

复杂地层顶板大直径高位定向钻孔试验

于成凤

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要:针对煤矿地层条件复杂,常规钻进工作量大、单孔深度不足、难以成孔、瓦斯抽采浓度低等诸多问题,开展了煤矿复杂地层中施工顶板大直径高位定向钻孔试验。以东保卫煤矿施工为依据,根据煤层顶板地质实际情况,在36号煤层顶板施工6个 $\text{O}120\text{ mm}$ 大孔径顶板高位定向钻孔,其中孔深 $>300\text{ m}$ 钻孔成孔率达到83.3%,最大孔深510 m。利用顶板大直径高位定向钻孔进行瓦斯抽采,其抽采浓度比原有工作面常规瓦斯钻孔抽采浓度增加66.7%,取得显著瓦斯抽采效果。顶板大直径高位定向钻孔的成功应用,为东保卫煤矿以及相似条件矿区推广应用提供了技术支撑。

关键词:复杂地层;定向钻进装备;高位定向钻孔;瓦斯抽采

中图分类号:P634.7; TD712 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2022)04-0124-07

Large diameter high-level roof directional drilling test in complex strata

Yu Chengfeng

(Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an Shaanxi 710077, China)

Abstract: In view of the complex strata conditions at Roof 36-700 in the third mining area of Dongbaowei Coal Mine, as well as the problems such as heavy workload of conventional drilling, insufficient depth of single holes, difficulty in drilling, low concentration of gas drainage, coal mine underground directional drilling equipment was tested to drill large-diameter high-level roof directional holes in complex strata in Dongbaowei Coal Mine. According to the actual geological conditions of the coal seam roof, six $\text{O}120\text{mm}$ high-level directional boreholes with 120mm large diameter were drilled in the roof of the 36# coal seam. The completion rate of the holes with a depth more than 300 m reached 83.3%, with the maximum hole depth up to 510m. The gas drainage concentration with large diameter high-level roof directional drilling was 66.7% higher than that with conventional drilling in the original working face, resulting in significant gas extraction effect. The successful application of large-diameter high-level roof directional drilling provides technical support for its promotion and application in Dongbaowei Coal Mine and mining areas with similar conditions.

Key words: complex formation; directional drilling equipment; high-level directional drilling; gas drainage

我国大部分矿区煤层赋存地质条件复杂,高瓦斯、煤与瓦斯突出是煤矿重大自然灾害之一,瓦斯灾害对矿井开采造成巨大威胁、严重制约着矿井安全生产^[1-2]。在煤矿瓦斯治理中,瓦斯抽采效果取决于瓦斯抽采技术,关系着回采工作面的瓦斯浓度控制、也直接影响着瓦斯灾害治理程度^[3-4]。当前,煤矿井下定向钻进装备与技术取得重大进步,利用先进的煤矿井下定向钻进装备,采用先进的瓦斯抽采

技术,实现灾害精准治理,是未来瓦斯灾害治理的发展趋势^[5-6]。东保卫煤矿三采区-700工作面现有高位瓦斯孔、仰角瓦斯孔、底板拦截瓦斯孔等进行瓦斯抽采,由于单孔深度不足、钻孔难以成孔、瓦斯抽采效果不佳等复杂问题,对矿井安全生产造成潜在危险。基于此,东保卫煤矿采用中煤科工集团西安研究院有限公司研发生产的煤矿井下定向钻进装备在三采区-700工作面进行顶板大直径高位定

收稿日期:2021-05-13; 修回日期:2022-02-28 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.04.019

作者简介:于成凤,男,汉族,1988年生,地质工程专业,硕士,从事定向钻探工艺研究工作,陕西省西安市高新区锦业一路82号, yuchengfeng@cctegxian.com。

引用格式:于成凤.复杂地层顶板大直径高位定向钻孔试验[J].钻探工程,2022,49(4):124-130.

Yu Chengfeng. Large diameter high-level roof directional drilling test in complex strata[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4): 124-130.

向钻孔施工,对煤层顶板裂隙带赋存瓦斯进行预抽,解决高位瓦斯孔、仰角瓦斯孔、底板拦截孔瓦斯抽采效果不佳等问题,为东保卫煤矿乃至相似矿井工作面瓦斯治理提供新的技术思路。

1 试验基本情况

1.1 工作面概况

试验地点位于东保卫煤矿三采区36层-700右面工作面,所采煤层为36号煤,该工作面走向长813 m,倾斜长253 m,上部为30号煤,下部为41号煤。36号煤煤层厚度1.7~2.15 m,煤层的稳定可采平均厚度1.94 m,倾角14°~26°。煤层属于简单结构,条带状结构明显,内生裂隙发育,常具阶梯状断口,自然发火期3~6个月,煤尘爆炸指数37.00%。

36号煤层伪顶为0.4 m灰黑色细砂,岩石破碎、节理发育。老顶为7 m厚的粗砂岩,黄白色,层理不发育。煤层底板为3.6 m厚的中砂岩,灰白色,岩石层理发育。该回采工作面处于三采区深部,瓦斯浓度相对较高,并且32、33号煤均处于裂隙带内,预计瓦斯压力0.28 MPa、瓦斯含量4.69 m³/t。

1.2 配套装备

东保卫煤矿三采区36层-700工作面顶板地质条件复杂,断层较为发育、含有多层煤线,对井下定向钻进装备施工能力要求严格。为提高钻进效率以及钻孔成孔率,选用的主要装备情况如表1所示。

表1 主要装备情况
Table 1 Main equipment

序号	名称	型号、规格
1	定向钻机	ZDY12000LD
2	泥浆泵车	BLY460/13
3	孔底马达	Ø89 mm/1.25°
4	定向钻头	Ø120 mm
5	泥浆脉冲随钻测量系统	YHD3-1500T
6	高韧性大通径宽翼片螺旋钻杆	Ø89 mm×1500 mm
7	扩孔钻头	Ø120 mm×53 mm

1.2.1 ZDY12000LD型大功率定向钻机

该钻机具有低转速、大转矩,适用于大直径近水平深孔钻进,钻机技术性能先进、工艺适应性强、移动搬迁方便。钻机主要参数如表2所示。

1.2.2 BLY460/13型泥浆泵车

表2 ZDY12000LD型钻机主要参数

Table 2 Main parameters of ZDY12000LD drilling rig

序号	参数名称	数值
1	额定转矩/(N·m)	3000~12000
2	额定压力/MPa	28
3	额定流量/(L·min ⁻¹)	240
4	主轴制动转矩/(N·m)	2000
5	主轴倾角/(°)	-10~20
6	最大给进/起拔力/kN	250
7	给进/起拔行程/mm	1200
8	I 泵额定压力/MPa	28
9	II 泵额定压力/MPa	26
10	III 泵额定压力/MPa	21
11	额定功率/kW	132

用于ZDY12000LD型大功率定向钻机定向钻进时,提供高压水以驱动孔底马达实现定向钻进,具有可自主行走、集成性好、性能先进、操作简便、作业安全等特点。与定向钻机配套使用可有效提高瓦斯钻孔施工效率,为煤矿安全高效生产提供设备保障和技术支持。泵车主要参数如表3所示。

表3 BLY460/13型泥浆泵车主要参数

Table 3 Main parameters of BLY460/13 mud pump truck

序号	参数名称	数值
1	额定流量/(L·min ⁻¹)	460
2	额定压力/MPa	13
3	额定功率/kW	110
4	额定转速/(r·min ⁻¹)	1480
5	额定电压/V	1140/660

1.2.3 YHD3-1500T型泥浆脉冲随钻测量系统

用于煤矿井下钻探施工过程中的随钻监测,可随钻测量钻孔倾角、方位角、工具面向角等主要参数,同时可实现钻孔参数、轨迹的即时孔口显示,便于施钻人员随时了解钻孔施工情况,并及时调整工具面向角和工艺参数,使钻孔尽可能地按照设计的轨迹延伸。该系统钻具适配性强,方便根据复杂地层实际情况进行钻具调整。整套装备具有施工工艺适应性强、性能稳定、孔内事故处理能力强等优点^[7-8]。泥浆脉冲随钻测量系统连接如图1所示,主要参数如表4所示。

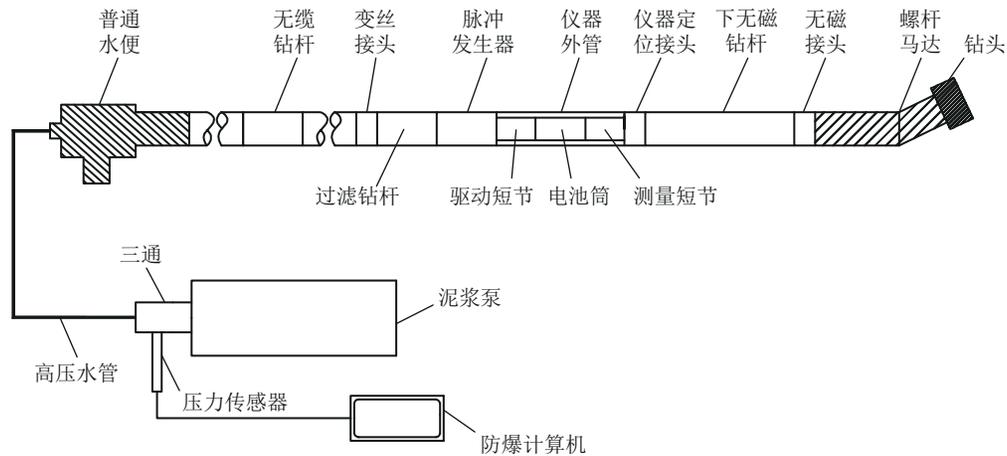


图1 泥浆脉冲随钻测量系统连接示意

Fig.1 Connection diagram of the mud pulse MWD

表4 YHD3-1500T型泥浆脉冲随钻测量系统主要参数
Table 4 Main parameters of YHD3-1500T mud pulse MWD

序号	参数名称	参数
1	传输距离/km	≥ 1.5
2	倾角测量范围/(°)	-90~90
3	方位角测量范围/(°)	0~360
4	工具面向角测量范围/(°)	0~360
5	信号传输方式	泥浆脉冲无线传输
6	最小启动泵量/(L·min ⁻¹)	90
7	适用泥浆泵量范围/(L·min ⁻¹)	90~600

1.3 钻孔布置

钻孔布置的合理性是决定顶板高位定向钻孔瓦斯抽采效果的关键因素^[9-11],高位定向钻孔在煤层顶板设计布孔时,同时考虑钻孔瓦斯抽采效果及目标层位选择2方面因素。

(1)瓦斯抽采效果。根据煤矿瓦斯治理经验,剖面上钻孔应布置在采动裂隙带上部,平面上钻孔应靠近且平行于回风巷布孔,同时根据单一钻孔的瓦斯有效抽采半径确定合理的钻孔平间距。

(2)目标层位选择。根据东保卫煤矿36号煤层采动后冒落带及裂隙带高度计算的的经验公式:冒落带高度可由经验公式(1)计算、裂隙带高度可由经验公式(2)计算^[12]:

$$H_1 = \frac{M}{(K-1)\cos\alpha} \quad (1)$$

$$H_2 = \frac{100\sum M}{1.6\sum M + 3.6} \pm 5.6 \quad (2)$$

式中: M ——煤层开采厚度,m; K ——岩石松散系数; α ——煤层倾角,(°); H_1 ——冒落带高度,m; H_2 ——裂隙带高度,m。

东保卫煤矿36号煤层采高 $M=1.9$ m,岩石松散系数 $K=1.3$,煤层倾角取平均值 $\alpha=20^\circ$,代入经验公式(1)、(2)计算得出36号煤层开采后裂隙带范围在 $(6.8\sim 28.6)\pm 5.6$ m之间。

依据36号煤层顶板柱状岩性分析,结合经验公式计算得出的裂隙带范围,选取钻孔成孔率高且稳定的层位,钻孔分上下2排6个钻孔布置,其中1、2、3号钻孔距36号煤层顶板30 m,4、5、6号钻孔距36号煤层顶板20 m,钻孔平间距按照10 m平行布置,1、4号钻孔距离回风巷35 m,2、5号钻孔距离回风巷25 m,3、6号钻孔距离回风巷15 m,钻孔布孔位置如图2所示。

2 现场施工

2.1 施工工艺

钻进施工完成6个 $\varnothing 120$ mm大孔径顶板高位定向钻孔,目标孔深 ≥ 300 m,施工工艺流程如图3所示。

钻进施工过程中采用回转钻进工艺施工孔口管孔段,再采用定向钻进工艺施工 $\varnothing 120$ mm定向钻孔孔段,达到目标要求后提钻终孔。

2.1.1 回转钻进工艺

采用普通回转钻进工艺施工孔口管段,目的是安装孔口管和孔口四通装置及气水分离器,并连接抽采系统,实现边钻进边抽采^[13],防止钻孔施工过

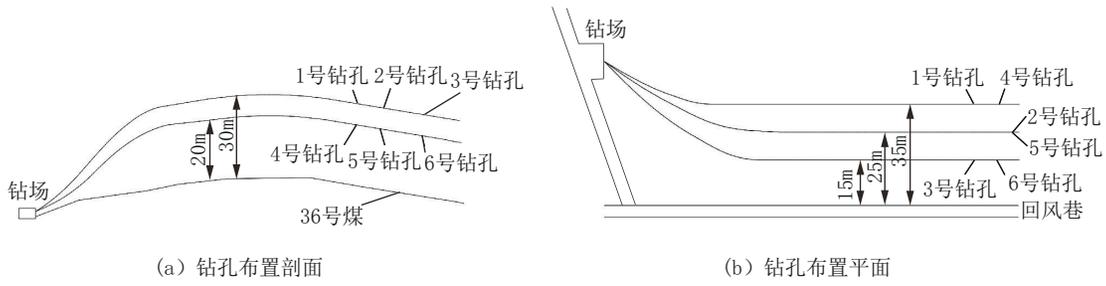


图2 顶板高位定向钻孔布置位置示意

Fig.2 Schematic diagram of placement of the roof directional drilling borehole

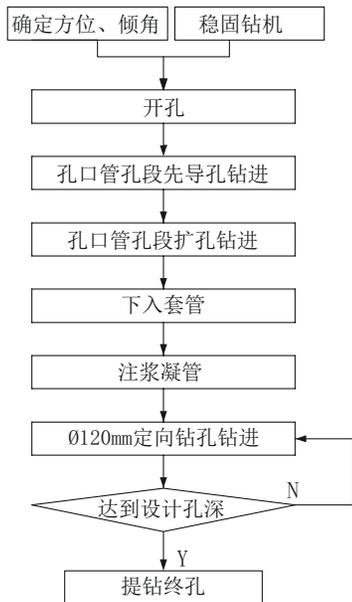


图3 大口径顶板高位定向钻孔施工工艺流程
Fig.3 Drilling process of the high-level roof directional drilling borehole

程中瓦斯超限。孔口管孔段先导孔采用 $\text{O}120\text{ mm}$ PDC钻头配套 $\text{O}89\text{ mm}$ 高韧性大通径宽翼片螺旋钻杆回转钻进至 9 m ;孔口管孔段扩孔采用 $\text{O}153\text{ mm}/120\text{ mm}$ PDC扩孔钻头配套 $\text{O}89\text{ mm}$ 高韧性大通径宽翼片螺旋钻杆回转扩孔钻进至 8 m ;孔口管孔段二级扩孔采用 $\text{O}193\text{ mm}/153\text{ mm}$ PDC扩孔钻头配套 $\text{O}89\text{ mm}$ 高韧性大通径宽翼片螺旋钻杆回转扩孔钻进至 7.5 m ,下入 $\text{O}159\text{ mm}$ 孔口管 6 m ,采用两堵一注方式进行注浆固管。

2.1.2 定向钻进工艺

主要采用滑动钻进工艺^[14],同时在钻孔轨迹参数变化较小孔段,采取回转钻进工艺与滑动钻进工艺相结合的复合钻进工艺^[15-18],钻进效率高,大大提高钻孔成孔率。定向钻进孔段采用 $\text{O}120\text{ mm}$ PDC

钻头、 $\text{O}89\text{ mm}$ 高韧性大通径宽翼片螺旋钻杆、BLY460型泥浆泵车以及YHD3-1500T型泥浆脉冲测量系统施工至目标孔深,施工结束提钻终孔。

2.2 施工完成情况

自2019年10月23日—2020年1月20日,共完成6个 $\text{O}120\text{ mm}$ 顶板高位定向钻孔,目标孔深均达到预期要求,其中最大孔深 510 m ,钻孔竣工参数见表5。钻孔实钻轨迹见图4、图5。

表5 钻孔竣工参数

Table 5 Drilling completion parameters

钻孔编号	开孔倾角/ $^{\circ}$	开孔方位角/ $^{\circ}$	孔深/ m	距36号煤层高度/ m	距回风巷距离/ m
1	12	303	366	30	34
2	12	306	510	29.5	23
3	12	310	408	29	14.5
4	10	303	312	19	35
5	10	306	327	21	24
6	10	310	354	20	15

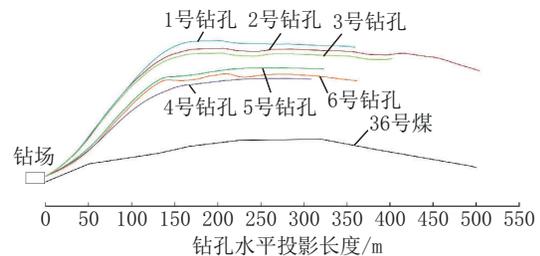


图4 钻孔实钻轨迹剖面示意

Fig.4 Sectional view of the as-drilled trajectory

2.3 复杂地层成孔难点

东保卫煤矿36层-700工作面地质条件复杂,断层较为发育、多层煤线、地层负角度走向等是钻孔成孔的主要障碍,也是复杂地层成孔难点,钻孔施工过程中遇到的问题归纳为以下几点。

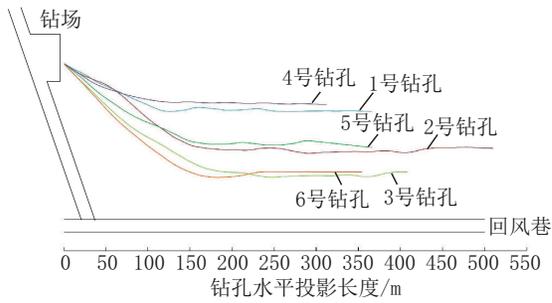


图5 钻孔实钻轨迹平面示意

Fig.5 Plan view of the as-drilled trajectory

(1)多层煤线。根据钻孔剖面布置原则,顶板高位定向钻孔布置在距离36号煤层顶板20、30 m目标层位,钻孔需穿过5层煤线,由于煤质松软,在定向钻具振动及高压水的冲刷作用下,煤层极易垮塌破碎,造成孔内卡埋压钻现象,严重影响钻孔成孔。

(2)断层发育。该工作面地质构造较为发育,主要类型为断裂构造,发育多条正逆断层,根据地质资料查询,在施工范围内距离孔口170 m位置揭露出一条正断层,落差0.3 m,钻孔穿过断层时,进入非目标层位,造成孔内潜在事故隐患。

(3)地层负角度。根据地质资料显示,在定向钻孔施工范围内,从钻场向切眼方向36号煤层呈现爬坡一下坡走势,导致钻孔在下坡孔段顺层呈负角度走势,不利于钻孔岩屑及时排出孔外。

2.4 解决措施

针对在东保卫煤矿36层-700工作面施工顶板高位定向钻孔遇到的难点,提出以下若干解决措施。

(1)采取大倾角钻进。根据36号煤层顶板岩性柱状分析钻孔钻进目标层位需穿过的煤线高度以及数量,然后进行设计计算,保证钻孔实钻轨迹按照目标轨迹钻进时,尽可能地减少煤层孔段长度,大倾角快速进入和穿出煤层,从而最大程度地降低煤层孔段破碎,减少破碎带影响。

(2)复杂孔段扩孔工艺。定向钻进过程中,难免遇到复杂孔段,例如破碎带、断层区域,都会导致可能的孔内风险发生,甚至泥岩层存在缩径现象,导致钻具“抱死”等复杂情况,可以通过回转扩孔工艺进行解决,通过增大钻孔孔径,减少钻具扰动、高压水冲刷导致的复杂孔段破碎情况,利于孔壁稳定,进而解决破碎引起的成孔难等问题。

(3)测量系统选择。东保卫煤矿36层-700工

作面地质条件复杂,尤其地层负角度,导致钻进时孔内岩屑不易排出,针对这一难点,采用YHD3-1500T型泥浆脉冲测量系统配套高韧性大口径宽翼片螺旋钻杆可以很好地携带出负角度钻孔孔内岩屑排出孔外,解决排渣困难问题。

3 瓦斯抽采效果

3.1 瓦斯抽采数据

东保卫煤矿36层-700工作面6个顶板大直径高位定向钻孔施工结束后,进入瓦斯抽采效果考察阶段。根据工作面推进情况,于2020年1月8日开始进行负压瓦斯抽采,6个顶板定向钻孔均有瓦斯数据显示,截止到4月13日共96 d持续稳定抽采。其中2号钻孔最大抽采流量达到 $9.3 \text{ m}^3/\text{min}$,全部钻孔抽采瓦斯总量达 214.84 万 m^3 ,瓦斯抽采效果显著。钻孔瓦斯抽采数据见表6。

表6 钻孔瓦斯抽采数据

Table 6 Borehole gas extraction data

孔号	距36号煤高/m	距回风巷距离/m	平均浓度/%	平均流量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	平均纯量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	抽采总量/ 万 m^3
1	30	34	67	6.35	4.25	51.24
2	29.5	23	64	6.3	4	55.29
3	29	14.5	64	6.3	2.63	31.81
4	19	35	67	6.25	4.15	25.34
5	21	24	66	6.45	4.35	28.12
6	20	15	68	6.35	4.25	23.04

3.2 瓦斯浓度变化

东保卫煤矿36层-700工作面原有抽采钻孔为仰角瓦斯孔,2020年1月2~7日利用仰角瓦斯孔抽采瓦斯,连续6天测得回风瓦斯浓度 $0.4\% \sim 0.5\%$,上隅角瓦斯浓度 $0.7\% \sim 0.8\%$ 。2020年1月8~13日利用顶板大直径高位定向钻孔进行负压瓦斯抽采,连续6 d测得回风瓦斯浓度 $0.1\% \sim 0.2\%$,上隅角瓦斯浓度 $0.2\% \sim 0.3\%$,工作面瓦斯浓度变化如图6所示。

根据钻孔瓦斯抽采数据以及工作面回风瓦斯浓度、上隅角瓦斯浓度变化得出:

(1)利用顶板大直径高位定向钻孔进行瓦斯抽采,其瓦斯抽采浓度比原有仰角瓦斯孔抽采浓度增加 66.7% ,取得显著瓦斯抽采效果。

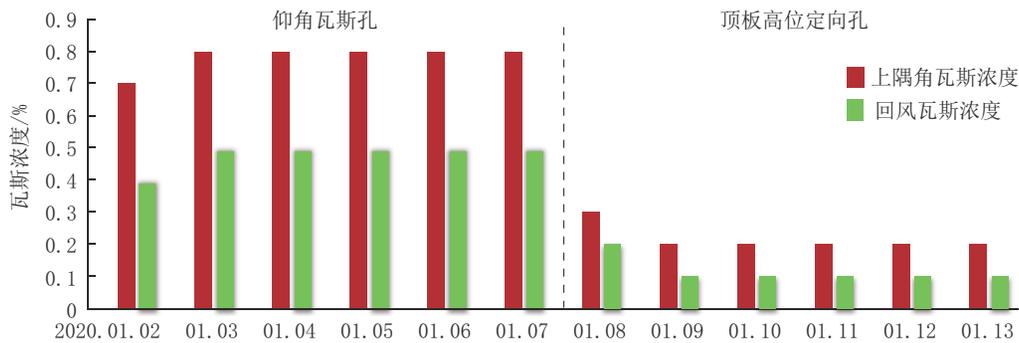


图6 工作面瓦斯浓度变化

Fig.6 Change of gas concentration at working faces

(2)解决仰角瓦斯孔有效抽采孔段短、抽采能力不足等问题,同时也解决高位瓦斯孔、底板拦截孔钻场接续盲区等缺点,大大提高了瓦斯抽采效率以及稳定抽采周期,极大地缓解了由于工作面瓦斯浓度超限而引起的煤矿安全开采紧张关系。

4 结语

针对东保卫煤矿36层—700工作面顶板复杂地层条件,选取合适的井下定向钻进装备以及合理的瓦斯抽采技术是钻孔成孔、瓦斯抽采效果显著的关键因素。

(1)本试验选取的ZDY12000LD型煤矿用井下大功率定向钻机、BLY460/13型泥浆泵车、YHD3-1500(T)型泥浆脉冲测量系统等附属设备工艺适应性强、钻进能力稳定、钻孔成孔率高。在36号煤层顶板裂隙带范围(6.8~28.6)±5.6 m之间布置钻孔,施工了6个Ø120 mm大孔径顶板高位定向钻孔,其中孔深>300 m钻孔成孔率达到83.3%,最大孔深510 m,取得优良的瓦斯抽采效果。

(2)在本次顶板大直径高位定向钻孔试验过程中,多层煤线采取大倾角钻进、复杂孔段扩孔钻进工艺,负角度地层孔段利用泥浆脉冲测量系统配套螺旋钻杆携带岩屑排出孔外是取得钻孔成孔成功的关键。

(3)采用顶板大直径高位定向钻孔进行瓦斯抽采,抽采瓦斯浓度变化明显,能够替代东保卫煤矿原有仰角瓦斯孔、高位瓦斯孔、底板拦截孔,为东保卫煤矿乃至相似矿井工作面瓦斯治理提供新的技术思路。

参考文献(References):

- [1] 陈开岩,张占国,林柏泉,等.综放工作面抽采条件下瓦斯涌出及分布特征[J].采矿全工程学报,2009,26(4):418-422.
CHEN Kaiyan, ZHANG Zhanguo, LIN Baiquan, et al. Characteristics of gas emission and distribution of fully mechanized top coal caving face under gas drainage conditions[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2009,26(4):418-422.
- [2] 李泉新,方俊,许超,等.井下长距离定点保压密闭煤层瓦斯含量测定取样技术[J].煤炭科学技术,2017,45(7):68-73,166.
LI Quanxin, FANG Jun, XU Chao, et al. Sampling technology for measuring gas content in coal seam with long distance fixed-point pressure sealing in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2017,45(7):68-73,166.
- [3] 张海权,王惠凤,王向东.大直径高位钻孔代替高抽巷抽采瓦斯的研究[J].煤炭科学技术,2012,40(6):51-57.
ZHANG Haiquan, WANG Hui Feng, WANG Xiangdong. Study on gas drainage with large diameter high level borehole to replace high level gas drainage gateway[J]. Coal Science and Technology, 2012,40(6):51-57.
- [4] 李晓泉.采空区高位钻场与高抽巷瓦斯抽采方法对比及实例分析[J].煤矿安全,2011,42(5):122-125.
LI Xiaoquan. Comparative analysis of methods and examples on gas emission of high level drilling site and high level suction roadway in gob[J]. Safety in Coal Mines, 2011,42(5):122-125.
- [5] 姚宁平,姚亚峰,方鹏,等.我国煤矿坑道钻探装备技术进展与展望[J].钻探工程,2021,48(1):81-87.
YAO Ningping, YAO Yafeng, FANG Peng, et al. Advances and outlook of coal mine tunnel drilling equipment and technology[J]. Drilling Engineering, 2021,48(1):81-87.
- [6] 姚克.煤矿井下智能化钻机及问题探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(10):48-52,71.
YAO Ke. Intelligent drilling rig for coal mines and discussion on problems[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(10):48-52,71.
- [7] 石智军,李泉新.煤矿区钻探技术装备新进展与展望[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):150-159.
SHI Zhijun, LI Quanxin. New progress and prospect of drilling

- technology and equipment in coal mine area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10): 150-159.
- [8] 方俊, 石智军, 李泉新, 等. 板高位定向大直径长钻孔钻进技术与装备[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(7): 92-97.
FANG Jun, SHI Zhijun, LI Quanxin, et al. Drilling technology and equipments on directional high level and long borehole with large diameter roof [J]. Mining Research and Development, 2015, 35(7): 92-97.
- [9] 张晓磊, 程远平, 王亮, 等. 煤与瓦斯突出矿井工作面顶板高位钻孔优化设计[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(10): 66-70.
ZHANG Xiaolei, CHENG Yuanping, WANG Liang, et al. Optimized design on high level borehole in roof of coal mining face in coal and gas outburst mine[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(10): 66-70.
- [10] 金新. 顶板岩层定向卸压瓦斯抽采钻孔钻进关键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(3): 124-127.
JIN Xin. The key technology for drilling pressure-releasing gas drainage hole in roof strata[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(3): 124-127.
- [11] 孙荣军, 李泉新, 方俊, 等. 采空区瓦斯抽采高位钻孔施工技术及其发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 94-99.
SUN Rongjun, LI Quanxin, FANG Jun, et al. Construction technology and development tendency of high level borehole for gas drainage in goaf[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 94-99.
- [12] 王福厚. 高位钻孔抽放瓦斯冒落带及裂隙带高度确定方法[J]. 煤炭科学技术, 2008, 27(8): 75-76.
WANG Fuhou. Determination method of caving & fracture zone height for gas drainage by high level borehole[J]. Coal Science and Technology, 2008, 27(8): 75-76.
- [13] 于成凤, 金新, 曹建明. 贵州大湾煤矿复杂地层井下定向钻进施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(3): 24-27.
YU Chengfeng, JIN Xin, CAO Jianming. Downhole direction drilling construction technology in complex formation of Dawan Coal Mine in Guizhou [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(3): 24-27.
- [14] 石智军, 姚克, 姚宁平, 等. 我国煤矿井下坑道钻探技术装备40年发展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 1-34.
SHI Zhijun, YAO Ke, YAO Ningping, et al. 40 years of development and prospect on underground coal mine tunnel drilling technology and equipment in China [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 1-34.
- [15] 刘金凯, 张春雷, 霍利杰, 等. 近水平煤层大采高综放开采冒落带高度研究[J]. 煤矿安全, 2014, 45(7): 23-25.
LIU Jinkai, ZHANG Chunlei, HUO Lijie, et al. Study on caving zone height of large mining height fully mechanized caving mining in horizontal seam [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(7): 23-25.
- [16] 杨贵. 综放开采导水裂隙带高度及预测方法研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2004.
YANG Gui. Study on the height of water flowing fractured zone and prediction method in fully mechanized sub-level caving [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2004.
- [17] 夏小刚, 黄庆享. 基于空隙率的冒落带动态高度研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014(1): 102-107.
XIA Xiaogang, HUANG Qingxiang. Study on the dynamic height of caved zone based on porosity [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014(1): 102-107.
- [18] 倪绍虎, 何世海, 汪小刚, 等. 裂隙岩体水力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 488-498.
NI Shaohu, HE Shihai, WANG Xiaogang, et al. Hydraulic properties of fractured rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 488-498.

(编辑 李艺)