

马海峰,程志恒,张科学,等.千米深井高瓦斯煤层 W-S-W 水力压裂强化增透试验研究[J].煤炭学报,2017,42(7):1757-1764.

doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0153

Ma Haifeng, Cheng Zhiheng, Zhang Kexue, et al. Intensive permeability enhancement experiment through hydraulic fracturing by way of water-sand-water in kilometer deep well with high gas seam[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1757-1764. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0153

doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0153

## 千米深井高瓦斯煤层 W-S-W 水力压裂强化增透 试验研究

马海峰<sup>1,2</sup>,程志恒<sup>3</sup>,张科学<sup>4</sup>,曹家明<sup>5</sup>

(1. 安徽理工大学 能源与安全学院,安徽 淮南 232001; 2. 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室,安徽 淮南 232001; 3. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院,北京 100013; 4. 中国煤炭科工集团有限公司 北京天地玛珂电液控制系统有限公司,北京 100013; 5. 淮南矿业(集团)有限责任公司,安徽 淮南 232001)

**摘要:**水力压裂是增加煤岩体透气性的有效方法之一,针对深部水力压裂存在的问题,提出了“水-砂-水”(W-S-W)水力压裂强化增透技术,以千米深井高瓦斯煤层为研究背景,开展了 W-S-W 水力压裂强化增透试验和常规水力压裂试验,并对增透效果进行了考察。结果表明:煤体的非均质性和孔隙裂隙分布的非均匀性导致了煤体非对称性增透,在水力压裂的作用下裂缝的扩展演化是递进循环式的,并依次经历了能量缓慢增长、微裂隙萌生、局部损伤破坏、裂缝迅速扩展、裂缝网络循环扩展演化 5 个阶段。高压水对煤体内部结构产生切割,形成一种高压水驱动裂隙弱面不断扩展、延伸的连锁效应,并使支撑剂(砂)楔入到裂缝端部,抑制了裂缝的闭合,增加了煤体的透气性。采用 W-S-W 水力压裂强化增透区域煤层的百孔抽采量最高达 1.2 m<sup>3</sup>/min,平均百孔抽采量与瓦斯体积分数分别为 0.77 m<sup>3</sup>/min,52%,与常规水力压裂区域的平均百孔抽采量 0.44 m<sup>3</sup>/min 和瓦斯体积分数 31% 相比分别提高了 0.75 倍、0.68 倍,与未压裂区域的平均百孔抽采量 0.32 m<sup>3</sup>/min 和瓦斯体积分数 24% 相比分别提高了 1.4 倍、1.2 倍,W-S-W 水力压裂强化增透区域煤层的百孔抽采量与瓦斯体积分数均具有明显的峰值阶段,且稳定抽采阶段可持续 45 d 以上,瓦斯抽采时效性明显,实现了千米深井高瓦斯煤层大范围增透和长时高效抽采瓦斯。

**关键词:**高瓦斯煤层;千米深井;增透;水力压裂;百孔抽采量

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)07-1757-08

### Intensive permeability enhancement experiment through hydraulic fracturing by way of water-sand-water in kilometer deep well with high gas seam

MA Hai-feng<sup>1,2</sup>, CHENG Zhi-heng<sup>3</sup>, ZHANG Ke-xue<sup>4</sup>, CAO Jia-ming<sup>5</sup>

(1. Faculty of Energy and Safety Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Key Laboratory of Safety and High-efficiency Coal Mining, Ministry of Education, Huainan 232001, China; 3. Mine Safety Technology Branch of China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 4. Beijing Tiandi-Marco Electro-Hydraulic Control System Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Beijing 100013, China; 5. Huainan Mining (Group) Co., Ltd., Huainan 232001, China)

**Abstract:** Hydraulic fracturing is one of the effective methods which increases the permeability of coal and rock. The technology of permeability enhancement through hydraulic fracturing by the way of water-sand-water (W-S-W) was

收稿日期:2017-02-07 修回日期:2017-05-12 责任编辑:毕永华

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51604154);安徽省高校自然科学基金项目重点资助项目(KJ2017A093);煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放基金资助项目(JYBSYS2017105)

作者简介:马海峰(1984—),男,安徽淮北人,讲师,博士。E-mail:haifeng990@163.com

put forward in order to overcome the problems of hydraulic fracturing in deep mining. The experiments of permeability enhancement through upward hydraulic fracturing by the way of W-S-W and conventional hydraulic fracturing were carried out at a high gas coal seam in a deep mine, and the effect of permeability enhancement was investigated. The results show that the heterogeneity of coal and the non-uniformity of the pore and fracture distribution leads to the asymmetric permeability enhancement. The extension and evolution of crack is progressive-circulating under the effect of hydraulic fracturing and experiences five stages in turn including the slow growth of energy, micro-cracks initiation, local damage and destruction, crack rapid expansion, the cyclic extension and evolution of crack network. The internal structure of coal has been cut by high pressure water and a chain effect of weak surface in fracture, which is constantly expanded driven by high pressure water, has been formed. The proppant (sand) is wedged in the ends of cracks and inhibited their closings, which increases the permeability of coal body. The highest gas extraction volume of one hundred holes is up to  $1.2 \text{ m}^3/\text{min}$  in the permeability enhancement area through W-S-W hydraulic fracturing, the average extraction volume and gas volume fraction of one hundred holes is  $0.77 \text{ m}^3/\text{min}$  and 52% respectively, which is increased 0.75 times and 0.68 times compared with the average extraction volume ( $0.44 \text{ m}^3/\text{min}$ ) and gas volume fraction (31%) of one hundred holes in the conventional hydraulic fracturing region, and which is increased 1.4 times and 1.2 times compared with the average extraction volume ( $0.32 \text{ m}^3/\text{min}$ ) and gas volume fraction (24%) of one hundred holes in the non-fractured region. There are some distinct peak stages of the extraction volume and gas volume fraction of one hundred holes in the permeability enhancement area through W-S-W hydraulic fracturing. The stable extraction stage can continue over 45 days and the timeliness of gas drainage is obvious, the permeability enhancement in a wide range seam and long-term and efficient drainage gas in high-gas coal seam in kilometer deep well is achieved.

**Key words:** high gas seam; kilometer well; permeability enhancement; hydraulic fracturing; extraction volume of one hundred holes

水力压裂技术广泛应用于石油领域,是油气增产、煤层气开采工程的主要增透技术之一<sup>[1-2]</sup>。目前,油气开发所采用的水力压裂技术在煤矿也得以大量应用,在水力压裂工艺与设备等方面取得了较多的研究成果<sup>[3-4]</sup>。近年来,随着煤矿开采深度的增加,地应力增大,煤层瓦斯抽采难度加大,发生瓦斯灾害的危险性随之增大,给煤矿的安全高效生产带来严重威胁<sup>[5-6]</sup>。瓦斯抽采是防治瓦斯灾害的重要手段,由于我国大部分煤与瓦斯突出矿井的煤层透气性低,瓦斯抽采难度大,抽采率低,为提高瓦斯抽采率,必须采取有效的技术措施增加煤层的透气性。水力压裂是增加煤层透气性的有效方法之一,相关学者对此进行了大量的研究,取得了一定的研究成果。康红普等<sup>[7]</sup>研究了定向水力压裂条件下工作面煤体的应力分布特征。林柏泉等<sup>[8]</sup>采用数值模拟和现场试验的方法研究了煤体水力压裂的破裂与变化规律。姜福兴等<sup>[9]</sup>开展了煤层超高压定点水力压裂防冲工程试验,并对防冲机理进行了研究。翟成等<sup>[10]</sup>提出了脉动水力压裂卸压增透技术,研究了不同压力频率条件煤体的疲劳损伤破坏特点。郭印同等<sup>[11]</sup>采用实验室试验的方法对页岩水力压裂的物理模拟与裂缝形态的表征方法进行了研究。李芷等<sup>[12]</sup>研究了页岩水力

压裂水力裂缝与层理面的扩展规律。王磊等<sup>[13]</sup>研究了水平井水中水力裂缝的起裂模式。闫发志等<sup>[14]</sup>对压裂钻孔与割缝钻孔协同布置时不同条件下压裂裂缝的扩展规律进行了研究,提出了割缝与压裂协同增透技术。

已有研究成果在增加煤岩体透气性方面取得了较大进展,但对深部围岩尤其是千米深井煤岩体进行水力压裂增透的研究成果较少。为提高深部围岩水力压裂增透效果,以千米深井高瓦斯煤层为背景,提出了“水-砂-水”(W-S-W)水力压裂强化增透技术,采用“水-砂-水”的工艺开展水力压裂增透试验,并对水力压裂增透的应用效果进行考察。

## 1 W-S-W 水力压裂增透机理分析

水力压裂是利用高压泵将水(或其它压裂液)注入地层,当注入水的速度大于渗失速度时,会在地层内形成逐渐升高的压裂压力,根据断裂力学及岩石损伤力学,水力压裂过程中裂隙首先在弱面(层理面、节理面等)产生及发展,在水压的作用下,弱面空间产生内水压力 $p$ ,对弱面形成法向拉应力,在裂缝尖端处形成拉应力集中,尖端应力值和应变值急剧增加,当法向拉应力达到岩体抗拉强度与地应力在该方

向分力之和时,弱面破裂并扩展,形成宏观裂隙,在持续水压的作用下,引起次级弱面及下一级弱面继续起裂、扩展,最终在岩体内形成相互贯通的裂隙网络,增大岩体的渗透性。

水力压裂结束后,在地应力的作用下,产生垂直于压裂裂缝的作用力  $\sigma_v$  (图1),会使压裂裂缝被压缩,减小裂缝的开度。由于浅部岩体所受的地应力与深部岩体相比较小,深部岩体压裂后,作用于压裂裂缝的作用力  $\sigma_v$  与浅部岩体相比较小,使裂缝更容易被压缩,导致裂缝开度更小,甚至闭合,削弱了水力压裂增透效果。为保证压裂裂缝的开度,提高水力压裂增透效果,在常规水力压裂的基础上,在水中添加一定比例的砂进行水力压裂。岩体弱面在水压的作用下起裂、扩展,与此同时,砂在水压的驱动下楔入到压裂裂缝内,如图2所示,对裂缝产生支撑力  $T$ ,与岩体的抗拉强度和作用力  $\sigma_v$  形成作用力与反作用力的关系,由于砂的抗压强度较大,不易破坏,阻碍了裂缝的闭合,保证裂缝处于张开状态,不会因水力压裂的结束而闭合,可有效增加水力压裂增透效果。

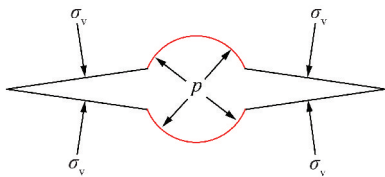


图1 水力压裂裂缝

Fig. 1 Hydraulic fracturing crack

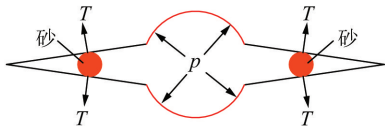


图2 含砂水力压裂裂缝

Fig. 2 Hydraulic fracturing crack containing sand

在浅部围岩进行常规水力压裂时,由于浅部地应力相对较小,水力压裂结束后,煤岩体内形成的水力裂缝不易闭合,煤岩体的透气性受地应力影响较小。在深部围岩进行常规水力压裂时,尤其千米深井,具有高地压的特点,水力压裂结束后,水力裂缝在较大的地应力作用下很容易被压缩,裂缝张开度明显减小,煤岩体的透气性在后期的瓦斯抽采过程中将进一步减小,煤岩体增透效果大大降低。

为提高千米深井高瓦斯煤层水力压裂增透效果,提出“水-砂-水”水力压裂强化增透技术,具体包括3个阶段:①第1阶段采用常规水力压裂,在煤体内形成初次压裂区域和水力裂缝,使水力裂缝

与部分裂隙相沟通;②为保证产生的裂缝处于张开状态,第2阶段采用含有一定支撑剂(石英砂)的压裂液对初次压裂区域进行水力压裂,使煤体内的水力裂缝和裂隙进一步扩展、延伸,同时,支撑剂随压裂液进入水力裂缝和裂隙中,对裂缝和裂隙形成支撑作用,使裂缝不会因水力压裂的结束而闭合;③第3阶段采用常规水力压裂,一方面是对已压裂区域进行重复压裂,使裂缝和裂隙充分扩展、延伸,另一方面是支撑剂在后续高压水的驱动下楔入到裂缝端部,促进水力裂缝的扩展、延伸,从而在煤体内形成具有较高渗流能力并有利于瓦斯流动的裂缝网络,增大煤体的透气性。

## 2 水力压裂增透数值模拟

### 2.1 模型的建立

数值模拟以潘一矿东井1232(1)工作面的地质条件为依据,采用耦合分析软件RFPA进行建模和模拟,RFPA可对煤岩体介质逐渐破坏的过程进行模拟,RFPA软件可用声发射研究水力压裂过程中裂隙发育情况。材料在应力作用下发生变形与裂隙扩展,与变形和断裂机制有关的源,被称为声发射源,声发射可以有效描述煤岩体内部破裂情况<sup>[15]</sup>。

数值计算模型如图3所示,模型尺寸:20 m×30 m,划分为60 000个单元,模型顶部垂直载荷为24 MPa,两端水平约束,底端固定约束。在煤层中布置一个水力压裂孔,孔径94 mm,煤层初始瓦斯压力为2 MPa,压裂孔初始水压5 MPa,增量0.5 MPa/Step,逐步加载直至煤体完全破裂。数值模拟参数见表1。

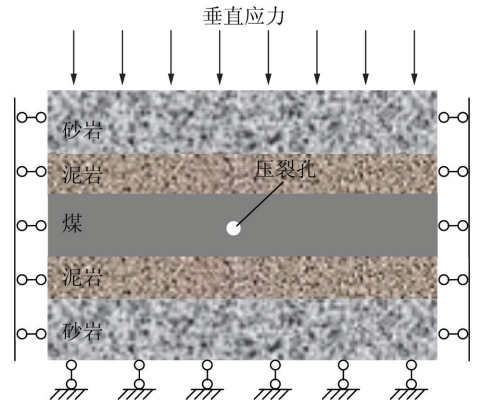


图3 数值计算模型

Fig. 3 Numerical model

### 3.2 数值模拟结果分析

图4为不同计算步数下压裂孔周围煤体裂缝扩展演化特征。导出RFPA系统中声发射(AE)和能量数据,采用声发射来定量分析不同计算步数下裂

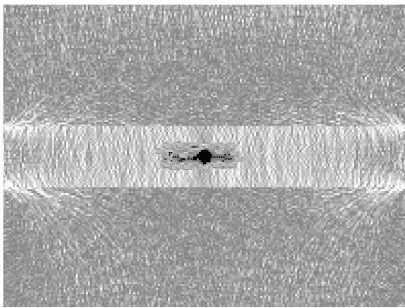


隙扩展发育情况,图 5,6 分别为水力压裂过程中声发射次数与声发射能量特征图。

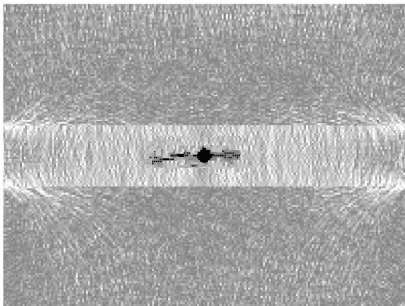
表 1 数值模拟计算参数

Table 1 Numerical simulation parameters

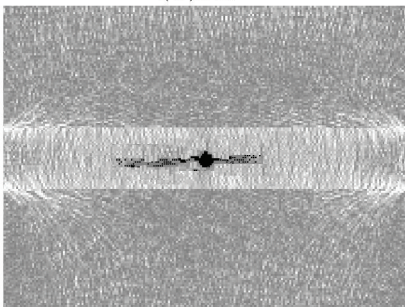
| 岩层 | 弹性模量/MPa | 抗压强度/MPa | 泊松比  | 渗透系数/(m·d <sup>-1</sup> ) | 均质度 |
|----|----------|----------|------|---------------------------|-----|
| 砂岩 | 45 000   | 45       | 0.22 | 0.01                      | 3   |
| 泥岩 | 5 800    | 15       | 0.25 | 0.02                      | 3   |
| 煤层 | 3 500    | 10       | 0.30 | 0.35                      | 3   |
| 泥岩 | 5 800    | 15       | 0.25 | 0.02                      | 3   |
| 砂岩 | 45 000   | 45       | 0.22 | 0.01                      | 3   |



(a) 20步



(b) 30步



(c) 40步

图 4 裂缝扩展延伸规律

Fig. 4 Law of crack propagation and extension

在水力压裂的过程中,煤岩体在持续水压的驱动下经历了由原生裂隙逐渐发育、扩展为复杂裂缝并继续扩展、演化的过程,期间伴随着声发射的发生与演化,结合水力压裂过程中裂缝扩展演化特征、声发射次数与声发射能量特征,水力压裂过程大致经历了 5 个阶段。

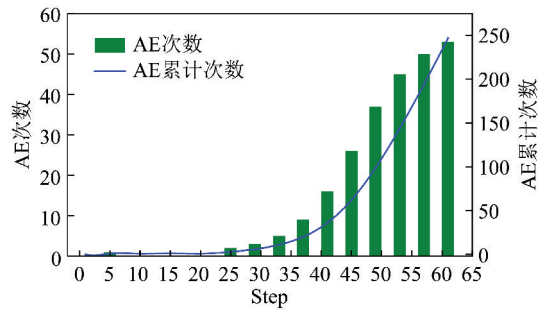


图 5 声发射次数

Fig. 5 AE Counts with Load Step

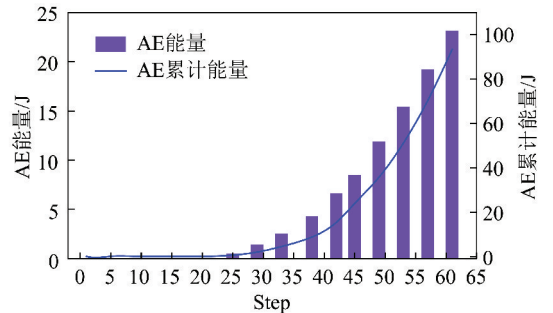


图 6 声发射能量

Fig. 6 AE energy with load step

(1) 能量缓慢增长(孕育)阶段

在该阶段压裂水主要以渗流的方式渗透到煤体原始孔隙裂隙中,随着水压的增加,压裂水逐渐向煤体的微裂隙中渗透。在该阶段高压水基本未对煤体造成损伤,声发射发生的次数较少,声发射能量也较小。

(2) 微裂隙萌生阶段

压裂孔周围煤体的应力随着水压的增加逐渐增大,并萌生了许多零星分布的微裂隙,压裂孔左右两侧微裂隙的密度与上下两侧相比较,声发射次数和能量在该阶段呈现增长趋势。

(3) 局部损伤破坏阶段

随着水压的持续增加,压裂孔周围煤体内微裂隙的密度逐渐增大并不断发育,最终由微裂隙的量变引起了质变,在压裂孔左右两侧产生了两条水平方向的主裂缝并不断扩展,形成了局部损伤破坏。声发射次数和能量在该阶段均有大幅度的增加。

(4) 裂缝迅速扩展阶段

当压裂水积聚的能量逐渐增大,对裂隙产生的支撑力足以克服裂隙失稳扩展的临界压力时,裂隙加速扩展、发育,使压裂孔两侧的主裂缝迅速扩展延伸,形成部分裂隙与主裂缝沟通的裂缝网络。裂隙的加速发育与主裂缝的迅速扩展增大了煤体内裂隙的自由空间,使压裂水的水压降低。

(5) 裂缝网络循环扩展演化阶段

当压裂水的水压因裂隙空间的增大而降低后,水压会在压裂泵的作用下得到补给,再次积聚能量增压,当压裂水对裂隙形成的支撑力再次满足裂隙失稳扩展的临界压力时,裂隙再次萌生发育,主裂缝再次扩展延伸,裂缝网络再次扩展演化,压裂水的水压因裂隙自由空间的再次增大而降低,随后进入压裂水的水压再次积聚能量、裂缝网络再次扩展演化的递进循环过程。

数值模拟表明,水力压裂产生的裂缝以压裂孔为中心呈水平方向非对称性发育与扩展趋势,图4(b),(c)所示的压裂孔左侧的裂隙发育程度和主裂缝延伸长度大于右侧,裂隙发育程度与主裂缝延伸长度的非对称性主要是由于煤体的非均质性和孔隙裂隙分布的非均匀性所致。

煤体是一种富含原生孔隙裂隙的多孔介质,具有天然的裂隙弱面。对煤体进行水力压裂的过程中,高压水渗透到煤体的孔隙裂隙内,对裂隙弱面产生一种支撑力,当支撑力大于裂隙弱面的破裂压力时,弱面发生起裂、扩展并逐渐延伸,在高压水的持续作用下,引起次级及下一级弱面继续起裂、扩展和延伸,产生一种高压水驱动裂隙弱面不断扩展、延伸的连锁效应,从而对煤体内部形成区域分割,改变了煤体的力学性质与受力状态,在煤体内形成了相互贯通的裂缝-裂隙网络体系,增加了瓦斯运移的通道,增大了煤体的透气性。

图7为水力压裂过程中压裂孔周围煤体渗透系数变化曲线。

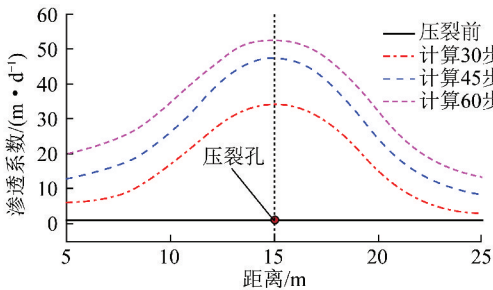


图7 渗透系数曲线

Fig. 7 Curves of permeability coefficient

由图7可知,压裂前煤体的渗透系数较小,随着计算步数的增加,压裂孔周围煤体的渗透系数逐渐增大,距离压裂孔越近渗透系数越大,这反映出压裂孔周围煤体内裂隙得到了不同程度的发育、裂缝网络得到了不同程度的扩展演化。水力压裂显著增加了煤体的透气性,压裂孔左侧煤体的渗透系数大于右侧,渗透系数呈非对称性,这是由于压裂孔左右两侧煤体发育程度与裂缝网络扩展程度不同所致,左侧煤体发

育程度与裂缝扩展程度大于右侧。

### 3 W-S-W 水力压裂增透工程试验

#### 3.1 工程地质条件

潘一矿东井位于潘一井田东部,地面标高+23 m,一水平标高-848 m,二水平标高-1 042 m,为淮南矿区的千米深井之一,矿井煤层具有埋深大、高瓦斯、地压大、地温高的特点。11-2煤平均厚度2.7 m,平均倾角5°,煤层原始瓦斯压力为2 MPa,瓦斯含量为9 m<sup>3</sup>/t,原始含水率2%。试验区域标高-985 m,煤层顶底板均为泥岩和粉细砂岩。

#### 3.2 水力压裂过程及分析

水力压裂试验地点在1232(1)工作面的底抽巷内进行,在底抽巷的钻场内施工水力压裂孔,钻孔不穿透11-2煤层,距顶板0.8 m时即可起钻,压裂孔孔径为94 mm。

为提高千米深井煤体水力压裂增透效果,采用“水-砂-水”的工艺进行水力压裂作业,即

第1阶段常规水力压裂:开启单泵进行压裂作业,水压在23~25 MPa波动,压裂时间288 min,压入水量56 t。水力压裂结束后,钻场内有一处锚杆少量渗水,巷道内无其他地点渗水。

第2阶段含支撑剂(石英砂)水力压裂:水压在25~27 MPa波动,压裂时间91 min,压入水量18 t。在该压裂阶段,在压裂液中添加一定比例的支撑剂进行压裂,支撑剂的作用在于充填水力压裂过程中形成的水力裂缝以及与水力裂缝沟通的原生裂缝,使张开的裂缝不因水力压裂结束后应力的释放而闭合,从而使煤体保持较高的透气性。水力压裂结束后,距压裂点以东30 m处的钻场有少量掉渣,距压裂点以西30 m处的钻场有一处锚杆少量渗水,距压裂点以西20 m处巷道顶板出现掉浆皮现象。

第3阶段常规水力压裂:水压在28~31.4 MPa波动,压裂时间259 min,压入水量50 t。水力压裂结束后,压裂孔周边巷道顶板有漏水现象,距压裂点以东23 m处巷道帮部出现掉浆皮现象,距压裂点以东、西50~60 m范围内巷道局部围岩出现水荫现象。

#### 3.3 水力压裂增透效果考察

为考察水力压裂增透效果,以压裂孔为中心,在巷道轴向60 m和径向50 m范围内对煤层进行取样分析,分别测定煤样的含水率、瓦斯含量等特性。为了与水力压裂区域形成对比,在压裂地点东侧200 m外的未压裂区域施工取样钻孔,测定原始煤层的含水率、瓦斯含量。同时,在距压裂地点西侧200 m处开

展常规水力压裂试验,与W-S-W水力压裂增透效果进行对比分析。

由于单个钻孔的抽采量较小,测定精度也难以保证,因此,以100个抽采孔作为一个抽采评价单元,将评价单元内的抽采孔合并为一组接入抽采系统,并安装流量计测定百孔抽采量,与原始煤层抽采评价单元形成对比,考察水力压裂抽采效果。

### (1) 水力压裂后煤体含水率分布特征

图8为水力压裂后压裂孔周围煤层含水率的分布特征,由图可知,压裂孔周围煤体的含水率较大,最大含水率为8.9%,随着至压裂孔距离的增加,含水率逐渐减小。与压裂孔相同距离条件下,1232(1)工作面运输平巷轴向方向煤体的含水率大于径向方向。含水率在巷道轴向与径向方向的差异是由于煤体内原生裂隙赋存的非均匀性、水力压裂裂缝扩展演化的差异性及水在裂缝中不规则流动造成的。图8所示的以压裂孔为中心45 m范围内煤体的含水率均大于4.2%,为煤体原始含水率2%的2.1倍。

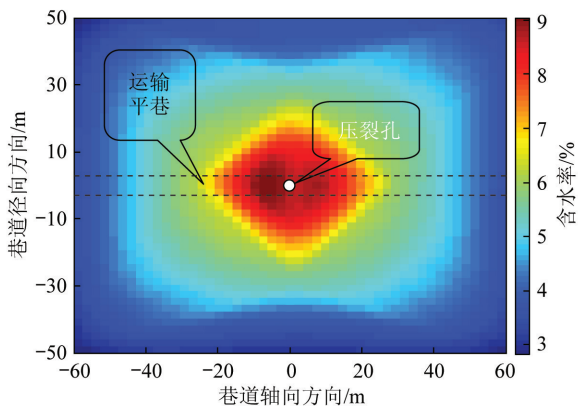


图8 含水率分布

Fig. 8 Moisture distribution

### (2) 水力压裂后煤层瓦斯含量分布特征

图9为水力压裂后压裂孔周围煤层瓦斯含量的分布特征,由图可知,压裂孔周围煤层的瓦斯含量较小,随着至压裂孔距离的增加,瓦斯含量呈现逐渐增大的趋势,煤层瓦斯含量与含水率呈现相反分布特征。与压裂孔相同距离条件下,1232(1)工作面运输平巷轴向方向煤层的瓦斯含量大于径向方向,在巷道轴向方向上,压裂孔东侧煤层的瓦斯含量大于西侧。煤层瓦斯含量在巷道轴向与径向方向分布的差异是由于裂缝扩展的差异性与水在裂缝中非均衡流动导致的。与未压裂区域煤层原始瓦斯含量相比,水力压裂影响范围内煤层瓦斯含量呈现降低现象,尤其是压裂孔附近,即水力压裂影响较大的区域,煤层瓦斯含量明显减小,这是由于水力压裂过程中水驱气效应所致。

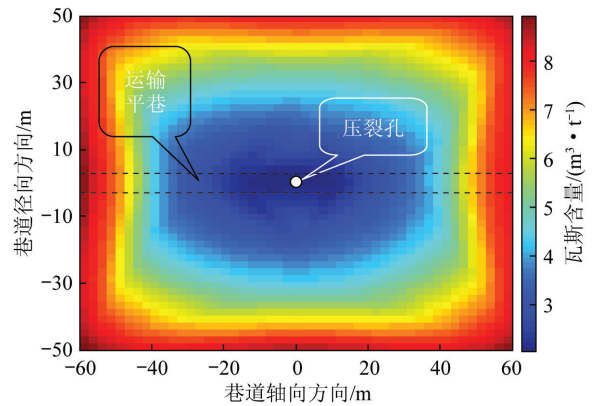


图9 瓦斯含量分布

Fig. 9 Gas content distribution

### (3) 抽采效果考察

W-S-W水力压裂区域抽采60 d时抽采评价单元的百孔抽采量、瓦斯体积分数与常规水力压裂及未压裂区域的对比情况如图10,11所示。

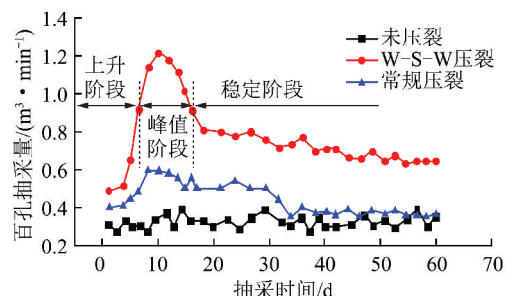


图10 抽采量曲线

Fig. 10 Curves of extraction volume

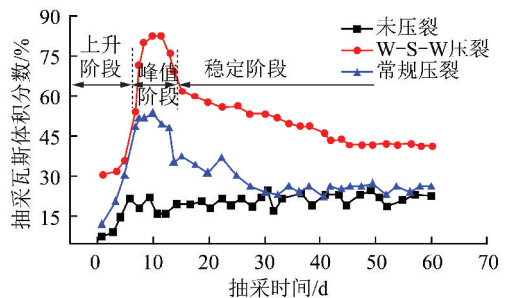


图11 瓦斯体积分数曲线

Fig. 11 Curves of gas volume fraction

由图11可知,W-S-W水力压裂与常规水力压裂区域抽采评价单元的百孔抽采量与瓦斯体积分数均经历了3个阶段,即上升阶段、峰值阶段和稳定阶段。与常规水力压裂、未压裂区域抽采评价单元相比,W-S-W水力压裂区域抽采评价单元的百孔抽采量与瓦斯体积分数具有明显的峰值阶段。1232(1)工作面运输平巷多个抽采评价单元抽采结果表明,上升阶段一般为3~7 d,峰值阶段一般为3~8 d,稳定阶段可持续45 d以上,时效性明显。W-S-W水力压裂区域煤层的百孔抽采量最高达 $1.2 \text{ m}^3/\text{min}$ ,平均



百孔抽采量和瓦斯体积分数分别为  $0.77 \text{ m}^3/\text{min}$ ,  $52\%$ , 与常规水力压裂区域煤层的平均百孔抽采量  $0.44 \text{ m}^3/\text{min}$  和瓦斯体积分数  $31\%$  相比分别提高了  $0.75$  倍、 $0.68$  倍, 与未压裂区域煤层的平均百孔抽采量  $0.32 \text{ m}^3/\text{min}$  和瓦斯体积分数  $24\%$  相比分别提高了  $1.4$  倍、 $1.2$  倍。在稳定阶段, W-S-W 水力压裂区域煤层的百孔抽采量和瓦斯抽采体积分数也达到了未压裂区域的 2 倍以上。

## 4 结 论

(1) 煤体的非均质性和孔隙裂隙分布的非均匀性导致了煤体非对称性增透, 在水力压裂的作用下裂缝的扩展演化是递进循环式的, 依次经历了能量缓慢增长、微裂隙萌生、局部损伤破坏、裂缝迅速扩展、裂缝网络循环扩展演化 5 个阶段。

(2) 提出了“水-砂-水”水力压裂强化增透技术, 高压水对煤体内部结构产生切割, 形成一种高压水驱动裂隙弱面不断扩展、延伸的连锁效应, 并使支撑剂(砂)楔入到裂缝端部, 抑制了裂缝的闭合, 增加了煤体的透气性。

(3) 水力压裂后, 压裂孔周围煤体的含水率较大, 瓦斯含量则较小, 随着至压裂孔距离的增加, 煤体含水率逐渐减小, 瓦斯含量呈现逐渐增大的趋势, 煤层瓦斯含量与含水率呈现相反分布特征。

(4) 采用“水-砂-水”工艺开展了千米深井高瓦斯煤层强化增透试验, 取得了较好的增透效果。水力压裂强化增透区域煤层的百孔抽采量最高达  $1.2 \text{ m}^3/\text{min}$ , 平均百孔抽采量与瓦斯体积分数分别为  $0.77 \text{ m}^3/\text{min}$ ,  $52\%$ , 与常规水力压裂区域的平均百孔抽采量  $0.44 \text{ m}^3/\text{min}$  和瓦斯体积分数  $31\%$  相比分别提高了  $0.75$  倍、 $0.68$  倍, 与未压裂区域的平均百孔抽采量  $0.32 \text{ m}^3/\text{min}$  和瓦斯体积分数  $24\%$  相比分别提高了  $1.4$  倍、 $1.2$  倍, 水力压裂强化增透区域煤层的百孔抽采量与瓦斯体积分数均具有明显的峰值阶段, 稳定抽采阶段可持续 45 d 以上, 瓦斯抽采时效性明显。

## 参考文献 (References):

[1] 埃克诺米德斯 M J, 诺尔蒂 K G. 油藏增产措施 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.

[2] Rahim Z, Holditch S A. Using a three-dimensional concept in a two dimensional model to predict accurate hydraulic fracture dimensions [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1995(13): 15-27.

[3] 林柏泉, 李子文, 翟成, 等. 高压脉动水力压裂卸压增透技术与应用 [J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 452-455.

Lin Baiquan, Li Ziwen, Zhai Cheng, et al. Pressure relief and permeability-increasing technology based on high pressure pulsating hydraulic fracturing and its application [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 452-455.

[4] 富向. 井下点式水力压裂增透技术研究 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1317-1321.

Fu Xiang. Study of under ground point hydraulic fracture increased permeability technology [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1317-1321.

[5] 黄炳香, 程庆迎, 刘长友, 等. 煤岩体水力致裂理论及其工艺技术框架 [J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 167-173.

Huang Bingxiang, Cheng Qingying, Liu Changyou, et al. Hydraulic fracturing theory of coal-rock mass and its technology framework [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 167-173.

[6] 周红星, 程远平. 突出煤层穿层钻孔孔群增透技术及应用 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(9): 1515-1518.

Zhou Hongxing, Cheng Yuanping. Permeability improvement technology of array crossing boreholes and its application in outburst coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(9): 1515-1518.

[7] 康红普, 冯彦军. 定向水力压裂工作面煤体应力监测及其演化规律 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 1953-1959.

Kang Hongpu, Feng Yanjun. Monitoring of stress change in coal seam caused by directional hydraulic fracturing in working face with strong roof and its evolution [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 1953-1959.

[8] 林柏泉, 孟杰, 宁俊, 等. 含瓦斯煤体水力压裂动态变化特征研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(1): 106-110.

Lin Baiquan, Meng Jie, Ning Jun, et al. Research on dynamic characteristics of hydraulic fracturing in coal body containing gas [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(1): 106-110.

[9] 姜福兴, 王博, 翟明华, 等. 煤层超高压定点水力压裂防冲试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 526-531.

Jiang Fuxing, Wang Bo, Zhai Minghua, et al. Field tests on fixed-point hydraulic fracture with extra-high pressure in coal seam for rock burst prevention [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 526-531.

[10] 翟成, 李贤忠, 李全贵. 煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 1996-2001.

Zhai Cheng, Li Xianzhong, Li Quanguai. Research and application of coal seam pulse hydraulic fracturing technology [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 1996-2001.

[11] 郭印同, 杨春和, 贾长贵, 等. 页岩水力压裂物理模拟与裂缝表征方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 52-59.

Guo Yintong, Yang Chunhe, Jia Changui, et al. Research on hydraulic fracturing physical simulation of shale and fracture characterization methods [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 52-59.

[12] 李芷, 贾长贵, 杨春和, 等. 页岩水力压裂水力裂缝与层理面扩展规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 12-20.

Li Zhi, Jia Changui, Yang Chunhe, et al. Propagation of hydraulic fissures and bedding planes in hydraulic fracturing of shale [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 12-20.

- [13] 王磊,杨春和,郭印同,等. 基于室内水力压裂试验的水平井起裂模式研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(S2):3624-3632.  
Wang Lei, Yang Chunhe, Guo Yintong, et al. Investigation on fracture initiation modes of horizontal wells based on laboratory hydraulic fracturing test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2):3624-3632.
- [14] 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.
- [15] Tang Shoufeng, Tong Minming, Hu Junli, et al. Characteristics of acoustic emission signals in damp cracking coal rocks [J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(1):143-147.