

第1章

绪 论

我国中东部富水矿区底板突水灾害频发,严重威胁矿井安全生产,其灾变过程本质上是动静耦合扰动下岩体损伤累积与渗流失稳的多场耦合演化问题(见图 1-1)。传统研究多聚焦于单一静态或准静态条件下的岩体破坏特征,难以揭示复杂扰动环境下底板岩体时效损伤演化与突水通道形成的动力学机制。

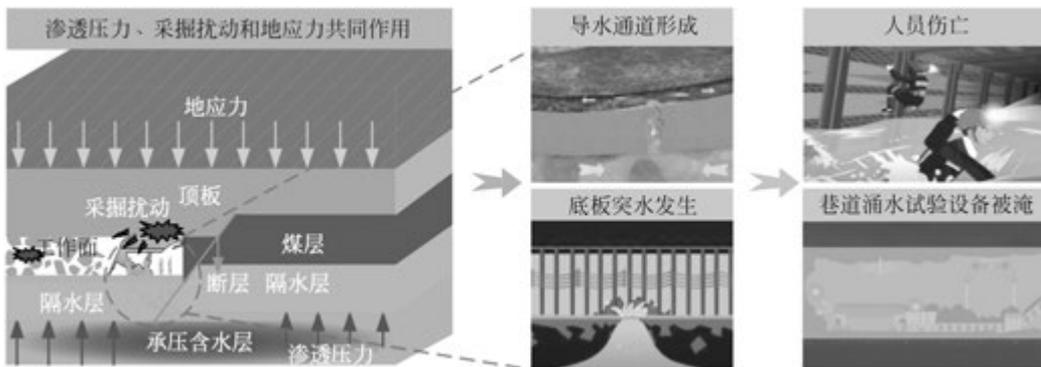


图 1-1 底板突水灾变

岩土工程环境往往赋存一定的地下水位,岩体在地下水环境的作用下物理力学性质发生很大变化,使得围岩的应力场、变形场及其渗流场相互耦合、相互作用,进而加快了井下冒顶、突水灾害的发生。同时,扰动作用造成岩体内部结构损伤和破裂,岩体损伤在造成岩体失稳的同时,显著影响岩体的渗透特性。大量的岩体工程实践经验表明,扰动作用诱发的岩体损伤与破裂行为及其造成的岩体中渗流场的突变是导致大规模岩体工程失稳和工程突水灾害的主要原因之一。特别是复杂的地质条件进一步提高了工程灾害的敏感程度,导致矿井底板隔水层无前兆的、突发性的失稳破坏特性,进而导致深井涌水、突水灾变机理的复杂性,伴有强随机性,因此,研究扰动作用下矿井底板隔水层失稳破坏导致的突水灾变机理非常必要。深入探讨扰动作用和渗透压力耦合作用下矿井底板隔水层岩体裂隙扩展的时空演化规律,是富水含水层上巷道稳定性控制研究领域亟须解决的关键技术难题。下文将针对这一难题的相关领域研究现状进行叙述和总结,共分为以下四个方面。



彩图 1-1

1.1 动静扰动下岩石蠕变损伤研究现状

岩石在恒定载荷下会慢慢变形和损伤,特别是在受到动静扰动的条件下,岩石的力学性能和变形特性会发生显著变化^[1-4]。蠕变现象通常表现为岩石在长期荷载作用下的缓慢变形,这种变形不仅与岩石的内部结构和物理性质相关,还受到外界扰动因素(如地震、开采、爆破等)影响。动静扰动下的岩石蠕变行为,往往表现出与静态荷载作用下不同的损伤机理和演化规律,尤其是在动态荷载条件下,岩石的应力应变关系、破坏模式以及变形特征的变化在工程尺度上多表现为巷道围岩的蠕变现象(见图 1-2)。



图 1-2 巷道围岩蠕变现象

高延法等^[5-6]研制了扰动蠕变试验设备,进行了岩石流变及扰动效应试验,得到了扰动效应对蠕变不同阶段的影响。王波等^[7]阐述了岩石强度极限邻域等岩石力学新概念,建立了岩石多次受到扰动后的累积变形量的本构方程。范庆忠^[8]通过引入损伤变量和硬化变量,建立了一个新的岩石蠕变模型,并指出岩石蠕变存在一个应变阈值。付志亮^[9]在热力学框架基础上推导了岩石材料的蠕变损伤本构关系。崔希海等^[10]对红砂岩和软弱泥岩进行了不同扰动幅值下的蠕变扰动试验,构建了考虑扰动突变本构模型。Fu 等^[11]通过试验发现,岩石轴向载荷进入极限强度邻域,小的动力扰动会造成岩石微损伤,当扰动更大时,破坏会瞬间发生。宋大钊等^[12]研究了煤系岩石受扰动效应下的损伤破坏特性,建立了损伤蠕变本构模型。徐俊等^[13]进行了室内扰动蠕变试验,分析不同轴压及扰动荷载下含孔洞大理岩的蠕变特性,并通过蠕变本构模型及确定 Burgers 扰动蠕变模型的参数等方法进行蠕变理论分析。王波等^[14]进行了岩石单轴压缩蠕变扰动试验,发现强度极限邻域内岩石蠕变对外界扰动响应明显,扰动产生的蠕变扰动变形量剧烈增加且不可恢复,随着扰动能量的累积,蠕变变形量加速增长至试件破坏。刘峰等^[15]基于岩石扰动状态理论,提出一个以扰动能量和扰动次数为自变量的扰动因子函数,以它为权重函数与 NRC 模型有机结合,建立了

软岩流变扰动效应的本构模型。苏荣华等^[16]在周期冲击扰动下单轴蠕变试验基础上,提出一种与时间有关的非线性黏滞体并引入损伤因子改进 Burgers 模型,建立粉砂岩蠕变扰动理论模型。王俊光等^[17]考虑了扰动幅值和频率对岩石的蠕变效应,并基于此建立了岩石非线性扰动蠕变损伤复合模型。王青元等^[18]探讨了岩石蠕变状态、落锤冲击次数和冲击能量对蠕变岩石变形破坏特征的影响,从能量角度阐述了蠕变岩石在冲击扰动作用下的破坏规律。王俊光等^[19]研究了不同扰动幅值和频率对泥岩蠕变及断口细观特征的影响。Zhu 等^[20]对砂岩进行了蠕变试验,同时施加了动力扰动,结果表明动态干扰不仅增大了轴向应变率,还促进了岩石标本的膨胀,进而导致岩石的剪切破坏。苏荣华等^[21]充分考虑初始损伤以及加速蠕变损伤的影响,引入塑性变形体、加速损伤元件,与 Burgers 模型串联构建一种非线性蠕变模型。Wang 等^[22]在不同的最大循环应力和周期下进行了盐岩试样上的单轴长周期循环载荷测试,根据测试结果,分析了周期、最大循环应力和循环次数对盐岩蠕变特征的影响。Chen 等^[23]进行了交替的循环载荷和卸载蠕变测试,以研究载荷路径和循环高应力蠕变及低应力蠕变对砂岩蠕变行为的影响。张慎河等^[24]对类岩石试件进行三轴蠕变扰动试验,研究不同预静载下扰动荷载对类岩石蠕变变形特性的影响。Bai 等^[25]在研究零度下的岩石块受到动力扰动后的蠕变行为时发现,该环境下扰动超过某种强度会加速裂缝等缺陷的破坏,进而造成样本突然破坏。马利遥等^[26]开展了不同冲击能量扰动下的剪切蠕变试验,并在试验结果的基础上,引入基于冲击能量的损伤因子 D ,建立了考虑冲击扰动效应的软岩剪切蠕变损伤模型。Yang 等^[27]建立了蠕变损伤模型,该模型基于弹性损伤原理和 COMSOL 的 Norton-Bailey 方程,揭示了由动态干扰触发的岩石蠕变损伤机制。Ding 等^[28]分析了煤岩在不同的蠕变和撞击应力下蠕变损伤的影响,并分析了介质机制、损伤程度、力链结构和能量演化。吉东亮等^[29]基于复杂应力下的蠕变方程模型,同时考虑煤岩材料的非均质性,结合 Weibull 分布构建了能够描述煤岩蠕变全过程的蠕变损伤本构模型,并进行参数的敏感性分析。Wu 等^[30]进行冲击扰动蠕变试验,揭示了动力扰动对砂岩的瞬时和蠕变行为的影响,通过整合动力损伤黏性元件和扰动损伤瞬时元件构建了一个新的黏塑性扰动损伤蠕变模型。王波等^[31]进行了单轴蠕变扰动试验,并基于 CT 扫描结果,结合单位像素点坐标建立了孔隙距离。Yue 等^[32]进行了不同的分级载荷速率下煤的蠕变试验,揭示了静态-动力耦合载荷下无烟煤的蠕变和硬化特性,基于试验结果,建立了分级负载速率和弹性模量硬化系数,以及实际屈服应力和应变率衰减系数之间的功能关系。王泽祺等^[33]基于协同损伤效应影响下软岩蠕变各阶段黏度系数的新型演化方程和改进的牛顿体元件,采用元件模型的方法,建立软岩一维蠕变损伤模型。在此基础上,引入塑性流动法则,建立协同损伤效应影响下软岩的三维蠕变损伤模型。樊赖宇等^[34]对红砂岩开展了多级冲击扰动蠕变试验,分析了不同蠕变应力与扰动能量下瞬时变形与蠕变行为,引入长期强度与扰动能量的相关性、动态扰动单元和扰动-损伤黏性元件,建立了黏塑性扰动损伤蠕变模型。

综上,动静扰动下岩石蠕变损伤研究已取得显著进展,但未来仍需在多个方向深入探索。未来的研究应着重于深化对微观损伤机制与能量耗散过程的理解,构建更精细化、物理意义明确且能适应复杂环境因素的多尺度本构模型,并加强对复杂动静扰动组合作用下岩石蠕变特性的研究。

1.2 富水岩体渗流-蠕变规律研究现状

富水岩体中水对岩石蠕变的影响主要包括物理作用、化学作用和力学作用。物理作用和化学作用使岩石性状逐渐恶化,力学作用主要表现为静水压力的有效应力作用和动水压力的冲刷作用,蠕变过程中,裂隙面的矿物溶解(如压溶现象)或沉淀会改变裂隙表面粗糙度,进而影响岩体渗流特性(见图 1-3)^[35]。

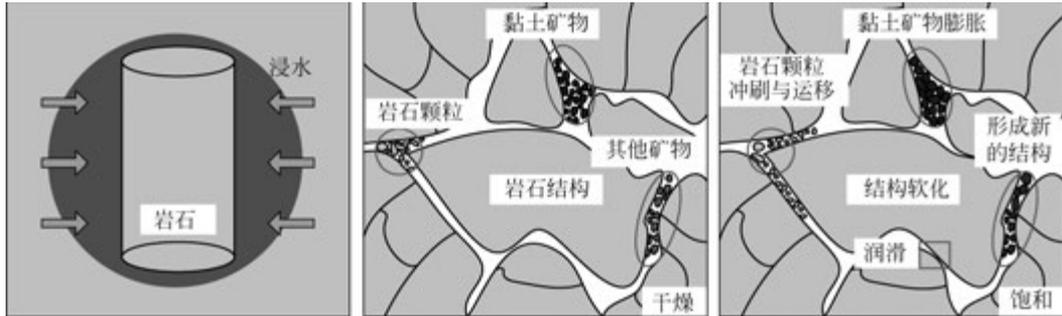


图 1-3 富水岩体内部水-岩作用

阎岩^[36]研制了岩石渗流-蠕变耦合试验系统,探讨了岩石在渗流作用下的蠕变特性,得到了岩样的体积蠕变与渗透系数及二者之间的关系。何峰^[37]进行了三轴渗流-蠕变耦合试验,通过不同围压、孔压条件下岩石的渗透率变化,拟合出相应的蠕变-渗透率曲线并建立了渗透率-蠕变方程。王如宾等^[38]对角砾岩进行三轴流变试验,发现施加应力水平大于或小于但接近变质火山角砾岩破裂应力水平时,岩石出现明显蠕变变形,且发生加速蠕变破裂,表现出较为明显的加速蠕变特性,且在分级加载过程中加速蠕变阶段,岩石应力敏感性明显增大。贾善坡等^[39]基于莫尔-库仑准则蠕变势,构造了泥岩非线性蠕变损伤本构模型及其损伤演化方程。仇培涛^[40]利用 MATLAB 对分数流变模型参数进行数值计算,采用分数阶微积分的数学方法对经典 Burgers 模型的本构方程进行推导,推导出常见蠕变参数的分数阶形式,并对各模型在不同阶数下的蠕变参数进行无量纲化。杨红伟等^[41]对细粒砂岩进行分级加载渗流压力的蠕变试验,随着应变的累积,横向应变量大于轴向应变量呈扩容效应,直至发生蠕变破坏。浦海等^[42]以 Burgers 模型作为覆岩蠕变模型,以应力场方程与渗流场方程为基础建立了覆岩渗流-蠕变本构方程,并对充填开采过程进行数值模拟研究,得出渗流作用带来的覆岩蠕变变形量大于无渗流作用带来的覆岩蠕变变形量,并且随着开采时间的推移,二者差距逐渐增大。陈俊国等^[43]在离散裂隙网络耦合模型基础上加入裂隙蠕变效应,建立了裂隙岩体流固耦合时空演化模型,推导了裂隙岩体流固耦合模型的一般表达式。王登科等^[44]研制了煤岩三轴蠕变-渗流-吸附解吸试验装置,通过试验得出含瓦斯煤的渗透性与蠕变载荷之间存在较好的一致性。何峰等^[45]研究了渗流-蠕变耦合条件下,不同围压、轴压、孔隙水压力对渗流量大小的影响。江宗斌^[46]进行了加卸载循环扰动的渗流-蠕变耦合试验,揭示了蠕变过程中的渗流特性和蠕变规律,实现了量化评价岩石的弹性阶段、塑性阶段、破坏阶段对蠕变与渗流的影响。曹丽丽^[47]基于岩石蠕变理论、分数阶微积分理论,建立了煤系砂岩整数阶与分数阶非线性黏弹塑性三维蠕变模型;基于太沙基应力原理,建立

了煤系砂岩整数阶与分数阶渗流-蠕变模型。王睿^[48]探讨了花岗岩蠕变-渗流声发射特征,得出了花岗岩蠕变破坏以剪切裂缝占比的显著上升为主要特征,并且在高围压条件下,剪切裂缝为主要破坏形式。Wang等^[49]对水力耦合作用下破裂前后的石灰岩和粗砂岩进行了力学和渗透性试验,发现不同水压差通过影响试样的应力条件和微观结构改变试样的物理力学特征,强度、变形模量和渗透性随水压差增加而减小,泊松比增加。Sha等^[50]通过自制的渗流-蠕变耦合试验系统研究渗流作用下富水巷道围岩蠕变特性,发现砂岩相同围压下饱和试样最大蠕变变形大于自然含水试样,随着渗流压力的增加,宏观破坏由拉伸破坏逐渐转变为剪切破坏,微观断裂模式由脆性断裂转变为韧性断裂,最后又变为脆性断裂。Qin等^[51]研究了干湿循环过程中岩石细观结构的损伤情况,并指出在干湿循环作用下岩石细观结构可分为四个变化阶段。Wang等^[52]对尾砂进行了干湿循环条件下的直剪试验和基质吸力试验,并提出了尾砂抗剪强度、黏聚力和内摩擦角在干湿循环作用下的损伤机制。Vergara等^[53]研究了干湿循环作用下智利安第斯山脉中部火山岩的溶胀行为。Hua等^[54]研究了干湿循环作用对砂岩断裂韧性的影响规律。Tang等^[55]采用直剪试验研究了干湿循环对滇中引水工程红砂岩裂缝剪切特性的影响,并建立了干湿循环与力学性能之间的经验关系。Huang等^[56]通过对长江引水淮河工程桐城地区红层泥质粉砂岩进行崩解试验,得出随着干湿循环次数的增加,红层泥质粉砂岩逐渐破碎,大颗粒逐渐转变为小颗粒。杨春和等^[57]研究了板岩泡水后发生软化的过程与机理,并指出随着浸泡时间的增加,吸水率在前期变化明显,后期变化较小,峰值强度随着吸水率增加按负对数规律降低。李鹏等^[58]对砂岩软弱结构面在不同含水率条件下进行了剪切蠕变试验,研究了含水率对砂岩软弱结构面剪切蠕变特性的影响。黄小兰等^[59]通过大庆泥岩在不同含水条件下的蠕变试验,认为含水率的增加在极大程度上降低了泥岩的单轴抗压强度和弹性模量。徐辉等^[60]研究了不同应力状态下干燥砂岩和饱水砂岩的剪切蠕变试验,发现饱水砂岩比干燥砂岩具有更明显的蠕变性。李男等^[61]对干燥砂岩和饱水砂岩进行了剪切蠕变试验,研究表明水能够增大岩石的蠕变应变量和应变速率,并降低蠕变破坏强度值。Müller等^[62]为了描述岩石在蠕变过程中随时间变化的力学性质,提出了一种基于变阶分数阶导数建立蠕变模型的新方法,并基于新方法提出一个改进的Maxwell分数阶蠕变模型。Wu^[63]基于分数阶导数理论,建立了盐岩的黏弹塑性损伤-蠕变模型,将该模型与西原模型进行了比较,并根据分数阶导数的非线性拟合结果对各参数进行了敏感性分析^[64]。陈国庆等^[65]利用统计损伤理论和分数阶积分理论,建立了一个新的考虑温差冻融特征的砂岩蠕变损伤本构模型,其中分数阶的阶数与损伤变量参数变化和蠕变时间效应以及蠕变变形大小密切相关。

综上所述,国内外学者采用理论分析、数值模拟和实验室试验等手段对富水岩体渗流-蠕变作用进行了较为细致的研究。由于岩石所处地质环境复杂,未来的研究应集中在岩石的各向异性对渗流-应力-蠕变共同作用下的强度特性、渗流特性影响等方面。在实际工程中,尤其是在深部地下工程中,受水体作用的岩体不但承受渗流-应力耦合的作用,还将受到爆破振动、高温、化学、地质构造及破碎带等更多因素的干扰,因此后续的工作应集中于更多物理场耦合作用下的巷道围岩多场演化规律的研究,使其更贴近实际工程环境。

1.3 基于数字图像处理的岩石扰动蠕变损伤演化研究现状

随着科技的飞速发展,数字图像处理技术(见图 1-4)已经成为众多领域不可或缺的重要工具。国内外学者对数字图像处理技术开展了丰富的研究。

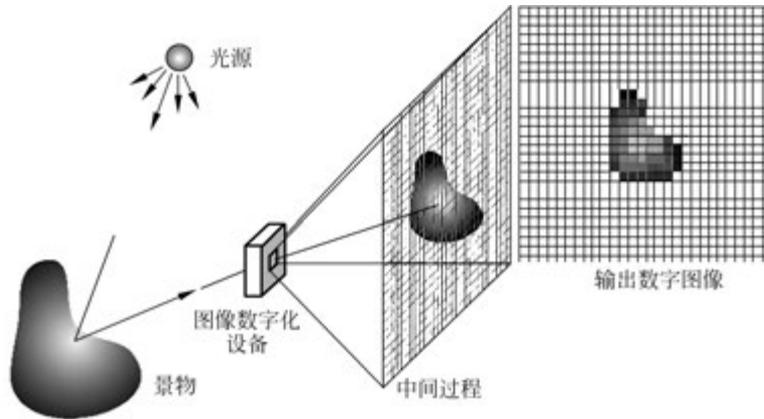


图 1-4 数字图像处理技术

陈高祥^[66]利用优化图像去噪、边缘检测、图像增强等关键技术,显著提高了基于优化算法的数字图像处理技术的效率和质量,实现了在保证图像质量的同时大幅缩短处理时间。与此同时,陈妙燕^[67]则深入探讨了多元信息融合技术在数字图像处理中的应用,通过引入自适应权重融合、多尺度分解、图卷积网络等方法,显著提升了图像处理的精度、鲁棒性和泛化能力。史章潞等^[68]设计了一种针对漆面缺陷识别检测的数字图像处理技术系统,该系统基于局部定向模糊方法和图像对比度增强技术,有效实现了对车身表面小缺陷的检测,并在四川成都的大众工厂生产线上成功试运行,展现出良好的稳健性和可靠性。张琦等^[69]则针对电子元器件外观缺陷检测问题,提出了一种基于数字图像处理技术的检测方法,并通过试验验证了该方法的高准确性和高效率。此外,张万旭^[70]探讨了融媒体中数字图像处理技术的应用,为融媒体的发展提供了包括图像编码压缩、信息处理、修复及分割在内的全方位技术支持。张瑞华等^[71]则研究了数字图像处理技术在建筑设计中的应用,通过采集建筑立面的图像数据,结合虚拟现实技术,实现了建筑立面肌理变化的模拟和分析,创造出逼真的呈现效果。王晋^[72]分析了融媒体时代数字图像处理技术的应用,强调了计算机技术在传媒行业创新和改革中的重要作用,以及数字图像处理技术在整合传媒手段、促进传媒行业进步中的核心价值。

Konara 等^[73]分析了过去五年中数字图像处理技术在作物氮管理中的应用趋势,并指出面临的挑战和机遇,强调了机器学习和深度学习算法与数字图像处理技术相结合在作物氮管理中的巨大潜力。同时,Mdletshe 等^[74]探讨了将计算机技术、数字图像处理和人工智能整合到医学成像本科课程中的可能性,提出了一个旨在提高医学成像教育质量并促使学生应对未来挑战的综合课程框架。在聚合物复合材料领域,Geier 等^[75]开发了四种方法用于检测短切碳纤维增强的聚合物复合材料中的纤维方向。此外,Ivković 等^[76]开发了一个

基于卷积神经网络(CNN)和 Faster R-CNN 的系统,用于高效准确地分类和检测电子废物。Saini 等^[77]则提出了一种基于数字图像和数据处理技术的自动肾结石识别方法,该方法在 CT 扫描和 MRI 图像上表现出色。Agrawal 等^[78]系统回顾了人工智能技术在车削加工中刀具磨损监测的应用,发现基于人工神经网络(ANN)和卷积神经网络的方法在稳定车削操作和在线预测方面展现出的巨大潜力。

近年来,数字图像相关技术(DIC)在蠕变行为的研究中展现出了巨大潜力。宋义敏等^[79]采用分级加载方式对红砂岩进行单轴压缩蠕变试验,以 DSCM 方法对分级加载不同阶段试件表面变形场演化及裂隙位移演化进行观测和分析。储亮等^[80]利用该技术深入研究了微合金化 25Cr35NiNb 钢焊接接头的蠕变变形行为,成功建立了基于双曲正弦函数的蠕变本构模型,并验证了其对焊接接头非均质蠕变变形行为的预测能力。胡江坤^[81]则聚焦于镍基单晶薄壁试样的蠕变行为,利用数字图像相关技术建立了针对薄壁试样的蠕变断裂寿命和蠕变速率预测模型,并验证了模型的精准度。此外,胡江坤等^[82]还介绍了一种基于四平面镜的单相机三维数字图像相关测量系统,该系统能够获取镍基单晶高温合金不同厚度试样的应变曲线和全场变形云图。在岩石领域,王学军^[83]基于三维数字岩心技术,采用 CT 扫描、数字岩心三维重构和数值模拟技术,深入探究了岩石在细观、宏观及工程尺度下的裂缝扩展演化规律。谢军等^[84]则利用数字图像处理技术分析了沥青混合料在蠕变剪切试验前后的粗骨料运动轨迹规律,探讨了颗粒组成对沥青混合料剪切性能的影响。袁畅^[85]进一步研究了沥青混合料的蠕变剪切微观性能,分析了混合料破坏前后不同级配内部各层面孔隙率、CT 数及损伤变量的变化规律,并验证了 DIP-FEM 方法的适用性。徐叶恒等^[86]提出了基于数字图像处理的 A 参数(孔洞晶分数)自动确定方法,通过链码表征孔洞形态特征,并构造 BP 神经网络聚类器进行孔洞模式识别,实现了高判定准确率的孔洞分析。

数字图像相关技术在蠕变研究中得到广泛应用。Tian 等^[87]深入研究了结构各向异性对复合岩石压缩蠕变行为的影响,揭示了瞬态和稳态蠕变参数随倾角变化的各向异性特征。Gilles 等^[88]探索了高温 3D 数字图像相关技术在耐火材料蠕变行为研究中的应用,展示了该技术在测量弯曲和压缩蠕变参数方面的有效性。杨典森等^[89]利用数字图像相关技术研究了金坛盐岩在不同尺度(100 μm 和 1 cm 尺度)下的蠕变损伤演化过程,研究结果表明等速蠕变阶段的宏观与细观局部应变率不相等,细观尺度上的粒间张拉和剪切滑移应变远大于颗粒本身的应变。赵法锁等^[90]通过单轴、三轴压缩蠕变试验,以及对试验前后软岩薄片的电镜扫描对比分析,对该软岩的力学性质、细观特征变化等做了研究。Yang 等^[91]采用数字图像相关技术对不同饱和度和应力水平的非饱和黏土岩的蠕变速率进行测量,发现蠕变应变速率会随水分和应力水平的提高而提高,相对湿度 75%时的应变率比相对湿度 25%时的应变率大一个数量级。徐卫亚和杨圣奇等^[92-94]借助电镜扫描技术(scanning electron microscope, SEM)对进行三轴蠕变试验后的绿片岩破裂面微观形貌进行分析,提出了矿物晶体滑移与解理位移是绿片岩蠕变破坏微细观机理的观点。任建喜^[95]采用计算机断层扫描(computerized tomography, CT)技术实时扫描了单轴蠕变作用下红砂岩的内部损伤演化过程,研究了细观裂缝几何特征(长度与宽度)的时空演化规律。研究表明,岩石的单轴蠕变机理是其内部存在不均匀的初始损伤,导致在恒载作用下岩石损伤演化出现不均匀性和局部化现象。

综上所述,数字图像相关技术在蠕变行为研究中的应用日益广泛,为相关领域的研究提供了重要的技术支持。未来,随着技术的不断进步和应用的深入拓展,数字图像相关技术将在蠕变领域发挥更加重要的作用。

1.4 矿井底板突水孕灾机制研究现状

长期以来,有关密闭含水层中突水的预测和决策技术一直是中国的一个主要研究课题^[96-97]。许多学者都取得了丰硕的成果,如突水系数法(WICM)^[98],下三区理论^[99],原位张力裂缝和零位置失效理论^[100],关键层理论^[101],板块模型理论,以及岩石-水-应力关系的观点^[102]。Mironenko 和 Strelsky^[103]认为,地下水涌流是一个过程,在煤层开采后干扰应力变化的影响下,地下水和岩石的稳定状态变得不稳定。Odintsev 和 Miletenko^[104]认为,在采矿引起的应力减少地区的地下水压力下,裂缝会增长。Cao 等^[105]对断层底板突水进行了深入研究,并建立了断层渗流障碍能力的评价模型。Jin 等^[106]和 Kmab 等^[107]论述了煤层底板突水监测预警的监测条件、指标及技术体系、监测位置选择等基本技术问题。Wu 等^[108]建立了具有高密度水的隐性断层的水涌断裂力学模型(WIFM)。Zhang 和 Duan 等^[109-110]确定了矿井 p 与 M 的临界曲线方程,得出影响矿井突水的主要因素。在过去的 40 年里,中国北方地区发生了超过 200 起与奥多维斯石灰岩含水层有关的水涌事故,造成 300 亿元人民币的经济损失和 1300 多人死亡^[111-112]。唐家会矿区是一个典型的华北型煤田。

底板突水的根本原因是隧道内突水通道的形成和扩大,其演化过程受裂隙形态、构造条件、地应力、水压、岩体扰动作用等多种因素控制。近年来,随着采煤需求的增加,不稳定卸荷条件下渗透性和地应力引起的突水灾害的演化过程变得更加复杂。高压水力压裂引发的不稳定突水灾害已成为工程突水通道形成机理研究的热点。20 世纪 50 年代,国外学者利用弹性理论对水力压裂引起的裂缝与应力场之间的关系进行深入研究。随后,来自多个国家的学者从损伤和裂缝等宏观与微观角度探讨了水力压裂问题。Nolen-Hoeksema 等^[113]通过光学观测得到了宏观岩体裂隙通道的形成过程是从细观微小裂缝的扩展、贯通演化开始的。蒋腾飞^[114]针对较完整和含裂隙防突层提出了考虑爆破效应的最小安全厚度计算公式。李利平^[115]基于防突层条件,借助传统岩梁结构理论,建立了不同性质的防突层失稳突变模型,并给出了具有一定安全系数的突水判据与最小防突层厚度计算公式。Li 等^[116]认为裂隙扩展多属于 II 型裂缝断裂扩展问题,并分析了深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用。杨为民等^[117]设计研制了突水突泥相似材料试验设置,结合工程实际开展,取得了较好的效果。杨天鸿等^[118]针对岩溶陷落柱等进行多场耦合分析,并建立了多相渗流模型。李术才等^[119]系统提出了不同类型突水灾害的发生条件、判据及安全厚度分析方法。很多科研工作者通过室内试验已经认识到判断巷道底板的失稳破坏及其突水孕灾演化是一个综合性问题,目前许多突水判据方法例如突水系数法等,并不适用于受扰动的矿井底板,缺乏扰动对巷道突水通道影响作用的考虑,对矿井受扰动底板突水无法做出有效判断。

尽管国内外学者在动静扰动下岩石蠕变损伤、富水岩体渗流-蠕变耦合特性及突水孕灾机制等领域的研究工作取得了重大进展,但现有研究仍存在以下局限:其一,传统模型多聚焦单一静态或准静态荷载条件,对复杂动静耦合扰动与渗透压力多场耦合作用的动态响应

机制揭示不足,难以准确刻画岩体时效损伤的非线性演化特征;其二,裂隙扩展与突水通道形成的宏细观关联机制尚不明确,现有数字图像处理技术对裂隙动态演化的定量表征精度及多尺度损伤关联分析仍有待深化;其三,突水前兆信息识别多依赖单一物理场参数,缺乏多场耦合作用下临界事件奇异性特征的动态捕捉方法,导致滞后型突水预警可靠性不足;其四,既有突水判据多基于理想化地质条件,未充分考虑扰动作用下底板岩体损伤累积与渗流失稳的协同效应,工程适用性受限。为此,本书利用理论建模、多尺度试验、数值模拟与工程验证相结合的方法,系统揭示动静扰动-渗流耦合作用下底板岩体蠕变损伤演化规律,打破传统模型的物理机制简化“瓶颈”,构建融合分数阶微积分理论与离散元方法的非线性损伤模型,并创新性提出基于多场信息融合的突水前兆识别体系,为富水矿井底板突水灾害防控提供理论支撑与技术范式。

1.5 本书主要内容

本书系统研究动静扰动与渗透压力耦合作用下富水矿井底板岩体的蠕变损伤演化规律及突水孕灾机制,通过理论建模、室内试验、数值模拟与工程应用相结合的方法,揭示了水-岩相互作用对岩体时效变形的影响机理,构建了考虑渗透压力与动态扰动的非线性蠕变损伤模型,并提出了突水危险性评价体系。主要包括:

(1) 岩体蠕变基本理论与水岩耦合效应。系统阐述了渗透压力作用下岩体流变的类型、影响因素及组合模型,揭示了孔隙压力对岩石应力状态的弱化机制和水的软化作用,建立了考虑时效性的水岩耦合蠕变模型。

(2) 多尺度试验与损伤演化规律。通过三轴压缩蠕变试验,结合声发射、数字图像相关技术和扫描电镜,分析了页岩在不同围压、渗透压力及扰动条件下的力学特性、渗透行为及宏观破坏特征,明确了扰动幅值、频率及水压对蠕变速率、裂隙扩展和突水通道形成的敏感性。

(3) 数字图像处理与裂隙定量分析。提出基于改进优先搜索方向的裂隙骨架节点跟踪算法和生长面积算法,自主研发 Fracture Geometry Feature Extraction Tool 软件,实现了岩石裂隙几何特征的高效提取与定量表征,揭示了扰动对裂隙数量、长度及分布的动态影响规律。

(4) 基于离散元的扰动蠕变数值模拟。通过离散元法(DEM)构建了页岩扰动蠕变微观模型,阐明了不同扰动幅值与频率对蠕变曲线、裂缝扩展及损伤演化的影响规律。研究发现,扰动幅值增大显著加速微裂缝的萌生与贯通,高频扰动则导致破坏形态由剪切主导转向张剪复合模式,为预测底板损伤阈值提供了量化依据。

(5) 分数阶非线性蠕变模型的创新。引入分数阶微积分理论,建立了渗透压力与扰动耦合作用下的页岩非线性蠕变损伤模型。该模型成功捕捉了蠕变三阶段特征,并通过参数反演验证了其室内试验的高度吻合性,为复杂应力环境下岩体长期稳定性评估提供了新方法。

(6) 相似材料试验与突水前兆识别。自主研发了动力扰动-渗流耦合试验系统,揭示了开挖扰动下巷道围岩应力释放、渗流通道演化的动态过程。结合声发射技术,提出了基于

RA-AF 参数和临界幂律奇异性理论的突水前兆识别方法,实现了灾变时间的精准预测,填补了滞后型突水预警的技术空白。

(7) 底板突水危险性定量评价体系。以唐家会煤矿为工程背景,构建了基于 Hoek-Brown 准则与临界 p - M 方程的突水判据,综合水文地质参数与扰动系数,实现了底板隔水层稳定性的多因素动态评价,为矿区安全开采提供了科学决策依据。