



移动扫码阅读

邹永洺.基于水力割缝与二氧化碳致裂的煤层增透技术研究[J].煤炭科学技术,2019,47(1):226-230.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.01.032  
ZOU Yongming. Study on the coal seam permeability increasing technique based on hydraulic cutting and CO<sub>2</sub> fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 226-230. doi: 10. 13199/ j. cnki. cst. 2019. 01. 032

# 基于水力割缝与二氧化碳致裂的煤层增透技术研究

邹永洺<sup>1,2</sup>

(1.煤科集团沈阳研究院有限公司,辽宁抚顺 113122;2.煤矿安全技术国家重点实验室,辽宁抚顺 113122)

**摘要:**针对单一煤层增透技术手段的局限性,提出了气液两相综合作用煤层增透技术,含二氧化碳致裂增透技术和水力割缝增透技术。对气液两相综合增透技术原理和工艺进行了研究,确定了水力割缝工艺的低压钻进、高压割缝工艺以及二氧化碳致裂工艺,设计了气液两相综合增透效果考察现场试验方案。现场试验结果表明:采用气液两相综合增透后,瓦斯抽采平均混合量达到 12.80 m<sup>3</sup>/min,是增透之前平均混合量的 9.41 倍,瓦斯抽采平均纯量达到 9.53 m<sup>3</sup>/min,是增透之前平均瓦斯纯量的 14.44 倍;且气液两相综合增透后的瓦斯抽采效果均远高于采用单一增透技术的瓦斯抽采效果,气液两相综合作用增透技术为煤层增透提供了一种新的技术手段。

**关键词:**煤层增透;二氧化碳致裂;水力割缝;瓦斯抽采

中图分类号:TD712 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2019)01-0226-05

## Study on the coal seam permeability increasing technique based on hydraulic cutting and CO<sub>2</sub> fracturing

ZOU Yongming<sup>1,2</sup>

(1. China Coal Technology and Engineering Group Shenyang Research Institute, Fushun 113122, China;

2. State Key Laboratory of Coal Safety Technology, Fushun 113122, China)

**Abstract:** According to the limitation of the single coal seam permeability increasing technique, the gas-liquid two-phase comprehensive action coal seam permeability increasing technique was put forward, including CO<sub>2</sub> fracturing technique and hydraulic cutting technique. The principle and process of the gas-liquid two-phase comprehensive action were studied, the low pressure drilling process, the high pressure cutting process and the CO<sub>2</sub> fracturing process were confirmed. The permeability increasing effect testing programs of the gas-liquid two-phase comprehensive action were designed. The field tests showed that the average mixed amount of the gas extraction reached to 12.80 m<sup>3</sup>/min after the gas-liquid two-phase comprehensive action, which was 9.41 times than that of the average mixed amount before permeability increasing. The average absolute amount of the gas extraction reached to 9.53 m<sup>3</sup>/min after the gas-liquid two-phase comprehensive action, which was 14.44 times than that of the average absolute amount before permeability increasing. The permeability increasing effect of the gas-liquid two-phase comprehensive action were higher than the single permeability increasing technique effect, the gas-liquid two-phase comprehensive action permeability increasing technique provided a new technical means for coal seam permeability increasing.

**Key words:** coal seam permeability increasing; CO<sub>2</sub> phase transition fracturing; the hydraulic cutting; gas drainage

## 0 引 言

我国煤层瓦斯抽采大致经历了高透气性煤层瓦斯抽采、邻近层卸压瓦斯抽采、低透气性煤层强化瓦斯抽采和综合瓦斯抽采等 4 个发展阶段,瓦斯抽采

已经作为瓦斯治理和防止瓦斯灾害的基本手段<sup>[1]</sup>。由于我国大部分矿井的煤层都属于低透气性煤层,抽采难度较大,为了提高煤层的透气性,国内外学者进行了大量研究,提出了许多提高煤层透气性的技术手段,主要包括开采保护层、密集钻孔、交叉钻孔、

收稿日期:2018-09-01;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05067004-003);中国煤炭科工集团有限公司科技创新基金资助项目(2018QN010)

作者简介:邹永洺(1986—),男,山东临沂人,助理研究员,硕士。E-mail:z7766610@126.com

卸压带瓦斯抽采、大直径钻孔、煤层注水、水力疏松、水力压裂、水力割缝、水射流扩孔、水力冲孔、高能气体压裂和深孔松动爆破等,它们主要是从改变煤层外在压力入手,造成煤体卸压并产生不均匀的变形和破坏,张开原生裂隙、产生新裂隙并将裂隙相互贯通,为瓦斯的解吸和流动提供通道,这些技术措施对提高煤层透气性都起到了较大的推动作用,煤层增透技术也取得较大的进展<sup>[2-8]</sup>。但由于我国煤层瓦斯赋存地质条件十分复杂,煤矿井下巷道布置形式多种多样,现有的单一煤层增透技术手段在实际工程应用中仍存在较多问题,煤层的增透效果并不理想,近些年来,针对单一煤层增透技术手段的局限性,煤层综合增透技术逐渐发展起来,综合增透技术联合采用2种或者多种增透技术手段,能够使不同的增透技术手段优势互补和取长补短<sup>[9-11]</sup>。

目前单一煤层增透技术手段存在一定的局限性,煤层综合增透技术也正处于起步试验阶段,针对上述存在的问题,笔者提出了一种气液两相综合作用煤层增透技术,通过二氧化碳致裂技术和水力割缝技术2种气液两相增透技术的组合,可控制裂缝扩展方向,扩大煤层自由面和煤层裂缝网络,增加煤层增透影响的范围,置换煤层吸附的瓦斯量,提高煤层瓦斯抽采效果。

## 1 气液两相综合作用增透技术原理

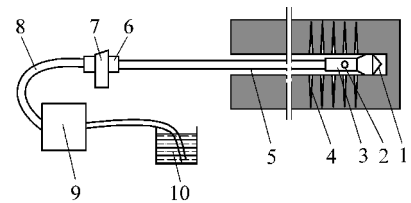
水力割缝增加了煤体暴露面积,给煤层内部卸压、瓦斯释放和流动创造了良好的条件,缝槽上下的煤体在一定范围内得到较充分的卸压,增大了煤层的透气性。缝槽在地压的作用下,周围煤体产生空间移动,扩大了缝槽卸压、排瓦斯范围。在水流的切割、冲击作用下,钻孔周围一部分煤体被高压水击落冲走,形成扁平缝槽空间,增加了煤体中的裂隙,可大幅改善煤层中的瓦斯流动状态,为瓦斯排放创造了有利条件,改变了煤体的原始应力和裂隙状况,缓和煤体和围岩中的应力紧张状态,既可削弱或消除突出的动力,又可提高煤层的强度,起到防突作用,并提高透气性和瓦斯释放能力<sup>[12-15]</sup>。

二氧化碳相变致裂过程属于高压气体冲击波对其周围煤体的破坏作用,致裂启动后加热管经脉冲高压电击催化反应产生热量,将液态二氧化碳瞬间转化为气态,并冲破致裂筒顶端的破裂片,经过释放筒定向地作用到致裂孔周边煤体上,形成裂隙发育,提高煤层的透气性;另外煤体对二氧化碳的吸附性远高于对瓦斯的吸附性,使得致裂后的二氧化碳能够滞留,且驱替出大量煤体吸附的瓦斯,二氧化碳相变致裂技

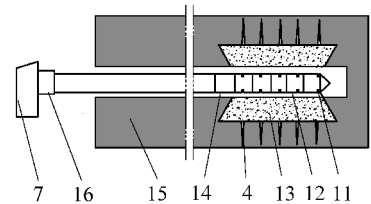
术作为物理方法克服了传统炸药爆炸易产生火花、高压起爆、破坏性大、危险性高等缺点<sup>[16-18]</sup>。将水力割缝增透和二氧化碳致裂增透2种技术进行组合,可实现2种增透取长补短、优势互补,扩大煤体的卸压、增透范围,控制裂缝的延伸方向和改变裂缝的无序扩展状况,增加裂缝的发育规模,减少瓦斯富集区和抽采空白带,同时致裂后二氧化碳可驱替出煤体吸附的瓦斯,大幅提高煤层瓦斯抽采效果<sup>[10-11]</sup>。

## 2 气液两相综合作用增透技术工艺

气液两相综合作用增透工艺包括水力割缝工艺和二氧化碳致裂工艺,首先在煤层中进行水力割缝,通过水力割缝形成的裂缝在煤层中施工定向裂缝,控制裂缝的扩展方向;水力割缝完成后再进行二氧化碳致裂增透,在水力割缝的裂缝位置上,利用汽化后的二氧化碳致裂再次对煤层进行致裂增透,可扩大煤体裂缝的规模,增加煤体内裂隙通道,使得煤体内游离瓦斯流通通道增加;另外,煤体对二氧化碳的吸附性远高于对瓦斯的吸附性,致裂后产生的二氧化碳能驱替出大量煤体吸附的瓦斯,气液两相综合作用增透工艺如图1所示。



(a) 水力割缝工艺示意



(b) 二氧化碳致裂工艺示意

- 1—水力割缝钻头;2—喷嘴;3—高低压转换割缝器;  
4—切割的裂缝;5—割缝螺旋钻杆;6—高压旋转接头;  
7—钻机;8—高压管路;9—高压水泵;10—水箱;11—二氧化碳致裂器释放孔;12—二氧化碳致裂器;13—二氧化碳致裂裂隙区;  
14—推送钻杆;15—煤层;16—接头

图1 气液两相综合作用增透工艺示意

Fig. 1 Schematic diagram of the gas-liquid two-phase comprehensive action increase permeability technical

### 2.1 水力割缝工艺

水力割缝工艺包括低压钻进工艺和高压割缝工艺。低压钻进工艺为依次连接水力割缝钻头、高低压转换割缝器、割缝螺旋钻杆和钻机,利用正常钻进的接头及低压水管路,按照割缝钻孔设计参数,施工到设计深度。

高压割缝工艺:根据煤孔段长度,计算该钻孔所需割缝刀数,将高低压转换割缝器停在指定割缝位置,换接超高压旋转接头,连接高压管路,先开启钻机带动割缝螺旋钻杆以适当速度旋转,然后再开启超高压水泵,首次启动空载 2 min 以上,待孔口返水后,通过调节高压水泵的泵压由低到高缓慢、匀速增压,水经过超高压管路进入割缝螺旋钻杆内,最后从高低压转换割缝器的喷嘴射出,对煤层周边煤体进行切割,每刀割缝时间为 2~5 min。

割缝过程中若遇堵孔、憋孔现象,先缓慢将高压水泵压力降低,低压冲洗 2~3 min,待孔口返水正常后再缓慢调压至高压,继续割缝作业。割缝过程若遇喷孔或瓦斯超限现象,立即停止作业,分析喷孔或瓦斯超限原因,处理完成并恢复正常后方可继续割缝作业。

切割一刀结束后,先将超高压水泵的泵压回零,再关闭超高压水泵,开启钻机,撤卸割缝螺旋钻杆,重新连接超高压旋转接头及高压管路,再次开启高压水泵,将泵压缓慢、匀速增压,继续进行割缝作业。

重复上述步骤,完成预计割缝刀数。钻孔割缝完成后,孔内返水正常且无憋孔、堵孔等异常现象,先将高压水泵的泵压缓慢回零,再关闭高压水泵,切断电源,撤卸割缝螺旋钻杆,完成割缝工作。

## 2.2 二氧化碳致裂工艺

在进行二氧化碳致裂前,根据水力割缝后缝隙的位置,计算出需要二氧化碳致裂器的数量,并通过推送钻杆 14 和二氧化碳致裂器 12 不同数量的组合,使二氧化碳致裂器释放孔 11 在水力割缝的裂缝 4 的位置,二氧化碳致裂工艺如图 1b 所示。

将钻机对准钻孔的孔位,利用钻机和接头将推送钻杆和二氧化碳致裂器按计算数量逐根送入钻孔内,并利用管钳等工具逐根旋转拧紧。二氧化碳致裂器送入指定深度后,钻机不要移动,松开前后夹持器,同时孔口采用专用封孔器封孔,并连接炮线。拉开放炮线,设好警戒,将放炮线接到起爆器上,旋转放炮钥匙(逆时针旋转)给起爆器充电,当指示灯闪烁时,起爆器已充好电,发出放炮信号,顺时针旋转放炮钥匙起爆,完成致裂工作。

二氧化碳致裂会产生二氧化碳致裂裂隙区与水力割缝产生的裂缝相互叠加,扩大煤体的卸压、增透范围,提高瓦斯抽采效果。另外,煤体对二氧化碳的吸附性远高于对瓦斯的吸附性,致裂后的二氧化碳能驱替出大量煤体吸附的瓦斯。

## 3 气液两相综合作用增透现场试验

某矿 8208 综采工作面位于井田 8 号煤层二采

区,开采 8 号煤层,煤层平均厚度 2.1 m,煤层平均倾角 8°。煤层原始瓦斯含量为 9.95 m<sup>3</sup>/t,最大原始瓦斯压力 0.55 MPa,工作面最大绝对瓦斯涌出量为 14 m<sup>3</sup>/min,瓦斯放散初速度为 12.17~20.50,煤的普氏系数为 0.23~0.60,钻孔瓦斯流量衰减系数为 0.014 4~0.015 8 d<sup>-1</sup>,属于可以抽采煤层;煤层透气性系数 1.11 m<sup>2</sup>/(MPa<sup>2</sup>·d),属于可以抽采煤层。

为了考察气液两相综合作用增透的效果,在 8202 工作面底板巷进行了现场试验。通过控制相同的试验条件,对比水力割缝煤层增透技术、二氧化碳致裂煤层增透技术和气液两相综合作用增透技术的增透效果,主要考察采用增透措施前后瓦斯抽采的混合量、瓦斯抽采纯量和瓦斯浓度。

### 3.1 试验方案

选择在 8208 综采工作面底板巷围岩比较稳定的 500 m 处进行本次试验,分别对 3 种不同增透方法和增透后的瓦斯抽采效果进行考察。试验分为 3 组,第 I 组进行二氧化碳致裂增透试验,第 II 组进行水力割缝增透试验,第 III 组进行气液两相综合作用增透试验,每组试验各布置 5 个钻孔,每组钻孔中各有 3 个增透钻孔,每组钻孔的钻孔参数相同,为避免各组钻孔之间的相互影响,各组钻孔之间的间距要大于 30 m,增透效果考察钻孔布置如图 2 所示。

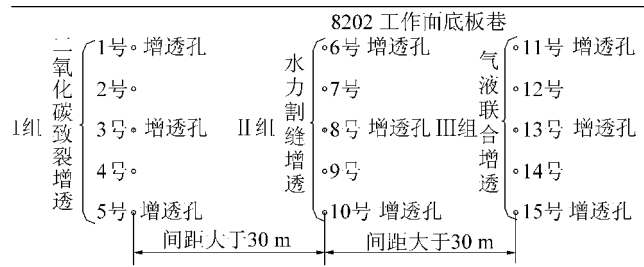


图2 钻孔布置示意

Fig. 2 Schematic diagram of the drilling hole layout

为尽量减少外在因素对试验效果的影响,第 I 组和第 III 组试验中采用的二氧化碳致裂器均为同一型号,致裂压力相同;第 II 组和第 III 组水力割缝采用相同割缝装备和相同的割缝压力。每组钻孔要在增透前连接瓦斯抽采管路进抽采,并对增透之前的抽采数据进行观测,观测时间为 1 周;在各组钻孔采用不同的方式增透后,在抽采负压相同条件下,对 3 组钻孔的抽采数据进行观测,观测时间大于 14 d,通过以下 2 种方式进行煤层增透效果考察。①每组钻孔增透前后的瓦斯抽采数据对比,包括瓦斯抽采的平均混合量、平均纯量和瓦斯浓度。②不同组钻孔之间增透后的瓦斯抽采数据对比,包括瓦斯抽采的平均混合量、平均纯量和瓦斯浓度。

### 3.2 试验结果

采用不同方式增透后,各组钻孔的瓦斯抽采数据如图3所示。

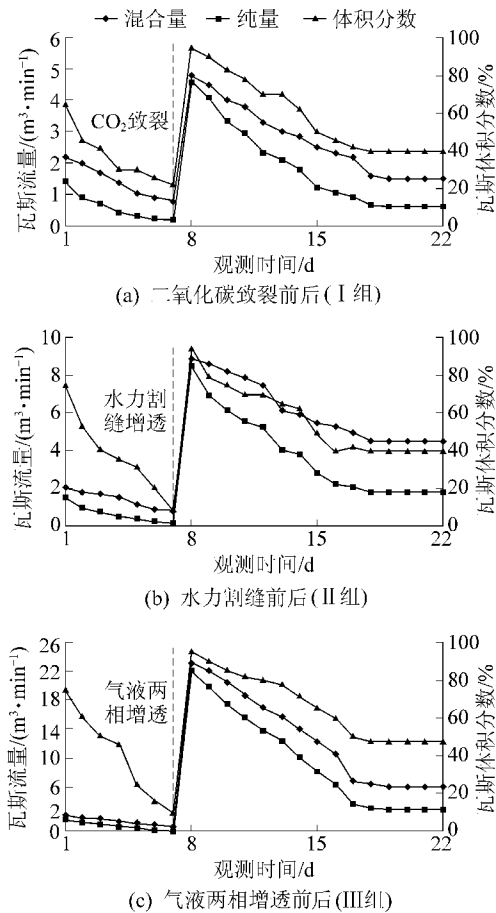


图3 不同增透方式瓦斯抽采效果

Fig. 3 Gas extraction result of different permeability increasing method

通过图3可以看出,在未采用增透措施前,3组钻孔的瓦斯抽采混合量和抽采纯量随着抽采时间的增加逐渐减少,在观测的7 d内,第I组的瓦斯抽采平均混合量为 $1.43 \text{ m}^3/\text{min}$ 、平均瓦斯纯量为 $0.59 \text{ m}^3/\text{min}$ ,第II组的瓦斯抽采平均混合量为 $1.40 \text{ m}^3/\text{min}$ 、平均瓦斯纯量为 $0.60 \text{ m}^3/\text{min}$ ,第III组的瓦斯抽采平均混合量为 $1.36 \text{ m}^3/\text{min}$ 、平均瓦斯纯量为 $0.66 \text{ m}^3/\text{min}$ ,通过上述数据可以看出,在未采用增透措施前3组钻孔的平均瓦斯抽采的混合量和纯量相差不大。由于3组钻孔的瓦斯浓度在增透前后变化幅度相差不大,因此瓦斯浓度的变化不作为增透效果的考察指标。

1) 每组钻孔增透前后瓦斯抽采数据对比。在采取3种不同的煤层增透措施后,3组钻孔的瓦斯抽采混合量和纯量均会突然增大,随着抽采时间的增长,瓦斯抽采混合量和纯量逐渐降低到一定的数值。第I组钻孔在增透后观测的15 d内,瓦斯抽采

的平均混合量为 $2.73 \text{ m}^3/\text{min}$ 、平均瓦斯纯量为 $1.82 \text{ m}^3/\text{min}$ ,通过与二氧化碳致裂增透前的瓦斯抽采数据对比,瓦斯抽采的平均混合量是未采用二氧化碳致裂之前的1.91倍,平均瓦斯纯量是未采用二氧化碳致裂之前的3.08倍。第II组钻孔在增透后观测的15 d内,瓦斯抽采的平均混合量为 $6.11 \text{ m}^3/\text{min}$ 、平均瓦斯纯量为 $3.74 \text{ m}^3/\text{min}$ ,通过与水力割缝增透前的瓦斯抽采数据对比,瓦斯抽采的平均混合量是未采用水力割缝之前的4.36倍,平均瓦斯纯量是未采用水力割缝之前的6.23倍。第III组钻孔在增透后观测的15 d内,瓦斯抽采的平均混合量为 $12.80 \text{ m}^3/\text{min}$ 、平均瓦斯纯量为 $9.53 \text{ m}^3/\text{min}$ ,通过与综合增透前的瓦斯抽采数据对比,瓦斯抽采的平均混合量是未采用综合增透之前的9.41倍,平均瓦斯纯量是未采用综合增透之前的14.44倍。

通过上述分析可知,采用不同的增透方式后,煤层增透效果是不相同的,气液两相综合增透的效果最好,尤其是瓦斯抽采纯量,采用二氧化碳增透后瓦斯抽采纯量增加3.08倍,采用水力割缝增透瓦斯抽采纯量增加6.23倍,采用综合增透瓦斯抽采纯量增加14.44倍,可以看出采用综合增透的煤层增透效果并不是2种增透方式的简单叠加,综合增透实现2种增透优势互补,扩大煤层的卸压、增透范围,增加裂缝的发育规模,减少瓦斯富集区和抽采空白带,同时致裂后二氧化碳可驱替出煤体吸附的瓦斯,大幅提高煤层瓦斯抽采效果。

2) 不同组钻孔之间增透后的瓦斯抽采数据对比。在采用不同方式增透后,III组的瓦斯抽采平均混合量是I组的4.67倍,II组的2.09倍;III组的瓦斯抽采平均纯量是I的5.24倍,II组的2.54倍;通过不同组之间的瓦斯抽采数据对比也可以看出,气液两相综合增透的效果最好。

## 4 结 论

1) 对气液两相综合作用增透原理进行了研究,包括二氧化碳致裂增透技术原理和水力割缝增透技术原理,通过2种增透技术的组合,可实现2种增透取长补短、优势互补,控制裂缝扩展方向,扩大煤层自由面和煤层裂缝网络,增加煤层增透影响的范围,置换煤层吸附的瓦斯量,提高煤层瓦斯抽采效果。

2) 进行了二氧化碳致裂技术和水力割缝技术气液两相综合增透工艺研究,对水力割缝工艺的低压钻进、高压切割工艺以及割缝过程中可能出现的问题提出了解决方案;对二氧化碳致裂的启裂位置、致裂器推送过程和致裂工艺进行了研究。

3)在同组增透前后瓦斯抽采效果对比中,气液两相综合作用增透后的瓦斯抽采平均混合量是未采用综合增透之前的9.41倍,平均瓦斯纯量是未采用综合增透之前的14.44倍,是3组钻孔中效果最好的;在不同组增透前后瓦斯抽采效果对比中,Ⅲ组瓦斯抽采平均混合量是Ⅰ组的4.67倍,Ⅱ组的2.09倍;Ⅲ组的瓦斯抽采平均纯量是Ⅰ的5.24倍,Ⅱ组的2.54倍;从上述两方面的抽采数据也可以看出,采用气液两相综合作用增透的效果最好。

#### 参考文献(References):

- [1] 周世宁,林柏泉.煤矿瓦斯动力灾害防治理论及控制技术[M].北京:科学出版社,2007.
- [2] 林海飞,李树刚,赵鹏翔,等.我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展[J].煤炭科学技术,2018,46(1):28-35.  
LIN Haifei, LI Shugang, ZHAO Pengxiang, et al. Research progress on pressure released gas drainage technology of mining cracking zone in over-burden strata of coal mine in China[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 28-35.
- [3] 赵耀江,谢生荣,温百根,等.高瓦斯煤层群顶板大直径千米钻孔抽采技术[J].煤炭学报,2009,34(6):797-801.  
ZHAO Yaojiang, XIE Shengrong, WEN Baigen, et al. Gas drainage technique by 1 000 m long and large diameter roof boreholes in high gas coal seam group[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6): 797-801.
- [4] 袁亮,林柏泉,杨威,等.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.  
YUAN Liang, LIN Baiquan, YANG Wei, et al. Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in China Coal Mine[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 45-49.
- [5] 王耀锋.三维旋转水射流与水力压裂联作增透技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
- [6] 宋维源,王忠峰,唐巨鹏.水力割缝增透抽采煤层瓦斯原理及应用[J].中国安全科学学报,2011,21(4):79-81.  
SONG Weiyuan, WANG Zhongfeng, TANG Jupeng. Principle of gas extraction by increasing permeability of coal seam with hydraulic cutting and its application[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(4): 79-81.
- [7] 王耀锋,何学秋,王恩元,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.  
WANG Yaofeng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Research progress and development tendency of the hydraulic technology for increasing the permeability of coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1945-1955.
- [8] 李守国.高压空气爆破煤层增透关键技术与装备研发[J].煤炭科学技术,2015,43(2):92-95.  
LI Shouguo. Key technology and equipment research and development of improving coal seam permeability by high pressure air blasting[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 92-95.
- [9] 闫发志,朱传杰,郭畅,等.割缝与压裂协同增透技术参数数值模拟与试验[J].煤炭学报,2015,40(4):823-829.  
YAN Fazhi, ZHU Chuanjie, GUO Chang, et al. Numerical simulation parameters and test of cutting and fracturing collaboration permeability increasing technology[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 823-829.
- [10] 秦江涛,陈玉涛,黄文祥.高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透技术[J].煤炭科学技术,2017,45(7):80-84.  
QIN Jiangtao, CHEN Yutao, HUANG Wenxiang. Combined permeability improved technology with high pressure hydraulic fracturing and carbon dioxide phase change cracking[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 80-84.
- [11] 张开加.松软煤层水力冲孔与二氧化碳爆破联合增透技术[J].煤炭工程,2018,50(7):53-55.  
ZHANG Kaijia. Joint permeability-enhancement technology using hydraulic flushing and carbon dioxide blasting[J]. Coal Engineering, 2018, 50(7): 53-55.
- [12] 林柏泉,张其智,沈春明,等.钻孔割缝网络化增透机制及其在底板穿层钻孔瓦斯抽采中的应用[J].煤炭学报,2012,37(9):1425-1430.  
LIN Baiquan, ZHANG Qizhi, SHEN Chunming, et al. Permeability-increasing mechanism of network slotting boreholes and application in crossing borehole gas drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1425-1430.
- [13] 郑春山,林柏泉,杨威,等.水力割缝钻孔喷孔机制及割缝方式的影响[J].煤矿安全,2014,45(1):5-8.  
ZHENG Chunshan, LIN Baiquan, YANG Wei, et al. Hole-spraying mechanism of hydraulic slotting drilling and the influence of slotting mode[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(1): 5-8.
- [14] 唐建新,贾剑青,胡国忠,等.钻孔中煤体割缝的高压水射流装置设计及试验[J].岩土力学,2007,28(7):1501-1504.  
TANG Jianxin, JIA Jianqing, HU Guozhong, et al. Design and experimentation of high-pressure water jet set applied to incising coal seam in boreholes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1501-1504.
- [15] 顾北方.高压水射流割缝煤体损伤演化规律研究与应用[D].北京:中国矿业大学(北京),2016.
- [16] 邹永洛.煤与瓦斯突出煤层CO<sub>2</sub>相变致裂增透技术试验研究[J].煤矿安全,2018,49(3):5-8.  
ZOU Yongming. Experimental study on the permeability increasing technique with the CO<sub>2</sub> phase transition fracturing in the coal and gas outburst coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(3): 5-8.
- [17] 霍中刚.二氧化碳致裂器深孔预裂爆破煤层增透新技术[J].煤炭科学技术,2015,43(2):80-83.  
HUO Zhonggang. New technology of carbon dioxide fracturer applied to deep borehole pre-cracking blasting for seam permeability improvement[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 80-83.
- [18] 王兆丰,孙小明,陆庭侃,等.液态CO<sub>2</sub>相变致裂强化瓦斯预抽试验研究[J].河南理工大学学报:自然科学版,2015,34(2):1-5.  
WANG Zhaofeng, SUN Xiaoming, LU Tingkan, et al. Experiment research on strengthening gas drainage effect with fracturing technique by liquid CO<sub>2</sub> phase transition[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science Edition, 2015, 34(2): 1-5.