文章编号：0253 - 9993(2005)02 - 0160 - 04

瞬变电磁勘探中的低阻层屏蔽问题

石显新，闫　述，陈明生

（煤炭科学研究总院 西安分院，陕西 西安　710054）

摘　要：分析了华北型煤田地层的电阻率特点，用时域有限差分法和 G - S 算法分别对理论模型和皖北煤电集团公司任楼煤矿的勘探实例作了数值与解析分析，证明低阻层对瞬变电磁探测是屏蔽层，当低阻层覆盖在探测目标之上时，要探测同样的深度需更长的观测时间，由此降低了晚期信号的信噪比，因此现场施工应选择合理的设计参数并有必要研制用于煤田水文地质勘探的大功率仪器.

关键词：瞬变电磁勘探；低阻层；屏蔽；时域有限差分法

中图分类号：P631.325　　**文献标识码**：A

Study on screening of conductive bed in transient electromagnetic prospecting

SHI Xian-xin，YAN Shu，CHEN Ming-sheng

（*Xi'an Branch*，*China Coal Reseach Institute*，*Xi'an*　710054，*China*）

Abstract：Analyzed resistivity characteristics of stratum in Huabei coal field，and established numerical analysis by finite-difference time-domain method for two-dimensional transient field excited by a negative step pulse and analytic analysis by G - S method for a prospecting example in the Renlou Mine，Wanbei Coal and Power Group Co.，LTD. The theoretical research and numerical calculations indicated that the conductive bed is screening to transient electromagnetic field，the longer time is needed to detecting the same depth where conductive overburden exists and a decrease in transient fields for conductive overburden. Therefore，it is very important to choose from suitable parameters in transient electromagnetic prospecting，and develop a transient electromagnetic instrument with high power.

Key words：fransient electromagnetic prospecting；conductive bed；screen；finite-difference time-domain method

瞬变电磁法（称 TEM）是近年来发展很快、并得到广泛应用的一种时间域电磁勘探方法. 由于这种方法观测的是纯二次场，可采用重叠回线或中心回线装置在近区进行观测，具有对低阻含水体特别灵敏、受体积效应影响小、纵横向分辨率高，且施工方便、快捷、效率高等优点，被普遍认为是水文地质勘查中最有前景的地球物理勘探方法之一[1]. 与直流电法相比，TEM 能克服高阻屏蔽层的影响，在接地困难如坚硬裸露的岩石、水泥地面等直流电法无法施工的场地，应用 TEM 仍可取得良好的探测效果. 目前，对于 TEM 的原理、探测成果等已有大量的文献[2~5]. 但这些文献着重讨论该方法对高阻层的穿透能力，对于低阻层的影响却很少提及. 实际上，当低阻层覆盖在勘探目的层之上时，低阻层对瞬变电磁场具有屏蔽作用. 特别当地表为低阻层时，将会对 TEM 的探测深度有很大的影响，此时，TEM 勘探所需的探测时间加长，导致晚期资料的信噪比下降. 因此，低阻层对瞬变电磁勘探的影响应引起高度重视.

收稿日期：2004 - 11 - 01
基金项目：国家自然科学基金资助项目（40374052）
作者简介：石显新（1967 - ），男，贵州湄潭人，博士研究生，研究员. Tel：029 - 87862231，E - mail：Shixx-red008@163.net

1　华北型煤田煤系地层特点及其电阻率

华北型煤田水文地质勘探是目前 TEM 应用的一个热点. 华北型煤田煤系地层的共同特点是：煤系地层直接位于奥陶系灰岩之上，中间缺失志留纪、泥盆纪及石炭纪下统达两个半世纪的沉积. 因此，奥灰中的岩溶裂隙很容易向上发展成陷落柱，造成突水淹井事故，是重点探测对象. 此外，探明新地层底部含水层、煤系砂岩中的裂隙水、石炭系太原组灰岩中的岩溶水以及井田内断层的含导水情况等都是电法勘探的任务. 为解决上述水文地质问题，勘探深度需达到奥灰顶界面（800 ~ 1 200 m）才能实现：以奥灰顶界面作为电性标志层，向上逐层推断各含水层位，准确定位；将含水陷落柱和其它含水体或富水区区别开. 华北型煤田煤系地层的另一个特点是上覆有第三、第四纪沉积新地层，如皖北地区，其厚度 200 ~ 600 m，电阻率较低，一般小于 20 Ω · m；再如河北邢台，新地层厚度约 160 m、电阻率约为 15 Ω · m. 在此种地电条件下，低阻覆盖层对 TEM 勘探的影响不能不考虑. 因在大勘探深度下，若对低阻层的屏蔽作用不了解，往往达不到预想的勘探深度或不能采集到足够信噪比的信号，以致不能取得良好的探测效果.

2　低阻层对瞬变电磁场屏蔽作用的数值分析

2.1　时域有限差分法简介

为了解瞬变电磁场在地下随时间的传播（扩散）过程及低阻层对瞬变场的影响，采用时域有限差分法（简称 FDTD）对时域 Maxwell 方程进行直接模拟. TEM 属时间域电磁法，其基本规律可用时域 Maxwell 方程来描述. 设大地为线性、各向同性、非磁性的导电媒质，在准静态近似下，无源 Maxwell 方程为

$$\nabla \times E(\boldsymbol{r}, t) = -\mu \frac{\partial H(\boldsymbol{r}, t)}{\partial t}, \tag{1}$$

$$\nabla \times H(\boldsymbol{r}, t) = J(\boldsymbol{r}, t), \tag{2}$$

$$\nabla \cdot E(\boldsymbol{r}, t) = 0, \quad \nabla \cdot H(\boldsymbol{r}, t) = 0,$$

及电磁特性方程

$$J(\boldsymbol{r}, t) = \sigma(\boldsymbol{r}) E(\boldsymbol{r}, t),$$

式中，$\nabla \times$ 表示旋度；$\nabla \cdot$ 表示散度，$E(\boldsymbol{r}, t)$，$H(\boldsymbol{r}, t)$，$J(\boldsymbol{r}, t)$，μ，$\sigma(\boldsymbol{r})$ 分别为电场强度、磁场强度、电流密度、磁导率和电导率；$\boldsymbol{r}$ 为空间矢量；t 为时间.

直接时域有限差分法[6] 的出发点是概括电磁场普遍规律的 Maxwell 方程，不再需要导出任何方程，即保持 Maxwell 旋度方程中的时间变量，不经变换直接在时 – 空域中求解，只用微分的差商近似，避免了使用更多的数学工具. 就差商对微分的逼近程度而言，在差商的 3 种形式即向前、向后、中心差分中，中心差商的精度最高. 因此，FDTD 一般应用的是中心差商. 但一种逼近程度高的差分格式，并不一定能给出好的近似解，这是因为一个合理的差分格式还必须保持原问题的基本物理性质. K. S. Yee[2] 提出了一种合理的网格体系（Yee 氏网格），成功地创立了计算电磁场的时域有限差分法. Yee 氏网格体系的特点是，电场和磁场各分量在空间的取值点被交叉放置，使每个坐标平面上每个电场分量的四周被磁场分量环绕，同时每个磁场分量的四周由电场分量环绕. 这样的电磁场空间配置符合电磁场的基本规律，即式（1）的 Faraday 电磁感应定律和式（2）的 Ampere 环路定理，因而符合电磁场在空间的传播规律. 现 FDTD 的计算程序已十分规范，通用性很强，可直接拿来使用. 只是对于地球物理场计算中的特殊问题，如源的引入、地 – 空边界的处理、准静态近似引起的电场与磁场之间的解耦等采用了一些技巧[3,4].

2.2　低阻层对瞬变电磁场的屏蔽作用

（1）均匀半空间中低阻异常体的瞬变电磁响应特征　用二维 FDTD 模拟均匀半空间中低阻异常体对瞬变电磁场的时域响应. 假定均匀大地的电阻率为 300 Ω · m，二维低阻异常体电阻率为 5 Ω · m，沿 y 轴方向无限延伸，竖直异常体宽 20 m、高 100 m、顶部埋深 100 m，水平异常体宽 20 m、长 100 m、顶部埋深 100 m，如图 1 所示. 图中 + I 和 – I 分别表示无限长电流发射线框的正源和负源. 由图 1 可知，在低阻

异常体处瞬变电场（单位：μV/m）等值线发生显著畸变，异常体赋存形态不同，等值线的变化也不同，但都是吸引电流线向低阻体聚集，在其中激发出密度较大的涡流场. 瞬变场对低阻体的敏感性是进行煤田水文地质勘探的依据. 在对低阻体敏感的同时也会看到，由于低阻体对电场的吸引，使得图 1 中低阻体左右两侧电场等值线向下延伸的程度不同，无低阻体一侧的场能达到更深的地下. 所以，当低阻体范围很大形成覆盖层时，很可能会阻止瞬变场向下传播，造成屏蔽.

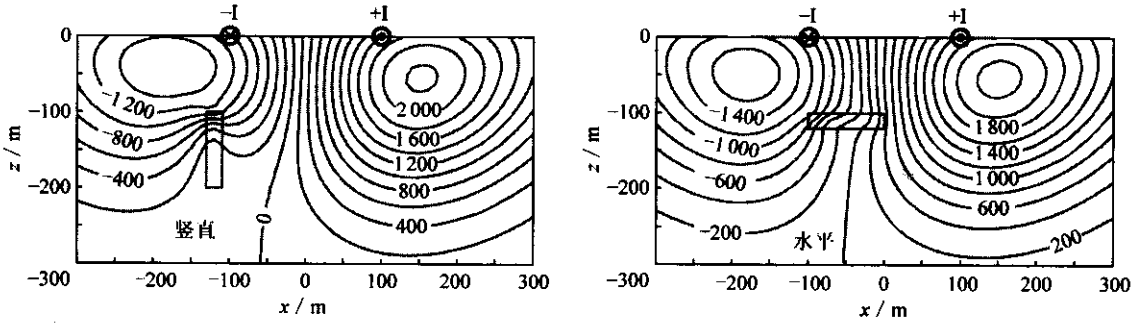


图 1 均匀大地中含低阻体的瞬变电场 0.03 ms 时刻等值线

Fig. 1 Electrical field contour map at 0.03 ms in uniform earth with a conductor

（2）低阻覆盖层对瞬变电磁场的屏蔽作用 对图 1 的模型加上厚为 40 m、电阻率为 10 Ω·m 的低阻覆盖层后，仍采用 0.03 ms 的观测延时时间，由图 2（a）可见，此时电场等值线大部分集中在此覆盖层

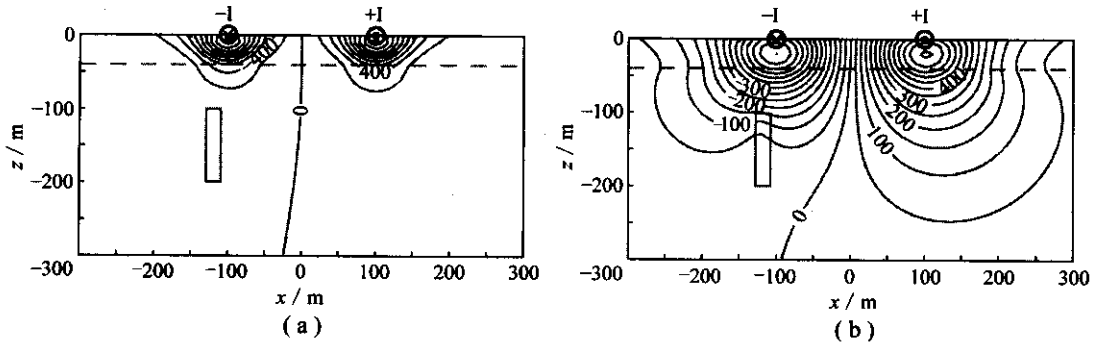


图 2 有覆盖层时低阻体的瞬变电场等值线

Fig. 2 Electrical field contour map in uniform earth with overburden and a conductor

中，它延缓了场向地下的传播. 除零值等值线受低阻体的吸引稍向左偏移外，场还尚未到达目标体. 当把观测时间增加到 0.10 ms 时（图 2（b））, 在异常体处才出现图 1 在 0.03 ms 时场的变化情况，而且，其变化的幅度较小. 在图 2（b）中上覆低阻层仍然吸引了大部分的涡流. 由此可见，上覆低阻层减小了瞬变场的扩散速度，减弱了其下异常体的异常反映，屏蔽了场. 要探测同样的深度，有低阻覆盖层存在时，需要更长的观测时间.

3 应用实例

如前所述，安徽皖北地区新地层的厚度较大，且电阻率低. 表 1 为根据任楼煤矿 40_{12} 钻孔（电测井采用视电阻率电位法）和 $39-40_3$ 号钻孔（电测井采用三侧向电阻率方法）综合柱状图给出的简化地电模型，表中电阻率为 500 Ω·m 的层位是奥陶系基底. 由于观测在地表进行，笔者用 G-S 算法正演模拟了表 1 所示地电模型在地面上的响应，结果见表 2. 根据表 2 的响应，可以反演出视电阻率和视深度，见表 3. 由表 3

表 1 地电模型

Table 1 The geoelectric models

模 型 1		模 型 2	
电阻率/Ω·m	厚度/m	电阻率/Ω·m	厚度/m
20	250	20	250
50	280	50	280
30	120	30	120
50	250	50	250
500		30	100
		500	

可见，探测 1 000 m 深度，观测时间需 70 ms 左右. 表 2 表明，从 1 ~ 70 ms 瞬变场信号衰减了 4 个数量级. 因此，需要在正式施工前先进行信号噪声试验，以确定是否能够达到预定的探测深度. 笔者在皖北煤电集团公司任楼煤矿进行了 TEM 试验，结果证明，施工区电磁干扰较严重，在工区的地质条件和噪声干扰水平情况下，由于受仪器功率的限制，TEM 无法取得足够信噪比的信号，不能达到预定的勘探深度. 因此，改换频率域的可控源声频大地电磁测深法（简称 CSAMT）进行探测.

表 2　任楼煤矿 TEM 正演结果

Table 2　The positive results of TEM in the Renlou Mine

序号	时间 /ms	模型 1 的感生电动势 /μV·A^{-1}	模型 2 的感生电动势 /μV·A^{-1}
1	1	3.96×10^{-2}	3.89×10^{-2}
2	10	4.27×10^{-4}	4.24×10^{-4}
3	20	6.87×10^{-5}	6.93×10^{-5}
4	30	2.19×10^{-5}	2.28×10^{-5}
5	40	9.39×10^{-6}	1.00×10^{-5}
6	50	4.77×10^{-6}	5.21×10^{-6}
7	60	2.71×10^{-6}	3.01×10^{-6}
8	70	1.65×10^{-6}	1.87×10^{-6}
9	80	1.08×10^{-6}	1.23×10^{-6}
10	90	7.42×10^{-7}	8.53×10^{-7}
11	100	5.26×10^{-7}	6.10×10^{-7}

注：模型 1，2 发射线圈边长为 600 m，接收线圈边长为 10 m，发射电流为 1 A.

表 3　任楼煤矿 TEM 反演结果

Table 3　The inversion results of TEM in the Renlou Mine

序号	对应时间 /ms	模型 1		模型 2	
		视深度 /m	视电阻率 /Ω·m	视深度 /m	视电阻率 /Ω·m
1	1	-87.0	19.0	-87.0	19.0
2	10	-303.8	23.1	-304.6	23.3
3	20	-459.2	26.5	-457.5	26.3
4	30	-592.8	29.4	-584.6	28.6
5	40	-718.3	32.4	-702.1	30.9
6	50	-838.4	35.3	-813.7	33.2
7	60	-954.0	38.1	-920.9	35.5
8	70	-1 067.3	40.9	-1 025.5	37.7
9	80	-1 176.9	43.5	-1 127.7	39.9
10	90	-1 288.0	46.3	-1 226.2	41.9
11	100	-1 392.6	48.7	-1 325.7	44.1

4　结　论

瞬变电磁场在地下的扩散速度受介质电阻率的影响，在高阻体中扩散速度快，在低阻体中扩散速度慢. 故存在低阻覆盖层时，探测同样的深度需要更长的延迟时间. 瞬态信号是随时间衰减的信号，过长的观测时间会使晚期时段的信噪比降低，在存在低阻覆盖层、且厚度较大的地区，要取得勘探效果，必须加大仪器发射功率，因此，研制适合煤系地层探测用的大功率仪器有实际意义. 在煤系地层特别是华北地区开展 TEM 施工时，必须根据工区地电特征进行正反演，获得合理的施工参数，否则难以取得好的勘探效果. 本文的结论不仅适用于华北型煤系地层（上覆低阻层与大探测深度）的 TEM 勘探，而且在海上石油和水上煤田电磁法勘探中也同样适用.

参考文献：

[1]　蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探 [M]. 北京：地质出版社，1998.

[2]　Lee T，Thomas L. The transient electromagnetic response of a polarizable sphere in a conducting half space [J]. Geophys. Prosp.，1992，40：541 ~ 563.

[3]　Oristaglio M L，Hohmann G W. Diffusion of electromagnetic fields into a two dimensional earth：A finite - difference approach [J]. Geophysics，1984，49 (7)：870 ~ 894.

[4]　Wang Tsili，Hohmann G W. A finite - difference time - domain solution for three - dimensional electromagnetic modeling [J]. Geophysics，1993，58 (6)：797 ~ 817.

[5]　Reid J E，Macnae J C. Comments on the electromagnetic“smoke ring”concept [J]. Geophysics，1998，63 (6)：1 908 ~ 1 913.

[6]　王长清，祝西礼. 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.