

# 高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透技术

秦江涛<sup>1</sup>, 陈玉涛<sup>2</sup>, 黄文祥<sup>1</sup>

(1. 重庆工程职业技术学院, 重庆 402260; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039)

**摘要:**针对白皎煤矿地质构造复杂、构造应力大、煤层透气性差、抽采瓦斯效果差的问题,提出了高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透技术,分析了水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透技术的原理;并在238底板巷对B<sub>4</sub>煤层进行了联合增透对比试验研究。试验结果表明:试验区域煤层透气性显著提高,单孔初抽瓦斯体积分数分别是高压水力压裂试验区域和普通抽采试验区域平均瓦斯体积分数的1.70、3.48倍;瓦斯抽采纯量较水力压裂区域和普通抽采区域分别提高了1.49、3.04倍;抽采65 d以后,高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透区域汇总瓦斯体积分数仍保持在40%以上,抽采效果良好,该技术可供类似矿井借鉴。

**关键词:**高压水力压裂;二氧化碳相变致裂;低透气性煤层;瓦斯抽采

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2017)07-0080-05

## Combined permeability improved technology with high pressure hydraulic fracturing and carbon dioxide phase change cracking

Qin Jiangtao<sup>1</sup>, Chen Yutao<sup>2</sup>, Huang Wenxiang<sup>1</sup>

(1. Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, China;

2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China)

**Abstract:** According to the problems of complicated geological tectonics, high tectonic stress, poor seam permeability and poor gas drainage effect in Baijiao Mine, a permeability improved technology combined with a high pressure hydraulic fracturing and carbon dioxide phase change cracking was provided and the principle of the hydraulic fracturing and carbon dioxide combined permeability improved technology was analyzed. A comparison experiment study was conducted on the combined permeability improvement of No. B<sub>4</sub> Seam in No. 238 floor gateway. The experiment results showed that the permeability of the seam in the technical experiment area was remarkably improved and the initial drained gas volume fraction of a single borehole was 1.70 times and 3.48 times higher than the average volume fractions of the high pressure hydraulic fracturing area and the conventional gas drainage trial area individually. The gas drainage pure volume was improved by 1.49 and 3.04 times higher than the hydraulic fracturing area and the conventional gas drainage area individually. After 65 days of the gas drainage operation, the total gas volume fraction of the high pressure hydraulic fracturing and carbon dioxide phase change cracking combined permeability area could keep over 40%, the gas drainage effect was excellent and the technology could provide references to the similar mines.

**Key words:** high pressure hydraulic fracturing; carbon dioxide phase change cracking; low permeability seam; gas drainage

## 0 引言

随着煤矿采深的逐渐增加,煤层原始瓦斯压力、

瓦斯含量都有显著的增加,特别是地质构造复杂、高构造应力和低透气性突出煤层瓦斯灾害治理难度越来越大;尤其是西南地区,瓦斯灾害的治理难度更加

收稿日期:2017-03-05;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.07.015

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51204217);重庆市科学技术研究资助项目(KJ1732437)

作者简介:秦江涛(1982—),男,陕西榆林人,讲师,工程师,硕士。Tel:13658379663, E-mail:441308841@qq.com

引用格式: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.

突出,严重影响矿井生产采掘部署,必须采用联合强化增透措施增加煤层的透气性,提高煤层瓦斯抽采效果,解决瓦斯治理难度大的难题。目前局部煤层瓦斯增透措施主要有深孔预裂爆破、水力冲孔和水力割缝等方法<sup>[1-6]</sup>,消除局部突出煤层的危险性<sup>[7-8]</sup>,但是以上方法都存在一定的不足:①水力冲孔容易形成局部瓦斯超限,工序复杂,特别是下斜钻孔对煤层增透效果较差,卸压面积比较小;②水力割缝操作工序复杂、影响范围较小,卸压面积较小、工作效率低、不适宜大面积增透煤层瓦斯;③深孔预裂爆破长钻孔装药和封孔工艺存在的问题仍然未解决,并且炸药受到严格的管制,审批、购买、运输程序复杂,给生产带来严重的不便;④二氧化碳相变致裂增透技术具有操作简单、安全性高、工作可靠、爆破能量易控制、相变致裂装置能够反复使用的特点,但是二氧化碳相变致裂面积较小;高压水力压裂卸压范围较大,方向不易控制,在地质构造复杂、高构造应力带易形成压裂盲区和高应力集中区。因此,高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透技术能够增加煤层透气性,提高煤层瓦斯抽采效果。

基于高压水力压裂和二氧化碳相变致裂在煤层瓦斯治理的作用,针对白皎煤矿地质构造复杂、构造应力大、煤层透气性差、瓦斯抽采效果差的问题,提出高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透技术的方法进行试验研究,并与高压水力压裂和普通抽采效果进行比较分析。

## 1 高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透原理

煤体水力压裂增透技术是以高压水作为煤体压裂介质,促使原始煤体产生一系列的裂隙、空隙(孔洞)增加煤层透气性。高压水力压裂增透就是通过钻孔向煤体里注入高压压裂水,高压压裂水进入煤体裂缝以后,促使弱面原有的裂缝继续起裂、扩展和延伸<sup>[9-10]</sup>;而液态二氧化碳相变致裂,通过化学加热能够使液态二氧化碳压力急剧增加 130~270 MPa,高压液态二氧化碳冲破定压剪切片迅速转化为气态,体积膨胀 600 多倍,瞬间释放的气体膨胀能使钻孔周边煤体裂隙和空隙充分的发育,形成互相交叉贯通的立体裂隙网络,有效解决水力压裂后存在局部应力集中和卸压盲区问题<sup>[11-14]</sup>,区域整体形成卸压,提高区域煤层的透气性。

## 2 高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透试验

### 2.1 试验地点概况

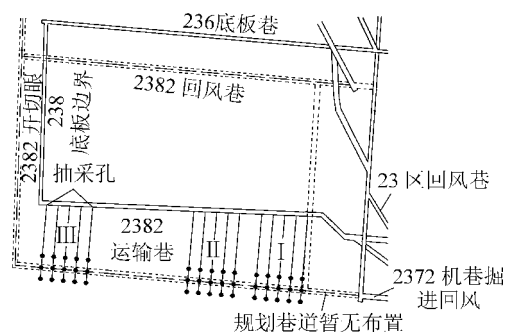
本次试验地点为白皎煤矿 23 采区的 238 底板巷专用瓦斯抽采巷,预抽 2382 运输巷条带区域 B<sub>4</sub> 煤层, B<sub>4</sub> 煤层产状 275°∠10°,厚度变化范围 0.5~5.4 m,平均厚度为 2.5 m,普氏系数  $f=2\sim4$ ;该区域 B<sub>4</sub> 煤层层位稳定,结构单一,全区可采,基本顶岩性为泥质灰岩、细砂岩、炭质泥岩,厚度为 5.93 m,直接顶为深灰色生物碎屑灰岩、砂质泥岩,平均厚 0.21 m,底板为细粒砂岩、黏土岩,厚度为 3.52 m。

根据矿方提供的实测 B<sub>4</sub> 煤层瓦斯参数,原始瓦斯压力为 2.96 MPa,瓦斯含量 18.41 m<sup>3</sup>/t,透气性系数  $\lambda=0.024\text{ m}^2/(\text{MPa}^2\cdot\text{d})$ ,为低透气性突出煤层。

### 2.2 试验区域钻孔布置及施工

#### 2.2.1 试验钻孔位置及压裂钻孔参数设计

设计了 3 种试验方案,方案 I 是高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透方案,方案 II 是高压水力压裂增透方案,方案 III 是普通抽采方案;每种方案布置 15 个钻孔,每组布置 3 个钻孔,即每种方案 5 组钻孔,组间距为 16 m。钻孔布置如图 1 所示。靠近 23 区总回风巷 5 组为高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透试验区域,第 3 组 2 号为高压水力压裂增透孔,其余全部为二氧化碳相变致裂增透孔;距离高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透试验区域第 1 组钻孔 32~96 m 的 5 组钻孔为高压水力压裂增透试验区域,第 3 组 2 号为高压水力压裂增透孔;靠近 238 底板边界 5 组钻孔为普通抽采试验区域;其中试验区域高压水力压裂增透钻孔的设计参数见表 1。



1—高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透孔;  
II—高压水力压裂增透孔; III—普通抽采孔

图 1 238 底板巷抽采钻孔布置

Fig. 1 Drilling boreholes layout in No.238 bottom roadway

表1  试验区域高压水力压裂钻孔参数

Table 1  High pressure hydraulic fracturing drilling parameters in test area

试验 方案	压裂 孔号	方位角/ (°)	倾角/ (°)	L/m	孔深/ m
Ⅱ类	第3组2号	180	22	4.7	59
Ⅰ类	第3组2号	180	24	4.3	63

注:L为钻孔穿过煤层倾斜长度。

2.2.2  试验钻孔施工情况

试验区域的钻孔孔径为94 mm,终孔穿过B<sub>4</sub>煤层底板,采用风力排渣。采用普通水泥砂浆封孔,封孔长度不小于8 m,抽采负压不小于13 kPa,严格做好试验区域钻孔施工过程记录。

高压水力压裂钻孔施工完毕以后,将φ50 mm无缝压裂钢管和DN20 mmPVC返浆管埋入高压水力压裂的钻孔;压裂管埋置穿过B<sub>4</sub>煤层顶板,高压裂管的前端布置2 m长的塞管,返浆管埋至煤层底板,孔口埋入长度为2 m的DN20 mmPVC注浆管;孔口段采用A、B胶封堵,采用标号425号水泥与白水泥3∶1的混合物封堵高压水力压裂钻孔中段,封至煤层底板处。

2.2.3  试验区域现场情况

1)高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透试验区域,采用CBYL400压裂泵进行压裂,经过5 min后,注水压力在由0逐步升至25.4 MPa,稳定压力区域为21.5~25.4 MPa,流量44~48 m<sup>3</sup>/h,经过4.2 h后,压裂泵的压力急剧下降为10.5 MPa,发现距离高压水力压裂和二氧化碳相变致裂试验区域第3组2号孔靠近23总回风巷一侧55 m处顶板大量的裂隙水,停止压裂,共计压入水量185 t;15 d后,对方案Ⅰ区域钻孔进行二氧化碳相变致裂,然后进行埋管、封孔,最后进行接抽。

2)高压水力压裂增透试验区域。压裂泵与高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透试验相同,经过5 min后,注水压力0逐步升至24.4 MPa;压力稳定区域为20.3~24.4 MPa,流量46~49 m<sup>3</sup>/h,经过3.6 h后,压裂泵的压力急剧下降为8.3 MPa,停止压裂,发现238底板巷离压裂孔靠近2382开切眼一侧45 m顶板有大量淋水现象,共计注入水量180 t;15 d以后,按方案Ⅱ设计钻孔进行打孔、封孔和接抽。

3)普通抽采试验区域,按照方案Ⅲ设计的钻孔

进行打孔、封孔和接抽。

2.3  试验监测方法

现场施工完毕以后,对试验区域的全部抽采钻孔和增透钻孔进行数据检测,对3种方案试验区域瓦斯抽采汇总管路安装V锥流量计,采用V锥流量计测定3种试验区域汇总瓦斯体积分数、抽采负压以及抽采混合量;采用高浓度瓦斯检测仪测定3种方案试验区域瓦斯初抽单孔体积分数。

3  试验效果分析

3.1  瓦斯抽采体积分数比较分析

3.1.1  钻孔初抽瓦斯体积分数比较分析

3种方案试验区域的钻孔初抽瓦斯体积分数,如图2所示。

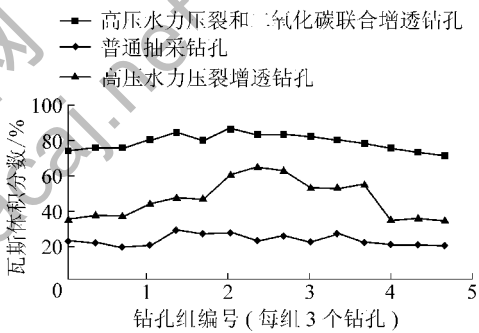


图2  3种方案试验区域的钻孔初抽瓦斯体积分数

Fig. 2  Gas beginning drainage volume fraction in test area under three drainage technologies

由此可知,高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透试验区域钻孔初抽瓦斯体积分数70%~90%,第1组(1、2、3号)和第5组(1、2、3号)6个钻孔单孔瓦斯抽采体积分数都小于80%,因为该抽采区域受水力压裂影响相对较小,主要受到二氧化碳相变致裂增透的影响,整个试验区域抽采效果较好。因高压水力压裂增加了试验区域煤层的透气性,而二氧化碳相变致裂促使周边煤体裂隙和空隙充分发育,形成互交叉贯通的立体裂隙网络,有效解决了高压水力压裂存在局部应力集中和卸压盲区问题;高压水力压裂增透试验区域钻孔初抽瓦斯体积分数30%~70%,第1组(1、2、3号)和第5组(1、2、3号)单孔初抽瓦斯体积分数小于40%,该区域的钻孔距离压裂孔中心的距离较远,在压裂过程中,高压压裂水沿原始煤岩体裂隙、孔隙的方向



流动,随着距离高压压裂钻孔的距离逐渐增大,受到高压压力水的影响程度减小,原始煤体的裂隙、孔隙达不到充分的延伸,相互之间不能够形成交织贯通的网络;普通抽采试验区域钻孔初抽瓦斯体积分数在 20%~30%,说明高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透能够促使煤体原始裂隙、孔隙充分发育,形成相互交叉贯通网络,提高区域煤体整体的透气性。

3.1.2 抽采钻孔汇总瓦斯体积分数比较

通过测定 3 种方案试验区域抽采钻孔汇总瓦斯体积分数的变化趋势,反映试验区域瓦斯抽采的效果,每隔 5 d 对 3 种方案试验区域的抽采钻孔瓦斯参数进行测定,结果如图 3 所示。

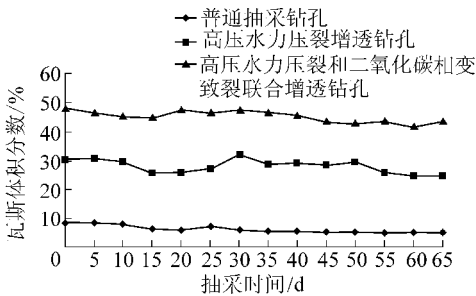


图 3 3 种方案的试验区域瓦斯体积分数的衰减曲线  
Fig. 3 Gas concentration decay curves in test area under three drainage technologies

由图 3 可知,238 底板巷抽采 65 d,高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透试验区域 5 组钻孔汇总瓦斯体积分数几乎无衰减,汇总瓦斯体积分数仍然保持在 40%以上;高压水力压裂试验区域 5 组钻孔汇总瓦斯体积分数 6.1%,瓦斯体积分数衰减幅度较大,普通抽采试验区域汇总瓦斯体积分数衰减了 3.7%,瓦斯体积分数衰减幅度最大,说明高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透能够保持长效抽采。

3.2 抽采瓦斯纯量比较分析

3 种方案试验区域累积抽采瓦斯纯量如图 4 所示。试验抽采 65 d,高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透试验区域抽采瓦斯纯量为 14 382 m<sup>3</sup>,分别是高压水力压裂试验区域和普通抽采试验区域的 1.49 倍和 3.04 倍;累计抽采瓦斯纯量几乎呈直线变化,说明高压水力压裂和二氧化碳相变致裂试验区域抽采瓦斯纯量随抽采时间衰减较小。

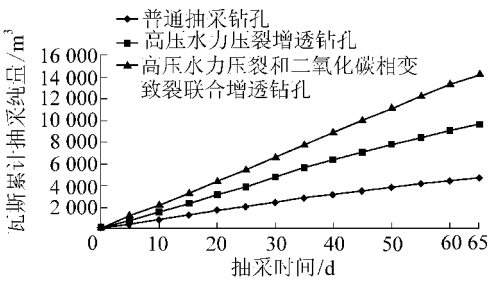


图 4 3 种方案试验区域累积瓦斯抽采瓦斯纯量  
Fig. 4 Gas accumulation drainage curves in test area under three drainage technologies

4 结 论

1) 高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透试验区域初次抽采瓦斯体积分数为 70%~90%,分别比高压水力压裂试验区域和普通抽采试验区域提高了 21.2%~37%和 51.4%~57.6%;分别是高压水力压裂试验区域和普通抽采试验区域平均瓦斯体积分数的 1.70 倍和 3.48 倍;抽采 65 d 以后,高压水力压裂和二氧化碳相变致裂试验区域钻孔汇总瓦斯体积分数仍保持在 40%以上,高压水力压裂试验区域和普通抽采试验区域则分别衰减了 6.1%和 3.7%,汇总瓦斯体积分数衰变显著。表明高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透技术能够增加煤层的透气性,瓦斯抽采效果良好。

2) 高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透试验区域瓦斯的累积抽采纯量随抽采时间增加几乎呈直线变化,钻孔瓦斯抽采体积分数衰减较小,抽采 65 d,瓦斯累积纯量达到 14 382 m<sup>3</sup>,分别是高压水力压裂试验区域和普通抽采试验区域的 1.49 倍和 3.04 倍。表明高压水力压裂和二氧化碳相变致裂联合增透技术能够保持长久高效抽采。

3) 高压水力压裂能够促使压裂区域原始裂隙和孔隙发育,而二氧化碳相变致裂能使原始裂隙和孔隙更加充分发育,最后形成互相交叉贯通的立体网络,提高了煤层透气系数,抽采效果良好,可供类似矿井借鉴。

参考文献 (References) :

[1] 秦江涛,杨 春,庞 成,等.A-B 胶封孔工艺在煤矿顺层抽采钻孔中的应用性试验[J].矿业安全与环保,2013,40(6):77-78.  
Qin Jiangtao, Yang Chun, Pang Cheng, et al. Application test of A-B glue hole-sealing technology in gas drainage holes along seam in Coal Mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2013,

- 40(6):77-78.
- [2] 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.
- [3] 李全贵,翟 成,林柏泉,等.低透气性煤层水力压裂增透技术应用[J].煤炭工程,2012(1):31-33.  
Li Quanguai, Zhai Cheng, Lin Baiquan, *et al.* Application of hydraulic fracturing and permeability improvement technology to low permeability seam [J]. Coal Engineering, 2012(1): 31-33.
- [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] 董钢锋,林府进.高压水射流扩孔提高穿层钻孔预抽效果的试验[J].矿业安全与环保,2001,28(3):17-18.  
Dong Gangfeng, Lin Fujin. The experiment on pressure water jetreamer to improve the effect of wear layer borehole [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2001, 28(3): 17-18.
- [6] 卢义玉,葛兆龙,李晓红,等.脉冲射流割缝技术在石门揭煤中的应用研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(1):55-59.  
Lu Yiyu, Ge Zhaolong, Li Xiaohong, *et al.* Investigation of a self-excited pulsed water jet for rock cross-cutting to uncover coal [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 55-59.
- [7] 闫发志,林柏泉,沈春明,等.基于煤层卸压增透的水力割缝最优出煤量研究[J].中国煤炭,2013,39(4):95-97.  
Yan Fazhi, Lin Baiquan, Shen Chunming, *et al.* Study on the application of seam pressure relief through hydraulic slotting to optimize coal production [J]. China Coal, 2013, 39(4): 95-97.
- [8] 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.
- [9] 李晓红,卢义玉,赵 瑜,等.高压脉冲水射流提高松软煤层透气性的研究[J].煤炭学报,2008,33(12):1386-1390.  
Li Xiaohong, Lu Yiyu, Zhao Yu, *et al.* Study on improving the permeability of soft coal seam with high pressure pulsed water jet [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1386-1390.
- [10] 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.  
Chen Xuexi, Xu Yong, Jin Wenguang, *et al.* Permeability improvement technology of directional hydraulic fracturing in low permeability coal seam [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2016, 35(2): 124-128.
- [11] 王海东.突出煤层掘进工作面 CO<sub>2</sub> 可控相变致裂防突技术[J].煤炭科学技术,2016,44(3):70-74.  
Wang Haidong. CO<sub>2</sub> controllable phase transition fracturing and outburst prevention technology of gateway driving face in outburst seam [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 70-74.
- [12] 董庆祥,王兆丰,韩亚北,等.液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂的 TNT 当量研究[J].中国安全科学学报,2014(11):84-88.  
Dong Qingxiang, Wang Zhaofeng, Han Yabei, *et al.* Research on TNT equivalent of liquid CO<sub>2</sub> phase-transforming fracture [J]. Chinese Journal of Safety Science, 2014(11): 84-88.
- [13] 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.
- [14] 姜二龙,刘 健,蔡文鹏,等.深孔预裂爆破技术在低透气性回采工作面中的试验研究[J].中国安全生产科学技术,2013,9(7):20-24.  
Jiang Erlong, Liu Jian, Cai Wenpeng, *et al.* Experiment study on deep hole pre-splitting blasting technology in low permeability outburst working face [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(7): 20-24.