

高含量低透性近水平煤层 控制性水力割缝技术

冯仁俊^{1,2}, 朱永建^{1,3}, 邓飞², 余伟健^{1,3*}

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;
2. 中煤科工集团新疆研究院有限公司, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830000;
3. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 基于高压水射流割缝的技术原理和特点, 针对云南省朱家湾煤矿煤层“硬度系数大、瓦斯含量高、低透气、抽放时间紧”的特点, 结合矿井目前的实际采掘部署和生产情况, 提出工作面“钻割一体化”的瓦斯治理增透措施, 并在矿区内已经施工抽采钻孔的工作面开展试验研究。通过现场研究表明: 采用“钻割一体化”增透技术, 能有效提高煤层裂隙发育程度, 改变和降低煤层原始应力和瓦斯含量, 增大煤层瓦斯流动空间, 成功消除煤层的突出危险性。试验数据显示, 煤层在水力割缝后单孔瓦斯抽采量增加到原来的 3.7 倍, 工作面抽采达标时间缩短一半, 成功缓解了矿井采掘接替紧张的局面。该试验的成功, 为本矿井及类似矿井的瓦斯治理提供依据和经验。

关键词: 低透气; 高压水射流; 钻割一体化; 瓦斯含量

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2024)02-0001-07

On Controlled Hydraulic Seam Cutting Technology of Near-horizontal Coal Seam with High Content and Low Permeability

FENG Renjun^{1,2}, ZHU Yongjian^{1,3}, DENG Fei², YU Weijian^{1,3}

(1. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. CCTEG Xinjiang Research Institute, Urumqi 830000, China;
3. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Based on the technical principle and characteristics of high-pressure water jet slits, in view of the characteristics of “large hardness coefficient, high gas content, poor air permeability and tight pumping time” of the coal seam of Zhujiawan Coal Mine in Yunnan Province, combined with the actual mining deployment and production situation of the mine, the gas treatment and permeability measures of “drilling and cutting integration” of the working face are proposed, and experimental research is carried out in the mining area. Through on-site research, it is shown that the use of “drilling and cutting integration” can effectively improve the cracks of the coal seam, change and reduce the original stress and gas content of the coal seam, increase the gas flow space of the coal seam, and successfully eliminate the outstanding danger of the coal seam. The test data show that the single-hole gas extraction capacity of the coal seam increases by 3.7 times after hydraulic cutting, and the working face extraction time is shortened by half, which successfully alleviates the tension of mine mining succession. The success of this test provides a basis and experience for gas treatment in this mine and similar mines.

Keywords: permeability; high-pressure water jet; drilling and cutting integration; gas content

在未来很长一段时间里,煤炭作为我国主要能源的格局不会改变,2021年我国煤炭资源消费比重虽然有所下降,但仍然占到消费资源总额的56%。同时,我国煤炭资源十分丰富,尤其埋深超过1 000 m的煤炭储量达29 500亿t,占我国煤炭资源总储量的53%。但是,随着开采深度的增加,矿井瓦斯越来越严重,煤矿瓦斯灾害也成为制约煤矿安全发展的关键性因素^[1-5]。井下钻孔预抽煤层瓦斯是有效防治煤与瓦斯突出、降低矿井瓦斯涌出量的有效途径之一。但是当预抽钻孔面对具有“煤层透气性低、煤层瓦斯含量高、预抽时间不足”等特征的煤层时,却无法充分降低和改变采掘区域内的瓦斯压力及含量,满足不了矿井瓦斯抽采达标的要求。因此,研究一种既能降低煤层瓦斯压力,又能快速降低煤层瓦斯含量,实现快速抽采达标的增透技术,是煤矿科研工作者共同努力的方向^[6-9]。正是在这样的条件下,水力化增透措施孕育而生。

我国对水力化增透措施的研究时间较早,随着新材料和加工工艺的发展,水力化增透措施的工艺和装备都得到了较好发展。从现场运用来看,水力化增透措施主要包括水力压裂、水力割缝和水力扩孔等3种方法。高压水射流割缝卸压增透技术,是以水为动力,对钻孔周围的煤体进行冲刷、剥离,增加煤体中的裂隙。裂隙的产生,除了能改善煤层中的瓦斯流动状态,为瓦斯抽采创造有利条件外,还可以改变煤体的原始应力和裂隙分布状态,降低煤体和围岩中的应力。高压水射流割缝卸压增透技术既可削弱煤与瓦斯突出的动力,又可大大改变突出煤层的物理力学性质,起到卸压防突的作用,同时提高透气性和瓦斯释放能力,是煤矿瓦斯动力灾害防治措施的有效手段之一^[10-15]。目前,水力割缝技术已经向“定向切割”发展,结合水力压裂工艺,实现岩层精确软化与切割的目的。

云南东源镇雄煤业有限公司朱家湾煤矿,主采煤层具有“瓦斯含量高、矿井瓦斯涌出量大”等特点,加上矿井采掘接替紧张,工作面预抽时间不足。为有效解决工作面预抽时间不足的问题,矿井展开了水力割缝增透技术研究,为矿井实现快速抽采、达标提供方向。

1 试验矿井概况

1.1 煤层概况

本次试验地点为云南东源集团镇雄煤业朱家湾煤矿152201工作面。152201工作面位于矿井东部的二采区,工作面长约1 000 m,宽约210 m,主采C₅^b煤层。在该区域范围内,C₅^b煤层呈近水平分布,煤层倾角2°~5°,煤层厚度2~3 m,埋深170~440 m。顶板为砂岩,底板为泥岩,赋存较为稳定。

1.2 工作面煤层瓦斯

152201工作面瓦斯含量为13.8~14.3 m³/t,切眼掘进工作面瓦斯涌出量为4.63 m³/min,工作面回风巷在未生产的条件下瓦斯涌出量约为3.2 m³/min,工作面煤层瓦斯其他基本参数见表1。

表1 朱家湾煤矿152201工作面C₅^b煤层瓦斯基本参数

参数名称	吸附常数 $a/(m^3/t)$	吸附常数 b/MPa	瓦斯放散初 速度/mmHg	煤层坚固性 系数	衰减系数/d ⁻¹	透气性系数/ (m ² /MPa ² ·d)
参数值	39.42	1.017	19	0.79	1.865	0.718 4

1.3 工作面抽放钻孔设计与施工

152201工作面抽采钻孔已经施工完毕,距切眼0~80 m处,由于抽采时间较为紧张,钻孔间距为2 m,设计长度为190 m;距切眼80~300 m处,钻孔间距为4 m,钻孔设计长度为190 m;距切眼300~1 000 m处,钻孔间距为2 m,设计长度为190 m。

钻孔由运输顺槽向回风顺槽方向施工,钻孔与运输顺槽夹角为90°,钻孔孔径95 mm,钻孔施工长度79~203 m。钻孔施工平面图如图1所示。

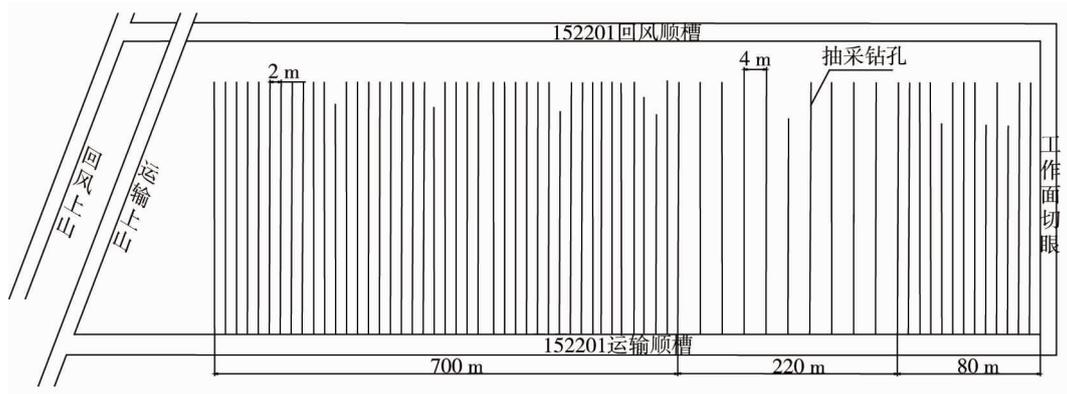


图 1 工作面钻孔布置

2 水力割缝原理及工艺

2.1 水力割缝技术原理

超高压水力割缝通过高压水射流对煤体进行切割,增加煤体暴露面积,缝槽上下的煤体在一定范围内得到较充分的卸压.缝槽在地应力的作用下,周围煤体产生空间移动,扩大缝槽卸压和排瓦斯的范围.在高压旋转水射流的切割、冲击作用下,钻孔周围一部分煤体被高压水击落冲走,形成扁平缝槽空间,改变煤体的原始应力和裂隙状况,缓和煤体和围岩中的应力紧张状态,增大卸压效果.

2.2 水力割缝技术工艺

超高压水力割缝技术在实施中规范操作主要包括 4 个阶段:设备准备与连接阶段、检查阶段、实施阶段、效果考察阶段.

- 1) 设备准备与连接阶段.主要是准备井下供水系统、排水系统、供电系统及封孔和抽采材料,并对设备连接.
- 2) 检查阶段.主要是对工作环境、方案制定和宣贯情况、水电供给系统、设备安装、重要元件和控制性设备、操作人员等进行检查.
- 3) 实施阶段.准备工作和检查工作完成后,按照设计方案和水力割缝的程序进行操作和技术控制.
- 4) 效果考察阶段.实施阶段完成以后,通过一定的技术手段,对钻孔的割缝参数、排渣量、单孔瓦斯抽采浓度、瓦斯抽放量等进行考察.

朱家湾煤矿水力割缝操作流程见图 2.

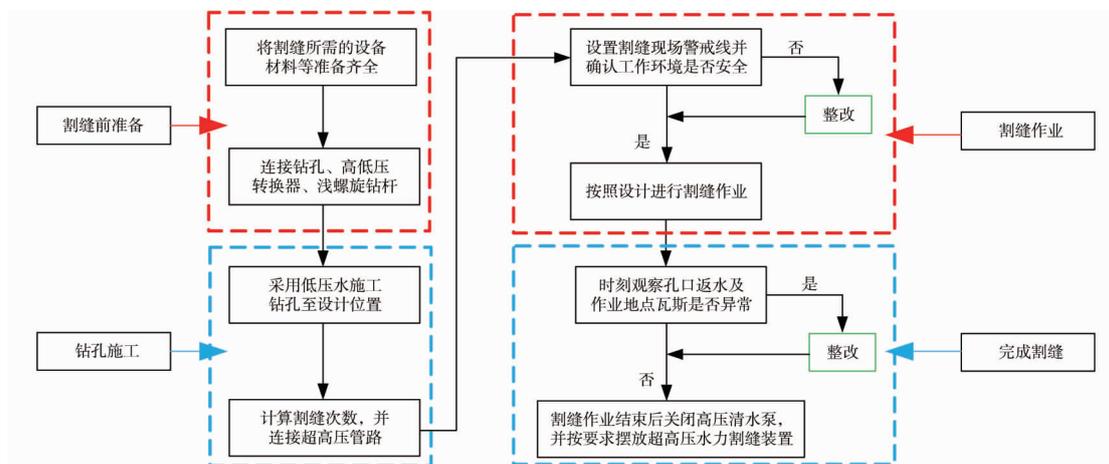


图 2 朱家湾煤矿水力割缝操作流程

3 水力割缝方案设计及参数选取

3.1 方案设计

由于152201工作面已经全部施工了瓦斯预抽钻孔,现场割缝的原始条件受到破坏.为保证本次试验取得成功,根据工作面预抽钻孔的布置条件,水力割缝方案设计如下:

- 1) 工作面试验地点选取在距切眼80~300 m、预抽钻孔间距为4 m的区间范围内.
- 2) 本次试验共设计12个钻孔,包括4个检验钻孔,8个割缝钻孔.检验钻孔不进行割缝,主要是测定该区域普通钻孔的瓦斯抽采参数.
- 3) 为保证割缝效果,钻孔由回风顺槽向运输顺槽方向施工,钻孔开孔位置位于原预抽钻孔中间位置,钻孔倾角为 $-2^{\circ} \sim -3^{\circ}$.
- 4) 由于钻孔为下向钻孔,考虑到排渣的问题,钻孔设计深度为120 m.钻孔设计见图3.

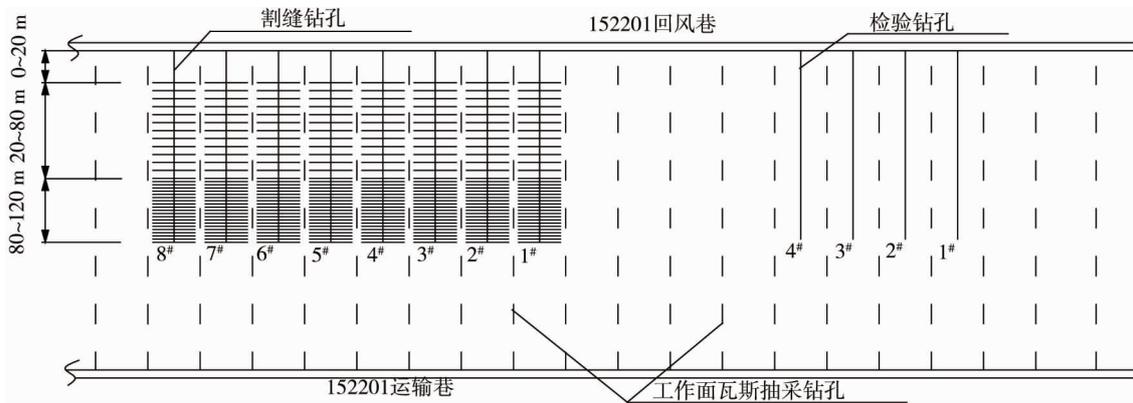


图3 朱家湾煤矿水力割缝试验设计

3.2 关键参数确定

割缝半径的大小,除了受到煤层硬度系数的影响以外,水射流的压力和割缝时间都是重要影响因素.由于本次试验的割缝钻孔设计在间距为4 m的预抽钻孔中间,所以钻孔的割缝深度不能超过2 m.如果水射流压力过大,割缝时间过长,则割缝深度较深,很可能导致割缝钻孔与预抽钻孔导通,水流就会通过预抽钻孔跑偏和泄漏,无法将割缝过程中所产生的煤渣顺利排出,割缝工艺不能正常进行;但是,如果水射流压力过小,割缝时间较短,割缝深度和半径无法达到预期目标,增透的效果不佳.因此,本项目实施中,水射流压力和割缝时间成为参数选取的关键.

3.2.1 水射流压力的确定

对于不同水射流压力与割缝深度的关系,国内学者做了大量研究.张永将等^[16]通过数值模拟、现场试验等手段,得出不同坚固性系数(f)条件下,水射流压力与割缝之间的关系如图4所示.

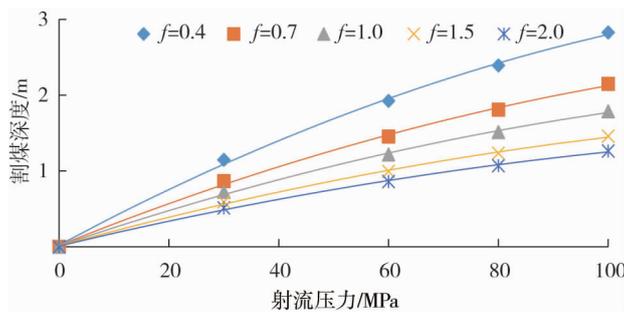


图4 不同坚固性系数条件下水射流压力与割缝之间的关系

朱家湾煤矿的煤层硬度系数为0.79,割缝半径的控制范围最大值为2 m,根据图4中坚固性系数与割缝半径之间的关系,确定试验过程中水射流压力应控制在85~95 MPa.

3.2.2 单刀割缝时间的确定

为准确确定每刀割缝时间,在152201工作面回风顺槽,向邻近工作面施工2个方位和倾角相同的抽放钻孔,钻孔长度65 m,间距2 m,孔径为113 mm.为保证钻孔与设计方位不发生偏移,2个钻孔均进行轨迹测定.钻孔施工完成后,对其中一个钻孔分别在60, 50, 40, 30, 20 m处进行割缝.水射流压力为85~90 MPa时,割缝压力与时间的关系见表2.

表2 水射流压力随时间变化的关系

割缝位置/m	水射流压力值/MPa	压力下降时间点/s	邻近钻孔是否有返水
60	90~94	353	无
50	87~92	377	有
40	89~93	364	有
30	88~93	349	有
20	87~92	391	有

通过分析表2可知,在水射流压力保持在87~94 MPa的条件下,割缝深度达到2 m所需的最短时间为349 s.考虑到钻孔偏移量及煤层硬度系数的不均衡性,确定钻孔每刀割缝时间为300~330 s.

3.3 钻孔施工

3.3.1 检验钻孔施工

在本次水力割缝试验过程中,共施工检验钻孔4个,总进尺为457.2 m,钻孔平均深度114.3 m,钻孔倾角 -2° ,孔径113 mm,开孔高度2.0 m,钻孔间距4.0 m,每个割缝钻孔位于2个抽放钻孔之间,钻孔采用压风排渣方式.钻孔施工情况见表3.

表3 检验钻孔施工参数

钻孔编号	方位角/ $(^{\circ})$	倾角/ $(^{\circ})$	孔径/mm	孔深/m	钻孔描述
检验钻孔1 [#]	174	-2	113	110.3	全煤
检验钻孔2 [#]	174	-2	113	117.6	全煤
检验钻孔3 [#]	174	-2	113	114.5	全煤
检验钻孔4 [#]	174	-2	113	114.8	全煤

3.3.2 割缝钻孔施工

本次试验共施工8个割缝钻孔,累计钻孔进尺908.1 m,钻孔平均深度113.5 m.钻孔采用“钻割一体化”施工,割缝钻孔孔径为113 mm,开孔高度2.0 m,钻孔间距4.0 m,每个钻孔位于2个抽放钻孔之间.钻孔在0~20 m段内不割缝,在20~80 m段每隔5 m割缝一次,在80~120 m段内每隔2 m割缝一次,每刀割缝时间300~330 s.割缝完成后,用水进行冲洗,直至水变清澈且无煤渣排出为止.钻孔施工参数见表4.

表4 割缝钻孔施工参数

钻孔编号	方位角/ $(^{\circ})$	倾角/ $(^{\circ})$	孔径/mm	孔深/m	钻孔描述
割缝孔1 [#]	174	-2	113	105.7	全煤
割缝孔2 [#]	174	-2	113	115.8	全煤
割缝孔3 [#]	174	-3	113	116.1	全煤
割缝孔4 [#]	174	-3	113	120.0	全煤
割缝孔5 [#]	174	-3	113	117.3	全煤
割缝孔6 [#]	174	-3	113	120.0	全煤
割缝孔7 [#]	174	-2	113	105.8	全煤
割缝孔8 [#]	174	-2	113	107.4	全煤

4 效果考察

4.1 割缝钻孔出煤量考察

本次施工的8个超高压水力割缝钻孔累计下钻深度为826.7 m,实际割缝率91.0%,单位进尺钻孔平

均出煤量为 0.073 t, 每个钻孔施工情况见表 5。

表 5 割缝钻孔施工参数

钻孔编号	钻孔深度/m	下钻深度/m	割缝刀数/刀	钻孔出煤量/t	单位进尺出煤量/t
割缝孔 1 [#]	105.7	94.8	24	5.407 0	0.057
割缝孔 2 [#]	115.8	101.2	25	6.983 0	0.069
割缝孔 3 [#]	116.1	104.6	27	8.263 0	0.079
割缝孔 4 [#]	120.0	115.1	33	10.014 0	0.087
割缝孔 5 [#]	117.3	102.1	25	6.024 0	0.059
割缝孔 6 [#]	120.0	120.0	35	11.521 0	0.096
割缝孔 7 [#]	105.8	93.1	23	6.051 0	0.065
割缝孔 8 [#]	107.4	95.8	23	6.898 0	0.072

4.2 瓦斯抽采效果考察

4.2.1 检验钻孔抽采效果考察

检验钻孔施工完成后, 2021 年 12 月 7 日至 2022 年 1 月 5 日期间, 矿井对 4 个钻孔进行 11 次瓦斯抽采参数测定, 分析得出检验钻孔的单孔平均瓦斯抽采纯量与时间的变化关系如图 5 所示。

将检验钻孔单孔瓦斯抽采纯量与相应钻孔长度进行比值, 可得到检验钻孔单位进尺钻孔瓦斯抽采量。测流周期内检验钻孔单位进尺平均瓦斯抽采量与时间的变化规律如图 6 所示。通过分析可以得出, 检验钻孔单位进尺平均瓦斯抽采纯量为 $0.000\ 879\ \text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m})$ 。



图 5 检验孔单孔平均瓦斯抽采纯量

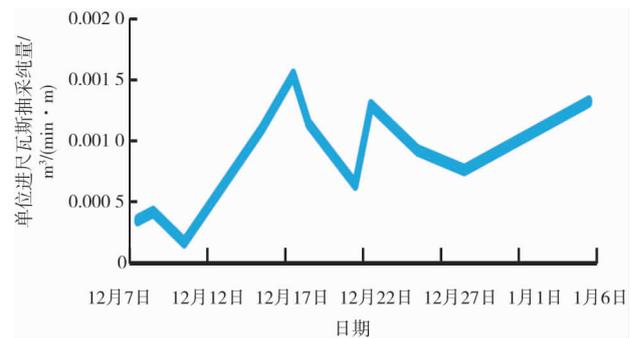


图 6 检验钻孔单位进尺孔深平均瓦斯抽采纯量

4.2.2 割缝钻孔效果对比

割缝钻孔于 2021 年 12 月 15 日—2022 年 1 月 12 日进行 12 次抽采参数测定, 测得割缝钻孔单孔平均瓦斯抽采纯量为 $0.385\ \text{m}^3/\text{min}$, 是检验孔单孔平均瓦斯抽采纯量的 3.7 倍, 割缝钻孔与检验钻孔平均抽采纯量与时间的变化趋势对比图如图 7 所示。

同理将割缝钻孔单孔瓦斯抽采纯量与相应钻孔长度相比, 即可得到割缝钻孔单位进尺钻孔瓦斯抽采量。割缝钻孔与检验钻孔在测流周期内单位进尺钻孔平均瓦斯抽采量变化规律对比如图 8 所示。

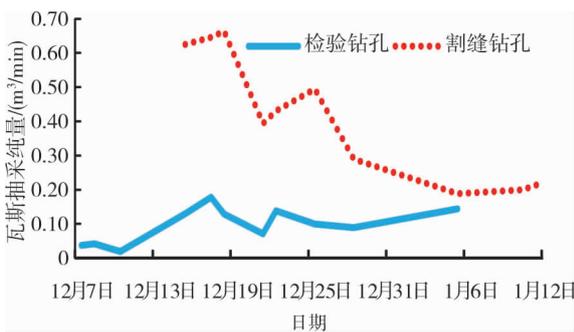


图 7 割缝钻孔与考察钻孔单孔瓦斯抽采纯量对比



图 8 割缝钻孔与考察钻孔单位进尺单孔瓦斯抽采纯量对比

分析图8可知:割缝钻孔单位进尺钻孔平均瓦斯抽采纯量为 $0.003\ 743\ \text{m}^3/(\text{min}\cdot\text{m})$,检验钻孔单位进尺钻孔平均瓦斯抽采纯量为 $0.000\ 879\ \text{m}^3/(\text{min}\cdot\text{m})$,割缝钻孔单位进尺平均瓦斯抽采纯量为检验钻孔的4.258倍。

4.3 现场应用效果

现场考察结束后,矿井对钻孔间距为2 m的预抽钻孔进行割缝增透,即每间隔一个拆除已经进行连接抽放的钻孔,然后在原钻孔的轨迹上进行割缝操作施工,再进行接抽。现场于2022年2月25日完成所有割缝钻孔施工并正式接抽。

2022年5月3日进行第一次效果检验,现场分析得出:

- 1) 瓦斯含量最大值从 $14.3\ \text{m}^3/\text{t}$ 降低至 $7.63\ \text{m}^3/\text{t}$;
- 2) 钻孔施工过程中无喷孔、钉钻等动力现象;
- 3) 工作面回风巷瓦斯涌出量由 $3.2\ \text{m}^3/\text{min}$ 降低至 $1.7\ \text{m}^3/\text{min}$ 。

工作面瓦斯抽采满足达标要求,可以进行生产,比预计的生产时间至少提前3个月。如果矿井在预抽钻孔施工的同时就采取“钻割一体化”的增透措施,工作面达标时间至少可以减少一半,不但可以节约成本,还可以缓解矿井采掘接替紧张的难题。

5 结论

1) 通过“钻割一体化”水力化增透措施,朱家湾煤矿单孔瓦斯抽采量提高至原来的3.7倍,单位进尺平均瓦斯抽采纯量为检验钻孔的4.258倍。

2) 采用“钻割一体化”增透措施,可以大幅度减少工作面瓦斯抽采达标时间和钻孔工程量,有效缓解矿井“抽、采、掘”失调的问题。

3) 在抽采钻孔已经施工的条件下进行水力割缝增透技术试验并获得成功。该技术的运用,为朱家湾煤矿在瓦斯治理问题上找到了有效途径和方向,为类似矿井的瓦斯治理提供经验。

参考文献:

- [1] 胡千庭,赵旭生.中国煤与瓦斯突出事故现状及其预防的对策建议[J].矿业安全与环保,2012,39(5):1-6.
- [2] 宁德义.我国煤矿瓦斯防治技术的研究进展及发展方向[J].煤矿安全,2016,47(2):161-165.
- [3] 梁敦仕.2017年世界煤炭市场形势回顾及发展趋势展望[J].煤炭经济研究,2018,38(3):6-18.
- [4] 肖新建,高虎,张有生.2017年我国煤炭发展形势回顾及2018年展望与建议[J].中国能源,2018,40(1):5-9.
- [5] 钱伯章,李敏.能源结构随能源需求增长而持续多样化:2018年世界能源统计年鉴解读[J].中国石油和化工经济分析,2018(8):51-54.
- [6] 刘喜军.深井煤岩瓦斯动力灾害防治研究[J].煤炭科学技术,2018,46(11):69-75.
- [7] 袁亮,林柏泉,杨威.我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J].煤炭科学技术,2015,43(1):45-49.
- [8] 孟贤正,曹建军,何清,等.水力化高效防突集成技术研究与应用[J].矿业安全与环保,2009,36(增刊1):49-53.
- [9] 张永将,孟贤正.高压水射流水力扩孔抽采半径考察研究[J].矿业安全与环保,2012,39(增刊1):45-46.
- [10] 袁本庆.煤巷条带水力化增透技术措施适用条件及评价指标初探[J].煤矿安全,2018,49(12):164-168.
- [11] 袁本庆.淮南矿区深部煤巷条带卸压增透措施优选与应用[J].煤炭技术,2018,37(10):34-36.
- [12] 张磊,郝将,王坤.25011下副巷煤巷条带区域水力割缝[J].内蒙古煤炭经济,2018(12):107.
- [13] 张倩,栗磊.水力割缝增透预抽技术在一缘煤业的试验[J].煤,2019,28(2):9-10.
- [14] 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.
- [15] 张占国,张锋.超高压水力割缝技术在低渗透特厚煤层中的应用[J].能源与环保,2018,40(11):90-93.
- [16] 张永将,黄振飞,李成成.高压水射流环切割缝自卸压机制与应用[J].煤炭学报,2018,43(11):3016-3022.