

引用格式:郭方旭,王文强,张帅阳,等.采动影响下承压含水层底板断层突水机理与防控技术研究进展[J].有色设备,2025,39(4):16-30.
GUO Fangxu, WANG Wenqiang, ZHANG Shuaiyang, et al. Research advances in prevention technology and disastrous mechanism of water intrush from floor faults in confined aquifers under mining influence[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(4): 16-30.

采动影响下承压含水层底板断层突水机理 与防控技术研究进展

郭方旭¹, 王文强², 张帅阳¹, 巫勇江¹, 李振华^{2,3,4}, 杜锋^{2,3,4}, 曹正正^{1,3,4*}

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000;

2. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000;

3. 河南理工大学 河南省矿井水害防控及水资源利用工程技术研究中心, 河南 焦作 454000;

4. 河南理工大学 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454000)

[摘要] 煤炭作为我国主体消耗能源,随着浅部资源枯竭,开采深度和规模增加,矿井突水灾害成为制约煤矿安全生产的重大隐患,约80%的矿井突水事故与断裂构造相关。本文聚焦采动情况下承压含水层工作面断层引发的底板突水问题,在底板裂隙岩石损伤破坏特征方面,总结了基于损伤特性和渗流特性的裂隙岩体研究成果;对于断层诱发底板突水机理,阐述了底板断层采动受力特征及突水机理;在承压含水层工作面底板断层防突水技术上,介绍了防突水措施、突水性评价和预测的研究进展。同时指出当前研究在底板裂隙岩体损伤渗流多场耦合机制、底板断层突水机理以及智能监测预警装备与治理技术等方面存在不足,为煤矿防治水的发展提供理论依据。

[关键词] 突水机理; 断层; 底板; 损伤破坏; 防控技术

[中图分类号] TD745

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2025)04-0016-15

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.04.002

0 引言

2024年我国原煤产量突破47亿t,同比增长1.3%^[1]。随着浅部煤炭资源逐渐枯竭,煤层的开采深度和开采规模不断扩大,矿井安全生产形势正面临不断升级的技术挑战。尤其值得注意的是,在复杂水文地质条件与高强度开采扰动耦合作用下,矿井突水灾害已成为制约煤矿安全生产的关键性隐患。煤矿重大事故的危险等级仅次于瓦斯爆破,统计表明,此类水害事故的伤亡率、直接经济损失等均居煤矿灾害前列,更为严峻的是由于突水具有破坏

性强、衍生次生灾害等特征,其救援周期和矿井生产恢复的时间远超常规煤矿灾害^[2]。

1 煤层底板突水灾害调查

随着煤矿开采深度的持续增加,采掘作业逐渐逼近底板承压含水层区域,底板突水威胁显著加剧^[3-4]。以2016年山东省肥城市白庄煤矿为例,在煤层回采的过程中揭露了煤层底板的隐伏破碎带,使底板的采动破坏深度和含水层的裂隙导升高度持续增大,最终形成一个完整的突水通道,发生突水事故^[5]。2021年,新疆昌吉州呼图壁县白杨沟丰源煤

[收稿日期] 2025-05-28

[基金项目] 国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点项目(U24B2041);河南省自然科学基金面上项目(242300421246);河南省高校科技创新团队支持计划(23IRTSTHN005)。

[第一作者] 郭方旭(2001—),男,山东肥城人,硕士,研究方向为断层突水机理及防控技术。

[通信作者] 曹正正(1990—),男,安徽砀山人,副教授,博士,研究方向为采动岩体力学与矿井水害防控技术。

矿发生的重大透水事故,其直接原因为:掘进作业面过度逼近底板承压含水层,且在工程勘察中未能对地质构造薄弱区(小型断层带)实施精细化探测与加固处理,最终诱发高承压水体沿断层破碎带突破充填体防护屏障,造成灾难性突水事故^[6]。

断层是在原始地层形成期间由于构造运动作用而形成的。通常,大规模的构造运动会引发一条或多条大型断层,并伴随着数十条中小型断层的产生。这些断层破坏了岩层的连续性和完整性,其内部含

有大量破碎的填充物质,导致断层几乎不具备承受拉伸应力和剪切应力的能力,同时其阻隔水分的性能也显著下降。2000年以来,我国发生的煤层底板水害事故中由断层直接引发的事故占近六成,根据统计分析结果形成我国煤层底板断层突水灾害分布图,如图1所示。断层诱发底板滞后突水因其具有隐蔽性高、致灾机理复杂、防控时效性弱等显著特征,长期制约着承压含水层工作面安全开采。

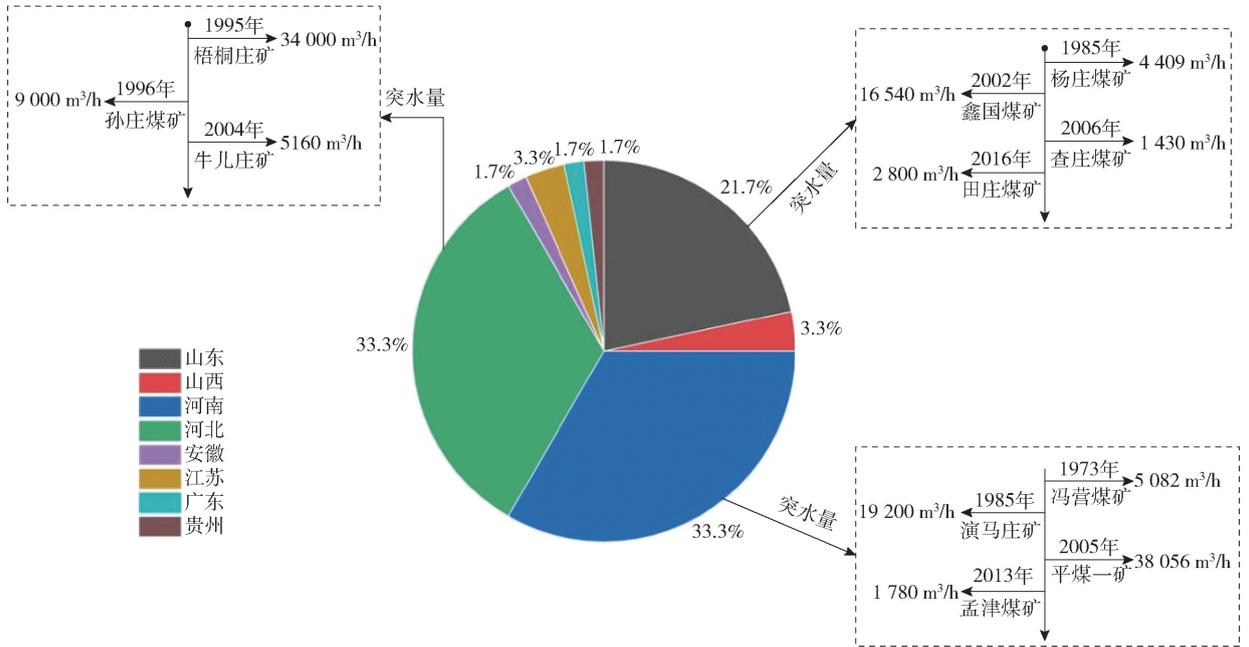


图1 我国煤层底板断层突水灾害分布

Fig. 1 Distribution map of water inrush disasters from coal seam floor faults in China

针对承压含水层工作面中由断层引发的底板突水这一核心科学难题,国内外的研究者们已从多个维度特别是岩石损伤力学、渗流-应力相互作用理论以及工程防治技术领域,进行了全面而系统的探索。这些研究为有效预防和控制突水灾害提供了重要的理论基础。本文在总结当前研究的基础上,聚焦于以下3大核心方向进行综述:①底板裂隙岩石损伤破坏特征;②断层诱发底板突水机理;③承压含水层工作面底板断层防突水技术。通过系统梳理和分析现有研究成果,本文旨在明确本研究领域的理论创新点和实际应用价值,为进一步揭示断层诱发底板突水的灾变机理以及构建集探测、治理、评估于一体的综合防控体系奠定坚实的基础,为相关领域的科学研究和技术进步提供新的思路和方向。

2 底板裂隙岩石损伤破坏特征研究现状

在矿井开采作业初期,底板岩石维持着一种应力平衡状态。然而,随着开采活动的逐步推进,这种原有的应力平衡被打破,导致底板岩石的受力状况发生显著变化。开采活动从远离底板岩石区域开始逐渐接近随后远离的过程中,岩石所经受的扰动先逐渐增强而后再逐渐减弱,这一过程促使底板岩石产生损伤。鉴于地质构造的复杂性,底板岩层中广泛分布着众多断层。为了深入探究存在缺陷的岩体特性,众多研究者们聚焦于裂隙岩体的损伤破坏特性以及渗流特性等多个维度,进行了广泛而深入的研究。

2.1 基于损伤特性的裂隙岩体研究现状

目前,国内外诸多学者针对含裂隙岩体的力学特性已开展系统的研究^[7-11]。曹文贵等^[12]搭建的统计损伤本构模型是通过综合考虑空隙演化效应的新型岩石损伤模型与 Lemaitre 应变等价性假设建立的,该模型不仅能够反映岩石的应变软化行为,还可实现由空隙压缩所引起的岩石变形的非线性特征的描述。赵延林等^[13]基于几何损伤力学、岩体结构力学及岩石流体力学理论,建立了裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合模型,通过 Fish 语言研制了该模型的专用分析程序,耦合分析认为:裂隙渗透水压增加会导致岩体裂纹起裂扩展,为渗流-损伤-断裂耦合问题的数值模拟提供了新思路。Chen 等^[14]通过开展渗

流腐蚀试验与单轴蠕变试验,构建了岩石蠕变模型(图 2),并运用 CRG 模型探究了蠕变模型、岩石断裂现象以及宏微观参数之间的内在联系。田森等^[15]采用多学科交叉的研究方法,通过裂隙岩体冻融循环试验体系、单轴压缩力学测试及声发射实时同步监测技术,系统探究了寒区裂隙岩体在冻融耦合作用下的多参数损伤演化规律、冻胀应力动态响应机制及其断裂破坏模式,指出冻胀作用使岩体承受反复张拉作用而强度下降,宏观破坏模式表现为张拉与剪切的混合破坏。林志斌等^[16]构建的岩体损伤-渗流耦合分析模型,运用 FLAC 3D 对围岩的变形特征、渗透系数及塑性区进行数值模拟分析,系统揭示了围岩的变形破坏机制。

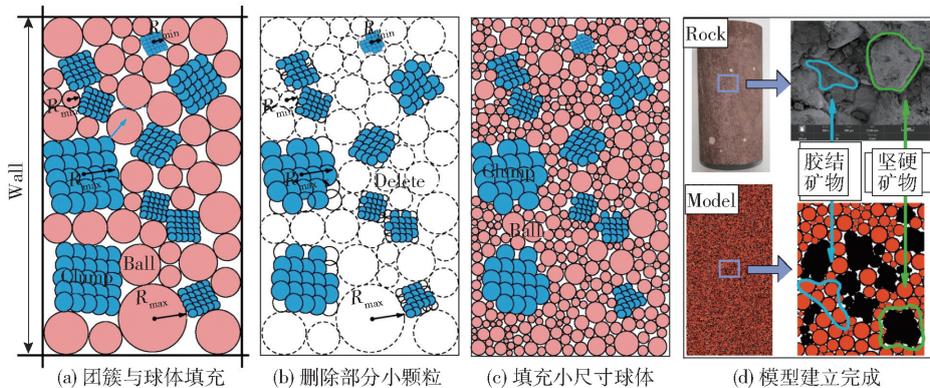


图 2 CRG 模型构建方法示意图^[14]

Fig. 2 Schematic diagram of CRG model method^[14]

陈欣等^[17]通过开展裂隙岩体静力直剪试验,揭示了裂隙岩体的剪切强度特性和变形特征,将裂隙岩体剪切强度变形曲线分为压密阶段、近似线弹性阶段、不稳定发展阶段和残余变形阶段。同时,运用 PFC 2D 进行模拟,系统地研究了不同加载条件对裂隙岩体的剪切损伤力学行为的影响,并指出损伤裂纹萌生于裂隙岩体的预置裂隙尖端。Liu 等^[18]通过开展循环加卸载力学试验,系统研究了预制裂隙倾角、围压梯度多因素耦合作用下裂隙岩体的变形行为与渗流规律,基于弹性损伤理论、多孔和裂隙介质渗流理论以及有效应力原理,考虑侧向应力约束的裂隙变形,构建了嵌入裂隙损伤-逾渗流固耦合数值模型,探究了不同应力条件下岩体损伤演化特征。郭颖泉等^[19]借助 PFC 模拟单、双裂隙岩体在单轴压缩和双轴压缩和卸围压条件下裂隙倾角对裂纹扩展贯通的影响,总结出裂纹扩展贯通模式,岩体内部损

伤和贯通裂隙的产生导致耗散能的急剧增加。

针对含裂隙岩体的力学特性,上述研究通过建立统计损伤本构模型、渗流-损伤-断裂耦合模型、多孔蠕变模型等,结合数值模拟(如 FLAC 3D、PFC2D)和试验测试(如冻融循环、声发射监测、直剪试验),系统探究了损伤演化、裂纹扩展、渗流规律及能量机制,深入揭示了裂隙岩体的变形破坏机理。

2.2 基于渗流特性的裂隙岩体研究现状

从岩体渗流的视角出发,一些研究者们紧密围绕底板滞后突水事故,针对底板裂隙岩体开展了深入的试验研究与理论分析^[20-22]。郑茂慧等^[23]为分析裂隙结构、颗粒粒径和入射流速对裂隙损伤的影响,建立了三维单裂隙渗流模型,还原了断层破碎带在应力-渗流耦合作用下的颗粒运移过程,揭示了其渐进演化规律。Zhao 等^[24]以 3 种不同的裂隙石灰岩岩样为研究对象,在基于岩石力学原理构建的

应力加载与卸荷工况下,运用渗流力学理论,深入剖析裂隙渗流特性的响应机制,量化分析形貌特征的演化进程。陈兴周等^[25]开展了一项针对深部开挖卸荷岩体的研究,揭露其岩体力学特性的演化规律。研究过程中,发现孔隙水压在岩样循环加卸载进程中,起到了促进拉剪破坏的作用。此外,研究还指出,孔隙水压力的增幅会导致同量级卸荷岩样在循环加卸载时,延性变形更加显著,强度衰减也进一步加剧。

将含倾斜粗糙单裂隙砂岩置于轴压和孔压低频多次循环加卸载条件下开展应力-渗流耦合试验,分析不同加载路径下单裂隙试样的形貌特征、强度及渗流的特性。裂隙岩体伴随循环次数增多出现损伤劣化,试样的抗变形能力下降^[26]。系统探究循环荷载作用下裂隙岩体力学破坏机制与渗流演化规律。施炎等^[27]在单裂隙渗流试验的基础上研究干湿循环作用下裂隙岩体渗流特性,又通过理论分析得出裂隙岩体渗透特性存在明显的各向异性特征。Cao 等^[28]基于 CT 扫描装置得到了细粒砂岩裂隙岩样三维重构图,并利用 COMSOL 软件研究了注浆浆液运移降渗效果,如图 3 所示。闫寿庆等^[29]为研究富水裂隙砂岩的蠕变损伤特性,通过预制试件流固耦合蠕变试验,在 CRG 模型的基础上,结合颗粒流理论建立 PSC-CFD 耦合模型,分析裂隙岩体在流固耦合作用下裂纹的扩展规律,提出蠕变损伤的定量评价方法。

岩体裂隙的粗糙程度对裂隙渗流特性的影响显著。甘磊等^[30]开展应力、渗流和化学耦合作用下石灰岩裂隙渗流试验,得出岩体裂隙面 JRC(节理粗糙度系数)值越大,通过裂隙的渗流量和渗透率越小。寿云东^[31]基于近场动力学理论,提出了裂隙岩体温度场-渗流场-应力场耦合数值模型,运用自主研发的数值计算程序对大强煤矿巷道围岩在温度场-渗

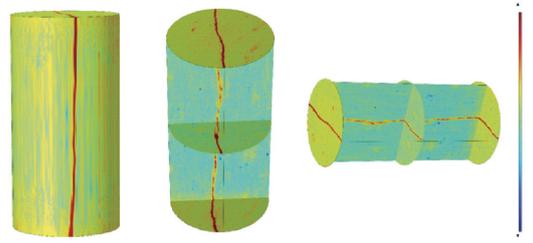


图 3 裂隙分布云图^[28]

Fig. 3 Cloud map of fracture distribution^[28]

流场-应力场耦合作用下的温度、渗流和岩体破坏进行模拟分析。李卓徽等^[32]构建了有限体积法与近场动力学耦合的方法来模拟岩石流固耦合的力学扩展破裂过程,取得良好的效果,验证了方法的可行性。季慧等^[33]建立了一对交叉裂隙的裂隙岩体模型(图 4),并深入探讨了一种用于处理三维交叉裂隙的有效方法,显著降低了网格单元的扭曲程度。在此基础上,运用裂隙孔隙双重介质渗流模型,对三维交叉裂隙模型的渗流特性进行了全面分析。王惠栋等^[34]以关键块体理论为基础,构建了考虑渗流作用的裂隙岩体块体稳定性分析方法。运用该方法对渗流作用下岩质边坡块体稳定性展开研究,揭示出渗流力影响块体稳定的复杂性以及结构面水弱化对抗滑力的削弱作用,为相关工程实践提供理论依据。

围绕底板滞后突水问题,诸多学者聚焦岩体渗流视角展开深入研究。研究涉及三维单裂隙模型构建、应力-渗流耦合试验、裂隙网络模拟及数值模型开发,系统揭示了底板裂隙在应力、渗流及多场耦合作用下的损伤机制、渗流特性演化规律(如孔隙水压加剧强度衰减与延性变形)以及裂隙粗糙度、交叉结构等对渗流的影响,为相关工程灾害防治提供了理论基础与方法支撑。

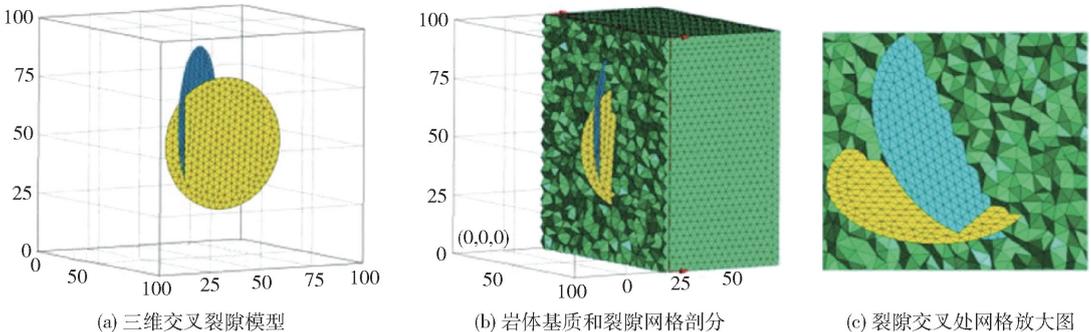


图 4 三维交叉裂隙模型及其网格划分^[33]

Fig. 4 Three-dimensional intersecting fractures model and mesh division^[33]

3 断层诱发底板突水机理研究现状

在煤层开采过程中,当煤层底板存在断层且该断层恰好处于煤层与含水层之间时,采动作业会促使断层周围的应力场以及位移场发生改变。一旦断层因这些变化而出现变形活化现象,使成为一个极具优势的导水“捷径”,进而诱发底板高承压水突水灾害,极具危害性,断层渗流突水如图 5 所示。

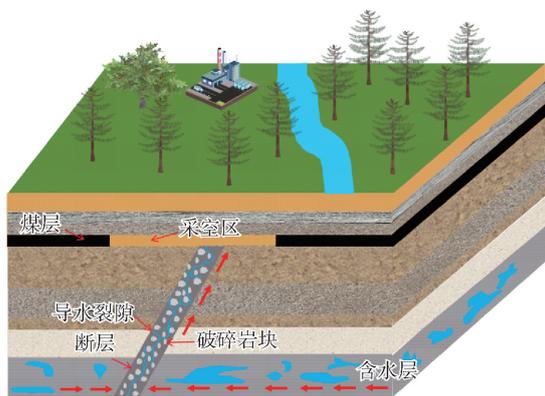


图 5 断层渗流突水示意

Fig. 5 Schematic diagram of fault seepage and water inrush

当前,国内外众多学者运用理论剖析、数值运算、实验室模拟试验以及现场实地测试等多元化手段,对底板断层在采动状态下的受力特性、底板断层突水呈现出的特征,还有底板断层突水背后的内在机理等诸多方面展开了系统且全面的总结与回顾工作,力求为防治此类灾害提供坚实的理论支撑。

3.1 底板断层采动受力特征

大量工程实践证实,采掘诱发围岩应力重分布是底板断层变形破坏及突涌水通道形成的主因。学者们通过现场测试、数值模拟与理论分析,探究了不同采动应力路径下底板断层及围岩应力场特征。任政等^[35]通过现场数据、理论推导以及数值模拟手段,综合分析了采动影响下逆断层阶段活化过程,研究表明断层滑移受断层倾角和工作面距断层距离的影响。开采初期,断层面能量积累值随断层倾角变大而变大;开采后期,断层面能量积累值随断层倾角减小而变大。王宏伟等^[36]通过建立模拟工作面开采过程和断层滑动的物理模型,对应力场、位移场、能量场及温度场进行检测,并分析其分布特征,结果显示受损上覆岩层的卸荷作用为断层扩展

提供了额外空间,加速了断层滑移失稳和岩层垮落,极易诱发冲击地压灾害。张丁丁等^[37]利用分布式光纤传感技术对断层面的应力状态进行监测,制作相似材料模型模拟工作面从上、下盘向断层推进的过程,结果表明工作面从下盘向断层推进更容易引起断层活化。这一发现为进一步剖析采动影响下的地质构造变动规律提供了新的视角。张宁博等^[38]基于数值模拟和相似模拟试验,系统研究了开采扰动诱发的逆冲断层卸荷响应机制。研究过程中发现采矿扰动引起断层卸荷作用,促进覆岩裂隙向断层扩展并引发新裂纹产生。将载荷引起的失稳过程划分为线性、非线性、失稳及亚失稳 4 个阶段,对逆冲断层卸载失稳形成了新的认识。张鹏等^[39]通过岩体极限平衡理论,建立了断层影响下采动应力力学模型,揭示了断层附近围岩体应力极限平衡状态与断层活化诱发底板突水灾害之间的内在作用机制。孙文斌等^[40]建立了采动影响下断层带岩体的应力力学模型,并围绕该模型开展了系统深入的研究。结果发现开采扰动首先作用于应力而非位移,并导致应力达到峰值;应力峰值超过屈服极限后,扰动对位移的影响日益显著。随着工作面推进,采动引发上覆岩层大规模垮塌,致使岩层与断层带贯通,逐步诱发断层活化。李海燕等^[41]基于王楼煤矿 13301 采煤工作面,提出“开采扰动-渗透弱化”双阶段理论模型,模拟王楼煤矿工作面断层滞后突水的过程,深入探究了断层滞后突水的渗流转化机制。赵毅鑫等^[42]通过模拟研究了主应力偏转对不同倾角断层面应力分布及断层滑移量的影响规律,采动诱发主应力偏转导致断层面剪应力增大;断层倾角越大,断层面剪应力增量对主应力偏转的响应越显著,断层面附近区域底板主应力最先发生偏转。朱广安等^[43]以“砌体梁”理论为研究基石,系统分析开采过程中断层围岩系统的应力状态动态演变规律及其在力学作用下的响应特征。

蒋金泉等^[44]构建逆断层与工作面关系的 FLAC 3D 三维数值计算模型,系统分析工作面向逆断层推进过程中的采动应力场动态演化特征,揭示断层活化的演化规律。研究表明上盘工作面围岩应力集中程度大于下盘工作面,采动应力受工作面与断层距离的影响较大。林远东等^[45]基于 Mohr - Coulomb 强度准则,采用 Anderson 断层模型,研究了采动影响下断层稳定性演化机制及系统参量与断层

稳定性的关系,以系统参量对断层稳定性的量化影响规律为基础,提出了控制系统稳定性的方法。赵志刚等^[46]依据流固耦合理论,运用 FLAC 软件对上下盘开采顺序和工作面推进方向共 4 种方案开展模拟研究。结果表明,采用先上盘后下盘对向断层推进的开采顺序,更能减轻底板岩体破坏,保障承压水上安全开采。牛心刚等^[47]运用 FLAC 数值模拟软件,模拟煤层开采时断层对底板应力峰值、塑性区变化的影响,分析不同断层倾角、刚度及底板水压下二者的变化情况,结合现场实测对比有无断层时的破坏深度。结果显示:断层倾角小,底板应力峰值高、破坏区大;倾角大,破坏区小,呈“X”形。张玉军等^[48]聚焦承压水体上煤层底板下位隐伏断层的底板突水模式,开展底板突水相似模拟试验,深入探究在煤层回采作业推进期间底板空间内采动应力的变化规律,细致观察隐伏断层的扩展动态,以及精准剖析突水通道的演化历程。

以上研究表明,采动影响下断层活化机制复杂多元。研究者们通过现场监测、理论分析、数值模拟及物理试验等手段,系统揭示了断层滑移受倾角、工作面距离、开采方向(下盘更易活化)及主应力偏转等因素控制;深入剖析了逆断层卸荷响应、失稳瞬态演变与能量突变规律;明确了断层附近围岩应力极限平衡状态、渗流转化机制及其与底板突水灾害的关联;量化了系统参量(如刚度、水压)对断层稳定性及底板破坏形态(如“X”形)的影响,给断层突水研究提供理论支撑与实践指导。

3.2 底板断层突水机理

在我国煤矿防治水领域,断层突水作为煤矿开采中最具破坏性的灾害形式之一,其发生过程通常涉及地质构造演化、流体渗流规律及采矿扰动效应等复杂因素,对其机理的精准阐释直接关系到矿井水害预警与防控技术的发展。断层突水机理如图 6 所示。

当前,随着煤层开采不断向深部推进,底板相对隔水层厚度日益减小,受含水层影响,突水风险正急剧攀升。20 世纪 40 年代,国外率先提出了底板相对隔水层这一概念。其核心要义在于,底板隔水层的厚度在底板突水防控方面扮演着关键角色,能够为抑制突水起到一定限制功效;底板含水层的水压与底板相对隔水层紧密关联,相互作用之下呈现出一种规律,即水压数值越大,相对隔水层的厚度随之越小^[49-50]。郭惟嘉等^[51]在借鉴国外有关底板相对

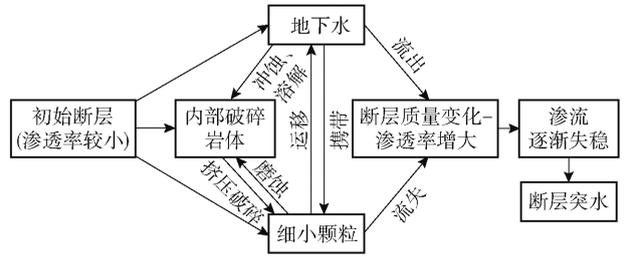


图 6 断层突水机理

Fig. 6 Mechanism of water inrush in faults

隔水层现场实践经验的前提下,以焦作矿区独特的水文地质条件作为依托,率先提出了“突水系数”这一关键概念,为后续煤矿防治水工作的深入开展筑牢了理论根基。孟凡树等^[52]结合筒仓理论和极限平衡方法,构建了断层破碎带突水模型,得出富水断层破碎带突水突泥的力学判据,揭示了破碎带宽度对岩盘失稳临界条件的影响机理。王成绪^[53]提出“岩水应力关系”学说,指出底板突水是岩石、水、应力共同作用所致,揭示了底板突水的动态演化机制。陆银龙等^[54]基于弹性损伤力学理论,构建了线性弹性损伤本构模型,揭示了工作面推进过程中含断层煤层底板的损伤破坏演化规律,提出当断层带活化区与底板破坏区相互连通时,会增加底板的破坏深度进而提高了底板突水的可能性。黄震等^[55]为深入探究断层破碎带的渗流特性,开展了三轴渗流试验,运用 CT 扫描技术,系统分析了断层破碎带在渗流前后微细观结构的变化特征,渗流会使断层破碎带内部的孔隙减少,逐渐形成渗流通道,进而形成突水通道。此外,借助数值模拟方法,对弱胶结充填断层的渗流特性展开了研究。李昂^[56]针对董家河煤矿 5 号煤层底板渗流与应力耦合作用下的破坏突水机理展开系统深入研究,并对影响该煤层底板突水的主要因素进行了深度剖析。

李橐等^[57]基于流固耦合理论构建破碎岩体压剪渗流试验系统,实现剪切变形与渗流过程的耦合模拟,通过多因素控制开展破碎岩体剪切-渗流耦合试验,结果表明破碎岩体剪切带内岩石颗粒在剪切作用下的运移,是导致孔隙率和渗透率增加的主因。李浩等^[58]采用数值模拟手段,充分考虑岩石在峰前强化、峰后软化以及拉压荷载转换时弹性刚度的改变,同时纳入塑性流动特性,运用基于 Drucker-Prager 屈服准则的弹塑性双标量型损伤本构模型(D-P 损伤模型),进而推导出充填影响下底板导水

通道的时空演化规律。姚邦华等^[59]基于采动岩体破坏与断层颗粒冲蚀的协同作用机制,提出了采动岩体损伤破裂-破碎岩体(断层)冲蚀协同致灾的突水概念模型,并对其研究发现,随工作面不断推进,形成含水层-断层-采动裂隙-工作面的渗流路径,冲蚀时间延长后,最终发育为数条优势导水通道,引发工作面涌水量急剧增大及滞后突水。官云章等^[60]通过自主研制的断层突水试验系统,进行了断层活化突水相似模拟试验,对断层活化突水过程中涌水量、突泥量、渗透性、孔隙性及渗流形态进行分析,从试验角度揭示了底板断层突水机理。

安泰龙等^[61]将研究对象精准拆分为固体、充填物颗粒与流体 3 个关键部分,进而成功搭建起一个纳入冲蚀作用的断层突水流固耦合数学模型。依托该模型,通过数值模拟深入探究了断层充填物颗粒在水流作用下的运移、流失状况以及由此引发的渗透性动态演化规律,为精准防治断层突水提供了有力依据。Bai 等^[62]采用有限元数值模拟与多场耦合分析手段,对断层破碎带内滞后突水的演化机制展开研究。提出突水演化历经 3 个阶段:非饱和渗流、达西流及快速渗流。王进尚等^[63]基于递进导升理论与断裂力学原理,构建了断层递进导升的简化断裂力学模型,并采用相似材料模拟试验方法,系统探究底板隐伏断层的递进导升演化过程。结果表明,隐伏断层初始发育时的自然导升高度越大,其后续递进导升所引发的破坏就越剧烈,也就更容易使断层与煤层底板相互连通,进而引发突水状况。

综上所述,随着深部开采使底板隔水层厚度减小,突水风险随之升高。相关研究从相对隔水层概念与突水系数的提出入手,逐步加深了对底板带突水判别依据、岩水应力关联、损伤破坏演变、渗流特征、流固耦合效应及采动-冲蚀协同致灾等多个维度。目前,借助理论建模、试验模拟(物理与数值)及多场耦合分析等方法,基本完整阐明含构造底板的突水机理。

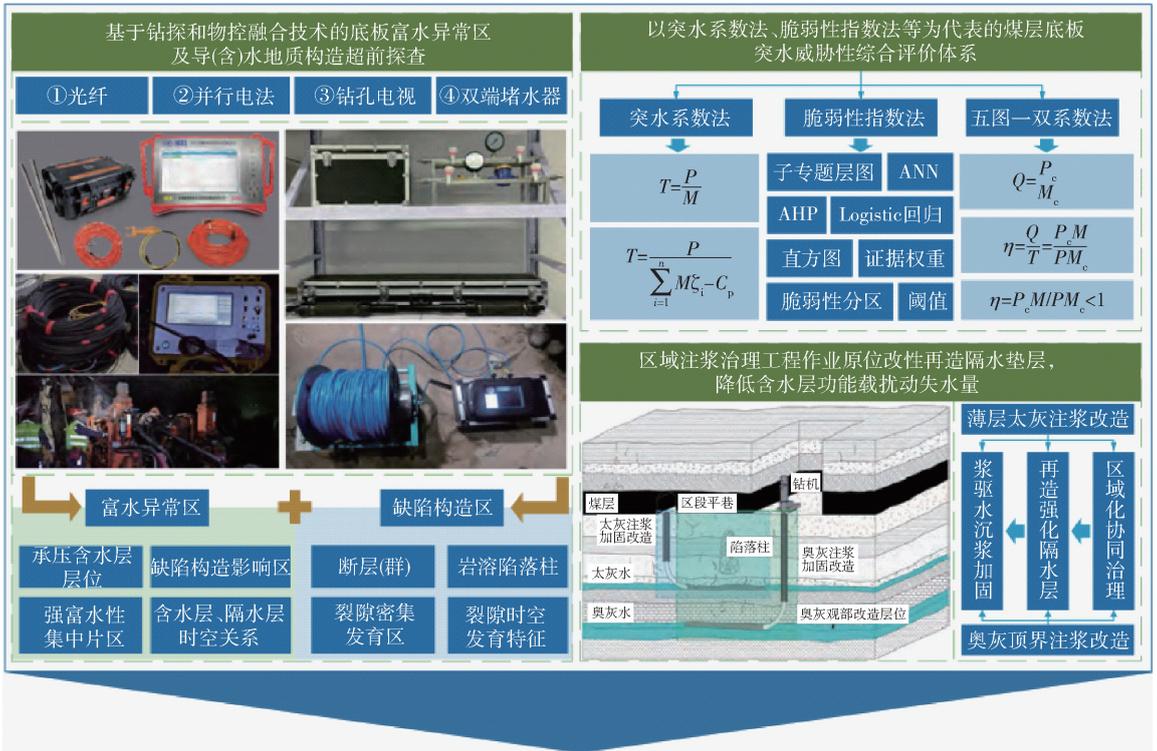
4 承压含水层工作面底板断层防突水技术研究现状

4.1 底板断层防突水措施

我国矿井底板防突水重点主要集中在东部地区,经过几十年的矿井水害治理研究,底板水害的防治理论和配套的防治技术已相对成熟。当前针对底

板承压含水层工作面断层突水防治技术,主要从理论、探测、留设防水煤柱等方面进行,主要包括物探、突水系数法、脆弱性指数法、疏水降压、带压开采、区域注浆治理等,在工程实践中取得了一定成效,形成了一套防治技术体系,如图 7 所示^[64]。刘泉声等^[65]为研究注浆加固对岩体裂隙力学特性的影响规律,在自研的裂隙岩体注浆系统平台上开展注浆加固试验,并对注浆后的岩体裂隙试件进行法向与切向力学加载测试。试验结果表明,注浆加固显著改变了岩体裂隙的剪缩/剪胀力学特性。黄明发^[66]以某金矿缓倾斜矿体为对象,探究富水环境下突水防控技术,提出通过多序次超前注浆与疏干排水改善水环境。现场显示,采用多序次超前注浆加固回采区域后,试验采场涌水量显著减少,验证了该防控措施的有效性。程帅帅等^[67]基于宾汉体浆液特性建立一维渗流注浆模型,研究水平裂隙浆液扩散规律,并结合赵家寨煤矿 22 采区 L1-2 灰岩含水层注浆工程验证。结果表明:底板含水层注浆充填改造可有效防控突水风险,保障矿井安全。

当前常用的监测手段涵盖钻孔注水法、岩移钻孔探测法、水文地质钻孔探测法以及三维地球物探技术等,这些方法从不同维度为底板突水监测提供精准数据支撑,助力相关工作的高效开展。孙文斌等^[68]以煤矿断层活化突水事故为研究对象,开展灾害感知方法的试验验证。结果得出:断层活化突水事故与敏感控制因素的变化有关,为煤矿灾害早期预警体系提供技术参考。靳德武等^[69]基于底板“下三带”理论,提出了煤层底板突水三维监测与智能预警体系,通过时序大数据挖掘技术对多元时序监测数据进行分析处理,实现对煤层底板充水水源变化过程的三维监测;结合指标预警与模型预警方法,实现矿井底板水害的智能预警。樊鑫等^[70]提出井-地联合微震监测系统,并基于陕西彬长矿区开展实例验证。该微震系统可精准定位煤层顶板应力异常区域的空间分布,动态揭示回采过程中顶板导水裂隙带的发育演化全过程,为回采工作面顶板水害风险的监测预警提供了创新性技术手段。连会青等^[71]提出针对突水机理不同的各种水害类型要建立相应的突水判据,以陕西省长矿区亭南矿为例,构建由原位数据采集网络和突水要素感知节点组成的立体化监测系统,实现对工作面突水前兆信息的多维度精准获取。结合数值模拟和仿真模拟建立智能

图7 煤层底板水害防控技术体系架构^[64]Fig. 7 Prevention and control technology system architecture of water disaster in coal seam floor^[64]

预警系统,实现井上下全空间水害风险预警“一张图”的可视化展示。

在现阶段工程实践操作中,断层活化突水的防治措施仍以防水煤柱留设为主。针对这一问题,诸多学者从理论依据构建、参数优化策略设计到影响因素辨识等多个维度开展了系统研究。董永等^[72]从矿压作用、构造作用以及水力劈裂作用的不同角度出发,分别推导出采动时对岩层破坏深度的公式,考虑水压的作用,进一步计算断层影响下防水煤柱的留设宽度,得出合理的计算公式。于小鸽等^[73]以山东翟镇煤矿七采区近DF3断层的待开采F7202W工作面为工程背景,通过COMSOL构建三维流-固耦合数值模型,模拟工作面开采过程,采用优化后公式计算防隔水煤柱留设宽度,最终确定108m煤柱尺寸。研究进一步验证了该宽度的安全性与合理性,其成果可为不同承压水条件下断层防隔水煤岩柱精准计算提供方法支撑,也为矿井防治水工作提供可靠依据。

上述研究表明,注浆加固技术能有效改善岩体裂隙力学特性,降低富水环境涌水量并防控突水风险。针对突水监测,现有多种手段(钻孔注水、物探等)及创新系统可实现多维度信息采集、动态演化

揭示及智能预警。在断层活化突水防治方面,防水煤柱留设仍是主要措施,其理论、参数优化及工程验证为精准计算和安全保障提供了支撑。

4.2 底板断层突水性评价和预测

在承压水上煤体的开采作业中,精准预测底板突水所潜藏的风险是保障开采安全的核心要点。通过突水性评价与预测,可提前识别高风险区域,避免人员伤亡与生产中中断。断层突水性评价是对断层本身及其周围岩体的水文地质、工程地质特征进行综合分析,判断其在自然或采动条件下诱发突水的可能性及危险性等级。而预测是在评价基础上结合采矿活动(如工作面推进、采深变化)定量预判断层在采动应力-水压耦合作用下发生突水的时间、位置和规模。针对过去频发的底板突水事故,众多业内学者综合运用灰度理论、模糊数学、突变理论、层次分析法、神经网络等前沿数学方法,构建了多元化、精细化的数学模型与评价体系。该体系旨在科学评估承压含水层工作面底板断层的突水风险等级,通过精准预测为煤炭开采作业的安全开展提供坚实的理论支撑与决策依据。

孙强等^[74]通过剖析充填体与隔水关键层的耦合作用机制,融合层状岩层渗流动力学方程,系统探

究了临界充实率对隔水关键层非线性渗流失稳的影响关系。结果表明,软弱泥岩类岩层因具备优异的抗渗透特性,对维系隔水关键层渗流系统的稳定性起到决定性作用。李博等^[75]构建了煤层底板富水承压溶洞突水力学模型,以突变理论中的尖点突变模型解析该力学模型,推导出系统变形失稳的标准势函数表达式,由此研究系统临界稳定状态,得出煤层底板富水承压溶洞突水的力学判据。李建林等^[76]基于岩石力学和地质力学,对煤层气开采后煤层底板突水进行理论分析,以山西晋煤集团成庄矿为背景,搭建突水危险性评价模型,揭示了最小主应力、含水层水压等因素对煤层底板突水的影响。王秉文等^[77]采用深梁理论与数值模拟结合的方法,将深梁分解为浅梁并考虑层间挤压应力影响,这样求解应力精度更高,可更好地指导底板突水的预测。王妍等^[78]把隔水关键层简化成固支梁,用弹性力学的应力函数法和半逆解法分别求应力与位移,将 2 种计算结果与 FLAC 3D 模拟结果对比验证。应力函数法所得应力及位移与 FLAC 3D 模拟结果更吻合,建议关键层固定梁弹性力学分析优先用应力函数法。该成果可为采场底板突水预测、预报提供理论支撑。

上述学者聚焦于隔水关键层力学特性、渗流失稳机制、溶洞突水判据及影响因素分析(如临界充实率、最小主应力、水压),并通过理论建模(如深梁理论、弹性力学应力函数法)与数值模拟相结合,深化了对底板稳定性的认识,为突水预测提供了重要理论依据。

5 基于非线性耦合模型的断层突水演化规律

煤矿断层突水均要经历从渗流到突水的阶段。为了研究煤层开采过程中断层渗流通道演化及流体流动规律,需建立断层破碎岩体渗流突水模型,但考虑流体在不同区域的流体物理过程有明显差异,则需建立断层非线性渗流模型,将其划分为含水层达西流、断层破碎带非达西流及层流 3 个流体物理过程,依据达西层流、非达西流动及层流 3 种流场下的方程进行模拟仿真^[79-80]。

5.1 非线性耦合模型

首先是建立集达西层流、非达西流动和层流 3 种流场为一体的断层非线性渗流模型,各个流场之间的流体压力和流速是一个互相联系、互相影响的物理过程,流体流动是一个统一的有机整体,不可

分割。达西流动方程适用于含水层岩石孔隙/裂隙中低速层流,流速与压力梯度满足线性关系。表达式可表示为式(1)。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\phi\rho) + \nabla(\rho u_d) = Q_m \\ u_d = -\frac{k}{\mu}\nabla p_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: k 为渗透率; ϕ 为孔隙率; p_d 为达西流流体压力; ρ 为流体密度; Q_m 为源项; u_d 为达西流速度; μ 为动力黏度; ∇ 表示向量微分算子。

Brinkman 方程适用于断层破碎岩体的非达西渗流,采用如下控制方程(式(2))。

$$\begin{cases} \frac{1}{\phi}\rho \frac{\partial u_b}{\partial t} = \nabla[-p_b l + K] - \left(\mu k^{-1} + \beta\rho u_b + \frac{Q_m}{\phi^2}\right)u_b + F \\ \rho \nabla u_b = Q_m \\ \beta = \frac{c_F}{\sqrt{k}} \\ K = \mu \frac{1}{\phi}(\nabla u_b + (\nabla u_b)^T) - \frac{2}{3}\mu \frac{1}{\phi}(\nabla u_b)l \end{cases} \quad (2)$$

式中: c_F 为 Forchheimer 参数; K 为黏性应力张量; F 为体积力; l 为位移矢量。

层流常表现为流体在低速、低扰动条件下(如通过断层破碎带缓慢渗入),水流沿采空区空间分层缓慢流动。控制方程见式(3)。

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u_c}{\partial t} + \rho(u_c \nabla)u_c = \nabla[-p_c l + K] + F \\ \rho \nabla u_c = 0 \\ K = \mu(\nabla u_c + (\nabla u_c)^T) \end{cases} \quad (3)$$

式中: p_c 为层流流体压力; ρ 为流体密度; u_c 为层流速度; μ 为动力黏度; K 为黏性应力张量; F 为体积力; l 为位移矢量。

5.2 断层破碎带突水演化规律

断层破碎岩体渗流突水模型是根据某矿采区断层区域有关地质资料,得到的与实际相符的数值计算模型,如图 8 所示。模型的几何尺寸为 200 m × 150 m,煤层埋深约 520 m,含水层位于模型底部,宽度为 10 m;断层位于模型中间,宽为 8 m,倾角 70°;采空区高为 5 m。数值模拟参数见表 1。模型的含水层水压为 4 MPa,四周边界均为不透水边界,模型的初始孔隙压力为大气压力。

自然界中的岩体作为地质作用长期演化的产物,

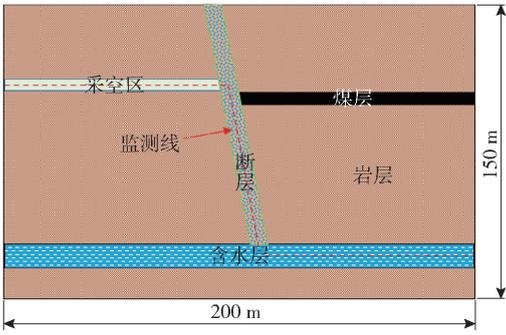


图8 断层破碎岩体渗流突水数值计算模型

Fig.8 Numerical calculation model of fault seepage and water inrush

其力学性质呈现出显著的不连续性、非均质性和各向异性,而这些特性在大尺寸模型中会更加突出。采用韦伯分布描述岩体非均质性,分布函数见式(4)。

$$f(x) = \frac{m}{n} \left(\frac{x}{n}\right)^{m-1} \exp \left[-\left(\frac{x}{n}\right)^m \right] \quad (4)$$

对上式积分,取 n 和 m 为定值,则可以根据反函数产生随机数(式(5))。

$$x = n \left\{ -\log[1 - F(n)] \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (5)$$

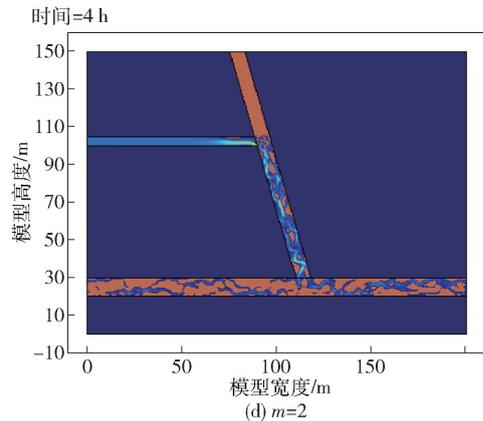
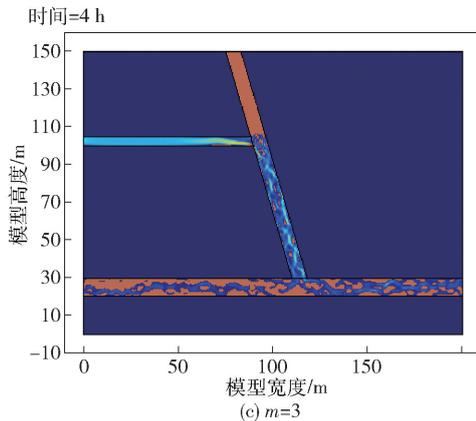
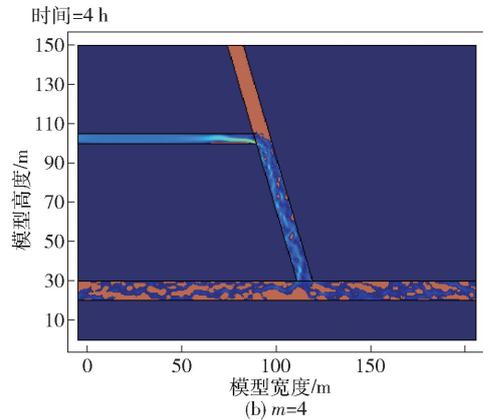
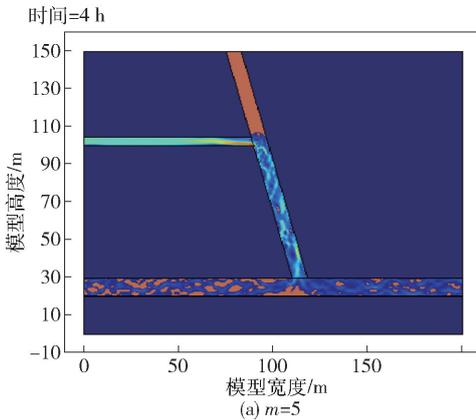


图9 不同非均质度下断层导水通道演化规律

Fig.9 Seepage channels in fault under different heterogeneity

式中: x 为自变量; n 为尺度参数; m 为形状参数。

在韦伯分布模拟岩石非均质性的研究中,参数 m 用于量化岩石非均质程度,尺度参数 n 为 1 时,构建了 $m=2,3,4,5$ 的 4 个数值模型。

表1 数值模拟参数数值

Tab.1 Parameter values of numerical calculation

参数名称	数值	单位
流体密度	1 000	kg/m ³
水的动力黏度	1×10^{-3}	Pa·s
初始平均孔隙率	0.1	—
浓度	0.01	—
溶蚀系数	1.2×10^3	m ⁻¹
Forchheimer 参数	0.55	—
初始渗透率	5×10^{-14}	m ²

在 8 MPa 含水层水压条件下,对 4 种不同非均质度下的断层渗流模型进行计算,结果表明:各模型渗流过程中均形成多条导水通道,且非均质度越小,孔隙率与渗透率分布越不均匀,导水通道形态越显著;流体速度呈现“工作面 > 断层 > 含水层”的分布特征。图 9 给出了不同非均质度下的渗流失稳通

道,可以看出,非均质度小的破碎岩体因物理性质差异大,形成的渗流失稳通道更单一,而均质度高的岩体通道更宽;当破碎岩体物理性质差异显著时,会阻碍流体流动,导致最终流速与流量降低。

在断层模型非均质度 $m = 2$ 的条件下,对 4 种不同含水层水压下的断层渗流模型进行计算,图 10 呈现流体通道随时间的演化规律:初期形成细小渗流区域,随后逐步扩张为完整导水通道。随着时

间推进,含水层与断层水流形成开路,破碎岩石颗粒随水流持续流失,促使含水层和断层渗透性能增强,孔隙率、渗透率不断提升,导水裂隙数量增多且宽度加大,渗流速度持续加快;而渗流速度的增大又加剧破碎颗粒流失,二者相互作用进一步增强断层渗透性、拓宽渗流裂隙,最终导致开采工作面突水灾害。

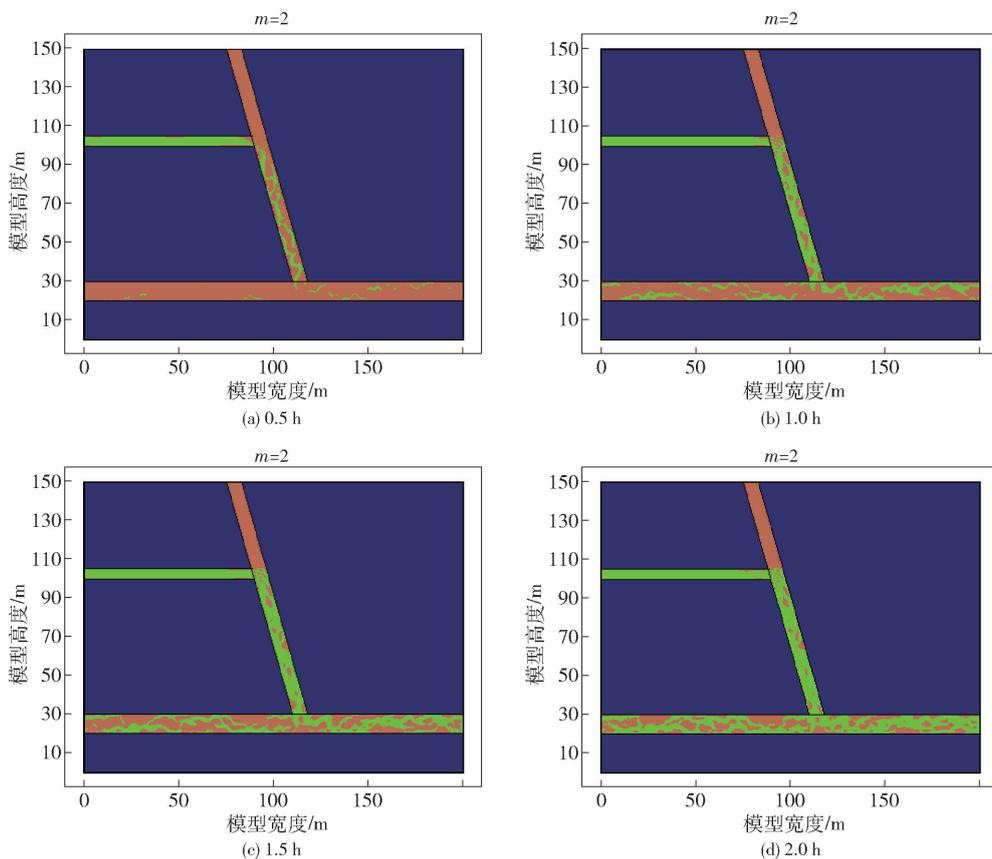


图 10 不同时刻下断层导水通道演化规律
Fig. 10 Seepage channels in fault formed at different times

5.3 小结

基于达西流动方程、非达西流动方程及层流方程,采用 COMSOL 开展三流场模拟,结合破碎岩体质量流失与变质量渗流突变理论,对含水层-断层破碎带-巷道的渗流至突水过程进行数值研究,低非均质度岩体易形成单一失稳通道,高均质度的通道则更宽,破碎岩体渗流失稳速度随非均质度增加及物理性质均匀性提高而增大。含水层压力升高导致流体流速增大,加剧岩体颗粒流失,促进导水裂隙扩展;压力越大,裂隙发展越快,巷道流速越高。

6 现有研究的不足与未来研究方向

煤矿开采扰动下,承压含水层工作面中断层诱发的底板突水灾害是当前矿井水害防治领域亟待解决的关键科学问题。国内外学者已在底板裂隙岩体损伤破坏、底板突水机制及防控技术体系等方面已取得系统性研究成果,为突水灾害防控提供了重要理论支撑,但仍有需要进一步研究的问题。

1) 在底板裂隙岩石损伤破坏理论研究领域,多场耦合机制与细观损伤机理已取得显著进展。然

而,针对深部工程环境,高地应力、高温与高渗透压耦合作用下的裂隙岩石损伤演化机制仍存在研究盲区,特别是渗流-应力-温度多场耦合下裂隙扩展的动态反馈机制尚未形成系统性理论框架。现有理论模型普遍采用简化假设,未充分考虑孔隙介质对水岩相互作用的影响,导致损伤演化预测结果与工程实际存在偏差。未来研究可构建包含孔隙效应的多物理场耦合模型,通过深化多场耦合理论体系,揭示深部底板裂隙的动态演化规律。

2)当前底板突水理论体系主要基于常规地质条件构建,针对承压含水层工作面断层构造的突水机理研究存在明显不足,尤其是融合断层带物质组成、结构特征与采动应力动态演化过程的耦合判据尚处空白。物理模拟方法受限于现场复杂地质条件的复现难度,导致模拟结果存在系统性偏差。同时,断层突水临界水压、关键层厚度等核心参数缺乏统一理论计算公式,可发展从微观裂隙扩展到宏观突水过程的多尺度模拟技术,通过跨尺度耦合分析揭示突水灾害的全过程演化机制。

3)现有底板断层水害防治技术以宏观工程措施为主,针对承压含水层工作面断层的精细化治理技术与专用装备研发相对滞后。常规注浆材料受物理化学特性限制,在复杂裂隙中的扩散范围有限;深部环境下主流地球物理探测手段易受干扰,难以捕捉有效的突水预警特征;现有监测系统多获取单点离散数据,缺乏对突水前兆信息的综合分析。亟需研发适用于复杂应力环境下的定向注浆加固技术,配套智能化监测预警装备,构建集灾害预测、精准加固、实时监控于一体的综合防治体系。

[参考文献]

- [1] 谢和平,任世华,谢亚辰,等. 零碳清洁煤电发展研究——“清洁煤电+CCUS”的可行性与竞争性[J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 176-185.
- [2] 武强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795-805.
- [3] 尹尚先,姚辉,梁满玉,等. 突水系数60年:面临困境及发展方向[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 600-609.
- [4] 张培森,董宇航,张晓乐,等. 2008—2021年我国煤矿水害事故统计规律分析及预测研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(11): 131-137.
- [5] 刘泽威,刘其声,刘洋. 煤层底板隐伏断层分类及突水防治措施[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(2): 141-146.
- [6] 国家矿山安全监察局. 新疆昌吉州呼图壁县白杨沟丰源煤矿“4·10”重大透水事故案例. [2022-01-19]. https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxgk/fdzdgnr/sgcc/sgalks/202201/t2022_0119_406923.shtml
- [7] 王进尚,姚多喜,黄浩. 煤矿隐伏断层递进导升突水的临界判据及物理模拟研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 2014-2020.
- [8] 刘泽威,刘其声,刘洋. 煤层底板隐伏断层分类及突水防治措施[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(2): 141-146.
- [9] 武强,朱斌,刘守强. 矿井断裂构造带滞后突水的流-固耦合模拟方法分析与滞后时间确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 93-104.
- [10] Zhao C, Zhang Z, Wang S, et al. Effects of fracture network distribution on excavation-induced coupled responses of pore pressure perturbation and rock mass deformation [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 145: 104670.
- [11] Meng Q, Liu J, Xie L, et al. Experimental mechanical strength and deformation characteristics of deep damaged-fractured rock [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 81(1): 32.
- [12] 曹文贵,张超,贺敏,等. 岩石空隙变化及其变形全过程的统计损伤模拟方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(9): 100-106.
- [13] 赵延林,王卫军,黄永恒,等. 裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合分析与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 24-32.
- [14] Chen D X, Wwang L G, Sun C, et al. Particle flow study on the microscale effects and damage evolution of sandstone creeps [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 161: 105606.
- [15] 田森,赵映,司鸽,等. 寒区露天矿岩质边坡裂隙岩体冻融损伤特征及力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(12): 4687-4700.
- [16] 林志斌,李亚豪,林培忠,等. 损伤-渗流耦合作用下上覆溶洞隧道突水灾变规律研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2025, 44(2): 154-163.
- [17] 陈欣,周小涵,许彬,等. 裂隙岩体宏观细观剪切损伤力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2509-2521.
- [18] Liu X, Zhang J, Zhou X, et al. Damage-seepage evolution mechanism of fractured rock masses considering the influence of lateral stress on fracture deformation under loading and unloading process [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024: 1-27.

- [19] 郭颖泉, 岑夺丰, 李悦, 等. 卸荷条件下岩体裂隙扩展贯通及能量演化机制[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(5): 1521-1531.
- [20] 李浩, 朱开鹏, 郭国强, 等. 大变形卸荷载下特厚煤层底板断层突水机理模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(5): 118-128.
- [21] 赵鹏, 冯子军, 南翰墨, 等. 花岗岩干热岩体裂隙的大位移动态剪切-渗流特征[J]. 煤炭学报, 2023, 48(3): 1139-1154.
- [22] 王恩志, 张东, 刘晓丽, 等. 裂隙岩体多结构多流态渗流模型与模拟[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(6): 894-902.
- [23] 郑茂慧, 王东林, 和志永, 等. 颗粒迁移下岩体单裂隙冲蚀损伤主控因素分析[J]. 有色设备, 2024, 38(6): 36-42.
- [24] Zhao Y, Wang C L, Bi J. Analysis of fractured rock permeability evolution under unloading conditions by the model of elastoplastic contact between rough surfaces[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(12): 5795-5808.
- [25] 陈兴周, 白亚妮, 陈莉丽, 等. 高渗压与循环加卸载环境下开挖卸荷岩体力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(4): 737-745.
- [26] 唐劲舟, 唐文豪, 杨科, 等. 循环荷载作用下含倾斜单裂隙砂岩力学响应特征及渗流演化规律[J]. 岩土学, 2025, 46(1): 199-212.
- [27] 施炎, 王团乐, 宛良朋, 等. 干湿循环作用下裂隙岩体渗流特性演化规律研究[J]. 人民长江, 2024, 55(7): 198-203.
- [28] Cao Z Z, Wang P S, Li Z H, et al. Migration mechanism of grouting slurry and permeability reduction in mining fractured rock mass [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 3446.
- [29] 闫寿庆, 王国徽, 赵宇, 等. 流固耦合作用下裂隙砂岩蠕变损伤特征及颗粒流模型研究[J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(11): 51-58.
- [30] 甘磊, 刘玉, 张宗亮, 等. 岩体裂隙粗糙度表征及其对裂隙渗流特性的影响[J]. 岩土力学, 2023, 44(6): 1585-1592.
- [31] 寿云东. 裂隙岩体温度场-渗流场-应力场耦合问题的近场动力学模拟分析[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
- [32] 李卓徽, 周宗青, 高成路, 等. 基于近场动力学与有限体积法耦合的裂隙岩体渗流模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 1251-1263.
- [33] 季慧, 王鲁瑀, 吴则祥, 等. 裂隙岩体三维随机裂隙建模与渗流数值仿真研究[J]. 计算力学学报, 2024, 41(4): 718-725.
- [34] 王惠栋, 段秦生, 宋锋锋, 等. 渗流力和结构面水弱化作用下裂隙岩体边坡块体的稳定性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(4): 50-59.
- [35] 任政, 姜耀东, 张科学. 采动影响下逆断层阶段性活化诱冲机制[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 618-625.
- [36] 王宏伟, 田政, 王晴, 等. 采动诱发断层覆岩耦合失稳的突变效应[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 2961-2975.
- [37] 张丁丁, 李淑军, 张曦, 等. 分布式光纤监测的采动断层活化特征实验研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(1): 92-100.
- [38] 张宁博, 赵善坤, 赵阳, 等. 逆冲断层卸载失稳机理研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1671-1680.
- [39] 张鹏, 朱学军, 孙文斌, 等. 采动诱发充填断层活化滞后突水机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3): 136-143.
- [40] 孙文斌, 郝建邦, 戴宪政, 等. 采动诱发断层活化响应机制特征研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(4): 12-20.
- [41] 李海燕, 张红军, 李术才, 等. 断层滞后型突水渗-流转化机制及数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2): 323-329.
- [42] 赵毅鑫, 卢志国, 朱广沛, 等. 考虑主应力偏转的采动诱发断层活化机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 73-80.
- [43] 朱广安, 窦林名, 刘阳, 等. 采动影响下断层滑移失稳的动力学分析及数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(1): 27-33.
- [44] 蒋金泉, 武泉林, 曲华. 硬厚岩层下逆断层采动应力演化与断层活化特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 267-277.
- [45] 林远东, 涂敏, 付宝杰, 等. 采动影响下断层稳定性的力学机理及其控制研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 158-165.
- [46] 赵志刚, 赵春波. 不同采动对含断层底板破坏影响数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(9): 22-25.
- [47] 牛心刚, 马海峰, 李传明, 等. 断层影响下底板应力分布和破坏分析[J]. 金属矿山, 2013(6): 16-19+48.
- [48] 张玉军, 张志巍, 肖杰, 等. 承压水体上煤层底板下位隐伏断层采动突水机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 283-291.
- [49] T. N. Singh, B. Singh. Model simulation study of coal mining under river bed in India[J]. International Journal of Mine water. 1985, 4(3): 1-10.

- [50] Brace, Matthew. Predicting coal mine water[M]. Australian Mining. 2006; Reed Business Publishing Pty. Ltd.
- [51] 郭惟嘉, 刘杨贤. 底板突水系数概念及其应用[J]. 河北煤炭, 1989(2): 56-60.
- [52] 孟凡树, 王迎超, 焦庆磊, 等. 断层破碎带突水最小安全厚度的筒仓理论分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(2): 89-95.
- [53] 王成绪. 煤矿防治水理论与实践的思考[C]. 中国地质学会. 中国煤炭资源现状与勘探开发利用技术进展及环境保护——中国地质学会、中国煤炭学会煤炭田地质专业委员会 2004 年学术交流会议论文集. 中国地质学会: 中国地质学会, 2004: 104-107.
- [54] 陆银龙, 王连国. 含断层煤层底板损伤破坏演化数值模拟及微震监测研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 38-44.
- [55] 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. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1381>
- [56] 李昂. 带压开采下底板渗流与应力耦合破坏突水机理及其工程应用[D]. 西安:西安科技大学, 2012.
- [57] 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.
- [58] 李浩, 白海波, 武建军, 等. 岩体循环加卸载力学特性对完整底板导水通道演化影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3470-3480.
- [59] 姚邦华, 李硕, 杜锋, 等. 采动岩体损伤与断层冲蚀协同致灾时空演化机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2212-2221.
- [60] 官云章, 常刚, 岳尊彩, 等. 底板断层活化突水过程试验研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(2): 202-205.
- [61] 安泰龙, 姚邦华, 李硕, 等. 底板承压水作用下断层破碎带岩体冲蚀-渗流灾变规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2): 354-360.
- [62] Bai J W, Duan S L, Liu R T, et al. Evolution of delayed water inrush in fault fracture zone considering time effect. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(11): 1001.
- [63] 王进尚, 姚多喜, 黄浩. 煤矿隐伏断层递进导升突水的临界判据及物理模拟研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 2014-2020.
- [64] 曾一凡, 朱慧聪, 武强, 等. 我国不同类别煤层底板水害致灾机理与防控远景导向[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1073-1099.
- [65] 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(S1): 3140-3147.
- [66] 黄明发. 富水环境缓倾斜矿体采矿方法与突水防控研究[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(6): 34-41.
- [67] 程帅帅, 黄存捍, 张伟, 等. 考虑浆液黏度时变性的底板含水层注浆充填改造机制研究[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(6): 28-34.
- [68] 孙文斌, 张纪扬, 陈东伟. 以断层活化突水事故为例的煤矿灾害感知研究[J]. 有色设备, 2024, 38(2): 24-31.
- [69] 靳德武, 赵春虎, 段建华, 等. 煤层底板水害三维监测与智能预警系统研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2256-2264.
- [70] 樊鑫, 程建远, 栗升, 等. 煤矿微震监测系统在回采工作面顶板水害防治中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(6): 115-127.
- [71] 连会青, 徐斌, 田振焘, 等. 矿井水情监测与水害风险预警平台设计与实现[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 198-207.
- [72] 董永, 孟祥瑞, 高召宁. 断层影响下防水煤柱留设合理宽度研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(S1): 241-243.
- [73] 于小鸽, 罗文娜, 徐东晶, 等. 含导水断层的煤层隔水煤(岩)柱留设优化计算[J/OL]. 煤炭学报, 2024: 1-12. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0975>.
- [74] 孙强, 刘恒凤, 张吉雄, 等. 充填开采隔水关键层渗流稳定性力学模型及分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(2): 273-281.
- [75] 李博, 刘子捷. 煤层底板富水承压溶洞突水力学模型构建及突水判据研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 232-237.
- [76] 李建林, 赵帅鹏, 崔延华. 煤层气开采后成庄矿 15 号煤层底板突水危险性评价[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 1-7.
- [77] 王秉文, 查文华, 鲁海峰. 深部开采环境下底板隔水关键层深梁力学分析[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(9): 80-91.
- [78] 王妍, 姚多喜, 鲁海峰. 高水压作用下煤层底板隔水关键层弹性力学解[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(1): 127-132,137.
- [79] 贾运隆. 基于突变理论的破碎岩体变质量渗流规律研究[D]. 焦作:河南理工大学, 2025.
- [80] 官明山, 谭立维, 杨成志, 等. SICOMINES 铜钴矿开采阶段地下水变化规律研究[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(1): 35-40,53.

Research advances in prevention technology and disastrous mechanism of water inrush from floor faults in confined aquifers under mining influence

GUO Fangxu¹, WANG Wenqiang², ZHANG Shuaiyang¹, WU Yongjiang¹,
LI Zhenhua^{2,3,4}, DU Feng^{2,3,4}, CAO Zhengzheng^{1,3,4*}

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

3. Henan Mine Water Disaster Prevention and Control and Water Resources Utilization Engineering Technology Research Center, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

4. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Coal is the prominent energy resource consumed in China. With the depletion of shallow resources and the increasing mining depths and scales, water inrush disaster in coal mine has become a major hidden danger restricting coal mine safety production, with approximately 80% of mine water inrush associated with fault structures. The paper focuses on floor water inrush caused by faults in pressurized aquifer working faces under mining disturbances, and reviews the current research achievement. Regarding damage and failure characteristics of fractured floor rocks, the state-of-the-art review on fractured rock masses based on damage properties and seepage characteristics are summarized. For fault-induced floor water inrush mechanism, the stress characteristics and water inrush mechanism of floor faults under mining activities are elucidated. In terms of water inrush prevention technology for floor faults in pressurized aquifer working faces, progress in prevention measurements, water inrush risk evaluation, and prediction research are presented. The study also identifies existing research gaps in multi-field coupling mechanisms of damage-seepage in fractured floor rock masses, fault-induced floor water inrush mechanisms, and intelligent monitoring/early warning equipment with governance technologies, which provides an important theoretical foundation for water inrush prevention in coal mines.

Keywords: water inrush mechanism; fault; floor; damage and failure; prevention technology

