

文章编号: 1673-3363-(2012)01-0226-06

# 急斜煤层覆岩关键层对防水煤柱尺寸的影响

李永明<sup>1,2</sup>, 刘长友<sup>1</sup>, 黄炳香<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 山西大同大学煤炭工程学院, 山西 大同 037003)

**摘要** 为了对水体下急斜煤层的安全回采提供依据, 基于龙湖煤矿南二采区急斜煤层的水文工程地质和煤岩层赋存条件, 采用离散元 UDEC<sup>2D</sup> 数值计算, 分析了覆岩关键层对急斜煤层开采导水裂隙分布和防水煤柱稳定性的影响, 结果表明: 当上覆岩层无关键层时, 急斜煤层开采导水裂隙呈“耳型”分布, 而当上覆岩层存在关键层时, 导水裂隙以平行于岩层层面的离层裂隙为主, 且随着煤层采厚的增加呈抛物线型增大趋势, 顶板初次破断后导水裂隙向关键层及其上方岩层发育; 急斜煤层覆岩关键层的存在, 将明显增大防水煤柱的抽冒范围, 水体更易沿防水煤柱塑性破坏区渗流进入工作面采空区。据此, 现场设计了分带仰斜充填开采方法, 并采取了加固防水煤柱的措施, 有效确保了水体下急斜煤层的安全回采。

**关键词** 急斜煤层; 关键层; 导水裂隙; 防水煤柱; 流固耦合

**中图分类号** TD 325

**文献标识码** A

## Influence of Key Stratum on Waterproof Coal Pillar Size in Steep Seam

LI Yong-ming<sup>1,2</sup>, LIU Chang-you<sup>1</sup>, HUANG Bing-xiang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and safe Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Mining Engineering, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037003, China)

**Abstract** To provide theory basis for safety mining of steep seam under water body, the UDEC<sup>2D</sup> numerical calculation is used in this paper to analyze the influence of key stratum in overburden on water flowing fracture distribution and waterproof coal pillar stability, based on the occurrence conditions of coal-rock seams and hydrogeology conditions in South No.2 District of Longhu coal mine. The results show that when there is no key stratum in overburden, the water flowing fracture in steep seam mining presents “ear style” distribution. When there exists key stratum in overburden, the water flowing fracture is mainly composed of bed separated fracture parallel to the bedding face, and will be parabolically increased in tendency with mining height. In addition, the water flowing fracture zone begins to develop upwards the key stratum and its upper strata after the first breakage of main roof. The exit of key stratum in steep seam can enlarge the falling range of waterproof pillar obviously, and the water body is more easily to enter into the goaf along the plastic failure zone of waterproof pillar. Hereby, the strip and up-dip backfilling mining method is designed, and the corresponding measures are adopted to reinforce the waterproof pillar, so as to ensure safety mining of steep coal seam under water body.

**Key words** steep coal seam; key stratum; water flowing fracture; waterproof pillar; fluid-solid coupling

收稿日期: 2011-04-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209400)

作者简介: 李永明(1979-), 男, 山西省朔州市人, 讲师, 博士, 从事采矿工程方面的教学与研究。

Email: liyongming1569@163.com

Tel: 15162232351

急斜煤层由于倾角较大,充分采动后上覆岩层易发生破坏并向上扩展,同时,水体下急斜煤层开采时留设的防水煤柱在水头压力和矿山压力作用下也易发生抽冒,均导致急斜煤层开采比倾斜、缓斜煤层更易发生突水事故<sup>[1-3]</sup>。因此,急斜煤层开采合理的防水煤柱尺寸,不仅应考虑覆岩导水裂隙的发育高度,也应考虑防水煤柱自身的稳定性。目前,采用经验公式计算急斜煤层开采防水煤柱尺寸主要基于覆岩裂隙的发育高度,未考虑防水煤柱自身的稳定性<sup>[4]</sup>。同时,当煤层上方存在一层或几层较坚硬且厚的关键层时,将对整个上覆岩体的变形、破坏、离层和地表沉陷等一系列矿压显现起主要控制作用<sup>[5-7]</sup>。但目前覆岩关键层对急斜煤层开采,尤其对防水煤柱稳定性的影响研究相对较少。本文采用离散元数值计算和相似材料模拟试验,研究覆岩关键层对导水裂隙分布、防水煤柱稳定性以及水体渗流途径的影响,为水体下急斜煤层的安全开采提供依据。

## 1 急斜煤层水文地质和赋存条件

### 1.1 急斜煤层水文地质条件

黑龙江龙煤集团七台河分公司龙湖煤矿南二采区煤层赋存条件复杂,设计开采 44, 46, 48, 49, 54<sub>上</sub>, 57, 58<sub>上</sub>, 59 八层煤,多为急斜薄及中厚煤层,倾角最大 73°,平均为 60°。该采区急斜煤层上方分布有六对老窑,部分已废弃井口未按规程封闭,在废旧井巷中充满大量积水。同时,采区地表露头存在多处塌陷,且处于山谷之间,无法进行回填。雨季时地表大量积水沿煤层露头灌入使上覆废弃老窑空区与地表水体形成水力联系,导致南二采区急斜煤层开采存在严重的安全生产隐患。

### 1.2 急斜煤层赋存条件

48 煤为南二采区首采煤层,埋深 320~400 m,平均倾角 63°;煤厚平均 0.7 m,煤层结构单一,属稳定煤层。48 煤综合柱状如图 1。

柱状	名称	煤厚/m	岩性描述
.....	粉砂岩	10	灰黑色,层理发育,多为水平层理
.....	中砂岩	18	灰白色,无层理,坚硬,厚层状构造,结构致密
.....	粉砂岩	5	灰黑色,水平层理发育,整合接触,结构致密,坚硬
.....	48煤	0.4~1.0 0.7	黑色,半暗型煤层理发育,局部夹矸
.....	粉砂岩	2.2	灰黑色,岩石层理发育,结构致密

图 1 48 急斜煤层综合柱状图

Fig.1 Geological histogram of 48th steep coal seam

从图 1 可知,48 煤直接顶为厚 5.0 m 坚硬粉砂岩层,基本顶为厚 18.0 m 的坚硬中砂岩层,根据关键层的判断准则可知<sup>[8]</sup>,48 煤基本顶为关键层,其变形、破断将对上覆岩层的稳定和急斜煤层采场的矿压显现有较大的影响。

## 2 急斜煤层开采数值计算模型和方案

### 2.1 急斜煤层开采数值模型

为了研究覆岩关键层对水体下急斜煤层开采导水裂隙分布、防水煤柱稳定性的影响,以 48 煤赋存条件和开采技术条件为依据,采用离散元数值计算软件 UDEC<sup>2D</sup> 3.10,建立数值计算力学模型如图 2 所示。模型范围 120 m×160 m (长×高),回采步距 5 m,仰斜推进距离 80 m。采用围岩本构关系为莫尔-库仑准则,模型采用应力-位移混合边界,上表面施加均匀的垂直压应力和 3 MPa 的水体压力,两侧施加随深度变化的水平压应力。

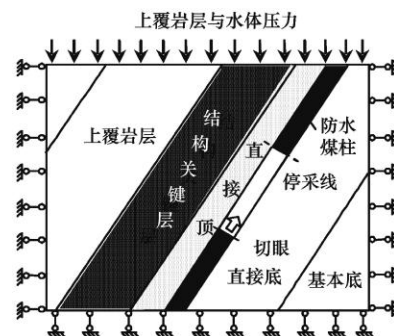


图 2 数值计算力学模型

Fig.2 Mechanical model of numerical simulation

### 2.2 煤岩层力学参数

根据 48 急斜煤层的赋存条件,模拟煤岩层的力学性质如表 1 所示。

表 1 煤岩层力学参数  
Table 1 Mechanical parameters of coal seam and rock strata

岩层性质	密度/ (10 <sup>3</sup> kg·m <sup>-3</sup> )	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	黏结力/ MPa	摩擦 角/(°)	抗拉强 度/MPa
上覆岩层	2.5	20	11	28	29	1.13
非关键层	2.4	18	10	30	32	1.12
关键层	2.6	26	12.5	32	34	1.18
直接顶	2.5	20	11	33	28	1.03
48 煤	1.4	12	8	4	20	0.60
直接底	2.6	20	11	26	29	1.15
基本底	2.75	23	12	29	31	1.14

同时, UDEC 离散元程序可较真实的模拟岩体中的不连续面,如断层、节理、层面等,并考虑了介质内存在大位移、旋转、滑动乃至块体分离的情

况, 以及可用于模拟流体沿节理面渗流, 分析流体在非渗水块体裂隙中的流动。由于岩体渗流实际上是裂隙渗流, 因此, 离散单元模型很大程度上可反映裂隙岩体渗流的实质<sup>[9]</sup>。数值模拟流体的密度  $d=1\ 000\ \text{kg/m}^3$ , 煤岩层节理的流体渗透系数  $k_j=10^8\ (\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ , 零应力水力孔径  $a_0=5 \times 10^{-4}\ \text{m}$ , 残余水力孔径  $a_{\text{res}}=2 \times 10^{-4}\ \text{m}$ 。

### 2.3 数值计算方案

为了分析急斜煤层开采, 上覆岩层关键层对导水裂隙分布、防水煤柱稳定性的影响, 并与上覆岩层中无关键层时进行比较, 数值计算采用方案有:

1) 上覆岩层存在和不存在关键层时, 分析急

斜煤层覆岩破断和导水裂隙的分布特征;

2) 上覆岩层存在和不存在关键层时, 研究急斜煤层防水煤柱的抽冒特征;

3) 上覆岩层存在关键层, 急斜薄煤层防水煤柱宽 20 m 时, 分析水体沿导水裂隙和防水煤柱渗流的特征。其中, 急斜薄煤层、中厚煤层和厚煤层采厚分别为 1, 2.5, 4 m。

## 3 数值计算结果分析

### 3.1 覆岩关键层对导水裂隙分布的影响

图 3 为急斜煤层开采上覆岩层中无关键层时不同采厚导水裂隙的分布特征。

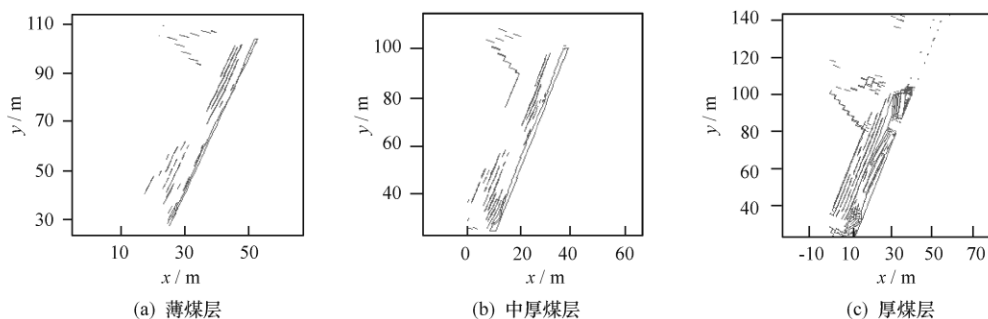


图 3 无关键层时采厚对导水裂隙分布特征的影响

Fig.3 Influence of mining height on water flowing fracture distribution without key stratum

从图 3 可知, 当上覆岩层内无关键层时, 急斜煤层不同采厚导水裂隙分布具有以下特征:

1) 不同采厚急斜煤层导水裂隙均呈“耳型”分布。“耳型”导水裂隙分布状态主要由工作面上部沿层面法向的垂直裂隙和平行于层面的离层裂隙构成。其中, 上部边界位置沿层面法向的垂直导水裂隙均超过采空区停采线位置。

2) 急斜薄煤层和中厚煤层工作面下部平行于层面的离层裂隙均较工作面上部发育, 如工作面下部离层发育高 11.3 m, 高于上部离层发育高 5.3 m。

而急斜厚煤层上部和下部离层高趋于相等。

3) 随着煤层采厚的增加, 急斜煤层工作面下部和上部的离层和垂直裂隙逐渐贯通。

4) 随着煤层采厚的增加, 急斜煤层工作面切眼上方附近的垂直裂隙也逐渐发育, 且急斜厚煤层工作面上部的垂直裂隙逐渐向采空区上山方向发育, 如图 3c 所示。

图 4 为急斜煤层上覆岩层中存在关键层时, 不同采厚条件下导水裂隙分布特征。

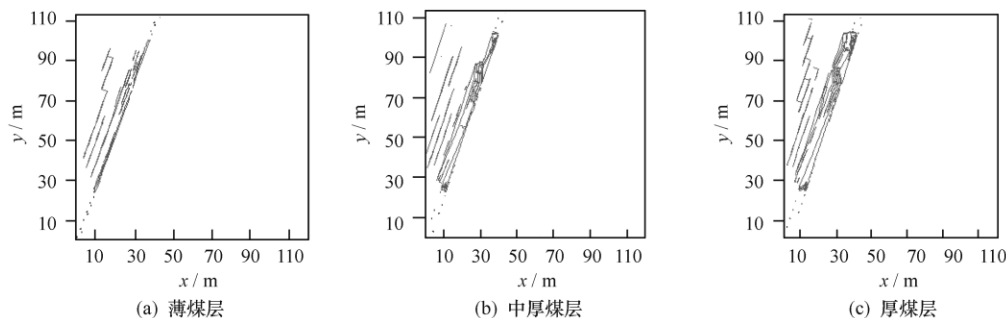


图 4 覆岩存在关键层不同采厚导水裂隙分布特征

Fig.4 Water flowing fracture distribution with key stratum for different mining height

1) 受覆岩中关键层的影响, 不同采厚急斜煤层导水裂隙均以离层裂隙为主, 并随着煤层采厚增加, 离层逐渐向关键层及其上方岩层发育。导水裂隙高随采厚的增加呈抛物线型增大趋势, 且符合

$$H_{li} = 1.8615M^2 - 12.537M + 27.369$$

$$R^2 = 0.9597$$

式中:  $H_{li}$  为导水裂隙高;  $M$  为煤层采厚。

2) 急斜厚煤层形成了垂直裂隙, 与离层裂隙沟通, 并逐渐向采空区上山方向发育, 如图 4c。

采用相似材料模拟试验, 研究急斜薄煤层上覆岩层中存在关键层时的导水裂隙分布特征如图 5。从图 5 可知, 急斜薄煤层覆岩存在关键层时, 顶板岩梁以层状破断为主, 初次断裂步距 60 m, 岩梁断裂高最大 8 m。采场顶板岩梁初次垮断后呈“耳型”分布。直接顶岩梁的断裂和失稳对工作面矿压显现影响较大, 直接顶岩梁初次垮断后, 离层裂隙逐渐向关键层及其上方岩层发育, 在关键层中上部距煤层 19 m 和 15 m 位置, 均形成延伸长约 30 m 的离

层, 其中, 距层面 15 m 的离层有和顶板岩梁初次破断裂隙贯通的趋势, 是上覆水体进入工作面的优势导水途径。

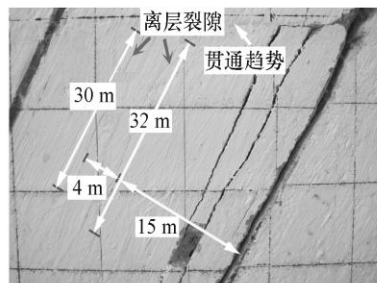


图 5 急斜薄煤层覆岩存在关键层导水裂隙分布特征

Fig.5 Water flowing fracture distribution characteristic with key stratum in thin steep seam

### 3.2 覆岩关键层对防水煤柱抽冒特征的影响

急斜煤层开采防水煤柱的抽冒特征受上覆岩层关键层的影响较大。当急斜煤层上覆岩层无关键层和存在关键层时, 不同采厚防水煤柱的抽冒特征如图 6 所示。

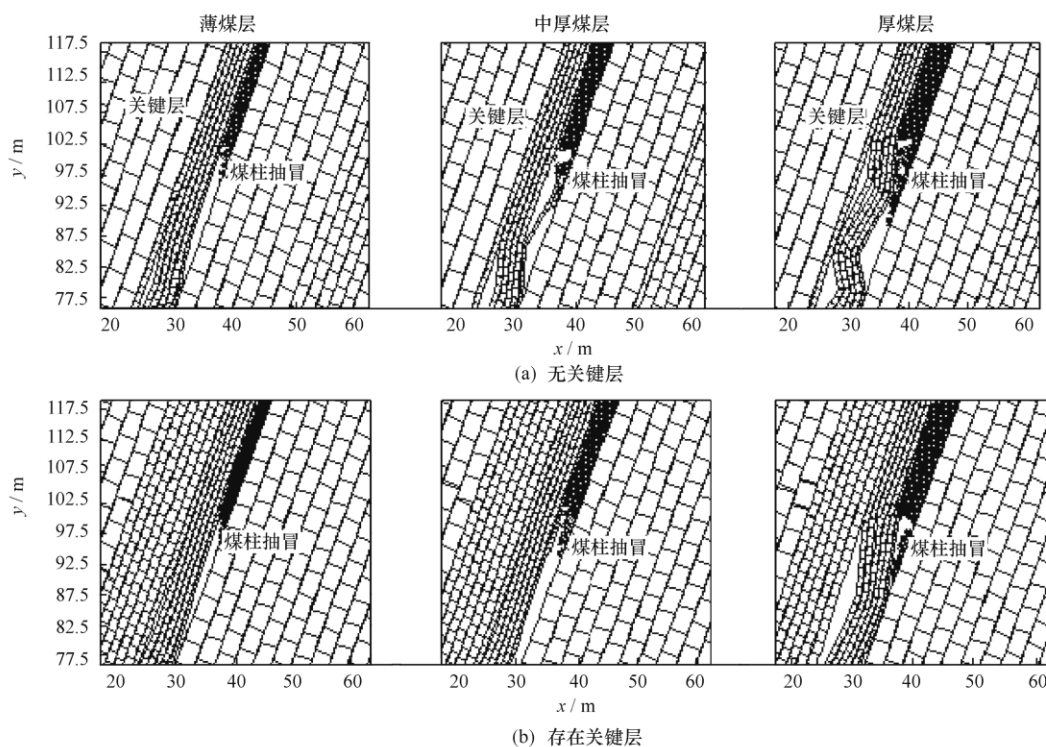


图 6 急斜煤层防水煤柱抽冒特征

Fig.6 Waterproof pillar falling characteristic in steep seam

不同采厚急斜煤层上覆岩层存在和无关键层时防水煤柱的抽冒范围对比如图 7 所示。

从图 7 可知, 急斜煤层开采因受上覆岩层有无关键层的影响, 防水煤柱抽冒具有以下特征:

1) 急斜煤层开采上覆岩层无关键层时, 防水

煤柱的抽冒范围随煤厚的增加呈增大趋势, 急斜厚煤层比薄煤层防水煤柱抽冒范围增大 121.4%; 当上覆岩层存在关键层时, 防水煤柱的抽冒范围也随煤厚的增加呈增大趋势, 且厚煤层比薄煤层防水煤柱抽冒范围增大 171.4%。

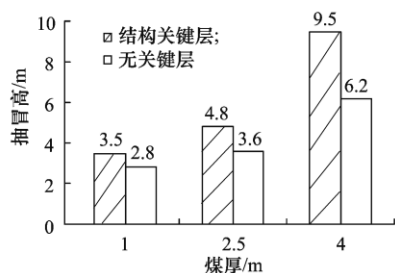


图 7 急斜煤层开采防水煤柱抽冒范围对比

Fig.7 Comparison of waterproof pillar falling height in steep seam

2) 急斜煤层开采上覆岩层中存在关键层时, 防水煤柱下部边缘煤体的抽冒范围比无关键层时明显增大。如在薄、中厚和厚煤层条件下, 抽冒范围分别增加了 33.3%, 25% 和 54.8%。

关键层影响急斜煤层开采防水煤柱抽冒范围的原因, 上覆岩层中存在较厚且较硬的关键层时, 应力传递要好于岩性较软的岩层, 从而使防水煤柱上的应力集中程度增大, 导致防水煤柱的抽冒破坏范围增加。

### 3.3 覆岩关键层对水体渗流途径的影响

急斜薄煤层防水煤柱宽度 20 m 时, 上覆水体沿防水煤柱和覆岩导水裂隙渗流的特征如图 8。

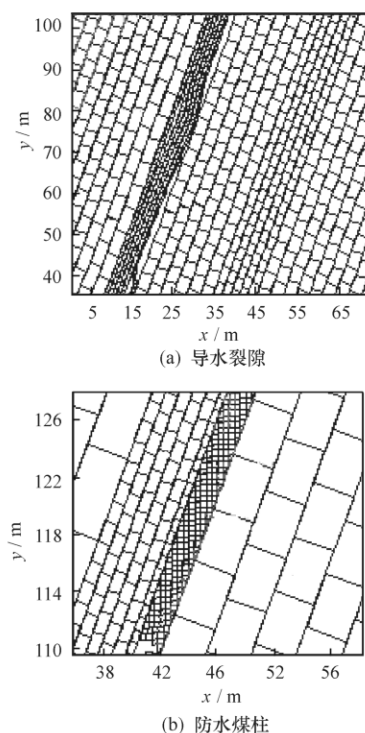


图 8 急斜薄煤层开采水体渗流特征

Fig.8 Water body seepage characteristic in thin steep seam

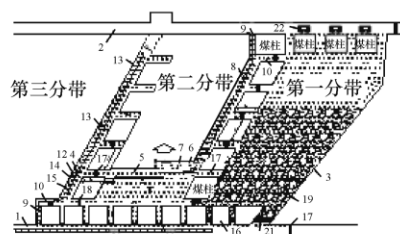
从图 8 可知, 防水煤柱宽 20 m, 上覆岩层存在关键层时, 虽部分离层扩展至上覆水体, 但由于垂

直裂隙不发育, 使离层和垂直裂隙未能贯通, 因此, 上覆水体不通过导水裂隙渗流进入急斜工作面空间。由于受关键层的影响, 防水煤柱下部边缘煤体抽冒范围不断增大, 同时, 在上覆岩层尤其是关键层形成的支承压力和水体压力共同作用下, 防水煤柱基本处于塑性状态, 水体沿防水煤柱煤体与煤层底板界面形成的突水通道渗流进入采空区。

因此, 上覆岩层存在关键层时, 水体下急斜薄煤层开采防水煤柱留设应以确保自身的稳定为主, 并尽量降低防水煤柱的塑性破坏宽度。同时, 根据数值计算结果, 当防水煤柱尺寸 30 m 时, 水体既不沿覆岩导水裂隙, 也不沿防水煤柱进行渗流, 可以确保水体下急斜煤层的安全回采。

## 4 现场应用

为了确保上覆岩层存在关键层条件下急斜煤层的安全回采, 对龙湖煤矿南二采区 48 煤设计了分带仰斜开采方法, 工作面分带走向长 25 m, 沿倾斜推进距 80 m, 分带间留设 5 m 煤柱。结合数值计算和相似材料模拟结果, 并考虑留有一定的安全系数, 确定 48 煤防水煤柱的合理尺寸为 45 m。同时, 确定了采空区矸石自溜充填并注浆胶结充填体的顶板控制技术, 当相邻分带回采时对已采分带及时进行充填, 如图 9 所示。



1- 运输巷; 2- 回风巷; 3- 切眼; 4- 进风上山; 5- 回采工作面  
6- 临时柱; 7- 作业平台; 8- 回风上山; 9- 安全出口; 10- 横川;  
11- 放煤仓口; 12- 煤柱; 13- 档杆板; 14- 防滑绳; 15- 防滑木;  
16- 巷道煤柱; 17- 密闭; 18- 调节风窗; 19- 矸石充填物;  
20- 巷道刮板输送机; 21- 煤粉; 22- 矿车

图 9 急斜煤层分带仰斜充填开采采煤方法

Fig.9 Strip and up-dip backfilling mining method used in steep seam

这种仰斜充填采煤方法, 有效防止了顶板岩梁的破断, 阻止了导水裂隙向关键层及其上方岩层的发育, 降低了防水煤柱上支承压力的大小, 从而可减小防水煤柱的塑性破坏范围<sup>[10]</sup>。同时, 为防止受关键层影响防水煤柱不断抽冒导致塑性破坏范围增大, 现场采取了煤柱加固措施, 在防水煤柱下边界采用木板、锚杆等进行加强支护, 局部进行了注

浆加固, 如图 10 所示, 现场应用取得较好效果。

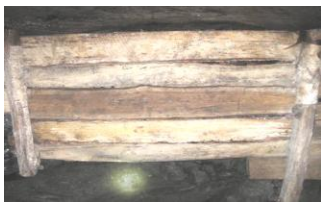


图 10 现场防水煤柱加固  
Fig.10 Waterproof pillar reinforcement on spot

## 5 结 论

1) 急斜煤层开采上覆岩层中关键层的存在, 影响导水裂隙的分布形态和发育高度, 并导致防水煤柱抽冒范围的增大。

2) 急斜薄煤层条件下, 受上覆岩层关键层的影响, 防水煤柱的塑性破坏范围大于导水裂隙的发育高度, 防水煤柱的设计尺寸应重点考虑防水煤柱自身的稳定性。

3) 急斜煤层分带开采矸石充填顶板控制技术, 可有效控制顶板下沉, 降低导水裂隙的发育高, 减小防水煤柱的塑性破坏范围, 从而确保水体下急斜煤层的安全回采。

## 参考文献:

- [1] 刘长友, 刘跃俊, 黄炳香, 等. 急斜煤层防水煤岩柱的失稳及留设[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(3): 330-334.  
LIU Chang-you, LIU Yue-jun, HUANG Bing-xiang, et al. Instability characteristic and reasonable design of water-preventive coal-rock pillars in mining steep coal seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(3): 330-334.
- [2] 赵苏启, 武强, 尹尚先. 广东大兴煤矿特大突水事故机理分析[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 618-622.  
ZHAO Su-qi, WU Qiang, YIN Shang-xian. Mechanism analysis of water inrush in daxing coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 618-622.
- [3] 李永明, 刘长友, 杨伟, 等. 急倾煤层采空区控顶方式对采场围岩稳定性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 20-24.  
LI Yong-ming, LIU Chang-you, YANG Wei, et al. Roof control method of coal mining in steep seam affected to surrounding rock stability of coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1): 20-24.
- [4] 中华人民共和国国家煤炭工业局. 建筑物、水体下、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- [5] 缪协兴, 陈荣华, 浦海, 等. 采场覆岩厚关键层破断与冒落规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1289-1295.  
MIAO Xie-xing, CHEN Rong-hua, PU Hai, et al. Analysis of breakage and collapse of thick key strata around coal face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1289-1295.
- [6] 缪协兴, 浦海, 白海波. 隔水关键层原理及其在保水采煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 1-4.  
MIAO Xie-xing, PU Hai, BAI Hai-bo. Principle of water-resisting key strata and its application in water-preserved mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology. 2008, 37(1): 1-4.
- [7] 桂和荣. 防水煤(岩)柱合理尺寸留设的应力分析计算法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1997: 39-48.
- [8] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000: 46-50.
- [9] 谢文兵, 陈晓祥, 郑百生. 采矿工程问题数值模拟研究与分析[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005: 18-32.
- [10] 李永明, 刘长友, 李西蒙, 等. 水体下急斜煤层采空区矸石充填顶板控制研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(9): 1419-1424.  
LI Yong-ming, LIU Chang-you, LI Xi-meng, et al. Research on roof control effect for gangue backfilling of goaf in thin steeply inclined seam under water body[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(9): 1419-1424.