

基于水量演化特征的煤层底板突水通道识别方法

刘再斌^{1,2} 杨小刚¹

(1. 中国煤炭科工集团西安研究院有限公司 陕西 西安 710054; 2. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室 陕西 西安 710077)

摘要: 为在突水发生后快速判断突水通道类型, 提出通过突水量演化特征识别煤层底板突水通道的方法。依据煤层底板构造发育情况及其与采掘活动的空间关系, 将煤层底板突水通道划分为完整底板通道、非贯通型通道及贯通型通道3种类型。分析了3种类型突水实例, 获得了不同突水通道煤层底板突水量演化特征。再依据水量演化特征的煤层底板突水通道识别方法, 凭峰前突水量演化及峰后水量衰减特征, 判断突水通道类型。且采用三维相似模拟平台, 模拟了1例岩溶陷落柱突水过程。结果表明: 该次突水通道为贯通型通道, 与突水通道识别模型分析结果一致, 不同突水通道具有显著的突水量演化规律差异, 水量演化特征能够较准确地反映突水通道的演化过程。

关键词: 突水通道; 水量演化; 识别方法; 底板突水

中图分类号: TD745 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)06-0152-07

Method to distinguish water inrush channel in seam floor based on water quantity evolution features

Liu Zaibin^{1,2}, Yang Xiaogang¹

(1. Xi'an Research Institute Company Limited, China Coal Technology and Engineering Group Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Provincial Key Lab of Mine Water Disaster Prevention and Control Technology Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to rapidly judge the type of the water inrush channel according to the structure development condition of the seam floor and the space relationship between the mining and driving activities, the water inrush channel of the seam floor was divided into a completed floor channel, non running through type channel and running through channel. The three type water inrush cases were analyzed and the quantity evolution features of the water inrush from seam floor with different water inrush channel were obtained. Based on the quantity evolution features, the method to distinguish the water inrush channels in the seam floor was provided and based on the water inrush evolution before the peak occurred and the water quantity attenuation features after the peak occurred, the water inrush channel type was judged. A 3D similar simulation platform was applied to simulate a water inrush process of a karst sinkhole. The results showed that this water inrush channel was a running through channel, was the same to the analysis results of the water inrush distinguishing model, the different water inrush channel would have obvious differences of the water inrush quantity evolution law and the water quantity evolution features could accurately reflect the evolution process of the water inrush channel.

Key words: water inrush channel; water quantity evolution; distinguishing method; water inrush from floor

0 引言

我国煤矿受水害威胁严重, 在各类煤矿水害问题中煤层底板突水的演变过程尤为复杂^[1-3]。煤层底板突水问题的本质是采矿扰动下岩体变形破坏和

地下水渗流进入采掘空间的问题, 一方面开采扰动改变岩体内部应力场分布从而影响岩体结构, 引起岩体内部水压、渗流场发生变化, 另一方面渗流场作用于岩体之上, 影响岩体的变形破坏过程^[4-6]。

突水通道是原始岩体结构在采掘活动影响下

收稿日期: 2016-04-18; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.06.025

基金项目: 中国煤炭科工集团西安研究院有限公司科技创新基金面上资助项目(2015XAYMS17)

作者简介: 刘再斌(1982—), 男, 江苏徐州人, 副研究员, 博士。Tel: 13572198204 E-mail: liuzabing@cctegxian.com

引用格式: 刘再斌, 杨小刚. 基于水量演化特征的煤层底板突水通道识别方法[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 152-158.

Liu Zaibin, Yang Xiaogang. Method to distinguish water inrush channel in seam floor based on water quantity evolution features[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 152-158.

应力场、渗流场耦合作用下形成的,是采掘前底板岩体结构、采掘扰动破坏和水力压裂等效应的叠加作用结果。突水特征是突水发生过程中突水量、地下水水位等参数变化特征。不同突水事故突水量变化特征不同,具有不同演化特点。突水发生后,突水通道的判别缺少理论的依据和科学的准则,容易造成对水害形势的误判。笔者旨在通过研究不同类型突水通道导致的煤层底板突水特征,提出煤层底板突水通道的识别方法,以期在水害发生后快速判断突水原因,制定救援方案提供指导。

1 煤层底板突水通道分类

煤层底板突水的发生意味着在采掘空间与承压含水层之间存在突水通道,突水通道是原始岩体结构在采掘活动、应力场、渗流场耦合作用下形成的,是采掘前底板岩体结构与采动破坏、水力压裂等效

应的叠加作用^[7-10]。初始岩体及其与采掘活动的关系的差异使突水过程各异,煤层底板突水通道的分类基于未受采掘活动影响的煤层底板结构及其与未来采掘活动的空间关系划分。煤层底板岩体指煤层与基底承压含水层之间的岩体,包括相对隔水层和薄层含水层。参照裂隙岩体力学中贯通性裂隙与非贯通性裂隙的划分方法,将煤层底板突水通道划分为完整型底板通道、非贯通型底板通道及贯通型底板通道^[11-13]。①完整型底板是指煤层底板岩体不存在明显的可以通过钻探、物探手段探查到的裂隙、断层等构造,无岩溶陷落柱发育,如图1a所示;②非贯通型底板通道是指煤层底板岩体存在的裂隙或断层构造,未直接导通煤层和基底含水层,或是存在的未发育到煤层的隐伏岩溶陷落柱,如图1b所示;③贯通型底板通道是指煤层底板存在的直接导通煤层和基底含水层的裂隙、断层及陷落柱等导水通道,如图1c所示。

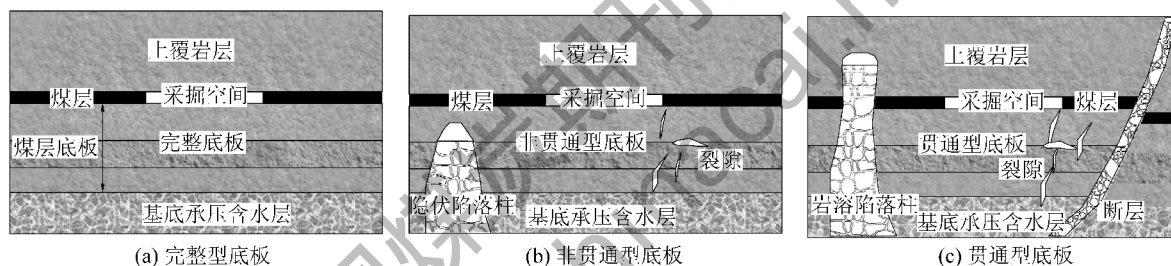


图1 煤层底板突水通道类型

Fig. 1 Types of coal floor inrush channel

2 完整型底板突水特征

完整型底板突水是由于底板在采动应力与底板水压耦合作用下发生破坏,形成导通采掘空间与基底灰岩含水层的裂隙网络,承压水经过采动底板涌入采掘空间。完整型底板可以分为原生的完整底板和人工改造后的完整底板,在底板岩体经过探查有裂隙富水区的条件下,可以通过注浆加固手段改造其为完整底板。

2.1 完整型底板突水实例

东庞矿北井9208工作面是该矿9号煤层回采的第3个工作面,工作面标高-120~-210 m,煤层至奥灰距离32~44 m,平均34.4 m。奥灰含水层水位标高+72 m,采掘活动受煤层底板奥灰突水威胁。

工作面在轨道巷、运输巷掘进过程中未发现断层等构造。在工作面回采前进行了综合物探、钻探探查工作。通过瞬变电磁、音频电透视、电测深等物

探手段,探查底板岩体不存在断层等构造,没有隐伏岩溶陷落柱发育。针对局部裂隙带,进行了钻探探查和注浆工作。施工了57个底板注浆钻孔,进尺3 626.7 m,注入水泥量644.83 t。通过检查钻孔进一步证实了在底板注浆加固后,在工作面回采前不存在断层、裂隙、岩溶陷落柱等导水通道,将9208工作面底板视为完整底板。

2.2 完整型底板突水过程

当9208工作面推采至680 m时发生突水,初期水量为50 m³/h,此后逐渐增加,7 h后突水量增至1 550 m³/h,9 h后水量减至1 250 m³/h,并逐渐稳定。完整底板工作面突水有以下特点:①突水量渐变,突水量逐渐增大,后有少量衰减,且维持在一定水平,突水量的渐变反映突水通道逐渐增大;②突水通道规模较小,通过实际探查未发现断层构造,未发现岩溶陷落柱,突水通道为底板岩体内部采后形成的导通突水水源与采掘空间的裂隙;③突水即时

性,突水点位于液压支架后方5 m,突水基本没有滞后性,该位置与前期监测的回采至传感器附近应力变化剧烈的位置基本一致,说明该处底板破坏深度较大。完整底板突水量在达到峰值前,突水过程为线性增长,如图2所示。

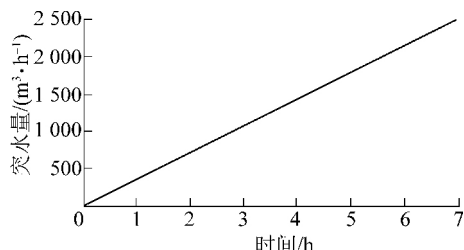


图2 完整底板突水量拟合曲线

Fig. 2 Fitting curve of complete coal seam floor water inrush quantity

完整型底板突水量线性关系表达式为

$$Q = bt \quad (1)$$

其中: Q 为突水量, m^3/h ; t 为时间, h ; b 为突水量系数, m^3/h^2 , 在 9208 工作面突水实例中, $b = 357.1 \text{ m}^3/\text{h}^2$ 。突水达到峰值后, 突水量衰减比较小, 基本稳定在与突水量峰值接近的水平。

2.3 完整型底板突水机制

完整型底板突水, 底板岩体厚度一般较薄, 突水通道孕育初始阶段中, 由于岩体内部有效孔隙率低, 岩体渗透性能差, 基底承压水对底板岩体施加孔隙水压, 改变岩体边界水力条件。受采动应力影响, 岩体产生变形, 内部裂纹萌生, 岩石渗透率逐渐增大, 底板岩体内部孔隙水压增大, 岩体有效应力降低。在应力变化剧烈位置, 底板岩体破坏程度最大, 当裂纹彼此连通便形成地下水涌入矿井的通道。在渗流-应力耦合作用下, 突水通道逐渐发育至一定规模, 因此, 突水量表现出线性的渐变过程。

3 非贯通型底板通道突水特征

非贯通型通道是底板存在的未沟通采掘空间与基底承压水的导水断层、裂隙、岩溶陷落柱等。断层、裂隙及陷落柱周边的岩体应力集中, 岩体渗透性大。由于底板岩体分布孔隙水压, 且岩体内部结构面发育, 渗流-应力耦合机理有别于完整底板, 突水的发生也有不同的表现。通过一例隐伏陷落柱突水说明非贯通型通道突水特点。

3.1 非贯通型底板通道实例

15423N 工作面位于九龙矿北二采区北部, 开采 4 号煤层。煤层底板标高 -616—-710 m, 工作面

距基底奥灰含水层距离 110 m, 奥灰水位标高 +116.8 m, 底板奥灰水压为 9.1 MPa 左右。在 15423N 工作面回采过程中, 工作面采空区范围内发生突水。采用地面钻探方法探查了突水通道, 施工了 6 个垂直探查钻孔和 15 个分支斜孔, 确定了突水通道的大小和空间形态。通过探查该突水通道为岩溶陷落柱, 陷落柱顶端位于 15423N 工作面之下 41.5 m 的位置, 基底为奥陶纪灰岩。平面形态为不规则椭圆形, 长轴近南北方向, 长度 14 m 左右, 短轴近东西向, 长度 7.2 m 左右。15423N 工作面底板发育有隐伏陷落柱, 为非贯通型通道。

3.2 非贯通型底板突水过程

15423N 工作面突水发生时, 初期突水量为 900 m^3/h , 2 h 后减少至 180 m^3/h , 之后水量发生数次波动, 突水发生 61 h 之后突水量突然增大, 突水发生 66 h 水量达到 2 160 m^3/h , 突水发生 71 h 后, 水量增至 2 778 m^3/h , 突水发生 80 h 后突水量经测算达到 7 200 m^3/h 。突水发生后至突水点 2 300 m 的奥灰水文观测孔水位由突水前的 +96.76 m 下降至 -114.58 m, 水位降深 211.34 m。

从突水发生过程来看, 非贯通型底板突水具有以下特征: ①滞后性, 突水发生在采空区范围, 滞后于回采工作, 表现出滞后性; ②突水量突增, 突水初期, 水量处于一个较低水平。有数次波动, 在突水发生一段时间后, 水量突然增大, 在短时间内达到峰值后维持在一个较高水平; ③突水规模较大, 较之完整底板突水, 非贯通型突水规模一般较大。

对于非贯通型底板突水, 在突水量到达峰值之前, 突水量与时间呈指数关系, 如图3所示。

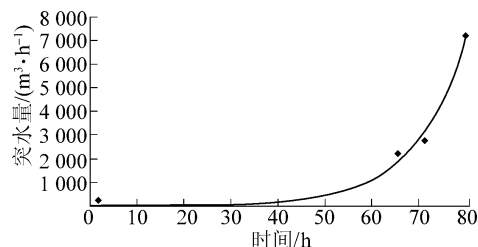


图3 非贯通型底板突水量拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of unconnected coal seam floor channel water inrush quantity

非贯通型底板突水量指数关系表达式为

$$Q = me^{nt} \quad (2)$$

其中: m 为突水量系数, m^3/h ; n 为时间因子, h^{-1} 。在 15423N 隐伏陷落柱突水实例中, $m = 3.544$

m^3/h $n=0.09514 \text{ h}^{-1}$ 。与完整型底板突水类似,非贯通型突水在突水发生后,突水量衰减比较小,基本稳定在与突水量峰值接近的水平。

3.3 非贯通型通道突水机制

非贯通型通道的渗流-应力耦合作用有别于完整型底板的渗流-应力耦合作用。小规模构造及隐伏岩溶陷落柱拉近了承压水体与采掘空间的距离,缩小了有效隔水岩体厚度。采动前岩体内部分布静水压力,岩体有效应力降低。构造及陷落柱的存在产生了应力集中,在采掘活动扰动后,应力进一步集中,构造周边岩体破坏程度加大。底板岩体在渗流-应力耦合作用下,发生破坏,形成突水通道,导致突水发生。在突水通道形成过程中,应力集中造成的变形局部化是造成岩体裂隙形成的主要原因。在突水通道形成后,应力得到释放,岩体应力趋于稳定,突水量稳定在一定的水平。突水发生后,由于突水通道内水体的静水压力与水动力学效应,对突水通道不断冲刷,造成通道的改变,使得突水量在某个时刻突然增加。渗流场对岩体的作用是突水发生后岩体结构变化的主要因素。可见,在通道形成过程中,采掘活动对应力场的扰动是通道形成的主因,在突水发生过程中,渗流场对通道的改变是水量变化的主因,不同因素在突水孕育及发生的不同阶段重要性不同。

4 贯通型底板突水特征

贯通型通道是底板存在的沟通采掘空间与基底承压水的导水断层、裂隙、陷落柱等异常体。贯通型突水是底板突水的主要类型,防水煤岩柱是预防贯通型突水的重要措施^[14]。以东庞矿2903陷落柱突水为例说明贯通型突水特点。

4.1 贯通型底板突水实例

东庞矿2903工作面位于该矿-480 m水平南翼,2901工作面采空区以东,开采2号煤层,设计走向长度1370 m,倾向长度175 m。该工作面下巷掘进至750 m时发生突水,此时工作面处于巷道掘进阶段。由于工作面处于巷道掘进阶段,采掘活动扰动范围小,应力场较初始应力场变化不明显。经过综合探查,突水通道为岩溶陷落柱,陷落柱发育至开采煤层2号煤层以上,陷落柱周围存在一定宽度的裂隙带。

4.2 贯通型底板突水过程

2903下巷掘进工作面出现涌水后,涌水量急剧增加,1 h后突水量为2500 m^3/h ,9 h后突水量为30000 m^3/h ,10 h突水量达最大值70000 m^3/h 。此

后突水量逐步减小,24 h后水量减至7800 m^3/h ,120 h后突水量为7500 m^3/h 。突水发生后,井田范围内奥灰水文地质观测孔水位降低,突水前观26孔水位为+33.57 m,6.5 h后水位降低至+18.07 m,1 d后降至+4.46 m。

由于突水发生之前,突水通道已经沟通承压含水层与开采煤层,在突水发生时,贯通型突水具有以下特点:①突发性,采掘工程一旦揭露或足够接近贯通型通道,就会发生突水,往往突然发生,应急时间较短,容易形成灾难性事故;②初期突水量急剧增加,若原生通道具有一定规模,突水量会短时间内急剧增加至峰值,往往突水量大;③较高的衰减率,衰减率指的是峰值突水量与稳定突水之差量与峰值突水量的比值。2903陷落柱突水量衰减率为89.3%。较高的衰减率是因为突水的发生,导致含水层弹性释水能力降低,同时由于采掘空间积水水位上升,突水通道两端渗透压差降低。

对于贯通型底板通道,突水量达到峰值前,突水量与时间也为指数关系,如图4所示。在2903工作面突水实例中, $m=1017 \text{ m}^3/\text{h}$, $n=4.425 \text{ h}^{-1}$ 。系数 m 反映突水量峰值幅度,系数 n 反映突水通道演化快慢。贯通型底板突水量峰值较非贯通型底板突水量峰值大,突水通道演化快,时间短。

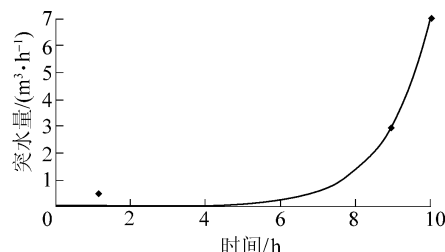


图4 贯通型底板突水量拟合曲线

Fig. 4 Fitted curve of connected coal seam floor channel water inrush quantity

贯通型底板突水,在突水量到达峰值后出现突水量跌落,跌落至与突水量峰值相比较低的水平,如图5所示。

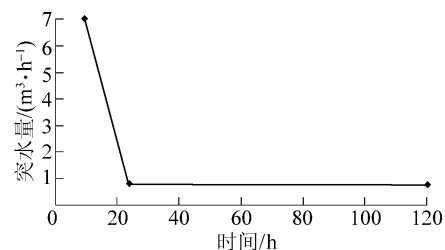


图5 贯通型底板峰值后突水量曲线

Fig. 5 Connected coal seam floor channel water inrush quantity curve after peak

4.3 贯通型底板突水机制

突水通道在采动之前便已存在,渗流-应力耦合作用主要表现在对突水通道的改变。突水发生时,地下水高速流动,从陷落柱内部携带出大量填充物。2903陷落柱突水治理后复矿过程中,发现了尺寸达 $1.35\text{ m}\times 0.8\text{ m}$ 泥岩岩石从陷落柱内部冲至-480 m水平南翼大巷,还有大量的淤积堆积物。突水的水动力效应使得突水通道规模进一步加大,造成突水峰值水量大。

5 突水通道识别模型建立

不同类型通道导致的底板突水具有不同的水量演化特征,通过水量演化特征的分析能够对突水通道做出判断。基于前述水量演化特征可以获得底板突水通道识别准则,如图6所示。当突水发生后,如果突水量达到峰值之前为线性增长,则为完整底板通道;当突水发生后,如果突水量达到峰值之前为指数型增长,则煤层底板为贯通型通道或非贯通型通道;如果突水量峰值后,水量维持在较高水平,则为非贯通型通道;如果突水量峰值后,出现水量跌落,则为贯通型通道。

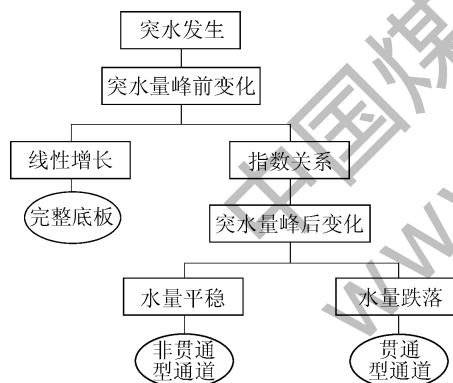


图6 突水通道识别模型

Fig. 6 Water intrush channel recognition model

6 突水通道识别方法验证

6.1 突水通道识别方法应用

骆驼山煤矿基建过程中,在16号煤层+870 m水平回风大巷掘进过程中发生突水。突水发生1 h之内,平均突水量为 $65\ 000\text{ m}^3/\text{h}$,突水发生后2~4 h平均突水量为 $6\ 700\text{ m}^3/\text{h}$ 。

从突水规模上能够容易判断矿井突水水源为奥陶纪灰岩水,16号煤层回风大巷底板承受奥灰水压4 MPa左右。突水具有以下特征:①突发性,在掘进

头突水为突发性突水,且相对于采掘工程没有滞后性;②初期突水量急剧增加,突水发生后,水量急剧增加,第1 h之内的水量高达 $65\ 000\text{ m}^3/\text{h}$;③水量衰减,水量达到峰值后,迅速衰减,衰减率达90%。通过突水通道识别模型分析骆驼山突水过程,判断骆驼山矿突水通道为贯通型通道。

6.2 相似模拟试验验证

通过探查孔及注浆孔探查,查明突水通道为导水岩溶陷落柱。该陷落柱顶面发育有2个高点,A点隐伏于16号煤层之下,陷落柱上部裂隙带距离煤层16.7 m。另一高点B点已进入煤层,距16号煤层回风大巷4.8 m。若突水从A点经过底板突入巷道,则突水通道可以视为非贯通型通道。若突水从B点经过掘进面前方涌入巷道,则通道可以视为贯通型通道,如图7所示。

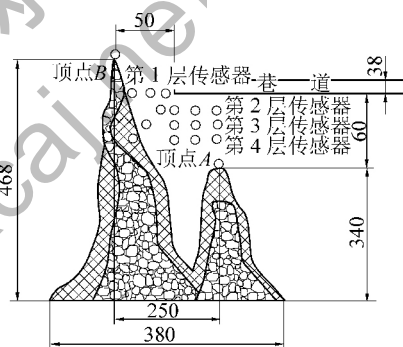


图7 三维相似模型剖面示意

Fig. 7 Profile of 3D analog simulation model

通过突水通道识别,认为突水为通过B点的贯通型突水,为了验证识别结果,针对该陷落柱复合结构条件进行模拟试验验证^[15-16]。相似模拟试验依托于矿井水害三维模拟试验系统进行。试验系统主要由试验台、加载系统、监测系统及数据采集分析系统组成^[17-20]。三维相似模型尺寸为直径2 m,高度2 m。

底板初始水压值设定为1.8 MPa,相似水压为0.012 MPa。当巷道掘进后,每隔30 min,增加0.3 MPa,相似水压为0.002 MPa。模拟采动时,水流由小至大缓慢加载。由于模型高度所限,通过顶部加压来替代上覆地层,顶部加压相当于实际压力6.5 MPa的轴压。

1) 突水量历时变化特征。在经过加载水压39 min之后,突水量迅速增加。从加载水压至52 min,前期突水量随时间变化呈指数关系,模拟曲线如图8所示。指数关系反映出的突水量变化关系同实际

突水时贯通型底板及非贯通型底板突水特征一致。相似模型突水量与时间关系为

$$Q = 1.17e^{0.1149t} \quad (3)$$

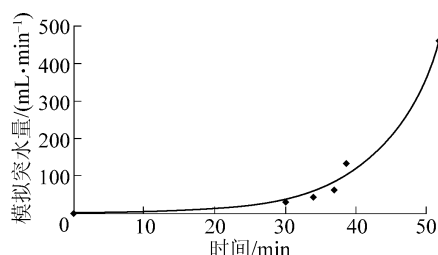


图8 模型突水量历时拟合曲线

Fig. 8 Water inrush quantity curve of simulation model

2) 水压变化特征。埋设在顶点A顶端位置处的水压传感器监测值变化与加载水压无相关性。在顶点B点附近,埋设在巷道前段45°斜下方位置的传感器的水压随着水压的增加相应增加,当底板水压增加至0.026 MPa时,传感器水压与底板加载水压一致,反映此时突水通道相对畅通。

3) 底板岩体结构验证。试验结束后,将模型切开,直观的观察模型突水通道,结合不同位置应变传感器、水压传感器数据可以看出突水通道位于B点位置附近。突水通过侧向煤柱进入采掘巷道,证实了骆驼山突水为贯通型底板突水。突水前巷道发生底鼓现象,反映出A点位置隐伏构造的存在,造成应力集中,产生底鼓现象,但是该处底鼓并未进一步造成突水通道的形成。

7 结 论

1) 煤层底板突水问题的本质是渗流-应力耦合作用过程,煤层底板突水通道类型控制着渗流-应力耦合作用模式。将底板突水通道分为完整型底板通道、非贯通型底板通道及贯通型底板通道3种类型。依据突水量演化特征提出煤层底板突水通道识别方法,根据峰前突水量随时间变化的线性变化型、指数型等规律及峰后水量的稳定及衰减特征,可以判断突水通道类型,为底板突水灾害抢险与治理提供指导。

2) 基于底板突水通道识别模型判断骆驼山矿突水为贯通型底板突水,采用三维相似模拟试验的方法,再现了陷落柱突水过程,验证了突水通道识别模型的有效性。结果表明模型突水过程仍呈指数型增长,通过传感器数据及模型切面观察,证实了突水通道位于巷道掘进工作面前方,突水通道为贯通型

通道。

3) 由于所分析的突水案例有限,未能包含全部的突水量演化特征,非线性、波浪形及阶梯形等水量演化过程是下一步研究的重点。

参考文献(References):

- [1] 靳德武,刘英锋,冯宏等.煤层底板突水监测预警系统的开发及应用[J].煤炭科学技术,2011,39(11):14-17.
Jin Dewu, Liu Yingfeng, Feng Hong et al. Development and application of monitoring and early warning system to seam floor water inrush [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(11): 14-17.
- [2] 刘再斌,靳德武.华北型煤田下组煤开采岩破坏规律研究[J].煤炭科学技术,2013,41(7):24-31.
Liu Zaibin, Jin Dewu. Study on surrounding rock failure laws of mining lower group coal seam in north China coalfield [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(7): 24-31.
- [3] Oda M. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses [J]. Water Resources Research, 1986, 22(13): 1845-1856.
- [4] 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.
- [5] 黎良杰,钱鸣高,李树刚.断层突水机理的分析[J].煤炭学报,1994,16(2):119-123.
Li Liangjie, Qian Minggao, Li Shugang. Mechanism of water-inrush through fault [J]. Journal of China Coal Society, 1994, 16(2): 119-123.
- [6] 杨天鸿,唐春安,谭志宏等.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[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):268-277.
Yang Tianhong, Tang Chun'an, Tan Zhihong et al. State of art of inrush models in rock mass failure and developing trend for prediction and forecast of groundwater inrush [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 268-277.
- [7] 刘再斌,靳德武,刘其声.基于二项Logistic回归模型与CART树的煤层底板突水预测[J].煤田地质与勘探,2009,37(1):56-62.
Liu Zaibin, Jin Dewu, Liu Qisheng. Prediction of water inrush through coal floor based on binary logistic regression model and CART [J]. Coal Geology and Exploration, 2009, 37(1): 56-62.
- [8] 武强,张志龙,马积福.煤层底板突水评价的新型实用方法I:主控指标体系的建设[J].煤炭学报,2007,32(1):42-47.
Wu Qiang, Zhang Zhilong, Ma Jifu. A new practical methodology of the coal floor water bursting evaluating I: the master controlling index system construction [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 42-47.
- [9] 徐智敏,孙亚军,巩思园等.高承压水上采煤底板突水通道形成的监测与数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2012,31(8):1698-1704.
Xu Zhimin, Sun Yajun, Gong Siyuan et al. Monitoring and numeri-

- cal simulation of formation of water inrush pathway caused by coal mining above confined water with high pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (8): 1898 – 1704.
- [10] 武强, 刘守强, 贾国凯. 脆弱性指数法在煤层底板突水评价中的应用 [J]. 中国煤炭, 2010, 36(6): 15 – 22.
Wu Qiang, Liu Shouqiang, Jia Guokai. The application of the vulnerability index method in coal floor water inrush evaluation [J]. China Coal, 2010, 36(6): 15 – 22.
- [11] 顾铁凤. 贯通裂隙条件下地下巷道失稳的理论分析 [J]. 太原理工大学学报, 2005, 36(1): 30 – 32.
Gu Tiefeng. Theoretical analysis on underground roadways instability under penetrative cranny [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36(1): 30 – 32.
- [12] 曾科, 许模, 张强. 傍湖隧道渗漏通道评价及防治措施 [J]. 地下水, 2012, 34(2): 169 – 170.
Zeng Ke, Xu Mo, Zhang Qiang. Alongside lake tunnel leakage channel assessment and prevention measures [J]. Ground Water, 2012, 34(2): 169 – 170.
- [13] 李利平, 路为, 李术才, 等. 地下工程突水机理及其研究最新进展 [J]. 山东大学学报: 工学版, 2010, 40(3): 104 – 118.
Li Liping, Lu Wei, Li Shucai, et al. Research status and developing trend analysis of the water inrush mechanism for underground engineering construction [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2010, 40(3): 104 – 118.
- [14] 叶合欣, 董明, 董海洲. 软弱结构面水流冲刷形成集中渗漏通道机制研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(2): 173 – 179.
Ye Hexin, Dong Ming, Dong Haizhou. Mechanism research on concentrated leakage passage formed by water flow erosion in weak structure plane [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(2): 173 – 179.
- [15] 李术才, 周毅, 李利平. 地下工程流 – 固耦合模型试验新型相似材料的研制及应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1128 – 1137.
Li Shucai, Zhou Yi, Li Liping. Development and application of a new similar material for underground engineering fluid – solid coupling model test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1128 – 1137.
- [16] 胡耀青, 赵阳升, 杨栋. 采场变形破坏的三维固流耦合模拟实验研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2007, 26(4): 520 – 523.
Hu Yaoqing, Zhao Yangsheng, Yang Dong. 3D solid – liquid coupling experiment study into deformation destruction of coal stope [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2007, 26(4): 520 – 523.
- [17] 胡耀青. 带压开采岩体水力学理论与应用 [D]. 太原: 太原理工大学, 2003: 40 – 43.
- [18] 张杰, 林海飞, 吴建斌. 流固耦合相似材料模拟实验及技术 [J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2011, 30(3): 329 – 332.
Zhang Jie, Lin Haifei, Wu Jianbin. Liquid – solid coupling simulation experimental plant and technology [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2011, 30(3): 329 – 332.
- [19] 弓培林, 胡耀青, 赵阳升. 带压开采底板变形破坏规律的三维相似模拟研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4396 – 4402.
Gong Peilin, Hu Yaoqing, Zhao Yangsheng. Three – dimensional simulation study on law of deformation and breakage of coal floor on mining above aquifer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4396 – 4402.
- [20] 郭国强. 复合承压煤层底板突水水源判别及治理措施 [J]. 中州煤炭, 2013(6): 67 – 70.
Guo Guoqiang. Coal floor inrush water source discrimination and control measures of compound confined aquifers [J]. Zhongzhou Coal, 2013(6): 67 – 70.
- tie self – regulating and accumulation effects of high – rank coals [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(S1): 99 – 103.
- [69] Laxminarayana C, Crosdale P J. Controls on methane sorption capacity of Indian coals [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(2): 201 – 212.
- [70] 郑毅, 黄洪春. 中国煤层气钻井完井技术发展现状及发展方向 [J]. 石油学报, 2002, 23(3): 81 – 85.
Zheng Yi, Huang Hongchun. Development of drilling and completion technology of coalbed methane wells in China [J]. Acta Petroli Sinica, 2002, 23(3): 81 – 85.
- [71] 李仰民, 王立龙, 刘国伟, 等. 煤层气井排采过程中的储层伤害机理研究 [J]. 中国煤层气, 2010, 7(6): 39 – 47.
Li Yangmin, Wang Lilong, Liu Guowei. Study on coal reservoir damage mechanism in dewatering and extraction process of CBM wells [J]. China Coalbed Methane, 2010, 7(6): 39 – 47.

(上接第145页)

76: 205 – 216.

- [65] Scott S, Anderson B, Crosdale P, et al. Coal petrology and coal seam gas contents of the Walloon Subgroup – Surat Basin, Queensland, Australia [J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 70: 209 – 222.
- [66] Levine J R. Model study of the influence of matrix shrinkage on absolute permeability of coal bed reservoirs [J]. Geological Society Publication, 1996: 197 – 212.
- [67] Pan Z, Connell L D. A theoretical model for gas adsorption induced coal swelling [J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 69: 243 – 252.
- [68] 秦勇, 傅雪海, 吴财芳, 等. 高煤级煤储层弹性自调节作用及其成藏效应 [J]. 科学通报, 2005, 50(S1): 99 – 103.
Qin Yong, Fu Xuehai, Wu Caifang, et al. Coal bed reservoir elas-