

倪维军, 杨国昊, 刘刚, 等. 井下低频脉动水力压裂技术参数优化及现场应用[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(3): 643-652.

NI Wei-jun, YANG Guo-hao, LIU Gang, et al. Parameter Optimization and Field Application of Downhole Low Frequency Pulsation Hydraulic Fracturing Technology[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(3): 643-652.

DOI: 10.19814/j.jese.2022.11058

·《地球科学与环境学报》更名二十周年纪念专辑·

井下低频脉动水力压裂技术参数优化及现场应用

倪维军¹, 杨国昊¹, 刘刚², 凡朝波², 解聪²

(1. 西安石油大学石油工程学院, 陕西西安 710065;

2. 延长石油(集团)油气勘探公司采气四厂, 陕西延安 727500)

摘要:对于地层压力高、岩石破裂压力大的储层,水力压裂施工面临井口泵压大、设备要求高的难题。井下低频脉动水力压裂技术通过在井底产生低频脉动,可以显著降低岩石起裂压力和延伸压力,提高压裂增产效果。通过室内实验以及理论计算,对低频脉动水力压裂技术的脉动频率及脉动压力幅值两个关键参数进行了优化。结果表明:当脉动频率为20 Hz时,岩石的破坏最为严重;脉动频率越高,振幅衰减越快;岩石的抗压强度与脉动压力幅值成反比,幅值越大,岩石的抗压强度越低。最后,在陕北地区低渗透油田进行了3口井的低频脉动水力压裂现场试验。试验结果表明,低频脉动水力压裂后的试验井与相邻常规压裂井相比,砂堵问题明显减少,且在降低施工压力方面具有显著效果。

关键词:低频脉动;水力压裂;脉动压力;脉动频率;参数优化;施工压力;抗压强度;疲劳破坏

中图分类号:TE35 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2023)03-0643-10

Parameter Optimization and Field Application of Downhole Low Frequency Pulsation Hydraulic Fracturing Technology

NI Wei-jun¹, YANG Guo-hao¹, LIU Gang², FAN Chao-bo², XIE Cong²

(1. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. No. 4 Gas Production Plant, Yanchang Petroleum (Group) Exploration Company, Yan'an 727500, Shaanxi, China)

Abstract: For the reservoir with high formation pressure and rock fracture pressure, the hydraulic fracturing is faced with the difficult problems of high wellhead pump pressure and high equipment requirements. By producing low frequency pulsation at the bottom of the well, the downhole low frequency pulsation hydraulic fracturing technology can significantly reduce rock initiation pressure and extension pressure, and improve the stimulation effect of fracturing. Through laboratory experiment and theoretical calculation, two key parameters of low frequency pulsation hydraulic fracturing technology, including pulsation frequency and pulsating pressure amplitude were optimized. The results show that when the pulsation frequency is 20 Hz, the rock damage is the most serious; the higher the pulsation frequency, the faster the pulsating pressure amplitude decays; the compressive strength of rock is inversely proportional to pulsating pressure amplitude; the greater the pulsating pressure amplitude, the lower the compressive strength of rock. Field tests of low frequency pulsation hydraulic fracturing technology were carried out on

three wells in low permeability oilfield of northern Shaanxi. The test results show that compared with the adjacent conventional fracturing wells, the sand plugging problem of the test wells after low frequency pulsation hydraulic fracturing is significantly reduced, so downhole low frequency pulsation hydraulic fracturing technology has a significant effect in reducing the construction pressure.

Key words: low frequency pulsation; hydraulic fracturing; pulsating pressure; pulsation frequency; parameter optimization; construction pressure; compressive strength; fatigue failure

0 引言

在低渗油气储层开发中,脉动水力压裂技术是非常重要的技术手段,主要用于提高裂缝导流能力和裂缝的延伸、扩展与控制^[1-5]。孙京等采用脉动水力压裂技术扩展裂缝孔隙,提高裂缝导流能力,使施工压力大幅降低^[6]。叶功勤等通过自行研制的可调频脉动水力压裂系统研究发现,在脉动作用下,岩样的压降阶段比在非脉动作用下更早出现,并且压降持续时间短,但关于脉动压力幅值的变化对压降的影响没有深入研究^[7]。杨宏民等研究发现脉动水力压裂技术能够破坏储层原有的应力平衡,使应力重新分布,集中向孔眼深部转移,降低孔眼附近岩石的起裂压力,导致孔隙张开、裂缝向前延伸^[8]。李全贵等研究分析脉动水力压裂频率与破裂压力、裂缝扩展的关系,发现研究试件受到单位时间脉动的冲击次数、脉动压力控制,而试件的疲劳效果与脉动压力幅值密切相关^[9]。吴琼等基于水压致裂作用,结合高压脉动效应实现储层致裂增隙,达到降压的目的^[10]。魏超采用脉动加载与静压相结合的预脉动组合式水力压裂法,结合室内实验、理论分析和数值模拟,揭示了不同压裂方式下水力裂缝遇到微裂缝时的扩展行为及网状裂缝的形成机理^[11]。董康兴等基于流固耦合模型建立数学模型与有限元模型,对岩石样品损伤情况进行模拟计算,证明循环脉动载荷的累积对降低起裂压力有促进作用^[12]。目前,国内脉动水力压裂技术已经形成了针对不同储层来调节脉动参数的方式,但在缝内压开多分支裂缝,会出现一些施工问题。例如,施工中可能出现高压封孔困难,裂缝孔隙不易控制且成功率低;如何控制裂缝的延伸及克服岩石天然裂缝制约也是一直困扰脉动水力压裂技术的难题^[13-17]。

鉴于脉动水力压裂技术的发展现状,本课题组研发了一种井下低频脉动水力压裂发生工具短节,将其连接在压裂管柱下端,位于喷砂器之上,通过在施工过程中产生脉动作用,促使多孔介质储层岩石

产生疲劳损伤,提高裂缝扩展水平,促进裂缝延伸、压力降低。目前,井下低频脉动水力压裂在降低施工压力中展现了较好的应用前景^[18-19]。低频脉动水力压裂中,合适的脉动参数是该技术的关键。在低频脉动载荷作用下,该技术逐渐劣化岩石的强度,促进微小裂缝发育,进一步促使岩石裂隙起裂延伸、扩展。本课题组研发的工具短节不仅可以用于常规水力压裂、“多裂缝”水力压裂,还可以进一步扩展应用于体积压裂和水平井分段多簇压裂。与常规压裂技术相比,井下低频脉动水力压裂技术克服了常规压裂技术的部分缺点,扩展了适用条件(表1)。

在井下低频脉动水力压裂中,应充分考虑脉动参数的优选,它是降低施工压力的关键,但目前针对对脉动频率、脉动压力幅值的优选方法较少;另外,确定井下低频脉动水力压裂相关参数也是提高裂缝导流能力,进而强化增产的关键。基于此,本文通过动静载疲劳实验结合现场应用来确定井下低频脉动水力压裂技术的脉动频率、脉动压力幅值的合理范围,为后续低频脉动水力压裂技术脉动参数的优选提供参考。

1 参数优化

在脉动水力压裂技术中,动力来自于自身供水所供给的能量,当恒压水吸收脉动工具的能量后,便会对岩石产生周期性的脉冲作用,峰值压力和谷值压力形成脉动波,并据此建立脉动场^[20]。脉动波的水力压裂作用是指通过脉动泵驱动流体在井筒内形成脉动水压,多次冲击岩石,使岩石内部结构遭受疲劳破坏,降低岩石起裂压力,实现高效压裂的目的。脉动波有两个用途:一是通过脉动可以激发低渗致密储层中的堵塞物,破碎堵塞物,疏通裂缝通道,增加流体流动速度和裂缝导流能力;二是通过脉动水压作用到岩石上,改变岩石内部应力分布,使岩石内部结构遭受疲劳破坏,降低岩石起裂压力的作用。当利用高压脉动作用对低渗致密储层进行压裂时,高压脉动下的脉动水流不断冲击低渗致密储层,使

表 1 井下低频脉动水力压裂技术与常规压裂技术对比

Table 1 Comparison of Downhole Low Frequency Pulsation Hydraulic Fracturing Technology and Conventional Fracturing Technology

技术名称	原理	适用条件	优点	缺点
“多裂缝”压裂技术	压开主裂缝,并在储层中形成始于主裂缝的“多裂缝”	地层应力均衡或非均质性且具有微裂缝	防砂堵,提高了裂缝导流能力	当施工压力远大于常规水力压裂时,会出现被迫停泵的事故,施工风险较大
体积压裂技术	压裂施工中大量注入,裂缝中产生高净压力,在储层中出现网状裂缝	天然裂缝发育,地层敏感性不强	防砂堵,提高了裂缝导流能力	施工技术难度大,作业成本高
套管压裂技术	套管柱进行压裂液输送,压裂后工具与管柱不起出回收	非常规油气藏改造中的新井筒	砂比高,排量,管内摩阻小	对套管的完整性要求较高
井下低频脉动水力压裂技术	脉动压力下,岩石疲劳损伤,岩石起裂强度降低	适应不同压裂工艺管柱设计和施工设计等	降低了施工压力,强化铺砂,防砂堵,提高了裂缝导流能力	

储层产生微裂缝,与低渗致密储层中的原生裂隙沟通,形成互通的裂缝网,为流体流动提供新的流动通道^[20-22]。油层岩石是非均匀材料,在受到脉动水压冲击作用下,岩石内部会产生非均匀的剪切应力,导致岩石的疲劳强度远低于静水柱压力载荷的疲劳强度。此时,仅需要较小的水压就会使得岩石内部产生破坏,形成网络状裂缝^[21]。

1.1 降压机理

在脉动载荷作用下,微小裂隙发育,降低了岩石的破裂压力,促使岩芯内部裂隙起裂延伸并扩展。运用 MTS Landmark 高性能疲劳试验机进行动静载疲劳实验(图 1)。具体实验步骤为:步骤①,调试脉动仪器,测试环境、温度等因素的影响,检查岩石样品表面是否有裂缝等异常情况;步骤②,启动加载系统、控制系统、测量系统,先观察原岩应力下的初始状态;步骤③,设定实验参数,准备数据的采集分析;步骤④,观察数据收集系统接收信号情况,若无反应,调整实验参数,重复步骤③;步骤⑤,当脉动载荷为静载峰值的 85% 时出现体积破碎。单轴压缩及脉动载荷下裂缝演化过程如图 2 所示。脉动载荷作用下,地层岩石破裂过程为:在脉动作用载荷反复作用下,岩石局部发生损伤,致使其强度降低;当损伤累积到一定程度后,岩石力学性能下降,最终导致完全破裂。

邓华锋等研究认为,当岩石出现塑性应变时,结构是层层脱落的,而裂缝的扩展速度却很小,微小裂缝之间得到充分扩展和沟通,大量细观裂缝也参与破裂过程,裂缝分布均匀,大、小裂缝沟通构成破裂面,因而试件内部形成较好的裂缝网络与渗流通道^[23-24]。脉动载荷疲劳损伤作用的实质是塑性应变的累积作用使试件力学强度逐渐降低,从而使岩石

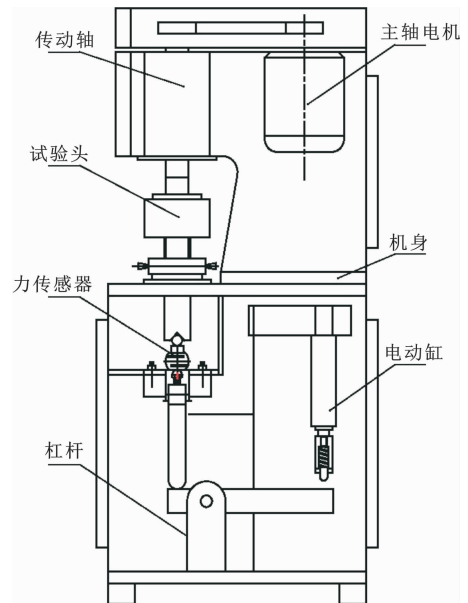


图 1 MTS Landmark 高性能疲劳试验机主要结构示意图

Fig. 1 Main Structure View of MTS Landmark High Performance Fatigue Testing Machine

能够在较低的峰值载荷下破坏^[25-26]。

理论上,可将脉动压力的传播看作是脉动波在地层岩石裂隙中的传播。传播时的波动方程为

$$\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: ϵ 为质点的位移; x 为质点平衡位置; v 为波速,依赖于介质; t 为时间。

平面波的波动方程为

$$\epsilon = A \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right] \quad (2)$$

式中: A 为脉动波幅; ω 为角速度。

式(2)描述了介质中各质点的位移随各质点的平衡位置和时间变化。

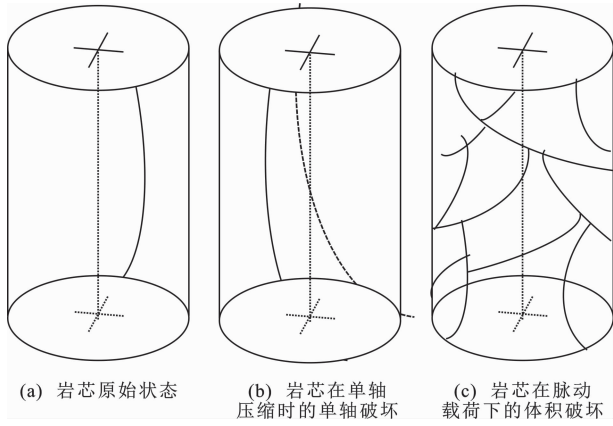


图2 单轴压缩及脉动载荷下裂隙演化示意图

Fig. 2 Views of Crack Evolution Under Uniaxial Compression and Pulsation Load

脉动压力的传播即为波动能量的传播,波动能量包括势能和动能。质点动能表达式为

$$W_k = \frac{1}{2} \Delta m v^2 = \frac{1}{2} \rho v \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial t} \right)^2$$

$$= \frac{1}{2} \rho \Delta V A^2 \omega^2 \sin^2 \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] \quad (3)$$

式中: W_k 为质点动能; Δm 为质点的质量; ρ 为密度; ΔV 为质点体积。

质点势能表达式为

$$W_p = \frac{1}{2} k \Delta \epsilon^2 \quad (4)$$

式中: W_p 为质点势能; k 为弹性系数。

由于

$$\begin{cases} \omega^2 = \frac{k}{m} \\ \Delta \epsilon = A \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] \end{cases} \quad (5)$$

所以

$$W_p = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2 \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right]$$

$$= \frac{1}{2} \rho \Delta V A^2 \omega^2 \sin^2 \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] \quad (6)$$

得出质点的总机械能(W)为

$$W = W_k + W_p = \rho \Delta V A^2 \omega^2 \sin^2 \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] \quad (7)$$

由式(7)得出,总机械能是时间与平衡位置的函数。某一时刻,质点的能量随质点做周期性运动;在某一位置的质点,其能量随着时间的推移进行周期性的改变。也就是说,在波动时,后一质点周期性地从前一质点获得能量,并周期性地将能量传递给下一个质点。低频脉动水力压裂技术运用这一原理,使介质中质点的某些物理量反复变化,以对储层岩石造成疲劳破坏,便于形成微裂缝,提高裂缝导流

能力^[27-28]。

1.2 脉动频率优化

围压作用下,轴向循环载荷对岩石产生疲劳破坏,疲劳破坏的程度与围压大小、频率变化等有关^[20,29]。脉动载荷下,岩石出现的疲劳破坏程度也与脉动载荷大小、重复加载的次数有关。

为确定脉动频率对岩石破裂压力的影响,本文对陕北地区某低渗透油田W油区储层开展低频脉动水力压裂实验。实验中,采用W油区C₆储层岩芯,其平均直径为50 mm,长径比为2:1;为模拟地层条件,在岩芯夹持器内加载25 MPa的围压压力,给定脉动压力幅值为2 MPa,脉动作用时间为10 s。在不同脉动频率(5、8、10、12、15、18、20、23、25、30 Hz)下进行实验,脉动实验设备如图3所示。最后,对脉动处理后的岩芯进行单轴压缩实验,并比较不同条件下岩石抗压强度及破裂压力变化,得到造成岩石疲劳损伤的最佳脉动频率。脉动处理后的岩石抗压强度随脉动频率的变化如图4所示。

从图4可以看出,W油区C₆储层岩芯在模拟脉动作用下,岩石的破裂压力与脉动频率相关。其脉动频率为5~10 Hz时,岩石的抗压强度呈缓慢上升趋势,可能是低频率的脉动作用使岩石颗粒间产

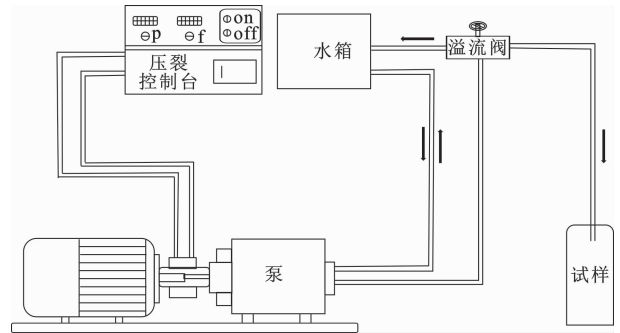


图3 脉动实验设备

Fig. 3 Pulsation Test Equipment

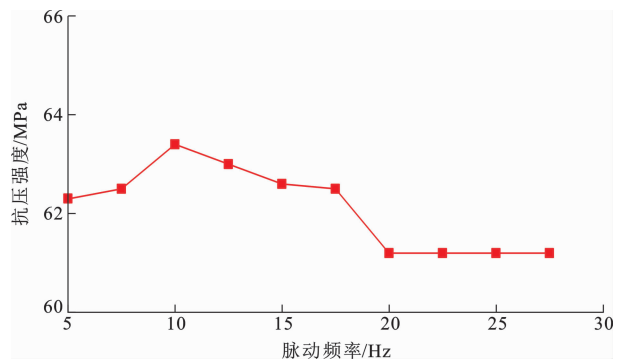


图4 岩石抗压强度随脉动频率的变化

Fig. 4 Change of Tensile Strength of a Rock with Pulsation Frequency

生摩擦,岩石表面粗糙度增加导致抗压强度上升。当脉动频率为10~20 Hz时,随着脉动频率的升高,抗压强度趋于下降,说明此阶段脉动频率对岩石抗压强度影响显著;当脉动频率为20 Hz时,岩石抗压强度达到最低值,而当脉动频率超过20 Hz并持续升高时,岩石抗压强度几乎保持不变,说明当脉动频率为20 Hz时,脉动频率与岩石的固有频率相近,两者间产生共振,对岩石内部结构造成最大疲劳破坏。因此,当脉动频率为20 Hz时,脉动作用对岩石的疲劳损伤作用效果最好。综上所述,当脉动频率约为20 Hz时,脉动作用对岩芯的破坏效果显著,岩石的抗压强度达到最小。综合基础理论可以得出岩石的理论破裂压力计算公式为

$$P=0.25\tau_i \cdot C_b \cdot 10^{-6} \quad (8)$$

$$\alpha=1-\frac{G_r}{C_b} \quad (9)$$

式中: τ_i 为起始剪切强度; P 为抗压强度; C_b 为岩石体积压缩系数; G_r 为岩石骨架体积压缩系数; α 为无因次参数。

将根据式(8)与(9)求出的无因次参数 α 代入Anderson模式,得到

$$P_f=\frac{2\mu}{1-\mu}P_0+\frac{1-3\mu}{1-\mu}\alpha P_p \quad (10)$$

式中: μ 为泊松比; P_0 为上覆岩层压力; P_p 为孔隙压力梯度; P_f 为破裂压裂梯度。

将计算结果与实际破裂压力进行对比,结果如图5所示。从图5可以看出:当脉动频率为5 Hz时,岩石的实际破裂压力比理论破裂压力降低了7.8%;当脉动频率为10 Hz时,岩石的实际破裂压力比理论破裂压力降低了11.5%;当脉动频率为20 Hz时,岩石的实际破裂压力比理论破裂压力降低了18.4%;当脉动频率为30 Hz时,岩石的实际破裂压力比理论破裂压力降低了14.6%。以上实验结果

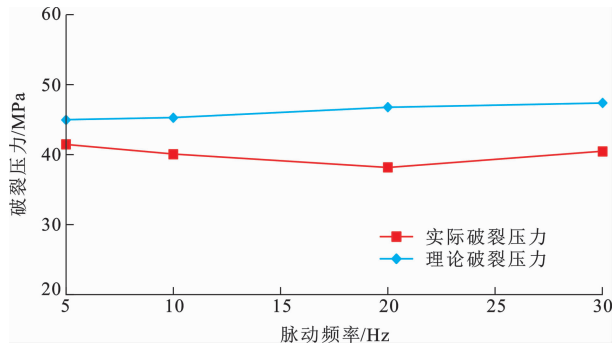


图5 岩芯脉动处理后破裂压力与脉动频率的变化

Fig. 5 Change of Rupture Pressure with Pulsation Frequency After Core Pulsation Treatment

证明,各频率脉动作用下的岩石实际破裂压力均小于理论破裂压力,且当脉动频率为20 Hz时,岩石的疲劳损伤尤为显著,降低破裂压力的效果最佳。

1.3 脉动压力幅值在裂缝中传播引起的压力变化

脉动波在裂缝传播过程中,脉动压力幅值的衰减变化受到岩石内的沿程阻力、裂缝发育情况、液体流动速度等的影响^[30]。

计算脉动压力幅值对人工模拟裂缝的影响可以使用脉动压力波传播方程。其表达式为

$$\frac{\partial v'}{\partial t} + v' \frac{\partial v'}{\partial x} + g \frac{\partial p'_s}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial p'_s}{\partial t} + v' \frac{\partial p'_s}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial v'}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

式中: p'_s 为裂缝内脉动压力幅值; v' 为液体流动脉动速度幅值; g 为重力加速度; $\frac{\partial v'}{\partial t}$ 为不同脉动压力时的频率; $\frac{\partial v'}{\partial x}$ 为脉动时的处理时长。

裂缝的尺寸、压裂液密度、黏度、裂缝壁面粗糙度等都会引起脉动压力幅值的扩大及压力增加。为探索脉动压力幅值对人工裂缝起裂的影响,有必要研究振幅与裂缝变化的关系。实验使用脉动频率为20 Hz,处理时长为10 s,脉动压力幅值控制在0.01~0.05 MPa内,测试脉动压裂对脉动压力幅值的影响,结果如图6与表2所示。

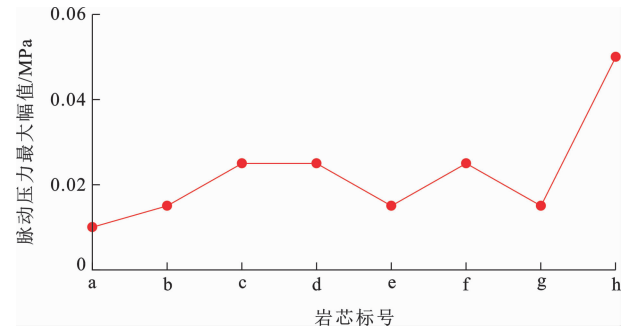


图6 脉动作用下不同裂缝中脉动压力幅值的变化

Fig. 6 Changes of Pulsating Pressure Amplitude in Different Fractures Under Pulsation

表2和图6展示了脉动作用下8种不同裂缝中的脉动压力幅值。岩芯标号a的裂缝指示脉动压力波初始传播时的幅值,最大幅值为0.01 MPa,波形近似为余弦波,数值周期性变化相对平稳。其他7种裂缝在脉动作用下幅值最小变化是初始脉动压力幅值的1.5倍,且波形均呈现无规律传播,部分人工裂缝的传播波形幅值增大近5倍,将脉动能力发挥到最大。因此,当频率一定时,脉动压力幅值越大,裂隙扩展速率越大,进而降低起缝压力,破坏岩石结

表2 脉动作用下不同裂缝中压力波对比

Table 2 Comparisons of Pressure Waves in Different Fractures Under Pulsation

岩芯标号	a	b	c	d	e	f	g	h
压力幅值/MPa	0.010	0.015	0.025	0.025	0.015	0.025	0.015	0.050
波形	余弦波	无规律波形	无规律波形	无规律波形	无规律波形	无规律波形	无规律波形	无规律波形
增长率		150%	250%	250%	150%	250%	150%	500%

构。由表2可知:岩芯标号b~h的裂缝出现无规律的压力波形,这是由岩石内部孔隙不均匀分布造成的;压力波的叠加、往复传播等,会引起脉动压力幅值的变化。

依据实验结果建立不同脉动压力幅值条件下的抗压强度变化曲线,结果如图7所示。低频脉动压力幅值变化与岩石的抗压强度成反比,近似线性关系,幅值越大,岩石损伤越明显^[3]。

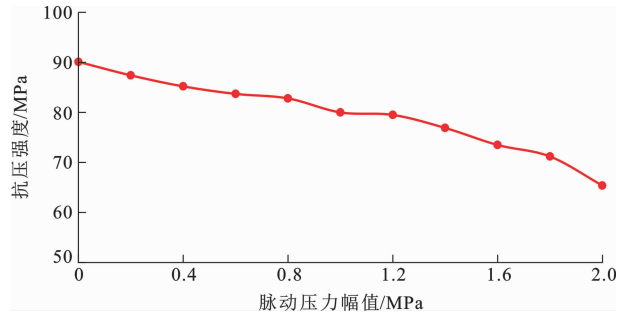


图7 岩石抗压强度与不同脉动压力幅值的关系

Fig. 7 Relationship Between Rock Compressive Strength and Different Pulsating Pressure Amplitudes

图8为脉动压裂工艺参数中脉动频率和传播距离的变化对最大振幅的影响。脉动频率越高,振幅衰减越快,低频脉动波有效传播距离越短。当脉动频率为10~20 Hz时,振幅的衰减率大于10%,可有效传播的作用距离大约100 m。

2 现场应用

2.1 脉动压裂计算参数

储层岩石的杨氏模量、泊松比、地应力状态在储层的压裂改造中决定了既定施工方案条件下水力裂缝的形态、方位、高度和宽度,压裂的增产效果也受其影响。

W油区C₆储层砂岩弹性模量为13.8~26.0 GPa,平均值为20.6 GPa;砂岩的泊松比为0.17~0.36,平均值为0.22;砂岩的抗压强度为73.62~204.00 MPa,平均值为129.8 MPa。对W油区采用声发射、凯塞效应测定最大水平地应力方位范围为NE 55°~80°,且从西南向东北有增加趋势。根据地应力的测试结果可知,最小主应力存在于水平

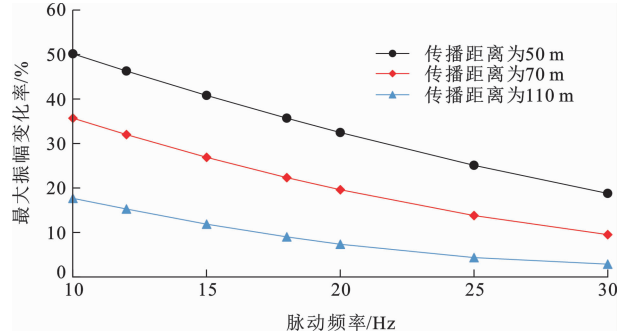


图8 不同传播距离下的脉动频率与振幅变化率的关系

Fig. 8 Relationship Between Amplitude Change Rate and Pulsation Frequency Under Dissemination Distances

方向,为每百米1.356~1.602 MPa,因此压裂容易形成垂直裂缝。

总体上,W油区砂岩具有杨氏模量相对较低、泊松比相对较大等岩石力学特征,导致在相同的条件下砂岩更有利于缝高的控制。

2.2 井组施工数据

现场试验选取在相比陕北其他油区压裂施工压力较高的W油区实施。同一丛式井组平台布井的先期注水井1口,菱形反九点井网布井7口(井编号为A1、A2、A3、A4、C1、C2、C3)。其中,井下低频脉动压裂试验井3口。C1、C2为井下低频脉动+常规工艺压裂井;C3为“多裂缝”压裂井;A1、A2、A3为常规工艺压裂井,A4为注水井。C2井压裂施工参数、使用支撑剂类型及规格、施工中的工作液配方、井组施工数据对比详见表3~6。

表3 压裂施工参数

Table 3 Fracturing Construction Parameters

注入系统	前置液量/ m ³	携砂液量/ m ³	顶替液量/ m ³	施工排量/(m ³ · min ⁻¹)	支撑剂量/ m ³	含砂浓度/(g· m ⁻³)	平均含砂量/ %	最高限压/ MPa
油管	15.0	83.7	5.9	1.2~1.4	25.0	468.0	30.0	45

当脉动工具下井时,考虑生物胶压裂液携砂稳定性,该井场先期同一天施工的C1井与C2井采用胍胶压裂液,目的是为了重点考察脉动工具的性能。6口井施工过程分为两个阶段,在两个阶段每口井的排量、含砂浓度等相当条件下,分别得到其平均施工压力,以确保结果的准确性。试验井的平均施

表 4 支撑剂类型及规格

Table 4 Proppant Type and Specification

支撑剂类型	粒径/mm	体积密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	视密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	用量/ m^3
石英砂 (20~40目)	0.425~0.850	1.56	1.76	25.00

表 5 工作液配方

Table 5 Working Fluid Formula

过程	配方	备注
施工	反排废液+生物胶	无预配液、无预混堵剂
施工中		小泵泵入生物胶混入井液
加砂中		压裂砂人工加入堵剂

工压力与同平台邻井平均施工压力的测试结果对比如表 7 所示。

由现场试验效果来看,脉动压力处理后的试验井 C1、C2 和 C3 的平均施工压力小于同平台邻井 A1、A2、A3(图 9),且施工压力下降最大达到 32%,低频脉动水力压裂的效果明显高于常规水力压裂,试验井施工压力显著下降(图 9)。

结合表 7 的试验数据,试验井 C3 中的两个施工阶段两次加入了暂堵剂,且在此之前已经加入过一次暂堵剂。从现场数据可以看出,当排量、含砂浓度、阶段时间、支撑剂量等相当的条件下,试验井的

表 6 井组施工数据对比

Table 6 Comparison of Well Group Construction Data

井号	射孔段/m	$Q_{\min}/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	$P_{\min}/$ MPa	破裂压力/MPa	加砂量/ m^3	最高加砂浓度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	压裂液类型	工艺	停泵压力/MPa	备注
C1	1 887~1 890	1.42	10.10	27.1	20	566	胍胶	单封单卡 $\Phi 23$ mm 节流+脉动工具+ $\Phi 28$ mm 节流	6.3	试验井
C2	1 932~1 934 1 936~1 938	1.42	11.00	30.7	25	649		单封单卡 $\Phi 23$ mm 节流+脉动工具+ $\Phi 28$ mm 节流	6.8	
A1	1 912~1 916	1.83	14.14	28.8	35	543	生物胶	单封单卡 $\Phi 23$ mm 节流	6.8	同平台邻井
A2	1 923~1 927	1.83	14.30	28.8	35	625		单封单卡+ $\Phi 23$ mm 节流	6.4	
A3	1 963~1 968	1.60	15.30	28.6	20	695		双封单卡+滑套 $\Phi 23$ mm 节流	7.1	
	1 975~1 978	1.60	15.08	23.6	35	695				
C3	1 833~1 937	1.84	11.40	32.0	40	644	单封单卡 $\Phi 23$ mm 节流	7.2	“多裂缝”压裂井(加暂堵剂+井下脉动)	

注: Q_{\min} 为最小排量; P_{\min} 为最小施工压力;表中数据源自压裂施工分钟数据。

表 7 试验井与同平台邻井在两个施工阶段的平均施工压力

Table 7 Average Construction Pressures of Test Wells and Adjacent Wells on the Same Platform in Two Construction Stages

技术名称	低频脉动水力压裂技术			常规水力压裂技术				
	位置	C1 井	C2 井	C3 井	A1 井	A2 井	A3 井下层	A3 井上层
第一阶段平均施工压力/MPa		13.20	12.27	13.8	15.81	14.81	18.88	19.59
第二阶段平均施工压力/MPa		12.27	11.16	16.73	15.79	14.81	16.73	19.30

施工压力显著下降。该区块为多裂缝的压裂禁区,加暂堵剂后容易出现砂堵问题,导致现场施工中被迫停泵。由图 10 可知:试验井 C1、C2、C3 的最小施工压力均小于其他同平台邻井,试验井 C1 最小施工压力为 10 MPa,而同平台邻井的最小施工压力为 14 MPa,施工压力的下降幅度为 22%;加砂前,试验井 C1、C2 的施工压力也都小于同平台邻井,试验井 C2 的施工压力为 18 MPa,此时同平台邻井的最大施工压力为 20 MPa,施工压力的下降幅度为 10.9%;加砂后,3 个试验井的最大施工压力为 18 MPa,同平台邻井的最大施工压力为 21 MPa,施工压力的压力下降幅度为 20%,井下低频脉动水力压裂不仅可应用于常规水力压裂,也可应用于“多裂缝”压裂,且应用效果较好,没有砂堵问题出现,提高了施工安全性,强化了压裂施工效果。

3 结 语

(1)低频脉动水力压裂能够对岩石造成疲劳破坏,脉动作用促进裂缝的扩展和沟通,裂缝分布均匀,构成粗糙的破裂面,形成裂缝分布均匀的裂缝网络。

(2)脉动频率与脉动压力幅值是低频脉动水力压裂的关键因素。合适的脉动作用导致岩石结构破

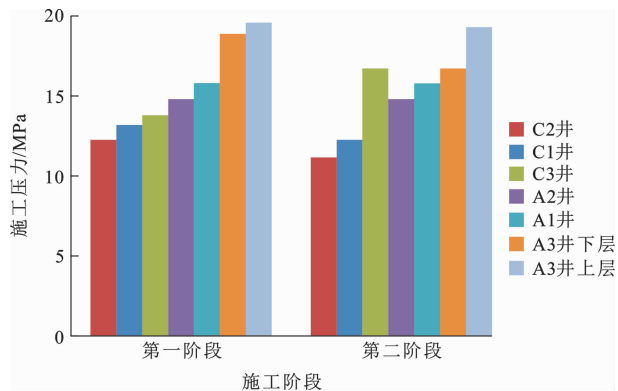


图9 试验井与同平台邻井平均施工压力在两个施工阶段的对比

Fig. 9 Comparison of Average Construction Pressures Between Test Wells and Adjacent Wells on the Same Platform in Two Construction Stages

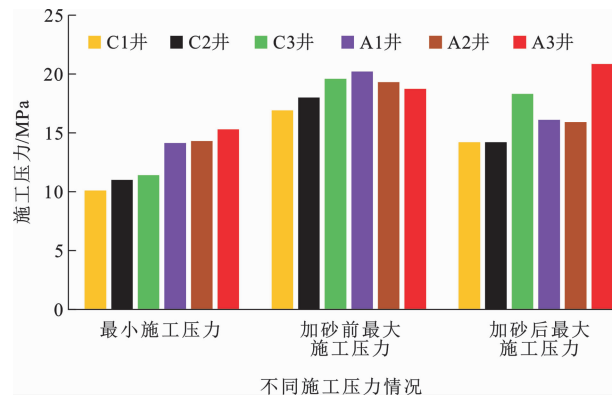


图10 试验井与同平台邻井加砂前、后施工压力对比

Fig. 10 Comparison of Construction Pressures Before and After Sand Addition Between Test Wells and Adjacent Wells on the Same Platform

坏,降低压裂液沿程的能量损失,对施工压力的降低具有积极作用。

(3)低频脉动使施工裂缝向前延伸,有效脉动作用过程时间长,且有效传播距离较远,可达到100 m。

(4)低频脉动水力压裂技术在“多裂缝”压裂井的顺利施工,证明该技术具有降低施工压力的功能,可在更为复杂的致密砂岩储层中应用。

(5)因为实验设备等条件限制,目前低频脉动水力压裂技术的理论研究处于起步阶段,需要结合更多现场应用来加强研究。

由衷祝贺《地球科学与环境学报》更名二十周年! 贵刊一直致力于报道地球科学和环境领域的高质量、前沿性学术研究成果,逐渐成为被广泛认可的权威期刊,深受广大读者的喜爱和信任! 贵刊的快速发展离不开学术共同体的鼎力支持,期待贵刊能深度融入学术共同体,全方位挖掘青年学术新星,报

道更多高质量科研成果,为我国地球科学和环境领域的科研进步贡献更大力量!

参考文献:

References:

- [1] 史广山,魏风清,高吾斌. 基于空气脉冲循环作用的抽采钻孔增透技术研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(3): 207-210.
SHI Guang-shan, WEI Feng-qing, GAO Wu-bin. Research on Permeability Improvement Technology of Borehole Based on Air Pulse Circulation[J]. Coal Technology, 2023, 42(3): 207-210.
- [2] 李 德. 定向长钻孔水力压裂煤层增透提高瓦斯抽采效果研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
LI Si. Study on Permeability Improvement and Gas Extraction Effect of Hydraulic Fracturing of Coal Seam with Directional Long Borehole[D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.
- [3] 冯仁俊. 脉冲射流割缝控制压裂技术关键参数研究及应用[J]. 煤炭工程, 2022, 54(1): 63-69.
FENG Ren-jun. Research on Key Technical Parameters of Control Fracturing with Pulse Jet Slotting and Its Application[J]. Coal Engineering, 2022, 54(1): 63-69.
- [4] 李晓坤,刘瑞鹏. 含夹矸煤层水力割缝瓦斯抽采技术研究及应用[J]. 工矿自动化, 2023, 49(4): 134-140.
LI Xiao-shen, LIU Run-peng. Research and Application of Hydraulic Slotting Gas Extraction Technology in Coal Seams Containing Gangue[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(4): 134-140.
- [5] 骆家宁,谢雄刚,杨家向,等. 煤巷条带超高压水力割缝增透试验[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2023, 38(1): 19-24.
LUO Jia-ning, XIE Xiong-gang, YANG Jia-xiang, et al. Experimental Study on Anti-reflection of Ultra-high Pressure Hydraulic Seam in Coal Roadway[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(1): 19-24.
- [6] 孙 京,李贤忠,李克相. 水力割缝增透技术在近距离煤层群石门揭煤中的应用[J]. 煤炭科技, 2023, 44(1): 123-126.
SUN Jing, LI Xian-zhong, LI Ke-xiang. Application of Hydraulic Slitting and Permeability Enhancement Technology in Coal Seam Group Crosscut Uncovering[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2023, 44(1): 123-126.
- [7] 叶功勤,曹 函,高 强,等. 充填型单缝煤岩水力脉动解堵试验研究[J]. 工程科学学报, 2022, 44(3):

- 348-356.
- YE Gong-qin, CAO Han, GAO Qiang, et al. Experimental Study of the Unblocking of Coalbed with Single-slit Filling by Pulse Hydraulic Fracturing [J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44 (3): 348-356.
- [8] 杨宏民, 贾镇府, 尹海. 巷帮钻场扇形钻孔水力造穴增透促抽技术研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(2): 112-116.
- YANG Hong-min, JIA Zhen-fu, YIN Hai. Research on Technology of Hydraulic Cave-making to Increase Permeability and Promote Drainage for Fan-shaped Drilling in Roadway Side Drilling Field [J]. Coal Technology, 2023, 42(2): 112-116.
- [9] 李全贵, 武晓斌, 翟成, 等. 脉动水力压裂频率与流量对裂隙演化的作用[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(6): 1067-1076.
- LI Quan-gui, WU Xiao-bin, ZHAI Cheng, et al. Effect of Frequency and Flow Rate of Pulsating Hydraulic Fracturing on Fracture Evolution [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(6): 1067-1076.
- [10] 吴琼, 张凤翔, 陈松柏, 等. 基于水力压裂下脉冲放电技术的煤层气开采应用研究[J]. 煤炭与化工, 2022, 45(8): 108-224.
- WU Qiong, ZHANG Feng-xiang, CHEN Song-bai, et al. Application of Pulse Discharge Technology in Coalbed Methane Exploitation Based on Hydraulic Fracturing [J]. Coal and Chemical Industry, 2022, 45(8): 108-224.
- [11] 魏超. 预脉冲组合压裂下水力裂缝扩展及缝网形成机制研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- WEI Chao. Study on the Mechanism of Hydraulic Fracture Propagation and Fracture Network Formation Under Pre-pulse Hydraulic Fracturing [D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [12] 董康兴, 赵安楠, 王素玲, 等. 脉冲参数对致密储层水力压裂起裂压力影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2022, 41(1): 22-26.
- DONG Kang-xing, ZHAO An-nan, WANG Su-ling, et al. Effect of Pulse Parameters on Hydraulic Fracturing Initiation Pressure of Tight Reservoir [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2022, 41(1): 22-26.
- [13] 饶庆. 加脉冲条件下的水力压裂裂缝扩展规律研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2020.
- RAO Qing. Research on Fracture Propagation Law of Hydraulic Fracturing Under Pulsed Condition [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2020.
- [14] 马淑胤. 水力压裂增透工艺及瓦斯综合治理效果考察研究[J]. 能源与环保, 2023, 45(3): 134-139, 143.
- MA Shu-yin. Investigation and Research on Hydraulic Fracturing and Permeability Enhancement Technology and Comprehensive Gas Control Effect [J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(3): 134-139, 143.
- [15] 尹陈, 石学文, 才博, 等. 天然裂缝复杂程度对致密储层破裂特征的影响[J]. 高校地质学报, 2023, 29(1): 128-137.
- YIN Chen, SHI Xue-wen, CAI Bo, et al. The Effect of Pre-existing Fracture Complexity on Rupture Characteristics of Tight Reservoir [J]. Geological Journal of China Universities, 2023, 29(1): 128-137.
- [16] 柴锡军, 熊俊杰, 杨程涛. 煤矿井下机械造穴卸压增透装置研究与应用[J]. 煤炭技术, 2023, 42(2): 163-166.
- CHAI Xi-jun, XIONG Jun-jie, YANG Cheng-tao. Research and Application of Pressure Releasing and Permeability Improvement Equipment for Mechanical Caving in Underground Coal Mine [J]. Coal Technology, 2023, 42(2): 163-166.
- [17] 易书钢, 郝殿, 赵庆红, 等. 机械造穴增透技术在硬煤层穿层抽采钻孔的应用研究[J]. 煤矿机械, 2023, 44(2): 137-140.
- YI Shu-gang, HAO Dian, ZHAO Qing-hong, et al. Study on Application of Mechanical Caving and Permeability Increasing Technology in Hard Coal Seam Cross Seam Drainage Drilling [J]. Coal Mine Machinery, 2023, 44(2): 137-140.
- [18] 聂翠平, 兰剑平, 王祖文, 等. 井下低频水力脉动压裂技术及其应用[J]. 钻采工艺, 2021, 44(2): 38-42.
- NIE Cui-ping, LAN Jian-ping, WANG Zu-wen, et al. Downhole Low Frequency Hydraulic Pulsing Fracturing Technology and Its Application [J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(2): 38-42.
- [19] 聂翠平, 兰剑平, 王祖文, 等. 井下低频水力脉动压裂机理与应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2020, 35(5): 54-59.
- NIE Cui-ping, LAN Jian-ping, WANG Zu-wen, et al. Mechanism Study and Application of Downhole Low-frequency Pulsing Hydraulic Fracturing Technology [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2020, 35(5): 54-59.
- [20] 张世殊, 刘恩龙, 张建海. 砂岩在低频循环荷载作用下的疲劳和损伤特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增1): 3212-3218.

- ZHANG Shi-shu, LIU En-long, ZHANG Jian-hai. Experimental Study of Fatigue Damage Properties of Sandstone Samples Under Cyclic Loading with Low Frequencies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 3212-3218.
- [21] 李贤忠. 高压脉动水力压裂增透机理与技术[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- LI Xian-zhong. The Mechanism and Technology of Permeability Enhancements in Coal Seam Based on High Pressure Pulsating Hydraulic Fracturing[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [22] 杜金磊. 低透气性突出煤层高压水力割缝增透技术研究及应用[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2022.
- DU Jin-lei. Research on Damage Deformation Laws and Acoustic Emission Characteristics of Raw Coal Under Different Loading and Unloading Methods [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2022.
- [23] 邓华锋, 胡玉, 李建林, 等. 循环荷载的频率和幅值对砂岩动力特性的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3402-3409, 3418.
- DENG Hua-feng, HU Yu, LI Jian-lin, et al. Effects of Frequency and Amplitude of Cyclic Loading on the Dynamic Characteristics of Sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12): 3402-3409, 3418.
- [24] 张海波. 低频水力脉动压裂中脉动在垂直裂缝中的传播特性研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- ZHANG Hai-bo. Study on Propagation Characteristics of Pulsing in Vertical Fractures During Low-frequency Hydraulic Pulsing Fracturing[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2020.
- [25] 李全贵. 脉动载荷下煤体裂隙演化规律及其在瓦斯抽采中的应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- LI Quan-gui. Research on the Evolution Law of Coal Fracture Under Pulse Loading and Its Application on Gas Extraction[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [26] 宋建民, 邹永洛. 机械造穴增透技术在高瓦斯低透气性煤层的应用研究[J]. 山西煤炭, 2022, 42(4): 25-32.
- SONG Jian-min, ZOU Yong-ming. Application of Mechanical Cavitation and Permeability Enhancement Technology in Coal Seams of High Gas and Low Permeability[J]. Shanxi Coal, 2022, 42(4): 25-32.
- [27] 张小军, 郭继香, 许振芳, 等. 压裂增产过程中页岩层伤害机理研究进展[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(34): 14991-14998.
- ZHANG Xiao-jun, GUO Ji-xiang, XU Zhen-fang, et al. Research Progress on Shale Formation Damage Mechanism During Fracturing Stimulation [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(34): 14991-14998.
- [28] 杨长鑫, 杨兆中, 李小刚, 等. 中国煤层气地面井开采储层改造技术现状与展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 154-162.
- YANG Chang-xin, YANG Zhao-zhong, LI Xiao-gang, et al. Status and Prospect of Reservoir Stimulation Technologies for CBM Surface Well Production in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 154-162.
- [29] 康红普, 姜鹏飞, 冯彦军, 等. 煤矿巷道围岩卸压技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 1-15.
- KANG Hong-pu, JIANG Peng-fei, FENG Yan-jun, et al. Destressing Technology for Rock Around Coal Mine Roadways and Its Applications[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 1-15.
- [30] 徐经苍, 南晶晶, 刘斌, 等. 瓦斯抽采影响因素及布孔参数优化模拟研究[J]. 煤炭科技, 2023, 44(2): 74-80.
- XU Jing-cang, NAN Jing-jing, LIU Bin, et al. Simulation Study on Influencing Factors of Gas Drainage and Optimization of Hole Layout Parameters[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2023, 44(2): 74-80.