

# 重复采动影响下采场坚硬覆岩离层水涌水致灾机制研究进展

徐德金, 邵德盛, 聂建伟, 陈海军

安徽省煤炭科学研究院煤矿水害防治中心, 合肥 230001

**摘要** 采场覆岩离层水水害是一种新型水害类型, 迄今为止对其认识不是十分清楚。为了更好地对其进行研究, 对该领域已有的研究成果进行梳理分析。首先, 对 9 个典型的离层水水害事例进行整理、总结, 得出 5 个方面的共同特征, 分别是坚硬覆岩、多煤层或单煤层分层开采所引起的重复采动、离层区具有充沛的补给来源、积水离层带与采场之间存在隔水层形成封闭水体、具有冲击地压等诱发因素。其次, 根据前人对离层水突水机制的阐述过程, 总结出 5 种揭示离层水突水的观点, 并基于物理场的角度把这 5 种观点归纳成 3 类: 渗流场的单独作用、应力场的单独作用、渗流场和应力场的耦合作用。最后, 指明了离层水害领域中 5 个研究重点, 并展望了发展方向。

**关键词** 重复采动; 上覆岩层; 离层水; 涌水; 水害

**中图分类号** TD12

**文献标志码** A

**DOI** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.23.014

## Advances in the Mechanism of Groundwater Gushing from Bed Separation of Hard Overlying Strata Induced by Repeated Coal Mining

XU Dejin, SHAO Desheng, NIE Jianwei, CHEN Haijun

Coal Mine Water Disasters Prevention Center, Anhui Province Coal Science Research Institute, Hefei 230001, China

**Abstract** The groundwater inrush from bed separation of overlying strata is a new type of water disaster. So far its mechanism is not recognized clearly. Therefore existing research results in this field were analyzed by the author. Firstly, nine typical examples of groundwater inrush from bed separation of overlying strata were sorted out and summarized. Then common characteristics on the five areas were obtained. They include hard overlying strata, repeated coal mining of multiple seams or single seam slicing mining, abundant water resources recharging bed separation space, closed water body between bed separation space and a stope, induction factors such as rock burst. Secondly, five viewpoints of groundwater inrush from bed separation of overlying strata were summarized, according to mechanisms expounded by previous researchers. And then on the basis of the view of the physical field, five viewpoints were generalized three categories: seepage field alone, stress field alone, coupling seepage field and stress field. At last, according to research results, five highlights and some prospects in the field of groundwater inrush from bed separation of overlying strata were pointed out.

**Keywords** repeated coal mining; overlying strata; water accumulation in the bed separation area; groundwater gushing; water disaster

### 0 引言

随着煤矿井工开采深度的增加, 多煤层开采也逐渐增多, 且上覆岩层结构也越来越复杂, 这些原因会诱发严重的煤矿地质灾害, 如顶板离层水水害。与以往常规顶板水(机制为静水压突水, 如顶板砂岩突水、顶板松散层突水等, 其突水过程可形象地描述为瓶塞有缝隙的热水袋中的水, 在重力作

用下流出瓶口)相比, 具有以下显著特征: 灾变瞬间涌水量巨大、无明显突水前兆、破坏性极大。

采场覆岩离层不是新近才有的现象, 很早以前已有学者对其进行了研究<sup>[1-3]</sup>。现阶段在离层体本身的形成机制、离层空间分布规律、离层注浆减沉等方面取得了许多研究成果。但采场覆岩中形成离层并不一定就能发育成离层水, 还受其

收稿日期: 2013-05-31; 修回日期: 2013-07-16

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(1308085QE90); 国家自然科学基金项目(41202179)

作者简介: 徐德金, 博士, 研究方向为矿井水文地质与工程地质, 电子信箱: dejinxu@126.com



他影响因素的制约。当前对于离层水的形成机制及其涌水致灾机制等研究较少,为了让更多的学者对此进行系统的认识,本文将全面详细地介绍国内学者在离层水水害方面的研究进展。

### 1 典型离层水水害事例分析

通过对国内学者的研究成果检索、整理,发现大多数学者都是基于某一个典型离层水水害事例进行单独研究,分析

各自矿井的离层水补给来源、致灾直接原因、突水过程等。尽管离层水是所有煤矿离层水事故的突水水源,但不同煤矿离层水突水事故的水源形成条件及其影响因素、致灾直接原因、突水通道等方面存在较大差异。这就需要对每个矿井水害事故进行总结、分析,以期达到对离层水突水机制进行全面研究的目的。表 1<sup>[9]</sup>统计了中国 9 个煤矿的典型顶板离层水水害事故<sup>[4-10]</sup>。通过表 1 可以发现,9 个离层水水害的发生具有以下 5 个共同的特征。

表 1 中国煤矿典型顶板离层水水害事故一览表

Table 1 Statistics of major groundwater inrush disasters occurred in the north China coalfield

矿区名称	矿井名称	突水时间	最大涌水量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	突水位置	覆岩岩性	离层所在位置	离层带补给水源	煤层开采顺序	直接诱发原因
重庆松藻	打通一矿	2008-12-02	650	S1821 工作面	石灰岩、泥岩	灰岩、与钙质泥岩界面	长兴组灰岩中富水带、玉龙山组灰岩弱含水层	先采上部 M7-3 煤,后采下部 M8 煤	顶部发生垮塌
山东兖州	济宁二号煤矿	2007-10-06	490	11306 工作面	厚层状砂岩、砂质泥岩、泥岩	砂岩	顶板二叠系砂岩含水层	3 煤	离层水体对其下位岩层施加一定的孔隙水压力及荷载作用
山东新汶	华丰煤矿	2005-09	780	1409 工作面	巨厚砾岩、黏土岩和砂岩互层	底砾岩和砾岩层和黏土层互层	第三系砾岩含水层	4 煤分 3 层开采	冲击地压
安徽淮北	海孜煤矿	2005-05-21	3887	745 工作面	厚层火成岩、粉砂岩、泥岩	火成岩底界、粉砂岩、粉砂岩与砂岩界面	砂岩弱含水层,四含水通过浅部露头 and 火成岩裂隙的缓慢补给	先采下部 10 煤,后采上部 7 煤	火成岩失稳破断形成的冲击地压对离层水产生动水压力作用
安徽淮南	新集一矿	2003-01-30	400	1307 工作面	片麻岩、石灰岩、砂页岩、泥岩	片麻岩与砂页岩界面	寒武系灰岩水、新生界三含水体	13-1 煤后于 11-2 煤、8 煤	冲击地压
安徽淮南	新集二矿	2001-12-28	85	1113104 工作面	片麻岩、石灰岩、泥质岩	片麻岩与砂页岩界面	寒武系灰岩水、新生界三含水体	13-1 煤后于 11-2 煤、8 煤	冲击地压
重庆南桐	南桐一井	1994-08-28	963	6404 工作面	石灰岩、砂岩、页岩	长兴灰岩	顶板裂隙水	先采下部 5 煤,后采上部 4 煤	剪切裂隙切穿离层水
重庆南桐	鱼田堡矿	1985	1500	2403 采区	石灰岩、砂岩、页岩	长兴中上部	顶板裂隙水	先采下部 5 煤,后采上部 4 煤	剪切裂隙切穿离层水
重庆南桐	南桐二井	1966-06-02	442	5404 区	石灰岩、砂岩、页岩	长兴灰岩	顶板裂隙水	先采下部 5 煤,后采上部 4 煤	剪切裂隙切穿离层水

(1) 煤层顶板的覆岩结构:存在坚硬岩层,如石灰岩、火成岩、片麻岩、厚层砂岩等。由于硬岩的存在,使其在采动效应影响下发生不均匀弯曲变形(岩层界面处和硬岩间),从而形成离层,离层的形成是发育离层水的前提条件。同时随着工作面的推进,覆岩中硬岩会发生破断,从而产生冲击力,对离层水体形成动水压力作用,也是离层水害诱发的直接原因。如众多学者对各自煤矿的统计结果可作为其成为主控因素的佐证(表1)。

(2) 离层空间的补给水源:若要形成离层水害,必须存在补给水源,如果没有,那么离层的发育在煤矿防治水领域不会存在威胁。由表1可以发现,补给水源多数为顶板砂岩裂隙水,但不排除存在其他水源补给,如淮南煤田内推覆体中的灰岩岩溶水、火成岩裂隙水、新生界松散层中水等。同时,需要水源补给通道,如采动引起离层裂隙、重剪裂隙,断裂活化导水等。

(3) 重复采动条件:可以是多煤层开采,也可以为厚的单煤层分层开采,总之要满足离层带分布范围广,离层空间大的要求。而通常的单煤层开采,在相同条件下也会形成离层,但是其离层空间是动态演化的,随着工作面的推进,离层带也向前发展,原先的离层会发生闭合,总之不能形成有限的离层空间。

(4) 离层到导水裂隙带之间具有隔水层:如果离层区与导水裂隙带间没有隔水层,那么不会形成封闭空间的水体,也不会形成具有一定水量和水压的积水离层带,那么其瞬时涌水量不会对矿井构成威胁。这种隔水层可以是软岩,如泥岩页岩等,容易被动水压力作用冲破,从而形成突水灾害。

(5) 致突诱因:直接诱发原因都与矿压有关,大多由冲击地压激发。原因如下:简单的离层区积水,其静水压力不会很大,不足以冲破隔水层,必须有强动力的矿压,如冲击地压,使得离层空间中水产生动水压力作用,从而形成突水通道,可以是水力劈裂或者渗流转换作用形式。通过已有的突水案例也会发现,所有的突水都与矿压显现规律一致。

## 2 离层水涌水致灾机制

中国对离层水突水机制的研究始于1992年,由谢宪德<sup>[9]</sup>基于南桐煤田3个井田的突水事例的研究得出。近些年,由于受其威胁的矿井越来越多,对其研究热度又重新高起来。下列是笔者对已有的研究成果进行梳理而得到的5种离层水突水机制。

观点1:由采矿活动使得巨厚坚硬岩层中形成弹性能积聚,当其达到一定程度时,会发生坚硬覆岩动力失稳,产生冲击性压力,迫使离层水体产生超高压动水压力作用,瞬时冲破离层带与采场临空面间的隔水层,从而引发动力突水。研究实例主要有海孜煤矿、新集一矿、新集二矿,研究者主要有:李文平<sup>[7]</sup>、王经明<sup>[10]</sup>、李伟<sup>[11]</sup>、程新明<sup>[12]</sup>、胡戈<sup>[14]</sup>、赵团芝<sup>[15]</sup>、李凤荣<sup>[16]</sup>、李忠凯<sup>[17]</sup>、任春辉<sup>[18]</sup>、韩东亚<sup>[19]</sup>、王争鸣<sup>[8]</sup>。

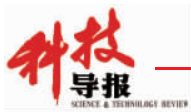
观点2:与观点1相比,引入了爆炸力学的理论,细化了突水通道的形成过程。具体为:离层上位厚层坚硬覆岩发生破断会对其下离层水体产生瞬间的冲击作用,这种冲击波在离层水体中传播、衰减至下位岩层,在下位岩层(隔水层)形成透射波,并对其产生冲击压缩。而离层下位岩层中的透射波及其冲击压缩作用在该岩层中则转化为弹性应力波,当应力波峰值应力达到一定强度时,隔水层将发生破坏,形成一定的动力突破带,即发生突水。研究实例主要有海孜煤矿,研究者主要有:李小琴<sup>[20]</sup>、乔伟<sup>[21]</sup>。

观点3:离层水形成以后,多煤层的重复采动后,采动裂隙会不断向上发育,随着开采面积的增大,其向上延伸的强度也随之增大,致使这些采动裂隙直接切穿采场覆岩中的积水离层带,从而引发离层水涌入工作面。研究实例主要有打通一矿、济宁二号煤矿、鱼田堡煤矿、南桐一矿、南桐二矿、海孜煤矿,研究者主要有:李吴波<sup>[4]</sup>、谢宪德<sup>[9,10]</sup>、朱卫兵<sup>[22]</sup>、胡东祥<sup>[23]</sup>。

观点4:随着补给水源对覆岩中离层补给水量及覆岩变形逐渐增大,离层水体具有一定的静水压力,将对下位岩层施加孔隙水压力及荷载作用。其中孔隙水压力对下位岩层微裂隙产生扩张、冲刷等作用,使得完整岩层中有效隔水层厚度逐渐减小;同时,荷载作用使得下部岩体的裂隙带高度增大,在水头压力差的作用下,最终导致覆岩离层积水涌入下部采场。研究实例主要有济宁二号煤矿,研究者主要有:乔伟<sup>[21]</sup>、乐建<sup>[24]</sup>、刘心广<sup>[25]</sup>。

观点5:坚硬覆岩断裂形成冲击地压,在冲击地压作用下水平离层和垂向断裂相互贯通,加剧了离层带与采场间的隔水岩层中原有裂隙和采动裂隙的发育,使裂隙率和裂隙高度都有所增加,同时导致离层水体的压力增加,离层水导入采空区。研究实例主要有华丰煤矿,研究学者主要有:张金涛<sup>[26]</sup>、景继东<sup>[27]</sup>、施龙青<sup>[28]</sup>、苏宝成<sup>[29]</sup>。

对上述5种离层水突水机制进行分析,结果发现,有些机制是学者对离层水突水现象的主观解释,有的是借用数学公式推导得出,有的是基于试验数据得到。总之从场的角度出发,上述5种突水机制可以整理成3类:渗流场的单独作用、应力场的单独作用、渗流场和应力场的耦合作用。根据表1中典型突水案例的分析,绘制了采场覆岩离层水突水模型示意图(图1)。通过对5种突水机制的认知过程的分析,并结合图1,笔者基本倾向于第3种情况。煤矿开采活动必然引起采场覆岩的应力场改变,应力场的改变会引起覆岩变形破坏,在一定岩层结构条件下(如坚硬覆岩),会形成离层空间和剪切裂隙。在此过程中受到顶板含水层渗流场的影响,离层带会通过一些断裂等构造(断层、软弱结构面、原生裂隙、次生裂隙等)接受水源的补给。随着时间和空间的演化,采场的范围越来越大,离层的空间越来越大,离层带积水的量、水压越来越大。当应力场继续变化时,坚硬覆岩会发生变形破坏即破断,从而对离层水体的渗流场产生一定的作用即动



水压力作用。随着渗流场与应力场耦合作用的进一步演化,将会发生涌水致灾。

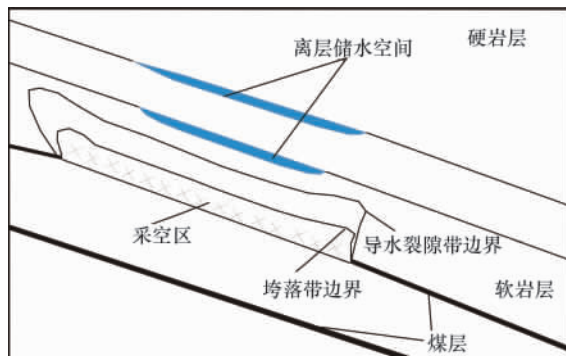


图 1 采场覆岩离层水突水模型示意图

Fig. 1 Sketches of groundwater inrush from bed separation

### 3 重点研究的问题

通过对文献的综述,可以发现离层水害研究还存在以下几个问题没有被认识清楚,如离层及其积水形成机制、离层水体的补给来源、离层水体的接受补给通道、离层水突水的直接原因、离层水害的主控因素。以下分析是众多研究学者针对每一个问题的看法。

(1) 离层及其积水形成机制。主要有以下 9 种观点:

- ① 覆岩由于竖向移动变形的大小和速度不同使得岩层间或层理面之间产生开裂,从而形成离层水<sup>[30]</sup>;
- ② 上部的岩体因岩性不同发生不均衡沉降,形成大量离层空间,发育离层水<sup>[4]</sup>;
- ③ 煤层顶板的强弱岩层在开采过程中因不同步的破坏或变形而产生离层,发育离层水<sup>[19]</sup>;
- ④ 由于岩层受拉产生离层水<sup>[31]</sup>;
- ⑤ 由于水平应力产生离层水<sup>[30]</sup>;
- ⑥ 由于岩层界面的力学特征产生的离层水<sup>[31]</sup>;
- ⑦ 上覆各岩层下沉速率并不完全一致,因而煤层回采初期在岩层间将出现张拉应力,而岩层间层理面的黏结强度较弱、抗张拉能力差,即在部分岩层间或内部分层间上下两岩层将发生分离,继而形成离层水<sup>[32]</sup>;
- ⑧ 弯曲带岩层在重力作用下而弯曲下沉,由于层理和上下岩性的变化导致上下岩体弯曲不同步,产生离层裂隙水<sup>[9]</sup>;
- ⑨ 由于岩层向下弯曲受拉而产生垂向裂隙,在沿岩层面上产生离层裂隙水。

(2) 离层水体的补给来源。主要有顶板砂岩裂隙含水层、松散层中水、地表水、附近采空区的水。

(3) 离层水体的接受补给通道。主要有断层构造、原生裂隙、采动裂隙、软弱结构面等。

(4) 离层水突水的直接原因。主要有以下 5 个原因:

- ① 坚硬覆岩的破断形成的冲击力;
- ② 整个顶板岩层及煤层的冲击地压;
- ③ 离层水的空隙水压力;
- ④ 离层水体的荷载;
- ⑤ 导水裂隙带的向上发育沟通。

(5) 离层水害的主控因素。主要因素包括:覆岩结构中存

在坚硬岩层、多煤层的重复采动、离层空间足够大、有充沛的水源补给、离层水的水量和水压大、离层积水带与采场间具有隔水层。

以上 5 类问题也是离层水研究将来需要重点研究的问题,只有这些问题研究透彻了,离层水的突水机制才能研究清楚,才能为煤矿提供行之有效的防治离层水的措施。

### 4 结论与展望

(1) 通过对 9 个煤矿的典型顶板离层水水害事故统计分析,得出发生离层水害事故所具有的 5 个共同特征:坚硬覆岩、多煤层或单煤层分层开采所引起的重复采动、离层区具有充沛的补给水源、积水离层带与采场之间存在隔水层形成封闭水体、具有冲击地压等诱发因素。

(2) 通过对以往离层水突水机制研究成果的梳理分析,得到 5 种离层水突水机制的观点,同时对这 5 种观点以场的角度归纳出 3 种情况:① 渗流场的单独作用;② 应力场的单独作用;③ 渗流场和应力场的耦合作用。

(3) 根据已有的研究成果分析,笔者认为对离层水的研究可以从以下几个方面进行突破:① 离层及其积水形成机制;② 离层水体的补给来源;③ 离层水体的接受补给通道;④ 离层水突水的直接原因;⑤ 离层水害的主控因素等。

(4) 离层水研究领域的许多方面还需进行更深入细致的研究,如:①对离层水涌水进行监测预警;② 预测评价可能存在离层水威胁的区块;③ 根据不同类型的离层水提出相应的防治技术方法等。

### 参考文献 (References)

- [1] Peng S S. Coal mine ground control[M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc, 1978.
- [2] Bieniawski Z T. Strata control in mineral engineering[M]. New York: Wiley, 1987.
- [3] Kratzsch H. Mining subsidence engineering[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1983.
- [4] 李吴波, 吴鹏, 王现金, 等. 缓倾斜地层顶板离层水对综采工作面的危害及防治探讨[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(10): 42-45.  
Li Wubo, Wu Peng, Wang Xianjin, et al. Coal Geology of China, 2009, 21(10): 42-45.
- [5] 乔伟, 李文平, 李小琴. 采场顶板离层水“静水压涌突水”机理及防治[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 96-104.  
Qiao Wei, Li Wenping, Li Xiaoqin. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(1): 96-104.
- [6] 景继东, 施龙青, 李子林, 等. 华丰煤矿顶板突水机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(5): 642-646.  
Jing Jidong, Shi Longqing, Li Zilin, et al. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(5): 642-646.
- [7] 李文平, 李小琴, 孙如华. 巨厚坚硬岩层下煤层开采“动力突水”初步研究[J]. 工程地质学报, 2008(S1): 446-450.  
Li Wenping, Li Xiaoqin, Sun Ruhua. Journal of Engineering Geology, 2008(S1): 446-450.

- [8] 王争鸣, 王经明. 新集矿区推覆体下采煤离层水的成因与防治[J]. 能源技术与管理, 2008, 32(3): 55-57.  
Wang Zhengming, Wang Jingming. Energy Technology and Management, 2008, 32(3): 55-57.
- [9] 谢宪德. 浅谈南桐煤矿采区顶板离层裂隙透水[J]. 矿山测量, 1992(2): 15-19.  
Xie Xiande. Mine Surveying, 1992(2): 15-19.
- [10] 谢宪德. 南桐煤矿深部采区离层裂隙突水的原因及其防治[J]. 煤矿安全, 1997(1): 31-35.  
Xie Xiande. Safety in Coal Mines, 1997(1): 31-35.
- [11] 王经明, 喻道慧. 煤层顶板次生离层水害成因的模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 231-237.  
Wang Jingming, Yu Daohui. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 231-237.
- [12] 李伟, 李文平, 程新明, 等. 整体结构顶板特大动力突水水害查治方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.  
Li Wei, Li Wenping, Cheng Xinming, et al. The method of surveying and prevention dynamic super water inrush concerned with whole structure roof [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008.
- [13] 程新明, 王经明. 海孜煤矿顶板离层水害的成因与防治研究[J]. 煤炭工程, 2008(7): 60-62.  
Cheng Xinming, Wang Jingming. Coal Engineering, 2008(7): 60-62.
- [14] 胡戈, 李文平, 刘启蒙, 等. 叠加开采顶板变形破坏离散元模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 498-501.  
Hu Ge, Li Wenping, Liu Qimeng, et al. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4): 498-501.
- [15] 赵团芝, 李文平, 李小琴, 等. 叠加开采应力及覆岩离层动态变化数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(1): 118-122.  
Zhao Tuanzhi, Li Wenping, Li Xiaoqin, et al. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(1): 118-122.
- [16] 李凤荣, 陈真富, 王和志. 煤层顶板离层水体分布规律及防治技术探讨[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(2): 239-243.  
Li Fengrong, Chen Zhenfu, Wang Hezhi. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(2): 239-243.
- [17] 李忠凯, 胡杰. 工作面顶板动态离层水治理研究[J]. 中国煤田地质, 2007, 19(2): 35-37.  
Li Zhongkai, Hu Jie. Coal Geology of China, 2007, 19(2): 35-37.
- [18] 任春辉, 李文平, 李忠凯, 等. 巨厚岩层下煤层顶板水突水机理及防治技术[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(15): 46-48.  
Ren Chunhui, Li Wenping, Li Zhongkai, et al. Coal Science and Technology, 2008, 36(15): 46-48.
- [19] 韩东亚, 王经明. 海孜煤矿顶板次生离层水的形成与防治[J]. 华北科技学院学报, 2008, 5(1): 9-12.  
Han Dongya, Wang Jingming. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2008, 5(1): 9-12.
- [20] 李小琴. 坚硬覆岩下重复采动离层水涌突机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.  
Li Xiaoqin. Study on the inrush mechanism of the water in bed separation due to repeated coal mining under hard rock[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [21] 乔伟, 李文平, 孙如华, 等. 煤矿特大动力突水动力冲破带形成机理研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1726-1733.  
Qiao Wei, Li Wenping, Sun Ruhua, et al. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1726-1733.
- [22] 朱卫兵, 王晓振, 孔翔, 等. 覆岩离层区积水引发的采场突水机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 306-311.  
Zhu Weibing, Wang Xiaozhen, Kong Xiang, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 306-311.
- [23] 胡东祥. 济宁煤田巨厚覆岩离层水突水机理初探[J]. 能源技术与管理, 2010(1): 94-97.  
Hu Dongxiang. Energy Technology and Management, 2010(1): 94-97.
- [24] 乐建. 采场顶板离层水涌水机理及其危险性评价研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.  
Le Jian. Mechanism of water inrush in roof bed separation of a mining face and its risk assessment [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [25] 刘心广, 王秀莲, 李小琴. 济宁二号煤矿覆岩离层积水诱发异常涌水分析[J]. 山东煤炭科技, 2011(6): 90-91.  
Liu Xinguang, Wang Xiulian, Li Xiaoqin. Shandong Coal Science and Technology, 2011(6): 90-91.
- [26] 张金涛. 华丰煤矿第三系砾岩水与开采四层煤关系[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(5): 35-38.  
Zhang Jintao. Coal Geology and Exploration, 2002, 30(5): 35-38.
- [27] 景继东. 巨厚砾岩顶板突水机理及防治技术研究[D]. 泰安: 山东科技大学, 2007.  
Jing Jidong. Roof giant conglomerate and technology controlling roof water[D]. Taian: Shandong University of Science and Technology, 2007.
- [28] 施龙青, 于小鸽, 魏久传, 等. 华丰井田4煤层顶板砾岩水突出影响因素分析[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 26-32.  
Shi Longqing, Yu Xiaoge, Wei Jiuchuan, et al. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 26-32.
- [29] 苏宝成. 华丰煤矿顶板突水机理及防治技术研究[D]. 泰安: 山东科技大学, 2005.  
Su Baocheng. Study on the apical plate of the water-inrush mechanism and the technique of prevention and harnessing in huafeng coal mine[D]. Taian: Shandong University of Science and Technology, 2005.
- [30] 何国清, 杨伦, 凌赓娣, 等. 矿山开采沉降学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991.  
He Guoqing, Yang Lun, Ling Gengli, et al. Mining subsidence theory [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1991.
- [31] 陆庭侃, 刘玉洲, 程立朝. 水平应力作用下采区巷道顶板离层特征[J]. 隧道建设, 2007(S1): 41-47.  
Lu Tingkan, Liu Yuzhou, Cheng Lichao. Tunnel Construction, 2007(S1): 41-47.
- [32] 钱鸣高, 刘听成. 矿山压力及其控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.  
Qian Minggao, Liu Tingcheng. Ground pressure and its control [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984.

(责任编辑 吴晓丽)