

# 边界元法在深部地层井眼稳定中的应用

马天寿, 陈平

西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500

**摘要** 为解决石油天然气钻井、地热钻井中深部地层井眼稳定问题, 基于连续介质弹性力学建立深部地层井眼稳定平面应变问题的基本微分方程, 采用边界元理论推导了井周应力和位移的边界元求解方法; 通过建立井眼稳定物理模型、划分边界单元, 将求解出的井周应力结果与解析解进行对比; 分析了四川某油田深部地层井眼的稳定性情况。结果表明: BEM 求解应力分布与解析解吻合较好, 其误差小于 0.82%; 实例井 2500~3500 m 井段井眼稳定性分析结果与实际情况基本一致, 实际钻井液密度低于坍塌压力当量密度, 导致井眼扩大率普遍达到 20% 以上, 适当提高钻井液密度能够维持井眼稳定, 进一步验证了 BEM 方法的准确性。该方法为井眼稳定分析提供了一种新的手段和方法。

**关键词** 井眼稳定; 坍塌压力; 边界元; 数值方法

**中图分类号** TE21

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.07.008

## Application of boundary element method to borehole stability problem in deep formation

MA Tianshou, CHEN Ping

State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

**Abstract** To study the borehole stability problem of oil and gas drilling and geothermal drilling in deep formations, a basic differential equation of plane strain problem for borehole stability in deep formation is proposed on the basis of the continuum mechanics of elasticity, and a BEM calculation method of stress and displacement distribution around the wellbore is derived by using the BEM theory. To test the correctness of the BEM method, a physical model and the boundary elements of borehole stability problem are established, then the stress solution around the wellbore is compared with the analytical solution. By analyzing the borehole stability problem of deep formation in a certain oilfield of Sichuan, it is shown that the stress distribution with the BEM method is in good agreement with analytical solution, and its error is less than 0.82%. The borehole stability analysis results are basically in accord with the actual situation at 2500~3500 m in the example well, the actual drilling fluid density is lower than the equivalent density of the collapse pressure, and the hole expanding rate is above 20%. Increasing the density of drilling fluid can maintain wellbore stability, thus the accuracy of the BEM method is further verified. This method provides a new means for wellbore stability analysis.

**Keywords** wellbore stability; collapse pressure; boundary element method; numerical method

随着地球科学的发展和工程设施的深延, 深部地层钻探技术迅速发展。深部地层钻探技术成为深部油气开采、石油及天然气的地下贮存、大陆科学钻探、地热资源开发、深部采矿、煤炭地下直接液化与气化、煤层气开采、高放射性核废料

的深地层处置、矿山安全、建筑安全等工程实施的必要手段, 尤其是深部油气开采方面<sup>[1-3]</sup>。深部地层钻探技术是获取地球深部物质, 了解地球内部信息最直接、最有效、最可靠的方法<sup>[2]</sup>, 也是深部地层资源开采的技术通道。石油天然气钻井、

收稿日期: 2014-09-29; 修回日期: 2015-01-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB228003)

作者简介: 马天寿, 博士研究生, 研究方向为页岩气钻井、随钻测量、深水钻井等, 电子邮箱: matianshou@126.com

引用格式: 马天寿, 陈平. 边界元法在深部地层井眼稳定中的应用[J]. 科技导报, 2015, 33(7): 49-54.

地热钻井和大陆科学钻探的实践均表明<sup>[2-4]</sup>,深部地层钻探井眼围岩的稳定性较差,钻井过程中若发生井眼失稳,容易导致卡钻、埋钻等井下复杂和事故的发生,严重时甚至导致井眼报废。因此,井眼稳定问题成为决定钻井成败的关键因素之一。

针对深部地层钻探井眼失稳的问题,国内外开展了大量的研究,并形成了多种井眼稳定分析方法,如解析解方法、数值计算方法<sup>[4-7]</sup>。随着数值计算理论和计算机技术的进步,各种数值计算方法在井眼失稳问题中得到广泛的应用,如有限元方法(FEM)<sup>[8-10]</sup>、离散元方法(DEM)<sup>[11,12]</sup>、有限差分方法(FDM)<sup>[13,14]</sup>、其他数值分析方法<sup>[15]</sup>等。这些方法中考虑了岩石的本构方程(线弹性、孔隙弹性、弹塑性、蠕变等多种形式),基于不同的岩石本构方程并结合上述的求解方法,即可得到井周围岩的应力和位移分布情况,再结合岩石的强度判别准则(如M-C、D-P、H-B、MG-C等多种强度准则)进行井周围岩的稳定性判别,即实现了井眼稳定性分析,从而为控制井眼稳定的合理技术措施提供制定依据,如提高钻井液密度(即提高井眼支护压力)、增加钻井液封堵能力等。

井眼稳定常规分析方法已在深部地层钻探井眼稳定性控制方面做出了巨大贡献,但是,不同的模型和方法计算结果有自身的缺陷和不足,只能解决一些特殊的或特定区域的问题。为此,需要继续发展其他不同的分析方法,以期解决现有方法存在的不足和缺陷。作为现代数值分析方法——边界元方法(BEM)在井眼稳定问题中的应用却未见文献报道。BEM是对边界积分方程离散求解的现代数值分析方法,属于近似求解方法之一,BEM适合于求解无穷域或应力集中问题,具有降阶、降维的特点<sup>[16-18]</sup>,其优点在于依靠微分方程阶数的减少可降低对近似试函数所必需的可导阶数<sup>[16]</sup>,加拿大Roesscience公司开发了一种快速的二维平面应变间接边界元程序Examine2D,主要用来计算岩石地下和地表挖掘的压力和位移。为此,本文采用BEM方法分析井眼稳定问题,给出井眼稳定分析的弹性力学基本方程和直接边界元求解方法,采用Examine软件分析深部地层井眼周围岩石的应力分布规律,阐述BEM在井眼稳定问题分析中的应用。

## 1 井眼平面应变基本方程

平衡方程

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0 \quad \text{在 } \Omega \text{ 内} \quad (1)$$

几何方程

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

本构方程

$$\varepsilon_{ij} = s_{ij} \sigma_{ij} \quad (3)$$

$$s = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \quad (4)$$

若假设井眼轴线方向为 $z$ 轴,则井眼平面横截面大小和形状沿 $z$ 轴不发生改变,作用的外力与 $z$ 轴垂直,这种情况下,井周地层的位移将主要发生在横截面内,因此,往往将这类问题简化为广义的平面应变问题,可以将上述弹性体基本方程转化为平面应变问题的弹性力学基本方程。

首先,考虑应变分量与 $z$ 方向无关,即

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{rz} = \varepsilon_{\theta z} = 0 \quad (5)$$

将式(3)代入式(5)可得

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = 0 \quad \sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (6)$$

再将式(6)代入式(3),可得深部地层平面应变问题的本构方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{1-\nu^2}{E} \left( \sigma_{xx} - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{yy} \right) \\ \varepsilon_{yy} = \frac{1-\nu^2}{E} \left( \sigma_{yy} - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{xx} \right) \\ \gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \end{cases} \quad (7)$$

静力边界条件为

$$p_i = \sigma_{ij} n_j = \bar{p}_i \quad \text{在 } \Gamma_1 \text{ 上} \quad (8)$$

$$n_1 = \cos(n, x_1) \quad (9)$$

$$n_2 = \cos(n, x_2)$$

位移边界条件

$$u_i = \bar{u}_i \quad \text{在 } \Gamma_2 \text{ 上} \quad (10)$$

将式(2)代入式(7)中,再将得到的结果代入式(1)中,即可得到由位移表示的平衡方程,再配合边界积分方程的离散化处理和边界条件,即可求解深部地层的井眼稳定问题。

## 2 边界元求解方法

为了求解深部地层平面应变问题基本方程,需将基本方程转化为边界积分方程,为此,采用直接边界元方法,即采用Somigliana直接法进行求解<sup>[16]</sup>。若忽略体力,则基本方程的边界积分方程为

$$c_{ik}^i u_k^i + \int_{\Gamma} u_k p_{ik}^* d\Gamma = \int_{\Gamma} p_k^* u_{ik} d\Gamma \quad (11)$$

式中,基本解满足基本解方程

$$\frac{\partial \sigma_{jk}^*}{\partial x_j} + \delta^i = 0 \quad (12)$$

边界积分方程的基本解作用于位于边界或域内( $c_{ik}^i = \delta_{ik}$ ),对于光滑边界 $c_{ik}^i = \delta_{ik}/2$ ,在角点上具体确定 $c_{ik}^i$ 的值。平面应变问题的基本解可依据Kelvin解确定出基本

解<sup>[16]</sup>为

$$u_{ik}^* = \frac{1}{8\pi G(1-\nu)} \left[ (3-4\nu) \ln\left(\frac{1}{r}\right) \delta_{ik} + \frac{\partial r}{\partial x_i} \frac{\partial r}{\partial x_k} \right] \quad (13)$$

$$p_{ik}^* = \frac{1}{4\pi(1-\nu)r} \left\{ \frac{\partial r}{\partial n} \left[ (1-2\nu) \delta_{ik} + 2 \frac{\partial r}{\partial x_i} \frac{\partial r}{\partial x_k} \right] - (1-2\nu) \left( \frac{\partial r}{\partial x_i} n_k - \frac{\partial r}{\partial x_k} n_i \right) \right\} \quad (14)$$

式中,  $u_{ik}^*$ ,  $p_{ik}^*$  分别为  $l$  方向单位集中载荷引起的  $k$  方向位移和表面力。

基本解的分量  $u_{ik}^*$  和  $p_{ik}^*$  以  $2 \times 2$  阶的矩阵表示为

$$\mathbf{p}^* = \begin{bmatrix} p_{11}^* & p_{12}^* \\ p_{21}^* & p_{22}^* \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}^* = \begin{bmatrix} u_{11}^* & u_{12}^* \\ u_{21}^* & u_{22}^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

位移、表面力矢量可表示为

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{p} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} \quad (16)$$

由此, 边界积分方程可以转换为

$$\mathbf{c}^i \mathbf{u}^i + \int_{\Gamma} \mathbf{p}^* \mathbf{u} d\Gamma = \int_{\Gamma} \mathbf{u}^* \mathbf{p} d\Gamma \quad (17)$$

式中,  $\mathbf{u}^i$  为基本解作用点  $i$  (边界或域内) 的位移,  $\mathbf{c}^i$  为  $2 \times 2$  阶的常数矩阵, 取决于该节点  $i$  所在的位置及几何形状。

于是可对求解域及边界分割单元, 本文采用常单元进行分割, 则  $\mathbf{u}$  和  $\mathbf{p}$  在单元内是常量, 等于单元中点 (节点) 的值, 则式 (17) 可写成离散形式

$$\mathbf{c}^i \mathbf{u}^i + \sum_{j=1}^N \left( \int_{\Gamma_j} \mathbf{p}^* d\Gamma \right) \mathbf{u}^j = \sum_{j=1}^N \left( \int_{\Gamma_j} \mathbf{u}^* d\Gamma \right) \mathbf{p}^j \quad (18)$$

式中,  $\int_{\Gamma_j} \mathbf{p}^* d\Gamma$  和  $\int_{\Gamma_j} \mathbf{u}^* d\Gamma$  是与  $i$  节点和  $j$  节点有关的边界积分项, 称为影响系数, 经过积分计算后成为  $2 \times 2$  阶的矩阵  $\hat{\mathbf{H}}_{ij}$  和  $\mathbf{G}_{ij}$ 。

因此, 边界积分方程离散形式可简化为

$$\mathbf{c}^i \mathbf{u}^i + \sum_{j=1}^N \hat{\mathbf{H}}_{ij} \mathbf{u}^j = \sum_{j=1}^N \mathbf{G}_{ij} \mathbf{p}^j \quad (19)$$

若令

$$\begin{cases} \mathbf{H}_{ij} = \hat{\mathbf{H}}_{ij} & i \neq j \\ \mathbf{H}_{ij} = \hat{\mathbf{H}}_{ij} + \mathbf{c}^i & i = j \end{cases} \quad (20)$$

则式 (19) 可写成如下简单形式

$$\sum_{j=1}^N \mathbf{H}_{ij} \mathbf{u}^j = \sum_{j=1}^N \mathbf{G}_{ij} \mathbf{p}^j \quad (21)$$

对边界上所有节点应用式 (21), 可得矩阵方程

$$\mathbf{H} \mathbf{u} = \mathbf{G} \mathbf{p} \quad (22)$$

式中,  $\mathbf{H}$  和  $\mathbf{G}$  均是  $2N \times 2N$  阶的矩阵,  $N$  为边界上的节点总数。

将已知边界带入式 (22), 并将未知量及其系数移至方程的左边, 其余项移至方程的右边可得

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{B} \quad (23)$$

式中,  $\mathbf{x}$  代表未知的数组, 包括位移和表面力。

求解式 (23) 可以获得全部边界值。当获得全部边界值 (位移和表面力) 后, 便可计算域内任一点的位移和应力。为了得到求解域内的位移分布, 可以采用 Somigliana 公式求解<sup>[16]</sup>, 将 Somigliana 公式表示的边界积分方程写成离散形式

$$\mathbf{u}^i = \sum_{j=1}^N \left( \int_{\Gamma_j} \mathbf{u}^* d\Gamma \right) \mathbf{p}^j - \sum_{j=1}^N \left( \int_{\Gamma_j} \mathbf{p}^* d\Gamma \right) \mathbf{u}^j \quad (24)$$

为了得到求解域内点的应力分布, 可以通过对该点位移的求导和本构方程加以确定, 求得域内点应力分布的边界积分方程的离散形式<sup>[16]</sup>为

$$\sigma_{kl} = \sum_{j=1}^N \left( \int_{\Gamma_j} \mathbf{D}_{kl} d\Gamma \right) \mathbf{p}^j - \sum_{j=1}^N \left( \int_{\Gamma_j} \mathbf{S}_{kl} d\Gamma \right) \mathbf{u}^j \quad (25)$$

其中,

$$\mathbf{D}_{kl} = (\mathbf{D}_{1kl}, \mathbf{D}_{2kl}) \quad (26)$$

$$\mathbf{S}_{kl} = (\mathbf{S}_{1kl}, \mathbf{S}_{2kl}) \quad (27)$$

$$\mathbf{D}_{kij} = \frac{1}{r} \left[ (1-2\nu) \left( \delta_{ki} \frac{\partial r}{\partial x_j} + \delta_{ij} \frac{\partial r}{\partial x_k} + \delta_{ij} \frac{\partial r}{\partial x_k} \right) + 2 \frac{\partial r^3}{\partial x_i \partial x_j \partial x_k} \right] \frac{1}{4\pi(1-\nu)} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{kij} = & \frac{2\mu}{r} \left[ \frac{\partial r}{\partial n} (1-2\nu) \left( \delta_{ij} \frac{\partial r}{\partial x_k} + \nu (\delta_{ik} \frac{\partial r}{\partial x_j} + \delta_{jk} \frac{\partial r}{\partial x_i}) - 4 \frac{\partial r^3}{\partial x_i \partial x_j \partial x_k} \right) \right. \\ & + \nu \left( n_i \frac{\partial r^2}{\partial x_j \partial x_k} + n_j \frac{\partial r^2}{\partial x_i \partial x_k} \right) + \frac{(1-2\nu)}{2} \left( 2n_k \frac{\partial r^2}{\partial x_i \partial x_j} + n_j \delta_{ik} + n_i \delta_{jk} \right) \\ & \left. - \frac{(1-4\nu)}{2} n_k \delta_{ij} \right] \frac{1}{4\pi(1-\nu)} \end{aligned} \quad (29)$$

上述即为采用 BEM 方法求解井眼周围应力分布的方法, 通过 BEM 计算得出井周应力分布后, 结合强度判别准则即可进行井眼稳定性分析, 本文采用 Mohr-Coulomb 准则进行井眼稳定性判别。

### 3 模型建立与求解验证

#### 3.1 求解模型的建立

对于数千米的井眼来说, 沿轴向的纵向应变可近似认为是一常量, 即将复杂的三维空间应力分析问题转化为平面应变问题来考虑。因此, 采用边界元方法求解时, 采用 Examine2D 软件建立的井周地层井眼稳定问题求解模型如图 1 所示。其中, 图 1(a) 为求解域全部边界 (内外边界) 的网格模型, 图 1(b) 为内边界 (井壁) 离散网格模型, 本文后续分析均采用这种计算网格模型, 图 1(b) 中的  $e \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow h \rightarrow e$  为取值路径 (即  $e$ 、 $f$ 、 $g$ 、 $h$  点分别代表井周角  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  的点)。

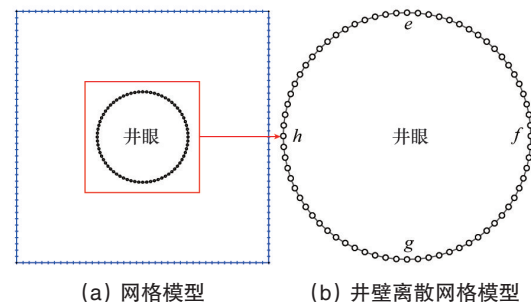


图 1 井周地层计算网格模型

Fig. 1 Mesh model of formation around borehole

### 3.2 模型验证

为了检验本文模型的准确性,取各向同性均质地层直井并眼模型检验边界元方法的准确性,计算中所采用的基础参数:井深2479 m,井眼直径0.216 m,垂向地应力61.96 MPa,水平最大地应力67.77 MPa(方位NE115°),水平最小地应力

51.99 MPa,井筒钻井液密度1.3 g/cm<sup>3</sup>,弹性模量36.5 GPa,泊松比0.2,岩石内聚力17 MPa,岩石内摩擦角40°。分别采用常规井壁稳定力学分析方法(解析解)<sup>[4]</sup>和边界元方法计算井周应力分布情况。采用边界元方法计算出各向同性均质地层井周应力分布结果如图2所示。

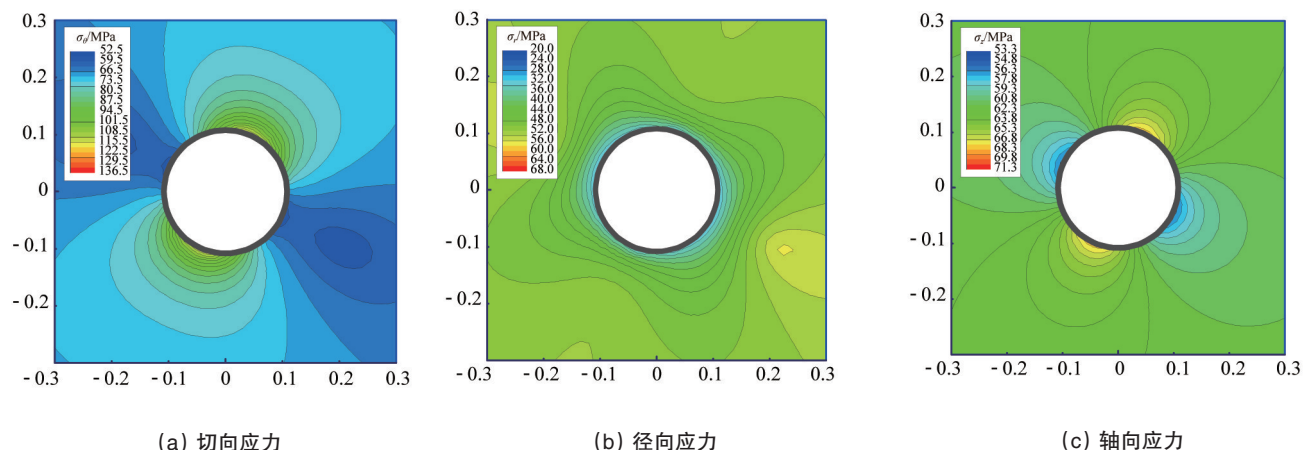


图2 边界元方法解出的井周应力分布

Fig. 2 Stress distribution of wellbore by BEM

为了对比解析解方法和边界元方法计算结果,取井壁处 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow a$ 路径的应力(径向、切向、轴向应力)计算结果进行对比,如图3所示。不难看出,井周应力在25°方向(最小水平地应力方向)的应力差异最大,在115°方向(最大水平地应力方向)的差异最小,因此,深部地层中井眼坍塌通常发生在最小水平地应力方向上,这在井周地层岩石的安全系数分布图中也得到了印证(图4),图4中安全系数最低的部位出现在井壁处25°方向,井壁最低安全系数为1.222(图5)。井周

应力分布求解结果在径向、切向和轴向( $z$ 轴)3个方向的计算结果均非常吻合,边界元方法计算结果与解析解计算结果误差小于0.82%(表1)。

对于所出现的误差,其主要原因是由于边界元本身是一种近似求解的数值方法,加之划分网格单元的不规则性,使得其计算结果与解析解计算结果有一些差异,但总体上误差较小,完全能够满足工程所需精度,验证了边界元方法的正确性和准确性。

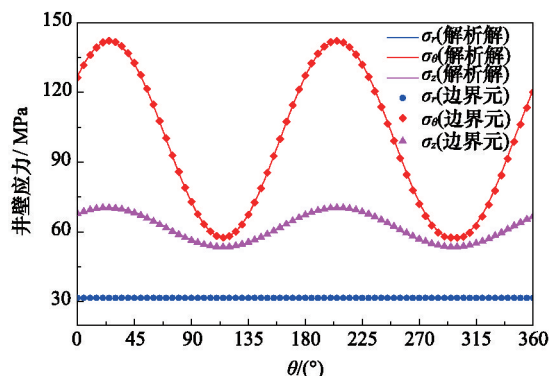


图3 井壁( $r=R$ )应力分布

Fig. 3 Stress distribution of wellbore( $r=R$ )

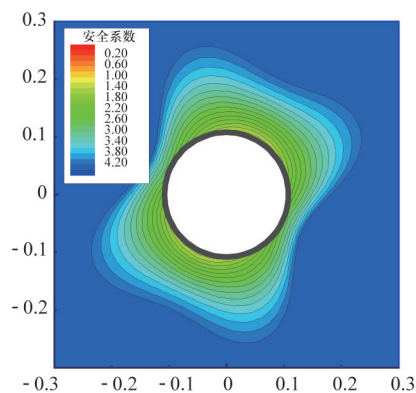


图4 井周地层安全系数分布

Fig. 4 Strength factor distribution around borehole

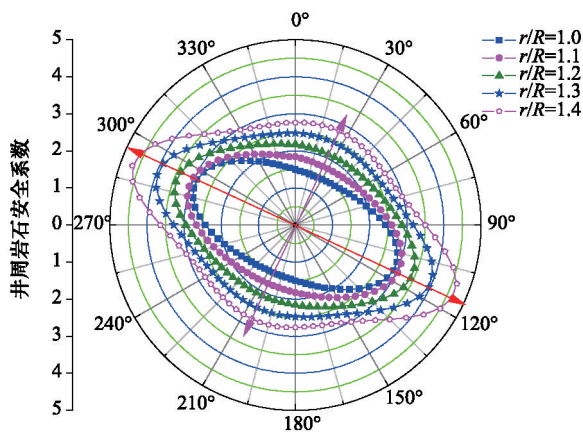


图5 井周地层安全系数分布

Fig. 5 Strength factor distribution around borehole

#### 4 实例分析

以四川某油田深部井眼实际钻井数据为例,分析井段为2500~3500 m,钻遇地层为中生界三叠系上统须家河组,岩性为一套砂岩、页岩含煤系地层。通过对该井2500~3500 m井段测井资料分析表明,最大水平地应力梯度为1.37~1.93 MPa/100 m,最小水平地应力梯度为1.32~1.51 MPa/100 m,上覆地层压力梯度为2.11~2.17 MPa/100 m,地层孔隙压力梯度1.10 MPa/100 m,地层岩石内摩擦角为36.54°,内聚力为12.22 MPa,泊松比为0.25。根据测井资料分析,采用本文建立的模型,计算不同深度处维持井壁不发生坍塌失稳的最小钻井液密度(坍塌压力当量密度),计算结果如图6所示。

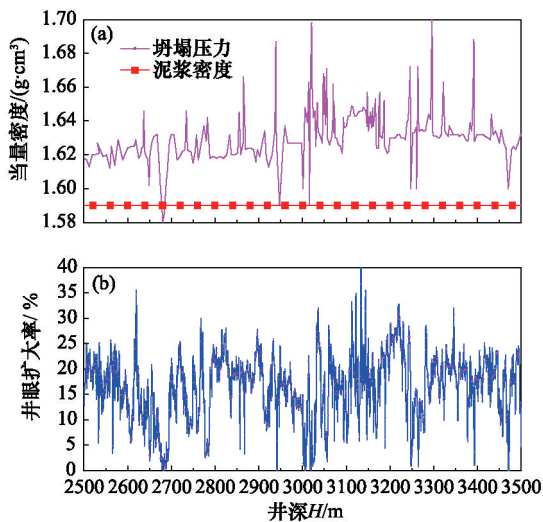


图6 井眼稳定计算结果

Fig. 6 Calculation results of borehole stability

计算结果表明:

1) 钻井过程中,2500~3500 m井段实际钻井液密度(1.59 g/cm³)整体上低于坍塌压力当量密度(普遍大于1.62 g/cm³),

表1 各向同性均质地层直井井壁应力计算结果

Table 1 Stress distribution calculation results for vertical well in isotropic homogeneous formation

| $\theta/(^\circ)$ | 解析解计算/MPa  |                 |            | 边界元计算/MPa  |                 |            |
|-------------------|------------|-----------------|------------|------------|-----------------|------------|
|                   | $\sigma_r$ | $\sigma_\theta$ | $\sigma_z$ | $\sigma_r$ | $\sigma_\theta$ | $\sigma_z$ |
| 0                 | 31.580     | 127.063         | 67.387     | 31.580     | 126.360         | 67.807     |
| 30                | 31.580     | 141.537         | 70.275     | 31.580     | 141.685         | 70.186     |
| 60                | 31.580     | 114.334         | 64.848     | 31.580     | 114.845         | 64.542     |
| 90                | 31.580     | 72.657          | 56.533     | 31.580     | 72.913          | 56.380     |
| 120               | 31.580     | 58.183          | 53.645     | 31.580     | 58.159          | 53.660     |
| 150               | 31.580     | 85.386          | 59.072     | 31.580     | 85.449          | 59.035     |
| 180               | 31.580     | 127.063         | 67.387     | 31.580     | 127.271         | 67.262     |

地层强度不足以支撑井壁,导致井壁岩石坍塌、掉块,表现为井眼扩大率普遍达到20%以上;因此,深部地层钻井过程中,需要通过合理设计钻井液密度来维持井眼的稳定性。

2) 在井深2680、2940、3000、3020、3250、3270、3470 m处的井眼扩大率较低,主要是由于实际使用的钻井液密度已基本接近或超过坍塌压力当量密度,此时加之井眼环空循环流动压耗附加的井底压力当量密度,使得实际井底压力当量密度已大于坍塌压力当量密度。另外,地层在纵向上存在一定的非均质性,这种情况下即使钻井液密度维持不变,若地层岩石的强度较高,自身也能使井眼保持稳定。而对于地层强度较低的井段,则需要通过提高钻井液密度来维持井眼稳定。因此,实际钻井过程中,不能只考虑钻井液密度与坍塌压力当量密度的关系,而需要综合分析井底实际的压力与坍塌压力之间的关系,方可比较准确地判断井眼稳定性情况。

#### 5 结论

1) 基于连续介质力学和边界元理论,建立了深部地层的井眼稳定问题基本微分方程,给出了该问题的边界元求解方法,得出了井周应力和位移的边界元离散解,结合强度准则即可判别井眼稳定性,从而形成了基于BEM求解深部地层井眼稳定问题的基本方法。

2) 建立了深部地层井眼稳定问题的BEM求解模型,并将求解结果与解析解进行了对比,BEM求解结果与解析解非常吻合,二者的计算误差小于0.82%,检验了BEM方法的准确性。

3) 以四川某油田深部井眼实际钻井数据分析了2500~3500 m井段井眼稳定情况,实例计算结果表明,BEM方法求解的坍塌压力当量密度与地层实际情况吻合较好,2500~3500 m井段实际钻井液密度整体上低于坍塌压力当量密度,地层强度不足以支撑井壁,表现为井眼扩大率普遍达到20%以上,说明BEM方法能够准确计算井周地层受力及井眼稳定情况,进一步验证了本文方法的准确性。

# 参考文献 (References)

- [1] 邵保平, 赵阳升. 高温高压下花岗岩中钻孔围岩的热物理及力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1245-1253.  
Xi Baoping, Zhao Yangsheng. Experimental study of thermophysico-mechanical property of drilling surrounding rock in granite under high temperature and high pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1245-1253.
- [2] 苏德辰, 杨经绥. 国际大陆科学钻探(ICDP)进展[J]. 地质学报, 2010, 84(6): 873-886.  
Su Dechen, Yang Jingsui. Advances of international continental scientific drilling program[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(6): 873-886.
- [3] 邵保平, 赵金昌, 赵阳升, 等. 高温岩体地热钻井施工关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2234-2243.  
Xi Baoping, Zhao Jinchang, Zhao Yangsheng, et al. Key technologies of hot dry rock drilling during construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2234-2243.
- [4] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
Chen Mian, Jin Yan, Zhang Guangqing. Rock mechanics on petroleum engineering[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [5] Lu Y H, Chen M, Jin Y, et al. Influence of porous flow on wellbore stability for an inclined well with weak plane formation[J]. Petroleum Science and Technology, 2013, 31(6): 616-624.
- [6] 崔杰, 焦永树, 曹维勇, 等. 各向异性地层中井孔周围应力场的研究[J]. 工程力学, 2011, 28(7): 31-36.  
Cui Jie, Jiao Yongshu, Cao Weiyong, et al. A study on the stress field around a borehole in anisotropic formation[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(7): 31-36.
- [7] 殷有泉, 陈朝伟. 用稳定性理论和方法研究井壁坍塌问题[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(4): 559-564.  
Yin Youquan, Chen Zhaowei. Study on wellbore collapse using the theory and method of stability[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 45(4): 559-564.
- [8] Roshan H, Rahman S S. The effect of water content on stress changes around a wellbore drilled in a chemically active elastoplastic formation[J]. Petroleum Science and Technology, 2013, 31(20): 2118-2126.
- [9] 盛金昌, 廖秋林, 刘继山, 等. 基于FEMLAB的钻井过程中流固热耦合响应分析[J]. 工程力学, 2008, 25(2): 219-223, 229.  
Sheng Jinchang, Liao Qiulin, Liu Jishan, et al. Analysis of coupled porothermoelastic response of a wellbore by using a FEMLAB-based simulator[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(2): 219-223, 229.
- [10] 王倩, 周英操, 王刚, 等. 泥页岩井壁稳定流固耦合模型[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(4): 475-480.  
Wang Qian, Zhou Yingcao, Wang Gang, et al. A fluid-solid-chemistry coupling model for shale wellbore stability[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(4): 475-480.
- [11] 屈平, 申瑞臣, 付利, 等. 三维离散元在煤层水平井井壁稳定中的应用[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 153-157.  
Qu Ping, Shen Ruichen, Fu Li, et al. Application of the 3D discrete element method in the wellbore stability of coal-bed horizontal wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 153-157.
- [12] Zhao H, Chen M, Li Y, et al. Discrete element model for coal wellbore stability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 54: 43-46.
- [13] 王炳印, 邓金根, 邹灵战, 等. 物理-化学耦合作用下泥页岩坍塌周期应用研究[J]. 石油学报, 2006, 27(3): 130-132.  
Wang Bingyin, Deng Jingen, Zou Lingzhan, et al. Applied research of collapse cycle of shale in wellbore using a coupled physico-chemical model[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 130-132.
- [14] 屈平, 申瑞臣, 付利, 等. 煤层井壁稳定的时间延迟效应探讨[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 255-260.  
Qu Ping, Shen Ruichen, Fu Li, et al. Time delay effect on wellbore stability in coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 255-260.
- [15] 邹灵战, 邓金根, 徐显广, 等. 山前高陡构造节理围岩的井壁失稳机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增1): 2733.  
Zhou Lingzhan, Deng Jingen, Xu Xiangguang, et al. Study on wellbore collapse mechanism in jointed rock masses of high-dip-structures before mountains[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Suppl 1): 2733.
- [16] 申光宪. 边界元法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.  
Shen Guangxian. Boundary element method[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [17] 邓琴, 郭明伟, 李春光, 等. 基于边界元法的边坡矢量和稳定分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1971-1976.  
Deng Qin, Guo Mingwei, Li Chunguang, et al. Vector sum method for slope stability analysis based on boundary element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1971-1976.
- [18] 张志增, 李仲奎. 横观各向同性岩体中圆形巷道反分析的惟一性[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2066-2072.  
Zhang Zhizeng, Li Zhongkui. Uniqueness of displacement back analysis of a circular tunnel in transversely isotropic rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2066-2072.

(责任编辑 赵业玲)



SCIENCE & TECHNOLOGY REVIEW

## 《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。