



移动扫码阅读

杨兆中,王乃璐,张平,等.复合射孔技术对松软煤层的损伤效果研究[J].煤炭科学技术,2022,50(3):144-151.
YANG Zhaozhong, WANG Nailu, ZHANG Ping, et al. Research on damage effect of compound perforating technology on soft coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(3): 144-151.

复合射孔技术对松软煤层的损伤效果研究

杨兆中¹,王乃璐¹,张平²,李成兵¹,李小刚¹

(1.西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500;2.中联煤层气有限责任公司,北京 100011)

摘 要:松软煤层具有弹性模量低、抗压强度低及泊松比高等特点,同时节理、割理发育,存在大量天然裂缝。大量研究数据表明,水力压裂技术对煤层气的增产效果并不理想,于是国内外学者逐渐将目光转移到复合射孔技术。针对复合射孔技术对松软煤层的损伤效果问题,采用试验与数值模拟相结合的方法,选取松软煤层中煤样进行三轴压缩试验及分离式霍普金森杆试验,并进行数值模拟计算。结果表明:煤岩在静态压缩下呈现偏塑性,在高应变率条件下呈现明显的脆性,表现出很强的气动力冲击可压性;复合射孔技术比普通射孔剪切和拉伸破坏范围明显更大,损伤裂缝数量更多,裂缝扩展更长;HMX-HTPB 系推进剂,升压延迟时间长,峰值压力高,对射孔孔道及井筒周围煤岩压裂作用明显,因此较适用于复合射孔;推进剂外置对射孔孔道附近的煤岩压裂改造作用较为明显,形成多条延伸距离较远的损伤裂纹,对套管、水泥环的损伤破坏效应相对弱。

关键词:复合射孔;松软煤岩;损伤效果;分离式霍普金森杆

中图分类号:TD823;TD745

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2022)03-0144-08

Research on damage effect of compound perforating technology on soft coal seam

YANG Zhaozhong¹, WANG Nailu¹, ZHANG Ping², LI Chengbing¹, LI Xiaogang¹

(1.State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2.China United Coaled Methane Co., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: The soft coal seam has the characteristics of low elastic modulus, low compressive strength and high Poisson's ratio. At the same time, joints and cleats are developed, and there are a large number of natural fractures. A large number of research data show that the stimulation effect of hydraulic fracturing technology on coal seam is not ideal, so scholars at home and abroad gradually turn their attention to compound perforation technology. In view of the damage effect of compound perforating technology on soft coal seams, a combination of experiment and numerical simulation was adopted to conduct triaxial compression test and SHPB test by using coal samples in soft coal seams, and numerical simulation calculations were also carried out. The results show that: coal and rock exhibit partial plasticity under static compression, exhibit obvious brittleness under high strain rate conditions with strong aerodynamic impact compressibility; the composite perforation technology has a significantly larger shear and tensile failure range than ordinary perforation, with more damage cracks and longer crack propagation; HMX-HTPB propellant has a long delay time for pressure rise and high peak pressure. It has obvious fracturing effect on the perforation channel and coal rock around the wellbore, so it is more suitable for composite perforation; the external propellant has a more obvious effect on coal fracturing near the perforation tunnel, forming multiple damage cracks that extend far away, and the damage and destruction effect on casing and cement ring is relatively weak.

Key words: composite perforation; soft coal; damage effect; SHPB

0 引 言

煤层气是一种非常规天然气,以吸附状态的形式自生自储在煤层中,由于煤层压力和渗透率低、气

体在煤层中驱动力低,导致煤层气解吸和运移速度降低,即使是煤层含气量高的地区,其最终产量也很低^[1]。因此要实现我国煤层气工业开发,需采取一定的增产措施^[2-3]。与页岩不同^[4],对于松软煤层,

收稿日期:2021-09-20 责任编辑:常琛 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018-1539

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05044-004-002)

作者简介:杨兆中(1969—),男,四川泸州人,教授,博士生导师,博士。E-mail: yzzycl@vip.sina.com

由于煤岩弹性模量、抗压强度低,泊松比高,储层中存在大量节理、割理和天然裂缝等^[5],导致射孔后采用常规水力压裂施工作业时,常常出现漏失严重,裂缝起裂难,裂缝延伸受地应力控制等现象,严重影响煤层气开发效果。复合射孔技术将聚能射孔与高能气体压裂技术相结合,以毫秒级的升压速率迅速压裂地层,在井筒附近压开多条不受地应力控制的多方位裂缝,改善煤层气开发效果^[6]。为提高煤层气井单井产能,实现煤层气效益开发,开展复合射孔技术对松软煤层的损伤效果研究具有重要意义。目前,复合射孔对煤岩损伤效果的研究并不成熟。刘晓辉等^[7]对无烟煤进行了不同应变率下冲击动力试验,研究了能量耗散与应变率的关系。孙可明等^[8]利用理论与数值模拟的方法研究了低渗煤层预裂爆破裂纹的扩展规律。张文清等^[9]对煤岩进行不同应变率条件下的冲击压缩试验,分析了冲击加载速率对煤岩破碎耗能和块度分布的影响。武进壮等^[10]研究了煤储层的高能气体压裂下的裂缝扩展情况。李杨^[11]通过实验研究了煤体在高压气体作用下的爆破致裂规律。结合前人的研究成果,针对煤岩弹性模量低,抗压强度低,泊松比高,储层中存在大量节理、割理和天然裂缝等特点,以充分改造煤储层为目标,笔者采用实验与数值模拟相结合的方法,研究复合射孔对煤岩的损伤效应,分析原生裂缝、推进剂类型及其配置方式对煤岩损伤效果的影响,为后续复合射孔技术的发展提供一定的数据支撑。

1 复合射孔技术的相关理论

1.1 聚能射孔理论

聚能射孔的原理是利用聚能炸药的聚能效应形成高速金属射流,高速金属射流穿透地层形成一定深度的孔道,从而在井筒与储层之间形成连接通道。所谓聚能效应通常称为“门罗效应”,即炸药爆炸后,爆炸物沿着炸药表面的法向运动。因此,聚能射孔弹起爆后,药型罩在爆轰产物压力作用下压垮变形,并运行到轴线上汇合形成射流,这股高速、高压射流使爆炸产生的化学能汇聚,从而增强射孔能力^[11]。

1.2 高能气体压裂理论

高能气体压裂技术是利用火药或火箭推进剂快速燃烧产生的高温高压气体,在适当的加载速率下,在井筒附近压开多方位的裂缝,沟通天然裂缝,从而使油气水井增产增注^[12]。高能气体压裂技术的作用体现在以下4个方面:①机械作用。高加载速率的气体压力,可形成径向多裂缝体系,解除井筒附近

的污染,并增加沟通天然裂缝的机会。②热作用。火药燃烧时释放出大量的热能,燃烧点处的气体温度高达2 000℃,处理1~3 h后整个射孔井段井筒附近温度提高20~50℃。这些热量可融化近井地带的蜡质沥青质,改善地层孔隙度和渗透性。③化学作用。火药燃烧产生大量CO₂、CO、HCl、NO、NO₂等酸性气体,有刻蚀裂缝和保护地层的作用。④振动脉冲作用。在裂缝延伸过程中,伴随着压力脉冲波动过程,对冲刷近井堵塞物有着积极作用。

1.3 复合射孔技术原理

复合射孔技术将聚能射孔与高能气体压裂技术相结合^[13],在聚能射孔的基础上,将复合推进剂引入到射孔枪内作为二次能量,聚能射孔弹射孔形成孔道的同时,复合推进剂被激发燃烧,在枪内产生高温高压气体,通过枪身泄压孔释放并直接进入射孔孔道,对地层进行有效的气体压裂,形成孔缝结合型的深穿透,在近井地带形成广泛的裂缝网络,大幅度提高近井地带的导流能力。

2 煤岩相关试验

为真实地说明复合射孔对煤岩损伤效应数值计算的准确性,结合AUTODYN软件^[14]对材料所需要的数据,从我国滇东黔西的松软煤层^[15]中选取煤样进行相关力学参数测试。所测量的数据具体为岩样的泊松比、弹性模量、差应力(抗压强度)及静态压缩下应力应变曲线。为深入研究复合射孔对煤岩的损伤效应,使用分离式霍普金斯杆(SHPB)对煤样进行室内冲击试验,研究煤岩在高升压速率下的破坏形式。

2.1 煤岩静态压缩试验

为准确测试煤岩的泊松比、弹性模量、差应力(抗压强度)及在静态压缩下应力应变关系曲线,制备了4组直径在25 mm左右,长度在50 mm左右的岩心(图1),并根据所取煤岩的深度加上相应的围压,其试验结果见表1,围压9.4 MPa下应力-应变曲线如图2所示。



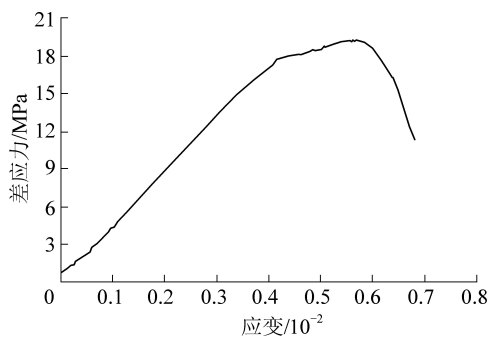
图1 岩样

Fig.1 Coal samples

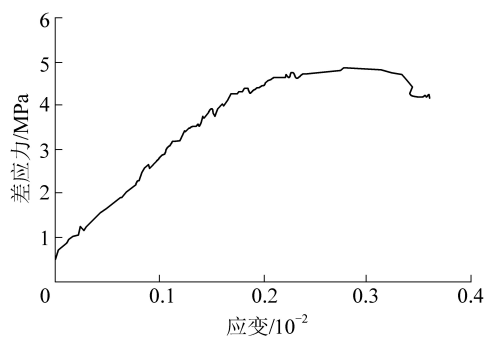
表1 煤岩基本力学参数测试结果

Table 1 Coal basic mechanical parameters

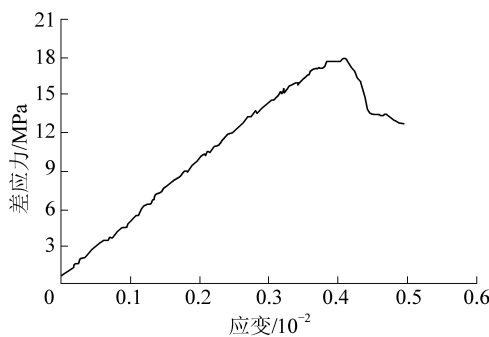
序号	围压/MPa	泊松比	弹性模量/MPa	差应力/MPa
1	9.4	0.382	4 012.4	19.3
2		0.162	4 379.1	4.9
3		0.425	4 903.5	18.0
4		0.404	5 867.1	24.1



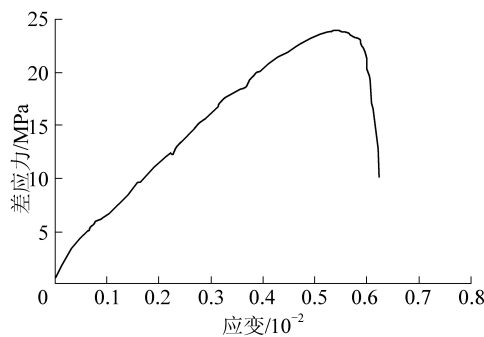
(a) 1号煤样



(b) 2号煤样



(c) 3号煤样



(d) 4号煤样

图2 4组煤岩在静态压缩下的应力-应变曲线

Fig.2 Stress and strain curves of 4 coal samples under static compression

2.2 分离式霍普金森杆测试

煤岩的在动态压缩下的应力应变关系曲线由分离式霍普金森杆(SHPB)进行测试^[16],分离式霍普金森杆试验技术是研究中高应变率下材料力学性能的最主要、可靠的试验方法,是爆炸与冲击动力学试验技术的重要组成部分。

1) 试验材料准备。为对煤岩进行 SHPB 测试,选取滇东黔西的煤岩,制作了6块直径约30 mm,长度在18 mm左右的岩样(图3),各岩样两端面打磨光滑且平行,每个相同的应变率范围内测试2组。

2) SHPB 试验装置及原理。冲击动态试验采用分离式霍普金森压杆试验装置完成(图4a),试验设备子弹直径为14.5 mm。压杆材料选择强度较高的7075-T6 铝,采用的锥形变截面入射杆杆长2 000 mm,直径30 mm(图4b)。

试样夹在入射杆和转化杆之间。用高压氮气驱

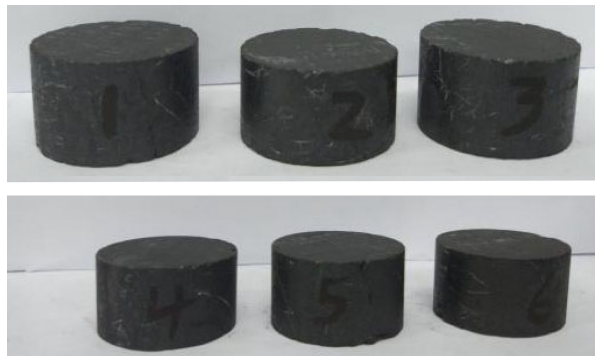
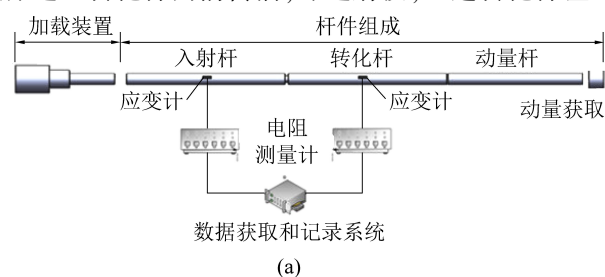


图3 岩样

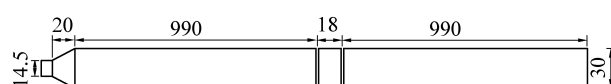
Fig.3 Preparations of coal samples

动加载装置(子弹)以一定的速度撞击入射杆,在入射杆内产生一个应力脉冲,即入射波。入射波沿入射杆向试样传播,经过输入杆应变计被记录下来。当入射波传播到试样位置时,推动试样开始变形,并在入射杆中产生一个反向应力脉冲,即反射波;到达

入射杆应变计时也被记录下来。另一部分脉冲透过试样进入转化杆向前传播,即透射波,经过转化杆应



(a)



(b)

图4 SHPB设备示意

Fig.4 Schematic of SHPB equipment

3) 试验准备。在试验中,使用分离式霍普金斯压杆作为试验设备。试验开始前,需要在弹性杆的两端进行润滑措施,在煤样两端也需要润滑,如凡士林等,保证煤样端面与杆件端面接触完全(图5)。



(a) 被夹持煤样



(b) 霍普金斯压杆局部

图5 煤样与杆件接触示意

Fig.5 Schematic of contact between coal sample and pole

4) 试验结果分析。SHPB 试验中,煤样受冲击载荷,应变率从 $300 \sim 1\,200 \text{ s}^{-1}$ 依次增加,每次增加 200 s^{-1} 。试验数据采用“二波法”处理^[19]。从应力应变曲线(图6)来看,煤岩表现出明显的冲击脆性。随冲击加载应变率的增加,煤岩峰值应力不断增加,当应变力高于 843 s^{-1} 后,应变率效应更加显著。与常规静态压缩岩石力学试验发现的偏塑性不同,此试验表明煤岩有明显的冲击脆性,表现出很强的气动力冲击可压性。

变计时也被记录下来。利用实验记录的3个典型脉冲信号,可以计算材料的动态应力及应变参数^[17]。

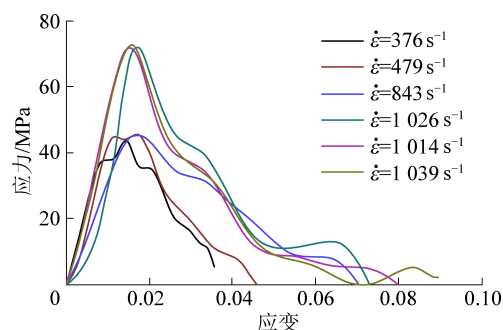


图6 6组煤岩应力应变曲线

Fig.6 Stress and strain curves of 6 coal samples

3 复合射孔诱导煤岩起裂数值计算

3.1 模型的建立

复合射孔作用到地层中需依次穿过套管、水泥环,建立 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 二维对称计算模型(图7),选用的套管材料参数见表2,水泥环厚度设定为 20 mm ,抗压强度为 20 MPa ,复合射孔枪外径为 89 mm ,推进剂外置在射孔枪外表面,厚度为 10 mm 。为减少数值计算时间,先建立射孔模型,借助软件的映射功能,将爆炸形成的高速金属射流映射到

复合射孔数值计算模型中,避免了炸药爆炸形成金属射流等复杂动力学过程,从而大大节约了计算时间。

表2 套管参数

Table 2 Casing parameters

套管尺寸/mm	套管外径/mm	壁厚/mm	钢级	屈服强度/MPa
18.3	139.7	7.72	N80	551

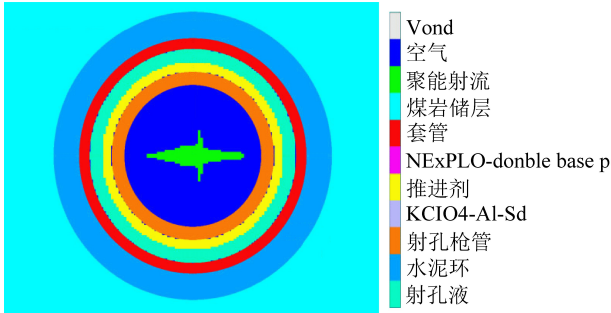
结合滇东黔西松软煤层的特性,数值计算中确定 Druker-Prager 和 Cumulative Damage 作为煤岩本

构和损伤模型,相关参数见表 3。

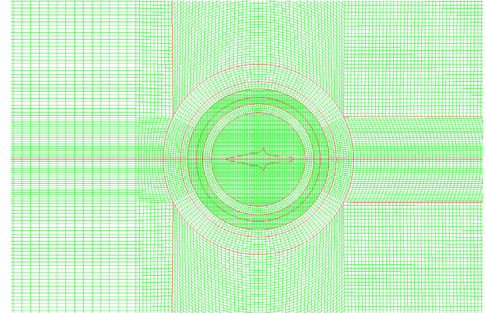
表 3 煤岩相关参数

Table 3 Coal parameters

密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	抗压强度/MPa
2 500	4 827.7	0.404	20.5



(a) 复合射孔整体数值计算模型



(b) 模型网格划分

图 7 数值计算模型

Fig.7 Model of numerical calculation

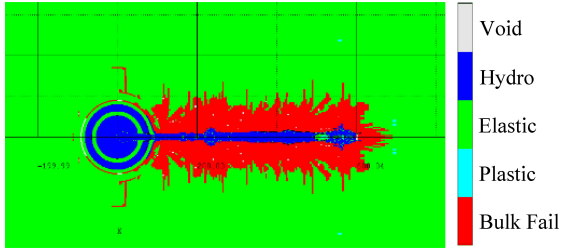
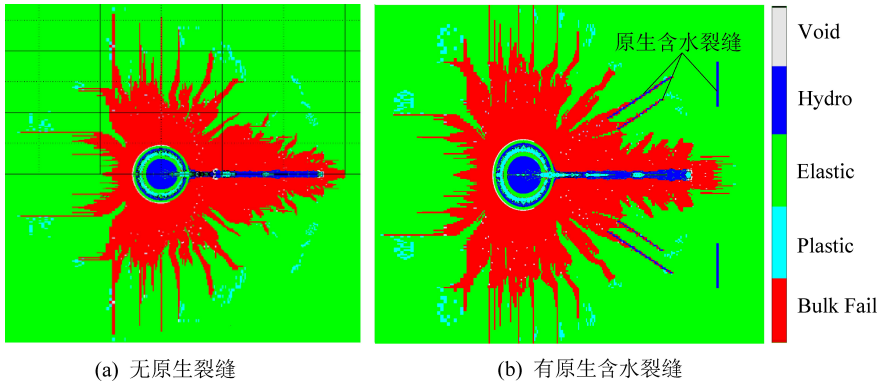


图 8 普通射孔对煤岩的损伤效应

Fig.8 Damage effect of perforation on coal



(a) 无原生裂缝

(b) 有原生含水裂缝

图 9 复合射孔有无原生裂缝时对煤岩的损伤效应

Fig.9 Damage effect of coal bearing on presence or absence of primary cracks by compound perforation

选取了 HMX-HTTPB、KCIO4-Al、NEXPLO 三种推进剂,由计算结果可以看出:HMX-HTTPB 系推进剂^[20],在井筒周围压裂作用明显,形成多条损伤裂纹,从 0.2 ms 开始升压,在 0.25 ms 压力达到 30 GPa (图 10);KCIO4-Al 系推进剂在井筒周围产生粉碎区,形成多条短裂缝,引爆瞬间开始升压,在 0.7 ms 时压力达到峰值 2.6 GPa (图 11);NEXPLO 系推进剂在井筒周围产生粉碎区更加明显,短裂缝更多,从 0.01 ms 开始升压,在 0.025 ms 压力达峰值 12 GPa (图

3.2 数值计算结果分析

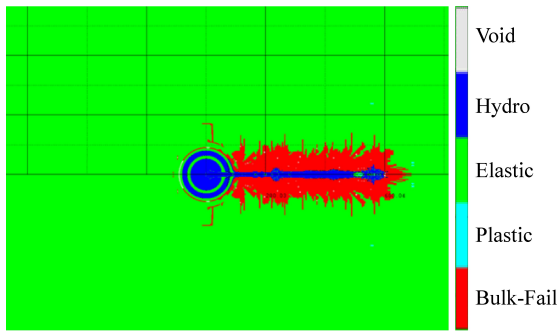
1) 原生裂缝的影响。建立一个普通射孔模型(图 8)作为对比,并逐步研究原生裂缝对计算结果的影响(图 9),最后研究推进剂的类型(图 10)及推进剂配置方式对计算结果的影响(图 11)。

由图 8、9 可以看出:在松软煤层中应用复合射孔技术时,剪切和拉伸破坏范围明显增大,损伤裂缝数量更多,裂缝扩展更长;煤岩内原生裂缝对复合射孔时煤岩损伤裂缝萌生、扩展和延伸产生明显影响;相比于普通射孔,复合射孔时水泥环及近井筒区煤岩损伤破坏明显,井筒稳定性遭受一定程度破坏。

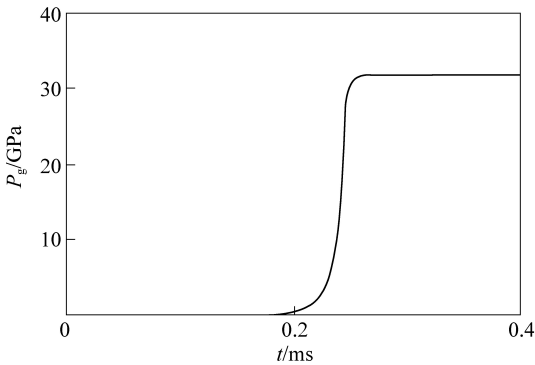
2) 推进剂的影响。复合射孔高压气动力诱导煤岩损伤效应的强弱取决于推进剂的种类。计算时

12)。HMX-HTTPB 系推进剂,由于其点火后升压延迟时间长,对聚能射流射孔不产生影响,对射孔孔道及井筒周围煤岩压裂作用明显,形成多条损伤裂纹。因此,3 种推进剂,HMX-HTTPB 系推进剂较适用于复合射孔。

3) 推进剂配置方式的影响。在复合射孔器结构设计中,推进剂配置方式通常有内置在射孔枪管内表面(图 13)和外置在射孔枪管外表面(图 14)2 种方式。



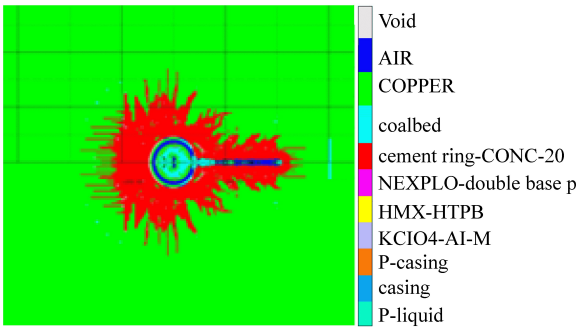
(a) HMX-HTPB 推进剂损伤模拟结果



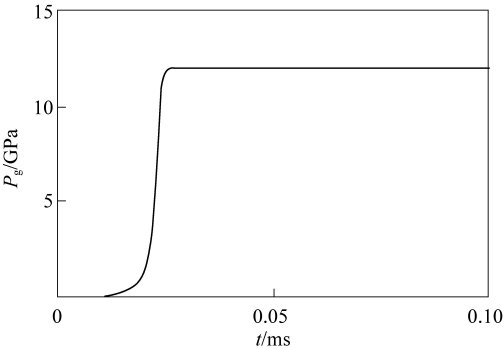
(b) HMX-HTPB 推进剂 P_g-t 曲线

图 10 HMX-HTPB 推进剂对煤岩损伤效应的影响及其 p_g-t 曲线

Fig.10 Effect of HMX-HTPB propellant on coal damage and the p_g-t curve



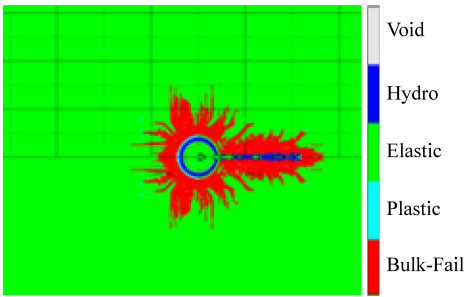
(a) NEXPLO 推进剂损伤模拟结果



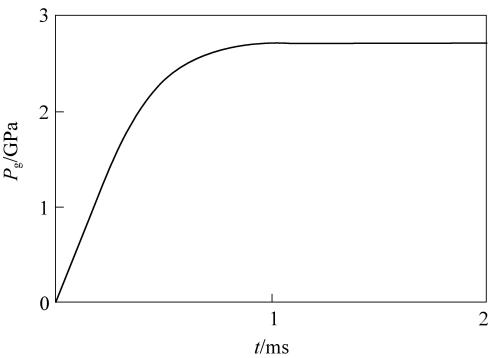
(b) NEXPLO 推进剂 P_g-t 曲线

图 12 NEXPLO 推进剂对煤岩损伤效应的影响及其 P_g-t 曲线

Fig.12 Effect of NEXPLO propellant on coal damage and the P_g-t curve



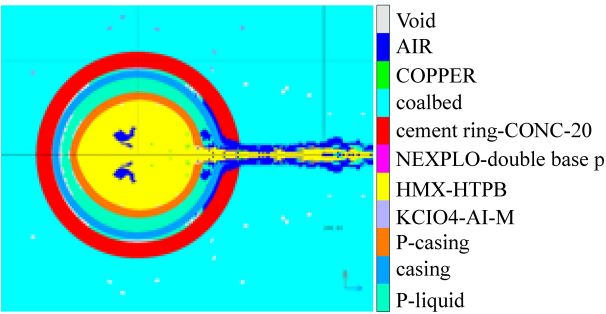
(a) KCIO4-AI 推进剂损伤模拟结果



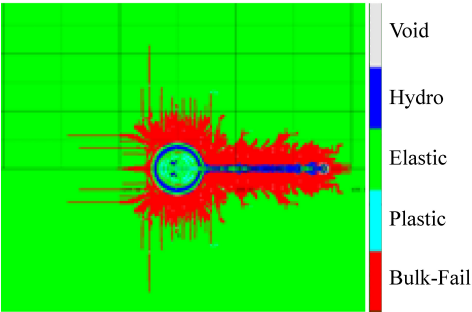
(b) KCIO4-AI 推进剂 P_g-t 曲线

图 11 KCIO4-AI 推进剂对煤岩损伤效应的影响及其 P_g-t 曲线

Fig.11 Effect of KCIO4-AI propellant on coal damage and the P_g-t curve



(a) 推进剂内置初始射孔效果



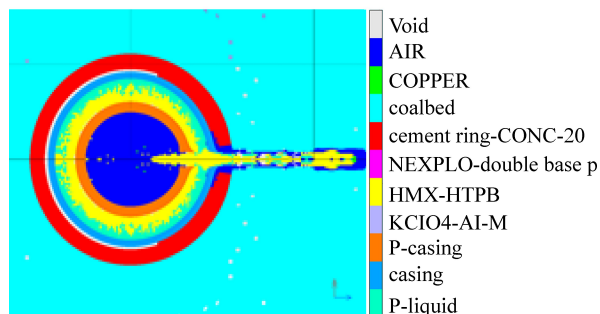
(b) 推进剂内置损伤效果

图 13 推进剂内置对复合射孔效应的影响

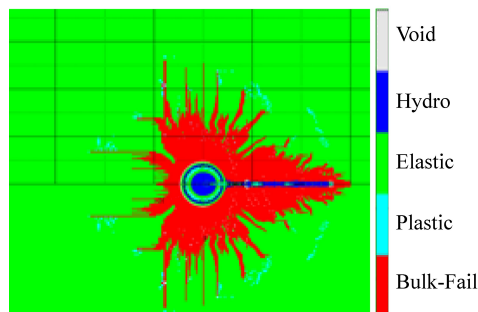
Fig.13 Effect of propellant built-in on compound perforation

结果表明:外置推进剂时,复合射孔后,对射孔孔道附近的煤岩压裂改造作用较为明显,形成多条

延伸距离较远的损伤裂纹;对套管、水泥环的损伤破坏效应相对弱。



(a) 推进剂外置初始射孔效果



(b) 推进剂外置损伤效果

图14 推进剂外置对复合射孔效应的影响

Fig.14 Effect of external propellant on compound perforation

4 结 论

1) 煤岩在静态压缩下呈现偏塑性,但通过分离式霍普金斯杆对煤样进行的冲击试验表明,煤岩在高速率载荷加载下有明显的冲击脆性,表现出很强的气动力冲击可压性,为复合射孔技术在松软煤层中的可行性提供了有利的试验基础。

2) 在松软煤层中应用复合射孔技术时,会在井筒周围产生多条径向裂缝,原生裂缝对裂缝起裂、扩展及延伸有明显的影。

3) HMX-HTPB 系推进剂,点火升压延迟时间长,对射孔孔道及井筒周围煤岩压裂作用明显,因此较适用于复合射孔;推进剂外置对射孔孔道附近的煤岩压裂改造作用较为明显,形成多条延伸距离较远的损伤裂纹,对套管、水泥环的损伤破坏效应相对较弱。

4) 复合射孔技术能够对地层进行有效的气体压裂在近井地带形成广泛的裂缝网络,大幅度提高近井地带的导流能力,为改造松软煤层提供了有效的途径。

参考文献(References):

[1] 鲜保安,高德利,陈彩红,等.煤层气高效开发技术[J].特种油

气藏,2004,11(4):63-66.

XIAO Baoan, GAO Deli, CHEN Caihong, *et al.* Efficient development of coal-bed gas[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2014, 11(4): 63-66.

[2] 李景明,巢海燕,李小军,等.中国煤层气资源特点及开发对策[J].天然气工业,2009,29(4):9-13.

LI Jingming, CHAO Haiyan, LI Xiaojun, *et al.* Characteristics of coalbed methane resource and the development strategies [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(4): 9-13.

[3] 刘大锰,刘正帅,蔡益栋.煤层气成藏机理及形成地质条件研究进展[J].煤炭科学技术,2020,48(10):1-16.

LIU Dameng, LIU Zhengshuai, CAI Yidong. Research progress on accumulation mechanism and formation geological conditions of coalbed methane [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 1-16.

[4] 路艳军,杨兆中, SHELEPOV V V, 等.煤岩体积压裂脆性评价研究[J].油气藏评价与开发,2018,8(1):64-70.

LU Yanjun, YANG Zhaozhong, SHELEPOV V V, *et al.* Evaluation and research of brittleness on simulated reservoir volume in coal [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(1): 64-70.

[5] 李增学,魏久传,刘莹.煤地质学[M].北京:地质出版社,2005:15-25.

[6] 徐景德,郝旭,李晖,等.复合射孔聚能射流速度场变化的数值模拟[J].煤炭技术,2017,36(1):145-147.

XU Jingdeng, HAO Xun, LI Hun, *et al.* Numerical simulation of velocity filed change of shaped charge jet during composite perforating [J]. Coal Technology, 2017, 36(1): 145-147.

[7] 刘晓辉,张茹,刘建锋.不同应变率下煤岩冲击动力试验研究[J].煤炭学报,2012,37(9):1528-1534.

LIU Xiaohui, ZHANG Ru, LIU Jianfeng. Dynamic test study of coal rock under different strain rates [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1528-1534.

[8] 孙可明,李云.低渗煤层预裂爆破裂纹扩展规律数值模拟研究[J].爆破,2014,31(1):32-37.

SUN Keming, LI Yun. Numerical simulation on crack propagation law of pre-splitting explosion in lowly permeable coal seam [J]. Blasting, 2014, 31(1): 32-37.

[9] 张文清,石必明,穆朝民.冲击载荷作用下煤岩破碎与耗能规律试验研究[J].采矿与安全工程学报,2016,33(2):375-380.

ZHANG Wenqing, SHI Biming, MU Chaomin. Experimental research on failure and energy dissipation law of coal under impact load [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(2): 375-380.

[10] 武进壮,巩芳军.煤储层高能气体加载压裂下裂缝扩展研究[J].石油化工应用,2016,35(1):15-17.

WU Jinzhuang, GONG Fangjun. Study of coal reservoir fracture extension under the loading of high energy gas fracturing [J]. Petrochemical Industry Application, 2016, 35(1): 15-17.

[11] 李杨.一种新型结构石油射孔弹的数值模拟研究[D].太原:中北大学,2015.

LI Yang. Research on the new type of structure of oil perforating charge jet forming numerical simulation [D]. Taiyuan: North University of China, 2015.

- [12] 王安仕,秦发动,等.高能气体压裂技术[M].西安:西北大学出版社,1998:60-88.
- [13] 王艳萍,黄寅生,潘永新,等.复合射孔技术的现状与趋势[M].爆破器材,2002,31(3):30-33.
- [14] ZHU Z M, WANG C, KANG J M, *et al.* Study on the mechanism of zonal disintegration around an excavation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 67(4): 88-95.
- [15] 陈贞龙,汤达祯,许浩,等.黔西滇东地区煤层气储层孔隙系统与可采性[J].煤炭学报,2010,35(S1):158-163.
CHEN Zhenlong, TANG Dazhen, XU Hao, *et al.* The pore system properties of coalbed methane reservoirs and recovery in western Guizhou and eastern Yunnan[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S1): 158-163.
- [16] 张佳.岩石压缩能量演化规律及非线性演化模型研究[J].煤炭科学技术,2021,49(8):73-80.
ZHANG Jia. Study on evolution law of rock compression energy and nonlinear evolution model[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 73-80.
- [17] 胡时胜.霍普金森压杆技术[J].兵器材料科学与工程,1991,11(11):40-47.
HU Shisheng. Technology of split Hopkinson pressure bar[J]. Engineering Material Science and Engineering, 1991, 11(11): 40-47.
- [18] 王晓燕,卢芳云,林玉亮.SHPB试验中端面摩擦效应研究[J].爆炸与冲击,2006,2(2):134-139.
WANG Xiaoyan, LU Fangyun, LIN Yuliang. Study on interfacial friction effect in the SHPB tests[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 2(2): 134-139.
- [19] 宋力,胡时胜.SHPB数据处理中的二波法与三波法[J].爆炸与冲击,2005(4):368-373.
SONG Li, HU Shisheng. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing [J]. Explosion and Shock Waves, 2004(4): 368-373
- [20] 周学刚.AP/HMX HTPB推进剂的能量特性[J].固体火箭技术,1996(2):26-29.
ZHOU Xuegang. Energy performance of AP/HMX/HTPB Propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1996(2): 26-29.