

文章编号:1000-582X(2011)08-090-07

煤层底板变形与破坏规律直流电阻率 CT 探测

高召宁^{a,b}, 孟祥瑞^b, 赵光明^b

(安徽理工大学 a. 矿业工程博士后流动站; b. 煤矿安全高效开采省部共建教育部
重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘要:从煤层开采引起底板破坏的一般规律出发,探讨了底板岩层破坏与其电阻率的响应关系。介绍了直流电阻率 CT 探测技术的原理与方法,按照采动底板岩层活动规律设计了探测方案,进行煤层底板破坏深度的动态直流电阻率 CT 探测。通过在淮北某矿 1028 工作面风巷中底板位置施工 2 个钻孔,在孔中埋置一定数量电极,形成孔间探测剖面,并根据工作面回采进度探测不同时期岩层电场变化特征,反演其电阻率值,得出煤层底板采动裂隙演化过程中的岩层电阻率响应特征和 1028 工作面底板破坏深度为 17 m,为煤矿安全生产提供直观有效的技术参数。试验结果表明:采用直流电阻率 CT 探测煤层底板采动破坏带演化过程效果明显,能显示出底板在回采过程中变化破坏情况,有利于煤矿底板突水预测和突水防治措施的制订。

关键词:直流电阻率 CT 探测;底板破坏;正演模拟;反演模拟

中图分类号:TD 325

文献标志码:A

DC electrical resistivity CT survey of deformation and damage law of coal floor

GAO Zhao-ning^{a,b}, MENG Xiang-rui^b, ZHAO Guang-ming^b

(a. Mobile Center of Post doctor Science and Research of Mining Engineering; b. Key Laboratory of Coal mine Safety and High Efficiency Mining Cosponsored by Province and MOE, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, P. R. China)

Abstract: Based on the general laws of the floor damage caused by coal mining, the response relation between the floor rock damage and its electrical resistivity are mainly discussed. Then, the principle and method of the direct current electrical resistivity CT surveying technology are introduced. The survey plan is made according to movement characteristics of mining rock strata in floor, and the dynamic direct-current resistivity CT survey is then applied to predict the damage depth of coal floor. In the return airway of face 1028 in Huaibei Mine, two boreholes were drilled in the coal floor, with a certain number of electrodes buried in the holes, the survey profile was formed between them. With characteristics of electric fields in rock strata in different time measured according to advance of working face, and its electrical resistivity values simulated inversely, the responses of rock strata to electrical resistance during the evolution of fractures were obtained and the damage depth of coal floor in face 1028 was determined to be 17m, which

收稿日期:2011-03-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51074003,51074005);高等学校博士学科点专项科研项目(200803610001);高等学校博士学科点专项科研项目新教师类(20093415120001);安徽省优秀青年科技基金资助项目(10040606Y31);安徽高校省级自然科学研究重点资助项目(KJ2009A66)

作者简介:高召宁(1971-),男,副教授,博士后,主要从事采矿工程的教学和科研工作,(Tel)15855463684;
(E-mail)gaozn1207@sohu.com。

provides visual and effective technical parameters for the coal mining safety. Test results show that direct current electrical resistivity CT technique can detect coal floor mining damage evolution process effectively, and illustrate the floor deformation and damage in the process of mining, which is conducive to the water-inrush forecast, prevention and control.

Key words: direct current electrical resistivity method; floor damage; forward simulation; inverse simulation

随着煤矿开采不断延深,煤层底板突水威胁日趋严重。煤层底板突水是底板受采动矿压和水压共同作用的结果。在工作面回采过程中,煤层底板因应力变化产生变形、破坏而形成一定深度的破坏带,削弱了岩体的隔水性能。当承压水沿导水裂隙进一步侵入,岩体因受渗水软化而导致裂隙继续扩展,直至底板岩体的最小主应力小于承压水水压时,便产生压裂扩容,发生突水,因此,准确地探测煤层底板破坏深度乃至实时监测其动态发育演化过程对于煤矿防治水措施的制定及突水预测都是至关重要的^[1-3]。

20 世纪 80 年代以来,国内许多学者进行了大量的顶底板采动破坏现场观测研究,常用的观测方法有钻孔注水法、电磁波法、钻孔声波法、超声成像法和震波 CT 技术^[4-7]。但是,受技术方法条件的限制,对岩层变形与破坏的判断准确率低,如地震波法现场施工中震源操作不易控制,工序烦琐;电磁波法(如瞬变电磁法)主要用于中深部水文勘探,抗干扰能力较直流电阻率 CT 技术低,受人为设施干扰大,存在浅部勘探盲区,成本高等缺点。直流电阻率 CT 技术相对于电磁波法技术,理论方法比较成熟,施工技术简单,抗干扰能力强,且成本较低,该技术主要应用于浅部的水文勘探工作。因此,为了能够连续观测采动过程中煤层底板变形与破坏过程,首次在淮北某煤矿 1028 工作面采用孔间与孔内直流电阻率 CT 测试技术,获得了相对准确的测试结果。通过观测 1028 工作面回采过程中底板岩层电阻率的变化,获得了回采过程中底板的最大破坏深度,为矿井安全开采提供了更加科学的依据。

1 煤层底板破坏的电阻率响应

工作面在开采过程中,破坏了原岩应力场的平衡状态,引起了应力重新分布。在老顶岩层尚未破断以前,老顶将被煤体所支撑,此时可将老顶岩层视为固支梁,它与采空区前后支撑体形成一完整的结构体系,承受上覆岩层的载荷,并把这种载荷向四周传递,形成支承压力。随着回采工作面的推进,上覆岩层形成的结构经历稳定—失稳—再稳定的周期性过程,以及采空区为岩体的移动提供了自由空间,促

使采场周围的应力再次发生改变,在工作面前方形成了超前支承压力,它随工作面推进而不断推移。在工作面后方,采空区冒落矸石将逐渐进入压实状态,支承压力逐渐恢复到原岩应力状态,由于支承压力的作用,对采场周围岩层变形产生影响。

在采动影响下,工作面前方底板岩层由于受超前支承压力的作用而处于增压区内,使该处的煤层底板受到压缩,岩层内部垂直于支承压力的原始裂隙出现闭合或压密,岩石电阻率有所降低,但幅度不大,该区称为压缩区。在工作面后方,由于采空区范围内底板应力的释放,这部分底板岩层从压缩状态转为膨胀状态,由于应力释放,还可能出现垂直裂隙与层间裂隙贯通,特别是在回采工作面后方 10 m 左右,膨胀比较剧烈,该区称为膨胀区,由于煤层底板岩性常为泥岩或砂岩,加之煤层回采时降尘喷水和顶板岩层淋水,底板破坏带多为含水状态,因此,因充水膨胀区岩石的电阻率大幅下降。当底板岩体处于采空区重新压实的冒落矸石下时,扩张的裂隙部分闭合,又从膨胀状态转为压实状态,重新压实区电阻率有所增高,但与原岩相比还是低阻。从已有的研究来看,过渡区电阻率与原岩变化不大^[8-10]。因此,随着底板岩体经历原岩应力—支承压力增大—支承压力减小—支承压力恢复的变化,其电阻率也做出相应的变化,据此,通过开采前的电法背景测试,可得到原岩应力条件下的电阻率图像。在开采期间连续监测,可得到底板电阻率的连续变化图像;在开采后,持续监测一段时间,可得到其稳定后的电阻率图像。通过不同阶段的电阻率变化情况,可以准确地判断底板岩体的破坏程度和深度。

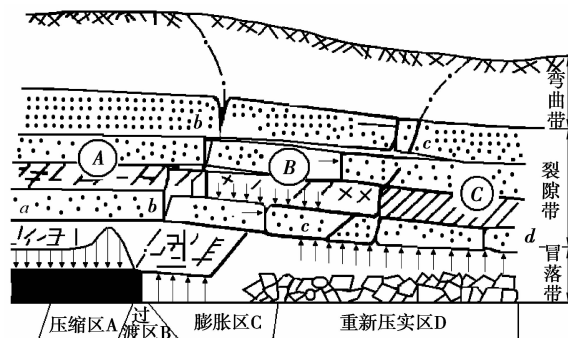


图 1 底板岩层变形分区示意图

在此要强调的是,若破坏带内不含水,则破坏带的电阻率值会升高,升高的幅度越大,则破坏越完全,电阻率值没有明显变化区域,即为未破坏区;若破坏带内充水,则该破坏带内的电阻率值会明显降低。工作面底板的原始导升带在矿山压力和地下水压力作用下向上发展,低阻带会向上发展。

2 直流电阻率 CT 探测技术

直流电阻率 CT 探测法在井下巷道中进行,通过布置在巷道底板的供电电极在岩层中建立起全空间稳定电场,该稳定场空间分布电性特征取决于巷道周围岩层的赋存状态。

测试电极分别布置在巷道底板不同位置的钻孔内,通过多条测线可以形成立体电场观测空间,获得相应的立体电位数据。采用如图 2 所示的装置在大地中建立稳定电流场^[11-12]。

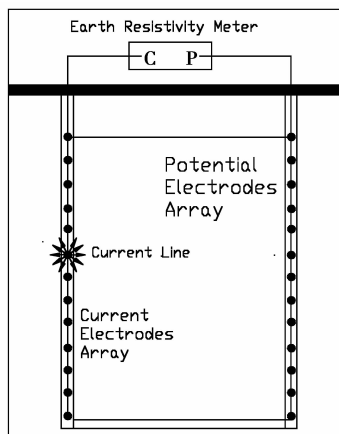


图 2 直流电阻率法 CT 探测系统

由于煤层底板倾角不大,符合二维层状大地地电特征,根据二维点电源稳定电流场理论,可知稳定电场强度向量和电流密度向量分别为:

$$\mathbf{E} = -\nabla U = -\text{grad}U, \quad (1)$$

$$\mathbf{J} = -\sigma \nabla U. \quad (2)$$

式中: \mathbf{E} 为电场强度向量, U 为电位, σ 为岩石的电导率。

2.1 正演计算

正演计算是根据所建立的电阻率模型来推导测试区域内任意点供电时,电场分布空间内其它各处的电位响应值。对于点源二维地电问题,选取 y 轴平行于地质体走向,因此,地电参数只在 x, z 方向发生变化,而在 y 方向上无变化,则建立正演模型为:

$$\nabla \cdot (\sigma(x, z) \nabla U(x, y, z)) = -I \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0). \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial n} + \gamma U \right) \Big|_{\Gamma} = 0. \quad (4)$$

利用傅立叶变换,结合有限元理论,由正演模型和边界条件得泛函方程为:

$$J(\varphi) = \iint_D \left\{ \sigma \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] + \beta \varphi^2 - 2f\varphi \right\} dx dz + \oint_{\Gamma} \sigma \gamma \varphi^2 ds. \quad (5)$$

式中: D 为研究区域, Γ 为 D 的边界, φ 为目标函数。

通过对泛函取极小,便可满足正演模型和边界条件。要实现极小泛函的求取,需将研究区域 D 按有限元网格划分法划分成多个小三角单元,联立所有小三角单元极小泛函方程,可形成正演问题的一般表示形式为:

$$\mathbf{K}\Phi = \mathbf{I}. \quad (6)$$

式中: \mathbf{K} 为刚度矩阵, Φ 为电位 U 的傅立叶变换函数, \mathbf{I} 为与供电点有关的列向量。

解方程组(6),可得各网格节点 φ 值,再经过反傅立叶变换,获得各网格节点的真实电位响应值。

2.2 反演迭代

通过正演计算,获得计算电位响应值,然后将计算值与实测值进行比较、拟合,不断迭代修正模型电阻率值,直至拟合精度达到要求。

对于非线性的反演问题,实测数据体 \mathbf{d} 是模型参数矩阵 \mathbf{m} 的一个非线性函数,即 $\mathbf{d} = g(\mathbf{m})$,而阻尼最小二乘法正是这种非线性拟合度达到最小的一种方法,有:

$$\mathbf{S}(\mathbf{m}) = (\mathbf{d}_{obs} - g(\mathbf{m}))^T \mathbf{W}_d (\mathbf{d}_{obs} - g(\mathbf{m})). \quad (7)$$

其中: \mathbf{d}_{obs} 是观测数据, $g(\mathbf{m})$ 是正演计算数据, \mathbf{W}_d 是权矩阵。

根据理论计算值与实测值之间的比较、拟合,如果两者之间的误差未达到给定精度要求时,可不断的重复修正模型参数。在每一次迭代过程中,模型都需更新矩阵 $\Delta \mathbf{m}$, $\Delta \mathbf{m}$ 是将非线性转为线性化的等价方式,即:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{W}_d \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I}) \Delta \mathbf{m} = \mathbf{J}^T \mathbf{W}_d \cdot (\mathbf{d}_{obs} - g(\mathbf{m})). \quad (8)$$

其中: $\mathbf{J} = \frac{\partial g(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}}$ 为灵敏度矩阵或称雅各比矩阵, λ 是阻尼因子。通过正演计算、反演迭代和模型修正,最终获得探测区域反演图像的重建。

3 直流电阻率 CT 探测系统布置

选择 1028 工作面回风巷作为实施地点,在巷道较为平整且无构造段布置底板测试钻孔。为方便表达,可直接对比底板钻孔之间形成的垂向剖面,进行岩层变形与破坏特征分析。

3.1 探测钻孔布置

本次探测在 1028 工作面回风巷底板布置 2 个钻孔,2 孔水平间距 5 m,孔间剖面处于同一垂面上,2 孔与巷道轴向线间保持 90°夹角。结合矿井实际情况,ZK1 终孔深度 54 m,竖直向下,孔内布置套管 20 m,浅部 30 m 钻孔直径 91 mm,深部钻孔直径 75 mm;ZK2 实际终孔深度 21 m,竖直向下,距 10 煤底板 5 m 内布置套管,孔径 91 mm。图 3 为 ZK1 和 ZK2 钻孔布置示意图。

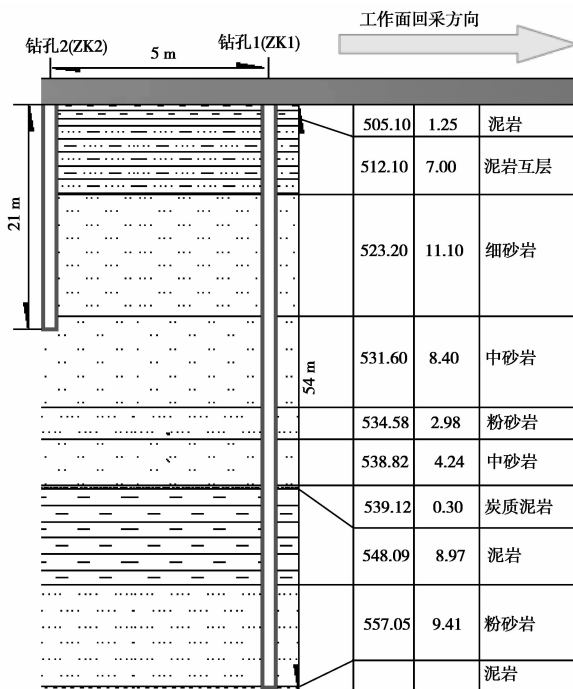


图 3 测试钻孔剖面图

由于钻孔 ZK1 和 ZK2 的探测目的有所区别,ZK1 主要探测巷道底板深部裂隙的发展规律,ZK2 主要探测巷道底板浅部裂隙的发展规律。因此两孔中布置的电极也不相同,其中 ZK1 中布置测试铜电极 8 个;ZK2 中布置测试铜电极 10 个,形成探测区域剖面。电极安装结束后即采用水泥浆封孔,保证电极与钻孔岩层之间的完全耦合,可以有效地收集岩层变形与破坏过程中的地电场变化特征。同时孔口加以盖板,盖板的直径大于 150 mm,盖板厚度要求能耐压 5 MPa,与变径套管采用法兰连接,变径套管长度大于 300 mm,避免因人为施工钻孔形成的导水通道而引发突水。

3.2 探测工程量

2009 年 12 月 29 日工作面距离 ZK2 探测孔 75 m 处,第一次获得岩层电阻率分布,此时测试为背景场值。为保证获得煤层采动全过程数据,后续

监测结合作业面回采进度情况进行了测试,2010 年 1 月 22 日工作面推过孔口 25 m,现场数据采集结束,共获得了 4 组测试数据。

4 数据处理与分析

直流电法数据处理主要是先利用自编电法勘探系统解析软件进行数据解编—电流、电位奇异点剔除—多种装置数据提取—AGI 文件格式转换,然后将转换数据文件导入专用孔间电阻率透射 CT 成像软件进行数据反演,获得孔间岩层电阻率图像。选取 ZK2 与工作面风巷交点为坐标系原点,沿工作面回采方向为 X 正向,沿风巷底板深度方向为 Y 轴负方向建立笛卡尔空间直角坐标系,形成空间区域并进行网格单元划分。综合考虑反演计算精度和实际有效测试区域特点,本次探测采用矩形网格划分方式,单元边长 0.5 m,共划 108×10 个网格,利用各点电极所采集的发射电流和测量电位,进行空间电阻率反演,可获得测试区域电阻率分布图。根据钻孔剖面位置切取其电阻率剖面,以便进行底板岩层电阻率的时空对比与特征分析。

4.1 底板岩层背景电阻率分布

图 4 为 ZK1 和 ZK2 跨孔间岩层背景电阻率 CT 切片,此时工作面距 ZK2 钻孔 75 m。

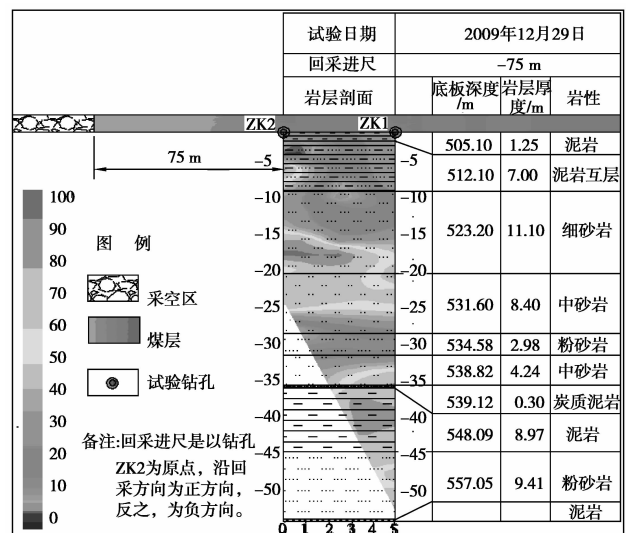


图 4 岩层背景电阻率 CT 反演切片图

从图 4 可以看出,巷道底板下岩层电阻率值高低起伏,探测深度 0~54 m 范围内主要表现出 4 个电性分带:0~15 m 范围内由浅至深岩性由泥岩和砂泥互层变至砂岩,通常情况下,砂岩电阻率值略高于泥岩电阻率值,但受地质条件影响,电阻率值表现出动态变化。1028 工作面探测钻孔初始时受孔内

含水影响,岩性电阻率值均为几十 $\Omega \cdot \text{m}$ 左右,砂岩和泥岩电阻率值差异不大。0~15 m 段岩层电阻率值为 10~35 $\Omega \cdot \text{m}$,符合实际岩层电性分布规律,可为后续探测提供良好基础。底板深度 10m 处电阻率值相对较低,根据现场情况,判断该段低阻是由两钻孔内布置的套管引起的;15~25 m 段岩层由细砂岩和中砂岩组成,电阻率值为 40~100 $\Omega \cdot \text{m}$,砂岩在含水时,电阻率值表现在该范围;25~33 m 段岩层由粉砂岩和中砂岩组成,电阻率值为 0~30 $\Omega \cdot \text{m}$;33~54 m 段主要为泥岩和粉砂岩且内部空隙少,导水效果相对较差,电阻率值为 40~100 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

综上所述,背景测试电阻率值与实际地质条件对应较好,且具有成层状,可作为岩层测试背景值,方便与后续测试结果对比。

4.2 超前支承压力区底板岩层电阻率分布

在采矿活动过程中,受超前支承压力影响,底板岩层受力状态发生改变,其内部裂隙发生一定程度闭合导致其电性特征改变,使得电阻率值明显降低。图 5 为工作面距 ZK2 钻孔 31 m 时的测试剖面。从图 5 可以看出:0~15 m 段岩层电阻率值与背景电阻率值相比,有降低趋势,但电阻率值总体表现较高;15~20 m 段岩层电阻率值降低明显,从背景值的 40~100 $\Omega \cdot \text{m}$ 降为 0~30 $\Omega \cdot \text{m}$;20~25 m 段岩层电阻率值变化不明显;25~33 m 段岩层电阻率值相对背景电阻率值为 40~100 $\Omega \cdot \text{m}$,电阻率值较背景值有所升高;33~54 m 段岩层电阻率值基本无变化。综合背景条件下岩层电阻率值变化结果分析,认为其采动影响超前距离在 31 m 以上。

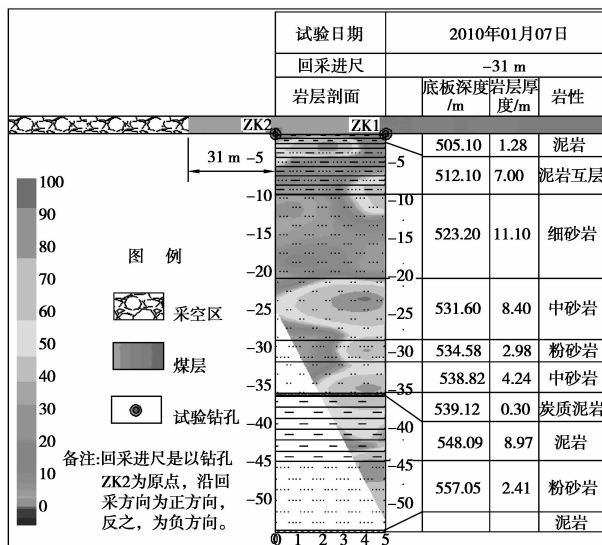


图 5 工作面前方岩层电阻率 CT 反演切片图

4.3 工作面附近岩层电阻率分布

随着回采工作面距离 ZK2 钻孔越近,煤层底板应力变化越大,钻孔处底板受顶板压力影响,岩层受到压缩垂向裂隙发育。图 6 为工作面推至 ZK2 孔口附近时 ZK1 和 ZK2 间电阻率 CT 切片。从图 6 看出,底板下 0~15 m 段岩层电阻率值降低,且低阻范围有所增大;15~25 m 段岩层电阻率值与上次探测结果相比,变化不太明显,仍然存在两带性,分别为 15~20 m 段和 20~25 m 段;25~33 m 段岩层电阻率值同上次相比,无明显变化;33 m~54 m 段岩层电阻率值同上次测试值相比,岩层电阻率降低,这是由于承压水导升高度上升引起的结果。

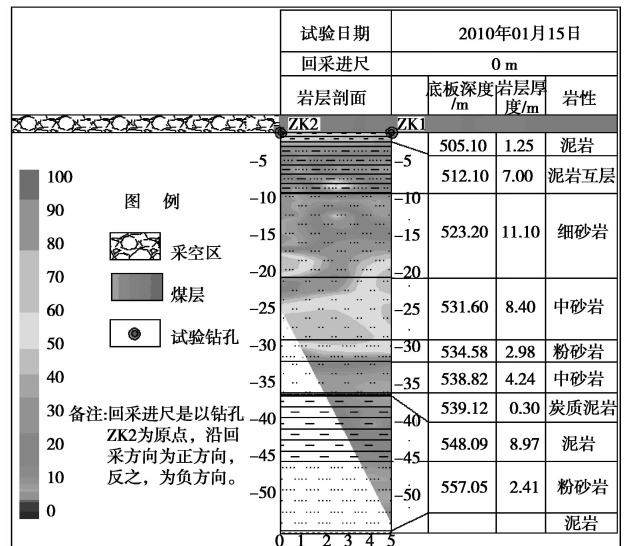


图 6 工作面附近岩层电阻率 CT 反演切片图

4.4 采后底板岩层电阻率分布

图 7 为工作面推过 ZK2 孔口 25 m 时 ZK1 和 ZK2 间电阻率 CT 切片。由于工作面已推过钻孔 25 m,工作面后方采空区内探孔附近巷道顶板垮落不完全,致使巷道底板应力释放,底板岩层从压缩状态转为膨胀状态,出现垂直裂隙与层间裂隙贯通,由于煤层回采时降尘喷水和顶板淋水,底板破坏带多为含水状态,因此,膨胀区内充水岩石的电阻率大幅下降。与前 3 次 CT 反演切片对比分析可知,底板下 0~17 m 范围内,岩层电阻率值局部降低明显,低阻区呈水平条带状,表明该段岩层受煤层开采,发生破坏;17~25 m 段电阻率值与开采前相比,变化不明显;25~33 m 段电阻率值基本恢复到开采前状态,表明岩层在整个探测阶段受采动影响,发生动态弹性变形,岩层结构本身变化不大;33~54 m 段岩层电阻率值也有所恢复。

综上所述,并结合相关地质资料,可以认为

1028 工作面由于煤层开采,工作面底板破坏带深度为 17 m,即 0~17 m 为底板破坏影响带,岩层中垂向裂隙和横向裂隙发育明显;17~33 m 段底板岩层受煤层开采影响较小,对底板破坏具有保护作用。但是 33~54 m 段随工作面的推进,岩层电阻率有所降低,是由于承压水导升高度上升引起的。

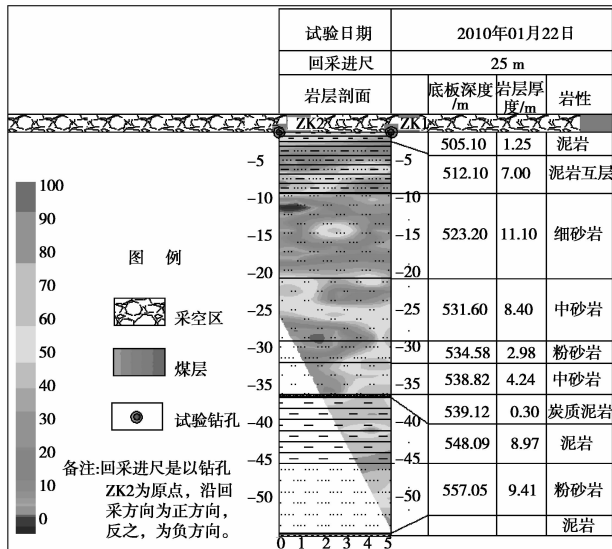


图 7 工作面后方岩层电阻率 CT 反演切片图

5 结 论

应用直流电阻率 CT 探测法进行开采过程中煤层底板破坏带动态的实时监测还处于起步阶段,有许多问题需要深入研究。通过本工作,可以得出以下结论:

1) 根据煤层底板变形破坏产生超前压缩区、过渡区、膨胀破坏区及重新压缩区这一特征,建立煤层开采前和开采后地电模型,得出 1028 工作面因其开采深度较大,受采动矿压的作用,加之原始裂隙的影响,底板破坏深度达 17 m。

2) 岩体电阻率随采动支撑压力影响的变化显著,且主要与岩体的岩性、含水性有关。对于煤层底板为泥岩或砂岩充水时,底板破坏带电阻率会大幅度下降。

3) 实测结果表明,根据采动过程中岩层电阻率值的时空变化,可以清晰分辨出岩层结构破坏及裂隙发育,能显示出在回采过程中不同时间的底板变形与破坏变化情况,有利于底板水情的监测和突水预防措施的制定。

4) 依据直流电阻率 CT 探测的思想,探测回采工作面底板破坏及裂隙发育,技术方法可行,准确率高,效果明显,推广应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 尹尚先,虎维岳,刘其声,等. 承压含水层上采煤突水危险性评估研究[J]. 中国矿业大学学报,2008,37(3): 311-315.
YIN SHANG-XIAN, HU WEI-YUE, LIU QI-SHENG, et al. Risk assessment for water inrush from confined aquifers located under coal seams[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(3): 311-315.
- [2] 李连崇,唐春安,李根,等. 含隐伏断层煤层底板损伤演化及滞后突水机理分析[J]. 岩土工程学报,2009,31(12): 1838-1844.
LI LIAN-CHONG, TANG CHUN-AN, LI GEN, et al. Damage evolution and delayed groundwater inrush from micro faults in coal seam floor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(12): 1838-1844.
- [3] 高召宁,孟祥瑞. 采动条件下煤层底板变形破坏特征研究[J]. 矿业安全与环保,2010,37(3):17-20.
GAO ZHAO-NING, MENG XIANG-RUI. Study on deformation characteristics of coal floor with mining influence [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2010, 37(3): 17-20.
- [4] 施龙青,朱鲁,韩进,等. 矿山压力对底板破坏深度监测研究[J]. 煤田地质与勘探,1997,32(6):20-22.
SHI LONG-QING, ZHU LU, HAN JIN, et al. Monitor study on broken floor depth caused by underground pressure[J]. Coal Geology and Exploration, 1997, 32(6): 20-22.
- [5] 张红日,张文泉,温兴林,等. 矿井底板采动破坏特征连续观测的工程设计与实践[J]. 矿业研究与开发,2000,20(4):1-4.
ZHANG HONG-RI, ZHANG WEN-QUAN, WEN XING-LIN, et al. Design of continuous observation work on mining failure feature in the floor of mine and its practice [J]. Mining Research and Development, 2000, 20(4): 1-4.
- [6] 高延法,李白英. 受奥灰承压水威胁煤层采场底板变形破坏规律研究[J]. 煤炭学报,1992,17(2):32-39.
GAO YAN-FA, LI BAI-YING. Investigation on rules of floor rock failure in the workings with risk of Ordovician confined water [J]. Journal of China Coal Society, 1992, 17(2): 32-39.
- [7] 王连成. 矿井地质雷达的方法及应用[J]. 煤炭学报,2000,25(1):5-9.
WANG LIAN-CHENG. Method and application of mine geological radar [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 5-9.
- [8] 刘树才,刘鑫明,姜志海,等. 煤层底板导水裂隙演化规

- 律的电法探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 349-356.
- LIU SHU-CAI, LIU XIN-MING, JIANG ZHI-HAI, et al. Research on electrical prediction for evaluating water conducting fracture zones in coal seam floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanic and Engineering, 2009, 28(2): 349-356.
- [9] 王家臣, 许延春, 徐高明, 等. 矿井电剖面法探测工作面底板破坏深度的应用[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(1): 97-100.
- WANG JIA-CHEN, XU YAN-CHUN, XU GAO-MING, et al. Application of mine electric profiling method to detect floor failure depth of coal mining face [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(1): 97-100.
- [10] 赵贤任, 刘树才, 李富, 等. 煤层底板破坏带电阻率法异常特征研究[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(2): 164-168.
- ZHAO XIAN-REN, LIU SHU-CAI, LI FU, et al. Study on resistivity abnormal characteristics of coal seam floor failure[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008, 5(2): 164-168.
- [11] 张平松, 刘盛东, 吴荣新, 等. 采煤面覆岩变形与破坏立体电法动态测试[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1871-1875.
- ZHANG PING-SONG, LIU SHENG-DONG, WU RONG-XIN, et al. Dynamic detection of overburden deformation and failure in mining workplace by 3d resistivity method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanic and Engineering, 2009, 28(9): 1871-1875.
- [12] 韩德品, 李丹, 程久龙, 等. 超前探测灾害性含导水地质构造的直流电法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 635-639.
- HAN DE-PIN, LI DAN, CHENG JIU-LONG, et al. DC method of advanced detecting disastrous water-conducting or water-bearing geological structures along same layer[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 635-639.

(编辑 张小强)

(上接第89页)

- [6] ZHU P, YANG F, TU G, et al. Fault-tolerant scheduling for periodic tasks based on DVFS[C]//The 9th International Conference for Young Computer Scientists 2008, November 18-21, 2008, Zhangjiajie, Hunan, China. [USA]: IEEE, 2008: 2186-2191.
- [7] ZHAO B, AYDIN H, ZHU D. Reliability-aware dynamic voltage scaling for energy-constrained real-time embedded systems[C]// 26th IEEE International Conference on Computer Design 2008, October 12-15, 2008, Lake Tahoe, CA, United states. [USA]: IEEE, 2009: 633-639.
- [8] ZHU D, QI X, AYDIN H. Energy management for periodic real-time tasks with variable assurance requirements [C]//The 14th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, 2008, August 25-27, 2008, Kaohsiung, Taiwan. [USA]: IEEE, 2008: 259-268.
- [9] CASTILLO X, MCCONNEL S R, SIEWIOREK D P. Derivation and calibration of a transient error reliability model[J]. IEEE Transactions on Computers, 1982, 31(7): 658-671.
- [10] IYER R K, ROSSETTI D J. A measurement-based model for workload dependence of cpu errors[J]. IEEE Transactions on Computers, 1986, 35(6): 511-519.
- [11] DABIRI F, AMINI N, ROFOUEI M, et al. Reliability-aware optimization for DVS-enabled real-time embedded systems [C]// The 9th International Symposium on Quality Electronic Design, March 17-19, 2008, San Jose, CA, United States. [USA]: IEEE, 2008: 780-783.
- [12] KARABOGA D, BASTURK B. Artificial Bee Colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization problems[C]//The 12th International Fuzzy Systems Association World Congress on Foundations of Fuzzy Logic and Soft Computing, June 18-21, 2007, Cancun, Mexico. [S. l.]: Springer, 2007: 789-798.
- [13] KARABOGA D, BASTURK B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm [J]. Journal of Global Optimization, 2007, 39(3): 459-471.

(编辑 陈移峰)