

关于直流电法模型实验中的 激发极化效应问题

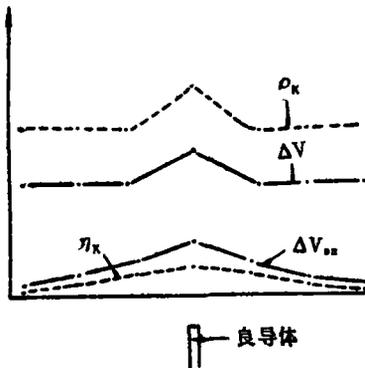
王 继 伦

在供电时间较长的直流电法模型实验中，金属模型的激发极化效应常常是不可忽视的。

例如以中间梯度装置在良导体（金属）模型上进行测量，当供电电流为直流时，所得到的异常不仅不是低阻的；相反，却是高阻的，这种“高阻异常”便是金属模型的激发极化效应所致。

但是，目前对上述“高阻异常”现象还存在着不同认识，下面引述的意见可作为这方面的代表。

“……附图三是……一般四极法的 η_k 、 ρ_k 、 ΔV_{BH} 、 ΔV 的对比图，由图可看到…… ρ_k 在模型顶上趋近正常值，两边离模型距离 $d=AO$ 处有不明显的极小，曲线中部凸起，这是因为良导薄板上四极法的



附图3 一般四极法实验结果

ρ_k 曲线只有很窄小的低异常如图C曲线1。

在极距较大而且具有一定埋深的情况下，导体顶上的极小值不能得出，如图C曲线2，故 ρ_k 曲线在导体薄板上似乎出现高阻反映，这与理论并不矛盾，而说明了四极法应用的局限性。”（引文及插图摘自某地质学院物探教研室编“金属矿床电法勘探补充教材”）

这个实验所用的导体厚度为0.15厘米，根据引文， ΔV 即 ρ_k 是在激发极化法观测过程中得到的，故知是在供电时间（实际为一分钟）较长的条件下的观测结果，据此我们认为“附图三”中低阻导体上产生“高阻异常”的原因是金属导体的激发极化效应，并非其他。

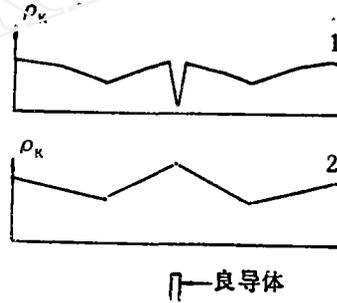
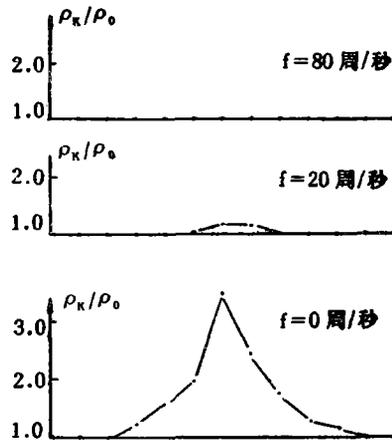


图 C

首先，从实验*证明。下图是薄水层中铜板上中间梯度法测量结果，实验中所用的 $AB=150$ 厘米， $MN=1$ 厘米，供电电流约为3.8毫安，铜板大小为 $6 \times 20 \times 0.2$ 厘米³，埋深为0.5厘米。在整个测量过程中不间断地供电，供电电流的频率如下图所示。

实验结果表明，薄铜板上的“高阻异常”随供电电流频率的增加而迅速减小，当频率增至80周/秒时，已完全消失。

然而，众所周知，供电电流频率的增加，导致了导体激发极化效应的迅速减小以至消失。变频激发极化法的频域测量方法就正是在这样物理基础上建立起来的。



供电电流的频率不同时薄铜板上中间梯度法的测量结果

因此,我們的實驗結果既然表明了“高阻異常”和供電電流頻率間的上述依存關係,實際上也證明了“高阻異常”和導體激發極化效應大小間的依存關係,所以產生“高阻異常”的原因是導體的激發極化效應。

其次,再用導體面極化的理論分析較為詳盡地闡述這一現象。

1. 均勻電流場中的扁橢球狀導體的異常場

設橢球體的三個軸為 a, b, c ; 且 $a \gg b, a = c$ 。直角座標系的原點位於橢球體中心,座標軸取向為 x 沿 b 軸, z 沿 a 軸。

由場論已知結果得知,在上述條件下,導體外部的電位:

$$u_x = A Q_1(j\eta) P_1(\xi) - j e E_x P_1(j\eta) P_1(\xi) \quad (1)$$

$$u_z = [A' Q_1^*(j\eta) P_1^*(\xi) - j e E_z P_1^*(j\eta) P_1^*(\xi)] \cos \varphi \quad (2)$$

式中, η, ξ, φ 為扁橢球座標系,與直角座標系的关系為: $x = e\eta\xi, y = e\sqrt{(\eta^2 + 1)(1 - \xi^2)} \sin \varphi,$
 $z = e\sqrt{(\eta^2 + 1)(1 - \xi^2)} \cos \varphi, \xi = x/b, \eta = b/e.$
 e 為半焦距 ($e^2 = a^2 - b^2$), $j = \sqrt{-1}$

$P_1(\xi), Q_1(j\eta)$ 依次為第一類及第二類勒讓德函數; $P_1^*(\xi), Q_1^*(j\eta)$ 為勒讓德伴隨函數。

現在研究一下 (1) 及 (2) 式中的係數 A 及 A' , 因其決定扁橢球狀導體, 在均勻電流場中的異常場的性質。

根據文獻,

$$A = E_x a \frac{\frac{b}{a}(\gamma_i - \gamma_e) - k_p \frac{\gamma_e \gamma_i}{a}}{\gamma_i + \frac{b}{a} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \gamma_e + k_p \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\gamma_e \gamma_i}{a}} \quad (1)$$

$$A' = E_z ab \frac{\gamma_i - \gamma_e - k_p \frac{\gamma_e \gamma_i}{a}}{\frac{\pi}{2} b \gamma_i + 2a \gamma_e + 2k_p \gamma_e \gamma_i} \quad (2)$$

式中, E_x, E_z 分別為沿 x 及 z 軸正方向的均勻電場強度;

γ_i, γ_e 分別為導體和介質的電導率;

k_p 為導體表面激發極化係數, 導體表面激發極化電動勢 $e_{nn} = k_p i_n$, i_n 為電流密度的法向分量。

為了明顯起見, 把 (1) 及 (2) 式改寫成如下形式:

$$A = E_x b \frac{1 - \frac{\gamma_e}{\gamma_i} \left(1 + \frac{\lambda}{b} \cdot \frac{\gamma_i}{\gamma_e}\right)}{1 + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{\gamma_e}{\gamma_i} \left(1 + \frac{\lambda}{b} \cdot \frac{\gamma_i}{\gamma_e}\right)} \quad (3)$$

$$A' = E_z \cdot a \frac{1 - \frac{\gamma_e}{\gamma_i} \left(1 + \frac{\lambda}{a} \cdot \frac{\gamma_i}{\gamma_e}\right)}{\frac{\pi}{2} + 2 \frac{a}{b} \cdot \frac{\gamma_e}{\gamma_i} \left(1 + \frac{\lambda}{a} \cdot \frac{\gamma_i}{\gamma_e}\right)} \quad (4)$$

式中, $\lambda = k_p \gamma_e \dots$,

由上兩式可見導體表面的激發極化效應等效於導體的電導率由 γ_i 減小到 $\gamma_a = \gamma_i \left(1 + \frac{\lambda}{a} \cdot \frac{\gamma_i}{\gamma_e}\right)^{-1}$ 或

$\gamma_i \times \left(1 + \frac{\lambda}{b} \cdot \frac{\gamma_i}{\gamma_e}\right)^{-1}$ 。當 $\gamma_a < \gamma_e$, 則由於激發極化效應, 均勻電流場中低阻導體的異常將和高阻體的異常等價, 即將得到“高阻異常”。

對於 (3) 式, 如 $\gamma_a < \gamma_e$, 則必須 $\frac{\lambda}{b} > 1 - \frac{\gamma_e}{\gamma_i}$ 。

對於 (D) 式, 如 $\gamma_a < \gamma_e$, 則必須 $\frac{\lambda}{a} > 1 - \frac{\gamma_e}{\gamma_i}$ 。

根據 B.A. 柯馬洛夫的材料, λ 值一般為數十厘米, 所以對於模型實驗用的薄銅板, $\frac{\lambda}{b} > 1 - \frac{\gamma_e}{\gamma_i}$ 的條件經常能夠滿足是毫無疑問的, 因為薄銅板的厚度 $2b$ 只有十分之几厘米。

2. 均勻電流場中的球狀導體的異常場

這個問題的解答在文獻中載有, 我們把導體外部電位的公式改寫如下:

$$u_x = E_x \cdot \gamma \cdot \cos \theta \left[1 - \frac{1 - \frac{\gamma_e}{\gamma_i} \left(1 + \frac{\lambda}{a} \cdot \frac{\gamma_i}{\gamma_e}\right)}{1 + 2 \frac{\gamma_e}{\gamma_i} \left(1 + \frac{\lambda}{a} \cdot \frac{\gamma_i}{\gamma_e}\right)} \cdot \frac{a^3}{\gamma^3} \right]$$

式中 a 為球體半徑, γ, θ 為球座標, 其餘符號同前。

由上式, 所得出的結論和均勻電流場中扁橢球狀導體異常的結論相同。只要 $\frac{\lambda}{a} > 1 - \frac{\gamma_e}{\gamma_i}$ 的條件被滿足, 在低阻球狀導體上同樣可以得到“高阻異常”。

3. 點電源場中的球狀導體的異常場

取球座標的原點位於球心, 點電源到球心的距離為 d , 到觀測點的距離為 R , 點電源的電流強度為 I , 其餘符號同前。

根據文獻, 此時球狀導體外部的電位公式如下:

$$u = \frac{I}{4\pi\gamma_e} \left\{ \frac{1}{R} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{N \left[\left(1 - \frac{\gamma_e}{\gamma_i}\right) - n \frac{\lambda}{a} \right]}{\frac{\gamma_e}{\gamma_i} + n \left(1 + (n+1) \frac{\lambda}{a}\right)} \right\} \times$$

* 引自冶金部地球物理探礦公司實驗室電法模型實驗組實驗成果。

** 根據 A.B. 柯馬洛夫引述的實驗證明, 當電流密度相同時, e_{nn} 隨電介質的電導率的減小, 大致成反比的增加, 所以認為 e_{nn} 和電場強度成正比是合適的, 即 $e_{nn} = \lambda E_n$ 。

$$\times \frac{a^{2n+1}}{a^{n+1}\gamma^{n+1}} P_n(\cos\theta) \}$$

由上式可知，公式中第二项（无穷级数项）决定了球状导体异常的性质。当 $\lambda=0$ 时，此无穷级数表征的是低阻球体的“低阻异常”，它的符号和点电源的相反，但当 $\frac{\lambda}{a} > 1 - \frac{\gamma_e}{\gamma_i}$ 时，则上式中无穷级数的符号改变，和点电源的相同，故此时将出现“高阻异常”。

综上所述，可知：

(1) 在均匀电流场中均匀极化的电子导体，它的表面极化效应：等价于导体的导电率 γ_i 减小为 $\gamma_i \left(1 + \frac{\lambda}{a} \cdot \frac{\gamma_e}{\gamma_i}\right)^{-1}$ ，式中 a 为导体在极化场方向上的“半长度”（如半径，半轴等）。

(2) 当 $\frac{\lambda}{a} > 1 - \frac{\gamma_e}{\gamma_i}$ 时，不论在均匀场或是点电源场中，低阻导体上都会出现“高阻异常”。

(3) $\frac{\lambda}{a} > 1 - \frac{\gamma_e}{\gamma_i}$ 的条件在供电时间较长的

直流电法模型实验中，常易满足，故在导体模型“半长度”不大的方向上供电时，经常可以得到“高阻异常”；相反，在野外工作中，导体的“半长度”常常大大超过 λ 值，故此时发现不了上述的“高阻异常”。

但是，在直流电的充电法或等电位法中，在一定条件下，特别是对导电性不甚好的导体而言，导体激发极化效应对“低阻异常”的抵消作用是值得注意研究的。

$$(4) \text{ 既然面极化的导体，其 } \eta_k = \eta_k \left(\frac{\lambda}{a}\right),$$

且 η_k 不与 $\frac{\lambda}{a}$ 成正比，因此，在直流激发极化法模型实验中所得到的面极化的 η_k 曲线，就不可能用定量地去模拟或解释野外工作成果。不了解这一点，将造成实验工作的失败或导致错误的结论。

(5) 用金属导体作电阻法模型实验时，为避免激发极化的干扰，采用低频（例如50—100周/秒）的交流电源供电是合适的。

钢粒钻进技术经验总结

鞍山冶金地质勘探公司

“钢粒钻进”是目前我国钻探生产中提高坚硬岩层钻进效率的最主要方法。1957年推广使用钢粒钻进以来，操作水平逐年提高，在同级岩层比铁砂钻进效率提高1—1.5倍。1961年起，我公司开始加强了钢粒钻进技术的系统科研工作。1963年至1964年末，我们与中南矿冶学院共同以中南矿冶学院钻探实验室及鞍山冶金地质勘探公司402队为基地，共同进行了三次室内试验和一次生产试验，对钢粒钻进工作过程，岩石破碎基本原理，规程参数等，进行了较系统地研究。总结出“钢粒钻进两大一快一多”（即大压力，大水量，快转速，一次投砂量多）的新操作方法。

从1964年起，该操作法在我公司使用钢粒钻进地区普遍推广，获得了良好效果。如405队1964年，在某矿区采用上述方法钻进，在平均8级岩石（有部分7级和9级）条件下，全队年平均台月效率达到354米。现将情况介绍如下：

一、钢粒的优点

做为钢粒钻进用磨料来说，钢粒比铁砂具有明显的优点：

1. 抗压强度高；较好的铁砂一般在650—700公斤/粒，而直径相同（以3—4毫米鞍山产钢粒为标准）的钢粒最高可达2000—2400公斤/粒，平均亦可达1400—1800公斤/粒。较之铁砂可高出两倍左右。
2. 抗冲击韧性好。因铁砂属于典型的脆性磨料，而钢粒则具有较好的抗冲击韧性。它能承受较大的脉动冲击负载（即钻进时的“动载”），直径3—4毫米的钢粒（鞍山地质勘探公司产品）其抗冲击破碎强度平均能达到13—17公斤—米/秒²。最高可达20公斤—米/秒²。但铁砂的抗冲击破碎性能则很低。在冲击功作用下，极易破碎。

二、对钢粒钻进破碎岩石原理的认识

1. 钢粒钻进已代替了铁砂钻进而成为提高坚硬岩层钻进效率的主要方法。钢粒具有较高的抗压强度，