

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2011.01.009

# 考虑渗流作用的套管错断口井壁围岩应力场分析

艾 池<sup>1</sup> 刘国勇<sup>2</sup> 刘顺利<sup>3</sup> 隋 杨<sup>4</sup> 赵万春<sup>1</sup>

(1. 提高油气采收率教育部重点实验室(东北石油大学),黑龙江 大庆 163318; 2. 大庆石油国际工程公司,黑龙江 大庆 163453; 3. 大庆钻探工程公司 钻井二公司,黑龙江 大庆 163413; 4. 大庆钻探工程公司 钻井三公司,黑龙江 大庆 163412)

**摘要:**考虑井壁周围岩体中流体的渗流作用,建立了套管错断口井壁岩体的平衡微分方程。然后按照损伤程度的不同将错断口井壁岩体划分为不同的区域(失稳破坏区、损伤区、弹性区),考虑不同区域内岩石材料参数的不同,分析了错断口周围岩体各个区域内的应力分布规律,确定了失稳破坏区和损伤区的半径,并在此基础上得到了岩体发生失稳破坏和损伤时的临界应力条件,从而为套管错断后井壁稳定性的研究和错断口吐岩块现象的预防提供了理论依据。

**关键词:**渗流;套管断裂;围岩;应力场;岩石破碎

中图分类号:TE21 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2011)01-0040-04

## Wellbore Wall Stress Analysis around Failure Casing in Consideration of Fluid Seepage

Ai Chi<sup>1</sup> Liu Guoyong<sup>2</sup> Liu Shunli<sup>3</sup> Sui Yang<sup>4</sup> Zhao Wanchun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Education Ministry for Enhanced Oil Recovery, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang, 163318, China; 2. DQE International, Daqing, Heilongjiang, 163453, China; 3. No. 2 Drilling Company of Daqing Drilling and Exploration Engineering Company, Daqing, Heilongjiang, 163413, China; 4. No. 3 Drilling Company of Daqing Drilling and Exploration Engineering Company, Daqing, Heilongjiang, 163412, China)

**Abstract:** The balanced differential equation of wellbore wall is built around failure casing considering fluid seepage. The area around failure casing is divided into different areas (unstable failure zone, damaged zone, elastic zone) according to the degree of damage, their stress distribution were obtained with consideration of variations of rock properties in different areas. The radius of unstable failure zone and damaged zone are determined. Critical stresses of rock failure and damage are obtained which provides a theoretical basis for the wellbore stability investigation and casing failure prevention.

**Key words:** percolation; casing failure; stress field; surrounding rock; rock breaking

套管错断后,错断口处的岩石失去了套管的支撑作用,注水井停注和采油井周围由于窜槽、层间浸水、水力压裂所形成的高压层瞬间在井壁附近产生巨大的流体压差,将井壁周围岩石原有的平衡打破。在孔隙流体压力及地应力等的作用下,错断口处岩体出现应力集中,当应力分布达到破坏极限时,错断口井壁围岩发生失稳破坏<sup>[1]</sup>。因此,笔者在前人研究的基础上,考虑孔隙渗流作用,并结合不同损伤程度岩体材料的参数,对套管错断后断口周围岩石的

应力场进行了分析。

收稿日期:2009-05-15;改回日期:2010-11-26

基金项目:黑龙江省教育厅科学技术研究项目“天然气井微间隙防气窜封堵技术研究”(编号:11531001)、黑龙江省青年基金“注采动态应力场诱导岩体损伤与孔-渗演化研究”(编号:QC2010096)资助

作者简介:艾池(1957—),男,吉林洮南人,1982年毕业于大庆石油学院钻井工程专业,2003年获大庆石油学院油气田开发工程专业工学博士学位,教授,博士生导师,从事油气井工程力学方面的研究工作。

联系方式:(0459)6503073,aichi2001@163.com

## 1 考虑渗流作用的井壁岩体平衡微分方程

假设井筒是垂直的,错断口处井壁围岩内的应力分布规律属平面应变问题,水平应力在各方向上相等,宏观上岩石具有各向同性,且岩石具有孔隙性和渗透性;因为孔隙很小,可以认为岩石是均匀的。在发生损伤前,岩石是完全弹性体,发生损伤后,符合摩尔-库仑准则。

再假设井壁周围岩石中流体的渗流满足达西定律,就可以确定套管错断口处围岩内孔隙压力沿径向的变化规律,并在此基础上推导出渗流作用下套管错断口处井壁围岩的应力状态<sup>[2]</sup>。套管错断口岩体损伤的计算模型如图1所示。

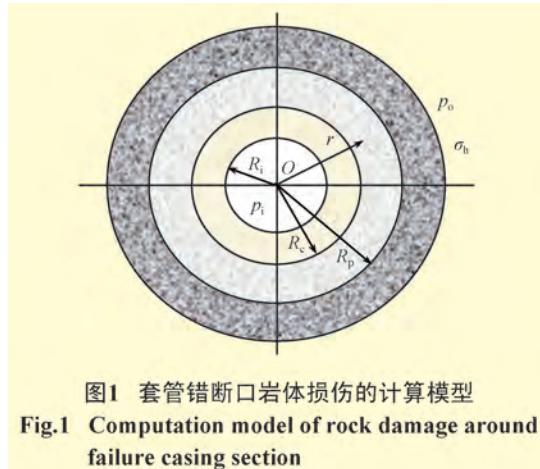


图1 套管错断口岩体损伤的计算模型

Fig.1 Computation model of rock damage around failure casing section

图1中,取井眼轴线为z轴,建立柱坐标系,井眼半径为 $R_i$ ,井眼处的液柱压力为 $p_i$ ,在较远的 $R_o$ ( $R_o \gg R_i$ )处,孔隙压力为 $p_o$ ,地应力为 $\sigma_h$ ,井壁周围岩石的有效孔隙度为 $\beta$ ,渗透率为 $K$ ,弹性模量为 $E$ ,泊松比为 $\nu$ ,失稳破坏区的平均半径为 $R_c$ ,损伤区的平均半径为 $R_p$ 。

在地层中,孔隙流体和岩石骨架共同承担着上覆岩层的重力和水平应力,孔隙压力影响着岩石骨架应力。根据达西定律,黏度为 $\eta$ 的流体,在单位长度井段内流过半径为 $r$ 柱面的流量 $q$ 为:

$$q = -\frac{2\pi K r dP}{\eta} \quad (1)$$

边界条件为:

$$\begin{cases} p|_{r=R_i} = p_i \\ p|_{r=R_o} = p_o \end{cases} \quad (2)$$

移项、积分并根据上述边界条件,解得孔隙压力沿过流半径的分布规律为:

$$p = p_i + (p_i - p_o) \frac{\ln \frac{r}{R_i}}{\ln \frac{R_o}{R_i}} \quad (R_i \leq r \leq R_o) \quad (3)$$

考虑岩石内流体的渗流作用,结合井壁围岩弹塑性力学理论建立应力满足的平衡微分方程为<sup>[2-4]</sup>:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \beta \frac{dp}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (4)$$

式中: $\sigma_r$ 为井壁围岩某一处的径向应力,MPa; $\sigma_\theta$ 为井壁围岩某一处的切向应力,MPa。

## 2 不同损伤程度岩体应力计算

套管错断后,井壁周围岩体在外力作用下会出现塑性屈服和失稳破坏,此时其应力满足摩尔-库伦准则,可统一表示为<sup>[5]</sup>:

$$F = \sigma_\theta - N\sigma_r - S = 0 \quad (5)$$

式中, $N$ 、 $S$ 为材料参数,而对于破裂区和塑性区, $N$ 、 $S$ 可分别由粘聚力及内摩擦角表示。

将式(3)和式(5)代入式(4)得:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \beta \frac{p_i - p_o}{\ln \frac{R_o}{R_i}} \frac{1}{r} + \frac{(1-N)\sigma_r - S}{r} = 0 \quad (6)$$

令 $A = \beta \frac{p_i - p_o}{\ln \frac{R_o}{R_i}}$ ,则式(6)可化简为:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{1-N}{r}\sigma_r = \frac{A+S}{r} \quad (7)$$

对式(7)求解,得:

$$\sigma_r = \frac{A+S}{1-N} + Cr^{N-1} \quad (8)$$

再根据边界条件 $\sigma_r(R_i) = -p_i(1-\beta)$ ,得:

$$\sigma_r = \frac{\frac{A+S}{N-1} - p_i(1-\beta)}{R_i^{N-1}} r^{N-1} - \frac{A+S}{N-1} \quad (9)$$

按照损伤程度的不同,将套管错断口井壁岩体划分为失稳破坏区、损伤区、强性区等不同的区域,来分析各区域内岩石材料的参数。

### 1) 失稳破坏区

在失稳破坏区内,岩石的材料参数 $N$ 、 $S$ 分别满足:

$$\begin{cases} N = N_c = (1 + \sin\varphi_c) / (1 - \sin\varphi_c) \\ S = S_c = 2c_c \cos\varphi_c / (1 - \sin\varphi_c) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $N_c$ 、 $S_c$ 分别为失稳破坏区的岩石材料参数; $\varphi_c$ 为失稳破坏区岩石的内摩擦角,(°); $c_c$ 为失稳破坏

区岩石的粘聚力, MPa。

因此,结合式(9)可知失稳破碎区的应力分布为:

$$\sigma_r = \frac{A + S_c}{N_c - 1} - p_i(1 - \beta) r^{N_c - 1} - \frac{A + S_c}{N_c - 1} \quad (11)$$

$$\sigma_\theta = N_c \left[ \frac{A + S_c}{N_c - 1} - p_i(1 - \beta) r^{N_c - 1} - \frac{A + S_c}{N_c - 1} \right] + S_c \quad (12)$$

当  $r=R_c$  时,可以得到失稳破坏区外边界处的径向应力为:

$$\sigma_r(R_c) = \frac{A + S_c}{N_c - 1} - p_i(1 - \beta) R_c^{N_c - 1} - \frac{A + S_c}{N_c - 1} \quad (13)$$

### 2) 损伤区

在损伤区内,岩石的材料参数  $N$ 、 $S$  满足:

$$\begin{cases} N = N_p = (1 + \sin\varphi_p)/(1 - \sin\varphi_p) \\ S = S_p = 2c_p \cos\varphi_p/(1 - \sin\varphi_p) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $N_p$ 、 $S_p$  分别为损伤区的岩石材料参数;  $\varphi_p$  为损伤区岩石的内摩擦角,  $(^\circ)$ ;  $c_p$  为损伤区岩石的粘聚力, MPa。

采用与失稳破坏区同样的求解方法,结合损伤区的内边界条件,可以解得损伤区的应力分布为:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_r(R_c) + \frac{A + S_p}{N_p - 1}}{R_c^{N_p - 1}} r^{N_p - 1} - \frac{A + S_p}{N_p - 1} \quad (15)$$

$$\sigma_\theta = N_p \left[ \frac{\sigma_r(R_c) + \frac{A + S_p}{N_p - 1}}{R_c^{N_p - 1}} r^{N_p - 1} - \frac{A + S_p}{N_p - 1} \right] + S_p \quad (16)$$

当  $r=R_p$  时,可得损伤区外边界处的应力为:

$$\sigma_r(R_p) = \frac{\sigma_r(R_c) + \frac{A + S_p}{N_p - 1}}{R_c^{N_p - 1}} R_p^{N_p - 1} - \frac{A + S_p}{N_p - 1} \quad (17)$$

$$\sigma_\theta(R_p) = N_p \left[ \frac{\sigma_r(R_c) + \frac{A + S_p}{N_p - 1}}{R_c^{N_p - 1}} R_p^{N_p - 1} - \frac{A + S_p}{N_p - 1} \right] + S_p \quad (18)$$

### 3) 弹性区

根据对渗流作用下井壁周围岩石的弹性力学分析,结合弹性区内外边界条件,可得井壁围岩弹性区内的应力分布。

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_r(R_p) + \frac{R_o^2(R_p^2 - r^2)}{r^2(R_o^2 - R_p^2)} \left[ \sigma_r(R_p) - \sigma_h + \right. \\ &\quad \left. \frac{\beta(p_o - p_i)}{2(1-\nu)} \right] + \frac{\beta(p_o - p_i) \ln \frac{r}{R_p}}{2(1-\nu) \ln \frac{R_o}{R_p}} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= \sigma_r(R_p) - \frac{R_o^2(r^2 + R_p^2)}{r^2(R_o^2 - R_p^2)} \left[ \sigma_r(R_p) - \sigma_h + \right. \\ &\quad \left. \frac{\beta(p_o - p_i)}{2(1-\nu)} \right] - \frac{\beta(p_o - p_i) \ln \frac{r}{R_p}}{2(1-\nu) \ln \frac{R_o}{R_p}} - \frac{\beta(p_o - p_i)}{\ln \frac{R_o}{R_p}} \end{aligned} \quad (20)$$

弹性区内边界处的切向应力为:

$$\begin{aligned} \sigma_\theta(R_p) &= \sigma_r(R_p) - \frac{2R_o^2}{R_o^2 - R_p^2} \left[ \sigma_r(R_p) - \right. \\ &\quad \left. \sigma_h + \frac{\beta(p_o - p_i)}{2(1-\nu)} \right] - \frac{\beta(p_o - p_i)}{\ln \frac{R_o}{R_p}} \end{aligned} \quad (21)$$

根据井壁周围岩石损伤区和弹性区应力连续条件,结合式(18)、式(21)可以得到:

$$\begin{aligned} N_p \left[ \frac{\sigma_r(R_c) + \frac{A + S_p}{N_p - 1}}{R_c^{N_p - 1}} R_p^{N_p - 1} - \frac{A + S_p}{N_p - 1} \right] + S_p &= \\ \sigma_r(R_p) - \frac{2R_o^2}{R_o^2 - R_p^2} \left[ \sigma_r(R_p) - \sigma_h + \right. \\ &\quad \left. \frac{\beta(p_o - p_i)}{2(1-\nu)} \right] - \frac{\beta(p_o - p_i)}{\ln \frac{R_o}{R_p}} \end{aligned} \quad (22)$$

失稳破坏区与损伤区半径之间的关系为:

$$R_p = R_c \sqrt{1 + E/\lambda} \quad (23)$$

式中:  $\lambda$  为降模量, MPa。

将式(23)代入式(22)得:

$$\begin{aligned} N_p \left[ \left( \sigma_r(R_c) + \frac{A + S_p}{N_p - 1} \right) (1 + E/\lambda)^{\frac{N_c - 1}{2}} - \frac{A + S_p}{N_p - 1} \right] + \\ S_p &= \sigma_r(R_p) - \frac{2R_o^2}{R_o^2 - R_c^2 (\sqrt{1 + E/\lambda})} \left[ \sigma_r(R_p) - \right. \\ &\quad \left. \sigma_h + \frac{\beta(p_o - p_i)}{2(1-\nu)} \right] - \frac{\beta(p_o - p_i)}{\ln \frac{R_o}{R_c \sqrt{1 + E/\lambda}}} \end{aligned} \quad (24)$$

由式(24)即可求出失稳破坏区的半径  $R_c$ , 根据式(23)可计算得损伤区的半径  $R_p$ , 将  $R_c$ 、 $R_p$  分别代入式(11)、(12)、(13)、(15)、(16)、(17)、(18)、(19)和(20)就可以求出不同损伤程度岩体的应力场分布以及岩体发生失稳破坏和损伤的边界应力条件<sup>[5-7]</sup>。

## 3 算例与分析

$p_i = 4$  MPa,  $p_o = 20$  MPa,  $\beta = 0.2$ ,  $\nu = 0.25$ ,  $R_i = 0.2$  m,  $R_o = 100$  m, 井壁围岩失稳破坏区的粘聚力  $c_c$  和内摩擦角  $\varphi_c$  分别为 1.5 MPa 和  $15^\circ$ , 损伤区内的粘聚力  $c_p$  和内摩擦角  $\varphi_p$  分别为 4.5 MPa 和  $30^\circ$ ,  $E/\lambda = 0.5$ , 根据式(24)可以得出失稳破坏区的

半径  $R_c = 0.96 \text{ m}$ , 损伤区的半径  $R_p = 1.18 \text{ m}$ 。将  $R_c$ 、 $R_p$  代入式(11)、(12)、(15)、(16)、(19)和(20)可以得到井壁周围岩石不同区域内的径向应力和切向应力沿半径方向的变化情况,结果见图2、图3(横坐标表示井壁周围岩体任一点距井眼中心线的距离,纵坐标表示距井眼中心线不同距离的岩体所对应的应力)。图2、图3显示了井壁周围不同损伤程度岩体径向应力和切向应力的变化趋势:  $0.20 \text{ m} \leq r \leq 0.96 \text{ m}$  段是失稳破坏区内岩体应力的变化曲线;  $0.96 \text{ m} \leq r \leq 1.18 \text{ m}$  段是损伤区内岩体应力的变化曲线; 当  $r > 1.18 \text{ m}$  后, 岩体处于弹性区, 图中呈现的是弹性区的应力变化趋势。通过分析套管错断口井壁岩体应力场, 可以计算出井壁岩体发生损伤和破坏的临界应力条件, 这样就可以指导分析套管错断后井壁岩体的稳定性, 同时也为套管错断后吐岩块现象的预防和控制提供了理论基础。

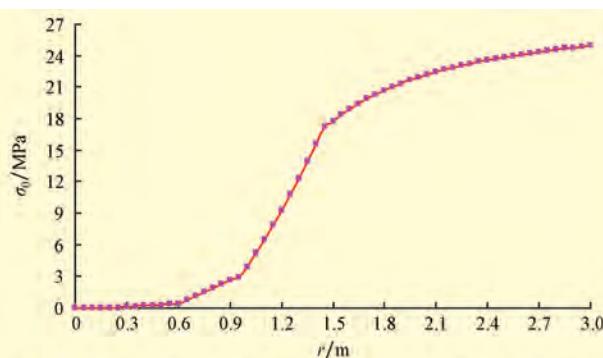


图2 井壁围岩径向应力沿井眼半径方向的变化曲线  
Fig.2 Variation of wellbore wall radial stress along the direction of well radius

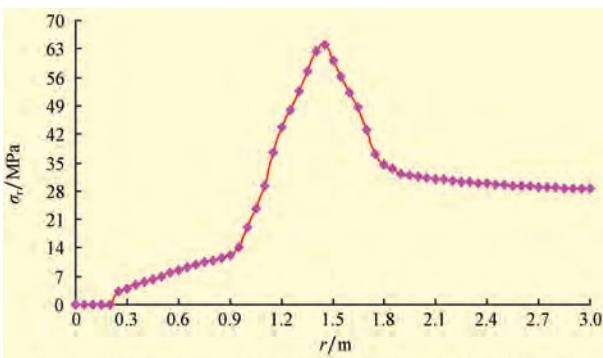


图3 井壁围岩切向应力沿井眼半径方向的变化曲线  
Fig.3 Variation of wellbore wall tangential stress along the direction of well radius

同损伤程度岩体的材料参数,对不同区域岩体进行了应力场计算分析。

2) 确定了套管错断口处井壁周围岩体失稳破坏区和损伤区的范围,并得出了岩体发生失稳破坏和损伤的边界应力条件,对井壁稳定性的研究和吐岩块的治理有一定的参考价值。

3) 笔者的研究建立在均匀地应力的基础上,可尝试在非均匀地应力条件下对套管错断口井壁岩体应力场进行更深入的研究。

## 参 考 文 献

- [1] 尹中民, 武强, 刘建军, 等. 注水井泄压对井壁围岩应力场的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 363-368.  
Yin Zhongmin, Wu Qiang, Liu Jianjun, et al. Numerical simulation of geo-stress distribution during injecting well blowout [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 363-368.
- [2] 李敬元, 李子丰. 渗流作用下井筒周围岩石内弹塑性应力分布规律及井壁稳定条件[J]. 工程力学, 1997, 14(1): 131-137.  
Li Jingyuan, Li Zifeng. Rock elastic-plastic stresses around a wellbore and wellbore stability under permeation osmosis [J]. Engineering Mechanics, 1997, 14(1): 131-137.
- [3] 冯福平, 艾池, 刘国勇, 等. 渗流作用下套管错断口岩石损伤破坏半径计算[J]. 大庆石油学院学报, 2008, 32(4): 38-41.  
Feng Fuping, Ai Chi, Liu Guoyong, et al. Calculation of rock damage radius in casing broken part under seepage [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2008, 32(4): 38-41.
- [4] 李忠华, 潘一山. 考虑损伤和孔隙压力的油井井壁稳定条件[J]. 钻采工艺, 2002, 25(1): 27-29.  
Li Zhonghua, Pan Yishan. Stable condition of sidewall considering damage and pore pressure [J]. Drilling & Production Technology, 2002, 25(1): 27-29.
- [5] 蒋斌松, 张强, 贺永年, 等. 深部圆形巷道破裂围岩的弹塑性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 982-986.  
Jiang Binsong, Zhang Qiang, He Yongnian, et al. Elastoplastic analysis of cracked surrounding rocks in deep circular openings [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 982-986.
- [6] 李忠华, 宫福海, 潘一山. 基于损伤理论的圆形巷道围岩应力场分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊2): 160-163.  
Li Zhonghua, Guan Fuhai, Pan Yishan. Analysis of stress field of rock surrounding circular roadway based on damage theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (Supplement 2): 160-163.
- [7] 代立强. 注水导致套管损坏机理及力学模型研究[D]. 北京: 中国科学院渗流流体力学研究所, 2003.  
Dai Liqiang. Theory of the mechanism of oilwell casing collapse caused by injecting water and its mechanical models [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, 2003.

## 4 结 论

1) 将套管错断口周围井壁岩体分为失稳破坏区、损伤区和弹性区,考虑孔隙和渗流作用,结合不