

射孔水平井产能预测方法

李龙龙, 吴明录, 姚 军, 高孙华, 刘丕养, 路然然

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要:为了预测射孔水平井的产能,在Joshi推导水平井产能公式所用模型的基础上,引入了三径向流模型,采用等值渗流阻力法,建立了孔眼未射穿污染带和孔眼射穿污染带2种情况下射孔水平井产能预测模型,考虑了孔深、孔密、孔径、相位、污染带的半径与污染程度、压实带的厚度与压实损害程度、水平井水平段长度等因素对产能的影响,流动机理更加符合油藏实际。利用所建立的产能预测模型进行参数敏感性分析,结果表明,射孔水平井产能随着孔深、孔径、孔密、相位、水平井水平段长度等参数的增大而增大,随着压实带厚度和压实损害程度的增大而减小,对水平井水平段长度、孔深、孔密、压实损害程度的敏感性较大,对相位、孔径、压实带厚度的敏感性较小;孔眼射穿污染带时产能指数对射孔参数的敏感性比孔眼未射穿污染带时低。工程设计时,应尽量增加水平井水平段长度、孔深、孔密,避免过高的压实损害程度。

关键词:水平井 产能预测 射孔 三径向流模型 等值渗流阻力法

中图分类号: TE33

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2014)02-0045-06

水平井具有泄油面积大、油气流动阻力小等优点,在油气勘探开发中的应用日益广泛^[1-5],其产能计算具有非常重要的意义。水平井的完井方式主要是射孔完井,射孔完井后流体流向孔眼的过程中流线会发生弯曲,且射孔过程中在孔眼周围形成压实带^[6-8],钻井液滤失形成污染带,这些都会对射孔水平井产能产生影响,因此对其预测存在一定难度。目前常用的水平井产能计算公式主要有 Borisov公式^[9]、Giger公式^[10]、Joshi公式^[11-12]和 Renard公式^[13],其中应用最广泛的是Joshi公式,对钻井和射孔所产生的污染则主要通过表皮系数来表征^[14-18],由于射孔水平井的产能难以通过数值模拟方法进行研究,因此其射孔表皮系数是通过修改直井的射孔表皮系数得到的。

表皮系数对产能预测结果的影响较大,其计算方法是在对模型进行简化处理的基础上,通过经验公式和数值模拟方法得到的,而且水平井的射孔表皮系数只是对直井射孔表皮系数进行了修改,因而难以准确计算射孔水平井的产能,为此,笔者在Joshi推导水平井产能公式所用模型的基础上引入三径向流模型,采用等值渗流阻力法^[19],建立了孔眼未射穿污染带和孔眼射穿污染带2种情况下射孔水平井产能预测模型,考虑了孔深、孔密、孔径、相

位、污染带的半径与污染程度、压实带的厚度与压实损害程度、水平井水平段长度等因素对产能的影响,流动机理更加符合油藏实际。

1 射孔水平井产能预测模型的建立

射孔完井后流体的流动主要分为油藏外边界向孔眼射穿区外边界的流动以及孔眼射穿区孔眼周围的径向流。由此,分别建立了孔眼未射穿污染带和孔眼射穿污染带时水平井的三径向流模型,应用等值渗流阻力法描述三径向流渗流过程,并对2种情况的产能指数进行求解。

1.1 孔眼未射穿污染带

由孔眼未射穿污染带时水平井的三径向流模型(图1)可见, I区为储层的未污染区,流体流动为Joshi水平井公式推导时描述的2个互相联系的二维流动^[11],将污染带半径看做垂直平面径向流的内边界半径,该区渗透率为油藏原始渗透率; II区为孔眼未射穿的污染带,流体流动为垂直平面径向流,外边界半径为污染带半径,内边界半径为井筒半径加上孔深,钻井液滤失产生污染带,导致渗透率降低; III区为孔眼射穿的污染带,流体流动为围绕孔眼的径向流,外边界半径为2个相邻的相同相位角

收稿日期: 2014-01-14。

作者简介: 李龙龙,男,在读博士研究生,从事油气渗流理论与应用研究。联系电话: 15192747182, E-mail: bzilonglong@163.com。

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助“复杂油藏开发和提高采收率的理论与技术”(IRT1294),中央高校基本科研业务费专项资金资助“化学驱流线数值试井解释理论与方法”(11CX04023A)。

孔眼之间距离的一半,内边界半径为压实带半径,该区渗透率与Ⅱ区相同;Ⅳ区为射孔压实带,流动为围绕孔眼的径向流,外边界半径为压实带半径,内边界半径为孔眼半径,射孔过程中在孔眼周围形成压实损害带,导致渗透率降低。

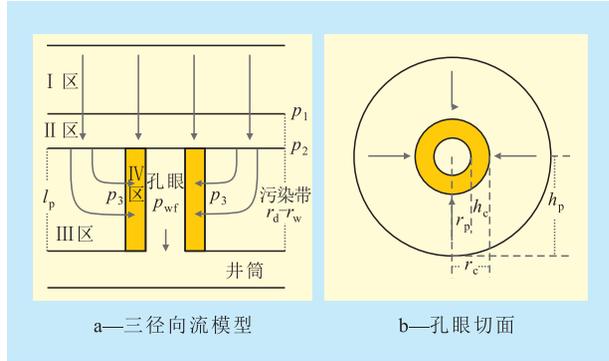


图1 孔眼未射穿污染带的水平井三径向流模型

p_1 为Ⅰ区内边界和Ⅱ区外边界处的压力, 10^{-1} MPa; p_2 为Ⅱ区内边界和Ⅲ区外边界处的压力, 10^{-1} MPa; p_3 为Ⅲ区内边界和Ⅳ区外边界处的压力, 10^{-1} MPa; p_{wf} 为井底流压, 10^{-1} MPa; l_p 为孔深, cm; r_d 为污染带半径, cm; r_w 为井筒半径, 包含水泥环厚度, cm; r_p 为孔眼半径, cm; r_c 为压实带半径, cm; h_c 为压实带厚度, cm; h_p 为2个相邻的相同相位角孔眼之间距离的一半, cm

Ⅰ区和Ⅱ区的流量都等于水平井产量,其表达式分别为

$$q_I = q = \frac{2\pi Kh(p_c - p_1)}{\mu \left[\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}}{\frac{L}{2}} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi r_d} \right]} \quad (1)$$

$$q_{II} = q = \frac{2\pi K_d L(p_1 - p_2)}{\mu \ln \frac{r_d}{r_w + l_p}} \quad (2)$$

其中

$$a = \frac{L}{2} \left[0.5 + \sqrt{\left(\frac{2r_c}{L}\right)^4 + 0.25} \right]^{0.5} \quad (3)$$

式中: q_I 和 q_{II} 分别为Ⅰ区和Ⅱ区的流量, cm^3/s ; q 为水平井产量, cm^3/s ; K 为油藏原始渗透率, μm^2 ; h 为油藏厚度, cm; p_c 为油藏供给边界压力,也是Ⅰ区外边界处的压力, 10^{-1} MPa; μ 为地层流体的粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; a 为水平井椭圆泄油体长轴的一半, cm; L 为水平井水平段长度, cm; K_d 为污染带的渗透率, μm^2 ; r_c 为油藏供给边界半径, cm。

由式(1)和式(2)得到Ⅰ区和Ⅱ区的渗流阻力分别为

$$R_I = \frac{\mu}{2\pi Kh} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}}{\frac{L}{2}} + \frac{\mu}{2\pi KL} \ln \frac{h}{2\pi r_d} \quad (4)$$

$$R_{II} = \frac{\mu}{2\pi K_d L} \ln \frac{r_d}{r_w + l_p} \quad (5)$$

式中: R_I 为Ⅰ区的渗流阻力, 10^{-1} MPa·s/cm³; R_{II} 为Ⅱ区的渗流阻力, 10^{-1} MPa·s/cm³。

对于单个孔眼周围的径向流动,Ⅲ区和Ⅳ区的流量相等,其表达式分别为

$$q_{pIII} = q_p = \frac{2\pi K_d l_p (p_2 - p_3)}{\mu \ln \frac{h_p}{r_c}} \quad (6)$$

$$q_{pIV} = q_p = \frac{2\pi K_c l_p (p_3 - p_{wf})}{\mu \ln \frac{r_c}{r_p}} \quad (7)$$

其中

$$q_p = \frac{q}{n_s L} \quad (8)$$

$$h_p = \frac{180}{\theta n_s} \quad (9)$$

式中: q_{pIII} 和 q_{pIV} 分别为通过Ⅲ区和Ⅳ区进入单个孔眼的流量, cm^3/s ; q_p 为单个孔眼的流量, cm^3/s ; K_c 为压实带渗透率, μm^2 ; n_s 为孔密, 个/cm; θ 为相位角, ($^\circ$), 取值为 $45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ 和 180° 。

由式(6)和式(7)得到Ⅲ区和Ⅳ区单个孔眼周围径向流动的渗流阻力分别为

$$R_{pIII} = \frac{\mu}{2\pi K_d l_p} \ln \frac{h_p}{r_c} \quad (10)$$

$$R_{pIV} = \frac{\mu}{2\pi K_c l_p} \ln \frac{r_c}{r_p} \quad (11)$$

式中: R_{pIII} 和 R_{pIV} 分别为Ⅲ区和Ⅳ区单个孔眼周围径向流动的渗流阻力, 10^{-1} MPa·s/cm³。

在孔眼射穿区中,对于单个孔眼,Ⅲ区的渗流阻力与Ⅳ区的渗流阻力为串联关系,由此可得

$$R_p = R_{pIII} + R_{pIV} \quad (12)$$

式中: R_p 为单个孔眼周围流体径向流动的渗流阻力, 10^{-1} MPa·s/cm³。

各孔眼周围流体径向流动的渗流阻力之间是并联关系,则

$$R_{p\text{总}} = \frac{R_p}{n_s L} \quad (13)$$

式中: $R_{p\text{总}}$ 为孔眼射穿区的渗流阻力, 10^{-1} MPa·s/cm³。

孔眼未射穿区的Ⅰ区渗流阻力和Ⅱ区渗流阻力以及孔眼射穿区的渗流阻力之间为串联关系,则

$$R_{\text{总}} = R_I + R_{II} + R_{p\text{总}} \quad (14)$$

式中： $R_{\text{总}}$ 为油藏总的渗流阻力， $10^{-1} \text{ MPa} \cdot \text{s} / \text{cm}^3$ 。

由油藏流体流动的总渗流阻力可得孔眼未射穿污染带时射孔水平井产能指数为

$$J = \frac{1}{BR_{\text{总}}} = \frac{2\pi Kh}{B\mu \left[\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}}{\frac{L}{2}} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi r_d} + \frac{Kh}{K_d L} \ln \frac{r_d}{r_w + l_p} + \frac{Kh}{n_s L K_d l_p} \ln \frac{h_p}{r_c} + \frac{Kh}{n_s L K_c l_p} \ln \frac{r_c}{r_p} \right]} \quad (15)$$

式中： J 为水平井产能指数， $10 \text{ cm}^3 / (\text{s} \cdot \text{MPa})$ ； B 为体积系数。

1.2 孔眼射穿污染带

由孔眼射穿污染带时水平井的三径向流模型(图2)可见，I' 区为储层未射穿区，流体流动为 Joshi 公式推导时描述的 2 个互相联系的二维流动^[11]，将井筒半径与孔深之和看做垂直平面径向流的内边界半径，该区渗透率为油藏原始渗透率；II' 区和 III' 区分别为孔眼射穿的未污染区与污染区，流体流动均为围绕孔眼的径向流，外边界半径为 2 个相邻相位相同的孔眼之间距离的一半，内边界半径为压实带半径，前者的渗透率为油藏原始渗透率，后者的渗透率为钻井液污染后的渗透率；IV' 区和 V' 区分别为未污染区和污染区的射孔压实带，流体流动为围绕孔眼的径向流，外边界半径为压实带半径，内边界半径为孔眼半径，由于射孔前 2 个区的渗透率不同，射孔导致压实带的渗透率也不同。

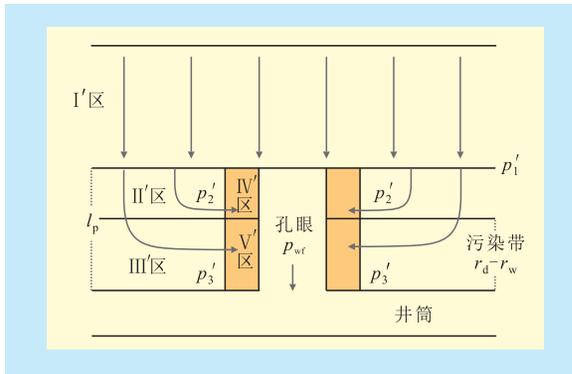


图2 孔眼射穿污染带的水平井三径向流模型

p_1' 为 I' 区内边界和 II' 区、III' 区外边界处的压力， 10^{-1} MPa ； p_2' 为 II' 区内边界和 IV' 区外边界处的压力， 10^{-1} MPa ； p_3' 为 III' 区内边界和 V' 区外边界处的压力， 10^{-1} MPa

I' 区的流量为

$$q = \frac{2\pi Kh(p_e - p_1')}{\mu \left[\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}}{\frac{L}{2}} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi(r_w + l_p)} \right]} \quad (16)$$

由式(16)得 I' 区渗流阻力为

$$R_V = \frac{\mu}{2\pi Kh} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}}{\frac{L}{2}} + \frac{\mu}{2\pi KL} \ln \frac{h}{2\pi(r_w + l_p)} \quad (17)$$

式中： R_V 为 I' 区的渗流阻力， $10^{-1} \text{ MPa} \cdot \text{s} / \text{cm}^3$ 。

对于单个孔眼周围的径向流动，II' 区和 IV' 区的流量相等，III' 区和 V' 区的流量相等，其表达式分别为

$$q_{p,II'} = q_{p,IV'} = \frac{2\pi K(r_w + l_p - r_d)(p_1' - p_2')}{\mu \ln \frac{h_p}{r_c}} \quad (18)$$

$$q_{p,III'} = q_{p,V'} = \frac{2\pi K_d(r_d - r_w)(p_1' - p_3')}{\mu \ln \frac{h_p}{r_c}} \quad (19)$$

$$q_{p,IV'} = q_{p,I'} = \frac{2\pi K_{c1}(r_w + l_p - r_d)(p_2' - p_{wf})}{\mu \ln \frac{r_c}{r_p}} \quad (20)$$

$$q_{p,V'} = q_{p,II'} = \frac{2\pi K_{c2}(r_d - r_w)(p_3' - p_{wf})}{\mu \ln \frac{r_c}{r_p}} \quad (21)$$

式中： $q_{p,II'}$ ， $q_{p,III'}$ ， $q_{p,IV'}$ 和 $q_{p,V'}$ 分别为通过 II' 区、III' 区、IV' 区和 V' 区进入单个孔眼的流量， cm^3/s ，其中通过 II' 区和 IV' 区进入单个孔眼的流量用 $q_{p,I}$ 表示，通过 III' 区和 V' 区进入单个孔眼的流量用 $q_{p,II}$ 表示； K_{c1} 为油藏未污染区射孔压实后的渗透率， μm^2 ； K_{c2} 为油藏污染区射孔压实后的渗透率， μm^2 。

由此得到 II' 区、III' 区、IV' 区和 V' 区单个孔眼周围径向流动的渗流阻力分别为

$$R_{p,II'} = \frac{\mu}{2\pi K(r_w + l_p - r_d)} \ln \frac{h_p}{r_c} \quad (22)$$

$$R_{p,III'} = \frac{\mu}{2\pi K_d(r_d - r_w)} \ln \frac{h_p}{r_c} \quad (23)$$

$$R_{p,IV'} = \frac{\mu}{2\pi K_{c1}(r_w + l_p - r_d)} \ln \frac{r_c}{r_p} \quad (24)$$

$$R_{p,V'} = \frac{\mu}{2\pi K_{c2}(r_d - r_w)} \ln \frac{r_c}{r_p} \quad (25)$$

式中： $R_{pII'}$ 、 $R_{pIII'}$ 、 $R_{pIV'}$ 和 $R_{pV'}$ 分别为 II' 区、III' 区、IV' 区和 V' 区单个孔眼周围径向流动的渗流阻力， $10^{-1} \text{ MPa}\cdot\text{s}/\text{cm}^3$ 。

在孔眼射穿区中，孔眼在 II' 区的渗流阻力与 IV' 区的渗流阻力以及孔眼在 III' 区的渗流阻力与 V' 区的渗流阻力均为串联关系，而对于同一个孔眼，II' 区和 IV' 区串联后的渗流阻力与 III' 区和 V' 区串联后的渗流阻力之间为并联关系，由此可得

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_{pII'} + R_{pIV'}} + \frac{1}{R_{pIII'} + R_{pV'}} \quad (26)$$

各孔眼周围流体径向流动的渗流阻力之间是并联的关系，孔眼射穿区渗流阻力与孔眼未射穿区渗流阻力之间为串联关系，则

$$R_{\text{总}} = R_r + \frac{R_p}{n_s L} \quad (27)$$

由油藏流体流动的总渗流阻力可得孔眼射穿污染带的射孔水平井产能指数为

$$J = \frac{1}{BR_{\text{总}}} = \frac{2\pi Kh}{B\mu \left[\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}}{\frac{L}{2}} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi(r_w + l_p)} + \frac{1}{\zeta} \right]} \quad (28)$$

其中

$$\zeta = \frac{\frac{n_s L}{h}}{\frac{1}{r_w + l_p - r_d} \ln \frac{h_p}{r_c} + \frac{K}{K_{c1}(r_w + l_p - r_d)} \ln \frac{r_c}{r_p}} + \frac{\frac{n_s L}{h}}{\frac{K}{K_{d1}(r_d - r_w)} \ln \frac{h_p}{r_c} + \frac{K}{K_{c2}(r_d - r_w)} \ln \frac{r_c}{r_p}} \quad (29)$$

2 参数敏感性分析

通过比较孔深和井筒半径之和与污染带半径的关系，判断孔眼是否射穿污染带，以此来选择相应的产能公式，将所需参数代入即可得到产能指数。

建立油藏模型，分析射孔水平井产能指数对水平井水平段长度、孔深、孔密、孔径、相位、压实带厚度和压实损害程度的敏感性。主要参数包括：油藏厚度为 20 m，供油半径为 300 m，井筒长度为 200 m，井筒半径为 10 cm，油藏原始渗透率为 $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；污染带的半径为 70 cm，渗透率为 $12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；射孔压实带的厚度为 12 mm，压实损害程度为 70%（渗透

率为射孔前的 30%），流体粘度为 $9 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，体积系数为 1.1。孔深 10~60 cm 为孔眼未射穿污染带，孔深 60~120 cm 为孔眼射穿污染带。

在孔径为 1.2 cm，孔密为 20 个/m，相位角为 90° 的情况下，研究了水平井水平段长度分别为 100, 130, 160, 190, 220, 250, 280 和 310 m 时产能指数随孔深的变化。由图 3 可知：①当孔深一定时，产能指数随着水平井水平段长度的增加而增大；当水平井水平段长度一定时，产能指数随着孔深的增加而增大；②随着孔深的增加，产能指数对水平井水平段长度的敏感性略有增大，孔眼未射穿污染带时比孔眼射穿污染带时低。总体来说，水平井水平段长度对产能的影响很大。

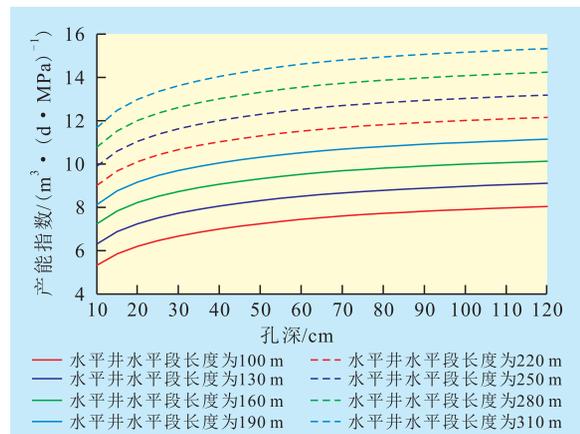


图3 不同水平井水平段长度时产能指数随孔深的变化

在孔径为 1.2 cm，相位角为 90° 的情况下，研究了孔密分别为 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 和 40 个/m 时产能指数随孔深的变化。由图 4 可知：①孔深一定时，产能指数随着孔密的增大而增大；②随着孔深的增大，产能指数对孔密的敏感性逐渐减小，孔眼未射穿污染带时比孔眼射穿污染带时高；③在孔密相同的情况下，随着孔深的增大，产能指数对孔深的敏感性逐渐降低，孔眼未射穿污染带时比孔眼射

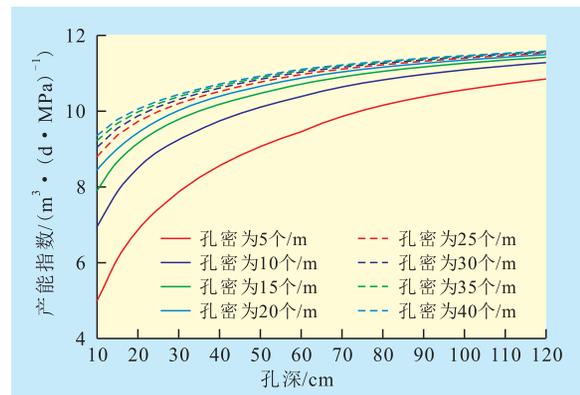


图4 不同孔密时产能指数随孔深的变化

穿污染带时高;④在孔深相同的情况下,孔密较小时,产能指数对孔密非常敏感,但随着孔密的增大,敏感性逐渐降低,当孔密达到一定程度之后,敏感性不再明显。总体来说,孔深、孔密对产能的影响大。

在孔径为1.2 cm,孔密为20个/m,相位角为90°的情况下,研究了压实损害程度分别为50%,55%,60%,65%,70%,75%,80%和85%时产能指数随孔深的变化。由图5可知:①当孔深一定时,产能指数随着压实损害程度的增大而减小;②随着孔深的增大,产能指数对压实损害程度的敏感性逐渐减小,孔眼未射穿污染带时比孔眼射穿污染带时高;③在孔深相同的情况下,压实损害程度较高时,产能指数对压实损害程度非常敏感,但随着压实损害程度的减小,敏感性逐渐降低,当压实损害程度减小到一定程度之后,敏感性不再明显。总体来说,压实损害程度对产能的影响较大。

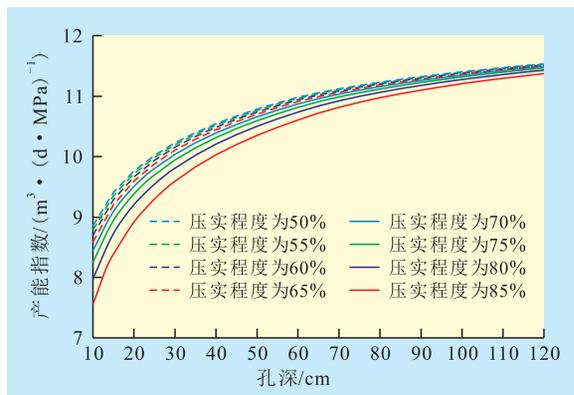


图5 不同压实损害程度时产能指数随孔深的变化

在孔密为20个/m、相位角为90°以及常见孔径(0.8~1.2 cm)的情况下,研究了孔径分别为0.8,0.9,1.0,1.1和1.2 cm时产能指数随孔深的变化。结果表明:①当孔深一定时,产能指数随着孔径的增大而增大,但是其对孔径的敏感性较小,如孔深为60 cm,孔径分别为0.8和1.2 cm时,产能指数分别为12.463和12.578 $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$;②随着孔深的增大,产能指数对孔径的敏感性逐渐减小,孔眼未射穿污染带时比孔眼射穿污染带时高,如孔深为20 cm,孔径分别为0.8和1.2 cm时,产能指数分别为10.734和10.995 $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$;孔深为100 cm,孔径分别为0.8和1.2 cm时,产能指数分别为13.068和13.128 $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$ 。总体来说,孔径对产能的影响较小。

在孔径为1.2 cm,孔密为20个/m的情况下,研究了相位角分别为45°,60°,90°,120°和180°时产能指数随孔深的变化。结果表明:①当孔深一定时,

产能指数随着相位角的增大而增大,产能指数对相位角的敏感性较小,比如孔深为60 cm,相位角分别为60°和120°时,产能指数分别为12.543和12.603 $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$;②随着孔深的增大,产能指数对相位角的敏感性逐渐减小,孔眼未射穿污染带时比孔眼射穿污染带时高,比如孔深为20 cm,相位角分别为60°和120°时,产能指数分别为10.916和11.053 $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$;孔深为100 cm,相位角分别为60°和120°时,产能指数分别为13.110和13.141 $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$ 。总体来说,相位角对产能的影响较小。

在孔径为1.2 cm,孔密为20个/m,相位角为90°以及常见压实带厚度(0.64~1.27 cm)的情况下,研究了压实带厚度分别为0.6,0.7,0.8,0.9,1.0,1.1,1.2和1.3 cm时产能指数随孔深的变化。结果表明:①当孔深一定时,产能指数随着压实带厚度的增大而减小,产能指数对压实带厚度的敏感性非常小,比如孔深为60 cm,压实带厚度分别为0.6和1.2 cm时,产能指数分别为12.660 8和12.578 4 $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$;②随着孔深的增大,产能指数对压实带厚度的敏感性逐渐减小,孔眼未射穿污染带时比孔眼射穿污染带时高,比如孔深为20 cm,压实带厚度分别为0.6和1.2 cm时,产能指数分别为11.186 3和10.995 4 $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$;孔深为100 cm,压实带厚度分别为0.6和1.2 cm时,产能指数分别为13.170 4和13.128 0 $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$ 。总体来说,压实带厚度对产能的影响较小。

3 结论

新建立的射孔水平井产能预测模型考虑了孔深、孔密、孔径、相位、污染带的半径与污染程度、压实带的厚度与压实损害程度、水平井水平段长度等因素。由敏感性分析可知,射孔水平井产能指数随着孔深、孔径、孔密、相位、水平井水平段长度等参数的增大而增大,随着压实带厚度和压实损害程度的增大而减小,对水平井水平段长度、孔深、孔密、压实损害程度的敏感性较大,对相位、孔径、压实带厚度的敏感性较小;孔眼未射穿污染带时产能指数对射孔参数的敏感性比孔眼射穿污染带时高。工程设计时,应尽量增加水平井水平段长度、孔深、孔密,避免压实损害程度过高,但没有必要无限制地增加孔深与孔密。

在新建立的射孔水平井产能预测模型的基础上,研究各射孔参数之间的约束关系,可以形成一套系统的水平井射孔参数优化方法。

参考文献:

- [1] 王聪.胜利油区致密砂岩油藏水平井开采技术[J].油气地质与采收率,2013,20(3):86-88.
- [2] 徐梦雅,廖新维,何逸凡,等.完井方式对致密气藏压裂水平井产能的影响[J].油气地质与采收率,2012,19(2):67-71.
- [3] 熊友明,刘理明,张林,等.我国水平井完井技术现状与发展建议[J].石油钻探技术,2012,40(1):1-6.
- [4] 孙致学,姚军,唐永亮,等.低渗透油藏水平井联合井网型式研究[J].油气地质与采收率,2011,18(5):74-77.
- [5] 杨勇,王洪宝,牛栓文,等.东辛地区不同类型油藏水平井优化设计[J].油气地质与采收率,2010,17(2):80-82,86.
- [6] Asadi M, Preston F W.Characterization of the crushed zone formed during jet perforation by qualitative scanning electron microscopy and quantitative image analysis[C].SPE 22812, 1991.
- [7] Pucknell J K, Berhmann L A.An investigation of the damaged zone created by perforating[C].SPE 22811-MS, 1991.
- [8] 李东传,唐国海,孙新波,等.射孔压实带研究[J].石油勘探与开发,2000,27(5):112-114.
- [9] Borisov J P.Oil production using horizontal and multiple deviation wells, Nedra, Moscow [M].Bartlesville Oklahoma: Philips Petro-

- leum Co.,The R&D Library Translation, 1984.
- [10] Giger F M, Reiss L H, Jourdan A P.The reservoir engineering aspects of horizontal drilling[C].SPE 13024-MS, 1984.
- [11] Joshi S D.Augmentation of well productivity with slant and horizontal wells[C].SPE 15375-PA, 1988.
- [12] Joshi S D.A review of horizontal well and drainhole technology [C].SPE 16868-MS, 1987.
- [13] Gerard Renard, Dupuy J M.Formation damage effects on horizontal-well flow efficiency[C].SPE 19414-PA, 1991.
- [14] 熊友明,潘迎德.各种射孔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,1996,18(2):56-62.
- [15] 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(增刊):105-106.
- [16] 成绥民,王天顺.表皮系数系统分解方法[J].钻采工艺,1991,14(4):35-40.
- [17] 张红霞.表皮系数系统分解研究与应用[D].青岛:中国石油大学(华东),2006:8-12.
- [18] 董长银,武龙,王爱萍,等.不同完井方式水平井表皮系数及产能评价新方法[J].特种油气藏,2009,16(6):77-81.
- [19] 张建国,杜殿发,侯健,等.油气层渗流力学[M].东营:中国石油大学出版社,2009:126-133.

编辑 刘北羿

(上接第34页)

碱之间的作用逐渐占据主导地位,可以使碱在砂粒表面的吸附量从 1.50 mg/g 增大到 1.70 mg/g。当碱质量分数小于 1.0%时,聚合物质量浓度基本不变,当碱质量分数大于 1.0%时,聚合物与碱作用加强,聚合物的吸附量快速增加。

参考文献:

- [1] 王家禄,袁士义,石法顺,等.三元复合驱化学剂浓度变化的实验研究[J].中国科学: E 辑 技术科学,2009,39(6):1 159-1 166.
- [2] 刘春天,李星.驱替体系的主要性质对驱油效率的影响[J].油气地质与采收率,2012,19(1):66-68.
- [3] 沈平平,俞家庸.大幅度提高石油采收率的基础研究[M].北京:石油工业出版社,2002:274-282.
- [4] 张新民,冯如森,宋新旺,等.胜利油区海上油田二元复合驱体系性能评价[J].油气地质与采收率,2011,18(5):48-50.
- [5] 赵修太,白英睿,韩树柏,等.热-化学技术提高稠油采收率研究进展[J].特种油气藏,2012,19(2):8-13.
- [6] 崔正刚,刘世霞,何江莲.重烷基苯磺酸盐在大庆油砂上的静态吸附损失研究[J].油田化学,2000,17(4):359-363.
- [7] 郭兰磊.聚合物吸附滞留规律及性能变化研究[J].石油与天然气化工,2011,40(6):587-589.

- [8] 张同凯,李永环,赵凤兰.双河油田 IV5-11 层系复合驱油体系实验研究[J].油气地质与采收率,2012,19(1):62-65.
- [9] 董大鹏,贾忠伟,于佰林.重烷基苯磺酸盐在岩石矿物上的静态吸附[J].断块油气田,2009,16(1):105-107.
- [10] 苑慧莹,李川,单存龙,等.碱对烷基苯磺酸盐吸附损失的影响研究[J].油田化学,2007,24(3):250-254.
- [11] 田利,邹明珠,许宏鼎,等.采油污水中部分水解聚丙烯酰胺浓度的测定[J].吉林大学学报:理学版,2003,41(2):224-227.
- [12] 李道山,侯吉瑞,徐瑞娟.三元复合驱油液各组分在大庆油砂上的吸附研究[J].油田化学,2001,18(4):358-361.
- [13] 潘静.北三西二元复合驱油体系性能研究[D].大庆:东北石油大学,2011.
- [14] Wang Demin, Cheng Jiecheng, Li Qun, et al.An alkaline bio-surfactant polymer flooding pilots in Daqing Oil Field [C].SPE 57304,2012.
- [15] 周雅萍,赵丽辉,王希芹,等.化学驱油体系中各组分在油砂表面上静吸附特征研究[J].化学工程师,2009,161(2):63-67.
- [16] 董文龙,徐涛,李洪生,等.聚合物—表面活性剂二元复合体系微观及宏观驱油特征——以河南双河油田某区块为例[J].油气地质与采收率,2011,18(3):53-56.
- [17] 康万利,张磊,孟令伟,等.两亲聚合物在岩石矿物上的静态吸附研究[J].应用化工,2012,41(11):1 865-1 871.

编辑 刘北羿