

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.12.005

带压综采工作面矿井综合物探及安全性评价研究

牟 义^{1,2,3}, 徐 慧^{1,2,3}, 马志超^{1,2,3}, 姜 鹏^{1,2,3}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室 (煤炭科学研究总院), 北京 100013; 3. 北京市煤矿安全工程技术研究中心, 北京 100013)

摘要:采用瞬变电磁法和无线电波透视法对大饭铺矿 61114 工作面带压开采区域进行导水通道和富水性探测, 综合分析瞬变电磁法和无线电波透视法圈出的异常重叠区域, 据此对带压开采区域进行安全性评价分析, 提出安全开采措施。结果表明: 矿井瞬变电磁法主要探明含水层范围及富水性, 无线电波透视法主要探明煤层及隔水层构造发育情况, 而两种方法探测的异常体重叠区域则可能既有含水层, 又有导水通道, 为带压综采工作面防治水工作重点区域; 对于井下综合物探圈定的重叠异常区需要进行提前打钻验证, 当揭示存在富水构造异常区时, 及时进行安全分析, 必要时需实施注浆封堵导水构造或留设防水煤岩柱, 保证工作面的安全采掘。

关键词:矿井瞬变电磁法; 无线电波透视法; 富水性探测; 导水通道探测; 带压开采

中图分类号: TD175

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)12-041-09

Comprehensive geophysical exploration and safety evaluation of the mine with a fully mechanized pressurized mining face

MU Yi^{1,2,3}, XU Hui^{1,2,3}, MA Zhichao^{1,2,3}, JIANG Peng^{1,2,3}

(1. Mine Safety Technology Branch of China Coal Research Institute, Beijing 100013, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization (China Coal Research Institute), Beijing 100013, P. R. China; 3. Beijing Mine Safety Engineering Technology Research Center, Beijing 100013, P. R. China)

Abstract: Through the combined use of transient electromagnetic method and radio wave perspective method, the water-rich mining area and the water-conducting channel were detected in the pressurized mining area of the 61114 working face of the Dafanpu Mine, and the overlapping abnormal areas identified by the transient electromagnetic method and the radio wave perspective method were comprehensively analyzed. Safety evaluation and analysis of the pressurized mining area was conducted, and safe mining measures were proposed. The results showed that the transient electromagnetic method mainly detected the aquifer range and water richness, the radio wave perspective method mainly detected the development of the coal seam and the aquifuge layer. The overlapping abnormal regions detected respectively by the two methods had both water bodies and water channels, which were key areas for water prevention and

收稿日期: 2019-07-25

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045001-004); 国家自然科学基金资助项目(51704162, 51804162); 煤科院基础研究基金资助项目(2017JC07)。

Supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2016ZX05045001-004), National Natural Science Foundation of China (51704162, 51804162) and Basic Research Fund of China Coal Research Institute (2017JC07).

作者简介: 牟义(1983—), 男, 副研究员, 从事煤矿地球物理勘探研究与应用工作, (E-mail)61673275@qq.com。

control. For these overlapping anomalies defined by the underground comprehensive geophysical exploration, it was necessary to carry out pre-drilling verification. When the existence of water-rich anomalous structural belt was confirmed, safety analysis should be conducted in time, and grouting may be necessary for blocking the water conducting fractured zone or setting waterproof coal (rock) pillar to guarantee the safe mining on the pressurized workface.

Keywords: transient electromagnetic method; radio wave perspective method; water-rich detection; water conducting fracture detection; pressurized mining

一般在煤层底板或顶板具有承压含水层的条件下,当隔水层的厚度大于临界隔水层的厚度,或水压值小于临界水压值时,可不采取疏降措施进行带压开采,但要对承压含水层的赋存情况、富水性及隔水层中可能存在导水通道等情况探查清楚,才能进行带压安全开采评价,保证安全回采。许多专家学者对带压回采工作面探测及安全评价进行了大量研究,程久龙等^[1]介绍了近几年来地球物理方法在地质构造、岩层含水性超前探测以及仪器研制等方面的最新进展,包括瞬变电磁波场转换与合成孔径、井下陷落柱等探测以及全空间反演和联合反演等技术,提出了今后井下地球物理方法探测的发展方向;薛国强等^[2]介绍了近年来瞬变电磁法的最新进展,包括瞬变电磁全空间理论、小回线大电流法及有低阻覆盖时观测数据的处理技术等,展望了矿井瞬变电磁法在煤田井下应用的发展方向;李宏杰等^[3]从突水危险性评价的角度采用突水系数法来预测采煤工作面底板突水可能性,并从地面、井下、井-地等多个维度进行了综合物探技术研究及应用;李文等^[4]指出煤矿含水异常体精细物探应采用2种及以上物探方法,可以按掘进头超前探测、工作面内部探测、顶底板探测进行分类,应根据含水异常体类型和特点选择适合的矿井综合物探方法;占文锋^[5]以地质分析为先导,根据探测目标、探测位置、探测深度不同,采用不同的物探方法及其组合方式,形成煤田综合物探技术体系;舒宗运等^[6]分析了“双带压”开采工作面太灰和奥灰含水层的水文地质特征,形成了“勘查—评价—防治”技术体系,解决了双带压综合防突这一关键问题;高保彬等^[7]采用瞬变电磁法、直流电法和无线电波透视法3种物探方法对回采工作面进行勘探,并进行突水危险性区域划分及评价,为采取针对性的治理措施提供了参考依据;马少杰^[8]采用瞬变电磁法与无线电波透视法对高承压水作用下采煤工作面内部导水构造发育情况进行了探测技术研究,较为准确地探测采煤工作面内部导水构造情况;屈少波^[9]采用无线电波透视法、矿井瞬变电磁法、并行直流电法3种物探方法对局部带压工作面进行了探测技术研究,为带压工作面安全回采提供保障。笔者在这些研究应用基础上,针对鄂尔多斯地区大饭铺煤矿61114带压综采工作面承压含水层及隔水层采用矿井瞬变电磁法和无线电波透视法进行探测,矿井瞬变电磁法主要探明含水层范围及富水性,无线电波透视法主要探明煤层及隔水层构造发育情况,而两种方法探测的异常体重叠区域则可能既有含水层,又有导水通道,为带压综采工作面防治水工作重点区域,并进行安全性评价,提出水害防治措施。

1 工作面概况及试验方案

1.1 工作面概况

内蒙古准格尔旗力量煤业有限公司大饭铺煤矿(即大饭铺煤矿)井田面积 9.6108 km^2 ,设计生产能力为 2.40 Mt/a ,核定生产能力为 5.10 Mt/a 。井田内资源储量为 367.77 Mt ,工业资源储量为 339.09 Mt ,设计资源储量为 321.63 Mt ,设计可采储量为 211.50 Mt ,设计服务年限为 31.7 a 。大饭铺煤矿布置3个井筒,采用混合式开拓方式。矿井采用单水平布置,将开采水平布置在6号煤层,标高为 $+850\text{ m}$ 。矿区采矿许可证开采深度标高为 $+1000\sim+750\text{ m}$ 。

综合物探的带压综采工作面为61114综采工作面,其北侧为61113工作面,东侧为井田边界保护煤柱,西侧为大巷,南侧为开拓区域。61114工作面地质条件简单,褶皱构造发育,61114胶运顺槽掘进期间揭露正断层FJ14-1($17^\circ\angle 70^\circ$, $H=3\text{ m}$)。根据矿方提供的长观孔观测资料,现奥灰水位最高标高为 $+871\text{ m}$,61114工作面最低设计掘进标高为 $+852.7\text{ m}$,因此,61114有部分属于承压水体上开采,剩余部分不属于承压水体上开采。

1.2 试验方案

为了保证 61114 工作面的安全开采,采用矿井瞬变电磁法和无线电波透视法进行 61114 工作面顶板、底板、顺层区域探测,以掌握工作面区域的构造和富水区分布情况,为整个工作面安全回采提供技术保障^[10-12]。

61114 工作面是主要由辅运顺槽和胶带顺槽形成的回采工作面,本次探测范围为工作面辅运顺槽和胶带顺槽探测停采线 0 m 处到距离停采线 650 m 处之间(见图 1),工作面宽度 240 m。图 1 中蓝线为带压开采边界线,蓝线左侧区域为带压开采区域,蓝线右侧区域为不带压开采区域,探测试验范围从带压区域向外扩展到部分不带压区域以覆盖整个局部带压开采影响段,保证安全性。

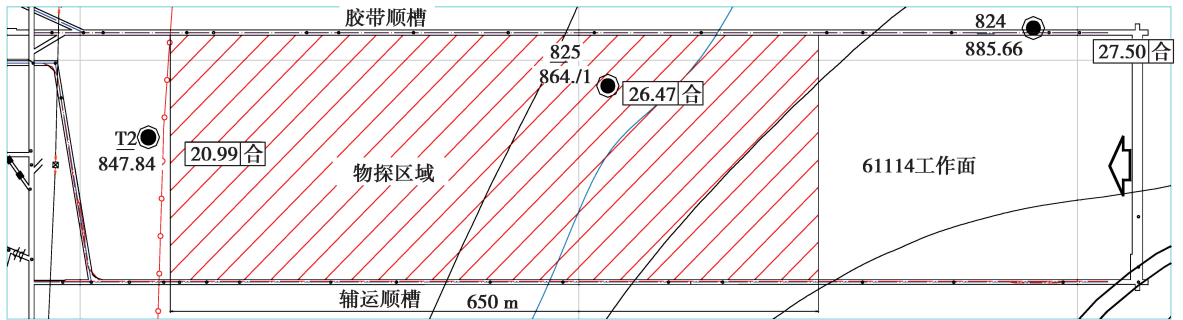


图 1 物探施工区域

Fig. 1 Geophysical construction area

1.2.1 瞬变电磁法

本次试验在 61114 工作面辅运顺槽和胶带顺槽的 0~650 m 范围内分别设计矿井瞬变电磁法探测测线 7 条(分别为底板 90°、底板 60°、底板 30°、顺层、顶板 30°、顶板 60°、顶板 90°),测线每条长 650 m^[13-15]。工作面两巷探测方向如图 2(a)所示,探测点由停采线向切眼方向布置,编号依次为 0,1,2……,每条巷道有 66 个测点。

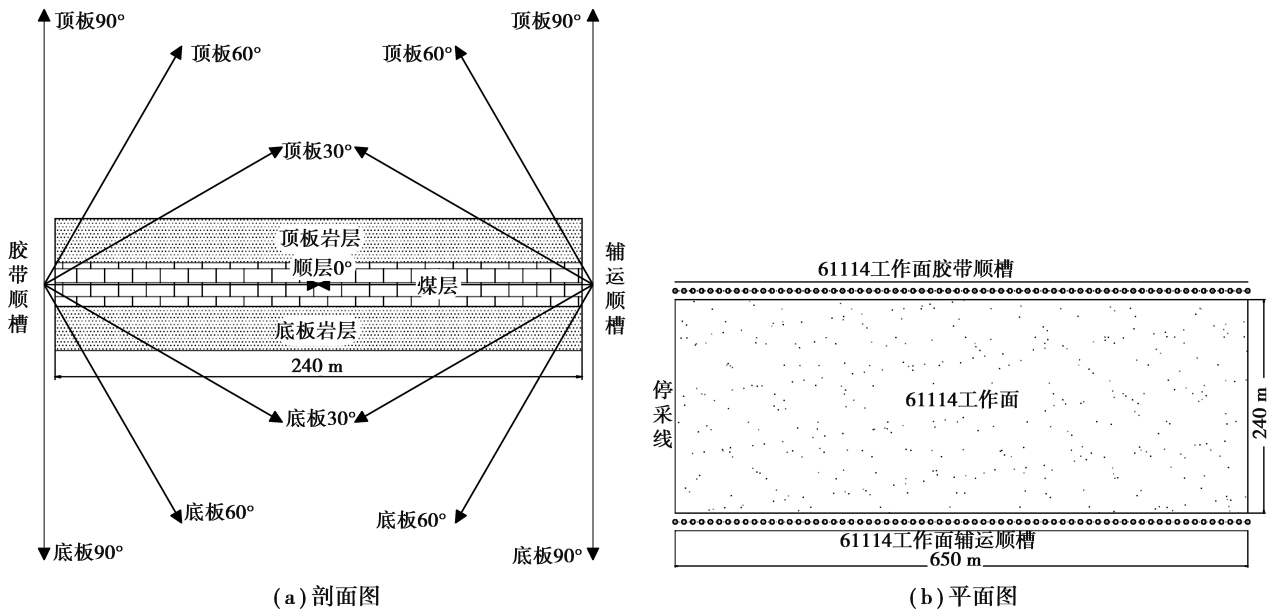


图 2 瞬变电磁法探测布置图

Fig. 2 Transient electromagnetic method detection layout

1.2.2 无线电波透视法

本次坑透法探测在两条巷道进行,采用“一发一收”方式施工,一条巷道接收、另一条巷道发射^[16-18]。在辅运顺槽发射时,发射点 17 个,发射点间距 40 m,在胶带顺槽接收点 130 个,接收点间距 5 m;在胶带顺槽发射时,发射点 17 个,发射点间距 40 m,在辅运顺槽接收点 130 个,接收点间距 5 m。测线测点分布如图 3。

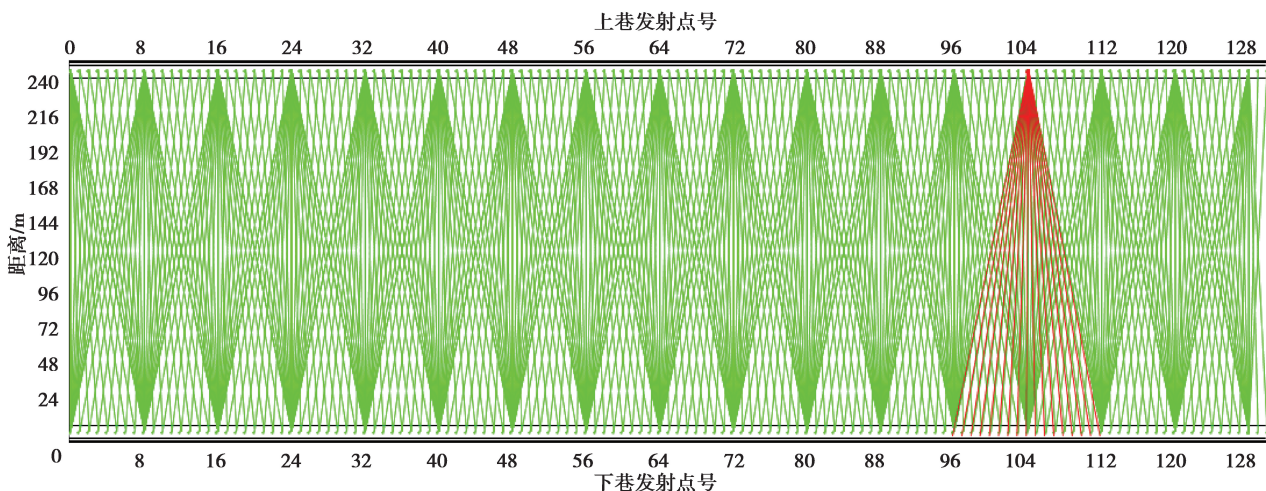


图 3 61114 工作面坑透法探测示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the 61114 working face pit penetration method

2 探测成果分析

综合物探成果中矿井瞬变电磁法探测成果主要对富水性进行分析,无线电波透视法主要对导水通道进行分析,而两种方法综合探测结果重叠区域则可能既富水,又有导水通道,为可能存在的突水区域。

2.1 富水性分析

本次矿井瞬变电磁法采集的数据经过数据整理、归一化、视电阻率计算及反演计算处理后,得到工作面区域顶、底板不同高度层位切片图,分析不同高度层位各低阻异常区域的分布情况^[18-21]。图 4 为 61114 工作面顶、底板和顺层不同高度水平富水性立体分布图,左侧为停采线,右侧为距离停采线 650 m 处,后边为胶带顺槽,前边为辅运顺槽,色标由冷色调到暖色调表示视电阻率逐渐升高,本次将视电阻率低于 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 的区域划为低阻异常,一般视电阻率越低,煤岩体富水性越强。在图 4 中将 61114 工作面从顶板 40 m 处、30 m 处、

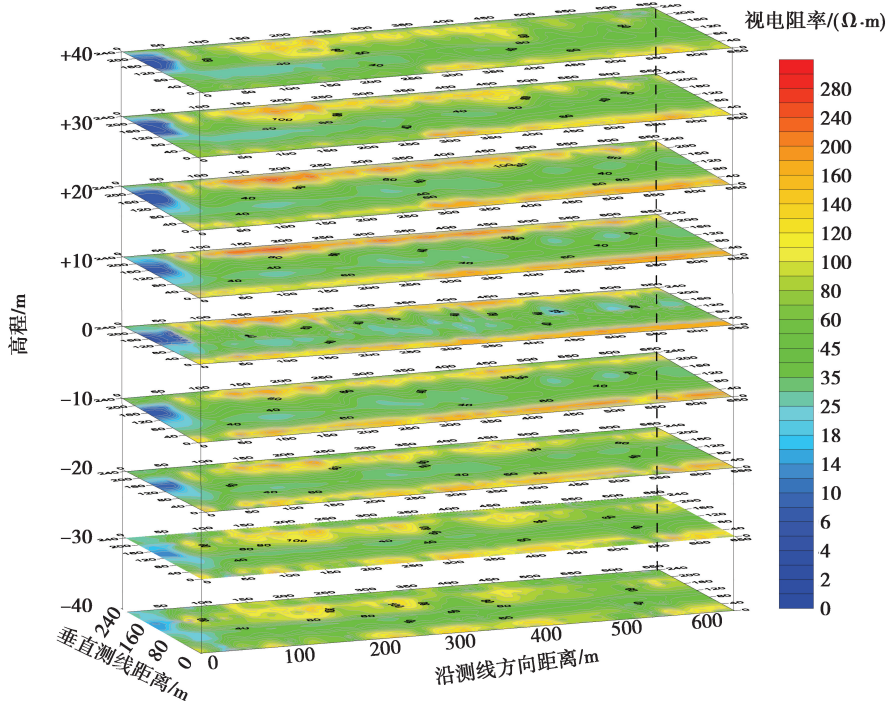


图 4 瞬变电磁法立体探测成果图

Fig. 4 Stereoscopic electromagnetic simulation results

20 m 处、10 m 处,顺层 0 m 处,底板 10 m 处、20 m 处、30 m 处、40 m 处进行富水性综合分析,得出立体图中分布 1 处较明显低阻异常区,贯穿于顶板、顺层到底板立体空间,投影到平面中分布范围如图 5 低阻 1 所示,推断低阻 1 为局部较强富水区或含水区。

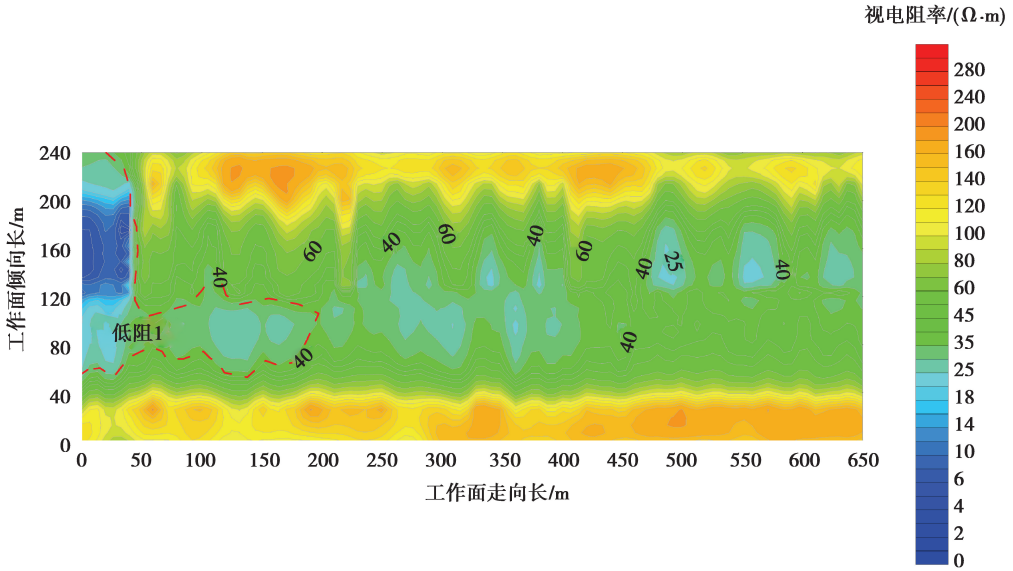


图 5 典型底板切片图
Fig. 5 Typical floor slice diagram

2.2 导水通道分析

本次无线电波透视法采集的数据用 CT 软件进行反演,反演结果以实测场强曲线图和 ART 法反演(CT 成像)图表示。ART 法反演 CT 成像图为煤岩层电磁波吸收系数值图,数据值大小用不同色标值表示,代表煤岩层电磁波衰减的强弱,其中冷(蓝绿)色调为低电磁波衰减系数值,暖(红黄)色调为高电磁波衰减系数值,一般构造越发育,电磁波衰减系数值也越大,电磁波衰减越快。坑透仪探测实测场强曲线图见图 6 和 7,其中标注为 0 号点为停采线,每隔 5 m 一个点,最后一个点为 130 号点。

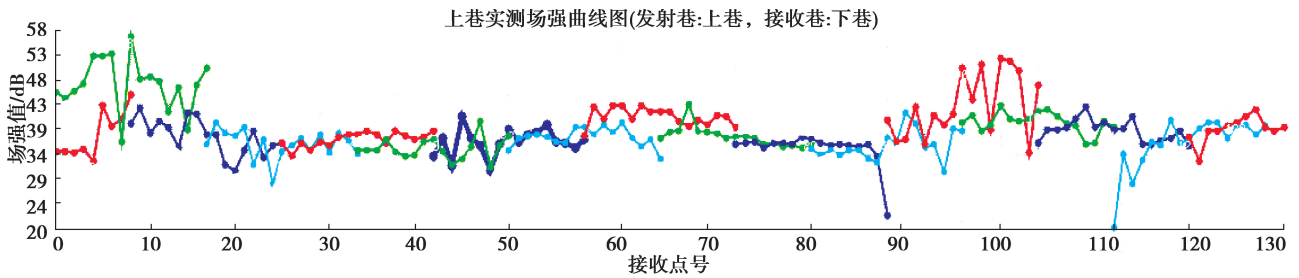


图 6 胶带顺槽发射实测场强曲线图
Fig. 6 The measured field strength curve of belt conveyor transmitting

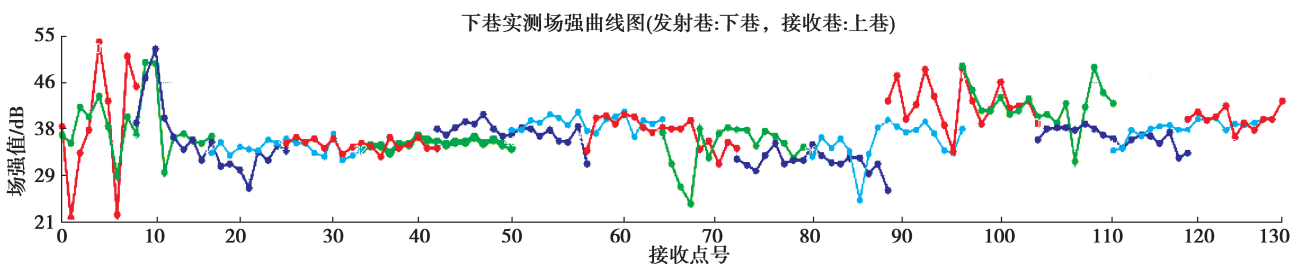


图 7 辅运顺槽发射实测场强曲线图
Fig. 7 The measured field strength curve of auxiliary transport trough transmitting

无线电波透视法衰减系数分布图见图 8,其中暖(红黄)色调区越深表明其衰减系数越高,即该段煤层无线电波穿透能力低,电磁波衰减快,为潜在的构造异常区。图中可以看出存在 8 个异常处,推断为潜在的导水通道构造。

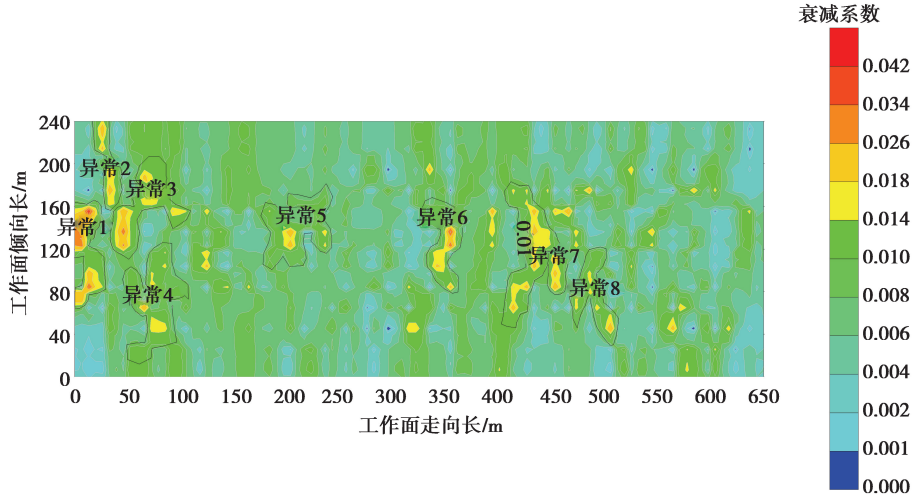


图 8 坑透法衰减系数成果图

Fig. 8 Results of the pit penetration attenuation coefficient

2.3 综合分析

将 61114 工作面中瞬变电磁法立体探测空间圈定的低阻异常区投影到水平面中的得到异常分布图,与无线电波透视法 ART 衰减系数分布图中圈定的异常进行叠加,圈定了两种探测方法重合的 4 处综合异常,这 4 处综合异常区为推断含水与构造异常等的重叠区域,因此,这些区域存在潜在的砂岩或奥灰突水水源和导水通道,为防突的重点区域。综合异常分布见图 9,其异常分析见表 1,表中 X 方向为平行辅运顺槽(或胶带顺槽)方向,Y 方向为垂直辅运顺槽(或胶带顺槽)方向。

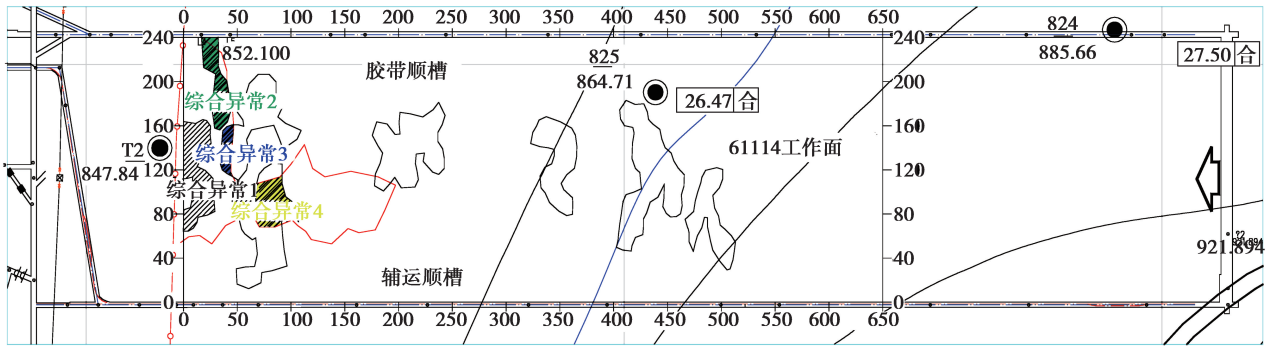


图 9 综合物探异常分布图(斜线填充区域)

Fig. 9 Integrated geophysical anomaly distribution map (slash filled areas)

表 1 综合物探异常区及推断统计表

Table 1 Comprehensive geophysical anomaly area and inferential statistics

异常编号	异常位置		可靠性评估	异常推断	异常强度
	X 方向距离/m	Y 方向距离/m			
综合异常 1	0~30	60~170	可靠性较强	含水构造	较强
综合异常 2	20~45	160~240	可靠性较强	含水构造	较强
综合异常 3	30~45	115~160	可靠性较强	含水构造	较强
综合异常 4	45~110	60~115	可靠性较强	含水构造	较弱

3 带压开采安全性评价

由于61114工作面部分处于奥灰水带压区域,因此,为了安全回采,除了探测水源及通道,还需要对61114工作面进行奥灰水带压开采安全性分析。当煤层底板含水层的水位高于煤层标高时,在此煤层内开采,称带压开采;反之,则称非带压开采。根据矿方提供的长观孔观测资料,现奥灰水位最高标高为+871 m,61114工作面最低标高为+852.7 m。当回采标高低于+871 m属于承压水体上采煤,反之不属于承压水体上采煤。分析得知,61114有部分属于承压水体上回采,部分不属于承压水体上回采。对于61114工作面的回采存在部分带压问题,其回采的安全性评价依据,就是工作面底板隔水层的安全性分析。根据《煤矿防治水细则》(2018)附录四中回采工作面安全水头值计算公式,采煤工作面安全水头压力值计算如下:

$$p_s = T_s M, \quad (1)$$

式中: p_s 为底板隔水层安全水头值,MPa; M 为底板隔水层厚度,m; T_s 为临界突水系数,MPa/m。从安全角度分析, M 取最小值41.18 m;一般情况下在底板受构造破坏的地段 T_s 按0.06 MPa/m计算。

将以上参数带入式(1)中,61114工作面6煤层回采中底板隔水层所能承受的最小安全水压为: $p_s = 2.47$ MPa。大饭铺矿奥灰水位最高标高为+871 m,根据61114工作面巷道布置平、断面图,最低设计标高为+852.7 m,隔水层厚度为41.18 m,水位差为18.3 m,奥灰水位标高高于回采标高,因此存在带压采煤。如果在6煤层内回采,煤层底板隔水层所承受的奥灰水最大水头压力为0.59 MPa,小于回采工作面底板隔水层安全水头压力2.47 MPa,所以,在现资料分析的基础上,在没有导水通道的区域,61114工作面在正常条件下回采是安全的,但对于井下综合物探圈定的4处重叠异常区,当验证存在富水异常构造带时,则存在突水危险,应及时进行安全分析,如有必要需实施注浆封堵导水构造或留设防水煤岩柱,保证工作面的安全采掘。

从综合物探的角度,将带压综采工作面防治水工作从易到难分为无物探异常不带压区域、有物探异常不带压区域、无物探异常带压区域以及有物探异常带压区域4大类,并需要提出有针对性的防治措施。笔者在本研究中探讨性地提出一些有侧重性防治措施,希望能对带压综采工作面防治水工作提供一些指导,并在实践中修正。对于无物探异常不带压区域,宜打钻验证,方可回采;对于有物探异常不带压区域,宜根据物探异常区域位置打钻验证,对于验证出水区域,重点进行疏放水等工作,方可回采;对于无物探异常带压区域,宜打钻验证,方可回采,并在开采过程中,做好水文监测等工作,防止发生滞后突水;有物探异常带压区域为带压开采工作面突水重点防治区域,宜打钻验证,可采取留设防水煤柱或预注浆的治理,并做好水文动态监测,预防滞后突水,若发生突、涌水现象,应及时进行化探,查明涌水水源及导水通道,及时治理。

4 结论

笔者采用瞬变电磁法和无线电波透视法对大饭铺矿61114工作面带压开采区域进行富水性和导水通道探测,重点分析综合探测重叠区域,视重叠区域为带压工作面防治水重点区域,并对带压开采区域进行安全性评价分析,提出安全开采措施。结论如下:

1)按照“有掘必探”的探放水原则,采用“物探先行、钻探验证”的方法,对61114带压综采工作面承压含水层及隔水层采用矿井瞬变电磁法和无线电波透视法进行探测。矿井瞬变电磁法主要探明含水层范围及富水性,无线电波透视法主要探明煤层及隔水层构造发育情况,而两种方法探测的异常体重叠区域则可能既有含水层,又有导水通道,为重点防突区域;

2)通过对工作面区域奥灰承压水水压和工作面底板隔水层能够承受的安全水压计算得出:底板隔水层能够承受的安全水压为2.47 MPa,大于工作面底板隔水层实际承受的奥灰0.59 MPa水压。因此,61114工作面在没有导水通道的区域带压开采,是安全可行的。

3)对于井下综合物探圈定的4处重叠异常区需要进行提前打钻验证,当揭示存在富水构造区时,及时进行安全分析,必要时需实施注浆封堵导水构造或留设防水煤岩柱,保证工作面的安全开采。

参考文献:

- [1] 程久龙,李飞,彭苏萍,等. 矿井巷道地球物理方法超前探测研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1742-1750.
CHENG Jiulong, LI Fei, PENG Suping, et al. Research progress and development direction on advanced detection in mine roadway working face using geophysical methods[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1742-1750. (in Chinese)
- [2] 薛国强,于景邨. 瞬变电磁法在煤炭领域的研究与应用新进展[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 319-326.
XUE Guoqiang, YU Jingcun. New development of TEM research and application in coal mine exploration[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 319-326. (in Chinese)
- [3] 李宏杰. 煤矿防治水物探技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018.
LI Hongjie. Coal mine water prevention and geophysical technology[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2018. (in Chinese)
- [4] 李文,牟义,邱浩. 煤矿含水异常体矿井综合物探方法及应用[J]. 煤矿安全, 2017, 48(7): 208-211.
LI Wen, MU Yi, QIU Hao. Application of mine comprehensive geophysical detection methods on water bearing abnormal bodies[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(7): 208-211. (in Chinese)
- [5] 占文锋. 矿井地质异常体多场联合探测技术体系及实践分析[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(9): 62-66.
ZHAN Wenfeng. Coalmine geological anomalous body multi-field integrated geophysical prospecting technological system and practices[J]. Coal Geology of China, 2018, 30(9): 62-66. (in Chinese)
- [6] 舒宗运,廉玉广,李江华,等. 复杂构造条件下工作面综合防突水关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 190-196.
SHU Zongyun, LIAN Yuguang, LI Jianghua, et al. Key technology of water inrush prevention and control in coal mining face under condition of complicated structure[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 190-196. (in Chinese)
- [7] 高保彬,李林,李回贵,等. 综合物探技术在矿井工作面底板含水构造探测中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(7): 87-92.
GAO Baobin, LI Lin, LI Huigui, et al. Application of integrated geophysical technologies in detection of aqueous structure in floor of mine working face[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(7): 87-92. (in Chinese)
- [8] 马少杰. 高承压水长采煤工作面井下物探综合探查研究[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(3): 65-68.
MA Shaojie. Research on comprehensive geophysical prospecting technology for long coal face with high confined water[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2017, 44(3): 65-68. (in Chinese)
- [9] 屈少波. 综合物探技术在带压开采工作面中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(5): 81-85, 92.
QU Shaobo. Application of comprehensive geophysical prospecting technology in working face under safe water pressure of aquifer[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2017, 44(5): 81-85, 92. (in Chinese)
- [10] 路拓,刘盛东,王勃. 综合矿井物探技术在含水断层探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(3): 1371-1375.
LU Tuo, LIU Shengdong, WANG Bo. Application of integrated mining geophysical method in detection of water-bearing faults[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(3): 1371-1375. (in Chinese)
- [11] Ma Z J, Xue G Q, Hou D Y, et al. Identifying deep saturated coal bed zones in China through the use of large loop TEM[J]. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 2018, 23(1): 135-142.
- [12] 牟义,徐慧,窦文武,等. 矿井回采工作面隐蔽灾害综合物探技术研究[J]. 煤矿开采, 2016, 21(6): 22-27.
MU Yi, XU Hui, DOU Wenwu, et al. Complex geophysical prospecting of hide disaster of mining working face in mine[J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(6): 22-27. (in Chinese)
- [13] 李江华,廉玉广,焦阳,等. 综合物探技术在工作面导水构造探测中的应用[J]. 煤矿安全, 2018, 49(3): 129-132.
LI Jianghua, LIAN Yuguang, JIAO Yang, et al. Application of comprehensive geophysical exploration technique in exploration of water conductive structures in working face[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(3): 129-132. (in Chinese)
- [14] Su B, Yu J, Sheng C, et al. Maxwell-equations based on mining transient electromagnetic method for coal mine-disaster water detection[J]. Elektronika Ir Elektrotechnika, 2017, 23(3): 20-23.

- [15] Chen W Y, Xue G Q, Olatayo A L, et al. A comparison of loop time-domain electromagnetic and short-offset transient electromagnetic methods for mapping water-enriched zones: a case history in Shaanxi, China[J]. *Geophysics*, 2017, 82(6): B201-B208.
- [16] 牟义. 切片技术在煤矿回采工作面瞬变电磁法探测中的研究与应用[J]. *中国煤炭*, 2014, 40(3): 35-39.
MU Yi. Research and application of slicing technology in transient electromagnetic detection in coal mining face[J]. *China Coal*, 2014, 40(3): 35-39. (in Chinese)
- [17] Chang J, Yu J, Su B. Numerical simulation and application of mine TEM detection in a hidden water-bearing coal mine collapse column[J]. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 2017, 22(3): 223-234.
- [18] Zhang X, Qiao W, Chen Y K. 3D visualization of the VTK and Qt based mine transient electromagnetic method[J]. *Journal of Mines, Metals & Fuels*, 2016, 63(12): 593-598.
- [19] 牟义, 丰莉, 姜国庆. 基于矿井电法的矿井水害超前探测技术研究[J]. *煤炭工程*, 2013, 45(5): 109-111.
MU Yi, FENG Li, JIANG Guoqing. Study on advance detection technology of Mine water disaster based on mine electric method[J]. *Coal Engineering*, 2013, 45(5): 109-111. (in Chinese)
- [20] Zhu X G, Fu Z H, Su X F, et al. Frequency-domain analysis for pulse current sources in transient electromagnetic method[J]. *Near Surface Geophysics*, 2017, 15(2): 155-162.
- [21] Xue Y G, Li S C, Su M X, et al. Response and test of whole space transient electromagnetic field in mine goaf water[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 353/354/355/356: 1136-1139.

(编辑 罗 敏)