

机电与自动化

煤层顶板高位定向钻孔施工技术与发展趋势

赵建国

(中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077)

摘要:基于采空区顶板竖“三带”与横“三区”理论,分析了顶板高位定向长钻孔技术瓦斯抽采基本原理与优势,总结归纳了“定向先导孔+扩孔”施工工艺的技术特点,介绍了施工装备系统组成。利用该成孔技术与装备在陕西彬长集团文家坡煤矿 4101 工作面进行了现场试验,完成顶板高位定向长钻孔 2 个,累计钻孔进尺 1 221 m,单孔主孔深度超过 480 m。同时,针对现有顶板高位定向钻孔施工技术存在的问题,提出引入液动冲击辅助碎岩扩孔钻进技术与大直径孔定向钻进技术,进一步增大钻孔终孔直径,提升钻孔施工效率,保证钻孔施工安全。

关键词:瓦斯抽采;高位钻孔;定向钻进;扩孔;液动冲击

中图分类号:TD41

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2017)06-0137-05

Construction technology and development tendency of high level directional drilling in seam roof

Zhao Jianguo

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

Abstract: Based on a theory on a vertical “three zones” and lateral “three blocks” of goaf roof, the paper analyzed the basic principle and advantages of the gas drainage with the high level directional long borehole drilling technology of the seam roof, summarized and included the technical features of the “directional pilot borehole + reaming” construction technology and introduced the composition of the construction equipment system. The boring technology and equipment were applied to conduct a site trial on No.4101 coal mining face in Wenjiapo Mine of Shaanxi Bingchang Group. Two high level directional drillings were completed in the roof with a total drilling mater of 1 221 m and a single main borehole depth over 480 m. Meanwhile, according to the problems existed in the available construction technology of the high level directional drilling in the roof, the paper provided and introduced a hydraulic and percussive secondary rock breaking and remaining drilling technology and large diameter directional drilling technology in order to further increase the final borehole diameter of the drilling, to improve the drilling construction efficiency and to ensure the construction safety of the drilling.

Key words: gas drainage; high level borehole; directional drilling; reaming; hydraulic percussion

0 引 言

矿井瓦斯灾害是煤矿重大自然灾害之一,严重威胁、制约着矿井安全生产^[1]。随着矿井生产强度的提高和开采深度的加大,矿井瓦斯涌出量增大,采空区瓦斯涌出现象加剧^[2]。研究表明,回采工作面回

风流瓦斯有 40%~50%来自采空区瓦斯涌出,其对生产工作最直接的影响是造成工作面上隅角瓦斯超限,不仅迫使工作面停产,还有可能酿成瓦斯爆炸等安全事故。在目前技术条件下,采取有效措施抽采采空区瓦斯是解决这一问题的最有效技术途径^[3]。

针对工作面采空区及采动影响区瓦斯抽采治理

收稿日期:2016-12-01;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.06.022

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045-003,2016ZX05067-001-003);煤炭科学研究总院技术创新基金资助项目(2016ZYMS015)

作者简介:赵建国(1983—),男,河南焦作人,助理研究员,硕士。Tel:029-81881629,E-mail:zhaojianguo@cctegxian.com

引用格式:赵建国.煤层顶板高位定向钻孔施工技术与发展趋势[J].煤炭科学技术,2017,45(6):137-141,195.

Zhao Jianguo. Construction technology and development tendency of high level directional drilling in seam roof[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 137-141, 195.

需要,国内开展了大量的研究工作:开发了高位瓦斯抽采巷、专用尾巷、倾斜局位巷等专用巷道法抽采瓦斯,虽取得了较好的瓦斯抽采效果,但存在掘进成本高、施工周期长、管理难度大,其技术推广受到一定限制^[4-5]。开发了插(埋)管、地面垂直钻孔和“L”型钻孔、井下高位钻孔等钻孔抽采法^[6],其中插管抽采浓度和效率低,地面钻孔适用于开采深度较浅的高瓦斯煤层且施工成本高^[7]。相比较而言,采用高位钻孔抽采法瓦斯抽采具有成本低、效果好、施工方便、管理简单等特点,在淮南、晋城、平顶山、鸡西、铁法、阳泉等许多矿区得到了应用^[8]。

近年来,随着煤矿井下定向钻进技术的飞速发展与大规模推广,越来越多的煤矿企业将其应用于顶板高位定向钻孔施工,具有轨迹可控、工程量小、施工周期短、钻孔有效长度长等优点。顶板高位定向长钻孔已成为现阶段煤矿工作面瓦斯治理的重要技术手段。

1 高位定向钻孔瓦斯抽采原理

煤层开采在采空区上覆岩层中形成竖向的破断裂隙与横向的离层裂隙。随着工作面的推进,采空区顶板覆岩充分垮落后,其中部顶板岩层裂隙被压实,而采空区四周由于煤壁的支撑作用使得上下位岩层的离层裂隙仍能在一定程度保留,在横向上自采空区边界向采空区中部形成煤壁支撑区、离层区与重新压实区,处于采空区边界的煤壁支撑区与离层区则形成一个闭合的环形采动裂隙发育区,称之为采动裂隙“O”形圈(简称“O”形圈)^[9]。“O”形圈在采空区开切眼一侧固定不动,而在工作面一侧则随着工作面推进而前移,其移动速度和工作面推进速度相当,因此“O”形圈在采空区顶板充分垮落后始终存在^[10]。

研究表明:“O”形圈既是瓦斯运移的主要通道,也是瓦斯积聚的重要场所。在瓦斯和空气密度差以及采空区漏风的共同作用下,其内部聚积的瓦斯会通过密闭墙或煤柱裂隙进入采区或巷道,增加矿井通风负担和不安全因素。因此治理采空区上隅角瓦斯除了尽量减少工作面漏风外,还应为采空区内瓦斯提供一条流通渠道。顶板高位定向长钻孔(图1)便是持续在工作面裂隙带内制造负压,在压力梯度影响下引流采空区瓦斯的引流渠道^[11]。

在回采工作面推进过程中,高位定向钻孔轨迹始终处于采空区裂隙带范围以内,如图2所示,利用

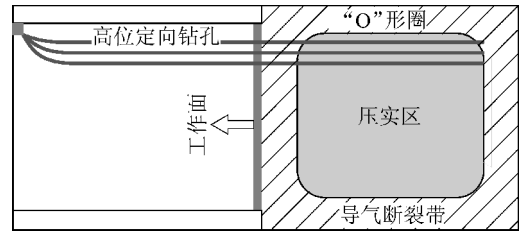


图1 高位定向钻孔平面示意

Fig. 1 Horizontal diagrammatic sketch of high position directional drilling

采动压力形成的竖向破断裂隙、横向离层裂隙抽采采空区与采动影响区的瓦斯。高位定向钻孔具有钻孔轨迹可控,有效抽采层位钻遇率高,钻孔深度大等显著特点。工作面回采过程中,钻孔与采动裂隙保持贯通并持续抽采采空区裂隙带内游离态瓦斯,直至采煤工作面越过高位定向钻孔覆盖区域。

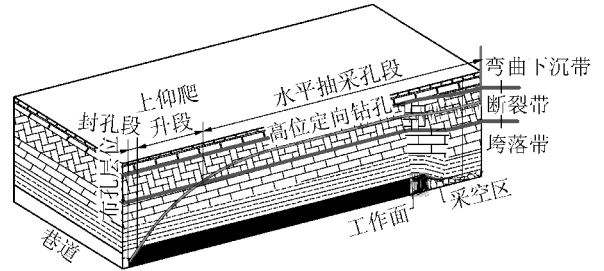


图2 高位定向钻孔剖面投影示意

Fig. 2 Vertical profile projection of high position directional drilling

2 高位定向钻孔施工技术

2.1 高位定向钻孔层位选取

顶板高位定向孔布孔层位直接影响其对工作面采空区及采动影响区瓦斯的抽采效果。布孔层位的选择需着重考虑2个方面因素:一是瓦斯抽采效果,即将钻孔布置在垮落带以上采动裂隙发育的层位,钻孔构建的瓦斯抽采通道与采动裂隙有效贯通。二是钻进成孔效果,即将钻孔布置在易钻进成孔且孔壁稳定性好的层位,尽量避开泥岩及易坍塌地层。

根据采空区覆岩移动规律和瓦斯流动规律,可知裂隙带是邻近层瓦斯和冒落区瓦斯的主要聚集区,有大量、高浓度瓦斯,同时裂隙发育充分,是抽采瓦斯的最佳层位。具体地讲,垮落带上部、断裂带中下部是布置高位钻孔的最佳层位^[12]。冒落带高度可采用以下理论公式进行计算:

$$H = \frac{M}{K - 1} \quad (1)$$

其中: H 为冒落带高度; M 为煤层采高; K 为岩石碎胀系数。实际的冒落带岩层厚度一般都小于上述理论计算值, 主要是因为: ①自由空间高度还不等于零时, 其上部岩层就可能进入裂隙带; ②在冒落带岩层冒落的同时, 裂隙带岩层可能已有所下沉, 而且是岩层愈软下沉得愈多^[13]。冒落带和裂隙带高度一般分别采用经验公式(1)和式(2)计算。

$$H_1 = \frac{100M}{6.2M - 10} \pm 2.5 \quad (2)$$

$$H_2 = \frac{100M}{3.1M + 6} \pm 6.5 \quad (3)$$

2.2 高位定向钻孔施工技术

基于现有煤矿井下定向钻进技术装备能力, 高位定向钻孔主要采取“先导孔+扩孔”的成孔技术。首先沿设计轨迹在煤层顶板完成1条定向先导孔, 之后在先导孔的基础上实施扩孔。具体施工工艺如下:

1) 套管段施工。套管段先导孔孔深依据所下入封孔套管的长度而定, 一般不超过12 m。先导孔完成之后更换大直径扩孔钻头扩孔, 然后下入相应规格的封孔套管。目前针对 $\phi 153$ mm终孔直径的高位定向钻孔, 一般采用 $\phi 200$ mm矿用PE管封孔。

2) 抽采孔段施工。抽采孔段先导孔施工采取滑动定向与旋转保直相结合的复合定向钻进技术, 通过实时调整滑动定向与旋转保直2种钻进模式比例, 实现钻孔的造斜与保直。根据抽采孔段轨迹特点, 可分为上仰爬升段与水平抽采段2个部分。上仰爬升段轨迹控制应充分考虑定向钻具造斜能力与钻杆柱允许造斜强度, 主要采用滑动定向钻进。水平抽采段则主要采用旋转保直钻进。

2.3 高位定向钻孔钻进装备系统

1) 全液压定向钻机。工作面瓦斯治理对顶板高位定向钻孔直径、深度与成孔效率等需求的不断提升, 对于定向钻机设备能力提出了更高要求: ①顶板硬岩钻进要求定向钻机具备大转矩, 大的给进起拔力, 同时配备高压大排量的泥浆泵, 以满足大转矩孔底马达破碎顶板硬岩的动力需要; ②自煤层向顶板施工高位定向钻孔要求钻机具备大角度的安全开孔能力; ③大直径扩孔及钻孔事故处理要求钻机在具备大的给进起拔力的同时, 动力头主轴通孔具备 $\phi 127$ mm以上粗径钻具通过的能力。

针对上述需求, 依托“十二五”重大油气专项“中硬煤层大功率定向钻进技术与装备”, 开发了ZDY12000LD大功率定向钻机(图3)与配套

BLY390/12型全液压履带泵车(图4), 具有整机功率大、钻进及事故处理能力强、工艺适应性广等优点。满足 $\phi 153$ mm及以上顶板岩层高位大直径定向钻孔高效钻进成孔需要, 为顶板高位大直径定向钻孔的推广应用提供了装备支撑。



图3 ZDY12000LD 大功率定向钻机

Fig. 3 ZDY12000LD high power directional drilling rig

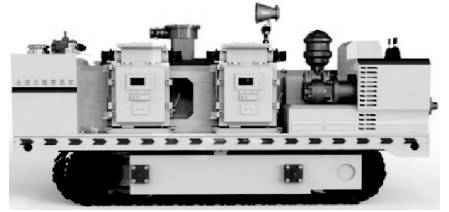


图4 BLY390/12型全液压履带泵车

Fig. 4 BLY390/12 type full hydraulic track pump truck

2) 随钻测量系统。随钻测量系统是实施顶板高位定向长钻孔的关键, 其主要功能为随钻实时测量定向先导钻孔轨迹参数与孔底定向钻具姿态参数, 以便于根据设计参数实时调控钻孔轨迹。YHD2-1000(A)型随钻测量系统是基于有线传输的孔口供电式随钻测量系统, 能够实现近水平定向长钻孔轨迹参数的测量及测量数据的实时快速传输, 具有测量精度高, 传输速率快, 探管连续工作时长等显著特点, 满足1 000 m以内高位定向钻孔先导孔轨迹测量与控制需要。YHD2-1000(A)随钻测量装置实物如图5所示。



图5 YHD2-1000(A)随钻测量装置实物

Fig. 5 YHD2-1000(A) measuring device with drilling

3) 定向钻具。定向钻具是实施定向先导孔的核心。主要由长寿命PDC定向钻头、单弯螺杆马

达、无磁钻具、随钻测量钻杆等组成。基于大功率定向钻机的定向先导孔典型钻具组合形式如图6所示,可用于 $\phi 120\text{ mm}$ 定向先导钻孔的施工。

4)扩孔钻具。定向先导孔施工完成之后,更换更大一级扩孔钻具组合实施扩孔,将钻孔直径增大至终孔直径。基于 $\phi 120\text{ mm}$ 先导定向钻孔的扩孔钻具组合形式如图7所示。 $\phi 153\text{ mm}/\phi 120\text{ mm}$ PDC扩孔钻头实物如图8所示。

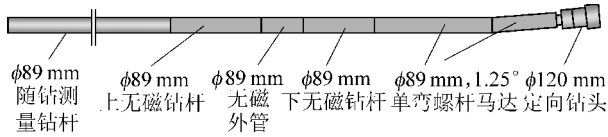


图6 定向钻进钻具组合示意

Fig. 6 Schematic of directional drilling tool assembly

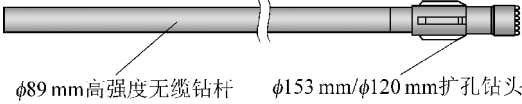


图7 扩孔钻进钻具组合示意

Fig. 7 Schematic of reaming drilling tool assembly



图8 $\phi 153\text{ mm}/\phi 120\text{ mm}$ PDC扩孔钻头

Fig. 8 $\phi 153\text{ mm}/\phi 120\text{ mm}$ PDC drill bit

2.4 工程应用实例

2016年7月,利用大功率定向钻进装备系统与“先导孔+扩孔”成孔工艺在陕西彬长集团文家坡煤矿4101工作面实施了顶板高位定向钻孔钻进试验。试验共完成顶板高位定向长钻孔2个,单孔最大长度525 m,累计钻孔进尺1 221 m(含主孔进尺1 005 m,分支钻孔进尺216 m)。先导孔平均单班进尺48 m,最高进尺72 m,扩孔平均单班进尺58 m,最高进尺90 m。试验钻孔参数见表1。实钻轨迹剖面投影如图9所示。

表1 文家坡矿4101工作面高位钻孔实钻参数

Table 1 High level drilling parameters in No.4101 working face of Wenjiapo Coal Mine

钻孔编号	开孔倾角/($^{\circ}$)	开孔方位角/($^{\circ}$)	先导孔直径/mm	先导孔长度/m	扩孔直径/mm	扩孔长度/m
L2	5.3	31.5	120	525	153	522
M3	6.7	26.1		480		456

试验结果表明:ZDY12000LD大功率定向钻进装备和“先导孔+扩孔”成孔工艺具有良好的适用性,成孔深度、成孔直径能够满足文家坡煤矿顶板岩

层大直径钻孔施工要求,为4101工作面采动及采空区瓦斯治理提供了新的思路。

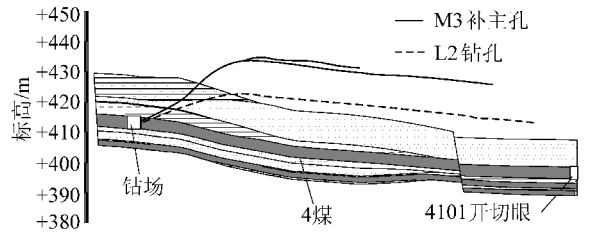


图9 试验钻孔实钻轨迹剖面

Fig. 9 Trajectory profile of test drill hole

3 定向钻孔技术发展趋势

随着煤矿安全高效开采意识的不断增强,工作面采动过程中瓦斯治理对于顶板高位定向钻孔施工效率,终孔直径及钻孔施工安全提出了更高要求,现有“先导孔+扩孔”成孔技术实施更大直径的顶板岩层高位定向钻孔仍然面临诸多问题,例如:①随着扩孔级数的增加,综合成孔效率显著降低,在现有钻进装备基础上,完成 $\phi 200\text{ mm}$ 以上顶板高位定向长钻孔需2次以上扩孔钻进,制约了钻孔综合成孔效率提升。②随着钻孔直径的进一步扩大,钻杆柱与钻孔级差增加,单一的孔口动力扩孔钻进面临转矩传递效率低,钻头破岩效果差,钻杆柱疲劳失效等突出问题。

3.1 液动(气动)冲击钻进技术

该技术是在常规旋转钻井的基础上,通过将钻井液的能量转化为冲击载荷并作用于钻头,实现钻头的冲击剪切破岩,提高了钻井效率^[14-15]。液动冲击器种类繁多,根据冲击载荷方式可分为轴向冲击器和扭力冲击器^[16]。

1)潜孔锤反循环扩孔钻进技术。潜孔锤反循环钻进技术适用于硬岩大直径钻孔的高效钻进,一般采用泥浆或压缩空气作为动力介质,驱动潜孔锤冲击碎岩。集束式潜孔锤通过特殊的结构设计,将多个小直径潜孔锤单体捆绑组合为一体,以较小排量的压力介质驱动潜孔锤单体工作,实现较大直径的钻孔施工。具有施工效率高,设备功耗小,潜孔锤单体成本低等特点。目前该技术已成功应用于煤矿区大直径地面救援井的钻进施工。基于集束式潜孔锤的上述特点,可以考虑将其用于顶板高位定向钻孔的扩孔钻进,提升顶板高位大直径定向钻孔的综合施工效率。

2)扭转冲击钻进技术。扭转冲击钻进是指在

常规钻进方法的基础上,在PDC钻头上方增设一个扭转冲击钻井工具,给钻头提供周期性的扭向冲击载荷的钻井技术^[17]。该技术最早应用于国外油气勘探开发钻井领域,用于克服硬岩深孔(井)钻进时PDC钻头黏滑问题,避免在钻头和钻柱中引发周期性波动应力与应变,提升钻头的破岩效率,节约钻井成本,防止钻柱断裂与钻头过早失效。将扭转冲击器应用于煤矿井下顶板岩层大直径定向钻孔扩孔施工,可通过改善钻具转矩传递效率,改善孔内钻具受力条件,提升钻头破岩能力,获取更高的扩孔钻进效率。

3.2 大直径孔定向钻进技术

大直径孔定向钻进技术利用大转矩定向钻机,大转矩螺杆马达,配套大直径定向钻头可一次性实施 $\phi 200$ mm以上定向钻孔。然而现有井下定向钻进装备能力与钻具规格,尚无法满足大排量螺杆马达钻进动力需要。

4 结论与建议

针对顶板高位大直径定向长钻孔施工技术特点,研制了大功率定向钻进装备与配套有线随钻测量系统,开发了“先导孔+扩孔”的成孔工艺,保证钻孔轨迹精确可控的同时,实现 $\phi 150$ mm以上顶板走向高位定向长钻孔的高效成孔。为钻孔抽采工作面采动与采空区瓦斯提供了装备支撑与技术支持。针对当前顶板高位定向钻孔存在的问题,应积极发展液动冲击辅助碎岩扩孔钻进技术与大直径定向钻孔一次成孔技术。在此,提出以下2点建议。

1) 研制适合高位钻孔施工工况的液动(气动)冲击辅助碎岩机具;研制开发集束式潜孔锤或者小排量扭转冲击器,改善孔口回转扩孔钻进转矩传递效果,提升扩孔钻头破岩效率,开展大直径钻孔反循环扩孔钻进技术的研究,解决更大直径高位定向钻孔扩孔技术难题。

2) 开发大直径孔定向钻进技术,研制 $\phi 200$ mm以上大直径定向钻进用大功率定向钻机与高泵压大排量泥浆泵车,发展完善配套钻进工艺,实现顶板高位大直径定向钻孔的一次成孔。

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].采矿与安全工程学报,2009,26(4):418-422.
Chen Kaiyan,Zhang Zhanguo,Lin Boquan,et al.Gas emission and

distribution characteristics in fully mechanized top coal caving face [J].Journal of Mining and Safety Engineering,2009,26(4):418-422.

- [2] 朱大志,陈志平,徐宏.封闭采空区瓦斯抽采地面钻井技术在大隆矿的初步应用[J].煤矿安全,2009,40(8):20-22.
Zhu Dazhi,Chen Zhiping,Xu Hong.Preliminary application of closed goaf gas drainage drilling technology in Dalong Coal Mine Ground[J].Safety in Coal Mines,2009,40(8):20-22.
- [3] 李铁良,陶玉梅,刘先平,等.采空区瓦斯涌出特征与抽放方法综述[J].煤矿安全,2003,34(4):21-24.
Li Tieliang,Tao Yumei,Liu Xianping,et al.Summary of gas emission characteristics and drainage methods in goaf[J].Safety in Coal Mines,2003,34(4):21-24.
- [4] 钱鸣高,许家林,缪协兴.煤矿绿色开采技术[J].中国矿业大学学报,2003,32(4):343-348.
Qian Minggao,Xu Jialin,Miao Xiexing.Green mining technology in coal mine[J].Journal of China University of Mining,2003,32(4):343-348.
- [5] 胡恩宝,张春雷.高抽巷治理厚煤层综采工作面瓦斯技术研究[J].矿业安全与环保,2014,34(10):79-81.
Hu Enbao,Zhang Chunlei.Study on gas control technology for fully mechanized coal of thick seam by high-level drainage roadway[J].Mining Safety & Environmental Protection,2014,34(10):79-81.
- [6] 程欢,王方田.煤与瓦斯突出矿井沿空留巷技术研究[J].煤炭科学技术,2015,43(5):5-8,121.
Cheng Huan,Wang Fangtian.Study on gob-side entry retaining technology in coal and gas outburst mine[J].Coal Science and Technology,2015,43(5):5-8,121.
- [7] 赵晶,皮希宇,王栓林,等.高瓦斯薄煤层采煤工作面高位钻孔瓦斯抽采技术[J].煤炭科学技术,2015,43(11):78-82.
Zhao Jing,Pi Xiyu,Wang Shuanlin,et al.Gas drainage technology with high level borehole at coal mining face in gassy thin seam[J].Coal Science and Technology,2015,43(11):78-82.
- [8] 周亚东,耿耀强.大口径长钻孔替代高抽巷瓦斯抽采技术[J].煤矿安全,2011,42(10):25-27.
Zhou Yadong,Geng Yaoqiang.Gas drainage technology with long borehole with large diameter instead of high extraction lane [J].Safety in coal Mines,2011,42(10):25-27.
- [9] 王耀锋,聂荣山.基于采动裂隙演化特征的高位钻孔优化研究[J].煤炭科学技术,2014,42(6):86-91.
Wang Yaofeng,Nie Rongshan.Study on high level borehole optimization based on evolving characteristics of mining induced fracture [J].Coal Science and Technology,2014,42(6):86-91.
- [10] 刘啸,年军,杜刚.高瓦斯综放工作面顶板破坏规律及高位钻孔抽采技术[J].煤炭科学技术,2016,44(8):132-135.
Liu Xiao,Nian Jun,Du Gang. Technology of roof failure law and high level borehole gas drainage inhigh gassy fully-mechanized top coal caving mining face [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8):132-135.

- ling factors of storage and enrichment of coalbed methane[J]. *Zhongzhou Coal*, 2013(3):23-26,36.
- [15] 李梦溪,刘庆昌,张建国,等.构造模式与煤层气井产能的关系:以晋城煤区为例[J].*天然气工业*,2010,30(11):10-13,114.
Li Mengxi, Liu Qingchang, Zhang Jianguo, *et al.* Relationship between structural style and CBM well productivity: a case study of the Jincheng coalfield[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(11): 10-13, 114.
- [16] 付永强,马发明,曾立新,等.页岩气藏储层压裂实验评价关键技术[J].*天然气工业*,2011,31(4):51-54.
Fu Yongqiang, Ma Faming, Zeng Lixin, *et al.* Key techniques of experimental evaluation in the fracturing treatment for shale gas reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(4): 51-54.
- [17] 归榕,万永平.基于常规测井数据计算储层岩石力学参数:以鄂尔多斯盆地上古生界为例[J].*地质力学学报*,2012,18(4):418-424.
Gui Rong, Wan Yongping. Rock mechanics parameter calculation based on conventional logging data: a case study of upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 2012, 18(4): 418-424.
- [18] 袁俊亮,邓金根,张定宇,等.页岩气储层可压裂性评价技术[J].*石油学报*,2013,34(3):523-527.
Yuan Junliang, Deng Jingen, Zhang Dingyu, *et al.* Fracability evaluation of shale-gas reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(3): 523-527.
- [19] 倪小明,陈鹏,李广生,等.恩村井田煤体结构与煤层气垂直井产能关系[J].*天然气地球科学*,2010,21(3):508-512.
Ni Xiaoming, Chen Peng, Li Guangsheng, *et al.* Relations between productivity of CBM vertical wells and coal structure in Encun Mine Field[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(3): 508-512.
- [20] 胡奇,王生维,张晨,等.沁南地区煤体结构对煤层气开发的影响[J].*煤炭科学技术*,2014,42(8):65-68,74.
Hu Qi, Wang Shengwei, Zhang Chen, *et al.* Coal structure affected to coalbed methane development in Qinnan Region[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(8): 65-68, 74.
- [21] 赵俊芳,王生维,秦义,等.煤层气井煤粉特征及成因研究[J].*天然气地球科学*,2013,24(6):1316-1320.
Zhao Junfang, Wang Shengwei, Qin Yi, *et al.* Characteristics and origin of coal powder in coalbed methane well[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(6): 1316-1320.
- [22] 魏迎春,曹代勇,袁远,等.韩城区块煤层气井产出煤粉特征及主控因素[J].*煤炭学报*,2013,38(8):1424-1429.
Wei Yingchun, Cao Daiyong, Yuan Yuan, *et al.* Characteristics and controlling factors of pulverized coal during coalbed methane drainage in Hancheng Block[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(8): 1424-1429.
- [23] 陈文文,王生维,秦义,等.煤层气井煤粉的运移与控制[J].*煤炭学报*,2014,39(S2):416-421.
Chen Wenwen, Wang Shengwei, Qin Yi, *et al.* Migration and control of coal powder in CBM well[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(S2): 416-421.
- [24] 熊先铖.韩城区块煤层气连续排采主控因素及控制措施研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2014.
熊先铖.韩城区块煤层气连续排采主控因素及控制措施研究[J].*石油矿场机械*,2010,39(3):18-21.
Wang Can, Li Qinghai, Wang Guorong, *et al.* Analysis of energy transfer model of percussive drilling system[J]. *Oil Field Equipment*, 2010, 39(3): 18-21.
- [15] 张海平,索忠伟,陶兴华.新型液动射流冲击器顶紧及密封机构设计[J].*石油矿场机械*,2011,40(4):44-47.
Zhang Haiping, Suo Zhongwei, Tao Xinghua. Design of a new type of hydraulic jet impactor top and seal mechanism[J]. *Oil Field Equipment*, 2011, 40(4): 44-47.
- [16] 贾涛,徐丙贵,李梅,等.钻井液冲击器技术研究进展及应用对比[J].*石油矿场机械*,2012,41(12):83-87.
Jia Tao, Xu Binggui, Li Mei, *et al.* Research progress and application of drilling fluid percussion device[J]. *Oil Field Equipment*, 2012, 41(12): 83-87.
- [17] 祝效华,汤历平,吴华,等.高频扭转冲击作用下硬地层破岩机理研究[C]//第十届全国振动理论及应用学术会议论文集.南京:中国振动工程学会,2011:896-901.

(上接第141页)

- [11] 李杰.定向高位长钻孔抽采位置确定及瓦斯治理效果[J].*煤炭科学技术*,2014,42(12):51-53,58.
Li Jie. Location determination and gas control effect of directional high long hole drilling[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(12): 51-53, 58.
- [12] 王军,魏国山,闫大为,等.大兴矿顶板岩石水平长钻孔瓦斯抽采技术的应用[J].*煤矿安全*,2008,39(12):36-38.
Wang Jun, Wei Guoshan, Yan Dawei, *et al.* Application of horizontal long borehole gas drainage technology in Daxing Mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2008, 39(12): 36-38.
- [13] 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 1800 m horizontal directional drilling technology and equipment[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(2): 109-113.
- [14] 王灿,梨青海,王国荣,等.冲旋钻井系统能量传递模型分析