时，由于阴极、阳极都参加了电极反应，因而这时不能把矿体看作惰性电极。只有当高电位的物质在矿体上部，并有氧参加电极反应，那么阴极可以看作惰性电极。因为阴极表面只提供了电极反应的场所，而本身并不参加或者很少参加电极反应，阳极仍然不能看作是惰性电极。当几种硫化物共存，并且有氧参与，这时低电位的硫化物将会加速溶解和氧化，而高电位的硫化物则受到抑制。白铁矿和闪锌矿放在一起时，闪锌矿在水和空气中的氧化速度比它单独存在时提高了10～14倍，而白铁矿的相应速度则降为单独存在时的1/4～1/6[4]。这一方面说明了电极电位越负的硫化物越容易发生氧化反应，而且有氧存在时高电位的硫化物可以当作惰性电极来考虑；另一方面说明，由于发生了电化学的氧化还原反应，因而加速了低电位的硫化物的溶解和氧化。

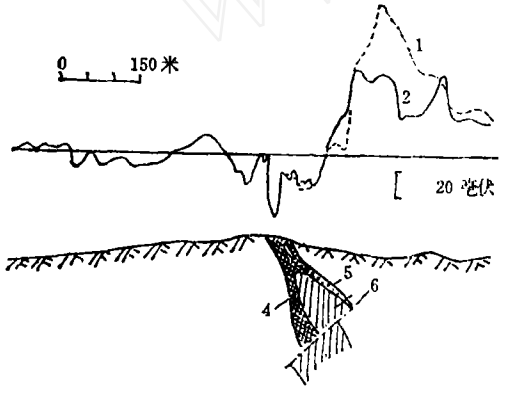

图10　多金属黄铁矿透镜体上的电位剖面曲线
1—潮湿环境实测曲线；2—干燥环境实测曲线；
4—氧化矿；5—次生硫化矿；6—原生硫化矿

5.根据传统观点，在求均匀极化球体的数学解时，设矿体是均匀的，围岩的电阻率也是均匀的，还假设潜水面又正好切割矿体。在潜水面之上和之下围岩的电阻率毫无疑问是不等的。潜水面之下的围岩电阻率小于潜水面之上的围岩电阻率。当矿体有分带时，矿体是不均匀的，在闪锌矿与其它硫化矿共存时尤其如此，闪锌矿的电阻率比较高，那么，矿体也不能看作均匀的。因此，自然电场法的数理基础也值得进一步研究。

以上对金属硫化矿自然电场形成的机理进行了初步探讨。看法可能有错误，希读者指正。

本文曾得到程方道同志的指导，张宗岭同志参加了实验并绘图，在此表示感谢。

参考文献

〔1〕徐采栋等编，锌冶金物理化学，1979
〔2〕肖宗瑶，地质学报，1979，第4期
〔3〕克维亚特柯夫斯基著，电法勘探（上册），地质出版社，1957
〔4〕傅良魁等译，自然电场法电法勘探，地质出版社

探寻硫化矿时所见到的机电电位

前　言

在印度东北部的梅加拉亚高原进行了自然电场法勘探，在山上观测到特别强大的负自电反应。自电法在那里是物探综合找矿手段之一。在山上西隆群石英岩和砂质岩层上观测电位，测得的剖面好象是山的反射镜像。山峰顶点附近的电位高达－1940毫伏，通常这种机电异常反应的特点是，有与地形梯度成比例的、宽的“电位低”，或者叫作“凹槽”。不过在某些地方，异常的形状与在硫化矿带上测到的自电表示对应。因此有必要把机电效应产生的电位从中区分出来，以便正确地圈出有电化学效应的矿化岩石，再用其它物探方法或钻探作进一步的勘探。

按别克和特勒福德的看法，自电异常可能由于矿体形状、几个硫化矿体的组合、热效应、电过滤作用、接触效应以及地形影响等原因所产生的。这两位作者还声称，上述电位在强度上比硫化矿或石墨产生的自然电位要小。帕纳斯尼斯对此作了描述，他认为机电电位一般对找矿是无关紧要的。

据帕克盖伊报导，在秘鲁瓦利亚加附近发现一负1800毫伏的自电异常，他推想异常是与黑明矾石有关的硫酸引起的。这样大的自电异常值比佐藤和莫尼所指出的电化学效

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

应引起异常要大得多，可以用机电效应，特别是当自电负心位于山头附近时，来解释这种现象。

艾米德、奥格尔维、博哥斯洛夫斯基、富纳塔都把机电电位解释为是由于液体通过多孔介质产生的。在这篇文章中，展示了不同地质条件下测得的自电剖面，目的想说明，在某些地区在有利的地质水文条件下，机电效应也能产生特低的自电电位，这种电位可能与硫化矿无关。

矿化石英岩上的自电反应

图1是在走向为北东—南西、山峰最高点为海拔1000米的一个山上测得的自电剖面。地面分别向北西和南东两侧倾斜达到950和955米的高度。在山的北西侧、在红色土壤中埋有准辉长岩的漂砾。在山脊顶峰，出露有向北西倾斜约65°的砂质千枚岩。在此地区其它地方有千枚岩和石英岩延伸。

在山的北西和南东两侧自电剖面都很平缓，没有异常，而在测点E32和E42之间则有一非常明显的异常带。在山的两侧电位为－100毫伏，在E37号点降低到－987毫伏，该测点位于山脊最高点的北西。异常不对称，在东南侧梯度比较陡。

从初步研究结果可看出，自电异常值既不均匀也不与地面的梯度成比例，山的顶点并不是自电值的最低点。剖面的形状说明，自电主要是彼此互相连接的硫化物或者是薄的导体产生的。时间域IP测量测得其视充电率为14毫秒；电阻率测量的结果是，产生自电异常的矿体在200欧姆米的背景值上有3300欧姆米的视电阻率异常。

为研究地球物理和地球化学异常，在离山峰北西侧120米处布置一验证钻孔，打到了石英岩和燧石质岩石中的浸染黄铁矿，不过，象这样的矿石品位和矿体产状均不能解释这一强大的自电异常。为说明自电异常来源，还考虑了以下几种因素。

（1）在石英岩和燧石质岩石上测得的自电反应具有高电阻率的特征。从地面到地下50米这些岩石都遭到破碎，水能在其中自由流动。

（2）在不透水的红色粘土上未测得有意义的自电反应。

（3）在破碎的石英岩与分解的准基性岩的接触带附近见到喷泉，说明地下水能通过多孔岩石和可渗透的砂流动，在覆盖准基性岩的不透水粘土层边界上地下水是静止的。

（4）石英岩不含千枚岩的物质，地下水是淡的，不含碳酸氢盐。

显然，在破碎的石英岩上的自电电位部份原因是黄铁矿产生的，另一部份原因是地下水在破碎的石英岩中流动引起的。另外，不透水的粘土层上电位梯度剧烈下降，表明电位主要由于淡水通过破碎的石英岩流动所引起的。这与奥格尔维等人的看法一致。但是此观测结果并不能证明机电电位比电化学位占优势。

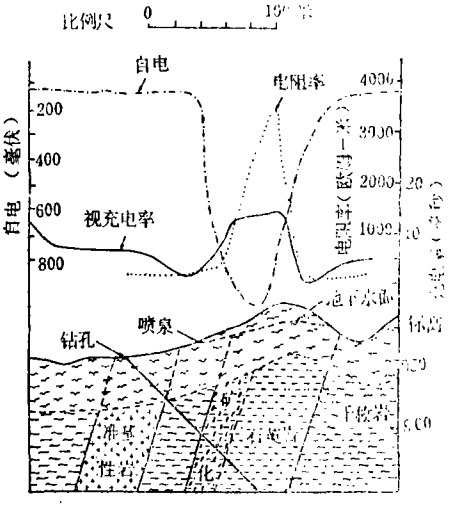

图1　在印度梅加拉亚高原巴拉洛尼附近测得的自电、激电和电阻率剖面与地质断面图

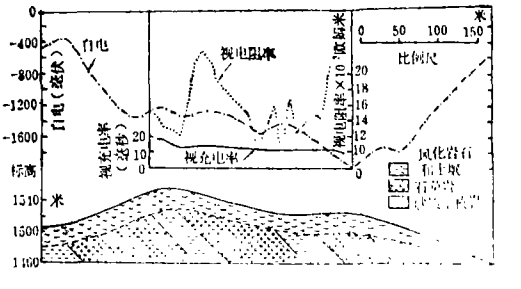

图2　印度西隆附近的机电电位、激电和电阻率剖面以及推测的地质断面图

石英岩上的自电异常

图2是在西隆附近的一个山上的地形特征，在石英岩上自电最小值达－1940毫伏。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

地面在北西和南东两侧各有一峰，海拔分别为1554和1520米。二者之间有一不大的洼地，在棕色土壤中有绿色石英岩的漂砾。石英岩向东南方向倾斜，测得的最低电位点位于山峰向下倾不远的地方。地下水渗漏也多半是朝东南方向。

自电剖面有很宽的极小值带，在山的某些小山头上还有几个起伏不大的负心。地下水通过石英颗粒流动引起的机电效应或者是由于导电矿物的电化学效应，都能产生上述自电异常。由于视电阻率变化在一万到两万三千欧姆米之间，充电率的反应也不能说明有浸染矿物存在。所以认为在低洼处可能有导电矿物存在，这是没有依据的。此外，在河谷两侧山上所出露的都是石英岩。

推想在整个地区，自电产生的原因，是在山的两翼在正常的地下水条件下，淡水透过干净的石英颗粒的机电作用所引起的。

含石墨硫化矿物的砾岩上的自电异常

在西隆东北山大学校园里的变质岩上也测得了机电电位。如图3所示，自电最低值与砾岩伴生的、含硫化物矿化的、石墨化千枚岩对应。从图4可见，石墨化千枚岩穿过山头在山的两侧出露。

在图3中，石墨化千枚岩的自然电位值比不含碳质的千枚岩的要低。事实上在自电反应带上，大的突起就是千枚岩条带的表示。它既不产生机电效应，也不产生电化学效应。在自电剖面上强度稍小的负异常则与透水的破碎的砾岩带对应。

图4表示的是电化学位等值线图和激电异常轴的位置。正如在一般情况下所预料到的，产生电化学位的石墨千枚岩上也有高的充电率异常。电化学位是地下水穿过破碎的砂质层流动引起的，而且一般在大的面积内有不大的、大约10毫秒的充电率异常反应。在电化学位异常带切过河谷和山头时，在这些山头上还有机电电位异常。

讨 论

经过在大约20平方公里范围内的探测研究，在许多地方观测到机电电位。发现岩石类型、地形、倾斜方向与地面坡度的关系，以及地下有没有导电地质体存在，都对机电电位的强度有影响。观测结果归纳列入表1。

岩石类型的影响 在上述情况中已指出，在砂质岩上有机电电位异常。千枚岩也表现有这种电位，碳质的或石墨化的千枚岩有利于产生电化学电位异常。另外由于它的导电性能好，能帮助电子从地区某个部位沿走向迁移到地区的另一部位，如图3、图4所表示的那样。

不同岩石上的自电强度数据　　表1

位　置	岩石类型	自电中心所在位置离平地的高度(米)	岩层的电阻率(欧姆米)	自由强度(毫伏)	备　注
巴拉潘尼	石英岩和燧石岩	60	3,400	887	岩石有黄铁矿化自电中心沿下倾方向位移
西　隆	石英岩	80	20,000	1,540	自电中心沿下倾方向位移
西隆北东山大学校园内	砾岩和石英岩	100	7,000	650	与含石墨的硫化物伴生

地形影响 在山的两侧出露的石英岩上发现有机电电位异常，其最大电位梯度为高差1米约19毫伏。根据博哥斯洛夫斯基和奥格尔维所报导的室内实验结果来看，石英岩的机电电位的强度相当低。负电位的强度随地面的标高的增高而增大，负电位中心位于山头顶峰附近。

岩石倾斜影响 发现负电位中心由山峰顶点向岩层下斜方向位移。当地面沿倾斜方向成斜坡时，渗透性的改变，粒度均匀性的改变，以及液体沿有利岩层自由流动，都可能引起负中心位移。

机电电位的来源 机电电位一般是由于在矿物颗粒与液体分界面上形成离子电偶层所产生的。在流动的液体的影响下，电偶层液相的位移产生电位差。艾米德通过用小玻璃球作实验的结果，证明流动电位的大小与介质的粒度和流动液体中盐的浓度成反比。奥格尔维等用粒度不同的石英颗粒实验，发现当介质的粒度为250～315微米，具有60～70达西的渗透率时，流动电位有着最大的负值。他们还证明电位差的大小随流动液体

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

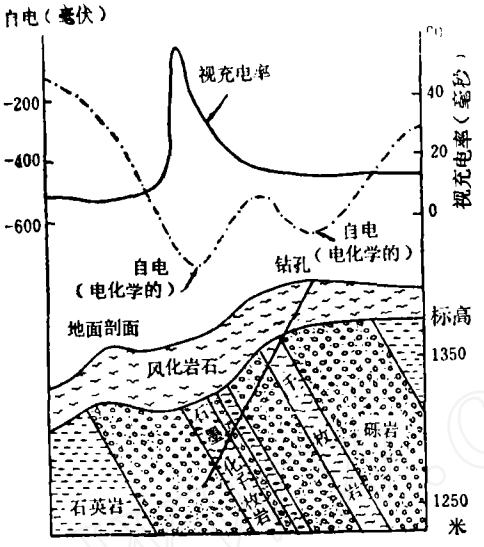

图 3　在西隆附近的一条测线上，电化学位、机电电位和充电率变化曲线

中含盐量的增多而减小。博哥斯洛夫斯基和奥格尔维还观察到此电位随流动液体中粘土含量的增多而急剧减小，中等粒度的砂可使流动电位的绝对值大大地增大。

研究了上述实验结果，并把它们应用于西隆的地区条件。在石英岩上以及其它砂质岩层上，能产生强大的负电位，有以下四种因素。

（1）破碎的石英岩的石英颗粒有着理想的粒度，介质有最佳的渗透率。

（2）用薄片在显微镜下鉴定，石英岩大部份不含千枚岩物质。

（3）这个地区的地下水只含少量的溶解盐。

（4）山的两侧坡度陡，对水通过透水层的运动提供液压差，所以在一般地下水条件下能产生大的电位差。

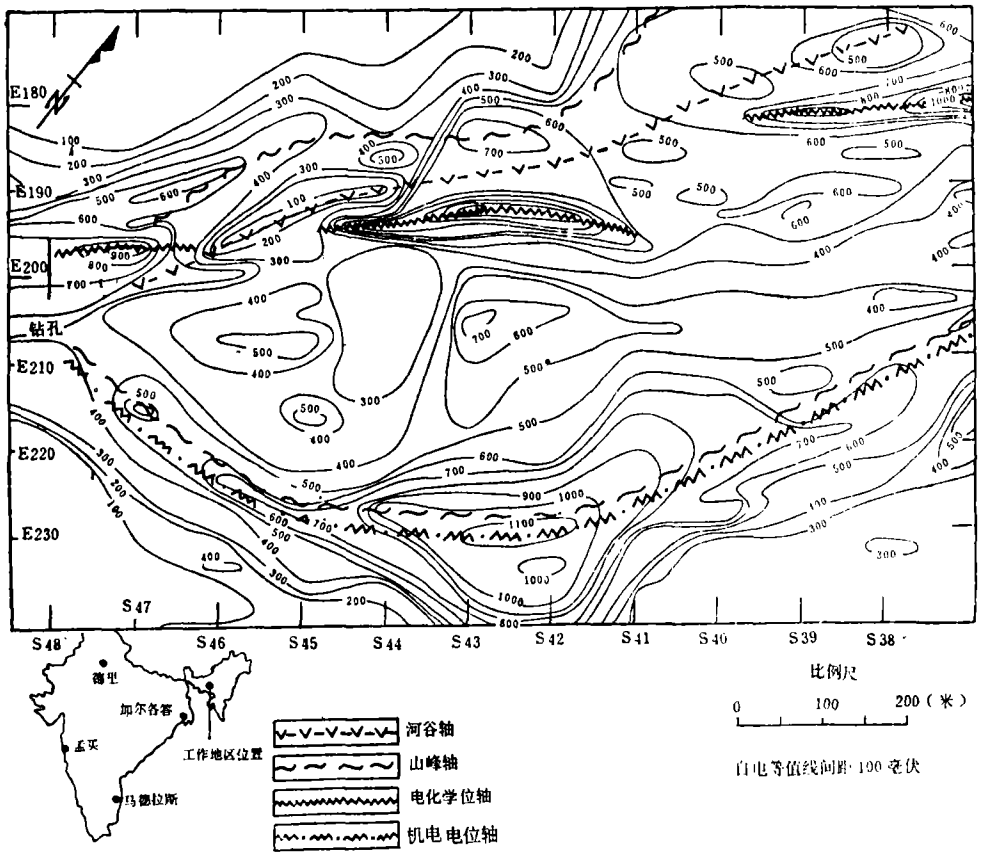

图 4　电化学位等值线图

如图 2 所示，千枚岩的存在阻止电位差的产生，石墨化千枚岩改变了这个地区的自电异常强度。

机电电位的应用

地震研究　在中国和苏联报导过许多例

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

硫阴离子* 气化测定及其在找矿中的应用

孙祥利

赋存于地壳中的金属硫化物，都是由金属阳离子和S^{2-}所组成。因此，S^{2-}是硫化矿床中含量最丰富的组分。当岩浆侵入沉积岩或沉积岩受热液影响时，硫在岩体和沉积岩中，都将发生再分配。所以，金属硫化矿床的形成过程也是内生（岩浆岩）和外生（围岩）介质中硫的再分配过程。其结果不但在局部地段中形成了一定规模的富集体（即硫化矿体），同时在其毗邻的或较远的围岩中也形成原背景高的亚富集带(即硫化物晕)。硫的再分配过程中，不但受矿液（或热液）性质、围岩成分、金属元素性质等因素的影响，而且还明显地受成矿阶段（或蚀变阶段）的等温线的影响。所以，硫化物晕与矿体在空间关系上，往往于矿体上盘更为发育。硫的这些重要性质，对于地球化学勘查硫化矿床来说，是一种十分重要的特征。

在地球化学找矿工作中，利用硫总量作为寻找硫化矿床的指示元素的工作，在国内外已有一些研究，资料证明它在岩石地球化学勘查中的有效性。如我国富家坞、多宝山，美国克拉马祖，加拿大海兰谷等斑岩铜矿床中，以硫作指示，均有一定效果。但由于采用了全硫，方法就比较繁杂，工效低、成本高、普及性差，并且由于完全提取样品中的硫，使背景值增高，从而降低了异常的衬度，减弱了分辨力。

用硫作指示的另一手段是测定次生介质（如水或水系沉积物中的硫酸根。这种方法

---

* 硫阴离子，系指硫化物、硫氢络合物中的S^{2-}及S_2^{2-}两种硫阴离子，为了读写方便，文中一律以S^{2-}表示。

子，地电场如发生大的变化将是地震的先兆。雷诺塔曾把这种地电场变化解释为是与地震有联系的机电现象产生的。需要作些野外实验来确定，在中级地震时是不是伴随有大的电场变化，这个方法可不可以用作地震的指示器。如果是这样，那末在薄弱地带或是在可能为地震震中的附近的石英岩上连续地监测电场的变化，可能会有助于地震预报。由于西隆位于地震活动地区，可以在这个地区用来预测大地震；在微地震和中级地震频繁发生的地区，测量自电场是有价值的。

水库漏水　奥格尔维等观察到，利用在水库底上测得的电位分布图形可以找出漏水地点。这一方法在印度东北部很有用，因为那里修建了一些水电站的蓄水库，漏水可能是一个大问题。

导体上的自电异常　佐藤和莫内证明石墨的最大电位是－780毫伏。但是在实际野外条件下，观测到更大的电位差。部份原因可能是附加有机电电位的影响，特别是当机电电位中心在导电矿化岩石露头附近时，就有这种情况。机电电位有沿导体走向和倾斜方向分布的趋势，因而使深部导体产生的电化学电位的分布图象发生改变。

钻井中的强大自电异常　在钻孔中偶尔见到强大的负电位，也可以解释为是导体中的机电电位作用，导体构成了地面上机电电位中心与地下岩层之间的连通关系。

结　论

在砂质岩石山头上观测到的机电电位是探寻硫化矿的干扰因素，因为在初始工作阶段，很难分辨电位的类型。在大多数情况下，研究自电剖面的形态与地面形态间的关系，对确定这类干扰因素是有帮助的。但是在某些情况下，应该用地质踏勘的方法或别的物探方法来分辨这种模棱两可的性质。我们知道，激发极化现象产生的机理为机电电位效应的机理有点类似，但在西隆附近的探测过程中，没有观测到这样孔真的充电率异常。

在印度北部，机电电位对检查水电站水库的漏水能提供有价值的材料。自电随时间变化的图象作为先兆，对预报地震是有用的。

贝庚译自：《Geoexploration》，1981，Vol.18，№.4，P.311～320
作者：P.N.纳雅克

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net