

# 二氧化碳致裂器止飞技术研究

彭 然 霍中刚 温 良

(煤炭科学技术研究院有限公司 北京 100013)

**摘 要:** 基于二氧化碳致裂器爆破瞬间飞管的问题,分析了致裂器内部的压力变化规律、孔内力学变化规律,探讨了致裂器飞管的主要因素,试验结果表明:为了测定爆破瞬间高压、高速气体的压力,通过压力测定系统,精确测定出最直接造成飞管现象的管内压力 185 MPa,同时也分析了泄能孔面积和方向对飞管的影响;通过压力的计算和三维流体模拟,提出了 3 种止飞手段,封孔止飞作为常规辅助手段,计算封孔物长度,机械止飞膨胀摩擦角为 30°,泄能口倾角 75°,上下排列,两两径向对称,这些止飞手段,很大程度上提高了致裂器爆破的效果,确保致裂器在瓦斯抽采方面的广泛应用。

**关键词:** 致裂器飞管; 管内压力变化规律; 泄能压力; 封孔止飞; 机械止飞; 泄能口倾角

**中图分类号:** TD263 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2020)S1-0134-06

## Study on anti-flying technology of carbon dioxide fracturer

PENG Ran, HUO Zhonggang, WEN Liang

(China Coal Research Institute Company Limited, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Based on the fly tube problem of carbon dioxide fracturer during blasting, the change law of pressure inside crack and hole mechanics were analyzed and the main factors of fly tube were discussed. The results showed that in order to determine the pressure value of high pressure and high speed gas in the instant of blasting, the pressure value in the tube that is the most direct cause of the phenomenon of flying tube is accurately determined by the pressure measurement system, which mean value was 185 MPa. At the same time, the influence of area and direction of vent hole on the flying tube was also analyzed. Through the calculation of stress and three-dimensional fluid simulation, three kinds of anti-flying means were put forward. The length of the sealing material was calculated as the conventional auxiliary means. It calculates that the expansion friction angle of the mechanical stop was 30°, and the angle of inclination of the vent was 75°, which were arranged from top to bottom and two radial symmetry. To a great extent, the blasting effect of carbon dioxide fracturer was improved, and the wide application of carbon dioxide fracturer in gas drainage was ensured.

**Key words:** fly tube of fracture; change law of pressure inside fracture; discharge pressure; sealing hole to stop flying; mechanical stop; vent inclination angle

## 0 引 言

二氧化碳深孔预裂爆破是利用储液管内液态二氧化碳经加热棒加热,温度不断升高,达到二氧化碳气液超临界点<sup>[1-4]</sup>,气化膨胀达到剪切片极限强度后,瞬间释放高压气体破断煤(岩)体<sup>[5-8]</sup>,高压的二氧化碳气体瞬间爆炸中心传播出来,强烈的压缩邻近空气,使介质压力、密度突然升高而形成空气冲击波,对煤体的损伤断裂作用是在应力波作用后所产生的初始裂隙及损伤场的基础上发生的<sup>[9]</sup>,这种冲击波能够扩大和延伸煤(岩)体的裂缝,也能对爆源附近的物体产生冲击和破坏。

在气体膨胀压力场和原岩应力场的作用下使裂

隙扩展<sup>[10-11]</sup>,在整个裂隙扩展过程中,高压二氧化碳气体首先进入张开宽度大、较平直、对气体楔入阻力大的大裂隙中,再进入与之沟通的小裂隙中,直到二氧化碳气体压力降到不足以使裂隙继续扩展为止,在爆破孔轴向方向,若存在压力梯度,裂隙也会沿着轴向扩展。

不仅如此,由于爆破中心距离孔底较近,爆破瞬间,高压气体在孔底聚集,在狭小空间内对致裂器端面产生反向作用力,使致裂器瞬间飞出钻孔,出现飞管问题,造成致裂效果不可控,也威胁操作人员的人身安全。目前,由于这项技术比较新颖,相关研究文献比较少,还未见前人对其二氧化碳致裂器止飞技术进行专门、系统的研究,开展相对较晚,在止飞技

收稿日期: 2019-09-22; 责任编辑: 赵 瑞

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2016ZX05045-004-005)

作者简介: 彭 然(1987—),男,河北保定人,助理研究员,硕士。Tel: 010-84263047, E-mail: 175000167@qq.com

术的应用上没有一个比较好的解决办法,止飞手段具有一定的经验性,在现场试验中,工作人员多采用钢丝绳捆绑、地面覆盖止飞网等手段。为了破解这一技术难题,深入研究了一整套止飞理论,旨在实现致裂器止飞效果,从而保证致裂效果明显。

## 1 单管致裂器孔内力学分析

### 1.1 爆破瞬间致裂器内部压力变化规律

在致裂器爆炸瞬间,完成时间在几毫秒内,是一个高压、高温、高速的瞬态过程<sup>[12]</sup>,有爆炸冲击波和爆生气体共同作用于致裂器本身。气体爆生膨胀产生的能量中,能量损失较少,绝大部分产生的能量都储存在爆生气体之中,并且储液罐内部发生作用所需时间小于爆生气体载荷作用于煤层的时间。二氧化碳气化瞬间,爆生气体迅速膨胀,对致裂器内壁作用一个极高的压力,在管内瞬间形成一个压应力场<sup>[13]</sup>,径向力相互作用,绝大多数抵消。轴向压力偏向一侧,且足够大,压应力场可能沿轴向使致裂器瞬间飞出,因此得出管路内瞬间产生的爆生气体的膨胀压力作用致使致裂器瞬间位移的这一结论。

储液管内当气流沿轴向运动冲破定压剪切片瞬间,高压二氧化碳气体向泄能头方向运动,对管体产生一个相反的作用力,导致管体向钻孔孔口方向运动,造成致裂器飞管;径向方向沿中心对称,各方向作用力相互抵消。

当二氧化碳气流冲破定压剪切片转向泄能口运动时,二氧化碳气体由径向泄能口喷射而出,泄能口在圆周上对称布置,径向方向上作用力均匀分布,不会产生扭转力矩,也不会产生轴向的作用力。

### 1.2 爆生气体卸放瞬间孔内力学变化规律

爆破能量的释放是通过形成冲击波作用周围介质来完成的,当二氧化碳气体泄放瞬间,随着时间推移,气体膨胀,冲击波压力也随之升高,在局部内向外传播,其正压区域被不断扩大,但是随着传播距离的不断伸长,冲击波的传播面积增大,假设在能量没有任何损耗的情况下,单位面积上正压能量不断衰减,因此,泄放口局部区域冲击波压力最高,孔底压力场最大,向孔口和媒体方向,压力场减弱,压力由高压方向向低压方向转移。

爆生气体经径向 3 个泄放口释放,冲击波压力和速度极高,在很短时间内作用于煤层,使煤层产生裂隙,由于孔口有封孔,高压气体不能短时间内压力减少,将气体视为理想气体在孔内等熵膨胀<sup>[14]</sup>,高压气体在孔内经过多次放射与透射,气压也随裂隙增加而慢慢减小,最终形成一个相对稳定的气压。

爆生气体状态方程为

$$PV^\eta = C \quad (1)$$

式中: $P$  为气体压力, Pa;  $V$  为气体体积,  $m^3$ ;  $\eta$  为爆生气体等熵指数;  $C$  为常数。

爆生气体压力逐渐减小,造成体积增大,体积增大有 2 个方面:一是裂隙增多、增大使体积增大;二是使孔内管路产生位移,向孔口飞出,使孔内体积瞬间增大<sup>[15]</sup>,致使致裂器管体瞬间飞出。

## 2 致裂器止飞关键参数对飞管现象的影响

### 2.1 管内泄放压力的测定及对飞管的影响

为了考察不同发热材料用量、液态二氧化碳充装量与爆破压力之间关系,搭建了爆破过程储液管内压力变化测定试验系统<sup>[16]</sup>。试验系统主要包括防爆试验舱、数据采集系统、侧壁开孔的  $\phi 57$  mm 致裂器、固定装置等,其中,数据采集系统包括压力传感器、数据采集卡及其配套软件、直流稳压电源、计算机、信号线、电源线等。试验系统布置与设备连接分别如图 1 和图 2 所示。

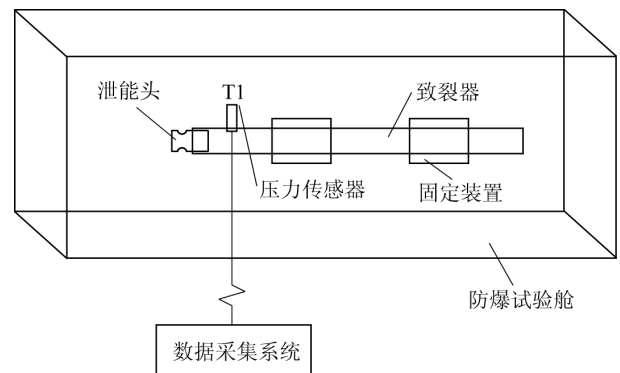


图 1 泄放压力测试系统布置示意

Fig.1 Layout diagram of pressure release test system



图 2 泄放压力测试系统设备连接

Fig.2 Equipment connection for pressure release test system

根据发热材料合理用量考察结果,利用爆破压力测试系统对液态二氧化碳充装量、发热材料用量条件下的管内压力变化开展实测。试验考察了规格为  $\phi 57$  mm、长度 1 m、定压剪切片厚度 3 mm 的致裂器爆破过程管内压力变化情况,试验过程中,液态二氧化碳充装压力均为 10 MPa,发热材料用量分别为

130、150、180 g,开展了3次爆破压力测定试验,试验记录见表1。典型爆破压力曲线如图3所示。

表1 爆压压力测定试验记录

Table 1 Experimental record of explosive pressure measurement

储液罐 直径/m	定压剪 切片厚 度/mm	发热 材料 用量/g	液态二氧 化碳充 装量/kg	峰值 压力/ MPa
1	3	130	0.93	181.31
—	3	150	0.96	187.41
0.057	3	180	0.95	186.50

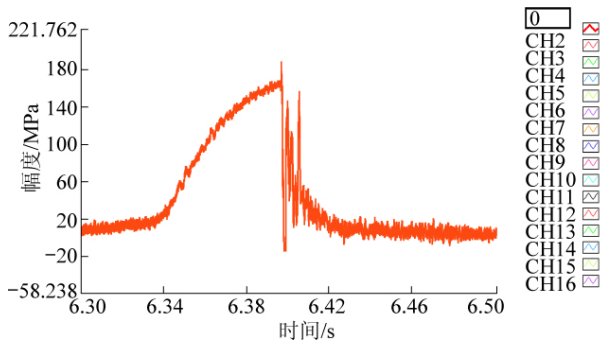


图3 发热材料用量150 g时爆破压力曲线

Fig.3 Blasting pressure curve for heating material dosage 150 g

从测定结果可以得出,3 mm定压剪切片动态抗剪强度约为185 MPa。发热材料用量对储液管内压力变化影响不大,发热材料用量在满足成功爆开定压剪切片基础上,适当增加有限量即可。峰值压力185 MPa的冲击波对储液管产生等值的方向作用力,使储液管做直线加速运动,迅速向孔口方向飞出。

## 2.2 管体对止飞的影响

根据流体力学的理论,流体在通道内流动时,将受到沿途阻力和局部阻力影响,能量在流动过程中,存在消耗,管径越小,过流断面越小,管壁对流体约束作用越大,流动阻力越大,能量损失越大;能量损失也随流体流程长度的增加而增加,管体越长,沿途阻力也越大;过流断面突变越大,局部能量损失越大,定压剪切片连接处,断面面积变化越小,局部能量损失越小;管内壁的粗糙程度对流体能量损失也起到正相关的作用,管壁越粗糙,沿途损失越大,内壁的高压气体撞击内壁也会产生不规则的反射,造成内壁流动不规则,反之亦然。

光滑的管体、较小的断面面积变化、适当长度的管体都会对致裂器的止飞起到积极的作用因素,在一定程度上避免飞管现象。

## 2.3 泄能孔面积对飞管的影响

二氧化碳泄放过程相当于高压容器冲破安全阀

的过程,泄能孔面积大小影响着泄放压力和流量,泄放能量大小会直接影响致裂器是否飞管,当泄放压力一定时,面积越小,单位时间内流体泄放量越小,管内超压增大;反之,泄能孔面积增大到一定程度,单位时间内流体泄放量增加,泄放后容器内超压将在短时间内迅速降低。

如果泄能孔面积过小,不仅泄放能量降低,对煤体致裂效果减弱,达不到致裂的作用,又会在管体内部造成短时的超压增大,造成流体发生不规则的湍流,对管体造成不规则作用力,使管体发生不规则的异动,发生不明方向的飞管。如果泄能孔面积过大,单位时间内泄放量过大,一方面局部过大的推力使管体发生飞管,另一方面面积过大的泄能孔使泄能头强度不足,不能重复使用。总之,在保证充足的管体强度的前提下,增加泄能孔面积,防止管内气体湍流和管外局部推力过大,对致裂器产生飞管的现象。

## 2.4 泄能孔方向对飞管的影响

泄能孔方向对致裂爆破后飞管有重要影响,不同的气体运动方向产生不同的反作用力,随孔口方向不同,产生不同方向的合力,使管体飞出钻孔;当孔口方向与管体轴线正交时,即 $90^\circ$ 时,泄能孔在圆周方向上对称布置,不同泄能孔喷射的二氧化碳气体形成的反向作用力合力为零,不会影响致裂器轴向运动;当孔口方向与管体轴线斜交时,斜角度朝向充装阀方向,不同泄能孔喷射的二氧化碳形成的反向作用力不为零,径向作用力对称分布,合力为零,各轴向作用力合力叠加,方向朝向孔口方向,将与气体沿直线运动时的轴向作用力相互抵消,部分阻止致裂器飞出。

## 3 止飞技术

### 3.1 封孔技术

封孔是煤矿抽放瓦斯中一项重要的技术,钻孔的密封性直接影响抽采的效果,然而对于致裂器止飞来说,封孔也是至关重要一项技术,如果致裂器本体把封孔冲破,直接关系到致裂器的致裂效果,更影响瓦斯的抽采效果。封孔多采用合成树脂和水泥浆加压注浆工艺,二堵一注能使钻孔周围裂隙得到填充、密闭,也能更好地护孔<sup>[17-19]</sup>,保证孔口的稳定。在现场试验中,采用的钢丝绳捆绑、覆盖止飞网等手段进行封孔止飞,效果并不显著。封孔作为其他止飞技术的补充,封孔长度和材料的不同选择,可以作为致裂器止飞的有效手段之一。

由于封孔后孔口注浆经过压密,在爆生气体高压冲击波作用下,变形忽略不计,视为刚体,运动方

向为孔口方向,其运动可视为刚体运动,进行受力分析,如图4所示,以顺层钻孔封孔为例。

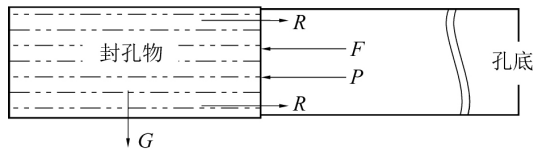


图4 封孔物受力分析示意

Fig.4 Stress analysis of sealing material

封孔物受爆生气体压力  $P$ 、自身重力  $G$  及孔口对封孔物的滑动摩擦力(静摩擦力)  $R$  的作用下向孔口运动,根据牛顿第二定律可得:

$$\frac{\pi}{4} d^2 P + F - R = ma \quad (2)$$

其中  $m = \pi d^2 L \rho / 4$ , 根据泊松效应,可得滑动摩擦力  $R = \pi d(L-X) \lambda f P^{[15]}$ , 其中:  $L$  为封孔物的长度,  $X$  为封孔物的滑动距离;  $\rho$  为密度;  $\lambda$  为侧压系数<sup>[20]</sup>  $\lambda = \mu_d / (1 - \mu_d)$ ;  $f$  为滑动摩擦因数;  $d$  为封孔物的直径;  $F$  为致裂器飞管的冲击力,由于致裂器飞管时的速度足够快,轴向力远大于外管壁与内孔的摩擦力,  $F = PS$ ,  $S = \pi d_1 / 4$ ;  $d_1$  为致裂器直径。

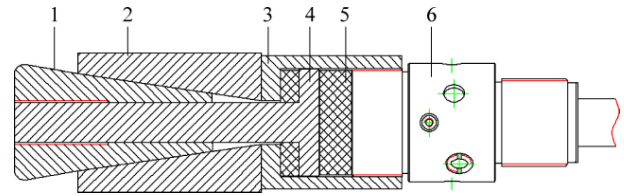
$$L = X + \frac{d}{4\lambda f} + \frac{F}{\pi d \lambda f P} \quad (3)$$

封孔物的位移  $X$  为零或者刚好为封孔物的长度  $L$  时,钻孔直径增加,封孔长度也相应增加;封孔材料的不同,摩擦因数也相应变化,  $f$  增大,封孔的长度也逐渐减小;封孔物既可以阻止致裂器飞出,又可以使爆生气体在孔内充分发挥预裂效果,高压应力波充分作用于煤(岩)石。

### 3.2 机械止飞

机械式止飞是爆破作业时必要的止飞装置,缓冲室与致裂器主控头通过螺纹连接,压缩轴与锥体相连,在缓冲室内腔的压缩轴前后端部有缓冲垫。致裂器有轴向飞出孔口的趋向,固定连接的缓冲室推动尼龙套沿锥体运动,尼龙套膨胀并径向扩张,扩张到与钻孔大小,利用与钻孔内壁的膨胀摩擦,强制止飞;缓冲垫起到缓冲减震的作用,防止压缩轴与致裂器发生刚性碰撞,损坏电路。止飞装置利用膨胀的尼龙套与锥体的相互摩擦,利用的是锥体自锁的原理,也就是斜面自锁,当尼龙套受的水平推力、铅锤作用力、斜面法向反力、最大摩擦力组成平衡力系时,可以最大限度保证致裂器止飞效果。止飞装置如图5所示。

由受力分析可知,当锥体处于平衡状态时,静摩擦力最大时,支持力和摩擦力的夹角与接触面



1—锥体;2—尼龙套;3—缓冲室;4—压缩轴;5—缓冲垫;6—致裂器

图5 止飞装置

Fig.5 Mechanical stop device

法线的夹角为摩擦角,摩擦角的正切值等于静摩擦因数。

$$\mu = \tan \alpha \quad (4)$$

尼龙套与45号钢在无润滑的情况下摩擦因数为0.57,根据式(4)可知,  $\alpha$  为  $29.683^\circ$ ,摩擦角取整为  $30^\circ$ ,尼龙套和锥体间角度为  $30^\circ$ ,满足自锁条件,可最大限度止飞。

### 3.3 泄能口止飞

泄能装置选用双向泄能阀,如图6所示,有夹角为  $180^\circ$  的上下4个径向泄能口,两两相对互通,上下排列,爆生气体冲破剪切片后,高压气体在相对泄能口喷出受到的径向力,可相互抵消,力沿半径方向,不会对管径产生力矩,可有效防止管体转动。

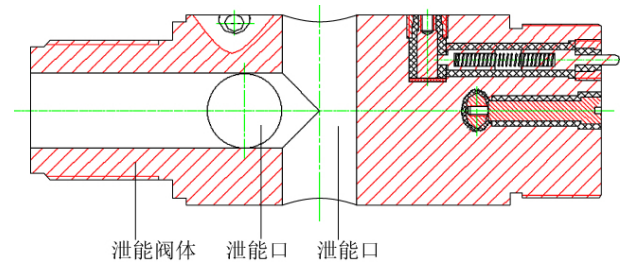


图6 泄能阀

Fig.6 Energy relief valve

由于高压、高速气体冲破剪切片的瞬间,作用于整个致裂器的轴向作用力造成致裂器向瓦斯抽采钻孔孔口方向移动,且速度较快,经受力分析,如果使泄能口倾斜一定角度,泄放的作用力可分解为轴向和径向作用力,径向作用力相互抵消,致裂器不能转动,4个泄能口的轴向作用力可抵消部分爆破瞬间产生的轴向作用力,轴向力减小,致裂器止飞,如图7所示。

采用 Solidworks 建立三维模型,管体材料45号钢,剪切片材料为 Q345,使用 Flow Simulation 进行内部流动分析,对4个斜泄能口进行封盖,封盖厚度为3mm,形成一个完全封闭的内部体积,设置热动力参数,压力为测定的185MPa,插入入口边界

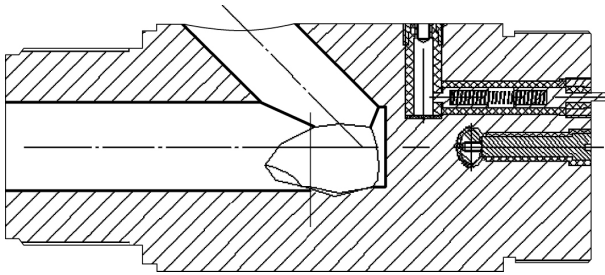


图7 斜泄能阀

Fig.7 Oblique energy relief valve

条件腔内总压 185 MPa,设置 4 个泄能口为出口边界条件,显示封盖处动压平均值,进行网格划分,加载试验。

内部流体模拟结果显示,经过多次湍流和涡流之后,封闭空间内压力聚集,爆破瞬间冲破泄能片,泄压压力 185 MPa,在 4 个泄能口冲出,由结果可知 4 个泄能口压力相同。计算分析结果如图 8 所示。

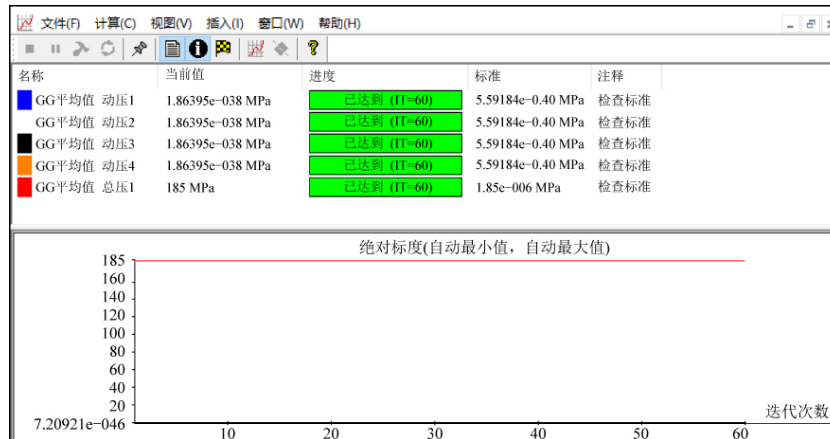


图8 计算分析结果

Fig.8 Calculation and analysis results

由于爆破泄放时间很短,可等效把气体当作理想不可压缩气体,由理想气体状态方程可得:

$$PV = nRT \quad (5)$$

其中:  $P$  为压强;  $V$  为体积;  $n$  为物质的量;  $R$  为气体常量;  $T$  为体系温度。

假设斜孔倾斜角度为  $\alpha$ ,  $A$  个泄能口作用力在轴向上的合力与爆破产生的轴向外力相等,使致裂器达到平衡:

$$4\pi R_{22} P_2 \cos \alpha = P_1 \pi R_{12} \quad (6)$$

$$\alpha = 75^\circ$$

## 4 结 论

1) 爆生气体爆破瞬间,无论管内高压气体对管体的轴向力和泄能口释放后在钻孔内部体积变化,都会致使二氧化碳致裂器向孔口方向移动,且移动速度较快。

2) 在压力泄放试验中,为了测定致使致裂器飞出的压力,使用压力测试系统,测定了爆生气体冲破剪切片瞬间最高的压力,1 kg 液态二氧化碳气化后,可达到的最高压力平均为 185 MPa,致裂效果显著,但是这个压力也造成了致裂器飞管的主要原因。

3) 一定长度的光滑管内壁,保证强度前提下,适当的泄能孔面积和一定角度的斜泄能孔可以在一

定程度上降低或者阻止飞管现象的发生。

4) 止飞的手段有 3 种,封孔止飞、机械止飞和泄能口自身止飞,三者相互配合,通过设计泄能口的方向和角度,可最大程度上保持致裂器的动态平衡,结合机械式膨胀摩擦强制止飞手段和辅助手段封孔止飞,为致裂器更稳定的致裂增透提供保证。

## 参考文献(References):

- [1] 刘升贵,贺小黑,李惠.煤层气水平井煤粉产生机理及控制措施[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2011,30(4):508-512.  
LIU Shenggui, HE Xiaohei, LI Hui. Production mechanism and control measures of coal powder in coalbed methane horizontal well [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2011, 30(4): 508-512.
- [2] 李瑞,王生维,陈立超,等.煤层气排采中煤粉产出量动态变化及影响因素[J].煤炭科学技术,2014,42(6):122-125.  
LI Rui, WANG Shengwei, CHEN Lichao, et al. Coal powder output dynamic variation and influence factors during coalbed methane drainage [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 122-125.
- [3] 柳迎红,刘强,刘春艳,等.煤层气解堵实验研究[J].中国煤层气,2009,6(4):34-37.  
LIU Yinghong, LIU Qiang, LIU Chunyan, et al. Study on CBM blocking removal experiment [J]. China Coalbed Methane, 2009, 6(4): 34-37.

- [4] 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.  
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, 2015, 34(1): 1-5.
- [5] 赵立朋. 煤层液态 CO<sub>2</sub> 深孔爆破增透技术[J]. 煤矿安全, 2013, 44(12): 76-81.  
ZHAO Lipeng. Technology of liquid carbon dioxide deep hole blasting enhancing permeability in coal seam [J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(12): 76-81.
- [6] 贺 超. 基于二氧化碳深孔预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.
- [7] 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 fracturer applied to deep borehole pre-cracking blasting for seam permeability improvement [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 80-83.
- [8] 黄国月, 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.
- [9] 严成增, 孙冠华, 郑 宏, 等. 爆炸气体驱动下岩体破裂的有限元-离散元模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2419-2425.  
YAN Chenzeng, SUN Guanhua, ZHENG Hong, *et al.* Simulation of explosive gas-driven rock fracture by FEM/DEM [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(8): 2419-2425.
- [10] 李 宁, 陈莉静, 张 平. 爆生气体驱动岩石裂缝动态扩展分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 460-463.  
LI Ning, CHEN Lijing, ZHANG Ping. Dynamic analysis for fracturing progress by detonation gas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 28(4): 460-463.
- [11] 李 宁, SWOBODA G. 爆破荷载的数值模拟与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(4): 357-364.  
LI Ning, SWOBODA G. A numerical model for blast load and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 13(4): 357-364.
- [12] 杨小林, 孙 博, 褚怀保. 爆生气体在煤体爆破过程中的作用分析[J]. 金属矿山, 2011(11): 65-68.  
YANG Xiaolin, SUN Bo, CHU Huaibao. Analysis on effect of detonation gas in the process of coal blasting [J]. Metal Mine, 2011(11): 65-68.
- [13] 李 炜. 数值分析模拟爆生气体作用下岩石裂纹扩展研究进展[J]. 工程建设, 2008, 40(2): 16-22.  
LI Wei. Advancement of study on numerical analysis and simulation of rock crack growth under action of gas generated by explosion [J]. Engineering Construction, 2008, 40(2): 16-22.
- [14] 凌伟明, 杨永琦. 爆生气体在光面爆破中的作用[J]. 煤炭学报, 1990, 15(1): 73-82.  
LING Weiming, YANG Yongqi. Effect of explosion gas on smooth blasting [J]. Journal of China Coal Society, 1990, 15(1): 73-82.
- [15] 赵新涛, 刘东燕, 程贵海, 等. 爆生气体作用机理及岩石裂纹扩展分析[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(6): 75-80.  
ZHAO Xintao, LIU Dongyan, CHENG Guihai. Analysis of blasting gas mechanism and rock crack growth [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(6): 75-80.
- [16] 康 玉. 煤气泄漏装置的数值模拟与试验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011, 24(9): 21-24.
- [17] 王圣程, 庞叶青, 张云峰, 等. 抽采钻孔带压注浆封孔技术的研究与应用[J]. 煤矿安全, 2011, 42(6): 4-6.  
WANG Shengcheng, PANG Yeqing, ZHANG Yunfeng. Research and application of borehole grouting sealing under pressure technology [J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(6): 4-6.
- [18] 陈春阳. 深孔预裂爆破联合封孔技术研究[J]. 煤矿安全, 2015, 24(9): 10-12.  
CHENG Chunyang. Deep hole pre-splitting joint sealing holes blasting technology research [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 24(9): 10-12.
- [19] 刘思佳, 王直亚, 赵荣阔. 深孔预裂爆破封孔技术的研究[J]. 煤矿安全, 2014, 45(11): 72-73.  
LIU Sijia, WANG Zhiya, ZHAO Rongkuo. Study on deep-hole pre-splitting blasting hole sealing technique [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(11): 72-73.
- [20] 郭德勇, 杨 雄, 单智勇, 等. 煤层深孔聚能爆破封孔技术[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(7): 785-789.  
GUO Deyong, YANG Xiong, SHAN Zhiyong. Sealing technology of coal bed deep-hole cumulative blasting [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(7): 785-789.