



马彦阳,吴教锐,冯仁俊,等. 坚硬顶板定向长钻孔水力压裂卸压瓦斯抽采研究[J]. 矿业安全与环保,2022,49(6):52-56.
MA Yanyang, WU Jiaokun, FENG Renjun, et al. Pressure relief gas drainage by directional drilling hydraulic fracturing in hard roof[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(6): 52-56.
DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.2022.06.009

扫码阅读下载

坚硬顶板定向长钻孔水力压裂卸压瓦斯抽采研究

马彦阳^{1,2}, 吴教锐^{1,2}, 冯仁俊^{1,2}, 李良伟^{1,2}

(1. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400037; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要:为了解决焦坪矿区特厚煤层坚硬顶板综放工作面瓦斯防治难题,通过顶板定向长钻孔分段水力压裂技术,以陕西崔家沟能源有限公司2305综放工作面为对象进行工程应用研究。现场施工定向长钻孔3个,最大单孔长度602 m。采用倒退式分段压裂工艺对3个定向长钻孔进行水力压裂,累计注液量983.1 m³,总压裂时间5 231 min,单段最大峰值压力37.5 MPa。试验结果表明:经过顶板定向长钻孔水力压裂,工作面初次来压步距缩短29.37%,定向长钻孔平均抽采甲烷体积分数及纯度分别提高了1.92倍和1.57倍,本煤层区域预抽甲烷体积分数及纯度分别提升了1.79倍和2.01倍,初采初放阶段绝对瓦斯涌出量降低19.9%。顶板定向长钻孔分段水力压裂技术通过高压水精准预裂,降低坚硬顶板完整性,增加顶煤及围岩裂隙发育程度,拓展瓦斯运移通道,提高卸压瓦斯抽采效果,研究成果可为焦坪矿区类似地质条件下瓦斯治理提供技术参考。

关键词:分段水力压裂;坚硬顶板;定向长钻孔;瓦斯抽采;初采初放;卸压瓦斯

中图分类号:TD712.6

文献标志码:A

文章编号:1008-4495(2022)06-0052-05

Pressure relief gas drainage by directional drilling hydraulic fracturing in hard roof

MA Yanyang^{1,2}, WU Jiaokun^{1,2}, FENG Renjun^{1,2}, LI Liangwei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of the Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing 400037, China;
2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: Aiming at the difficult problems of gas prevention and control in hard roof fully mechanized caving face of extra thick coal seam in Jiaoping mining area, the roof directional long borehole staged hydraulic fracturing technology was proposed, and the 2305 fully mechanized caving face of Shaanxi Cuijiagou Energy Co., Ltd. was taken as the object for engineering application research. Three directional long boreholes were drilled on site, with the maximum single hole length of 602 m. Three directional long boreholes were hydraulically fractured by backward staged fracturing technology. The cumulative injection volume was 983.1 m³, the total fracturing time was 5 231 min, and the maximum peak pressure of single section was 37.5 MPa. The results show that, after hydraulic fracturing of the roof directional long borehole, the first weighting step of working face is shortened by 29.37%, the average concentration and purity of directional long borehole gas drainage are increased by 1.92 times and 1.57 times respectively, the concentration and purity of pre-drainage gas in this coal seam area are increased by 1.79 times and 2.01 times respectively, and the absolute gas emission is reduced by 19.9% in the initial mining and initial discharge stage. Roof directional long borehole staged hydraulic fracturing technology reduces the integrity of hard roof, increases the development degree of top coal and surrounding rock fractures, broadens the gas migration channel, and

improves the effect of pressure relief gas drainage through accurate pre-splitting of high pressure water, and provides technical support for gas control in Jiaoping mining area under similar geological conditions.

Keywords: staged hydraulic fracturing; hard roof; directional drilling; gas extraction; initial mining and release; pressure relief gas

收稿日期:2022-03-01;2022-09-16 修订

基金项目:重庆市自然科学基金面上项目(cstc2020jcyj-msxmX1013)

作者简介:马彦阳(1992—),男,山西晋城人,硕士,助理研究员,主要从事矿井瓦斯灾害治理研究工作。E-mail:2017130@cqcteg.com, Tel:023-65239556。

近年来,我国煤炭开采正以每年 10~25 m 的速度向深部延伸,矿井面临的瓦斯等重大灾害越发严重。焦坪矿区特厚煤层透气性较差,煤层上方存在厚度较大、节理发育差、强度高的坚硬顶板,其在工作面回采期间极难垮落^[1-5],特别是在工作面初采初放阶段,顶煤、顶板大面积垮落时极易造成大量瓦斯涌入工作面,严重制约了煤矿安全高效生产^[6-9]。

针对有坚硬顶板的低渗透性特厚煤层瓦斯抽采困难问题,需采取强制放顶及煤岩增透措施,提高瓦斯治理效果。实践应用表明:实施坚硬顶板水力压裂技术时,通过压裂泵组将高压流体注入钻孔内并持续保持高压,当压力超过围岩破裂压力后,坚硬顶板岩体的整体性产生破坏,随工作面推进顶板及时垮落,避免大面积悬顶冒落导致瓦斯异常涌出,并且水力压裂措施能够提高煤岩裂隙发育程度,有效提高煤岩透气性,提高瓦斯抽采效果^[10-13]。张群等^[8]提出了碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂煤层气高效抽采模式,在淮北矿区取得了较好的应用效果;王建利等^[9]在韩城矿区瓦斯抽采工程中实施顶板梳状孔水力压裂技术,实践效果良好;孙四清等^[14]开展了井下长钻孔整体水力压裂增透技术的工程试验研究,针对阳泉矿区碎软低渗高突煤层工程实现了井下一次性整体压裂;王广宏^[15]将定向长钻孔水力压裂增透技术用于煤巷条带瓦斯抽采,取得了较好的效果。目前,水力压裂技术提高瓦斯抽采效果的实现途径主要为本煤层压裂,笔者针对崔家沟煤矿含坚硬顶板低渗煤层,开展定向长钻孔水力压裂工程试验,旨在探究坚硬顶板定向长钻孔水力压裂技术在焦坪矿区地质条件下瓦斯高效抽采的可行性。

1 试验工作面概况

崔家沟煤矿位于焦坪矿区中南部,矿井采用斜井立井联合开拓。井田含煤地层为侏罗系中统延安组,共含煤 4 组 9 层,矿井主采 4⁻² 煤层,其余均为不可采煤层。4⁻² 煤层位于延安组第一段中上部,地质勘探资料显示煤层平均厚度为 13.4 m,最大埋深为 755.3 m。

试验区域位于矿井二水平三采区 2305 综放工作面,工作面设计可采走向长度为 1 560 m,倾向长度为 200 m。煤层平均可采厚度为 10.50 m,开切眼处最大煤层厚度达到 26.8 m,煤层平均倾角为 4°,煤的坚固性系数 f 值约为 1.06,煤层原始瓦斯含量为 2.50~4.33 m³/t,钻孔流量衰减系数为 0.028~

0.033 d⁻¹。2305 综放工作面主要采用本煤层顺层普通钻孔进行预抽,由于煤层透气性差,钻孔抽采瓦斯流量及瓦斯浓度衰减快,抽采效果不佳。

2305 综放工作面地质构造简单,4⁻² 煤层直接顶以粉砂岩为主,部分区域为泥岩、炭质泥岩,厚度为 2.16~2.60 m。基本顶以灰色、灰白色细粉砂岩为主,部分地段为炭质泥岩,成分以石英石为主,含暗色矿物,钙质胶结,较坚硬。崔家沟井田地层特征如表 1 所示。

表 1 崔家沟井田 4⁻² 煤层及顶底板特征

岩性类别	层厚/m	备 注
含砾粗砂岩	14.50	坚硬顶板
3 ⁻³ 煤	1.20	邻近层
粉砂岩	2.56	直接顶
4 ⁻² 煤	13.40	主采煤层
泥岩	6.80	底板

2 顶板定向长钻孔工艺

顶板定向长钻孔施工采用 VLD-1000 型矿用履带式千米钻机进行,配套 DGS 孔底测量仪、孔内马达、CHD120 重型 MECCA 钻杆,该套设备主要用于煤矿井下以瓦斯抽放、排水、勘探及地质构造探测为目的定向钻探施工。

针对 4⁻² 煤层坚硬顶板厚度大、强度高、不易垮落的特点,结合回采期间拉架放顶导致邻近 3⁻³ 煤层瓦斯大量涌入综放工作面的现状,本次定向钻孔布置层位选择在含砾粗砂岩层,定向长钻孔轨迹剖面图如图 1 所示。

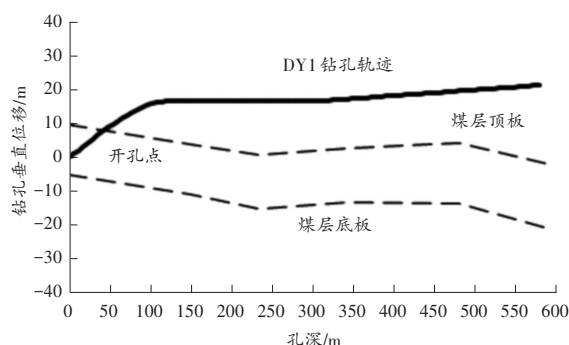


图 1 DY1 定向长钻孔轨迹剖面图

定向钻场选在 2305 综放工作面回风巷侧距开切眼 590 m 处,共布置 3 个钻孔,与回风巷水平距离分别为 60、110、160 m。钻孔采用一次成孔工艺,孔径 145 mm。钻孔平面轨迹如图 2 所示,具体施工参数如表 2 所示。

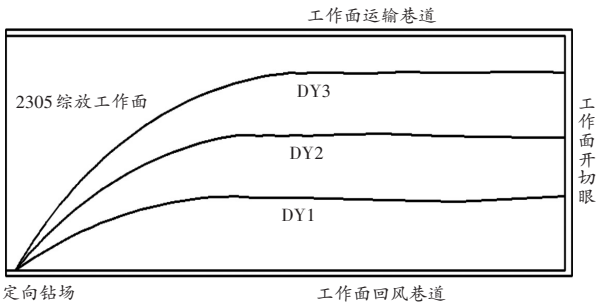


图 2 2305 综放工作面顶板定向长钻孔平面位置

表 2 顶板定向长钻孔施工参数

孔号	钻孔长度/ m	煤孔段长度/ m	岩孔段长度/ m	与回风巷水平 距离/m
DY1	564	92	472	60
DY2	579	116	463	110
DY3	602	133	469	160

3 顶板定向长钻孔分段水力压裂技术

3.1 水力压裂设备

本次顶板定向长钻孔水力压裂成套设备由中煤

科工集团重庆研究院有限公司自主研发,设备主要包含有 BYW220/50 矿用压裂泵组、水箱、高压胶管、密封钻杆、调压阀及分段压裂工具串,其中分段压裂工具串由变扣、机械丢手、扶正器、封隔器、筛管、压差滑套、上封隔器、导向丝堵



图 3 分段压裂工具串结构图

3.2 水力压裂参数设计

根据矿井地质条件,结合定向钻孔施工情况,本次顶板压裂采用分段倒退式裸眼压裂,双封隔器拖动式封孔工艺,压裂介质为清水。根据定向钻孔在坚硬顶板层位长度及邻近工作面周期来压步距(约 28.3 m)设计多段孔内压裂,压裂位置选在 2 次周期来压范围内,每段压裂长度 10 m,间隔 30 m,设计压裂压力不低于 28 MPa。DY1 定向长钻孔分段压裂示意图如图 4 所示。

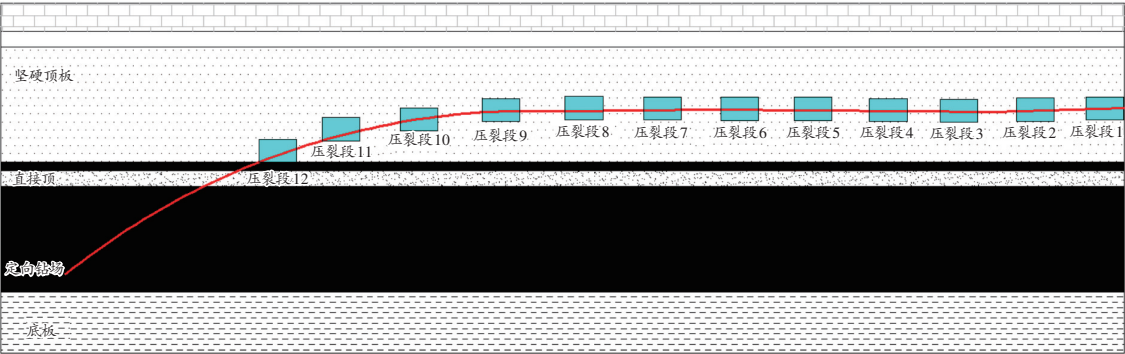


图 4 DY1 定向长钻孔分段压裂示意图

3.3 水力压裂施工

依次连接导鞋、筛管、封隔器、高压油管等工具,上扣时涂抹密封油后打紧;管柱入孔时注意限速、匀速送入;下放至预定位置后,首先利用小压力启动封隔器,然后加大压力从筛孔出水即可进行压裂;压裂完毕待卸压完全后,即可解除封隔器,退出部分管柱

进行下一段压裂,直至所有段压裂完成后回收管柱。

本次试验成功实施 3 个顶板定向长钻孔总计 39 段、1 560 m 的裸眼分段水力压裂作业,总计压裂时间 5 231 min,单段压裂最高峰值压力为 37.5 MPa,累计注水量 983.1 m³。具体各顶板定向长钻孔分段水力压裂数据如表 3 所示。

表 3 顶板定向长钻孔分段水力压裂数据

孔号	孔长/m	压裂段数	总压裂时间/min	压入水量/m ³	单段压裂时间/min	单段峰值压力/MPa	单段注水量/m ³
DY1	564	12	1 372	250.2	84~136	27.6~32.5	17.5~24.2
DY2	579	13	1 762	333.6	104~168	31.4~37.5	19.0~33.5
DY3	602	14	2 097	399.3	124~196	28.1~35.3	23.2~36.8
合计	1 745	39	5 231	983.1			

4 顶板水力压裂及瓦斯抽采效果分析

4.1 顶板水力压裂卸压效果分析

通过对 2305 综放工作面与相同地质条件下未开展水力压裂的相邻 2303 综放工作面初采初放阶段矿压显现情况对比,分析顶板定向长钻孔水力压裂效果。其中,2303 综放工作面悬顶面积大、持续时间长、

初次来压步距大、强度高,造成工作面瓦斯异常涌出,出现煤壁片帮等现象,严重影响 2303 综放工作面正常安全回采。而 2305 综放工作面通过顶板定向长钻孔分段水力压裂治理,初采初放阶段 132 台支架除去两端各 4 台过渡支架外,循环末阻力各数据均有下降,工作面绝对瓦斯涌出量下降了 19.9%。2305 综放工作面与 2303 综放工作面矿压数据对比如表 4 所示。

表 4 相邻工作面初采初放阶段矿压数据对比

工作面 编号	初次来压 步距/m	来压前支架峰值 压力/MPa	来压前支架平均 压力/MPa	来压时支架峰值 压力/MPa	来压时支架平均 压力/MPa	绝对瓦斯涌出量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	备注
2303	46.3	36.2	30.7	43.3	38.6	32.2	未压裂
2305	32.7	33.5	28.1	39.7	35.2	25.8	水力压裂
降幅/%	29.37	7.46	8.47	8.31	8.81	19.9	

4.2 压裂钻孔瓦斯抽采效果分析

顶板定向长钻孔分段水力压裂将高压水注入围岩,使煤层及围岩中孔隙发生扩张并形成裂缝,为瓦

斯解吸及运移提供通道,增大了煤层渗透率,提高了瓦斯抽采效果^[16-18]。顶板定向长钻孔压裂前后瓦斯抽采效果对比如表 5 所示。

表 5 顶板压裂长钻孔瓦斯抽采效果对比

孔号	压裂前		压裂后		提升倍数	
	抽采甲烷体积 分数/%	抽采瓦斯纯量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	抽采甲烷体积 分数/%	抽采瓦斯纯量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	抽采甲烷 体积分数	抽采瓦斯 纯量
DY1	15	0.096	52	0.263	2.47	1.74
DY2	23	0.117	53	0.318	1.30	1.72
DY3	25	0.132	50	0.297	2.00	1.25

通过对 3 个顶板定向长钻孔瓦斯抽采效果分析对比可知:压裂后钻孔抽采甲烷体积分数平均提升了 1.92 倍,瓦斯抽采纯量平均提升了 1.57 倍。

4.3 本煤层区域瓦斯预抽效果分析

根据 2305 综放工作面瓦斯抽采设计,工作面预抽主要为回风巷侧施工的本煤层平行顺层钻孔,其

中开切眼向外 240 m 范围煤层厚度超过 20 m 作为瓦斯预抽第 1 单元,每 3 个钻孔为 1 组,组间距为 6 m,开孔呈上中下布置;240 m 至定向钻场煤层厚度间 10~20 m 作为瓦斯预抽第 2 单元,每 2 个钻孔为 1 组,组间距为 6 m,开孔呈上下布置。本煤层区域预抽瓦斯压裂前后效果对比如表 6 所示。

表 6 本煤层区域预抽瓦斯抽采效果对比

本煤层瓦斯 预抽单元	压裂前		压裂后		提升倍数	
	抽采甲烷体积 分数/%	抽采瓦斯纯量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	抽采甲烷体积 分数/%	抽采瓦斯纯量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	抽采甲烷 体积分数	抽采瓦斯 纯量
第 1 单元	4.6	1.19	12.3	3.95	1.67	1.74
第 2 单元	3.7	0.69	10.8	2.26	1.92	2.28

通过对顶板定向长钻孔水力压裂前后 2 个预抽单元的瓦斯抽采多参数传感器数据对比可知:压裂后本煤层预抽甲烷体积分数平均提升了 1.79 倍,抽采瓦斯纯量平均提升了 2.01 倍。研究表明,顶板定向长钻孔水力压裂影响范围扩展至 4⁻² 煤层。

顶板定向水力压裂技术是基于力学角度,结合定向钻孔服务周期长、施工精度高等优点,采用高于地层应力的高压水精准冲击顶煤及围岩,使原生裂隙、孔隙及节理发生扰动,造成局部损伤,促使围岩及煤体内部裂隙弱面扩展延伸,在扩展原生裂隙的

同时,不断发育新生裂隙,最终形成相互交织贯通的裂缝网络,增加了瓦斯运移流动通道,提高了煤体及围岩渗透性,从而提高瓦斯抽采效果。

5 结语

1)针对焦坪矿区坚硬顶板垮落难,特厚煤层及围岩瓦斯抽采效果差的特点,提出了顶板定向长钻孔分段水力压裂卸压瓦斯抽采工艺,完成了3个顶板定向长钻孔水力压裂施工,累计压裂长度1 560 m,累计注水量983.1 m³,总压裂时间5 231 min,单段最大峰值压力37.5 MPa。

2)顶板定向长钻孔分段水力压裂后,工作面初次来压步距同比降低了29.37%,来压前支架峰值压力和平均压力同比分别下降了7.46%和8.47%;来压时支架峰值压力、平均压力同比分别下降8.31%和8.81%;工作面绝对瓦斯涌出量同比下降19.9%。有效解决了工作面初采初放阶段大面积悬顶和瓦斯异常涌出问题。

3)压裂后顶板定向长钻孔抽采甲烷体积分数、纯量分别提高了1.92倍和1.57倍,本煤层区域预抽甲烷体积分数、纯量分别提高了1.79倍和2.01倍,瓦斯抽采效果显著提升,可为类似地质条件下瓦斯治理提供参考。

4)本次试验初步证实了焦坪矿区坚硬顶板采用定向长钻孔分段水力压裂技术在实现工作面顶板区域弱化的同时,提高了本煤层及围岩瓦斯抽采效果,但受样本数量较少及抽采效果考察周期短限制,该技术对本煤层渗透性及瓦斯高效抽采机制仍需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 姬健帅,李志华,葛胜文,等.坚硬顶板深孔预裂爆破强制初放技术研究[J].矿业安全与环保,2021,48(6):34-39.
- [2] 牟宗龙,窦林名,张广文,等.坚硬顶板型冲击矿压灾害防治研究[J].中国矿业大学学报,2006,35(6):737-741.
- [3] 马赛,陶广美,马晋琴.定向水力压裂技术在晋城矿区坚硬顶板中的应用[J].矿业安全与环保,2016,43(2):84-86.
- [4] 王凯,李波,魏建平,等.水力冲孔钻孔周围煤层透气性变化规律[J].采矿与安全工程学报,2013,30(5):778-784.
- [5] 秦江涛,陈玉涛.低透气性煤层高压水力压裂—冲孔联合增透技术研究及应用[J].矿业安全与环保,2021,48(6):53-57.
- [6] 李胜,罗明坤,周利峰,等.高瓦斯综采工作面瓦斯立体抽采技术与应用[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2018,37(2):244-250.
- [7] 高涵,龚选平,臧杰,等.含瓦斯煤的渗透率演化模型及其影响因素研究[J].矿业安全与环保,2019,46(6):47-52.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 龙威成,赵乐凯,陈冬冬,等.顺煤层定向长钻孔水力压裂煤层增透技术及试验研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2019,38(3):10-15.
- [11] 郭启文,韩炜,张文勇,等.煤矿井下水力压裂增透抽采机理及应用研究[J].煤炭科学技术,2011,39(12):60-64.
- [12] 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.
- [13] 陈同刚,汪启年,朱将波,等.煤层及其顶底板岩石力学性质对水力压裂裂缝延伸的控制[J].华东地质,2018,39(3):212-217.
- [14] 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.
- [15] 王广宏.定向长钻孔水力压裂增透技术预抽煤巷条带瓦斯的应用研究[J].能源与环保,2019,41(7):25-28.
- [16] 周红星,王亮,程远平,等.低透气性强突出煤层瓦斯抽采导流通道的构建及应用[J].煤炭学报,2012,37(9):1456-1460.
- [17] 王耀锋,何学秋,王思元,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.
- [18] 徐涛,冯文军,苏现波.煤矿井下水力压冲增透强化抽采技术试验研究[J].西安科技大学学报,2015,35(3):303-306.

(责任编辑:逢锦伦)