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)



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

#### 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。 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.

**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>。

Vol. 45 No. 5

Oct. 2018

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:

 $p_1 = v \rho c_w \rho_s c_s / (\rho c_w + \rho_s c_s)$  (1) 式中: $p_1$  为水锤压力,  $Pa_i v$  为水射流的冲击速度, m/s;  $\rho_s \rho_s$  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* = 4Δ*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:

$$p_2 = \frac{1}{2}\rho u^2 \tag{2}$$

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

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环形网状流动,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。

第45卷 第5期

2018年10月

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1000 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 η(η=控制区域割出煤量÷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 与水将形成固一液两相流,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,则需要在增加冲孔时 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;

 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°~+3°,煤层原始瓦斯含 量为 11.5 m<sup>3</sup>/t,煤的坚固性系数 f 为 0.4~0.8,煤 层透气性系数为 0.052 4 m<sup>2</sup>/(MPa<sup>2</sup> · d),钻孔瓦斯 流量衰减系数为 0.11~0.25 d<sup>-1</sup>。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1 100 m 位置。为便于效果对比,设 计施工 36 个钻孔,其中 A1<sup>#</sup> ~ A5<sup>#</sup>为普通钻孔(对比 钻孔),孔深 135 m,孔间距4 m;B1<sup>#</sup> ~ B31<sup>#</sup>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<sup>#</sup>~B31<sup>#</sup>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<sup>#</sup>~B31<sup>#</sup>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<sup>#</sup>~B31<sup>#</sup>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:

$$r = \sqrt{\frac{M}{\pi h K \gamma}} \tag{3}$$

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;γ 为煤的密度,γ=1.39 t/m<sup>3</sup>。

将有关数据代入式(3),计算得到等效割缝半径 r=1.51~2.08 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 m<sup>3</sup>/min, 最大为 0.080 m<sup>3</sup>/min,平均为 0.051 m<sup>3</sup>/min;对比组 钻孔单孔日均瓦斯抽采纯流量最小为 0.005 m<sup>3</sup>/min, 最大为 0.030 m<sup>3</sup>/min,平均为 0.017 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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5m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2m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

 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。

- [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
  工技术及发展趋势[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 赶与浅孔抽采消突研究[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 inthedefinite 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:逄锦伦)

(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)