

井中激发极化法在矿产资源勘探中的作用

潘 和 平

(中国地质大学 地球物理与空间信息学院,湖北 武汉 430074)

摘 要: 通过介绍井中激发极化法(简称井中激电)地—井方式寻找井旁、井底盲矿的基本原理以及野外应用实例;介绍井中激电井—地方式探测深部盲矿、圈定矿体走向的原理和实例;介绍井中激电井—井方式探测井间盲矿实例,较系统地综述了井中激电(电阻率)在矿产资源勘探中的作用。

关键词: 井中激发极化法;地—井方式;井—地方式;井—井方式;矿产资源勘探

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 8918(2013)04 - 0620 - 07

井中激发极化法(简称井中激电),是在钻孔中进行激发极化测量的各种工作方式的统称。近年来井中激电在国内外铜矿、多金属矿以及某些弱磁或无磁性铁矿的勘查中,起到了越来越广泛的应用,并取得了好的地质效果。井中激电的独到之处在于^[1-6]:①场源或接收装备置于地下,使仪器从不同深度、不同方位接近或穿过矿体,有效地提高了探测深度和发现深部矿的能力;②灵活的工作方式,便于寻找井旁、井底盲矿,确定矿体埋深、连通性、展布范围及产状等;③将场源、观测装置置于井中,减小了地形和地表不均匀性的影响。

1 地—井工作方式

地表—井中工作方式(图 1),常用两种排列:一是把金属套管用作供电电极 A,即所谓井口接地地—井方式($r=0$),可用来查明井底盲矿,确定背景值;另一种将 A 置于距井口 r 处,并改变其相对于钻孔的方位,在井中对每一不同 A 极方位进行逐次激发极化测量,称作地—井方式方位测量,它可用来查明井旁盲矿并确定其空间位置。

地—井方式主要用于来查明井旁盲矿并确定其空间位置,查明井底盲矿、确定背景值等。

1.1 判断矿体所在方位

图 2 是主方位($r=100$,球体所在方位)、反方位($r=-100$)、套管接地($r=0$)3 个方位球体的二次场电位差曲线(或视极化率 $\eta_s = \Delta V_2 / \Delta V$)。图中可以看出^[1,2]:

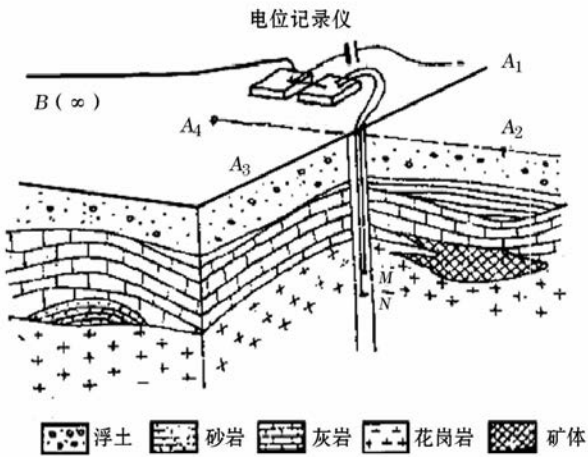


图 1 地—井工作方式

(1)主方位时,球体近于垂直极化,二次场电位差幅值最大,曲线形态是反“S”型,球心位置在极大值与第二个零值点之间;

(2)反方位时,球体接近于水平极化,幅值最小,二次场电位差曲线形态是正“S”型,球心位置在极大值与第一个零值点之间;

(3)套管接地时,球体近于垂直极化,二次场电位差曲线形态接近对称型,球心位置在极大值与第一个零值点之间。

综上所述,可以根据二次场电位差 ΔV_2 曲线(或视极化率 $\eta_s = \Delta V_2 / \Delta V$)的形状、幅值等来确定球体相对于钻孔的方位。

图 3 为洋鸡山金矿激电测井和地井激电测量结

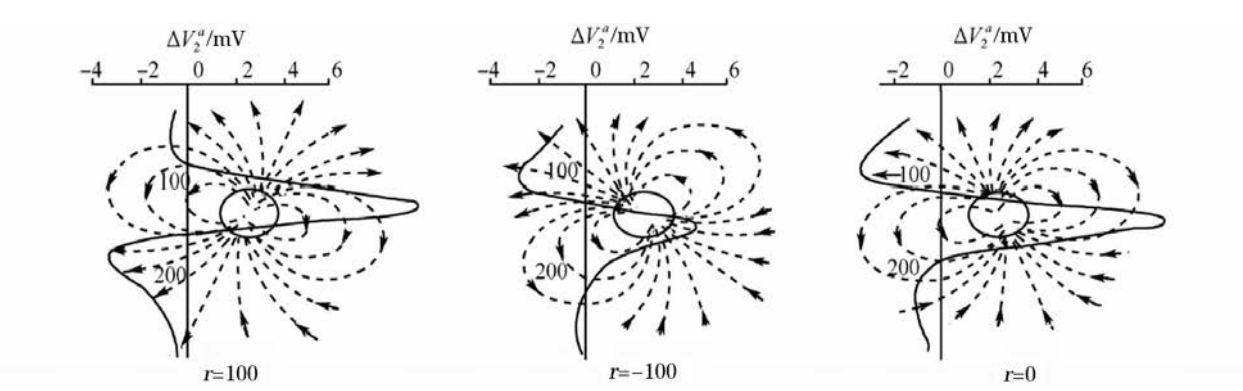


图 2 球体二次场电位差曲线

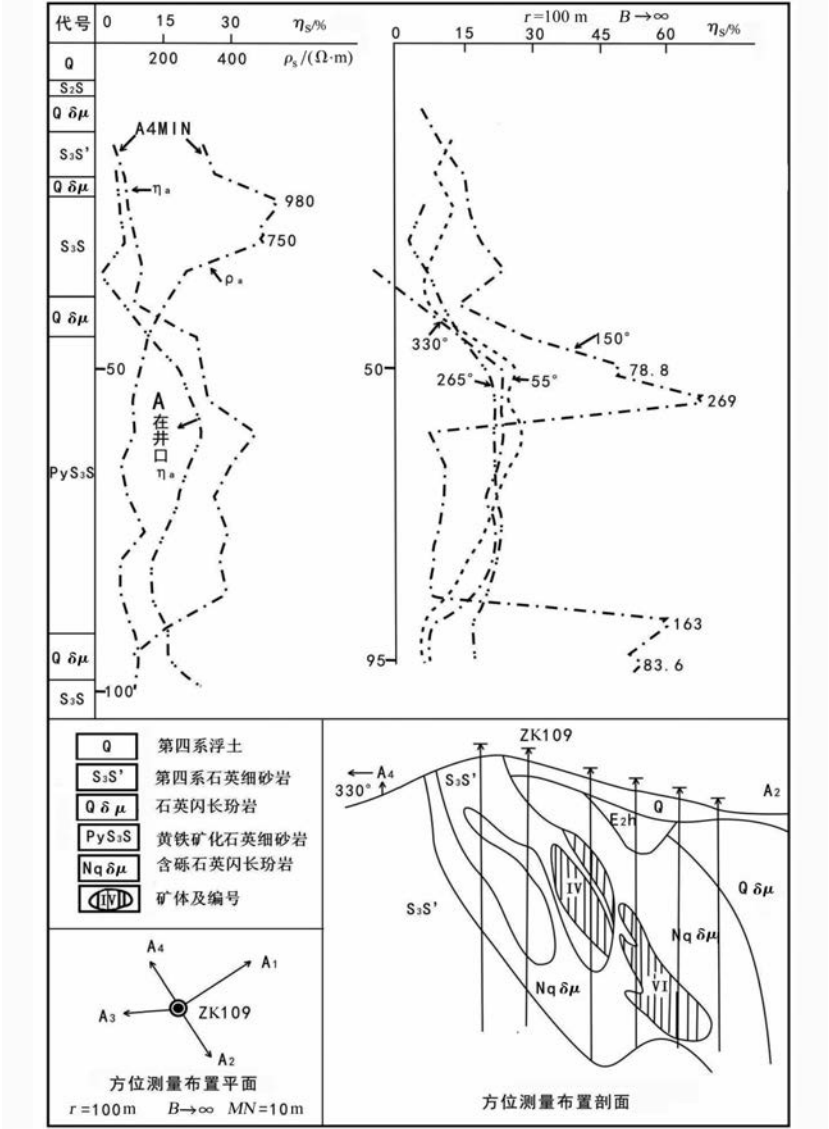


图 3 激电测井和地井激电测量(引自参考文献[7])

果^[7]。ZK109 孔未见工业矿体,测井结果表明上部为高阻低极化率,下部(孔深 40 m 以下)为低阻高极化率,主要是硫化物矿化砂岩。地一井方式供电极 A 在井口 $r=0$ 测量反应 η_s 背景场,地井方式激电 4 个方位($55^\circ, 150^\circ, 230^\circ, 265^\circ$)极化率表明,方

位为 150° 是 η_s 幅值最大,且曲线呈反“S”型,据此,推断矿体位于 ZK109 井南侧(方位为 150°),后经打钻证实,见图 3 下部附图。

图 4 为广东凡口铅锌矿铁矿石岭区段激电测井及方位测量极化率曲线^[8],孔中未见矿。井的 S 方位

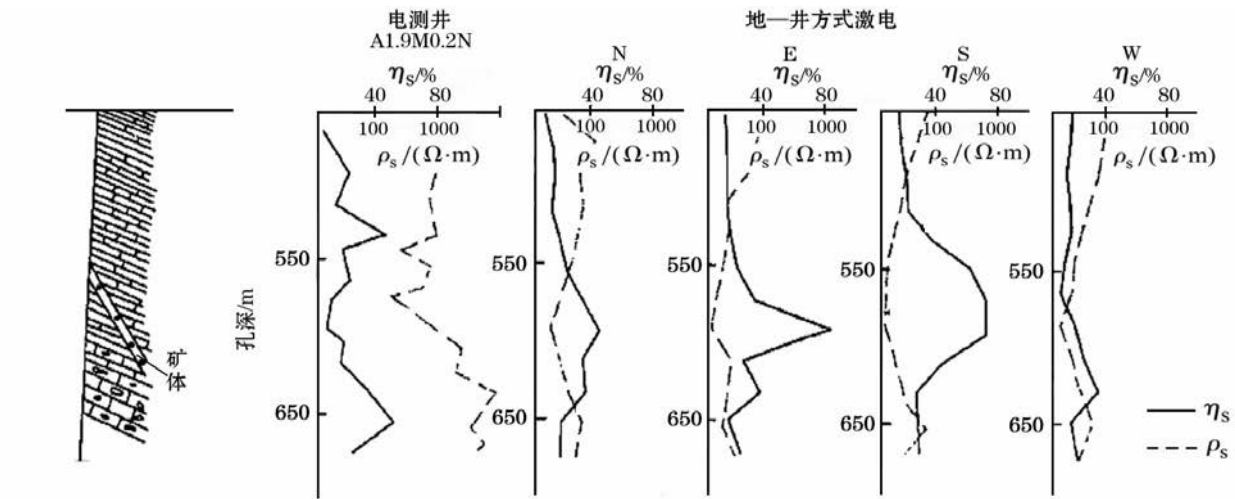


图 4 激电测井及地井方式激电(引自参考文献[8])

在井深 550 ~ 600 m 出现低阻、高极化异常,据此,在 S 方位 100 m 处布设了钻孔,结果见到约 30 m 的富铅锌矿体。

图 5 为富蕴科克库都克南 ZK0301 井中激电测量结果^[9],激电测井 50 ~ 65 m 井段有明显低阻高极化特征异常,虽然在该钻井中再没发现其他有意义的异常,但在地井方式激电时发现,在方位 215°, 45 ~ 57.5 m 深度段处有一可喜异常。经加密观测,异常段厚度超过 10 m,50 m 处极化率为 5.7%,呈现典型的低阻、高极化异常特征,推断可能富集品位很高的金属硫化物。后证实,该孔内富含了品位相当高的黄铁矿和磁铁矿体。

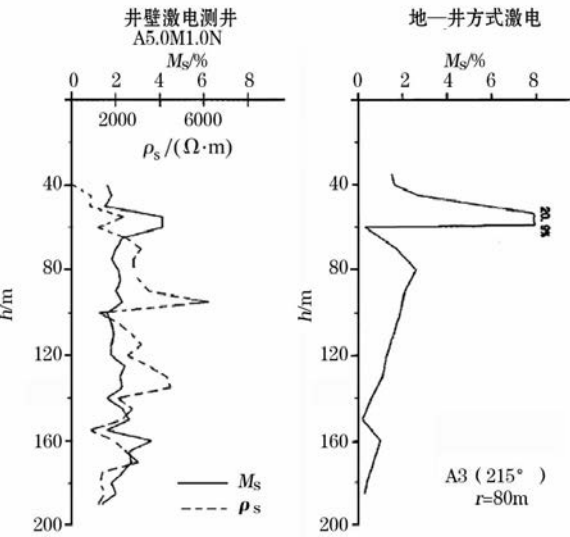


图 5 ZK0301 井中激电(引自参考文献[9])

1.2 预报井底盲矿

预报井底盲矿一般采用 $r = 0$ 或 $r = 50$ m 的地井方式激电测量,当井底存在盲矿时视极化率或二次场电位异常曲线出现正(或负)张口异常。

图 6 是内蒙古某铜矿地—井方式激电测量结果^[1],井深 199.37 m,在 110 ~ 153.17 m 见到硫化矿层。由于钻孔坍塌,井中激电只测到 100 m。从 50 ~ 100 m 井段没见到矿层,从 40 ~ 80 m 井段视极化率呈现明显的正张口异常。用任意切线法对两曲线进行估算,矿顶板深度分别为 108、109 m,平均深度 108.5 m,实际硫化矿顶板为 110 m(经查看岩芯),两者深度仅差 1.5 m,证明了这种方法的预报效果。

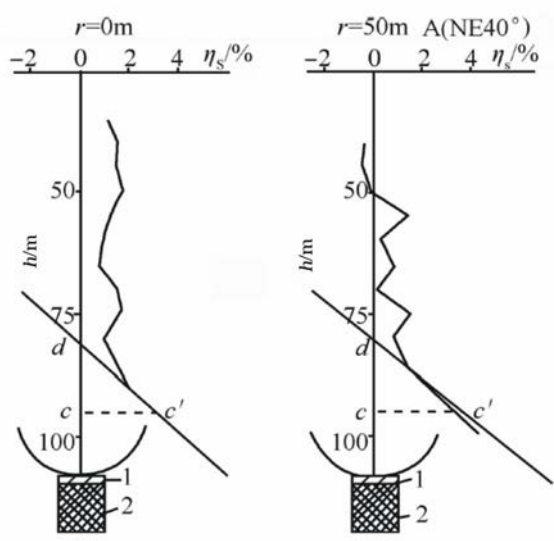


图 6 地—井激电测量(引自参考文献[1])

任意切线法的估算方法为:在视极化率曲线上任意选一点如 C' , 经 C' 井轴投影点 c 作 C' 点的切线,切线在井轴交于 d 点,以 c 为圆心、 cd 为半径画圆,便得到矿顶的位置(图 6)。

2 井—地工作方式

井—地方式分为井—地方式剖面测量和井—地

方式激电测深。

2.1 井—地方式剖面测量

如图 7 所示,将 A 极置于井内某一选定深度, B 在无穷远处地面,测量电极 MN 布在地面,沿测线进行测量。国外称沉降电极或埋藏电极法,包括横剖面和纵剖面测量、向量测量。该方法主要用于追索矿体走向、判断矿体产状等。

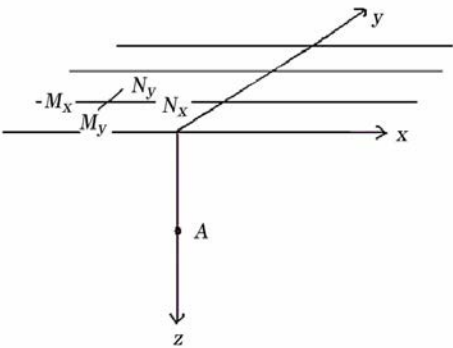


图 7 地—井激电测量

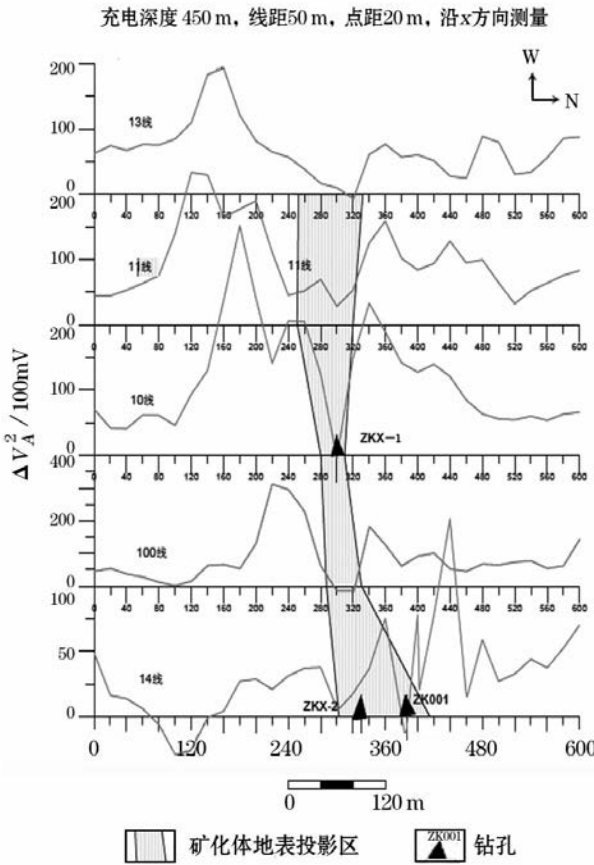
2.2 井—地方式激电测深

井—地方式激电测深是将供电电极 A 放于井中, B 在无穷远处地面,逐点改变电极 A 的深度,测量电极 M、N 固定于井口某一距离进行观测。该方法主要用于预报井底盲矿。

井—地方式激电追索矿体走向、判断矿体产状等因素较多,主要依据井中电源位置,矿体所在位置、矿体形状、地面观测电位曲线、电位梯度曲线、二次场电位差曲线的异常形状、幅值、特征点(包括极大、极小、零值、半幅值点)等。例如李建新^[10]等分析了激电测井,井—地激电三类工作方法在野外施测中存在的若干问题,建立了倾斜板状体在井—地工作方式下的标准激电曲线。

图 8 是镜儿泉 ZKX-1 孔井中充电(井中充电法是井中激电地—井方式的一个特例) ΔV_A^2 剖面^[11],孔深 455 m 见 6 m 厚的铜镍矿,充电深度 455 m,地面进行剖面测量。利用测量结果推断: ΔV_A^2 曲线呈“双峰夹一谷”的形态,两“山峰”为矿体与两侧围岩接触带,走向为近东西向的板状体,最宽处为 130 m,最窄处为 20 m,长 200 m。

图 9 为新疆哈密黄山矿区井—地方式测量结果^[12],充电点位于钻孔 ZK1226。图中可见:①充电点为 C_1 (矿体内)和 C_2 (矿体附近)时,其地面一次场电位曲线形态及幅值完全一致(电极位置: A 极充电, M 极测量, B 和 N 极在无穷远),这意味着该深部矿体的规模较大;② C_3 充电的电位曲线幅值高于 C_1 、 C_2 ,主要是由所见浅部一矿体及低阻矿化带综合



8 镜儿泉 ZKX-1 孔井中充电 ΔV_A^2 剖面(引自参考文献[11])

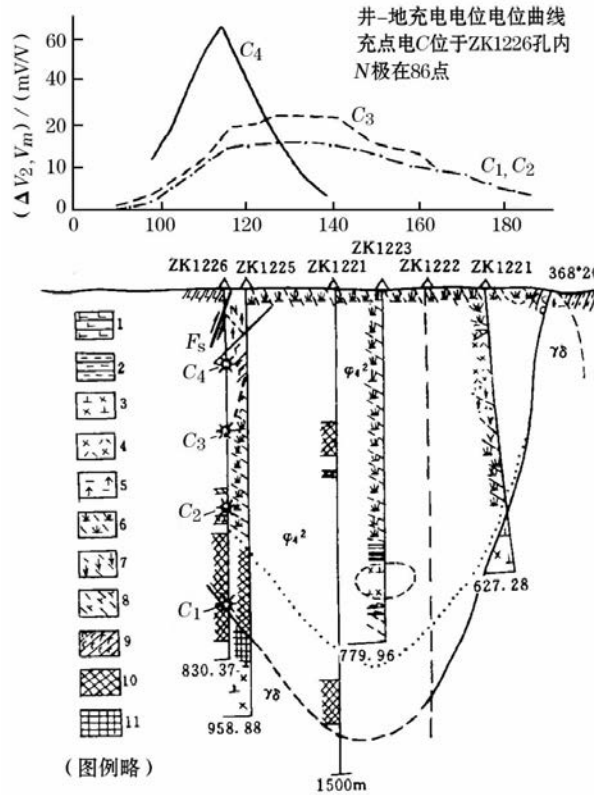


图 9 黄山矿区 ZK1226 井中充电法(引自参考文献[12])

影响所致引起的影响;③ C_4 充电点位于该孔浅部围岩中, 电位极大值对应于充电点正上方, 这是典型点电源正常场曲线, 该电位曲线形态与各类矿体及矿化低阻体无关。

图 10 为水文孔井—地方式(充电)测量结果^[13]。在 S11 号孔, 充电点 A 极置于含水层段中心 124 m 处, 无穷远极距充电点为 2.6 km 处, 沿测线每 2 m 采集一组数据。观测完充电点的有效范围后, 再将孔内的充电点 A 极置于第二含水层段 227 m 处, 按上述方法观测并绘制剖面平面图。

在剖面图中确定电位异常带以及电位梯度曲线零值的位置。圈出测区内的异常带, 并推断为溶洞裂隙富水带, 对比分析可以看出, 在垂向上不同深度

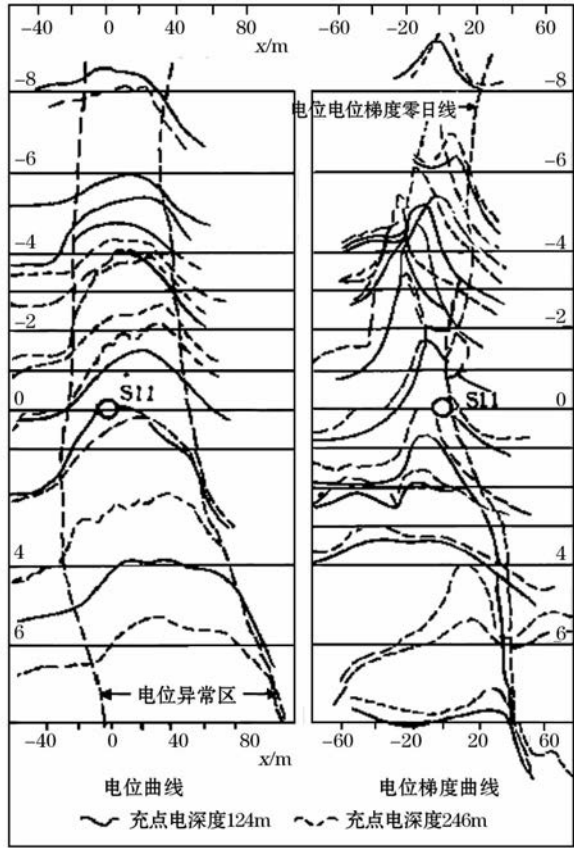
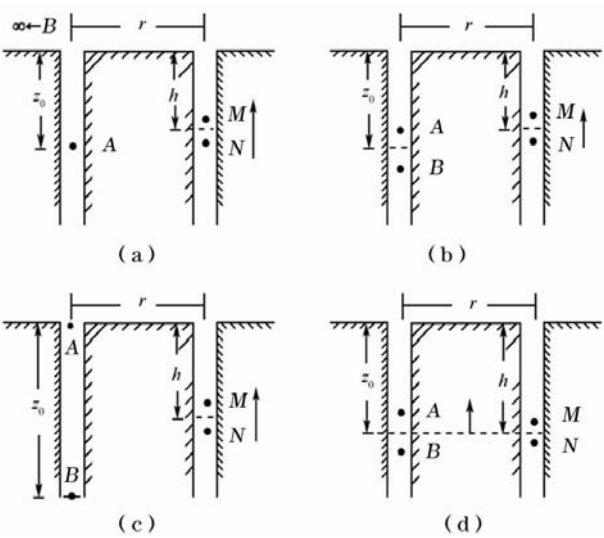


图 10 水文孔井中充电法(引自参考文献[13])

的两含水层段中所反映的异常和异常带在平面中同属于一个位置和范围, 故推断测区内 3 个水源孔所揭露的含水层均在一个统一的岩溶含水体中, 其中并存多个含水层段的平面展布和延伸方向。通过水文钻孔抽水试验, 证实推断是正确的。

3 井—井工作方式

井—井方式排列装置分为 2 种: 单井井—井方式, 这是将供电装置和测量装置都放入同一钻孔中,



a—固定单板供电移动双极测量;b—固定双极供电移动双极测量;c—中间梯度排列;d—双极供电双极测量等深同步移动

图 11 双井井—井激电(电阻率)方式

属于该类的方法有激发极化测井, 单井井中中间梯度等; 双井井—井方式(图 11), 这是将供电装置放入一钻孔中, 测量装置都放入另一钻孔中, 它需要同时具有两个钻孔才能开展工作。

单井井—井方式, 如激发极化测井, 主要用来划分钻孔地质剖面, 确定激电物性参数等。图 12 为内蒙某铜矿区 ZK175 孔激电测井结果^[1]。图中显示, 小极距 A0.95M0.1M(电极距 1 m) 梯度电极系, 由于探测范围小, 能很好地反映出矿层中的局部不均匀性(夹层), 从而可用于详细分层; 而大极距(5.5

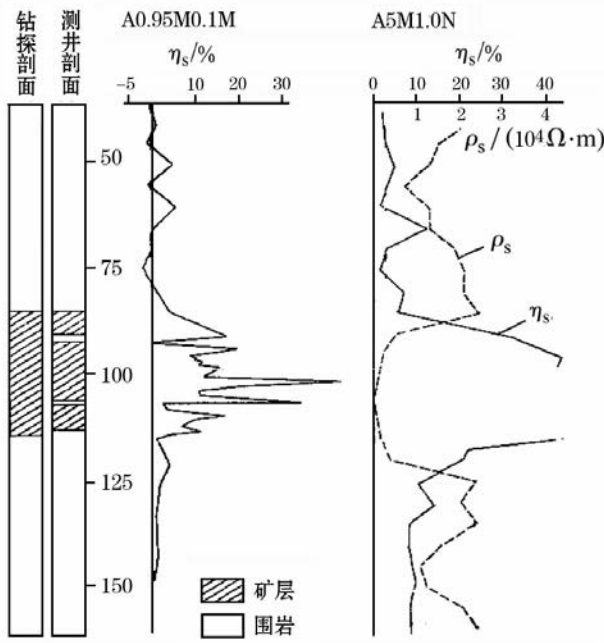


图 12 ZK175 激电测井(引自参考文献[1])

m)的探测范围大,曲线由于平均作用变得平滑,因而不能详细分层,但有利于了解岩矿层的电性和极化率(选取背景)。这样的电性剖面对于开展井中激电是有利的。同时为地面勘探提供物性。

任振波、蔡柏林提出单孔多电极排列视电阻率

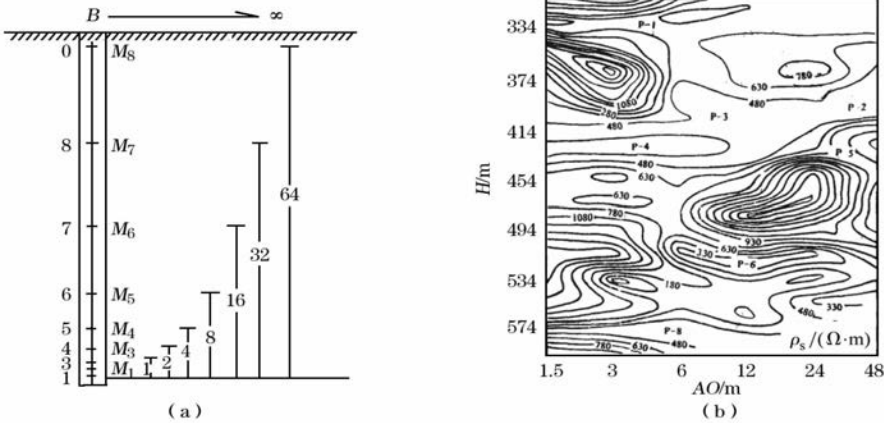


图 13 单孔多电极排列观测系统(a)与 A 孔的激电测量 ρ_s 断面(b)(引自参考文献[14])

测半径。
图 14 是铜板模型实验结果,是 3 种排列方式的井—井激电曲线^[1-2]。

(1)单极固定电源排列: A₁ 定点供电, MN 移动测量,由于 A₁ 离矿体较近,极化场强度大,所以产生上正下负大异常,零值点的位置对应着矿体右端埋深。

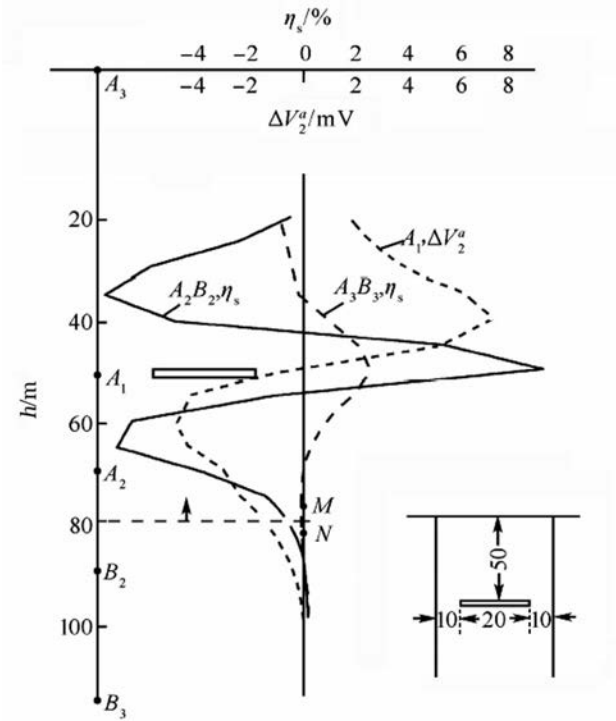


图 14 井—井模型(铜板)实验(引自参考文献[1-2])

与激电测量的单井井—井方式(图 13)^[14],该测量系统共有 9 个电极,可测量 8 种极距(包括电位电极系、梯度电极系)多探测深度的电性参数。该测量系统的优点是不同极距组合测量结果可发现近井旁或井底盲矿,绘制近井周电性图,提高钻孔的有效探

(2)中间梯度排列: A₃B₃ 供电, MN 移动测量,由于 A₃B₃ 离矿体较远,极化场强度小,所以曲线幅值不大,极大值的位置对应矿体右端埋深。

(3)双极同步排列: 供电电极(A₂B₂), MN 同步移动测量,由于当 A₂B₂ 中点对矿体左端时,极化场强度最大,所以曲线幅值大,极大值的位置对应矿体右端埋深。

3 条曲线比较可以看出,双极同步排列异常最明显,其正异常的幅值大约是井中中间梯度的两倍。

4 结语

- (1)井中激电(电阻率)应用范围广,在固体矿产、煤田、水文、石油勘探中是一种重要的物探方法;
- (2)地—井方式激电(电阻率)能较好地寻找井旁、井底盲矿,估算矿体距井距离,判断矿体所在方位;
- (3)井—地方式激电(电阻率)能较好寻找井旁、井底盲矿,追踪矿体走向,判断矿体走向等;
- (4)井—井方式激电(电阻率)能较好地探测井间矿体,判断矿体是否相连等。

参考文献:

[1] 蔡柏林. 金属矿钻孔地球物理勘探[M]. 北京:地质出版社, 1986.

[2] 潘和平,马火林,蔡柏林,等. 地球物理测井与井中物探[M]. 北京:科学出版社,2009.

[3] Klaus Spitzer, Michel Chouteau. A DC resistivity and IP borehole

survey at the Casa Berardi, gold mine in northwestern Quebec[J]. GEOPHYSICS, 2003(68): 453 - 463.

[4] Slater L, Binley A M, Daily W, et al. Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer, injection[J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, (44): 85 - 102.

[5] Osiensky J L, Belknap W J, Donaldson P R. Superposition of borehole-to-surface voltage residuals for Vadose Zone plumedelineation[J]. Journal of Contaminant Hydrology 82, 2006: 241 - 254.

[6] Bevc D, Morrison H F. Borehole-to-surface electrical resistivity monitoring of a salt water injection experiment[J]. Geophysics, 1991, 56(6): 769 - 777.

[7] 陈有太. 井中激电在金矿床上应用的地质效果[J]. 物探与化探, 1990, 14(3): 202 - 208.

[8] 徐振超. 地下物探在有色金属矿山寻找隐伏矿体的应用[J]. 矿产与地质, 2003, 17(94): 37 - 42.

[9] 朱长喜. 钻探井中激电测井寻找盲矿体前景乐观[J]. 新疆有色金属, 2011(1): 44 - 45.

[10] 李建新, 王云, 张征. 井中激电在新疆彩霞山铅锌矿区的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(2): 192 - 199.

[11] 张征. 彩霞山铅锌矿区井中激电应用[J]. 地质与勘探, 2005, 41(增刊): 19 - 23.

[12] 张兆京. 大功率多源充电法在黄山铜镍矿区的应用[J]. 物探与化探, 1997, 21(5): 363 - 365.

[13] 李黔西. 充电法探测充水岩溶裂隙的应用效果[J]. 西部探矿工程, 2003, 82(3): 9 - 10.

[14] 任振波, 蔡柏林. 单孔多电极排列视电阻率与激电测量[J]. 物探与化探, 1991, 5(5): 352 - 357.

THE ROLE OF BOREHOLE INDUCED POLARIZATION/RESISTIVITY METHOD
IN THE EXPLORATION OF MINERAL RESOURCES

PAN He-ping

(Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Borehole induced polarization method (referred to as borehole IP) is the general term of induced polarization measurements in the borehole. This paper describes the basic principles of the prospecting for blind ore bodies beside and at the bottom of the borehole as well as the application examples using IP/resistivity methods for the surface-to-borehole work pattern. The basic principles of detecting deep blind deposits, the delineation of the ore bodies and the application examples using IP/resistivity method for the borehole-to-surface work pattern are dealt with, and the examples of detecting ore bodies between boreholes are presented. The effect of borehole induced polarization / resistivity method in the exploration of mineral resources is systematically reviewed.

Key words: borehole induced polarization method; surface-to-borehole work pattern; borehole-to-surface work pattern; borehole-to-borehole work pattern; mineral resources exploration

作者简介: 潘和平(1953 -),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为地球物理测井与井中物探。