



(c) σ_3=30 MPa

图 6 注浆后不同围压下平行双裂隙灰岩的渗透率与轴向应力-应变的关系

Fig.6 Relationship between permeability and axial stress-strain of limestone with parallel double fissures under different confining pressures after grouting

图 5(b)和图 6(a)分别呈现了注浆前试件在 20 MPa 围压、注浆后试件在 10 MPa 围压下的全应力-应变渗流演化过程,试验中观察到渗透率存在显著的“突跳”现象。岩样内部萌生轴向贯穿性裂纹,主破裂面初步形成但尚未贯通。此时渗透率出现小幅“突跳”,增速随后放缓,反映微裂纹网络局部连通,形成过渡性渗流通道。值得注意的是,此时岩样的整体性尚未遭到破坏,其内部结构仍具备一定的承载能力。从应力-应变特征点对应关系来看,渗透率“突跳”存在统一规律,均发生在“屈服阶段末期至峰值强度前”区间,且“突跳”时刻的轴向应力与试件峰值强度的比例保持一致,均为峰值强度的 90%～95%。在图 5(b)中,试件的峰值强度为 110 MPa,渗透率“突跳”发生时刻的轴向应力在 99～104.5 MPa 之间,在应力-应变曲线上对应“屈服平台末端”;在图 6(a)中,试件的峰值强度为 146 MPa,渗透率“突跳”发生时刻的轴向应力在 131.4～138.7 MPa 之间,在应力-应变曲线上对应“屈服阶段向峰值强度过渡”阶段。随着载荷进一步增大,当达到应力峰值时,岩样的承载结构发生破坏,内部裂纹大量扩展并相互贯通,形成了更为广泛的渗流通道,使得渗透率再次快速升高。

图 5(b)和图 5(c)分别为注浆前双裂隙灰岩试件在 20 MPa 和 30 MPa 围压环境下的全应力-应变渗流演化过程,注浆前双裂隙灰岩在加载过程中的渗透率均表现出具有代表性的“双峰”演化特征。这一现象表明,在轴向压应力的持续作用下,试件内部的预制裂隙与其尖端附近的微裂隙逐渐扩展并最终发生贯通,使渗流通道的连通性显著增强,渗透率出现第一次峰值。随后,随着围压的持续约束,裂隙面间的摩擦作用和表面凸起的咬合作用逐渐增强,部分渗流通道被压闭,渗透率明显降低。当轴向载荷接近峰值强度并进入破坏阶段时,裂隙在应力集中区域发生再次扩展甚至贯通,形成新的渗流通道,从而引发渗透率的第二次上升。由此可见,该“双峰”特征是在轴压作用下裂隙扩展贯通与高围压条件下裂隙面摩擦力和凸起咬合力共同作用的结果。

对比发现,经过注浆处理后的试件,渗透率“双峰”现象出现的频率明显降低。这主要归因于注浆后浆液充填了试件裂隙,增强了裂隙面之间的黏结力,改变了裂隙的几何形态和力学性质,使得裂隙在轴压和围压共同作用下的扩展模式发生变化,从而减少了渗透率“双峰”现象的出现。

3.2 注浆前后不同围压下平行双裂隙灰岩渗流率对比

基于试验获取的数据,建立了注浆前后在不同围压条件下双裂隙灰岩试样在峰值应力前渐进破坏过程中渗透率随轴向应变变化的关系曲线(见图 5 和图 6)。为便于分析,在全应力-应变路径中提取了以下 5 个关键渗流参数:静水压力状态对应的初始渗透率(K_0)、渗透率最小值(K_{min})、最大体积压缩点处的渗透率(K_C)、峰值应力点对应的渗透率(K_s)、渗透率最大值(K_{max})。表 2 列出了注浆前后不同围压下平行双裂隙灰岩的 5 个关键渗透率值。

表 2　注浆前后平行双裂灰岩在全应力-应变过程中的 5 个关键渗透率值

Table 2　Five critical permeability values during the complete stress-strain process of limestone with parallel double fissures before and after grouting

试件类型	围压/MPa	$K_0/(\times10^{-19}\,m^2)$	$K_{min}/(\times10^{-19}\,m^2)$	$K_C/(\times10^{-19}\,m^2)$	$K_s/(\times10^{-19}\,m^2)$	$K_{max}/(\times10^{-19}\,m^2)$
注浆前	10	4.95	2.78	3.44	6.81	93.18
	20	4.56	2.31	2.97	6.55	59.15
	30	4.12	1.95	2.53	6.05	48.20
注浆后	10	4.31	2.40	3.13	5.81	43.00
	20	3.93	1.77	2.70	10.6	29.30
	30	3.14	1.71	2.33	4.11	25.10

试件所受围压 10 MPa 相当于地下 400 m 埋深的地应力环境。图 5(a)展示了注浆前平行双裂隙灰岩在围压 10 MPa、渗透压 6 MPa 条件下,渗透率随轴向应力-应变演化的全过程曲线。轴向加载初期,裂隙面在法向应力作用下逐渐闭合,导致渗透率呈显著下降趋势。当最低渗透率 $K_{min}=2.78\times10^{-19}$ m²(为初始渗透率 K_0($K_0=4.95\times10^{-19}$ m²)的 56.2%)时,岩体进入完全压密状态。随着轴向应力持续增大,原生裂隙端部萌生新裂纹并逐步扩展,形成次级渗流通道,渗透率转而呈上升趋势。临近峰值强度时,内部裂纹网络加速发育,并逐渐汇合连通,导致渗流通道急剧扩张,渗透率急速上升;在峰后阶段,裂隙瞬间贯通形成宏观破裂面,渗透率出现突增现象,反映出脆性岩体失稳破坏的典型渗流响应。分析发现,关键力学状态点处的渗透率呈现规律性变化:全应力-应变过程中裂隙灰岩的最大体积压缩点的渗透率值 K_C、峰值应力点的渗透率值 K_s 和峰后阶段最高渗透率值 K_{max},分别为初始渗透率 K_0 的 0.69, 1.38 和 18.82 倍,渗透率的大小顺序为:$K_{min}<K_C<K_0<K_s<K_{max}$。

图 6(a)展示了注浆加固后平行双裂隙灰岩在围压 10 MPa 条件下,渗透率随轴向应力-应变的全过程演化曲线。在全应力-应变过程中,初始渗透率 $K_0=4.31\times10^{-19}$ m²,轴向加载初期,裂隙压密效应导致渗透率下降至最低渗透率 $K_{min}=2.4\times10^{-19}$ m²,最大体积压缩点的渗透率 $K_C=3.13\times10^{-19}$ m²,此值要高于最低渗透率 K_{min},但仍低于初始渗透率 K_0,表明浆液固结体延缓了裂隙完全闭合过程。在应力峰值处,渗透率 $K_s=5.81\times10^{-19}$ m²,达到初始渗透率的 1.35 倍。进入峰后破坏阶段后,渗透率快速上升至最大值 $K_{max}=43\times10^{-19}$ m²,相当于初始值的 9.98 倍。针对围压 10 MPa 下注浆后的裂隙试件,其在全应力-应变过程中的渗透率的大小顺序为:$K_{min}<K_C<K_0<K_s<K_{max}$。注浆后,水泥浆体充分充填了岩石内部的预制裂隙及其尖端附近的微裂隙空间,有效阻断了潜在的渗流通道。在加载过程中,裂隙扩展和贯通受到浆体充填物的阻碍,渗流通道的形成速度和规模均显著降低,且峰后阶段的渗透率增长受到明显限制。试验结果表明,注浆试件在峰后阶段的最高渗透率显著低于未注浆试件,说明浆体充填有效削弱了由裂隙贯通引发的渗流突变。这一现象进一步验证了注浆在改善裂隙岩体渗流稳定性、降低渗流突变风险方面的有效性。

注浆前后试件在全过程中的渗透率变化对比见图 7。在 10 MPa 和 20 MPa 围压下,注浆后试件的初始渗透率 K_0 相较于注浆前下降的幅度较小,介于 12.9%～13.8%之间;而在 30 MPa 围压下,K_0 的下降幅度则明显更大,为 23.7%。

试验结果表明,注浆前后试件的最高渗透率 K_{max} 存在显著差异。围压对 K_{max} 的抑制效果呈现一个明确规律:围压越低,K_{max} 的降幅越大。具体而言,在 10 MPa、20 MPa 和 30 MPa 围压下,K_{max} 的平均降幅分别为 53.8%、50.4%和 47.9%。这表明 10 MPa 围压下注浆降低渗透率的效果最优,20 MPa 次之,30 MPa 相对最弱。

注浆后裂隙试件的初始渗透率 K_0 和峰值渗透率 K_{max} 均较注浆前显著降低的原因在于:未注浆试件中倾角裂隙在破坏过程中易发生快速贯通,形成高效的导水通道,从而显著增加渗流能力;相比之下,注浆形成的固结体通过提高裂隙面的黏结强度和摩擦阻力,有效抑制了裂隙在受力作用下的张开与扩展,使渗透率的整体变化幅度明显小于注浆前的试件。虽然注浆固结体无法完全阻止试件在加载过程中的结构破坏,但其在裂隙贯通后仍能显著降低渗流通道的连通性,从而抑制破坏后水流的大量

通过,最终降低峰后渗透率。

深入分析不同围压下注浆效果的差异发现,围压与注浆的协同作用在较高围压条件下表现得尤为显著。综上所述,注浆通过“充填-胶结-围压协同”这三阶段机制重塑渗流行为,注浆效应与围压条件的耦合作用共同控制了裂隙灰岩渗透率的演化规律。

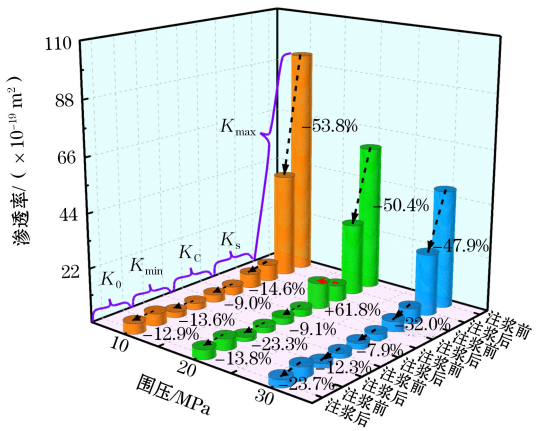


图 7 注浆前后平行双裂隙灰岩渗透率对比

Fig.7 Permeability comparison of limestone with parallel double fissures before and after grouting

4 结论

本研究制备了预制平行双裂隙灰岩试验、纯水泥浆注浆充填裂隙灰岩试件,通过对这两种不同类型的裂隙灰岩进行了力学和渗流试验,系统探究了裂隙灰岩在渗透破坏过程中,纯水泥浆注浆加固对其力学行为及渗透率演化规律的影响,具体研究结论如下。

(1) 注浆前后 45°平行双裂隙灰岩的峰值强度和残余强度均随围压增大呈现非线性上升趋势。在围压条件相同的情况下,经过水泥浆注浆充填处理的试件,其强度相较于未注浆充填的双裂隙试件有明显提升。

(2) 在峰前阶段,注浆前后平行双裂隙灰岩试件的渗透率变化幅度均处于较低水平,且二者的渗透率数值处于同一数量级范围;进入峰后阶段后,注浆充填裂隙的存在使渗透率显著下降,与注浆前相比,注浆后双裂隙灰岩渗透率降幅为 47.9%～53.8%。裂隙灰岩的渗透率在峰后阶段达到最大值,而在线弹性阶段则处于最小值水平。未进行注浆时,双裂隙灰岩在加载过程中的渗透率表现出典型的“双峰”现象;注浆完成后,这一特征现象明显减弱。

(3) 在 10～30 MPa 围压范围内,注浆前与注浆后两类试件的渗透率值排序规律具有高度一致性,均遵循 $K_{min}<K_C<K_0<K_s<K_{max}$ 的顺序,且该排序未因围压变化或注浆处理而改变。进一步观察可知,随着围压从 10 MPa 升高至 30 MPa,两类试件的各关键渗透率值均呈逐渐降低趋势;在相同围压条件下,注浆后试件的 5 个关键渗透率值均显著低于注浆前试件,其中渗透率最大值 K_{max} 的降幅最为突出。此外,两类试件的渗透率最大值 K_{max} 始终出现在峰后阶段,而非与峰值强度对应的点位。

(4) 在全应力-应变过程中,平行双裂隙灰岩在注浆前后的渗透率演化历程均可划分为 4 个典型阶段,分别为压密阶段、近线性变形阶段、屈服阶段与峰后阶段。这 4 个阶段分别与全应力-应变过程中的孔隙压缩阶段、弹性变形阶段、屈服变形阶段及峰后破坏阶段相对应。

参考文献(References):

[1] 曾一凡,武强,赵苏启,等.我国煤矿水害事故特征、致因与防治对策[J].煤炭科学技术,2023,51(7):1-14.
Zeng Yifan, Wu Qiang, Zhao Suqi, et al. Characteristics, causes, and prevention measures of coal mine water hazard accidents in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7):1-14.

[2] 胡少银,刘泉声,李世辉,等.裂隙岩体注浆理论研究进展及展望[J].煤炭科学技术,2022,50(1):112-126.
Hu Shaoyin, Liu Quansheng, Li Shihui, et al. Advance and review on grouting critical problems in fractured rock mass [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1):112-126.

[3] 祁帅帅.裂隙岩体的力学及渗流特性综述[J].化学工程与装备,2023(3):206-208+214.
Qi Shuaishuai. A review of mechanies and seepage characteristics of fractured rock masses [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2023(3):206-208+214.

[4] 李向全,张春潮,马剑飞,等.高原构造岩溶水文地质特征与隧道突涌水风险判识[J/OL].地质学报:1-13[2025-08-10]. https://link.cnki.net/urlid/11.1951.p.20250729.1526.003.
Li Xiangquan, Zhang Chunchao, Ma Jianfei, et al. Hydrogeological characteristics of the plateau tectonic karst and water inrush risk identification and evaluation of tunnels [J/OL]. Acta Geologica Sinica: 1-13[2025-08-10]. https://link.cnki.net/urlid/11.1951.p.20250729.1526.003.

[5] 杨柱,叶强,李阳明,等.复杂大水矿山近矿体帷幕注浆技术优化及应用[J].矿业研究与开发,2023,43(11):157-162.
Yang Zhu, Ye Qiang, Li Yangming, et al. Optimization and application of curtain grouting technology near ore body in complex water-rich mine [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(11):157-162.

[6] 谢世平，侯垣麒，刘天奇.龙塘沿铁矿首采段近矿体帷幕注浆应用[J].矿业研究与开发，2020，40(5)：80-83.
Xie Shiping，Hou Yuanqi，Liu Tianqi. Application or curtain grouting near orebody in the first mining section of Longtangyan Iron Mine [J]. Mining Research and Development，2020，40(5)：80-83.

[7] 王光生，刘会超.寒区地下水封洞库注浆技术优化与应用研究[J].红水河，2025，44(4)：112-115.
Wang Guangsheng，Liu Huichao. Optimization and application of grouting technology for groundwater-sealed caverns in cold regions[J]. Hongshui River，2025，44(4)：112-115.

[8] 胡亥.晋华宫矿副平硐浅部出水段帷幕注浆堵水技术实践[J].江西煤炭科技，2025(3)：156-159.
Hu Hai. Practice on water plugging technology with curtain grouting in shallow water outflow section of auxiliary adit in Jinhuagong Colliery[J]. Jiangxi Coal Science & Technology，2025(3)：156-159.

[9] 韩飞.增子坊矿缓坡副斜井井筒注浆堵水研究与实践[J].江西煤炭科技，2025(3)：143-145＋149.
Han Fei. Study and practice on grouting for water plugging in gentle-slope auxiliary inclined shaft of Zengzifang Colliery [J]. Jiangxi Coal Science & Technology，2025(3)：143-145＋149.

[10] 王建军，吴继蛟.煤矿水文地质条件分析及矿井水害防治技术研究[J].能源与节能，2025(7)：136-138.
Wang Jianjun，Wu Jijiao. Analysis of hydrogeological conditions and research on mine water hazard prevention technologies of coal mines [J]. Energy and Energy Conservation，2025(7)：136-138.

[11] 高晓耕.深部高承压水巷道定投注动水封堵技术实践研究[J].建井技术，2025，46(4)：1-7.
Gao Xiaogeng. Case study on directional grouting technology for dynamic water sealing in deep high-confined water roadways[J]. Mine Construction Technology，2025，46(4)：1-7.

[12] 李嘉伟，张玉军，肖杰，等.水－力耦合作用下砂岩力学及裂隙－渗流特征试验研究[J].煤矿安全，2025，56(4)：183-194.
Li Jiawei，Zhang Yujun，Xiao Jie，et al. Experimental study on mechanical and fracture-seepage characteristics of sandstone under hydro-mechanical coupling [J]. Safety in Coal Mines，2025，56(4)：183-194.

[13] 曾一凡，袁子龙，李昊，等.岩石粒径和浆液浓度影响下的采空区充填浆液扩散规律试验[J].煤田地质与勘探，2025，53(7)：80-89.
Zeng Yifan，Yuan Zilong，Li Hao，et al. Experiments on the diffusion patterns of coal gangue-based grout in goaves under varying rock particle sizes and grout mass fractions [J]. Coal Geology & Exploration，2025，53(7)：80-89.

[14] 陈军涛，周浩宇，喻军健，等.含不同裂隙数量砂岩注浆前后渗流特性试验研究[J].煤田地质与勘探，2025，53(7)：101-111.
Chen Juntao，Zhou Haoyu，Yu Junjian，et al. An experimental study on the seepage characteristics of sandstones with different numbers of fractures before and after grouting[J]. Coal Geology & Exploration，2025，53(7)：101-111.

[15] 钱自卫，谭春智，孙强，等.烧变岩渗流特性及注浆减渗规律实验研究[J/OL].煤田地质与勘探：1-12[2025-08-10]. https://doi.org/10.13827/j.cnki.kyyk.20250416.002.
Qian Ziwei，Tan Chunzhi，Sun Qiang，et al. Experimental on seepage characteristics and grouting seepage reduction law of burnt rock[J/OL]. Coal Geology & Exploration：1-12 [2025-08-10]. https://doi.org/10.13827/j.cnki.kyyk.20250416.002.

[16] Zhao Y L，Zhang L Y，Wang W J，et al. Transient pulse test and morphological analysis of single rock fissures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2017，91：139-154.

[17] Zhao Y L，Liu J H，Zhang C S，et al. Mechanical behavior of sandstone during post-peak cyclic loading and unloading under hydromechanical coupling[J]. International Journal of Mining Science and Technology，2023，33(8)：927-947.

[18] 刘旸，王迎超，余宏波，等.考虑宏细观耦合损伤的注浆加固体渗流－蠕变本构模型及试验验证[J].中国矿业大学学报，2024，53(5)：1006-1021.
Liu Yang，Wang Yingchao，Yu Hongbo，et al. Seepage-creep constitutive model and experimental verification of grouted rock mass considering macro-meso coupling damage effect [J]. Journal of China University of Mining & Technology，2024，53(5)：1006-1021.

[19] 许江，崔梦芹，彭守建，等.渗流－应力耦合作用下砂岩蠕变特性与损伤特征研究[J].矿业研究与开发，2025，45(1)：144-157.
Xu Jiang，Cui Mengqin，Peng Shoujian，et al. Study on creep characteristics and damage features of sandstone under seepage-stress coupling [J]. Mining Research and Development，2025，45(1)：144-157.

[20] 张培森，许大强，李腾辉，等.裂隙砂岩注浆前后渗流特性及注浆后力学特性试验研究[J].岩土力学，2023，44(增刊1)：12-26.
Zhang Peisen，Xu Daqiang，Li Tenghui，et al. Experimental study of seepage characteristics before and after grouting and mechanical characteristics after grouting of fractured sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics，2023，44(Suppl.1)：12-26.

[21] 余伟健，周明娟.不同次裂隙数目条件下岩石力学特性及破坏模式[J].采矿与安全工程学报，2025，42(2)：394-403.
Yu Weijian，Zhou Mingjuan. Rock mechanics characteristics and failure modes under different number of secondary fractures[J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2025，42(2)：394-403.

[22] 罗许林,王国柱,潘燕秋,等.水力耦合作用下预制裂隙砂岩声发射试验研究[J].实验技术与管理,2024,41(10):51-60.
Luo Xulin, Wang Guozhu, Pan Yanqiu, et al. Experimental study on the acoustic emission of prefabricated fracture sandstone under hydraulic coupling[J]. Experimental Technology and Management,2024,41(10):51-60.

[23] 赵延林,付成成,汪亦显,等.全应力-应变过程中裂隙灰岩的水-力耦合特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增刊2):3763-3773.
Zhao Yanlin, Fu Chengcheng, Wang Yixian, et al. Tests on hydro-mechanical coupling characteristics of fractured limestone in complete stress-strain process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(Suppl.2):3763-3773.

[24] 赵延林,唐劲舟,王卫军,等.常规三轴压缩条件下茅口灰岩流固耦合破坏行为研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(1):205-212.
Zhao Yanlin, Tang Jinzhou, Wang Weijun, et al. Study on failure behavior of fluid-solid coupling under conventional triaxial compression for Maokou limestone[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2018,35(1):205-212.

[25] 赵延林,廖健,刘强,等.水-力耦合和隔离状态下孔道砂岩力学特性的对比[J].煤炭学报,2020,45(12):3973-3983.
Zhao Yanlin, Liao Jian, Liu Qiang, et al. Comparison on mechanical properties of hollow sandstones under hydro-mechanical coupling and isolation conditions[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(12):3973-3983.