

文章编号: 1001-1986(2020)04-0219-07

矿井超浅层高分辨率瞬变电磁探测技术

张 军

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 为了减小矿井瞬变电磁探测盲区, 提高探测精度, 提出矿井瞬变电磁超浅层高分辨率探测技术。该技术不仅能够适用于常规的矿井地质探测, 而且能够对矿井巷道顶板岩层裂隙等浅层地质体进行高分辨率探测, 确保煤矿的安全高效掘进与开采。通过理论方法研究, 确立了矿井浅层高分辨率瞬变电磁方法的可行性; 设计硬件系统的发射电路和接收天线部分, 使硬件系统能够适用于超浅层高分辨率探测; 对数据采集软件以及数据校正方法进行分析计算, 经过数据校正, 提高了瞬变电磁浅层探测能力以及探测分辨率。通过矿井实测数据的分析与钻探验证情况的对比, 说明该方法技术能够实现矿井瞬变电磁超浅层高分辨率探测目标, 适用于矿井生产。

关键词: 矿井; 瞬变电磁; 高分辨率; 探测技术; 信号提取

中图分类号: P631.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2020.04.030



移动阅读

The high-resolution transient electromagnetic detection technology for ultra-shallow layer in coal mine

ZHANG Jun

(Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to reduce the blind zone of the transient electromagnetic detection in mines and improve the detection accuracy, the high-resolution transient electromagnetic detection technology for the ultra shallow layer in mines is studied. The high-resolution transient electromagnetic detection technology for ultra-shallow layer in mines is not only suitable for conventional mine geological exploration, but also for high-resolution detection of shallow geological bodies such as cracks in the roof of the mine roadway, ensuring the safe and efficient mining. Through theoretical research, the feasibility of the shallow high-resolution transient electromagnetic method in mine was established; the hardware system of the shallow high-resolution transient electromagnetic detection system was studied, and the transmitting circuit and the receiving antenna of the hardware system were studied. The hardware system can be applied to ultra-shallow high-resolution detection; research on data acquisition software and shallow signal inductance correction methods, data acquisition software, and data correction methods has improved the transient electromagnetic shallow detection capability and detection resolution. The analysis of the actual measured data at the mine site and the comparison with the drilling verification results show that this technology can achieve the target of the transient high-resolution electromagnetic detection for ultra-shallow layer in mines, is suitable for mine production.

Keywords: mine; transient electromagnetic; high resolution; detection technology; signal extraction

矿井瞬变电磁法勘探技术具有体积效应小、施工效率高等优势, 在煤矿水文地质探测中发挥着越来越重要的作用^[1-3]。矿井瞬变电磁法勘探会受到地层吸收衰减、环境噪声干扰等因素影响, 常规矿井瞬变电磁探测方法盲区较大, 给煤矿精细化探测以及矿井瞬变

电磁数据的处理与解释带来难题^[4-6]。如何实现矿井瞬变电磁超浅层高分辨率探测成为关键技术问题。

在瞬变电磁弱异常的增强与处理方面, 李貅等^[7]提出采用纵向电导进行微分成像以取代常规视电阻率的解释方法, 以“电性同相轴”的方式展现电

收稿日期: 2020-01-15; 修回日期: 2020-05-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0804100); 国家科技重大专项任务(2016ZX05045-003-005)

Foundation item: National Key R&D of China(2017YFC0804100); National Science and Technology Major Project(2016ZX05045-003-005)

作者简介: 张军, 1981年生, 男, 陕西西安人, 硕士, 副研究员, 从事电磁法探测技术研究. E-mail: zjun0119@126.com

引用格式: 张军. 矿井超浅层高分辨率瞬变电磁探测技术[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 219-225.

ZHANG Jun. The high-resolution transient electromagnetic detection technology for ultra-shallow layer in coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(4): 219-225.

性界面的分布形态；嵇艳鞠^[8]提出一次感应电压及其过渡过程对全程瞬变响应的影响，分析了剔除一次场的过渡过程可以获取全程瞬变二次场，使探测深度变小；程久龙等^[9]开展了瞬变电磁数据拟地震成像的研究，对电性界面进行准确划分。

目前采用的矿井瞬变电磁探测系统，由于受到硬件及数据处理软件方面的制约，导致探测盲区深度较大，很难反映煤(岩)层浅层的地质信息；探测分辨率不高，尤其是在纵向分辨率方面无法令人满意^[10-13]。基于以上原因，从矿井瞬变电磁硬件、软件及探测方法等方面进行了研究。提出适用于矿井的瞬变电磁超浅层高分辨率探测技术，该技术可以很好地解决目前存在的这些问题，实现矿井瞬变电磁超浅层高分辨率探测的目标。

1 超浅层高分辨率探测原理

影响瞬变电磁最小探测深度的主要因素有：关断时间、线圈过渡过程、线圈匝数及边长、地层表层电阻率等。在这些因素中，地层表层电阻率在不同采样地点有所差异，且无法通过技术手段改变。只有研究其他几个影响最小探测深度的因素，通过优化相关参数，达到矿井瞬变电磁超浅层高分辨率探测的目的^[14-16]。

矿井瞬变电磁测量的有效信号为二次场信号，进行数据计算时只能使用完全关断后的数据，由于关断时间不为零，导致近地表浅层目标体无法探测。为了实现瞬变电磁超浅层探测，需要对一次场的影响进行校正；由于接收天线过渡过程存在，使探测盲区增大，需要排除线圈过渡过程的影响，提高瞬变电磁超浅层探测能力^[17-18]。

矿井瞬变电磁接收线圈测量的参数是感应电压，这里记录的全程感应电压，根据电磁感应定律有：

$$V_1(t) = -Sn\mu_0 \frac{\partial H_z(t)}{\partial t} \quad (1)$$

式中： $V_1(t)$ 为感应电压值，V； S 为发射线圈面积， m^2 ； n 为线圈匝数； μ_0 为真空磁导率， $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$ H/m； $H_z(t)$ 为磁场场强，A/m； t 为观测时间， μs 。

对于边长为 a 的回线，回线中心位置产生磁场，当发射电流关断时，接收线圈接收的感应电压^[8]为：

$$V_1(t) = \begin{cases} -M_{TR}I/t_{of} & 0 \leq t \leq t_{of} \\ 0 & t > t_{of} \end{cases} \quad (2)$$

式中： M_{TR} 为发射线圈与接收线圈之间的互感； I 为发射电流，A； t_{of} 为关断时间， μs 。

由式(2)可以看出，当发射边长和发射电流幅值不变时，关断时间越小，一次场感应电压幅值越大。

电压在感应段对分布电容进行充电，充电达到

最大幅值时为 $V_{lg}(t)$ 。线圈电阻为 r ，电压为 V_r ，电路电阻为 R ，电压为 V_R ，阻尼系数为 δ 。当线圈在临界阻尼，电路电阻远大于线圈电阻时^[16-17]，关断电流后，接收线圈 R_x 的一次场感应电压为零，当 $t=t_{of}$ 时的感应电压为 $V_{lg}(t_{of})$ ，则此时关断后一次场感应电压和纯二次感应电压分别为：

$$V_{lg}(t) = \frac{M_{TR}I}{t_{of}}[1 - (1+\delta \cdot t)e^{-\delta \cdot t}] \quad 0 \leq t \leq t_{of} \quad (3)$$

$$V'_{lg}(t) = V_{lg}(t_{of})[1 + \delta \cdot (t - t_{of})e^{-\delta(t-t_{of})}] \quad t > t_{of} \quad (4)$$

由于线圈在关断后存在过渡过程，这一过程的表达式为：

$$V_g(t) = \begin{cases} V_{lg}(t) & 0 \leq t \leq t_{of} \\ V'_{lg}(t) & t > t_{of} \end{cases} \quad (5)$$

通过分析发现，在关断电流后，当阻尼系数越大时，线圈的过渡过程越小。当线圈阻尼系数不变时，一次感应电压幅值随关断时间变短而变大，过渡过程时间变短。根据以上分析，需要对全程二次场进行处理，减小探测系统过渡过程的影响，减小探测盲区，从而实现矿井瞬变电磁超浅层探测。

对一次场影响的校正，需要分别计算一次场感应电压，发射线圈参数以及一次场感应电压的过渡过程。计算完成后，将实测的感应电压减去一次场感应电压，从而消除一次场感应电压的影响，缩短最早取样时间，减小探测盲区。

通过记录发射电流和全程感应电压信息，计算发射线圈参数与一次场感应电压值，计算电压的过渡过程，在总场中减去一次场的感应电压，便可得到瞬变电磁的全程二次场感应电压值。过渡过程的全程瞬变电磁响应和二次感应响应理论值的对比曲线，如图1所示。

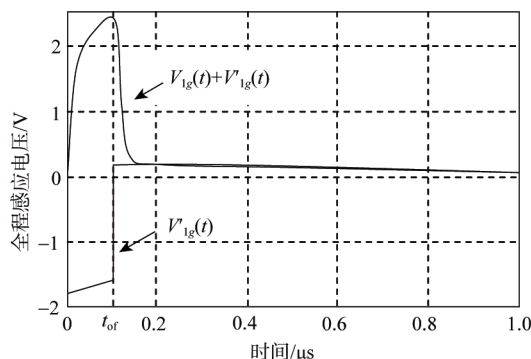


图1 全程瞬变响应与纯二次场响应对比曲线

Fig.1 Correlation curves of whole-course transient response and pure secondary field response

图1中 $V'_{lg}(t)$ 为纯二次感应电压理论值曲线， $V_{lg}(t) + V'_{lg}(t)$ 为接收线圈过渡过程影响的曲线。由图1可以看出，由于叠加了一次场感应响应，存在过渡过程的全程瞬变电磁响应比纯二次场感应电压

幅值大很多, 延时一段时间后恢复正常值。通过校正一次场感应电压, 得到纯二次场感应电压, 可以有效提高瞬变电磁场的早期分辨率以及浅层探测能力。

2 系统硬件设计

经过理论分析认为, 通过优化瞬变电磁发射电路与接收天线可以达到减小探测盲区, 提高探测精度的目的。从发射电路以及接收天线 2 个方面进行优化设计, 研究适用于矿井瞬变电磁超浅层高分辨率探测的发射电路模块和组合式接收天线。主要包括发射电路模块、组合式接收天线模块。

2.1 发射电路模块

矿井瞬变电磁发射电路必须尽可能减少对早期信号的影响, 电流关断要快。发射电路包括信号控制电路、关断控制电路、电流控制电路、发射信号产生电路等。发射电路中设计有加速截至电路, 以满足快速关断的要求, 电流采样使用高精度无感电阻。发射电路采用 RC 回路使驱动电压下降沿的斜率变大, 减小关断时间^[8]。

设计了一种新型瞬变电磁发射机快速关断电路, 如图 2 所示, 发射线圈的供电过程可分为正向供电、反向供电等。负载电感通过电阻 R_2 和二极管与电源构成放电回路, 放电过程中, 由于电阻 R_2 的值比较大, 负载电感放电回路中的时间常数比较小, 使负载电感中的电流快速下降, 减小关断时间。通过快速关断电路的设计, 在其他条件不变的情况下, 可以使关断时间由 $0.5 \mu s$ 减小到 $0.2 \mu s$ 。这种情况下可以减小关断时间, 达到浅层探测的目的。

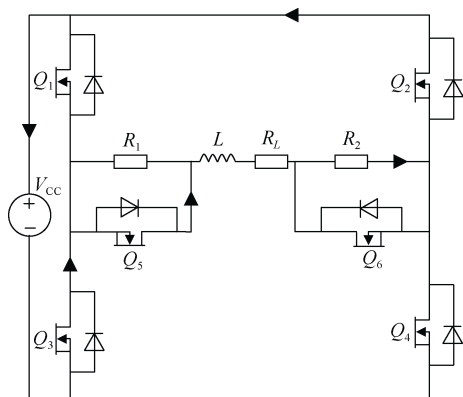


图 2 瞬变电磁发射机快速关断电路
Fig.2 Fast turn-off circuit of TEM transmitter

根据矿井瞬变电磁法探测的目的和环境不同, 当距离探测目标较近并且规模较小时, 通过减小天线的发射电流强度, 从而减小发射天线的发射功率, 达到降低探测深度, 实现超浅层探测的目的; 适当

提高高频谐波成分, 提高数据信号信噪比, 达到提高勘探精度, 实现精细探测的目的。

2.2 组合式接收天线

矿井瞬变电磁采用屏蔽接收天线, 该天线可有效提高天线灵敏度。接收天线主要由放大电路、滤波电路、电池组成, 滤波电路与信号放大电路相连。电路连接屏蔽天线, 屏蔽天线主要由接收线圈、磁芯、屏蔽线圈组成, 屏蔽线圈可有效降低外界电磁干扰。信号放大电路和屏蔽线圈都可以有效提高信号信噪比和测量精度, 为精细测量提供有利条件^[19-20]。

采用磁芯接收探头, 可以有效提高天线的灵敏度, 能够减轻接收天线质量, 降低野外工作强度, 提高工作效率。增加屏蔽线圈可降低工频干扰以及其他电磁干扰, 提高信号信噪比, 提高采集数据质量, 为精细测量打好基础。

采用有源与无源 2 种测量方式, 对于弱信号采用有源方式进行接收, 采用信号放大电路将信号放大转换, 弱信号经过放大后再传输, 提高了采样信号信噪比, 提高测量精度; 对于强信号采用无源方式测量, 即将接收线圈接收到的信号发送到接收机存储, 减少信号的饱和段, 能够获得更多时间序列的有用信号, 为精细探测提供条件。

矿井瞬变电磁采用常规屏蔽接收天线进行高精度探测时, 该天线的施工效率较低。针对高精度矿井瞬变电磁法超前预报, 设计采用组合式天线的方法, 即将 3 个屏蔽接收天线规则的排列在探测目标区域, 组成组合式接收天线, 如图 3 所示。

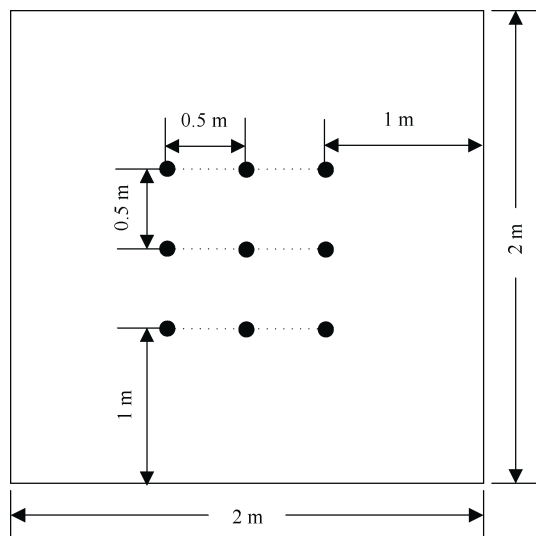


图 3 组合式天线示意图
Fig.3 Schematic diagram of a combined antenna

由图 3 可以看出, 组合式接收天线装置采用间距为 $0.5 m$ 的屏蔽接收天线进行组合, 3 个屏蔽接

收天线为一组,在探测完一组数据后移动 0.5 m 继续进行探测。在发射线圈不移动的情况下,同一发射点位置可以进行 9 个测点的数据接收,提高探测效率。该组合方法更加适用于矿井巷道条件下使用。组合式接收天线装置主要包括通信模块、信号同步模块等。组合式接收天线数据采集效率高,单次数据采集效率提高了 3 倍。采集数据为高密度三维数据。

3 数据采集与数据处理方法

3.1 采集软件

基于控制模块的矿井瞬变电磁上位机采集装置,能够实时调整数据采集相关参数,有效提高数据信噪比,从而提高探测深度范围和信号分辨率。根据采样信号不同,可在上位机对不同采样参数信号进行叠加、拼接组合等处理。将浅层的高频信号和深层的低频信号进行组合,形成全程瞬变电磁场。采集装置上位机控制模块主要包括发射控制电路模块、接收控制电路模块、数据记录模块、信息反馈控制电路模块等。矿井瞬变电磁数据采集软件界面如图 4 所示。

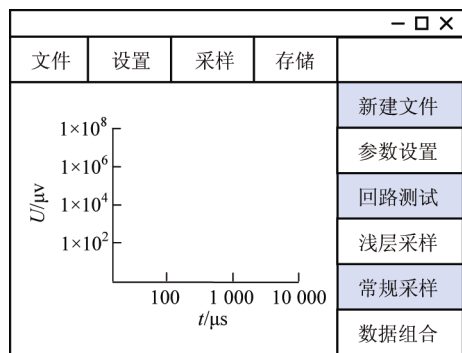


图 4 矿井瞬变电磁数据采集软件界面示意图

Fig.4 Schematic diagram of transient electromagnetic data acquisition software interface of mine

发射控制电路模块用于控制发射电流和调整发射线圈参数,根据超浅层探测和常规深层探测的不同需求,控制电路电流,调整发射线圈类型。发射电流包括适用于超浅层探测的低功率电流和适用于常规探测的高功率电流。接收控制电路模块用于接收一次场和二次场信号,并将数据传输到数据记录模块。数据记录模块记录采集的一次场和二次场数据。采用信息反馈控制模块可以根据反馈信息实时调整数据采集相关参数,更加有效地提取有用数据信息。

采用发射控制模块可以分别发射低功率与高功率信号,采用接收控制模块可以接收一次场和二次

场信号。通过以上数据采集组合模式,获得超浅层探测数据和常规深层探测数据,分别记录浅层与深层探测信息,有效降低了探测盲区,提高了探测深度范围。

3.2 浅层信号电感校正方法

减小关断时间不但需要提高仪器性能,而且需要在数据处理时消除关断时间的影响。通过对数据的分析得到浅部地层的信息,通过与晚期数据拼接,达到超浅层探测的目的。矿井瞬变电磁在巷道内进行探测,电磁场呈全空间分布,在全空间地层介质中,发射线圈中心的感应电动势为^[21-22]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\mu^2 I S_r a (2\pi)^{1/2}}{8\pi^2 \rho t^2 (2\rho t / \mu)^{1/2}} \cdot e^{-\frac{a^2 \mu^2}{4\rho t}} \quad (6)$$

式中: μ 近似为真空磁导率 μ_0 , $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; I 为发射电流强度, A; S_r 为接收天线等效面积, m^2 ; a 为发射线圈等效边长, m; t 为观测时间, μs ; ρ 为电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

通过式(6)可以看出,矿井瞬变电磁发射回线线圈中心的感应电动势与介质磁导率、发射电流强度、接收线圈等效面积、发射线圈等效边长、表层岩层电阻率等因素有关。

由于线圈的自感信号衰减很快,定义自感信号衰减 3 个数量级时的时间为最早可分辨时间,其对应的深度为最小探测深度,最小探测深度^[3]为:

$$h_{\min} = \sqrt{t_{\min} \cdot \rho} \quad (7)$$

式中: h_{\min} 为最小探测深度, m; t_{\min} 为有效信号最小接收时间, μs ; ρ 为表层岩层电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

通过式(7)可以看出,最小探测深度主要与有效信号最小接收时间和表层岩层电阻率有关。当介质磁导率、接收天线等效面积、表层岩层电阻率不变的情况下,改变发射电流强度和发射线圈等效边长可有效减小最早可分辨时间,从而减小探测深度。

由于线圈在关断后需要考虑线圈过渡过程的影响,在不同发射电流和发射线圈有效边长条件下,将接收信号早期数据与晚期数据分别进行记录,其表达式为:

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \varepsilon_1(t) & 0 \leq t \leq t_1 \\ \varepsilon_2(t) & t > t_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: t_1 为早期信号与晚期信号之间的取样时间,即从信号关断到 t_1 作为早期信号采样;采用低电流和低等效边长方式采样,时间大于 t_1 时采用常规矿井瞬变电磁探测方式采样;在数据处理时将早期信号与晚期信号经过归一化处理后进行拼接组合。通过这样的方式,在不改变其他条件下,适当地减小

发射电流强度和发射线圈等效边长可有效减小关断时间, 使探测盲区减小。

在实际矿井瞬变电磁工作中大多采用边长为 a 的方形回线, 这种 n 匝方形回线的电感系数^[15-16]为:

$$\tilde{L}' = \frac{n\mu_0 a}{\sqrt{\pi}} \left[n \ln \frac{8a}{a\sqrt{\pi}} - (2n-1.25) \right] \quad (9)$$

式中: μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。由多匝方形回线自感和互感影响产生的感应电动势为:

$$\tilde{E}' = d\varphi/dt = SdB/dt \quad (10)$$

式中: S 为导线截面积, m^2 ; B 为磁场强度, A/m 。对于固定的线圈, 磁场强度 B 与电流 I 成正比关系, 设比例系数为 c , $dB = cdI$, 则可得:

$$\tilde{E}' = \tilde{L}' dI/dt \quad (11)$$

从实测矿井瞬变电磁二次场 E 中减去一次场电磁感应影响, 可得消除多匝方形回线电感影响后的感应电动势为:

$$E_T = E - \tilde{E}' \quad (12)$$

此时衰减曲线早期与晚期的斜率达到基本一致, 可以取得较好的剔除干扰效果。通过对一次场干扰的校正, 可有效提高早期瞬变电磁场信号, 从而使有效接收时间更小, 达到浅层探测的目的。

只有将一次场的影响减小或者消除, 才能得到真实有效的探测结果。一次电磁场干扰校正就是从探测结果中减去一次场产生的自感和互感影响值。进行实测数据一次场校正前后的曲线对比(图5)。

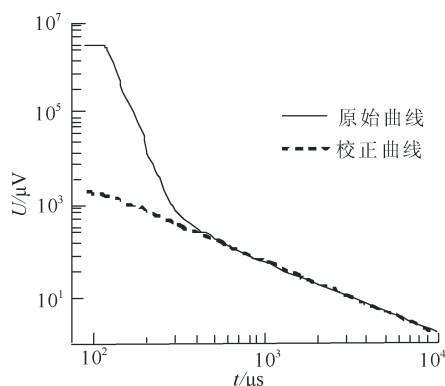


图5 实测曲线一次场干扰校正对比

Fig.5 Comparison chart of primary field interference correction of measured curves

通过数据校正的方法使计算结果更加接近地层真实视电阻率值。使曲线形态恢复为, 不受巷道多匝小线圈装置和巷道全空间等条件影响的形态。

4 应用实例

山西某煤矿对其巷道顶板进行探测, 主要目的

是应用地球物理技术探测了解顶板浅层裂隙及富水情况。为此, 在掘进巷道布置了矿井瞬变电磁测点进行探测, 为避免大型金属设备的影响, 离开大型机械一定距离后进行观测, 在探测区域范围内开展三维探测。布置测线长度 100 m, 由于巷道条件限制, 顶板探测点使用扇形布置方法, 每条测线布置 13 个测点, 线距 5 m, 共 21 条测线。矿井瞬变电磁巷道实测点布置如图 6 所示。

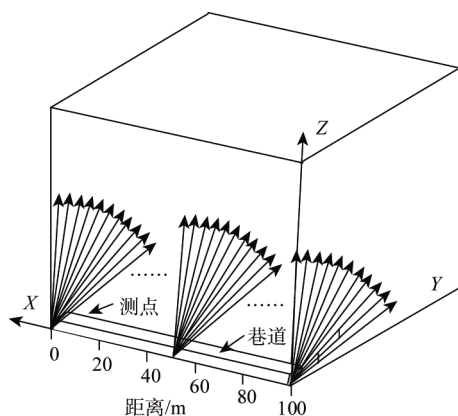


图6 巷道顶板瞬变电磁探测测点布置

Fig.6 Layout of measurement points for transient electromagnetic detection in roadway roof

在巷道中进行顶板探测时, 测线与测点的布置方法: 在巷道顶板方向由左至右, 每间隔 15° 设置一个测点, 一条测线共 13 个测点。通过对现场采集的数据进行处理, 得到巷道三维瞬变电磁探测成果。 X 方向为巷道走向, Y 方向为垂直于巷道走向且与水平面平行方向, Z 方向为垂直于巷道走向且与水平面垂直方向。通过瞬变电磁数据处理结果, 分析巷道顶板浅层裂隙发育及充水情况。在进行瞬变电磁探测时, 巷道空间无金属体以及其他人文干扰因素的影响, 保证探测结果为地质体真实的异常反映。

通过对这一区域数据采集与处理, 形成该探测区域的三维探测结果及巷道顶板三维数据处理成果(图7)。通过数据三维成果, 可以了解巷道顶板内部异常区域对矿井生产的影响; 通过对巷道顶板的探测, 可以分析巷道顶板 2~100 m 范围内裂隙发育及充水情况; 根据裂隙发育和充水情况, 可以进行有针对性的预防和治理措施。瞬变电磁是通过低阻异常区推断岩层充水情况, 该区域数据岩石充水性推断成果如图 8 所示。

由图 7 可以看出, 在 X 方向右侧 70~100 m 位置, 深度距离在 15~40 m 处产生低阻异常, 在 X 方向左侧 0~70 m 位置表现出明显的高阻特征, 异常边界清楚。说明在矿井瞬变电磁探测时, 顶板不同位置分别具有充水和未充水特征。

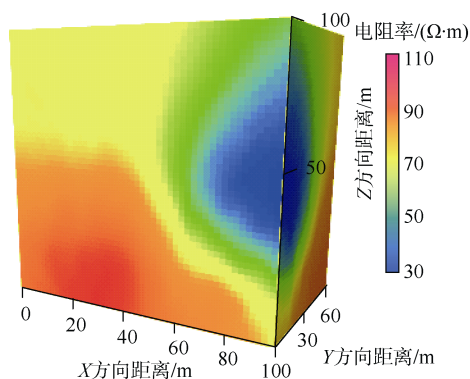


图7 巷道顶板瞬变电磁三维数据处理成果

Fig.7 Result of transient electromagnetic 3D data processing of roadway roof

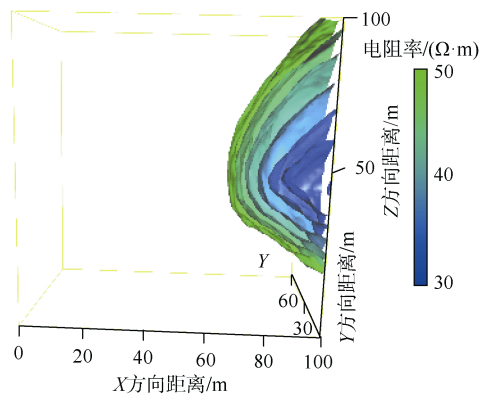


图8 瞬变电磁三维数据岩石充水性推断成果

Fig.8 Results of rock water filling property inferred from three-dimensional transient electromagnetic data

由图8可以看出,在顶板局部区域有低阻异常区,说明该区域岩层裂隙出现充水现象,异常区范围较小,呈上下导通状。在15~40 m深度范围内,有连通性低阻异常区,说明在巷道顶板产生裂隙后,顶板上方有水源向顶板附近区域补给。顶板裂隙区域形态和规模均有充分展示,从而提供了巷道顶板岩层含水裂隙的信息。通过钻探的验证及结合该区域地质资料可知,该探测区域巷道顶板的含水层为顶板砂岩裂隙含水层。受巷道掘进影响,在X方向90~100 m易形成积水危险区。通过矿井瞬变电磁超浅层高分辨率探测法对该区域进行探测分析,精细地查明了煤层顶板低阻异常体的分布状态。

5 结论

a. 通过理论分析矿井瞬变电磁探测盲区产生的原因,提供了解决矿井瞬变电磁探测盲区较大的方法,即超浅层探测与常规深层探测相结合的方法。研究了瞬变电磁发射和接收系统,实现矿井瞬变电磁超浅层探测。

b. 设计适用于矿井瞬变电磁超浅层探测的上位机系统,通过改变不同发射和接收参数,实现超

浅层探测与深层探测相结合的方式。通过建立适合矿井巷道生产的三维观测系统,利用三维数据处理方法对探测结果进行数据处理与分析,实现精细化三维探测。

c. 通过理论分析,针对矿井瞬变电磁探测的特点制定数据计算方法,使矿井瞬变电磁的探测盲区减小到2 m左右。通过电感校正,三维数据反演及成图处理方法,进一步提高了瞬变电磁探测精度。应用结果显示,矿井巷道瞬变电磁三维探测,能够准确显示巷道顶板内部视电阻率三维空间分布形态。

d. 本次只是针对简单地质条件下矿井瞬变电磁超浅层精细化探测进行了研究,没有涉及到复杂地质条件下的精细化探测的理论以及实际应用研究,这方面在以后的研究中还需要进行深入分析。

请听作者语音介绍创新技术成果

等信息,欢迎与作者进行交流



OSID 码

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 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.
- [2] 于景邨,刘志新,刘树才,等. 深部采场突水构造矿井瞬变电磁法探查理论及应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 818-821.
YU Jingcun, LIU Zhixin, LIU Shucai, et al. Theoretical analysis of mine transient electromagnetic method and its application in detecting water burst structures in deep coal stope[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(8): 818-821.
- [3] 薛国强. 论瞬变电磁测深法的探测深度[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(5): 575-578.
XUE Guoqiang. On surveying depth by transient electromagnetic sounding method[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(5): 575-578.
- [4] 刘志新,于景邨,郭栋. 矿井瞬变电磁法在水文钻孔探测中的应用[J]. 物探与化探, 2006, 30(1): 59-61.
LIU Zhixin, YU Jingcun, GUO Dong. The application of the mining transient electromagnetic method to the exploration of hydrological borehole[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2006, 30(1): 59-61.
- [5] 李富,廖国忠,刘鑫明. 矿井瞬变电磁法在煤矿陷落区探测中的应用[J]. 煤矿安全, 2013, 44(4): 155-158.
LI Fu, LIAO Guozhong, LIU Xinming. Application of mine transient electromagnetic method in coal mine collapse area detection[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(4): 155-158.
- [6] 姜志海,岳建华,刘志新. 矿井瞬变电磁法在老窑水超前探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(4): 291-294.

- JIANG Zhihai, YUE Jianhua, LIU Zhixin. Application of mine transient electromagnetic method in forecasting goaf water[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007, 4(4): 291–294.
- [7] 李貅, 全红娟, 许阿祥, 等. 瞬变电磁测深的微分电导成像[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(3): 59–61.
- LI Xiu, QUAN Hongjuan, XU Axiang, et al. Differential coefficient imaging of the longitudinal conductance in the transient electromagnetic sounding[J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(3): 59–61.
- [8] 嵇艳鞠. 浅层高分辨率全程瞬变电磁系统中全程二次场提取技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- JI Yanju. All-time secondary electromagnetic field extraction in high resolution transient electromagnetic system for subsurface imaging[D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [9] 程久龙, 邱浩, 叶云涛, 等. 矿井瞬变电磁法波场变换与数据处理方法研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1646–1650.
- CHENG Jiulong, QIU Hao, YE Yuntao, et al. Research on wave field transformation and data processing of the mine transient electromagnetic method[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(9): 1646–1650.
- [10] 胡雄武, 张平松, 严家平, 等. 矿井瞬变电磁超前探测视电阻率扩散叠加解释方法[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 925–931.
- HU Xiongwu, ZHANG Pingsong, YAN Jiaping, et al. Spread stack interpretation means of apparent resistivity in roadway advanced detection with transient electromagnetic method[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 925–931.
- [11] 左博新, 胡祥云. 基于盲信源分离的地球物理弱异常提取[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(2): 375–381.
- ZUO Boxin, HU Xiangyun. Detection of geophysical weak anomalies based on blind signal separation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(2): 375–381.
- [12] 朱学臣, 韩沙沙, 秦辆, 等. 基于数理统计的视电阻率平面图异常划分[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(12): 70–73.
- ZHU Xuechen, HAN Shasha, QIN Liang, et al. Anomalies division on apparent resistivity plan based on mathematical statistics[J]. Coal Geology of China, 2014, 26(12): 70–73.
- [13] 程德福, 林君, 于生宝, 等. 瞬变电磁法弱信号检测技术研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2002, 20(2): 1–5.
- CHENG Defu, LIN Jun, YU Shengbao, et al. Study on TEM weak signal detection techniques[J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2002, 20(2): 1–5.
- [14] 雷达. 瞬变电磁法数据提取纯异常方法技术[J]. 物探与化探, 2004, 28(4): 320–322.
- LEI Da. The technique for extracting pure anomalies from the transient electromagnetic data[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2004, 28(4): 320–322.
- [15] 杨海燕, 岳建华. 瞬变电磁法中关断电流的响应计算与校正方法研究[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(6): 1947–1952.
- YANG Haiyan, YUE Jianhua. Research on response calculation and correction technique of turn-off current in the transient electromagnetic method[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(6): 1947–1952.
- [16] 范涛. 孔巷瞬变电磁动源定接收方法探测采空区试验[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3229–3238.
- FAN Tao. Experimental study on the exploration of coal mine goaf by dynamic source and fixed reception roadway-borehole TEM detection method[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3229–3238.
- [17] 张军, 李貅, 赵莹, 等. 瞬变电磁虚拟波场高分辨成像技术研究[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(3): 1077–1084.
- ZHANG Jun, LI Xiu, ZHAO Ying, et al. A technology research of high resolution imaging for the transient electromagnetic pseudo wave field[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(3): 1077–1084.
- [18] 武军杰, 智庆全, 李貅, 等. 定源回线瞬变电磁三分量纯异常三维反演方法[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(6): 2827–2835.
- WU Junjie, ZHI Qingquan, LI Xiu, et al. 3D inversion method of fixed-loop TEM with three-component pure anomaly response[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(6): 2827–2835.
- [19] 闫述, 石显新, 陈明生. 瞬变电磁法的探测深度问题[J]. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1583–1591.
- YAN Shu, SHI Xianxin, CHEN Mingsheng. The probing depth of transient electromagnetic field method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(6): 1583–1591.
- [20] 张军, 赵莹, 刘银爱. 合成孔径瞬变电磁成像数值模拟[J]. 煤炭学报, 2012, 37(10): 1732–1736.
- ZHANG Jun, ZHAO Ying, LIU Yin'ai. Imaging simulation of synthetic aperture transient electromagnetic[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(10): 1732–1736.
- [21] 孙怀凤, 李貅, 李术才, 等. 考虑关断时间的回线源激发 TEM 三维时域有限差分正演[J]. 地球物理学报, 2013, 56(3): 1049–1064.
- SUN Huafeng, LI Xiu, LI Shucan, et al. Three-dimensional FDTD modeling of TEM excited by a loop source considering ramp time[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(3): 1049–1064.
- [22] 饶丽婷, 武欣, 吴超, 等. 基于瞬变电磁矩变换的快速三维反演方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(11): 4338–4348.
- RAO Liting, WU Xin, WU Chao, et al. A rapid 3D inversion based on TEM moment transformation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(11): 4338–4348.

(责任编辑 聂爱兰)