



## 激波脉动荷载作用下煤岩体动态损伤特征

鲍先凯 姜斌 张武 宋翔宇 赵金昌 于超云 张童

### 引用本文：

鲍先凯, 姜斌, 张武, 等. 激波脉动荷载作用下煤岩体动态损伤特征[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 204–223.  
BAO Xiankai, JIANG Bin, ZHANG Wu. Dynamic damage characteristics of coal and rock mass under shock wave pulsating load[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 204–223.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-1660>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 液电脉冲激波碎煤能量转换效率分析

Analysis of energy conversion efficiency of coal crushed by hydroelectric pulse shock wave  
煤炭科学技术. 2021, 49(12): 217–224 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0b088ba4-2999-4ad5-ae32-9f4e9baab78d>

##### 饱和煤样力学及损伤特征的加载速率微观作用机制研究

Microscopic mechanism of loading rate of saturated coal sample mechanics and damage characteristics  
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 130–142 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1750>

##### 冲击荷载作用下不同煤阶煤的结构演化特征研究

Study on structure evolution features of different rank coals under shock load  
煤炭科学技术. 2021, 49(10): 217–227 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b50c4734-3d52-4757-8da1-bb188100cf63>

##### 水岩作用下煤岩组合体力学特性与损伤特征

Mechanical properties and damage characteristics of coal–rock combined samples under water–rock interaction  
煤炭科学技术. 2023, 51(4): 37–46 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2020-1385>

##### 加卸荷应力路径下巷帮煤体力学特性与损伤破坏研究

Study on mechanical characteristics and damage failure of coal mass from roadway side wall under loading and unloading stress path  
煤炭科学技术. 2019(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/65218e6a-074a-49c2-9524-9582a022901e>

##### 热冲击花岗岩力学响应及损伤特征显微CT试验研究

Study on mechanical properties and damage characteristics of granite under thermal shock based on CT scanning  
煤炭科学技术. 2023, 51(8): 58–72 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0180>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



鲍先凯, 姜斌, 张武, 等. 激波脉动荷载作用下煤岩体动态损伤特征[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 204–223.  
BAO Xiankai, JIANG Bin, ZHANG Wu, et al. Dynamic damage characteristics of coal and rock mass under shock wave pulsating load[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 204–223.

移动扫码阅读

## 激波脉动荷载作用下煤岩体动态损伤特征

鲍先凯<sup>1,2,3</sup>, 姜斌<sup>1</sup>, 张武<sup>1</sup>, 宋翔宇<sup>1</sup>, 赵金昌<sup>4</sup>, 于超云<sup>1,2,3</sup>, 张童<sup>1</sup>

(1. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古科技大学 内蒙古自治区建筑结构防灾减灾工程技术研究中心, 内蒙古 包头 014010; 3. 内蒙古科技大学 内蒙古自治区土木工程安全与耐久重点实验室, 内蒙古 包头 014010;  
4. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:**为了研究水中高压电脉冲激波脉动荷载特性及其作用下的煤岩体动态损伤特征,开展了真三轴煤岩体压裂试验。试验研究了不同水压、电压条件下的水激波峰值压力、冲击荷载、加载速率等水激波加载特性,探究了煤岩体钻孔侧壁环向有效应力与动态抗拉强度的关系,同时揭露了煤岩体裂纹起裂应力、扩展角与地应力、水压力、脉冲激波之间的关系。基于CT扫描和ABAQUS数值模拟计算不同液电参数下的煤岩体损伤变量,进而评价煤岩体动态损伤和裂纹起裂扩展形态及演化特征。结果表明:脉冲水激波峰值压力随着放大电压和水压的增加而迅速增加,加载速率随放电电压增加而增加,随水压增加而减小;相对于水压变化,放电电压的变化对水激波峰值压力及其加载速率影响更大;数值模拟与室内试验所得结果吻合度较高,二者从细、微观角度互相印证了随着水压、放电电压的增加,煤岩体的损伤变量增加明显,损伤致裂程度加剧,裂纹数量、扩展长度、开度、复杂程度变化明显,其中放电电压的改变对煤岩体的损伤影响尤其明显。研究结果可以为我国水中高压电脉冲压裂煤岩体,高效抽采煤层气提供指导。

**关键词:**水激波;加载速率;损伤变量;动态损伤;高压电脉冲水力压裂

**中图分类号:**TD315; TU452   **文献标志码:**A   **文章编号:**0253-2336(2024)12-0204-20

### Dynamic damage characteristics of coal and rock mass under shock wave pulsating load

BAO Xiankai<sup>1,2,3</sup>, JIANG Bin<sup>1</sup>, ZHANG Wu<sup>1</sup>, SONG Xiangyu<sup>1</sup>, ZHAO Jinchang<sup>4</sup>, YU Chaoyun<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Tong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Building Structure Disaster Prevention and Mitigation Engineering Technology Research Center, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 4. School of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** To investigate the hydraulic load characteristics of high-voltage electric pulse shock waves in water, as well as the dynamic damage features of coal rock mass subjected to their influence, true triaxial fracturing tests on coal-rock specimens have been carried out. Under varied conditions of water pressure and discharge voltage, the investigation delved into attributes of water shock waves, including peak pressures, impulsive loads, and loading velocities. Elucidating the correlation between the circumferential effective stress at the drill hole periphery and the dynamic tensile strength of coal-rock mass. Furthermore, the study explored the relationships linking the initiation stress and propagation angle of cracks in coal-rock mass with factors such as in-situ stress, water pressure, and electric pulse shocks. Based on CT scans and the ABAQUS numerical simulation software, damage variables for coal rock mass with different hydraulic and electrical parameters were calculate and then evaluate the dynamic damage and crack initiation and propagation morphologies and evolutionary properties of coal rock mass. The results show that the peak pressure of the impulsive water shock increases rapidly with the amplification

收稿日期:2023-11-10    策划编辑:宫在芹    责任编辑:宫在芹    DOI: 10.12438/cst.2023-1660

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2024LHMS05044);内蒙古自治区直属高校基本科研业务费资助项目(2024XKJX009);中央支持地方高校改革发展项目-学科建设-土木工程提质培育学科建设资助项目(0404052401)

作者简介: 鲍先凯(1974—),男,内蒙古赤峰人,副教授,博士。E-mail: baoxkzlm@163.com

通讯作者: 姜斌(1998—),男,江西上饶人,硕士研究生。E-mail: jiangbin\_1998@163.com

voltage and the water pressure, and the loading rate increases with the discharge voltage and decreases with the water pressure. Compared to the change in water pressure, the change in discharge voltage has a larger effect on the peak pressure of the water shock and its loading rate. The results of numerical simulations and laboratory tests are in good agreement and confirm each other from a microscopic point of view. The damage variables of the coal rock mass, the degree of damage and cracking significantly increase, and the number of cracks, length of extension, opening, and complexity change significantly with the water pressure and discharge voltage increase. Variations in the discharge voltage have a particularly marked effect on the destruction of coal rock mass. The research results can provide guidance for high electric pulse fracturing coal rock mass in water for efficient extraction of coalbed methane in China.

**Key words:** water shock wave; loading rate; damage variables; dynamic damage; high-voltage electric pulse hydraulic fracturing

## 0 引言

中国煤层气(煤矿瓦斯)储量极为丰富,但储层普遍具有变质程度高、渗透率低、埋藏深等特点<sup>[1]</sup>,导致传统静荷载水力压裂技术在储层改造过程中面临设备复杂、成本高、起裂压力大<sup>[2]</sup>,压裂液污染环境等难题<sup>[3]</sup>。因此,水力压裂新技术(动荷载水力压裂)逐渐成为储层改造领域的研究热点<sup>[4]</sup>,常见的动荷载水力压裂形式有:脉动水力压裂<sup>[5]</sup>、水压爆破压裂<sup>[6]</sup>、水下超声波致裂<sup>[7]</sup>和高压电脉冲水力压裂<sup>[8-9]</sup>。其中高压电脉冲水力压裂由于具有水压爆破致裂和脉动水力压裂两种动载致裂的特点,受到了国内外研究者的广泛关注。

国内水下高压电脉冲压裂煤岩体领域,太原理工大学卞德存<sup>[10]</sup>通过改造真三轴压力机,加装电脉冲放电电极,实现水中高压电脉冲煤岩体致裂研究。随后,鲍先凯等<sup>[11-12]</sup>基于液电效应提出了高压电脉冲液相放电致裂增透煤层技术,该技术通过水中高压脉冲放电实现电能向机械能的转化,以水激波(冲击波)的形式作用至钻孔表面,在煤层裂隙尖端形成水锤效应,使微细裂纹损伤断裂、发展、贯通,达到煤层气减阻增透、提高抽采效率的目的。在此基础上该团队又对不同放电电压和水压致裂煤岩进行了深入研究,鲍先凯等<sup>[13]</sup>利用CT扫描系统和孔隙特征分析软件对压裂后的煤岩进行压裂效果分析,分别从裂隙的几何形态参数、分形维数及裂隙宽度概率密度函数等对液电破岩效果进行定量评价;BAO等<sup>[14]</sup>、贾少华等<sup>[15]</sup>分别对水中高压电脉冲致裂煤岩体的脉冲水激波产生、固-液面透射和反射、破岩等机理进行定性分析,并对脉冲水激波的破岩效果展开定量评价。但是,目前对于水中高压电脉冲致裂煤岩体的研究主要是从宏观角度对不同液电参数(放电电压和水压)下的静态或准静态裂纹损伤断裂规律进行分析,缺乏对于高压电脉冲作用下煤岩体的动态损伤机理、破坏特征、损伤评价的相关研究。

岩石类材料裂纹动态断裂损伤、破裂扩展是一个复杂的问题。GRADY等<sup>[16]</sup>在1980年提出了岩石动态断裂准则模型,之后国内外学者开展了大量的相关试验,研究表明岩石类材料的动态破坏效果与动荷载作用强度、荷载加载速率、材料变形速率等均有密切的关系。在动荷载作用的研究方面,李涛等<sup>[17]</sup>、李子运等<sup>[18]</sup>通过开展三轴循环加载岩石试验分别探究了动荷载作用下岩石的弹性模量变化特征和能量演化规律,闻名等<sup>[19]</sup>通过开展霍普金森压杆冲击试验研究了低温砂岩在动荷载作用下的力学性能和微观破坏形态并将二者进行结合分析。在荷载加载速率方面,通过利用自主改进的霍普金森压杆冲击试验装置,LI等<sup>[20]</sup>和刘晓辉等<sup>[21]</sup>分别研究了混凝土和岩石在不同加载速率下的变形损伤规律,结果表明抗拉强度会随加载速率的增大而增加;郭德勇等<sup>[22]</sup>和梁为民等<sup>[23]</sup>分别对煤岩的力学特征、动态破坏特征和孔径结构变化进行了分析,建立了低-中-高应变率响应的黏弹性损伤本构模型并得到了孔径结构和裂纹扩展随荷载加载速率的变化规律。上述研究内容多为动载状态下岩石动态破坏强度和动态本构关系方面的研究,为岩石材料的动态损伤破坏提供了一定的理论基础,但对于液电效应下的动态损伤评价尚需进一步研究,因此,笔者从动荷载(冲击波)作用强度和作用速率等角度对液相放电水激波作用下煤岩体致裂损伤进行分析研究。

近年来,数值模拟凭借不受试验条件限制、可以观测裂纹从起裂、扩展到止裂全过程、能精确提取裂纹相关数据等优点<sup>[24]</sup>,逐渐得到广大学者的青睐。李培培<sup>[25]</sup>和卞德存<sup>[10]</sup>分别利用有限元(ANSYS)和离散元(PFC<sup>2D</sup>)数值模拟软件,对煤岩体在水激波作用下的裂纹起裂、分叉和扩展规律进行研究。鲍先凯<sup>[12]</sup>利用有限元软件LS-DYNA模拟了高压电脉冲水压致裂煤岩体试验,并探究了不同放电电压、水压、放电次数作用下的裂纹起裂位置、长度和分布范围等情况。而对于有限元软件ABAQUS,最早是由LECAMPION<sup>[26]</sup>将其中的XFEM模块用于模拟水力

压裂问题,并且分析出了每个节点处的水压力对裂纹扩展的影响。利用XFEM模块,DAHI-TALEGHANI等<sup>[27-28]</sup>通过模拟人工裂缝与天然裂缝的相交问题,提出了裂缝相交扩展准则;GHOLAMI等<sup>[29]</sup>和MOHAMMADNEJAD等<sup>[30]</sup>通过构建黏性裂纹模型,模拟了孔隙介质的非线性裂纹扩展问题。以上研究表明,数值模拟软件的应用可以为煤岩体裂纹起裂、扩展和损伤的定量分析提供有力工具。

为了研究液电效应下煤岩体的动态损伤特性,分析煤岩体在不同冲击荷载强度、加载速率下的裂纹损伤破坏特征和规律。笔者首先开展真三轴压力下的水中高压电脉冲水压致裂试验,并同时借助CT设备对压裂前后的煤样试件进行扫描,分析评价煤岩体压裂损伤效果和裂纹形态。然后基于地应力和水压力的静态应力强度因子和脉冲激波的动态应力强度因子,推导煤岩体裂纹尖端在地应力、水压力、脉冲激波等动静荷载作用下产生的最大环向正应力 $\sigma_{\theta,\max}$ 和裂纹扩展角 $\theta_0$ 的计算公式,并基于CT扫描图像计算不同液电参数下的煤岩体损伤变量,对不同水激波加载强度和加载速率下的煤岩体损伤程度和损伤效果进行定量评价。最后利用ABAQUS进行数值计算,从微观角度研究裂纹的起裂、扩展形态、损伤行为和结果,并对煤岩体动态损伤变量进行计算。研究结果可为高压电脉冲水力压裂煤岩体参数选取和煤岩体动态损伤机理研究提供借鉴作用。

## 1 液相放电脉冲激波加载特性

液相放电水激波致裂增透技术是利用高能电容器,将所储存电能转化为水激波机械能致裂增透煤岩体的过程。水激波(即冲击波)产生后携带的能量大、压力高,作用范围广。研究表明,水中高压脉冲放电时,等离子通道内的压力最高可达1GPa,有效作用范围可达60m左右<sup>[31]</sup>。典型的脉冲水激波波形如图1所示。根据津格尔曼理论,水激波的波前峰值压力与放电能量的关系<sup>[12]</sup>为

$$P_{\max} = \beta \sqrt{\frac{\rho W}{\tau T}} \quad (1)$$

式中: $P_{\max}$ 为水激波的波前峰值应力,MPa; $\beta$ 为无因次复杂积分函数,近似取0.7; $\rho$ 为流体密度,kg/m<sup>3</sup>; $W$ 为放电通道单位长度的脉冲总能量,J; $\tau$ 为压力波前时间,s;由文献[15]可知水激波波前时间为水激波上升前沿10%峰值与90%峰值时刻之间时间的1.25倍; $T$ 为脉冲能量的持续时间,s。

高压放电电极在煤岩体钻孔(或钻井)中液相放

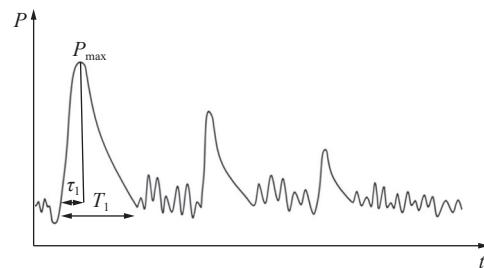


图1 典型的脉冲水激波波形图

Fig.1 Typical pulse water shock wave waveform

电形成脉动水激波,通过液体传播作用至钻孔表面,并由固液接触面进入煤岩体内部,改变煤岩体结构应力场,造成结构损伤扰动形成缺陷。当水激波在钻孔附近产生的环向拉伸应力大于煤岩体动态抗拉强度时,就会导致孔壁损伤,产生裂纹,直至拉断破裂。水激波在钻孔附近产生的环向正应力<sup>[32]</sup>为

$$\sigma_{\theta} = P \frac{r^2}{r_0^2} - \left[ \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left( 1 + \frac{r^2}{r_0^2} \right) - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left( 1 + 3 \frac{r^2}{r_0^2} \right) \cos 2\theta - \tau_{x,y} \left( 1 + 3 \frac{r^2}{r_0^2} \right) \sin 2\theta \right] \quad (2)$$

式中: $\sigma_{\theta}$ 为环向正应力,MPa; $r$ 为钻孔轴线(放电电极)到煤岩体钻孔附近任意一点的直线距离, $r_0$ 为钻孔半径,m; $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 和 $\tau_{x,y}$ 分别为水平方向x轴和y轴的地应力和剪应力分量,MPa; $\theta$ 为极坐标系下的极角,(°); $P$ 为作用在钻孔壁上的水激波实际应力,本文中取第一压力脉冲波的峰值压力,MPa,即:

$$P = P_{\max} \quad (3)$$

由文献[21]可知煤岩体的动态抗拉强度随动荷载的加载速率的改变而变化,二者的拟合回归公式为

$$\sigma_d = 0.244V^{0.430} \quad (4)$$

式中: $\sigma_d$ 为煤岩体动态抗拉强度,MPa; $V$ 为荷载加载速率,GPa/s。其中 $V$ 为

$$V = \frac{P - P_w}{\tau} \quad (5)$$

式中: $P_w$ 为水压值,MPa。

将式(3)代入(2),将式(5)代入式(4)可得:

$$\sigma_{\theta} = P_{\max} \frac{r^2}{r_0^2} - \left[ \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left( 1 + \frac{r^2}{r_0^2} \right) - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left( 1 + 3 \frac{r^2}{r_0^2} \right) \cos 2\theta - \tau_{x,y} \left( 1 + 3 \frac{r^2}{r_0^2} \right) \sin 2\theta \right] \quad (6)$$

$$\sigma_d = 0.244 \left( \frac{P_{\max} - P_w}{\tau} \right)^{0.430} \quad (7)$$

由于煤岩体的抗压强度远大于抗拉强度,钻孔表面在激波作用下率先满足抗拉强度,损伤破坏产生的裂纹以I型裂纹为主。换言之,在垂直于裂

纹面的拉应力作用下, 裂纹产生垂直于裂纹面的位移。考虑煤岩体内部的瓦斯压力的影响, 当 $\sigma'_\theta = (\sigma_\theta - P_2) \geq \sigma_d$ 时(其中,  $\sigma'_\theta$ 为环向有效应力,  $P_2$ 为煤岩体中的瓦斯压力), 煤岩体受到损伤, 裂纹起裂扩展。

## 2 液相放电致裂煤岩动态损伤试验

### 2.1 高压电脉冲致裂系统与煤岩试样制备

为探究不同液电参数下(放电电压、水压)液相放电水激波对煤岩体的损伤效果, 继而定量评价煤岩体裂隙形态及断裂损伤情况, 设计高压电脉冲水激波致裂煤岩体损伤试验。

试验装置为自主研发的真三轴水中高压脉冲放电压裂试验平台, 如图2所示, 试验平台由高压电脉冲放电系统、承压管道系统和三轴围压加载系统组成。

高压电脉冲放电系统由高压电脉冲电源(高压储能柜、放电开关等)、电缆线、放电电极等组成(图2), 高压储能柜能够实现最高15 kV电压的电能储存, 并通过电缆线将高压电能传递至放电电极, 电极放电会击穿液体, 使之产生强烈的水激波, 水激波沿承压管道传播至煤岩钻孔壁的表面, 实现致裂目的。放电电极置于承压管内, 压裂试验时电极端部紧临煤岩体试样。

承压管道如图2所示, 是由多节法兰盘连接而成。法兰盘的节数可根据试验目的进行相应调整,

当进行水激波传播性质的测试时, 为多节法兰盘连接而成; 当进行煤岩体压裂试验时, 仅使用一节法兰盘与压力室相连接。承压管道上安装了高频压力传感器(与动态数据存储记录仪连接), 可用于接收水激波信号。

伺服压力控制系统由加载系统(液压千斤顶等)和刚性三轴压力室(图2)组成。加压系统由3台电动液压千斤顶和加载控制装置组成, 加载控制装置具有数控稳压功能, 可长时间保持恒定的压力并自动补压, 以确保在模拟试验在真实地层状态下进行。加载前, 将刚性钢垫片置于试样表面, 确保试样受力均匀。加载过程中, 3个方向的千斤顶依次交替、多次少量的提高轴压, 直至增加至轴压所需值。

试验所用煤样源自晋煤集团蓝焰公司寺河煤矿, 煤层平均埋深450 m左右, 平均厚度6.3 m, 煤层内瓦斯应力为0.29 MPa, 平均地应力6.45~8.41 MPa<sup>[33-35]</sup>。选用的煤样表面光滑, 未受扰动、断面完整、节理发达有序, 煤岩样本具体物理力学参数见表1。

将现场采取的煤岩样本切割成边长为270 mm的立方体试样并在其表面均匀涂抹一层氯丁胶。静置一段时间后, 在立方体试样外表面均匀浇注一层厚度约15 mm的混凝土(配置的混凝土力学参数确保与煤岩样本的力学参数相似)。经过28 d养护后, 最终形成边长为300 mm的立方体试样。在其中心处钻取直径为26 mm的注水孔, 如图2所示。

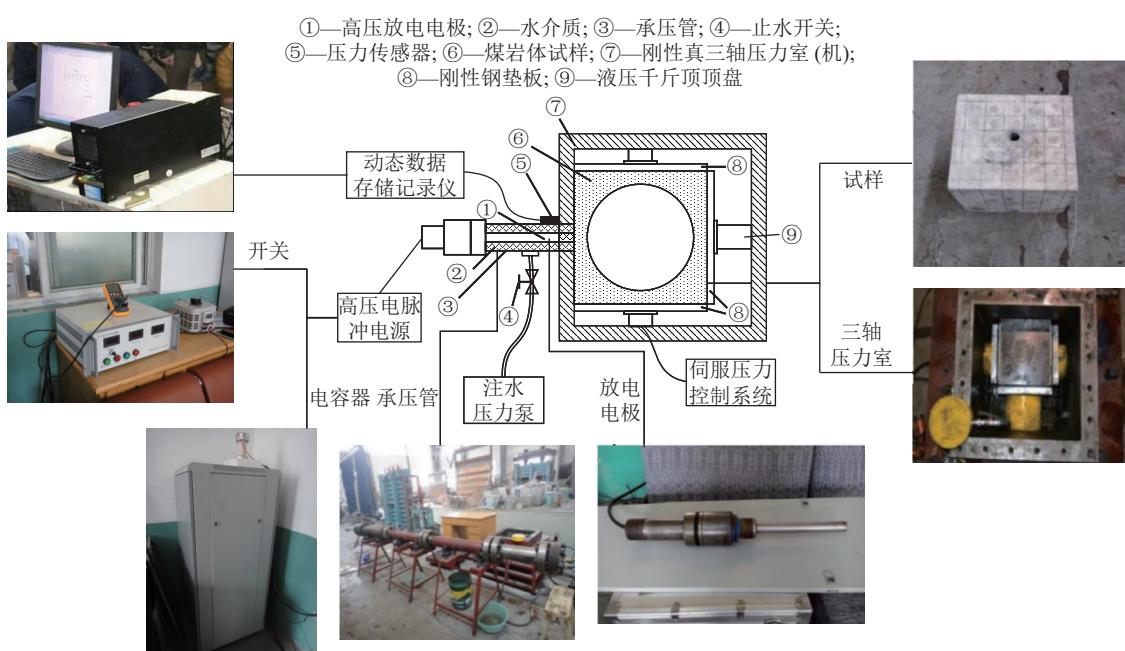


图2 水中高压脉冲放电压裂试验平台

Fig.2 Experimental platform of high-pressure pulse discharge fracturing in water

表1 煤样物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal samples

天然密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
1 515	19.69	2.53	1 105	0.3

## 2.2 试验方案及试验步骤

为研究不同液相放电参数(水压、放电电压)产生的水激波加载速率对煤岩体的致裂损伤效果,结合卞德存<sup>[10]</sup>、鲍先凯等<sup>[12]</sup>、闫东<sup>[36]</sup>的研究,可知放电电压与水压等参数对于煤岩样本的损伤致裂有着显著的影响,本次试验设置不同水压(1、2、3 MPa)和不同放电电压(9、11、13 kV)下的放电试验。具体试验方案见表2。

表2 不同液电参数的试验方案

Table 2 Discharge parameter schemes under different discharge voltages and different water pressures

试件编号	水压/MPa	电压/kV
0-0(原始煤样)	0	0
1-1	1	9
1-2	1	11
1-3	1	13
2-1	2	9
2-2	2	11
2-3	2	13
3-1	3	9
3-2	3	11
3-3	3	13

具体试验方法与步骤如下:

1)利用内窥镜对试件的钻孔进行窥探并拍照,了解试件钻孔在加载前的裂纹分布情况。其中,试件3-1的钻孔在压裂前的内窥图如图3a所示。

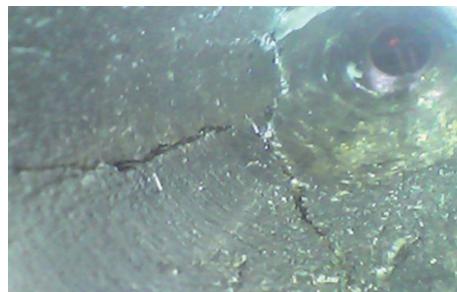
2)将准备好的1-1煤岩试件装入三轴压力室中并保证钻孔位置对中,围压与轴压分级交替加载至设定值(竖向轴压6.45 MPa,围压8.41 MPa)并始终保持不变。

3)压力泵开始向压力室内注压力水,待管道内水压达到1 MPa时,停止加压并保持水压不变。在高压电脉冲电源上设置放电电压9 kV,接通放电开关,电极在高压水中放电1次,然后继续充电至9 kV,重复放电10次后停止放电。

4)放电完成后,关掉高压电脉冲电源,卸掉静水压力,排空管道内的水,将1-1煤岩试件吊出箱体。



(a) 压裂前



(b) 压裂后

图3 试件3-1的钻孔内窥图

Fig.3 Borehole endoscopy of specimen 3-1

5)参照以上步骤,依次对其余试件进行不同水压、电压的压裂试验。

压裂试验完成后,采用内窥镜对煤岩体岩样钻孔内部拍照,试件3-1的内窥图如图3b所示。利用Z1Z(W)-200e型万向工程钻机进行钻心取样,钻具直径为80 mm。钻心取样过程中钻具套筒内外壁涂抹润滑油,钻速极其缓慢,同时不断浇水,最大限度的减少钻心取样过程中对煤岩体试样的损伤影响。

由图3可知,高压电脉冲水压致裂试验完成以后,钻孔内部已经形成3条纵向明显可见的开度较大的裂纹,裂纹延展情况良好,说明高压电脉冲水压致裂效果明显,试件纵向裂纹发展较好。对比后面CT扫描结果可知,取样过程对岩心影响较小,钻心取样方法得当。

取心完成以后,采用μCT225KVFCB显微CT对取得的煤心进行CT扫描分析,再利用裂隙图像识别与分析系统软件(Pores and Cracks Analysis System, PCAS)<sup>[37]</sup>将CT图片进行二值化处理,然后对煤岩体进行损伤评价。

## 2.3 水激波压力及加载速率结果分析

高压电极水中放电以后,水中形成水激波,水激波以球面波的形式向四周扩散,在传播的过程中,除了沿轴向以外,由于受承压管道的限制,还将出现由管道四周壁面反射回来的各种状态的反射波,它们

在承压管道腔体内相互叠加,传播一定距离后,逐渐形成沿管道轴向传播的平面波。液相放电过程中采用高频压力传感器对水激波波形、峰值压力和波前时间等信息进行采集。压力传感器采集到的理想冲击波应为沿管道轴向传播的平面波,由于煤岩体试件是经过多次放电致裂,在读取记录数据时,选取波形稳定、压力峰值、上升时间及脉宽变化幅值较小的

波形并截取第一压力脉冲波形图作为最有代表性的波形进行分析,并以此波形所对应的第一压力峰值为该放电条件下的激波峰值应力,典型波形图结果如图4所示。结合贾少华等<sup>[15]</sup>对水激波波前时间等问题的研究,水激波(冲击波)的波前时间可采用10%峰值强度和90%峰值强度对应时间间隔 $\tau_1$ 的1.25倍进行计算(即波前时间 $\tau=1.25\tau_1$ ),将计算得到

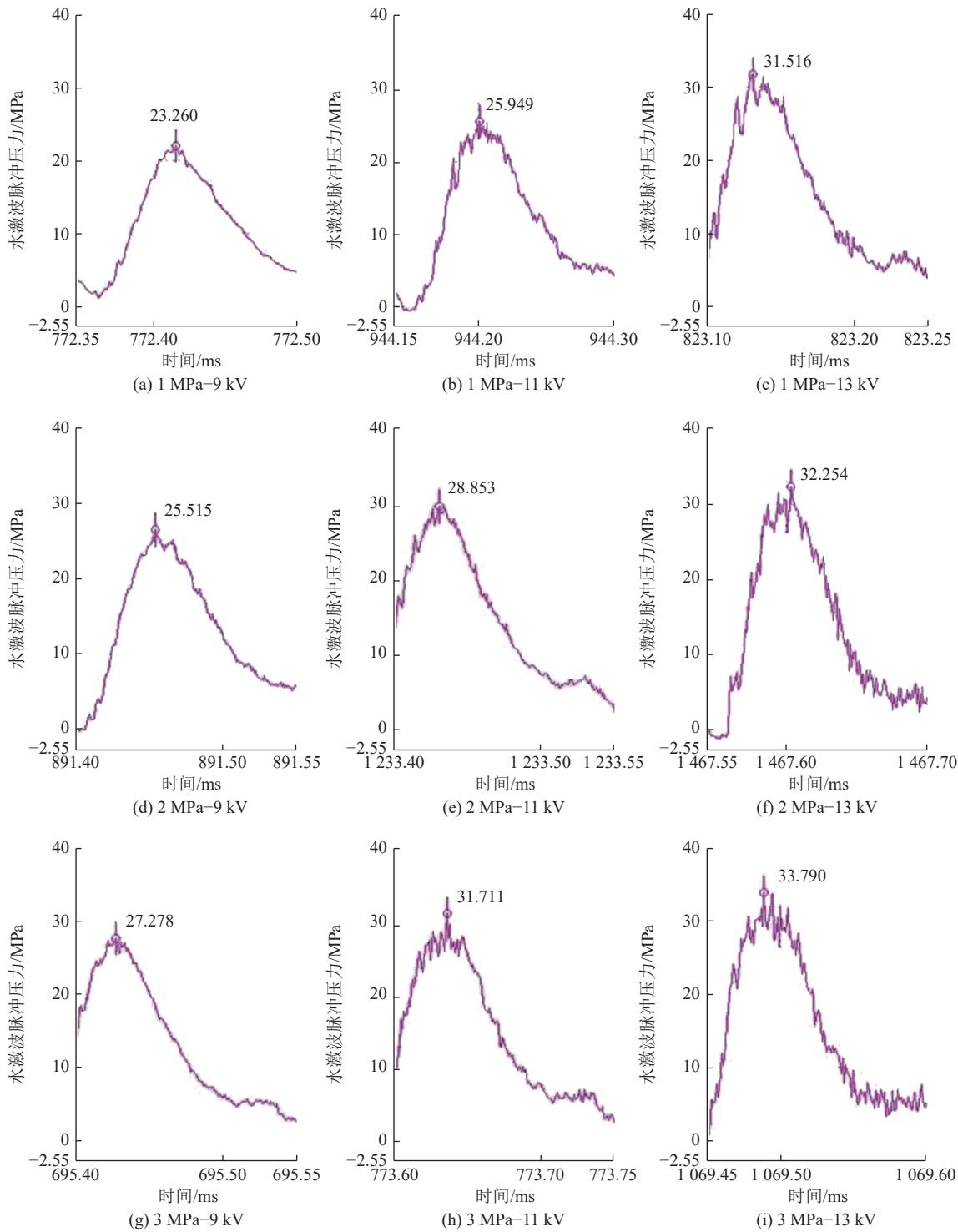


图4 激波脉冲压力图

Fig.4 Shock pulse pressure diagram

波前时间  $\tau$  代入式(6)便能计算出水激波加载速率  $V$ (峰值压力上升的速率), 具体数据见表3。其中 1 MPa–9 kV 的含义为 1 MPa 水压条件下进行 9 kV

高压脉冲放电, 其他参数含义与之相似。将表3中水激波峰值应力及荷载加载率导出, 变化规律如图5、图6所示。

表3 不同液电参数(放电电压、水压)的水激波参数

Table 3 Water shock wave parameter table with different hydraulic and electrical parameters (discharge voltage, water pressure)

液电参数	峰值应力 $P_{\max}/\text{MPa}$	水压 $P_w/\text{MPa}$	应力差值 $(P_{\max}-P_w)/\text{MPa}$	波前时间 $\tau/\mu\text{s}$	加载速率 $V/(\text{GPa} \cdot \text{s}^{-1})$
1 MPa–9 kV	23.260	1	22.260	43.446	512.357
1 MPa–11 kV	25.949	1	24.949	38.863	641.981
1 MPa–13 kV	31.516	1	30.516	32.298	944.841
2 MPa–9 kV	25.515	2	23.515	47.864	491.290
2 MPa–11 kV	28.853	2	27.853	42.600	630.352
2 MPa–13 kV	32.254	2	30.754	33.836	894.130
3 MPa–9 kV	27.278	3	23.278	49.729	488.209
3 MPa–11 kV	31.711	3	28.711	45.846	626.245
3 MPa–13 kV	33.790	3	30.790	36.650	840.109

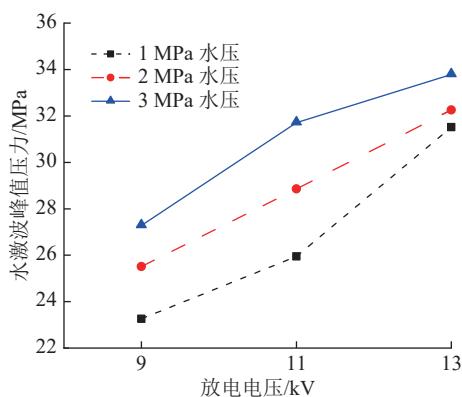


图5 水激波峰值压力变化

Fig.5 Water shock wave peak stress variation diagram

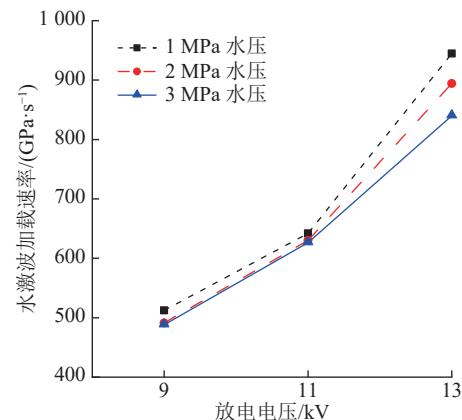


图6 水激波加载速率变化图

Fig.6 Change of water shock wave loading rate diagram

由图4可以看出, 水压相同条件下, 随着放电电压的提高, 水激波(冲击波)波前上升时间逐渐缩短, 峰值压力显著提高。放电电压相同的条件下, 随着

水压的增大, 水激波波前上升时间逐渐缩短, 峰值压力不断提高。

分析图5可知, 水激波峰值压力随着放电电压、水压的升高而升高。当放电电压由9 kV增加到13 kV, 水压分别为1、2、3 MPa时, 水激波峰值压力最大增长率分别为37.09%、28.66%和26.82%, 平均增长率为30.86%。同理, 当水压由1 MPa增加到3 MPa, 放电电压分别为9、11、13 kV时, 激波峰值压力最大增长率分别为9.07%、15.08%和0.90%, 平均增长率为8.35%。由此可见, 水激波峰值压力的增长率对放电电压的变化更为敏感, 或者说相对于水压的改变, 放电电压的变化对水激波峰值压力增长率的变化影响更为显著。

分析图6可得, 在相同水压条件下, 水激波加载速率随着放电电压的升高而升高, 而且变化率较高; 在相同放电电压条件下, 虽然水激波加载速率随着水压的升高而降低, 但是加载速率较为接近, 数值变化不大。对比分析图5、图6的变化规律可以发现, 在相同液电参数条件下, 放电电压对水激波影响程度要明显大于水压对水激波影响程度。

由此可见, 水激波峰值压力及其加载速率均随着放电电压的增加而增加, 水激波的峰值压力随着水压的增加而增加, 加载速率随着水压的增加而减小, 这与文献[23]的研究结论是一致的。但比较而言, 放电电压的变化对水激波的峰值压力及其加载速率影响显著, 这也必将影响到煤岩体压裂试验中钻孔侧壁附近的环向应力及煤岩体的动态抗拉强度, 进而影响到煤岩体的压裂效果。

## 2.4 裂纹起裂扩展理论分析及煤岩体 CT 扫描结果

煤岩体中既存在着张开型裂纹(I型裂纹),又存在着滑开型裂纹(II型裂纹)和撕开型裂纹(III型裂纹)<sup>[12]</sup>。当流体进入煤岩体中的裂纹后,裂纹多发生剪切滑动或沿拉应力方向张开,所以煤岩体中的裂纹是以I、II型裂纹为主的一种复合型裂纹<sup>[38,39]</sup>。

对I型裂纹而言,它总是沿着原来的裂缝面直线向前扩展,而对于I-II复合型裂纹而言,其扩展方向一般总和原裂缝方向呈一定的角度,如图7中的θ。

建立如图7所示的极坐标系,当环向有效应力达到煤岩体的动态抗拉强度(即: $\sigma'_\theta \geq \sigma_d$ )时,煤岩体受到损伤,裂纹开始失稳扩展。在平面问题中,利用I型和II型裂纹尖端应力计算结果和叠加原理,可得到I-II复合型裂纹尖端附近应力<sup>[40]</sup>。

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2(2\pi a)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I(1 + \cos \theta) - 3K_{II}\sin \theta] \quad (8)$$

$$\sigma_a = \frac{1}{2(2\pi a)^{1/2}} \left[ K_I(3 - \cos \theta) \cos \frac{\theta}{2} + K_{II}(3\cos \theta - 1) \sin \frac{\theta}{2} \right] \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} &= \frac{1}{2(2\pi a)^{1/2}} \left\{ -\frac{1}{2} \sin \frac{\theta}{2} [K_I(1 + \cos \theta) - 3K_{II}\sin \theta] + \cos \frac{\theta}{2} [-K_I\sin \theta - 3K_{II}\cos \theta] \right\} = \\ &\frac{1}{2(2\pi a)^{1/2}} \left[ -\frac{3}{2} K_I \cos \frac{\theta}{2} \sin \theta + \frac{3}{2} K_{II} \cos \frac{\theta}{2} (1 - 3\cos \theta) \right] = -\frac{3}{2} \times \frac{1}{2(2\pi a)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I\sin \theta + K_{II}(3\cos \theta - 1)] = \quad (11) \end{aligned}$$

$$-\frac{3}{2} \tau_{a,\theta} = 0$$

因此,式(11)中 $\cos \frac{\theta}{2} = 0$ 、 $K_I\sin \theta + K_{II}(3\cos \theta - 1) = 0$ 。若 $\cos \frac{\theta}{2} = 0$ ,则 $\theta = \pm\pi$ ,式(11)无实际意义,所以当且仅当 $K_I\sin \theta + K_{II}(3\cos \theta - 1) = 0$ 时,式(11)才能成立。即:

$$K_I\sin \theta_0 + K_{II}(3\cos \theta_0 - 1) = 0 \quad (12)$$

由式(12)解得角度 $\theta_0$ 就是环向有效应力 $\sigma'_\theta$ 取最大值所对应的方向,也就是裂纹开始扩展的方向,因而称 $\theta_0$ 为断裂角,即:

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \arcsin \left| \frac{K_{II} (K_I \pm 3 \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2})}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \right| = \\ &\arcsin \left| \frac{K_I \pm 3 \sqrt{8 + \left(\frac{K_I}{K_{II}}\right)^2}}{9 + \left(\frac{K_I}{K_{II}}\right)^2} \right| \quad (13) \end{aligned}$$

将 $\theta = \theta_0$ 代入式(8)就可得裂纹的最大环向正

$$\tau_{a,\theta} = \frac{1}{2(2\pi a)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I\sin \theta + K_{II}(3\cos \theta - 1)] \quad (10)$$

式中: $\sigma_a$ 为径向正应力, MPa;  $\tau_{a,\theta}$ 为剪切应力, MPa;  $a$ 为极坐标系下的极径, m;  $K_I$ 为I型裂纹尖端的应力强度因子(Stress Intensity Factor, SIF);  $K_{II}$ 为II型裂纹尖端的SIF。

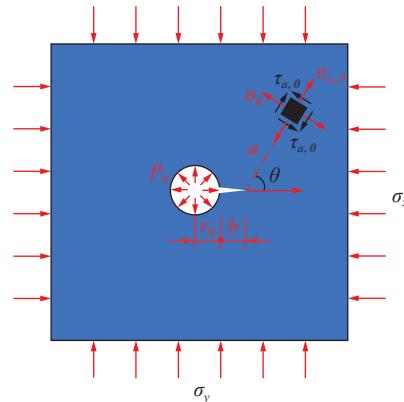


图7 裂纹扩展及尖端应力

Fig.7 Crack propagation and crack tip stress

对式(10)中的 $\theta$ 求导,并令 $\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} = 0$ ,则有:

$$\begin{aligned} \text{应} &\text{力:} \\ \sigma_{\theta,\max} &= \frac{1}{2(2\pi a)^{1/2}} \cos \frac{\theta_0}{2} [K_I(1 + \cos \theta_0) - 3K_{II}\sin \theta_0] \quad (14) \end{aligned}$$

参考文献[12],可得水压、地应力和冲击波作用下的煤岩体I-II复合型裂纹总的强度因子为

$$\begin{aligned} K_I &= K_I^S + K_I^t = K_{I(1)}^S + K_{I(2)}^S + K_I^t = \\ &2P_w \left( \frac{\pi}{2} - \frac{b+r_0}{b} \right) \sqrt{\frac{b+r_0}{\pi}} + P \sqrt{\pi b} |k_I| \exp \left[ -i\omega \left( t - \frac{\pi}{8} \right) \right] \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{II} &= K_{II}^S + K_{II}^t = K_{II(1)}^S + K_{II(2)}^S + K_{II}^t = \\ &- \left\{ \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} [\sin 2\theta - f(1 - 2\cos \theta)] - f\sigma_y \right\} \sqrt{\pi b} + \\ &P \sqrt{\pi b} |k_{II}| \exp \left[ -i\omega \left( t - \frac{\pi}{8} \right) \right] \quad (16) \end{aligned}$$

式中: $K_I^S$ 、 $K_{II}^S$ 为静荷载作用下煤岩体裂纹尖端的SIF,其中 $K_{I(1)}^S$ 、 $K_{II(1)}^S$ 为地应力作用下煤岩体裂纹尖端的

$SIF$ 、 $K_{I(2)}^S$ 、 $K_{II(2)}^S$ 为静水压作用下煤岩体裂纹尖端的  $SIF$ ;  $K_I^t$ 、 $K_{II}^t$ 为动荷载(冲击波)作用下煤岩体裂纹尖端的  $SIF$ ;  $b$  为裂纹长度, m;  $t$  为冲击波作用的时间, s;  $f$  为摩擦因数;  $i$  为虚数单位;  $\omega$  为冲击波的圆频率;  $k_1$

$$\sigma_{\theta,\max} = \frac{1}{2(2\pi a)^{1/2}} \cos \frac{\theta_0}{2} \left\{ \left\{ \frac{3}{2} (\sigma_x - \sigma_y) [\sin 2\theta - f(1 - 2\cos \theta)] - 3f(\sigma_y) \right\} \sqrt{\pi b} \sin \theta + P \left\{ (1 - 2\cos \theta) |k_1| \exp \left[ -i\omega \left( t - \frac{\pi}{8} \right) \right] - 3 \sin \theta |k_{II}| \exp \left[ -i\omega \left( t - \frac{\pi}{8} \right) \right] \right\} \right\} \sqrt{\pi b} + 2P_0(1 - \cos \theta) \left( \frac{\pi}{2} - \frac{b + r_0}{b} \right) \sqrt{\frac{b + r_0}{\pi}} \right\}$$

根据以上分析可知, 当  $\sigma_{\theta,\max} \geq \sigma'_\theta$  时, 裂纹将开始扩展。此时, 煤岩体在静水压力、地应力及冲击波作用下, 裂纹尖端会产生最大环向正应力为  $\sigma_{\theta,\max}$ , 裂纹扩展方向沿  $\theta_0$  方向。

煤岩体钻孔侧壁在水激波冲击作用下发生结构性能劣化, 考虑地层应力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  作用, 结合前文试验所得的水激波峰值应力  $P_{\max}$ , 波前时间  $\tau$ , 加载速率  $V$ , 计算出孔壁附近的环向有效应力  $\sigma'_\theta$  和煤岩体的动态抗拉强度  $\sigma_d$ <sup>[21]</sup>, 所得结果如图 8 所示。

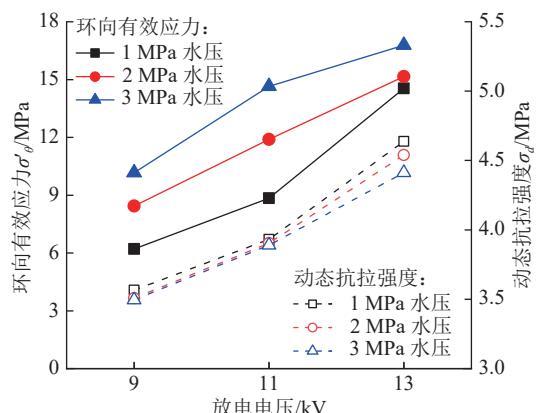


图 8 煤岩体的钻孔侧壁环向有效应力和动态抗拉强度  
Fig.8 Circumferential effective stress and dynamic tensile strength of borehole sidewall of coal and rock mass

分析图 8 可得, 随着放电电压、水压的升高, 煤岩体钻孔侧壁附近的环向有效应力和煤岩体动态抗拉强度均随之增大。但相同水压、电压的条件下, 环向有效应力均大于煤岩体的动态抗拉强度。换言之, 此时钻孔侧壁受拉破坏, 裂纹起裂扩展。

为进一步从细观角度分析煤岩体试样的损伤破坏情况, 对不同液电参数(放电电压、水压)产生的水激波作用后的煤岩体钻心样本进行 CT 图像分析。将每个岩心进行自上而下的 CT 断面扫描, 共扫描了 1 500 层。选取不同部位、典型层位的 CT 扫描图像进行处理和分析, 其中 200、400 层位于岩心中上部, 600、800 层位于岩心中部, 1 000 层位于岩心下部。

冲击波中的 P 波和 SV 波产生的 I 型裂纹动态强度因子;  $k_{II}$  为冲击波中的 P 波和 SV 波产生的 II 型裂纹动态强度因子。

将式(15)和式(16)代入式(14)可得:

$$\sigma_{\theta,\max} = \frac{1}{2(2\pi a)^{1/2}} \cos \frac{\theta_0}{2} \left\{ \left\{ \frac{3}{2} (\sigma_x - \sigma_y) [\sin 2\theta - f(1 - 2\cos \theta)] - 3f(\sigma_y) \right\} \sqrt{\pi b} \sin \theta + P \left\{ (1 - 2\cos \theta) |k_1| \exp \left[ -i\omega \left( t - \frac{\pi}{8} \right) \right] - 3 \sin \theta |k_{II}| \exp \left[ -i\omega \left( t - \frac{\pi}{8} \right) \right] \right\} \right\} \sqrt{\pi b} + 2P_0(1 - \cos \theta) \left( \frac{\pi}{2} - \frac{b + r_0}{b} \right) \sqrt{\frac{b + r_0}{\pi}} \right\}$$
(17)

借助 PCAS 软件对 CT 扫描结果进行二值化处理, 处理后的黑色部分为试样裂纹, 白色部分为煤岩体。CT 扫描图像结果和 PCAS 处后的二值化图像结果见表 4、表 5。

由表 4、表 5 可知, 0-0 试件(原始煤样)中裂纹数量极少, 宽度较小, 延展长度较短, 可以明显发现, 原始煤样试件内部明显的原生裂纹较少。随着放电电压由 9 kV 增加至 13 kV, 第 1 组试件(1 MPa 水压)中, 裂纹走向清晰, 裂纹数量由 2 条分别增加至 4 条、6 条, 裂纹开度不断扩大, 裂纹延展程度逐渐增加, 1-2 试件和 1-3 试件的裂纹边际均延展至边缘; 第 2 组试件(2 MPa 水压)中, 主裂纹数量由 4 条增加至 5 条, 主裂纹的分支裂纹数量、复杂程度明显增加, 裂纹延展充分、走向清晰、边际平整; 第 3 组试件(3 MPa 水压)中, 主裂纹数量由 3 条增加至 6 条, 裂纹延展、曲折、交叉程度明显增加, 裂纹走向清晰, 尤其是 3-3 试件(放电电压 13 kV、水压 9 kV)的裂纹延展最为充分、曲折程度最高、交叉情况最为复杂。需要注意的是, 极少部分裂纹并不是由钻孔边缘位置起裂, 如位于 3-2 试件的第 200 层 CT 图像左上角的 2 条细小裂纹。这可能是由于钻取岩心过程产生的; 也可能是裂纹扩展过程中遇到煤基质或其他杂质, 裂纹发生方向转变而形成; 或者是裂纹在 CT 扫描平面内停止扩展, 但在立体空间上继续延展而形成的; 或者是煤岩体原有裂纹。但此类型裂纹数量极少, 在裂纹形态分析中给予剔除, 不做分析。

综合以上分析可知, 随着水压、放电电压的增加, 水激波的冲击作用强度和加载速率不断增大, 煤岩体试件受到扰动, 其损伤致裂程度逐渐加剧, 裂纹数量、扩展长度、开度、以及复杂程度(曲折、分叉、交叉、裂缝边际凸凹等现象)明显增加。由此可见煤岩体试件的损伤致裂效果与水激波的动态冲击作用参数呈正相关性。

## 2.5 裂纹动态损伤评估

为进一步定量评估不同激波峰值压力作用下煤岩体的损伤情况, 采用定量评价的方式对煤岩体试

表4 煤岩体CT扫描图像结果  
Table 4 CT scan image results of coal and rock mass

试件	200层	400层	600层	800层	1 000层
0-0					
1-1					
1-2					
1-3					
2-1					
2-2					
2-3					

续表

试件	200层	400层	600层	800层	1 000层
3-1					
3-2					
3-3					

表 5 煤岩体 CT 扫描图像二值化图像处理结果

Table 5 Binarization image results of CT scanning of coal and rock mass

试件	200层	400层	600层	800层	1 000层
0-0					
1-1					
1-2					

续表

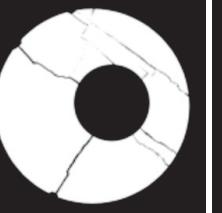
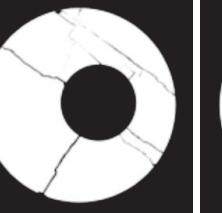
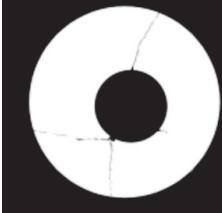
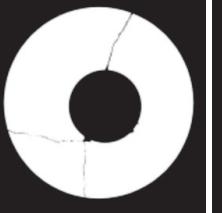
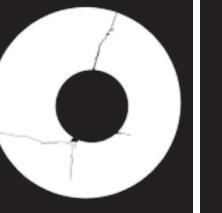
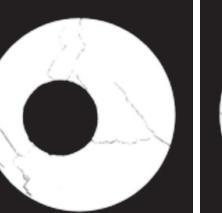
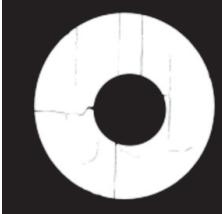
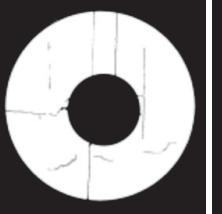
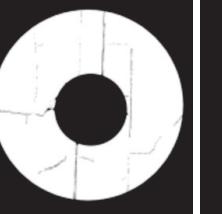
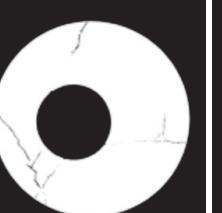
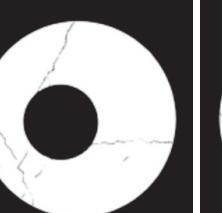
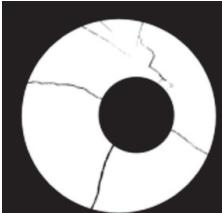
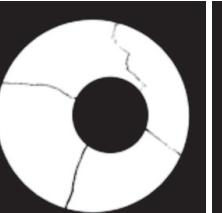
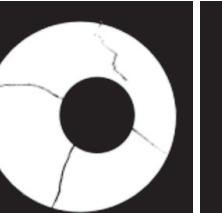
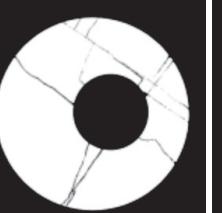
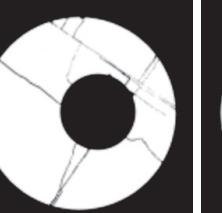
试件	200层	400层	600层	800层	1 000层
1-3					
2-1					
2-2					
2-3					
3-1					
3-2					
3-3					

表6 不同液电参数下煤岩体CT扫描图像的裂纹损伤情况

Table 6 Damage of coal rock mass with single crack under different hydraulic and electrical parameters

试件CT 扫描图层	压裂后 裂纹总面积/ $10^{-5}m^2$		压裂后 有效承载 面积/ $10^{-5}m^2$		损伤 变量 的平均值	损伤 变量 的平均值	试件CT 扫描图层	压裂后 裂纹总面积/ $10^{-5}m^2$		压裂后 有效承载 面积/ $10^{-5}m^2$		损伤 变量 的平均值	损伤 变量 的平均值
	压裂后 裂纹总面积/ $10^{-5}m^2$	压裂后 有效承载 面积/ $10^{-5}m^2$	损伤 变量 的平均值	压裂后 裂纹总面积/ $10^{-5}m^2$	压裂后 有效承载 面积/ $10^{-5}m^2$			压裂后 裂纹总面积/ $10^{-5}m^2$	压裂后 有效承载 面积/ $10^{-5}m^2$	损伤 变量 的平均值	损伤 变量 的平均值		
1-1-200	2.932	2.7398	0.5169	2-1-200	10.254	8.7693	0.5390	3-1-200	12.095	7.2256	0.6260		
1-1-400	2.221	2.0095	0.5250	2-1-400	10.672	8.0812	0.5691	3-1-400	15.952	9.3719	0.6299		
1-1-600	2.289	2.2537	0.5039	2-1-600	10.491	8.0467	0.5659	3-1-600	11.115	6.9510	0.6152	0.6233	
1-1-800	2.256	2.0671	0.5218	2-1-800	10.687	8.9188	0.5451	3-1-800	13.697	8.0794	0.6290		
1-1-1000	2.754	2.4440	0.5298	2-1-1000	10.601	8.1219	0.5662	3-1-1000	10.722	6.6789	0.6162		
1-2-200	5.118	3.0788	0.6244	2-2-200	14.887	7.9887	0.6508	3-2-200	15.413	6.2526	0.7114		
1-2-400	5.056	3.3442	0.6019	2-2-400	12.862	6.5461	0.6627	3-2-400	15.478	6.0107	0.7203		
1-2-600	5.169	3.2462	0.6142	2-2-600	12.284	5.8141	0.6787	3-2-600	13.216	5.4440	0.7083	0.7149	
1-2-800	5.972	3.6387	0.6214	2-2-800	12.465	6.5433	0.6558	3-2-800	13.928	5.4366	0.7193		
1-2-1000	5.451	3.6183	0.6010	2-2-1000	12.529	5.9645	0.6775	3-2-1000	13.783	5.4853	0.7153		
1-3-200	7.720	2.8646	0.7294	2-3-200	16.746	5.6361	0.7422	3-3-200	13.441	4.5015	0.7491		
1-3-400	7.845	3.1288	0.7149	2-3-400	10.259	3.6722	0.7334	3-3-400	12.467	4.3367	0.7419		
1-3-600	7.246	2.7439	0.7253	2-3-600	11.951	4.2432	0.7375	3-3-600	12.094	4.2668	0.7392	0.7409	
1-3-800	7.937	3.1375	0.7167	2-3-800	16.646	5.5690	0.7413	3-3-800	10.692	3.8239	0.7366		
1-3-1000	7.746	2.8759	0.7292	2-3-1000	14.016	4.7250	0.7334	3-3-1000	10.810	3.8402	0.7379		

件的细观损伤情况进行分析研究。损伤变量可以定量表征煤岩体劣化程度,是一种内部状态变量,是可以客观反映煤岩体内部损伤特征的场变量。

煤岩体裂纹起裂扩展是内部损伤累积的结果,由文献[41]可知由裂纹损伤面积定义的损伤变量可表示为

$$D = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \quad (18)$$

式中:  $A_1$ 、 $A_2$  分别为原始状态下有效承载面积和损伤后的有效承载面积,  $m^2$ 。

利用 PCAS 软件分别提取煤岩体二值化图像各层的裂纹总面积和压裂后的有效承载面积, 并对求得的煤岩体各层损伤变量求平均值, 以减小计算误差, 计算结果见表 6, 绘制煤岩体在不同液电参数下的损伤变量如图 9 所示。

分析图 9 可知, 在水压一定的条件下, 三组试件的损伤变量变化趋势基本一致, 煤岩体损伤变量均随着放电电压和水压的增加而增加。放电电压由 9 kV 增加至 13 kV, 1、2、3 MPa 水压下的损伤变量分别增长了 28.16%、24.47%、15.87%, 其中 1 MPa 水压条件下的损伤变量增长率最大, 3 MPa 水压条件下的损伤变量数值最大。需要注意的是, 13 kV 放电电压条件下, 损伤变量最为接近, 说明此时水压因素

对煤岩体损伤效果的影响弱于放电电压对煤岩体损伤效果的影响, 这与 CT 扫描二值化图像处理结果较为吻合。

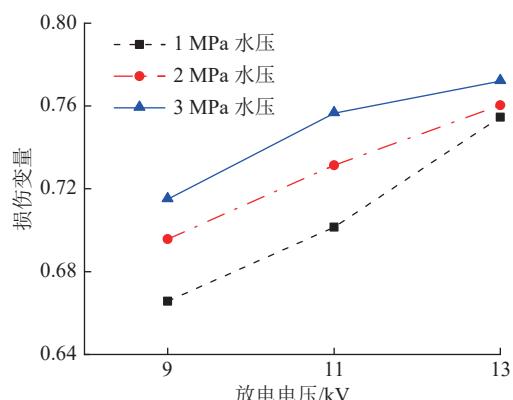


图9 不同液电参数下的损伤变量

Fig.9 Damage variables of coal caused by water shock waves with different discharge voltages and water pressures

以上分析可以看出, 放电电压和水压的提高都可以增加煤岩体的损伤变量, 从而提高煤岩体的损伤致裂效果。说明随着水激波的冲击作用强度和加载速率不断增大, 煤岩体劣化程度增大, 损伤变量曲线急剧上升, 此时煤岩体微裂纹不断萌生、扩展, 最终相互贯通并形成了细观裂缝, 这与 CT 扫描结果

一致。另外值得注意是,不同电压、水压下煤岩体损伤变量变化趋势大致相同,但相对而言,放电电压增加44.4%(由9 kV增加到13 kV),可导致煤岩体损伤变量最大增加28.16%,而水压增加200%,煤岩体试样损伤变量仅增加16.65%。这充分说明在改变液电参数过程中,提高放电电压更能够增加煤岩体试样的损伤变量值,增加试件的劣化程度和破坏程度,从而提高煤岩体的损伤致裂效果。

### 3 动态损伤数值模拟计算

虽然室内试验可以直接测得施加于煤岩体试件的水激波压力及加载速率,观察到试件钻孔周围细观裂纹扩展形态,但是作为一种矿物颗粒集合体,煤岩体内部微裂隙的发育扩展过程、裂纹形态、定量评价裂隙动态损伤特性等规律还需要从微观角度进一步验证分析。由于试验加载条件的不同,煤岩体钻孔周围会出现单条以及多条压裂裂纹,为更加充分、全面地评价不同液电参数下水激波冲击压裂煤岩体的效果,深入分析冲击荷载作用下煤岩体裂纹损伤特征及起裂、扩展形态发生的过程,分别通过预设单条、双条裂纹进一步对水激波冲击压裂煤岩体进行数值模拟计算,从裂纹的初始面积、扩展面积、损伤面积等方面进一步、全面探究煤岩体液电冲击损伤规律。

#### 3.1 数值模型的建立

利用ABAQUS中XFEM模块,建立液电耦合作用下压裂煤岩体的二维数值模型,煤岩体物理力学参数与室内试验完全相同,具体模型参数详见表7。模型尺寸大小为30 cm×30 cm,其中模型正中心处设一直径为2.6 cm的钻孔,由于煤岩体内部存在着随机分布的天然裂纹,所以在钻孔周围附近预设一条、两条径向裂纹,以模拟单条及多条裂纹的随机分布及压裂扩展情况,其中预制两条裂纹之间呈90°,裂纹长度均为 $2.2 \times 10^{-2}$  m(图10),裂纹初始缝宽为 $2 \times 10^{-3}$  m,单元格尺寸为 $3 \times 10^{-3}$  m× $3 \times 10^{-3}$  m= $0.9 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>,经计算统计,模型初始有效承载面积为 $2.16 \times 10^{-4}$ 、 $4.32 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>。

表7 数值模型参数

Table 7 Numerical model parameters

渗透系数	滤失系数	弹性模量/GPa	泊松比	孔隙比	天然密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
$10^{-7}$	$10^{-14}$	11.1	0.3	0.1	1 515	2.53	19.69

模型上下边界和左右边界分别施加 $\sigma_x=\sigma_y=8.41$  MPa的地应力。孔内静水压力直接作用于钻孔

表面。水激波峰值压力通过平滑分析步幅值进行赋值,然后加载至钻孔表面,如图11所示。

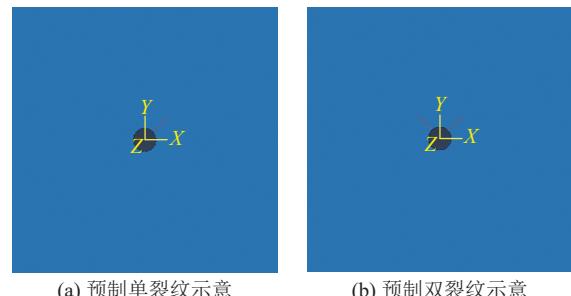
(a) 预制单裂纹示意  
(b) 预制双裂纹示意

图10 预制裂纹示意

Fig.10 Schematic diagram of prefabricated crack

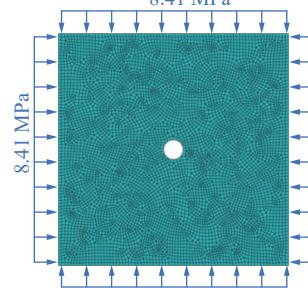


图11 地应力加载示意

Fig.11 Schematic diagram of in-situ stress confining pressure loading

模型钻孔内的水激波加载参数与试验参数一致,即在钻孔内分别施加不同初始水压、放电电压状态下的水激波峰值压力和波前时间(表3),ABAQUS内置的平滑分析步幅值点根据试验中水激波波形进行选择,即波形上升段视为直线,波形下降段视为指数衰减曲线,曲线函数为式(19),水激波幅值曲线如图12所示。

$$\begin{cases} P = P_0 + (P_{\max} - P_0) \exp [-(t - \tau)/t_s], & t > \tau \\ P = P_0 + [t(P_{\max} - P_0)]/\tau, & t \leq \tau \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{\max}$ 为水激波峰值压力, MPa; $P_0$ 为初始水压, MPa; $\tau$ 为波前时间, s; $t_s$ 为衰减段的衰减时间常数, s。

#### 3.2 数值计算结果分析

数值计算结束后,可以利用Abaqus附属插件,将裂纹长度、宽度导出,其原理是通过获取单元内裂缝所在边界上的2个端点位置,计算出单元内裂缝长度,最后通过累积求和实现对整条裂纹长度的计算;同理可计算输出单元格平均缝宽,最终实现压裂后裂纹总面积的计算。进而利用式(18)计算煤岩体裂纹的损伤变量。

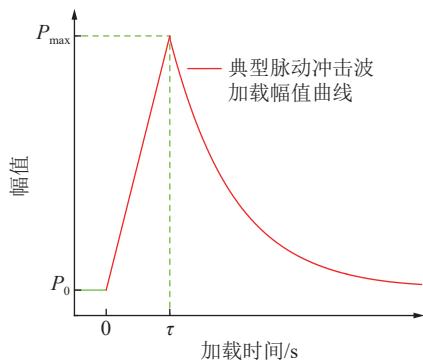


图 12 水激波幅值曲线  
Fig.12 Amplitude curve of water shock wave

细观状态下裂纹扩展面积  $A_1-A_2$  可理解为多个等单位尺寸微小单元体裂纹面积叠加而成, 表达式为

$$A_1-A_2 = \int d(A_1-A_2) = \sum_{i=0}^n \int_{L_i}^{L_{i+1}} c(x) dx \quad (20)$$

式中:  $n$  为裂纹长度的等分个数;  $c(x)$  为每段裂纹单元对应的单元段的裂纹平均宽度, m。

### 3.2.1 预制单裂纹数值模拟结果及分析

不同液电参数下煤岩体单裂纹裂纹扩展形态如图 13 所示。将裂纹长度、宽度结果代入式(20)中, 可计算出煤岩体裂纹损伤面积、损伤变量, 结果

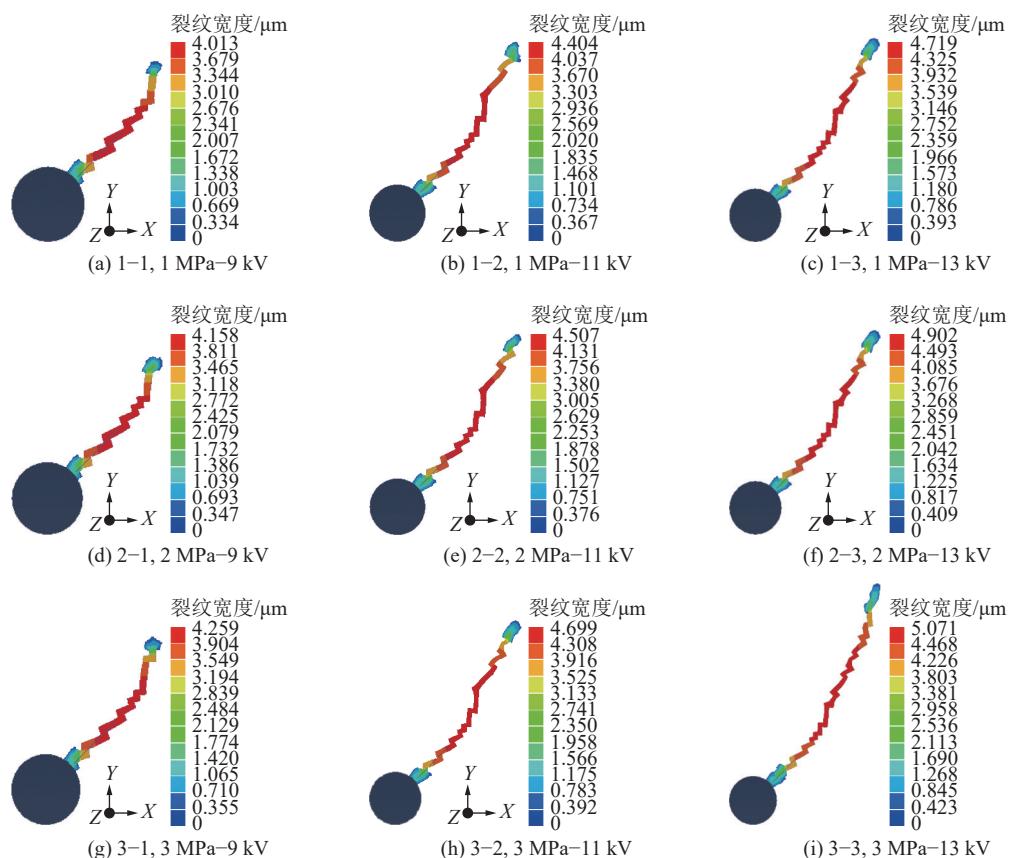


图 13 不同液电参数下单裂纹扩展形态  
Fig.13 Morphology of single crack growth with different hydraulic and electrical parameters

见表 8。

由上文的分析可知, 放电电压对水激波致裂煤岩体的影响程度要明显大于水压的影响程度, 通过观察图 13 也能明显得到此规律, 因此本节主要开展相同水压下, 裂纹的延展长度、宽度、损伤破坏随放电电压的变化规律分析。结合图 13 和表 8 可知, 在相同水压的情况下, 随着放电电压的增加, 裂纹的延展长度、宽度、损伤面积、损伤变量都有明显增加。具体而言, 随着放电电压的增加, 水压保持 1 MPa 不变, 裂纹最大宽度增加了 0.58%, 裂纹延展长度增加了 30.30%, 结合 1-1、1-2、1-3 的裂纹扩展形态图可以明显看出红色单元网格数量随之增加, 造成的损伤面积增加了 30.64%, 有效承载面积减少了 33.70%, 损伤变量增加了 30.62%; 水压保持 2 MPa, 裂纹最大宽度增加了 0.58%, 裂纹延展长度增加了 23.53%, 造成的损伤面积增加了 23.90%, 有效承载面积减少了 30.08%, 损伤变量增加了 23.89%; 水压保持 3 MPa, 裂纹最大宽度增加了 0.63%, 裂纹延展长度增加了 17.14%, 造成的损伤面积增加了 17.55%, 有效承载面积减少了 25.60%, 损伤变量增加了 17.55%。煤岩体在不同液电参数下的有效承载面积和损伤变量如图 14 所示。在相同电压的情况下, 随着水压的增加,

表 8 不同液电参数下单裂纹煤岩体的损伤情况

Table 8 Damage of coal rock mass with single crack under different hydraulic and electrical parameters

模型编号	预设裂纹初始长度/ $10^{-2}$ m	预设裂纹初始宽度/ $10^{-3}$ m	预设裂纹初始面积/ $10^{-5}$ $m^2$	压裂后裂纹总长度/ $10^{-2}$ m	压裂后裂纹总宽度/ $10^{-3}$ m	压裂后裂纹总面积/ $10^{-5}$ $m^2$	压裂后有效承载面积/ $10^{-5}$ $m^2$	损伤变量
1-1	2.2	2	4.4	4.6	2.042	9.351 7	12.248 3	0.433 0
1-2	2.2	2	4.4	5.8	2.043	11.795 9	9.804 1	0.546 1
1-3	2.2	2	4.4	6.6	2.054	13.479 9	8.120 1	0.624 1
2-1	2.2	2	4.4	5.2	2.042	10.571 5	11.028 5	0.489 4
2-2	2.2	2	4.4	5.9	2.047	12.017 8	9.582 2	0.556 4
2-3	2.2	2	4.4	6.8	2.054	13.888 4	7.711 6	0.643 0
3-1	2.2	2	4.4	5.8	2.042	11.791 3	9.808 7	0.545 9
3-2	2.2	2	4.4	6.2	2.057	12.677 6	8.922 4	0.586 9
3-3	2.2	2	4.4	7.0	2.055	14.302 4	7.297 6	0.662 1

裂纹延展长度、损伤面积和损伤变量的增加率都在不断减小,说明水压对裂纹损伤变量的提高作用在不断减小。具体数值不再赘述。

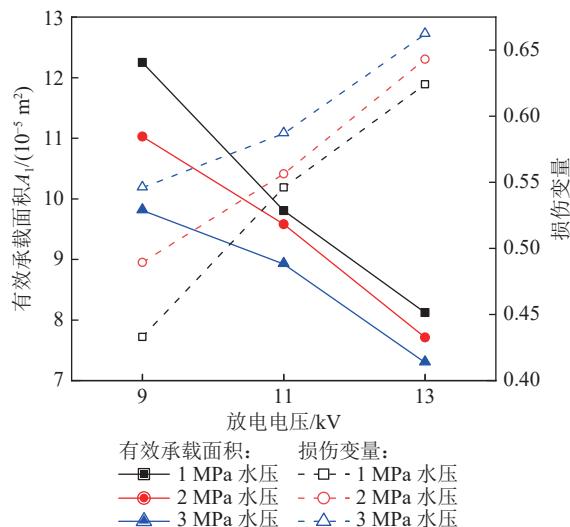


图 14 不同液电参数下单裂纹煤岩体的有效承载面积和损伤变量

Fig.14 Effective bearing area and damage variables of coal rock mass with single crack with different hydraulic and electrical parameters

进一步分析表 8、图 13、图 14 可知,在保持水压(放电电压)不变的条件下,随着放电电压(水压)的提高,预制单裂纹煤岩体的损伤面积逐渐提高,有效承载面积逐渐降低,损伤变量逐渐变大,煤岩体致裂效果明显。由此可见,三组试件的损伤面积、损伤变量均随着水压、电压的升高而增大,这与室内试验得到的不同液电参数下试件的损伤变量(图 9)变化趋势是一致的。

### 3.2.2 预制双裂纹数值模拟结果及分析

数值计算所得不同液电参数下煤岩体双裂纹裂纹扩展形态如图 15 所示。按照上文方法可得出扩

展后裂纹长度和平均缝宽,并将结果代入式(20)中,计算出双裂纹煤岩体裂纹损伤面积、损伤变量,结果详见表 9。

结合图 15 和表 9 可知,预制双裂纹与预制单裂纹在扩展规律上有着相似之处,随着电压(水压)的增加,裂纹延展长度、宽度、损伤面积、损伤变量均有明显增加。在裂纹形态上,煤岩体双裂纹在扩展压裂过程中会呈现明显的相互干扰现象。随着放电电压的增加,具体而言,水压保持 1 MPa 不变,裂纹最大宽度增加了 0.09%,裂纹延展长度增加了 71.86%,结合 1-1、1-2、1-3 的裂纹扩展形态图可以明显看出红色单元网格数量随之增加,造成的损伤面积增加了 72.00%,有效承载面积减少了 29.34%,损伤变量增加了 30.77%;水压保持 2 MPa 不变,裂纹最大宽度增加了 0.45%,裂纹延展长度增加了 71.54%,造成的损伤面积增加了 71.67%,有效承载面积减少了 30.93%,损伤变量增加了 28.71%;水压保持 3 MPa 不变,裂纹最大宽度增加了 0.22%,裂纹延展长度增加了 71.28%,造成的损伤面积增加了 71.34%,有效承载面积减少了 36.23%,损伤变量增加了 21.11%。相同电压时,裂纹延展长度、损伤面积和损伤变量随水压的变化规律与预制单裂纹的扩展规律相似,不再赘述。煤岩体在不同液电参数下的有效承载面积和损伤变量如图 16 所示。

进一步分析表 9、图 15、图 16 可知,在保持水压(放电电压)不变的条件下,随着放电电压(水压)的提高,双裂纹煤岩体损伤面积逐渐提高,有效承载面积逐渐降低,损伤变量逐渐变大,煤岩体致裂效果明显。由此可见,三组试件的损伤面积、损伤变量均随着水压、电压的升高而增大,而在形态上 2 条裂纹对称呈 90°分布,裂纹走向清晰,裂缝边缘凸凹不平、曲折

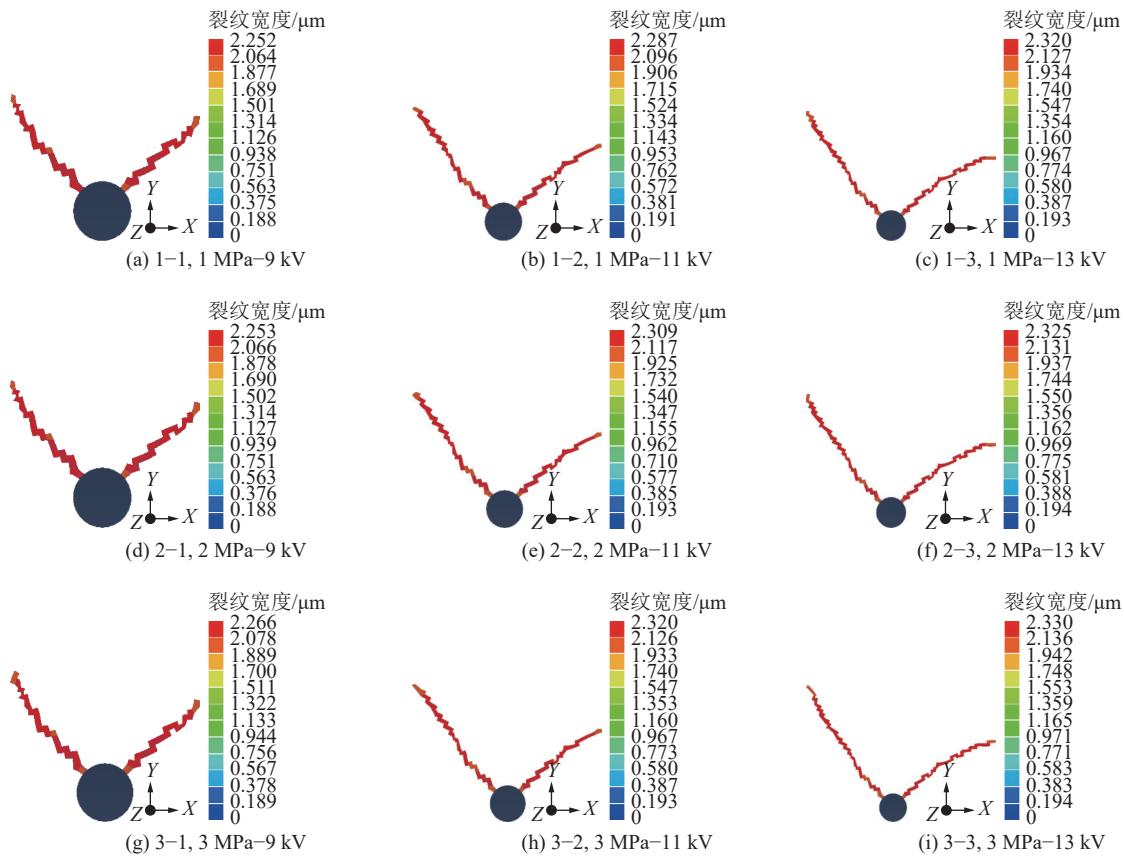


图 15 不同液电参数下双裂纹扩展形态

Fig.15 Double crack growth patterns under different hydraulic and electrical parameters

表 9 不同液电参数下双裂纹煤岩体的损伤情况

Table 9 Damage of coal rock mass with double cracks under different hydraulic and electrical parameters

模型编号	预设裂纹初始长度/ $10^{-2}$ m	预设裂纹初始宽度/ $10^{-3}$ m	预设裂纹初始面积/ $10^{-5}$ $m^2$	压裂后裂纹总长度/ $10^{-2}$ m	压裂后裂纹总宽度/ $10^{-3}$ m	压裂后裂纹总面积/ $10^{-5}$ $m^2$	压裂后有效承载面积/ $10^{-5}$ $m^2$	损伤变量
1-1	2.2	2	8.8	10.3	2.232	22.8729	22.5104	0.4553
1-2	2.2	2	8.8	19.7	2.238	43.8649	18.9114	0.5698
1-3	2.2	2	8.8	36.6	2.243	81.6773	15.9062	0.6577
2-1	2.2	2	8.8	10.5	2.233	23.3275	22.0535	0.4952
2-2	2.2	2	8.8	19.9	2.239	44.3300	18.4439	0.6172
2-3	2.2	2	8.8	36.9	2.243	82.3467	15.2333	0.6946
3-1	2.2	2	8.8	10.8	2.240	24.0693	21.3080	0.5581
3-2	2.2	2	8.8	20.7	2.242	46.1739	16.5906	0.6435
3-3	2.2	2	8.8	37.6	2.245	83.9837	13.5880	0.7074

延展,这与表 5 中室内试验试件 1-2、1-3 的 CT 扫描二值化图像处理结果较为吻合。

### 3.3 煤岩体损伤综合评价分析

水激波脉冲冲击作用可以被视为动载作用,如何准确的对动载作用下煤岩体裂纹扩展规律和损伤效果进行定量评价,一直是广大学者所关注的问题。本文结合水激波冲击强度、加载速率的性质研究,对于高压电脉冲液相放电致裂煤岩体动态损伤研究分

别采用有效应力法和面积法、从宏观和微观角度、运用不同计算指标进行损伤变量计算分析,并分别通过致裂试验和数值计算进行综合评价分析。首先通过压裂试验并采用 CT 扫描的手段进行裂纹损伤扩展的宏观观测,并基于 CT 扫描图像裂纹面积损伤计算煤岩体的损伤变量。接着通过数值计算从微观角度对不同加载强度条件下的煤岩体损伤进行定量分析。采用不同研究手段,从不同研究角度、综合分析

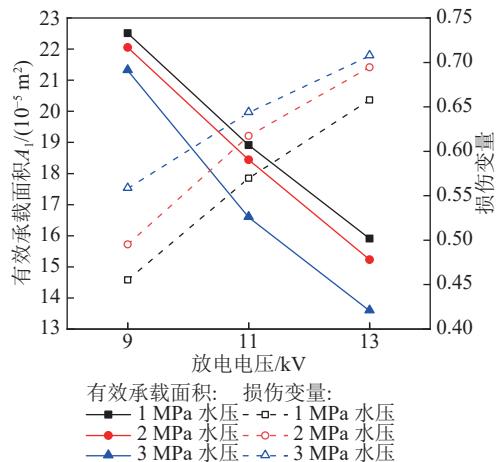


图 16 不同液电参数下双裂纹煤岩体的有效承载面积和损伤变量

Fig.16 Effective bearing area and damage variables of coal rock mass with double cracks under different hydraulic and electrical parameters

不同液电加载条件的加载特性及煤岩体动态损伤特征。室内试验和数值计算所得煤岩体损伤变量如图 17 所示。

由图 17 可知, 在相同液电参数条件下, 高压电脉冲水压致裂试验和数值模拟得到的煤岩体损伤变量均随着放电电压和水压的增加而不断增加。具体而言, 随着放电电压的增加, 保持 1 MPa 水压不变

(图 17a), 试验所得的损伤变量增加了 28.16%, 数值模拟中预制 1 条、2 条裂纹的损伤变量分别增加了 30.62%、30.77%; 保持 2 MPa 水压不变(图 17b), 试验所得的损伤变量增加了 24.47%, 数值模拟中预制 1 条、2 条裂纹的损伤变量分别增加了 23.89%、28.71%; 保持 3 MPa 水压不变(图 17c), 试验所得的损伤变量增加了 15.87%, 数值模拟中预制 1 条、2 条裂纹的损伤变量分别增加了 17.55%、21.11%。虽然室内试验与数值模拟所得的损伤变量在数值上有差距, 但两者的差距很小。在相同液电参数下, 试验所得的损伤变量总是略大于数值模拟所得到的损伤变量, 造成这一现象的主要原因是数值模拟中材料属性定义为各向同性, 而试验中煤岩体更接近于各向异性, 内部缺陷较多, 所以相同加载条件下损伤更为明显、更为充分、更为严重。但试验和模拟从不同的角度得到的损伤变量变化趋势是一致的, 两者相互印证, 通过对有效应力、有效承载面积和损伤变量的计算, 揭示了在不同液相放电激波加载强度、加载速率条件下, 裂纹从损伤、起裂到扩展的演化过程, 可以较好的表征出液电脉冲激波作用下的加载特性和煤岩体宏、微观动态损伤特征, 可有效地评价煤岩体损伤致裂效果, 研究可为实际工程提供一定的理论指导。

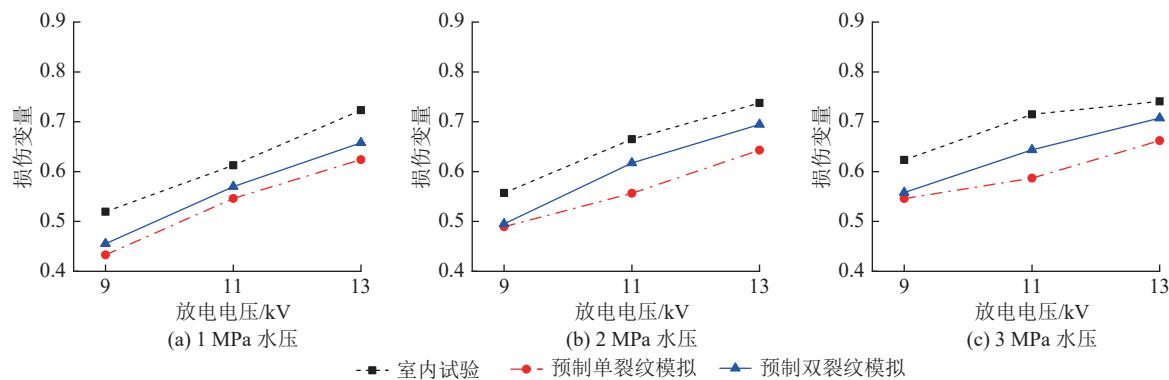


图 17 不同液电参数下煤岩体损伤变量对比

Fig.17 Comparison of damage variables of coal and rock mass under different hydraulic and electrical parameters

## 4 结 论

1) 高压电脉冲水压致裂产生的水激波, 其前沿上升时间短, 峰值压力和冲击加载速率最大值分别能够达到 33.790 MPa 和 944.841 GPa/s。水激波的峰值压力随着放电电压和水压的增大而增大, 加载速率随着放电电压的增大而增大, 随着水压的增大而减小。

2) 煤岩体的损伤致裂效果与水激波的动态冲击

作用参数呈正相关性。随着水压、电压的增加, 水激波的加载速率和冲击作用强度不断增大, 煤岩体损伤致裂加剧, 裂纹数量、扩展长度、开度以及裂纹复杂程度(曲折、分叉、交叉等现象)增加明显。

3) 相对于改变水压, 改变放电电压更能显著的增加煤岩体损伤变量, 提高煤岩体的损伤致裂效果。室内试验所得的煤岩体损伤变量随着放电电压和水压的增加而增加, 放电电压增加 44.4%, 煤岩体损伤变量最大增幅为 28.16%, 水压增加 200%, 煤岩体损

伤变量最大增幅仅为16.15%。

4)通过在煤岩体内部预制裂纹的方式展开的数值模拟计算,有效的对室内试验进行了印证、扩展和补充,计算结果与室内试验所得到的结果非常吻合。室内试验和数值模拟分别从细、微观角度互相印证,再次证明随着水压、电压的增加,煤岩体的裂纹损伤面积和损伤变量逐渐增加,相对于改变水压,提高放电电压更能够显著的增加损伤变量值。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘大锰,贾奇锋,蔡益栋.中国煤层气储层地质与表征技术研究进展[J].煤炭科学技术,2022,50(1):196–203.  
LIU Dameng, Jia Qifeng, Cai Yidong. Research progress on coalbed methane reservoir geology and characterization technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 196–203.
- [2] YEHYA A, BASBOUS J, MAALOUF E. Analysis of the Hydrogeological Conditions Affecting Fault Response to Nearby Hydraulic Fracturing[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2022, 127(10): e2022JB024881.
- [3] 马东东,罗宇杰,胡大伟,等.粒径分选性与围压对砂砾岩水力压裂破裂影响机制研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(11):2264–2273.  
MA Dongdong, LUO Yujie, HU Dawei, et al. Effects of particle size sorting and confining pressure on hydraulic fracturing mechanism of glutenite rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(11): 2264–2273.
- [4] XU J Z, ZHAI C, QIN L. Mechanism and application of pulse hydraulic fracturing in improving drainage of coalbed methane[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2017, 40: 79–90.
- [5] 陈江湛,曹涵,孙平贺,等.三轴加载下煤岩脉冲水力压裂扩缝机制研究[J].岩土力学,2017,38(4):1023–1031.  
CHEN Jiangzhan, CAO Han, SUN Pinghe, et al. Mechanisms of fracture extending in coal rock by pulse hydraulic fracturing under triaxial loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 1023–1031.
- [6] YANG J. X. , LIU C. Y. Experimental Study and Engineering Practice of Pressured Water Coupling Blasting[J]. Shock and Vibration, 2017, 2017: 1–12.
- [7] 乔奕炜.煤层气超声波增产可行性研究[D].成都:西南石油大学,2018.  
QIAO Yiwei. Feasibility study of ultrasonic production enhancement of coalbed methane[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [8] ZHANG X L, LIN B Q, LI Y J, et al. Enhancement effect of NaCl solution on pore structure of coal with high-voltage electrical pulse treatment[J]. Fuel, 2019, 235: 744–752.
- [9] 赵胤翔,赵金昌,马忠忠,等.水中高压电脉冲放电致裂不同强度煤体效果研究[J].中国矿业,2021,30(10):175–180.  
ZHAO Yinxiang, ZHAO Jinchang, MA Zhongzhong, et al. Research on effect of high-voltage electric pulse discharge in water on cracking different strength coal[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(10): 175–180.
- [10] 卞德存.静水压下脉冲放电冲击波特性及其岩体致裂研究[D].太原:太原理工大学,2018.  
BIAN Decun. Research on the shock wave characteristics of pulsed discharge under hydrostatic pressure and its fracturing effect on rock mass[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [11] 鲍先凯,武晋文,杨东伟,等.高压电脉冲水压致裂煤体效果试验研究[J].煤炭科学技术,2017,45(9):133–138.  
BAO Xiankai, WU Jinwen, YANG Dongwei, et al. Experimental study on coal fracturing effect by high-voltage pulsed water pressure[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 133–138.
- [12] 鲍先凯.高压电脉冲水压裂煤体机理及实验研究[D].太原:太原理工大学,2018.  
BAO Xiankai. The study on mechanism and experiment of hydraulic fracturing coal in high voltage electric pulse[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [13] 鲍先凯,刘源,郭军宇,等.煤岩体在水中高压放电下致裂效果的定量评价[J].岩石力学与工程学报,2020,39(4):715–725.  
BAO Xiankai, LIU Yuan, GUO Junyu, et al. Quantitative evaluation of the fracturing effect of coal-rock masses under high-voltage discharge actions in water[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(4): 715–725.
- [14] BAO X K, GUO J Y, LIU Y, et al. Damage characteristics and laws of micro-crack of underwater electric pulse fracturing coal-rock mass[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2021, 111(5): 102853.
- [15] 贾少华,赵金昌,尹志强,等.基于高压电脉冲煤体增透的水激波波前时间变化规律研究[J].太原理工大学学报,2015,46(6):680–684,690.  
JIA Shaohua, ZHAO Jinchang, YIN Zhiqiang, et al. Study on the variation law of water excitation wavefront time based on high-voltage electric pulse coal body permeability enhancement[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015, 46(6): 680–684, 690.
- [16] GRADY D. E. , KIPP M. E. Continuum modelling of explosive fracture in oil shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1980, 17(3): 147–157.
- [17] 李涛,马永君,刘波,等.循环荷载作用下冻结灰砂岩强度特征与弹性模量演化规律[J].煤炭学报,2018,43(9):2438–2443.  
LI Tao, MA Yongjun, LIU Bo, et al. Strength characteristics and elastic modulus evolution of frozen gray sandstone under cyclic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2438–2443.
- [18] 李子运,吴光,黄天柱,等.三轴循环荷载作用下页岩能量演化规律及强度失效判据研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(3):662–670.  
LI Ziyun, WU Guang, HUANG Tianzhu, et al. Variation of energy and criteria for strength failure of shale under triaxial cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 662–670.
- [19] 闻名,许金余,王浩宇,等.低温–动荷载耦合作用下砂岩破坏断

- 口的形貌分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S2): 3822–3830.
- WEN Ming, XU Jinyu, WANG Haoyu, et al. Fractography analysis of sandstone failure under low temperature-dynamic loading coupling effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2): 3822–3830.
- [20] LI X B, WANG S M, WENG L, et al. Damage constitutive model of different age concretes under impact load[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(2): 693–700.
- [21] 刘晓辉, 戴峰, 刘建锋, 等. 考虑层理方向煤岩的静动巴西劈裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2098–2105.
- LIU Xiaohui, DAI Feng, LIU Jianfeng, et al. Brazilian splitting tests on coal rock considering bedding direction under static and dynamic loading rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2098–2105.
- [22] 郭德勇, 吕鹏飞, 赵杰超, 等. 煤岩冲击变形破坏特性及其本构模型[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2233–2242.
- GUO Deyong, LU Pengfei, ZHAO Jiechao, et al. Deformation and damage characteristics and constitutive model of coal and rock under impact loading[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2233–2242.
- [23] 梁为民, 李晓鹏, 李敏敏. 冲击荷载作用下各向异性煤体中大孔结构变化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(11): 100–109.
- LIANG Weimin, LI Xiaopeng, Li Minmin. Study on the evolution of macropore structure in anisotropic coal under impact load[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(11): 100–109.
- [24] 李全贵, 邓羿泽, 胡千庭, 等. 煤岩水力压裂物理试验研究综述及展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 62–72.
- LI Quangui, DENG Yize, HU Qianting, et al. Review and prospect of coal rock hydraulic fracturing physical experimental research[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 62–72.
- [25] 李培培. 钻孔注水高压电脉冲致裂瓦斯抽放技术基础研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- LI Peipei. Drilling water injection pressure impulses crack gas drainage technology research[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [26] LECAMPION B. An extended finite element method for hydraulic fracture problems[J]. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 2009, 25(2): 121–133.
- [27] DAHI-TALEGHANI A, OLSON J E. Numerical modeling of multistranded hydraulic fracture propagation: accounting for the interaction between induced and natural fractures[J]. SPE Journal, 2011, 16(3): 575–581.
- [28] DAHI-TALEGHANI A, OLSON J E. How natural fractures could affect hydraulic fracture geometry[J]. SPE Journal, 2014, 19(1): 161–171.
- [29] GHOLAMI A, RAHMAN S S, NATARAJAN S. Simulation of Hydraulic Fracture Propagation Using XFEM[C]. Sustainable Earth Sciences, 2013.
- [30] MOHAMMADNEJAD T., KHOEI A. R. An extended finite element method for hydraulic fracture propagation in deformable porous media with the cohesive crack model[J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2013, 73: 77–95.
- [31] 尹志强, 赵金昌, 贾少华, 等. 基于高压电脉冲的水激波加载特性的实验研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(6): 182–185.
- YIN Zhiqiang, ZHAO Jinchang, JIA Shaohua, et al. Experimental study of water shock load characteristics based on high-voltage pulse discharge[J]. Coal Technology, 2016, 35(6): 182–185.
- [32] 薄云鹤. 火山岩水平井分段压裂应力场变化规律分析[D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
- BO Yunhe. Analysis of variation law of volcanic reservoir stress fields in horizontal well staged fracturing[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2019.
- [33] 师素珍, 郭家成, 谷剑英, 等. 寺河矿东五盘 2011ZX\_CC\_01 井井喷原因[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3187–3195.
- SHI Suzhen, GUO Jiacheng, GU Jianying, et al. Exploration research on 2011ZX\_CC\_01 well blowout in East Five Panel of Sihe Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3187–3195.
- [34] 彭守建, 许江, 尹光志, 等. 基质收缩效应对含瓦斯煤渗流影响的实验分析[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(5): 109–114.
- PENG Shoujian, XU Jiang, YIN Guangzhi, et al. Experimental analysis of matrix shrinkage's influence on mechanical permeability of gas-filled coal[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(5): 109–114.
- [35] 田富超. 寺河矿西井区 3 号煤层瓦斯突出预测指标研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2010.
- TIAN Fuchao. Research on gas outburst prediction indexs about No. 3 coal seam in west area of sihe coal mine[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2010.
- [36] 同东. 岩体内静水压下高压脉冲放电爆轰致裂基础研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- YAN Dong. The foundational research on the highvoltage pulse discharge detonation fracturing in rock mass under hydrostatic pressure[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [37] LIU C, SHI B, ZHOU J, et al. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: Application on SEM images of clay materials[J]. Applied Clay Science, 2011, 54(1): 97–106.
- [38] 邱宇超, 梁卫国, 李静, 等. 非均质弹塑性煤体水压致裂纹形态研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3668–3679.
- QIU Yuchao, LIANG Weiguo, LI Jing, et al. Study on fracture morphology of hydraulic fracturing in heterogeneous elastoplastic coal[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3668–3679.
- [39] 李宗利, 张宏朝, 任青文, 等. 岩石裂纹水力劈裂分析与临界水压计算[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1216–1220.
- LI Zongli, ZHANG Hongchao, REN Qingwen, et al. Analysis of hydraulic fracturing and calculation of critical internal water pressure of rock fracture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1216–1220.
- [40] 徐世娘. 混凝土断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [41] BAO X K, CAO J X, ZHENG W X, et al. Study on the damage model of coal rock caused by hydraulic pressure and electrical impulse in borehole[J]. Geofluids, 2021, 2021(1): 6627242.