

油井出砂后期多级防砂技术级数研究

赵修太¹ 陈东明²

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266555; 2. 中国石油辽河油田公司 勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010)

摘 要:油井出砂是油田注水开发进入高含水期普遍存在的问题。针对现有的防砂方法在油井出砂后期存在防砂效果差、有效期短的问题,提出了油井出砂后期多级防砂技术,并在已有防砂技术的基础上,建立了油井出砂量模型、出砂临界压力模型和非均质性地层渗流模型来优化砾石充填的级数,系统研究了地层亏空半径、地层出砂量、砾石在亏空地层充填级数的确定因素,利用岩石力学和井壁稳定因素建立了一套完整的数学预测模型,为多级防砂技术在油田的推广和应用提供了理论依据。

关键词:油井; 出砂; 防砂; 砾石充填; 数学模型; GD1-18-7 井

中图分类号:TE358.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)01-0094-07

Multiple Sand Control Technology in Late Stage of Sand Production

Zhao Xiutai¹ Chen Dongming²

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, 266555, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Liaohe Oilfield Corporation, CNPC, Panjin, Liaoning, 124010, China)

Abstract: Sand production is a widespread problem for waterflooding oilfields with high water cut. For the problems of poor sand control results in existing methods and limited effective period, a multiple sand control technology was proposed. A new sand production model was developed based on the existing sanding control techniques. Critical drawdown pressure model and fluid flow model in heterogeneous formations was used to optimize gravel packing. In addition, formation voidage radius, sand production, number of gravel packing in voidage formation were studied systematically. A complete set of mathematical prediction model which was established using rock mechanics and borehole stability factors provides a theoretical basis for promotion and application of multi sand control techniques in oilfield.

Key words: oil well; sand production; sand control; gravel-packing; mathematical model; Well GD1-18-7

疏松砂岩在开发后期,由于地层受流体的冲刷及开发因素的影响,井筒周围亏空比较严重,机械防砂及化学防砂不适于这类地层亏空严重、高泥质粉细砂岩的情况。针对这一现象,提出了一种多级防砂挡砂的防砂工艺技术,在亏空地层中按照一定的级序逐一填入与地层砂粒径相匹配的石英砂或树脂涂敷砾石砂,在地层条件下经沉积、胶结后建立一个不同粒径的高渗透挡砂层墙壁,保护套管、减少地层的出砂量,保证油井的正常生产,降低人工举升设备的损坏和采出液的处理成本,达到提高油田最终采收率的目的。

对多级防砂级数进行研究与优化时,首先对地

层出砂半径、地层亏空的程度要有较为准确的预测,现在已有的各种预测模型和方法没有针对地层亏空程度进行系统完整的理论研究。为此,笔者系统研究了地层亏空半径、地层出砂量、砾石在亏空地层充填的级数的确定因素,利用岩石力学和井壁稳定因素建立了一套完整的数学预测模型。

收稿日期:2009-03-03; **改回日期:**2010-11-29

作者简介:赵修太(1958—),男,山东寿光人,1982年毕业于华东石油学院有机化工专业,教授,硕士生导师,现主要从事提高采收率方面的研究工作。

联系方式:(0532)86981173, zhaoxt1667@126.com

1 出砂量模型的建立及累积出砂量预测

1.1 油层出砂量预测模型的建立

岩石破坏遵循库仑-摩尔准则,在塑性膨胀条件下^[1]:

$$\frac{\partial v}{\partial r} + \xi \frac{v}{r} = \zeta \theta_l \left| \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right| \quad (1)$$

式中: θ_l 为液体剪切速率, s^{-1} ; ζ 为膨胀速度系数, $\zeta = 1.5 \exp(-0.25\sigma_r)$; ξ 为流型系数,对于平面径向流, $\xi = 1$,对于球形径向流, $\xi = 2$; v 为流体固相速度, m/s ; r 为径向距离, m 。

求解式(1),得到固相速度:

$$v = C/r^n \quad (2)$$

式中: n 为膨胀指数, $n = (\xi + \zeta \theta_l) / (1 - \zeta \theta_l)$, C 为积分常数。

对于出砂地层,假设液-固混合相的流动遵循达西定律,那么,液相与固相真实速度差可以用压力梯度分量来表示:

$$\phi(\bar{v} - v) = \lambda \frac{K_o}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (3)$$

式中: ϕ 为孔隙度; \bar{v} 为液相真实速度, m/s ; $\partial p / \partial r$ 为压力梯度, Pa/m ; λ 为压力梯度分量系数($\lambda \leq 1$),平面径向流时 $\lambda = 1$; K_o 为地层渗透率, μm^2 ; μ 为地层流体黏度, $mPa \cdot s$ 。

对于裸眼砾石充填或者套管预充填砾石筛管完井,假设油层完全被射开,井底附近没有流线的汇集,流体在井筒附近的流动形态可以看作是平面径向流。假设油层出砂半径(细小颗粒运移半径)为 r_s ,则在 $[r_w, r_s]$ 范围内地层有出砂,所以 $q_s \neq 0$;在 $[r_s, r_e]$ 范围内地层不出砂,所以 $q_s = 0$ 。考虑到地层流体处于稳定流动,则 q_l 为常数。

单位油层厚度单个射孔孔眼的产液量 q_l 和出砂量 q_s 可表示为:

$$q_l = 2\pi r \phi \bar{v}(r) \quad (4)$$

$$q_s = 2\pi r(1-\phi)v(r) \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入式(3),积分整理得到:

$$(1-\phi)q_l \int_{r_w}^{r_e} \frac{1}{r} dr - \phi \int_{r_w}^{r_s} q_s \frac{1}{r} dr = 2\pi\lambda(1-\phi) \frac{K_o}{\mu} \int_{p_w}^{p_e} dp \quad (6)$$

式中: r_w 为井眼半径, m ; r_e 为油层供给半径, m ; p_w 为井底压力, Pa ; p_e 供给半径处的地层压力, Pa 。

因为 $q_s = 2\pi r(1-\phi)v(r) = 2\pi r(1-\phi)C/r^n$,将其代入式(6)积分得:

$$C = \left[q_l \ln \frac{r_e}{r_w} - 2\pi\lambda \frac{K_o}{\mu} (p_e - p_w) \right] / \left[2\pi\phi(r_s^{1-n} - r_w^{1-n}) \right] \quad (7)$$

所以,在井底处油层的出砂量为:

$$q_s = \left| \frac{\phi}{(1-\phi)(1-n)} \right| \left(\frac{r_s}{r_w} \right)^{1-n} - 1 \left| \right|^{-1} \ln \frac{r_e}{r_w} \left| q_l - 2\pi\lambda \frac{K_o}{\mu} (p_e - p_w) / \ln \frac{r_e}{r_w} \right| \quad (8)$$

只有当油井生产压差大于临界压差时,油井才会出砂,所以流量 q_l 可以写成临界压差下的产液量 q_{cl} 与超出临界产液量的流量 Δq_l 之和。对于射孔完井的井,流动形态简化为平面径向流时,流量 q_l 的计算公式为:

$$q_l = \Delta q_l + \left[2\pi\lambda \frac{K_o}{\mu} (p_e - p_{wcl}) \right] / \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8),得:

$$q_s = \left| \frac{\phi}{(1-\phi)(1-n)} \right| \left(\frac{r_s}{r_w} \right)^{1-n} - 1 \left| \right|^{-1} \ln \frac{r_e}{r_w} \left| \Delta q_l + \left[2\pi\lambda \frac{K_o}{\mu} (p_e - p_{wcl}) \right] / \ln \frac{r_e}{r_w} \right| \quad (10)$$

从式(10)可以看出,当 $p_w = p_{wcl}$ 时,此时超出临界产液量的流量 $\Delta q_l = 0$,则存在 $q_s = 0$ 。因此,如果井底流压小于井底出砂临界压力,就不会出砂。

1.2 临界井底流压的确定

假设一垂直井钻穿一渗透性水平油层,油层岩石是具有各向同性的均质弹性体,孔隙被流体完全充满,忽略构造应力的影响^[2]。

对于圆柱形孔眼,其应力平衡方程为:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (11)$$

在外边界的水平和垂直方向上,应力有如下关系:

$$\sigma_{r0} = \frac{\delta}{1-\delta} \sigma_{z0} + \frac{1-2\delta}{1-\delta} \beta p_k \quad (12)$$

式中: r 为径向距离, m ; σ_r 为径向应力, Pa ; σ_θ 为周向应力, Pa ; σ_{r0} 、 σ_{z0} 分别为外边界水平应力和垂直应力, Pa ; δ 为岩石泊松比, β 为 Biot 常数; p_k 为孔隙压力, Pa 。

再假设地层中孔隙是连通的,则作用于岩石骨架上的有效应力等于正应力减去孔隙压力,因此井

壁上的有效应力为:

$$\begin{cases} \sigma_{ri} = (1-\beta)p_w \\ \sigma_{\theta i} = \frac{\delta}{1-\delta}\sigma_{zo} + \frac{1-2\delta}{1-\delta}\beta(p_k + p_w) - (1+\beta)p_w \\ \sigma_{zi} = \sigma_{zo} - \frac{1-2\delta}{1-\delta}\beta(p_k - p_w) - \beta p_w \end{cases} \quad (13)$$

式中: σ_{ri} 为井壁处的有效径向应力, Pa; $\sigma_{\theta i}$ 为井壁处的有效周向应力, Pa; σ_{zi} 为井壁处的有效轴向应力, Pa。

根据库伦-摩尔准则, 在井壁处:

$$r_m = \frac{\sigma_{\theta i} - \sigma_{ri}}{2} = \frac{\delta}{1-\delta}\sigma_{zo} + \frac{1-2\delta}{2(1-\delta)}\beta(p_k + p_w) - p_w \quad (14)$$

$$\begin{aligned} d &= \tau_o \cos\theta + \frac{\sigma_{\theta i} + \sigma_{ri}}{2} \sin\theta = \\ &\frac{\sin\theta}{2} \left(\frac{\delta}{1-\delta}\sigma_{zo} + \frac{1-2\delta}{1-\delta}\beta p_k - \frac{1}{1-\delta}\beta p_w \right) + \tau_o \cos\theta \end{aligned} \quad (15)$$

根据力学模型弹性解及库伦-摩尔准则, $r_m \geq d$ 时岩体处于极限状态或产生剪切破坏。令 $r_m = d$, 联立式(14)和(15)求解, 得到油井出砂的临界井底流压 p_{wcr} , 此时 $p_w = p_{wcr}$ 。

$$p_{wcr} = \frac{\frac{2\sigma_{zo}\delta + (1-2\delta)\beta p_k}{1-\delta} \sin\theta + 2\tau_o \cos\theta - \frac{2\sigma_{zo}\delta}{1-\delta} - \frac{1-2\delta}{1-\delta}\beta p_k}{\left| \frac{1-2\delta}{1-\delta}\beta - 2 + \frac{\sin\theta}{1-\delta}\beta \right|} \quad (16)$$

1.3 地层出砂半径的确定

假设条件: 1) 地层岩石具有各向同性、均质, 孔隙内充满流体; 2) 应变为平面应变, 仅为径向水平应变; 3) 圆柱状地层; 4) 忽略射孔对应力分布的影响。

钻井后井壁周围岩石的原始应力平衡状态遭到破坏, 产生应力集中, 并在井壁上产生最大和最小主应力(见图 1)^[3-4]。

由岩石力学可以得到:

$$(\lambda_0 + 2G) \frac{d}{dr} \left(\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} \right) + \beta_0 \frac{dp}{dr} = 0 \quad (17)$$

式中: β_0 为中间变量, $\beta_0 = 1 - C_r/C_f$; λ_0 为拉梅常数, $\lambda_0 = E\delta/[(1+\delta)(1-2\delta)]$; G 为岩石的剪切模量, $G = E/2(1+\delta)$, Pa; E 为岩石杨氏弹性模量, Pa; C_r 为岩石压缩系数, MPa^{-1} ; C_f 为岩石体积压缩系数, MPa^{-1} 。

由达西渗流定律可以得到压力梯度表达式为:

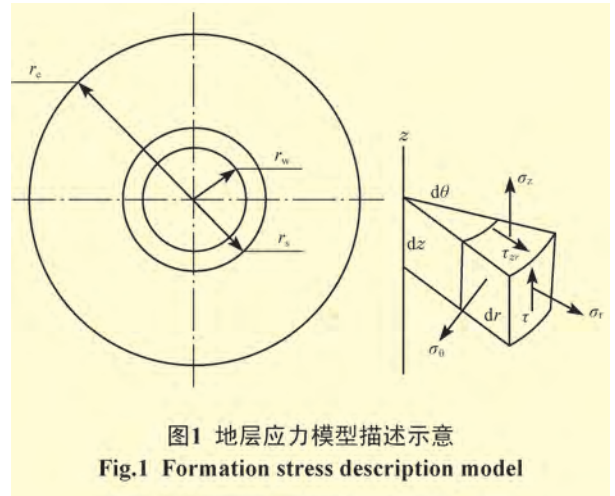


图1 地层应力模型描述示意

Fig.1 Formation stress description model

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu q}{2\pi h K r} \quad (18)$$

孔隙压力的应力-应变关系为:

$$\begin{cases} \sigma_r = \lambda_0 \Delta + 2G\epsilon_r + \beta_0 p_k \\ \sigma_\theta = \lambda_0 \Delta + 2G\epsilon_\theta + \beta_0 p_k \\ \sigma_z = \lambda_0 \Delta + 2G\epsilon_z + \beta_0 p_k \end{cases} \quad (19)$$

地层未钻开之前, 只发生垂向应变 ϵ_{zo} , 由 $\sigma_z = \lambda_0 \Delta + 2G\epsilon_z + \beta_0 p_k$ 可得:

$$\epsilon_{zo} = \frac{\sigma_{zo} - \beta_0 p_e}{\lambda_0 + 2G} \quad (20)$$

地层钻开后只发生径向应变, 故存在:

$$\begin{cases} \epsilon_r = du/dr \\ \epsilon_\theta = u/r \\ \epsilon_z = \epsilon_{zo} \end{cases} \quad (21)$$

式中: ϵ_r 为径向应变; ϵ_θ 为切向应变; ϵ_z 为垂向应变; $\Delta = \epsilon_r + \epsilon_\theta + \epsilon_z$; ϵ_{zo} 为井筒形成前的垂向应变; u 为径向位移, m。

1.3.1 弹性解

油层被钻开后, 井筒周围既可能处于弹性应力状态, 也可能处于弹性、塑性应力状态。对于胶结不好的砂岩, 近井地带必然处于塑性带, 塑性带以外则是弹性区。

设塑性带半径为 r_s , 弹、塑性交界处的边界条件为:

$$\begin{cases} (\sigma_r)_p = (\sigma_r)_e \\ (\sigma_\theta)_p = (\sigma_\theta)_e \\ (\sigma_z)_p = (\sigma_z)_e \end{cases} \quad (22)$$

式中: 下标 p 和 e 分别表示塑性和弹性。

联立式(17)~(22), 根据 Hencky 全塑性假设可知, 在弹、塑性交界处有 $\sigma_\theta = \sigma_z$, 可以得到:

$$\begin{cases} \sigma_r = -\frac{\beta_0 \mu q}{2\pi h K(1-\delta)} \left(\frac{\ln r}{2} + \frac{1-2\delta}{4} \right) + \frac{D_1}{2\delta} + \\ \frac{\delta}{1-\delta} (\sigma_{zo} - \beta_0 p_e) - D_2 \left(\frac{r_s}{r} \right)^2 + \beta_0 p_k \\ \sigma_\theta = -\frac{\beta_0 \mu q}{2\pi h K(1-\delta)} \left(\frac{\ln r}{2} - \frac{1-2\delta}{4} \right) + \frac{D_1}{2\delta} + \\ \frac{\delta}{1-\delta} (\sigma_{zo} - \beta_0 p_e) - D_2 \left(\frac{r_s}{r} \right)^2 + \beta_0 p_k \\ \sigma_z = \sigma_{zp} + \beta_0 (p_k - p_p) + \frac{\beta_0 \mu q}{2\pi h K(1-\delta)} \frac{\delta}{r} \ln \frac{r_s}{r} \end{cases} \quad (23)$$

式中: σ_{zo} 为油层上覆压力, Pa; $D_1 = (\sigma_{zp} + \beta_0 p_p) - (\sigma_{zo} - \beta_0 p_e) + \frac{\delta}{1-\delta} \frac{\beta_0 \mu q}{2\pi h K} \ln r_s$; $D_2 = (\sigma_{zp} + \beta_0 p_p) - \frac{D_1}{2\delta} - \frac{\delta}{1-\delta} (\sigma_{zo} - \beta_0 p_e) + \frac{\beta_0 \mu q}{2\pi h k(1-\delta)} \left(\frac{\ln r_s}{2} - \frac{1-2\delta}{4} \right)$; p_p 、 σ_{rp} 和 σ_{zp} 由塑性解得到。

1.3.2 塑性解

设弹、塑性的交界处半径为 r_s , 在 $r_w \leq r < r_s$ 范

$$\begin{cases} \sigma_r = p_w + \frac{\mu q}{2\pi h K_p} \ln \frac{r}{r_w} + \frac{1}{t} \left(2\tau_0 \tan a - \frac{\mu q}{2\pi h K_p} \right) \left[\left(\frac{r}{r_w} \right)^t - 1 \right] \\ \sigma_\theta = p_w + \frac{\mu q}{2\pi h K_p} \left(1 + \ln \frac{r}{r_w} \right) + \frac{1}{t} \left(2\tau_0 \tan a - \frac{\mu q}{2\pi h K_p} \tan^2 a \right) \left[(t+1) \left(\frac{r}{r_w} \right)^t - 1 \right] \\ \sigma_z = p_w + \frac{\mu q}{2\pi h K_p} \left(1 + \ln \frac{r}{r_w} \right) + \frac{1}{t} \left(2\tau_0 \tan a - \frac{\mu q}{2\pi h K_p} \tan^2 a \right) \left[(t+1) \left(\frac{r}{r_w} \right)^t - 1 \right] \end{cases} \quad (28)$$

式中: $t = \tan^2 a - 1$ 。

设塑性带的半径为 r_s , 由于弹塑性边界处应力必须是连续的, 式(23)和(28)使用连续条件 $\sigma_{rp}|_{r=r_s} = \sigma_{re}|_{r=r_s}$, 可以得到满足塑性带半径 r_s 的方程为:

$$-\frac{\beta_0 \mu q}{2\pi h K(1-\delta)} \left(\frac{\ln r_s}{2} - \frac{1-2\delta}{4} \right) + \frac{D_1}{2\delta} + \frac{\delta}{1-\delta} (\sigma_{zo} - \beta_0 p_e) - D_2 + \beta_0 p_p - p_w - \frac{\mu q}{2\pi h K_p} \ln \frac{r_s}{r_w} - \frac{1}{t} \left(2\tau_0 \tan a - \frac{\mu q}{2\pi h K_p} \right) \left[\left(\frac{r_s}{r_w} \right)^t - 1 \right] = 0 \quad (29)$$

1.4 油井累积出砂量的预测

通过临界井底流压、临界产量及油田的生产资料, 可确定油井以超过临界产液量生产的时间, 从而得到出砂时间段 $[T_0, T]$ 。再对时间进行积分得到累积出砂量。即得:

$$V_{\text{sand}} = \int_{T_0}^T h q_{\text{sw}} dt = \int_{T_0}^T h \left| \frac{\phi}{(1-\phi)(1-n)} \right| \left(\frac{r_s}{r_w} \right)^{1-n} - 1 \left| \right|^{-1} \ln \frac{r_e}{r_w} \Delta q_1 +$$

围内发生塑性变形。由式(21)可以得到轴对称的塑性力学问题平衡方程为:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (24)$$

假设钻开油层后只发生径向应变, 即 $\partial \tau_{rz} / \partial r = 0$, 由此可得:

$$r \partial \sigma_r / \partial r + \sigma_r - \sigma_\theta = 0 \quad (25)$$

在多孔介质中, 考虑孔隙压力时的库伦-摩尔准则可表示为:

$$\sigma_1 - p_k = 2\tau_0 \tan a + (\sigma_3 - p_k) \tan^2 a \quad (26)$$

式中: a 为岩石的破坏角, $a = \pi/4 + \theta/2$, ($^\circ$)。

其屈服函数为:

$$f = \sigma_\theta + (\tan^2 a - 1) p_k - \sigma_r \tan^2 a - 2\tau_0 \tan a = 0 \quad (27)$$

根据 Hencky 全塑性假设, 在弹、塑性交界处有 $\sigma_\theta = \sigma_z$, 由边界条件 $\sigma_r|_{r=r_w} = p_w$, 联立式(25)~(27)求解, 可以得到:

$$2\pi\lambda \frac{K_o}{\mu} (p_w - p_{\text{wcl}}) / \ln \frac{r_e}{r_w} \Big| dt \quad (30)$$

地层实际出砂量可以根据预测的出砂量进行系数校正, 根据现场经验得出校正系数 ξ_0 为 1.3~1.5, 则实际出砂量 $V_{\text{real}} = \xi_0 V_{\text{sand}}$ 。

对于单一油层, 假设地层出砂均匀且连续, 地层亏空的半径为 R_{sand} , 出砂地层厚度为 h , 根据累积出砂量 $V_{\text{sand}} = \pi R_{\text{sand}}^2 h$ 可以求出地层亏空深度为:

$$R_{\text{sand}} = \sqrt{V_{\text{real}} / \pi h} = \sqrt{\xi_0 V_{\text{sand}} / \pi h} \quad (31)$$

2 多级防砂砾石充填层渗透率及充填级数的确定

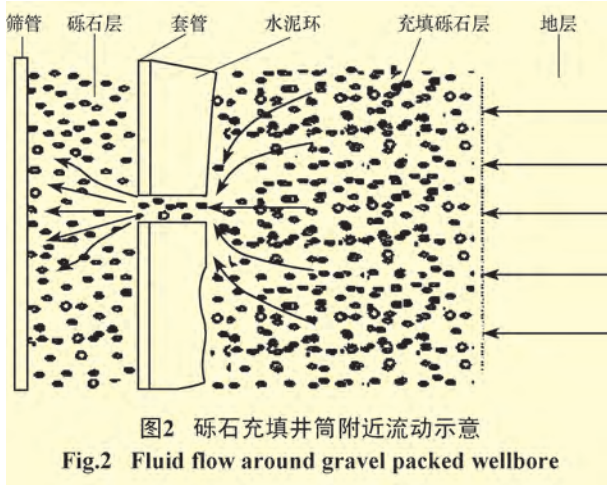
2.1 多级防砂充填层渗透率的确定

砾石充填后, 若忽略油水的黏度差或油井的含水率较低, 则流体的流动可以看作单相流, 在流体流动过程中, 由供给边缘向井底的流动分为 4 部分^[5-7]: 1) 供给边缘到井筒附近的径向流; 2) 炮眼孔眼附近的球面向心流; 3) 通过射孔孔眼的单向流;

4)井筒内由射孔孔眼到筛管的发散流(见图2)。总压降可表达为:

$$p_e - p_w = (p_e - p_h) + (p_h - p_p) + (p_p - p_c) + (p_c - p_w) \quad (32)$$

式中: p_e 、 p_w 、 p_h 、 p_p 、 p_c 分别为供给边缘的压力、井底压力、孔眼附近球面向心流的压力、射孔孔眼流入端的压力和射孔孔眼流出端的压力, Pa。



由供给边缘到井筒附近的径向流的压降为:

$$\Delta p_1 = p_e - p_h = \frac{q_o B_o \mu}{2\pi h} \left(\frac{1}{K_o} \ln \frac{r_e}{r_d} + \frac{1}{K_{do}} \ln \frac{r_d}{r_{cl}} \right) \quad (33)$$

式中: q_o 为油井的地面产油量, m^3/s ; B_o 为地层油的体积系数; K_o 、 K_{do} 为流体在油层渗透率及砾石充填带的平均渗透率, μm^2 ; μ 为地下原油黏度, $Pa \cdot s$; h 为油层厚度, m ; r_e 为供给边缘半径, m ; r_d 为地层砾石充填带半径, m ; r_{cl} 为套管外水泥环外缘半径, m 。

通过炮眼附近的球面向心流区域的压降为:

$$\Delta p_2 = p_h - p_p = \frac{q_o B_o \mu}{2n_p h \pi K_{do}} \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_h} \right) + \frac{\beta_g \rho_o q_o^2 B_o^2}{12\pi^2 n_p^2 h^2} \left(\frac{1}{r_p^3} - \frac{1}{r_h^3} \right) \quad (34)$$

式中: n_p 为射孔密度, 孔/ m ; K_{do} 为砾石层的渗透率, μm^2 ; r_h 为球面向心流供给边缘半径, 近似取沿套管轴线方向相邻两射孔距离之半, 即 $r_h = 180/(n_p \theta_0)$, m ; θ_0 为射孔相位角, ($^\circ$); ρ_o 为地层油的密度, kg/m^3 ; β_g 为砾石层的紊流系数, m^{-1} 。

通过射孔孔眼的单向流的压降为:

$$\Delta p_3 = p_p - p_c = \left[\frac{\mu}{K_{do}} \frac{q_o B_o}{n_p h \pi r_p^2} + \beta_g \rho_o \left(\frac{q_o B_o}{n_p h \pi r_p^2} \right)^2 \right] (r_{cl} - r_{c2}) \quad (35)$$

式中: r_{c2} 为套管内半径, m ; r_p 为射孔孔眼半径, m 。

胶结地层的紊流系数 $\beta_g = 1.906 \times 10^7 K_o^{-1.201}$; 非胶结砾石充填层的紊流系数 $\beta_g = 1.08 \times 10^6 K_o^{-0.55}$ 。

井筒内由射孔孔眼到筛管的锥形流区域的压降为:

$$\Delta p_4 = p_c - p_w = \frac{r_{c2} - r_o}{r_z - r_p} \left[\frac{q_o B_o \mu}{\pi n_p h K_{do}} \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_z} \right) + \frac{\beta_g \rho_o q_o^2 B_o^2}{3\pi^2 n_p^2 h^2} \left(\frac{1}{r_p^3} - \frac{1}{r_z^3} \right) \right] \quad (36)$$

令: $S_d = \frac{K_o}{K_{do}} \ln \frac{r_d}{r_{cl}}$, $D_s = \beta_g \rho_o \frac{B_o^2}{3n_p^2 h^2 \pi^2} \frac{r_{c2} - r_o}{r_z - r_p}$, $\left(\frac{1}{r_p^3} - \frac{1}{r_z^3} \right)$, $S_{dp} = \frac{K_o}{n_p K_{do}} \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_h} \right)$, $S_p = \frac{K_o}{n_p K_{do}} \frac{r_{cl} - r_{c2}}{r_p^2}$, $S_s = \frac{2K_o}{n_p K_{do}} \frac{r_{c2} - r_o}{r_p r_z}$, $D_{dp} = \beta_g \rho_o \frac{\beta_o^2}{12n_p^2 h^2 \pi^2} \left(\frac{1}{r_p^3} - \frac{1}{r_h^3} \right)$, $D_p = \beta_g \rho_o \frac{B_o^2}{n_p^2 h^2 \pi^2} \frac{r_{cl} - r_{c2}}{r_p^2}$, 可得:

$$\Delta p = \frac{\mu B_o}{2\pi K_o h} \left(\ln \frac{r_e}{r_d} + S_d + S_{dp} + S_p + S_s \right) q_o + (D_{dp} + D_p + D_s) q_o^2 = B q_o + A q_o^2 \quad (37)$$

式中: $B = (\mu B_o / 2\pi K_o h) [\ln(r_e/r_d) + S_d + S_{dp} + S_p + S_s]$; $A = D_{dp} + D_p + D_s$; S_d 为砾石充填防砂井的表皮系数; D_s 为套管内侧与筛管内侧之间的紊流项常数; S_{dp} 为炮眼孔眼附近的表皮系数; S_p 为套管内侧与水泥环外缘之间的表皮系数; S_s 为套管内侧与筛管内侧之间的表皮系数; D_{dp} 为炮眼孔眼附近的紊流项常数; D_p 为套管内侧与水泥环外缘之间的紊流项常数。

设一系列 q_o , 由式(37)计算一系列压降 Δp , 绘制 $q_o - \Delta p$ 曲线或给出压降直接由下式计算产量:

$$q_o = (-B + \sqrt{B^2 + 4A(p_e - p_w)}) / 2A \quad (38)$$

由此可以确定充填砾石带的渗透率 K_{do} :

1) 油井的设定产量为 q_o , 根据生产测井资料可以得知井底压力 p_w 和油藏压力 p_e , 因此由式(38)可以求出生产的总压降 Δp ;

2) 筛管到水泥环之间充填砾石的渗透率 K_{do} 可以通过实验室试验测得, 由油田的生产数据和油田作业数据可以得到该井的油层厚度、射孔孔眼半径、射孔密度、水泥环外径、套管内径、筛管外径, 由式(34)、(35)、(36)可以求得油井的供给边缘到射孔孔眼外边缘的压降 $\Delta p_1 = \Delta p - \Delta p_2 - \Delta p_3 - \Delta p_4$;

3) 由油层的生产数据可以得知油井的供液半径和油层的渗透率, 根据式(37)可得亏空地层充填

砾石的平均渗透率 \bar{K}_{do} 为:

$$\bar{K}_{do} = \frac{\mu K_o B_o q_o}{\left(2\pi h K_o \Delta p_1 - \mu B_o q_o \ln \frac{r_d}{r_{c1}}\right)} \ln \frac{r_d}{r_{c1}} \quad (39)$$

2.2 多级防砂级数的确定

地层亏空区域经不同粒径的砾石分级充填后,井筒附近的渗流可以视为横向非均质地层径向流。对于将要充填的砾石建立如图 3 所示的模型,其中, L_{d1} 、 L_{d2} 、 L_{d3} 为从井筒开始由近及远砾石充填层的厚度,m; r_{d1} 、 r_{d2} 、 r_{d3} 、 r_d 为对应砾石充填层的半径,m; K_{d1} 、 K_{d2} 、 K_{d3} 为对应砾石充填层的渗透率, μm^2 ;对于平面径向流,有:

$$\bar{K}_{do} = \ln(r_d/r_{c1}) \bigg/ \left[\frac{\ln(r_{d1}/r_{c1})}{K_{d1}} + \frac{\ln(r_{d2}/r_{d1})}{K_{d2}} + \dots + \frac{\ln(r_d/r_{d_{n-1}})}{K_{d_n}} \right] = \ln(r_d/r_{c1}) \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{\ln(r_{di}/r_{di-1})}{K_{di}} \quad (40)$$

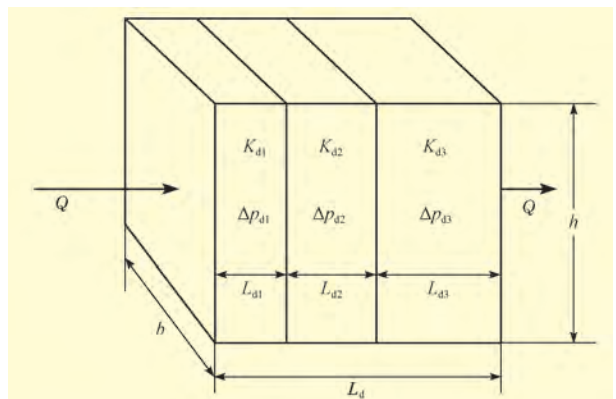


图3 砾石充填层渗流微观模型

Fig.3 Microscopic fluid flow model in gravel packing zone

地层亏空半径与各级砾石充填的厚度满足以下条件:

$$r_d = r_{c1} + \sum_{i=1}^n L_{di} \quad (41)$$

1) 当充填级数 $n=2$ 时:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{K}_{do} &= \ln(r_d/r_{c1}) \bigg/ \left[\frac{\ln(r_{d1}/r_{c1})}{K_{d1}} + \frac{\ln(r_d/r_{d1})}{K_{d2}} \right] \\ r_{d1} &= r_{c1} + L_{d1} \\ r_d &= r_{d1} + L_{d2} \\ L_{d1} + L_{d2} &= r_d - r_{c1} \end{aligned} \right. \quad (42)$$

求解式(42)可得二级砾石充填时各级砾石的半径及厚度。

2) 当充填级数 $n=3$ 时:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{K}_{do} &= \ln(r_d/r_{c1}) \bigg/ \left[\frac{\ln(r_{d1}/r_{c1})}{K_{d1}} + \frac{\ln(r_{d2}/r_{d1})}{K_{d2}} + \frac{\ln(r_d/r_{d2})}{K_{d3}} \right] \\ r_{d1} &= r_{c1} + L_{d1} \\ r_{d2} &= r_{d1} + L_{d2} \\ r_d &= r_{d2} + L_{d3} \\ L_{d1} + L_{d2} + L_{d3} &= r_d - r_{c1} \end{aligned} \right. \quad (43)$$

求解式(43)就可以得出三级砾石充填各级砾石的半径及厚度。

3) 当 $n=4$, 即充填级数为 4 级时, 计算方法同上。

3 应用实例

取胜利油田孤岛采油厂出砂井 GD1-18-7 井的岩心数据和油藏生产测试时的基本数据, 根据经验公式计算得 $\sigma_{zo} = 30.53 \text{ MPa}$ 。其他基本数据为: 油层中部深度 1 440 m, 原始地层压力 13.35 MPa, 地层孔隙压力 12.12 MPa, 井底压力 7.85 MPa, 原油黏度 70 mPa·s, 原油密度 0.96 kg/L, 油层渗透率 $2 \mu\text{m}^2$, 油层孔隙度 30.15%, 油层有效厚度 8 m, 体积系数 1.13, 岩石泊松比 0.12, 岩石压缩系数 $4 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$, 岩石体积压缩系数 $5 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$, 地层供液半径 100 m, 套管外水泥环半径 0.214 m, 套管内径 0.157 m, 筛管半径 0.076 m, 射孔孔眼半径 0.006 5 m, 射孔相位角 60° , 射孔密度 14 孔/m, 砾石层渗透率 $25 \mu\text{m}^2$, 内摩擦角 35.5° , 流型系数 1, 膨胀指数 2, Biot 常数 1, 压力梯度分量系数 1。

利用前面的计算公式计算得该井临界井底流压为 9.40 MPa、临界压差为 3.95 MPa、临界产量为 $75.20 \text{ m}^3/\text{d}$, 并预测了该井产液量为 80、100 m^3/d 时的出砂量, 结果见表 1。

表 1 GD1-18-7 井出砂预测结果
Table 1 Sanding prediction of Well GD1-18-7

产液量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	出砂半径/ m	出砂量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$		误差, %
		预测	实际	
80	0.31	0.35	0.31	13
100	0.45	0.48	0.54	11

根据砾石充填防砂井产能预测的计算公式可以得到, 流体由供给边界向井底流动过程中, 供给边缘到井筒附近的径向流、炮眼孔眼附近的球面向心流、通过射孔孔眼的单向流和井筒内由射孔孔眼到筛管的发散流四部分产生的压降(见表 2)。计算了该井

在不同产液量下的亏空半径、亏空带砾石的平均渗透率、充填级数和各级的长度,结果见表 3。

表 2 不同产液量下砾石充填时各部分的压降
Table 2 Pressure drop at different production rate under gravel packing

项目	不同产液量下的压降/MPa	
	80 m ³ /d	100 m ³ /d
地层至井筒	3. 75	4. 10
孔眼外向心流	0. 14	0. 18
孔眼内单向流	0. 95	1. 20
筛套环形空间	0. 02	0. 03
预测总压降	4. 87	5. 51
实际总压降	4. 20	5. 85

表 3 不同产量下亏空地层砾石充填的级数与半径
Table3 Voided gravel series and radius at different production rate

产液量/m ³ · d ⁻¹	亏空带砾石平均渗透率/μm ²	地层亏空半径/m	充填级数	砾石段 1 长度/m	砾石段 2 长度/m	砾石段 3 长度/m
80	20	2. 4	2	1. 2	1. 0	
100	18	4. 3	3	2. 0	1. 3	0. 8

生塑性变形,其直径随流速的增大而增大。因此必须控制生产速度,将塑性带限制在一个合理的范围内。

4) 砾石充填的级数与充填半径根据油井的产量和生产时井底的压差来确定,根据油田现场充填防砂的情况和地层实际亏空的半径,最多不宜超过 4 级。

5) 根据地层出砂临界产量公式可知,流体黏度越大,出砂的临界流速越低,不同的油井,出砂的临界流速是不一样的。

参 考 文 献

[1] 丛洪良,盛宏至. 疏松砂岩油藏油井出砂量预测模型及应用[J]. 石油天然气学报,2006,28(2):120-122.
Cong Hongliang,Sheng Hongzhi. A mathematic model for predicting sand production in unconsolidated sandstone reservoirs and its application[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006,28(2):120-122.

[2] 王勤田,赵彦超,杨晶,等. 油井出砂临界井底流压计算模型及应用[J]. 江汉石油学院学报,2002,24(2):75-76.
Wang Qintian, Zhao Yanchao, Yang Jing, et al. Calculating model of critical bottomhole pressure of sand production and its application[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute,2002, 24(2):75-76.

[3] 段玉廷. 近井塑性带应力状态与地层损害关系[J]. 石油勘探与

4 结论与认识

1) 预测模型与真实情况比较接近,可以根据油井产量计算得到砾石充填的级数和各级的长度。

2) 地层出砂半径是在油层被钻开时,井壁周围发生弹塑性形变的过程中,井筒到岩石的塑性形变和弹性形变边界处的距离,与地层的亏空半径是不同的概念,后者是根据地层的累积出砂量来判断的,亏空半径为 $R_{\text{sand}} = \sqrt{\xi_0 V_{\text{sand}} / \pi h}$ 。

3) 对易出砂地层,当测试或生产速度超过出砂临界速度时,地层将坍塌破裂,造成储集层毁灭性破坏;生产速度低于临界速度时,近井带仍将发

开发,1998,25(1):76-79.
Duan Yuting. The relation of stress condition and formation damgage in near wellbore plastic area[J]. Petroleum Exploration and Development,1998,25(1):76-79.

[4] 董长银,武龙,汪天游,等. 气井水平井防砂产能预测与评价模型[J]. 石油钻探技术,2009,37(5):20-25.
Dong Changyin,Wu Long,Wang Tianyou,et al. An integrated model for productivity prediciton and evaluation of sand control horizontal gas wells[J]. Petroleum Drilling Techniques,2009, 37(5):20-25.

[5] 李爱芬,姚军,寇永强. 砾石充填防砂井产能预测方法[J]. 石油勘探与开发,2004,31(1):103-105.
Li Aifen, Yao Jun, Kou Yongqiang. A method of calculating productivity for gravel packed well[J]. Petroleum Exploration and Development,2004,31(1):103-105.

[6] 董长银,张琪,李志芬,等. 筛管砾石充填井筒附近压降计算方法[J]. 西安石油学院学报:自然科学版,2002,17(2):33-36.
Dong Changyin,Zhang Qi, Li Zhifen, et al. A new calculation method of the pressure drop around the wellbore of a gravel-packed perforated well[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute; Natural Science Edition,2002,17(2):33-36.

[7] 董长银,李志芬,张琪. 基于油井流入动态曲线的防砂井产能预测方法[J]. 石油钻探技术,2001,29(3):58-60.
Dong Changyin, Li Zhifen, Zhang Qi. A new productivity prediction model for sand contorl wells based on IPR curve[J]. Petroleum Drilling Techniques,2001,29(3):58-60.