

地质与测量

有耗媒质中任意入射角电磁波传播衰减特性研究

刘鑫明^{1,2}, 刘树才^{1,2}, 姜志海^{1,2}, 李秀晗³

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008;
3. 兖煤菏泽能化有限公司, 山东 菏泽 274900)

摘要: 为提高无线电波透视技术的探测精度, 给出了含入射角度参数的振幅衰减常数表达式。指出在工作频率和媒质参数一定的前提下振幅衰减常数与电磁波入射角度两者满足正弦关系, 在 $0 \sim \pi/2$ 区间, 振幅衰减常数的值随入射角度的增大而增大。采用改进的振幅衰减常数计算得到的数据进行无线电波层析成像, 结果表明: 改进后的振幅衰减常数计算得到的数据层析成像效果显著优于经典振幅衰减常数得到数据的层析成像效果, 层析成像剖面图与实测地质剖面吻合较好。证明了采用改进后的振幅衰减常数可以在一定程度上提高无线电波透视的精度。

关键词: 入射角度; 无线电波透视; 振幅衰减常数; 层析成像

中图分类号: P319.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336 (2012) 06-0096-04

Study on Propagation Attenuation Features of Random Incidence Angle Electromagnetic Wave in Lossy Medium

LIU Xin-ming^{1,2}, LIU Shu-cai^{1,2}, JIANG Zhi-hai^{1,2}, LI Xiu-han³

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. National Key Lab for Geomechanics & Deep Underground Engineering, Xuzhou 221008, China;
3. Heze Energy and Chemical Company Ltd., Yanzhou Coal Mining Group, Heze 274900, China)

Abstract: In order to improve the detection accuracy of the radio wave perspective technology, an expression of the amplitude attenuation constant with incidence angle parameters was provided. The paper pointed out that on the certain premise of the working frequency and Medium parameters, the amplitude attenuation constant and electromagnetic wave could meet the sinusoidal relationship. Within the $0 \sim \pi/2$, the value of amplitude attenuation constant would be increased with the incidence angle increased. The data calculated and obtained with the modified amplitude attenuation constant were applied to the tomography of the wireless electromagnetic wave. The results showed that the data tomography results obtained with the modified amplitude attenuation constant would be obviously better than the data tomography results obtained with the classic amplitude attenuation constant and the section drawings of the tomography and the section drawings of the site measured geology could be well fitted. The modified amplitude attenuation constant could improve the perspective accuracy of the wireless electromagnetic wave in certain degree.

Key words: incidence angle; perspective of wireless electromagnetic wave; amplitude attenuation constant; tomography

坑道无线电波透视技术可以有效探测采掘工作面内隐伏的断层、陷落柱、火成岩侵入区等小型地质构造以及煤与瓦斯突出异常区^[1-2]。在当前高产高效高安全地质保障系统中, 对工作面内隐伏构造的探测精度要求越来越高。若能够在回采之前提前

提供准确的地质资料, 则不仅能确保生产顺利进行, 提高生产效率, 而且能保证煤矿安全^[3]。目前, 无线电波透视技术主要是依据时域电磁场场强值的衰减特征来反映工作面内地质异常体的性质和空间位置^[4-5]。当构造简单时, 无线电波透视的探

收稿日期: 2012-02-17; 责任编辑: 曾康生

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (2007CB209400)

作者简介: 刘鑫明 (1980—), 男, 河北唐山人, 博士研究生。Tel: 13813290853, E-mail: liuxinming@cumt.edu.cn

网络出版时间: 2012-06-15 10:27:00; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120615.1027.201206.96_026.html

引用格式: 刘鑫明, 刘树才, 姜志海, 等. 有耗媒质中任意入射角电磁波传播衰减特性研究 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40 (6): 96-99, 103.

测效果一般较好; 而当构造复杂时, 由于电磁波衰减的复杂性, 该方法得到的结果难以满足生产需要。这种方法在应用中存在的问题主要表现在: ①探测过程中, 井下干扰因素较多, 观测资料可信度较差; ②投影不完全, 每个发射点对应的观测数据一般只有 15 ~ 20 个; ③初始场强难以确定; ④电磁波的几何扩散、传播过程中的反射和折射问题较为复杂; ⑤场源与接收的耦合作用不明; ⑥能量的屏蔽和其他干扰因素等。

为提高无线电波透视资料的准确性, 针对不同的实际问题 and 干扰因素进行的研究工作主要集中在以下 3 个方面^[6]: ①电磁波 CT 成像技术以及抗干扰的相对层析成像技术, 该技术对断层的组合及交叉切割关系反映清晰, 效果较好; ②频域内质心频移技术, 利用这种方法可重建衰减场的空间分布图像, 但要求电磁波信号的频带足够宽, 以应用于多频情况, 这种方法的优点在于它受干扰因素的影响较小, 所以重建的衰减图像相对使用场强方法得到的结果要准确可靠^[7]; ③提高接收机灵敏度、信噪比, 增大发射机功率及频率稳定性, 以便发射稳定的电磁波信号, 提高透视地质效果。电磁波传播过程中传播衰减特性直接影响了无线电波透视结果的准确性。本文从电磁波自无耗媒质空气透射到有耗媒质煤层这一过程为切入点, 给出修正后的振幅衰减常数, 讨论其与入射角之间的关系, 以发射天线辐射初始场强值为参考, 标定并归一化接收场强的振幅, 对改进后的振幅衰减常数计算得到数据采用层析成像技术重建衰减图像, 与实测地质剖面进行对比分析, 讨论改进的振幅衰减常数的优劣。

1 经典衰减常数的计算

煤层为有耗非磁性媒质, 麦克斯韦方程组中不能忽略传导电流项, 为了形式上与无源、无耗媒质中的电磁场波动方程保持一致, 引入等效复介电常数 ε_c , 其表达式为

$$\varepsilon_c = \varepsilon [1 - j\sigma/(\omega\varepsilon)] \quad (1)$$

其中: ε 为介电常数, F/m; σ 为电导率, S/m; ω 为角频率, rad/s; j 为虚数。由此, 有耗媒质中的电磁波动方程可写为如下形式

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{E} + \gamma^2 \mathbf{E} = 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} + \gamma^2 \mathbf{H} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中: \mathbf{E} 为电场强度, V/m; \mathbf{H} 为磁场强度,

A/m; γ 为传播常数, 为一复数。建立 xoz 平面直角坐标系如图 1 所示, 其中 x 为竖直方向, z 为水平方向。设电磁波沿 $+z$ 方向传播, 当电场强度只有 x 分量时, 那么波动方程式 (2) 电场分量为

$$\mathbf{E} = \mathbf{e}_x E_0 e^{-j\gamma z} \quad (3)$$

式中: \mathbf{e}_x 为 x 方向单位向量; E_0 为初始电场强度。

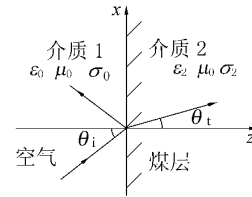


图1 斜入射的电磁波

令 $\gamma = \beta - j\alpha$, 则 $\mathbf{E} = \mathbf{e}_x E_0 e^{-j(\beta - j\alpha)z} = \mathbf{e}_x E_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}$ 。表明电场强度的振幅以因子 $e^{-\alpha z}$ 随传播距离 z 的增大而衰减, α 称为振幅衰减常数, 即经典衰减常数, β 为相位常数。两者表达式如下:

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu\varepsilon} \{ \sqrt{1 + [\sigma/(\omega\varepsilon)]^2} - 1 \} / 2 \quad (4)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\varepsilon} \{ \sqrt{1 + [\sigma/(\omega\varepsilon)]^2} + 1 \} / 2 \quad (5)$$

式中, μ 为磁导率, H/m。

2 任意入射角衰减常数的计算

对于无线电波透视定点工作方式而言, 当建立 xoz 平面直角坐标系时, 只有唯一的接收点位于 $+z$ 方向, 大多数远端接收点和发射点之间存在一定的夹角, 因此电磁波可视为斜入射。如果忽略入射角度, 势必会使计算结果产生一定偏差。为此, 从电磁波自无耗媒质空气透射到有耗媒质煤层这一入射过程为出发点, 推导含入射角度透射波的振幅衰减常数。假设煤层为非磁性介质, 其磁导率等于真空磁导率 μ_0 。建立如图 1 所示坐标系, θ_i 为入射角, θ_t 为折射角, 媒质 1 和 2 分别代表空气媒质和煤层媒质, 相应的参数为 $\varepsilon_0, \mu_0, \sigma_0$ 和 $\varepsilon_2, \mu_0, \sigma_2$ 。

考虑透射过程, 设入射面 xoz 为 $y = 0$ 平面, 沿任意方向传播的透射波电场分量可写为

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_0 e^{-jk_2 \mathbf{n}_t \cdot \mathbf{r}} = \mathbf{E}_0 e^{-jk_2 (x \sin \theta_t + z \cos \theta_t)} \quad (6)$$

式中: \mathbf{E}_0 为透射波的初始场强; \mathbf{n}_t 为传播方向上的单位向量, \mathbf{r} 为此方向上的传播距离; k_1, k_2 分别为介质 1 和 2 的波数, rad/m, 其表达式分别为

$$k_1 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$$

$$k_2 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_c} = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_2 [1 - j\sigma_2/(\varepsilon_2 \omega)]} =$$

$$\sqrt{\omega^2 \mu_0 \varepsilon_2 - j\omega \mu_0 \sigma_2} = \beta - j\alpha$$

根据折射定律式有

$$k_1 \sin \theta_i = k_2 \sin \theta_t \quad (7)$$

可求得复折射角正弦

$$\sin \theta_t = k_1 \sin \theta_i / (\beta - j\alpha) = k_1 \sin \theta_i (\beta + j\alpha) / (\beta^2 + \alpha^2) = (a + jb) \sin \theta_i \quad (8)$$

其中: $a = k_1 \beta / (\beta^2 + \alpha^2)$, $b = k_1 \alpha / (\beta^2 + \alpha^2)$ 。利用三角公式, 引入中间变量 ρ 和 φ , 可得对应式 (8) 的复折射角的余弦。

$$\cos \theta_t = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_t} = \sqrt{1 - (a^2 - b^2 + 2jab) \sin^2 \theta_i} = \rho e^{-j\varphi} \quad (9)$$

将式 (9) 两边平方, 整理可得

$$\begin{cases} \rho^2 \cos 2\varphi = \rho^2 (2\cos^2 \varphi - 1) = 1 - (a^2 - b^2) \sin^2 \theta_i \\ \rho^2 \sin 2\varphi = 2\rho^2 \sin \varphi \cos \varphi = 2ab \sin^2 \theta_i \end{cases} \quad (10)$$

经过折射定律和欧拉公式转换, 透射场中的指数表示为

$$-j(xk_2 \sin \theta_t + zk_2 \cos \theta_t) = -j[xk_1 \sin \theta_i + z(\beta - j\alpha)(\rho \cos \varphi - j\rho \sin \varphi)] \quad (11)$$

整理式 (11), 等式右边项可得

$$-j[xk_1 \sin \theta_i + z\rho(\beta \cos \varphi - \alpha \sin \varphi) - jz\rho(\beta \sin \varphi + \alpha \cos \varphi)] \quad (12)$$

因此, 可将透射场表示为

$$E_t = E_0 e^{-\rho z} e^{-j(xk_1 \sin \theta_i + qz)} \quad (13)$$

式中: p 和 q 分别为改进的振幅衰减常数和相位常数, 利用中间变量 ρ 和 φ , 求得两者表达式为

$$\begin{cases} p = \rho(\beta \sin \varphi + \alpha \cos \varphi) \\ q = \rho(\beta \cos \varphi - \alpha \sin \varphi) \end{cases} \quad (14)$$

式 (14) 表明电场强度的复振幅以因子 $e^{-\rho z}$ 随 z 的增大而衰减。消去中间变量 ρ 和 φ , 利用式 (8)、式 (10) 和式 (14), 计算 p 和 q 表达式可得

$$\begin{cases} p^2 = \{\alpha^2 - \beta^2 + k_1^2 \sin^2 \theta_i + [4\alpha^2 \beta^2 + (\beta^2 - \alpha^2 - k_1^2 \sin^2 \theta_i)^2]^{1/2}\} / 2 \\ q^2 = \{\beta^2 - \alpha^2 - k_1^2 \sin^2 \theta_i + [4\alpha^2 \beta^2 + (\beta^2 - \alpha^2 - \sin^2 \theta_i)^2]^{1/2}\} / 2 \end{cases} \quad (15)$$

可以证明, 当电磁波沿 $+z$ 方向传播时, 即入射角度 $\theta_i = 0^\circ$ 时, p 和 q 分别退化为经典的振幅衰减常数 α 和相位常数 β 。以常用无线电波透视工作频率为例, 设发射频率 $f = 1.5 \times 10^6$ Hz, 取介质 2 的相对介电常数 $\varepsilon_2 = 9$, $\sigma_2 = 10^{-3}$ S/m, 图 2 中给

出了 $0 \sim \pi/2$ 区间改进的振幅衰减常数 p 随入射角度 θ_i 的变化关系。

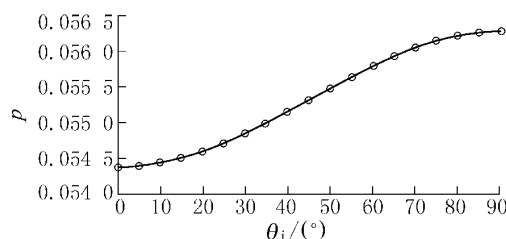


图2 振幅衰减常数 p 随入射角 θ_i 变化关系

显而易见, 当入射角度增大时, 衰减常数也变大, 两者之间满足正弦关系。此外, 对于高频电磁波和导电性较好的媒质, 衰减常数的变化将更为明显。因此, 对于定点工作形式而言, 如果接收点数量较多, 远端接收点和发射点之间的相对入射角度较大时, 必须对入射角度予以考虑。

3 初始场强的确定

如果已知天线辐射的入射波的场强为 E_{i0} , 利用透射系数很容易确定透射波的场强 E_{t0} 。由于斜入射的平面电磁波不论以何种方式极化, 都可以分解为 2 个相互正交的垂直线性极化波和平行线性极化波, 这里直接给出垂直极化波的透射系数 T_\perp 和平行极化波的透射系数 T_\parallel [8]。

$$T_\perp = 2 \cos \theta_i / (\cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_0 - \sin^2 \theta_i}) \quad (16)$$

$$T_\parallel = \frac{2 \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_0} \cos \theta_i}{\varepsilon_2 \cos \theta_i / \varepsilon_0 + \sqrt{\varepsilon_2 / \varepsilon_0 - \sin^2 \theta_i}} \quad (17)$$

由此, 可由天线参数计算初始场强, 并把辐射波分解为垂直极化和平行极化波, 分别应用垂直极化和平行极化的透射系数, 计算两透射波的场强, 在有耗媒质中将二者合成, 即可求得透射波的初始场强。无线电波透视通常采用框形天线, 可视为磁偶源, 天线辐射场的计算参考相关文献 [9]。

4 应用实例

菏泽市某矿首采工作面火成岩侵入严重, 采用无线电波透视技术查明煤层内火成岩侵入情况, 为工作面开采提供可靠的资料。施工布置如图 3 所示, 以 10 m 点距等间隔布置测点。发射点距 50 m, 接收点距 10 m, 工作面上下平巷实际布置发射点 23 个, 接收数据点 370 个。

通常情况下, 煤层的相对介电常数一般在 4 ~ 5, 而火成岩一般在 8 ~ 9; 煤的电阻率可在几百欧姆米至几千欧姆米之间变化, 火成岩的电阻率可在几百欧姆米至几千欧姆米之间变化。同一工作频率下, 选择煤层相对介电常数为 3, 火成岩为 9, 两者电导率相差 6 倍时, 利用式 (15) 计算衰减常数 p 的值, 发现两者的衰减比可达 4 倍以上, 能较好的区分正常煤层与火成岩。

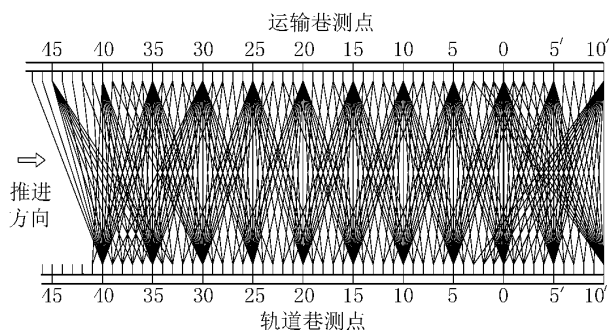


图3 施工布置

将接收的场强值分别利用衰减常数 α 和 p 经过对数变换后转化衰减系数, 并在传播路径上进行网格离散化, 即将衰减系数空间归位, 采用文献 [5, 7, 10] 中的电磁波层析成像技术, 将各网格衰减作用进行叠加, 求得各网格的衰减系数并利用图像表示, 结果如图 4 所示。

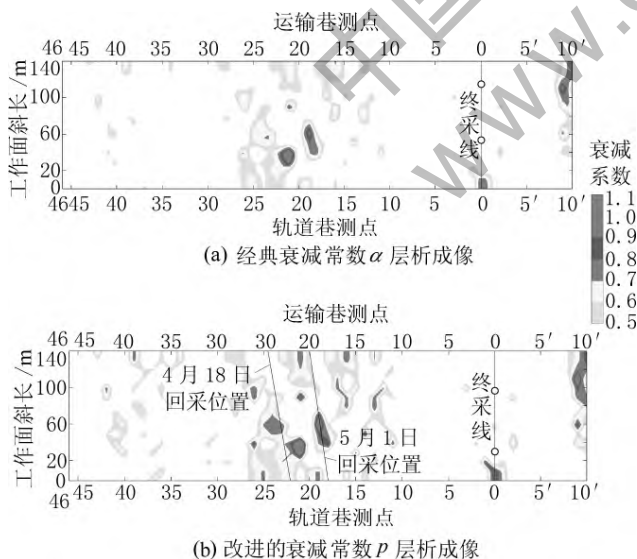


图4 衰减常数层析成像

图 4a 为采用经典衰减常数 α 重建的层析成像图, 图 4b 为采用改进的衰减常数 p 重建的层析成像图。图 4b 中的衰减明显大于图 4a 中的衰减, 更易区分衰减异常区域。分析图 4 可知运输巷

13—27 号测点与轨道巷 18—26 号测点连成的区段内衰减最大, 衰减异常区分布范围广, 结合上下平巷揭露情况, 推测该区段火成岩侵入情况严重, 预计煤层厚度不足平均煤厚的 1/2, 对回采将产生较大影响。工作面回采至 4 月 18 日位置 (图 4b), 此时运输巷距切眼位置 305.6 m, 对应无线电波透视测点为 24 号点 + 5.6 m, 轨道巷距离切眼位置 320.4 m, 对应测点 22 号点 + 0.4 m, 实测地质剖面如图 5 所示。工作面回采至 5 月 1 日位置 (图 4b), 此时运输巷距开切眼位置 340 m, 对应无线电波透视测点为 20 号, 轨道巷距离开切眼位置 360 m, 对应 18 号测点。实测地质剖面如图 5 和图 6 所示。

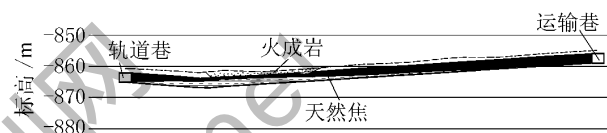


图5 4月18日实测地质剖面

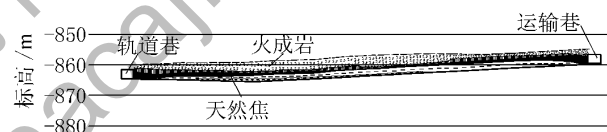


图6 5月1日实测地质剖面

从图 5 和图 6 可以发现, 整个工作面顶底板均受不同程度的火成岩侵入, 煤层变薄, 揭露的火成岩平均厚度超过 1/2 煤厚, 且以靠近轨道巷和中间位置较为明显, 与层析成像衰减系数图 (图 4) 中衰减数值最大的区域吻合较好, 表明采用改进后的振幅衰减常数计算无线电波透视结果可以有效地预测火成岩在煤层内的侵入情况。

5 结 论

导出了含入射角度的电磁波振幅衰减常数的计算公式, 并指出当工作频率和媒质参数确定时, 衰减常数随入射角度的增大而增大, 两者之间满足正弦关系, 对于高频电磁波和导电性较好的媒质, 衰减常数的变化更为明显。回采揭露结果与采用改进的振幅衰减常数计算的无线电波透视结果吻合程度较高, 验证结果令人满意, 这表明采用该方法能有效探测煤层内火成岩的侵入情况。利用先验模型, 估算初始场强并计算吸收系数, 并指导实际采集工作及后期资料处理, 有助于提高资料的准确性。

(下转第 103 页)

煤田瓦斯含量、瓦斯压力大致为“西高东低”的态势^[13],如图4所示,并随着开采深度的增加,煤层气含量逐步增加,为4.65%~8.47%,平均煤层含气量 $10.2\text{ m}^3/\text{t}$,甲烷体积分数89%,含气饱和度为59%。从横向上看,开平向斜的南东翼瓦斯普遍较低,全为低瓦斯矿井;北西翼瓦斯普遍较高,分布有2个高突矿井和1个高瓦斯矿井^[14]。这主要是由于煤层的埋藏深度控制了瓦斯分布的总体轮廓,地质构造控制了局部瓦斯蕴育状态,构造应力集中的区段,瓦斯涌出量大,煤的赋存条件控制了瓦斯梯度和风化带的变化,煤厚变化大、煤层结构破坏严重的区段,瓦斯涌出量大。在水文地质条件复杂的区域,瓦斯涌出量减小^[15]。

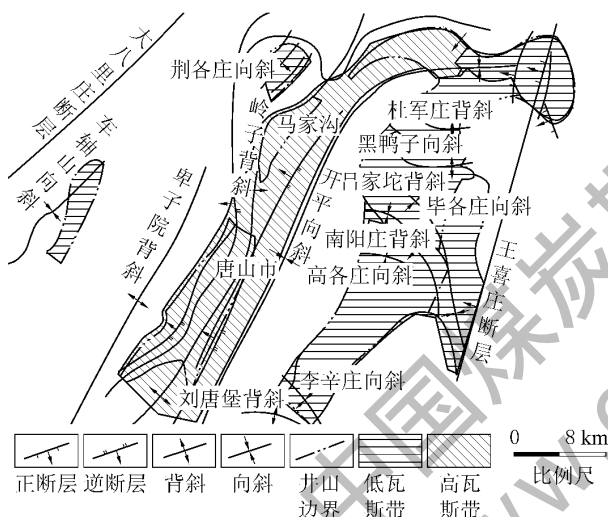


图4 开平向斜瓦斯赋存特征

4 结 语

开平煤田煤层气受区域构造演化、煤层埋深及水文地质特征等因素控制,使得不同地区的煤层经历了不同埋藏作用,导致不同的瓦斯生成、赋存与逸散过程形成了唐山矿W字型、吕家坨矿阶梯状型与东欢坨矿V字型3种埋藏-生气模式,并呈现煤层气“西高东低”的分布规律。

参考文献:

- [1] Boyer C M. The Coalbed Methane Resources and the Mechanism of Gas Production [M]. Chicago: GRI, 1989.
- [2] 汤达祯,秦 勇,胡爱梅. 煤层气地质研究进展与趋势 [J]. 石油实验地质, 2003, 25 (6): 644-647.
- [3] 赵靖舟,时保宏. 中国煤层气聚集单元研究现状 [J]. 新疆石油地质, 2004, 25 (5): 546-549.
- [4] 李明潮,梁生正,赵克静. 煤层气及其勘探开发 [M]. 北

京: 地质出版社, 1996.

- [5] 赵庆波,孙粉锦,李五忠. 中国煤层气勘探的新思路 [J]. 天然气工业, 1996, 16 (5): 25-28.
- [6] 吴俊杰,彭 军. 煤层气成藏机理研究进展综述 [J]. 内蒙古石油化工, 2010 (15): 9-13.
- [7] 方爱民,侯泉林,据宜文,等. 不同层次构造活动对煤层气成藏的控制作用 [J]. 中国煤田地质, 2005, 17 (4):
- [8] 姜 波,秦 勇,据宜文,等. 煤层气成藏的构造应力场研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2005, 43 (5): 564-569.
- [9] 李文阳,王慎言,赵庆波. 中国煤层气勘探与开发 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [10] 陈尚斌,朱炎铭,袁 伟,等. 开滦唐山矿推覆构造特征研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39 (2): 7-12.
- [11] 罗 跃,朱炎铭,王怀勤. 开平煤田吕家坨矿7#煤层断裂构造特征 [J]. 黑龙江科技学院学报, 2011, 12 (3): 93-96.
- [12] 赵 雯,朱炎铭,王怀勤,等. 开滦矿区东欢坨煤矿瓦斯涌出规律分析 [J]. 矿业安全与环保, 2011, 39 (1): 60-63.
- [13] 彭 力. 开滦矿区瓦斯地质的分布规律 [J]. 煤矿安全, 1995, 26 (7): 16-19.
- [14] 周凤增,洪益清,冼伟东. 开滦矿区煤与瓦斯赋存规律探讨 [C]. // 瓦斯地质与瓦斯防治进展, 北京: 煤炭工业出版社, 2007.
- [15] 彭 力. 开滦矿区瓦斯地质分布规律 [J]. 煤炭科学技术, 2001, 29 (2): 35-38.

(上接第99页)

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 储绍良. 矿井物探应用 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.
- [3] 程久龙,祁和刚,路风光. 工作面复杂构造电磁波CT探测研究 [J]. 矿业安全与环保, 2000, 27 (4): 26-27, 62.
- [4] 程久龙,于师建,邱 伟,等. 工作面电磁波高精度层析成像及其应用 [J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27 (4): 63-65.
- [5] 于师建,刘家琦,韩 波. 采场电磁波透射波场正演数值模拟 [J]. 黑龙江大学学报: 自然科学版, 2007, 24 (6): 712-715.
- [6] 宁书年,张绍红,杨 峰,等. 无线电波层析成像技术在矿井坑透中的应用 [J]. 煤炭学报, 2001, 26 (5): 468-472.
- [7] 刘广亮,于师建. 基于质心频移的无线电波透视层析成像 [J]. 地球物理学进展, 2008, 23 (2): 583-587.
- [8] 王家礼,朱满座,路宏敏. 电磁场与电磁波 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [9] 杨儒贵,汤姆斯. 电磁场与电磁波 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [10] 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): 579-582.