

◀教授专家专栏▶

# 割缝衬管完井适度出砂临界缝宽研究

汪志明 杨芳 魏建光

(中国石油大学(北京) 石油天然气工程学院,北京 昌平 102249)

**摘要:**针对油田严重出砂的危害及现有防砂工艺存在的问题,指出了割缝衬管防砂的优越性及适度出砂割缝衬管缝宽设计的重要性。介绍了割缝筛管防砂的机理,建立了出砂的数学模型、割缝衬管表皮模型及割缝衬管防砂产能模型,基于模型比较了不同防砂程度情况下的增产比,提出了临界缝宽的概念。计算分析表明:采取防砂措施后,随着缝宽减小,产量减小,增产比降低;不同防砂程度相比较,得出了割缝衬管防砂临界缝宽;大于临界缝宽时,采取防砂措施时的产量和增产比比不防砂时高,而小于临界缝宽时,采取防砂措施时的产量和增产比比不防砂时低。

**关键词:**出砂;割缝衬管;衬管完井;裂缝宽度

**中图分类号:**TE925<sup>+</sup>.3    **文献标识码:**A    **文章编号:**1001-0890(2008)03-0001-04

严重出砂会导致地层堵塞,使油井产能下降,甚至导致油井报废<sup>[1-2]</sup>。从油田的防砂现状来看,现有防砂工艺技术基本能够满足生产要求,但也出现了一些难以解决的问题,如绕丝筛管防砂施工工艺复杂<sup>[3]</sup>、在斜井或套损井上防砂有效率低、在热采井上注汽后大量常温防砂工作液进入井筒和地层而影响了油井热采效率等。利用先进切割技术制成的割缝筛管不仅结构简单易处理,而且强度高,能满足高强度采液的要求。割缝衬管还可以防止松散的砂岩堵塞井眼,但其效果取决于控制出砂的程度。适度出砂能够增大产能,提高采收率,因此适度出砂割缝衬管缝宽的设计显得尤为重要。为此,笔者基于出砂数学模型、割缝衬管表皮模型及割缝防砂产能模型,比较了不同防砂程度与不防砂的增产比,提出了割缝衬管防砂临界缝宽的概念,解决了适度出砂度的问题。

## 1 割缝筛管防砂机理

割缝筛管的防砂机理是允许一定大小的、能被原油携带到地面的细小砂粒通过,而把较大的砂粒阻挡在筛管外面,使大砂粒在筛管外面形成“砂桥”,达到防砂的目的。为了形成砂桥或完井时阻止地层砂,而又不过分限制流通能力,需要知道地层砂的粒度,以便合理地确定割缝筛管的缝宽尺寸。

Abrams 在研究地层中颗粒运移时提出了著名

的 1/3 桥堵原理,即固相颗粒在地层孔喉处形成桥堵的条件是,颗粒尺寸为地层孔喉尺寸的 1/3,并用试验给予了证实。对于割缝筛管防砂来说,1/3 桥堵原理的实质是颗粒在割缝筛管表面的沉积,在一定条件下砂粒有可能垮塌,并随流体冲走。经过大量的试验研究,桥堵原理得到了修正和完善,提出了 1/3~2/3 架桥原理,即固相颗粒尺寸是孔喉尺寸的 1/3~2/3 时,能够形成稳定的砂桥。

从微观桥堵机理来看,“砂桥”稳定时,桥堵颗粒能够在筛管缝口牢固地相互嵌紧。由于“砂桥”处流速快,小砂粒不能停留在其中,所以“砂桥”具有很好的渗透性。砂粒的这种自然分选使“砂桥”具有良好的流通能力,同时又起到保护井壁骨架的作用。在 1/3~2/3 范围之外,小于 1/3 则砂粒过小,全部从缝口通过,被流体冲走,不能够形成“砂桥”;大于 2/3 则接近于单缝堵塞,当砂粒堵塞在缝口,剩余的空间很小,渗透率小,流通性差。以上两种情况都达不到防砂的目的。一般认为缝宽小于砂粒直径的 2 倍

收稿日期:2007-12-03;改回日期:2008-02-25

基金项目:教育部“长江学者和创新团队发展计划”项目(编号:IRT0411)资助

作者简介:汪志明(1964—),男,安徽黄山人,1985 年毕业于华东石油学院石油工程专业,1993 年获石油大学油气井工程专业博士学位,教授,博士生导师,主要从事井筒复杂流动与控制、现代完井工程方面的研究。

联系电话:(010)89734958

就可以形成“砂桥”<sup>[4]</sup>。

## 2 数学模型的建立

### 2.1 地层出砂数学模型

假定在一种饱和流体多孔介质中,体积单元为V,由固体骨架(用1表示)、液体(用2表示)和流化固相(用3表示)三部分组成,质量和体积分别为 $M_s$ 、 $M_f$ 、 $M_{ls}$ 和 $V_s$ 、 $V_f$ 、 $V_{ls}$ ,液体密度和流化颗粒密度与相应的岩石组成有关,分别设为 $\rho_f$ 和 $\rho_s$ ,固体基质压实可以忽略,液体与流化固相的速度相同,即 $v^{(1)}=0$ , $v^{(3)}=v^{(2)}=v$ 。

流体力学中,由输运公式可知质量守恒公式为<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\partial \rho^{(k)}}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho^{(k)} v^{(k)}) = j^{(k)} \quad (1)$$

式中, $k=1,2,3$ ; $j$ 为单位时间物质的变化量, $j^{(3)}=-j^{(1)}=m$ , $j^{(2)}=0$ ; $m$ 为固相颗粒流化速度; $\rho$ 为密度。

三相的局部密度分别为:

$$\rho^{(1)} = \frac{M_s}{V} = \rho_s \frac{V_s}{V} = \rho_s \frac{V - V_f - V_{fs}}{V} = (1 - \phi) \rho_s \quad (2)$$

$$\rho^{(2)} = \frac{M_f}{V} = \rho_f \frac{V_f}{V} = \rho_f \frac{\phi V - V_{fs}}{V} = (1 - c) \phi \rho_f \quad (3)$$

$$\rho^{(3)} = \frac{M_{ls}}{V} = \rho_s \frac{V_{ls}}{V} = \rho_s \frac{c \phi V}{V} = c \phi \rho_s \quad (4)$$

流化固相生成相本构方程为<sup>[6-7]</sup>:

$$\frac{m}{\rho_s} = \lambda (1 - \phi) c q \quad (5)$$

由以上可得出砂数学模型:

$$\frac{\partial(c\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (cq) = \frac{\partial\phi}{\partial t} \quad (6)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = \lambda (1 - \phi) c q \quad (7)$$

$$\nabla \cdot q = 0 \quad (8)$$

对径向不可压缩单相流:

$$\frac{\partial(c\phi)}{\partial t} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + q \frac{\partial c}{\partial r} \quad (9)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = \lambda (1 - \phi) c q \quad (10)$$

渗透率K的变化与孔隙度有关,常用公式为:

$$K = K_0 \exp\left(\frac{\phi - \phi_0}{1 - \phi_0}\right) \quad (11)$$

混砂液粘度与含砂体积分数的关系为:

$$\begin{cases} \mu = \mu_0 (1 + 2.5c) & c \leq 2.5\% \\ \mu = \mu_0 (1 + 2.5c + 14.4c^2) & c > 2.5\% \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\lambda$ 为砂液侵蚀系数, $\text{m}^{-1}$ ; $q$ 为渗流速度, $\text{m}/\text{s}$ ; $\phi$ 为孔隙度,无因次; $\phi_0$ 为初始孔隙度,无因次; $c$ 为含砂体积分数,无因次; $K_0$ 为初始渗透率, $\mu\text{m}^2$ ; $\mu_0$ 为原油初始粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

引入无因次量,用差分方法求解可得关于 $c$ 、 $\mu$ 、 $\phi$ 及 $K$ 的解,其中井壁含砂体积分数 $c_{\text{井壁}} = c(0, t)$ 。

### 2.2 割缝表皮模型

目前研究割缝表皮的学者很多<sup>[8-11]</sup>,笔者采用Furui<sup>[11]</sup>给出的模型。具体的表示式为:

$$s = s_{\text{fo}} + s_{\text{SL},r} K_0 / K \quad (13)$$

裸眼完井情况下,污染带产生的表皮系数为:

$$s_{\text{fo}} = (K_0 / K - 1) \ln(r_s / r_w) \quad (14)$$

由于径向流产生的表皮系数为:

当 $\gamma < v$ 时:

$$s_{\text{SL},r} = \frac{2}{m_s \delta} \ln\left(\frac{1 - \delta + 2l_s / w_s}{1 - \delta + l_s / w_s}\right) + \frac{2}{m_s} \left[ \frac{1}{\delta} \ln(1 - \delta + l_s / w_s) + \ln \frac{2\delta v}{l_s / r_w} \right] - \ln(1 + v) \quad (15)$$

当 $\gamma > v$ 时:

$$s_{\text{SL},r} = \frac{2}{m_s \delta} \ln\left(\frac{1 - \delta + 2l_s / w_s}{1 - \delta + l_s / w_s}\right) + \frac{2}{m_s \delta} \ln \frac{1 - \delta + l_s / w_s}{1 - \delta + l_s / (2vr_w)} + \frac{l_s / (\delta r_w)}{l_s / r_w - 2(1 - \delta)} \ln \left[ \left( \frac{\delta + l_s / 2r_w}{1 + v} \right) \left( 1 + \frac{2v(1 - \delta)}{l_s / r_w} \right) \right] - \ln [1 + l_s / (2\delta r_w)] \quad (16)$$

由于缝内堵塞产生的表皮:

$$s_{\text{SL},l} = \frac{2\pi}{m_s w_s \delta} \frac{t_1}{K_1 / K_0} \quad (17)$$

式中,下角fo表示裸眼污染带、SL表示割缝衬管、r表示径向流、l表示线性流; $r_w$ 为井筒半径, $\text{m}$ ; $l_s$ 为割缝衬管缝长, $\text{m}$ ; $l_u$ 为割缝单元长, $\text{m}$ ; $w_s$ 为缝宽, $\text{mm}$ ; $m_s$ 为割缝衬管一周割缝单元数,无因次; $t_1$ 为缝内堵塞深度, $\text{m}$ ; $v$ 为径向流半径, $v = \sin(\pi/m_s)$   
( $m_s \neq 1$ ), $v \approx 1.5$ ( $m_s = 1$ ),无因次; $\gamma$ 为轴向流半径, $\gamma = l_u / 2r_w$ ,无因次; $\delta = l_s / l_u$ ; $K_1$ 为缝内堵塞物渗透率, $\mu\text{m}^2$ ;笔者设堵塞割缝的是地层砂,则 $K_1 = K_0$ 。

### 2.3 割缝衬管防砂产能模型

根据达西定律,在供给边缘压力不变的圆形单层油藏中心一口井的产能公式为<sup>[12]</sup>:

$$Q = \frac{2\pi K h \Delta p}{\mu \left( \ln r_e / r_w + s - \frac{1}{2} \right)} \quad (18)$$

式中, $h$ 为油层厚度, $\text{m}$ ; $\Delta p$ 为生产压差, $\text{MPa}$ ; $r_e$ 为

供给半径, m。

假设流动砂悬浮于原油中, 不发生沉积现象, 并以混砂液的形式产出, 且流动砂和原油的速度相同, 混砂液流动符合达西定律。所以, 可以用式(18)计算产出的混砂液量。

根据研究情况定义, 当地面设施及其他影响因素允许 90% 的地层砂通过、即防砂程度  $\beta$  为 10% 时,  $w_s \leq 2D_{10}$ ; 允许 80% 的地层砂通过、即防砂程度  $\beta$  为 20% 时,  $w_s \leq 2D_{20}$ ; 依次类推, 当防砂程度  $\beta$  为  $n\%$  时,  $w_s \leq 2D_n$ 。此时, 实际上通过割缝筛管的地层砂应该小于  $1-n\%$ 。

笔者定义此时混砂液中的含砂体积分数为:

$$c_n = (1-n\%) c_{\text{井壁}} \quad (19)$$

由此可得出砂量的计算公式为:

$$Q_s = c_n Q \quad (20)$$

则产油量为:

$$Q_o = (1 - c_n) Q \quad (21)$$

不出砂时, 产量为:

$$Q'_o = \frac{2\pi K_0 h \Delta p}{\mu_0 (\ln r_e / r_w - \frac{1}{2})} \quad (22)$$

则增产比为:

$$R = Q_o / Q'_o \quad (23)$$

以不防砂时增产比为基准, 增产比大于等于不防砂时的增产比, 定义此时的防砂程度为临界防砂程度、缝宽为临界缝宽。

### 3 割缝衬管缝宽敏感性分析

以某一单位厚度稠油油藏为例。该油藏地层参数分别为: 初始孔隙度 30%, 初始含砂体积分数  $10^{-4}$ , 原油初始粘度  $6.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 初始渗透率  $1.5 \mu\text{m}^2$ , 供给半径 100 m, 井筒半径 0.12 m, 冲蚀系数  $10 \text{ m}^{-1}$ , 生产压差 5.0 MPa, 出砂半径 2.0 m。割缝筛管几何参数分别为: 一周割缝单元数  $m_s = 12$ , 缝长  $l_s = 0.08 \text{ m}$ , 割缝单元长  $l_u = 0.1 \text{ m}$ , 缝内堵塞深度  $t_l = 0.08 \times 10^{-2} \text{ m}$ 。缝宽根据对防砂程度的不同要求及砂粒直径的不同来确定, 不同防砂程度缝宽取值为<sup>[13]</sup>:  $\beta = 10\%、20\%、30\%、40\%、50\%、60\%、70\%$  和  $80\%$  时,  $w_s = 0.48、0.36、0.30、0.29、0.28、0.26、0.24$  和  $0.11 \text{ mm}$ 。计算结果如图 1~3 所示。

冲蚀系数  $\lambda = 12 \text{ m}^{-1}$ , 其他地层参数不变时, 计算结果如图 4 所示。

生产压差  $\Delta p = 8.0 \text{ MPa}$ , 其他地层参数不变

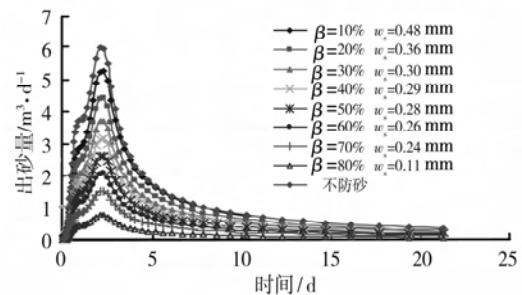


图 1 不同防砂程度下出砂量随出砂时间变化曲线

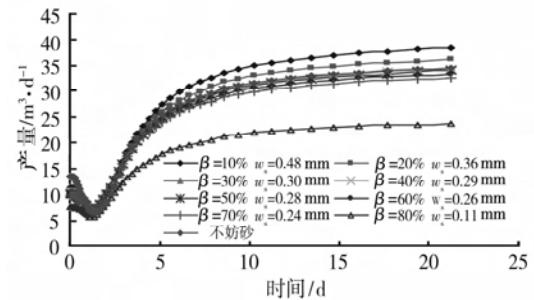


图 2 不同防砂程度下产量随出砂时间的变化曲线

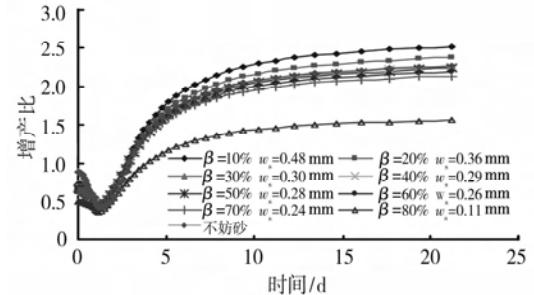


图 3 不同防砂程度下增产比随出砂时间变化曲线

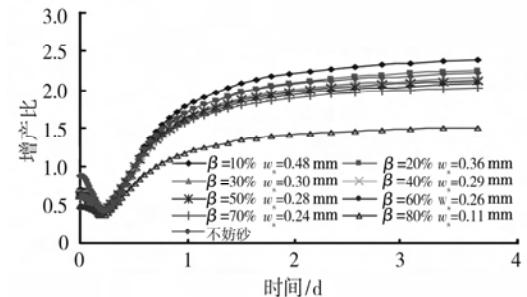


图 4 不同防砂程度下增产比随出砂时间变化曲线  
时, 计算结果如图 5 所示。

比较图 1、2、3 可知: 在出砂量达到最大时, 产油量达到最小; 随后, 出砂量逐渐变小并趋于稳定, 而产油量逐渐增大并趋于稳定; 在出砂量达到最大时, 增产比小于 1, 产能降低, 出砂量逐渐变小并趋于平稳时增产比大于 1, 产能增高。

从图 3 可看出: 在割缝筛管防砂条件下, 随着防砂量增大, 即筛管缝宽减小, 产油量逐渐减小, 增产比逐渐降低; 防砂与不防砂相比较, 防砂程度 30%

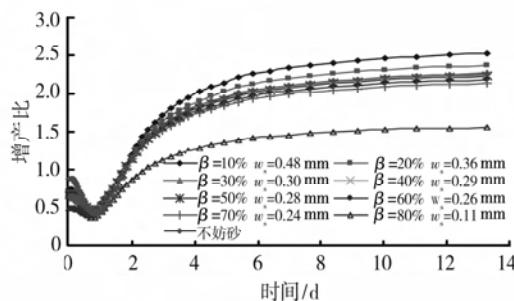


图 5 不同防砂程度下增产比随出砂时间变化曲线

以下增产比和产量比不防砂时高,防砂程度 30% 以上增产比和产量均比不防砂时低。因此,30% 为临界防砂程度,对应 0.30 mm 为临界缝宽。

从图 4 可看出:在其他参数不变而增大冲蚀系数的情况下,出砂时间变短,20% 为临界防砂程度,对应 0.36 mm 为临界缝宽。

从图 5 可看出:在其他参数不变而增大生产压差的情况下,出砂时间变短,临界防砂程度和临界缝宽没有变化。

## 4 结 论

1) 基于出砂数学模型、割缝衬管表皮模型及割缝防砂产能模型,经过比较不同防砂程度与不防砂的增产比,提出了割缝筛管防砂临界缝宽的概念,解决了适度出砂度的问题。

2) 采取防砂措施下,随着防砂量增大,筛管缝宽减小,产油量逐渐减小,增产比逐渐降低;比较防砂与不防砂时的情况,得出了割缝衬管防砂临界缝宽,大于临界缝宽时,采取防砂措施时的产量和增产比比不防砂时高,小于临界缝宽时,采取防砂措施时的产量和增产比比不防砂时低。这表明,在稠油油藏出

砂过程中,适度防砂可以提高增产比,防砂程度过大将使增产比降低。

3) 可以在此基础上建立井筒携砂模型来拓展和完善模型。通过完井方法来调节携砂量和出砂量,使砂完全被携带出井筒,使产能达到最高。

## 参 考 文 献

- [1] Veeken C A M, Davies D R, Kenter C J, et al. Sand production review: developing an integral approach[R]. SPE22792, 1991.
- [2] 张卫东, 葛洪魁, 宋丽莉. 疏松砂岩油藏“适度防砂”技术研究[J]. 石油钻探技术, 2004, 32(3): 62-64.
- [3] 张永华, 冯莉萍, 李凯军, 等. 完井防砂筛管尺寸对水平井气井产能影响分析[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(5): 76-78.
- [4] 万仁溥. 采油工程手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [5] J 贝尔. 多孔介质流体动力学[M]. 李竞生, 陈崇希, 译. 北京: 中国建筑出版社, 1983.
- [6] 王治中, 邓金根, 田红, 等. 弱胶结砂岩油藏出砂量预测技术研究进展[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(6): 70-75.
- [7] Euripides P, Eva M M. A sand-erosion model for volumetric sand predictions in a North Sea reservoir[R]. SPE69841, 2001.
- [8] Yula T. Optimization of horizontal well completion[D]. Tulsa: The University of Tulsa, 2001.
- [9] Spivak D, Horne N. Unsteady-state pressure response due to production with a slotted liner completion[R]. SPE10785, 1983.
- [10] Kaiser T M V, Wilson S, Venning L A. Inflow analysis and optimization of slotted liners[R]. SPE65517, 2000.
- [11] Furui K. A comprehensive skin factor model for well completions based on finite element simulations[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2001.
- [12] 张琪. 采油工程原理与设计[M]. 山东东营: 石油大学出版社, 2000.
- [13] 石晓兵, 施太和, 王兆会, 等. 岩心粒度分析分选评价及割缝筛管缝宽设计[J]. 石油钻采工艺, 1999, 21(4), 43-47.

〔审稿 楼一珊〕

## A Study on Critical Slot Width of Screen Liner for Proper Sand Control

Wang Zhiming Yang Fang Wei Jianguang

(School of Oil and Gas Engineering, China University of Petroleum, Changping, Beijing, 102249, China)

**Abstract:** Considering the damage caused by severe sand production and the problems existing in current sand control techniques, this paper points out the advantages of using screen liners for sand control and the importance of its width design. This paper introduced the sand control mechanisms of screen liners. A sand production model, a skin model and a sand control productivity model of screen liners were built. Stimulation results were compared in various sand control conditions based on these models and the concept of critical slot was proposed. Calculations indicate that, after sand control, productivity deteriorates with the decrease of slot width; critical slot width of screen liner was determined after comparing various sand control results. When the width is larger than critical width, production and stimulation of well with sand control is higher than that without sand control; when the width is less than critical width, production and stimulation of well with sand control is less than that without sand control.

**Key words:** sand production; slotted liner; liner completion; fracture widenes