

电爆冲击波增渗解堵技术试验研究

周 鹏^{1,2}, 杜孝友^{3,4}, 曹砚锋^{3,4}, 于继飞^{3,4}, 江海畏^{1,2}, 薛启龙^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部深部钻探重点实验室, 北京 100083; 3. 海洋石油高效开发国家重点实验室, 北京 100028; 4. 中海油研究总院, 北京 100028)

摘要: 常规油水井解堵技术存在工艺复杂、成本高和环境污染严重等问题, 电爆冲击波增渗解堵技术因具有解堵增渗效果好、能量可控和环保等优势而成为研究热点。在分析电爆冲击波增渗解堵机理的基础上, 研制了电爆冲击波试验装置, 进行了电容、充电电压及金属丝直径对电爆冲击波压力峰值的影响试验, 并进行了模拟地层压力环境下的电爆冲击波造缝及解堵效果评价试验。结果表明, 冲击波压力峰值随着充电电压增大呈线性增大, 金属丝直径对冲击波压力峰值影响不大, 存在一个使冲击波压力峰值最大的最优电容, 验证了电爆冲击波可以扩展储层岩石的裂缝并产生新的微裂缝, 而且能达到增渗解堵的效果。研究结果为推动电爆冲击波增渗解堵技术研究及现场试验奠定了基础。

关键词: 电爆冲击波; 压力峰值; 增渗; 解堵; 渗透率; 岩心试验

中图分类号: TE358 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2020)02-0098-06

Experimental Research on Permeability Enhancement and Plug Removal by Means of an Electric Explosion Shock Wave

ZHOU Peng^{1,2}, DU Xiaoyou^{3,4}, CAO Yanfeng^{3,4}, YU Jifei^{3,4}, JIANG Haiwei^{1,2}, XUE Qilong^{1,2}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing, 100083, China; 2. Key Laboratory of Deep Geodrilling Technology, Ministry of Land and Resources, Beijing, 100083, China; 3. State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Beijing, 100028, China; 4. CNOOC Research Institute, Beijing, 100028, China)

Abstract: Using an electric explosion shock wave to enhance permeability and remove plugging have become a hot topic because of the possibility for better control and also better environmental protection. Conventional plugging removal techniques for oil and water wells present problems that include complicated processes, high cost and serious environmental pollution. For that reason, permeability enhancement and plugging removal techniques from electric explosion shock wave have become a research hot spot for the advantages of good plugging removal and permeability enhancement effect, controllable energy, environmental protection, etc. By analyzing the mechanism of permeability enhancement and plugging removal from electric explosion shock wave, an experimental device for the influence factors evaluation was developed. The effects of capacitance, charging voltage and wire diameter on the peak pressure of electric explosion shock wave were tested, and the electric explosion shock wave fracture-generating and plugging removal were evaluated under the simulated in-situ conditions of the reservoir. The experimental results show that the shock wave peak pressure increases linearly with charging voltage, and wire diameter has little effect on the shock wave peak pressure. There is an optimal capacitance that maximizes the shock wave peak pressure, which verifies that the electric explosion shock wave can trigger fracture propagation in reservoir and generate new microcracks, hence enhancing permeability enhancement and facilitating plugging removal. The research results provide a baseline for promoting the research and field test permeability enhancement and plugging removal from electric explosion shock wave.

Key words: electric explosion shock wave; peak pressure; permeability enhancement; plug removal; permeability; core test

随着生产时间增长, 油水井近井筒附近渗流通道会出现堵塞, 对注水井而言, 注水压力会逐年升高, 常规酸化解堵频次增加, 且注水效果越来越差, 作业成本逐年增加; 对油井而言, 井底流压升高, 油井产量降低。物理解堵、化学解堵和生物解堵等常规解堵方法虽具有一定解堵效果^[1-7], 但均存在一定不足: 多数物理解堵方法施工工艺复杂;

收稿日期: 2019-12-23; 改回日期: 2020-02-04。

作者简介: 周鹏(1990—), 男, 江苏苏州人, 2018年获中国地质大学(北京)地质工程专业硕士学位, 主要从事电爆冲击波解堵设备的研发工作。E-mail: zhoupeng@163.com。

通信作者: 薛启龙, E-mail: xql@cugb.edu.cn。

基金项目: 海洋石油高效开发国家重点实验室开放基金课题“电爆冲击波解堵技术适应性研究”及国家科技重大专项课题“海上稠油油田高效开发钻采技术”(2016ZX05025-002)联合资助。

化学解堵方法成本高, 有效期短, 易对油井造成二次伤害, 环境污染问题严重; 生物解堵方法对环境要求很高, 技术不够成熟。为此, 国内外开展了一系列增渗解堵新技术研究, 其中, 井下电爆冲击波解堵技术是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, 对地层及孔隙内各种介质产生较强的冲击振动, 从而解除堵塞, 并产生微裂缝, 达到解堵、增注的目的, 具有广阔的应用前景^[8]。

笔者在分析电爆冲击波增渗解堵机理的基础

上, 开展了电爆冲击波压力峰值影响因素的分析试验、冲击波造缝以及解堵效果评价的室内试验, 验证了井下电爆冲击波增渗解堵技术的可行性, 为该技术的快速发展及现场试验奠定了基础。

1 电爆冲击波增渗解堵技术原理

1.1 电爆冲击波作用机制

电爆冲击波增渗解堵技术原理如图 1 所示, 主要包括造缝和解堵 2 个方面。

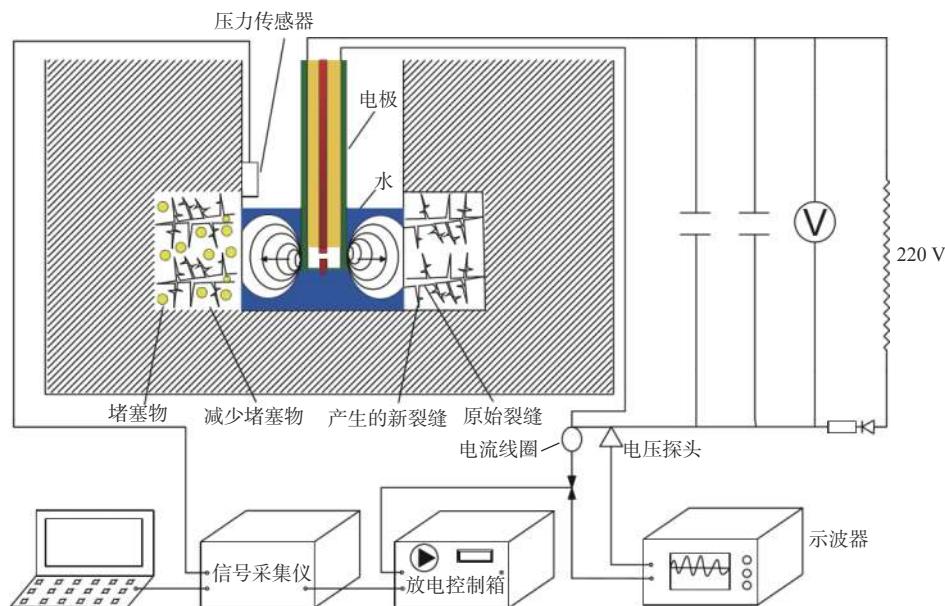


图 1 井下电爆冲击波解堵技术基本原理及试验装置

Fig.1 Basic principle of permeability enhancement and plugging removal technology from downhole electric explosion shock wave

1) 冲击波造缝作用。与静态力作用相比, 岩石在冲击力作用下的断裂疲劳强度要小得多, 冲击波使地层岩石受到拉伸及剪切应力, 导致地层原始裂纹扩展并产生新的微裂缝, 从而扩展原油渗流通道, 提高油井产量。

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汲作用, 有助于将孔隙杂质排除, 起到解堵作用^[9]。

1.2 电爆冲击波产生机理

电爆冲击波产生机理类似于经典的“液电效应”原理, 当储能电容充满电后, 放电电路如图 2 所示。其中, 电容储存能量可以通过电容和电压(通常可以达

到 20 kV 以上)求得:

$$W = 0.5CU_c^2 \quad (1)$$

式中: W 为电容储存能量, J; C 为电容器的电容, μF ; U_c 为电容电压, V。

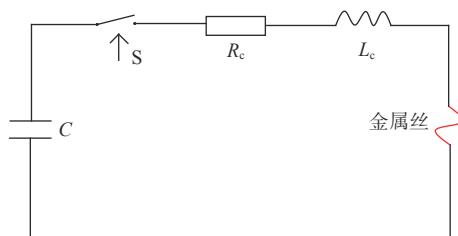


图 2 电爆冲击波金属丝放电电路

Fig.2 Electric explosion shock wave metal wire discharge circuit

放电电路的放电端采用金属丝引弧的方式, 可以提高能量利用效率, 放电开关 S 闭合的瞬间高电

压作用于金属丝, 金属丝瞬间通过极大电流, 相当于电容储存的能量瞬间转移到放电端的金属丝上, 使金属丝瞬间融化并形成等离子体放电通道, 周围的水介质在极短的时间内汽化而产生大量热能, 从而产生压力冲击波并迅速向外膨胀^[10-12]。

金属丝放电过程应满足如下方程:

$$L_c C \frac{d^2 U_c}{dt^2} + (R_c + R_w) C \frac{d U_c}{dt} + U_c = 0 \quad (2)$$

式中: L_c 为电容器的电感, H ; R_w 为金属丝的时变电阻, Ω ; R_c 为电容器的电阻, Ω ; t 为放电时间, s 。

金属丝放电过程中释放的能量主要包括金属丝沉积能量 E_c 和电弧产生的能量 E_d , 分别可以表示为:

$$E_c = \int_0^t I(t) R dt \quad (3)$$

$$E_d = \int_{t_1}^t I(t) U(t) dt \quad (4)$$

式中: E_c 为金属丝沉积能量, J ; t_1 为能量沉积时间, 即从放电初始到金属丝变为气体状态的时间, s ; $I(t)$ 为电路中电流, A ; R 为金属丝电阻, Ω ; E_d 为电弧产生的能量, J ; $U(t)$ 为电弧处电压, V 。

由于放电过程不稳定, 冲击波在形成和传播过程中波尾能量逐渐向波头聚集, 从微观上研究冲击波的形成机理和得到定量的物理模型是困难的。然而当冲击波传播一定距离演化为球面波之后, 能量沉积密度对冲击波的特性影响不大, 可以认为冲击波的压力峰值 p_{peak} 与放电参数的关系呈幂指数的形式, 其经验计算公式为^[13]:

$$p_{peak} = \beta \sqrt{\frac{\rho W_p}{\tau t_d}} \quad (5)$$

式中: β 为复杂积分函数, 对于水为电介质, 可取 0.7; ρ 为电介质的密度, kg/m^3 ; W_p 为放电通道单位长度的脉冲总能量, J ; τ 为冲击波上升持续时间, s ; t_d 为冲击波总持续时间, s 。

根据式(5)可知, 改变放电能量、冲击波上升持续时间和冲击波总持续时间, 可以调节冲击波压力峰值。

2 冲击波压力影响因素试验

大量研究表明, 冲击波压力与电容、充电电压及金属丝直径之间关系密切^[13-16], 为此通过室内试验研究其影响规律。图 3 为电爆冲击波影响因素试验装置原理图, 其中 T1 为变压器, P1 为 10 kV 高压直流电源, RX1、X 为控制充电速度的绕线电阻, C1 为 40 μF 脉冲储能电容, R1 为电路阻抗, KDIA 为自制电子开关, CTA 为自制电流互感器。

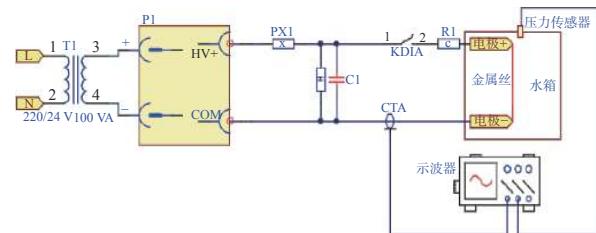


图 3 冲击波压力影响因素试验装置基本原理

Fig. 3 Basic principle of the shock wave pressure influencing factors test device

为自制电子开关, CTA 为自制电流互感器。

试验时, 通过控制面板设定参数, 为储能电容充电, 达到设定的电压参数时触发电子开关, 电能传输到金属丝上, 完成放电过程。用示波器采集压力传感器处的压力信号, 采用自制的电流线圈和电压差分头测量得到电流电压的波形。

2.1 充电电压

设定金属丝直径为 0.30 mm, 电容为 50 μF , 测量充电电压分别为 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 和 3.5 kV 时的冲击波压力峰值, 结果见图 4。由图 4 可以看出, 随着充电电压增大, 冲击波压力峰值基本成线性增大。这是由于充电电压与电容器储能量直接相关, 充电电压越大, 电容器储能量就越大, 注入金属丝的电爆能量也越大, 产生的冲击波压力峰值越大。在实际应用中, 可以通过提高充电电压获得更高的冲击波压力峰值, 以达到更好的增渗解堵效果, 这也是实现冲击波可控的重要手段。

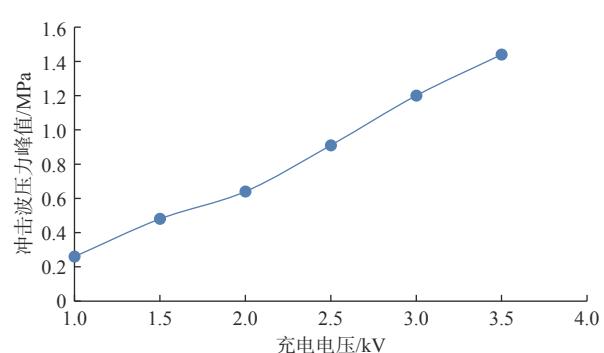


图 4 冲击波压力峰值随充电电压的变化规律

Fig.4 Variation laws of shock wave peak pressure with charging voltage

2.2 金属丝直径

设定充电电压为 3 kV, 电容为 50 μF , 测量金属丝直径分别为 0.15, 0.20, 0.30, 0.06, 0.90 和 1.00 mm 时的冲击波压力峰值, 结果见图 5。由图 5 可以看出, 随着金属丝直径增大, 冲击波压力峰值基本稳

定在 1.1 MPa 左右, 可见, 金属丝直径对冲击波压力峰值影响不大。这是由于金属丝直径直接影响金属丝电阻, 而金属丝电阻与电路电阻共同影响放电电流, 进而影响电爆能量。在设置的试验放电参数下, 金属丝电阻相对较小, 对放电电流影响较小, 所以对冲击波压力峰值影响不大。

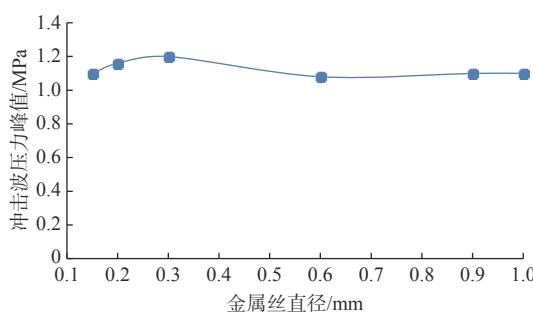


图 5 冲击波压力峰值随金属丝直径的变化规律

Fig.5 Variation laws of shock wave peak pressure with wire diameter

2.3 电容

设定充电电压为 3 kV, 金属丝直径为 0.30 mm, 测量电容分别为 10, 20, 30, 40 和 50 μF 时的冲击波压力峰值, 结果见图 6。由图 6 可以看出, 电容为 20 μF 时, 冲击波压力峰值达到最大, 然后随着电容增大开始下降。这是由于随着电容增大, 电容器储能量增大, 压力峰值会随着增大, 但同时电容增大会增大电路电阻, 使放电电流变小, 进而导致冲击波压力峰值降低, 因此, 在实际应用中, 要根据具体情况选择最优电容。

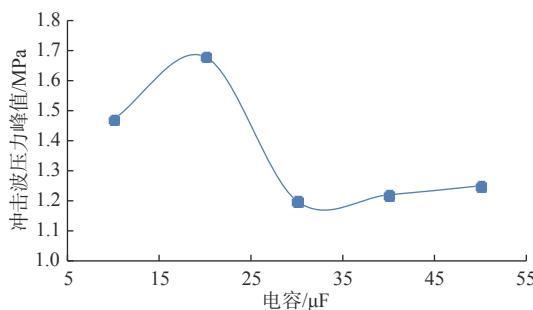


图 6 冲击波压力峰值随电容的变化规律

Fig.6 Variation laws of shock wave peak pressure with capacitance

3 冲击波造缝试验

为验证电爆冲击波的地层造缝作用, 选取了与目标砂岩地层物理性质类似的 C30 混凝土试样(直

径为 500 mm, 高为 500 mm), 并在试样上钻一直径 130 mm、深 300 mm 的孔, 利用冲击波试验装置(见图 3)进行不同能量冲击波造缝试验。试验时, 孔中灌满水作为电介质, 将放电电极置于孔中, 设置电容为 9 μF , 充电电压在 0~30 kV 可调, 根据式(1), 电容储能最大为 4.05 kJ。

试验结果表明, 放电电压为 30 kV 时, 产生的压力冲击波可以对混凝土试样造成贯穿裂缝, 如图 7 所示。第 1 次冲击后, 测量得到的裂缝渗透流量为 0.27 mL/s, 连续冲击 2 次、3 次后的裂缝渗透流量分别增加至 3.06 和 28.00 mL/s。电爆冲击波多次作用后, 混凝土试样表面出现明显裂缝, 并且随着冲击次数的增多, 混凝土试样的渗透率显著增大。

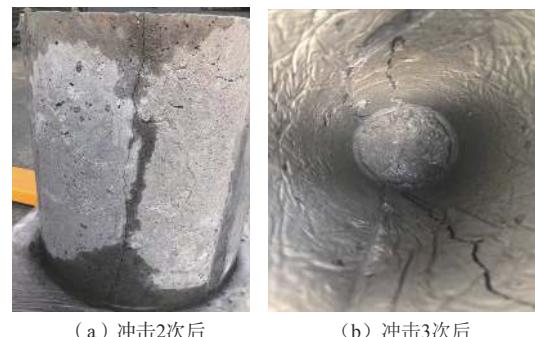


图 7 电爆冲击波对 C30 混凝土试样造缝试验结果

Fig.7 Fracture-generating results of electric explosion shock wave on C30 concrete sample

电爆冲击波造缝试验结果初步验证了电爆冲击波对砂岩储层造缝增产的可行性, 不同储层可以选取不同的放电参数, 以获得适用于不同储层物性的可控冲击波。

4 解堵效果评价试验

4.1 试验装置

为验证电爆冲击波的解堵效果, 研制了电爆冲击波解堵试验室内评价装置(见图 8), 通过串联岩心夹持器, 可以模拟近井壁直径 1.00 m 内的地层渗透效果, 还可对岩心施加围压, 模拟井下压力环境进行电爆冲击波解堵试验。

试验装置中各部分的主要参数及功能为:

1) 采用电爆压力罐模拟井筒环境。电爆压力罐内径 150 mm, 深度 400 mm, 罐体中部配有加注阀口, 用于注入水, 顶部为电极插入口。罐体安装有压力传感器, 用于测量电爆过程中的冲击波瞬时压力; 压力控制阀 1 控制电爆压力罐的压力, 当压力大

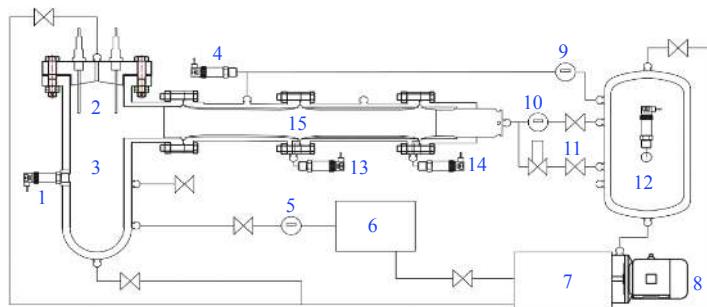


图 8 电爆冲击波解堵试验装置示意

Fig.8 Schematic of the electric explosion shock wave plugging removal test device

1. 压力传感器; 2. 放电电极; 3. 电爆压力罐; 4. 围压传感器; 5. 压力控制阀 1; 6. 流量计量装置; 7. 储液箱; 8. 注流泵; 9. 围压加载阀; 10. 压力控制阀 2; 11. 流入流量控制阀; 12. 供液压力罐; 13. 轴压传感器 1; 14. 轴压传感器 2; 15. 测试岩心

于设定压力时, 电爆压力罐内的液体会通过压力控制阀溢流到流量计量装置。

2) 岩心夹持器外套连接围压加载阀, 外套内部配有胶套, 通过围压加载阀向胶套与外套之间的空间注水, 模拟地层压力环境; 岩心夹持器连接有围压和轴压传感器, 用于监测加载围压和岩心轴向的渗透压力。

3) 供液压力罐可通过压力控制阀 2 向岩心注水, 水渗透岩心后进入电爆压力罐, 具有恒压、恒流 2 种工作模式。

4) 流量计量装置可根据设定的时间间隔记录流入液体的质量, 求得瞬时流量和累计流量。流量计量装置底部有阀门连接到储液箱, 每次试验完毕, 可将水通过阀门排至储液箱。

4.2 试验流程

1) 试验开始时, 通过注流泵向供液压力罐注水, 供液压力罐向电爆压力罐注水并加压至 2.0 MPa, 向岩心夹持器胶套与外套之间的空间注水加压至 4.0 MPa。

2) 启动电爆冲击波设备, 设置充电电压 30 kV, 储能 4.05 kJ。电爆压力罐内产生冲击波作用于岩心, 压力传感器监测冲击波压力。

3) 水在轴压的作用下渗透穿过岩心, 流向电爆压力罐, 当电爆罐压力超过压力控制阀 1 设定的初始压力时, 电爆压力罐内的水会流入流量计量装置, 获得岩心渗透流量。

4) 试验完毕后将流量计量装置中的水排空, 再次进行电爆冲击, 重复上述操作进行多次试验, 测试多次电爆冲击波作用后岩心的渗透率变化情况。

4.3 试验结果分析

岩心累计渗透流量试验结果如图 9 所示。由图 9 可以看出: 累计流量随时间呈抛物线增长, 开始时

增长速度较快, 最后趋于平缓; 冲击波作用 4 次后岩心平均渗流量达到 0.064 mL/min, 与试验前岩心的平均渗流量 0.040 mL/min 相比, 平均渗流量提高了 60.0%, 表明电爆冲击波对岩心产生了良好的解堵增渗效果, 验证了在井下围压条件下电爆冲击波增渗解堵的可行性。

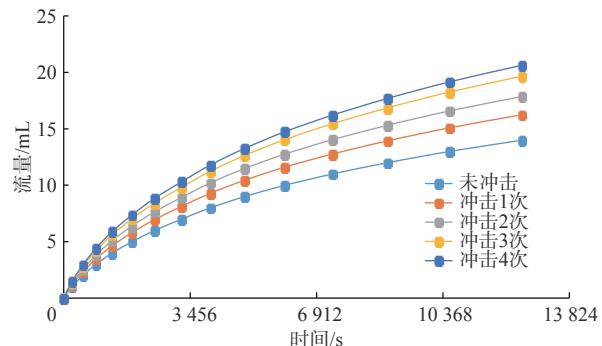


图 9 冲击波作用前后渗透流量随时间变化曲线

Fig.9 Curves of seepage flow vs. time pre/post-shock wave action

5 结论与建议

1) 电爆冲击波可以在地层流体介质中形成定向传播的压力脉冲, 不但能使储层产生微裂缝, 而且对堵塞杂质具有抽汲作用, 可以获得解堵增渗的效果。

2) 室内试验表明, 随着充电电压增大, 冲击波压力峰值呈线性增长, 金属丝直径对冲击波压力峰值影响不大, 电容对冲击波压力峰值的影响有一个最优值, 要根据具体情况选择最优电容。

3) 室内试验结果验证了电爆冲击波可以扩展储层岩石的裂缝并产生新的微裂缝, 而且在井下围压条件下能达到增渗解堵的效果。

4) 由于采用的试验岩心较为致密, 渗透时间较

长,试验初期的电爆冲击波能量也较小,导致增渗效果还不是非常明显,在后期试验研究中需要进一步改进和优化。

参 考 文 献

References

- [1] 刘海庆,姚传进,蒋宝云,等.低渗高凝油藏堵塞机理及解堵增产技术研究[J].*特种油气藏*,2010,17(6):103-106.
LIU Haiqing, YAO Chuanjin, JIANG Baoyun, et al. Study on plugging mechanism and plugging removal technique for low permeability and high pour point oil reservoir[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2010, 17(6): 103-106.
- [2] 陶磊,李松岩,程时清.稠油油藏水平井泡沫酸解堵技术[J].石油钻探技术,2015,43(6):76-80.
TAO Lei, LI Songyan, CHENG Shiqing. Foamed acid plug-removal technique for horizontal wells in heavy oil reservoirs[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(6): 76-80.
- [3] 刘永山,肖志明,杨谨敏,等.老君庙油田浅井低温油层复合解堵技术研究与应用[J].*石油钻采工艺*,2001,23(3):58-60.
LIU Yongshan, XIAO Zhiming, YANG Jinmin, et al. Composite plug remove technology in shallow and low temperature formation in Yumen Oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2001, 23(3): 58-60.
- [4] 左伟芹,李雪莲,卢义玉,等.旋转射流联合沉砂筒解堵工艺关键参数研究[J].石油钻探技术,2014,42(6):92-96.
ZUO Weiqin, LI Xuelian, LU Yiyu, et al. Key parameters of removing blockage with rotating jets and sand-tubes[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(6): 92-96.
- [5] 李燕,豆宁辉,姚二冬.哈萨克K油田油井堵塞物分析及解堵技术研究[J].*钻井液与完井液*,2019,36(3):391-396.
LI Yan, DOU Ninghui, YAO Erdong. Analysis of oil well blockage in K Oilfield in Kazakhstan and blockage removal techniques[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019, 36(3): 391-396.
- [6] 朱继东,张建国,石爱霞,等.声波解堵综合配套技术研究[J].石油钻探技术,2006,34(1):59-61.
ZHU Jidong, ZHANG Jianguo, SHI Aixia, et al. Comprehensive supporting technology for plug removal with sonic wave[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2006, 34(1): 59-61.
- [7] 杨乾隆,李立标,陶思羽,等.注水并不动管柱螯合酸脉冲式注入酸化增注技术[J].石油钻探技术,2018,46(5):90-94.
YANG Qianlong, LI Libiao, TAO Siyu, et al. Chelate acid pulse injection and acidizing stimulation technology for immobilized injecting well string[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(5): 90-94.
- [8] 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.
- [9] 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 Edition)*, 2016, 40(5): 118-122.
- [10] 孙冰.液相放电等离子体及其应用[M].北京:科学出版社,2013:8.
SUN Bing. Liquid-phase discharge plasma and its application[M]. Beijing: Science Press, 2013: 8.
- [11] 张金龙,郭先敏,蔡西茂,等.等离子通道钻井技术[J].石油钻探技术,2013,41(4):64-68.
ZHANG Jinlong, GUO Xianmin, CAI Ximao, et al. Plasma channel drilling technology[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013, 41(4): 64-68.
- [12] JOMNI F, AITKEN F, DENAT A. Experimental investigation of transient pressure waves produced in dielectric liquids[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, 107(3): 1203-1211.
- [13] 张春喜.水中丝爆引发的推进效应[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2005.
ZHANG Chunxi. The propulsion effect caused by exploding wire in water[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2005.
- [14] MAUREL O, REESS T, MATALLAH M, et al. Electrohydraulic shock wave generation as a means to increase intrinsic permeability of mortar[J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(12): 1631-1638.
- [15] 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.
- [16] 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.
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.

[编辑 陈会年]