



移动扫码阅读

李 阳, 舒龙勇, 凡永鹏, 等. 地面压裂井衰竭期井下接替抽采时空衔接关系研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 73–82.
LI Yang, SHU Longyong, FAN Yongpeng, *et al.* Research on temporal–spatial relationship between ground fracturing wells and underground drilling for substitution drainage of during extraction exhaustion period[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 73–82.

地面压裂井衰竭期井下接替抽采时空衔接关系研究

李 阳^{1,2}, 舒龙勇^{1,2}, 凡永鹏^{1,2}, 郝晋伟^{1,2}, 周建伟³, 何 健⁴

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究总院 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013;
3. 山西潞安集团余吾煤业有限责任公司 瓦斯治理研究中心, 山西 长治 046100; 4. 潞安化工集团有限公司, 山西 长治 046100)

摘 要: 为了利用地面压裂形成的有利抽采条件进行地面压裂井衰竭期井下钻孔接替抽采, 形成“地面压裂井超前治理+井下钻孔接替抽采”的井上下接替抽采模式, 开展了地面压裂井衰竭期井下接替抽采的合理时空衔接关系研究。通过地面压裂井压裂裂缝展布规律分析、地面压裂增透促抽效果井下考察及煤储层参数变化规律数值模拟等工作, 掌握了潞安矿区地面压裂井的影响作用及有效影响范围, 采用数值模拟方法分析确定了井下接替钻孔与地面压裂井的最优空间布置关系; 基于地面压裂井排采曲线, 并结合衰竭期井下钻孔接替抽采的需求, 探讨了地面压裂井衰竭期的定义和划分方法, 提出了地面压裂井衰竭期的判别指标及关键时间节点。研究表明: 潞安矿区地面压裂井的有效影响范围为井周 80 m, 在该区域内储层压力可以下降 50% 左右, 透气性系数可以增加 0.77~1.40 倍, 井下接替钻孔单孔抽采纯量平均值可达 53.68~131.67 m³/d, 提升了井下钻孔的抽采效率; 当地面压裂井沿钻孔轴向上的位置固定时, 则井下接替钻孔与地面压裂井的法向距离越短, 抽采效果越好, 当地面压裂井与接替钻孔的法向距离不变时, 地面压裂井位于接替钻孔轴向中部位置时井下接替钻孔的抽采效果最好; 将地面压裂井的产气速率作为衰竭期评判指标, 潞安矿区地面压裂井衰竭期的判别指标临界值为产气速率 200 m³/d, 对应的衰竭期时间节点为 8~10 a。

关键词: 地面压裂井; 衰竭期; 井下接替抽采; 时空衔接关系; 产气速率

中图分类号: TD712.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2022)12-0073-10

Research on temporal–spatial relationship between ground fracturing wells and underground drilling for substitution drainage of during extraction exhaustion period

LI Yang^{1,2}, SHU Longyong^{1,2}, FAN Yongpeng^{1,2}, HAO Jinwei^{1,2}, ZHOU Jianwei³, HE Jian⁴

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. Gas Control Research Center, Shanxi Lu'an Yuwu Coal Industry Co., Ltd., Changzhi 046000, China; 4. Lu'an Chemical Group Co., Ltd., Changzhi 046000, China)

Abstract: In order to make use of the favorable extraction conditions formed by ground fracturing to carry out the underground borehole replacement extraction in the drainage exhaustion period of ground fracturing wells, and form the advanced treatment of ground fracturing wells + underground borehole replacement extraction mode of underground borehole replacement extraction, the temporal–spatial relationship between ground fracturing wells and underground drilling for substitution extraction of during drainage exhaustion period was studied. Through the analysis of the distribution law of fracturing fractures, the investigation of the effect of ground fracturing on enhancing permeability and promoting extraction, and the numerical simulation of the variation law of coal reservoir parameters, the influence and effective range of ground fracturing wells in Lu'an Mining Area are mastered. Numerical simulation method is used to analyze and

收稿日期: 2022-03-01 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.mcq22-04

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05067006-003); 国家自然科学基金面上资助项目(51874178); 煤炭科学技术研究院有限公司技术创新基金资助项目(2021(X-I-07))

作者简介: 李 阳(1988—), 男, 河南焦作人, 副研究员, 博士。E-mail: liyanglxg@163.com

determine the optimal temporal—spatial relationship between ground fracturing wells and underground drilling for substitution extraction. Based on the drainage curve of surface fractured wells and the demand of drilling in the drainage exhaustion period, the definition and division method of the drainage exhaustion period of surface fractured wells are discussed, and the discriminant indexes and key time nodes of the drainage exhaustion period of surface fractured wells are put forward. The results show : The effective influence range of ground fracturing wells is 80 m. In this area, the reservoir pressure can be decreased by about 50%, the permeability coefficient can be increased by 0.77–1.40 times, and the average pure volume of single underground drilling for substitution extraction can reach 53.68–131.67 m³/d, which improves the extraction efficiency of downhole drilling. When the position of ground fracturing wells is fixed along the axis of the underground drilling, the shorter the normal distance between the underground drilling and the ground fracturing wells, the better the extraction effect. When the normal distance between the ground fracturing wells and the underground drilling is constant, the best extraction results are achieved when the ground fracturing wells is located in the middle of the axial direction of the underground drilling. The gas production rate of ground fracturing wells is used as an indicator of drainage exhaustion period. And the critical value of the indicator of drainage exhaustion period of surface fractured wells in the Lu'an mine area is 200 m³/d, and the corresponding failure period time node is 8~10 years.

Key words: ground fracturing wells; drainage exhaustion period; underground drilling for substitution extraction; temporal-spatial relationship; gas production rate

0 引言

潞安矿区位于沁水盆地东南部,区内主采的3号煤层赋存稳定,煤层气(煤矿瓦斯)资源丰富,随着煤炭开发强度和开采深度的增加,传统的井下瓦斯抽采技术难以满足现代化矿井安全、高效、高产的需求,导致矿井抽、掘、采工程衔接困难,煤矿瓦斯问题愈来愈成为制约矿区发展的重要因素^[1-3]。为缓解日益严峻的瓦斯灾害局面,探索地面井超前治理煤层瓦斯的方式,潞安矿区通过先期进行的地面直井试验和参数井测试,初步掌握了区内的储层物性特征^[4-5],论证了地面煤层气开发的可行性。随后,潞安矿区开展了大量的地面煤层气开发研究和试验工程,试验了水力压裂、氮气泡沫压裂、水平井、U型井等技术工艺^[6-8],提高了地面煤层气排采效率,一定程度上降低了煤层中的瓦斯含量和瓦斯压力。但由于潞安矿区储层具有渗透率低、储层压力低、含气饱和度低、地应力高及吸附瓦斯量高的“三低两高”特征^[4,9-11],钻井、压裂和排采等工艺技术一直难以突破,单井产量仍然偏低、整体开发难度仍然较大,严重制约了该区域的地面煤层气开发与瓦斯治理工作^[5]。

潞安矿区的煤层气开发与瓦斯治理实践表明,单独使用地面煤层气开发或井下瓦斯治理措施,难以有效解决矿井瓦斯治理问题^[12]。随着煤与煤层气协调开发理念的提出与发展^[13],煤矿区煤层气井上下联合抽采模式得到了广泛应用^[14-15]。同时,潞安集团经过近几年的探索^[16-20],表明地面井通过压裂工艺后虽然仍处于低产状态,但可以使煤层产生卸压增透效果,并能够在一定程度上降低储层孔隙压

力,在局部形成瓦斯抽采有利区域。在地面压裂井进入衰竭期后,利用压裂形成的抽采有利条件进行井下钻孔接替抽采,形成“地面压裂井超前治理+井下钻孔接替抽采”的井上下联合抽采新模式,将能充分发挥地面压裂影响范围广、超前治理时间长和井下钻孔施工成本低、覆盖密度高的优势,进而有效提升瓦斯抽采效率。

地面压裂井衰竭期井下接替抽采模式包含了“地面压裂井”和“井下钻孔”两部分,在工程应用中必须保证两者在空间上相互协调、在时间上有序衔接。在空间布置上,需要根据地面压裂井的有效影响范围,将井下钻孔布置在合理的区域内;在时间衔接上,需要根据地面压裂井衰竭期时间节点,提前施工井下钻孔并及时进行接替抽采。笔者将从充分利用地面压裂井形成的有利区域进行井下接替抽采的角度出发,围绕地面压裂井有效影响范围、地面压裂井与井下钻孔的最优空间关系、地面压裂井衰竭期时间节点等方面,开展潞安矿区地面压裂井衰竭期井下接替抽采时空衔接关系研究。

1 地面压裂对煤储层的影响作用

水力压裂措施广泛应用于煤层气地面井增产作业。在水力压裂过程中,随着井筒内压裂液压力的增大,压裂液逐渐注入煤储层并使其产生破裂形成裂缝。随着裂缝在储层内部的扩张和延伸,一方面在储层与井筒之间增加一条或多条流体通道,另一方面将会在压裂范围内平衡应力产生卸压增透效果。为了使井下接替抽采钻孔能够充分利用地面井的压裂效果,首先需要掌握地面压裂对煤储层的影响作用与影响范围。

1.1 地面压裂井裂缝展布规律

地面井水力压裂裂缝形态直接影响其卸压增产效果与影响范围,因此需要对地面井压裂裂缝展布规律进行研究。为了研究地面水力压裂的裂缝延展情

况,根据地面井压裂过程微震监测解释资料^[8,17,21-22],分析评价了 LA-01、LA-02、LA-11、LA-15、LA-16、LA-17、LA-19 等煤层气井的压裂裂缝延展情况,详见表 1。

表 1 水力压裂裂缝参数

Table 1 Fracture parameters of hydraulic fracturing

井号	东翼缝长度/m	西翼缝长度/m	裂缝方位/(°)	影响宽度/m	总缝长度/m
LA-01	116.8	77.5	38.2	100	194.3
LA-02	111.5	85.3	43.1	105	196.8
LA-11	106.4	66.5	38.1	100	172.9
LA-15	108.5	81.6	40.2	105	190.1
LA-16	106.8	67.5	38.2	100	174.3
LA-17	104.2	78.2	39.8	98	182.4
LA-19	107.5	82.3	43.1	105	189.8

根据微震监测解释可知,地面水力压裂裂缝主裂缝长度为 172.9 ~ 196.8 m,影响宽度为 98 ~ 105.0 m,形成了一个近似于椭圆形的裂缝区域。主裂缝方位角为 N38.1°E ~ N43.1°E,平均为 N40.1°E 与试验区域所在区域的最大水平主应力方向(N30.0°E ~ N44.8°E)基本一致,并与最小水平主应力方向垂直,这与水力压裂裂缝延展规律相吻合。

1.2 地面压裂井增透促抽效果

1)为了分析地面压裂对煤层透气性的影响作用,以 LA-20、LA-27 及 LA-28 地面井为研究对象,将每口地面井周围的煤层按照 50 m 间隔均匀划分为 4 个试验单元,共划分出 12 个试验单元进行透

气性系数测试,如图 1 所示。结合 2.1 节中裂缝方向平均值及长度平均值可以判断,1 号、2 号、3 号、5 号、6 号、7 号、9 号、10 号、11 号等单元位于压裂裂缝影响区域内,4 号、8 号、12 号等单元位于压裂裂缝影响区域外。为了对比压裂区域内和压裂区域外的透气性系数差异,在 2 号、4 号、7 号、8 号、11 号、12 号单元共布置了 6 个测点,分别对煤层透气性系数进行了测试,详见表 2。根据测试结果,压裂裂缝延展区内煤层的透气性系数是压裂裂缝延展区外的 1.77 ~ 2.40 倍,说明经过地面水力压裂,煤层透气性有明显的提高,有利于瓦斯抽采。

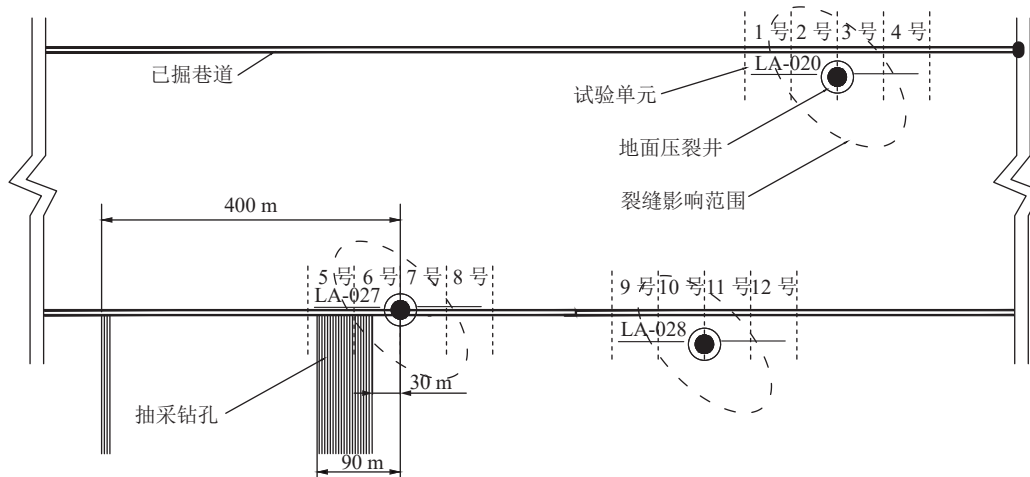


图 1 地面压裂井分布示意

Fig.1 Distribution of surface fracturing wells

2)为了分析地面压裂井对井下钻孔抽采的影响作用,在 LA-027 井附近按照相同工艺参数施工了 6 组抽采钻孔,在远离地面井的区域布置 1 组抽采钻

孔,如图 1 所示。将每组 4 个抽采钻孔并入同一汇流管,在汇流管上安装孔板流量计对抽采数据进行监测,将单组钻孔的抽采纯量除以组内钻孔的数量

作为该组抽采钻孔的单孔日抽采纯量,测试结果见表3。根据表3可以发现,随着井下钻孔与地面压裂井的距离接近,则井下钻孔抽采纯量和初始流量均相对增高,抽采效果也相对更好。

表2 透气性系数测试结果
Table 2 Test results of permeability coefficient

区域	单元	透气性系数/(m ² ·(MPa ² ·d) ⁻¹)
压裂裂缝影响区域内	2号	0.421 2
	7号	0.461 3
	11号	0.518 7
	平均值	0.467 1
压裂裂缝影响区域外	4号	0.176 3
	8号	0.260 9
	12号	0.215 9
	平均值	0.217 7

表3 井下钻孔抽采流量
Table 3 Underground drilling drainage flow

序号	至地面井距离 范围/m	单孔抽采 纯量/(m ³ ·d ⁻¹)	钻孔初始 流量/(m ³ ·d ⁻¹)
1	30 ~ 40	(70.32 ~ 174.22)/131.67	156.5
2	40 ~ 50	(71.61 ~ 128.19)/92.59	108.06
3	50 ~ 60	(45.87 ~ 114.57)/92.38	109.98
4	60 ~ 70	(49.94 ~ 96.45)/80.25	77.90
5	70 ~ 80	(35.94 ~ 109.17)/53.68	83.19
6	80 ~ 90	(21.95 ~ 50.28)/38.19	49.73
7	390 ~ 400	(20.15 ~ 49.51)/35.06	41.51

注:数据格式为(最小值~最大值)/平均值。

1.3 煤储层参数变化规律

通过地面水力压裂措施能够联通煤层中裂缝与裂隙,平衡储层应力产生卸压增透效果,提升煤层气排采量和井下钻孔抽采量,降低储层压力^[8]。地面压裂井排采是一个复杂的过程,涉及了气体和液体的吸附、解吸、扩散、渗流以及固体变形等多物理场作用,因此采用 COMSOL Multiphysics 多物理场数值模拟软件开展地面压裂井对煤储层的影响作用研究。

根据相关资料^[5,8-9]中的煤岩物理参数,以潞安矿区的地面井为原型,建立了基于热-流-固耦合的地面压裂井排采模型,基础模型尺寸为 300 m×300 m,采用三角网格划分为 6 266 个单元,为研究水力压裂井设置了平行与主裂缝方向的抽采效果监测线

1(AB)、垂直与主裂缝方向的抽采效果监测线 2(CD)以及抽采效果监测点 E、F,如图 2 所示。

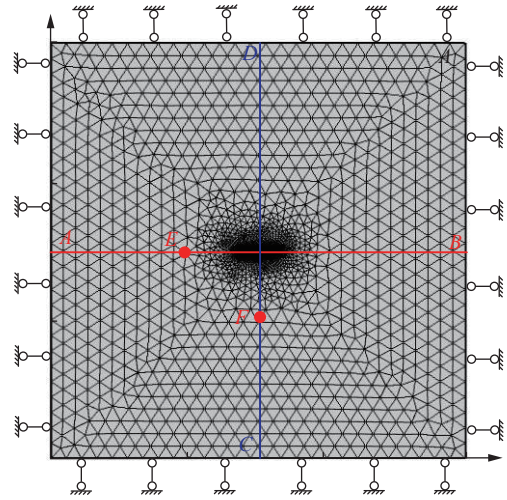


图2 数值模拟的物理模型

Fig.2 Physical model of numerical simulation

为验证数值模型的准确性,对比分析了产气速率、累积产气量的模拟值和实测值的差异,如图 3 和图 4 所示。可以看出,模拟所得的压裂井产气速率、累积产气量与实际值变化趋势相同,且数值接近。其中产气速率随着时间延长存在先增加再降低后逐渐稳定的规律,稳定的峰值产气速率出现在 300 d 左右。

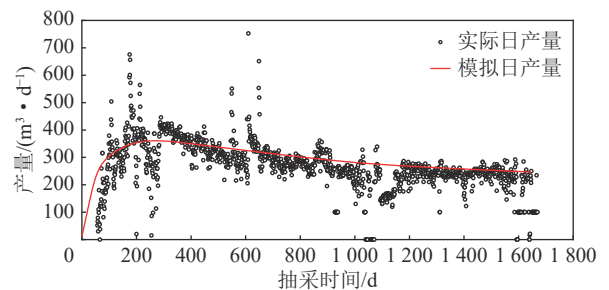


图3 模拟和实际产气速率对比

Fig.3 Comparison of simulated and actual gas production rates

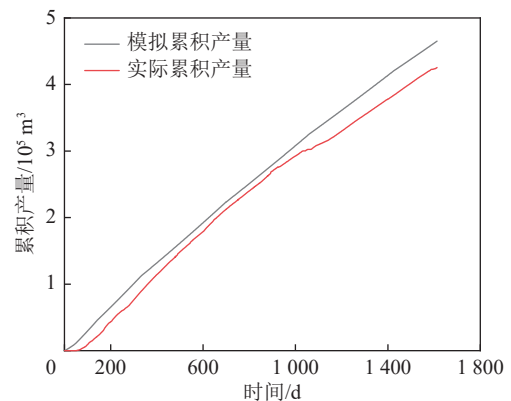


图4 模拟和实际累积产量对比

Fig.4 Comparison of simulated and actual cumulative yield

利用数值模拟值和实际测试值计算了排采 365、730、1 095、1 560 d 时的累积产量数值模拟误差分别为：19.7%、9.38%、8.28%、9.28%。可见数值模型误差较小，能够满足工程计算的要求。

根据从抽采效果监测线、监测点上提取的储层压力数据，分别绘制了地面压裂井周围不同距离内，煤层平均储层压力随时间变化规律如图 5 所示。可以看出随着排采时间的延长，地面压裂井周围的储层压力逐渐下降，且距压裂井的距离越近，储层压力降幅越大。

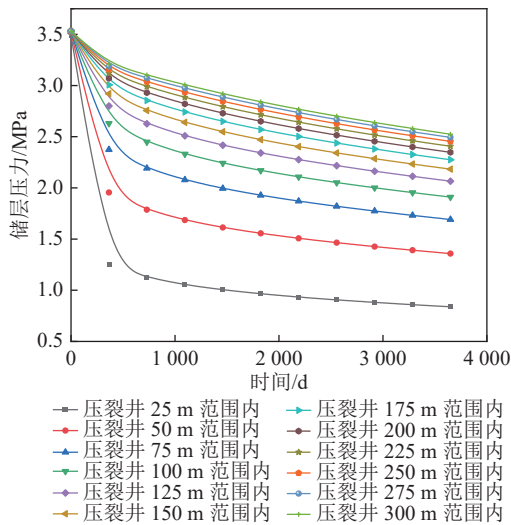


图 5 储层压力平均值变化

Fig.5 Variation of average reservoir pressure

2 地面压裂井衰竭期井下接替抽采空间布置关系

对于地面压裂井衰竭期井下接替抽采模式，井下钻孔需要布置在地面压裂井的有效影响范围内，但同时为了防止压裂裂缝影响井下钻孔稳定性和封孔质量，还需要在此基础上进一步分析地面压裂井与井下钻孔的空间位置关系^[12]。

2.1 地面压裂井的有效影响范围

随着地面压裂井排采，其周边不同范围内的透气性、储层参数乃至裂缝形态等均会发生不同程度的变化。因此，可以通过综合分析压裂裂缝长度、增透促抽效果及储层参数变化等现象，可以较为准确地确定地面压裂井的有效影响范围。

1)根据微震监测解释数据^[8,17,21-22]，地面压裂井的主裂缝单翼长度可达 100 m 以上，裂缝影响宽度单翼可达 50 m 左右，但裂缝长度并不等同于地面压裂井的有效影响范围。一方面，压裂裂缝远端的规模一般相对较小，能够产生的影响相对有限；另一方

面，在地应力和基质变形的双重作用下，压裂裂缝会发生不同程度的闭合塌缩。因此，需要结合地面压裂的增透促抽效果进一步分析地面压裂井的影响范围。

2)根据图 5 中的模拟数据，在地面压裂井排采 10 a 之后，其周围 75 m 范围内的储层压力可以下降 50% 以上；当井下钻孔与地面井的距离达到 100 m 时，储层压力的下降幅度为 43%，说明地面压裂井在井筒周围 75 m 左右的范围内能够更为有效的产生卸压效果。

3)根据表 2 可以看出，压裂裂缝影响区域内的煤层透气性系数相对于裂缝影响区域外会有较大幅度的增长，井下钻孔抽采量也会相应增大。根据表 3 数据，随着井下钻孔与地面井之间距离的增大，钻孔抽采纯量和初始流量整体上逐渐减小，但在不同距离范围内的减小幅度存在差异。其中 40~60 m 范围内的井下钻孔抽采纯量、初始流量基本不变，在 60~80 m 范围内的井下钻孔抽采纯量、初始流量略有减小；当钻孔与地面压裂井的距离增大到 80 m 以上时，井下钻孔抽采纯量、初始流量减小幅度较大，与无地面压裂井区域的抽采钻孔基本一致。

综合现场实测与数值模拟结果可以看出，在地面压裂井周围 80 m 的范围内煤层卸压增透效果明显，能够有效提升井下接替钻孔的抽采效果。因此，以井下接替钻孔抽采效果最优为前提，可以将地面压裂井的有效影响范围定为井周 80 m。

2.2 井下钻孔与地面压裂井的最优空间关系

为了进一步研究井下接替钻孔与地面压裂井的空间关系，在 1.2 节的地面压裂井排采模型基础上，按照地面压裂井与井下接替钻孔的 3 种空间位置关系，进一步建立了地面压裂井衰竭期井下接替钻孔抽采模型，如图 6 所示。

当地面压裂井进入衰竭期后，随着井下接替钻孔不断抽采煤层中瓦斯，钻孔覆盖区域的煤层瓦斯含量逐渐下降，在钻孔附近形成低含量区域，并在多个钻孔之间相互叠加，在接替钻孔和压裂井之间产生较大的含量梯度，形成含量漏斗。如图 7 所示。

根据监测线上的瓦斯含量变化数据(表 4—表 6)，当地面压裂井沿钻孔轴向上的位置固定时，则井下接替钻孔与地面压裂井的法向距离越短，抽采效果越好，抽采区域的瓦斯含量相对越低。当地面压裂井与接替钻孔的法向距离不变时，地面压裂井位于接替钻孔轴向中部位置时井下接替钻孔的抽采效果最好，抽采区域煤层瓦斯含量相对更低；当地面井位

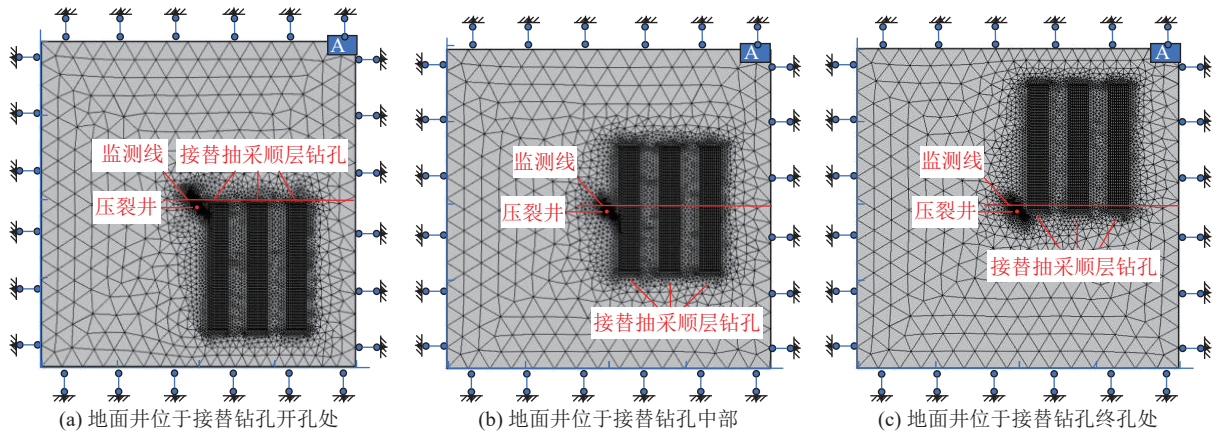


图6 地面压裂井衰竭期井下接替钻孔抽采模型

Fig.6 Drainage model of underground replacement borehole in exhaustion period of ground fracturing well

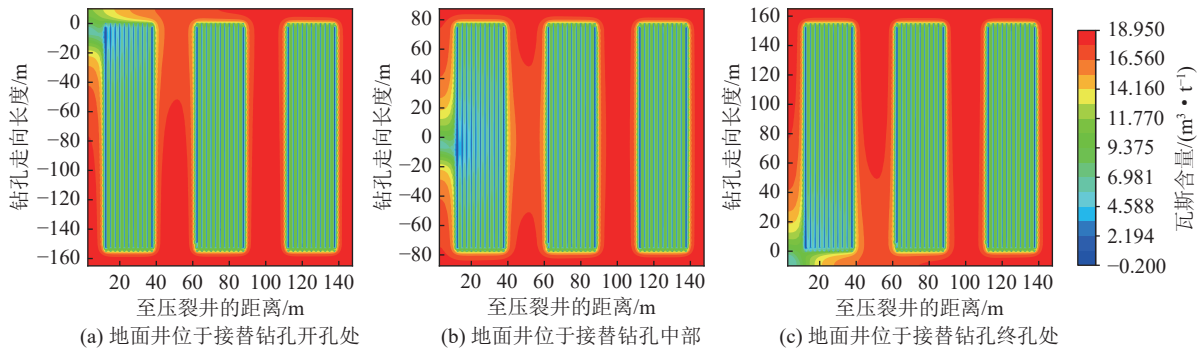


图7 煤层瓦斯含量分布云图

Fig.7 Gas content distribution nephogram of coal seam

于接替钻孔开孔位置或终孔位置附近时,井下接替钻孔的抽采效果相对略差,抽采后的煤层瓦斯含量相对更高。

基于表4—表6中数据和地面压裂井的有效影响范围,可以判断地面压裂井与井下接替钻孔的最优空间布置为:①地面压裂井应该位于接替钻孔的轴向中部位置;②接替钻孔与地面压裂井的法向距

离小于80 m。

3 地面压裂井衰竭期井下接替抽采时间衔接关系

地面压裂井衰竭期井下接替抽采模式的核心思想是:当地面压裂井排采进入衰竭期后,在地面压裂

表4 煤层瓦斯含量变化值(地面压裂井位于接替钻孔开孔处)

抽采时间/d	瓦斯含量平均值/(m ³ ·t ⁻¹)		
	接替钻孔距地面压裂井法向距离0~50 m	接替钻孔距地面压裂井法向距离50~100 m	接替钻孔距地面压裂井法向距离100~150 m
	0	17.38	18.20
90	9.18	9.87	10.15
180	7.39	8.01	8.25
270	6.30	6.87	7.11
360	5.56	6.09	6.31
450	5.02	5.52	5.74

表5 抽采后煤层瓦斯含量(地面压裂井位于接替钻孔中部)

抽采时间/d	瓦斯含量平均值/(m ³ ·t ⁻¹)		
	接替钻孔距地面压裂井法向距离0~50 m	接替钻孔距地面压裂井法向距离50~100 m	接替钻孔距地面压裂井法向距离100~150 m
	0	16.58	17.93
90	8.35	9.53	9.94
180	6.45	7.49	7.87
270	5.41	6.37	6.72
360	4.77	5.66	5.98
450	4.33	5.17	5.49

表 6 抽采后煤层瓦斯含量(地面压裂井位于接替钻孔终孔处)
Table 6 Change value of coal seam gas content(ground fracturing well located at the end of substitution borehole)

抽采 时间/d	瓦斯含量平均值/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)		
	接替钻孔距	接替钻孔距	接替钻孔距
	地面压裂井法 向距离0~50 m	地面压裂井法 向距离50~100 m	地面压裂井法 向距离100~150 m
0	17.49	18.22	18.56
90	9.20	9.84	10.12
180	7.43	8.00	8.26
270	6.35	6.88	7.12
360	5.59	6.09	6.32
450	5.05	5.52	5.74

产生的卸压增透区域内施工井下钻孔继续高效抽采煤层瓦斯。为了实现地面压裂井衰竭期井下接替抽采模式的高产、高效,除了优化井下钻孔和地面压裂井之间的空间布置外,还需要保证井下接替抽采与地面排采在时间上的有序衔接。因此,地面压裂井何时进入衰竭期以及如何判断地面压裂井进入衰竭期变得至关重要。

3.1 地面压裂井衰竭期划分方法

通过中国知网数据库、万方数据库及中国专利网等数据库检索,尚未发现关于“地面井衰竭期”“地面压裂井衰竭期”“地面压裂井排采衰竭期”等词的明确定义、解释或者论述^[23]。但从“地面压裂井衰竭期”的文字含义和“地面压裂井衰竭期井下接替抽采”目的出发,可以明确地面井衰竭期是一个相对概念,进入衰竭期并不代表地面压裂井已经完全不能生产煤层气,而是指此时的产气速率过低,导致地面压裂井在排采效率、经济成本及安全效益等方面已经不能够满足矿井瓦斯治理和煤层气开发的需要。基于这一思想,可以将“地面压裂井衰竭期”初步概述为:地面压裂井排采速率随着排采时间延长而逐渐降低到无法高效开采煤层气、有效降低瓦斯含量的时期。

煤层气井的产气动态不同于常规天然气,具有初期产气量低、排采时间长、产气量相对稳定的特点,整体排采年限一般可达 15 a 以上^[24]。地面压裂井的生产通常包括:排水降压、稳定生产及气产量下降等 3 个阶段,产气速率也相应地经历“逐渐增加—保持稳定—逐渐减少”3 个阶段(图 8),其中气产量下降阶段持续时间最长^[25]。在此基础上,结合地面压裂井衰竭期的概念,按照产气速率变化将地面井整个排采周期进一步划分为:上升期、稳产期、下降期

及衰竭期,如图 8 所示。

因此,地面压裂井衰竭期的时间并不固定,其判断标准也不完全相同,需要结合所在区域的储层特征进行具体分析。根据图 8 中对地面压裂井排采周期的划分,上升期和稳产期分别对应了排水降压和稳定生产阶段,而下降期和衰竭期则对应了气产量下降阶段。地面压裂井进入气产量下降阶段后产气速率会不断降低,当地面压裂井的产气速率降低到一定程度时,则由下降期进入衰竭期。因此,可以将地面压裂井的产气速率作为衰竭期评判指标,当地面井的排采量速率小于一定值时,即可认为地面压裂井进入衰竭期。

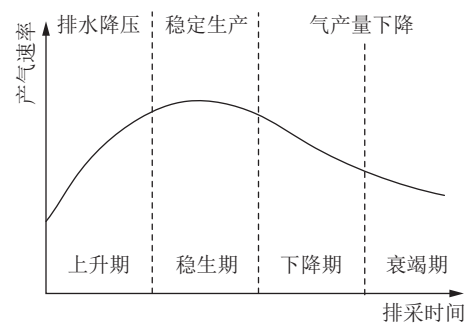


图 8 地面压裂井排采周期演示曲线

Fig.8 Demonstration curve of production cycle of ground fracturing wells

3.2 地面压裂井衰竭期判别指标

从地面井产气动态和排采曲线出发,结合地面井衰竭期井下钻孔接替抽采的需求,可以将产气速率作为地面井衰竭期的一个评判指标,即当地面压裂井的产气速率降低到一定程度,使得地面排采的效率低于井下抽采时,即可判断地面压裂井进入衰竭期。地面压裂井是否进入衰竭期是多方面综合作用的结果,通过综合分析地面压裂井的排采规律和井下钻孔抽采情况,确定了地面压裂井衰竭期的判别指标临界值。

1)地面压裂井的排采规律。煤层气属非常规油气资源,至今没有形成一套统一的煤层气井分类标准及方法,引用了前人关于潞安矿区地面压裂井产量划分的方法^[6,26-27],以产量分布曲线作为划分低产井与高产井的评判准则,分别以平均产气速率 <100 、 $100 \sim 200$ 、 $200 \sim 400$ 和 $>400 \text{ m}^3/\text{d}$ 作为低产井、中产井、中高产井和高产井的划分依据。在此基础上,统计分析了矿区内 27 口典型地面压裂井的排采数据,其中平均产气速率在 $200 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上的中高产井及高产井占地面井总数的 66.67%,而平均排采速率在 $200 \text{ m}^3/\text{d}$ 以下的中产井和低产井占地面井总数的

33.33%, 见表7。

2)产气速率指标确定。根据地面井压裂影响区井下钻孔接替抽采试验可知, 井下接替钻孔的百米钻孔抽采纯量可达 $15.8 \sim 43.3 \text{ m}^3/\text{d}$, 平均值 $25.8 \text{ m}^3/\text{d}$ 。按照井下接替钻孔单孔抽采纯量取最小值 $15.8 \text{ m}^3/\text{d}$ 进行计算, 则在地面压裂井周围布置 13 个钻孔即可达到中高产井的产气速率 $200 \text{ m}^3/\text{d}$ 。对于产气速率低于 $200 \text{ m}^3/\text{d}$ 的中产井和低产井, 从瓦斯抽采量、抽采效率和作业成本考虑, 采用井下钻孔抽采代替地面压裂井排采相对更加合适, 据此可以将地面压裂井产气速率 $200 \text{ m}^3/\text{d}$ 作为判断地面压裂井是否进入衰竭期的一个指标值。

表7 地面压裂井产能分布情况

Table 7 Productivity distribution of surface fractured wells

产能分类	排采速率范围/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	占比/%	井数/口	排采速率实测值/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
低产井	<100	18.52	5	(70~97)/86
中产井	100~200	14.81	4	(118~197)/162
中高产井	200~400	51.86	14	(204~353)/278
高产井	>400	14.81	4	(433~1 625)/840

注: 数据格式为(最小值~最大值)/平均值。

3.3 地面压裂井衰竭期关键时间节点

根据“3.2节”中的地面压裂井排采数据, 潞安矿区高产井及中高产井排采 62 个月后的平均排采速率为 $204 \sim 1 625 \text{ m}^3/\text{d}$, 平均值为 $403 \text{ m}^3/\text{d}$ 。通过分析其排采速率的变化趋势, 统计计算出其产气速率降低到 $200 \text{ m}^3/\text{d}$ 时所需要的时间为 $8 \sim 18 \text{ a}$ 。对于煤矿企业来说, 地面压裂井应当服务于矿井瓦斯治理工作, 地面压裂井的排采也应在井下采掘工程部署到位前完成。结合潞安矿区地面煤层气开发超前井下采掘 10 a 的规划^[1], 将中高产井及高产井的衰竭期排采时间指标定为 $8 \sim 10 \text{ a}$ 。

对于中产井和低产井, 由于其平均产气速率已经在 $200 \text{ m}^3/\text{d}$ 以下, 按此判断则其整个排采周期内均处于衰竭期。但是, 从煤矿安全开采的角度出发, 地面压裂井具有超前治理瓦斯、改善煤层透气性的优点, 能够以地面开发时间换取井下瓦斯治理空间, 只有排采一定时间才能够起到应有的瓦斯治理效果。同时, 根据表7可知, 中高产井及高产井占地面压裂井的相对多数, 其进入衰竭期的时间节点具有代表性。因此, 中产井和低产井可以参考中高产井和高产井的衰竭期时间节点。综上所述, 潞安矿区的压裂井一般在排采 $8 \sim 10 \text{ a}$ 后进入衰竭期。

4 结 论

1)通过分析微震监测解释资料, 确定了潞安矿区地面水力压裂裂缝主裂缝长度为 $172.9 \sim 196.8 \text{ m}$, 影响宽度为 $98 \sim 105.0 \text{ m}$; 根据井下实测数据可知, 地面压裂能够提高煤层透气性系数 $0.77 \sim 1.40$ 倍, 并在井周 80 m 范围内有效提升钻孔抽采纯量; 地面压裂井排采数值模拟结果表明, 井周 75 m 范围内的储层压力可以下降 50% 以上; 综合上述现场实测与数值模拟结果可以看出, 以井下接替钻孔抽采效果最优为前提时, 地面压裂井的有效影响范围为 80 m 。

2)根据地面压裂井与井下接替钻孔在 3 种空间位置关系, 在 COMSOL Multiphysics 多物理场数值模拟软件中分别建立了对应的井下接替抽采数值模型, 模拟确定了潞安矿区地面压裂井与井下接替钻孔的最优空间关系为: ①地面压裂井应该位于接替钻孔的轴向中部位置; ②接替钻孔与地面压裂井的法向距离小于 80 m 。

3)基于潞安矿区的压裂井排采数据, 提出将地面压裂井的产气速率作为衰竭期评判指标, 并进一步确定了其临界值为 $200 \text{ m}^3/\text{d}$; 通过分析潞安矿区典型地面压裂井的排采速率变化趋势, 计算确定了地面压裂井衰竭期时间节点为排采 $8 \sim 10 \text{ a}$ 。

参考文献(References):

- [1] 崔宝库, 何健, 周建伟, 等. 潞安矿区地面井压裂抽采与衰竭期井下接替抽采效果研究[J]. 煤炭与化工, 2021, 44(4): 103-107. CUI Baoku, HE Jian, ZHOU Jianwei, et al. Study on the effect of surface well fracturing pumping and underground replacement pumping in failure period in Lu'an Mining Area[J]. Coal and Chemical Industry, 2021, 44(4): 103-107.
- [2] 宋志刚. 潞安屯留矿低渗煤层瓦斯抽采技术研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2009: 5-8. SONG Zhigang. Study on Gas Drainage Technology on Hypotonic Coal Seam in Tunliu Coal Mine, Lu'an[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2009: 5-8.
- [3] 秦贵成, 李阳, 舒龙勇. 本煤层分段水力造穴钻孔抽采半径考察试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(8): 106-113. QIN Guicheng, LI Yang, SHU Longyong. Investigation and experimentation research on extraction radius of segmented hydraulic cavitation borehole in mining-coalbed[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 106-113.
- [4] 刘正, 傅雪海, 王可新, 等. 潞安矿区屯留井田煤层气储层物性特征[C]//煤层气勘探开发理论与实践. 北京: 石油工业出版社, 2007: 88-93. LIU Zheng, FU Xuehai, WANG Kexin, et al. Physical Characteristics of coalbed methane reservoir in Tunliu Well Field, Lu'an

- Mining Area[C]/Theory and Practice of Coalbed Methane Exploration and Development. Beijing: Petroleum industry press, 2007: 88-93.
- [5] 周 丹. 潞安矿区山西组3[#]煤层储层特征及成因机理[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011: 36-43.
ZHOU Dan. The reservoir characteristics and genetic mechanism of ShanXi Formation 3[#] of Coal In Lu'an mining area[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011: 36-43.
- [6] 李恒乐, 曹运兴, 周 丹, 等. 煤层气直井氮气泡沫压裂参数分析及产能评价[J]. 煤田地质与勘探, 48(3): 65-74.
LI Hengle, CAO Yunxing, ZHOU Dan, *et al.* Fracturing parameters analysis and productivity evaluation of vertical coalbed methane wells with nitrogen foam[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(3): 65-74.
- [7] 陈绍杰. 低渗透煤层高压注水驱替瓦斯机理及应用研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2019: 84-90.
CHEN Shaojie. Research on mechanism and application of high-pressure water infusion to displace gas in permeability coal seam[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019: 84-90.
- [8] 翁红波. 煤层气井水力压裂效果评价与消突时间预测研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2015: 1-3.
WENG Hongbo. Hydraulic fracture evaluation and outburst elimination prediction in coalbed methane wells[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2015: 1-3.
- [9] 刘小峰, 刘帅帅. 潞安矿区3号煤层气储层物性综合评价[J]. 中国煤层气, 2018, 15(6): 34-39.
LIU Xiaofeng, LIU Shuaishuai. Comprehensive evaluation of physical properties of No. 3 coalbed methane reservoir in lu'an mining area[J]. China Coal Bed Methane, 2018, 15(6): 34-39.
- [10] 高万兴. 潞安矿区煤层气开发地质条件评价与区块划分[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.
GAO Wanxing. Evaluation of coalbed methane reservoir characterizations and block division in Lu'an mining area[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014: 25-37.
- [11] 李 阳, 张 浪, 舒龙勇, 等. 潞安矿区煤储层特征及瓦斯含量分布规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(12): 65-69.
LI Yang, ZHANG Lang, SHU Longyong, *et al.* Study on coal reservoir features and gas distribution law in Lu'an Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(12): 65-69.
- [12] 申 凯. 晋城矿区地面压裂与井下抽采时空衔接关系研究[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(4): 22-26, 31.
SHEN Kai. Temporal-spatial relationship between ground fracturing and underground gas extraction in Jincheng Mining Area[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2018, 45(4): 22-26, 31.
- [13] 刘彦青, 赵 灿, 李国富, 等. 晋城矿区煤与煤层气协调开发模式优化决策方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2575-2589.
LIU Yanqing, ZHAO Can, LI Guofu, *et al.* Optimized decision method of coordinated development mode of coal and coalbed methane in Jincheng mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2575-2589.
- [14] 肖丽辉, 李彦明, 徐树斌. 井上下联合抽采瓦斯技术的研究及应用[J]. 中国煤炭, 2018, 44(2): 118-121.
XIAO Lihui, LI Yanming, XU Shubin. Study and application of combined gas drainage technology of surface and underground boreholes[J]. China Coal, 2018, 44(2): 118-121.
- [15] 张志刚, 李日富. 煤矿重复扰动“采动-采空”地面井抽采技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(10): 91-97.
ZHANG Zhigang, LI Rifu. Research and application of “mining-gob” surface well extraction under repeated disturbance in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10): 91-97.
- [16] 王少卿, 赵阳升, 唐海波. 地面钻井压裂煤层结合井下钻孔瓦斯抽放技术研究[J]. 煤炭技术, 2014, 33(12): 216-218.
WANG Shaoqing, ZHAO Yangsheng, TANG Haibo. Experimental Study on combining surface well drilling fracturing coal seams with horizontal drilling gas drainage underground[J]. Coal Technology, 2014, 33(12): 216-218.
- [17] 刘高峰, 翁红波, 宋志敏, 等. 煤层气井水力压裂效果评价与消突时间预测研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34(6): 753-783.
LIU Gaofeng, WENG Hongbo, SONG Zhimin, *et al.* Study on hydraulic fracturing effect evaluation and outburst elimination time prediction in coalbed methane wells[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2015, 34(6): 753-783.
- [18] 王少卿. 地面钻井压裂与井下水平钻孔联合瓦斯抽采研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015: 25-40.
WANG Shaoqing. Study on gas drainage by combining surface well drilling fracturing with underground horizontal drilling[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015: 25-40.
- [19] 周龙刚. 煤层气井水力压裂对煤炭生产的影响-以晋城寺河矿为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
ZHOU Longgang. Coalbed well hydraulic fracturing's influences on coal mining-a case study of sihe coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014: 86-90.
- [20] 王骏辉. 余吾煤业竖井水力压裂煤层增透技术应用基础研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
WANG Junhui. The applied fundamental research of vertical shaft hydraulic fracturing and permeability improving technique in yuwu mining company[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016: 75-80.
- [21] 任建刚, 张子茂, 刘高峰. 潞安屯留井田煤层气井水力压裂效果评价研究[C]/瓦斯地质基础与应用研究. 徐州, 2011: 215-223.
REN Jiangan, ZHANG Zixu, LIU Gaofeng. Study on hydraulic fracturing effect evaluation of coalbed methane wells in lu'an tunnel well field [C]/Basis and Application of gas Geology. Xuzhou, 2011: 215-223.
- [22] 冯培文. 潞安矿区煤层气生产井井网布置方法的探讨[J]. 中国煤炭地质, 2008, 20(11): 21-23.
FENG Peiwen. A discussion on CBM producing well pattern layout method in lu'an mining area[J]. Coal Geology of China, 2008, 20(11): 21-23.
- [23] 王公达, 陈善文, 孙 峰, 等. 抽采衰竭期注气增压强采穴瓦斯技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 125-130.
WANG Gongda, CHEN Shanwen, SUN Feng, *et al.* Study on technology of gas flushing unsaturated gas during drainage ex-

- haustion period [J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49 (8): 125- 130.
- [24] 张培河. 煤层气井产能分级方案研究[J]. *中国煤层气*, 2007(1): 28-29,27.
ZHANG Peihe. Study on CBM well capacity grading scheme[J]. *China Coalbed Methane*, 2007(1): 28-29,27.
- [25] 侯世辉. 煤层气井排采过程中不同煤体结构储层渗透率动态变化特征研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018: .
HOU Shihui. Dynamic variation characterization of permeability of different coal structure reservoir during depletion[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018: 48-50.
- [26] 武 男, 陈 东, 孙 斌, 等. 基于分类方法的煤层气井压裂开发效果评价[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(6): 1694-1700.
WU Nan, CHEN Dong, SUN Bin, *et al.* Evaluation on fracturing effect based on classification method[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1694-1700.
- [27] 刘 飞. 山西沁水盆地煤岩储层特征及高产富集区评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2007: 122-124.
LIU Fei. The Characteristics of coal reservoirs and evaluation of coalbed methane enrichment and high-productivity in Qinshui basin of shanxi province[D]. Chengdu : Chengdu University of Technology, 2007: 122-124.