

# 高寒冻土条件下 CSAMT 在地热勘探中的试验研究

祝杰 李平 刘应冬

中国人民武装警察部队黄金第十二支队

DOI:10.32629/gmsm.v3i1.520

**[摘要]** 地热作为新的清洁能源越来越受到重视和开发。我国地热资源储量丰富,尤其紧邻城市周围,地热利用率高,经济和社会效益潜力巨大。地热田勘查以电磁法为主,电阻率的异常幅值一般能指示地热田的赋存状况。本文以探测深度大、分辨率高等为特点的可控源音频大地电磁法为例,阐述了在高原冻土条件下寻找城市周边埋藏较深的传导型地热的成功实例。

**[关键词]** 地热; 可控源音频大地电磁; 高原冻土; 电阻率; 清洁能源

## 引言

地热作为可替代太阳能、风能、核能、水能、石油、煤炭等的一种绿色能源,其开发利用受到越来越广泛的关注。然而,地热资源埋藏较深,目前开采深度已超过2000m,尤其在高海拔冻土地区地质构造复杂,开采风险很大。本文利用可控源音频大地电磁测深法具有地形条件限制小、抗干扰能力强、穿透能力强、工作效率高等特点,在高原冻土区复杂地质条件下进行探索性研究工作,并结合地质推断来较为准确地判断热储地层位及地质构造分布情况。

## 1 方法原理简介

CSAMT法是一种人工源频率域电磁法(见图1):

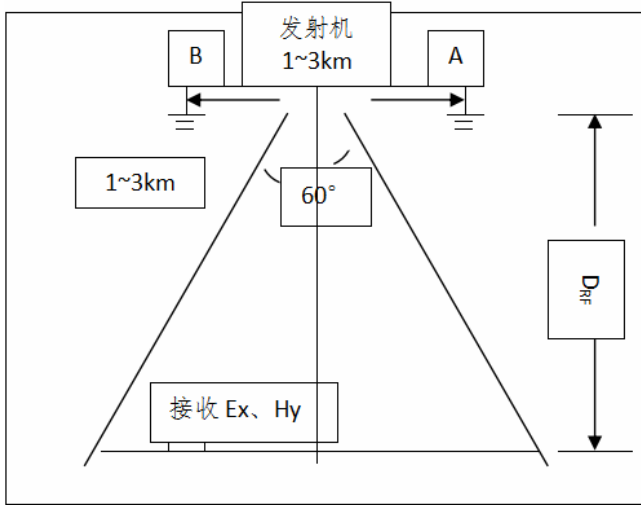


图1 CSAMT工作方法示意图

Fig.1 Diagram of CSAMT working methods

研究区域内沿测线用接收机接收与发射偶极AB平行的电场信号Ex及与发射偶极垂直的磁场信号Hy,然后根据Cagniard公式

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2} \quad (1)$$

计算出视电阻率 $\rho_s$ ,始终f为发射频率。

电磁波在介质中的穿透深度D为:

$$D \approx 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2)$$

上式说明,当大地电阻率结构一定时,改变信号频率,便可达到垂向测深的目的。在利用加拿大凤凰公司所推出的V8多功能电法工作站时,发射

频率一般从8192Hz开始,以2的方次递减,最低可达1000s,发射功率一般可达到20~30KW。

由式(1)计算出的视电阻率 $\rho_s$ 。“近场”因子法进行近场改正,经改正过的视电阻率值满足电磁场在远区成为平面波的条件。由地形和电阻率的浅部横向变化引起的静态位移很有可能影响最终的解释结果,因此,用空间滤波法积分求得静态校正过的电阻率数据。经过上述计算处理之后,用配套的反演软件进行Bostick反演,综合考虑发射极距、接收距离和外界干扰等因素的影响,保证整条测线反演结果的连续性,经过不断的校正来做出更接近真实电阻率值随深度变化的断面图,从而直观地揭示地下电性结构特征。

## 2 地热田类型及其勘探方法

地热田主要为对流型和传导型两类。

对流型地热田是指:由于大陆板块的移动碰撞,使地壳发生断裂破碎,沿板块边缘生成深大断裂带,地下深部的热熔岩浆加热上升到地壳浅部并和地表冷水混合形成对流,这种以对流循环方式形成的地下热水以温泉形式出露或储藏于地层浅部,这种地热田温度一般较高。

传导型地热田是指:深部热能通过岩石的热传导作用将热量传递到地层浅部并将地下水加热形成地热田。传输热量的多少是以大地热流值来表示的,其意义是指单位时间内单位面积上通过的热量。其表达式为:

$$Q = Kgrad\theta \quad (3)$$

据统计,全球大地热流值的平均值约为 $1.6 \times 10^{-6}$ 卡·厘米<sup>-2</sup>·秒<sup>-1</sup>,正常情况下地壳内的地温梯度均值为 $20^\circ C / km$ ,所以大地热流值与热导率相关,热导率高,热流值大,传输热量多。

地热田形成受很多种因素制约,而地热田的形成又对地下原始地质环境造成了破坏。因此以寻找地热田形成有力地质条件为线索开展物化探测量是发现地热田的基本方法。勘查地热田的方法很多,主要有:测温法、化探方法、重力法、磁法及电阻率法等。最终的勘查目标是发现地热田的热储构造,即:断裂构造破碎带。

电阻率法是进行地热田勘查的传统方法。由于温度升高,地下水密度和粘连性减小,溶解能力增强,随之水矿化度增高,离子活性增加,电阻率降低,与周边地层形成显著的低电阻异常特征。

可控源音频大地电磁法具有勘探深度大,横向分辨率高,穿透高、低阻层及抗干扰能力强等优点,再考虑到高寒冻土条件下的现实情况,对发射装置做了一些特殊的研究实验处理,使发射极的接地电阻从 $8000\Omega \cdot m$ 降低到 $100\Omega \cdot m$ 以内的理想范围之内以后才进行地热田勘查工作,取得了

满意的效果。

### 3 地热田勘查实例

本工程北祁连山褶皱带, 界于走廊褶皱带与中祁连山隆起带之间, 以大断裂为界, 西北端以东北东向大断裂和塔里木地块相接, 向东为华北地台的鄂尔多斯地块相切。古老基地出露局限, 前长城系在西部呈北西西向断块展布, 岩性为黑云斜长片麻岩、混合片麻岩、斜长角闪岩、石英片岩夹少量中基性火山岩及铁矿层。

本次工作选用的仪器为加拿大凤凰公司生产的V8多功能电法仪。经过多次现场试验后, 场源采用赤道电偶极装置, 采用接地电偶极距AB为2km向下供电, AB方向误差小于 $3^\circ$ , 供电电极采用钢钎, 采用组合电极方式布极, A、B两端给打入60根电极, 环形并联排列, 入地深度1米以上, 浇灌盐水保持接地条件的良好, 以减小接地电阻, 增大供电电流, 提高接收信号质量。施工最大供电电流达到10A。收发距选择5km较为适宜。测量装置采用赤道装置, 标量测量, 水平方向电场(MN)平行于场源(AB), 水平磁场垂直于场源布设, 最低频率选择为0.416Hz。

当打入60根电极环形并联电极时, 引起极点面积扩大, 这时将不再是满足格林公式所需要的点电源了。为了克服这一问题, 而将60根环形并联电极等效为点电源, 在实际工作中, 我们采用增大发射极AB的办法予以处理, 这就消除了非点电源电流扩散所引起的误差。

通过对CSAMT野外原始数据进行处理后, 剔除了各种干扰频点, 经过数据反演转换绘制了各剖面的电阻率剖面等值线图, 如图2:

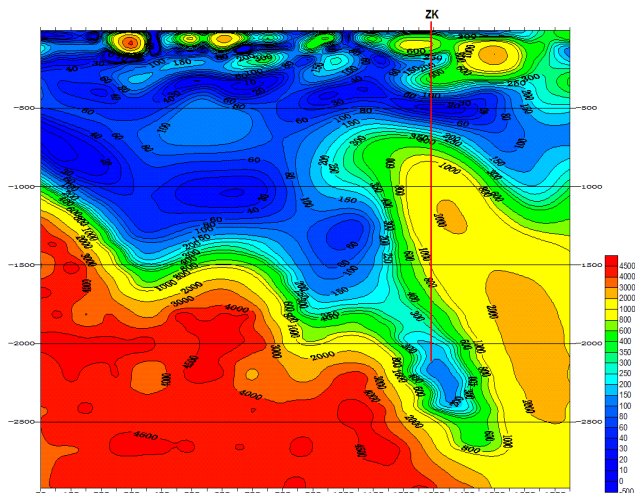


图2 CSAMT勘查综合解释断面图

Fig.2 An integrated profile of inverted resistivity from CSAMT

地热田勘查中, 物探勘查的主要任务是寻找温泉上升的断裂破碎通道。断裂构造由于应力作用, 岩石破碎裂隙发育, 多被水或胶结物充填, 从

而引起了电阻率的降低, 破坏了电磁场的连续稳定性, 使电位场发生畸变, 通常反应为明显的低阻异常, 但随着断层中含水量的不同, 电阻率反应将有明显的差异。反应在视电阻率等值线剖面图上, 表现为视电阻率等值线的扭曲、错动、变形、宽度突变、出现“V”字型低谷等, 在区内当断裂带富水性越好水温越高时, 此时电阻率越低。

依据上述思路对图2进行综合剖面解释, 推测在25m~1175m范围从垂深200m~1750m有多个相对集中的低电阻率值封闭圈, 推断在该带内岩石裂隙相对发育, 透水性较好, 但深度较浅, 不宜布钻; 在1275m~1525m范围从垂深2000m~2500米出现一个低电阻率值封闭圈, 与周围岩石视电阻率形成很显著的对比, 该出面积较大, 富水性相对较强, 可作为开发该地区地热资源的较理想井位。最终定孔位在1375m处, 钻探结果在2250m深处发现热储构造, 出水温度 $50^\circ\text{C}$ , 出水量1500t/d, 勘探结果达到了预期目的。

### 4 结论

可控源音频大地电磁法对查明地下地质情况, 寻找低阻体赋存部位、划分深部的地质构造具有明显的优势。充分发挥这些优势可以勘查地热资源赋存状况及储地热的有利部位, 为地热资源开发提供地球物理依据, 从而提高地热和地下水资源的开发效率, 减少投资风险。

上述试验研究表明, 电磁测深法能够较好地承担断陷盆地传导型地热田的勘查工作, 尤其是第一次在高寒冻土条件下进行勘查, 电阻率异常较好地反映了地热存储条件和热储空间的分布情况, 不失为一次成功而有效的尝试。

### [参考文献]

- [1]黄力军, 孟银生, 陆桂福. 可控源音频大地电磁测深在深部地热资源勘查中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2007(S1):60-63+12.
- [2]L Rybach, L J P Muffkr. Geothermal systems principles and case histories[M]. John Willey & Sons Ltd, 1981.12.
- [3]刘德瑞, 黄力军. 可控源音频大地电磁测深法在地热田勘查中应用效果初探[J]. 工程地球物理学报, 2007,(2):86-89.
- [4]青海省地质矿产局. 青海省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1982:11.
- [5]可控源音频大地电磁系统(说明书), 加拿大:Phoenix公司, 1987:11.
- [6]吴璐苹, 石昆法. 可控源音频大地电磁法在地下水勘查中的应用研究[J]. 地球物理学报, 1996,(5):712-717.

### 作者简介:

祝杰(1986--), 男, 四川乐山人, 汉族, 硕士研究生学历, 工程师, 武警黄金第十二支队, 611732, 研究方向: 地球物理勘探。

### 基金项目:

基金项目名称: 中国地质调查局基金项目“青海省大场金矿矿区技术经济与环境综合评价”; 基金项目编号: DD20160331。