

# 矿井瞬变电磁重叠回线耦合响应三维正演模拟

赵 晶

(恒源煤电股份有限公司 任楼煤矿, 安徽 宿州 235123)

**[摘 要]** 矿井瞬变电磁法受制于施工环境而只能采用边长小于 3m 的重叠回线, 其探测效果取决于回线与三维地电体的耦合情况。基于瞬变电磁场的“烟圈效应”理论, 利用其扩散方程, 推导出三维时域有限差分方程, 用 VC 编制程序, 模拟重叠回线的耦合响应特征。结果表明: 重叠回线位于 K 型地电模型中间层时, 发射线框平面垂直地层激发时的耦合响应最强, 平行地层时的耦合响应最小; 重叠回线位于 H 型地电模型中间层时, 耦合响应与 K 型地电模型相反; 当低阻地电体存在于 K 型地电模型中, 重叠回线平面法向指向低阻地电体时响应最强。因此, 应用矿井瞬变电磁法时可设计多个探测角度, 使低阻地电体与重叠回线达到最佳耦合, 有利于低阻地电体的识别, 提高矿井瞬变电磁法的探测精度。

**[关键词]** 矿井瞬变电磁; 重叠回线; 耦合响应; 三维正演

**[中图分类号]** P319.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2013) 03-0017-05

## 3-D Forward Simulation for Overlapping Loop Coupling Response of Mine Transient Electromagnetic

ZHAO Jing

(Renlou Colliery, Hengyuan Coal &amp; Power Co., Ltd., Suzhou 235123, China)

**Abstract:** Limited by construction environment, only less-than 3m overlapping loop could be used in mine transient electromagnetic method, its application effect depended on coupling of loop and 3-d geoelectric body. Based on smoking ring effect of transient electromagnetic field and its emission equations used, 3-d time-domain limited difference equations were deduced and coupling response characteristic of overlapping loop was simulated with VC programming. Results showed that if overlapping loop was in medium-layer of K-style geoelectric model, coupling response was strongest when emission line was vertical to stratum and it was weakest when emission line was parallel to stratum. If low-resistance geoelectric body existed in K-style model, coupling response was strongest when overlapping loop's normal directed to low-resistance geoelectric body. Therefore, designing several exploration angels could obtain the best coupling of low-resistance geoelectric body and overlapping loop. It was favorable to distinguish low-resistance geoelectric body and improve exploration precise of mine transient electromagnetic.

**Key words:** mine transient electromagnetic; overlapping loop; coupling response; 3-D forward simulation

瞬变电磁最初的理论研究始于 20 世纪 50 年代的前苏联, 70 年代“烟圈”理论的提出简化了瞬变电磁资料的反演与解释<sup>[1]</sup>, 90 年代瞬变电磁的理论研究开始扩展到了三维空间<sup>[2-6]</sup>。

经过各国学者的不断努力, 在视电阻率定义与计算方面, 逐步解决了瞬变电磁法的视电阻率定义、不同条件下瞬变电磁场的扩散速度公式以及全区视电阻率公式等问题, 提高了全程视电阻率的精度与分辨率<sup>[7-10]</sup>。

实践表明, 矿井瞬变电磁法与地面瞬变电磁法勘探的物理环境明显不同。地面瞬变电磁法的观测装置铺设于地表, 为半空间条件, 探测位于装置下方的地电体, 并可根据实际工作的需要采用大回线

装置以实现深部探测。而矿井瞬变电磁法的观测装置布置在地下几百米深的巷道内, 为全空间条件, 受巷道空间的限制一般采用边长小于 3m 的重叠回线, 探测的地电体一般位于工作面顶、底板或者煤层的某一位置, 在实际施工时通常设计不同角度架设装置来改变探测方向, 实现与目标体的最佳耦合。

自 1998 年起, 矿井瞬变电磁法在探测煤层顶、底板岩层富水性、掘进工作面前方隐伏导(含)水构造、充水钻孔、采空区积水等, 取得了一定的效果<sup>[11-14]</sup>。

为了进一步提高矿井瞬变电磁探测地电体的精度, 需要研究装置与地电体的耦合规律, 包括全空

**[收稿日期]** 2013-03-20

**[基金项目]** 国家重点基础研究发展计划(973) 资助项目: 西部煤炭高强度开采下地质灾害防治与环境保护基础研究(2013CB227900)

**[作者简介]** 赵 晶(1981-), 男, 安徽宿州人, 硕士, 主要从事矿井地球物理勘探方面的工作。

间水平层状均匀介质条件下装置不同设计角度时的响应, 以及低阻地电体与装置的耦合响应规律, 因此, 本文基于“烟圈效应”和扩散方程, 编制时间域有限差分程序, 模拟重叠回线与地电体的耦合响应特征。为完善井下施工方法, 优化井下观测技术, 提高矿井瞬变电磁法资料处理和解释水平提供一定的理论依据。

### 1 三维时域有限差分

#### 1.1 三维有限差分方程

无源区域的电磁场扩散方程可写为 (以磁场分量为例)

$$\nabla^2 H - \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

式中,  $H$  为磁场强度, 单位 A/m;  $\mu$  为磁导率, 单位 H/m;  $\sigma$  为电导率, 单位 S/m。

按照图 1 所示将计算的区域剖成立体网格, 空间连续的磁场值就离散为各个节点处的磁场值。在式 (1) 两边对节点  $H(i, j, k)$  为中心的立方体 (如图 1 中所示的虚线表示的立方体) 体积元  $\Delta V(i, j, k)$  进行体积分

$$\iiint_{V(i, j, k)} \nabla^2 H dV = \iiint_{V(i, j, k)} \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} dV \quad (2)$$

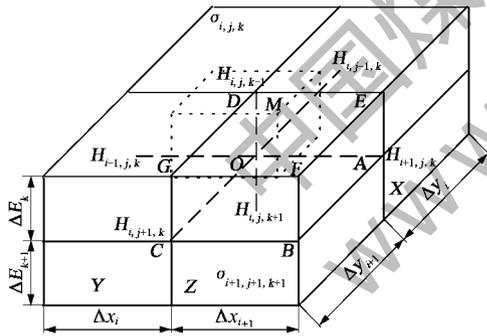


图 1 有限差分网格中的典型节点模型

根据格林公式, 式 (2) 左端关于体积元  $\Delta V(i, j, k)$  的体积分可化为面积分

$$\iiint_{V(i, j, k)} \nabla^2 H dV = \iint_{S(i, j, k)} \frac{\partial H}{\partial q} dS \quad (3)$$

式中,  $S(i, j, k)$  为包围体积元  $\Delta V(i, j, k)$  的封闭曲面,  $q$  为封闭曲面  $S(i, j, k)$  的外法线方向。在第  $n$  个时间步求解空间中每一个网格节点  $H_{i,j,k}^n$  的值。

式 (3) 的右端项可分解为体积元  $\Delta V(i, j, k)$  6 个面的面积分之和, 并用每个侧面中心的中心差分近似代替该侧面上每一点的  $\frac{\partial H_{i,j,k}^n}{\partial q}$  值。

对体积元  $\Delta V(i, j, k)$  的 6 个面求面积分:

$$\begin{aligned} \iint_{S(i, j, k)} \frac{\partial H_{i,j,k}^n}{\partial q} dS \approx & P_{i,j,k} H_{i,j,k}^n + P1_{i,j,k} H_{i-1,j,k}^n + \\ & P2_{i,j,k} H_{i+1,j,k}^n + P3_{i,j,k} H_{i,j-1,k}^n + P4_{i,j,k} H_{i,j+1,k}^n + \\ & P5_{i,j,k} H_{i,j,k-1}^n + P6_{i,j,k} H_{i,j,k+1}^n \end{aligned} \quad (4)$$

式中, 变量上标  $n$  表示时间轴坐标; 下标中的  $i, j$  和  $k$  分别表示  $X$  轴坐标、 $Y$  轴坐标和  $Z$  轴坐标;  $P, P1, P2, P3, P4, P5$  和  $P6$  为连接系数, 表达式为

$$\begin{cases} P1_{i,j,k} = (\Delta y_j \Delta z_k + \Delta y_{j+1} \Delta z_k + \Delta y_j \Delta z_{k+1} + \Delta y_{j+1} \Delta z_{k+1}) / (4\Delta x_i) \\ P2_{i,j,k} = (\Delta y_j \Delta z_k + \Delta y_{j+1} \Delta z_k + \Delta y_j \Delta z_{k+1} + \Delta y_{j+1} \Delta z_{k+1}) / (4\Delta x_{i+1}) \\ P3_{i,j,k} = (\Delta x_i \Delta z_k + \Delta x_{i+1} \Delta z_k + \Delta x_i \Delta z_{k+1} + \Delta x_{i+1} \Delta z_{k+1}) / (4\Delta y_j) \\ P4_{i,j,k} = (\Delta x_i \Delta z_k + \Delta x_{i+1} \Delta z_k + \Delta x_i \Delta z_{k+1} + \Delta x_{i+1} \Delta z_{k+1}) / (4\Delta y_{j+1}) \\ P5_{i,j,k} = (\Delta x_i \Delta y_j + \Delta x_{i+1} \Delta y_j + \Delta x_i \Delta y_{j+1} + \Delta x_{i+1} \Delta y_{j+1}) / (4\Delta z_k) \\ P6_{i,j,k} = (\Delta x_i \Delta y_j + \Delta x_{i+1} \Delta y_j + \Delta x_i \Delta y_{j+1} + \Delta x_{i+1} \Delta y_{j+1}) / (4\Delta z_{k+1}) \\ P_{i,j,k} = -(P1_{i,j,k} + P2_{i,j,k} + P3_{i,j,k} + P4_{i,j,k} + P5_{i,j,k} + P6_{i,j,k}) \end{cases}$$

式中,  $\Delta X, \Delta Y$  和  $\Delta Z$  表示  $X$  轴、 $Y$  轴和  $Z$  轴上的空间网格步长。

对式 (2) 右端体积元  $\Delta V(i, j, k)$  作体积分, 并根据相关文献做近似<sup>[15]</sup>:

$$\iiint_{V(i, j, k)} \mu\sigma \frac{\partial H_{i,j,k}^n}{\partial t} dV \approx P0_{i,j,k} \frac{\partial H_{i,j,k}^n}{\partial t} \quad (5)$$

式中,  $P0_{i,j,k} = \frac{\mu}{8} [\sigma_{i,j,k} \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k + \sigma_{i+1,j,k} \Delta x_{i+1} \Delta y_j \Delta z_k + \sigma_{i,j+1,k} \Delta x_i \Delta y_{j+1} \Delta z_k + \sigma_{i,j,k+1} \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_{k+1} + \sigma_{i+1,j+1,k} \Delta x_{i+1} \Delta y_{j+1} \Delta z_k + \sigma_{i,j+1,k+1} \Delta x_i \Delta y_{j+1} \Delta z_{k+1} + \sigma_{i+1,j,k+1} \Delta x_{i+1} \Delta y_j \Delta z_{k+1} + \sigma_{i+1,j+1,k+1} \Delta x_{i+1} \Delta y_{j+1} \Delta z_{k+1}]$

最后可得

$$\begin{aligned} H_{i,j,k}^{n+1} = & Q_{i,j,k}^n H_{i,j,k}^{n-1} + Q1_{i,j,k}^n H_{i-1,j,k}^n + Q2_{i,j,k}^n H_{i+1,j,k}^n + \\ & Q3_{i,j,k}^n H_{i,j-1,k}^n + Q4_{i,j,k}^n H_{i,j+1,k}^n + Q5_{i,j,k}^n H_{i,j,k-1}^n + Q6_{i,j,k}^n H_{i,j,k+1}^n \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $Q, Q1, Q2, Q3, Q4, Q5$  和  $Q6$  为连接系数, 其上下标含义与前述一致, 表达式为

$$\begin{cases} Q_{i,j,k}^n = (P0_{i,j,k} / \Delta t_n + P_{i,j,k}) / (P0_{i,j,k} / \Delta t_n - P_{i,j,k}) \\ Q1_{i,j,k}^n = 2P1_{i,j,k} / (P0_{i,j,k} / \Delta t_n - P_{i,j,k}) \\ Q2_{i,j,k}^n = 2P2_{i,j,k} / (P0_{i,j,k} / \Delta t_n - P_{i,j,k}) \\ Q3_{i,j,k}^n = 2P3_{i,j,k} / (P0_{i,j,k} / \Delta t_n - P_{i,j,k}) \\ Q4_{i,j,k}^n = 2P4_{i,j,k} / (P0_{i,j,k} / \Delta t_n - P_{i,j,k}) \\ Q5_{i,j,k}^n = 2P5_{i,j,k} / (P0_{i,j,k} / \Delta t_n - P_{i,j,k}) \\ Q6_{i,j,k}^n = 2P6_{i,j,k} / (P0_{i,j,k} / \Delta t_n - P_{i,j,k}) \end{cases}$$

式中,  $\Delta t$  表示时间轴上的时间步长。式 (6) 即为与图 1 对应的扩散方程的七点显式差分格式<sup>[16]</sup>。

#### 1.2 程序流程

程序编制时, 首先划分空间区域, 建立空间网格, 根据要求建立地电模型, 根据磁偶源全空间解析公式计算初始时刻的场值, 即  $t = t_0$  时刻的电场强度; 设置空间步长与时间步长进行有限差分计

算, 计算出  $t = t_1$  时刻的电场强度脉冲响应, 以此类推, 计算出各个时刻的电磁场脉冲响应分量。程序流程如图 2 所示。

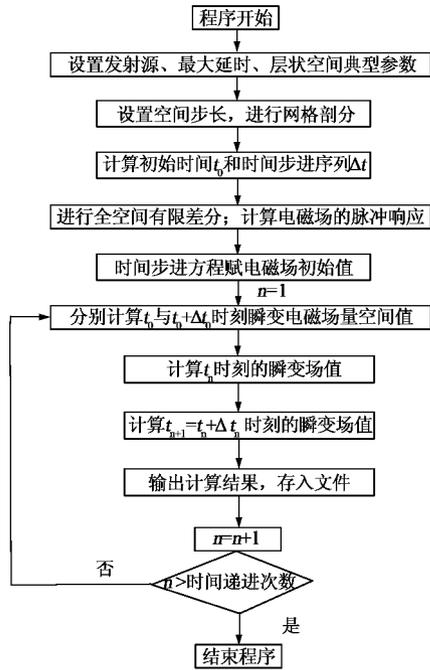


图 2 程序流程

### 1.3 边界条件及网格剖分<sup>[17]</sup>

有限差分法中的边界条件至关重要。在全空间网格剖分中, 其边界条件分外部边界条件 (截断边界条件) 与内部边界条件。

总体来讲, 需要一种截断边界网格点处场的特殊计算方法, 其不仅能保证边界场计算的必要精度, 而且还能大大消除非物理因素引起的入射到截断边界的波的反射, 使得用有限的网络空间就能模拟电磁波在无界空间中的传播。边界上的电磁波可以看成是相应的边界内一个节点处的电磁波经过一个时间步传播到边界上的, 即将第  $n-1$  个时间步中边界内层网点上的场值赋予第  $n$  个时间步中边界面上相应网点上, 对每个边界做类似处理, 并对各个参数设定后, 便可进行模拟均匀全空间中瞬变电磁场响应。

在时域有限差分方程中, 为提高相应计算区域的分辨率, 可以在一些区域使用小网格尺寸 (细网格), 而在其他区域应用粗网格, 以达到节省计算存储量的目的。本文将要计算的异常体由于有几何形状的变化, 所以采用了“子域法” (即在某局部区域使用均匀的细网格, 而在其他区域使用均匀的粗网格)。并且地电体边界处的网格部分尽可能细化, 使其边界能更多地落在网格交线上, 以便更好地进行插值计算。

## 2 耦合响应模拟

### 2.1 水平层状均匀介质耦合响应模拟

煤系地层通常成层分布, 相应的地电断面亦层状分布, 因而激发源与地层的几何关系会改变瞬变电磁场的耦合响应。本节设置 K 型和 H 型地电断面, 分别模拟线框平面与地层界面夹角  $\alpha$  为  $0^\circ$  (磁偶源垂直地层界面)、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  (磁偶源平行地层界面) 时瞬变电磁场的耦合响应, 如图 3, 并总结  $\alpha$  为任意角度时瞬变电磁场的响应规律。

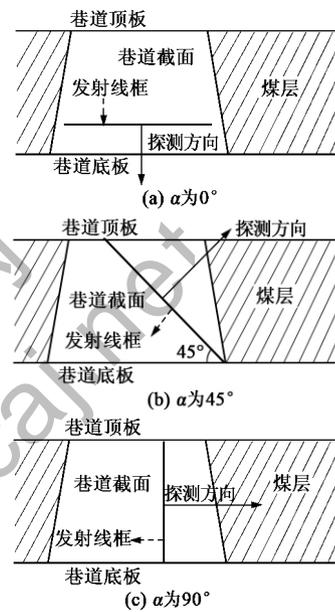


图 3 线框平面与地层夹角

设置 K 型地电断面第一层电阻率为  $10 \Omega \cdot m$ , 第二层电阻率为  $200 \Omega \cdot m$ , 厚度为  $20m$ , 第三层电阻率为  $10 \Omega \cdot m$ ; 设置 H 型地电断面第一层电阻率为  $500 \Omega \cdot m$ , 第二层电阻率为  $10 \Omega \cdot m$ , 厚度为  $20m$ , 第三层电阻率为  $500 \Omega \cdot m$ 。激发源距第一层与第二层分界面、第二层与第三层分界面均为  $10m$ 。

图 4a 和图 4b 分别为 3 种不同激发角度下 K 型和 H 型地电断面瞬变电磁场耦合响应曲线。由图可见 3 条曲线形态大致相同, 都呈衰减趋势, 且曲线比较光滑。不同的是, K 型 3 条曲线首支的值相差较小, 然后差别逐渐增大。当  $\alpha$  为  $0^\circ$  时激发的感应电动势最大,  $\alpha$  为  $45^\circ$  时次之,  $\alpha$  为  $90^\circ$  激发的感应电动势最小。H 型 3 条曲线中,  $\alpha$  为  $90^\circ$  时激发的感应电动势最大,  $\alpha$  为  $45^\circ$  时次之,  $\alpha$  为  $0^\circ$  激发的感应电动势最小。

地电体被激励所感应的二次涡流场强弱取决于地电体所切割的一次脉冲磁场磁力线的多少, 二次场的大小与地电体的电性有关: 低阻电体感应二次

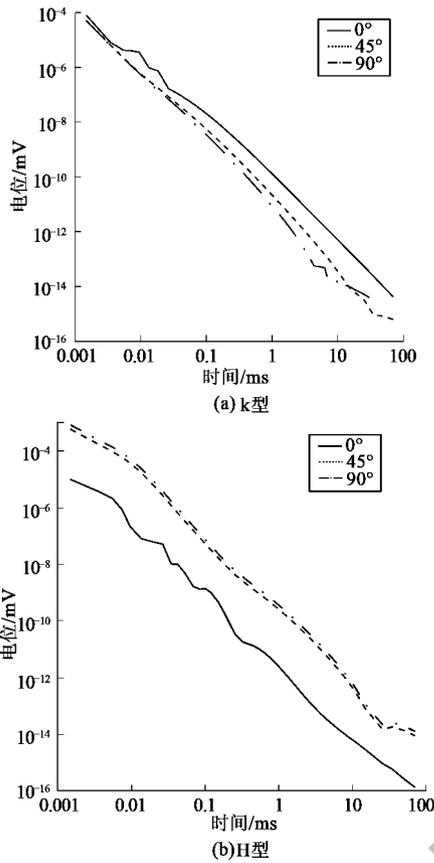


图 4 不同角度下水平均匀层状介质耦合响应曲线

场衰减较慢，二次场电压较大；高阻电体感应二次场衰减较快，二次场电压较小。因此对于 K 型地电断面，当  $\alpha$  为  $0^\circ$  时，一次场扩散范围内低阻介质切割的磁力线多，高阻介质切割的磁力线少，低阻地电体感应二次场衰减较慢，其感应电动势较大； $\alpha$  为  $90^\circ$  时高阻介质切割的磁力线较多，低阻介质切割的磁力线少，高阻地电体感应二次场衰减较快，感应电动势较小； $\alpha$  为  $45^\circ$  时感应电动势介于两者之间。对于 H 型地电断面，在  $0.01\text{ms}$  前 3 条曲线衰减幅度较小，此时电磁场集中在源附近且没有扩散到高阻层，由于发射源位于低阻层中间，受低阻层吸引作用，低阻地电体感应二次场衰减较慢。以后由于电磁场扩散到高阻地层中，地电体感应二次场衰减较快，所以下降趋势加快。当  $\alpha$  为  $0^\circ$  激发时，一次场范围内高阻地层介质切割的磁力线多，高阻地电体感应二次场衰减较快，其感应电动势较小； $\alpha$  为  $90^\circ$  时低阻地层介质切割的磁力线较多，低阻地电体感应二次场衰减较慢，感应电动势较大； $\alpha$  为  $45^\circ$  时感应电动势介于两者之间。

### 2.2 含低阻地电体水平层状介质耦合响应模拟

限于篇幅，同时考虑到煤层相对于围岩为高阻

岩层，本节仅模拟 K 型地电断面中存在异常的情况。设置异常为低阻地电体，电阻率参数为  $0.1\Omega \cdot \text{m}$ ，大小为  $10\text{m} \times 10\text{m} \times 30\text{m}$ ，分别模拟低阻地电体位于工作面底板、顶板和顺层（煤层）距激发源同一距离下的耦合响应。模拟过程中，设置线框平面与地层夹角分  $0^\circ$ ， $45^\circ$  和  $90^\circ$ ，如图 5 所示。

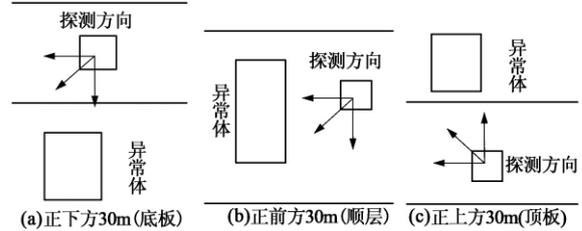


图 5 低阻地电体位置示意

图 6 为线框所在平面与地层界面夹角  $\alpha$  为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  这 3 种激发角度时瞬变磁场耦合响应曲线。

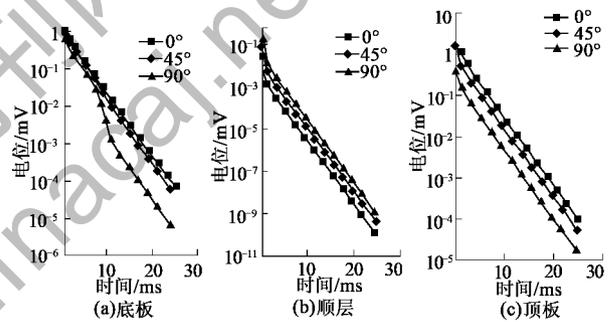


图 6 不同角度下水平均匀层状介质含低阻地电体耦合响应曲线

图 6a 中 3 条曲线形态大致相同， $10\text{ms}$  左右以后曲线衰减幅度变快。在曲线首支，线框正下方存在低阻异常体，其感应二次场衰减较慢，随着时间推移，电磁场扩散出低阻异常体进入到高阻地层介质，此时感应电动势衰减变快。穿过低阻地电体磁力线越多，感应的二次涡流场强，耦合程度越高。K 型地电断面中，低阻地电体在发射接收点正下方，所以  $\alpha$  为  $0^\circ$  时低阻地电体切割的磁力线比其他 2 种激发角度下的要多，所感应的二次场也最强， $\alpha$  为  $90^\circ$  时低阻异常体切割的磁力线最少，感应的二次场也最弱，曲线尾支响应幅值比  $0^\circ$  曲线约小一个数量级。

图 6b 中 3 条曲线首支衰减缓慢， $5\text{ms}$  左右以后曲线衰减幅度变快，在曲线首支，线框正前方存在低阻异常体，其感应二次场衰减较慢，随着时间推移，电磁场扩散出低阻地电体进入到高阻地层介质，此时感应电动势衰减变快。当  $\alpha$  为  $90^\circ$  时响应

幅值最大,  $\alpha$  为  $0^\circ$  时的响应幅值最弱。

图 6c 中 3 条曲线形态比较光滑, 首支衰减缓慢, 6ms 左右以后衰减幅度增大, 在曲线首支, 线框正上方存在低阻异常体, 其感应二次场衰减较慢, 随着时间推移, 电磁场扩散出低阻异常体进入到高阻地层介质, 此时感应电动势衰减变快。当  $\alpha$  为  $0^\circ$  时的响应幅值最大;  $\alpha$  为  $90^\circ$  时的响应幅值最弱;  $\alpha$  为  $45^\circ$  激发时响应幅值次之。

垂直地层界面激发探测方向的响应强度最强, 类似于异常体在底板正下方时的情况 (图 6a), 也就是在这个探测方向线圈与异常体耦合程度最好, 感应的二次场最强。

### 3 实例

淮北某矿 363 回风巷掘进过程中, 巷道右前方施工钻孔时出现不同程度的渗水, 为保证巷道的安全掘进, 查明巷道前方一定范围内岩层的富水情况, 提前采取防治水措施, 决定采用矿井瞬变电磁法对掘进巷道前方进行超前物探。根据矿井的实际条件, 沿巷道迎头从左至右布置 15 个探测角度, 每个探测角度分顺层 ( $90^\circ$ ) 和底板 ( $45^\circ$ ) 2 个探测方向, 实现对巷道掘进前方区域的覆盖。图 7 为矿井瞬变电磁顺层和底板探测的结果, 图中的横坐标代表探测范围 (由迎头断面的左帮向右帮进行扫描探测; 纵坐标代表探测深度, 单位均为 m)。

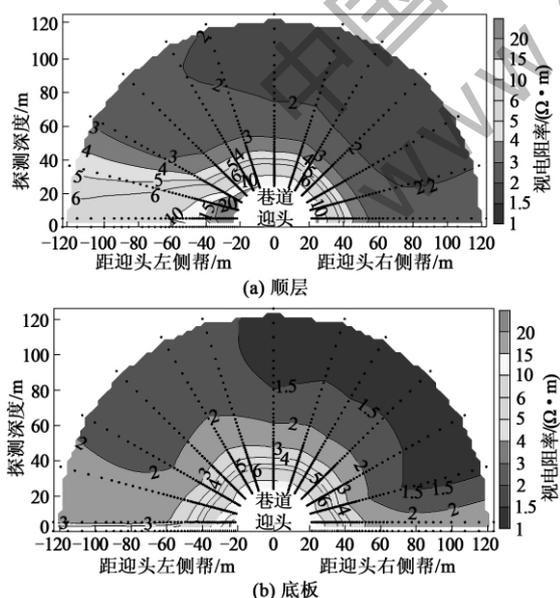


图 7 363 回风巷探测结果

分析图 7 两图可知, 在巷道迎头右前方出现明显的低阻区域, 根据数值模拟结果, 推断巷道迎头右前方存在相应的低阻地电体, 使得右前方探测角

度瞬变电磁耦合响应较强, 综合解释为 363 回风巷迎头前方及其底板下岩层赋水裂隙发育, 特别是迎头前方和右侧及其底板赋水性强, 与深部岩层有明显水力联系。

矿方在迎头右前方俯角  $30^\circ$  和  $45^\circ$  布设探放水钻孔, 两孔终孔深度为 110m 和 80m, 在垂深 55m 左右瞬时水量增大, 表明底板以下 50m 深度左右岩层赋水裂隙较为发育, 与深部岩层水力存在一定联系, 验证了矿井瞬变电磁探测的准确性, 间接证明了底板低阻地电体与瞬变电磁场耦合响应较强的特点。

### 4 结论

(1) 地层介质被激励所感应的二次涡流场强弱决定于地层介质所切割的一次脉冲磁场磁力线的多少, 二次场的大小与地下介质的电性有关: 低阻地电体感应二次场衰减较慢, 二次场电压较大; 高阻地电体感应二次场衰减较快, 二次场电压较小。当改变发射线框角度 (即改变夹角  $\alpha$  的大小), 模拟在不同角度下的磁场变化, 其变化趋势大致相同, 只是量值的变化。

(2) 全空间水平层状均匀介质中三维低阻地电体电磁场耦合响应规律基本一致, 都呈衰减状态。低阻地电体位于线框正下方, 垂直地层激发 (即线框所在平面与地层界面夹角  $\alpha$  为  $0^\circ$ ) 时, 耦合程度最好; 低阻地电体位于第二层介质, 在线框正前方, 平行地层界面激发 (夹角  $\alpha$  为  $90^\circ$ ) 时, 耦合程度最好; 低阻地电体位于第一层介质, 位于线框正上方, 垂直地层界面激发 (夹角  $\alpha$  为  $0^\circ$ ) 时, 耦合程度最好, 接收到的感应电动势最强。

(3) 若改变线框的架设方位 (即改变夹角  $\alpha$  的大小) 来改变探测方向, 低阻地电体切割的磁力线数量会发生变化, 因而接收到的感应电动势大小也会发生变化。随着线框与低阻地电体耦合程度不同, 曲线值大小也不同。

### [参考文献]

- [1] Morrison H F, Phillips R J, O'brien D P. Quantitative Interpretation of Transient Electromagnetic Fields Over a Layered Half SPACE [J]. Geophysical prospecting, 2006, 17 (1): 82-101.
- [2] 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 (S): 486-492.
- [3] 鲍光淑, 张碧星, 敬荣中, 等. 三维电磁响应积分方程数值模拟 [J]. 中南工业大学学报, 1999, 30 (5): 472-474.

(下转 36 页)

## 5 结束语

本文的目的是希望通过对煤机装备多生命周期绿色再制造性相关基本概念的介绍,使广大煤机制造厂及研究院所对煤机装备多生命周期绿色再制造性的定义、内涵、地位和作用,及其基本的研究理论体系有一个正确的认识,以辅助企业制定和实施其产品再制造。

## [参考文献]

- [1] 朱 胜,姚巨坤. 基于再制造的装备多寿命周期工程 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2009 (4).
- [2] 陈 庄,刘 飞,陈晓慧. 基于绿色制造的产品多生命周期工程 [J]. 中国机械工程, 1999, 10 (2).
- [3] Lund R, Skeels F. Guidelines for an original equipment manufacturer starting a remanufacturing operation, Government Report, DOE/CS/40192, CPA-83-8 [R]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, Center for Policy Alternatives, 1983.
- [4] Lund R. Remanufacturing [J]. Technol Rev 1984, 87 (2): 19-23, 28-29.
- [5] Navin-Chandra D. Restar: a design tool for the environmental recovery analysis [C]. ICED93: Int Conf on Engineering Design, The Hague, The Netherlands: Heurista, 1993.
- [6] Amezcua T, Hammond RM, Salazar M, Bras B. Characterizing the remanufacturability of engineering systems. 21st Annual Design Automation Conf [C]. vol. 82, New York: ASME, DE, 1995.
- [7] Bras B., Hammond R. Design for remanufacturing metrics. In: Deron A, Douwe-Flapper S, editors. Proceedings of the 1st International Workshop on Reuse, Eindhoven, The Netherlands, 1996.
- [8] McIntosh M, Bras B. Addressing rapid innovation and mass customization challenges in an integrated manufacturing reorganization [A]. The 5th Int Congress on Environmentally Conscious Design and Manufacturing. Rochester Institute of Technology [C]. Rochester, NY, 1998 (6): 16-17.
- [9] McIntosh M, Bras B. Determining the value of remanufacture in an integrated manufacturing-remanufacturing organization [A]. Paper No. 98DETC-DFM5750, 1998 Design for Manufacture Symposium, 1998 ASME Design Engineering Tech Confs and Computers in Engineering Conf [C]. Atlanta, GA, 1998 (9): 13-16.
- [10] Steinhilper R. Remanufacturing: The Ultimate Form of Recycling [M]. Fraunhofer IRB Verlag, 1998: 86.
- [11] Lily h Shu, Woodie C. Flowers. Application of a design-for-remanufacture framework to the selection of product life-cycle fastening and joining methods [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 1999 (15): 179-190.
- [12] Ruud H Teunter, Dimitrios Vlachos. On the necessity of a disposal option for returned items that can be remanufactured [J]. Int. J. Production Economics, 2002 (75): 257-268.
- [13] 徐滨士,马世宁,刘世参,等. 绿色再制造工程设计基础及其关键技术 [J]. 中国表面工程, 2001 (2): 12-15.
- [14] 朱 胜,徐滨士,姚巨坤. 再制造设计基础及方法 [J]. 中国表面工程, 2003 (3): 27-31.
- [15] 张国庆,荆学东,浦耿强,等. 产品可再制造性评价方法与模型 [J]. 上海交通大学学报, 2005 (9): 1431-1436.
- [16] 张国庆. 零件剩余疲劳寿命预测方法与产品可再制造性评估研究 [D]. 上海交通大学, 2007.
- [17] 钟骏杰,范世东,姚玉南,等. 再制造性综合评估研究 [J]. 中国机械工程, 2003 (12): 2110-2114.
- [18] 申立艳. 机电产品的可再制造性评价研究 [M]. 济南: 山东大学, 2008.
- [19] 王晶晶. 机电产品再制造性评价研究 [M]. 郑州: 郑州大学, 2009.
- [20] 毛果平,朱有为,吴 超. 废旧机电产品再制造性评估模型研究 [J]. 现代制造工程, 2009 (6): 114-118.
- [21] 吴小艳. 面向再制造的产品绿色模块化设计研究 [J]. 经济研究导刊, 2011 (26): 270-272.
- [22] 李 娟,梁工谦. 质量驱动再制造产品设计研究 [J]. 航空制造技术, 2012 (5): 66-73.
- [23] 侯杰泰,温忠麟. 结构方程模型及其应用 (第1版) [M]. 北京: 教育科学出版社, 2006. [责任编辑: 邹正立]
- [4] 唐新功,胡良俊,严良俊. 层状地层中三维薄板的瞬变电磁响应 [J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35 (5): 628-633.
- [5] 宋维琪. 3D 瞬变电磁场有限差分正演计算 [J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35 (6): 751-756.
- [6] 谭捍东,余钦范, John Booker, 等. 大地电磁法三维交错采样有限差分数值模拟 [J]. 地球物理学报, 2003, 46 (5).
- [7] 苏朱刘,胡文宝. 中心回线方式瞬变电磁测深虚拟全区视电阻率和一维反演方法 [J]. 石油物探, 2002, 41 (2).
- [8] 宋先旺,姜胜华. 瞬变电磁法全期视电阻率视深度求解方法与应用 [J]. 矿产与地质, 1997, 41 (2): 129-135.
- [9] 白登海. 时间域瞬变电磁法中心方式全程视电阻率的数值计算 [J]. 地球物理学报, 2003, 46 (5): 697-704.
- [10] 翁爱华,陆冬华. 利用连分式定义瞬变电磁法全区视电阻率研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31 (3): 56-59.
- [11] 岳建华,姜志海. 矿井瞬变电磁探测技术与应用 [J]. 能源科技与管理, 2006 (5): 72-75.
- [12] 于景邨,刘志新,汤金云. 用瞬变电磁法探查综放工作面顶板水体的研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36 (4).
- [13] 于景邨,刘志新,岳建华. 煤矿深部开采中的地球物理技术现状及展望 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22 (2).
- [14] 刘志新,岳建华,刘仰光. 矿井物探技术在突水预测中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2007, 4 (1): 9-14.
- [15] 魏宝君,张庚骥. 三维井间电磁场的正反演计算 [J]. 地球物理学报, 2002, 45 (5): 735-743.
- [16] 周仕新,岳建华. 矿井中瞬变电磁场三维时域有限差分模拟 [J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28 (6): 408-412.
- [17] 王长清,祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分法 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1994. [责任编辑: 施虹霞]