系列讲座

瞬变电磁法基本原理

静恩杰 李志聃

（中国矿业大学地质系 徐州 221008）

瞬变电磁法是一种利用电磁感应原理预测地下矿产的地球物理方法。

瞬变电磁法最早由加拿大地球物理学家Wait于1951年提出，并于1953年获取专利权。1960年，原苏联研制出第一台共圈式瞬变电磁装置（MPPO一型）；1962年，Mclaughlin和Dolan研制出固定发射回线、移动接收回线的瞬变电磁仪，并利用该装置于1964年和1970年在塞浦路斯和南美洲取得找矿效果，从而推动了瞬变电磁法的进一步发展。

近几年来，瞬变电磁法发展迅速，仪器更新较快。七十年代初，我国也开始研制瞬变电磁仪器系统；我们深信，随着瞬变电磁技术的进一步推广和应用，具有世界先进水平的瞬变电磁仪不久将在我国问世。

讲座分三讲。第一讲：瞬变电磁法基本原理，简述方法特点并介绍实例，第二讲：瞬变电磁法野外工作方法与技术；第三讲：瞬变电磁法资料处理和解释。

1 基本原理

瞬变电磁法测量装置由发射回线和接收回线两部分组成。瞬变电磁法工作过程可以划分为发射、电磁感应和接收三部分。当发射回线中的稳定电流突然切断后，根据电磁感应理论，发射回线中电流突然变化必将在其周围产生磁场、该磁场称为一次磁场。一次磁场在周围传播过程中，如遇到地下良导电的地质体，将在其内部激发产生感应电流，又称涡流或二次电流。由于二次电流随时间变化，因而在其周围又产生新的磁场，称二次磁场（图1）。由于良导电矿体内感应电流的热损耗，二次磁场大致按指数规律随时间衰减，形成如图2所示的瞬变磁场。二次磁

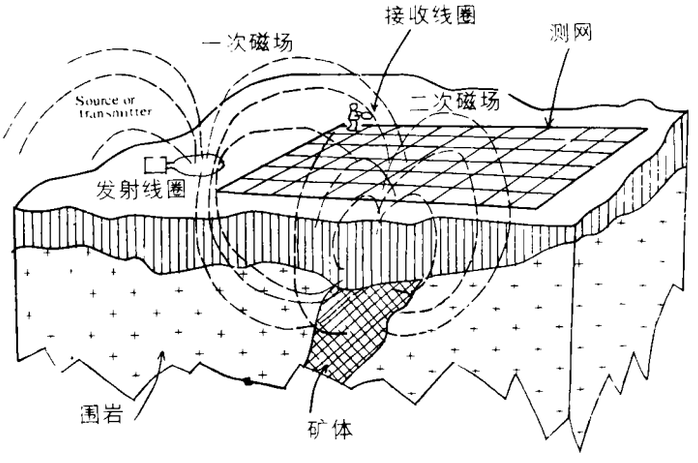


图1 瞬变电磁法工作原理示意图

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

场主要来源于良导电矿体内的感应电流，因此它包含着与矿体有关的地质信息。二次磁场通过接收回线观测；并对所观测的数据进行分析和处理，据此，解释地下矿体及相关物理参数。

图 3 是地面瞬变电磁系统，其发射装置为一固定大发射线框，接收装置是可移动的小型线框。根据法拉第(Faraday)电磁感应定律，当发射回线中稳定电流突然切断后一段时间内，地下良导电矿体内将产生感应电流，感应电流在矿体内扩散过程可分三个阶段。为了维持矿体内原磁场，在断电初，感应电流集中分布于矿体表面，形成表面电流(Grant and West 1965，Weaver，1970)，该阶段称早期时间。随着感应电流在矿体内的热损耗，表面电流开始向矿体内部扩散(图 4)，其扩散速度一般与矿体的导电率成反比关系，该阶段称中期。当矿体内感应电流扩散经过一段时间后便进入所谓的晚期阶段，其感应电流的每个线电流的阻抗和感抗均趋于渐近值是晚期阶段主要特征，此时矿体内的电流分布趋于相对稳定，热损耗速度减慢，表现为与感应电流相对应的二次磁场衰减速度大大减缓(图 2)。

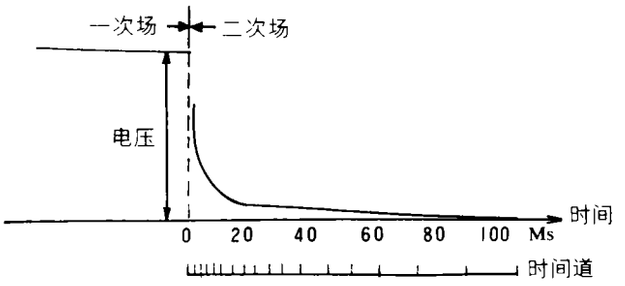


图 2 瞬变电磁法发射与接收波形图

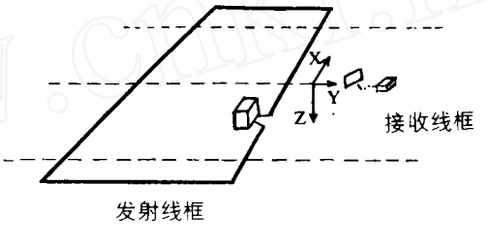


图 3 固定式大发射回线与移动小接收回线测量装置

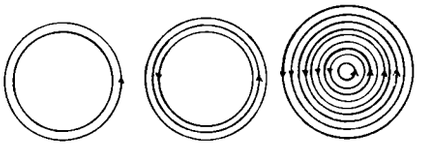


图 4 球形导体内感应电流分布示意图

矿体内感应电流以及与之对应的二次磁场随时间的变化率取决于矿体的电导率、尺寸大小及形状。早期矿体表面电流的分布仅于矿体的形状和大小有关，而与矿体的电导率几乎无关。

瞬变电磁场的物理过程可用电路理论解释。如图 1 所示，其发射、矿体和接收分别由三个线圈摸拟(图 5)，其中 M_{01} 表示线圈 I_0 与线圈 I_1 之间的互感，R 和 L 表示摸拟矿体线圈的阻抗和感抗。假设发射线圈中有电流强度为 $I_0(t)$ 的方波电流输入，根据电磁感应定律，则矿体线圈内产生的感应电流为：

$$I_1(t)=\frac{M_{01}I_0}{L}e^{-t/\tau} \quad t\geqslant 0 \qquad (1)$$

(Grant and West，1965)，其中 $\tau=L/R$ 为矿体线圈的时间常数。由式(1)看出，矿体线

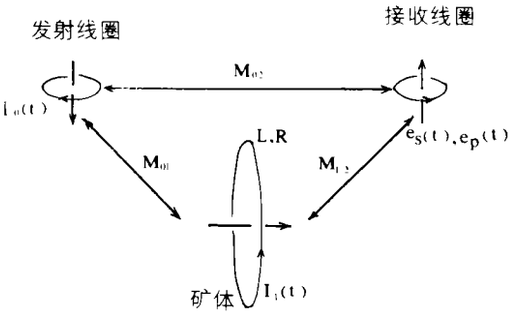


图 5 用电路理论表示的瞬变电磁法测量系统

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

圈内的感应电流是随时间按指数规律衰减。在 t＝0 时刻,即为衰减初期,矿体内感应电流强度为:$I_1(o)=\frac{M_{o1}I_o}{L}$

显而易见,此时的感应电流仅与一次磁场穿过矿体线圈的磁通量($M_{01}I_0$)以及矿体的形状和尺寸(L)有关,而与矿体的电导率(1/R)无关。矿体内的感应电流将在接收线圈中产生二次磁场,线圈输出电动势与二次磁场随时间的变化率成正比关系,其表达式为:

$$e_s(t)=M_{12}\frac{\partial I_1(t)}{\partial t}$$

$$=I_0\frac{M_{01}M_{12}}{L}[\delta(t)-\frac{e^{-t/\tau}}{\tau}]\quad t\geqslant 0 \qquad (2)$$

式中:S(t)为单位脉冲函数。

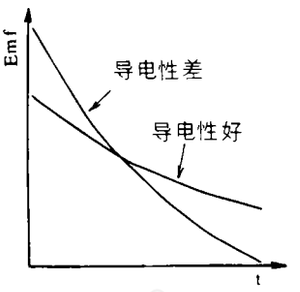


图 6　瞬变电场随时间衰减规律与矿体导电性关系图

分析式(2)可知,对于导电性差的矿体,其时间常数 τ 值较小,二次场初始值较大,但衰减速度较快;反之,导电性良好矿体,时间常数 τ 值较大,尽管二次场初始值小,但衰减速度慢(图 6)。瞬变电磁场的这一物理特性构成了利用瞬变电磁法寻找地下矿体的基本原理。

2　方法特点

瞬变电磁法是利用不接地回线向地下发送一次脉冲磁场,在一次场间歇期间采用接收回线(或同一回线)在时间域对二次磁场进行观测,故该法又称时间域电磁法。瞬变电磁场法最大特点在于它将一次磁场与二次磁场分离,观测纯二次场,这是瞬变电磁法有别于频率域电磁法的根本之处。

3　应用实例

3.1　寻找金属矿体

Elura 大型硫化矿床位于澳大利亚新南威尔士州境内,图 7 和图 8 分别为该区瞬变磁场剖面图和视电阻率拟断面图。可以看出矿体在两张图上均有明显异常反映。后已查明,Elura 矿床为一含铅、锌和银元素的大型磁黄铁矿,其南北长约 200m,东西长约 120m,深部延伸近 410m,矿体顶部盖层厚约 100m。

3.2　煤田勘查

图 9 为澳大利亚某煤田根据瞬变电磁数据绘制的视电阻率拟断面图。在该例中,煤层电阻率明显高于其围岩,在拟断面图上表现为两个高阻等值区;图的中部的低阻异常为充水直立断层的反映。下图是推

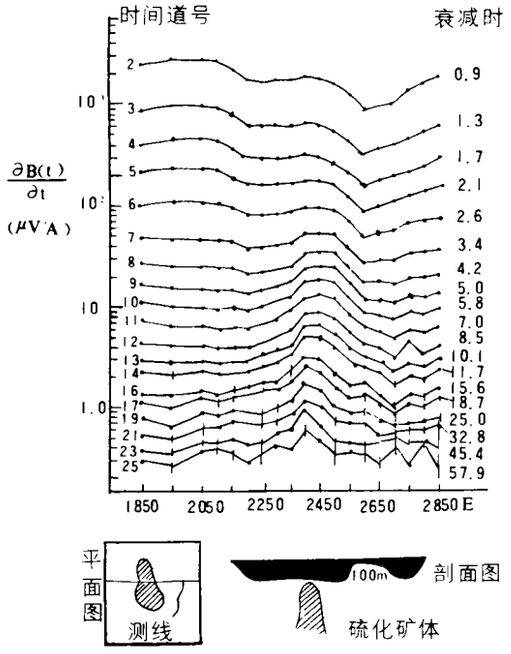


图 7　澳大利亚 ELVRA 磁黄铁矿瞬变电磁法剖面图(Bvselli　1980)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

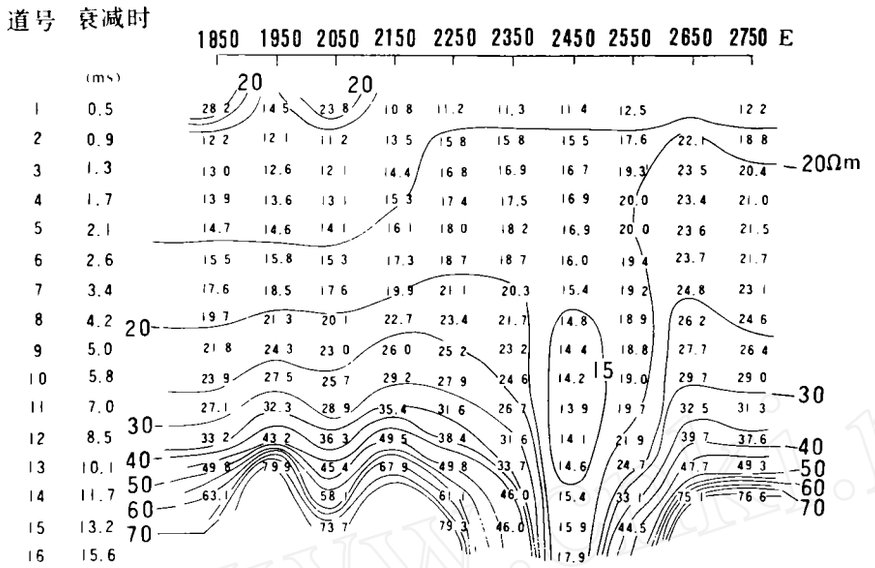


图 8 澳大利亚 ELVRA 磁黄铁矿瞬变电磁法视电阻率 拟断面图(Buselli 1980)

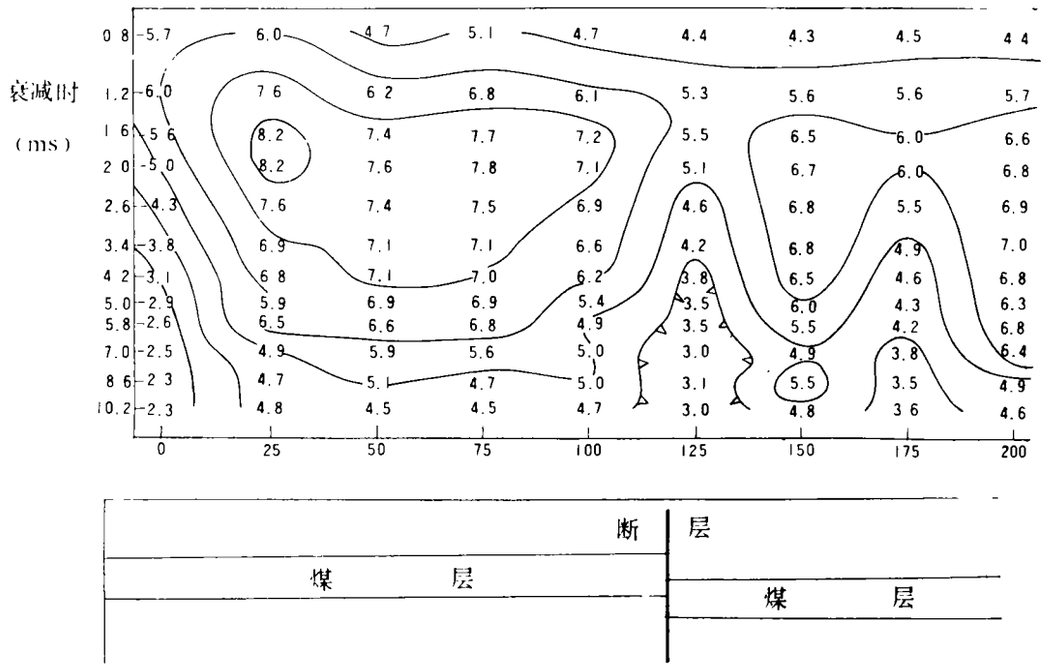


图 9 澳大利亚某煤田瞬变电磁法观测结果(Henderson,1986)

断地质剖面。勘查效果取决于煤层与围岩电阻率差异大小。

3.3 石油勘探

图 10 为瞬变电磁法在澳大利亚新南威尔士州境内勘探油田的实例。测井资料表明该区含油层埋深约 1040m,顶部为一高阻层和低阻表层。上图为瞬变电磁法视电阻率与时间的关系曲

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

线，图形标记为实测值；方形记号是测井资料的计算值，二者能很好吻合。下方左图为计算的输入模型，右图为输出模型。可以看出，三个不同电阻率的地质层在瞬变法电阻率曲线上均有明显反映，其油层顶部界面反映在瞬变磁场衰减时为 100 毫秒区段。

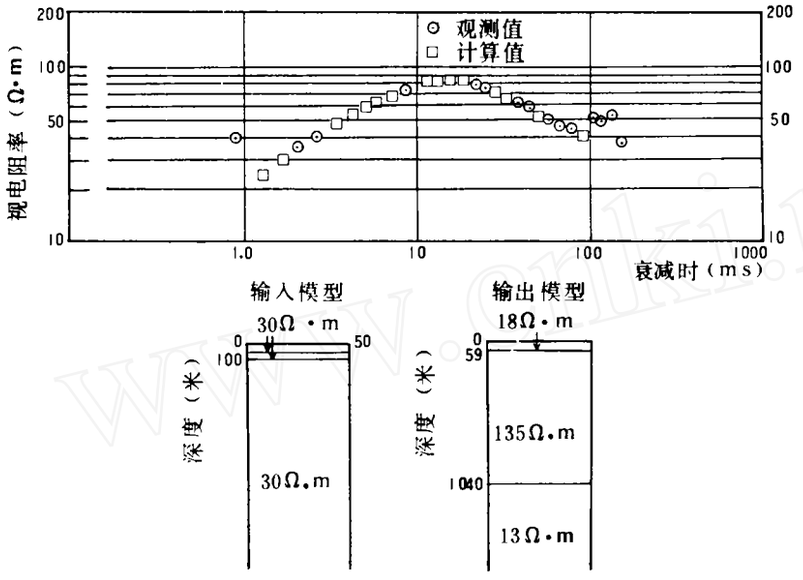


图 10　澳大利亚某油田瞬变电磁法观测结果

(Henderson 1986)

参考文献

1　Grant，F. S. . and West，G. F. ，1965，Interpretation theory in applird geophysics：McGraw－Hill，New York.

2　Jing，E. . 1995，Modelling electromagnetic responses of 3－D earth structures：Ph. D. thesis，University of Melbourne.

3　Nabighian，M. N. and Macnae，J. C. ，1991，Time domain electromagnetic prospecting methods，in Nabighian，M. N. ，Ed. ，Electonagnetic methods in applied geophysics，vol. 2：Investigatione in Geophysics，Soc. Expl. Geophys. ，427－520

4　Wait，J. R. . 1951la，Transient electromagnetic propagation in a conducting mebium：Geophysics，16，213－221.

5　Weaver，J. T. . 1970，The general theory of EM induction in a conducting half－space：Geophys. J. Roy. Autr. Soc. ，22，82－100.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net