

引文格式:姚强强,赵金昌,牛少卿,等. 原生裂缝长度对电脉冲致裂煤岩体的影响规律[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(4):808-815.

YAO Qiangqiang, ZHAO Jinchang, NIU Shaoqing, et al. Effects of primary fracture length on high-voltage electrical pulse fracturing coal rock mass[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(4):808-815.

原生裂缝长度对电脉冲致裂煤岩体的影响规律

姚强强¹, 赵金昌¹, 牛少卿¹, 刘正和², 李 铭¹

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原; 2. 太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原)

摘 要:【目的】水中高压脉冲放电作为一种新型的致裂增产手段,以其绿色安全及高效可控的特性在煤层气致裂增产方面得到了广泛应用。由于煤岩体中存在丰富的原生裂缝,水中高压脉冲放电产生的水激波在原生裂缝处产生透射与反射,同时反射波和下一道水激波会叠加形成干涉,从而产生更多裂纹。本文研究水中高压脉冲放电在不同原生裂缝长度下对岩体的致裂效果。【方法】通过实验室三轴压力下岩石大尺寸试件的放电致裂实验和数值模拟,统计了不同原生裂缝长度下放电致裂产生的裂纹长度、力链断裂数目、定点测量的裂纹宽度和震动速度等参数,研究了原生裂缝长度对岩石致裂裂纹的起裂、扩展的影响规律。【结果】研究结果表明:脉冲放电次数对煤岩体裂纹的起裂和扩展有明显促进作用,裂纹宽度增长率随着设置裂缝长度的增加而增加;原生裂缝的存在提高了电脉冲致裂时产生裂纹的总长度和总数量;原生裂缝的存在改变了煤岩体中应力分布情况,随着原生裂缝长度的增加迎波侧区域压应力降低,在相同冲击载荷作用下更容易产生裂纹;相同放电次数下,随着原生裂缝长度的增大,力链断裂数目增加,在迎波侧区域所测定点的震动速度峰值增大,达到最大震动速度时所需时程步数减少。【结论】研究结果为高瓦斯煤层放电动态致裂技术提供了理论依据。

关键词: 高压电脉冲; 水激波; 预制裂缝; 裂纹扩展

中图分类号: TD821 **文献标识码:** A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20240529

文章编号: 1007-9432(2026)04-0808-08

Effects of Primary Fracture Length on High-Voltage Electrical Pulse Fracturing Coal Rock Mass

YAO Qiangqiang¹, ZHAO Jinchang¹, NIU Shaoqing¹, LIU Zhenghe², LI Ming¹

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China;

2. Key Laboratory of In-situ Property Improving Mining of Ministry of Education,

Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China)

Abstract:【Purposes】As a new method of fracturing, high-voltage pulse discharge in water has been widely used in coalbed methane fracturing owing to its green, safe, efficient, and controllable characteristics. Since to the abundant primary cracks in coal and rock mass, the water shock wave generated by high-voltage pulse discharge in water will produce transmission and reflection at the primary fracture, and the reflected wave and the next water shock wave will superimpose to form interference, resulting in more cracks. The cracking effect of high-voltage pulse discharge in water on rock mass un-

收稿日期: 2024-07-04; 修回日期: 2024-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51574280); 山西省自然科学面上项目(202303021221042)

第一作者: 姚强强, 硕士研究生, (E-mail) 1604701175@qq.com

通信作者: 赵金昌, 博士, 副教授, 主要从事煤层气开采、锚杆无损检测方面的教学与研究工作, (E-mail) 382574340@qq.com

der different primary fracture lengths is studied. **【Methods】** The parameters such as crack length, force chain fracture number, crack width, and vibration velocity measured at fixed point were counted through discharge fracture test and numerical simulation of large-size rock specimens with triaxial pressure in the laboratory, and the influence of primary fracture length on the initiation and propagation of rock fractures was studied. **【Results】** The results show that the number of pulse discharges has a significant effect on the initiation and propagation of cracks in coal and rock mass, and the growth rate of crack width increases with the increase of the length of the cracks. The presence of primary cracks increases the total length and total number of cracks generated when electrical pulse induces cracking. The existence of primary fractures changes the stress distribution in coal and rock mass, and with the increase of the length of primary fractures, the compressive stress in the wavefront region decreases, and cracks are more likely to occur under the same impact load. With the increase of the length of the primary crack, the number of force chain fractures increases, the peak value of the vibration velocity at the measured point in the frontal side region increases, and the number of time steps required to reach the maximum vibration velocity decreases. **【Conclusions】** The research results provide a theoretical basis for the dynamic fracturing technology of high-gas coal seam discharge.

Keywords: high-voltage electrical pulse; water shock; prefabricated cracks; crack propagation

我国煤层气(瓦斯)储量极其丰富,若能加大煤层气的有效开发利用^[1],不仅可以降低煤与瓦斯突出的风险,还可以缓解能源短缺的问题,从而响应国家提出的绿色发展和节能减排核心战略^[2,3]。水中高压脉冲放电致裂作为一种新型的致裂增产手段,以其绿色安全及高效可控的特性在煤层气致裂增产方面展现出广阔的应用前景^[4,5]。与水压致裂^[6]这一传统致裂方式相比,水中高压脉冲放电致裂的劳动强度更低且不易受煤层构造影响,致裂增产更高效;与新型致裂技术(如注热开采^[7]和注气驱替^[8])相比,水中高压脉冲放电致裂具有绿色高效、施工设备要求更低、前期成本投入较小且工艺更加成熟的优势。自Yutkin发现液体中的高压放电能产生巨大机械效应,并将其广泛应用于工业以来,液电效应^[9,10]发展迅猛;邱爱慈院士^[11,12]团队基于脉冲功率技术的重复可控性,经过现场实验验证了电脉冲技术在顺层钻孔煤层改造及瓦斯抽采中显著的效益和有效性,成功证明了其对地面煤层气井煤储层的改造作用。李恒乐等的实验表明在经过电脉冲热致裂过程以后,煤体孔隙连通度增加,热渗透率也随之提高^[13];并且指出针对不同变质程度煤样存在一个最佳冲击次数^[14]。冯国瑞等^[15]对经过电脉冲循环冲击作用后的花岗岩试样进行了剪切实验,指出高压电脉冲对花岗岩试样的抗剪强度有弱化作用。郭军等^[16]利用室内实验和Ls-Dyna数值模拟相结合的研究方式,指出围岩应力对裂缝的扩展方向有重要影响,并且指出对深部围岩体致

裂时应考虑围岩的应力状态。鲍先凯等对水高压电脉冲激波致裂增透方法的有效性做出了更全面的检验,进一步解释了致裂起裂机理^[17]及断裂演化规律^[18]。

上述研究在电脉冲致裂理论上进行了深入的探索,但岩体中天然存在大量节理裂隙和地质构造,这些不同材料的交界面都会对水激波产生透射与反射,反射波和下一道水激波会形成叠加与干涉。在水激波叠加区域会产生更多的裂纹,从而有利于形成网状裂纹群,有利于瓦斯的析出。因此,研究不同原生裂缝长度下水中高压脉冲放电对岩体的致裂效果有重要的理论意义。利用自主研发的高压电脉冲岩体致裂实验平台,研究不同原生裂缝长度下的岩体致裂实验,并基于PFC颗粒流数值模拟软件进行数值模拟,分析原生裂缝长度对高压电脉冲致裂岩体的影响规律。

1 脉冲致裂实验研究

1.1 实验原理

水中高压脉冲放电技术^[19]是利用放电电极在饱和水煤层进行强脉冲放电,在高能作用下,水介质迅速汽化、分解和电离,从而产生高温等离子体通道。通道内部的压力和温度差异导致通道膨胀并对周围水体产生挤压,产生脉动冲击波来改变岩石中裂缝的性质,增加岩石裂隙率。岩体中原生裂缝和不同介质交界面的存在,会使水激波产生复杂的反射和透射现象^[20],使岩石更容易产生裂纹。实验设计采用大尺寸煤岩体相似试样,用平行预制裂

缝代替煤层中的天然节理,研究在真三轴受压状态下原生裂缝长度对电脉冲致裂煤岩体裂纹扩展的影响规律。

1.2 实验设备及流程

为了验证水中高压电脉冲对煤体破坏的实际效果,采用自主研发的真三轴高压脉冲放电致裂实验台开展实验,实验平台及流程如图1所示。该装

置主要由真三轴压力控制系统、高压储能机柜、充放电控制装置、同轴对极式放电电极组成。充放电过程为:人工控制充电装置,将220 V、50 Hz的交流电经过高压电脉冲储能机柜(含电容器,电容值30 μF)升压至预定值(参考前人经验设置8 kV)后停止升压,人工触发放电控制箱点火按钮,电脉冲储能机柜通过放电开关向同轴放电电极放电。

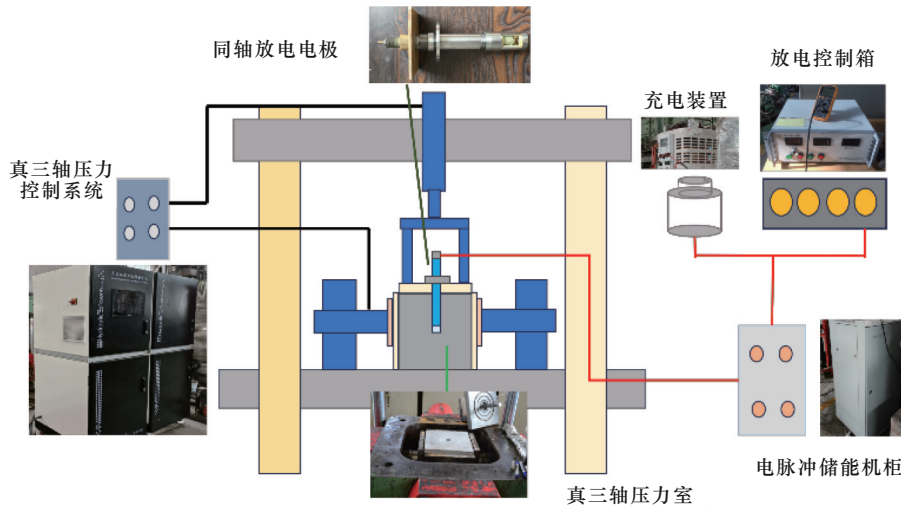


图1 实验平台及流程图

Fig. 1 Test platform and flow chart

马忠忠等^[21]指出相同峰值压力下低阶煤体产生的裂纹越多,致裂效果越好,参照该文中山西焦煤东曲矿2#煤层的焦煤试件,制作物理力学性质相似的试件。采用液电伺服试验机对不同比例水泥、河砂与石膏制作的样品进行单轴抗压与巴西劈裂实验,最终采用 $m(\text{水泥}):m(\text{河砂}):m(\text{石膏})=1.7:4:0.3$ 的比例,得到单轴抗压强度9.34 MPa、单轴抗拉强度0.47 MPa的相似试件。同时按照此比例制作300 mm×300 mm×300 mm的混凝土相似试件4个,在每个试件中间预留直径32 mm、深200 mm的致裂孔,并在致裂孔两侧预制0、5、10、15 cm的对称裂缝,裂缝距致裂孔边缘均为50 mm。

实验开始时,先将试块放置在真三轴伺服压力机中,向致裂孔内注满水介质,放置电极及特制电极密封装置,随后利用伺服压力机给试件施加三轴压力,轴压为2.0 MPa,侧压分别为1.0 MPa及1.5 MPa,每个试件的预制裂缝都垂直于最大侧应力方向,试件放置在三轴压力室内,如图2所示。按照图1所示流程,连接放电设备,充电至8 kV电压值进行放电,每连续放电6次卸去轴压,用高清相机记录表面裂纹扩展形态,用细绳和刻度尺记录致裂裂纹长度,用高清显微测距仪记录致裂裂纹宽度,每个试块重复致裂18次结束。

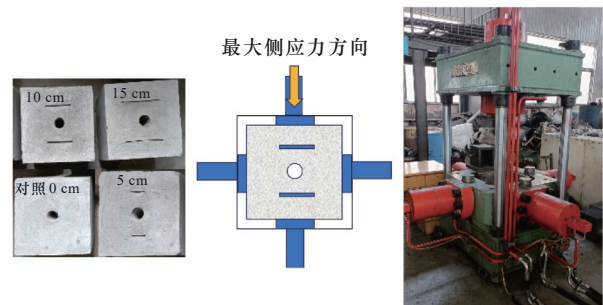


图2 试块制作及放置

Fig. 2 Fabrication and placement of test blocks

1.3 实验结果与分析

在三轴围压条件下,通过电脉冲水激波的重复作用,试件表面产生了不同形态的裂纹,如图3所示。

无预制裂缝的对照试件与不同预制裂缝长度的试件,试件表面致裂裂纹数量与长度随着致裂次数的增加而增大。图4为实验裂缝长度数据,对比6次致裂裂纹长度,致裂12、18次产生的裂纹数量增长率平均为82%和148%。

4个试件裂纹均在致裂孔周围起裂,带有预制裂缝的试块,在第一次观察即6次致裂后,致裂裂纹已经沿着致裂孔与预制裂缝之间的最短距离贯通。预制裂缝长度越长,迎波侧区域内产生的裂纹网也更复杂,与致裂孔之间生成的“X”状裂纹分布更加明显。

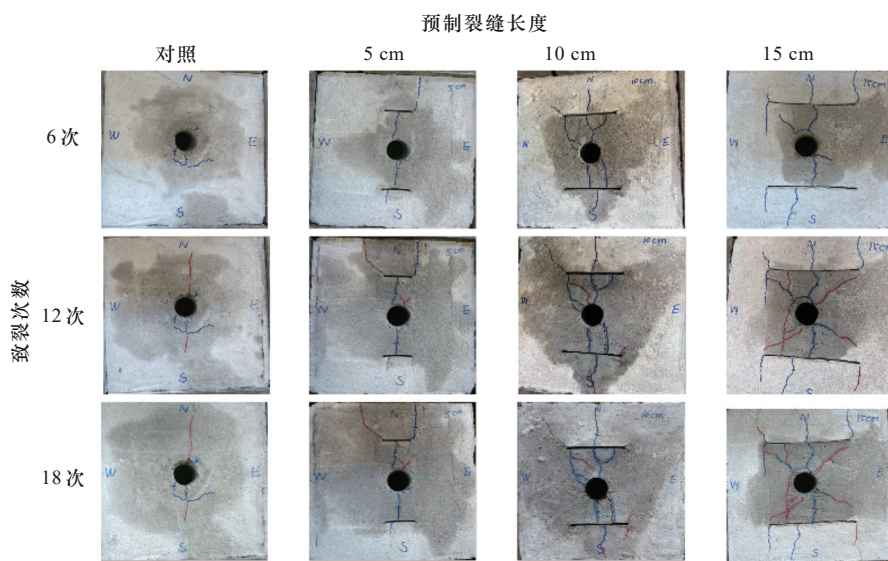


图3 实验试块形态裂纹分布图

Fig. 3 Morphological crack distribution photos of test block

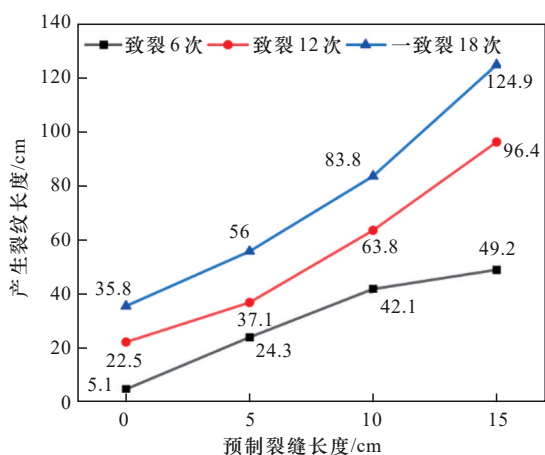


图4 不同预制裂缝长度下产生裂纹的长度

Fig. 4 Crack length changes with different prefabricated crack lengths

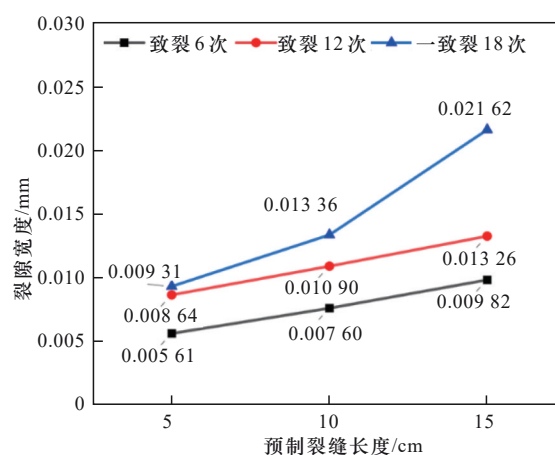


图5 不同预制裂缝长度下定点裂纹宽度图

Fig. 5 Fixed-point crack width changes with different prefabricated crack lengths

对含有不同长度预制裂缝的试件施加相同次数冲击载荷后产生的新生裂纹长度进行多次测量取平均值并绘制成如图5所示曲线。电脉冲作用6次,随着预制裂缝长度的增加,试样表面裂纹的总长度对比不含裂缝的试样平均增加了95%、227%、344%,电脉冲作用12次,随着预制裂缝长度的增加,试样上表面裂纹的总长度对比不含裂缝的试样平均增加了64%、183%、328%,电脉冲作用18次,随着预制裂缝长度的增加,试样上表面裂纹的总长度对比不含裂缝的试样平均增加了56%、134%、248%。

在以致裂孔中心为圆心、直径为50 mm的圆周上,设置不同走向的裂纹宽度观测点,使用高清显微测距仪观测不同冲击次数下裂纹宽度的变化规律。通过高清显微测距仪观测得到的定点裂纹宽度图如图6所示,观察发现,不同预制裂缝长度下,裂纹

宽度均随加载次数的增多而持续增宽,结合图5测得的裂纹宽度数据,对比六次致裂宽度平均增加60%、120%,说明脉冲次数对裂缝扩展有显著影响。迎波侧定点测得的主裂纹宽度随预制裂缝长度增加而增加,对比六次致裂产生裂纹的宽度,不同预置裂缝长度试件的最终裂缝宽度分别增加65%、75%、120%,裂纹宽度增长率随设置裂缝长度的增加而增加。

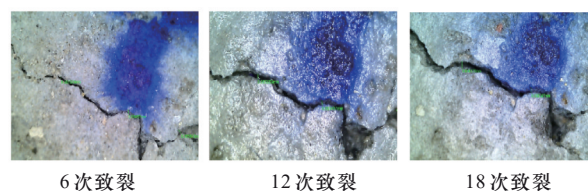


图6 高清显微测距仪下裂纹宽度

Fig. 6 Crack width images through HD microscope

预制裂缝的存在对裂纹的产生和扩展具有明显的影响,其机理是水激波在该处产生反射、透射和衍射,反射后的水激波在迎波侧区域内形成更多的干涉,延长了水激波在迎波侧区域的作用时长,从而促进致裂裂纹的萌生。相同脉冲加载次数下,预制裂缝长度越长,与致裂孔之间生成的“X”状裂纹分布越明显,裂纹增长量随着预制裂缝长度的增多而增大。

2 数值模拟建立分析

2.1 模型参数的确定

为更直观地了解高压电脉冲致裂岩体过程中的微观力学行为和损伤演化规律,采用数值模拟技术来模拟并反映岩体内部的力学响应和损伤发展。颗粒流模拟将岩石类材料视为由大量刚性颗粒通过接触力和接触变形相互作用的集合体,能从细观角度观察和理解材料内部裂纹的孕育、扩展以及贯通等力学过程,适用于模拟岩石类非均质材料的力学行为。

平直节理模型可以抑制颗粒破坏后的旋转,使抗压强度明显变小^[22],更符合岩石的拉压强度比。选用平直节理模型,建立脉冲放电致裂模型如图7所示,在模型内共生成 17 588 个颗粒,采用“试错法”^[23]不断校准和修正细观参数,以对照宏观力学性质进行标定,并将数值模拟所得岩体单轴压缩与室内实验对照,如图8所示。为模拟脉冲放电对孔壁上颗粒的冲击作用,对数值模型孔壁处的球施加预定的冲击力,为便于施加,采用Yan等人^[24]将水激波压力简化为三角应力波的方式。

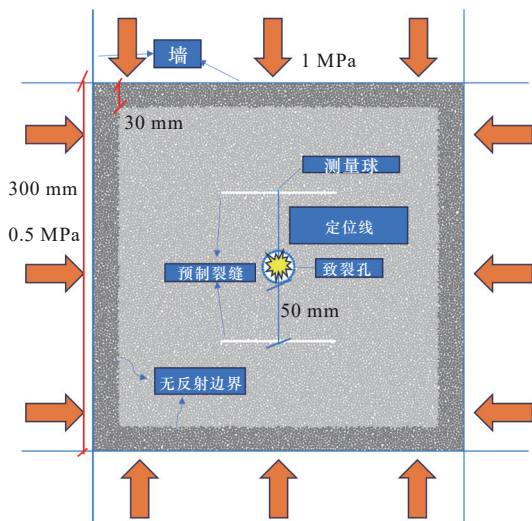


图7 致裂数值模拟模型

Fig. 7 Numerical simulation model of fracturing

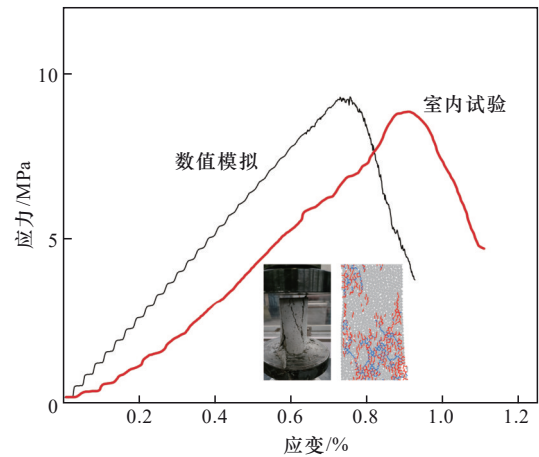


图8 数值模型与室内实验单轴压缩对比

Fig. 8 Uniaxial compressions of numerical model and laboratory test result

2.2 室内实验与数值模拟对比

致裂模拟过程中用蓝色表示张拉裂纹,绿色表示剪切裂纹。从模拟结果图(图9)中可以看出,产生的断裂大多是以张拉和剪切为主,且剪切裂纹主要位于致裂孔周边,预制裂缝背波侧区域主要是张拉裂纹。从图9可看出,脉冲次数的增多使力链断裂数目明显增加,致裂孔与预制裂缝之间的力链断裂更加复杂;相比于不含预制裂缝的试样,含预制裂缝的试样力链断裂数目明显增加,并且随着预制裂缝长度的增加力链断裂数目明显增加,且力链断裂数目的增加集中体现在预制裂缝与致裂孔之间。背波侧裂纹的延伸随着预制裂缝长度的增加而受到抑制作用,延伸趋势愈发不明显。由此可见,预制裂缝的存在对于致裂孔与预制裂缝之间裂纹的产生具有一定促进作用,而对背波侧裂纹的产生与延伸则有一定的抑制作用。

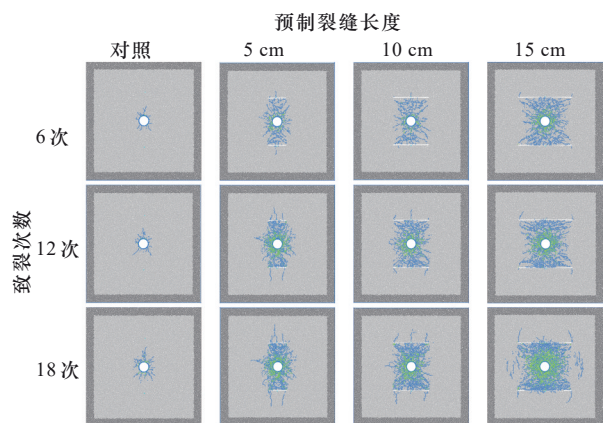


图9 数值模拟分析与实验对照

Fig. 9 Numerical simulation analyses compared with experiment results

数值模拟结果与室内实验结果的裂纹扩展基

本一致,可利用这一数值模型进一步分析高压电脉冲作用下不同预制裂缝长度对煤岩石的致裂机理。

2.3 不同预制裂缝下应力分布研究

为了更直观地观察裂纹分布及起裂机理,研究不同长度预制裂缝下的静态应力分布及单次放电不同时间段的应力分布特征,通过力链中力的大小来显示颗粒间接触力,通过颜色来分辨拉应力和压应力、张拉裂纹和剪切裂纹,其中,黑色表示压应力,红色表示拉应力,裂纹断裂力链颜色表示同图9。

仅施加围压后模型的静态应力分布图10所示,预制裂缝的存在改变了试样中应力的分布状况,拉应力主要集中于致裂孔附近及预制裂缝两侧,预制裂缝与致裂孔之间的压应力区域,随预制裂缝长度增大,黑色逐渐变浅,即压应力逐渐降低。预制裂缝尖端存在颜色较深的压应力区域,并且随着预制裂缝长度的增大,尖端处压应力区黑色更深,压应力数值更大。这是由于原生裂缝的存在向材料中引入了不连续性,使得应力重新分布。在施加围压后,致裂孔附近和预制裂缝两侧的区域在围压作用下向外扩展,且预制裂缝越长这种扩展越明显。因此,随着预制裂缝长度的增加,拉应力集中区域更加明显。同时预制裂缝尖端处的材料受到周围材料的挤压,向预制裂缝和孔洞方向压缩,导致该区域的压应力增大,形成明显的压应力区。

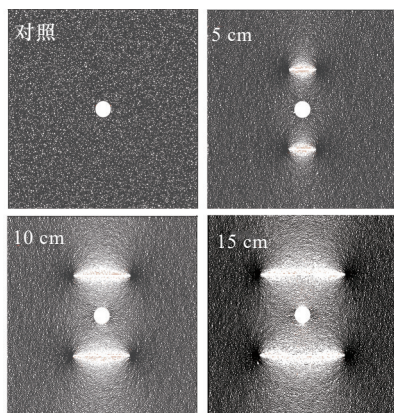


图10 不同预制裂缝静态应力分布图

Fig. 10 Static stress distributions of different prefabricated cracks

单次放电不同时段动态应力分布及力链断裂情况如图11所示(预制裂缝长度为100 mm),单次致裂总时长为250 μs ,图中分别为0、50、100、150、200和250 μs 时的应力及断裂力链分布状态。可以看出,水激波作用后,致裂孔周围首先产生球状的压缩波向外扩张(50~100 μs),压缩波经过后的区域产生拉应力区域(100~200 μs),裂纹主要增生在水激波作用的中间时段,即拉应力区产生的时间段。

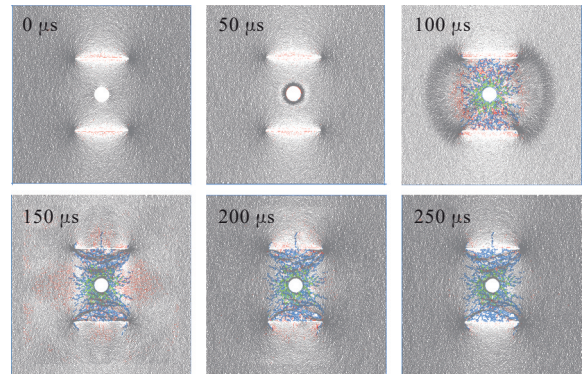


图11 单次致裂动态应力分布

Fig. 11 Dynamic stress distributions for a single fracturing

这是由于水激波传播过程中,波的前沿主要产生压应力,而波的后沿则形成拉应力。当波的前沿经过原生裂缝时,裂缝周围的材料首先受到压应力作用,但随即在波的中间时段进入拉应力区。波的中间时段的拉应力区内应力分布较均匀且集中度高,这种应力状态有利于裂纹的萌生和扩展。拉应力区是水激波能量释放的主要区域,能量集中在裂缝尖端,使得裂纹更容易萌生。在拉应力作用下,裂纹一旦萌生,就会沿着应力集中方向迅速扩展,形成显著的裂隙结构。

分析表明,预制裂缝使试验块致裂孔附近区域的应力分布发生变化,平行裂缝中间的区域压应力降低,在相同冲击载荷作用下更容易产生裂纹。预制裂缝附近始终存在的拉应力集中区域,为预制裂缝与致裂孔之间裂纹的产生提供了有利条件。

2.4 断裂力链及震动速度分析

为进一步分析不同预制裂缝长度对水激波的致裂效果,设置十组预制裂缝长度,施加单次脉冲载荷,研究断裂力链数目及固定测点震动速度与预制裂缝长度的关系。预制裂缝长度分别设置为0、2.5、5、7.5、10、12.5、15、17.5、20和25 cm,力链断裂形态模拟和力链断裂数目分别如图12、图13所示。

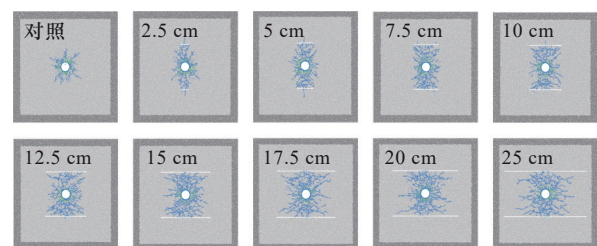


图12 不同预制裂缝长度下力链断裂形态图

Fig. 12 Morphology of force chain fractures with different prefabricated crack lengths

由图13分析可知,力链断裂数目随预制裂缝长度的增大而增大。预制裂缝15 cm以后,力链断裂

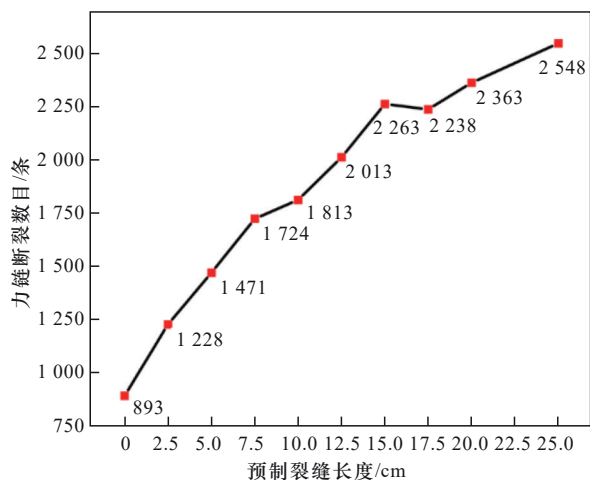


图 13 不同预制裂缝长度下力链断裂数目图

Fig. 13 Number of force chain fractures with different prefabricated fabricated crack lengths

数目增长速度开始降低,预制裂缝 15 cm 前,力链断裂数目的平均增长速率为 91 条/cm,预制裂缝 15 cm 后平均增长速率为 45 条/cm。由图 12 可知,随着预制裂缝长度的增大,致裂孔与预制裂缝之间力链断裂数目增多,且随着预制裂缝长度的增大,预制裂缝背波侧力链断裂数目减小,15 cm 预制裂缝以后,背波侧几乎不产生裂纹。说明预制裂缝的长度延长会抑制背波侧裂纹增生。

预制裂缝长度增加时,反射波在迎波侧区域产生的干涉效应更强,进一步增加了该区域的应力集中。水激波在预制裂缝处发生的反射和干涉更明显,导致这些区域内产生更高的拉应力,从而增加力链的断裂数目;从能量角度分析,预制裂缝长度的增加,使得更多的能量在裂缝前被吸收和散射,增多迎波侧区域裂纹的同时减少了透射波的能量,导致背波侧的应力集中区域明显减弱,从而直接影响了背波侧裂纹的增生。

为研究迎波侧的实际影响效果,按模拟分析示意图中测量球的位置,对其震动速度进行监测与分析,结果如图 14 所示。

预制裂缝的存在,使得监测点处测量球的震动速度峰值和监测到速度出现时的时程步数发生变化。随着预制裂缝长度的增加,测量球的震动速度峰值逐渐增大,监测到最大震动速度峰值所需的震动步数逐渐降低。这是由于预制裂缝长度增加时,水激波在裂缝处的反射和干涉效应增强,使得更多能量集中在迎波侧区域,震动频率及震动速度峰值随之增大。震动速度的提高增加了能量传递效率,

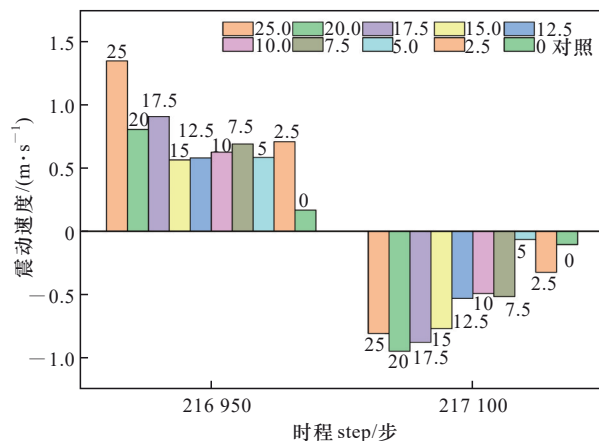


图 14 震动速度分析图

Fig. 14 Vibration velocity analyses

这使得达到最大震动速度峰值所需的震动步数减少。上述结果表明预制裂缝的长度变化对致裂的影响,主要是通过改变试样内部的应力分布、增加应力波的反射、延长应力波在试样中通过的路程来提高能量利用效率,从而提高电脉冲致裂煤岩体的效果。

3 结论

为了揭示不同长度原生裂缝对电脉冲致裂煤层裂纹的发展规律,开展了室内实验和数值模拟研究,得出如下结论:

1) 脉冲放电次数对煤岩体裂纹的起裂和扩展有明显促进作用,在有限放电次数下,致裂裂纹长度随放电次数的增加而增加。在相同放电次数下,裂纹宽度增长率随着预设裂缝长度的增加而增加。对比 6 次致裂产生的裂纹宽度,原生裂缝长度分别为 5、10、15 cm 时,定点测得的最终裂纹宽度分别增加 65%、75%、120%。

2) 原生裂缝的存在提高了电脉冲致裂煤岩体时裂纹的总长度和总数量。在相同放电次数下,随着原生裂缝长度的增加,致裂裂纹总长度不断增加。相较于无原生裂缝,原生裂缝长度为 5、10、15 cm 时,裂纹长度平均增长率分别为 71%、181%、306%。

3) 原生裂缝的存在改变了煤岩体中的应力分布。随着原生裂缝长度的增加,迎波侧区域压应力降低,在相同冲击载荷作用下更容易产生裂纹。

4) 力链断裂数目和质点的震动速度随原生裂缝长度的增大而增大,到达最大震动速度所需的时程步数随原生裂缝长度的增大而减小。

参考文献:

- [1] Jin S W, Yan T T, Deng Z Y, et al. Evaluation of favorable area for coalbed methane development based on local variable weight theory[J]. ACS Omega, 2024, 9(15): 17616-17625.
- [2] 王双明, 刘浪, 赵玉娇, 等. “双碳”目标下赋煤区新能源开发: 未来煤矿转型升级新路径[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 59-79.
- [3] 秦勇, 袁亮, 胡千庭, 等. 我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(10): 1-6.
- [4] 李元, 孙滢, 刘毅, 等. 液电效应及电火花震源的研究现状与展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 753-765.
- [5] 武强, 涂坤, 曾一凡, 等. 打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1625-1636.
- [6] 黄炳香, 赵兴龙, 陈树亮, 等. 坚硬顶板水压致裂控制理论与成套技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 2954-2970.
- [7] 冯子军, 万志军. 高温三轴应力下煤中甲烷生成特征及在注热开采瓦斯中应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(2): 442-448.
- [8] 侯东升, 梁卫国, 张倍宁, 等. CO₂驱替CH₄煤层中混合气体渗流规律的研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3463-3471.
- [9] Liu K R, Zhang H, Li J, et al. Study on the bottom-hole rock-breaking law of electrohydraulic shockwave[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(6): 3949-3970.
- [10] Lu H Q, Liu Y W, Nie B S, et al. Crack propagation characteristics of coal samples utilizing high-voltage electrical pulses[J]. ACS omega, 2021, 6(50): 34395-34405.
- [11] 张永民, 邱爱慈, 秦勇. 电脉冲可控冲击波煤储层增透原理与工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(9): 79-85.
- [12] 秦勇, 邱爱慈, 张永民. 高聚能重复强脉冲波煤储层增渗新技术试验与探索[J]. 煤炭科学技术, 2014(6): 1-7, 70.
- [13] 李恒乐, 秦勇, 张永民, 等. 重复脉冲强冲击波对肥煤孔隙结构影响的实验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 915-921.
- [14] 李恒乐, 秦勇, 周晓亭, 等. 循环高压电脉冲作用下煤体微裂隙发育特征及其煤岩学控制[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 105-113.
- [15] 冯国瑞, 朱林俊, 郭军, 等. 电脉冲循环冲击作用对花岗岩抗剪性能弱化研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 785-796.
- [16] 郭军, 米鑫程, 冯国瑞, 等. 基于液电效应的高压电脉冲岩体致裂特征及机理研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2270-2282.
- [17] 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: 102853.
- [18] 鲍先凯, 张童, 崔广芹, 等. 水中高压电脉冲压裂煤岩体裂纹断裂演化特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(4): 324-337.
- [19] 刘伟吉, 胡海, 祝效华, 等. 围压条件下电脉冲破碎干热岩机理[J]. 天然气工业, 2022, 42(4): 117-129.
- [20] 于明, 刘全. 凝聚炸药爆轰波在高速材料界面上的折射现象分析[J]. 物理学报, 2016, 65(2): 235-244.
- [21] 马忠忠, 赵金昌, 赵胤翔, 等. 脉冲放电应力波致裂不同煤阶煤体规律研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(1): 135-139, 149.
- [22] 郝保钦, 张昌锁, 王晨龙, 等. 岩石PFC2D模型细观参数确定方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(4): 132-141.
- [23] 田文岭, 杨圣奇, 方刚. 煤样三轴循环加卸载力学特征颗粒流模拟[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 603-610.
- [24] Yan D, Bian D C, Zhao J C, et al. Study of the electrical characteristics, shock-wave pressure characteristics, and attenuation law based on pulse discharge in water[J]. Shock and Vibration, 2016: 6412309.

(编辑: 杨 鹏)