

柳林地区煤层渗透率影响因素及模糊综合评价

李 玲, 汤达祯, 许 浩, 孟艳军, 喻廷旭

(中国地质大学(北京) 能源学院 北京 100083)

摘要: 煤储层渗透性是寻找煤层气有利开发的关键参数之一。本文通过对柳林地区煤层渗透性深入研究,并结合大量煤层气田勘探开发资料分析了影响柳林地区煤层渗透率的两大因素:煤体条件(煤的原生孔结构、煤体裂隙结构、煤体结构)、煤层赋存条件(埋深、地应力、储层压力)。针对该区多煤层区域上渗透率变化较大的情况,应用多层次模糊综合评判法建立了该区煤层渗透性评价指标体系。利用渗透性模糊综合评判数学模型,对煤层进行了渗透性模糊综合评价,得出了该煤层渗透率为中等级别,评价结果与实测结果相符,为寻找渗透性较好的矿区或井田提供了新的预测方法。

关键词: 渗透率; 影响因素; 煤体条件; 煤层赋存条件; 多层次模糊综合评价

中图分类号: TD849; P618.11

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2013)05-0105-07

Influencing factors of Liulin coal seam permeability and its fuzzy comprehensive evaluation

LI Ling, TANG Dazhen, XU Hao, MENG Yanjun, YU Tingxu

(School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing) Beijing 100083, China)

Abstract: Coal reservoir permeability is one of the crucial parameters for favorable coalbed methane development zone. Through analysis of the coal seam permeability of Liulin area and a large number of coal seam gas exploration and production information, conduct two major factors influencing the local coal seam permeability, which are coal body itself condition (primary pore structure, fracture of coal body structure, coal body structure) and coal seam saves conditions (depth, the crustal stress, the reservoir pressure). According to the permeability of multiple coal seam changes greatly in this area, apply multi-level fuzzy comprehensive evaluation method to establish the coal seam permeability evaluation index system. Based on the mathematical model of fuzzy comprehensive evaluation of permeability, this area is established the fuzzy comprehensive evaluation of permeability. Based on the evaluation results, the coal seam permeability of Liulin area is on the level of medium, the evaluation results are consistent with the measured results, which offer a new method to predict permeability level of ore district or mining area.

Key words: permeability; influencing factors; coal characteristics; saves conditions; multi-level fuzzy comprehensive evaluation

0 引 言

柳林地区位于鄂尔多斯盆地东缘,是中国煤层气开发示范区之一。本区发育中阶煤,储层渗透性较好,为煤层气的开采提供了很好的保障。煤储层

渗透性作为影响煤层气开发的关键性参数之一,一直是近年来研究的热点^[1-18]。影响煤层渗透率因素主要集中于裂隙系统的发育、煤储层有效应力、煤层构造演化、煤体结构、储层压力、煤层埋深、基质收缩、克林伯格效应等方面^[13],对不同地区煤层

收稿日期: 2013-08-19 责任编辑: 孙淑君

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272175); 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05062-01; 2011ZX05034-001)

作者简介: 李 玲(1988—)女,山东济宁人,在读硕士研究生,研究方向为煤层气勘探与开发。E-mail: lilingx2013@163.com。

引用格式: 李 玲, 汤达祯, 许 浩, 等. 柳林地区煤层渗透率影响因素及模糊综合评价[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(5): 105-111.

李 玲等: 柳林地区煤层渗透率影响因素及模糊综合评价

渗透率有时是多因素综合作用的结果,有时是某一因素起主要作用。然而煤层渗透性影响因素研究大多局限于定性的描述和分析^[8],专门定量分析各个因素对渗透性贡献大小的研究甚少。在测试数据较少的新矿区或者井田,要想评价该区的煤层渗透率情况,仅定性分析煤层渗透率影响因素是远远不够的,因此需要借助有关数学模型定量预测煤层渗透率级别^[21-26,33]。

本文通过研究柳林煤层气矿区,利用勘探开发资料及相关实验先定性分析该区渗透率影响因素,再应用模糊数学建立渗透性模糊综合评判数学模型,分析评价结果与实测结论的一致性。该评价模型为煤层渗透率测试数据较少的开发区块提供了新的评价渗透率方法。根据煤层渗透率影响因素以及评价结果提出提高渗透率的建议,对煤层气开发具有非常现实的指导意义。

1 柳林地区地质背景

柳林地区位于鄂尔多斯盆地东部河东煤田中段,南邻石楼北区块,东邻杨家坪区块。区域构造

上位于鄂尔多斯盆地东缘离石鼻状构造南翼。区内构造简单,地层产状平缓,倾角约 $3^{\circ}\sim 8^{\circ}$,发育有起伏微弱的次级小褶曲,总体为一向西或西南倾斜的单斜构造。

本区出露地层由老到新依次太古界、寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系和新近系,其中上石炭统太原组和下二叠统山西组为主要含煤层系,其中山西组的3号、4号、5号煤层和太原组的8号、9号、10号煤为本区煤层气开发目标层位。

2 煤层渗透率特征

本文采用的试井渗透率代表了储层原始渗透率。柳林地区渗透率主要在 $0.01\sim 10\text{ mD}$ 。其中3+4号煤层渗透率为 $0.01\sim 2.8\text{ mD}$,平均 0.6 mD ;5号煤层渗透率为 $0.02\sim 1.89\text{ mD}$,平均 0.52 mD ;8+9号煤层渗透率变化范围为 $0.005\sim 4.36\text{ mD}$,平均 0.86 mD 。整体上各煤层渗透率区域上变化较大,以中等渗透率级别为主,且8+9号煤层明显高于3+4号和5号,各个层位都呈现出北高南低的趋势(图1)。

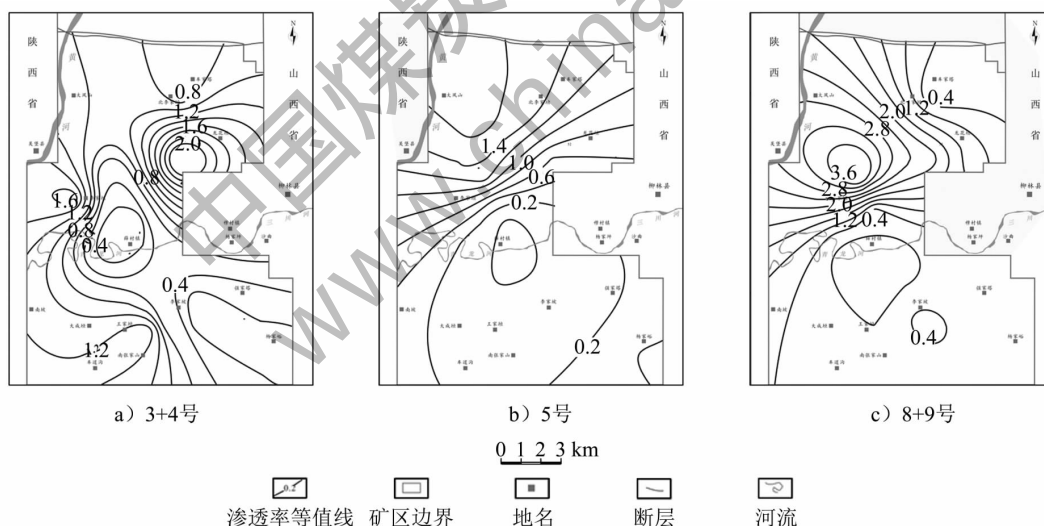


图1 煤层渗透率等值图

3 煤层渗透率影响因素分析

煤层渗透率既受到煤的原生孔结构、裂隙结构、煤体结构等煤体条件的影响,也与埋深、地应力、储层压力等煤层赋存条件密切相关。煤层渗透性有时多因素综合作用的结果,有时是某一因素起主导作用。本文从煤体条件和煤层赋存条件两方面分析煤层渗透率的影响因素。

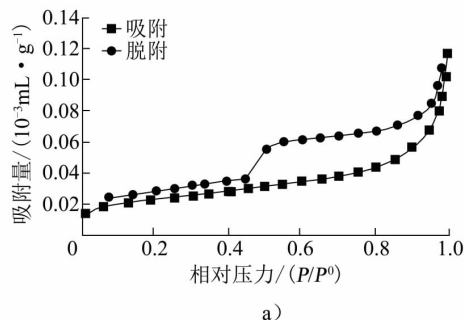
3.1 煤体条件对煤层渗透率的影响

3.1.1 原生孔结构

煤储层中孔隙发育程度和孔隙结构直接影响煤层渗透率。本文采用低温氮吸附实验研究煤孔隙结构对渗透率的影响,根据孔隙形态及其是否产生吸附回线把煤中孔隙分为3类:第一类不产生吸附回线,为一端封闭的不透气性孔,包括一端封闭的平行板孔,一端封闭的圆筒形孔、一端封闭的楔

形孔以及一端封闭的锥形孔;第二类为产生吸附回线的开放性透气性孔,包括两端开口的圆筒形孔及四边开放的平行板孔;第三类为产生吸附回线的特殊孔,即细颈瓶孔,这种孔是一端封闭的,但在这种孔产生的回线上有一急剧下降点^[28,32]。

煤层渗透性可以根据煤样的吸附回线来判断,



渗透性较差的煤没有吸附回线或回线很小,渗透性较好的煤具有吸附回线,且面积较大。开放性孔所占比例越大,煤渗透性越好^[19]。

对柳林地区煤样进行了低温氮吸附实验,典型的吸、脱附曲线如图2所示。根据实验结果得出孔隙结构以开放性透气孔为主,并发育少量细瓶颈孔。

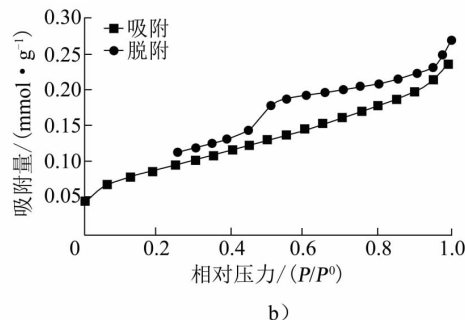


图2 柳林煤样低温氮吸附实验典型吸附、脱附曲线

3.1.2 裂隙对渗透率的影响

煤中裂隙根据成因划分为外生裂隙和割理,柳林地区及周边地区以中煤级为主,裂隙非常发育,多近东西向展布,其中平行层理的割理非常发育。裂隙的发育程度主要指裂隙的密度(或间距)、长度、宽度、裂口宽度等,它们的值越大,煤层的渗透性越好^[30]。统计面裂隙密度表明,裂隙密度较大,且裂隙大部分未被充填,大幅度扩大了煤体的渗透率。该区山西组3+4+5号煤层裂隙发育,显微裂隙平均密度达42条/9 cm²,其中以C类与D类显微裂隙最为发育,分别占平均总裂隙的38.6%与58.1%。

显微裂隙发育程度有明显的组分选择性,即显微裂隙发育程度与镜质组含量成正比,而显微裂隙的发育情况决定了储层在原始条件下的渗透能力(图3)。柳林地区煤中镜质组含量集中在60%~80%,煤层渗透率随着煤中镜质组含量的增大而增高。

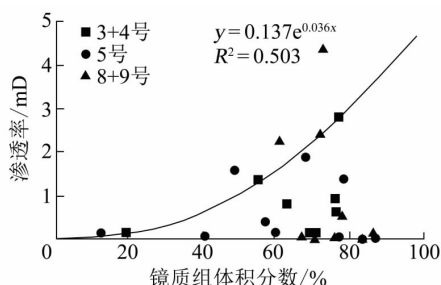


图3 煤层镜质组含量与渗透率的关系

3.1.3 煤体结构对渗透率的影响

柳林地区构造简单且未见岩浆活动,以原生结

构煤为主,只在区块北部受断层影响发育少量构造煤。该地质背景下形成的裂隙(割理)保持着较好的开启性和连通性,因而使煤层具有比较好的渗透性能。

3.2 煤层赋存条件对渗透率的影响

由于柳林地区以中煤阶煤为主,煤中孔隙结构、裂隙等内在因素对煤层渗透率的影响起主导作用,地应力、埋深等煤层赋存条件对煤层渗透率也有显著影响。

3.2.1 地应力

本文所用的地应力是采用水力压裂法测得的最小主应力,有效应力为煤储层原地应力减去储层压力。笔者分析了3+4号、5号、8+9号煤层地应力、有效应力对煤层渗透率的相关关系(图4、图5)。地应力与渗透率之间的规律不明显,而有效应力与渗透率之间的负相关关系较好,随着原地应力的增大,渗透率呈明显减小趋势。究其原因,当原地应力增大时,煤储层裂隙趋于闭合,孔隙度随之降低,增加了通道的渗流阻力,从而使渗透率降低。

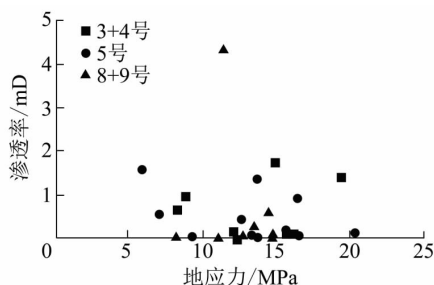


图4 最小主应力与渗透率的关系

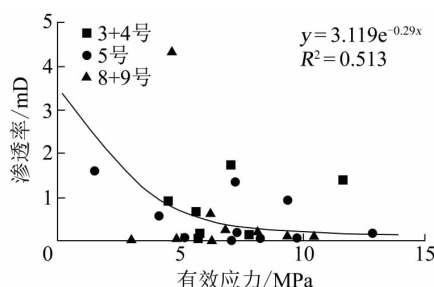


图5 有效应力与渗透率的关系

3.2.2 埋藏深度对渗透率的影响

一般来说,渗透率随着埋藏深度的增加而降低。因为埋藏深度与相应地层有效应力存在相关性,埋藏越深,有效应力越大,渗透率越低。笔者对柳林地区渗透率与埋藏深度二者之间的关系进行拟合,得出该区渗透率随埋深增加呈幂指数降低,且相关性较好(图6)。

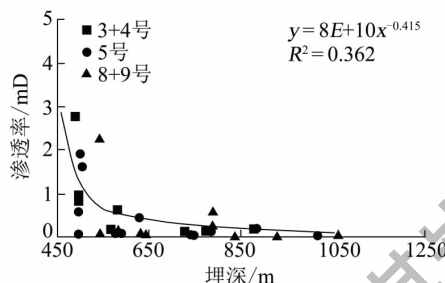


图6 埋藏深度与渗透率的关系

3.2.3 储层压力

储层压力直接影响煤层气的吸附与解吸能力。在煤层气开采的排水降压阶段,煤层含气饱和度一定时,煤储层压力越高越有利煤层气的排采开发。煤层渗透率随储层压力增大呈现十分明显的减小趋势^[4]。在煤层气开发过程中储层压力变化引起的有效应力效应与基质收缩效应强烈影响着煤储层渗透率。研究柳林地区渗透率与储层压力的关系(图7)表明渗透率与储层压力呈负相关关系。究其原因主要是储层压力随埋深加大而升高,埋深加大引起的压实作用促使煤层孔裂隙闭合,渗流空间随之减少,渗透率降低。

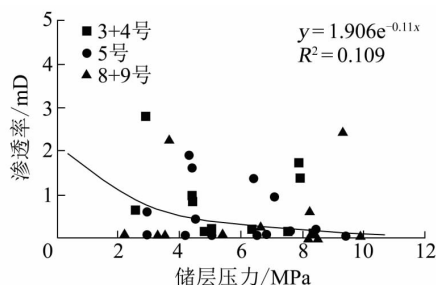


图7 储层压力与渗透率的关系

4 煤层渗透率模糊数学评价模型的建立

柳林地区煤储层渗透率的影响因素较多,且各因素之间关系复杂,这些指标难以进行精确的定量分析和评价,因此本文采用多层次模糊综合评判法对其进行评价^[20-21]。该方法首先把决策系统划分层次,建立多层次结构模型,然后对同一层次各元素关于上一层中某一准则的重要性进行两两比较,构造出两两比较判断矩阵,再由判断矩阵计算被比较元素对于该准则的相对权重和各层元素对系统目标的合成权重,最终得出排序结果^[29]。

4.1 评价目标与指标的选取

本次研究是在大量调研柳林地区煤层气评价参数的基础上,综合考虑各影响因素的相互关系,以煤体参数和煤层赋存参数2个指标为一级评价指标,每个一级指标又由煤的原生结构、裂隙结构、煤体结构、地应力、埋深等多项次级指标决定,见表1。

表1 煤层气渗透率评级体系

评价指标	评价参数
煤体条件参数 B_1	煤的原生孔结构 C_{11}
	煤中裂隙结构 C_{12}
	煤体结构 C_{13}
渗透率综合评价 A	
煤层赋存条件参数 B_2	煤层地应力 C_{21} / Pa
	煤层埋深 C_{22} / m
	煤储层压力 C_{23} / Pa

4.2 评价集的确立

煤层气抽采的难易程度可分为容易抽采、可以抽采和较难抽采^[26],这里将煤层渗透性模糊综合评价的评语集 V 定义为好、中、差3个等级, $V = \{v_1(\text{好}) \ v_2(\text{中}) \ v_3(\text{差})\}$,其中 $v_1 \geq 0.9$, $v_2 \geq 0.75$, $v_3 \leq 0.75$ 。

4.3 确定指标隶属度

由于本文中二级指标和三级指标的各影响因素多数为定性描述,很难建立隶属函数,而且即使建立函数有时也难以准确表示模糊特性。因此本文采取专家打分方法对各因素在煤层瓦斯渗透性中的影响程度进行评测,结合前面对柳林地区煤层渗透率影响因素的分析得到各指标隶属度,见表2。

4.4 各层次因素权重的建立

权重(重要性系数)作为模糊评价煤层渗透率的关键,借助层次分析方法确定评价因素权重,可以减少人为因素的干扰。首先按照表3的标度对表1各同层指标进行两两对比得到判断矩阵表4。再

利用 Matlab 软件计算出判别矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 及其对应的特征向量,得到指标层和准则层相邻层判断矩阵以及各指标权重(表4)。

表2 影响渗透性各因素隶属度打分情况^[19]

二级指标	三级指标	标准分	评价方法	得分	隶属度
煤体条件	煤的原生结构	4	开放型孔	4	1
			一段封闭型孔	2	
	煤体裂隙结构	4	平行层理	4	1
			垂直层理	2	
	煤体结构	4	原生结构	4	1
			破裂结构	3	
			碎裂结构	2	
			糜棱结构	1	
煤层赋存条件	地应力/MPa	3	>20	3	2/3
			10~20	2	
			<10	1	
	埋深/m	2	位于新生界	2	1/2
			新生界以下	1	
	储层压力/MPa	2	≥0.74	1	1/2
			≤0.74	2	

表3 两两判断矩阵构建中相对重要性标度的含义^[20]

指标对比	赋值
极重要	≥3
很重要	2~3
稍微重要	1~2
两者相当	1
稍不重要	1/2~1
不重要	0.5~1/3
极不重要	≤1/3

表4 各指标层相对于目标层的重要性参数

评价指标及矩阵	特征向量	最大特征根	随机一致性比率
A-B	W_B	$\lambda_{\max}$	C.R.
B_1	1	2	0
B_2	1/2	1	0.47
$B_1 - C_1$	W_{C1}	3.02	0.019
C_{11}	1	5	0.57
C_{12}	1/2	4	0.33
C_{13}	1/5	1	0.10
$B_2 - C_2$	W_{C2}	3.02	0.019
C_{21}	1	5	0.63
C_{22}	1/3	2	0.24
C_{23}	1/5	1	0.13

本文采用一致性指标 C.I. 和一致性比率 C.R. 来检验矩阵的一致性,以确保计算结果的可信度,其中 $C.I. = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$, $C.R. = C.I. / R.I.$ 。

平均一致性指标见表5。当 C.R. < 0.1 时认为判断矩阵的一致性可接受,否则需进行重新赋值和修正,直到一致性通过为止。

表5 R.I. 值^[31]

矩阵阶数	R.I.	矩阵阶数	R.I.
1	0	6	1.26
2	0	7	1.36
3	0.52	8	1.41
4	0.89	9	1.46
5	1.12	10	1.49

4.5 层次总排序系数的计算

利用指标层各指标的重要性系数与准则层对应的重要性系数加权综合,得到指标层相对于目标层的权重(表6)。

表6 层次总排序系数

评价指标	权重	评价参数	权重值
煤体条件参数 B_1	0.53	煤的原生孔结构 C_{11}	0.30
		煤中裂隙结构 C_{12}	0.17
		煤体结构 C_{13}	0.05
煤层赋存条件参数 B_2	0.47	煤层地应力 C_{21} / Pa	0.30
		煤层埋深 C_{22} / m	0.12
		煤储层压力 C_{23} / Pa	0.06

4.6 模糊综合评价的计算

4.6.1 煤体条件模糊评价

由 4.2.3 所确定的隶属度和表4确定的权重 W_{C1} 进行矩阵计算可得评价向量 B_1

$$\begin{aligned} B_1 &= W_{C1} \cdot R_1 \\ &= [0.57 \ 0.33 \ 0.10] \times [1 \ 1 \ 1]^T \\ &= 1.00 \end{aligned}$$

4.6.2 煤层赋存条件模糊评价

根据 4.2.3 所得的隶属度和表4确定的权重 W_{C2} 进行矩阵计算的评价向量 B_2

$$\begin{aligned} B_2 &= W_{C2} \cdot R_1 \\ &= [0.63 \ 0.24 \ 0.13] \times [0.67 \ 0.5 \ 0.5]^T \\ &= 0.61 \end{aligned}$$

4.6.3 煤层渗透率模糊综合评价

由各评价向量进行综合评价得到总的综合评价向量 R , 即 $R = [B_1 \ B_2]^T = [1.00 \ 0.61]^T$ 。然后根据表4得到的权重 W_B 进行矩阵运算,计算渗透性评价向量 B , 以此判断本区煤层渗透性情况。

$$\begin{aligned} B &= W_B \cdot R \\ &= [0.53 \ 0.47] \times [1.00 \ 0.61]^T \\ &= 0.82 \geq 0.75 \end{aligned}$$

得到模糊评价结果后,根据4.2.2评价集得出柳林地区煤层渗透率中等。结合实际生产资料可知评价结果和实测结果相符。借鉴该区煤层渗透性模糊评价模型,可以对煤层渗透率数据较少的矿区或井田进行渗透性模糊评价,获得煤层渗透率级别,进而采取相关措施提高煤层气开发效果。要想提高煤层气井的产量,改善煤层渗透性,需抓住主要矛盾,煤原生孔结构无法改变,要从地应力和煤中裂隙结构角度考虑,提高抽采效果。

5 讨 论

影响煤层渗透率的因素很多,最终都可归结为裂隙、煤级、煤岩类型、煤体结构等煤体自然条件因素和地应力、埋深、储层压力等煤层赋存条件因素,在不同的地质环境中,起主导作用的因素不同。采用多层次模糊综合评判法可以明确矿区煤层渗透性。在改善煤层渗透率时直接从主要因素方面考虑,减少不必要的工作量,提高工作效率。

综合考虑柳林地区煤层渗透率影响因素,煤的原生孔结构、地应力、煤层埋深、煤中裂隙结构对渗透率影响显著,煤体结构和煤储层压力对渗透率影响较小,煤的原生孔结构、煤层埋深无法改变,因此提高煤层渗透率需增大煤层裂隙、改善地应力状态。借鉴抽采瓦斯工艺中的水力破裂(压裂)、水力割缝(扩孔)及长钻孔控制预裂爆破技术,均可达到增大裂隙改善煤层渗透性的目的^[23,25]。针对煤层渗透率中等的情况,需合理增加预抽时间和增大预抽煤层裂隙,提高煤层气抽采效果^[27]。因此应用渗透率多层次模糊综合评价具有现实的指导意义。

6 结 论

1) 从煤体条件和煤层赋存条件两方面分析了影响柳林地区煤层渗透率的因素,煤体条件包括煤的原生孔结构、煤中裂隙结构和煤体结构,煤层赋存条件主要为地应力、煤层埋深和储层压力。

2) 采用多层次模糊综合评判方法构建了煤层渗透率评价指标体系,应用三级模糊评判数学模型,对柳林地区煤层进行了渗透率模糊综合评价。得出该区煤层渗透率为中等级别,评价结果与实测结果相符,可以借鉴该区的渗透性模糊评价模型,对煤层渗透率数据较少的矿区或井田进行渗透性模糊评价,获得煤层渗透率级别,进而采取相关措施提高煤层气开发效果。

3) 针对柳林地区煤层渗透率模糊综合评价结果和生产实际,提出了从增大煤层裂隙和改善地应力状态角度提高煤层渗透率的建议。对于该区煤层渗透率中等的情况,需合理增加预抽时间和增大预抽煤层裂隙,提高煤层气抽采效果。

参考文献:

- [1] 叶建平,史保生,张春才.中国煤储层渗透性及其主要影响因素[J].煤炭学报,1999,24(2):118-122.
- [2] 许浩,汤达祯,唐书恒.沁南地区重点区块煤储层渗透率控制因素及产能响应[C]//2011年煤层气学术研讨会论文集.北京:地质出版社,2011:141-146.
- [3] Enever R E, Hennig A. The relationship between permeability and effective stress for Australian coals and its implications with respect to coalbed methane exploration and reservoir modeling[C]//Proceedings of the 1997 International Coalbed Methane Symposium. Alabama: The University of Alabama, Tuscaloosa, 1997: 13-22.
- [4] 何伟钢,唐书恒,谢晓东.地应力对煤层渗透性的影响[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2000,19(4):353-355.
- [5] 陈振宏,贾承造,宋岩,等.高煤阶与低煤阶煤层气藏物性差异及其成因[J].石油学报,2008,29(2):179-184.
- [6] 员争荣.构造应力场对煤储层渗透性的控制机制研究[J].煤田地质与勘探,2004,32(4):23-25.
- [7] 刘金剑,陈霞.华北地区煤层渗透性及主要地质控制因素[J].煤田地质与勘探,2002,30(1):19-21.
- [8] 薄冬梅,赵永军,姜林,等.煤层气储层渗透性研究进展[J].西南石油大学学报:自然科学版,2008,30(6):31-34.
- [9] Puri R, Evanoff J C, Brugler ML. Measurement of coal cleat porosity and relative permeability characteristics [C]//Proceedings of 1991 SPE Annual Technical Conference & Exhibition. Houston: Society of Petroleum Engineers of AIME, 1991.
- [10] Palmer I, Mansoori J. How permeability depends upon stress and pore pressure in coalbeds: a new model [J]. SPE Reservoir Evaluation Engineering, 1998(12): 539.
- [11] 彭春洋,陈健,原晓珠,等.煤层气储层渗透性影响因素分析[J].煤,2011,20(5):38-41.
- [12] 梁冰,赵明鹏,高战武.煤层气储集层渗透性的分形理论和实验室研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(S1):882-884.

- [13] 李培超,孔祥言,曾清红,等.煤层渗透率影响因素综述与分析[J].天然气工业,2002,22(5):45-48.
- [14] Joachim Gross, George W. Scherer. Dynamic pressurization: Novel method for measuring fluid permeability [J]. Journal of Non Crystalline Solids, 2003: 34-47.
- [15] 王锦山,王力,孟德光.煤层中水-气两相流体渗透性影响因素分析[J].矿业研究与开发,2006,26(2):41-43.
- [16] 刘瑞珍,严家平,李建楼,等.煤体温度对瓦斯渗透性影响的实验研究[J].煤炭技术,2010,29(7):71-73.
- [17] 叶建平.煤岩特性对平顶山矿区煤储层渗透性的影响初探[J].中国煤田地质,1995,7(1):82-85.
- [18] 曾家瑶,吴财芳.黔西-滇东地区煤储层渗透性特征及其地质控制因素研究[C]//2011年煤层气学术研讨会论文集.北京:地质出版社,2011:148-153.
- [19] 陈亮.煤层渗透性评价模型研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2009:35-59.
- [20] 杨纶标.模糊数学原理及应用[M].广州:华南理工大学出版社,2000.
- [21] Ian Palmer. Permeability changes in coal: Analytical modeling [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 77: 119-126.
- [22] 孙景来.关于煤层渗透性系数的研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2009.
- [23] 冯增朝.低渗透煤层瓦斯强化抽采理论及应用[M].北京:科学出版社,2008.
- [24] 傅雪海.多相介质煤层气储层渗透率理论预测与方法[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.
- [25] 韩俊,邵龙义,肖建新,等.多层次模糊数学在煤层气开发潜力评价中的应用[J].煤田地质与勘探,2008,36(3):31-35.
- [26] 孟艳军,汤达祯,许浩.煤层气产能潜力模糊数学评价研究——以河东煤田柳林矿区为例[J].中国煤炭地质,2010,22(6):17-20.
- [27] AQ 1027—2006 煤矿瓦斯抽放规范[S].
- [28] 王魁军,富向.矿井瓦斯抽放技术优选[C]//全国煤矿安全学术年会.徐州:中国矿业大学出版社,2008:3-9.
- [29] 陈萍,唐修义.低温氮吸附法与煤中微孔隙特征的研究[J].煤炭学报,2001,26(5):552-556.
- [30] 林亮,姚勇,黄晓明.山西柳林地区煤层气储层孔渗发育特征研究[C]//2011年煤层气学术研讨会论文集.北京:地质出版社,2011:182-186.
- [31] 邵龙义,周俊,文怀军,等.煤层气勘探开发潜力的多层次模糊数学评价方法研究[C]//2008年煤层气学术研讨会论文集.北京:地质出版社,2008:73-81.
- [32] 张兴华.煤的原生孔结构对煤层渗透性的影响[J].煤矿安全,2005,36(11):4-7.
- [33] 邵龙义,文怀军,李永红,等.青海省天峻县木里煤田煤层气有利区块的多层次模糊数学评判[J].地质通报,2011,30(12):1896-1903.

(上接第102页)

参考文献:

- [1] GB 13223—2011 火电厂大气污染物排放标准[S].
- [2] 环境保护部环境工程评估中心.环境影响评价技术方法[M].北京:中国环境科学出版社,2013.
- [3] 吕游,蒋大龙,赵文杰,等.生物质直燃发电技术与燃烧分析研究[J].电站系统工程,2011,27(4):4-7.
- [4] 陈俊,徐荻萍.流化床生物质锅炉燃料适应性分析与改进[J].节能,2012(11):32-34.
- [5] 王许涛,张百良.生物质秸秆成型燃料特性分析[J].洁净煤技术,2013,19(2):39-41.
- [6] 晋宏师,顾春伟.燃料特性对生物质直燃电站运行影响的研究[J].太阳能学报,2010,31(8):951-954.
- [7] 李诗媛,吕清刚,王东宇,等.生物质直燃循环流化床发电锅炉设计准则和运行分析[J].可再生能源,2012,30(12):96-100.
- [8] 葛光荣,张旭,王丽,等.勉县凯迪生物质能发电厂工程(1×30 MW)环境影响报告书[R].西安:中煤科工集团西安研究院,2013:28-35.
- [9] 国家环境保护总局环境影响评价工程师职业资格登记管理办公室.环境影响评价工程师职业资格登记培训教材建材火电类环境影响评价[M].北京:中国环境科学出版社,2007.
- [10] 沈国章,钟振成,吴占松.生物质燃料在流化床内结渣特性判别指标研究[J].热力发电,2011,40(4):24-28.
- [11] 郝卫东,胡志宏,周新刚,等.130 t/h 生物质直燃锅炉性能试验[J].华东电力,2009,37(1):176-179.
- [12] 田松峰,付小倩.某秸秆电站燃料的燃烧特性实验研究[J].锅炉技术,2012,43(1):68-71.
- [13] 钟振成,张坤竹,罗锐,等.生物质锅炉中 CaO 和 HCl 反应动力学[J].清华大学学报:自然科学版,2012,52(7):984-988.
- [14] 高岩,鲁光辉.煤与生物质共热解的协同特性研究[J].洁净煤技术,2013,19(3):53-56.
- [15] 纪括,鄢晓忠,江焯焯,等.生物质及燃煤混合流化特性的实验研究[J].洁净煤技术,2013,19(2):74-77.