

CSAMT法在某地区地热水勘查中的应用

——以广东省飞来峡地区为例

黄国东 丁超玉

广东煤炭地质二〇一勘探队

摘要:以广东省飞来峡地区地热资源勘查成果为基础,介绍了可控源音频大地电磁法(CSAMT)物探在地热水勘查中的应用实例。为了查明区内控温、导水断裂构造,寻找有利导水部位,利用地下水与岩层具有电阻率差异的物理特性,我们选择了可控源音频大地电磁法(下简称CSAMT法)测电阻率的物探方法,对含水断裂进行探测。CSAMT法的优点是抗干扰能力强、探测深度大,分辨率高。本文介绍了CSAMT法的基本原理,工作方法、资料处理,以及成果解释,准确推断出该地区地热的有利储存场所。

关键词:可控源音频大地电磁法;低阻异常;含水断裂带;热水通道

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.18.113

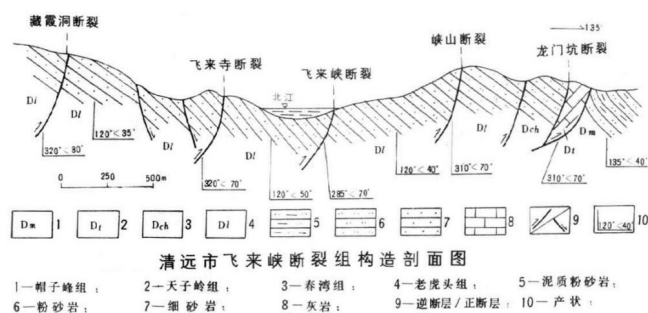
一、地层

测区地层主要为泥盆系和第四系,泥盆系地层以滨海—浅海相碎屑岩为主,局部夹薄层含炭质灰岩和泥质灰岩。第四系以河床冲—沉积砂砾岩和残坡积黏土层。

二、构造

区内构造以断裂为主,地处飞来峡断裂带(组)。

其中2条北东走向的断裂组成峡山断裂带,在峡山南西侧复合;2条北东向断裂组成龙门坑断裂带,在黄泥咀北侧复合。这两条断裂带倾向北西为主,倾角 40° — 80° 左右,在剖面上构成叠瓦式逆冲断层系(见图)。



清远市飞来峡断裂组构造剖面图

1—帽儿岭组; 2—天子岭组; 3—春湾组; 4—老虎头组; 5—泥质粉砂岩;
6—粉砂岩; 7—细砂岩; 8—灰岩; 9—逆断层/正断层; 10—产状。

峡山断裂,发育于泥盆系地层中,呈现出挤压破碎带性质,并伴随分支,倾向北西,碎裂岩发育;另一条龙门坑断裂,是飞来峡断裂带发育最好,规模最大的断裂之一。它发育于泥盆—石炭纪地层中,并以巨型透镜体的形式分布,裂隙极其发育,充填有褐铁矿。剖面上这些断裂构成叠瓦式逆冲断层系,而龙门坑断裂是这个逆冲推覆体的推覆面。它规模大,延伸长,切割了深部增温层,是储热断裂。而东西走向的潜江断裂,其主断面呈舒缓波状,沿主断面可见断层泥和密集的劈理。它经历了两次活动,早期受到强烈的左旋逆冲挤压,晚期又发生近南北向水平伸展,也同样切割深部热源区,是一条导热断裂。因此本区充分具备了储热、导热构造条件。

热异常区的深部温度场经常受到压扭性深断裂控制,高异常热流常沿该断裂带活动,由于高温软流层沿

深部隆起以及岩体热传导各向异性的热效应使得深部热流趋向于沿深断裂向上传导。而本区主要位于东西向佛冈—丰良深断裂带之一束“潜江断裂”与北东向“飞来峡断裂带”的交汇处,发育多条次级断裂,断裂带内可见断层泥、硅化岩、硅化碎裂岩等,且广泛分布有侏罗世花岗岩,这说明该断裂带深部蕴藏着岩浆、放射性物质衰变和断层活动摩擦等多种成因的热源。

三、岩浆岩

该调查区发生了频繁的岩浆活动,侵入岩较发育。主要为晚侏罗世花岗岩,燕山运动中晚期岩浆活动的产物,时间序列属于高桥单元(J_3G),侵位于泥盆系地层中。主要岩性为中粒斑状黑云母二长花岗岩,具有似斑状结构、基质花岗结构,岩石化学特征为:SiO₂ 71.65%,Al₂O₃ 7.69%,Al₂O₃ 1.03,DI 83.59,为铝过饱和的钙碱性岩石系列。

四、水文地质

测区内的地下水可分为第四系孔隙水、风化壳孔隙、裂隙水、构造裂隙水及基岩裂隙水等四类。根据野外调查及前人资料简述如下:

第四系孔隙水主要分布在山间洼地以坡积、冲积成因,厚5—10m的第四系坡积、冲积物中,水位埋深约0.2m。

风化壳孔隙、裂隙潜水主要分布在花岗岩体上部风化壳中,风化壳厚一般>10m,最厚达50m。含水一般,出露泉水点不多(测区内暂见5个),流量1.5—5.0 m³/d。大气降水为其主要补给源。

构造裂隙水分布在硅化破碎带、构造蚀变带和构造节理中,含水性不一。

基岩裂隙水主要分布于区内(主要西南部)的砂岩中,由于本区曾有多次构造运动,砂岩解理发育,孔隙度较大,因而含水相对较为丰富。

区内地下水的补给主要来源于大气降水和地表水的渗入。第四系孔隙水与风化壳孔隙、裂隙潜水及构造裂隙水的水力联系较为密切。相互补给。不同类型的地下水以蒸发、渗水和下降泉的形式排泄。

五、探测方法及原理

地下水与断裂带有不可分割的关系,断裂为地下水之路径、也是导水、贮水之构造。在电性上,由于存在地下水,断裂相对于岩层(围岩)具有良导电性,即表现出低电阻率,因此,利用其相对于围岩具低电阻率的差异,找出断裂,从而进一步找到地下水。花岗岩具高电阻率值,砂岩的电阻率值也相对较高,据调查,本区无金属矿床,出现相对极低值的电阻率异常(下称“低阻异常”),通常为断裂带所致——是比较明显的“纯异常”。

利用地下水与岩层具有电阻率差异的物理特性,我们选择了可控源音频大地电磁法(下简称CSAMT法)测电阻率的物探方法,对含水断裂进行探测。

CSAMT法具有抗干扰能力强、探测深度大,分辨率高的特点。

CSAMT方法是基于电磁波传播理论和麦克斯韦方程组所反映的电荷、电流、电场、磁场随时间和空间变化

的定律。依据大地电磁法在满足远区条件下的卡尼亚视电阻率公式：

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

其中 ρ_s 为视电阻率， f 为频率， E 为电场强度矢量， H 为磁场强度矢量。

对穿透深度 D 较好的经验公式是：

$$D = \frac{\delta}{\sqrt{2}} = 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

上式说明，穿透深度仅仅取决于两个参数：大地电阻率 ρ 和使用的信号频率 f 。随着电阻率的增大或频率的减小，穿透深度会加大。在大地电阻率结构一定时，只要改变信号频率，就能得到连续的垂直测深，实现测深目的。但是往往最大穿透深度会受到场源近场效应和信号强度的制约。按照一般的经验，CSAMT法的最大探测深度为1~2km。

六、工作方法与技术

采集电磁场信号的频率范围为1~5765赫兹，并设置频点加密。工作装置采用标量测量、扇形赤道装置，收发距 r 为5~10km，供电电极距 AB 为1000~1200m；在实际接收机测量中，观测电场和磁场两个分量，典型的旁侧标量测量包括与场源平行的电场及与之垂直的磁场。在接收机上一次同时接收上述不同频率系列的5道电场 (E_x) 和1道磁场 (H_y)，即一次发射可同时完成6个点的频率测深。测量电极距 $MN=20m$ ，接收电极为不极化电极。发射机在2048Hz以下频率供电电流一般不小于10A，测量点距25m。采取压实磁棒、增加叠加次数采集数据、压制长周期干扰信号和实时监控数据标准偏差等办法来确保数据质量，一般数据叠加次数为128~16384次。数据采集仪为美国Zonge公司生产的GDP32-II多功能电法工作站。

(一) 物探工作的布置

从已完成的地质调查结果来看，区内最为明显的含水构造是北东走向的F1断裂，其出露最长，各向节理发育，地质依据充分；参考汤塘温泉形成的机理：其由北东向断裂（控水）与东西向断裂（控热）两条断裂交汇而涌出。因此，明确F3断裂附近的北东向F1断裂的特征尤为关键。基于这种考虑，结合实地高压线、乐广高速公路以及对F1断裂进行探测可控范围，布置北西向（136°）测线5条分别为L2、L4、L8、L10、L12号，其中L2、L4各长700m，L8、L10、L12各长1000m。

各测线的坐标见下表3-1。

物探测线信息表

线号	起点坐标		终点坐标		长度	备注
	Y	X	Y	X		
L2	2625798.18	418749.75	2625299.63	419241.13	700m	各测线走向136°，施测时用距离标志点号，点距20m。
L4	2625869.22	418912.38	2625370.67	419403.76	700m	
L8	2626308.94	419161.00	2625596.73	419862.96	1000m	
L10	2626720.04	419263.83	2626007.82	419965.80	1000m	
L12	2626774.94	419544.23	2626062.73	420246.20	1000m	

(二) 数据处理

数据处理的流程是：首先对原始数据进行编辑，将明显的干扰点剔除掉，然后对存在静态影响的数据进行空间滤波，形成频率~视电阻率等值线图，接着再进行二维反演，绘出二维反演断面图。最后分析这些图件，划分出异常段，结合已知的地质资料进行综合解释推断，形成最终的CSAMT测深推断成果。

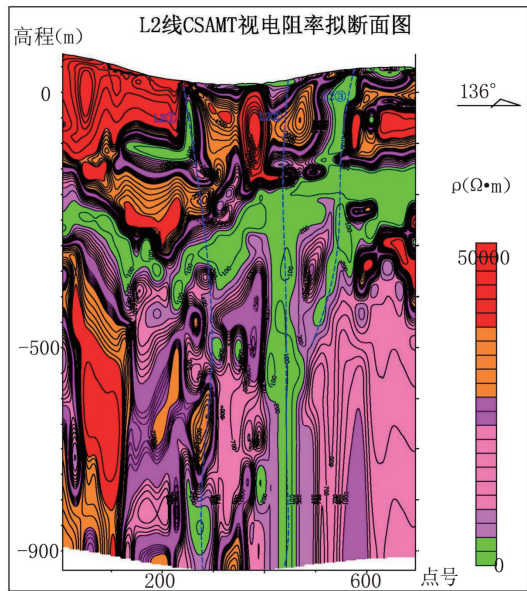
七、物探工作成果解析推断

用视电阻率拟断面图则可直观地了解到剖面的电性分布情况，利用相邻两条剖面的异常特点，结合地质情况，将两剖面中的异常联系起来，进行综合的推断分析，可进一步了解断裂构造的走向、延深及倾向等情况。在没有如地下金属管道、地下供电电缆管线、通讯管线等干扰的条件下，低电阻率异常带基本反映了含水断裂带的存在。

经验认为，与温泉有关的断裂破碎带或裂隙带一般有如下特点：陡、窄、深、长。陡，断层面表现为高倾角形式；窄，为压性断裂；深，延深大，可切入深部热源；长，具有一定的规模才可深入地下。因此，电阻率剖面中高倾角的、延深大的低电阻率带是我们寻找的“低阻异常带”，并在平面上可在多条平行剖面上连续反映出来，这样的低阻异常带在地质上推断为含水的断裂破碎带或裂隙带。

综合统计5条剖面电阻率值，最大值为577930 $\Omega \cdot m$ ，最小值为1 $\Omega \cdot m$ ，平均值为8558 $\Omega \cdot m$ ，取不大于200 $\Omega \cdot m$ 的值为异常值，以150 $\Omega \cdot m$ 等值线形成的陡立体作为低阻异常体（绿色），并根据电阻率值的变化趋势，确定断裂带的大体位置。

下以L2测线为例分析，根据L2号测线视深度—电阻率剖面图，图中电阻率值由小（低）至高分别由绿色—浅紫—紫—橙—红色表示（见图右侧色标），蓝色斜线条表示低阻异常体的综合体，由其表示推断的断裂带。



电阻率剖面中低电阻率异常表示方式

L2全剖面电阻率最大值为182650 $\Omega \cdot m$ ，最小值为7 $\Omega \cdot m$ ，平均值为6984 $\Omega \cdot m$ ，剖面电阻率由浅至深呈高一低—相对高特点，剖面两端相对完整。剖面由西往东地表岩性显示为砂岩—第四系—砂岩。

通过电阻率值的对比，认为此剖面主要有三条低阻异常带，倾角均较陡。其中异常带L2①向下延深约1000m，异常带呈高倾角产状，倾向南东，推断为一条有一定深度的断裂；异常带L2②向北西倾，倾角陡，延深大于1000m，上部较封闭，推断为后期构造运动剪切，或为后期硅化充填所致，其低阻异常带下延深度大，电阻率值小，是一个强低阻异常带，推断为一延深较大断裂；异常L2③推断为一北西倾、延深较小的断裂，其深部末端已交汇至L2②断裂中。L2剖面各异常推断情况具体见下表。

L2号测线低电阻率异常带推断表

序号	异常地段	推断倾向	描述
①	230-280	SE	异常倾角较陡、延深约1000m, 异常强度中等; 异常位置地表为一高压线(110千伏), 有一定的干扰, 推断为一有一定深度的断裂。
②	430-470	NW	异常倾角陡、延深大于1000m, 浅部电阻率值较大, 地表附近有硅化, 自中部电阻率变小, 至深部有延伸趋势, 异常强, 推断为一延深较大断裂, 热水有利通道。
③	490-560	NW	异常延深约500m, 中部异常较强, 深部与L2②异常交汇, 为上一深断裂的次一级断裂。

图中L2①~③为推断出来的断裂带。下用此类似方式对各测线进行分析推断, 为简明起见, 将各个异常推断出来的断裂带以说明表方式作分析说明。

L2、L4、L8这三条测线位于涪江南岸, 认为在同一岩性序列上。这三条平行的测线, 主要针对地表发现的北东向硅化破碎带F1进行深部探测。L4、L8测线推断异常断裂带如下:

L4号测线低电阻率异常带推断表

序号	异常地段	推断倾向	描述
①	150-260	SE	异常倾角陡、延深有限, 地表处一条近东西向的110千伏高压线, 因此不作详解。仅推断此异常为一断裂破碎带。
②	380-420	NW	地表见石英脉, 与断裂F1相关。
③	580-640	NW	异常浅部倾向北西, 深部近直立, 异常强度为3个异常中最大一个, 推断为一条有较大延深的断裂。

L8号测线低电阻率异常带推断表

序号	异常地段	推断倾向	描述
①	350-450	SE	异常倾角较陡、延深约1000m, 异常强度中等; 异常总体呈上宽下窄状, 异常所处为一民宅, 可能有一定的干扰, 推断为一有一定深度的断裂。
②	550-750	NW	异常倾角较陡、北西倾, 延深大于1000m, 异常总体呈上宽下窄状; 深部有延伸趋势, 异常强, 推断为一延深较大断裂, 是一条热水有利通道。

由点到线, 多条平行剖面的相邻近的、性质相似的异常点可以形成线状的构造带。低阻异常L2①、L4①与L8①的形态、产状相似, 平面上将两点连成线, 标出其倾向, 可以明显反映了一条断裂带的存在, 在平面图上用F-3标志, 同理L2②、L4②与L8②的连线, L2③与L4③的连线分别标记为F-1、F-2。F-1、F-2、F-3均推断为断裂破碎带。

F-1断裂与地质调查发现的F1断裂相对应, 地表见多条石英脉, 这是一条有一定宽度的断裂破碎带, 硅化带的存在, 显示其曾有热液作用, 也可认为其延深较大, F-1断裂呈北东走向。

F-3断裂走向北东, 地表无明显的断层迹象, 其位于测线L2、L4的部分与一条近南北向的110千伏高压线

相交、相邻, 在分辨率上受到一定的影响, 因此不作详细推断, 但从地形、岩性变化的特性相分析, 其应是在的一条隐伏断裂。

F-2断裂走向北东, 地表为砂岩地层, 推断为一条隐伏的断裂带, 从L2测线的L2②与L2③的关系来看, F-2断裂是F1断裂浅部的一条分支。

L10、L12这两条测线位于涪江北岸, 从地质调查的情况来看, 两测线所处位置为花岗岩体风化层。对于F1断裂的延伸方向, 涪江北岸也难以在地表有所发现, 因此L10、L12测线为探测北东向的隐伏断裂带(F1)而设计。

L10号测线低电阻率异常带推断表

序号	异常地段	推断倾向	描述
①	90-190	NW	电阻率值相对较高、延深约700m, 推断为一压扭性断裂。
②	660-710	陡立	地表为花岗岩风化层, 推断为一条隐伏断裂。
③	850-950	NW	异常浅部倾向北西, 深部近直立, 异常强度为3个异常中最大一个, 推断为一条有较大延深的断裂, 是热水有利通道。

L12号测线低电阻率异常带推断表

序号	异常地段	推断倾向	描述
①	20-220	SE	异常范围宽, 中一中深部破碎程度高, 推断其为一条处于(或接近于)近东西向断裂带的断裂破碎带, 具开放性(张性断裂)。
②	420-460	陡立	异常为一隐伏断裂。
③	690-780	NW	异常上部宽大, 中浅部收窄呈上宽下窄的漏斗状, 延深大, 有一定的规模, 与F1断裂对应。

两测线剖面中, 低阻异常L10①与L12①相邻, 但两者的形态、产状并不相似, 因而两者分别作单独的异常处理。L10②与L12②两异常的形态、产状高度相似, 其连线推断为一条隐伏的断裂, 考虑到涪江南岸的F-3断裂与之对应关系明显, 认为其是处于涪江北岸的同一条断裂; L10③与L12③与F1断裂相关, 对应于涪江南岸的F-1断裂, 这是一条具有一定规模的北东向断裂破碎带, 深度大, 认为这是一条热水有利通道。

八、结论

通过电阻率值对比, 推断出F-1、F-2及F-3三条北东向的断裂带。认为F-1与F-3断裂被东西向的F3断裂所冲断, 而F-1断裂与F1断裂相对应, 是一条有利的热水通道。

参考汤塘温泉的成因, 北东向断裂与东西向断裂的交汇部位有高温热泉涌出。因此, 距东西向断裂不远、且与东西向断裂交汇的断裂带地段形成温泉的可能性也较大。

参考文献

[1] 崔恒哲. 综合物探在地热资源勘查中的应用[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
 [2] 余年, 庞方. 2010. 音频大地电磁测深法在地热勘查中的应用研究[J]. 水文地质工程, 37(3): 135-138.
 [3] 刘海桐, 刘同庆, 徐克全. 可控源音频大地电磁测深法在贵州地热勘探中的应用[J]. 山东煤炭科技. 2015: (6) 149-151.