

〔苏〕 B. A. 柯马罗夫 著

激发极化法 电法勘探



激发极化法电法勘探

修订增补第二版

〔苏联〕 B.A. 柯马罗夫 著

阎立光 等 译

罗延钟 校

地 质 出 版 社

内 容 提 要

本书根据1980年原书第二版译出。全书共五章：岩石和矿石激发极化性质的理论和实验资料；激发极化场的理论计算和模型实验；野外工作方法和技术；激发极化异常的解释方法；在普查和勘探有用矿产时激发极化法的应用。书中介绍了近年来各国研究激发极化法的新成就；列举了该方法在黑色、有色、稀有、非金属以及在石油天然气矿床和水文工程地质调查方面的应用实例。

本书主要由阎立光同志翻译，余海泉、郭爱纓同志翻译了第三章的部分内容；全书由罗延钟同志校对。

В. А. Комаров
ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА МЕТОДОМ
ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

издание второе,
переработанное и дополненное
Ленинград «Недра»
Ленинградское отделение
1980

激发极化法电法勘探

修订增补第二版

〔苏联〕В. А. 柯马罗夫 著

阎立光 等 译

罗延钟 校

*

地质矿产部书刊编辑室编辑

责任编辑：张怀素

地质出版社出版

（北京西四）

地质出版社印刷厂印刷

（北京海淀区学院路29号）

新华书店北京发行所发行·全国新华书店经售

*

开本：850×1168¹/₃₂·印张：13¹/₁₆·字数：342,000

1983年6月北京第一版·1983年6月北京第一次印刷

印数：1—2,722册 定价：2.50元

统一书号：15038·新903

第 一 版 序

苏联在普查和勘探金属矿床时成功地使用 ВП 法的功绩，主要应归于全苏勘探方法和技术研究所 (ВИТР)、苏联地质部生产大队和批量生产该方法仪器的麦蒂希仪器制造厂的工作人员。

ВИТР 的工作人员 Л. М. 约费 (Иоффе)、Л. С. 赫洛波尼娜 (Хлопонина)、М. В. 谢苗诺夫 (Семенов)、Н. А. 皮什帕寥娃 (Пишпарева)，以及生产大队的工作人员 О. М. 沙波瓦洛夫 (Шаповалов)、А. Н. 巴拉舍夫 (Балашев)、Я. В. 马尔库申 (Маркушин)、И. И. 波波夫 (Попов)、В. А. 沙法连科 (Шафаренко)，在室内和野外条件下研究了岩石和矿石的激发极化性质和规律性。本书的很大一部分乃是他们获得的资料。

前几年全苏勘探方法和技术研究所出版了两本专著^[268, 280]。因此，在提供给读者的这本书中，ВП 场理论计算和钻孔工作方法只占一小部分，大部分是论述 ВП 现象的性质、应用该方法的原则可能性的分析和该方法今后的发展远景。

第 二 版 序

在本书第一版问世后几年内，激发极化法又有了新的发展。它的应用范围大为扩大。各种金属矿床成了用激发极化法普查的普通对象。证明了普查石油-天然气田使用该方法的可能性，改善了该方法的技术基础，拟定了并且正在生产实践中应用研究激发极化时间参数和非线性参数的新方法。

在第二版中应用了 А. Н. 巴拉舍夫、В. Н. 泽姆佐夫 (Земцов)、Ю. Т. 伊林 (Ильин)、В. И. 列梅茨 (Лемец)、Я. В. 马尔库申、И. И. 波波夫、П. В. 罗克辛 (Роксин)、А. А. 斯米尔诺夫 (Смирнов)、В. Ю. 切尔内什 (Черныш)、И. С. 丘普林 (Чуприн)、О. М. 沙波瓦洛夫、Б. Б. 沙特罗夫 (Шатров)、В. А. 沙法连科等给作者寄来的建议和资料。作者对他们和在修改手稿时给予很大帮助的 К. Г. 舒勃尼科娃 (Шубникова) 表示深深的谢意。

对书中涉及时间参数和非线性参数的一些章节重新进行了改写。更详细地叙述了激发极化时间特性和频率特性的作用及相互关系的理论原理。扩充了该方法的应用实例。删去了对过时仪器的叙述，代之以阐述综合电测站的结构原理。这些电测站可用来在很宽的时间或频率范围内，研究二次电场的过渡过程或频率特性。

目 录

第一版序

第二版序

绪论..... 1

第一章 岩石和矿石激发极化性质的理论和实验资料10

电子导体的激发极化12

 一般原理12

 试验方法和技术16

 试验结果19

 小结31

离子导电岩石的激发极化34

 石英砂的极化34

 粘土和其他沉积岩的极化42

 结晶岩石的极化46

 理论概念50

 小结56

含电子导电包裹体岩石的激发极化57

 含电子导体包裹体的石英砂的极化58

 浸染状矿石标本的极化59

 小结63

激发极化的时间特性64

 一般原理64

 激发极化的时间规律65

 在充电和放电时间内激发极化的相互关系69

 由直流和交流电建立的激发极化的关系77

 任意形状脉冲电流情况下的激发极化电压90

 小结92

第二章 激发极化场的理论计算和模型试验94

一般原理。均匀介质中的激发极化场	95
基本公式	95
均匀各向同性介质中的激发极化场	102
含球形包裹体的均匀介质的极化率	103
极化率的时间特性	106
含椭球形包裹体的均匀介质的极化率	111
计算视极化率的基本方法	114
层状介质的平均极化率	116
均匀非各向同性介质的视极化率	118
小结	120
球体的激发极化	121
均匀场中的电子导电球体	121
点电源场中的电子导电球体	129
点电源场中的体极化球体	132
球体上的剖面测量	135
固定电源时激发极化场的测量	141
利用钻孔作激发极化场的测量	142
两层介质中的球体	146
面极化和体极化的对比	149
致密矿体周围金属矿浸染晕的作用	151
小结	153
椭球体的激发极化	154
平行于椭球体轴的均匀场中的椭球体	154
不平行于椭球体轴的均匀场中的椭球体	160
点电源场中的椭球体	161
小结	165
板状体的激发极化	166
二层介质	166
三层介质	169
多层介质	172
两种介质的垂直接触带	174
均匀场中的直立板状体	177
板状体上的剖面测量	182

小结	184
任意断面拉长矿体的激发极化	184
金属矿体激发极化的模拟	185
电子导体激发极化场的相似准则	185
体极化体激发极化场的相似准则	188
实验室装置	189
试验结果	190
小结	199
第三章 野外工作方法与技术	200
对仪器的基本要求	200
测量电极	201
测量仪器	203
极化电流源	205
供电电极	206
供电和测量线路的导线	207
直流电工作的仪器设备	207
方框图	208
电流源	209
测量仪器	210
开关装置	210
设备	211
仪器工作原理	211
СВП-74型电测站	214
用途和技术性能	214
结构图	215
可控硅转换器	219
稳流器	221
控制部分	221
测量仪器	224
用电测站工作的顺序	226
ВП-Φ 电测站	228
用途和技术性能	228
结构图	229

生产工作	232
布极方式	232
电极距	240
钻孔测量的特点	242
测量的时间制式	245
测量结果的整理	249
第四章 激发极化异常的解释方法	260
视极化率异常的划分	260
一般原则	260
区域异常和局部异常	261
钻孔异常的特点	266
极化体形状和水平规模的确定	268
极化体埋深的确定	271
极化体倾向和其他产状要素的确定	274
钻孔附近空间内的极化体位置的确定	277
极化体极化率和电导率的确定	280
极化体中电子导电矿物含量的确定。激发极化异常远景的 评价	283
第五章 普查和勘探有用矿产时激发极化法的应用	289
应用激发极化法的原则可能性	289
岩石和矿石极化率的差别	290
矿体规模和调查深度	293
地形和岩石不均匀性的影响	296
各种工业类型金属矿床中电子导电矿物的分布	301
黑色金属矿床	307
铁	307
锰	312
铬	315
钛	316
轻金属矿床	316
铝	317
有色金属矿床	320
铜	321

铅和锌 (多金属).....	334
镍	345
铋	353
稀有金属矿床	354
锡	355
钨和钼	358
汞	363
贵金属矿床	366
金	367
非金属矿产矿床	373
石墨	373
云母	375
蔷薇辉石	376
刚玉	376
磷块岩	377
石油和天然气矿床	378
水文地质和工程地质调查	381
结论.....	385
参考文献	387

绪 论

随着激发极化^①法的出现,在地质工作中开始积极利用电流作用下岩石和矿石中产生的电化学过程。对于大地中自然发生的电化学反应所形成的电流很早就进行了研究,并且成为大家熟知的自然电场法的基础。A. C. 谢苗诺夫教授领导的列宁格勒大学的地球物理工作者们,对该方法的发展作出了重要贡献^[249, 255]。出现很强的自然电场的条件是很复杂的,在金属矿床上并不总是有利于形成强自然电场。强制形成电极化使发现矿床的可能性增大了,并开辟了研究大地电化学反应的另一途径。

将矿石 BП 应用于地质目的的思想首先由法国地球物理工作者 K. 施伦贝尔热提出,他早在 1912 年就取得了相应的专利权。K. 施伦贝尔热以下述理由提出了假设:在电流作用下,在电子导电金属矿脉和围岩离子导电介质的界面上产生氢-氧电池,它的放

电引起二次电流(图 1)。

K. 施伦贝尔热用断掉一次电流后所观测到的 BП 场与充电时观测的电场之比作为 BП 的参数。这个比值用拉丁字母 PP (激发极化的法文为 polarisation provoquée) 表示,并以百分数表示之。

在 20 年代, K. 施伦贝尔热试图在野外条件下发现金属矿体的 BП。但他自己

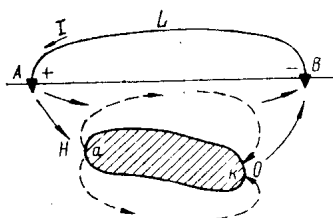


图 1 产生 BП 的示意图

(据 K. Шлюмберже)

L—供电线; A 和 B—供电电极; H—阴极分离出来的氢的位置; O—阳极分离出来的氧的位置; 实线箭头是一次电流; 虚线箭头是二次电流

① 原文用“BП”表示激发极化,中译本中保留这个表示方法。——中译本编注

承认，由于测量电极间自然电位差变化所造成的干扰，试验是不成功的^[315]。以后，K. 施伦贝尔热和公司的同事们从事用于油田测井的岩石激发极化的研究^[316]，就在当时，O. 韦斯提出了应用激发极化法解决地质构造问题^[421]。

在30年代，各国物探工作者试图找出野外条件下记录ВП效应的可靠方法。M. 缪勒尔^[382-384]应用交流电代替直流极化电流，但同样没有达到预期的成就。由于使用的仪器和测量方法有缺点，在20~30年代完成的许多工作都是不成功的。A. C. 谢苗诺夫^[254,257]指出了K. 施伦贝尔热所提方法的缺点，A. 别卢依吉^[334]查明了M. 缪勒尔和O. 韦依斯假设的错误。

1935年E. A. 谢尔盖耶夫 (Сергеев) 和H. H. 拉古林 (Рагулин) 在中央地质勘探科学研究所 (ЦНИГРИ) (现名全苏地质研究所 ВСЕГЕИ) 物探部物理化学方法实验室，对硫化物的ВП进行了有意义的研究。他们确定了ВП与极化电流密度、其作用的时间、金属矿物和与之相接触的电解液的成分之间关系的性质；同时证实了K. 施伦贝尔热关于在金属矿物表面上形成明显电化学电动势 (э. д. с.) 可能性的假设。H. H. 拉古林预见到浸染矿石有强大ВП效应的可能性，并正确地拟定了野外工作方法。其中，他指出了在ВП法中使用中间梯度、剖面和垂向测深装置的有用性，同时指出无论单个还是周期性的单向脉冲电流的测量制式 (режим) 都是可行的。由于工具不足，E. A. 谢尔盖耶夫和H. H. 拉古林也没有进行野外工作。

在战后年代，B. H. 达赫诺夫教授和他的同事们拟定了钻孔中激发极化场的测量方法 (电测井)，该方法在煤田测井以及在某种程度上于油田测井中，都得到了广泛的推广。这种方法的特点是：直接在靠近供电电极的地方，用一个或两个电极组成的电位电极系作测量；并且根据激发极化电位曲线进行解释^[83-85,319]。煤层与围岩电阻率差别很小，因而在其它电测方法无效的情况下，这种电测井的应用保证了划分煤层^[40,41,79]。电解测井在实际中的运用，促进了对激发极化现象的科学上的兴趣。在50年代，在莫

斯科石油研究所^①和全苏勘探地球物理方法科学研究所（ВНИИ геофизика）对激发极化进行了多方面的研究，并给出了激发极化现象的理论解释^[83, 166, 167, 174-177]。

与此同时，在金属矿床上开始了ВП法的试验工作。1948年在乌拉尔，先是Г. П. 萨科甫采夫（Саковцев）（斯维尔德洛夫斯克矿业学院），而后是А. С. 波利亚科夫（Поляков）（ВИРГ）进行了先前由Н. Н. 拉古林拟定的但未能实现的研究。当时，А. С. 波利亚科夫指出，中间梯度装置比追索激发极化等电位线装置更优越，并证明了使用К. 施伦贝尔热提出的PP参数的合理性。以后该参数称为极化率，并以 η 表示。

1949年在中乌拉尔的矿床上曾研究了激发极化与极化电流及充电时间的关系。以此为基础，А. С. 波利亚科夫作出了如下的结论：必须用长时间的充电和大电流，以保证激发极化测量信号有足够大的数值。А. С. 波利亚科夫还指出，在单个脉冲电流之后测量ВП电压瞬时值，比К. 施伦贝尔热的做法好。后者是借助于换向器，在周期性脉冲电流制式下测量ВП电压的平均值。А. С. 波利亚科夫研究了矿脉和岩石产生ВП的可能性，并着重指出：“应以很谨慎的态度对待ВП法野外资料的解释，因为除了矿体的极化以外，还可以观测到围岩很强的极化”^[221, 38页]。

在1950~1951年间，全苏地球物理勘探研究所的野外队在哈萨克和阿尔泰，斯维尔德洛夫斯克矿业学院的野外队在乌拉尔，塔什干工学院的野外队在乌兹别克进行了试验工作。关于ВП法应用的前景和形式的意见是互相矛盾的。由于对ВП规律研究得不充分，致使对所观测效应推断解释的意见发生分歧。在围岩极化的背景上划分矿体产生的ВП异常曾被认为是棘手的问题。Г. П. 萨科甫采夫在矿体模型上完成了专门的实验室研究，并进行了理论计算，以估计野外条件下ВП异常可能达到的值。他得出结论：由于作用在金属矿体表面的极化电流密度很小，并且相应

① 现名是莫斯科И. М. 古勃金石油化学和天然气工业研究所。

的BП电动势也小，所以“在野外条件下，当装置极距为500米和电流 $I=10$ 安时，矿化的激发极化实际上不存在，观察到的只是近电极带的电场”〔245,35页〕。

近电极带电场理解为对岩石电位的平均效应，由于在近电极带内溶液浓度的变化，这种电场在靠近正供电电极的地方得到高的正电位，而在负供电电极附近得到很大的负电位。这种思想很接近于A. C. 波利亚科夫的假说，后者曾断言：“在所研究的情况下，岩石激发电位形成的基本原因是在供电电极附近存在的不均匀电场中的电荷积累”〔221,37页〕。Ю. П. 布拉舍维奇给出了该思想的理论证明，他指出：“在介质具有物理和化学不均匀性的条件下，同性电荷存在的必然性是电场微观理论的简单结果”〔35,58页〕。

在阿尔泰矿区的矿床上，1952~1953年间Ю. С. 雷斯(Рыс)和作者完成的野外工作证明，在矿体上能得到很大的BП异常；而在卡明斯克物探大队，BП法开始用来区分电子导电矿体和离子导电的浮土局部不均匀体及充水构造带等所引起的电法异常。当时曾尝试将BП异常解释为硫化浸染体的体极化效应。

在1953年，美国物探工作者D. 布莱尔〔338〕将所有测得的BП效应都解释为分散金属矿物的影响（他抛弃了岩石离子极化的观点）。德国物探工作者W. 布赫海姆〔342,343〕从理论推测出发，指出浸染物对产生BП起很大的作用。W. 布赫海姆曾研究过不同频率的交流电的激发极化。

Ю. П. 布拉舍维奇在理论上估计了浸染物的作用，并作出了含足够浓度的硫化浸染物的矿带能形成明显BП场的重要结论〔34〕。

1954年重新建立的全苏勘探方法和技术科学研究所(ВИТР)从事于BП法的详细研究。委托工作小组（其中M. B. 谢苗诺夫和作者在这段时间已经有了野外和室内研究BП的经验）研制可靠的仪器，研究岩石和矿石的BП规律性，在不同的矿床上试验该方法并且评价它的实用可能性。Л. М. 约费组装了几种类型的试验仪器，在断掉直流脉冲电流后，示波仪能记录BП电压的衰减曲线。M. B. 谢苗诺夫、Л. С. 赫洛波尼娜和H. A. 皮什帕寥

娃用这个仪器从各个方面研究了电子导电矿物和离子导电岩石的 BП [53, 137]。同时, 全苏勘探方法和技术研究所与卡明斯克物探大队团结一致地在阿尔泰矿区的无矿地段和多金属矿床上进行了试验工作。工作结果所得的资料, 有可能进一步弄清岩石和矿石的 BП 规律性, 定出对仪器的要求, 提出对野外测量结果解释方法的建议。解释方法是以发现无矿岩石极化率的稳定性为基础的, 超过该极化率的上限就是有电子导体影响的可靠标志。野外资料证明了测得的 BП 异常与金属矿化带之间的因果关系 [53, 122, 123, 140, 242]。

1957~1958 年间, BП 法曾在格鲁吉亚、中哈萨克、科拉半岛的不同金属矿床上进行了试验。得到的资料使可能提出建议将 BП 法用于生产, 以作为普查硫化矿床尤其是浸染硫化矿床的有效手段, 浸染矿对其它物探方法来说是很困难的。为了 BП 法的应用, 全苏勘探方法和技术研究所于 1958 年制造了十套可以利用当时在物探队中已普及的 $\Theta\Pi-1$ 型电位计进行 BП 法工作的配件和汽油发电-充电机组 [109]。1960 年在切利亚宾斯克大队, O. M. 沙波瓦洛夫组织生产了一批这样的配件。

在哈萨克曾对 $\Theta\text{CK}-1$ 型电子指针式补偿仪制造了配件, 以后完善了这些配件, 并使之适用于双极性脉冲的工作 [235]。简化仪器的制成使许多大队能够进行试验生产工作, 并证实了 BП 法的适用性。阐明 BП 法实际应用经验的方法指南 [143] 的发表, 促进了 BП 法的运用。同时, 采取了一些措施以组织专用仪器的批量生产。

1959 年, 全苏勘探方法和技术研究所、全苏勘探地球物理方法研究所和麦蒂希仪器制造厂共同研制了在照像纸上示波记录待测电压的 $\text{BП}-59$ 型电测站的试验样机 [211]。1960 年在麦蒂希仪器厂安排了 $\text{BП}-59$ 型电测站的批量生产, 该仪器在苏联和国外得到了广泛的普及。以后几年, 全苏勘探方法和技术研究所和麦蒂希仪器厂研制了车载式的、轻便的和携带式的新型仪器 ($\text{BП}-62$ 、 $\text{BПO}-62$ 和 $\text{BПП}-67$)。同时, A. C. 波利亚科夫和 H. И. 沃斯科博

依尼克^[223]组装了可以在纸带上记录ВП电压的记录仪。

1958—1961年间，全苏勘探方法和技术研究所的工作人员研究了ВП法钻孔方案的基本理论^[258-260]。在以后的几年中，钻孔方案在苏联许多地区进行了试验。为了保证钻孔工作，全苏勘探方法和技术研究所和麦蒂希仪器厂研制了ВПС-63型电测站，麦蒂希仪器厂从1964年起批量生产了这种电测站^[268]。

早在1957~1958年，莫斯科地质勘探学院（МГРИ）的工作人员М. И. 普柳斯宁和А. Ф. 波斯捷尔尼科夫就提出了连续测量视极化率的方法^[217]，这种方法在浸染金属矿床上成功地进行了试验，但只是在最近时期才找到可靠的技术“援兵”——由“西伯利亚有色金属自动化”联合会В. Ф. 列别杰夫（Лебедев），В. Ф. 舍费尔（Шефер）和В. И. 伊戈尔金（Иголкин）研制的自动仪器。

仪器的大量生产，使可能在地质勘探实际中普遍运用ВП法。矿山阿尔泰（В. А. Белаш，Я. В. Маркушин）、乌拉尔（О. М. Шаповалов）、高加索（А. Е. Гезин）、诺里尔斯克（А. М. Волыхин）、中亚细亚（А. Н. Балашев，И. И. Попов，В. И. Могильников）等地生产单位的工作人员不仅主动地掌握了新的电法勘探方法，而且对方法的基本理论和试验原则做出了重要贡献。А. Ф. 康德腊田科和Г. Я. 沙依杜罗夫（克拉斯诺雅尔斯克）研制了几种新颖的仪器，并明显地影响到工厂生产和批量生产的新仪器中技术决策的选择^[150-152]。

在解决方法的理论和ВП过程的电化学性质的问题中，各大学和科学研究所的工作人员：И. И. 罗基田斯基（Рокитянский）、А. Ф. 波斯捷尔尼科夫（Постельников）、Д. А. 弗里德里赫斯别尔格（Фридрихсберг）、М. П. 西多罗娃（Сидорова）、В. В. 科尔米利采夫（Кормильцев）、Б. И. 根纳季尼克（Геннадий）、Р. В. 乌利廷（Улитин）、Г. И. 米哈依洛夫（Михайлов）、Э. Н. 库兹明娜（Кузьмина）、Г. П. 涅恰耶娃（Нечаева）、В. В. 日阿沃朗科娃（Жаворонкова）、В. С. 莫依谢耶

夫 (Моисеев) 等, 都起了很大的作用。

由于 С. В. 巴达梁^[12-14], А. В. 库利科夫, З. Д. 克鲁格洛娃^[163, 165], М. И. 戈洛德^[72, 73], Н. А. 格拉德科夫^[70], В. А. 里亚波洛夫^[244]等人的工作, 近年来 ВП 法的应用范围已包括研究金属矿、油气田、伟晶岩、铝土矿床和解决工程地质问题。

弗赖堡矿山科学院 (民主德国) W. 布赫海姆教授的理论和实验著作的出版^[37, 38, 342, 343], 引起了苏联地球物理工作者的注意, 促进了交流 ВП 过程的研究。从1960年起, 苏联科学院乌拉尔科学中心物探研究所的 Г. В. 阿斯特拉汉采夫和 Р. В. 乌利廷^[8, 9, 283, 284]进行了这方面的研究。最近几年在莫斯科地质勘探学院 (Л. З. 博布罗夫尼科夫, В. П. 梅利尼科夫, В. А. 波波夫等)、全苏勘探地球物理方法研究所 (А. В. 库利科夫, Е. А. 谢米亚金)、哈萨克物探研究所 (В. Ф. 萨尔巴什, В. И. 列梅茨)、哈萨克物探仪器试验-实验工厂专业设计处 (В. Д. 日利尼科夫) 和苏联科学院西伯利亚分院冻土研究所 (Б. И. 根纳季尼克) 成功地拟定了记录 ВП 过程振幅和相位的仪器、方法和理论^[64, 192, 276, 286, 287, 318]。

1972年研制了在0.3到78周频带内测量 ВП 相位的 ИФАЗ-ВП 电测站, 之后于1975年研制了携带式 ВПФ 仪, 给广泛运用交流 ВП 法打下了技术基础^[120, 276, 286]。

国外在美国和加拿大, А. 布朗特、Р. 包尔德文、Н. 西格尔、Р. 哈洛夫制造了用脉冲和周期性交流电测量的适当的仪器。从50年代初起, 某些公司“纽蒙特” (Newmont Mining Co.)、 “麦克发尔” (McPhar Geophysics Ltd.)、 “夏普” (Sharp Instruments) 等在普查金属矿床时成功地应用了 ВП 法。稍后, 美国学者找到了用 ВП 法找地下水的方法^[218, 395]。

1959年是有意义的文章大“丰收”的一年。出现了 R. 包尔德文的文章^[332] 和美国著名物探专家 J. 维特主编的科学论文集^[388], 阐述了许多专家的十年工作结果。J. 沙弗尔^[403]描述了离子导电介质极化的试验研究。D. 马歇尔和 T. 麦登^[380]从理论上解释了 ВП 现象。加拿大物探工作者 H. 西格尔^[404]提出了体极化