



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](#)

安全科学与工程



移动扫码阅读

牟全斌,闫志铭,张 俭.煤矿井下定向长钻孔水力压裂瓦斯高效抽采技术[J].煤炭科学技术,2020,48(7): 296-303. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.07.032

MOU Quanbin, YAN Zhiming, ZHANG Jian. High efficiency gas drainage technology of hydraulic fracturing with directional long drilling in underground coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 296-303. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.07.032

煤矿井下定向长钻孔水力压裂瓦斯高效抽采技术

牟全斌¹, 闫志铭², 张 俭¹

(1.中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710054;2.阳泉煤业(集团)有限责任公司,山西 阳泉 045000)

摘 要:为了提高煤矿井下单一低渗煤层瓦斯抽采效果,基于普通中、短钻孔水力压裂技术在瓦斯治理方面存在的弊端,结合煤储层地质条件和定向钻进技术特点,提出了井下定向长钻孔水力压裂瓦斯高效抽采技术,总结了长钻孔整体压裂和围岩梳状孔分段压裂2种水力压裂模式,分析了施工工艺和关键技术,以阳泉矿区为例,进行了定向长钻孔水力压裂试验,并考察了其效果。结果表明:长钻孔整体压裂采用基于扩张式封隔器原理的快速封孔技术,可在10 min内实现封孔工具组合快速坐封。梳状孔分段压裂施工采用裸眼封隔器滑套分段压裂工艺,利用孔口投球方式依次打开各级投球滑套,完成各个分支钻孔注水压裂作业。水力压裂影响范围内煤体全水分随着与钻孔距离的增大呈现先增大、后减小的现象,煤层瓦斯含量与煤体全水分呈现相反的分布特征。压裂过程中巷道受力变形现象明显,放喷初期水流大量携粉,排粉量达到6.5 t。长钻孔整体压裂和梳状孔分段压裂的最大影响半径分别达到58 m和60 m,比常规压裂钻孔增大2.32倍和3.53倍,平均瓦斯抽采纯量达1.51 m³/min和0.25 m³/min,比常规压裂钻孔提高24.40倍和13.89倍。分析认为压裂过程存在水驱气效应,且压裂对煤储层改造效果在空间上存在不均衡性。煤岩体吸水后发生体积膨胀和软化现象,改变了钻孔周围应力场的分布,导致了巷道受到挤压破坏发生变形。梳状孔分段压裂过程中围岩中裂缝通过牵引作用与煤层中压裂裂缝沟通,进而形成新的煤储层裂隙网络系统,有利于提高瓦斯抽采效果。

关键词:整体压裂;分段压裂;梳状孔;坐封;抽采效果

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)07-0296-08

High efficiency gas drainage technology of hydraulic fracturing with directional long drilling in underground coal mine

MOU Quanbin¹, YAN Zhiming², ZHANG Jian¹

(1. Xi'an Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an 710054, China;

2. Yangquan Coal Industry (Group) Co., Ltd., Yangquan 045000, China)

Abstract: In order to improve the gas drainage effect of a single coal seam with low permeability in underground coal mines, based on the shortcomings of the gas fracturing technology of ordinary medium and short borehole hydraulic fracturing, combined with the geological conditions of coal reservoirs and the characteristics of directional drilling technology, a high-efficiency gas drainage technology of directional long borehole hydraulic fracturing is put forward, and the overall pressure of long borehole is summarized. Two hydraulic fracturing modes—integral fracturing and comb-shape borehole fracturing in surrounding rock are introduced. The construction technologies and key technologies are analyzed. Taking Yangquan mining area as an example, the directional long borehole hydraulic fracturing test was carried out and its effect was investigated. The results show that the fast fracturing technology based on the principle of expandable packer can be

收稿日期:2020-01-25;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045002);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JM-314);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(2019XAYZD10-3)

作者简介:牟全斌(1982—),男,陕西汉中,人,副研究员。Tel:029-87862509, E-mail: muquanbin518@126.com

used for integral fracturing of long boreholes, and the fast setting of combination of sealing tools can be realized within 10 minutes. The slip sleeve fracturing technology of bare-hole packer was adopted in the section fracturing of comb hole, and the slip sleeve of all levels was opened in turn by the way of hole opening shot, thus the water injection fracturing operation of each branch of comb-shape borehole was completed. With the increase of the distance from the borehole, the total water content of the coal in the influence range of hydraulic fracturing first increases and then decreases, and the gas content of the coal seam has the opposite distribution characteristics to the total water content of the coal body. During the fracturing process, the stress and deformation of the roadway were obvious. In the initial stage of the ejection, the water flow carried a large amount of powder, and the powder discharge amount reached 6.5 t. The maximum influence radius of integral fracturing with long boreholes and sectional fracturing with comb-shape boreholes are 58 m and 60 m respectively, which are 2.32 times and 3.53 times larger than that of conventional fracturing boreholes. The average gas drainage volume is $1.51 \text{ m}^3/\text{min}$ and $0.25 \text{ m}^3/\text{min}$, which are 24.40 times and 13.89 times higher than that of conventional fracturing boreholes. The analysis shows that there was a water flooding effect in the fracturing process, and there was a spatial imbalance in the effect of fracturing on the coal reservoir transformation.. The phenomenon of volume expansion and softening occurs after water absorption of coal and rock mass, which changes the distribution of stress field around boreholes, and leads to the deformation of roadway under compression damage. During the staged fracturing of comb holes, the fractures in the surrounding rock communicate with the fractures in the coal seam through traction, thereby forming a new coal reservoir fracture network system, which is conducive to improving the gas drainage effect.

Key words: integral fracturing; sectional fracturing; comb-shape boreholes; sealing; drainage effect

0 引言

我国煤矿区成煤地质背景复杂,多数煤层具有低渗、不饱和、高吸附性、构造煤发育等特点^[1-2],瓦斯抽采达标难度大,单一低渗突出煤层瓦斯高效抽采仍是煤矿区瓦斯治理亟待突破的技术难题。近年来,国内学者提出了以卸压抽采^[3-4]和缝网改造^[5]为代表的低渗高突煤层瓦斯治理技术,围绕水力压裂^[6-8]、水力冲孔^[9]、水力割缝^[10]等水力化增透技术在煤矿井下进行了大量试验,特别是水力压裂技术,由于其具有卸压范围大、增透效果明显等优点而受到了广泛的关注^[11-12]。

水力压裂技术利用高压水对钻孔周围煤体物理力学性质、应力场和瓦斯渗流场产生扰动和改变,使之重新分布,并在钻孔周围煤体中产生驱排瓦斯和激活原生裂隙的双重作用,能显著改善煤层瓦斯流动条件、提高钻孔瓦斯抽采效果。目前国内学者围绕井下水力压裂增透机理^[13]、压裂参数设计^[14]、钻孔优化布置^[15]、压裂影响范围考察^[16]等方面开展了大量的理论研究和工程试验,并积极探索定向压裂^[17]、重复压裂^[18]、脉动压裂^[19]、加砂压裂^[20]等新的压裂技术。然而,常规的煤矿井下水力压裂作业多以普通中、短钻孔为主,技术层面上存在以下几个问题:①压裂作业与钻探工程结合不够,煤层段钻孔长度短(<200 m),煤体与高压水作用空间受限,压裂影响半径较小、难以实现真正意义上的区域瓦斯治理;②封孔技术落后,常采用水泥、聚氨酯封孔方式,封孔位置处于巷道卸压圈影响范围之内,压裂作业过程中有漏水、压穿孔口的风险;③压裂设备排量

有限,不足以克服地层滤失效应,孔内压力达不到地层的破裂压力。上述技术问题制约了水力压裂技术的进一步推广应用。张群等^[21]提出了碎软低渗煤层的顶板岩层水平井分段压裂技术模式,探索了“泵送桥塞+定向射孔”联作的分段压裂工艺,并在淮北矿区取得了成功。杨宏伟^[22]通过数值模拟和现场试验结合的方法,分析了井下低透气性煤层分段点式压裂的原理和过程,提出了井下点式水力压裂技术工艺。罗文等^[23]研究了井下双封单卡拖动管柱式顶板长钻孔分段水力压裂技术,并用于对神东矿区坚硬难垮落顶板的弱化。马文伟等^[24]研制了由注水器、封孔胶囊等组成的井下短钻孔分段压裂装置,实现了50~60 m短钻孔的分段压裂。然而,针对于井下长钻孔水力压裂瓦斯高效抽采技术研究相对匮乏。

近年来,国内厂家成功研制了井下大功率水力压裂泵组,同时,在国家科技重大专项的支持下,煤矿井下定向钻进装备及技术得到迅速发展,并在瓦斯抽采、隐蔽致灾地质因素探查及防治水等方面取得了广泛应用^[25-26],已形成顶板高位定向钻孔、顶(底)板梳状定向钻孔、本煤层定向钻孔等多种钻进技术和工艺^[27-28],为定向钻进技术与水力压裂技术相结合提供了可能。与普通中、短钻孔水力压裂相比,定向长钻孔水力压裂在施工工艺与技术方面更为复杂,中煤科工集团西安研究院有限公司针对传统中、短钻孔水力压裂存在的问题,结合井下煤储层地质条件和定向钻进技术特点进行了大量探索,提出了井下定向长钻孔水力压裂瓦斯治理模式,并进行了井下工业性试验,取得了较好的效果,笔者旨在对上述技术进行总结,以

期对突出矿井瓦斯治理有所启示。

1 定向长钻孔水力压裂模式

1.1 长钻孔整体压裂

选择在底抽巷开孔,钻孔沿煤层底板进入煤层,根据煤层产状合理设计钻孔轨迹,使钻孔轨迹沿着煤层走向布置(图1)。采用滑动复合钻进工艺,利用定向钻进技术控制钻孔轨迹沿着煤层走向延伸,在条件允许的情况下,可在煤层中施工分支孔,增大水力压裂影响范围。根据煤层底板岩性组合,在岩孔段末端选择合适层位下入扩张式封隔器进行封孔,采用大排量压裂泵一次性对整个煤孔段进行整体压裂。此技术可用于对煤巷掘进区域进行强化抽采,以替代常规底抽巷密集型瓦斯抽采钻孔。

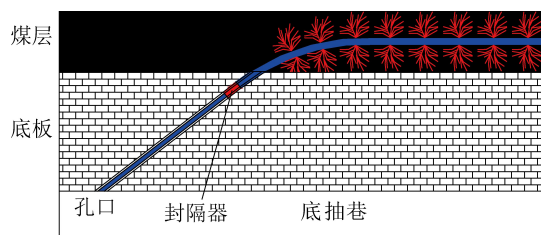
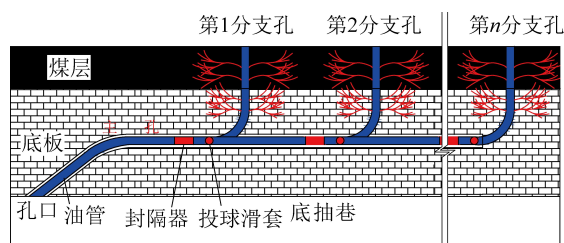


图1 井下长钻孔整体压裂示意

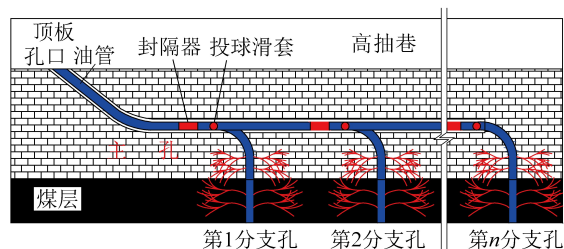
Fig.1 Schematic diagram of long hole integral fracturing underground

1.2 围岩梳状孔分段压裂

围岩梳状孔分段压裂模式可分为底板梳状孔分段压裂和顶板梳状孔分段压裂2类(图2),针对碎软低渗煤层中成孔难的技术弊端,选择在底抽巷或



(a) 底板梳状孔分段压裂



(b) 顶板梳状孔分段压裂

图2 梳状孔分段压裂示意

Fig.2 Schematic of comb-shape borehole sectional hydraulic fracturing

高抽巷开孔,主孔布置在成孔性较好的煤层底板或顶板稳定地层中,采用“前进式”或“后退式”的开分支施工工艺,首先在煤层底板(或顶板)下方(或上方)2~5 m 施工长定向孔作为主孔,之后从主孔采用裸眼开分支的方法施工若干分支孔进入煤层,要求分支孔穿透煤层,分支孔之间间距大于50 m,分支孔间要有不低于20 m 的长平缓孔段,便于封隔器坐封。压裂作业采用裸眼封隔器滑套分段压裂工艺,首先在水平段各分支开孔位置前下入坐封式封隔器和投球滑套,利用井口投球装置投球憋压,依次打开相应位置的滑套,从远到近依次实现对各个分支进行水力压裂作业,实现“一次性全部坐封、逐级分段压裂”,该技术主要适用于构造软煤普遍发育的煤层条件,实现对煤层及围岩进行联合增透作业。

2 压裂工艺及关键技术

2.1 长钻孔整体压裂

井下长钻孔整体水力压裂作业可分为准备阶段、高压注水阶段和保压阶段,准备阶段主要包括设备连接、通孔、洗孔、封孔、试压等工序,高压注水阶段包括注水压裂、监测监控工序;保压阶段包括关泵、保压、排水等工序。压裂完成后将压裂孔作为瓦斯抽采孔,实现一孔多用。

准备阶段首先对压裂钻孔进行通孔作业,并用清水反复洗孔,清除孔内沉渣,然后对压裂设备进行试车。采取基于扩张式封隔器原理的快速封孔技术,根据钻探过程地层岩性判识,选择孔径稳定层段下入由引鞋、单流阀、压差滑套、扩张式封隔器等组成的封孔工具组合(图3)。通过从油管内打压,靠水压迅速撑开和膨胀胶筒,在10 min 内实现封孔工具组合快速坐封。高压注水阶段采用整体不间断压裂方式,选用清水作为压裂液,详细记录时间、压力、排量等压裂数据,当注水量达到设计要求时停止压裂作业。压裂结束后上提油管剪断封隔器销钉即实现解封。压裂结束后进行保压,使钻孔内流体压力缓慢降低直至恢复平衡,而后打开孔口阀门进行排水作业。



图3 封孔工具组合实物示意

Fig.3 Physical map of sealing tool composition

2.2 梳状孔分段压裂

梳状孔分段压裂施工流程主要包括下入孔内压

裂装置、孔口设备安装、坐封、投球、注水压裂、监测监控、保压、排水等。孔内压裂装置主要由扩张式封隔器、投球滑套、压差滑套、引鞋等组成,由高压油管连接并下入到预定位置(图4)。利用封隔器将主孔分隔成若干段,每段分别对应着一个分支钻孔。在相邻封隔器之间连接有投球滑套,每个投球滑套上设置有高压出水孔眼和球座。施工过程中采用裸眼封

隔器滑套分段压裂工艺,采用孔口投球方式将低密度球泵送到最里端的投球滑套球座内,封堵里面的分支钻孔,同时打开高压出水孔眼进行水力压裂作业。以此类推,由里向外逐级投球,依次打开各级投球滑套,完成梳状孔各个分支钻孔注水压裂作业。监测监控、保压、排水等工序和整体压裂一致。

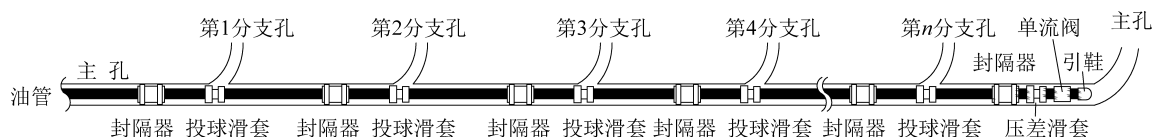


图4 梳状孔分段水力压裂封孔示意

Fig.4 Schematic chart of sectional hydraulic fracturing sealing for comb-shape borehole

3 现场应用

3.1 长钻孔整体水力压裂

阳泉矿区新景煤矿保安区目标煤层为3号煤,选择在南六底抽巷进行长钻孔整体水力压裂试验,试验区煤层平均厚度2.25 m,煤层瓦斯含量在12.87~15.95 m³/t,平均14.41 m³/t,瓦斯压力2.10 MPa,煤体全水分在2.54%~3.10%,平均2.82%,煤体结构类型以碎裂煤为主,局部受构造挤压破坏,有碎粒煤存在,坚固性系数 f 值为0.77,煤层透气性系数为0.009 7 m²/(MPa²·d),钻孔百米流量衰减系数为0.597 d⁻¹,属于典型的碎软低渗煤层。普通穿层钻孔瓦斯抽采体积分数仅为0.20%~

1.80%,抽采流量为0.003~0.006 m³/min,瓦斯抽采难度较大。

开孔位置与煤层垂直距离47 m,进入煤层后钻孔轨迹沿煤层走向布置(图5),采用滑动定向钻进技术,钻孔长度495 m,其中煤层段307 m,钻孔直径120 mm,水力压裂作业共计进行33.6 h,累计注入水量1 510 m³,最大泵注流量在0.66~0.94 m³/min,注水压力在17.17~26.09 MPa。压裂过程中巷道瓦斯体积分数在0.10%~0.45%,可观测到巷帮泥皮垮落、巷顶锚杆变形和局部渗水等现象。保压共15 d,孔口压力从13.50 MPa降低到2.20 MPa,放喷过程前期水流浑浊,携带大量煤粉,经现场测算,放喷期间排粉量达到6.5 t。

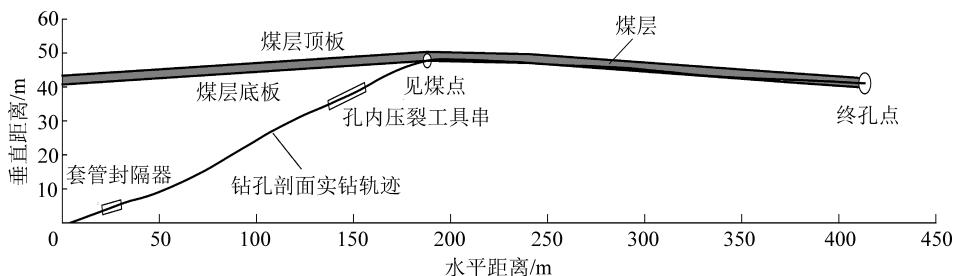


图5 长钻孔轨迹剖面

Fig.5 Long drill trajectory chart

试验期间共施工12组效果考察孔,其中1、2号钻孔布置在远离压裂钻孔的区域,且在压裂作业前施工。其余钻孔为压裂后的效果对比孔(图6)。采用定点采样方法对煤体全水分值、瓦斯含量参数进行测试,煤样密封后在24 h内送至实验室化验全水分,利用钻孔径向流量法对压裂前后煤层透气性系数进行测试。

经测试,压裂后煤层透气性系数为0.025 9 m²/(MPa²·d),是压裂前的2.67倍。煤体全水分在1.23%~13.01%,平均6.91%,比压裂前提高2.45

倍。煤层瓦斯含量在7.12~11.82 m³/t,平均9.20 m³/t,比压裂前降低36.16%,且压裂后煤层瓦斯含量和煤体全水分在空间展布方面呈现相反的分布特征(图7)。以煤体全水分参数作为考察指标,水力压裂最大影响半径达到58 m。通过对水力压裂钻孔瓦斯抽采参数监测分析,抽采初期瓦斯抽采流量快速升高,后期呈整体缓慢下降趋势。工况条件下抽采流量在0.46~1.88 m³/min,平均1.51 m³/min,连续抽采235 d累计瓦斯抽采量达50.80×10⁴ m³,而邻近区域普通穿层压裂钻孔平均瓦斯抽采流量为

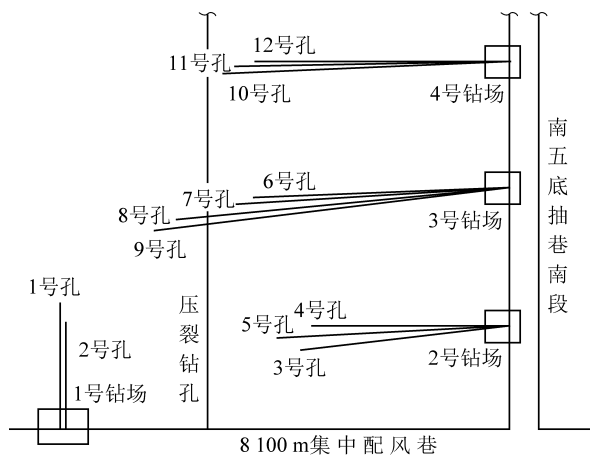


图6 效果考察钻孔布置示意

Fig.6 Schematic diagram of effect investigation holes

0.062 m³/min,最大压裂影响半径为 25 m。与普通穿层压裂钻孔对比,本次长钻孔水力压裂钻孔平均瓦斯抽采流量提高了 24.40 倍,最大压裂影响半径提高了 2.32 倍。

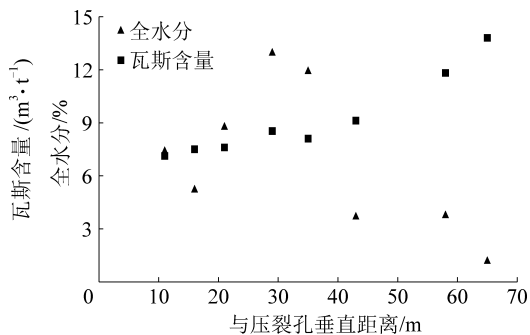


图7 压裂钻孔周围煤体全水分和瓦斯含量分布

Fig.7 Distribution of moisture and gas content in coal around the fracturing borehole

3.2 梳状孔分段压裂

在寺家庄煤矿 15117 工作面进风底抽巷施工 1 组煤层底板梳状孔,目标煤层 15 号煤,底板以灰黑色砂质泥岩为主,试验区煤层平均厚度 5.12 m,瓦斯含量 11.22 m³/t,煤层透气性系数为 0.011 9 m²/(MPa²·d),煤体全水分平均为 1.90%。

主孔布置在距离煤层底板 4.5 m 的砂质泥岩层中,采用“前进式”开分支施工工艺,即沿主孔由近至远向上依次施工分支钻孔。钻孔累计进尺 1 155 m,其中主孔孔深 534 m,穿煤段长度 30 m,1-4 分支长 78 m,穿煤段长度 24 m;1-3 分支长 55 m,穿煤段长度 21 m;1-2 分支长 127 m,穿煤段长度 46 m;1-1 分支长 136 m,穿煤段长度 40 m,主孔及分支孔孔径 120 mm,其中 1 个主孔和 4 个分支孔均穿过目标煤层(图 8),分支孔间距 80 m。压裂过程中由于 1-3 分支靠近切巷,漏水严重,被迫放弃,其余分支均正常作业。分段压裂累计注水时间 300

30.9 h,注水总量 1 098 m³,注入最大压力 17.18 MPa,最大排量 57.75 m³/h,平均注水排量达到 35 m³/h。主孔及各分支主要压裂作业参数分别为:主孔注水时间 824 min,注水量 611 m³,最大注水压力 17.18 MPa;1-4 分支注水时间 119 min,注水量 70 m³,最大注水压力 13.85 MPa;1-2 分支注水时间 643 min,注水量 278 m³,最大注水压力 10.69 MPa;1-1 分支注水时间 268 min,注水量 139 m³,最大注水压力 11.78 MPa。

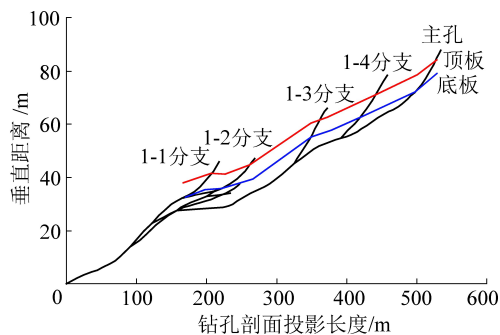


图8 底板梳状孔轨迹剖面

Fig.8 Floor comb-shape drill trajectory chart

压裂后施工考察钻孔对煤储层参数进行了测试,经测试,压裂后煤层透气性系数为 0.197 9 m²/(MPa²·d),比压裂前提高 16.60 倍。压裂后煤层瓦斯含量平均为 8.36 m³/t,比压裂前降低 25.5%。煤体全水分平均值为 4.71%,提高了 2.47 倍。最大影响半径达到 60 m,压裂后监测的瓦斯抽采流量平均为 0.25 m³/min,而同区域普通穿层压裂钻孔瓦斯抽采流量平均为 0.018 m³/min,最大影响半径为 17 m,压裂后抽采影响半径和瓦斯抽采量分别提高了 3.53 倍和 13.89 倍。

4 讨论

1)根据图 7,井下长钻孔水力压裂影响范围内煤体全水分值明显高于压裂前,随着测点距离压裂主孔距离越远,全水分呈现先增大、后降低的趋势,在距离钻孔 30 m 附近出现最大值,达到 13.01%。从瓦斯含量分布来看,整体上水分较高的区域瓦斯含量较小,煤层瓦斯含量与煤体全水分呈现相反的分特征,表明压裂过程中水驱气效应明显。但全水分、瓦斯含量在不同位置分布差异较大,说明长钻孔水力压裂对煤储层改造效果在空间上存在不均衡性。

2)水力压裂的裂缝形态与地应力分布密切相关,根据文献[29-30],阳泉矿区地应力分布比较复杂, σ_v 为 12.38 ~ 12.75 MPa, σ_H 为 11.75 ~ 14.06 MPa, σ_h 为 6.31 ~ 7.15 MPa(σ_v 为垂直主应力,

σ_H 为最大水平主应力, σ_h 为最小水平主应力),该区域地应力类型主要为正断型应力状态 $\sigma_V > \sigma_H > \sigma_h$,或走滑型应力状态 $\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$,垂直主应力与最大水平主应力比较接近,最大水平主应力方向为N38.4°—WN49°W,根据现有水力压裂成缝理论,地应力状态是影响裂缝扩展方向的主导因素,水力压裂破裂面垂直于最小主应力方向^[31],由此推测,裂缝形态以垂直裂缝为主,有利于沟通煤层与围岩。同时,根据文献[32],压裂裂缝的长度受岩层的脆性和塑性大小影响,脆性越大形成的压裂裂缝长度越大。在梳状孔分段水力压裂过程中,由于分支孔岩孔段距离长(占整个分支孔长度的60%~70%),而裂缝在岩层中作脆性主导性扩展,与围岩相比,煤层的脆性弱而塑性强,裂缝扩展压力低,而围岩中产生的裂缝由于规模大,通过牵引作用容易延伸、穿过煤岩界面进入煤层,撕裂碎软煤层,与煤层中压裂裂缝沟通,形成新的供气裂隙网络通道,更有利于提高瓦斯抽采效果。

3) 孔口放喷初期水流携带有大量煤粉,说明压裂过程高压水流产生的力学作用改变了钻孔周围煤体体积和分布形态。同时,压裂过程中巷道出现的泥皮垮落、锚杆变形、裂隙渗水等围岩受力变形现象,分析其原因,认为水力压裂过程煤岩体含水率增大,体积发生膨胀,改变了钻孔附近原有应力场的分布,加之煤岩体在吸水后发生软化,抗压强度降低,因此,巷道受到挤压破坏后容易发生变形。

4) 与煤层气水力压裂大排量($>8 \text{ m}^3/\text{min}$)、短时间(2~3 h)、连续作业方式相比,井下长钻孔压裂过程呈现注入规模小(排量 $<2.0 \text{ m}^3/\text{min}$),作业时间长(2~5 d)的特点,受采掘过程卸压作用影响,井下水力压裂过程滤失效应更为明显。此外,试验过程受井下作业条件限制,压裂施工并未实现全程连续不间断作业,上述因素对压裂效果带来的影响有待于进一步深入研究。

5 结 论

1) 结合煤矿井下地质条件和定向长钻孔施工工艺,针对性地提出了长钻孔整体压裂和围岩梳状孔分段压裂2种水力压裂技术模式,提出了压裂钻孔布置方式,分析了压裂作业主要工艺流程和关键技术。长钻孔整体压裂采用基于扩张式封隔器原理的快速封孔技术,而梳状孔分段压裂施工采用裸眼封隔器滑套分段压裂工艺。

2) 以阳泉矿区为例进行了长钻孔水力压裂工业试验,试验结果表明:①压裂过程中存在水驱气效

应,且对煤储层改造效果在空间上存在不均衡性;②压裂裂缝形态以垂直裂缝为主,梳状孔压裂过程中产生的围岩裂缝与煤层中压裂裂缝沟通,形成新的供气裂隙网络通道;③压裂过程改变了钻孔周围煤岩体物理性质和应力场分布,巷道受到挤压破坏发生变形;④压裂后钻孔瓦斯抽采效果得到了明显提高,瓦斯抽采量分别提高了24.40倍和13.89倍,最大影响半径分别达到58 m和60 m。

3) 井下长钻孔水力压裂瓦斯治理模式融合了定向钻进技术和水力压裂技术的优点,具有影响范围大、增透效果明显的特点,是实现低透气性煤层瓦斯高效抽采的有效技术途径,为工作面条带瓦斯治理提供了技术借鉴。

4) 建议下一步在压裂装备、地质选区、压裂参数和压裂工艺优化设计、压裂效果监测技术等方面展开深入研究,构建完善的井下长钻孔水力压裂瓦斯高效抽采技术体系。具体可开展下列研究:①井下大排量、小型化、智能化、本质安全型压裂设备研究;②井下加支撑剂水力压裂装备及压裂关键技术研究;③井下长钻孔水力压裂施工区域地质条件评价及区域优选方法研究;④长钻孔水力压裂优化设计方法研究,包括长钻孔布置参数优化设计、分段间距设计、压裂工艺及压裂参数优化研究;⑤长钻孔水力压裂裂缝形态及分布规律研究,特别是分段压裂裂缝穿层机理及延展规律研究;⑥井上下联合长钻孔分段水力压裂技术及工艺研究;⑦井下孔巷联合瞬变电磁、井下地质雷达等基于精细物探技术的长钻孔水力压裂效果监测技术研究。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 张泓,张群,曹代勇,等.中国煤田地质学的现状与发展战略[J].地球科学进展,2010,25(4):343-349.
ZHANG Hong, ZHANG Qun, CAO Daiyong, et al. Status and development strategy of coal geology in China[J]. Advances in Earth Science, 2010,25(4):343-349.
- [3] 袁亮.卸压开采抽采瓦斯理论与煤与瓦斯共采技术体系[J].煤炭学报,2009,34(1):5-12.
YUAN Liang. Theory of pressure-relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1):5-12.
- [4] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等.我国煤与瓦斯共采:理论与技术与工程[J].煤炭学报,2015,39(8):1391-1397.

- XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, *et al.* Theory, technology and engineering of simultaneous exploitation of coal and gas in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1391-1397.
- [5] 苏现波, 马耕, 宋金星, 等. 煤系气储层缝网改造技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 213-217.
- [6] 贾文超, 张明杰, 梁锡明, 等. 地应力与孔隙压力对定向水力压裂效果影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(12): 151-157.
- JIA Wenchao, ZHANG Mingjie, LIANG Ximing, *et al.* Study on geostress and pore pressure affected to directional hydraulic fracturing effect[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(12): 151-157.
- [7] 袁志刚, 任梅清, 沈永红, 等. 穿层钻孔煤巷条带水力压裂防突技术及应用[J]. 重庆大学学报, 2016, 39(1): 72-78.
- YUAN Zhigang, REN Meiqing, SHEN Yonghong, *et al.* Hydraulic fracturing technology by drilling through strata for outburst prevention in coal roadway stripes and its application[J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(1): 72-78.
- [8] 马衍坤, 刘泽功, 蔡峰. 急倾斜低透煤层水力压裂瓦斯及水分富集特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(6): 1160-1164.
- MA Yankun, LIU Zegong, CAI Feng. Characteristics of gas/water distribution in steeply inclined low permeability coal seam induced by hydraulic fracture[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(6): 1160-1164.
- [9] 刘东, 刘文. 水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 136-141.
- LIU Dong, LIU Wen. Research on gas extraction technology: hydraulic stamping and hydro-fracture to pressure relief and permeability improvement[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 136-141.
- [10] 张帅, 刘志伟, 韩承强, 等. 高突低渗透煤层超高压水力割缝卸压增透研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 147-151.
- ZHANG Shuai, LIU Zhiwei, HAN Chengqiang, *et al.* Study on coal pressure relief and permeability increase through ultra-high pressure hydraulic slotting in high outburst and low permeability coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 147-151.
- [11] 李经国, 戴广龙, 李庆明, 等. 低透煤层水力压裂增透技术应用[J]. 煤炭工程, 2016, 48(1): 66-69.
- LI Jingguo, DAI Guanglong, LI Qingming, *et al.* Application of hydraulic fracturing and permeability improvement technology for low permeability coal seam[J]. Coal Engineering, 2016, 48(1): 66-69.
- [12] 蔡峰, 刘泽功. 深部低透气性煤层上向穿层水力压裂强化增透技术[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 113-119.
- CAI Feng, LIU Zegong. Simulation and experiment research on upward cross-seams hydraulic fracturing in deep and low-permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 113-119.
- [13] 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.
- [14] 李国旗, 叶青, 李建新, 等. 煤层水力压裂合理参数分析与工程实践[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(12): 73-78.
- LI Guoqi, YE Qing, LI Jianxin, *et al.* Theoretical analysis and practical study on reasonable water pressure of hydro-fracturing technology[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(12): 73-78.
- [15] 王志荣, 韩中阳, 李树凯, 等. “三软”煤层注水压裂增透机理及瓦斯抽采施工参数确定[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(5): 739-746.
- WANG Zhirong, HAN Zhongyang, LI Shukai, *et al.* Mechanism of water-fracturing-induced permeability increment of “Three-Soft” coal seam and construction parameters determination[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5): 739-746.
- [16] 段建华, 汤红伟, 王云宏. 基于微震和瞬变电磁法的煤层气井水力压裂监测技术[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 160-166.
- DUAN Jianhua, TANG Hongwei, WANG Yunhong. Detection technology of hydraulic fracturing in coalbed methane well based on microseismic and transient electromagnetic method[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 160-166.
- [17] 王耀锋, 李艳增. 预置导向槽定向水力压穿增透技术及应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1326-1331.
- WANG Yaofeng, LI Yanzeng. The technology and application of directional hydraulic penetration permeability improvement by guided groove[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1326-1331.
- [18] 刘晓. 井下钻孔重复水力压裂技术应用研究[J]. 煤炭工程, 2013, 45(1): 40-42.
- LIU Xiao. Study on application of repeated hydraulic fracturing technology to borehole in underground mine[J]. Coal Engineering, 2013, 45(1): 40-42.
- [19] 王宁, 李树刚, 邓增社. 脉动水力压裂煤层微观结构变化及其工程实践[J]. 煤矿安全, 2019, 50(8): 18-22.
- WANG Ning, LI Shugang, DENG Zengshe. Microstructural changes of pulsating hydraulic fracturing coal seam and its engineering practice[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(8): 18-22.
- [20] 马海峰, 程志恒, 张科学, 等. 千米深井高瓦斯煤层W-S-W水力压裂强化增透试验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1757-1764.
- MA Haifeng, CHENG Zhiheng, ZHANG Kexue, *et al.* Intensive permeability enhancement experiment through hydraulic fracturing by way of water-sand-water in kilometer deep well with high gas seam[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1757-1764.
- [21] 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.
- [22] 杨宏伟. 低透气性煤层井下分段点式水力压裂增透[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(11): 1235-1239.
- YANG Hongwei. Underground segmentation point hydraulic fractu-

- ring antireflection for low permeability coal seams[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(11): 1235-1239.
- [23] 罗文, 杨俊彩, 高振宇. 强矿压矿井定向长孔分段压裂技术研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(11): 43-49.
LUO Wen, YANG Juncai, GAO Zhenyu. Research and application of directional long - borehole staged hydraulic fracturing technology for strong rock pressure in mine [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(11): 43-49.
- [24] 马文伟, 李江海, 梁文勘. 煤层定向分段水力压裂增透装置应用试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(5): 132-138.
MA Wenwei, LI Jiangtao, LIANG Wenxu. Experimental study and application of directional subdivision hydraulic fracturing and permeability improvement device[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5): 132-138.
- [25] 李泉新. 碎软煤层复合定向钻进技术研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(11): 101-106.
LI Quanxin. Research and application of drilling technology combined rotary with direction in soft - fragmentized coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(11): 101-106.
- [26] 石智军, 刘建林, 李泉新. 我国煤矿区钻进技术装备发展与应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(4): 1-6.
SHI Zhijun, LIU Jianlin, LI Quanxin. Developent and application of drilling technique and equipment in coal mining area of China [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4): 1-6.
- [27] 李宏, 刘明举, 郝光生, 等. 底板梳状长钻孔替代穿层钻孔瓦斯抽采技术可行性[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 32-38.
LI Hong, LIU Mingju, HAO Guangsheng, *et al.* Technology feasibility of gas drainage with comb-shaped long borehole in floor instead of translayer borehole [J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 32-38.
- [28] 方俊, 李泉新, 许超, 等. 松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(5): 130-137, 172.
FANG Jun, LI Quanxin, XU Chao, *et al.* Construction technology and development tendency of gas drainage borehole in soft and outburst seam [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(5): 130-137, 172.
- [29] 康红普, 林健, 颜立新, 等. 山西煤矿矿区井下地应力场分布特征研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1782-1792.
KANG Hongpu, LIN Jian, YAN Lixin, *et al.* Study on characteristics of underground in-situ stress distribution in Shanxi coal mining fields [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(7): 1782-1792.
- [30] 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.
- [31] 马耕, 张帆, 刘晓, 等. 地应力对破裂压力和水力压裂裂缝影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 216-222.
MA Geng, ZHANG Fan, LIU Xiao, *et al.* Experimental study of impact of crustal stress on fracture pressure and hydraulic fracture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 216-222.
- [32] 万军凤, 肖阳, 王明. 大牛地气田泥砂岩间互层穿层压裂影响因素分析[J]. 石油化工高等学校学报, 2017, 30(3): 32-38.
WANG Junfeng, XIAO Yang, WANG Ming. Effect factors for layer penetration fracturing of thin interbeds in Daniudi gas field [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2017, 30(3): 32-38.