

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2024125

引用格式: 丁乾申, 吴春新, 李金泽, 等. 电热化学聚能冲击波致裂储层数值模拟及破岩规律研究 [J]. 石油钻探技术, 2025, 53(1): 67–74.

DING Qianshen, WU Chunxin, LI Jinze, et al. Numerical simulation and rock breaking law of reservoir induced by electrothermal chemical energy-gathered shock wave [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2025, 53(1): 67–74.

电热化学聚能冲击波致裂储层数值模拟及 破岩规律研究

丁乾申¹, 吴春新¹, 李金泽¹, 邹德昊¹, 夏金娜², 何 滨¹

(1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300450; 2. 中海油田服务股份有限公司油田生产事业部, 天津 300450)

摘 要: 为探究电热化学聚能冲击波储层改造技术的破岩规律及机理, 首先, 在明确技术装置演变的基础上, 分析了聚能冲击波在储层中传播破坏的机制; 然后, 利用脆性材料动态破坏 JH-2 数值模型模拟, 在物理模拟试验检验模拟方法的基础上, 开展了聚能冲击波重复冲击破岩试验, 分析了不同聚能冲击波波形对破岩效果的影响规律及机理; 最后, 对不同组合冲击波波形进行了模拟优选。研究表明: 聚能冲击波破坏岩石过程包括近井破碎缓冲阶段、多裂缝竞争性起裂扩展阶段、优势裂缝延伸扩展阶段; 峰值压力 90 MPa、脉宽 15 μ s 的冲击波具有较好的致裂效果; “低峰值压力+小脉宽”冲击和“高峰值压力+大脉宽”冲击组合重复冲击的破岩效果较好, 产生裂缝数量多且裂缝区长度大、破碎区长度小。研究结果在一定程度上明确了电热化学聚能冲击波储层改造技术的破岩机理, 为现场应用提供了理论支撑。

关键词: 冲击波; 数值模型; 重复冲击; 组合冲击波; 裂缝扩展

中图分类号: TE357.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2025)01-0067-08

Numerical Simulation and Rock Breaking Law of Reservoir Induced by Electrothermal Chemical Energy-Gathered Shock Wave

DING Qianshen¹, WU Chunxin¹, LI Jinze¹, ZOU Dehao¹, XIA Jinna², HE Bin¹

(1. Tianjin Branch, CNOOC China Limited, Tianjin, 300450, China; 2. Production Optimization Division, China Oilfield Services Limited, 300450, China)

Abstract: To explore the rock breaking law and mechanism of the reservoir stimulation technology by electrothermal chemical energy-gathered shock wave, a group of work have been done. Firstly, based on a clear understanding of the evolution of technological devices, the mechanism of propagation and damage of energy-gathered shock waves in reservoirs was analyzed. Then, by using the JH-2 numerical model of brittle material with dynamic failure and conducting physical simulation tests to verify the simulation method, the repeated impact rock breaking test of the energy-gathered shock wave was carried out, and the influence law and mechanism of different energy-gathered shock wave waveforms on the rock breaking effect were analyzed. Finally, the waveforms of different combinations of shock waves were simulated and optimized. The results indicate that the process of rock breaking by energy-gathered shock waves includes the near wellbore fragmentation buffering stage, the competitive initiation and expansion stage of multiple fractures, and the extension and expansion stage of dominant fractures. The combination of shock wave parameters with a peak pressure of 90 MPa and a pulse width of 15 μ s has a good fracturing effect. The combinations of low peak pressure with small pulse width and high peak pressure with large pulse width have a better effect on repeated impact rock breaking, which produces a large number of fractures with long lengths and smaller fracture zones. The research results have clarified the rock breaking mechanism of the reservoir stimulation technology by electrothermal chemical energy-gathered shock waves to some extent, providing theoretical support for field applications.

收稿日期: 2023-02-14; 改回日期: 2024-11-08。

作者简介: 丁乾申(1993—), 男, 山东菏泽人, 2017年毕业于中国石油大学胜利学院石油工程专业, 2020年获中国石油大学(华东)石油与天然气工程专业硕士学位, 工程师, 主要从事油气田开发工作。E-mail: upcdqs@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“爆燃压裂中饱和脆性岩石细观损伤机制及其对宏观破坏的控制规律”(编号: 51874339)资助。

Key words: shock wave; numerical model; repeated impact; shock wave combination ; fracture propagation

随着石油资源不断开采,新发现油田中低渗及特低渗油藏占比越来越大^[1]。水力压裂、爆燃压裂、高能气体压裂对常规油藏具有较好的适用性,但面对非常规油藏渗透率低、储层岩石坚硬、压实程度高等复杂情况,常规储层改造技术的效果不佳^[2-3]。基于此,电热化学聚能冲击波技术得到发展,且在油田进行了矿场应用^[4-5]。该技术由常规电脉冲技术发展而来,利用放电装置释放高压电能引发高能材料局部爆炸,进而产生冲击波致裂地层,兼顾爆炸压裂能量高和电脉冲重复冲击的特点。最早,G. A. Vorobiev 等人^[6]发现电极在固液界面处可产生放电通道现象;J. S. Clements 等人^[7]采用试验方法对放电过程进行了动态研究;孙凤举等人^[8]研制了用于提供高压能量的脉冲电源,为电脉冲技术的现场应用提供了良好的物质条件;孙鹞鸿等人^[9]设计了多种快速切换开关,提高了高压电能转化效率;R. R. Buntzen^[10]在两电极板之间夹持金属丝的试验中发现金属丝瞬间接受高压电能可发生爆炸冲击,并探究了产生冲击的机理;T. Tobe^[11]开展了高压电通过不同类型、直径金属丝的爆炸试验,评价了不同金属丝的特性;A. Grinenk 等人^[12]从理论角度出发,建立了高压电引发金属丝爆炸的能量释放数值模型;张云亮等人^[13-14]研发了聚能材料棒,代替金属丝夹持在电极板之间,大幅提高了释放的能量,并将该技术逐步应用于煤层气、油藏储层改造。

电热化学聚能冲击波储层改造技术已进行了先导性试验,通过控制含能材料的药量、管柱的位置、引发次数,可以压开储层,能够满足现场应用,并获得较好的效果,但致裂地层的机理尚不明确。为此,笔者分析了该技术的特点及原理,进行了复杂地层条件下聚能冲击波致裂岩石的模拟研究,进一步明确了破坏规律,优化了技术参数,为该技术在石油开采中的应用提供了理论依据。

1 电热化学聚能冲击波储层改造技术原理

1.1 技术发展及特点

电热化学聚能冲击波储层改造技术由常规电脉冲技术演变而来^[15-16],主要分为3个研究阶段:第一阶段,利用设备将电能压缩、储存并瞬间释放到水介质,液电效应可产生约30 MPa的冲击压力,对井

周进行简单的解堵作业;第二阶段,对升压装置及电容器等设备进行升级,在电极板间连接金属丝,高压电流通过金属丝发生局部爆炸,复合作用的冲击压力可达到100 MPa,可在常规油藏近井区域产生小裂缝;第三阶段,利用含能材料代替金属丝,爆炸起主要作用,在液电效应的辅助下冲击压力高达230 MPa,受地层温度的限制,该装置可对深度2 500 m以内的井进行储层改造^[17-18]。综上所述,该技术产生的能量冲击形式兼容了爆燃压裂、高能气体压裂的高能量体积压裂和电脉冲解堵技术精量可控的特点,同时可弥补实施中由于能量过大、可控性能低导致体积压裂效果达不到预期的不足^[19]。因此,该储层改造技术具有可控、高能和可形成缝网的特点,适用于对低渗透、特低渗储层进行致裂,在储层中形成复杂缝网,提高油气井的产能。

1.2 致裂机理

该技术利用引发聚能棒产生的高能冲击波破坏储层岩石。储层既是传播介质也是破坏的对象,传播过程中因岩石结构不断被破坏而导致冲击波峰值压力不断衰减,套管壁是接触储层的开始,若峰值压力大于岩石抗压强度,破坏表现为局部发生破碎,岩石分解成碎块状,该范围较小且由于岩石破碎而导致渗透率大幅度提高;冲击波继续传播,衰减为压缩波,峰值压力小于岩石的抗压强度但大于抗拉强度,表现为撕裂储层岩石,在破碎区域外产生多条裂缝,裂缝的长度与峰值压力的衰减幅度有关;冲击波进一步衰减为弹性波,峰值压力小于岩石的抗剪强度,此时冲击波能量无法破坏岩石,仅可作用于岩石孔隙内的杂质,一定程度上提高了远井地带地层的渗透率。综上所述,冲击波在岩石传播的过程中,对岩石的破坏主要集中在压碎作用、撕裂作用、震荡作用、累积损伤作用,储层岩石对于破坏作用的表现就是在井周依次形成了压碎区域、裂缝区域和未波及区域。

2 聚能冲击波破岩数值模拟方法

物理模型具有制作繁琐、物性控制难度大,冲击波参数调整困难等问题,为了分析不同冲击波技术参数对岩石的破坏效果,根据低渗、特低渗储层岩石硬度高、不易变形,应变较小和脆性指数较大等特点,从力学角度借鉴脆性材料动态破坏JH-

2 模型。建立模型时, 针对脆性材料拉伸断裂前只发生弹性形变、不发生塑性形变的特点, 用不同方向上的应变来表征, 一般认为应变率小于 5% 是脆性材料, 并采用该方法进行相关数值模拟。

作用在岩石微单元上的应力可分解为平均沉积应力和偏应力, 其中平均沉积应力为:

$$\sigma_h = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad (1)$$

式中: σ_h 为作用在岩石上的平均沉积应力, MPa; σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} 分别为作用在岩石 x , y , z 方向上的应力, MPa。

作用在岩石上的偏应力为:

$$\begin{cases} S_{xx} = \sigma'_{xx} - \sigma_h \delta_{xx} \\ S_{yy} = \sigma'_{yy} - \sigma_h \delta_{yy} \\ S_{zz} = \sigma'_{zz} - \sigma_h \delta_{zz} \\ S_{xy} = \sigma_{xy} - \sigma_h \delta_{xy} \\ S_{yz} = \sigma_{yz} - \sigma_h \delta_{yz} \\ S_{zx} = \sigma_{zx} - \sigma_h \delta_{zx} \end{cases} \quad (2)$$

式中: S_{xx} , S_{yy} , S_{zz} 分别为 x , y , z 方向的偏应力, MPa; σ'_{xx} , σ'_{yy} , σ'_{zz} 分别为 x , y , z 方向的 Cauchy 应力, MPa; δ_{xx} , δ_{yy} , δ_{zz} 分别为 x , y , z 方向的克罗内克函数; S_{xy} , S_{yz} , S_{zx} 分别为 xy , yz , zx 方向的合偏应力, MPa; σ_{xy} , σ_{yz} , σ_{zx} 分别为 xy , yz , zx 方向的 Cauchy 应力, MPa; δ_{xy} , δ_{yz} , δ_{zx} 分别为 xy , yz , zx 方向的克罗内克函数。

进而, Mises 等效应力的计算式为:

$$\sigma_m = \sqrt{3} \sqrt{\frac{1}{2}(S_{xx}^2 + S_{yy}^2 + S_{zz}^2) + S_{xy}^2 + S_{yz}^2 + S_{zx}^2} \quad (3)$$

式中, σ_m 为作用在岩石上的 Mises 等效应力, MPa。

同时, 有效应变率的计算式为:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{zz}^2 + 2(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)}} \quad (4)$$

式中: ε 为有效应变率, s^{-1} ; ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{zz} 分别为 x , y , z 方向的有效应变率, s^{-1} ; ε_{xy} 为 x 方向分应力在 y 方向的有效应变率, s^{-1} ; ε_{yz} 为 y 方向分应力在 z 方向的有效应变率, s^{-1} ; ε_{zx} 为 z 方向分应力在 x 方向的有效应变率, s^{-1} 。

那么, 标准化应变率为:

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

式中: ε^* 为标准化应变率; ε_0 为参考应变率, s^{-1} 。

JH-2 模型中, yield 函数表示为:

$$F = \sigma_m - \sigma_{hl} \sigma^* \quad (6)$$

式中: F 为 yield 压力差, MPa; σ_{hl} 为弹性极限时的压

力, MPa; σ^* 为标准归一化岩石强度。

一定时间间隔内的标准归一化岩石强度可表示为:

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (7)$$

$$\sigma_i^* = A(p+T)^N(1+C \ln \varepsilon^*) \quad (8)$$

$$\sigma_f^* = BP^M(1+C \ln \varepsilon^*) \quad (9)$$

式中: σ_i^* 为 t 时刻标准归一化强度; σ_f^* 为 $t+\Delta t$ 时刻的标准归一化强度; D 为损伤因子; A , N , C , B 和 M 为系数, 由材料的属性决定; T 为材料的抗拉强度, MPa; p 为某时刻施加的压力, MPa。

塑性应变增量为:

$$\Delta \varepsilon_p = \lambda \Delta t \quad (10)$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 为压力为 p 时的塑性应变增量; λ 为材料的塑性指数; Δt 为时间步的单位增量, s。

岩石在一定压力下可发生的塑性应变为:

$$\varepsilon_p^f = D_1(p+T)^{D_2} \quad (11)$$

式中: ε_p^f 为岩石在一定压力下可发生的塑性应变; D_1 为 I 型强度因子; D_2 为 II 型强度因子。

岩石压缩系数为:

$$\mu = \frac{\rho_1}{\rho_0} - 1 = \frac{V_0}{V_1} - 1 = \frac{V_1 - V_0}{V_1} \quad (12)$$

式中: μ 为岩石压缩变系数; ρ_0 为材料初始密度, kg/m^3 ; ρ_1 为材料受力 t 时间后的密度, kg/m^3 ; V_0 为岩石初始体积, m^3 ; V_1 为材料受力 t 时间后的体积, m^3 。

JH-2 模型中的岩石状态方程为:

$$p_i = (1 + K_1 \mu + K_2 \mu^2 + K_3 \mu^3) \Delta p_i \quad (13)$$

式中: p_i 为岩石所承受的压力, MPa; K_1 , K_2 和 K_3 为系数; Δp_i 为施加在岩石上的压力变化量, MPa。

3 聚能冲击波储层模拟及破岩机理分析

给 JH-2 数学模型编制子程序, 将其嵌入 ABAQUS 数值模拟软件进行相关的冲击破坏模拟, 实现岩样尺寸、物性、冲击参数等的数值模拟, 并根据模拟结果对参数进行优化。

3.1 试验验证

为了验证数学模型的准确性, 选取花岗岩经钻取、切割、磨削、钻孔等处理后, 获得试验岩样, 利用冲击损伤模拟试验装置进行冲击模拟。花岗岩岩样直径 8.00 cm, 长度 4.50 cm, 渗透率 1.12 mD, 孔隙度 5.58%, 抗压强度 52.45 MPa。

试验结果表明, 花岗岩岩样冲击 1 次后形成了

一条对称的贯穿裂缝,试验结果与模拟结果一致,验证了数值模拟的合理性。为此,利用该数学模型进行多次冲击模拟,进一步探究聚能冲击波破岩的机理、影响规律,并优化冲击参数。

3.2 聚能冲击波重复冲击破岩过程分析

模拟聚能冲击波破坏岩石的效果,首先设定地层压力为 20 MPa,岩石的密度为 2.50 g/cm^3 ,泊松比为 0.22,黏聚力为 9.0 MPa,抗拉强度为 3.11 MPa,抗压强度为 29.50 MPa,塑性系数为 0.98,摩擦因数为 0.77,对模拟岩石累积冲击 7 次。前期仅在井眼周围产生损伤破坏,然后在井周破碎带外出现簇状裂缝型损伤;随着冲击次数增多,裂缝进一步延伸,最终整体上形成 6 条裂缝,其中 2 条延伸至岩石边缘,破岩过程总体可分为近井破碎缓冲阶段、多裂缝竞争性起裂扩展阶段和优势裂缝延伸扩展阶段等 3 个阶段。

3.2.1 近井破碎缓冲阶段

近井破碎缓冲阶段发生在冲击初期,一般在冲击 1~3 次时。原始完整状态下的岩石仅存在一些天然的微裂缝及孔隙,处于一种比较完整、坚固的状态,冲击之初完整状态下的岩石受到冲击,冲击产生的冲击波会在井眼周围急速消耗,如果冲击波峰值压力大于岩石的抗压强度,冲击波在岩石内部的 Mises 应力主要分布在井眼附近(见图 1(a)),此时井眼周围在应力作用下会产生破碎而消耗能量,剩余的冲击波沿径向向外传播,其冲击波峰值压力较小,已无法对岩石造成实质性的破坏。因为井周存在 Mises 应力,高应力对岩石内部颗粒造成的推动力就会表现为内部的位移,位移只发生在井眼附近,其波及范围略大于应力分布范围,应力导致颗粒发生位移的范围界限外,颗粒会在力的作用下发生惯性位移,进而向外扩展(见图 1(b))。

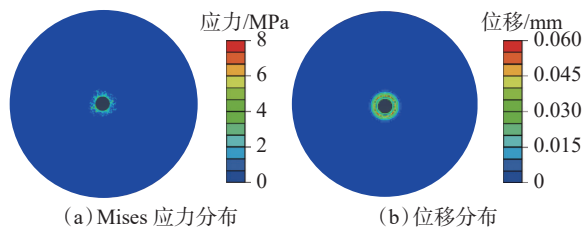


图 1 近井破碎缓冲阶段 Mises 应力及位移的分布

Fig.1 Mises stress and displacement distribution during near wellbore fragmentation buffering stage

该阶段本质上就是对完整的岩石产生初始的破坏,由于岩石的完整性导致冲击波的绝大部分能量消耗于井眼附近,表现为岩石发生局部破碎,进而

为之后的裂缝起裂提供了条件。

3.2.2 多裂缝竞争性起裂扩展阶段

多裂缝竞争性起裂扩展阶段是在近井破碎缓冲阶段基础之上发生的破坏阶段,此时冲击了 3~4 次,模拟井眼周围已经破碎,再进行冲击,冲击波的能量对近井地带的破碎效果就会削弱,冲击波峰值压力沿传播方向的衰减将会减小,一方面由于岩石自身内部具有弱胶结面或者微裂缝集中部位,此区域的岩石受到冲击波压力的作用出现起裂现象,但由于岩石内部存在多个薄弱面,每个薄弱面起裂成为裂缝都需要能量,在此过程中冲击波的能量消耗在裂缝的起裂,每条裂缝基本上都没有得到延伸扩展。该阶段岩石内部 Mises 应力的分布区域也将扩大, Mises 应力出现阴影部位,由于裂缝已经起裂,导致裂缝内没有充填固体, Mises 应力无法分布在内部, Mises 应力主要集中分布在井周附近,但随着径向距离增大,分布区域不再扩大,也验证了冲击波能量主要消耗在多条裂缝的起裂(见图 2(a))。岩石内部的位移在破碎区域也急剧减小,井眼附近破碎带位移的变化较小,主要突出 4 个位移尖端,代表着岩石内部的位移主要发生在裂缝起裂的周围(见图 2(b))。多裂缝竞争性起裂扩展阶段 Mises 应力及位移的分布更加说明,在此阶段冲击波的能量主要消耗在多条裂缝的起裂。

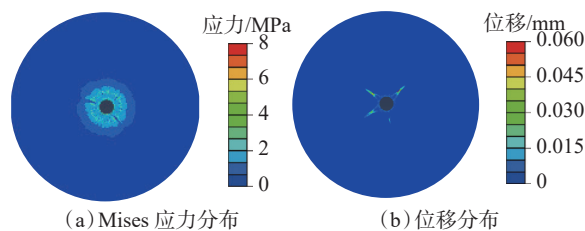


图 2 多裂缝竞争性起裂扩展阶段 Mises 应力及位移的分布

Fig.2 Mises stress and displacement distribution during competitive initiation and propagation stage of multiple fractures

3.2.3 优势裂缝延伸扩展阶段

优势裂缝延伸扩展阶段是在近井破碎缓冲阶段和多裂缝竞争性起裂扩展阶段基础之上的破坏阶段,此时冲击 5 次以上,模拟井眼周围已经破碎且多条裂缝已经起裂,持续冲击导致破碎范围变大,因为已经有多条裂缝起裂,裂缝延伸需要的能量比重新起裂新裂缝要小,冲击波的能量传递到此区域优先作用于裂缝,但裂缝与裂缝之间的缝尖劈裂延伸不同,岩石的各向异性和非均质性导致裂缝的延伸

长度和延伸速率不同,在此过程中会出现优势裂缝,此类裂缝在延伸方向上存在较多的弱胶结处,裂缝延伸过程中会不断贯穿弱胶结面,冲击波的能量多消耗在弱胶结面,在冲击波压力能量总量一定的情况下,能量消耗在弱胶结面,导致岩石出现较长和较宽的裂缝。该阶段岩石内部 Mises 应力的分布范围也更广(见图 3(a)),但冲击波峰值压力随径向距离增大而增大,具有在裂缝处不分布的特征。岩石内部的位移在裂缝处表现明显(见图 3(b)),在井周附近的岩石基本不发生位移,这与冲击波压力作用于岩石产生裂缝的位置有直接关系。

3.2.4 冲击波分阶段作用距离

利用拟合后的参数建立裸眼井数值模拟模型,岩石密度为 2.50 g/cm³,泊松比为 0.22,黏聚力为 9 MPa,抗拉强度为 3.11 MPa,抗压强度为 29.50 MPa,塑性系数为 0.98,摩擦因数为 0.77,其他参数以按照

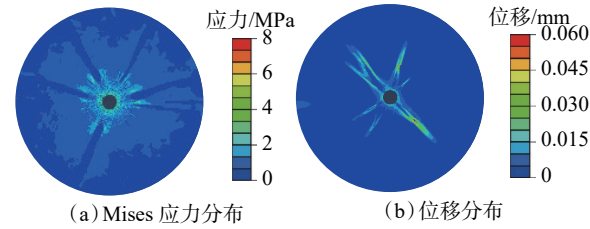


图 3 优势裂缝延伸扩展阶段 Mises 应力及位移分布
Fig.3 Mises stress and displacement distribution during extension and expansion stage of dominant fractures

数值拟合确定的模型参数为依据设定。利用控制单一变量的赋值方法模拟岩石的破坏效果,通过改变冲击次数、脉宽、峰值压力、弹性模量、泊松比和地层压力,得到其破坏效果(见表 1)。

从表 1 可以看出,冲击波在近井破碎缓冲阶段作用的距离为 0.10~0.22 m,裂缝的竞争起裂及优势裂缝延伸阶段的裂隙区长度为 0~1.95 m,产生的

表 1 不同冲击条件下的冲击波作用效果
Table 1 Effect of shock wave under different conditions

冲击次数	脉宽/ μ s	峰值压力/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	地层压力/MPa	破碎区长度/m	裂缝条数	裂隙区长度/m
1	30	130	30	0.22	30	0.10	0	0
2	30	130	30	0.22	30	0.15	1	0
4	30	130	30	0.22	30	0.18	2	1.15
6	30	130	30	0.22	30	0.21	4	1.62
6	10	130	30	0.22	30	0.13	5	1.62
6	30	130	30	0.22	30	0.14	4	1.68
6	50	130	30	0.22	30	0.15	4	1.74
6	70	130	30	0.22	30	0.14	3	1.82
6	30	100	30	0.22	30	0.15	4	1.52
6	30	130	30	0.22	30	0.16	5	1.71
6	30	150	30	0.22	30	0.19	5	1.82
6	30	170	30	0.22	30	0.20	5	1.95
6	30	130	10	0.22	30	0.16	3	1.42
6	30	130	30	0.22	30	0.15	4	1.56
6	30	130	50	0.22	30	0.15	4	1.75
6	30	130	70	0.22	30	0.14	5	1.87
6	30	130	30	0.12	30	0.16	5	1.68
6	30	130	30	0.22	30	0.17	5	1.62
6	30	130	30	0.32	30	0.16	5	1.60
6	30	130	30	0.42	30	0.15	4	1.56
6	30	130	30	0.22	10	0.12	5	1.84
6	30	130	30	0.22	20	0.18	4	1.62
6	30	130	30	0.22	30	0.21	4	1.42
6	30	130	30	0.22	40	0.22	3	1.32

裂缝为0~5条,可根据地层条件优选冲击次数和聚能材料组合,实现多裂缝、长裂缝的致裂效果,达到储层改造的目的。

3.3 聚能冲击波波形对破岩效果影响规律分析

电热化学聚能冲击波储层改造技术利用高压电引发聚能棒爆炸,进一步产生聚能冲击波作用于

储层岩石,破坏在聚能冲击波传播中发生,破坏的能量来源于聚能冲击波,因此冲击波的波形(峰值压力和脉宽)对岩石的破坏效果具有重要影响。

为了探究峰值压力对破岩效果的影响规律,设脉宽为15 μs ,峰值压力分别为30, 100和130 MPa, Mises 应力分布模拟结果如图4所示。

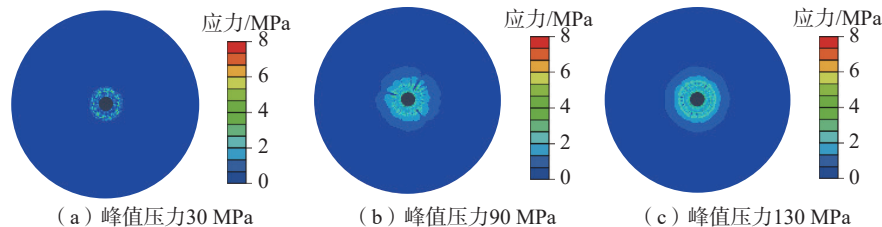


图4 脉宽15 μs 时不同峰值压力下 Mises 应力分布模拟结果

Fig.4 Simulated Mises stress distribution under different peak pressures with a pulse width of 15 μs

脉宽不变,意味着冲击能量的施加速率不变。模拟低峰值压力(30 MPa)下的冲击发现, Mises 应力主要分布在井眼周围(见图4(a)),在较小的范围内存在且呈现花斑状,分布颜色较浅代表应力集中现象不明显,根据应力与裂缝产生的对应关系可知,在低峰值压力冲击下岩石没有被破碎或无裂缝起裂,只是井眼附近造成微观上的损伤,该损伤仅使岩石渗透率略提高,但无法沟通天然裂缝来增加单井产量。模拟高峰值压力(130 MPa)下的冲击发现, Mises 应力主要集中分布(见图4(c)),虽然在井眼附近的分布范围较大,但应力分布均连续,没有产生裂缝,分布颜色较深代表分布应力较大,宏观上表现为岩石被破碎并在一定程度上压实,这是由于较高的冲击能量瞬间作用于岩石,根本无法做到

瞬时的传播,较高的冲击能量集中作用使岩石破碎压实,这种破坏效果虽比低峰值压力的作用效果好,但致裂效果并不明显,且在一定条件下,较高峰值压力的冲击有可能对套管造成破坏或造成井壁的坍塌。模拟中峰值压力90 MPa下的冲击发现,其 Mises 应力分布范围较大,同时出现了多条的条状阴影(见图4(b)),代表着岩石受到了冲击后产生了多条裂缝,且长度较为可观,应力分布颜色深度居中代表岩石只是发生了简单破碎而没有受到压实,更有利于提高储层的渗透率及连通能力。

在探究同一脉宽、不同峰值压力条件下 Mises 应力分布情况的基础上,为分析脉宽对破坏效果的影响规律,设定峰值压力为90 MPa,脉宽分别为3, 15和30 μs , Mises 应力分布模拟结果如图5所示。

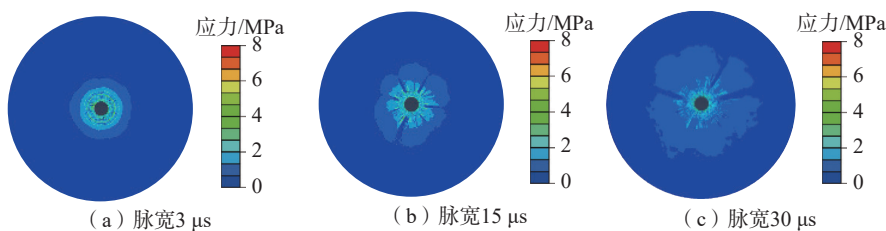


图5 峰值压力90 MPa 时不同脉宽下 Mises 应力分布模拟结果

Fig.5 Simulated Mises stress distribution under different pulse widths with a peak pressure of 90 MPa

峰值压力不变,意味着冲击能量大小不变。小脉宽(3 μs)的冲击模拟结果表明, Mises 应力的分布范围相对较大,但在井周区域集中存在(见图5(a)),小脉宽意味着冲击能量的释放速率极小,在某一位位置极短的时间内释放能量,冲击能量无法立即传递,导致主要作用于井眼附近,该脉宽冲击会造成

岩石破碎压实,不利于储层渗透率及流通能力的提高。大脉宽(30 μs)冲击模拟结果表明,应力分布范围大且出现应力条形缺少的现象(见图5(c)),该脉宽下岩石可以产生裂缝且破碎程度较小,不存在压实现象,但产生裂缝的数量较少,裂缝相对较长。这是由于大脉宽下冲击波有足够的传播时间,促进

起裂的裂缝进一步扩展,但这种起裂形式会导致裂缝数量减少。中脉宽(15 μs)冲击模拟结果表明,Mises 应力分布范围较大,同时出现了多条的条状阴影(见图 5(b)),代表着岩石受到了冲击后产生多条裂缝且长度较为可观,应力分布颜色深度居中代表岩石只是发生了简单破碎而没有受到压实,该脉宽冲击波的能量传播适中,能量释放时可以导致多条裂缝起裂,后续的冲击能量虽不能将裂缝扩展至较远的距离,但是该距离已满足储层改造的需要,有利于提高储层的连通能力。

综上所述,聚能冲击波波形对岩石破坏的规律是:低峰值压力压不开,高峰值压力破碎压实;小脉宽冲击波破碎压实,大脉宽冲击波裂缝数量少。因此,中峰值压力和中脉宽的冲击波组合最有利,最

优的施工参数为峰值压力 90 MPa、脉宽 15 μs 。

3.4 组合聚能冲击波破岩过程分析

基于上述研究分析,进一步探究组合冲击的破坏效果,为此设计 4 种波形:(A)低峰值压力+大脉宽,(B)低峰值压力+小脉宽,(C)高峰值压力+大脉宽,(D)高峰值压力+小脉宽。对 4 种波形进行组合,组合方式为 AC、AD、BC、BD,利用之前的数值模拟方法模拟冲击 6 次,组合内的 2 个波形各冲击 3 次,最终的冲击效果如图 6 所示。

1)AC 组合。分析认为,低峰值压力+大脉宽的冲击无法致裂地层,仅在井周产生少许微裂缝,之后进行的高峰值压力+大脉宽的冲击主要是对第一阶段的微裂缝进一步扩展,能量主要消耗在裂缝的延伸扩展,基本不会有新的裂缝起裂。

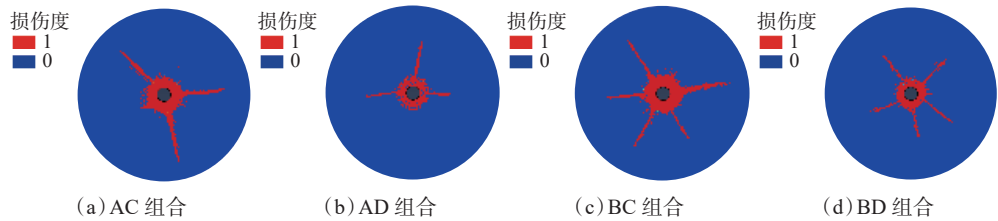


图 6 不同波形组合冲击损伤效果

Fig.6 Impact damage effect of different waveform combinations

2)AD 组合。该组合形式与 AC 组合不同之处在于第二阶段采用高峰值压力+小脉宽的形式,由于脉宽较小,大部分能量无法瞬间传递,导致第二阶段主要是破碎作用,对已起裂的裂缝只是进行扩展,其效果不如 AC 组合的冲击效果。

3)BC 组合。首先进行的低峰值压力+小脉宽冲击无法致裂地层,这种形式相当于不断敲击损伤,在井周可以产生较多的微裂缝,之后的高峰值压力+大脉宽的冲击主要是对第一阶段的微裂缝进一步扩展,冲击能量主要消耗在裂缝的延伸扩展,其破坏效果最佳。

4)BD 组合。该组合的第二阶段采用高峰值压力+小脉宽的形式,由于脉宽较小,大部分能量无法瞬间传递,导致第二阶段主要是破碎作用;但是由于第一阶段产生了较多的微裂缝,在部分能量的作用下仍然可以进行有限的扩展,裂缝数量与 BC 组合效果相当,但是裂缝的长度比其要小,破碎区域略大,其破坏效果略逊 BC 组合。

4 种组合冲击后破碎区的长度、裂缝数量和裂缝长度见表 2。从表 2 可以看出,整体上看组合冲击形式比单一波形冲击的效果要好,且 BC 组合的

破裂效果最好,产生的裂缝数量最多,且裂隙区长、破碎区短。

表 2 不同冲击波波形组合下岩石的破坏情况

Table 2 Rock failure under different combinations of shock wave waveforms

波形组合	破碎区长度/m	裂缝数量/条	裂隙区长度/m
AC	0.17	3	1.98
AD	0.22	3	1.62
BC	0.14	5	2.11
BD	0.21	5	1.56

4 结论与建议

1)采用 JH-2 模型嵌入 ABAQUS 软件的方法模拟电热化学聚能冲击波破坏岩石的过程,实现了物理模型和数值模型的相互验证,并根据不同冲击次数下岩石破坏形态的模拟结果,将破坏岩石的过程划分为近井破碎缓冲阶段、多裂缝竞争性起裂扩展阶段和优势裂缝延伸扩展阶段。

2)数值模拟结果表明,聚能冲击波破坏岩石时,存在低峰值压力压不开、高峰值压力破碎压实、

小脉宽冲击波破碎压实和大脉宽冲击波裂缝数量少的特征,中峰值压力和中脉宽冲击波组合的破裂效果最优;根据储层物性进一步优化筛选冲击波组合,得到“低峰值压力+小脉宽”和“高峰值压力+大脉宽”两者组合的效果最好。

3)电热化学聚能冲击仅适用于低渗储层、碳酸盐岩等脆性岩石储层,不适用于疏松砂岩储层的改造,且未开展不同类型储层岩石适用波形组合的研究,建议在工程应用前分析储层岩性,获取测试资料,并开展实验室打靶试验。

参 考 文 献

References

- [1] 徐鲲,陶林,李文龙,等.渤海油田变质岩潜山油藏钻井关键技术[J].石油钻探技术,2023,51(3):16-21.
XU Kun, TAO Lin, LI Wenlong, et al. Key drilling technologies for metamorphic buried hill reservoirs in Bohai Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(3): 16-21.
- [2] 达引朋,李建辉,王飞,等.长庆油田特低渗透油藏中高含水井调堵压裂技术[J].石油钻探技术,2022,50(3):74-79.
DA Yinpeng, LI Jianhui, WANG Fei, et al. Fracturing technologies with profile control and water shutoff for medium and high water-cut wells in ultra-low permeability reservoirs of Changqing Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(3): 74-79.
- [3] 孙林,黄波,张杰,等.过筛管爆燃压裂技术[J].特种油气藏,2021,28(3):162-167.
SUN Lin, HUANG Bo, ZHANG Jie, et al. Study on screen-through deflagration fracturing technology[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(3): 162-167.
- [4] 刘伟吉,张有建,祝效华,等.影响高压电脉冲破岩效率的关键因素分析[J].天然气工业,2023,43(10):112-124.
LIU Weiji, ZHANG Youjian, ZHU Xiaohua, et al. Key factors influencing rock breaking efficiency of high voltage electric pulse[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(10): 112-124.
- [5] 刘红磊,周林波,陈作,等.中国石化页岩气电动压裂技术现状及发展建议[J].石油钻探技术,2023,51(1):62-68.
LIU Honglei, ZHOU Linbo, CHEN Zuo, et al. The up-to-date electric shale gas fracturing technologies of Sinopec and suggestions for further improvements[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(1): 62-68.
- [6] VOROB'EV G A, EKHANIN S G, NESMELOV N S. Electrical breakdown in solid dielectrics[J]. Physics of the Solid State, 2005, 47(6): 1083-1087.
- [7] CLEMENTS J S, SATO M, DAVIS R H. Preliminary investigation of prebreakdown phenomena and chemical reactions using a pulsed high-voltage discharge in water[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1987, 1A-23(2): 224-235.
- [8] 孙凤举,曾正中,邱毓昌,等.一种用于油水井解堵的脉冲大电流源[J].高电压技术,1999,25(2):47-49.
SUN Fengju, ZENG Zhengzhong, QIU Yuchang, et al. Pulse high current power supply used for dredging oil & water wells[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(2): 47-49.
- [9] 孙鹤鸿,孙广生,严萍,等.大功率电脉冲采油技术原理与应用[J].钻采工艺,2002,25(5):53-55.
SUN Yaohong, SUN Guangsheng, YAN Ping, et al. High-power electrical impulse oil recovery technology and its application[J]. Drilling & Production Technology, 2002, 25(5): 53-55.
- [10] BUNTZEN R R. The use of exploding wires in the study of small-scale underwater explosions[C]//Exploding Wires. Boston: Springer, 2001: 195-205.
- [11] TOBE T, KATO M, OBARA H. Metal forming by underwater wire explosions: 2. experiments on bulging of circular aluminum sheets by copper wire explosions[J]. Bulletin of JSME, 1984, 27(223): 130-135.
- [12] GRINENKO A, GUROVICH V T, SAYPIN A, et al. Strongly coupled copper plasma generated by underwater electrical wire explosion[J]. Physical Review E, 2005, 72(6): 066401.
- [13] 张云亮,孙鹤鸿,王永荣.大功率电火花震源在VSP测井中的应用[J].石油仪器,2006,20(1):27-28.
ZHANG Yunliang, SUN Yaohong, WANG Yongrong. High-power sparker used in VSP logging[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2006, 20(1): 27-28.
- [14] 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.
- [15] 李昂,杨万有,丁乾申,等.复合电热化学聚能冲击波储层强化改造试验与评价[J].石油钻探技术,2020,48(1):72-79.
LI Ang, YANG Wanyou, DING Qianshen, et al. Testing and evaluation of reinforced reservoir stimulations using composite electro-thermal-chemical shock waves[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(1): 72-79.
- [16] 张衍君,王鲁瑀,刘娅菲,等.页岩油储层压裂-提采一体化研究进展与面临的挑战[J].石油钻探技术,2024,52(1):84-95.
ZHANG Yanjun, WANG Luyu, LIU Yafei, et al. Advances and challenges of integration of fracturing and enhanced oil recovery in shale oil reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(1): 84-95.
- [17] 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.
- [18] 李沼沅,闫铁,侯兆凯,等.液相高压脉冲放电致裂岩石技术研究进展[J].特种油气藏,2021,28(4):1-9.
LI Zhaoxuan, YAN Tie, HOU Zhaokai, et al. Study progress of rock fracturing technology with high-voltage pulse discharge in liquid[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(4): 1-9.
- [19] 王先荣,袁艳勤,钟声.低渗透油藏冲击波解堵的应用效果与影响因素分析[J].特种油气藏,2005,12(4):68-69.
WANG Xianrong, YUAN Yanqin, ZHONG Sheng. Effectiveness and influence factors of deplugging by shock wave in low permeability reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2005, 12(4): 68-69.