

# 综合矿井物探技术在探测陷落柱中的应用

刘志新, 刘树才, 于景邨

(中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 提出了探测煤矿陷落柱位置及其富水性的综合矿井物探技术: 采用无线电波透视法可确定煤层内异常构造的相对位置, 利用矿井瞬变电磁法可根据电阻率的变化来查明探测范围内异常构造的富水情况。重点介绍了这2种矿井物探技术在探测皖北某矿区煤层内陷落柱构造异常的应用情况, 同时从理论上说明无线电波透视方法对含水构造的电性特征有明显的反映, 研究了综合曲线分析法和层析成像法在资料解释中的应用, 总结了“V”字型及半“V”字型综合曲线所反映的水文地质特征。

**关键词:** 综合矿井物探技术; 无线电波透视法; 矿井瞬变电磁法; 陷落柱

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2008)02-0212-04

在煤矿开采过程中, 常常碰到一种灾害性的地质异常体——陷落柱及其伴生构造。它们破坏了煤层的连续性, 并经常诱发矿井水患发生, 导致矿井生产安全事故。陷落柱的存在不仅给煤矿的安全生产造成严重威胁, 而且降低了煤矿的经济效益, 因此, 总结陷落柱的发育规律, 找出适合相应地质条件下的物探方法, 以便快速探测出陷落柱的发育影响范围就显得非常重要。煤矿陷落柱的形成与奥陶系灰岩岩溶裂隙发育有密切的关系, 由于岩溶裂隙的发育、扩大, 其周围地层受重力作用而塌落下沉, 因此, 陷落柱内部充填物常常成分复杂, 比较松散, 正常的地层沉积层序被打乱, 陷落柱与煤层的接触边界两侧存在着明显的密度、速度、电性、放射性等物性差异, 这为采用矿井物探技术对其进行探测提供了前提条件。目前探查岩溶陷落柱的主要物探方法技术为无线电波透视技术和电阻率探测技术, 电阻率法又包括矿井直流电法和矿井瞬变电磁法。

## 1 无线电波透视法技术原理

无线电波透视法, 又称坑透法。电磁波在地下岩层中传播时, 由于各种岩、矿石电性的不同, 它们对电磁波能量吸收不同, 低阻岩层对电磁波具有较强的吸收作用, 当波前进方向遇到断裂构造所出现的界面时, 电磁波将在界面上产生反射和折射作用, 造成能量的损耗。因此在矿井地质条件下, 如果发射源发射的电磁波在穿过煤层途中遇到断层、陷落柱、含水裂隙、煤层变薄区或其他构造时, 波能量被

吸收或完全屏蔽, 则在接收巷道收到微弱信号或收不到透射信号, 形成透视异常区, 即为所要探测异常体的位置和范围。

目前的仪器, 只测固定频率的透射电磁波的磁场(或电场)振幅分量。在电磁波射线路径上, 介质电磁性质的变化和波阻抗的变化造成电磁场强度的变化; 反之, 分析电磁场强度的变化, 就可以预测测区介质的物性变化。

煤层中传播的电磁波在介质中任意点的场强表达式可表示为  $E = E_0(e^{-\beta r}/r) \sin\theta$ ,  $E$  为介质中某点的实测场强,  $E_0$  为决定发射功率和周围介质的初始辐射场强,  $r$  为发射机与接收机之间的直线距离,  $\beta$  为决定于工作频率、介质电阻率、介电常数等参数的介质吸收系数,  $\theta$  为发射天线轴与观测点方向间的夹角。显然,  $E$  值随  $r$  和  $\beta$  而变化, 其中射线路径上  $\beta$  值的变化, 是使  $E$  值发生异常变化的关键因素:

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \cdot \sqrt{1/2 \{ [1 + \sigma^2/(\omega^2\epsilon^2)]^{1/2} - 1 \}}.$$

由上式可知, 在一定频率( $\omega = 2\pi f$ )时,  $\beta$  值是煤或岩石的介电常数  $\epsilon$ 、导磁率  $\mu$ 、电导率  $\sigma$  的函数。由于煤层与顶底板岩石介电常数有较大差异, 而导磁率变化很小, 所以在电磁波射线路径上出现煤层与岩层的交替时, 就发生  $\beta$  与  $E$  值的明显变化。又由于煤层相对于顶底板岩层是一种波导介质, 当它厚度发生变化时(如煤层变薄), 其波阻抗就发生变化, 也造成  $\beta$  与  $E$  值的变化。

电磁波在煤层中传播时, 若存在陷落柱或其他地质异常构造, 由于其电性参数不同, 它们对电磁波

收稿日期: 2006-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(40674074); 博士点基金课题(20050290501); 中国矿业大学青年科研基金项目(D200409)。

能量吸收有一定的差异。电阻率低的岩矿石具有较大的吸收作用,另外,伴随着断裂构造所出现的界面,对电磁波产生折射、反射等作用,也会造成电磁波能量的损耗,因此,如果在发射机与接收机之间,电磁波穿越煤层的途径中存在着与煤层电性不同的良导体,如陷落柱、断层、火成岩体、厚层夹石等地质构造,电磁波能量就会被其吸收或完全屏蔽。对采集的数据利用层析成像的方法进行处理,可以比较直观地反映出工作面内异常的分布情况。

## 2 矿井瞬变电磁法工作原理

矿井瞬变电磁法是一类非接触式探测技术,属于时间域电磁法。它利用不接地回线向采掘空间周围的煤岩体中发射一次场,通过在发射间歇测量煤岩体中电性不均匀体感应产生的二次场随时间的变化,来达到查明各种地质目标体的目的。由于根据采掘空间断面的大小选择发射和接收回线边长后,仍可通过加大发射功率和接收回线匝数的方法增强二次场信号的强度,从而增大瞬变电磁法的顺层或垂直勘探深度。

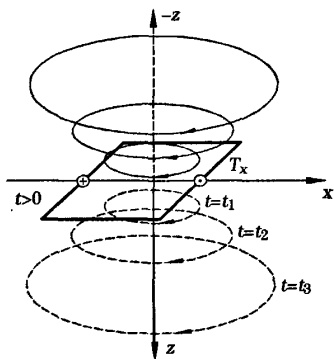


图1 地下感应电流环带分布示意

在电导率为 $\sigma$ 、磁导率为 $\mu_0$ 的均匀各向同性空间,附设面积为 $S$ 的矩形发射线圈,如图1所示,在回线中供以 $I(t) = I(t < 0)$ 、 $I(t) = 0(t \geq 0)$ 的阶跃脉冲电流。在电流断开之前,发射电流在回线周围空间建立起一稳定的磁场,在 $t=0$ 时刻,将电流突然断开,由该电流产生的磁场也立即消失。一次场的这一剧烈变化通过巷道周围导电介质传至回线周围的岩层中,并在岩层中激发出感应电流以维持发射电流断开之前存在的磁场,使空间磁场不会立即消失。由于介质的欧姆损耗,这一感应电流将会迅速衰减,这种迅速衰减的磁场又在其周围介质中感应出新的强度更弱的涡流,这一过程继续下去,直至岩层的欧姆损耗将能量消耗完为止。这便是岩层中的瞬变电磁过程场,伴随这一过程场存在的电磁

场就是岩层中的瞬变电磁场。

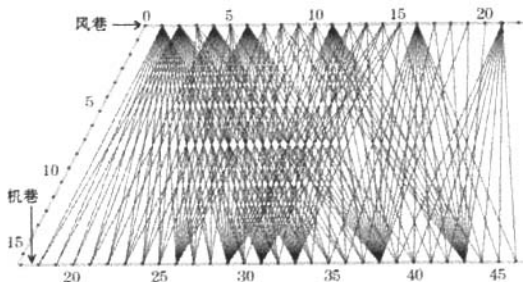
由于煤系地层的沉积序列比较清晰,在原生地层状态下,其导电性特征在纵向上有固定的变化规律,而在横向上相对比较均一。当存在构造破碎带时,如果构造不含水,则其导电性较差,局部电阻率值增高;如果构造含水,由于其导电性好,相当于存在局部低电阻率值地质异常体。综上所述,当煤层顶底板岩层内断层、裂隙和陷落柱等地质构造发育时,无论其含水与否,都将打破地层电性在纵向和横向上的变化规律。这种变化规律的存在,为以岩石导电性差异为物理基础的矿井瞬变电磁法探测提供了良好的地质条件。

## 3 实例分析

陷落柱与其周边的煤岩层的电性有明显差异(通常导含水陷落柱的电阻率值比煤层的电阻率值低得多),陷落柱的形成往往伴随着临近煤层的产状变化和裂隙发育,导致其周围煤层及顶底板裂隙发育并大量充水。这样的构造能够大量地吸收电磁波能量,反映在无线电波透视综合曲线上有明显的特征。

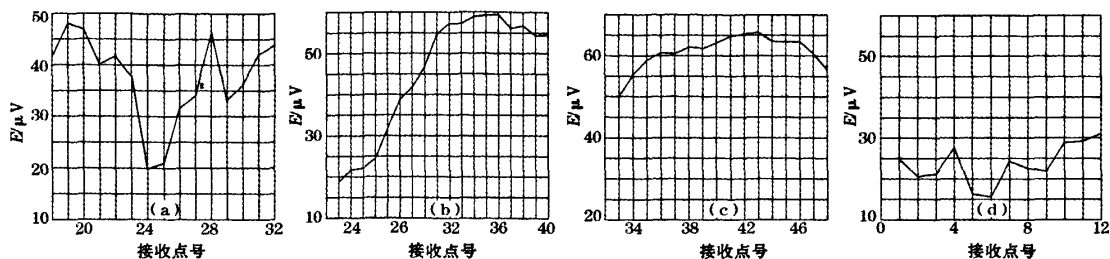
皖北矿区某煤矿7218工作面长820 m,宽150 m,层倾角小于 $10^\circ$ 。煤层赋存稳定,平均厚度4.8 m,煤以块状及碎块状为主,中间夹一层约0.4 m的炭质泥岩夹矸。在工作面掘进任务完成后,两巷道及工作面切眼未揭露较大的含水构造异常。距机巷迎头80~100 m范围内,煤层上帮出水,随后巷道内出现大面积淋水,初始水量为 $3 \sim 5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。为探测工作面煤层内的隐伏含水构造异常,立即采用无线电波透视法和矿井瞬变电磁法这2种物探技术对出水段进行重点探测。

无线电波透视方法采用12~19次定点覆盖测量(图2),接收点距10 m,发射点距为20~50 m,工作频率为0.5 MHz。从接收无线电磁信号可知,在



(图中数据标号以左上角为起点分别向下、向右以50 m点距进行标注。图4同。)

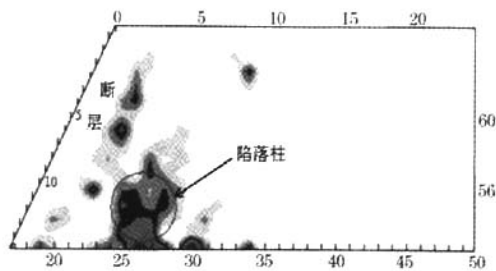
图2 7218工作面无线电波透视射线示意



a、b、c 分别为风巷的 1、5、15 号点发射在机巷接收的场强曲线, d 为机巷 25 号点发射在风巷接收的场强曲线

图 3 7218 工作面无线电波透视法场强曲线

7218 工作面机巷迎头上帮存在一明显异常区, 异常衰减值为  $-13 \sim -38$  dB。图 3 为定点观测曲线(仅对综合曲线中的场强曲线进行分析)。图 3a 和图 3b 曲线呈现“V”字型 and 半“V”字型, “V”型曲线主要是因为中间部分的接收点接收的场强信号受到低阻异常吸收的影响, 而半“V”型曲线说明接收点一侧的接收信号受到低阻异常体的影响。图 3c 为接近理论值的场强曲线, 说明在发射点和接收点的辐射范围内无低阻构造异常。图 3d 也呈现近“V”型曲线, 但其场强值相对较小, 主要因为发射点和接收点的辐射范围内均受低阻异常体的影响, 而图 3a 和图 3b 只有一部分受到影响。以上分析情况表明该低阻异常体距离机巷较近。采用综合曲线分析法和层析成像技术可得出如图 4 所示的解释结果, 即在距离迎头  $70 \sim 110$  m 范围内, 煤层内 20 m 处存在陷落柱构造异常。后经相应的防治水手段处理, 现工作面已经安全回采完毕。回采揭露表明: 在 7218 机巷迎头上帮 20 m 左右存在 1 个导水陷落柱(即 7218 陷落柱)。



(图中不同的灰度值代表煤层对电磁波的吸收能力)

图 4 7218 工作面视层析成像

从 7218 陷落柱段无线电波透视资料分析可知, 陷落柱中心位置的衰减值为  $-33 \sim -38$  dB, 在陷落柱的周围, 异常区幅度逐渐减弱, 衰减值为  $-13 \sim -33$  dB。因 7218 陷落柱位于现工作面中间, 两巷均有较好的探测环境。从该面无线电波透视场强有曲线表现出半“V”字、“V”字及漏斗形典型的水文特

征曲线。水文特征曲线之所以有多种形态, 原因为发射点位置与陷落柱位置是一种动态关系, 造成电磁波穿越陷落柱范围不一样。发射点远离陷落柱一侧时, 其接收场强曲线图呈漏斗状、“V”字形或半“V”字形(这主要取决于陷落柱的大小及与发射点的位置关系); 发射点靠近陷落柱一侧时, 其接收场强值整体远离理论探测曲线, 即呈现低值反映。

在利用无线电波透视方法探测的同时, 也采用矿井瞬变电磁法对其富水性及准确位置做进一步的测量。矿井瞬变电磁法的测点布置在工作面风巷和机巷之间的辅助巷道下山, 工作装置选择  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  重叠回线组合, 并靠近工作面侧帮。测点位置及探测方向见图 5, 探测结果经过时间—深度换算后得到深度视电阻率等值线拟断面(图 6)。

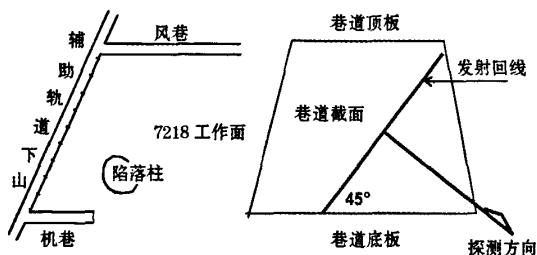


图 5 瞬变电磁法探测方向示意

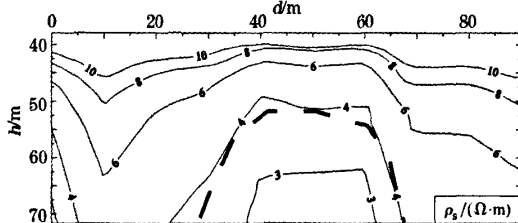


图 6 陷落柱视电阻率断面

根据全空间瞬变电磁场传播的“烟圈效应”理论, 瞬变电磁法勘探体积为一锥形体。由于井下瞬变电磁法为全空间响应, 其勘探体积是以回线为对称的锥形体, 在早期窗口, 探测深度较浅, 主要为近距离电性层瞬变响应, 由于锥形体半径较小, 基本局

限于煤层或包括少部分顶底板岩层,因此电性横向变化不大,视电阻率等值线横向变化均匀。随着时间的延迟,勘探体积和探测距离增大,涉及煤层顶底板岩层范围增大,电性变化复杂化。在视电阻率等值线拟断面图上,距离辅助轨道下山巷道水平距离为 50 m 左右,发育一宽度为 20 m(40 ~ 60 m 之间)的低阻异常区,视电阻率等值线呈半封闭状。

矿井瞬变电磁法和无线电波透视法对该地质异常的反映基本一致,根据已知的相关地质资料该异常区解释为陷落柱构造。为了确定异常范围和特征,在井下巷道不同位置布置了 5 个钻孔,根据钻孔出水点位置和岩芯取样情况综合分析,含水异常体为半径为 40 m 左右的陷落柱,发育位置距离辅助轨道下山巷道 50 m 左右。钻探结果与矿井瞬变电磁法和无线电波透视法探测结果完全吻合。

#### 4 结论

实践证明,物探技术具有探测能力强、效果高、成本低等优点,越来越多地被用于井下陷落柱的探测。针对目前的技术水平,在工作中,还应采用有效的综合物探的探测方法,选用多种有效物探技术,彼此互相补充,以便减少或避免因单一物探方法的多解性造成的解释误差。同时,要不断积累经验,探索正确的资料解释方法,并从中找出其规律性,以提高物探资料解释的准确性。此外,物探技术离不开地质工作,在探测中需要结合地质、水文、钻探等方面

资料进行综合分析,才能取得更好的探测效果,以适应煤矿安全生产的需要。

#### 参考文献:

- [1] 刘天放,李志聘. 矿井地球物理勘探[M]. 北京:煤炭工业出版社,1993.
- [2] 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.
- [3] 邵爱军. 煤矿地下水与底板突水[M]. 北京:地震出版社,2001.
- [4] 汤友谊,陈江峰,彭立世. 无线电波坑道透视构造煤的研究[J]. 煤炭学报,2002,27(3):254.
- [5] 董守华,王琦. 层析成像在巷道无线电波透视法中的应用[J]. 中国矿业大学学报,2003,32(5):579.
- [6] 王琦. 坑道无线电波透视层析成像中数字模型的设计与特殊处理[J]. 物探化探计算技术,1998,20(2):156.
- [7] 刘志新. 无线电波透视法在探测隐伏含水构造中的应用[J]. 工程地球物理学报,2005,2(3):185.
- [8] 王齐仁. 地下地质灾害地球物理探测研究进展[J]. 地球物理学进展,2004,19(3):497.
- [9] 曲寿利,王鑫. 国内外物探技术现状与展望[M]. 北京:石油工业出版社,2003.
- [10] 朱德兵. 工程地球物理方法技术研究现状综述[J]. 地球物理学进展,2002,17(1):41.
- [11] 岳建华,刘志新. 井-地三维电阻率成像技术[J]. 地球物理学进展,2005,20(2):407.
- [12] 王希良,彭苏萍. 深部煤层开采高承压水突水预报及控制[J]. 辽宁工程技术大学学报,2004,23(6):758.

## THE APPLICATION OF INTEGRATED MINING GEOPHYSICAL TECHNOLOGY TO DETECTING THE COLLAPSE COLUMN

LIU Zhi-xin, LIU Shu-cai, YU Jing-cun

( School of Resources and Geoscience, CUMT, Xuzhou 221008, China )

**Abstract:** The Integrated Mining Geophysical Technology for detecting the location and water content of the collapse column is put forward in this paper. The radio-wave penetration method can detect the relative locations of abnormal structures such as collapse columns, faults and thin coal layer areas, and the mine transient electromagnetic method can estimate the water-containing situation of these structures based on the variation of the resistivity in the detection range. Emphasis of this paper is placed on describing the application of the radio-wave penetration method and the mine transient electromagnetic method to exploring the collapsing column in No. 7218 working face coal layer. The obvious reflection of the radio-wave penetration method to the electrical property of the hydrated structure is discussed theoretically, the application of the synthetic curve method and tomography to data explanation is studied, and the hydrogeological characteristics shown by the "V" and semi-"V" synthetic curve are also explained.

**Key words:** integrated geophysical technology; radio-wave penetration method; mine transient electromagnetic method; collapse column

作者简介: 刘志新(1976-),男,安徽萧县人,中国矿业大学讲师,从事地球探测与信息技术的教学及科学研究工作。