文章编号: 1001-1986(2020)06-0155-06

# 淮北芦岭煤矿煤层顶板水平井煤层气抽采效果分析

方良才[1]，李贵红[2]，李丹丹[2]，李浩哲[2]，刘 嘉[2]

(1. 淮北矿业(集团)有限责任公司，安徽 淮北 235000；2. 中煤科工集团西安研究院有限公司，陕西 西安 710077)

**摘要：**淮北芦岭煤矿为高瓦斯突出矿井，煤层碎软低渗，瓦斯抽采困难。应用“十二五”期间开发的紧邻煤层顶板水平井分段压裂煤层气高效抽采技术，试验井已取得产气突破。为了深入分析评价地面煤层气抽采对煤矿瓦斯灾害的防治效果，基于目标煤层特征，分析煤层顶板水平井的产气规律，利用产能数值模拟技术，对生产井数据进行了历史拟合，在此基础上，进行水平井产能预测，分析水平井抽采过程中煤层气含量和储层压力变化趋势。结果表明：水平井抽采影响范围主要为裂缝和近井筒区域，井筒–裂缝系统外部区域受影响较小；水平井影响范围随抽采时间的延长逐渐增大，预测 1、3、5、8、10 a 的影响面积分别为 0.113、0.193、0.242、0.311、0.350 km$^2$；随着水平井抽采时间的延长，剩余含气量和储层压力逐渐降低，预测水平井抽采 5 a，水平井控制范围内瓦斯含量最低可降至 2.86 m$^3$/t，平均可降至 4.2 m$^3$/t，降低 50.6%。储层压力最低可降至 0.85 MPa，平均可降至 2.30 MPa，降低 66.2%。煤层顶板水平井技术对煤层气开发和瓦斯灾害防治效果显著，是实现碎软低渗煤层瓦斯地面预抽的有效手段。

移动阅读

**关 键 词：**煤层气；碎软低渗煤层；煤层顶板；水平井；抽采效果；淮北芦岭煤矿

**中图分类号：**TE35 **文献标志码：**A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2020.06.021

# Analysis on the CBM extraction effect of the horizontal wells in the coal seam roof in Luling coal mine in Huaibei

FANG Liangcai[1], LI Guihong[2], LI Dandan[2], LI Haozhe[2], LIU Jia[2]

(1. *Huaibei Coal Mining Group Co. Ltd.*, *Huaibei* 235000, *China*; 2. *Xi'an Research Institute Co. Ltd.*, *China Coal Technology and Engineering Group Corp.*, *Xi'an* 710077, *China*)

**Abstract:** Huaibei Luling Coal Mine is a mine with high risk of gas outburst. The coal seams are broken and soft have low permeability, the gas extraction is difficult. The high-efficiency gas extraction technology of staged hydraulic fracturing horizontal well next to seam roof, developed during the 12th Five Year Plan, was applied. The pilot test achieved a breakthrough in gas production. However, there are few researches on the effect of horizontal well drainage on the prevention and control of gas disasters. In this paper, the reservoir characteristics of the target coal seams and the gas production law of the pilot horizontal well were analyzed. Then, the numerical simulation technology was employed to historically match the production data. On this basis, the horizontal well production was predicted for ten years. The change law of coalbed methane gas content and reservoir pressure over time in the process of horizontal well extraction was analyzed. And the effect of coalbed methane extraction on coal mine gas control was evaluated. The results show that: The influence area of horizontal well drainage is mainly near the hydraulic fracture and wellbore, and the area outside the wellbore-fracture system is less affected; The influence area of horizontal well gradually increases with the production time. It is predicted that the area of influence scope of 1 a, 3 a, 5 a, 8 a, and 10 a is 0.113, 0.193, 0.242, 0.311, 0.350 km$^2$, respectively; With the drainage time, the gas

**收稿日期：**2020-11-18；**修回日期：**2020-12-18

**基金项目：**国家科技重大专项课题(2016ZX05045-002)；陕西省创新人才推动计划(2018TD-039)；天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目(2018-TD-QN049)

**Foundation item：**National Science and Technology Major Project(2016ZX05045-002)；Shaanxi Province Innovative Talent Promotion Program(2018TD-039)；Tiandi Science and Technology Co., Ltd. Innovation Venture Capital Special Project(2018-TD-QN049)

**第一作者简介：**方良才，1966 年生，男，正高级工程师，从事矿井安全技术与管理研究工作. E-mail：fanglc126126@126.com

**通信作者：**李浩哲，1990 年生，男，河南洛阳人，硕士，从事煤层气开发与储层改造研究工作. E-mail：lihaozhe@cctegxian.com

**引用格式：**方良才，李贵红，李丹丹，等. 淮北芦岭煤矿煤层顶板水平井煤层气抽采效果分析[J]. 煤田地质与勘探，2020，48(6)：155–160.

FANG Liangcai，LI Guihong，LI Dandan，et al. Analysis on the CBM extraction effect of the horizontal wells in the coal seam roof in Luling coal mine in Huaibei[J]. Coal Geology & Exploration，2020，48(6)：155–160.

content and reservoir pressure gradually decrease. It is predicted that after 5 years of production, the gas content within the control range of the horizontal well can be reduced to 2.86 $m^3$/t at the lowest, and the average can be reduced to 4.2 $m^3$/t, with a reduction ratio of 50.6%. The reservoir pressure can be reduced to 0.85 MPa at the lowest, and 2.30 MPa on average, with a reduction ratio of 66.2%; Coal seam roof horizontal well technology has significant effects on coalbed methane development and gas disaster prevention and control, and is an effective method to achieve ground pre-drainage of gas from broken, soft and low-permeability coal seams.

**Keywords:** coalbed methane; broken-soft and low-permeability coal seam; the roof of coal seam; horizontal well; extractive effect; Luling Mine in Huaibei

我国华北东部、华南、西南地区石炭–二叠纪煤田广泛分布着碎软煤层[1-5]，该类煤层塑性强，连续性差，物性差，孔隙率＜2%，渗透率＜$1\times10^{-4}$ μ$m^2$ [6-9]。在煤层中直接压裂不能形成有效压裂裂缝和渗流通道，煤层气抽采难度大。碎软煤层的存在也是煤与瓦斯突出事故的主要诱因[10-11]。淮北矿区是我国典型的高瓦斯突出矿区，地质构造复杂，瓦斯灾害严重，曾发生过多起瓦斯突出和爆炸事故，采煤前开展瓦斯预抽极为必要。通常井下采用常规底板岩巷穿层钻孔或煤巷顺层水平钻孔预抽瓦斯，由于煤层碎软低渗，单孔瓦斯抽采量低，抽采达标时间长，采掘接替矛盾十分突出。

“十二五”期间，淮北矿业集团与中煤科工集团西安研究院有限公司合作，首次将紧邻碎软低渗煤层顶板水平分段压裂煤层气高效抽采技术应用于淮北芦岭煤矿，获得了碎软低渗煤层单井产气量突破[12-14]。水平井组排采 4 a 累计抽采煤层气超 590 万 $m^3$，取得了良好的产气效果。然而，目前对于地面煤层气抽采效果缺乏分析与评价，对于煤层气抽采过程中煤层气含量和储层压力的变化规律缺乏定量研究。笔者选取 LG01 水平井，分析其储层特征及工程施工情况，运用产能数值模拟技术，在对生产数据进行历史拟合的基础上，开展煤层气抽采效果评价，以期为类似区域的工程应用提供借鉴。

## 1 储层特征

淮北芦岭煤矿位于安徽省淮北煤田东南部的宿州矿区，宿东向斜西南翼的东南段。矿区主采煤层为下二叠统下石盒子组 8、9 和 10 号煤层，顶板水平井煤层气抽采目标煤层为 8 号煤。

### 1.1 煤层厚度与初始储层压力

8 号煤层厚度 0.30~17.75 m，平均 8.96 m，全区可采，为特厚煤层，含 1~2 层夹矸，有软硬分层。煤层坚硬程度多为松软级，为中变质烟煤，主要为气煤和弱黏煤。工程井钻遇 8 号煤层深度为 729.6~740.5 m。试井测试结果显示，储层压力 5.58 MPa，压力梯度 0.759 MPa/hm，属于欠压储层。

### 1.2 储层物性特征

煤层孔隙率和渗透率是煤层气井产量的重要影响因素。8 号煤层孔隙率 1.9%，注入/压降试井测试渗透率(8~10)×$10^{-5}$ μ$m^2$。为碎粒–糜棱结构煤，此类煤层由于后期挤压和揉搓作用，煤中裂隙被压缩、扭曲、变形以致不复存在，加之不同程度裂隙堵塞，煤层渗透性大大降低。

### 1.3 气含量与吸附特征

测试结果表明，8 号煤层空气干燥基含气量为 5.13~14.59 $m^3$/t。但由于煤体结构破碎，钻孔绳索取心过程中损失气量较大，在一定程度上影响测试结果。8 号煤干燥无灰基 Langmuir 体积 20.31~21.39 $cm^3$/g，平均 20.85 $cm^3$/g，Langmuir 压力 2.72~2.93 MPa，平均 2.82 MPa。

### 1.4 煤层顶板特征

煤层顶底板均以泥岩或粉砂岩为主。由 LG01-V 井取心资料分析可知，在井深 729 m 钻遇 8 号煤层，直接顶板为厚约 0.8 m 的结构不完整炭质泥岩，炭质泥岩上覆坚硬块状泥岩(5.3 m)，泥岩上覆为厚度 2 m 的细砂岩。

## 2 煤层顶板水平井应用

### 2.1 钻完井

LG01 井组包含一口直井 LG01-V 和一口对接水平井 LG01-H[15-16]。水平井沿最小水平主应力钻进，以便于在后期压裂时形成横切缝，获得最大产能[17-18]。二开钻进时，首先钻进导眼揭露的目标煤层，回填后侧钻至二开着陆点并下套管固井。三开完钻深度 1 485.96 m，水平段长度 585.96 m。导眼及水平井井眼轨迹如图 1 所示。

为便于水力压裂裂缝穿层扩展，沟通井筒与下部煤层，采用随钻测井技术控制水平井水平段轨迹。水平井井筒距离煤层顶面距离不宜过大或过小，若距离过大，不利于裂缝穿层扩展，同时会在顶板内形成较多的无效裂缝；若距离过小，则不利于井筒的稳定和快速钻进。LG01-H 水平井施工过程中，控制水平井井筒距离煤层顶面 0.5~1.5 m。

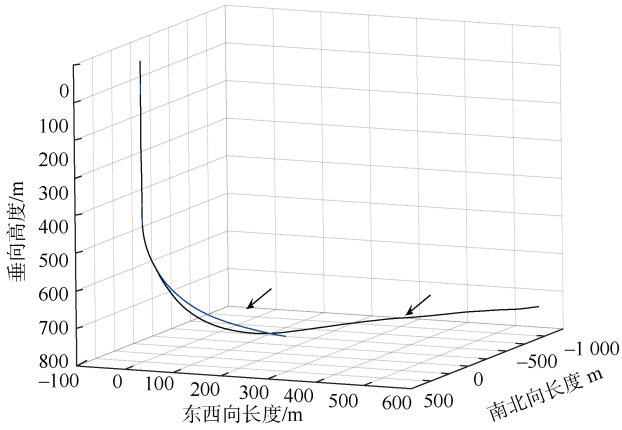


图 1　导眼及水平段井眼轨迹

Fig.1　Trajectory of the guiding hole and the horizontal section

## 2.2　水平井分段水力压裂

### 2.2.1　射孔方案

对于水平井 LG01-H，由于最大主应力为垂向应力，因此，当射孔孔眼位于水平井井筒顶部或底部时，裂缝起裂压力最低[19]。水力压裂目的在于沟通井筒与下部煤层，因此，采用深穿透射孔，0°相位射孔，孔眼位于水平井井筒底部(图 2)，以诱导裂缝向井筒下部延伸，沟通煤层。单段射孔孔眼长度 3 m，射孔孔眼密度 10 个/m。

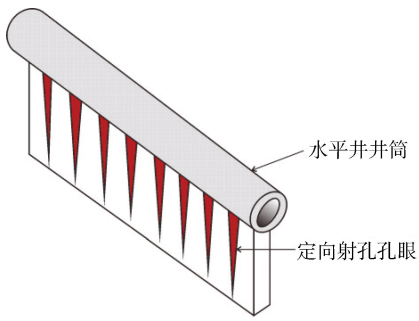


图 2　定向深穿透射孔示意图

Fig.2　Schematic diagram of oriented deep penetration perforation

### 2.2.2　压裂施工

根据煤储层特点，采用清水压裂，支撑剂选用石英砂，前置液阶段注入 20~40 目(0.42~0.84 mm)石英砂段塞，打磨射孔孔眼、堵塞远端裂隙、减小滤失促进主裂缝延伸,携砂液阶段注入 16~20 目(0.84~1.19 mm)石英砂，支撑主裂缝，增大裂缝导流能力。

压裂施工中，压裂段间距 74~107 m，采用桥塞射孔联作分段压裂工艺对水平井分 7 段进行压裂，压裂液总注入量 6 627 $m^3$，支撑剂总注入量 542 $m^3$。各压裂段压裂液及支撑剂注入情况如图 3 和图 4 所示。可以看出，各压裂段压裂液注入量整体平稳，压裂段 3—7 比压裂段 1、2 注入支撑剂量多 10~20 $m^3$。

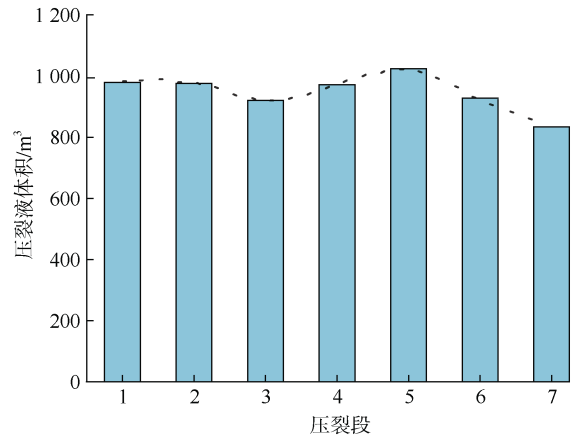


图 3　水平井各压裂段压裂液注入情况

Fig.3　Fracturing fluid volume injected into different fracturing sections of the horizontal well

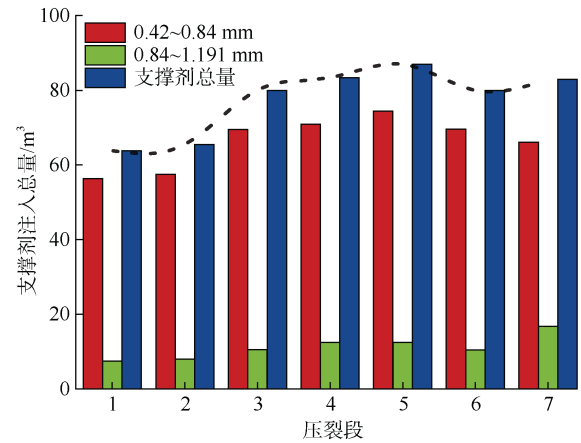


图 4　水平井各压裂段支撑剂注入情况

Fig.4　Proppant volume injected into different fracturing sections of the horizontal well

### 2.2.3　裂缝监测

在压裂施工过程中，采用微地震监测技术对裂缝形态及规模实时监测。考虑施工成本，仅对压裂段 1 和 4 进行微地震监测，解释得到裂缝形态均为垂直缝。压裂段 1 裂缝总长度 169.1 m，裂缝高度 20.5 m；压裂段 4 裂缝总长度 163.2 m，裂缝高度 17.6 m。从微地震事件空间分布可知裂缝实现了跨界面穿层扩展，沟通了井筒与下部煤层，可以为煤层气渗流进入井筒提供通道。

## 3　产气规律分析

LG01 水平井排采曲线如图 5 所示。井组于 2015 年 1 月 19 日开始排采,动液面距离 8 号煤层 702 m，3 个月后开始产气，见气时间为 2015 年 4 月 16 日，动液面降至距离 8 号煤层 241 m，初始套压 0.27 MPa，产气量 23.1 $m^3$/d。1 个月后产气量上升至 2 000 $m^3$/d，中间间断下降，后持续上升，2015

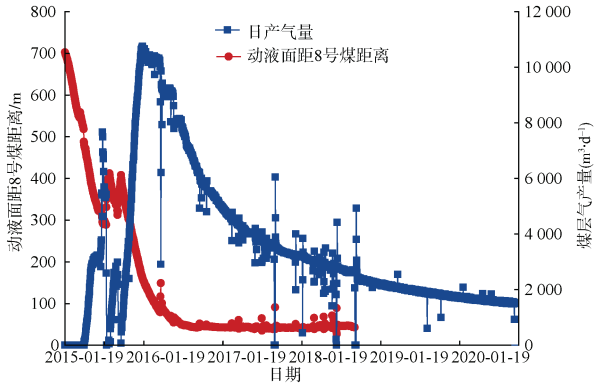


图 5 LG01 井产气量及距 8 号煤层动液面高度

Fig.5 Gas production rate and distance between fluid level and coal No.8 of well LG01-V

年 12 月底达到 10 000 $m^3/d$，维持 3 个月之久，在 2017 年 1 月降至 5 000 $m^3/d$，2018 年 9 月底降至 3 000 $m^3/d$。排采至 2017 年 7 月时，动液面距号 8 煤的距离降至 50 m 以下，此后一直维持在 43 m 左右，截至 2018 年 9 月，尚未暴露 8 号煤层。如果以 3 000 $m^3/d$ 来计稳产期，LG01 井于 2015 年 6 月进入稳产阶段，至 2018 年 9 月稳产 39 个月，稳产期内平均产气量 4 887 $m^3/d$，截至 2018 年 9 月累计产气 590 万 $m^3$。2018 年 9 月后，水平井产量低于 3 000 $m^3/d$，产量进入递减阶段，截至 2020 年 9 月累计产气 727 万 $m^3$。

## 4 抽采效果评价

### 4.1 区域模拟及网格划分

根据 LG01 井组周围的勘探井数据以及前期的煤层气开发直井数据，圈定模拟范围，目标水平井组位于模型中部。模拟区域及网格情况如图 6 所示。

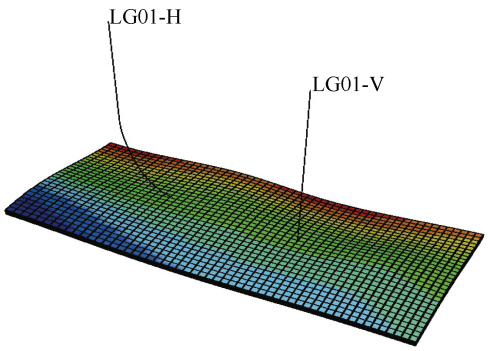


图 6 煤层气产能数值模拟模型

Fig.6 Numerical simulation model of coalbed methane productivity

### 4.2 历史拟合

基于煤层实验/试验参数，参考煤层气井产能数值模拟方法[20-21]，应用分段压裂水平井产能数值模拟技术，采用定井底流压的工作制度进行生产，对 LG01 水平井生产数据进行了历史拟合，得到的产气曲线如图 7 所示。历史拟合曲线表明，计算结果与实际生产数据接近，变化趋势一致。实际生产数据累计产气量 594.5 万 $m^3$，历史拟合结果为 592.7 万 $m^3$，相对误差仅为–0.31%，具有较高的拟合精度。工程参数和经过历史拟合得到的储层参数见表 1，该修正参数能够更加真实客观地反映煤层的特征和产气潜力，据此可对顶板水平井产能进行更加准确、合理的评价。

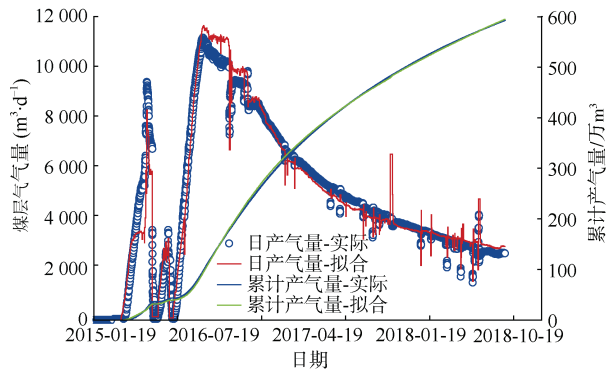


图 7 LG01 井产气量历史拟合曲线

Fig.7 History matching curve of the gas production of well LG01

**表 1 LG01 井基本参数与拟合值**

**Table 1 Basic parameters and fitted values of well LG01 before and after simulation**

| 参数 | 模拟前 | 模拟后 |
|---|---|---|
| 渗透率 $I,J,K/10^{-3}$ μm² | 0.17，0.17，0.017 | 0.38，0.30，0.03 |
| Langmuir 体积/($m^3 \cdot t^{-1}$) | 15.45 | 13.21 |
| Langmuir 压力/kPa | 2 820 | 2 820 |
| 基质孔隙率/% | 0.02 | 0.02 |
| 割理孔隙率/% | 0.013 | 0.010 7 |
| 压缩系数/ $kPa^{-1}$ | $2.5\times10^{-5}$ | $5.8\times10^{-5}$ |
| 吸附时间/d | 1.10 | 0.85 |
| 初始气含量/($m^3 \cdot t^{-1}$) | 6.12 | 8.48 |
| 临界解吸压力/kPa | 5 054.39 | 5 054.25 |
| 裂缝半长/m | 82.5 | |
| 裂缝导流能力/($10^{-3}$ μm²·$m^{-1}$) | 374.5 | |

### 4.3 产能预测

以历史拟合结果为基础，采用校正后的储层参数，对 LG01-H 水平井产量进行预测，累计生产时间为 10 a，截止日期 2025-01-18。排采条件设置为定压生产，压力为 0.513 MPa，产气量预测结果如图 8 所示。

至 2020 年 1 月 19 日，实际累计产气 686.7 万 $m^3$，数值模拟预测累计产气 691.1 万 $m^3$。数值模拟与实

际生产数据误差较小，证明通过历史拟合获得的数值模拟模型能够较为精确地预测水平井产能情况。

从图 8 中可以看出，由于水平井组已进入排采后期，气井产量进入递减阶段。井组排采至 1、3、5、8、10 a 时的日产气量分别为 9 640.06、3 259.76、1 764.45、1 156.81、987.86 $m^3$，累计产气量分别为 87.11、520.48、686.12、836.30、912.97 万 $m^3$。预测结果表明，水平井井组产气潜力巨大，生产至 10 a 时，产量仍旧保持在 1 000 $m^3/d$ 左右，10 a 累计产气量超过 900 万 $m^3$，既能够获得很好的产气效果，又能减少井下瓦斯抽采的工作量。

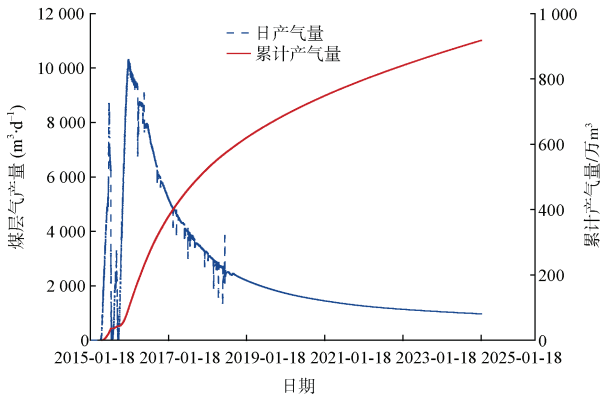


图 8　LG-01 井产气量预测

Fig.8　Prediction of gas production rate

### 4.4　瓦斯防治效果分析

根据产能预测结果，得出 LG01 井组附近抽采 3 a 和 5 a 时剩余含气量分布情况(图 9)，抽采 3 a 和 5 a 时储层压力随时间的变化情况如图 10 所示。

从图 9 和图 10 可以看出，随着生产时间的增加，水平井抽采影响范围逐渐扩大，首先为裂缝周围区域，随后为裂缝间区域，最后以水平井为中心向四周逐渐扩大。水平井影响范围主要为围绕井筒–裂缝系统的椭圆形，并且水平井抽采影响范围主要为裂缝和近井筒区域，井筒–裂缝系统外部区域受影响较小。这是由于 8 号煤碎软低渗，水力压裂裂缝是瓦斯的主要运移通道，煤层瓦斯解吸后主要通过人工裂缝进入井筒。

随着水平井抽采时间的延长，预测 1、3、5、8、10 a 的影响范围面积分别为 0.113、0.193、0.242、0.311、0.350 $km^2$。定义宽度为裂缝长度(平均约 160 m)、长度为水平井段长度(约 600 m)的矩形区域为水平井控制范围，抽采 10 a 时水平井影响范围可达水平井控制范围面积的 3.6 倍。

预测水平井抽采 5 a，水平井控制范围内瓦斯气含量最低可降至 2.86 $m^3/t$，平均可降至 4.2 $m^3/t$，较初始的 8.5 $m^3/t$ 降低了 4.3 $m^3/t$，降低了 50.6%。储

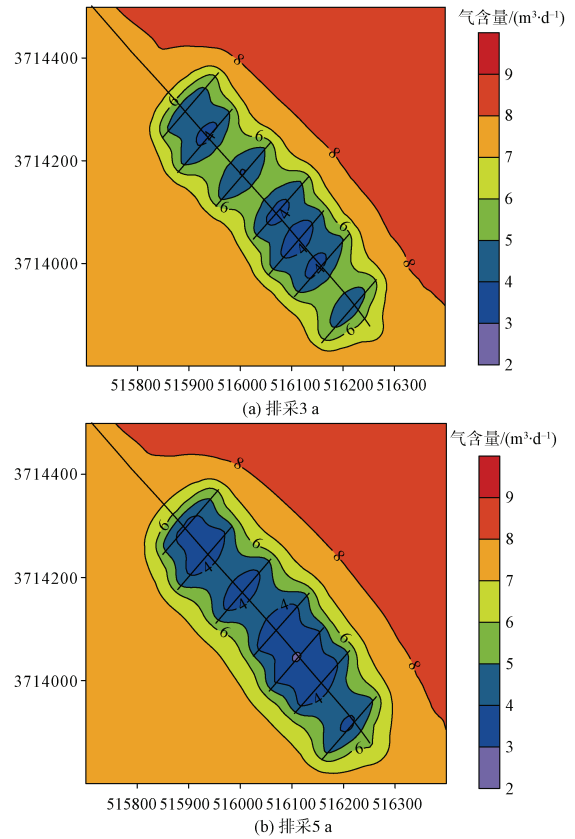


图 9　煤层剩余气含量随生产时间的变化情况

Fig.9　Variation of residual gas content with production time

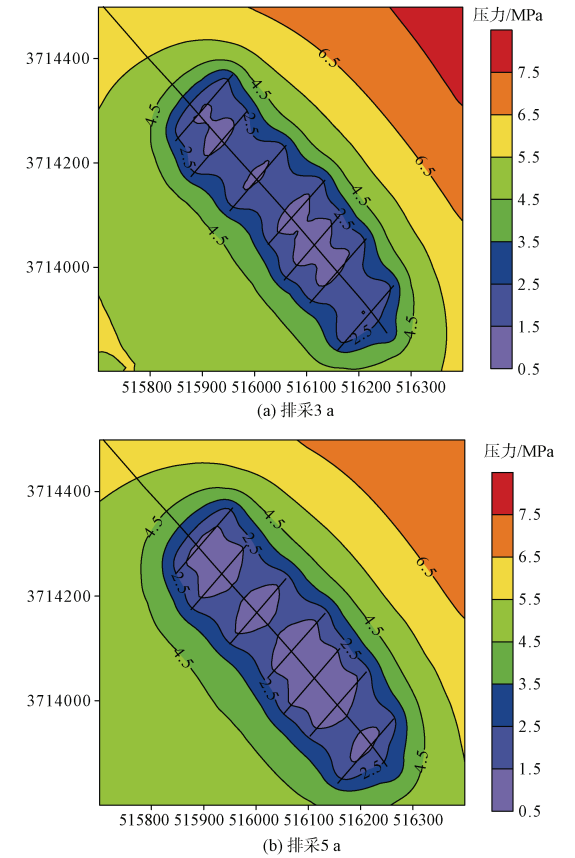


图 10　煤储层压力随生产时间的变化情况

Fig.10　Variation of reservoir pressure with production time

层压力最低可降至 0.85 MPa，平均可降至 2.30 MPa，降低了 66.2%。由此可知，水平井抽采煤层气可显著降低瓦斯含量和储层压力。

以上数值模拟结果表明，煤层顶板水平井技术瓦斯抽采效果显著，能够显著降低水平井控制区域内的瓦斯含量和瓦斯压力，影响范围广，对于保障煤矿安全生产具有十分重要的意义，是实现碎软低渗煤层瓦斯地面预抽的有效手段。

## 5 结 论

**a.** 淮北芦岭煤矿应用的紧邻碎软低渗煤层顶板岩层分段压裂水平井抽采模式，典型 LG01 水平井组稳产期 39 个月，稳产期内平均产气量 4 887 $m^3/d$，获得良好的产气效果。

**b.** 随着水平井排采，裂缝周边及裂缝间区域首先受到影响，随后以水平井为中心向四周逐渐扩大。预测抽采 10 a 影响区域范围 0.35 $km^2$，是水平井控制范围的 3.6 倍，水平井井组周围剩余气含量和储层压力逐渐降低；预测水平井抽采 5 a，井筒控制范围内瓦斯气含量平均可降低 50.6%。储层压力平均可降低 66.2%。

**c.** 煤层顶板水平井煤层气抽采技术具有煤层气开发和瓦斯抽采的双重效益，是实现碎软低渗煤层瓦斯地面预抽的有效手段。

**请听作者语音介绍创新技术成果等信息，欢迎与作者进行交流**

**OSID 码**

## 参考文献(References)


[1] 张群. 关于我国煤矿区煤层气开发的战略性思考[J]. 中国煤层气，2007，4(4)：3–5.
ZHANG Qun. Strategic thinking on coal mine methane development in China[J]. China Coalbed Methane，2007，4(4)：3–5.

[2] 李树刚，包若羽，张天军，等. 本煤层瓦斯抽采钻孔合理密封深度确定[J]. 西安科技大学学报，2019，39(2)：183–188.
LI Shugang，BAO Ruoyu，ZHANG Tianjun，et al. Determining the rational sealing depth for horizontal gas drainage borehole[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology，2019，39(2)：183–188.

[3] 桑树勋，周效志，刘世奇，等. 应力释放构造煤煤层气开发理论与关键技术研究进展[J]. 煤炭学报，2020，45(7)：2531–2543.
SANG Shuxun，ZHOU Xiaozhi，LIU Shiqi，et al. Research advances in theory and technology of the stress release applied extraction of coalbed methane from tectonically deformed coals[J]. Journal of China Coal Society，2020，45(7)：2531–2543.

[4] 孟中泽，刘明举，孟磊，等. 淮南矿区 C13–1 煤层构造软煤分布特征及其主控因素分析[J]. 中国煤炭，2010，36(2)：72–76.
MENG Zhongze，LIU Mingju，MENG Lei，et al. An analysis of the distribution characteristics of tectonic soft coal in C13-1 coal seam of Huainan coal mine area and its main control factors[J]. China Coal，2010，36(2)：72–76.

[5] 周培明，高为，邓兰，等. 织纳煤田晚二叠世构造煤区域分布及构造控制[J]. 煤田地质与勘探，2020，48(3)：29–34.
ZHOU Peiming，GAO Wei，DENG Lan，et al. Regional distribution and geotectonic control of Late Permian tectonically deformed coal in Zhina coalfield[J]. Coal Geology & Exploration，2020，48(3)：29–34.

[6] JIANG Bo，QU Zhenghui，WANG Geoff G X，et al. Effects of structural deformation on formation of coalbed methane reservoirs in Huaibei coalfield，China[J]. International Journal of Coal Geology，2010：82(3/4)：175–183.

[7] 姜波，琚宜文. 构造煤结构及其储层物性特征[J]. 天然气工业，2004，24(5)：27–29.
JIANG Bo，JU Yiwen. Tectonic coal structure and its petro-physical features[J]. Natural Gas Industry，2004，24(5)：27–29.

[8] 琚宜文，姜波，王桂樑，等. 构造煤结构及储层物性[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，2005：33–36.
JU Yiwen，JIANG Bo，WANG Guiliang，et al. Tectonic coals：structures and physical properties of reservoirs[M]. Xuzhou：China University of Mining and Technology Press，2005：33–36.

[9] 董夔，贾建称，巩泽文，等. 淮北许疃矿构造煤孔隙结构及压敏效应[J]. 煤田地质与勘探，2019，47(2)：58–65.
DONG Kui，JIA Jiancheng，GONG Zewen，et al. Study on pore structure and pressure-sensitive effect of tectonic coal in Huaibei Xutuan mine[J]. Coal Geology & Exploration，2019，47(2)：58–65.

[10] 韩付涛，杨晓峰，赵旭光. 平煤十三矿构造煤发育特点与分布规律[J]. 能源与环保，2018，40(5)：148–150.
HAN Futao，YANG Xiaofeng，ZHAO Xuguang. Characteristics and distribution regularity of tectonic coal development in No.13 Coal Mine of Pingdingshan Tian'an Coal Industry Co. Ltd.[J]. China Energy and Environmental Protection，2018，40(5)：148–150.

[11] 高魁，刘泽功，刘健，等. 构造软煤的物理力学特性及其对煤与瓦斯突出的影响[J]. 中国安全科学学报，2013，23(2)：129–133.
GAO Kui，LIU Zegong，LIU Jian，et al. Physical and mechanical characteristics of tectonic soft coal and their effects on coal and gas outburst[J]. China Safety Science Journal，2013，23(2)：129–133.

[12] 巫修平. 碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂裂缝扩展规律及机制研究[D]. 北京：煤炭科学研究总院，2017.
WU Xiuping. Research on control mechanism of fracture propagation of multi-stage hydraulic fracturing horizontal well in roof of broken soft and low permeable coal seam[D]. Beijing：China Coal Research Institute，2017.

[13] 张群，葛春贵，李伟，等. 碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂煤层气高效抽采模式[J]. 煤炭学报，2018，43(1)：150–159.
ZHANG Qun，GE Chungui，LI Wei，et al. A new model and application of coalbed methane high efficiency production from broken soft and low permeable coal seam by roof strata-in horizontal well and staged hydraulic fracture[J]. Journal of China Coal Society，2018，43(1)：150–159.


**(下转第 169 页)**

simulation of piping-filter prevention in sandy soil by discrete element method[J]. Shuili Xuebao，2010，41(1)：17–24.

[13] ZHOU Jian，LI Yexun，JIA Mincai，et al. Numerical simulation of failure behavior of granular debris flows based on flume model tests[J]. The Scientific World Journal，2013：1–10.

[14] 罗勇，龚晓南，吴瑞潜. 颗粒流模拟和流体与颗粒相互作用分析[J]. 浙江大学学报(工学版)，2007，41(11)：1932–1936.
LUO Yong，GONG Xiaonan，WU Ruiqian. Analysis and simulation of fluid-particles interaction with particle flow code[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science)，2007，41(11)：1932–1936.

[15] 王胤，艾军，杨庆. 考虑粒间滚动阻力的 CFD-DEM 流–固耦合数值模拟方法[J]. 岩土力学，2017，38(6)：1771–1780.
WANG Yin，AI Jun，YANG Qing. A CFD-DEM coupled method incorporating soil inter-particle rolling resistance[J]. Rock and Soil Mechanics，2017，38(6)：1771–1780.

[16] 蒋明镜，张望城. 一种考虑流体状态方程的土体 CFD-DEM 耦合数值方法[J]. 岩土工程学报，2014，36(5)：793–801.
JIANG Mingjing，ZHANG Wangcheng. Coupled CFD-DEM method for soils incorporating equation of state for liquid[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2014，36(5)：793–801.

[17] 景路，郭颂怡，赵涛. 基于流体动力学–离散单元耦合算法的海底滑坡动力学分析[J]. 岩土力学，2019，40(1)：388–394.
JING Lu，GUO Songyi，ZHAO Tao. Understanding dynamics of submarine landslide with coupled CFD-DEM[J]. Rock and Soil Mechanics，2019，40(1)：388–394.

[18] 刘卡，高辰龙，周玉. 基于 CFD-DEM 方法的水下抛石运动模拟研究[J]. 中国水运：航道科技，2016(6)：1–9.
LIU Ka，GAO Chenlong，ZHOU Yu. Simulation of underwater riprap motion based on CFD-DEM method[J]. China Water Transport：Channel Technology，2016(6)：1–9.

[19] 苏东升. 基于 CFD-DEM 耦合模拟方法的水流泥沙运动研究[D]. 天津：天津大学，2016.
SU Dongsheng. Investigation of fluid-sediment particle motion based on CFD-DEM coupling simulation method[D]. Tianjin：Tianjin University，2016.

[20] 邵兵，闫怡飞，毕朝峰，等. 基于 CFD-DEM 耦合模型的大粒径非常规岩屑颗粒运移规律研究[J]. 科学技术与工程，2017，17(27)：190–195.
SHAO Bing，YAN Yifei，BI Chaofeng，et al. Migration of irregular cuttings particles in big size by CFD-DEM coupled simulation model[J]. Science Technology and Engineering，2017，17(27)：190–195.

[21] 黄文博，李潭秋，杨润泽，等. 基于 CFD-DEM 的颗粒填充床压力下降仿真和实验验证[J]. 航天医学与医学工程，2018，31(5)：526–531.
HUANG Wenbo，LI Tanqiu，YANG Runze，et al. Simulation and experimental validation of pressure drop in packed bed based on CFD-DEM[J]. Space Medicine & Medical Engineering，2018，31(5)：526–531.

[22] 何文社，方铎，杨具瑞. 泥沙起动流速研究[J]. 水利学报，2002，33(10)：51–56.
HE Wenshe，FANG Duo，YANG Jurui. Study on incipient velocity of sediment[J]. Shuili Xuebao，2002，33(10)：51–56.

(责任编辑　周建军)

**(上接第 160 页)**

[14] 许耀波，朱玉双，张培河. 紧邻碎软煤层的顶板岩层水平井开发煤层气技术[J]. 天然气工业，2018，38(9)：70–75.
XU Yaobo，ZHU Yushuang，ZHANG Peihe. Application of CBM horizontal well development technology in the roof strata close to broken-soft coal seams[J]. Natural Gas Industry，2018，38(9)：70–75.

[15] 李彬刚. 芦岭煤矿碎软低渗煤层高效抽采技术[J]. 煤田地质与勘探，2017，45(4)：81–84.
LI Bingang. Technology of CBM extraction in the crushed and soft coal seam in Luling Coal Mine[J]. Coal Geology & Exploration，2017，45(4)：81–84.

[16] 于洋，周池明，张浩. 定向射孔桥塞分段压裂技术在提高煤层气采收率中的应用[J]. 钻采工艺，2016，39(1)：63–64.
YU Yang，ZHOU Chiming，ZHANG Hao. Application of directional perforation bridge plug staged fracturing technology in improving the recovery rate of coalbed methane[J]. Drilling & Production Technology，2016，39(1)：63–64.

[17] 吴奇. 水平井体积压裂改造技术[M]. 北京：石油工业出版社，2013：19–20.
WU Qi. Horizontal well volume fracturing technology[M]. Beijing：Petroleum Industry Press，2013：19–20.

[18] ECONOMIDES M，MARTIN A N. How to decide between horizontal transverse horizontal longitudinal and vertical fractured completions[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Italy：Society of Petroleum Engineers，2010.

[19] 虞建业，沈飞，顾庆宏，等. 水平井射孔参数对压裂起裂压力的影响[J]. 油气地质与采收率，2011，18(1)：105–107.
YU Jianye，SHEN Fei，GU Qinghong ，et al. Influence of perforation parameters on hydraulic fracturing of fracture pressure in horizontal well[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency，2011，18(1)：105–107.

[20] 张群. 煤层气储层数值模拟模型及应用的研究[D]. 北京：煤炭科学研究总院，2003.
ZHANG Qun. Study of coal seam gas reservoir simulation numerical model and application[D]. Beijing：China Coal Research Institute，2003.

[21] 王晓梅，张群，张培河，等. 煤层气井历史拟合方法探讨[J]. 煤田地质与勘探，2003，33(1)：20–22.
WANG Xiaomei，ZHANG Qun，ZHANG Peihe，et al. Discussion on the method of history matching of coalbed methane well[J]. Coal Geology & Exploration，2003，33(1)：20–22.

(责任编辑　范章群)