时间域瞬变电磁法在地质勘查中的应用①

陈 卫, 杨 生, 王有霖, 刘 涛
(有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012)

摘 要: 在介绍对瞬变电磁法原理、方法技术以及资料解释等的基础上, 论述了该方法在金属矿产勘查中的深埋矿体的探测、划分构造格局以及利用井中TEM 确定井旁盲矿等方面的应用实例。应用结果表明, 瞬变电磁法在固体矿产找矿中, 具有工作效率高、分辨率高且勘探深度较大和空间定位效果好等优点, 它是固体矿产勘查的有效方法之一。

关键词: 瞬变电磁法; 应用实例; 时间域; 地质勘查
中图分类号: P631. 325 **文献标识码**: A **文章编号**: 1001- 5663(2006)04- 05- 0538- 05

0 引言

随着地质找矿工作的深入, 露天矿和近地表矿已基本上被查明, 无论是在我国, 还是在加拿大、澳大利亚等西方发达国家, 以及在一些勘探程度较高的发展中国家, 金属矿勘查所面临的基本形势是, 它已进入寻找隐伏矿阶段, 以传统地表普查和地质研究为主的找矿方法逐渐让位于依靠地质理论预测与物探、化探等勘查技术综合应用的现代找矿手段, 以现代地质理论指导预测、物探手段定位、钻探验证的隐伏矿综合勘查方法已成为业内人士的共识。为适应勘查隐伏矿(尤其是深部隐伏矿) 的需求, 优先发展具有高分辨率、大探测深度的新方法, 使总体找矿能力达到较大深度, 这已成为隐伏矿勘查技术的发展趋势。瞬变电磁法(TEM) 正是这类方法的典型代表, 它是一种时间域的人工源地球物理电磁感应探测方法, 是一种近年来发展很快, 并得到广泛应用的一种时间域电磁勘探方法。

近十几年来, 时间域电磁法的系列技术得到很大的发展, 其动力来自大的探测深度和良好的找矿效果。上世纪80年代以来, 利用时间域电磁法相继发现了一大批隐伏矿, 包括埋藏较深的金属矿床, 如澳大利亚的赫利尔、欧内斯特亨利, 加拿大的温斯顿湖、林兹里、维克多等深部隐伏火山岩型块状硫化物矿床, 俄罗斯的科拉- 卡罗利阿铜镍矿区, 加拿大萨德伯里铜镍区等, 主要都是应用物探TEM 测量而取得了很明显的找矿效果。在国内, 新疆阿尔泰南缘多金属成矿带的克因布拉克、铁木尔特和可可塔勒以及阿舍勒矿区的发现和深部勘探亦有它的巨大贡献。有鉴于此, 该方法倍受青睐, 新技术、新仪器不断涌现。本文将对该方法的原理、方法技术及其应用效果作简要介绍和讨论。

1 原理及方法技术

瞬变电磁法或称时间域电磁法, 简称TEM。它是利用不接地回线或接地线源向地下发送一次脉冲磁场, 地下的导电地质体在一次脉冲磁场的激发下, 被感应出涡流, 其大小取决于地质体的导电程度, 并在空间形成二次瞬变磁场。一次脉冲磁场随着脉冲电流的关断而崩溃, 但二次瞬变磁场并不立即消失, 它将有一个过渡(衰减) 过程, 随时间按指数规律衰减, 衰减的快慢与地质体的电性参数、结构构造、体积形态等有关。一般导体越大、导电性越好, 涡流的热损耗越小, 二次瞬变磁场衰减就越慢。在一次脉冲磁场的间歇期间, 利用线圈或接地电极观测二次涡流场, 研究获得的感应电动势的时空特性来判断导电体的规模、产状和电性, 通过反演、成像和解释即可得到地下介质电性结构的丰富信息。TEM 是没有一次场背景的情况下观测研究二次场(纯异常), 大大地简化了对地质对象所产生异常场的研究, 对于提高方法的探测能力更具有前景。基于这个原理, 该方法主要用于寻找高导电性的工业矿床。由于时间域方法可使用频率域方法无法实现的重叠装置工作, 与探测的地质体达到最佳耦合, 得到的异常幅度大、形态简单及受旁侧影响小, 提高了对地质体的横向分辨能力和平面、垂向定位精度, 并且装备简单、经济、工效高,

① 收稿日期: 2006- 04- 18 作者简介: 陈 卫(1968-), 男, 江苏建湖人, 高级工程师, 主要从事地球物理勘查方法技术和应用研究。

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

更适合于金属矿普详查及勘探工作的需要。

TEM 尽管有各种各样的变种方法, 其数学、物理基础都是基于导电介质在阶跃变化的激励磁场激化下引起的涡流场的问题。研究局部导体的瞬变电磁响应的目的在于勘查良导电金属矿体, 研究水平层状大地的瞬变电磁场理论的目的在于解决地质构造测深问题。利用瞬变电磁信号应用于地质构造测深问题, 在苏联早在上世纪30 年代末由A. П Крае в提出, 上世纪 50 年代以后建立了近区场测深方法(ЗСБ), 在同时期内, 创立应用于勘查金属矿产的过渡过程法(МПП), 上世纪 60 年代以后 ЗСБ及МПП得到更广泛及成功的应用和发展, 制定出了适应于钻井、航空和海洋等领域的变种方法的理论和技术, 用于勘探金属矿的主要仪器有: МПП-3、4 及 Импульс, 在西方, 1951 年首先由J. R. W ait 提出了利用瞬变电磁场法寻找导电矿体的概念, 也在示波器屏幕上观测到了瞬变场波形, 这种快速增长(或减小)的磁场将使导体激发起涡流场, 可以观测到衰变电压。1958 年加拿大Barringer 公司开始研制应用于航空的 INPUT 系统, 于1962 年投入使用, 经过多次改进, 至今已成为世界范围内应用的主要航电系统。地面仪器系统于上世纪 70 年代出现商品仪器, 近些年不断涌现出智能化的仪器, 具有代表性的有: PROTEM-37、47、57、67, DEEP-EM, UTEM, SIROTEM-Ⅱ、Ⅲ。此外, 多功能电测站 GDP-32 及V-8 等配置了用于TEM 测量的功能, 新的系统均实现了多功能、多参数、高密度数据采集, 集中体现了新技术向更大深度、更高分辨率发展的趋势。利用这些系统取得了不少引人注目的地质效果。在我国, 于上世纪 70 年代初开始进行瞬变电磁法的理论及方法技术研究, 并研制出了仪器样机, 近年来国产仪器在研制方面取得了很大进展, 研制出的仪器主要有 SD-1、WDC-2、SCD-1 及TEMS-3S 等系统, 广泛开展了试验研究及推广应用, 取得了一批好效果的应用实例。出版的代表著作有朴化荣著的《电磁测深法原理》、牛之琏著的《时间域电磁法原理》及蒋邦远等的《实用近区磁源瞬变电磁法勘探》。

TEM 使用的人工场源通常有两种: 一种是电源, 它是向具有一定间距的一对电极发射电流, 产生一次电场信号; 另一种是磁源, 它是通过在地面铺设的不接地回线发射大电流, 产生一次磁场信号。对应于磁场源观测系统的工作装置有多种, 有剖面装置、测深装置、井中装置和航空装置。剖面装置又分为同点、偶极、大定源三种装置。测深装置分为电偶源、磁偶源、线源、中心回线四种装置。

瞬变电磁测深法资料解释的过程亦包括定性解释和定量解释两个方面。定性分析即对观测得到的各测点视电阻率曲线、拟断面图、平面图进行分析, 判断各测点所处的岩性导电性。定量解释即通过反演计算确定地下介质的电性分层, 即对观测资料进行层状结构反演, 在此基础上, 结合地质资料, 对地层和构造作出推断。但在资料的解释处理方面, 由于瞬变电磁响应的数值模拟较困难, 目前TEM 资料的解释基本上还处于半定量阶段。因此, 大力发展TEM 正、反演尤其是高维问题的正、反演研究具有十分重要的意义。

2 应用实例

2.1 深埋矿体的TEM 探测

2.1.1 安徽某铜矿床

安徽某小型铜矿处于铜陵—戴家汇断块中的戴公山背斜之南东翼, 南部为南陵火山岩盆地。矿体受花岗闪长斑岩与黄龙组、船山组的接触带控制, 为矽卡岩型矿床。矿体呈透镜状分布, 深约320m, 上覆低阻的白垩系, 其厚度为200m。采用SIROTEM-Ⅱ瞬变电磁仪, 以200m×200m 重叠回线装置对该铜矿的0 线剖面进行测量。其结果显示, 早、中期响应曲线由北至南增大(见图1), 反映了由高阻的泥盆系的出露演变为低阻的白垩系的上覆。推测100 号点响应曲线下降及 ρ_τ 断面的高阻异常与白垩系下赋存的高阻的三叠系灰岩有关。晚期道的高响应低阻异常反映了矿体及其产状。通过反演计算, 低阻体埋深与实际矿层埋深相当。

2.1.2 辽宁某铜矿区

辽宁某铜矿矿体以主要含铜、锌、硫组分、伴生金、银组分为特征, 矿体产于清原太古宙花岗-绿岩地体中, 受中深变质的绿岩带所控制, 属火山沉积变质变形混合岩化改造的块状硫化物矿体。主矿体多产于岩层强烈褶曲地段, 支矿体与主矿体(柱状)连接, 呈似层状顺层产出。主矿体为复杂脉体, 可分为矿柱和矿脉, 1 号矿的柱长为70～110m, 宽度为20～40m, 矿柱上部呈“音叉状”向SW 倾伏, 下部变成“Z”字形, 转向SE 倾伏, 矿体延伸大于1200m, 开拓深度已达千米。矿石构造以致密块状和浸染状为主。EM 67 试验剖面选择在果园地区27 勘探线, 采用600m×400m 大定源回线装置回线内外全域测量, 同时观测 dBz/dt、dBx/dt、dBy/dt 三个分量, 发射电流为16.5～18.5A、发射基频为6.25Hz、中心延时为0.3525～27.92ms。在该地区曾投入过中小功率的TEM 工作, 经ZK901 孔验证, 在孔深801.3m 范围内未见工业矿体, 后经-407m 水平巷道钻孔揭露, 在-700m 标高左右见到厚大的工业矿体, 现-647m 中段巷道已将其开采至31 线附近。本次TEM 工作探测范围在300m～1200m, 在基于烟圈快速反演的视电阻率-拟深度断面图上, 电阻率低阻异常呈南北两个带分布, 中间被高阻异常分隔, 南北两个低阻异常带分别分布于古火山第Ⅲ旋回及第Ⅱ旋回地层。在北异常带, 低阻异常呈“马蒂状”, 相对较弱, 范

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

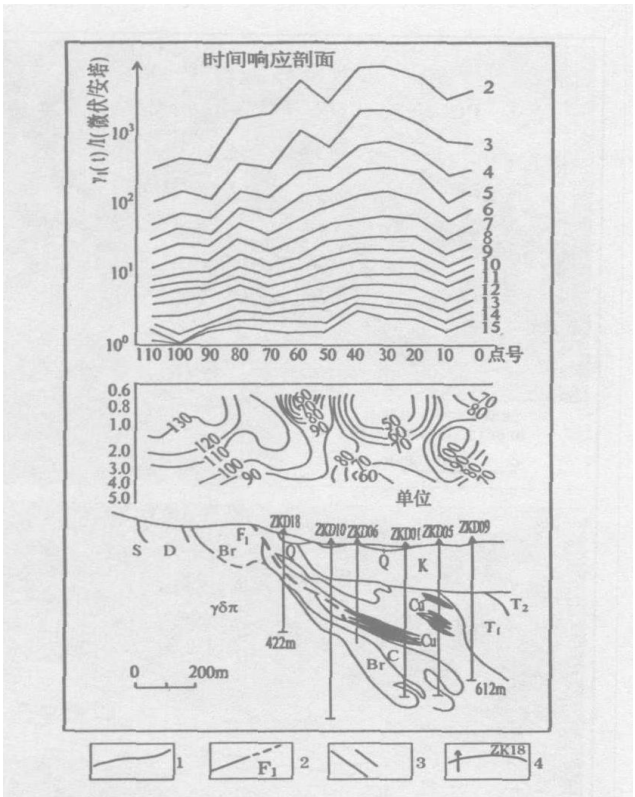


图1　安徽某铜矿0线TEM 剖面图

Fig. 1　TEM profile on Line 0 of a copper deposit in Anhui

K- 白垩系砂岩　T2- 三叠系砂页岩　T1- 三叠系灰岩　C- 石炭系灰岩　D- 泥盆系砂岩　S- 志留系砂岩　γδπ- 花岗闪长斑岩　Br- 角砾岩　1- 地质界线　2- 断层及编号　3- 铜矿体　4- 钻孔及编号

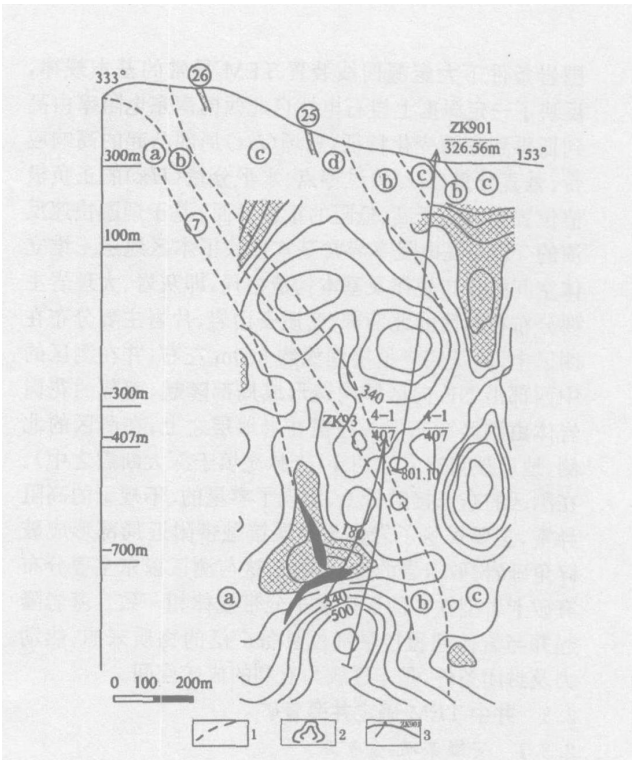


图2　辽宁某铜矿27线地质TEM 视电阻率断面图

Fig. 2　Geological and TEM apparent resistivity section on Line 27 of a copper deposit in Liaoning

ⓐ- 黑云斜长片麻岩　ⓑ- 角闪斜长片麻岩　ⓒ- 石榴直闪黑云斜长片麻岩　ⓓ- 石榴黑云石英斜长片麻岩　⑦、26、25- 矿体及矿化体编号　1- 地质界线　2- 视电阻率异常等值线(Ω·m)　3- 钻孔及编号

围较小(见图2)，但异常衬度大，埋深达1050m 的140Ωm 的低阻异常封闭圈仍清晰可辨。低阻异常走向NE，相邻剖面均有反映，深度由浅至深向NE 倾伏。在空间上与-647m 中段的呈"音叉状"厚大矿体(部分已开采)完全对应，显示了矿异常特征。另外，在矿区外围的小西堡地区，发现两处与铜-锌矿化有着密切关系的低阻异常，根据异常特征，布孔验证，在孔深330m 处，见2.8m 厚的黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿化带，其中有0.7m 厚后的致密块状黄铜矿，在孔深400m 处，见到浸染状的黄铁矿化、黄铜矿化。

2.2　TEM 法划分构造格局

早在20 世纪30 年代末，前苏联就有人提出"利用瞬变电磁信号应用于地质构造测深"问题，并作了相应论证，且广泛应用于深部地质填图、划分构造格局及确定成矿远景方面。在我国金属矿勘查方面，更多地作为直接找矿手段，使得TEM 方法的潜能并没有完全发挥。近几年在西部内蒙古阿拉善、新疆阿尔泰南缘多金属成矿带、云南滇中两卡地区的TEM 法工作中发现，瞬变电磁法对断裂构造的反映相当灵敏，在对构造位置、地层分布的确定上显示出简捷、准确的优点。很显然，利用TEM 法划分构造格局既是提高地质填图质量的一个重要途径，也是勘查方法技术拓宽应用领域的重要方向。内蒙古阿拉善某铁铜矿区TEM 工作就是这方面的一个实例。

工作区位于阿拉善某铁铜矿东延部位，出露地层为中上元古界巴彦希别组，地层岩性主要是硅质条带状白云岩、白云质大理岩，部分绿泥片岩、石英片岩以及花岗岩。矿化带主要分布于沙拉西别向斜的南北两翼，向斜总体走向为NE60°，属紧闭型，局部向N 倒转。TEM 工作仪器选用EM 67，采用400m ×400m 大定源回线装置回线内外全域测量，同时观测dBz/dt、dBx/dt、dBy/dt 三个分量，发射电流为20A、发射基频为25Hz、中心延时为0.08813～6.978ms。

在延时0.6313ms(第10 道)的平面等值线图上，瞬变场总场(H t)显示，测区中部响应高，北西、南东两侧响应略低，并在两侧梯度带形成两条走向NE、局部凸起的高响应带；垂直分量(H z)(见图3)的瞬变电磁场在测区的中部形成较强的正值异常，东、西两侧伴随有负值异常；水平分量(H x)则显示为沿剖面方向先正后负的异常特征，正负极值对应于垂直分量的过零点，过零点对应于垂直分量的正极值。总体上反映了导电围

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

岩条件下大定源回线装置TEM 异常的基本规律, 反映了一定深度上岩石电性自北西向南东电阻率由高到低再到高的变化特征, 总场(H t) 局部凸起的高响应带、垂直分量(H z) 的过零点、水平分量(H x) 的正负极值位置则对应于高、低阻的接触界面。基于烟圈快速反演的TEM 视电阻率异常基本反映了本区地层三维立体空间的分布规律及基本构造格局, 即灰岩、大理岩主要分布在测区的北西部; 变质安山岩、片岩主要分布在测区中部; 基底老地层埋深约600m 左右; 并在测区的中西部沿NE 向区域构造形成局部隆起, 南部的花岗岩体由测区南东侵入超覆在老地层之上; 在测区的北侧, 地层被花岗岩脉切穿(岩脉充填于深大断裂之中)。在测区的东部接触带上, 出现了零星的、不规则的高阻异常, 主要反映了岩体与地层接触带附近局部形成破碎角砾岩、矽卡岩的这一现象, 这与测区以东主要分布有矽卡岩型铁矿的矿床水平分带规律相一致。基岩隆起并与岩体超覆接触部位具备广泛的物质来源、热动力及封闭条件, 是本区较为有利的成矿空间。

2.3 井中TEM 确定井旁盲矿

2.3.1 安徽某硫-金矿床

该矿床属沉积- 热液改造层控型矿床, 矿体以似层状、透镜状产于黄龙组、船山组大理岩及栖霞组灰岩中, 矿石矿物主要是黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿及自然金。CK2401 孔在222m 井段打到30m 厚的Ⅱ号硫金矿体, 井中TEM 结果在井深170m 处的各道上出现强而宽的正异常(图5)。为确定异常体的赋存状态, 进行了四个方位测量。其中b、c、d 三个方位的曲线与中心方位相似, 均在170m 出现正异常, 而a 方位在170m 处出现负异常。从四个方位异常的时空特性分析, a 方位处于激发体之外; c 方位异常规整, 梯度最陡, 幅值最强(0.3ms) 时间道的$V_z(t)$ 极值达900μs, 是激发体主要赋存方位。计算的视时间常数大于1000μs, 属良导矿体, 用板状体0.5 电平的异常半宽度来计算, 盲矿体与井轴的距离为16m。对比CK2401 孔所在勘探剖面, 该盲矿体位于CK2508 孔Ⅰ号硫金矿体(281m) 的上延方向。为此, 以井中TEM 异常推算, 使原地质上推断的Ⅰ号矿体的延伸长度增加了60 多米。

2.3.2 江苏某铅-锌-银矿床

该地区工作程度虽高, 但由于构造复杂, 矿体隐伏深埋, 有时尖灭再现, 钻探工程难以控制。ZK1667 孔的目的是为了探测印支不整合面及F_4 纵向断层的含矿性, 孔深为435m, 穿过F_4 而未见矿。井中TEM (图6) 在408m 处(栖霞组燧石灰岩中) 发现一幅值高、范围大的负异常, 异常曲线上缓下陡, 说明异常体在钻孔408m 左右上部尖灭, 产状较陡。从异常的空间特征分析, 因钻孔倾向SE, 则中心回线近似为NW 方位, 所以异常体应位于钻孔的SE 方位(与马山CK2401 孔方位

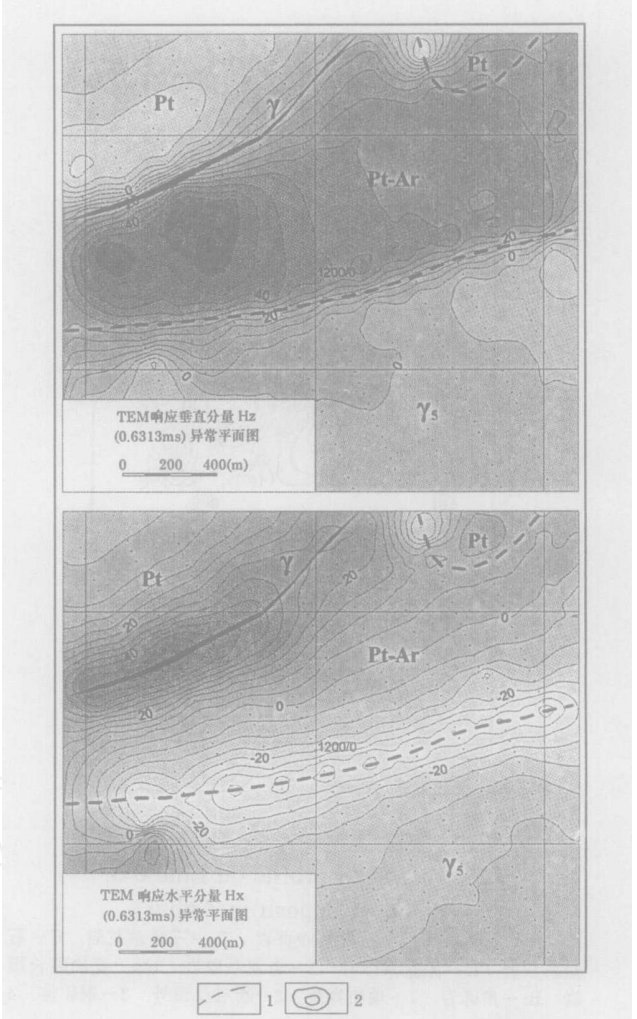


图3 阿拉善某铁铜矿TEM 响应(0.6313ms) 异常平面图

Fig. 3 TEM response (0.6313ms) anomaly plan of an iron- copper mine in Alasan

Pt- 元古界 Pt- Ar 元古界- 太古界未分 γ5- 燕山期花岗岩 γ- 花岗岩脉 1- 地质界线 2- TEM 响应垂直、水平分量异常等值线

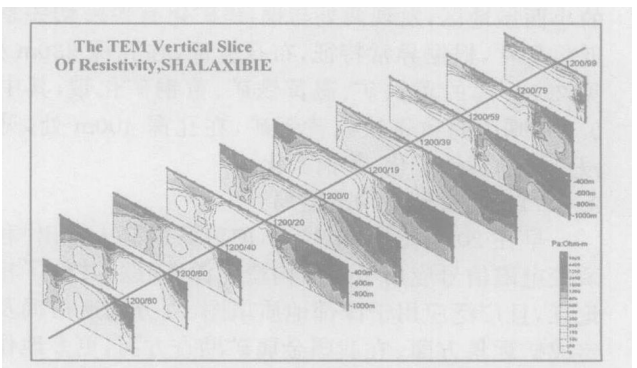


图4 阿拉善某铁铜矿TEM 视电阻率垂向切片

Fig. 4 TEM apparent resistivity profile section in an iron- copper mine in Alasan

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

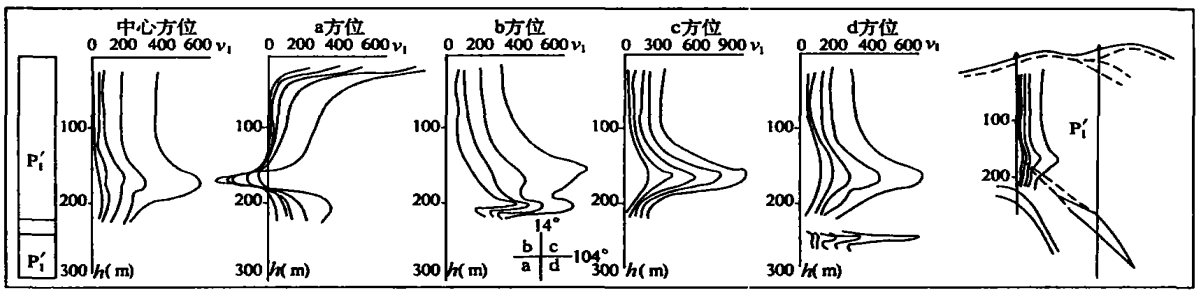


图5　安徽某硫金矿CK2401孔井中TEM 剖面图

Fig. 5　TEM profile in bore hole of CK2401 in a sulfur gold deposit in Anhui

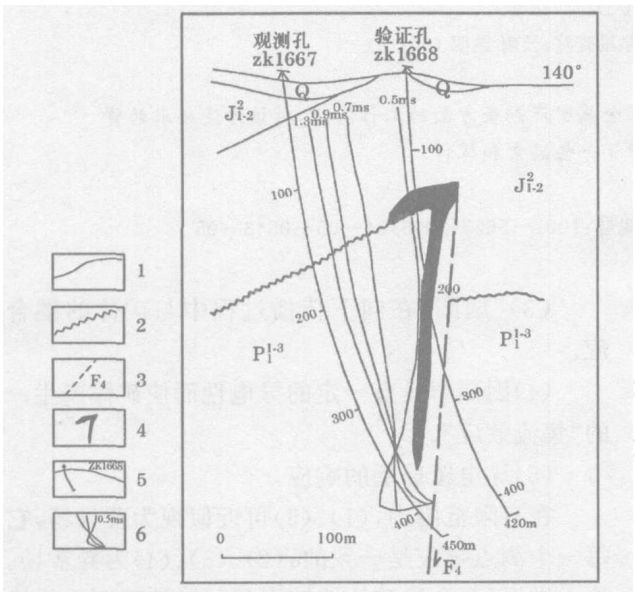


图6　ZK1667孔井中TEM 剖面

Fig. 6　TEM profile in ZK1667 bore hole

Q- 第四系　J_{1-2}^{2}- 侏罗系下统象山群第二层　J_{1-2}^{1}- 侏罗系下统象山群第一层　P_1^{1-3}- 二叠系栖霞组第三层　1- 地质界线　2- 不整合面　3- 断层及编号　4- 矿体　5- 钻孔及编号　6- 视时间常数曲线(ν_t)

相似)。异常的视时间常数(ν_t)为420μs,属良导矿体。此外,井中激电、自电在相应深度也有明显的异常存在,极值分别为22mV/V、270mV。钻孔原生晕Zn、Cu 元素含量也高于背景值。为此推测,钻孔SE 方位到F_4的断层内赋存有块状硫化矿体。经ZK1668孔验证,在印支不整合面上及与F_4平行的下构造层栖霞灰岩中,见到两层总厚度为15m 的块状硫化矿体,其下延部位与井中测得的TEM 异常位置相对应。

3　结论

本文对瞬变电磁法原理、方法技术以及资料解释等方面进行了简单阐述,给出了采用该方法在金属矿产的深埋矿体的探测、划分构造格局以及利用井中TEM 确定井旁盲矿等方面的应用实例。应用结果表明,瞬变电磁法在固体矿产找矿中,具有工作效率高、分辨率高、勘探深度较大和空间定位效果好等优点,是固体矿产探查的有效方法之一。特别是井中TEM 方法,由于在井中观测(避免或减弱地面干扰影响),接近探测体,从而增强了信噪比,解决地面物探不能测出的深部较小盲矿体和地质构造,已成为一种加大勘探深度、寻找深部隐伏盲矿的重要手段。

致谢: 承蒙有色金属矿产地质调查中心总工朱谷昌教授、北京矿产地质研究院齐文秀教授等的认真审阅并提出宝贵意见,在此一并致谢。

参考文献:

[1] 考夫曼A A,凯勒G V 著. 频率域和时间域电磁测深[M]. 王建谋译. 北京: 地质出版社, 1987.

[2] 牛之琏. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1992.

[3] 朴花荣. 电磁测深法原理[M]. 北京: 地质出版社, 1990.

[4] 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.

Application of TEM in geological exploration

CHEN Wei, YANG Sheng, WANG You-ling, LIU Tao

(*China Nonferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing* 100012, *China*)

Abstract: The principle, technical method and data interpretation of TEM were briefly explained in this paper. The applied examples using the TEM to detect the deep buried orebody, structures and search the bind ore close to the shaft in the metal resource survey were introduced. The results showed that TEM was one of the useful methods in the solid ore survey for its advantages of high-efficiency, high-resolution and precision as well as deep reaching exploration and ideal spatial localization.

Key Words: TEM, geological exploration, applied examples, time domain

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