

瞬变电磁法(TEM)新进展 及其在寻找深部隐伏矿中的应用

周平,施俊法

(中国地质调查局发展研究中心,北京 100083)

[摘要]近年来,我国大部分老矿区面临着浅表矿资源日渐枯竭,接替资源严重不足的问题,寻找深部隐伏矿体成为当前地质找矿的重点也是难点之一。文章介绍了瞬变电磁法(TEM),尤其是近20年来TEM系统的主要进展,举例说明了TEM在国内外寻找深部隐伏矿中的应用效果。TEM以其探测深度大、空间分辨率高等优势,在围岩和矿体电导性差异较为明显的地区,如铜镍硫化物等矿区,有着极为良好的深部隐伏矿找矿应用前景。

[关键词]瞬变电磁法 深部隐伏矿 块状硫化物矿床

[中图分类号]P631 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2007)06-0063-07

0 引言

当前,人类对矿产资源的需求迅速增加。有限的矿产资源与人类不断增长的需求之间的矛盾日益突出,资源瓶颈成为制约人类社会发展的的重要因素之一。进入21世纪,这种资源瓶颈作用愈发明显。然而,纵观人类的发展史,强大的矿产资源需求必然带动新一轮的地质科技创新与发展。反之,新的地质找矿理论与方法,以及探矿技术的升级与更新,必然促进找矿突破。早期的地质找矿多集中在近地表,曾取得了骄人的业绩。但浅表矿资源量有限,而且大多已近枯竭,难以满足日益增长的矿产需求。因此,在隐伏区找矿、在已知矿区外围寻找深部矿或盲矿等成为当前地质找矿工作的重点也是难点领域之一^[1]。

瞬变电磁法(TEM)是近年来电法勘探领域发展较快的一种重要方法。利用瞬变电磁法寻找矿体始于20世纪50年代,80年代后得到迅速发展。我国自20世纪70年代开始对其技术和仪器开展了研究,80年代投入生产。相对于其他地球物理方法而言,TEM具有探测深度大、分辨率高、信息丰富等优点,在找寻深部隐伏矿的应用中业已收到了较为显著的成效。

1 瞬变电磁法发展及其主要进展

20世纪50年代,TEM开始用于低阻异常填图,其目的主要是为了开展硫化物勘探。随着近几十年来的技术进步,尤其是20世纪80年代后电子技术和计算机技术的飞速发展,TEM系统测量精度和灵敏度大为提高,其应用范围从初始的找矿扩展到构造地质填图以及水文地质等领域^[2-5]。在应用的过程中,TEM形成了瞬变电磁剖面法、瞬变电磁测深法、井中瞬变电磁法和航空瞬变电磁法等四类方法^[6]。

文章从瞬变电磁法的两大应用系列——航空瞬变电磁系列和地面瞬变电磁系列加以阐述。由于井中瞬变电磁方法与地面方法存在很大的相似性,其优势在于可以将TEM接收器布设在导体附近,尽量减小低阻盖层等的影响,可最大限度地发现深部矿体。因此,该文将其列入地面瞬变电磁系列的范畴。近年来,还发展了一种新的半航空瞬变电磁系统,它采用地面发射、空中接收的形式,具有一定的应用前景。

1.1 航空瞬变电磁系列

航空电磁物探具有快速、大面积、成本低等特点,在基础地质调查、矿产勘查和水工环调查等领域

[收稿日期]2007-03-14;[修订日期]2007-04-25。

[基金项目]国土资源部百名优秀青年科技人才计划资助。

[第一作者简介]周平(1981年—),男,2006年毕业于中国地震局地质研究所,获硕士学位,助理工程师,现主要从事地质调查战略研究工作。

得到广泛应用。在方法原理上,航空电磁系统(AEM)可分为航空瞬变电磁和航空频率域电磁两种。从系统载体的角度,又可分为固定翼 AEM 和直升机 AEM 两种。在 AEM 史上,第一套系统为 1948 年问世的固定翼航空频率域系统,第一套直升机航空频率域系统出现于 1955 年,而第一套真正的固定翼航空瞬变电磁系统是 INPUT 系统,于 1965 年问世。虽然航空频率域电磁系统的问世时间早于航空瞬变电磁系统,但由于后者在勘探深度、应用范围以及数据采集和解释等方面的优势,其发展速度远胜于前者。时至上世纪 70 年代后期,固定翼 AEM 即进入到瞬变电磁时代,而直升机 AEM 的发展则相对较慢,仍旧停留在频率域电磁时代。

90 年代以后,伴随着矿产勘查投资的增加和 AEM 在环境方面的扩展应用,AEM 取得了长足的进步。在此期间,固定翼航空瞬变电磁系统从单分量(一般为 x 分量)发展为三分量(x 、 y 、 z 分量)信号测量,而且还可选择测量的脉冲宽度和脉冲频率。开展多分量测量可获得更多的关于地下导体的信息。例如, z 分量可确定导体的深度和倾角,获得更好的信噪比,尤其是在晚期延时阶段; y 分量可判定导体的对称特性、横向不均匀性等。对于脉冲频率而言,原则上脉冲基频越高,信噪比越好;脉冲基频越低,上覆岩层的响应就越会受到压制,从而达到更好地区分导体与上覆岩层的目的^[7-8]。这个时期还出现了一些可同时测量电磁场的磁分量(B 场)及其时间变化率(dB/dt)的系统。例如 QUESTEM 系统、GEOTEM 系统和 SPECTREM 系统。与 B 场相关的测量,有助于区分硫化物导体(通常与磁性硫化物矿体如磁黄铁矿共生)与其他非磁性导体,如粘土、石墨和剪切带等^[9]。此外,一次场补偿的数字算法能够把发射脉冲(即发射机接通时间)期间采集的数据用于地质填图。尤其是在高阻地区,接通响应要比断开响应强好几个数量级,因此可以测量极弱电导区的接通响应,如填制 $25\mu S/m$ 以下的电导率。而在高导区,接通响应信号还能用于多种形状波形的反褶积,将测量的数据变换成系统发射另一种波形时采集的数据,生成有限频宽的阶跃或脉冲响应,从而使系统对于高导体的响应更为灵敏^[10-11]。在直升机航空瞬变电磁领域,此阶段研发出了多线圈对、多频率(如五个线圈对、五个频率以上)的系统^[12-14]。下面将简要介绍最近二十年

来研发的主要航空瞬变电磁系统及其特点(图 1 和图 3)。

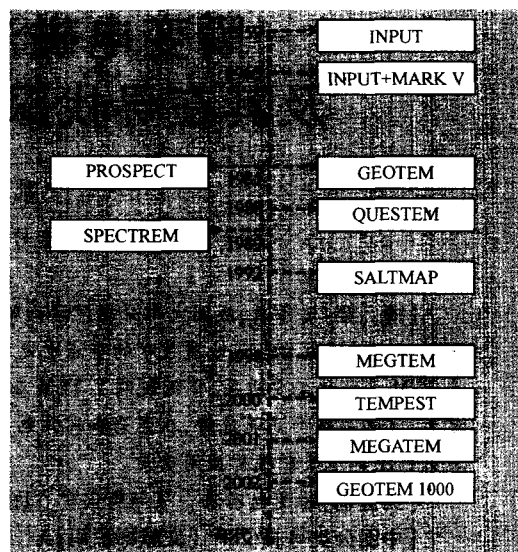


图 1 近半个世纪以来研发的主要固定翼航空瞬变电磁系统

据[13]修编

1.1.1 固定翼航空瞬变电磁系统

1983 年,一套新的 INPUT 测量系统问世。这是一种由 Geotrex 公司研制的安装在 CASA212 双引擎飞机上的系统。其系统外形直接影响到后来开发的 GEOTEM 系统(1985 年,Geotrex 公司)、QUESTEM 系统(1988 年,Questor 公司)和 SPECTREM 系统(1989 年,Anglo American 公司)。SPECTREM 系统最初名为“PROSPECT I”,以三分量测量为设计目标,后改为 SPECTREM 系统,以 DC-3 双引擎飞机为平台开展二分量测量(x 方向和 z 方向)。它是当时唯一投入使用的多分量测量系统。之后出现的多分量测量系统有 SALTMAP 系统(World Geoscience 公司,现为 Fugro 公司)和 GEOTEM 系统等。SALTMAP 系统是第一套以近地表电导率变化,尤其是辅助干旱地区盐度填图为目的的固定翼瞬变 AEM。它采用了与以往不同的方波作为发射信号,其基频理论上最高可达 50000Hz,但为了进行浅部地下水电导率填图,通常采用 500Hz 基频工作。由澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)和 World Geoscience 公司联合研发的 TEMPEST 系统也是主要用于近地表电导率填图的系统(包括盖层和基岩)。它的频谱范围宽,采样率

① 刘士毅,牟绪赞,莫根生. 公益性地质调查中航空物探方法技术现状、发展趋势与对策研究报告. 中国地质调查局发展研究中心, 2001a.

高,而且属较为轻型的系统,集成了高频近地表瞬变系统(如 SALTMAP 系统)和低频正弦波瞬变系统(如 QUESTEM 系统)的优势,可用于深达 300m 的金、镍、铜、铅、锌等金属矿勘探^[7,8,12]。

GEOTEM 系列是近二十年来最为成功的固定翼航空瞬变电磁系统之一。它以 CASA212 双引擎飞机为载体,经过多年应用和不断地改进与升级,至 2002 年,演化为 GEOTEM1000 系统,最大偶极矩从 GEOTEM 系统的 $0.69 \times 10^6 \text{ Am}^2$ 增加至 $1.1 \times 10^6 \text{ Am}^2$ 。但是, CASA212 双引擎飞机在高海拔地区(>2400m)不稳定,存在安全隐患,如南美安第斯山的阿蒂普拉诺高原(Altiplano)。因此, BHP 公司选定 Dash-7 四引擎飞机作为系统的新载体,研制了 MEGATEM 系统。其回线面积从 CASA 载体的 232 m^2 增加至 406 m^2 ,最大偶极矩达 $1.1 \times 10^6 \text{ Am}^2$,对阿比蒂比型(Abitibi)矿体的有效探测深度达到 200m。该系统于 2000 年在加拿大魁北克省马塔加米(Matagami)附近发现了 Perseverance, Perseverance West 和 Equinox 多金属矿床^[9]。2001 年,通过将电流增加至原来的四倍, MEGATEM 偶极矩翻倍,演化为 MEGATEM II 系统,偶极矩达 $2.2 \times 10^6 \text{ Am}^2$,有效探测深度增加 1/4,延伸至地下 250 多米(图 2)。

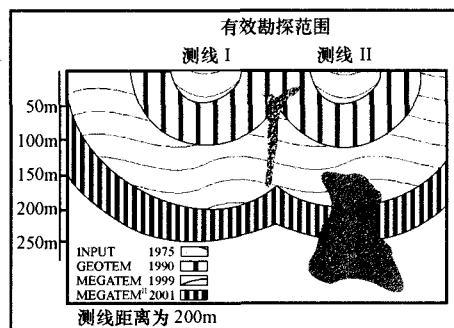


图 2 勘探深度随最大偶极矩增加而增大的示意图

据[9]修编

灰色图案为阿比蒂比型矿体, MEGATEM 和 MEGATEM II 系统均能探测到 200m 深部隐伏矿体。

1.1.2 直升机航空瞬变电磁系统

过去的二十多年,尤其是最近十年以来,直升机航空瞬变电磁迅速发展。这一时期出现了一大批新的系统,如 AeroTEM、ExplorHEM、HoisTEM、THEM、VTEM、HeliGEOTEM 等(图 3)。与固定翼航空瞬变电磁系统相比,虽然直升机航空瞬变电磁系统的运行成本要高些,探测深度也不如固定翼系统(当前直升机系统中最大功率的 VTEM 系统,最大偶极矩

达到 $6 \times 10^5 \text{ Am}^2$, 小于固定翼系统),但是,直升机系统的横向分辨能力更好,操作更加灵活,拥有能在高海拔地区进行测量等优势;而且对于小规模测量,它更加经济可行^[14-15]。此外,相对于直升机频率域系统,如 DIGHEM 和 HUMMINGBIRD,直升机时间域系统的穿透深度更大。其飞行测量高度一般在 25m 以上,只是专门用于探测地下未爆炸武器的 ORAGS-TEM 系统除外,它的飞行高度约为 2~3m^[16]。

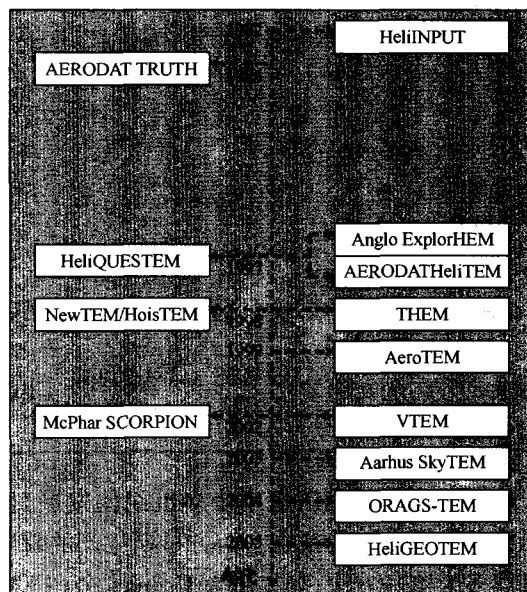


图 3 主要直升机航空瞬变电磁系统随时代的演变
据[13-16]修编

表 1 列出了当前投入使用的主要直升机时域系统的各主要参数。从表上可以看出,所有的直升机时域系统都采用垂直发射并进行 z 分量测量。HoisTEM 和 VTEM 测量 z 分量数据, AeroTEM 和 SkyTEM 测量 x、z 分量,而 ExplorHEM、THEM、HeliGEOTEM 和 NewTEM 则进行三分量测量。记录除 z 分量以外的数据有助于确定地下导体的形态特征、产出位置等。

AeroTEM、ExplorHEM 和 THEM 记录全波形,其优点在于: I. 记录了全数据带宽,包括接通、断开时的高频信息,可增强近地表构造的分辨能力; II. 全波形数据可转化为磁场响应,简化剖面解释,更容易发现良导体; III. 由于良导体没有断开响应,因此,记录全波形可能发现良导体。

1.2 地面瞬变电磁系列

地面瞬变电磁具有快速探测能力、较好的空间分辨率等优点,近年来被广泛用于矿产勘查和水工环勘查等领域。在金属矿产勘查领域,回线法和电

磁偶极法是应用较广的两种方法。由于电磁偶极法能量衰减快,其勘探深度比回线法要小,一般为几十米至百米^[17]。因此,在寻找深部隐伏矿时,回线法更为常用。回线法通常有重叠线圈、内置线圈和水

平线圈等形态。内置线圈探测水平层状或似层状导体比水平线圈要好;而对于垂直或近垂直导体而言,水平线圈效果更佳。

表 1 当前应用的主要直升机时域系统的技术参数^[16]

	AeroTEM IV (II)	ExplorHEM	HoisTEM II	HTEM	VTEM	HeliGEOTEM 30Hz(90Hz)	NewTEM	ORAGSTEM	SkyTEM
Tx 面积/m ²	113(20)	16	375	44.2	531	95	300	36	283
Tx 匝数	7(8)	8	1	2	4	2	1	4	4
最大偶极矩 /Am ²	395,000 (39,200)	25,600	120,000	123,700	630,000	230,000 (212,800)	80,000	4,320	94,000
Tx 电流(A)	500(250)	200	320	1400	300	1210(1120)	265	30	83
基频(Hz)	30/90 (90/150)	75	25	30	25/30	30(90)	25/30	90(270)	25
Rx 分量	x, z	x, y, z	z	x, y, z	z	x, y, z	x, y, z	z、垂直梯度	x, z
全波形记录	√	√	x	√	规划中	√	x	x	x
B 场	-	√	x	x	规划中	√	-	x	x
Rx 频宽	30/90 - 23,040 (90/150 - 19,200)	75 - 19,200	25 - 19,722	30 - 30,720	25/30 - 25,000	30 - 11,520 (90 - 92,160)	25/30 - 100,000	90/270 - 5,400	-
Tx 波形	三角波形	全周期 方波	1/4 全周期 方波	半正弦波	梯形波	半正弦波	方波	1/2 全周期 方波	梯形波
Tx 脉宽(ms)	1.86	3.33	5	4	4.5	4(2)	-	2.8(0.9)	10

地面瞬变电磁法历经半个多世纪的发展,目前已形成了较为完备的系统。西方早期生产的瞬变电磁法仪器多为单一方法,如加拿大 Geonics 公司 EM 系列、Lamontange 公司的 UTEM 系统、Crone 公司 PEM 系统以及澳大利亚的 SIROTEM 系统等。20 世纪 90 年代前后,电磁仪器趋于集成化,各种多功能系统相继问世,如加拿大 Phoenix 公司生产的 V-5、V-6 型系统(FasTEM、MulTEM)以及美国 Zonge 公司 GDP 系统(NanoTEM、ZEROTEM)等^[18-19]①。最近,Phoenix 公司推出了最新的 V8 网络型多功能电磁接收机。它可以开展包括大地电磁(MT)、音频大地电磁(AMT)、可控源音频大地电磁(CSAMT)和激发极化(IP)以及 TEM 等在内的多种方法。类似的还有美国 ZONGE 公司新近开发的 GDP-32^{II}多功能电磁法工作站等。

加拿大 GEONICS 公司以生产电磁法仪器 EM 系列而闻名于世。其生产的 PROTEM 系统系列不断地更新换代,现已推出 PROTEM47、PROTEM57-MK2(PROTEM57 的升级版)和 PROTEM67 系统。三套系统采用相同的接收机-PROTEM 接收机,只是发射机不同,它们分别对应 TEM47、TEM57-MK2 和 TEM-67 发射机。PROTEM47 系统最小最为轻

便,是专门为近地表测量而设计的。若采用输出电流 3A,回线圈 100m × 100m,其有效探测深度为 150m。PROTEM57-MK2 系统功率更大,有效探测深度 500m。PROTEM67 作为替换 PROTEM37 的升级系统,若采用 3D 接收线圈进行深部导电矿体(如块状硫化物)剖面测量,其探测深度 500m 以上;若采用 BH43-3 三轴钻孔探测器进行时域测井,其探测深度可达 2km。近年来,丹麦 Sørensen 等人研制了新的拖曳阵列式瞬变电磁系统(PATEM)。该系统与传统瞬变电磁系统相比,最大的优势在于能够沿着剖面进行连续的瞬变电磁测深,从而减小因数据加密和增加覆盖区域等需求所带来的成本^[20]。

国内地面瞬变电磁系统基本是在引进、消化和吸收国外先进仪器装备后进行研发的,具有代表性的是原地矿部物化探研究所生产的 WDC-2 系统。它吸收了 SIROTEM 系统和 EM 系统的优点,是一种轻便、小功率的单点测量仪器,采用微机控制,采样率为 20Hz,动态范围 140dB,最大发射电流 10A。另外还有中南工业大学和长沙高新技术开发区智通研究所合作生产的 SD-1 型瞬变电磁仪^[18]。上世纪 90 年代中期,为有效研究高阻地层覆盖下的地质构造,在高、中阻围岩中探测良导体(层),并结合我国

① 刘士毅,牟绪赞,莫根生. 公益性地质调查中地面物探方法技术现状、发展趋势与对策研究报告. 中国地质调查局发展研究中心. 2001b.

多山等特点,研制了具有探测深度范围大、分辨能力强及装备轻便化等优点的 TEMS-3S 系统。该系统理论上可将探测深度延伸至 3km 以下,而且还具有勘查隐伏良导金属矿等优势^[21]。

1.1.3 半航空瞬变电磁系统

半航空系统是一种采用地面发射、空中接收的测量系统。在测量条件较为复杂的地区,如地势起伏的山区等,相对于地面瞬变电磁系统而言,具有方便、高效等优势;而且,较航空瞬变电磁系统,信噪比更高、空间分辨率更好。

最早的半航空系统出现在 20 世纪 70 年代初期,名为 TURAIR 系统。它属于频率域电磁系统,采用两个分开的接收机确定振幅比和相位差。进入 90 年代,半航空瞬变电磁系统 FLAIRTEM 系统和 TerraAir 系统先后问世。1997 年 12 月, Fugro 公司用 TerraAir 系统进行了实验,将其与航空 TEM 系统(GEOTEM)和地面 TEM 系统(PROTEM37)进行实测对比。结果发现,对于地下浅部导体,地面 TEM 系统的晚期信噪比最好(50000:1),半航空 TEM 系统次之(500:1),航空 TEM 系统最低(仅为 25:1)。数字模拟结果显示,随着导体埋藏加深,地面 TEM 系统的晚期信噪比优势将减弱,而且半航空 TEM 系统始终强于航空 TEM 系统^[22]。

2 瞬变电磁法在深部隐伏矿找矿中的应用

目前,TEM 由于其探测深度大、空间分辨能力较强等优点,已在国内外得到广泛应用。从近年来直接寻找深部隐伏矿过程中的案例分析中可以发现,TEM 是找矿效果最好的方法之一。

2.1 井中 TEM 直接导致老矿区深部盲矿体的发现——加拿大奇瑟尔北(Chisel North)锌铜矿床^[23]

原来的奇瑟尔湖(Chisel Lake)矿床位于马尼托巴省斯诺莱克地区,发现于 1956 年,是在航空物探测量之后对地面 EM 异常进行钻探验证的结果。矿山位于马尼托巴省斯诺莱克镇西南 6km 处,共生产了约 787 万 t 矿石(含 Zn 10.6%, Cu 0.54%),于 1994 年停产。奇瑟尔和奇瑟尔北矿体产在弗林弗伦火山岩带东部,属近源火山成因块状硫化物(VMS)矿床,硫化物矿化为半块状-块状闪锌矿和黄铁矿。矿床下面发育有宽阔的热液蚀变带,其中产有含 Zn、Fe、Pb、Cu、As 和 Ag 的富含绢云母和绿泥石的透镜体。

从 1979 年开始, Hudbay 公司在原来的奇瑟尔

湖矿山重新开展勘探工作,目的是沿老矿体倾斜和倾伏方向寻找新的透镜状矿体。在 1979、1981、1984 和 1987 年期间共打了 14 个钻孔,对奇瑟尔构造盆地进行勘查。由于锌或闪锌矿与高导电性块状硫化物伴生,因此将井中电磁法视作一种有效的深部勘查手段。1983 年,该公司制定了一项针对所有深部钻孔进行测量的计划,选用的是 PEM 系统。为便于解释,采用多发射和数孔共用线圈对钻孔做了系统测量,记录了一次场强度和二次场衰减特性。1987 年 6 月,测量了两个新的钻孔,将其结果与在 1984 年测量的附近两个孔的结果进行对比。根据对一次场偏置的解释布设了 C-87-8 钻孔,该钻孔在离地面约 533 米深处打到了厚达 18.8m 的矿体(含 Au 4.37×10^{-6} 、Ag 119.6×10^{-6} 、Cu 0.17%、Zn 5.6%、Pb 1.7%)。1988 年 4 月,对 C-88-4W1 钻孔进行了测量。二次场响应显示出一个远离钻孔的异常。1990 年 1 月,布设了 C-90-2 钻孔来验证异常,在孔深 491m 处打到了厚 4m 的矿体(含 Zn 14.9%、Cu 0.36%)。另外,PEM 技术的更新促成了奇瑟尔北矿床的扩大和更准确的异常体圈定。其中,Crone 公司开发的 150 毫秒时基发射器起了很大作用。奇瑟尔北矿床的估算地质资源量约 300 万 t 矿石,含 Au 品位 0.54×10^{-6} 、Ag 34.87×10^{-6} 、Cu 0.23%、Zn 12.18%、Pb 0.81%。

2.2 以 TEM 为主的综合物化探方法发现浅部小型隐伏矿——西澳卡兹莫斯(Cosmos)镍硫化物矿床^[24]

在伦斯特地区的卡兹莫斯镍矿位于西澳耶尔冈(yilgarn)克拉通东南部诺斯曼-魏卢那(Norseman-Wiluna)的凯思琳谷(Kathleen Valley),北有基思山镍矿,南有伦斯特镍矿。块状硫化物矿体位于地下深处约 50~75m,没有地表露头,且处于强烈的镍矿化超基性岩中,确定资源量 40.1 万 t, Ni 品位 8.2%, Cu 0.36%, Co 0.12%。以现有的勘探技术很难发现该矿床,属于浅部小型隐伏矿范畴。

在该区的勘探过程中,综合应用了地质、地球化学和地球物理等多种勘探技术。其中,取得突破的是 TEM 的晚期异常。动回线 TEM 首先发现了异常,随后采用大定回线 TEM 对异常区进行详探。通过对晚期定回线数据的模拟,推测矿体为东陡倾导体,埋深约 50~75m。随后进行打钻验证了此推断。TEM 测量快速而准确地定位出规模小而品位高的透镜状矿体的产出深度和几何形态信息,对于该矿床的发现具有重要意义。

2.3 大功率 TEM 发现广西大厂老矿区外围深部矿^[25]

广西大厂矿区是我国主要的锡多金属矿区,发现的 100*矿体已日渐开采殆尽。为解决矿山可持续发展的矿源问题,已开展了多次找矿工作,但并未取得明显效果。考虑到该区锡多金属矿床与礁灰岩共生的关系,在研究大厂矿田系统的岩石和矿石物性的基础上,发现该区矿石电阻率总体小于 $1\Omega \cdot m$,而围岩电阻率多在 10^4 以上,电阻率差异巨大,因而选取了大功率 TEM 作为深部找矿的方法。

测量选取了国产的 TEMS-3S 仪器,采用重叠回线装置 $200m \times 200m$,供电时间 40ms,发射电流 100A,接收时间 80ms。从应用效果上看,除探测到已知矿体在 500 多米的异常外,还发现了 100*带、105*带和南带 3 个深部异常带,推测其深度都在 800m 以下,确定了深部找矿的靶位,从而为大厂矿田所面临的资源紧缺和可持续发展等问题提供了可喜的前景。

3 讨论与小结

现阶段我国中东部地区的老矿山普遍面临矿产资源枯竭的问题,浅部矿床正逐渐采空。寻找深部高品位、小规模矿体,对于最大限度的延长矿山寿命,充分利用现有采矿、选矿和运输设施,促使投资收益最大化具有重大经济意义。西部地区矿产埋深又比较大,野外条件复杂。因此,需要根据实际情况选用有效的物探方法进行矿产资源勘探。综合国内外寻找深部隐伏矿的经验,不难发现,现代地球物理勘探正朝着综合物探方向发展。电法、磁法、重力等方法的综合运用,是现代物探的一个重要特点。TEM 以其探测深度大、空间分辨率高等优势,在围岩和矿体电导性差异较为明显的地区,如铜镍硫化物等矿区,有着极为良好的深部隐伏矿找矿应用前景。

1) TEM 系统已从单分量发展到多分量、多参数测量,从小功率、小探测深度到大功率、大探测深度,信噪比、空间分辨率不断提高。多分量、多参数测量可获得更多更为丰富的关于地下导体的信息,确定地质体的产出位置、形态特征等。加大回线面积或(和)电流,TEM 系统的最大偶极矩不断增加,探测深度也在逐渐加大。

2) 测量 B 场及 B 场的时间变化率“dB/dt”,有助于区分导电磁性与其他非磁性矿体。

3) 航空 TEM 系统具有快速、大面积、成本低、

工效高等特点,在基础地质调查、矿产勘查和水文地质调查等领域被广泛应用。但是,对于深部矿产勘探,由于探测深度不如地面 TEM 系统,所以通常作为前期辅助性勘探方法,初步圈定异常大区带。

4) 地面 TEM 系统具有快速探测能力、较好的空间分辨率、探测深度大等优点,近年来被广泛用于矿产勘查和水工环勘查等领域。由于深部隐伏矿多具有品位高、规模小、地质条件复杂等特征,需综合开展多种形式的 TEM 测量,如动回线 TEM 和定回线 TEM 结合。动回线 TEM 可初步圈定异常区,定回线 TEM 进一步确定异常体的形态和产出层位等信息。

5) 井中 TEM 系统由于更加接近深部隐伏矿体,可降低上覆盖层的影响,在钻孔周边 200~300m 半径范围内具有较好的分辨能力,能最大限度地发现深部隐伏矿体。但成本较高,在应用时需综合考虑经济效益等因素。

致谢:国土资源部信息中心吴其斌研究员为本文的编写提出了大量宝贵意见和建议,特此表示感谢!

[参考文献]

- [1] 翟裕生,邓 军,王建平,等. 深部找矿研究问题[J]. 矿床地质,2004, 23(2):142-149.
- [2] Manzella A, Volpi G, Zaja A. Combined TEM - MT Investigation of Shallow - depth resistivity structure of Mt Somma - Vesuvius [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004, 131: 19-32.
- [3] Christiansen A V, Christensen N B. A quantitative appraisal of Airborne and Ground - based Transient Electromagnetic (TEM) Measurements in Denmark [J]. Geophysics, 2003, 68: 523-534.
- [4] Danielsen J E, Auken E, Jørgensen F, et al. The Application of the Transient Electromagnetic Method in hydrogeophysical surveys [J]. Journal of Applied Geophysics, 2003, 53: 181-198.
- [5] Meju M A, Fenning P J, Hawkins T R W. Evaluation of Small - loop Transient Electromagnetic Soundings to locate the Sherwood sandstone aquifer and confining formations at Well Sites in the Vale of York, England [J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 44: 217-236.
- [6] 张胜业,潘玉玲. 应用地球物理学原理[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2004,282-283.
- [7] Smith R S, Keating P B. The usefulness of multicomponent, Time - domain Airborne Electromagnetic Measurements [J]. Geophysics, 1996, 61: 74-81.
- [8] Smith R S, Annan A P. Advances in Airborne Time - Domain EM Technology [M]. In "Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration" edited by Gubins A. G., 1997, 497-504.

- [9] Smith R S, Fountain D. The MEGATEM Fixed - Wing Transient EM System applied to mineral exploration: A discovery case history [J]. *First Break*, 2003, 21: 71 - 75.
- [10] Annan A P, Smith R S, Lemieux J, et al. Resistive - limit Time - domain AEM apparent conductivity [J]. *Geophysics*, 1996, 61: 93 - 99.
- [11] Smith R S. On the effect of varying the pulse width to detect high conductance bodies [J]. *Exploration Geophysics*, 1998, 29: 42 - 45.
- [12] Fountain D K. Airborne electromagnetic systems - 50 years of development [J]. *Exploration Geophysics*, 1998, 29: 1 - 11.
- [13] Fountain D K, Smith R S. 55 years of AEM; 50 years of KEGS. KEGS 50th Anniversary symposium, Toronto. 2003. (<http://www.fugroairborne.com/download/KEGSSymposiumAEM.pdf>)
- [14] Fountain D, Smith R, Payne T, et al. A Helicopter Time - Domain EM System applied to mineral exploration: System and Data [J]. *First Break*, 2005, 23: 73 - 78.
- [15] Witherly K, Irvine R. The VTEM Heli - time Domain EM system - Four Case Studies. In: AESC2006, Melbourne, Australia, 2006: 1 - 4.
- [16] Sattel D. A brief discussion of Helicopter Time - Domain EM Systems. In: AESC2006, Melbourne, Australia, 2006: 1 - 5.
- [17] 李舟波, 孟令顺, 梅忠武. 2004. 资源综合地球物理勘查 [M]. 地质出版社. p. 86 - 93.
- [18] 豆会平, 魏 启. 脉冲瞬变电磁仪的发展现状及对策 [J]. *石油仪器*, 2000, 14(4): 26 - 28.
- [19] 李金铭. 电法勘探方法发展概况 [J]. *物探与化探*. 1996, 20(4): 250 - 255.
- [20] Sørensen K I, Auken E, Thomsen P. TDEM in groundwater mapping - a continuous approach. 2000. (<http://www.hgg.au.dk/media/soerensen2000cpresentation.pdf>)
- [21] 王庆乙. TEMS - 3S 瞬变电磁测深系统的研制 [J]. *有色金属矿产与勘查*. 1996, 5(3): 169 - 175.
- [22] Smith R S, Annan A P, McGowan P D. A comparison of data from Airborne, Semi - airborne, and Ground Electromagnetic Systems [J]. *Geophysics*, 2001, 66(5): 1379 - 1385.
- [23] Vowles A K. A case history of the discovery of the Chisel North Zinc/Copper Deposit - Snow Lake, MB. (<http://www.cronegeophysics.com/Chisel%20case%20history%20for%20SEG.pdf>)
- [24] Craven B, Rovira T, Grammer T, et al. The role of geophysics in the discovery and delineation of the Cosmos Nickel Sulphide Deposit, Leinster area, Western Australia [J]. *Exploration Geophysics*, 2000, 31: 201 - 209.
- [25] 王志豪, 张小路, 王 钟. 大功率瞬变电磁在广西大厂外围深部找矿中的应用 [J]. *物探与化探*, 2006, 30(3): 194 - 198.

NEW PROGRESSES AND APPLICATION OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC METHOD (TEM) IN DEEP - CONCEALED ORE FINDING

ZHOU Ping, SHI Jun - fa

(Development and Research Centre, China Geological Survey, Beijing 100083)

Abstract: In the past years, most of old mining areas in China are confronted with resource exhaustion in shallow depth areas and scarcity of replacement resources. Therefore, prospecting for deep - concealed ores has become highlight as well as a difficult point for current mineral exploration. The paper introduces Transient Electromagnetic Method (TEM) and its progresses in the past two decades, and illustrates application of TEM in mineral prospecting, showing advantages of this method in prospecting for deep - concealed ores. Through integrated study, it is concluded that due to large depth of prospecting and high resolution, TEM is expected to be a promising future for deep - concealed ore prospecting in areas with evident conductive differences, such as Cu - Ni sulfide mining area.

Key words: Transient Electromagnetic Method (TEM), deep - concealed ores, massive sulfide ore deposits