

全过程下钻速度对地层裂缝宽度影响^{*}

赵世贵^{1,2}, 孔祥伟^{1,2}, 钟 森³

- (1. 长江大学 石油工程学院, 武汉 430100;
2. 油气钻完井技术国家工程研究中心(长江大学), 武汉 430100;
3. 重庆渝浮能源发展有限公司, 重庆 400000)

摘要: 下钻速度通过影响井筒有效压力而引起地层裂缝宽度变化,造成井漏隐患.结合下钻井深、钻具组合、地层岩石物理参数、钻井液性能,考虑下钻速度和钻井液可压缩系数等参数,建立了井筒压力瞬变与裂缝变形耦合作用的数学模型.模型采用有限元-有限体积耦合方法进行求解,并利用四川盆地威远区块自 X 井龙马溪组硬脆性页岩地层数据验证了其可靠性.结果表明:① 下钻速度从 0.5 m/s 增加到 2.0 m/s 时,井筒压力从 86.0 MPa 增加到 106.6 MPa,裂缝宽度从 0.478 mm 增加到 0.881 mm.② 裂缝宽度随下钻井深、钻柱环空比的增加而增加.下钻速度为 0.5 m/s 时,下钻井深从 1 500 m 增加到 5 500 m,裂缝宽度从 0.432 mm 增加到 0.478 mm;钻柱环空比从 0.59 增加到 0.65,裂缝宽度从 0.463 mm 增加到 0.487 mm.③ 下钻速度从 0 增加到 1.5 m/s,下钻井深为 1 500 m 时,裂缝宽度从 0.4 mm 增加到 0.474 mm;下钻井深增加到 5 500 m 时,裂缝宽度从 0.5 mm 增加到 0.624 mm;裂缝宽度随下钻速度增加而增加,下钻速度超过 1.0 m/s 后,增加趋势更加显著;且随着下钻井深增加,裂缝宽度的增加幅度越大.本研究为优化下钻操作参数提供了理论依据,对预防钻井过程中的井漏事故具有重要指导意义.

关键词: 下钻速度; 裂缝宽度; 井筒压力; 流-固耦合

中图分类号: O39 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.460178

Effects of Entire Process Tripping-in Speeds on Formation Fracture Widths During the Entire Process

Zhao Shigui^{1,2}, Kong Xiangwei^{1,2}, Zhong Sen³

- (1. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan 430100, P.R. China;
2. National Engineering Research Center for Oil & Gas Drilling and Completion Technology
(Yangtze University), Wuhan 430100, P.R. China;
3. Chongqing Yufu Energy Development Co., Ltd., Chongqing 400000, P.R. China)

Abstract: The tripping-in speed affects the wellbore effective pressure, leading to changes in formation fracture widths and posing a risk of mud loss. The tripping-in speed and drilling fluid compressibility, along with the well depth, the bottom-hole assembly, the formation petrophysical parameters, and the drilling fluid properties were incorporated to build a mathematical model coupling wellbore pressure transients and fracture deformation. The model was solved with the finite element-finite volume coupling method and validated with data

^{*} 收稿日期: 2025-09-20; 修订日期: 2025-11-11

基金项目: “十五五”新型油气勘探开发国家科技重大专项(SQ2025AAA120076)

作者简介: 赵世贵(1989—),男,博士生(E-mail: zhao_shigui.stu@yangtzeu.edu.cn);

孔祥伟(1982—),男,博士,教授,博士生导师(通信作者. E-mail: 76922591@qq.com).

引用格式: 赵世贵,孔祥伟,钟森. 全过程下钻速度对地层裂缝宽度影响[J]. 应用数学和力学, 2026, 47(8): 999-1008.

from the hard-brittle shale formation of the Longmaxi formation in the Zi X well of the Weiyuan Block in the Sichuan Basin. The results show that, i. when the tripping-in speed increase from 0.5 m/s to 2.0 m/s, the wellbore pressure will increase from 86.0 MPa to 106.6 MPa, while the fracture width will rise from 0.478 mm to 0.881 mm. ii. Bigger fracture widths go with greater tripping-in depths and higher drill string annular ratios. At a tripping-in speed of 0.5 m/s, when the tripping depth increases from 1 500 m to 5 500 m, the fracture width will rise from 0.432 mm to 0.478 mm; when the drill string annular ratio increases from 0.59 to 0.65, the fracture width will rise from 0.463 mm to 0.487 mm. iii. As the tripping-in speed increases from 0 to 1.5 m/s, at a tripping depth of 1 500 m, the fracture width will rise from 0.4 mm to 0.474 mm; at a tripping depth of 5 500 m, the fracture width will rise from 0.5 mm to 0.624 mm. Bigger fracture widths go with higher tripping-in speeds, and the rising trend will be more pronounced once the tripping-in speed exceeds 1.0 m/s; further, this rise becomes more pronounced with greater tripping depths. This study provides a theoretical basis for optimizing tripping-in operation parameters and offers an important guidance for preventing mud loss incidents during drilling.

Key words: tripping-in speed; fracture width; wellbore pressure; fluid-solid coupling

0 引言

下钻操作是钻井过程中必不可少的重要环节,下钻速度通过改变井筒压力影响裂缝张开和闭合,导致井漏和堵漏后复漏.处理井漏不仅损耗大量钻井液,延长钻井周期,处理不当还可能导致井塌、井喷、卡钻等复杂情况^[1-4].以往的研究大多关注钻井过程中的裂缝扩展机制或防漏堵漏技术^[5-15],而对下钻速度如何影响裂缝宽度的研究相对较少.

近年来,随着数值模拟技术和流-固耦合理论的发展,研究人员开始关注钻井过程中裂缝的动态响应行为.例如:张世锋等^[16]研究了泥(页)岩地层漏失诱导裂缝扩展机制;何新星等^[17]研究了地层裂缝动态变形对堵漏效果的影响;杜旭林等^[18]研究了致密砂岩气水两相流固耦合裂缝动态闭合分析半解析模型;还有一些学者研究了可变形天然裂缝的动态宽度变化^[19-24].这些成果为理解裂缝宽度演化规律奠定了重要基础,然而,目前仍缺乏对下钻速度与裂缝宽度之间关联性的研究.传统方法多依赖现场经验、地质建模与测井数据估算原位缝宽,尚未从力学机制与数学建模角度系统地揭示“下钻速度—井筒压力—裂缝宽度”之间的内在联系.

本文基于应用数学和力学分析方法,通过建立井筒压力-裂缝内流体耦合的数学模型,分析了下钻速度与井筒压力的动态变化特征,探讨了下钻速度、下钻井深、钻柱环空比等参数下裂缝宽度的响应规律,揭示了下钻速度通过井筒“激动压力”效应影响的裂缝宽度变化规律,提出了分段控速下钻建议,以期在现场优化下钻操作参数、降低漏失风险提供参考.

1 数学模型建立

1.1 井筒压力动态变化模型

下钻过程中,钻柱的向下移动会在井筒内产生激动压力,导致井筒压力发生动态变化.这一变化不仅取决于下钻速度,还与钻井液的可压缩性及井筒-地层间的流体交换密切相关.为描述这一瞬变过程,基于质量守恒定律建立了井筒压力动态变化模型^[25]:

$$\begin{cases} \frac{\partial P_w}{\partial t} + v_z \frac{\partial P_w}{\partial z} = \frac{\beta}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) - \frac{\beta}{A} \frac{\partial Q}{\partial z}, \\ A = \frac{\pi D^2}{4}, \\ Q = \frac{\pi d^2}{4} v_z, \end{cases} \quad (1)$$

其中, P_w 为井筒压力, MPa; t 为时间, s; z 为井深坐标, m; v_z 为下钻速度, m/s; β 为钻井液的可压缩系数, 无

量纲; ρ 为钻井液密度, g/cm^3 ; A 为井筒横截面积, m^2 ; Q 为钻井液流量, m^3/s ; D 为井眼直径, m ; d 为钻柱直径, m 。

在该模型中,第一个方程左侧两项共同构成压力的物质导数,其中 $\partial P_w/\partial t$ 代表井筒固定位置处的局部压力瞬变, $v_z \partial P_w/\partial z$ 表征由于钻柱运动穿越静液柱压力梯度所带来的对流效应;右侧第一项描述了钻井液因自身压缩所产生的“缓冲”效应;右侧第二项 $-(\beta/A) \partial Q/\partial z$ 描述了因钻井液流入地层(即漏失)所造成的质量损失源汇,是连接井筒系统与地层系统的关键桥梁。该方程整体上揭示了下钻过程中,井筒压力的动态响应是由对流、流体压缩性及地层交换三者共同决定的物理本质。

1.2 裂缝变形控制方程

基于岩石力学理论,裂缝的变形方程为^[26-28]

$$\sigma_n = K_n \cdot w + P_f, \quad (2)$$

其中, σ_n 为作用在裂缝面上的正应力, MPa ; K_n 为裂缝的法向刚度, Pa/m ; w 为裂缝宽度, mm ; P_f 为裂缝内的流体压应力, MPa 。

根据渗流理论,裂缝内流体流动符合立方定律^[29]:

$$q = -\frac{w^3}{12\mu} \frac{\partial P_f}{\partial l}, \quad (3)$$

其中, q 为裂缝内流体的单位体积流量, m^3/s ; μ 为钻井液黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; l 为裂缝长度坐标, m 。

1.3 流-固耦合方程

井筒压力与裂缝变形之间存在强烈的相互作用关系,如图1所示,需要通过流-固耦合方法进行求解。裂缝宽度随时间的变化率方程为

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{1}{K_n} \left(\frac{\partial P_f}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_n}{\partial t} \right). \quad (4)$$

同时,裂缝内的流体压力分布满足质量守恒方程

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial l} = 0. \quad (5)$$

通过联立以上方程,建立下钻速度-井筒压力-裂缝宽度相互作用的数学模型。

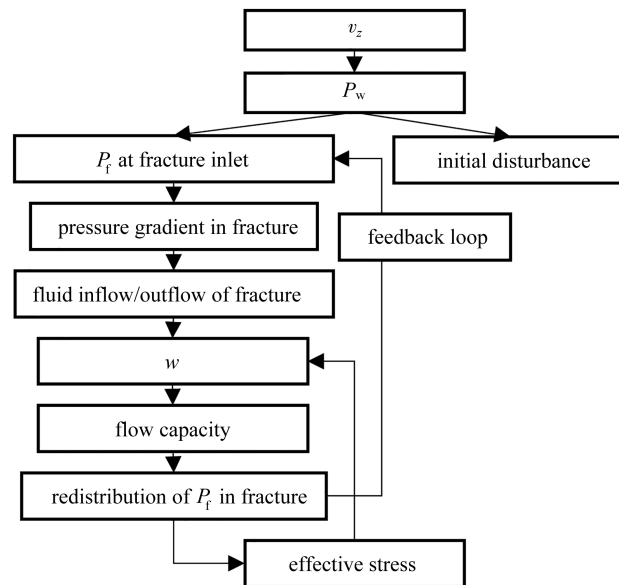


图1 井筒压力与裂缝宽度相互作用关系

Fig. 1 The interaction between the wellbore pressure and the fracture width

2 数值方法及验证

2.1 数值求解方法

2.1.1 流体域离散(采用有限体积法(FVM))

① 网格生成:将一维裂缝长度 L 离散为 N 个控制体(单元),每个单元的中心点为节点 i ,其宽度为 w_i ,压力为 $P_{f,i}$.

② 积分方程:对每个控制体 i 进行积分,得到控制方程

$$\int_{\Delta V_i} \frac{\partial w}{\partial t} dV - \int_{\Delta V_i} \nabla \cdot \left(\frac{w^3}{12\mu} \nabla P_f \right) dV = 0. \quad (6)$$

③ 应用 Gauss 定理:

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} \Delta V_i - \left[\left(\frac{w^3}{12\mu} \frac{\partial P_f}{\partial l} \right)_{i+1/2} A_{i+1/2} - \left(\frac{w^3}{12\mu} \frac{\partial P_f}{\partial l} \right)_{i-1/2} A_{i-1/2} \right] = 0, \quad (7)$$

其中 $A_{i\pm 1/2}$ 是单元界面处的面积.

④ 界面通量计算:采用调和平均法计算得到界面传导率

$$T = \frac{w^3}{12\mu}, \quad (8)$$

$$T_{i+1/2} = \frac{2}{1/T_i + 1/T_{i+1}}. \quad (9)$$

采用中心差分法计算得到界面压力梯度

$$\left. \frac{\partial P_f}{\partial l} \right|_{i+1/2} \approx \frac{P_{f,i+1} - P_{f,i}}{\Delta l}. \quad (10)$$

最终,对每个控制体都能得到一个离散化的方程,并将所有方程组装成一个线性系统:

$$\mathbf{A}(w^{(k)}) \cdot \mathbf{P}_f^{k+1} = \mathbf{b}, \quad (11)$$

其中矩阵 $\mathbf{A}$ 依赖于当前迭代步的宽度场 $w^{(k)}$.

2.1.2 固体域离散(采用有限元法(FEM))

① 弱形式:将方程(2)写成等效的弱形式(加权残值法).

② 单元插值:在每个单元上,宽度 w 和压力 P_f 用形函数 N_j 插值,得到

$$w^h = \sum N_j w_j, \quad (12)$$

$$P_f^h = \sum N_j P_{f,j}. \quad (13)$$

③ 组装系统:最终得到一个系统方程,但由于本构关系简单,直接退化为在每个节点上求解,得到

$$w_i^{k+1} = \frac{\sigma_{n,i} - P_{f,i}^{k+1}}{K_{n,i}}. \quad (14)$$

2.1.3 时间离散

将流体方程中的时间导数项离散为

$$\frac{\partial w}{\partial t} \approx \frac{w_i^{t+\Delta t} - w_i^t}{\Delta t}. \quad (15)$$

2.1.4 耦合迭代策略

采用固定应力分裂法的迭代思想,并结合 Newton-Raphson 迭代,求解技术路线见图 2.在每个时间步 t^{n+1} 内:

① 初始化:用上一时间步的解初始化 $w^{(0)} = w^n, P_f^{(0)} = P_f^n$. 设置迭代计数器 $k = 0$.

② 流体子步:固定裂缝宽度 $w^{(k)}$;求解流体方程,得到新的压力场 $P_f^{(k+1)}$:

$$\left[\frac{1}{\Delta t} \mathbf{M} + \mathbf{A}(w^{(k)}) \right] \Delta P_f = -\mathbf{R}(P_f^{(k)}, w^{(k)}), \quad (16)$$

其中 $\mathbf{R}$ 是残差向量。

③ 固体子步:固定新求得的流体压力 $P_f^{(k+1)}$;代入式(14),更新整个裂缝上的宽度场。

④ 收敛性检查:计算两次迭代间变量变化的相对范数,得

$$\varepsilon_w = \frac{\|w^{(k+1)} - w^{(k)}\|}{\|w^{(k+1)}\|}, \tag{17}$$

$$\varepsilon_{P_f} = \frac{\|P_f^{(k+1)} - P_f^{(k)}\|}{\|P_f^{(k+1)}\|}. \tag{18}$$

如果 $\varepsilon_w < 10^{-5}$ 且 $\varepsilon_{P_f} < 10^{-5}$,则当前时间步收敛,接受 $w^{n+1} = w^{(k+1)}$, $P_f^{n+1} = P_f^{(k+1)}$,然后进入下一个时间步。否则,令 $k = k + 1$ 返回第②步继续迭代。

⑤ 井筒耦合:在每个耦合迭代步的最后,根据当前下钻速度 v_z ,通过井筒质量守恒方程更新井筒压 P_w ;将新的 P_w 作为流体方程在 $l = 0$ 处的边界条件,用于下一个迭代步。

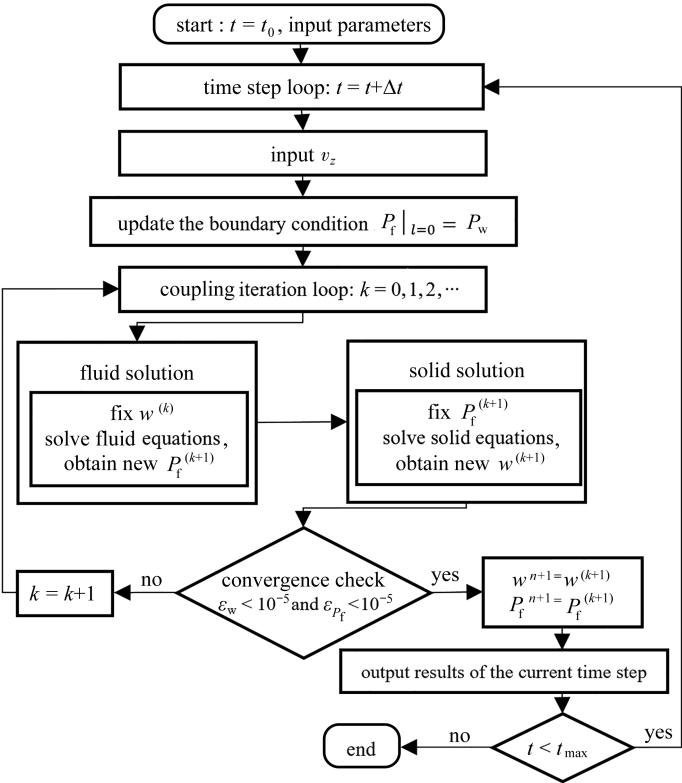


图 2 流-固耦合迭代技术路线

Fig. 2 The technical workflow of fluid-solid coupling iteration

2.2 模型验证

采用四川盆地威远区块自 X 井龙马溪组硬脆性页岩地层数据进行了验证。该区域地层深度约 4 000 ~ 4 200 m, 预测地层压力系数为 2.1, 钻井液密度为 2.15~2.32 g/cm³。由本模型计算的地层裂缝初始宽度为 0.40 mm, 与测井解释的裂缝宽度 0.382 mm 相比,误差为 4.7%。表 1 为井筒压力计算结果与现场实测结果对比,相对误差在 3.8%~4.4%,证明了模型的准确性。

表 1 井筒压力计算结果与现场实测结果对比

Table 1 Comparison of the wellbore pressure between calculated results and field measured results

tripping-in speed/(m/s)	measured result/MPa	calculated result/MPa	relative error/%
0.1	86.1	82.8	3.8
0.2	87.3	83.5	4.4
0.3	87.8	84.1	4.2
0.4	88.5	84.7	4.3

3 结果与讨论

3.1 下钻速度对井筒压力动态变化的影响

利用本文所建立的数学模型,计算了下钻速度为 0.5~2.0 m/s 时的井筒压力,下钻速度曲线见图 3.如图 4 所示,随着下钻速度的增加,井筒压力将呈上涨趋势;当下钻速度从 0.5 m/s 增加至 2.0 m/s 时,井筒压力从 86.0 MPa 增加到 106.6 MPa.

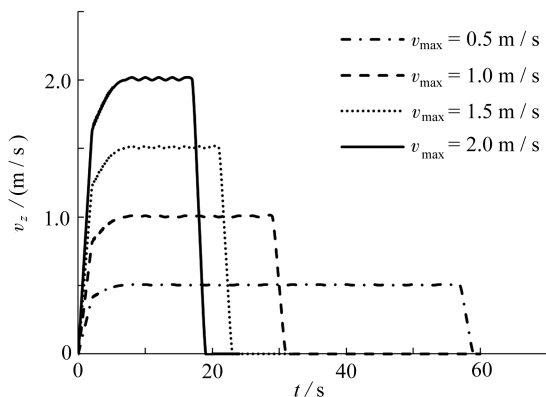


图 3 下钻速度曲线

Fig. 3 The tripping-in speed curves

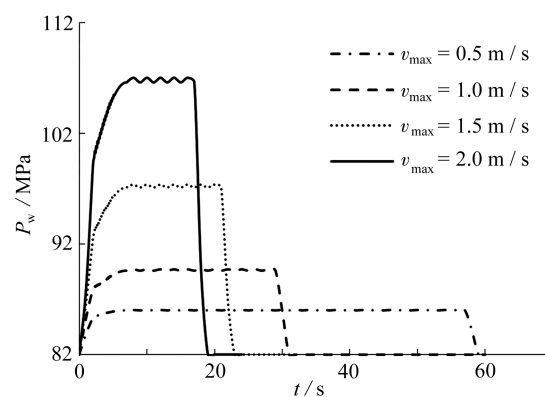


图 4 不同下钻速度下的井筒压力变化

Fig. 4 Variations of the wellbore pressure under different tripping-in speeds

3.2 下钻速度与裂缝宽度变化的关系

图 5 为下钻速度为 0.5~2 m/s 时的裂缝宽度变化图.裂缝宽度随下钻速度增加而增加,当下钻速度为 0.5 m/s 时,裂缝宽度从 0.4 mm 增加至 0.478 mm,缝宽增幅为 19.5%;当下钻速度为 2.0 m/s 时,裂缝宽度从 0.4 mm 增加至 0.881 mm,缝宽增幅为 120.3%;下钻速度 2.0 m/s 的缝宽增幅是 0.5 m/s 的 6.2 倍.这是因为下钻速度越快,产生的激动压力越大,导致裂缝入口的压差越大,从而使缝宽的增幅更显著.

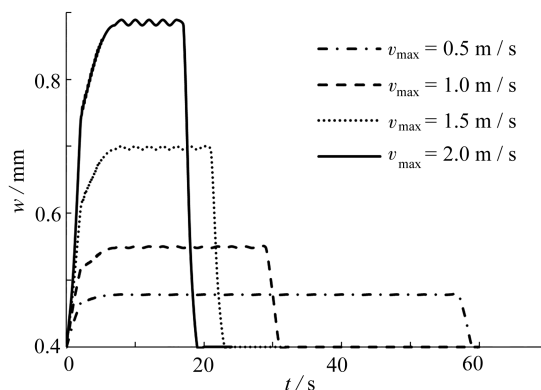


图 5 不同下钻速度下的裂缝宽度变化

Fig. 5 Variations of the fracture width under different tripping-in speeds

3.3 下钻井深与裂缝宽度变化的关系

图 6 描绘下钻速度为 0.5 m/s 时不同下钻井深的裂缝宽度变化情况.裂缝宽度随下钻井深增加而增加,井深 1 500 m 时裂缝宽度从 0.4 mm 增加到 0.432 mm,缝宽增幅为 8%;井深 5 500 m 时裂缝宽度从 0.4 mm 增加到 0.478 mm,缝宽增幅为 19.5%;井深 5 500 m 的缝宽增幅是 1 500 m 时的 2.4 倍.这是因为下钻位置越靠近井底,井筒内钻井液的静液柱压力和下钻过程中的激动压力越大,缝宽增幅随之加大.

3.4 不同钻具组合与裂缝宽度变化的关系

在井深 5 000 m 以上,现场常用钻具组合有:

钻柱组合 1: $\Phi 215.9$ mm 钻头+ $\Phi 165.1$ mm 钻铤+ $\Phi 127$ mm 钻杆;

钻柱组合 2: $\Phi 215.9$ mm 钻头+ $\Phi 165.1$ mm 钻铤+ $\Phi 139.7$ mm 钻杆;
钻柱组合 3: $\Phi 149.2$ mm 钻头+ $\Phi 121$ mm 钻铤+ $\Phi 101.6$ mm 钻杆.

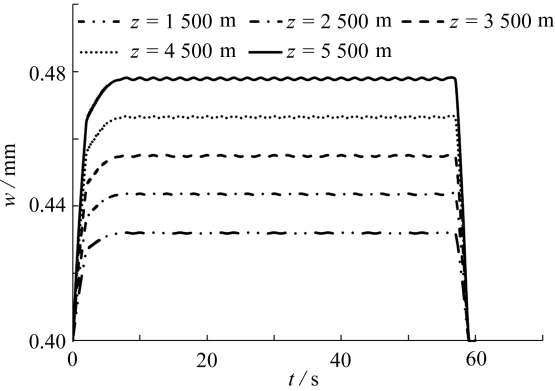


图 6 不同下钻井深下的裂缝宽度变化
Fig. 6 Variations of the fracture width at different tripping depths

表 2 各钻具组合环空比

Table 2 Annular ratios of different bottom hole assemblies (BHA)

BHA	drill collar annular ratio	drill pipe annular ratio
1	0.76	0.59
2	0.76	0.65
3	0.81	0.68

设定钻铤长 200 m,下钻井深为 5 500 m.图 7 为下钻速度 0.5 m/s 时,3 种钻具组合下裂缝宽度变化情况.钻铤环空比相同时(钻具组合 1、2),钻杆环空比从 0.59 增加到 0.65,裂缝宽度从 0.463 mm 增加至 0.487 mm,缝宽增幅为 5.1%;钻具组合 3 的钻铤环空比从 0.76 增加到 0.81、钻杆环空比从 0.59 增加到 0.68,裂缝宽度从 0.463 mm 增加至 0.639 mm,缝宽增幅为 38%,钻具组合 3 的缝宽增幅是组合 1 的 7.45 倍;裂缝宽度随钻柱环空比增加而增加,这是因为环空比越大,钻具在井筒中运动的“活塞效应”越强,产生的激动压力越大,致使缝宽的增幅越显著.

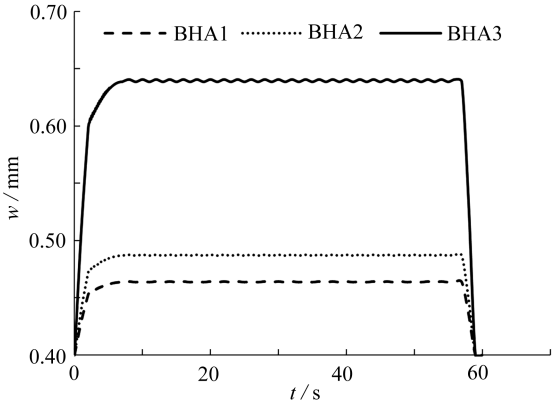


图 7 不同钻具组合与裂缝宽度变化
Fig. 7 The variations of the fracture width with different BHA configurations

4 全过程下钻速度与裂缝宽度变化关系

图 8 描绘了钻具组合 1 在不同下钻井深时,下钻速度对裂缝宽度影响.裂缝宽度随下钻速度增加而增加,下钻速度超过 1.0 m/s 后,增加趋势更加显著;且随着井深增加,缝宽的增幅越大.在井深 1 500 m,下钻速度从 0 增加到 1.5 m/s 时,裂缝宽度从 0.4 mm 增加到 0.474 mm,缝宽增幅为 18.5%;井深为 5 500 m 时,裂缝宽度从 0.4 mm 增加到 0.624 mm,缝宽增幅达 56%,是井深为 1 500 m 时的 3 倍.

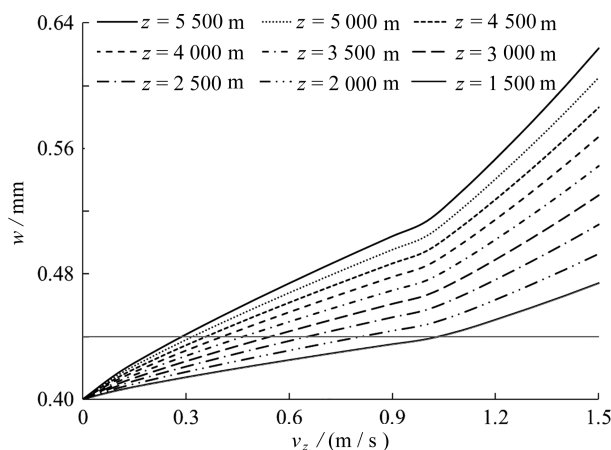


图8 全过程下钻速度与裂缝宽度变化

Fig. 8 Variations of the fracture width during the entire tripping-in process

根据以上结论,基于裂缝宽度增加率控制在10%(图8水平标记线)以内的原则,提出下钻作业分段控速建议:

- 5 000~5 500 m:下钻速度控制在0.3 m/s 以内;
- 4 000~<5 000 m:下钻速度控制在0.4 m/s 以内;
- 3 000~<4 000 m:下钻速度控制在0.5 m/s 以内;
- 1 500~<3 000 m:下钻速度控制在0.7 m/s 以内;
- 0~<1 500 m:下钻速度控制在1.1 m/s 以内。

5 结 论

本研究通过数学建模和数值模拟方法,系统分析了下钻速度对井筒地层裂缝宽度的影响机制.主要研究结论如下:

- 1) 建立的流-固耦合模型经现场数据验证,具有较高的预测精度,可用于指导现场下钻操作和优化钻井设计。
- 2) 井筒压力和裂缝宽度随下钻速度增加而增加.当下钻速度从0.5 m/s 增加到2.0 m/s 时,井筒压力从86.0 MPa 增加到106.6 MPa,裂缝宽度从0.478 mm 增加到0.881 mm 。
- 3) 在下钻速度为0.5 m/s 时,裂缝宽度随下钻井深和钻柱环空比增加而增加。井深从1 500 m 增加到5 500 m 时,裂缝宽度从0.432 mm 增加到0.478 mm;钻柱环空比从0.59 增加到0.65 时,裂缝宽度从0.463 mm 增加到0.487 mm 。
- 4) 裂缝宽度随下钻速度增加而增加,下钻速度超过1.0 m/s 后增加趋势更加显著;且随着井深增加,裂缝宽度的增幅越大,下钻速度为1.5 m/s 时,下钻井深5 500 m 缝宽增幅是1 500 m 时的3 倍。
- 5) 基于研究成果提出了分段控速下钻建议。

参考文献(References):

- [1] 雷少飞, 孙金声, 白英睿, 等. 裂缝封堵层形成机理及堵漏颗粒优选规则[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(3): 597-604. (Lei Shaofei, Sun Jinsheng, Bai Yingrui, et al. Formation mechanisms of fracture plugging zone and optimization of plugging particles[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(3): 597-604. (in Chinese))
- [2] 邱正松, 刘均一, 周宝义, 等. 钻井液致密承压封堵裂缝机理与优化设计[J]. 石油学报, 2016, 37(增刊2): 137-143. (Qiu Zhengsong, Liu Junyi, Zhou Baoyi, et al. Tight fracture-plugging mechanism and optimized design for plugging drilling fluid[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(S2): 137-143. (in Chinese))
- [3] 孙金声, 白英睿, 程荣超, 等. 裂缝性恶性井漏地层堵漏技术研究进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48

- (3): 630-638. (Sun Jinsheng, Bai Yingrui, Cheng Rongchao, et al. Research progress and prospect of plugging technologies for fractured formation with severe lost circulation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, **48**(3): 630-638. (in Chinese))
- [4] 舒刚, 孟英峰, 李红涛, 等. 裂缝内钻井液的漏失规律研究[J]. 石油钻采工艺, 2011, **33**(6): 29-32. (Shu Gang, Meng Yingfeng, Li Hongtao, et al. Research on leakage laws of drilling fluid in fracture reservoirs [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2011, **33**(6): 29-32. (in Chinese))
- [5] 邸士莹, 程时清, 白文鹏, 等. 致密油藏动态裂缝扩展机理及应用[J]. 力学学报, 2021, **53**(8): 2141-2155. (Di Shiyang, Cheng Shiqing, Bai Wenpeng, et al. Dynamic fracture propagation mechanism and application in tight oil reservoir [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, **53**(8): 2141-2155. (in Chinese))
- [6] 杨斌, 许成元, 张浩, 等. 深部破碎地层井壁失稳机理研究进展与攻关对策[J]. 石油学报, 2024, **45**(5): 875-888. (Yang Bin, Xu Chengyuan, Zhang Hao, et al. Research progress on mechanism of wellbore instability in deep fractured formations and related countermeasures[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, **45**(5): 875-888. (in Chinese))
- [7] Mirabbasi S M, Ameri M J, Biglari F R, et al. Thermo-poroelastic wellbore strengthening modeling: an analytical approach based on fracture mechanics[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, **195**: 107492.
- [8] Albattat R, Hoteit H. Modeling yield-power law drilling fluid loss in fractured formation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, **182**: 106273.
- [9] 蔡文军, 丁建琦, 李中, 等. 基于地质力学数据的井下裂缝宽度智能预测方法研究与应用[J]. 科学技术与工程, 2024, **24**(33): 14187-14194. (Cai Wenjun, Ding Jianqi, Li Zhong, et al. Application of intelligent prediction method for underground fracture width based on geomechanical data[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, **24**(33): 14187-14194. (in Chinese))
- [10] Dong Xiao, Meng Yingfeng, Zhao Xiangyang, et al. Liquid-liquid gravity displacement in a vertical fracture during drilling: experimental study and mathematical model[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2020, **38**(2): 533-554.
- [11] Zhu B Y, Tang H M, Yin S L, et al. Effect of fracture roughness on transport of suspended particles in fracture during drilling[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, **207**: 109080.
- [12] 曹玉玲, 何强胜, 刘闯. 考虑页岩塑性变形的水力裂缝与天然裂缝相交模拟研究[J]. 应用数学和力学, 2023, **44**(6): 679-693. (Cao Yuling, He Qiangsheng, Liu Chuang. Numerical simulation of hydraulic fractures intersecting natural fractures in shale with plastic deformation[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2023, **44**(6): 679-693. (in Chinese))
- [13] 张磊, 谢涛, 张羽臣, 等. 钻井过程中井筒裂缝动态扩展规律研究[J]. 非常规油气, 2021, **8**(2): 114-119. (Zhang Lei, Xie Tao, Zhang Yuchen, et al. Research on dynamic propagation law of wellbore fractures in drilling process[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2021, **8**(2): 114-119. (in Chinese))
- [14] Dupriest F E. Fracture closure stress (FCS) and lost returns practices[C]//*Society of Petroleum Engineers Journal*, 92192 MS, 2005.
- [15] Crespo F E, Ahmed R M, Saasen A, et al. Surge-and-swab pressure predictions for yield-power-law drilling fluids[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal (Drilling & Completion)*, 2012, **27**(4): 574-585.
- [16] 张世锋, 李加宝, 汪海阁, 等. 泥(页)岩地层漏失诱导裂缝扩展机制及裂缝宽度预测[J]. 天然气工业, 2025, **45**(4): 121-132. (Zhang Shifeng, Li Jiabao, Wang Haige, et al. Mechanisms of lost circulation induced fracture propagation and fracture width prediction in shale reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2025, **45**(4): 121-132. (in Chinese))
- [17] 何新星, 李皋, 段慕白, 等. 地层裂缝动态变形对堵漏效果的影响研究[J]. 石油钻探技术, 2018, **46**(4): 65-70. (He Xinling, Li Gao, Duan Mubai, et al. The influence of dynamic deformation of formation fractures on the plugging effect[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, **46**(4): 65-70. (in Chinese))
- [18] 杜旭林, 苏彦春, 房茂军, 等. 致密砂岩气水两相流固耦合裂缝动态闭合分析半解析模型[J]. 天然气地球科学, 2024, **35**(7): 1289-1303. (Du Xulin, Su Yanchun, Fang Maojun, et al. A semi-analytical model coupled gas-

- water two-phase flow and geomechanics for dynamic closure analysis of fractures in tight sandstone[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, **35**(7):1289-1303. (in Chinese))
- [19] 彭浩, 李黔, 高佳佳, 等. 可变形天然裂缝动态宽度流-固耦合计算模型[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2023, **45**(2): 77-86. (Peng Hao, Li Qian, Gao Jiajia, et al. Calculation model of hydro-mechanical coupling for dynamic width of deformable natural fracture[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2023, **45**(2): 77-86. (in Chinese))
- [20] Verga F, Carugo C, Chelini V, et al. Detection and characterization of fractures in naturally fractured reservoirs[C]//*Society of Petroleum Engineers Journal*, 63266 MS, 2000.
- [21] 王健, 徐加放, 赵密福, 等. 基于神经网络的钻井液漏失裂缝宽度预测研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, **51**(9): 81-88. (Wang Jian, Xu Jiafang, Zhao Mifu, et al. Prediction of crack width of drilling fluid leakage based on neural network[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, **51**(9): 81-88. (in Chinese))
- [22] 彭浩, 李黔, 尹虎, 等. Lietard 天然裂缝宽度预测模型新求解方法[J]. 石油钻探技术, 2016, **44**(3): 72-76. (Peng Hao, Li Qian, Yin Hu, et al. A new solution method for Lietard natural fracture width prediction model [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, **44**(3): 72-76. (in Chinese))
- [23] 孔祥伟, 刘祚才, 靳彦欣. 川渝裂缝性地层自动压井环空多相压力波速特性研究[J]. 应用数学和力学, 2022, **43**(12): 1370-1379. (Kong Xiangwei, Liu Zuocai, Jin Yanxin. Study on multiphase pressure wave velocity characteristics of automatic kill annulus in Chuanyu fractured formation[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(12): 1370-1379. (in Chinese))
- [24] 金泰宇. 三维粗糙裂缝网络钻井液漏失流固耦合模型研究[J]. 石油钻探技术, 2024, **52**(1): 69-77. (Jin Taiyu. Study on three-dimensional fluid-solid coupling model of drilling fluid leakage in rough fracture network[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2024, **52**(1): 69-77. (in Chinese))
- [25] 赵岩龙, 任传杰, 冯智, 等. 起下钻引发的环空瞬态波动压力计算方法[J]. 科学技术与工程, 2022, **22**(13): 5198-5204. (Zhao Yanlong, Ren Chuanjie, Feng Zhi, et al. Improved calculation of transient surge pressure in wellbore while tripping operations[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, **22**(13): 5198-5204. (in Chinese))
- [26] Majidi R, Miska S Z, Yu M J, et al. Fracture ballooning in naturally fractured formations: mechanism and controlling factors[C]//*Society of Petroleum Engineers Journal*, 115526 MS, 2008.
- [27] Lavrov A, Tronvoll J. Mechanics of borehole ballooning in naturally fractured formations[C]//*Society of Petroleum Engineers Journal*, 93747 MS, 2005.
- [28] Lavrov A, Tronvoll J. Modeling mud loss in fractured formations[C]//*Society of Petroleum Engineers Journal*, 88700 MS, 2004.
- [29] Witherspoon P A, Wang J S, Iwai K, et al. Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture [J]. *Water Resources Research*, 1980, **16**(6): 1016-1024.