

“863”计划专栏

气井水平井防砂产能预测与评价模型

董长银¹ 武 龙¹ 汪天游² 冯胜利² 王爱萍¹

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石油青海油田公司 钻采工艺研究院, 甘肃 敦煌 736200)

摘 要:给出了带表皮系数的气井水平井基本产能公式的统一形式。将防砂气井水平井中流体由远处地层到井筒内所经的区域划分为管外环形带和射孔压实带、射孔孔眼充填带和管内充填带等几个区域,可以用上述区域的特定组合来表达目前水平井防砂前后的渗流阻力区域。根据所假设的物理模型,推导了上述各区域的气体流动层流和紊流压降及表皮系数的计算公式,并给出了气井水平井不同防砂方式下总表皮系数和产能比的计算模型。通过实例分析了各渗流阻力区表皮系数的相对大小,分析了射孔参数、充填渗透率等对防砂气井水平井产能的影响规律,并提出了提高气井水平井防砂产能比的基本途径。

关键词:水平井;气井;防砂;砾石充填;表皮系数;产能评价

中图分类号:TE375 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2009)05-0020-06

目前水平井已经应用于疏松砂岩气藏的开采,如青海涩北(台南)气田,水平井防砂成为维持该类气藏正常生产的一项重要技术措施。防砂井的产能预测与评价是防砂方案选择与评价以及生产参数调整的重要依据。目前关于气井防砂井产能评价的研究主要集中于垂直井^[1],关于防砂气井水平井产能评价的研究几乎空白。笔者将产能比引入到气井水平井防砂产能的评价中,来表征防砂措施对水平气井产能的影响程度,并根据所建立的物理模型,推导出了气流条件下防砂措施造成的附加渗流阻力区域的表皮系数计算公式,建立了一套系统的防砂气井水平井产能预测与评价模型。

1 气井水平井产能公式的统一形式

笔者分析了目前几种气井水平井的产能公式^[2-3],并经过分析整理,给出了带表皮系数的水平井产能公式的统一形式:

$$p_r^2 - p_{wf}^2 = q_{sc} \frac{Z_{sc} p_{sc}}{T_{sc}} \frac{T_r \mu_g Z_g}{Kh} [f(x) + D(x) q_{sc} + S] \quad (1)$$

式中, q_{sc} 为标况下的产气量, m^3/s ; K 为地层渗透率, m^2 ; h 为气层厚度, m ; T_r 为气层温度, K ; μ_g 为天然气黏度, $Pa \cdot s$; Z_g 为天然气偏差系数, 无因次; p_{sc} 为标况压力, Pa ; T_{sc} 为标况温度, K ; Z_{sc} 为标况下天然气的偏差系数, 无因次; p_r 为地层压力, Pa ; p_{wf} 为井底流压, Pa ; $f(x)$ 、 $D(x)$ 为计算项, 取决于不同的

气井水平井产能模型; S 为总表皮系数, 无因次。

不同气井水平井产能模型的区别之处在于 $f(x)$ 和 $D(x)$ 的表达式不同。例如, Joshi 气井水平井产能公式中 $f(x)$ 和 $D(x)$ 的表达式为^[2-3]:

$$\begin{cases} f(x) = \ln \frac{2L_b}{L} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{L^2}{4L_b^2}} \right] \left(\frac{\kappa L_b}{2r_w} \right)^{\frac{\kappa L}{L}} \\ D(x) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, L 为水平井段长度, m ; L_b 为中间变量; κ 为气层渗透率非均质系数, 无因次; r_w 为井筒半径, m 。

2 气井水平井防砂产能比评价模型

对于气井水平井,防砂产能比是指特定防砂方式下的产气量与相同生产压差下防砂前产气量的比。根据式(1),气井水平井防砂前的产气量为:

收稿日期:2009-05-31;改回日期:2009-08-03

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“水平井及大斜度井砾石充填工艺技术研究”(编号:2006AA09Z351)和中国石油与天然气股份有限公司项目“涩北疏松砂岩气藏精细描述及提高采收率配套技术研究”(编号:2008D-1502-09)部分研究内容

作者简介:董长银(1976—),男,河南卫辉人,1998年毕业于石油大学(华东)石油工程专业,2003年获石油大学(华东)油气田开发工程专业博士学位,副教授,主要从事采油(气)工程、油气井防砂完井、水平井开采等方面的教学与研究工作。

联系电话:(0546)8395860

$$q_{SC(0)} = \frac{Kh}{T_r \mu_g Z_g} \frac{T_{SC}}{Z_{SC} p_{SC}} \frac{p_r^2 - p_{wf}^2}{f(x) + D(x) q_{SC} + S_0} \quad (3)$$

特定防砂方式下的水平井产气量为:

$$q_{SC(1)} = \frac{Kh}{T_r \mu_g Z_g} \frac{T_{SC}}{Z_{SC} p_{SC}} \frac{p_r^2 - p_{wf}^2}{f(x) + D(x) q_{SC} + S_1} \quad (4)$$

根据定义,气井水平井防砂产能比为:

$$B_q = \frac{q_{SC(1)}}{q_{SC(0)}} = \frac{f(x) + D(x) q_{SC} + S_1}{f(x) + D(x) q_{SC} + S_0} \quad (5)$$

式中, $q_{SC(0)}$ 、 $q_{SC(1)}$ 分别为气井水平井防砂前、后的产气量(标况), m^3/s ; S_0 、 S_1 分别为气井水平井防砂前后的总表皮系数, 无因次; B_q 为特定防砂方式下水平井产能比, 无因次。

根据上述分析,要计算水平井防砂产能比,只要

首先确定水平井防砂前后的井底状态,然后计算出相应的防砂前后的总表皮系数 S_0 、 S_1 即可。

3 不同防砂方式的表皮系数计算

3.1 不同防砂方式下的渗流区域

气井水平井完井方式主要有裸眼和射孔两大类,可应用的防砂工艺主要有机械滤砂管防砂、膨胀筛管防砂、化学固砂、人工井壁防砂、管内砾石充填防砂、高压一次充填防砂等。每种防砂工艺在井底形成的阻力区域不同,见表 1。井筒附近渗流区域可分为 4 类:管外地层中的环形渗流介质(径向流)、井筒内的环形渗流介质(径向流)、圆柱状射孔孔眼充填带(单向流)、环柱状射孔孔眼压实带(径向流)。

表 1 不同防砂工艺防砂前后的渗流区域特征

完井方式	防砂工艺	钻井污染	管外固砂带	管外砾石充填带	筛管渗流带	井筒内充填带	射孔孔眼	射孔压实带	孔眼充填带
裸眼	不防砂		×	×	×	×	×	×	×
	机械滤砂管		×	×			×	×	×
	膨胀筛管		×	×		×	×	×	×
	化学固砂			×	×	×	×	×	×
	管内砾石充填		×	×			×	×	×
射孔	不防砂		×	×	×	×			×
	机械滤砂管		×	×					
	化学固砂			×	×	×			×
	人工井壁		×		×	×			
	管内砾石充填		×	×					
	高压一次充填		×						

注: 表示有; ×表示没有; 表示可能有; 表示当地层继续出砂形成堆积层后,存在。

3.2 不同渗流区域的气体流动压降计算

根据上节的分析,不同防砂方法在水平井底形成的渗流阻力区及其流动分为如下两种情况:流动压降分为环柱形渗流介质中的径向流流动压降和圆柱状渗流介质中的单向流流动压降。

3.2.1 环柱形渗流介质中径向气体流动压降

假设一环柱形渗流介质,长度为 L ,内外半径分别为 r_i 、 r_o ,渗透率为 K_o ,内、外边界的压力分别为 p_i 和 p_o ,气体流量(标况)为 q ,则根据 Forchheimer 方程有:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu}{K} v + v^2 \quad (6)$$

由式(6)可推导出其流动压降为:

$$p_o - p_i = q \frac{p_{SC}}{Z_{SC} T_{SC}} \frac{T_r \mu_g Z_g}{K_o L} \ln \frac{r_o}{r_i} +$$

$$q^2 \left(\frac{p_{SC}}{Z_{SC} T_{SC}} \right)^2 \frac{M_g}{R} \frac{T_r Z_{g-o}}{2 L^2} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_o} \right) \quad (7)$$

3.2.2 圆柱状渗流介质中的单向气体流动压降

设圆柱状渗流介质长度为 L ,半径为 R ,入、出口端压力分别为 p_o 和 p_i ,渗透率为 K_o ,其压降为:

$$p_o - p_i = q \frac{p_{SC}}{Z_{SC} T_{SC}} \frac{2 T_r \mu_g Z_g}{K_o r^2} L + q^2 \left(\frac{p_{SC}}{Z_{SC} T_{SC}} \right)^2 \frac{2 M_g}{R} \frac{T_r Z_{g-o}}{r^4} L \quad (8)$$

式中, r 为渗流孔道半径, m 。

为了得到表 1 中渗流区域表皮系数的计算公式,考虑如图 1 所示最复杂的情况,即由外到内分别为原始地层、污染带、管外充填带、砾石充填射孔孔眼、管内充填带和机械筛管等渗流区域。根据各区域的流动压降结合产能模型推导其层流与紊流表皮系数的计算公式。

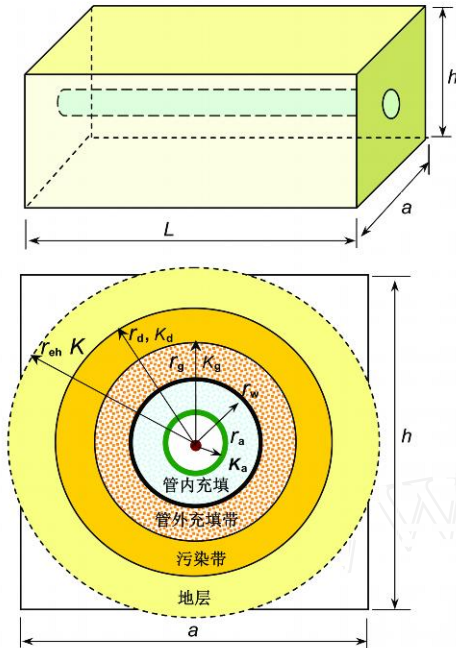


图1 物理模型

图1中,水平井位于长 L 、宽为 a 、厚度为 h 的长方体地层中。为推导各流动区域的表皮系数,假设地层流体向水平井筒的流动为一个长圆柱体中的径向流动,则等效的供给半径 r_{eh} 为:

$$r_{eh} = \sqrt{ah} \quad (9)$$

式中, L 为水平井长度,m; a 为控制地层宽度,m; h 为地层厚度,m; r_{eh} 为等效供给半径,m。

为简化公式和推导,令 $A = \frac{p_{sc}}{Z_{sc} T_{sc}} \frac{T_r \mu_g Z_g}{R}$, $B = \left(\frac{p_{sc}}{Z_{sc} T_{sc}}\right)^2 \frac{M_g}{R} \frac{T_r Z_g}{2}$,根据式(7)、(8)分别可得气井产量为 q_{sc} 情况下各区域的流动压降。

原始地层中的径向流动压降为:

$$p_r^2 - p_d^2 = q_{sc} \frac{A}{Kh} [g(x) + D(x) q_{sc}] \quad (10)$$

地层污染带径向流动压降为:

$$p_d^2 - p_g^2 = q_{sc} \frac{A}{K_d L} \ln \frac{r_d}{r_g} + q_{sc}^2 B \frac{A}{L^2} \left(\frac{1}{r_g} - \frac{1}{r_d} \right) \quad (11)$$

管外地层砾石充填带径向流动压降为:

$$p_g^2 - p_{dp}^2 = q_{sc} \frac{A}{K_g L} \ln \frac{r_g}{r_w} + q_{sc}^2 B \frac{A}{L^2} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_g} \right) \quad (12)$$

射孔压实带径向流压降为:

$$p_{dp}^2 - p_p^2 = q_{sc} \frac{A}{K_{dp} (L_{dp} + 2r_p)} \frac{1}{L_s S_D} \ln \frac{r_{dp}}{r_p} + q_{sc}^2 B \frac{A}{(L_{dp} + 2r_p)^2} \frac{1}{L_s^2 S_D^2} \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{dp}} \right) \quad (13)$$

砾石充填射孔孔眼中的单向流压降为:

$$p_p^2 - p_a^2 = q_{sc} \frac{2A}{K_p r_p^2} \frac{1}{L_s S_D} L_p + q_{sc}^2 B \frac{4A}{r_p^4} \frac{1}{L_s^2 S_D^2} L_p \quad (14)$$

井筒内环空砾石层径向流动压降为:

$$p_a^2 - p_s^2 = q_{sc} \frac{A}{K_a L_s} \ln \frac{r_w}{r_a} + q_{sc}^2 B \frac{A}{L_s^2} \left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_w} \right) \quad (15)$$

井筒内筛管渗滤层径向流动压降为:

$$p_s^2 - p_{wf}^2 = q_{sc} \frac{A}{K_s L_s} \ln \frac{r_a}{r_s} + q_{sc}^2 B \frac{A}{L_s^2} \left(\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_a} \right) \quad (16)$$

式中, d 、 g 、 p 、 dp 、 a 、 s 分别为污染带、砾石充填带、充填炮眼、射孔压实带、管内充填带和滤砂管渗滤带的紊流速度系数, m^{-1} ; K_d 、 K_g 、 K_p 、 K_{dp} 、 K_a 、 K_s 分别为对应渗透区域的渗透率, m^2 ; r_d 、 r_g 、 r_p 、 r_{dp} 、 r_a 、 r_s 分别为污染带外半径、砾石充填带外半径、射孔孔眼半径、射孔压实带外半径、管内充填带内半径、滤砂管内半径,m; L_s 为水平井射孔段长度,m; L_{dp} 为射孔压实带长度,m; S_D 为射孔密度,孔/m; p_d 、 p_g 、 p_{dp} 、 p_p 、 p_a 、 p_s 分别为对应渗透区域外边界的压力,Pa。

3.3 不同渗流区域的表皮系数

上述各区域的流动压降相加得到总压降,即:

$$p_r^2 - p_{wf}^2 = (p_r^2 - p_d^2) + (p_d^2 - p_g^2) + (p_g^2 - p_{dp}^2) + (p_{dp}^2 - p_p^2) + (p_p^2 - p_a^2) + (p_a^2 - p_s^2) + (p_s^2 - p_{wf}^2) \quad (17)$$

将式(10)~(16)代入式(17),并整理得:

$$\begin{aligned} p_r^2 - p_{wf}^2 &= q_{sc} \frac{A}{Kh} [g(x) + D(x) q_{sc} + \Delta] \\ &= q_{sc} \frac{A}{Kh} \left[g(x) + D(x) q_{sc} + \frac{Kh}{K_d L} \ln \frac{r_d}{r_g} + q_{sc} \frac{B}{A} \frac{Kh}{L^2} \left(\frac{1}{r_g} - \frac{1}{r_d} \right) + \frac{Kh}{K_g L} \ln \frac{r_g}{r_w} + q_{sc} \frac{B}{A} \frac{Kh}{L^2} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_g} \right) + \frac{Kh}{K_{dp} (L_{dp} + 2r_p)} \frac{1}{L_s S_D} \ln \frac{r_{dp}}{r_p} + q_{sc} \frac{B}{A} \frac{Kh}{(L_{dp} + 2r_p)^2} \frac{1}{L_s^2 S_D^2} \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{dp}} \right) + \frac{2Kh}{K_p r_p^2} \frac{1}{L_s S_D} L_p + q_{sc} \frac{B}{A} \frac{4Kh_p}{r_p^4} \frac{1}{L_s^2 S_D^2} L_p + \frac{Kh}{K_a L_s} \ln \frac{r_w}{r_a} + q_{sc} \frac{B}{A} \frac{Kh_a}{L_s^2} \left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_w} \right) + \frac{Kh}{K_s L_s} \ln \frac{r_a}{r_s} + q_{sc} \frac{B}{A} \frac{Kh_s}{L_s^2} \left(\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_a} \right) \right] \end{aligned} \quad (18)$$

采用类似于垂直井的处理方法,将 $\ln \frac{r_{ch}}{r_w} = \ln$

$\left(\frac{r_{ch}}{r_d} \frac{r_d}{r_g} \frac{r_g}{r_w} \right) = \ln \frac{r_{ch}}{r_d} + \ln \frac{r_d}{r_g} + \ln \frac{r_g}{r_w}$ 代入式(18)并做适当简化后得总表皮系数为:

$$\begin{aligned}
S = & \frac{h}{L} \left[\frac{K}{K_d} - 1 \right] \ln \frac{r_d}{r_g} + q_{SC} \frac{B}{A} \frac{Kh_d}{L^2} \left[\frac{1}{r_g} - \frac{1}{r_d} \right] + \\
& \frac{h}{L} \left[\frac{K}{K_g} - 1 \right] \ln \frac{r_g}{r_w} + q_{SC} \frac{B}{A} \frac{Kh_g}{L^2} \left[\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_g} \right] + \\
& \frac{Kh}{K_{dp} (L_{dp} + 2r_p)} \frac{1}{L_s S_D} \ln \frac{r_{dp}}{r_p} + \\
& q_{SC} \frac{B}{A} \frac{Kh_{dp}}{(L_{dp} + 2r_p)^2} \frac{1}{L_s^2 S_D^2} \left[\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{dp}} \right] + \\
& \frac{2Kh}{K_p r_p^2} \frac{1}{L_s S_D} L_p + q_{SC} \frac{B}{A} \frac{4Kh_p}{r_p^4} \frac{1}{L_s^2 S_D^2} L_p + \\
& \frac{Kh}{K_a L_s} \ln \frac{r_w}{r_a} + q_{SC} \frac{B}{A} \frac{Kh_a}{L_s^2} \left[\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_w} \right] + \\
& \frac{Kh}{K_s L_s} \ln \frac{r_a}{r_s} + q_{SC} \frac{B}{A} \frac{Kh_s}{L_s^2} \left[\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_a} \right] \quad (19)
\end{aligned}$$

式(19)即为如图 1 所示情况下的总表皮系数计算公式。根据式(19)以及不同渗流区域的几何特征,可分解得到水平井筒附近不同渗流区域的压降与表皮系数计算公式。

管外地层中渗透率为 K_s 的径向环形介质的表皮系数为:

$$\begin{cases}
S_{ol} = \frac{h}{L} \left[\frac{K}{K_o} - 1 \right] \ln \frac{r_o}{r_i} \\
S_{ot} = q_{SC} \frac{B}{A} \frac{Kh_o}{L^2} \left[\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_o} \right]
\end{cases} \quad (20)$$

式中, S_{ol} 、 S_{ot} 分别为地层中环形介质的层流和紊流表皮系数,无因次; r_i 、 r_o 分别为环形介质的内、外半径, m; K_o 为管外地层中环形介质渗透率, m^2 ; o 为管外地层中环形介质紊流速度系数, m^{-1} 。

管外化学固砂带、砾石充填带等区域为径向流动,其表皮系数均可以使用式(20)计算。

砾石充填射孔眼中单向流动表皮系数为:

$$\begin{cases}
S_{pp1} = \frac{2KhL_p}{K_p L_s S_D r_p^2} \\
S_{pp2} = q_{SC} \frac{B}{A} \frac{4Kh_p}{r_p^4} \frac{L_p}{L_s^2 S_D^2}
\end{cases} \quad (21)$$

式中, S_{pp1} 、 S_{pp2} 分别为砾石充填射孔眼中的层流和紊流表皮系数,无因次。

射孔压实带径向流表皮系数为:

$$\begin{cases}
S_{dpl} = \frac{Kh}{K_{dp} (L_{dp} + 2r_p)} \frac{1}{L_s S_D} \ln \frac{r_{dp}}{r_p} \\
S_{dpt} = q_{SC} \frac{B}{A} \frac{Kh_{dp}}{(L_{dp} + 2r_p)^2} \frac{1}{L_s^2 S_D^2} \left[\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{dp}} \right]
\end{cases} \quad (22)$$

式中, S_{dpl} 、 S_{dpt} 分别为射孔压实带层流和紊流的表皮系数,无因次。对于新井,射孔压实带长度 L_{dp} 可取从水泥环外算起的射孔孔眼长度;对于老井, $L_{dp} = 0$ 。

井筒内环形介质流动表皮系数为:

$$\begin{cases}
S_{al} = \frac{Kh}{K_a L_s} \ln \frac{r_o}{r_i} \\
S_{at} = q_{SC} \frac{B}{A} \frac{Kh_a}{L_s^2} \left[\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_o} \right]
\end{cases} \quad (23)$$

式中, S_{al} 、 S_{at} 分别为井筒内环形介质的层流和紊流表皮系数,无因次; r_i 、 r_o 分别为井筒内环形介质的内、外半径, m; K_a 为井筒内环形介质渗透率, m^2 ; a 为井筒内环形介质紊流速度系数, m^{-1} 。

井筒内筛管环空充填带、管内机械筛管渗滤带的流动为径向流动,其表皮系数也可用式(13)计算。

水平井射孔几何表皮系数可采用文献[4]的计算方法进行计算。

4 模型的应用与实例分析

4.1 模型应用方法

上述模型考虑了所有区域气体流动的层流和紊流表皮系数。需要注意的是,对于单纯的机械滤砂管类防砂工艺,存在筛管-井筒环空;在投产初期,该环空中无充填介质;但如果地层出砂,则随着生产的继续,环空(及炮眼)中可能会被地层产出砂沉积并充填,形成附加阻力层^[4],在进行渗流区域判断及产能比评价时应考虑上述因素。

上述水平井防砂产能比预测模型应用步骤如下:1) 根据实际生产情况及防砂措施,依据表 1 判断防砂前后气井水平井防砂前后的井底渗流区域特征;2) 根据渗流区域特征,分解水平井防砂前后总表皮系数 S_0 、 S_1 的组成;3) 使用式(20)~(23) 计算相应的渗流区域表皮系数,并得到防砂前后总表皮系数 S_0 、 S_1 ;4) 使用式(5) 计算水平井防砂产能比;5) 根据防砂前正常生产时的生产测试资料计算气井水平井的 IPR 曲线,然后进行防砂产能比较校正即可预测防砂后的 IPR 曲线^[1]。

4.2 实例分析与讨论

某气田规划某水平气井水平段长度 300 m,气层厚度 7.8 m,控制体积宽度 500 m,控制体积长度 1 500 m,井眼直径 240 mm。地层渗透率 $0.5 \mu m^2$ 。为了便于分析各渗流阻力区表皮系数的相对大小,假

设该井采用射孔完井+管内砾石充填防砂工艺,采用 $\phi 77.8$ mm 套管,砾石尺寸 0.4~0.8 mm,充填带渗透率为 $40.0 \mu\text{m}^2$,射孔段长度 300 m,孔眼直径 14 mm,射孔密度 24 孔/m,孔深 0.35 m,射孔压实带厚度 12 mm,压实带渗透率取地层渗透率的 25%。采用 $\phi 90.0$ mm 绕丝筛管,等效渗透率 $200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。钻井污染半径 1.5 m,污染带渗透率 $0.25 \mu\text{m}^2$ 。

4.2.1 各阻力区域的表皮系数对比

根据表 1 判断该井防砂前仅存在钻井污染、射孔孔眼及射孔压实带三个渗流区域;而防砂后形成的渗流区域见表 2。使用上述的表皮系数计算公式,计算各阻力区域的表皮系数,结果见表 2。

表 2 各阻力区域的表皮系数计算结果

阻力区域	层流表皮系数	紊流表皮系数	总表皮系数
钻井污染带	0.065 67	0.000 406 00	0.066 07
射孔几何	- 0.015 52		- 0.015 52
射孔压实带	0.013 20	0.000 177 00	0.013 37
砾石充填孔眼	0.193 45	0.120 806 00	0.314 26
井筒环空充填带	0.000 20	0.000 001 23	0.000 20
机械筛管	0.000 04	0.000 000 33	0.000 04

由表 2 可看出:1)与层流表皮系数相比,各区域的紊流表皮系数相对较小,但并不可以忽略,尤其是气体流速较高的渗流区域(如砾石充填射孔孔眼),因此,虽然在油井的计算中常常忽略紊流影响,但在气井中,紊流影响必须考虑;2)对于气井水平井射孔管内砾石充填防砂,主要的表皮系数来自于钻井污染、射孔几何及压实带、射孔孔眼充填带;由于射孔炮眼的流动面积最小,流速最高,因此砾石充填射孔孔眼的表皮系数占据了主要地位;对于射孔完井砾石充填防砂方式,优化射孔参数对于提高气井水平井防砂后产能十分重要;3)在合理的参数范围内,管内砾石充填层、机械筛管渗滤带的表皮系数很小,对水平井防砂后产能的影响较小。

4.2.2 水平井防砂产能比敏感性分析

使用上述井例中的数据,对影响气井水平井防砂产能比的射孔参数、砾石层渗透率等参数进行了敏感性分析,结果见图 2、图 3。

从图 2 可看出,对于射孔完井砾石充填防砂工艺,由于砾石充填射孔孔眼中的流速较高,射孔参数如孔径和孔密对水平井产能比有明显的影 响。图 3 及表 2 的结果表明,射孔孔眼充填渗透率是影响射孔砾石充填防砂水平井产能比的主要因素,尤其当

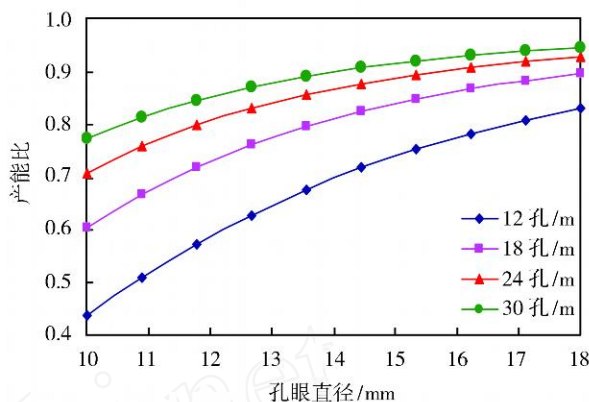


图 2 防砂产能比与孔眼直径和孔密的关系

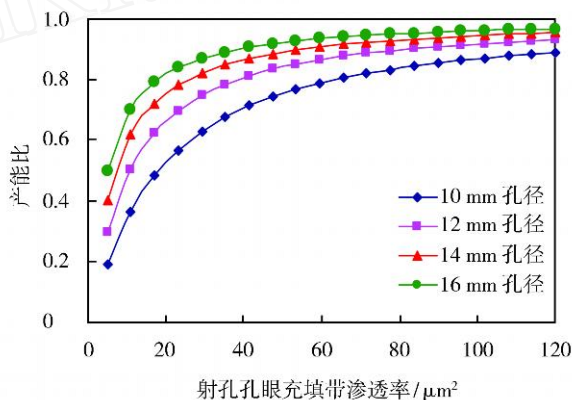


图 3 防砂产能比与孔眼充填带渗透率的关系

充填带渗透率较低时,影响更加明显。在实际应用中应尽可能使砾石充填层渗透率高,同时应尽可能采用较大的孔径和孔密以及粒径较大的砾石,从而使表皮系数尽可能小^[5]。

4.2.3 不同防砂方式的产能比对比

利用上述井例的数据,假设分别采用表 1 中的多种防砂工艺,对各种防砂方式的总表皮系数及产能比进行了计算和对比,结果见表 3。

表 3 不同防砂工艺的总表皮系数及产能比计算对比

防砂工艺	采用的计算参数	防砂后总表皮系数	产能比
机械滤砂管	井例数据	0.063 96	0.968 7
机械滤砂管	产出砂沉积层渗透率 $0.8 \mu\text{m}^2$	0.901 05	0.675 4
化学固砂	固砂半径 2.0 m,固砂带渗透率保持率 70 %	0.119 2	0.882 3
人工井壁	管外挤注半径 1.0 m,孔眼及固结带渗透率 $25 \mu\text{m}^2$	0.087 6	0.913 5
管内砾石充填	井例数据	0.467 2	0.756 1
高压一次充填	管外充填半径 1.5 m,管外充填带渗透率 $35 \mu\text{m}^2$,孔眼和环空充填带渗透率 $89 \mu\text{m}^2$	0.378 4	0.867 0

注:表示环空(及射孔孔眼)被地层产出砂沉积充填,地层散砂堆积渗透率取 $0.8 \mu\text{m}^2$ 。

从表 3 可看出:1) 高压充填防砂工艺中,管外地层充填带由于与地层介质混合,渗透率要低于纯粹砾石层的渗透率,但依然大大高于原始地层渗透率,因此管外地层充填形成负表皮系数,而孔眼和井筒内充填形成正表皮系数,最终的总附加表皮是正是负取决于前两者的相对大小;2) 除高压充填防砂外,其它防砂工艺均会在水平井底附近造成新的正表皮系数,对气井水平井产能造成负面影响;3) 对于机械滤砂管防砂,如果地层继续出砂充填孔眼和井筒环空,将会形成较大的附加正表皮系数,从而大大降低水平井产量。

5 结 论

1) 考虑了各种防砂工艺在气井水平井井底造成的附加渗流区域,根据所建立的物理模型,建立了气井水平井不同防砂方式下总表皮系数和产能比的计算模型,形成了一套系统的防砂气井水平井产能预测与评价理论与方法。该方法系统全面,使用简单,可操作性强。

2) 防砂工艺参数对防砂气井水平井产能具有重要的影响,提高防砂措施形成的附加渗流区域的渗透率是提高防砂水平井产能的主要途径。采用粒径较大的砾石、进行大孔径、高孔密射孔、加大管外充填量可提高渗透率。

3) 在合理的参数范围内,管内砾石充填层、机械

筛管渗滤带的表皮系数很小,对气井水平井防砂后产能的影响较小;与层流表皮系数相比,除砾石充填射孔孔眼外,防砂水平井各渗流区域的紊流表皮系数很小,但并不可以忽略,尤其是气体流速较高的渗流区域。

4) 机械滤砂管、化学固砂、人工井壁和管内砾石充填等防砂工艺均会在水平井底附近造成新的正表皮系数,对气井水平井产能造成负面影响;尤其对于机械滤砂管防砂,如果地层继续出砂充填孔眼和井筒环空,将会形成较大的附加正表皮系数,从而大大降低水平井产量。此类防砂工艺设计的关键是选择合适的防砂工艺,采取合理的施工参数,尽可能将防砂措施对气井水平井产能的负面影响降至最低。

参 考 文 献

- [1] 董长银,饶鹏,冯胜利,等. 高压砾石充填防砂气井产能预测与评价[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(3): 54-57.
- [2] Joshi S D. Horizontal well technology, Chapter 3[M]. Tulsa: Pennwell Publishing Company, 1991: 73-94.
- [3] 程林松,李春兰,马志远. 气藏多分支水平井产能的计算方法[J]. 石油学报, 1998, 19(4): 69-72.
- [4] 曾文广,米强波. 水平井射孔完井表皮系数分解计算方法[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(增): 105-108.
- [5] 何生厚,张琪. 油气井防砂理论及其应用[M]. 北京:中国石化出版社, 2003.

[审稿 陈月明]

An Integrated Model for Productivity Prediction and Evaluation of Sand Control Horizontal Gas Wells

Dong Changyin¹ Wu Long¹ Wang Tianyou² Feng Shengli² Wang Aiping¹

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying, Shandong, 257061, China; 2. Drilling & Production Technology Research Institute, CNPC Qinghai Oilfield Corporation, Dunhuang, Gansu, 736200, China)

Abstract: In this work, the uniform formula for horizontal gas wells with skin factor is provided. For horizontal gas wells, flow resistance areas from faraway to the wellbore were divided into annular region outside pipe, perforation crashed radial area, gravel-packed perforation hole and radial packed area inside the wellbore. The formula for gas laminar and turbulent skin factor for the above additional areas is provided and an integrated model for total skin factor and productivity ratio of horizontal gas well with variable sand control technology is developed. The integrated model can be used to analyze the skin factor of all flow areas and the sand control productivity ratio of horizontal gas wells. The skin factors of all additional areas are compared and the key factors, such as perforation parameters and packed zone permeability, affecting the productivity ratio are analyzed.

Key words: horizontal well; gas well; sand control; gravel packing; skin factor; productivity evaluation