

气体钻井井壁稳定性模型的建立

聂臻^{1,2} 夏柏如¹ 邹灵战³ 邓金根⁴

1.中国地质大学(北京) 2.中国石油勘探开发研究院 3.中国石油钻井工程研究院 4.中国石油大学(北京)

聂臻等. 气体钻井井壁稳定性模型的建立. 天然气工业, 2011, 31(6): 71-76.

摘要 气体钻井井壁稳定性研究是解决气体钻井适应性评价问题的关键,对促进气体钻井技术推广应用、提高钻井速度、加快油气勘探开发步伐都具有重要意义。借鉴近年来岩石的全应力—应变实验成果和弹塑性分析理论模型的最新成果,考虑岩石材料峰后的应变软化特性、剪切膨胀特性,建立了气体钻井井壁稳定性模型。研究结果表明:气体钻井时井壁围岩可能出现弹性状态、塑性软化状态和塑性残余状态,当岩石处于弹性状态和塑性软化状态时井壁都能够保持稳定;塑性临界状态时井壁围岩恰好达到塑性残余状态,井壁将发生坍塌;岩石峰后的应变软化特性和剪切膨胀特性对塑性临界状态有重要影响。依据井壁围岩是否达到临界塑性状态而不是弹性极限状态来判断井壁稳定性是气体钻井井壁稳定分析模型的特殊之处。该研究结论与现场实际情况较为吻合,对气体钻井适应性评价具有重要的应用价值。

关键词 气体钻井 井壁稳定模型 建立 弹性极限状态 临界塑性状态 塑性残余状态

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2011.06.015

气体钻井主要具有以下特点:①井深 1 000~5 000 m 的范围内;②井眼直径通常介于 215.9~311.15 mm 之间;③钻屑靠气体循环携带;④钻井过程中由于井眼内没有支撑措施,气体钻井中井眼周围不可避免地会出现塑性区。因此需要发展评价井壁稳定性的新模型和新理论,以解释当井壁出现一定塑性的情况下,仍然能够保持稳定的力学原因,更好地发挥地层岩石的强度潜力,扩大气体钻井的适应范围。这对气体钻井的钻前适应性评估具有重要意义^[1-2]。

国内外气体钻井中井壁稳定的分析目前仍然沿用了泥浆钻井条件下的方法,即按照井壁围压达到弹性极限状态来计算坍塌压力。国内李爱军、黄进军、项德贵等对气体钻井试验中现场观察到井壁失稳现象做了有益的探索,但分析主要集中在现场现象的描述和讨论上^[3-5]。近两年来蒋祖军、邓虎、张杰开始尝试从力学上分析气体钻井的井壁稳定性,按照井壁应力集中是否达到岩石弹性阶段的强度来判断井壁是否稳定^[6-8],国外 Boyun Guo 和 Ali Ghalambor 在气体钻井的井壁稳定评估中也借用了泥浆钻井坍塌压力的评估模型,按照弹性极限状态来分析应力并比较井壁岩石的强度^[9]。但这些力学分析的假设条件都是岩石达到

峰值强度后完全丧失承载能力。

然而,工程实践表明,某些岩石工程,如地下巷道、矿柱等,尽管岩石发生了破裂,但仍能够维持稳定、安全地工作。这表明岩石不仅在破坏前承受载荷,而且破坏后仍具有一定的负荷能力。因此,为了有效利用岩石为工程服务,促使人们注意岩石破裂后区的力学特性以及如何得到包括后区力学特征在内的所谓荷载—位移全过程。近年来,岩石材料试验机已能够完整地测出岩石峰后的全应力—应变过程,揭示了岩石峰后具有应变软化特性、剪切膨胀特性,对岩石结构的承载能力具有重要的影响^[10-17]。川本兆万于 1981 年首先提出了将岩石全应力应变模型简化为弹性、线性软化和残余 3 个线性阶段^[18]。方德平、陈进、潘岳、范文等采用岩石全应力—应变的三线性模型,考虑岩石峰后应变软化特性和剪切膨胀特性,研究了地下空间保持稳定的临界状态^[18-22]。这些弹塑性理论分析成果表明,理想弹塑性的假设不符合实际岩石的应力—应变关系,从而过高估计了地下岩体工程结构的稳定性,而依据弹性极限状态的分析又过低地估计了地下工程结构的稳定性,因为实际地下岩石工程结构都存在一个保持稳定的临界塑性状态。

作者简介:聂臻,女,1969 年生,高级工程师,中国地质大学(北京)博士研究生;主要从事钻完井工程的研究工作。地址:(100089)北京市学院路 20 号 910 信箱。电话:(010)83593088,13552624186。E-mail:niezhen@cnpicnt.com

笔者借鉴国内外在岩石全应力—应变实验成果和岩石结构弹塑性分析的最新理论成果,建立了考虑岩石应变软化和体积膨胀特性的气体钻井井壁稳定性分析新模型。

1 气体钻井井壁稳定性分析模型的建立

1.1 基本假设

笔者建立的气体钻井井壁稳定性分析模型进行了以下的假设:①连续性假设,把井眼稳定性问题作为连续介质岩石力学问题,以在更大的尺度范围内来描述各种力学参量时,取统计平均值;②岩石为各向同性材料;③不计时间与温度的影响;④岩石材料的全应力—应变关系符合川本兆万提出的三线性模型;⑤岩石的强度服从统一强度准则,峰后岩石的强度准则也满足统一强度准则。

1.2 岩石的全应力—应变实验和本构关系

在普通材料试验机上,传统方法是把力做自变量,以恒定的加载率加载,结果必然是在荷载—位移曲线的峰值处,岩石突然失稳、断裂。如果把位移当作自变量,在具有刚性机架或者反馈控制系统的试验机中进行加载,就可以使试样得到恒定的位移率,从而使岩石的破坏得到控制。随着电液伺服反馈控制刚性压力机的出现,岩石破坏后区力学特性的研究取得了进一步的成果^[10-17]。

岩石的全应力—应变曲线可分为 4 个区段(图 1)。oa 段对应原生裂隙闭合阶段,曲线呈上凹特征,载荷卸除后变形可完全恢复,对致密岩石或有围压作用时,该区段范围很小甚至不存在;ab 段对应线弹性变形阶段,曲线呈直线特征,载荷卸除后变形可完全恢复,直线斜率为岩石的弹性模量 E ,b 点被称为屈服点,对应应力为屈服应力或弹性极限;bc 段对应弹塑性变形阶段,曲线呈下凹特征,载荷卸除后,变形不可完全恢复,残留变形为塑性应变,c 点对应的压应力为压缩强度,该阶段有微破裂发生,岩石中不断产生新的裂隙,若压力保持不变或减小得不及及时,岩石试件将突

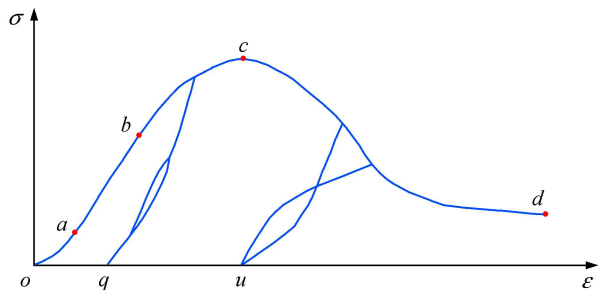
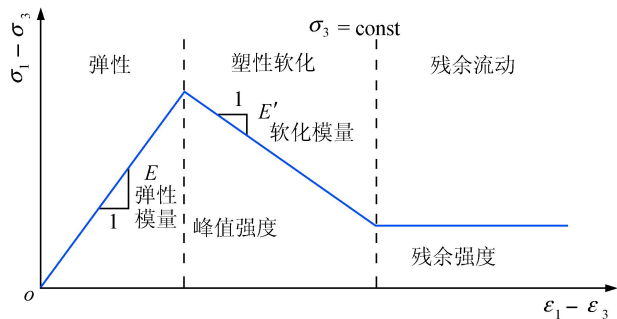


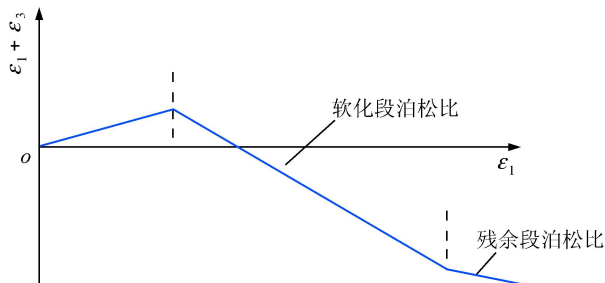
图 1 岩石的全应力—应变曲线图

然碎裂破坏;cd 段对应应变软化阶段,曲线呈先下凹再上凹的特征。

笔者把岩石材料在峰后的应变软化特性、剪切膨胀特性用三线性模型来简化描述(图 2)。



(a) 线性软化模型



(b) 线性膨胀模型

图 2 三线性本构关系示意图

以上三线性本构关系可由以下的关系式表示:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon_1 & (\varepsilon_1 \leq \varepsilon_m) \\ (1 + \frac{E}{N})(N\varepsilon_1 + \alpha_1) - E'\varepsilon_1 & (\varepsilon_m \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_n) \\ \alpha_{1r} + N\varepsilon_1 & (\varepsilon_n \leq \varepsilon_1) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\varepsilon_m = \frac{\alpha_1 + N\varepsilon_0}{E}$, $\varepsilon_n = \beta\varepsilon_0 + N\varepsilon_1/E$, $N = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$,

$$N_r = \frac{1 + \sin\varphi_r}{1 - \sin\varphi_r}, \beta = 1 + \frac{\int d\varepsilon'}{\varepsilon'}$$

1.3 统一强度准则

统一强度理论充分考虑了中间主应力 σ 在不同应力条件下对材料屈服或破坏的影响,更适合于气体钻井井壁稳定性分析并有利于发挥岩石材料的强度潜力。

当采用材料的内摩擦角 φ 与黏聚力 ω 表示时,统一强度准则的表达如下:

当 $\sigma \leq \frac{\sigma + \alpha}{2} + \frac{\sigma - \alpha}{2} \sin\varphi$ 时

$$F = \left[\sigma - \frac{1}{1+b} (b\sigma + \alpha) \right] + \left[\sigma + \frac{1}{1+b} (b\sigma + \alpha) \right] \sin\varphi = 2\omega \cos\varphi \quad (2)$$

当 $\sigma \geq \frac{\sigma + \alpha}{2} + \frac{\sigma - \alpha}{2} \sin \varphi$ 时

$$F' = \left[\frac{1}{1+b} (\sigma + b\alpha) - \sigma \right] + \left[\sigma + \frac{1}{1+b} (b\alpha + \sigma) \right] \sin \varphi = 2\alpha \cos \varphi \quad (3)$$

式中 b 表示统一强度准则的参数,当 $b=0$ 时准则退化为莫尔—库仑准则,当 $b=1$ 时为双剪强度准则,对于岩石材料,应依据真三轴实验成果取值。

气体钻井中井壁围岩应力分析的强度准则,形式如下:

$$\frac{\sigma - \alpha}{2} = \frac{\sigma + \alpha}{2} \sin \varphi + \alpha \cos \varphi \quad (4)$$

$$\text{其中 } \sin \varphi = \frac{2(1+b)\sin \varphi}{2(1+b) + mb(\sin \varphi - 1)}$$

$$\alpha = \frac{2(1+b)\alpha \cos \varphi}{2(1+b) + mb(\sin \varphi - 1)\cos \varphi}$$

1.4 气体钻井的井眼稳定性分析

本文的模型分析建立在范文等的理论分析基础上,结合气体钻井的实际情况做进一步的应用推导,实现了对坍塌压力、井眼极限承载能力、安全系数、井眼塑性区范围的定量计算。模型考虑到岩石峰后的应变软化特性、剪切膨胀特性和残余强度特性。

在气体钻井中,井眼钻开后应力集中,如果应力集中超过了井壁围岩的强度,井壁进入塑性,在井眼周围出现了弹性区和塑性软化区,如果地应力载荷过大,井眼周围塑性软化区进一步扩展,在井眼周围会出现残余区(图3)。井眼处于弹性状态时井壁最为稳定,不会出现井下阻卡现象;井壁出现一定程度的损伤状态时,可能伴随着较轻的井下阻卡现象,但井眼整体仍然能够保持稳定;如果井壁处于残余塑性状态,井壁围岩坍塌。

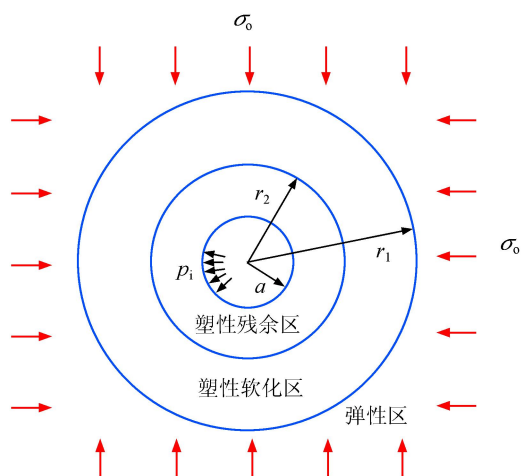


图3 气体钻井的井壁稳定分析模型图

1.4.1 气体钻井的坍塌压力计算模型

井壁围岩软化到塑性残余状态是井壁稳定的极限状态,对应于临界状态时的井眼内支撑力为:

$$p_{i, \text{critical}} = \frac{2}{1-N} \left[\frac{AE'}{h+N} + \frac{(1-N)\alpha - \alpha_i}{1+N} \right] \left(\frac{r_c}{a} \right)^{1-N} + \frac{\alpha_i(1+h) - 2AE'}{(1-N)(h+N)} - \frac{\alpha_r}{h+N} \quad (5)$$

$$\text{其中 } \alpha_i = \frac{2\alpha - \alpha_i}{N+1}, \alpha_i = \frac{2\alpha \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}.$$

临界状态时的井眼内支撑力就是气体钻井的坍塌压力,而目前泥浆钻井采用的坍塌压力模型是按照弹性极限状态建立的。依据临界塑性状态时的井眼内支撑力的计算结果来判断气体钻井井壁是否稳定,若 $p_i < 0$ 则表明气体钻井时井壁塑性没有达到临界状态,井壁保持稳定;若 $p_i > 0$ 则表明气体钻井时井壁周围形成了残余塑性区,井壁发生坍塌,气体钻井不安全。

1.4.2 临界状态时的塑性区范围

$$r_c = a \left\{ \frac{\frac{2}{1-N} \left[\frac{AE'}{h+N} + \frac{(1-N)\alpha - \alpha_i}{1+N} \right]}{p_i - \frac{\alpha_i(1+h) - 2AE'}{(1-N)(h+N)} + \frac{\alpha_r}{h+N}} \right\}^{\frac{1}{1-N}} \quad (6)$$

1.4.3 气体钻井的安全系数

气体钻井时井眼内支撑力 p_i 取0,根据公式(6)变换,计算井眼的极限承载能力,安全系数用井眼的极限承载能力比实际的地应力载荷:

$$\alpha_{\text{critical}} = \frac{\alpha_i(h+N) - (1+N)AE'}{(1-N)(h+N)} + \frac{1+N}{2} \left(\frac{r_c}{a} \right)^{N-1} \times \left[p_i + \frac{\alpha_r}{h+N} - \frac{\alpha_i(1+h) - 2AE'}{(1-N)(h+N)} \right] \quad (7)$$

$$\eta = \frac{\alpha_{\text{critical}}}{\alpha} \quad (8)$$

1.4.4 塑性区扩展与载荷的关系

临界状态前的载荷—塑性区扩展的关系:

$$\alpha = \left(Q_1 - \frac{AE'}{h+N} + \frac{\alpha_i}{1+N} \right) \frac{1+N}{1-N} \quad (9)$$

$$\text{其中 } Q_1 = \left\{ p_i + \frac{2AE'}{1+h} \left[\frac{1}{h+N} \left(\frac{r_1}{a} \right)^{h+1} + \frac{1}{1-N} \right] - \frac{\alpha_i}{1-N} \right\} \frac{1-N}{2} \left(\frac{r_1}{a} \right)^{N-1}.$$

临界状态后的载荷—塑性区扩展的关系:

$$\alpha = \frac{1+N}{1-N} \left(\frac{1-N}{2} t^{1-N} Q_2 - \frac{AE'}{h+N} + \frac{\alpha_i}{1+N} \right) \quad (10)$$

$$\text{其中 } Q_2 = \left[\left(p_i \frac{\alpha_r}{1-N_r} \right) \left(\frac{a}{tR_p} \right)^{1-N_r} + \frac{\alpha_r}{1-N_r} - \frac{\alpha_i}{1-N} + \frac{2AE'}{1+h} \left(\frac{1}{h+N} t^{-h+1} + \frac{1}{1-N} \right) \right].$$

1.4.5 地应力非均匀情况的处理

实际情况下地应力往往是非均匀的,可以引入一个当量的均匀地应力,经过数值模拟的验证可以使用下面的公式来近似计算当量地应力情况。

$$\sigma = \frac{3\sigma_{1,\max} - \sigma_{1,\min}}{2} \quad (11)$$

1.5 模型参数

采用应变软化材料的本构模型建立的气体钻井井壁稳定评估模型,考虑了以下因素和影响条件:

1)应变软化用脆性度 β 来表征,趋于无穷时是理想弹塑性的材料,没有临界状态;当 β 趋于 1 时是理想脆性材料,分析结果与弹性分析一致;实际岩石的 β 通常大于 1,表现出应变软化特性, β 越大,井眼的极限承载能力越高,气体钻井的井壁稳定性就好。

2)岩石峰后剪切膨胀特性用峰后泊松比 h 来表征,越脆性的岩石表现出越明显的剪切膨胀, h 较大,越塑性的岩石剪切膨胀越不明显, h 接近于 0.5 表示不剪切膨胀,一般岩石的 h 在 1 附近, h 越大,剪切膨胀性增强,井眼稳定的极限承载能力降低。

3)残余强度系数对井眼临界承载能力有影响,但相对不大。

4)强度准则考虑中间主应力的影响,用 b 来表征, $b=0$ 时为莫尔—库仑准则, $b=1$ 时为双剪强度准则,对于气体钻井 b 取 0.5 左右,更有利于发挥材料强度潜力。

5)非均匀地应力程度的影响,引入当量均匀地应力来分析。

1.6 与目前钻井井壁稳定性评估模型的比较

目前泥浆钻井的坍塌压力评估模型假设材料是线弹性的,即达到峰值强度后完全丧失支撑能力,分析采用弹性应力分析方法,考虑了地应力因素和材料强度:

$$p_{\text{mud}} = f(\sigma_{\text{地应力}}, \sigma_{\text{峰值强度}}) \quad (12)$$

气体钻井的井壁稳定性由于井眼内没有泥浆滤液的化学作用,因此可以使用井眼的稳定极限状态来评估,假设材料峰后应变软化和剪切膨胀,支撑能力随着软化而降低,分析采用了弹塑性的分析方法,考虑了地应力、峰前弹性特性、峰后应变软化和剪切膨胀特性、残余强度特性:

$$p_{\text{gas}} = f(\sigma_{\text{地应力}}, \alpha_{\text{峰前弹性和强度特性}}, \beta_{\text{峰后应变软化}}, h_{\text{剪切膨胀}}) \quad (13)$$

目前采用的泥浆钻井坍塌压力模型,要求井壁保持在弹性状态,如果将之应用于气体钻井的井壁稳定性评估中则显得过于保守,也不符合气体钻井的实际情况。这两种模型存在以下区别:①一种是弹性分

析,另一种是弹塑性分析;②对材料本构关系的假设,一种是线弹性的,另一种是非线性全曲线的;③对岩石材料的假设,一种是脆性的,峰值后完全丧失,另一种是软化的,峰值后仍然具有,这是材料试验机发展的历史的阶段性;④前者是材料强度分析,后者是结构稳定性分析;⑤泥浆钻井的分析方法过于保守,而气体钻井的分析方法更合乎实际情况。

2 现场应用与验证

气体钻井井眼稳定性分析模型是按照临界塑性状态建立的,解决了按照弹性极限状态分析时过低估计井眼稳定能力的问题,已经应用在川渝气区的气体钻井井壁稳定性分析中。根据本模型进行井壁稳定性评估可依照以下几个指标进行表征:

1)气体钻井坍塌压力:按照临界损伤状态计算的井眼支撑力,小于 0 表示井眼稳定,等于 0 表示达到了临界损伤状态,大于 0 表示需要井眼支撑力,气体钻井时井壁失稳。

2)气体中钻井的安全系数:等于井眼保持稳定的最大承载能力除以实际地应力,大于 1 表明井眼稳定,等于 1 为临界损伤状态,小于 1 表明井壁失稳。

3)井壁围岩状态:可能有 3 种,弹性状态最为稳定,其次是由于损伤造成的软化状态,也能保持稳定,第三是井壁达到残余状态,则表明井眼整体失稳。

4)损伤区椭圆长轴/井眼半径:井眼钻开后应力集中,如果超过井壁围岩的强度,就会发生损伤,损伤区是近似椭圆形的,椭圆长轴表明了损伤区范围的大小。

元坝 1 井是部署在巴中低缓构造带元坝岩性圈闭的一口重点区域探井,钻遇地层从上到下差异较大,对该井进行气体钻井井壁稳定性评价结果见图 4。认识如下:①元坝 1 井在遂宁组以上地层,气体钻井时井壁能够保持弹性状态,井壁很稳定;②预测从遂宁组下部 2 220~2 420 m 井段井壁出现了损伤,损伤区的范围为 12% 左右的井眼半径;③从上沙溪庙组中部井段 3 100 m 开始,井壁再次出现损伤,损伤程度更大一些,至 3 380~3 420 m 井壁损伤严重,进入残余状态,井眼整体失稳,对应井段的气体钻井坍塌压力超过 0,安全系数低于 1,预测该井段将发生严重的阻卡,需要转换成钻井液钻井。

元坝 1 井气体钻井的阻卡统计见表 1,元坝 1 井的气体钻井实际情况印证了井壁损伤存在临界损伤(塑性)状态的结论,预测在 3 380~3 420 m 井壁达到临界损伤(塑性)状态并进入残余状态。在该井深无法继续实施气体钻井的这一结论与实钻情况相吻合。

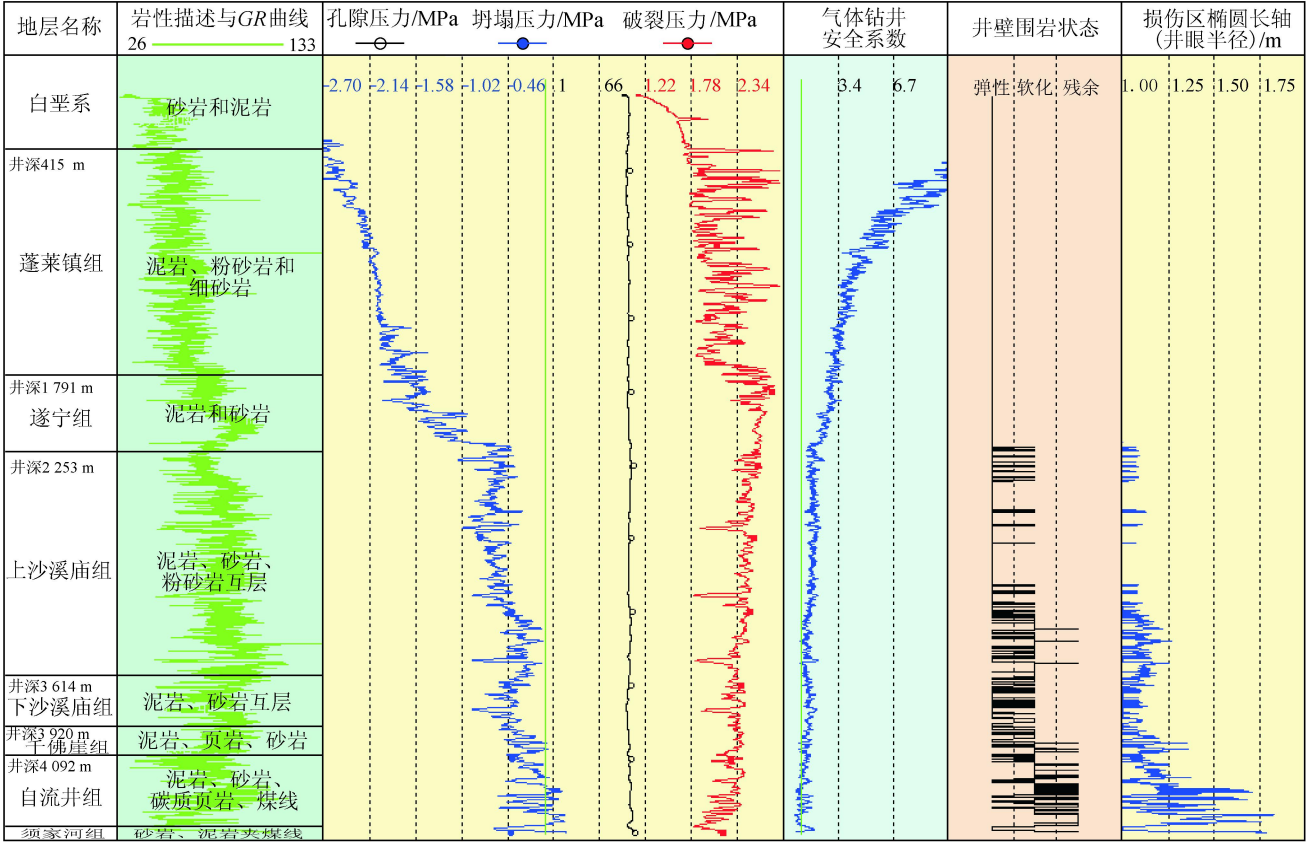


图 4 元坝 1 井气体钻井的井壁稳定性评估结果图

表 1 元坝 1 井实钻中的阻卡情况统计表

复杂情况	备 注
起钻至 2 274.22 m 遇卡,最大悬重上提至 132 t	为空气钻井井段,循环持续返出掉块
下钻至 2 279.87 m 遇阻,循环冲至井深 2 281.8 m	返出大量掉块
下钻至 2 252 m 遇阻,开气冲不开	启动转盘划眼
2 271.95~2 281.59 m 下放钻具多处遇阻	—
下钻至 2 268 m 遇阻	气排量开至 170 m ³ /min 划眼
下钻至 3 281.62 m 遇阻划眼,最大气量 170 m ³ /min	没有大量掉块
钻至井深 3 390 m,上提遇卡,下放遇阻	接单根沉砂约 10 m
钻至井深 3 419.56 m,上提遇卡,下放遇阻	结束气体钻井,转换钻井液

3 结 论

1)井眼稳定存在一个临界塑性状态,是气体钻井井眼稳定允许的极限状态。岩石材料峰后的应变软化特性、剪切膨胀特性对井眼稳定的极限状态影响很大。气体钻井要根据井眼是否达到临界塑性状态而不是弹性极限状态来判断井眼的稳定性。

2)借鉴和引入了近年来刚发展起来的考虑岩石峰后应变软化和剪切膨胀特性、采用统一强度准则的弹

塑性分析模型,分析了气体钻井中井眼周围弹性区、塑性软化区和塑性残余区的应力、应变和位移。建立了气体钻井井壁稳定预测模型,实现了对气体钻井的安全系数、坍塌压力、损伤区范围、损伤状态的定量计算和判断。

3)气体钻井中井壁围岩状态可能有三种,弹性状态最为稳定,其次是由于损伤造成的软化状态,也能保持稳定,第三是井壁达到残余状态,则表明井眼整体失稳。

4)研究成果应用在元坝地区的气体钻井井壁稳定性评估,和实钻情况吻合。

5)笔者从宏观弹塑性力学分析角度建立了气体钻井的井壁稳定评估模型,解决了钻前适应性评估的问题,针对转换介质后普遍发生的井下阻卡和划眼复杂情况,建议结合细观损伤力学的方法来研究。从细观的角度看,气体钻井会在井眼周围形成损伤区,损伤区内微裂缝和裂缝形成,容易导致转换介质后井壁的坍塌。

符 号 说 明

E 表示杨氏模量, Pa; $\bar{E}$ 表示 E'/E , E' 表示软化模量; G 表示剪切模量, Pa; α 表示径向应力, Pa; φ 表示内摩擦角, ($^{\circ}$); σ 表示切向应力, Pa; c 表示黏力, Pa; p_i 表示井眼内支撑力, Pa; σ_{tr} 表示单轴压缩残余强度, Pa; σ_t 表示单轴压缩峰值强度, Pa; α 表示统一黏聚力, Pa; ϵ_0 表示单轴压缩弹性极限应变; φ 表示统一内摩擦角, ($^{\circ}$); σ_1 、 σ_2 、 σ_3 表示第一、第二、第三主应力, Pa; β 表示脆性模量, 无量纲; ν 表示泊松比, 无量纲; h 表示塑性软化阶段泊松比, 无量纲; ϵ 表示轴向应变; f 表示塑性残余阶段泊松比, 无量纲; ϵ 表示环向应变; $p_{i, \text{critical}}$ 表示临界状态时坍塌压力, Pa; $\sigma_{H, \text{max}}$ 表示水平最大主应力, Pa; $\sigma_{c, \text{critical}}$ 表示井眼极限承载能力, Pa; $\sigma_{H, \text{min}}$ 表示水平最小主应力, Pa; χ 表示临界状态的塑性区半径, m; α 表示上覆应力, Pa; α 表示井眼半径, m; α 表示地应力载荷, Pa; A 表示井壁围岩弹性和塑性软化交界处的弹性极限, $-\epsilon = \epsilon = A$ 。

参 考 文 献

- [1] 刘厚彬, 孟英峰, 万尚贤, 等. 高压气层气体钻井井壁稳定性分析[J]. 天然气工业, 2010, 30(11): 59-62.
- [2] 魏武, 邓虎, 李皋, 等. 气体钻井井壁稳定处理剂评价方法探讨[J]. 天然气工业, 2010, 30(9): 51-54.
- [3] 李爱军. 空气钻井井眼稳定问题初探[J]. 西部探矿工程, 1994, 6(1): 11-14.
- [4] 黄进军, 崔茂荣, 罗平亚. 雾化空气钻井井壁稳定性的实验研究[J]. 钻井液与完井液, 1995, 12(5): 6-10.
- [5] 项德贵, 孙梦慈, 陈志学. 青西油田空气钻井井眼稳定问题的探讨[J]. 断块油气田, 2005, 12(6): 68-70.
- [6] 蒋祖军, 张杰, 孟英峰, 等. 气体钻井井壁稳定性评价方法分析[J]. 天然气工业, 2007, 27(11): 68-70.
- [7] 邓虎, 杨令瑞, 陈丽萍, 等. 气体钻井井壁稳定性分析[J]. 天

然气工业, 2007, 27(2): 49-51.

- [8] 张杰, 李皋. 地层出气对气体钻井井壁稳定性影响规律研究[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(5): 76-78.
- [9] GUOBOYUN, GHALAMBOR ALI. An innovation in designing underbalanced drilling flow rates: a gas-liquid rate window (GLRW) approach[C]// paper 77237-MS presented at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology, 8-11 September 2002, Jakarta, Indonesia. New York: SPE, 2002.
- [10] 吴玉山, 林卓英. 单轴压缩下岩石破坏后区力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(1): 23-31.
- [11] 林卓英, 吴玉山. 815-03 型电液伺服控制压力机和岩石的荷载—位移全过程[J]. 岩土力学, 1985(1): 1-26.
- [12] FAIRHURST C E, HUDSON J A. 单轴压缩试验测定完整岩石应力—应变全曲线 ISRM 建议方法草案[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 802-808.
- [13] 卢允德, 葛修润, 蒋宇, 等. 大理岩常规三轴压缩全过程试验和本构方程的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2489-2493.
- [14] 邓小亮. 三轴压缩下大理岩应力—应变全过程的力学特征试验研究[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1993, 13(3): 272-277.
- [15] MADSEN F T. 膨胀岩石室内试验 ISRM 建议方法草案[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 604-613.
- [16] 朱建明, 徐秉业, 岑章志. 岩石类材料峰后滑移剪膨变形特征研究[J]. 力学与实践, 2001, 23(5): 19-22.
- [17] 李林峰, 侯克鹏, 余贤斌, 等. 岩石峰后扩容特性及扩容模型的探讨[J]. 矿业快报, 2007, 23(9): 15-17.
- [18] 方德平, 汪浩. 考虑岩石脆—塑性过渡特性的地下洞室受力分析[J]. 地下空间, 1991, 11(1): 15-23.
- [19] 陈进, 袁文伯. 地下岩体结构的弹塑性与极限状态分析[J]. 工程力学, 1988(1): 117-126.
- [20] 潘岳, 王志强. 基于应变非线性软化的圆形洞室围岩弹塑性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 915-920.
- [21] 范文, 俞茂宏, 陈立伟. 考虑材料剪胀及软化的有压隧洞弹塑性分析的解析解[J]. 工程力学, 2004, 21(5): 16-24.
- [22] 俞茂宏, 刘继明, ODA YOSHIYA, 等. 论岩土材料屈服准则的基本特性和创新[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1745-1757.

(修改回稿日期 2011-03-28 栏目编辑 居维清
特约编辑 杨 斌)