

岩体破坏突水模型研究现状及突水 预测预报研究发展趋势

杨天鸿¹, 唐春安¹, 谭志宏¹, 朱万成¹, 冯启言²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 在收集整理国内外相关资料的基础上, 从岩体渗流损伤耦合方程、突水试验监测等方面总结目前岩体破坏突水模型及预测预报研究现状, 认为破坏诱发渗透性演化方程和破坏引起有效应力方程的修正是建立描述破坏渗流机制的关键。通过现场实例分析及提出的数值模型的讨论, 提出“采动压力和水压力扰动应力场诱发岩体破裂(微震活动性)是矿山突水前兆本质特征”这一学术思路, 认为突水预测预报研究发展趋势为依托实例工程, 采用渗流耦合力学理论、计算科学技术和高新微震测量技术手段, 在深层次上对采动岩层破坏突水通道形成特征、突水岩层微震活动前兆信息和并行渗流耦合数值仿真结果进行综合反演, 通过微震活动信息来基准标定突水模型, 达到揭示岩层破断突水前兆规律及定位突水通道的目标, 为建立矿山突水灾害预测预报奠定理论基础。

关键词: 岩石力学; 突水模型; 基准标定; 数值模拟; 微震监测

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)02 - 0268 - 10

STATE OF THE ART OF INRUSH MODELS IN ROCK MASS FAILURE AND DEVELOPING TREND FOR PREDICTION AND FORECAST OF GROUNDWATER INRUSH

YANG Tianhong¹, TANG Chun'an¹, TAN Zhihong¹, ZHU Wancheng¹ FENG Qiyang²

(1. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China; 2. School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: Based on extensive literature review, the state of the art of coupled hydromechanical models and in-situ monitoring for groundwater inrush predictions are summarized in detail, based on which, it is proposed that the key issues for describing the seepage characteristics during groundwater inrush are to calibrate the equations for damage-induced evolution of permeability and of effective stress. Depending on in-situ experiments and numerical simulations, a new academic idea, i.e. “the rock microseismicity induced by mining processes and water pressure disturbance is in essence the index of groundwater inrush”, is put forward. Based on case studies, coupled hydro-mechanical theory, high-performance computing technology and microseismic monitoring. The authors propose that the tendency for analyzing and predicting the groundwater inrush is to synthetically inverse the inrush pathway formation, strata microseismic precursor and high performance computing results. And relying on the microseismic monitoring events, the groundwater inrush models are calibrated, which could be used to clarify the precursory characteristics and to locate the inrush pathway. This study will lay theoretical basis for establishing the models to predict the groundwater inrush in underground mining.

Key words: rock mechanics; groundwater inrush models; calibration; numerical simulation; microseismic monitoring

收稿日期: 2006 - 04 - 03; **修回日期:** 2006 - 05 - 10

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50490274); 国家自然科学基金资助项目(50674025, 50204003); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET - 05 - 0290)

作者简介: 杨天鸿(1968 -), 男, 博士, 1991年毕业于中国矿业大学水文地质专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩体水力学及边坡工程方面的教学与研究工作。E-mail: yang_tianhong@126.com

1 引言

采矿活动必然造成地下岩体应力的重新分布和岩体的破裂损伤, 这种损伤极大地改变了围岩的渗透性, 从而导致了顶板、断层带或底板突水并造成安全事故, 为矿井生产的五大灾害之一^[1~6]。据统计^[3], 60% 矿井事故与地下水作用有关, 尤其是在我国华北型煤矿区石炭 - 二叠纪煤层的开采受到底板奥陶系强岩溶含水层的威胁, 自 1956 年到 1999 年, 底板突水发生达 1 386 次, 其中淹井 200 余次, 造成十几个亿的巨大经济损失, 人员伤亡千余人。金属矿山在露天转地下开采过程中, 过渡层“突涌突冒”灾害是威胁其顺利过渡开采的主要因素^[7]。此外, 在深埋长大隧道开挖过程中, 突水灾害问题也十分突出^[8, 9]一直是隧道地质灾害及超前预报的主要内容之一。

随着矿山开采深度的增加, 水压不断增大, 深部开采的水害问题日益严重^[10], 有些矿井因为底板水的威胁而不能开采。目前全国 600 余处国有重点煤矿中受水害威胁的矿井达 285 处, 占 47.5%, 受水害威胁的储量达 2.5×10^{11} t。因此, 开展采动条件下岩体突水机制及监测预测预报研究, 对于采动岩体突水预测与防治、开采方法的改进、安全度的评价具有重大理论意义和实际价值。

2 岩层破断突水机制及力学模型研究现状

早在 20 世纪初, 国外就有人注意到底板隔水层的作用, 认识到隔水层越厚则突水次数越少及突水量越小。20 世纪 40~50 年代, 匈牙利韦格弗伦斯第一次提出隔水层厚度同水压之比的底板相对隔水层的概念, 指出煤层底板突水不仅与隔水层厚度有关, 而且还与水压力有关。其间前苏联学者 B. 斯列萨列夫将煤层底板视作两端固定的承受均布载荷作用的梁, 并结合强度理论, 推导出底板理论安全水压值的计算公式。20 世纪 60~70 年代, 匈牙利国家矿业技术鉴定委员会将相对隔水层厚度的概念列入《矿业安全规程》, 并对不同矿井条件作了规定和说明。前苏联、南斯拉夫等国的学者这期间也开始研究相对隔水层的作用, 包括采空区引起的应力变化对相对隔水层厚度的影响, 以及水流和岩石结

构关系等。20 世纪 70~80 年代末期, 很多国家的岩石力学工作者在研究矿柱的稳定性时, 研究了底板的破坏机制。其中最有代表性的是 C. F. Santos, Z. T. Bieniawski。他们基于改进的 Hoek-Brown 岩体强度准则, 并引入临界能量释放点的概念分析了底板的承载能力。世界上一些主要采矿国家, 如美国、加拿大、澳大利亚以及欧洲国家(俄罗斯等), 由于矿床水文地质条件远不如我国复杂, 所以开展这方面的研究^[11~13]不多。而我国矿山突水问题一直是制约矿山安全生产的重大技术难题, 针对矿山生产过程中断层突水、底板突水和岩溶突水预测与防治问题, 我国学者^[1~6, 14~19]开展了大量的科研工作, 在隐伏陷落柱探测与防治、煤层底板测试与突水预测预报、带压开采、浅层帷幕截流和控制疏水技术方面, 取得了一定的突破, 提出了突水系数法、突水临界指数法、“下三带”理论、原位张裂和零位破坏理论、板模型理论、关键层理论、突变及非线性模型、突水优势面理论、底板突水的动力信息理论、强渗流说、相似理论法、岩 - 水应力关系说等突水判据和理论, 形成了包括防水煤岩柱留设、双降采煤、底板注浆等突水防治方法。目前这些成果为防治煤矿底板突水起到了积极的指导作用。但也存在明显的弱点^[2]: 不能解释涌水量和岩层破坏程度的关系, 把岩体和水分开研究, 实际上是没能考虑渗流与破坏的相互作用, 因此, 从应力场与渗流场共同作用方面研究突水规律, 将更与实际相吻合。

3 岩体渗流破坏问题的数值模型研究

随着计算机技术的发展, 数值模拟方法在岩石渗流力学领域中得到了越来越广泛的应用, 由此也产生了许多数值计算方法。数值模拟方法可以综合考虑多方面因素, 而且其计算结果直观、可视化。针对突水的渗流 - 损伤耦合作用机制, 一般需要在 FLAC, UDEC 等商业程序或者基于弹塑性力学、断裂力学和损伤力学理论的数值模型中引入介质断裂、损伤判断准则, 嵌入描述介质破坏膨胀区渗透性 - 损伤演化方程, 研究水力劈裂或突水过程的渗流 - 损伤耦合行为^[20~28]。

应用传统的弹塑性理论和有限元方法, 一般是分析计算弹性和塑性区, 建立塑性变形和渗透率的关系方程来解释渗流 - 应力的演化机制^[14~16, 22, 23]。上述模型通过判断塑性区或变形引起的渗透性的改

变来定义突水通道，对于破坏后水压力的导升传递作用机制没有进行深入讨论。

基于断裂力学理论的数值分析中，一般基于线弹性或非线性的断裂力学理论^[24]，这种方法假设材料是连续的，预测裂纹萌生的基础在于将计算出的应力强度因子与岩石的断裂韧度作比较。它的缺点是不能预测裂纹的萌生，同时对于某些假定的初始裂纹、裂纹本身临界尺寸(包括过程区)、本构关系(应力与裂纹张开位移之间的关系)需要人为确定^[25]。目前已建立的基于断裂力学的数值模型有分离裂缝模型(discrete crack model)、分布裂缝模型(smearred crack model)和内嵌单元裂缝法(element-embedded crack approach)。黄润秋等^[8]、朱珍德和胡定等^[26]、C. Wolkersdorfer 和 R. Bowell^[11]、K. Noghabai^[27]应用断裂力学方法或数值模型研究隧道开挖、矿山开采、带孔的圆环油压胀裂等水力劈裂现象，探讨水压力对裂纹扩展的力学机制。

连续损伤力学是研究材料和结构损伤、破坏过程机制的重要工具，在岩体力学领域得到应用，显示出良好发展前景。P. Valko 和 M. J. Economides^[28]用 Kachanov 和 Perkins-Kern-Nordgren 损伤模型模拟分析水压致裂作用下岩石的损伤和开裂过程。杨延毅和周维垣^[29]、朱珍德和孙钧^[30]、郑少河和朱维申^[31]建立了裂隙岩体渗流场与损伤场耦合分析模型，并成功应用边坡渗流破坏、矿井突水灾害机制模拟。

此外，L. Li 等^[32, 33]用 Particle 模型耦合渗流压力研究水压致裂过程。上述模型实际上是一种细观力学模型，该模型的主要优点是它们具有描述细观结构微裂纹的力学特性的能力，能把岩石宏观力学行为和裂纹发展的微结构机制相联系。

4 突水实例分析及数值模拟

本节首先通过兖州杨村煤矿突水的实测资料说明突水发生机制，强调做到超前预测、预报的重要性，为后面说明本文提出研究思路的合理性、科学性提供实际依据。其次，提出作者初步建立的岩层破裂突水的二维模型，阐明考虑水-力耦合作用机制研究突水过程的必要性。

4.1 杨村煤矿突水实例分析

杨村煤矿位于山东省兖州市，煤层埋藏的平均深度为 300 m。煤层底板按深度依次有 12, 13, 灰

和奥陶系等灰岩含水层，它们之间通过断层建立了水力联系，奥陶系位于煤层以下 30~60 m，富水性强，水压高达 3~5 MPa，对煤层的开采构成了严重威胁，发生过多起突水事故，严重影响矿山安全生产。为了确定工作面的推进过程中底板的破裂深度，分别在采前和采后对 3701 和 2602 工作面进行了现场底板岩体压水试验。两个工作面采前、采后压水试验结果表明，采后单位时间水流量和渗透系数明显增大，比采前增大了 8.5 倍，根据注水孔位置确定采动底板破坏深度为 9.96~12.35 m^[34]。3701 工作面力学模型如图 1 所示。

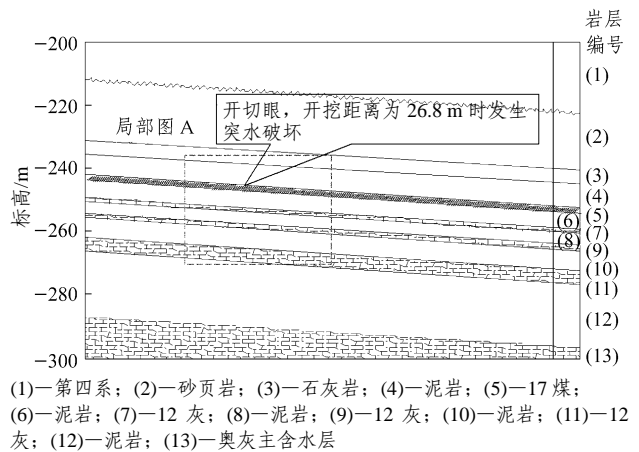


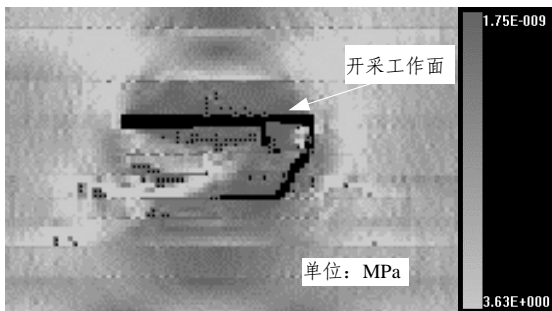
图 1 承压水下采矿工作面力学模型
Fig.1 Mechanical model of the double longwall mining geometry above the confined limestone aquifer

完整底板的突水机制，煤层开挖后(一般达到 20~30 m)，在扰动应力和底板水压力作用下，采空区工作面中间发生鼓胀变形直至拉张破坏，煤壁下方发生剪切破坏，两种裂隙不断向下发展直到和含水层贯通发生突水事故。所以要做到突水超前预测、预报，掌握岩层破坏突水通道分布及发展过程十分关键。

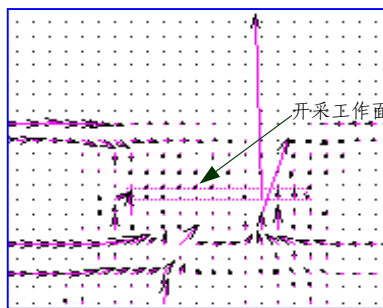
4.2 应用本文数值模型得到的模拟结果

作者以岩石破坏过程中渗流规律演化的试验结果为依据，以损伤力学、经典渗流力学基本理论为基础，引入弹性损伤本构关系、损伤变量和渗透系数、孔隙水压力关系方程，建立描述岩石渗流-损伤耦合模型^[35, 36]。在这个模型中，单元在开裂破坏过程中流体压力传递通过单元渗流-损伤耦合迭代来实现。该模型能够对岩体在水压力和荷载作用下裂纹的萌生、扩展过程中渗透率演化规律及其渗流-应力耦合机制进行模拟分析。有关模型的详细介绍参见相关研究^[35~39]。

以 3701 工作面为例(岩层按水平分布做简化处理), 应用自行开发的岩石破裂过程渗流 - 应力耦合分析系统(二维)能够从流固耦合的角度直观地得到了采动条件下岩层裂隙发展、贯通以及整个底板发生突水的过程, 对底板的易发生突水部位进行了预测^[34]。模拟得到以下几点结论(见图 2): (1) 当回采工作面推进到 26.8 m 时, 在隔水层的两个约束端产生拉剪破坏区, 该破坏区和 12 灰贯通, 在此部位形成通道并发生突水; (2) 突水后在通道处的位移、流量和水力梯度都发生突变增加, 垂直流量达到 $650 \text{ m}^3/\text{dm}$, 向上鼓起位移为 700 mm; (3) 随着拉剪破坏区的形成, 底板破坏深度急剧增大, 造成 12 灰到 13 灰及其之间的隔水层依次发生破坏, 破坏深度达 13 m, 由于 12, 13 灰水量较小, 同时当它们没有和水压、水量较大奥灰巨厚含水层贯通时, 对矿井不会产生灾难性的突水事故, 反之, 当它们和奥灰巨厚含水层存在连通性的陷落柱或导水断层时, 奥灰巨厚含水层中的水将依次沿着 14, 13, 12 灰和 12 灰上的裂隙通道进入采空区, 这时会产生灾难性的突水破坏。



(a) 应力场



(b) 渗流场

图 2 工作面突水过程的应力、流量分布数值模拟结果(图 1 中局部图 A)

Fig.2 Numerical simulation results of stress and flow rate during the progressive formation of a continuous groundwater inrush path linking the mining face to the aquifers

由此可知, 开采期间, 间接加强对 12, 13 和 14 灰水量、水压观测, 相应地确定对应位置岩层破坏突水通道部位, 这进一步表明, 建立岩体渗流 - 破裂耦合模型才能够深刻认识岩层突水破坏力学本质, 对于底板突水防治和预测预报具有重要的科学意义。

5 岩体渗流破坏演化机制研究

研究岩石破坏渗流的数值模型很多, 而对于岩层突水问题, 采动应力和水压力作用下岩层破断渗流通道的形成过程是突水机制研究的核心内容和关键问题^[6], 其破坏过程和水力压裂机制一样, 是水压驱动下岩层裂纹萌生、扩展并跟踪传递, 直到最后贯通导致失稳破裂的复杂过程。在适合突水机制研究的数值模型中, 关键问题是建立描述岩体破裂后渗透率的突变和水压的跟踪传递规律的方程, 这样不但区分隔水单元和导水单元不同的水压作用的机制, 而且能正确解释岩体破裂后从隔水层变成导水通道层的演化过程。因此, 数值模型的可靠性依赖下述两方面的基本原理。

5.1 破坏诱发渗透性演化方程

近 20 a 来, 随着先进的试验设备和方法的不断研制开发, 能够测定出特定条件下岩石变形、渐进破裂过程中孔隙结构变化引起渗透性演化规律及其对宏观力学行为的响应。许多学者^[40~56]进行了大量关于岩石应力应变渗透率方面的试验研究工作, 最初的研究是通过三轴压缩试验研究岩石峰值前后的渗透率变化规律, 正如 S. Paterson^[40]代表性的总结。

对于该问题, W. Zhu 和 T. F. Wong^[41]在围压范围从 13~550 MPa、孔隙压力为 10 MPa 的条件下, 通过对于低孔隙率(<5%)的砂岩和高孔隙率(>10%)的塑性岩石的试验研究, 认为低孔隙率岩石和高孔隙率(或破碎带)岩石在压应力作用下, 裂纹萌生、发展有不同的机制。低孔隙率岩石产生不可恢复的变形和破坏是由于渐进的损伤中小尺度微裂纹萌生、发展和贯通形成大尺度的裂纹和断层, 所以岩石膨胀变形明显, 渗透率增加; 高孔隙率(或破碎带)岩石的变形机制包括沿原有裂纹和颗粒边界的滑动、矿物颗粒位错移动等, 新的微裂纹萌生较少, 岩石以压缩变形为主, 渗透率减小。由此可知, 膨胀变形导致的孔隙率增加是岩石渗透率增大的直接原因。

为此, N. Cristescu 和 U. Hunsche^[42]在八面体剪

切应力状态下将岩盐划分为 3 个区：压缩区、微破裂发展形成的膨胀区和峰值强度后的破坏区。提出了在强度包络线内盐岩由非膨胀到膨胀变形的转变，建立了膨胀边界方程。只要应力状态保持在非膨胀应力区域，那么盐岩通常处于压缩状态而不产生膨胀裂纹。认为在膨胀区和破坏区岩石的渗透性都要发生增大。O. Schulze 等^[43]验证了盐岩的膨胀边界，认为只要应力状态保持在非膨胀应力区域，那么盐岩通常不产生膨胀裂纹。试验通过超声波速率和渗透率测试来研究由膨胀应力范围内的应变引起的膨胀破坏，并认为岩石材料的破裂导致损伤和其渗透性具有一致性，据此建立了裂纹扩展、体积膨胀和渗透率的关系，得出损伤(孔隙率)和渗透性受到多个参数的影响，其中最主要的就是最小主应力和加载条件。

目前的室内试验研究比较系统，初步建立了损伤、体积膨胀、孔隙率等参数和渗透性的关系，W. F. Brace^[44]在一次回顾中也着重强调，随着变形的增加，岩性和孔隙、微裂隙结构等因素对应力-渗透性关系影响的比较复杂。O. Schulze 等^[43]基于岩盐、M. T. Oda 等^[45]基于花岗岩、韩宝平等^[46]基于碳酸盐、J. A. Wang 和 H. D. Park^[22]基于沉积岩、W. Zhu 和 T. F. Wong^[41]基于不同孔隙度砂岩的研究结论，应该说比较全面地揭示了不同岩性应力、损伤和渗透率的关系。关于沉积岩中损伤演化规律，最重要的争论是体应变对孔隙度和渗透率决定性影响和使用 CAP 模型模拟压缩过程的必要性。对沉积岩这种多孔岩石损伤中像应变局部化、压实带、体应变、脆-延破坏过渡等应变局部化都是建立突水模型的关键问题^[49~54]。

5.2 破坏引起有效应力方程的修正

Terzaghi 提出的有效应力原理是研究应力和流体孔隙压力共同作用下岩土介质整体的宏观力学响应的一个基本和重要的力学方程，M. A. Biot^[55]修正了有效应力原理，提出有效应力系数的概念。所以，有效应力原理的等效性反映在有效应力系数的取值上，这个系数的取值范围一直是一个有争议的问题，M. Bai 和 D. Elsworth^[56]对这个问题进行了系统的回顾分析。

对于修正的 Terzaghi 有效应力原理在岩石材料中的应用，J. B. Walsh, Krang, A. A. Borisewko 等作了大量的试验研究验证 α 的等效性，尤其是 M. S. Bruno 和 F. M. Nakagawa^[57]对含双缺口的岩样进行

孔隙水压力试验，并和 P. W. Bridgeman^[58], J. R. Rice 和 M. P. Cleary^[59]进行的没有孔隙水压力时直接拉伸试验进行对比，得到等效的孔隙水压系数。Y. Bernabe^[60]、赵阳升^[61]通过试验研究证明了孔隙压力与孔隙、裂隙密度密切相关。

实际上，孔隙、裂隙、节理等缺陷结构的密度和尺度不同，尤其是裂纹扩展，他们的流体压力对岩石整体的力学响应也是不同的，这表明单一的孔隙水压力系数不能区分在孔隙和裂隙中流体压力对介质变形的影响，Terzaghi 也认为，有效应力的概念应该包含对变形和破坏两种独立的现象的解释。所以，Wilson 和 Aifantis 在单孔弹性介质(singleness-porosity model)解析方法的基础上，提出了用于双重弹性介质模型(dual-porosity model)的有效应力准则，分别定义了 α_1 和 α_2 来描述孔隙和裂隙的变形及其水压作用机制^[56]。Z. Xing 等^[62]等用双重渗流模型分析了裂隙水压力作用效果的重要性。

对于岩石类材料破坏后的有效应力表达，Y. Bernabe^[60]的工作十分重要，他通过理论推导和试验研究提出了材料破坏前后的有效应力表达方程，对于裂纹单元，可以近似认为 $\alpha = 1$ 。

5.3 关于模型研究的发展趋势

由此可知，破裂发展是突水研究的本质特征，同时岩石破坏模式的复杂性，使得建立统一的渗流破坏耦合方程十分困难，所以建立适合某种岩石材料的突水渗流耦合方程及其数值模型必须通过基准台标定和验证。国外学者在这方面做了大量卓有成效的研究工作：

M. T. Oda 等^[45]通过花岗岩的损伤扩展的三轴试验及瞬时脉冲试验，认识到渗透性变化与损伤发展密切相关，他的结论是脉冲试验对渗透性的观测在分析高损伤的花岗岩时十分有意义。O. Schulze 等^[43]认为超声波速率和渗透率测试是研究由岩盐膨胀应力范围内的应变引起的膨胀破坏的一种有效方法。

M. Souley 等^[63]通过加拿大的核废物处理的地下试验，研究了地下洞室围岩的开挖扰动区域(EDZ)的开挖损伤范围、渗透性和水压分布。他们用测量花岗岩的渗透性的实验室三轴试验结果建立了损伤变量和渗透性变化之间的关系，在三维显式有限差分程序 FLAC^{3D} 中实现了各向异性损伤模型的扩展。这个模型对在开挖区附近与微裂纹的发展和它们的连通性相关的渗透性变化有很好的指示。矿房

围岩附近微裂纹的发展导致渗透性的改变的计算结果通过和原位测量的比较得到了检验。他们的工作将渗流 - 损伤耦合模型应用于实际工作, 对于推动渗流 - 损伤耦合模型的标定研究具有重大的现实意义。

从 1995 年开始由瑞典、美国、日本等 7 个国家 14 个研究机构联合进行了 DECOVALEX 的国际合作项目, 对岩体的热、水、力耦合模型进行了一系列的案例标定试验(test cases, TC)及基准台试验(bench mark tests, BMT)研究^[64-67], 以验证数值模型的可靠性, 每年的研究经费高达 1 亿欧元。DECOVALEX 国际合作项目通过大量的标定和 THM 耦合模型修正试验, 认识到流体运移和热对流变化对局部裂纹扩展过程较敏感, 缺乏合理、细致的解释; 受缺陷和裂纹扩展影响, THM 耦合模型存在不确定性。他们认为不考虑裂纹扩展作用的 THM 耦合数值模型是不可靠的^[67]。

由此可知, 突水机制及模型正确性的关键是岩层破坏通道的形成, 所以突水数值模型分析必须和现场岩体破坏监测结果相结合, 使分析模型能够依据现场微震监测结果变化动态调整, 这样的突水预测、预报方法更能符合实际。

6 矿山突水监测技术研究现状

在采矿过程中, 由于煤层底板或断层应力场发生了变化, 承压水的入侵高度沿断层带或破断的底板向上发展产生递进导升现象, 以致造成突水。因此, 突水过程具有岩体应力、渗透性变化, 水压升高、涌水量增大等一系列前兆。这些前兆是突水预测、预报的依据, 通过传感器对应力、水压的变化幅度等信息进行分析处理, 来反演突水区域, 进而计算突水点的位置。煤层底板或陷落柱突水监测预警系统的基本工作流程是: 物探确定煤层底板或陷落柱水文地质异常区→在工作面煤层底板薄弱的部位施工若干钻孔→在预定的位置、按照特定的工艺埋设传感器→监测煤层底板特定位置的温度、水压、特征例子、应力、应变(对于底板突水预警)或断面位移、渗透压力、特征例子(对于陷落柱)→将传感器与数据采集发射器连接→连接地面测控中心→实时监测、数据处理、水情预警→远程中心监测。

早在 20 世纪 80 年代, 国内煤炭科学研究总院西安分院在淮南新庄孜煤矿进行了大规模的煤层底

板试验, 试验的内容包括: 矿压、位移观测, 采矿对断层扰动观测和底板破坏深度观测(注水试验)等。得到了底板深部超前破坏和采矿扰动深度等重要数据, 试验和理论证实了煤层底板突水预测的可能性。20 世纪 90 年代初煤炭科学研究总院西安分院又通过工业性试验的形式在多个大水煤矿进行了矿山控制测量、注水试验、矿压测试等大量的底板试验; 90 年代中期, 煤炭科学院的系统又测量了底板突水前的位移、钻孔中水压的变化和弹性波的变化, 发现了突水前的物理量的变化指标, 研制了煤层底板突水前兆监测仪器, 开发了相应的岩水耦合的突水判别模型。目前国内矿山对于突水监测做了大量的工作^[68-71], 采用抗地电干扰的瞬变电磁仪、红外探测仪、三维高分辨率目标地震勘探仪、综合物探和超前钻探法等综合方法探测突水点, 取得了较好的效果。但是主要工作还是围绕应力、水压等信息的变化对高压富水区、导水断层和岩溶陷落柱进行探测, 缺乏对岩体破坏突水通道形成过程的动态监测和预报监测。

试验结果表明: 随着岩石被逐渐加压, 其内在微缺陷被压裂或扩展或闭合, 此时产生能级很小的声发射, 当裂纹扩展到一定规模、岩石受载强度接近其破坏强度的一半时, 开始出现大范围裂隙贯通并产生能级较大的声发射, 称之为“微震”或 MS。当压力越接近岩石的极限强度时, 微震事件的次数越多, 直至岩石破坏^[72]。每一个微震信号都包含着岩体内部状态变化的丰富信息, 对接收到的微震信号进行处理、分析, 可作为评价岩体稳定性的依据。所以, 微震监测、定位等方面的地球物理方法, 是矿山岩层破断、突水、瓦斯突出等灾害研究中十分有效的监测手段^[73]。美国、加拿大、澳大利亚、前苏联等国家早在 20 世纪 70 年代把微震监测方法应用于矿山岩爆等灾害预测, 国内徐州矿务局三河间等煤矿^[74]、凡口铅锌矿等冶金矿山^[75]针对岩爆或冲击地压也进行了微震监测研究。

美国等发达国家在石油开采中广泛应用测震技术分析水压致裂过程, 认为跟传统的测试方法比较, 可以实时监视岩层破裂带扩展过程并能以高精度测量破裂带几何参数, 如破裂带的长、宽和高^[76-77], 而且能估计破裂带扩展方向及速率。同理(突水与水压致裂机制一致), 目前矿山突水灾害的监测、预测, 不能只监测岩体涌水量、水压力这些表象特征, 必须寻找突水量增大的本质机制和前兆规律——岩层

破坏导水通道的形成, 加强突水过程中对岩层破坏微震活动性规律及定位的监测分析。

目前, 高性能的微震监测技术、网络传输技术、并行计算技术、渗流耦合力学理论方法的发展为矿山突水等灾害分析预报方法的研究提供了技术手段。同时, 突水灾害具有震源区可接近性(如采空区), 空间上具有多发性、高重复性、区域固定性、地质构造的明确性和在时间上的可控性(如调整开采进度或顺序)等特点, 因此, 开展矿山突水灾害的预测预报在空间、时间上都具有许多便利条件:

(1) 可以对矿体和围岩的力学性质有一个总体的了解, 这对于分析矿山突水灾害产生的部位和原因, 特别是寻找矿山突水灾害与地质结构的联系(尤其是占突水事故 80%的断层突水, 可进行断层区域的重点布控), 具有重要的参考价值。

(2) 矿山突水灾害的发生往往与已知的人工开挖过程(即干扰)具有特定的联系。可以在矿山整个开采过程中观测和记录矿山突水灾害前兆、空间和时间序列过程, 分析他们与开采过程的联系, 对于矿山突水灾害发生的机制和预测预报无疑具有重要的作用。

(3) 建立典型开采工作面尺度范围的三维地质力学模型是可能的, 从而可以对进行开采过程诱发突水可能性的应力场、渗流场和损伤场分析。只有建立在三维实体应力分析基础上的微震活动性时空分布规律分析, 才更有牢固的物理力学理论基础, 才有可能对开采过程中的矿山突水现象和机制进行更加深入有效的研究。

7 结 论

已往的研究表明, 只通过建立三维突水力学模型进行渗流-损伤数值模拟分析, 模型的可靠性和适用性缺乏实际监测反馈信息的验证; 同时孤立地进行突水的微震监测, 对于结果的解释和机制分析缺乏理论依据和进一步的突水预测预报的可靠性。所以, 在突水的微震监测结果分析中, 充分考虑背景应力场、损伤场、渗流场的内因影响和联系, 无疑是开展突水通道预测预报研究的新思路。两种方法从不同角度有机结合, 互为补充: 数值模拟方法可以帮助理解所观测到的微震活动的特征和模式; 微震监测数据可以和数值模拟分析结果互为修正敏感的系统参数和标定模型。

据此, 本文提出“采动压力和水压力扰动应力场诱发微破裂(微震活动性)是矿山突水前兆本质特征”这一学术思路, 依托实例工程, 采用渗流耦合力学理论、并行计算科学技术和高新微震测量技术手段, 在深层次上对采动岩层破坏突水通道形成特征、突水岩层微震活动前兆信息和并行渗流耦合数值仿真结果进行综合反演: 通过应力场、损伤场和渗流场的演化来解读微震活动性规律, 通过微震活动信息来基准标定突水模型, 达到揭示岩层破断突水前兆规律及定位突水通道的目标, 为建立矿山突水灾害预测预报奠定理论基础。

致谢 本文得到山东科技大学施龙青教授指导, 参考了煤炭科学研究总院西安分院研究报告, 在此表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 彭苏萍, 王金安. 承压水体上安全采煤[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.(PENG Shuping, WANG Jin'an. Safely coal mine on the confined aquifer[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2001.(in Chinese))
- [2] 张金才, 张玉卓, 刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水[M]. 北京: 地质出版社, 1997.(ZHANG Jincai, ZHANG Yuzhuo, LIU Tianquan. Rock mass permeability and coal mine water inrush[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.(in Chinese))
- [3] 仵彦卿, 张倬元. 岩体水力学导论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995.(WU Yanqing, ZHANG Zhuoyuan. Introduction to rock mass hydraulics[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995.(in Chinese))
- [4] 钱鸣高, 缪协兴, 徐家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2000.(QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin, et al. Key strata theory in ground control[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2000.(in Chinese))
- [5] 赵阳升, 胡耀青. 承压水上采煤理论与技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.(ZHAO Yangsheng, HU Yaoqing. Theory and technology of coal mine on the confined aquifer[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2004.(in Chinese))
- [6] 施龙青, 韩进. 底板突水机制及预测预报[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2004.(SHI Longqing, HAN Jin. Floor water-inrush mechanism and prediction[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2004.(in Chinese))
- [7] 李元辉, 南世卿, 赵兴东, 等. 露天转地下境界矿柱稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 278-283.(LI Yuanhui, NAN Shiqing, ZHAO Xingdong, et al. Stability of boundary pillars for

- transition from open pit to underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 278 - 283.(in Chinese))
- [8] 黄润秋, 王贤能, 陈龙生. 深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(9): 573 - 576.(HUANG Runqiu, WANG Xianneng, CHEN Longsheng. Hydro-splitting off analysis of underground water in deep lying tunnels and its effect on water gushing out[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(9): 573 - 576.(in Chinese))
- [9] 白明洲, 许兆义, 王 勳. 长大隧道施工过程中突水突泥灾害预测预报技术研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(6): 123 - 126.(BAI Mingzhou, XU Zhaoyi, WANG Meng. Study on the technology of advance forecasting underground water and mud in rush during tunnel construction in karst area[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(6): 123 - 126.(in Chinese))
- [10] 何满潮, 谢和平, 彭书萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 803 - 2 813.(HE Manchao, XIE Heping, PENG Shuping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 803 - 2 813.(in Chinese))
- [11] WOLKERSDORFER C, BOWELL R. Contemporary reviews of mine water studies in Europe[J]. Mine Water and the Environment, 2004, 23: 161.
- [12] SALIS M, DUCKSTEIN L. Mining under a limestone aquifer in southern Sardinia: a multiobjective approach[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1983, 1(4): 357 - 374.
- [13] KUZNETSOV S V, TROFIMOV V A. Hydrodynamic effect of coal seam compression[J]. Journal of Mining Science, 2002, 39(3): 205 - 212.
- [14] 尹尚先, 武 强, 王尚旭. 北方岩溶陷落柱的充水特征及水文地质模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 77 - 82.(YIN Shangxian, WU Qiang, WANG Shangxu. Water-bearing characteristics and hydro-geological models of karstic collapse columns in north China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 77 - 82.(in Chinese))
- [15] WANG J A, PARK H D. Coal mining above a confined aquifer[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(4): 537 - 551.
- [16] 郑少河, 朱维申, 王书法. 承压水上采煤的固流耦合问题研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(7): 421 - 424.(ZHENG Shaohe, ZHU Weishen, WANG Shufa. Study on the coupling problem between flow and solid of mine in confined aquifer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(7): 421 - 424.(in Chinese))
- [17] 白晨光, 黎良杰, 于学馥. 承压水底板关键层失稳的尖点突变模型[J]. 煤炭学报, 1997, 22(2): 149 - 154.(BAI Chenuang, LI Liangjie, YU Xuefu. Cusp catastrophe model for instability of key stratum in floor with water inrush[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(2): 149 - 154.(in Chinese))
- [18] 王连国, 宋 扬. 煤层底板突水突变模型[J]. 工程地质学报, 2002, 8(2): 160 - 163.(WANG Lianguo, SONG Yang. A catastrophic model of water inrush from coal floor[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 8(2), 160 - 163.(in Chinese))
- [19] 李白英. 预防矿井底板突水的“下三带”理论及其发展与应用[J]. 山东矿业学院学报(自然科学版), 1999, 8(4): 11 - 18.(LI Baiying. “Down three zones” in the prediction of the water inrush from coal bed floor aquifer—theory, development and application[J]. Journal of Shandong Institute of Mining and Technology(Natural Science), 1999, 8(4): 11 - 18.(in Chinese))
- [20] WU Q, WANG M, WU X. Investigations of groundwater bursting into coal mine seam floors from fault zones[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(4): 557 - 571.
- [21] ZHANG J C, SHEN B H. A coal mining under aquifers in China: a case study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(4): 629 - 639.
- [22] WANG J A, PARK H D. Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress-strain process[J]. Engineering Geology, 2002, 63(2): 291 - 300.
- [23] ZHANG J C. Stress-dependent permeability variation and mine subsidence[C]// Pacific Rocks 2000. Rotterdam: A. A. Belkema, 2000: 811 - 816.
- [24] CHARLEZ P A. Rock mechanics(II: petroleum applications)[M]. Paris: Technical Publisher, 1991.
- [25] 孙秀堂, 常 成, 王成勇. 岩石临界 CTOD 的确定及失稳断裂过程区的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(4): 312 - 319.(SUN Xiutang, CHANG Cheng, WANG Chengyong. Determination of rock mechanics and analysis of instable rupture zone for rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(4): 312 - 319.(in Chinese))
- [26] 朱珍德, 胡 定. 裂隙水压力对岩体强度的影响[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 64 - 67.(ZHU Zhende, HU Ding. The effect of interstitial water pressure on rock mass strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 64 - 67.(in Chinese))
- [27] NOGHABAI K. Discrete versus smeared versus element-embedded crack models on ring problem[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(6): 307 - 314.
- [28] VALKO P, ECONOMIDES M J. Propagation of hydraulically

- induced fractures—a continuum damage mechanics approach[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1994, 31(3): 221 - 229.
- [29] 杨延毅, 周维垣. 裂隙岩体的渗流 - 损伤耦合分析模型及其工程应用[J]. *水力学报*, 1991, (5): 19 - 27.(YANG Yanyi, ZHOU Weiyuan. A coupled seepage-damage analysis model for jointed rock masses and its application to rock engineering[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991, (5): 19 - 27.(in Chinese))
- [30] 朱珍德, 孙 钧. 裂隙岩体非稳态渗流场与损伤场耦合分析模型[J]. *水文地质工程地质*, 1999, 26(2): 35 - 42.(ZHU Zhende, SUN Jun. Coupled analysis of unsteady state seepage field and damage field in fractured rock mass[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1999, 26(2): 35 - 42.(in Chinese))
- [31] 郑少河, 朱维申. 裂隙岩体渗流损伤耦合模型的理论分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(2): 156 - 159.(ZHENG Shaohu, ZHU Weishen. Theoretical analysis of a coupled seepage damage model of fractured rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(2): 156 - 159.(in Chinese))
- [32] LI L, HOLT R M. Simulation of flow in sandstone with fluid coupled particle model[C]// *Rock Mechanics in the National Interest*. [S. l.]: Swets Zeitinger Lisse, 2001: 165 - 172.
- [33] BRUNO M S, DORFMANN A, LAO K. Coupled particle and fluid flow modeling of fracture and slurry injection in weakly consolidated granular media[C]// *Rock Mechanics in the National Interest*. [S. l.]: Swets Zeitinger Lisse, 2001: 173 - 180.
- [34] 冯启言, 杨天鸿, 于庆磊. 底板突水过程的渗流 - 损伤耦合机制及数值模拟研究[J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(3): 1 - 4.(FENG Qiyang, YANG Tianhong, YU Qinglei. Numerical simulation on water inrush from the seam floor based on the coupled analysis of seepage and damage[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(3): 1 - 4.(in Chinese))
- [35] TANG C A, THAM L G, LEE P K K, et al. Coupled analysis of flow, stress and damage(FSD) in rock failure[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(4): 477 - 489.
- [36] YANG T H, THAM L G, TANG C A, et al. Influence of heterogeneity of mechanical properties on hydraulic fracturing in permeable rocks[J]. *Rock Mech. Rock Eng.*, 2000, 37(4): 251 - 275.
- [37] 杨天鸿, 唐春安, 刘红元, 等. 承压水底板突水失稳过程的数值模型初探[J]. *地质力学学报*, 2003, 9(3): 281 - 288.(YANG Tianhong, TANG Chun'an, LIU Hongyuan, et al. Numerical model of the instability-failure process of the coal-bed floor due to confined water inrush[J]. *Journal of Geomechanics*, 2003, 9(3): 281 - 288.(in Chinese))
- [38] YANG T H, WANG S H, LI L C, et al. Numerical simulation on instable failure process of floor in confined aquifer[M]. Beijing: Science Press, 2001: 37 - 43.
- [39] YANG T H, LIU J S, TANG C A. A coupled flow-stress-damage model for groundwater inrushes from an underlying aquifer into mining excavations[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(1): 87 - 97.
- [40] PATERSON S. Experimental deformation of rocks: the brittle field[M]. Berlin: Springer, 1978.
- [41] ZHU W, WONG T F. The transition from brittle faulting to cataclastic flow: permeability evolution[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(B2): 3 027 - 3 041.
- [42] CRISTESCU N, HUNSCHE U. Time effects in rock mechanics[C]// *Series, Materials, Modelling and Computation*. Chichester: Wiley, 1998: 342 - 438.
- [43] SCHULZE O, POPP T, KERN H. Development of damage and permeability in deforming rock salt[J]. *Engineering Geology*, 2001, 61(1): 163 - 180.
- [44] BRACE W F. A note on permeability change in geologic materials due to stress[J]. *Pure Appl. Geophys.*, 1978, 116: 627 - 633.
- [45] ODA M T, TAKEMURA A, AOKI T. Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of Inada granite[J]. *Mechanics of Materials*, 2002, 34(2): 313 - 331.
- [46] 韩宝平, 冯启言, 于礼山, 等. 全应力 - 应变过程中碳酸盐岩渗透性研究[J]. *工程地质学报*, 2000, 8(2): 127 - 128.(HAN Baoping, FENG Qiyang, YU Lishan, et al. Study on the permeability of carbonate during full period of stress-strain[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2000, 8(2): 127 - 128.(in Chinese))
- [47] LI S P, WU D X. Effect of confining pressure, pore pressure and specimen dimension on permeability of Yin Zhuang sandstone[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3/4): 435 - 441.
- [48] ZOBACK M D, BYERLEE J D. The effect of microcracks dilatancy on the permeability of Westerly granite[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80: 752 - 755.
- [49] SCHULZE O, POPP T, KERN H. Development of damage and permeability in deforming rock salt[J]. *Engineering Geology*, 2001, 61(1): 163 - 180.
- [50] HOLCOMB D J, OLSSON W A. Compaction localization and fluid flow[J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(10): 2 290.
- [51] OLSSON W A, HOLCOMB D J. Compaction localization in porous rock[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, 27: 3 537 - 3 540.
- [52] WONG T F, DAVID C, ZHU W L. The transition from brittle faulting to cataclastic flow in porous sandstones: Mechanical deformation[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(12): 3 009 - 3 025.
- [53] WONG T F, BAUD P, KLEIN E. Localized failure modes in a compacting porous rock[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 28: 2 521 - 2 524.
- [54] YUAN S C, HARRISON J P. Numerical modeling of progressive

- damage and associated fluid flow using a hydro-mechanical local degradation approach[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(4): 417 - 418.
- [55] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. *J. Appl. Phys.*, 1941, 12: 155 - 164.
- [56] BAI M, ELSWORTH D. Coupled processes in subsurface deformation, flow, and transport[M]. [S. l.]: American Society of Civil Engineers, 2000.
- [57] BRUNO M S, NAKAGAWA F M. Pore pressure influence on tensile fracture propagation in sedimentary rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1991, 28(4): 261 - 273.
- [58] BRIDGEMAN P W. Breaking tests under hydrostatic pressure and conditions of rupture[J]. *Phil. Mag.*, 1912, 24: 63 - 80.
- [59] RICE J R, CLEARY M P. Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents[J]. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1976, 14: 227 - 241.
- [60] BERNABE Y. The effective pressure law for permeability in Chelmsford granite and bare granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomech. Abstr.*, 1986, 23(3): 267 - 275.
- [61] 赵阳升. 煤岩流体力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.(ZHAO Yangsheng. *Hydromechanics in coal rock*[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993.(in Chinese))
- [62] XING Z, SANDERSON D J, BARKER A J. Numerical study of fluid flow of deforming fractured rocks using dual permeability model[J]. *Geophys. J. Int.*, 2002, 151: 452 - 468.
- [63] SOULEY M, HOMAND F, PEPA S, et al. Damage-induced permeability changes in granite: a case example at the URL in Canada[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(2): 297 - 310.
- [64] CHAN T, KHAIR K, JING L, et al. International comparison coupled of thermo-hydro-mechanical models of multiple-fracture bench mark problem: DECOVALEX phase 1, bench mark test 2[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomech. Abstr.*, 1995, 32(5): 435 - 452.
- [65] TSANG C F, STEPHANSSON O, HUDSON J A. A discussion of thermo-hydro-mechanical (THM) processes associated with nuclear waste repositories[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(3): 397 - 402.
- [66] TSANG C F. Coupled thermomechanical hydrochemical processes in rock fractures[J]. *Review of Geophysics*, 1991, 29: 537.
- [67] RUTQVIST J, TSANG C F. Analysis of thermal-hydrologic-mechanical behavior near an emplacement drift at Yucca Mountain[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 62(2/3): 637 - 652.
- [68] POTVIN Y, HUDYMA M. Controlling seismic risk[C]// The 6th International Symposium on Rock Burst and Seismicity in Mines. Perth, Australia: [s. n.], 2005: 60 - 66.
- [69] 杨道庆, 接铭训. 地震目标勘探实现奥灰水研究的可能性[J]. *煤炭学报*, 2002, 27(1): 36 - 40.(YANG Daoqing, JIE Mingxun. The possibility of detecting water in the Ordovician carbonate with objective seismic exploration[J]. *Journal of China Coal Society*, 2002, 27(1): 36 - 40.(in Chinese))
- [70] 王 鹰, 陈 强, 魏有仪, 等. 红外探测技术在圆梁山隧道突水预报中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(5): 855 - 857.(WANG Ying, CHEN Qiang, WEI Youyi, et al. Application of infrared acquisition technology in prediction of water gushing in Yuanliangshan tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(5): 855 - 857.(in Chinese))
- [71] 胡耀青, 赵阳升, 杨 栋, 等. 承压水上采煤突水的区域监控理论与方法[J]. *煤炭学报*, 2000, 25(3): 252 - 255.(HU Yaoqing, ZHAO Yangsheng, YANG Dong, et al. The regional monitor theory and method of water-inrush for coal mining over confined aquifer[J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(3): 252 - 255.(in Chinese))
- [72] 姜福兴, XUN Luo, 杨淑华. 采场覆岩空间破裂与采动应力场的微震探测研究[J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(1): 23 - 25.(JIANG Fuxing, XUN Luo, YANG Shuhua. Study on microseismic monitoring for spatial structure of overlying strata and mining pressure field in longwall face[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(1): 23 - 25.(in Chinese))
- [73] 张银平. 岩体声发射与微震监测定位技术及其应用[J]. *工程爆破*, 2002, 8(1): 58 - 61.(ZHANG Yinping. Rock mass acoustic and micro-seismic monitoring and localizing technology and its application[J]. *Engineering Blasting*, 2002, 8(1): 58 - 61.(in Chinese))
- [74] 陆菜平, 窦林名, 吴兴荣, 等. 岩体微震监测的频谱分析与信号识别[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(7): 772 - 775.(LU Caiping, DOU Linming, WU Xingrong, et al. Frequency spectrum analysis of microseismic monitoring and signal differentiation of rock material[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(7): 772 - 775.(in Chinese))
- [75] 李庶林, 尹贤刚, 郑文达. 凡口铅锌矿多通道微震监测系统及其应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(12): 2 048 - 2 053.(LI Shulin, YIN Xiangang, ZHENG Wenda. Research of multi-channel microseismic monitoring system and its application to Fankou lead-zinc mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(12): 2 048 - 2 053.(in Chinese))
- [76] HOUSE L. Locating micro-earthquakes induced by hydraulic fracturing in crystalline rock[J]. *Geophysics Res. Lett.*, 1987, 14: 919 - 921.
- [77] BLOCK L V, CHENG C H, FEHLER M C, et al. Seismic imaging using micro-earthquakes induced by hydraulic fracturing[J]. *Geophysics*, 1994, 59: 102 - 112.