

$$1: I_1, U_{12}/\rho_{s12}, U_{13}/\rho_{s13}, U_{14}/\rho_{s14}, \dots, U_{1n}/\rho_{s1n}。$$

$$2: I_2, U_{21}/\rho_{s21}, U_{23}/\rho_{s23}, U_{24}/\rho_{s24}, \dots, U_{2n}/\rho_{s2n}。$$

.....

$$n: I_n, U_{n1}/\rho_{sn1}, U_{n2}/\rho_{sn2}, U_{n3}/\rho_{sn3}, \dots, U_{n(n-1)}/\rho_{sn(n-1)}。$$

2 数据处理

通过单极供电,对所测的电位时间序列 U_y 进行分类处理,按照供电点序列进行总体数据排序,对每一供电点序列再细分成供电前序列(即自然电位序列)、供电中序列(即一次场序列)、供电后序列(即二次场序列),求出这 3 个序列的均值、方差以及奇异系数等,判定数据的可信度与取舍。对于二极电阻率法取一次场与自然电位的均值差,利用式(1)计算并记录对应点的视电阻率 ρ_{sij}^{AM} 。对相邻测量电极的均值两两求差,就实现了电法测量的三极(包括温纳三极 A、温纳三极 B)测量解析。

2.1 高密度温纳三极 A (W-A) 数据体的实现

根据高密度电阻率法中温纳三极 A 装置的视电阻率表达式 $\rho_s^A = 4\pi\alpha \cdot R_s^A$ (α 为活动电极间距)^[1],单极供电法测得的数据通过如下处理,便可获得温纳三极 A 装置的数据体。

2.1.1 第一层数据体的视电阻率值

第一个记录点:

$$\rho_{s11}^A = 4\pi\alpha \cdot R_{s11}^A = 4\pi \cdot x \cdot [| U_{12} - U_{13} | / I_1],$$

第二个记录点:

$$\rho_{s12}^A = 4\pi\alpha \cdot R_{s12}^A = 4\pi \cdot x \cdot [| U_{23} - U_{24} | / I_2],$$

第三个记录点:

$$\rho_{s13}^A = 4\pi\alpha \cdot R_{s13}^A = 4\pi \cdot x \cdot [| U_{34} - U_{35} | / I_3],$$

.....

第 $n-2$ 个记录点:

$$\rho_{s1(n-2)}^A = 4\pi\alpha \cdot R_{s1(n-2)}^A = 4\pi \cdot x \cdot [| U_{(n-2)(n-1)} - U_{(n-2)n} | / I_{(n-2)}]。$$

2.1.2 第二层数据体的视电阻率值

第一个记录点:

$$\rho_{s21}^A = 4\pi\alpha \cdot R_{s21}^A = 4\pi \cdot 2x \cdot [| U_{13} - U_{15} | / I_1],$$

第二个记录点:

$$\rho_{s22}^A = 4\pi\alpha \cdot R_{s22}^A = 4\pi \cdot 2x \cdot [| U_{24} - U_{26} | / I_2],$$

第三个记录点:

$$\rho_{s23}^A = 4\pi\alpha \cdot R_{s23}^A = 4\pi \cdot 2x \cdot [| U_{35} - U_{37} | / I_3],$$

.....

第 $n-4$ 个记录点:

$$\rho_{s2(n-4)}^A = 4\pi\alpha \cdot R_{s2(n-4)}^A = 4\pi \cdot 2x \cdot [| U_{(n-4)(n-2)} - U_{(n-4)n} | / I_{(n-4)}]。$$

2.1.3 第 $m-1$ 层数据体的视电阻率值

m 为最大测量层数,当 n 为奇数且 $n \geq 3$ 时,

$m = (n-1)/2$; 当 n 为偶数且 $n \geq 4$ 时, $m = (n-2)/2$ 。

(1) 当 n 为奇数时,

第一个记录点:

$$\begin{aligned} \rho_{s(m-1)1}^A &= 4\pi\alpha \cdot R_{s(m-1)1}^A = \\ &4\pi \cdot (m-1)x \cdot [| U_{1m} - U_{1(2m-1)} | / I_1] = \\ &4\pi \cdot (m-1)x \cdot [| U_{1(n-m-1)} - U_{1(n-2)} | / I_1]。 \end{aligned}$$

第二个记录点:

$$\begin{aligned} \rho_{s(m-1)2}^A &= 4\pi\alpha \cdot R_{s(m-1)2}^A = \\ &4\pi \cdot (m-1)x \cdot [| U_{2(m+1)} - U_{2(2m)} | / I_2] = \\ &4\pi \cdot (m-1)x \cdot [| U_{2(n-m)} - U_{2(n-1)} | / I_2]。 \end{aligned}$$

第三个记录点:

$$\begin{aligned} \rho_{s(m-1)3}^A &= 4\pi\alpha \cdot R_{s(m-1)3}^A = \\ &4\pi \cdot (m-1)x \cdot [| U_{3(m+2)} - U_{3(2m+1)} | / I_3] = \\ &4\pi \cdot (m-1)x \cdot [| U_{3(n-(m-1))} - U_{3n} | / I_3]。 \end{aligned}$$

(2) 当 n 为偶数时,

第一个记录点:

$$\begin{aligned} \rho_{s(m-1)1}^A &= 4\pi\alpha \cdot R_{s(m-1)1}^A = \\ &4\pi \cdot (m-1)x \cdot [| U_{1m} - U_{1(2m-1)} | / I_1] = \\ &4\pi \cdot (m-1)x \cdot [| U_{1(n-m-2)} - U_{1(n-3)} | / I_1]。 \end{aligned}$$

第二个记录点:

$$\begin{aligned} \rho_{s(m-1)2}^A &= 4\pi\alpha \cdot R_{s(m-1)2}^A = \\ &4\pi \cdot (m-1)x \cdot [| U_{2(m+1)} - U_{2(2m)} | / I_2] = \\ &4\pi \cdot (m-1)x \cdot [| U_{2(n-m-1)} - U_{2(n-2)} | / I_2]。 \end{aligned}$$

第三个记录点:

$$\begin{aligned} \rho_{s(m-1)3}^A &= 4\pi\alpha \cdot R_{s(m-1)3}^A = \\ &4\pi \cdot (m-1)x \cdot [| U_{3(m+2)} - U_{3(2m+1)} | / I_3] = \\ &4\pi \cdot (m-1)x \cdot [| U_{3(n-m)} - U_{3(n-1)} | / I_3]。 \end{aligned}$$

第四个记录点:

$$\begin{aligned} \rho_{s(m-1)4}^A &= 4\pi\alpha \cdot R_{s(m-1)4}^A = \\ &4\pi \cdot (m-1)x \cdot [| U_{4(m+3)} - U_{4(2m+2)} | / I_4] = \\ &4\pi \cdot (m-1)x \cdot [| U_{4[n-(m-1)]} - U_{4n} | / I_4]。 \end{aligned}$$

2.1.4 第 m 层数据体

(1) 当 n 为奇数时,

$$\rho_{sm1}^A = 4\pi\alpha \cdot R_{sm1}^A = 4\pi \cdot mx \cdot [| U_{1(n-m)} - U_{1n} | / I_1]。$$

(2) 当 n 为偶数时,

第一个记录点:

$$\begin{aligned} \rho_{sm1}^A &= 4\pi\alpha \cdot R_{sm1}^A = \\ &4\pi \cdot mx \cdot [| U_{2(n-m-1)} - U_{2(n-1)} | / I_1]。 \end{aligned}$$

第二个记录点:

$$\rho_{sm2}^A = 4\pi\alpha \cdot R_{sm2}^A = 4\pi \cdot mx \cdot [| U_{2(n-m)} - U_{2n} | / I_2]。$$

2.2 高密度温纳三极 B (W-B) 数据体的实现

温纳三极 B 装置的数据体的实现与温纳三极 A 装置大体相同,只是对供电电极前方的测量电极(即此时供电电极的序号大于测量电极的序号)所测得的电位进行两两求差。

2.3 高密度二极(AM)数据体的实现

单极供电法测得的视电阻率数据通过如下处理,便可获得高密度二极装置的数据体。

(1)第一层数据体的视电阻率值

第一个记录点: $\rho_{s11}^{AM} = \rho_{s12}$;

第二个记录点: $\rho_{s12}^{AM} = \rho_{s23}$;

第三个记录点: $\rho_{s13}^{AM} = \rho_{s34}$;

.....

第 $n-1$ 个记录点: $\rho_{s1(n-1)}^{AM} = \rho_{s(n-1)n}$ 。

(2)第二层数据体的视电阻率值

第一个记录点: $\rho_{s21}^{AM} = \rho_{s13}$;

第二个记录点: $\rho_{s22}^{AM} = \rho_{s24}$;

第三个记录点: $\rho_{s23}^{AM} = \rho_{s35}$;

.....

第 $n-2$ 个记录点: $\rho_{s1(n-2)}^{AM} = \rho_{s(n-2)n}$ 。

.....

(3)第 $n-2$ 层数据体的视电阻率值

第一个记录点: $\rho_{s(n-2)1}^{AM} = \rho_{s1(n-1)}$;

第二个记录点: $\rho_{s(n-2)2}^{AM} = \rho_{s2n}$ 。

(4)第 $n-1$ 层数据体的视电阻率值

第一个记录点: $\rho_{s1n}^{AM} = \rho_{s1n}$ 。

将以上得到的高密度温纳三极 A、温纳三极 B 和二极装置的电阻率数据分别附上对应的坐标值,通过高密度电法处理软件绘制出相关图件,从而圈定异常区。

3 几种方法野外数据采集时间的比较

在电极数 n 和供电时间间隔 Δt 相同的情况下,采用高密度温纳三极 A 装置完成 1 条测线的现场数据采集时间为

$$T_{WA} = [(n-2) + (n-4) \cdots + (n-2m)] \Delta t = m(n-m-1) \Delta t \approx \left(\frac{n}{2} - 1\right) \left[n - \left(\frac{n}{2} - 1\right) - 1\right] \Delta t = \left(\frac{n}{2} - 1\right) \frac{n}{2} \Delta t \approx \frac{n^2}{4} \Delta t;$$

高密度温纳三极 B 数据采集时间与 T_{WA} 相同,即

$$T_{WB} \approx (n^2/4) \Delta t;$$

高密度二极法数据采集时间为

$$T_{AM} = [(n-1) + (n-2) \cdots + 1] \Delta t = [n(n-1)/2] \Delta t \approx (1/2)n^2 \Delta t;$$

则高密度温纳三极 A、温纳三极 B、二极的采集时间合计为

$$T_g = T_{WA} + T_{WB} + T_{AM} = n^2 \Delta t。$$

而采用单极供电、多点同时测量的方法,完成 1 条测线的现场数据采集时间仅为 $T_e = n \Delta t$, 即 $T_g = n T_e$ 。

这说明,单电极供电法较高密度电法效率提高了 n 倍,且获得的信息和数据量却远远大于高密度电法温纳三极装置与二极装置获得的信息和数据量。

4 工程实例

4.1 工作概况

某工作面回采 13-1 煤层,工作面标高 -529.7 ~ -419.8 m,可采走向长 578 m,倾斜宽为 139 ~ 153 m,平均 149 m。13-1 煤厚度 2.60 ~ 8.25 m,平均 5.13 m,煤层倾角为 $10^\circ \sim 47^\circ$, 平均 28° 。煤层直接顶板为灰色泥岩及煤线组成的复合顶板,平均厚度为 1.89 ~ 8.70 m;老顶为灰白色中砂岩,平均厚度为 3.34 m;底板为灰色砂质泥岩,平均厚度 4.08 m。该面构造复杂,风巷、机巷及切眼在掘进中共揭露断层 18 条,其中大于 3 m 的断层 8 条。煤系地层上覆为寒武灰岩,含水丰富,工作面防水煤柱为 70 ~ 138 m。

根据工作面的地质情况并结合文献[3]中冒落带与导水裂隙带最大高度的经验公式,取大值取

$$H_c = 4M = 4 \times 3.0 = 12 \text{ m},$$

$$H_f = \frac{100M}{3.3n + 3.8} + 5.1 = 47.4 \text{ m},$$

其中, M 为累计采厚, H_c 为冒落带高度, H_f 为导水裂隙带高度, n 为煤分层层数。

根据淮南矿区冒落带与导水裂隙带最大高度的经验公式^[4],取大值取 $H_c = 6M = 18 \text{ m}$, $H_f = 16M = 48 \text{ m}$ 。

根据上述 2 种经验公式,我们均取其中的大值作为钻孔施工依据。钻孔施工时,观测孔位于风巷,该孔开孔于煤层顶板,倾角 41° ,指向煤层顶板,孔口位于风巷距离切眼 240 m,孔深 108 m,在巷道水平投影方向影响 81.51 m,终孔距煤层顶板 70.85 m。为了更准确地判定冒裂带的发育规律,特对钻孔进行取芯。钻孔开口孔径为 108 mm。钻孔靠近孔口端的 30 m(控制垂高 19.68 m)下入钢套管,以防止冒落带形成时拉断信号电缆。钻孔形成后,用水冲洗钻孔中的岩粉,信号电缆及电极埋入后用水泥浆封闭钻孔。

孔内共埋设电极 32 根,电极间距为 3 m,信号线采用 8 芯屏蔽电缆。采用安徽理工大学和江苏东华测试技术有限公司研制的防爆型并行网络电法监测系统探测。

4.2 数据采集及分析

电法 CT 现场探测从 11 月 16 日开始,翌年 1 月 24 日结束,先后进行了 5 次探测,以终孔电极为 1

号电极,坐标建立以1号电极坐标原点,其 x 轴方向沿钻孔指向孔口; y 轴与 x 轴垂直,并指向下方。孔口坐标为(108,0)。

11月16日,工作面距离孔口223 m,在封孔注浆后进行了首次电阻率测试(图2a),结果表明:测试区内岩层的视电阻率值分布基本与钻孔斜线相平行,阻值由低到高依次分布,主要分布在100~400 $\Omega \cdot \text{m}$,对照钻孔岩心资料,13-1煤层顶板70 m范围内岩性为泥岩、花斑泥岩、中细砂岩,测试电阻率应为岩体正常的电性反应。钻孔附近的视电阻率小于100 $\Omega \cdot \text{m}$,分析认为:探测孔布封孔注浆后,其周围岩石的孔隙度降低、颗粒间的接触性增强,从而导电性增强,电阻率降低。

12月31日,进行了第2次电阻率测试(图2b),此时工作面距离孔口84 m,接近探测孔终孔(1号电极)正下方。测试结果较第1次有了明显的差异: x 轴0~20 m, y 轴30 m以下的竖直条带内视电阻率明显增大,分析认为:该区域受到的工作面超前应力已经超过岩石强度极限,岩石变形破裂,其电阻率明显增大,此范围应为裂隙发育区;而 x 轴20~60 m的竖直条带内,其中下部的视电阻率值明显降低,分析认为:该区域受到的工作面超前应力在岩石

强度极限范围内时,随着应力的增大,岩石的孔隙度降低,导电性增强,电阻率降低。此时超前应力带的前缘距工作面约50 m。

1月10日,工作面距离孔口44 m(图2c),进行了第3次电法CT探测,探测区内 x 轴0~50 m的竖直条带的下部,其视电阻率大部分在800 $\Omega \cdot \text{m}$ 以上,分析认为:该范围为冒落带发育区,冒落带滞后工作面约10 m,其原因是该工作面采用综合机械化采煤,综采支架长约7 m,支架移开后煤层顶板才会冒落;探测区内工作面与钻孔之间的大部分区域视电阻率值较第2次也明显增大,其中工作面前方10 m范围内煤层直接顶板的视电阻率大都在400 $\Omega \cdot \text{m}$ 以上,分析认为此范围应为裂隙发育区。

1月17日,工作面距离孔口9.5 m(图2d),进行了第4次电法CT探测,探测区内煤层顶板22 m范围内视电阻率值大部分在800 $\Omega \cdot \text{m}$ 以上,26号以下大多数电极的供电电流很小,表明探测区内冒落带已充分发育; x 轴40~75 m的水平区域内的视电阻率值较前一次明显增大。

1月24日,进行了第5次电法CT探测,此时工作面已经采过孔口5 m(图3)。探测区内视电阻率值较第4次无明显变化,26号以下大多数电极的

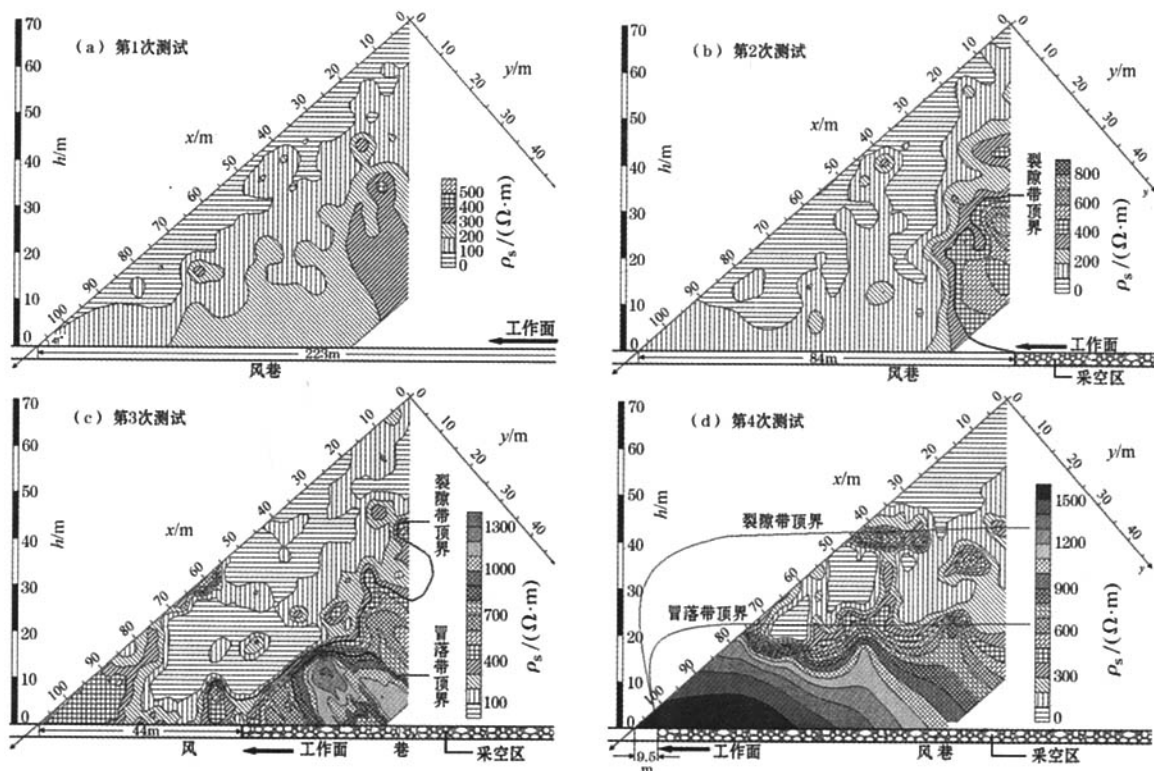


图2 第1次~第4次探测过钻孔与风巷的温纳三极A电阻率剖面

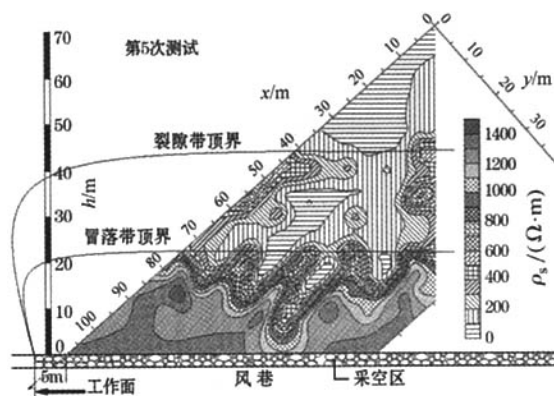


图3 第5次探测过钻孔与风巷的温纳三极A电阻率剖面
供电电流仍很小。探测区 x 轴40~75 m的水平区域内的视电阻率值较第4次虽无明显变化,但坐标(35,10)附近视电阻率值明显降低,分析原因,可能由裂隙闭合所致。

综合本次检测的上述各种分析结果,可确定煤层采动对顶板产生的变形及破坏状况。一是在煤层顶板上方21.4~22.2 m处发育有一薄煤层,根据探测结果分析,煤层回采顶板在此处发生离层;二是在煤层顶板上方45.4 m的位置为细砂岩与花斑泥岩的交界面,45.4 m以上为花斑岩。根据探测结果分析,交界面为裂隙带的顶界。结论为:①该工作面煤层开采过程中,导水裂隙带最大高度距煤层顶板

44.6 m,冒落带的最大高度距离煤层顶板21.6 m;②采动应力超前工作面前方距离在50 m左右,煤层覆岩破坏超前工作面10~20 m(图2b,c);③裂高具有一定的发育期,以该工作面推进速度2~4 m/d来看,裂高充分发育的时间约为1个月;④冒落带、裂隙带在形成过程中其顶界面具有明显的不规则性;⑤电阻率探测的冒裂带高度与根据经验公式计算的结果基本一致。

5 结论

目前,基于二极直流电阻率法的防爆型并行网络电法监测系统已由安徽理工大学和江苏东华测试技术有限公司研制成功,并已广泛应用于安徽、河南等煤矿的回采工作面导水裂隙带高度探测、矿井出水水源探测等工程实践中,取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] 岳建华,刘树才. 矿井直流电法勘探[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2000.
- [2] 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.
- [3] 中华人民共和国煤炭工业部. 矿井水文地质规程[S]. 北京:煤炭工业出版社,1984.
- [4] 王桦,周继生,曹思华. 潘三矿1711₀(3)工作面突水机理探讨[J]. 淮南工业学院学报,2002(增刊):116.

THE PARALLEL ELECTRICAL PROSPECTING TECHNOLOGY BASED ON THE POLE-POLE RESISTIVITY METHOD

WANG Hua^{1,2}, CHENG Hua^{1,2}, LIU Sheng-dong¹

(1. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Anhui Institute of Architecture and Industry, Hefei 230022, China)

Abstract: According to the distribution regularity of the electric fields of surface single spot current source and the basic thought of the high density resistivity prospecting method, and from the principles of the pole-pole electrical prospecting and the seismic prospecting, this paper puts forward a network electrical prospecting system, which uses one current electrode to perform power supply, with the other electrodes conducting synchronous prospecting. The synchronous rapid measurements such as Wenner pole-dipole, Wenner pole-dipole and pole-pole array of the high density resistivity method can be realized by indoor data-processing. This technology can enormously cut down the working hours of data collection in open field and greatly improve the efficiency of the electrical prospecting. It has been applied in many engineering projects, such as foundation prospecting, the measuring of the height of the water flowing fractured zone in working faces, the detection of the water source of coal well water bursting.

Key words: pole-pole method; parallel collection; high density resistivity method; seismic prospecting

作者简介: 王桦(1970-),男,安徽宿州人,讲师,在读博士。现从事安全工程、应用地球物理和岩土工程的教学与科研工作。