

# 井壁失稳区域确定方法及影响因素分析<sup>1)</sup>

魏 凯<sup>\*,†,2)</sup> 马金山<sup>\*</sup> 管志川<sup>†</sup> 齐金涛<sup>\*</sup> 张晓春<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>(中国石油渤海钻探钻井技术服务公司, 天津 300280)

<sup>†</sup>(中国石油大学(华东), 山东青岛 266580)

<sup>\*\*</sup>(大港油田石油工程研究院, 天津 300280)

**摘要** 井壁失稳区域及其面积能够反映井壁失稳破坏特性及其严重程度, 以井壁安全系数作为识别准则, 建立了井壁失稳区域识别方法, 并基于 Monte-Carlo 方法, 给出了井壁失稳面积的计算方法. 以井壁坍塌为例, 分析了钻井液密度、井斜角及方位角对井壁失稳区域特性的影响, 以本文建立的失稳区面积计算方法, 分析了不同地应力场中井眼轨迹对井壁失稳区大小的影响, 评价结果符合工程实际, 表明能够利用本文方法评价井壁失稳特性及其严重程度.

**关键词** 井壁稳定, 井壁失稳区域面积, 安全系数, 蒙特卡罗模拟, 井眼轨迹

中图分类号: TE21 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-13-363

## DETERMINATION OF WELLBORE INSTABILITY AREA AND ANALYSIS OF INFLUENCING FACTORS<sup>1)</sup>

WEI Kai<sup>\*,†,2)</sup> MA Jinshan<sup>\*</sup> GUAN Zhichuan<sup>†</sup> QI Jintao<sup>\*</sup> ZHANG Xiaochun<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>(Drilling Technology Service Company, BHDC, Tianjin 300280, China)

<sup>†</sup>(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Shandong, Qingdao 266580, China)

<sup>\*\*</sup>(Petroleum Engineering Research Institute, Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China)

**Abstract** The wellbore safety factor is used as a criterion to determine the wellbore instability area, and with the Monte-Carlo simulation, the instability area is calculated. To consider the wellbore collapse risk, the influence of the mud density, the deviation and the azimuth on the wellbore instability area is analyzed, and the effect of the well trajectory parameters on the wellbore instability in different in-situ stress fields is evaluated by the method of calculating the instability area proposed in this paper. The evaluation results agree with the actual engineering practice, which shows that this method could be used to evaluate the characteristics and the severity of the borehole instability.

**Key words** wellbore stability, wellbore instability area, safety factor, Monte-Carlo simulation, well trajectory.

井壁稳定性问题是影响安全高效钻井的关键因素<sup>[1-2]</sup>. 产生井壁围岩失稳的根本原因, 在于井眼形成后井壁围岩的应力场(包括化学力)发生了改变, 引起井壁应力集中, 井内钻井液柱压力未能与地层中的地应力建立起新的平衡<sup>[3]</sup>. 地应力状态、井眼轨迹和钻井液对井壁稳定具有重要影响<sup>[4-5]</sup>. 目前,

基于岩石力学理论, 从井壁围岩的物理化学特性、水力因素及力学机理等方面分析井壁围岩的应力状态和强度条件, 建立了室内实验分析、有限元模拟和力学模型计算等井壁稳定评价分析方法<sup>[6-11]</sup>, 通过分析地层坍塌压力、地层破裂压力与钻井液密度的关系评价井壁围岩稳定性. 井壁失稳区域的面积是

2013-08-29 收到第 1 稿, 2013-12-04 收到修改稿.

1) 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010CB226706), “十二五”国家科技重大专项(2011ZX05021-001)和渤海钻探工程公司“十二五”重点培育项目(2012ZD04K)资助项目.

2) 魏凯, 1983 年生, 男, 工学博士学位, 主要从事气体钻井技术、控压钻井技术、钻井工程风险评价等方面的工作.

E-mail: upcweikai@163.com

反映井壁稳定性的重要指标, 目前研究较少. 特别是井壁坍塌风险区域, 井壁失稳面积直接反映了井壁坍塌掉块体积的多少, 表征了井壁坍塌风险的烈度. 本文以井壁安全系数作为井壁失稳区域识别准则, 建立了井壁失稳区域识别方法, 并基于 Monte-Carlo 随机模拟, 给出了井壁失稳区域面积的计算方法, 从而建立了以井壁围岩失稳面积为评价指标的井壁稳定性的评价方法, 并以井壁坍塌风险为例, 分析了钻井液密度、井斜角及方位角对井壁失稳区域特性的影响, 对于井壁稳定性分析具有重要理论意义及工程价值.

### 1 井壁失稳区域识别方法

井壁围岩失稳是由于围岩所受的应力超过了其本身的强度引起的, 因此, 分析井壁围岩稳定性需要明确井壁围岩应力状态、强度及其失稳机理. 忽略钻井液与井壁的化学作用, 井眼形成后井壁围岩受钻井液液柱压力  $P_1$ 、垂向应力  $\sigma_V$ 、最大水平地应力  $\sigma_H$ 、最小水平地应力  $\sigma_h$  和地层孔隙压力  $P_p$  的综合作用, 通过力学分析可以得到井壁围岩三向主应力  $\sigma_1, \sigma_2$  和  $\sigma_3$ <sup>[8]</sup>. 井壁失稳有两种形式: 压缩剪切破坏和拉伸破坏, 工程上一般应用 Mohr-Coulomb 强度准则和最大拉应力强度准则分别评价井壁的压缩剪切破坏和拉伸破坏<sup>[9]</sup>.

井壁坍塌、缩径

$$K_c = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \frac{1 + \sin \varphi}{\sigma_1 - P_p - (\sigma_3 - P_p) \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (1)$$

井壁破裂

$$K_f = S_t + \sigma_\theta - P_p \quad (2)$$

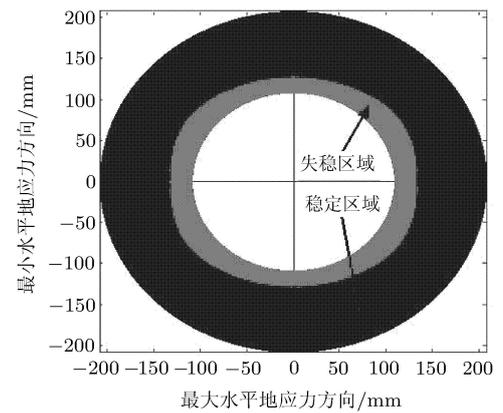
其中,  $K_c$  和  $K_f$  为井壁安全系数;  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别为最大、最小主地应力, MPa;  $C$  为岩石粘聚力, MPa;  $\varphi$  为岩石内摩擦角, ( $^\circ$ );  $S_t$  为岩石抗拉强度, MPa;  $\sigma_\theta$  为岩石周向应力, MPa;  $P_p$  为地层孔隙压力, MPa.

(1) 当  $K_c < 1$  时, 井壁围岩发生压缩剪切破坏; 当  $K_f < 0$  时, 井壁围岩发生拉伸破裂;

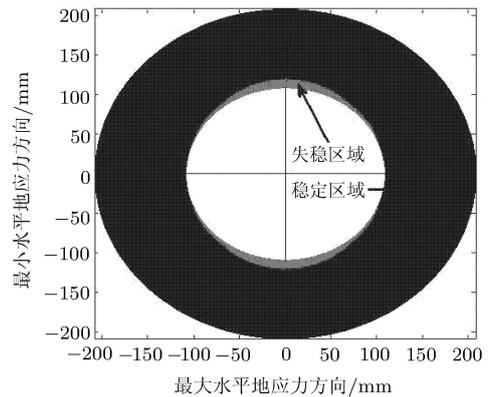
(2) 当  $K_c = 1, K_f = 0$  时, 井壁围岩处于极限稳定状态;

(3) 当  $K_c > 1, K_f > 0$  时, 井壁围岩稳定.

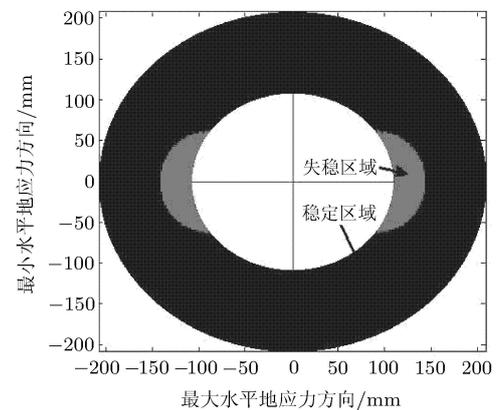
以井壁坍塌失稳为例, 分别对直井和定向井壁围岩失稳区域分布情况进行了分析. ①对于直井(图 1), 随钻井液密度增大, 井壁失稳区域类型变化



(a) 类型 A



(b) 类型 B



(c) 类型 C

图 1 直井井壁围岩失稳区域分布

为: A→B→C; 钻井液密度较低时, 井壁失稳区域位于最小水平地应力方向(类型 B); 钻井液密度较高时, 井壁失稳区域位于最大水平地应力方向(类型 C). ②对于定向井(图 2), 由于井斜角和井斜方位角的影响, 水平地应力不再与井眼轴线垂直, 井壁失

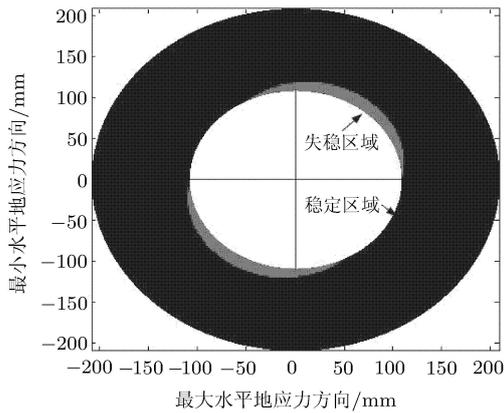


图2 定向井井壁围岩失稳区域分布

稳区域会沿井眼轴线旋转一定角度(井斜方位与最大水平地应力方位的差值).

### 2 井壁失稳面积计算方法

井壁失稳面积是反映井壁失稳区域特性和严重程度的重要指标. 根据井壁稳定安全系数定义及其失稳判断准则可知, 井壁失稳面积是指安全系数不满足稳定性条件的围岩区域面积. 其函数描述形式如下

$$\left. \begin{aligned} S_c &= S [K_c < 1] = S \left[ \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} - (\sigma_1 - P_p) + \right. \\ &\quad \left. (\sigma_3 - P_p) \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} < 0 \right] \\ S_f &= S [K_f < 0] = S [S_t + \sigma_\theta - P_p < 0] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由于井壁围岩受力状态复杂, 失稳面积无解析解, 笔者利用 Monte-Carlo 随机模拟建立了井壁失稳面积的数值计算方法. 步骤如下:

- (1) 综合考虑计算精度和计算量, 根据井眼半径  $r$ , 选定井壁围岩外径  $R$ ; 对井壁围岩进行网格划分, 假定网格节点总数为  $N$ ;
- (2) 计算各节点处的主应力  $\sigma_{1i}$ ,  $\sigma_{2i}$  和  $\sigma_{3i}$  ( $1 \leq i \leq N$ );
- (3) 将各节点主应力、岩石强度参数等代入安全系数公式计算;
- (4) 对计算结果进行统计分析, 假设表示井壁失稳的安全系数个数为  $N_k$ (坍塌失稳的安全系数个数为  $N_{ck}$ 、井壁破裂的安全系数个数为  $N_{fk}$ ), 则相应的井壁失稳面积为

$$S = N_k/N \quad (4)$$

### 3 井壁失稳区域影响因素分析

根据井壁失稳机理可知, 影响井壁围岩应力分布和地层岩石强度的因素都是影响井壁失稳区域特性的关键因素. 其中, 地应力场、地层压力及地层岩石强度等属于客观因素, 因此, 研究一定客观地质条件下的钻井液密度、井眼轨迹特性等主观因素对井壁失稳区域特性的影响, 具有重要意义. 本文以井壁坍塌风险为例, 对井壁失稳区域影响因素的影响特性进行了分析, 算例基本参数如表 1 和表 2.

表 1 地应力类型及基本参数

地应力类型 [12]	正常地应力场	走滑地应力场	反正地应力场
垂向应力/MPa	76	67	50
最大水平地应力/MPa	67	76	76
最小水平地应力/MPa	50	50	67

表 2 剪切破坏准则基本参数

内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比	孔隙压力/MPa
20	25	0.2	35

#### 3.1 正常地应力场 ( $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ )

从图 3 可以看出:

- (1) 井壁失稳区域与方位角成  $90^\circ$  对称, 方位角  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内的井壁失稳区域特性能够反映全方位内的井壁失稳情况;
- (2) 一定方位角时, 随着井斜角增加井壁失稳面积增加;
- (3) 一定井斜角时, 方位角  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内, 随方位角越大, 井壁失稳面积减小;
- (4) 小井斜角有利于井壁稳定;

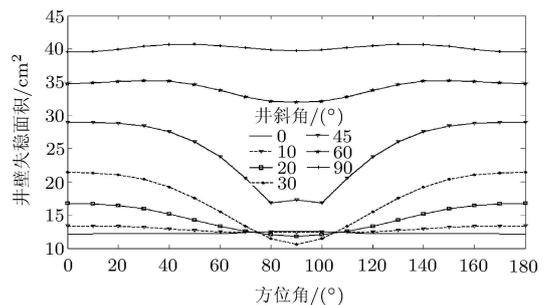


图 3 正常地应力场井眼轨迹对井壁围岩失稳面积的影响

(5) 沿着  $90^\circ$  方位角方向 (即沿着最小水平地应力方位) 钻进有助于井壁稳定。

### 3.2 走滑地应力场 ( $\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$ )

从图 4 可以看出:

(1) 井壁失稳区域与方位角成  $90^\circ$  对称, 方位角  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内的井壁失稳区域特性能够反映全方位内的井壁失稳情况;

(2) 一定方位角时, 随着井斜角增加井壁失稳面积减小;

(3) 一定井斜角时, 方位角  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内, 随方位角越大, 井壁失稳面积增大;

(4) 大井斜角有利于井壁稳定;

(5) 沿着  $0^\circ$  方位角方向 (即沿着最大水平地应力方位) 钻进有助于井壁稳定。

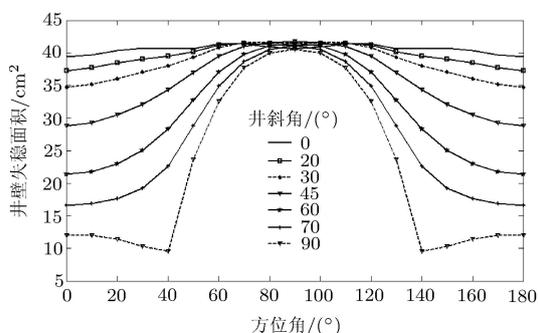


图 4 走滑地应力场井眼轨迹对井壁围岩失稳面积的影响

### 3.3 反转地应力场 ( $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$ )

从图 5 可以看出:

(1) 井壁失稳区域与方位角成  $90^\circ$  对称, 方位角  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内的井壁失稳区域特性能够反映全方位内的井壁失稳情况;

(2) 一定方位角时, 随着井斜角增加井壁失稳面积减小;

(3) 一定井斜角时, 方位角  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内, 随方位角越大, 井壁失稳面积增大;

(4) 大井斜角有利于井壁稳定;

(5) 沿着  $0^\circ$  方位角方向 (即沿着最大水平地应力方位) 钻进有助于井壁稳定。

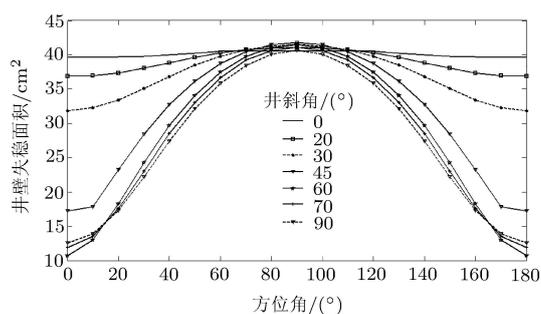


图 5 反转地应力场井眼轨迹对井壁围岩失稳面积的影响

## 4 结论

(1) 本文以井壁失稳面积为评价指标, 建立了井壁围岩稳定性评价方法. 以井壁安全系数作为井壁失稳区域识别准则, 建立了井壁失稳区域识别方法; 基于 Monte-Carlo 随机模拟, 确定了井壁失稳区域面积计算方法. 以此为基础, 对不同地应力场中井眼轨迹对井壁坍塌风险区域的影响规律进行了实例分析, 评价结果符合工程实际。

(2) 钻井液密度对井壁失稳区域类型及面积有较大影响. 钻井液密度较低时, 井壁失稳区域位于最小水平地应力方向; 钻井液密度较高时, 井壁失稳区域位于最大水平地应力方向. 通常情况下, 增大钻井液密度有利于减小井壁坍塌失稳区域面积。

(3) 地应力场类型和井眼轨迹对井壁失稳区域及其严重程度影响显著. 对于正常地应力场: 小井斜角有利于井壁稳定; 沿着  $90^\circ$  方位角方向 (即沿着最小水平地应力方位) 钻进有助于井壁稳定. 对于走滑地应力场和反转地应力场: 大井斜角有利于井壁稳定; 沿着  $0^\circ$  方位角方向 (即沿着最大水平地应力方位) 钻进有助于井壁稳定。

## 参考文献

- 1 Aadnoy BS, Chenevert ME. Stability of highly inclined boreholes. *SPE Drilling Engineering*, 1987, 2(4): 364-374
- 2 邓金根. 泥页岩井眼力学稳定理论及工程应用. [博士学位论文]. 北京: 中国石油大学 (北京), 2000 (Deng Jingen. Shale borehole mechanical stability theory and engineering application. [PhD Thesis]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2000 (in Chinese))
- 3 Mody FK, Hale AH. Borehole stability model to couple the mechanics and chemistry of drilling-fluid/shale interactions. *J Petrol Tech*, 1993, 45(11): 1093-1101
- 4 高德利, 陈勉, 王家祥. 谈谈定向井井壁稳定问题. 石油钻采工艺, 1997, 19(1): 1-4 (Gao Deli, Chen Mian, Wang Jiaxi-

- ang. Discussion on borehole wall stability. *Oil Drilling & Production Technology*, 1997, 19(1): 1-4 (in Chinese))
- 5 张文波, 周鹏高, 李亚双等. 不同地应力场对大斜度井井壁稳定规律的影响. *天然气技术*, 2010, 4(1): 58-60 (Zhang Wenbo, Zhou Penggao, Li Yashuang, et al. Effect of borehole stability in highly deviated wells under different in-situ stress fields. *Natural Gas Technology*, 2010, 4(1): 58-60 (in Chinese))
  - 6 邱正松, 徐家放, 黄维安等. 深水钻井液循环携岩与井壁稳定模拟实验装置. 中国专利, CN101701520A. 2010-05-05 (Qiu Zhengsong, Xu Jiafang, Huang Wei'an, et al. Deep water drilling fluid circulation with rocks and borehole stability simulation experiment device. Patent, CN101701520A. 2010-05-05 (in Chinese))
  - 7 李军, 陈勉, 金衍等. 大位移井井壁稳定三维弹塑性有限元分析. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(14): 2385-2389 (Li Jun, Chen Mian, Jin Yan, et al. Three-dimensional elasto plastic fem analysis on borehole stability. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(14): 2385-2389 (in Chinese))
  - 8 金衍, 陈勉, 柳贡慧等. 大位移井的井壁稳定力学分析. *地质力学学报*, 1999, 5(1): 4-11 (Jin Yan, Chen Mian, Liu Gonghui, et al. Wellbore stability analysis of large displacement wells. *Journal of Geomechanics*, 1999, 5(1): 4-11 (in Chinese))
  - 9 陈勉, 金衍, 张光清. 石油工程岩石力学 (第1版). 北京: 科学出版社, 2008
  - 10 程远方, 黄荣樽. 钻井工程中泥页岩井壁稳定的力学分析. *石油大学学报 (自然科学版)*, 1993, 17(4): 35-39 (Cheng Yuanfang, Huang Rongzun. Mechanical analysis of borehole stability in shale formation in drilling. *Journal of the University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 1993, 17(4): 35-39 (in Chinese))
  - 11 殷有泉, 陈朝伟. 用稳定性理论和方法研究井壁坍塌问题. *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. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (Edition of Natural Science)*, 2009, 45(4): 559-564 (in Chinese))
  - 12 Finkbeiner T, Moos D, Derosé W, et al. Wellbore stability evaluation for horizontal hole completion: A case study. In: SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Brisbane, Australia, 2000

(责任编辑: 刘希国)

## 科普传播文明、创新成就未来

### ——第六届全国中学生趣味力学制作邀请赛 (清华永丰杯) 纪要

2013年12月15日,第六届全国中学生趣味力学制作邀请赛(清华永丰杯)在清华大学附属中学永丰学校成功举办。来自全国24所学校的120余名师生参加了本次活动。

中国力学学会副秘书长周济福,中国力学学会科普工作委员会主任朱克勤,中国力学学会科普工作委员会秘书长高云峰,中国力学学会科普工作委员会委员李子恒,中国力学学会办公室副主任刘俊丽,中国力学学会科普工作委员会委员、清华大学附属中学永丰学校执行校长孟卫东,清华大学附属中学永丰学校党支部书记周兆玉,清华大学附属中学永丰学校副校长董蓓,清华大学附属中学永丰学校副校长王大庆,北京市物理界名师和北京市物理学会初中物理专题组专家们出席了开幕式。开幕式由清华大学附属中学永丰学校教务处张林主任主持。

中国力学学会副秘书长周济福致开幕词,接着,清华大学附属中学永丰学校执行校长孟卫东致辞。他们对各参赛学校代表队的到来表示热烈欢迎,并预祝参赛选手们取得好成绩。随后,中国力学学会科普工作委员会主任朱克勤致辞并

宣布本届全国中学生趣味力学制作邀请赛正式开始。

开幕式结束后,比赛正式开始。上午的题目是力学大连环,要求基于十种力学原理设计、制作大连环,并利用力学方法使之运转起来,最终呈现一个生活场景。各参赛队于一个月前知道比赛题目并开始制作,在比赛现场展示作品的性能。学生们展示了各种奇思妙想的设计,观赏性、趣味性十足。

下午,参赛队员需在规定时间内合作探究、拼装出一个有科技含量的“电动小老虎”,并且使之完成走直线和转圆圈的规定动作。此项比赛竞争激烈、难度系数大,但是各队还是凭借参赛选手们丰富的科技知识储备,出色的动手能力最终圆满完成了比赛任务。

经过一天的紧张比赛,最终评出特等奖3名,一等奖10名,二等奖11名。闭幕式上,对获奖的各参赛队进行了颁奖。

本次比赛在热烈友好的氛围中落下帷幕。活动还邀请了中央电视台《异想天开》栏目组前来拍摄整个竞赛过程,并将在中央电视台少儿频道的《异想天开》节目中播出。