

仇勇海等译

自然电场法文集

中南工业大学出版社

前 言

近10余年来,自然电场法在金属矿产资源的普查、工程水文地质 的应用、油气储集层的勘探、地热资源的开发、预测地震、圈定煤田火区 范围及深部地质构造的研究等方面都有了新的进展。

美国1980年自然电场法野外工作量仅次于激电而占第二位。在美国 西部地区1978至1981年完成自然电场法测线3000余公里。1984年在美国 亚特兰大召开的SEG54届年会上,发表了10篇有关自然电场法的论文及 论文摘要。有三项自然电场法的专利。

苏联有关自然电场法的专著有:自然电场法(物理化学问题)(别 尔穆哈诺夫,1977)、自然电场法电法勘探(谢苗诺夫,1980)、金属 矿床普查与勘探效果、自然电场法与激发极化法的电位异常(谢弗林, 1983)、地电化学勘探(累斯,1983)、地质体自然电场动力学理论 (别尔穆哈诺夫,1984)。

不断总结自然电场法应用的地质效果,加强基础理论问题的研究, 有可能拓宽自然电场法的应用领域。为了使我国广大物探人员了解自然 电场法的进展情况,本文集最后列出了近期国外自然电场法参考资料 题 录165条,可供参考。

自然电场法文集由中南工业大学地质系仇勇海同志组稿,程真、蔡 文成、张宗岭、薛少青、刘代志、甘为民、周文明等同志参加了翻译工 作,译文全部由程方道同志校对,插图由熊水珊同志清绘。由于我们水 平有限,错误之处在所难免,敬希读者批评指正。

译 者

一九八八年八月

目 录

第一篇	斑岩硫化矿的自然电位·····	(1)
第二篇	含金硫化物矿区矿柱的地质—地球物理评价方法···	(27)
第三篇	在金属矿产普查中提高自然电场法的效果·····	(37)
第四篇	自然电场的井下测量·····	(43)
第五篇	在地下矿山平峒及水平钻孔中自然电场的观测方法 与技术·····	(49)
第六篇	亚美尼亚金属矿床上自然电场的结构及用自然电场 法地下观测结果对某些问题的解释·····	(53)
第七篇	自然电场法对比地球化学情况的填图经验·····	(72)
第八篇	自然电场法勘探中的 Саксов-Нигард变换·····	(81)
第九篇	碳氢化物贮油层上的自电异常·····	(87)
第十篇	论石英及伟晶岩脉上自然电场的实质·····	(92)
第十一篇	随时间变化的自然电场及其在成矿过程中的作用	(97)
第十二篇	岩石热毛细管效应是自然极化的形式之一·····	(108)
第十三篇	自然电位随时间的变化及其与水文地质和气象参 数之间的关系·····	(117)
第十四篇	Balcova 地热区自然极化的研究·····	(140)
第十五篇	地下电子导体自然极化和激发极化的相互作用···	(160)
第十六篇	自然电场与深部构造的关系·····	(168)
第十七篇	西伯利亚磷矿上的自电和激电场·····	(185)
第十八篇	自然电位和电流通道效应·····	(198)

第十九篇	温差自然电位异常及其与源区所对的立体角的关系.....	(207)
第二十篇	关于海上自然电场的测量方法.....	(221)
第二十一篇	自然电位法在铀矿勘探中的应用-印度卡拉塔卡阿坝地区的一个研究实例.....	(229)
第二十二篇	地震前活断层破碎带中自电异常随时间的变化	(240)
第二十三篇	硫化矿层自然电位与钻孔井液含氧量的关系.....	(255)
索 引	国外近期自然电场法参考资料.....	(263)

斑岩硫化矿的自然电位*

Charles E. Corry

一、 引 言

相对于围岩,在硫化矿上可测得天然负电位这一事实,人们已经知道一百五十多年了(Fox 1829, 1830a, 1830b)。只有在瑞典的铁矿上使用的磁法勘探要比自然电位法(SP)探矿运用得早些。Kelly (1924)评价了早期的自电**测量工作及其一般历史。他(1957)描述了1924年在Quebec的Noranda矿上使用SP测量所取得的显著效果。Fedynsky等人(1970)和Semenov (1974)评述了俄罗斯的自电工作。Parasnis (1970, 1975)、Malmquist和Parasnis (1972)以及Bölvikem (1974)提供了在瑞典做的某些SP资料。Hulse (1978)给出了更多的文献目录。

1978至1981年几年里,AMAX在美国西部已知的硫化矿

-
- Spontaneous polarization associated with porphyry sulfide mineralization

** 自电——自然电场法,下同

床勘查中做了3000测线千米以上的SP测量工作，这里将引用部分测量结果。

——不管自电的历史多长，由于存在野外数据的可靠性和重现性问题，许多勘探工作者未能有效地使用SP方法。近来，在矿床勘探中，随着野外方法的改进、仪器稳定性能提高、手提式数字毫伏计的使用，已使上述问题得到了解决。

在硫化矿SP勘探中黄铁矿是主要的探测对象、其次是磁黄铁矿，与SP异常有关的其它硫化矿物为：黄铜矿、辉铜矿、铜蓝、铜和铜-镍硫化物，钴矿石以及辉钼矿。

除了硫化矿外，石墨是最常见具有SP异常的矿物。曾有人报导过高品位的无烟煤也能产生SP异常。可是，在一个高品位的无烟煤矿区所作的观测并没有发现相应的SP异常，另外，人们已经报导了在菱铁矿（Wilckens, 1955），锰的氧化物，软锰矿，明矾石（Kruger and Lacy 1949, Gay 1967）和磁铁矿上具有SP异常。

SP方法的成功使用必然促使人们研究其机理。Sato和Mooney（1960）建立了一种模型。但野外资料没有证实他们的模型理论，此后我们做了一系列的试验来研究这种机理。这些试验表明，野外测量的电位是置于矿化带外的参考电极与硫化物系统内的移动电极之间的氧化电位 ΔE 。

二、野外工作方法（略）

三、自然电位的野外测量

本文所依据的SP测量工作主要布置在已知浸染状斑岩硫化矿附近，尽管偶而遇见块状硫化矿体。我们发现斑岩和块状硫

化矿床两者的SP响应没有什么区别。图1-1是可能由斑岩硫化矿产生的高SP异常的例子。大家知道，观测的异常与黄铁矿和磁黄铁矿有较好的对应关系，而它们常赋存在斑岩硫化矿有关的石英—绢云母—黄铁矿（QSP）晕中。

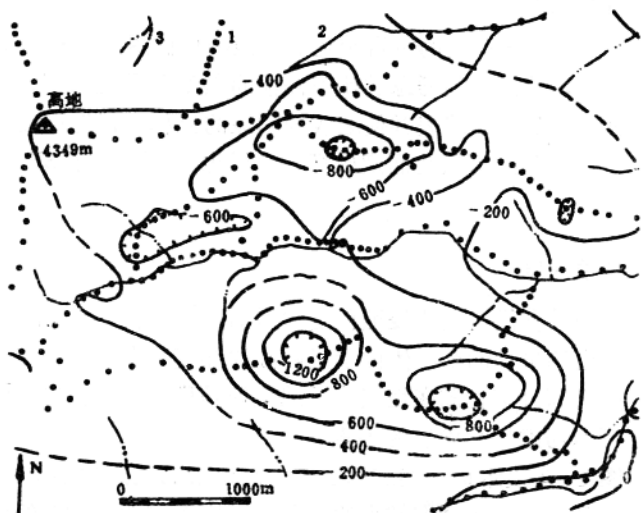


图1-1 Buena Vista 县南西的Sawatch山硫化矿床的SP异常平面图。测量基点置于所示地区北西大约10公里处。-200毫伏等值线可大致圈出硫化矿物范围，硫化物富集区具有更大负值。

1—SP测点；2—SP等值线；3—溪流

通过野外测量我们一致认为，SP异常与大的未氧化的斑岩硫化矿床有关。然而，几种因素可减小SP值或妨碍对SP异常的探测。测点距是最主要的因素。对于图1-1中的异常采

用100至200米测点距较为合适。探测硫化矿的其它影响因素是在现有的侵蚀表面以下矿床的深度，通常由硫化矿产生的SP异常并不直接与地形有关，但是SP异常的幅值与矿床侵蚀深度之间有一定的关系，此外侵蚀表面下的风化深度也影响观测的SP异常值。

人们在已知深度的斑岩硫化矿体范围内试图确定SP的有效勘探深度，为此必须考虑矿体被侵蚀的程度和风化深度，有效的侵蚀使矿体接近地表并使之成为明显的目标。但近地表的风化可以使硫化矿因氧化而遭破坏，这样也就影响了SP观测值。

四、侵蚀深度

四个具有代表性的侵蚀程度模型如图1-2所示。在地表进行自电测量。四个矿体位于足够高的纬度和高程上。在这种环境中大部分硫化矿在地表或近地表处是稳定的，在这样的测量中可不考虑风化深度的因素。

图1-2表示每一类矿体上矿石品位带的近似边界，值得注意的是较深矿体具有较小的矿化带，因为作为一种有经济价值的矿体，当其埋深增加时，要求矿石的品位也增大，如果较深矿体靠近地表，矿化带就要宽，图中所示的浅矿床和上升矿床便是如此。

图1-2所示的分类并不是绝对标准，同时也不意味着在类似的矿体上所有测量都有相同的响应。更进一步说，两个相同的矿体，由于侵蚀深度不同可以表现不同的响应特征，而侵蚀深度取决于SP测线越过矿体的方向，在较低高程或纬度地区，这种响应变化可能是不同的风化作用造成的。但是在

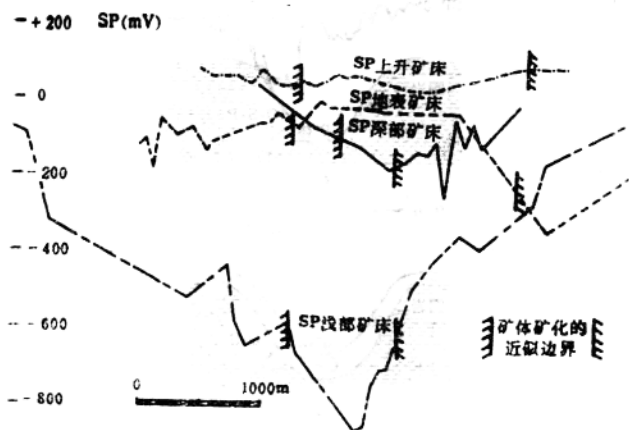


图1-2 在四个已知的具有不同深度侵蚀上观察的 SP 异常。异常与矿床上部或周围的 QSP 晕有关。

目前的测量中，这种变化显然是由于侵蚀差异形成的。侵蚀程度的不同，可以在一个地区完全保留大面积的 QSP（石英、绢云母、黄铁矿）晕，而在另外的地区完全没有这种晕。如果在某个给定地区内大部分甚至全部的硫化矿遭到侵蚀和风化而被迁移，那么这个地区的 SP 异常将会很弱甚至为零。图 1-3 中的模型表明了这些关系。

五、侵蚀程度

关于斑岩硫化矿系统有四个代表性的侵蚀程度：

深矿床——侵蚀还没有切割矿床上的 QSP 蚀变带。图 1-2 说明了深矿床的响应为一宽的幅值相对低的异常（-100 到

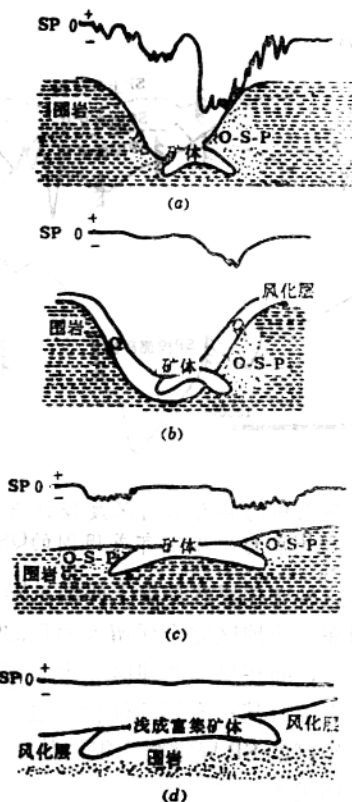


图1-3 地表自然极化与侵蚀及风化之间的关系模型。

- (a)、侵蚀面上SP异常。在高纬度或高寒山区，斑岩硫化矿床基本未风化，侵蚀可能因水或冰引起。风化因气候受阻。
- (b)、在a一样的矿体上SP异常。但风化、侵蚀较深。在低纬度或低地产生。侵蚀通常是由于水的作用。风化通过暴雨和高温产生。
- (c)、具有较深侵蚀的SP异常。斑岩硫化矿基本未风化。在矿体出露周围发现与QSP带的残余有关的晕。
- (d)、深度侵蚀的SP异常。斑岩硫化矿床已经风化，硫化物完全被氧化。

-300毫伏)。在图1-2中深矿床其矿体埋深大于1千米,因此在良好的条件下,SP测量的有效勘探深度超过1千米。值得注意的是,过去人们通常认为自然电位法是一种浅部勘探方法。

浅矿床——侵蚀切割了QSP蚀变带但不到矿体,图1-2说明了地面SP响应是一条宽的、幅值很高的异常(-400到-1000毫伏多,如图1-1所示)。SP异常通常在矿体上方中

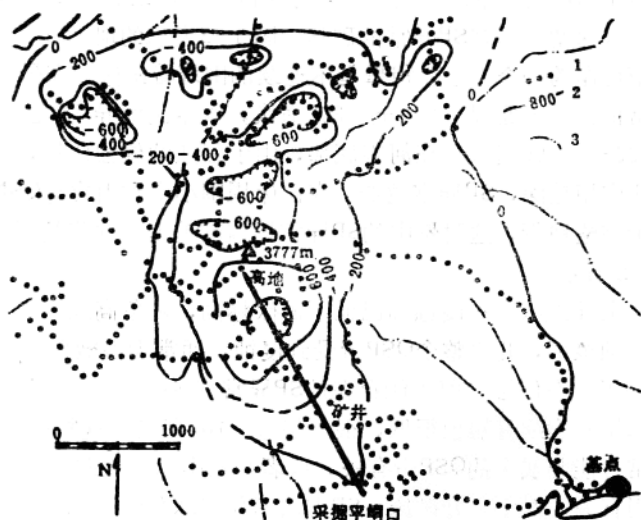


图1-4 Colorado矿带中心,靠近Crested Butte县的Mt.Emmons斑岩硫化矿床的地表SP平面图。-200毫伏等位线大致圈出硫化矿化轮廓,大的硫化物富集区具有更负值。

1—SP测点; 2—SP等值线; 3—溪流

心处，因为这一段是QSP晕中最高硫化矿浓度区。图1-2中浅矿床剖面的自电平面等值线图如图1-4所示。从图1-4中可以看出，有几个与已知硫化矿浓度相符合的负异常中心，小的、远离负异常可能是矿脉。范围最大幅值最高的几个中心异常与斑岩体系中的几个矿化侵入体有关。

地面矿床——侵蚀切割了矿体顶部，部分矿体出露于地表，或埋藏在冰积物、岩堆底下的浅部，在大多数情况下，仅保留了QSP蚀变带外面的部分，好象间断地围绕着矿体的晕一样，也保留一些有SP异常的矿脉。图1-2表示的地面矿床的宽晕可作为一个例子，但晕是不连续的围绕着矿体。在晕中SP异常的幅值通常从-200至-300毫伏，观察到的异常范围从-100至-500毫伏。在河谷底部，由于强烈的侵蚀作用，通常风化作用越深，SP异常越弱。在矿体周围小山和山脊有QSP蚀变带完整地带，这时晕中的SP异常幅值就越大。这些关系如图1-3所示。

上升矿床——侵蚀面已低于矿体标高，就象高地一样仅留下耐蚀核部，几乎整个QSP带受到侵蚀，通常大多数矿石已被迁移了。在侵蚀之前可能存在的SP异常现在不存在了或很弱，晕不连续且幅值很低，很少超过-100毫伏。这些孤立的异常可能与残余的QSP带有关，或者与晕中未风化矿脉的矿化作用有关。对于上升矿床，SP方法不如地球化学采样和地质填图那么有效。

六、风化深度

Poldini (1938) 首先论述了风化作用与由硫化矿产生的SP之间的关系。在南斯拉夫的Vardar地区，老的、后生的含金

属地层在被上新世的泥炭局部覆盖以前被剥蚀和氧化了。这些矿床没有产生SP异常。进一步说，在Vardar盆地，他在平地边缘山上发现出露的铁帽，但在这些铁帽上没有获得SP响应，再向山里去，他发现了能产生SP异常的新鲜硫化矿。在更高处地区，近期侵蚀已经破坏了老的铁帽并露出伴随有SP异常的新鲜硫化矿。因此他总结道（Poldini, 1938 P282）：

“……SP现象只发生在一定的高度地区，粗略地说，当人们越走近山峰时，强度增大，在那里最终发现了阿尔卑斯型反应。”

如果向更高纬度移动，就可获得相同的气候条件，那里的寒冷气候阻止了氧化反应，因此在近地表处，大部分硫化矿是稳定的。

由于气候寒冷，不管其纬度，在树木线高程以上地表或近地表处大部分硫化矿都是稳定的。在近期地质年代的冰川地区或现代的长年冻结地区，常可有把握地假定，硫化矿化作用在接近矿床表面的环境里是稳定的，于是在高纬度和高山进行SP测量有很高的成功率。

低纬度或低标高一般与大深度风化作用有关。沿延深大的破碎带，或者由于其他局部地质因素可以发生深部风化。在深部风化地区，地面观测的SP可能大大地减小，因矿床由于氧化而遭到破坏。

在风化硫化矿体上进行了大量的SP测量工作，在所有情况下，已经知道风化带延伸到矿体底部，风化作用的深度与硫化矿系统的宽度为同一数量级，这样，地面所测量的自然电位为零或很微弱。基于图1-5所示的这些结果，我们可以得到侵蚀深度、风化深度与地表测量SP之间的经验关系。

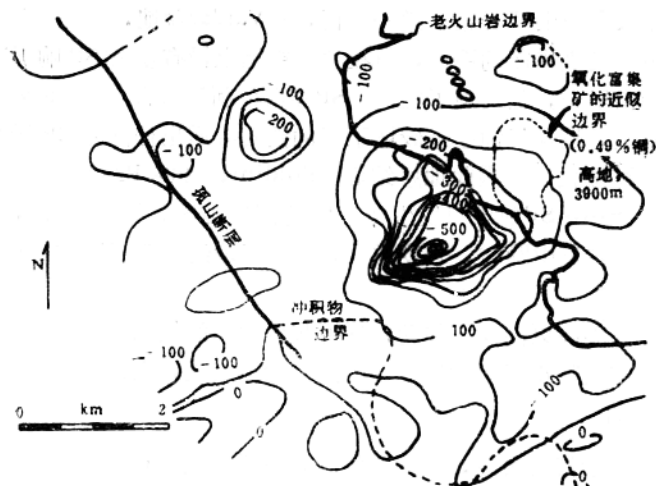


图1-5 AZ Safford矿床的地表上观察的SP图。“深部矿床”位于主要SP异常下部。引自Robinson和Cook(1966)。

通过西部SP晕可粗略地画出 Nevada Battle山 Backingham矿床的矿化作用轮廓，东部这边没有发现在 $(0 \pm 50$ 毫伏) 背景下幅值超过 -100 毫伏的SP异常，后来地质调查揭露了微弱的浅成富集，在矿床东部伴有硫化矿的前期氧化。Robinson和Cook (1966) 在Arizona Safford矿床上进行SP测量得到了类似结果，如图1-5所示。在原生矿床南西大约1.5千米中心处获得了幅值为 -600 毫伏的明显的SP异常。后来通过钻孔 (Circa 1972) 验证了它即为大约在深550米出现的“深部矿床”的响应。Parasnis (1975 p89—91) 在瑞典Kimheden块状

硫化矿上进行SP测量得到了相似结果。有特征的SP异常与三个扁豆状矿体中的二个有关系，钻孔指出了被风化的西部矿体没有产生SP异常；而其它地区出现新鲜岩石 (Parasnis 1975, P90)

七、自然电位机理

1、SP现象的稳定性

除少数例外，与硫化矿有关的SP异常具有不随时间、季节、气候变化的稳定性。poldini (1938 P348) 在十年间没有发现自然电位变化，也没有看到其随季节变化。Parasnis 在瑞典Akulla地区进行检查，发现八年内即便幅值很小的异常也是稳定的。Navada地区的SP异常随时间和季节没有明显的变化。图1-4给出地区的SP在几年内重复测量没什么大的变化。

在地下也可进行SP测量。在深部或还原环境里测出的负异常分别如图1-6和图1-7所示 (引自 Parasnis 1970)。Malmquist和Parasnis (1972)、Logn和Baluken (1974) 在钻孔深部也发现了与硫化矿有关的负异常。因此在潜水面和任何风化氧化带以下，观测到SP负异常，作者还在大于1.5千米井下和550米地下矿井中发现了与硫化矿有关的SP负异常(图1-6)。没有证据表明，如果存在硫化矿会使深部SP变换极性或消失。

有用的证据指出，SP产生于硫化矿上并延续到因侵蚀而出露为止，假定硫化矿产生SP异常一直存在并不意味着表明观察的电位保持不变。图1-2是历经地质年代的硫化矿的地表上观测的电位随时间迁移图，由于矿化作用的深度，地表电位起初是小的，这种矿化作用使得SP发生在大大远离观察者的位置上。在地质年代过程中，覆盖层逐渐被侵蚀，硫化矿被携

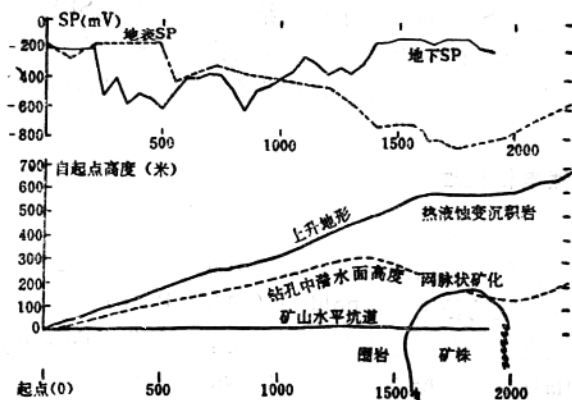


图1-6. Mt. Emmous斑岩硫化矿床上、下自然极化。
图1-4表示了矿山起点位置和发展方向。
两种测量都与图1-4基点相同。

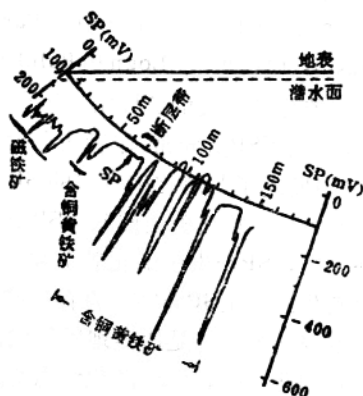


图1-7 相切瑞士Kimheden矿体的65号钻孔的SP测井曲线。引自Parasnis(1970)。

带到地表，因此地表电位幅值增大，最后侵蚀扩展到硫化矿，它们被氧化，自电异常遭到了破坏。

Poldini (1938 P348) 发现地面电阻率的固有变化稍稍改变了在很短时间内地表所测量的电位分布。在沙漠地区工作时，他注意到暴雨降低了地表电阻率，使SP异常扩展了几米。从他(1938)的观察结果看，良导表层可在一定程度上扩展SP异常的范围。

有限的证据说明，在较短时间内由于钻井，井中套管和管道可大大改变地表SP。Pirson (1977) 表明了油田上观测到了这种SP现象，在这种情况下，可假定作为一种末端产物SP是由硫化矿的碳氢化合物的生物分解作用产生的(Sass 1980)。

根据笔者研究，在矿山测量电位时，文化噪声效应可降低SP幅值，这种幅值与钻孔附近的井底测量值有关。因此矿山的非干扰电位可能更负。

地球化学的工作表明，在潜水面以下和离开矿体表面为还原环境。有理由假定，借助于与井中套管和管道有关的原电池电流，靠近地表的硫化矿更容易被氧化，在深部还原条件下硫化矿不易受影响，因此文化噪声使地面电位迅速衰减，一旦产生这种现象，则只涉及到浅部，深部的SP值不受影响。

2、以往的理论

自然电位或自电起因于各种各样的机理，但只有一些理论有地质意义。电化学原电池是大家熟悉的一种机理模型。如果用导线将插入电解液里的两种物质连接起来，同时这两种物质的氧化—还原电位能使反应自发进行，结果可测量到电位。这个物理过程就是原电池，电位称为氧化电位，反应称为电解。许多早期理论如 Poldini (1938) 采用原电池机理，在这种理论