

# 井壁失稳风险评价方法

魏 凯, 管志川, 廖华林, 史玉才, 刘永旺

(中国石油大学 石油工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:**针对井壁几何参数、力学性能参数和地层压力存在的随机性特点,对传统井壁稳定性系数评价方法的不足进行分析。根据可靠性理论,从力学角度建立井壁失稳风险评价方法。利用 Monte-Carlo 随机抽样法,计算井壁失稳的风险概率数值解,分析井壁围岩失稳风险概率分布规律,并与传统井壁稳定性系数进行对比,建立全井段井壁失稳风险评价方法。结果表明:井壁失稳风险评价方法和程序能够满足井壁失稳评价的需要;基于可靠性理论建立的井壁失稳风险评价方法,可对井壁的稳定性进行定量评价;井壁失稳风险概率评价指标,可为传统井壁稳定性系数的选取和不确定性条件下的井壁稳定性评价提供依据。

**关键词:**钻井;井壁稳定;可靠性理论;Monte-Carlo方法;稳定性系数;井壁失稳风险概率

**中图分类号:**TE 21 **文献标志码:**A

## Assessment method of borehole instability risk

WEI Kai, GUAN Zhi-chuan, LIAO Hua-lin, SHI Yu-cai, LIU Yong-wang

(School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** For the stochastic property of borehole geometric parameters, mechanical properties and formation pressures, the deficiency of the traditional method of borehole stability coefficient was analyzed. According to the broad structural reliability theory, the risk assessment method of borehole instability was established from the perspective of mechanics. The distribution regularities of the borehole instability risk probabilities were simulated by Monte-Carlo random sampling method, and the instability risk probabilities distribution and the traditional borehole stability coefficient were discussed. The borehole instability risk assessment method of full well section was established. The results show that this method and program could meet the requirements of wellbore stability evaluation. The probabilistic method of borehole instability risk based on the reliability could be used to quantitatively evaluate borehole stability. The borehole instability risk probability could provide foundations for selection of borehole stability coefficient as well as evaluation of borehole stability under uncertainty conditions.

**Key words:** drilling; borehole stability; reliability theory; Monte-Carlo method; stability coefficient; borehole instability risk probability

井壁失稳的原因错综复杂<sup>[1-2]</sup>,一般可归结为地层力学因素和物理化学因素。不论是地层力学因素还是物理化学因素,最终可归结为井壁围岩力学不稳定所致<sup>[3]</sup>。目前,一般利用井壁稳定性系数对井壁稳定性进行分析评价,井壁稳定性系数为定值,凭借经验确定,且不能反映井壁围岩的实际稳定性状态。在井壁稳定性分析过程中,由于地震资料、测井数据的不确定性及系统误差<sup>[4]</sup>,计算出的井壁围岩的岩石力学参数和地层压力存在较大的不确定性及

误差<sup>[5-6]</sup>,从而使得钻井过程中经常发生稳定性系数大于1的井壁失稳,而稳定性系数小于1时却稳定的情况。笔者根据可靠性理论和随机理论,从力学角度建立井壁失稳风险概率评价方法。

## 1 井壁稳定性系数评价方法

假设地层为均匀各向同性、线弹性多孔介质,井壁围岩处于平面应变状态。井壁围岩受钻井液液柱

压力  $p_i$ 、上覆地应力  $\sigma_v$ 、水平最大地应力  $\sigma_H$  和水平最小地应力  $\sigma_h$  的综合作用(三向主应力为  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ ),力学模型如图 1 所示。

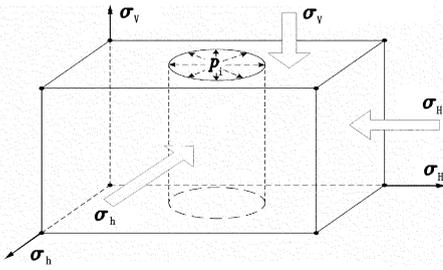


图 1 井壁围岩力学模型

Fig. 1 Borehole side-bed mechanics model

井壁失稳<sup>[7]</sup>有压缩剪切破坏和拉伸破坏两种基本形式。工程上一般应用 Mohr-coulomb 强度准则和最大拉应力强度准则评价井壁的压缩剪切破坏和拉伸破坏<sup>[8]</sup>。

传统方法采用井壁稳定性系数评价井壁的稳定性,将井壁围岩的强度与井壁围岩的应力状态视为定值,它们是井壁围岩受力状态和岩石力学参数的函数。对于井壁稳定性评价,考虑到计算模型及参数的不确定性可能引起的误差,引入井壁稳定性系数和强度-应力差加以处理。根据 Mohr-coulomb 准则和最大拉应力理论,传统井壁稳定性的评价准则为井壁坍塌、缩径和井壁破裂。

井壁坍塌、缩径:

$$K_c = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} \cdot \frac{1 + \sin \phi}{(\sigma_1 - p_p) - (\sigma_3 - p_p)}; \quad (1)$$

井壁破裂:

$$K_t = S_t + \sigma_\theta - p_p. \quad (2)$$

式中,  $K_c$  和  $K_t$  为井壁稳定性系数;  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别为最大、最小主地应力, MPa;  $C$  为岩石黏聚力, MPa;  $\phi$  为岩石内摩擦角, ( $^\circ$ );  $S_t$  为岩石抗拉强度, MPa;  $\sigma_\theta$  为岩石轴向应力, MPa;  $p_p$  为地层孔隙压力, MPa。

当  $K_c < 1$  时,井壁围岩发生压缩剪切破坏;当  $K_t < 0$  时,井壁围岩发生拉伸破裂;当  $K_c = 1$ 、 $K_t = 0$  时,井壁围岩处于极限稳定状态;当  $K_c > 1$ 、 $K_t > 0$  时,井壁围岩稳定。

井壁稳定性系数是在大量设计实践的基础上得出的,反映了一定的统计特性。对于不同地应力状态和井壁围岩力学特性,井壁稳定性系数取值有一个很大的变化范围。实践表明,井壁稳定性系数不能对井壁围岩的稳定性进行有效评价。

## 2 井壁失稳风险概率评价方法

### 2.1 井壁稳定功能函数

可靠性理论中一般利用功能函数分析系统的可靠度或失效概率<sup>[9]</sup>。井壁稳定的可靠度是指在一定的地质构造中钻进时,井壁不发生失稳破坏并保证顺利钻进的概率。因此井壁失稳风险概率是指钻井过程中井壁围岩发生失稳破坏的可能性。

从力学角度,将影响井壁稳定的因素用  $n$  个随机变量  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  描述,根据广义应力-强度理论<sup>[9]</sup>,井壁的广义强度为  $R$ ,广义应力为  $S$ ,定义井壁稳定功能函数为

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = R - S. \quad (3)$$

根据井壁稳定功能函数:  $Z > 0$  时,井壁稳定;  $Z < 0$  时,井壁失效;  $Z = 0$  时,井壁处于极限状态。

图 2 为井壁失稳风险概率的广义应力-强度干涉理论解释。假定强度  $R$  与载荷  $S$  相互独立,即  $f_R(R)$  和  $f_S(S)$  为两个独立的随机变量分布函数,图 1 中阴影区域为  $f_R(R)$  和  $f_S(S)$  的重叠部分,称为干涉区,是可能出现井壁失稳现象的区域。干涉区域面积越大,井壁失稳风险越高,反之,井壁失稳风险越低。根据广义应力-强度干涉理论,通过计算干涉区域出现的概率,进行井壁失稳风险的定量计算。

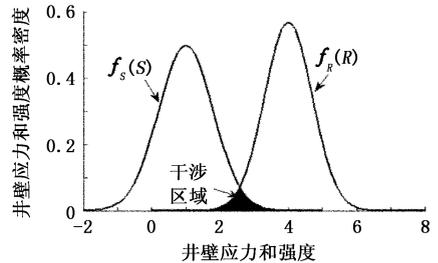


图 2 井壁失稳应力-强度干涉示意图

Fig. 2 Sketch map of borehole instability stress and strength interference

根据井壁失稳类型及其强度判断准则,可用剪切破坏功能函数和拉伸破裂功能函数描述井壁稳定问题。

井壁剪切破坏功能函数为

$$Z_c = g_c(\sigma_1, \sigma_3, p_p, C, \phi) = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} - (\sigma_1 - p_p) + (\sigma_3 - p_p) \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}. \quad (4)$$

井壁拉伸破坏功能函数为

$$Z_f = g_f(S_f, \sigma_\theta, p_p) = S_f + \sigma_\theta - p_p \quad (5)$$

### 2.2 井壁失稳风险概率计算

根据可靠性理论,对于给定的功能函数,可以通过理论分析和随机模拟方法计算功能函数描述系统的可靠度或失效概率。由于描述井壁稳定的功能函数的参数较多,且概率分布特性不确定,笔者选择随机模拟方法计算井壁失稳风险概率。Mote-Carlo 方法是求解工程技术问题近似解的一种数值计算方法<sup>[10]</sup>,井壁稳定功能函数确定之后,通过分析影响因素的不确定性和随机分布特征,利用 Mote-Carlo 方法可以计算出井壁失稳的风险概率。

根据描述井壁剪切破坏( $P_c$ )和拉伸破坏( $P_f$ )的功能函数和井壁失稳风险概率的定义,井壁失稳风险概率计算式为

$$\begin{cases} P_c = P[Z_c = R_c - S_c < 0] = \\ P\left[\frac{2C\cos\phi}{1-\sin\phi} - (\sigma_1 - p_p) + (\sigma_3 - p_p)\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} < 0\right], \\ P_f = P[Z_f = R_f - S_f < 0] = P[S_f + \sigma_\theta - p_p < 0]. \end{cases} \quad (6)$$

根据井壁失稳风险概率定义式和 Mote-Carlo 理论方法,计算井壁失稳风险概率的步骤如下:

(1) 依据井壁失稳类型及其失稳机制,确定相应井壁失稳类型的影响因素,即井壁剪切破坏风险因素  $X_c(x_{c1}, x_{c2}, \dots, x_{cn})$  和井壁拉伸破坏风险因素  $X_f(x_{f1}, x_{f2}, \dots, x_{fm})$ ,  $X_c$  和  $X_f$  分别为  $1 \times n$  和  $1 \times m$  的矩阵。

(2) 根据精度要求,确定模拟次数  $N$ ,分析影响因素的不确定性,产生符合参数概率分布特性的随机数。井壁剪切破坏风险  $X_{cN}(X_{c1N}, X_{c2N}, \dots, X_{cnN})$ ; 井壁拉伸破坏风险:  $X_{fN}(X_{f1N}, X_{f2N}, \dots, X_{fmN})$ ,  $X_{cN}$  和  $X_{fN}$  分别为  $N \times n$  和  $N \times m$  的矩阵,每一行表示一个试验样本,共  $N$  组试验样本。

(3) 将每一个试验样本参数代入相应功能函数进行计算,统计相应风险类型的失效风险次数。假设井壁剪切破坏风险次数为  $N_{ck}$ ,井壁拉伸破坏风险次数为  $N_{fk}$ ,则相应的井壁失稳风险概率为

$$P_c = \frac{N_{ck}}{N}, P_f = \frac{N_{fk}}{N} \quad (7)$$

### 3 实例分析

X1 井是西部某油田一口重点勘探井,因地质、工艺水平及技术装备等主客观不确定性因素影响,2.05 ~ 2.50 km 井段钻井施工过程中井壁坍塌严重。测井资料信息可连续地反映地层变化规律和岩石的各种力学特性<sup>[11]</sup>,该井段测井曲线如图 3 所

示。

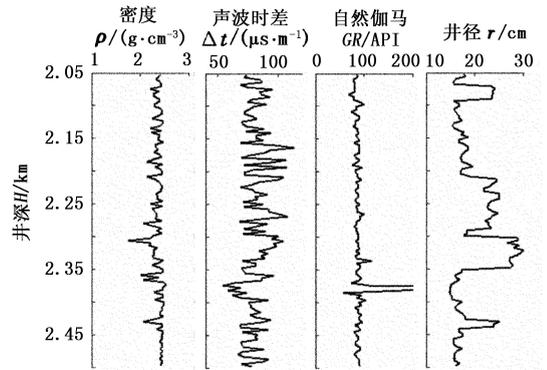


图3 X1 井 2.05 ~ 2.50 km 井段测井曲线  
Fig. 3 Well logging curve of well X1 at 2.05-2.50 km depth

### 3.1 井壁围岩稳定评价方法对比

利用岩石力学测井解释方法,计算了井深 2.253 km 处影响井壁稳定的岩石力学参数,假设相应岩石力学参数服从正态分布<sup>[12]</sup>,测井解释结果为相应岩石力学参数的均值,各参数概率分布特征参数见表 1。

表 1 影响井壁稳定的岩石力学参数

Table 1 Rock mechanics parameters affecting wellbore stability

	最大主应力 $\sigma_1$ /MPa	最小主应力 $\sigma_3$ /MPa	孔隙压力 $p_p$ /MPa	内摩擦角 $\phi$ /°	黏聚力 $C$ /MPa
均值	59.87	35.91	24.39	25.00	5.14
方差	1.67	1.20	1.50	0.50	1.00

基于 Mohr-coulomb 强度准则和以上参数,利用稳定性系数评价方法和风险概率评价方法对井壁稳定性进行分析,图 4、5 分别为稳定性系数评价结果和风险概率评价结果。对比可以看出,井壁稳定稳定性系数和井壁失稳风险概率具有较好的一致性。靠近最小水平地应力方向井壁的剪切破坏风险最大,靠近最大水平地应力方向井壁的剪切破坏风险概率最小,与现场实际情况吻合,表明风险概率分析方法能够用于井壁剪切破坏的评价。

### 3.2 全井段井壁失稳风险

钻井过程中更为关心的是某井段的井壁稳定性,通过井眼截面方向稳定性分析可以看出:①井壁失稳的实际风险概率在最大值和最小值之间,最大风险概率和最小风险概率数值越大,相应位置处井壁失稳的可能性越大,通过分析地应力方位和风险极值,能够确定坍塌最严重位置的方位;②最大和最小风险概率之差定义为风险概率极差,风险概率极差越小,井壁破坏越均匀。因此,通过分析全井段井壁失稳风险的

最值和极值分布情况,可以判断该井段井壁失稳的可能性

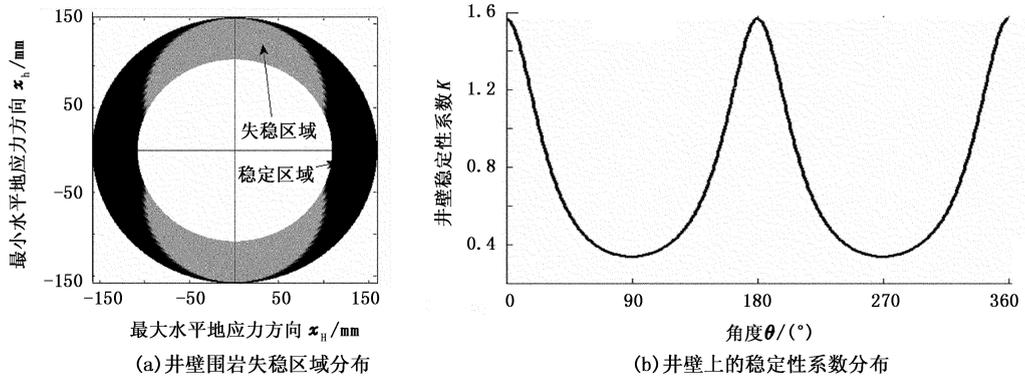


图 4 井壁围岩剪切破坏的稳定性系数评价

Fig. 4 Stability coefficient evaluation of borehole surrounding rock shear failure

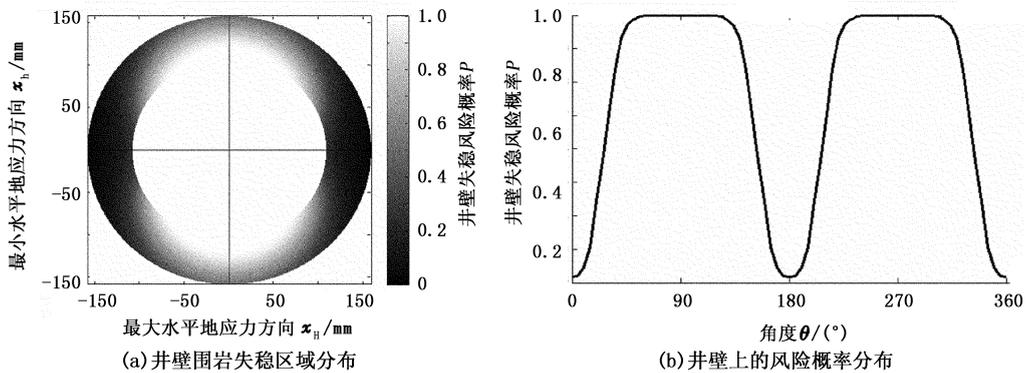


图 5 井壁围岩剪切破坏的风险概率评价

Fig. 5 Risk probability evaluation of borehole surrounding rock shear failure

利用测井资料分析了该井 2.1 ~ 2.5 km 井段的井壁失稳风险概率(图 6)。从评价结果可以看出, 2.07 ~ 2.09、2.15 ~ 2.16、2.23 ~ 2.35 及 2.43 ~ 2.44 km 处井壁均有失稳风险,且由于 2.23 ~ 2.35 km 风险最值较大,风险极差较小,因此可以预测该

段井壁失稳破坏情况。

## 4 结 论

(1)建立的井壁失稳风险评价方法和程序能够满足井壁失稳评价的需要;基于可靠性理论建立的井壁失稳风险评价方法,可对井壁的稳定性进行定量评价;井壁失稳风险概率评价指标,可为传统井壁稳定性系数的选取和不确定性条件下的井壁稳定性评价提供依据。

(2)加强井壁失稳机制和岩石力学参数不确定性的研究,是提高井壁失稳风险概率评价方法分析可靠性和精度的关键。

## 参考文献:

[1] 高德利. 地下钻掘采工程不稳定性理论控制技术[M]. 1 版. 北京: 中国科学技术出版社, 1999:1-9.  
 [2] 王中华. 钻井液性能及井壁稳定问题的几点认识[J]. 断块油气田, 2009, 16(1): 89-91.  
 WANG Zhong-hua. Views on the problems of drilling fluid properties and wellbore stability [J]. Fault-Block Oil

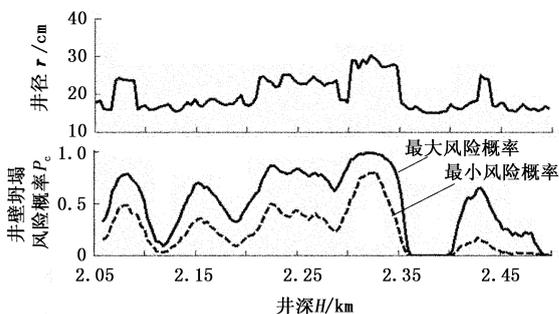


图 6 2.05 ~ 2.50 km 井段井径测井曲线与井壁失稳风险概率曲线

Fig. 6 Caliper logging curve and borehole instability risk probability of 2.1-2.5 km section

井段井壁全周坍塌破坏都会比较严重。对比井径测井曲线可知,风险概率评价结果与井径测井曲线基本吻合,表明能够利用风险概率评价方法分析全井

- & Gas Field, 2009, 16(1):89-91.
- [3] MODY F K, HALE A H. A borehole stability model to couple the mechanics and chemistry of drilling fluid shale interaction[R]. SPE/IADC 25728, 1993.
- [4] 毕雪亮. 基于知识发现的钻井工程优化理论及应用[D]. 大庆: 东北石油大学石油工程学院, 2007: 23-33.  
BI Xue-liang. Research and application of drilling engineering optimization based on knowledge discovery [D]. Daqing: College of Petroleum Engineering in Northeast Petroleum University, 2007: 23-33.
- [5] 熊文林, 李胡生. 岩石样本力学参数值的随机-模糊处理方法[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(6): 101-108.  
XIONG Wen-lin, LI Hu-sheng. A random-fuzzy method for treating the experimental data of mechanical parameters of rock sample [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(6): 101-108.
- [6] 刘世君, 徐卫亚, 王红春. 不确定性岩石力学参数的区间反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 885-888.  
LIU Shi-jun, XU Wei-ya, WANG Hong-chun. Interval back analysis on uncertain parameters in rock mechanics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 885-888.
- [7] 陈勉, 金衍, 张光清. 石油工程岩石力学[M]. 1版. 北京: 科学出版社, 2008.
- [8] 李天太, 孙正义. 井壁失稳判断准则及应用分析[J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 2002(5): 24-27.  
LI Tian-tai, SUN Zheng-yi. Study and application of sidewall instability criteria[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition), 2002(5): 24-27.
- [9] 贡金鑫. 工程结构可靠度计算方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2003: 325-330.
- [10] 卫军胡. 蒙特卡洛方法在系统工程中的应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [11] 刘向君, 罗平亚. 测井在井壁稳定性研究中的应用及发展[J]. 天然气工业, 1999, 19(6): 33-35.  
LIU Xiang-jun, LUO Ping-ya. Application of logging to the research on sidewall stability and its development [J]. Natural Gas Industry, 1999, 19(6): 33-35.
- [12] 邓建, 李夕兵, 古德生. 岩石力学参数概率分布的信息熵推断[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2177-2181.  
DENG Jian, LI Xi-bing, GU De-sheng. Probability distribution of rock mechanics parameters by using maximum entropy method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2177-2181.

(编辑 李志芬)

(上接第 61 页)

- [11] 史兴全. 西气东输管道工程大型穿越遇到的技术难题及其对策[J]. 石油工程建设, 2005, 31(1): 43-47.  
SHI Xing-quan. Difficult technical problems of crossings in west to east gas pipeline project and countermeasure [J]. Petroleum Engineering Construction, 2005, 31(1): 43-47.
- [12] JIAO Ruyi, ZENG Cong, MA Baosong. Study on influence factors to application of large-scale HDD to oil and gas pipe installation [R]. ICPTT 2011 Annual Conference Proceeding, Beijing [C]. ASCE, 2011.
- [13] 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 You-quan, CHEN Zhao-wei. Study on wellbore collapse using the theory and method of stability [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 45(4): 559-564.

(编辑 李志芬)