文章编号:1007－6735(2025)06－0708－10　　DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20240926002

既有裂缝下高压电脉冲–水力压裂联合破岩裂缝演化

饶平平，　袁　璐，　宁　肯，　崔纪飞
（上海理工大学 环境与建筑学院，上海 200093）

摘要：针对高压电脉冲–水力压裂联合技术在遇到胶结型天然裂缝时致裂效果受限的问题，基于能量释放率理论，构建了包含胶结型天然裂缝的高压电脉冲–水力压裂联合破岩流–固耦合模型，考虑胶结型天然裂缝与水力裂缝的相互作用，研究了不同主应力差、水力裂缝与天然裂缝相交角度和电压对裂缝扩展的影响。结果表明：在主应力差小于 10 MPa、相交角度小于 30°的条件下，与传统水力压裂相比，高压电脉冲使裂缝宽度增加约 25%；低主应力差时，水力裂缝沿天然裂缝扩展，高主应力差时则穿过天然裂缝并沿最大主应力方向延伸；相交角度较小时，天然裂缝更易被开启并沿其方向扩展；电压在 1～5 kV 范围内，裂缝宽度总增幅约 94%，天然裂缝更易被开启。研究结果可为高压电脉冲–水力压裂技术在实际工程中的应用提供理论依据和技术支持，以提高复杂地层中资源的开采效率。

关键词：高压电脉冲破岩；水力压裂；能量释放率；天然裂缝；裂缝演化
中图分类号：TE 242　　**文献标志码：**A

Fracture evolution of combined high-voltage electric pulse-hydraulic fracturing in pre-existing fractures

RAO Pingping,　YUAN Lu,　Ning Ken,　CUI Jifei
(*School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093*)

Abstract: To address the problem that the fracturing effect of the combined high-voltage electric pulse-hydraulic fracturing technology is limited when encountering cemented natural fractures, based on the energy release rate theory, a fluid-solid coupling model for rock breaking by the combined high-voltage electric pulse-hydraulic fracturing, which incorporates cemented natural fractures, was established. Considering the interaction between cemented natural fractures and hydraulic fractures, the effects of

收稿日期: 2024–09–26
基金项目: 国家自然科学基金资助项目（42077435，42377171）
通信作者: 饶平平（1984—），男，教授．研究方向：岩土力学防灾减灾．E-mail：raopingping@usst.edu.cn

引文格式: 饶平平，袁璐，宁肯，等．既有裂缝下高压电脉冲-水力压裂联合破岩裂缝演化[J]．上海理工大学学报，2025，47（6）：708-717.
Citation: RAO Pingping, YUAN Lu, Ning Ken, et al. Fracture evolution of combined high-voltage electric pulse-hydraulic fracturing in pre-existing fractures[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47（6）：708-717.

different principal stress differences, intersection angles between hydraulic fractures and natural fractures, and voltage on fracture propagation were studied. The results demonstrate that under conditions of principal stress difference less than 10 MPa and intersection angle less than 30°, high-voltage electric pulse fracturing increases fracture width by approximately 25% compared to conventional hydraulic fracturing. At low principal stress differences, hydraulic fractures propagate along natural fractures, while at high principal stress differences, they penetrate through natural fractures and extend in the direction of maximum principal stress. When the intersection angle is small, natural fractures are more readily activated and extend along their original orientation. Within a voltage range of 1～5 kV, the total fracture width increase reaches approximately 94%, with natural fractures becoming significantly more susceptible to activation. These findings provide theoretical foundation and technical guidance for applying high-voltage electric pulse and hydraulic fracturing technology in practical engineering to enhance resource extraction efficiency in complex subsurface formations.

Keywords: *high-voltage electric pulse rock breaking*; *hydraulic fracturing*; *energy release rate*; *natural fractures*; *fracture evolution*

近年来，非常规油气资源的开发利用逐渐成为我国经济发展的重要组成部分，然而，复杂的地质环境（如岩溶地区、高应力区以及冻土区等）导致破岩难度逐渐增大[1]。高压电脉冲破岩技术是近年来逐渐兴起的一种新型钻井技术，具有较高的岩石破碎效率，且不受钻孔深度的限制[2]。水力压裂技术能够有效弱化坚硬岩层，提高岩层可采性，改善矿压环境，确保煤矿生产安全[3]。与未经过预处理的水力压裂单独作用相比，高压电脉冲−水力压裂联合作用可以增强岩体裂缝的扩展和贯通能力[4]，在复杂应力条件下具有更好的应用效果和更广泛的适用性。在岩体中，天然裂缝作为常见的地质特征，对压裂过程产生显著影响，不仅会改变应力场的分布，还会影响裂缝的扩展路径及其最终形态[5]。

国内外学者已对高压电脉冲−水力压裂破岩裂缝扩展规律进行了大量研究。Bao 等[6] 基于高压电脉冲−水力压裂技术，研究了煤岩体在高压电脉冲−水力压裂作用下的裂缝起裂与扩展规律。李培培[7] 通过理论分析和数值模拟脉冲波在水中的传播作用后发现，脉冲波作用下岩石裂缝具有明显的扩展优势。李春明等[8] 研究了预制裂缝对水中高压电脉冲致裂煤岩体的影响，通过试验和数值模拟，证明了预制裂缝对裂缝扩展具有一定导向作用。

现有研究集中于高压电脉冲对人工裂缝扩展的影响，较少考虑天然裂缝的致裂效果。Zhang 等[9] 通过三轴水力压裂试验，研究了预存在裂缝与井眼之间距离对水力裂缝扩展路径的影响，证明了天然裂缝与井筒之间的距离会影响裂缝的扩展行为；张广清等[10] 基于裂缝性储层理论，通过真三轴水力压裂实验，建立了包含随机天然裂缝的人工试件模型，分析了天然裂缝群与地应力差对水力裂缝扩展形态的影响，结果表明，天然裂缝尺度越大，地应力差越小，水力裂缝形态越复杂。Zhou 等[11] 基于裂缝偏转理论，研究了异质界面对页岩压裂过程中裂缝扩展路径的影响，证明了裂缝在异质界面处的偏转以及新裂缝的形成受到应力场和界面特性的显著影响。上述研究工作均为摩擦型天然裂缝与水力裂缝的相互作用。与摩擦型天然裂缝相比，胶结型裂缝因被矿物胶结物填充，具有更高的抗拉和抗剪强度[12]。尤其在复杂开采工况下，胶结型天然裂缝广泛存在，水力裂缝与其相互作用时更容易被阻挡或偏转，导致裂缝网络的形成更加复杂，难以通过简单的解析解来表征[13]。

因此，研究高压电脉冲−水力压裂与胶结型天然裂缝相互作用机理，提出高压电脉冲−水力压裂与胶结型天然裂缝的穿透准则，构建包含胶结型天然裂缝的高压电脉冲−水力压裂联合破岩流−固耦合模型，讨论在有无高压电脉冲条件下的水力压裂效果，并研究主应力差、相交角度、电压等不同因素对高压电脉冲水力裂缝与胶结型天然裂缝作用时裂缝的扩展行为。

1 高压电脉冲水力裂缝与天然裂缝相互作用机理

1.1 高压电脉冲-水力压裂破岩机理

水中高压电脉冲放电致裂过程按时间顺序分为 4 个阶段[14]：放电击穿阶段、等离子体通道膨胀阶段、水中脉冲放电冲击波传播阶段和脉冲放电冲击致裂阶段。在水下高压脉冲放电过程中，电极周围局部温度升高，电极之间形成的气泡和微气泡逐渐增大并相互连接[15-16]，形成击穿通道。在击穿通道形成之后，电容器储存的能量被迅速释放到电通道中，形成强烈的电弧放电，导致通道内部压力骤增，温度急剧升高。通道内高温高压状态与外部低压状态的巨大差异，形成了强烈的压力梯度和温度差[17]，导致水介质的快速压缩与膨胀，产生强烈的冲击波。

电容器储存的能量通过电弧放电迅速转化为机械能，这部分能量称为电弧放电的剩余能量或电击穿能量[18]，电击穿能计算公式为

$$E_{\mathrm{b}} = \frac{CU^2}{2} \tag{1}$$

式中：E_{b}为电击穿能；C为电容器电容；U为放电电压。

冲击波的产生进一步作用于周围介质，引发岩体破裂。Yan 等[19]通过水下放电实验，测量了在不同静水压力、放电能量和传播距离条件下的冲击波压力。通过拟合冲击波压力随静水压力、传播距离及放电能量的变化规律，得出了第一峰值压力 p 的计算公式：

$$p = \left(7.23 + 30.46\mathrm{e}^{-\frac{p_{\mathrm{w}}}{2.67}}\right) d^{-0.32-0.17\mathrm{e}^{-\frac{p_{\mathrm{w}}}{4.70}}} \cdot E_{\mathrm{b}}^{0.46-0.14\mathrm{e}^{-\frac{p_{\mathrm{w}}}{1.75}}} \tag{2}$$

式中：p_{w}为水压；d为传播距离，即孔洞中心至裂缝尖端的距离。

1.2 天然裂缝与水力裂缝作用机理

胶结型天然裂缝可以抵抗拉应力和剪应力，与高压电脉冲水力裂缝相交时相互作用较为复杂，本文作出以下假设：

(a) 岩石均质并且各向同性；

(b) 天然裂缝界面具有足够的抗剪切能力；

(c) 裂缝尖端与流体同步扩展，无滞后现象；

(d) 水力裂缝扩展符合线弹性力学基本假设；

(e) 液体不可压缩且天然裂缝被胶结基质完全填充。

基于上述假设，高压电脉冲水力裂缝与天然裂缝相交机理如图 1 所示。图中：r、θ 为极坐标系下的极径与极角；θ_0 为天然裂缝与最大主应力方向的夹角；a 为天然裂缝长半轴的长度。根据线弹性力学，水力裂缝尖端区域的应力由远场应力和裂缝尖端区域诱导应力叠加。

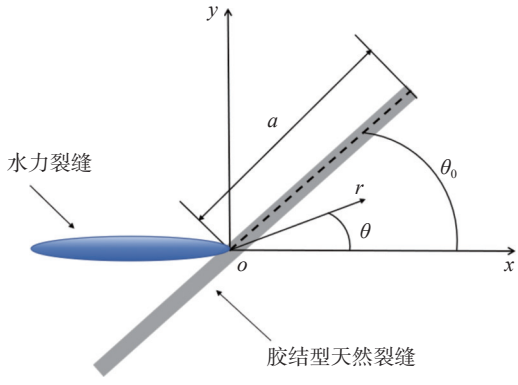


图 1 裂缝相交示意图

Fig.1 Schematic diagram of intersecting fractures

远场应力作用下的裂缝尖端区域应力分量直角坐标系表达式为[20]

$$\begin{cases} \sigma_x = \dfrac{\sigma_{\mathrm{H}}+\sigma_{\mathrm{h}}}{2} + \dfrac{\sigma_{\mathrm{H}}-\sigma_{\mathrm{h}}}{2}\cos 2\alpha \\ \sigma_y = \dfrac{\sigma_{\mathrm{H}}+\sigma_{\mathrm{h}}}{2} - \dfrac{\sigma_{\mathrm{H}}-\sigma_{\mathrm{h}}}{2}\cos 2\alpha \\ \tau_{xy} = \dfrac{\sigma_{\mathrm{H}}-\sigma_{\mathrm{h}}}{2}\sin 2\alpha \end{cases} \tag{3}$$

式中：σ_x、σ_y 和 τ_{xy} 分别为水平方向的正应力、垂直方向的正应力和平面内的剪应力；σ_{H}、σ_{h} 分别为远场最大水平和最小水平主应力；α 为水力裂缝与最大主应力方向夹角。

远场应力作用下的裂缝尖端区域应力分量极坐标表达式为

$$\begin{cases} \sigma_{r1} = \sigma_x\cos^2\theta + \sigma_y\sin^2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \\ \sigma_{\theta 1} = \sigma_x\sin^2\theta + \sigma_y\cos^2\theta - \tau_{xy}\sin 2\theta \\ \tau_{r\theta 1} = \tau_{xy}\cos 2\theta + 2(\sigma_y - \sigma_x)\sin\theta\cos\theta \end{cases} \tag{4}$$

式中：σ_{r1}、$\sigma_{\theta 1}$ 和 $\tau_{r\theta 1}$ 分别表示沿径向方向的正应力、垂直于径向方向的正应力和剪应力。

水力裂缝尖端区域，含天然裂缝影响时水力裂缝尖端应力场的计算公式为

$$\begin{cases} \sigma_{r2} = \dfrac{1}{2\sqrt{2\pi r}}\left[K_{\mathrm{I}}(3-\cos\theta)\cos\dfrac{\theta}{2} + K_{\mathrm{II}}(3\cos\theta - 1)\sin\dfrac{\theta}{2}\right] \\ \sigma_{\theta 2} = \dfrac{1}{2\sqrt{2\pi r}}\cos\dfrac{\theta}{2}\left[K_{\mathrm{I}}(1+\cos\theta) - 3K_{\mathrm{II}}\sin\theta\right] \\ \tau_{r\theta 2} = \dfrac{1}{2\sqrt{2\pi r}}\cos\dfrac{\theta}{2}\left[K_{\mathrm{I}}\sin\theta + K_{\mathrm{II}}(3\cos\theta - 1)\right] \end{cases} \tag{5}$$

式中：σ_{r2}、$\sigma_{\theta2}$ 和 $\tau_{r\theta2}$ 分别表示由裂缝尖端奇异性引起的径向正应力、环向正应力和剪应力；K_{I}、K_{II} 分别为 I、II 型应力强度因子。

叠加式 (4)、式 (5)，得到天然裂缝影响下水力裂缝尖端区域应力分量为

$$\begin{cases} \sigma_r=\sigma_{r1}+\sigma_{r2}=\sigma_x\cos^2\theta+\sigma_y\sin^2\theta+ \\ \quad \tau_{xy}\sin 2\theta+\dfrac{1}{2\sqrt{2\pi r}}\left[K_{\mathrm{I}}(3-\cos\theta)\cos\dfrac{\theta}{2}+\right. \\ \quad \left. K_{\mathrm{II}}(3\cos\theta-1)\sin\dfrac{\theta}{2}\right] \\ \sigma_\theta=\sigma_{\theta1}+\sigma_{\theta2}=\sigma_x\sin^2\theta+\sigma_y\cos^2\theta- \\ \quad \tau_{xy}\sin 2\theta+\dfrac{1}{2\sqrt{2\pi r}}\cos\dfrac{\theta}{2}\cdot \\ \quad [K_{\mathrm{I}}(1+\cos\theta)-3K_{\mathrm{II}}\sin\theta] \\ \tau_{r\theta}=\tau_{r\theta1}+\tau_{r\theta2}=\tau_{xy}\cos 2\theta+ \\ \quad 2\left(\sigma_y-\sigma_x\right)\sin\theta\cos\theta+\dfrac{1}{2\sqrt{2\pi r}}\cos\dfrac{\theta}{2}\cdot \\ \quad [K_{\mathrm{I}}\sin\theta+K_{\mathrm{II}}(3\cos\theta-1)] \end{cases} \tag{6}$$

式中，σ_r、σ_θ 和 $\tau_{r\theta}$ 分别表示径向正应力、环向正应力和剪应力。

高压电脉冲−水力压裂条件下，高压电脉冲产生的冲击波作用在岩石上，使岩石开裂产生裂缝。随着电压增大，冲击波压力增加，裂缝间压力增加，使裂缝尖端I型应力强度因子增加。为考虑电压对水力压裂的影响，引入式(2)计算冲击波峰值压力，可得高压电脉冲−水力压裂条件下裂缝I型应力强度因子为

$$K_{\mathrm{I}}=\left[p-\left(\frac{\sigma_{\mathrm{H}}+\sigma_{\mathrm{h}}}{2}-\frac{\sigma_{\mathrm{H}}-\sigma_{\mathrm{h}}}{2}\cos 2\alpha\right)\right]\sqrt{\pi\alpha} \tag{7}$$

高压电脉冲−水力压裂不影响裂缝尖端区域，II型应力强度因子为

$$K_{\mathrm{II}}=-\left(\frac{\sigma_{\mathrm{H}}-\sigma_{\mathrm{h}}}{2}\sin 2\alpha\right)\sqrt{\pi\alpha} \tag{8}$$

基于能量释放速率理论，Olson[21] 提出了胶结型天然裂缝的张开准则，即当水力裂缝尖端的能量释放速率达到临界值时，裂缝将扩展，扩展方向为能量释放速率达到最大值的方向。在此基础上，引入了高压电脉冲作用下的裂缝应力强度因子 K_{I}和 K_{II}，并建立胶结型天然裂缝在高压电脉冲−水力压裂条件下的张开准则。

当水力裂缝沿预设方向扩展时，裂缝尖端的能量释放速率可表示为

$$G_{\beta_0}=\frac{K_{\mathrm{I}}^2+K_{\mathrm{II}}^2}{E^*} \tag{9}$$

式中，E^*为平面应变模量，$E^*=E/(1-\nu)^2$，E 为弹性模量，ν 为泊松比。

当水力裂缝与天然裂缝相交，并且水力裂缝沿天然裂缝方向($\theta=\theta_0$)产生分支裂缝时，裂缝尖端能量释放速率可表示为

$$G_\theta=\frac{K_{\mathrm{I}\theta}^2+K_{\mathrm{II}\theta}^2}{E^*} \tag{10}$$

式中，$K_{\mathrm{I}\theta}$、$K_{\mathrm{II}\theta}$为分支裂缝尖端应力强度因子。

Taleghani 等[22] 通过连续性假设，得出分支裂缝起裂时尖端应力强度因子为

$$\begin{cases} K_{\mathrm{I}\theta}=\lim\limits_{r\to0}(\sigma_y\sqrt{2\pi r})=\sigma_\theta\cdot 2\pi r= \\ \quad \dfrac{1}{2}\cos\dfrac{\theta}{2}[K_{\mathrm{I}}(1+\cos\theta)-3K_{\mathrm{II}}\sin\theta] \\ K_{\mathrm{II}\theta}=\lim\limits_{r\to0}(\tau_{xy}\sqrt{2\pi r})=\tau_{r\theta}\sqrt{2\pi r}= \\ \quad \dfrac{1}{2}\cos\dfrac{\theta}{2}[K_{\mathrm{I}}\sin\theta+K_{\mathrm{II}}(3\cos\theta-1)] \end{cases} \tag{11}$$

水力裂缝扩展路径一般为具有最大能量释放率或更大的相对能量释放率的路径[23]，因此，判别高压电脉冲水力裂缝与天然裂缝相交后的延伸方向，关键在于沿天然裂缝的能量释放率与沿最大能量释放率 ($\theta_{\max}$) 方向两者之间的关系。根据水力裂缝通常沿最大能量释放率路径扩展的原则，定义相对能量释放率为

$$\begin{cases} m=\dfrac{G_{\theta_0}}{G_{\mathrm{c}}^{\mathrm{NF}}} \\ n=\dfrac{G_{\theta_{\max}}}{G_{\mathrm{c}}^{\mathrm{rock}}} \end{cases} \tag{12}$$

式中：m 为最大能量释放率方向的相对能量释放率；n 为沿天然裂缝方向的最大能量释放率；$G_{\mathrm{c}}^{\mathrm{rock}}$为临界能量释放率；$G_{\mathrm{c}}^{\mathrm{NF}}$为单位长度胶结天然裂缝开启能量释放率。当$G_{\theta_0}>G_{\mathrm{c}}^{\mathrm{NF}}$且 $m>n$ 时，天然裂缝被激活，高压电脉冲水力裂缝沿天然裂缝方向发展；当$G_{\theta_{\max}}>G_{\mathrm{c}}^{\mathrm{rock}}$且 $n>m$ 时，高压电脉冲水力裂缝穿过天然裂缝，且继续沿原方向延伸。

将式(11)代入式(10)中，可得：

$$G_\theta=\frac{1}{E^*}\left\{\frac{1}{2}\cos\frac{\theta}{2}[K_{\mathrm{I}}^2(1+\cos\theta)+\right. \\ \left. K_{\mathrm{II}}^2(5-3\cos\theta)-4K_{\mathrm{I}}K_{\mathrm{II}}\sin\theta]\right\} \tag{13}$$

基于上述分析，水力裂缝沿任意方向扩展时，能量释放率取得极值的条件为

$$\frac{\partial G(\theta)}{\partial\theta}=0 \tag{14}$$

则通过下列求解方程可获得 $\theta_{\max}$ 的值：

$$K_{\mathrm{I}}^2\sin\theta_{\max}(1+\cos\theta_{\max})-2K_{\mathrm{I}}K_{\mathrm{II}}(\sin^2\theta_{\max}-\cos\theta_{\max}- \\ \cos^2\theta_{\max})+K_{\mathrm{II}}^2\sin\theta_{\max}(1-3\cos\theta_{\max})=0 \tag{15}$$

Zeng 等[24] 通过理论分析，给出了 θ 取得极大

值时的解析解：

$$\theta_{\max}=\begin{cases}-\cos^{-1}\left[(3K_{\mathrm{II}}^2+\sqrt{K_{\mathrm{I}}^4+8K_{\mathrm{I}}^2K_{\mathrm{II}}^2})/(K_{\mathrm{I}}^2+9K_{\mathrm{II}}^2)\right], \\ \quad K_{\mathrm{I}}>0,\ K_{\mathrm{II}}>0 \\ \cos^{-1}\left[(3K_{\mathrm{II}}^2+\sqrt{K_{\mathrm{I}}^4+8K_{\mathrm{I}}^2})/(K_{\mathrm{II}}^2K_{\mathrm{I}}^2+9K_{\mathrm{II}}^2)\right], \\ \quad K_{\mathrm{I}}>0, K_{\mathrm{II}}\leqslant 0 \\ \pm\arccos\dfrac{1}{3},\ K_{\mathrm{I}}=0,\ K_{\mathrm{II}}\neq 0\end{cases} \tag{16}$$

胶结型天然裂缝被激活后，水力裂缝在抵达相交界面前可能返回储层中，通常被称为裂缝偏移。此时，能量释放率在天然裂缝和储层方向改变，返回储层方向的能量释放率根据断裂力学相交准则算得。沿天然裂缝方向的能量释放率为

$$G_{\theta_0}=\frac{K_{\mathrm{I}}^2+K_{\mathrm{II}}^2}{E^*} \tag{17}$$

基于上述分析，建立一个高压电脉冲–水力压裂破岩模型。模型中引入了断裂韧度参数G_{θ_0}，并将其作为损伤演化的初始条件。与传统的损伤演化不同，本文通过能量释放率G_{θ_0}来表征材料的分级断裂韧度。

定义相对能量释放率为天然裂缝方向断裂韧度与最大断裂韧度之比，即$G_{\theta_0}/G_{\theta_{\max}}$。如图 2 所示：相对能量释放率对应曲线在红色虚线的上部分时，高压电脉冲水力裂缝遇天然裂缝后沿天然裂缝方向扩展；相对能量释放率对应曲线在红色虚线的下部分时，高压电脉冲水力裂缝遇天然裂缝后沿能量释放率极大值方向扩展。

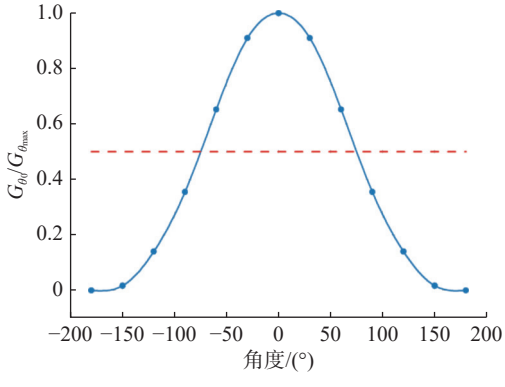


图 2 相对能量释放率

Fig.2 Relative energy release rate

2 数学物理模型

利用有限元软件建立截面尺寸为 20 m×20 m 煤岩试样的二维数值模型，在模型左侧布置压裂井筒，井壁施加水下高压脉冲放电所产生的冲击波峰值压力，模型的岩样采用 Quads 损伤准则，其中，模型损伤演化中的裂缝起裂准则基于理论部分设置，其他物理力学参数参考文献 [25]，如表 1 所示。

表 1 岩样物理力学参数[25]

Tab.1 Physical and mechanical parameters of rock samples

参数	数值
弹性模型E/GPa	12
抗拉强度σ_t/MPa	6
泊松比υ	0.18
渗透系数k/(m·s^{-1})	10^{-7}
滤失系数C_t/(m·Pa^{-1}·s^{-1})	10^{-14}
液体黏度μ/(Pa·s)	0.001

利用黏聚力单元模拟裂缝的起裂与扩展，如图 3 所示。模型边界模拟远场地层应力分布，模型四周设置边界条件。上下边界施加地应力为 σ_{h} = 6 MPa，左右边界施加地应力为 σ_{H} = 8 MPa，垂直截面方向施加地应力为 σ_z = 6 MPa。由于岩石为多孔渗流性质，采用 CPE4P 单元模拟岩石基质，COH2D4P 单元模拟裂缝黏结层。

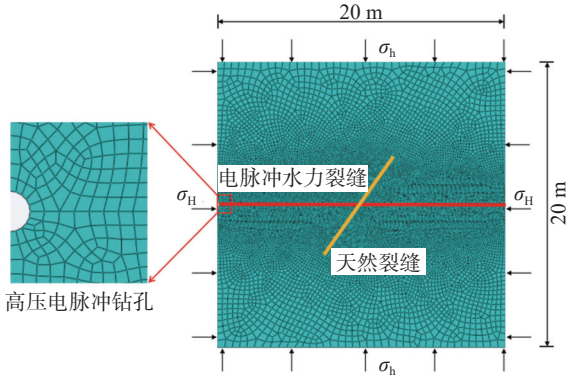


图 3 计算模型

Fig.3 Computational model

模型加载过程分为施加初始应力场、施加水下高压脉冲放电产生的冲击波载荷与注水 3 部分。首先，设置初始分析步，施加岩体所在地层的原岩应力为初始应力场条件；其次，采用有限元软件内置的衰减曲线表将水下高压脉冲放电所产生的冲击波峰值均匀施加在钻孔周边，电学参数见表 2[26]，时间约为 2 ms；最后，将流体注入到注水点中，持续时间为 60 s。

表 2　电学参数

Tab.2　Electrical parameters

参数	数值
电感L/μH	1
电容C/μF	60
间隙距离d/ mm	500
电导率σ/(s·m^{-1})	1.2
回路电阻R/Ω	0.1
电极到传感器的距离D/m	0.5

3　模型验证与结果分析

3.1　模型验证

为验证模拟方法的准确性，将建立的流−固耦合模型裂缝扩展长度与文献 [27] 所得结果进行对比。文献 [27] 所建立的模型如图 4 所示，选取表 1 中的岩石基质参数，σ_H = 8 MPa，σ_h = 6 MPa。根据文献 [27] 中的描述，模型裂缝长度的计算公式如下：

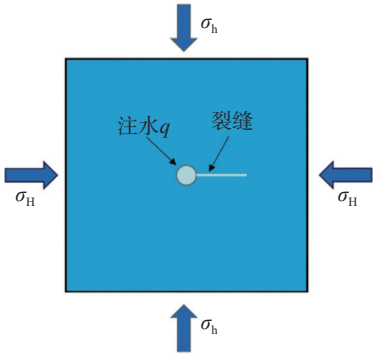


图 4　水力压裂概念模型

Fig.4　Conceptual model of hydraulic fracturing

$$L_w = \pi^{-1/3}\left(\frac{qE^*t}{K_{IC}}\right) \tag{18}$$

式中：L_w 为水力裂缝半长；q 为流体注入速率，q=1×10^{-4}m^2/s；K_{IC} 为断裂韧度；t 为时间。

图 5 为本文模型计算所得水力裂缝半长和文献 [27] 结果的对比，可以看出两者的时程关系吻合程度较高，验证了本文模拟方法的准确性。

3.2　高压电脉冲致裂效果分析

为研究存在既有天然裂缝时，高压电脉冲对岩体水力压裂效果的影响，建立了有高压电脉冲的水力压裂模型和没有高压电脉冲的传统水力压裂模型。传统水力压裂模型参数设置为相交角度

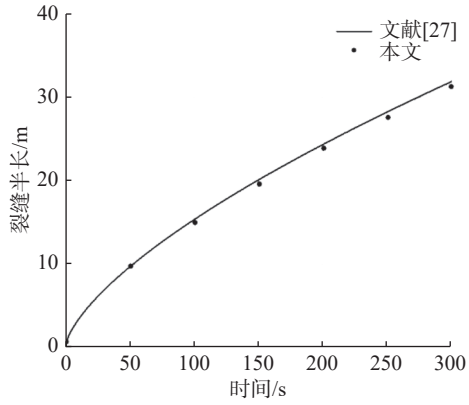


图 5　水力裂缝扩展半长模拟结果验证

Fig.5　Validation of hydraulic fracture extension half-length simulation results

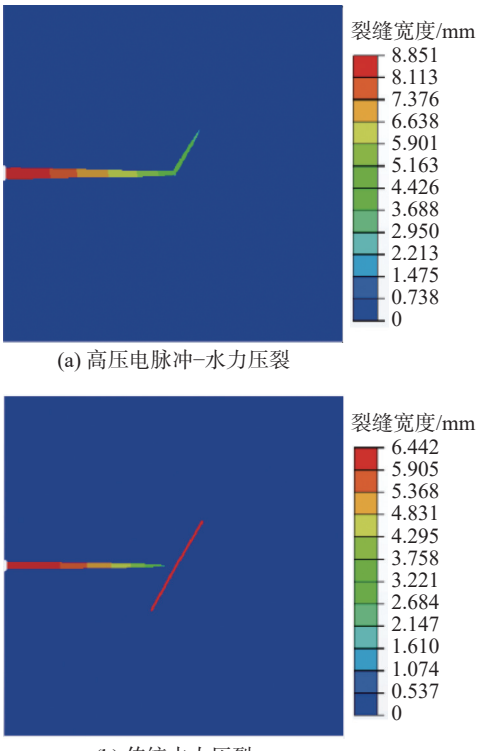
60°，主应力差 0 MPa，水压 3 MPa，有高压电脉冲作用时电压取 3 kV。图 6(a) 为有高压电脉冲条件时，水力裂缝和天然裂缝相交 60 s 时的效果图。高压电脉冲水力裂缝在钻孔起裂后沿最大水平主应力方向扩展，随后水力裂缝逐渐靠近天然裂缝；继而水力裂缝与天然裂缝相交，天然裂缝开启，产生以拉伸和剪切为主的裂缝；水力裂缝沿天然裂缝方向扩展，此时原始应力场无法抵抗天然裂缝区域诱导应力场的影响，使水力裂缝区域产生了新的应力场，并沿天然裂缝方向进一步扩展。

图 6(b) 为传统水力压裂下水力裂缝与天然裂缝作用 60 s 时的效果图，可以发现水力裂缝沿最大主应力方向扩展，且未能与天然裂缝相交。对比图 6(a) 得到，有高压电脉冲作用的水力裂缝扩展更长。高压电脉冲作用下的岩体最大裂缝宽度为 8.851 mm，传统水力压裂最大裂缝宽度为 6.442 mm，增幅为 37.4%。出现此现象的原因是在高压电脉冲作用下，冲击波压力作用在钻孔周边，使得钻孔周边初始裂缝开启比传统水力压裂初始裂缝开启更宽，所以在后续注水相同时间内液体通过流量更高，使得裂缝延伸更长。因此，在实际工程中施加高压电脉冲，天然裂缝的存在能够有效引导裂缝扩展，增大裂缝损伤面积，提高破岩效率。

4　影响因素分析

4.1　主应力差

为分析主应力差对高压电脉冲−效果的影响，在保持其他参数不变的情况下，设置主应力差为 0、2、4 MPa，并进行计算。图 7(b) 为主应力差 2 MPa、作用时间 60 s 时的裂缝扩展图。岩体最大

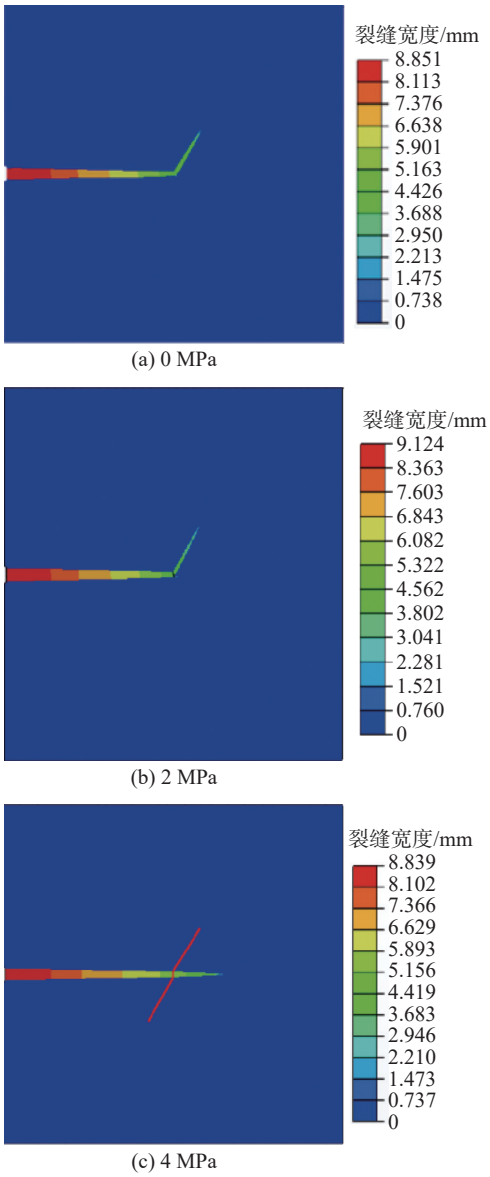


(a) 高压电脉冲–水力压裂

(b) 传统水力压裂

图 6 有无高压电脉冲作用下的裂缝扩展图

Fig.6 Fracture propagation diagrams with and without high-voltage electrical impulses



(a) 0 MPa

(b) 2 MPa

(c) 4 MPa

图 7 不同主应力差在 60 s 时的裂缝扩展图

Fig.7 Fracture propagation diagrams at 60 s under different principal stress differences

裂缝宽度为 9.14 mm，高压电脉冲水力裂缝沿天然裂缝方向扩展，天然裂缝被激活。其原因是天然裂缝周围的应力集中，产生诱导应力，使水力裂缝被“吸引”并沿天然裂缝转向。与图 7(a) 主应力差为 0 MPa 时的扩展规律不同，主应力差为 2 MPa 时，水力裂缝沿天然裂缝转向的时刻约为 40 s，岩体的最大裂缝宽度为 8.68 mm。图 7(c) 为主应力差取 4 MPa、作用时间为 60 s 时的裂缝扩展图，岩体最大裂缝宽度为 8.52 mm。由图显示，水力裂缝穿过天然裂缝继续沿原方向扩展。由此可见：高压电脉冲水力裂缝在低水平应力差作用下更容易沟通天然裂缝，并沿天然裂缝方向转向；高压电脉冲水力裂缝在高水平应力差作用下穿过天然裂缝，并继续沿最大水平主应力的方向扩展延伸，且天然裂缝未开启。

4.2 相交角度

为分析天然裂缝与最大水平主应力方向相交角度对高压电脉冲水力裂缝扩展行为的影响，在保持其他参数不变的条件下，设置相交角度为 30°、45°、60°、75°、90°，并进行计算。

如图 8 所示：当天然裂缝与高压电脉冲水力裂缝夹角为 30°、45°、60°时，高压电脉冲水力裂缝沿天然裂缝转向，此时天然裂缝被激活，最大裂缝宽度随裂缝相交角度的增大而增大，岩体最大裂缝宽度分别为 8.51、8.93、9.18 mm；当天然裂缝与高压电脉冲水力裂缝夹角为 75°与 90°时，岩体最大裂缝宽度为 7.87、8.23 mm。天然裂缝与高压电脉冲水力裂缝夹角为 60°时裂缝宽度最大，与最小裂缝宽度相比增幅为 16.4%。高压电脉冲水力裂缝穿透天然裂缝并继续沿最大水平主应力方向扩展，天然裂缝没有被激活。由此可见，高压电脉冲水力裂缝与天然裂缝相交角度越小，其越容易向天然裂缝方向延伸，天然裂缝的开启难度则越小。

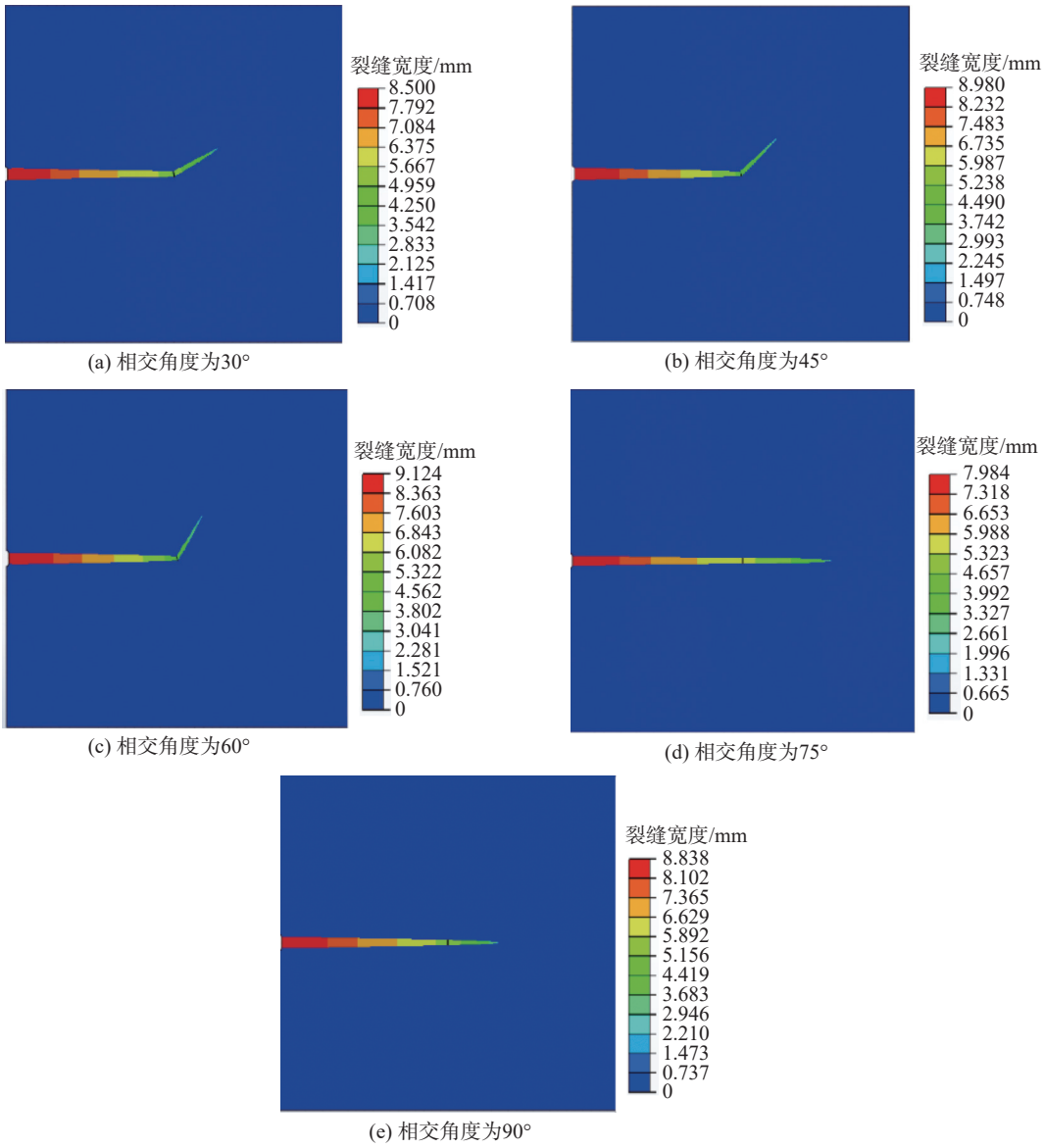


图 8　不同相交角度下裂缝扩展图

Fig.8　Fracture propagation diagrams at different intersection angles

4.3　电　压

为研究在不同电压下天然裂缝对高压电脉冲水力裂缝扩展行为的影响，在保持其他参数不变的条件下，设置电压为 1、2、4、5 kV，并进行计算。提取不同电压下钻孔周围裂缝宽度随时间的变化，如图 9 所示，可以看出在 0 ～ 5 s 内，裂缝宽度迅速上升，这是因为作用在钻孔上的冲击波使黏聚力单元打开。裂缝宽度随电压增大而增大，同一时间内经过的液体流量也越多。

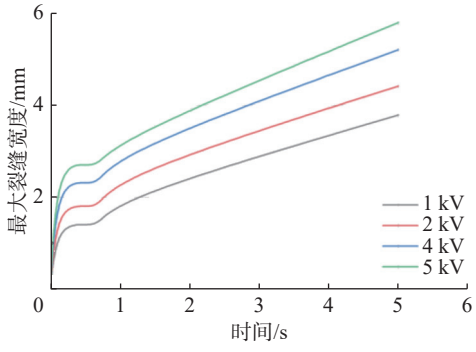


图 9　不同电压下裂缝随时间变化图

Fig.9　Plot of fractures with time at different voltages

从图 9 可以看出，高压电脉冲水力裂缝宽度随电压增加而增加，岩体的损伤程度也随之增大。分析图 9 中前 5 ms 最大裂缝宽度，电压由 1 kV 增加到 2 kV，裂缝宽度由 1.4 mm 增加至 1.81 mm，增加幅度约为 29.3%；电压由 2 kV 增加至 4 kV，裂缝宽度由 1.81 mm 增加至 2.31 mm，增加幅度约为 27.6%；电压由 4 kV 增加至 5 kV，裂缝宽度由

2.31 mm 增加至 2.72 mm，增加幅度约为 17.8%。

图 10 为电压取 1、2、4、5 kV，作用时间为 60 s 时水力裂缝与天然裂缝相交时的扩展行为。当电压为 1、2 kV 时，水力裂缝穿透天然裂缝并继续沿最大主应力方向扩展，天然裂缝不会开启；当电压为 4、5 kV 时，水力裂缝与天然裂缝相交且沿天然裂缝方向继续延伸，天然裂缝开启。由图 10 可见，高压电脉冲水力裂缝宽度随电压增加而增加。因此，电压越大，天然裂缝越容易开启，水力裂缝易于向天然裂缝方向扩展；电压越大，裂缝宽度越大，注入的流体越多，致裂效果越明显。

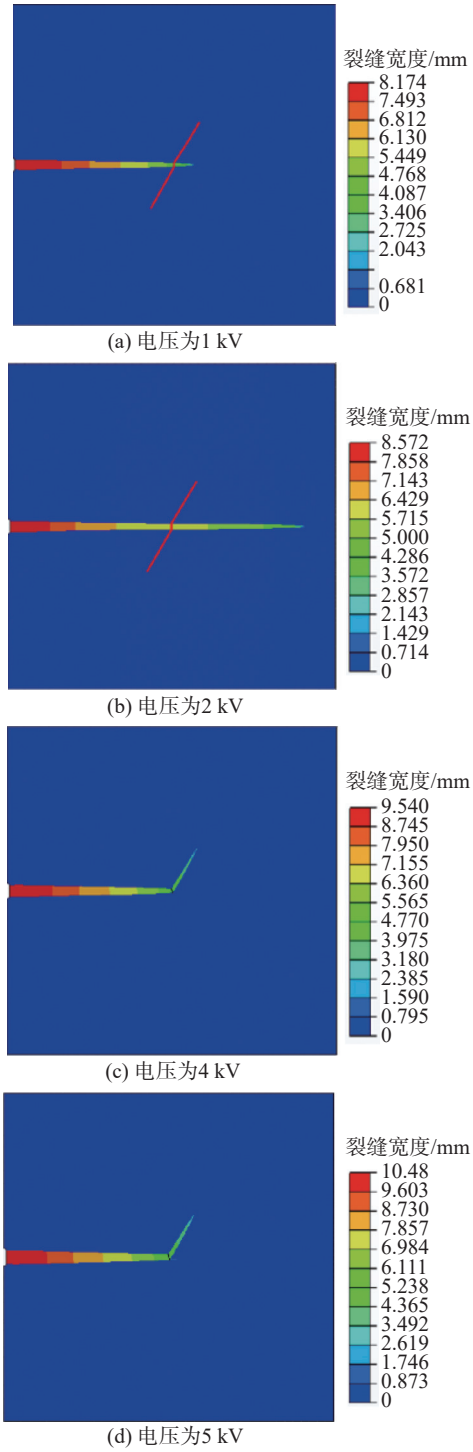


图 10 不同电压下裂缝扩展图

Fig.10 Fracture extension at different voltages

5 结 论

基于能量释放率理论，构建了包含天然裂缝的高压电脉冲−水力压裂联合破岩流−固耦合模型，模拟了不同工况下高压电脉冲水力裂缝遇到天然裂缝的扩展行为，为实际工程中的应用提供理论依据，主要结论如下：

a. 高压电脉冲作用后水力压裂和传统水力压裂破岩效果差异显著。在相同条件下，有高压电脉冲作用下的水力裂缝可以沟通到天然裂缝，并使得天然裂缝开启；传统水力压裂水力裂缝没有沟通到天然裂缝，且天然裂缝未开启。

b. 高压电脉冲作用会在压裂初期效果显著，冲击波强度随电压的增大而增大。冲击波强度越大，裂缝宽度越宽，使得压裂后期注入的流体增多，岩体损伤越大。此外，电压越高，电脉冲水力裂缝越容易沟通到天然裂缝，天然裂缝越容易开启。在实际工程中可通过提高放电电压值来达到更好的致裂效果，可为实际工程应用的脉冲放电设备的设计提供依据。

c. 水力裂缝与天然裂缝相交角度越小，其越易于向天然裂缝方向延伸，天然裂缝的开启难度越小。在高应力差作用下，裂缝受最大主应力的控制，天然裂缝难以开启，高压电脉冲水力裂缝穿过天然裂缝继续沿原来方向延伸。

参考文献：

[1] LI Y, ZHOU D H, WANG W H, et al. Development of unconventional gas and technologies adopted in China[J]. Energy Geoscience, 2020, 1(1/2): 55−68.

[2] ZHU X H, LUO Y X, LIU W J. On the rock-breaking mechanism of plasma channel drilling technology[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 194: 107356.

[3] 康红普, 冯彦军, 张震, 等. 煤矿井下定向钻孔水力压裂岩层控制技术及应用 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 31−44.

[4] 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 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2270−2282.

[5] RUEDA J, MEJIA C, QUEVEDO R, et al. Impacts of natural fractures on hydraulic fracturing treatment in all asymptotic propagation regimes[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 371: 113296.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 李春明, 赵胤翔, 赵金昌, 等. 预制裂纹对水中高压电脉冲致裂煤岩体的影响 [J]. 煤矿安全, 2021, 52(7): 27−32.

[9] ZHANG B, LIU J Y, WANG S G, et al. Impact of the distance between pre-existing fracture and wellbore on hydraulic fracture propagation[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 57: 155−165.

[10] 张广清, 周大伟, 窦金明, 等. 天然裂缝群与地应力差作用下水力裂缝扩展试验 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2019, 43(5): 157−162.

[11] ZHOU D W, ZHANG G Q, ZHAO B, et al. Experimental investigation on non-planar fractures mechanisms in hydraulic fracturing[J]. Journal of Unconventional Oil and Gas Resources, 2016, 15: 106−112.

[12] 许文俊. 非常规油气藏缝网压裂裂缝扩展数值模拟研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2019.

[13] QIU G, CHANG X, LI J, et al. Study on the interaction between hydraulic fracture and natural fracture under high stress[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 130: 104259.

[14] 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.

[15] JONES H M, KUNHARDT E E. Pulsed dielectric breakdown of pressurized water and salt solutions[J]. Journal of Applied Physics, 1995, 77(2): 795−805.

[16] YAN G H, FU H W, ZHAO Y M, et al. A review on optimizing potentials of high voltage pulse breakage technology based on electrical breakdown in water[J]. Powder Technology, 2022, 404: 117293.

[17] 李和平, 于达仁, 孙文廷, 等. 大气压放电等离子体研究进展综述 [J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3697−3727.

[18] TOUYA G, REESS T, P´EECASTAING L, et al. Development of subsonic electrical discharges in water and measurements of the associated pressure waves[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(24): 5236−5244.

[19] 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, 2016: 6412309.

[20] 丁遂栋, 孙利民. 断裂力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 131–134.

[21] OLSON J E. Predicting fracture swarms—the influence of subcritical crack growth and the crack-tip process zone on joint spacing in rock[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 231(1): 73−88.

[22] TALEGHANI A D, GONZALEZ M, SHOJAEI A. Overview of numerical models for interactions between hydraulic fractures and natural fractures: challenges and limitations[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 71: 361−368.

[23] 曾青冬. 页岩致密储层压裂裂缝扩展数值模拟研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2016.

[24] ZENG X G, WEI Y J. Crack deflection in brittle media with heterogeneous interfaces and its application in shale fracking[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2017, 101: 235−249.

[25] 周鑫, 刘向君, 丁乙, 等. 考虑隔层效应的水力裂缝与天然裂缝相交模拟 [J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(3): 515−525.

[26] 闫东. 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.

[27] FU P C, JOHNSON S M, CARRIGAN C R. An explicitly coupled hydro-geomechanical model for simulating hydraulic fracturing in arbitrary discrete fracture networks[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(14): 2278−2300.

（编辑：丁红艺）