

# 上覆不明采空区突水危险性分析及积水范围探测

乔宁, 丁亮斌

(大同煤矿集团有限责任公司, 山西 大同 037003)

**摘要:**针对整合矿井上覆不明采空区工作面易发生老空水害的工程难题,以重组整合矿井胜利煤矿太原组 10 号煤层开采为例,运用力学模型分析、经验公式计算以及数值模拟方法,综合分析研究了 10 号煤层及上覆 6 号、2 号煤层开采后的导水裂隙带高度、底板破坏带深度情况。研究表明:10 号煤层及上覆 6、2 号煤层开采后的最大导水裂隙带高度分别是 54.94、30.49、33.67 m,最大底板破坏带深度分别是 12.24、3.12、1.25 m,基于其相对空间位置,判断出 2 号煤层采空区积水不会影响 10 号煤层开采,而 6 号煤层采空区积水会直接进入 10 号煤层,对 10 号煤层安全生产造成重大影响;利用调查资料、地面物探、井下物探相结合的方法对 6 号煤层不明采空区积水范围进行了精确定位,为后续钻探放水提供了依据,为相似工程条件下上覆采空区突水危险性分析及积水范围探测提供借鉴。

**关键词:**不明积水;采空区突水;地面物探;井下物探

中图分类号:TD745

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2017)08-0048-07

## Analysis on water inrush risk and detection of accumulation water scope in overlying unknown gob

Qiao Ning, Ding Liangbin

(Datong Coal Mine Group Co., Ltd., Datong 037003, China)

**Abstract:** Aimed at the engineering problems of goaf water disaster easy to happen in the goaf of the unknown goaf in the mine, taking No. 11 coal seam of Taiyuan Formation of Shengli Coal Mine which belonged to reorganization and integration mine as an example, the mechanical model analysis, empirical formula calculation and numerical simulation method were adopted, height of water flowing fractured zone and depth of failure zone of floor were analyzed and studied after the No. 10 coal seam was mined and the overlying No. 6 and No. 2 coal seams were mined. Results showed that the maximum height of water flowing fractured zone was respectively 54.94, 30.49 and 33.67 m when No. 10, No. 2 and No. 6 coal seams were mined, and the maximum floor failure zone depth was respectively 12.24, 2.55 and 1.25 m, based on the relative spatial location of them, it was concluded that the water in the goaf of No. 2 coal seam would not affect the mining of No. 10 coal seam, and the water in the goaf of the No. 6 coal seam would come into No. 10 coal seam, and could bring great influences on the safety production of No. 10 coal seam. The scope of accumulated water in unknown mined out area was accurately determined combine with several methods, including survey data, surface geophysical prospecting and underground geophysical prospecting, all this could provide references for risk analysis and range detection of water inrush in overlying unknown mined out area.

**Key words:** unknown accumulated water; water inrush of gob; surface geophysical prospecting; underground geophysical prospecting

## 0 引 言

我国煤炭资源丰富,矿井水文地质条件复杂,水害事故频发,特别是老空水害事故占有较大的比例。老空水突水具有水量大、时间短以及破坏性强等特点,

一旦突水,就会造成巨大的经济损失和人员伤亡,严重威胁矿井的安全生产。随着矿井开采水平的不断延深,开采条件愈发复杂,近几年所发生的水害事故中,老空水所造成的比例越来越大。2009年,山西省进行了煤炭资源整合,随着整合工作的开

收稿日期:2017-04-08;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.08.009

作者简介:乔宁(1965—),男,山西阳高人,高级工程师,现任大同煤矿集团地方煤炭有限责任公司总工程师。E-mail:qiaoning03@163.com

引用格式:乔宁,丁亮斌.上覆不明采空区突水危险性分析及积水范围探测[J].煤炭科学技术,2017,45(8):48-54.

Qiao Ning, Ding Liangbin. Analysis on water inrush risk and detection of accumulation water scope in overlying unknown gob[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(8): 48-54.

展,山西省煤炭产量达历史最高水平,安全生产形势明显好转,尽管如此,资源整合矿井采空区不明积水仍然是影响矿井安全生产的重大隐患,特别是上覆小煤矿不明采空区下的工作面回采时,由于一些小煤矿的不规范开采及采掘资料的缺失,导致采空区积水位置范围难以弄清,从而造成多起透水事故。因此,为了矿井的安全生产,有必要研究上覆小窑不明采空区工作面老空水害的突水危险性,在弄清楚有突水危险性危害的基础上进一步确定积水范围,从而能有效地指导生产矿井制定一套科学合理的防治水方案。笔者以同煤集团临汾宏大重组整合矿井胜利矿太原组10号煤层开采为背景,运用力学模型分析、经验公式计算以及数值模拟方法综合研究了10号煤层及上覆2、6号煤层开采后的导水裂隙带高度、底板破坏带深度,分析了10号煤层开采时受到上覆6、2号煤层采空区积水的影响程度。在此基础上,进一步利用调查资料、地面物探、井下物探相结合的方法对6号煤层不明采空区积水范围进行了精确定义。

## 1 工程概况

大同煤矿集团临汾宏大胜利矿是兼并重组整合矿井,井田长3.5 km,宽1.60~2.65 km,面积7.15 km<sup>2</sup>,设计生产能力60万t/a。井田内主要可采煤层自上而下为2、6和10号煤层,井田内及周围有40多个关闭小煤矿,原小煤矿主要开采2、6号煤层。目前,2、6号煤层已全部开采完毕,主要开采10号煤层。其中10号煤层平均厚度5.05 m,煤层倾角4°,顶板为石灰岩,底板为泥岩,10号煤层与6号煤层层间距42.30 m,6号煤层平均厚度1.05 m,6号煤层与2号煤层层间距50.47 m。2号煤层平均厚度1.40 m。由于缺乏小煤窑开采资料,无法确定2、6号煤层采空区积水情况,将直接影响10号煤层的安全开采。

## 2 上覆不明采空区工作面突水危险性分析

为判定小煤窑采空区不明积水对10号煤层开采的影响程度,通过力学模型分析、经验公式计算及数值模拟方法,分别计算2、6、10号煤层导水裂隙带高度及底板破坏带深度,分析2、6号煤层采空区不明积水对10号煤层开采的影响程度。

### 2.1 上覆老空水形成机理

矿井生产实践及相关研究表明,工作面上覆老空水的形成是由充水水源、连通充水水源的充水通

道及其充水空间一起所造成的,一旦发生突水,必然是多种因素综合作用,由充水、积水到突水的过程,是一个量变到质变的过程。

充水水源是老空水形成的前提条件,老空水充水水源由大气降水、地表水、松散层水、砂岩水、灰岩水以及其他矿井废水构成的多种水源类型,然而,有水源后必须由一定的充水空间,即废弃的老空区。而要发生突水还必须具备连通充水空间与工作面的充水通道,常见的充水通道主要有顶板垮落形成的导水裂隙带、底板破坏带、封闭不良勘探钻孔、陷落柱、断层等。主要研究由10号煤层工作面顶板垮落形成的导水裂隙带与上层煤层的底板破坏带形成的充水通道。

### 2.2 老空水充水通道分析

上覆不明采空区工作面发生突水的通道是由工作面回采形成的导水裂隙带与上层煤层开采形成的底板破坏带深度所构成,其二者之和小于煤层之间的层间距,则不会发生突水;否则,就有突水危险。其中,10号煤层与6号煤层层间距42.3 m,6号煤层与2号煤层层间距50.47 m。

#### 2.2.1 导水裂隙带与底板破坏带理论分析

利用板壳理论和关键层理论<sup>[1]</sup>构建导水裂隙带发育高度计算力学模型<sup>[2-5]</sup>,对2、6、10号煤层的导水裂隙带高度进行计算分析。

1) 坚硬岩层位置的确定。坚硬岩层是指变形挠度小于其下部岩层,且不与下部岩层协调变形的岩层。假设第1层岩层为坚硬岩层,其上至第 $m$ 层岩层与之协调变形,而第 $m+1$ 层岩层不与之协调变形,那么第 $m+1$ 层岩层就被视为第2层坚硬岩层。依组合梁理论得出第1层坚硬岩层的上覆载荷为

$$q_1 | _m = \frac{E_1 h_1^3 \sum_{i=1}^m h_i \gamma_i}{\sum_i E_i h_i^3} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中: $q_1 | _m$ 为第 $m$ 层岩层对第1层坚硬岩层形成的载荷; $h_i$ 为第 $i$ 层岩层的厚度; $\gamma_i$ 为第 $i$ 层岩层的容重; $E_i$ 为第 $i$ 层岩层的弹性模量。

同理,可得第 $m+1$ 层岩层对第1层岩层形成的载荷,如果第 $m+1$ 层岩层为坚硬岩层时,应满足:

$$q_1 | _m > q_1 | _{m+1} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)可以得出:

$$E_{m+1} h_{m+1}^2 \sum_{i=1}^m h_i \gamma_i > \gamma_{m+1} \sum_{i=1}^m E_i h_i^3 \quad (3)$$

判别坚硬岩层时,从第1层逐次向上计算,当满足式(3)时停止计算,此时第 $m+1$ 层岩层为坚硬岩层。再从第 $m+1$ 层上方的岩层按照同样的方法判断坚硬岩层,直至最后一个岩层。

2) 临界载荷和极限位移的确定。应用板壳理论对坚硬岩层在开采过程中的断裂极限进行分析。临界载荷大于坚硬岩层上覆载荷,且极限位移大于坚硬岩层下方自由空间高度,断裂带停止发育,即获得断裂带高度位置。

用厚度为 $a$ 的板表示坚硬岩层,取中面为 $xy$ 平面, $x$ 方向为工作面推进方向, $y$ 方向为工作面布置方向。 $z$ 轴垂直于 $xy$ 平面,取 $z>0$ 的一面为上表面, $z<0$ 的一面为下表面。在本模型中,假定岩层厚度是均匀分布的,而且应力在坚硬岩层的表面上也是均匀分布的。煤层顶板坚硬岩层分析如图1所示。

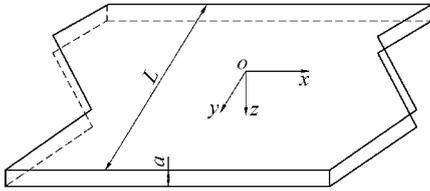


图1 煤层顶板坚硬岩层模型

Fig. 1 Model of hard rock strata of coal seam roof

图1中 $x$ 方向为工作面推进方向, $y$ 方向为工作面平行方向,当上方受到均匀的压力 $Q$ 时,顶板

处于初次断裂时的临界载荷 $Q_1$ 为

$$Q_1 = \frac{4\pi^2 CD}{L^2 C + 4\pi^2 D} \quad (4)$$

式中: $L$ 为工作面斜长; $D$ 为坚硬岩层的抗弯刚度, $D = \frac{E a^3}{2(1-\nu^2)}$ , $\nu$ 为泊松比, $a$ 为坚硬岩层的厚度, $E$ 为坚硬岩层弹性模量; $C$ 为剪切刚度, $C = Ga$ , $G$ 为剪切模量。

顶板处于初次断裂时的极限位移 $W_1$ 为

$$W_1 = \frac{L^2 C \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{L}\right) + 4\pi^2 D}{L^2 C + 4\pi^2 D} \quad (5)$$

3) 坚硬岩层下方自由空间高度 $Z$ 为

$$Z = M - \sum_{j=1}^{i-1} h_j (\mu_j - 1) \quad (6)$$

式中: $Z$ 为岩层可下沉高度; $M$ 为采高; $h_j$ 为第 $j$ 层岩层厚度; $\mu_j$ 为第 $j$ 层岩层的碎胀系数, $j=1,2,\dots,i-1$ , $i$ 为目标岩层。

从式(6)可以看出,自由空间高度与采高成正比,与碎胀系数成反比。根据本矿区的实际地质条件,碎胀系数的一般取值范围为1.4~1.6,为分析开采过程中可能的最大裂隙带高度,分析过程中碎胀系数取值为1.4。笔者以2号煤层为例进行说明,以表1的数据为基础,计算2号煤层裂隙带高度。

表1 2号煤层覆岩层分布及其岩性参数

Table 1 Distribution of strata and its lithological parameters in No.2 seam

岩性	埋深/m	厚度/m	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	抗剪强度/MPa	弹性模量/GPa
未取岩心段	79.17	79.17	—	—	—	—	—
粉砂岩	83.82	4.65	2 619	36.35	1.79	2.51	12.05
泥岩	88.48	4.66	2 609	23.18	1.21	3.47	6.50
细砂岩	89.48	1.00	2 608	45.08	1.83	3.02	12.48
粉砂岩	93.13	3.65	2 619	36.35	1.79	2.51	12.05
细砂岩	101.35	8.22	2 608	45.08	1.83	3.02	12.48
中砂岩	109.00	7.65	2 721	41.2	1.79	2.45	11.8
泥岩	111.75	2.75	2 609	23.18	1.21	3.47	6.50
细砂岩	114.82	3.07	2 608	45.08	1.83	3.02	12.48
泥岩	118.45	3.63	2 609	23.18	1.21	3.47	6.50
粉砂岩	120.41	1.96	2 619	36.35	1.79	2.51	12.05
泥岩	122.63	2.22	2 609	23.18	1.21	3.47	6.50
2号煤	124.03	1.40	2 292	11.27	0.84	1.23	4.74

通过式(3)可以得到坚硬岩层分别为:距离2号煤层7.81 m,厚度为3.07 m的细砂岩J1层;距离

2号煤层21.28 m,厚度为8.22 m的细砂岩J2层。

通过式(4)和式(6)计算得到:J1层的临界载荷

为  $1.6 \times 10^6$  kN, 极限位移为 0.42 m; J2 层的临界载荷为  $3.9 \times 10^6$  kN, 极限位移为 0.64 m。

当工作面推进 58 m 时, J1 层的载荷为  $1.6 \times 10^6$  kN, 自由空间高度为 0.82 m。此时, J1 层承受的载荷等于临界载荷, J1 层极限位移小于其可下沉高度, J1 层会发生断裂。工作面继续推进, J2 层承受的载荷和下方自由空间高度不能同时达到临界载荷和极限位移, 所以 J2 层在整个开采过程中不会发生断裂。最终裂隙带发育至 J2 层下部, J2 层与煤层间

距为 21.28 m, 确定 2 号煤层的裂隙带高为 21.28 m。据板壳理论计算公式, 岩体底板破坏深度为

$$h = \frac{1.57\gamma^2 + H^2 L_x}{4\sigma_c^2} \quad (7)$$

式中:  $\gamma$  为底板岩体平均容重;  $H$  为采深;  $\sigma$  为岩石抗压强度。

按照上述计算方法和计算过程, 对 6、10 号煤层的裂隙带高度和底板破坏深度进行计算, 计算结果见表 2。

表 2 2、6、10 号煤层导水裂隙带高度和底板破坏深度综合计算结果

Table 2 Calculation results of water flowing and depth of seam floor fractured zone in No.2, No.6, No.10 coal seam

煤层	采高/m	导水裂隙带高度/m			底板破坏深度/m		
		理论计算	经验公式	数值模拟	理论计算	经验公式	数值模拟
2 号	1.40	21.28	33.67	29	0.56	1.25	1
6 号	1.05	8.32	30.49	14.2	1.41	3.12	2
10 号	5.05	38.86	54.94	47	2.13	12.24	5

2.2.2 导水裂隙带与底板破坏深度经验公式计算

根据《三下采煤规程》等相关规定, 对矿井主要可采煤层的导水裂隙带最大高度和工作面底板裂隙带深度可用以下公式进行计算:

$$H_{li} = 20\sqrt{\sum M} + 10 \quad (8)$$

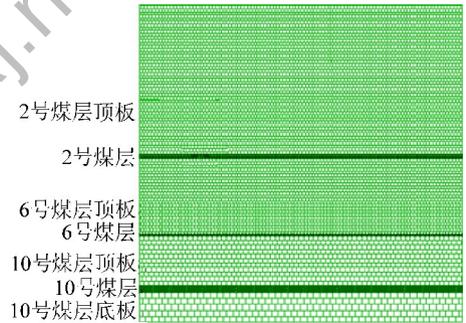
$$H_{po} = 0.0085H + 0.1665\alpha + 0.1079L - 4.3579 \quad (9)$$

式中:  $H_{li}$  为导水裂隙带最大高度;  $M$  为累计采高;  $H_{po}$  为工作面底板破坏带深度;  $H$  为采深;  $\alpha$  为煤层倾角;  $L$  为工作面斜长。

按照上述经验公式, 2、6、10 号煤层导水裂隙带高度和底板破坏深度计算结果见表 2。

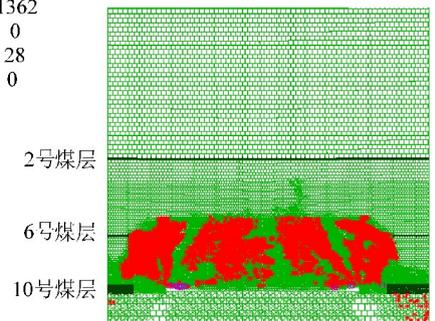
2.2.3 导水裂隙带与底板破坏深度数值模拟分析

通过在 UDEC 软件上建立 2、6、10 号层模型, 来模拟最大导水裂隙带高度和底板破坏深度<sup>[6-8]</sup>。模型长×高为 200 m×210 m, 自上而下岩层是 2 号煤层顶板, 2 号煤层, 6 号煤层顶板, 6 号煤层, 10 号煤层顶板, 10 号煤层, 10 号煤层底板的单元尺寸分别为 1.0 m×1.0 m, 0.8 m×0.7 m, 1.0 m×1.0 m, 0.5 m×0.6 m, 3.0 m×3.5 m, 1.2 m×1.2 m, 4.0 m×4.0 m, 总计 18 138 个单元, 如图 2 所示。在单层开采 10 号煤层时, 模拟采高 5.05 m, 模拟其顶板最大导高, 如图 2 所示, 最大导水裂隙带高度为 47.00 m, 最大导水裂缝带高度与采高比约为 9.3 : 1.0。底板的最大破坏带深度为 5.0 m。其中, 2、6、10 号煤层开采后导水裂缝带高度和底板破坏深度模拟结果见表 2。



(a) 初始模型

no.zones:total 21362  
at yield surface (e) 0  
yielded in past (x) 28  
tensile failure (o) 0



(b) 10 号煤层工作面顶板破坏场范围

图 2 初始模型与 10 号煤层工作面顶板破坏场范围

Fig. 2 Initial model and roof damage range of working face in No.10 coal seam

2.3 采空区突水危险性分析

为保证开采安全, 取上述 3 组数据较大一组经验公式的结果作为参考依据。2 号煤层与 6 号煤层的层间距为 50.47 m, 大于 6 号煤层导水裂隙带高度与 2 号煤层底板破坏深度之和 31.74 m, 由此判断 2

号煤层采空区积水不影响6号煤层开采。6号煤层和10号煤层同时开采,10号煤层与2号煤层间距为93.82 m,大于10号煤层最大导水裂隙带高度与2号煤层底板破坏深度之和55.74 m,即2号煤层采空积水不会影响10号煤层安全开采<sup>[9-10]</sup>。

### 3 不明采空区积水范围探测

为查清6号煤层不明采空积水对10号煤层开采的影响范围,通过查阅当地有关资料,运用地面物探、井下物探探测相结合的方法<sup>[12-15]</sup>,查清不明积水区的位置、积水量以及影响区域。

#### 3.1 调查资料分析

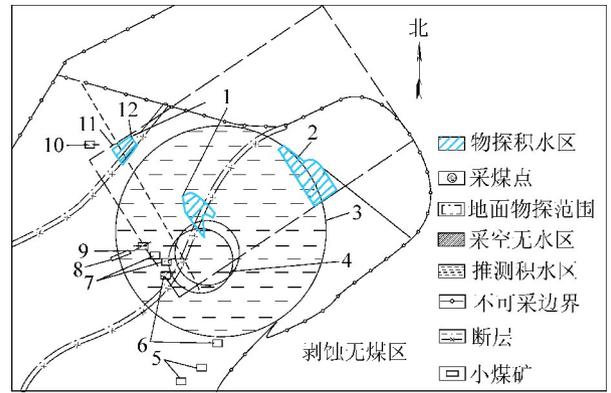
根据相关资料,井田范围内有5座小煤窑,分别为卓里大队煤矿、一平恒煤矿、一平恒联营煤矿、西郭一号井、西郭二号井。卓里大队煤矿,调查总采出煤量约20万t。主斜井方位角为北偏东53°,长度约为330 m,井下有积水。沿主井方位角,并按斜长330 m确定与6号煤层的见煤点,并该点为圆心,按20万t产量,平均采高0.95 m,以20%采出率(山西地方志记载)计算出开采半径为450 m。以此做出的圆即为推测的开采范围,应为疑似积水采空区,积水面积为635 122 m<sup>2</sup>,为面信息。一平恒煤矿为斜井开拓,斜井方位角为北偏东60°,斜井长约200 m,在煤层倾斜方向上确定见煤点。说明在见煤点附近一定范围内存在积水采空区,为点信息。一平恒联营煤矿,推测结果为线信息,无积水;西郭一号井,采空区面积为63 000 m<sup>2</sup>,推测结果为面信息,有积水。西郭二号井,采空区面积为64 337 m<sup>2</sup>,推测结果为面信息,有积水。共计3个面信息,1个点信息,1个线信息,如图3所示。

#### 3.2 地面物探

为探测首采区上部采空区及其积水情况,利用瞬变电磁仪对6号煤层进行地面瞬变电磁法探测<sup>[16-18]</sup>。将6号煤层物探结果与小煤窑开采范围推测结果进行对比,如图3所示。通过对比,在6号煤层探测到3处积水异常区,积水1区积水面积7 800 m<sup>2</sup>,积水2区积水面积11 800 m<sup>2</sup>,积水3区积水面积25 600 m<sup>2</sup>。

#### 3.3 井下物探验证

为了验证6号煤层积水异常区,利用现有井下巷道设置4个测站进行物探验证<sup>[18-20]</sup>,分别在运输巷掘进445 m处、轨道巷掘进370 m处和主斜井掘进480 m处验证了卓里大队煤矿开采情况;在副斜



1—地面物探积水2区;2—地面物探积水3区;3—卓里大队煤矿采空区;4—西郭一号井采空区;5—西郭二号井;6—西郭一号井;7—卓里大队煤矿;8—平恒联营煤矿无水采空线图层;9—平恒联营煤矿;10—平恒煤矿;11—地面物探积水1区;12—平恒煤矿采空积水点  
图3 6号煤层物探结果和小煤矿开采范围推测结果

Fig. 3 Results of geophysical prospecting and inferred of small coal mining range in No.6 coal seam

井227~267 m处验证了地面物探采空区积水异常3区。在1号测站斜向上60°进行物探,发现6号煤层交线附近无异常区,判定该交线处为未采区。在2号测站斜向下30°进行物探,发现6号煤层的交线穿过低阻异常区,表明此处存在积水区可能性,同时,该处位于卓里大队煤矿开采推测范围内,且该处位于地面物探异常3区,进一步验证了地面物探异常3区为积水区。在3号测站斜向下30°进行物探,其电阻率剖面如图4所示。

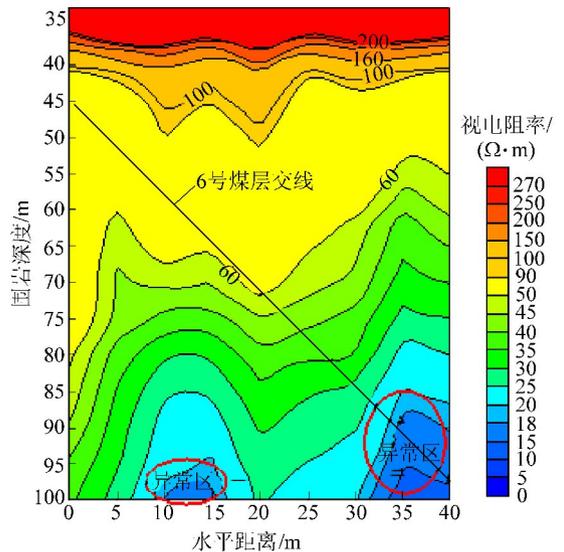


图4 斜向下30°时电阻率剖面

Fig. 4 Profile map of apparent resistivity in 30° oblique upward

6号煤层交线穿过积水异常区,该区位于采空区推测范围内,验证了在卓里大队煤矿推测范围内

一定存在积水采空区。但地面物探没有探测出,说明地面物探还不够精确。在4号测站沿延伸方向进行物探,如图5所示。6号煤层交线位于高阻异常区,此处位于采空区推测范围内,验证了卓里大队煤矿在该处进行过开采。

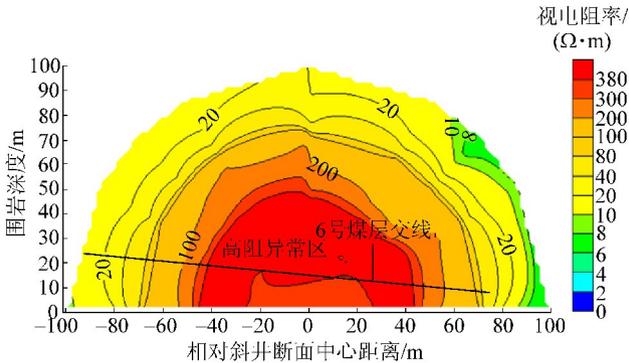


图5 主斜井处延深方向电阻率剖面

Fig. 5 Profile map of apparent resistivity in extension direction

## 4 结 论

1) 通过力学理论分析、经验公式计算以及数值模拟方法综合研究,确定了10号煤层及上覆6号、2号煤层开采后的最大导水裂隙带高度分别是54.94、30.49、33.67m;最大底板破坏带深度分别是12.22、3.12、1.25m。

2) 得出了2号煤层采空积水不会影响10号煤层安全开采,6号煤层采空积水会直接进入10号煤层,对10号煤层安全开采造成重大影响。

3) 利用调查资料、地面物探、井下物探相结合的方法对6号煤层不明采空区积水范围进行了精准确定,查清了不明积水区的位置、积水量以及影响区域,为后续的钻探放水提供了依据。研究结果可为相似工程条件下上覆采空区突水危险性分析及积水范围探测提供借鉴。

## 参考文献 (References):

[1] 杨艳国,秦洪岩,王 猛,等.基于板壳理论的充填开采覆岩断裂带高度确定方法:中国,CN10525733A[P].2016-01-20.

[2] 余学义,刘 俊,赵兵朝,等.孟巴矿特厚煤层分层开采覆岩导水裂隙带高度测定[J].煤矿安全,2013,44(8):169-174.  
Yu Xueyi, Liu Jun, Zhao Bingchao, et al. Determination on the height of slice mining overburden rock water flowing fractured zone of extremely thick coal seams in Barapukuria Coal Mine of Bangladesh[J].Safety in Coal Mines, 2013,44(8):169-174.

[3] 刘红元,刘建新,唐春安.采动影响下覆岩垮落过程的数值模拟[J].岩土工程学报,2001,23(2):201-204.  
Liu Hongyuan, Liu Jianxin, Tang Chunan. Numerical simulation of

failure process of overburden rock strata caused by mining excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2):201-204.

- [4] 陈建杰,吴庆伟.1930煤矿导水裂隙带高度预计[J].山东煤炭科技,2014(10):170-171.  
Chen Jianjie, Wu Qingwei. Prediction of height of water flowing fractured zone in No.1930 Coal Mine[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2014(10):170-171.
- [5] 余学义,王 鹏,刘 俊,等.孟巴矿1204工作面导水裂隙带高度探测研究[J].中州煤炭,2014(1):83-86.  
Yu Xueyi, Wang Peng, Liu Jun, et al. Research on height exploring of water flowing fractured zone on No.1204 working face of Barapukuria Colliery in Bangladesh [J]. Zhongzhou Coal, 2014(1):83-86.
- [6] 陈善乐,汪华君,李雨成.基于瞬变电磁法探测工作面底板含水率研究[J].煤炭科学技术,2014,42(3):96-98.  
Chen Shanle, Wang Huajun, Li Yuchen. Study on floor water-bearing property of coal mining face based on transient electromagnetic method[J]. Coal Science and Technology, 2014,42(3):96-98.
- [7] 吕文宏.覆岩顶板导水裂隙带发育高度模拟与实测[J].西安科技大学学报,2014,34(3):309-313.  
Lyu Wenhong. Measure and simulation for development height of water conducted crack zone in overburden roof [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2014,34(3):309-313.
- [8] 杨俊哲.7m大采高综采工作面导水断裂带发育规律研究[J].煤炭科学技术,2016,44(1):61-66.  
Yang Junzhe. Study on development law of water conducted zone in fully-mechanized mining face with 7 m mining height [J]. Coal Science and Technology, 2016,44(1):61-66.
- [9] 李焕春,张有朝,王士平.高密度高分辨电阻率法在采空区“三带”的探测研究[J].河北煤炭,1999(2):38-40.  
Li Huanchun, Zhang Youchao, Wang Shiping. Study on detection of “three - zone” in goaf by high density and high resolution resistivity method [J]. Hebei Coal, 1999(2):38-40.
- [10] 张 彬,杨 勇,黎 灵.水库下煤炭开采安全性分析研究工作[J].煤炭科学技术,2016,44(6):140-145.  
Zhang Bin, Yang Yong, Li Ling. Safety Analysis of Coal Mining under Reservoir [J]. Coal Science and Technology, 2016,44(6):140-145.
- [11] 林旭东,王建美,王春海.煤矿井下奥灰水突水危险区判别方法研究[J].煤炭科学技术,2015,43(6):126-130.  
Lin Xudong, Wang Jianmei, Wang Chunhai. Study on criterion method of water inrush from Ordovician limestone water in underground mine [J]. Coal Science and Technology, 2015,43(6):126-130.
- [12] 李林贵,黄胜昔,杨 柱,等.综合物探技术在金属矿山水害防治中的应用[J].采矿技术,2015,15(2):71-73.  
Li Lingui, Huang Shengxi, Yang Zhu, et al. Application of comprehensive geophysical prospecting technology in prevention and control of water damage in metal mine [J]. Mining Technology, 2015,15(2):71-73.

- [13] 花育才,项首龙,夏双力,等.电法勘探在煤矿防治水中的应用[J].中国煤田地质,2006,18(4):66-68.  
Hua Yucui, Xiang Shoulong, Xia Shuangli, *et al.* Application of electric prospecting in coalmine water control[J]. Coal Geology of China, 2016, 18(4):66-88.
- [14] 鲁辉,薛云峰,胡伟华.采空区的特征与探测技术研究[J].水利规划与设计,2014(2):27-33.  
Lu Hui, Xue Yunfeng, Hu Weihua. Study on the characteristics and detection technology of goaf[J]. Water Resources Planning and Design, 2014(2):27-33.
- [15] 阳红.综合电磁法技术研究及其应用效果[D].成都:成都理工大学,2012.
- [16] 朱四新.高密度电阻率法在煤矿采空区勘查中的应用研究[J].勘察科学技术,2014(S1):102-105.  
Zhu Sixin. Application of high density resistivity method in coal mined area survey[J]. Investigation Science and Technology, 2014(S1):102-105.
- [17] 钟韬.超高密度电法在探测采空区中的应用研究[D].成都:成都理工大学,2008.
- [18] 付天光.综合物探方法探测煤矿采空区及积水区技术研究[J].煤炭科学技术,2014,42(8):90-94.  
Fu Tianguang. Study on technology of comprehensive geophysical method exploration of mine goaf and water accumulated area[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(8):90-94.
- [19] 张运霞,牛向东,韩自豪,等.瞬变电磁法在矿井水害治理工作中的应用[J].工程地球物理学报,2004,1(5):418-423.  
Zhang Yunxia, Niu Xiangdong, Han Zihao, *et al.* The application of transient electromagnetic method in the work of mine flood damage control[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics 2004, 1(5):418-423.
- [20] 张金才,茹瑞典,耿德庸.地质雷达探测技术在煤矿区的应用[J].煤炭科学技术,1994,22(6):21-23.  
Zhang Jincai, Ru Ruidian, Geng Deyong. Application of geological radar exploration technology in coal mining area[J]. Coal Science and Technology, 1994, 22(6):21-23.
- [21] 朴化荣.电磁测深法原理[M].北京:地质出版社,1990.
- [13] GB/T 50593—2010,煤炭矿井制图标准[S].
- [14] GB/T 50564—2010,金属非金属矿山采矿制图标准[S].
- [15] 张晋文,周艳兵,刘小生.网络地图缓存技术研究与应用进展[J].测绘与空间地理信息,2015(8):59-62,66.  
Zhang Jinwen, Zhou Yanbing, Liu Xiaosheng. A research review of map cache technology based on Web[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2015(8):59-62,66.
- [16] 徐永龙,李斌,徐明霞,等.一种数字地图切片算法的实现[J].测绘科学,2014(2):118-120,128.  
Xu Yonglong, Li Bin, Xu Mingxia, *et al.* Automatic annotation method of boundary points by secondary development[J]. Science of Surveying & Mapping, 2014(2):118-120,128.
- [17] 罗智勇,黎小东.基于数据库存储方案的高性能瓦片地图服务研究[J].地理与地理信息科学,2013(3):48-51,108.  
Luo Zhiyong, Li Xiaodong. High performance tile map service based on database storage scheme[J]. Geography and Geo-Information Science, 2013(3):48-51,108.
- [8] 陈国良.煤矿区“一张图”建设的若干关键技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2011.
- [9] 黄晓宇.基于MapGIS的矿产资源一张图[J].北京测绘,2015(2):112-115.  
Huang Xiaoyu. The mineral resources one-map based on the MapGIS[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2015(2):112-115.
- [10] 刘燕华.煤矿一张图协同机制及关键技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2016.
- [11] 王国保.煤矿机电专业小组“一张图”管理法[J].科技信息,2011(31):I0326.  
Wang Guobao. Coal mine electromechanical professional group “one map” management method[J]. Science and Technology Information, 2011(31):I0326.
- [12] 韩茜.智慧矿山信息化标准化系统关键问题研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2016.

(上接第36页)

classification of “mineral management with one-chart” system [J]. Geospatial Information, 2012, 10(1):64-66.

[8] 陈国良.煤矿区“一张图”建设的若干关键技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2011.

[9] 黄晓宇.基于MapGIS的矿产资源一张图[J].北京测绘,2015(2):112-115.

Huang Xiaoyu. The mineral resources one-map based on the MapGIS[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2015(2):112-115.

[10] 刘燕华.煤矿一张图协同机制及关键技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2016.

[11] 王国保.煤矿机电专业小组“一张图”管理法[J].科技信息,2011(31):I0326.

Wang Guobao. Coal mine electromechanical professional group “one map” management method[J]. Science and Technology Information, 2011(31):I0326.

[12] 韩茜.智慧矿山信息化标准化系统关键问题研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2016.