

基于有限元法的井底应力场随 井底压差变化规律研究

席境阳

(中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东 东营 257000)

摘要: 岩石破碎是钻头与井底岩石相互作用的结果, 井底应力场是决定钻头破岩效果的重要因素。本文利用有限元数值模拟手段探讨了特定地应力条件下井底压差对井底岩石应力的影响规律。研究表明, 降低井底压力可以减小井底岩石的等效应力、改变岩石的应力状态, 有利于钻头破碎岩石。井底平面上井眼中心附近的岩石最易破碎, 越靠近井壁岩石所受的应力越大, 在近井壁地带 $0.8R$ (R 为井眼半径) 附近, 会出现明显的应力集中现象, 这使得该区域的岩石最难破碎。本文的研究成果为研究最经济、最有效的钻井工艺和破岩技术提供理论依据, 为破岩工具的优化设计提供参考。

关键词: 有限元法; 应力场; 井底压力; 岩石破碎

中图分类号: TE21; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)05-0060-09

Study on the variation law of bottom hole stress field with bottom hole pressure difference based on finite element method

XI Jingyang

(Drilling Technology Research Institute of Shengli Petroleum Engineering Corporation Limited, Sinopec,
Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: The crushing of the rock is the result of the interaction between the drill bit and the bottom hole plane rock, and the bottom hole stress field is an important factor determining the rock fragmentation effect of the drill bit. In this paper, the finite element numerical simulation method is used to discuss the regular pattern of bottom hole pressure difference on bottom hole plane rock stress under specific ground stress conditions. To consider that reduce the bottom hole pressure can reduce the equivalent stress of rock, changing the stress state of rock, which is conducive to rock breaking by bit. At the same time, it is concluded that the rock near the center of the borehole is the most easily broken, and the rock stress value near the borehole wall is the largest. There will be obvious stress concentration near the borehole wall $0.8R$ (R is the radius of the borehole), which makes the rock in this area the most difficult to break. It provides theory basis for the study of the most economical, effective drilling and breakage rock technology.

Key words: finite element method; the stress field; bottom hole pressure; rock breaking

0 引言

提高机械钻速是钻井工程领域不懈追求的目标和努力的方向。国内外大量的室内实验和现场

实践都已表明,“降低井底压力,改变井底岩石应力状态”是提高钻速最有效的手段^[1-7]。但目前针对井底应力场及其受井底压力影响规律的研究较少,对

收稿日期:2020-05-10; 修回日期:2020-12-01 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.05.009

基金项目:中石化工程公司科技项目“干热岩开发关键技术研究”(编号:SG18-06K)

作者简介:席境阳,男,汉族,1986年生,副研究员,油气井工程专业,硕士,主要从事石油工程岩石力学、深井超深井钻井提速及井壁稳定技术研究工作,山东省东营市北一路827号, jingyang.hope@163.com。

引用格式:席境阳.基于有限元法的井底应力场随井底压差变化规律研究[J].钻探工程,2021,48(5):60-68.

XI Jingyang. Study on the variation law of bottom hole stress field with bottom hole pressure difference based on finite element method [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(5): 60-68.

其认识仍不深入,导致“降压提速”工艺技术的提升与应用受限。

目前井底应力场的研究方法主要分为室内实验与数值模拟2类。Maurer^[8]利用模拟井底条件下单齿侵入试验得出液柱压力的存在不仅增强了岩石的强度,而且对岩石破碎产生的岩屑有着“压持作用”;常德玉等^[9]通过对不同井底压差下的井底岩石应力场进行数值模拟计算,将井底待破碎岩石按照应力状态分为破碎区、较易破碎区和难破碎区3部分;彭焱等^[10]采用有限元方法分析得出常规钻井井壁径向应力和周向应力呈喇叭形分布且随着半径增大逐渐趋于原地应力的结果;王延民等^[11]、林铁军等^[12]对气体钻井条件下的井底应力场进行了基于有限元理论的分析研究,得出了气体钻井条件下井底岩石更趋向于“受拉”状态,较泥浆钻井更容易破碎的结论。

可以看出,目前石油工程业内针对井底岩石应力场的研究尚不够深入,且大多为定性分析^[13-14]。

$$\int_V \delta \epsilon^T D_{ep} \frac{d\epsilon}{dt} dV - \int_V \delta \epsilon^T D_{ep} \left[m \frac{(S_w + p_w \xi)}{3K_s} \frac{dp_w}{dt} \right] dV - \int_V \delta \epsilon^T m (S_w + p_w \xi) \frac{dp_w}{dt} dV = \int_V \delta u^T \frac{df}{dt} dV + \int_S \delta u^T \frac{dG}{dt} dV \quad (2)$$

式中: D_{ep} ——弹塑性矩阵; $d\epsilon$ ——由孔隙压力引起的固体颗粒在正方向上的压缩,剪方向上无变形; V ——控制体体积; S_w ——控制面积; K_s ——骨架颗粒模量; ξ ——待定系数,可通过试验确定; $m=[1, 1, 1, 0, 0, 0]^T$ 。

$$S_w \left(m^T - \frac{m^T D_{ep}}{3K_s} \right) \frac{d\epsilon}{dt} - \nabla^T \left[k_0 k_r \left(\frac{\nabla p_w}{\rho_w} - g \right) \right] + \left\{ \xi n + n \frac{S_w}{K_w} + S_w \left[\frac{1-n}{3K_s} - \frac{m^T D_{ep} m}{(3K_s)^2} \right] (S_w + p_w \xi) \right\} \frac{dp_w}{dt} = 0 \quad (3)$$

式中: k_0 ——初始渗透系数张量与水密度的乘积; k_r ——比渗透系数(含水饱和度、应力、应变或者损伤变量等的函数); ρ_w ——流体密度; g ——重力加速度; n ——孔隙度; K_w ——水的体积模量。

1.3 边界条件

(1)流量边界条件:

$$-F_s^T k_0 k_r \left(\frac{\nabla p_w}{\rho_w} - g \right) = q_w \quad (4)$$

式中: F_s ——边界的单位法向流量; q_w ——单位时间内流过边界的流体流量。

(2)孔隙压力边界条件:

本文利用有限元数值模拟的研究方法,建立了考虑三向地应力、井底压差(液柱压力和孔隙压力差)、渗流等因素的井底应力场分析模型,分析井底压差对井底应力场分布的影响规律,为“降压提速”技术的研究提供理论基础。

1 控制方程

1.1 应力平衡方程

根据虚功原理,某一时刻岩石的虚功等于作用其上的作用力(体力和面力)产生的虚功之和,则岩石材料的应力平衡方程为:

$$\int_V \delta \epsilon^T d\sigma dV - \int_V \delta u^T df dV - \int_S \delta u^T dG dS = 0 \quad (1)$$

式中: G ——体力; f ——面力; $\delta \epsilon$ ——虚位移; δu ——虚应变。

同时,为了将应力和渗流进行耦合,特对虚功方程(1)进行时间的求导,最终形式为:

1.2 连续方程

根据质量守恒原理,单位时间段内流入单位体积岩石内的流量与其内部流量变化值相等,结合达西定律可得渗流连续方程,如式(3)所示。

$$p_w = p_{wb} \quad (5)$$

式中: p_{wb} ——已知边界的孔隙压力值。

2 井底应力分析有限元模型

井眼形成过程中,岩石位移和应力重新分布,直到达到新的平衡状态,形成“二次应力场”。本文有限元模型分析了井眼形成后,不同井底压差条件下井底岩石的应力状态。

2.1 基本假设

为了充分说明问题,并使研究过程简化,本文在分析模型中做如下假设:

- (1)地层岩石物性、力学性质各向同性；
- (2)井身结构为直井,且井底面为水平面；
- (3)忽略温度对岩石物性、力学性质的影响；
- (4)不考虑流固耦合因素。

2.2 物理模型

井底岩石所受应力状态如图1所示。

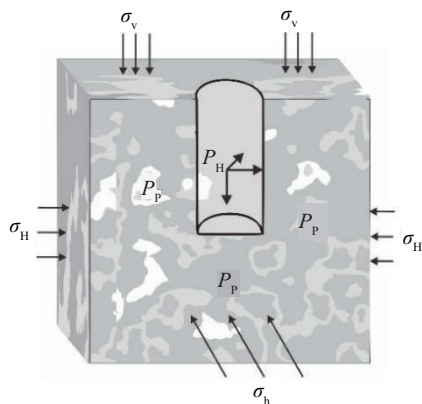


图1 井底受力示意

Fig.1 The schematic diagram of bottom hole pressure

为了提高计算机分析效率、减少计算量,在实际计算中取模型的1/4进行分析。设井孔的直径为 $D=300\text{ mm}$,在钻井工程分析中,模型尺寸通常大于井眼直径的5~10倍,因此取模型尺寸 $H=2\text{ m}$,建立的井底几何模型如图2所示。

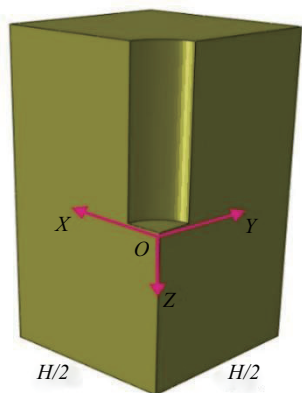


图2 井底应力场数值分析几何模型

Fig.2 Numerical analysis of bottom hole stress field geometric model

2.3 有限元离散方程

定义形函数：

$$\begin{cases} u = N_u \bar{u} \\ \epsilon = B \bar{u} \\ p_w = N_p \bar{p}_w \end{cases} \quad (6)$$

式中： u ——位移； N_u 、 N_p ——分别为形函数中表达位移和孔隙压力的形函数系数； $\bar{u}$ 、 $\bar{p}_w$ ——分别为单元节点的位移和孔隙压力。

将式(4)代入式(2),精简化可得到有限元列式：

$$K \frac{d\bar{u}}{dt} + C \frac{d\bar{p}_w}{dt} = \frac{df}{dt} \quad (7)$$

其中：

$$K = \int_V B^T D_{ep} B dV \quad (8)$$

$$C = \int_V B^T D_{ep} m \frac{(S_w + p_w \xi)}{3K_s} N_p dV - \int_V B^T D_{ep} m (S_w + p_w \xi) N_p dV \quad (9)$$

$$df = \int_V N_u^T B df dV + \int_S N_u^T B df dS \quad (10)$$

使用 Galerkin 方法,将式(3)作为控制方程,将式(4)作为通过边界的连续性方程,并联立形函数表达式(6),可得：

$$E = \int_V N_p^T \left[S_w \left(m^T - \frac{m^T D_{ep}}{3K_s} \right) B \right] dV \quad (11)$$

联立式(7)与式(11),可得应力-渗流耦合的有限元离散方程：

$$\begin{bmatrix} K & C \\ E & G \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{p}_w \end{pmatrix} + 0 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & F \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{p}_w \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{df}{dt} \\ \hat{f} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中：

$$F = \int_V (\nabla N_p)^T k_0 k_r \nabla N_p dV \quad (13)$$

$$G = \int_V N_p^T \left\{ \xi n + n \frac{S_w}{K_w} + S_w \left[\frac{1-n}{3K_s} - \frac{m^T D_{ep} m}{(3K_s)^2} \right] (S_w + p_w \xi) \right\} N_p dV \quad (14)$$

$$\hat{f} = \int_S S N_p^T q_{wb} dS + \int_V (\nabla N_p)^T k_0 k_r g dV \quad (15)$$

2.4 材料参数及边界条件

2.4.1 材料参数

根据假设,岩石性质为各向同性,其各项参数源自川西某井砂岩岩心 MTS 三轴力学试验结果,具体见表1。

表1 模型参数

Table 1 Model parameters

井眼参数		岩石材料参数			
井深 /m	井径/ mm	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙度	弹性模量/ GPa	泊松比
3000	215.9	2300	0.1	20	0.25

2.4.2 边界条件

(1)位移和约束边界。在模型的 XOZ 面及 YOZ 上加对称约束,并分别约束 XOZ 面和 YOZ 在 Y 和 X 方向的位移;同时在模型的底部 XOY 面上加 Z 方向约束。

(2)原始地应力场边界。模型顶部 Z 方向加载上覆岩层压力 σ_z , X 、 Y 赋予2个水平主应力 σ_H 、 σ_h 。

(3)井底、井壁压力边界。在井壁和井底施加液柱压力 p_h 与地层压力 p_d 之差 p_d 。

2.5 分析步骤及方案设计

本文利用Abaqus有限元分析软件,采用“地应力自动释放法”^[15]对井底应力场进行研究,分析步1施加初始边界条件,进行地应力平衡,即获得初始平衡地应力场,使数值计算模型得到一个存在应力而不存在应变的状态。分析步2去除井眼内的岩石模型,去除形成的井眼底部岩石原来所受到的上覆岩层压力,同时在井底和井壁施加井筒液柱压力及孔隙压力,形成新的应力场,达到较真实地模拟井底应力场的目的。其分析求解的基本流程如图3所示。

为了研究不同钻井方式、不同井底压差下井底应力场的分布,及不同井底压差对井底应力的影响规律,施加的模拟条件如表2所示^[16-18]。

3 结果及分析

为了便于分析井底应力场的变化规律及各个因素对井底应力场的影响,建立分析路径 $O-A$ 、 $O-B$ 、 $O-C$ 、 $O-D$ 、 $O-E$,它们与 X 轴之间的夹角分别为: 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° ,如图4所示, O 为路径起点, A 、 B 、 C 、 D 、 E 为终点。

3.1 井底岩石应力径向分布规律

3.1.1 Mises等效应力

根据计算结果,井底平面不同路径上Mises应力分布规律基本一致。因此,仅以路径 $O-C$ 为例,作出不同井底压差条件下井底岩石的Mises等效应力分布曲线如图5所示。

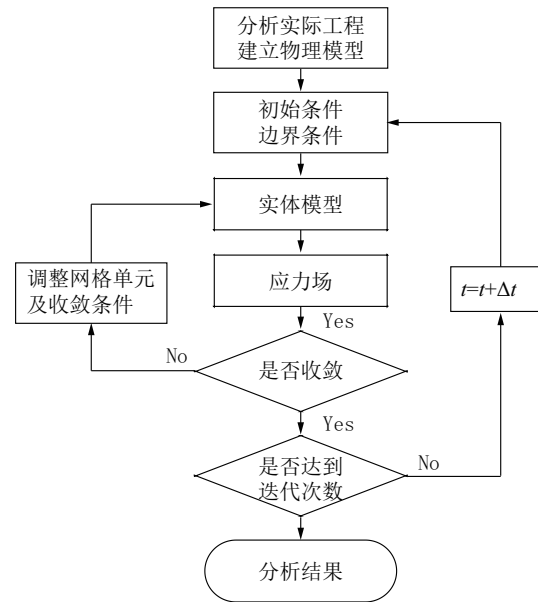


图3 有限元数值求解基本流程

Fig.3 The flow chart of finite element numerical solution

表2 不同钻井方式下的应力边界条件

Table 2 Stress boundary conditions under different drilling methods

钻井方式	开挖前原地应力/MPa			开挖后井底压差/MPa
	σ_z	σ_H	σ_h	p_d
欠平衡	60	50	45	-8/-6/-4/-2
近平衡	60	50	45	0
过平衡	60	50	46	-8/-6/-4/-2

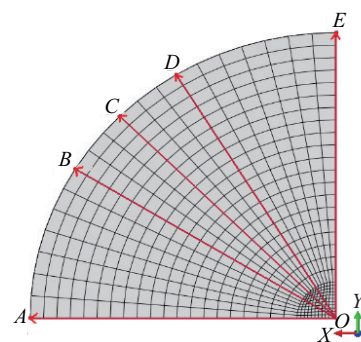


图4 井底平面岩石应力径向分析路径示意

Fig.4 Schematic diagram of radial stress analysis path for plane rock at bottom hole

可以看出,在井底中心周围 $0\sim 0.5R$ (R 为井眼半径)范围内,曲线表现较为平稳,等效应力变化较小;在 $(0.5\sim 0.8)R$ 范围内,曲线逐渐有了较明显的变化,等效应力增大; $(0.8\sim 1)R$ 范围,曲线变化最

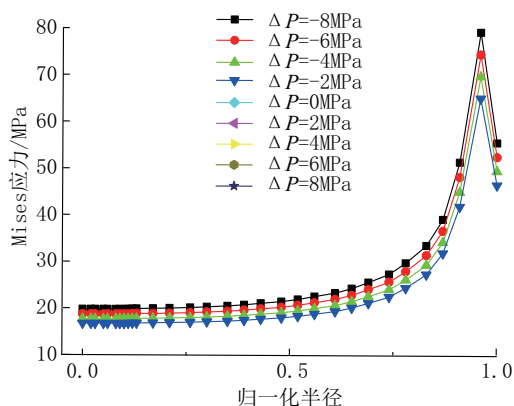


图5 不同压差下井底 Mises 应力分布

Fig.5 Mises stress distribution at bottom hole under different pressure difference

大,等效应力出现了明显的陡增陡降,这表示近井壁地带的井底岩石出现了明显的应力集中现象。从钻头破岩角度讲,这个范围内的岩石较难被钻头破碎。

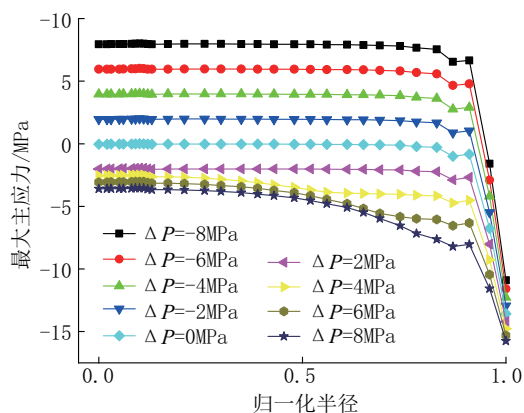
3.1.2 最大主应力与最小主应力

图6描述了不同压差下,井底平面最大主应力与最小主应力随径向距离的变化规律。由图6可以看到,在从井底中心到井壁的径向范围内,最大主应力受井底压差的影响,显示出了不同的应力状态:井底负压差时,最大主应力以拉应力为主(数值上为正数);井底正压差时则以压应力为主(数值上为负数)。在径向上,在 $0\sim 0.5R$ 范围内几乎保持水平,在 $(0.5\sim 0.8)R$ 范围内开始出现小幅度变化,而在 $(0.8\sim 1)R$ 范围内则出现了极为明显的变化:拉应力降低、压应力增大。甚至出现了拉应力向压应力的转变过程。相对于最大主应力而言,最小主应力一般以负数的形式出现,应力状态为压应力,其变化规律与最大主应力类似,在近井壁地带应力集中现象明显^[19-21]。

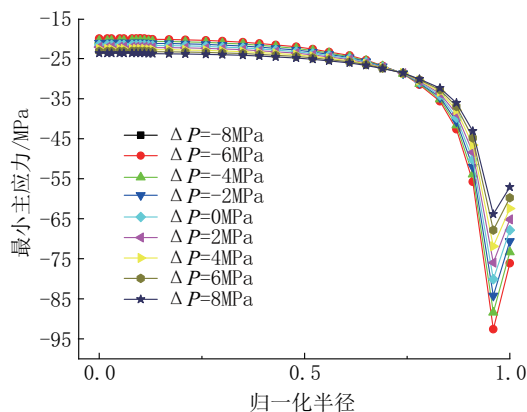
通过以等效应力、最大和最小主应力沿井底径向方向的变化规律,证实了近井壁地带井底岩石的应力集中现象。结合岩石材料的强度特性,在近井壁地带,无论是拉应力的大幅度减小,还是压应力的大幅度增加,都使得井底这一区域的岩石难以被破碎。

3.2 井底岩石应力周向分布规律

为说明井底岩石应力沿周向的变化规律,以井底压差为 -4 MPa 的情况为例进行分析。如图4所示,在井底平面上选取5条分析路径,其中 $O-A$ 为平行 X 轴方向,在这个方向上施加了最大水平地应



(a) 最大主应力



(b) 最小主应力

图6 不同压差下最大、最小主应力分布

Fig.6 Distribution of maximum and minimum principal stresses under different pressure difference

力(50 MPa), $O-B$ 、 $O-C$ 、 $O-D$ 、 $O-E$ 路径与 X 轴夹角分别为 30° 、 45° 、 60° 、 90° , $O-E$ 路径为井底平面上的 Y 轴方向,这个方向施加了最小水平地应力。

图7~图9表示井底压差为 -4 MPa 时,不同分析路径上的等效应力、最大和最小主应力的分布规律。由图可知,在周向上,自最大水平地应力方向(OA)向最小水平地应力方向(OE)偏移,在距离井底中心同一距离的圆弧上,井底岩石应力逐渐降低。

利用有限元分析软件将井底节点单元的应力数据提取出来,形成点云文件,再通过MathCad的数据处理功能,做出井底平面上应力分布的三维图形,可以形象直观地看到井底应力的分布特点。在井底中心附近范围应力变化较为平稳,而在近井壁地带会出现明显的应力集中现象,且分布不均,最大主应力方向近井壁地带处应力集中较最小主应力方向处要大,如图10所示。

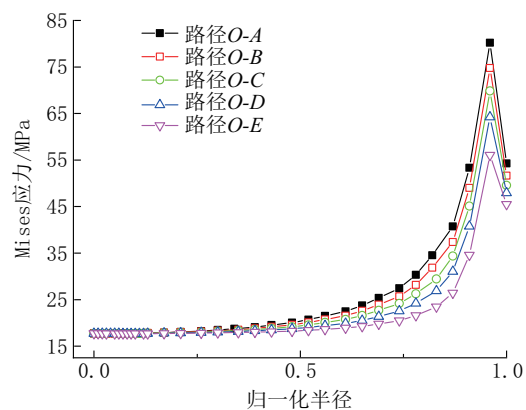


图7 不同分析路径井底等效应力分布曲线

Fig.7 Equivalent stress distribution curve of bottom hole under different analysis paths

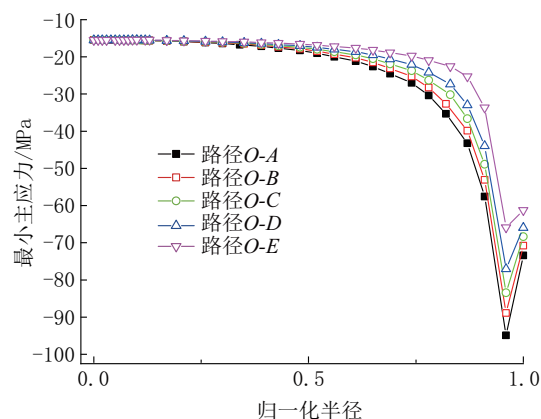


图9 不同分析路径井底最小主应力分布曲线

Fig.9 Minimum principal stress distribution curve of bottom hole under different analysis paths

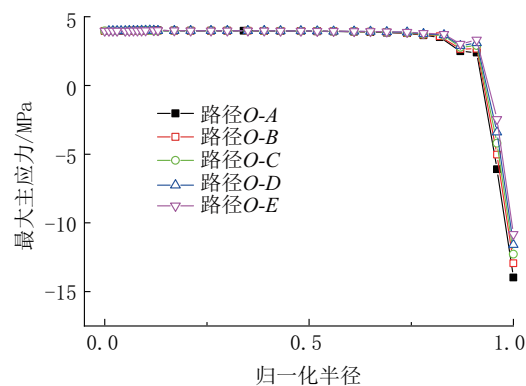


图8 不同分析路径井底最大主应力分布曲线

Fig.8 Maximum principal stress distribution curve of bottom hole under different analysis paths

综合以上分析,井底岩石应力的分布可大致分为3个应力区,井底中心至 $0.5R$ 为低应力区, $(0.5 \sim$

$0.8)R$ 为较高应力区, $0.8R$ 至井壁的近井壁地带出现应力集中现象,为高应力区。3个应力区的破岩难度依次增加。

3.3 井底压差对井底应力场的影响

由图5~图9可以明显地看出,随着井底压差的降低(钻井液密度的降低),井底等效应力、最大和最小主应力都在随之相应地变化,具体表现在:在过平衡压差条件下,最大和最小主应力均为压应力,说明井底岩石处于三向受压状态,等效应力较近平衡及欠平衡时更大;随着井底逐渐向欠平衡状态过渡,等效应力逐渐减小,最大主应力也逐渐出现拉应力。从应力云图上可以清楚地看到井底压差对井底应力的影响效果,如图11~图13所示,井底压差的变化使得井底岩石应力状态及大小发生变化。

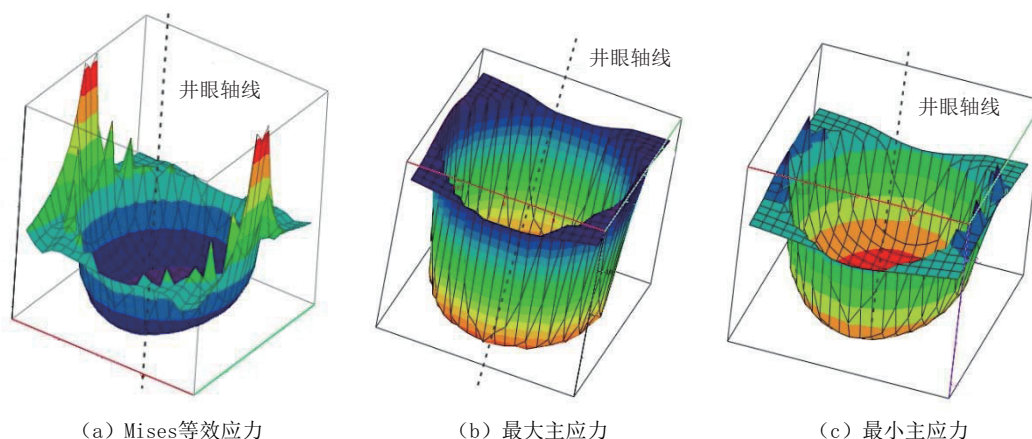


图10 井底平面岩石三维云图

Fig.10 Three-dimensional cloud images of plane rock at bottom hole

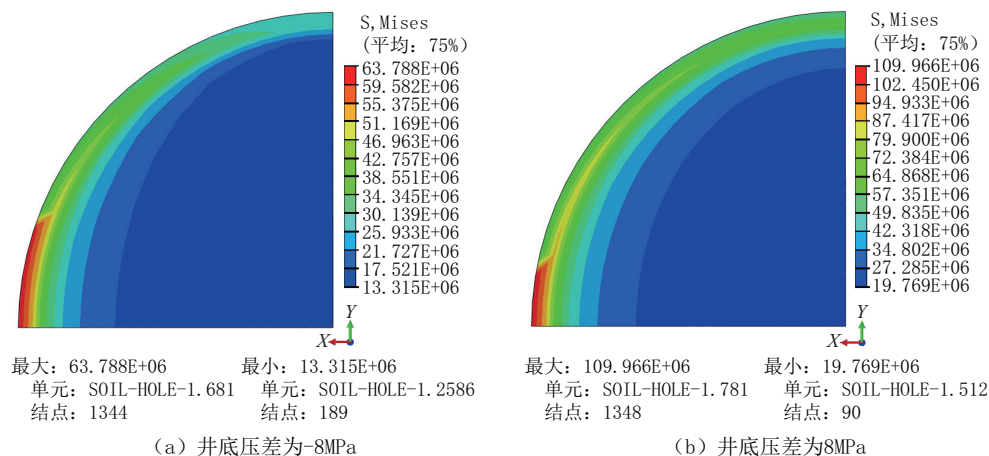


图 11 井底压差对井底岩石等效应力影响的对比

Fig.11 Comparison of influence of bottom hole pressure difference on equivalent stress of bottom hole rock

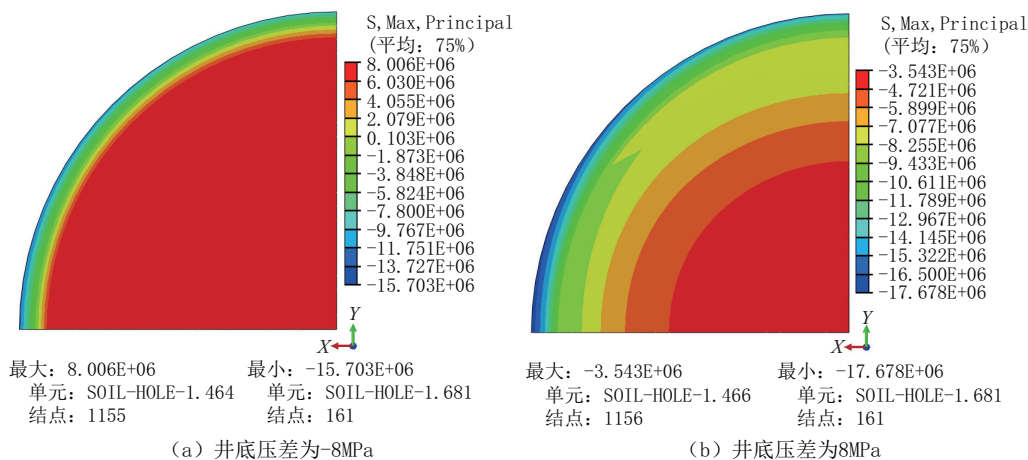


图 12 井底压差对井底岩石最大主应力影响的对比

Fig.12 Comparison of influence of bottom hole pressure difference on maximum principal stress of bottom hole rock

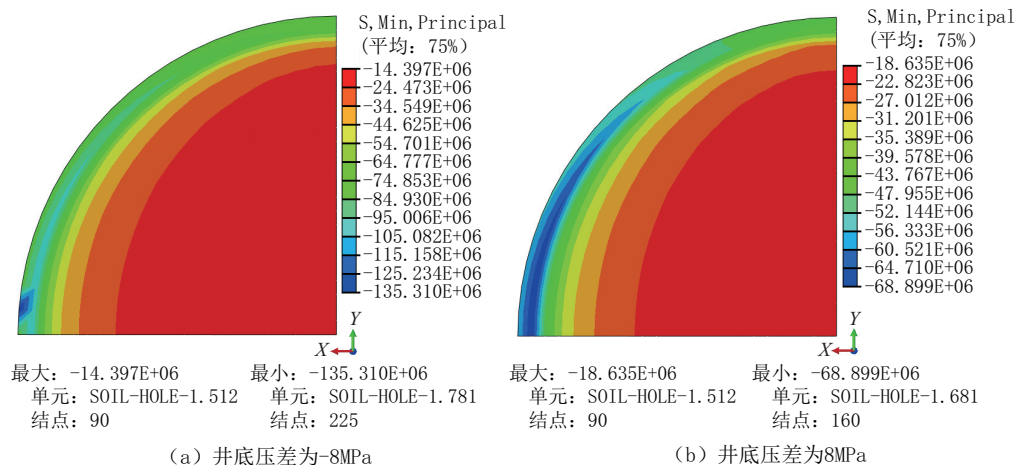


图 13 井底压差对井底岩石最小主应力影响的对比

Fig.13 Comparison of influence of bottom hole pressure difference on minimum principal stress of bottom hole rock

总的来说,降低井底压差可以降低岩石压应力,应力状态也逐渐向受拉转变,向更有利于破岩的趋势发展。分析原因,地层中原有的孔隙压力相当于多孔介质岩石内部的内张力,这个内张力使得井底岩石向着拉伸状态发展,促使井底岩石破碎或者崩离井底。钻井过程中,钻井循环介质在井底形成的液柱压力可以部分或抵消孔隙压力对岩石形成的“外推”效果,钻井循环介质密度越高,这种抵消作用越明显^[22-25]。随着井底压差的降低,即钻井液密度的降低,钻井循环介质对孔隙压力的抵消作用减弱,岩石内部应力减小,更容易被破碎。

4 结论

(1)利用有限元数值分析原理建立了井底平面应力场的分析模型,结合井底岩石的受力分析,提供了一种研究井底压差对井底平面上岩石应力场的影响规律的方法。

(2)特定井底压差下,井底平面从井眼中心到井壁的径向方向上,岩石应力逐步增大,在 $0.8R$ 附近出现明显的应力集中现象;在从最大水平主应力向最小水平主应力偏移的周向方向上,应力逐渐减小。

(3)不同的井底压差对岩石强度和岩石的应力状态都有影响,总体而言,低压差时岩石的强度较高压差时低,同时应力状态会出现受拉的情况,更有利于岩石的破碎。

参考文献(References):

- [1] Bourgoyne A T J, Millheim K K, Chenevert M E, et al. Applied drilling engineering chapter 8 solutions[J]. 1986.
- [2] Garnier A J, van Lingen N H. Phenomena affecting drilling rates at depth[J]. 1959.
- [3] 张小林,韩爱果,任光明,等.基于某隧道岩石Kaiser效应测试及区域应力场数值分析[J].科学技术与工程,2016,16(29):306-311.
ZHANG Xiaolin, HAN Aiguo, REN Guangming, et al. Based on a certain tunnel sandstone kaiser effect test and the regional stress field numerical analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2016,16(29):306-311.
- [4] 蔡泽训.储层古构造应力场模拟预测裂缝技术及其应用[J].科学技术与工程,2013,13(2):446-449.
CAI Zexun. Paleo-structural stress field simulation for fracture prediction and its application[J]. Science Technology and Engineering, 2013,13(2):446-449.
- [5] 祝效华,易勤健.水平定向穿越双级牙轮式扩孔器岩石破碎效率研究[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(5):1130-1139.
ZHU Xiaohua, YI Qinjian. Rock breaking efficiency analysis of two-stage roller reamer in horizontal directional drilling[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018,26(5):1130-1139.
- [6] 李玉飞,孟英峰,孙万里,等.不同钻井条件对钻速的影响分析[J].石油地质与工程,2008,22(5):113-114.
LI Yufei, MENG Yingfeng, SUN Wanli, et al. Analysis of effect on drilling rate under different drilling conditions[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008,22(5):113-114.
- [7] 郑小燕.深切河谷应力场分布特征研究[J].科学技术与工程,2012,12(21):5366-5370.
ZHENG Xiaoyan. Study of the stresses field characteristics of a high valley slope [J]. Science Technology and Engineering, 2012,12(21):5366-5370.
- [8] Maurer W. Bit-tooth penetration under simulated borehole conditions [J]. Journal of Petroleum Technology, 1965, 17 (12) : 1433-1442.
- [9] 常德玉,李根生,沈忠厚,等.考虑三向地应力差时不同钻井条件下井底应力场研究[J].岩土力学,2011,32(5):1546-1552.
CHANG Deyu, LI Gensheng, SHEN Zhonghou, et al. Study of bottom-hole stress field with differential pressure of 3D in-situ stress under different drilling conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(5):1546-1552.
- [10] 彭烨,沈忠厚,樊胜华,等.基于开挖方法的井底应力场有限元模型[J].石油学报,2006,27(6):133-136.
PENG Ye, SHEN Zhonghou, FAN Shenghua. Finite element model for analyzing stress field of bottom hole based on excavating method[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006,27(6):133-136.
- [11] 王延民,孟英峰,李皋,等.从井底岩石受力分析研究气体钻井对机械钻速的影响[J].钻采工艺,2008,31(2):1-2.
WANG Yanmin, MENG Yingfeng, LI Gao, et al. Research on the influence of gas drilling on penetration rate [J]. Drilling & Production Technology, 2008,31(2):1-2.
- [12] 林铁军,练章华,刘健,等.空气钻井井斜问题与地层倾角的规律探讨[J].钻采工艺,2007,30(3):7-9.
LIN Tiejun, LIAN Zhanghua, LIU Jian, et al. Discussion on the rule of well deviation and stratigraphic dip in air drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2007,30(3):7-9.
- [13] 常德玉,李根生,沈忠厚,等.深井超深井井底应力场[J].石油学报,2011,30(4):697-703.
CHANG Deyu, LI Gensheng, SHEN Zhonghou, et al. The stress field of bottom hole in deep and ultra-deep wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,30(4):697-703.
- [14] 唐辉明.工程地质数值模拟的理论与方法[M].武汉:中国地质大学出版社,2001.
TANG Huiming. Theory and method of engineering geology numerical simulation [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2001.

- [15] 董世明,施太和.井底地带应力应变场实验研究[J].石油钻采工艺,1995,17(6):25-27.
DONG Shiming, SHI Taihe. Laboratory research of stress and strain field under bottom of borehole[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1995,17(6):25-27.
- [16] 席境阳.基于井底降压对岩石强度影响的提速效果研究[D].成都:西南石油大学,2012.
XI Jingyang. Study on the acceleration effect based on the influence of bottom hole depressurization on rock strength [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [17] 黄志强,曾其科,李琴,等.气体钻井井底应力场数值模拟研究[J].石油机械,2013,41(5):11-14.
HUANG Zhiqiang, ZENG Qike, LI Qin, et al. Numerical simulation of bottom hole stress field in gas drilling[J]. Petroleum Machinery, 2013,41(5):11-14.
- [18] 夏阳,文豪,金衍,等.非均匀应力场中井筒卸载过程井壁围岩孔隙弹性动力响应机制[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1115-1125.
XIA Yang, WEN Hao, JIN Yan, et al. Elastic dynamic response mechanism of borehole surrounding rock during unloading in heterogeneous stress field[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018,37(5):1115-1125.
- [19] 曾祥茜,何文社,王开喜.渗流-应力耦合作用下的临库竖井开挖数值分析[J].人民黄河,2019,41(4):139-143.
ZENG Xiangxi, HE Wenshe, WANG Kaixi. Numerical analysis of shaft excavation near reservoir under seepage stress coupling[J]. Yellow River, 2019,41(4):139-143.
- [20] 董宇.工程地质因素对钻井提速的影响[J].中国石油和化工标准与质量,2018,38(24):16-17.
DONG Yu. Influence of engineering geological factors on drilling speed increase [J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2018,38(24):16-17.
- [21] 罗成波,蒋祖军,李皋,等.Q11井井底突发性岩爆动力学机理及动态演化过程[J].石油学报,2020,41(2):244-252.
LUO Chengbo, JIANG Zujun, LI Gao, et al. Dynamic mechanism and dynamic evolution process of sudden rock burst in Q11 well[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020,41(2):244-252.
- [22] 罗成波,孟英峰,李皋,等.氮气钻井井底岩爆机理及动态过程演化[J].天然气工业,2019,39(7):99-105.
LUO Chengbo, MENG Yingfeng, LI Gao, et al. Mechanism and dynamic process evolution of bottom hole rockburst in nitrogen drilling[J]. Natural Gas Industry, 2019,39(7):99-105.
- [23] 呼怀刚,管志川,许玉强,等.基于多孔弹性力学理论的深井井底应力场分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(5):52-61.
HU Huaigang, GUAN Zhichuan, XU Yuqiang, et al. Analysis of deep well bottom hole stress field based on porous elasticity theory[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2020,44(5):52-61.
- [24] 胡棚杰,李忠慧,蒋战峰,等.确定岩石抗钻特性空间分布规律的新方法[J].石油机械,2020-10-16,DOI:10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2021.01.002.
HU Pengjie, LI Zhonghui, JIANG Zhanfeng, et al. A new method for determining the spatial distribution of rock resistance to drilling[J]. Petroleum Machinery, 2020-10-16, DOI: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2021.01.002.
- [25] 夏广强.高研磨性硬地层钻井提速技术分析[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(9):162,166.
XIA Guangqiang. Analysis of drilling speed increase technology in high abrasive hard formation[J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2020,40(9):162,166.

(编辑 李艺)