



推荐阅读：

[智能化煤矿分类、分级评价指标体系](#)

[煤矿智能化标准体系框架与建设思路](#)

[煤矿智能化\(初级阶段\)研究与实践](#)

[综采工作面煤层装备联合虚拟仿真技术构想与实践](#)

[煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装备现状及展望](#)

[智慧煤矿主体架构设计与系统平台建设关键技术](#)

[虚拟现实技术在煤矿领域的研究现状及展望](#)

[德国工业4.0与中国煤机装备智能制造的发展](#)

[智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向](#)

[智能矿井安全生产大数据集成分析平台及其应用](#)

[基于TOA压缩感知的矿井分布式目标定位方法](#)

[松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)

[我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)

[煤矿井孔钻进技术及发展](#)

[2311m顺煤层超长定向钻孔高效钻进技术](#)

[我国煤矿区钻进技术装备发展与应用](#)

[煤矿井下人员精确定位方法](#)

[智慧矿山建设架构体系及其关键技术](#)

[矿山工程信息物理系统研究及挑战](#)

[智能化无人开采系列关键技术之——综采智能化工作面调斜控制技术研究](#)



移动扫码阅读

牟义,李江华,徐慧,等.矿井瞬变电磁法参数优化试验及超前探测应用[J].煤炭科学技术,2020,48(6):184-190.doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.06.024
 MU Yi, LI Jianghua, XU Hui, et al. Parameters optimization test of mine transient electromagnetic method and application of advanced detection [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (6): 184 - 190. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.06.024

矿井瞬变电磁法参数优化试验及超前探测应用

牟义^{1,2,3},李江华^{1,2,3},徐慧^{1,2,3},马志超^{1,2,3},崔金亮^{1,2,3},张永超^{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:为了精准超前探测采空区及积水区,确保煤矿的安全掘进,通过对已知积水采空区进行矿井瞬变电磁法探测对比试验,分析不同参数对积水采空区电场响应特征的影响,优化了一套适合积水采空区探测的发射频率、叠加次数以及采集密度等采集参数,并将该优化参数应用到井下超前探测实践中,成功发现前方采空区及积水区。结果表明:矿井瞬变电磁法采用 6.25 Hz 的发射频率、32 次叠加以及中密度采集方式,对采空区及积水区超前探测较好;将该采集优化参数应用到晋城矿区井下超前探测,以王台铺矿超前探测应用为例,发现掘进工作面前方存在明显的 1 处高阻异常体和 2 处低阻异常体,且分界面明显,其与查明的小煤窑巷道分布区基本重合,后经过打钻验证,正前方 50 m 之外的高阻异常区见空,通过钻孔透视发现,为小煤窑采空区且无积水,后退 30 m,向右侧帮 1 处低阻异常区打钻,打到深度 35 m 遇空出水,水量较大,为采空区积水,取得较好探测效果;根据在鄂尔多斯地方煤矿、临汾地方煤矿、晋煤集团、朔州地方煤矿等井下探测总结的经验,一般视电阻率位于 $30 \Omega \cdot m$ 以下推断为含水异常, $30 \Omega \cdot m$ 以上推断为不含水正常岩层,更高则推断为高阻异常。

关键词:超前探测;采空区;瞬变电磁法;发射频率;叠加次数;采样密度;矿井

中图分类号:TD166; P631.3 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)06-0184-07

Parameters optimization test of mine transient electromagnetic method and application of advanced detection

MU Yi^{1,2,3}, LI Jianghua^{1,2,3}, XU Hui^{1,2,3}, MA Zhichao^{1,2,3}, CUI Jinliang^{1,2,3}, ZHANG Yongchao^{1,2,3}

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

Abstract: In order to accurately detect the gob and the water-bearing area in advance, and ensure the safe excavation of the coal mine, the mine transient electromagnetic method was used to detect and compare the test in the known water-bearing gob, and the electric field response characteristics of different parameters to the mined-out gob were analyzed. A set of data acquisition parameters suitable for the detection of the water level, the number of superpositions and the acquisition density were optimized and the optimized parameters were applied to the practice of underground advance detection, the front gob and water-bearing gob area were successfully discovered. The results showed that the mine transient electromagnetic method used the emission frequency of 6.25 Hz, 32 superposition and medium density acquisition methods, and it was better to detect the gob and the water-bearing area; The acquisition optimization parameters were applied to the underground exploration in Jincheng Mining Area. Taking the advanced detection application of Wangtaipu mine as an example, it was seen that there was an obvious high-resistance anomaly and two low-resistance anomalies in front of the face, and the interface was obvious, which was basically the same as the identified distribution area of small coal mine roadway. After drilling and verification, the high-resistance anomaly area 50 m ahead of the front was empty, and it was found through the borehole fluoroscopy that it was a small coal mine gob and there was no water. When retreating 30 m backward, a low-resistance anomaly area was drilled to the right side, hitting a depth of 35 m

收稿日期:2019-10-18;责任编辑:赵瑞

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045001-004);国家自然科学基金青年基金资助项目(51804162,51704162)

作者简介:牟义(1983—),男,山东日照人,副研究员。Tel:010-84264744,E-mail:61673275@qq.com

with effluent, large amount of water, and the water was collected in the gob, which has a good detection effect. According to the exploration and summary experience of local coal mine in Ordos, Linfen local coal mine, Jimmei Group, Shuzhou local coal mine and other underground mines, the apparent resistivity value was generally below $30 \Omega \cdot m$, which was inferred to be water-containing anomaly, and $30 \Omega \cdot m$ or more was inferred to be a normal rock formation without water, and higher than that would be inferred to be a high-resistance anomaly.

Key words: advance detection; gob; transient electromagnetic method; transmitting frequency; number of superposition; sampling density; mine

0 引言

矿井瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Method, TEM)采用电磁波在煤矿井下全空间激发一次场,在一次场脉冲的间隔期间(断电后),观测由围岩体感应形成的二次场随时间的变化^[1]。其在对采煤工作面内部以及巷道掘进前方隐伏小煤窑采空区、断层、陷落柱、水文钻孔等地质异常体的导含水性超前探测中取得了良好的应用效果^[2]。受井下空间及防爆限制,矿井瞬变电磁探测回线边长尺寸和发射功率较小,为了达到相应的探测深度及探测精度,研究合适的数据采集及处理参数尤为重要^[3]。国内不少专家学者进行了大量研究,姜志海等^[4]采用物理试验对矿井瞬变电磁观测系统的发射功率、发射磁矩、关断时间等参数随发射线圈匝数的变化关系,以及关断时间、接收信号随接收线圈匝数的变化关系进行了定性研究;李飞等^[5]通过数值模拟和现场试验,分别研究了矿井半空间和全空间条件下瞬变电磁法偶极装置观测信号随收发距的变化规律;陈明生等^[6]应用时域有限差分方法(FDTD)分析地下和地面的瞬变响应,采用3~5 ms的延迟时间可探测较浅的异常体;陈健强^[7]开展了瞬变电磁法探测参数的现场试验研究,通过发射频率、叠加次数、数据采集密度等采集参数及视电阻率系数、深度系数等处理参数的对比试验,得出了适用于试验矿区及相似地球物理场条件下的最优探测参数;邱浩^[8]在朝阳煤矿9101工作面巷道掘进过程中通过基于瞬变电磁法频率、叠加次数的参数优化试验,确定了工作面内部老旧巷道探测的最优参数;文献[9~12]分别从地面瞬变电磁法中心回线、小线框、浅埋深采空区以及不同系统装置的角度对各类参数进行了地面试验研究,优化了相关地面采集技术,取得了一定成果。

在以上研究基础上,为了获取适合井下施工的矿井瞬变电磁法参数,在晋煤集团朝阳矿已知积水采空区进行了大量参数优化试验工作,并将优化结果应用到晋煤集团王台铺矿超前探测采空区及积水区,取得一定的成果,对榆林、鄂尔多斯、山西等地的

矿井瞬变电磁法探测工作可以起到一定的借鉴作用。

1 试验区概况及试验设计

1.1 试验区概况

晋煤集团某矿9101工作面轨道巷位于9号煤层中,探测位置东面为矿界,南部为未采区(可能存在采空区)。井田内可采煤层为山西组的3号煤层及太原组的9、15号煤层。

2015年8月23日在轨道巷1 152 m处施工超前探测钻孔,在掘进工作面正前方45 m处与右帮方位角160°方向65 m处见空,并有采空区积水涌出(图1)。经测定,水压最大可达0.2 MPa,涌水量为10~20 m³/h。采取水样进行水质化验后,发现非常高的矿化度和SO₄²⁻离子含量,具备采空区积水水文地质特征。

超前探测钻孔揭露采空区以后,为了提高瞬变电磁法探测精度,在9101工作面轨道巷1 152 m处(图1),进行了矿井瞬变电磁法超前探测参数优化试验的现场数据采集工作。试验现场轨道巷宽度4.1 m,高度2.2 m,锚杆锚网支护,综掘机退后27 m,掘进工作面正中间1号钻孔与右帮B5号钻孔作为放水孔对采空区积水进行疏放,外接排水钢管,长度1 m左右,掘进工作面与右帮管路接口处有少量涌水。距掘进工作面3~5 m处有钢管等铁器,右帮距掘进工作面5 m处钻孔有渗水,颜色为黄色。图

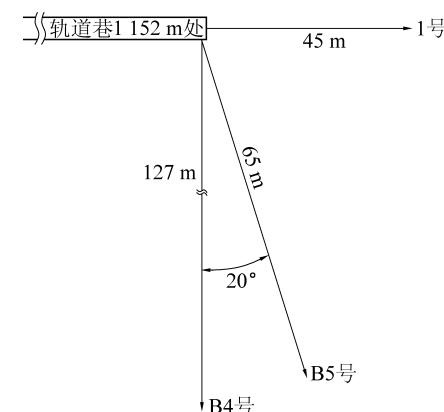


图1 物探位置钻孔示意

Fig.1 Schematic of geophysical location drilling

1中,1号钻孔:方位角90°,倾角+5°,孔深45 m时出水,出水量约为10 m³/h,水压0.2 MPa。B4号钻孔:方位角180°,倾角-1°,孔深127 m,揭露全煤。B5号钻孔:方位角160°,倾角-0.9°,孔深时65 m出水,出水量约为10 m³/h,水压0.2 MPa。

1.2 试验设计

矿井瞬变电磁法超前探测试验设计探测方向为顺煤岩层向掘进工作面前方探测,共布置横向探测角度14个(图2),探测角度分别是左侧帮(180°、165°、150°、135°、120°、105°)、正前方(90°、90°)、右侧帮(0°、15°、30°、45°、60°、75°),计14个测点数据^[12]。

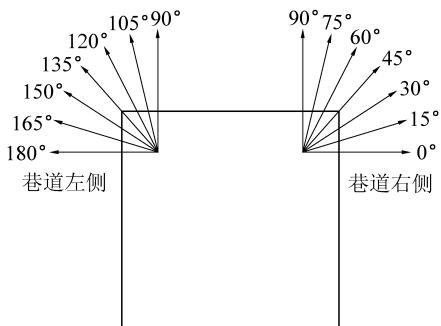


图2 横向探测角度示意

Fig.2 Schematic of lateral detection angle

2 参数优化试验

2.1 发射频率

矿井瞬变电磁法一般要求井下探测区域附近进行断电处理,以防止受到生产用电的干扰;矿井瞬变电磁仪的发射波形为方形波,发射频率为普通用电频率的倍数或约数,通过滤波可完全对普通用电频率的干扰进行剔除^[13-14]。频率越高,探测深度越小,目标体分辨率越高;频率越低,探测深度大,目标体分辨率越低。在频率的选择上,一般以实际探测时曲线的完整为标准,既要兼顾探测深度,又能兼顾探测精度^[15-16]。

本次试验选取发射频率为2.5、6.25和25 Hz时进行试验(叠加次数均为32次,采样密度均为中密度)。1号钻孔方向(探测角度90°方向)不同发射频率的归一化电压-时间曲线和视电阻率-深度曲线分别如图3和图4所示,由图3可以看出:6.25和25 Hz曲线衰减较为圆滑,2.5 Hz曲线40 ms之前曲线衰减较为圆滑,40 ms之后曲线尾支出现较大的跳跃性,曲线衰减不稳定,且随着频率从2.5、6.25 Hz到25 Hz逐步增大,其感应二次场随衰减时间的增加而减少;在图4中表现为随频率增大,其最大探测深度减少,2.5、6.25、25 Hz最大探测深度分别为

170、120、100 m左右。结合图1中在探测深度45 m打钻出水位置,可以看出:随着频率增大,视电阻率也逐步增大,25 Hz的曲线视电阻率显示较高,不能很好地表现低阻异常,2.5 Hz曲线视电阻率虽然较低,但衰减不稳定,影响探测精度,而6.25 Hz曲线衰减圆滑,且在出水位置表现出相吻合的低阻异常,与现场实际最为符合。

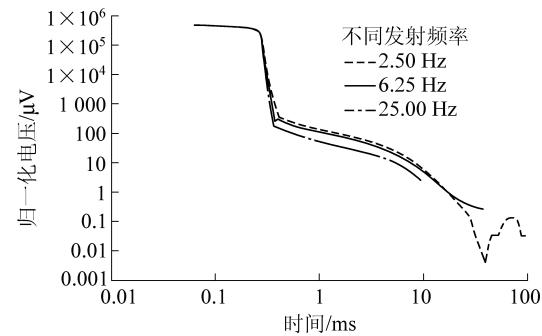


图3 1号钻孔方向测点归一化电压-时间曲线

Fig.3 Normalized voltage-time curves of measuring points in No.1 borehole direction

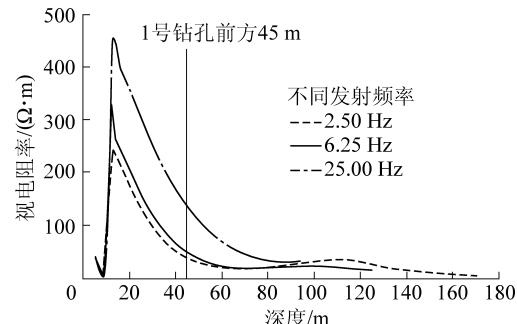


图4 1号钻孔方向测点视电阻率-深度曲线

Fig.4 Resistivity-depth curves of measuring points in No.1 borehole direction

不同发射频率的瞬变电磁法顺层方向超前探测视电阻率等值线拟断面如图5所示,图中横坐标0点位置为探测位置,横坐标负轴对应巷道左侧,正轴对应巷道右侧,纵坐标为沿顺层方向探测的距离;图中从冷色调到暖色调表示视电阻率不断升高。从图5中可以明显看出:2.5 Hz和6.25 Hz的断面图中,1号钻孔45 m处开始出现凹陷状冷色调低阻异常,与现场打钻情况相符,而25 Hz的断面图则出现正常的视电阻率值,冷色调低阻异常出现在70 m之后,与打钻出水情况不符;考虑到现场掘进工作面左右帮均有锚网及钻杆等铁器干扰,在图5中所有断面图中左右帮均出现大片低阻干扰异常,与B5号钻孔出水位置重合,不具备验证性。

2.2 叠加次数

矿井瞬变电磁法在数据采集时,可能遇到游散

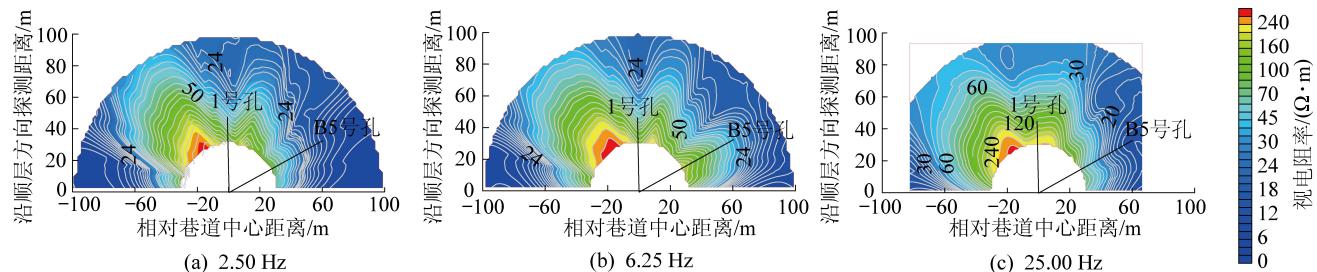


图5 不同发射频率超前探测视电阻率等值线拟断面

Fig.5 Pseudo-section of apparent resistivity isoline for advanced detection with different emission frequencies

电流等随机干扰,通过多次数据采集并叠加到一起可以减弱随机干扰,增强数据的真实性;但有时遇到井下交流电缆等周期性干扰,通过多次数据采集叠加,可能增强或突出周期性干扰,降低探测结果的可靠性^[17~18]。另外,叠加次数越多,采集时间越长,施工效率越低,所以不能简单增加叠加次数来提高数据质量,不能简单从叠加次数的多少来说明探测结果的质量,选择叠加次数也是以实际探测时曲线的整体、圆滑为标准^[19~20]。

本次选取叠加次数为16、32和64次进行试验(发射频率均为6.25 Hz,采样密度均为中密度)。1号钻孔方向(探测角度90°方向)不同叠加次数的归一化电压-时间曲线和视电阻率-深度曲线分别如图6和图7所示。由图6可知:3种叠加次数曲线衰减均较为圆滑,只有16次叠加曲线尾支出现上扬,不能有效压制晚期二次场干扰,不同之处在于在

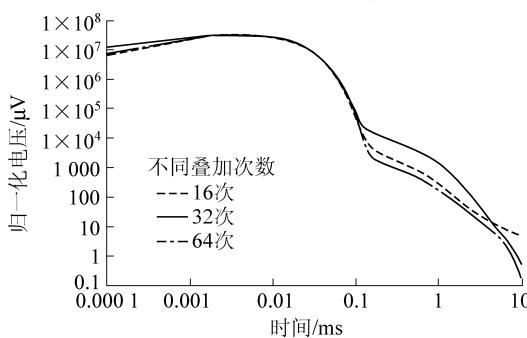


图6 1号钻孔方向测点归一化电压-时间曲线

Fig.6 Normalized voltage-time curves of measuring points in No.1 borehole direction

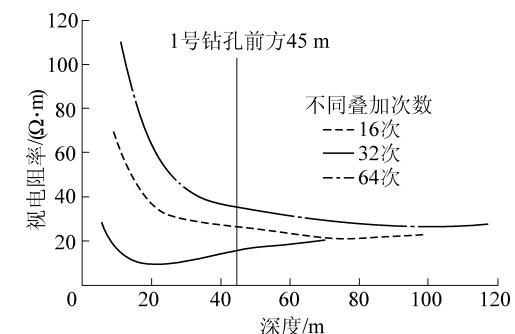


图7 1号钻孔方向测点视电阻率-深度曲线

Fig.7 Resistivity-depth curves of measuring points in No.1 borehole direction

0.1~3.0 ms时,32次叠加次数曲线整体归一化电压值最大,16次和64次叠加次数曲线最小,16次叠加次数相比较于64次整体略大;图7中32次叠加次数曲线整体视电阻率值位于30 Ω·m以下,而16次和64次叠加次数曲线在30 Ω·m以上,在1号钻孔45 m深度也有类似的表现。根据在井下探测总结的经验,一般视电阻率值位于30 Ω·m以下推断为含水异常,30 Ω·m以上推断为不含水正常岩层或高阻异常。因此,32次叠加次数在1号钻孔45 m深度表现为低阻含水异常,与出水位置相吻合,与现场实际最为符合,为矿井瞬变电磁法最佳叠加次数。

瞬变电磁法顺层方向不同叠加次数超前探测视电阻率等值线拟断面如图8所示,可以明显看出:32次的断面图中1号钻孔45 m处开始出现大片蓝色

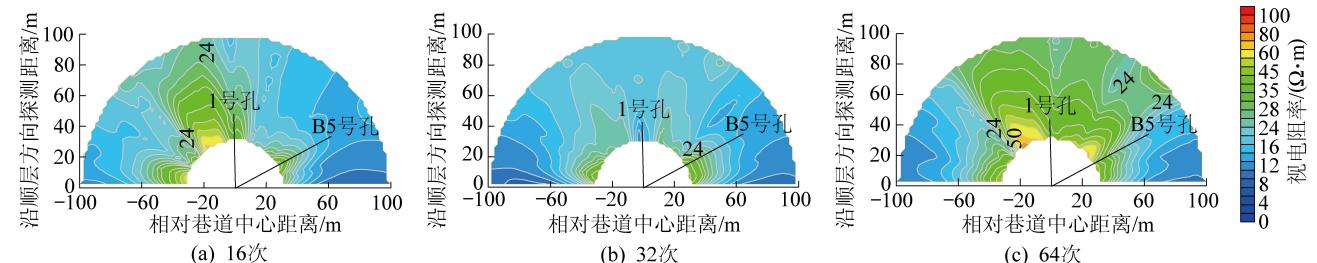


图8 不同叠加次数超前探测视电阻率等值线拟断面

Fig.8 Pseudo-section of apparent resistivity isoline for advanced detection with different number of superpositions

低阻异常,与现场打钻情况相符,而16次和64次叠加次数的断面图均出现正常或偏高的视电阻率值,与打钻出水情况不符;左右帮均存在铁器干扰,断面图左右帮不具备试验验证性。

2.3 采样密度

一般采样密度越高,采集的数据点越多,数据质量越可靠,但采样密度越高,采集时间越长,施工效率就越低,且受限于计算机处理效率,不能无限增大采样密度^[21-22]。另外,采样密度越高,采集的电性信息越多,地质信息越丰富,分辨异常越精细,同时采集到的干扰信息也可能增多,干扰增大,所以需要试验选择合理的采样密度来提高数据质量,不能简单从增加采样密度来提高异常分辨率,选择采样密度也是以实际探测时曲线的衰减圆滑程度为标准,更要兼顾实际。

本次试验选取低密度、中密度和高密度进行试验(发射频率均为6.25 Hz,叠加次数均为32次)。1号钻孔方向(探测角度90°方向)不同采样密度的归一化电压-时间曲线和视电阻率-深度曲线如图9和图10所示,由图9可知,3种采样密度曲线衰减均较为圆滑,且较为重合,高密度采样曲线尾部稍显上翘,归一化感应电压未见明显差异;图10中表现为较明显的视电阻率差异,中密度采样曲线整体视电阻率最低,低密度采样曲线视电阻率整体居中,高密度采样视电阻率值整体偏高,但均位于 $30 \Omega \cdot m$ 以下,属于低阻含水异常,低阻异常幅度有差异。因此,中密度采样曲线吻合程度最高,为矿井瞬变电磁

法最佳采样密度^[23]。

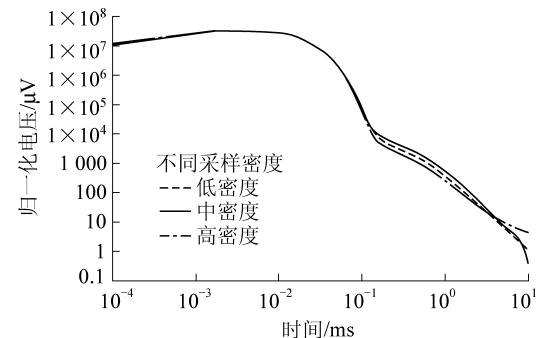


图9 1号钻孔方向测点归一化电压-时间曲线

Fig.9 Normalized voltage-time curves of measuring points in No.1 borehole direction

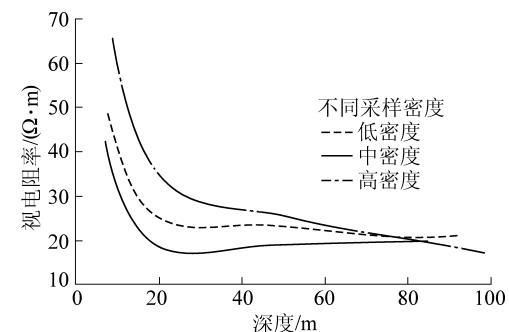


图10 1号钻孔方向测点视电阻率-深度曲线

Fig.10 Resistivity-depth curves of measuring points in No.1 borehole direction

瞬变电磁法顺层方向低密度、中密度、高密度采样的超前探测视电阻率等值线拟断面如图11所示。可以看出:低密度采样断面图中低阻异常位于正

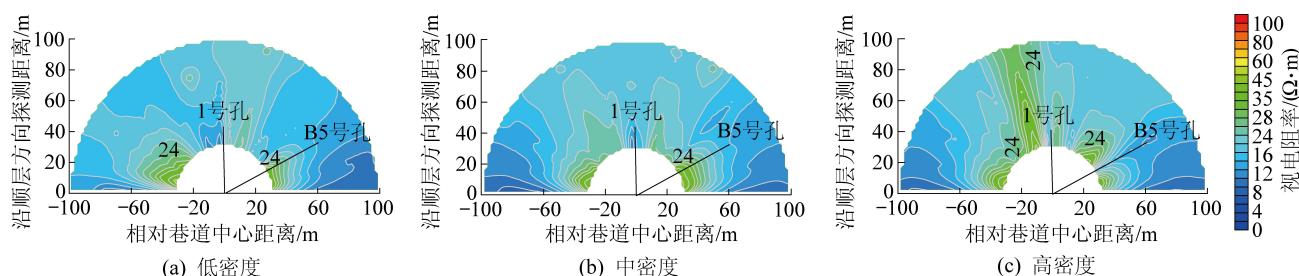


图11 不同采样密度的超前探测视电阻率等值线拟断面

Fig.11 Pseudo-section of apparent resistivity isoline for advanced detection with different sampling densities

前方及偏左方向,中密度低采样断面图中低阻异常呈现在正前方一片,左右对称,而高密度采样断面图中低阻异常位于正前方及偏右方向,中密度采样断面图中的低阻异常可以较好地涵盖现场实际富水区分布。

3 应用实例分析

按照以上优化的瞬变电磁法发射频率、叠加次数以及采样密度等参数,对山西晋城矿区王台铺矿

进行矿井瞬变电磁法超前探测工作,以准确查明前方采空区及积水情况。超前探测位置位于XV3308工作面的33083巷500 m处(距离开切眼30 m),探测成果叠加如图12所示,图中从蓝色到红色(冷色调到暖色调)表示视电阻率不断升高。可以看出在掘进工作面两帮随着距离增大,出现较大面积的低阻异常区(蓝色),推断为含水采空区;而在掘进工作面前方较近区域存在大范围高阻异常区(红色),推断为不含水或弱含水采空区。

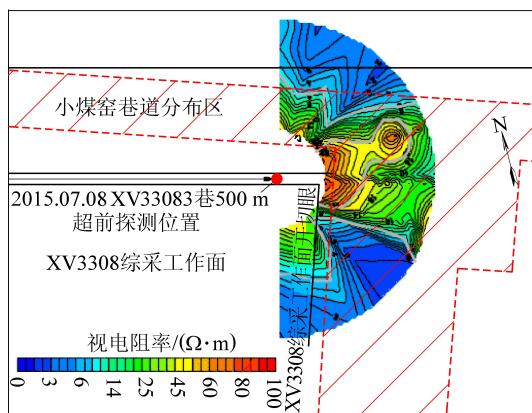


图 12 顺层切片叠加及小窑采空区分布

Fig.12 Stratigraphic slice stacking and small kiln goaf distribution

由图 12 可以看出存在明显的 1 处高阻异常体和 2 处低阻异常体,且分界面明显,其与查明的小窑巷道分布区基本重合。后经过矿方打钻验证,正前方 50 m 之外的高阻异常区见空,通过钻孔透视发现,为小煤窑采空区,无积水,后退 30 m,向右侧帮 1 处低阻异常区打钻,打到深度 35 m 遇空出水,水量较大。可以看出,瞬变电磁法发射频率、叠加次数以及采样密度优化结果在晋城矿区煤矿应用取得较好验证效果。

4 结论与建议

1) 矿井瞬变电磁法确定了采用 6.25 Hz 的发射频率、32 次叠加和中密度采集方式的采空区及积水区超前探测优化参数,可取得较好探测效果。

2) 根据在鄂尔多斯地方煤矿、临汾地方煤矿、晋煤集团、朔州地方煤矿等井下探测总结的经验,一般视电阻率值位于 $30 \Omega \cdot m$ 以下推断为含水异常, $30 \Omega \cdot m$ 以上推断为不含水正常岩层,更高则推断为高阻异常。

3) 将采集优化参数应用到瞬变电磁法实例中,成功发现前方采空区及积水区。

4) 本次试验由于防爆仪器本身局限性,部分常用参数如发射电流等不能试验,并且尚未考虑资料处理过程部分参数如视电阻率系数、深度系数等对数据曲线的影响,未来试验中会加大这方面参数的试验工作。

致谢:感谢晋煤集团技术研究院物探工程分公司以及煤炭科学技术研究院有限公司安全分院晋城项目部的各位领导、同事对本次试验的重视和支持!

参考文献(References) :

[1] 申宝宏,郑行周,弯效杰.煤矿隐蔽致灾因素普查技术指南

- [M].北京:煤炭工业出版社,2015.
- [2] 李宏杰,张彬,李文,等.煤矿采空区灾害综合防治技术与实践[M].北京:煤炭工业出版社,2016.
- [3] 闫述,陈明生,傅君眉.瞬变电磁场的直接时域数值分析[J].地球物理学报,2002,45(2):275~284.
YAN Shu, CHEN Mingsheng, FU Junmei. Direct time domain numerical analysis of transient electromagnetic fields [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45 (2) : 275~284.
- [4] 姜志海,岳建华,刘树才.多匝重叠小回线装置形式的矿井瞬变电磁观测系统[J].煤炭学报,2007,32(11):1152~1156.
JIANG Zhihai, YUE Jianhua, LIU Shucai. Mine transient electromagnetic observation system in the form of multi-turn and small-loop device [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32 (11) : 1152~1156.
- [5] 杨撷民,霍俊杰,李彦荣.基于 MIDAS 软件对受采空区影响坡体的稳定性研究[J].煤炭科学技术,2019,47(8):89~95.
YANG Xiemin, HUO Junjie, LI Yanrong. Study on stability of slope affected by goaf based on MIDAS software [J]. Coal Science and Technology, 2019,47(8):89~95.
- [6] 李文.煤矿采空区地面综合物探方法优化研究[J].煤炭科学技术,2017,45(1):194~199.
LI Wen. Optimization study of surface comprehensive geophysical detection methods of coal mine goafs [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1) : 194~199.
- [7] 姜国庆,贾春梅,牟义,等.矿井瞬变电磁法全空间处理及三维解释方法研究[J].地球物理学进展,2015,30(5):2164~2170.
JIANG Guoqing, JIA Chunmei, MU Yi, et al. Study on full-space treatment and 3D interpretation method of mine transient Electromagnetic Method [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30 (5) : 2164~2170.
- [8] 牟义.典型地质异常体电磁法响应特征研究[J].煤矿开采,2017,22(4):4~9.
MU Yi. Study of electromagnetic response characteristics of typical geological anomalous body [J]. Coal Mining Technology, 2017, 22 (4) : 4~9.
- [9] 杨云见.不同观测参数条件下中心回线瞬变响应特征分析[J].物探装备,2006,16(3):216~220.
YANG Yunjian. Analyzing transient response of central loop under different conditions of observing parameters [J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2006, 16 (3) : 216~220.
- [10] 陈明生,闫述,石显新,等.二维地质体的瞬变电磁场响应特征[J].地震地质,2001(2):252~256.
CHEN Mingsheng, YAN Shu, SHI Xianxin, et al. Transient electromagnetic response characteristics of two-dimensional geological bodies [J]. Seismology and Geology, 2001(2):252~256.
- [11] 郭纯,刘白宙,白登海.地下全空间瞬变电磁技术在煤矿巷道掘进头的连续跟踪超前探测[J].地震地质,2006,28(3):456~462.
GUO Chun, LIU Baizhou, BAI Denghai. Study on continuous follow-up further detection of underground all-time transient electromagnetic technique in coal mining tunnel driving head [J]. Seismology and Geology, 2006, 28 (3) : 456~462.

- [12] 刘志新,岳建华,刘仰光.扇形探测技术在超前探测中的应用研究[J].中国矿业大学学报,2007,36(6):822-868.
LIU Zhixin, YUE Jianhua, LIU Yangguang. Application of fan-shaped detection technology in advanced detection [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36 (6) : 822-868.
- [13] 程久龙,王玉和,于师建,等.巷道掘进中电阻率法超前探测原理与应用[J].煤田地质与勘探,2000,28(4):60-62.
CHENG Jiulong, WANG Yuhe, YU Shijian, et al. Development of resistivity method for advance exploration in roadway excavation [J]. Coalfield Geology and Exploration, 2000, 28 (4) : 60-62.
- [14] 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.
- [15] 陈健强,张俊英,李宏杰,等.掘进面瞬变电磁探测采空区及三维成像技术研究[J].煤矿开采,2017,22(1):18-21.
CHEN Jianqiang, ZHANG Junying, LI Hongjie, et al. 3-D imaging technology and goaf transient electromagnetic exploration of driving face [J]. Coal Mining Technology, 2017, 22 (1) : 18-21.
- [16] 窦文武,牟义,邱浩,等.基于Voxler的瞬变电磁勘探三维解释技术研究[J].煤炭科技,2015(4):37-39.
DOU Wenwu, MU Yi, QIU Hao, et al. Study on 3D interpretation technology of transient electromagnetic exploration based on voxler [J]. Coal Science and Technology, 2015 (4) : 37-39.
- [17] 夏春鹏,窦文武,樊林林,等.不同视电阻率导体对瞬变电磁法的响应特征分析[J].中州煤炭,2015(11):114-117.
XIA Chunpeng, DOU Wenwu, FAN Linlin, et al. Characteristics of response of different apparent resistivity conductors to transient electromagnetic method [J]. Zhongzhou Coal, 2015 (11) : 114-117.
- [18] 牟义.矿井工作面突水地质异常体电阻率响应特征实验研究[D].青岛:山东科技大学,2009.
- [19] 陈健强.采空区全空间瞬变电磁响应特征与应用研究[D].北京:煤炭科学研究院,2017.
- [20] 邱浩.基于参数优化试验的工作面空巷探测技术研究[J].煤矿开采,2016,21(4):18-22.
QIU Hao. Detection technology of working face abandoned roadway based on optimal parameters [J]. Coal Mining Technology, 2016, 21 (4) : 18-22.
- [21] 安晋松,孙庆先,邱浩,等.井下陷落柱综合探测技术试验研究[J].煤炭科学技术,2015,43(10):144-147.
AN Jinsong, SUN Qingxian, QIU Hao, et al. Experimental study on underground collapse column by integrated detection technology [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43 (10) : 144-147.
- [22] 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.
- [23] 肖乐乐,魏久传,牛超,等.掘进巷道构造富水性电法探测综合应用研究[J].煤矿开采,2015,20(3):21-24.
XIAO Lele, WEI Jiuchuan, NIU Chao, et al. Comprehensive application of electrical surveying watery property of tectonic in driving roadway [J]. Coal Mining Technology, 2015, 20 (3) : 21-24.