



移动扫码阅读

李军军, 余梦飞, 李国富, 等. 航天固体推进剂对煤储层致裂增透试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 121-128.  
LI Junjun, YU Mengfei, LI Guofu, *et al.* Experimental study of aerospace solid propellant fracturing in simulated coal sample[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 121-128.

## 航天固体推进剂对煤储层致裂增透试验研究

李军军<sup>1,2</sup>, 余梦飞<sup>3</sup>, 李国富<sup>1,2</sup>, 王 争<sup>1,2</sup>, 龚 健<sup>3</sup>, 高军科<sup>4</sup>

(1. 煤与煤层气共采国家重点实验室, 山西 晋城 048012; 2. 易安蓝焰煤与煤层气共采技术有限责任公司, 山西 太原 030031;  
3. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000; 4. 湖北航天化学技术研究所, 湖北 襄阳 441003)

**摘要:** 高瓦斯低渗透性的煤储层严重制约煤炭和煤层气的高效生产, 必须对煤储层进行致裂增透。航天固体推进剂爆燃能够产生大量的高能气体冲击煤储层, 可以达到致裂增透煤储层的目的。为研究航天固体推进剂致裂煤体特性, 首先以民用航天固体推进剂配方为基底, 研发了一种用于煤储层致裂增透的固体推进剂, 并对其性能、感度、耐压和耐温性能进行了测试, 然后采用模拟煤样开展了航天固体推进剂致裂试验, 并对试验过程中的孔壁压力和模拟煤样内应变进行了监测, 最后根据试验结果分析了模拟煤样的破坏特征。结果表明: 航天固体推进剂性能良好, 具备防水、耐压和不产生 CO 等优点, 能够适应煤矿井下的环境。试验过程中孔壁压力时程曲线呈现急速升压阶段、缓慢升压阶段和非线性降压阶段, 孔壁压力上升时间约为 18 ms; 孔内压力峰值较低且分布不均匀, 孔中压力峰值为 118.1 MPa, 孔底压力峰值为 85.3 MPa。航天固体推进剂致裂过程中, 模拟煤样内产生的应力波由压缩相和拉伸相组成, 应力波强度较低、持续时间长并且随距离的增大衰减缓慢。航天固体推进剂致裂煤储层以高能气体的准静态作用为主, 应力波能量的利用率较高。研究结果为航天固体推进剂在煤层气开采领域的应用提供了参考。

**关键词:** 低渗透性煤层; 航天固体推进剂; 高能气体致裂; 应力波传播; 衰减规律; 孔壁压力; 增透  
**中图分类号:** P618      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0253-2336(2023)09-0121-08

### Experimental study of aerospace solid propellant fracturing in simulated coal sample

LI Junjun<sup>1,2</sup>, YU Mengfei<sup>3</sup>, LI Guofu<sup>1,2</sup>, WANG Zheng<sup>1,2</sup>, GONG Jian<sup>3</sup>, GAO Junke<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal and Coalbed Methane Co-Mining, Jincheng 048012, China; 2. Yian Lanyan Coal and Coalbed Methane Co-Mining Technology Co., Ltd., Taiyuan 030031, China; 3. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;  
4. Hubei Institute of Aerospace Chemistry Technology, Xiangyang 441003, China)

**Abstract:** Coal reservoirs with high gas content and low permeability seriously restrict the efficient production of coal and coalbed methane. It is necessary to fracture and enhance the permeability of coal reservoirs. Aerospace solid propellant deflagration can generate a large amount of high-energy gas to impact coal reservoirs, which can achieve the purpose of fracturing and enhancing permeability of coal reservoirs. To study the characteristics of aerospace solid propellant for fracturing coal, a solid propellant for fracturing and permeability enhancement of coal reservoir was firstly researched and developed based on the formula of civil aerospace solid propellant, was, and its performance, sensitivity, pressure and temperature resistance were tested. The aerospace solid propellant fracturing test was then carried out using simulated coal samples, and the borehole wall pressure and strain within the simulated coal samples were monitored during the test. Finally, the destruction characteristics of simulated coal samples were analyzed according to the test results. The results shown that the aerospace solid propellant had good performance, with the advantages of waterproof, pressure resistant, and no CO generation, which could be adapted to the underground environment of coal mine. During the test, the time curve of the borehole wall pressure shown the stages of rapid pressure rise, slow pressure rise, and nonlinear pressure drop, in which the rise time of the borehole wall pressure was about

收稿日期: 2022-07-01      责任编辑: 宫在芹      DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1022

基金项目: 山西省科技重大专项资助项目(20181101013); 山西省科技重大专项揭榜招标资助项目(20201101003)

作者简介: 李军军(1984—), 男, 河北唐山人, 高级工程师, 硕士。Tel: 0356-3653851, E-mail: qaljj@163.com

18 ms. The peak pressure in the borehole was low and unevenly distributed. The peak pressure in the middle of the borehole was 118.1 MPa, and the peak pressure at the bottom of the borehole was 85.3 MPa. Stress wave generated in simulated coal sample during aerospace solid propellant fracturing was composed of compressive and tensile phases with low intensity, long duration and slow decay with distance. The aerospace solid propellant fracturing technology was dominated by the quasi-static action of high-energy gas, with high utilization of stress wave energy. The research results provide a reference for the application of aerospace solid propellant in the field of coalbed methane mining.

**Key words:** low permeability coal seam; aerospace solid propellant; high-energy gas fracturing; stress wave propagation; attenuation law; pressure in the borehole wall; permeability enhancement

## 0 引言

我国煤层气资源丰富,储量约 36.8 万  $\text{m}^3$ , 位居世界第三,开发和利用潜力巨大<sup>[1-2]</sup>,但煤层渗透率普遍偏低,一般在  $(0.001 \sim 1.800) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ <sup>[3]</sup>。目前,提高煤层的渗透性已经成为我国煤层气抽采效果成败的关键,不仅商业开采面临挑战,而且制约煤矿的安全绿色生产<sup>[4]</sup>。因此,研究低渗透煤层增透技术迫在眉睫。国内外煤炭工作者对提高煤层渗透性进行了长期探索和实践,目前提高煤层渗透性的技术主要有水力压裂、水力割缝、开采解放层、深孔爆破预裂、等离子脉冲等<sup>[5-9]</sup>。水力压裂和水力割缝耗水量大,且活性水压裂液中的化学添加剂对地下水资源造成污染,大量的活性水压裂液会占据煤层气流通通道,导致产气量降低;深孔预裂爆破实施过程易发生事故;开采解放层多适用于煤层组的联合抽采,但对于单一厚煤层,压裂施工复杂,效果不理想;等离子脉冲技术对于储层改造效果维持时间难以保证且成本过高。

高能气体压裂技术最早于 19 世纪 60 年代由美国提出<sup>[10]</sup>,其实质是通过非爆炸方式产生大量气体,促使脆性煤岩体产生较长的多裂缝体系,沟通更多的天然裂缝,形成复杂的网络裂缝,达到致裂效果的目的<sup>[11-14]</sup>。陈莉静等<sup>[15]</sup>利用断裂力学初步揭示了高能气体作用下的致裂机理;王建中<sup>[16]</sup>在恩洪盆地进行了实地试验,证明高能气体压裂技术应用于煤层气开发的研究思想是可行的;吴飞鹏等<sup>[17]</sup>分别利用不同加载条件下的岩石动态损伤模拟试验和理论研究,建立了高能气体压裂载荷计算模型与合理药量的确定方法;ZHU 等<sup>[18]</sup>基于数值模拟对高压空气爆破可增强瓦斯抽放效果进行量化,结果表明高压空气爆破引起的损伤可有效促进瓦斯抽采;贺飞飞<sup>[19]</sup>通过数值模拟结合理论分析,探究了高能气体压裂煤系复合储层裂缝穿层扩展机理。

利用航天固体推进剂爆燃产生高能气体是一种典型的高能气体压裂技术,因其不需要大型施工设备、作业过程和普通炸药爆破类似,并且可以通过控

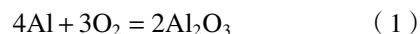
制推进剂当量和成分比例来控制产气量和产气速度等优点,在油气开采领域已经开展了大量应用,是目前认可度较高的一种致裂技术。但是航天固体推进剂在煤层气开采领域的应用和研究还停处在初级阶段,尤其是利用航天固体推进剂致裂煤样过程中孔壁压力时空演化规律和煤样内应力场缺乏系统性研究。

为此,笔者首先以民用航天固体推进剂配方为基底,研发了一种煤矿用固体推进剂,并对其性能、感度、耐压和耐温性能进行了测试,然后采用模拟煤样开展了航天固体推进剂致裂试验,并对试验过程中的孔壁压力和模拟煤样内应变进行了监测,最后根据试验结果分析了模拟煤样的破坏形态。以期航天固体推进剂在煤层气开采领域的应用提供参考。

## 1 航天固体推进剂产气原理与高能气体致裂机理

### 1.1 航天固体推进剂产气原理

航天固体推进剂主要由加热剂、产气剂和供氧剂等组成。其中供氧剂给加热剂提供氧气,使其发生氧化反应并放出大量热量,然后产气剂受热分解产生大量气体。笔者选择采用铝粉为加热剂,选择高氯酸铵为供氧剂和主要的产气剂制作高能气体压裂剂。高温情况下高氯酸铵分解产生氧气,同时铝粉被氧气氧化,放出大量的热,又反过来促使以高氯酸铵为主的混合物受热分解产生大量高温高压气体产物(高能气体),主要反应方程式如式(1)~式(3)所示。



### 1.2 高能气体致裂机理

推进剂被激发后在孔内产生高温高压的气体并迅速膨胀冲击孔壁,在煤样内产生冲击波或应力波,从而在孔壁周围产生粉碎区或径向裂隙。随后高温高压气体产物在应力波作用的基础上开始膨胀做功,首先高温高压气体楔入孔壁上的初始裂纹驱动其稳

态扩展,随后高温高压气体准静态应力场与原岩应力场叠加致使裂纹尖端介质发生准脆性断裂进一步促进裂纹扩展,最后裂纹尖端由于损伤局部化作用而再次在小范围内扩展。从而在钻孔周边形成大范围的裂隙区,在一定程度上改善煤层气储层裂隙发育水平,疏通渗流通道,提高煤层渗透性。

此外,利用推进剂爆燃产生高能气体对煤储层进行致裂对煤层气还具有较强的解吸作用:裂隙区以外的弹性区内,煤样微观孔裂纹结构和煤层气赋存状态受到扰动,打破了煤样中煤层气吸附与解吸的动态平衡,使部分吸附煤层气转化成游离煤层气,构成扰动解吸作用;推进剂在钻孔内爆燃产生大量高温气体,而煤层气的解吸属于吸热过程,这样产生的热量通过热传递作用于钻孔周围的煤层,从而使处于动态平衡的瓦斯气体朝着解吸的方向进行,构成热效应解吸作用;航天固体推进剂中的主要成分是碳、氢、氧,完全燃烧后可产生大量的 $\text{CO}_2$ ,而煤对 $\text{CO}_2$ 分子的吸附效应约是 $\text{CH}_4$ (煤层气的主要成分,甲烷)分子的2倍,因此 $\text{CO}_2$ 分子可以通过替换 $\text{CH}_4$ 分子而使 $\text{CH}_4$ 分子解吸,使其成为游离态,构成置换解吸作用。

## 2 航天固体推进剂压裂模拟煤样试验

### 2.1 推进剂配比及性能

为研制适合煤储层致裂增透的航天固体推进剂,根据航天固体推进剂的产气原理和高能气体致裂机理,对推进剂有以下要求:产生的气体尽可能无毒无害无腐蚀性;高能气体作用下煤样不产生或产生较小的粉碎区,尽可能提高能量利用率;尽可能产气量大,能够稳态驱动裂纹扩展较长距离,造成更大范围的裂隙区;保证使用和生产过程中的安全。经过分析,通过以下技术途径实现以上要求:①慎选原材料并进行氧平衡计算,以碳、氢、氧、氮元素优先为主,不含硫等,减少有毒有害气体;②通过更改配比控制推进剂燃烧速度(产气速度),从而使高能气体作用下钻孔附近产生的应力波强度高于煤的动态抗拉强度,但低于煤的动态抗压强度;③产气剂选择受热分解后能够产生大量气体的化学物质,本压裂剂选择高氯酸铵为主要的产气剂;④不含爆炸物,如硝酸铵、高磷酸铵、硝基铵等,一般刺激源(如摩擦、撞击、静电)不能引发其燃烧,保证生产、储备、运输和使用安全。

以民用航天固体推进剂配方为基底,研发了一种煤矿用固体推进剂,其组分见表1。

为了解推进剂的基本性能参数,根据火炸药性能测试方法<sup>[20]</sup>对推进剂进行性能试验,试验结果见表2。结果表明:研发的推进剂产气量大,约1400 L/kg,且能释放大量热量,热值约为3500 kJ/kg。

表1 航天固体推进剂成分及比例

Table 1 Composition and proportion of aerospace solid propellant

原料	规格	质量配比/%
HTPB(丁羟胶)	I型	13.39
KZ(二乙酸二异氰酸酯)	工业级	3.5
AP(高氯酸铵)	Ⅲ类	73.0
AP(高氯酸铵)	Ⅳ类	5.0
Al(铝粉)	工业级	5.0
其他	—	0.11

表2 推进剂(试验件)性能参数

Table 2 Performance parameters of propellant (test piece)

试验件	配方	装药量/kg	燃速/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	产气量/ $(\text{L}\cdot\text{kg}^{-1})$	热值/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
Sy-高	YLD	0.3	14	>1400	$\geq 3500$	1.4~1.7

为了解推进剂感度和耐温与抗压性能,对压裂剂进行相应的测试<sup>[20]</sup>,测试结果见表3,由表3可以看出,配方的摩擦和撞击感度、耐压和耐温性能较好,可以满足生产、储备、运输和使用的要求。

表3 推进剂感度、耐压和耐温试验结果

Table 3 Test results of propellant sensitivity, pressure and temperature resistance

试验项目	试验条件	试验结果
摩擦感度	温度: 20℃; 湿度: 55% 摆角: 66°; 压强: 2.5 MPa	8%
撞击感度	温度: 20℃; 湿度: 59% 锤重: 10.0 kg	10%
耐压	—	120 MPa

### 2.2 试验方法

根据文献<sup>[21]</sup>的试验结果,试验选取水泥、沙子和水作为基本材料控制其模拟煤样的结构强度;选取石膏、珍珠岩、发泡剂和云母碎作为添加材料控制模拟煤样的微裂纹、微孔洞、结构面和内部吸收、吸附及自由气体。煤样模拟材料及配比和基本物理力学性能参数见表4。

同时为验证本模拟材料的合理性,表5给出了焦作中马村矿煤的基本力学参数,对比表4和表5可知,本模拟材料的强度、泊松比和弹性模量与原煤

相差较小,模拟煤样可以用来研究航天固体推进剂致裂煤储层特性制作的模拟煤样试块尺寸为 1 000 mm×1 000 mm×600 mm,如图 1a 所示,人工搅拌,在模板中配以小型振动板振动捣固成形,人工养

护 28 d。在试块中间预留直径 50 mm 的装药孔,孔深为 400 mm,推进剂放入后,用植筋胶填塞,利用引火药头起爆,制作的推进剂试样和点火头如图 1b 和图 1c 所示。

表 4 模拟煤样材料及配比和基本物理力学参数

Table 4 Materials, proportions and basic physical and mechanical parameters of the simulated coal

材料质量配比	密度 $\rho$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	泊松比 $\nu$	抗压强度 $\sigma_c$ /MPa	纵波波速 $c_p$ /(m·s <sup>-1</sup> )	弹性模量 $E$ /GPa
沙子:水:水泥:石膏:云母碎:珍珠岩:发泡剂					
4.346:0.501:1.581:0.327:0.035:0.023:0.067	1.84	0.18	24.25	2 580	4.73

表 5 原煤的基本力学参数

Table 5 Basic mechanical parameters of coal

煤样	抗压强度 $\sigma_c$ /MPa	弹性模量 $E$ /GPa	泊松比 $\nu$
焦作中马煤2号	28.735	4.054	0.245
焦作中马煤3号	37.513	3.883	0.184

通过在孔壁上粘贴压力传感器的方式实现孔壁压力测试。试验时将压力传感器用 502 胶水粘到孔壁上,通过信号线从孔口导出到信号采集系统。高能气体作用到孔壁上时挤压传感器产生相应的压力信号,经电荷放大器传输给信号采集系统,从而实现孔壁压力的测试。试验采用 PVDF 压力传感器(图 2a)、信号采集系统采用采样频率 200 kHz 的 DH5922N 动态应变仪(图 2b),孔壁压力测试测点布置如图 2c 所示。

图 3 为应变测试。根据应力波指数衰减规律,在装药段中部预留距钻井中心距离分别为 125、225、350、500 mm 的 4 个位置预埋应变砖,应变砖尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm,其材料及配比与大试块的材料和配比相同。每个应变砖上黏贴应变片,采用成都电测仪器厂生产的型号为 BF120-3AA 的应变片。采用 DH5922N 动态信号采集系统采集应变波形,分析煤样中应力波传播与衰减规律。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 孔壁压力测试结果及分析

试验对孔中和孔底 2 个位置的压力进行测试,试验结束后,从 DHDAS 动态信号分析软件中导出孔底和孔中的压力时程曲线,为便于分析,截取曲线特征明显部位进行分析。测试结果如图 4 所示。



图 1 航天固体推进剂模拟煤样致裂试验

Fig.1 Aerospace solid propellant fracturing simulation coal sample test

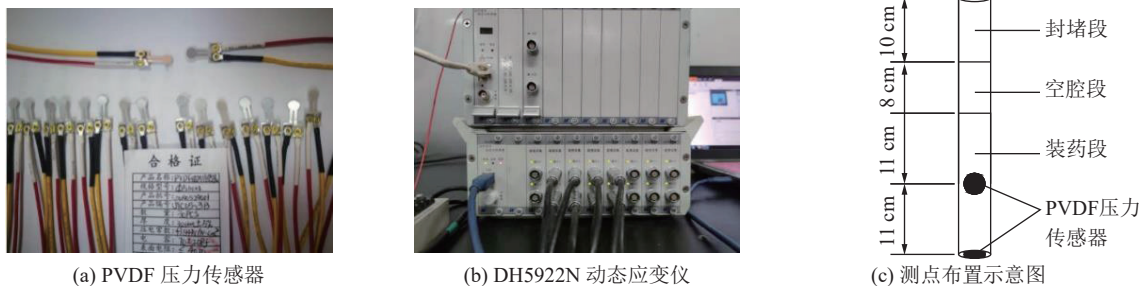


图 2 孔壁压力测试

Fig.2 Borehole wall pressure test

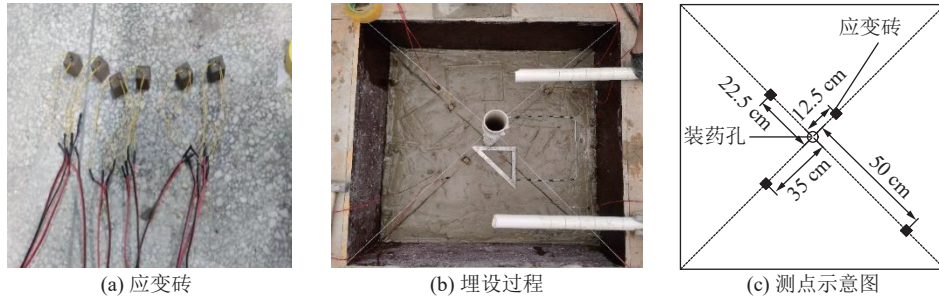


图3 应变测试  
Fig.3 Strain test

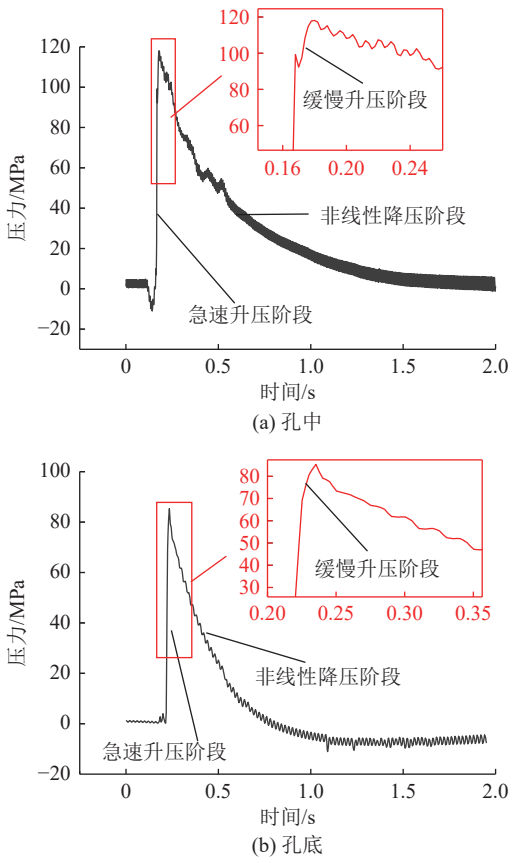


图4 孔壁压力时程曲线  
Fig.4 Pressure-time curve in the borehole

由图4可以看出，高能气体作用下钻井孔中和孔底的压力时程曲线变化趋势一致，呈现出急速升压阶段、缓慢升压阶段和非线性降压阶段。推进剂被激发后，产生大量的高压高温的气体并快速膨胀冲击孔壁，使孔壁压力快速上升，同时诱发煤样内的应力波，在应力波作用下孔壁出现初始裂纹。随着孔壁起裂，高能气体楔入到裂纹内并驱动裂纹稳态向前扩展，气体不断进入煤样，但此时推进剂还在持续反应产生高能气体，生成的气体量大于进入煤样的气体量，因此孔壁压力持续上升，但上升速度减慢。随着裂纹的发育直至贯通，煤样破裂，气体快速泄出，孔壁压力快速下降至 1 MPa 以下。

压力时程曲线无论上升段还是下降段均有明显的波动现象，这不仅跟 PVDF 压电传感器自身特性有关，还与气体在钻井内非均匀流动现象以及推进剂产气速度受钻井内气压影响不稳定有关。

表6为航天固体推进剂致裂煤样过程中孔壁压力测试统计结果。从表中可以看出，推进剂致裂煤样过程中，孔壁压力峰值较小、加载时间较长。推进剂致裂煤体孔壁压力上升时间约 18 ms，压力峰值为 85.3 ~ 118.1 MPa，而炸药爆破作用下孔壁压力在几微秒便能达到几千甚至几万兆帕<sup>[22]</sup>，水力压裂为静态荷载，压力峰值一般较低<sup>[23]</sup>。炸药爆破产生的荷载动态冲击作用较强，水力压裂是完全的静态荷载，而高能气体作用下产生的荷载既有动态冲击作用，也有气体的准静态作用，且以气体的准静态作用为主。

表6 孔壁压力测试统计结果

Table 6 Statistical results of borehole wall pressure test

统计项目	测点位置	测试结果
峰值压力/MPa	孔中	118.1
	孔底	85.3
升压时间/ms	孔中	18.4
	孔底	18.9

通过表6可以看出，航天固体推进剂致裂煤样过程中，钻孔内压力分布不均匀，孔底压力峰值比孔中小。两方面可以解释以上现象：①推进剂点火端在钻井上部，因此钻井上部优先起裂，并且裂纹扩展程度从上到下逐渐降低，孔壁上部出现裂纹后，气体不断进入煤样，高能气体到达孔底时孔内气体量减少，压力下降。②气体都有一定的黏性，推进剂产生的气体在通过孔壁与压裂剂管壁之间的空隙流向炮孔底部时，气体的流层与流层之间、气流与孔壁及压裂剂管壁之间存在相对方向的运动，该运动促使气

体流层之间,气流和孔壁及压裂剂管壁之间产生摩擦力,克服这种摩擦力会消耗高能气体的部分能量,从而造成气体压力的减小,因孔底距离点火端(产气端)较远,气体流经长,所以压力衰减大。

### 3.2 应力波测试结果及分析

试验对距离装药孔 125、225、350、500 mm 处的 4 个测点的径向应变进行了测试。为便于分析,截取波形特征明显部位从 DHDAS 动态信号分析软件中导出,部分测试结果如图 5 所示。

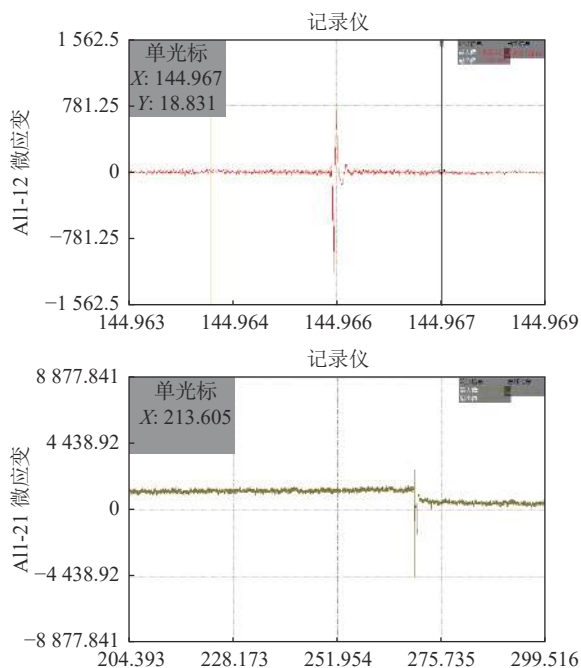


图 5 高能气体作用下煤样内应变波

Fig.5 Strain wave in coal under the action of high-energy gas

从图 5 中可以看出,各测点处一般形成 2 段应变波形。从测点第一段完整应变波波形可以看出,测点首先承受压应力,而后承受拉应力;在作用时间上,高能气体作用下煤样内应变波压缩相持续时间比拉伸相短,整体应变波持续时间大于炸药爆破,高能气体作用下应变波压缩相的作用时间为 2.3 ~ 5.6 ms,拉伸相的作用时间为 3.1 ~ 8.7 ms,而炸药爆炸应力波压缩相作用时间为 40 ~ 50  $\mu$ s,拉伸作用时间为 100  $\mu$ s 以上<sup>[24]</sup>。

表 7 给出了各测点径向应变峰值统计结果,由各测点应变峰值  $\epsilon_{\max}$  乘以煤样动态弹性模量  $E_d$ ,得到各测点的动态应力峰值。其中  $E_d = \frac{c_p^2(1+\mu_d)(1-2\mu_d)}{(1-\mu_d)}$ ,

表 7 各测点应变峰值

Table 7 Peak strain of each measuring point

测点距离/cm	12.5	22.5	35	50
径向微应变	11 812	4 510	2 517	758

$c_p$  为试样纵波波速, m/s;  $\mu_d$  为煤样动态泊松比, 在 高能气体冲击作用下,  $\mu_d = 0.8\mu$ ,  $\mu$  为静态泊松比。计算得出,  $\mu_d = 0.144$ ;  $E_d = 6.34$  GPa。

为分析高能气体作用下煤样内应力波传播与衰减规律,做出高能气体作用下径向应力波峰值随距离分布的散点图,并对散点图进行非线性拟合(拟合公式为  $y = a\bar{r}^\alpha$ , 其中  $\bar{r}$  比例距离为测点到钻孔的距离与钻孔半径比值),拟合结果如图 6 所示。由拟合结果可知,高能气体作用下煤样中应力波衰减指数  $\alpha$  为: 1.67,符合  $\alpha = 2 - \mu/(1 - \mu)$  ( $\mu$  为煤样的泊松比, 0.14 ~ 0.3),而炸药爆破作用下煤样内应力波衰减系数基本符合  $\alpha = 3 - \mu/(1 - \mu)$ <sup>[24]</sup>,即高能气体冲击作用下煤样内应力波衰减较慢。

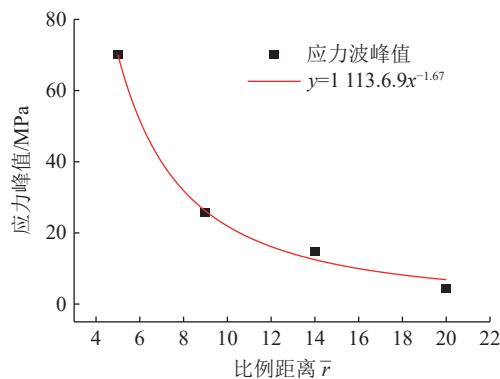


图 6 高能气体作用下应力波衰减规律

Fig.6 Stress wave attenuation law under high-energy gas action

高能气体作用下煤样内应变波持续时间大于炸药爆破,应变峰值小于炸药爆破,即高能气体作用下煤样的应变率小于炸药爆破。应变率越小,能量耗散越少,所以航天固体推进剂致裂煤样过程中煤样内应力波衰减较慢。

### 3.3 模拟煤样破坏形态分析

图 7 给出了一组推进剂致裂煤样试验后试块的破坏形态。从图 7 中可以看出,高能气体作用下试块产生的裂纹呈现随机分布,并且裂纹发育良好,全部贯通,未出现次生裂纹,爆破孔周微裂纹数量较少,无论是主裂纹还是未发育的微裂纹都近似沿着孔的径向向外扩展。碎块的断口多为不规则的粗糙面,有部分碎块剥落现象,符合拉伸破坏的特征。

从孔壁破坏特征可以看出,孔壁表面基本完好无损,高能气体作用下试块没有出现压碎区。此外,高能气体作用下产生的碎块以大块为主,致裂过程中没有出现碎块蹦飞现象。综合以上现象可以得出:利用航天固体推进剂致裂,试块破碎程度不高,但致裂效果好。主要原因如下:



图7 试块破坏形态

Fig.7 Damage pattern of the test block

1) 高能气体压裂以气体的准静态作用为主。高能气体破岩分为两个过程,即作用下应力波的动力加载阶段和高能气体的准静态加载阶段。高能气体的准静态加载阶段在应力波加载阶段的后面,加载压力较低,因此高能气体准静态加载主要作用是使应力波造成的初始裂纹稳态扩展,而不是产生新的裂纹。

2) 应力波加载速率对于材料的断裂韧性有重要影响。对于大多数材料来说,在冲击荷载条件下的断裂韧性低于静态断裂韧性。在静态加载范围内,断裂韧性保持相对稳定,在中等加载范围内,断裂韧性随加载速率的增加而降低。爆破工程中,加载速率一般为中加载或动加载。根据3.2节分析,炸药爆破作用下煤样内应力波加载速率大于高能气体,这说明高能气体致裂过程中煤样的断裂韧性大于炸药爆破,因此高能气体作用下试块破碎程度不高。

3) 应力波加载速率越小,试块孔附近产生的裂纹数量越少。炸药爆破产生的应力波加载速度远大于高能气体,在相同的时间内炸药爆破可以做更多的功,裂隙区开端的介质产生的合成位移更大,孔口附近形成了更多的裂纹,这些裂纹还可能分叉又来消耗应力波的能量。高能气体作用下,煤样内应力波加载速率低,同一时间做的功少,相同的时间内不足以产生与炸药爆破相同数量的裂纹。裂纹数量越少,扩展相同的距离消耗的能量越少,扩展范围越大。

4) 高能气体作用下孔壁荷载远小于炸药爆破,煤样中产生的应力波强度低,不足以使试块孔口附近产生压碎区。炸药爆破作用下孔壁附近煤样产生的应力波强度能达到几千甚至几万兆帕,远大于煤样的动态抗压强度,而高能气体作用下煤样内产生的应力波强度只有几十到几百兆帕,大多数情况下小于煤样的动态抗压强度。因此,高能气体作用下煤样很难产生压碎区。炸药爆破产生的应力波强度很高,但大部分能量消耗在了压碎区,较少比例的能量促进了裂纹的扩展。虽然高能气体作用下产生的应力波强度低,但其不产生压碎区,大部分的能量促

进了裂纹的扩展。

## 4 结 论

1) 分析了航天固体推进剂产气原理和高能气体致裂机理,并据此研发了一种产气量大、解吸效果强、性能良好的煤矿用固体推进剂。

2) 航天固体推进剂致裂煤样过程中孔壁压力时程曲线可分为3个阶段,即急速升压阶段、缓慢升压阶段和非线性降压阶段。试验条件下孔壁荷载升压时间约为18 ms,压力峰值较小,且压力在孔内分布并不均匀。

3) 高能气体作用下,煤样内应力波由压缩相和拉伸相组成;高能气体诱发的应力波强度低,持续时间长且衰减缓慢。

4) 航天固体推进剂致裂煤储层以气体的准静态作用为主,且应力波能量利用率高。

## 参考文献(References):

- [1] 徐 栋,王玉斌,白坤森,等.煤系非常规天然气一体化压裂液体系研究与应用[J].煤田地质与勘探,2022,50(10):35-43.  
XU Dong, WANG Yubin, BAI Kunsen, *et al.* Research and application of integrated fracturing fluid system for unconventional natural gas in coal measures[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2022, 50(10): 35-43.
- [2] 李润之,司荣军,王 磊,等.瓦斯煤尘爆炸主动隔爆启动条件及隔爆效果试验研究[J].煤炭学报,2021,46(S2):810-816.  
LI Runzhi, SI Rongjun, WANG Lei, *et al.* Experimental study on starting condition and effect of active explosion proof for gas and coal dust explosion[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S2): 810-816.
- [3] 文 卓,康永尚,邓 泽,等.中国煤储层渗透率区域分布规律探讨及其与地应力的关系[A].中国煤层气勘探开发与产业化发展战略—2019年煤层气学术研讨会论文集[C]//北京:地质出版社,2019:281-292.  
WEN Zhuo, KANG Yongshang, DENG Ze, *et al.* Discussion on regional distribution law of permeability in China and the relationship with in-situ stress[A]. *China Coalbed Methane Exploration and Development Technology and Industrialization Development*

- Strategy-2019 Coalbed Methane Academic Seminar Papers[C]// Beijing: Geology Press, Beijing, 2019: 281–292.
- [4] 卢义玉, 黄杉, 葛兆龙, 等. 我国煤矿水射流卸压增透技术与战略思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3189–3211.  
LU Yiyu, HUANG Shan, GE Zhaolong, *et al.* Research progress and strategic thinking of coal mine water jet technology to enhance coal permeability in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3189–3211.
- [5] MOU Pengwei, PAN Jienan, WANG Kai. Influences of hydraulic fracturing on microfractures of high-rank coal under different in-situ stress conditions[J]. *Fuel*, 2021, 287: 119566.
- [6] 周雷, 彭雨, 卢义玉, 等. 基于物质点法的深部煤层气水力割缝卸压解吸增透规律数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3298–3309.  
ZHOU Lei, PENG Yu, LU Yiyu, *et al.* Research progress and strategic thinking of coal mine water jet technology to enhance coal permeability in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3298–3309.
- [7] 谢世勇, 赵伏军, 陈才贤, 等. 开采解放层预防煤与瓦斯突出的断裂力学分析[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(4): 22–25.  
XIE Shiyong, ZHAO Fujun, CHEN Caixian, *et al.* Breaking mechanics analysis on mining protective seam to prevent coal and gas outburst[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(4): 22–25.
- [8] 李廷春, 张浩, 张治高, 等. 综采工作面过大落差断层深孔预裂爆破技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 199–209.  
LI Tingchun, ZHANG Hao, ZHANG Zhigao, *et al.* Deep hole pre-splitting technology when fully mechanized coal mining face passes through high drop fault[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 199–209.
- [9] 张祥良, 林柏泉, 申建, 等. 循环等离子体击穿受载煤体电学响应及孔隙结构演化规律[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1567–1583.  
ZHANG Xiangliang, LIN Boquan, SHEN Jian, *et al.* Electrical response and pore structure evolution affected by cyclical plasma breakdown[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1567–1583.
- [10] COWARD H F, JONES G W. Limits of flammability of gases and vapors[R]. Washington, D C: US Bureau of Mines, Bulletin 503, 1952.
- [11] 翟成, 林柏泉, 王力, 等. 我国煤矿井下煤层气抽采利用现状及问题[J]. 天然气工业, 2008, 28(7): 23–26, 132.  
ZHAI Cheng, LIN Boquan, WANG Li, *et al.* Status and problems of drainage and utilization of downhole coalbed methane in coal mines in china[J]. *Natural gas industry*, 2008, 28(7): 23–26, 132.
- [12] WU F, WEI X, CHEN Z, *et al.* Numerical simulation and parametric analysis for designing high energy gas fracturing[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 53: 218–236.
- [13] YANG X, WANG C, CHU H, *et al.* Study on the stress field and crack propagation of coal mass induced by high-pressure air blasting[J]. *Minerals*, 2022, 10: 3390.
- [14] 刘勇, 何岸, 魏建平, 等. 高压气体射流破煤应力波效应分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1694–1700.  
LIU Yong, HE An, WEI Jianping, *et al.* Analysis of stress wave effect during coal breakage process by high pressure gas jet[J]. Journal of china coal society, 2016, 41(7): 1694–1700.
- [15] 陈莉静, 冯纪米, 吴小超. 高能气体瞬态破岩特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S2): 3271–3277.  
CHEN Lijing, FENG Jimi, WU Xiaochao. Experimental research on transient rock breaking characteristics of high-energy gas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S2): 3271–3277.
- [16] 王建中. 高能气体压裂技术在云南恩洪盆地煤层气开发中的试验应用[J]. 中国煤层气, 2010, 7(5): 14–17.  
WNAG Jianzhong. The application of high-energy gas fracture technique in the development of CBM in Enhong basin of Yunnan province[J]. *China Coal bed Methand*, 2010, 7(5): 14–17.
- [17] 吴飞鹏, 蒲春生, 陈德春. 高能气体压裂载荷计算模型与合理药量确定方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(3): 94–98.  
WU Feipeng, PU Chunsheng, CHEN Dechun, *et al.* Load calculation model and determination method of reasonable charge for high-energy gas fracturing[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 2011, 35(3): 94–98.
- [18] ZHU W C, GAI D, WEI C H, *et al.* High-pressure air blasting experiments on concrete and implications for enhanced coal gas drainage[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 36: 1253–1263.
- [19] 贺飞飞. 高能气体压裂煤系复合储层裂缝穿层扩展机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020: 68–70.  
HE Feifei. Research on the Mechanism of fracture Crossing Layer Expansion of High Energy Gas Fracturing Coal Reservoirs[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020: 68–70.
- [20] GJB772A—1997 中华人民共和国国家军用标准炸药试验方法[S]. 国防科学技术工业委员会, 1997.
- [21] 褚怀保, 杨小林, 余永强, 等. 煤样爆破模拟材料选择试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(5): 31–33.  
CHU Huaibao, YANG Xiaolin, YU Yongqiang, *et al.* Experimental research of the choice for coal blasting simulation material[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(5): 31–33.
- [22] 凌伟明. 岩石爆破炮孔井壁压力的试验研究[J]. 矿冶, 2004, 13(4): 13–16.  
LING Mingwei. Experimental research on explosion pressure on the wall of a borehole in rock[J]. *Mining and Metallurgy*, 2004, 13(4): 13–16.
- [23] GAO Feng, TANG Leihu, ZHOU Keping. Mechanism analysis of liquid carbon dioxide phase transition for fracturing rock masses[J]. *Energies*, 2018, 11: 2909.
- [24] 褚怀保, 任志强, 闫松, 等. 高压气体冲击作用下煤样内部应力波传播和衰减规律试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 1–6.  
CHU Huaibao, REN Zhiqiang, YAN Song, *et al.* Experimental study on the propagation and attenuation laws of stress waves in coal under high-pressure gas impact[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Nature Science), 2022, 41(4): 1–6.