

基于测井参数的煤体结构预测模型及空间展布规律

陶传奇¹, 王延斌¹, 倪小明², 张崇崇¹, 马婷¹

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 为了定量、准确地预测煤体结构空间展布, 基于沁水盆地柿庄北区块煤层气测井和钻井取心数据, 引入煤岩地质强度因子的概念, 对煤岩煤体结构进行宏观描述与定量表征, 通过分析煤体结构表征值与各测井曲线间相关性, 选取体积密度、自然伽马、井径、声波时差、电阻率曲线, 利用多元回归分析方法, 建立了煤体结构预测模型, 并对取心煤体结构进行了验证, 对柿庄北区块煤体结构进行单井分层划分, 进而揭示其空间分布规律。结果表明: 基于测井参数建立的煤体结构预测模型准确性较高, 可供煤层气储层改造借鉴应用。

关键词: 测井参数; 煤体结构; 回归分析; 沁水盆地

中图分类号: TD15; P584

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2017)02-0173-06

Prediction model of coal-body structure and spatial distribution law based on logging parameters

Tao Chuanqi¹, Wang Yanbin¹, Ni Xiaoming², Zhang Chongchong¹, Ma Ting¹

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China.)

Abstract: In order to make quantitative and accurate forecast of coal-body structure about its spatial distribution, making a macroscopic description and quantitative characterization on coal-body structure by introducing coal Geology Strength Index (GSI) concept, the relationship between quantitative characterization of coal-body structure and logging parameters were analyzed, based on coalbed methane well loggings and drilling data in northern Shizhuang Area of Qinshui Basin. Logging parameters were chosen, such as volume density, gamma, hole diameter, interval transit time, resistivity. Then the forecast model of coal-body structure was built by means of multi-factor regression analysis, and a contrast verification was made between prediction model and coring coal-body structure. Coal-body structure of single wells were divided and the spatial distribution law was announced in northern Shizhuang Area. The results showed that the forecast model of coal-body structure was reliable, based on logging parameters. It could provide guidance for coalbed methane reservoir reconstruction.

Key words: logging parameters; coal-body structure; regression analysis; Qinshui Basin

0 引 言

煤体结构是煤层各组成部分颗粒大小、形态特征及其组合关系的表现, 是煤储层渗透率的影响因素之一。根据煤体破碎程度不同, 煤体结构可分为原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤和糜棱煤4类^[1]。实际生产中煤体结构划分的直接方法是煤体结构矿井编录和钻孔煤心描述, 但对于未开采煤层矿区和钻井

不能取岩心地区, 如何获取煤体结构信息成为很大难题。

我国学者在应用测井资料研究煤体结构方法上已经做了相关研究, 其中傅雪海等^[2]应用测井曲线形态、幅值划分煤体结构, 并利用聚类分析法划分了两淮煤田各矿井的煤体结构。汤友谊等^[3]发现构造煤在计算机上有特殊的识别方法, 应用概率统计、斜率方差分层的方法, 实现了计算机对构造软煤的

收稿日期: 2016-10-12; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2017.02.029

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05042-003-001); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110023130001)

作者简介: 陶传奇(1988—), 男, 吉林公主岭人, 博士研究生。Tel: 15201291073, E-mail: 862439204@qq.com

引用格式: 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, 196.

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, 196.

自动识别。姚军朋等^[4]基于测井资料,应用 Archie 公式求解构造煤孔隙结构指数,以此识别构造煤。陈健杰等^[5]试验测试了不同视电阻率条件下原生结构煤和构造煤的视电阻率,试验结果表明原生结构煤的视电阻率明显高于构造煤。倪小明等^[6]探讨了钻进过程中不同煤体结构组合下井径扩径的主控因素。

但以往对煤体结构表征的研究多集中于定性识别煤体结构。如何准确、定量地识别煤体结构却鲜有研究。为了能够实现煤体结构准确表征,笔者基于测井参数,通过引入地质强度因子(GSI)进行定量描述,利用多元回归拟合的方法,建立煤体结构预测模型,实现对煤体结构的定量表征。采用测井参数建立的预测模型,划分了柿庄北区块单井煤体结构,进而揭示其空间分布规律特征。

1 地质概况

沁水盆地总体是一个大型复式向斜构造,褶皱与断裂较为发育。柿庄北区块位于沁水盆地东南部地层较平缓的斜坡上,地质构造以褶曲为主,大断裂较少,小断层局部发育^[7-9]。区块总体上是一个西倾的单斜构造,中央贯穿南北的向斜构造又将区块分为3个次一级构造单元:西部总体是一个凹槽,有几条规模较大的断层,这对煤层起伏影响很大,构造情况复杂^[10-11];中部挤压严重的向斜南北贯穿,轴向NNE;东部是平缓的单斜构造,呈SE向缓慢抬升,倾角一般小于5°,规模较小的断层局部发育^[12]。区块煤层发育较多,其中山西组3号煤层和太原组15号煤层厚度较大,全区稳定分布,是煤层气勘探的主力煤层。

对于主要研究的3号煤层赋存条件有:煤层埋深830~1600 m,煤厚4~6 m,平均为5.82 m,部分煤层有0.24~0.70 m厚度砂质泥岩或泥岩的夹层,总体呈东高西低。宏观煤岩组分以亮煤为主,偶夹镜煤条带,具垂直节理,内生裂隙较为发育^[13-14]。

2 煤体结构测井响应原理

实现测井参数评价和预测煤体结构,要以不同煤体结构具有不同测井响应特征为基本原理,再结合钻井取心数据进行对比分析。不同煤体结构间存在着物性差异,通常随煤体遭受构造破坏程度的增加,会出现声波时差增大;孔裂隙发育,密度降低;因煤体破碎,单位体积内放射性物质含量减少,自然伽

马表现为低异常等^[2,15]。这些差异在各地球物理测井上会产生不同响应特征,从而为测井参数预测煤体结构提供理论依据。

1) 电阻率测井特征:随煤体破碎煤空隙率增加,煤体中小分子自由基浓度增高,导电离子在电场和水分子作用下迁移性增强,使得电阻率有减小的趋势^[16]。

2) 井径测井特征:煤体破坏程度越高,则煤体结构越疏松,在钻井过程中容易造成井壁垮塌,发生扩径现象,所以煤体结构破坏程度越高,其井径测井值越大。

3) 自然伽马测井特征:煤体结构破坏程度越高,则煤体孔隙和裂隙越发育,单位体积内放射性物质质量降低,自然伽马值表现为低异常^[17]。

4) 密度测井特征:煤体结构的差异使得煤体具有不同的松散度,可由煤体密度的变化进行反映,煤体越破碎其密度值越小。

5) 声波时差测井特征:随煤体破碎程度增加,声波在煤体中传播速度减小,声波时差增大。

3 煤体结构测井解释模型的建立

柿庄北区块3号煤层全区发育,变质程度高^[18-19]。要想实现测井参数预测煤体结构,首先要将煤体结构进行定量表征,笔者尝试引入地质强度因子(GSI)的方法,GSI岩体分类体系是由E. Hoek创立的一种岩体分类方法,图1中斜线上的数值即GSI取值,“N-A”表示在这个范围内不适用(图1)。

利用原岩的力学性质和岩体观察结果估算岩体的强度来确定其值。GSI值的确定主要依据岩块块度和不连续面状况2个基本参数。煤也是特殊的岩石,煤体结构可以反映煤的整体性,外生裂隙和割理均属于不连续面,而被切割的基质块则相似于岩体分类中的块度,两者相似^[17-20]。将煤体结构特征分为4类:①原生结构煤(I类):完整层状,原生结构完整,宏观煤岩类型界限清晰,煤岩成分可辨,大部分未错开层理,无揉皱及构造滑面,坚硬;②碎裂结构煤(II类):层状透镜体,宏观煤岩类型界面清晰,煤岩成分可辨,原生结构轻微破坏,外生裂隙发育,轻微错开层理,较坚硬;③碎粒结构煤(III类):煤层变形为透镜体,煤体破碎,宏观煤岩类型整体不可分辨,原生结构遭受严重破坏,层理难辨,煤体多被裂隙割成块体,常见揉皱,滑面发育,手试较疏松;④糜棱结构(IV类):煤岩呈鳞片状或微小碎粒状,宏观

煤岩类型不可分辨,原生结构遭受严重破坏,揉皱发育,手试疏松。煤体表面质量越好、煤岩块之间连接作用越强,表示煤体结构越完整,则煤岩 GSI 值越大。按其完整性分为非常好、较好、一般、差、很差 5 种: ①非常好: 结构面极其粗糙,裂隙宽度极小,肉眼无法辨识; ②较好: 结构面较粗糙,裂隙宽度肉眼可辨识; ③一般: 结构面平整或被改造,裂隙宽度可明显辨识; ④差: 结构面光滑且相互交错,夹角砾充填物; ⑤很差: 结构面很光滑,镜面发育且非常破碎。基于该原理实现对煤体结构定量分析,建立测井预测煤体结构模型。

选取有代表性的柿庄北区块取心样品进行宏观描述,依据 GSI 岩体分类系统对样品煤体结构定量表征。进而对煤体结构 GSI 值与各测井参数进行相关性分析(图 2),可以看出,柿庄北区块煤体结构 GSI 值与该区自然伽马、井径、声波时差、深侧向电阻率的对数和体积密度测井参数存在一定的相关性。

煤体结构	非常好	较好	一般	差	很差
	煤体结构 GSI 量化值				
I	90	80	70	—	—
II	—	60	50	40	30
III	—	—	—	—	20
IV	—	—	—	—	10

图 1 GSI 岩体分类系统

Fig. 1 GSI rock mass classification system

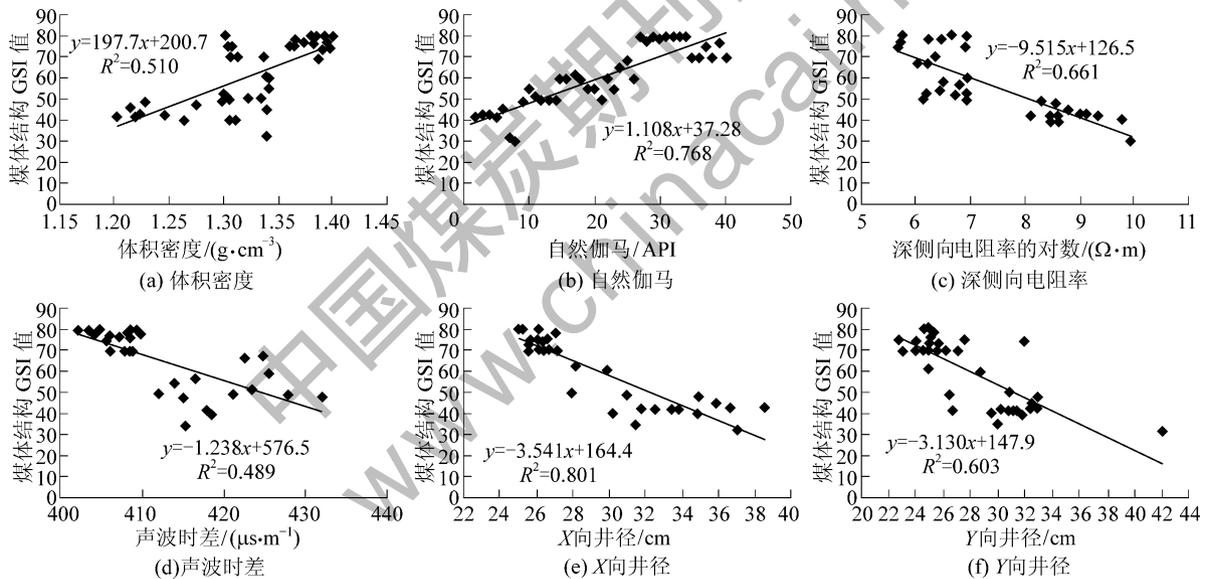


图 2 柿庄北区块煤体结构 GSI 值与测井参数相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis about characterization value and logging parameters in northern Shizhuang Area

考虑到单一测井曲线受钻井液、施工和地质条件等影响,如果按照单参数建立解释模型,很难满足生产评价模型的准确性,因此,利用多测井参数建立多元回归解释模型是排除单因素误差的方式之一^[24]。选取与煤体结构 GSI 值相关性较好的自然伽马、井径、声波时差、深侧向电阻率的对数和体积密度为参数,建立多元回归方程:

$$M = aD + bG + cC_X + dC_Y + e \ln R_D + fA + g \quad (1)$$

式中: M 为煤体结构 GSI 值; a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 为回归系数; D 为体积密度 g/cm^3 ; G 为伽马值, API; C_X 为

X 向井径 μm ; C_Y 为 Y 向井径 μm ; R_D 为深侧向电阻率 $\Omega \cdot m$; A 为声波时差 $\mu s/m$ 。

通过拟合得出各回归系数值分别为: $a=0$ 、 $b=-0.165$ 、 $c=-2.811$ 、 $d=-1.277$ 、 $e=-2.393$ 、 $f=0$ 、 $g=204.174$, 所以,煤体结构测井解释模型为

$$M = -0.165G - 2.811C_X - 1.277C_Y - 2.393 \ln R_D + 204.174 \quad (2)$$

回归方程的相关性系数 R^2 为 0.88, 说明自变量与因变量间存在较密切的相关关系。 R^2 的调整

值为 0.856,表示排除自变量数量的影响后,该模型的拟合度较好。对回归方程进行 F 检验,拟合计算得出 $F = 37.721$,若取显著性水平为 0.05,查得 $F_{0.05}(4, 33) = 2.659 < F$,故认为自然伽马、深侧向电阻率、井径与煤体结构 GSI 值间存在线性关系,所建立的回归方程是显著的。

4 煤体结构分层划分与展布规律

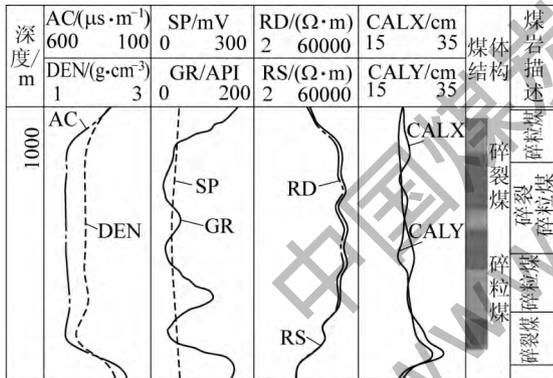
4.1 柿庄北区块煤体结构分层划分

依所建多元回归模型预测单井煤体结构(图3),从图3a可知:碎裂煤和碎粒煤具有明显低密度值,但两者差别不大;自然伽马值比上下岩层明显降低,碎裂煤段曲线形态呈箱型或单峰形,碎粒煤呈单峰形;具有高深、浅侧向值的特征,并且碎粒煤深、浅侧向值要比碎裂煤高,曲线呈波浪状;井径扩径现象明显,尤其碎粒煤井径值明显偏高(图3a)。碎裂煤和碎粒体积密度曲线呈箱型,但两种煤体结构曲线形态无明显区别;深、浅侧向呈波浪状,而碎粒煤对应曲线值要高于碎裂煤;井径整体扩径不明显,但碎

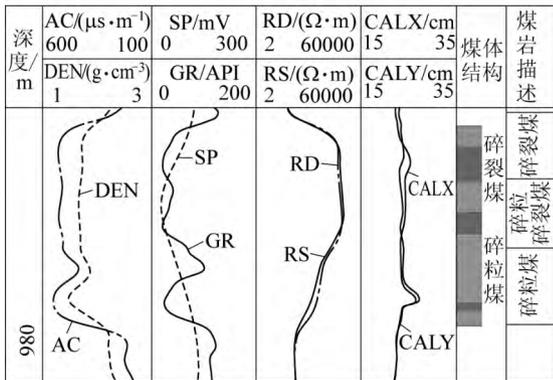
粒煤段井径值明显变大(图3b)。经对比验证,模型预测煤体结构与钻井取心描述煤体结构具有较好的一致性,且与曲线形态识别煤体结构大体吻合,尤其煤体结构较厚层段模型预测准确性更高,仅煤体结构薄层段存在较小差别。

4.2 柿庄北区块煤体结构空间展布规律

对柿庄北3号煤层按照预测模型进行煤体结构厚度分层统计,结果表明:柿庄北区块原生结构煤和糜棱煤发育较少。煤体结构主要为碎裂煤和碎粒煤,分别生成碎裂煤厚度等值线图 and 碎粒煤厚度等值线图(图4)。煤体结构空间展布特征为:区块西北和东南方向碎裂煤厚度较大,一般2~4 m,中央区域碎裂煤厚度较小,主要集中在1~2 m,最小为0,局部地区超过2 m;区块西南碎粒煤厚度最大,达4~6 m,中央出现较厚 NE 方向碎粒煤条带,厚度3.0~4.5 m,局部出现5 m 厚度碎粒煤。



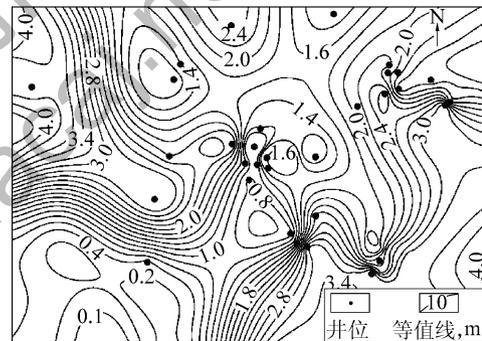
(a) S1井煤体结构



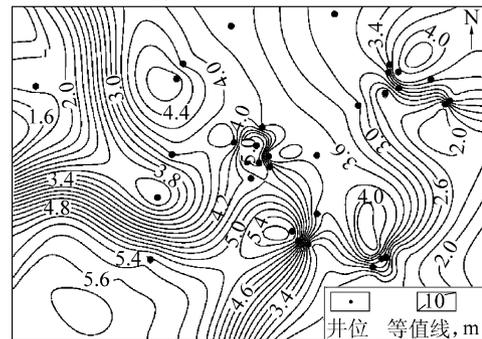
(b) S2井煤体结构

图3 煤体结构模型预测与宏观描述单井对比

Fig. 3 Comparison about coal-body structure between model calculation and macroscopic description



(a) 碎裂煤厚度等值线



(b) 碎粒煤厚度等值线

图4 柿庄北3号碎裂煤与碎粒煤煤体结构厚度等值线

Fig. 4 Coal-body structure contours of No. 3 mylonitic coal and fragmented coal in northern Shizhuang Area

柿庄北区块3号煤层全区发育,煤质无明显差异,区域构造是造成煤体结构差异主要原因,西南部为一个凹槽,有数条大规模的断层发育,煤层挤压严重,碎粒煤厚度明显变大,中部是挤压较严重的背向斜区,碎粒煤在区块中央呈条带状发育,南北贯穿。

东部是平缓的单斜构造, 仅有一些规模很小的断层, 倾角很小, 煤层发育较稳定, 煤体破坏程度较低, 以碎裂煤为主, 煤体结构发育特征受构造影响强烈。

5 结 论

1) 不同煤体结构在测井曲线上会有不同的响应特征, 与测井参数间存在一定的相关性。煤体结构定量表征值与井径、自然伽马、电阻率曲线相关性明显。通过引入地质强度因子 GSI, 实现了煤体结构的定量表征, 利用多元回归分析, 建立了煤体结构预测模型。

2) 柿庄北区块煤体结构以碎裂煤和碎粒煤为主, 煤体结构分布受构造作用影响明显: 背向斜轴部、中央向斜区和小断层发育密集区碎粒煤厚度较大; 平缓褶皱区和背向斜翼部碎裂煤较发育。

参考文献 (References):

- [1] 倪小明, 陈鹏, 李广生等. 恩村井田煤体结构与煤层气垂直井产能关系[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(3): 508-512.
Ni Xiaoming, Chen Peng, Li Guangsheng, et al. Relations between productivity of CBM vertical wells and coal-body structure in Encun Mine Field[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(3): 508-512.
- [2] 傅雪海, 姜波, 秦勇等. 用测井曲线划分煤体结构和预测煤储层渗透率[J]. 测井技术, 2003, 27(2): 140-143, 177.
Fu Xuehai, Jiang Bo, Qin Yong, et al. Classification of coal-body structure and prediction of coal reservoir permeability with log curves[J]. Logging Technology, 2003, 27(2): 140-143, 177.
- [3] 汤友谊, 孙四清, 田高岭. 测井曲线计算机识别构造软煤的研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(3): 293-296.
Tang Youyi, Sun Siqing, Tian Gaoling. Study of computer identifying on tectonic soft coal with well log[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(3): 293-296.
- [4] 姚军朋, 司马立强, 张玉贵. 构造煤地球物理测井定量判别研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S1): 94-98.
Yao Junpeng, Sima Liqiang, Zhang Yugui. Quantitative identification of deformed coals by geophysical logging [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 94-98.
- [5] 陈健杰, 江林华, 张玉贵等. 不同煤体结构类型煤的导电性质研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(7): 90-92, 101.
Chen Jianjie, Jiang Linhua, Zhang Yugui, et al. Study on coal conductive properties of different coal structure [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(7): 90-92, 101.
- [6] 倪小明, 石书灿. 不同煤体结构组合下井径扩径的钻进主控因素[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(6): 135-139, 212-213.
Ni Xiaoming, Shi Shucan. Main controlling factors about expanding well diameter in the process of drilling in different combined coal-body structure [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011, 33(6): 135-139, 212-213.
- [7] 任战利, 肖晖, 刘丽等. 沁水盆地中生代构造热事件发生时期的确定[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 43-47.
Ren Zhanli, Xiao Hui, Liu Li, et al. Determination of mesozoic tectonic heat event in Qinshui Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 43-47.
- [8] 秦勇, 姜波, 王继尧等. 沁水盆地煤层气构造动力条件耦合控藏效应[J]. 地质学报, 2008, 82(10): 1355-1362.
Qin Yong, Jiang Bo, Wang Jiyao, et al. Coupling control of tectonic dynamical conditions to coalbed methane reservoir formation in Qinshui Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(10): 1355-1362.
- [9] 王存武, 柳迎红, 梁建设等. 沁水盆地南部柿庄北地区煤层气勘探潜力研究[J]. 中国煤层气, 2014, 11(3): 3-6.
Wang Cunwu, Liu Yinghong, Liang Jianshe, et al. Study on the exploration potential of north shizhuang block in south Qinshui Basin, [J]. China Coalbed Methane, 2014, 11(3): 3-6.
- [10] 黄晓明, 孙强, 闫冰夷等. 山西沁水盆地柿庄北地区煤层气潜力[J]. 中国煤层气, 2010, 7(5): 3-9.
Huang Xiaoming, Sun Qiang, Yan Bingyi, et al. Coalbed methane potential of north Shizhuang Block in Qinshui Basin, Shanxi [J]. China Coalbed Methane, 2010, 7(5): 3-9.
- [11] 叶建平, 张兵, Sam Wong. 山西沁水盆地柿庄北区块3号煤层注入埋藏CO₂提高煤层气采收率试验和评价[J]. 中国工程科学, 2012, 14(2): 38-44.
Ye Jianping, Zhang Bing, Sam Wong. Test of and evaluation on elevation of coalbed methane recovery ratio by injecting and burying CO₂ for No. 3 coal seam of north section of Shizhuang, Qinshui Basin, Shanxi [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(2): 38-44.
- [12] 陆小霞, 黄文辉, 王佳旗等. 沁水盆地柿庄北深部煤层煤体结构发育特征[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(3): 8-11, 16.
Lu Xiaoxia, Huang Wenhui, Wang Jiaqi, et al. The development characteristics of deep coal body structure in northern Shizhuang Area [J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(3): 8-11, 16.
- [13] 彭苏萍, 高云峰, 杨瑞召等. AVO探测煤层瓦斯富集的理论探讨和初步实践: 以淮南煤田为例[J]. 地球物理学报, 2005, 48(6): 262-273.
Peng Suping, Gao Yunfeng, Yang Ruizhao, et al. Theory and application of AVO for detection of coalbed methane: a case from the Huainan Coalfield [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(6): 262-273.
- [14] 叶建平, 彭小妹, 张小朋. 山西沁水盆地煤层气勘探方向和开发建议[J]. 中国煤层气, 2009, 6(3): 7-11.
Ye Jianping, Peng Xiaomei, Zhang Xiaopeng, et al. Exploration orientation and development proposal of coalbed methane in Qinshui Basin of Shanxi Province [J]. China Coalbed Methane, 2009, 6(3): 7-11.
- [15] 陈跃, 汤达祯, 许浩等. 应用测井资料识别煤体结构及分层[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(1): 19-23.

(下转第196页)

- sludge dewaterability by bioleaching approach with comparison to other physical and chemical conditioning methods [J]. *Journal of Environmental Sciences* 2012, 24(8): 1403-1410.
- [9] Lee Jaeho, Lee Jeong-min, Lim Ji-sung *et al.* Enhancement of microwave effect with addition of chemical agents in solubilization of waste activated sludge [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 2015, 24: 359-364.
- [10] Uma Rani R, Adish Kumar S, Kaliappan S *et al.* Low temperature thermo-chemical pretreatment of dairy waste activated sludge for anaerobic digestion process [J]. *Bioresource Technology* 2012, 103(1): 415-424.
- [11] 严媛媛, 冯雷雨, 张超杰, 等. 超声波能量密度对污泥脱水性能的影响[J]. *化工学报* 2010, 61(2): 491-495.
Yan Yuanyuan, Feng Leiyu, Zhang Chaojie *et al.* Effect of ultrasonic energy density on sludge dewatering performance [J]. *CI-ESC Journal* 2010, 61(2): 491-495.
- [12] Rashad Rafique, Tjalfje Gorm Poulsen, Abdul-Sattar Nizami *et al.* Effect of thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatments to enhance methane production [J]. *Energy* 2010, 35(12): 4556-4561.
- [13] Nathan D Park, Steve S Helle, Ronald W Thring. Combined alkaline and ultrasound pre-treatment of thickened pulp mill waste activated sludge for improved anaerobic digestion [J]. *Biomass and Bioenergy* 2012, 46(6): 750-756.
- [14] Emiliano Bruni, Anders Peter Jensen, Irini Angelidaki. Comparative study of mechanical, hydrothermal, chemical and enzymatic treatments of digested biofibers to improve biogas production [J]. *Bioresource Technology* 2010, 101(22): 8713-8717.
- [15] Maria Ruiz-Hernando, Esther Cabanillas, Jordi Labanda *et al.* Ultrasonic, thermal and alkali treatments affect extracellular polymeric substances (EPSs) and improve waste activated sludge dewatering [J]. *Process Biochemistry* 2015, 50(3): 438-446.
- [16] 唐晓明. 高浓度粘稠物料的泵送及流变特性试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [17] 王春荣, 侯志斐, 何绪文, 等. 反渗透浓水用于水煤浆制备对其流变性的影响[J]. *煤炭科学技术* 2015, 43(10): 1-6.
Wang Chunrong, Hou Zhifei, He Xuwen *et al.* Reverse osmosis concentrated water applied to preparation of coal water mixture affected to rheology [J]. *Coal Science and Technology* 2015, 43(10): 1-6.
- [18] Wang Ruikun, Liu Jianzhong, Gao Fuyan *et al.* The slurring properties of slurry fuels made of petroleum coke and petrochemical sludge [J]. *Fuel Processing Technology* 2012, 104(23): 57-66.
- [19] Liu Jianzhong, Wang Ruikun, Gao Fuyan *et al.* Rheology and thixotropic properties of slurry fuel using municipal wastewater sludge and coal [J]. *Chemical Engineering Science* 2012, 76: 1-8.
- [20] Baudex J C. About peak and loop in sludge rheograms [J]. *Journal of Environmental Management* 2006, 78: 232-239.
- [21] Liu Jianzhong, Wang Ruikun, Hu Yourui *et al.* Improving the properties of slurry fuel preparation to recycle municipal sewage sludge by alkaline pretreatment [J]. *Energy & Fuels* 2013, 27(2): 2883-2889.
- [22] Xiao Benyi, Liu Cao, Liu Junxin *et al.* Evaluation of the microbial cell structure damages in alkaline pretreatment of waste activated sludge [J]. *Bioresource Technology* 2015, 196: 109-115.
- [23] Jiang Jiankai, Wu Jing, Souhila Poncin *et al.* Rheological characteristics of highly concentrated anaerobic digested sludge [J]. *Bi-chemical Engineering Journal* 2014, 86(10): 57-61.

(上接第177页)

- Chen Yue, Tang Dazhen, Xu hao *et al.* Application of logging data in recognition of coal body structure and stratification [J]. *Coal Geology & Exploration* 2014, 42(1): 19-23.
- [16] 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-body structure in Hancheng Block based on well logging data [J]. *Journal of China Coal Society* 2013, 38(8): 1435-1442.
- [17] 郭红玉, 苏现波, 夏大平, 等. 煤储层渗透率与地质强度指标的关系研究及意义[J]. *煤炭学报* 2010, 35(8): 1319-1322.
Guo Hongyu, Su Xianpo, Xia Daping *et al.* Relationship of the permeability and geological strength index (GSI) of coal reservoir and its significance [J]. *Journal of China Coal Society* 2013, 35(8): 1319-1322.
- [18] 姚艳斌, 刘大锰, 汤达祯, 等. 沁水盆地煤储层微裂隙发育的煤岩学控制机理[J]. *中国矿业大学学报* 2010, 39(1): 6-13.
Yao Yanbin, Liu Dameng, Tang Dazhen *et al.* Influence and control of coal petrological composition on development of microfracture of coal reservoir in Qinshui Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology* 2010, 39(1): 6-13.
- [19] 张尚虎, 汤达祯, 王明寿. 沁水盆地煤储层孔隙差异发育主控因素[J]. *天然气工业* 2005, 25(1): 37-40, 207-208.
Zhang Shanghu, Tang Dazhen, Wang Mingshou *et al.* Main control factor affecting pore differential development of coal reservoirs in Qinshui Basin [J]. *Natural Gas Industry* 2005, 25(1): 37-40, 207-208.
- [20] 范超, 王少雷. 基于地质强度因子(GSI)测定瓦斯抽采半径[J]. *山西焦煤科技* 2014(1): 36-38, 44.
Fan Chao, Wang Shaolei. Measure the gas drainage radius based on geological intensity factor [J]. *Shanxi Coking Coal Science & Technology* 2014(1): 36-38, 44.
- [21] 孟召平, 郭彦省, 张纪星. 基于测井参数的煤层含气量预测模型与应用[J]. *煤炭科学技术* 2014, 42(6): 25-30.
Meng Zhaoping, Guo Yansheng, Zhang Jixing. Application and prediction model of coalbed methane content based on logging parameters [J]. *Coal Science and Technology* 2014, 42(6): 25-30.