

文章编号: 1001-1986(2010)05-0055-03

断层构造在层测深曲线上的响应特征

石亚丁^{1,2}

(1. 煤炭科学研究院西安研究院, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 应用数值模拟方法研究了巷道层测深技术应用的环境及影响因素, 分析了断层构造在层测深曲线上的响应特征。结果表明, 在煤层为高阻, 顶、底板为低阻的情况下, 巷道层测深技术对断层构造具有良好的分辨率, 并且煤层与其顶、底板的视电阻率差异越大, 对断层构造的分辨率越高; 煤层厚度和断层与巷道的夹角等因素也对探测断层构造的分辨率有一定的影响。

关键词: 巷道层测深; 断层; 响应特征

中图分类号: P631 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.05.012

Response characteristics of fault in coal seam sounding curve

SHI Yading^{1,2}

(1. Xi'an Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China;
2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: By using numerical simulation the paper studied the environments and influencing factors of application of coal seam sounding technique in roadway floor, analyzed the response characteristics of fault in coal seam sounding curve. The results indicated that in case where coal was highly resistive, floor and roof less resistive, coal seam sounding had good resolution for fault, the higher the contrast of apparent resistivity of coal and roof/floor was, the higher the resolution for fault. Coal thickness and the angle between roadway and fault also have effects on resolution of the fault detection.

Key words: coal seam sounding; fault; response characteristics

在煤矿生产过程中, 采煤工作面经常会受到隐伏构造的影响。小的构造会造成煤质下降、生产效率降低, 大的构造甚至会造成采煤工作面被迫停工^[1]。造成以上现象的本质原因是目前探测工作面内隐伏构造的手段相对落后, 在综采工作面回采前难以查明工作面内隐伏地质构造的发育情况^[2]。

在采煤工作面煤层为高阻, 顶、底板为低阻的情况下, 巷道层测深技术可以用于探测断层及其裂隙发育带在工作面内的延伸情况^[3-5]。目前, 巷道层测深技术仍处于理论研究阶段, 在煤矿实际生产中的应用刚刚起步。国内, 除中国矿业大学在淮北杨庄煤矿井下做过课题试验外, 还未见到巷道层测深法应用的报道^[6], 而煤矿实际生产迫切需要能够探测工作面内隐伏构造的有效方法。因此, 从理论上研究巷道层测深技术的应用环境, 分析断层在层测深曲线上的响应特征, 对于巷道层测深技术探测断层构造具有十分重要的理论和现实意义。

1 二维正演方法原理

由于巷道层测深电极的排列和模型参数相对复

杂, 一般场论中经典的数理方法很难求得问题的答案, 需从电场所满足的微分方程出发, 用近似方法求其数值解, 有限单元法就是其常用的方法之一。

在稳恒电流场条件下, 对于三维空间, 设点电荷在 (x_0, y_0, z_0) 点上, 电位 U 和电流强度 I 间必须满足的基本微分方程是:

$$\nabla(\sigma \cdot \nabla U) = -I\delta(x - x_0)(y - y_0)(z - z_0)。 \quad (1)$$

对于均匀介质, 导电率 σ 为常数, 上式可简化为泊松方程:

$$\nabla^2 U = -\frac{1}{\sigma} \delta(x - x_0)(y - y_0)(z - z_0)。 \quad (2)$$

若在无源空间, 上式变为拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 U = 0。 \quad (3)$$

对于二维地电情况, 点源二维有限单元法选取 y 轴平行地质体走向, 所以地电参数只随 x, z 方向发生变化, 而在 y 方向没有变化, 即:

$$\frac{\partial}{\partial y}[(\sigma(x, y, z))] = 0。 \quad (4)$$

这时电位满足的基本微分方程式变为:

收稿日期: 2010-01-31

作者简介: 石亚丁(1969—), 男, 河北万全人, 高级工程师, 从事煤田电法与电磁法勘探研究工作。

$$\nabla[\sigma(x, z) \cdot \nabla U(x, y, z)] = -I\delta(x-x_0)\delta(y-y_0)\delta(z-z_0)。 \quad (5)$$

为了充分利用二维情况 σ 与 y 无关的条件简化计算，利用富氏变换

$$\Phi(x, ky, z) = \int_0^\infty U(x, y, z) \cdot \cos(ky, y) dy$$

将 (x, y, z) 空间的电位 U 变换为 (x, ky, z) 空间中的二维变换电位，这时 ky 是空间波数， k 为装置系数。

对式(5)两边沿 y 进行富氏变换，可得：

$$\nabla[\sigma(x, z) \cdot \nabla U(x, ky, z)] - ky^2 \sigma(x, y) \varphi(x, ky, z) = -\frac{I}{2} \delta(x-x_0) \delta(z-z_0)。 \quad (6)$$

实际工作中，选取 5~7 个 ky 值求解。每次求解时， ky 值为一常数，最后根据不同的 ky 值所示得 φ 值，通过反富氏变换求得真正的电位 $U(x, y, z)$ 值，即

$$U(x, y, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \varphi(x, ky, z) \cos(ky, y) dk y。 \quad (7)$$

采用有限单元法求解微分方程式(5)一式(7)，得到各节点的电位 U 值后，再由公式：

$$R_s = \frac{\Delta U}{I} ; \rho_s = k \frac{\Delta U}{I}， \quad (8)$$

求得巷道层测深的视电阻率和视电阻率值。其中 $k = \frac{2\pi r \sqrt{r^2 + h_d^2}}{\sqrt{r^2 + h_d^2} - r}$ 为层测深装置系数； r 为偶极距； h_d 为巷道所在层的厚度。

2 巷道层测深曲线二维模型正演计算

首先，对三层地电模型进行数值模拟， ρ_1 、 ρ_2 和 ρ_3 分别代表煤层顶板、煤层和煤层底板的视电阻率。

2.1 无构造扰动的巷道层测深曲线

三层介质层测深曲线的尾支渐近线公式为：

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \rho_s = \frac{2\rho_2^2}{\rho_1 + \rho_3}。$$

从上式可以看出，层测深装置对煤层(ρ_2)的视电阻率有放大作用，同样对煤层中发育的构造引起的电性异常也有放大作用，但对煤层顶、底板电阻率的变化反映不敏感。这也是层测深技术可以探测煤层内构造异常的理论依据。

假定煤层的厚度 $h_d=5$ m，煤层(ρ_2)的视电阻率为 1 000 $\Omega \cdot m$ ，顶板(ρ_1)的视电阻率为 100 $\Omega \cdot m$ ，底板的视电阻率在 50~800 $\Omega \cdot m$ 间变化，按以上参数进行正演计算，得到如图 1 所示的巷道层测深曲线。

从图 1 所示的曲线上可以看出，当 $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ 时，层测深曲线均为上升型，类似于地表直流电测深的 G 型曲线，并且 ρ_3 与 ρ_2 、 ρ_1 与 ρ_2 的差别越大，层测深曲线的斜率越陡。很明显，煤层的视电阻率

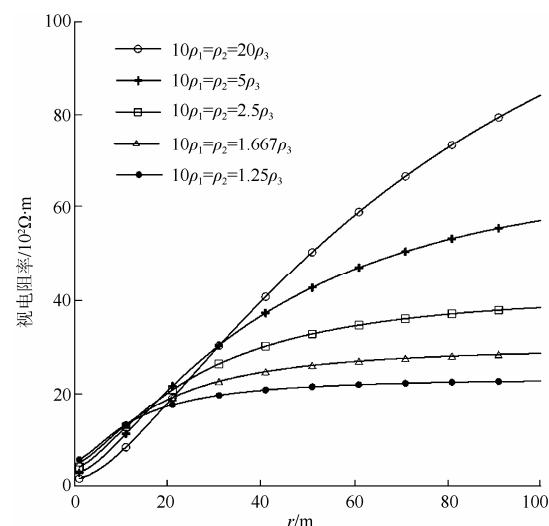


图 1 正演模型的巷道层测深曲线

Fig. 1 Coal seam sounding curve of forward model

大于其顶、底板视电阻率的 5 倍以上时，适于开展巷道层测深探测工作。

2.2 煤层厚度变化对巷道层测深理论曲线的影响

层测深曲线的分辨率也受煤层的厚度(h_d)的影响。以煤层的视电阻率 $\rho_2=1 000 \Omega \cdot m$ ，顶底板视电阻率 $\rho_1=\rho_3=100 \Omega \cdot m$ ，煤层厚度 h_d 分别等于 2 m、4 m、6 m、8 m、10 m 的地电模型进行正演计算，得图 2 所示层测深曲线。

通过对图 2 所示层测深曲线的对比分析可知：

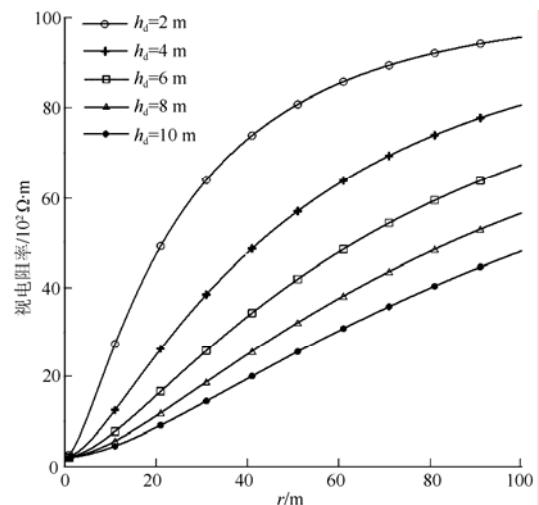


图 2 煤层厚度变时的层测深曲线

Fig. 2 Coal seam sounding curve of variation in coal thickness

a. 当煤层厚度较薄时，小电极距(r)对应的曲线斜率较大，对构造的分辨率较高，当电极距(r)增大时很快进入平直段，因此煤层厚度较薄时不利于大深度探测；

b. 当煤层厚度较厚时，小极距(r)对应曲线的斜率较小，对构造的分辨率较低，但当极距(r)增大时，

曲线的斜率缓慢增大，在较大极距时仍对煤层内的构造有一定的分辨能力。

3 断层构造层测深曲线上的响应特征

为模拟断层构造在层测深曲线上的响应特征，设计如图3所示的地电模型。假定发射点偶极A、B位于(0, 0)点，断层破碎带与巷道相交于(100, 0)点，断层破碎带与巷道的夹角分别为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 和 75° (图3中斜线条所示)；接收点偶极M、N在巷道中从(1, 0), (2, 0), (3, 0)到(100, 0)移动；煤层厚度 $h_d=4\text{ m}$ ，煤层视电阻率 $\rho_1=1000\Omega\cdot\text{m}$ ；断层破碎带宽度 $L=2\text{ m}$ ，断层破碎带的视电阻率 $\rho_2=50\Omega\cdot\text{m}$ 。

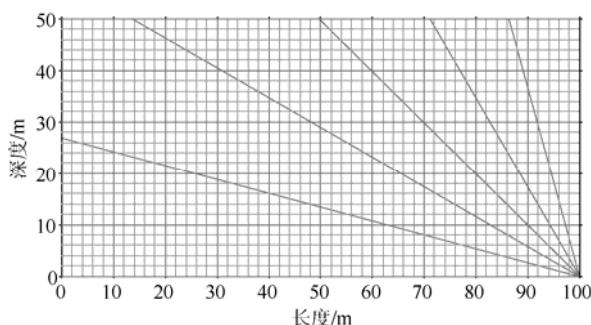


图3 工作面内断层分布情况模型

Fig. 3 Model of fault distribution in working face

对图3所示的地电模型进行正演计算，得图4所示的层测深视电阻率曲线。

从图4中可以看出，断层与巷道的夹角越小层测深曲线的最小值出现的越早；而断层与巷道的夹角越大层测深曲线最小值出现的越晚。

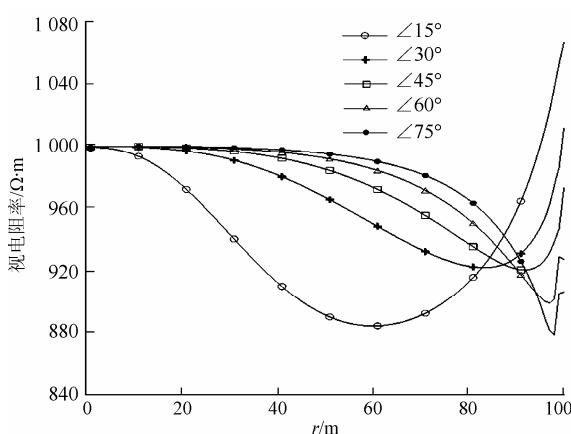


图4 断层存在时的巷道层测深曲线

Fig. 4 Coal seam sounding curve of fault

从勘探体积角度分析，随着电极距(r)的增大，断层等低阻体在层测深曲线上的反映逐渐增强。当层测深曲线斜率最大时，也即对应层测深曲线的拐

点位置，断层带在该点反映最为强烈，随后层测深曲线的斜率逐渐减小，并达到视电阻率的最小值。达到视电阻率最小值后，如果电极距(r)继续增大，层测深曲线的斜率会反向增大。

通过以上分析可得断层在层测深曲线上的响应特征：

a. 当断层存在时，巷道层测深曲线类似地面电法的“H”型曲线。断层破碎带与采掘巷道的夹角越小，层测深曲线的拐点和最小值点出现的越早，越易于断层破碎带的识别。

b. 层测深曲线存在拐点和最小值点，拐点和最小值点可作为确定断层位置的特征点。

c. 当断层与巷道的夹角大于 45° 时，特征点靠近断层根部，对断层的识别相对小角度断层而言困难，因此巷道层测深法适用于探测与巷道夹角小于 45° 的断层。

4 结论

a. 巷道层测深应用的前提条件是煤层为高阻，顶、底板为低阻的情况。煤层与顶、底板的视电阻率差别越大，其探测的分辨率越高。当煤层的视电阻率大于其顶、底板视电阻率5倍以上时，适于开展巷道层测深探测。

b. 煤层厚度变化对巷道层测深的分辨率有一定影响。煤层厚度薄，小电极距(r)对应的曲线斜率较大，对构造的分辨率较高；煤层厚度较大时，小电极距(r)对应曲线的斜率较小，对构造的分辨率相对较低。

c. 层测深技术适于探测与巷道夹角小于 45° 的断层，夹角越小越易于断层的识别，并且可从层测深曲的拐点和最小值点来确定断层的位置。

参考文献

- [1] 刘天放, 李志聃. 矿井地球物理勘探[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [2] 冯宏. 地下工程中的地球物理探测研究技术[C]//陕西地球物理学会. 陕西地球物理文集(6). 西安: 西安地图出版社, 2005.
- [3] CAOKAS J, DOBROKA M, GYULAI A. Geoelectric determination of quality changes and tectonic disturbances in coal deposits[J]. Geophysical Prospecting, 1986, 34(7): 1067–1081.
- [4] 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, 1999.
- [5] 岳建华, 李志聃. 煤矿井下直流层测深方法与原理[J]. 煤炭学报, 1994, 19(4): 422–428.
- [6] 岳建华, 李志聃, 刘世蕾. 巷道层测深理论曲线数值模拟及资料解释方法[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(1): 52–56.