

矿井工作面开采水文地质条件综合地球物理探测研究

朱若军¹, 程久龙², 张要田¹, 王玉和², 姜国庆²

(1. 国投新集能源股份有限公司刘庄煤矿, 安徽 淮南 236232 ;

2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266510)

摘 要: 基于对矿井瞬变电磁法和高密度电阻率法理论基础、技术特点及其方法局限性的分析, 提出综合运用两种方法进行工作面水文地质条件探测, 结合某矿 121101 工作面水文地质条件探测实例, 探讨综合地球物理探测的工作方法技术、数据采集方法、资料处理与解释方法等。工程应用结果表明: 综合地球物理探测方法, 既可以弥补矿井瞬变电磁法无法分辨顶、底板异常响应的缺陷, 又可以对两种方法的探测结果相互验证, 排除由于干扰引起的假异常, 从而有效查明矿井工作面开采水文地质条件, 为工作面安全回采提供技术保障。

关键词: 矿井瞬变电磁法; 高密度电阻率法; 水文地质条件; 工作面开采

中图分类号: P641. 72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004 - 4051 (2010) 07 - 0098 - 04

Research on the integrated geophysical detection of hydrogeological condition in mine working face

ZHU Ruo-jun¹, CHENG Jiu-long², ZHANG Yao-tian¹, WANG Yu-he², JIANG Guo-qing²

(1. Liuzhuang Coal Mine, Sdic Xinji Energy Co. Ltd, Huainan 236232, China; 2. Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science & Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: Based on the analysis of theoretical basis, technical characteristics and limitations of mine transient electromagnetic method (MTEM) and high density resistivity method, this paper proposed the integrated geophysical method to detect hydrogeological condition of mine working face by combining the above two methods. With the detection case in 121101 working face, this paper discussed the working procedure, data acquisition, processing and interpretation methods of integrated geophysical detection. Results of engineering application show that the integrated geophysical method can remedy the defect of mine transient electromagnetic method (unable to distinguish the abnormal responses of roof and floor) and contrast the detecting results of both methods, thus remove the false anomaly aroused by interference. The integrated geophysical method can effectively detect the hydrogeological condition of mine working face and provide technical support for safe mining.

Key words: mine transient electromagnetic method; high density resistivity method; hydrogeological condition; working face mining

瞬变电磁法和高密度电阻率法, 是目前应用于矿井工作面水文地质条件探测的主要水文物探方法。它们在工作面顶、底板岩层含水地质异常体、裂隙带富水性、导水通道和含隔水层厚度探

测等方面, 取得了良好的应用效果^[1]。但是, 由于理论基础和方法本身的特点, 这两种方法在实际应用中, 仍存在一定的局限性。

矿井瞬变电磁法探测是在井下巷道中进行的, 测量的是巷道附近岩层在一次场激励下产生的感应二次场随时间的变化规律。在进行煤层顶、底板岩层含水性探测时, 接收天线接收的是来自煤层顶、底板两个方向的地电信息, 因此很难判断电性异常是来自顶板、底板, 或者是二者共同作

收稿日期: 2010 - 03 - 23

基金资助: 国家自然科学基金资助 (编号: 50774051, 50974081); 973 计划课题 (编号: 2007CB209406); 山东省“泰山学者”建设工程专项经费资助

作者简介: 朱若军 (1974 -), 男, 安徽安庆人, 总工程师, 主要从事煤矿生产和安全的技术及管理工作。

用的结果，这就严重影响了资料解释精度。矿井高密度电阻率法的特殊性，是由电流场的分布特征决定的，与地面电阻率法不同。矿井电阻率法的电流场在巷道中呈全空间分布，数值模拟、物理模拟和井下技术试验结果均表明，全空间效应和巷道空间对矿井电阻率法的影响是客观存在的^[2]。考虑到回采工作面煤层的电阻率高（主要是气煤、肥煤），而顶底板围岩一般为砂页岩类，其电阻率比煤层低得多。因此，回采工作面底板（或顶板）上点电源的电流分布，可近似看作半空间，这一近似不影响探测地质效果^[3]。

基于以上分析，可以考虑综合运用两种方法进行工作面水文地质条件的探测，这样既可以弥补矿井瞬变电磁法无法分辨顶、底板异常的缺陷，达到对异常体准确定位的目的，又可以对两种物探方法的探测结果相互验证，提高资料解释精度。

1 矿井瞬变电磁法与高密度电阻率法基本原理

1.1 矿井瞬变电磁法基本原理

矿井瞬变电磁法（MTEM）是利用设置于井下巷道中的不接地回线向巷道周围空间发射一次脉冲磁场，在其激发下，巷道周围导电岩矿体中激励起的感应涡流，将产生随时间变化的感应电磁场（二次场）。由于二次场包含有巷道周围地质体丰富的地电信息，通过在一次场间歇期间观测二次场，并对观测信息进行提取和分析，就可以达到探测巷道周围导电介质电性特征的目的^[4]。

由“烟圈”理论来看，早期瞬变电磁场是由距离发射线框较近的巷道围岩介质的感应电流产生的，可以反映近距离的电性分布；晚期瞬变电磁场是由距离发射线框相对较远的围岩介质的感应电流产生的，可以反映远距离的电性分布。全空间条件下，磁偶源晚期计算视电阻率的公式为^[5]：

$$s = C \times \frac{\mu_0}{4t} \times \left(\frac{2\mu_0 S N s n}{5t(V/I)} \right)^{2/3} \quad (1)$$

式中：C 为全空间响应系数；S、N 和 s、n 分别为发射线圈和接收线圈面积及匝数；t 为瞬变延迟时间；V/I 为观测到的归一化二次场电位场值。矿井瞬变电磁法时深转换公式为^[6]

$$D_s(t) = \int_0^t V(s, t) dt \quad (2)$$

式中：D_s(t) 为 t 时刻电磁场传播深度；V(s, t) 为任意导电介质分布情况下电磁场垂直扩散速度。

1.2 矿井高密度电阻率法基本原理

矿井高密度电阻率法，是集电测深和电剖面

法于一体的阵列勘探方法。该方法的核心是实现的野外测量数据的快速、自动和智能化采集，一次布极即可进行多点、多极距和多参数数据采集，因此数据采样高、信息量大，能够比较全面的反映测量断面的电性特征^[7]。并且该方法在资料处理解释中，可以运用多种参数进行综合解释，弥补了常规电阻率法测点稀疏和解释参数单一的不足。

2 工作方法技术

综合地球物理探测要求在工作面胶带顺槽、轨道顺槽同时布置瞬变电磁探测测线和高密度电阻率法探测测线，并充分利用矿井瞬变电磁法探测的方向性特点，进行多方位探测。

2.1 矿井瞬变电磁法工作方法

由于巷道空间有限，矿井瞬变电磁法的装置尺寸不能太大，一般采用多匝小回线组合。这种装置有效发射面积大，且发射电流较大，因此发射磁矩增强，信噪比提高，有效勘探深度也相应增加。常用工作的装置主要有重叠回线、中心回线和偶极装置三种。

矿井瞬变电磁法装置较小，可以灵活的进行旋转、移动，施工效率较高，同时根据小回线发射电磁波的方向性特点，可以进行多方位探测。一般认为，线框平面的法线方向即为探测的目标方向。因此，通过灵活调整线圈法线与巷道底板的夹角，可探测工作面顶板、底板和顺层方向上介质的电性变化情况。应用矿井瞬变电磁法进行竖直方向和倾斜方向探测时，线圈的放置方式如图 1 所示。

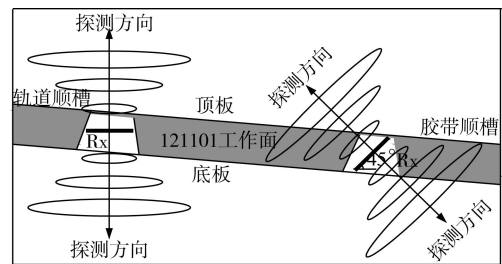


图 1 矿井瞬变电磁法探测方向示意图

2.2 高密度电阻率法工作方法

高密度电阻率法现场数据采集，一般采用三电位电极系，即由温纳四极（AMNB）、偶极（ABMN）及微分（AMBN）装置按一定方式组合所构成的测量系统^[8]。高密度电阻率法观测系统布置如图 2 所示，具体测量方式如下：首先在设计测线上按固定点距 x 布置一系列电极，然后将电极通过电缆与主控采集站（主机）相连。取装置电极

间距 $a = ix$, ($i = 1, 2, \dots, n$) , 将相距为 a 的一组电极 (供电电极和测量电极) 经转换开关连接到主机进行观测, 并通过转换开关改变装置类型, 依次完成该测点上各种装置形式的视电阻率观测; 一个测点观测完毕, 转换开关自动转接下一组电极, 以同样方式进行下一测点的观测, 直到某一电极间距的整条剖面观测完为止; 改变电极间距, 重复以上观测, 直到所有不同电极间距的剖面观测完为止^[8-9]。

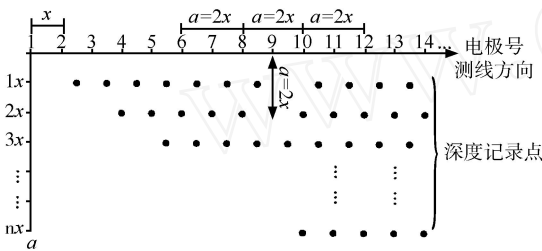


图 2 高密度电阻率法观测系统布置示意图

3 工程应用

3.1 工作面地质概况

121101 工作面总体形态为一单斜构造, 煤层走向近东西, 工作面沿近走向布置, 平均走向长 1501.6m, 倾向长 192.8m, 平均煤厚 3.83m, 局部受层滑断层影响煤层变薄, 甚至缺失。工作面直接顶为砂质泥岩, 老顶为细砂岩, 直接底为泥岩或砂质泥岩, 老底为砂质泥岩、细砂岩或粉砂岩。根据水文地质资料并结合邻近工作面开采情况可知, 工作面顶板各含水层多以静储量水为主, 含水性不均一, 局部水量较大; 工作面老底下方, 厚层石英砂岩裂隙发育且局部含水, 回采时存在突水危险。因此, 为了查明工作面水文地质条件, 保证工作面安全回采, 开展了综合地球物理探测研究。

3.2 地球物理特征

瞬变电磁法和高密度电法同属于电法勘探范畴, 都是以岩矿石的电性差异为基础来研究地质构造的。由于本工作面所涉及的含水层是顶底板砂岩层, 这里主要讨论砂岩地层的电性特征。结构致密完整且不含水的砂岩, 在电性上表现为高电阻率特征, 如果砂岩裂隙发育且含水, 那么在裂隙发育、断层或裂隙带附近的电阻率会比正常砂岩地层的电阻率大大降低, 且降低的程度视裂隙发育和含水程度的不同而不同, 裂隙愈发育赋水性愈强, 则电阻率愈低。这是本次综合地球物理探测的物理基础。

3.3 数据采集

在综合地球物理探测具体施工时, 需在工作面轨道顺槽、胶带顺槽中同时布置矿井瞬变电磁法探测测线和高密度电阻率法探测测线, 探测点距 10m。考虑到工作面倾向长较大, 为了较全面地反映工作面顶底板砂岩的电性特征, 矿井瞬变电磁法探测在工作面两顺槽均设计两个探测角度, 分别为 90° 方向和 45° 方向 (发射框法线与水平面夹角), 具体探测方式见图 1。采用加拿大产 PRO-TEM-47 矿井瞬变电磁仪进行数据采集, 装置形式选用偶极方式, 发射框为 2m × 2m 的矩形线框。高密度电阻率法采用 E60C 型全自动电法仪进行数据采集, 仪器采用方波供电, 抗干扰能力强、精度高。

3.4 资料处理与解释

矿井瞬变电磁法和高密度电阻率法数据, 经过专门数据处理软件进行处理、成图之后, 可以生成视电阻率断面图。资料解释时, 需结合两种方法获得的成果图进行综合对比。图 3 所示为胶带顺槽距切眼 500 ~ 1200m 桩号段综合地球物理探测的视电阻率断面图。X 轴为测点坐标, Y 轴为探测深度, 右侧为视电阻率色谱图。首先, 从矿井瞬变电磁法视电阻率断面图可以看出, 视电阻率起伏变化较大, 呈现分区性, 根据视电阻率相对大小, 解释中将视电阻率值在 0 ~ 4 Ω·m 的区域定为 A 级异常区, 视电阻率在 4 ~ 8 Ω·m 的区域定为 B 级异常区。该桩号段 A、B 异常区分别为 2 处和 6 处。高密度电阻率法断面图上, 根据视电阻率相对大小圈定低阻异常区 3 处。综合解释分析如下: 矿井瞬变电磁法竖直方向探测 (图 3b) 510 ~ 610m 段为 A 级异常区, 含水性相对最强, 但是在上倾 45° 方向 (图 3a) 对应区段无明显低阻反映。对比高密度电阻率法剖面图 (图 3c) 可以看出, 在底板 530 ~ 600m 段存在一个低阻异常 (1#), 据此可以排除顶板含水异常, 低阻响应是由底板砂岩富水区引起; 图 3b 中 1050 ~ 1140m 段为含水性 A 级异常区, 但是在图 3a 中与之对应段为含水性 B 级异常, 出现这种现象的原因是在这个区段, 底板也存在一个低阻异常带 (图 3c 中 3#), 因此, 图 3b 中该 A 级异常带为顶、底板砂岩含水异常区共同作用结果。

3.5 探测成果

采用上述资料解释方式, 并结合水文地质资料进行综合分析, 即可得到整个工作面水文地质条件综合物探结果。通过结合矿井瞬变电磁法和

高密度电阻率法进行综合地球物理探测，在 121101 工作面共圈定顶板 A 级富水区 5 个、顶板 B 级富水区 4 个、底板富水区 14 个。探测结果表明，工作面顶底板岩层含水性不均一，呈现分区性，局部块段含水性较强，并且工作面靠近轨道顺槽一侧底板岩层的含水性相对强于胶带顺槽一侧。矿方针对综合地球物理探测所圈定富水异常区布置钻孔进行放水，证实全部含水异常区都不同程度含水，共计放出水量 9.4 万 m³，回采过程中水量小于 5m³/h，放水效果显著，为工作面安全顺利回采奠定了坚实的基础，从而充分证明了采用综合地球物理方法探测工作面水文地质条件的可行性和优越性。

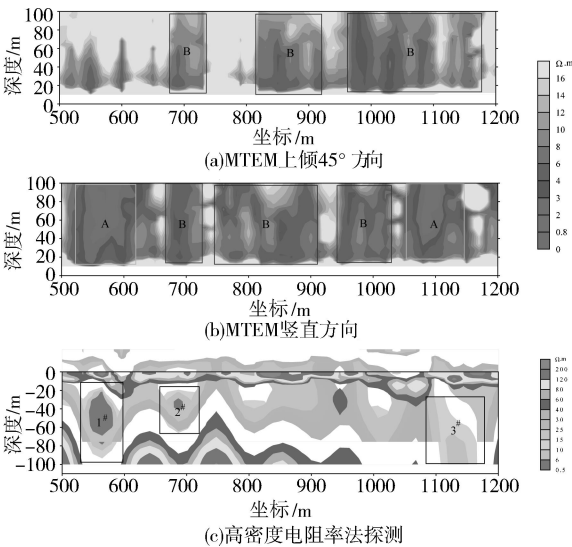


图 3 胶带顺槽综合地球物理探测视电阻率剖面图

4 结论

综合运用矿井瞬变电磁法和高密度电阻率法

进行矿井工作面水文地质条件探测，既可以弥补全空间条件下矿井瞬变电磁法无法确定含水地质异常体相对于发射框的具体位置的缺陷，又可以对两种方法的探测结果相互验证，排除由干扰引起的假异常，从根本上提高了矿井水文地质条件综合地球物理探测资料解释精度，达到优势互补的效果。应用结果表明：该技术可以有效查明矿井工作面水文地质条件、圈定顶底板岩层富水异常区，从而指导矿方有针对性地组织探放水，为工作面安全回采奠定基础。同时，该综合地球物理探测技术，在受水威胁的类似金属、非金属矿山也可推广应用。

参考文献

[1] 刘树才, 岳建华, 刘志新. 煤矿水文物探技术与应用 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005.

[2] 刘志新, 岳建华, 刘仰光. 矿井物探技术在突水预测中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 4 (1): 9 - 14.

[3] 刘天放, 李志鹏. 矿井地球物理勘探 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.

[4] 牛之琰. 时间域电磁法原理 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007.

[5] 于景邨, 等. 深部采场突水构造矿井瞬变电磁法探查理论及应用 [J]. 煤炭学报, 32 (8): 818 - 821.

[6] Raiche A P, Gallagher R G. Apparent resistivity and diffusion velocity [J]. Geophysics, 1985, 50 (10): 1628 - 1633.

[7] 程久龙, 等. 回采工作面水害的高密度电阻率成像法探测研究 [J]. 煤炭科学技术, 27 (10): 37 - 40.

[8] 程久龙, 于师建, 王渭明, 等. 岩体测试与探测 [M]. 北京: 地震出版社, 2000.

[9] 岳建华, 刘树才. 矿井直流电法勘探 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.

(上接第 97 页)

参考文献

[1] 苏文贤. 朱家包铁矿高台阶排土场稳定性及治理技术的研究 [J]. 金属矿山, 1991 (12): 14 - 20.

[2] 黄礼富, 苏文贤. 高台阶排土场岩石块度分布规律研究 [J]. 中国矿山工程, 1988 (9): 7 - 13.

[3] 黄礼富, 周玉新, 陈柏林. 排土机排土合理工艺参数的确定 [J]. 金属矿山, 1998 (1): 8 - 11.

[4] 韦寒波, 孙世国, 高谦, 等. 基于临界滑移场技术的排土场边坡稳定性分析 [J]. 北京科技大学学报, 2008, 30 (6): 581 - 584.

[5] 马公望. 金堆城露天矿排土场稳定性分析 [J]. 金属矿山, 2004 (8): 32 - 34.

[6] 杨巨文, 曹兰柱, 张利忠, 等. 露天矿软岩基底内排土场

变形破坏规律 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26 (增): 1 - 3.

[7] 潘建平, 黄润秋, 许强. 攀枝花露天矿排土场边坡稳定性的三维数值模拟研究 [J]. 成都理工学院学报, 2002, 29 (3): 329 - 333.

[8] 穆大耀, 王勋业. 露天排土场边坡稳定性模拟试验与分析 [J]. 昆明理工大学学报, 1994, 19 (1): 12 - 18.

[9] ITASCA Consulting Group. PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions) Theory and Background [M]. USA: Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota 55401, 2002.

[10] ITASCA Consulting Group. PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions) User ' s Guide [M]. USA: Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota 55401, 2002.