

文章编号: 1673- 9469(2011) 01- 0100- 06

兴安岭群油层注水井速敏伤害酸化规模的探讨

杨宝泉^{1,2}, 周治刚³, 陈冲⁴

(1. 中国矿业大学 地球科学与测绘学院, 北京 100083; 2. 大庆油田有限责任公司 采油工程研究院, 黑龙江 大庆 163453; 3. 大庆油田有限责任公司 第三采油厂, 黑龙江 大庆 163453; 4. 大庆油田有限责任公司 第一采油厂, 黑龙江 大庆 163001)

摘要:兴安岭群油层粘土矿物含量较高, 胶结疏松, 注水过程中存在较强的速敏伤害。本文以速敏实验为基础, 结合现场生产参数, 通过理论推导, 计算出该油层常规注水井和压裂注水井的速敏伤害半径和解除伤害的最佳酸化半径, 通过现场7口井的试验, 取得了较好的效果。速敏试验表明, 兴安岭群油层存在中等偏强~ 强的速敏伤害, 常规注水井I ~ IV油层组伤害半径分别为2.42m、0.94m、1.30m、0.26m, 压裂注水井I油层组存在速敏伤害, 伤害半径为3.3m。酸化设计的规模应以解除地层伤害, 且取得最大效益为准则。常规注水井I ~ IV油层组的最佳酸化半径分别为2.4m、1.6m、1.6m和1.8m, 压裂注水井I油层组酸化半径为3.3m。兴安岭群油层7口井试验结果表明, 该设计方法具有较强的实用性, 可用于指导其它砂岩油层的酸化设计。

关键词:兴安岭群; 速敏; 伤害半径; 酸化; 现场试验

中图分类号: TE357.62

文献标识码: A

Discussion of acidizing radius of speed sensitivity injectors of Xinganling Group

YANG Bao-quan^{1,2}, ZHOU Zhi-gang³, CHEN Chong⁴

(1. College Of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. Oil Production Engineering Research Institute, Daqing Oilfield, Heilongjiang Daqing 163453, China; 3. No. 3 Oil Production Company, Daqing Oilfield Company Ltd., Heilongjiang Daqing 163453, China; 4. No. 1 Oil Production Company of Daqing Oilfield Company Ltd., Heilongjiang Daqing 163001, China)

Abstract: Damage of speed sensitivity during water injection process exists in the Xinganling Group because of the high clay content and loose stratigraphic framework. According to the speed sensitivity experiment and the production parameters, this paper has calculated the damage radiuses and the optimal acidizing radiuses of conventional injection well and fractured injection well through theoretical derivation. This technology has been applied on 7 wells in field test. Speed sensitivity experiment shows that Xinganling Group shows m- strong to strong speed sensitivity. The damage radiuses of I ~ IV layers of conventional injection well are 2.42m, 0.94m, 1.30m and 0.26m respectively, damage of fractured injection well is only exist in I layer and the damage radius is 3.3m. Theoretical derivation shows that the optimal acidizing radiuses of I ~ IV layers of conventional injection well and I layer of fractured injection well are 2.4m, 1.6m, 1.6m, 1.8m and 3.3m respectively. Field test in 7 wells has confirmed that this method has strong practical applicability and can be used to the acidizing design of other sandstone oilfield.

Key words: Xinganling Group; speed sensitivity; damage radius; acidizing; field test

兴安岭群油层是海拉尔油田的主要开发层系, 其地质储量约占海拉尔盆地已探明储量的50%左右。兴安岭群对应地质时期为侏罗纪, 由

于发育填充过程中伴随有频繁的构造活动和火山作用, 形成了较为复杂的沉积环境, 因此储层岩性复杂, 粘土矿物含量较高(平均含量达到24.8%),

收稿日期: 2010- 10- 22

作者简介: 杨宝泉(1970-), 男, 黑龙江人, 博士研究生, 高级工程师, 从事油田化学工作。

表 1 速敏指数和伤害程度的关系

Tab. 1 Relation of damage degree of permeability and speed sensitivity index

伤害程度	强	中偏强	中等	中偏弱	弱	无
速敏指数	≥0.8	0.8- 0.6	0.6- 0.4	0.4- 0.2	0.2- 0.01	≤0.01

储层胶结疏松, 注水过程中粘土矿物容易脱落、分散和运移, 堵塞孔隙, 使注水井注水能力下降, 严重影响油田开发效果^[1- 2]。本文在速敏实验的基础上, 通过理论推导, 计算出常规注水井和压裂注水井的速敏伤害深度和解除伤害的最佳酸化半径, 为酸化解堵措施的实施提供了有力的依据。

1 兴安岭群油层速敏伤害实验

粘土矿物对油层的伤害主要有两种, 一种是由于蒙脱石膨胀而引起的水敏伤害; 第二种是由于伊利石等易脱落颗粒运移而引起的速敏伤害。在油田实际生产过程中, 常采用注防膨剂的方法抑制粘土膨胀, 而对于速敏, 则采用酸化解堵的方法, 解除速敏伤害。

兴安岭群粘土矿物主要为蒙脱石、高岭石和伊利石, 若采用普通注入水进行实验, 容易发生水敏伤害, 因此, 实验中采用加入防膨剂的注入水, 研究不同注入速度下, 渗透率的变化规律。

1. 1 速敏伤害实验

速敏性是指因流动速度变化引起地层中微粒运移而堵塞喉道, 造成渗透率下降的现象^[3- 5]。采用速敏指数评价岩样的速敏性, 速敏指数为

$$\eta = (K_l - K_s) / K_l$$

式中 η —速敏指数; K_l —小于临界流速时的原始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_s —大于临界流速时, 渗透率的最小值, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。渗透率伤害强度与速敏指数的关系如表 1。

实验方法: 以不同的注入速度, 向岩芯注入标准盐水, 在各个注入速度下测定岩石的渗透率, 从注入速度与渗透率的变化关系曲线上, 判断岩石对流速的敏感性, 并找出其临界速度, 计算速敏指数^[6- 7]。按下式将实验临界流量换算成线速度。

$$V = 14.4 Q / (A \varphi) \tag{1}$$

式中 V —流体运动的线速度, m/d ; Q —流量, ml/min ; A —岩样截面积, cm^2 ; φ —岩样孔隙度, %。

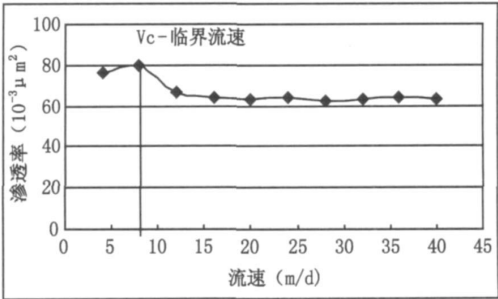


图1 34号岩心速敏曲线

Fig.1 Speed sensitive curve of No. 34 core

以渗透率为纵坐标, 以流速为横坐标, 绘出速敏实验曲线(图 1)。从实验数据可见(表 2), 兴安岭群油层随深度增加, 呈逐渐下降的趋势, 但总体来看, 整个储层都具有较强的速敏性。因此必须采取相应的酸化解堵技术, 解除速敏伤害。

1. 2 速敏伤害半径的确定

在实际注水过程中, 注入水是以井筒为中心, 呈径向流方式渗流的, 离井筒越近, 流速就越高, 反之则越低, 因此油层发生速敏伤害, 一般是在井筒周围一定半径内发生的。

表 2 速敏实验数据表

Tab. 2 Data of speed sensitivity

油层组	深度 / m	临界流量 / (ml/min)	临界流速 / (m/d)	速敏指数	速敏程度
I	1331	0.43	2.10	0.9	强
I	1342	0.47	2.30	0.89	强
II	1385	1.00	4.89	0.79	中偏强
II	1394	1.40	6.85	0.63	中偏强
III	1483	0.80	3.91	0.77	中偏强
III	1507	0.88	4.30	0.46	中等
IV	1643	3.20	15.65	0.21	中偏弱
IV	1704	6.00	2.10	0.13	弱

兴安岭群注水井分为常规注水井和压裂注水井。常规注水井注水是以井筒为中心呈径向流方式渗流(图 2), 而压裂注水井由于压裂裂缝的影

响,注水方式由圆形径向流转变为以椭圆径向流方式向地层渗流(图3)。这里分别针对常规注水井和压裂注水井,进行速敏伤害特征的探讨。

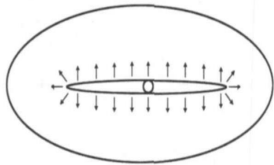


图2 常规注水方式
Fig.2 Conventional injection mode

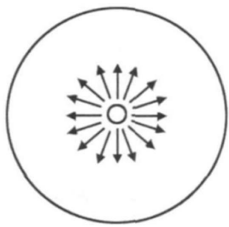


图3 压裂后注水方式
Fig.3 Fractured injection mode

径向流流速公式表明,在井筒半径 r 处的流量和流速的关系为

$$V=Q/(A\varphi)$$

式中 V —流速, m/d ; Q —单位厚度吸水油层的日实注量, m^3/d ; φ —孔隙度, %; A —半径 r 处单位厚度地层截面积。

对于常规注水井,注水呈圆形方式渗流,则单位厚度地层截面积 $A=2\pi r$,相应的流量和流速的关系为

$$V_{\text{常规}}=Q/(2\pi r\varphi) \tag{2}$$

对于压裂注水井,注水呈椭圆形方式渗流,则单位厚度地层截面积 $2\pi r+4b$, b 为椭圆长半轴长, a 为短半轴长,这里 b 为压裂实际缝长, a 为井眼半径长。相应的流量和流速为

$$V_{\text{压裂}}=Q/(2\pi r\varphi+4b\varphi) \tag{3}$$

已知,兴安岭群地层平均孔隙度为 15%,压裂井单侧有效缝长,一般为 10m,常规注水井,单位厚度油层配注为 $5\text{m}^3/\text{d}$,压裂井配注 $20\text{m}^3/\text{d}$ 。那么,结合速敏实验结果,通过式(2)和式(3)可计算出常规井和压裂井的速敏伤害半径(表3)。

从表3可看出以下几点:

1) 常规井在目前配注条件下, I ~ IV油层组均存在不同程度的速敏伤害。其中 I 油层组速敏伤害半径最大,达到 2.5m 左右, IV 油层组伤害半径较小,只有不到 0.5m。

2) 压裂井只有 I 油层组存在速敏伤害,其它大部分油层组不存在速敏伤害,但是一旦发生速敏伤害,那么其伤害半径远大于同类油层常规井的伤害半径。

表3 常规井和压裂井速敏伤害半径计算结果

Tab.3 The calculation results of the damage radius of conventional well and fracturing well

油层组	临界流速 /(m/d)	速敏伤害半径 / m			
		常规井		压裂井	
I	2.10	2.52	3.72		
I	2.30	2.31	2.42	2.87	3.30
II	4.89	1.09	0.94	-2.03	-2.65
II	6.85	0.78		-3.27	
III	3.91	1.36	1.30	-0.94	-1.69
III	4.30	1.23		-1.44	
IV	15.65	0.34		-5.01	
IV	29.35	0.18	0.26	-5.65	-5.33

分析造成这种差异的原因有以下几方面:

压裂后,注水过流面积增大,导致流速降低,因此压裂注水井不容易发生速敏伤害。

压裂后,注水方式由圆的径向流变为扁椭圆形径向流,近井地带流速递减慢,因此一旦流速超过临界流速,其伤害半径要远远大于常规井的伤害半径。

伤害半径过大会给后续的酸化措施带来很大难度,因此建议压裂注水井在实际注水时,要严格控制注入速度,以避免速敏伤害的发生。

2 速敏伤害酸化半径的确定

油层发生堵塞后,常采用酸化措施进行解堵。酸化措施的规模应以经济可行且最大程度地解除地层堵塞为目的,因此如何确定和设计酸化半径是决定酸化措施效益的一个重要因素。

设井筒半径为 R_w ,堵塞半径为 R_s ,井控制地层半径为 R_e ,井底压力为 P_1 ,地层压力为 P_3 ,堵塞区前缘压力为 P_2 ,地层厚度为 h ,未污染地层渗透率为 K ,地层污染后渗透率为 K_2 ,注入水粘度为 μ ,井筒、污染带、油藏边界情况如图4所示。

由达西定律^[8-9]

$$v=\frac{Kdp}{\mu dr}$$

$$Q=vA=\frac{2\pi K\phi hrdP}{\mu dr}$$

将上式分离变量并积分得

$$\int_{P_3}^{P_1} dP = \frac{Q\mu}{2\pi K h} \int_{R_w}^{R_e} \frac{dr}{r}$$

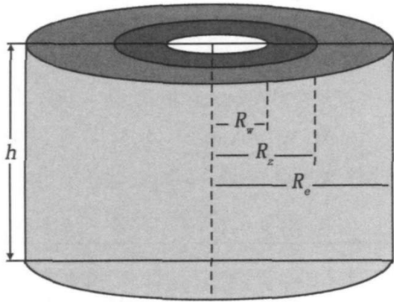


图4 封闭油藏酸化井示意图
Fig. 4 Schematic diagram of acidizing well of sealed reservoir

常规注水井平面径向流的流量公式

$$Q_{常} = \frac{2\pi K h (P_1 - P_3)}{\mu \ln \frac{R_e}{R_w}} \quad (3)$$

同样可得压裂注水井椭圆形径向流的流量公式

$$Q_{压} = \frac{2\pi K h (P_1 - P_3)}{\mu \ln \left(\frac{R_e + 0.64b}{R_w + 0.64b} \right)} \quad (4)$$

下面分别针对常规井和压裂井, 计算酸化后注水井的注入量, 进而确定酸化半径。

2.1 增注倍数的确定

首先针对常规注水井进行计算。

根据式(3), 地层未发生堵塞时, 其注入量为

$$Q_1 = \frac{2\pi K h (P_1 - P_3)}{\mu \ln \frac{R_e}{R_w}} \quad (5)$$

地层堵塞后, 其注入量为

对于非污染区 $R_s \leq R \leq R_e$

$$Q_2 = \frac{2\pi K h (P_2 - P_3)}{\mu \ln \frac{R_e}{R_s}}$$

污染区 $R_w \leq R \leq R_s$

$$Q_3 = \frac{2\pi K h (P_1 - P_2)}{\mu \ln \frac{R_s}{R_w}}$$

根据连续性原理, 在 $R_w \leq R \leq R_e$ 范围内 $Q_2 = Q_3$, 可得注水井注入量为

$$Q_4 = \frac{2\pi K h (P_1 - P_3)}{\mu \left(\ln \frac{R_e}{R_s} + \frac{1}{X} \ln \frac{R_s}{R_w} \right)} \quad (6)$$

式中 $X = K_2/K$ 。

若采取酸化措施, 酸化半径为 R_a , 酸化后注入量的计算同样符合连续性原理, 根据式(6) 当 $R_w < R_a \leq R_s$ 时, 可得

$$Q_5 = \frac{2\pi K h (P_1 - P_3)}{\left(\ln \frac{R_e}{R_s} + \frac{1}{X_2} \ln \frac{R_a}{R_w} + \frac{1}{X} \ln \frac{R_s}{R_a} \right)}$$

式中 X_2 为渗透率恢复率。

则增注倍数为

$$\partial_1 = \frac{Q_5}{Q_4} =$$

$$\frac{\ln \left(R_e \cdot R_s^{\frac{1}{X}-1} \cdot R_w^{-\frac{1}{X}} \right)}{\ln \left(R_e \cdot R_s^{\frac{1}{X}-1} \cdot R_w^{-\frac{1}{X_2}} \cdot R_a^{\frac{1}{X_2}-\frac{1}{X}} \right)} \quad (7)$$

当 $R_a > R_s$ 时

$$Q_6 = \frac{2\pi K h (P_1 - P_3)}{\mu \left(\ln \frac{R_e}{R_a} + \frac{1}{X_2} \ln \frac{R_s}{R_w} + \frac{1}{X_1} \ln \frac{R_a}{R_s} \right)}$$

则增注倍数为

$$\partial_2 = \frac{Q_6}{Q_4} =$$

$$\frac{\ln \left(R_e \cdot R_s^{\frac{1}{X}-1} \cdot R_w^{-\frac{1}{X}} \right)}{\ln \left(R_e \cdot R_s^{\frac{1}{X_2}-\frac{1}{X_1}} \cdot R_w^{-\frac{1}{X_2}} \cdot R_a^{\frac{1}{X_1}-1} \right)} \quad (8)$$

同样, 可得压裂井酸化的增注倍数。

当 $R_w < R_a \leq R_s$ 时

$$\partial_3 = \frac{\ln \left[(R_e + 0.64b) \cdot (R_s + 0.64b)^{\frac{1}{X}-1} \cdot (R_w + 0.64b)^{-\frac{1}{X}} \right]}{\ln \left[(R_e + 0.64b) \cdot (R_s + 0.64b)^{\frac{1}{X}-1} \cdot (R_w + 0.64b)^{-\frac{1}{X_2}} \cdot (R_a + 0.64b)^{\frac{1}{X_2}-\frac{1}{X}} \right]} \quad (9)$$

当 $R_a > R_s$ 时

$\partial_4 =$

$$\frac{\ln \left[(R_e + 0.64b) \cdot (R_s + 0.64b)^{\frac{1}{X}-1} \cdot (R_w + 0.64b)^{-\frac{1}{X}} \right]}{\ln \left[(R_e + 0.64b) \cdot (R_s + 0.64b)^{\frac{1}{X_2}-\frac{1}{X_1}} \cdot (R_w + 0.64b)^{-\frac{1}{X_2}} \cdot (R_a + 0.64b)^{\frac{1}{X_1}-1} \right]} \quad (10)$$

2.2 酸化半径的确定

对于常规井, 已知条件 $R_w = 0.1397\text{m}$, $R_e = 200\text{m}$, 每米油层注入量为 5m^3 , 地层孔隙度 15% , 每注 15m^3 水产 1t 油, 每立方米酸 0.25 万元, 每吨油 0.15 万元 (扣除采油成本)。

现场一般注水井下降到原来注水量一半时, 就采取酸化措施, 酸化的有效期一般在半年左右。对于 I~IV 油层组, 根据速敏实验结果, 可知其速敏伤害半径 R_s 分别为 2.42m 、 0.94m 、 1.30m 、 0.26m , 那么根据式(3)和式(6)可计算出 I~IV 油层组的 X 分别为 0.35 、 0.27 、 0.30 、 0.11 。

实验室测得酸液对未污染岩心渗透率提高率 X_1

= 1.98, 对于速敏伤害岩心渗透率恢复率 $X_2= 1.19$, 根据式 (7) 和式(8) 可得出各油层组不同酸化半径与增产倍数的关系(图4), 通过计算不同酸化半径所得的最大效益, 可进一步确定酸化半径(图5)。

由图4可见, 在伤害区内, 随酸化半径增大, 增产倍数增大幅度较大, 在酸化半径超过伤害半径后, 则曲线变缓, 表明增产倍数增大幅度变缓。由图5也可看出, 酸化半径超过伤害半径后, 效益增长变缓, 甚至开始负增长。经计算, 在半年有效期内, I、II、III、IV油层组取得最大效益的酸化半径分别为 2.4m、1.6m、1.6m 和 1.8m。各油层组获得最大酸化效益情况见表4。

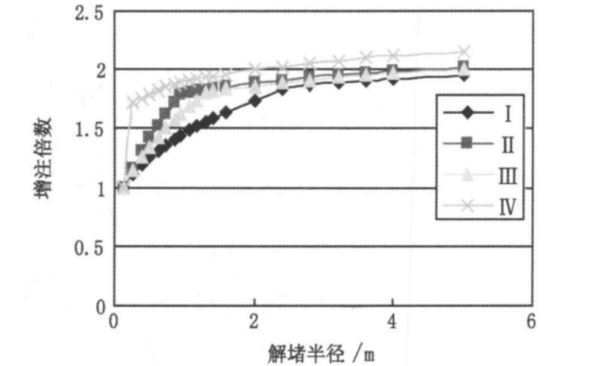


图5 增产倍数与酸化半径的关系曲线
Fig.5 Relational curve between stimulating multiple and acidizing radius of conventional injection well

I油层组的压裂井存在速敏伤害, 伤害半径 $R_s= 3.3m$, 当注水量下降一半时, 其渗透率伤害率 $X= 0.10$, 已知, $X_1= 1.98$, $X_2= 1.19$, $b= 10m$, 每米油层注入量为 $20m^3$, 根据式(9)和式(10) 计算可得酸化半径与增产倍数及效益的关系曲线(图6、图7、图8)。

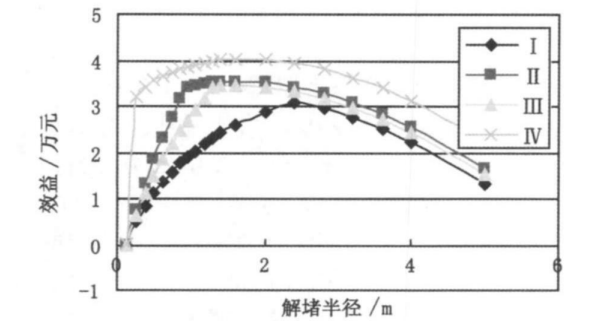


图6 效益与酸化半径的关系曲线
Fig.6 Relational curve between economic benefit and acidizing radius of conventional injection well

表4 不同油层组最大酸化效益计算结果

Tab.4 The calculation results of the largest acidizing benefit of different group

油层组	伤害半径 / m	酸化半径 / m	获得效益 / 万元	投入产出比
I	2.42	2.4	3.10	1: 4.57
II	0.94	1.6	3.54	1: 11.75
III	1.30	1.6	3.44	1: 11.42
IV	0.26	1.8	4.03	1: 10.55

从图6和图7可见, 在伤害区域内, 增产倍数和效益增加幅度明显, 超过伤害区域, 增产倍数明显变缓, 效益也出现明显的负增长, 因此对于压裂井, 酸化半径应以解除地层堵塞为主。经计算, 每米压裂井酸化, 最大可得效益 14.01 万元, 投入产出比为 1: 2.71。

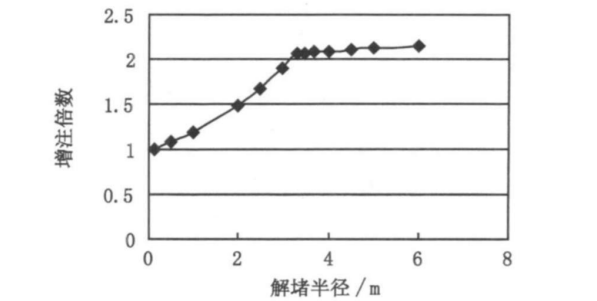


图7 增产倍数与酸化半径的关系曲线
Fig.7 Relational curve between stimulating multiple and acidizing radius of fractured injection well

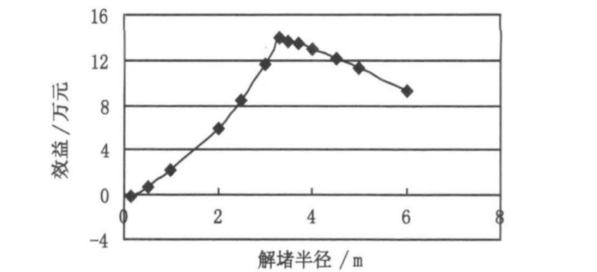


图8 效益与酸化半径的关系曲线
Fig.8 Relational curve between economic benefit and acidizing radius of fractured injection well

3 现场试验情况

在兴安岭群油层开展了7口井的现场试验, 试验后注水压力平均下降 2.2MPa, 单井平均日增

注 15m³, 平均有效期已达到 5 个月以上。

德 108- 233 井酸化前顶破裂压力 11. 7MPa, 注水 2m³/d。该井酸化后, 压力下降 1. 1MPa, 日增注 20m³, 酸后分层注水监测结果表明(表 5), 各层段吸面均匀, 说明达到了增加吸水能力和吸水厚度, 调整吸水剖面的目的。目前该井有效期已超过 6 个月。

表 5 德 108- 233 井分层注水监测表

Tab. 5 Monitoring table of separated layer injection					
测试日期	测试压力 /MPa	各层注水量/ (m ³ / d)			
		偏 I	偏 II	偏 III	偏 IV
2010. 8. 4	11. 7	0	2	0	0
2010. 9. 2	10. 6	5	5	5	5
2010. 10. 14	10. 8	5	5	5	5
2010. 2. 13	11. 3	5	5	5	5
2010. 5. 16	11. 5	5	6	5	4
2010. 8. 28	11. 6	4	7	6	3

注: 该井为分层注水井。

4 结束语

研究表明, 兴安岭群储层存在较严重的速敏伤害。常规注水井 I ~ IV 油层组伤害半径分别为 2. 42m、0. 94m、1. 30m、0. 26m, 压裂注水井 I 油层组存在速敏伤害, 伤害半径为 3. 3m。酸化设计的规

模应以解除地层伤害, 且取得最大效益为主。常规注水井 I ~ IV 油层组的最佳酸化半径分别为 2. 4m、1. 6m、1. 6m 和 1. 8m。压裂注水井 I 油层组酸化半径为 3. 3m。兴安岭群油层 7 口井试验结果表明, 该设计方法具有较强的实用性, 可用于指导其它砂岩油层的酸化设计。

参考文献:

[1] 张绍槐, 罗平亚. 保护储集层技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.

[2] 秦积舜, 彭苏萍. 注入水中固相颗粒损害地层机理分析[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(1): 87- 88.

[3] 吕道平, 刘荣军. 储集层流速敏感性评价实验参数的讨论及应用[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(增): 31- 36.

[4] 段 勇. 岩心速敏试验理论与方法的研究[J]. 石油钻采工艺, 1994, 16(2): 36- 40.

[5] 李明忠, 秦积舜, 郑连英. 注水水质造成油层损坏的评价技术[J]. 石油钻采工艺, 2002, 24(3): 40- 43.

[6] HOWER J. Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediment I: Mineralogical and chemical evidence [J]. Geol Soc Amer, 1975(87): 727- 757.

[7] BASAN P B. Fomation damage index number: A model for the evaluation of fluid sensitivity in shale sandstone [J]. SPE 14317, 1985: 404- 412.

[8] 史绍德. 油层物理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.

[9] 丛洪良, 盛宏志. 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.

(责任编辑 刘存英)