



煤矿未采区地面水平井全周期施工效果相互作用机制及开发建议

张寨男 杨科 华心祝 叶春辉 叶敏 刘文杰 池小楼 吕鑫

引用本文:

张寨男, 杨科, 华心祝, 等. 煤矿未采区地面水平井全周期施工效果相互作用机制及开发建议[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(3): 356–369.

ZHANG Zhainan, YANG Ke, HUA Xinzhu. Interaction mechanism and development suggestions for the full cycle construction effect of surface horizontal wells in unmined coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(3): 356–369.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1136>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

淮南矿区煤层顶板分段压裂水平井抽采技术及效果研究

Study on technology and effect of gas extraction in horizontal well with segmental hydraulic fracture in roof of coal seam in Huainan mining area

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 155–163 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1937>

贵州省煤层气井压裂改造对产气量的影响及开发建议

Influence of fracturing reconstruction of coalbed methane wells on gas production and development suggestions in Guizhou Province: taking Panguan syncline as an example

煤炭科学技术. 2024, 52(S1): 116–126 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0188>

煤层气水平井井型结构分析及钻完井技术优化

Analysis on well type structure and optimization of associated drilling technology of CBM horizontal wells

煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0ba95d16-0798-4366-b6f0-3029133ac398>

顶板水平井分段分簇压裂治理掘进巷道瓦斯模式研究

Study on the model of staged and cluster fracturing to control the gas in driving roadway by horizontal well in roof strata

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 114–126 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0736>

影响煤层气单支压裂水平井产量关键要素及提产对策

Analysis of key elements affecting production and technical countermeasures to increase production of CBM fractured single horizontal wells: A case study of Zhengzhuang Block

煤炭科学技术. 2024, 52(10): 158–168 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1596>

沁水盆地南部煤层气水平井产能影响因素分析

Analysis of factors affecting productivity of CBM in horizontal wells in southern Qinshui Basin

煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c628192c-8d90-43b7-b5d1-968b8be91440>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



张寨男¹, 杨 科¹, 华心祝¹, 叶春辉^{2,3}, 叶 敏^{2,4}, 刘文杰¹, 池小楼¹, 吕 鑫¹
ZHANG Zhainan, YANG Ke, HUA Xinzhu, *et al.* Interaction mechanism and development suggestions for the full cycle construction effect of surface horizontal wells in unmined coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(3): 356–369.

煤矿未采区地面水平井全周期施工效果 相互作用机制及开发建议

张寨男¹, 杨 科¹, 华心祝¹, 叶春辉^{2,3}, 叶 敏^{2,4}, 刘文杰¹, 池小楼¹, 吕 鑫¹

(1. 安徽理工大学 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 淮南矿业(集团)有限责任公司, 安徽 淮南 232001;
3. 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心, 安徽 淮南 232001; 4. 淮南矿业集团煤层气开发利用有限责任公司, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为探究煤矿未采区地面水平井不同层位压裂效果差异, 揭示瓦斯治理全周期各阶段工程施工效果的相互作用机制, 结合朱集东矿 ZJ2-1 与 ZJ2-2 井施工现状, 从压裂施工规模、压裂施工曲线和测压降数据角度, 分析各段及各层位压裂效果的差异, 并与微地震监测结果对比验证; 分析钻井、压裂效果对气水产出效果的影响及停产诱因, 揭示地面水平井钻井、压裂与排采工程全周期之间的相互作用机制, 提出煤矿未采区地面水平井瓦斯治理过程面临的关键问题及建议。结果表明: ZJ2-2 井较 ZJ2-1 井与 ZJ2-1 井的煤层较顶、底板压裂的裂缝打开效果好, 而微地震结果显示顶底板压裂较煤层压裂效果好, 这是由于压裂效果好不但需要裂缝均匀打开, 还需要确保裂缝持久性高。钻井效果体现在钻井轨迹与井筒稳定 2 个方面, 钻井轨迹不仅会直接影响井筒稳定, 还会影响压裂效果, 压裂施工会降低井筒稳定, 而井筒稳定是保障排采工程顺利进行的基础。井筒稳定性受钻井层位、压裂施工、储层岩层与长期浸水等因素的影响均不可忽视, 压裂效果好只是排采效果好的必要条件, 排采效果的好坏很大程度上还受井筒稳定性与排采制度精细化程度的影响。两口井排采阶段均可划分为返排、上产、稳产、停产和再产气 5 个阶段, ZJ2-1 井的返排率较大且大于 1, 说明存在邻近水源的侵入, 导致压裂效果较好的 ZJ2-1 井的产气效果较差。最后, 从地面水平井瓦斯治理技术优选、钻井轨迹精准控制、井筒稳定性控制、排采制度优化和水赋存环境探测等角度总结了煤矿未采区地面水平井瓦斯治理过程中存在的关键问题, 并给出相应的开发建议, 以期煤矿未采区地面水平井瓦斯治理提供思路。

关键词: 煤矿未采区; 地面水平井; 钻井轨迹; 分段压裂效果; 气水产出; 相互作用机制

中图分类号: P618, TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)03-0356-14

Interaction mechanism and development suggestions for the full cycle construction effect of surface horizontal wells in unmined coal mines

ZHANG Zhainan¹, YANG Ke¹, HUA Xinzhu¹, YE Chunhui^{2,3}, YE Min^{2,4}, LIU Wenjie¹, CHI Xiaolou¹, LYU Xin¹

(1. State Key Laboratory of Safe Mining of Deep Coal and Environmental Protection, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
2. Huainan Mining (Group) Co., Ltd., Huainan 232001, China; 3. National Engineering Research Center for Coal Mine Gas Control, Huainan 232001, China; 4. Huainan Mining Group Coalbed Methane Development and Utilization Co., Ltd., Huainan 232001, China)

Abstract: To explore the differences in fracturing effects of different levels of ground level wells in unmined coal mines, and to reveal the interaction mechanism of construction effects in various stages of gas control throughout the entire cycle, combined with the construction status of ZJ2-1 and ZJ2-2 wells in Zhujidong Mine, the differences in fracturing effects of each section and level were analyzed from the

收稿日期: 2024-08-04

策划编辑: 宫在芹

责任编辑: 李雅楠

DOI: 10.12438/cst.2024-1136

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U21A20110, 52174161); 国家重点研发计划资助项目 (2023YFC2907502)

作者简介: 张寨男 (1995—), 男, 安徽阜阳人, 博士研究生。E-mail: 2392614146@qq.com

通讯作者: 杨 科 (1979—), 男, 四川叙永人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: yksp2003@163.com

perspectives of fracturing construction scale, fracturing construction curve, and pressure drop data, and compared and verified with microseismic monitoring results; Analyze the impact of drilling and fracturing effects on gas and water production efficiency, as well as the reasons for production shutdown, reveal the interaction mechanism between the entire cycle of surface horizontal well drilling, fracturing, and drainage engineering, and propose key issues and suggestions for gas control in surface horizontal wells in unmined coal mines. The results showed that the fracture opening effect of the coal seam in ZJ2-2 well was better than that of the top and bottom plate fracturing in ZJ2-1 well and ZJ2-1 well, while the microseismic results showed that the top and bottom plate fracturing had better fracture opening effect than the coal seam fracturing. This is because the fracturing effect is not only good, but also requires uniform crack opening and high crack persistence. The drilling effect is reflected in two aspects: drilling trajectory and wellbore stability. Drilling trajectory not only directly affects wellbore stability, but also affects fracturing effect. Fracturing construction will reduce wellbore stability, and wellbore stability is the foundation for ensuring the smooth progress of drainage projects. The stability of the wellbore cannot be ignored due to factors such as drilling layer, fracturing construction, reservoir rock layers, and long-term immersion. Good fracturing effect is only a necessary condition for good drainage effect, and the quality of drainage effect is largely influenced by the stability of the wellbore and the refinement of drainage system. The production stages of both wells can be divided into five stages: backflow, upward production, stable production, shutdown, and re production of gas. The backflow rate of ZJ2-1 well is relatively high and greater than 1, indicating the invasion of adjacent water sources, resulting in poor gas production of ZJ2-1 well with better fracturing effect. Finally, the key issues in the gas control process of surface horizontal wells in unmined areas of coal mines were summarized from the perspectives of optimal selection of surface horizontal well gas control technology, precise control of drilling trajectory, stability control of wellbore, optimization of drainage system, and detection of water storage environment. Corresponding development suggestions were provided in order to provide ideas for gas control of surface horizontal wells in unmined areas of coal mines.

Key words: unmined areas of coal mines; ground level well; drilling trajectory; segmented fracturing effect; gas and water production; interaction mechanism

0 引 言

我国煤矿区煤层气资源储量丰富,超过 16 万亿 m^3 , 占全国煤层气总资源储量的 43.5%^[1-4]。确保煤矿区煤层气资源安全、绿色和高效开发是未来清洁能源发展的重要方向,不仅有利于保障我国煤层气产量稳步增长,还可以降低煤矿瓦斯灾害发生频率,助力煤炭资源的高效生产^[5-8]。自 2011 年以来,率先在淮北矿区芦岭煤矿等地开展煤层地面水平井瓦斯治理工程示范,产气效果良好^[9-11]。自 2018 年以来,淮南矿区在借鉴淮北矿区先进技术经验的基础上,先后开发了 29 口地面水平井工程,旨在形成以地面预抽降突先行和井下抽采为主的煤层气开发模式^[12-13]。朱集东矿西二采区 13-1 煤层还未进行任何的煤炭资源开采和巷道施工,为典型的煤矿未采区,在进行地面水平井瓦斯治理时,排采阶段存在时间不等的停产情况。煤矿未采区煤层气地面水平井煤层气开发过程中,钻井、压裂与排采工程之间关系复杂,亟需进行地面水平井瓦斯治理效果的全周期且精细化的研究,以确保煤层气高效开发。

现阶段,煤矿区地面水平井钻探成本高且钻井轨迹精度低^[14],井筒稳定性受钻井层位、压裂参数与排采制度的影响较大,但也是排水产气的唯一通道。因此,注重提升钻井轨迹精度,是确保良好压裂与排采效果的前提。地面水平井分段压裂效果分析方法

较多,基于现场压裂工程施工的分析方法主要有压裂施工参数^[15-16]、压裂施工曲线^[17-18]、测压降参数^[19-20]和微地震监测^[21-24]等,各方法的对比分析可提升评价结果的可靠性。排采制度是基于施工区域各关键压力点,兼顾井底流压、排水、产气和套压等因素实时变化的基础上形成的一种排采产气方法^[25]。基于不同解吸阶段生产动态不同,需针对性优化排采制度,一般包括“五段三压法”^[26]、“低套压排采”^[27]等制度方法,遵循“一井一策”的策略,坚持煤层气井的“快-慢-缓”的排采控制原则,确保精细化的排采参数控制是实现稳定和持久产气的关键^[28]。

以往评价研究多以不同压裂井之间的压裂效果差异进行分析,较少有针对不同压裂段与钻井层位的压裂效果分析研究。综上,基于邻近的 ZJ2-1 与 ZJ2-2 井钻井层位变化而导致的压裂层位差异,从压裂施工规模、压裂施工曲线和测压降数据角度,分析两口井、各层位与各段的压裂效果差异,并与微地震监测结果对比验证,分析压裂效果对气水产出效果的影响及停产诱因,揭示钻井、压裂与排采工程之间的相互作用机制,提出煤矿未采区地面水平井瓦斯治理过程面临的关键问题及建议,以期类似工程背景下的煤层气开发提供建设性的意见。

1 煤储层地质概况

淮南矿区朱集东煤矿西二采区主采 13-1 煤层

赋存于下石河子组中部,煤层倾角在 $2^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 范围,平均煤厚 4.1 m。13-1 煤层内生裂隙发育,坚固性系数为 0.23 ~ 1.74,平均为 0.66。直接顶以泥岩和砂质泥岩为主,平均厚度约 24.6 m;基本顶以粉砂岩为主,平均厚度约 3.0 m;直接底以泥岩为主,平均厚度约 3.5 m。地面勘探孔显示,西二采区 11-2 煤层缺失,直接开采 13-1 煤层,煤层标高在 -844.9 ~ -875 m,瓦斯含量超过 $8.0 \text{ m}^3/\text{t}$,预计瓦斯压力 3.8 MPa 以上。根据《防治煤与瓦斯突出细则》与《煤矿安全规程》规定,同时结合国家政策导向,需使用地面井预抽区域瓦斯。ZJ2-1 与 ZJ2-2 井在矿井中的位置如图 1 所示。两口井在地面位于西二采区 13-1 煤层南部盘区的地面 2 号井场,水平段分别位于 1422(3) 和 1412(3) 工作面,相距约 200 m。

2 工程施工概况

2.1 钻井工程

由于现场钻孔轨迹控制精度差,导致现场实际钻井层位在顶板、煤层和底板中均出现。基于

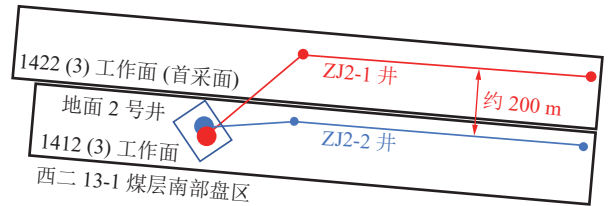


图 1 两口井平面位置关系示意

Fig.1 Schematic diagram of the planar position relationship between two wells

ZJ2-1 与 ZJ2-2 井水平段轨迹及各段射孔位置的贯穿岩性特征,绘制水平各段实钻轨迹及贯穿岩性情况如图 2 所示。ZJ2-1 井在 15 段压裂过程中,顶板压裂存在 5 段,分别为第 1、2、10、11、12 段;煤内压裂存在 3 段,分别为第 3、9 和 13 段;底板压裂存在 7 段,分别为第 4、5、6、7、8、14、15 段。ZJ2-2 井在 15 段压裂过程中,顶板压裂仅存在 1 段,其余为煤层上方 0 ~ 0.1 m 或煤层内部,结合各段射孔方案,可以认为均是在煤层压裂。因此,层位差异对压裂效果的影响分析仅以 ZJ2-1 井为例。

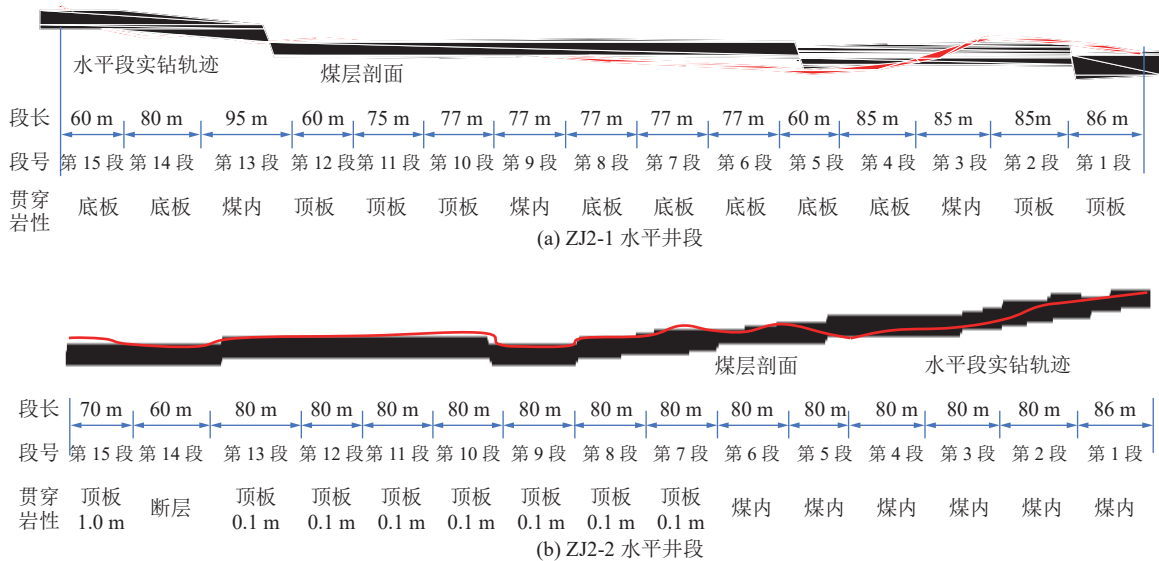


图 2 ZJ2-1 与 ZJ2-2 井各段实钻轨迹及贯穿岩性情况

Fig.2 Actual drilling trajectories and penetrating lithology of each section of ZJ2-1 and ZJ2-2 wells

2.2 压裂工程

两口井压裂参数见表 1。两口井压裂施工参数较为接近,且 ZJ2-1 井先于 ZJ2-2 井压裂。根据水平段长度与实际井眼轨迹与煤层间距,两口井各段段长在 60 ~ 95 m 和 60 ~ 86 m 范围内,采用泵送桥塞-射孔联作的压裂工艺分 15 段,每段分 2 ~ 3 簇进行射孔。根据轨迹特征应用 60° 螺旋和定向射孔组合方式,有利于诱导压裂裂缝向煤层方向的沟通。

由于 13-1 煤层质软且对压力敏感,压裂施工中应避免排量频繁波动或排量提升过快,施工排量应控制在 $8 \sim 12 \text{ m}^3/\text{min}$ 。采用活性水加砂,可降低煤储层的吸附伤害。若遇加砂困难,可改变泵注策略为超低砂比间歇性连续加砂模式,适当增加液量,综合降低施工难度,完成设计加砂要求。

2.3 排采工程

现场煤层气排采以最大产气量为目标导向,着

表 1 ZJ2-1 与 ZJ2-2 井压裂施工参数

Table 1 Fracturing construction parameters for ZJ2-1 and ZJ2-2 wells

井号	实际井深/m	煤厚/m	垂深/m	水平段长/m	分段数/段	单段簇数/簇	段长/m	压裂工艺
ZJ2-1	2 249	4.1	865.24	1 146	15	2~4	60~95	泵送桥塞-射孔联作
ZJ2-2	2 175	4.1	866.04	1 176	15	2~3	60~86	泵送桥塞-射孔联作

井号	簇间距/m	射孔参数	总液量/m ³	总砂量/m ³	平均排量m ³ /min	一般压力/MPa	平均砂比	贯穿岩性
ZJ2-1	19~22	1.5 m/簇、10孔/米	24 206	1 100	8~12	27~54	3%~10%	顶板5段；煤内3段；底板7段
ZJ2-2	17~22	1.5 m/簇、10孔/米	22 902	1 154	10~12	27.1~42.7	3%~20%	顶板1段；煤内13段；断层1段

重从压力和煤粉 2 个角度进行精细化管理。压力管理需要保证压降漏斗的连续性均匀扩散,控制排采强度;煤粉管理既要保证煤粉能稳定排出,为产气建立良好的通道,同时也防止了生产压差过大引起储层压力激增堵塞地层。煤层气排采制度采用“五段三压法”,其核心是控制井底流压,即通过控制产水、产气速度以保障卸压面积内渗流通道的有效范围。根据不同时期的生产特点,以起抽压力、解吸压力,稳产压力为控制节点,将煤层气井的排采划分为平衡产水单相流阶段、憋压生产阶段、控压提产阶段、控制稳产阶段和衰减阶段 5 部分,各阶段顺利推进是实现煤层气排采精细控制的关键。

3 水平井各段及各层位压裂效果分析

3.1 压裂施工规模

ZJ2-1 与 ZJ2-2 井各段压裂施工规模数据见表 2。以 ZJ2-1 井为例,对比顶板、煤层和底板压裂施工规模数据可知,煤层压裂时的总液量、总砂量、每米液量与每米砂量均高于顶、底板。ZJ2-2 井以煤层压裂为主,对比分析 ZJ2-1 与 ZJ2-2 井的压裂施工规模数据可知,ZJ2-2 井的总液量和总砂量均高于 ZJ2-1 井。直观来看,这只能说明地层中形成了更大的裂缝体积,地层打开空间大,并不能说明压裂效果好。一方面,煤层微孔、裂隙发育,导致地层吸水能力较顶底板强,一定程度上会影响注入液量与

表 2 ZJ2-1 与 ZJ2-2 井压裂规模数据

Table 2 Average values of fracturing scale data for each group of ZJ2-1 and ZJ2-2 horizontal wells

段号/层位	阶段液量/m ³		阶段砂量/m ³		每米液量/(m ³ ·m ⁻¹)		每米砂量/(m ³ ·m ⁻¹)	
	ZJ2-1井	ZJ2-2井	ZJ2-1井	ZJ2-2井	ZJ2-1井	ZJ2-2井	ZJ2-1井	ZJ2-2井
1	1 568	75	382	18	1 568	75	382	18
2	1 643	80	401	20	1 643	80	401	20
3	1 643	80	401	20	1 643	80	401	20
4	1 643	80	401	20	1 643	80	401	20
5	1 165	40	284	10	1 643	80	401	20
6	1 568	75	382	18	1 643	80	401	20
7	1 567	75	382	18	1 643	80	401	20
8	1 567	75	382	18	1 643	80	401	20
9	1 567	75	382	18	1 643	80	401	20
10	1 567	75	382	18	1 643	80	401	20
11	1 567	75	382	18	1 643	80	401	20
12	1 165	40	284	10	1 643	80	401	20
13	1988	100	485	24	1 643	80	401	20
14	1 643	80	401	20	1 165	40	284	10
15	1 568	75	382	18	1 568	75	382	18
顶板	1 502	69	366.2	16.8				
煤层	1 732.7	85	422.7	20.7				
底板	1 531.6	71.4	373.4	17.4				

砂量。另一方面,煤层质软,支撑剂支撑效果不会太好,导致裂缝易开启也易闭合,难以形成长期稳定的裂缝。

3.2 压裂施工曲线

一般认为降低型和平稳型曲线表示压裂效果较好,而上升型和波动型曲线表示压裂效果较差^[17]。ZJ2-1 与 ZJ2-2 井典型压裂施工曲线如图 3—图 4

所示。ZJ2-1 井 15 段压裂施工曲线中存在降低—升高型(4 段)、波动型(6 段)、降低型(3 段)和平稳型(2 段)4 种类型。ZJ2-2 井存在升高—降低型(3 段)、波动型(2 段)、降低型(2 段)和平稳型(8 段)4 种类型。ZJ2-1 井压裂效果好的段数仅 5 段,而 ZJ2-2 井占 10 段,可以推断 ZJ2-2 井整体压裂效果较好。

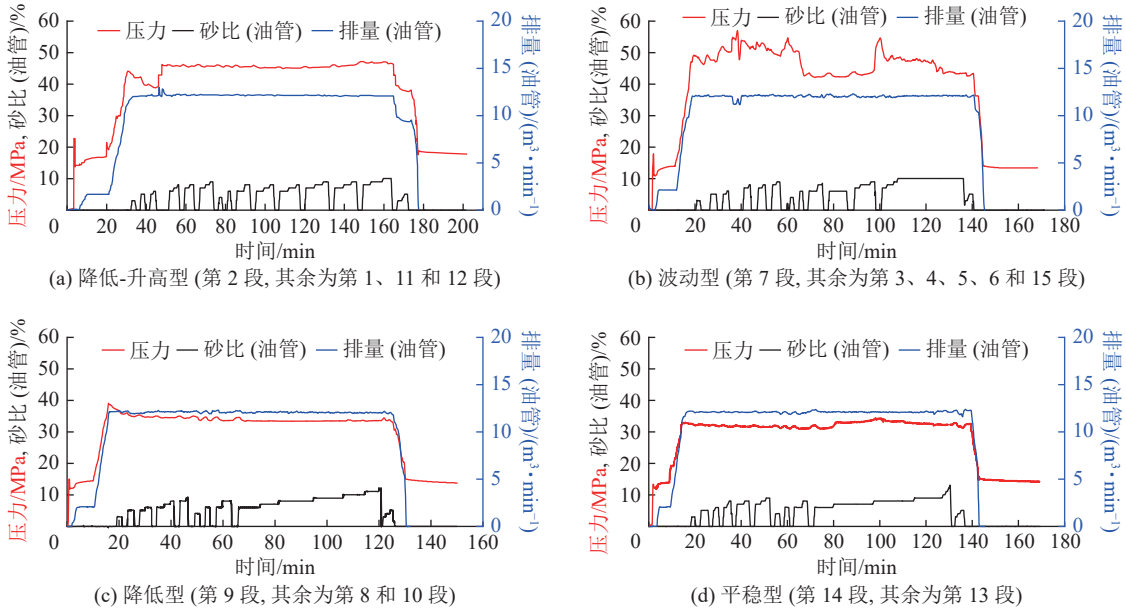


图 3 ZJ2-1 井典型压裂施工曲线
Fig.3 Typical fracturing construction curve of ZJ2-1 well

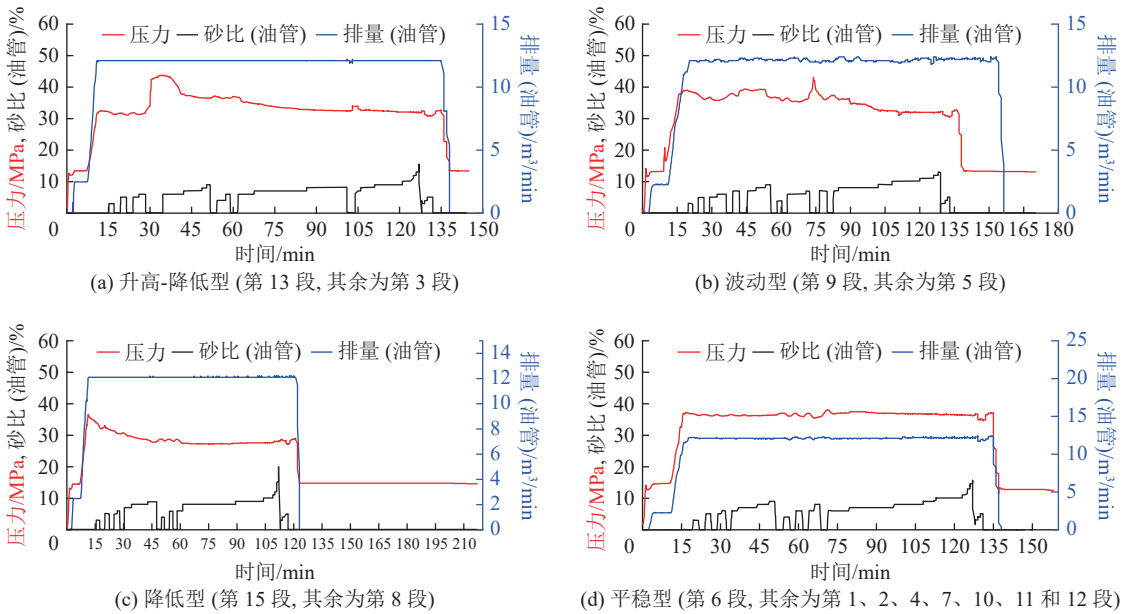


图 4 ZJ2-2 井典型压裂施工曲线
Fig.4 Typical fracturing construction curve of ZJ2-2 well

从压裂层位差异的角度来看,ZJ2-1 井顶板压裂存在降低—升高型(4 段)和平稳型曲线(1 段),且以

降低—升高型曲线为主;底板压裂曲线存在波动型(5 段)、降低型(1 段)和平稳型(1 段)曲线,且以波动

型曲线为主；煤层压裂则出现波动型、降低型和平稳型曲线各 1 条，综合来看，顶、底板压裂效果均略差于煤层。

3.3 测压降数据

ZJ2-1 与 ZJ2-2 井的压裂测压降数据见表 3。两口井施工泵压整体上均呈下降的趋势，ZJ2-1 井

初期施工泵压 47.9 MPa，后期降至 33.2 MPa，降幅为 30.7%；ZJ2-2 井初期施工泵压 42.7 MPa，后期降至 28.9 MPa，降幅为 32.3%。压裂过程中，ZJ2-2 井施工泵压的降幅略大于 ZJ2-1 井，压降数据降幅越大，说明压裂后地层的滤失性强，造缝效果较好。

表 3 ZJ2-1 与 ZJ2-2 井压裂测压降数据
Table 3 Fracturing pressure drop data of ZJ2-1 and ZJ2-2 wells

段号/层位	P_s /MPa		P_t /MPa		T_c /min		P_c /MPa	
	ZJ2-1 井	ZJ2-2 井	ZJ2-1 井	ZJ2-2 井	ZJ2-1 井	ZJ2-2 井	ZJ2-1 井	ZJ2-2 井
1	47.9	19.9	31.7	17.6	42.7	14	14.6	14.5
2	45	18.5	23.2	17.8	42.1	14	36.1	12.8
3	52.9	24	26.9	20.5	44.5	13	26.3	12.9
4	46	19	23.2	17	38.5	13	32.3	13.5
5	32	14	29.5	14.8	39.5	13	29.7	15
6	47	13.5	29.4	13.3	36.1	13.3	20.2	12.5
7	50	13.5	23.4	13.4	33.8	13.3	91.2	13.3
8	34.5	13.8	26	13.5	35.2	12.6	14.5	12.4
9	34.3	14.6	19.8	13.8	35.3	14	31.5	13.1
10	31.8	13.5	—	12.6	34.3	15	18.2	14.4
11	32.8	13.5	—	13.1	27.1	12	28.3	12
12	27	14.4	27.8	13.6	32.7	12	31.8	13.3
13	30	13.2	15.5	13.4	33.5	12	7.8	13.4
14	31.7	15	26.3	14.2	32.4	14	29.2	13.6
15	33.2	13	34.1	12.5	28.9	14	94.1	14.6
顶板	36.9	16	27.6	14.9				
煤层	39.1	17.3	20.7	15.9				
底板	39.2	14.5	27.4	14.1				

注： P_s 为施工泵压； P_t 为停泵压力； T_c 为测压降时间； P_c 为测压降压力。

图 5 所示为两口井的停泵压力与测压降数据变

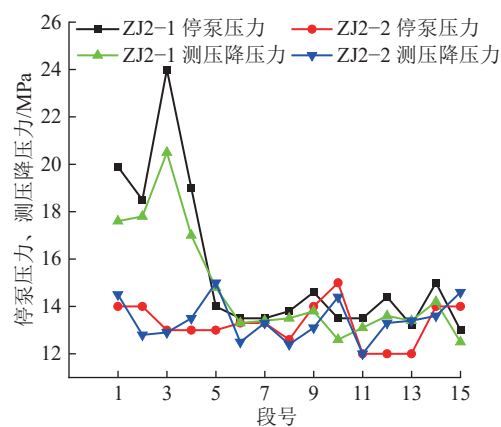


图 5 ZJ2-1 与 ZJ2-2 井压力数据变化
Fig.5 Changes in pressure data of ZJ2-1 and ZJ2-2 wells

化图。ZJ2-1 井第 2~3 段压裂期间停泵压力与测压降压力剧增，现场实时压裂显示，ZJ2-1 井在第 1 段压裂开泵后压力居高不下，排量提高速度慢，中途调整施工泵压，排量提至 12 m³/min，由于压力较高且波动剧烈，采用短段塞式加砂，控制砂比最高为 10%，达到泵注程序加砂量 80 m³。这可能由于地质资料显示该段地层为砂岩或粉砂质泥岩，距离煤层较远，破裂压力梯度高。地层应力高、沿程摩阻高及首段的钻井液污染等原因，造成该段压裂施工压力较高，注入排量提升较慢，低排量影响了液体的造缝和携砂能力、裂缝窄，加砂难度增大。

从不同压裂层位来看，煤层压裂的停泵压力与测压降压力均大于顶底板压裂，而煤层压裂的测压

降时间显著小于顶底板压裂,说明煤层压裂较顶板与底板压裂更能促进地层能量增大,煤层层位压裂裂缝较顶板和底板与原始地层的天然裂隙连通较好,压裂液的滤失性较好。

3.4 微地震监测验证

图 6 所示为两口井各段压裂裂缝微地震监测俯视图。整体来看,两口井各段压裂裂缝平行度和均匀性较好。表 4 和图 7 所示为 ZJ2-1 与 ZJ2-2 井各段压裂裂缝监测结果。现场实测两口井的平行间距约 200 m,平均裂缝半长分别为 116.3 m 和 131.6 m,说明较晚压裂的 ZJ2-2 井的裂缝缝网已与 ZJ2-1 井的裂缝进行交汇,也即两口井的压裂缝网已经连通。ZJ2-1 井压裂裂缝的长度小于 ZJ2-2 井,而裂缝宽度、裂缝高度和微地震事件数均大于 ZJ2-2 井。从压裂层位和压裂先后顺序来说,这可能是由于 ZJ2-2 井的压裂层位主要以煤层压裂为主,裂缝在煤层的扩展效果好于存在 12 段岩层压裂的 ZJ2-1 井,但由于 ZJ2-1 井的压裂时间先于 ZJ2-2 井,且压裂缝网已经连通,很明显 ZJ2-2 井在压裂缝网扩展过程中存在

明显的应力阴影效应^[29],抑制了裂缝的扩展。综合来说,ZJ2-1 井的整体压裂裂缝缝网效果较好于 ZJ2-2 井。

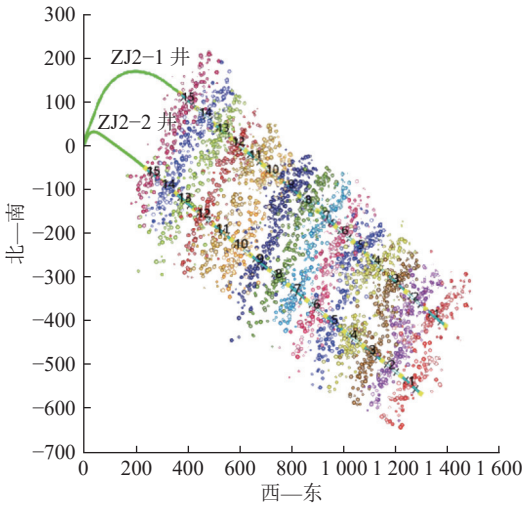


图 6 ZJ2-1 与 ZJ2-2 井各段压裂裂缝微地震监测俯视图
Fig.6 Top view of microseismic monitoring of fractured fractures in various sections of ZJ2-1 and ZJ2-2 wells

表 4 ZJ2-1 与 ZJ2-2 井各段压裂裂缝监测结果

Table 4 Monitoring results of fracturing cracks in various sections of ZJ2-1 and ZJ2-2 wells

段号/层位	裂缝半长/m		裂缝半宽/m		裂缝高度/m		事件数/个	
	ZJ2-1井	ZJ2-2井	ZJ2-1井	ZJ2-2井	ZJ2-1井	ZJ2-2井	ZJ2-1井	ZJ2-2井
1	158.4	22.8	38.8	157	123.0	20.7	42	121
2	129.8	29.5	33.4	162	128.4	18.2	49	149
3	104.9	21.3	29.9	151	126.2	26.4	44.5	142
4	138.8	27.8	37.2	143	94.2	27.3	37.3	124
5	101.1	18.4	39.3	137	132.8	29.3	56	133
6	127.1	27.9	38.8	135	122.4	21.3	26.6	135
7	118.9	16.9	33.0	133	107.5	20.3	22.4	121
8	119.5	24.3	35.6	142	146.9	22.8	24.7	133
9	110.7	24.8	39.9	187	151.6	20.8	26	142
10	89.5	20.8	39.7	137	118.7	23.7	25.2	153
11	105.2	44.3	31.3	131	151.0	31.6	14.1	118
12	90.3	40.1	32.1	105	142.0	22.9	11.1	124
13	95.3	39	29.4	149	218.5	48.0	10.9	147
14	127.0	38.8	35.5	138	96.4	39.2	12.0	115
15	128.0	50.2	29.7	141	114.4	42.7	15.2	75
总和	1 744.5	446.9	523.6	2 148	1974	415.2	417	1932
顶板	114.6	31.5	35.1	138				
煤层	103.6	28.4	33.1	162				
底板	122.9	29.2	35.6	138				

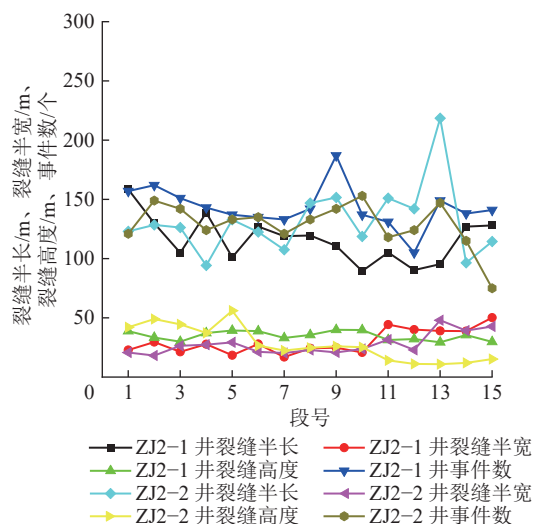


图7 两口井各段压裂裂缝尺寸

Fig.7 Size of fracturing cracks in each section of two wells

图8为ZJ2-1井不同层位压裂裂缝尺寸特征。ZJ2-1井的顶、底板压裂裂缝半长、半宽和高度的平均值接近,且均大于煤层压裂,说明顶、底板压裂在煤层形成的裂缝延伸范围更大。但煤层压裂事件数大于顶底板,说明煤层压裂破碎较为剧烈,造缝数量较多,裂缝更加复杂。

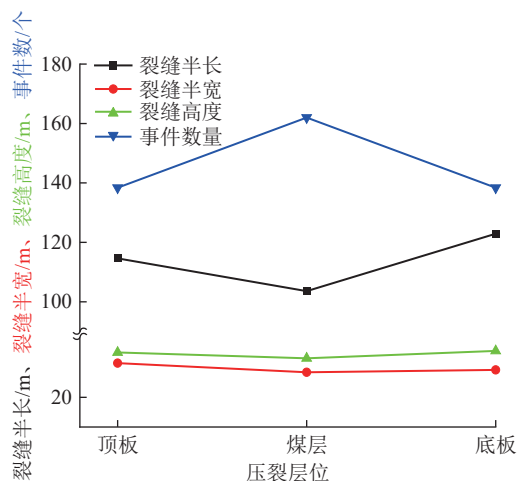


图8 ZJ2-1井不同层位压裂裂缝变化特征

Fig.8 Characteristics of fracturing fracture changes in different layers of ZJ2-1 well

4 气水产出特征及停产原因分析

4.1 排采阶段划分及气水产出规律

目前地面瓦斯排采正在逐步进行,截止2024年3月,ZJ2-1与ZJ2-2井的投产时间均超过先导试验井平均水平(9.6个月),此处基于现有阶段的排采数据进行分析。由于施工效果差异与井下环境的复杂性,排采阶段出现不产气的情况。两口井的排采曲

线如图9所示,两口井各个阶段与整体排采参数特征见表5—表6。

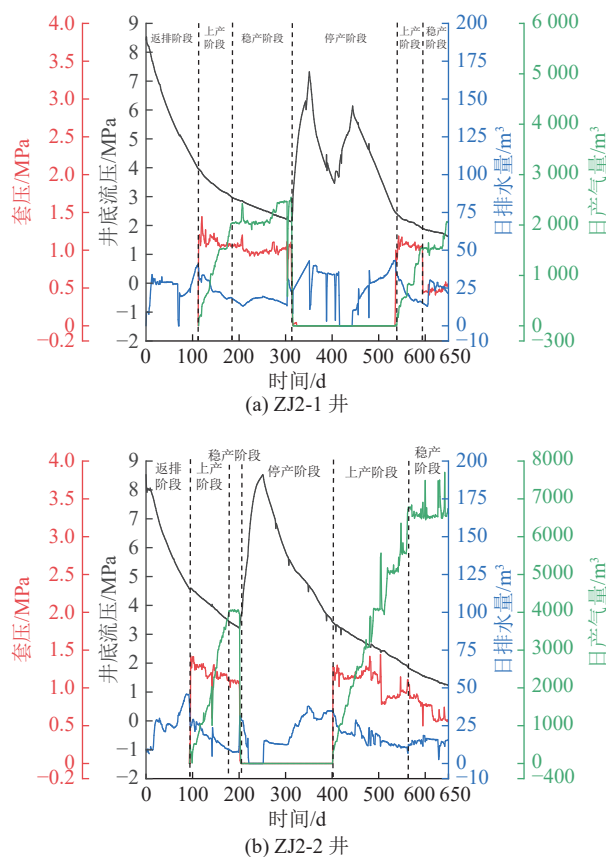


图9 ZJ2-1与ZJ2-2井排采曲线

Fig.9 ZJ2-1 and ZJ2-2 well production curves

1)返排阶段。ZJ2-1与ZJ2-2井的返排阶段时长分别为113 d和93 d,均经历油嘴控制和直排放喷阶段进行排液,两口井井底流压降幅分别为4.476 MPa和3.958 MPa,降速分别为0.040 MPa/d与0.043 MPa/d。最大日产水量分别为40.339 m³和45.823 m³,累计产水量约为14 374.652 m³和10 204.921 m³,阶段累计产水率约61.48%和46.01%。整体来看,产水量过高,可能存在含水层的破碎情况,导致地下水的侵入。

2)上产阶段。ZJ2-1与ZJ2-2井的上产阶段持续时间分别为70、86 d,两口井井底流压降速分别为0.014 MPa/d与0.013 MPa/d;返排率分别为9.64%与8.58%;累计产液量分别为1 718.615 m³和1 571.267 m³;最高日产气量分别为2027 m³和4 039 m³,累计产气量分别为78 130 m³和162 460.7 m³。ZJ2-1井累计产液量略大于ZJ2-2井,但产气量明显小于ZJ2-2井。

3)稳产阶段。ZJ2-1与ZJ2-2井的稳产阶段持续时间分别为132 d和22 d。井底流压降速分

表 5 两口井各阶段主要排采参数
Table 5 Main production parameters for each stage of the two wells

阶段	井号	阶段井底流压降幅/ MPa	阶段井底流压降速/ (MPa · d ⁻¹)	阶段产水量/ m ³	阶段产气量/ m ³	阶段持续时间/ min	阶段返排率/ %
返排阶段	ZJ2-1井	4.476	0.040 0	14 374.652	0	113	61.48
	ZJ2-2井	3.958	0.043 0	10 204.921	0	93	46.01
上产阶段	ZJ2-1井	0.954	0.014 0	1 718.615	78 130	70	9.64
	ZJ2-2井	1.091	0.013 0	1 571.267	162 460.7	86	8.58
稳产阶段	ZJ2-1井	0.859	0.006 5	2 301.531	281 288	132	6.15
	ZJ2-2井	0.228	0.010 0	168.997	88 761	22	1.80
停产阶段	ZJ2-1井	0.624	0.002 8	5 214.400	0	221	24.02
	ZJ2-2井	0.261	0.001 3	3 973.900	0	197	19.29
再次上产阶段	ZJ2-1井	0.978	0.008 9	2 498.590	165 831	90	9.11
	ZJ2-2井	1.528	0.009 6	2 795.184	1 220 612	160	17.20

表 6 两口井产水量及排采参数对比
Table 6 Comparison of water production and production parameters between two wells

井号	平均日产气量/m ³	平均日排水量/m ³	最大日产气量/m ³	最大日排水量/m ³	产气量/m ³	排水量/m ³	返排比/%
ZJ2-1	1 591.664	34.887	2 550	318.45	525 249.0	25 813.77	110.4
ZJ2-2	3 945.935	27.178	7 701	367.59	1 471 833.7	20 600.94	92.88

别为 0.0065 MPa/d 与 0.01 MPa/d; 返排率分别为 6.15% 与 1.8%, 累计产液量分别为 2 301.531 m³ 和 168.997 m³; 日产气量分别稳定在 2 050 m³ 和 4 030 m³ 附近, 日产气量最高值分别为 2 550 m³ 和 4 061 m³, 累计产气量分别为 281 288 m³ 和 88 761 m³。返排液量少, 井底压力回升, 是导致突然不产气的原因。

4)停产阶段。在稳产阶段中突然出现。ZJ2-1 与 ZJ2-2 井分别在 315 d 和 204 d 后进入停产阶段, 持续时间分别为 221 d 和 197 d, 期间两口井均不产气。两口井的井底流压均迅速上升, ZJ2-1 井迅速上升 7.322 MPa 后开始下降, 随后循环上升、下降一次后降至 2.437 MPa 附近开始恢复产气; ZJ2-2 井迅速上升至 8.53 MPa 后开始下降, 当降至 3.409 MPa 附近开始恢复产气。两口井再次产气时的井底压力与最初的稳产压力较为接近, 套压为 0, 日排水量较少。

5)再产气阶段。该阶段包括上产和稳产阶段(仅部分)。ZJ2-1 与 ZJ2-2 井的上产阶段持续时间分别为 90 和 160 d。井底流压降速分别为 0.008 9 MPa/d 与 0.009 6 MPa/d; 阶段返排率分别为 9.11% 与 17.2%; 累计产液量分别为 2 498.59 m³ 和 2 795.184 m³; 最高日产气量分别为 2 061 m³ 和 6 605 m³, 累计产气量分别为 165 831 m³ 和 1 220 612 m³。该阶段 ZJ2-1 井的产气量明显小于 ZJ2-2 井。

综上所述, 截止 2024 年 3 月, ZJ2-2 井的阶段综合产气能力比 ZJ2-1 井强, 但总返排量 ZJ2-1 井大于 ZJ2-2 井, 且 ZJ2-1 井的返排率大于 1, 存在邻近水源的侵入, 导致 ZJ2-1 井停产阶段井底流压反复升高, 这可能是导致压裂效果较好的 ZJ2-1 井的产气效果较差的原因之一。

4.2 停产原因分析

在实际排采过程中, 长时间的不产气情况, 严重影响产气水平和后续煤炭资源开发。ZJ2-2 井于 2022-12-29 无法产气, 2023-02-08—2023-02-13 通过现场工程技术人员对现场进行检泵作业, 发现原井泵上油管在第 24 根油管时水质开始发黑, 说明煤粉堵塞了产气通道, 后下入通井管柱 130 根, 进行洗井冲砂作业, 于 2023-07-14 才恢复产气。ZJ2-1 井于 2023-04-18 无法产气, 2023-05-17—2023-05-23 通过现场工程技术人员对现场进行检泵作业, 加入冲砂管柱在 1 247 m 和 1 248.9 m 均遇阻, 随后下铅模管柱, 入井油管 131 根, 铅印井深 1 248 m, 后开泵试抽无果。2023-08-18—2023-08-23 再次检泵, 发现泵筒内有煤泥, 在 1 245 m 出遇阻, 开泵反复循环冲砂洗井, 后下管柱, 于 2023-11-25 恢复产气。

综合来看, 两口井在排采阶段不产气的原因均是由于钻井井筒失稳破坏, 导致产气通道堵塞, 无法形成稳定性的气水运移通道。而井筒的稳定性受地

面水平井瓦斯治理全周期的影响,包括前期技术优选、钻井施工轨迹精度、压裂工程参数与排采制度精细化程度等因素影响。虽采取措施进行补救,但耽误较多时间,影响地面瓦斯排采效率,也影响矿井生产接替。由此可见,钻井阶段的井筒稳定性控制在整个地面水平井瓦斯治理中的意义重大。

5 钻井、压裂与排采效果相互作用机制探讨

基于压裂施工规模、压裂施工曲线、测压降数据变化规律,对比 ZJ2-1 与 ZJ2-2 井及 ZJ2-1 井的不同层位压裂造缝效果发现, ZJ2-2 井较 ZJ2-1 井压裂与 ZJ2-1 井的煤层较顶、底板压裂的地层打开效果好。微地震监测的裂缝特征可以作为地层打开效果的验证手段,但微地震的监测结果与上述结论相反。结合排采过程中 ZJ2-1 与 ZJ2-2 井分别出现 221 d 和 197 d 的不产气阶段,导致排采效果较差。因此,笔者认为需要重新审视现场压裂施工规模、压裂施工曲线、测压降数据的具体含义及其与压裂效果之间的关系,进一步从地面水平井瓦斯治理工程的全周期角度上,深入梳理钻井、压裂及排采效果之间的相互作用关系,进而揭示钻井、压裂对排采效果的影响机制及排采效果的反馈机制,如图 10 所示。

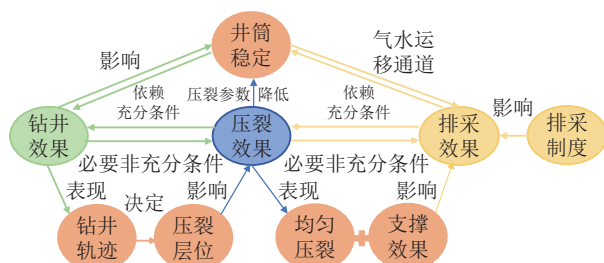


图 10 钻井、压裂与排采效果之间的作用关系

Fig.10 The relationship between drilling, fracturing, and production efficiency

1) 钻井效果的全局控制作用。钻井效果体现在钻井轨迹与井筒稳定 2 个方面。从上述分析可知,钻井轨迹不仅会直接影响井筒稳定,还会影响压裂效果,压裂施工会降低井筒稳定,而井筒稳定是保障排采工程顺利进行的基础。从现场地质背景与工程施工效果来看,一方面,钻井轨迹所形成的压裂层位差异对压裂效果影响显著。ZJ2-2 井较 ZJ2-1 井与 ZJ2-1 井的煤层较顶、底板压裂的裂缝打开效果好,而微地震结果显示顶底板压裂较煤层压裂效果好,这是由于压裂效果好不但需要裂缝均匀打开,还需要确保裂缝持久性高,但受地下水长期对煤、岩层侵

蚀弱化的影响,其与支撑剂的耦合作用导致持久裂缝效果较差,导致煤层压裂效果较差。

另一方面,井筒稳定性的影响因素较多,主要体现在以下 4 个方面:① 钻井轨迹。在煤层及顶、底板中往复“穿行”;② 压裂施工。井筒附近的分段多簇压裂施工;③ 煤层及顶、底板材料的物性参数。现场煤体碎软且顶、底板均为泥岩,强度较低;④ 长期水环境弱化。松软煤体与泥岩遇水强度降低显著,会大大影响井筒稳定。除此之外,井底压力的波动变化也不可忽视。各因素耦合影响最终导致井筒失稳,是两口井排采停产的根本原因。

2) 压裂效果的评价思路。压裂效果的好坏与地层打开程度、裂缝均匀性和持久性关系密切。从现场工程施工效果来看,钻井层位在煤层与顶、底板时的压裂效果存在差异。裂缝扩展的均匀性与压裂施工层位及煤岩物理力学性质关系密切;裂缝的持久性与支撑剂的支撑效果关系密切。现场微地震监测结果表明造缝的均匀性较好。而裂缝支撑效果是由支撑剂材料与被支撑材料(煤岩体)所共同决定的,排采阶段井下压力变化复杂、煤体长期浸水强度的降低等都可能造成支撑剂嵌入煤体,致使裂缝闭合^[30]。受地下水长期对煤、岩层侵蚀弱化的影响,其与支撑剂的耦合作用能否保障裂缝长期打开,是决定现场压裂效果好坏的关键因素,也是制约现场产气效果的原因,同时也极易被忽视。

3) 排采效果的评价思路。压裂效果好并不代表排采效果好,压裂效果好只是决定排采效果好坏的必要条件之一。排采效果是 1 个受多因素影响的变量,其好坏受井筒稳定性和精细化排采制度的选择,排采制度对气井产能的影响主要是控制生产过程中煤储层渗透率的动态变化^[31]。由此可见,在碎软低渗煤层中表现得更为显著。

6 煤矿未采区地面水平井瓦斯治理建议

煤矿采动区瓦斯治理可以将井下采动裂隙与压裂裂隙相结合,充分进行井下造缝,打开瓦斯运移通道,实现瓦斯的井地联合压裂-抽采。而对于高瓦斯矿井未采区地面水平井瓦斯治理无法采取井地联合压裂-抽采技术,只能依靠地面压裂造缝来打开瓦斯运移通道,受深部煤储层地应力大和渗透率低等因素的影响,瓦斯治理难度较采动区增大,压裂效果一般较差,导致地层的导流能力弱,瓦斯抽采效果也变差。因此,笔者通过分析朱集东煤矿西二采区地面水平井瓦斯治理措施较采动区地面水平井瓦斯治理

技术的差异,从地面水平井瓦斯治理技术优选、钻井轨迹精准控制、井筒稳定性控制、排采制度优化和水赋存环境探测等角度总结了煤矿未采区地面水平井

瓦斯治理过程中存在的关键问题,并给出相应的开发建议,如图 11 所示,以期煤矿未采区地面水平井瓦斯治理提供建设性的意见。

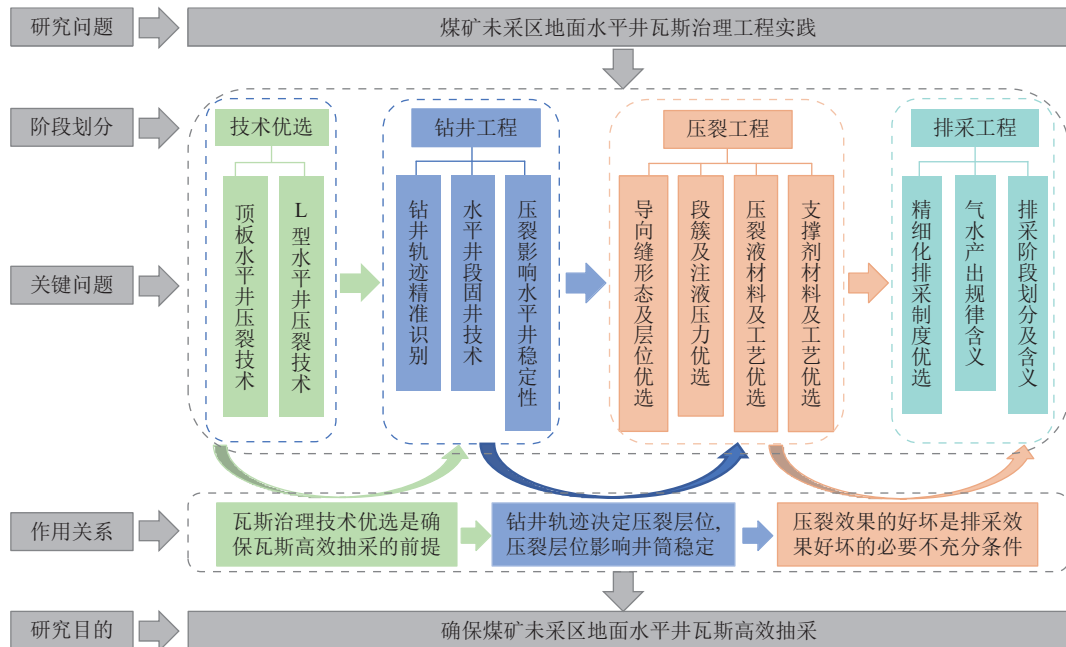


图 11 煤矿未采区地面水平井瓦斯治理建议

Fig.11 Suggestions for gas control of ground horizontal wells in undigested areas of coal mines

6.1 地面水平井瓦斯治理技术优选

地面水平井瓦斯治理技术主要包括地面 L 型水平井(或分段压裂)瓦斯抽采技术和煤层顶板水平井分段压裂瓦斯抽采技术 2 种。二者的主要区别在于对水平井钻完井层位要求的差异,前者一般认为是在井下采动裂隙区域内进行的水平井瓦斯抽采,若加之分段压裂进行造缝,可构建采动裂隙+压裂裂隙耦合的缝网结构,形成井地联合瓦斯高效抽采技术;后者则是在煤层的顶板进行水平井分段压裂施工,对钻井轨迹的控制技术要求更高,但可有效避免钻井轨迹对煤储层的伤害以及松软低渗高瓦斯煤层压裂的低效造缝效果。

朱集东矿西二采区瓦斯压力大于 3 MPa,属未采区,无采动裂隙。现场施工采用 L 型水平井分段压裂技术,仅压裂裂缝形成的缝网结构,加之钻井轨迹在煤层及其顶底板中来回穿梭,易导致瓦斯抽采效果差。若选择煤层顶板地面水平井瓦斯治理技术,必然会形成比现在更好的造缝效果,继而保障瓦斯的高效抽采。

6.2 水平井段钻井轨迹精准控制

现场工程施工采用的低成本钻井轨迹控制技术,使得钻井轨迹的控制精度较差,导致钻井轨迹在煤

层及其顶底板之间来回“穿行”,现场压裂层位也随之变化,导致压裂效果较差,瓦斯抽采效果变差,甚至可能出现断抽的情况,后期虽然可以采取相关的措施恢复排采,但一方面会耽误施工工期,导致排采效率降低,另一方面还有可能出现二次断抽的情况,对整个采区的排采产生不利影响。朱集东矿西二采区 13-1 煤层厚度变化范围为 2.7~6.4 m,煤厚变异系数为 19.36%,属稳定煤层。钻井轨迹控制技术的关键在于高精度与低成本。现场地质模型的精准建立利于钻井轨迹方案设计,同时结合煤岩物性特征曲线与随钻测井曲线规律,实时优化模型,重建钻井轨迹,实现钻井轨迹的实时精准控制。同时考虑经济效益因素,只有低成本才能确保工程施工顺利开展。

6.3 水平井段井筒稳定性控制

地面水平井施工井筒的稳定性控制问题是决定后续压裂及排采工程施工成败的关键。在钻井阶段,钻井轨迹在煤层及其顶底板之间来回“穿行”,一方面,会导致水平井分段多簇压裂层位出现在煤层或顶、底板岩层中,甚至出现在顶板-煤层或者底板-煤层的界面处,煤层的实时压裂曲线可能会显示压裂效果较好,但井筒的稳定性受压裂层位的影响可能

会降低,继而可能会对煤层压裂处的煤层气排采产生负面影响。另一方面,在煤层或界面处的分段多簇压裂施工离井筒较近,导致该处的固井效果较顶、底板岩层变差,会对井筒的稳定性产生较大的影响。同时,13-1 煤层顶、底板均以泥岩为主,长期浸水导致强度降低,且存在层理面,也是导致井筒稳定性变差的原因。综上所述,各因素共同影响不同层位水平井段井筒的稳定性,保证钻井通道畅通无阻,是确保水气运移的关键前提。

6.4 排采制度优化

两口井均在稳产阶段出现不产气的情况,从而进入停产阶段。而稳产阶段的目的是通过合理配产,实现长稳产、高累产,达到储层供采平衡,充分利用地层能量排液,防止储层出砂,持续提高返排率。稳产阶段前期采用以油嘴控产、环空自喷生产为主,后续转为油管生产。稳产过程中,井底压力波动大,井筒的稳定性受到较大的挑战,尤其在碎软低渗煤层更为显著。由此可见,配产参数的制定并未精准考虑井筒稳定性程度,在这种情况下,单纯从井筒稳定性角度或者合理配产角度都无法确保储层高效排采,只有建立井筒稳定性与排采参数之间的定量关系才是实现精细化排采制度的关键一步。

除此之外,从排采工程本身来看,排采制度的优化实际上就是向精细化排采制度的转变,离不开对井下压降规律和气水产出规律含义的深刻认识。在精细分析生产阶段、生产制度和配套采气工艺的基础上,利用 3 个关键解吸压力节点,整体将气井全生命周期划分为 5 个生产阶段,通过对各阶段排采参数进行定量化研究,进一步明确各排采阶段控制的目的及要求^[14]。

6.5 水环境精准探测

朱集东井田西二采区煤系地层富水性与砂岩裂隙发育程度、裂隙开放程度和大小密切相关。钻井施工过程中,ZJ2-1 井水平段钻遇 DF13、F19、DF48 断层带,ZJ2-2 水平段钻遇 DF48。断层带岩性均以泥岩、砂质泥岩为主,含砂岩碎块,岩芯受构造挤压破碎,极易发生漏水。两口井平均日排水量、最大日排水量和累计排水量较为接近,但返排量已超过施工液量,目前 ZJ2-1 井返排量大于施工液量,这也侧面说明由于井下施工破坏了邻近含水层,导致返排量增大,且难以确定含水量的多少。目前煤层气的排采工程仍旧在进行中,后续排水量也会持续增加。这对于后续施工考察钻孔去评价降突效果以及煤炭资源的回采是一个潜在的隐患,在施工时需探明煤

层及邻近区域水量大小,确保避免水害对人身及财产安全的影响。

7 结 论

1) ZJ2-2 井较 ZJ2-1 井压裂与 ZJ2-1 井的煤层较顶、底板压裂的液量与砂量参数大、压降数据降幅高及平稳型和下降型压裂施工曲线数量多,这说明煤层压裂地层打开效果较好。微地震监测结果显示顶底板压裂较煤层压裂效果好,且裂缝均匀性较好。但地层打开效果好只是压裂效果好的必要条件,压裂效果还与裂缝均匀性和持久性有关。同时压裂效果好只是排采效果好的必要条件,排采效果还受井筒稳定性与排采制度精细化程度的影响。

2) 两口井排采阶段均可划分为返排、上产、稳产、停产和再产气 5 个阶段,且 ZJ2-2 井的产气能力比 ZJ2-1 井强。总返排量 ZJ2-1 井大于 ZJ2-2 井,且 ZJ2-1 井的返排率大于 1,存在邻近含水层水源的侵入,使得 ZJ2-1 井停产阶段井底流压反复波动,这是导致压裂效果较好的 ZJ2-1 井产气量不如 ZJ2-2 井的原因之一。

3) 井筒稳定性受钻井层位、长期浸水和压裂施工等因素的影响,井筒失稳是导致不产气阶段出现的直接原因,其根本原因在于钻井轨迹,同时井筒通道也是气水运移的必要通道,贯穿地面水平井瓦斯治理工程的全周期。

4) 从地面水平井瓦斯治理技术优选、钻井轨迹精准控制、井筒稳定性控制、排采制度优化和水赋存环境探测等角度总结了煤矿未采区地面水平井瓦斯治理过程中存在的关键问题,并给出相应的开发建议。

参考文献(References):

- [1] 矿区煤层开发项目组. 煤层气与煤炭协调开发理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [2] 刘大锰, 贾奇峰, 蔡益栋. 中国煤层气储层地质与表征技术研究进展 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 196–203.
LIU Dameng, JIA Qifeng, CAI Yidong. Research progress on coal-bed methane reservoir geology and characterization technology in China [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 196–203.
- [3] 孙海涛, 舒龙勇, 姜在炳, 等. 煤矿区煤层气与煤炭协调开发机制模式及发展趋势 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 1–13.
SUN Haitao, SHU Longyong, JIANG Zaibing, et al. Progress and trend of key technologies of CBM development and utilization in China coal mine areas [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 1–13.
- [4] 陈本良, 袁亮, 薛生, 等. 淮南矿区煤层顶板分段压裂水平井抽采技术及效果研究 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 155–163.

- CHEN Benliang, YUAN Liang, XUE Sheng, et al. Study on technology and effect of gas extraction in horizontal well with segmental hydraulic fracture in roof of coal seam in Huainan mining area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 155–163.
- [5] 刘见中, 孙海涛, 雷毅, 等. 煤矿区煤层气开发利用新技术现状及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 258–267.
- LIU Jianzhong, SUN Haitao, LEI Yi, et al. Current situation and development trend of coalbed methane development and utilization technology in coal mine area[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 258–267.
- [6] 张群, 降文萍, 姜在炳, 等. 我国煤矿区煤层气地面开发现状及技术研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 139–158.
- ZHANG Qun, JIANG Wenping, JIANG Zaibing, et al. Present situation and technical research progress of coalbed methane surface development in coal mining areas of China[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 139–158.
- [7] 王国法, 任世华, 庞义辉, 等. 煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 1–8.
- WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, et al. Development achievements of China's coal industry during the 13th Five-Year Plan period and implementation path of “dual carbon” target[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 1–8.
- [8] 刘峰, 郭林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1–15.
- LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1–15.
- [9] 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.
- [10] 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. Study on fracture propagation law and mechanism of horizontal well staged fracturing in broken soft and low permeability coal seam roof[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2017.
- [11] 姜在炳, 李浩哲, 方良才, 等. 紧邻松软煤层顶板水平井分段穿层压裂裂缝延展机理[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 922–931.
- JIANG Zaibing, LI Haozhe, FANG Liangcai, et al. Fracture propagation mechanism of staged through-layer fracturing for horizontal well in roof adjacent to broken-soft coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 922–931.
- [12] 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, 15.
- ZHANG Qun. Strategic thinking on coal mine methane development in China[J]. China Coalbed Methane, 2007, 4(4): 3–5, 15.
- [13] 孔祥喜, 唐永志, 李平, 等. 淮南矿区松软低透煤层煤层气开发利用技术与思考[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 26–35.
- KONG Xiangxi, TANG Yongzhi, LI Ping, et al. Thinking and utilization technology of coalbed methane in soft and low permeability coal seams in Huainan Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 26–35.
- [14] 张群, 孙四清, 降文萍. 碎软低渗煤层煤矿区煤层气勘探开发关键技术及发展方向[J]. 石油学报, 2024, 45(5): 855–865.
- ZHANG Qun, SUN Siqing, JIANG Wenping. Key technology and development direction of coalbed methane exploration and development in coal mining area with broken soft and low permeability coal seam[J]. China Industrial Economics, 2024, 45(5): 855–865.
- [15] 陈捷, 胡海洋, 娄毅, 等. 贵州省低渗薄煤层水力增渗模拟及地面抽采试验: 以山脚树矿 YP-7 井为例[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 60–70.
- CHEN Jie, HU Haiyang, LOU Yi, et al. Surface permeability improvement and gas control extraction test of low permeability thin coal seam in Guizhou province: Taking the YP-7 well of Shanjiaoshu Mine as an example[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 60–70.
- [16] 胡海洋, 颜智华, 娄毅, 等. 贵州省煤层气井压裂改造对产气量的影响及开发建议: 以盘关向斜为例[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S1): 116–126.
- HU Haiyang, YAN Zhihua, LOU Yi, et al. Influence of fracturing reconstruction of coalbed methane wells on gas production and development suggestions in Guizhou Province: Taking Panguan syncline as an example[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S1): 116–126.
- [17] 张晓娜, 康永尚, 姜杉钰, 等. 沁水盆地柿庄区块 3 号煤层压裂曲线类型及其成因机制[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S2): 441–451.
- ZHANG Xiaona, KANG Yongshang, JIANG Shanyu, et al. Types and genetic mechanism of fracturing curve of No. 3 coal seam in Shizhuang block of Qinshui basin[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S2): 441–451.
- [18] 赵金洲, 付永强, 王振华, 等. 页岩气水平井缝网压裂施工压力曲线的诊断识别方法[J]. 天然气工业, 2022, 42(2): 11–19.
- ZHAO Jinzhou, FU Yongqiang, WANG Zhenhua, et al. Study on diagnosis model of shale gas fracture network fracturing operation pressure curves[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(2): 11–19.
- [19] 赵馨悦, 韦波, 袁亮, 等. 煤储层水文地质特征及其煤层气开发意义研究综述[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 105–117.
- ZHAO Xinyue, WEI Bo, YUAN Liang, et al. Hydrological characters of coal reservoir and their significances on coalbed methane development: A review[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 105–117.
- [20] 胡秋嘉, 毛崇昊, 樊彬, 等. 高煤阶煤层气井储层压降扩展规律及其在井网优化中的应用[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2524–2533.
- HU Qiujia, MAO Chonghao, FAN Bin, et al. Pressure drop expansion law of high rank coalbed methane reservoir and its application in well pattern optimization[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2524–2533.
- [21] 王嘉晨, 张海江, 赵立朋, 等. 基于地面微地震监测定位和成像

- 的煤层气水力压裂效果评价研究[J]. *石油物探*, 2023, 62(1): 31–42, 55.
- WANG Jiachen, ZHANG Haijiang, ZHAO Lipeng, et al. Evaluation of the coalbed methane hydraulic fracturing effect based on microseismic event locations and tomography results for surface microseismic monitoring[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2023, 62(1): 31–42, 55.
- [22] 王元杰, 刘宁, 陈法兵, 等. 基于井上下微震联合监测技术的地面水平井分段压裂效果分析[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2023, 5(3): 87–97.
- WANG Yuanjie, LIU Ning, CHEN Fabing, et al. Analysis of horizontal well staged fracturing effect based on the joint monitoring of surface and underground micro-seismic monitoring technology[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(3): 87–97.
- [23] 李颖涛, 杨国旗, 冯洋, 等. 基于井中微地震监测方法的压裂效果评价: 以延安探区 YP5-1 井为例[J]. *非常规油气*, 2022, 9(6): 114–120.
- LI Yingtao, YANG Guoqi, FENG Yang, et al. Fracturing effect evaluation based on borehole microseismic monitoring method: Take well YP5-1 in Yan'an exploration area as an example[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2022, 9(6): 114–120.
- [24] 张永成, 郝海金, 李兵, 等. 煤层气水平井微地震成像裂缝监测应用研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(4): 67–71.
- ZHANG Yongcheng, HAO Haijin, LI Bing, et al. Application of microseismic monitoring and imaging of fractures in horizontal CBM well[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(4): 67–71.
- [25] 陈明, 王大猛, 余莉珠, 等. 大宁—吉县区块深部煤层气井排采制度研究与实践 [J/OL]. *煤炭学报*, 1–11[2024–07–29]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0318>
- CHEN Ming, WANG Dameng, YU Lizhu, et al. Drainage system research and application of deep coalbed methane gas reservoirs in the Daning-Jixian block[J/OL]. *Journal of China Coal Society*, 1–11[2024–07–29]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0318>.
- [26] 李金平, 潘军, 李勇, 等. 基于流动物质平衡理论的煤层气井定量排采新方法[J]. *天然气工业*, 2023, 43(6): 87–95.
- LI Jinping, PAN Jun, LI Yong, et al. A new CBM well quantitative production method based on the flow material balance theory[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(6): 87–95.
- [27] 胡海洋, 赵凌云, 陈捷, 等. 发耳矿区煤储层敏感性对煤层气排采影响及控制对策[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 334–340.
- HU Haiyang, ZHAO Lingyun, CHEN Jie, et al. Influence of coal reservoir sensitivity on CBM drainage and control strategy in Faer Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 334–340.
- [28] 胡秋嘉, 毛崇昊, 石斌, 等. 沁水盆地南部高煤阶煤层气井“变速排采-低恒套压”管控方法[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(6): 1795–1803.
- HU Qiuja, MAO Chonghao, SHI Bin, et al. “Variable speed drainage-low casing pressure” control method of high rank CBM wells in South Qinshui Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(6): 1795–1803.
- [29] 于永军, 朱万成, 李连崇, 等. 水力压裂裂缝相互干扰应力阴影效应理论分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(12): 2926–2939.
- YU Yongjun, ZHU Wancheng, LI Lianchong, et al. Analysis on stress shadow of mutual interference of fractures in hydraulic fracturing engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(12): 2926–2939.
- [30] 杨科, 张寨男, 华心祝, 等. 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术研究进展、关键科学问题与展望 [J/OL]. *煤炭学报*, 1–28[2024–07–30]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.DM24.0334>
- YANG Ke, ZHANG Zhainan, HUA Xinzhu, et al. Research progress, key scientific issues, and prospects of segmented fracturing and pressure relief gas drainage technology for coal seam roof horizontal wells[J/OL]. *Journal of China Coal Society*, 1–28[2024–07–30]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.DM24.0334>.
- [31] 房大志, 程泽虎, 李佳欣. 渝东南地区超深层煤层气高效压裂技术及精细排采制度研究与实践: 以 NY1 井为例[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(5): 50–56.
- FANG Dazhi, CHENG Zehu, LI Jiaxin. Efficient fracturing technology and fine drainage system of ultra-deep coalbed methane in southeast Chongqing: A case study of NY1 well[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(5): 50–56.