

# 煤层气物性参数随埋深变化规律研究

叶建平<sup>1</sup> 张守仁<sup>1</sup> 凌标灿<sup>2</sup> 郑贵强<sup>2</sup> 吴见<sup>1</sup> 李丹琼<sup>3</sup>

(1. 中联煤层气有限责任公司 北京 100011; 2. 华北科技学院 河北 燕郊 101601; 3. 中国石油大学(北京) 北京 102249)

**摘要:** 针对深部煤层煤气的“高地应力、低渗透性”特性导致开发难度大的问题,分析了沁水盆地南部煤层气井岩心试验数据和测井、试井、压裂、生产等实际资料,研究了主要储层物性参数与埋深的关系。研究表明:不同储层物性随埋深变化规律各不同,具有跃变式变化特征;拐点变化值并不是一个确定埋深。利用BP神经网络模拟物性参数变化拐点的结果表明:选取的关键参数不同,得到的物性随埋深变化拐点值是不一致的。以力学参数为关键参数的深部煤层埋深拐点为1 043 m;侧重物性参数的埋深拐点为659~950 m;以产能因素为关键参数的埋深拐点为927~1 171 m。

**关键词:** 深部煤层; 煤层气; 储层物性; 神经网络; 沁水盆地; 渗透率; 地应力

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2014)06-0035-05

## Study on Variation Law of Coalbed Methane Physical Property Parameters with Seam Depth

YE Jian-ping<sup>1</sup> ZHANG Shou-ren<sup>1</sup> LING Biao-can<sup>2</sup> ZHENG Gui-qiang<sup>2</sup> WU Jian<sup>1</sup> LI Dan-qiong<sup>3</sup>

(1. China United Coalbed Methane Corporation Limited Beijing 100011 China;

2. North China Institute of Science and Technology Yanjiao 101601 China; 3. China University of Petroleum(Beijing) Beijing 102249 China)

**Abstract:** According to high difficult development caused by high geostress and low permeability features of the coalbed methane in deep seam, the paper analyzed the rock core test data of the coalbed methane well in the south part of Qinshui Basin and the logging, well test, fracturing, production and other actual informations of the coalbed methane well and studied the relationship between the physical property parameters of main reservoir and depth. The study results showed that the variation law of different reservoir with seam depth would be different and would have jumped type variation features. The variation value of the inflection point would not be a certain buried depth value. The results of the changed inflection point of the physical property parameter simulated with BP neural network showed that due to the selected key parameters different, the obtained physical property with the changed inflection point of the depth would be different. The inflection point value of the deep seam depth with the mechanics parameters as the key parameters was 1 043 m. The deep seam depth inflection point value of the particular physical property parameters was 659~950 m. The deep depth inflection point value with production factors as the key parameters was 927~1 171 m.

**Key words:** deep seam; coalbed methane; reservoir physical property; neural network; Qinshui Basin; permeability; geostress

## 0 引言

煤层渗透率和含气量是影响煤层气井产量的重要因素,在一个盆地内,含气量增加到某一埋深后即达到稳定状态,而渗透率继续降低,因此存在一个工业开采煤层气的最佳埋深问题。煤的孔隙度、渗透率与有效应力相关,含气量、吸附性与沉积环境、煤

成熟度、温度、压力和构造背景等一系列地质储层条件有关,国内外学者均对此做了大量研究。文献[1]基于煤是多孔介质模型,固体介质是不可压缩的假设,建立了基于试验和煤层气井数据的渗透率、孔隙度与应力关系,随着煤层埋藏埋深和有效应力增加,煤层割理缝的宽度减小,渗透率呈指数级降低,认为圣胡安盆地在300~600 m埋深部煤层的渗

收稿日期: 2014-03-02; 责任编辑: 赵瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2014.06.007

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05042)

作者简介: 叶建平(1962—),男,浙江宁海人,教授级高级工程师,博士。E-mail: yejp@cnooc.com.cn

引用格式: 叶建平,张守仁,凌标灿,等.煤层气物性参数随埋深变化规律研究[J].煤炭科学技术,2014,42(6):35-39.

YE Jian-ping, ZHANG Shou-ren, LING Biao-can, et al. Study on Variation Law of Coalbed Methane Physical Property Parameters with Seam Depth [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 35-39.

透率随埋深增加而缓慢降低,然后快速下降,所以,煤层渗透变化率一般随埋深增加而降低。不同的盆地,如果压缩系数发生变化,煤层渗透率随埋深变化率将改变。煤储层渗透率是地应力、埋深、裂隙、储层压力和水文地质条件等综合作用的结果,其中地应力和埋深是主控因素。研究表明:在小于510 m埋深处,最大主应力为最大水平应力,中间主应力为垂向应力(上覆岩层压力),最小主应力为最小水平应力<sup>[2]</sup>。研究者通过对沁水盆地南部43口煤层气井渗透率和地应力统计分析,建立了煤储层渗透性与现今地应力之间的相关关系和模型,指出随着地应力增加煤储层试井渗透率呈指数函数关系降低;煤储层地应力在650 m以浅、650~1 000 m和1 000~1 500 m三种埋深条件下,最大主应力、最小主应力和垂直主应力大小随埋深增加发生转换<sup>[3-5]</sup>。

研究认为,地质构造是决定煤层气地质条件和开采条件的根本。影响煤层气保存的主要因素是吸附能力和最小流体静压头<sup>[6]</sup>。煤层气吸附量受温度和压力的影响,三者之间关系一般符合朗格缪尔全因素模型<sup>[7-9]</sup>。地层温度和地层压力对煤层吸附性的影响呈现出2种截然不同的效应。浅部地层的温度相对较低,煤层埋深引起垂直应力增高,正效应可能发挥主导作用;深部地层的温度增高,其产生的负效应甚至可能远大于地层压力正效应,造成煤层吸附能力减弱,含气量显著低于浅部煤层,这正是深部煤层气地质条件的特殊性之一。对鄂尔多斯盆地东部的深部煤层气研究认为,随埋深增加含气量先增大后减小,变化拐点在1 000 m处<sup>[10-13]</sup>。

从目前研究现状看,对煤储层物性参数的研究主要集中在浅部区域,对深部煤层物性参数随埋深变化规律和地应力对煤储层渗透性的影响研究远不够,尤其是单因素储层物性参数如温度、压力、渗透率、含气量、吸附量等随埋深或有效应力的变化拐点值是否存在,哪些因素影响其变化规律,这种随埋深变化规律将对深部煤层气井钻完井、增产改造技术的优化改进和适宜的排采制度的建立产生重大影响。基于此,笔者研究了单因素储层物性随着埋深的变化规律,通过BP神经网络方法模拟计算分类储层物性随埋深变化规律,分析随埋深变化的临界变化点埋深,俗称拐点埋深,试图通过深部煤层储层物性随埋深变化的规律研究,以期对深部煤层煤气的勘探开发研究提供参考。

## 1 煤层气物性参数随埋深变化规律分析

研究的煤储层物性参数主要包括含气性、孔隙度、渗透率等煤储层物性和地温、储层压力、破裂压力、地应力等。统计数据主要来自沁水盆地煤层气井实测的岩心测试、试井、压裂和测井解释数据。

### 1.1 深部煤层孔隙度变化特征

沁水盆地南部煤层孔隙度与埋深关系如图1所示,由图1可知,当埋深小于800 m时,孔隙度的分布范围较宽(1%~13%),而当埋深超过800 m时,孔隙度的分布则较为集中,分布在小于6.5%的范围之内。这主要是因为埋深增加,地应力增大,其中垂向应力增大后地层的压实作用增强。

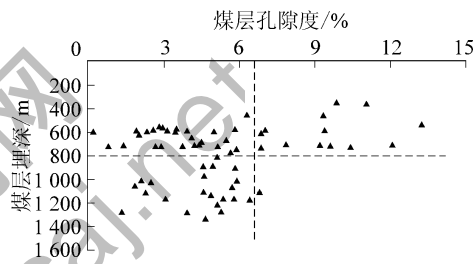


图1 沁水盆地南部煤层孔隙度随埋深变化

### 1.2 深部煤层渗透率变化特征

通过对沁水盆地63口煤层气井的埋深与渗透率的关系进行统计发现,随着煤层埋深的增加,渗透率呈减小的趋势。而且,煤层埋深大于700 m后,随着煤层埋深的增加,煤层渗透率减小趋势明显加剧,煤层埋深大于800 m后,渗透率基本维持在一个低值( $0.45 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ )范围内(图2)。可见,随着煤层埋深的增加,有效应力增加,煤中的裂隙逐渐闭合,使渗透率逐渐减小。所以,对煤层埋深大于800 m的煤层气进行开发时,将面临极低的渗透率。

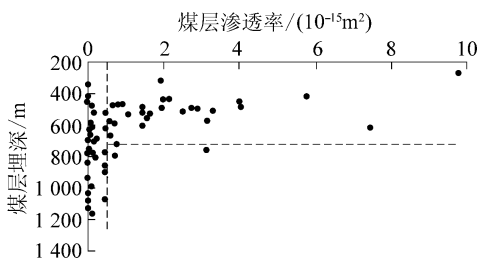


图2 沁水盆地南部煤层渗透率随埋深变化

### 1.3 深部煤层含气性变化规律

沁水盆地南部柿庄地区煤层含气量较高,其中3号煤层含气量 $3.55 \sim 25.48 \text{ m}^3/\text{t}$ 。15号煤层含气量 $8.15 \sim 27.07 \text{ m}^3/\text{t}$ 。3号和15号煤层含气量都是自东南向西北随埋深的增大呈现逐渐增高的变化

趋势。但煤层含气量与埋深关系(图 3)显示,柿庄地区两者相关性较差。表明 1 100 m 以浅,埋深不是本区含气量的主控因素。

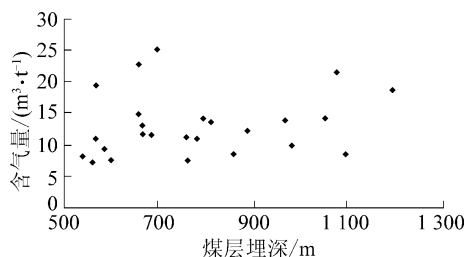


图 3 沁水盆地南部煤层含气量与埋深的相关性

#### 1.4 深部煤层地温变化规律

沁水盆地测试的 5 口井的地温与煤层埋深的关系如图 4 所示,由图 4 可知:随着埋深的增加,温度呈对数逐渐增加。在浅部(<800 m)随埋深增加地温增加幅度较小;在深部(>800 m)随埋深增加,地温增加幅度较大。

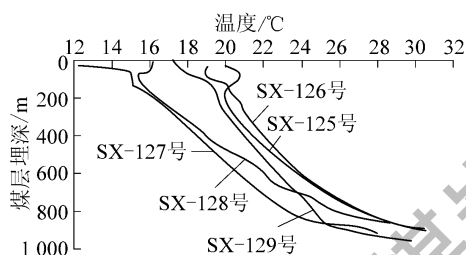


图 4 沁水盆地的地温随煤层埋深变化关系

#### 1.5 深部煤层地应力变化规律

沁水盆地深部煤层气井的地应力与煤层埋深的关系如图 5 所示,从图 5 可看出,随埋深增加,最大水平主应力增加,地应力呈台阶式跃变,在埋深 600 和 900 m 处均有阶跃式变化。

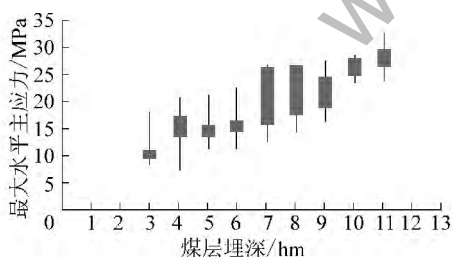


图 5 沁水盆地最大水平主应力与煤层埋深关系

通过沁水盆地南部煤层气井压裂数据和测井数据统计,地层最大水平主应力  $\sigma_H$ 、最小水平主应力  $\sigma_h$ 、垂直主应力  $\sigma_v$  随着埋深的增加,地应力发生状态转换。在埋深小于 650 m 以浅,  $\sigma_v < \sigma_h < \sigma_H$ ; 在埋深 650 ~ 920 m,  $\sigma_h < \sigma_v < \sigma_H$ ; 在埋深大于 920 m,  $\sigma_h < \sigma_H < \sigma_v$  (图 6)。

#### 1.6 煤储层物性参数变化规律

煤储层物性均具有跃变式变化特征:煤层孔隙

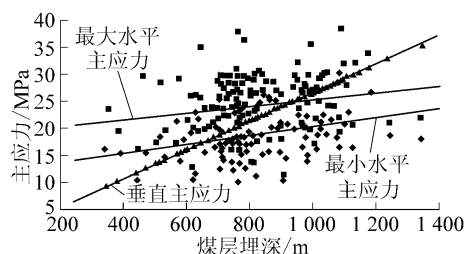


图 6 沁水盆地南部主应力随煤层埋深转换特征

度在 800 m 的埋深点具有明显变化;煤层渗透率在埋深 700 ~ 800 m 具有跃变式变化;煤储层温度在埋深 800 m 增大幅度明显变小;煤储层最大水平主应力在埋深 600、900 m 均有阶跃式变化。

## 2 煤层气物性参数随埋深变化模型的建立

为进一步研究深部煤层物性参数随埋深的变化规律及参数变化的拐点值,采用 BP 神经网络方法模拟物性参数随埋深的变化规律,并确定出物性参数变化的临界埋深。数值模拟的主要操作步骤如下:①选取原数据;②数据归一化处理;③用 Matlab 软件进行先期非线性回归;④再次用 Matlab 进行方程回归;⑤确定不同参数的权重;⑥首次确定各参数随着埋深变化的突变点;⑦利用回归方程初次划分出深、浅煤层的埋深;⑧利用迭代法重新计算埋深,直至首次突变点值与埋深落在同一区间内,则该埋深即深部煤层临界埋深。

### 2.1 特性参数数据的选取

为比较不同参数差异对模拟结果的影响,分别选取力学参数、物性参数和产能参数为关键参数。以上参数主要来自于沁水盆地的阵列声波测井数据、储层物性数据和国内外典型深部煤层气的产能数据。选取纵波速度、井内温度、破裂压力为关键力学参数,渗透率、吸附量、储层压力、温度和镜质体反射率为物性参数,含气量、渗透率、储层压力和日产气量为关键产能参数。以力学参数为例,经归一化处理并剔除某些参数后的力学参数见表 1。

### 2.2 模拟结果分析

1) 侧重力学参数的数值模拟结果分析。选取深部煤层储层关键参数为埋深、纵波、温度和破裂压力,通过 Matlab 数值模拟,得到深部煤层储层关键参数耦合的回归方程为

$$H = 0.247 - 0.2107P + 0.9394T + 0.0044P_1$$

式中:  $H$  为煤层埋深,耦合区间最大值为 1 461 m;  $P$  为测井纵波速度,耦合区间最大值 3.982 m/ms;  $T$

为井内温度,耦合区间最大值 47.28 °C;  $P_l$  为破裂压力,耦合区间最大值 30.14 MPa。

表 1 经归一化处理并剔除某些参数后的力学参数

井号	层位	井深/m	经归一化处理的力学参数				
			纵波速度	横波速度	井内温度	破裂压力	井深
SX-007	太原组	1 318 ~ 1 321	0.801 858	0.682 344	0.767 555	0.627 405	0.902 122
		1 325 ~ 1 326	0.855 349	0.607 413	0.769 882	0.825 813	0.906 913
SX-008	太原组	1 126 ~ 1 128	0.819 940	0.567 557	0.740 271	0.888 188	0.770 705
		1 170 ~ 1 180	0.803 114	0.556 397	0.761 421	1.000 000	0.800 821
SX-010	太原组	1 412 ~ 1 413	0.886 740	0.595 855	0.970 178	0.857 332	0.966 461
		1 452 ~ 1 456	0.799 347	0.548 824	0.998 308	0.829 794	0.99 384
		1 461 ~ 1 464	0.855 349	0.664 807	1.000 000	0.872 263	1.000 000
SX-011	太原组	1 301 ~ 1 309	0.881 467	0.680 351	0.702 411	0.412 741	0.890 486
SX-016	太原组	1 198 ~ 1 199	1.000 000	0.677 561	0.771 997	0.930 325	0.819 986
SX-023	太原组	1 225 ~ 1 236	0.927 675	0.569 550	0.782 572	0.792 303	0.838 467
		869 ~ 875	0.799 347	0.569 550	0.681 261	0.646 649	0.594 798
		960 ~ 961	0.964 591	0.820 646	0.730 118	0.596 549	0.657 084
		977 ~ 978	0.967 855	0.760 462	0.737 944	0.643 663	0.668 720
		993 ~ 994	0.905 575	0.787 166	0.743 232	0.532 515	0.679 671
		997 ~ 999	0.837 519	0.612 595	0.744 924	0.713 338	0.682 409

对埋深与纵波、温度和破裂压力等参数的权重进行数值模拟,得到权重结果:参数  $P$ 、 $T$ 、 $P_l$  权重分别为 0.079 9、0.227 4、0.692 7;可见本组耦合参数中,破裂压力权重最大,对确定埋深影响最大,温度因素次之,而纵波对于确定埋深影响较小。

2) 侧重储层物性参数的数值模拟结果。经过 BP 神经网络数值模拟,对参数渗透率  $k$ 、吸附量  $Q$ 、储层压力  $P_c$ 、井内温度  $T$  和镜质组反射率  $R_o$  进行方程耦合,得到的回归方程为  $H = -0.376 5 - 0.005 5k - 0.006 8Q + 0.225 4P_c + 1.080 3T + 0.129 6R_o$ , 参数  $k$ 、 $Q$ 、 $P_c$ 、 $T$ 、 $R_o$  的权重分别为 0.811 7、0.051 9、0.114 4、0.011 1、0.010 9。

3) 侧重产能参数的数值模拟结果。经 BP 神经网络数值模拟,以  $Q$ 、 $k$ 、 $P_c$  和日产气量  $Q_g$  为主要参数的耦合方程,得到的回归方程为  $H = 0.075 5 + 0.163 6Q - 0.070 9k + 0.888 6P_c - 0.066 4Q_g$ 。侧重产能的耦合参数经过数值模拟,得到参数  $Q$ 、 $k$ 、 $P_c$ 、 $Q_g$  的权重分别为 0.053 7、0.575 4、0.063 5、0.307 4。

### 2.3 拐点值的确定

1) 以力学参数为关键参数的拐点埋深。与侧重储层物性为关键参数的计算方法相同,可以计算出以力学参数为关键参数的深部煤层埋深界线为 1 043 m,而实际取的拐点为 997 m,两者误差为 4.6%,在误差允许范围内。

2) 以储层物性为关键参数的拐点埋深。首次选取深部煤层储层参数的拐点埋深为 665 ~ 686 m,利用耦合公式得出储层参数拐点埋深为 628 ~ 726 m;此埋深与初选埋深差值较大,利用迭代法,重新取参数范围。经过迭代最终得到侧重物性参数的埋深为 659 ~ 950 m。

3) 以产能为关键参数的拐点埋深。利用耦合公式得出产能参数拐点埋深为 800 ~ 1 000 m;计算出以产能因素为关键参数的深部煤层埋深界限为 876 ~ 991 m,计算值与选取值在误差允许范围内。故而确定以产能因素为关键参数的埋深界限为 927 ~ 1 171 m。

采用 BP 神经网络模拟的结果显示:选取的关键参数不同,得到的物性埋深拐点是不一致的。以力学参数为关键参数的深部煤层埋深拐点为 1 043 m;侧重物性参数的埋深拐点为 659 ~ 950 m;而以产能因素为关键参数的埋深拐点为 927 ~ 1 171 m。由此可以认为,以渗透率为主的煤储层物性参数和以破裂压力为主的岩石力学参数以及产能参数在埋深拐点上存在差异性,其影响机理值得深入研究。

## 3 结 论

1) 在沁水盆地南部煤层试验数据和煤层气井测井、试井、压裂、生产等实际资料分析的基础上,通

通过对深浅煤层煤层气储层物性、物性参数变化规律和埋深拐点的研究表明,储层物性均具有跃变式变化特征:在埋深 620 m 处,垂直应力大于最小水平主应力,应力发生转换。在埋深 700 ~ 800 m 处,煤层孔隙度、渗透率、储层温度发生跃变式变化。在埋深 900 ~ 1 000 m 处,垂直应力大于最大水平主应力,应力再次发生转换。

2) 由于埋深拐点的存在,在地质研究、钻井压裂等工程作业、排采生产等相关环节应采取对应的技术措施。例如由于地应力临界转换埋深的不同,造成在压裂工艺选择时要考虑是以垂向裂缝为主,还是以水平裂缝为主,或者是中间的过渡地带。由于埋深拐点不同,对煤层气的开采工艺和技术也产生影响,在已知拐点数值的条件下,可以决定是采用简单工艺或者复杂工艺来进行开采,并对开采的可行性和开采成本进行分析。

3) BP 神经网络模拟计算结果表明,以岩石力学参数和产能参数为关键参数,埋深拐点为 927 ~ 1 171 m,中值在 1 000 m 左右;侧重物性参数的埋深拐点为 659 ~ 950 m,中值在 800 m 左右。研究表明,煤层气物性参数埋深拐点不是固定的,不同类型的煤层气物性参数其埋深拐点是不同的。当然,不同的盆地,由于煤层压缩系数不同,地应力条件不同,物性参数埋深拐点表现出不同。由此表明,随着埋深增加,孔渗、含气性、地应力和有效应力发生拐点性变化,它对煤层气的井位优选、增产改造工艺优化和排采制度完善等各个生产环节具有指导意义。

致谢:参加研究工作的还有陆小霞、付晓龙等研究生,同时得到戴俊生、黄文辉、张遂安、王延斌、朱

希安等教授的指导,在此一并表示诚挚的谢意!

#### 参考文献:

- [1] McKee C R, Bumb A C, Way S C *et al.* 应用渗透率与埋深关系评价煤层天然气的生产潜力[M]. 地质矿产部,译. 郑州:河南科学技术出版社,1990:56-59.
- [2] 傅雪海,秦勇敢,李贵中,等. 山西沁水盆地中、南部煤储层渗透率影响因素[J]. 地质力学学报,2001,7(12):618-622.
- [3] 孟召平,田永东,李国富,等. 沁水盆地南部煤储层渗透性与地应力之间关系和控制机理研究[J]. 自然科学进展,2009,19(10):1142-1147.
- [4] 田永东. 沁水盆地南部煤储层参数及其对煤层气井产能的控制[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2009:34-39.
- [5] 许浩,汤达祯,唐书恒,等. 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 煤层气学术研讨会论文集. 北京:地质出版社,2011:55-62.
- [6] Malone P G, Briscone F H, Camp B S *et al.* 亚拉巴马州勇士盆地 GRI/USSC 大印地安溪工区煤层低天然气含量的发现及解释[M]. 地质矿产部,译. 郑州:河南科学技术出版社,1990:44-50.
- [7] 秦勇,袁亮,胡千庭,等. 我国煤层气勘探开发技术现状与发展方向[J]. 煤炭科学技术,2012,40(10):351-357.
- [8] 闫涛涛,刘大锰,姚艳斌,等. 地震技术在长治经纺矿区煤储层研究中的应用[J]. 煤炭科学技术,2012,40(2):102-106.
- [9] 胡宝林,车遥,杨起,等. 吐哈盆地煤储层物性特征研究及煤层气资源前景[J]. 煤炭科学技术,2003,31(4):50-53.
- [10] 许浩,张尚虎,冷雪,等. 沁水盆地煤储层孔隙系统模型与物性分析[J]. 科学通报,2005,50(1):45-50.
- [11] 秦勇,汤达祯,刘大锰,等. 煤储层开发动态地质评价理论与技术研究[J]. 煤炭科学技术,2014,42(1):80-88.
- [12] 刘大锰,姚艳斌,蔡益栋,等. 煤层气储层地质与动态评价研究进展[J]. 煤炭科学技术,2010,38(11):10-16.
- [13] 汤达祯. 煤储层物性控制机理及有利储层预测方法[M]. 北京:科学出版社,2010:77-80.

(上接第 52 页)

采的一种成本低、效率高的抽采方式。采动区地面井在开采煤层群的矿井将成为一种重要的、高效的瓦斯抽采方式,它不受井下时空条件的限制,更易于应用和实施。采动区地面井对开采单一煤层的矿井仍然有很好的抽采效果,而且由于抽采的瓦斯主要来自开采层工作面,能显著降低工作面瓦斯涌出量、降低瓦斯浓度。采动区地面井抽采也还有一些技术问题需要完善提高,如提高防止地面井损毁的技术可靠性,解决山区地面井施工的问题等。

#### 参考文献:

- [1] 赵全福. 煤矿安全手册[M]. 北京:煤炭工业出版社,1994.
- [2] 张铁岗. 矿井瓦斯综合治理技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,

2001.

- [3] 于不凡,王佑安. 煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册[M]. 北京:煤炭工业出版社,2000.
- [4] 抚顺矿务局,阳泉矿务局,煤科院抚顺研究所. 煤矿抽采瓦斯手册[M]. 北京:煤炭工业出版社,1980.
- [5] 袁亮. 松软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2004.
- [6] 王显政. 煤矿安全新技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2002.
- [7] 李日富,梁运培,张军. 地面钻孔抽采采空区瓦斯效率影响因素研究[J]. 煤炭学报,2009,34(7):942-946.
- [8] 孙海涛. 采动影响下地面钻井的变形破坏机理研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [9] 淮南矿业(集团)有限责任公司,煤炭科学研究总院重庆研究院,澳大利亚联邦工业科学园. 地面钻孔抽采采动区域瓦斯技术研究[R]. 淮南:淮南矿业(集团)有限责任公司,2006.