



顶板水平井分段分簇压裂治理掘进巷道瓦斯模式研究

王博 侯恩科 马良 孙四清 杜新峰 杨建超 王正喜 单元伟

引用本文：

王博, 侯恩科, 马良, 等. 顶板水平井分段分簇压裂治理掘进巷道瓦斯模式研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 114–126.
WANG Bo, HOU Enke, MA Liang. Study on the model of staged and cluster fracturing to control the gas in driving roadway by horizontal well in roof strata[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 114–126.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0736>

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>

水力压裂分段射孔簇多裂缝空间偏转模拟研究

Simulation investigation on spatial deflection of multiples fractures of multistage perforation clusters in hydraulic fracturing
煤炭科学技术. 2023, 51(9): 160–169 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1358>

分段水力压裂弱化采场坚硬顶板围岩控制技术研究

Study on surrounding rock control technology for weakened hard roof of stope by staged hydraulic fracturing
煤炭科学技术. 2022, 50(8): 50–59 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0776b09b-df68-43fc-9911-6c9b63865d6b>

碎软低渗煤层顶板定向长钻孔水力加砂分段压裂工程应用

Application of hydraulic sand staged fracturing in directional long drilling of roof in broken soft and low permeability coal seam
煤炭科学技术. 2022, 50(8): 91–100 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/204a7b71-ca79-44e7-8801-b7e71f5238be>

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>

煤层气直井压裂效果及其对产能影响

Hydraulic fracturing effect of CBM vertical well and its impact on productivity: a case study of Yaojie Mining Area
煤炭科学技术. 2023, 51(6): 130–136 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0539>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王博,侯恩科,马良,等.顶板水平井分段分簇压裂治理掘进巷道瓦斯模式研究[J].煤炭科学技术,2024,52(5):114-126.

WANG Bo, HOU Enke, MA Liang, et al. Study on the model of staged and cluster fracturing to control the gas in driving roadway by horizontal well in roof strata[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 114-126.

顶板水平井分段分簇压裂治理掘进巷道瓦斯模式研究

王博^{1,2},侯恩科¹,马良^{2,3},孙四清²,杜新峰²,杨建超²,王正喜²,单元伟²

(1. 西安科技大学 地质与环境学院,陕西 西安 710054; 2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司,陕西 西安 710077;

3. 中国地质大学 地球科学学院,湖北 武汉 430074)

摘要:为了解决淮南矿区碎软低渗煤层掘进巷道瓦斯抽采效率低的问题,提出了煤层顶板水平井分段分簇压裂瓦斯治理模式。运用数值模拟方法和物理相似模拟方法研究了煤层顶板水平井水力压裂裂缝扩展过程;运用产能模拟的方法研究了分段分簇压裂的产气效果,对分簇压裂和不分簇压裂进行了剩余瓦斯含量对比分析。裂缝扩展数值模拟结果表明:煤层顶板水平井内的裂缝能够扩展至煤层,将煤层全部压开,且由于煤层的塑性大于顶板砂质泥岩,煤层形成比顶板更为宽泛的压裂缝。裂缝扩展物理相似模拟结果表明:在考虑了泥岩伪顶发育的条件下,水平钻孔布置在碎软煤层顶板的砂岩内,在合理的垂直距离和大排量压裂液施工的环境下,若煤层发育有较薄的泥岩伪顶,裂缝能沿着射孔孔眼穿过直接顶-伪顶界面(粉砂岩-泥岩界面)和伪顶-煤层界面(泥岩-煤层界面),扩展至下伏煤层内,裂缝延伸形成1条弯曲不规则的阶梯型裂缝,能实现对碎软煤层的压裂改造目标。但是,当煤层发育有较厚的泥岩伪顶时,泥岩对水力压裂产生了阻挡作用,导致裂缝难以压开下伏煤层。产能模拟结果表明:在相同的地层环境和施工条件下,经过3 a的抽采,单段不分簇压裂能够产生更大的瓦斯抽采影响范围,但不能均匀降低掘进巷道的瓦斯含量,压裂段之间出现了瓦斯抽采空白带,分簇压裂产生的瓦斯抽采影响范围小,却能够更均匀的降低掘进巷道的瓦斯含量。经过在淮南地区潘谢煤矿的工程验证,在10 m³/min的施工排量下,裂缝长度最长可以达到193.8 m,最大缝高27.0 m,单井日产气量最高达到1 490 m³/d,2 a的瓦斯抽采量达到31×10⁴ m³,说明煤层顶板水平井分段分簇压裂技术是淮南地区碎软低渗煤层掘进巷道瓦斯高效抽采的有效模式。

关键词:掘进巷道;瓦斯治理;顶板水平井;分段分簇压裂;裂缝形态;产能模拟

中图分类号:TD712.6 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2024)05-0114-13

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

WANG Bo^{1,2}, HOU Enke¹, MA Liang^{2,3}, SUN Siqing², DU Xinfeng², YANG Jianchao²,
WANG Zhengxi², SHAN Yuanwei²

(1. School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China; 3. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: To address the issue of low gas extraction efficiency in driving roadway of broken soft and low permeability coal seams in Huainan mining area, a model of segmented cluster fracturing gas management in horizontal wells at the roof of coal seams was proposed. The crack expansion process of hydraulic fracturing in horizontal wells of coal seam roof was studied using numerical simulation and physical similarity simulation methods. The gas production effect of segmented and clustered fracturing was investigated using productivity simulation, and a comparative analysis of residual gas content between fracturing in clusters and without clustering was conducted. The numerical simulation results of crack extension shown that, the cracks in the horizontal wells at the roof of coal seam could expand to the

收稿日期:2023-05-19 责任编辑:宫在萍 DOI: 10.12438/cst.2023-0736

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42374176);陕西省自然科学基础研究计划重点资助项目(2022JZ-16);陕西省创新能力支撑计划资助项目(2022TD-02)

作者简介:王博(1985—),男,陕西西安人,助理研究员,博士研究生。E-mail: 351947527@qq.com

coal seam and open up the coal seam completely. Due to the plasticity of the coal seam was greater than that of the sandy mudstone at the roof, a wider fracturing crack was formed in the coal seam than at the roof. The physical similarity simulation results of crack extension shown that, considering the development of the mudstone pseudo-roof, when the horizontal drilling was placed in the sandstone at the roof of the broken soft coal seam, and under reasonable vertical distances and high-displacement fracturing fluid construction, if coal seam developed a relatively thin mudstone pseudo-roof, the fractures could extend through the interface of direct roof and pseudo roof (siltstone-mudstone interface) and the interface of pseudo-roof and coal seam (mudstone-coal seam interface) along the shot hole aperture and into the underlying coal seam. The fractures extended to form a curved and irregular step-like pattern, which can achieve the goal of fracturing and reforming the broken soft coal seam. However, when the coal seam developed a thick mudstone pseudo-roof, it had a blocking effect on hydraulic fracturing, making it difficult for the cracks to open up the underlying coal seam. The productivity simulation results shown that, under the same stratigraphic environment and construction conditions, after 3 years of extraction, single-stage non-cluster fracturing could produce a larger gas extraction impact range. However, the gas content of driving roadway could not be uniformly reduced, and there was a gas extraction gap between the fractured segments. Fracturing in clusters produced a smaller gas extraction impact, but it could more evenly reduce the gas content in driving roadway. After the engineering verification in the Panxie coal mine in Huainan, with a construction discharge of $10 \text{ m}^3/\text{min}$, the longest fracture length could reach up to 193.8 m, the maximum height of fracture was 27.0 m, and the daily gas production of a single well reached $1490 \text{ m}^3/\text{d}$. The gas extraction volume of 2 years was $31 \times 10^4 \text{ m}^3$, indicating that the segmented and cluster fracturing technology of horizontal wells at the coal seam roof was an effective model for efficient gas extraction in the driving roadway of broken soft and low-permeability coal seams in Huainan area.

Key words: driving roadway; gas control; roof strata-in horizontal well; staged and cluster fracturing; fracture morphology; productivity simulation

0 引言

淮南煤矿区煤层破碎,瓦斯含量高,煤层透气性低,在这类煤层中进行常规瓦斯抽采钻探,由于煤层破碎、孔壁易发生坍塌,不利于钻孔施工,瓦斯治理效率低,对矿井安全造成了严重的威胁^[1-2]。对于碎软煤层,煤矿企业已开发出了保护层卸压开采^[3]、底抽巷定向穿层孔^[4]、本煤层顺层孔^[5]等抽采方式,并结合井下高压水力割缝^[6-7]、水力压裂^[8-10]等多种瓦斯增透措施进行消灾。保护层卸压开采或底抽巷定向穿层孔瓦斯抽采模式需要进行巷道掘进施工,其治理费用高,速度慢,采掘接替问题突出,降低了煤炭企业的经济效益。本煤层顺层孔瓦斯抽采模式在淮南矿区遇到了钻探施工困难,表现在抽采范围小,瓦斯浓度衰减快等问题^[11]。近年来一些煤矿尝试在煤矿井下开展水力压裂瓦斯增透措施,刘乐等^[12]、陈冬冬等^[13]研究了井下煤层顶板水平井分段压裂瓦斯增透技术,然而井下环境的限制导致压裂泵施工排量一般小于 $2 \text{ m}^3/\text{min}$,不能大规模加砂,压裂效果不显著,抽采结果参差不齐^[14]。为应对深部煤层瓦斯灾害,提前做好深部煤层瓦斯治理技术储备,淮南煤矿区创新了地面瓦斯治理模式^[15-16],即选择在紧邻煤层顶板中施工大直径定向“U”型井,然后在顶板内向下伏煤层定向射孔,最后实施分段分簇压裂,使用排采井进行瓦斯集中抽采,能够快速降低煤层瓦斯含量和压力。煤层顶板水平井压裂施工排量大,抽采浓度高,抽采的瓦斯可以全部用于发电,是实现

“双碳”目标的可靠路径^[17]。姜在炳等^[18]、庞涛等^[19]根据“顶板-煤层”模型,通过数值模拟的方法研究了裂缝的穿层规律,巫修平^[20]、李全贵等^[21]利用物理相似的方法对顶板分段压裂裂缝的扩展规律进行了分析,许耀波等^[22]对煤层顶板水平井压裂间距进行了优化研究,认为压裂间距过小会导致裂缝之间产生干扰。以往研究多假设煤层顶板是单一岩层,然而根据井下揭露及地面钻孔岩心分析,煤层往往不是和直接顶接触,淮南矿区煤层普遍发育有一层厚 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$ 的含炭泥岩伪顶,因此,水力压裂必须考虑泥岩夹层对压裂裂缝扩展的影响。同时,以往煤层顶板水平井分段压裂,主要以压裂段的间距为主进行研究^[23],对分簇压裂研究较少,但是在掘进巷道条带瓦斯抽采需要考虑抽采的均一性。笔者以淮南矿区潘谢煤矿为例,在考虑煤层顶板沉积有泥岩伪顶的基础上,研究了煤层顶板水平长钻孔裂缝穿层延展特性,对比了单段不分簇与单段分3簇的瓦斯抽采效果,最后结合了现场工程应用,阐述了煤层顶板水平井分段分簇压裂掘进巷道瓦斯抽采技术,可为淮南矿区区域瓦斯治理的工程布置方式提供理论依据。

1 地质背景及煤层顶板水平井分段分簇压裂瓦斯抽采方法

1.1 地质背景

淮南矿区在地层区划上属华北地层区淮河地层分区淮南地层小区。煤层主要赋存有二叠系山西组、下石盒子组和上石盒子组,主采13-1煤层赋存于下

石河子组中部,平均厚度为6.70 m,全区可采,含多层夹矸,煤层结构较复杂。伪顶为黑色炭质泥岩,直接顶为深灰色粉砂岩;基本顶为灰白色细粒砂岩。底板为深灰色泥岩或砂质泥岩,可见植物化石。13-1煤层遭受强烈的韧性变形改造,以糜棱煤和鳞片煤为主,碎粒煤仅见于煤层上部和下部,其中糜棱煤和鳞片煤的煤体坚固性系数为0.32~0.50,煤体破碎。瓦斯含量为10.78~17.22 m³/t,平均15.28 m³/t。

1.2 煤层顶板水平井分段分簇压裂瓦斯治理方法

淮南地区为碎软煤层,直接在煤层中施工钻孔易发生塌孔,因此工程采用“U”型煤层顶板分段压裂水平井进行地面瓦斯抽采,将水平段轨迹控制在距离目标煤层(13-1煤层)顶界2 m的范围内,在水平段向下定向射孔和分段分簇压裂,实现水平井眼与目标煤层的有效沟通,利用煤层顶板相对较强的脆性造长缝,提高压裂改造效果,在水平井末端施工垂直井进行排采,实现瓦斯高效抽采,如图1所示。

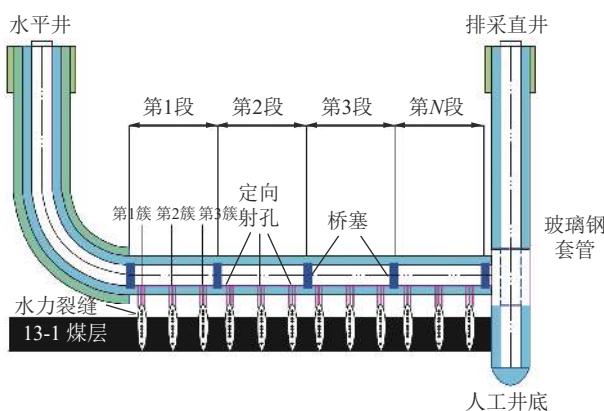


图1 顶板水平井分段分簇压裂模式示意

Fig.1 Schematic of staged and clustered fracturing mode with strata-in horizontal well

通过井下水力压裂法测得潘谢矿最大水平主应力16.30 MPa,最小水平主应力14.00 MPa,垂直应力17.74 MPa,垂直应力大于水平应力。因此,顶煤水平井分段分簇水力压裂将形成垂直裂缝网。由于顶板的弹性模量更大,受到的水平应力一般大于煤层的水平应力,能够使顶板中形成的垂直裂缝扩展延伸到煤层,提高煤层的增透效果^[24]。

2 裂缝穿层特征

2.1 裂缝穿层特征数值模拟

2.1.1 模型参数设置

基于ABAQUS有限元数值模拟软件,应用扩展有限元(XFEM)的方法模拟水力压裂裂缝的穿层扩展规律。建立的二维数值模拟模型如图2所示,模

型宽高设定为25 m×20 m,采用四边形单元,每个单元宽和高均为0.2 m,模型划分形成12 500个单元。模型从上至下划分为5层,即基本顶细粒砂岩6 m,直接顶粉砂岩3 m,伪顶泥岩1 m,煤层6 m,底板泥岩4 m,水平井的位置部署在距离煤层伪顶1 m的粉砂岩顶板内。插入XFEM单元格作为起裂点,模拟向下射孔深度0.5 m,压裂液选择清水,水平井压裂施工排量为11 m³/min,压裂液黏度1.0 Pa·s,压裂时间100 s;以淮南矿区潘谢矿实测岩石力学参数、渗透率及地应力数据为依据进行了参数的选取,见表1。

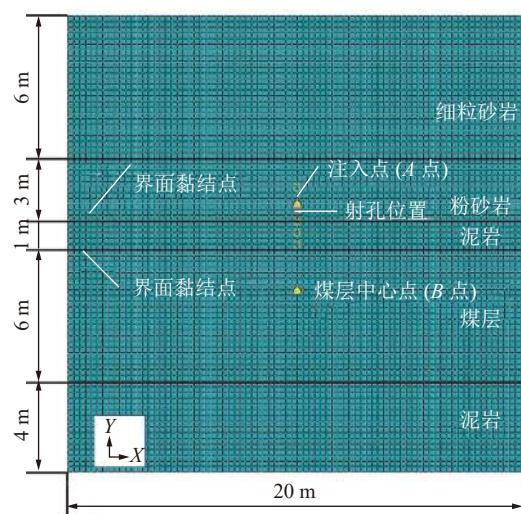


图2 裂缝穿层数值模拟模型示意

Fig.2 Schematic of numerical simulation model for fracturing and fracture perforation

表1 压裂模型计算参数

Table 1 Calculation parameters of fracturing model

岩层	细粒砂岩	粉砂岩	泥岩	煤层	泥岩
弹性模量/GPa	20.00	15.50	11.80	5.10	11.80
泊松比	0.23	0.25	0.28	0.33	0.28
抗拉强度/MPa	4.50	2.42	1.75	0.50	1.75
密度/(t·m ⁻³)	2.54	2.05	1.85	1.35	1.85
渗透率/μm ²	2×10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻³
垂向地应力/MPa	17.74	17.74	17.74	17.74	17.74
最大水平主应力/MPa	16.30	16.30	16.30	16.30	16.30
最小水平主应力/MPa	14.00	13.50	13.00	10.00	14.00

为准确反映界面的黏结特性,在数值模拟模型中采用零厚度黏结cohesive单元层对其性质进行表征,模型中共插入4个零厚度黏结cohesive单元层,用于表征煤岩界面;由于煤层割理发育,表面处理光滑平整,因此煤层和泥岩一侧的胶结强度远小于泥岩和砂岩一侧。在实际地面钻井过程中,含有煤层

与顶板界面的岩样较难获取,对于煤体结构碎软的煤层尤其如此,结合以往学者的研究成果^[25-27],由上而下设置细粒砂岩-粉砂岩界面抗拉强度4 MPa,抗剪强度9 MPa;粉砂岩-泥岩界面的抗拉强度3 MPa,抗剪强度7 MPa;煤层-泥岩界面的抗拉强度1 MPa,抗剪强度2 MPa;在粉砂岩顶板注入点和煤层中部分别设置观测点A、B,统计压裂期间岩体裂缝宽度变化情况。提取模型在不同时刻形成的裂缝形态图,对穿层扩展规律进行分析。

2.1.2 数值模拟结果分析

通过裂缝宽度监测点统计数据,如图3和图4所示,由于煤层的塑性比顶板泥岩大,可以形成比顶板更为宽泛的压裂缝。图5为压裂裂缝应力剖面图。从图5可以看出,裂缝扩展是一个渐进过程,压裂初始阶段裂缝主要在煤层顶板砂质泥岩内扩展,此时裂缝会沿着纵向高度向上覆顶板砂岩和下伏煤层同时扩展,扩展速度较快。当裂缝扩展到上界面时,裂缝内压力难以压开顶板细砂岩。在定向射孔的诱导作用下,裂缝向下传递,在直接顶板-伪顶分界面(粉砂岩-泥岩界面)会产生较大的阻力,当应力达到一定程度时,裂缝会穿过直接顶板-伪顶分界面(粉砂岩-泥岩界面);当裂缝到达(伪顶-煤层分界面)泥岩-煤层分界面时,产生的阻力较小,最终穿透煤岩层界面把煤层全部压开。

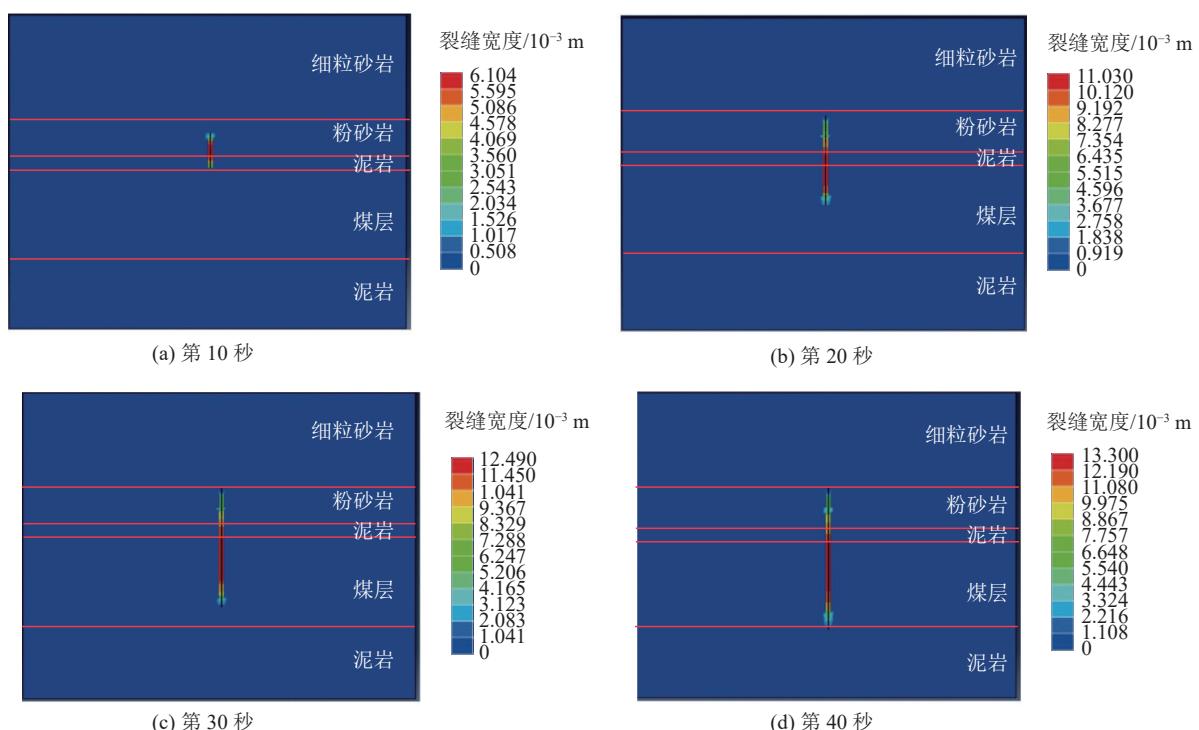


图4 压裂裂缝宽度剖面
Fig.4 Fracturing crack width profile

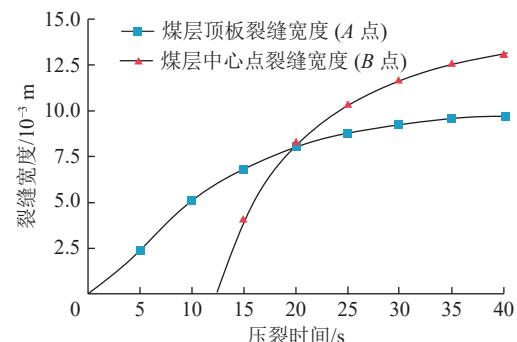


图3 压裂裂缝宽度统计
Fig.3 Statistical of fracture width

2.2 裂缝穿层特性物理相似模拟

为了验证顶板水平井裂缝穿层数值模拟的正确性,开展了2组室内物理相似模拟研究,对裂缝穿层特性加以证明。试验选择在中国石油大学(北京)岩石力学实验室开展。

2.2.1 物理相似模型的制作

通过对煤层顶板水平长钻孔进行水力压裂室内物理模拟试验,研究水力压裂裂缝在煤岩层内的扩展规律及穿层机理。淮南矿区13-1煤层多发育1层泥岩或砂质泥岩伪顶,厚度一般在0.5~1.0 m,因此本次物理相似模拟实验考虑了泥岩夹层对裂缝扩展的影响,开展2组不同泥岩伪顶厚度三轴围压物理模拟试验。相似物理模拟试验方案如图6a所示,水平井筒设置在模型顶板内,距离煤层垂直距离40 mm,

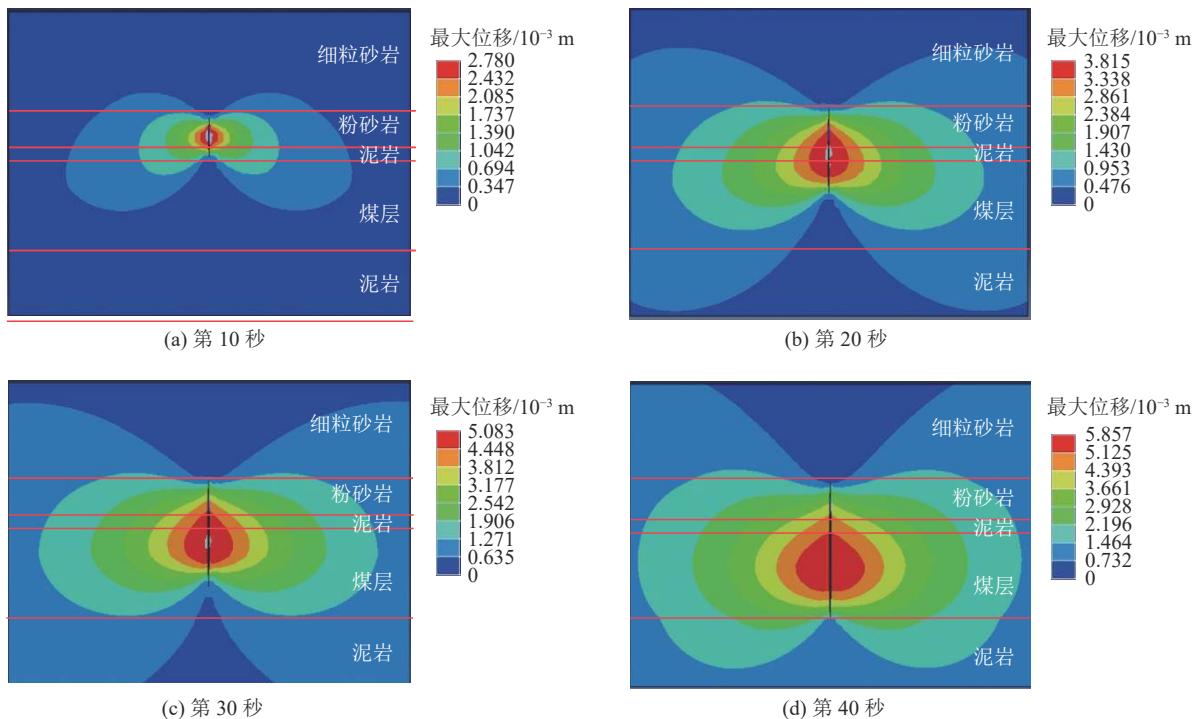


图 5 压裂裂缝应力剖面图
Fig.5 Fracturing crack stress profile

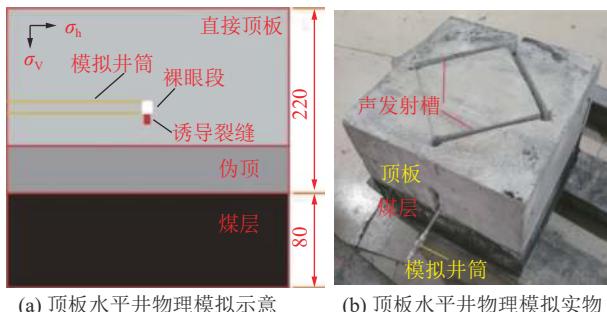


图 6 水力压裂物理相似模拟模型
Fig.6 Physical similarity simulation model for hydraulic fracturing

井筒延展方向平行于煤岩层结合面以及最小水平主应力方向,井筒最前端垂直向下射孔1 cm。为了模拟真实地层压裂效果,建立基于岩石力学强度的“顶板-伪顶泥岩-煤层”胶结的物理模型,模型尺寸大小为300 mm×300 mm×300 mm(长×宽×高),物理模型的煤层厚度为8 cm且保持不变,2组试验的泥岩伪顶厚度分别为4 cm和6 cm,与之相应顶板厚度分别为18 cm和16 cm。在顶板内埋置了声发射监测设备,如图6b所示。采集了淮南矿区煤层及其顶板岩样,测试真三轴条件下岩石力学性质,以采样测试的煤、岩力学参数为依据,基于相似性原理,确定相似材料合理配比,制备了煤岩组合体压裂物模试件。结合煤层和顶板的力学参数优选得到顶板岩层的配方为:煤层采取和目的煤层参数基本一致的原煤样;

按1:1的水泥、石英砂加水配制泥岩伪顶材料(选用0.147~0.210 mm的砂);按1:1.5的水泥、石英砂加水配制顶板材料(选用0.21~0.42 mm的砂),岩石参数实测值见表2。岩层界面之间采取云石胶黏结,模拟界面的黏结特性,其中顶板砂岩-泥岩伪顶界面的抗剪强度为3 MPa,抗拉强度1.5 MPa,泥岩伪顶-煤层界面的抗剪强度为2 MPa,抗拉强度1.0 MPa。

表 2 试件岩石物理参数

Table 2 Rock physical parameters of test specimens

试件		弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa
直接顶板	试件1	17.90	0.20	3.50
	试件2	18.40	0.20	3.50
泥岩伪顶	试件1	15.00	0.20	2.20
	试件2	15.50	0.18	2.10
煤层	试件1	1.00	0.28	0.50
	试件2	1.10	0.25	0.50

在试件加工过程中,2个试件在同一批次进行加工制作,包括材料的配比,凝固时温度、湿度等其他因素,消除对试件材料力学性质的影响,同时为了提高实验结果的准确性,在以下几方面强化试件加工制作:

1)岩层之间的界面胶结强度不同,会对裂缝穿越界面后的扩展有细微的影响。因此,模型制备过

程中确保材料浇筑程序和方法完全相同,使用的黏结材料严格统一,消除界面的胶结强度差异。

2)水平井眼与试件边界不完全垂直,会影响水平井压裂点与煤层的距离,对试验结果会有影响。因此,井筒加工过程中,尽可能确保井眼与试件边界完全垂直,降低井身倾斜的影响。预置裂缝诱导水力压裂时,切割裂缝的长度存在差异,会影响试验结果。因此,人工预制裂缝时,采用相同的切割方法和程序,确保试件的预制缝长相同。

3)加载围压通过三向加压板实现,由于试件表面处理得不平整,实际加载到试件表面的力可能分布不均匀,造成应力集中,影响试验结果。因此,水平井筒加工完毕后再对试样的各面打磨光滑以消除局部应力的影响。

2.2.2 物理模拟试验条件及参数

压裂液采用红色清水压裂液,压裂液排量设置为20 mL/min,根据淮南地区实际地质情况设置三向围压,即垂直应力为17 MPa,最大水平主应力设置为15 MPa,最小水平主应力设置为13 MPa;压力按照从大至小隔一定时间依次增压,为了更好地模拟地应力环境,压力达到设置数值后稳压约20 min开始压裂模拟。

2.2.3 物理相似模拟试验过程

1)1号试件。试验设置排量为20 mL/min,在200 s后试件顶板内部产生水力裂缝,破裂压力为12 MPa,随后注液压力发生一定程度的波动;360 s时泥岩起裂,破裂压力为11.5 MPa;935 s时,煤岩割理起裂,破裂压力为9.3 MPa,然后压力基本维持在9.3 MPa左右,直至试验结束。

2)2号试件。试验设置排量为20 mL/min,在150 s后试件顶板内部产生水力裂缝,破裂压力为14.3 MPa,随后注液压力下降;189 s时泥岩起裂,破裂压力为9.2 MPa;后续压力缓慢升高,650 s砂—泥界面起裂,随后压力在12 MPa左右波动,直至试验结束。

2.2.4 相似模型的结果

1号试件水力压裂物理相似模拟试验结果如图7所示,压裂形成的裂缝如图中黄色虚线勾勒出的范围。可以看出裂缝从孔内裸眼段起裂后,向下延伸并成功穿越了直接顶板—伪顶分界面(砂质泥岩—泥岩),水力裂缝在泥岩和煤岩胶结面发生转向,继续下穿进入煤层中,最终穿透煤岩,裂缝总体呈阶梯状。声发射监测解释如图8所示,可以看出裂缝向上在顶板内形成了规模较小的椭圆形裂缝,钻孔裸眼正

下方裂缝完全将煤层切分,穿层明显。

2号试件水力压裂物理相似模拟试验结果如图9所示,声发射监测解释图如图10所示。2号试样裂缝从孔内裸眼段起裂后,向上在顶板内形成了规模较大的椭圆形裂缝;向下裂缝未穿透泥岩隔层,水力裂缝沿泥岩层和顶板砂岩层界面扩展,并最终穿透试样,导致水力裂缝并未波及煤层,裂缝整体呈“T”型缝。

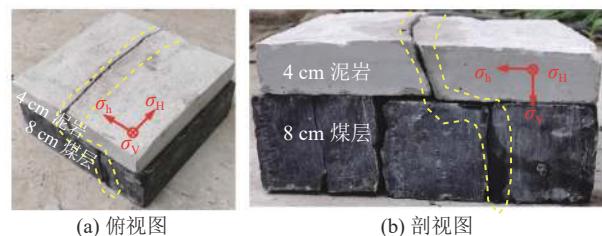


Fig.7 Physical simulation results of hydraulic fracturing for No.1 piece

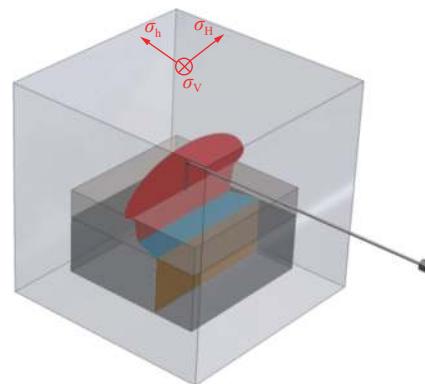


Fig.8 Schematic of crack interpretation for acoustic emission monitoring of No.1 piece

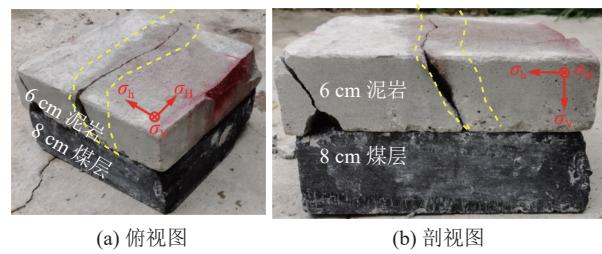


Fig.9 Physical simulation results of hydraulic fracturing for No.2 piece

由试验过程可以得出:水平钻孔布置在碎软煤层顶板的砂质泥岩内,在合理的垂直距离和大排量压裂液施工的环境下,若煤层发育有较薄的泥岩伪顶,如泥岩伪顶厚度发育不大于4 cm,则裂缝能沿着射孔孔眼穿过直接顶—伪顶界面(砂质泥岩—泥岩界

面)和伪顶-煤层界面(泥岩-煤层界面),扩展至下伏煤层内,裂缝延伸形成一条弯曲不规则的垂直裂缝,表明水力压裂能实现对软硬煤层的压裂增产改造目标。但是,当煤层发育有较厚的泥岩伪顶时,如泥岩伪顶发育大于等于6 cm时,泥岩对水力压裂产生了较强的阻挡作用,导致裂缝难以压开下伏煤层,可见,泥岩伪顶是煤层顶板水力压裂增产改造的不利因素。

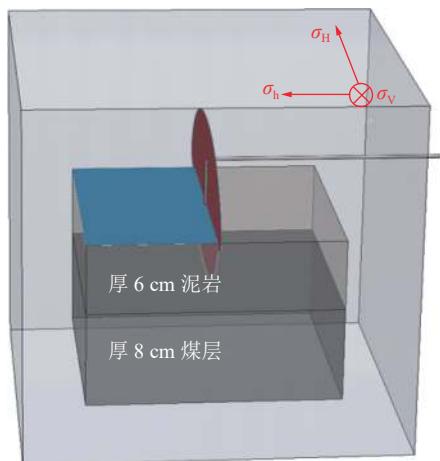


图 10 2号试件声发射监测裂缝解释示意

Fig.10 Schematic of crack interpretation for acoustic emission monitoring of No.2 piece

3 煤层顶板分段分簇压裂研究

掘进巷瓦斯条带抽采与地面煤层气抽采目的有所不同,掘进巷瓦斯预抽是为在短期内将掘进巷道的瓦斯含量降至安全界限以下,以保证在掘进过程中不发生瓦斯突出事故,因此需要对掘进范围内开展分簇压裂,以保证掘进巷瓦斯抽采均匀。

上述压裂缝扩展研究表明,紧邻煤层顶板岩石的压裂缝能够延展至煤层,但是裂缝在煤层中的扩展形态如何,何种形态的裂缝才能均匀的降低掘进巷道的瓦斯含量,亦是区域化瓦斯治理必须解决的

问题。因此,首先使用压裂设计软件对压裂缝形态进行模拟,对比不分簇压裂与分簇压裂裂缝形态的差异,在此基础上运用产能模拟的方法研究对比分段分簇压裂的产气效果,对分簇压裂和不分簇压裂进行了剩余瓦斯含量对比分析,对瓦斯治理工程具有重要意义。

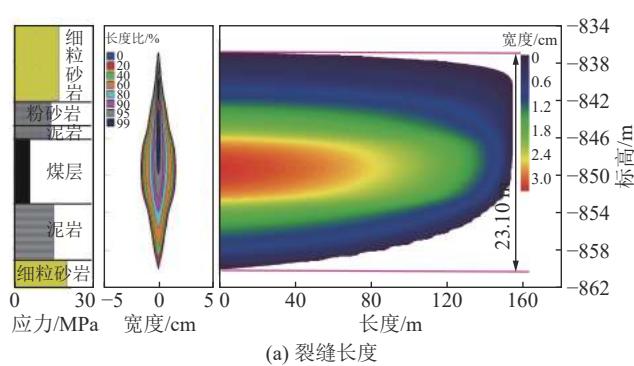
3.1 裂缝形态特性数值模拟

在相同的地层条件下,首先开展单段不分簇和单段分3簇的压裂特性对比。使用 MFracSuite 三维压裂设计软件进行裂缝参数设计对比,模型设置为6层,由上而下依次为细粒砂岩、粉砂岩、泥岩、煤层、泥岩和细粒砂岩,水平井位于煤层直接顶粉砂岩内,下距离煤层伪顶泥岩1 m,射孔长度0.5 m,顶板地层岩石力学参数参考表3进行设置,结果显示:在不考虑缝间干扰的情况下,压裂缝呈椭圆状垂直于水平井方向,单段不分簇在 $10 \text{ m}^3/\text{min}$ 的施工条件下,裂缝半长可达154.9 m,裂缝高度23.1 m,裂隙在射孔段(粉砂岩)起裂后能够进入下伏泥岩及煤层,将煤层全部压开,如图11a所示;单段分3簇裂缝半长为58 m左右,缝高21.7 m,如图11b所示。由支撑剂浓度剖面图可以看出单段不分簇压裂形成的裂缝有效裂缝半长约为120 m,单段分3簇有效裂缝半长约为45 m,如图11b和图12b所示。

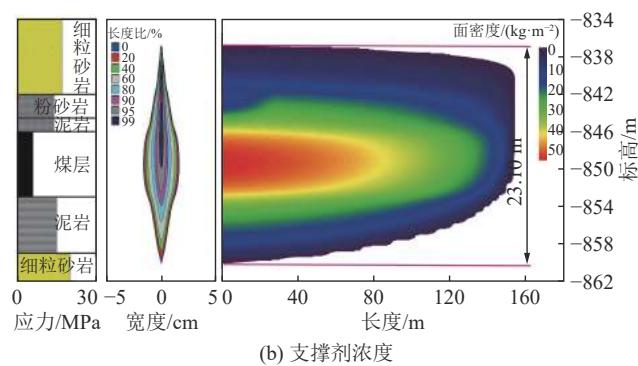
表3 压裂设计参数

Table 3 Calculation parameters of fracturing model

岩层参数	细粒砂岩	粉砂岩	泥岩	煤层	泥岩	细粒砂岩
弹性模量/GPa	20.00	15.50	11.80	5.10	11.80	20.00
泊松比	0.23	0.25	0.28	0.33	0.28	0.23
断裂韧度/(MPa·m ^{1/2})	5.00	4.00	3.00	1.00	3.00	5.00
滤失系数/(10 ⁻³ m ³ ·min ^{-1/2})	3	2	1	5	1	3
抗拉强度/MPa	4.50	2.42	1.75	0.50	1.75	4.50
密度/(t·m ⁻³)	2.54	2.05	1.85	1.35	1.85	2.54



(a) 裂缝长度



(b) 支撑剂浓度

图 11 单段不分簇裂缝延伸形态

Fig.11 Crack extension of single segment without clusters

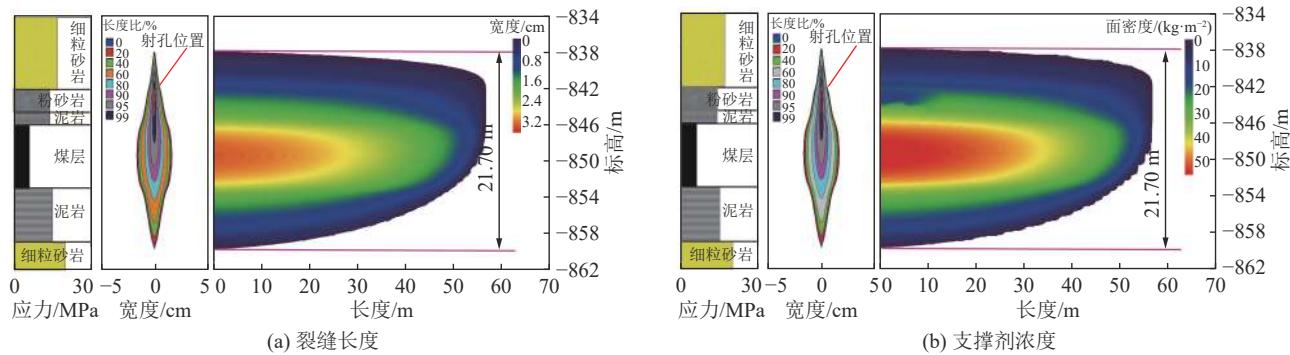


图 12 单段分 3 簇裂缝延伸形态

Fig.12 Crack extension of single segment with 3 clusters

3.2 瓦斯抽采效果产能模拟

以上述裂缝参数为基础,裂缝设置如图 13 所示,工作面长宽设置为 500 m×200 m,高度为 6 m,段与段之间的距离设置为 75 m,簇之间的间距设置为 20 m,按照潘谢煤矿瓦斯最大测试数据设置煤层原始气含量为 20 m³/t,产能模拟参数见表 4。在煤储层中部(高 3 m 处)切面观测气含量变化,使用 Eclipse

产能模拟软件对水平井 3 a 的产气量进行模拟,对比了单段不分簇与单段分 3 簇压裂的抽采效果,由图 14 可以看出,不分簇压裂会比分簇压裂产生更长的裂缝长度,能够产生更大的瓦斯抽采影响范围,但不能均匀降低掘进巷道的瓦斯含量,压裂段之间出现了瓦斯抽采空白带,分簇压裂产生的裂缝较短,瓦斯抽采影响范围小,却能够更均匀的降低掘进巷道的瓦斯含量。

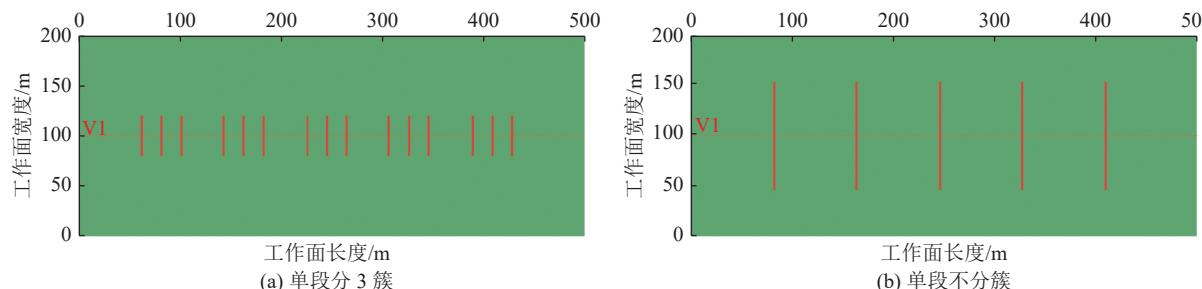


图 13 裂缝设置情况示意

Fig.13 Schematic of crack setting

表 4 瓦斯抽采产能模拟参数

Table 4 Gas drainage capacity simulation parameter

参数	数值	参数	数值
气藏深度/m	850.00	岩石压缩系数 /MPa ⁻¹	4.28×10^{-2}
含气量/(m ³ ·t ⁻¹)	20.00	气藏温度/℃	25
储层厚度/m	6.00	煤岩孔隙率/%	7
密度/(kg·m ⁻³)	1 450	抽采压力/kPa	15
瓦斯压力/MPa	1.30	煤层渗透率/μm ²	10^{-2}

4 工程验证

为了解决潘谢煤矿掘进巷道瓦斯抽采效率低下,采掘接续紧张的问题,潘谢矿在 13011 工作面上方距离回风巷 80 m 处施工一组沿工作面走向的“U”型井组,其中 PX1-1 井水平段长度为 956 m,将水平段分割成 13 段进行压裂改造,各段间距在 60~80 m,每段射孔 3 簇,簇间距 15~25 m,共射孔 39 簇,压裂

注入排量平均约为 10 m³/min,平均每段加砂 77 m³,平均每段注入压裂液 938 m³。总加砂量 892 m³,压裂总液量 23 816 m³。各段的施工平均砂比 6.68%~9.09%,平均排量 9.0~10.0 m³/min,施工破裂压力最高 31.8 MPa,最低 22.5 MPa,施工压力一般在 22~33 MPa,压裂施工参数见表 5。在压裂施工过程中,通过微地震裂缝监测技术对顶板水平井压裂裂缝形态进行监测,微震缝长监测结果见表 6,主裂缝总长度 114.9~193.8 m,裂缝方位角总体呈北东东向,如图 15 所示,裂缝高度 17.3~27.0 m,裂缝高度完全覆盖了煤层厚度范围,如图 16 所示,证明了顶板裂缝能够下穿进入煤层,且能够在煤层和顶板内延展较长的距离,实现对煤层的强化改造的目的。

截至到 2021 年 10 月 25 日,PX1-1 井日产气 605 m³,日产水 5.2 m³,井底流压 0.25 MPa,液柱高度 14.8 m;水平井产气量最高达到 1 490 m³/d;累计

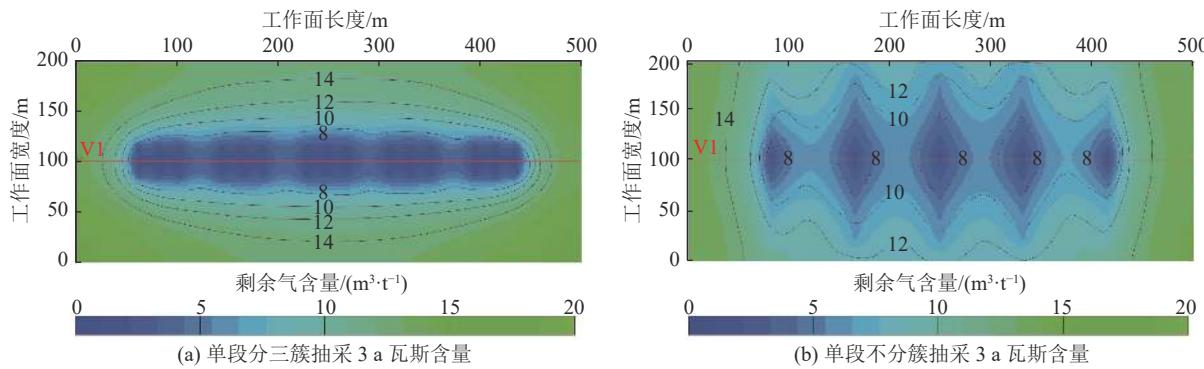


图 14 3 a 瓦斯含量变化情况
Fig.14 Gas content change in three years

表 5 压裂施工参数统计

Table 5 Statistics of fracturing construction parameter

段序	压裂液量/ m^3	总砂量/ m^3	一般泵压/MPa	平均砂比/%	一般排量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)
1	2 408	70.3	27.3	6.68	10.0
2	1 890	70.2	29.5	7.41	10.0
3	1 820	70.0	23.6	7.73	9.8
4	1 423	60.0	23.1	9.09	10.0
5	1 499	60.0	28.3	8.33	10.0
6	1 719	70.6	31.8	7.66	10.0
7	1 746	70.4	30.0	6.78	10.0
8	1 907	70.1	28.0	7.65	9.0
9	1 676	70.0	29.7	7.38	9.9
10	1 748	70.0	29.5	7.53	9.8
11	2 504	70.0	30.0	5.7	9.7
12	1 715	70.0	24.6	6.81	9.6
13	1 761	70.6	25.7	8.19	9.5

表 6 微震缝长监测统计
Table 6 Statistics of fracturing construction parameter

压裂段	方位/(°)	裂缝总长/m	东翼缝长/m	西翼缝长/m	裂缝高度/m	倾角/(°)
第4段	73.1	189.2	94.9	94.3	27.0	10
第7段	68.1	114.9	65.0	49.9	17.3	3
第9段	71.5	193.8	108.4	85.4	18.8	11
第13段	73.5	162.0	78.3	83.7	18.8	5

产气 $31 \times 10^4 \text{ m}^3$, 累计排水 $1.13 \times 10^4 \text{ m}^3$, 如图 17 所示。

5 结 论

1)采用数值模拟的方法模拟了煤岩界面处裂缝从顶板起裂后的穿层及延展规律,认为在煤层顶板岩石的裂缝能够延展至煤层,且在顶板岩石的撕扯作用下,裂缝能够向煤层内快速延展,且煤层的裂缝宽度大于顶板岩石的裂缝宽度。

2)在相同的工区条件下,对比了单段不分簇与

单段分 3 簇压裂的抽采效果。结果显示:单段不分簇压裂会比分簇压裂产生更长的裂缝长度,抽采范围更大,但是会导致裂缝之间产生瓦斯抽采盲区,而分簇压裂虽然产生的裂缝短,抽采范围小,但是能够保证巷道范围内瓦斯均匀且快速降至安全阈值以内。

3)在考虑了泥岩伪顶发育条件下,利用物理相似模拟的手段对水力压裂裂缝的扩展进行了模拟,结果表明,水平钻孔布置在碎软煤层顶板的砂质泥

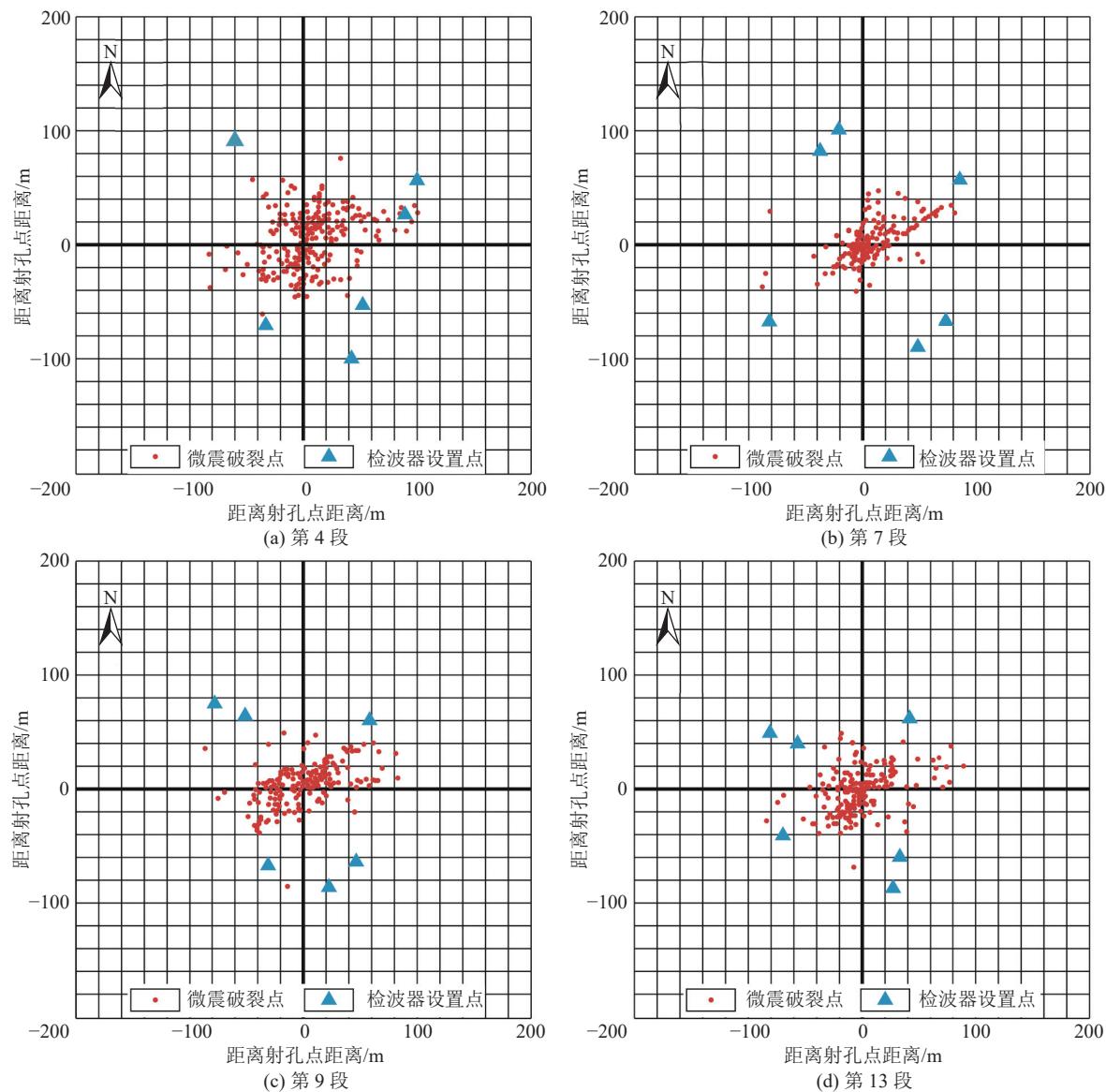
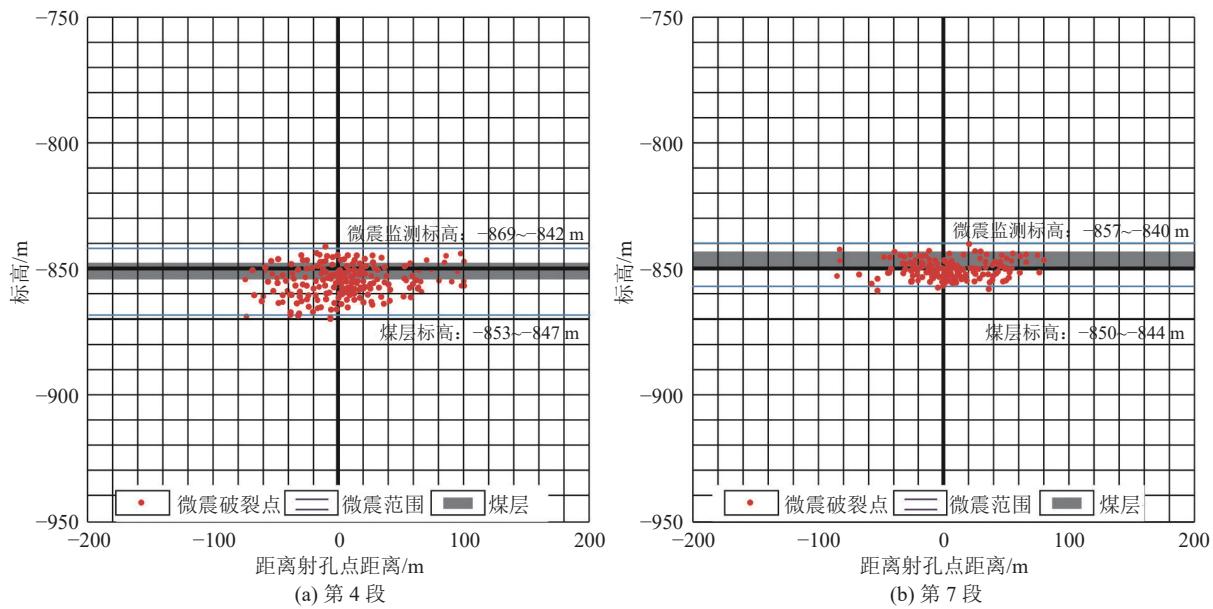


图 15 PX1-1 井裂缝方位、长度微震监测俯视图

Fig.15 Fracture orientation and length of PX1-1 Well



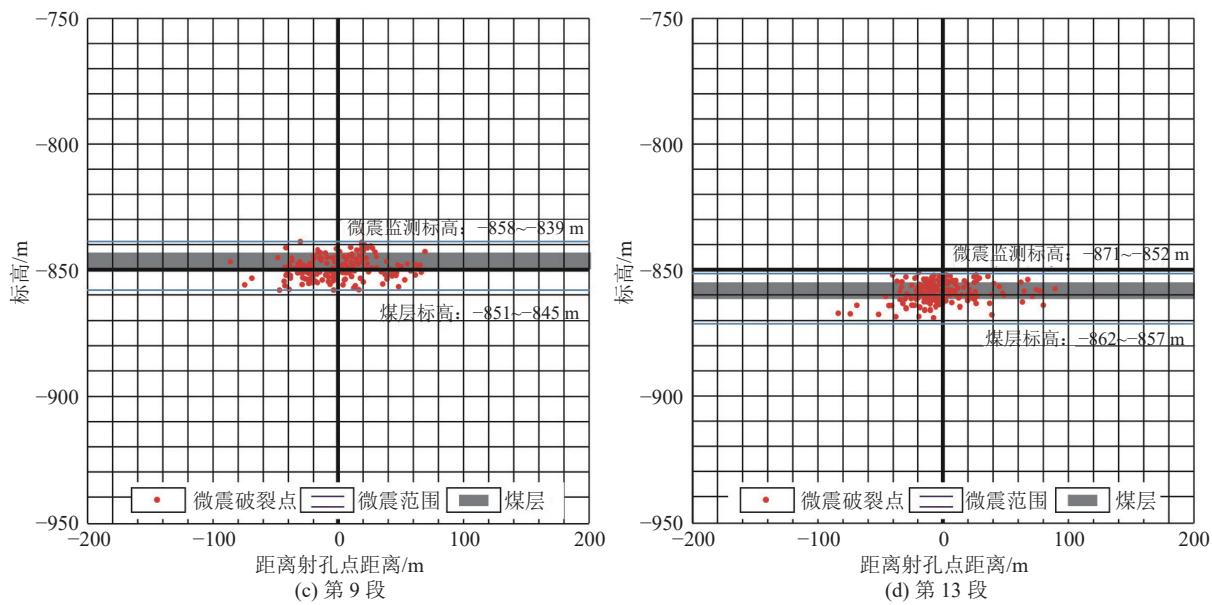


图 16 PX1-1 井裂缝微震监测剖面图

Fig.16 Profile of microseismic monitoring for fractures in PX1-1 well

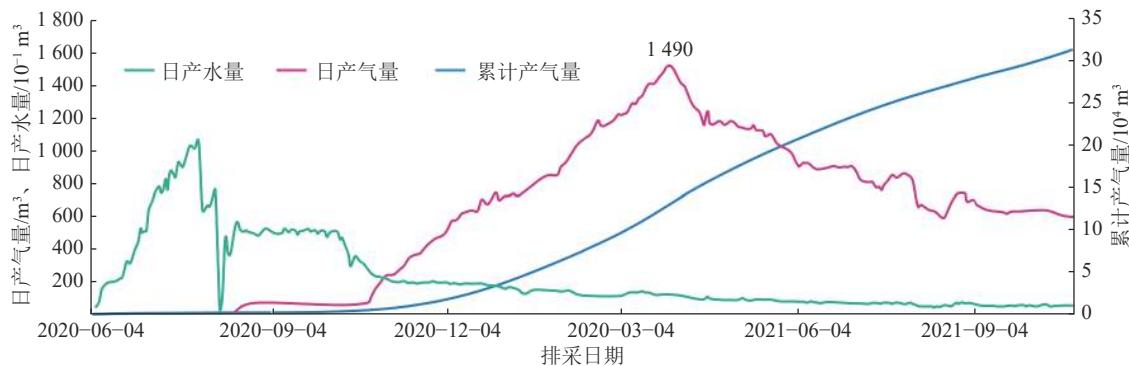


图 17 潘谢煤矿 PX1-1 井组排采曲线

Fig.17 Drainage and production curve of PX1-1 Well Cluster in Panxie Coal Mine

岩内,在合理的垂直距离和大排量压裂液施工的环境下,若煤层发育有较薄的泥岩伪顶,裂缝能沿着射孔眼穿过直接顶-伪顶界面(砂质泥岩-泥岩界面)和伪顶-煤层界面(泥岩-煤层界面),扩展至下伏煤层内,裂缝延伸形成一条弯曲不规则的阶梯型裂缝,表明水力压裂能实现对软硬煤层的压裂增产改造目标。但是,当煤层发育有较厚的泥岩伪顶时,泥岩对水力压裂产生了阻挡作用,导致裂缝难以压开下伏煤层,可见,泥岩伪顶是煤层顶板水力压裂增产改造的不利因素,建议在泥岩伪顶较发育的地区加大施工排量。

4)在淮南矿区潘谢矿进行了工程应用,通过微震监测,观测到压裂主裂缝总长度 114.9~193.8 m,裂缝方位角总体呈北东东向,裂缝高度 17.3~27.0 m,裂缝高度完全覆盖了煤层厚度范围,证明了顶板裂缝能够下穿进入煤层,且能够延展较长的距离,2 年的累计产气量达到了 $31 \times 10^4 \text{ m}^3$,证明了煤层顶板水

平井是淮南矿区碎软煤层掘进巷道瓦斯治理的有效措施。

参考文献(References):

- [1] 王恩元, 张国锐, 张超林, 等. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 297–322.
WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 297–322.
- [2] 丁 洋, 朱 冰, 李树刚, 等. 高突矿井采空区卸压瓦斯精准辨识及高效抽采[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3565–3577.
DING Yang, ZHU Bing, LI Shugang, et al. Accurate identification and efficient drainage of relieved methane in goaf of high outburst mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3565–3577.
- [3] 柴 敬, 刘永亮, 王梓旭, 等. 保护层开采下伏煤岩卸压效应及其光纤监测[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 2896–2906.

- CHAI Jing, LIU Yongliang, WANG Zixu, et al. Pressure relief effect of prospective layer mining and its optical fiber monitoring[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 2896–2906.
- [4] 吴冬梅,李 双.单一中厚煤层以孔代巷区域瓦斯抽采技术研究[J].煤炭技术,2021,40(3): 58–62.
- WU Dongmei, LI Shuang. Study on gas drainage technology technology of replacing roadway with borehole in single medium-thick coal seam[J]. Coal Technology, 2021, 40(3): 58–62.
- [5] 李 强,叶嗣煊,金 新.松软煤层顺层孔筛管护孔工艺及装备应用[J].煤炭科学技术,2017,45(6): 147–151.
- LI Qiang, YE Sixuan, JIN Xin. Application of hole protection technology and equipment for bedding hole screen tubes in soft coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 147–151.
- [6] 唐永志,李 平,朱贵旺,等.超高压水力割缝技术在中等硬度低透气性煤层的应用[J].煤炭科学技术,2022,50(12): 43–49.
- TANG Yongzhi, LI Ping, ZHU Guiwang, et al. Application of ultra-high pressure hydraulic cutting technology in medium hardness and low permeability coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 43–49.
- [7] 周 雷,彭 雨,卢义玉,等.基于物质点法的深部煤层气水力割缝卸压解吸增透规律数值模拟研究[J].煤炭学报,2022,47(9): 3298–3309.
- ZHOU Lei, PENG Yu, LU Yiyu, et al. Numerical simulation study on hydraulic slotting, pressure relief, desorption, and permeability enhancement of deep coalbed methane based on the material point method[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3298–3309.
- [8] 贾建称,陈 晨,董 瓣,等.碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂高效抽采煤层气技术研究[J].天然气地球科学,2017,28(12): 1873–1881.
- JIA Jiancheng, CHEN Chen, DONG Kui, et al. Research on staged fracturing and efficient extraction of coalbed methane from horizontal wells in fractured soft and low-permeability coal seams[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(12): 1873–1881.
- [9] 孙四清,李文博.井下碎软煤层顶板加砂分段压裂瓦斯高效抽采技术[J].工矿自动化,2022,48(12): 101–107.
- SUN Siqing, LI Wenbo. High efficiency gas extraction technology for underground fractured soft coal seam roof plus sand staged fracturing[J]. Industrial and Mining Automation, 2022, 48(12): 101–107.
- [10] 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. Current status and technological research progress of coalbed methane surface development in China's coal mining areas[J]. [Coal Geology and Exploration](#), 2023, 51(1): 139–158.
- [11] 唐永志.淮南矿区煤炭深部开采技术问题与对策[J].煤炭科学技术,2017,45(8): 19–24.
- TANG Yongzhi. Technical problems and countermeasures for deep coal mining in Huainan Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(8): 19–24.
- [12] 刘 乐,张 健,方秦月,等.碎软低渗煤层顶板定向长钻孔水力加砂分段压裂工程应用[J].煤炭科学技术,2022,50(8): 91–100.
- LIU Le, ZHANG Jian, FANG Qinyue, et al. Application of direction long borehole hydraulic sanding staged fracturing engineering in fractured soft and low permeability coal seam roof[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 91–100.
- [13] 陈冬冬,孙四清,张 健,等.井下定向长钻孔水力压裂煤层增透技术体系与工程实践[J].煤炭科学技术,2020,48(10): 84–89.
- CHEN Dongdong, SUN Siqing, ZHANG Jian, et al. Technical system and engineering practice of underground directional long borehole hydraulic fracturing for coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 84–89.
- [14] 孙四清,李文博,张 健,等.煤矿井下长钻孔分段水力压裂技术研究进展及发展趋势[J].煤田地质与勘探,2022,50(8): 1–15.
- SUN Siqing, LI Wenbo, ZHANG Jian, et al. Research progress and development trend of long borehole segmented hydraulic fracturing technology in coal mines[J]. Coal Geology and Exploration, 2022, 50(8): 1–15.
- [15] 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. High efficiency extraction model of fractured coalbed methane from horizontal wells in fractured soft and low-permeability coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 150–159.
- [16] 王 博,姜在炳,杜天林,等.煤层顶板水平井分段压裂瓦斯治理模式研究[J].中国煤炭地质,2023,35(1): 25–31.
- WANG Bo, JIANG Zaibing, DU Tianlin, et al. Study on the gas control model for staged fracturing of horizontal wells in coal seam roof[J]. China Coal Geology, 2023, 35(1): 25–31.
- [17] 桑树勋,刘世奇,韩思杰,等.中国煤炭甲烷管控与减排潜力[J].煤田地质与勘探,2023,51(1): 159–175..
- SANG Shuxun, LIU Shiqi, HAN Sijie, et al. Coal methane control and emission reduction potential in China[J]. Coal Geology and Exploration, 2023, 51(1): 159–175.
- [18] 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[J].煤炭学报,2020,45(S2): 922–931.
- JIANG Zaibing, LI Haozhe, FANG Liangcai, et al. Fracture extension machine for horizontal wells adjacent to the roof of fractured soft coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 922–931.
- [19] 庞 涛,姜在炳,李浩哲,等.碎软煤层顶板水平井空间位置对压裂裂缝扩展的影响[J].煤炭学报,2022,47(S1): 196–203.
- PANG Tao, JIANG Zaibing, LI Haozhe, et al. The influence of the spatial location of horizontal wells in the roof of fractured soft coal seams on the expansion of fracturing fractures[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 196–203.
- [20] 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 the law and mechanism of fracture propagation in horizontal well staged fracturing in fractured soft and low-permeability coal seam roof[D]. Beijing: China Coal Re-

- search Institute, 2017.
- [21] 李全贵, 邓羿泽, 胡千庭, 等. 煤岩水力压裂物理试验研究综述及展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 62–72.
LI Quangui, Deng Yize, Hu Qianting, et al. Review and prospect of coal rock hydraulic fracturing physical experimental research[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 62–72.
- [22] 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. Staged fracturing technology and application of coalbed methane horizontal wells combined with soft and hard coal[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 1169–1177.
- [23] 王博. 井上下联合压裂区域瓦斯治理模式及裂缝延展规律研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(16): 151–152, 157.
WANG Bo. Study on the gas control mode and fracture extension law in the area of combined fracturing of upper and lower wells[J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2022, 42(16): 151–152, 157.
- [24] 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. Technology for developing coalbed methane in horizontal wells in roof strata adjacent to fractured and soft coal seams[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(9): 70–75.
- [25] LI Wenfeng, BAI Jianbiao, CHENG Jingyi, et al. Determination of coal-rock interface strength by laboratory direct shear-tests under constant normal load[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 77: 60–67.
- [26] ZOU Junpeng, CHEN Weizhong, YUAN Jingqiang, et al. 3-D numerical simulation of hydraulic fracturing in a CBM reservoir[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 37: 386–396.
- [27] 张娟. 煤矿区煤层气抽采地应力条件及其对煤层气井产能影响[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
ZHANG Juan. Geo-stress condition of coalbed methane extraction in coalmining area and its influence on productivity of coalbed methane wells[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2016.