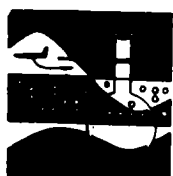


埋藏极化体激电时间谱视参数的实验研究结果

傅良魁 李金铭 陈兆洪

(武汉地质学院北京研究生部)



物探与化探

近年来,国内外的一些研究者曾试图利用在一维标本上获得的激电谱特征(如时间域二次场衰减曲线斜率)来评价野外激电异常,但在实际找矿中尚未取得预期效果。其主要原因在于对岩(矿)石激电特性与三维条件下各种因素的综合影响认识不足。我们在文献[1]中曾定性地指出,当极化体埋

于地下时,对激电异常时间特性有明显影响的因素有十余个。

本文是在定性研究衰减时间谱的基础上^[1],采用高精度的数字电子仪,在某些方面做了更详细的定量实验研究,用Cole—Cole频散模型对实验曲线进行反演拟合,研究影响埋藏极化体时间谱激电视参数各种因素的作用规律,给出一些有意义的结果,以供参考。

激电时间谱的Cole—Cole数学模型及其反演方法

皮尔顿等人将介电极化的Cole—Cole张弛模型用于描述岩(矿)石的激电特性^[2],并给出了时域表示式

$$V(t) = \eta RI \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (t/\tau)^{nc}}{\Gamma(1+nc)} \quad (t/\tau < 2\pi)$$

$$V(t) = \eta RI \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (t/\tau)^{nc}}{\Gamma(1+nc)} \quad (t/\tau > 2\pi) \quad (1)$$

式中, t 为阶跃响应时间; τ 为时间系数; c 为频率相关系数; $\Gamma(x)$ 为伽马函数; R 为直流电阻; η 为最大极化率; I 为一次场电流强度。若岩石的激电响应满足时间不变线性系统条件,则对有限脉冲宽度的响应为:

$$V^T(t) = V(t+\tau) - V(t) \quad (2)$$

根据皮尔顿等的研究结果,对于不同的岩(矿)石,其响应特征具有不同的 R , c , τ 和 η 参数值。因此,在一定条件下,可根据这些参数进行激电异常的评价。分析(1)式可知,时间响应的曲线形态仅受 τ 和 c 两参数的影响,而 R 和 η 只改变响应的幅值。为明确起见,我们称 τ 和 c 为形态参数,而 R 和 η 为幅值参数。在非一维条件下,阻抗 R 可改变为包含极化作用的视电阻率 ρ_s^* ,另三个参数也均为视值,即 τ_s , c_s , η_s 。

反演求视参数的方法较多,经过对比,我们采用了马奎特方法。若用 $E(t)$ 表示实测数据, $V(t)$ 为Cole—Cole模型时间域响应函数,则最优反演便是求解下式在最小二乘意义下对应的最优参数。

$$\phi[c_s, \tau_s, \eta_s, \rho_s^*] = \sum_{i=1}^m [E(t_i) - V(t_i)]^2 / E(t_i)^2 \quad (3)$$

根据多元函数极值的必要条件,并将模型函数 $V(t)$ 按泰勒级数展开后,略去一阶导数以上的项,经整理后得:

$$(P^T P + \lambda I) \cdot \Delta X = G \quad (4)$$

其中:

$$P = \begin{bmatrix} \frac{\partial V(t_1)}{\partial x_1} & \frac{\partial V(t_1)}{\partial x_2} & \frac{\partial V(t_1)}{\partial x_3} & \frac{\partial V(t_1)}{\partial x_4} \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ \frac{\partial V(t_m)}{\partial x_1} & \frac{\partial V(t_m)}{\partial x_2} & \frac{\partial V(t_m)}{\partial x_3} & \frac{\partial V(t_m)}{\partial x_4} \end{bmatrix}$$

P^T 为 P 的转置

$$G = P^T \begin{bmatrix} E(t_1) - V(t_1) / E(t_1)^2 \\ \dots\dots\dots \\ E(t_m) - V(t_m) / E(t_m)^2 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_s \\ \tau_s \\ m_s \\ \rho_s^* \end{bmatrix} \quad \Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \\ \Delta x_4 \end{bmatrix}$$

I 为单位阵, λ 为大于零的常数。第 K 次迭代参量为:

$$X_k = X_{k-1} + \Delta X$$

若 X_k 使函数 ϕ 小于预先给定的一个小量 ϵ , 则迭代结束, 否则继续。

实验结果及一些规律

实验主要是在三度水槽 (尺度为 $153 \times 122 \times 105 \text{ cm}^3$) 中进行的, 介质为自来水 ($\rho_{\text{水}} = 23 \text{ 欧姆} \cdot \text{米}$, $\eta_s = 0$)。个别实验是在薄水盘 (尺度为 $98 \times 58 \times 2 \text{ cm}^3$) 中进行的, 介质为氯化钾溶液。测量装置一般采用中梯。测量仪器采用 192 型高精度可编程数字多用表 (Model 192 programmable DMM)。供电设备为改装的 DJJ-1 型变频发电电位仪发送机, 配合自制面板手动控制输出。时间范围是: 供电时间 $T = 1200$ 秒, 测量时间 $t = 0.15 \sim 1200$ 秒。以下介绍我们取得的部分实验结果。

(一) 极化体几何因素对视参数的影响

1. 极化体规模大小的影响 当其他条件相同、只改变极化体大小时, 对反演获得的视参数均有不同程度影响。极化体尺度分别作三个延伸方向的改变。表 1 为直立石墨板状体 (下延长度 10 cm, 走向长度 30 cm) 改变厚度的结果。由表可见, 随直立板厚度的增大, 视极化率明显地增

大, 视电阻率则有所减小, 视时间常数的总趋势有所增大, 但不显著, 而视频率相关系数基本不变。表 2 为直立石墨板状体 (走向长度 30 cm, 厚度 3 cm) 改变下延长度的实验结果。由表可见, 随下延长度的增加, τ_s , η_s 和 ρ_s^* 值均相应增大; c_s 的变化无明显规律。若保持极化体下延长度 (10 cm) 和厚度 (5 cm) 固定, 只改变走向长度, 则各参数的变化规律与改变下延长度时基本一致。

厚度改变时直立石墨板状体的次级参数值

表 1

厚度 (cm)	τ_s	c_s	η_s	ρ_s^*
2	3.6	0.80	0.50	38.7
4	4.3	0.81	0.66	40.0
6	4.0	0.74	0.78	38.0
8	4.7	0.67	0.84	37.6
10	5.8	0.71	0.92	35.8

由上述结果可知, 在当前的实验条件下, 改变极化体与沿极化场方向的尺度, 除视极化率外, 对其他参数影响较小。当改变极化体其他方向上的尺度时, 随其数值增大, 均使 η_s , τ_s 和 ρ_s^* 增加。 c_s 值一般变化不大。

2. 极化体埋藏深度的影响 为了解极化体埋藏深度对视参数的影响规律, 我们在大水槽中水

下延长度改变时直立石墨板

状体的次级参数值

表 2

下延长度 (cm)	τ_s	C_s	η_s	ρ_s^*
2	1.38	0.84	0.32	27.7
4	2.5	0.70	0.45	30.6
6	5.0	0.72	0.49	33.9
16	6.0	0.81	0.63	43.9
20	7.7	0.78	0.65	44.7

平石墨板 ($30 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$) 正上方进行了对比性实验观测。如图 1 所示,在当前条件下,随极化体相对埋藏深度 $D = h/d$ (d 为模型的水平宽度) 的增大,四个视参数 τ_s , C_s , η_s 和 ρ_s^* 值均单调地减小。当 D 值较小时,视参数的变化相当明显;而 D 值较大时,各参数均趋于一定的渐近值。在 $h = 0$ 的出露条件下,得极化体的真参数值。随着深度的增大,视参数逐渐偏离真值,最后趋于渐近值。

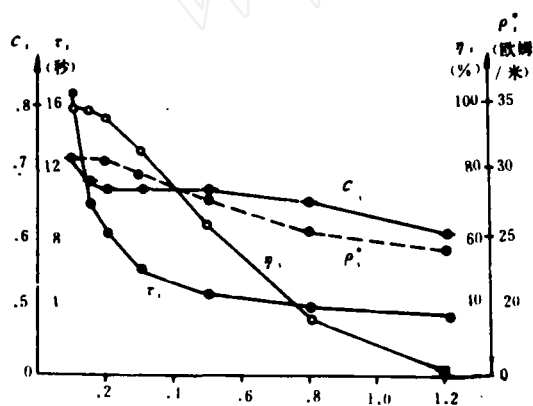


图 1 视参数随石墨板埋深的变化曲线
模型大小: $30 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$, $AB = 100 \text{ cm}$,
 $MN = 1 \text{ cm}$, $I = 100 \text{ mA}$

3. 极化体产状不同的影响 我们在石墨板状体 ($30 \times 10 \times 2 \text{ cm}^3$) 上改变三种倾角 ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) 进行了观测。当倾角改变时,使板状体上顶埋深 ($h = 2 \text{ cm}$) 保持不变。所得反演结果列于表 3。由表可知,反映激电响应形态的参数 τ_s 和 C_s 基本上与倾角无关。 ρ_s^* 值是直立的大于倾斜的,水平情况最小; η_s 以倾斜时最小。

比较三种极化体几何因素的影响可以看出,

极化体埋深对视参数影响最显著。随着埋深的增大,视参数逐渐偏离真值,最终趋于某一渐近值。因而,在实际工作中,要进行从已知区到未知区的对比研究,应注视该因素的影响。

改变倾角时石墨板状体的次级参数值

表 3

倾角 (度)	τ_s	C_s	η_s	ρ_s^*
0	1.7	0.82	0.96	27.8
45	4.5	0.79	0.72	40.9
90	4.5	0.77	0.87	49.8

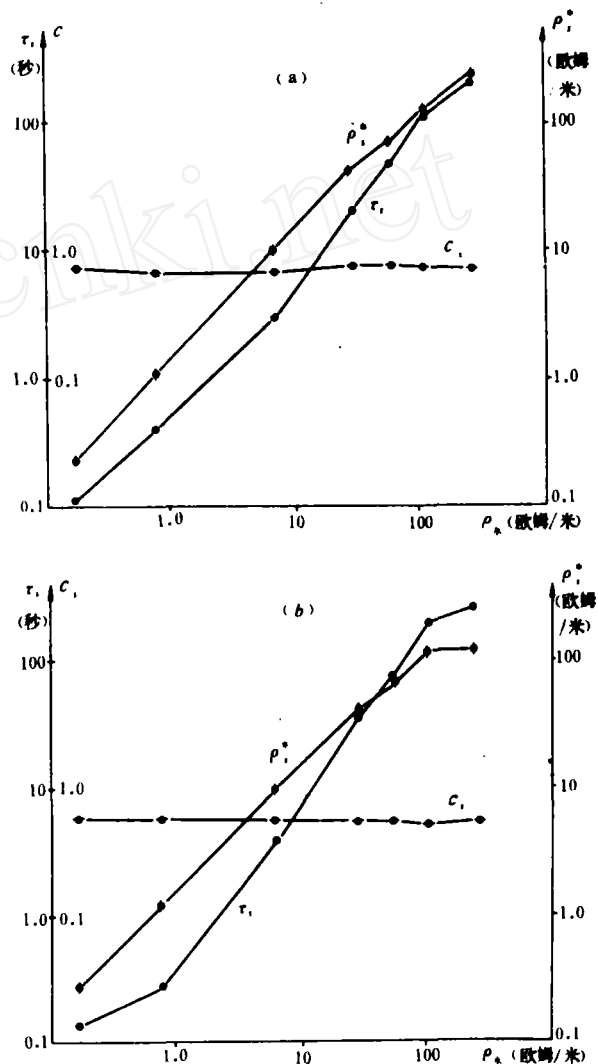


图 2 Cole—Cole 模型视参数与溶液电阻率关系的实验曲线

$x = 0$, $AB = 60 \text{ cm}$, $MN = 1 \text{ cm}$, $2.0 \text{ mA} < I < 20 \text{ mA}$

(a) 石墨柱: $30 \times 5^2 \times \pi \text{ cm}^3$, $h_0 = 10.2 \text{ cm}$

(b) 黄铁矿: $5 \times 5 \times 4 \text{ cm}^3$, $h = 2 \text{ cm}$

(二) 极化体与围岩电阻率对视参数的影响

实验是在二度水盘中进行的。极化体与围岩相对导电性的变化, 主要是通过向蒸馏水中添加氯化钾改变溶液电阻率来实现。溶液电阻率由270欧姆·米降到0.164欧姆·米, 共作了七种变化。

实验按下列顺序进行: 首先将蒸馏水注入水盘(水层厚度为2 cm), 将待测标本置于规定的位置, 并进行观测。然后依次加入KCl, 逐渐降低溶液电阻率, 每次均对两种标本(人工的和天然的)反复进行实验观测。对实测曲线的反演结果列于图2和图3, 分析图中曲线, 可得到以下几点认识:

(1) 随溶液电阻率的增高, 两种标本的视时间常数 τ_s 和视直流电阻率 ρ_s^* 均单调增大, τ_s 和 ρ_s^* 与溶液电阻率(ρ_w)的关系近似呈45°上升的斜线; 当溶液电阻率较大时($\rho_w = 270$ 欧姆·米), τ_s 曲线变陡些, 并逐渐趋于某一定值。

(2) 随溶液电阻率的变化, 两种标本上的频率相关系数较稳定, 近似呈水平直线。

(3) $\eta_s(t)$ 与溶液电阻率的关系曲线, 随着 ρ_w 增高, 在某一电阻率值上出现极大; 对于不同衰减时间 t , 其极值位置有所不同; 衰减时间越长, 与 $\eta_s(t)$ 曲线极值点对应的溶液电阻率值越高; 表明对视极化率而言有一使异常极大的最佳电阻率比值。

(三) 人为因素对视参数的影响

1. 装置类型的影响 在电法勘探中, 装置类型繁多, 通常可根据不同的地质任务和工区条件选用能获得最佳效果的装置。我们在实验中选用中梯、偶极和二极三种装置, 在球体、水平圆柱体和板状体上进行了对比性实验研究; 对不同装置在各极化体上的测量结果作反演拟合, 求得的视参数列于表4。由表可见, 除板状体外, 其他模型测得的视参数 τ_s 和 c_s 基本一致, η_s 和 ρ_s^* 明显与装置有关。因而, 当主要研究 τ_s 和 c_s 时可不考虑装置影响, 而根据实际需要选用合适的装置进行观测。如当工区无较强的游散电流于扰源(城镇, 电站, 工厂或矿山等)时, 可选用能获得强二次场信息的近场源装置^[3]。

2. 测置极距的影响 在直立石墨板正上方,

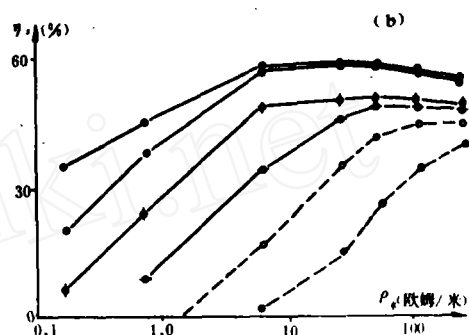
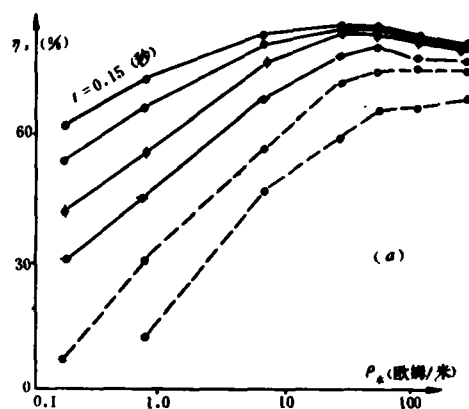


图3 在不同衰减时间取得的 η_s 与溶液电阻率关系的实验曲线

$x = 0$, $AB = 60$ cm, $MN = 1$ cm, 2.0 mA ~ 20 mA
(a) 石墨柱: $30 \times 5^1 \times \pi$ cm³, $h_0 = 10.2$ cm
(b) 黄铁矿: $5 \times 5 \times 4$ cm³, $h = 2$ cm

用不同装置时石墨标本的次级参数值 表4

模型	中 梯				偶 极				二 极			
	τ_s	c_s	η_s	ρ_s^*	τ_s	c_s	η_s	ρ_s^*	τ_s	c_s	η_s	ρ_s^*
水平板	3.8	0.78	84	25	9.9	0.78	82	44	12.0	0.63	52	23
直立板	4.7	0.72	73	35	3.7	0.73	57	31	3.9	0.73	36	11
水平圆柱	8.1	0.79	59	28	7.6	0.78	51	25	8.9	0.76	41	18
球 体	2.6	0.67	29	24	2.4	0.60	30	21	3.5	0.62	17	16

采用中梯装置以 $MN = 1, 2, 3, 4, 6, 8$ cm六种测量极距进行了观测, 所得数据列于表5。实验结果表明, 在当前条件下, 测量极距增大8倍, τ_s 和 c_s 参数均无明显变化, η_s 和 ρ_s^* 则随 MN 的增大而明显地减小。

3. 测点位置的影响 尽管在异常评价工作中, 通常重视在异常极大点处进行, 但为了解时

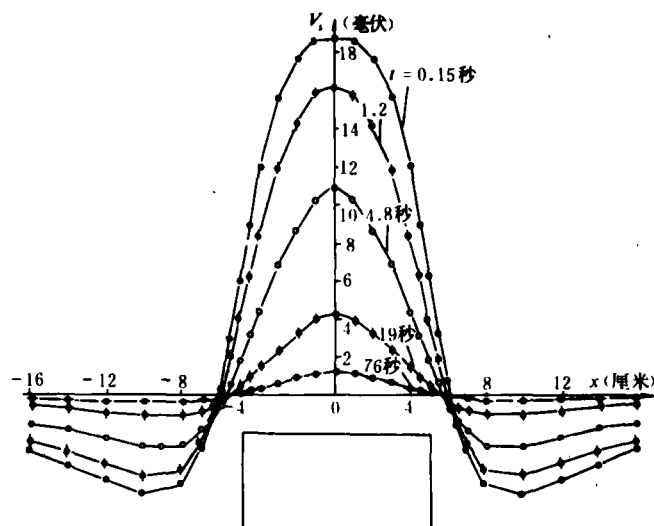


图4 石墨板上不同衰减时间的二次场剖面异常实验曲线

石墨板大小: $30 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$, $h = 2 \text{ cm}$, 倾角 $\alpha = 0$, $AB = 100 \text{ cm}$, $MN = 1 \text{ cm}$, $I = 100 \text{ mA}$

测量极距改变时直立石墨板的次级参数值 表5

$MN(\text{cm})$	τ_s	c_s	η_s	ρ_s^*
1	4.4	0.82	0.82	70.5
2	4.6	0.79	0.79	69.3
3	4.7	0.79	0.76	67.4
4	4.8	0.79	0.68	62.1
6	4.5	0.77	0.60	53.0
8	4.4	0.77	0.52	46.0

间谱的分布规律,以便全面认识极化体的激电特性,我们在水平石墨板和倾斜石墨板上做了不同测点位置的实验。

图4和图5是在水平和倾斜石墨板上取不同衰减时间的二次电位差异异常剖面曲线。由图可见,对于不同衰减时间的剖面曲线,其形态特征不同,曲线零值点的位置不一致(这就是文献[1]中提出的变向区问题)。这表明,利用传统的特征点法确定极化体埋深和产状要素时,应考虑时间因素。对实验结果反演求得的视参数变化情况列于图6,对于不同测点位置,除 η_s 和 ρ_s^* 变化外, τ_s 和 c_s 值的大小也与测点位置密切相关。二次场的变向区,也是视参数 τ_s 和 c_s 的跃变区。

4. 供电方向不同的影响 这项实验是在直立石墨板上进行的,供电方向分别取垂直和平行板

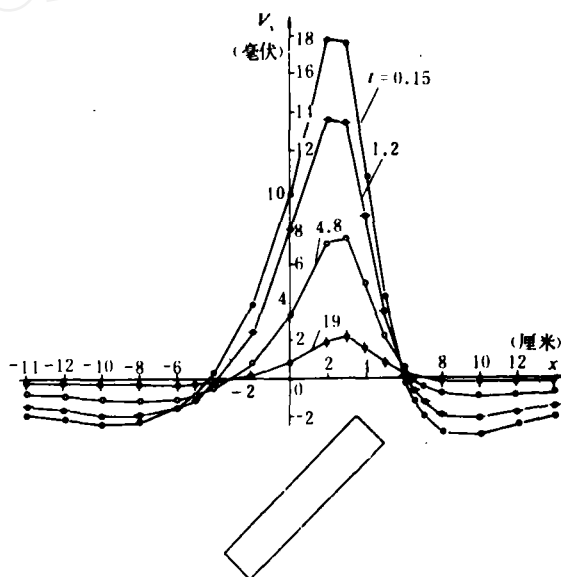
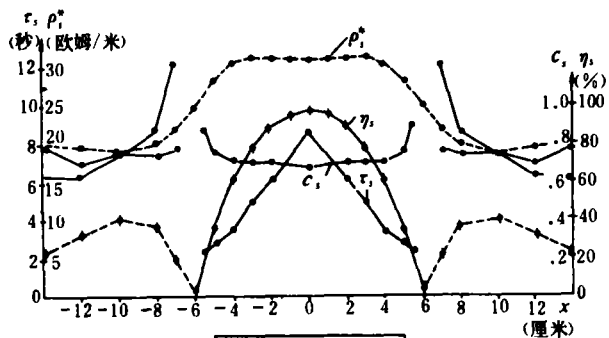


图5 倾斜石墨板上不同衰减时间的二次场异常实验剖面曲线

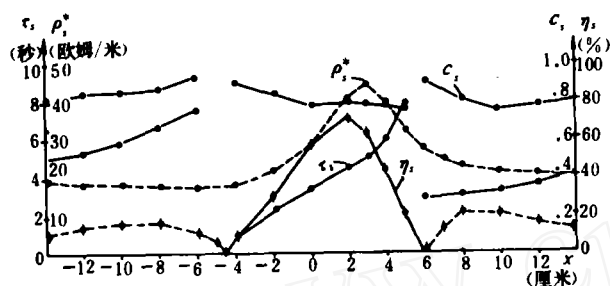
石墨板大小: $30 \times 10 \times 2 \text{ cm}^3$, $h = 2 \text{ cm}$, 倾角 $\alpha = 45^\circ$

$AB = 100 \text{ cm}$, $MN = 1 \text{ cm}$, $I = 100 \text{ mA}$

状体走向两种情况,表6给出实验曲线的反演结果。由表可见,除 c_s 参数外,供电方向的不同,对 τ_s , η_s 和 ρ_s^* 均有明显影响。平行走向供电时的 τ_s 和 η_s 值大于垂直走向供电时的数值,而 ρ_s^* 的值则以垂直走向供电时大。



(a)



(b)

图6 石墨板上不同测点处Cole—Cole模型视参数的实验剖面曲线

$AB = 100\text{cm}$, $MN = 1\text{cm}$, $h = 2\text{cm}$, $I = 100\text{mA}$

(a) 石墨板大小: $30 \times 10 \times 5\text{cm}^3$, $\alpha = 0^\circ$

(b) 石墨板大小: $30 \times 10 \times 2\text{cm}^3$, $\alpha = 45^\circ$

根据上述实验分析,我们认为:在埋藏极化体情况下,当考虑影响时间特性或各视参数的原因时,应充分重视在不同条件下二次极化电流的分布受地表面的反射作用。

结 论

1. 极化体的三维激电视参数除与一维条件下

改变供电方向时直立石墨板的参数值 表6

视参数	垂 直	走 向	平 行 走 向	
	$h = 1\text{cm}$	$h = 3\text{cm}$	$h = 1\text{cm}$	$h = 3\text{cm}$
τ	4.4	4.7	14.5	9.1
c	0.82	0.72	0.79	0.77
η	0.82	0.74	0.99	0.88
ρ^*	70.5	35.4	20.5	21.2

的真值有关外,还受极化体的赋存条件和某些人为因素影响,因而,视参数与真参数之间并不具有简单的一一对应关系。

2.在一般情况下,极化体的大部分视参数受围岩导电性和埋深的影响最为显著。受极化体大小的影响也相当明显。

3.尽管反演求得的 c 参数较 τ 稳定,但由于 c 值本身变化范围小($0 \sim 1$),各种岩(矿)石的真参数值可能彼此重叠,因此在实际工作中,利用 c 作对比参数也有一定困难。综合考虑 τ , c , η 和 ρ^* 这四个视参数,可以更全面地研究埋藏极化体的激电特性。

总之,根据所得实验结果,我们认为,在对激发极化体的野外观测资料进行异常评价时,应充分重视本文及文献[1]中所指出的各种因素的作用规律和影响强度,以便取得更好的地质效果。

参 考 文 献

- [1] 傅良魁等:地质与勘探,1980,第8期
- [2] Pelton, W. H., et al; Geophysics, 1978, Vol. 43, No. 3
- [3] 傅良魁等:《地质研究——同点激电法专辑》第1辑,北京,地质出版社,1983年