

电爆冲击波对储层致裂效果影响因素的数值模拟研究

江海畏^{1,2}, 薛启龙^{1,2}

(1.自然资源部深部钻探重点实验室,北京 100083; 2.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083)

摘要:电爆冲击波在油气储层增渗解堵中具有巨大应用潜力,为了解各因素对电爆冲击波致裂效果的影响程度,本文采用 ANSYS/LS-DYNA 软件,通过改变地应力、弹性模量、抗拉强度参数进行数值模拟。结果显示,地应力对致裂效果具有强烈的抑制作用,在双向等压地应力作用下,裂纹区形状为圆形,并且随着地应力的增大,岩体破裂度、破裂半径均逐渐减小。在双向不等压地应力作用下,随水平主应力差值增大,裂纹扩展方向由圆形逐渐转变为椭圆形,具有沿最大水平主应力方向扩展的特点;弹性模量对致裂效果具有重要影响,随着弹性模量的增大,岩体破裂度、破裂半径均呈增大趋势;随抗拉强度增大,岩体破裂度、破裂半径均减小。

关键词:石油气;储层压裂;增渗解堵;ANSYS/LS-DYNA;电爆冲击波;影响因素;破裂度;破裂半径

中图分类号:TE358 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)11-0070-07

Numerical simulation study of the influencing factors of electric explosion shock waves on reservoir fracture initiation

JIANG Haiwei^{1,2}, XUE Qilong^{1,2}

(1.Key Laboratory of Deep Geodrilling Technology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China; 2.School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The electric blast shock wave has great application potential in increasing permeability and removing plugs of oil and gas reservoirs. In this paper, ANSYS/LS-DYNA software is used to investigate the influencing factors of electric blast shock wave-induced cracks through variation of the in-situ stress, elastic modulus and tensile strength. The simulation results show that the in-situ stress has a strong inhibitory effect on crack propagation. Under action of the two-way isobaric in-situ stress, the shape of the crack zone is circular, and with increase of the in-situ stress, the fracture degree and fracture radius of the rock mass decrease gradually. Under action of the bi-directional unequal compressive in-situ stresses, as the difference between the horizontal principal stresses increases, the direction of crack propagation gradually changes from circular to elliptical, exhibiting the characteristic of extending along the direction of the maximum horizontal principal stress. The elastic modulus has important effect on crack initiation: with increase of the elastic modulus, the fracture degree and fracture radius of the rock mass increase. As the tensile strength increases, the fracture degree and fracture radius of the rock mass decrease.

Key words: oil gas; reservoir fracture; increasing permeability and removing plugs; ANSYS/LS-DYNA; electric blast shock wave; influencing factors; fracture degree; fracture radius

0 引言

近年来世界能源需求不断增长,能源供应日趋紧张,石油气的开采由此受到越来越多国家的重视。提高油气层渗透率以增加油气井产量,一直是国内外石油工程界追求的目标,水力加砂压裂是目前油层增渗的主流技术。但是,该技术的压裂效果受石油气储层条件的制约严重,压裂过程会对油气储

层造成诸多伤害并波及后续排采。由于水力压裂法所用的水中加入了大量的化学物质,会给环境带来极大伤害。为此,国内外开展了一系列增渗解堵新技术研究,其中,电爆冲击波技术近年来不断得到重视。该技术利用液电效应产生的强大冲击波,在地层中形成定向传播的压力脉冲,会使岩心内部产生一定量的微裂缝或贯通原有无效孔隙,从而实现孔

收稿日期:2020-05-16; 修回日期:2020-05-26 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.11.012

作者简介:江海畏,男,汉族,1996年生,硕士研究生在读,研究方向为电爆冲击波增渗解堵,北京市海淀区学院路29号,1191951743@qq.com。

引用格式:江海畏,薛启龙.电爆冲击波对储层致裂效果影响因素的数值模拟研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):70-76.

JIANG Haiwei, XUE Qilong. Numerical simulation study of the influencing factors of electric explosion shock waves on reservoir fracture initiation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(11):70-76.

隙度和渗透率的提高。具有无污染、工艺简单、成本低的特点,已在国内多个油田应用,并取得了较好的效果^[1-10]。

但该技术的研究目前主要侧重于设备研发、机制研究和效果评价,仍停留在定性解释的水平^[2],为了分析该技术的适应性以及定量分析各影响因素对致裂效果的影响程度,本文通过 ANSYS/LS-DYNA 软件分别模拟不同地应力、地层弹性模量、抗拉强度条件对岩体致裂效果的影响,为该技术的选井选层提供理论依据。

1 电爆冲击波作用机制

(1)冲击波造缝作用。冲击力作用下地层岩石受到拉伸及剪切应力,当其大于岩石的抗拉或抗剪强度,导致地层岩石内部产生新的微裂缝或原始裂缝发生扩展贯通,从而扩展了原油渗流通道,增加了油井产量。

(2)冲击波解堵作用。地层岩石为非均匀介质,当冲击波在地层中传播时,由于不同介质的波阻抗不同,在其界面处会产生剪切应力,有助于剥离渗流通道内的堵塞物。另外,冲击波传播过程中对孔隙进行推挤和抽吸作用,有助于将孔隙杂质排除,起到解堵作用^[1]。

2 电爆冲击波产生机理与传播过程

电爆冲击波产生机理与“液电效应”原理(高压电场通过液体,由于巨大的能量瞬间释放于放电通道内,通道中的液体就迅速汽化、膨胀并引起爆炸)类似。不同的是电爆冲击波的产生附加金属丝作为引弧丝,高功率电压穿过金属丝,金属丝瞬间放电熔断,同时周围的水介质在极短的时间内被汽化而产生大量热能,从而产生冲击波迅速向外膨胀,作用于地层岩石。电爆冲击波的传播过程可分为 3 个阶段,分别为地震波阶段,应力波阶段和冲击波阶段,而岩体的裂纹区产生主要是由应力波阶段作用形成。

3 数值模拟

前人的研究发现,从电爆冲击波的产生原理、波形特征及其力学行为来看,可以将其视为爆炸冲击波^[4-6]。爆炸模拟属于大变形非线性问题,ANSYS/LS-DYNA 作为世界上最著名的通用非线性动力分析软件,特别适合求解二维、三维结构的爆炸

以及非线性动力冲击问题,并且能够通过 ALE 和 Euler 算法解决大变形过程中的网格畸变问题^[11]。综合以上考虑,本文采用 ANSYS/LS-DYNA 中的爆炸物本构模拟电爆冲击波的致裂过程。

3.1 岩体模型及失效准则

爆炸时近区岩体发生屈服以致破碎,应变很大,应变率效应明显。计算证明,采用包含应变率效应的随动塑性材料模型是比较合适的。该模型是各向同性、随动硬化或各向同性和随动硬化的混合模型,且与应变率相关,可考虑失效,通过在 0(仅随动硬化)和 1(仅各向同性硬化)间调整硬化参数 β 来选择各向同性或随动硬化。应变率用 Cowper-Symonds 模型来考虑,用与应变率有关的因数表示屈服应力:

$$\sigma_Y = [1 + (\dot{\epsilon}/c)^{1/p}] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}}) \quad (1)$$

$$E_p = E_0 E_{\tan} / (E_0 - E_{\tan}) \quad (2)$$

式中: σ_0 ——岩体的初始屈服应力,Pa; $\dot{\epsilon}$ ——应变率, s^{-1} ; E_0 ——弹性模量,Pa; c 、 p ——均为 Cowper-Symonds 应变率参数,是由材料应变率特性决定的常量,取 $c = 2.5$, $p = 4.0$; E_p ——岩体塑性硬化模量,Pa; $E_{\tan}$ ——切线模量,Pa; β ——各向同性硬化和随动硬化的贡献的硬化参数, $0 \leq \beta \leq 1$; ϵ_p^{eff} ——岩体有效塑性应变。

$$\epsilon_p^{\text{eff}} = \int_0^t d\epsilon_p^{\text{eff}} \quad (3)$$

$$d\epsilon_p^{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2}{3} d\epsilon_{ij}^p d\epsilon_{ij}^p} \quad (4)$$

式中: t ——发生塑性应变累计时间,s; ϵ_{ij}^p ——岩体塑性应变偏量分量。

岩体爆炸粉碎区是岩体受压所致,采用 Mises 破坏准则;而裂纹区则是受拉破坏的结果,岩体破坏准则如下:

$$\sigma_{VM} > \sigma_{cd} \text{ (压碎区)} \quad (5)$$

$$\sigma_t > \sigma_{td} \text{ (裂纹区)} \quad (6)$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij}} \quad (7)$$

式中: σ_{VM} ——岩体中任一点的 von Mises 有效应力,Pa; σ_{ij} ——岩体单元的应力分量; σ_t ——岩体中任一点在爆炸荷载下所受的拉应力,Pa; σ_{cd} 、 σ_{td} ——分别为岩体单轴动态抗压强度和抗拉强度,Pa。

可近似用下式统一表达岩石动态抗压强度与静态抗压强度之间的关系:

$$\sigma_{cd} > \sigma_c \epsilon^{1/3} \quad (8)$$

$$\sigma_{td} > \sigma_{t0} \epsilon^{(1/3)'} \quad (9)$$

式中: σ_c ——岩体的单轴静态抗压强度, Pa; σ_{t0} ——岩体的单轴静态抗拉强度, Pa。

根据以上分析, 本文以砂岩为研究对象, 其基本力学参数为: 密度 $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E_0 = 5.5 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.26$, 屈服强度 $\sigma_0 = 40 \text{ MPa}$, 切线模量 $E_{tan} = 4.0 \text{ GPa}$, 抗压强度 $\sigma_c = 80 \text{ MPa}$, 抗拉强度 $\sigma_{st} = 10 \text{ MPa}$, $c = 2.5$, $p = 5$ 。

3.2 爆炸物参数及状态方程

采用 ANSYS/LS-DYNA 提供的爆破物本构, 同时采用 JWL 状态方程模拟爆炸过程中压力和比容的关系, 爆炸过程中单元体内任一点的压力为:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (10)$$

式中: P ——爆炸压力; E_0 ——爆轰产物的内能; V ——爆轰产物的相对体积; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω ——爆炸物的性质常数。

爆炸物参数及 JWL 状态方程参数为: 密度 $\rho_0 = 1150 \text{ kg/m}^3$, 爆速 $D = 4300 \text{ m/s}$, $A = 540.9 \text{ GPa}$, $B = 9.4 \text{ GPa}$, $R_1 = 4.5$, $R_2 = 1.0$, $\omega = 0.15$, $E_0 = 8 \text{ GPa}$ 。

3.3 几何计算模型的建立

利用 ANSYS/LS-DYNA 建立 $2000 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的三维几何模型, 作为一种准二维模型。模型中部爆孔直径 $d = 50 \text{ mm}$, 模型四周边界分别施加 X、Y 方向地应力, 同时由于实际地层情况为无限大岩体范围, 为了消除冲击波到达岩体边界后形成的反射波对模拟结果的影响, 在模型四周边界处均施加无反射边界条件, 所建立的几何模型如图 1 所示。

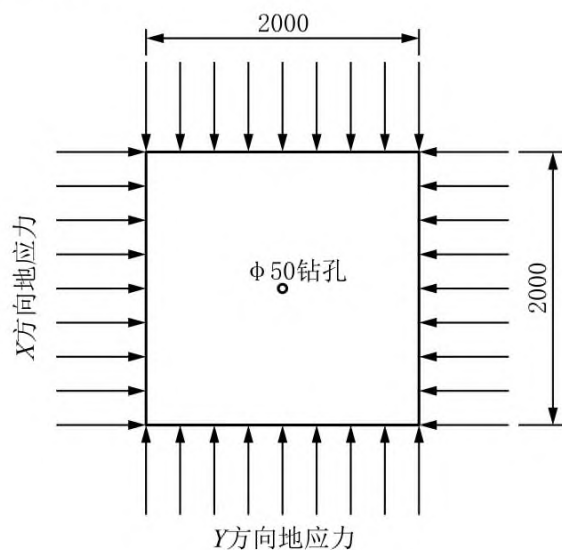


图 1 几何计算模型

Fig.1 Geometric calculation model

3.4 网格的划分及算法的选择

采用 solid185 单元对几何模型进行网格划分, 划分后的模型共计 42935 个单元。共设 2 个 part, part1 为爆炸物单元, part2 为岩体单元, 2 个 part 之间采用共节点方式进行连接, 划分网格后的模型如图 2 所示。模拟分为 2 个阶段进行, 第一阶段为地应力加载, 地应力的加载属于静态分析, 选用隐式单元 solid185 单元, 采用隐式求解器求解并形成动力松弛文件。爆炸过程属于显示分析, 将隐式单元 solid185 单元转化为与之对应的显示单元 solid164 单元, 并对爆炸求解过程导入隐式分析形成的动力松弛文件, 采用隐式—显示连续求解^[12-16]。

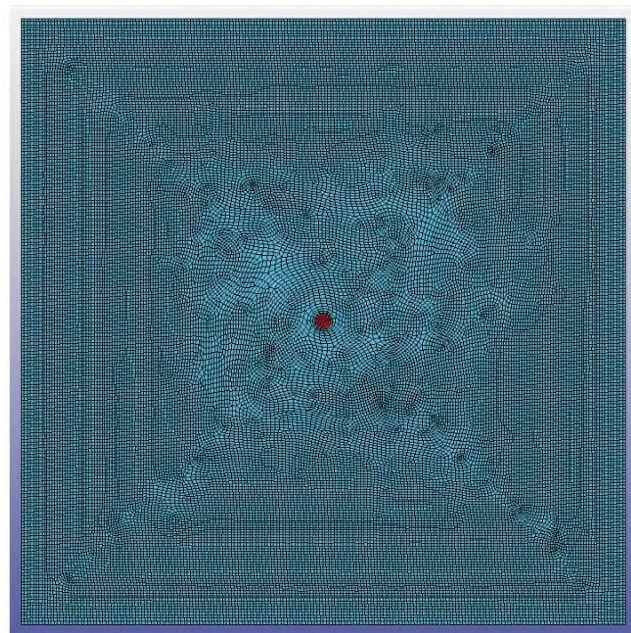


图 2 网格划分结果

Fig.2 Meshing results

4 模拟结果及分析

4.1 致裂程度分析方法

为了能够更直观地表达电爆冲击波作用下岩体的破裂效果, 在数值模拟中通常采用 2 种方法对结果进行量化分析: (1) 统计破裂区最大半径; (2) 统计岩体破裂度。岩体破裂度是评价地质体破裂程度的指标, 采用以下公式表示, 岩体破裂度 = 破裂岩体的体积 / 岩体总体积。在数值分析中, 即为失效单元的体积 / 所有单元体积。

4.2 地应力对致裂效果的影响

地应力分为垂直应力 σ_v 、最大水平主应力 σ_H 和最小水平主应力 σ_h , 是由岩体自重及构造运动等因素引起, 其对油田油层的稳定性以及开采具有重要影响。为此本文仅开展水平主应力对裂纹扩展的模拟研究, 分为 $\sigma_H = \sigma_h$ 、 $\sigma_H > \sigma_h$ 两种情况进行讨论^[17-25]。

4.2.1 双向等压地应力的情况: $\sigma_H = \sigma_h$

在地应力分别为 0、5、10、20 MPa 的情况下,岩体裂纹扩展规律模拟结果如图 3 所示。岩体破裂半径、破裂度随地应力变化的规律分别如图 4、图 5 所示。

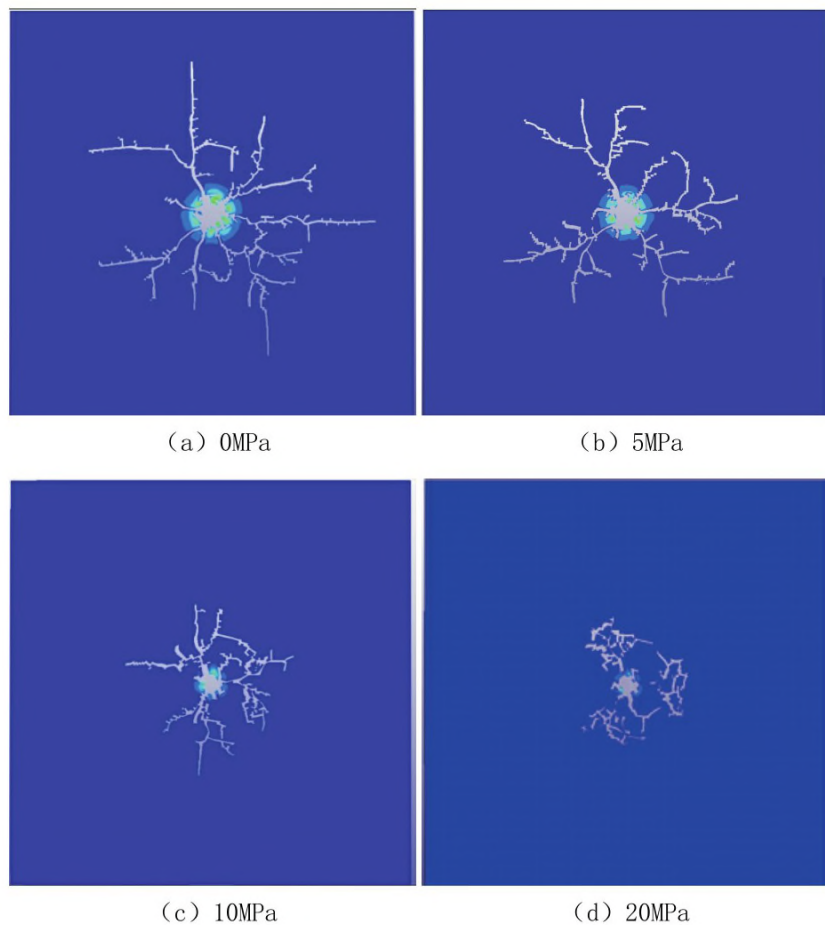


图 3 双向等压地应力作用下的裂纹分布

Fig.3 Crack distribution under the bi-directional equal pressure in-situ stress

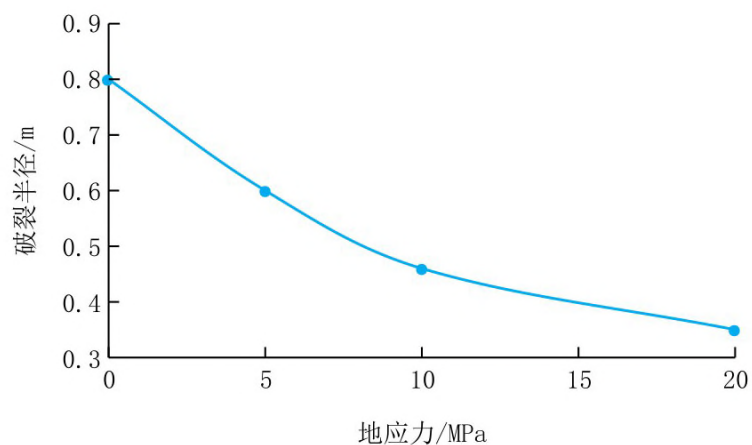


图 4 破裂半径随地应力变化曲线

Fig.4 Fracture radius vs in-situ stress

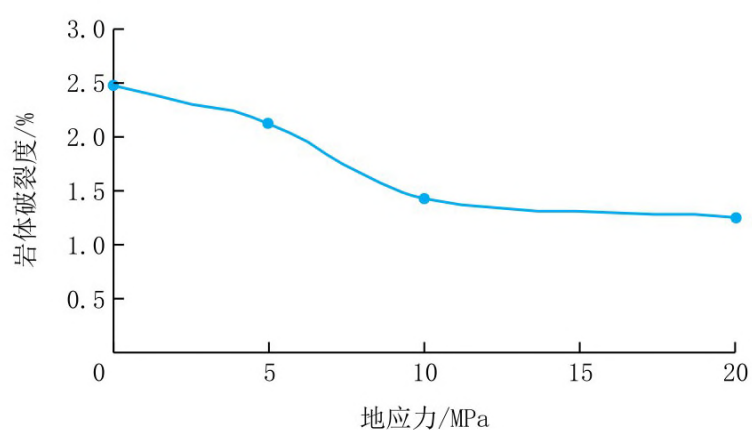


图 5 岩体破裂度随地应力变化曲线

Fig.5 Rock mass fracture degree vs in-situ stress

模拟结果显示,在不同量级的双向等压地应力作用下,裂纹均以爆炸点为中心呈近圆形趋势向外扩展。而且随着地应力的增大,岩体破裂度及破裂半径都呈减小趋势,说明地应力对裂纹扩展具有强烈的抑制作用。在地应力 0~10 MPa 范围内,呈快速减小的趋势,10~20 MPa 范围内,下降趋势逐渐放缓。

4.2.2 双向不等压地应力情况: $\sigma_H > \sigma_h$

在 $\sigma_h = 10$ MPa, $\sigma_H = 10, 20, 30, 40$ MPa 条件下水平主应力差值分别为 0、10、20、30 MPa,岩体裂纹扩展规律模拟结果如图 6 所示。裂纹区长短轴、岩体破裂度随地应力变化曲线分别如图 7、图 8 所示。

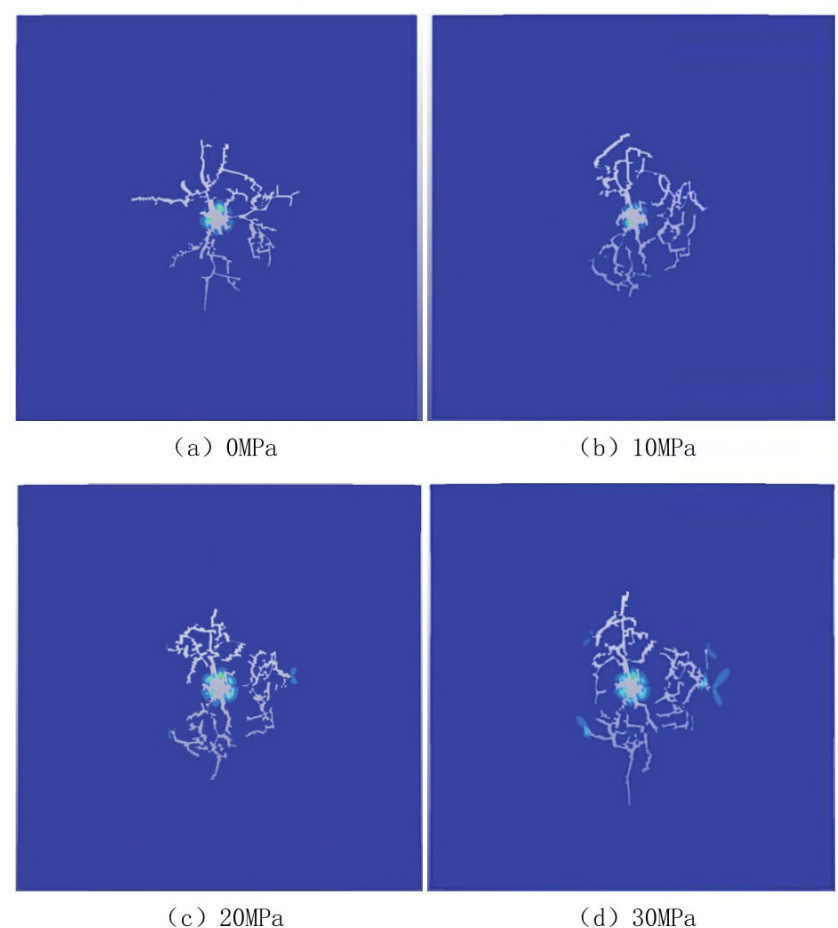


图 6 双向不等压地应力作用下的裂纹分布

Fig.6 Crack distribution under the bi-directional unequal ground stress

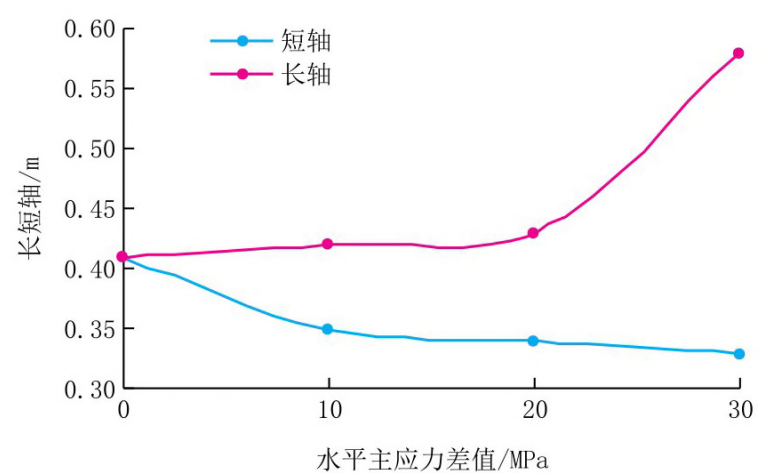


图 7 裂纹区长短轴随水平应力差值的变化曲线

Fig.7 Long and short axes of the crack zone vs in-situ stress

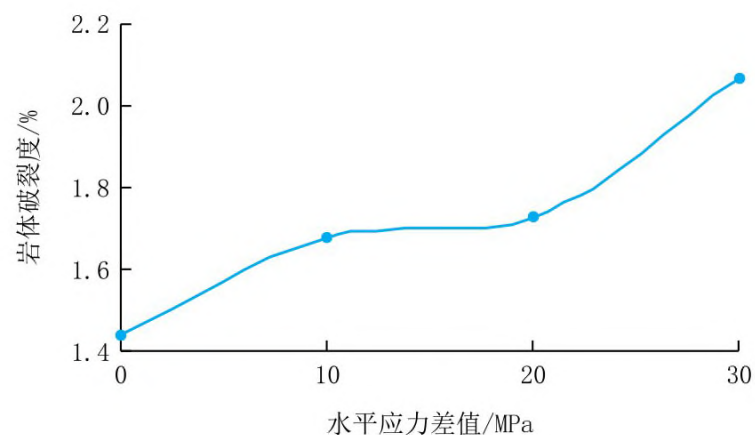


图 8 岩体破裂度随水平应力差值的变化曲线

Fig.8 Rock mass fracture degree vs in-situ stress

模拟结果显示,在双向不等压地应力情况下,随着水平主应力差值的增大,裂纹区形状由原来的圆形转化为近似椭圆形,长轴出现在最大水平主应力作用方向,短轴出现在最小水平主应力作用方向。随着水平应力差值的增大,短轴减小,长轴不断增大,岩体破裂度也呈增大趋势。由此可知,在水平主应力差较大的地层中作业时,电爆冲击波释放方向与最大水平主应力方向相近,更易增加裂纹破裂半径,提高岩体破碎度,最大限度地提高储层渗透性。

4.3 弹性模量对致裂效果的影响

在地应力为 0 MPa,保持岩体其他力学参数不变,弹性模量分别为 4.5、5.5、6.5、7.5 GPa 的情况下,岩体裂纹扩展规律模拟结果如图 9 所示。

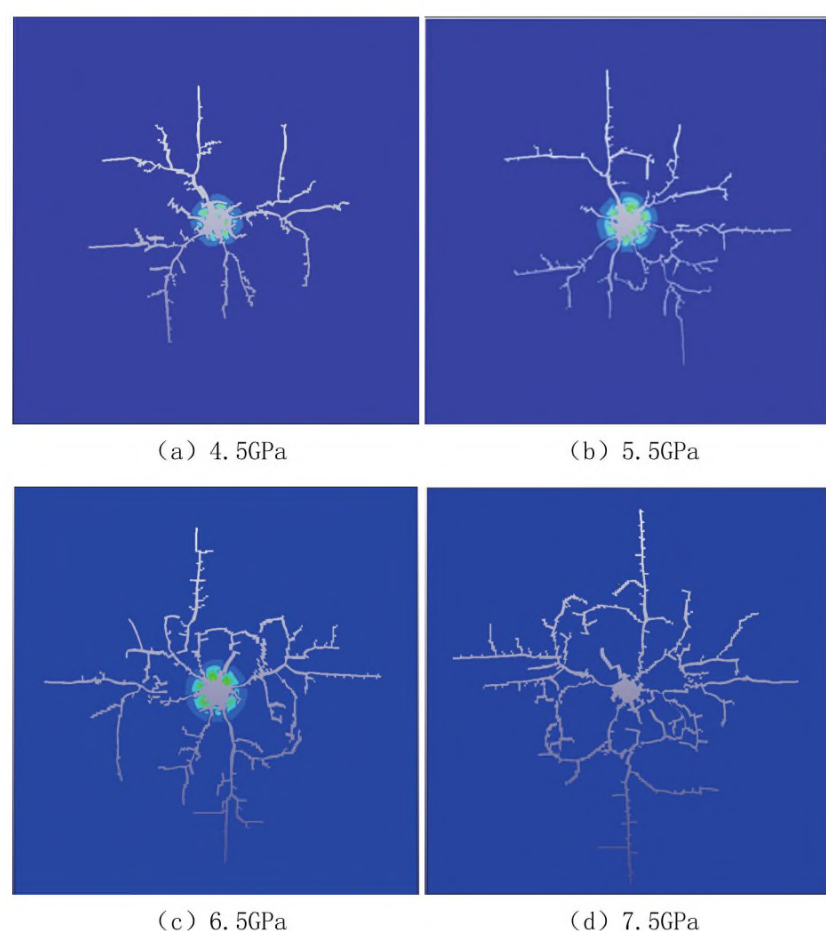


图 9 不同弹性模量下的裂纹分布

Fig.9 Crack distribution at different elastic moduli

岩体破裂度、破裂半径随弹性模量变化的规律分别如图 10、图 11 所示。

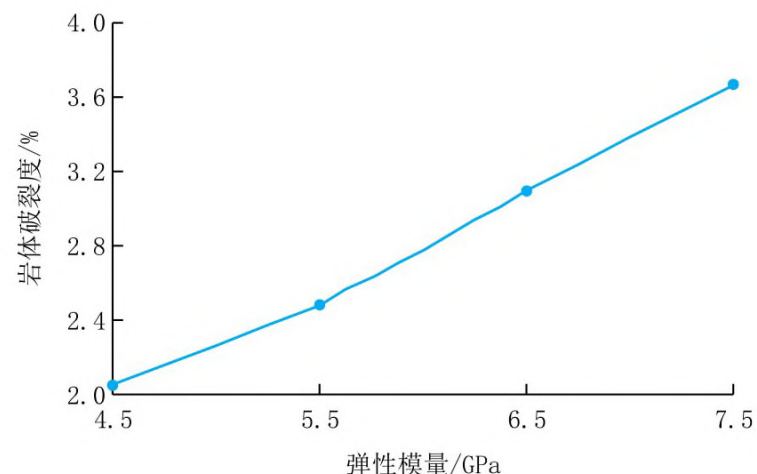


图 10 岩体破裂度随弹性模量变化曲线

Fig.10 Rock mass fracture degree vs elastic modulus

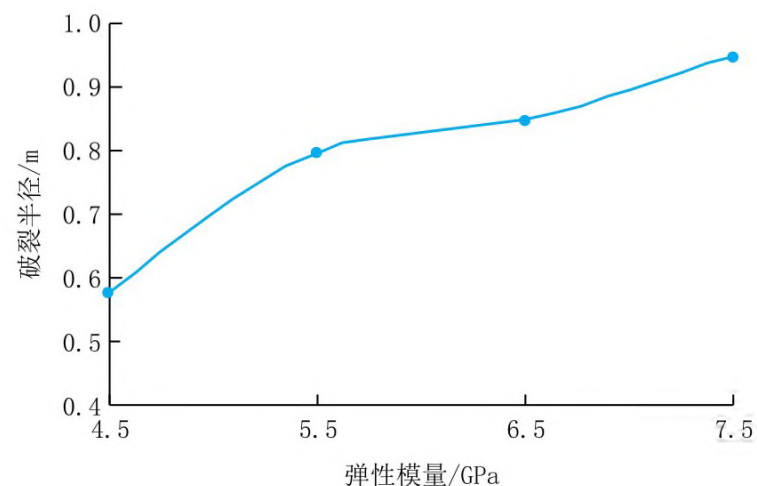


图 11 破裂半径随弹性模量变化曲线

Fig.11 Fracture radius vs elastic modulus

模拟结果显示,随弹性模量增大,岩体破裂半径、破裂度也随之增大。这是由于当弹性模量处于较小量级时,岩体刚度较低,电爆冲击波作用下爆炸点附近岩体较易破碎;随着岩体破碎程度的增加,抵抗冲击波的能力越来越强,冲击波衰减越快,裂纹主要发育在爆炸点附近,以短小裂纹为主,因此破裂半径很小。而随着弹性模量的增加,岩体刚度增大,爆炸点附近岩体破碎程度有所降低,较易形成大裂纹,破裂半径随之增大。

4.4 岩体抗拉强度对致裂效果的影响

在地应力为 0 MPa,保持岩体其他力学参数不变,抗拉强度分别为 1、5、10、20 MPa 的情况下,岩体裂纹扩展规律模拟结果如图 12 所示。岩体破裂度、破裂半径随抗拉强度的变化规律分别如图 13、14 所示。

随着抗拉强度的增大,岩体破裂度、破裂半径均不断减小,而且曲线呈近似线性趋势,说明抗拉强度是影响致裂效果的关键因素。这是由于在电爆冲击

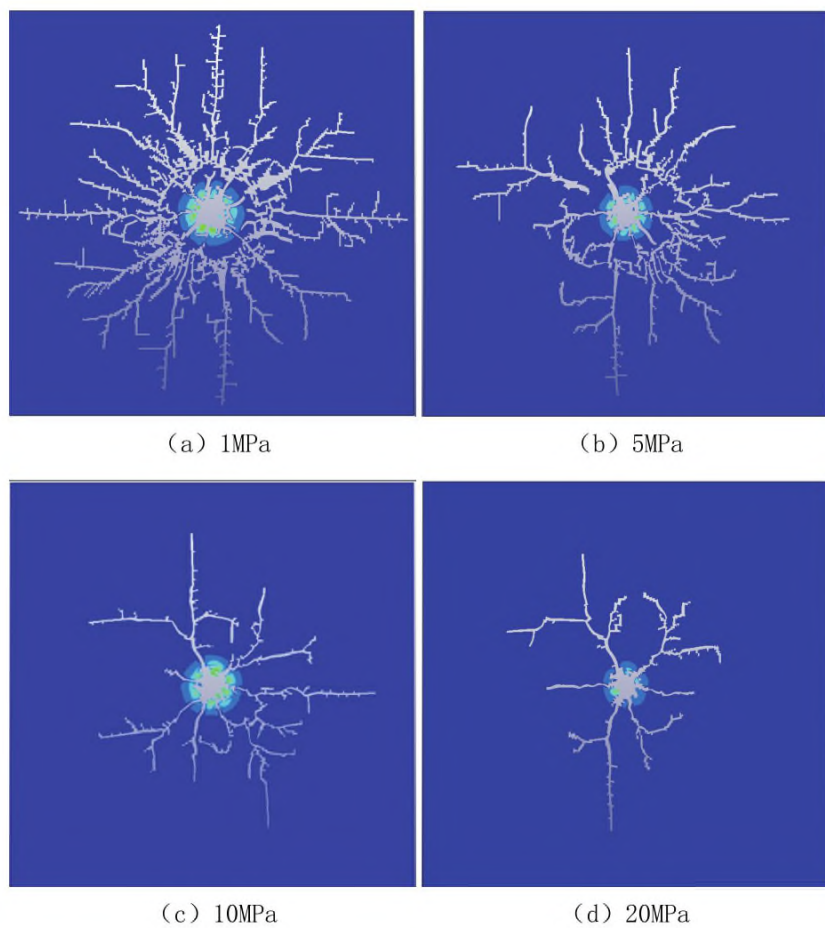


图 12 不同抗拉强度下的裂纹分布

Fig.12 Crack distribution at different tensile strengths

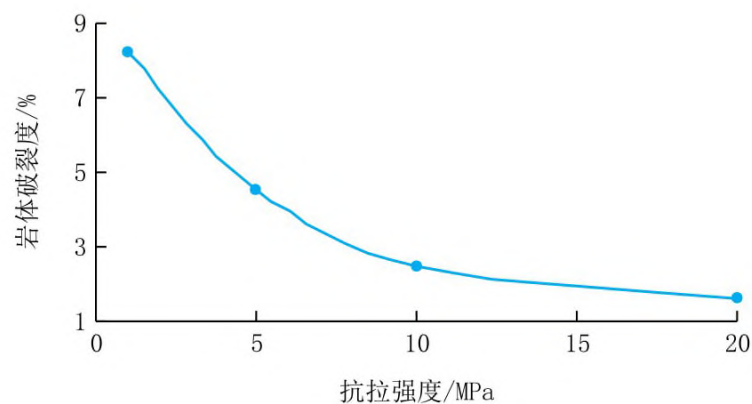


图 13 岩体破裂度随抗拉强度变化曲线

Fig.13 Rock mass fracture degree vs tensile strength

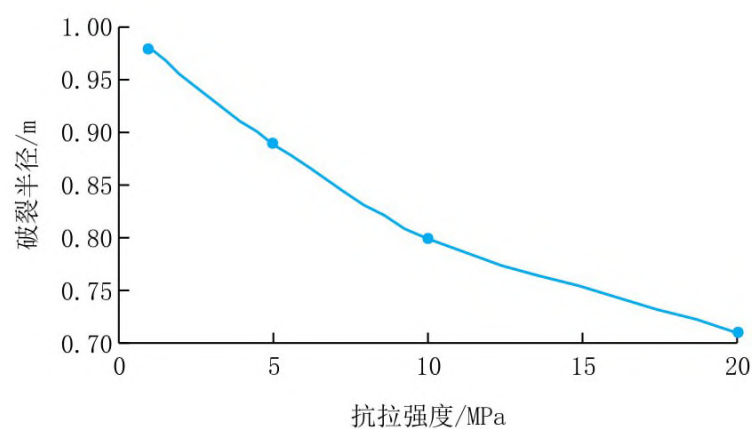


图 14 破裂半径随抗拉强度变化曲线

Fig.14 Fracture radius vs tensile strength

波作用下,当岩体内部所受的拉伸力大于岩石的抗拉强度时,岩体内部才会产生新裂纹。

5 结论

本文通过对电爆冲击波致裂岩体的数值模拟,得到如下结论:

(1)地应力对致裂效果具有强烈抑制作用。在实际应用中,电爆冲击波释放方向应尽量与最大水平主应力方向相近,更易增加裂纹扩展半径,提高岩体破碎度,最大限度地提高储层渗透性。

(2)抗拉强度和弹性模量都是影响电爆冲击波致裂效果的关键因素。抗拉强度对致裂效果具有线性影响,这是由于电爆冲击波致裂岩体就是克服抗拉强度产生的。

(3)电爆冲击波对地应力和抗拉强度较小、弹性模量较大的地层具有更好的致裂效果,因此在以上工况地层中进行作业具有最佳效果。

参考文献 (References):

- [1] 周鹏,杜孝友,曹砚锋,等.电爆冲击波增渗解堵技术试验研究[J].石油钻探技术,2020,48(2):98—103.
ZHOU Peng, DU Xiaoyou, CAO Yanfeng, et al. Experimental research on permeability enhancement and plug removal by means of an electric explosion shock wave[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020,48(2):98—103.
- [2] 隋义勇,张永民,李加强,等.脉冲冲击波有效作用距离影响因素模拟分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(5):118—122.
SUI Yiyong, ZHANG Yongmin, LI Jiaqiang, et al. Numerical simulation study on parameters impacting effective influence distance of pulse shock waves for well stimulation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(5):118—122.
- [3] 周晓亭.重复电脉冲波煤岩致裂增渗效果岩石学分析[D].徐州:中国矿业大学,2016.
ZHOU Xiaoting. Coal petrology analysis of effect for enhancing coal reservoir permeability with repetitive electric pulses wave[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [4] 李恒乐.煤岩电脉冲应力波致裂增渗行为与机理[D].徐州:中国矿业大学,2015.
LI Hengle. Behavior and mechanism of fracturing and enhanced-permeability of coals with electric pulse stress waves [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [5] 鲍先凯,杨东伟,段东明,等.高压电脉冲水力压裂法煤层气增透的试验与数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2017,36(10):2415—2423.
BAO Xiankai, YANG Dongwei, DUAN Dongming, et al. Experiment and numerical simulation of coalbed methane permeability enhancement by high-pressure electric pulse hydraulic fracturing method[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017,36(10):2415—2423.

- [6] 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.
YAN Dong. Foundational research on high voltage pulse discharge detonation fracturing in rock mass under hydrostatic pressure[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [7] 周晓亭,秦勇,李恒乐,等.电脉冲应力波作用下煤体微裂隙形成与发展过程[J].煤炭科学技术,2015,43(2):127-130,143.
ZHOU Xiaoting, QIN Yong, LI Hengle, et al. Formation and development of coal micro-fractures under stress wave induced by electrical impulses[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2):127-130,143.
- [8] 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.
LI Hengle, QIN Yong, ZHANG Yongmin, et al. Experimental study on the effect of strong repetitive pulse shockwave on the pore structure of fat coal [J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(4):915-921.
- [9] 张永民,邱爱慈,周海滨,等.面向化石能源开发的电爆炸冲击波技术研究进展[J].高电压技术,2016,42(4):1009-1017.
ZHANG Yongmin, QIU Aici, ZHOU Haibin, et al. Research progress in electrical explosion shockwave technology for developing fossil energy[J]. High Voltage Engineering, 2016,42(4):1009-1017.
- [10] 赵丽娟.煤岩波动致裂增渗物理模拟[D].徐州:中国矿业大学,2014.
ZHAO Lijuan. Physical simulation of fracturing and permeability enhancement of coals under wave action[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [11] 张红松,胡仁喜,康士廷,等.ANSYS14.5/LS-DYNA 非线性有限元分析实例指导教程[M].北京:机械工业出版社,2013.
ZHANG Hongsong, HU Renxi, KANG Shiting, et al. ANSYS14.5/LS-DYNA nonlinear finite element analysis tutorial[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [12] 涂振飞.ANSYS有限元分析工程应用实例教程[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
TU Zhenfei. ANSYS finite element analysis engineering application tutorial[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [13] 白金泽.LS-DYNA3D理论基础与实例分析[M].北京:科学出版社,2005.
BAI Jinze. LS-DYNA3D theoretical basis and case analysis [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [14] 石少卿,康建功,汪敏,等.ANSYS/LS-DYNA 在爆炸与冲击领域内的工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
SHI Shaoqing, KANG Jiagong, WANG Min, et al. Engineering application of ANSYS/LS-DYNA in explosion and shock field [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [15] 尚晓江,苏建宇,王化锋,等.ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
SHANG Xiaojiang, SU Jianyu, WANG Huafeng, et al. ANSYS/LS-DYNA dynamic analysis method and engineering example[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [16] 赵海鸥.LS-DYNA 动力分析指南[M].北京:兵器工业出版社,2003.
ZHAO Haiou. LS-DYNA dynamic analysis guide[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2003.
- [17] 张凤鹏,彭建宇,张鑫,等.地应力对岩体爆破影响的数值模拟[J].金属矿山,2015(12):15-18.
ZHANG Fengpeng, PENG Jianyu, ZHANG Xin, et al. Numerical simulation of the effect of in-situ stress on rock mass blasting[J]. Metal Mine, 2015(12):15-18.
- [18] 夏祥,李海波,李俊如,等.岩体爆生裂纹的数值模拟[J].岩土力学,2006,27(11):1987-1991.
XIA Xiang, LI Haibo, LI Junru, et al. Numerical simulation of blast-induced cracks in rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006,27(11):1987-1991.
- [19] 白羽.地应力影响下岩石爆破损伤模型及其数值试验[D].沈阳:东北大学,2014.
BAI Yu. Blasting damage model and numerical test of rock under effect of in situ stress[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [20] 王长柏,李海波,谢冰,等.岩体爆破裂纹扩展影响因素分析[J].煤炭科学技术,2010,38(10):31-34,61.
WANG Changbai, LI Haibo, XIE Bing, et al. Analysis on influencing factors of blasting crack expansion[J]. Coal Science and Technology, 2010,38(10):31-34,61.
- [21] 刘艳,许金余.地应力场下岩体爆体的数值模拟[J].岩土力学,2007,28(11):2485-2488.
LIU Yan, XU Jinyu. Numerical simulation of explosion in rock mass under ground stress field[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007,28(11):2485-2488.
- [22] 肖正学,张志呈,李端明.初始应力场对爆破效果的影响[J].煤炭学报,1996(5):497-501.
XIAO Zhengxue, ZHANG Zhicheng, LI Duanming. The influence of initial stress field on blasting[J]. Journal of China Coal Society, 1996(5):497-501.
- [23] 谢源.高应力条件下岩石爆破裂纹扩展规律的模拟研究[J].湖南有色金属,2002,18(4):1-3.
XIE Yuan. The modelling experiment for regularity of blasting crackle spread of rock under high stress conditions[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2002,18(4):1-3.
- [24] 白羽,朱万成,魏晨慧,等.不同地应力条件下双孔爆破的数值模拟[J].岩土力学,2013,34(S1):466-471.
BAI Yu, ZHU Wancheng, WEI Chenhui, et al. Numerical simulation on two-hole blasting under different in-situ stress conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013,34(S1):466-471.
- [25] 戴俊,钱七虎.高地应力条件下的巷道崩落爆破参数[J].爆炸与冲击,2007,27(3):272-277.
DAI Jun, QIAN Qihu. Break blasting parameters for driving a roadway in rock with high residual stress[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(3):272-277.

(编辑 王建华)