

激 发 極 化 法

(方法指南)

B.A.柯馬罗夫 Л.М.約 飞 M.B.謝苗諾夫 著

地質部地球物理探矿局地球物理探矿研究室
北 京 地 質 学 院 物 探 教 研 室 譯

· 内部讀物 注意保存 ·

中 国 工 业 出 版 社

激 发 极 化 法

(方 法 指 南)

B.A. 柯馬罗夫 Л.М. 約 飞 M.B. 謝苗諾夫 著

地质部地球物理探矿局地球物理探矿研究室 譯
北 京 地 质 学 院 物 探 教 研 室

• 内部讀物 注意保存 •

中 国 工 业 出 版 社

本书为苏联地质部全苏勘探技术研究所所編的经验交流集第20集激发极化法方法指南 (ВИТР обмен опытом вып. 20, Метод Вызванной Поляризации (методическое руководство), 1959)。譯者为地质部地球物理探矿局地球物理探矿研究室和北京地质学院物探教研室的几位同志,最后由张赛珍、顧燕庭两位同志校对。

激发极化法 (方法指南)

地质部地球物理探矿局地球物理探矿研究室
北京地质学院物探教研室

地质部地质书刊编辑部編輯 (北京西四學市大街地质部內)

中国工业出版社出版 (北京各册路門牌10号)

(北京市书刊出版事业管理局登記第110号)

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $2^{11/16}$ ·插頁1·半數47,000

1962年1月北京第一版·1962年1月北京第一次印刷

印数0001—2,320·定价(9-5)0.31元

統一书号: 15165·1267 (地质-123)

前 言

近年来在苏联大部分地区試用激发极化法的成就吸引了很多生产机构。为将此法广泛应用到金属矿床的勘探工作中，就产生了一系列新的要求：第一，安排仪器的成批生产工作；第二，出版新的地球物理工作的即使是簡明的方法指南。

专用于激发极化法工作及电測站的生产将是最近将来的事情。但是要对各生产机构保証充分供应这样的仪器，暂时还是不可能的，所以在“工作方法指南”中，除略述激发极化法电測站外，还应指出这种方法对仪器的一般要求，对如何应用队上現有的仪器及装备作出建議，并写出使用ЭП-1时的一套簡單仪器配备。

激发极化法的研究，特别是它的理論基础还是相当不成熟的，今后随着实际資料的积累，对岩石和矿石的激发极化現象的概念将更正确，并且能够改进地球物理勘探中激发极化法的应用。

所以增补和批評意見請寄下列地址：

Г. Ленинград, В—106, Весельная ул.,

Д. 6, ВИТР.

目 录

前言	
緒言	5
一、激发极化法的理論和实验基础	7
二、仪器和装备	17
三、工作方法	39
四、資料的編录和野外整理	49
五、激发极化法資料的解释	54
附录 1 激发极化法记录本的扉頁格式	74
附录 2 用示波仪工作时记录本的记录格式	75
附录 3 用 $\Theta\Pi-1$ 电位計工作时记录本的记录格式	77
附录 4 激发极化法记录本最后第二頁的格式	79
附录 5 反比于裝置系数的 I 值的計算表	81
参考文献	85

緒 言

在不久以前，岩石的激发极化（俄文简称ВП）现象仅仅在煤田鑽井和石油測井中被利用（4,5）。在金屬矿床上应用激发极化法的試图很久都沒有得到实际收效。

最近几年來，全苏勘探地球物理研究所 А.С. 謝苗諾夫（Семенов）、А.С. 波利亚科夫（Поляков）研究了利用長時間的直流脉冲所激发起的激发极化場的測量方法原理。1948—51年間，全苏勘探地球物理研究所斯維尔德洛夫矿业学院和其他机关也进行了激发极化法的試驗，对方法远景評價得出了相反的意見（14,17）。这时由于对岩石和矿体激发极化特性研究得不够，阻碍了建立解释激发极化法資料的可靠的方法。

在以后試驗資料的总结里，在最近几年以來，特別加强了这些資料的积累，使得关于激发极化規律性的某些以前的概念，得到了修正、确立，而且使得拟定解决激发极化場的解釋与記錄問題的方案更有了根据。在Д. 勃列依尔（Блейл）（21）的試驗研究中及 Ю.П. 布拉謝維奇（Булашевич）（3）的理論計算中和全苏勘探技术研究所全体工作人員工作的結果（10,11），确定了硫化物和其他的电子导体的分散浸染物对岩石极化率的重要影响。1954—1956年在全苏勘探技术研究所實驗室里的研究，以及該所工作人員与卡曼地球物理勘探队在阿尔泰矿区的野外工作，作出了对非矿离子导体岩石极化率大小和一些由于矿体造成的异常效应的評價（12,16）。

从1957年开始；不仅在阿尔泰金属矿区，而且在格鲁吉亚、中哈萨克、科拉半岛和其他地区，都进行了激发极化法的方法研究和生产工作。这些工作的经验指出，和其他普遍所应用的方法相比，激发极化法具有很多优越性。

1. 激发极化法有可能可靠地区分与含水裂隙带、浮土等有关非矿异常。

2. 用激发极化法可以发现具有电子导电性的散漫浸染矿体。

3. 如果矿体是被造成激发极化异常的浸染晕所包围时，用激发极化法可以发现极深层的矿床。

激发极化法不仅可以用来解释其他方法所谓的异常，而且可以作为区域性普查工作方法之一。用激发极化法可以发现和圈定岩石中硫化物和其他电子导电性矿物的富集带，可在一定程度上指导详查工作。在普查对于其他地球物理勘探方法来说束手无策的浸染状矿体时，以及在普查被金属矿物浸染晕围绕着的盲矿体时，采用激发极化法是特别有效的。

除此之外，激发极化法也可以用来解决构造地质问题和寻找含水层。在这种情况下，调查的方法与在金属矿体上所采用的是有些区别的。

在激发极化法的各种方案中，“方法指南”仅仅探讨了其中一种，即使用长时间直流电脉冲激起极化作用的方案。这个方案曾经经过充分的实际考验，可以推荐广泛采用。关于使用交流电的问题、激发极化时间特性问题以及其他一些有希望获得解决、但是要求先做许多理论和实验研究的一些问题，在“方法指南”中不作探讨。

一、激发极化法的理論和实验基础

激发极化可以理解为，在电流作用下，在岩石里产生着二次电动势的一种物理化学现象。

当电流通过岩石后，在测量电极間出現随時間而下降的激发极化电位差(ΔU_{nn})，它的符号通常与在通极化电流的时间里同一对测量电极間的电位差(ΔU_{np})的符号相同。激发极化电位差值的大小取决于充电時間 $\odot$ 。随着充电時間的增加， ΔU_{nn} 开始时增加很快，以后逐漸減慢；最后达到某一极限（漸近綫）的值（图1）。对于各种不同的地質条件，

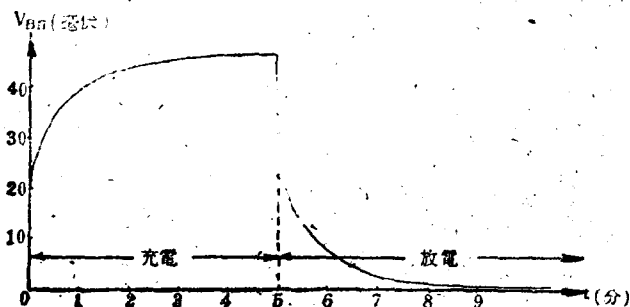


图 1 ΔU_{nn} 与充电和放电时间的关系

ΔU_{nn} 达到极限值所需的时间也不同，导电性很高的疏松沉积层所需時間就比較短，而块状的結晶岩石時間就长些，电子导电性矿体則時間就更长。在野外的条件下，为了得到接近极限值的 ΔU_{nn} ，一般通电3—5分鐘就足够了。

●对极化体通电而产生激发极化叫做充电，断电后激发极化值头叫放电。

断电后 ΔU_{nn} 的衰减与充电过程中 ΔU_{nn} 的增长相似，开始时快，以后逐渐变慢。实际上，一般在几分钟之内 ΔU_{nn} 就降低到零，整个 ΔU_{nn} 的大部分数值都是在去掉极化电流那一瞬间开头几秒里下降的。所以，为了得到相当大的 ΔU_{nn} 数值，应该使测量尽可能在接近于断电的瞬间内进行。显然，只有在这样情况下，即 ΔU_{nn} 数值全是对应断电后同一瞬时的值，这些 ΔU_{nn} 的测量结果才可以相互比较。在比较由不同仪器和由不同放电瞬间所测得的结果时，可以利用下面的表格。表内大致地列出了在各种不同的放电瞬间 ΔU_{nn} 数值与断电后0.25秒时 ΔU_{nn} 数值的比值。

断电后的时间 (t)	量 $\tau = \frac{\Delta U_{nn}(t)}{\Delta U_{nn}(0.25 \text{秒})}$
0.0	1.2—1.8
0.25秒	1.0
0.5 秒	0.86
1.0 秒	0.72
2.0 秒	0.63
5.0 秒	0.47
10.0 秒	0.38
60.0 秒	0.16

表中所列各值均为平均值，是由数百次示波器测试结果所得，每次充电时间均为3分钟。与平均值相比的偏差值，在每种具体情况下都未超过10—20%，在断电后瞬间的 τ 值例外，这时的 τ 值是大概的，因为它是根据 ΔU_{nn} 下降曲线外推而得到的。除此之外，主要的相对平均值的误差还可能在断电后60秒时出现，因为那时比起很短的放电时间来说，量 τ 在很大程度上取决于充电时间的长短和岩石的特性。

在实验室内和野外条件下明显地表现出激发极化放电的速度是由充电持续的长短而定。正象瓦依特 (Вайт) (22) 所提出的那样, 是一个线性过程, 因此, 对于有任意的充电时间 t_1 的放电曲线 $V^*(t)$, 都可以从一个具有较长的充电时间的放电曲线 $V(t)$ 中得到, 因为经长时间充电, 那时激发极化实际上已达到“饱和”; $V^*(t) = V(t) - V(t + t_1)$ 。

下面所写出的激发极化规律符合以下条件: 有足够的充电时间, 以便得到接近极限值的 $\Delta U_{\text{ан}}$ 值, 而 $\Delta U_{\text{ан}}$ 的数值是在放电时间为 0.25—0.5 秒内测得的。

激发极化的形成是与在电流作用下固体物质表面附近的溶液(内孔隙的水份)边界层内所发生的一些过程有关。当固体物质是绝缘体时(大多数的造岩矿物), 或者是当它具有很高的导电性(电子导体的矿物)时, 这些过程是有一些差别的。

在电子导体和溶液的边界上所产生的激发极化电动势与前二者的成分及极化电流密度有关。如果金属在自己离子的溶液的条件下, 在金属里阳极极化作用实际上不存在, 而阴极的极化作用也并不大(图 2)。在矿物里阴阳极的极化作

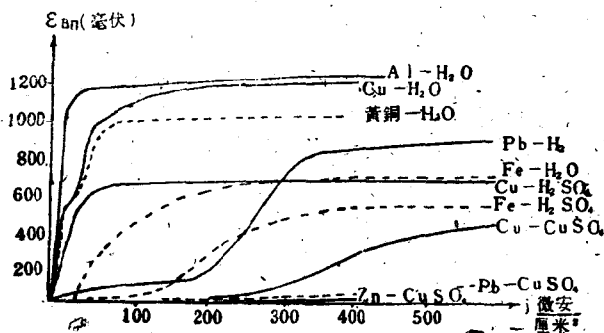


图 2. 在自来水和 H_2SO_4 及 CuSO_4 溶液中, 金属的激发极化电动势 ($\Theta. \Delta. C. \text{ан}$) 与电流密度的关系。

用具有同等的数量级(图3)。在这两种情况下,当极化电流密度较小时(每平方厘米到几十,有时达到几百微安),激发极化电动势与电流密度成正比。当电流密度大时,激发极化电动势与电流密度的关系曲线的形式就变得复杂,好象极谱曲线一样(并且对各种矿物和溶液它们的曲线都不一样)。

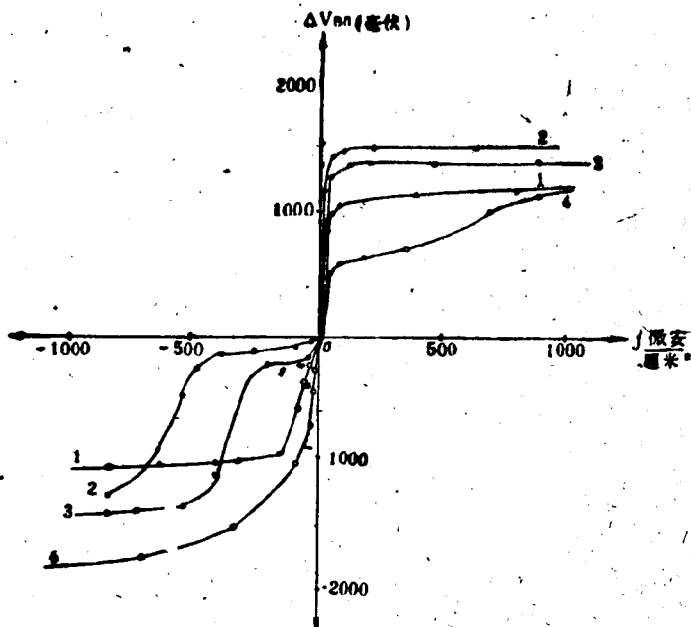


图3. 在不同成分的百分克分子的溶液中, 磁铁矿的激发极化电动势 ($\Delta V_{ин}$) 与其电流密度的关系
1— $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$; 2— H_2SO_4 ; 3— CuSO_4 ; 4— KOH 。

离子导体岩石的激发极化作用, 在很大的极化电流密度的范围内(每平方厘米达数毫安)与极化场程度成正比:

$$\Delta U_{ин} = \eta \Delta U$$

在研究比单个的岩石“颗粒”大得多的岩石体积时, 可

以把激发极化看作是体积激发极化，因为激发极化的基本来源分布在个体积中。因此，如果岩石是粗粒均匀的， η 的数值不仅与外加的极化场无关，同时与测量电极间的距离也无关。

表示岩石极化特性的这个量 η ，称为极化率。度量极化率的单位一般采用 % 来表示，也就是相当于极化电场电压为 100 毫伏时，相对有一个毫伏的激发极化场电压。

离子导体岩石的极化特性与很多因素有关，其中起主要作用的是：湿度、内孔隙水份所含溶盐浓度和岩石颗粒大小。 η 值在万分之几到百分之几以内变化。在粘土中和充满了矿化水的砂土中观察到的极化率最小。 η 的最大值可达到 3—4%，这是在实验室的条件下，在砂土里和被少量低浓度（百分）溶液浸湿的块状晶体岩石中得到的。在离子导体岩石中上述那么高的极化率一般比较少见^①，极化率数值一般在千分之几到 1—2%。

从上面所提出的事实中可以知道， η 与岩石的电阻率也有关系。如果改变岩石的湿度，在湿度很大时， η 和 ρ 之间的变化几乎成正比。在湿度不大，当电阻率为几百欧姆米或者更高时，则 η 增加的程度比起 ρ 来就低得多，在电阻率很高时（几千欧姆米），随着 ρ 的增加， η 可能降低（图 4）。

在一般的情况下，电阻率相同，但是湿度不同和孔隙溶液的溶盐浓度不同的岩石，其极化率不一样。●

① 根据现有观点，离子导体岩石的激发极化作用，是由固体物质和液体边界上的双电层中所发生的作用过程所引起的，同时当双重层的厚度

② 和液膜的厚度是一定比例关系时，激发极化效应达到最大。

③ 当岩石达到完全湿度饱和时，极化率随着孔隙度而变化，同样在孔隙度不变时，极化率随着湿度而变化(15)。

所以，应用激发极化法在原則上有可能区分出按电阻率所不能区分的一些岩石。

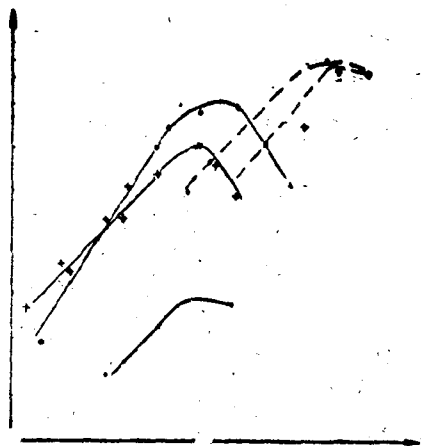


图4. 石英砂的极化率与它的电阻率的关系。
砂的电阻变化是依靠湿度的改变。

电子导体的激发极化作用与在电子导体和溶液的边界上的各种电化学过程有关。所以在一定限度内，电子导体和电解液的分界面越发育，也就是说电子导体的比面积越大，则激发极化作用也越强。这也就说明了沿体积分散浸染有电子导电性矿物的岩石所以具有高极化率的原因，并且也就在理論上論証了，用激发极化法普查浸染矿体时是适宜的。

属于具有电子导电性的矿物有：硫化銅、黃鉄矿、方鉛矿、磁黄鉄矿、磁鉄矿、石墨、軟錳矿等。在岩石中含有这些矿物时，一方面使得电阻率有某些减少，另外一方面使得极化率增大，并且电子导体的浸染浓度越大，极化率也越强（图5）。

岩石的极化率与岩石中浸染物的体积含量之间的比例系数 (ξ)，根据理论和实验研究的判断 (3, 10, 11, 16)，很少与电子导体的成分有关，而在很大程度上与电子导电性包裹体的形状和其在空间之相互位置有关^①， ξ 值可以达到 4 (η 和 ξ 按百分数计算)。百分之几体积含量的电子导电性浸染物的存在会使岩石的极化率比起纯离子导体的岩石来要显著增高。这样一来，便可按照极化率的数值来判断在岩石中是否有电子导体的存在。

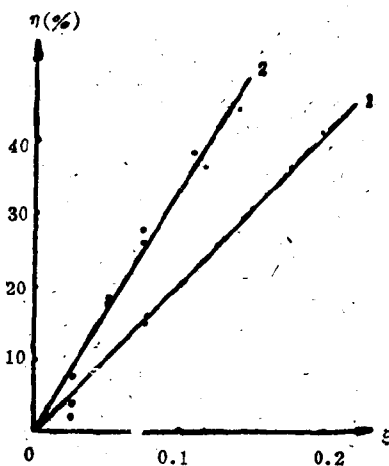


图 5. 石英砂的极化率与其中金属浸染矿物体积含量的关系

1—多金属矿物：(閃鋅矿—52%，方鉛矿—20%，黃銅矿—10%，黃鐵矿—15%，石英—3%)；2—硫化鐵矿 (磁黃鐵矿—90%，鐵黃鐵矿—10%)

除此之外，电子导体的作用还显著影响到极化率与岩石湿度、岩石电阻率的关系。湿的含有金属矿物的岩石的极化率就比湿度很小的同种岩石的极化率高 (图 6)。当极化率的增强是由于电子导电性矿物含量增加所引起时，则随着极化率的增大，将引起岩石电阻率的某些减少。

在野外的条件下，如果介质不均匀，则所测得的 η 值与真正的极化率在空间的分布以及供电和测量电极的布置有关。

① 理论计算和室内实验相当于小电流密度 (不大于 10 微安/厘米²) 的情况，符合一般野外工作条件。

对这样的条件引入视极化率 η_k 的概念（类似于视电阻率 ρ_k ）是适宜的。

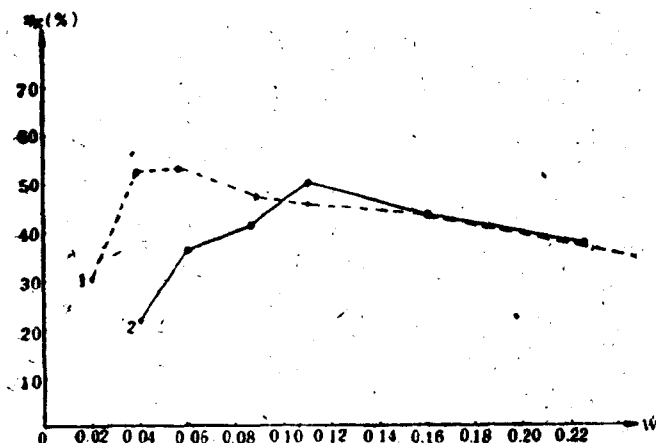


图6.带有浸染金属矿物的石英砂的极化率与其湿度的关系
1—硫化镍矿；2—多金属矿石

在现有水平上，用激发极化法可以准确地发现这样的异常，这种异常的极化率超过正常背景上极限值不少于1—2%。这种激发极化异常按理论计算判断（13）可能是由于等级形状的富浸染矿体所引起的，这矿体的中心到地表面的深度比它的半径大三倍。若矿体是板状或其他形状并且矿体倾斜很陡，如果垂直矿体走向的水平宽度不小于其顶板埋藏深度，则可以期望得到很清楚的激发极化异常。

按激发极化场位与极化场位的比值求得的异常值而要比用场位梯度法测量所得的数值为小。当供电电极与物体间的距离显著超过已知物体的大小时，应用电位测量线路往往是不合适的。

对四极对称装置，四极中心是在球体中心的上面，异常值 η_k 可按下列近似公式来估算①：

$$\eta_k^{\text{a}} = \frac{2\eta^* \frac{a^3}{h^3} \cos^3 \varphi}{3 - \eta^* + 2\eta^* \frac{a^3}{h^3} \cos^3 \varphi}$$

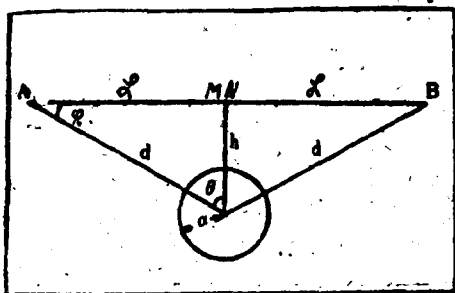


图7

式中， a ——球半径， h ——球中心深度， η^* ——剩余极化率，它等于球体极化率和周围介质极化率之差，而

$$\cos \varphi = \frac{l}{\sqrt{l^2 + \left(\frac{h}{L}\right)^2}}$$

L ——供电电极距之半（ $L = \frac{AB}{2}$ ）（图7）。

所观测的 η_k 值等于周围介质极化率 η_1 及异常值 η_k^{a} 之和。当 $L < \frac{1}{5}h$ 时， η_k^{a} 值很小，因此 $\eta_k = \eta_1$ 。当 $L > 2.5h$

①在假说中引出的公式，球体的电导性与周围介质的电导性没有区别。

时, η_k 趋近极限。此时如果根据已由理論計算証明了的實驗資料認為, 剩余的极化率与球內电子导体浸染物的体积含量成正比, 那么 η_k 的最大值就与球內电子导电性包裹体的体积总和成正比, 而与球体深度的立方成正比。因为矿体的深度可以按 η_k 垂直測深曲綫来确定, 所以在激发极化法中就发现在原理上有可能估計引起激发极化异常的电子导电性矿物的数量。

根据實驗資料, 如果測綫在矿上通过 (图 8), 对这样一种剖面装置 (中間梯度), η_k 极大值的宽度大約与高极化率的物体的宽度相符合。位于矿体边缘的剖面, 随着离开矿体距离的增加, 激发极化异常强度减弱, 而 η_k 峯值变得較寬。按 η_k 图可以很清楚地画出矿体的外形, 測量綫一定不能少于一条, 已知垂直測綫主要方向和在矿体上通过。

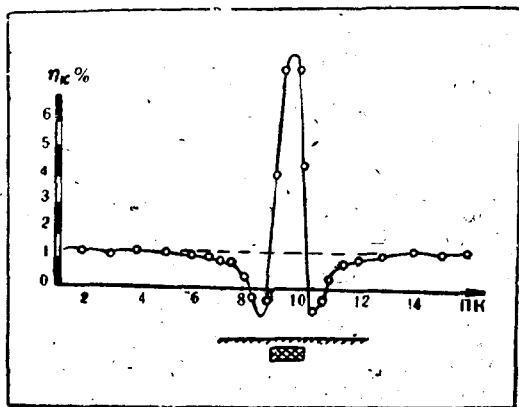


图8. 在长方形的电子导体上的 η_k 曲綫