

四级装置均在单纯激电效应相关线的左侧查到X, 偶极—偶极装置大多在激电效应相关线的右侧查到X。

关于校正的误差问题。由于这种求解方法主要是用所测数值之间的比例关系, 故对系统观测误差有压制作用, 传递误差一般都比较小。要注意的是频率间隔较小的视频率效应值(如: $P_s(0.3125, 1.25)$), 这个值的观测误差影响最大, 所以要尽量观测准确。另外, 测量尽量在校准好 $\rho_s(f_D)$ 之后一次完成, 这不仅提高工作效率, 主要是使随机干扰的影响最小。

江西省地质局物探队提供了宝贵的实测资料, 谨此致谢。

参 考 资 料

- (1) Frank B. Millett, 'Part E, Electromagnetic Coupling of Collinear dipoles on a uniform half-Space' Mining Geophysics I 401-419
- (2) 战克、朱宝汉, 《物探与化探》, 1981年第1期
- (3) 贺来秀三, 日《物理探矿》, 19卷第4、5号
- (4) 邓祖林: 电磁耦合及改正方法, 地质总局变频激电会议专题报告
- (5) 罗延钟, 《地质与勘探》, 1980年第10期
- (6) J. B. 维特, 变频法, 《地球物理勘探专辑》第7辑
- (7) 阎立光、沈连金, 非均匀介质中电磁耦合的模型实验, 冶金部物探公司专题报告

电阻率法在个旧矿区的应用与效果

西南冶金地质勘探公司物探队 曹显光

问题的提出

个旧矿区的找矿向物探工作提出来的主要任务是: 1. 寻找深部硫化矿和浅部氧化矿; 2. 圈定控制成矿中心的隐伏花岗岩的起伏形态; 3. 在浮土覆盖区寻找含矿断裂带。该区的物性参数从表1可见:

1. 花岗岩基本上没有磁性, 氧化矿磁性不大, 硫化矿埋藏太深, 而浮土磁性干扰较大。曾大面积做过磁法, 但效果不佳。

2. 花岗岩与围岩(个旧灰岩)的密度和弹性波速度相差均不大, 硫化矿与围岩虽有密度差, 但埋藏深, 地形切割, 重力法没有取得明显效果。地震法因受条件、设备等限制未作研究。

3. 由于矿床氧化深度大(大多在300米以上), 山形过滤电场强, 以致大面积使用自然电场法也没有取得地质效果。

4. 花岗岩、氧化矿和断裂带的电阻率与围岩有3~10倍的差异, 具备寻找这些地质体的物性前提。但矿区存在着各种强大干扰, 为此, 在开展电阻率法工作时, 应对干扰

表 1

物性 参数 岩矿 石名称	电阻率 $\Omega \cdot m$	磁化率 $10^{-6} CGSM$	密度 g/cm^3	地震波速 km/S
个旧灰岩	4.8×10^3 2.8×10^4	0	2.6~2.7	4~5
花 岗 岩	4×10^2 1.5×10^3	$0 \sim 5 \times 10^2$	2.6	5~5.9
夕 卡 岩	1.1×10^2 1.2×10^3	60		5.1
硫 化 矿	0.0n $n \times 10^2$	$n \times 10^3$	3.7~4.4	5
氧 化 矿	1.3×10^3 $n \times 10^2$	1×10^3		
断 裂 带	1.5×10^3			
浮 土	10~ $n \times 10^3$	$0 \sim 10^4$		

逐一进行研究, 予以消除或压抑到最小程度。

几种主要干扰的研究

一、地形影响的干扰 在山区作电阻率

法地形影响是主要干扰之一。地形引起的异常强度往往比有用异常大若干倍,给异常的推断解释带来困难。为此,我们从63年起就进行了这方面的研究。70年代又得到中南矿冶学院地质系、云南大学数学系的支持和协作。先后取得的主要成果是:1.提出了地形上的视电阻率概念: $\rho_s = (\rho_{MN} \cdot J_{MN}) / J_0 \cos \alpha$ (其中测量点处坡角 α 余弦的倒数项是我们引入的);解决了供电点和测量点分别位于角域两坡、且径向长度相等的电位公式^[1],推导出角域地形点电源场电位公式。2.用实验和计算方法证明了复杂地形可以组合迭加,角域是地形的基本单元,从而使复杂地形的改正简化。3.计算编制了《角域电位畸变量板》,《联合剖面的角域地形曲线图册》,《对称电测深的角域地形曲线图册》、《斜交地形辅助曲线图册》和《三度体山脊辅助曲线图册》,为地改提供了资料。去年中南矿冶学院地质系又提出了一种简便、快速的“多项式趋势拟合的地改法”。

即使是作定性解释,对山脊、山谷及地形拐点附近的异常,如不作地形改正,强大的地形影响将掩盖或歪曲地质体产生的异常。在图1-1上,山顶上实测曲线出现了一个明显的反交点。经地改后,山顶上的反

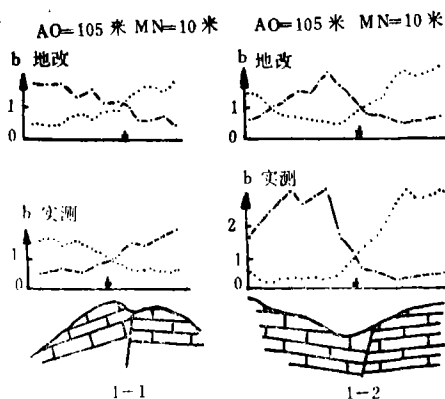


图1 地形改正实例

交点消失,而在含矿断裂带上出现了明显的正交点,显示含矿断裂的存在。图1-2是一个强大的山谷异常掩盖了断裂带异常的实例,正交点向山谷方向发生位移。经地改后,正交点移回,正好反映了断裂带的位置。说明地改是必要的。

二、低(高)阻岩层界面侧向影响的研究

当电法在电性不同的岩层界面附近工

作、或电测深点到界面的距离 α 小于所用的电极距时,另一侧低(高)阻岩系将吸引(或排斥)电流,形成所谓的侧向影响。这种影响主要与电测深点到界面的距离(d)、两侧介质电阻率的比(μ)及测深点布极方位和界面夹角(θ)三个因素有关。已有人计算出平行和垂直界面两种不同情况下的电阻率曲线。但在实际工作中,布极方向往往与界面斜交。为此,我们研究出适用于斜交界面的电测深计算公式,并编制出《直立界面视电阻率量板》,用来解决陡倾斜界面的影响。这种影响不是容忽视的。如69年我们在矿区某个地段工作时,由于当时对侧向影响认识不足,没有对近南北走向,陡倾斜的个旧大断裂带及其西侧的法郎组砂页岩(其电阻率比工作地段小10~20倍)所形成的侧向影响进行改正,所以按KQ型四层断面推断,认为有一个以724点为中心的“低阻花岗岩突起”,其埋深为540米,电阻率为 $1240\Omega \cdot m$ (与花岗岩的电阻率相当)但验证结果,打到1001.6米时仍未见到花岗岩。这一失败的教训是很深刻的。经用“量板”改正后,曲线末枝不同程度地上升,如图2改正点($\times$)所示,这是个旧组下部岩层的反映。

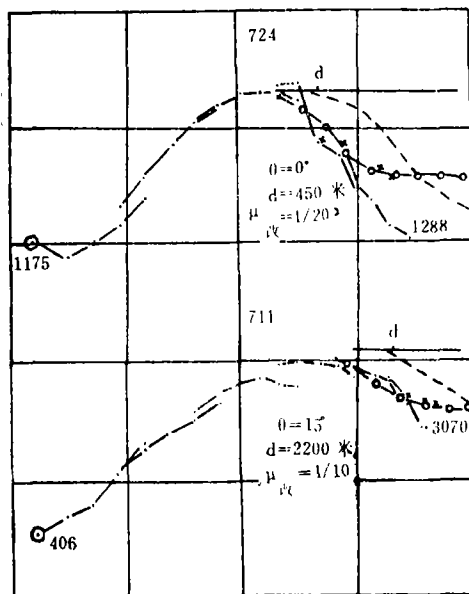


图 例
 实测曲线
 推断曲线
 改正点
 垂直界面计算曲线
 与界面夹角
 离界面距离

图2 侧向影响改正实例

推断花岗岩的埋深大致为1390米。图2还表明：测深点离界面距离 d 越小、或 μ 越大，侧向影响就越大。如724点比711点的侧向影响的改正值大得多。对其它存在这种影响的各测深点也都进行了改正，“低阻突起”异常消失。此后对全区 400km^2 内的700多个点逐个进行检查，对那些需要和可以进行侧向影响改正的点（目前对几个界面综合影响的点还没有研究出改正办法）都作了改正，把原来圈定的另一个“低阻突起”异常消除了。并为钻探所证实。

实际工作中经常碰到不同电性的倾斜界面对电测深的影响。为此，又编制出《倾斜界面视电阻率量板》，用来改正受倾斜界面影响的电测深曲线。

三、地表、地下局部电性不均匀体及邻近良导体影响的研究 由理论计算和实验得知，当地表电性不均匀体（局部浮土、局部地形等）的规模比电剖面法所用电极距小许多倍时，同一测点的 ρ_s^A 、 ρ_s^B 值近似地呈一定比例的变化，这样，视电阻率曲线可以转换成视电阻率比值曲线（简称 b 曲线）。图3所示的局部起伏地形，引起 ρ_s 曲线近似同比例的畸变，虽然 ρ_s 异常值 n_ρ 达45~90%，但对 b 曲线的影响很小，其异常值 n_b 只有10%。

当局部浮土规模（相对电极距而言）较大时，联剖曲线将形成正交点。为鉴别它是

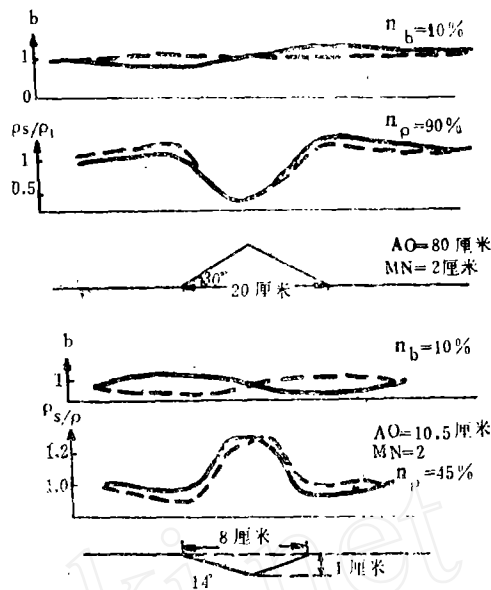


图3 ρ_s 与 b 曲线的对比

浅部浮土还是深部地质体引起，可在正交点附近布置4个电测深点。当交点是浮土引起时，所测得的电测深视电阻率断面图上的 ρ_s 曲线只表现浅部有异常，深部的 ρ_s 线趋于平，行与图6-2近似。对浮土中部（如图4-1）的实测曲线，可借助“浮土量板”用选择法计算理论曲线使之与实测曲线逼近。当两者相近时（如图4-3），说明理论曲线计算所依据的半圆柱形态（图4-4）与引起实测曲线畸变的浮土形态（图4-2）是

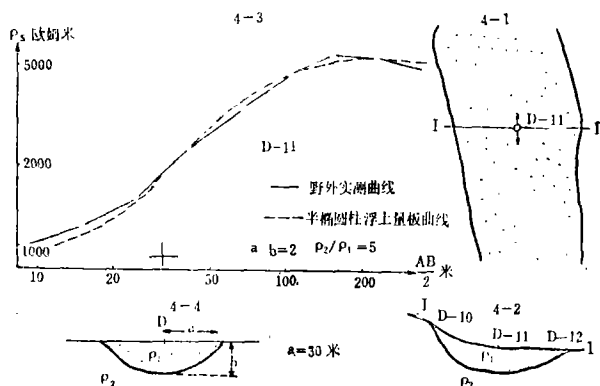


图4 浮土厚度选择法推断曲线

相近的，于是达到了了解浮土厚度的目的。

地下局部电性不均匀体的影响，我们采用 b 曲线来解释，效果较好。

直立良导体位于地形平坦、介质均匀的

围岩中，在它上方将出现一个对称而且是低阻的联剖法正交点。可是在区内的良导性含矿断裂带上很少出现正交点。由于该区断裂带常成群出现，间距小于供电电极距、异常互

相迭加。图5就是一例,图中所示的两个导体相距 $1.09AO$,其电阻率 $\rho_2 = (1/5)\rho_1$, $\rho_3 = (1/10)\rho_1$ 。在 ρ_2 顶部, ρ_2 使 ρ_s^A 下降, ρ_s^B 上升;但在同一位置, ρ_3 却使 ρ_s^A 上升、 ρ_s^B 下降。两者综合结果,形成组合迭加曲线5-2,在 ρ_2 顶部并不形成正交点,而形成两曲线由宽到窄由窄到宽的低阻带。同理,在 ρ_3 上方,由于 ρ_2 影响,使其正交点不在 ρ_3 正上方,偏向 ρ_3 的左侧。两导体的位置均可由b曲线梯

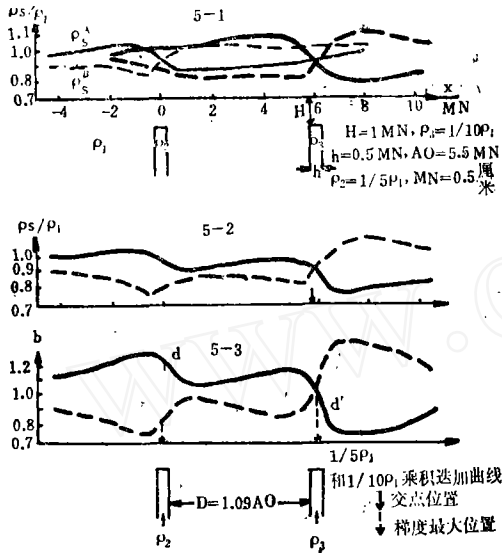


图5 导体组合迭加 ρ_s 和b曲线

度的最大值点确定。当 $b_A > b_B$ 时,导体位于b曲线靠近点左侧的梯度最大处,即图5-3 d点处;当 $b_A < b_B$ 时,导体位于b曲线接近点(或交点)右侧的梯度最大处,即d'处。这就说明b曲线不但能分辨邻近的良导体影响,而且能利用其特征点比较准确地确定导体的顶部位置。

四、工业游散电流及铁管干扰的研究

矿区内还有工业游散电流和铁管的干扰,前者给电法读数带来很大困难,甚至无法观测,后者产生干扰异常,给推断解释带来困难。对于工业游散电流的影响,虽采用换向器等办法来消除,可是由于干扰讯号太大以及频率不同,因而未能奏效。通过调查干扰的范围,最后在干扰小的空隙时间,快速读数而获得了较准确的数据。对铁管的干扰是通过对异常的实地踏勘,针对影响情况的不同,采取了不同的消除方法。例如,将铁管悬空后再观测。如果没有异常,则说明原

来的异常是铁管引起的,(如图6-1示)。或利用小极距电测深测得视电阻率断面图,根据 ρ_s 等值线变化来区别。当等 ρ_s 线只在浅部有异常时,说明联剖曲线交点是铁管影响,如图6-2示。铁管给电测深造成的干扰,还可改变布极方向,取其影响最小的曲线来推断。这样做的结果,大多数干扰异常均可得到消除。

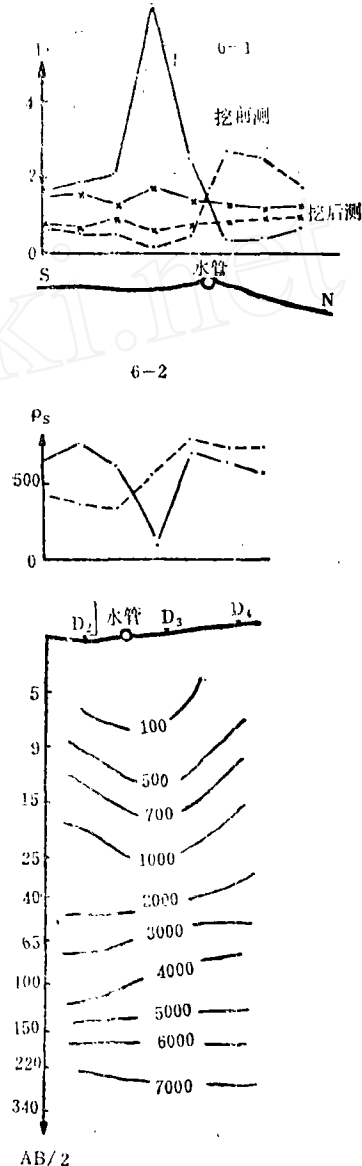


图6 水管干扰的消除方法图

找矿效果及异常的推断解释

一、在浮土覆盖区寻找含矿断裂带 地质情况表明:脉状氧化矿往往赋存在陡倾的断裂带内。其电阻率从表1可知,与围岩

有3~10倍的差异,因而投入了联合剖面法来寻找隐伏的含矿断裂带。

全区做了面积53km²、比例尺1:5千至1:1万的联剖法工作,获得400余条异常。据不完全统计,将近一半的异常得到工程揭露,绝大多数工程都达到了验证目的。矿产储量增加不少。图7就是该区29线的电法、地质综合剖面图。由于受平行导体、浮土等影响, ρ_s 曲线没有出现正交点。但转换成b曲线后,出现了一些歧离带异常。当时推断在异常I、II、III处有三条含矿断裂带。除I号异常部位可见角砾岩外,其余两条均被15~20余米厚的浮土掩盖。为了进一步查明断裂的存在及其倾斜方向,在II号异常

两侧布置了四个电测深点。从等 ρ_s 线断面图可见,中部有一个低阻带,说明有断裂带存在;等 ρ_s 线南陡北缓,反映断裂向北倾,如图中虚线所示。又根据 $b_A > b_B$,所以在b曲线靠近点的左侧梯度最大值点布置了浅井,于23.6米打穿浮土后见断裂带和矿体。同样,III号异常由浅井和钻孔所证实,也是断裂带和矿脉所引起。

在岩性比较均一,地质情况比较简单的情况下,借助电阻网络用选择法、对所假设的导体的形状和电性不断地加以修改,使模拟得的曲线逐次接近野外实测曲线,即可达到解释异常的目的。图8就是电阻网络模拟实例之一。采用二维电阻网络模拟,先后三次修改导体的形态和电参数比例,最后所得的曲线(图8-2)与实测曲线(8-1)基本

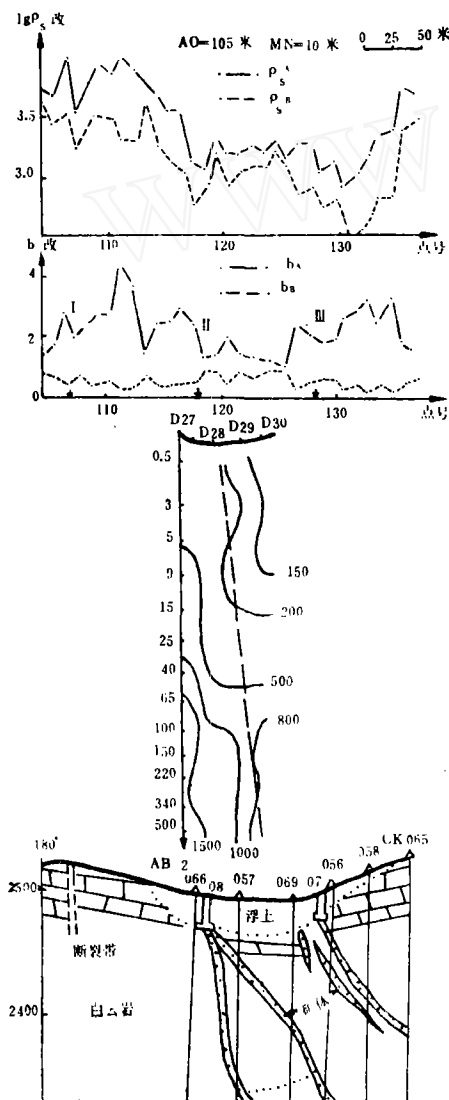


图7 电法地质综合剖面图

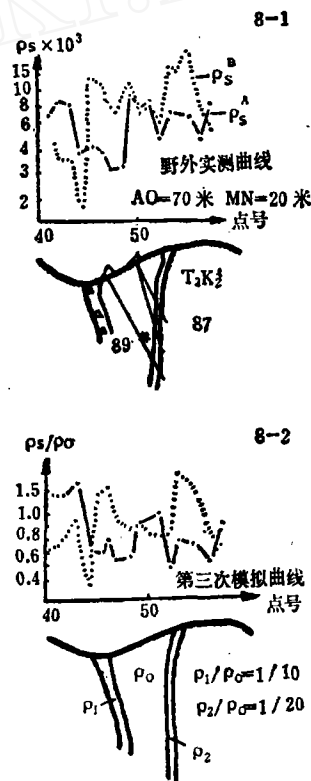


图8 电阻网络模拟推断实例

一致,说明异常是断裂和含矿断裂带引起。后得到槽采与钻探的证实,在 $\rho_1/\rho_0 = 1/10$ 的部位为断裂带,在 $\rho_2/\rho_0 = 1/20$ 部位为含矿断裂带。可见所作出的解释是正确的。

二、圈定花岗岩的起伏形态 矿区内已知硫化矿多赋存在燕山期黑云母花岗岩的突

起部位或凹陷带。因此,圈定隐伏花岗岩的起伏形态具有间接找矿的意义。

早在50年代后期,在这个地区应用电测深法(极距 $AB=4000$ 米)成功地圈定了埋藏较浅的(300~500米)花岗岩突起地带,指出了矿体赋存部位。以后继续进行这项工作,也取得了一些较好的地质效果。图9是用电测深法圈定的北炮台到天马山的花岗岩突起形态。所推得的花岗岩埋深与钻探结果相符,误差一般均小于10%。与此同时,为了寻找埋深更大(近1000米)的花岗岩突起,投入了大极距($AB=10000$ 米)的电测深。由于它同样存在上述干扰,我们除采取相应的消除措施外,还特别注意测深点位置的选

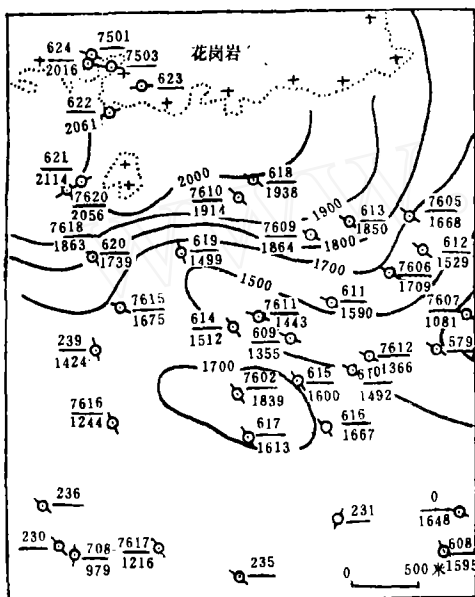


图9 北炮台一天马花岗岩等高线平面图

择和布极方向;分析对比时注意使曲线圆滑;力求较准确地掌握中间层的电阻率。最后,编制出花岗岩等高线和等深线平面图,基本上反映了区内较大的隐伏花岗岩的起伏形态。对高峰山花岗岩的突起经验证后找到了一个中-大型的以锡矿、铜矿为主的矿田。该花岗岩突起部分的埋深大于800米,推断误差较大,初步认为下部有一低阻岩系和一个大破碎带的干扰。其中有一些低阻的异常还有待验证。

三、直接寻找深部硫化矿 寻找浅部矿体已有实例证明应用电测深法是有效的。但是能否用它来寻找深部矿,还有待实践证明。一般均认为电测深只能在平坦地区寻找顶部

面积相对于埋深为无限大的矿体,其厚度须大于上复岩层,而且倾角不能大于 20° 等。

在研究老厂电测资深时⁽¹⁾,发现有几个电测深点的测深曲线的末枝下降,其斜率也比一般的测深曲线要陡,末枝的视电阻率值也比花岗岩的电阻率值小。图10所示的曲线,其末枝 ρ_s 仅为 $600\Omega\cdot\text{m}$,还在继续下降。说明是电阻率值远小于 $600\Omega\cdot\text{m}$ 的地质体与花岗岩的综合反映。定量推断结果,该地质体的埋深为288米。经查核地质资料,在该点下312米处,有一厚约10米、规模 400×700 米的硫化矿体(编号3—1号)。推断的埋深与实际埋深相对误差只有8.4%。从此例可看出,在这里用电测深法直接寻找深部矿体也是有可能的。

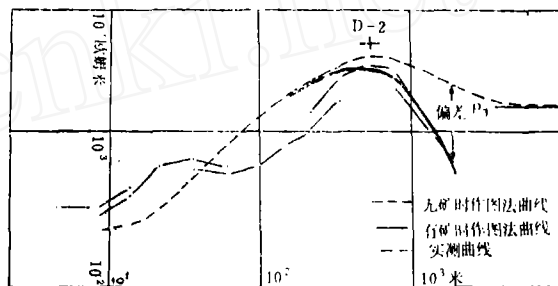


图10 D-2两种方案推断结果的对比图

从电测深理论得知:电测深曲线的变化,不仅决定于被探测层的深度,而且还决定于被探测层的厚度 h 和电阻率 ρ 的关系,即与纵向电阻 $S=h/\rho$ 和横向电阻 $T=h\cdot\rho$ 的大小有关。如果被探测层的 S 、 T 与上复岩层的 S' 、 T' 差异越大,则电测深曲线的变化就越大。就图10电测深点F的矿体来说,如取其平均厚度 $h_3=10$ 米,平均电阻率为 $1\Omega\cdot\text{m}$,则 $S=10$;取浮土的厚度为 $h_1=15$ 米,电阻率为 $\rho_1=250\Omega\cdot\text{m}$;取灰岩的厚度 $h_2=297$ 米,电阻率 $\rho_2=5400\Omega\cdot\text{m}$,此时上覆岩层的 $S_{1,2}=15/250+297/5400=0.115$ 。于是 S 比 $S_{1,2}$ 大87倍,曲线一定产生很大偏差。我们把这种偏差称为异常。在上述条件下,当异常大于20%就有可能发现它。而D-2在 $AB/2=2000$ 米时,异常达68%。从图10可见,假设有矿时,由作图法得到的理论曲线的末枝与实测曲线的末枝将重合在一起;如果无矿,则花岗岩的理论曲线与实测曲线的末枝将彼此偏离很大。在这

个地区还发现几条类似D-2的电测深曲线,有些经钻探验证,打到了矿体,408号和116号点在74年还没有工程验证,78年验证结果,打到了10.31米和17.31米厚的矿体。

对于408号点,推得末枝的电阻率为700 $\Omega \cdot m$,埋深为480米。CK9-4布置在408号点西10米,于447.34米见矿,推断的相对误差为7.3%,矿体厚10.31米,是一个锡、铜、铅、锌综合矿体。后来在其周围又打了三个孔,都见到了矿。

用量板只能推断矿体与花岗岩体的综合埋深。为了单独把矿层划分出来,我们对408号点用电子计算机做了三种方案的反演计算。即(1)假设其下没有矿体,花岗岩电阻率取1360 $\Omega \cdot m$,获得图11中的曲线1,与实测曲线偏差很大,说明推断与实际情况不符;

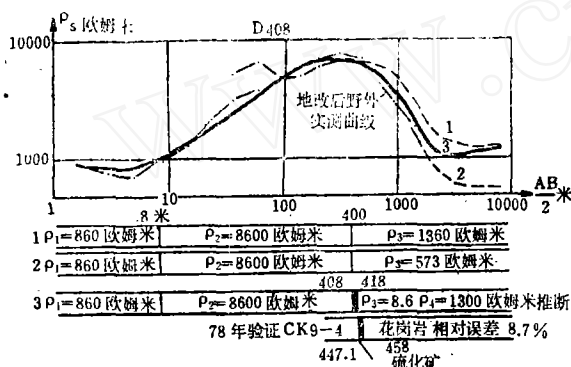


图11 D408三种方案推断结果的对比图

(2)假设其下没有矿体,花岗岩电阻率取573 $\Omega \cdot m$ (下限值),获得了图中的曲线2,也显示与实测曲线不符;(3)假设在408~418米有一层电阻率为8.6 $\Omega \cdot m$ 的硫化矿,418米以下仍取花岗岩的平均电阻率为1300 $\Omega \cdot m$,则获得图中的曲线3与实测曲线相当吻合。

电测深曲线末枝下降陡,其电阻率小于花岗岩电阻率的点是否都是矿体的反映呢?情况并不如此简单。例如76—5号点位于白云岩上,曲线末枝斜率陡、末枝电阻率为400 $\Omega \cdot m$ 。如果推断下面有矿,则推断的深度与已知孔(CK75—2)所揭露的花岗岩埋深对比,相对误差达40%。如果把该点东南侧两公里(AB距10公里)的低阻断层、大片浮土及北西侧4.2公里的低阻砂页岩做为侧向影响,并给予改正后,曲线末枝变平缓,

电阻率值为1100 $\Omega \cdot m$ 。根据改正后的曲线来推断,花岗岩的埋深与实际埋深相对误差只有6%,再次说明消除干扰的重要性。

存在的问题

1.工作游散电流的干扰,严重地影响所测得的数据的质量和工作效率,有些地区至今仍无法观测,应采用新的仪器来解决。

2.在这个矿区,找矿方向之一是向深部发展。但用目前的方法和设备有很大的困难。从图12可知:假设在类似矿区的地电条件下,在710~730米深处寻找厚20米、水平方向的规模可视为一维的、电阻率为10 $\Omega \cdot m$ 的矿体,要获得一条完整的曲线(相对无矿的曲线1、异常大于20%而言),AB极距需要20公里。这时观测精度很难保证,如果要寻找埋深更大的矿体,观测精度则更难以保证。此外,定量解释的精度,在很大程度上取决于中间层电阻率的精确程度。在这个地区又难以用电测井方法来获得所需要的电阻率值。

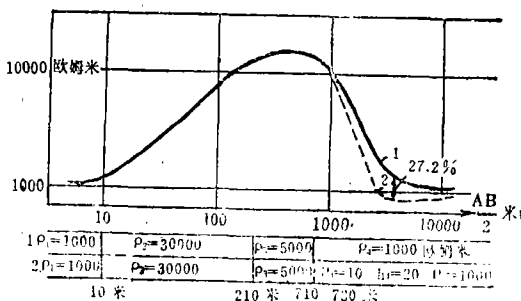


图12 电测深电算正演曲线

3.目前电阻率法对解决许多地质问题还不能得到定量的解释。例如大极距电测深存在多个不同电性的岩层界面的侧向影响;用电测深能直接寻找的矿体的水平方向的规模与埋深的关系如何,都有待进一步研究。

以上所介绍的成果,有些是我们与中南矿冶学院地质系物探专业,云南大学数学系的老师们集体协作取得的。于安良等同志对本文提了许多宝贵的意见,在此一并致谢。