低渗煤层 CO_2 预裂增透高效瓦斯抽采原理及应用

孙 文 忠
(山西高河能源有限公司,山西 长治 046100)

摘 要: 为了解决低渗透煤层抽采效率低、抽采时间长等难题,提出利用 CO_2 高能气体预裂增透技术改造低渗透煤层,增大煤层透气性,提高瓦斯抽采量和抽采效率;通过分析低渗煤层高能气体预裂增透技术的卸压增透机理,制定了回采工作面和掘进工作面的高能气体预裂增透瓦斯抽采技术方案,并进行了现场试验和效果分析。结果表明:高能气体预裂能够在煤层形成裂隙卸压圈或裂隙卸压区,使圈(区)内煤层透气性和瓦斯解吸速度增高,掘进工作面预裂增透后的平均瓦斯抽采浓度、平均抽采纯流量和平均百米钻孔抽采纯流量分别增加了 1.5、4.7、17.8 倍;回采工作面预裂增透后,平均瓦斯抽采浓度、平均抽采纯流量和平均百米钻孔抽采纯流量分别增加了 0.8、1.0、1.5 倍。

关键词: 低渗透煤层;高能 CO_2 预裂;卸压增透;瓦斯抽采
中图分类号: TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2017)01-0100-06

High efficient gas drainage principle and application of low permeable seam with CO_2 pre-fracturing and permeability improvement

Sun Wenzhong
(*Shanxi Gaohe Energy Company Limited*, *Changzhi* 046100, *China*)

Abstract: In order to solve the low gas drainage efficiency, long gas drainage time and other problems of the low permeable seam, the CO_2 high energy pre-fracturing and permeability improved technology was applied to reconstruct the low permeable seam, to improve the seam gas permeability and to improve the gas drainage volume and gas drainage efficiency. With the analysis on the pressure releasing and permeability improved mechanism of the high energy gas pre-fracturing and permeability improved technology for the low permeable seam, a gas drainage technology plan with the high energy gas pre-fracturing and permeability improvement was set up for the coal mining face and the excavated face. The site experiment and effect of the technology were analyzed. The results showed that the high energy gas pre-fracturing could form a crack and pressure released ring or the crack and pressure released zone in the seam and thus the seam permeability and gas desorption speed within the ring (zone) was improved. After the pre-fracturing and permeability improved of the gateway driving face, the average gas drainage concentration, average gas drainage pure flow and average gas drainage pure flow per 100 m borehole were individually increased by 1.5 times, 4.7 times and 17.8 times. After the pre-fracturing and permeability improved of the coal mining face, the average gas drainage concentration, the average gas drainage pure flow and the average gas drainage pure flow per 100 m borehole were increased by 0.8 time, 1.0 time and 1.5 times individually.

Key words: low permeable seam; high energy CO_2 pre-fracturing; pressure releasing and permeability improved; gas drainage

0 引 言

瓦斯灾害主要发生在低渗透煤层,随开采深度增加,煤层地应力增加,煤层渗透率急剧降低,高瓦斯和突出煤矿数量大幅度增加,瓦斯灾害日益严重,已经成为我国煤矿重特大灾害事故的首要致灾因素[1]。同时,瓦斯(煤层气)属非常规天然气,是优质的清洁能源。瓦斯抽采是低渗透煤层瓦斯综合治

收稿日期: 2016-06-27;**责任编辑:** 王晓珍 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2017.01.017
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274146);山西省回国留学人员科研资助项目(2015-037)
作者简介: 孙文忠(1970—),男,山西陵川人,高级工程师。Tel:0355-5960555,E-mail:shanxisunwenzhong@163.com
引用格式: 孙文忠. 低渗煤层 CO_2 预裂增透高效瓦斯抽采原理及应用[J]. 煤炭科学技术,2017,45(1):100-105.
Sun Wenzhong. High efficient gas drainage principle and application of low permeable seam with CO_2 pre-fracturing and permeability improvement [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 100-105.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

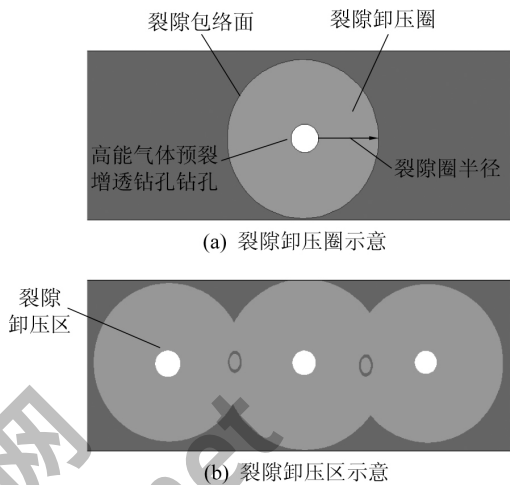
理的根本性技术措施，可以降低瓦斯含量和瓦斯压力，进而从根本上消除瓦斯灾害。然而低渗透煤层具有透气性差、压力大、地应力集中、煤体破坏严重且松软等复杂地质特征，从而导致井下和地面瓦斯抽采难度大、钻孔抽采有效半径小、抽采瓦斯流(产)量低、衰减快、抽采率低下、抽采达标时间长、抽采成本高等技术难题[2]。我国 95% 以上的高瓦斯、突出矿井都发育有低渗透煤层。因此，研究低渗透煤层瓦斯抽采理论与技术十分重要。

我国目前试验较多的是深孔控制爆破瓦斯抽采、水力割缝卸压瓦斯抽采技术、水力预裂卸压瓦斯抽采技术、水力挤出卸压瓦斯抽采技术等增透卸压瓦斯抽采技术，这些技术多数情况下均只能做到局部有效，在不同矿井应用效果相差很大，受制于技术、成本等因素的制约，在推广中尚存在较多问题[3-8]。近些年来新提出的 CO_2 高能气体预裂增透技术利用液态 CO_2 相变产生的高能气体作用煤体进行压裂，压裂液不含水，压裂过程中受热膨胀全部气化，避免了水锁现象，对钻孔周围煤体的相对渗透率和毛细管压力伤害相对较小，增加了煤层内瓦斯的流动通道，提高了煤层透气性。同时，该技术具有工艺简单、可靠易行、安全度高、综合成本低的优点[9-10]，可大幅度提高瓦斯抽采率和抽采速度，保障煤层的安全掘进和回采。国内外学者对 CO_2 预裂在煤矿应用的认识多集中于这种技术、装备的工作方式及特点的介绍方面，对于技术原理、效果考察等详细的研究还较少见到[11]。笔者将基于 CO_2 预裂增透瓦斯抽采的技术原理，在掘进工作面和回采工作面分别进行试验，对其增加煤层透气性、强化瓦斯抽采的应用效果进行了定量研究。

1　高能气体预裂增透瓦斯抽采技术原理

1.1　高能气体预裂原理

高能气体预裂增透技术主要通过液态 CO_2 在密闭空间液-气两相转变的过程中，释放出的大量高能气体，对煤体进行预裂。CO_2 在 31 ℃ 以下、压力 7.2 MPa 时以液态存在，而当温度超过 31 ℃，无论其压力多大，液体 CO_2 都会瞬间膨胀为气态。根据这一原理，在压裂管内用专用高压泵充装液态 CO_2，预裂时给加热器接通电流，通过其内装的化学物质发生反应快速放热，使液态 CO_2 在 20~40 ms 内迅速转化为气态，其体积瞬间膨胀 600 多倍，压力剧增至设定压力，将剪切片冲破，高能气体瞬间从压裂管喷气阀喷出，高能气体喷射所形成的流动射流和后期气体膨胀形成的静态压力综合作用于煤体，从而破坏煤体产生裂隙，如图 1 所示。



(a) 裂隙卸压圈示意

(b) 裂隙卸压区示意

图 1　高能气体预裂增透技术机理示意

Fig. 1　High energy gas pre-splitting anti-reflection technology mechanism

高能气体预裂主要通过高压气体流动射流和静态压力综合作用破坏煤岩层，其破坏机理如下。

1) 在射流作用范围内，滞点的射流速度和压力均为最大值，是应力集中和破坏优先发生的地方。

2) 在气体射流冲击作用下，煤岩层介质将被激起应力波，破坏孔壁近区煤岩层，或者使煤岩体沿先存裂隙发生剪切滑动变形并扩展形成新生裂隙系统。

3) 射流冲击钻孔孔壁后，压力迅速衰减，在钻孔周围将形成准静态压力场。随后，高压气体将涌入先存煤层裂隙或者压入由射流冲击所形成的裂隙，并在高压气体持续作用下驱动裂纹继续扩展，直至压力降低到低于煤体破坏强度时终止。

4) 高能气体预裂的动力为高压气体的低温低速(300~400 m/s)长波，避免了常规炸药爆破前端的高温高速(3 000~4 000 m/s)高频冲击波段对煤体的破坏作用，不会产生孔壁破碎压实带，而是产生类似常规炸药爆破后端的爆生气体静压力作用效果，形成裂隙圈层。

1.2　卸压增透高效抽采技术原理

高能气体预裂增透瓦斯抽采技术主要通过高能气体预裂增加煤层透气性，并加速煤体内吸附态瓦斯的快速解吸，进而增加瓦斯抽采量，提高瓦斯抽采

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

效率，减少抽采达标时间，其作用原理如下。

1) 高能气体预裂增透时，高压气体带来的射流和静压力瞬间作用于煤体，一方面使煤体破坏产生新的裂隙; 另一方面使煤体内被填充或压实的裂隙被重新开启，并促使原生裂隙进一步扩展、发育。当采用单孔或连续多孔高能气体预裂增透时，将在煤层中形成单个裂隙卸压圈或裂隙卸压区，圈(区) 内煤体裂隙数量和规模显著增加，增加了瓦斯运移通道，煤层卸压，地应力得到重新分布，应力集中现象得以改善，从而使得圈(区) 内煤层透气性相较于预裂前显著提高。

2) 高能气体预裂增透在煤层内形成裂隙卸压圈或裂隙卸压区，一方面预裂使圈(区) 内煤层透气性显著增高，瓦斯运移阻力减小; 另一方面预裂促使圈(区) 内煤层瓦斯解吸速度增加，大量吸附态瓦斯转化为游离态，煤基质内、外瓦斯压力梯度增加，瓦斯运移驱动力增大; 在上述双重因素影响下，瓦斯抽采流量和抽采效率提高，抽采达标时间缩短。

3) 高能气体预裂增透过程中，作用于煤体的是干燥的高压气体，不会在煤层中产生额外的积水，避免了大量水侵入煤层引起孔隙的含水饱和度增加以及额外的毛管阻力，避免了水锁效应对瓦斯抽采速度和抽采率产生的负面影响。

4) 高能气体预裂增透技术，一方面在煤体开启或形成的是长裂隙和较大规模有效预裂-卸压体积，提高渗透率，更有利于快速瓦斯抽采; 另一方面还避免了炸药爆破产生高频波，造成煤体破碎，形成孔壁破碎压实带，降低煤层渗透率，阻碍瓦斯抽采。

2　高能气体预裂增透装置及技术方案

2.1　高能气体预裂增透装置

高能气体预裂增透器主要由预裂管、充气阀、喷气阀、剪切片及加热器等 5 个部分组成，如图 2 所示。

1) 预裂管，采用热处理的空心高强度钢管构成，管道的两端设有注液孔和排放孔。高压管坚固耐用，可重复使用。

2) 充气阀，包括六角定位锥形螺钉阀门和 2 个连接引燃导线的电极等，该部分有充气、放气和接通电源功能。

3) 喷气阀，安装在高压管前端，上有 8 ~ 16 个孔，用于使高压气体喷出。

4) 剪切片，剪切片在高能气体预裂增透装置中主要用于控制爆破压力，一旦预裂管内压力超过剪切片的强度，剪切片就发生破坏，气体从而得到释放。

5) 加热器，内装化学物质，用于预裂管内液态气体加热增压引爆; 当电极接通电流时，增压器内化学物质发生快速反应放热增压，即刻引爆预裂管，使气体喷出。

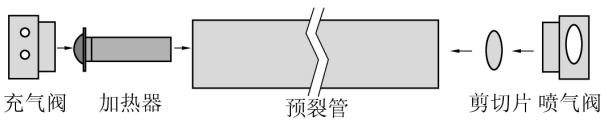


图 2　高能气体预裂增透装置结构

Fig. 2　High energy gas pre-splitting anti-reflection device structure

2.2　高能气体预裂增透高效瓦斯抽采技术方案

根据煤矿生产特点，高能气体预裂增透高效瓦斯抽采技术主要采用高能气体预裂钻孔、辅助瓦斯抽采钻孔相结合的施工方法，其中回采工作面和掘进工作面的布置方法各不同。对于预裂孔的影响半径，由于高能气体预裂增透技术在该矿区还处于应用完善阶段，尚没有系统地进行过相关试验研究，暂不能对其进行准确定义，但是根据已进行过的几次预裂试验，可暂时将高能气体预裂增透影响半径定为不大于 10 m。

2.2.1　掘进工作面布置方案

根据掘进工作面的布置特点，在掘进工作面、钻场分别布置高能气体预裂钻孔和辅助瓦斯抽采钻孔。根据掘进工作面的生产、布置特点制定以下布置方案: 在掘进工作面正中布置 1 个高能气体预裂增透兼瓦斯抽采孔，左右钻场内各布置 5 个辅助瓦斯抽采孔，钻场辅助孔可在预裂作业前施工。钻孔布置如图 3 所示。

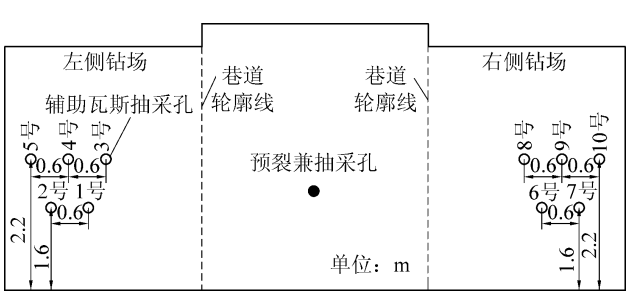


图 3　掘进工作面高能气体预裂增透钻孔布置

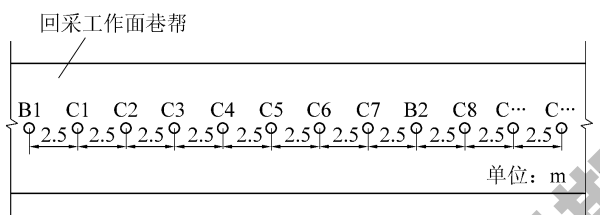
Fig. 3　Layout of high energy gas pre-splitting anti-reflection drilling of excavated face

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

2.2.2　回采工作面布置方案

根据回采工作面的布置特点,在回采工作面由低标高一侧巷道向另一侧巷道施工高能气体预裂钻孔和辅助瓦斯抽采钻孔,预抽工作面煤体内的瓦斯。根据回采工作面的生产、布置特点制定以下方案。

在回采工作面由一侧巷道向另一侧巷道施工高能气体预裂钻孔和辅助瓦斯抽采钻孔,高能气体预裂增透孔间距为 10~30 m,由于预裂增透钻孔之间还要施工辅助抽采钻孔,一般建议预裂钻孔间距为 20 m,预裂钻孔兼做抽采钻孔,预裂完成后,封孔并网抽采,并在 2 个预裂钻孔中间补打辅助瓦斯抽采钻孔(实际也可先施工辅助瓦斯抽采钻孔),瓦斯抽采钻孔间距为 2.5 m,如图 4 所示。



B系列钻孔为高能气体预裂孔; C系列钻孔为辅助瓦斯抽采钻孔

图 4　回采工作面高能气体预裂增透瓦斯抽采钻孔布置

Fig. 4　Layout of high energy gas pre-splitting anti-reflection drilling of mining face

3　现场应用及分析

3.1　试验区域概况

E1305 工作面和 E2303 工作面位于高河能源井田东一盘区,现开采 3 号煤层,煤层平均厚度为 6.77~7.00 m,倾角 2°~14°。试验区域内 3 号煤层瓦斯含量较高,经高河能源实验室实测,瓦斯含量一般为 6.76~14.59 m^3/t,平均含量为 11.5 m^3/t。区内煤层透气性系数 0.000 159 7~0.262 1 $m^2/(MPa^2 \cdot d)$,瓦斯流量衰减系数 0.183 3~0.438 9 d^{-1},属于较难抽采类型; 预裂前百米钻孔抽采纯瓦斯量为 0.000 89~0.028 4 $m^3/(min \cdot hm)$,平均为 0.007 0 $m^3/(min \cdot hm)$。

3.2　掘进工作面预裂增透瓦斯抽采

3.2.1　设计施工情况

根据工作面的布置情况,选择在 E2303 进风巷进行掘进工作面预裂增透瓦斯抽采试验,根据掘进工作面布置方案,在掘进工作面施工预裂孔 1 个,在掘进工作面左右两侧钻场内各施工 5 个辅助瓦斯抽采钻孔,布置方式及参数如图 3、表 1 所示。

表 1　采掘工作面高能气体预裂增透钻孔参数

Table 1　High energy gas pre-splitting anti-reflection drilling parameters of mining face

工作面类型		掘进工作面	回采工作面
高能气体预裂孔	钻头直径/mm	94	94
	钻孔深度/m	60(孔深在超前距离以内)	≥1/3 工作面宽度
	扩孔	孔口 15 m 使用 113 mm 钻头扩孔	孔口 15 m 使用 113 mm 钻头扩孔
	钻孔角度	方位: 垂直煤壁; 倾角: 沿煤层倾向	方位: 垂直煤壁; 倾角: 沿煤层倾向
辅助瓦斯抽采孔	钻头直径/mm	94	94
	钻孔深度/m	80	≥1/3 工作面宽度
	钻孔角度	方位: 垂直煤壁; 倾角: 沿煤层倾向	方位: 垂直煤壁; 倾角: 沿煤层倾向
	封孔深度/m	10~15	10~15
预裂管数量/(根·次$^{-1}$)		15~20	15~20
封孔压力/MPa		5~7	5~7

3.2.2　应用效果分析

首先在 E2303 进风巷两侧的左右钻场各施工 5 个辅助瓦斯抽采钻孔,并网进行抽采,然后在掘进工作面施工 1 个预裂孔,进行高能气体预裂增透。由于影响瓦斯抽采效果的因素众多,单个钻孔有时会受偶然性因素影响不能真实反映预裂增透效果,故本次试验不针对单一抽采钻孔效果进行考察,仅分析掘进工作面预裂区域内钻孔的整体抽采效果。因此,将各钻孔连接在一根汇流管上并入抽采支管,并在汇流管上安装孔板流量计,监测掘进工作面钻孔的整体抽采情况。预裂完毕抽采 20 d 后,平均抽采瓦斯体积分数为 52%,平均抽采混合流量为 1.43 m^3/min,平均抽采纯流量为 0.74 m^3/min,平均百米钻孔抽采纯瓦斯流量为 0.131 7 $m^3/(min \cdot hm)$。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

将 E2303 进风巷的抽采数据与预裂前的数据进行对比，见表 2。

表 2　掘进工作面预裂前后抽采数据对比

Table2　Drainage data comparison before and after presplitting of excavated faces

抽采参数	预裂前	预裂后	增幅/%
平均瓦斯体积分数/%	21.2	52	145
平均抽采混合流量/($m^3 \cdot min^{-1}$)	0.62	1.43	131
平均抽采纯流量/($m^3 \cdot min^{-1}$)	0.13	0.74	469
平均百米钻孔抽采纯流量/($m^3 \cdot min^{-1} \cdot hm^{-1}$)	0.007 0	0.121 7	1 781

从表 2 中可以看出，在掘进工作面进行高能气体预裂增透后，抽采钻孔的抽采浓度、混合流量和纯瓦斯流量均有显著提高。

3.3　回采工作面预裂增透瓦斯抽采

3.3.1　设计施工情况

根据工作面的布置情况，在 E1305 辅助运输巷进行回采工作面预裂增透瓦斯抽采试验。按照回采工作面布置方案，在 E1305 辅助运输巷预抽采工作面密集钻孔段向工作面施工预裂孔进行高能气体预裂增透，共成功施工预裂钻孔 6 个，预裂钻孔间距为 20 m，在预裂钻孔之间每 2.5 m 施工一个辅助瓦斯抽采钻孔(该工作面先施工辅助瓦斯抽采钻孔进行了一段时间的预抽，后施工预裂孔进行高能气体预裂增透)，具体施工参数见表 1，布置方式如图 4 所示。

3.3.2　应用效果分析

同掘进工作面预裂增透瓦斯抽采试验一样，在回采工作面预裂增透瓦斯抽采试验中也不分析单个瓦斯抽采钻孔，仅分析预裂区域内钻孔抽采的总体效果。因此在 E1305 辅助运输巷抽采支管安装孔板监测抽采情况。E1305 辅助运输巷进行高能气体预裂增透抽采 150 天后，抽采支管平均抽采瓦斯体积分数为 18.6%，平均抽采混合流量为 40.54 m^3/min，平均抽采纯流量为 7.54 m^3/min，平均百米钻孔抽采纯瓦斯流量为 0.017 5 $m^3/(min \cdot hm)$。将 E1305 辅助运输巷支管的抽采数据与预裂前的数据进行对比，见表 3。

从表 3 中可以看出，在回采工作面已施工辅助瓦斯抽采钻孔进行预抽的情况下，回采工作面高能气体预裂增透的效果略差于掘进工作面高能气体预裂增透效果；但是，经过高能气体预裂增透后，抽采钻孔的抽采浓度、混合流量和纯瓦斯流量相较于预裂前仍然具有较高提升。

表 3　回采工作面预裂前后抽采数据对比

Table3　Drainage data comparison before and after presplitting of mining face

抽采参数	预裂前	预裂后	增幅/%
平均瓦斯体积分数/%	10.1	18.6	84
平均抽采混合流量/($m^3 \cdot min^{-1}$)	38.4	40.54	6
平均抽采纯流量/($m^3 \cdot min^{-1}$)	3.8	7.54	98
平均百米钻孔抽采纯流量/($m^3 \cdot min^{-1} \cdot hm^{-1}$)	0.007 0	0.017 5	150

同时，抽采 210 d 后，对预裂区域煤层瓦斯含量进行测试，瓦斯含量由原来的 11.73 m^3/t 降为 6.5 m^3/t，满足抽采达标的要求，并且比采用普通抽采方法的预计抽采时间 720 d 缩短了 510 d。

4　结　论

1) CO_2 预裂增透高效瓦斯抽采技术利用液态 CO_2 在密闭空间内液-气两相转变过程中产生的高压气体破坏煤体，产生大量新裂隙，并重启和拓展先存裂隙，形成裂隙卸压圈或裂隙卸压区。使圈(区)内煤层透气性显著增高，瓦斯运移阻力减小，并促使圈(区)内煤层瓦斯解吸速度增加，大量吸附态瓦斯转化为游离态，煤基质内、外瓦斯压力梯度增加，瓦斯运移驱动力增大。从而增加了煤层透气性，提高瓦斯抽采流量和抽采效率，缩短抽采达标时间。

2) 高能气体预裂增透高效瓦斯抽采技术利用干燥的高压气体进行预裂，一方面避免了微孔隙水锁现象，不会额外增加煤层孔隙含水饱和度及毛管阻力对瓦斯流动的影响；另一方面，还避免了炸药爆破产生高频波作用造成的孔壁破碎压实带，不会导致孔壁附近煤层透气性明显下降；避免了水锁效应和煤体破碎压实对煤层瓦斯抽采的负面影响，有利于低渗透煤层瓦斯的快速解吸、扩散和渗流，提高瓦斯抽采速度和抽采率。

3) 掘进工作面进行高能气体预裂增透后，掘进工作面试验钻孔平均瓦斯抽采体积分数为 52%，平均抽采纯流量为 0.74 m^3/min，平均百米钻孔抽采

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

纯流量为 0.121 7 m^3/(min·hm),与预裂前相比分别增加了 1.5、4.7、17.8 倍;回采工作面进行高能气体预裂增透后,平均抽采瓦斯体积分数为 18.6%,平均抽采纯流量为 7.54 m^3/min,平均百米钻孔抽采纯流量为 0.017 5 m^3/(min·hm),与预裂前相比分别增加了 0.84、0.98、1.5 倍。高能气体预裂增透后,煤层增透效果明显,采掘工作面的抽采数据均有大幅提高,抽采效率和抽采量提升明显。

参考文献(References):

[1] 张建国.平顶山矿区深井动力灾害灾变机理及防治关键技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2012.

[2] 申宝宏,刘见中,雷　毅.我国煤矿区煤层气开发利用技术现状及展望[J].煤炭科学技术,2015,43(2):1-4.
Shen Baohong,Liu Jianzhong,Lei Yi.Present status and prospects of coalbed methane development and utilization technology of coal mine area in China[J].Coal Science and Technology,2015,43(2):1-4.

[3] 郭臣业,沈大富,张翠兰,等.煤矿井下控制水力压裂煤层增透关键技术及应用[J].煤炭科学技术,2015,43(2):114-118,122.
Guo Chenye,Shen Dafu,Zhang Cuilan,*et al*.Key technology and application of controlled hydraulic fracturing and seams permeability improvement in underground coal mine[J].Coal Science and Technology,2015,43(2):114-118,122.

[4] 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.
Yuan Liang,Lin Baiquan,Yang Wei.Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in China coal[J].Coal Science and Technology,2015,43(1):45-49.

[5] 赵阳升,杨　栋,胡耀青,等,低渗透煤储层煤层气开采有效技术途径的研究[J].煤炭学报,2001,26(5):455-458.
Zhao Yangsheng,Yang Dong,Hu Yaoqing,*et al*.Study on the effective technology way for mining methane in low permeability coal seam[J].Journal of China Coal Society,2001,26(5):455-458.

[6] 李全贵,翟　成,林柏泉,等.定向水力压裂技术研究与应用[J].西安科技大学学报,2010,31(6):735-737.
Li Quangui,Zhai Cheng,Lin Baiquan,*et al*.Research and application of directional hydraulic fracturing technology[J].Journal of China Coal Society,2010,31(6):735-737.

[7] 杨　威,林柏泉,翟　成,等.水力压裂潜在危险及钻爆压抽一体化技术[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2011,30(1):36-38.
Yang Wei,Lin Baiquan,Zhai Cheng,*et al*.Risk of hydraulic fracturing technology and dbfp technology[J].Journal of Liaoning Technical University:Natural Science,2011,30(1):36-38.

[8] Day S,Fry R,Sakurovs R.Swelling of Australian coals in supercritical CO_2[J].International Journal of Coal Geology,2008,74(1):41-52.

[9] 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 fracture applied to deep borehole pre-cracking blasting for seam permeability improvement[J].Coal Science and Technology,2015,43(2):80-83.

[10] 聂　政.二氧化碳炮爆破在煤矿的应用[J].煤炭技术,2007,26(8):140-141.
Nie Zheng.Application of carbon dioxide blasting in coal mine[J].Coal Technology,2007,26(8):140-141.

[11] 春　兰,何　晓,向　斌,等.水力压裂技术现状及其进展[J].天然气技术,2009,3(1):11-13.
Chun Lan,He Xiao,Xiang Bin,*et al*.Current situation of hydraulic fracturing technology and progress[J].Natural Gas Technology,2009,3(1):11-13.

(上接第 77 页)

and Technology Beijing,2001,23(5):460-462.

[14] 马　砺,任立峰,韩　力,等.粒度对采空区煤自燃极限参数的影响试验研究[J].煤炭科学技术,2015,43(6):59-64.
Ma Li,Ren Lifeng,Han Li,*et al*.Experiment study on partical size affected to coal spontaneous combustion limit parameters in goaf[J].Coal Science and Technology,2015,43(6):59-64.

[15] 谢振华,金龙哲,宋存义.程序升温条件下煤炭自燃特性[J].北京科技大学学报,2003,25(1):12-14.
Xie Zhenhua,Jin Longzhe,Song Cunyi.Coal spontaneous combustion characteristics at programmed temperatures[J].Journal of University of Science and Technology Beijing,2003,25(1):12-14.

[16] 秦跃平,宋宜猛,杨小彬,等.粒度对采空区遗煤氧化速度影响的试验研究[J].煤炭学报,2010,35(S1):132-135.
Qin Yueping,Song Yimeng,Yang Xiaobin,*et al*.Experimental study on coal granularity influencing oxidation rate in goaf[J].Journal of China Coal Society,2010,35(S1):132-135.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net