

# 基于二氧化碳深孔致裂增透技术的低透煤层瓦斯治理

贺 超<sup>1,2,3</sup>

(1. 煤炭科学研究总院 建井研究分院,北京 100013;2. 煤矿深井建设技术国家工程实验室,北京 100013;  
3. 北京中煤矿山工程有限公司,北京 100013)

**摘 要:**为解决低透气性煤层瓦斯抽采中存在长深钻孔抽采有效影响范围小、抽采效率低、抽采周期长等问题,在司马煤矿 3 号煤层 1211 工作面进行 100 m 深孔二氧化碳致裂强化增透的试验及应用,以提高煤层透气性,缩短瓦斯抽采周期。在未抽采及已抽采煤层中分别进行了 100 m 深孔致裂试验,采用示踪气体法,确定了煤层致裂增透钻孔间距为 10 m。通过在 1211 工作面走向 300 m 范围内的煤层深孔致裂增透应用表明:利用二氧化碳深孔致裂能实现对 3 号煤层的高效渗透和瓦斯驱替,煤层瓦斯解吸量和瓦斯压力显著降低,在 60 d 内煤层瓦斯含量平均降低 1.8 m<sup>3</sup>/t,改善了低透气性高瓦斯煤层难以抽采的现状,显著缩短抽采周期。

**关键词:**低透气性煤层;二氧化碳致裂器;煤层增透;深孔预裂爆破;瓦斯治理

中图分类号:TD712 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2017)06-0067-06

## Gas control of low gas permeability seam based on deep borehole fracturing and permeability improved technology with carbon dioxide

He Chao<sup>1,2,3</sup>

(1. Mine Construction Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Lab of Deep Coal Mine Shaft Construction Technology, Beijing 100013, China; 3. Beijing China Coal Mine Engineering Company Limited, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to solve low effective influence scope of the gas drainage with long deep borehole existed in the gas drainage of low permeable seam, the low gas drainage efficiency, long gas drainage period and other problems, the carbon dioxide fracturing and enhanced permeability improved test and application with 100 m deep borehole was conducted in No. 1211 coal mining face of No. 3 seam in Sima Coal Mine to effectively improve the permeability of the seam and to reduce the gas drainage period. The fracturing test with the 100 m deep borehole was individually conducted in the no gas drainage seam and in the gas drainage seam. A tracer gas method was applied to determine the spacing between the fracturing and permeability improved boreholes in the seam as 10 m. Within 300 m strike scope of No. 1211 coal mining face, the application of the fracturing and permeability improved to the deep borehole in the seam showed that the carbon dioxide fracturing of the deep borehole could realize the high efficient permeability and the gas replacement in No. 3 coal seam. The gas desorption and gas pressure of the seam could be obviously reduced. Within 60 days, the seam gas content was reduced by 1.8 m<sup>3</sup>/t averagely, the difficult gas drainage status of the low permeability high gassy seam was improved and the gas drainage period was obviously reduced.

**Key words:** low gas permeability seam; carbon dioxide fracturing equipment; improved permeability of seam; deep borehole pre-fracturing and blasting; gas control

收稿日期:2017-01-03;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.06.011

基金项目:国家安全生产监督管理总局 2016 年安全生产重大事故防治关键技术科技资助项目(yangqi-0021-2016AQ);天地科技股份有限公司科技创新基金面上资助项目(KJ-2016-BJZM-09)

作者简介:贺超(1986—),男,山东东阿人,助理研究员,硕士。Tel:13488766921, E-mail:super00158@163.com

引用格式:贺超.基于二氧化碳深孔致裂增透技术的低透煤层瓦斯治理[J].煤炭科学技术,2017,45(6):67-72.

He Chao. Gas control of low gas permeability seam based on deep borehole fracturing and permeability improved technology with carbon dioxide[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 67-72.

## 0 引言

对煤层中的瓦斯提前进行抽采是高瓦斯和煤与瓦斯突出矿井煤层安全开采的主要措施,通过瓦斯抽采,可降低矿井瓦斯涌出量和风排瓦斯量,从而达到矿井安全生产的目的。我国煤层瓦斯赋存条件复杂,普遍具有渗透率低、吸附性强、浅层煤层气的原始压力不高、解吸速度慢的特点,低透气性煤层工作面瓦斯抽采多面临长深钻孔抽采有效影响范围小、区域瓦斯抽采需要的钻孔数量多、钻孔施工工程量大、抽采瓦斯浓度低、抽采效果差和抽采时间长等问题<sup>[1-3]</sup>,给矿井安全生产和瓦斯的利用带来不利影响。为提高煤层透气性,常用的技术手段包括增加钻孔密度、射孔增透、水力压裂、水力割缝和深孔预裂爆破等,在煤矿瓦斯治理中发挥了一定的作用<sup>[4-7]</sup>,但在应用中也存在着一定的局限性<sup>[8]</sup>,而且目前国内学者采用炸药深孔预裂爆破技术最大深孔为65 m<sup>[9]</sup>。二氧化碳致裂增透技术,因其安全性及二氧化碳对于煤层瓦斯良好的驱替作用,在国内外得到了进一步研究和发展<sup>[10]</sup>。国内学者已开展了对二氧化碳致裂器的结构、工作原理、特点、相变过程、卸放压力的分析和研究<sup>[11-13]</sup>,对于煤层瓦斯抽采有学者开展了二氧化碳致裂增透用于回采工作面、掘进工作面、穿层强化增透的试验研究<sup>[14-17]</sup>,致裂孔深度一般在4060 m;受致裂器结构、连接可靠性、推送工艺、起发技术和钻孔参数、煤层地质条件等因素制约和影响,国内外学者对于顺层二氧化碳深孔(超过80 m)致裂增透的研究和应用较少。

笔者以山西潞安集团司马煤业主采3号煤层为研究对象,开展100 m深孔预裂强化增透的系统性试验,结合确定的技术参数,进行强化增透设计,并完成二氧化碳致裂深孔强化增透的应用研究。

## 1 二氧化碳致裂增透技术与现场方案设计

### 1.1 二氧化碳致裂增透技术

二氧化碳在温度高于临界温度31.26℃,压力高于临界压力7.38 MPa的状态下,其密度近于液体,黏度近于气体,扩散系数为液体的100倍。在低于其临界温度和高于临界压力条件下,将二氧化碳以液态存储于高压容器,利用发热装置提供热量,将其瞬间处于超临界状态,体积膨胀达600倍<sup>[18]</sup>,压力可达270 MPa<sup>[19]</sup>。利用二氧化碳这一性质,可致裂煤体、岩体等,增加被作用介质裂隙发育和扩展。

由于其独特的物理性质,煤体对二氧化碳的吸附性远高于对瓦斯的吸附性,二氧化碳可在煤体中滞留,并驱替吸附态的瓦斯。煤体对二氧化碳的渗透率远高于对瓦斯的渗透率,通过二氧化碳的渗流运移,可减小煤体吸附瓦斯的分压,使得煤层瓦斯持续解吸,显著提高抽采效率。

单组二氧化碳致裂器,仅能够实现小范围内的对被作用介质的物理爆破、预裂或增透。要实现对工作面煤层大范围的顺层强化增透,需在煤体中钻深孔并在钻孔内组合致裂器使用,涉及到致裂器的可靠串接、推送、起发和回收等技术环节。发展二氧化碳深孔(100 m)致裂增透技术,实现工作面增透的全覆盖,对于煤层瓦斯治理具有实际意义。

### 1.2 深孔致裂增透试验方案设计

深孔致裂试验在司马煤矿3号煤层1211工作面运输巷中进行。该矿属于高瓦斯矿井,主采3号煤层,煤层位于山西组中下部,平均厚度6.62 m,顶板一般为泥岩、砂质泥岩,局部为粉砂岩或细粒砂岩,底板为泥岩、砂质泥岩,局部为砂岩或粉砂岩。3号煤层平均瓦斯含量6.12 m<sup>3</sup>/t,瓦斯压力0.37 MPa,透气性系数为0.3631.141 m<sup>2</sup>/(MPa<sup>2</sup>·d),钻孔瓦斯流量衰减系数0.319 40.784 5 d<sup>-1</sup>,属可以抽采至较难抽采类型之间。总体而言3号煤层属于单一厚煤层,煤层透气性较差。1211工作面倾向长度180220 m,抽采钻孔间距1.5 m,已经过6个月的抽采,但瓦斯抽采浓度低,煤层瓦斯下降不明显。为此试验采用MZL200-51/1400致裂器,其主要技术参数如下:

储液管外径/mm	51
储液管长度/mm	1 400
储液管容积/L	1.0
卸放压力/MPa	200
二氧化碳充装量/g	900±100
设计充装压力/MPa	10

笔者分别对已抽采区域、未抽采区域和开切眼处进行致裂增透试验,如图1所示,通过3组试验,综合评定深孔预裂的效果。致裂孔孔深100 m,孔径75 mm,深部80 m为强化增透区域,外部为卸压保护区,由深部至浅部致裂器起发单元采用均匀布置。每组起发单元长度为6.3 m,由致裂器、串接杆和专用连接装置组成,确保连接可靠和防水,致裂

孔内共布置13组起发单元。

1.2.1 已抽采区域深孔致裂试验

试验主要考查致裂增透对抽采煤层抽采效果影响和抽采有效半径,设置在运输巷南帮800 m处。在煤壁323号和324号抽采孔之间布置致裂增透孔编号分别为Z1—Z3,深度100 m,孔口距离巷道地板的距离为1.6 m,终孔控制在距煤层顶板13 m范围内,已抽采区试验钻孔布置如图2所示。



图1 二氧化碳深孔致裂增透孔布置  
Fig.1 Boreholes layout of carbon dioxide deep borehole pre-cracking test

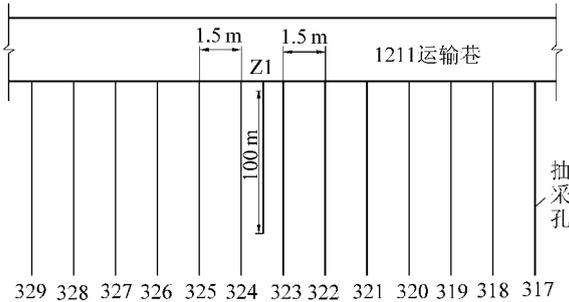


图2 已抽采区试验钻孔布置

Fig.2 Boreholes layout of extraction region

1.2.2 未抽采区域深孔致裂试验

试验设置在运输巷北帮800 m处,中间布置致裂孔,两侧设置观测孔,编号依次为G1—G6,钻孔距离巷道地板高度为1.6 m,观测孔间距大于本煤层抽采半径。实际钻孔布置情况如图3所示,试验目的为测量深孔预裂在未抽采煤层的有效半径。

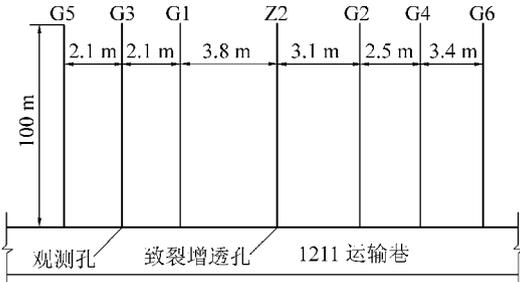


图3 未抽采区试验钻孔布置

Fig.3 Boreholes layout of non-extraction region

1.2.3 工作面开切眼处深孔致裂试验

试验位于1211工作面开切眼内,距1211运输巷40 m,钻孔深度为100 m,钻孔距离巷道底板的高度为1.2 m,试验目的为检验致裂增透后的影响深度,工作面处试验钻孔布置如图4所示。

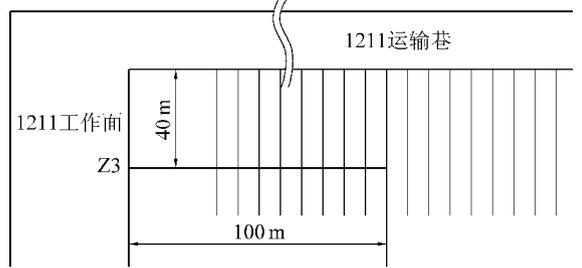


图4 工作面开切眼处试验钻孔布置  
Fig.4 Borehole layout of open-off cut

1.3 深孔致裂增透工艺过程

- 1) 测定致裂增透前的煤层瓦斯及观测孔的抽采数据,按照钻孔设计施工致裂孔。
- 2) 在井上完成二氧化碳致裂器的充装和检验,井下利用推送装置将致裂器和连接杆逐一推入致裂孔中,进行固定封孔,检测无误后按作业规程起发致裂。
- 3) 增透结束后向致裂孔内注入SF<sub>6</sub>,利用示踪气体法测定抽采有效半径。对致裂孔封孔抽采后,连续测定各观测孔的流量、瓦斯浓度,采用流量法进一步观测对比。

2 二氧化碳深孔致裂增透效果与分析

1) 致裂有效半径。现场通过示踪气体检测法,在致裂前后从致裂钻孔中注入SF<sub>6</sub>气体,测量观测钻孔中是否有SF<sub>6</sub>气体被检验出,确定致裂有效半径。由表1和表2可知,致裂前已抽采区检测到SF<sub>6</sub>气体扩散的最大距离为2.3 m,未致裂区域观测孔均未检测到SF<sub>6</sub>气体。致裂后注入示踪气体30 min后,已抽采区域318—329号抽采钻孔检测到示踪气体,距致裂孔的最大距离为8.2 m,未抽采区域内距致裂孔5.9 m的观测孔G3内检测到示踪气体,说明致裂有效半径不低于5.9 m,是抽采间距的3.9倍。2 h后测得已抽采区域检测到示踪气体的范围进一步扩大,有效半径达10.9 m,未抽采区域达8 m,已抽采区域示踪气体测得浓度更高,表明受高压气体剪切煤体及原抽采钻孔共同作用,已抽区裂隙扩展更大,渗透效果更明显。

表1 已抽采区域示踪气体检测结果

Table 1 Tracer gas test results of extraction region

检测时间	检测到示踪气体的钻孔	至致裂孔的最大距离/m
致裂前	325—322号	2.3
致裂后 30 min	318—329号	8.2
致裂后 2 h	316—330号	10.9

表2 未抽采区域示踪气体检测结果

Table 2 Tracer gas test results of non-extraction region

观测孔	至 Z2 孔 距离/m	是否检测到示踪气体		
		致裂前	致裂后 30 min	致裂后 2 h
G1	3.8	—	是	是
G2	3.1	—	是	是
G3	5.9	—	是	是
G4	5.6	—	是	是
G5	8.0	—	否	是
G6	9.0	—	否	否

2) 钻孔、汇流组瓦斯流量及浓度。对致裂前后已抽采区域汇流组、未抽采区观测孔瓦斯抽采参数进行测量,见表3,从表3中可以看出,已抽采区虽然经过抽采,但是经过致裂增透和二氧化碳驱替作用后,汇流组瓦斯浓度有明显提升。随着裂隙扩展及新裂隙发育,煤层透气性显著增高,汇流组瓦斯流量由致裂前的  $0.450.63 \text{ m}^3/\text{min}$ ,提高到  $0.621.49 \text{ m}^3/\text{min}$ ,增幅达 40%137%。致裂前后未抽采区域各单孔的平均瓦斯浓度见表4,未致裂前各孔瓦斯抽采浓度处于相对较高的水平,致裂后煤体得到卸压,瓦斯运移驱动力增大,抽采浓度得到进一步提高,平均增幅为 52%。

表3 致裂前后抽采参数对比

Table 3 Drainage parameters comparison before and after the presplitting

抽采参数	致裂前后			增幅/%
	致裂前	致裂后	增幅/%	
324—328号钻孔汇流组 平均瓦斯体积分数/%	10.30	13.00	26	
324—328号钻孔汇流组 平均抽采混合流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	0.45	0.62	40	
317—323号钻孔汇流组 平均瓦斯体积分数/%	13.90	22.30	60	
317—323号钻孔汇流组 平均抽采混合流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	0.63	1.49	137	

3) 致裂有效深度。致裂前后,切眼处致裂钻孔

上方抽采孔汇流组瓦斯浓度变化如图5所示。致裂后,煤体内瓦斯得到进一步解吸,80 m 强化增透区内9组汇流组瓦斯均明显增加,距开切眼 100 m 的 132 号抽采孔瓦斯体积分数提高 38%,表明深孔气相致裂增透效果可达 100 m,可很好的提高钻孔深度 100 m 范围内的瓦斯抽采效率。

表4 钻孔瓦斯体积分数对比

Table 4 Contrast of borehole gas density

编号	钻孔瓦斯体积分数/%		增幅/%
	致裂前	致裂后	
G1	5.4	18.2	237
G3	2.5	4.4	76
G5	26.9	33.9	26
Z2	—	38.7	—
G2	23.4	31.6	35
G4	15.7	26.1	66
G6	33.3	37.1	11

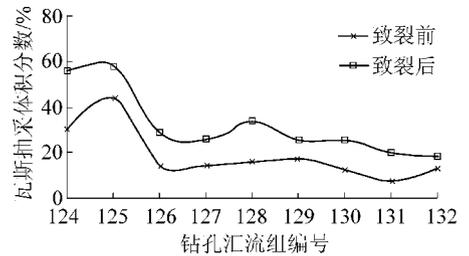


图5 致裂前后钻孔汇流组瓦斯浓度对比  
Fig. 5 Contrast of borehole gas flow density before and after presplitting

4) 致裂后试验地点的环境参数见表5。现场环境中,二氧化碳浓度很低,气相致裂后不会产生 CO 和氮氧化物等有害气体,作业环境安全。

表5 致裂后试验地点环境参数

Table 5 Environment parameters after cracked test

温度/ $^{\circ}\text{C}$	体积分数/%				
	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	CO	$\text{O}_2$	氮氧化物
22	0.04	0.03	0	19.4	0

### 3 深孔致裂增透技术的致裂效果评价

#### 3.1 深孔致裂应用

致裂增透试验为二氧化碳深孔预裂增透的应用提供了设计和实施依据。为客观考察深孔预裂治理瓦斯的效果,自 1211 工作面距开切眼 10 m 处开始布置致裂孔,运输巷与回风巷平行于开切眼对称布置,致裂孔间距 10 m,孔深 100 m,孔径 75 mm,两侧各布置 30 个。致裂孔内起发单元布置方式与试验

方案相同。致裂后连续测定致裂孔、抽采钻孔的瓦斯抽采参数,测定煤层瓦斯含量及解吸量,考察瓦斯

抽采效果 1211 运输巷和回风巷预裂前后 60 d 内取样地点煤体瓦斯参数分别见表 6 和表 7。

表 6 1211 运输巷预裂前后 60 d 内取样地点煤体瓦斯参数

Table 6 Gas parameters of No. 1211 headentry before and after cracked test within 60 days

序号	1211 运输巷 取样地点	瓦斯解吸量/( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )			减幅/%	瓦斯含量/( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )			瓦斯压力/MPa	
		致裂前	致裂后	致裂前		致裂后	致裂前	致裂后		
1	40 m 处	3.069	2.618	14.69	5.151	3.922	23.86	0.287	0.24	
2	90 m 处	3.912	2.239	42.76	6.085	4.544	25.32	0.338	0.218	
3	140 m 处	4.254	2.395	43.69	6.383	4.745	25.66	0.369	0.224	
4	190 m 处	4.095	2.982	27.19	6.184	5.332	13.77	0.363	0.258	
5	240 m 处	4.290	1.453	66.12	6.372	3.797	40.41	0.379	0.173	
6	290 m 处	4.361	2.471	43.33	6.491	4.815	25.82	0.378	0.229	
7	平均值	3.997	2.360	40.96	6.111	4.526	25.81	0.352	0.224	

表 7 1211 回风巷预裂前后 60 d 内取样地点煤体瓦斯参数

Table 7 Gas parameters of No. 1211 return airway before and after the cracked test within 60 days

序号	1211 回风巷 取样地点	瓦斯解吸量/( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )			减幅/%	瓦斯含量/( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )			瓦斯压力/MPa	
		致裂前	致裂后	致裂前		致裂后	致裂前	致裂后		
1	15 m 处	4.107	1.402	65.87	6.405	3.700	42.24	0.336	0.171	
2	65 m 处	3.173	1.518	52.15	5.426	3.816	29.67	0.278	0.178	
3	115 m 处	3.963	2.444	38.34	6.268	4.742	24.35	0.326	0.23	
4	165 m 处	4.351	2.536	41.71	6.565	4.834	26.36	0.364	0.235	
5	215 m 处	3.916	2.565	34.49	6.175	4.863	21.25	0.327	0.237	
6	265 m 处	3.634	0.566	84.43	5.893	2.864	51.41	0.308	0.128	
7	平均值	3.857	1.839	52.34	6.122	4.136	32.43	0.323	0.197	

### 3.2 深孔气相致裂应用效果

1) 致裂前后煤体瓦斯解吸量。由表 6 和表 7 可知,致裂前运输巷和回风巷两侧煤体中可解吸瓦斯在煤层中占比较高,致裂后超临界二氧化碳进入煤体,存在着驱替和置换的双重过程,从而提高煤体孔隙率和渗透性,伴随着煤层致裂卸压,原始煤层瓦斯吸附解吸平衡进一步被破坏,在此双重影响下瓦斯涌出量显著增加。致裂后 60 d 内,运输巷侧各个地点煤体中的瓦斯解吸量减幅为 14.69%~66.12%,平均减幅为 40.96%;回风巷侧各个地点煤体中的瓦斯解吸量减幅为 34.49%~84.43%,平均减幅为 52.34%,工作面煤层中的瓦斯充分解吸,显示了二氧化碳致裂技术在低透气性煤层瓦斯治理的有效性和独特优势。

2) 致裂前后煤体瓦斯含量。二氧化碳致裂增透压力可控,其对煤体的作用主要为高压气体的剪切破坏,不仅能产生多条径向宏观裂隙和微观裂隙,

而且不破坏煤体形成粉碎区,因而可显著增加透气性,提高煤层瓦斯抽采效率。由表 6 和表 7 可看出,致裂抽采后运输巷侧煤体中的瓦斯含量平均减少  $1.6 \text{ m}^3/\text{t}$ ,最高减幅达到 40.41%,回风巷侧煤层瓦斯含量平均值由  $6.12 \text{ m}^3/\text{t}$  减少至  $4.14 \text{ m}^3/\text{t}$ ,平均减少  $2 \text{ m}^3/\text{t}$ 。致裂抽采后 90 d,通过对煤层取样,测得各取样地点的煤层瓦斯含量均低于  $4 \text{ m}^3/\text{t}$ ,达到了矿井规定的开采标准。

3) 致裂前后煤层瓦斯压力。已抽采煤层的二氧化碳深孔预裂技术,也是一种深孔卸压技术。抽采钻孔起到辅助控制孔的作用,促进裂隙发育或贯穿。通过运输巷和回风巷侧的深孔致裂,各地点煤体中的瓦斯压力明显降低,实现了整个煤层卸压增透,保障了高瓦斯煤层的安全开采。

## 4 结 论

1) 二氧化碳深孔预裂技术可实现 100 m 范围的煤

层强化增透,作业过程和环境气体参数安全,致裂后煤层透气性改善显著,影响范围大。在长冶矿区3号煤层可按照致裂钻孔间距10 m布置,为相似条件下煤层瓦斯抽采和强化增透提供了设计和实施依据。

2) 二氧化碳深孔预裂增透技术拓宽了抽采煤层瓦斯含量的下限,在煤层瓦斯含量仅为 $5.16.2 \text{ m}^3/\text{t}$ 时仍可进行瓦斯抽采利用,在60 d内煤层瓦斯平均降低 $1.8 \text{ m}^3/\text{t}$ ,改变了瓦斯含量相对较低煤层无法或难以抽采利用的现状。

3) 利用二氧化碳气体,通过深孔致裂能实现对司马煤业3号煤层的高效渗透和瓦斯驱替,降低了煤层中的瓦斯含量和瓦斯压力,显著缩短了抽采周期,对于促进矿井安全高效生产具有重要作用。

#### 参考文献 (References):

- [1] 顾德祥.低透气性煤层强化增透瓦斯抽采技术研究[D].淮南:安徽理工大学,2009.
- [2] 琚宜文,李清光,谭锋奇.煤矿瓦斯防治与利用及碳排放关键问题研究[J].煤炭科学技术,2014,42(6):8-14.  
Ju Yiwen, Li Qingguang, Tan Fengqi. Research on key issues of mine gas prevention and control and utilization as well as carbon emission[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 8-14.
- [3] 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.
- [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] 蔡峰.高瓦斯低透气性煤层深孔预裂爆破强化增透效应研究[D].淮南:安徽理工大学,2007.
- [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):36-39.  
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): 36-39.
- [8] 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.
- [9] 赵宁.顾桥矿1123(1)工作面深孔预裂爆破控制放顶与瓦斯治理技术[D].淮南:安徽理工大学,2014.
- [10] 聂政.二氧化碳炮爆破在煤矿的应用[J].煤炭技术,2007, 26(8):62-63.  
Nie Zheng. Application of carbon dioxide blasting in coal mine [J]. Coal Technology, 2007, 26(8): 62-63.
- [11] 董庆祥,王兆丰,韩亚北,等.液态 $\text{CO}_2$ 相变致裂的TNT当量研究[J].中国安全科学学报,2014,24(11):84-88.  
Dong Qingxiang, Wang Zhaofeng, Han Yabei, et al. Research on TNT equivalent of liquid  $\text{CO}_2$  phase-transition fracturing [J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(11): 84-88.
- [12] 杜泽生,范迎春,薛宇飞,等.二氧化碳爆破采掘装备及技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(9):36-42.  
Du Zesheng, Fan Yingchun, Xue Yufei, et al. Study on carbon dioxide blasting mining and driving equipment and technology [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(9): 36-42.
- [13] 孙文忠.低渗煤层 $\text{CO}_2$ 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. Application of the technology of  $\text{CO}_2$  pre-splitting blast in low-permeability coal seams to increase permeability [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 100-105.
- [14] 周西华,门金龙,宋东平,等.煤层液态 $\text{CO}_2$ 爆破增透促抽瓦斯技术研究[J].中国安全科学学报,2015,25(2):60-65.  
Zhou Xihua, Men Jinlong, Song Dongping, et al. Research on increasing coal seam permeability and promoting gas drainage with liquid  $\text{CO}_2$  blasting [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(2): 60-65.
- [15] 范迎春,霍中刚,姚永辉.复杂条件下二氧化碳深孔预裂爆破增透技术[J].煤矿安全,2014,45(11):74-77.  
Fan Yingchun, Huo Zhonggang, Yao Yonghui. Application of deep hole presplitting blasting and permeability increasing technology by carbon dioxide under complex conditions [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(11): 74-77.
- [16] 孙小明.液态二氧化碳相变致裂穿层钻孔强化预抽瓦斯效果研究[D].焦作:河南理工大学,2014.
- [17] 王海东.突出煤层掘进工作面 $\text{CO}_2$ 可控相变致裂防突技术[J].煤炭科学技术,2016,44(3):70-74.  
Wang Haidong.  $\text{CO}_2$  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.
- [18] 黄园月,尹岚岚,倪昊,等.二氧化碳致裂器研制与应用[J].煤炭技术,2015,34(8):123-124.  
Huang Yuanyue, Yin Lanlan, Ni Hao, et al. Development and application of carbon dioxide fracturing device [J]. Coal Technology, 2015, 34(8): 123-124.
- [19] 王兆丰,周大超,李豪君,等.液态 $\text{CO}_2$ 相变致裂二次增透技术[J].河南理工大学学报:自然科学版,2016,35(5):597-600.  
Wang Zhaofeng, Zhou Dachao, Li Haojun, et al. Research on secondary fracturing technology by phase transformation of liquid  $\text{CO}_2$  [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2016, 35(5): 597-600.