



推荐阅读:

[综采工作面上隅角瓦斯流动活跃区形成机理研究](#)

[高瓦斯突出煤层综采工作面注水降尘技术应用研究](#)

[超大直径钻孔采空区瓦斯抽采技术研究](#)

[风速对近距离煤层采空区漏风及煤自燃影响研究](#)

[深部高瓦斯矿井大采高工作面立体抽采瓦斯技术](#)

[水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究](#)

[巷道火灾时期流场及瓦斯浓度变化规律数值模拟研究](#)

[高突低渗透煤层超高压水力割缝卸压增透研究](#)

[高瓦斯综采工作面定向高位钻孔瓦斯抽采技术研究](#)

[寺河井田煤层气产能分布特征及影响因素分析](#)

[我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展](#)

[基于高位定向长钻孔的上隅角瓦斯治理研究](#)

[松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)

[综采工作面煤层注水防尘优化及效果研究](#)

[我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)

[高瓦斯矿井高抽巷合理布置及终巷位置确定研究](#)

[原生结构煤与构造煤孔隙结构与瓦斯扩散特性研究](#)

[不同孔间距抽采孔对深孔预裂爆破增透效果影响研究](#)

[顺层瓦斯抽采钻孔封隔一体化封孔工艺研究](#)

[煤层瓦斯赋存特征及其关键地质因素影响研究](#)



移动扫码阅读

陈冬冬,孙四清,张 俭,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. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.10.009

CHEN Dongdong, SUN Siqing, ZHANG Jian, et al. Technical system and engineering practice of coal seam permeability improvement through underground directional long borehole hydraulic fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 84-89. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.10.009

## 井下定向长钻孔水力压裂煤层增透技术体系与工程实践

陈冬冬,孙四清,张 俭,赵继展,郑凯歌,贾秉义

(中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077)

**摘 要:**低渗煤层区域超前增透是实现瓦斯区域超前高效抽采的技术支撑。针对定向长钻孔水力压裂面临的泵注能力不足和压裂不均衡问题,研发了煤矿井下快速、定点、分段与可重复的水力压裂孔内装备,实现了煤矿井下水力压裂由传统的点式压裂向区域压裂的转变。结合不同煤(岩)层定向长钻孔布孔方式,提出并形成了碎软煤层顶(底)板梳状孔整体/分段、中硬煤层层层定向孔顺煤层整体及硬煤层顺层定向长钻孔整体/分段水力压裂煤层增透技术体系。以韩城矿区碎软煤层、黄陵矿区中硬煤层和焦作矿区硬厚煤层为研究对象进行工程实践。结果表明:韩城矿区碎软煤层顶板梳状主孔 588 m、分 4 段压裂,最大封隔深度 467.81 m,水力压裂半径 39.6 m,钻孔瓦斯抽采量是常规钻孔的 4.8 倍;黄陵矿区中硬煤层主孔深度 240~285 m、压裂段长度 117~216 m(5 孔),压裂影响半径最小 36 m,钻孔瓦斯平均抽采量是未压裂钻孔的 4.0 倍;赵固二矿顺层主孔深度 605 m、封隔深度 385.73 m、压裂段长 220 m,水力压裂影响半径 33 m,钻孔瓦斯抽采量是常规钻孔的 2.3 倍。井下定向长钻孔水力压裂技术融合了定向长钻孔瓦斯高效抽采及水力压裂强化抽采技术的优势,实现了大区域煤层增透与瓦斯超前强化预抽。

**关键词:**定向长钻孔;分段压裂;煤层增透;瓦斯抽采

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)10-0084-06

## Technical system and engineering practice of coal seam permeability improvement through underground directional long borehole hydraulic fracturing

CHEN Dongdong, SUN Siqing, ZHANG Jian, ZHAO Jizhan, ZHENG Kaige, JIA Bingyi

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

**Abstract:** Advanced penetration enhancement in low-permeability coal seams is an effective technical support for realizing "regional advanced and efficient drainage" of coal seam gas. In view of the insufficient pumping capacity and fracturing imbalance faced by hydraulic fracturing of directional long boreholes, the rapid, fixed-point, segmented and reusable hydraulic fracturing in-hole tool combination and complete sets of equipment in underground coal mines have been developed to achieve the transformation of underground hydraulic fracturing from traditional point fracturing to regional fracturing. Combined different coal (rock) layers with long directional boreholes, we proposed and formed the integrated/segmented hydraulic fracturing of comb-shaped holes in the top (bottom) plate of the fractured soft coal seam, the overall/segmented hydraulic fracturing of the medium-hard coal seam through the directional hole along the coal seam, and the hard coal seam along the bedding directional long borehole integral/segmental hydraulic fracturing coal seam permeability enhancement technology system. The field engineering practice of different fracturing technology was carried out with the fractured soft coal seam in Hancheng mining area, medium hard coal seam in Huangling mining area and hard thick coal seam in Jiaozuo mining area as the research objects. The results show that: the comb-shaped main hole of the roof of the fractured soft coal seam in Hancheng mining area is 588 m fracturing in 4 stages, the maximum isolation depth is 467.81 m, the fracture radius is 39.6 m, and the gas drainage volume of the borehole is 4.8 times that of the conventional borehole. The main hole depth of the medium-hard coal seam in Huangling mining area is 240~

收稿日期:2020-05-19;责任编辑:郭 鑫

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045002-002);中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金资助项目(2019XAYMS18)

作者简介:陈冬冬(1985—),男,河南项城人,副研究员,硕士。E-mail: chendongdong@cctegxian.com

285 m, the length of the fracturing section is 117~216 m (5 holes), the minimum fracturing radius is 36 m, and the average gas drainage volume of the boreholes is 4 times of the unfractured borehole. In Jiaozuo mining area, the depth of the main hole along the bedding is 605 m, the isolation depth is 385.73 m, the fracturing section is 220 m long, and the fracturing influence radius is 33 m. The gas drainage volume of the borehole is 2.3 times that of the conventional borehole. Underground directional long borehole hydraulic fracturing technology combines the advantages of directional long borehole gas high-efficiency drainage technology and hydraulic fracturing enhanced drainage technology, and realizes large-area coal seam enhancement and advanced gas pre-drainage.

**Key words:** directional long borehole; staged fracturing; coal seam enhancement; gas drainage

## 0 引言

煤层瓦斯抽采是防治煤矿瓦斯事故的有效措施,煤层瓦斯抽采效率很大程度上取决于煤层渗流特性<sup>[1]</sup>。我国煤储层渗透率比国外低1~3个数量级,煤层渗透性差导致煤层瓦斯抽采效率低、难度大,低透气性煤层瓦斯高效抽采是煤矿瓦斯治理的技术难题<sup>[2]</sup>。实践证明,煤层增透是解决煤矿瓦斯抽采技术“瓶颈”的关键。近些年,煤矿井下水力压裂技术得到长足发展,具有增透范围大、效果显著等特点,诸多矿区采用该技术在低渗煤层瓦斯强化抽采方面取得了较好效果<sup>[3]</sup>,并发展了定向水力压裂、重复水力压裂、脉动水力压裂等<sup>[4-6]</sup>。但现有井下水力压裂煤层增透工艺技术,仍主要集中在煤层底(顶)板岩巷穿层钻孔和顺煤层短钻孔,钻孔有效压裂段短,无法实现大面积区域煤层增透与超前预抽。我国政府倡导“区域超前治理”理念,坚持区域措施先行、局部措施补充原则<sup>[7]</sup>。《防治煤与瓦斯突出细则》首次将定向长钻孔预抽煤巷条带煤层瓦斯作为区域防突措施<sup>[8]</sup>。定向钻进工艺可跨盘(采)区、采面进行钻孔施工,实现了大区域、超长距离、递进式煤层瓦斯精准高效抽采<sup>[9]</sup>,可大幅增加钻孔抽采范围,解决了高瓦斯、煤与瓦斯突出矿井瓦斯灾害治理的时空矛盾。根据不同煤储层条件及其顶底板岩性组合,已形成较为成熟的硬煤定向钻进、碎软煤层顶(底)板梳状钻孔等定向长钻孔成孔工艺技术<sup>[10]</sup>。冲破常规水力压裂技术与方法束缚,融合井下定向长钻孔瓦斯高效抽采技术及水力压裂煤层增透强化抽采技术优势,实现大区域煤层增透与瓦斯超前预抽是未来矿井瓦斯抽采的关键技术之一<sup>[11]</sup>。近年来,笔者课题组在定向长钻孔水力压裂煤层增透与强化抽采工艺技术和装备等方面进行了攻关研究<sup>[12-15]</sup>,研发了适用于不同煤岩层特征的定向长钻孔水力压裂工艺技术和成套装备,初步形成了煤矿井下定向长钻孔水力压裂煤层增透技术体系。

## 1 井下定向长钻孔水力压裂面临的问题与对策

煤岩层具有多孔介质和非均质属性,由层理、节

理、天然裂隙和孔隙等组成的裂隙系统较为复杂<sup>[16-18]</sup>,其对水力压裂的影响体现在2个方面:①必然存在相应的地层滤失率,且钻孔越长,地层滤失效应越明显,直接导致泵注压力和泵注排量无法达到压裂煤岩层、延展裂缝的效果<sup>[19-20]</sup>;②现有水力压裂技术在短钻孔中无法实现煤岩层均衡增透,钻孔越长,水力压裂的不均衡性越大,增透空白带越严重且无法避免。

定向长钻孔一般钻进长度大于300 m,由上可知,定向长钻孔中实施水力压裂工程,既要保证现有泵注能力达到破裂煤岩层,又要尽可能避免压裂不均衡性、实现均衡压裂。基于此,课题组研发了定向长钻孔孔内快速、定点、分段与可重复利用的水力压裂工具组合,针对矿井常用等瓦斯抽采钻孔孔径94、96(98)、120 mm,分别开发了匹配的成套工具,实现了单孔压裂14段的突破。该套工具可实现稳定煤岩层定向长钻孔的任1点(段、分支孔)的封隔和压裂,即将定向长钻孔分为 $n$ 段实施独立压裂,可有效封隔非目标层段钻孔、降低非必要地层滤失。优选BYW65/400型压裂泵(最高压力65 MPa、排量1.458 m<sup>3</sup>/min)、BYW50/315J压裂泵组(最高压力52.8 MPa、排量1.128 m<sup>3</sup>/min)等高压、大排量的井下水力压裂泵组,根据压裂实际需要,采用双泵或多泵并联形式以增加泵注排量达到压裂施工要求。孔内水力压裂工具组合配备大排量、高压压裂泵组构成了井下定向长钻孔水力压裂成套装备,实现了煤矿井下水力压裂由传统的常规点式压裂向区域压裂的转变,解决了井下定向长钻孔水力压裂与泵注能力不匹配及整体压裂不均衡问题。

## 2 孔内压裂工具组合与施工工艺

### 2.1 压裂工具组成与封隔技术

定向长钻孔水力压裂孔内工具组合由引鞋、单流阀、封隔器、压差滑套、投球滑套、油管、反洗孔口等部件组成,其中,封隔器为核心部件,单个封隔器长度1 620 mm、最大扩张系数2.0,泵注压力大于0.5 MPa时即开始膨胀,适用于裸眼钻孔快速封孔与分段压裂。封隔器主要由胶筒、锁紧机构、密封原

件、中心管、浮动头等部件组成。座封时,封隔器下入孔内设计位置后,通过高压泵从油管注水打压,液体从中心管进入胶筒内囊腔,靠液体压力撑开和膨胀胶筒,使胶筒外表面紧贴孔壁,从而实现封隔。停止打压后,胶筒内置单流阀可保持封隔器座封状态。油管压力解除后,剪断上提油管以解封销钉使内外压力平衡,封隔器收缩解封。

## 2.2 整体/分段水力压裂施工工艺

1) 整体水力压裂。定向长钻孔施工完成后,利用钻机将水力压裂工具组合下入孔内,下入深度不小于 30 m,选取钻孔轨迹平滑、成孔性较好的孔段进行座封。座封完成后,继续开启高压泵对整个钻孔进行一次性压裂,施工结束解封封隔器,退出工具。

2) 分段水力压裂。根据定向长钻孔实钻轨迹与施工参数,设计封隔器座封位置、压裂段数、泵注压力等,确定油管长度、引鞋、单流阀、压差滑套、投球滑套、封隔器间距和数量及整体连接顺序。利用钻机输送压裂工具组合至煤(岩)孔内指定位置,水力压裂顺序为后退式,即先压裂孔底段第 1 段,再依次压裂第 2 段、第 3 段(图 1)。工具组合输送至设计位置后,开启高压泵注水,使多个封隔器同时膨胀座封,第 1 压裂段由封隔器 1 和压差滑套控制,第 2 段和第 3 段通过由小到大逐级投球方式打开投球滑套,实现分段压裂。



图 1 孔内分段压裂工具连接与工艺示意

Fig.1 Connection and process diagram of fracturing tool in hole

## 3 定向长钻孔水力压裂技术模式及适用条件

结合不同煤(岩)层定向长钻孔布孔方式,研发出适合于我国不同地质条件的煤矿井下定向长钻孔水力压裂工艺技术,即碎软煤层顶(底)板梳状孔整体/分段压裂技术、中硬煤层穿层定向长钻孔顺层整体压裂技术、硬煤层顺层定向长钻孔整体/分段水力压裂技术。

### 3.1 碎软煤层顶(底)板梳状孔整体/分段压裂技术

1) 工艺技术简介。采用定向钻进技术在距碎软煤层 1.0~5.0 m 的顶(底)板稳定岩层中施工长距离主孔,并开分支孔进入目标煤层。成孔后,下入

水力压裂工具组合进行裸眼快速封隔,采用高压、大排量水力压裂泵组,对钻孔进行整体(压裂段 < 300 m)或分段压裂(压裂段 > 300 m, 技术工艺如图 2 所示)。在高压水动力条件下,煤层顶(底)板岩层发生起裂,在钻孔与煤层之间产生相互交错的裂缝体系,形成以分支孔为一级裂缝、破裂岩体为二级裂隙的多级渗流网络通道,为瓦斯扩散-运移提供了良好通道,实现了碎软煤层远距离区域的瓦斯高效抽采。



图 2 碎软煤层底板梳状孔分段压裂技术示意

Fig.2 Schematic of segmented fracturing of comb-type hole in bottom of broken soft seam

2) 适用条件。煤层顶(底)板岩层成孔性好,主孔层位以砂岩和泥质砂岩为主,煤层松软(煤的坚固性系数  $f \leq 0.5$ )、破碎、成孔性差,地质构造复杂程度属简单-中等类型。

3) 应用目的。主要用于碎软低渗高瓦斯、煤与瓦斯突出煤层的区域瓦斯超前预抽,实现煤巷条带、回采工作面或区段以及石门揭煤等区域的煤层增透和瓦斯高效预抽。

### 3.2 中硬煤层穿层定向孔顺煤层整体压裂技术

1) 工艺技术简介。煤层硬度适宜施工顺层定向长钻孔,需满足水力压裂施工的有效封孔深度和封孔质量。在煤层顶(底)板岩层或钻场开孔,施工穿层定向钻孔,钻孔见煤后顺层钻进。成孔后,在岩孔段内下入压裂工具组合实现岩孔段的快速封隔,采用高压泵向煤层段长钻孔注入高压水,对煤层进行整体压裂,随压裂液持续注入,煤层原有裂缝不断延伸和扩展并产生新裂缝,形成丰富的裂隙网络,技术工艺如图 3 所示。

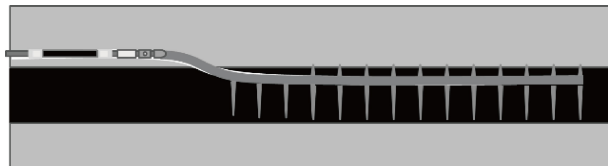


图 3 中硬煤层穿层定向长钻孔整体压裂技术示意

Fig.3 Schematic of integrated fracturing of layer-through directional hole in medium hard seam

2) 适用条件。煤的坚固性系数满足  $0.5 < f \leq 1.5$ ,能够施工顺层定向长钻孔,地质构造复杂程度属简单-中等类型。

3) 应用目的。实现煤层透气性的区域性整体

提升,提高煤层瓦斯抽采效率,增加钻孔有效抽采半径,降低抽采工程投入,减少瓦斯抽采达标时间,缓解采掘接续紧张局面,取消或减少突出煤层顶(底)板岩巷数量。

### 3.3 硬煤层顺层定向长钻孔整体/分段水力压裂技术

1) 工艺技术简介。在硬煤层中施工定向长钻孔,成孔后,下入水力压裂工具组合实施裸眼定点、快速封隔,采用高压泵实施顺层定向长钻孔整体(压裂段<300 m)或分段水力压裂(压裂段>300 m,技术工艺如图4所示),压裂范围均匀可控,改造煤层原有裂隙系统,提高煤层透气性。

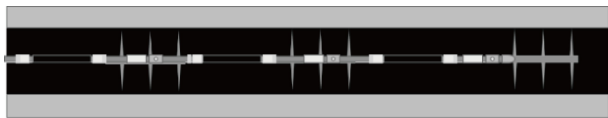


图4 硬煤顺层定向长钻孔分段压裂示意

Fig.4 Schematic of segmented fracturing of directional long borehole down hard seam

2) 适用条件。具有一定的厚度且相对稳定的煤层,煤体结构较为完整( $f>1.5$ ,能够有效保证孔内压裂工具的封隔质量),煤层抽采难易程度属于较难抽采—可以抽采,地质构造复杂程度属简单—中等类型。

3) 应用目的。实现低透气性硬煤层的煤巷条带、回采工作面或区段、以及石门揭煤等煤层区域增透和瓦斯高效预抽。

## 4 不同技术模式工程实践

### 4.1 韩城矿区碎软煤层顶板梳状孔分段水力压裂

韩城矿区位于鄂尔多斯盆地东缘,主采二叠系下统山西组3号煤层,矿区瓦斯灾害严重。3号煤层透气性差,钻孔瓦斯初始体积分数最大达10%以上,很快衰减到1%~2%。煤层瓦斯含量高( $10\text{ m}^3/\text{t}$ 以上)、压力大(2.50 MPa),煤体松软( $f$ 为0.1~0.3),顺煤层钻孔一般施工深度为30~40 m,局部仅15~30 m<sup>[21]</sup>,常规措施难以实现大区域瓦斯高效抽采。试验地点选取桑树坪二号井3309工作面,3号煤层平均厚度5.97 m,煤层伪顶为泥岩,厚度0.05~0.20 m,直接顶为灰黑色粉砂岩,厚度1.5~1.8 m,较致密坚硬,具备定向长钻孔施工条件。钻孔开孔点位于3号煤层,由煤层进入直接顶稳定岩层;采用前进式开分支工艺,施工主孔长度588 m、8个分支孔,累计进尺1 188 m,主孔至煤层距离最大达3.28 m。采用分段水力压裂工艺完成4段压裂施工(封隔器最大入孔深度467.81 m),累计压裂液用量2 012 m<sup>3</sup>、最大泵注压力8.74 MPa,钻孔布置与分段压裂如图5所示。压裂后,实测水力压裂影响半径最大达39.6 m;抽采体积分数为19.6%~56.0%,平均41.28%,钻孔瓦斯抽采纯量为479.81~2 776.03 m<sup>3</sup>/d,平均1 558.87 m<sup>3</sup>/d,是该煤层常规钻孔的4.8倍。

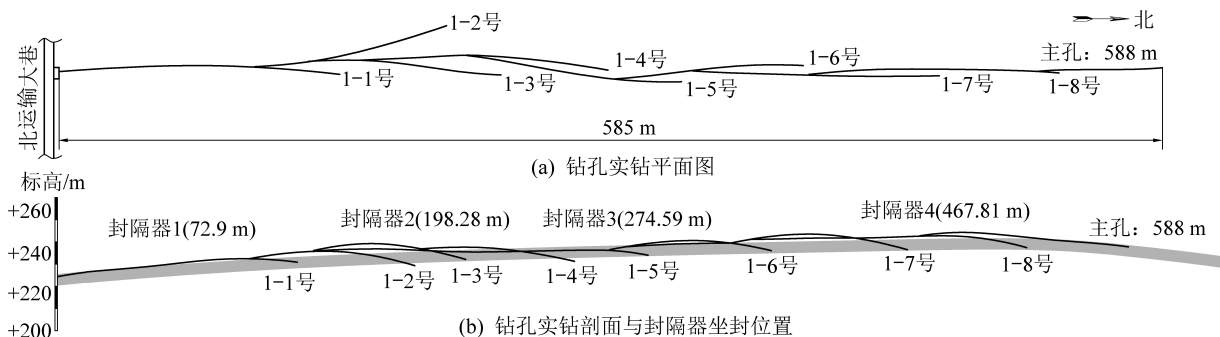


图5 3号煤层顶板梳状孔布置与分段压裂

Fig.5 Arrangement of roof comb hole and segmented fracturing in No.3 seam

### 4.2 黄陵矿区中硬煤层定向长钻孔水力压裂技术

黄陵矿区地处华北板块鄂尔多斯盆地陕北斜坡带庆阳单斜东南角,属煤油气共生矿区,矿区主采延安组2号煤层<sup>[22]</sup>平均厚度3.91 m,煤类为弱黏煤,地质类型属简单型,煤层瓦斯分布不均衡,最大达6.67 m<sup>3</sup>/t,煤层透气性系数为30.87 m<sup>2</sup>/(MPa<sup>2</sup>·d), $f$ 为0.92~1.40。试验点选取黄陵2号煤矿211工作面。

为防止常规水力压裂钻孔“钢管+水泥砂岩”封孔工艺对工作面安全回采所带来的风险和隐患,提出压裂钻孔“先入顶板后进煤层”的定向长钻孔布

置方式和可重复使用、定点封隔整体水力压裂工艺。从煤层巷道开孔进入煤层顶板并控制钻孔轨迹在2号煤层顶板岩层延深(深度>80 m),随后进入2号煤层顺层钻进。水力压裂工具位于顶板岩层中,以保证良好的封隔效果。共施工5个定向长钻孔(图6),主孔深度240~285 m,钻孔孔径96 mm,压裂段(煤层段)长度117~216 m,钻孔累计压裂液用量874.79 m<sup>3</sup>、最大泵注压力19 MPa。实施水力压裂后,平均钻孔瓦斯抽采量0.173~1.059 m<sup>3</sup>/min,是未压裂钻孔的4倍,钻孔瓦斯抽采体积分数为42.5%~86.5%;实测水力压裂影响半径最小为36 m。

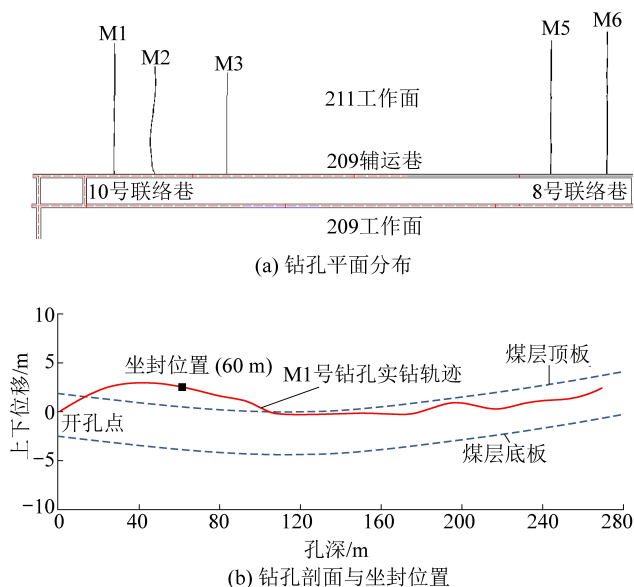


图6 定向钻孔实钻轨迹与封隔位置

Fig.6 Actual trajectory and set packer location

### 4.3 焦作矿区硬厚煤层顺层深孔水力压裂技术

选择焦作赵固二矿,该矿井为煤与瓦斯突出矿井,主采煤层为二叠系下统山西组 $2_1$ 煤层,属2号优质无烟煤, $2_1$ 煤层厚度为6.03~6.77 m,平均厚度6.4 m,煤层瓦斯含量为3.94~13.96  $\text{m}^3/\text{t}$ 。煤的坚固性系数为1.6~2.5,适宜施工定向长钻孔。但 $2_1$ 煤层透气性差、钻孔有效影响半径小,导致抽采钻孔工程量大、抽采效果不理想,需采取煤层增透措施以强化瓦斯抽采。压裂钻孔由11060工作面回风巷开孔,穿过回采面向运输巷掘进区域施工,对11060工作面运输巷掘进区域的 $2_1$ 煤层实施超前压裂增透与瓦斯预抽。施工钻孔主孔长度605.5 m,孔径115 mm,设计有效压裂段为385~605 m段,长220 m。采用顺煤层定向长钻孔整体水力压裂工艺,裸眼封隔器封隔方式,累计下入压裂工具组合388.63 m,封隔压裂段为220 m,共下入3个封隔器,分别位于孔深385.73、378.69、126.5 m处(图7)。

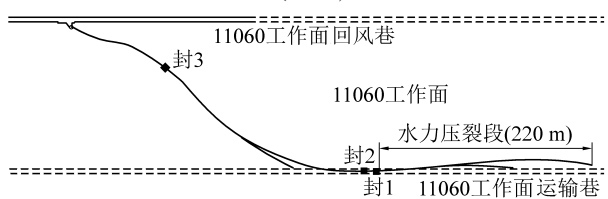


图7 钻孔实钻与坐封位置

Fig.7 Actual trajectory and set packer location

压裂段累计压裂液用量1 613  $\text{m}^3$ ,最大泵注压力24.3 MPa。施工过程中孔口不漏水,表明封孔质量较好,能够满足水力压裂施工要求。压裂后,实测水力压裂影响半径达33 m;钻孔瓦斯抽采量为7.08~134.03  $\text{m}^3/\text{d}$ ,平均60.06  $\text{m}^3/\text{d}$ ,是常规瓦斯抽采钻孔的2.3倍。

## 5 结 论

1)研发出快速、定点、分段与可重复利用的水力压裂孔内工具组合,其将定向长钻孔分为多段实施独立压裂,与配备的大排量、高压水力压裂泵组构成了井下定向长钻孔水力压裂成套装备,实现了煤矿井下水力压裂由传统的常规点式压裂向区域压裂的转变。

2)形成井下定向长钻孔碎软煤层顶(底)板梳状孔整体/分段压裂、中硬煤穿层定向孔顺煤层整体压裂以及硬煤顺层定向长钻孔整体/分段水力压裂煤层增透技术体系。在韩城矿区、黄陵矿区和焦作矿区进行了现场实践:①韩城矿区碎软煤层实施了顶板梳状孔,主孔长度588 m、分4段压裂施工,最大封隔深度467.81 m,压裂半径达39.6 m,钻孔瓦斯抽采量是常规钻孔的4.8倍;②黄陵矿区中硬煤层实施了“先入顶板后进煤层”的定向长钻孔整体水力压裂技术,压裂钻孔瓦斯抽采量是未压裂的4倍,压裂影响半径最小为36 m;③焦作赵固二矿实施了硬煤顺层定向长钻孔水力压裂,主孔深度605 m,封隔深度385.73 m、压裂段长220 m,水力压裂影响半径33 m,钻孔瓦斯抽采量是常规抽采钻孔的2.3倍。

3)定向长钻孔水力压裂煤层增透技术体系为不同煤储层条件下煤层瓦斯的“区域超前高效抽采”提供了有效技术支撑,特别是对碎软煤层,可在煤层顶、底板稳定岩层成孔并实施压裂,突破了碎软煤层大区域瓦斯预抽的技术瓶颈。

### 参考文献(References):

- [1] 袁亮,林柏泉,杨威.我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J].煤炭科学技术,2015,43(1):45-49.  
YUAN Liang, LIN Baiquan, YANG Wei. Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in China coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2015,43(1):45-49.
- [2] 刘毅,张禹.我国煤矿瓦斯防治与抽采利用技术进展[J].煤炭科学技术,2013,41(S2):185-188.  
LIU Yi, ZHANG Yu. Technologies development of coal mine gas control and CBM/CMM utilization[J]. Coal Science and Technology, 2013,41(S2):185-188.
- [3] 张有狮.煤矿井下水力压裂技术研究进展及展望[J].煤矿安全,2012,43(12):163-165,172.  
ZHANG Youshi. Research progress and prospect of hydraulic fracturing technologies in coal mine underground[J]. Safety in Coal Mines, 2012,43(12):163-165,172.
- [4] 徐幼平,林柏泉,翟成,等.定向水力压裂裂隙扩展动态特征分析及其应用[J].中国安全科学学报,2011,21(7):104-110.  
XU Youping, LIN Baiquan, ZHAI Cheng, et al. Analysis on dynamic characteristics of cracks extension in directional hydraulic

- fracturing and its application[J]. *China Safety Science Journal*, 2011,21(7):104-110.
- [5] 张帆,马耕,刘晓,等.泵注排量对煤层水力压裂影响的试验研究[J].*煤矿安全*,2017,48(7):13-15,19.  
ZHANG Fan, MA Geng, LIU Xiao, *et al.* Experimental research on effect of pumping displacement on hydraulic fracturing in coal reservoir[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017,48(7):13-15,19.
- [6] 翟成,李贤忠,李全贵.煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用[J].*煤炭学报*,2011,36(12):1996-2001.  
ZHAI Cheng, LI Xianzhong, LI Quanguai. Research and application of coal seam pulse hydraulic fracturing technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011,36(12):1996-2001.
- [7] 袁亮.我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J].*煤炭学报*,2016,41(1):1-6.  
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016,41(1):1-6.
- [8] 煤安监技装[2019]28号.防治煤与瓦斯突出细则[S].
- [9] 姚宁平,张杰,李乔乔.煤矿井下近水平定向钻孔技术研究与应用[J].*煤炭科学技术*,2011,39(10):53-57.  
YAO Ningping, ZHANG Jie, LI Qiaoqiao. Research and application of horizontal directional drilling technology in underground mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2011,39(10):53-57.
- [10] 石智军,李泉新,姚克.煤矿井下1800m水平定向钻进技术与装备[J].*煤炭科学技术*,2015,43(2):109-113.  
SHI Zhijun, LI Quanxin, YAO Ke. Underground mine 1800m horizontal directional drilling technology and equipment[J]. *Coal Science and Technology*, 2015,43(2):109-113.
- [11] 王耀锋,何学秋,王恩元,等.水力化煤层增透技术研究进展及发展趋势[J].*煤炭学报*,2014,39(10):1945-1955.  
WANG Yaofeng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, *et al.* Research progress and development tendency of the hydraulic technology for increasing the permeability of coal seams[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014,39(10):1945-1955.
- [12] 孙四清,张群,闫志铭,等.碎软低渗高突煤层井下长钻孔整体水力压裂增透工程实践[J].*煤炭学报*,2017,42(9):2337-2344.  
SUN Siqing, ZHANG Qun, YAN Zhiming, *et al.* Practice of permeability enhancement through overall hydraulic fracturing of long hole in outburst-prone soft crushed coal seam with low permeability[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017,42(9):2337-2344.
- [13] 李国栋,郑凯歌,陈冬冬.赵固二矿本煤层定向长钻孔水力压裂增透技术研究[J].*煤炭工程*,2019,51(7):53-57.  
LI Guodong, ZHENG Kaige, CHEN Dongdong. Study on permeability enhancement technology through overall hydraulic fracturing of long directional hole in Zhaogu No. 2 coal mine mining coal seam[J]. *Coal Engineering*, 2019,51(7):53-57.
- [14] 王建利,陈冬冬,贾秉义.韩城矿区碎软煤层顶板梳状孔水力压裂瓦斯抽采工程实践[J].*煤田地质与勘探*,2018,46(4):17-21.  
WANG Jianli, CHEN Dongdong, JIA Bingyi. Practice of gas drainage by hydraulic fracturing of roof pectination boreholes in broken soft coal seam in Hancheng mining area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018,46(4):17-21.
- [15] 郑凯歌.碎软低透煤层底板梳状长钻孔分段水力压裂增透技术研究[J].*采矿与安全工程学报*,2020,37(2):272-281.  
ZHENG Kaige. Permeability improving technology by sectional hydraulic fracturing for comb-like long drilling in floor of crushed and soft coal seam with low permeability[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020,37(2):272-281.
- [16] 祝一搏.多介孔质孔隙结构特征及其输运属性分析[D].焦作:河南理工大学,2015.
- [17] 王登科,于充,魏建平,等.基于LBM方法的裂隙煤岩应力-应变过程中渗流特性研究[J].*岩石力学与工程学报*,2020,39(4):695-704.  
WANG Dengke, YU Chong, WEI Jianping, *et al.* Seepage characteristics of loaded fractured coal based on LBM Method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*: 2020,39(4):695-704.
- [18] 李永,林柏泉,杨凯,等.注热蒸汽后的煤体微观孔裂隙演化规律[J].*煤炭科学技术*,2019,47(12):102-108.  
LI Yong, LIN Baiquan, YANG Kai, *et al.* Evolution law of microscopic pore fractures of coal after hot steam injection[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019,47(12):102-108.
- [19] 付江伟,田坤云,王公忠,等.井下“双高”专用压裂泵组研制与应用[J].*煤炭工程*,2016,48(5):135-138.  
FU Jiangwei, TIAN Kunyun, WANG Gongzhong, *et al.* Development and application of special underground fracturing pump unit with high pressure and displacement[J]. *Coal Engineering*, 2016,48(5):135-138.
- [20] 吴信波,王谦,张俊.彬长矿区煤层气井水力压裂效果影响因素分析[J].*非常规油气*,2017,4(6):100-104.  
WU Xinbo, WANG Qian, ZHANG Jun. Analysis on Influencing factors of hydraulic fracturing effect of coalbed methane wells in Binchang mining area[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2017,4(6):100-104.
- [21] 史晓勇.韩城矿区松软突出煤层瓦斯抽采技术研究[J].*煤炭工程*,2012(S1):109-110.  
SHI Xiaoyong. Study on gas extraction technology of soft outburst coal seam in Hancheng mining area[J]. *Coal Engineering*, 2012(S1):109-110.
- [22] 陈冬冬.煤油气共生矿井围岩气多因素耦合区域预测技术:以鄂尔多斯盆地黄陵矿区为例[J].*煤田地质与勘探*,2018,46(2):49-53.  
CHEN Dongdong. Prediction technology of surrounding rock gas zones by multiple factor coupling in coal mines with coal-oil-gas coexistence[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018,46(2):49-53.