

矿井瞬变电磁透视探测技术响应特征研究与应用

李毛飞¹, 姜志海¹, 刘树才¹, 童雪瑞¹, 陈尚斌¹, 高兆丰¹, 代琦²

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 天津市水务规划勘测设计有限公司, 天津 300000)

摘要: 针对大采长/超宽工作面内部隐蔽地质异构体常规地球物理探测难的问题, 揭示了对侧发射接收的瞬变电磁透视探测电磁响应机制。采用理论研究、数值模拟和实测数据分析相结合的研究方式, 对瞬变电磁透视探测技术电磁场扩散特征、数据影响机制以及探测能力进行了详细研究, 研究结果表明: 受地空边界的影响, 全空间长条形发射回线瞬态电磁场扩散与半空间电磁场扩散不同, 全空间状态下感应电动势极值长期位于发射线圈中心位置, 无法直接沿用地面“烟圈效应”进行处理解释; 对侧发射接收的瞬变电磁透视早期数据主要受一次磁场的影响, 具有较高的左右低阻异常分辨能力和探测能力, 晚期数据与同侧发射接收数据产生机制相同, 为发射线圈附近产生的二次场相互感应扩散形成, 其分辨能力和探测能力相对较弱; 相较于同侧发射接收的瞬变电磁法, 对侧发射接收的瞬变电磁透视技术结合早晚期数据, 可以很好的区分低阻异常体相对于发射线圈和接收点的空间位置; 低阻异常体越靠近发射线圈, 对侧接收的早期数据受到的影响越大, 晚期数据影响时间段有所增加, 但影响程度越小, 越靠近接收点所在巷道, 其影响特征相反, 以此可以粗略判断低阻异常体沿工作面切向的位置。早晚期数据相结合的瞬变电磁透视探测技术, 能更加精细地解译工作面内部及附近隐蔽突水地质异构体的空间信息。

关键词: 瞬变电磁透视; 大采长工作面; 一次磁场; 感应磁场; 水害防治

中图分类号: TD745 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)04-1976-13

Research and application of response characteristics of mine transient electromagnetic perspective detection technology

LI Maofei¹, JIANG Zhihai¹, LIU Shucui¹, TONG Xuerui¹, CHEN Shangbin¹, GAO Zhaofeng¹, DAI Qi²

(1. School of Resource and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Tianjin Water Planning Survey & Design Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: Aiming at the difficulty in detecting concealed geological isomers using conventional geophysical method in ultra-wide coal working face, the electromagnetic response mechanism of mine transient electromagnetic (TEM) perspective detection with opposite side emission and reception is revealed in this study. The electromagnetic field diffusion characteristics, data influence mechanism and detection capability of transient electromagnetic perspective detection technology are studied in detail by means of theoretical research, numerical simulation and analysis of measured data. The results show that the transient electromagnetic field diffusion of the full-space elongated emission loop is different from that

收稿日期: 2023-09-29 修回日期: 2023-12-05 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1222

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(42230811); 国家自然科学基金青年基金资助项目(42204139); 国家自然科学基金面上资助项目(41974141)

作者简介: 李毛飞(1989—), 男, 江苏丰县人, 博士后。E-mail: limaofei@cumt.edu.cn

通讯作者: 姜志海(1978—), 男, 山东宁津人, 教授, 博士生导师。E-mail: jzh3885434@126.com

引用格式: 李毛飞, 姜志海, 刘树才, 等. 矿井瞬变电磁透视探测技术响应特征研究与应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 1976-1988.

LI Maofei, JIANG Zhihai, LIU Shucui, et al. Research and application of response characteristics of mine transient electromagnetic perspective detection technology[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1976-1988.



移动阅读

of the half-space electromagnetic field diffusion due to the boundary between ground and air. In the full-space state, the extreme value of the induced electromotive force (EMF) is located in the center of the emission coil for a long time, which cannot be interpreted directly by using the ground ‘smoke ring effect’. The early transient electromagnetic perspective data transmitted and received on the opposite side are mainly affected by the primary magnetic field and have high resolution and detection ability of left and right low resistance anomalies. The late data and the same-side transmitting and receiving data have the same generation mechanism, both of them are formed by mutual induction and diffusion of secondary fields generated near the transmitting loop, and their resolution and detection ability are relatively weak. Compared with the transient electromagnetic method, this technology can distinguish the spatial position of the low-resistance anomaly relative to the transmitting loop and the receiving point by combining early and late data. The closer the low resistivity anomaly body is to the transmitter loop, the greater the impact on the early data received at the opposite side, and the impact time period of the late data increases, but the degree of influence is smaller. On the contrary, the closer it is to the receiving point in the roadway, the opposite the impact characteristics are. Therefore, the approximate position of the low-resistance anomaly body along the working face can be roughly determined. The transient electromagnetic perspective detection technology, which combines early and late data, can more accurately interpret the spatial information of hidden water inrush geological isomers which are inside and near the working face.

Key words: transient electromagnetic perspective; ultra-wide working face; primary field; induced magnetic field; water damage prevention

随着“地上无煤、井下无人”的智能开采模式以及“大采长”工作面的提出^[1],对煤层内部地质信息的探测要求越来越高。经回采验证,大采长工作面(工作面采长大于300 m)的回采方案投入合理、技术可行且优势明显,与背拉开采工艺相比,具有占用设备少、设备管理难度小、操作工相对少、生产系统简单等优点^[2]。然而,大采长工作面的构建对矿井地质物探技术方法及矿井灾害治理工程技术提出了更高要求。

目前,国内外针对工作面内部隐蔽突水致灾源探查的方法大致分为2类:地震类和电磁类。其中地震类主要为槽波地震勘探^[3-5],但由于地震类方法基于岩、矿石的密度进行探测,难以分辨煤层中隐蔽致灾因素的导含水性。电磁法类方法主要有直流电法^[6-10]、无线电波透视法^[11-13]、瞬变电磁法^[14-18]等,该类方法依据煤层及顶底板岩层电性的差异进行探测,可有效探测一般工作面内部的隐蔽突水致灾因素,但对于一些宽度比较大的工作面存在探测盲区。直流电法勘探由于井下空间的限制,其探测范围有限,同侧发射接收的二维观测模型仅可探测巷道正下方地质信息,而对于矿井直流电透视等三维工作方式^[19-20],随工作面采长的增加,将降低浅部地质信息的探测能力。无线电波透视法常用的电磁波频率有0.3、0.5和1.5 MHz^[21],频率越高,电磁波穿透能力越差,可探测的工作面宽度越小。矿井瞬变电磁法以其施工便捷、工作效率高、纵横向分辨率高和对低阻反应灵敏等优点,在探测煤矿巷道前方及工作面顶底板和工作面内导(含)水异

常体构造中的应用越来越广^[22],然而,受巷道空间的限制,通常采用边长为2 m×2 m的发射回线进行探测,限制了其探测深度^[23]。

综上所述,常规矿井物探方法不适用于探测大采长工作面内部的隐蔽突水致灾源。为保证工作面安全回采,借鉴地巷瞬变电磁探测方法^[24-25]以及磁性源瞬变电磁透视(小回线源)^[26-27]的施工模式,提出了大采长工作面矿井瞬变电磁透视探测技术(长条形回线源)^[28],即在工作面的一条巷道内布置长条形发射回线,并通过以阶跃电流构建一次脉冲磁场,在另一巷道内接收工作面中异常地质体引起的二次场。与原始大多考虑中晚期数据的方式不同,笔者所提的矿井瞬变电磁透视探测技术充分利用早期数据特征,并结合晚期数据综合分析,对大采长工作面内部隐蔽突水致灾因素进行探测。

1 瞬变电磁透视探测技术基本原理

瞬变电磁透视技术与常规瞬变电磁法相同,均基于麦克斯韦方程组,观测瞬态电磁场(即一次磁场感应得到的二次电磁场或感应电动势),但存在2处不同:首先是观测系统,瞬变电磁透视技术所探测的目标体位于发射线圈和接收点之间,该施工特点与地巷瞬变电磁法一致;其次是观测数据关注的时间段不同,该探测技术关注早期段数据,主要受建场时的一次磁场的影响,可准确得到目标体沿测线的相对位置,另外也考虑晚期由线圈附近二次场感应扩散形成的电磁场。

1.1 观测系统

借鉴地巷瞬变电磁法发射与接收模式,矿井瞬变电磁透视探测技术通过在工作面一侧巷道内布设一个长条形发射回线用以增大发射磁矩,分析工作面另一条巷道内接收到的由长条形发射回线充电断电后的瞬态电磁场,以此来解译工作面内部地质信息,获得影响工作面安全回采的地质异构体空间位置,其工作布设如图1所示,其中红色长条矩形为发射源,蓝色圆点为接收点。

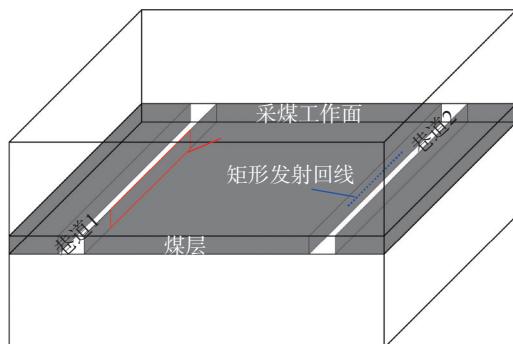


图1 矿井瞬变电磁透视探测技术观测系统

Fig.1 Observation system of mine TEM perspective detection technology

1.2 瞬变电磁透视概念

与常规瞬变电磁法一样,矿井瞬变电磁透视依然观测由阶跃电流产生的二次场,所不同的是矿井瞬变电磁透视主要通过早期与晚期数据相结合的方式进行地质异常区的解译。根据毕奥-萨法尔定律可知^[29],对于矩形发射回线和电性源发射回线,供电时,在周围介质中产生的一次场磁场与介质电导率无关,仅与介质磁导率以及与发射源间的距离有关。然而,断电瞬间,一次磁场的迅速消失将在周围介质中产生变化的二次场(二次磁场和电场)。在时间域内,变化电磁场关系可用麦克斯韦方程组^[30]表示

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \end{array} \right. \quad (1)$$

其中, \mathbf{H} 为磁场强度, A/m ; \mathbf{D} 为电位移, C/m^2 ; t 为时间, s ; \mathbf{J} 为电流密度, A/m^2 ; \mathbf{E} 为电场强度, V/m ; \mathbf{B} 为磁感应强度, V/m^2 ; ϵ 为介质的介电常数, F/m ; σ 为介质电导率, S/m ; μ 为磁导率, $\text{T} \cdot \text{m}/\text{A}$ 。在有源条件下,式(1)中第1式和第2式可写为

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (2)$$

式(2)形象的阐述了变化磁场与变化电场之间的关系,其中第1式中存在的电导率 σ 表明变化的磁场产生的电场与介质电导率相关,瞬变电磁法便是利用上述电磁场关系进行地质信息的探测。由毕奥-萨法尔定律可知,距离发射源越近,发射源产生的一次磁场越强,电流关断后产生的二次场越强,距离发射源较远的异常产生的二次场相对较弱,因此同侧接收时,早期数据包含的异常信息被发射源附近较强的二次电磁场所掩盖。而对侧发射接收的瞬变电磁透视技术采用在距离发射回线一定位置进行接收,所接收的二次场早期受发射源的影响相对较弱,可以更明显的区分异常与围岩产生的二次场,因此认为瞬变电磁透视数据早期主要由一次磁场的瞬间消失引起,晚期则由发射回线附近较大的二次场随时间循环往复的感应扩散引起。

2 数值分析

由于瞬变电磁透视探测技术应用场景为大采长/超宽工作面,处于全空间,另外,瞬变电磁透视探测技术采用长条形发射回线作为发射源,其电磁场扩散特征与半空间不同,分析全空间长条形发射回线形成的瞬态电磁场扩散特征将有助于实测资料的解释。因此,构建全空间均匀模型分析电磁场随时间的变化规律以及研究瞬变电磁透视探测技术数据特征及探测能力,以期为大采长工作面瞬变电磁透视实测提供理论支撑。

2.1 全空间长条形发射回线瞬态电磁场特征

地面和矿井瞬变电磁法通常观测感应电动势 F_{EM} 的 z 分量(定义发射回线法线方向为 z 方向,即磁感应强度 B_z 随时间的变化率, $\text{V}/(\text{m}^2 \cdot \text{A})$)进行地质信息的解译,故本节主要分析全空间长条形发射回线产生的感应电动势随时间的空间分布特征。图2为尺寸为 $1000 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的长条形发射回线产生的感应电动势 z 分量时空分布,图2中位于 $x=0$ 水平附近的黑色线框为发射回线,均匀全空间电阻率设置为 $100 \Omega \cdot \text{m}$,发射电流 1 A ,接收线圈有效面积为 1 m^2 ,关断时间为 10^{-7} s 。由图2可知,在早期(时间 $t < 10^{-5} \text{ s}$),感应电动势极值主要集中在长条形发射回线附近,在发射线圈所在平面($z=0$ 平面)内外极值正负相反,主要是因为供电时刻产生的一次磁场是以发射回线为中心分布,发射回线的边所在的 $x=2.5 \text{ m}$ 和

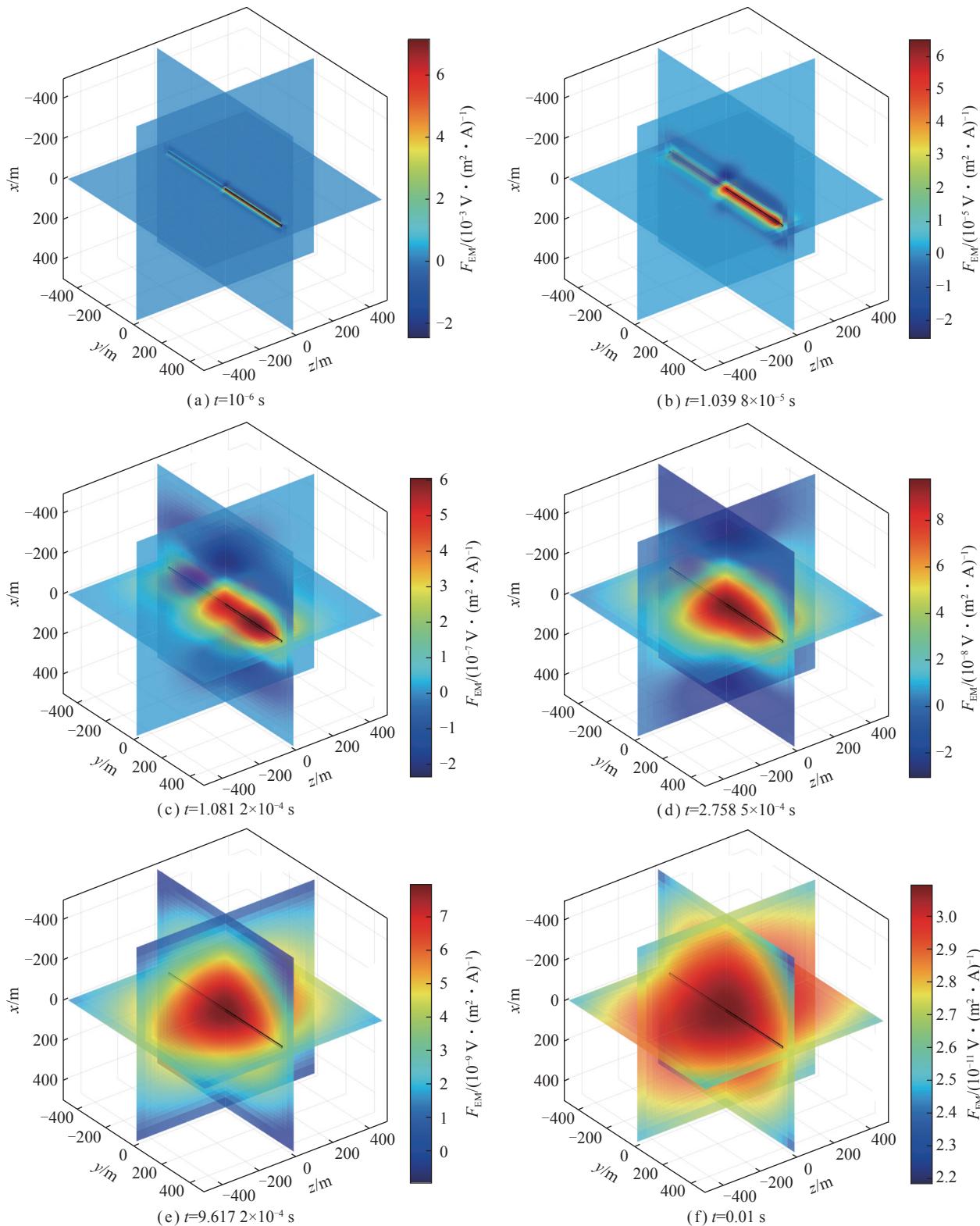


图2 全空间长条形发射回线产生的感应电动势时空分布

Fig.2 Space-time distribution of F_{EM} generated by the whole space long strip transmitter loop

$x=-2.5$ m 平面的磁场 z 分量为 0, 而线圈内外两侧磁场 z 分量方向相反造成。

由毕奥-萨法尔定律可知, 一次磁场与距离发射源成反比, 即发射回线边附近的一次磁场最大, 从而发射回线附近感应的二次场最大。随时间的增加, 发

射线圈外侧的负极值朝远离发射回线方向移动, 正极值在发射回线中心汇聚并一直位于发射回线中心位置。全空间长条形发射回线产生的感应电动势极值早期主要集中在发射回线附近, 为发射回线充电未断电时产生的一次磁场较强引起, 距离发射回线较远位

置虽然感应电动势 z 分量相对较弱,但依然存在。晚期感应电动势极值集中在发射回线中心,但其影响范围逐渐增加,因此在晚期,距离发射回线较远位置的感应电动势主要由发射回线附近的极值引起,为二次场循环往复、交叉感应扩散造成。

2.2 瞬变电磁透视数据特征

为了能给实际工作提供指导依据,判定数据的优劣,构建了如图3所示的地球物理电性模型,用以模拟采长为300 m的超宽工作面,分析对侧发射接收时的矿井瞬变电磁透视数据特征。图3中红色矩形线圈为发射回线,尺寸为1000 m×5 m,红色点为同侧发射接收点,蓝色点为对侧发射接收点,浅蓝色长方体为低阻体,电阻率1 $\Omega \cdot m$,尺寸100 m×100 m×5 m,该长方体厚度与煤层(图3中灰色部分,电阻率1000 $\Omega \cdot m$)一致,用以模拟矿井工作面内部老窑采后破坏积水区。模型背景电阻率为100 $\Omega \cdot m$,巷道宽和高均为5 m,电阻率设置为10⁻⁸ $\Omega \cdot m$ 。

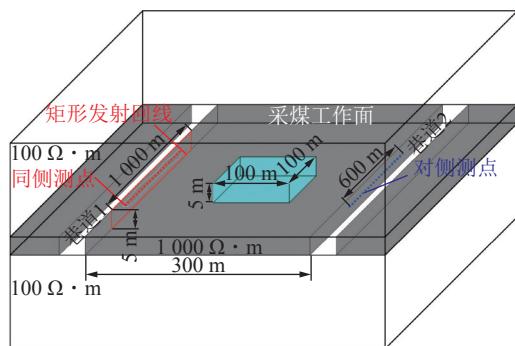


图3 瞬变电磁透视数据特征分析模型示意

Fig.3 Model diagram of mine TEM perspective data feature analysis

2.2.1 低阻异常体正对测线中心位置

图4为上述模型测线中心位置测点数据特征曲线(其中,横坐标为时间,左侧纵坐标为感应电动势,红色和蓝色实线为仅含有煤层时的模型计算出的感

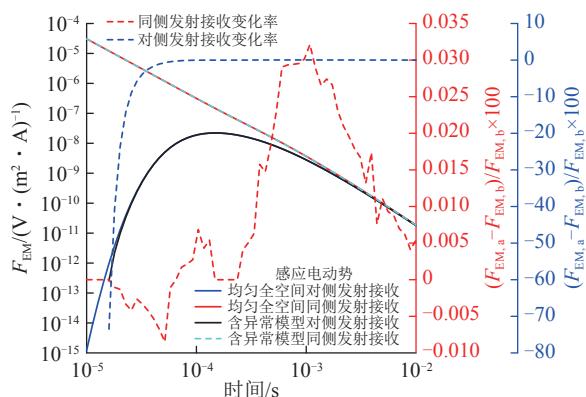


图4 感应电动势及其变化率随时间变化曲线

Fig.4 Curves of F_{EM} and its change rate with time

应电动势,浅蓝色虚线和黑色实线为同时含有煤层和低阻体模型计算出的感应电动势)。由图4可知,同侧发射接收时,含低阻体和不含低阻体感应电动势曲线基本重合,无论早期和晚期均无法区分,而对侧发射接收时,2个模型所得感应电动势曲线早期出现明显的分歧,晚期基本重合。对于同侧发射接收模式,感应电动势随时间一直在减小,故可称为感应电动势衰减曲线,而对侧发射接收感应电动势曲线呈先上升后下降的趋势,称之为感应电动势时变曲线。

由于同侧发射接收时,感应电动势曲线基本重合,难以区分,因此我们采用图4中右侧纵坐标所示公式计算了感应电动势变化率, $F_{EM,a}$ 为含低阻体模型计算出的感应电动势, $F_{EM,b}$ 为不含低阻体时得到的感应电动势。其中红色虚线和蓝色虚线分别为同侧和对侧发射接收时计算出的感应电动势变化率,同侧发射接收时,感应电动势变化率在-0.0075~0.0325间,变化率相对较小,而对侧发射接收的变化率在早期(3×10^{-5} s前)小于-3%,时刻越早,其变化率绝对值越大,远超10%。相较于同侧发射接收模式,对侧发射接收的瞬变电磁透视方式早期具有较高的探测能力。

为进一步说明对侧发射接收模型下的矿井瞬变电磁透视数据的特征,针对图3中2条接收测线,计算出各个测点不同时刻感应电动势变化率并绘制如图(图5中,横坐标为各个测点水平位置,纵坐标为时间)。图5(a)为同侧发射接收测线计算出的感应电动势变化率剖面,其感应电动势变化率在-0.027~0.032,通常所观测到的数据包含4%~5%的随机噪音^[31],则本模型同侧发射接收的变化率无法准确反映为低阻异常体信息,若忽略随机噪音,在横向-50~50 m、纵向 0.6×10^{-3} ~ 2×10^{-3} s存在变化率相对大的区域,可认为低阻异常体引起。图5(b)为对侧发射接收瞬变电磁透视探测方式下计算出的感应电动势变化率剖面,其在-73.49~24.94,远大于同侧发射接收模式。受早期较大变化率的影响,无法明显看出晚期数据的变化,因此以 10^{-4} s为界限将对侧发射接收感应电动势变化率剖面分为2段,如图5(b)右侧所示。图5(b)右上图为时间小于 10^{-4} s结果,其中正对低阻异常体测点位置变化率为负值,两侧为正值,正负交界面为低阻异常体沿测线方向的边界。右下图为时间大于 10^{-4} s结果,其感应电动势变化率在-0.025~0.040,其分布形态与同侧发射接收晚期感应电动势变化率基本一致,但变化率大于同侧发射接收。

实际探测时无法得到不含低阻异常体的背景数据,即 $F_{EM,b}$,且全空间长条形发射回线激发的电磁场

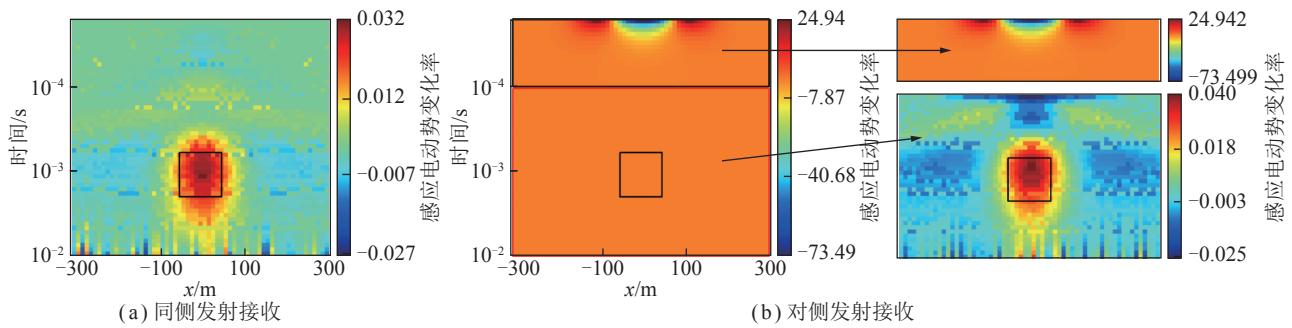


图 5 低阻异常体正对测线中心时的感应电动势变化率剖面

Fig.5 Profile of change rate of F_{EM} when the low-resistivity anomalous body is facing the center of the measuring line

时空分布特征与半空间不同,无法直接沿用地表处理方式进行瞬变电磁透視数据解释,在没有研发出适用于瞬变电磁透視解释的方法时,原始数据绘制的多测道成为能够直接用于数据解释的唯一方式,如图 6 所示。

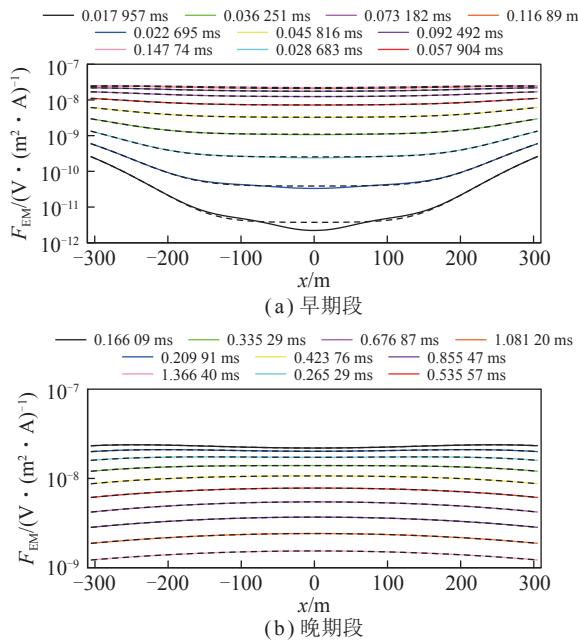


图 6 低阻异常体正对测线中心时的感应电动势多测道剖面

Fig.6 Multi-channel profile of F_{EM} when the low-resistivity anomalous body is facing the center of the measuring line

图 6(a) 为小于 0.147 74 ms 时刻数据绘制的早期多测道剖面,其中黑色虚线为不含低阻异常体绘制的多测道剖面,各色实线为含低阻异常体的多测道剖面。由图 6(a) 可见,早期多测道两侧感应电动势大于中间值,由前述电磁场分布特征可知,早期感应电动势极值所处位置与发射回线形状类似,即越靠近回线位置感应电动势越大。早期多测道表明,在早于 0.022 695 ms 时刻,从多测道中仍可有效看到低阻异常体的影响。图 6(b) 为大于 0.166 09 ms 时刻数据绘制的晚期多测道剖面,随时间的增加,多测道剖面在 $x=0$ 位置处的感应电动势大于两侧,由电磁场分布特征可知,在晚

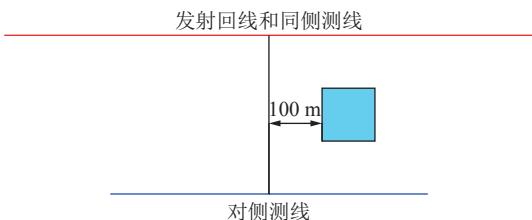


图 7 异常体偏移测线中心水平位置示意

Fig.7 Abnormal body offset from the horizontal position of the survey line center

期感应电动势极集中于发射回线正中心位置,即测线中间感应电动势略大于两侧。

2.2.2 低阻异常体偏移测线中心 100 m 位置

在进行测线布设时,工作面内部的隐蔽突水致灾源不一定位于测线中心位置,因此在图 3 的基础上构建了如图 7 所示异常体偏离测线中心水平位置模型,模型参数设置与前述一致。

图 8 为异常体偏移测线中心水平 100 m 位置模拟结果。图 8(a) 为同侧发射接收测线计算出的感应电动势变化率剖面,其感应电动势变化率在 $-0.207 \sim 0.172$,虽然变化率相较于前述中心位置异常体有所增加,但无法准确反映异常所在位置,变化率在异常所在位置两侧符号相反,范围较大。图 8(b) 为对侧发射接收瞬变电磁透視探测方式计算出的感应电动势变化率剖面,在 $-47.70 \sim 36.83$ 。以 10^{-4} s 为界限将对侧发射接收感应电动势变化率剖面分为 2 段,如图 8(b) 右侧。右上图为时间小于 10^{-4} s 结果,其中正对低阻异常体的测点变化率为负值,靠近测线中心侧变化率为正值且较大,正负交界面为异常在测线中心侧位置的边界,远离测线中心侧变化率相对较小。右下图为时间大于 10^{-4} s 结果,其感应电动势变化率在 $-0.353 \sim 0.269$,其形态与同侧发射接收晚期感应电动势变化率基本一致,无法准确反映所设置模型的边界,但变化率大于同侧发射接收。

图 9 为低阻异常体位于偏移测线中心 100 m 时

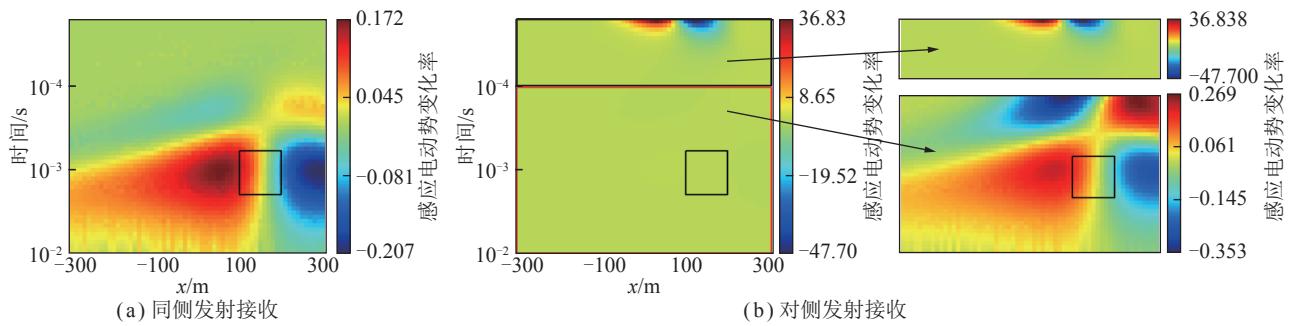


图 8 低阻异常体偏移测线中心 100 m 时的感应电动势变化率剖面

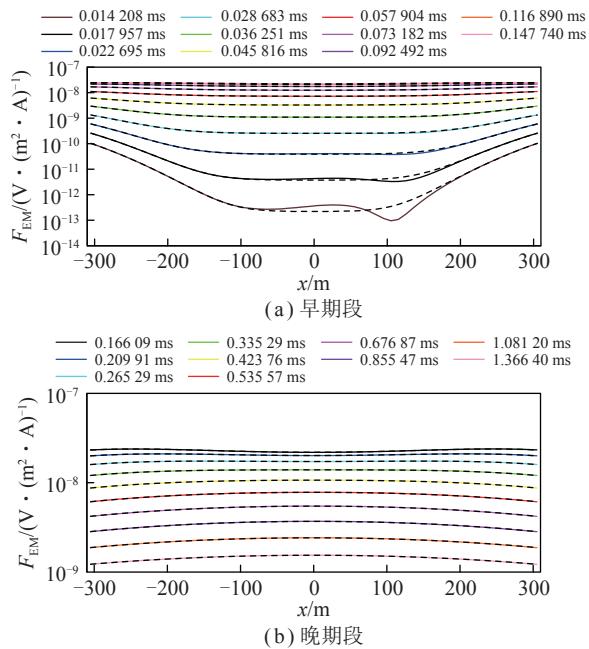
Fig.8 Profile of change rate of F_{EM} when the low-resistivity anomalous body deviates from the center of the measuring line by 100 m

图 9 低阻异常体偏移测线中心 100 m 时的感应电动势的多测道剖面

Fig.9 Multi-channel profile of F_{EM} when the low-resistivity anomalous body deviates from the center of the measuring line by 100 m

对侧发射接收的多测道剖面。其形态整体上与上述异常体位于测线中心位置时结果类似,但在早期水平 100 m 位置出现一处明显下凹区域,对应模型所在水平位置。

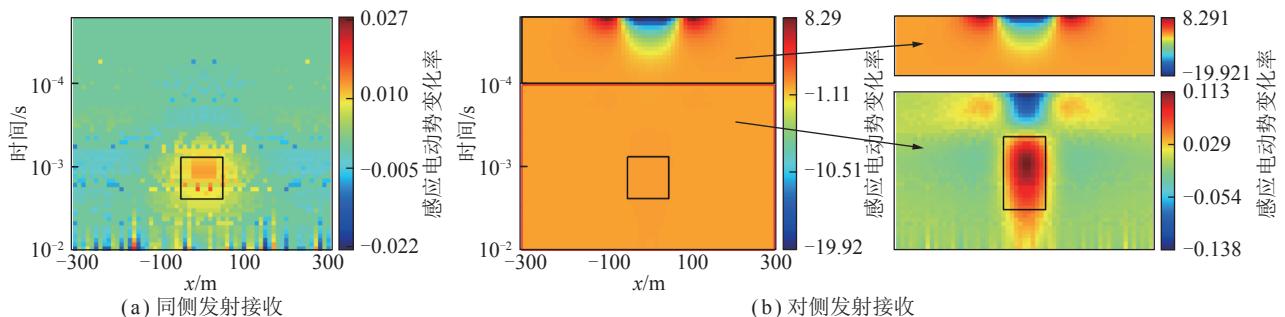


图 11 低阻异常体靠近接收点时的感应电动势变化率剖面

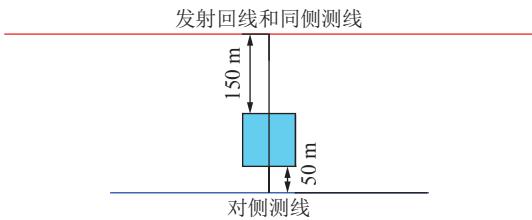
Fig.11 Profile of change rate of F_{EM} when low resistivity anomalous body approaches the receiving points

图 10 异常体靠近对侧接收点示意

Fig.10 Abnormal body is close to the opposite receiving point

2.2.3 低阻异常体靠近对侧接收点位置

在进行测线布设时,工作面内部的隐蔽突水致灾源不一定位于工作面中间位置,因此在图 3 的基础上构建了如图 10 所示异常体靠近对侧接收测线时的模型,低阻体与发射源距离 150 m,与对侧接收测线距离 50 m,模型其余参数设置与图 3 一致。

图 11 为异常体靠近对侧测线时的模拟结果。

图 11(a) 为同侧发射接收测线计算出的感应电动势变化率剖面,其感应电动势变化率在 $-0.022 \sim 0.027$,模型所在位置变化率与周围没有明显差异。图 11(b) 为对侧发射接收瞬变电磁透视探测方式下计算出的感应电动势变化率剖面,其在 $-19.92 \sim 8.29$,远大于同侧发射接收模式,但较异常位于工作面中心模型时变化率绝对值有所降低。受早期较大变化率的影响,无法明显看出晚期数据的变化,因此以 10^{-4} s 为界限将对侧发射接收感应电动势变化率剖面分为 2 段,如图 11(b) 右侧。右上图为时间小于 10^{-4} s 结果,其中

正对低阻异常体的测点变化率为负值, 靠近测线中心侧变化率为正值且较大, 正负交界面为异常在测线中心侧位置的边界, 远离测线中心侧测变化率相对较小。右下图为时间大于 10^{-4} s 结果, 其感应电动势变化率在 $-0.138 \sim 0.113$, 大于同侧发射接收模式结果, 在异常对应水平位置变化率相对较大, 但沿时间方向(纵向), 范围较大。由此可知, 当异常体靠近对侧接收测线时, 无论早期和晚期, 对侧发射接收的矿井瞬变电磁透視模式所得数据比同侧发射接收包含更多的异常体信息。

2.2.4 低阻异常体靠近发射回线位置

在图 3 的基础上构建了如图 12 所示异常体靠近发射回线时的地电模型, 低阻体与发射源距离 50 m, 与对侧接收测线距离 150 m, 模型其余参数设置与图 3 一致。

图 13 为异常体靠近发射源时的模拟结果。图 13(a) 为同侧发射接收测线计算出的感应电动势变化率剖面, 其感应电动势变化率在 $-0.028 \sim 0.137$, 在水平 $-50 \sim 50$ m, 纵向上存在 2 处变化率较大区域, 早期变化率大于晚期变化率, 其位置与异常体水平范围基本

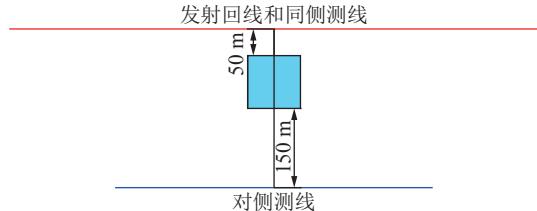


图 12 异常体靠近发射回线示意

Fig.12 Abnormal body is close to the transmitter loop

一致。图 13(b) 为瞬变电磁透視探测方式计算出的感应电动势变化率剖面, 其在 $-330.75 \sim 88.20$, 较异常位于工作面中心模型时变化率绝对值有所增加。以 10^{-4} s 为界限将对侧发射接收感应电动势变化率剖面分为 2 段, 如图 13(b) 右侧。右上图为时间小于 10^{-4} s 结果, 其中正对低阻异常体的测点变化率为负值, 两侧变化率为正值, 正负交界面为异常体边界。右下图为时间大于 10^{-4} s 结果, 其感应电动势变化率在 $-0.029 \sim 0.027$, 小于同侧发射接收模式结果, 变化率较大区域水平范围大于模型边界, 沿时间方向(纵向), 范围较大。由此可知, 当异常体靠近发射源时, 对瞬变电磁透視数据的早期影响有所增加, 晚期影响有所降低。

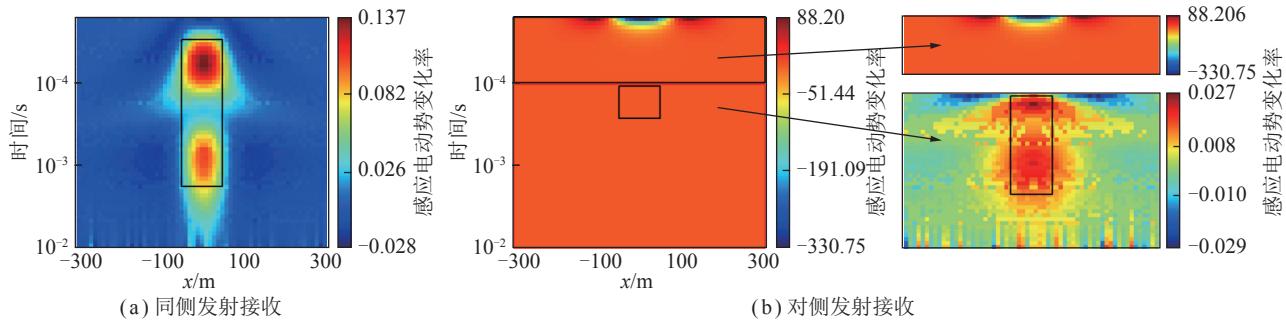


图 13 低阻异常体靠近发射回线时的感应电动势变化率剖面

Fig.13 Profile of change rate of F_{EM} when low resistivity anomalous body approaches the transmitting loop

综上所述, 对侧发射接收时的感应电动势时变曲线与同侧发射接收不同, 其感应电动势随时间先增加后减小。对于本文所述薄板模型: 当异常体位于测线以及工作面中心位置时, 同侧发射接收无论早期和晚期均无明显响应, 对侧发射接收早期响应非常明显; 当异常体位于工作面中心、偏移测线中心 100 m 位置时, 同侧发射接收与对侧发射接收晚期影响基本一致, 但对侧接收早期数据具有较高的分辨能力, 在早期多测道剖面中, 可以明显看出本模型低阻异常体的影响; 异常体越靠近发射源侧, 对瞬变电磁透視数据早期的影响越大, 晚期影响越小, 对同侧发射接收数据影响有所增加; 异常体越靠近对侧接收测线时, 对瞬变电磁透視数据早期的影响越小, 晚期影响越大, 对同侧

发射接收数据影响有所减小。上述研究充分说明了由早期一次磁场直接引起的初始二次场具有更高的分辨能力, 而晚期由发射回线附近二次场交叉感应扩散引起的感应电动势分辨能力相对较弱。

2.3 低阻体位于工作面外侧透視特征分析

对于同侧发射接收瞬变电磁法/矿井瞬变电磁法, 探测结果中异常体空间位置的多解性一直是难以解决的问题。本节基于图 3 模型, 将低阻异常体移至发射回线和接收点外侧, 研究瞬变电磁透視探测技术沿煤层所在平面的低阻异常体的定位能力。

(1) 低阻异常体位于接收点外侧。图 14(a) 为低阻异常体位于接收点外侧 100 m 位置处模型示意, 模型参数设置与图 3 一致。图 14(b) 为对侧接收点绘制

的感应电动势变化率剖面,变化率在 $-0.38\sim0.39$,虽然 10^{-4} s时刻之后有一处明显的浅蓝色负变化率条带和一处黄绿色小范围正变化率区域,为低阻异常体二

次场扩散引起,然而在早期没有出现由一次磁场迅速衰减引起的较大变化率,由此可以判断低阻异常体是在工作面内还是接收点外侧。

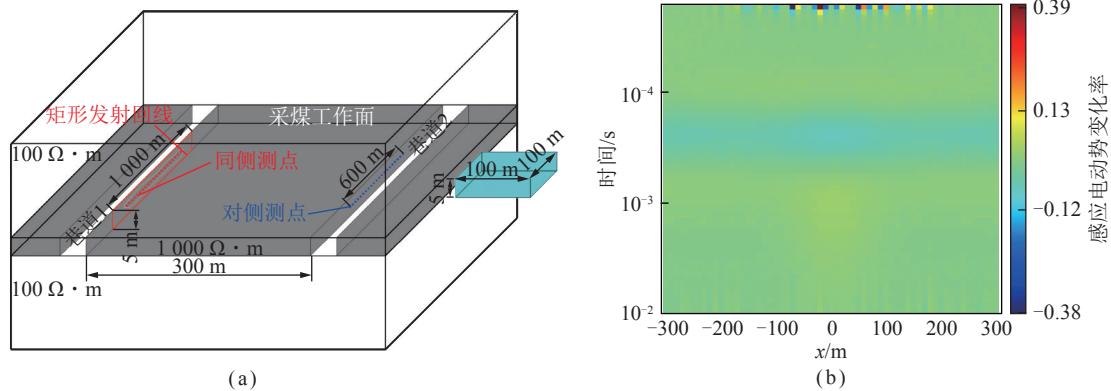


图 14 低阻异常体位于接收点外侧模型示意

Fig.14 Schematic diagram of the model of the low resistivity anomaly body located outside the receiving points

(2) 低阻异常体位于发射回线外侧。图 15(a) 为低阻异常体位于发射线圈外侧 100 m 位置处模型示意。图 15(b) 为对侧接收点绘制的感应电动势变化率

剖面,变化率在 $-0.29\sim0.24$ 间,变化率较大区域位于早期且变化较为杂乱,无规律可循,晚期基本上看不

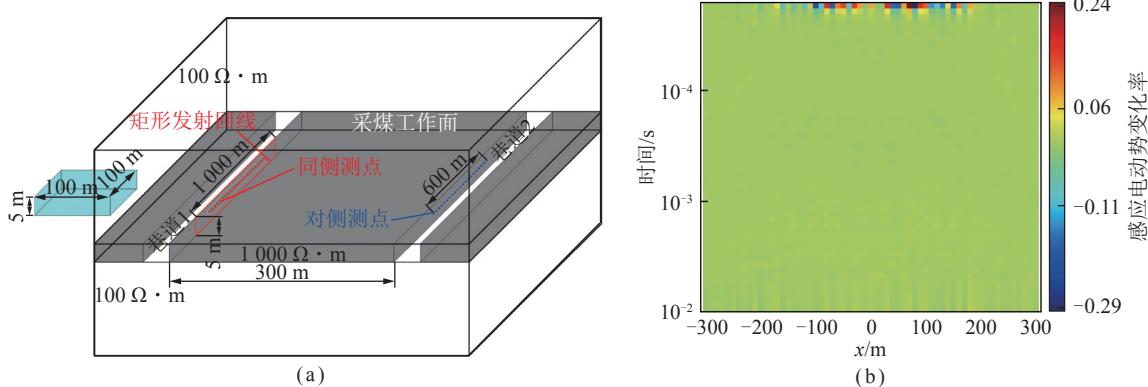


图 15 低阻异常体位于发射线圈外侧模型示意

Fig.15 Schematic diagram of the model of the low resistivity anomaly body located outside the transmitter loop

通过上述模拟可知,在实际工作时,如果观测数据早期没有明显的透视影响,则低阻异常体不在工作面内部,如果晚期出现二次场扩散的影响,则可得到低阻异常体位于接收点外帮,否则在发射线圈外帮。

2.4 左右双异常分辨能力分析

实际工作面内部可能同时存在多个富水区,为了分析瞬变电磁透视探测技术的对 2 个异常体的分辨能力,在图 3 的基础上构建了如图 16 所示的左右双异常体模型。发射线圈与测线水平间距 300 m(模拟 300 m 宽的工作面),2 个异常体位于发射线圈和接收点之间,沿测线方向间隔 100 m,电阻率为 $1 \Omega \cdot m$,尺寸均为 $100 m \times 100 m \times 5 m$ 。

图 17 为左右双异常体得到的感应电动势变化率剖面,其中黑色矩形框为 2 处低阻异常区所处位置。

图 17(a) 为同侧发射接收瞬变电磁工作模式下计算出的感应电动势变化率剖面,其感应电动势变化率在 $-0.09\sim0.23$,在横向 $-150\sim150$ m、纵向 $0.6 \times 10^{-3}\sim2 \times 10^{-3}$ s 存在一处变化率相对大的区域,无法区分两处低阻异常体。图 17(b) 为对侧发射接收瞬变电磁透

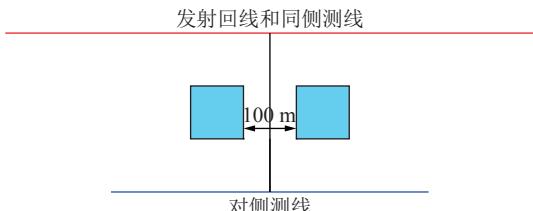


图 16 左右双低阻异常体水平位置示意

Fig.16 Horizontal position diagram of left and right double low-resistivity abnormal bodies

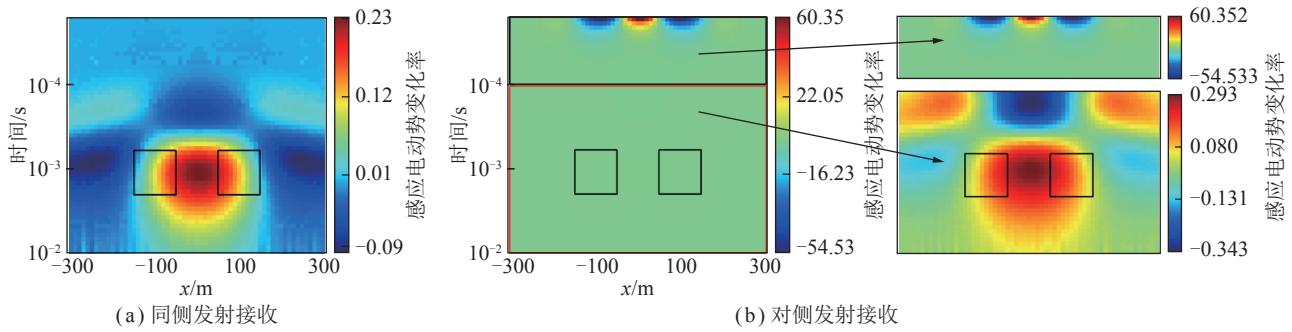


图 17 左右双低阻异常体感应电动势变化率剖面

Fig.17 Profile of change rate of F_{EM} of left and right double low-resistivity abnormal bodies

视探测方式下得到的感应电动势变化率剖面,其在 $-54.53\sim60.35$,远大于同侧发射接收模式数百倍。以 10^{-4} s为界限将对侧发射接收感应电动势变化率剖面图分为2段,如图17(b)右侧。右上图为时间小于 10^{-4} s结果,其中正对低阻异常体的测点变化率为负值,而两异常体中间为正值,正负交界面为低阻异常体沿测线方向的边界。右下图为时间大于 10^{-4} s结果,其感应电动势变化率在 $-0.343\sim0.293$,其分布形态与同侧发射接收晚期感应电动势变化率基本一致,无法有效区分2处低阻异常区,但变化率大于同侧发射接收。

图18为左右双低阻异常体对侧发射接收时的多测道剖面,其整体形态与前述单个异常体一致,但早期可以看到2处明显下凹区域($x=100$ m和 $x=-100$ m位置),分别对应2处低阻异常体沿测线位置。

综上,相较于常规的同侧发射接收瞬变电磁法,

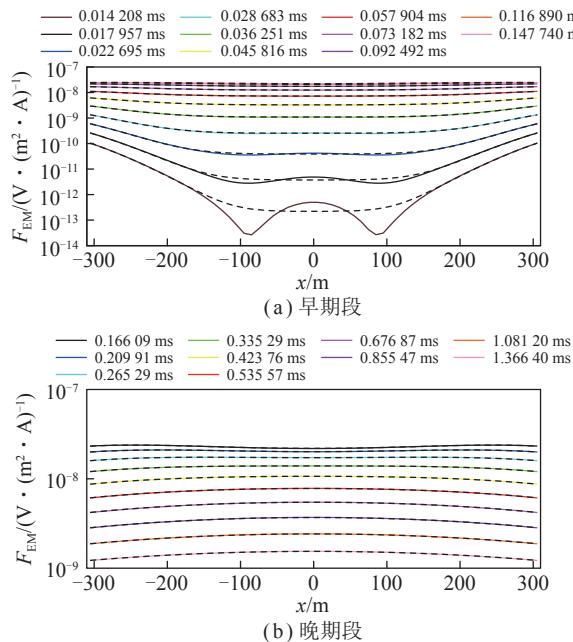


图 18 左右双低阻异常体感应电动势多测道剖面

Fig.18 Multi-channel profile of F_{EM} of left and right double low-resistivity abnormal bodies

对侧发射接收的瞬变电磁透視观测模式,早期数据主要受一次磁场瞬态变化的影响具有较高的水平分辨能力,晚期与同侧发射接收方式相同,主要受二次场扩散引起,其水平分辨能力相对较弱。

3 实验数据分析

3.1 施工设计

为了验证该方法的可行性,在山西某矿3202工作面开展了瞬变电磁透視现场试验,工作面长约3 600 m,宽约310 m,整体东高西低、南高北低。

选取该工作面终采线朝开切眼方向1 000 m范围作为试验区,在运输巷布置1 000 m长、4 m高的矩形回线作为发射源,如图19中红色直线所在位置,在对侧回风巷布设1 000 m长测线接收长条形回线形成的瞬态电磁场(图中蓝色直线),点距为10 m,共101个测点。

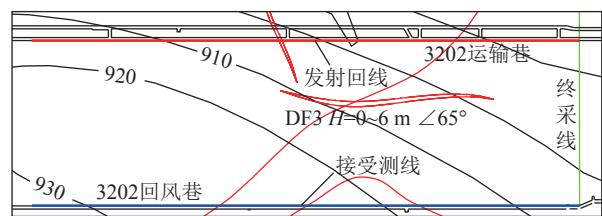


图 19 施工布设

Fig.19 Construction layout map

本次试验采用澳大利亚EMIT公司最新生产的SMART24瞬变电磁设备,如图20所示,该设备接收和发射可以通过GPS和石英钟进行同步。由于矿井瞬变电磁透視通过在工作面一侧巷道发射,另一侧巷道进行接收,则发射和接收设备在没有GPS的环境下可通过石英钟进行同步。

3.2 单点数据分析

图21(a)为测线中的一个测点所观测到的感应电动势随时间变化曲线,其中红色段为负值,蓝色段为正值,感应电动势随时间变化时存在正负拐点。



图 20 瞬变电磁设备

Fig.20 Transient electromagnetic equipment

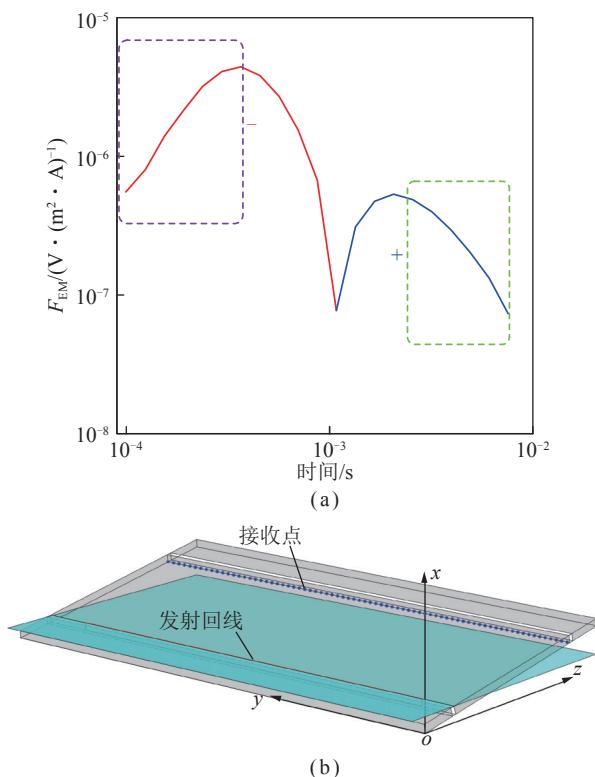


图 21 单点衰减曲线及工作面立体示意

Fig.21 Single point attenuation curve and working face three-dimensional schematic diagram

通过分析 3202 工作面煤层底板等高线可知, 运输巷和回风巷之间存在高差, 将其可等效于图 21(b) 所示的工作面立体图。图 21(b) 中红色矩形线为发射回线, 其法线方向沿 z 轴, 在发射回线的上侧边绘制水平面(图中蓝色平面), 结合全空间长条形发射回线电磁场分布特征可知, 初始时刻, 在平面上方感应电动势 z 分量为负值(图 21(a) 中的负值段), 回线所对应的法线方向空间为正值, 随着时间的增加回线外侧的负极值朝远离回线上下方向移动, 而内部正极值逐渐集中于回线中间, 且正值逐渐扩散至发射线圈法线方向对应空间的外侧(图 21(a) 中的正值段)。

3.3 多测道剖面分析

分别提取图 21(a) 中早期上升段(紫色框)和晚期下降段(绿色框)各个测点的数据绘制了多测道剖面,

如图 22 所示。图 22(a) 为早期上升段多测道结果: 随着横向距离的增加, 感应电动势逐渐减小, 结合图 19 中的煤层底板等高线可知, 该工作面不仅在倾向上有角度, 在走向上也存在角度, 推测由地形起伏引起; 在横向 900~1 000 m 位置存在感应电动势突然增大阶段, 推测该变化由工作面内隐蔽低阻异常体引起; 由衰减曲线可知, 观测时间从 10^{-4} s 开始, 缺少了模拟数据的早期段, 故多测道中并未出现两侧高中间低的现象。图 22(b) 为晚期下降段多测道结果, 由图 22 可知, 晚期多测道水平方向变化较为平缓, 仅 $x=90$ m 位置存在一处突变, 推测为干扰引起。

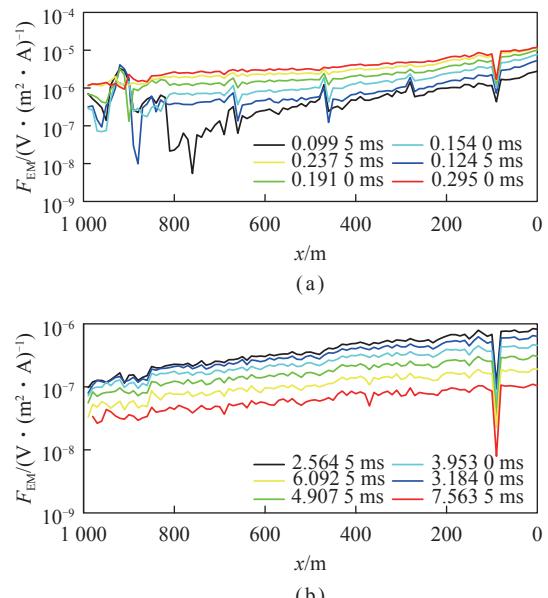


图 22 实测数据多测道剖面

Fig.22 Multi-channel profile of measured data

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 相较于传统同侧发射接收工作模式, 对侧发射接收的瞬变电磁透视探测方式可以观测到更小范围的低阻异常体, 且异常体对早期数据的影响比同侧观测数据大数百倍甚至数千倍。

(2) 随着异常体靠近发射源侧, 对瞬变电磁透视数据早期的影响越大, 晚期影响越小, 对同侧发射接收数据影响有所增加, 靠近对侧接收测线时的影响相反。

(3) 同侧发射接收的瞬变电磁法无法区分本文所建立的左右双异常体模型, 而对侧发射接收数据早期段可明显区分 2 个低阻异常体的边界。

(4) 同侧接收和对侧接收的晚期数据均是二次场随时间感应扩散所引起, 而早期数据受发射回线一次磁场瞬间消失产生的初始二次场的影响, 非发射线圈

附近二次场感应扩散引起,故瞬变电磁透視技术早期数据识别异常体的能力更高。

(5) 实测数据多测道结果与数值模拟结果共同互相验证了对侧发射接收模式早期的优势。

4.2 讨 论

(1) 瞬变电磁透視模式下的早期数据影响机制还需进一步探讨与分析,厘清早期数据产生机制有助于数据处理及解释。笔者提出的早期数据由发射回线建立的一次磁场瞬间消失而产生二次场,称之为初始二次场,晚期数据由发射回线附近产生的初始二次场循环往复扩散引起的电磁场,其产生机制存在明显不同,属笔者等在研究瞬变电磁透視时的感悟,望与各位学者共同更加深入研究电磁场扩散机制,为电磁法精准、精细、精确探测提供更好的方法技术。

(2) 由上述模拟分析可知,早期透視段存在较高的分辨能力,但数值相对较小,因此对仪器的要求较高,需提高早期数据的探测能力,提高仪器采样率,同时具有较强的抗干扰能力。

(3) 由前述研究可知,无论是现有的一维视电阻率计算还是常用的一维反演均无法很好的应用于本文所提到的透視模式数据处理,笔者亦曾考虑采用三维反演来进行处理,但由于数据体量等问题,反演结果难以收敛,因此开展适用于该方法处理的研究是该方法广泛应用于工作面隐蔽突水致灾源探测极为重要的一环。望对此感兴趣的专家学者提出宝贵意见进行讨论与应用。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J].煤炭学报,2017,42(3): 547–556.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Theoretical and technology conception of the fluidization mining for deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 547–556.
- [2] 李业君,陈树涛.永城矿区大采高大采长高校工作面回采实践[J].煤炭技术,2019,38(2): 15–17.
LI Yejun, CHEN Shutao. Practice on mining high-efficiency mining faces of high mining height in Yongcheng coal mine[J]. Coal Technology, 2019, 38(2): 15–17.
- [3] 王伟,高星,李松营,等.槽波层析成像方法在煤田勘探中的应用——以河南义马矿区为例[J].地球物理学报,2012,55(3): 1054–1062.
WANG Wei, GAO Xing, LI Songying, et al. Channel wave tomography method and its application in coal mine exploration: An example from Henan Yima Mining Area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(3): 1054–1062.
- [4] 杨辉.薄煤层透射槽波探测技术及应用[J].煤田地质与勘探,2020,48(3): 176–181, 187.
YANG Hui. Detection technique and application of transmission in-seam wave in thin coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(3): 176–181, 187.
- [5] 何文欣.槽波地震勘探在煤层构造探测中的应用[J].煤炭技术,2017,36(2): 99–102.
HE Wenxin. Application of in-seam wave exploration in coal structure detection[J]. Coal Technology, 2017, 36(2): 99–102.
- [6] 刘树才,岳建华,李志聃.矿井电测深理论曲线变化规律研究[J].中国矿业大学学报,1996,25(3): 101–105.
LIU Shucai, YUE Jianhua, LI Zhdan. Study on changing law of theoretical electrical sounding curves in coal mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1996, 25(3): 101–105.
- [7] 刘树才,刘鑫明,姜志海,等.煤层底板导水裂隙演化规律的电法探测研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2): 348–356.
LIU Shucai, LIU Xinming, JIANG Zhihai, et al. Research on electrical prediction for evaluating water conducting fracture zones in coal seam floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 348–356.
- [8] 刘鑫明,刘树才,姜志海,等.电阻率法监测煤层底板破碎带数值模拟[J].煤矿安全,2013,44(1): 39–42.
LIU Xinming, LIU Shucai, JIANG Zhihai, et al. Numerical simulation on coal seam floor fracture zone based on resistivity method monitoring[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(1): 39–42.
- [9] 胡雄武,孟当当,张平松,等.采煤工作面底板水视电阻率全方位探测方法[J].煤炭学报,2019,44(8): 2369–2376.
HU Xiongwu, MENG Dangdang, ZHANG Pingsong, et al. An all-directional detection method of apparent resistivity for water from the floor strata of coal-mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2369–2376.
- [10] 吴荣新,刘盛东,张平松.双巷并行三维电法探测煤层工作面底板富水区[J].煤炭学报,2010,35(3): 454–457.
WU Rongxin, LIU Shengdong, ZHANG Pingsong. The exploration of two-gateways parallel 3-D electrical technology for water-rich area within coal face floor[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 454–457.
- [11] 张军.矿井孔-巷无线电波透視探测方法[J].煤炭学报,2020,45(8): 2856–2864.
ZHANG Jun. Research on radio electromagnetic wave perspective detection method through borehole-roadway in mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2856–2864.
- [12] 肖玉林,吴荣新,张平松,等.无线电波透視场强增量法在煤层工作面坑透探测中的应用[J].矿业安全与环保,2016,43(5): 36–40, 44.
XIAO Yulin, WU Rongxin, ZHANG Pingsong, et al. Application of radio wave penetration field strength increment method in detection by coal face roadway[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2016, 43(5): 36–40, 44.
- [13] 杨光,姜志海,金红娣,等.无线电波透視技术探查工作面隐伏构造[J].煤炭工程,2012(3): 126–128.
YANG Guang, JIANG Zhihai, JIN Hongdi, et al. Radio penetration technology applied to explore hidden structure of coal mining face[J]. Coal Engineering, 2012(3): 126–128.
- [14] 韦义,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.
WEI 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.

[15] 常江浩. 煤矿富水区矿井瞬变电磁响应三维数值模拟及应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017: 1–2.
CHANG Jianghao. Three-dimensional numerical simulation and application of mine transient electromagnetic response of water-rich area in coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017: 1–2.

[16] LI Maofei, LIU Shucui, SU Benyu, et al. Study on transient electromagnetic response of high resistivity goafs and its application[J]. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 2019, 25(1): 31–35.

[17] CHANG Jianghao, YU Jingcun, LIU Zhixin. Three-dimensional numerical modeling of full-space transient electromagnetic responses of water in goaf[J]. *Applied Geophysics*, 2016, 13(3): 539–552.

[18] HU Xiongwu, HAN Dan, MAVOUNGOU D. Michelle Naomie. Roadway transient electromagnetic signal analysis and its testing system improvement[J]. *Exploration Geophysics*, 2022, 53(3): 255–261.

[19] 李毛飞, 刘树才, 姜志海, 等. 矿井直流电透视底板探测及三维反演解释[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2708–2721.
LI Maofei, LIU Shucui, JIANG Zhihai, et al. Detecting floor geological information by Mine DC perspective and 3D inversion[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2708–2721.

[20] 刘宝宝, 郭纯, 杨海涛. 煤矿电法集成勘探系统应用研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(5): 247–252.
LIU Baobao, GUO Chun, YANG Haitao. Research on application of coal mine electrical method integrated exploration system[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(5): 247–252.

[21] 刘鑫明, 煤岩介质中中高频电磁波传播规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
LIU Xinming. Research the propagation rules of middle-high frequency electromagnetic wave in coal medium[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.

[22] 岳建华, 薛国强. 中国煤炭电法勘探 36 年发展回顾[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(4): 1716–1724.
YUE Jianhua, XUE Guoqiang. Review on the development of Chinese coal electric and electromagnetic prospecting during past 36 years[J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(4): 1716–1724.

[23] 于景伟, 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 Shucui, 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.

[24] 刘树才, 姜志海, 赵云. 地面—坑道瞬变电磁灾害水源精细探查技术研究[C]//迎接地球电磁技术发展的机遇和挑战——第十届中国国际地球电磁学术讨论会. 2011: 117–119.

[25] JIANG Zhihai, LIU Lanbo, LIU Shucui, et al. Surface-to-underground transient electromagnetic detection of water bearing goaves[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(8): 5303–5318.

[26] 许新刚. 矿井含水构造瞬变电磁场响应及透视技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
XU Xingang. Study on response and perspective technology of transient electromagnetic field in mine water bearing structure[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.

[27] 栗升. 矿井磁性源透射瞬变电磁有限差分正演数值模拟[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
LI Sheng. Numerical simulation of finite difference forward modeling of mine transient electromagnetic using magnetic source[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.

[28] 童雪瑞. 超宽工作面瞬变电磁透视技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
TONG Xuerui. Study of transient electromagnetic perspective technology on ultra-wide working face[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[29] ALEXANDER A · Kaufman. *Geophysical field theory and method, Part A: Gravitational, Electric, and Magnetic field*[M]. New York: Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich publishers, 1992: 410–411.

[30] 米萨克 N · 纳比吉安. *勘查地球物理——电磁法*[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 121.

[31] 黄俊革, 王家林, 阮百尧. 坑道直流电阻率法超前探测研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(5): 1529–1538.
HUANG Junge, WANG Jialin, RUAN Baiyao. A study on advanced detection using DC resistivity method in tunnel[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(5): 1529–1538.