

# 透冲积层断层带特征及致灾原因分析

冯玉<sup>1,3</sup>, 王东<sup>2,3</sup>, 孟凡刚<sup>3</sup>, 马亚杰<sup>2,3</sup>, 王永<sup>2,3</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 华北理工大学矿业工程学院, 河北唐山 063009;  
3. 开滦(集团)有限责任公司, 河北唐山 063009)

**摘要:**应用三维地震勘探、钻探、断层带物质成分测试与构造历史-应力分析等方法,分析了东欢坨矿F2'断层带的几何特征、工程地质与水文地质性质。分析表明:该断层带为多条正断层组合的大规模复杂断层带;破碎带宽且富泥,泥富粘土矿物,遇水膨胀或呈流体状;断层带阻水且局部含水,承受两侧200余米水头差,水文地质性质复杂。通过灾后的突水水质分析、长观孔水位动态观测、通道调查与冲积层底部瞬变电磁探测等方法,分析了灾害因素与致灾原因。结果表明,两年前巷道工程扰动为断层活化埋下隐患,断层泥的物质成分是断层带活化的基础,开采造成的高水头差对断层活化具有促进作用。

**关键词:**断层带;冲积层;突水;断层活化;水头差;东欢坨矿

中图分类号:TD745

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)04-0079-07

## Characteristics and Disastrous Causes of Alluvium-burst Fault Zone

Feng Yu<sup>1,3</sup>, Wang Dong<sup>2,3</sup>, Meng Fangang<sup>3</sup>, Ma Yajie<sup>2,3</sup>, Wang Yong<sup>2,3</sup>

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing, 100083, China;

2. School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063009, China;

3. Kailuan (Group) Co. Ltd, Tangshan, Hebei 063009, China)

**Abstract:** By means of 3D seismic exploration, drilling, fault zone material composition testing and structural history-stress analysis, this study analyzed the structural geometric features, engineering geological nature and hydrogeological nature of F2' fault zone of Donghuantuo coal mine. The analyses show that F2' is a large-scale complex fault zone composed by multiple normal faults with wide crushed zones rich in clay mineral mud which expands or becomes fluid under the influence of water. Water-proof but water-containing locally, this fault zone bears the water head difference of over 200 m between two hanging walls and is of complicated hydrogeological nature. Based on after-calamity bursting water quality analysis, dynamic water level observation of long term observation drill holes, channel survey and alluvium bottom transient electromagnetic detection, disaster-inducing factors were clarified and reasons for disasters were analyzed. Results indicate that the engineering disturbance happened 2 years ago poses a potential causes of fault activation which is based on the material composition of fault gouge while the high hydraulic head difference caused by mining promotes it.

**Key words:** fault zone; alluvium; water burst; fault activation; head difference; Donghuantuo coal mine

煤矿井下透冲积层黄泥是由突水事故引发的一种特殊灾害,松散冲积物随突入水流进入井下造成巷道

收稿日期:2014-06-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51174071/E0409);中国煤炭工业协会科学技术研究指导计划项目(MTKJ2013-419);2013年河北省科技支撑指导计划项目(13275412);“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAK04B04)

作者简介:冯玉(1965—),男,河北昌黎人,高级工程师,长期从事矿井水文地质工作。E-mail: fengyu@kailuan.com.cn

淤堵、设备掩埋,甚至淹井,破坏性大,难以恢复,灾害影响严重<sup>[1-3]</sup>。隐伏于冲积层下的急倾斜煤层超高抽冒有时会引发透冲积层事故。断层是矿井突水的重要通道,开滦东欢坨矿 F2'断层透水引发了透冲积层事故,对矿井生产造成了严重影响。透冲积层黄泥断层具有特殊的复杂性质<sup>[4-5]</sup>,生产中对此类灾害认识不深。为预警同类灾害发生,以开滦东欢坨矿 F2'断层透冲积层事故为实例,对透冲积层的断层特征与致灾原因加以深入分析。

## 1 透冲积断层带特征勘探与分析

### 1.1 断层带构造勘探与几何特征分析

#### 1) 地震勘探

应用高精度地面三维地震勘探技术对 F2'断层进行了控制,确定其为沿煤层倾向延伸的正断层,倾角  $62^{\circ} \sim 72^{\circ}$ ,落差为  $0 \sim 16$  m,延伸长度达 690 m,为可靠断层。断层穿过 5 煤、8 煤、14-1 煤,局部切到奥灰顶界面。预测为井田内规模最大的断层构造,对矿井生产建设影响重大。

#### 2) 钻孔勘探

##### ① -230 回风大巷正巷钻孔勘探

-230 回风大巷正巷为位于 12-1 煤中的煤巷。工作面临近 F2'断层 60 m 和 20 m 时分别施工 2 个勘探孔,钻孔勘探结果为:三维地震控制的 F2'断层位置与钻孔控制结果相吻合,钻孔控制的断层倾角  $70^{\circ}$ ,落差  $8 \sim 10$  m;钻孔控制的断层破碎带较宽 ( $0.94 \sim 1.47$  m),断层带成分主要是断层泥并夹断层角砾,钻孔水量较大,由于高压水力作用产生断层泥及煤外喷现象。

正巷钻孔勘探反应出断层带具有复杂的水动力情况,考虑正巷煤层松软,难以抵抗承压水和实施注浆的压力,将巷道改为 12-1 底板绕道。

##### ② -230 回风大巷底板绕道勘探

-230 回风大巷底板绕道位于 12-1 煤底板粗砂岩中。底板绕道迎头在距 F2'断层 27 m 处,遇到 1 条落差  $4 \sim 5$  m 的断层,施工 4 个钻孔对该断层进行控制,结果 3 个孔内无水,只有 1 个钻孔有水,无喷泥现象。该断层位于 F2'断层下盘, F2'断层下盘岩石较为完整,工程及水文地质条件较好。

为实现底板绕道由 F2'断层下盘穿过断层带进入上盘,在工作面距断层 16 m 位置施工两期 16 个钻孔以确定断层位置、落差、断层带宽度,并同时用以注浆加固破碎带。第一期 6 孔勘探成果分析得出: F2'断层由一组(至少三条)正断层组成,呈阶梯状产出,断层面倾角  $70^{\circ}$ ,综合落差  $4 \sim 5$  m;断层组破碎带很宽,约 15 m,岩石非常破碎,多处间隔出现软泥。第二期 10 孔勘探成果分析得出: F2'断层为一组正断层,断层带由破碎带和软泥带组成;多数钻孔在断层带有水,依据水压观测与水质化验工作综合分析其水源为 12-1 煤底板砂岩裂隙水,非奥灰水源;每个钻孔都出现不同程度的塌孔,部分钻孔出现喷孔现象,注浆时多处窜浆。

由于 F2'断层带在底板绕道处仍表现出复杂的工程地质与水文地质条件,注浆加固失败后,-230 回风大巷进行了二次改道,绕道至 11 煤顶板最终通过 F2'断层带。

##### ③ -500 水平钻孔勘探

-500 水平北二大巷为运输巷道,近断层处施工 2 个过断层勘探孔和 2 个过断层放水孔,测定 F2'断层带由三条断层组成,即 F2'-1、F2'-2 和 F2'-3。F2'-1 断层为一条小断层,断层落差  $H$  为 1.0 m,倾角  $70^{\circ}$ ,其中 1 个钻孔揭露断层软泥,而其他各孔均无明显的变化。F2'-2 断层, $H=5.5$  m,倾角  $60^{\circ}$ ,为一条主要断层,各钻孔钻至此断层均发生岩石破碎、塌孔,过断层后均出水,发生喷孔。F2'-3 断层, $H=17.0$  m,倾角  $70^{\circ}$ ,过断层后钻进稳定岩石 3.2 m,岩芯较完整。F2'-1~F2'-2 之间有的孔发现岩石破碎,有的孔无明显变化, F2'-2~F2'-3 之间岩芯较破碎,出水喷孔,故对 F2'断层带总宽度推测如下:主要断层带宽度为 F2'-2~F2'-3 之间,其宽度为 12.2 m; F2'-1 断层为主断层之前伴生的小断层,即裂隙造成岩石破碎。综合探测结果绘制 -500 水平剖面图,如图 1 所示。其中 F2'-4 为巷道过断层带后期揭露的又一条正断层,产状  $116^{\circ} \angle 47^{\circ}$ , $H=2.3$  m,引发冒顶事故。

### 3) 几何特征

F2'断层为落差大、延展长的大规模断层,基本错断整个煤系地层直下部奥灰岩。断层主要由3~4条断层组成,伴生小断层若干条,断层带内呈阶梯状构造,形成宽度大的破碎带。大规模断层在不同水平、不同部位的特点有所差别。

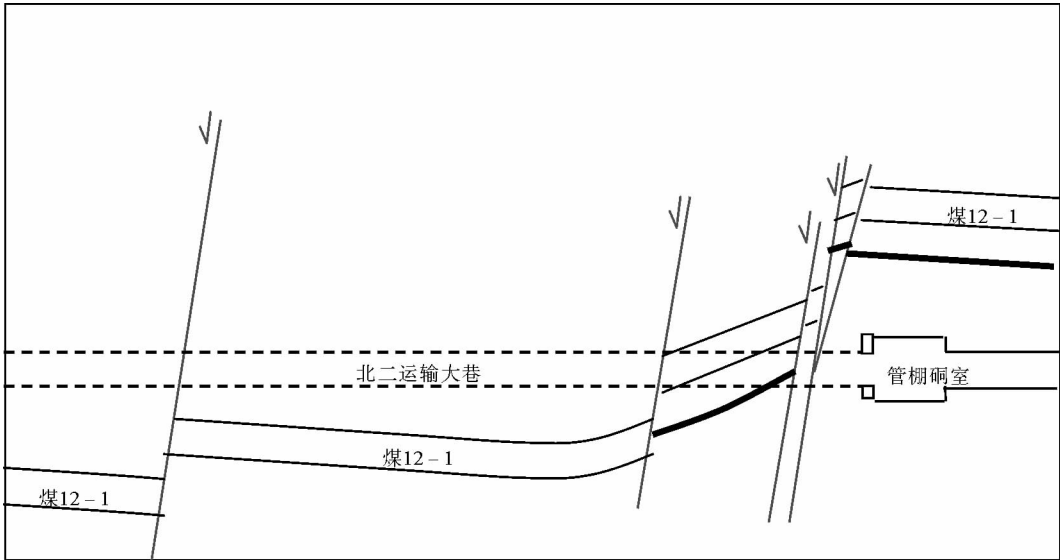


图1 -500水平巷道F2'断层剖面图

Fig. 1 The section of fault F2' in -500 levels' roadway

## 1.2 断层带工程地质特征

断层带工程地质特性与其物质成分的物理力学性质密切相关,也与断层所处的地应力环境关系密切<sup>[6-7]</sup>。

### 1) 断层带物质成分分析

F2'断层带物质成分与其围岩地层岩性有直接关系。主要为断层角砾与断层泥,断层泥有黑色煤泥与灰色的岩粉泥,将断层角砾胶结在一起,其原始状态为干燥致密的压实体。

由-500 m运输大巷取喷孔泥层,通过X射线分析断层泥矿物成分与粘土矿物类型与含量,在中国石油勘探设计研究院X光衍射实验室经粉末法处理后制薄片进行实验。全岩矿物X-衍射分析结果表明断层泥主要矿物成分(质量分数)为石英(28.7%)、钾长石(2.4%)、白云石(14.7%)及粘土矿物(54.2%)。对粘土矿物进一步X-衍射分析结果表明,断层泥中的粘土矿物主要为伊蒙混层(质量分数为52%)与高岭石(质量分数为46%)。伊蒙混层比(伊蒙混层中伊利石所占质量分数)为25%,为有序混层。

伊蒙混层具有强吸水膨胀性,产生膨胀力。高岭石晶格内不充许水分进入,亲水性较小,但其表面电荷吸附形成水化膜吸附层,使得矿物在宏观上产生膨胀的特性,具有膨胀力<sup>[8-10]</sup>。因此可见,F2'断层泥具有强的吸水膨胀性,产生膨胀压力。当钻孔冲洗水接触到断层泥化带时,膨胀力作用下产生喷孔,直径一般不超过3 cm的细小矽石和玻璃岩屑等断层夹杂物大量涌出,形成喷孔灾害。

粘土矿物被工程扰动或渗入裂隙水后产生塑性变形、流动及触变,甚至变为流体状态,岩石力学强度丧失。因此,断层带工程地质条件脆弱,钻孔难以钻进,巷道掘进与支护困难。

### 2) 断层带构造历史-应力

综合区域地质与矿井地质特征,F2'断层带为NWW走向的大型正断层组合,形成于燕山早-中期,为车轴山向斜形成过程中由于物质不均匀、受力不均匀及运动差异导致的缓倾斜翼撕裂而成的拉张剪切正断层;燕山晚期区域构造应力转为垂直断层走向的NNE-SSW挤压应力,断层带在此构造应力作用下呈现强

烈挤压特征,断层表现出强烈封闭并阻水的特性,断层下盘构造应力集中。

宽度大、断层带富泥且断层泥富含粘土矿物,加之强构造应力环境,因此该断层带工程地质条件十分恶劣,易发地质灾害。

### 1.3 断层带水文地质性质

东欢坨矿 F2' 断层为北一采区与北二采区边界线, F2' 断层在水平及垂向上延展长度大,将断层两侧分割为两个不同的水文地质单元。F2' 断层下盘区北一采区经多年开采,采区内各含水层水位均形成强烈地下水降落漏斗; F2' 断层上盘区北二采区各含水层均接近于原始高水位状态。F2' 断层视为矿井内隔水边界。钻探揭露断层带有水溢出,水量较小,为 0.01~0.03 m<sup>3</sup>/min;巷道揭露断层带最大水量 3 m<sup>3</sup>/min。因此该断层表现出局部含水、整体阻水的复杂特征。经断层涌水水质分析,断层水源为砂岩裂隙含水层,未导通冲积层水与奥灰水。

## 2 断层带透冲积层黄泥灾害因素

### 2.1 灾害情况概述

东欢坨矿-230 水平回风巷道采用管棚支护技术由 11 煤层顶板绕道穿过 F2' 断层,两年后巷道内沿 F2' 断层发生了透冲积层水、黄泥、卵砾石及风化砂岩灾害。灾害发生时先突水,后突泥,水量最大 9.26 m<sup>3</sup>/min,喷出物达 1 000 m<sup>3</sup>,淤堵北二采区主要回风巷道,造成北二采区停工停产。

### 2.2 出水水源与水位变化

经取水样分析,出水点水质为重碳酸钙型水,硝酸根 7 mg/L,具有冲积层水的特点。

对突水前后地面水文长观孔水位变化情况进行分析。突水前水位数据历时 43 d,突水后水位数据历时 9 d,通过对比突水前日平均水位降深与突水后日平均水位降深来反应水位下降受突水影响的程度。5 煤顶板含水层(5<sub>s</sub>)、第四系含水层(Q)、奥灰含水层(O<sub>2</sub>)及煤 12 底板砂岩裂隙含水层中钻孔水位变化分析如表 1 所示。

表 1 透冲积层事故前后长观孔水位变化情况

Tab.1 The water level changes of long term observation drill holes through alluvium accident

| 层号         | 5 <sub>s</sub> | 5 <sub>s</sub> | Q     | Q     | Q     | O <sub>2</sub> | 12 煤底板 |
|------------|----------------|----------------|-------|-------|-------|----------------|--------|
| 孔号         | 东观 39          | 东观 27          | 东观 16 | 东观 36 | 东观 37 | 东观 2           | 东观 6   |
| 距离         | 1 100          | 700            | 2 100 | 2 150 | 2 200 | 700            | 400    |
| 前 43 天累积降深 | 1.33           | 1.6            | 1.73  | 1.19  | 1.41  | 1.56           | 3.14   |
| 事故前日平均降深   | 0.03           | 0.04           | 0.04  | 0.03  | 0.03  | 0.04           | 0.07   |
| 后 9 天累计降深  | 1.88           | 2.63           | 0.89  | 2.47  | 1.06  | 1.42           | 1.62   |
| 事故后日平均降深   | 0.21           | 0.29           | 0.10  | 0.27  | 0.12  | 0.16           | 0.18   |

分析水位变化数据得出: ①突水前各含水层水位降速比较均一,5 煤顶板含水层(5<sub>s</sub>)、第四系含水层(Q)与奥灰含水层(O<sub>2</sub>)平均日降深 0.03~0.04 m/d;12 煤底板含水层为 F2' 断层带正常淋水情况下的出水层位,日降深略偏大,为 0.07 m/d。②突水后各含水层水位降速都不同程度提高,其中 5<sub>s</sub>、Q 含水层降速提高显著,代表了断层突泥水事件的直接充水含水层;东欢坨矿具有窄条状和面状水力边界组合特征,脆性相对隔水岩层中发育面状整体展布的裂隙网络,为多层地下水之间的越流提供了通道,同时第四系含水层在基岩含水层的浅部隐伏露头处与其形成垂向间的水力交替<sup>[11-14]</sup>。因此,O<sub>2</sub> 与 12 煤底板含水层间接受到影响,水位降速同步增加。③突水前后水位下降速度受观测点与突水点间的距离影响。同一含水层各观测孔与突水点间的水平距离越近水位下降越快,反之越慢。5<sub>s</sub> 层中的观测结果与这一规律相符。在 Q 中,东观 36 孔与东观 16 相比,距离较远,水位下降速度显著。分析其原因发现,在 Q 含水层的观测孔中,东观 36 孔离巷道出水点的水平距离虽不是最近,但其与 F2' 断层间的垂直距离却是最小的,因此表现出强烈的水位下降。

这反映出冲积层底部泥水通过断层带向下运移,不是围绕巷道突水点发生的点状活动,而是沿断层带具有长距离影响的线型活动。泥水透过断层带向下运移,受空间制约,逐渐集中于巷道过断层点,以此为突破点发生了突泥水事件。

### 2.3 黄泥突入通道

对断层周围的采掘工程进行分析确定附近无采掘工作面,无采动诱发因素形成的人工通道。

事故发生后,采用瞬变电磁与直流电流法对断层带附近冲积层冒落情况进行了勘探。结果表明第四系底界线在 F2'断层两侧有一沟状起伏,与断层近似平行。也说明了冲积层底部黄泥透入活动是沿 F2'断层带线型通道进行的。F2'断层带物质产生类似急倾斜煤层顶板的向上抽冒,抽冒带下小上大,至冲积层底部沿断层带走向产生影响。突水共带出固体(矸石、砂、泥与卵石)1 000 m<sup>3</sup>,依据体积计算,断层内形成通道体积不大,溃泄出口较小,当大的岩块与冒落物堵住出口后,或溃出物堆积至一定高度后,形成暂时动态平衡,溃泄停止。

## 3 断层透冲积层黄泥成灾原因

### 3.1 早期过 F2'断层巷道工程扰动的影响

矿井先后于-230水平与-500水平施工建设了穿过 F2'断层的巷道,对断层产生工程扰动,特别是-230水平回风大巷多次工程失败,先后经由正巷、底板绕道与顶板绕道三个不同层位对断层产生了扰动。

1)正头巷道(与顶板绕道突水点相距 50 m)曾施工多个探查孔,并在顶板绕道施工过断层带期间,正巷发生过强涌水与喷冒事件。涌水携带矸石从正巷密闭墙下部突然涌出,涌水量 0.62 m<sup>3</sup>/min,之后出现瞬间变大情况,涌水携带矸石将 1.5 m 深的管棚硐室充填,矸石冲出距离达到 10 m,堆积高度达 3.4 m,据估算本次矸石涌出累计达 320 m<sup>3</sup>,该次冒落喷出对断层带进行扰动,在断层带上方产生冒落空间。

2)底板绕道(与顶板绕道突水点相距 70 m)曾施工钻孔 16 个并进行了注浆,工程量 570.29 m<sup>3</sup>,注入水泥 409.8 t。巷道施工遇断层时曾发生冒顶,涌水 0.23 m<sup>3</sup>/min,冒出物 30 m<sup>3</sup>,之后进行注浆充填,注入水泥-水玻璃浆液 6.7 t;在充填过程中出现涌水转移,后路压力加大,为了防止出现重大事故,对巷道进行了永久闸墙封闭。该次冒顶对断层带进行了扰动,也使断层带上方初步形成了一定空间。

3)顶板绕道施工过断层时,由于放水孔发生堵孔后巷道迎头及后路巷顶出现滴淋水,底板一出水点发浑并有碎矸石涌出,待疏通好放水孔(涌水量 0.3 m<sup>3</sup>/min)后上述滴淋水等现象消失。

-230 水平多次、多点对 F2'断层进行扰动,造成正头巷道与底板绕道两次冒落,特别是正头冒落后未加以充填治理,造成局部空洞,为 F2'断层带物质抽冒活动埋下隐患。F2'断层为高角度断层,破碎带宽度大,工程性质差,断层带物质冒落类似于急倾斜煤层抽冒,抽冒高度大,导通远距离冲积层含水层,影响严重。

### 3.2 高水压及越流作用的影响

F2'断层带切割矿井两大重要直接充水含水层组:煤 5 顶板充水含水层组与煤 12 底板含水层组,并且充当线型隔水内边界。断层两侧含水层组长期保持高水差,突水前煤 5 顶板含水层组在断层上盘的水头高于断层下盘 200 m。高水头差造成断层带两侧不对称的水平应力,影响断层带的原始稳定状态。

高水头差能改变低渗透性断层带的阻水性。自然界地下水的水力梯度值非常小,数量级常在 10<sup>-2</sup>~10<sup>-4</sup>,而-230 水平按断层垂直落差 35 m 计算,断层两侧煤 5 顶含水层间的水力梯度约为 5.71,高水力梯度下能够极大强化穿过渗透性较低的弱透水层的越流。地下水渗透入断层带,随之可能产生渗透变形。地下水渗透时产生渗透应力  $J = \gamma_w \cdot I$ ,  $\gamma_w$  为水的重度,  $I$  为水力梯度,水力梯度为 5.71 时产生约 56 kPa 的渗透应力,在水流过程中带走断层带细粒物质,长时间作用使裂隙带通畅,提高导水性。此外水渗透中遇裂隙,具有劈裂冲刷作用,增强断层带渗透性,扩大断层带导含水部位。

### 3.3 断层活化时效性

F2'断层在巷道过断层两年后发生透冲积层事故,为典型的滞后突水事故。武强等<sup>[15-19]</sup>在多年研究突水的基础上,提出了突水的时效观点:突水瞬间表现为一个综合效应下的瞬时地质工程事件,突水前表现为一个与时间有关的地质作用过程;时间效应指任何一种因素或几种作用相叠加,在长时间不改变其作用条件与

方式的场合,便会导致被作用的结构面岩石及充填物质发生流变或蠕变,从而强化结构面的变形、破坏和扩展。

前述条件下,F2'断层带内越流段导水性增加,由于断层泥中粘土矿物成分含量很高,遇水极易软化,力学性质弱化,孕酿着断层带活化。断层带集中的地应力场、多点局部不平衡工程应力场与高水头差地下水流场构成参与F2'断层时效活动的三场应力。

#### 4 结论

1)发生透冲积层事故的F2'断层在几何特征上具有多断层组合、落差大、破碎带宽度大的特征;工程地质特征上,破碎带遇水软化、膨胀、强度丧失,表现出极脆弱特性;在水文地质特征上表现出整体阻水局部含水的复杂性。实际工作中遇到此类复杂断层,需通过大量的勘探与分析工作,进行认识与控制。

2)高角度复杂F2'断层带在透冲积层黄泥时,其通道沿断层带产生,断层带物质发生类似急倾斜煤层抽冒的破坏,直导通上部距离较远的冲积层。这一问题在高角度断层区施工中需进行充分预防。

3)泥化断层活化的时效性受应力场与渗流场的强烈影响,复杂泥化断层区工程活动中需对所有工程活动导致的应力场失衡加以分析与有效控制,对冒落灾害产生的空间进行有效的充填。

4)阻水断层两侧高水头差,是断层活化的有利因素,采矿活动中应尽量减少脆弱断层长期承受高水压差的情况。

#### 参考文献:

- [1]马亚杰,冯玉,章之燕,等.煤层底板强含水层超前疏放分析与应用[J].煤炭学报,2014,39(4):731-735.  
Ma Yajie,Feng Yu,Zhang Zhiyan,et al. Analysis and application on the advanced discharge of water-rich aquifer of coal floor [J]. Journal of China Coal Society,2014,39(4):731-735.
- [2]马亚杰,王东,孙海威. ANN 采煤工作面最大涌水量预测与指标优化[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2013,32(7):869-873.  
Ma Yajie,Wang Dong,Sun Haiwei. ANN-based mining face maximum inflow forecasting and predicting index optimization [J]. Journal of Liaoning Technical University:Natural Science,2013,32(7):869-873.
- [3]洪益清,张瑞玺,霍忠锋,等.东欢坨矿透冲积层黄泥救灾和治理技术[J].煤田地质与勘探,2008,36(6):35-37.  
Hong Yiqing,Zhang Ruixi,Huo Zhongfeng,et al. Technology and practices in alluvial mud burst disaster relief and control in Donghuantuo coal mine[J]. Coal Geology & Exploration,2008,36(6):35-37.
- [4]李建民.东欢坨矿冲积层巷道突水治理技术[J].煤炭科学技术,2008,36(5):35-38.  
Li Jianmin. Control technology for water inrush in mine alluvium roadway of Donghuantuo Mine[J]. Coal Science and Technology,2008,36(5):35-38.
- [5]张品刚,曹代勇,王强,等.东欢坨矿构造特征及断裂构造定量研究[J].中国煤炭地质,2009,21(7):4-6.  
Zhang Pingang,Cao Daiyong,Wang Qiang,et al. Structural features and fault quantitative study in Donghuantuo coal mine [J]. Coal Geology of China,2009,21(7):4-6.
- [6]刘伟韬,武强.范各庄矿F0断层滞后突水数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3604-3610.  
Liu Weitao,Wu Qiang. Numerical simulations of water inrush of fault F0 in Fanggezhuang coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(S2):3604-3610.
- [7]董东林,王焕忠,武彩霞,等.断层及滑动构造复合构造区煤层顶板含水层渗流特征及突水危险性分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):373-379.  
Dong Donglin,Wang Huanzhong,Wu Caixia,et al. Seepage characters of roof aquifers in faults and sliding structure and risk analysis of water inrush[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(2):373-379.
- [8]张培丰.龙门山地震断裂带地应力分布及其对井壁稳定的影响:以WFSD-2井为例[J].地质与勘探,2012,48(2):379-386.  
Zhang Peifeng. In-situ stress distribution and its effects on borehole stability in the Longmenshan earthquake fault zone[J]. Geology and Prospecting,2012,48(2):379-386.
- [9]马向贤.断层泥特征及其工程地质意义[D].兰州:兰州大学,2010:1-23.
- [10]鲁得文.高速公路膨胀性泥岩隧道施工技术研究[D].兰州:兰州交通大学,2013:9-52.

- [11]田洪胜,洪益清,马亚杰.开滦东欢坨矿水文地质特征及防治对策[J].地下水,2009,31(3):110-113.  
Tian Hongsheng,Hong Yiqing,Ma Yajie. Hydrogeology characteristics and measures of water prevention in Donghuantuo Mine in Kailuan[J]. Ground Water,2009,31(3):110-113.
- [12]谭静,张普田,洪益清,等.开滦赵各庄矿2137西下工作面防水煤柱留设研究[J].中国煤炭地质,2009,21(4):35-37.  
Tan Jing,Zhang Putian,Hong Yiqing,et al. Research on Safety pillar against water in No. 2137 west lower working face, Zhaogezhuang Coalmine,Kailuan[J]. Coal Geology of China,2009,21(4):35-37.
- [13]马亚杰,左文喆,刘伯,等.隐伏向斜扬起端构造控水规律分析:以开滦东欢坨矿为例[J].煤炭学报,2012,37(S1):157-160.  
Ma Yajie,Zuo Wenzhe,Liu Bo,et al. Analysis on law of geological structures controlling groundwater in buried syncline nose;A case in the Donghuantuo coal mine,Kailuan[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(S1):157-160.
- [14]武强,董书宁,张志龙.矿井水害防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010:3-55.
- [15]武强,朱斌,李建民,等.断裂带煤矿井巷滞后突水机理数值模拟[J].中国矿业大学学报,2008,37(6):780-785.  
Wu Qiang,Zhu Bin,Li Jianmin,et al. Numerical simulation of lagging water-inrush mechanism of rock roadways near fault zone[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2008,37(6):780-785.
- [16]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.  
Wu Qiang,Zhu Bin,Liu Shouqiang. Flow-solid coupling simulation method analysis and time identification of lagging water-inrush near mine fault belt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(01):93-104.
- [17]武强,刘金韬,钟亚平,等.开滦赵各庄矿断裂带滞后突水数值仿真模拟[J].煤炭学报,2002,27(5):511-516.  
Wu Qiang,Liu Jintao,Zhong Yaping. The numeric simulations of water bursting time effect for faults in Zhaogezhuang coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2002,27(5):511-516.
- [18]刘伟韬,申建军,王连富.基于FLAC<sup>3D</sup>的断裂带滞后突水数值仿真技术[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2012,31(5):646-649.  
Liu Weitao,Shen Jianjun,Wang Lianfu. Numerical simulation on lag water-bursting at fault zone based on FLAC<sup>3D</sup>[J]. Journal of Liaoning Technical University:Natural Science,2012,31(5):646-649.
- [19]马亚杰,常江.东欢坨北二采区8煤顶板水害危险性评价[J].河北联合大学学报:自然科学版,2013,35(3):9-13.  
Ma Yajie,Chang Jiang. Risk evaluation of roof water inrush in Donghuantuo coalmine North 2th district No. 8 Coal[J]. Journal of Hebei United University:Natural Science Edition,2013,35(3):9-13.

(责任编辑:吕海亮)