

复杂地层顺层定向钻孔轨迹设计方法优化

李笔文, 叶嗣暄

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要:金泰煤矿M6煤层具有顶底板破碎、视倾角由双倾角控制(XZ 视图倾角 17° 、 YZ 视图倾角 3°)、煤层厚度薄且厚度变化差异大(1.08~1.68 m)的复杂产状特征,在顺层定向钻孔施工中,钻孔平面拐弯段采用原有的轨迹设计方法存在轨迹实控难度大、易偏离煤层进入不稳定顶底板而无法钻进、多分支孔施工降低施工效率和无效进尺的难题。本文基于视倾角计算公式,引入钻孔沿工作面走向倾角参数,针对钻孔平面拐弯段优化轨迹设计方法,并在金泰煤矿开展验证试验。结果表明:优化的钻孔平面拐弯段轨迹设计方法相对于原有轨迹设计方法,能够保持钻孔沿煤层中部钻进,克服煤层厚度变化干扰,实现钻孔平面拐弯段精确沿煤层钻进,有效进尺率分别为48.82%、76.72%和100%。8~10号试验钻孔瓦斯监测数据均呈现出较好的瓦斯抽采效果。

关键词:煤层产状;顺层钻孔;定向钻孔;钻孔轨迹设计;瓦斯抽采

中图分类号:P634.7;TD713 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)02-0047-06

Optimization of directional drilling path design method in complex formation

LI Biwen, YE Sixuan

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

Abstract: The M6 coal seam in Jintai Coal Mine has complex occurrence characteristics such as roof and floor breakage, apparent dip angle controlled by double dip angle (XZ view inclination 17° , YZ view inclination 3°), thin seam thickness (1.08~1.68m) and large variation in thickness. In the construction of directional drilling along strata, there are some problems such as difficulty of actual control, easy deviation from coal seam into unstable roof and floor, lower construction efficiency and ineffective penetration in multi-branch hole construction. Based on the calculation formula of apparent dip angle, this paper introduces the dip angle parameter of borehole along the working face to optimize the trajectory design method for the plane turning section of borehole, and carries out the verification test in Jintai Coal mine. The results show that: Compared with the original trajectory design method, the optimized trajectory design method can keep the borehole drilling along the middle of the coal seam, overcome the interference of the thickness change of the coal seam, and realize the accurate drilling along the coal seam of the plane turning section of the borehole, and the effective footage rates are 48.82%, 76.72% and 100%, respectively. The gas monitoring data of test borehole No. 8~10 show good gas extraction effect.

Key words: occurrence of coal seam; bedding drilling; directional drilling; design of drilling holes track; methane extraction

0 引言

煤矿井下定向长钻孔成孔技术装备具备施工

精度高、实钻轨迹可控、布孔层位灵活等技术优势,在煤矿瓦斯抽采、水害防治、构造探查等领域得到

收稿日期:2023-07-23; 修回日期:2023-11-08 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.02.007

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(编号:2023-JC-YB-341);中煤科工西安研究院(集团)有限公司科技创新基金项目(编号:2022XAYKF01-01)。

第一作者:李笔文,男,汉族,1994年生,实习研究员,硕士,从事煤矿井下钻探工艺的研发与推广工作,陕西省西安市高新区锦业一路82号,2430569717@qq.com。

引用格式:李笔文,叶嗣暄.复杂地层顺层定向钻孔轨迹设计方法优化[J].钻探工程,2024,51(2):47-52.

LI Biwen, YE Sixuan. Optimization of directional drilling path design method in complex formation[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 47-52.

了广泛地应用^[1-7]。我国西南煤炭产区地质条件复杂,煤层厚度薄且走向厚度变化大,煤层产状在倾向和走向上多具较大起伏^[8-9]。关于煤矿井下近水平定向钻孔轨迹设计和控制技术研究较为统一,认为轨迹设计方法的不断优化和分支孔施工工艺的配合,是实现不同地层条件定向钻孔符合设计主要技术路径^[10-14]。董小明^[15]等在金泰煤矿10605运输顺槽M6煤层进行了定向钻孔与普通钻孔在瓦斯治理效果上的研究,但施工工作面M6煤层不具备缓倾斜地层特征,因而未进行钻孔设计方法的研究。

金泰煤矿可采煤层共分为M6、M8和M12三层。其中,M6煤层内钻孔路径沿倾向倾角 17° 、沿走向倾角 3° 。M6煤层顶底板均为泥质粉岩层,综合柱状图的地层描述以及以往钻孔施工资料,M6煤层底板岩层稳定性差、难以成孔。同时,拟施工10606工作面巷道未完全揭露、地层产状信息缺乏、煤层厚度薄、导致该工作面顺层定向钻孔施工存在较大难度,故在10606运输巷开展顺层定向钻进成孔试验,为金泰煤矿及相似地层特征矿区提供可借鉴的顺层定向成孔工艺技术。

1 地层概述

M6煤层位于P3l上部,上距P3c底界平均厚24.83 m,下距M8煤层(B2)顶界平均21.49 m。煤层厚度1.08~1.68 m,变化系数为9.92%。采用直接法测定煤层瓦斯含量为 $5.05\sim 16.07\text{ m}^3/\text{t}$,煤层瓦斯压力为 $0.10\sim 0.57\text{ MPa}$;煤的坚固性系数 $f=0.49\sim 0.97$ ^[16]。地层柱状图如图1所示。

204.90		黑色半光亮型块煤
205.85		黑色炭质泥岩,见植物碎片
206.10		黑色半光亮型块煤
208.00		灰色薄层泥质粉砂岩
208.90		深灰色泥岩
209.15		灰色泥质粉砂岩
211.10		M6煤层: 黑色粒状结构、半光亮型块煤
212.75		深灰色泥质粉砂岩
213.75		深灰、灰黑色泥岩
214.20		黑色块煤,见黄铁矿颗粒

图1 M6煤层简化地层柱状图

Fig.1 Simplified stratigraphic histogram of M6 coal seam

煤层结构简单,不含夹矸。煤层顶板岩性为粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩。底板为粘土岩,含炭质泥岩,产植物碎片化石。煤层较稳定。

2 倾角设计方法

定向钻进能够实现轨迹精确控制是以实钻轨迹与设计轨迹的偏差值作为参考,通过控制螺杆马达弯头朝向(即工具面向角)来控制钻孔轨迹倾角和方位角值的变化^[17-18],从而消除偏差保障实钻轨迹符合设计轨迹,因而钻孔初始设计的准确性具有重要意义。M6煤层受化觉背斜褶皱构造控制,钻孔路径呈现出XZ视图倾角 17° 、YZ视图倾角 3° 的产状特征。将定向钻孔从开孔到与主勘探线方位角一致之前的孔段定义为平面拐弯段,该段同时受XZ视图倾角和YZ视图倾角控制,且随着钻孔逐渐趋近主勘探线方位,XZ视图倾角控制减弱,YZ视图倾角加强,在达到主勘探线方位孔段后,钻孔仅受YZ视图倾角控制。M6煤层地层产状示意如图2所示。

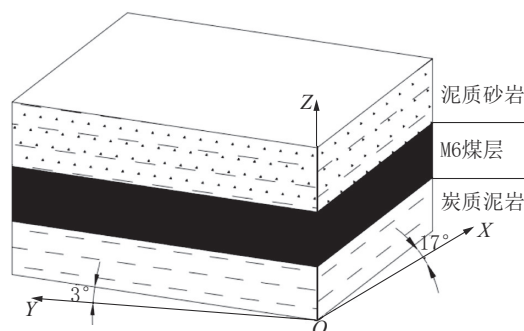


图2 M6煤层地层产状示意

Fig.2 Schematic diagram of M6 coal seam stratigraphic occurrence

常规视倾角与真倾角的换算通常与真倾角 α 、岩层走向与观察剖面的夹角 θ 、比例尺纵横比 η 3个数值有关,由关系式: $\tan\beta = \tan\alpha \cdot \sin\theta \cdot \eta$ 可计算得出视倾角值。视倾角与真倾角换算关系如图3所示。

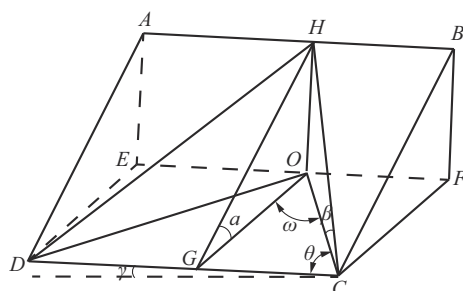


图3 视倾角与真倾角转换关系

Fig.3 The conversion relationship between apparent dip and true dip

但在该公式中,默认地层走向倾角为(YZ视图倾角)0°,而金泰煤矿M6煤层具有YZ视图倾角3°,煤层的平均厚度薄,为保障钻孔在平面拐弯段的钻进过程中保持在煤层中钻进,故需重新进行计算公式推导。在原有计算参数中增加走向倾角,钻孔单位设计长度及其上下位移、倾向上的上下位移、走向上的上下位移,而岩层走向与观察剖面的夹角亦即钻孔设计方位与主勘探线方位的夹角,依据上下位移关系及三角函数关系得出:

$$H = H_1 + H_2 \tag{1}$$

$$H = L \cdot \sin \beta \tag{2}$$

$$H_1 = \tan \alpha \cdot \sin \theta \cdot \cos \beta \cdot L \tag{3}$$

$$H_2 = \tan \gamma \cdot \cos \theta \cdot \cos \beta \cdot L \tag{4}$$

将式(2)、(3)、(4)代入式(1)可得:

$$\cos \beta (\tan \alpha \cdot \sin \theta + \tan \gamma \cdot \cos \theta) = \sin \beta \tag{5}$$

则可得出:

$$\beta = \arctan (\tan \alpha \cdot \sin \theta + \tan \gamma \cdot \cos \theta) \tag{6}$$

式中: β ——视倾角; α ——地层XZ视图倾角(地层真倾角); γ ——地层YZ视图倾角; θ ——钻孔设计方位与主勘探线方位夹角; L ——钻孔单位设计长度,一般取3m; H ——钻孔单位设计长度上下位移; H_1 ——钻孔单位设计长度在倾向上的上下位移; H_2 ——钻孔单位设计长度在走向上的上下位移。

由上述公式可知,在平面拐弯段的钻孔设计中,视倾角值 β 随着钻孔设计方位与主勘探线方位夹角 θ 值的变化而变化,取钻孔单位设计长度为3m,则钻孔视倾角值 β 随着设计方位角的变化(其与主勘探线方位角的夹角 θ 值的变化),每3m进行一次计算,得到钻孔视倾角值。依据施工采用的 $\varnothing 73$ mm螺杆马达(弯角值为 1.25°)造斜能力,定向钻孔设计一般采用 $0.5^\circ/3$ m等间隔变化量来进行。因而通过计算得出视倾角值后,然后根据上下位移关系式: $H = H_1 + H_2$,采用 0.5° 值的四舍五入来进行设计倾角值的化整调整,最终得出钻孔设计倾角值。钻孔平面拐弯段长度对应的钻孔深度亦为夹角 θ 值为0时的孔深, θ 值为0代表钻孔与主勘探线方位重合,后续孔段设计只与YZ视图倾角与地层产状变化有关。8号钻孔局部设计参数如表1所示。

3 钻孔布孔设计

本次设计试验钻孔3个,钻孔编号8~10。钻孔

表1 金泰煤矿M6煤层8号顺层定向钻孔设计倾角

Table 1 The design inclination angle of the 8# directional drilling in the M6 coal seam of Jintai Coal Mine

序号	孔深/ m	夹角/ °	夹角 弧度 值	倾向 倾角/ °	倾向倾 角弧度 值	倾角/ °	倾角 弧度 值	视倾 角值/ °
1	0	36.5	0.64	17	0.30	3	0.05	12.62
7	18	35.5	0.62	17	0.30	3	0.05	12.41
10	27	34	0.59	17	0.30	3	0.05	12.10
14	39	32	0.56	17	0.30	3	0.05	11.66
17	48	30.5	0.53	17	0.30	3	0.05	11.32
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
76	225	0.5	0.01	17	0.30	3	0.05	3.15
77	228	0	0.00	17	0.30	3	0.05	3.00

剖面设计上,由于平面拐弯段受煤层XZ视图倾角和YZ视图倾角共同控制,因而在平面拐弯段倾角值为视倾角值,而在进入主勘探线方位段后,钻孔倾角仅受YZ视图倾角(走向)控制,因而与煤层走向倾角保持一致。由于煤层平均厚度薄,将钻孔布置在煤层中部有利于钻孔克服煤层变薄、产状起伏和人为轨迹控制偏差,保持钻孔沿煤层钻进。钻孔平面设计上,依据煤层瓦斯抽采半径2.5m,钻孔设计平面间距为5m,平面控制距10606运输巷帮47~67m范围。钻孔平面设计如图4所示。

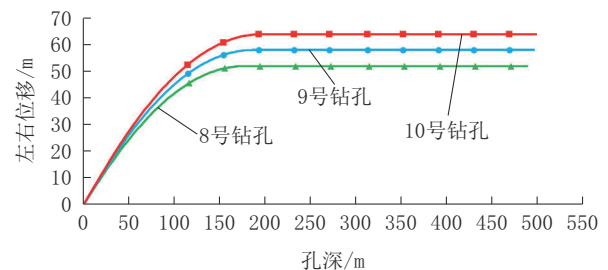


图4 钻孔平面设计

Fig.4 Drilling plan design

4 试验效果

4.1 控制精度分析

基于本文提出的平面拐弯段钻孔倾角设计方法及选用的定向分支孔探顶施工工艺,统计试验钻孔实钻轨迹数据,分析其工艺适用性。8号钻孔为第1个试验钻孔,在平面拐弯段的钻进中因钻出煤层开分支孔2个,在主勘探线方位段钻进中因钻出煤层开分支孔10个,主孔深度498m,累计开分支孔12

个,有效进尺率为48.82%,试验钻孔实钻平面轨迹如图5所示。

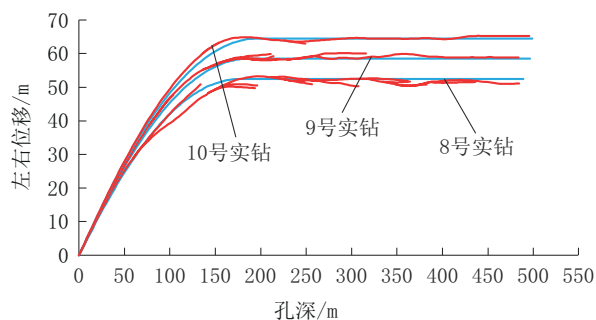


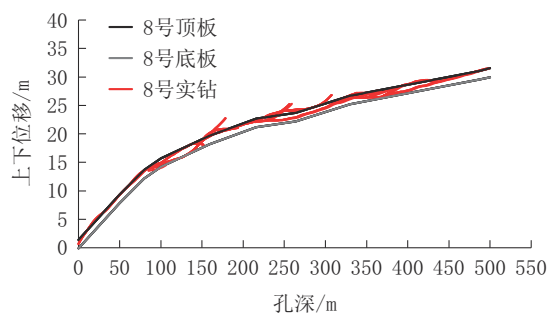
图5 试验钻孔实钻平面轨迹

Fig.5 Actual drilling plane trajectory of test hole

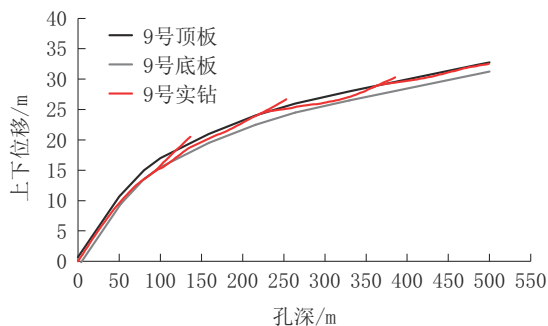
分析8号钻孔实钻轨迹得出:(1)提供的地层产状信息存在一定误差,需要通过实钻轨迹进行修正,通过定向分支孔探顶施工工艺,有效修正地层产状。(2)在平面拐弯段钻进中,实钻轨迹左右偏差符合设计要求的孔段,钻孔能够实现纯煤层孔钻进。2次钻出煤层都发生在左右偏差较大的孔段。分析认为,由于地层XZ视图 17° 的倾角,在实钻轨迹控制中,左右偏差导致钻孔易钻遇煤层顶底板,右偏差易提前钻遇顶板,左偏差易提前钻遇底板。(3)在主勘探线方位段钻进中,钻孔顺着煤层YZ视图倾角钻进,但在钻进过程中出现煤层局部变薄和YZ视图倾角偏离设计参考值 3° 导致的钻出煤层。通过8号钻孔实钻轨迹对地层产状的探明,同时强化在实钻过程中的左右偏差控制。在9号钻孔施工中,平面拐弯段无分支孔,而主勘探线方位段分支孔降为3个,主要为勘探线方位段轨迹控制不佳产生左右偏差,导致钻孔钻出煤层。10号钻孔实现单一主孔全煤层孔钻进,未施工分支孔。试验钻孔轨迹剖面如图6所示。

通过最大孔深、分支孔数量、分支孔进尺、综合台班效率(8h)、煤岩情况参数分析得出:(1)试验钻孔最大孔深501m,3个钻孔均达到设计要求终孔。综合台班效率最大15m/h,影响综合台班效率的主要因素为分支孔施工。(2)采用定向分支孔探顶施工工艺,通过探顶后提钻至煤层分支点处开分支孔实现煤孔段搭接,消除了主孔瓦斯抽采盲区孔段。钻孔施工参数统计如表2所示。

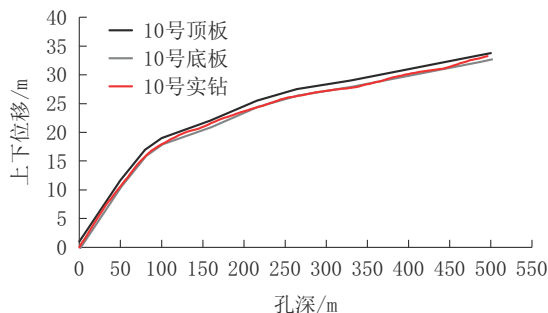
实施3个试验孔有效进尺率分别为48.82%、76.72%和100%,通过设计优化,显著提高了有效



(a)8号钻孔



(b)9号钻孔



(c)10号钻孔

图6 试验钻孔实钻剖面轨迹

Fig.6 The actual drilling profile of the test hole

表2 钻孔施工参数统计

Table 2 Statistical table of drilling parameters

孔号	主孔深度/m	分支孔数量/个	分支孔进尺/m	综合台班效率/($m \cdot h^{-1}$)	有效进尺率/%
8	498	12	522	8.54	48.82
9	501	3	152	10.89	76.72
10	498	0	0	15	100

进尺率,节约了时间成本和费用成本,并为煤矿安全生产提供了保障。

4.2 瓦斯抽采效果分析

8~10号定向钻孔瓦斯抽采负压13.6~18.0 kPa,平均14.5 kPa。瓦斯抽采数据统计如表3

所示。

表3 定向钻孔瓦斯抽采数据统计

Table 3 Directional drilling gas drainage data

抽采孔号	平均抽采天数/d	平均抽采混量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	平均抽采纯量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	平均抽采浓度/%	日均瓦斯抽采量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
8	28	0.92	0.61	65	874.35
9	22	0.96	0.72	71	1039.48
10	15	1.31	1.00	76	1443.68

8~10号定向钻孔的抽采浓度在监测期间均呈现波动变化趋势,总体保持在50%~70%之间,而抽采混量在抽采第10~12 d均出现快速下降,最后稳定在0.5~0.6 m^3/min ,抽采纯量也随着呈现同样的趋势。而3个钻孔的瓦斯抽采数据由于抽采天数的不同,平均值随着抽采天数而降低,因而平均值不代表钻孔间的抽采差异,而是从总体上呈现出抽采浓度高、抽采量大的特点,有效保障了M6煤层的瓦斯预抽效果。8~10号定向钻孔瓦斯抽采情况如图7所示。

5 结论及建议

(1)针对钻孔路径上同时受XZ视图倾角和YZ视图倾角控制的大倾向地层,平面拐弯段钻孔倾角设计方法能够保障定向钻孔平面拐弯段倾角设计的准确性,同时结合定向分支孔探顶施工工艺,可以有效解决薄煤层因局部厚度及产状变化而导致钻孔钻出煤层情况。

(2)缓倾斜薄煤层顺层定向钻孔施工中,左右偏差对于钻孔保持纯煤层孔钻进影响较大,在实际施工过程中,尤其是平面拐弯段,要注重左右偏差的控制,降低钻孔钻遇煤层顶底板的概率。同时,5 m平面间距的产状变化较小,在施工顺序上,沿平面设计依次施工可以有效降低钻孔施工难度。

(3)定向探顶施工工艺能够保障主孔段达到设计深度且实现纯煤层孔搭接覆盖,8~10号试验钻孔28、22、15 d抽采数据均呈现出较好的瓦斯抽采效果,对于相似地层条件矿井瓦斯治理具有良好的参考意义。

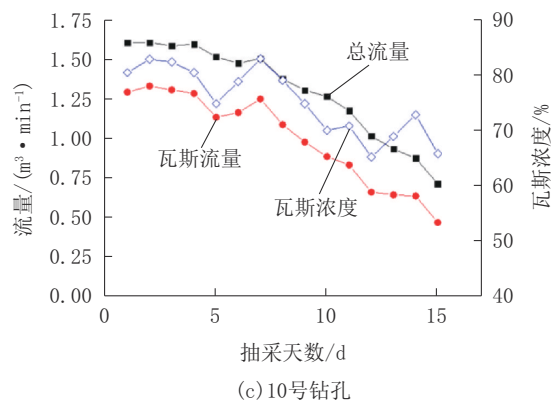
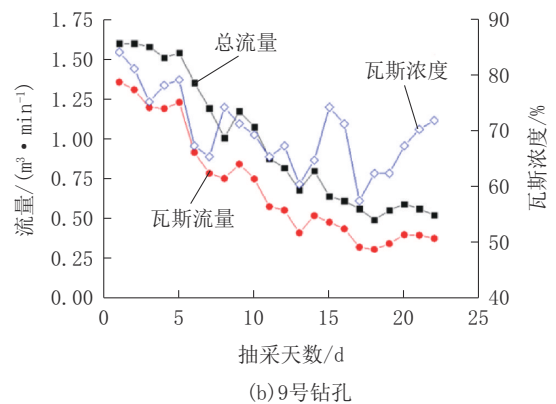
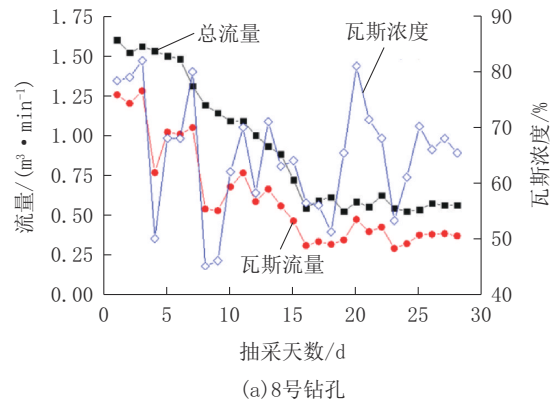


图7 定向钻孔瓦斯抽采情况

Fig.7 Directional drilling gas drainage

参考文献 (References):

- [1] 程亮.薄及中厚软煤层水力压裂煤岩损伤机理及瓦斯运移规律[D].重庆:重庆大学,2016.
CHENG Liang. Coal and rock damage mechanism and methane migration law in thin and medium thick soft coal seams by hydraulic fracturing[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [2] 王永文,姚宁平,王海龙,等.高位定向钻孔分层布置与瓦斯抽采效果分析[J].钻探工程,2022,49(4):117-123.
SUN Yongwen, YAO Ningping, WANG Hailong, et al. Layered layout of high-level directional boreholes and analysis of gas drainage effect[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4): 117-123.

- [3] 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.
- [4] 曹建明.复杂地层梳状定向长钻孔在区域瓦斯治理中的应用[J].钻探工程,2021,48(12):20-25.
CAO Jianming. Application of comb directional long boreholes to regional gas control in complex formation[J]. Drilling Engineering, 2021,48(12):20-25.
- [5] 曹小军.复杂工况下顺煤层空气定向钻进应用研究[J].钻探工程,2023,50(2):151-155.
CAO Xiaojun. Research on application of in-seam air directional drilling under complex working conditions[J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):151-155.
- [6] 石智军,董书宁,杨俊哲,等.煤矿井下3000m顺煤层定向钻孔钻进关键技术[J].煤田地质与勘探,2019,47(6):1-7.
SHI Zhijun, DONG Shuning, YANG Junzhe, et al. Key technology of drilling in-seam directional borehole of 3000m in underground coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2019,47(6):1-7.
- [7] 方鹏,姚克,王龙鹏,等.ZDY25000LDK智能化定向钻进装备关键技术研究[J].煤田地质与勘探,2022,50(1):72-79.
FANG Peng, YAO Ke, WANG Longpeng, et al. Research on key technologies of the ZDY25000LDK intelligent directional drilling equipment[J]. Coal Geology & Exploration, 2022,50(1):72-79.
- [8] 李泉新,方俊,褚志伟,等.青龙煤矿碎软煤层顺层定向钻孔钻进试验研究[J].工矿自动化,2018,44(11):1-6.
LI Quanxin, FANG Jun, CHU Zhiwei, et al. Drilling experiment research on bedding directional drilling of soft-fragmentized coal seam of Qinglong Coal Mine[J]. Industry and Mine Automation, 2018,44(11):1-6.
- [9] 陈万勇,潘自滔,刘政.贵州金泰煤矿龙潭组煤层发育特征与煤质分析[J].企业技术开发,2019,38(5):87-88,91.
CHEN Wanyong, PAN Zitao, LIU Zheng. Coal seam development characteristics and coal quality analysis of Longtan formation in Jingtai Coal Mine, Guizhou Province[J]. Technological Development of Enterprise, 2019,38(5):87-88,91.
- [10] 张垒,韩洪强.顺煤层随钻测量定向钻进技术在金泰煤矿的应用[J].内蒙古煤炭经济,2021(24):156-158.
ZHANG Lei, HAN Hongqiang. Application of measurement-while-drilling directional drilling technology along coal seam in Jintai Coal Mine[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2021(24):156-158.
- [11] 焦聚博,侯红,孙凯.煤矿井下保直钻进技术现状及展望[J].钻探工程,2021,48(7):14-19.
JIAO Jubo, HOU Hong, SUN Kai. State and prospect of underground straight drilling technology in coal mines[J]. Drilling Engineering, 2021,48(7):14-19.
- [12] 费振邦.浅谈煤层真倾角与视倾角相互换算的方法[J].科技展望,2016,26(10):184.
FEI Zhenbang. The method of converting the true dip angle and apparent dip angle of coal seam to each other[J]. Technology Outlook, 2016,26(10):184.
- [13] 姚宁平,张杰,李泉新,等.煤矿井下定向钻孔轨迹设计与控制技术[J].煤炭科学技术,2013,41(3):7-11,46.
YAO Ningping, ZHANG Jie, LI Quanxin, et al. Tracing design and control technology of directional drilling borehole in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2013,41(3):7-11,46.
- [14] 白家祉,苏义脑.定向钻井过程中的三维井身随钻修正设计与计算[J].石油钻采工艺,1991(6):1-4.
BAI Jiazhi, SU Yinao. Design and calculation of 3D borehole correction during directional drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1991(6):1-4.
- [15] 董小明,褚志伟,张垒,等.顺煤层随钻测量定向钻进技术在金泰煤矿的应用研究[J].煤炭技术,2022,41(1):92-96.
DONG Xiaoming, CHU Zhiwei, ZHANG Lei, et al. Application of directional drilling technology with measurement while drilling along coal seam in Jintai Coal Mine[J]. Coal Technology, 2022,41(1):92-96.
- [16] 褚志祥.水峪煤矿孤岛工作面强矿压机理及顶板控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.
CHU Zhixiang. Research on the mechanism of strong rock pressure and roof control in island working face of Shuiyu Coal Mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [17] 豆旭谦,王力,王毅,等.张集煤矿灰岩顺层定向钻进托压效应及影响因素分析[J].煤矿安全,2020,51(3):168-172,177.
DOU Xuqian, WANG Li, WANG Yi, et al. Back pressure effect of limestone consequent landslide directional drilling and analysis of influencing factors in Zhangji Coal Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2020,51(3):168-172,177.
- [18] 姚宁平,王毅,姚亚峰,等.我国煤矿井下复杂地质条件下钻探技术与装备进展[J].煤田地质与勘探,2020,48(2):1-7.
YAO Ningping, WANG Yi, YAO Yafeng, et al. Progress of drilling technologies and equipment for complicated geological conditions in underground coal mines in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2020,48(2):1-7.

(编辑 荐华)