

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. 地球物理学报, 2013, 56(1): 255-261, doi: 10. 6038/cjg20130126.

Xue G Q, Chen W Y, Zhou N N, et al. Short-offset TEM technique with a grounded wire source for deep sounding. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(1): 255-261, doi: 10. 6038/cjg20130126.

接地源瞬变电磁短偏移深部探测技术

薛国强, 陈卫营, 周楠楠, 李 海

中国科学院矿产资源研究重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘 要 对于接地源时间域瞬变电磁法, 当选取适当的激励波形后, 可将辐射场与自有场分离开来, 实现频率域电磁法无法实现的近源深部勘探; 水平分层大地的解析分析表明, 随着偏移距的缩短, 接地导线源的场对地层的反映变得更为灵敏; 时间域瞬变电磁法的探测深度主要由观测时长决定. 基于接地源近场测深的优越性, 作者提出短偏移瞬变电磁探测技术并首次命名为 SOTEM, 采用了 1000 m 的偏移距对埋深为 1400 m 的某盐矿溶腔进行探测, 在全期视电阻率-深度剖面上圈定的溶腔分布被钻孔所揭露, 验证了 SOTEM 方法的探测能力. 该方法为大深度、高分辨探测地下矿产资源提供了新的技术手段.

关键词 接地导线源, 瞬变电磁法, 短偏移, 深部探测

doi: 10. 6038/cjg20130126

中图分类号 P631

收稿日期 2011-11-01, 2012-10-17 收修定稿

Short-offset TEM technique with a grounded wire source for deep sounding

XUE Guo-Qiang, CHEN Wei-Ying, ZHOU Nan-Nan, LI Hai

Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract Although the loop-source TEM near-field survey system has been widely used, this method still cannot meet the demand for large-area 3D data acquisition and fine probing of deep ore bodies. Based on the advantage of near-field survey, a new configuration called short-offset TEM with a grounded wire-source (named SOTEM by authors) has been proposed and the detecting technique has been studied to solve the problem of detecting underground deep ore targets at high resolution. Analysis of the detection capability of this system such as time-domain response as well as investigation depth suggests that the SOTEM has more merits than the long-offset TEM (LOTEM). Apparent resistivity formula suiting for whole field area has been used to calculate apparent resistivity response of geo-electric models in the short-offset TEM system and the results are consistent with that of the designed geo-electric models. The field data have been collected and the results agree with the drilling data. It is concluded that the proposed method is more easily in exploration and has larger detecting depths and higher detection accuracy. It also shows that the SOTEM is a kind of methods worth to be widely applied.

Keywords Grounded wire source, TEM, Short-offset, Deep sounding

1 引 言

随着矿产资源日益减少, 深部探矿已成为矿产

勘查的一个主要方向. 在现有仪器装备基础上, 深入开展新方法、新技术研究, 是解决新一轮深部探矿战略需求问题的途径之一. 在各种深部电磁探矿方法中, 长偏移距瞬变电磁(Long Offset Transient

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973计划 2012CB416605), 国家自然科学基金(41174090, 41174108)资助.

作者简介 薛国强, 男, 1966年生, 副研究员, 主要从事瞬变电磁场理论与应用研究. E-mail: ppxueguoqiang@163.com

Electromagnetic, LOTEM)方法一直发挥着重要作用^[1-8]. 这种方法的深部探矿能力主要来源于较长的观测时长(1000 ms 以内),使场从地面到目标体有足够的“往返”时间和辨认异常的分离时间;此外,1000~2000 m 或更长的接地导线,可以获得较高的信噪比和提供满足接收机灵敏度的信号强度. 与在水平层状大地上仅激发水平电场、探测低阻层有利的回线源相比,接地导线源既有水平分量电场,还可在电性界面产生感应电荷的垂直分量电场^[9],对不同电阻率的矿藏^[10]有广泛的适用性,而且较易在地形复杂地区敷设. 和可控源音频大地电磁(Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric, CSAMT)法类似,LOTEM 收发间距一般取等于4~6倍的探测深度,以便分离一次场. 但是可能跨越了几个构造单元的长偏移存在记录点问题、体积效应较大,增加了解释结果的不确定性,故在1970和1980年代前苏联和美国都有关于短偏移距的研究与试验^[11-15],到2010年又有短偏移距的专利^[16]出现. 寻求消除一次场、缩短收发距的研究也有发表. 例如,有文献^[17]通过海底探矿的全空间解析分析认为,垂直电偶极的镜像可以消除一次场,水平电偶极源无此作用,不能反映地层电性. 随后,又有数值分析继续进行垂直电偶极短偏移距的海底探测研究^[18]. 实际上,在瞬变电磁勘探中,当采用适当的激发波形后,可以使一次场和二次场在时间上分开,因此,水平接地导线的近源响应仍然具有深部探测能力^[19]. 为表示简便,我们将收发距离等于或小于探测深度的电性源瞬变电磁装置命名为SOTEM(Short-offset Transient Electromagnetic).

2 SOTEM 的探测能力

2.1 SOTEM 的探测可行性

在主动源电磁勘探中,电磁场的激发有两种方式,一种直接由电荷或电流激发,如稳恒电流产生的电场和磁场;一种由电场和磁场间的交互感应激发,如变化的磁场激发涡旋状的电场,变化的电场又激发涡旋状的磁场,电磁波通过这种交互感应运动和传播. 在时域电磁法勘探中,这两种激发方式都是存在的. 稳定电荷和电流的场,在场源附近存在,场源消失则场消失,这种场称为源的自有场. 当电荷和电流随时间变化时,自有场也随时间变化,同时由于电磁场间的交互感应,还有一部分场离开场源向外辐射,这部分场就称为辐射场. 在频

率域电磁勘探中,变频测深能力就来源于辐射场. 如同是接地导线源的CSAMT,为了使变频测深能力的辐射场占主导地位,应在远区观测. 当然,场的强度随收发距离的增加衰减,考虑到信噪比和接收机灵敏度,一般将观测点布置在离开场源4~6倍探测深度的地方. 随着观测点向场源靠近,辐射场的主导地位下降,自有场逐渐占优. 以下是水平均匀大地CSAMT近场各分量公式^[20]:

$$E_x = \frac{Idl}{4\pi\sigma} \frac{1}{r^3} (3\cos 2\theta + 1), \quad (1)$$

$$E_y = \frac{3Idl}{4\pi\sigma} \frac{1}{r^3} \sin 2\theta, \quad (2)$$

$$E_z = \frac{i\omega\mu_0 Idl}{4\pi} \frac{1}{r} \cos\theta, \quad (3)$$

$$H_x = \frac{Idl}{4\pi} \frac{1}{r^2} \sin\theta \cos\theta, \quad (4)$$

$$H_y = \frac{Idl}{4\pi r^2} \cos 2\theta, \quad (5)$$

$$H_z = \frac{Idl}{4\pi} \frac{1}{r^2} \sin\theta, \quad (6)$$

式中 Idl 为偶极矩,其中 I 是供电电流、 dl 是偶极长度; r 是收发距, θ 是场点到源点的夹角; σ 是大地电导率、 μ_0 是非磁性大地的磁导率. 可以看出,当自有场占优,辐射场忽略不计时,公式(3)~(6)的4个场量已经与大地电导率无关,完全失去了探测能力;只有公式(1)、(2)中的两个水平电场分量 E_x 、 E_y 还与大地电导率有关,但与频率无关,只能做几何测深,不能进行频率测深. 要利用近区的辐射场进行变频测深,需要进行自有场和辐射场、即一次场和二次场的分离,时域瞬变场提供了这种可能性.

时域电磁法中的激励波形,有三角形连续波、梯形连续波(图1a),还有单脉冲的矩形、半正弦、三角形(图1b)等.

连续波形在观测期间始终有一次场存在,深部

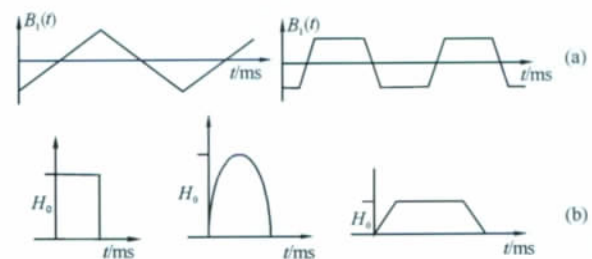


图1 常用 TEM 激励波形^[21]

(a) 连续三角波和梯形波;(b) 阶跃、正弦、梯形单脉冲.

Fig. 1 Usual TEM excitation wave forms^[21]

(a) Triangle and trapezoid continuous wave form;

(b) Step, sine and trapezoid single pulse.

TEM, 如 LOTEM 如果采用这种波形, 则要求发收间距等于 4~6 倍的探测深度达到远场观测, 使辐射场占优; 如果采用单脉冲波形, 脉冲关断后观测纯二次场, 由此将自有场和辐射场分离开来, 获得短偏移距的深部探测能力. 在对单脉冲频谱考查后, 还可以知道阶跃脉冲的频谱中, 幅度与频率成反比, 低频谐波占主导地位. 故为获得大的探测深度、分离自有场和辐射场, SOTEM 的激励电流需要采用阶跃波形.

在实际应用中, 为了抑制观测系统中的直流偏移和噪声干扰, 往往将图 1b 的单脉冲激励变换为周期性重复的双极性脉冲系列, 在正负脉冲关断后观测, 仍然是纯二次场.

2.2 SOTEM 的探测深度

在不考虑信噪比和接收机灵敏度的情况下, 探测深度 d 仅由观测时间 t 和地电结构决定, 和装置

$$G_{k(m-n)} = \frac{K_{(m-n)} + K_{(m-n+1)} G_{k(m-n+1)} - [K_{(m-n)} - K_{(m-n+1)} G_{k(m-n+1)}] \exp(-2K_{(m-n)} h_{(m-n)})}{K_{(m-n)} + K_{(m-n+1)} G_{k(m-n+1)} + [K_{(m-n)} - K_{(m-n+1)} G_{k(m-n+1)}] \exp(-2K_{(m-n)} h_{(m-n)})}, \quad (10)$$

图 2 是根据式 (8), (9) 和 (10) 计算的两层地层的不同偏移距磁场 $h_z(t)$ 曲线.

可见, 在早期随着发收距离 r 的增加, 场强 h_z 减小; 晚期 r 增大 h_z 也增大. 不过, 图 2 中不同发收距 $r=700, 1000, 2000, 3000, 4000$ m 的曲线, 虽然在 80 ms 后都有对下伏低阻层的反映, 但是, 不同偏移距离情况下的曲线反映低阻基底的延迟时间大小不同. 例如 700 m 的发收距可以更好地探测到 1000 m 深度的低阻层. 说明可以用小于目标深度

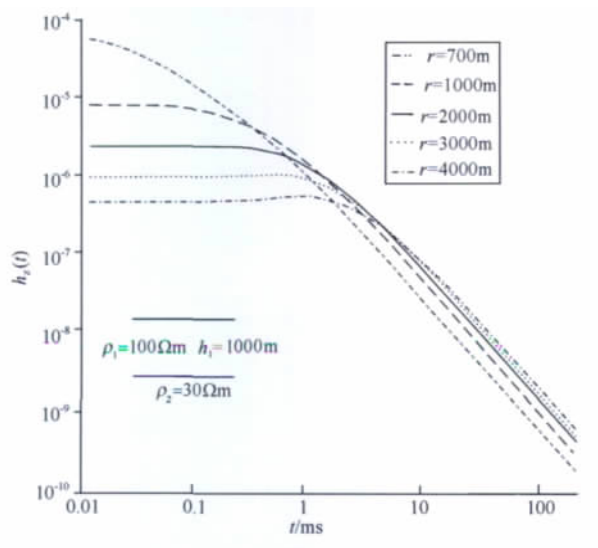


图 2 两层大地不同偏移距 $h_z(t)$ 曲线

Fig. 2 Two-layered $h_z(t)$ curves with different offset

类型、发收距离等无关^[22-23]:

$$d = \sqrt{\frac{2t}{\sigma\mu_0}}. \quad (7)$$

对于水平分层大地模型, 电偶极源形成的时域电磁场表达式可由全场频域公式^[20]、通过实部或虚部的正弦或余弦变换得到^[24]. 以垂直磁场 h_z 为例:

$$h_z(\omega) = \frac{Idl}{2\pi} \sin\theta \int_0^\infty \frac{1}{K_0 + K_1 G_k} \lambda^2 J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (8)$$

对虚部的余弦变换为

$$h_z(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\text{Im}h_z(\omega)}{\omega} \cos\omega d\omega, \quad (9)$$

式中 $J_1(\lambda r)$ 为 1 阶第一类柱 Bessel 函数, 其中 λ 是 r 方向的波矢量分量; $K_i = \sqrt{\lambda^2 - k_i^2}$, 其中 $k_i^2 = j\omega\sigma_i\mu_0$; G_k 是地层因子, 对于 m 层大地, 有从第 m 层向上的递推公式:

$$G_{k(m)} = 1,$$

的发收距实现测深, 这在频率域是无法做到的. 而且短偏移距的曲线变化幅度大, 使得曲线特征更为明显, 因此对地层有更高的分辨能力.

3 SOTEM 数据解释

视电阻率-深度剖面是电磁法勘探中的常规数据解释手段, 有多种算法. 其中在特定期限, 如早期或晚期的视电阻率算法较为简单. 但是为了对全部时段的观测数据都有较好的地层反映, 有必要采用如下的全期视电阻率算法.

3.1 全期视电阻率计算

文献^[25]给出了电性源由垂直磁场 $h_z(t)$ 出发的视电阻率 ρ_s 公式:

$$\rho_s = \frac{\mu_0 r^2}{4t \cdot g[h_z(t)]}, \quad (11)$$

式中, $g[h_z(t)]$ 是隐函数, 可用如下级数逼近.

$$g[h_z(t)] = \sum_{i=1}^5 \alpha_i y^{b_i}, \quad (12)$$

其中系数 b_i 由文献^[25]给出, α_i 由最小二乘法求取, 即使目标函数 F 取极小值.

$$F_{\min} = \sum_{j=1}^m (g[h_z(t)] - \sum_{i=1}^5 \alpha_i y^{b_i})^2, \quad (13)$$

上式等价于求下列方程的解.

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{Z} = \mathbf{A}^T \mathbf{G}, \quad (14)$$

式中

$$\mathbf{Z} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5)^T, \quad (15a)$$

$$\mathbf{G} = (g_1, g_2, g_3, \dots, g_m)^T, \quad (15b)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} y_1^{\alpha_1} & y_1^{\alpha_2} & \dots & y_1^{\alpha_n} \\ y_2^{\alpha_1} & y_2^{\alpha_2} & \dots & y_2^{\alpha_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_m^{\alpha_1} & y_m^{\alpha_2} & \dots & y_m^{\alpha_n} \end{bmatrix}. \quad (15c)$$

图 3 分别是 G 和 D 型两层大地全期和早、晚期视电阻率对比曲线。可以看出，全期视电阻率对地电结构变化的反映优于早期和晚期视电阻率的。

需要注意的是：通过线圈测得的磁场分量实际上是感生电动势，即 $\partial h_z / \partial t$ 。因此在利用全期视电阻率公式(10)之前，还应该把实测感应电压转化成垂直磁场强度 $h_z(t)$ 。

3.2 视深度

公式(7)是计算视深度的基础，是电磁法探测深度经典文献[22]定义的 TEM 场的“扩散深度”，是给定时间 t 内阶跃脉冲向地单向传播到达的深度。要探测地下某一深度的目标体，还需要返回时间，此双向传播时间至少为 $2t$ ，文献[22]的解析分析和其后的直接时域数值分析[23]表明，当携带地质信息的场刚刚返回到地面时，以目前的 TEM 方法和仪器的观测体制，还不能分辨出反射脉冲到达的时刻，还需要在分离时间之后延迟一段时间，达到可分辨时间，以分离异常；此外，大地的色散作用使低频成分逐渐占优的脉冲群速变慢。综合这些因素，可再将 $2t$ 时间加倍，取观测时间为 $T = 4t$ ，

代入式(7)，得视深度估算公式：

$$d = \sqrt{\frac{t}{2\sigma\mu_0}}, \quad (16)$$

由(16)式得观测时长估算公式：

$$t = d^2 \frac{2\mu_0}{\rho}, \quad (17)$$

式中用电阻率 ρ 替换了电导率 σ 。

4 探测实例

时域 SOTEM 在河南某盐矿地下溶腔探测中进行了试验性施工，证明了 SOTEM 的探测能力，取得了良好的地质效果。

4.1 工作参数

测区位于河南省中部叶县，地质构造属于舞阳盆地，盐矿层数 56 层，盐层厚度累计 430 m。在地下 1300~1400 m 层位发育有水溶压裂开采造成的溶腔，探测的目的是查明地下溶腔的分布范围。由于含盐地层溶水开采后形成的卤水极易导电，应呈低阻反应，观测垂直磁场 h_z 比较有利。使用 V8 电法工作站和 SB-7K 型磁探头(有效接收面积 40000 m²)进行测试。

如前所述，瞬变电磁法探测深度主要由地层电阻率和观测时间决定。表 1 列出了测区的地层电性。

虽然正演曲线(图 2)和转换后的视电阻率曲线(图 3)可以表示可分辨目的层的大致观测时长。但是，实际地层层数远比表 1 列出的多。三层以上的场曲线由于假极值效应[20]，将使层位不易分辨。况且，正演的时长也是需要事前确定的。为此，可用

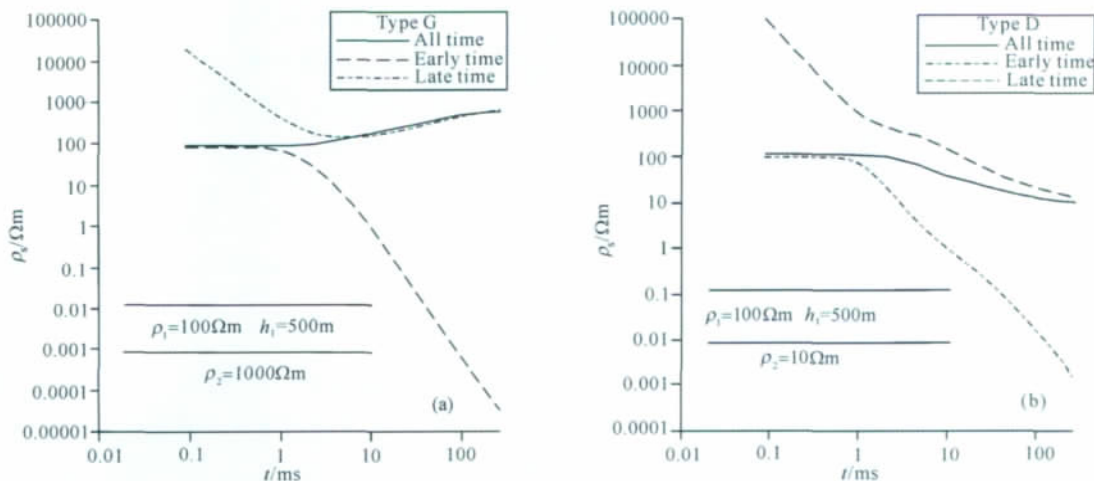


图 3 两层大地早期、晚期、全期视电阻率对比

Fig. 3 Two-layered curves of early-time, late-time and whole time

(a) G-type; (b) D-type.

表 1 河南某盐矿地层电性
Table 1 Geo-electric earth of some salt-ore
in Henan province

地层	岩性	厚度/m	电阻率/ Ωm
第四系	粘土和砂砾互层	$h_1=110$	$\rho_1=80$
	砂岩和泥岩互层	$h_2=920$	$\rho_2=50$
第三系	泥岩	$h_3=50$	$\rho_3=40$
	泥岩和盐岩互层	$h_4=400$	$\rho_4=100$

公式(11)估算观测时长。众所周知,在瞬变电磁法中,发射装置通电或断电瞬间激发的电磁波,首先在空气中以光速 c 很快传播到地表各处,然后有一部分电磁能量垂直传入地下,故可将表 1 地层厚度和电阻率代入以下公式,得出与地层层理垂直的综合电阻率 ρ_n [26],有

$$\rho_n = \frac{h_1\rho_1 + h_2\rho_2 + \dots + h_n\rho_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n}$$

$$= \frac{110 \times 80 + 920 \times 50 + 50 \times 40 + 400 \times 100}{110 + 920 + 50 + 400}$$

$$\approx 65. \quad (18)$$

式中 m 为地层层数。再将 $\rho_n \approx 65 \Omega\text{m}$ 代入公式(17)可知需要的观测时间长度 t 约为 125 ms(以光速传播到接收点需要的时间远小于在地中的垂直传播时间,忽略不计)。当然,还有直接从场源传播到地中的电磁能量,由于大地的电抗作用,与以光速建立的第一种场相比,第二种场的建立比较迟缓[26]。因此,观测时长的估算以第一种场为准。查 V8 仪器的观测时长(表 2)可知,要探测赋存深度 1300~1400 m 的溶腔,应取重复频率为 1 Hz 的时间档。

表 2 V8 仪器 SOTEM 观测时间表
Table 2 SOTEM survey time table of V8 system

序号	重复频率/Hz	标称时长/ms	实际起止时间/ms
1	25	10	0.072~6.28
2	5	50	0.312~37.7
3	2.5	100	0.725~75.4
4	1	250	1.58~188.7
5	0.5	500	3.12~377
6	0.25	1000	7.25~754

每时间档 40 道

在收发距的确定方面,如前所述,如果激励波形是理想阶跃函数,脉冲关断后观测的即为二次场,甚至零偏移距都具有探测能力。但实际仪器电路本身的响应、发射导线、大地造成的关断效应,使

得关断后的一段时间内还有一次场存在。为分离关断效应造成的一次场,导线源和观测点之间应当有适当的距离。还由于导电大地中的辐射场按指数衰减,源附近的场变化较为剧烈,较小的坐标测量误差,将通过视电阻率公式引起较大的解释误差[27-28],因此,源和接收点之间需要有一段距离。本次探测采用的收发距 $r=700\sim 1000$ m。而且,为达到一定的信噪比,要求有合理的接地导线源长度 AB 和供电电流 I 。当收发距 $r=1000$ m,重复频率 $f=1$ Hz, $AB=1000$ m, $I=20$ A 时,进行观测,图 4 为实测二次感应电压衰减曲线,可见采用上述工作参数进行观测可取得较高质量的实测数据。

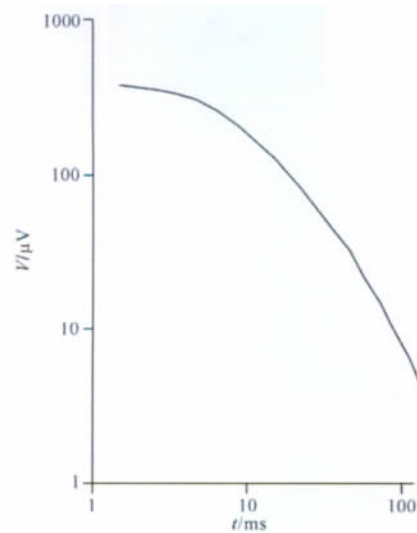


图 4 实测感生电动势 $V(t)$ 曲线

Fig. 4 EMF curve of field collected data

4.2 探测效果

图 5 是盐矿溶腔探测中的一条剖面(点距 40 m)。在视电阻率剖面(图 5a)中,地下 100 m 内的高阻层、地下 100~700 m 之间的低阻层、地下 700~1100 m 的更低阻层、和地下 1100~1500 m 的高阻层,分别与第四系的砂砾粘土互层、第三系的砂岩泥岩互层、泥岩层和含盐的膏质泥岩页岩互层对应,短偏移 SOTEM 观测剖面很好地反映了地层电性变化,图 5b 是推断地质剖面。进一步地,可以发现深度 1200~1400 m 范围内,视电阻率的横向及纵向分布不均匀,在整体的高阻背景下呈现几处 120 Ωm 的低阻等值线封闭区,根据盐矿赋存深度,推断为溶腔的反应。由此圈定了 80—120 号点、280—400 号点、600—640 号点的三处溶腔。随后在 360 号点布设的钻孔,在地下 1210 m 处见盐溶腔,证实了 SOTEM 的探测效果。

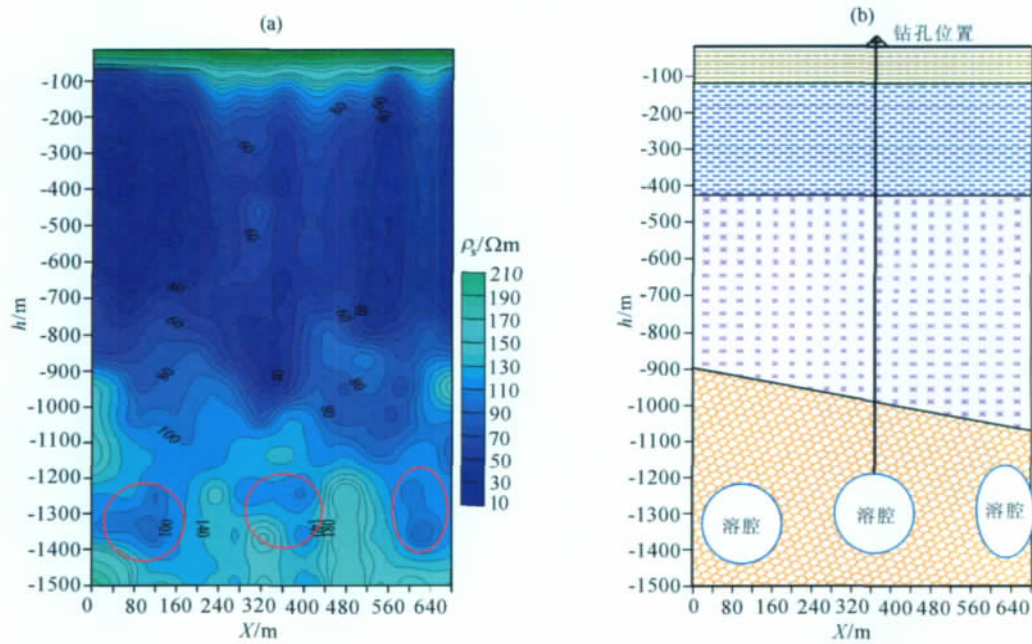


图5 盐矿溶腔 SOTEM 实测成果图

(a) 视电阻率-深度剖面;(b) 地质推断剖面.

Fig. 5 Result of field data typical section

(a) Apparent resistivity section;(b) Interpreted geological section.

5 结论与展望

当采用阶跃脉冲作为激发源,有足够的观测时长,在满足信噪比和接收机灵敏度的情况下,短偏移 SOTEM 不仅具有长偏移 LOTEM 的深部探测能力,而且层状大地表面上接地电性源的场,随着偏移距由长到短,曲线特征从平缓模糊变得陡峭明显,说明 SOTEM 对地层有更好的分辨能力.当测区的构造不能用一维水平层状大地近似时,较小的偏移距体积效应小,记录点问题较易处理,解释结果的确性更强,有更广泛的应用适应性.在 1400 m 深度的盐矿溶腔探测中,用小于埋藏深度的 1000 m 短偏移距测出的溶腔被钻孔验证.表明了 SOTEM 的勘探效果.在深部探测中,为获得高质量实测数据采用的长接地导线源,不能再用电偶极子近似.短偏移的场点与源点更为接近,需要有比沿线做电偶极子积分更精确的理论公式,如以时变点电荷为微元的理论公式,作为进一步的研究基础.此外,接地导线源 SOTEM 对高阻体的探测能力,其它电场和磁场分量在不同环境、不同地质任务中的应用等,都将是今后要继续深入研究的.可以预计, SOTEM 将为提高深部探测的分辨率、发展新的观测和解释技术起到积极的作用.

参考文献(References)

- [1] Strack K M, Seara J L, Gmh G, et al. LOTEM case histories in frontier areas of hydrocarbon exploration in Asia. *SEG Expanded Abstracts*, 1990, 9: 495-497.
- [2] Strack K M, Lüschen E, Köta A W. Long-offset transient electromagnetic (LOTEM) depth soundings applied to crustal studies in the Black Forest and Swabian Alps, Federal Republic of Germany. *Geophysics*, 1990, 55(7): 834-842.
- [3] Hördt A, Müller A. Effects of topography in LOTEM data recorded at Vesuvius Volcano, Italy. *SEG Expanded Abstracts*, 1999, 18: 286-290.
- [4] Hördt A, Müller A. Understanding LOTEM data from mountainous terrain. *Geophysics*, 2000, 65(4): 1113-1123.
- [5] Yan L J, Su Z L, Hu J H, et al. Field trials of LOTEM in a very rugged area. *The Leading Edge*, 1997, 16(4): 379-382.
- [6] 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. *工程地球物理学报*, 2004, 1(4): 313-317. Tang X G, Hu W B, Yan L J. Graben topographic effects to the long offset transient electromagnetic response. *Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese)*, 2004, 1(4): 313-317.
- [7] 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. *石油地球物理勘探*, 1999, 34(5): 532-538. Yan L J, Hu W B, Chen Q L, et al. The estimation and fast inversion of all-time apparent resistivities in long-offset

- transient electromagnetic sounding. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 1999, 34(5): 532-538.
- [8] 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. *地震地质*, 2003, 25(4): 664-670.
Weng A H, Wang X Q. Numerical simulations of very-late time response and apparent resistivity in long-offset TEM sounding. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2003, 25(4): 664-670.
- [9] Kaufman A A, Keller G V. *Frequency and Transient Soundings*. New York: Elsevier, 1983.
- [10] 米萨克 N 纳比吉安 主编, 赵经祥, 王艳君 翻译, 陈云升 校. 勘查地球物理 电磁法 第一卷. 北京: 地质出版社, 1992: 7-40, 217-231.
Edited by Nabighian M N, translated by Zhao J X, Wang Y J, proofed by Chen Y S. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics Volume 1 Theory* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1992: 7-40, 217-231.
- [11] Rabinovich B I. Comparative evaluation of sounding by transient fields in the far and near zones. *Geol. Geofiz.*, 1978, 11: 148-152.
- [12] Goldman M M, Grekova L B, Morozova G M, et al. Album of two-layer sounding curves for the transient horizontal magnetic field in the near zone. *Akad. Nauk. SSSR*, 1976, Siberian Div., vol. 9.
- [13] Antonov Y N, Manshtein A K. Development of equipment for depth sounding with transient field in the near zone (ZCB). // *Theory and Use of Electromagnetic Fields in Exploration Geophysics. Akad. Nauk SSSR, Novosibirsk*, 1979: 18-26.
- [14] Azad J. Mapping stratigraphic trap with electrical transients. *Bull. Ca. Pet. Geol.*, 1977, 25(5): 996-1036.
- [15] Gonzalez J M S. Test of time-domain electromagnetic exploration for oil and gas. Colorado: Colorado School of Mines, 1979.
- [16] Ziolkowski. Short-offset transient electromagnetic geophysical survey, US patent application publication, 2010/0201367 A1 Aug. 12, 2010.
- [17] Nestor H C, Alumbaugh D. Near-source response of a resistive layer to a vertical or horizontal electric dipole excitation. *Geophysics*, 2011, 76(6): F353-F371.
- [18] Evan S U, David A, Jerry M H, et al. Numerical modeling analysis of short-offset electric-field measurements with a vertical electric dipole source in complex offshore environments. *Geophysics*, 2012, 77(5): E329-E341.
- [19] 陈明生, 解海军. 电偶源瞬变电磁测深研究(三)—大地表面瞬变电磁场. *煤田地质与勘探*, 1999, 27(3): 58-61.
Chen M S, Xie H J. Study on the transient electromagnetic (TEM) sounding with electric dipole. III. TEM field on the earth surface. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 1999, 27(3): 58-61.
- [20] 陈明生, 闫述. 论频率测深应用中的几个问题. 北京: 地质出版社, 1995.
Chen M S, Yan S. Discussion Some Question in the Application of Frequency-Domain Sounding (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [21] 牛之琰. 时间域电磁法原理. 长沙: 中南大学出版社, 2007: 8-10.
Niu Z L. *Theory of Time Domain Electromagnetic Method* (in Chinese). Changsha: Press of Central South University, 2007.
- [22] Spies B R. Depth of investigation in electromagnetic sounding methods. *Geophysics*, 1989, 54(7): 872-888.
- [23] 闫述, 石显新, 陈明生. 瞬变电磁法的探测深度问题. *地球物理学报*, 2009, 52(6): 1583-1591.
Yan S, Shi X X, Chen M S. The probing depth of transient electromagnetic field method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(6): 1583-1591.
- [24] 陈明生. 电偶源瞬变电磁测深研究(二)——瞬变电磁场的求解方法. *煤田地质与勘探*, 1999, (2): 54-57.
Chen M S. Study on the transient electromagnetic (TEM) sounding with electric dipole. II. The solving process of the TEM field. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 1999, 2: 54-57.
- [25] 方文藻, 李予国, 李琳等. 瞬变电磁法测深原理. 西安: 西北工业大学出版社, 1993: 93-94.
Fang W Z, Li Y G, Li L, et al. *Theory of TEM Sounding* (in Chinese). Xi'an: Press of North-west Industry University, 1993: 93-94.
- [26] 朴化荣. 电磁测深法原理. 北京: 地质出版社, 1990: 10-27.
Piao H R. *Principle of Electromagnetic Sounding Methods* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1990: 10-27.
- [27] 石显新, 闫述, 傅君眉等. 瞬变电磁法中心回线装置资料解释方法的改进. *地球物理学报*, 2009, 52(7): 1931-1936.
Shi X X, Yan S, Fu J M, et al. Improvement for interpretation of central loop transient electromagnetic method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(7): 1931-1936.
- [28] 陈明生, 闫述. CSAMT 勘探中场区、记录规则、阴影及场源复印效应的解析研究. *地球物理学报*, 2005, 48(4): 951-958.
Chen M S, Yan S. Analytical study on field zones, record rules, shadow and source overprint effects in CSAMT exploration. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2005, 48(4): 951-958.

(本文编辑 胡素芳)