

库水渗压驱动下断层破碎带充填介质泥化及渗透特性演化研究进展

盛金昌, 李智涵, 赵远洋, 王惠民

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为揭示库水渗压驱动下断层破碎带充填介质的泥化-渗透耦合演化机制,系统梳理了地质特征、试验方法与劣化机理研究进展;原位高地应力约束下压性断层呈“断层核-破裂带”分带结构,核部以黏土矿物为主的低渗屏障受渗压长期作用易触发矿物软化-泥化效应,导致渗透率增幅达 3~5 个数量级;现场高压压水试验可捕捉地应力对裂隙闭合的抑制效应,但传统室内试验因弱化胶结效应及卸荷畸变难以模拟真实渗流路径;黏土矿物泥化可引发孔隙重构,而细粒含量通过絮凝胶结和“水膜”结构可显著提升启动压力梯度;渗压驱动劣化规律为渗透压力通过驱动原生裂隙扩展以及加速颗粒迁移流失来促使渗流通道贯通,临界水力坡降显著下降。

关键词:断层破碎带;充填介质;泥化;渗透特性;劣化机理

中图分类号:TV62

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)05-0089-13

Research progress on argillization and permeability evolution of fault fracture zone filling materials driven by reservoir water seepage pressure//SHENG Jinchang, LI Zhihan, ZHAO Yuanyang, WANG Huimin (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To elucidate the coupling evolution mechanism of argillization and permeability in fault fracture zone filling materials driven by reservoir water seepage pressure, research progress on geological characteristics, experimental methods, and degradation mechanisms was systematically reviewed. Under in-situ high tectonic stress constraints, compressible faults exhibit a “fault core-failure zone” zonal structure. The low-permeability barrier within the core, which is rich in clay minerals, is susceptible to mineral softening and argillization under prolonged seepage pressure, resulting in an increase in permeability by three to five orders of magnitude. In-situ high-pressure water injection tests can capture the inhibitive effect of tectonic stress on fracture closure. In contrast, traditional laboratory tests often fail to accurately simulate realistic seepage pathways due to weakened cementation effects and stress release-induced distortions. The argillization of clay minerals leads to pore reconstruction, while fine particle content significantly increases the initiation pressure gradient through mechanisms such as flocculation cementation and “water film” effects. Seepage pressure-driven degradation follows a pattern wherein water seepage pressure promotes the penetration of seepage channels by propagating original fractures and accelerating particle migration and loss, ultimately leading to a notable reduction in the critical hydraulic gradient.

Key words: fault fracture zone; filling materials; argillization; permeability characteristics; degradation mechanisms

随着我国西部地区深埋长隧洞和高坝水库工程的兴建,断层破碎带在高应力、高水头条件下的渗透劣化问题已成为深部地下工程安全的关键挑战^[1-4]。统计表明,80%以上的隧道突涌水事故和 35%的坝基渗漏失稳事件均与断层破碎带的渗透劣化密切相关^[5-7],其演化过程引发的工程灾害已成为制约深部地下工程安全的关键瓶颈。

在诸多断层类型中,压性断层破碎带因其特殊的形成机制备受关注。该类构造生成于长期构造挤

压环境,形成角砾岩、糜棱岩与断层泥构成的土石混杂介质,具有渗透性低(初始渗透系数大多低于 10^{-7} m/s)、胶结强度高特点,常被视为天然防渗屏障^[8-9]。例如,香炉山隧洞、秦岭输水隧洞等重大工程均将压性断层作为渗流控制边界进行设计^[10-12]。然而,大量工程实践^[13-15](表 1)表明,在库水位周期性涨落及高水头渗压长期作用下的压性断层,内部易发生矿物软化-泥化效应,如高岭石类黏土矿物的水化膨胀、胶结物溶蚀以及微裂隙扩展,导

基金项目:国家自然科学基金项目(42372296,42202286);中国博士后科学基金项目(2023M730916)

作者简介:盛金昌(1969—),男,教授,博士,主要从事裂隙岩体渗流研究。E-mail:jinchang@hhu.edu.cn

表 1 压性断层破碎带渗漏案例

水库名称	时间	断层描述	渗漏原因
银江水电站	2025 年	以碎裂岩为主,夹碎块岩、碎粒岩,质地坚硬、破碎,嵌合较紧密,胶结差,弱透水	f_{24} 、 f_{143} 断层渗漏量大、芯样获取率低
两河口水电站	2024 年	以顺层挤压为主,陡倾下游,破碎带主要充填片状岩、方解石及石英脉、糜棱岩等,带内物质挤压紧密,遇水易泥化、软化,性状较差	断层易发生冲蚀而造成渗漏现象
卡拉苏水库	2023 年	陡倾角 $55^{\circ}\sim 70^{\circ}$,以压扭性为主,带内主要为碎裂岩,胶结程度好,结构密实	f_{57} 、 f_{59} 断层存在绕渗可能
狮子山隧洞	2020 年	灰白色凝灰岩呈砂质,夹 2~4 cm 岩屑、玻屑等	凝灰岩受地下水软化,呈完全蚀变状态
广水宝林隧洞	2018 年	断层产状 $123^{\circ}\sim 150^{\circ}\angle 58^{\circ}\sim 80^{\circ}$,砾岩经历多次构造作用被破坏并重新胶结	f_{31} 断层在高水头压力下发生渗透破坏
双三隧洞	2017 年	17 条小的压扭性断层及节理裂隙	断层破碎带及基岩裂隙发育
溪洛渡水电站	2015 年	以层间错动为主,层内有挤压带,中等偏弱透水	地下水丰富,错动带局部渗水
彭水水电站	2013 年	断层走向 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$,倾向 SE,倾角 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$,压性断层,且由糜棱岩、角砾岩、碎裂岩组成,厚度约 7~15 m	f_1 断层易形成渗漏通道
秦岭输水隧洞	2013 年	逆断层,充填断层角砾岩及断层泥,宽 5~15 m	裂隙中充填物被涌水疏排
锦屏一级水电站	2012 年	陡倾角发育,岩体比较破碎,以片状岩、糜棱岩及断层泥为主,局部软化、泥化,散粒结构	f_2 、 f_5 断层防渗性差,易渗漏
照壁山水库	2012 年		f_{11} 顺河断层引起的渗漏性极大
下坂地水库	2011 年	以压性断层为主,高倾角顺河向,中间夹杂糜棱岩、断层泥	f_7 断层绕渗的可能性大
向家坝水电站	2007 年	f_{n23} 断层充填介质以砾岩为主,黏粒含量少,均为细粒土砾	断层可承受坡降小,渗透性大
吉林台面板坝	2004 年	破碎带宽 0.3~1.2 m,影响带宽 12~15 m,以碎裂岩为主,夹杂糜棱岩、灰黑色断层泥	f_{32} 断层可能存在局部失效漏水
三峡水电站	2000 年	走向 $55^{\circ}\sim 70^{\circ}$,倾角 $72^{\circ}\sim 83^{\circ}$,以碎裂岩、角砾岩为主,胶结性差,遇水易软化	f_{215} 断层易产生压缩、剪切变形
李家峡水电站	1995 年	高陡倾断层倾角 $70^{\circ}\sim 88^{\circ}$,充填片状破裂岩、角砾岩、泥质物等	断层易出现渗漏,灌浆固结明显

致渗透率出现 3~5 个数量级的劣化^[16-17]。这类渗透突变行为往往具有显著时空滞后特征,其演化机理超越传统渗流理论框架,使得现有基于静态渗透参数的防渗体系面临严峻失效风险。

当前研究对压性断层渗透稳定性的认知仍存在局限:①压性断层充填介质特性的原位表征不足。现有研究多基于重塑样开展室内试验^[18-19],忽略了现场高地应力(主应力 σ_3 可达 20~50 MPa)对介质孔隙率的约束效应以及土石混杂结构的级配重构过程^[20-21]。断层泥的黏土矿物定向排列特征在取样卸荷后发生显著畸变,导致室内测试的渗透系数比原位监测值高 1~2 个数量级^[22]。②泥化过程与渗透劣化的关联机制尚未明晰。目前对矿物泥化的认知多停留在微观离子交换层面(如 K^+ / Ca^{2+} 置换引发晶格膨胀)^[23],缺乏与宏观渗透率突变的定量关联模型。高岭石泥化会导致孔隙率增加 15%~20%,但仅当泥化区体积占比超过 36%时才会触发渗透系数阶跃式增长^[24-25]。这使得工程界对压性断层防渗屏障“为何失稳、何时失稳、如何防控”的核心问题缺乏定量化解答。

本文聚焦压性断层渗透劣化这一工程地质-渗流力学交叉难题,介绍了压性断层破碎带的构造定义、矿物组成特征及渗透特性,综合对比了现有断层破碎带渗透试验方法及其优劣,讨论了渗透劣化与泥化过程的关联机制,并分析了其在循环水力梯度

作用下的劣化规律,以期为在建重大水利工程断层破碎带渗控设计提供理论支撑。

1 压性断层破碎带结构及渗透特性

1.1 压性断层破碎带的构造定义

压性断层破碎带是地壳构造挤压应力场(主应力 σ_1 垂直、 σ_3 水平)作用下形成的特殊地质构造单元,其核心特征是断层两盘岩体因长期挤压、剪切作用发生强烈破碎与再胶结,形成以碎裂岩系为主的充填介质体系^[26]。具体表现为断裂带内部复杂的碎裂岩序列,包括断层角砾岩、碎粒岩、碎粉岩及断层泥,其空间分布受控于断层活动强度与应力累积历史,且具有显著的分带性结构^[27-28]。根据国内外学者分类共识,可将其划分为主位移滑动面(即断层核)及外围破裂带(亦称破碎带)。其中断层核以超碎裂化的糜棱岩、断层泥为主,渗透系数极小($10^{-9}\sim 10^{-8}$ m/s),而破碎带由次级断裂网络、裂隙及块状碎裂岩构成,渗透系数相对较大($10^{-7}\sim 10^{-6}$ m/s),二者共同组成了断层破碎带的渗流阻隔骨架^[20,29]。

从工程地质特征看,压性断层破碎带的形成与逆断层、逆冲断层等构造密切相关,其几何形态受控于断距与围岩强度。典型宽度范围为 23 cm 至 20 m,呈现显著的尺度依赖性:小型断裂以微米级碎粉岩为主,大型断裂则多见毫米至厘米级角砾

岩^[30-31]。充填介质的基质含量、碎块粒径(砂粒至巨砾不等)及胶结程度呈非均质性;高密实断层泥与松散碎粒岩的交替分布,导致其渗透特性兼具各向异性与时空演化特征。此外,伴随构造挤压产生的低阶变质矿物(如绿泥石、绢云母)与黏土矿物(高岭石、蒙脱石),通过胶结-溶蚀作用进一步强化了断层带的弱透水屏障功能,但其内部微裂隙网络的存在也埋藏了渗透突变的潜在风险。这一双重特性既为工程防渗设计提供了天然优势,也因泥化滞后效应与局部导渗通道的隐蔽性,成为深部地下工程渗控失效的关键诱因。

1.2 压性断层破碎带的矿物组成特征

断层破碎带的矿物组成是其物理力学与渗流特性演化的重要物质基础,其显著区别于围岩的特征主要体现在黏土矿物富集、胶结物多样性及蚀变矿物组合上。压性断层核部以超细粒断层泥为主,黏土矿物(如高岭石、蒙脱石、伊利石)占比可达30%~60%,其中蒙脱石因其层间离子交换能力与强膨胀性(晶层间距可增大至1.8 nm),显著影响核部的短期水力封闭性^[32-34];而破碎带则以碎裂岩、角砾岩为主,伴生碳酸盐(方解石)、硅质(石英)、铁质(赤铁矿)胶结物,方解石在渗流溶蚀作用下的质量损失率可达5%~15%,直接控制破碎带渗透率的长时效演化^[35]。此外,构造挤压过程中形成的低阶变质矿物(如绿泥石、绢云母)与次生黏土矿物常呈定向排列,形成渗透屏障的微观骨架,但局部微裂隙的溶蚀性矿物(如石膏、黄铁矿)富集会加剧渗透通道的连通性^[36-37]。

矿物组成的空间分异与断层分带结构具有显著相关性。断层核因高应力挤压与摩擦生热,黏土矿物热液蚀变作用显著(如长石蚀变为高岭石),孔隙充填率超过80%^[38-39];而破裂带以碎裂岩的原生矿物(石英、长石)为主,其力学性质及溶蚀敏感性主要受胶结物类型控制。许多现场和室内渗透试验证明,高黏土矿物含量的断层核通常较破裂带的渗透性下降4~5个数量级,但发生矿物溶蚀作用后孔隙率上升,渗透系数骤增3个数量级,揭示了矿物蚀变-渗流劣化的非线性效应^[40-43]。因此,综合考虑矿物溶蚀-渗流耦合机制,成为定量评价断层防渗屏障动态稳定性的关键基础。

1.3 压性断层破碎带的渗透特性

压性断层破碎带的渗透特性受其矿物组成与分带结构的双重控制,呈现显著的非均质性和动态演化特征。压性断层核部因高含量黏土矿物(如蒙脱石、高岭石)的致密填充和膨胀效应,初始渗透系数极小($10^{-9} \sim 10^{-8}$ m/s),在短期渗透压力作用下可维

持低渗屏障功能;而破碎带因碎裂岩的裂隙网络与碳酸盐胶结物(如方解石)的溶蚀敏感性,渗透系数相对较大($10^{-7} \sim 10^{-6}$ m/s),长期渗流下胶结物溶解可引发孔隙率提升至15%~20%,渗透系数增幅达24个数量级^[44-45]。渗透方向异性显著,平行断层面方向因裂隙优势产状,渗透系数较垂直方向高1~2个数量级,如甘肃某隧洞断层,平行断层方向的渗透系数较大($10^{-4} \sim 10^{-5}$ m/s),而垂直于断层方向的渗透系数较小($10^{-5} \sim 10^{-7}$ m/s)^[46-48]。

此外,压性断层破碎带的渗透特性对地应力-渗透压力耦合作用高度敏感。原位高围压(20~50 MPa)条件下,裂隙闭合效应使渗透系数较卸荷室内试验值低3~4个数量级。以映秀—北川断层为例,围压40 MPa时渗透率为 1.15×10^{-17} m²,卸荷至4 MPa后突增至 1.40×10^{-14} m²。随着库水渗透压力的周期性加载,黏土矿物泥化(如高岭石水解生成Al³⁺胶体)导致孔隙结构重构,启动压力梯度从初始的0.5 MPa/m降至临界值0.1 MPa/m以下,引起渗透失稳。此外,矿物蚀变与颗粒迁移的协同效应可形成局部渗流优势通道,如鲁尔河谷断层在泥化和颗粒迁移作用下渗透系数增幅超过1个数量级,揭示了泥化-渗流耦合劣化的非线性特性^[40]。这一特性使得断层破碎带在工程服役期可能从弱透水层突变为渗漏主通道,对渗控体系设计提出了严峻挑战。

2 断层破碎带渗透试验方法

当前,针对断层带渗透特性的研究主要采用3类试验方法:现场高压压水试验^[49]、室内渗透试验^[50]以及原位渗透试验^[51]。其中现场高压压水试验能最大限度地保持断层段原状且扰动量较小,作为原位测试的重要手段备受关注。钱自卫等^[52]基于此方法提出了“渗透压差-阻力”定量模型,并通过阻渗强度与含水层水压比值构建了突水安全系数评价体系。Yuan等^[53]通过陡倾角断层高压压水试验揭示了渗流场与岩体变形的耦合效应,发现水力劈裂作用下裂隙呈波纹状扩展,且高孔隙水压显著影响了围岩稳定性。这也说明了在水压加载过程中,渗流场呈放射状发散,其渗流方向难以控制。针对高压环境下的渗透异质性,朱术云等^[54]采用双孔压渗法对同一条断层的不同区段进行了多轮次现场压水试验,发现B区段断层经三次高压压渗后的渗透系数增幅较A区段低80%,揭示了断层带原生微裂隙的连通性与空间非均质性,证实压水压力-流量曲线的冲蚀型特征与充填物密实度直接相关。但上述试验周期较短,无法观测水致软化后断层带材料的

渗透特性演化过程^[55]。作为一种新兴渗透测试方法,高压水力劈裂试验通过在断层破碎带内施加高压来诱发裂隙扩展,可在原位条件下模拟渗透压力驱动下微裂隙网络的发育,对研究断层介质渗透特性的演化具有重要意义^[53]。但该方法也存在一定局限,如裂隙扩展方向难以控制、试验安全性要求高且周期较短等^[56]。因此,有必要进一步完善实验方案,以获取更可靠的长期泥化-渗透劣化数据。

传统室内渗透试验多将断层破碎带视为无黏性土体,通过烘干破碎裂隙岩体进行干密度与级配筛分下的渗透测试^[55]。此方法忽略了断层带原状结构的弱胶结特性,弱化了胶结强度对渗透行为的控制作用,导致试验结果与实际地应力条件下的渗透特性存在显著偏差。郁邦永等^[57]采用不同胶结剂研究了裂隙岩体渗透特性,发现黏土与岩屑的胶结作用较弱,而石膏和水泥胶结剂对渗透特性具有显著影响。进一步地,郁邦永等^[18]通过调控水泥与含盐量实现了断层带弱胶结强度控制,发现盐分溶蚀作用会加速水泥胶结剂的弱化进程,导致渗透特性发生突变。类似地,马丹等^[58]指出胶结强度是控制断层带蠕滑-冲蚀的主控因素,细观颗粒在胶结弱化过程中发生定向迁移,形成局部渗流通道,引发宏观损伤失稳。这一过程的渗透率变化与胶结剂类型、颗粒级配、溶蚀速率密切相关。但上述方法重构的试样在胶结结构方面仍与原状试样存在差异,导致渗透特性参数存在测试偏差。Liu 等^[59]与 Zhao 等^[60]对比了低渗透性挤压断层在地应力状态与卸荷条件下的渗透系数,发现原位条件下的渗透系数可能比室内模拟低两个数量级,揭示围压和地应力历史对渗透路径闭合的显著影响。因此,原位渗透试验更能反映断层带渗透特性的空间异质性和实际工程响应。

需要指出的是,原位渗透试验存在成本高昂、实施困难、周期较长等特点,往往与工程施工计划存在冲突,导致可供分析的试验数据相对有限。Sato 等^[61]提出的原位钻取测试法虽能保留原位结构与应力状态,但由于渗流通道封堵不完全,只能实测特定渗流路径下的渗透特性参数,无法反映断层带的整体渗透特性。Kim 等^[62]虽明确定义了渗流路径,但解除了断层的法向应力作用工况,导致试验过程中过流区控制失效,出现接触面渗漏现象。更为关键的是,工程扰动下断层带往往经历多级循环加卸载过程^[63],这将加剧黏土矿物的软化-泥化反应^[64],最终诱发局部渗透通道的产生。

3 泥化过程与渗透劣化的关联机制

在渗透压力作用下,断层破碎带充填介质中颗

粒被压碎和重新排列,形成渗流通道,导致渗透流速加快,大量的颗粒迁移流失,进而导致渗透失稳^[64]。研究者们针对充填介质发生渗透失稳控制性因素开展了大量研究,断层破碎带充填介质渗透失稳的影响因素可以分为内部因素和外部因素两大类:内部因素是指充填介质本身的材料特性,主要包括颗粒级配、矿物成分、含石率、Talbot 指数、胶结状态等;外部因素主要是指充填介质的力学条件,包括水压力、轴压、围压及其作用的时间效应^[8,19,65-69]。

3.1 充填介质特性

3.1.1 含石率的调控效应

含石率作为充填介质分类的关键指标,直接决定着断层破碎带的力学结构与渗流模式^[69]。当含石率小于 30% 时,充填介质以细粒土体为主,渗流路径集中于土颗粒间微孔隙,渗透系数较小($10^{-7} \sim 10^{-8}$ m/s),但在高渗透压力长期作用下易发生细粒迁移,形成局部流失通道;含石率为 40%~60% 时,粗颗粒(粒径大于 5 mm)形成刚性骨架,介质渗透系数显著提升($10^{-6} \sim 10^{-5}$ m/s),其破坏模式从土体渐进冲刷转向骨架孔隙中细粒的快速流失。如杨俊成等^[66]通过研究玉龙喀什 F₂ 断层发现,当含石率大于 40% 时,岩石骨架主导的贯通孔隙网络使渗透破坏呈现“无临界突变”特征,而当含石率小于 30% 时,试样因黏土胶结存在临界坡降阈值。这一结果与王鹏飞等^[19]提出的土-石混合体渗流模式一致,表明含石率通过调控介质“颗粒支撑”或“基质胶结”结构,主导渗透劣化行为的阶段性与空间异质性。

3.1.2 级配曲线的非均匀性控制

颗粒级配通过 Talbot 指数(n)反映充填介质的密实度与孔隙连通性。杨俊成等^[66]的试验表明,当含石率小于 30% 时, n 值增大(级配连续性增强)导致细粒含量降低,弱化了黏土胶结作用,使临界坡降降低 63.4%;而含石率大于 45% 时,粗颗粒骨架的均匀性抑制了 n 值对渗透坡降的敏感性,其临界坡降波动幅度小于 8%。这说明低含石率条件下,级配曲线的优化(如通过工程级配设计)可显著提升抗渗能力;而高含石率断层破碎带因天然级配的固有松散性,难以通过局部填隙作用抑制渗流通道的拓展。黄昌富等^[70]基于 Talbot 理论的三轴渗透试验也表明,胶结物的流失导致 $n=0.3$ 与 $n=0.9$ 试样的渗透系数相差达 2 个数量级,证实级配非均匀性是渗透劣化速率的主控因素之一。

3.1.3 黏土矿物的泥化风险

黏土矿物含量(尤其是蒙脱石、高岭石)通过物理化学作用调控渗透稳定性。杨俊成等^[66]的试验显示,当细粒含量(粒径小于 0.25 mm)不低于 20%

时,黏土矿物的絮凝胶结效应可显著提升临界坡降,破坏模式由颗粒迁移转向整体滑动。然而,黏土矿物的水敏性也带来了泥化隐患:蒙脱石膨胀(晶层间距增加至 1.8 nm)可能导致短期渗透系数骤降,但因层间离子(K^+ 、 Ca^{2+})溶出与胶结破坏,长期作用下微裂隙重新贯通,渗透系数可能反弹至初始值的 3~5 倍。此外,鲁洋等^[71]发现,黏土矿物与粗颗粒的接触界面是泥化集中区,含石率为 30%~45%的试样中泥化体积占比超过 15%时,渗透系数突增,触发渗漏通道发育。因此,黏土矿物的泥化风险是评价断层长期渗控的核心。

3.2 充填介质泥化机制

受长期地质构造运动影响,断层内部岩体不断经历压碎与研磨作用,形成大量呈黏土状的微细矿物颗粒。此类物质在应力作用下发生破裂、粒化、重结晶及化学反应,最终形成胶结物质^[72]。在压实和胶结共同作用下,充填介质内部处于胶结接触状态,此时整体结构相对稳定,具有较强的物理力学性能。然而,在外部扰动影响下,充填介质中的胶结结构逐级破坏,颗粒间接触类型逐渐由胶结转为摩擦接触,介质结构由连续体转化为离散体,宏观表现为泥化现象^[73]。泥化过程改变了介质的结构性,使致密结构向疏松多孔结构演变,充填介质状态由固态转变为塑态甚至液态,导致物理力学性能显著劣化。例如:王振等^[74-75,17]开展了泥化前后含黏土岩石的常规力学试验,对比发现抗压强度、弹性模量、黏聚力及内摩擦角等力学参数均呈不同程度的劣化趋势,最大损失率超过 90%;李鹏等^[76]通过不同含水率下充填介质的剪切蠕变试验发现,含水率显著改变充填介质的蠕变特性,随着泥化程度的加深,初始蠕变强度逐渐降低,蠕变变形量与干燥条件下相比可增加至 2~6 倍。

泥化机制主要包括外荷载作用下的泥化和水诱导作用下的泥化。在外荷载作用下,当充填介质所承受的应力达到一定阈值时,其内部胶结结构发生损伤破坏,产生非弹性变形。随着外荷载的进一步增强,胶结结构彻底破坏,充填介质仅依靠颗粒间的机械咬合作用维持结构稳定,材料强度显著弱化^[77]。在水诱导作用下,充填介质中的黏土矿物遇水膨胀,同时胶结物质被溶蚀,二者共同作用促使微裂隙扩展。随着作用时间延长,介质孔隙率逐渐增大,整体结构松散,使介质强度降低^[78]。李利平等^[16]针对泥化导致的力学性能退化问题,提出了以“损伤弱化”与“水致弱化”分别表征外荷载与水诱导两种泥化机制的主导过程,从机制角度对泥化行为进行了明确区分。此外,现场工程实例也验证了

上述泥化导致渗透性劣化的机制。例如,白鹤滩水电站层间错动带在蓄水后充填介质发生泥化软化,渗透系数骤增并形成集中渗漏通道^[17],说明泥化-渗透耦合效应在实际工程中确实存在。

Jiang 等^[79-80]借助计算机断层成像(computed tomography, CT)技术观察了泥岩的软化过程,发现水分子通过较大的初始裂隙侵入内部,水诱导下亲水性黏土矿物吸水膨胀,溶蚀作用下胶结结构弱化,致使裂隙不断地扩展和联通,形成网状结构。充填介质在吸湿、吸水、浸水等不同水环境作用过程中,易发生泥化软化,主要是因为亲水性黏土矿物晶格构造对水较为敏感,晶层间厚度在吸水后增大,导致介质膨胀^[81]。黄宏伟等^[82]研究发现蒙脱石吸水后其体积可增大几倍,伊利石、高岭石吸水后其体积可增大 40%~60%,由此产生的膨胀力会迫使介质劣化。张世雄等^[83]通过膨胀压力试验发现蒙脱石膨胀产生的膨胀压力为 0.125~0.684 MPa,与部分含黏土岩石抗拉强度的比值介于 11.79%~36.77%之间,与抗剪强度的比值介于 71.11%~171.18%之间,证明黏土矿物膨胀所产生的拉张效应和剪切效应对介质力学性质变化有控制性作用^[77]。李华志等^[17,73]通过电镜扫描图像观察了试样的破坏面,发现随着含水率增大,胶结结构在溶蚀作用下软化,骨架颗粒间的有效接触应力降低,破坏面逐渐变得光滑,由脆性破坏过渡为塑性破坏。

在泥化过程中,两种机制相互影响,加速了充填介质的泥化过程。荷载作用下胶结结构开始破坏后,水分子更容易进入粒间孔隙,对胶结物质进行溶蚀,增加孔隙连通性,增强水诱导泥化作用,同时胶结结构弱化后,荷载作用下泥化作用更容易发生。

3.3 渗透特性劣化

3.3.1 渗透系数的劣化机制

在长期渗透作用下断层破碎带内部原有结构逐渐发生软化与泥化,导致渗透性显著增加。Ma 等^[84]在渗透试验中发现,当渗透压力由 0.1 MPa 升高至 0.2 MPa 时,渗透系数增幅从 21.9% 上升至 75%,表明渗透压力的增大会加剧水流侵蚀、颗粒重组及细颗粒的内部迁移过程,从而引起渗透特性的劣化。王路珍等^[85]进一步验证,渗透压力的增大可显著缩短渗透性的劣化进程,并伴随着初始孔隙结构的减小,使得劣化特征更加明显。王鹏飞等^[19]揭示在围压由加载转到卸载的过程中,试样从结构致密状态逐步过渡至孔隙略有恢复、连通性增强,且在卸载阶段,渗透系数相较最大围压状态有明显升幅。李利平等^[16]则引入水致弱函数来描述断层饱水条件下的强度弱化过程,并用突跳系数来表征孔隙结

构损伤所引起的渗透性系数增大现象。

然而,细粒中的黏土矿物常作为弱胶结物质,其性质在很大程度上决定了渗透性劣化的难易程度。史新等^[86]发现细粒含量及其物理特性对宽级配岩土体渗透系数影响显著,尤其是红黏土中含有蒙脱石遇水易发生膨胀,可充填颗粒间的孔隙结构,从而增加渗透劣化的难度。随后,郁邦永^[65]对不同胶结物质开展渗透试验,结果表明黏土、岩屑胶结的试样,由于胶结强度较弱,在水诱导作用下其结构易遭破坏,颗粒容易迁移流失;相比之下,以石膏和水泥为胶结材料的试样因其胶结强度较高,结构破坏过程相对缓慢。郁邦永等^[18]与马丹等^[58]也进一步验证,胶结强度对断层破碎带的蠕变、劣化及破坏进程具有显著影响。因此,原有破碎带内自生黏土是决定渗透劣化程度的关键因素之一。Xu 等^[87]对黏土矿物的富集机制、形成模式及生长过程进行了系统探讨,为研究断层活化诱发的渗透性劣化过程提供了重要方向。此外,Farrell 等^[25]发现断层带中自生黏土(如绿泥石、高岭土等)在流体长期作用下反而促进了孔隙连通性的演化,进而加剧渗透性劣化。这一现象主要是因为黏土矿物在遇水后易膨胀和泥化,导致微孔隙和裂隙结构进一步扩张,从而增强了介质的渗透性。

3.3.2 启动压力梯度的调配作用

启动压力梯度是评价断层带充填介质抗渗能力的重要指标,其非线性渗流特征与细粒含量(尤其是黏土矿物)密切相关。当细粒含量大于 2.5% 时,充填介质开始表现出明显的非线性渗流特性。此时,细粒与骨架结构之间具有微弱的胶结性质。当细粒含量大于 20% 时,颗粒间的联动机制逐渐显现,絮凝胶结性增强,与水分子易形成“水膜”结构,使低速水流突破难度增大,对启动压力梯度影响显著。Yin 等^[88]研究表明在非 Darcy 渗流状态演化中,细粒含量中黏性矿物表现的弱胶结性会使孔隙结构的束缚水逐渐向自由水转化。

另外,细粒中的黏土矿物性质(如水合、水化反应等)也决定着启动压力梯度的大小。Zhang^[89]发现细粒中蒙脱石遇水会发生层间膨胀,导致孔隙空间被挤压,堵塞孔隙喉道,使得可流动性减弱,启动压力梯度可增大 3~10 倍。然而,Rast 等^[90]开展了三轴渗透试验,发现伊利石、高岭石等黏土颗粒表面双电层重叠引起离子浓度梯度驱动水分子进入颗粒间隙,从而引起渗透膨胀,破坏颗粒间的胶结,使近断层黏土转化为泥浆,启动压力梯度大幅下降。该机制被认为是断层活化过程中渗透性急剧增大的原因之一。Isaacs 等^[91]进一步指出,细粒中黏土矿物

组分直接影响启动压力梯度的变化,同时也是渗透系数改变的主要影响因素之一。

3.3.3 骨架结构的抗渗性能

渗透特征坡降(如临界水力坡降、破坏水力坡降)的变化是决定充填介质性质及渗透破坏形式的主要手段。杨俊成等^[66]研究表明,当细粒含量(粒径小于 0.075 mm)低于 18% 时,骨架结构以岩石颗粒为主,细粒不能完全充填于孔隙结构中,颗粒间的弱胶结性弱,可承担的临界水力坡降和破坏水力坡降的变化幅度较小,抗渗效果不明显。当细粒含量高于 20% 时,骨架结构以细粒填充为主,颗粒与骨架结构的“絮凝”结合作用增强,此时渗透特征坡降呈现指数型增长趋势,抗渗性能增强。马丹等^[92]认为岩石骨架受长期挤压、剪切破碎导致细粒含量升高,其性质由岩石颗粒逐渐向土体转变,从而形成更加密实的结构,可承担的渗透特征坡降显著提高。凡净等^[48]也证实了细粒含量会增加骨架结构的密实程度,使渗透性减弱,可承担的临界水力坡降和破坏水力坡降增加,抗渗性能大幅提升。

然而,细粒含量的增加会导致侵蚀过程中颗粒流失的加剧。Yang 等^[93-94]的试验表明细粒含量的减少会加速颗粒运移和渗透路径的发展,明显提高失稳破坏程度,可承受渗透特征坡降也会大幅下降。吴平等^[95]发现高细粒含量的岩土体渗透变形破坏主要以过渡型、流土型为主,细粒含量和相对密度的提高会使破坏方式逐渐由过渡型趋向流土型;临界水力坡降、破坏水力坡降受试验干密度影响显著。因此,判定渗透破坏中的临界水力坡降和破坏水力坡降是充填介质长期渗透稳定性分析的核心。

4 渗透压力驱动下的充填介质劣化规律

4.1 渗透压力驱动下充填介质的演化过程

渗透压力是驱动断层充填介质渗透特性演化的关键因素。在渗透压力作用下,充填介质依次经历软化、颗粒流失、通道扩展及通道成形 4 个阶段;加载初期,充填介质迅速进入浸水软化阶段,渗透压力加速了其软化过程;随着渗透压力的持续增大,水流驱动下介质中细颗粒迁移流出,同时部分细小颗粒从骨架上剥落进入流体,导致介质孔隙率和渗透率增加;部分颗粒在渗透压力作用下发生转动和滑移,沿渗流路径重新排列,促使渗流通道扩展,进一步削弱充填介质的渗透性;最终,在渗透压力驱动下形成稳定的渗流通道,充填介质渗透破坏^[96]。

在整个渗透破坏过程中,渗透压力的驱动作用主要包括以下两个方面:

a. 驱动裂隙扩展。在高渗透压力作用下,充填介质初始孔隙内空气被压缩,在裂隙尖端产生应力集中,导致介质损伤破坏,微裂隙逐渐发育。於昌峰等^[97]通过断层现场注水测试发现,在注水压力作用下,裂隙不断延伸扩展形成了小规模连续通道。黄震等^[67]采用 CT 扫描分析了断层充填介质渗流前后的细观结构变化特征,发现渗透后介质内部不同位置产生了新生裂隙,多呈扁平状结构。冯琳^[78]发现渗透压力作用下弱胶结地层中闭孔减少,连通孔增多,连通性增大明显,渗透率增长 3.85~5.74 倍。许进鹏等^[98]认为渗透压力是断层活化的控制因素之一,当渗透压力大于断层面法向应力时断层裂隙扩展,渗透系数呈增大趋势。渗透压力驱动微裂隙发育,随着作用时间的增加,损伤不断累积,裂隙逐步扩展并连通,最终形成集中渗漏通道^[16]。同时,裂隙损伤促使水分子更易侵入孔隙,加剧水诱导泥化过程,进一步促进裂隙发育。

b. 控制颗粒流失。断层充填介质的渗透破坏属于渗流与侵蚀耦合过程。在渗透压力作用下,介质中细颗粒优先迁移,孔隙结构随之扩大,颗粒流失量增加^[99-100]。渗透压力对颗粒流失控制作用主要体现在其大小、加载方式及作用时间 3 个方面。渗透压力是颗粒流失的直接驱动源,渗透压力越大,颗粒越易从骨架中剥离并成为可动颗粒。马丹等^[58]的变质质量渗透试验表明,渗透压力越大,侵蚀效果越显著,质量流失率增大,但侵蚀持续时间反而缩短。张庆艳等^[101]的渗透侵蚀试验则表明,渗透压力是控制孔隙率演变速率的决定因素。在梯度加载下,颗粒流失现象更为明显,其流失量是恒定水压下的 1.2~2.1 倍。黄昌富等^[70,102]通过断层破碎带渗透试验指出,在恒定水压条件下,颗粒流失质量与时间呈指数关系,说明渗透压力作用时间对颗粒流失具有显著控制作用,渗透破坏过程存在时间依赖性。

4.2 循环水力梯度加剧充填介质劣化

在循环水力梯度作用下,断层充填介质的渗透特性显著劣化,其渗透系数较恒定水力条件下的增长趋势更快。於昌峰等^[97]开展了断层现场注水试验,发现循环水力梯度加速了裂隙发育过程,导致断层阻水性下降。王显辉^[103]在断层原位压渗试验中发现多次重复压渗导致充填介质出现明显的渗透破坏,重复压渗作用下介质渗透性进一步增大,渗透系数最大增长 10.1 倍。周期性水压作用在裂隙尖端导致的应力集中和应力疲劳,加剧了介质结构劣化。Chen 等^[104-105]通过恒定水力梯度和循环水力梯度下渗透试验发现,恒定水力梯度下抗侵蚀系数大于循

环水力梯度下抗侵蚀系数,循环水力梯度下更容易发现潜蚀。在相同实验条件下,变水力梯度下颗粒迁移和流失比常水头更多,渗流通道贯通范围更大。Chen 等^[106]开展了周期性渗透试验,发现在相同平均水力梯度条件下,循环水力梯度幅度的增加会导致侵蚀质量和导水率的显著增加。李洪亚等^[107]开展了周期性水压力作用下的三轴试验,结果表明随着循环次数的增加,充填介质的黏聚力和内摩擦角分别呈指数式和线性衰减。随着水力梯度幅值和循环频率的增加,充填介质的临界水力梯度和破坏水力梯度显著降低。Deng 等^[108]基于透明土渗流试验观察到,在恒定水力条件下,颗粒易在狭窄孔隙通道处发生堵塞堆积,阻止颗粒迁移;而在循环水力条件下,水流扰动能够破坏这种暂态堵塞结构,重新启动颗粒迁移过程,从而加快渗透劣化速度。陈亮等^[109]进一步指出,循环水力梯度导致破坏水力梯度的下降幅度,可作为评判土体内部颗粒流失程度的重要指标。

5 结论与展望

5.1 结论

a. 压性断层结构控渗机制:高地应力环境下压性断层具有核部低渗屏障、破裂带相对导渗的分带特性,黏土矿物含量与含石率的耦合作用主导渗透破坏模式转型:低含石率以渐进式土体冲刷为主,高含石率则呈现骨架孔隙中细粒快速流失的“无临界突变”特征。

b. 泥化-渗透关联机制:泥化区体积占比大于 36%为渗透阶跃式劣化的临界条件,蒙脱石晶层间距扩张至 1.8 nm 引发孔隙连通性重构,而细粒含量大于 20%时通过絮凝胶结效应提升启动压力梯度。

c. 渗透压力灾变驱动路径:①渗透压力大于 0.2 MPa 时原生裂隙加速扩展(渗透系数增幅达 75%);②循环水力梯度作用使颗粒流失量达恒定荷载的 1.2~2.1 倍;③矿物溶蚀与水化膨胀协同形成优势渗流通道,导致临界水力坡降降至初始值的 20%~40%。

5.2 研究不足与展望

压性断层破碎带的泥化-渗透耦合演化研究虽取得进展,但仍存在关键难题:①原位高地应力约束下的充填介质真实状态表征仍不足。现有技术(如高压压水试验)受限于封堵不完整和时间尺度,难以捕捉长期泥化过程中的级配重构和裂隙扩展动态。②泥化过程与渗透劣化的定量关联模型尚未成熟。微观离子交换(如 K^+ 、 Ca^{2+} 置换膨胀)与宏观渗

透率突变的跨尺度建模尚缺系统性框架,特别在临界泥化体积阈值(大于36%)的普适性验证方面仍需更多尺度数据支持。③新兴实验技术应用不足。如高压水力劈裂在模拟渗透压驱动微裂隙起裂-扩展方面的潜力尚未充分探索。④工程预警机制存在盲区。渗透压力驱动下断层渗透突变常具滞后性,现有监控模型对循环水力梯度长期效应捕捉不足。

未来研究应聚焦:①多场耦合原位监测系统开发;②泥化-渗透跨尺度数值模型;③新兴实验与人工智能预测技术的融合;④工程案例数据的动态知识库构建。

参考文献:

[1] 周黎明,张杨,付代光,等.滇中引水隧洞工程典型致灾地质体雷达波场与时-频特性分析与应用[J].岩石力学与工程学报,2024,43(增刊2):3668-3680. (ZHOU Liming, ZHANG Yang, FU Daiguang, et al. Application and analysis of wave-field and time-frequency characteristics of typical disaster-causing geological bodies detected by ground penetrating radar in the tunnel of Central Yunnan Water Diversion Project [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43 (Sup2): 3668-3680. (in Chinese))

[2] 杨红霞,陈安东,孙兴邦,等.滇中引水工程香炉山隧洞TBM超前预报体系实践[J].地下空间与工程学报,2024,20(增刊2):834-840. (YANG Hongxia, CHEN Andong, SUN Xingbang, et al. Practice of TBM advanced prediction system for Xianglushan tunnel in Yunnan water diversion project [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20 (Sup2): 834-840. (in Chinese))

[3] 邓铭江,许振浩,刘斌.超特长隧洞TBM施工“115”超前地质预报系统创建与实践:以北疆供水二期工程为例[J].隧道建设(中英文),2021,41(9):1433-1450. (DENG Mingjiang, XU Zhenhao, LIU Bin. Establishment and application of “1 km + 100 m + 50 m” geological prediction system for extra-long TBM tunnels: a case study on water supply project II in Xinjiang, China [J]. Tunnel Construction, 2021, 41 (9): 1433-1450. (in Chinese))

[4] 李术才,许振浩,黄鑫,等.隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1041-1069. (LI Shucai, XU Zhenhao, HUANG Xin, et al. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (5): 1041-1069. (in Chinese))

[5] 李廷春,吕连勋,段会玲,等.深埋隧道穿越富水破碎带围岩突水机理[J].中南大学学报(自然科学版),

2016, 47 (10): 3469-3476. (LI Tingchun, LYU Lianxun, DUAN Huiling, et al. Water burst mechanism of deep buried tunnel passing through weak water-rich zone [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47 (10): 3469-3476. (in Chinese))

[6] 温时雨,肖洋,秦云,等.滇中长大引水隧洞典型致灾地质构造分析[J].现代隧道技术,2022,59(增刊1):719-726. (WEN Shiyu, XIAO Yang, QIN Yun, et al. Analysis of typical disaster-causing geological structures in long and large tunnels of central Yunnan water diversion project [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59 (Sup1): 719-726. (in Chinese))

[7] 徐乐心.富水断层隧洞掌子面突水突泥灾害演化规律与注浆防治研究[D].焦作:河南理工大学,2023.

[8] 王鹏飞.渗压作用下断层带岩体断裂导渗演化机制研究[D].北京:北京科技大学,2019.

[9] 李楠,马丹,张吉雄,等.断层带破碎岩体采动剪切变形与渗透性演化规律[J].煤田地质与勘探,2023,51(8):150-160. (LI Qiang, MA Dan, ZHANG Jixiong, et al. Mining-induced shear deformation and permeability evolution law of crushed rock mass in fault zone [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51 (8): 150-160. (in Chinese))

[10] 肖竟,万军伟,成建梅,等.MODFLOW-CFPv2模型在岩溶隧道突涌水及对地下水环境影响中的应用:以云南鹤庆锰矿沟岩溶水系统为例[J].地质科技通报,2024,43(3):301-310. (XIAO Jing, WANG Junwei, CHENG Jianmei, et al. Application of MODFLOW-CFPv2 model in karst tunnel water inrush and its impact on groundwater environment: example of the Mengkuanggou karst water system in Heqing County, Yunnan Province [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43 (3): 301-310. (in Chinese))

[11] 李鸣威,李玉峰,崔皓东,等.深埋隧洞施工期渗控措施对衬砌外水压力的影响研究[J/OL].长江科学院院报,1-8(2025-05-07)[2025-06-16]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20250507.1218.006>. (LI Mingwei, LI Yufeng, CUI Haodong, et al. Study on the influence of seepage control measures on the external water pressure of lining during the construction period of deep buried tunnel [J/OL]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 1-8 (2025-05-07) [2025-06-16]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20250507.1218.006>. (in Chinese))

[12] 范王涛.秦岭超长输水隧洞突涌水灾害的预判预测研究[D].西安:西安理工大学,2018.

[13] 张泽源.隧洞(道)施工期近断层带突涌水灾害渐进式评估方法研究[D].西安:西安理工大学,2024.

[14] 李亚朋.深大富水断层破碎带隧道突水突泥灾变机理及防治研究[D].重庆:重庆大学,2023.

[15] 张著彬,张乾,余伟,等.宝林隧洞F31断层的地质特征

- 及其突水突泥机制探讨[J]. 水科学与工程, 2024 (2): 80-83. (ZHANG Zhubin, ZHANG Qian, YU Wei, et al. Geological characteristics of F31 fault in Baolin tunnel and mechanism of water & mud inrush [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2024 (2): 80-83. (in Chinese))
- [16] 李利平, 李术才, 石少帅, 等. 基于应力-渗流-损伤耦合效应的断层活化突水机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊1): 3295-3304. (LI Liping, LI Shucui, SHI Shaoshuai, et al. Water inrush mechanism study of fault activation induced by coupling effect of stress-seepage-damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (Sup1): 3295-3304. (in Chinese))
- [17] 李华志. 白鹤滩水电站层间错动带遇水劣化机理及强度特性研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019.
- [18] 郁邦永, 陈占清, 吴疆宇, 等. 变质量胶结破碎岩石非Darcy 流渗透特性试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(2): 321-327. (YU Bangyong, CHEN Zhanqing, WU Jiangyu, et al. Experimental study of non-Darcy flow seepage properties of cemented broken rocks with mass loss [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(2): 321-327. (in Chinese))
- [19] 王鹏飞, 李长洪, 马学文, 等. 断层带不同含石率土石混合体渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊2): 53-61. (WANG Pengfei, LI Changhong, MA Xuewen, et al. Experimental study of seepage characteristics of soil-rock mixture with different rock contents in fault zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (Sup2): 53-61. (in Chinese))
- [20] BENSON V F, GLEESON T, LOVELESS S E, et al. Fault zone hydrogeology[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 127: 171-192.
- [21] 蒋亚龙, 汤新, 朱碧堂, 等. 黏性土石混合体力学特性及破裂形态影响因素研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(1): 161-170. (JIANG Yalong, TANG Xin, ZHU Bitang, et al. Study on influence factors of mechanical properties and fracture morphology of cohesive soil rock mixture [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2025, 55 (1): 161-170. (in Chinese))
- [22] 杨林, 王庆飞, 刘学飞, 等. 胶东控矿断裂断层泥形成与演化: 以新立金矿床为例[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(4): 908-918. (YANG Lin, WANG Qingfei, LIU Xuefei, et al. Compositions and genesis of the fault gouge in the ore-controlling fault in Jiaodong Peninsula: a case study from the Xinli gold deposit [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(4): 908-918. (in Chinese))
- [23] SKIPPER N T, CHANG F R C, SPOSITO G. Monte Carlo simulation of interlayer molecular structure in swelling clay minerals. 1. Methodology[J]. Clays and Clay Minerals, 1995, 43(3): 285-293.
- [24] AKSU I, BAZILEVSKAYA E, KARPYN Z T. Swelling of clay minerals in unconsolidated porous media and its impact on permeability[J]. GeoResJ, 2015, 7: 1-13.
- [25] FARRELL N J C, DEBENHAM N, WILSON L, et al. The effect of authigenic clays on fault zone permeability[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2021, 126 (10): e2021JB022615.
- [26] 史浙明, 叶海龙, 吕少杰, 等. 断裂带水力特性研究进展[J]. 地质科技通报, 2023, 42 (4): 47-54. (SHI Zheming, YE Hailong, LU Shaojie, et al. Advances in fault zone hydraulic properties [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42 (4): 47-54. (in Chinese))
- [27] 罗群, 王千军, 杨威, 等. 走滑断裂内部结构渗透差异特征及其输导控藏模式[J]. 地球科学, 2023, 48(6): 2342-2360. (LUO Qun, WANG Qianjun, YANG Wei, et al. Internal structural units, differential characteristics of permeability and their transport, shielding and reservoir control modes of strike-slip faults [J]. Earth Science, 2023, 48(6): 2342-2360. (in Chinese))
- [28] 宋佳佳, 孙建孟, 王敏, 等. 断层内部结构研究进展[J]. 地球物理学进展, 2018, 33 (5): 1956-1966. (SONG Jiajia, SUN Jianmeng, WANG Min, et al. Research progress in the internal structure of the fault [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(5): 1956-1966. (in Chinese))
- [29] 宫亚军, 张奎华, 王金铎, 等. 沉积碎屑岩断裂带结构特征、渗透性及流体运移规律[J]. 地球科学, 2025, 50 (5): 1968-1986. (GONG Yajun, ZHANG Kuihua, WANG Jinduo, et al. Structure, permeability and fluid flow in sedimentary clastic rock fault zone [J]. Earth Science, 2025, 50(5): 1968-1986. (in Chinese))
- [30] CHILDS C, MANZOCCHI T, WALSH J J, et al. A geometric model of fault zone and fault rock thickness variations[J]. Journal of Structural Geology, 2009, 31 (2): 117-127.
- [31] CAINE J S, EVANS J P, FORSTER C B. Fault zone architecture and permeability structure [J]. Geology, 1996, 24(11): 1025-1028.
- [32] FAULKNER D R, JACKSON C A L, LUNN R J, et al. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones[J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(11): 1557-1575.
- [33] 王跃鹏, 唐世斌, 刘向君, 等. 深埋复杂条件下钠蒙脱石水化的分子动力学模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(3): 599-607. (WANG Yuepeng, TANG Shibin, LIU Xiangjun, et al. Molecular dynamics simulation of sodium montmorillonite hydration under complex buried conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(3): 599-607. (in Chinese))
- [34] 刘伟, 梁栋, 杨仲田, 等. 蒙脱石含量对压实膨润土孔隙

- 结构的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊1): 180-184. (LIU Wei, LIANG Dong, YANG Zhongtian, et al. Effect of montmorillonite content on pore structure for compacted bentonite [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(Sup1): 180-184. (in Chinese))
- [35] 高鹏, 齐信, 谢扬龙, 等. 基于 CT 成像技术的含方解石脉灰岩溶蚀作用微观结构和变化规律研究[J]. 工程地质学报, 2025, 33(3): 1216-1229. (GAO Peng, QI Xin, XIE Yanglong, et al. Study on microstructure and change rule of calcite bearing vein limestone dissolution based on CT imaging technology [J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(3): 1216-1229. (in Chinese))
- [36] RENARD F. Reaction-induced fracturing: when chemistry breaks rocks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2021, 126(2): e2020JB021451.
- [37] 王婷, 王子龙, 李炎隆, 等. 粗糙裂隙渗流-溶蚀耦合过程可视化试验及渗透性演化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(8): 1662-1671. (WANG Ting, WANG Zilong, LI Yanlong, et al. Visualization experiments study on coupling process of flow-erosion in rough fractures and evolution of permeability [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(8): 1662-1671. (in Chinese))
- [38] 刘雪峰, 刘金辉, 邢拥国, 等. 酸法地浸采铀中的长石黏土化蚀变规律及其热力学机制[J]. 中国有色金属学报, 2025, 35(3): 993-1004. (LIU Xuefeng, LIU Jinhui, XING Yongguo, et al. Alteration patterns of feldspar clay alteration and thermodynamic mechanisms in acid in-situ leaching of uranium [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2025, 35(3): 993-1004. (in Chinese))
- [39] 许喆. 长石成岩过程中的热力学分析: 以鄂尔多斯盆地上古生界为例[D]. 荆州: 长江大学, 2018.
- [40] BENNE V F, VAN BALEN R T, DE VRIES J J. The impact of faults on the hydrogeological conditions in the Roer Valley Rift System: an overview [J]. Netherlands Journal of Geosciences, 2003, 82(1): 41-54.
- [41] ANTONELLINI M, AYDIN A. Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: petrophysical properties [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(3): 355-377.
- [42] FISHER Q J, KNIPE R J. The permeability of faults within siliciclastic petroleum reservoirs of the North Sea and Norwegian Continental Shelf [J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(10): 1063-1081.
- [43] 胡江, 马福恒, 李子阳, 等. 渗漏溶蚀混凝土坝力学性能的空间变异性研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(4): 87-94. (HU Jiang, MA Fuheng, LI Ziyang, et al. Review of spatial variability of mechanical properties of concrete dams impacted by leakage dissolution [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(4): 87-94. (in Chinese))
- [44] 张锐. 深部断裂带内在结构表征及渗透特性研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [45] 陈建业, 杨晓松, 党嘉祥, 等. 汶川地震断层带结构及渗透率[J]. 地球物理学报, 2011, 54(7): 1805-1816. (CHEN Jianye, YANG Xiaosong, DANG Jiaxiang, et al. Internal structure and permeability of Wenchuan earthquake fault [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(7): 1805-1816. (in Chinese))
- [46] MOKHTARI M, TUTUNCU A N. Characterization of anisotropy in the permeability of organic-rich shales [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 133: 496-506.
- [47] 丁立钦. 层理地层各向异性对井壁稳定性的影响规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [48] 凡净, 李晓昭, 黄震, 等. 导水夹泥断裂破碎岩内在结构与渗透性[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 160-166. (FAN Jing, LI Xiaozhao, HUANG Zhen, et al. Internal structural characteristics and permeability of Kata-rocks in geological structures filled with water and mud [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 160-166. (in Chinese))
- [49] LAROCHELLE S, LAPUSTA N, AMPUERO J P, et al. Constraining fault friction and stability with fluid-injection field experiments [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(10): e2020GL091188.
- [50] FENG Meimei, WU Jiangyu, MA Dan, et al. Experimental investigation on the seepage property of saturated broken red sandstone of continuous gradation [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77(3): 1167-1178.
- [51] XU Xinchuan, YU Zhaoyue, XUE Fangfang, et al. In-situ rock tests for fault gouge zone: a case in Fengman hydropower station, China [J]. E3S Web of Conferences, 2021, 293: 03008.
- [52] 钱自卫, 黄震, 张蕊, 等. 基于高压注水试验的断层破碎带渗透特性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(10): 1834-1841. (QIAN Ziwei, HUANG Zhen, ZHANG Rui, et al. Permeability characteristics of fracture zone by high-pressure water injection tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(10): 1834-1841. (in Chinese))
- [53] YUAN Honghu, XIE Heping, LI Minghui, et al. A novel *in-situ* permeability test system to study the fluid flow aspects of geological formations [J]. Engineering Geology, 2023, 320: 107132.
- [54] 朱术云, 王永军, 吕文茂, 等. 基于现场压水的同一条断层不同位置阻渗差异性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(4): 759-768. (ZHU Shuyun, WANG Yongjun, LYU Wenmao, et al. Study on impermeability of different sites for the same fault based on in-situ water

- injection test[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(4): 759-768. (in Chinese))
- [55] PARK J W, GUGLIELM Y, GRAUPNER B, et al. Modeling of fluid injection-induced fault reactivation using coupled fluid flow and mechanical interface model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 132: 104373.
- [56] ZHANG Cun, CHEN Yanhong, REN Zhaopeng, et al. Compaction and seepage characteristics of broken coal and rock masses in coal mining: a review in laboratory tests [J]. Rock Mechanics Bulletin, 2024, 3(2): 100102.
- [57] 郁邦永, 陈占清, 吴宇, 等. 胶结破碎泥岩渗透性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(5): 853-858. (YU Bangyong, CHEN Zhanqing, WU Yu, et al. Experimental study on the seepage characteristics of cemented broken mudstone [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(5): 853-858. (in Chinese))
- [58] 马丹, 段宏宇, 张吉雄, 等. 断层破碎带岩体突水灾害的蠕变-冲蚀耦合力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1751-1763. (MA Dan, DUAN Hongyu, ZHANG Jixiong, et al. Experimental investigation of creep-erosion coupling mechanical properties of water inrush hazards in fault fracture rock masses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1751-1763. (in Chinese))
- [59] LIU Sihong, XU Siyuan, ZHOU Bin, et al. In situ seepage testing method for fractured zones of rock mass [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2021, 54(1): qjgeh2020-050.
- [60] ZHAO Yongsheng, DENG Weijie, LI Liangdong, et al. In-situ seepage deformation testing method for shear zones [C]//2021 7th International Conference on Hydraulic and Civil Engineering & Smart Water Conservancy and Intelligent Disaster Reduction Forum (ICHCE & SWIDR). Nanjing: IEEE, 2021: 1307-1313.
- [61] SATO T, KIKUCHI T, SUGIHARA K. In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan [J]. Engineering Geology, 2000, 56(1/2): 97-108.
- [62] KIM H M, LETTRY Y, PARK D, et al. Field evaluation of permeability of concrete linings and rock masses around underground lined rock caverns by a novel in-situ measurement system [J]. Engineering Geology, 2012, 137-138: 97-106.
- [63] NING Zexu, XUE Yiguo, LI Zhiqiang, et al. Damage characteristics of granite under hydraulic and cyclic loading-unloading coupling condition [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(3): 1393-1410.
- [64] 吴琼, 李海兵, MARIE-LUCE C, 等. 鲜水河断裂带乾宁段岩石特征与内部结构及其物理-化学性质 [J]. 岩石学报, 2021, 37(10): 3204-3224. (WU Qiong, LI Haibing, MARIE-LUCE C, et al. Rock characteristics, internal structure and physical-chemical properties of Qianning segment in Xianshuihe fault zone [J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(10): 3204-3224. (in Chinese))
- [65] 郁邦永. 胶结破碎岩石非 Darcy 流渗透特性试验研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [66] 杨俊成, 胡小虎, 王惠民, 等. 压性致密断层破碎带渗透特性研究 [J/OL]. 人民长江, 1-8 (2025-04-28) [2025-06-16]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1202.TV.20250427.1340.002>. (YANG Juncheng, HU Xiaohu, WANG Huimin, et al. Study on the permeability characteristics of compressive tight fault fracture zone [J/OL]. Yangtze River, 1-8 (2025-04-28) [2025-06-16]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1202.TV.20250427.1340.002>. (in Chinese))
- [67] 黄震, 汪振鹏, 古启雄, 等. 弱胶结充填型断层破碎带岩体渗流特性研究 [J/OL]. 煤炭学报, 1-14 (2025-03-13) [2025-06-16]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1381>. (HUANG Zhen, WANG Zhenpeng, GU Qixiong, et al. Characterizing seepage behavior of weakly cemented filling fault fracture zone [J/OL]. Journal of China Coal Society, 1-14 (2025-03-13) [2025-06-16]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1381>. (in Chinese))
- [68] 王修铭, 陈群, 陈秀吉, 等. 微生物矿化对黏土渗透性影响的试验研究 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 29-36. (WANG Xiuming, CHEN Qun, CHEN Xiuji, et al. Experimental study on influence of microbial mineralization on permeability of clay [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1): 29-36. (in Chinese))
- [69] 谭文辉, 董锋鑫, 马学文, 等. 含石率对断层土石混合物体渗流特性的影响 [J]. 长江科学院院报, 2022, 39(8): 86-92. (TAN Wenhui, DONG Fengxin, MA Xuewen, et al. Influence of rock block proportion on seepage characteristics of soil-rock mixture in fault zone [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(8): 86-92. (in Chinese))
- [70] 黄昌富, 张帅龙, 高永涛, 等. 三轴应力下颗粒流失对断层破碎带凝灰岩渗流特征的影响 [J]. 工程科学学报, 2022, 44(7): 1134-1146. (HUANG Changfu, ZHANG Shuailong, GAO Yongtao, et al. Influence of particle loss on the seepage characteristics of tuff in the fault fracture zone under triaxial stress [J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(7): 1134-1146. (in Chinese))
- [71] 鲁洋, 刘斯宏, 张勇敢, 等. 黏质土石混合物体渗透特性试验及演化机制探讨 [J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1540-1548. (LU Yang, LIU Sihong, ZHANG Yonggan, et al. Experimental study and mechanism analysis of

- permeability performance of clayey soil-rock mixtures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1540-1548. (in Chinese))
- [72] 李泽豫,周鸣亮,黄宏伟,等. 考虑胶结作用的断层泥力学特性与本构表征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(6): 1801-1819. (LI Zeyu, ZHOU Mingliang, HUANG Hongwei, et al. Study on the mechanical behavior of fault gouge with cementation: characterization and constitutive modeling[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2024, 32(6): 1801-1819. (in Chinese))
- [73] 纪洪广,蒋华,宋朝阳,等. 弱胶结砂岩遇水软化过程微观结构演化及断口形貌分析[J]. 煤炭学报[J]. 2018, 43(4): 993-999. (JI Hongguang, JIANG Hua, SONG Zhaoyang, et al. Analysis on the microstructure evolution and fracture morphology during the softening process of weakly cemented sandstone[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 993-999. (in Chinese))
- [74] 王振,沈明荣,刘昂. 钙质泥岩水岩作用特征及遇水软化机理[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(6): 1061-1066. (WANG Zhen, SHEN Mingrong, LIU Ang. Water-rock interaction characteristics and softening mechanism of calcareous mudstone[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(6): 1061-1066. (in Chinese))
- [75] 王森. 红层地区软弱夹层形成演化规律及泥化特征研究[D]. 成都:成都理工大学, 2017.
- [76] 李鹏,刘建,朱杰兵,等. 软弱结构面剪切蠕变特性与含水率关系研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1865-1871. (LI Peng, LIU Jian, ZHU Jiebing, et al. Research on effects of water content on shear creep behavior of weak structural plane of sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1865-1871. (in Chinese))
- [77] 陈金刚,张景飞. 充填物的力学响应对裂隙渗流的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 577-580. (CHEN Jingang, ZHANG Jingfei. Influence of mechanical responses of fillings on fracture seepage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(4): 577-580. (in Chinese))
- [78] 冯琳. 侏罗系弱胶结地层采动诱发的渗透性演化试验研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2024.
- [79] JIANG Quan, CUI Jie, FENG Xiating, et al. Application of computerized tomographic scanning to the study of water-induced weakening of mudstone[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73(4): 1293-1301.
- [80] 杨成祥,宋磊博,王刚,等. CT实时观察下泥岩遇水软化过程的机理[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(10): 1461-1465. (YANG Chengxiang, SONG Leibo, WANG Gang, et al. Mechanism of water-weakening process of mudrock observed using real-time CT[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(10): 1461-1465. (in Chinese))
- [81] 张功基,李长冬,孟杰,等. 浸水作用下泥岩膨胀特性及其关键界面响应机制[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(4): 15-25. (ZHANG Gongji, LI Changdong, MENG Jie, et al. Mudstone swelling characteristics and key interface response under water immersion[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(4): 15-25. (in Chinese))
- [82] 黄宏伟,车平. 泥岩遇水软化微观机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 866-870. (HUANG Hongwei, CHE Ping. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of mudstone[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(7): 866-870. (in Chinese))
- [83] 张世雄,徐长佑,胡修文,等. 裂隙充填蒙脱石对巷道稳定性的影响[J]. 岩土力学, 1996, 17(4): 56-61. (ZHANG Shixiong, XU Changyou, HU Xiuwen, et al. The influence of montmorillonite filling in fractures on the stability of a tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, 17(4): 56-61. (in Chinese))
- [84] MA Dan, DUAN Hongyu, LI Xibing, et al. Effects of seepage-induced erosion on nonlinear hydraulic properties of broken red sandstones[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 91: 102993.
- [85] 王路珍,陈占清,孔海陵,等. 渗透压力和初始孔隙度对破碎泥岩变质量渗流影响的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(3): 462-468. (WANG Luzhen, CHEN Zhanqing, KONG Hailing, et al. An experimental study of the influence of seepage pressure and initial porosity on variable mass seepage for broken mudstone[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(3): 462-468. (in Chinese))
- [86] 史新,庞康,李旭,等. 宽级配砾质土防渗性能研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊2): 189-193. (SHI Xin, PANG Kang, LI Xu, et al. Hydraulic conductivity of widely-graded gravelly soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(Sup2): 189-193. (in Chinese))
- [87] XU Zhenhao, YU Tengfei, LIN Peng, et al. Anomalous patterns of clay minerals in fault zones[J]. Engineering Geology, 2023, 325: 107279.
- [88] YIN Yu, CUI Ziteng, ZHANG Xiao, et al. Effects of clay content on non-linear seepage behaviors in the sand-clay porous media based on low-field nuclear magnetic resonance[J]. Water, 2024, 16(6): 883.
- [89] ZHANG Miao. Stress-strain-sorption behaviour and permeability evolution in clay-rich rocks under CO₂ storage conditions[D]. Utrecht: Utrecht University, 2019.
- [90] RAST M, MADONNA C, SELVADURAI P A, et al. Importance of water-clay interactions for fault slip in clay-rich rocks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2024, 129(4): e2023JB028235.
- [91] ISAACS A J, EVANS J P, KOLESAR P T, et al.

- Composition, microstructures, and petrophysics of the Mozumi fault, Japan; in situ analyses of fault zone properties and structure in sedimentary rocks from shallow crustal levels[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B12): B12408.
- [92] 马丹,李楠,张吉雄,等. 断层破碎带岩体孔隙结构表征与非线性渗流特性[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 666-677. (MA Dan, LI Qiang, ZHANG Jixiong, et al. Pore structure characterization and nonlinear seepage characteristics of rock mass in fault fracture zones[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 666-677. (in Chinese))
- [93] YANG Bin, SHI Wenhao, YANG Xin. Nonlinear seepage erosion model of water inrush considering particle size distribution of karst collapse column and its engineering applications[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 17078.
- [94] ZHOU Ping, JIANG Yifan, ZHOU Feicong, et al. Disaster mechanism of tunnel face with large section in sandy dolomite stratum[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 131: 105905.
- [95] 吴平,凌小东,石北啸,等. 高细粒含量砂砾石料的渗透特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(增刊1): 44-49. (WU Ping, LING Xiaodong, SHI Beixiao, et al. Experimental study on permeability characteristics of sandy gravel with high fines content[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(Sup1): 44-49. (in Chinese))
- [96] 于海涛. 深部断层带微观特征及其渗透突水演化规律模拟研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2021.
- [97] 於昌峰,姜春露,吴云. 基于正向-反向高压注水试验的深部矿井断层阻水性特征研究[J]. *金属矿山*, 2025(2): 131-137. (YU Changfeng, JIANG Chunlu, WU Yun. Study on fault water resistance characteristics of deep mine based on forward-reverse high pressure water injection test[J]. *Metal Mine*, 2025(2): 131-137. (in Chinese))
- [98] 许进鹏,张福成,桂辉,等. 采动断层活化导水特征分析与实验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2012, 41(3): 415-419. (XU Jinpeng, ZHANG Fucheng, GUI Hui, et al. Characteristics and experimental study of water conduction caused by fault activation due to mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012, 41(3): 415-419. (in Chinese))
- [99] 巫勇江,韩宪军,曹正正,等. 变质量效应下断层破碎带的非达西效应及滞后突水机理[C]//第十九届北方七省市力学学会学术会议论文集. 北京:北京力学学会, 2023:3.
- [100] 李火坤,王文韬,王姣,等. 二元堤基结构堤防管涌机理模型试验[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(1): 79-88. (LI Huokun, WANG Wentao, WANG Jiao, et al. Model test study on piping mechanism of binary dike foundation structure[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(1): 79-88. (in Chinese))
- [101] 张庆艳,陈卫忠,袁敬强,等. 断层破碎带突水突泥演化特征试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(6): 1911-1922. (ZHANG Qingyan, CHEN Weizhong, YUAN Jingqiang, et al. Experimental study on evolution characteristics of water and mud inrush in fault fractured zone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(6): 1911-1922. (in Chinese))
- [102] 魏海江. 隧洞(道)充填介质突水突泥渗蚀致灾机制研究[D]. 西安:西安理工大学, 2023.
- [103] 王显辉. 基于现场实测的杨村煤矿下组煤断层带阻渗强度研究[D]. 徐州:中国矿业大学 2022.
- [104] CHEN Chen, ZHANG Limin. Hydro-mechanical behaviour of soil experiencing seepage erosion under cyclic hydraulic gradient[J]. *Géotechnique*, 2023, 73(2): 115-127.
- [105] 陈亮,谢佳敏. 颗粒形貌对循环水头作用下砂土潜蚀的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(3): 59-66. (CHEN Liang, XIE Jiamin. Effect of particle morphology on subsurface erosion of sand under cyclic water head[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(3): 59-66. (in Chinese))
- [106] CHEN Chen, ZHANG Pengtao, ZHANG Limin, et al. Internal erosion in granular soils with different microstructures under cyclically increased hydraulic gradients[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 639: 131601.
- [107] 李洪亚,马林建,刘杰,等. 周期性孔隙水压作用下砂岩损伤劣化特性研究[J]. *岩土力学*, 2024, 45(7): 2000-2010. (LI Hongya, MA Linjian, LIU Jie, et al. Damage and deterioration characteristics of sandstone under cyclical pore water pressure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(7): 2000-2010. (in Chinese))
- [108] DENG Zezhi, WANG Gang, JIN Wei. Mesostructural mechanism of hydraulic gradient fluctuations affecting internal instability using transparent soil[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2022, 45(6): 1054-1069.
- [109] 陈亮,滕耀宗,蔡国栋,等. 变水头下管涌细颗粒迁移试验[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(5): 82-88. (CHEN Liang, TENG Yaozong, CAI Guodong, et al. Experimental study on the migration of fine particles in piping under variable water head[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(5): 82-88. (in Chinese))

(收稿日期:2025-07-01 编辑:俞云利)