



煤层顶板分段压裂水平井地质适应性分析与施工参数优化

姜在炳 李浩哲 许耀波 张群 李贵红 范耀 降文萍 舒建生 庞涛 程斌

引用本文:

姜在炳, 李浩哲, 许耀波, 等. 煤层顶板分段压裂水平井地质适应性分析与施工参数优化[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(3): 183–192.

JIANG Zaibing, LI Haozhe, XU Yaobo, et al. Geological adaptability analysis and operational parameter optimization for staged fracturing horizontal wells in coal seam roof[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 183–192.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.01.0037>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

淮北芦岭煤矿煤层顶板水平井煤层气抽采效果分析

Analysis on the CBM extraction effect of the horizontal wells in the coal seam roof in Luling coal mine in Huaibei
煤田地质与勘探. 2020, 48(6): 155–160,169 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.06.021>

应力干扰下煤层顶板水平井穿层分段压裂规律

Layer-penetrating staged fracturing law of horizontal wells within roof of coal seams under stress interference
煤田地质与勘探. 2020, 48(4): 11–18 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.04.002>

延川南区块深部煤层气U型分段压裂水平井地质适用性研究

Geological adaptability of deep CBM U-shaped staged fracturing horizontal well in the south block of Yanchuan
煤田地质与勘探. 2018, 46(5): 146–152 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.05.023>

煤层气水平井微地震成像裂缝监测应用研究

Application of microseismic monitoring and imaging of fractures in horizontal CBM well
煤田地质与勘探. 2018, 46(4): 67–71 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.04.011>

煤层气水平井无导眼地质导向钻进技术

Geosteering technology and CBM horizontal well drilling without pilot hole
煤田地质与勘探. 2020, 48(1): 233–239 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.01.032>

黔西松河井田煤层群合层分段压裂影响因素及参数优化

Influencing factors and parameter optimization of staged fracturing in thin and medium coal seam group in Songhe mine in western Guizhou
煤田地质与勘探. 2018, 46(5): 153–158,166 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.05.024>



移动阅读

姜在炳, 李浩哲, 许耀波, 等. 煤层顶板分段压裂水平井地质适应性分析与施工参数优化[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 183-192. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.01.0037

JIANG Zaibing, LI Haozhe, XU Yaobo, et al. Geological adaptability analysis and operational parameter optimization for staged fracturing horizontal wells in coal seam roof[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 183-192. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.01.0037

煤层顶板分段压裂水平井地质适应性 分析与施工参数优化

姜在炳, 李浩哲, 许耀波, 张 群, 李贵红, 范 耀, 降文萍, 舒建生, 庞 涛, 程 斌
(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 煤层顶板分段压裂水平井是实现碎软低渗煤层煤层气高效抽采的有效技术。依托“十三五”国家科技重大专项课题, 围绕煤层顶板分段压裂水平井煤层气高效抽采技术, 采用理论分析、数值模拟等手段, 对比不同地应力状态下裂缝的穿层扩展形态, 研究水平井布井方位与最小水平主应力方向夹角对裂缝转向扩展的影响, 分析多簇射孔条件下裂缝的竞争扩展现象。结果表明: (1) 煤层顶板分段压裂水平井技术应用于碎软低渗煤层煤层气开发具有避免钻井液污染储层、提高水平井钻井施工安全性、提高固井质量、提高压裂改造效果、控制煤粉产出等优势。(2) 地应力是裂缝穿层扩展的关键控制因素。为保证裂缝穿层扩展, 垂向应力需大于最小水平主应力, 顶板最小水平主应力需大于煤层, 并且层间应力差为 1~3 MPa 时, 既能够保证裂缝的穿层扩展效果, 也能避免裂缝的起裂和延伸压力过高; “上覆岩层-顶板-煤层”应力剖面为“低-高-中”型时, 水平井与煤层顶面的距离对于裂缝的穿层扩展效果影响较大; 推荐水平井水平段与煤层顶面距离小于 2.0 m。(3) 水平井布井方位与最小水平主应力方向夹角越大, 裂缝转向半径和转向距离越大, 在压裂段间距相同的条件下, 夹角为 45°时缝间干扰程度比夹角为 0°时强, 不利于后续压裂段裂缝扩展, 建议水平井布井方位与最小水平主应力方向夹角±15°以内。(4) 对于分段多簇压裂, 缝间应力干扰、压裂液流动摩阻、射孔孔眼摩阻共同导致各射孔簇裂缝非均匀扩展, 可通过限流压裂、裂缝暂堵等手段促进裂缝均匀扩展。(5) 工程试验取得了良好的产气效果, 裂缝延伸特征与理论研究吻合度高。研究成果可为煤层顶板水平井的施工参数优化设计和推广应用提供借鉴。

关键词: 煤层顶板; 水平井; 地质适应性; 裂缝扩展; 分段多簇压裂; 煤层气

中图分类号: TE132 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2022)03-0183-10

Geological adaptability analysis and operational parameter optimization for staged fracturing horizontal wells in coal seam roof

JIANG Zaibing, LI Haozhe, XU Yaobo, ZHANG Qun, LI Guihong, FAN Yao,
JIANG Wenping, SHU Jiansheng, PANG Tao, CHENG Bin

(Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: The technique of staged fracturing horizontal wells in coal seam roof is effective for efficient extraction of coalbed methane (CBM) in broken soft and low-permeability coal seams. With the help of the major national science and technology projects of the 13th Five Year Plan for National Economic and Social Development, the efficient extraction

收稿日期: 2022-01-15; 修回日期: 2022-02-15

基金项目: 国家科技重大专项课题(2016ZX05045-002); 国家自然科学基金面上项目(51874349)

第一作者: 姜在炳, 1970 年生, 男, 重庆人, 博士, 研究员, 博士生导师, 从事煤层气地质与煤层气开发研究工作。

E-mail: jiangzaibing@cctegxian.com

通信作者: 许耀波, 1983 年生, 男, 湖南衡阳人, 博士, 副研究员, 研究方向为煤层气开发理论与工艺技术。E-mail: xuyaobo@cctegxian.com

technology of CBM by staged fracturing horizontal wells in coal seam roof was studied. By using theoretical analysis and numerical simulation, the fracture propagation patterns in different in-situ stress states were compared, and the influence of the angle between the horizontal well layout orientation and the minimum horizontal principal stress on the fracture deflection and propagation was studied. The competitive propagation phenomenon of fractures under the condition of multi-cluster perforation was also analyzed. The results show that: (1) the staged fracturing horizontal well in coal seam roof applied to CBM development in broken, soft and low-permeability coal seams can avoid contamination of reservoirs by drilling fluid, improve the safety in horizontal well drilling, cementing, and the effect of fracturing transformation, and controlling the output of coal fine. (2) In-situ stress is the key controlling factor for fracture propagation. In order to ensure the crack propagation through the bedding plane interface, the vertical stress must be greater than the minimum horizontal stress, and the minimum horizontal stress of the roof must be greater than that of the coal seam. The interlayer stress difference of 1-3 MPa can not only ensure the effect of through-layer propagation of fractures, but also avoid excessive fracture initiation and extension pressure. When the stress profile of “overlying rock-roof-coal seam” is “low-high-medium” type, the distance between the horizontal well and the top surface of the coal seam has a great influence on fracture propagation. It is recommended that the distance between the horizontal section of the horizontal well and the top surface of the coal seam should be less than 2.0 m. (3) The larger the angle between the horizontal well and the minimum horizontal stress, the greater the fracture turning radius and turning distance. With the same fracturing spacing, the fracture interference is stronger at an angle of 45° than at an angle of 0° , which is not conducive to the propagation of subsequent fractures. It is recommended that the angle between the horizontal well and the minimum horizontal stress should be within $\pm 15^\circ$. (4) For staged multi-cluster fracturing, the fracture stress interference, fracturing fluid flow friction, and perforation friction jointly lead to non-uniform propagation of fractures for each perforation cluster, which can be controlled by using limited entry fracturing, temporary plugging, etc., to promote the uniform propagation of fractures. (5) The pilot test has achieved good gas production, and the fracture extension characteristics are in good agreement with the theoretical research. The research results can provide reference for the optimization design and application of operational parameters of horizontal wells in the coal seam roof.

Keywords: coal seam roof; horizontal well; geological suitability; fracture propagation; staged multi-cluster fracturing; coalbed methane (CBM)

在“碳达峰、碳中和”背景下,天然气需求大幅增长^[1-3]。2021年10月发布的《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》指出,加快推进页岩气、煤层气、致密油气等非常规油气资源规模化开发。我国煤层气资源丰富,2000 m以浅煤层气地质资源量30.05 万亿 m^3 ,可采资源量12.50 万亿 m^3 ^[4]。开发煤层气,不仅可以获得优质高效的清洁能源,而且可以减少温室气体的排放,助力“碳达峰碳中和”目标的实现。

碎软低渗煤层煤层气高效开发是制约我国煤层气产业化发展的技术难题之一^[5-7]。此类煤层煤体结构差,整体富气,但物性差^[8-12],煤层气开发难度大,单井产气量低。为解决该技术难题,“十二五”期间提出了煤层顶板水平井分段压裂煤层气高效抽采模式^[13-16],通过将水平井布置在煤层顶板中并实施分段压裂,实现煤层气高效抽采。中煤科工集团西安研究院有限公司在淮北芦岭煤矿实施了一口煤层顶板分段压裂水平井,分7段进行水力压裂,连续92 d日产气量稳定在10 000 m^3 以上,创造了我国碎软低渗煤层地面煤层气井日产气量超万方的新纪录^[17-19]。

“十三五”期间,依托国家科技重大专项课题“碎软低渗煤层地面煤层气抽采技术与装备”(2016ZX05045-

002),围绕煤层顶板分段压裂水平井煤层气高效抽采模式,继续开展理论支撑研究、技术优化设计、工艺装备提升、成果规模化应用^[20-28]。

在对煤层顶板分段压裂水平井抽采技术原理进行系统阐述的基础上,笔者以水力压裂有限元数值模拟为手段,以裂缝延伸规律为切入点,对煤层顶板水平井技术的地质适应性进行分析,并优化设计水平井布井距离(水平井水平段与煤层顶面的距离)、布井方位与最小水平主应力方向的夹角,探讨煤层顶板水平井分段多簇压裂的多裂缝竞争扩展问题,为煤层顶板分段压裂水平井技术的进一步推广应用提供借鉴。

1 煤层顶板分段压裂水平井技术原理

与常规水平井煤层气抽采技术不同,煤层顶板分段压裂水平井技术将水平井布置在距离煤层顶面一定距离的顶板岩层中,通过实施密切割分段水力压裂,沟通井筒与下部煤层,避免碎软煤层中水平井钻进时的易垮孔、固井质量差、压裂效果不理想等问题,以实现煤层气高效抽采,其技术原理如图1所示。其中所述的煤层顶板,是指煤层以上一定距离范围内的几层岩层的总称。



图1 煤层顶板分段压裂水平井技术原理
Fig.1 Schematic diagram of the staged fracturing horizontal well in coal seam roof

分段压裂形成的三维裂缝网络是煤层气渗流进入井筒的通道。若对煤层直接压裂,由于支撑剂在煤层中的压嵌作用^[29-30],会影响水力压裂裂缝的导流能力以及煤层气在裂缝中的渗流,尤其对于碎软煤层,裂缝更易闭合、堵塞^[31-33]。而对于煤层顶板分段压裂水平井技术,其裂缝网络和渗流模式如图2所示。顶板岩层中的裂缝能够更好地扩展并获得良好的支撑,即使煤层中裂隙间的沟通受限,但是煤层与顶板、顶板与井筒间的沟通能够得到有效保持,从而获得高产、稳产。

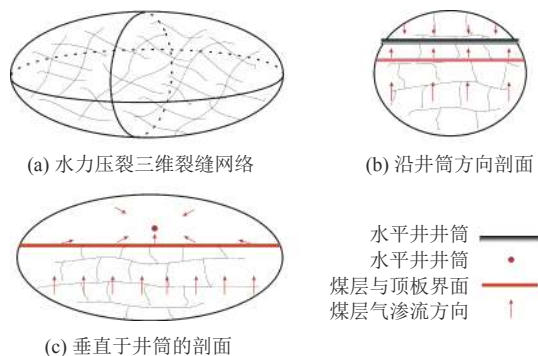


图2 煤层顶板水平井裂缝网络及渗流模式
Fig.2 Schematic diagram of the fracture network and seepage pattern of the horizontal well in the coal seam roof

与常规煤层气抽采技术相比,煤层顶板分段压裂水平井技术具有以下5方面主要优势。

(1) 将水平井布置在顶板岩层中,可避免钻井过程中钻井液直接接触煤层,避免了储层污染。

(2) 在碎软煤层中直接钻进时易垮孔、埋钻,在顶板中钻进可显著降低井下事故发生的概率,提升水平井钻井施工安全性、水平段钻进长度、钻井成功率。

(3) 在煤层顶板水平段下套管固井,固井质量要优于直接在煤层中固井,可为大规模体积压裂改造提供基础,避免水平井分段压裂时发生段间窜流。

(4) 与碎软煤层相比,煤层顶板具有高强度、高弹性模量、低泊松比的特点。从顶板压裂能够形成更长的裂缝,对水平井实施分段压裂可获得类似于页岩气井的体积压裂效果,从而提高煤层气的解吸和扩散速

率,加快煤层气井产气速度。

(5) 煤粉产出堵塞水力压裂裂缝是造成煤层气井中后期产能低的重要因素,而对于煤层顶板分段压裂水平井技术,煤层位于井筒下部,在重力作用下煤粉向井筒的运移受到抑制,降低了煤粉对通道的堵塞概率。

2 地质适应性分析

裂缝穿层扩展沟通井筒与下部煤层,为煤层气进入井筒提供高速渗流通道,是技术成功应用的关键。对于裂缝的穿层扩展,地应力起到关键控制作用。

采用数值模拟方法,研究垂向应力差异系数、地应力剖面和层间应力差对于裂缝穿层扩展的影响,建立的数值模型如图3所示。模型尺寸为10 m×20 m,网格均匀划分,尺寸0.2 m。模型设计为3层,上覆岩层厚度10 m,顶板厚度5 m,煤层厚度5 m。井筒及注入点位于煤层顶板中,井筒沿X方向,注入点距离煤层顶部2 m。采用垂直向下定向射孔,射孔孔眼长度为0.4 m。压裂液为清水,密度1000 kg/m³,黏度1.0 mPa·s,地应力状态根据研究的参数进行调整。上覆岩层、顶板岩层、煤层的岩石力学性质见表1。

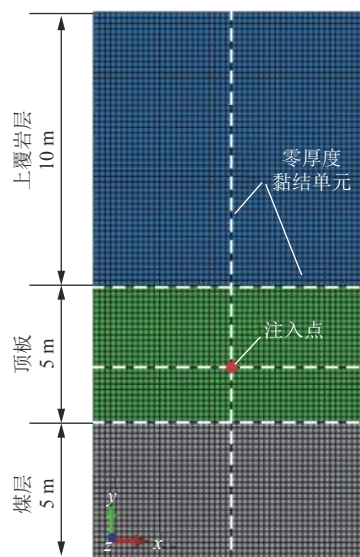


图3 穿层压裂有限元数值模拟模型
Fig.3 Finite element numerical simulation model of through-layer fracturing

地层界面性质对于裂缝的扩展形态具有重要影响,采用零厚度 Cohesive 单元表征裂缝面和地层界面。数值模拟模型中,界面抗剪切强度采用库伦准则计算,由于界面黏聚力较低,模拟中假定为0,界面摩擦因数取0.50。

2.1 垂向应力差异系数

定义垂向应力差异系数 k :

$$k = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{\sigma_h} \quad (1)$$

表 1 模型计算参数

Table 1 Simulation model parameters

参数	上覆岩层	顶板	煤层
抗拉强度/MPa	1.50	1.00	0.50
弹性模量/GPa	4.50	3.00	1.00
泊松比	0.25	0.30	0.35
渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	0.01	0.01	0.10
地层孔隙率/%	2	2	9
煤层孔隙压力/MPa	6	6	6
垂向地应力/MPa	16	16	16
最小水平主应力/MPa	14	13	12
最大水平主应力/MPa	12	11	10

式中: σ_v 、 σ_h 分别为垂向应力和最小水平主应力, MPa。

对于顶板岩层, 固定最小水平应力, 改变垂向应力为 9、11、13 和 16 MPa, 对应的垂向应力差异系数 k 为 -0.18、0、0.18 和 0.45, 研究裂缝穿层扩展情况, 结果如图 4 所示。为了清楚地观察裂缝形态, 将图中裂缝放大 100 倍。当 $k=-0.18$ 时, 垂向应力小于最小水平应力, 裂缝起裂后形成水平缝, 裂缝在顶板内扩展; 当 $k=0$ 时, 在顶板和煤层中形成复杂缝网, 既有在顶板内扩展的水平缝, 也有向煤层中穿层延伸的垂直缝, 裂缝整体穿层效果被削弱; 当垂向应力大于最小水平主应力, 裂缝起裂后形成垂直缝, 裂缝穿层扩展。较大的垂向应力差异系数能够保证裂缝从煤层顶板中起裂后形成垂直缝, 这是裂缝穿层扩展进入煤层的基础。

2.2 层间应力差

由于煤层与顶板岩石力学性质存在差异, 煤层与

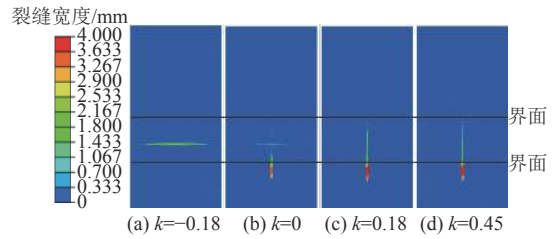


图 4 不同垂向应力差异系数裂缝扩展形态
Fig.4 Fracture propagation morphology under different vertical stress coefficients

顶板间地应力也存在差异。康红普等^[34]对我国煤矿地应力数据的统计表明, 弹性模量较大的岩石, 水平应力较高, 弹性模量较低的碎软破碎岩层, 水平应力较低。对于构造复杂区, 水平应力与岩层弹性模量成正相关关系, 因此, 对于碎软低渗煤层, 顶板的水平应力高于煤层, 淮北芦岭煤矿 8 号煤^[16] 和山西赵庄煤矿 3 号煤^[35] 的地应力数据验证了该结论, 因此, 主要研究顶板应力高于煤层的情况。

保持煤层地应力不变, 增加顶板最小水平主应力, 模拟了应力差由 0 增大至 5 MPa 时裂缝的穿层扩展形态, 结果如图 5 所示。6 种应力差条件下, 裂缝均可实现穿层扩展, 但煤层中裂缝长度和宽度不尽相同。随着应力差增大, 煤层中有效裂缝长度逐渐增大, 并且层间应力差越大, 裂缝在顶板内起裂和延伸时的压力越高, 进入煤层后流体能量瞬间释放, 有利于激活煤层内部的天然裂隙, 形成复杂缝网。较大的层间应力差可促进裂缝穿层扩展, 但是当应力差大于 3 MPa 后, 这种促进效果逐渐减弱。

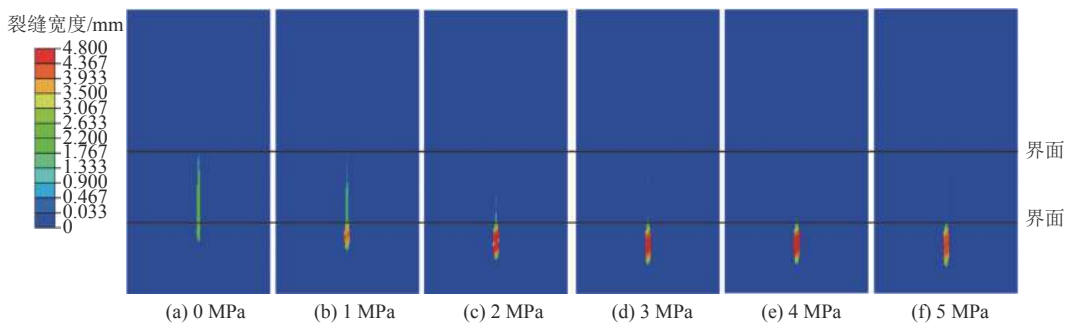


图 5 不同层间应力差条件下裂缝扩展形态
Fig.5 Fracture propagation morphology under different interlayer stresses between roof and coal seam

煤层与顶板之间不同应力差条件下, 注入压力变化如图 6 所示。裂缝从顶板起裂后进入煤层中扩展, 应力差越大, 裂缝起裂和延伸压力也越高(图 6)。当注入时间为 15~20 s 时裂缝跨煤岩界面穿层扩展, 与顶板相比, 煤层的最小水平主应力和岩石力学强度更低, 注入压力均有不同程度的下降, 层间应力差越大, 延伸压力降低幅度越明显。从裂缝起裂压力变化可以看出

(图 7), 随着层间应力差从 0 增大至 5 MPa, 起裂压力整体呈上升趋势, 并且当应力差由 0 增大至 3 MPa 时, 裂缝起裂压力增加幅度更为明显, 当应力差超过 3 MPa 后, 增加幅度趋缓。

综合考虑裂缝穿层扩展效果以及压裂施工压力, 层间应力差为 1~3 MPa 时, 既能满足裂缝穿层扩展要求, 也可避免施工压力过高。

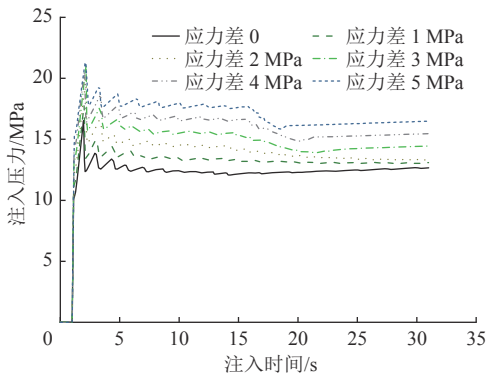


图 6 不同层间应力差条件下注入压力随时间的变化

Fig.6 Variation of injection pressure with time under different interlayer stresses between roof and coal seam

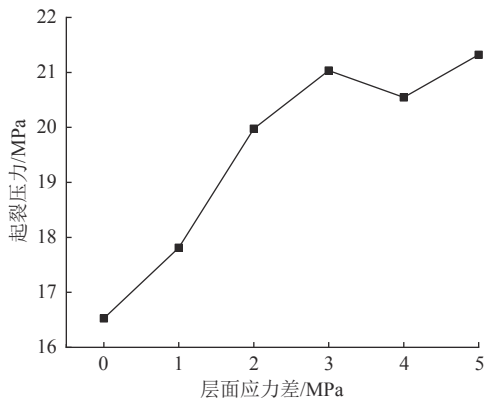


图 7 不同层间应力差条件下起裂压力的变化

Fig.7 Variation of fracture initiation pressure under different interlayer stresses between roof and coal seam

以上研究表明,为保证裂缝穿层扩展,沟通井筒与下部煤层,顶板最小水平主应力应大于煤层。而针对煤层气直井压裂改造提出的间接压裂(IFVC)技术^[36-37],则是优选顶板应力低于煤储层条件,射孔时同时射开顶板和煤层,压裂时裂缝在应力较低、脆性较强的顶板岩层中或煤层与顶板界面处扩展,使裂缝与下部煤层接触,依靠煤层本身较高的垂向渗透率,实现煤层气高效抽采。而对于煤层顶板分段压裂水平井技术,其主要针对碎软低渗煤层提出,煤层本身渗透率低,必须依靠裂缝穿层扩展,沟通井筒与煤层,为煤层气渗流提供通道,其技术原理与间接压裂技术有所不同。此外,我国煤层普遍低渗,因此,煤层顶板分段压裂水平井技术对于我国煤储层情况具有更强的适应性。

2.3 地应力剖面类型

地应力剖面对于裂缝的纵向扩展具有重要影响。“上覆岩层-顶板-煤层”可能存在不同的地应力剖面类型。

模拟了“上覆岩层-顶板-煤层”地应力剖面分别为“高-中-低”(12 MPa—11 MPa—10 MPa)、“低-高-低”(10 MPa—11 MPa—10 MPa)、“低-高-中”(9 MPa—

11 MPa—10 MPa)3 种类型时的裂缝延伸形态,结果如图 8 所示。裂缝在顶板内起裂后同时向上部和下部延伸,裂缝下端到达煤层界面后可实现穿层扩展沟通井筒与下部煤层,并且 3 种地应力剖面条件下裂缝穿层延伸效果相同。需要注意的是,模型中注入点与煤层顶面距离为 2.0 m,而顶板岩层总厚度为 5 m,裂缝从顶板起裂后,同时向上部和下部扩展,裂缝下端到达顶板下部的时间要先于裂缝上端到达顶板上部,裂缝率先进入煤层。并且由于煤层强度较低,最小水平主应力低于顶板岩层,因此,能够实现较好的穿层扩展。

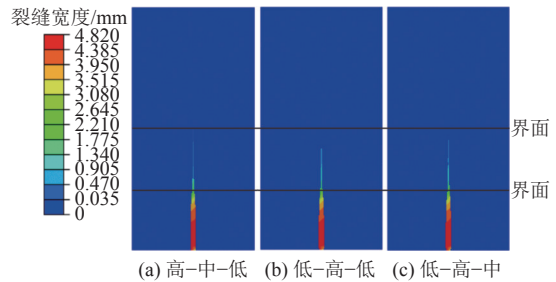


图 8 不同地应力剖面条件下裂缝穿层延伸形态

Fig.8 Fracture propagation morphology in different in-situ stress profiles

为了对比不同布井距离对于裂缝穿层扩展的影响,模拟了当距离增大至 4 m 时 3 种地应力剖面类型对应的裂缝扩展形态,结果如图 9 所示。对于“高-中-低”和“低-高-低”型地应力剖面,裂缝均可实现穿层扩展,并且“高-中-低”型煤层中裂缝长度更长,裂缝穿层扩展效果更好。对于“低-高-低”型地应力剖面,裂缝上端首先到达上覆岩层与顶板的界面,但是由于上覆岩层强度较高,抑制了裂缝向上扩展,使裂缝继续向下部煤层方向延伸实现了穿层。“低-高-中”型地应力剖面裂缝穿层扩展效果最差,裂缝在煤层顶板中扩展后进入地应力较低的上覆岩层扩展,极大地削弱了裂缝的穿层扩展效果。

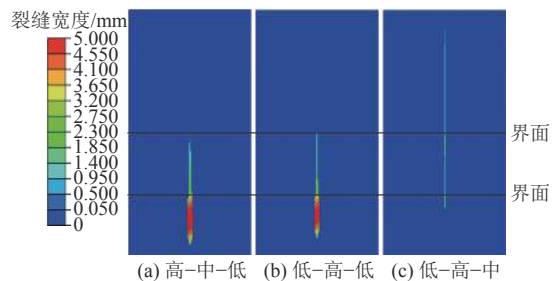


图 9 不同地应力剖面裂缝穿层延伸形态

Fig.9 Fracture propagation morphology in different in-situ stress profiles

因此,当地应力剖面为“高-中-低”和“低-高-低”型,并且煤层顶板厚度较大的岩层能够抑制裂缝向上部扩展时,水平井布置在煤层顶板岩层中均能获得较

好的穿层效果。但是当地应力剖面为“低-高-中”型时,水平井与煤层顶面的距离对于裂缝的穿层扩展效果影响很大,较大的布井距离和较高的施工排量均可能导致裂缝向顶板上部扩展失控,从而使裂缝向下穿层扩展效果变差。

水平井布井距离及钻进层位的优选需要综合考虑目标煤层附近的地应力剖面、顶板岩性组合等因素,整体而言,距离越近,裂缝穿层扩展效果越好,推荐水平段与煤层顶面距离小于 2.0 m。

3 水平井布井方位与最小水平主应力方向的夹角

采用有限元数值模拟方法,研究水平井与最小水平主应力方向呈不同夹角时,水力压裂裂缝的延伸形态,结果如图 10 所示。当水平井与最小水平主应力方向夹角较小时($0^{\circ}\sim 15^{\circ}$),水力压裂时形成与井筒垂直的横向裂缝,具有与地层较大的接触面积。随着夹角的增大($45^{\circ}\sim 60^{\circ}$),裂缝起裂后发生明显转向,最终仍旧沿着最大水平主应力方向延伸。夹角越大,裂缝转向半径和转向距离越大。裂缝转向扩展处裂缝宽度小,不利于支撑剂在裂缝内的运移,从而使支撑剂堆积在近井筒区域。并且裂缝起裂压力升高,近井迂曲摩阻增大,地面施工压力升高,不利于压裂施工。

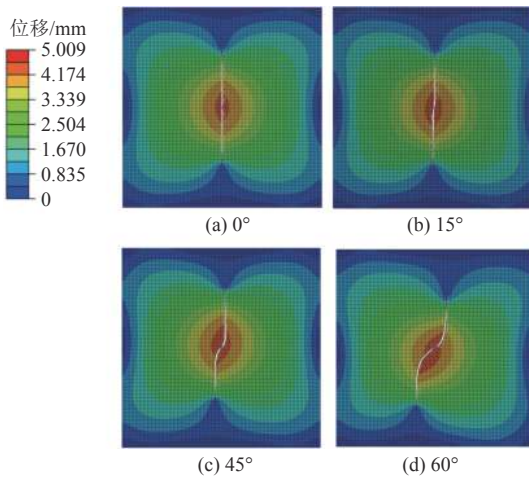


图 10 不同布井方位角条件下裂缝延伸形态
Fig.10 Fracture propagation morphology with different well placement azimuths

对于分段压裂,在压裂段间距相同的条件下,对比了水平井井筒方向与最小水平主应力方向夹角分别为 0° 和 45° 时裂缝的延伸形态,结果如图 11 所示。当夹角为 0° 时,第 1 段压裂形成的裂缝对第 2 段压裂裂缝的延伸无明显影响,裂缝两翼对称扩展,2 条裂缝均能获得充分的延伸。而当夹角为 45° 时,裂缝起裂后向最大主应力方向偏转,裂缝延伸阻力增大。第 1 段压裂形成的裂缝两翼近似对称扩展,而第 2 段压裂形

成的裂缝由于受到第 1 段压裂裂缝的影响,其两翼出现不对称扩展的情况,裂缝上翼延伸受限,主要向下部延伸,并且转向处裂缝宽度更窄,不利于支撑剂向裂缝端部输送,压裂效果变差。

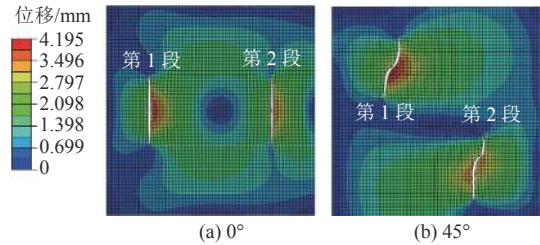


图 11 不同布井方位角双裂缝延伸形态
Fig.11 Fracture propagation morphology for double fractures with different well placement azimuths

因此,建议水平井布井方位与最小水平主应力方向夹角在 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 范围为宜。

4 水平井分段多簇压裂

针对煤层顶板水平井,模拟了单段 2 簇射孔和单段 3 簇射孔条件下裂缝的延伸形态,模型如图 12 所示。顶板岩层弹性模量 3.0 GPa、泊松比 0.30,三向主应力分别为 16.0、13.0 和 11.0 MPa。采用清水压裂,压裂液泵注排量 $10\text{ m}^3/\text{min}$,压裂液黏度 $1.0\text{ mPa}\cdot\text{s}$,压裂液密度 $1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$ 。单簇射孔数量为 15 孔和 30 孔,孔眼直径 10 mm。水平井井筒注入点位于模型右侧 2 簇射孔时,压裂液从射孔簇 1 和射孔簇 3 进入地层,射孔簇间距为 40 m。对于 3 簇射孔,压裂液同时进入射孔簇 1、射孔簇 2 和射孔簇 3,射孔簇间距为 20 m。

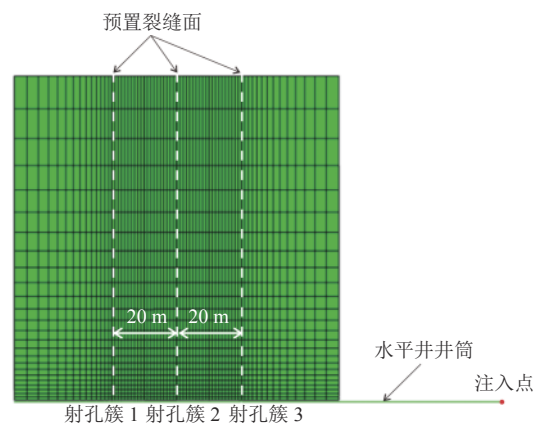


图 12 分段多簇压裂有限元数值模拟模型
Fig.12 Finite element numerical simulation model of staged multi-cluster fracturing

对于 2 簇射孔,簇间距 40 m,单簇 15 孔和单簇 30 孔的裂缝延伸形态分别如图 13a 和图 13b 所示。对于单簇射孔 15 孔情况,2 个射孔簇裂缝半长均为 46.10 m。对于单簇 30 孔的情况,裂缝半长分别为

40.96、51.77 m。由于裂缝间的竞争扩展现象,段内多裂缝扩展受到压裂液井筒流动摩阻、射孔孔眼摩阻以及缝间应力干扰作用的综合影响^[38-42],2条裂缝未能实现均匀扩展,并且射孔簇距注入点越近,获得的压裂液分配越大,裂缝扩展优势也越大。这是由于裂缝距离注入点越近,压裂液进入裂缝的流动摩阻越小。单簇30孔条件下,右侧裂缝根部受到左侧裂缝挤压,宽度降低,不利于后期支撑剂的输送。单簇15孔条件下裂缝的扩展均匀程度高于30孔,2个射孔簇裂缝长度相等。这是由于射孔孔眼数量减少,增大了射孔孔眼摩阻,起到了限流压裂作用,促进裂缝的均匀扩展,但是裂缝延伸压力也相应提高(图14)。

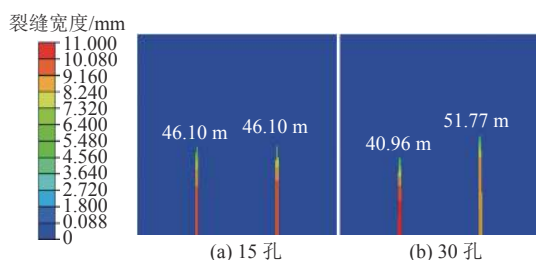


图13 2簇射孔条件下裂缝延伸形态
Fig.13 Fracture propagation morphology for two-cluster perforation

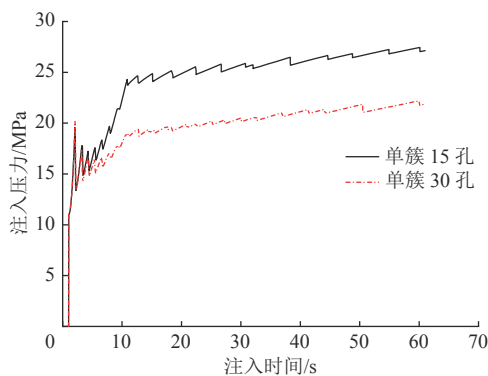


图14 2簇射孔条件下注入点压力变化
Fig.14 Variation of injection pressure at the injection point for two-cluster perforation

对于3簇射孔,簇间距20 m,单簇15孔和单簇30孔的裂缝延伸形态分别如图15a和图15b所示。单簇15孔条件下,裂缝半长分别为40.96、24.70和51.77 m;单簇30孔条件下,裂缝半长分别为40.96、4.65和46.10 m。3簇裂缝未能实现均匀扩展,由于侧边裂缝的应力干扰作用,中间裂缝的延伸受到抑制。对于单簇30孔的情况,中间射孔簇在压裂后期停止延伸,并且在两侧裂缝的应力干扰下发生闭合。而对于单簇15孔的情况,射孔孔眼摩阻提高,起到了限流压裂的作用,尽管裂缝长度较单簇30孔更加均匀,但是中间射孔簇延伸后对两侧裂缝的根部造成挤压,不利

于后期支撑剂的输送,并且裂缝延伸压力也相应提高(图16)。

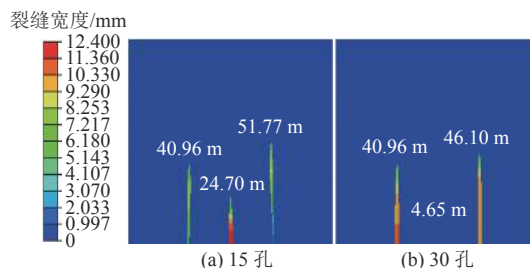


图15 三簇射孔条件下裂缝延伸形态
Fig.15 Fracture propagation morphology for three-cluster perforation

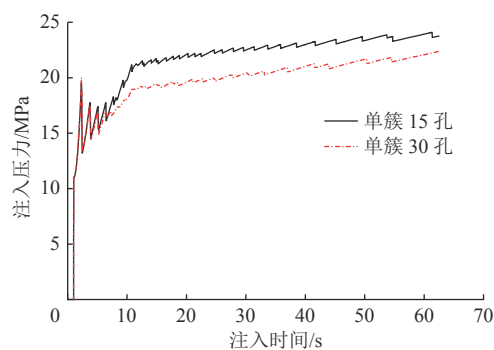


图16 3簇射孔条件下注入点注入压力变化
Fig.16 Variation of injection pressure at the injection point for three-cluster perforation

与单段单簇射孔相比,在同样的泵注排量及压裂施工规模条件下,多簇射孔能够产生多条裂缝,但是单条裂缝长度和宽度均降低,水力压裂影响范围也会减小。此外,由于多个射孔簇间的压裂液分流作用,也可能导致部分裂缝在纵向上无法实现穿层扩展,影响压裂效果。

对于煤层顶板水平井分段多簇压裂施工,多裂缝同步扩展时存在竞争扩展现象,需要综合考虑地质情况和压裂施工参数,通过优化设计射孔簇孔眼数量、簇间距等,借助限流压裂、极限限流压裂或裂缝暂堵技术^[43-45]促进段内多裂缝的均匀扩展,提高射孔簇效率及压裂改造效果。

5 工程验证

基于上述研究成果,在晋城矿区某井田开展工程应用。在含气量较高($\geq 10 \text{ m}^3/\text{t}$)、煤层厚度较大($\geq 4.0 \text{ m}$)的优选区域,开展煤层顶板分段压裂水平井煤层气抽采工程试验。根据室内实验测试结果,目标煤层顶板弹性模量2.73 GPa,泊松比0.25,煤层坚固性系数0.62,弹性模量0.95 GPa,泊松比0.35。

水平井沿最小水平主应力布置,为保证裂缝穿层扩展,沟通井筒与下部煤层,设计水平井与煤层顶面距

离在 2.0 m 以内。X-01 井水平段长 746.86 m, 分 8 段进行水力压裂改造, 其中第 3 段分 2 簇射孔, 单簇射孔

数量为 30 孔。施工过程中对第 3 段和第 7 段进行微地震监测, 监测及解释结果见表 2。

表 2 水平井压裂裂缝微地震监测结果
Table 2 Microseismic monitoring results of horizontal well hydraulic fracturing

裂缝参数		第3段		第7段
		1 357~1 360 m	1 317~1 320 m	947~950 m
裂缝长度/m	左翼长度	43	46	100
	右翼长度	未检测到有效裂缝	68	74
裂缝高度/m		11	16	12
裂缝方位		SW 70°	NE 49°	NE 45°
裂缝产状		垂直	垂直	垂直

微地震监测结果表明, 2 段主裂缝产状均为垂直裂缝, 裂缝穿层扩展, 实现了煤层与水平井筒之间的沟通, 且从缝长、缝高判断, 2 段压裂均形成了具有一定导流能力裂缝, 实现对煤层的强化改造, 取得了良好的压裂改造效果。第 7 段压裂形成的裂缝高度比第 3 段小、裂缝长度比第 3 段长, 改造效果优于第 3 段, 由此也验证了顶板水平井距离煤层的距离越近、压裂施工压力越低, 定向穿层压裂效果越好的理论认识。同时, 从第 3 段压裂施工效果也可以看出, 两射孔簇裂缝未能实现均匀扩展, 并且距离井口近的射孔簇裂缝延伸效果优于远端射孔簇, 与前文单簇 30 孔射孔施工时裂缝非均匀扩展数值模拟结果相吻合。

X-01 井自 2019 年 1 月开始排采, 最高日产气量 1.15 万 m³, 稳产 6 000~8 000 m³。截至 2020 年 12 月累计产气 325 万 m³, 目前稳产 4 000~5 000 m³, 取得了良好的生产效果, 由此也验证了煤层顶板分段压裂裂缝延伸规律的正确性。

6 结论

a. 煤层顶板分段压裂水平井煤层气抽采技术通过优化布井位置, 解决了碎软低渗煤层煤层气高效抽采难题, 利用顶板岩层中分段压裂形成的稳定支撑裂缝, 实现碎软低渗煤层煤层气井的高产和稳产, 具有避免钻井液污染储层、提高水平井钻井施工安全性、提高固井质量、提高压裂改造效果和减少煤粉堵塞通道等综合技术优势。

b. 较大的垂向应力差异系数能够保证裂缝在顶板内起裂后形成垂直缝。顶板与煤层的层间应力差为 1~3 MPa 时, 既能够保证裂缝的穿层扩展, 也能避免裂缝的起裂和延伸压力过高。

c. 当地应力剖面为“高-中-低”和“低-高-低”型, 并且顶板岩层上部具有厚度较大的岩层能够抑制裂缝向上部扩展时, 水平井布置在顶板岩层中均能获得较

好的穿层效果。而对于“低-高-中”型应力剖面, 布井距离对于裂缝的穿层扩展效果影响较大, 整体而言, 水平井布井距离越小, 裂缝穿层扩展效果越好。

d. 水平井布井方位与最小水平主应力方向夹角越大, 裂缝扩展的转向半径和转向距离越大, 越不利于裂缝延伸和支撑剂输送, 并且同样的压裂段间距条件下, 当夹角为 0°时缝间干扰程度小于夹角为 45°的情况, 优化水平井布井方位与最小水平主应力方向夹角为±15°以内。

e. 煤层顶板分段压裂水平井工程应用取得了良好的产气效果, 可为相似地层条件煤层气高效抽采提供借鉴。

参考文献(References)

- [1] 周守为, 朱军龙. 助力“碳达峰、碳中和”战略的路径探索[J]. *天然气工业*, 2021, 41(12): 1-8.
ZHOU Shouwei, ZHU Junlong. Exploration of ways to helping “Carbon Peak and Neutrality” strategy[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(12): 1-8.
- [2] 孙海萍, 张胜军, 徐立昊, 等. “双碳”目标下中国油气行业低碳发展措施与路径探讨[J]. *油气与新能源*, 2021, 33(5): 27-31.
SUN Haiping, ZHANG Shengjun, XU Lihao, et al. Discussion on low-carbon development measures and paths of China's oil and gas industry under the goals of “Dual Carbon” [J]. *Petroleum and New Energy*, 2021, 33(5): 27-31.
- [3] 刘合, 梁坤, 张国生, 等. 碳达峰、碳中和约束下我国天然气发展策略研究[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 33-42.
LIU He, LIANG Kun, ZHANG Guosheng, et al. China's natural gas development strategy under the constraints of carbon peak and carbon neutrality[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 33-42.
- [4] 张道勇, 朱杰, 赵先良, 等. 全国煤层气资源动态评价与可利用性分析[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(6): 1598-1604.
ZHANG Daoyong, ZHU Jie, ZHAO Xianliang, et al. Dynamic assessment of coalbed methane resources and availability in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1598-1604.

- [5] 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.
- [6] 申宝宏, 刘见中, 雷毅. 我国煤矿区煤层气开发利用技术现状及展望[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(2): 1-4.
SHEN Baohong, LIU Jianzhong, LEI Yi. Present status and prospects of coalbed methane development and utilization technology of coal mine area in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(2): 1-4.
- [7] 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.
- [8] 姜波, 据宜文. 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 petrophysical features[J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(5): 27-29.
- [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] LI Ming, JIANG Bo, LIN Shoufa, et al. Tectonically deformed coal types and pore structures in Puhe and Shanchahe coal mines in western Guizhou[J]. *Mining Science and Technology(China)*, 2011, 21: 353-357.
- [11] HOU Quanlin, LI Huijun, FAN Junjia, et al. Structure and coalbed methane occurrence in tectonically deformed coals[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(11): 1755-1763.
- [12] PAN Jienan, ZHU Haitao, HOU Quanlin, et al. Macromolecular and pore structures of Chinese tectonically deformed coal studied by atomic force microscopy[J]. *Fuel*, 2015, 139: 94-101.
- [13] 张群, 姜在炳, 李彬刚, 等. 一种煤层气分段压裂水平井强化抽采方法: CN103967472B[P]. 2016-08-31.
- [14] 张群, 姜在炳, 李彬刚, 等. 碎软低渗煤层顶板或底板分段压裂水平井煤层气抽采方法: CN112983385B[P]. 2021-08-10.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 姜在炳, 李浩哲, 方良才, 等. 紧邻碎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(Sup.2): 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(Sup.2): 922-931.
- [21] 巩泽文, 贾建称, 许耀波, 等. 基于测井信息的煤层顶板水平井抽采煤层气技术[J]. *天然气工业*, 2021, 41(2): 83-91.
GONG Zewen, JIA Jiancheng, XU Yaobo, et al. The coal seam roof strata-in horizontal well CBM gas drainage technology based on logging information[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(2): 83-91.
- [22] 许耀波. 应力干扰下煤层顶板水平井穿层分段压裂规律[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(4): 11-18.
XU Yaobo. Layer-penetrating staged fracturing law of horizontal wells within roof of coal seams under stress interference[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(4): 11-18.
- [23] 胡歆彭, 赵永哲, 徐堪社, 等. 黔北矿区煤层顶板水平井钻井关键技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(1): 227-232.
HU Xinpeng, ZHAO Yongzhe, XU Kanshe, et al. The key technology for drilling horizontal well in coal seam roof in Qianbei mining area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(1): 227-232.
- [24] 方佳伟, 韩保山, 周加佳, 等. 基于工作面全覆盖的地面瓦斯高效抽采模式研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(3): 81-85.
FANG Jiawei, HAN Baoshan, ZHOU Jiajia, et al. Surface efficient gas extraction mode based on full coverage of working face[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(3): 81-85.
- [25] 李浩哲, 姜在炳, 舒建生, 等. 水力裂缝在煤岩界面处穿层扩展规律的数值模拟[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(2): 106-113.
LI Haozhe, JIANG Zaibing, SHU Jiansheng, et al. Numerical simulation of layer-crossing propagation behavior of hydraulic fractures at coal-rock interface[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(2): 106-113.
- [26] 张东亮. 碎软低渗煤层顶板水平井条带瓦斯预抽技术[J]. *煤矿安全*, 2019, 50(4): 72-76.
ZHANG Dongliang. Strip gas pre-pumping technology in horizontal well of broken soft and low permeability coal seam roof[J]. *Safety in Coal Mines*, 2019, 50(4): 72-76.
- [27] 巫修平, 张群. 碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂裂缝扩展规

- 律及控制机制[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(2): 268-276.
- WU Xiuping, ZHANG Qun. Research on controlling mechanism of fracture propagation of multi-stage hydraulic fracturing horizontal well in roof of broken soft and low permeability coal seam[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(2): 268-276.
- [28] 李浩哲, 姜在炳, 范耀. 基于裂缝尖端应力强度因子的裂缝穿层行为分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(1): 76-82.
- LI Haozhe, JIANG Zaibing, FAN Yao. Analysis of crack across-layer extension behavior based on stress intensity factor at crack tip[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2019, 34(1): 76-82.
- [29] 成巧耘, 李波波, 李建华, 等. 考虑支撑剂压实和嵌入作用的滑脱效应及渗流机制[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 88-97.
- CHENG Qiaoyun, LI Bobo, LI Jianhua, et al. Slippage effect and the seepage mechanism considering the compaction and embedding action of proppant[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 88-97.
- [30] 唐方璇. 松软煤层支撑裂缝导流能力影响因素研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- TANG Fangxuan. Study on influence factors of fracture proppants conductivity in soft coal seam[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [31] 雷毅, 武文宾, 陈久福. 松软煤层井下水力压裂增透技术及应用[J]. 煤矿开采, 2015, 20(1): 105-107.
- LEI Yi, WU Wenbin, CHEN Jiufu. Technology of underground permeability improvement of soft coal-seam with hydrofracture and its application[J]. Coal Mining Technology, 2015, 20(1): 105-107.
- [32] 雷毅. 松软煤层井下水力压裂致裂机理及应用研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2014.
- LEI Yi. Study on mechanism and application of hydraulic fracturing in soft seam underground mine[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2014.
- [33] 郑同社. 水力压裂煤储层卸压增透技术的适用性分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2013, 32(5): 536-539.
- ZHENG Tongshe. Adaptability analysis of technique to improve gas permeability of coal seam by hydraulic fracturing[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2013, 32(5): 536-539.
- [34] 康红普, 伊丙鼎, 高富强, 等. 中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 23-33.
- KANG Hongpu, YI Bingding, GAO Fuqiang, et al. Database and characteristics of underground in-situ stress distribution in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 23-33.
- [35] 许耀波, 郭盛强. 软硬煤复合的煤层气水平井分段压裂技术及应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 1169-1177.
- XU Yaobo, GUO Shengqiang. Technology and application of staged fracturing in coalbed methane horizontal well of soft and hard coal composite coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 1169-1177.
- [36] OLSEN T N, BRENIZE G, FRENZEL T. Improvement processes for coalbed natural gas completion and stimulation[C]. SPE 84122, 2003.
- [37] OLSEN T N, BRATTON T R, DONALD A, et al. Application of indirect fracturing for efficient stimulation of coalbed methane[C]. SPE 107985, 2007.
- [38] 郭建春, 赵志红, 路千里, 等. 深层页岩缝网压裂关键力学理论研究进展[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 102-117.
- GUO Jianchun, ZHAO Zhihong, LU Qianli, et al. Research progress in key mechanical theories of deep shale network fracturing[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 102-117.
- [39] 赵金洲, 王强, 胡永全, 等. 多孔眼裂缝竞争起裂与扩展数值模拟[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(10): 1343-1354.
- ZHAO Jinzhou, WANG Qiang, HU Yongquan, et al. Numerical simulation of multi-hole fracture competition initiation and propagation[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(10): 1343-1354.
- [40] 周彤, 张士诚, 陈铭, 等. 水平井多簇压裂裂缝的竞争扩展与控制[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(4): 469-478.
- ZHOU Tong, ZHANG Shicheng, CHEN Ming, et al. Competitive propagation of multi-fractures and their control on multi-clustered fracturing of horizontal wells[J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, 49(4): 469-478.
- [41] 程万, 蒋国盛, 周治东, 等. 水平井中多条裂缝同步扩展时裂缝竞争机制[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4448-4456.
- CHENG Wan, JIANG Guosheng, ZHOU Zhidong, et al. Fracture competition of simultaneous propagation of multiple hydraulic fractures in a horizontal well[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12): 4448-4456.
- [42] WU Kan, OLSON J, BALHOFF M T, et al. Numerical analysis for promoting uniform development of simultaneous multiple-fracture propagation in horizontal wells[J]. SPE Production & Operations, 2016, 32(1): 41-50.
- [43] MURPHREE C, KINTZING M, ROBINSON S, et al. Evaluating limited entry perforating & diverter completion techniques with ultrasonic perforation imaging & fiber optic DTS warm-backs[C]. SPE 199712, 2020.
- [44] SOMANCHI K, BREWER J, REYNOLDS A. Extreme limited entry design improves distribution efficiency in plug-n-perf completions: Insights from fiber-optic diagnostics[C]. SPE 184834, 2017.
- [45] 陈钊, 王天一, 姜馨淳, 等. 页岩气水平井段内多簇压裂暂堵技术的数值模拟研究及先导实验[J]. 天然气工业, 2021, 41(增刊1): 158-163.
- CHEN Zhao, WANG Tianyi, JIANG Xinchun, et al. Numerical simulation study and pilot test of multi-cluster fracturing and temporary plugging technology in the horizontal hole section of shale-gas horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(Sup.1): 158-163.

(责任编辑 范章群)