

张永将,孟贤正,季飞. 顺层长钻孔超高压水力割缝增透技术研究与应用[J]. 矿业安全与环保,2018,45(5):1-5.  
文章编号:1008-4495(2018)05-0001-05

## 试验研究

# 顺层长钻孔超高压水力割缝增透技术研究与应用

张永将<sup>1,2</sup>,孟贤正<sup>1,2</sup>,季飞<sup>1,2</sup>

(1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆 400037; 2. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室,重庆 400037)



增强视频

时长170 s

**摘要:**为解决低渗透性中硬煤层顺层钻孔抽采半径影响范围较小、抽采效果较差等问题,研究了工作面顺层长钻孔超高压水力割缝技术。通过应力波效应研究了水射流破煤机理,分析了超高压水力割缝卸压增透原理,研制出工作压力达100 MPa的超高压水力割缝成套装置,实现了超高压状态下不退出钻杆的钻割一体化工艺和远程操作功能,考察了超高压水力割缝参数,形成了顺层钻孔超高压水力割缝工艺技术。现场试验得出:割缝钻孔平均单刀出煤量为0.32 t,等效割缝半径达1.51~2.08 m;割缝后钻孔瓦斯抽采浓度同比提高了1.44倍,瓦斯抽采纯流量提高了3倍,有效抽采半径为对比普通钻孔的3.6倍,钻孔施工时间缩短约30%,抽采达标时间缩短40%左右。应用表明,采用超高压水力割缝增透技术后,煤层的透气性明显改善,达到了快速卸压增透的目的。

**关键词:**瓦斯抽采;超高压水力割缝;钻割一体化;割缝工艺;煤层透气性;卸压增透

**中图分类号:**TD712<sup>+</sup>.6 **文献标志码:**A

## Study and Application of Antireflection Technology for Ultra-high Pressure Hydraulic Slitting of Long Bedding Borehole

ZHANG Yongjiang<sup>1,2</sup>, MENG Xianzheng<sup>1,2</sup>, JI Fei<sup>1,2</sup>

(1. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China;

2. State Key Laboratory of the Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing 400037, China)

**Abstract:** In view of the problem that occur in the bedding borehole of hard coal seam in low permeability, such as the range of extraction radius is small and the extraction effect is poor, this paper studied the technique of ultra-high pressure hydraulic slitting of long bedding borehole in the working surface, the mechanism of coal breaking by water jet was studied by stress wave effect, the principle of pressure relief and antireflection of ultra-high pressure hydraulic slitting was analyzed. A complete set of ultra-high pressure hydraulic slitting equipment with working pressure up to 100 MPa was developed. The integrated drilling and slotting technology that not out of drill pipe and remote operation function under the super high pressure condition were realized, the parameters of ultra-high pressure hydraulic slitting were investigated, and the technology of ultra-high pressure slitting was developed. The results of field test show that the average amount of coal produced by single cutting hole is 0.32 t, the equivalent slit radius is from 1.51 m to 2.08 m. The gas extraction concentration in borehole after slitting increased by 1.44 times and the net gas extraction flow increased by 3 times, the effective extraction radius is 3.6 times of the contrast borehole. The construction time of borehole is shortened by about 30%, and the standard time of extraction is shortened by about 40%. The application shows that the permeability of coal seam can be improved obviously by the application of antireflection technology for ultra-high pressure hydraulic slitting, which achieves the purpose of rapid pressure relief and antireflection.

**收稿日期:**2018-06-05;2018-09-10 修订

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2017YFC0804206);  
安全生产重大事故防治关键技术科技项目(yangqi-0006-  
2017AQ);重庆市社会事业与民生保障科技创新专项项目(cstc2017shmsA90008);中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项项目(2018MS011)

**作者简介:**张永将(1981—),男,安徽宿州人,博士研究生,副研究员,研究方向为煤矿瓦斯防治安全技术与工程。  
E-mail:zhangyj\_1026@163.com。

The construction time of borehole is shortened by about 30%, and the standard time of extraction is shortened by about 40%. The application shows that the permeability of coal seam can be improved obviously by the application of antireflection technology for ultra-high pressure hydraulic slitting, which achieves the purpose of rapid pressure relief and antireflection.

**Keywords:** gas extraction; ultra-high pressure hydraulic slitting; drilling and slotting integration; slotting process; coal seam permeability; pressure relief and antireflection

我国煤矿瓦斯灾害严重,通过施工钻孔预抽煤层瓦斯仍然是预防瓦斯灾害的有效手段之一<sup>[1-3]</sup>。但我国大部分煤层属难于抽采煤层,煤层透气性较差,影响了煤层瓦斯的抽采效果。因此,如何提高煤层透气性,解决低渗透性煤层的瓦斯抽采问题已成为确保煤矿安全生产,提高煤矿生产效率的关键环节<sup>[4-5]</sup>。近年来,随着水射流技术的不断发展,各种水力化技术措施被广泛应用到煤矿瓦斯治理中<sup>[6]</sup>,其中主要包括水力造穴、水力冲孔及水力割缝技术。水力造穴与水力冲孔的原理是利用高压水射流在已施工的钻孔内对煤体进行冲刷,达到增加钻孔直径、增大煤体暴露面积的目的<sup>[7-8]</sup>;水力割缝技术则是通过高压水射流对钻孔周围的煤体进行切割,在钻孔周围形成缝槽,从而增大钻孔影响范围,改善瓦斯流动状态,增加煤层渗透性,降低煤层应力<sup>[9-10]</sup>。

目前,国内广泛采用的水力造穴与水力冲孔压力一般为5~20 MPa,存在压力低,容易出现堵孔、垮孔,冲孔过程形成的孔洞不可控,孔洞过大可能造成瓦斯积聚,巷道掘进过程支护困难等问题,且针对中硬煤层的增透效果较差;而现有水力割缝压力一般为30~60 MPa,割缝深度0.5~0.8 m,存在硬煤层割缝深度小、钻孔割缝增透工序复杂,且需要钻孔施工完成后退出钻杆再进行割缝,未能实现高压状态下不退钻杆低压钻进、超高压割缝的功能,未形成系统的水力化技术措施体系等问题<sup>[11-13]</sup>。

为解决中硬煤层瓦斯抽采问题,提高煤层透气性,简化施工工艺,增加钻孔影响半径,研究了工作压力可达100 MPa的超高压水力割缝技术及装备,能够实现中硬煤层顺层钻孔快速卸压增透的目的。

## 1 超高压水力割缝技术原理

### 1.1 水射流破煤机理

水射流对煤体的冲击过程可分为2个阶段:水锤压力阶段和滞止压力阶段。

如图1所示,水锤压力阶段高速冲击煤体的射流可以被简化为尖端是圆弧状的液体束( $t = \Delta t$ ),射流尖端首先撞击煤体,水射流及煤体本身均受到压缩,强烈压缩作用导致的变形分别在射流和煤体内部传播产生应力波。随着射流束尖端弧形边缘逐次接触煤体表面,不断有新的应力波在煤体表面产生并向深部传播,直至射流与煤体表面充分接触为止。在这个过程中煤体变形量传播速度大于水射流中水的速度,因此冲击作用将会在煤体中产生水锤压力( $t = 2\Delta t$ )。水锤压力阶段从射流束尖端撞击煤体表面开始到射流实现稳定冲击结束,持续时间极

为短暂,冲击效应使煤体发生初始损伤。

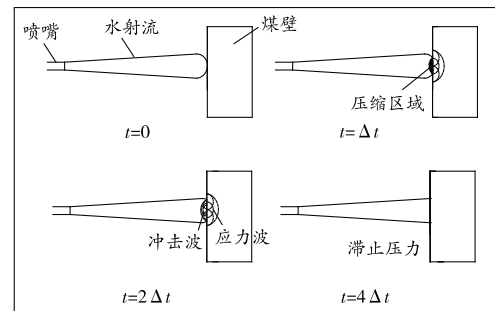


图1 高压水射流破煤过程示意图

水锤压力作用在靶板表面,导致固体产生微小的变形。因此在水锤压力作用的瞬间,将固体表面视为弹性体,根据动量守恒定理,可得到水锤压力为:

$$p_1 = vpc_w\rho_s c_s / (\rho c_w + \rho_s c_s) \quad (1)$$

式中: $p_1$  为水锤压力,Pa; $v$  为水射流的冲击速度,m/s; $\rho$ 、 $\rho_s$  分别为水和岩石的密度,kg/m<sup>3</sup>;  $c_w$ 、 $c_s$  分别为冲击波在水和岩石中的传播速度,m/s。

之后为滞止压力阶段( $t = 4\Delta t$ ),在该阶段中水射流实现稳定冲击,煤体将射流以一定的速度与角度反弹回去,此过程中由于动量定理煤体同时受到水射流的冲击力,滞止压力的大小同射流速度相关,其表达式如下:

$$p_2 = \frac{1}{2}\rho u^2 \quad (2)$$

式中: $p_2$  为射流滞止压力,Pa; $u$  为液体微元的速度,m/s。

在水锤压力阶段,射流撞击煤体使之处于压缩状态,随后由于水锤压力下降为滞止压力,煤体在高度压缩状态下迅速卸压,应变能的释放在煤体内部形成拉伸载荷,当载荷超过煤体自身强度极限时产生初始破坏。在滞止压力阶段,煤体破坏主要体现为水楔效应下的内部裂纹再次扩展。射流持续冲击煤体过程中,高压水进入裂纹尖端产生应力集中现象,裂隙在水压作用下再次发育,最终同自由面或原生裂隙贯通使煤块整体脱离,在煤体表面形成破碎坑。

### 1.2 超高压水力割缝卸压增透原理

超高压水力割缝技术是通过将水射流压力提高到100 MPa,利用超高压水射流对煤体进行切割,在煤体中形成宽度2~5 cm和深度1.5~2.0 m的扁平缝槽,该宏观缝槽的形成一方面增大了煤体的暴露面积,另一方面提供了煤岩的变形空间<sup>[14-15]</sup>。承压状态下的煤体经过高压水射流割缝以后,随着割缝煤渣的排出,缝槽附近煤岩应力分布、裂隙发育程度及相应的透气性系数等均发生变化,煤层含水率

增大,煤岩内应力降低,引起受压煤体裂隙张开,煤体透气性增高。同时,由于切割缝槽提供了煤岩变形空间,地应力再次加载以后煤体因为再次承压而发生弹塑性变形,由切割缝槽形成瓦斯流动的宏观通道,缝槽的上下侧面会形成大量的次生裂隙。由宏观的缝槽和大量的次生裂隙共同构成了解吸瓦斯的流动路径,合理控制缝槽间距,使瓦斯由径向与割缝层间流动共同作用实现钻孔间网状流动,煤体卸压均匀、充分,煤体的整体透气性系数得以大幅度提高,抽采影响范围增大,抽采效果显著提高。

超高压水力割缝钻孔与普通钻孔卸压增透原理对比见图2。

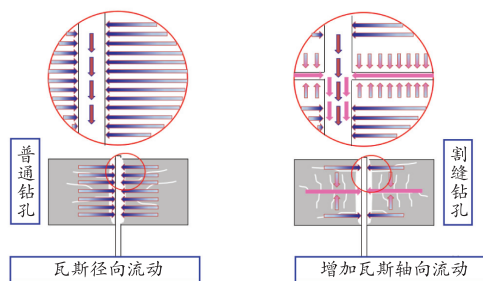


图2 超高压水力割缝与普通钻孔卸压增透原理对比图

## 2 超高压水力割缝成套装置

超高压水力割缝成套装置主要包括金刚石钻头、水力割缝浅螺旋整体钻杆、超高压旋转水尾、超高压清水泵、高压远程操作台、高低压转换割缝器、超高压软管、安全防护配件等,其组成结构如图3所示。

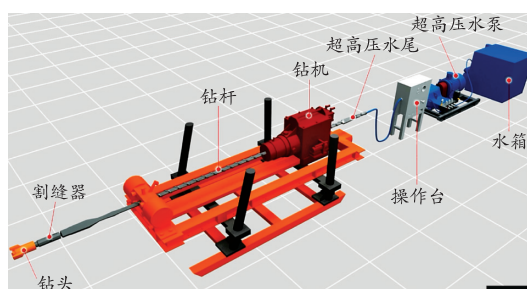


图3 ZGF-100(A)型超高压水力割缝装置组成结构图

1) 超高压清水泵。超高压清水泵为超高压水力割缝成套装置提供动力,其额定工作压力为100 MPa,流量不小于80 L/min。

2) 超高压软管。超高压软管主要用于连接超高压旋转水尾与超高压清水泵,是高压水传输通道,其内径为20 mm,额定工作压力为100 MPa,爆破压力在400 MPa以上。

3) 水力割缝浅螺旋整体钻杆。水力割缝浅螺旋整体钻杆采用高强度无缝钢管制作,钻杆长度1 000 mm,

外径73 mm,壁厚13 mm,抗扭强度大于7 200 N·m,为增加钻孔排渣效果,采用了浅螺旋结构。

4) 超高压旋转水尾。超高压旋转水尾采用高压动密封设计,结构连接为硬密封,工作压力为150 MPa,流量为400 L/min。

5) 高压远程操作台。高压远程操作台能够实现100 m以上远程控制,通过集成溢流阀与控制开关,实现远距离控制超高压清水泵的启停及压力调节。

## 3 超高压水力割缝增透工艺

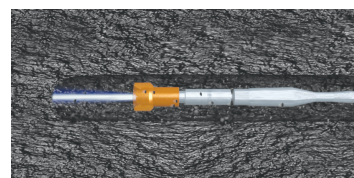
### 3.1 超高压水力割缝效果评价指标

1) 单刀割缝出煤量指标。为达到卸压增透效果,割缝后缝槽半径需达到1.5~2.0 m,将割缝后缝槽等效为厚度2~5 cm的环形缝槽,以此计算单刀出煤量在0.3 t左右。即单刀割缝效果评价指标为单刀出煤量达到0.3 t,如果不足0.3 t,可采用增大割缝压力、增加割缝时间或降低钻杆转速等方法增加出煤量,单孔割缝时间在5 min以上。

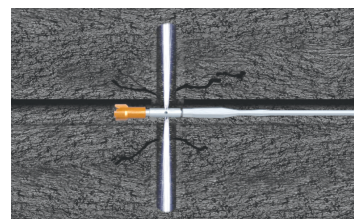
2) 措施孔控制区域均匀排出煤屑率指标。超高压水力割缝技术在煤层中人为再造裂隙,相当于在煤层中开采了一系列极小的保护层,为了让措施孔控制区域内煤体充分变形从而达到卸压增透的目的,通过现场试验数据综合分析,将措施孔控制区域均匀排出煤屑率指标 $\eta$ ( $\eta = \text{控制区域割出煤量} \div \text{控制区域总煤量}$ )定为3%。如果措施孔控制区域均匀排出煤屑率不足3%,则应采取增加措施孔密度、缩短割缝间距等措施,以增大措施孔控制区域均匀排出煤屑率,从而使煤体得到充分卸压。

### 3.2 水力切割工艺主要技术参数及特点

1) 不退出钻杆钻进、切割一体化,具有低压(水压小于15 MPa)钻进、高压(水压大于15 MPa)割缝的功能。钻割一体化工艺如图4所示。



(a) 低压水力钻进



(b) 高压水力割缝

图4 超高压水力割缝钻割一体化工艺示意图

- 2) 操作方便,穿层钻孔、顺层钻孔均适用。
- 3) 割缝深度大,中等硬度煤层割缝后缝槽半径可达1.5~2.0 m。
- 4) 割缝时间短,单刀割缝时间3~5 min。
- 5) 可实现100 m以上远程操控,同时可实现多个钻孔或多个钻场割缝,割缝效率高。

工作面顺层钻孔超高压水力割缝剖面示意图见图5。

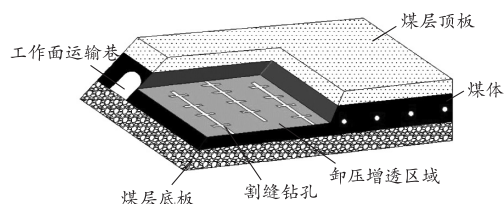


图5 工作面顺层钻孔超高压水力割缝剖面示意图

### 3.3 水力割缝排渣工艺

超高压水力割缝排渣主要采用水力排渣与钻杆螺旋排渣相结合的方式。针对不同角度的钻孔,其排渣工艺如下:

- 1) 仰角孔。钻孔角度为仰角,由于煤渣自身重力原因,钻孔割缝煤渣不易堵孔,通过合理控制割缝压力与切割煤量关系,就可以实现钻孔顺利排渣的目的。
- 2) 近水平孔。钻孔角度为近水平,钻孔内煤渣与水将形成固—液两相流,此时高压水射流落煤能力与水流输送能力将出现临界状态,在煤层坚固性系数 $f < 0.5$ 时,应采用低压力缓慢割缝,并提高钻机转速,以钻杆螺旋辅助水流达到顺利排渣目的;在 $f > 0.5$ 时,则可以采用较高压力进行割缝,并减小钻杆转速,以增加超高压水射流的落煤能力。
- 3) 俯角孔。钻孔角度为俯角,钻孔内煤渣被排出到孔口主要依靠煤渣颗粒自身浮力及钻孔螺旋旋转。在煤层坚固性系数 $f > 0.5$ 时,割缝排渣量较小,则可以通过增加冲孔时间来达到割缝排渣的目的;在 $f < 0.5$ 时,割缝排渣量较大,则需要增加冲孔时间的基础上,加大钻杆转速辅助排渣。

### 3.4 超高压传输安全保障工艺

- 1) 超高压割缝成套装置承压120 MPa以上;
- 2) 超高压清水泵配备安全保护自卸压系统,具有压力过载保护功能;
- 3) 超高压管路连接接头配有栅状自缩紧型防脱链及保护套,作为二次保护;

- 4) 采用远程操控,保障作业人员安全。

## 4 现场应用试验及效果

### 4.1 试验方案

山西潞安集团余吾煤矿3号煤层埋藏深度700 m,煤层平均厚度6 m,倾角 $-2^\circ \sim +3^\circ$ ,煤层原始瓦斯含量为 $11.5 \text{ m}^3/\text{t}$ ,煤的坚固性系数 $f$ 为 $0.4 \sim 0.8$ ,煤层透气性系数为 $0.0524 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ ,钻孔瓦斯流量衰减系数为 $0.11 \sim 0.25 \text{ d}^{-1}$ 。3号煤层具有埋藏深、煤层厚、瓦斯含量高及透气性差等特点,普通钻孔抽采效果较差,抽采达标时间较长。

超高压水力割缝试验地点选在余吾煤矿N1103工作面运输巷1100 m位置。为便于效果对比,设计施工36个钻孔,其中A1#~A5#为普通钻孔(对比钻孔),孔深135 m,孔间距4 m;B1#~B31#为割缝试验钻孔,孔深100~135 m,孔间距5 m,割缝间距2~4 m/刀,单刀割缝时间5~8 min,单孔割缝刀数为20~43刀。

### 4.2 钻孔出煤量分析

B1#~B31#割缝试验钻孔的超高压水力割缝压力为90~95 MPa,割缝过程中煤体被切割为均匀的小颗粒,粒度为0.2~1.0 cm,在水和螺旋钻杆的共同作用下,排水排渣均较顺畅,割缝过程中未出现憋孔和堵孔现象。在割缝试验过程中,B1#~B31#割缝试验钻孔平均单刀出煤量情况如图6所示,割缝试验钻孔平均单刀出煤量为0.32 t。

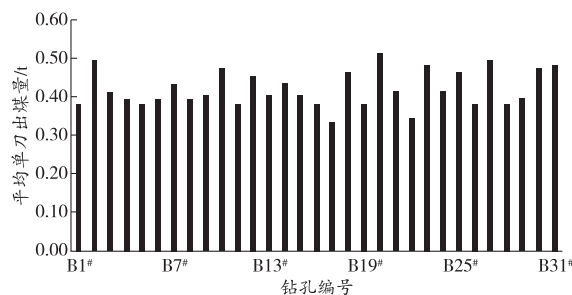


图6 B1#~B31#割缝钻孔平均单刀出煤量变化图

用单刀出煤量反算等效割缝半径如下:

$$r = \sqrt{\frac{M}{\pi h K \gamma}} \quad (3)$$

式中: $r$ 为割缝后缝隙的等效半径,m; $M$ 为割缝后平均排出煤屑量,t; $K$ 为煤量损失不均衡系数, $K = 0.80 \sim 0.95$ ; $h$ 为割缝后缝隙的宽度,m,考虑到缝槽为外宽内窄不规则槽形,割缝后缝隙的平均宽度按

2~5 cm 计算; $\gamma$  为煤的密度, $\gamma=1.39 \text{ t/m}^3$ 。

将有关数据代入式(3),计算得到等效割缝半径  $r=1.51 \sim 2.08 \text{ m}$ 。

### 4.3 瓦斯抽采浓度对比分析

割缝组与对比组钻孔在抽采时间内单孔平均瓦斯抽采浓度变化曲线见图7,可以看出:割缝组钻孔单孔平均瓦斯抽采浓度(甲烷体积分数)最小为56.0%,最大为82.3%,平均为67.2%;对比组钻孔单孔平均瓦斯抽采浓度最小为34.7%,最大为66.4%,平均为46.7%。割缝组钻孔日均瓦斯抽采浓度是对比组普通钻孔的1.44倍。

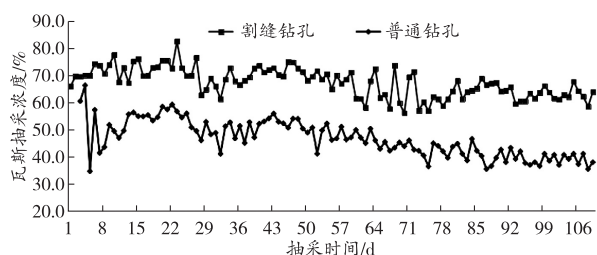


图7 割缝钻孔与普通钻孔平均瓦斯抽采浓度变化曲线

### 4.4 瓦斯抽采纯流量对比分析

割缝组与对比组钻孔在抽采时间内单孔平均瓦斯抽采纯流量变化曲线见图8,可以看出:割缝组钻孔单孔日均瓦斯抽采纯流量最小为 $0.035 \text{ m}^3/\text{min}$ ,最大为 $0.080 \text{ m}^3/\text{min}$ ,平均为 $0.051 \text{ m}^3/\text{min}$ ;对比组钻孔单孔日均瓦斯抽采纯流量最小为 $0.005 \text{ m}^3/\text{min}$ ,最大为 $0.030 \text{ m}^3/\text{min}$ ,平均为 $0.017 \text{ m}^3/\text{min}$ 。割缝组钻孔单孔日均瓦斯抽采纯流量是对比组普通钻孔的3倍。

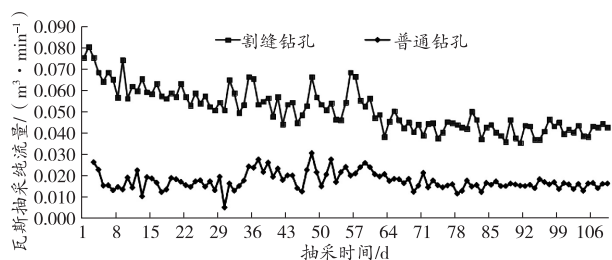


图8 割缝钻孔与普通钻孔平均瓦斯抽采纯流量变化曲线

### 4.5 有效抽采半径对比分析

在抽采60、90、120、180 d后,分别对割缝组钻孔与对比组钻孔进行残存瓦斯含量测试,以残存瓦斯含量降到 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ 以下为标准,分析其有效抽采半径。实测得到:在钻孔抽采60、90、120、180 d后,割缝组钻孔的有效抽采半径分别为0.92、1.28、1.62、2.10 m,而对比组钻孔的有效抽采半径分别为0.28、0.38、0.50、0.59 m。割缝组钻孔的有效抽采

半径是对比组普通钻孔的3.6倍,见图9。超高压水力割缝后钻孔的有效抽采半径明显高于普通抽采钻孔的有效抽采半径,能够减少钻孔数量,缩短抽采达标时间,提高钻孔抽采效率。

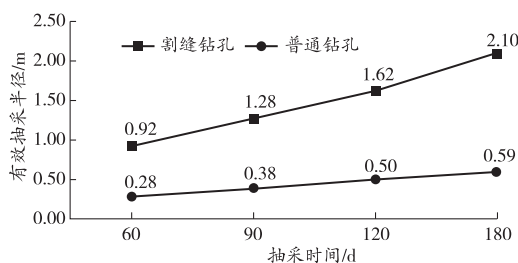


图9 割缝钻孔与普通钻孔有效抽采半径变化曲线

### 4.6 工效对比分析

#### 4.6.1 钻孔施工时间对比

按施工长度100 m巷道工程量计算:超高压水力割缝钻孔间距5 m,需施工20个钻孔,单个钻孔施工时间6 h,单孔割缝时间4 h,则100 m范围抽采钻孔施工时间为200 h;普通抽采钻孔间距2 m,需施工50个钻孔,单个钻孔施工时间6 h,则100 m范围抽采钻孔施工时间为300 h。同等条件对比可知,采用超高压水力割缝技术后,预抽煤层区域钻孔的施工时间可缩短约30%。

#### 4.6.2 抽采达标时间对比

根据试验区域瓦斯抽采达标条件下瓦斯的含量实测结果,在钻孔间距5 m条件下,超高压水力割缝钻孔抽采达标时间为8个月;普通钻孔在钻孔间距2 m条件下,抽采达标时间为14个月。同等条件对比可知,采用超高压水力割缝技术后,钻孔的抽采达标时间可缩短40%左右。

## 5 结论

1) 超高压水力割缝技术利用超高压水射流对煤体进行切割,在煤体中形成半径1.5~2.0 m缝槽,在钻孔煤层段内人为再造裂隙,增大了煤体的暴露面积,能够有效改善煤层中的瓦斯流动及原有应力状态,达到煤层卸压增透的目的。

2) 研制出工作压力达100 MPa的超高压水力割缝成套装置,形成了超高压水力割缝技术工艺,确定了顺层钻孔单刀割缝出煤量合理参数及割缝区域效果评价指标。试验结果表明,超高压水力割缝技术及装置具有工艺简单、煤层切割深度大、煤层切割速度快等特点。

(下转第11页)

- [4] 陈建忠,吕有厂. 高压水力压裂技术在高瓦斯低透气性突出煤层中的试验研究[J]. 矿业安全与环保,2012,39(4):21-23.
- [5] 孙荣军,李泉新,方俊,等. 采空区瓦斯抽采高位钻孔施工技术与发展趋势[J]. 煤炭科学技术,2017,45(1):94-99.
- [6] 杨新乐,任常在,张永利,等. 低渗透煤层气注热开采热—流—固耦合数学模型及数值模拟[J]. 煤炭学报,2013,38(6):1044-1049.
- [7] 吕有厂. 水力压裂技术在高瓦斯低透气性矿井中的应用[J]. 重庆大学学报,2010,33(7):102-107.
- [8] 黄炳香,程庆迎,陈树亮,等. 突出煤层深孔水力致裂驱赶与浅孔抽采冲突研究[J]. 中国矿业大学学报,2013,42(5):701-711.
- [9] 聂政. 二氧化碳炮爆破在煤矿的应用[J]. 煤炭技术,2007(8):62-63.
- [10] 商登莹,吕鹏飞,于学洋,等. 低透气性煤层深孔聚能爆破增透技术及实践[J]. 煤炭科学技术,2012,40(12):48-51.
- [11] 杜春志,茅献彪,卜万奎. 水力压裂时煤层缝裂的扩展分析[J]. 采矿与安全工程学报,2008(2):231-234.
- [12] 李贤忠,林柏泉,翟成,等. 单一低透煤层脉动水力压裂脉动波破煤岩机理[J]. 煤炭学报,2013,38(6):918-923.
- [13] 陈学习,徐永,金文广,等. 低透气性煤层定向水力压裂增透技术[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(2):124-128.
- [14] LIU He, LAN Zhongxiang, WANG Suling, et al. Hydraulic fracturing initiation mechanism in the definite plane perforating technology of horizontal well [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42: 869-875.
- [15] 胡建华,周科平,罗先伟,等. 顶板诱导崩落爆破效果的全景探测与评价[J]. 岩土力学,2010,31(5):1529-1533.
- [16] 黄文尧,颜事龙,刘泽功,等. 煤矿瓦斯抽采水胶药柱在煤层深孔爆破中的研究与应用[J]. 煤炭学报,2012,37(3):472-476.
- [17] 石亮,殷卫锋,王滨. 基于 CO<sub>2</sub> 爆破致裂增透的瓦斯治理技术与实践[J]. 煤炭科学技术,2015,43(12):72-74.
- [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(1):1-5.
- [19] LILLIES A T, KING S R. Sand fracturing with liquid carbon[J]. SPE1314,1982.
- [20] 文虎,李珍宝,王振平,等. 煤层液态 CO<sub>2</sub> 压裂增透过程及裂隙扩展特征试验[J]. 煤炭学报,2016,41(11):2793-2799.

(责任编辑:逢锦伦)

(上接第5页)

3) 现场试验表明,顺层长钻孔超高压水力割缝技术增透效果明显,割缝钻孔平均单刀出煤量为0.32 t,等效割缝半径达1.51~2.08 m;割缝钻孔瓦斯抽采浓度是普通钻孔的1.44倍,瓦斯抽采纯流量是普通钻孔的3倍,有效抽采半径是普通钻孔的3.6倍,钻孔施工时间缩短约30%,抽采达标时间缩短40%左右。

### 参考文献:

- [1] 程远平,付建华,俞启香. 中国煤矿瓦斯抽采技术的发展[J]. 采矿与安全工程学报,2009,26(2):127-139.
- [2] 袁亮. 低透高瓦斯煤层群安全开采关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008(7):1370-1379.
- [3] 程远平,俞启香. 中国煤矿区域性瓦斯治理技术的发展[J]. 采矿与安全工程学报,2007(4):383-390.
- [4] 袁亮,郭华,沈宝堂,等. 低透气性煤层群煤与瓦斯共采中的高位环形裂隙体[J]. 煤炭学报,2011,36(3):357-365.
- [5] 卢平,袁亮,程桦,等. 低透气性煤层群高瓦斯采煤工作面强化抽采卸压瓦斯机理及试验[J]. 煤炭学报,2010,35(4):580-585.
- [6] 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.

- [7] 王晓平. 新景矿水力造穴快速掘进技术研究[J]. 科技创新与应用,2017(17):119-120.
- [8] 郝从猛,刘洪永,程远平. 穿层水力造穴钻孔瓦斯抽采效果数值模拟研究[J]. 煤矿安全,2017,48(5):1-4.
- [9] 王瀚. 水力压裂垂直裂缝形态及缝高控制数值模拟研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2013.
- [10] 林柏泉,赵洋,刘厅,等. 水力割缝煤体多场耦合响应规律研究[J]. 西安科技大学学报,2017,37(5):662-667.
- [11] 童碧,王力. 下向穿层孔水力割缝施工工艺研究与应用[J]. 煤炭科学技术,2017,45(8):177-180.
- [12] 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.
- [13] 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(S1):45-46.
- [14] 黄振飞. 煤层水力割缝影响因素及割缝深度预测模型研究[D]. 北京:煤炭科学研究总院,2017.
- [15] 蒋一峰,杜锋,刘昂,等. 高压水射流破碎煤体过程及应力变化规律的数值分析[J]. 矿业安全与环保,2018,45(4):1-5.

(责任编辑:李琴)