

可控冲击波增渗解堵技术实验研究

王巧智 苏延辉 江 安 郑春峰 高 波 张云飞

中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300450

摘 要:压裂、酸化、注药剂是海上油田油水井增渗解堵的传统技术,但存在工艺复杂、成本高、储层二次损害等问题。可控冲击波技术作为一种新兴的改造储层技术,在工艺上不破坏井筒结构,可分段式多次重复作用,而且具备增渗解堵效果好、能量可控等特点。在分析可控冲击波产生机理的基础上,研制了可控冲击波实验装置。模拟储层及工程环境,分别以井筒与小岩心尺度样品为研究对象,开展可控冲击波增渗解堵效果评价实验。研究表明:可控冲击波对井筒及小岩心两种尺度实验样品均产生良好的增渗效果,井筒尺度样品产生较为明显宏观裂缝,岩石强度降低,小岩心尺度样品渗透率提升 13.3% ~ 57.9%,样品实现增渗;可控冲击波对解除小岩心尺度样品的固相侵入、无机垢堵塞、聚合物吸附滞留损害效果明显,无因次渗透率提升值在 0.12 ~ 0.27 之间,解除固相侵入损害最为显著,冲击使得岩心渗流通道内外的堵塞物被振动、推挤直至剥离,样品实现解堵。可控冲击波技术优势明显,研究成果为可控冲击波增渗解堵技术的现场应用奠定基础。

关键词:可控冲击波;增渗;解堵;裂缝;强度;渗透率

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2021.02.012

Experimental research on the technology of permeability enhancement and plug removal by controllable shockwave

WANG Qiaozhi, SU Yanhui, JIANG An, ZHENG Chunfeng, GAO Bo, ZHANG Yunfei

CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin, 300450, China

Abstract: Fracturing, acidizing and chemical injection are the traditional technologies for enhancing permeability and removing plugging in offshore oil and water wells. But, there are some problems such as complex process, high capital cost and secondary damage to reservoir. The controllable shockwave technology, as an emerging reservoir reconstruction technology, will not destroy the wellbore structure and also has the characteristics of good permeability enhancement and plug removal effect and controllable energy. Based on the analysis of the generation mechanism of the controllable shockwave, the controllable shockwave experimental device is developed. With the wellbore and small core scale samples taken as the research objects, the reservoir and engineering environment are simulated to carry out the evaluation experiment for controllable shockwave permeability enhancement and plug removal effect. The results show that the controlled shockwave has a good effect on the two scale samples of wellbore and small core. The

收稿日期:2020-08-12

基金项目:中海油能源发展股份有限公司基金项目“可控冲击波增透工艺技术及装备研究”(HFKJ-GJ2018-04)

作者简介:王巧智(1988-),男,天津人,工程师,硕士,主要从事油气田开发与储层保护技术工作。E-mail:wangqzh15@cnooc.

com.cn

samples of wellbore scale have obvious macro fractures, the rock strength is reduced, and the permeability of the samples of small core scale is increased by 13.3% ~ 57.9%, so as to realize the permeability enhancement. The controllable shock wave has obvious effect on removing solid invasion, inorganic scale and polymer plugging of small core scale samples. The dimensionless permeability increases between 0.12 and 0.27, and the most significant effect is to remove solid invasion damage. The shockwave makes the plug inside and outside the seepage channel vibrated, pushed and peeled off, so as to realize the plug removal. The controllable shockwave technology has obvious effect on increasing permeability and removing plug. The research results lay a solid foundation for the field application of controllable shockwave permeability enhancement and plug removal technology.

Keywords: Controllable shockwave; Permeability enhancement; Plug removal; Fracture; Strength; Permeability

0 前言

在钻井完井、采油采气、注水、增产、修井及提高采收率等各种作业时,油水井受外来工作液侵入影响,破坏储层原有的物理化学平衡状态,致使油气层损害,表现为渗透率下降^[1]。针对近井地带损害,渤海油田常采用基质酸化和化学药剂解堵,但存在解堵有效期短,储层二次损害等问题^[2-5];针对远井地带损害,常采用酸压及水力压裂解堵,但存在施工成本高、施工工艺复杂等问题^[6-7]。可控冲击波技术作为一种新兴物理法储层改造技术,具备工艺简单、增渗效果显著等特点,已在陆地油气田增渗以及煤矿瓦斯防治领域少量应用,效果良好^[8-9]。但该技术在海上油田应用极少,且应用的可行性未能得到系统论证。以往学者研究关注的重点是可控冲击波理论研究以及现场应用效果^[10-14],鲜有学者在现场应用之前系统实验评价可控冲击波增渗及解堵效果。本文针对海上特殊的应用环境,结合可控冲击波产生机理,搭建了可控冲击波产生平台,实验评价可控冲击波对井筒及岩心尺度样品的增渗及解堵效果,讨论了可控冲击波技术增渗及解堵机理,为现场应用提供理论支撑。

1 可控冲击波产生机理及实验装置

1.1 可控冲击波产生机理

冲击波改造储层技术的基础是脉冲功率技术,利用脉冲将能量的释放时间尽可能缩短,在短时间内获得大功率的能量。目前,脉冲冲击波的产生原理有两种:一种是电脉冲技术^[15-18],它通过液电反应将设备储存的电能转换为机械能冲击波,但其受能量转化效率低、电能储能密度低的影响,仅能在一定程度疏通近井地带渗流通道;另一种是可控冲击波技术^[19-21],其特点为在电脉冲技术上附加了化学能,即在金属丝周围包裹含能材料,形成聚能棒,液电反应使得金属丝爆炸,进而驱动含能材料释放能量,可控冲击波电热化学聚能结构见图 1。

在驱动过程中,通过优化聚能棒的参数,可控地产生参数可调的冲击波来大幅度提高电冲击波的冲击脉宽与冲击峰值,起到改造储层的效果。

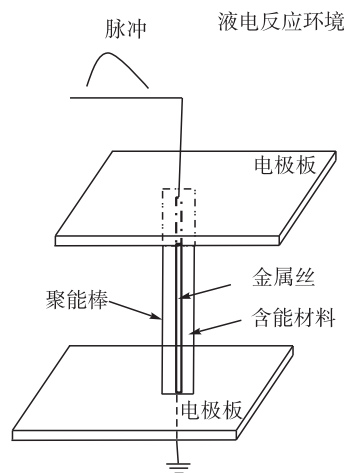


图 1 可控冲击波电热化学聚能结构图

Fig. 1 Structure of controllable shockwave electrothermal chemical energy accumulation

1.2 可控冲击波室内模拟实验装置

受西安交通大学张永民教授团队成果启发^[15,18,22],本文设计了可控冲击波产生室内实验装置。实验装置主要包括控制系统、脉冲电容器、开关、电缆和冲击波产生器,见图 2。其工作原理为:控制系统为脉冲电容器充电,当脉冲电容器的储能达到预设值时,触发开关导通,

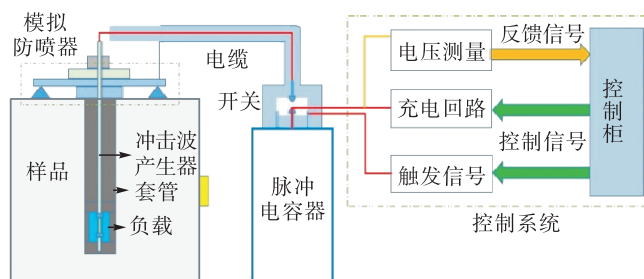


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

将存储在脉冲电容器的能量通过电缆进行快速释放,产生 20 ~ 100 kA 的强电流流过负载,驱动负载电爆炸产生强冲击波致裂样品。本文所有实验充电电压设定为 24 kV,系统初始储能为 30 kJ,该模式下产生冲击波可以满足渤海油田储层致裂要求^[11]。

2 可控冲击波增渗实验评价

2.1 井筒尺度

2.1.1 实验样品

为模拟海上真实的储层条件,将水泥、水、骨料、无机纳米硅粉和粉煤灰按一定比例制成,养护 28 d,制成井筒尺度(直径 1.0 m、高度 1.0 m)的样品,样品的岩石力学性质与渤海某油田的岩石力学性质相似。为模拟海上实际的工艺条

件,在样品中间钻深 600 mm、直径 244.5 mm 的孔,固定外径 244.5 mm 的套管,模拟套管射孔完井,见表 1 ~ 2 和图 3。

表 1 井筒尺度样品制作配方表

Tab. 1 Formulation of wellbore scale samples

水胶比	骨料 / kg	水 / kg	水泥 / kg	无机纳米硅粉 / kg	粉煤灰 / kg
0.27	1 467	101	288	28	56

表 2 井筒尺度样品岩石力学性质表

Tab. 2 Rock mechanical properties of wellbore scale samples

抗压强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	弹性模量 / GPa	泊松比
26.86	1.78	9.13	0.24



a) 浇筑模具
a) Casting mould



b) 样品脱模成型
b) Sample molding

图 3 实验样品照片

Fig. 3 Photos of experimental sample

2.1.2 实验方法

- 1) 安装模拟防喷器,将实验装置下入模拟套管射孔完井的样品内。
- 2) 实验装置安装至合适位置后,向套管内注满水,固定实验装置与套管顶部。
- 3) 连接控制系统,进行实验。
- 4) 一次冲击完成后,取出实验装置,更换聚能棒,再重复步骤 1) ~ 3),直到冲击次数达到 7 次。

5) 实验过程中记录每一次冲击后样品裂缝生成情况。

2.1.3 实验结果

如图 4 所示,放电电压控制在 24 kV 的条件下,样品累计冲击 7 次。冲击 1 次时,在样品上表面开始萌生一条微裂缝;冲击 5 次时,该微裂缝以套管为起点向样品侧面延伸,裂缝宽度增加;冲击 7 次时,该条裂缝的缝宽继续增加,并向岩样的侧表面继续延伸直至贯穿样品,最终形成一条宏观裂缝,样品渗透率显著提升。



a) 冲击 1 次
a) Impact once



b) 冲击 5 次
b) Impact 5 times



c) 冲击 7 次
c) Impact 7 times

图 4 井筒尺度样品不同冲击次数的裂缝生长情况照片

Fig. 4 Fracture growth photos of wellbore scale samples with different impact times

2.2 小岩心尺度

2.2.1 实验样品

实验选取渤海油田天然岩心 2 块,岩心参数及增渗实验计划见表 3。

表 3 小岩心柱尺度样品参数及增渗实验计划表

Tab.3 Sample parameters and permeability increasing experiment plan of small core column size

岩心 编号	长度 / mm	直径 / mm	孔隙度	渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	冲击次 数 / 次	充电电 压 / kV
1-1	45.66	25.12	19.8%	652.1	7	24
1-2	48.16	25.08	20.7%	579.6	7	24

2.2.2 实验方法

依然选用可控冲击波增渗解堵室内模拟实验装置作为脉冲驱动源,区别在于加工了装载 25 mm 直径小岩心柱的实验工装,代替图 2 中的样品一套管组合,小岩心实验工装组合及冲击波作用方式见图 5。

实验步骤如下。

- 1) 测量岩心初始液测渗透率。
- 2) 将岩心装入工装,对岩心施加 5 MPa 围压。
- 3) 将工装放于水罐内,连接控制系统,进行冲击波增渗实验,冲击次数 7 次。



a) 1-1 冲击前
a) 1-1 before impact



b) 1-1 冲击后
b) 1-1 after impact



c) 1-2 冲击前
c) 1-2 before impact



d) 1-2 冲击后
d) 1-2 after impact

图 6 可控冲击波冲击前后岩心及端面形貌对比照片

Fig.6 Comparison photos of core and end face morphology before and after controllabile shockwave

3 可控冲击波解堵实验评价

增渗实验重点体现冲击波的致裂作用,裂缝的产生增加油气渗流空间,大幅度提升储层渗透率。而解堵实验侧重于体现冲击波的冲击效应,冲击波不仅可以致裂储层,理论上还可以驱除地层堵塞物,发挥解堵作用,提高渗透率。

3.1 实验样品

由于很难模拟井筒尺度样品的堵塞行为,因此实验选取渤海油田天然小岩心 6 块,开展小岩心尺度样品解堵实验评价。岩心参数及解堵实验计划见表 4。为模拟渤海油田常见的固相侵入、无机垢堵塞及聚合物吸附滞留损害,人为地对岩心制造损害,处理方式如下。

- 1) 固相侵入:选用高岭土溶液作为固相侵入损害体

- 4) 将岩心从工装内取出,对比冲击前后的岩心形貌,测量岩心液测渗透率,评价冲击波增渗效果。

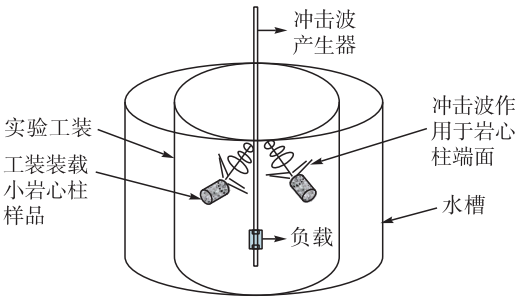


图 5 小岩心柱实验工装组合及冲击波作用方式图

Fig.5 Small core column experimental tooling combination and shockwave action mode

2.2.3 实验结果

实验现象见图 6,1-1 号岩心冲击 7 次后,观察到小岩心柱样品端面受损掉块,冲击波作用后的气测渗透率由 $652.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 提升至 $739.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,渗透率增幅 13.3%;1-2 号岩心冲击 7 次后,观察到小岩心柱样品除端面受损掉块外,还产生了一条非贯穿宏观裂缝,冲击波作用后的气测渗透率由 $579.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 提升至 $915.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,渗透率增幅 57.9%。

表 4 小岩心尺度样品参数及解堵实验计划表

Tab.4 Small core scale sample parameters and plug removal experiment plan

岩心 编号	长度 / mm	直径 / mm	孔隙 度	渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	冲击次 数 / 次	充电电 压 / kV	解堵类型
2-1	45.66	25.12	19.8%	652.1	7	24	固相侵入
2-2	48.16	25.08	20.7%	579.6	7	24	固相侵入
2-3	51.36	25.04	18.7%	739.1	7	24	无机垢堵塞
2-4	49.18	25.10	19.2%	854.3	7	24	无机垢堵塞
2-5	53.66	25.12	22.1%	557.5	7	24	聚合物吸附滞留
2-6	47.94	25.20	20.5%	627.8	7	24	聚合物吸附滞留

系,体系浓度 200 mg/L,岩心驱替该溶液 10 PV,使岩心内部产生固相侵入堵塞。

2) 无机垢堵塞:模拟地层温度压力条件,使用抽空饱和法和饱和碳酸钠和氯化钙混合溶液,饱和时间 4 h,使岩心内部产生无机垢堵塞。

3) 聚合物吸附滞留:选用渤海某油田现场聚合物作为吸附滞留损害体系,体系浓度 1 200 mg/L,岩心驱替该溶液 10 PV,使岩心内部产生聚合物吸附滞留堵塞。

3.2 实验方法

参考小岩心尺度增渗实验方法,小岩心在工装内完成 7 次冲击后,重点对比损害前、损害后、冲击后三种状态的岩心端面形貌及堵塞物状态,通过计算岩心渗透率评价冲击波解除固相侵入、无机垢堵塞、聚合物吸附滞留损害的效果。

3.3 实验结果

对比损害前后的岩心端面形貌,观察到各处理方式的样品均有明显的堵塞物附着于岩心端面,损害后岩心的无因次渗透率从大到小依次为无机垢堵塞(0.73)、固相侵入(0.63)、聚合物吸附滞留(0.21),说明聚合物吸附滞留损害最为严重。在同一冲击强度,同一冲击次数作用后,各岩心均未产生明显裂缝,但端面都有不同程度的破损,端面附着的堵塞物减少,冲击后的无因次渗透率从大到小依次为固相侵入(0.90)、无机垢堵塞(0.85)、聚合物吸附滞留损害(0.41),表明可控冲击波技术对于解除固相侵入、无机垢堵塞、聚合物吸附滞留损害均有效。各样品冲击后的无因次渗透率较损害后的无因次渗透率均有显著提升,提升值从大到小依次为固相侵入(0.27)、聚合物吸附滞留(0.20)、无机垢堵塞(0.12),说明该实验条件下可控冲击波对于解除固相侵入损害效果最佳。三种处理方式岩心在损害前、损害后、冲击作用后的无因次渗透率变化见图 7,固相侵入处理方式的岩心端面形貌变化见图 8。

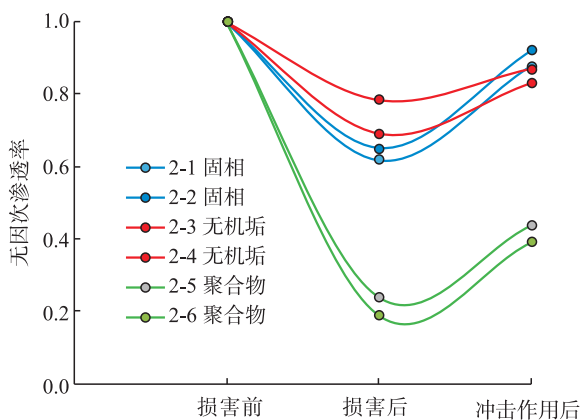


图 7 不同损害方式下岩心状态与无因次渗透率的关系图

Fig. 7 Relationship between core state and dimensionless permeability under different damage modes



图 8 固相侵入损害前、损害后、冲击作用后的岩心端面形貌变化照片

Fig. 8 Change of core end face morphology before, after solid invasion and after the shockwave

4 可控冲击波与储层作用机制讨论

可控冲击波是一种物理法储层改造技术,可控性表现在冲击的脉宽和峰值可调,冲击的区域和次数可控。从可控冲击波的技术特点来看,可以将其与储层的作用机制分为拉伸破坏造缝增渗与剪切推挤冲击解堵两类。

4.1 拉伸破坏造缝增渗

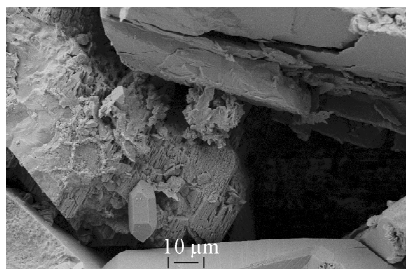
根据井筒尺度样品的配方,制作与之力学性质相同的小岩心柱,用于测试冲击前的力学参数。井筒尺度样品冲击实验完成后,在样品周向避开裂缝的区域钻取小样,测试冲击实验后的力学参数,对比冲击前后样品的检测数据,抗压强度由 26.86 MPa 降低为 15.36 MPa,抗拉强度由 1.78 MPa 降低为 0.69 MPa,弹性模量由 9.13 GPa 降低为 1.29 GPa,泊松比由 0.24 上升为 0.3。力学参数变化规律正符合拉伸破坏理论^[22-23],岩石破碎过程中往往先发生拉伸破坏,内在表现为岩石强度降低,外在表现为样品产生裂缝,增加油井的渗流空间,最终实现渗透率大幅度提升。需要说明的有两点:一是实验钻取小样避开了宏观裂缝,因此岩石强度的降低幅度比实际情况要低;二是实验制作的混凝土样品的原始裂缝及微裂缝与真实地层相比基本不发育,因此实验未能模拟地层原始裂缝及微裂缝的扩展行为,弱化了致裂后形成的裂缝网络规模。

4.2 剪切推挤冲击解堵

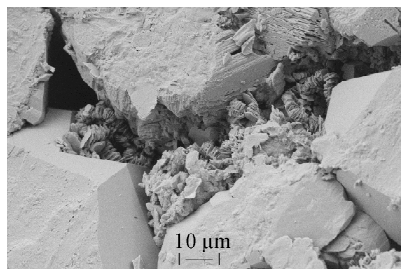
可控冲击波在传播的中后期会衰减成高强弹性声波,高强弹性声波的幅值大小明显区别于地层的抗张、抗剪强度,因此会在声波与地层的交界面处产生剪切力^[24]。剪切力作用于地层的渗流通道,产生振动、推挤、剥离等冲击效应,有利于驱除滞留吸附在地层内外部的堵塞物,发挥解堵作用。振动使得堵塞物的振幅、速度和加速度发生显著变化,从而使其产生松动效应。高强弹性声波的扰动会改善地层毛管力,减小表面张力^[9],堵塞物则更容易像活塞一样被推挤,最终从渗流通道“剥离”下来。如图 9 所示,以无机垢损害评价为例,岩样损害后孔隙及孔隙周围被大量无机垢堆积充填,渗流

空间明显减小。冲击作用之后,孔隙及孔隙周围环境变得清晰而干净,堆积物受剪切推挤冲击作用而大量

消失,渗流能力恢复,验证了对冲击波解堵机理的认识。



a) 无机垢损害后
a) After inorganic damage



b) 冲击波解堵后
b) After shock wave

图9 扫描电镜观察无机垢堵塞孔隙形貌变化照片

Fig. 9 Change of pore morphology observed by SEM

5 结论

本文在分析可控冲击波产生机理的基础上,研制了可控冲击波实验装置。模拟储层及工程环境,分别以井筒与小岩心尺度样品为研究对象,开展可控冲击波增渗解堵效果评价实验,得到以下结论。

1) 可控冲击波对井筒及小岩心两种尺度实验样品均产生良好的增渗效果,井筒尺度样品产生较为明显的宏观裂缝,岩石强度降低,小岩心尺度样品渗透率提升13.3%~57.9%,从而实现增渗。

2) 可控冲击波对解除小岩心尺度样品的固相侵入、无机垢堵塞、聚合物吸附滞留损害效果明显,无因次渗透率提升值在0.12~0.27之间,解除固相侵入损害的效果最为显著,冲击使得岩心渗流通道内外的堵塞物被振动、推挤直至剥离,从而实现解堵。可控冲击波技术增渗解堵效果明显,研究成果为可控冲击波增渗解堵技术的现场应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 徐同台,熊友明,康毅力,等. 保护油气层技术[M]. 第3版. 北京:石油工业出版社,2010:1-2.
XU Tongtai, XIONG Youming, KANG Yili, et al. The technique of formation protection [M]. 3rd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 1-2.
- [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] 杨乾隆,李立标,陶思羽,等. 注水井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.

- [5] 张应安. 生物酶技术在火山岩气藏筛管水平井解堵应用[J]. 科学技术与工程,2010,10(19):4624-4627.

ZHANG Ying'an. Deplinding application of biological enzyme technique in screen tube horizontal well on gas reservoir of volcanic rock [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10 (19): 4624-4627.

- [6] 刘鹏,徐刚,陈毅,等. 渤海低渗透储层水平井分段压裂实践与认识[J]. 天然气与石油,2018,36(4):58-62.

LIU Peng, XU Gang, CHEN Yi, et al. Practice and understanding on horizontal well staged fracturing in Bohai low permeability reservoirs [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 17 (30): 161-166.

- [7] 谢丽沙,胡勇,何逸凡,等. 考虑裂缝导流能力时效的海上压裂井产能研究[J]. 天然气与石油,2016,34(5):50-55.

XIE Lisha, HU Yong, HE Yifan, et al. Research on fracturing well productivity of low permeability reservoir at sea considering fracture conductivity varying over time [J]. 2016, 34 (5): 50-55.

- [8] 周家驹,郭志华,全宏,等. 冲击波解堵技术的作用机理及技术特点[J]. 钻采工艺,2002,25(4):101-102.

ZHOU Jiaju, GUO Zhihua, QUAN Hong, et al. Mechanism and technical characteristics of shock wave plugging removal technology [J]. Drilling & Production Technology, 2002, 25

- (4): 101-102.
- [9] 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.
ZHANG Yongmin, QIU Aici, QIN Yong. Principle and engineering practices on coal reservoir permeability improved with electric pulse controllable shock waves [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45 (9): 79-85.
- [10] 王先荣, 袁艳勤, 杜海涛. 冲击波解堵技术在中、低渗透油藏中的应用[J]. 海洋石油, 2005, 25(2): 68-71.
WANG Xianrong, YUAN Yanqin, DU Haitao. Application of shock wave plug-removing measure in low-mid permeability reservoir [J]. Offshore Oil, 2005, 25 (2): 68-71.
- [11] 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 electrothermal chemical shock waves [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48 (1): 72-79.
- [12] 刘海伟, 梁兰, 王涛. 冲击波解堵增注技术在子长油田的研究与应用[J]. 化工管理, 2019, 15(3): 15-17.
LIU Haiwei, LIANG Lan, WANG Tao. Research and application of shockwave plugging removal and injection increase technology in Zichang Oilfield [J]. Chemical Management, 2019, 15 (3): 15-17.
- [13] 袁其祥, 游兴友, 孟庆斌, 等. 冲击波解堵工艺及其应用[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(2): 63-65.
YUAN Qixiang, YOU Xingyou, MENG Qingbin, et al. Technology and application of shock wave plugging removal [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10 (2): 63-65.
- [14] 李庆云, 舒勇, 尚朝辉, 等. 低渗油藏双源振动及冲击波解堵技术应用[J]. 钻采工艺, 2004, 27(3): 105-106.
LI Qingyun, SHU Yong, SHANG Zhaohui, et al. Application of dual source vibration and shock wave plugging removal technology in low permeability reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2004, 27 (3): 105-106.
- [15] LIU Qiaojue, DING Weidong, HAN Ruoyu, et al. Fracturing effect of electrohydraulic shock waves generated by plasma-ignited energetic materials explosion [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45 (3): 423-431.
- [16] 周越. 液中放电的研究与应用[J]. 电工电能新技术, 1988(3): 20-27.
ZHOU Yue. Investigation and application of the electrical discharge in water [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1988 (3): 20-27.
- [17] 任杨, 吴飞鹏, 蒲春生, 等. 长脉冲燃爆压裂复合燃速火药配方优化与应用[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(24): 68-73.
REN Yang, WU Feipeng, PU Chunsheng, et al. The optimization and application of composite burning rate gunpowder formula of long pulse explosive fracturing [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14 (24): 68-73.
- [18] 付海峰, 张永民, 王欣, 等. 基于脉冲致裂储层的改造新技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊2): 4008-4017.
FU Haifeng, ZHANG Yongmin, WANG Xin, et al. New stimulation technology research based on impulse fracturing reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (Suppl 2): 4008-4017.
- [19] ZHOU Haibin, WU Jiawei, LIU Qiaojue, et al. Amelioration of petrophysical property with shock waves generated by underwater electrical wire explosion [C]//IEEE. 2014 IEEE 41st International Conference on Plasma Sciences (ICOPS) held with 2014 IEEE International Conference on High-Power Particle Beams (BEAMS). Washington D. C.: IEEE, 2014: 1.
- [20] 周海滨, 刘巧珏, 赵有志, 等. 脉冲大电流放电引爆含能材料产生冲击波的储层改造[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(4): 196-200.
ZHOU Haibin, LIU Qiaojue, ZHAO Youzhi, et al. Transformation of oil-and-gas reservoir with shock waves by high current pulsed discharge ignited energetic materials explosion [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28 (4): 196-200.
- [21] GRINENKO A, GUROVICH V T, SAYPIN A, et al. Strongly coupled copper plasma generated by underwater electrical wire explosion [J]. Physical Review E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2005, 72(6): 156-162.
- [22] 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]. 高压电技术, 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.
- [23] 李伦. 水下爆炸冲击波作用下岩石裂纹发展机理的实验研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2010.
LI Lun. Experimental Research on the development mechanism of rock crack under shock wave of underwater explosion [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020.
- [24] 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 the technology of electric explosion shock wave increase penetration and deblocking [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48 (2): 98-103.