

# 地层条件下煤层顶、底板声波速度与反射特征

朱国维<sup>1</sup>, 王怀秀<sup>2</sup>, 韩堂惠<sup>1</sup>, 李小华<sup>1</sup>, 李兆凯<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 北京建筑工程学院电气与信息工程学院, 北京 100044)

**摘 要:** 采取淮南矿区主采煤层 13-1 煤及其顶、底板典型泥岩与砂质泥岩样品, 通过改变温度与压力来模拟地层条件, 测试获得煤层层声波速度随深度(400~1 200 m)的变化, 并分析不同深度下煤层顶、底板反射系数与入射角的变化关系。结果表明: 煤岩层声波速度随深度增加而增大, 且具有较好的对数相关性; 煤层顶、底板反射系数不仅随入射角变化而变化, 而且受煤层埋深和顶、底板岩性变化的影响, 随着煤层埋深增加, 其顶、底板反射系数绝对值均减小, 煤层顶、底板岩石波阻抗差异越大, 反射系数越大, 因此, 在进行煤田或矿井地震勘探设计与资料处理时, 应综合考虑勘探区内煤层顶、底板岩性分布与赋存深度变化, 以便有效地利用顶、底板反射 P-P 波和 P-S 波 AVO 信息来解决诸多矿井地质条件精细探测问题。

**关键词:** 煤层顶、底板; 声波速度; 反射系数; 入射角

**中图分类号:** P631.4      **文献标识码:** A

## Reflection characteristics and acoustic velocity of coal roof and floor under formation conditions

ZHU Guo-wei<sup>1</sup>, WANG Huai-xiu<sup>2</sup>, HAN Tang-hui<sup>1</sup>, LI Xiao-hua<sup>1</sup>, LI Zhao-kai<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Electricity and Information Engineering, Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Typical roof and floor mudstone and sandy mudstone were sampled from the No. 13-1 coal seam in Huainan mining area and acoustic velocity were tested under the formation conditions by changing temperature and pressure with the depth (400~1 200 m). Also, the relationship between reflection coefficients and the changes of incident angles in coal roof and floor with different depths were analyzed. The results show that acoustic velocity of coal and rock strata increases with depths and have good logarithm correlation. The reflection coefficients of roof and floor are not only changed with the incident angles, but also are effected by the depths and the lithology of coal roof and floor. With increasing buried depths of coal seam, the absolute values of reflection coefficients all decrease. When wave impedance difference of coal roof and floor is bigger, its reflection coefficients are bigger. Therefore, lithologic distribution and depth of coal roof and floor should be comprehensively considered in order to use AVO information of reflective P-P wave and P-S wave to solve the detailed detection problems under lots of geological conditions of coal mine in exploration areas when the design of coal seismic prospecting and data processing are made.

**Key words:** coal roof and floor; acoustic velocity; reflection coefficient; incident angle

收稿日期: 2008-01-04      责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(973 项目)(2006CB202209); 国家自然科学基金资助项目(50727401); 北京市教委科技资助项目(KM200700003006)

作者简介: 朱国维(1964—), 男, 安徽金寨人, 副教授, 博士. Tel: 010-62331305, E-mail: zgw@cumtb.edu.cn

煤层及其顶、底板岩石声波速度是揭示煤系岩石性质,进行煤田和矿井地震勘探设计、地震数据处理与解释的一个重要参数.目前岩石声波速度测试大多是在常温常压下进行,并利用测试数据分析不同岩性声波速度与其弹性参数的定量关系<sup>[1-2]</sup>.在煤系地层岩石声波速度测试研究方面,文献[3-5]测试研究了煤系岩石物理力学参数与声波速度之间的关系,并进行了温度、压力条件对砂岩岩石力学性质的影响研究.文献[6]根据岩石实验测试数据和测井资料,对淮南煤田含煤地层中各类岩石的密度以及纵、横波速度等物性参数进行了研究,并获得碎屑岩和煤的密实度与纵波速度相关关系的经验公式.文献[7]对淮北矿区煤层及顶、底板岩石进行了纵、横波速度测试,并讨论了煤层顶、底板反射系数与入射角的关系,但没有进行地层条件下(温度、压力随深度变化而变化)声波速度随深度变化的测试分析.

东部煤田煤炭资源紧缺,矿井将向深部延拓,煤系地层随赋存深度增加其岩石物理性质也将发生变化,同时,现代化矿井对矿井地质工作的要求越来越高,要求采用先进的探测技术对矿井地质条件进行超前精细预测,高分辨率地震勘探是查明矿区致灾地质因素和大比例尺地质构造分布的一种重要勘探手段,而要从地震勘探信息中获取煤层的厚度,裂隙发育与瓦斯富集程度,顶、底板岩性等信息,必须利用 AVO 等属性分析技术,弄清矿区内地层条件下煤层顶、底板反射特征,全面分析影响反射波能量分布的主导因素,借以有效地指导煤田精细地震勘探设计与资料处理分析.

本文以淮南矿区主采 13-1 煤为研究对象,依据 13-1 煤层及其顶、底板岩性分布,选取顶、底板典型岩石进行地层条件下声波速度测试,并对不同深度煤层顶、底板反射系数与入射角的变化关系进行分析.

## 1 样品制备与测试

淮南煤田 13-1 煤层形成于三角洲平原环境网状河流沉积体系,煤层横向上起伏较大,但区内分布厚而稳定,是全区主要开采煤层,厚度一般为 6~10 m,倾角 5~10°,局部高达 30~50°,煤层顶、底板岩性横向变化大,主要为泥岩或砂质泥岩<sup>[8-9]</sup>.在顾桥、张集和谢桥 3 个矿区采取 13-1 煤及其顶、底板泥岩与砂质泥岩等样品,并选取其中典型的煤岩层样品制作试样,由于煤松散易碎,煤样制作前需先经适度煮胶处理,然后在车床上慢速地车磨到所要求的直径,若加工过程中造成煤样表面微弱残缺,则用早强水泥与粒径不大于 1 mm 的细砂制成的水泥砂浆来补平.岩石声波速度测试使用美国 New England Research 公司开发的 AUTOLAB-1000 多功能岩石声波参数自动测量系统.实验条件控制与模拟主要考虑地层条件下地温与地压状况,地温采用  $T = T_0 + HdT$  计算,根据苏永荣等<sup>[10]</sup>的研究,淮南矿区地表温度  $T_0 = 19.26\text{ }^\circ\text{C}$ ,地温梯度  $dT = 0.027\text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$ ;在不考虑构造应力的情况下,一定深度下水平压力等于垂直压力,且等于单位面积上覆盖岩层的质量,即  $\sigma_h = \sigma_v = \gamma H$ ,取上覆地层容重  $\gamma = 25\text{ kN}/\text{m}^3$ .

## 2 测试结果与分析

### 2.1 煤层及其顶、底板岩石声波速度

从采用的 13-1 煤与顶底板岩石样品中选取典型的顶底板泥岩、砂质泥岩和煤层样品,进行地层条件下声波速度测试,实测获得的纵、横波速度随深度(压力和温度)的变化数据见表 1.表中岩石密度是利用彭苏萍等<sup>[6]</sup>在淮南矿区研究获得的岩石声波速度与岩体密度的回归公式(顶、底板碎屑岩:  $\rho = 0.038v_p^{0.51}$ ;煤:  $\rho = 0.125v_p^{0.318}$ ,其中  $v_p$  的单位为  $\text{m}/\text{s}$ )计算而得.

图 1 给出 13-1 煤及其顶、底板泥岩与砂质泥岩的纵横波速度随深度变化分布情况,总体表现为:煤层较为松散,密度低,纵横波速度也较低,顶、底板泥岩次之,顶、底板砂质泥岩则相对较致密,波速较高,煤岩体纵、横波速度均随深度增加而呈不同程度的增加,且随深度变化均具有较好的对数相关关系,相关系数  $R^2$  皆在 0.95 以上.

### 2.2 煤层顶、底板反射特征及其随深度变化正演分析

#### 2.2.1 反射系数的求解

表 1 13-1 煤及其顶、底板典型岩石特征物理参数

Table 1 Physical parameters of typical rocks characteristics of coal No. 13-1, seam roof and floor

岩性	深度/m	围压/MPa	温度/℃	纵波速度/(m·s <sup>-1</sup> )	横波速度/(m·s <sup>-1</sup> )	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
砂质泥岩			室温	4 002	2 234	2.61
	400	10	30.2	4 137	2 386	2.66
	600	15	35.7	4 264	2 458	2.70
	800	20	40.5	4 333	2 493	2.72
	1 000	25	45.6	4 371	2 532	2.73
	1 200	30	50.7	4 396	2 551	2.74
泥岩			室温	3 512	1 944	2.45
	400	10	30.3	3 658	2 029	2.50
	600	15	35.8	3 703	2 061	2.51
	800	20	40.6	3 786	2 110	2.54
	1 000	25	44.7	3 802	2 121	2.54
	1 200	30	50.4	3 874	2 163	2.57
13-1 煤			室温	1 769	904	1.35
	400	10	30.5	1 964	1 049	1.39
	600	15	35.4	2 079	1 128	1.42
	800	20	40.9	2 140	1 166	1.43
	1 000	25	44.7	2 182	1 202	1.44
	1 200	30	50.6	2 217	1 249	1.45

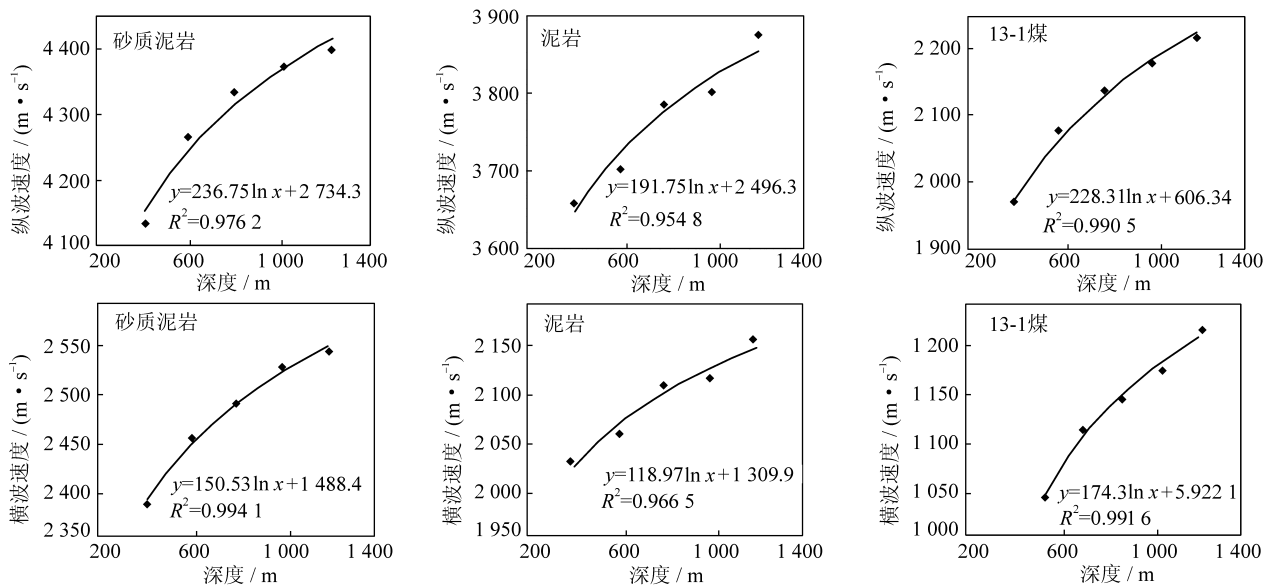


图 1 13-1 煤及顶底板泥岩、砂质泥岩纵横波速度随深度的变化曲线

Fig. 1 The changes of P-wave and S-wave velocity with depth of coal No. 13-1, mudstone and

sand mudstone of coal seam roof and floor

一般情况下,当地震波入射到岩层界面处会产生反射、折射与透射,如图 2 所示,其能量在界面处的重新分配取决于 2 种介质的密度和波速等弹性参数.表示界面处能量分配可用位移表达,即解 Zoeppritz 方程.由于煤层顶板界面两侧弹性参数相对变化量较大,因此本文利用 Matlab 软件进行 Zoeppritz 方程的精确求解,以提高解算精度.完整的 Zoeppritz 方程全面考虑了平面纵波和横波在界面两侧的纵、横波反射和透射能量之间的关系,即

$$\begin{bmatrix} \sin \theta_1 & \cos \varphi_1 & -\sin \theta_2 & \cos \varphi_2 \\ -\cos \theta_1 & \sin \varphi_1 & -\cos \theta_2 & \sin \varphi_2 \\ \sin 2\theta_1 & \frac{v_{P1}}{v_{S1}} \cos 2\varphi_1 & \frac{\rho_2 v_{S2}^2 v_{P1}}{\rho_1 v_{S1}^2 v_{P2}} \sin 2\theta_2 & -\frac{\rho_2 v_{S2}^2 v_{P1}}{\rho_1 v_{S1}^2} \cos 2\varphi_2 \\ \cos \varphi_1 & -\frac{v_{S1}}{v_{P1}} \sin \varphi_1 & -\frac{\rho_2 v_{P2}}{\rho_1 v_{P1}} \cos 2\varphi_2 & -\frac{\rho_2 v_{S2}}{\rho_1 v_{P1}} \sin \varphi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{PP} \\ R_{PS} \\ T_{PP} \\ T_{PS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 \\ -\cos \theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \\ -\cos 2\varphi_1 \end{bmatrix},$$

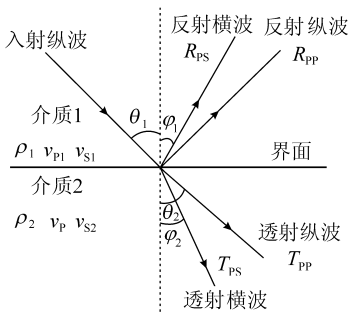


图 2 入射波、反射波和透射波的关系  
Fig. 2 Relationship among incident wave, reflected wave and transmitted wave

式中,  $\theta_1, \theta_2$  分别为纵波入射角、透射角;  $\varphi_1, \varphi_2$  分别为横波反射角、透射角;  $v_{P1}, v_{P2}$  分别为界面上、下岩石的纵波速度;  $v_{S1}, v_{S2}$  分别为界面上、下岩石的横波速度;  $\rho_1, \rho_2$  分别为界面上、下岩石的密度;  $R_{PP}, R_{PS}$  分别为纵波、转换横波反射系数;  $T_{PP}, T_{PS}$  分别为纵波、转换横波透射系数。

这是一个四阶矩阵组成的联立方程组, 当入射角已知时, 按斯奈尔定律求出  $\theta_1, \theta_2, \varphi_1$  和  $\varphi_2$ , 再解上式, 就可以求出 4 个未知数  $R_{PP}, R_{PS}, T_{PP}, T_{PS}$ 。

2.2.2 反射系数与入射角的关系

根据表 1 数据, 利用 Zoeppritz 方程求解 P 波入射时, 反射与透射 P 波、S 波的反射和透射系数, 然后再对所获的数据进行分析。

据进行分析。

图 3, 4 分别给出煤层顶、底板为泥岩和砂质泥岩时, 不同深度下煤层顶、底板反射系数与入射角的关系曲线, 由计算分析结果可知, 随煤层赋存深度的增加, 煤层顶、底板纵波反射系数的绝对值呈减小趋势, 并且其顶板反射系数在小角度 ( $0 \sim 5^\circ$ ) 范围内减小幅度较大, 随后随入射角的增大, 不同深度顶板反射系数差异减小, 反射系数曲线逐渐趋于一致, 如图 3 (a), (b) 所示。

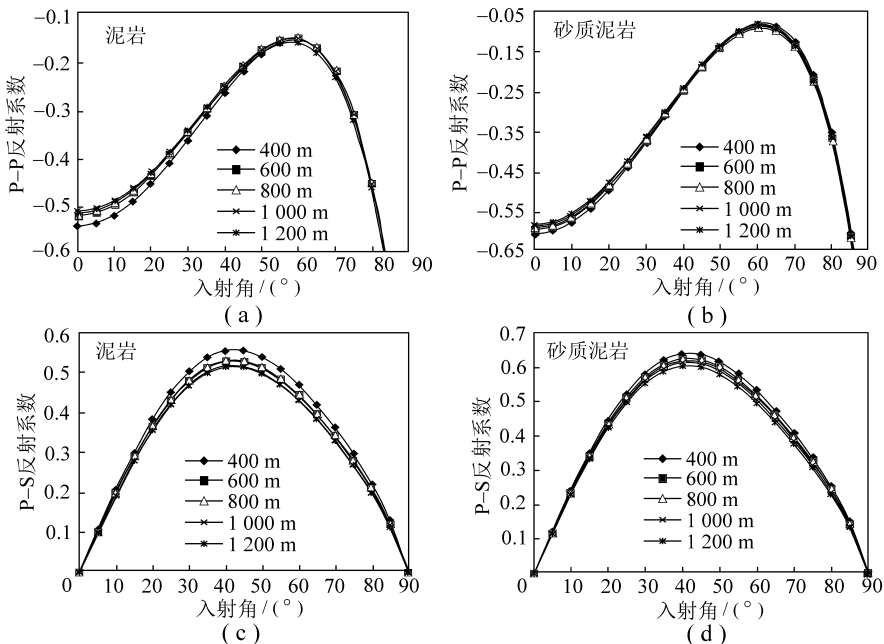


图 3 煤层顶板不同岩性时, 不同深度 P-P, P-S 反射系数与入射角的关系

Fig. 3 Relationship between coefficients of P-P wave and P-S wave with incident angle under different depth and different lithology of coal roof

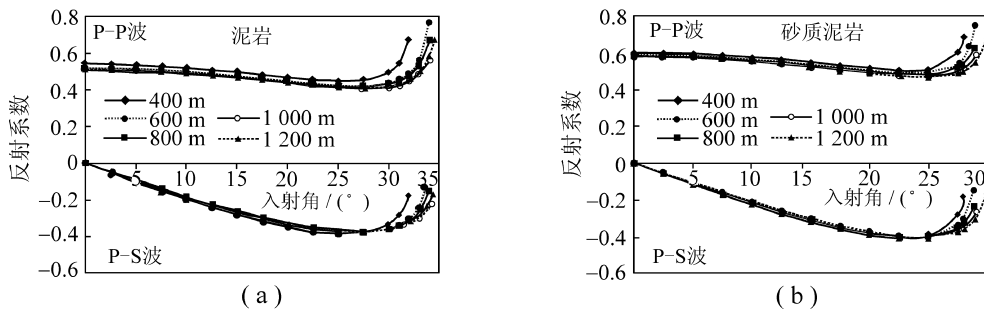


图 4 煤层底板不同岩性时, 不同深度 P-P, P-S 反射系数与入射角的关系

Fig. 4 Relationship between coefficients of P-P wave and P-S wave with incident angle under different depth and different lithology of coal floor

煤层顶板为泥岩, 当 P 波入射时, 按 Zoeppritz 方程精确求解煤层 P 波反射系数为负值 (图 3 (a)), 不同深度反射系数曲线族在  $0 \sim 90^\circ$  范围内为非单调曲线, P-P 波在入射角  $0 \sim 5^\circ$  范围内其反射系数绝对值最大, 但随入射角变化微弱, 在  $5 \sim 57^\circ$  范围内时, 反射系数随入射角单调增加, 随后则急剧降低; P-S 波则在  $0 \sim 37^\circ$  范围内单调上升 (图 3 (c)), 之后单调下降, 在曲线转折端附近反射系数随深度增加而减小的幅度最大. 因此, 研究煤层顶板为泥岩的入射角与反射系数关系时, P-P 波应在入射角  $5 \sim 57^\circ$  范围内进行, 而 P-S 波应在小于  $37^\circ$  范围内进行.

当煤层顶板为砂质泥岩时, 反射系数与入射角的关系如图 3 (d), 其曲线变化和顶板为泥岩图 3 (b) 时相近, 只是反射系数绝对值域稍大, 在入射角  $0 \sim 60^\circ$  范围内 P-P 波反射系数单调增加, P-S 波则在入射角  $0 \sim 35^\circ$  范围内单调上升.

由于煤层为低速层, P 波入射到煤层与其底板界面时, 当入射角  $\theta_1 = 0$  时, 不会产生转换 S 波的反射与透射, 在  $0 \sim 5^\circ$  范围内转换 S 波反射系数很小, 在小角度 ( $0 \sim 10^\circ$ ) 范围内顶、底板转换 S 波反射系数相对于 P 波反射系数较小; 当底板入射角大于临界角  $\theta_c$  时, 底板反射波将发生全反射. 图 4 (a) 为煤层底板是泥岩时不同深度 P-P, P-S 波反射系数与入射角的关系, 可见, P-P 波反射系数随深度增加呈均匀减小的变化状态, 在入射角  $0 \sim 5^\circ$  时反射系数基本不随偏移距变化,  $5 \sim 28^\circ$  范围内缓慢降低, 至临界角附近急剧抬升. P-S 波反射系数绝对值随入射角增大而增大, 在小角度范围其值较小, 之后单调上升, 至临界角附近则急剧减小, 因而, 研究煤层底板为泥岩的入射角 (偏移距) 与反射系数 (振幅) 的关系时应在入射角  $5 \sim 28^\circ$  范围内进行. 煤层底板为砂质泥岩时反射系数与入射角的关系如图 4 (b) 所示, 其变化趋势和底板为泥岩时相近, 只是反射系数值域稍大, P-P 波反射系数在入射角  $5 \sim 25^\circ$  范围内缓慢降低.

总之, 无论煤层顶、底板为砂质泥岩, 还是泥岩, 对于煤层作振幅随偏移距变化 (AVO) 分析时入射角范围一般应选择  $5 \sim 25^\circ$  范围内, 且其上限随煤与其顶、底板速度差异减小而增大.

### 3 结 论

(1) 煤层与其顶底板泥岩、砂质泥岩相比, 密度小, 声波速度低, 因而煤层顶、底板反射系数大, 有利于开展煤田或矿井高分辨率反射地震勘探.

(2) 测试分析表明, 煤层及其顶、底板纵横波速度随深度的增加而加大, 且具有很好的对数相关关系. 煤层顶、底板反射系数不仅随入射角变化而变化, 而且受煤层埋深和顶、底板岩性变化的影响, 随着煤层埋深增加, 其顶、底板反射系数绝对值均减小, 在小角度 ( $0 \sim 5^\circ$ ) 入射时, 煤层顶板 P-P 波反射系数绝对值大, 且随深度增加减小的幅度也大, P-S 波反射系数则较小; 在中等角度范围, 煤层顶板 P-P 波反射系数绝对值随入射角增大而单调减小, 从  $-0.5$  变至  $-0.1$  左右, 反射系数随深度的变化则越来越不明显, P-S 波则随入射角增大而先单调增大, 后单调减小, 转折处反射系数随深度增大减小幅度最大; 煤层底板 P-P 波反射系数在临界角以内随入射角增大呈小幅减小趋势, 随深度增加则呈均匀减小的变化

状态, P-S 波反射系数绝对值随入射角增大而增大, 至临界角附近则急剧减小, 入射角大于等于临界角则在底板发生全反射。因此, 在煤田地震勘探中, 欲通过研究振幅随偏移距变化信息来高分辨探测煤层厚度或结构构造等, 则需综合利用顶、底板反射 P-P 波和 P-S 波信息, 宜在入射角  $5 \sim 25^\circ$  范围进行。

(3) 由于不同煤层及其顶、底板结构与物性基本相近, 因此本文研究结果对淮南矿区其它煤层和其它矿区主采煤层的地震勘探设计与资料处理分析均具有借鉴作用, 但要注意反射系数与入射角变化范围将随煤层及其顶、底板岩性不同而有所变化。

## 参考文献:

- [1] 史 颢, 沈联蒂, 王建新. 岩石声波压实效应的实验研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2004, 40 (2): 177-183.  
Shi Ge, Shen Liandi, Wang Jianxin. Study on compaction effect of rock sonic wave [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2004, 40 (2): 177-183.
- [2] 史 颢, 杨东全. 上覆压力变化时孔隙岩层弹性波速度的确定及其普遍意义 [J]. 中国科学 (D 辑), 2001, 31 (11): 896-901.  
Shi Ge, Yang Dongquan. Determination of elastic wave velocities in pore rock and universal significance when overburden pressure change [J]. Science in China (Series D), 2001, 31 (11): 896-901.
- [3] 孟召平, 张吉昌, Joachim Tiedemann. 煤系岩石物理力学参数与声波速度之间的关系 [J]. 地球物理学报, 2006, 49 (5): 1 505-1 510.  
Meng Zhaoping, Zhang Jichang, Joachim Tiedemann. Relationship between physical and mechanical parameters and acoustic wave velocity of coal measures rocks [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49 (5): 1 505-1 510.
- [4] 孟召平, 李明生, 陆鹏庆, 等. 深部温度、压力条件及其对砂岩岩石力学性质的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (6): 1 177-1 181.  
Meng Zhaoping, Li Mingsheng, Lu Pengqing, et al. Temperature and pressure under deep conditions and their influences on mechanical properties of sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (6): 1 177-1 181.
- [5] 张慎河. 采动岩体声波速度特征实验研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2004.  
Zhang Shenhe. Experimental study on characteristics of acoustic velocity in mining rock mass [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2004.
- [6] 彭苏萍, 高云峰, 彭晓波. 淮南煤田含煤地层岩石物性参数研究 [J]. 煤炭学报, 2004, 29 (4): 177-181.  
Peng Suping, Gao Yunfeng, Peng Xiaobo. Study on the rock physic parameters of coal bearing strata in Huainan coalfield [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29 (4): 177-181.
- [7] 董守华. 地震资料煤层横向预测与评价方法 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004.  
Dong Shouhua. Lateral prediction and evaluation method by seismic data in coal field [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2004.
- [8] 刘钦甫, 刘衡秋, 彭苏萍, 等. 淮南煤田 13-1 煤层顶板地质特征与稳定性研究 [J]. 煤炭学报, 2004, 29 (3): 318-322.  
Liu Qinfu, Liu Hengqiu, Peng Suping, et al. The roof geological features and stability of coal-bed No. 13-1 in Huainan coalfield [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29 (3): 318-322.
- [9] 刘衡秋, 刘钦甫, 张景飞. 淮南煤田开采条件及其综合适应性评价研究 [J]. 煤炭科学技术, 2004, 32 (4): 50-54.  
Liu Hengqiu, Liu Qinfu, Zhang Jingfei. Evaluation study on coal mining conditions and fully mechanized mining suitability of Huainan coal field [J]. Coal Science and Technology, 2004, 32 (4): 50-54.
- [10] 苏永荣, 张启国. 淮南煤田潘谢矿区地温状况初步分析 [J]. 安徽地质, 2000, 10 (2): 124-129.  
Su Yongrong, Zhang Qiguo. Preliminary analysis of the geotemperature situation of the Panxie Mine in Huainan coalfield [J]. Geology of Anhui, 2000, 10 (2): 124-129.