

doi: 10. 11720/wtyht. 2022. 1610

王荣军,周超群,崔杰,等. 强干扰环境下铁矿导水通道精细探测研究[J]. 物探与化探, 2022, 46(6): 1396–1402. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2022. 1610](http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1610)

Wang R J, Zhou C Q, Cui J, et al. Fine detection of water-conducting channels in iron mine under strong interferences[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(6): 1396–1402. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2022. 1610](http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1610)

强干扰环境下铁矿导水通道精细探测研究

王荣军,周超群,崔杰,谢明星,秦壮杰

(五矿邯邢矿业有限公司 北洺河铁矿,河北 武安 056303)

摘 要: 为实现北洺河铁矿不明涌水异常区域导水通道的精确定位,保证该矿安全生产,采用矿井瞬变电磁法对该铁矿-110 m 水平 11#穿脉顶板岩层进行了探测。在对金属干扰下的矿井瞬变电磁响应特征进行理论分析的基础上,结合该铁矿实际地质情况分析其地球物理特征,采用系数校正法对实测数据进行金属干扰校正,再将其作为初始模型进行全空间瞬变电磁蜂群算法反演处理,最终得到了工作面顶板高分辨率电阻率成像结果,结合已有地质资料,实现了富水异常区以及导水通道的精细探测;探测结果得到了钻孔验证。研究表明,采用有效的数据处理手段,矿井瞬变电磁法可以提高铁矿工作面顶板岩层的富水异常位置的探测精度,为铁矿防治水工作提供有效的技术保障。

关键词: 强干扰;铁矿;矿井瞬变电磁;富水性;精细探测

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)06-1396-07

0 引言

矿井瞬变电磁具备施工方便、体积效应小、对低阻含水水体反映灵敏以及纵向分辨率高的优势,在煤矿工作面顶底板含水性探测、巷道迎头超前探测等方面得到了广泛应用,取得了良好的探测效果^[1-4]。但是在铁矿防治水工作中,尤其是在铁矿井下探测工作中,矿井瞬变电磁探测技术应用较少,主要原因是铁矿井下环境干扰因素较多,同时缺乏有效的数据处理手段。贾三石等^[5]利用矿井瞬变电磁对辽宁某铁矿井下采空区进行了有效探测;李静等^[6]采用矿井瞬变电磁对山东大牛铁矿迎头前方富水情况开展了超前探测工作,并得到了钻孔验证;刘殿军等^[7]利用矿井瞬变电磁成功发现井下铁矿掘进巷道掌子面前方的含水破碎带和老窑采空区;平守国等^[8]利用地面瞬变电磁法对齐大山铁矿含水构造带探测进行了研究。上述研究取得了一定的成果,但并没有涉及到巷道内金属干扰校正方面的工作,而这部分工作将直接影响探测结果的精度和分辨

率。除此之外,目前在实际勘探过程中,矿井瞬变电磁处理和解释手段通常采用“烟圈”理论进行反演^[9-10]。“烟圈”理论反演是一种定性的近似反演方法,其实质是时深转换,即将视电阻率随时间的变化曲线转换为视电阻率随深度的变化曲线^[11],解释结果不是地层的真电阻率,难以满足实际需要。所以,采用有效的反演方法在数据处理中显得尤为重要^[12-13]。

本文在铁矿导水通道探测中,利用系数校正法对接收信号进行金属干扰校正,并通过理论模型验证了该方法的有效性;随后提出采用人工蜂群算法对全空间瞬变电磁数据进行非线性反演的精细处理和解释方法,最后以北洺河铁矿涌水异常探测为例,准确圈定了导水通道和富水区域,为该铁矿安全生产和防治水工作提供了可靠的技术保障。

1 矿井瞬变电磁基本原理

瞬变电磁法或称时间域电磁法(time domain electromagnetic methods, TEM),是利用不接地回线或

收稿日期: 2021-11-19; 修回日期: 2022-01-09

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFC0801600);河北省自然科学基金项目(D2020402032、D2020402013)

第一作者: 王荣军(1975-),男,高级工程师,研究方向为金属和非金属矿山安全开采。Email: wrjironmine@163.com

接地线源向地下发射一次脉冲磁场,在一次脉冲磁场间歇期间,利用线圈或接地电极观测二次涡流场的方法^[14]。通过测量断电后各个时间段的二次场随时间变化规律,可得到不同深度的地电特征。

矿井瞬变电磁法基本原理与地面瞬变电磁法一致,但是受巷道内勘探环境的限制,测量线圈尺寸有限,一般为2 m×2 m的多匝回线,其勘探深度也较浅。与地面瞬变电磁法不同的是,矿井瞬变电磁法为全空间瞬变响应(图1),这种瞬变响应是来自于回线平面上下(或两侧)地层。除此之外,矿井瞬变电磁法可以将线圈平面以任意角度放置于巷道中,探测线圈平面法线方向一定深度内含水异常体的垂向和横向发育规律。因此,通过对发射线圈方位的调整可实现对整个工作面内顶板和底板一定范围内含水低阻异常体分布规律的探测。

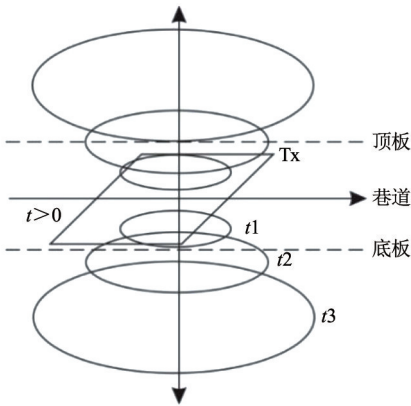


图1 矿井瞬变电磁“烟圈效应”示意

Fig.1 The "smoke ring" of mine transient electromagnetic

2 金属干扰下的矿井瞬变电磁响应特征

巷道内有用于支护顶底板和侧帮的锚杆、锚网以及工作面内的防水闸门,这些无疑会对瞬变电磁探测信号造成干扰,给后续的数据处理和资料解释带来很大的困难,所以需要研究其响应特征和影响规律。

采用三维时域有限差分法开展金属锚网影响下的全空间瞬变电磁数值模拟^[15]。全空间模型如图2所示,地下介质电阻率为100 Ω·m,巷道高度5 m,发射线圈(Tx)和接收线圈(Rx)边长为2 m,放置于巷道底板,发射电流为1 A,在巷道顶板设置厚度为0.5 m的金属支护,电阻率为0.1 Ω·m。

图3所示为有、无金属支护下的感应电动势衰减曲线。从图中可以看出,顶板存在金属支护时,感应电动势明显高于无金属支护时,说明金属支护的

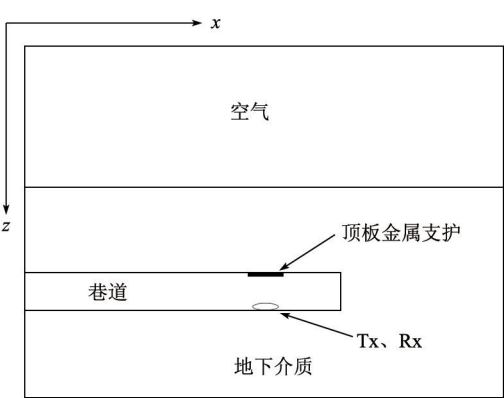


图2 矿井瞬变电磁探测模型示意

Fig.2 Schematic diagram of mine transient electromagnetic detection model

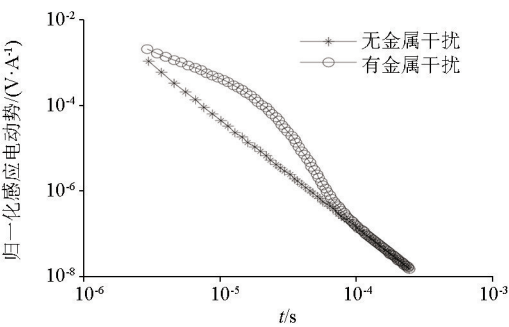


图3 金属干扰下的衰减曲线

Fig.3 the attenuation curve with metal interference

存在直接影响了矿井瞬变电磁响应信号,影响结果是其幅值增大,偏离地下介质的真实数值,若将其直接用于反演,可能会导致错误的结论,所以需要在前期对其进行处理。

3 地质概况及地球物理特征

北洛河铁矿地处河北省武安市,研究区内地表被第四系黄土及河床卵石层所覆盖,主要地层(由新至老)依次为第四系黄土砾石层、石炭系—二叠系含煤岩系以及中奥陶系灰岩层,其中燕山期闪长岩呈复杂的似层状侵入到奥陶系中统及其他地层中。在垂向上,矿区灰岩上覆有第四系砂砾卵石层、砂质黏土砾石层和底部黏土层,下为燕山期火成岩托底。区内的控矿构造为次级背斜,主要发育在奥陶系中统马家沟石灰岩中部层位中^[16]。研究区内共有8个矿层,产于燕山期闪长岩与奥陶系石灰岩接触带,为接触交代型磁铁矿床。区内水文地质资料显示,开采过程中受顶板奥陶系中统石灰岩含水层影响较大。

当地下岩层赋存良导体或者含水时,该区域与围岩介质存在明显的电性差异,会形成低阻异常,且

低阻异常的特征会随着含水程度和岩性变化而变化,这是矿井瞬变电磁探测含水异常区的地球物理基础。对于铁矿而言,磁铁矿床作为一种金属良导体,在探测结果中也呈现出低阻异常,这对于岩层的富水性探测是一种干扰。但是,从本区成矿条件和类型可知,区内磁铁矿石呈“鸡窝”簇状分布,可以视为孤立的低阻体,在资料解释过程中结合工作面内具体的地质及开采资料,可以排除某异常是否为铁矿体引起,所以能够确定顶底板的富水情况。

4 数据采集及处理

4.1 工程布置和数据采集

为了查明该铁矿-110 m 水平 11#穿脉不明涌水部位顶板导水通道及其富水性,鉴于 11#穿脉由于出水不能进入的情况,在该铁矿工作面-110 m 下盘运输巷布置瞬变电磁探测测线 1 条,长度 158 m,点距 1 m,测线布置见图 4。此次测量选用 IG-GETEM-30B 瞬变电磁仪进行数据采集,根据工作面实际情况和探测目的,采用多匝小回线装置,线圈尺寸为 2 m,发射和接收线圈匝数均为 20 匝,装置类型为重叠回线,供电电流>3.0 A,观测时间为 $1.4 \times 10^{-5} \sim 3.396 \times 10^{-2}$ s,叠加次数为 128 次。

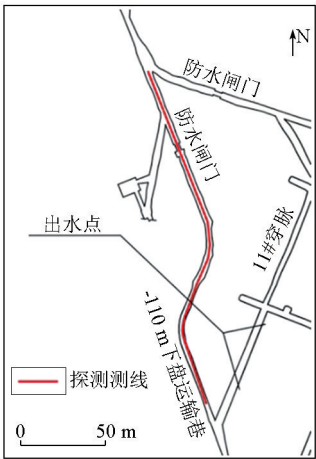


图 4 矿井瞬变电磁测线布置

Fig. 4 Layout of mine transient electromagnetic survey line

4.2 数据处理

4.2.1 金属干扰校正

工作中,瞬变电磁接收到的信号是富水异常的有效信号和金属干扰信号的混合,所以采用常规的滤波、平滑等手段无法有效压制干扰,反而可能会造成有效信号的丢失,因此本文采用系数校正法对其进行处理^[17-19]。矿井瞬变电磁视电阻率公式为^[9]:

$$\rho_{\tau} = 6.32 \times 10^{-12} \beta (S_T N_T)^{2/3} (S_R N_R)^{2/3} \cdot (V/I)^{-2/3} t^{-5/3}, \quad (1)$$

式中: β 为比例系数; S_T 、 S_R 是发射和接收线框面积; N_T 、 N_R 为发射和接收线框匝数; V 和 I 为激励电压和电流; t 为衰减时间。

在相同的工作条件下,对于某个测点的第 i 个观测时间,假设无金属干扰和有金属干扰测量得到的归一化感应电动势分别为 A_i 和 A'_i ($i = 1, 2, \dots, m$),则有^[20]: $A_i = V_i/I_i$, $A'_i = V'_i/I'_i$, 定义校正系数为 $C_i = A_i/A'_i$ 。假设对于给定的观测数据 (t_i, C_i) , Φ 为所有次数不超过 n ($n \leq m$) 的多项式构成的函数类,求 $P_n(t) = \sum_{k=0}^n a_k t^k \in \Phi$, 使得^[20]:

$$I = \sum_{i=1}^m [P_n(t_i) - C_i]^2 = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{k=1}^n a_k t_i^k - C_i \right)^2 = \min, \quad (2)$$

求出最小二乘拟合多项式:

$$P_n(t) = \sum_{k=1}^n a_k t^k, \quad (3)$$

即 $P_n(t)$ 为所求的拟合函数。由于 $P_n(t)$ 是多项式函数,所以可以根据精度要求选择适当阶数,最终得到 $A_i = A'_i \cdot P_n(t)$, 随后可以得到校正后的视电阻率:

$$\rho_{\tau} = 6.32 \times 10^{-12} \beta (S_T N_T)^{2/3} (S_R N_R)^{2/3} \cdot [p_n(t) V'_i/I'_i]^{-2/3} t^{-5/3}. \quad (4)$$

针对不同的金属干扰(锚杆、锚网和防水闸门),可以根据以上公式对含有金属干扰的实测数据进行校正。

针对图 3 所示的有、无金属支护下矿井瞬变电磁衰减曲线,采用上述方法进行金属干扰校正,得到校正结果如图 5 所示。可以看出,通过金属干扰校正后的衰减曲线与无金属干扰曲线基本吻合,说明该方法可以有效消除巷道内金属干扰对矿井瞬变电磁探测信号的影响。

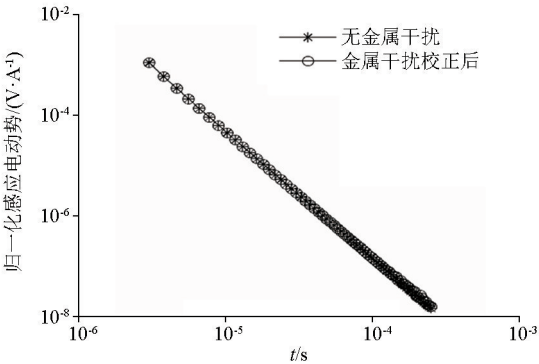


图 5 金属干扰校正前后衰减曲线对比

Fig. 5 Attenuation curve before and after metal interference correction

4.2.2 蜂群算法反演

人工蜂群算法是 Karaboga 在解决多个变量的函数优化问题时提出的迭代算法^[21-22]。在解决优化问题时,首先要对食物源的位置进行初始化,随机生成 SN 个 D 维向量,作为可能解的初始种群,并按照式(5)评价其适应度值,记录此时的食物源的最优值后,蜜蜂开始对所有食物源进行循环迭代搜索:

$$fit_i = \begin{cases} 1/(1 + f_i), & f_i \geq 0; \\ 1 + abs(f_i), & f_i < 0. \end{cases} \quad (5)$$

式中: fit_i 表示食物源的适应度值; f_i 表示对应优化问题的目标函数值。在解决实际问题中,由于目标函数值不存在小于 0 的情况,所以将式(5)修改为 $fit_i = 1/(1 + f_i)$ 。

其次,引领蜂对所有食物源进行邻域搜索,利用式(6)产生新的食物源 v_{ij} 并评估其适应度值(蜜源质量),将其与旧食物源 x_{ij} 进行比较,若它优于旧食物源,则用新食物源替换旧食物源,否则保留旧食物源。

$$v_{ij} = x_{ij} + \varphi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad , \quad (6)$$

式中: $j \in \{1, 2, \dots, D\}$; $k \in \{1, 2, \dots, SN\}$, k 为随机生成且 $k \neq i$; φ_{ij} 是 $[-1, 1]$ 之间的随机数,控制 x_{ij} 的生成。

当引领蜂对所有食物源搜索完成后,返回舞蹈区将记录的食物源的适应度和位置信息分享给跟随蜂。此时,跟随蜂根据引领蜂提供的食物源信息,按照式(7)所示概率 P_i 进行选择:

$$P_i = fit_i / \sum_{n=1}^{SN} fit_n \quad . \quad (7)$$

当跟随蜂选中食物源后,会同引领蜂一样进行一次邻域搜索,若搜索结果优于引领蜂给出的食物源,则会储存新的食物源的信息,反之保持不变。

在人工蜂群算法中,若某个食物源经过 limit 次循环之后,其适应度值仍没有改善,则表示该食物源已经陷入局部最优,应该将其放弃。而该食物源所对应的引领蜂将重新转变成侦察蜂,其通过式(8)随机产生一个新的食物源来代替放弃的食物源:

$$x_i^j = x_{min}^j + rand(0, 1)(x_{max}^j - x_{min}^j) \quad , \quad (8)$$

式中: $j \in \{1, 2, \dots, D\}$, 是 D 维解向量中的某个分量; x_{max}^j 和 x_{min}^j 分别为该解向量中最优和最差的食物源。本文在实测资料反演过程中,采用经过金属校正后的视电阻率数据作为蜂群算法反演的初始模型。

5 资料解释与成果分析

5.1 成果分析

5.1.1 金属干扰校正结果

图 6 为防水闸门附近的 150 号测点金属干扰校正前后的归一化感应电动势衰减曲线对比,可以看到,经过校正后感应电动势整体幅值减小,说明金属干扰的存在会导致瞬变电磁感应电动势幅值变大,与数值模型显示的金属干扰对矿井瞬变响应特征影响结果一致。

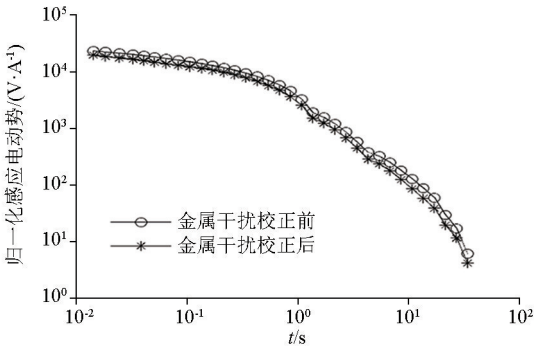


图 6 150 测点金属干扰校正前后衰减曲线对比
Fig. 6 Attenuation curve before and after 150-point metal interference correction

图 7 所示为经过金属干扰校正前后视电阻率拟断面对比结果。对比两图可以看到,校正后的视电阻率拟断面在中深部位置处发生了明显的变化,尤其是在测线距离 130 m 附近由防水闸门引起的低阻异常经过校正后基本消失,说明金属干扰经过校正后得到了较好的压制,岩层电性特征得到了有效还原。

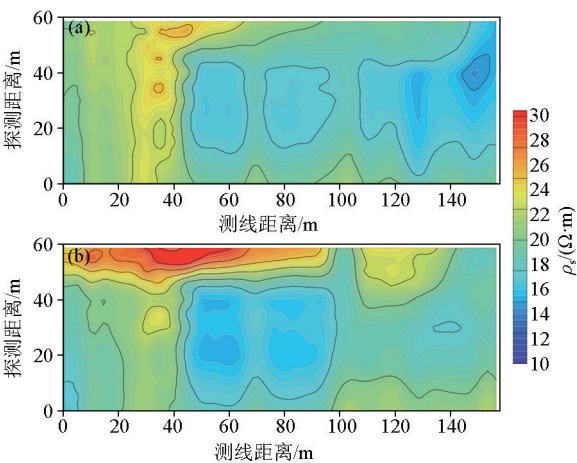


图 7 金属干扰校正前(a)校正后(b)视电阻率拟断面
Fig. 7 Comparison of the correction of metal interference (a) before correction (b) after correction

5.1.2 反演结果

图 8 所示为经过金属校正后,利用蜂群算法反演得到的电阻率断面。从图中可以看出,工作面顶板整体电阻率相对较低,测线范围内纵向电阻率随探测深度增加呈现近似“高一低一高”的特征;电阻率横向变化较大,局部电阻率呈现低阻特征,说明顶板岩层富水性不均。根据电阻率剖面特征,圈定了 3 处低阻异常。①号异常在测线 6~26 m,探测距离 10~35 m 位置,顶板岩层电阻率呈现中低阻特征,由于该测段范围内巷道边帮有灰岩裂隙水渗流,推断该位置范围顶板岩层为相对弱富水的裂隙。②号异常在测线 49~96 m,探测距离 10~38 m 位置,顶板岩层电阻率呈现低阻特征,且异常形态较为规则,封闭性较好,推断该异常可能为导水通道所在位置;同时考虑到异常形态,结合地质资料该异常也有可能为铁矿体。③号异常在测线 110~158 m,探测距离 20~35 m 位置,经过金属校正后,该位置顶板岩层仍然呈现中低阻特征,推断为弱富水的破碎带或裂隙。

由于矿井瞬变电磁属于全空间探测,探测成果中显示出的低阻异常可能是由底板含水造成,因此需要对探测成果进行钻孔验证。

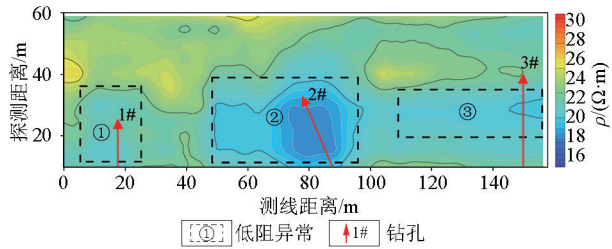


图 8 蜂群算法反演电阻率断面

Fig. 8 Inversion of resistivity by bee colony algorithm

5.2 成果验证

5.2.1 钻孔验证

为了验证探测成果的准确性并排除底板含水情

况的存在,根据上述探测和解释结果,分别在测线 18 m、88 m 和 150 m 位置处,对顶板进行钻孔施工,编号为 1#、2#和 3#,钻孔具体位置及角度见图 8 所示。具体钻孔情况见表 1。

从表 1 可以看出,经过金属干扰校正和蜂群算法反演圈定的低阻异常均得到了钻孔证实,尤其是②号异常,通过钻孔揭露结果可知,在该钻孔浅部发现铁矿的存在,同时在钻孔深部确定了采空区的位置。这与物探解释推断的该异常可能为铁矿体的结论一致,虽然在瞬变电磁反演成果中并没有清晰反映出采空区的存在,但这是由于铁矿体的低阻异常特征导致。

表 1 钻孔实际揭露情况
Table 1 List of actual disclosures of drilling

孔号	钻孔深度/m	孔内情况
1#	25	灰岩,岩石破碎严重,节理裂隙发育,裂隙被黄泥充填,在 24 m 处有少量出水
2#	40	灰岩,岩石较完整,在 6 m 处开始见铁矿,29.5 m 后为采空区
3#	40	灰岩,岩石破碎,7~10 m 和 14~25 m 处夹黄泥;在 20 m 开始出水,25 m 后水量增大

5.2.2 钻孔窥视验证

为了能够明确采空区的边界以及富水情况,进一步查明顶板采空范围,利用 2#钻孔开展了钻孔窥视工作,即通过钻孔向顶板采空区域放置高清影像装备,实现采空区的实时立体成像。

图 9 所示为窥视结果,从图中可以清晰看到-110 m 水平下盘运输巷顶板采空区以及空区内铁矿体的存在,从窥视结果中还可以看到有疑似采掘巷道的存在。根据已有的开采资料,综合物探与钻探结果,可知该采空区为盗采所致,且采空面积较大,所以最终推断 11#穿脉涌水异常是由②号异常顶板采空形成的导水通道所引起。

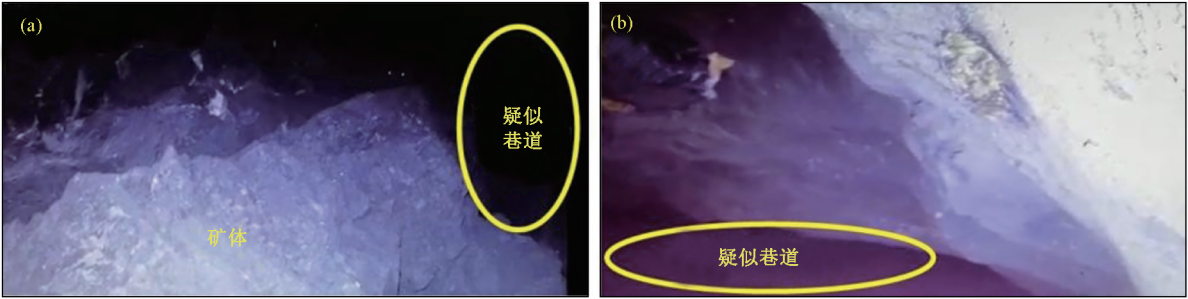


图 9 钻孔窥视结果

Fig. 9 The results of drilling peep

6 结论

在常规矿井瞬变电磁法的基础上,提出了金属干扰校正和蜂群算法反演的精细探测和解释技术,结合北洺河铁矿探测实例,得到以下结论:

1)巷道内金属锚杆、锚网的存在给矿井瞬变电磁数据质量带来了一定的影响,通过对实测数据进行金属干扰校正,能够较为真实地反映实际地层电性特征,为提高反演精度奠定了前期基础。

2)通过本次矿井瞬变电磁探测,准确圈定出北洺河铁矿-110 m 水平 11#穿脉涌水异常的导水通道位置以及运输巷顶板的富水情况;通过钻孔不仅验证了探测结果的准确性,还排除了底板含水异常的存在,说明通过采用精细的探查技术和有效的数据处理手段,矿井瞬变电磁能够应用于铁矿防治水的工作中。

参考文献 (References):

[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 J L, Li F, Peng S P, 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.

[2] 赵家宏,程久龙,温来福. 基于矿井瞬变电磁法的侏罗系煤层顶板富水性研究[J]. 煤炭技术,2018,37(12):97-100.
Zhao J H, Cheng J L, Wen L F. Study on water-richness of mine roof rock in Jurassic coal seam based on mine transient electromagnetic method[J]. Coal Technology, 2018,37(12):97-100.

[3] 徐栓祥,程久龙,董毅,等. 矿井瞬变电磁与红外测温联合超前探测方法与应用[J]. 中国矿业,2019,28(5):136-139,145.
Xu S X, Cheng J L, Dong Y, et al. The ahead detection combined method of the mine transient electromagnetic and infrared surveying and its application[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(5):136-139,145.

[4] 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.
Mu Y, Li J H, Xu H, 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.

[5] 贾三石,邵安林,王海龙,等. 基于 TEM 的井下铁矿采空区探测评价[J]. 东北大学学报:自然科学版,2011,32(9):1340-1343.
Jia S S, Shao A L, Wang H L, et al. Detection and evaluation of underground iron ore goaf based on TEM[J]. Journal of North-eastern University:Natural Science, 2011,32(9):1340-1343.

[6] 李静,刘向红,张平松,等. 矿井瞬变电磁精细探查技术在铁矿防治水中的应用[J]. 光谱实验室,2013,30(4):1807-1812.
Li J, Liu X H, Zhang P S, et al. Application of MTEM's fine exploration technology to detection of iron mine[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2013,30(4):1807-1812.

[7] 刘殿军,贾三石,王恩德,等. 井下铁矿巷道掘进工作面超前预警探测[J]. 金属矿山,2014(11):147-150.
Liu D J, Jia S S, Wang E D, et al. Advanced early warning detection ahead of tunneling in underground iron ore[J]. Mine Metal, 2014(11):147-150.

[8] 平守国,王永增,张忠海,等. 齐大山铁矿南帮含水构造带探测研究[J]. 金属矿山,2020(1):56-62.
Ping S G, Wang Y Z, Zhang Z H, et al. Study on the detection of water-bearing structural zones in the south side of Qidashan iron mine[J]. Mine Metal, 2020(1):56-62.

[9] 于景邨. 矿井瞬变电磁法勘探[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2007.
Yu J C. Mine transient electromagnetic prospecting[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2007.

[10] 周金,程久龙,温来福. 矿井瞬变电磁法反演方法研究进展与展望[J]. 煤矿安全,2017,48(4):180-183,187.
Zhou J, Cheng J L, Wen L F. Research progress and prospect on inversion methods of mine transient electromagnetic method[J]. Safety in Coal Mines, 2017,48(4):180-183,187.

[11] 李明星,程建远. 基于标准差标准化的矿井瞬变电磁数据处理方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(5): 225-229.
Li M X, Cheng J Y. Study on mine transient electromagnetic data processing method based on standard deviation standardization[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5): 225-229.

[12] 程久龙,李明星,肖艳丽,等. 全空间条件下矿井瞬变电磁法粒子群优化反演研究[J]. 地球物理学报,2014,57(10):3478-3484.
Cheng J L, Li M X, Xiao Y L, et al. Study on particle swarm optimization inversion of mine transient electromagnetic method in whole-space[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(10): 3478-3484.

[13] 李明星. 矿井瞬变电磁 PSO-DLS 组合算法反演研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 268-272.
Li M X. Study on mine transient electromagnetic method inversion based on PSO-DLS combination algorithm[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 268-272.

[14] 牛之珽. 时间域电磁法原理[M]. 长沙:中南大学出版社, 2007.
Niu Z L. The principle of transient electromagnetic method[M]. Changsha: Central South University Press, 2007.

[15] 李飞,程久龙,温来福,等. 瞬变电磁场有限差分与数字滤波双模型三维正演方法[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(3): 963-969.
Li F, Cheng J L, Wen L F, et al. Double model method for 3D TEM modeling based on combination of FDTD and digital filtering

method[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(3): 963–969.

[16] 周超群. 强干扰条件下矿井电梯井井壁损伤精细探测[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(1): 12–20.

Zhou C Q. Fine detection of mine elevator shaft wall damage under the condition of strong interference[J]. Advances in Geosciences, 2021, 11(1): 12–20.

[17] 杨允林,程久龙,赵家宏,等. 带式输送机影响下矿井瞬变电磁响应特征与校正研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(7): 282–284, 288.

Yang Y L, Cheng J L, Zhao J H, et al. Study on characteristics of mine transient electromagnetic response under the influence of belt conveyor and interference correction[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(7): 282–284, 288.

[18] 时志浩,程久龙,董毅,等. 锚网支护对矿井瞬变电磁响应的影响与校正[J]. 煤矿安全, 2019, 50(4): 108–111.

Shi Z H, Cheng J L, Dong Y, et al. Influence of bolt-net support on mine transient electromagnetic response and its correction[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(4): 108–111.

[19] 周金,程久龙,温来福. 矿井瞬变电磁金属干扰响应特征与校正方法[J]. 中国矿业, 2017, 26(8): 146–149, 164.

Zhou J, Cheng J L, Wen L F. Response characteristics of metallic facilities and correction method on mine transient electromagnetic surveying[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(8): 146–149, 164.

[20] 周璇,刘树才,常江浩,等. 金属棚支架对矿井瞬变电磁探测影响及校正技术[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(11): 101–104.

Zhou X, Liu S C, Chang J H, et al. Influences on metal support to mine transient electromagnetic detection and correction technology[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(11): 101–104.

[21] Huang S H, Cheng J L, Wen L F, et al. Study on metal interference correction method in mine TEM based on the fitting function [C]//7th International Conference on Environmental and Engineering Geophysics, 2016.

[22] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization[R]. Technical Report-TR06, Erciyes. University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.

Fine detection of water-conducting channels in iron mine under strong interferences

WANG Rong-Jun, ZHOU Chao-Qun, CUI Jie, XIE Ming-Xing, QIN Zhuang-Jie
(Beiminghe Iron Mine of Minmetals Hanxing Mining Co., Ltd., Wu'an 056303, China)

Abstract: To achieve the accurate positioning of the water-conducting channels in the areas with unknown anomalous water intrush in the Beiminghe iron mine to ensure the safe production of the mine, this study explored the 11# across-vein roof at -110 m level in this iron mine using the mine transient electromagnetic method (MTEM). Firstly, this study briefly introduced the basic principle of MTEM and theoretically analyzed the characteristics of mine transient electromagnetic response under metal interferences. Then, it analyzed the geophysical characteristics based on the geology of the iron mine and corrected the measured data targeting metal interferences using the coefficient correction method. Afterward, the measured data were used as the initial model for the inversion of full-space transient electromagnetic using the bee colony algorithm, obtaining the high-resolution resistivity images of the working face roof. The images combined with the existing geological data allow for the fine detection of water-rich anomalous areas and water-conducting channels, and the detection results were verified by drilling. The results show that the MTEM can effectively improve the detection accuracy of water-rich anomalous positions in the roof strata of the working face in iron mines by means of effective data processing, thus providing effective technical support for water control in iron mines.

Key words: strong interferences; iron mine; mine transient electromagnetic method; water abundance; fine detection

(本文编辑:王萌)