

文章编号: 1001-1986(2008)06-0058-04

深部高压水害隐患探测的井下电磁法技术

石显新^{1,2}, 李 华³, 闫 述⁴, 陈明生², 侯彦威², 秋兴国⁵

- (1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049;
2. 煤炭科学研究总院西安研究院, 陕西 西安 710054;
3. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710054;
4. 江苏大学计算机科学与通信工程学院, 江苏 镇江 212013;
5. 西安科技大学计算机系, 陕西 西安 710054)

摘要: 在煤矿深部高压水害隐患探测中, 井下电磁法发挥着独到的作用。介绍了井下直流电法、井下高密度电阻率法、电透视法、井下瞬变电磁法的工作原理和施工方法, 以及顶底板探测、侧帮水害隐患探测、回采工作面水害隐患探测及独头巷道超前探测的效果。结果表明, 矿井电磁法对含水低阻体敏感, 与探测目的层或地质体近距离接触, 对导含水体具有较高的分辨能力, 是探测采煤工作面突水隐患的有效方法。

关键词: 深部高压水害隐患探测; 井下直流电法; 井下高密度电阻率法; 电透视法; 矿井瞬变电磁法

中图分类号: P631.3 **文献标识码:** A

Down-hole electromagnetic method for detecting deep high-pressure water hazard

SHI Xian-Xin^{1, 2}, LI Hua³, YAN Shu⁴, CHEN Ming-Sheng², HOU Yan-Wei², QIU Xing-Guo⁵

- (1. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Xi'an Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China;
3. China Coal Xi'an Designing Co., LTD, Xi'an 710054, China;
4. School of Computer Science and Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
5. Dept. of Computer Science, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In the detection of deep high-pressure water hazard of coal mine, down-hole electromagnetic method plays a unique role. The article introduces working principles and construction methods of the down-hole DC electrical method, down-hole high-density resistivity method, electric transmission tomography and down-hole transient electromagnetic method, as well as their effects of water hazard detection respectively on roof, floor, lateral wall, mining face and pilot detection in blind roadway. The results indicate that the mine electromagnetic method is sensitive to water-bearing low-resistivity body and of relatively high resolution capacity on water-conducting and bearing body in case of a close contact with the target layer of detection or geological body; therefore, it is an efficient method for detecting water gushing hazard at coal face.

Key words: detection of deep high-pressure water hazard; down-hole DC electrical method; down-hole high-density resistivity method; electric transmission tomography; mine transient electromagnetic method

我国是世界上煤矿水文地质条件最复杂的国家之一, 煤矿水害是仅次于瓦斯灾害的第二大煤矿灾害性事故^[1]。在遭受水害威胁的煤田中, 华北型煤田是非常特别的一类。华北型煤田的许多矿井不同程度地受到煤层底板下奥灰岩溶水的威胁与危害, 在构造破碎带、陷落柱以及隔水层较薄的地段经常发生坑道突水事故^[2]。据统计, 在全国 700 多个统

配煤矿中有近 300 个分布在华北型煤田中, 煤炭产量占全国总产量的 60%以上^[3]。这些煤矿大多处于我国经济相对发达、煤炭消耗量最大的东部地区, 浅部煤炭资源面临枯竭, 受生态环境脆弱、基础设施落后、距消费市场遥远等因素的制约, 近期完全靠开发西部资源来替代东部煤炭产量缺口不现实。因此, 从国家能源战略安全的高度看, 开发东部地

收稿日期: 2008-05-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB202207)。

作者简介: 石显新(1967—), 男, 贵州湄潭人, 博士, 研究员, 从事科研管理工作。

区深部煤炭资源势在必行,是稳定东部确保国家能源战略安全的需要。而深部开采面临高岩溶水压问题,承压水位高,水头压力大,使巷道围岩和煤层底板承受的高压水对矿井安全生产的威胁越来越大。因此,采用适宜的探测技术为煤矿安全开采提供地质保障,是物探工作者的重要任务。本文介绍的常规矿井直流电法、井下高密度电阻率法、电透视、矿井瞬变电磁法及其应用实例表明,电磁法是井下突水隐患探测的有效方法。

1 常规矿井直流电法

矿井直流电法属全空间电法勘探,它以岩石导电性差异为基础,在全空间条件下建场,通过测量和分析巷道或采场附近稳定电流场的分布变化规律来研究矿井地质问题。它的供电、测量电极通常布置在巷道顶、底板或巷道侧帮上,从不同方位观测巷道周围稳定电流场的分布、变化规律,借以了解巷道顶、底板或所在岩层内的地质情况^[4]。针对需要解决的问题,矿井直流电法电极的排列形式、移动方式等多有变化,从而衍生出不同的方法。一般来说,电极的移动方式决定着矿井直流电法的工作原理,电极的排列方式决定着矿井直流电法的分辨能力和电性响应特征,而勘探目标体相对测点的空间位置决定矿井直流电法的布极位置。

矿井直流电法最适合底板水害探测。以山东肥城矿务局大封矿 9107 工作面突水隐患探测为例,该工作面开采 9 号煤,下距 5 灰(平均厚度为 9.37 m)平均 20 m,下距奥灰约 50 m。由于构造复杂,断层对煤层底板隔水层的破坏严重。因此,为预防 5 灰及奥灰突水,采用直流电法探测 9 号煤底板的断裂破碎发育程度。探测时采用了对称四极测深法和轴向偶极剖面法两种方法进行勘探,以便相互印证,提高探测结果的可靠性。对称四极测深法的最大极距为 90 m,轴向偶极剖面法的供电电极 AB 和测量电极 MN 均为 5 m, BM 为 20 m。

探测成果见图 1 和图 2。从图中可以明显地看到,在偶极剖面法视电阻率曲线图(图 1)上,33-46、60-64 号点为 2 个低阻异常区;在测深等视电阻率

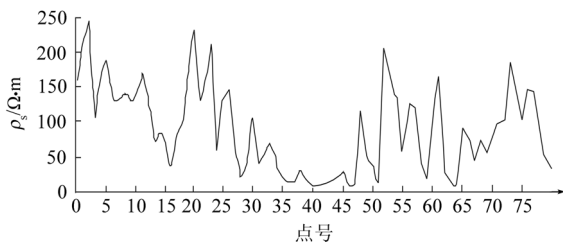


图 1 9107 工作面实测视电阻率剖面曲线

Fig.1 Observed resistivity profile of Working face 9107

断面图(图 2)上,33-46、60-64 号点均为等值线的凹形畸变,其形态直观地反映出 2 个断裂破碎带的形状、位置及影响范围。

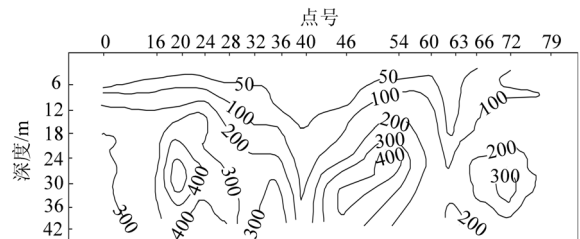


图 2 9107 工作面视电阻率断面等值线图

Fig.2 Contour map of apparent resistivity profile of Working face 9107

2 井下高密度电阻率法

井下高密度电阻率法是集电剖面法和电测深法于一体的多装置、多极距的组合方法。它具有一次布极即可进行多装置数据采集以及通过求取比值参数来突出异常信息的特点。其工作时只需将数十或数百根电极一次布设在一定间隔的测点上,测点密度远比常规矿井直流电法大,一般为 1~10 m。然后用多心电缆将每根电极连接到程控式多路电极转换开关上,通过测控式多路电极转换器选择不同的电极组合方式和不同的极距间隔,从而完成野外数据的快速采集,并将测量结果依此存入随机存储器。将数据回放并送入微机便可利用专门软件对原始资料进行处理。图 3 为高密度电阻率法测点分布示意图。当电极排列间距为 a 时,测量电极距为 $x=n \cdot a$,依此取 $n=1, 2, \dots$,每个极距依固定的装置形式逐点由左至右移动来完成该极距的数据采集。对某一极距而言,其结果相当于电阻率剖面法,而对同一记录点处不同极距的观测又相当于一个电测深点。为了实际工作的方便和有利于视电阻率自动测量的实现,高密度电阻率法系统一般采用温纳、施伦贝谢尔、偶极-偶极、单极-偶极排列装置进行

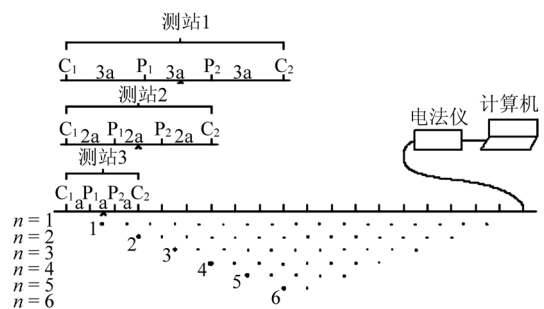


图 3 井下高密度电阻率法电极排列方式及观测点分布示意图

Fig.3 Layout of electrode and observation points of down-hole high density resistivity method

测量。电阻率法的探测深度随着供电电极 C_1C_2 距离的增大而增大,当隔离系数 n 逐次增大时, C_1C_2 电极距也逐次增大,对地下深部介质的反映能力亦逐步增加。通常把高密度电阻率法的测量结果记录在观测电极 P_1P_2 的中点、深度为 na 的点位上。

与常规矿井电测深法和矿井电剖面法相比,井下高密度电阻率法所获信息更为丰富,具有较强的抑制干扰和分解复合异常的能力。需要特别指出的是,为保证观测数据质量,在井下现场施工中,务必保证供电、测量电极接地良好。陕西星火煤业有限责任公司 1116 工作面位于星火井田南翼,走向长 1283 m,倾斜宽 140~160 m,开采煤层为 11[#]煤,煤层厚度约 4.69 m,倾角平均 3.5°。工作面掘进巷道顶板为砂质泥岩、泥岩、粉砂岩;底板为泥岩,泥岩下是奥灰岩。图 4 和图 5 分别是在 1116 工作面运输巷和回风巷采用矿井高密度电阻率法进行底板探测的结果。由图 4 可见,在该剖面上电阻率在纵、横向的变化都比较大,说明地电结构较复杂。在图 4 上主要有 2 处视电阻率较围岩低,根据视电阻率值分析,将视电阻率小于 15 $\Omega \cdot m$ 的异常段作为低阻段,认为是可能的突水隐患。按此原则,共圈定了 2 个低阻异常,其中一个低阻异常在剖面上的水平范围为 332~355 m、中心埋深约 50 m;另一个低阻异常的水平范围为 440~470 m,中心埋深 40 m。同样,可对图 5 中的低阻异常作出解释:水平范围为 490~520 m,中心埋深 85 m。为此,矿方分别在运输巷横坐标为 510 m 和回风巷横坐标为 345 m 位置布置验证钻孔,当钻孔进入异常区时最大出水量分别为 67 m³/h、5.7 m³/h,随即对底板进行了注浆加固处理。

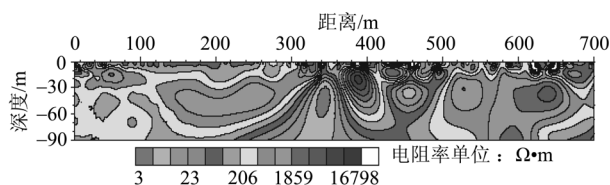


图 4 1116 工作面运输巷高密度电阻率法探测电阻率-深度剖面

Fig.4 Resistivity-depth profile of gang way of Working face 1116

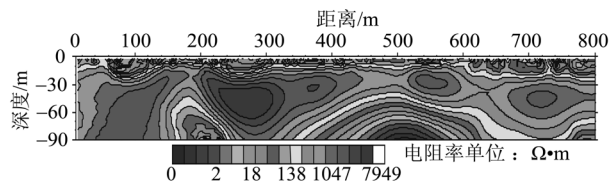


图 5 1116 工作面回风巷高密度电阻率法探测电阻率-深度剖面

Fig.5 Resistivity-depth profile of windroad of Working face 1116

3 电透视法

电透视法的原理与矿井无线电波透视法类似。所不同的是电透视法采用的是稳恒电流场。当有 2 条距离适当的巷道,应用电透视法可对巷道之间的回采工作面进行大面积的探测,为安全回采提供地质资料。电透视法采用单极-偶极装置^[5],它利用点电极 A 在一巷道(例如运输巷)供电,电极 B 置于无穷远处,测量电极 MN 在另一巷道(例如通风巷)测电位差,这是最基本的资料采集方法(图 6a)。实际施工布置是一供多收,形成密布的双向扇形观测系统(图 6b),如同无线电波透视那样,研究 2 巷道间工作面内及围岩中的电场分布规律,用于探测工作面内及其顶底板岩层内的含水、导水构造异常,并对资料进行层析成像,进而作出地质解释。

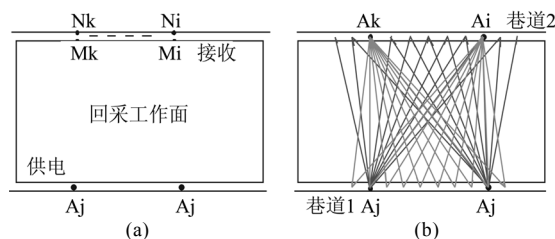


图 6 井下电透视测量布置图

Fig.6 Layout of down-hole electronic transmission survey
a——单向探测; b——双向探测

淮北矿业集团桃园煤矿 1031 工作面开采 10 号煤层,其埋藏深度 327~445 m。10 煤顶、底板岩层岩性一般为粉砂岩、细砂岩或粉、细砂岩互层,其含水性较弱;10 煤底板下 58 m 左右赋存有 2~3 m 厚的太原组灰岩(一灰),是矿井主要含水层之一。太灰、煤层顶、底板砂岩均为承压含水层,富水极不均一,其含水性主要受控于岩溶、孔隙、裂隙发育程度。图 7 所示为 1031 工作面底板下一定深度层段附近岩层含水性电透视探测成果图。由图 7 看出,层段内岩层视电导率值在 0.16~8.2 S 间变化,平均

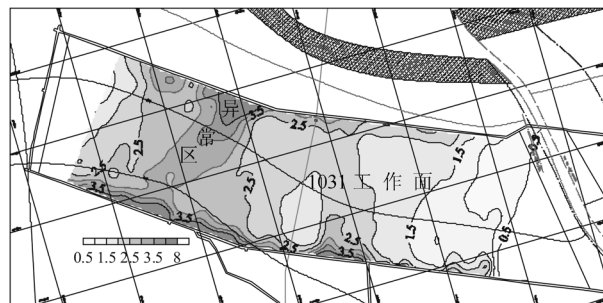


图 7 淮北矿业集团桃园煤矿 1031 工作面煤层底板电透视视电导率平面图

Fig.7 Electric transmission apparent conductivity plane of Working face 1031 coal floor of Taoyuan mine, Huaibei Mining Company

值为 1.5 S。按照电导率大,含水性好的一般规律,推断工作面内含水性异常条带主要分布在工作面里段(南段),在工作面回采时,应采取防治水措施。

4 矿井瞬变电磁法

矿井瞬变电磁法与其他方法如矿井直流电法类似,矿井瞬变电磁法也是由地面移植到井下,但是,相应的施工方法和解释方法需进行一定的改进。

由于矿井瞬变电磁勘探在井下巷道中进行,要在有限的井下空间布置装置,线圈不能大,且要达到一定的探测深度,这就要求增加发射电流。但考虑到安全问题,即使在低瓦斯矿井尽量加大井下通风量的条件下,发射电流也不能太大。因此,矿井瞬变电磁法须采用灵敏度高的仪器和特殊的工作方式,以便在发射电流不大的情况下尽可能增大超前探测的距离。在施工方面,井下测量处于全空间中,在掘进巷道迎头做超前探测时,应根据实际情况和需要改变发射线圈与接收线圈角度进行连续观测,以获得扇形剖面^[6]。

矿井瞬变电磁法除了能应用于巷道侧帮、煤层顶底板探测外,由于其探测距离大、定向性(方向性)好,相对其他电磁法对低阻体更敏感、施工快捷,因此,最适合井下巷道迎头前方的含水构造探测,如图 8 所示。

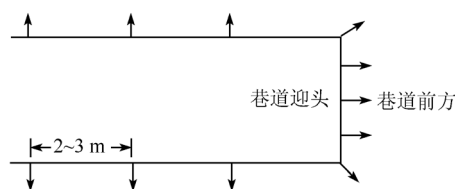


图 8 矿井瞬变电磁法超前探测工作布置示意图

Fig.8 Layout of advance survey of mine with transient electromagnetic method

图 9 是山东新汶矿业(集团)有限责任公司采用井中瞬变电磁法在煤矿独头巷道进行超前探测含水构造的结果。区内煤系为典型的华北型石炭二叠系,煤系上覆侏罗系、新近系、第四系。井田基本构造形态为一单斜构造,地层走向 300~330°,倾向 210~240°,倾角 12~30°。

考虑到现场工作条件,采用重叠回线装置进行测量,并根据现场实际情况进行了方法试验,以便尽可能提高信噪比。最终选择的工作参数为:发射线框 1.3 m×1.3 m(共 10 匝);接收线框 1.1 m×1.1 m(共 20 匝);发射电流 20 A;采样延迟时间 20ms;叠加次数 256 次。由图 9 可见,在掘进面前方约

275~320 m 范围有明显的低阻异常带,其中心大约在 310 m 处,根据地质情况分析,推断此异常是含水构造裂隙带的反映。在随后的巷道掘进过程中,在 282~317 m 发现含水裂隙带,涌水量为 60 m³/h。由于矿方提前采取了探放水措施,确保了掘进施工的安全。

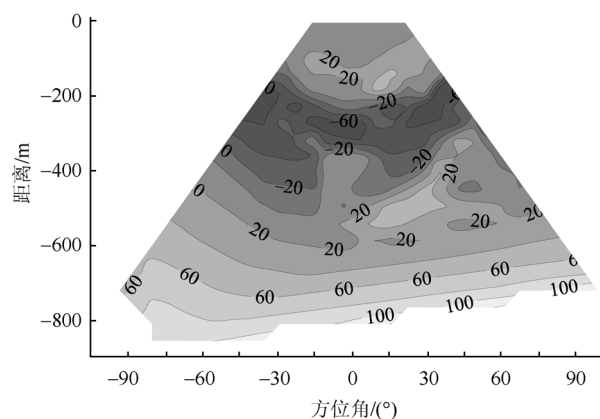


图 9 矿井瞬变电磁法独头巷道超前探测电阻率剖面图

Fig.9 Resistivity profile of advance survey of road with transient electromagnetic method

5 结 语

以岩石电性差异为基础的电磁法勘探是主要的矿井物探方法。由于电磁法对含水低阻体敏感,在解决与水有关的矿井构造及含水性评价方面显示出较大的优越性。实践证明,矿井电磁法具有施工简单、快速、经济的特点,是探测采煤工作面突水隐患的有效方法,它能为工作面防治水方案的设计、防治水工程的布置和实施提供可靠、正确决策的依据,在煤矿防治水工作中具有独到作用,对保证采煤工作面安全回采具有重要意义。

参考文献

- [1] 中国煤炭学会中国地质学会煤田地质专业委员会. 发展中的中国煤田地质学[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(6): 1-5.
- [2] 潘懋, 李铁峰. 灾害地质学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
- [3] 国家安全生产监督管理总局. 全国煤矿水害防治工作资料汇编[M]. 北京: 国家安全生产监督管理总局, 2006.
- [4] 储绍良. 矿井物探应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [5] 韩德品, 张天敏, 石亚丁, 等. 井下单极-偶极直流电透视原理及解释方法[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(5): 32-35.
- [6] 石显新, 闫述, 陈明生. 矿井瞬变电磁法在煤矿独头巷道超前探测中的应用研究[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(增刊): 98-99.