

# 出砂水平井近井塑性区出砂半径预测研究

董长银<sup>1</sup>, 王爱萍<sup>2</sup>

- (1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266555;  
2. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:** 基于地层岩石弹塑性变形理论, 建立出砂水平井近井塑性区应力分布模型. 根据弹性区与塑性区边界应力连续的原理, 提出水平井弹塑性区边界即塑性出砂半径的预测模型与方法, 分析了出砂水平井近井塑性区应力分布规律及出砂半径的敏感性因素. 结果表明: 水平井塑性应力分布及出砂半径与原始主应力关系、井周角、井斜方位角、流压等参数有直接关系; 塑性出砂半径随井周角的变化规律与原始垂向主应力和最大水平主应力的大小关系有关, 当最大水平主应力较大时, 井周铅垂方向的出砂半径大于水平方向的出砂半径, 即铅垂方向更容易出砂, 当垂向主应力较大时则相反; 随着井斜方位角变化出砂半径呈周期性变化, 在原始水平最大主应力  $\sigma_H$  大于垂向主应力  $\sigma_v$  的情况下, 井斜方位角为  $0^\circ$  和  $180^\circ$  时, 水平方向出砂半径较大, 更容易出砂; 井斜方位角为  $90^\circ$  和  $270^\circ$  时, 铅垂方向更容易出砂; 由于岩石力学参数及地应力的非均质性分布, 水平井出砂半径沿着井身轨迹方向也表现出明显的非均质性.

**关键词:** 水平井; 塑性区; 应力分布; 出砂预测; 出砂半径; 模型

**中图分类号:** TE 355      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1964(2012)04-0663-06

## Distribution of plastic stress near wellbore and prediction of sanding radius for sanding horizontal wells

DONG Chang-yin<sup>1</sup>, WANG Ai-ping<sup>2</sup>

- (1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266555, China;  
2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Northwest, PetroChina, Lanzhou, Gansu 730020, China)

**Abstract:** Based on the rock elastic and plastic deformation mechanisms, a systematic formation stress distribution model was evolved to study the plastic zone in sanding horizontal wells. According to the principle that the stress keeps continuous at the boundary between the elastic and plastic zones, a new model for the plastic sanding radius, which is the real boundary of elastic and plastic zones, for sanding horizontal wells was proposed. Using this model, the factors affecting the distribution of stress in plastic zone near a sanding horizontal well and the corresponding sanding radius were analyzed. The results show that in a sanding horizontal well, the plastic stress distribution and sanding radius are related to the prime principal stress, circumferential angle, drift azimuth and bottom hole flowing pressure. The relationship between plastic sanding radius and circumferential angle is directly affected by the relative magnitudes of the prime maximum horizontal principal stress and vertical principal stress. In case of high horizontal principal stress, the sanding radius in vertical direction is higher than that in horizontal direction, which means more severe sanding in vertical direction. In the case of high

收稿日期: 2011-11-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA09Z351); 国家自然科学基金项目(50704035)

作者简介: 董长银(1976—), 男, 河南省卫辉市人, 副教授, 博士, 从事防砂完井、水平井开采方面的研究.

E-mail: dongcy@upc.edu.cn      Tel: 0532-86981910

vertical principal stress, the law reverses correspondingly. The sanding radius varies periodically with drift azimuth. In a horizontal well with drift azimuth of  $0^\circ$  and  $180^\circ$ , the sanding radius keeps higher in horizontal direction than vertical, which means more severe sanding tendency. In case of  $90^\circ$  and  $270^\circ$  drift azimuth, the sand will be produced more seriously from vertical direction. Additionally, due to the heterogeneity distribution of rock property along wellbore trajectory, the distribution of stress and sanding radius reveal the same heterogeneity distribution characteristics.

**Key words:** horizontal well; plastic zone; stress distribution; sanding prediction; plastic sanding radius; model

水平井已广泛应用于陆地及海上疏松砂岩油气藏开发,出砂同样是疏松砂岩油气藏水平井正常生产所面临的主要问题之一.对于已出砂的水平井,研究其出砂半径及其沿水平井井身轨迹的分布规律可以更直观地了解井底出砂状况.对于准确评价出砂程度和进行针对性的防砂施工具有重要指导意义.水平井出砂的实质是近井岩石在地应力作用下达到岩石塑性破坏条件从而发生塑性破坏,在近井地带形成塑性出砂区,最终离散砂在流体携带作用下进入井筒造成出砂.近年来,关于油气井出砂预测的研究主要集中在垂直井中,部分学者对于水平井出砂开展了初步研究<sup>[1-9]</sup>,但主要集中在经验出砂预测、弹性区应力分布<sup>[4,7,9]</sup>、临界生产压差预测<sup>[2,5,8]</sup>及实验模拟<sup>[3,6]</sup>研究方面;而关于水平井近井塑性区应力分布,尤其是水平井塑性出砂半径的预测研究基本属于空白.笔者根据地层岩石弹塑性变形理论,建立出砂水平井近井塑性区应力分布模型;基于弹塑性区交界应力连续原理,研究建立水平井弹塑性区交界半径即塑性出砂半径的预测模型和方法,并进行水平井出砂规律分析.

## 1 出砂水平井近井塑性区应力分布模型

采用类似于垂直井出砂预测的研究方法,将已出砂的水平井近井地带分为近井塑性区、弹塑性过渡区和外部弹性区共 3 个区域,如图 1 所示.将弹塑性过渡区外半径  $r_c$  视为塑性出砂半径,根据连续性原理,在各区域边界  $r_b$  和  $r_c$  处,应力保持连续.分别建立弹性区、塑性区的应力分布模型,便可求解得到各区域边界半径及塑性出砂半径.

假设条件:

- 1) 地层岩石各向同性、均质,孔隙内充满流体;
- 2) 圆柱状地层与水平井同轴;
- 3) 忽略套管射孔对应力分布的影响.

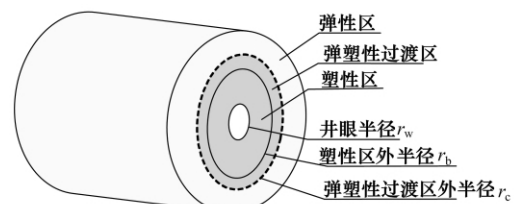


图 1 出砂水平井近井弹塑性区域划分  
Fig. 1 Sketch map of plastic and elastic zone in sanding horizontal well

### 1.1 出砂水平井外部弹性区应力分布模型

文献[8]研究了不出砂条件下柱坐标中水平井近井地带弹性区应力分布计算模型.对于出砂水平井,弹性区的内边界不再是井壁,而是塑性过渡区外半径;因此出砂水平井弹性区应力分布模型只需要将不出砂水平井近井弹性区应力计算模型中的井眼半径  $r_w$  及井底流压  $p_w$  分别换成弹塑性过渡区外半径  $r_c$  和孔隙压力  $p_c$  即可,如式(1)所示.

$$\begin{aligned} \sigma_r^e &= \frac{r_c^2}{r^2} \cdot p_c + \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \cdot \left(1 - \frac{r_c^2}{r^2}\right) + \\ &\quad \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cdot \left(1 + \frac{3r_c^4}{r^4} - \frac{4r_c^2}{r^2}\right) \cdot \cos 2\theta + \\ &\quad \delta \cdot \left[\frac{a}{2} \cdot \frac{1-2\nu}{1-\nu} \cdot \left(1 - \frac{r_c^2}{r^2}\right) - \phi\right] \cdot (p_c - p_p), \\ \sigma_\theta^e &= -\frac{r_c^2}{r^2} \cdot p_c + \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \cdot \left(1 + \frac{r_c^2}{r^2}\right) - \\ &\quad \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cdot \left(1 + \frac{3r_c^4}{r^4}\right) \cdot \cos 2\theta + \\ &\quad \delta \left[\frac{a}{2} \cdot \frac{1-2\nu}{1-\nu} \cdot \left(1 + \frac{r_c^2}{r^2}\right) - \phi\right] \cdot (p_c - p_p), \\ \sigma_z^e &= \sigma_{zz} - \nu \cdot \left[2(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \cdot \frac{r_c^2}{r^2} \cdot \cos 2\theta + \right. \\ &\quad \left. 4\sigma_{xy} \cdot \frac{r_c^2}{r^2} \cdot \sin 2\theta\right] + \\ &\quad \delta \left[\frac{a \cdot (1-2\nu)}{1-\nu} - \phi\right] \cdot (p_c - p_p), \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sigma_v, \\ \sigma_{yy} &= \sigma_H \cdot \sin^2 \beta + \sigma_h \cdot \cos^2 \beta, \\ \sigma_{zz} &= \sigma_H \cdot \cos^2 \beta + \sigma_h \cdot \sin^2 \beta, \end{aligned} \quad (2)$$

式中： $r$  为距井眼轴线距离，m； $\theta$  为柱坐标系下的极角，rad； $\beta$  为井斜方位角，rad； $\sigma_r^e, \sigma_\theta^e, \sigma_z^e$  分别为柱坐标系下弹性区径向、周向和轴向应力，MPa； $r_c$  为塑性过渡区外半径，m； $p_c$  为塑性过渡区外半径  $r_c$  处的孔隙流体压力，MPa； $p_p$  为位置  $r$  处的孔隙流体压力，MPa； $\nu$  为泊松比，无量纲； $a$  为 Biot 弹性系数，无量纲； $\delta$  为井壁渗透性系数，无量纲； $\phi$  为地层孔隙度，无量纲； $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$  为直角坐标系下正应力，MPa； $\sigma_v, \sigma_H, \sigma_h$  为分别为原始垂向、水平最大和水平最小主应力，MPa。

1.2 出砂水平井塑性区应力分布模型的建立

水平井近井地带弹性应力分布研究表明<sup>[7-8]</sup>，在弹性区水平井近井 3 个剪应力分量值都相对较小。为简化问题，将  $\sigma_{\theta z}$  的值忽略不计，一般有  $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$ ，将其代入 Mohr-Coulomb 准则方程得到

$$f = \sigma_\theta - \sigma_r \cdot \tan^2 \varphi + (\tan^2 \varphi - 1) \cdot a \cdot p - 2\tau_0 \cdot \tan \varphi = 0, \quad (3)$$

式中： $f$  为 Mohr-Coulomb 准则函数，MPa； $\sigma_\theta, \sigma_r$  为切向和径向应力，MPa； $\varphi$  为岩石内摩擦角，rad。

对式(3)分别关于  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  求导并代入塑性应变方程  $\epsilon_{ij}^p = K \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$ ，得到塑性区应变  $\epsilon_r^p, \epsilon_\theta^p, \epsilon_z^p$  的表达式

$$\begin{aligned} \epsilon_r^p &= K \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_r} = -K \cdot \tan^2 \varphi, \\ \epsilon_\theta^p &= K \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_\theta} = K, \\ \epsilon_z^p &= K \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_z} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

式中： $\epsilon_r^p, \epsilon_\theta^p, \epsilon_z^p$  为塑性区径向、切向和轴向应变，无量纲； $K$  为岩石切变模量，MPa。

由式(4)可得到

$$\epsilon_r^p + \epsilon_\theta^p \cdot \tan^2 \varphi = 0. \quad (5)$$

水平井近井地带总应变等于弹性区应变与塑性区应变之和，由式(5)可得到新的塑性区应变方程

$$\epsilon_r + \epsilon_\theta \cdot \tan^2 \varphi = \epsilon_r^e + \epsilon_\theta^e \cdot \tan^2 \varphi. \quad (6)$$

水平井近井地带弹性应力分布研究表明<sup>[8]</sup>，水平井弹性形变条件下，轴向应力  $\sigma_z^e$  基本保持不变，即可以认为轴向弹性应变是一个定值，其大小可用井壁处的轴向弹性应变值  $\epsilon_{zi}$  表示，即  $\epsilon_z^e \approx \epsilon_{zi}$ 。结合与应变-应力相关的胡克定律得到轴向应力计算公式

$$\sigma_z = E \cdot \epsilon_{zi} + \nu \cdot (\sigma_r + \sigma_\theta) + (1 - 2\nu) \cdot a \cdot p, \quad (7)$$

式中  $E$  为岩石弹性模量，MPa。

环柱状岩石的应力平衡方程为

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0. \quad (8)$$

应用地层应变-应力相关的胡克定律表示出的径向和轴向弹性应变  $\epsilon_r^e, \epsilon_\theta^e$ ，代入式(4)，并联立轴向应力方程式(7)，将  $\sigma_z$  换成  $\sigma_r, \sigma_\theta$  的表达式，再联立式(3)将  $\sigma_\theta$  换成  $\sigma_r$  的表达式，得到径向应力  $\sigma_r$  和周向应力  $\sigma_\theta$  的方程，再将其代入应力平衡方程式(8)，结合应力-位移方程得到关于位移函数  $u$  和  $r$  的一元二次微分方程，求积分得到位移函数  $u$  的表达式

$$2Gv = A_1 r^{\tan^2 \varphi} + A_2 r^{-\tan^2 \varphi} + A' r + A'' r \ln \frac{r}{r_w}, \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} A' &= \left[ \frac{2(1-2\nu)}{\tan^4 \varphi - 1} \cdot (1-\alpha) + \frac{\tan^2 \varphi}{\tan^2 \varphi + 1} + \frac{1-2\nu}{\tan^2 \varphi - 1} \alpha - \nu \right] \cdot A^p + (1-2\nu) \cdot \\ &(1-\alpha) \cdot \left( p_w - A^p \cdot \ln \frac{r}{r_w} \right) - \\ &\frac{1-2\nu}{\tan^2 \varphi - 1} \cdot 2\tau_0 \cdot \tan \varphi - \nu \cdot 2G \cdot \epsilon_{zi}, \\ A'' &= (1-2\nu) \cdot (1-\alpha) \cdot A^p, \\ A^p &= 0.1 \cdot \frac{\mu q}{2\pi L_x k_p}, \end{aligned} \quad (10)$$

式中： $G$  为岩石体积模量，MPa； $A', A'', A_1, A_2$  为中间变量和系数； $L_x$  为水平井水平段长度，m； $k_p$  为塑性区渗透率， $\mu\text{m}^2$ ； $\mu$  为原油黏度，Pa·s； $q$  为油井产量， $\text{m}^3/\text{s}$ 。

发生塑性变形条件下，水平井井壁处径向应力满足

$$\sigma_r |_{r=r_w} = p_w. \quad (11)$$

得到位移函数  $u$  的方程后，根据应变-位移方程  $\epsilon_r^e = du/dr$  和  $\epsilon_\theta^e = u/r$ ，对位移函数  $u$  分别关于  $r$  求导，结合边界条件式(11)，最终得到水平井近井塑性区应力分布预测模型

$$\begin{aligned} \sigma_r^p &= p_w + a \cdot A^p \ln \frac{r}{r_w} + \frac{1}{t} \cdot \\ &(2\tau_0 \cdot \tan \varphi - a \cdot A^p) \cdot \left[ \left( \frac{r}{r_w} \right)^t - 1 \right], \\ \sigma_\theta^p &= \tan^2 \varphi \cdot (1-\alpha) \cdot p_w + \alpha p_w + \\ &a \cdot A^p \cdot \left( \ln \frac{r}{r_w} + 1 \right) + \\ &\frac{1}{t} (2\tau_0 \cdot \tan \varphi - a \cdot A^p) \cdot \\ &\left[ (t+1) \cdot \left( \frac{r}{r_w} \right)^t - 1 \right], \\ \sigma_z^p &= \nu \cdot (\tan \varphi + 1) \cdot (1-a) \cdot p_w + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [2\nu \cdot (1-a) + a] \cdot \left( ap_w + aA^p \cdot \ln \frac{r}{r_w} \right) + \\ & \nu \cdot aA^p + \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{1-\nu} \cdot (\sigma_{zi} - ap_p) + \\ & \frac{\nu}{t} \cdot (2\tau_0 \cdot \tan\varphi - aA^p) \cdot \\ & \left[ (t+2) \cdot \left( \frac{r}{r_w} \right)^t - 2 \right], \end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $\epsilon_{ij}^p$  为任意方向塑性应变,无量纲; $\sigma_{ij}$  为任意方向应力,MPa; $\sigma_r^p, \sigma_\theta^p, \sigma_z^p$  为塑性区径向、切向和轴向应力,MPa; $\sigma_{zi}$  为井壁处轴向应力,MPa; $\tau_0$  为岩石内聚力,MPa; $p$  为孔隙压力,MPa; $r_w$  为井眼半径,m; $p_w$  为井底流压,MPa; $t$  为中间变量, $t = \tan^2\varphi - 1$ .

## 2 水平井塑性出砂半径预测方法

根据图 1 所示的物理模型,建立塑性区(将过渡区归为塑性区)的地应力分布模型.在弹塑性过渡带与塑性区的边界  $r_b$  处,任意井周角下切向应力和轴向应力相等,即

$$\sigma_\theta^p = \sigma_z^p \quad (r = r_b). \quad (13)$$

引入过渡带半径函数

$$F_b(r) = \sigma_\theta^p - \sigma_z^p. \quad (14)$$

将式(12)中的  $\sigma_\theta^p$  和  $\sigma_z^p$  的表达式代入式(14),并令  $F_b(r) = 0$ ,满足该式的半径  $r$  即为塑性区半径  $r_b$ .由于难以导出  $r_b$  的显式计算表达式,需要采用试算法求解.需要注意的是,对于给定条件的出砂水平井,求解得到的塑性区半径  $r_b$  在井周方向上并非一常数,而是随井周角发生变化.

将弹塑性过渡区外半径  $r_c$  视为塑性出砂半径,根据建立的弹性区、塑性区的应力分布模型以及应力连续性原理,在弹塑性过渡带与弹性区的交界  $r_c$  处,满足

$$\begin{cases} \sigma_r^e = \sigma_r^p, \\ \sigma_\theta^e = \sigma_\theta^p \\ \sigma_z^e = \sigma_z^p. \end{cases} \quad (r = r_c), \quad (15)$$

使用径向应力连续条件,引入塑性出砂半径函数

$$F_c(r) = \sigma_r^e - \sigma_r^p. \quad (16)$$

将式(1)和式(12)中的  $\sigma_r^e$  和  $\sigma_r^p$  的表达式代入式(16),并令  $F_c(r) = 0$ ,满足该式的半径  $r$  即为塑性出砂半径  $r_c$ .由于难以导出  $r_c$  的显式计算表达式,需要采用试算法求解,计算步骤如下:

1) 给定出砂水平井的内、外边界条件,即井筒半径  $r_w$ 、井底流压  $p_w$ 、外边界半径  $r_e$  和静压  $p_r$ ;

2) 在  $[0^\circ, 360^\circ]$  之间设置井周角序列  $\theta_i$ ,在  $[r_w, r_e]$  之间从小到大设定半径序列  $r_i$ ;

3) 对于任一井周角序列  $\theta_i$ ,执行如下步骤计算相应的半径  $r_c$ ;

4) 取一个  $r_i = r_w + \Delta r$ ,计算  $r_i$  处的孔隙压力分布  $p$ ,使用弹性区应力分布方程式(1)计算  $r_i$  处的径向应力  $\sigma_r^e$ ;使用塑性区应力分布方程式(12)计算  $r = r_i$  处的径向应力  $\sigma_r^p$ ;

5) 如果  $|\sigma_r^e - \sigma_r^p| < \epsilon$  (允许误差),则  $r_i$  即为塑性出砂半径  $r_c$ ;否则,更换下一个  $r_{i+1}$ ,转 4);

6) 转 3),直到计算完毕全部井周角下的塑性出砂半径.

## 3 计算结果分析

某水平井水平段长 200 m,井眼半径为 0.125 m,水平最大主应力方位为  $120^\circ$ ,井斜方位为  $160^\circ$ ,地层孔隙度为 0.27,地层静压 13.58 MPa,原始水平最大、最小主应力分别为 29.38 MPa 和 21.43 MPa,原始垂向主应力为 22.05 MPa,岩石泊松比为 0.3,地层渗透率为  $1.5 \mu\text{m}^2$ ,假设地层塑性区渗透率为  $0.3 \mu\text{m}^2$ ,井底流压为 8.0 MPa.使用该井数据利用本文模型进行水平井出砂半径预测及分析.

### 3.1 出砂水平井近井弹塑性区应力分布特征

使用上述基础数据,使用本文模型计算得到该井井周角  $90^\circ$  方向的弹、塑性区应力随半径的变化规律,如图 2 所示.在切向应力  $\sigma_\theta$  曲线和轴向应力  $\sigma_z$  曲线的交点位置即为塑性区外半径  $r_b$ ;切向应力  $\sigma_\theta$  曲线和轴向应力  $\sigma_z$  曲线的共同拐点位置即为弹塑性过渡区外半径  $r_c$ .从井壁到塑性区外半径  $r_c$  的区域中,近井地带塑性应力呈上升趋势;进入弹性区后,井周应力分布恢复到弹性应力的分布规律.

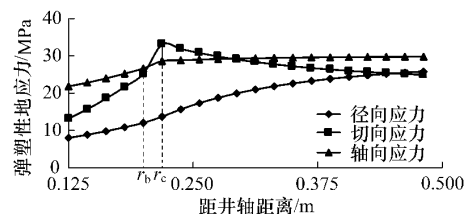


图 2 出砂水平井近井地应力分布及出砂半径的确定

Fig. 2 Stress distribution curves and sanding radius in sanding horizontal well

### 3.2 出砂水平井塑性出砂半径的敏感性分析

图 3a 为使用上述基础数据(原始水平最大主应力  $\sigma_H$  大于垂向主应力  $\sigma_v$ ) 计算得到的井周出砂半径分布.使用同样的数据,仅改变原始主应力关系,为了使  $\sigma_H < \sigma_v$ ,令  $\sigma_v = 25.87 \text{ MPa}$ , $\sigma_H = 22.38$

MPa, 计算得到的水平井出砂半径如图 3b 所示. 分析可知, 出砂水平井的出砂半径沿井周分布并非一个圆, 而是随井周角变化的类似椭圆形状. 并且出砂半径沿井周分布规律与原始垂向主应力和最大

水平主应力的大小关系有关. 当  $\sigma_H < \sigma_v$  时, 垂直方向的出砂半径大于水平方向的出砂半径, 即垂直方向更容易出砂; 当  $\sigma_v < \sigma_H$  时, 水平方向更容易出砂.

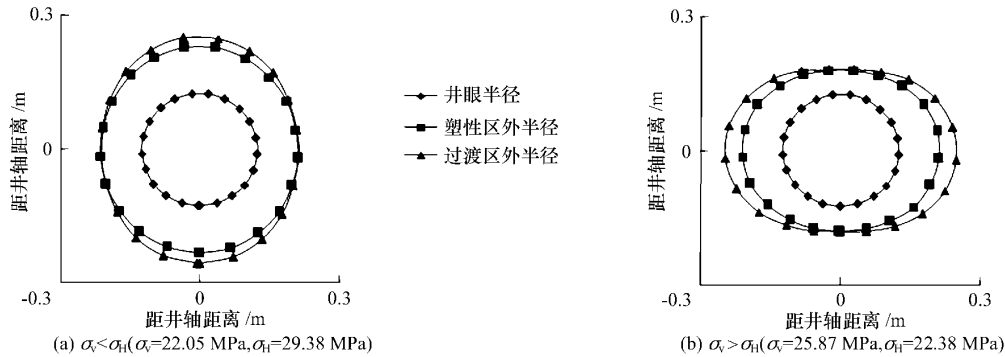


图 3 不同原始主应力关系下的水平井出砂半径分布

Fig. 3 Sanding radius distribution with circumferential angle under different principal stress

计算得到的水平井出砂半径随井底流压的变化规律如图 4 所示. 随着井底流压的降低, 塑性出

砂半径增大, 水平井出砂严重, 这与生产实践认识一致.

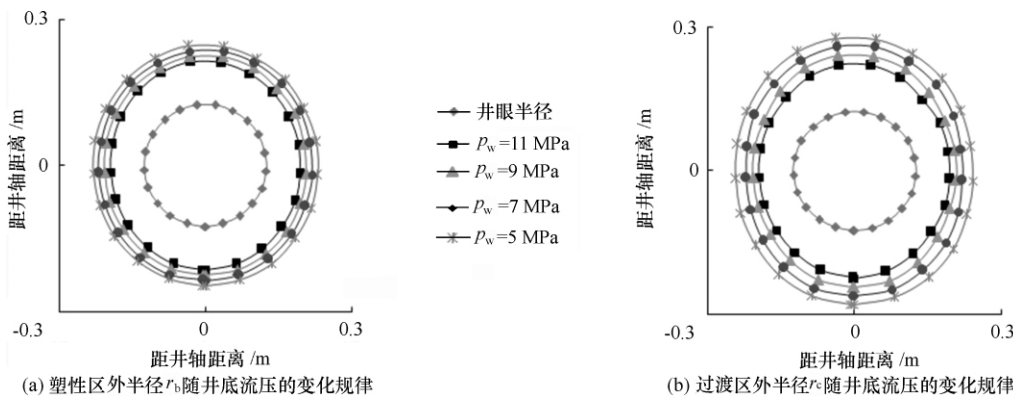


图 4 水平井出砂半径随井底流压变化规律

Fig. 4 Horizontal well sanding radius varying with bottomhole flowing pressure

为了研究同一地区水平井方位角对出砂的影响规律, 在原始水平最大主应力  $\sigma_H$  大于垂向主应力  $\sigma_v$  的情况下, 计算得到水平井出砂半径随井斜方位角的变化如图 5 所示.

砂; 井斜方位角为  $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$  时, 井周出砂半径比较接近, 即井筒周围倾向于均匀出砂.

### 3.3 水平井出砂半径随井身轨迹的变化规律

利用测井资料计算得到该井沿井身轨迹分布的地层岩石力学参数分布, 进而利用本文模型计算水平井井周角  $\theta = 0^\circ, \theta = 90^\circ$  方向出砂半径沿井深轨迹的分布如图 6 所示. 沿着水平井井身轨迹, 由于岩石力学参数及地应力的非均质性, 水平井出砂半径也表现出明显的非均质性.

本例中, 井周角为  $0^\circ$  位置处的出砂半径明显高于  $90^\circ$  处; 在井周角为  $0^\circ$ , 井深大约为 1 875 m 的井段位置处, 出砂半径较大, 即该井段处更容易出砂. 对于水平井防砂, 在搞清楚了出砂沿井身的分布规律后, 可针对水平井最容易出砂的部位进行防砂或者调整施工及生产参数, 已达到良好的防砂或控砂生产目的.

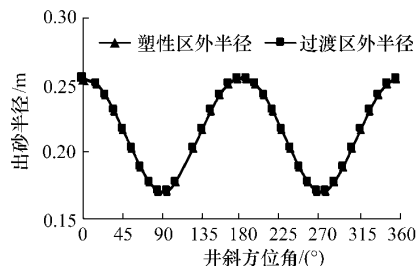


图 5 水平井出砂半径随井斜方位角的变化规律

Fig. 5 Relationship between horizontal well sanding radius and drift azimuth

随着井斜方位角变化, 出砂半径呈周期性变化. 井斜方位角为  $0^\circ, 180^\circ$  和  $360^\circ$  时, 水平方向出砂半径较大, 即水平方向更容易出砂; 井斜方位角为  $90^\circ$  和  $270^\circ$  时, 铅垂方向出砂半径较大, 更容易出

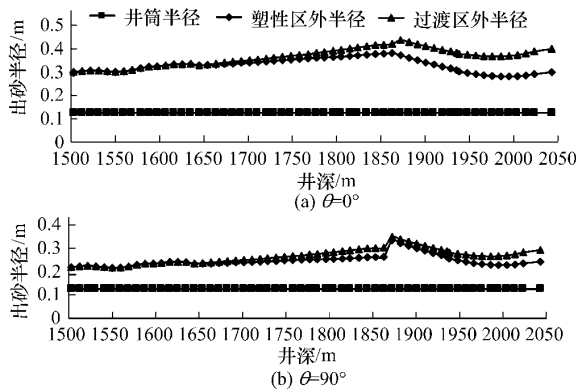


图 6 出砂半径随水平井井身轨迹的变化曲线  
( $\theta=0^\circ, \theta=90^\circ$ )

Fig. 6 Sanding radius distribution on wellbore trajectory of horizontal well ( $\theta=0^\circ, \theta=90^\circ$ )

#### 4 结 论

1) 出砂水平井近井地带分为塑性区、弹塑性过渡区和弹性区 3 个区域,弹塑性过渡区外半径即为塑性出砂半径。

2) 对于出砂水平井,近井地带地应力分布曲线上出现明显的转折,切向应力和轴向应力曲线的共同转折点位置即为弹塑过渡区外半径即塑性出砂半径;切向应力曲线和轴向应力曲线的交点位置即为塑性区外半径。近井塑性区内应力呈上升趋势,进入弹性区后,应力分布恢复到弹性应力分布规律。

3) 水平井塑性应力分布及出砂半径与原始主应力关系、井周角、井斜方位角、流压等参数有直接关系。塑性出砂半径随井周角的变化规律与原始垂向主应力  $\sigma_v$  和最大水平主应力  $\sigma_H$  的大小关系有关。当最大水平主应力  $\sigma_H$  较大时,井周铅垂方向的出砂半径大于水平方向的出砂半径,即铅垂方向更容易出砂;当垂向主应力  $\sigma_v$  较大时则相反。

4) 在同一地区,出砂水平井的塑性出砂半径随着井斜方位角呈周期性变化。在原始水平最大主应力  $\sigma_H$  大于垂向主应力  $\sigma_v$  的情况下,井斜方位角为  $0^\circ, 180^\circ$  时,水平方向出砂半径较大,即水平方向更容易出砂;井斜方位角为  $90^\circ, 270^\circ$  时,垂直方向更容易出砂。

5) 由于沿着水平井井身轨迹的岩石力学参数及地应力的非均质性分布,水平井出砂半径也表现出明显的非均质性。

#### 参考文献:

[1] 王艳辉,刘希圣.定向油气井出砂模型的建立与参数分析[J].石油大学学报:自然科学版,1995,19(增刊):60-65.  
WANG Yan-hui, LIU Xi-sheng. Analysis on stress

distribution in directional well and factors affecting on sand production[J]. Journal of the University of Petroleum, China; Edition of Natural Sciences, 1995, 19(Supp):60-65.

- [2] ALMEDEIJ J H, ALGHARAIB M K. Influence of sand production on pressure drawdown in horizontal wells: theoretical evidence[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2005, 47(3):137-146.
- [3] GILLIES R G, MCKIBBEN M J, SHOOK C A. Oil, water and sand flow experiments in a model horizontal well[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1995, 34(9):56-63.
- [4] 刘洪,刘向君,孙万里,等.水平井眼轨迹对气井出砂趋势及工作制度的影响[J].天然气工业,2006,26(12):103-105.  
LIU Hong, LIU Xiang-jun, SUN Wan-li, et al. How horizontal well trajectory affects the sand-producing tendency and working system of gas well[J]. Natural Gas Industry, 2006,26(12):103-105.
- [5] NOURI A, VAZIRI H, BELHAJ H, et al. Comprehensive transient modeling of sand production in horizontal wellbores[J]. SPE Journal, 2007, 12(4):468-474.
- [6] 秦积舜,王作颖.水平井出砂模拟试验研究[J].石油钻探技术,2008,28(4):34-36.  
QIN Ji-shun, WANG Zuo-ying. Experimental study on sand production in horizontal well[J]. Petroleum Drilling and Techniques, 2008,28(4):34-36.
- [7] 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[J].天然气技术,2010,4(1):58-60.  
ZHANG Wen-bo, ZHOU Peng-gao, LI Ya-shuang, et al. Effect of borehole stability in highly deviated wells under different in-situ stress fields[J]. Natural Gas Technology,2010,4(1):58-60.
- [8] 尉亚民,王爱萍,董长银,等.基于出砂特征半径的水平井出砂临界生产压差预测模型研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(2):85-90.  
WEI Ya-min, WANG Ai-ping, DONG Chang-yin, et al. New model for critical sanding pressure drawdown prediction in horizontal wells based on characteristic break radius[J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2011, 35(2):85-90.
- [9] HAN G, DUSSEAULT M B. Sand stress analysis around a producing wellbore with a simplified capillarity model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(7):1015-1027.

(责任编辑 姚志昌)