

# 利用测井参数定量识别韩城矿区北区煤体结构

陈粤强<sup>1</sup>, 张晓宏<sup>2</sup>, 浦静怡<sup>2</sup>

(1. 陕西煤田地质油气钻采有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省煤田地质集团有限公司, 陕西 西安 710021)

**摘要:**为了准确识别韩城矿区的煤体结构, 以实现煤层气的高效开发, 在分析韩城矿区北区钻井取心资料的基础上, 将区内煤层的煤体结构划分为更符合实际情况的 I、II、III 类。结合区内 18 口井的测井曲线, 分析了不同煤体结构的测井响应特征, 优选了与煤体结构相关性较好的 3 个参数: 井径 CAL、声波时差 DT、视电阻率幅值差异系数  $F_R$ , 引入地质强度因子 GSI 对煤体结构赋值, 建立了利用测井参数定量识别煤体结构的多元回归方程, 方程中自变量 CAL、DT、 $F_R$  与因变量 GSI 之间符合线性相关关系。实例应用效果表明, 该方程对煤体结构的定量识别结果与钻井取心结果一致, 准确度高, 可用于精确划分煤体结构“甜点区”。

**关键词:**煤体结构; 测井参数; 煤层气开发; 地质强度因子

中图分类号: P618.11 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2017)09-0042-05

## Logging parameters applied to quantitatively identify coal structure in Northern Hancheng Mining Area

CHEN Yueqiang<sup>1</sup>, ZHANG Xiaohong<sup>2</sup>, PU Jingyi<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Coal Geological Oil and Gas Drilling Company Limited, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Coal Geological Group Company Limited, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to accurately identify the coal structure in Hancheng Mining Area, so as to realize high efficient development of coalbed methane, based on the analysis on the well coring data at the Northern Hancheng Mining Area, according to the actual condition, the coal structures of the seams within the mining area was divided into Type I, Type II and Type III. In combination with the logging curves of 18 wells within the mining area, the paper analyzed the logging response features of the different coal structures and optimized three parameters with the good relative of the coal structures. The three parameters were the well diameter CAL, acoustic travel time DT and difference coefficient  $F_R$  of the apparent resistivity amplitude. The geological strength factor GSI was introduced to the valuation of the coal structure. The logging parameters were applied to establish the multiple regression equation to quantitatively identify the coal structure. The independent variables CAL, DT and  $F_R$  and dependent variable GSI in the equation could meet the linear correlation. The case application effect showed that with the equation, the quantitative identification results of the coal structure would be the same to the well coring results and the high accuracy would be applied to accurately divide the “dessert area” of the coal structure.

**Key words:** coal structure; logging parameters; coalbed methane development; geological strength factor

## 0 引 言

韩城矿区煤层气经过多年的开发实践, “有气难采”的局面仍未发生实质性的改变。区内进入排采阶段的煤层气井有上千口, 但大部分单井产量低,

许多井甚至不产气; 水平井技术在经历了多次失败后, 其技术适应性和开发效果受到质疑, 近年再鲜有实施案例。围绕如何提高区内煤层气开发效果的问题, 许多学者在压裂增产、排采优化等方面做了大量工作<sup>[1-4]</sup>, 而从地质角度特别是煤体结构方面进行

收稿日期: 2017-05-06; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2017.09.007

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05061)

作者简介: 陈粤强(1983—), 男, 湖南益阳人, 工程师, 硕士。Tel: 13474352915, E-mail: 544925391@qq.com

引用格式: 陈粤强, 张晓宏, 浦静怡. 利用测井参数定量识别韩城矿区北区煤体结构[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(9): 42-46, 91.

CHEN Yueqiang, ZHANG Xiaohong, PU Jingyi. Logging parameters applied to quantitatively identify coal structure in Northern Hancheng Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 42-46, 91.

的研究不多<sup>[5-6]</sup>。但笔者认为,压裂增产和排采优化的最终着力点还在于煤体结构,只有寻找到煤体结构的“甜点区”,才能从根本上解决韩城矿区煤层气的高效开发问题。

我国利用测井曲线识别煤体结构的研究始于20世纪90年代。早期主要是利用煤田测井中的视电阻率、自然伽马和伽马-伽马曲线来识别构造煤,用以预测煤与瓦斯突出危险性<sup>[7-9]</sup>。煤层气开发兴起后,利用井径、声波时差、深浅电阻率、补偿中子等曲线对煤体结构进行定性识别的研究增多<sup>[10-13]</sup>。近年,一些学者开始尝试引进岩石力学中的一些概念,建立模型对煤体结构进行定量识别,具有一定的可行性<sup>[14-16]</sup>。笔者利用韩城矿区北区18口井的测井资料,结合煤层取心资料,划分符合韩城地区实际的煤体结构类型,并分析不同煤体结构的测井响应特征,找出其变化规律。通过选取合适的测井参数,利用多元回归方法建立煤体结构定量识别模型,以期寻找区内煤体结构“甜点区”提供有效手段。

# 1 煤体结构分类及其测井响应特征

## 1.1 煤体结构分类

目前,国内一般将煤体结构分为原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤和糜棱煤(粉煤)4种类型<sup>[17-19]</sup>。在利用测井曲线分析煤体结构时,由于研究区域、使用曲线和识别方法的不同,不同学者都根据需要对煤体结构进行了进一步的划分。这些分类方法中,通常将原生结构煤单独列为一类,但韩城矿区由于经历了多期构造运动的影响,煤体结构较为破碎,原生结构煤很少,而碎裂煤、碎粒煤和粉煤较发育。从研究区已施工煤层气井采取煤心的描述结果看(表1),区内3号煤和11号煤多表现为块状、碎块状、碎粒状及粉状结构,少部分为短柱状,完整的煤心极少。

表1 韩城矿区北区煤层气井煤心描述结果统计  
Table 1 Coal core description results of CBM wells in northern Hancheng Mining Area

煤层	比例/%			
	短柱状、块状	碎块状	碎粒状	粉状
3号	11	20	32	37
11号	17	26	34	23

据此,将韩城矿区北区煤层的煤体结构分为3类:I类以块状煤为主,含部分碎块煤;II类以碎块煤为主,含部分碎粒煤;III类以粉煤为主,含部分碎粒煤。

## 1.2 测井响应特征

区内煤层气开发的主要煤层为3号煤和11号煤,均属于变质程度高的无烟煤与贫煤。测井采集的参数主要有井径CALX、井径CALY、自然伽马GR、自然电位SP、深侧向电阻率LLD、浅侧向电阻率LLS、微球形聚焦电阻率MSFL、补偿密度DEN、声波时差DT、补偿中子CNL等10个,各煤层在测井曲线上“三高三低”的特性明显,易于识别。

分析区内煤层取心资料发现:横向上,煤体结构与构造分布密切相关,中部构造简单区煤体结构较好,南、北两端构造复杂区煤体结构较差;纵向上,同一煤层深部煤体结构较浅部好,11号煤较3号煤的煤体结构好,但无论3号煤还是11号煤,相同的煤体结构在测井曲线上的响应特征都较为相似。

1) I类煤体结构。CALX、CALY曲线呈缓波浪状,X方向和Y方向井径幅值差异较小,基本同幅变化,说明不同方向扩径差异不明显,最大井径扩大值一般小于6 cm。MSFL与LLD、LLS曲线同趋势变化明显,但MSFL曲线在层内波动幅度较大,而LLD、LLS曲线在层内较稳定,曲线较为平滑,MSFL电阻率值通常较LLD、LLS电阻率小,但三者之间的幅值差异较小。电阻率最大幅值多在1 000~2 000  $\Omega \cdot m$ ,仅HP15井3号煤上段低于200  $\Omega \cdot m$ ,其原因可能是该井附近煤层裂隙更为发育。DT曲线在煤层段较为平滑,局部波动较小,幅值最大值一般小于410  $\mu s/m$ 。如HP27井11号煤,测井响应特征反映为I类煤体结构,如图1所示。

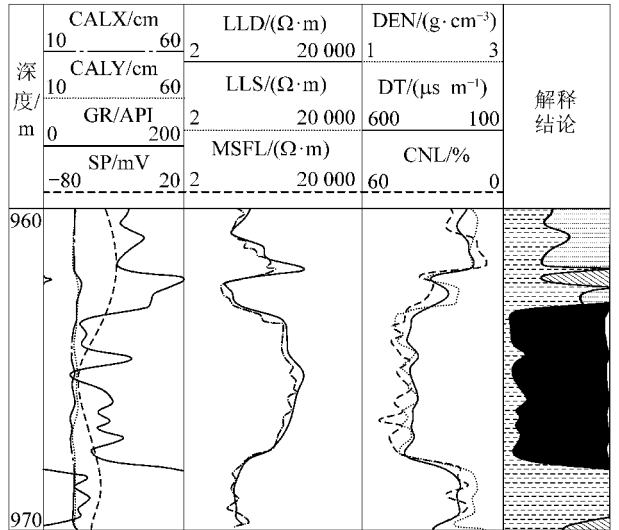


图1 I类煤体结构的测井响应特征(HP27井,11号煤)  
Fig. 1 Logging response characteristics of coal structure class I (Well HP27, Seam 11)

2) II类煤体结构。CALX、CALY 曲线呈波浪状,但幅值变化较大,以 X 方向和 Y 方向井径幅值差异明显为特征,扩径程度较 I 类煤体结构大,最大井径扩大值一般在 6~16 cm。MSFL 曲线幅值在煤层内部变化较为剧烈,无明显规律,其幅值明显较 LLD、LLS 幅值小,且不与 LLD、LLS 曲线同向变化。LLD、LLS 曲线基本同趋势变化,两曲线有一定的幅值差,但通常不明显。总体而言,电阻率曲线幅值在不同井中变化较大,在 200~8 000 Ω·m,一方面是由于煤变质程度的影响,另一方面也有可能是煤体的不均质性导致裂隙各向异性明显。DT 曲线在煤层段幅值平稳,有小幅宽缓波动,厚煤层较为平缓,薄煤层起伏明显,幅值最大值一般在 410~480 μs/m。如 HP15 井的 3 号煤下段和 HP18 井的 3 号煤上段,测井响应特征反映为 II 类煤体结构,如图 2 和图 3 所示。

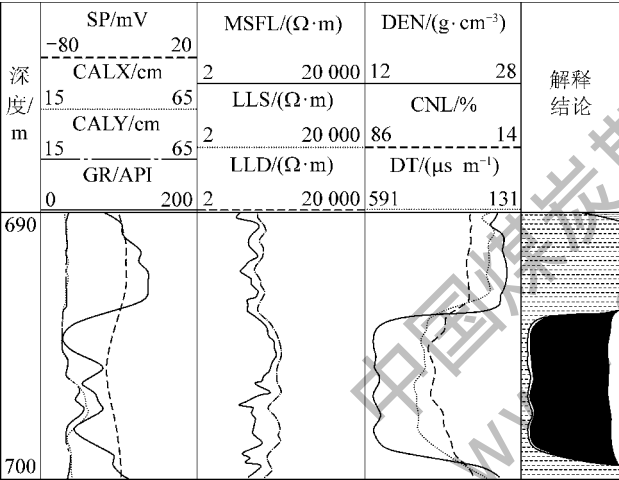


图 2 II 类煤体结构的测井响应特征(HP15 井,3 号煤)

Fig. 2 Logging response characteristics of coal structure class II (Well HP15, Seam 3)

3) III类煤体结构。CALX、CALY 曲线呈现箱形或连续陡波形,井径扩径严重,X 方向和 Y 方向井径幅值有差异,但基本能同步变化,这是与 II 类煤体结构不同的地方,最大井径扩大值一般大于 16 cm,最大达到 34 cm,在厚煤层中扩径相对大,薄煤层中扩径相对较小。MSFL、LLD、LLS 曲线形态变化基本与 II 类煤体结构类似,但 MSFL 曲线与 LLD、LLS 曲线的幅值差要比 II 类煤体结构大。LLD、LLS 曲线呈破浪状或小幅宽缓波动形态,最大幅值一般小于 500 Ω·m。DT 曲线形态在煤层段较为平缓,幅值最大值通常大于 480 μs/m。如 HP28 井 3 号煤,测井响应特征反映为 III 类煤体结构,如图 4 所示。

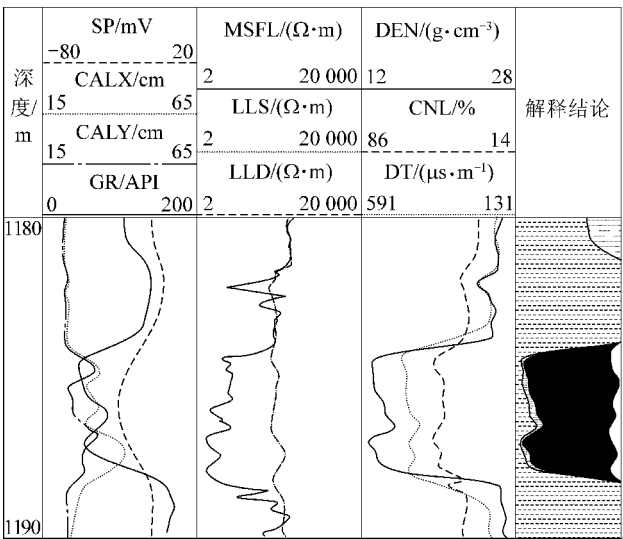


图 3 II 类煤体结构的测井响应特征(HP18 井,3 号煤)

Fig. 3 Logging response characteristics of coal structure class II (Well HP18, Seam 3)

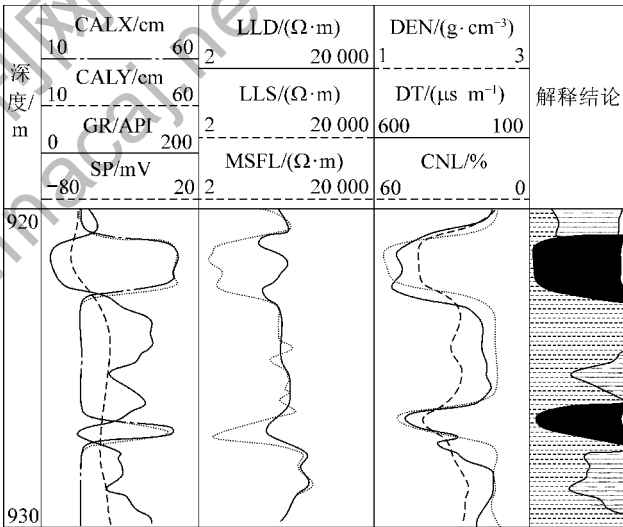


图 4 III 类煤体结构的测井响应特征(HP28 井,3 号煤)

Fig. 4 Logging response characteristics of coal structure class III (Well HP28, Seam 3)

## 2 煤体结构定量分析

### 2.1 测井参数定量处理

用于定量分析的测井参数,应对煤体结构的变化响应精确,相关性明显,受其他外在因素的干扰较小。通常,如果煤层原生结构没有受到破坏,则它的纵波速度是大致相同的。如因外力作用而煤体结构发生变化,煤体产生破碎、粉碎,则煤层的非弹性特征增强,使纵波速度远低于原生结构煤的速度,引起煤层的整体波速降低,DT 值增大。因而 DT 值是最能反映煤体结构好坏的关键参数之一。从研究区各

类煤体结构的 DT 值响应特征来看,Ⅰ类煤体结构  $DT<410\ \mu\text{s}/\text{m}$ ,Ⅱ类煤体结构  $410\ \mu\text{s}/\text{m}<DT<480\ \mu\text{s}/\text{m}$ ,Ⅲ类煤体结构  $DT>480\ \mu\text{s}/\text{m}$ ,具有很好的辨识度。

MSFL、LLD、LLS 三个参数中,LLD 值主要由煤体结构、裂隙充填物的电阻率来决定,而 MSFL、LLS 值受井径和钻井液的影响较大。因此,将 LLD 值作为另一个识别煤体结构的重要参数。但由于研究区煤体结构整体较为破碎,原生结构煤很少,LLD 值变化规律不明显,因此单凭 LLD 值识别煤体结构效果并不好。结合上述煤体结构测井响应特征分析可知,MSFL 与 LLD 的幅值差可以较明显地辨识三类煤体结构。为了消除 LLD 幅值变化的影响,构建 1 个新参数:视电阻率幅值差异系数  $F_R$ ,其计算公式见式(1)。

$$F_R = \frac{|LLD - MSFL|}{LLD} \times 100\% \quad (1)$$

双井径 CALX、CALY 受煤体结构的影响也较为明显,对煤体结构有很好辨识度,取其平均值  $(CALX+CALY)/2$  作为定量分析的另一个参数。

本次研究共采集区内 18 口煤层气井测井曲线上有代表性的参数 25 组共 125 个,经处理后,不同煤体结构定量分析参数的响应范围见表 2。

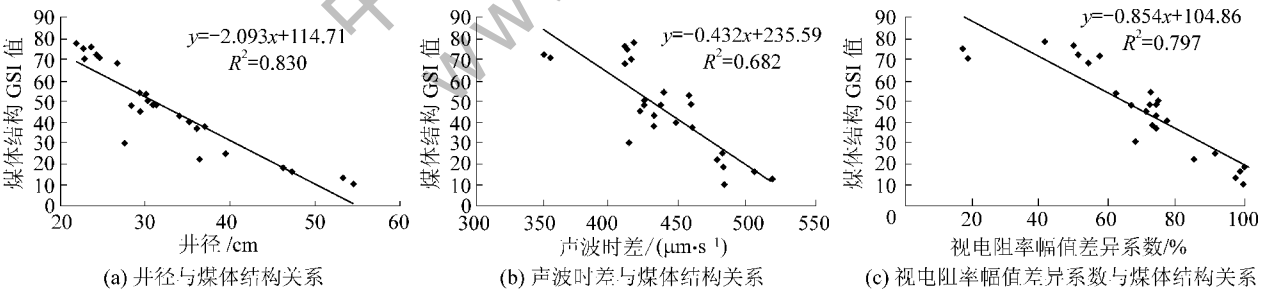


图 5 韩城矿区北区煤体结构 GSI 值与测井参数相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis about GSI value and logging parameters in northern Hancheng Mining Area

建立煤体结构 GSI 值与测井参数的多元回归方程为

$$GSI = a \times CAL + b \times DT + c \times F_R + d \quad (2)$$

其中: $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为回归系数。

利用选取的 25 组参数进行拟合,求得各回归系数为: $a = -0.833$ ,  $b = -0.119$ ,  $c = -0.401$ ,  $d = 153.449$ ,即研究区煤体结构与测井参数的多元回归方程为

表 2 不同煤体结构定量分析参数的响应范围

Table 2 Response range of quantitative analysis parameters of different coal structures

类型	DT/( $\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$F_R/\%$	CAL/cm
Ⅰ类	349.86~416.13	16.80~57.12	21.90~26.60
Ⅱ类	413.90~459.05	62.58~77.52	27.62~37.04
Ⅲ类	478.68~518.73	85.35~99.90	36.36~54.45

注:CAL 为平均井径。

2.2 煤体结构定量解释模型

煤体结构与测井参数之间的关系可用多元回归方程进行分析。在进行多元回归分析前,需要将不同的煤体结构赋值,借鉴近年一些学者引入的地质强度因子(GSI)概念和其对煤体结构的估测值<sup>[20]</sup>,充分考虑韩城矿区煤体结构受构造破坏的实际情况,确定不同煤体结构的地质强度因子值见表 3。

表 3 不同煤体结构的地质强度因子估值

Table 3 Geological strength index estimation of different coal structures

类型	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类
GSI 值	60~80	30~60	0~30

对不同煤体结构赋予 GSI 值后,将 CAL、DT 和  $F_R$  三个参数分别与 GSI 值进行单因素回归分析,结果如图 5 所示。可以看出,研究区内煤体结构 GSI 值与井径、声波时差和视电阻率幅值差异系数的相关性都比较好。

$$GSI = -0.833CAL - 0.119DT - 0.401F_R + 153.449 \quad (3)$$

该方程的相关系数  $R = 0.946$ ,拟合优度  $R^2 = 0.894$ ,各自变量参数 CAL、DT、 $F_R$  的弃真概率分别为 0.046、0.084、0.006,即置信度分别为 95.4%、91.6%、99.4%,说明方程的拟合效果较好。

3 实例应用

采集研究区内 HP15 井 3 号煤层有关测井参数



(图2),利用回归方程(3)对煤体结构进行分层。结果显示:3号煤层煤体结构 GSI 值为 46~78,其中井深 693.9~696.9 m,  $GSI>60$ ,为 I 类煤体结构;井深 696.9~700.1 m,  $30<GSI<60$ ,为 II 类煤体结构。据该井钻井煤心描述,井深 694.4~697.2 m 为块状,697.5~700.6 m 为碎块状、碎粒状。可见,利用确定的多元回归方程计算的煤体结构 GSI 值与钻井取心描述的煤体结构基本对应,检验效果较好,如图 6 所示。

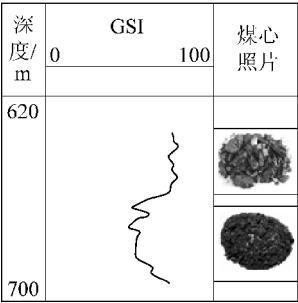


图6 煤心照片及 GSI 值(HP15 井,3 号煤)

Fig. 6 Photo of mine core and GSI(Well HP15, Seam 3)

4 结 论

- 1)将研究区内煤体结构分为 I、II、III 类符合实际情况,各类煤体结构的测井响应特征差异明显,易于区分和识别。
- 2)测井参数中的井径 CAL、声波时差 DT 及构建的视电阻率幅值差异系数  $F_R$ ,与煤体结构地质强度因子 GSI 相关性较好,据此建立的多元回归方程对煤体结构的拟合度较好。实例应用结果表明,利用测井参数定量识别的煤体结构与钻井取心描述的煤体结构基本一致。
- 3)自然伽马 GR、补偿密度 DEN 和补偿中子 CNL 三个参数与煤体结构也有一定的关系,但从研究区现有的测井资料中未发现明显相关规律,有待后续进一步研究。

参考文献(References):

[1] 邵先杰,董新秀,汤达祯,等.韩城矿区煤层气中低产井治理技术与方法[J].天然气地球科学,2014,25(3):435-443.  
SHAO Xianjie, DONG Xinxu, TANG Dazhen, et al. Treatment technology and method of low-to-moderate production coalbed methane wells in Hancheng Mining Area[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(3): 435-443.

[2] 赵俊龙,汤达祯,林文姬,等.韩城矿区煤层气井分层合采产能特征及分布模式[J].煤炭科学技术,2015,43(9):80-86.

ZHAO Junlong, TANG Dazhen, LIN Wenji, et al. Productivity characteristics and distribution modes of multi-layer drainage coalbed methane wells in Hancheng Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(9): 80-86.

[3] 接敬涛.韩城矿区煤层气开发技术优化[D].秦皇岛:燕山大学,2016.

[4] 马平华,霍梦颖,何俊,等.煤层气井压裂影响因素分析与技术优化:以鄂尔多斯盆地东南缘韩城矿区为例[J].天然气地球科学,2017,28(2):296-304.  
MA Pinghua, HUO Mengying, HE Jun, et al. Influencing factors and technology optimization of coalbed methane well fracturing: taking Hancheng Mining Area as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(2): 296-304.

[5] 魏迎春,曹代勇,袁远,等.韩城区块煤层气井产出煤粉特征及主控因素[J].煤炭学报,2013,38(8):1424-1429.  
WEI Yingchun, CAO Daiyong, YUAN Yuan, et al. Characteristics and controlling factors of pulverized coal during coalbed methane drainage in Hancheng Area[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8): 1424-1429.

[6] 刘宇,要惠芳,姬新强.韩城矿区煤体结构对煤层气排采效果分析[J].煤炭技术,2016,35(7):120-122.  
LIU Yu, YAO Huifang, JI Xinqiang. Analysis of effect of coal body structure on high rank CBM in Hancheng Area of coal[J]. Coal Technology, 2016, 35(7): 120-122.

[7] 张玉贵,樊孝敏,王世国.测井曲线在研究构造煤中的应用[J].河南理工大学学报:自然科学版,1995(1):76-78.  
ZHANG Yugui, FAN Xiaomin, WANG Shiguo. Application of logging curve in the study of tectonic coal[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Nature Science, 1995(1): 76-78.

[8] 傅雪海,陆国桢.测井曲线在预测煤与瓦斯突出中的作用[J].中国煤炭地质,1998(S1):82-83.  
FU Xuehai, LU Guozhen. The role of logging curve in predicting coal and gas outburst[J]. Coal Geology of China, 1998(S1): 82-83.

[9] 孙四清,陈致胜,韩保山,等.测井曲线判识构造软煤技术预测煤与瓦斯突出[J].煤田地质与勘探,2006,34(4):65-68.  
SUN Siqing, CHEN Zhisheng, HAN Baoshan, et al. Technology of identifying deformed soft coal using well log: an approach to the regional prediction of coal and gas outburst in coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 34(4): 65-68.

[10] 陈跃,汤达祯,许浩,等.基于测井信息的韩城地区煤体结构的分布规律[J].煤炭学报,2013,38(8):1435-1442.  
CHEN Yue, TANG Dazhen, XU Hao, et al. The distribution of coal structure in Hancheng based on well logging data[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8): 1435-1442.

[11] 郭涛,王运海.延川南煤层气田2号煤层煤体结构测井评价及控制因素[J].煤田地质与勘探,2014(3):22-25.  
GUO Tao, WANG Yunhai. Evaluation of logging of coal texture of seam 2 in southern Yanchuannan and analysis of its main controlling factors[J]. Coal Geology & Exploration, 2014(3): 22-25.

- 2014,39(6):1000-1008.
  - [13] 张国华.主动支护下沿空留巷顶板破碎原因分析[J].煤炭学报,2005,30(4):429-432.  
ZHANG Guohua. Roof cracking reason analysis about gob-side entry retaining under initiative support[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(4): 429-432.
  - [14] 郭鹏飞, 张国锋, 陶志刚. 坚硬软弱复合顶板切顶卸压沿空留巷爆破技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(10): 120-124.  
GUO Pengfei, ZHANG Guofeng, TAO Zhigang. Blasting technology of gateway retaining along goaf pressure release by roofcutting in hard and weak complex roof[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(10): 120-124.
  - [15] YANG Xiaojie, Pang Jiewen. Characteristics of in situ stress field at Qingshui coal mine[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(3): 497-501.
  - [16] 何满潮, 郭志彪. 恒阻大变形锚杆力学特性及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1297-1308.  
HE Manchao, GUO Zhibiao. Mechanical property and engineering application of anchor bolt with constant resistance and large deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1297-1308.
  - [17] 李松强. 液压抬棚支架在深部回采巷道支护中的应用[J]. 能源技术与管理, 2014(3): 87-89.  
LI Songqiang. Application of hydraulic lifting support in deep mining roadway support[J]. Energy Technology and Management, 2014(3): 87-89.
  - [18] 汪为峰. 轻型单体液压支柱在井下临时支护中的应用[J]. 山东煤炭科技, 2011(1): 71-72.  
WANG Weifeng. Hydraulic prop light provisional support in the underground application[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2011(1): 71-72.
  - [19] 张先声, 钱鸣高. 煤矿开采方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.
  - [20] 李建辉, 冯光明, 宁 帅, 等. 综采沿空留巷巷旁支护技术与应用[J]. 中国矿业, 2009, 18(3): 77-79.  
LI Jianhui, FENG Guangming, NING Shuai, et al. The technology and application of roadsides supporting for gob-side entry retaining in full-mechanized mining[J]. China Mining Magazine, 2009, 18(3): 77-79.
  - [21] 周俊帆, 李大伟, 李登月, 等. 高强度 U 型钢支架在软岩巷道支护中的应用[J]. 煤炭技术, 2010, 29(12): 80-82.  
ZHOU Junfan, LI Dawei, LI Dengyue, et al. Application of high strength U section steel support in soft rock roadway[J]. Coal Technology, 2010, 29(12): 80-82.
- (上接第 46 页)
- [12] 何 游. 韩城地区煤体结构判识方法及分布规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
  - [13] 林堃琦, 黄文辉, 张 谦, 等. 基于测井信息对沁水盆地南部构造煤分布规律的研究[J]. 中国煤炭地质, 2016, 28(3): 74-78.  
LIN Kunqi, HUANG Wenhui, Zhang Qian, et al. Study on tectonoclastic coal distribution pattern in southern Qinshui basin based on well logging information[J]. Coal Geology of China, 2016, 28(3): 74-78.
  - [14] 何 游, 要惠芳, 陈 强. 基于测井响应的韩城矿区煤体结构定量判识方法[J]. 煤矿安全, 2015, 46(6): 178-182.  
HE You, YAO Huifang, CHEN Qiang. Quantitative identification method for coal body structure based on logging response in Hancheng mining area[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(6): 178-182.
  - [15] 艾 林, 周明顺, 张 杰, 等. 基于煤岩脆性指数的煤体结构测井定量判识[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(2): 139-144.  
AI Lin, ZHOU Mingshun, ZHANG Jie, et al. Quantitative identification of coal structure based on coal rock brittleness index by logging data[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(2): 139-144.
  - [16] 陶传奇, 王延斌, 倪小明, 等. 基于测井参数的煤体结构预测模型及空间展布规律[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(2): 173-177.  
TAO Chuanqi, WANG Yanbin, NI Xiaoming, et al. Prediction model of coal-body structure and spatial distribution law based on logging parameters[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(2): 173-177.
  - [17] 胡 奇, 王生维, 张 晨, 等. 沁南地区煤体结构对煤层气开发的影响[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(8): 65-68.  
HU Qi, WANG Shengwei, ZHANG Chen, et al. Coal structure affected to coalbed methane development in Qinnan region[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(8): 65-68.
  - [18] 孟召平, 刘珊珊, 王保玉, 等. 晋城矿区煤体结构及其测井响应特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2): 58-63.  
MENG Zhaoping, LIU Shanshan, WANG Baoyu, et al. Study on feature of coal body structure and logging response in Jincheng mining area[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 58-63.
  - [19] 赵家攀, 张永琪, 张 帅, 等. 煤体结构对煤层气井产能的影响及其对策[J]. 中国煤层气, 2017(2): 9-12.  
ZHAO Jiapan, ZHANG Yongqi, ZHANG Shuai, et al. Effect of coal body structures on CBM wells' production and solutions[J]. China Coalbed Methane, 2017(2): 9-12.
  - [20] 李广生, 孙明闯, 史小卫, 等. 基于地质强度因子的煤体结构精细描述[J]. 中州煤炭, 2015(7): 121-124.  
LI Guangsheng, SUN Mingchuan, SHI Xiaowei, et al. Fine description of coal structure based on geological strength index[J]. Zhongzhou Coal, 2015(7): 121-124.