

# 层理性泥页岩井壁失稳机制的 FLAC3D 数值分析

赵靖影<sup>1,2</sup>, 邓金根<sup>2</sup>, 黄桢<sup>1</sup>, 朱海燕<sup>2</sup>

1. 中国石油西南油气田分公司川西北气矿, 江油 621709
2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

**摘要** 在层理性泥页岩钻井过程中经常出现井壁失稳, 影响钻井的顺利进行。考虑层理性泥页岩的岩块和层理特性, 采用层理岩石单元和层理面单元的组合模型描述层理性地层的破坏模式。利用有限差分数值模拟软件 FLAC3D 建立层理性泥页岩井眼的有限差分计算模型, 模拟了实际钻井过程。和均质地层对比, 分析了层理性泥页岩井眼的塑性区分布、井眼位移和次生应力分布特点。数值模拟再现了层理面的变形破坏现象, 描述了层理面的滑移特征。研究结果表明, 数值模拟结果和实际钻井现象相吻合, 层理面上下两侧位移差最大为 0.8 mm, 层理面滑移位移是错动位移的 8.13 倍, 证明了层理面的滑移是层理性泥页岩井壁失稳的根本原因。分别模拟了地应力、层理面空间分布、井眼轨迹参数和井眼尺寸对倾斜层理直井和水平层理斜井的变形破坏规律。

**关键词** 层理; 各向异性; 井壁失稳; FLAC3D

**中图分类号** TE21

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.13.008

## Numerical Analysis of Borehole Instability Mechanism in Layered Shale Formation Based on FLAC3D

ZHAO Jingying<sup>1,2</sup>, DENG Jinggen<sup>2</sup>, HUANG Zhen<sup>1</sup>, ZHU Haiyan<sup>2</sup>

1. Northwest Gas Station, Southwest Oil & Gas Filed Company, PetroChina, Jianguyou 621709, China
2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

**Abstract** The layered shale formation is an extremely troublesome formation of borehole instability, with a significant influence on drilling. This paper studies the effect of joint weak planes in the rock mass and proposes a combined model, which combines both the bedding plane model and the intact rock model to describe the characteristics of the layered formation, especially the characteristics of the bedding plane. The finite difference software FLAC3D is used to establish the numerical model of the layered shale formation and to simulate the drilling process. To compare with the isotropic shale formation, the distributions of the failed area, the borehole displacement and the secondary stress in the layered shale formation are obtained. The failure process of the bedding plane and characteristics of the deformation are well simulated. The difference of the displacements on the two sides of the bedding plane is up to 0.8 mm and the slip displacement is 8.13 times the shift displacement. The results agree with the drilling practice. The slip behavior of the bedding plane is shown to be the central cause of the borehole instability in the layered shale formation. The effect of the geo-stress, the occurrence of the bedding plane, the parameters of the well track and the borehole size on the well deformation in inclined and horizontal layered formations are also simulated.

**Keywords** bedding plane; anisotropy; well instability; FLAC3D

层理性泥页岩的主要成分为黏土矿物颗粒, 其中大部分是层状铝硅酸盐矿物。在沉积、压实过程中形成有一定排列次序的片状结构, 最后固结成有一定方向性的沉积地层<sup>[1]</sup>, 是一种非均质、非连续、各向异性的力学介质, 具有明显的各向

收稿日期: 2013-11-20; 修回日期: 2014-03-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51134004); 国家科技重大专项(2011ZX05024-003-02)

作者简介: 赵靖影, 助理工程师, 研究方向为油气田勘探开发, 电子邮箱: luzhouzjy@163.com

引用格式: 赵靖影, 邓金根, 黄桢, 等. 层理性泥页岩井壁失稳机制的 FLAC3D 数值分析[J]. 科技导报, 2014, 32(13): 46-52.

异性的变形和强度特性<sup>[2]</sup>。根据钻井现场资料统计,钻井工程中大约九成的井壁失稳问题出现在泥页岩地层<sup>[3]</sup>。大量层理性泥页岩中的钻井实践也已经证明,层理面的存在不仅会产生井壁失稳坍塌、井径扩大,还会导致卡钻、憋钻、掉钻具等事故<sup>[4-7]</sup>。地层中层理的发育状况、密集程度、层理走向倾角、层理所在的地应力环境等因素都会对井壁的稳定造成负面影响,层理性泥页岩井壁失稳机理是解决问题的基础和关键。

从Jaeger等<sup>[8]</sup>提出单一弱面强度理论,到剪切强度连续变化准则<sup>[9]</sup>及黏聚力和内摩擦角连续变化破坏准则<sup>[10]</sup>的提出,之后Chenevert等<sup>[11]</sup>,Okland等<sup>[15]</sup>和Crook等<sup>[12]</sup>的实验研究,众多学者对层理性泥页岩井壁失稳做了很多研究。前人的研究通常将层理性泥页岩视为横观各向同性体,利用弹性参数的差异来描述层理面对岩体的影响,却没有反映层理面的特性。本文基于有限差分法的三维快速拉格朗日数值计算软件FLAC3D,利用混合离散法模拟真实层理性地层破坏变形时的力学行为。考虑层理面破坏的各向异性特征,对层间岩体采用剪切屈服函数和拉应力屈服函数相组合的摩尔-库伦屈服准则,对层理面采用带拉应力路径的摩尔-库伦屈服准则,建立层理性泥页岩井壁失稳机制的有限差分计算模型,研究层理性泥页岩地层井眼的变形破坏规律,以为层理性地层安全高效钻井提供理论指导。

### 1 层理性泥页岩本构关系和强度准则

层理性泥页岩内部有大量定向排列的层理面,力学性质表现为非均质、非连续、各向异性,其层理组合对岩体的变形、强度特征有重要影响,是典型的各向异性岩体<sup>[13]</sup>。

以往的研究通常将层理性泥页岩视为横观各向同性体来描述其应力应变特征<sup>[14-16]</sup>。这是把层理面的应力应变特征等效进了岩体内部,用垂直和平行于层理面弹性参数的差异来描述层理面对岩体的影响,但实际上描述的是没有层理面的岩体整体,难以反映层理面破坏模式。

真实层理性泥页岩的层理面具有独特的强度、变形性质,为了更贴近实际,本文将其划分为层间岩石单元和层理面单元两个薄层单元。通过这两个单元的组合形成一个层理性地层基本单元,下文简称为“组合模型”。多个基本单元沿薄层法线方向组合叠加起来形成具有一定厚度的层理性地层(图1)。

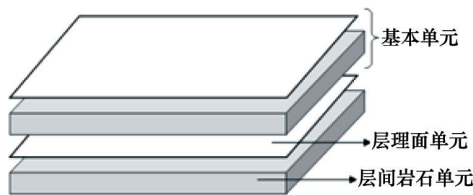


图1 层理性地层“组合模型”示意  
Fig. 1 Combined model of layered shale formation

层间岩石单元定义为均质、各向同性体,模拟实际地层中平行于层理面方向的同性特征,其弹性矩阵为

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $E$ 、 $\nu$ 分别为层间岩石单元的弹性模量和泊松比。

层理面单元为无厚度节理单元模型<sup>[17]</sup>,如图2所示。

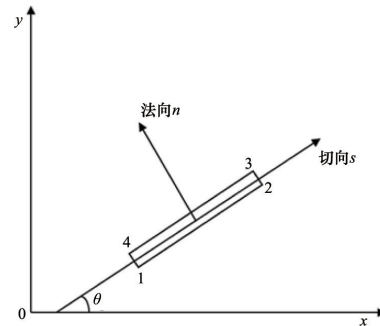


图2 无厚度节理单元  
Fig. 2 Layer unit with no thickness

层理面单元能够承受界面上的切向应力和法向应力为 $[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_s \\ \sigma_n \end{bmatrix}$ ,层理面单元之间相对位移为 $[\delta] = \begin{bmatrix} \delta_s \\ \delta_n \end{bmatrix}$ ,应力应变关系对应局部坐标 $(s, n)$ 表示为

$$\begin{bmatrix} \tau_s \\ \sigma_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_s \\ \delta_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $\tau_s$ 、 $\sigma_n$ 、 $k_s$ 、 $k_n$ 、 $\delta_s$ 、 $\delta_n$ 为层理面单元的切向应力、法向应力、切向刚度、法向刚度、相对切向位移、相对法向位移。

假设 $a = \frac{1}{2} - \frac{x}{L}$ ,  $b = \frac{1}{2} + \frac{x}{L}$ ,  $L$ 为层理面单元的长度,层理面单元内某点相对位移

$$[\delta] = \begin{bmatrix} \delta_s \\ \delta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & b & 0 & -b & 0 & -a & 0 \\ 0 & a & 0 & b & 0 & -b & 0 & -a \end{bmatrix} [u] = [B][u] \quad (3)$$

其中, $[u] = [u_1, v_1, u_2, v_2, u_3, v_3, u_4, v_4]^T$ 。

根据虚位移原理可以推导得出

$$[F] = \int [B]^T \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix} [B] dx [u] = [K][u] \quad (4)$$

其中, $[K]$ 为层理面单元对于局部坐标的刚度矩阵,具体表达式为

$$[K] = \frac{L}{6} \begin{bmatrix} 2k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 & -2k_s & 0 \\ 0 & 2k_n & 0 & k_n & 0 & -k_n & 0 & -2k_n \\ k_s & 0 & 2k_s & 0 & -2k_s & 0 & -2k_s & 0 \\ 0 & k_n & 0 & 2k_n & 0 & -2k_n & 0 & k_n \\ -k_s & 0 & -2k_s & 0 & 2k_s & 0 & k_s & 0 \\ 0 & -k_n & 0 & -2k_n & 0 & 2k_n & 0 & k_n \\ -2k_s & 0 & -2k_s & 0 & k_s & 0 & 2k_s & 0 \\ 0 & -2k_n & 0 & k_n & 0 & k_n & 0 & 2k_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

各层理面单元的刚度矩阵在满足节点平衡的条件下累

加到总刚度矩阵,利用应力应变关系求取应力。倾斜层理面单元通过坐标变换矩阵推导出对应的物理方程。组合模型同时具有沿层理面各向同性和垂直层理面各向异性的性质,既兼顾横观各向同性又能描述层理面变形,通过每个基本单元厚度和倾角的变化又能够描述层理的发育程度和产状。

总结工程实际和室内试验结果发现,层理性岩体的破坏有3种类型:层间岩石单元的剪切、拉伸破坏;层理面单元的剪切、拉伸破坏;二者的组合破坏<sup>[18]</sup>。为了描述这些不同破坏类型,分别对层间岩石单元和层理面单元确定强度准则。

对于层间岩石单元,采用剪切屈服函数和拉应力屈服函数相组合的摩尔-库伦屈服准则,如图3所示。

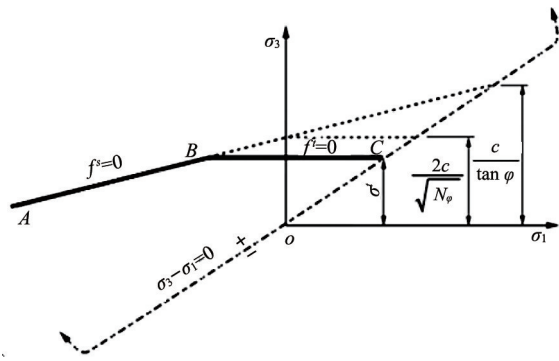


图3 层间岩石单元的摩尔-库伦屈服准则

Fig. 3 Mohr-Coulomb yield criterion of intact rock

规定拉应力为正,压应力为负,有 $\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3$ 。直线AB段为剪切屈服函数的包络线

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi + 2c \sqrt{N_\psi} \quad (6)$$

$$N_\psi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (7)$$

直线BC段为拉应力屈服函数包络线

$$f^t = \sigma^t - \sigma_3 \quad (8)$$

其中,  $\varphi$  为内摩擦角,  $c$  为黏聚力,  $\sigma^t$  为抗拉强度。

同时其拉伸强度有上限值,定义为  $f^s = 0$  和  $\sigma_1 - \sigma_3 = 0$

两条直线的交点  $\sigma_{\max}^t = \frac{c}{\tan \varphi}$ 。

当层间岩石单元进入屈服阶段后,其特性将是部分弹性和部分塑性的,应力增加导致的应变中同时含有弹性增量和塑性增量两个部分<sup>[19]</sup>:

$$d\varepsilon_{ij} = (d\varepsilon_{ij})_e + (d\varepsilon_{ij})_p \quad (9)$$

$$(d\varepsilon_{ij})_p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (10)$$

岩石进入屈服状态后,需利用流动法则进行修正,得到符合塑性规律的应力增量和应力状态<sup>[20]</sup>。

剪切塑性流动对应的是非关联流动法则,塑性势函数为

$$g^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \quad (11)$$

其中,  $N_\psi = \frac{1 + \sin \Psi}{1 - \sin \Psi}$ ,  $\Psi$  为岩石剪胀角。

拉伸塑性流动对应的是关联流动法则,塑性势函数为

$$g^t = -\sigma_3 \quad (12)$$

对于层理面单元,采用带拉应力路径的摩尔-库伦屈服准则,如图4所示。

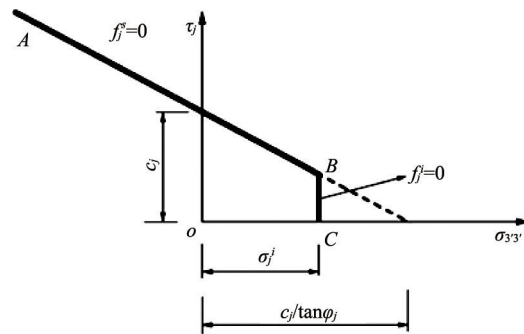


图4 层理面单元的摩尔-库伦屈服准则

Fig. 4 Mohr-Coulomb yield criterion of bedding plane

直线AB段为剪切屈服函数的包络线

$$f_j^s = \tau_j + \sigma_{33}^j \tan \varphi_j - c_j \quad (13)$$

$$\tau_j = \sqrt{\sigma_{13}^j{}^2 + \sigma_{23}^j{}^2} \quad (14)$$

直线BC段为拉应力屈服函数包络线

$$f_j^t = \sigma_{33}^j - \sigma_j^t \quad (15)$$

其中,  $\sigma_{m'n'}$  为层理面局部坐标系下应力的张量表达形式,  $\varphi_j$  为层理面内摩擦角,  $c_j$  为层理面黏聚力,  $\sigma_j^t$  为层理面抗拉强度。

其拉伸强度的上限值为  $\sigma_{j\max}^t = \frac{c_j}{\tan \varphi_j}$ 。

剪切塑性流动对应的是非关联流动法则,塑性势函数为

$$g_j^s = \tau_j + \sigma_{33}^j \tan \Psi_j \quad (16)$$

其中,  $\Psi_j$  为层理面剪胀角。

拉伸塑性流动对应的是关联流动法则,塑性势函数为

$$g_j^t = -\sigma_{33}^j \quad (17)$$

## 2 层理性泥页岩井壁失稳数值分析

### 2.1 层理面的不利影响

FLAC3D利用混合离散法模拟地层破坏变形时的力学行为,从物理现象建立微分方程,用差分格式转化控制方程中的微商格式,再求解离散后的差分方程<sup>[21]</sup>。当计算区域内网格节点较多时,近似解精度极高,适于模拟塑性变形破坏之类的不稳定过程。本文利用FLAC3D内置的柱形隧道渐变放射网格单元建立地层和井眼,利用接触面单元建立层理面<sup>[22,23]</sup>。模型为倾斜层理泥页岩中的直井,平面区域范围为4 m×4 m,井眼直径0.311 m,层理面间距0.035 m,如图5所示。

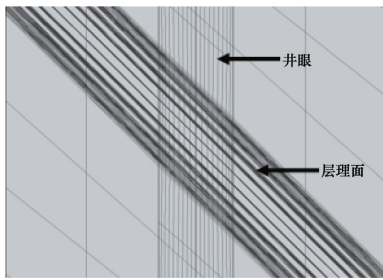


图5 层理面示意

Fig. 5 Model of bedding planes

模型边界条件:上覆岩层压力为 100 MPa,水平最大地应力为 110 MPa,水平最小地应力为 90 MPa,井眼内钻井液柱压力为 50 MPa,孔隙压力为 40 MPa,有效应力系数为 0.8。

层间岩石材料参数:弹性模量为 1.5 GPa,泊松比为 0.25,黏聚力为 13.5 MPa,内摩擦角为 33°,抗拉强度为 4 MPa。

层理面材料参数:黏聚力为 2.88 MPa,内摩擦角为 18°,抗拉强度为 0.8 MPa,法向刚度为 16 GPa/m,切向刚度为 1 GPa/m。

模型的层理倾角可变,根据地应力转换矩阵,能够模拟不同层理产状和井型。计算过程分别为井眼钻开前的地应力平衡状态和井眼钻开后的应力重分布状态,数值模拟过程符合钻井实际。

层理地层中的井眼在层理区域以外的塑性区和井眼位移沿井眼轴线均匀分布。但在层理区域内出现突变现象,沿井眼轴线出现各向异性,结果如图 6 所示。其中塑性区向地层最大扩展深度为非层理区域的 3 倍,井眼位移最大值为非层理区域的 10 倍。同时层理区域内塑性区与井眼位移的分布和层理面的倾角相吻合,层理面的存在对塑性区和井眼位移分布起主导作用。

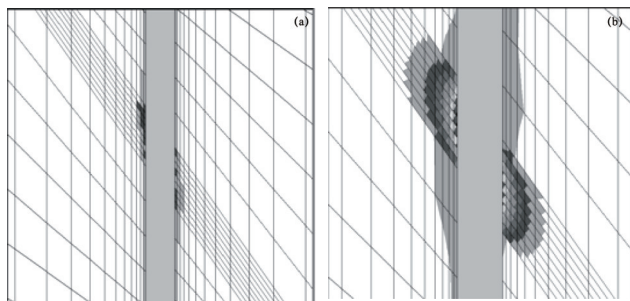


图6 层理性泥页岩井眼塑性区(a)和位移(b)

Fig. 6 Failed area (a) and borehole displacement (b) of layered shale formation

钻开井眼会使地层原始地应力发生改变,在地层中产生次生应力,其分布情况可以用来衡量地层的应力集中。井壁的塑性区内应力释放导致次生应力降低,而地层内部弹性交界地带次生应力出现最大值,应力集中现象明显。

如图 7 所示,对比层理地层和均质地层的次生应力,层理地层和均质地层的最大次生应力分别为 95.0 和 78.8 MPa。

层理地层最大次生应力是均质地层的 1.21 倍,而且次生应力的集中区域更大。在相同地应力条件下,层理面的存在应力集中更明显,地层破坏风险更大。

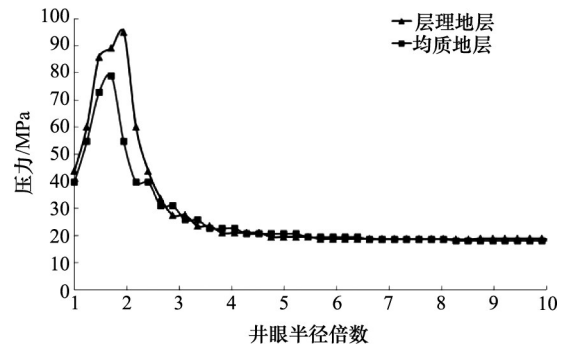


图7 层理地层和均质地层的次生应力对比

Fig. 7 Secondary stress in layered shale formation and isotropic formation

单独提取某一层理面处的井眼位移进行分析,位移在井眼周向呈非均匀非线性分布。0°、90°、180°和 270° 4 个极轴方向在层理面和井壁相交处出现最大位移,分别是 0.862、5.110、0.897 和 6.670 mm。如图 8 所示,垂直于层理走向的最大位移为平行走向的 8.13 倍,说明层理面主要发生沿垂直于走向的滑移,而不是平行于走向的层理面相互错动。平行于层理走向的位移最大差值为 0.035 mm,垂直于层理走向的位移最大差值为 1.56 mm,井壁高低边位移差值较大,反映了层理面在一定重力作用下从井眼高边向低边的滑移趋势。

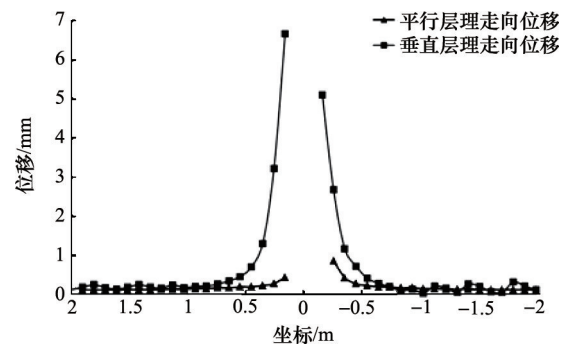


图8 层理面两种方向位移对比

Fig. 8 Displacement in two directions of interface

提取层理面两侧最近节点位移进行对比,结果如图 9 所示。交界面上侧节点的井壁高低边位移分别是 3.70 和 3.20 mm,下侧节点相应位移分别是 4.34 和 4.00 mm,交界面上下两侧的位移并不相等。越靠近井壁,差值越大。层理面上下两侧高低边的位移最大差值分别为 0.64 和 0.80 mm。该结果也说明在层理面交界处出现沿层理面的滑移现象,且井壁处滑移现象最严重。该结果和实际层理性泥页岩钻井中观察到的层理掉块现象相吻合。

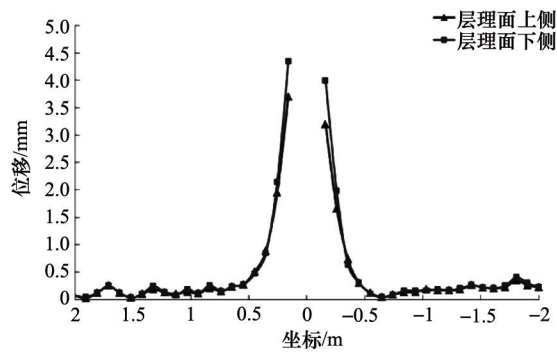


图9 层理面交界面两侧位移对比

Fig. 9 Displacement on the both sides of interface

## 2.2 不同地应力状态的影响

层理性泥页岩地层在地壳中受三轴地应力作用,在3个主应力方向上分别是上覆岩层压力,水平最大地应力和水平最小地应力。地层赋存环境不同,地应力状态不同,下面分

别模拟3种地应力的变化对层理性泥页岩井壁的失稳破坏,各工况参数如下。

工况1:改变上覆岩层压力,设置平行层理走向水平地应力为90 MPa,垂直层理走向水平地应力为110 MPa,上覆岩层压力分别为70、80、90、100、110、120、130 MPa。

工况2:改变平行层理走向水平地应力,设置上覆岩层压力为100 MPa,垂直层理走向水平地应力为110 MPa,平行层理走向水平地应力分别为70、80、90、100、110、120、130 MPa。

工况3:改变垂直层理走向水平地应力,设置上覆岩层压力为100 MPa,平行层理走向水平地应力为90 MPa,垂直层理走向水平地应力分别为70、80、90、100、110、120、130 MPa。

对比3种地应力变化下的塑性区面积和体积,结果如图10所示。平行走向水平地应力和上覆岩层压力有明显的分段现象。当其为中心主应力或最大主应力时,井眼处于相对稳定状态,此时应力改变对井眼破坏影响不大。垂直走向水平地应力则无分段现象,最大塑性区面积和体积都存在较为明显的线性关系。

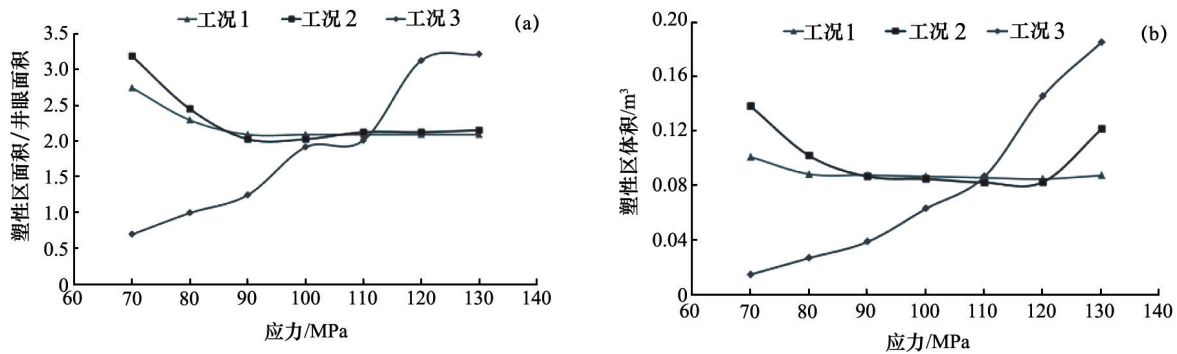


图10 层理面塑性区面积/井眼面积(a)和塑性区体积(b)对比

Fig. 10 Ratio of area on failed zone to borehole (a) and volume of failed zone (b)

对比表1的结果,3种工况下地应力对垂直走向位移影响的大小关系为:垂直于层理走向水平地应力 > 上覆岩层压力 > 平行于层理走向水平地应力。综合上述分析,3种地应力对层理性地层井眼破坏影响的大小关系为垂直于层理走向水平地应力 > 平行于层理走向水平地应力 > 上覆岩层压力。垂直层理走向水平地应力是层理面滑移破坏的主导应力。

表1 3种工况作用效果对比

Table 1 Comparison of simulated results under three conditions

工况	两个方向位移倍数比	井壁高低边位移差/m	位移影响半径/m
工况1	6.0	0.0026	0.3
工况2	4.5	0.0017	0.4
工况3	10.0	0.0040	0.5

## 2.3 层理性泥页岩空间分布的影响

层理面在三维空间的分布使地层性质具有各向异性,建立倾斜层理中的直井和水平层理中的斜井模型,分别以层理面走向(井眼方位)、层理面倾角(井斜角)为变量,讨论空间分布对井眼破坏的影响。

以层理面走向(井眼方位)为变量:倾斜层理直井的层理倾角为45°,层理走向与水平最大地应力夹角分别为0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°。水平层理斜井的井斜角为45°,井眼方位与水平最大地应力夹角分别为0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°。

以层理面倾角(井斜角)为变量:倾斜层理直井模型的层理走向与水平最大地应力夹角为90°,层理倾角分别为15°、30°、45°、60°、75°。水平层理斜井模型的井眼方位与水平最大地应力夹角为90°,井斜角分别为15°、30°、45°、60°、75°。

由图11可以看出,倾斜层理直井的破坏程度随层理走向方位角增大而增大。层理走向垂直于水平最大地应力时,井

眼稳定性较差。水平层理斜井当井眼方位在水平最小地应力方向时,井眼更稳定。但层理走向和井眼方位的影响较

小,还和地应力的大小顺序有关,没有一成不变的规律,要结合实际情况分析。

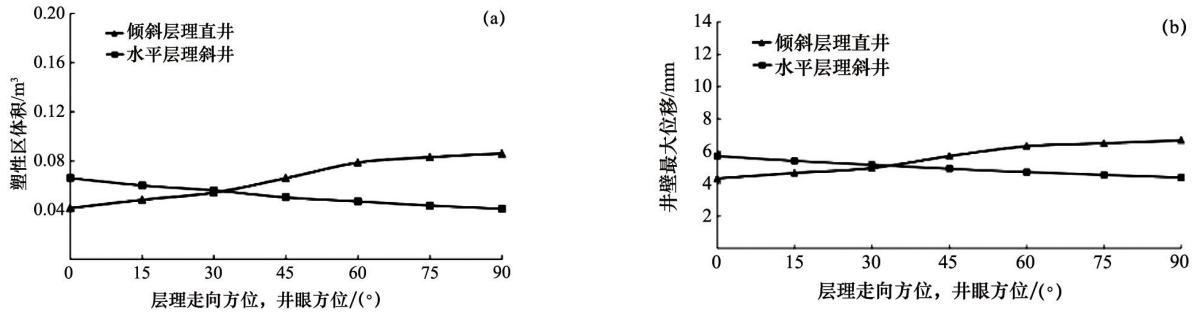


图 11 方位对塑性区体积(a)和最大位移(b)的影响

Fig. 11 Comparison of volume of failed area (a) and max displacement (b) in different directions

由图 12 可知,倾斜层理直井的破坏程度随层理面倾角增大而增大,有明显的线性关系。层理面倾角越大,井眼钻开后层理面在重力作用下产生滑移的风险越大。水平层理斜井的破坏程度总体上也随井斜角增大而增大,井斜角越小井眼越稳定。

当井斜角接近水平时,井眼破坏情况最严重,此时井眼更容易发生层理崩落现象,和实际钻井中观察到的现象相吻合。各曲线呈现一定 S 型,在 45°井斜角时有明显拐点,说明各破坏指标在 45°井斜角附近的变化率明显增大,此时层理面井眼的变形破坏对井斜角改变十分敏感。

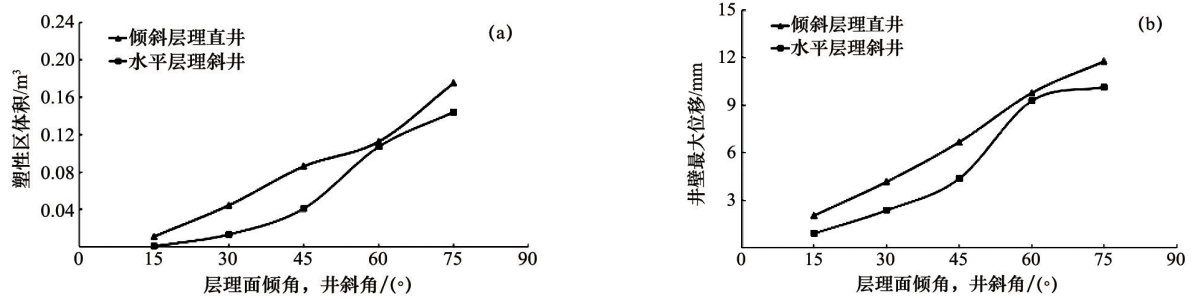


图 12 倾角对塑性区体积(a)和最大位移(b)的影响

Fig. 12 Comparison of volume of failed area (a) and max displacement (b) with different inclination angles

### 2.4 不同井眼尺寸的影响

在钻井过程中发现,井眼尺寸对井壁稳定性有重要影响。本文为研究倾斜层理地层中井眼尺寸对井壁稳定的影响,建立了层理性地层中的不同尺寸井眼模型,地层的层理走向和水平最大地应力垂直,井眼尺寸分别为 120.6、200、269.9 和 311 mm,层理面倾角分别为 30°、45°和 60°。

和井壁最大位移都随井眼尺寸增大而增大。相同条件下,井眼尺寸越大,井壁稳定性越差;对于同一尺寸的井眼,塑性区体积和井壁最大位移都随层理倾角增大而增大,层理倾角越大,井眼失稳风险越大,维持井壁稳定需要的钻井液密度越高。井眼尺寸越大,塑性区体积和井壁最大位移随层理倾角变化的幅度越大,大尺寸井眼对层理的倾角变化更敏感,小尺寸井眼在不同层理倾角环境下稳定性相对更好。

从图 13 可以看出,对同一倾角的层理地层,塑性区体积

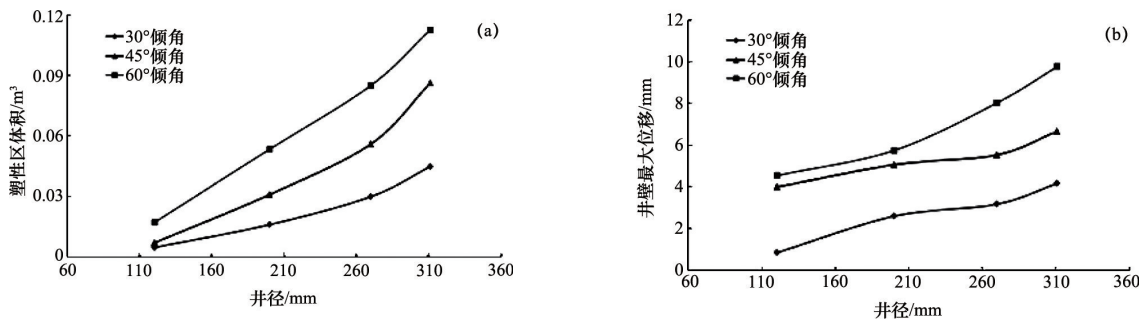


图 13 井径对塑性区体积(a)和井壁最大位移(b)的影响

Fig. 13 Comparison of volume of failed area (a) and max displacement (b) with different borehole diameters

### 3 结论

通过对层理性泥页岩组成结构的分析,建立了具有层间岩石单元和层理面单元的层理性泥页岩力学模型。基于此模型,运用FLAC3D建立了层理性泥页岩井眼三维数值模型,对钻井过程中的井眼变形破坏进行了数值分析。

1) 在相同地应力条件下,与均质地层相比,层理性泥页岩变形破坏主要发生在层理区域内。井眼破坏都从井壁和层理面的交界处发展而来,层理面的存在使次生应力更加集中,层理面是层理性泥页岩地层中井眼破坏的根本原因。

2) 层理面上下两侧和井眼高低边的位移的最大差值分别为0.8 mm和1.56 mm,说明层理面的滑移现象比较明显,这和钻井过程中观察到的井壁扁平掉块现象相吻合。在倾斜层理泥页岩地层中,垂直于层理走向的最大位移为平行走向的8.13倍,反映了其主要发生沿垂直于走向的滑移,平行于走向的层理面相互错动不明显。

3) 模拟了3个地应力对层理性泥页岩井眼变形的影响,综合分析层理面两个方向位移、层理面高低边位移和位移影响范围,发现垂直层理走向水平地应力的变化对层理面位移影响最大,对变形破坏起主导作用力。

4) 对于倾斜层理中的直井,主要影响因素为层理倾角,层理倾角较大时极易引发层理滑移破坏。对于水平层理中的斜井,主要影响因素为井斜角。井斜角越小井眼越稳定,当接近水平时,容易发生层理崩落。当井斜角在45°附近时,井壁的稳定性和井斜角的变化尤其敏感。

5) 层理性地层中,井眼尺寸越大,井壁越不稳定,并且大尺寸井眼对倾角变化更敏感。当层理倾角较大时,小尺寸井眼更利于井壁稳定,在满足井下工具使用的情况下尽量钻小尺寸井眼。

#### 参考文献(References)

[1] 邓虎. 裂缝性泥页岩的水化稳定性研究及其应用[D]. 成都: 西南石油学院, 2004.  
Deng Hu. Research and application of hydration stability in fractured shale[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2004.

[2] 朱泽奇, 盛谦, 梅松华, 等. 改进的遍布节理模型及其在层状岩体地下工程中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3115-3122.  
Zhu Zeqi, Sheng Qian, Mei Songhua, et al. Improved ubiquitous-joint model and its application to underground engineering in layered rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3115-3122.

[3] Steiger R P, Leung K P. Quantitative determination of the mechanical Properties of shales[J]. SPE drilling engineering, 1992, 7(3): 181-185.

[4] Gallant C, Zhang J G, Wolfe C A, et al. Wellbore stability considerations for drilling high-angle wells through finely laminated shale: A case study from terra nova[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, USA, November 11-14, 2007.

[5] Okland D, Cook J M. Bedding related borehole instability in high-angle wells[C]. SPE/ISRM Conference on Rock Mechanics in Petroleum Engineering, Eurock '98, Trondheim, Norway, July 7-10, 1998.

[6] Yamamoto K, Shioya Y, Uryu N. Discrete element approach for the wellbore instability of laminated and fissured rocks[C]. SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Irving, Texas, October 20-23, 2002.

[7] Narayanasamy R, Barr D, Mine A. Wellbore instability predictions within the cretaceous mudstones, clair field, west of Shetlands[J]. SPE Drilling & Completion, 2010, 25(4): 518-529.

[8] 耶格 J C, 库克 N G W. 岩石力学基础[M]. 中国科学院工程力学研究所, 译. 北京: 科学出版社, 1981.

Jaeger J C, Cook N G W. Fundamentals of rock mechanics[M]. Chinese Research Institute of Engineering Mechanics, Chinese Academy of Science, trans. Beijing: Science Press, 1981.

[9] Fjar E. Petroleum related rock mechanics[M]. The Netherlands: Elsevier Science Publisher, 1992.

[10] McLamore R T, Gray K E. A strength criterion for anisotropic rocks based upon experimental observations[C]. Annual Meeting of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Los Angeles, California, February 19-23, 1967.

[11] Chenevert M E, Gatlin C. Mechanical anisotropies of laminated sedimentary[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1965, 5(1): 67-77.

[12] Crook A J L, Yu J G, Willson S M. Development of an orthotropic 3D Elastoplastic material model for shale[C]. SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Irving, Texas, October 20-23, 2002.

[13] 张志增. 横观各向同性岩体位移反分析的理论与应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.  
Zhang Zhizeng. Theory and application research on displacement back analysis of transversely isotropic rock mass[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.

[14] 张玉军, 唐仪兴. 考虑层状岩体强度异向性的地下洞室平面有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 307-310.  
Zhang Yujun, Tang Yixing. 2-D FEM analysis for an underground opening considering the strength-anisotropy of the layered rock mass [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(3): 307-310.

[15] 张玉军, 刘谊平. 层状岩体的三维弹塑性有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1615-1619.  
Zhang Yujun, Liu Yiping. 3D elasto-plastic FEM analysis on layered rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11): 1615-1619.

[16] 徐磊, 任青文, 杜小凯, 等. 层状岩体各向异性弹塑性模型及其数值实现[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(4): 763-769.  
Xu Lei, Ren Qingwen, Du Xiaokai, et al. An anisotropic elasto plastic constitutive model for layered rock masses and its implementation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(4): 763-769.

[17] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.  
Zhou Weiyan. Advanced rock mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 1990.

[18] 黄书岭, 徐劲松, 丁秀丽, 等. 考虑结构面特性的层状岩体复合材料模型与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 743-756.  
Huang Shuling, Xu Jinsong, Ding Xiuli, et al. Study of layered rock mass composite model based on characteristics of structural plane and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 743-756.

[19] 梅松华. 层状岩体开挖变形机制及破坏机理研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.  
Mei Songhua. Study on deformation mechanism and failure characteristics of layered rock masses due to excavation[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, 2008.

[20] 蒋青青, 胡毅夫, 赖伟明. 层状岩质边坡遍布节理模型的三维稳定性分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 712-716.  
Jiang Qingqing, Hu Yifu, Lai Weiming. Three-dimensional stability analysis of stratified rock slope based on ubiquitous-joint model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 712-716.

[21] 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
Xie Heping, Chen Zhonghui. Rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2004.

[22] 陈育民. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.  
Chen Yumin. Basic and engineering examples of FLAC/FLAC3D[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009.

[23] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
Liu Bo, Han Yanhui. Theory examples and application guide of FLAC [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.

(责任编辑 刘志远)