

李术才,李凯,翟明华,等. 矿井地面-井下电性源瞬变电磁探测响应规律分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 2024-2032. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1928
Li Shucai, Li Kai, Zhai Minghua, et al. Analysis of grounded Transient Electromagnetic with surface-tunnel configuration in mining [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 2024-2032. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1928

矿井地面-井下电性源瞬变电磁探测响应规律分析

李术才¹ 李 凯¹ 翟明华² 孙怀凤^{1,2} 王世睿¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 山东能源集团有限公司 博士后科研工作站, 山东 济南 250014)

摘 要: 为了避免井下瞬变电磁探测面临的金属强干扰、高瓦斯矿井防爆等要求,对矿井地面布置瞬变电磁发射源,在井下巷道、采场接收的瞬变电磁探测方法进行研究。采用三维时域有限差分法建立电性源瞬变电磁三维正演算法,研究地面电性源发射,井下巷道接收的瞬变电磁响应规律。首先采用均匀半空间模型和层状模型研究地下接收瞬变电磁场的曲线形态特征以及对地层电阻率变化的敏感性,并考察接收排列的最佳方位角和收发距。以层状模型为例设置均布的5条测线接收排列,计算了不同接收点的瞬变电磁响应曲线,对比分析曲线形态,得到电性源瞬变电磁地面发射、井下接收采集范围和传播规律,即:①电性源磁响应在垂向(broadside)排列方向比在轴向(inline)排列幅值大,井下接收的最佳测线方向为垂直排列方向;②发射长度为1 km的电性源井下接收有效探测深度可达到1.5 km;③电阻率较高的煤层对接收点响应曲线的影响不大。其次,设计包含顶板水和底板水的模型,计算得到了不同类型含水层的响应规律,对比曲线可以发现明显的异常差异。最后,设计一个包含断层的复杂模型,得出了倾斜充水断层影响下的瞬变电磁响应曲线。得到地面发射-井下接收的瞬变电磁方法的采集范围和传播规律,最佳方位角为垂直排列方向;地面发射-井下接收的瞬变电磁方法对顶板水和底板水有一定的分辨和识别能力;地面发射-井下接收的瞬变电磁方法能够初步对倾斜充水断层的电磁场响应进行识别。该方法仅要求接收机在井下,易于进行本安设计。

关键词: 电性源; 瞬变电磁; 地井装置; 千米深井

中图分类号: P631.3 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2016)08-2024-09

Analysis of grounded Transient Electromagnetic with surface-tunnel configuration in mining

LI Shu-cai¹, LI Kai¹, ZHAI Ming-hua², SUN Huai-feng^{1,2}, WANG Shi-rui¹

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Postdoctoral Programme, Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250014, China)

Abstract: In order to avoid the strong metal interference and gas explosion of Transient Electromagnetic (TEM) detection in mines, a new configuration, which put the transmitting line source on the surface and the receiver in the underground mining roadways, was investigated. Its modeling algorithm was developed using finite difference time domain (FDTD) method in three dimensions. The characteristics of this configuration was studied with numerical experiments. Homogeneous half space and layered models were used to study the curve style and its sensitivity to the earth resistivity changes. The influences from the distance between the transmitter and receiver, the receiver azimuth angle were both

收稿日期: 2015-12-18 修回日期: 2016-05-06 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41404104); 中国博士后基金资助项目(2014M561951); 山东省博士后创新基金资助项目
作者简介: 李术才(1965—),男,河北涿水人,教授,博士生导师,博士。E-mail: lishucai@sdu.edu.cn

compared. Five lines were designed along different positions. Many useful phenomenon were obtained according to the comparison as follows: (1) The TEM responses amplitude from the broadside are quite larger than that of the inline. (2) The valid investigation depth can reach about 1.5 km using a line source of 1 km in length. (3) The high resistivity coalbed has little influences to the simulated acquired data. Then, models including roof and bottom water are simulated. The receiver decay curve has obvious difference which can be used to identify the acquirer. Finally, a complex model including dipping fault was used in the simulation. The best azimuth angle is broadside angle. This configuration can identify roof and bottom water in mines, and can generally identify dipping fault. This configuration is easy for intrinsically safe design in instruments manufacturing.

Key words: grounded source; TEM; surface-tunnel configuration; one kilometer-depth

瞬变电磁是一种利用低频电磁场进行勘探的地球物理方法,利用获取关断后的 2 次电磁场来反映地下的电性分布情况,已经被广泛应用于地球物理近地表面探测,例如煤矿采空区的探测或监测^[1],金属矿产资源勘查^[2-3],监测污染物迁移^[4-5],地下水调查^[6-8],以及隧道或矿井含水不良地质超前探测^[9-11]。瞬变电磁法也被应用于矿井中的超前探测,例如矿井中超前预报探测^[12-14],矿井老窑水超前探测^[15],矿井灾害水源井下瞬变电磁探测^[16-17],矿井溶洞地质灾害超前预报探测^[18],煤矿水文地质灾害调查^[19]。目前,可控源电磁法在航空、海洋以及隧道中的探测成为了研究热点,并且可控源电磁法取得了以下进展:殷长春等研究了频率域与时间域航空瞬变电磁的正反演技术^[20-22],胡祥云等研究了频率域海洋可控源电磁的正反演技术^[23],李术才等研究了隧道不良富水地质灾害中瞬变电磁的正反演技术^[24],瞬变电磁技术在不同的物探领域已经成为了研究热点,并且相关技术已经在实际的物探中得到了广泛应用。

煤矿安全规程(防治水部分)要求坚持“预测预报、有疑必探、先探后掘、先治后采”的水害防治原则。在这一规定的指导下,为了避免煤矿突涌水等灾害的发生,矿山瞬变电磁已经得到了广泛的应用。然而,现有的矿井瞬变电磁探测方法普遍存在两个方面的问题:第 1,矿井下方大型设备电磁干扰大并且存在较多的钢架结构,导致获取的早期数据幅值超出正常值数百倍,会对瞬变电磁采集的 2 次场造成影响;第 2,对于高瓦斯矿井,井下瞬变电磁勘探存在防爆问题,为了达到矿井防爆要求,瞬变电磁的发射电流必须进行限制,电流降低导致探测深度减小。尽管已经有国内的高校和厂家开发了防爆的瞬变电磁仪,例如中国矿业大学研制的矿用瞬变电磁仪,但其激发场源的电流限制在很小的范围内(<2.5 A),而目前国外设备还没有可以防爆的产品。针对上述的问题,需要提出一种新型的瞬变电磁探测方法来解决存在的

问题。地面发射-井下接收电性源瞬变电磁法首先由刘树才^[25]提出,该方法采用电性源的方法直接向大地供电,能够实现较大的能量直接向大地深处传播,其探测深度能够得到大幅提高;地面发射-井下接收电性源瞬变电磁法导线的铺设也不像磁性源那样严格,这就为施工带来了方便。如果能够实现地面发射-井下接收电性源瞬变电磁法,并配合相应的工作方法和解释技术,则该方法有望实现有效探测深度 1~1.5 km,服务于深采矿井富水构造的探查工作,为矿井的整体开采和防治水规划提供参考和依据。

本研究针对深部开采矿井中地面发射-井下接收的瞬变电磁探测方法的响应规律展开研究,通过三维正演算法进行了电性源瞬变电磁的数值计算。首先,通过研究均匀半空间的电性源正演响应规律,分析不同收发距和方位角的曲线形态,得到电性源瞬变电磁的探测范围和传播规律,对比高阻煤层在上顶板和下顶板接收的瞬变电磁数据差异;其次,建立了顶板水和底板水模型,得到对应的电磁响应衰减曲线和响应规律;最后,建立了包含倾斜含水断层的模型,并且在煤层的不同位置进行数据接收,接收的数据与均匀半空间模型的数据进行对比。

数值模拟显示:地面 1 km 发射源(1 A)地下有效探测深度可达 1.5 km,发现最佳的接收方位角是垂直排列方向,发现接收点在高阻煤层中接收位置的影响可以忽略;地面发射-井下接收的瞬变电磁探测方法能够对顶板水和底板水进行分辨和识别;发现该方法在倾斜含水断层中的响应规律与均匀背景存在巨大差异,能够对倾斜含水断层进行初步识别。数值模拟为实现地面发射-井下接收的瞬变电磁探测方法的实际应用提供了理论支持和数值试验支撑。

1 时域有限差分法基本原理

时域有限差分法(FDTD)为由微分形式的麦克斯韦旋度方程出发进行差分离散从而得到一组时序推进公式,能够在时间域求解 Maxwell 方程组,对三

维空间的瞬变电磁场的求解是首先获得某个时刻各个空间点的场值,然后随着时间的推进得出延时各点的场值。

1.1 基本关系式与差分方程

麦克斯韦旋度方程为

$$\begin{cases} \nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} - J_m \\ \nabla \times E = 0 \\ \nabla \times H = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, H 为磁场强度; D 为电通量密度; J 为电流密度; E 为电场强度; B 为磁通量密度; t 为时间; J_m 为磁流密度。

在有源煤质中,由于忽略位移电流,不存在电场对时间的一阶导数,不能构成显示的麦克斯韦方程组,引入虚拟位移电流 γ ,电导率 σ ,麦克斯韦方程变成

$$\nabla \times H = \gamma \frac{\partial E}{\partial t} + \delta E + J \quad (2)$$

采用差分格式离散方法,首先在源的位置添加初始的电流信息,然后除电流源的位置进行迭代运算,推算出的差分迭代公式^[26]为

$$\begin{aligned} E_y^{n+1}\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) &= \frac{2\gamma - \sigma\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) \Delta t}{2\gamma + \sigma\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) \Delta t} \times \\ &E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) + \frac{2\Delta t}{2\gamma + \sigma\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) \Delta t} \times \\ &\left[\frac{H_x^{n+1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) - H_x^{n+1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2}\right)}{\Delta z} - \right. \\ &\left. \frac{H_z^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+1/2}\left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right)}{\Delta x} \right] - \\ &\frac{2\Delta t}{2\gamma + \sigma\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) \Delta t} J_s^{n+1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} B_y^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) &= B_x^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) - \\ &\frac{\Delta t_{n-1} + \Delta t}{2} \left[\frac{E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k + 1\right) - E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right)}{\Delta z} - \right. \\ &\left. \frac{E_z^n\left(i + 1, j, k + \frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta x} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

1.2 激励源的施加

在时域有限差分算法中,电性源发射源采用梯形

波作为发射源,考虑发射源的上升沿、持续阶段和下降沿,电性源发射源于网格的相对位置如图 1 所示,按照图 1 所示的网格分布施加电性源,电性源采用电流密度施加在网格线上,与 E_x 分量的空间位置重合。

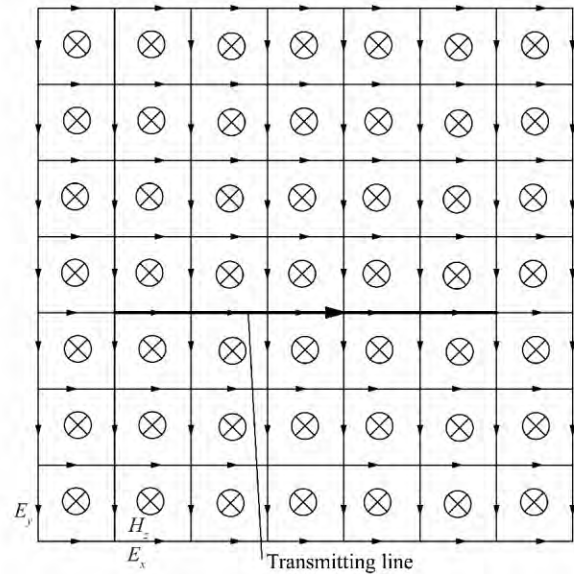


图 1 电性源与网格位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of source and grid position

由于梯形波有 4 个不可导点,会在迭代过程中造成不良的结果,所以笔者采用了开关函数进行了特殊处理,将梯形波的上升沿和下降沿用余弦函数进行代替,从而能使激励函数变得圆滑。将梯形波的上升沿和下降沿与转换的余弦函数进行频谱振幅和相位的对比,发现结果是一致的,可以用余弦函数代替梯形波的上升沿和下降沿。这两个开关函数^[26]为

$$U(t) = \begin{cases} 0.5 \left[1 - \cos\left(\frac{\pi t}{t_1}\right) \right] & (0 < t < t_1) \\ 1 & (t_1 < t < t_2) \\ 0.5 \left[1 + \cos\left(\frac{\pi t}{t_3 - t_2}\right) \right] & (t_2 < t < t_3) \end{cases} \quad (5)$$

2 地面-井下瞬变电磁观测方法

地面-井下瞬变电磁在地面采用电性源发射,如图 2 所示,采用正负电极接地的直导线作为发射源,接收测线在地下的接收方向如图 3 所示,在巷道接收线上依次采集电磁场数据。在数值试验过程中想要获得不同的方位角,可以在巷道方向固定的情况下改变布设的电性源的角度来获得不同的方位角。在数值试验过程中,要考虑巷道深度的不同而导致的收发距会有所改变。地面-井下瞬变电磁的原理与常规的地面回线源瞬变电磁基本一致,都是通过获取关断后的 2 次场衰减来对地下的电性情况进行识别判断,

但本方法采用的发射源为接地的直导线,接收点由地面改成了井下,实际上是地-井瞬变电磁的一个变种。

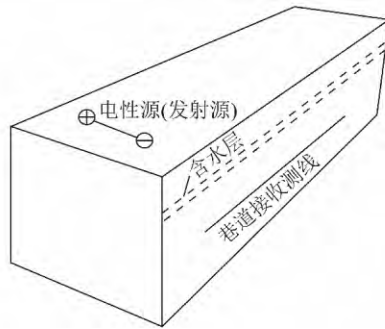


图 2 地面发射-巷道接收观测方式示意

Fig. 2 Schematic diagram of land-tunnel observation

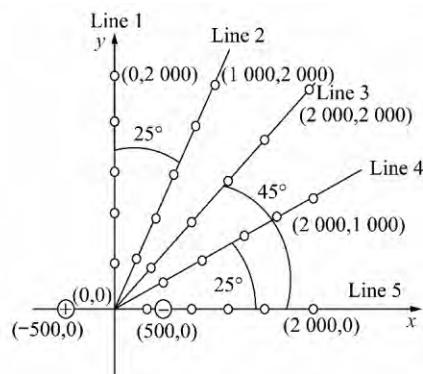


图 3 5 条测线测点分布

Fig. 3 Five survey lines measuring point distribution

地面发射-井下接收最大的优点是信噪比高,地面布设电性发射源并且巷道内进行数据采集,发射和接收对穿探测区域,电流关断之后异常体会产生 2 次场,布设在巷道内距离异常体较近的接收点能有效识别异常体产生的 2 次场,相比地面和空中接收信噪比显著增加;采用长距离电性源发射相比回线源发射来说,一次场能够辐射到地下更深的位置,因此能够加大探测的深度,使得瞬变电磁探测千米深井成为现实;地面-井下瞬变电磁的布设简单,仅需地面布设一条数百米的接地通电直导线即可,接收机在巷道内进行数据采集,相比回线源探测省略了发射回线窗户移动的过程,因此兼顾了野外施工效率。综上所述,地面-井下瞬变电磁有信噪比高、探测深度大、易于施工等优点。

3 数值试验

为了得到电性源瞬变电磁法在地面发射井下接收电磁场的传播规律、最佳方位角、顶底板水响应、充水断层响应,利用时域有限差分法进行数值试验。进行正演计算的参数如下:发射电极采用 1 km 的电性源发射方式,正负电极的位置分别为 $(-500, 0, 0)$ 、 $(500, 0, 0)$,激发电流 1 A,上升沿、下降沿均为 $1 \mu s$,计算模型采用非均匀网格剖分,模型 x, y, z 方向的网格数为 $160 \times 160 \times 400$ 个。

3.1 电性源瞬变电磁数据采集的范围及规律

为了研究电性源瞬变电磁法在地面发射井下接收电磁场响应规律,建立如下时域有限差分模型(表 1):分别建立电阻率为 50, 100, 150, 200, 300, 500 $\Omega \cdot m$ 的层状模型。

表 1 层状模型的参数

Table 1 Layered model parameters

参数	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
电阻率/($\Omega \cdot m$)	50	100	150	200	300	500
接收深度/m	500/1 500	300/500/600/900/1 200/1 500	500/1 500	500/1 500	500/1 500	500/1 500

为了研究 1 km 的电性源瞬变电磁在井下的接收深度,建立模型参数见表 1 中 Model 2 所示,均匀半空间的电阻率选取为 $100 \Omega \cdot m$,接收深度分别选取 300, 600, 900, 1 200, 1 500 m。如图 4 所示,随着探测深度增加电压的最大幅值减小,电压达到峰值的时间随接收深度的增加推迟,这说明在峰值之前,瞬变电磁向地下发射的电流还没有到达接收点位置,与电磁场传播规律吻合。

为了研究在同一深度下随背景场电阻率改变引

起的响应曲线变化情况,见表 1 参数,在深度为 500 m(图 5(a))位置分别选取电阻率为 50, 100, 150, 200, 300, 500 $\Omega \cdot m$ 的背景场进行计算,深度 1 500 m 的电阻率选取同上(图 5(b))。由图 5 可以看出,早期的数据包括平直段和上升段两个部分,平直段代表电磁场对模型背景场的响应,背景场的电阻率越高,平台的幅值越小,并且平台存在的时间越短,说明电磁场在背景场中的传播速度越快,平直段和上升段之间的尖点是由于变号导致的,上升段代表 2 次

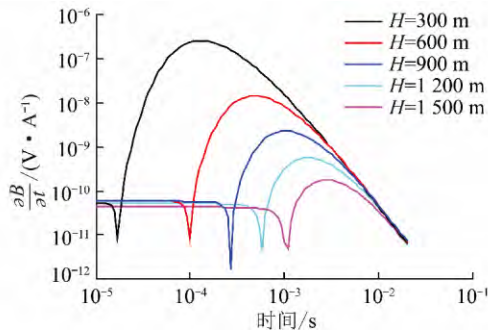


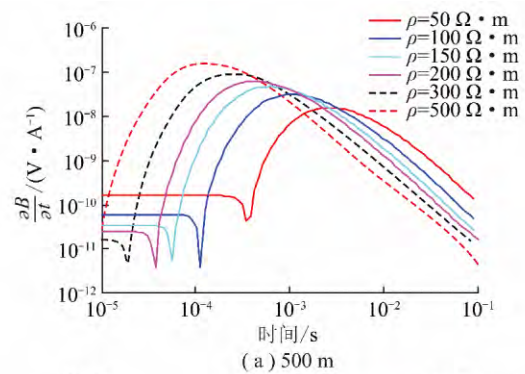
图 4 不同深度电压响应曲线

Fig. 4 Voltage response curves of different depths

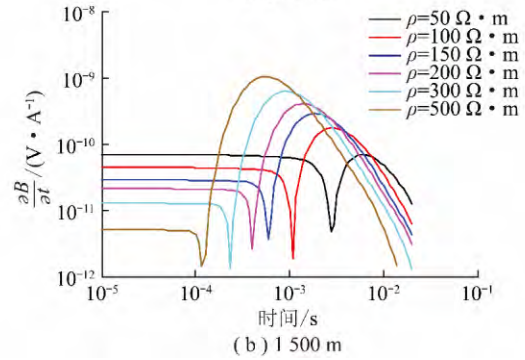
场电磁响应已经逐步到达接收位置,到达峰值的时刻说明电磁响应的 2 次场恰好到达接收点,背景场电阻率越高,电磁响应的峰值越大,并且到达峰值的时间越短。晚期电磁场的响应规律是电阻率越高,响应电压的幅值越低。由图 5 对比可以得出,在深度 1 500 m 响应曲线的平台时间要多于深度 500 m 的平台时间,说明 2 次场响应电压到达 1 500 m 深度所需要的时间比到达 500 m 深度更长。得出电磁响应曲线在深度 500 m 和 1 500 m 对不同电阻率的背景场有良好反应,从而推断 1.5 km 深度内地面-井下接收瞬变电磁能够良好的识别不同电阻率的背景场。

3.2 电性源瞬变电磁测量方式优选方法

为了研究地面发射井下接收电性源瞬变电磁法的最佳方位角,建立如图 3 所示 5 条测线,每条测线



(a) 500 m



(b) 1 500 m

图 5 不同深度和电阻率电压响应曲线

Fig. 5 Voltage response curves of different depths and resistivity

5 测点的坐标见表 2。选取背景场电阻率为 200 $\Omega \cdot m$ 的均匀半空间模型,接收点深度为 500 m,进行正演计算。

表 2 5 条测线接收点坐标

Table 2 Points of five lines

m

Point	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5
Point 1	(0 400)	(200 400)	(400 400)	(400 200)	(400 ρ)
Point 2	(0 800)	(400 800)	(800 800)	(800 400)	(800 ρ)
Point 3	(0 1 200)	(600 1 200)	(1 200 1 200)	(1 200 600)	(1 200 ρ)
Point 4	(0 1 600)	(800 1 600)	(1 600 1 600)	(1 600 800)	(1 600 ρ)
Point 5	(0 2 000)	(1 000 2 000)	(2 000 2 000)	(2 000 1 000)	(2 000 ρ)

由图 6 可以得出:随接收点到原点距离的增加,电压达到最大幅值的时刻推后,最大幅值减小;Line 1,Line 2 和 Line 3 对应测点的幅值要比 Line 4 略高,但是比 Line 5 要高大约两个数量级。由图 7 得出 Line 1,Line 2 和 Line 3 测线的电磁场响应电压幅值较高,能够反映测量区域电磁场变化,所以 Line 1,Line 2 和 Line 3 测线所在区域是较好的观测区域,但是最佳的观测方位角是垂向排列方向(Line 1)。

3.3 层状顶底板水模型电磁场响应规律

为了研究层状顶板水和底板水的电磁场响应规律,建立 4 个不同的模型,Model 1 为均匀半空间模

型,Model 2 设置 1 层 10 m 煤层,Model 3 在 10 m 煤层的基础上设置 10 m 的顶板水,Model 4 在 10 m 煤层的基础上设置 10 m 的底板水。设置表 3 所示模型参数:Model 1 为均匀半空间模型,背景场电阻率分别选取 100,150,200 和 300 $\Omega \cdot m$;Model 2 第 1 层(高度 500 m)电阻率分别选取 100,150,200 和 300 $\Omega \cdot m$,第 2 层(高度 10 m)电阻率为 500 $\Omega \cdot m$ 煤层,背景场电阻率为 1 000 $\Omega \cdot m$;Model 3 在 Model 2 的基础上在煤层的上顶板加 1 层电阻率为 10 $\Omega \cdot m$ 的 10 m 顶板水;Model 4 在 Model 2 的基础上在煤层的下顶板加一层电阻率为 10 $\Omega \cdot m$ 的 10 m 底板水。

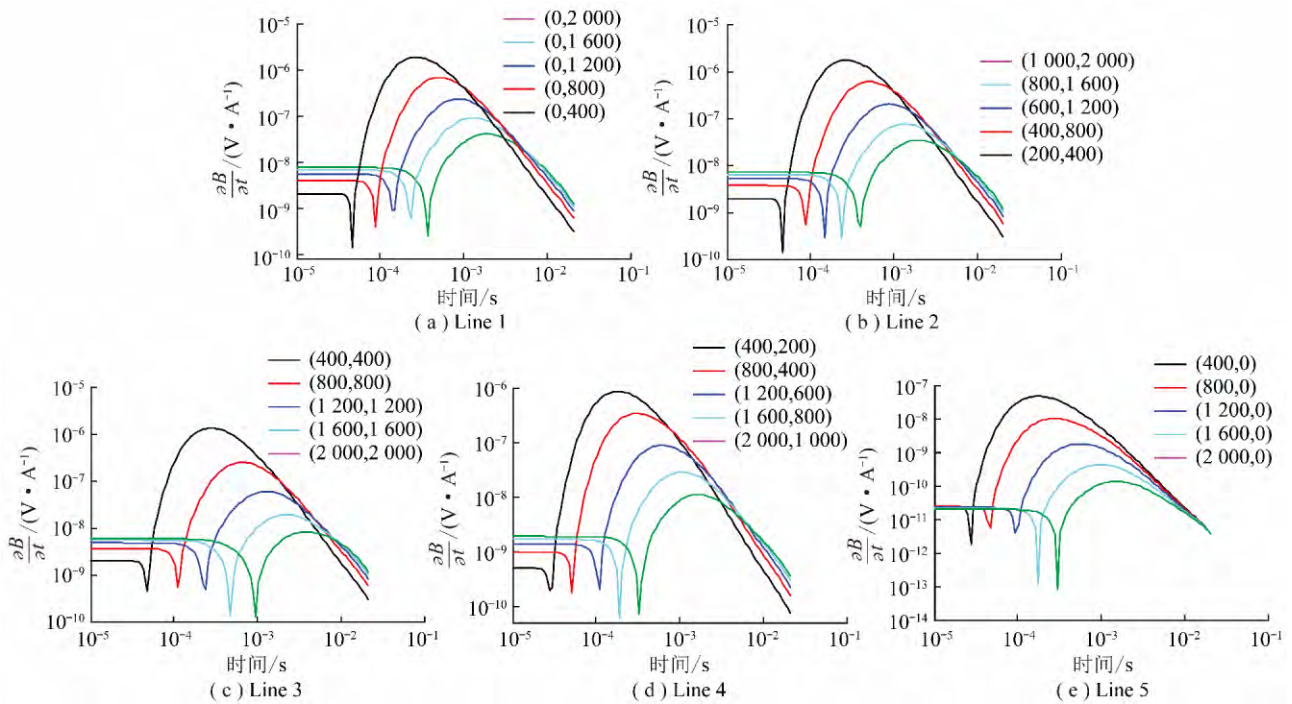


图 6 5 条测线的电压响应曲线(半空间电阻率 200 Ω·m; 深度 500 m)

Fig. 6 Five survey line voltage response curves

表 3 4 类顶底板水模型的参数

Table 3 Four types of mixture model parameters

Layer	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
Layer 1(500 m)	100 Ω·m ,150 Ω·m , 200 Ω·m ,300 Ω·m	100 Ω·m ,150 Ω·m , 200 Ω·m ,300 Ω·m	100 Ω·m ,150 Ω·m , 200 Ω·m ,300 Ω·m	100 Ω·m ,150 Ω·m , 200 Ω·m ,300 Ω·m
Layer 2(10 m)	100 Ω·m ,150 Ω·m , 200 Ω·m ,300 Ω·m	500 Ω·m	10 Ω·m	500 Ω·m
Layer 3(10 m)	100 Ω·m ,150 Ω·m , 200 Ω·m ,300 Ω·m	1 000 Ω·m	500 Ω·m	10 Ω·m
Layer 4	100 Ω·m ,150 Ω·m , 200 Ω·m ,300 Ω·m	1 000 Ω·m	1 000 Ω·m	1 000 Ω·m

Model 1 的背景场电阻率选取 100 Ω·m ,Model 2 ,Model 3 和 Model 4 第 1 层的电阻率同样选取 100 Ω·m ,其余参数不变 ,绘制的图像如图 7(a) 所示。同理 ,Model 1 的背景场电阻率分别选取 150 , 200 和 300 Ω·m ,Model 2 ,Model 3 和 Model 4 第 1 层的电阻率同样分别选取 150 ,200 和 300 Ω·m ,其余参数不变 ,绘制的图像如图 7(b) ,(c) ,(d) 所示。在巷道内接收点位置如图 7 所示 ,接收点 A ,B ,C 和 D 分别在 4 个模型中进行数据采集 ,接收点 A ,B ,C 和 D 的接收深度分别为 500 ,500 ,510 和 500 m。

由图 7 可以看出: 接收点 A 曲线为均匀半空间模型 ,和接收点 B 曲线相比接收点 A 曲线在达到最大幅值后衰减更快 ,这是由于 Model 2 电阻率较高的煤层和背景场导致的 ,接收点 C 曲线在 1 ~ 10 ms 的区

间电压幅值要略高于接收点 A ,这是由于 Model 3 中的顶板水导致的 ,接收点 D 曲线在 1 ~ 10 ms 的区间电压幅值要略高于接收点 C ,这是由于 Model 4 中的底板水导致的; 接收点 A ,B ,C 和 D 的电阻率是逐渐增大的 ,4 个模型的对比结果可以得出 ,随着电阻率的增大 ,接收点 D 曲线在 1 ~ 10 ms 高于接收点 A 的幅度比接收点 C 大。

通过观察达到峰值后的晚期数据 ,如图 7(a) 所示 ,由于第 1 层电阻率选取 100 Ω·m ,该模型对于顶板水和底板水的识别能力较弱 ,较难区分顶板水和底板水; 如图 7(b) 所示 ,第 1 层电阻率选取 150 Ω·m ,该模型能够初步识别顶板水和底板水 ,顶底板水与均匀半空间模型进行对比 ,可以发现顶板水模型与半空间模型电压产生差异的时间开始于 1 ms ,底板水模型

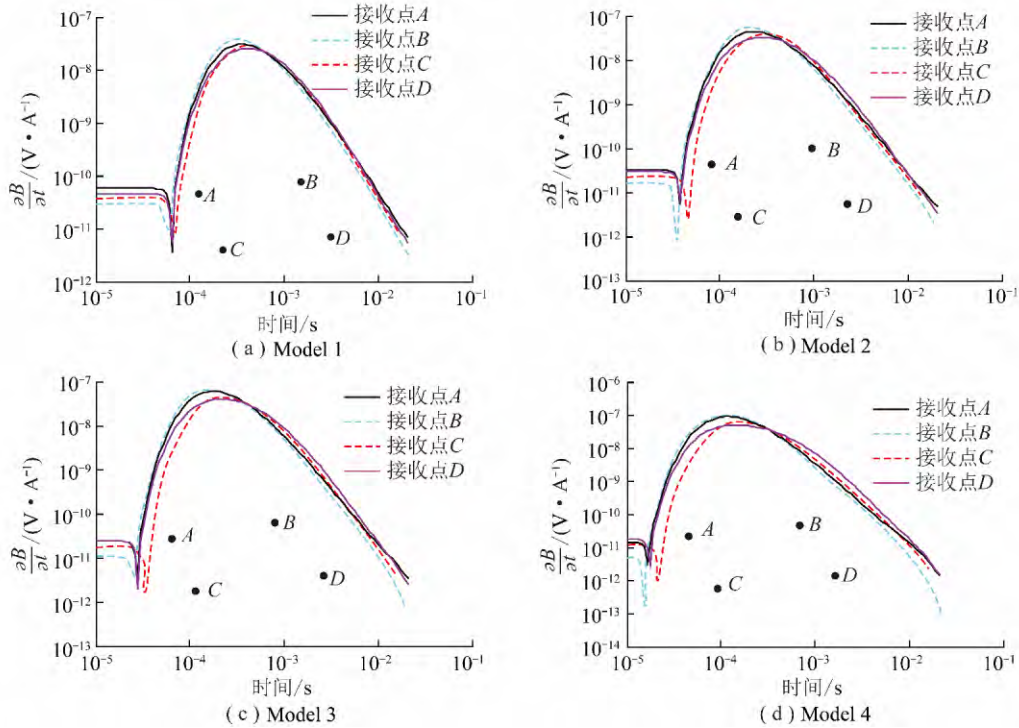


图 7 4 个模型的电压响应曲线对比

Fig. 7 Four models voltage response curve comparison

与半空模型电压产生差异的时间在滞后于顶板水模型,并且底板水的电压响应幅值要高于顶板水模型,从而能够区分顶底板水模型;图 7(c), (d) 表现的规律基本与图 7(b) 相似,都是底板水模型与半空模型电压产生差异的时间在滞后于顶板水模型,并且底板水的电压响应幅值要高于顶板水模型。

以上结果表明,地面发射-井下接收瞬变电磁是可以对煤层的顶板水和底板水进行识别,并且对底板水的辨识度更大。

3.4 复杂模型电磁场响应特征分析

由于煤矿工作环境复杂,巷道内接收点位置无法确定,研究煤层中接收点的不同位置的响应曲线十分必要,所以笔者对煤层的上顶板和下底板数据进行了对比。煤矿实际的地质环境,存在层状顶板水和底板水的可能性较小,含水体大多以复杂形态存在,因此选取倾斜断层含水体进行模型计算,探究地面发射井下接收瞬变电磁能否初步识别复杂含水体。

3.4.1 观测点在煤层中的不同位置的数据对比

通过建立均匀半空间模型和层状模型来对不同观测深度的响应曲线进行研究,参数如下:均匀半空间模型背景场电阻率选取 $150 \Omega \cdot m$,层状模型第 1 层(高度 200 m)电阻率选取 $150 \Omega \cdot m$,第 2 层(高度 10 m)选取电阻率 $500 \Omega \cdot m$ 的煤层,背景场电阻率为 $1000 \Omega \cdot m$ 。

通过图 8 数据对比发现:层状模型中煤层上下接收点电磁响应数据在后期是重合的,发现接收点 C 和接收点 D 响应曲线要比接收点 A 和接收点 B 的曲线衰减的快一些,这是由于层状模型煤层和背景场的电阻率较高导致的。综上所述,接收点在 10 m 煤层中的接收高度不会对响应曲线造成影响。

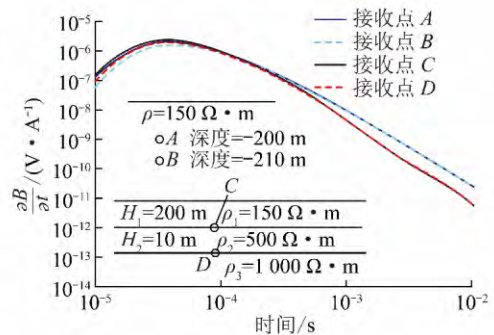


图 8 煤层不同位置电压响应曲线

Fig. 8 Voltage response curves of different locations in coal

3.4.2 复杂模型电磁场响应特征分析

建立如图 9 所示复杂模型,模型参数如下:背景场电阻率选取 $1000 \Omega \cdot m$,设置宽度 30 m 倾角为 30° 电阻率 $1 \Omega \cdot m$ 倾斜水体,宽度 10 m 电阻率 $500 \Omega \cdot m$ 的两个煤层,其余参数详见图 9。原点的坐标如图 9 所示,发射源正负电极的位置分别是 $(-500, 0)$, $(500, 0)$,接收点 A, B 的坐标分别为

(1 500, -260), (-500, -300)。同样,在背景场为 1 000 Ω·m 均匀半空间模型同样在接收点 A, B 进行数据采集。

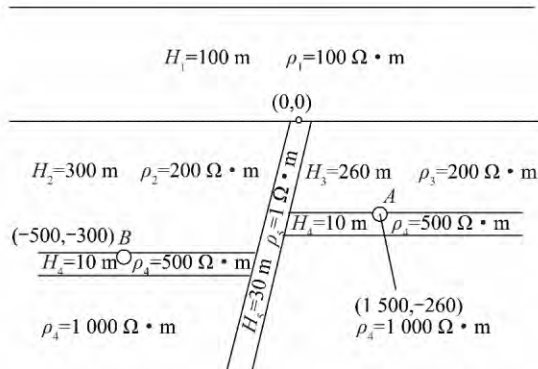


图 9 复杂模型参数

Fig. 9 Complicated model parameters

如图 10 所示:接收点 A 在复杂模型中的衰减规律和均匀半空间模型相比,由于含水断层的影响,导致响应电压达到峰值的时间推迟,并且小于均匀半空间模型峰值的幅值,响应电压 0.1 ms 之后的幅值高于均匀半空间模型;接收点 B 在复杂模型中的衰减规律和均匀半空间模型相比,由于含水断层的影响,导致响应电压达到峰值的时间推迟,并且小于均匀半空间模型峰值的幅值,在 1 ms 处出现一个向下的拐点,并且响应电压整体幅值低于均匀半空间模型,在 4 ms 之后响应电压高于均匀半空间模型。对复杂模型探究处于初级阶段,但是看出地面发射井下接收瞬变电磁对复杂模型含水体是可以识别的,需要更为系统和完善的探究。

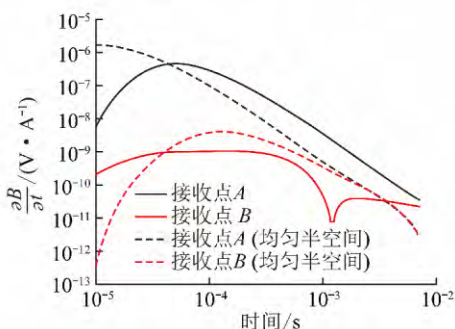


图 10 复杂模型电压响应曲线

Fig. 10 Complex models voltage response curve

4 结语与讨论

通过对均匀半空间模型探究,得出发射长度为 1 km 的电性源的接收深度可以达到 1.5 km,并且能够在这个范围识别不同电阻率的背景场,对探测深度和探测精度提供参考;研究电性源地面发射井下接收瞬变电磁的方位角,发现在垂向排列方向电磁响应幅

值最大,所以垂向排列方向是最佳观测方向;通过对煤层接收位置研究,得到接收点在 10 m 煤层中接收位置的差异可以忽略;探究顶板水和底板水及倾斜含水断层模型曲线响应特征,说明地面发射井下接收瞬变电磁对于顶板水和底板水以及复杂含水断层分辨能力良好,为后期地面发射井下接收瞬变电磁的数据解释工作提供了参考。

参考文献:

- [1] Xue G Q, Qin K Z, Li X, et al. Discovery of a large-scale porphyry molybdenum deposit in Tibet through a modified TEM exploration method [J]. Journal of Environmental & Engineering Geophysics 2012, 17(1): 19-25.
- [2] Yang D, Oldenburg D W. Three-dimensional inversion of airborne time-domain electromagnetic data with applications to a porphyry deposit [J]. Geophysics 2012, 77(2): B23-B34.
- [3] Liu Xiang, Jiao Chaoqun, Yao Aifen. Orthogonal experiment design of EMI of security monitoring system in coal mines [J]. International Journal of Coal Science & Technology 2015, 2(4): 325-332.
- [4] Pellerin. Toward mixed-element meshing based on restricted voronoi diagrams [J]. Procedia Engineering 2014, 82(1): 279-290.
- [5] Yan L J, Su Z L, Hu J H, et al. Field trials of LOTEM in a very rugged area [J]. The Leading Edge 1997, 16(4): 379-382.
- [6] S Keydar D. Application of seismic diffraction imaging for detecting near-surface inhomogeneities in the Dead Sea area [J]. Journal of Applied Geophysics 2010, 71(2): 47-52.
- [7] Strack K M, Seara J L, Gmih G, et al. LOTEM case histories in frontier areas of hydrocarbon exploration in Asia [J]. SEG Expanded Abstracts 1990, 9: 495-497.
- [8] Michael Ezersky. TEM study of the geoelectrical structure and groundwater salinity of the Nahal Hever sinkhole site, Dead Sea shore, Israel [J]. Journal of Applied Geophysics 2011, 75(1): 99-112.
- [9] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势 [J]. 岩石力学与工程学报 2014, 33(6): 1091-1113. Li Shucai, Liu Bin, Sun Huaifeng, et al. Tunnel construction advanced geological research status and development trend forecasting [J]. Rock Mechanics and Engineering 2014, 33(6): 1091-1113.
- [10] Sun H F. Multi-component and multi-array TEM detection in karst tunnels [J]. Journal of Geophysics And Engineering, 2012(9): 359-373.
- [11] Sun H F. Three-dimensional modeling of transient electromagnetic responses of water-bearing structures in front of a tunnel face [J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2014, 19(1): 13-32.
- [12] 杨海燕, 岳建华. 地下瞬变电磁法全区视电阻率核函数算法 [J]. 中国矿业大学学报 2013, 42(1): 84-87. Yang Haiyan, Yue Jianhua. Underground transient electromagnetic all time apparent resistivity kernel algorithm [J]. Journal of China University of Mining Technology 2013, 42(1): 84-87.
- [13] 唐新功, 胡文宝, 严良俊. 地堑地形对长偏移距瞬变电磁测深的影响研究 [J]. 工程地球物理学报 2004, 1(4): 313-317. Tang Xingong, Hu Wenbao, Yan Liangjun. Graben topography off-

- set the impact study on the long-distance transient electromagnetic sounding[J]. *Engineering Geophysics* 2004, 1(4):313-317.
- [14] 翁爱华,王雪秋.长偏移距瞬变电磁测深甚晚期响应及视电阻率的数值计算[J].*地震地质* 2003, 25(4):664-670.
Weng Aihua, Wang Xueqiu. Long-offset transient electromagnetic sounding very advanced numerical response and apparent resistivity calculations[J]. *Earthquake Geology* 2003, 25(4):664-670.
- [15] 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):292-294.
Jiang Zhihai, Yue Jianhua, Liu Zhixin. Mine transient electromagnetic method to leading exploration in the old kiln water application [J]. *Engineering Geophysics* 2007, 4(4):292-294.
- [16] 薛国强,陈卫营,周楠楠,等.接地源瞬变电磁短偏移深部探测技术[J].*地球物理学报* 2013, 56(1):255-261.
Xue Guoqiang, Chen Weiying, Zhou Nannan, et al. The grounding source transient electromagnetic short offset deep exploration technology[J]. *Chinese Journal of Geophysics* 2013, 56(1):255-261.
- [17] 严良俊,胡文宝,陈清礼,等.长偏移距瞬变电磁测深的全区视电阻率求取及快速反演方法[J].*石油地球物理勘探*, 1999, 34(5):532-538.
Yan Liangjun, Hu Wenbao, Chen Qingli, et al. Long-offset transient electromagnetic sounding region apparent resistivity inversion methods to strike and fast [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1999, 34(5):532-538.
- [18] 于景邨,刘振庆,廖俊杰,等.全空间瞬变电磁法在煤矿防治水中的应用[J].*煤炭科学技术* 2011, 39(9):111-113.
Yu Jingcun, Liu Zhenqing, Liao Junjie, et al. Full space transient electromagnetic method in coal mine water prevention application [J]. *Coal Science and Technology* 2011, 39(9):111-113.
- [19] 刘盛东,刘静,岳建华.中国矿井物探技术发展现状和关键问题[J].*煤炭学报* 2014, 39(1):19-25.
Liu Shengdong, Liu Jing, Yue Jianhua. Status quo China mine geophysical technology development and key issues [J]. *Journal of China Coal Society* 2014, 39(1):19-25.
- [20] 殷长春,张博,刘云鹤,等.航空电磁勘查技术发展现状及展望[J].*地球物理学报* 2015, 58(8):2640-2652.
Yin Changchun, Zhang Bo, Liu Yunhe, et al. Electromagnetic survey of the status quo and prospect of the development of aviation technology [J]. *Chinese Journal of Geophysics* 2015, 58(8):2640-2652.
- [21] 殷长春,刘斌.瞬变电磁法三维问题正演及激电效应特征研究[J].*地球物理学报*, 1994, 37(S1):486-492.
Yin Changchun, Liu Bin. Three-dimensional problem Bin Transient Electromagnetic Method forward and induced polarization effect feature [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1994, 37(S1):486-492.
- [22] Hordt, Muller A. Understanding LOTEM data from mountainous terrain [J]. *Geophysics* 2000, 65(4):1113-1123.
- [23] 韩波,胡祥云,黄一凡,等.基于并行化直接解法的频率域可控源电磁三维正演[J].*地球物理学报* 2015, 58(8):2813-2826.
Han Bo, Hu Xiangyun, Huang Yifan, et al. Based on the frequency domain controlled source electromagnetic direct solution of three-dimensional parallelism [J]. *Chinese Journal of Geophysics* 2015, 58(8):2813-2826.
- [24] 李貅,张莹莹,卢绪山,等.电性源瞬变电磁地空逆合成孔径成像[J].*地球物理学报* 2015, 58(1):278-288.
Li Xiu, Zhang Yingying, Lu Xushan, et al. Electrical ground and air source transient electromagnetic inverse synthetic aperture imaging [J]. *Chinese Journal of Geophysics* 2015, 58(1):278-288.
- [25] 李建慧,刘树才,焦险峰,等.地-井瞬变电磁法三维正演研究[J].*石油地球物理勘探* 2015, 50(3):556-564.
Li Jianhui, Liu Shucui, Jiao Xianfeng, et al. Well transient electromagnetic forward modeling study [J]. *Journal of Petroleum Geophysical Prospecting* 2015, 50(3):556-564.
- [26] 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 Huaifeng, Li Xiu, Li Shucui, et al. Considered off-time loop source excitation TEM dimensional finite-difference time-domain forward [J]. *Chinese Journal of Geophysics* 2013, 56(3):1049-1064.