

文章编号: 0253 - 9993 (2005) 06 - 0715 - 05

煤矿采空区及塌陷区的地球物理探查

刘菁华¹, 王祝文¹, 朱 士¹, 翁爱华¹, 夏安营²

(1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026; 2. 通辽市建筑工程质量检测中心, 内蒙古 通辽 128000)

摘 要: 通过前人工作实践, 总结了煤矿采空区的部分地球物理特征. 对营城煤矿未知采空区选择采用了高密度电阻率法、瞬变电磁法及放射性土壤测氡方法进行两个剖面的综合探查, 得出该煤矿采空区及塌陷区为低电阻率、高氡浓度异常特征.

关键词: 采空区; 塌陷区; 地球物理特征; 地球物理方法

中图分类号: P631 **文献标识码:** A

The geophysical exploration about exhausted area and sinking area in coal mine

LU Jing-hua¹, WANG Zhu-wen¹, ZHU Shi¹, WENG Ai-hua¹, XIA An-ying²

(1. College of Geoprospection Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Tongliao Construction Quality Checking Center, Tongliao 128000, China)

Abstract: Summarized the geophysical characteristics of exhausted area based on the former information of practices; and selected the HD (high density) resistivity method, TEM (Transient Electromagnetism) method and soil radon radioactive measurement method to make our measurement. Based on the two survey profiles in unknown exhausted area in Yingcheng, the results show that the geophysical characteristics of the exhausted area and sinking area are low resistivity and high radon concentration.

Key words: exhausted area; sinking area; geophysical characteristic; geophysical method

在煤层埋藏较浅的矿区, 由于小煤窑的随意开采, 存在许多不明采空区, 这些采空区的存在对煤矿安全生产构成极大威胁, 并对地面建筑、地面工程结构物的稳定造成危害. 因此, 对小煤窑巷道掘进采煤所遗空区的准确勘查, 了解和掌握采空区的地质构造、岩层特征、采矿条件, 查清采空区赋存深度、大小、状态以及覆岩与煤层的结构特征和物理、力学性质是人们普遍关心的问题. 煤矿地下采空区破坏了地基原有的应力平衡, 由此引发了采空区塌陷和持力层破坏等工程地质问题. 一般情况下, 采空区的塌陷在垂直方向上可分为 3 带^[1,2] (图 1):

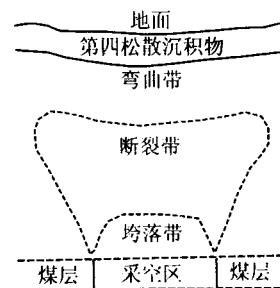


图 1 煤层采空区塌陷垂直“三带”示意
Fig. 1 Sketch map of sinking vertical “three zone” in the exhausted area of coal mine

(1) 垮落带: 煤层采空上部岩层出现坍塌.

(2) 断裂带: 坍塌带上方岩体因弯曲变形过大, 在采空区上方产生较大的拉应力, 两侧受到较大的剪应力, 因而岩体出现大量裂隙, 岩石的整体性受到破坏.

收稿日期: 2005 - 04 - 26

作者简介: 刘菁华 (1963 -), 女, 江西南昌人, 副教授, 博士研究生. Tel: 0431 - 7697096, E - mail: jinghua@jlu.edu.cn

(3) 弯曲带: 断裂带以上直到地面, 在自重应力作用下产生弯曲变形而不再破裂。

如果采空区较深、煤层较薄, 且上覆岩层坚硬, 则坍塌的可能性较小, 即使坍塌下沉, 对地面的影响也较小; 反之, 则对地面影响较大, 尤其是当采空区尚未充填密实, 如果建造高层建筑将诱发地基继续陷落。

通过地球物理方法, 查明采空区的位置、范围、深度, 对于地下及地面的安全, 同时对于治理起着指导作用。

1 煤矿采空区及塌陷区的地球物理特征

煤矿采空区及塌陷区的探查是一个复杂的问题, 众多学者对此进行过许多地球物理工作, 取得了一些较好的效果, 但具体的问题又有各自的特点。

煤层赋存于成层分布的煤系地层中, 被开采后形成采空区, 破坏了原有的地应力平衡。当开采面积较小, 且煤层顶板为塑性岩性并保存完整时, 由于残留煤柱较多, 应力转移到煤柱上, 未引起地层变动, 采空区以充水或不充水的空洞形式保存下来; 但多数采空区在重力和地层应力作用下, 顶板塌陷、垮落, 形成垮落带、断裂带和弯曲下沉带^[2]。这些地质因素的变化使得煤层采空区或其上部地层的地球物理特征发生变化, 通常表现为以下几个特征。

1.1 采空区及塌陷区面波特征^[3]

煤层采空区或采空塌陷区与完整地层相比, 地层变得疏松、密实度降低 (即单位体积内介质的密度降低), 同时使传播于其中的地震波速度下降。由于采空区形成的断裂、破碎、空洞等使得瑞利波传播到这些位置时将突然消失或产生散射。当采空区未发生塌陷时, 以空洞的形式保存下来, 瑞利波传播到这些位置时将突然消失或产生散射, 在频散曲线上反映为在采空区顶板处明显的“之”字形拐点, 且速度迅速下降, 依据这一特性, 可以在纵向上确定出未塌采空区的范围; 当采空区发生塌陷后, 引起煤层上部地层结构疏松, 使得传播于其中的瑞利波速度降低, 在频散曲线上反映受影响地段内瑞利波速度显著降低, 依据这一特性可以在横向上确定出塌陷区的范围, 在纵向上确定塌陷影响的范围。

1.2 煤矿采空区的地震波特征^[4]

由于煤层与其围岩一般情况下存在着明显的波阻抗差异, 当煤层具有足够厚度时, 便可形成良好的煤层反射波。但煤层采空及其顶板遭受破坏后, 在地震时间剖面上必然是反射波组的中断或消失, 同时煤层顶部结构的不规则破坏, 也将产生各种低频干扰。这些可作为识别采空区是否存在的标志。但多大范围的采空区在时间剖面上才能有反映, 这个问题依赖于地震记录的横向分辨率。在水平叠加时间剖面上, 地震记录的横向分辨率取决于第一菲涅尔带半径的大小, $r = v/2 \sqrt{t/f_c}$, 其中 v 为平均速度; f_c 为反射波主频; t 为反射波的双程旅行时间。从公式可知, 横向分辨率随深度的增加而降低, 随频率的提高得到改善。也就是说一个深部的地质体必须在横向上有较大的延伸长度才能与浅层较小的地质体产生同样的地震效应。在地震记录信噪比较高的情况下, 若地下地质体的尺度大于或等于第一菲涅尔带, 才能够在水平叠加时间剖面上分辨该地质体的存在。反之, 则不能。

1.3 采空区及塌陷区电性特征^[5]

(1) 电阻率特征 从理论上, 当煤层被采空以后, 短期内形成一定规模的充气空间, 造成采空区相应地层的电性与围岩电性不同, 经过一段时间后, 采空区上方岩层在重力作用下发生塌陷变形, 致使岩层破碎并出现裂缝, 地下水便沿破碎岩层和裂缝向采空区汇集并溶解大量的电解质。在水解作用下, 岩层中的钙、铁离子等呈游离状态存在。因此充水采空区具有低阻高极化率的电性特征; 由于垮落、断裂及离层现象的存在, 围岩具有电阻率高、低极化率的特征, 形变越大、电阻率越高。当断裂带不充水时, 出现高阻特征, 充水时呈现低阻特征, 据此可确定充水采空区的边界范围。

(2) 电磁波特征^[6~8] 当地下采空区分布极不规则, 无充填, 只保留有煤柱, 停采后, 经过多年的风化可能使煤柱遭受破坏, 导致整个采空区的顶板塌落, 并逐渐发展到地表, 引起地表开裂塌陷; 鉴于地下

塌落区岩体介质较松散，在应力拱的作用下，可能存在有一定规模的断裂。由于这两个原因，导致存在两种界面；一是岩体介质与空气或地下水的界面；二是致密岩体与松散岩体的接触界面。这两种界面都存在明显的电磁性差异，导致雷达波在传播过程中产生反射，可产生明显的反射界面。利用这一特性，即可圈定出采空区的分布范围，确定其埋深。瞬变电磁异常在采空区表现为低阻、高感应、高纵向电导。

1.4 采空区或塌陷区上土壤中放射性元素分布特征^[9,10]

在采煤过程中，地层将不断受到破坏。在地应力的作用下，采空区将会产生塌陷，由力学原理可知，当塌陷区呈现拱形时，承受力最大。所以没有填充的采空区在经过一段时间后，必定会形成拱形。由受力分析可知，在开采层上方的岩层中，将形成一对方向相反的平衡张力。张力作用的结果使采空区的上覆岩层的断裂增加，增大了岩层的透气能力，有利于氡向上运移。当采空区未塌陷时，形成的采空区由于其致密性差，通气性能好，氡气可不断地在此聚集，形成放射性元素的富集，氡气沿地层不断向上运移，在垂向地面土壤层中形成高氡浓度正异常。当发生塌陷区且延伸至地面，由于采空区上部岩层的裂隙度增加，微通道丰富，对氡气运移非常有利。在地温的差异、地下压力的差别、地下水的对流作用以及其他气体的携带作用下，使氡不断向上运移，但由于塌陷裂隙已延至地面，所以使氡保存条件受到破坏，使土壤中形成氡气受大气影响较大，所以氡浓度呈现较不稳定的正异常。依此可推断采空区及塌陷区的位置及范围。

2 营城煤矿未知采空区及塌陷区勘探

2.1 营城煤矿现状

九台营城煤矿位于松辽盆地内，成煤地层为下白垩统营城子组，煤层与酸性火山熔岩、火山碎屑岩等互层产出。主要岩性为砂岩、页岩、砂页岩。

营城煤矿经过上百年的开采，地下情况相当复杂，根据已有资料，以及地面塌陷的痕迹，实地现场踏勘可以看到许多采煤洞，多充水。为了解该区 60 m 以上地下采空区的情况，选择了高密度电阻率法、放射性土壤氡气方法和瞬变电磁法测量，对营城北区的采空区及塌陷区的地球物理特征进行勘探，以此来圈定该区采空区的位置、范围、埋深以及分布走向。

2.2 地球物理方法野外工作条件

通过对营城煤矿采空区地球物理特征的了解，选择两条相交剖面进行了高密度电阻率法、瞬变电磁法和放射性氡气测量，测线布置如图 2 所示，测线编号为 L_0 、 L_1 ，其中 L_0 为北西方向； L_1 为北东方向。

高密度电阻率法采用重庆地质仪器厂生产的 DUK-2 高密度电阻率仪，野外测量采用每次 60 根电极，电极距 5 m，温纳排列装置。

测氡法使用上海仪器厂的 FD-3017RaA 测氡仪，测量点距为 20 m，取样深度为 80 cm，取气体积为 1.5 L，测量条件为 2 min 高压，2 min 测量。

瞬变电磁测量所用仪器是从美国进口的 GDP32 多功能电测仪，采用共点回线方式，装置参数：发射回线 50 m × 50 m。工作频率 16 Hz，发射电流 6.0 ~ 8.3 A。接收线圈 10 匝，面积 1 m²。测量点距为 25 m。

2.3 剖面分析

(1) L_0 剖面分析 对 L_0 剖面进行的高密度电阻率法、测氡法、瞬变电磁法的测量，结果如图 3 (a) ~ (c) 所示。从图 3 (b) 中高密度电阻率断面图可看出，从地表至地下 60 m 的深度，电阻率的变化为几 $\cdot m$ 至 200 $\cdot m$ ，表层 5 ~ 15 m 为一层低阻层，电阻率为 20 ~ 50 $\cdot m$ 不等，15 m 以下，电阻率从西至东电阻率值高一低—高一低相间变化，表层低阻与地下低阻有的相连，有的不相连。表层高阻

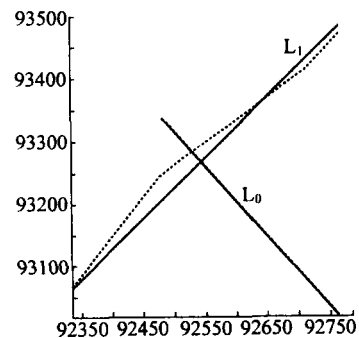


图 2 测线布置

Fig. 2 Survey line layout

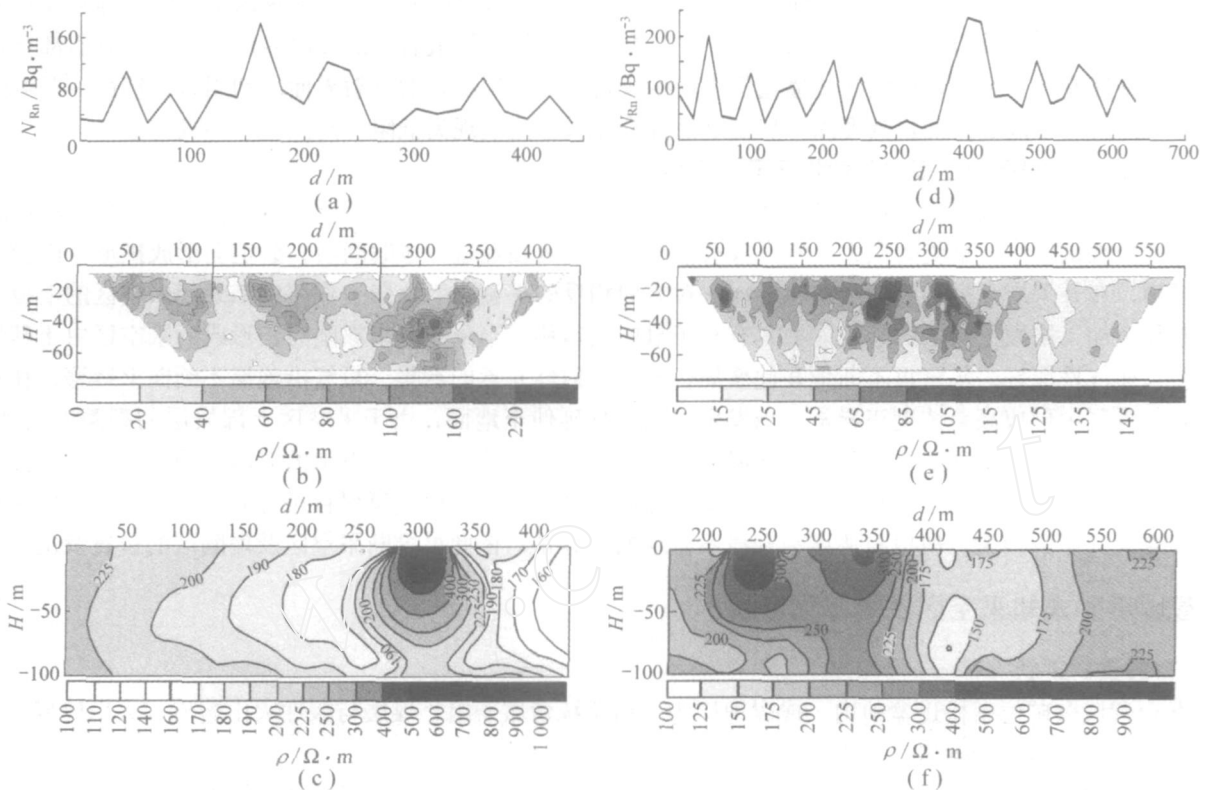


图 3 L_0 剖面 (a), (b), (c) 和 L_1 剖面 (d), (e), (f) 综合对照

Fig. 3 Synthetical comparison map of L_0 and L_1 profile

(a), (d) 氡浓度剖面; (b), (e) 高密度电阻率反演断面; (c), (f) 瞬变电磁反演电阻率断面

为盖层, 多为碎屑岩, 地下低阻为采空区充水后的反映, 当发生塌陷时, 地表的火山碎屑岩与采空区相连, 形成低阻反映, 因此可以判断塌陷区的范围, 地下高阻为残留煤柱。

氡浓度剖面曲线 (图 3 (a)) 的反映为前 250 m 氡浓度较高, 250 ~ 350 m 为低氡浓度, 350 ~ 450 m 为中高氡异常, 分别反映了采空区、残留煤柱、塌陷区。其原因是在采区空裂缝发育, 且采空区的存在, 更有利于氡的聚集, 所以在采空区上方覆盖层中可测到较高氡浓度, 出现氡异常; 而在塌陷区, 由于地表覆盖层下塌与下覆地层的相连, 形成较发育的断裂, 所以氡向地表的迁移通畅, 但此时氡气保存条件差, 所以形成氡异常不高; 而在残留煤柱处, 由于煤层的孔隙及断裂不发育, 上覆地层的应力破坏较小, 地层断裂不发育, 所以不利于氡的运移, 因此在地表覆盖层中形成低氡浓度。

瞬变电磁电阻率反演断面图 (图 3 (c)) 与高密度电阻率反演断面图 (图 3 (b)) 具有较好的一致性, 表现为低阻与高阻相间变化的特征, 反映了采空区与煤柱体及塌陷区横向变化, 断面上的高阻明显地反映了残留煤柱的存在, 与氡浓度剖面的低氡浓度异常较好地对应, 同时反映采空区的低阻位置与氡浓度的高氡浓度位置也有较好的对应关系。

(2) L_1 剖面分析 从图 3 (d) 综合剖面图中氡浓度测量剖面可以看出, 曲线分为 3 段: 第 1 段从 0 ~ 270 m, 氡浓度曲线表现为锯齿状, 浓度值在 50 ~ 200 Bq/m³, 为中等氡浓度; 第 2 段从 270 ~ 360 m 之间, 曲线表现较平缓, 浓度值为 40 Bq/m³, 为低氡浓度; 第 3 段从 360 ~ 630 m 之间, 曲线变化较剧烈, 氡浓度值高, 在 100 ~ 250 Bq/m³。这 3 段分别反映了塌陷区、煤柱体及采空区, 解释的原因同 L_0 剖面。

从高密度电阻率断面图 (图 3 (e)) 可看出, 断面分为 3 段: 第 1 段 0 ~ 200 m, 30 m 以上为较高电阻率, 电阻率为 45 ~ 85 $\Omega \cdot m$, 30 m 以下为较低电阻率, 电阻率为 5 ~ 45 $\Omega \cdot m$; 第 2 段 200 ~ 330 m, 出现两相间的高阻体反映, 电阻率在 125 ~ 145 $\Omega \cdot m$, 两者以低阻相隔, 60 m 以下为低阻反映; 第 3 段

330 ~ 600 m, 为低阻反映, 从地面到地下 70 m 都为低阻, 电阻率为 15 ~ 25 $\Omega \cdot m$ 左右. 这 3 段分别可解释为塌陷区、残留煤柱、采空区, 原因为由于塌陷, 使地面的地层下塌, 填充采空区, 使塌陷区形成下部充水, 上覆盖层相联的情况, 所以电阻率断面上就形成下部低阻, 上部较高电阻率; 对于残留煤柱, 为高阻反映; 对于采空区, 由于充水, 所以为低阻反映.

瞬变电磁电阻率断面图与高密度电阻率断面图相一致, 200 ~ 370 m 处为煤柱, 其形态更好地反映了煤柱体的存在. 370 ~ 600 m 为低阻反映, 为采空区的位置及范围.

以上 3 种方法对于采空区、塌陷区及残留煤柱位置, 范围的判断是一致的.

3 结 论

通过以上分析, 对于营城煤矿采空区、塌陷区的地球物理特征可归为:

- (1) 采空区的电阻率为低阻, 氡浓度为高正异常.
- (2) 塌陷区的电阻率上部为高阻, 下部为低阻; 氡浓度曲线为锯齿状, 波动较大, 浓度值为中等, 50 ~ 100 Bq/m³.
- (3) 残留煤柱电阻率为高阻, 氡浓度为低值.

由于地质资料的缺乏, 所以解释推断没有已知资料作为验证, 但综合地球物理勘探方法可以互相佐证, 综合判断, 使解释与推断更趋合理.

在野外数据测量过程中得到了王晓丽、徐波等研究生及 2001 级本科生的帮助, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 韩许恒, 郁春霞. 氡射气探测在采空区勘察中的应用 [J]. 工程勘察, 1996 (5): 63 ~ 66.
- [2] 刘 辉, 程建远. 层地震在采空区工程勘察中的应用 [J]. 江苏地质, 1998 (1): 39 ~ 41.
- [3] 常锁亮, 张淑婷, 李贵山, 等. 多道瞬态瑞利波法在探测煤矿采空区中的应用 [J]. 中国煤田地质, 2002, 14 (3): 70 ~ 72.
- [4] 靳聚盛. 地震勘探方法圈定老窑采空区 [J]. 中国煤田地质, 1998, 10 (3): 39 ~ 41.
- [5] 李焕春, 张有朝, 王士平. 高密度高分辨电阻率法在采空区“三带”的探测研究 [J]. 河北煤炭, 1999 (2): 38 ~ 40.
- [6] 刘红军, 贾永刚. 探地雷达在探测地下采空区范围中的应用 [J]. 地质灾害与环境保护, 1999, 10 (4): 73 ~ 76.
- [7] 路军臣, 苏维涛, 张济怀. 瞬变电磁法在探测小窑采空区中的应用 [J]. 河北煤炭, 2002 (2): 39.
- [8] 任基林, 邓金灿, 苏亚汝, 等. 瞬变电磁法在探明某矿区采空区方面的应用 [J]. 矿产与地质, 2001, 15 (3): 221 ~ 224.
- [9] 段鸿杰, 唐岱茂, 曹为民. 测氡技术圈定采空区影响边界的应用 [J]. 华北地质矿产杂志, 1999, 14 (1): 71 ~ 76.
- [10] 郭崇光, 李敬宇, 刘 君. 氡气测量在山西采空区探测中的应用 [J]. 科技情报开发与经济, 2004, 14 (1): 180 ~ 181.