

侯金玲. 煤矿区煤层气地面井抽采技术适用性评价[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(2): 102-106.
文章编号: 1008-4495(2017)02-0102-05

煤矿区煤层气地面井抽采技术适用性评价

侯金玲^{1,2}

- (1. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013;
2. 煤炭资源高效开采和洁净利用国家重点实验室(煤炭科学研究总院), 北京 100013)

摘要: 在地面钻井过程中, 由于准备工作不充分, 对区域客观条件考察不明确等问题导致井身损毁或产能不达标的情况时有发生, 为解决这一问题, 对影响煤矿区煤层气地面井抽采技术适用性的因素进行了深入分析, 得出其主要影响因素为: 煤层气可采资源量(煤层厚度、含气面积、含气量), 水文、地质条件(水动力条件、地质构造条件), 井眼稳定性(煤体结构、地应力、化学因素), 以及地形地貌特征。建立了以层次分析法+模糊综合评判法为基础的煤层气地面井适用性评价指标体系, 并以寺河煤矿为例, 对影响地面井抽采技术适用性的主要因素进行评判, 实例验证了此种方法的可靠性, 可为煤层气井上下联合抽采技术的适用性研究提供参考。

关键词: 煤层气; 地面井; 抽采; 适用性

中图分类号: TD712+.67; X913.4 **文献标志码:** A **网络出版时间:** 2017-04-11 10:09

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1062.TD.20170411.1009.010.html>

Applicability Evaluation of Coal-bed Methane Extraction Technology by Ground Well in Coal Mining Area

HOU Jinling^{1,2}

- (1. Mine Safety Technology Branch of China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;
2. National Key Lab of Coal Resource High Efficient Mining and Clean Utilization
(China Coal Research Institute), Beijing 100013, China)

Abstract: In the drilling process of the ground well, the objective conditions of the coal mining area are often uncertain due to the inadequate preparation, which may result in the well-body damage or undesirable coal-bed methane (CBM) capacity. In order to solve this problem, deep analysis was made on the factors affecting the applicability of the coal-bed methane extraction technology by ground wells in the coal mining area, it was concluded that the main affecting factors included the recoverable coal-bed methane resources (the thickness of coal seams, gas-bearing area and gas reserves), the hydro-geological conditions (the hydrodynamic condition and geological structure), the well stability (the coal structure, ground stress and chemical factors) and the topography and landform characters. An evaluation index system for the applicability of the coal-bed methane extraction technology by ground wells was set up based on the analytic hierarchy process and comprehensive fuzzy criterion, and by taking Sihe Coal Mine as an example, the judgment was carried out on the main factors affecting the applicability of the coal-bed methane extraction technology by ground wells, and its reliability was verified by this example. The study achievement provided the reference for researching the applicability of the combined coal-bed methane extraction technology by both ground wells and underground boreholes.

Keywords: coal-bed methane (CBM); ground well; extraction; applicability

收稿日期: 2016-10-25; 2017-02-28 修订

基金项目: “十三五”国家科技重大专项(2016ZX05045002-006); 山西省自然科学基金项目(2013012007); 国家自然科学基金项目(51504137); 北京市自然科学基金项目(2164075)

作者简介: 侯金玲(1985—), 女, 陕西咸阳人, 硕士, 助理研究员, 主要从事煤矿安全方面的研究工作。E-mail: 271832963@qq.com.

煤层气地面井抽采技术是近年来逐渐发展起来的一项抽采煤层气及瓦斯治理的新技术。国内外众多学者在煤与煤层气协调开发技术、采动区地面井变形规律, 以及优化煤层气井等方面进行了大量的研究工作, 也取得了显著的成效, 但我国现今煤层气井的施工仍带有一定的主观性, 往往多是先施工、后

测试,若井身破坏或产能差异甚大,往往会选择弃井或者重新打井。这种“试探”性的打井做法给施工单位带来了巨大的经济损失。

现今煤层气地面井抽采存在3方面的问题:

①就目前工程实践的效果来看,煤层气地面井抽采缺乏系统理论支撑;②大部分研究区地面井抽采产能差异性较大,产能不稳定;③煤层气井用压裂液存在“水锁”和伤害煤层的问题。

我国煤层气地面井建设不能满足对煤层气抽采量的总体要求,为此笔者从地面井抽采煤层气的角度出发,对影响地面井安全、有效的因素进行深入分析,提出评判地面井是否适用于矿区的一系列指标及评判方法。

1 煤层气地面井抽采技术适用性评价指标的建立

首先要对地面井的适用区域进行优选。笔者采取与专家交流、查阅科研论著,以及与现场工作人员交谈等多种方式,对现场大量的煤层气地质勘探和开发资料进行分析,结合实验室测试,得出煤层气地面开发各个关键技术环节对产气量的主要影响因素。

1)煤层气资源规模是建立地面井的先决条件,主要涉及开发的范围(面积)和开发范围内的资源量两方面。开发面积涉及煤层稳定性、煤层厚度(厚度的变异性)、开发的层数、开发最低厚度,必须将这些因素综合考量。而开发范围内的资源量也不是简单的含气量与厚度的乘积,需剔除那些不可开发的煤层,含气量的取值也应是大致相同范围内的平均值,差异太大时还需分别考虑。

2)煤层气藏的形成与后期保存条件密切相关^[1]。近年来,越来越多的研究集中在构造演化和水动力条件两方面。

3)能不能产出煤层气以及产出多少主要取决于产出通道畅通程度、煤层中CH₄的游离程度。除了微观方面,宏观方面这点也是地面井稳定性需要考虑的因素。地表下的煤层与岩层处于三维应力状态中,当在煤岩层中钻进时,形成的钻孔时刻处于应力状态下,3个方向上受力若不均衡,煤岩抵抗外力的差异则可能导致井筒失稳、塌孔。还有导致井壁失稳的一个主要因素是泥浆侵入引起的各种破坏作用。

4)若地形起伏较大,机械设备无法运到施工地点时,则不能进行地面井开发。

综上所述,将这些影响煤层气井适用性因素进行归类,总体分为4类一级指标:煤层气可采资源量、水文(地质)条件、井眼稳定性、地形地貌条件。其中煤层气可采资源量又分为:煤层厚度、含气面积

和含气量;水文(地质)条件又分为:水动力条件和地质构造条件;井眼稳定性又分为:煤体结构、地应力和化学因素。

1.1 煤层气可采资源量

煤层气可采资源量是地质储量的可采部分,是确定煤层气田是否具有经济价值的重要物质基础和开发方案的重要依据。

1)煤层厚度。煤层厚度与煤层气富集有着重要关系,含气量与煤厚成正比。在其他初始条件相似的情况下,煤层厚度越大,对煤层气保存就越有利。根据国内外经验,单层煤厚度大于3 m的煤层一般具有高产可能性^[2-5]。煤层厚度(D)等级划分见表1。

表1 煤层厚度等级划分

分级	煤层厚度变化范围/m	等级描述
A级	$D > 16$	极大
B级	$12 < D \leq 16$	大
C级	$8 < D \leq 12$	较大
D级	$4 < D \leq 8$	中等

2)含气面积。含气面积是指单井煤层气产量达到产量下限值的煤层分布面积,是确定煤层气资源储量的重要参数。

3)含气量。煤层含气量是指单位数量煤体中所吸附的煤层气量,或者每吨原煤中所含煤层气的量。煤层含气量是评价煤层气储层的重要参数,煤层气含气量确定原则参见DZ/T 0216—2010《煤层气资源/储量规范》。

1.2 水文、地质构造条件

1.2.1 水动力条件

煤层气主要以吸附状态赋存于煤的孔隙中,地下水系统通过地层压力对煤层气吸附聚积起控制作用。

1)水力运移逸散作用。导水断层或裂隙沟通了煤层与含水层。地下水的流动促进了煤层气的解吸,使煤层气由吸附状态转化为游离状态,溶解于地下水中运移散失。

2)水力封闭(堵)控气作用。井田断裂不甚发育,而且断裂构造主要为不导水性断裂,特别是一些发育有挤压、逆掩性质的边界断层的井田,这些井田常发生水力封闭控气作用,水力封闭控气作用一般发生在深部,通过压力传递作用,使煤层气相对富集而不发生运移或运移受阻,导致煤层含气量较高。

1.2.2 地质构造条件

构造对煤层气井产能的控制,主要体现于构造演化和构造形态控制储层的含气性和渗透性。

1) 构造演化。受构造运动控制,煤层经历多次抬升或沉降,若回返抬升或沉降时间晚且短,则煤层气散失的时间就短,对煤层气藏的保存有利;相反,则煤层气赋存量少。

2) 构造形态。背斜构造,其核部在中和面以上表现为拉应力,常发育垂向张裂隙,渗透性良好,若上覆盖层封闭性好,则有利于煤层气的保存,反之则不利于保存;中和面以下,受强烈的挤压应力作用,常在核部形成应力集中,有利于煤层气的保存,但储层高压低渗,两翼处裂隙不发育,所以煤层气保存较好。向斜构造,其核部中和面之上应力集中,表现为强烈的挤压应力,对于煤层气封存有利,煤层气含量高,但储层渗透性低,所以向斜构造核部和两翼都有利于煤层气的赋存。断层构造,张性断层(正断层、拉张走滑断层或反转逆断层)受拉张应力作用,形成开放性断层面,断层面附近煤层气大量解吸并通过张性断层面逸散,不利于煤层气的富集;挤压性断层(逆断层、压性走滑断层或反转正断层)由于挤压作用,断层面附近压力集中,形成封闭性断层面,煤层气难以逸散,常形成煤层气富集区。

1.3 井眼稳定性

井眼稳定是煤层气抽采成功的关键,具体影响因素为:

1) 煤体结构。井眼的稳定性受煤体结构的影响极大,在构造发育的区域或者由构造引起的裂隙带上,煤体结构破碎,井眼容易发生垮塌,在煤体结构完整的区域,施工钻孔一般能达到设计长度。

2) 地应力。埋深大的区域自重地应力大,钻孔钻进时导致地应力重新分配,对煤层尤其是钻孔周围产生的破坏作用较大,容易导致煤体结构破碎而发生塌孔。

3) 化学因素。已有的水化膨胀机理实验结果表明,由于煤的比表面积极大,巨大的比表面积来源于裂缝、微裂缝和孔洞,是煤岩具有强烈吸水能力的内在原因。煤岩大量吸水可导致煤岩的膨胀和胶结物的溶解,造成煤岩强度降低,增大了煤层钻井时井壁的不稳定性。

1.4 地形地貌特征

地形是指地势高低起伏的变化,即地表的形态。具有整体性,规模有大有小,诸如山脉、丘陵、河流、湖泊、海滨、沼泽等均为地形之类。

地形地貌复杂程度划分见表2。

1.5 适用性评价指标体系的建立

根据前面所述的煤层气地面井抽采技术适用性的影响因素,需要确定建设地面井的基本条件,因此,建立地面井的第一步是要确定一票否决的条件,

表2 地形地貌复杂程度划分

分类	特点
第一类 地形地貌简单	高丘陵(相对高差100~200 m),低丘陵(相对高差<100 m),一般坡面坡度<15°
第二类 地形地貌中等	中山(海拔高度1.0~3.5 km),低山(海拔高度<1 km),山地起伏高度一般200~500 m,一般坡面坡度>15°~25°
第三类 地形地貌复杂	极高山(海拔高度>5 km),高山(海拔高度3.5~5.0 km),一般山地起伏高度>500 m,一般坡面坡度>25°

如果其中有一项不符合条件,那么就不能建设地面井。根据资源储量规范的最低限值,此处对建立地面井的最低条件进行适当修正,所选择的一票否决条件为:煤层单层厚度小于1 m;埋藏深度小于200 m或大于1 500 m;上覆有效地层厚度小于200 m;高变质程度煤含气量小于4 m³/t;煤体结构中Ⅲ、Ⅳ类煤占80%以上,且顶底板为致密厚泥岩;生烃史、埋藏史、构造史关系不匹配。建立的评价指标体系如图1所示。

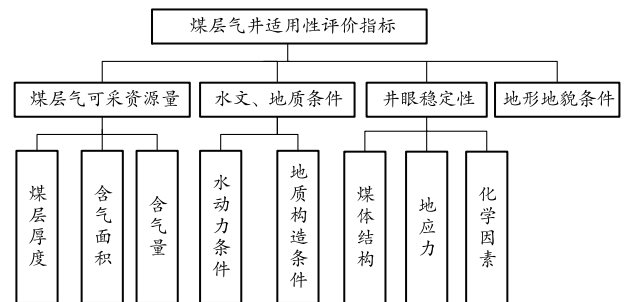


图1 煤层气地面井适用性评价指标体系

2 煤层气地面井抽采技术适用性评价方法

2.1 评价方法选择

目前用于评价煤层气井的方法主要分为:一般综合评价法、层次分析法、熵权法、模糊综合评判法、BP神经网络法。一般综合评价法最简单,但是没有考虑建立地面井各状况描述指标对研究目的贡献的差异性。层次分析法掺杂了许多人为的主观因素,客观性表现较差。模糊数学评价法的主旨是对各种方案进行综合筛选,仍然没有涉及对指标权重的客观评价。BP神经网络法本质上为梯度下降法,而其所要优化的目标函数又非常复杂,必然会出现“锯齿形”现象,这使得BP算法低效或者使训练失败^[6]。因此,笔者采用层次分析法+模糊综合评判法。由于地面井适用性的各个评价指标的量纲不一致,为了评价方便统一,对各个指标的满意程度进行专家打分,所有的指标按照满意程度的大小打分范围设定为90~100(极为适合)、80~89(适合)、60~79(一般)、0~59(不适合)。

2.2 研究适用性所用评价方法概述

1) 层次分析法确定权重, 构造两两参数互相判断的矩阵。构造的判断矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2) 层次排序及其一致性检验。把判断矩阵进行归一化处理, 得到的矩阵计为 W , 这个矩阵的各个向量的和为 1。

$W(=1) \Rightarrow w_1, w_2, \dots, w_n$ 可作为一个排序向量。

令 $a_{ij} = w_i / w_j$ 成对比较, 则:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \cdots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_1}{w_1} & & \frac{w_n}{w_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \cdots & \frac{w_n}{w_n} \\ \frac{w_1}{w_1} & & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于矩阵的一致性, 需要: A 的秩为 1, A 的唯一非零特征根为 n , 且非零特征根 n 所对应的特征向量归一化后可作为权向量, 即矩阵满足 $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$, 其中 $i, j, k = 1, 2, \dots, n$ 。

对于不一致的成对比较矩阵 A , 用对应于最大特征根 A 的特征向量作为权向量 w , 即:

$$Aw = \lambda w \quad (3)$$

3) 计算各参数的权重。本研究通过计算求其最大特征根 λ , 利用一致性指标计算公式, 求出 CI , 查表得到随机一致性指标 RI , 计算得出一致性比率 CR 。依次求出每一级指标的权重。

4) 煤层气井适用性得分。应用模糊矩阵的复合

运算, 得到适用性的模糊综合评判矩阵:

$$B = M \cdot R = (m_1, m_2, m_3, m_4) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix} = [b_1, b_2, b_3, b_4] \quad (4)$$

对 B 进行归一化处理:

$$B' = \left[\frac{b_1}{b}, \frac{b_2}{b}, \frac{b_3}{b}, \frac{b_4}{b} \right] \quad (5)$$

为了方便比较, 对 B' 进行量化处理, 最后对 B' 与量化值之间矩阵的积得出的数值进行比较, 可以得出综合评判结果。

3 实例验证

以寺河煤矿为例, 该矿 3 号、15 号煤层为主要可采煤层, 9 号煤层为局部可采煤层 (东区大部分可采, 西区局部可采), 其余为不可采煤层。3 号煤层平均厚 5.5 ~ 6.3 m, 下距 9# 煤层平均 47 m; 9 号煤层平均厚 1.3 m, 下距 15# 煤层平均 35 m; 15 号煤层平均厚 2.6 m^[7-11]。

寺河井田含煤地层为二叠系下统山西组、石炭系上统太原组, 含煤 11 ~ 21 层, 煤层平均总厚度为 11.49 ~ 13.87 m。目前主要开采 3# 煤层, 煤层倾角 2° ~ 10°, 一般 5° 左右。煤层埋藏深度东井区为 170 ~ 580 m, 西井区为 250 ~ 640 m。

煤体结构中 III、IV 类煤较少, 煤层顶底板大部分为泥岩、粉砂岩、粉砂质泥岩。首先根据寺河煤矿具体情况对每一层的最底层指标进行打分, 打分情况见表 3。

表 3 底层指标打分情况

指标名称	判断标准	得分	指标名称	判断标准	得分	指标名称	判断标准	得分
煤厚/m	≥8	82	水动力条件	①	87	地应力	地应力低, 钻孔成功率高	85
	6~8			②			地应力较低, 成孔率稍低	
	4~6			③			地应力一般, 成孔率低	
	<4			④			高地应力, 打钻易喷孔	
含气面积/ km ²	较大	80	地质构造	⑤	87	化学因素	钻井液与煤岩长时间接触后, 煤岩强度基本不变	85
	大			⑥			钻井液与煤岩长时间接触后, 煤岩强度稍弱	
	一般			⑦			钻井液与煤岩长时间接触后, 煤岩强度一般	
	小			⑧			钻井液与煤岩长时间接触后, 造成煤岩强度很低	

表3(续)

指标名称	判断标准	得分	指标名称	判断标准	得分	指标名称	判断标准	得分
含气量/m ³	≥12	98	煤体结构	煤体结构保存完整	85	地形地貌特征	简单	87
	12~8			煤体结构保存较完整			中等	
	8~4			煤体结构的破碎程度一般			复杂	
	<4			煤体结构破碎严重				

注:①—含煤地层处于导水性弱或者不导水的构造发育区,煤层气田边界发育有挤压、逆掩性质的断层,或者在地层中由于受地下水压力传递煤层气相对富集而不发生运移,煤层气扩散通道受阻;②—含煤地层处于导水性较弱或者不导水的构造发育区,煤层气田边界局部发育有挤压、逆掩性质的断层,或者在地层中由于受地下水压力传递煤层气比较富集,运移情况较少,煤层气扩散通道局部受阻;③—含煤地层处于导水性一般的构造发育区,煤层气田边界发育有挤压、逆掩性质的断层情况一般,或者在地层中由于受地下水压力传递煤层气富集情况一般,煤层气有一定的运移;④—含煤地层处于导水性强的构造发育区,煤层与含水层被断层或裂隙沟通,煤层气受地下水的流动影响,吸附态转化为游离态,随地下水的流动而散失;⑤—地质构造中的向斜、背斜、断层等受挤压作用明显,不利于煤层气的散逸;⑥—地质构造中的向斜、背斜、断层等的拉张应力作用表现不明显,挤压作用表现突出,煤层气挤压作用下富集较多;⑦—地质构造中的向斜、背斜、断层的拉张应力作用不明显,挤压作用表现较为突出,煤层气在两种作用下赋存一般;⑧—地质构造中的向斜、背斜、断层等拉张应力表现突出,有利于煤层气的散逸。另外,参考《山西晋城无烟煤矿业集团有限责任公司寺河矿西井区3号煤层瓦斯涌出量预测》,3#煤层倾角平均厚度6.31 m;含气量评判参考《煤层气资源/储量规范》DZ/T 0216—2010,寺河矿3号煤层瓦斯含量19.33~21.80 m³/t。

经过公式(1)~(5)计算得出各级指标权重与得分,结果见表4。

表4 各级指标权重与得分情况

一级指标	权重	分值	得分	二级指标	权重	分值	得分
煤层气可采资源量	0.456 1	85.677 2		煤厚	0.163 8	82	
				含气量	0.297 2	98	85.677 2
				含气面积	0.539 0	80	
水文地质构造条件	0.223 5	82.441 2	84.909 6	水动力条件	0.368 5	87	
				地质构造条件	0.579 1	87	82.441 2
井眼稳定性	0.230 7	85.008 5		煤体结构	0.648 0	85	
				地应力	0.229 9	85	85.008 5
				化学因素	0.122 2	85	
地形地貌条件	0.089 6	87					

根据一级指标的最终得分:84.909 6分,参考定量评级划分,对应结果为适合。在实际情况中,寺河煤矿矿井以其优越的地质、水文等客观条件,主要采用地面钻井抽采方法,以井下顺层钻孔、穿层钻孔、采空区抽采为辅的瓦斯抽采方法。截至2015年6月,寺河煤矿东井区共有地面抽采钻井401口、日产气量68万m³左右,西井区共有地面抽采钻井312口、日产气量58万m³左右。综合实际情况来看,此评价方法完全能够对煤矿区的煤层气地面井适用性做出正确评判。

4 结语

1) 为了减少地面钻井过程中对区域客观条件考察不明确导致的井身损毁,或者产能不达标的情况,对煤矿区地面井适用性首次进行了研究,限定地面井建设的门槛值,得出了影响地面井适用性的主要因素:煤层气可采资源量(煤层厚度、含气面积、含气量),水文、地质构造条件(水动力条件、地质构造条

件),井眼稳定性(煤体结构、地应力、化学因素),以及地形地貌特征。

2) 建立了煤层气地面井适用性评价指标体系,比较评价方法后认为,层次分析法+模糊综合评判法更适合地面井适用性评价研究。以寺河煤矿为例,在对影响地面井适用性主要因素的基础上运用该方法进行评判,结果表明,该区域适合建设地面井,为其他区域选择建设地面井提供了参考。

3) 对于煤层气抽采,除了地面井,目前国内大部分都进行井下抽采,所以下一步工作的重点应是井上下联合抽采技术的适用性研究。

参考文献:

[1] 王怀勤,朱炎铭,李伍,等.煤层气赋存的两大地质控制因素[J].煤炭学报,2011,36(7):1129-1134.
[2] 李腾.影响煤层气富集的地质因素[J].煤矿现代化,2011(1):108-110.

(下转第110页)

利用尾气的压力和其不含水的性质,对干燥塔反吹再生,从而实现了尾气的回收再利用。同时,减少了压缩后干燥空气的消耗量,提高了氮气产量,进一步实现了节能降耗的目的。从长期运行成本来看,压缩机因为空气进气量的减少而减少的耗电量远远大于新增尾气回收罐的固定投资。因此,变压吸附制氮尾气回收流程是一种合理可行、经济节能的新变压吸附制氮流程。

参考文献:

[1] 肖娅, 诸林. 含氧煤层气脱氧制 LNG 工艺研发[J]. 煤化工, 2014, 42(1):12-15.
[2] 李文林. 混合制冷剂的研究与发展[J]. 流体机械, 1986(4):62-66.
[3] 王长元, 张武, 陈久福, 等. 煤矿区低浓度煤层气含氧液化工艺技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2011, 38(4):1-3.
[4] 肖露, 任小坤, 张武, 等. 低浓度煤层气含氧液化冷箱的研制[J]. 矿业安全与环保, 2011, 38(5):19-21.
[5] 宁平, 唐晓龙, 易红宏. 变压吸附工艺的研究与进展[J]. 云南化工, 2003, 30(3):28-31.
[6] CRUZ P, SANTOS J C, MAGALHAES F D, et al. Cyclic adsorption separation processes: analysis strategy and optimization procedure[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58: 3143-3158.

2003, 58: 3143-3158.
[7] DAVID T, KEARNS, PAUL A, et al. Application of an adsorption non-flow exergy function to an exergy analysis of a pressure swing adsorption cycle [J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59:3537-3557.
[8] MEUINER F, KAUSHIK S C, NEVEU P, et al. A comparative thermodynamic study of sorption systems: second law analysis [J]. International Journal of Refrigeration, 1996, 19 (6):414-421.
[9] PONS M. Second law analysis of adsorption cycles with thermal regeneration [J]. Journal of Energy Resources Technology, 1996, 118:229-236.
[10] PONS M. Full analysis of internal adsorbate redistribution in regenerative adsorption cycles[J]. Adsorption, 1998, 4:299-311.
[11] SMITH O J, WESTERBERG A W. The optimal design of pressure swing adsorption systems [J]. Chemical Engineering Science, 1990, 46 (12):2967-2976.
[12] CRUZ P, SANTOS J C, MAGALHAES FD, et al. Cyclic adsorption separation processes: analysis strategy and optimization procedure [J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58:3143-3158.
[13] 赫希, C. K. 分子筛[M]. 北京:中国工业出版社, 1965.

(责任编辑:陈玉涛)

=====
(上接第 106 页)

[3] 叶建平, 武强, 王子和. 水文地质条件对煤层气赋存的控制作用[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5):459-462.
[4] 曹国华, 田富超, 郝从娜. 地质构造对寺河矿煤层瓦斯赋存规律的影响分析[J]. 煤炭工程, 2009(3):57-59.
[5] 余永强, 宋志刚, 高建成. 屯留井田 3#煤层瓦斯含量分布规律分析[J]. 煤矿安全, 2009(12):75-78.
[6] 李腾. 影响煤层气富集的地质因素[J]. 煤矿现代化, 2011(1):108-110.
[7] 曹军涛, 赵军龙, 王轶平. 煤层气含量影响因素及预测方法[J]. 西安石油大学学报, 2013, 28(4):29-32.
[8] 马国龙, 张庆华, 赵彬. 寺河煤矿煤与瓦斯突出主控因素

分析防治及对策[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(3):49-52.
[9] 王聪, 吴财芳, 欧正, 等. 黔西织纳煤田少普矿区 16 号煤层煤层气富集地质控制因素[J]. 煤炭学报, 2011, 36(9):1487-1489.
[10] 赵少磊, 朱炎铭, 曹新款, 等. 地质构造对煤层气井产能的控制机理与规律[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(9):108-112.
[11] 倪小明, 王延斌, 接铭训, 等. 晋城矿区西部地质构造与煤层气井网布置关系[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2):146-149.

(责任编辑:李 琴)