辐射状分支水平井非射孔完井方式下的产能研究 *

于 东　熊友明　补成中　刘 浩
（西南石油大学）

于东等.辐射状分支水平井非射孔完井方式下的产能研究.天然气工业,2008,28(2):76-78.

摘　要　针对分支水平井常用的完井方法,运用等值渗流阻力的原理并结合分支水平井在地层中的势分布,将分支水平井在理想井生产时产生的压降与实际非射孔完井方式下的附加压力损失结合在一起,推导出辐射状分支水平井在不同非射孔完井方式下的产能公式。结合现场实例,将各种非射孔完井方式下的产能与理想井产能进行比较,验证了数学模型的正确性,并指出在设计分支井钻井完井时,应当结合实际情况考虑地层损害和完井方式对产能的影响。

主题词　辐射　分支水平井　射孔完井　压力　产能

一、实际非射孔完井方式下的分支水平井产能公式

从 20 世纪 60 年代开始,前苏联的 Таσкова[1] 率先应用拟三维的思想和镜像反映原理,等值渗流阻力等方法并通过一些简化,推导出了同一平面内辐射状分支水平理想井(图 1)条件下的产量公式。他的成果后来为众多学者[2]所引用。90 年代开始,国内一些学者也进行了这方面的研究[3-5],并得出了更为严密、合理的结果[3]:

$$Q_n = \frac{2\pi K\beta h(p_e - p_{wf})/\mu}{\ln\frac{4^{(1/n)}r_e}{L} + \frac{h\beta}{nL}\left(\ln\frac{b\beta/\sin\frac{\pi z_w}{h}}{2\pi r_w}\right)} \tag{1}$$

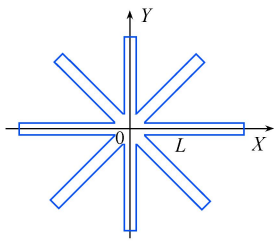

图 1　辐射状 n 分支水平井平面图

根据上式,按照等值渗流阻力的原理[6],分支水平井的稳态渗流可以看作是流体向假设垂直裂缝的渗流(这时分支水平井可以看作是缝高等于油层厚度的裂缝)和由垂直裂缝向井底渗流的组合。因此,要将产量为 Q_n 的流体从地层中渗流到井筒需要克服两个部分渗流阻力的作用:一个是渗流外阻(R_u),它是流体从地层中渗流到假想垂直裂缝所要克服的阻力;一个是渗流内阻(R_{ni}),它是流体从假想垂直裂缝向井筒中流动所需克服的阻力。而由于钻完井产生的附加渗流阻力(R_s)应当加到内阻(R_{ni})上,所以对于理想井,从式(1)可知其总的渗流阻力(R)为:

$$R = R_u + R_{ni} = \frac{\mu}{2\pi K\beta h}\ln\frac{4^{(1/n)}r_e}{L} + \frac{\mu}{2\pi KnL}\ln\frac{h\beta/\left(\sin\frac{\pi z_w}{h}\right)}{2\pi r_w} \tag{2}$$

而对于实际的非理想井,其总的渗流阻力应为:

$$R = R_u + R_{ni} + R_s \tag{3}$$

这时分支井产量就可以写成:

$$Q_n = \frac{p_e - p_{wf}}{R_u + R_{ni} + R_s} \tag{4}$$

由于理想井和非理想井的差别在于:后者在渗流内阻中考虑了附加渗流阻力(R_s),而它们的渗流外阻是完全相同的。所以只需推导非理想井渗流内阻的部分并结合渗流外阻就可以得到裸眼完井方式下的产能公式。在 YZ 平面(图 2),考虑由于钻完井产生的附加压力损失,则井筒中的势分布为:

$$\Phi_w = \frac{q}{4\pi}\ln\left(\frac{\pi r_w}{\beta h}\sin\frac{\pi z_w}{h}\right)^2 - \Delta\Phi_s + C \tag{5}$$

式中:q 为分支井单位时间流量,m^3/ks;$\Delta\Phi_s$ 为由于

* 本文受到中海油"分支水平井不同完井方式下产能研究"项目的资助。

作者简介:于东,1982 年生,硕士研究生;从事分支水平井产能等方面的研究工作。地址:(610500)四川省成都市新都区西南石油大学研究生院。电话:13880960190。E-mail:yd110_2005@163.com

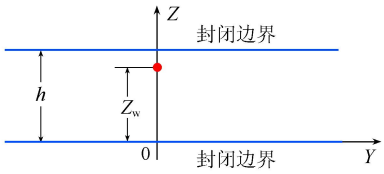

图 2　辐射状 n 分支平井 YZ 平面图

钻完井所造成的势差；Φ_w 为井筒中的势。

地层中远离井壁处一点 Y 的势分布为：

$$\Phi_y = \frac{q}{4\pi}\ln\left(ch\frac{\pi Y}{\beta h}\right)^2 + C \tag{6}$$

由式(5)、(6)并化简得：

$$Q_n = \frac{2\pi K\beta h(p_y - p_{wf})/\mu}{\frac{\beta h}{nL}\left[\frac{\pi Y}{\beta h} + \ln\frac{\beta h/\left(\sin\frac{\pi z_w}{h}\right)}{2\pi r_w} + \frac{2\pi KL}{q_L\mu}\Delta p_s\right]} \tag{7}$$

上式中由于钻完井产生的附加渗流阻力为：

$$R_s = \frac{\mu}{2\pi K\beta hn}S_h \tag{8}$$

其中：　$S_h = \frac{\beta h}{L}S_v$

并定义：$S_v = \frac{2\pi KL}{q_L\mu}\Delta p_s$　$\beta = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$

式中：q_L 为其中一个分支的产量，m^3/ks；S_v 为由于钻完井产生的机械表皮系数；K_h 为油层水平方向渗透率，μm^2；K_v 为油层垂直方向渗透率，μm^2；Δp_s 为由于钻完井的机械表皮系数所产生的附加压力损失，MPa。

将式(2)、(8)代入式(4)并整理得到辐射状分支水平井裸眼完井方式下的产能公式：

$$J_n = \frac{2\pi K\beta h/\mu}{\ln\frac{4^{(1/n)}r_e}{L} + \frac{h\beta}{nL}\left[\ln\frac{h\beta/\left(\sin\frac{\pi z_w}{h}\right)}{2\pi r_w}\right] + \frac{1}{n}S_h} \tag{9}$$

式中：J_n 为辐射状分支水平井地下产能，$m^3/(ks\cdot MPa)$；K 为各向异性油层平均渗透率，μm^2；h 为油层厚度，m；μ 为原油黏度，mPa·s；L 为分支水平井长度，m；r_w 为油井半径，m；r_e 为泄油半径，m；n 为分支井数；z_w 为分支井到油层底部的距离，m。

对于尾管完井，如果不考虑油流经过预钻井眼所产生的压力损失，其产能预测公式与实际裸眼完井一样。

运用上面所推导非理想井渗流内阻的方法，同样可以推导出裸眼防砂完井方式下的产能公式，在这里只给出结果。

二、割缝衬管内完井方式下的分支水平井产能公式

分支水平井段采用割缝衬管完井方式是当前分支水平井完井方式中最主要的完井方式之一。它即起到了裸眼完井的作用又防止了裸眼井壁坍塌堵塞井筒，同时在一定程度上还能起到防砂的作用。虽然它的防砂效果不如裸眼砾石充填完井，但是对于储层不是特别疏松，同时又是中、粗粒径的地层砂而言，也不适为一种经济、有效的完井方式。分支井采用割缝衬管完井，在进行生产的过程中，分支水平段中的衬管和井壁之间会自然分选形成砂桥堆积层，从而产生附加压力损失，降低产能。由于水平井割缝衬管完井所产生的表皮系数 S_s[7] 已经给出，运用上面所述的推导方法，割缝衬管完井方式下辐射状分支水平井的产能表达式可以由下式给出：

$$J_s = \frac{2\pi K\beta h/\mu}{\ln\frac{4^{(1/n)}r_e}{L} + \frac{h\beta}{nL}\left[\ln\frac{h\beta/\left(\sin\frac{\pi z_w}{h}\right)}{2\pi r_w}\right] + \frac{1}{n}S_h + \frac{h\beta}{nL}S_s} \tag{10}$$

式中：S_s 为水平井割缝衬管堆积砂层表皮系数，$S_s = \frac{2\pi KL\Delta p}{q_L\mu}$；$\Delta p$ 为原油流过储层砂堆积层时的附加压降，MPa；$\Delta p = \frac{4.468\times10^{-13}C_1E\rho L_g}{A^2}(q_L)^2 + \frac{C_2\mu L_g}{0.5877\times10^{-3}K_gA}(q_L)$；$C_1$，$C_2$ 为单位换算系数；其余物理量的计算及其意义见文献[7]。

在运用上式计算产能的时候，需要先求出包含 q_L 参数的 Δp 与 S_s，然后将其代入产能式(10)中，解一个一元二次方程组就可以得到 J_s。如果采用带 ECP 的割缝衬管完井，在运用上式计算产能的时候，应当从完井长度(L)中扣除掉封隔器的长度。

三、裸眼预充填砾石筛管完井方式的分支水平井产能公式

在出砂较为严重的储层中，运用割缝衬管完井已经不能满足生产防砂的需要，必须采用砾石充填防砂完井方法。但是在水平井段中进行砾石充填无论从技术上和经济上讲都不太可行。因此，目前在现场上分支水平井一般是采用预充填砾石筛管完井和其他一些防砂筛管完井方法(金属纤维防砂筛管，多层充填井下滤砂器等[8-10])。裸眼预充填砾石筛管完井方式下的分支水平井在生产时，所产生的附加

压力损失由 3 部分组成：①流体经过钻井和完井液污染带产生的压力损失；②流体经过外层筛管和井壁之间自然形成的砂桥堆积层时产生的压力损失 Δp_1；③流体经过两层筛管之间的砾石充填层时产生的附加压力损失 Δp_2。将这 3 个压力损失考虑到产能公式中就产生了预充填砾石筛管完井方式下的产能表达式：

$$J_G=\frac{2\pi K\beta h/\mu}{\ln\frac{4^{(1/n)}r_e}{L}+\frac{h\beta}{nL}\left[\ln\frac{h\beta/\left(\sin\frac{\pi z_w}{h}\right)}{2\pi r_w}\right]+\frac{1}{n}\left(S_h+\frac{h\beta}{L}S_G\right)} \tag{11}$$

式中：S_G 为裸眼水平井砾石充填表皮系数，$S_G=\frac{2\pi KL\Delta p_G}{q_L\mu}$，总压降 $\Delta p_G=\Delta p_1+\Delta p_2$。

其中：$\Delta p_1=\frac{4.468\times10^{-13}C_1E_1\rho L_{G1}}{A_1^2}(q_L)^2+\frac{C_2\mu L_{G1}}{0.5877\times10^{-3}K_{G1}A_1}(q_L)$

$\Delta p_2=\frac{4.468\times10^{-13}C_1E_2\rho L_{G2}}{A_2^2}(q_L)^2+\frac{C_2\mu L_{G2}}{0.5877\times10^{-3}K_{G2}A_2}(q_L)$

上式中物理量的计算及其意义见文献[7]。其他一些防砂筛管完井下的产能公式与式(11)基本一致，式(11)的计算方法在式(10)中已经给出。

四、几种完井方式下的产能比较

由于钻完井所造成的附加压力损失，采用了不同完井方式的分支水平井产能应当低于自然产能。因此，针对以上几种分支水平井常用的完井方法，利用某油层实际资料进行对比计算。某油层的地层和流体参数为：油层厚度 $h=16$ m，水平渗透率 $K_h=0.32\ \mu m^2$，垂向渗透率 $K_v=0.11\ \mu m^2$，原油密度 $\rho=0.974\ g/cm^3$，原油黏度 $\mu=71.6$ mPa·s，原油体积系数 $B_0=1.076$；钻完井参数为：分支井数 $n=2$，分支水平井长度 $L=300$ m，泄油半径 $r_e=1000$ m，井径 $r_w=0.107$ m，机械表皮系数 $S_v=3$，分支水平井到油层底部的距离 $z_w=11$ m。

从表 1 中可以知道，考虑了钻完井影响的真实井产能都要比理想井产能低，特别是在需要进行防砂的井中，其产能要比理想井低 20%～30%。因此，如果分支水平井的钻完井设计参考了理想井的产能预测，就会使得决策者对投资的风险性评估不足，从而造成分支水平井投产后达不到预期的收益。

表 1 某辐射状分支水平井几种裸眼完井方式下的产能表

完井方式	理想裸眼完井	实际裸眼完井	割缝衬管完井	裸眼预充填砾石完井
产能[m^3/(ks·MPa)]	17.75	16.36	14.81	13.79
产能比	1	0.922	0.801	0.777

所以在进行分支井产能预测时必须将由于钻井和不同完井方式所造成的影响考虑进去。

五、结　论

(1)通过运用等值渗流阻力的方法和势的叠加原理，在辐射状分支水平井自然产能公式的基础上，进行了实际裸眼完井，割缝衬管完井(包括带 ECP 的割缝衬管完井)，裸眼预充填砾石筛管完井和其他一些防砂筛管完井方式下的产能研究。

(2)结合现场实例，将各种非射孔完井方式下的产能与理想井产能进行比较，表明了数学模型的正确性。并指出应当结合实际情况考虑地层损害和完井方式对产能的影响，这对于正确指导分支井钻完井设计具有重要意义。

参 考 文 献

[1] БОРИСОВ ЮП，ТАБАКОВ ВП.有限厚度各向同性地层内的水平井和斜井的产量公式[C].莫斯科：石油天然气科学研究院，1964(16)：34-39.

[2] ABDEL-ALIM H，EL-SAYED，MOHAMMED M. Production performance of multilateral wells [J]. SPE 57542.

[3] 程林松，李春兰.分支水平井产能的研究[J].石油学报，1995，16(2)：49-55.

[4] 王卫红.分支水平井产能研究[J].石油钻采工艺，1997，19(4)：53-57.

[5] 程林松，李春兰.利用直井产能计算分支水平井产能的方法[J].大庆石油地质与开发，1998，17(3).

[6] 葛家理.现代油藏渗流力学原理[M].北京：石油工业出版社，2001.

[7] 熊友明，潘迎德.裸眼系列完井方式下水平井产能预测研究[J].西南石油学院学报，1997，19(2).

[8] 万仁溥.现代完井工程[M].2 版.北京：石油工业出版社，2000.

[9] 刘建锋，彭军，贾松，等.油气藏流动单元研究进展及认识[J].西南石油学院学报，2006，28(5)：19-22.

[10] 刘志斌，邓勇，凡哲元.混合遗传算法在气田产量构成优化模型中的应用[J].西南石油学院学报，2006，28(3)：1-4.

(收稿日期　2007-11-13　编辑　钟水清)