

非均质油藏水平井调剖注入压力和注入量预测方法的建立与应用

陈维余*, 刘凤霞, 黄波, 易飞, 孟科全, 朱立国

(中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452)

摘要:针对注入凝胶前后水平井注入参数的沿程分布问题,运用叠加原理与镜像反应原理,并考虑井筒摩阻的影响,建立了预测调剖前后注入压力与注水量沿程分布的解析方法,分析了凝胶对注入参数的影响。用此方法模拟预测了均质条件下和非均质条件下水平井注凝胶调剖前后注水量与注入压力的分布规律,为优化水平井调剖工艺参数、提高措施效果提供了保障。

关键词:非均质储层;水平井调剖;注入压力;注水量

中图分类号:TE349

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)06-0208-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.06.043

Establish and application of prediction method of injection pressure and injection volume for profile control in horizontal wells of heterogeneous oil reservoirs

CHEN Wei-yu*, LIU Feng-xia, HUANG Bo, YI Fei, MENG Ke-quan, ZHU Li-guo

(Engineering Technology Branch, CNOOC Energy Technology & Services Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: Aiming at the distribution along path problem of horizontal well injection parameters before and after gel injection profile control, an analytical method for predicting the distribution along path of injection pressure and water injection amount is established through applying the superposition principle and mirror reflection principle, and considering the influence of shaft friction. The effect of gel on the injection parameters is analyzed. This method is used to predict the distribution rule of water injection volume and injection pressure before and after gel injection profile control under homogeneous and heterogeneous conditions, which provides a guarantee for optimizing the profile control process parameters of horizontal wells and improving the effect of measures.

Key words: heterogeneous reservoirs; profile control on horizontal well; injection pressure; water injection volume

注水开发作为补充油田能量的重要手段,已在我国渤海油田、长庆油田、塔里木油田等油田中得到了广泛的应用。由于储层非均质性等因素的影响,在注水过程中往往出现注入水沿高渗通道快速“舌进”的问题^[1-2],导致油井含水率迅速上升。为改善注水开发的效果,在注水生产一段时间后,多进行注凝胶调剖处理,以改善注入剖面^[3]。但从实施的过程中发现,相比于常规定向井,大多数水平井更容易在注入凝胶过程中出现注入压力高注不进等问题,因此,准确预测注凝胶调剖前后水平井注水量与注入压力的沿程分布情况,对掌握注入水的驱油动态具有重要意义。黄学军等^[4]通过数值模拟等方法研究了调剖之后水平井井筒内流动损失的特点,刘想平等^[5]研究了水平井筒内压降对水平井向井流动态关系的影响,张雷^[6]研究了关于水平井注水管柱的受力分析,谢昆等^[7]分析了无限导流水平井动态压力分布研究。现有的研究对于水平生产井的井

筒压力分布较多,但缺少针对水平注水井压力分布的研究以及调剖前后水平井注入压力与注水量沿程分布的相关研究。对此,本文中基于无限大地层水平井的势函数,建立了非均质储层水平井注水模型,求解了水平井注入压力的势函数,预测了注水量与注入压力的沿程分布。运用所建立的模型,分析了储层非均质性对注入水分布的影响,并结合渤海某油田的现场实例,对注凝胶调剖前后注入压力和注水量的沿程分布进行了研究^[8-10]。

1 非均质储层水平井注水量和注入压力的求解

1.1 非均质储层水平井注水的物理模型

在水平等厚、厚度为 h 的油藏中,有一长度为 L 的水平井,距离储层下边界的距离为 z_w 。如图1所示,建立坐标系,水平井跟端坐标为 (x_1, y_1, z_w) ,水平井趾端坐标为 (x_2, y_2, z_w) 。假设储层的渗透率沿

收稿日期:2020-02-25;修回日期:2020-04-07

基金项目:中海油总公司综合科研项目(CNOOC-KJ, 135KJXM, NFGJ2019-05)

作者简介:陈维余(1981-),男,学士,高级工程师,从事海上油田增产措施技术研究与应用,通讯联系人,chenwy@cnooc.com.cn。

水平井井筒方向可以分为 n 段, 每段储层内的渗透率为 K_i 。

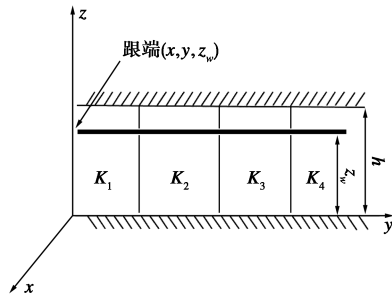


图1 非均质储层水平井注水物理模型

模型的其他假设条件为:①在注水过程为稳定渗流;②注入水为牛顿流体,不可压缩;③储层上下边界为封闭边界;④水平井平行于储层。

1.2 水平井势函数的计算

刘想平^[3]针对单相、稳定的渗流特点,推导了无限大地层中一口水平井生产时的势函数,由此可得无限大地层中一口水平井注水的势函数为:

$$\Phi(x, y, z) = (q/4\pi L) \ln[(r_1 + r_2 + L)/(r_1 + r_2 - L)] + C \quad (1)$$

式中, $r_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_w - z)^2}$, $r_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_w - z)^2}$; $\Phi(x, y, z)$ 为地层中任意一点的势; q 为水平井的日注水量, m^3/d ; L 为水平井的井筒长度, m ; r_1 为水平井跟端到地层中任意一点的距离, m ; r_2 为水平井趾端到地层中任意一点的距离, m ; C 为常数。

如图2所示,基于镜像反应原理,在所研究的问题中地层任意一点的势可以等效为无数口注入水平井的叠加结果。每口水平井上任意一点的坐标为 $(x, y, 2nh + z_w)$ 或 $(x, y, 2nh - z_w)$, 其中 $-\infty \leq n \leq \infty$, $x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2$ 。

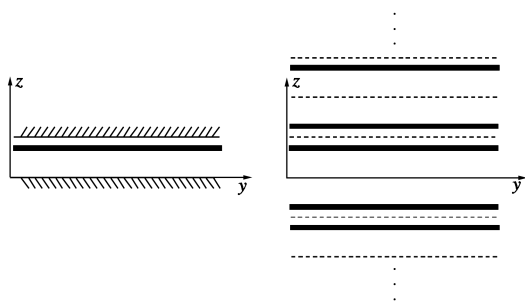


图2 封闭地层一口水平井的镜像反应结果

如图3所示,将储层与水平井井筒按照渗透率划分为 N 段,每段地层中的渗透率为 K_i , ($0 \leq i \leq N$),整个水平井井筒的流量可以看成由 N 个微小的

水平井井筒组成,注入水从各个微小的水平井井筒流入地层,每个水平井井筒上任意一点的坐标为 $(x, y, 2nh + z_w)$ 或 $(x, y, 2nh - z_w)$, 其中 $-\infty \leq n \leq \infty$, $x_{i1} \leq x \leq x_{i2}, y_{i1} \leq y \leq y_{i2}$ 。

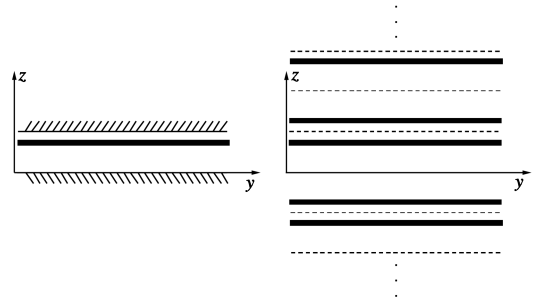


图3 封闭地层一口水平井的镜像反应结果

镜像反应得到的无数口水平井,每口水平井的势函数均可用公式(1)计算。对于物理模型中第 i 段 ($0 \leq i \leq N$) 微小的水平井井筒在地层中任意一点所产生的势函数,可以由其镜像反应成的无数口水平井叠加得到。因此,第 i 段 ($0 \leq i \leq N$) 微小的水平井井筒在地层中任意一点所产生的势函数为:

$$\Phi_i(x, y, z) = (q_i/4\pi L_i) \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} [\xi_i(2nh + z_w, x, y, z) + \xi_i(2nh - z_w, x, y, z)] \right\} + c_i \quad (2)$$

式中, $\xi_i(\eta, x_{wj}, y_{wj}, z_{wj}) = \ln[(r_{i1} + r_{i2} + L)/(r_{i1} + r_{i2} - L)]$; $\Phi_i(x, y, z)$ 为地层中任意一点的势; q_i 为第 i 段水平井的日注水量, m^3/d ; L_i 为水平井的井筒长度, m ; r_{i1} 为第 i 段水平井跟端到地层中任意一点的距离, m ; r_{i2} 为第 i 段水平井趾端到地层中任意一点的距离, m ; C_i 为常数。

根据势叠加原理,模型中整个水平井井筒在地层中任意一点处产生的势函数可以由模型中的 N 个微小水平井井筒叠加而来,势函数可以表示为:

$$\Phi(x, y, z) = \sum_{i=1}^N \Phi_i(x, y, z) + C \quad (3)$$

势函数的定义为:

$$p(x, y, z) = (\mu/K) \Phi(x, y, z) - \rho g z \quad (4)$$

因此,地层中的任意一点压力可以表示为:

$$p(x, y, z) = p_{\text{参}} + \sum_{i=1}^N (\mu/K_i) (\Phi_i - \Phi_{\text{参}}) + \rho g (z_{\text{参}} - z) \quad (5)$$

式中, $p_{\text{参}}, \Phi_{\text{参}}, z_{\text{参}}$ 为已知点处的压力、势、高度。

在均质地层中,各处地层的渗透率相等,因此,地层中任意一点的压力可表示为:

$$p(x, y, z) = p_{\text{参}} + (\mu/K) \sum_{i=1}^N (\Phi_i - \Phi_{\text{参}}) + \rho g (z_{\text{参}} - z) \quad (6)$$

1.3 非均质储层水平井沿程注入压力与注水量的计算

非均质储层中任意一点的压力公式可以整理为 $Aq=b$ 的形式,以便编程求解。

系数矩阵 A 为:

$$A = (\mu/4\pi KL) \begin{bmatrix} -a_{11} + a_{1e} & -a_{21} + a_{2e} & -a_{31} + a_{3e} & L & -a_{n1} + a_{ne} \\ -a_{12} + a_{1e} & -a_{22} + a_{2e} & -a_{32} + a_{3e} & L & -a_{n2} + a_{ne} \\ -a_{13} + a_{1e} & -a_{23} + a_{2e} & -a_{33} + a_{3e} & L & -a_{n3} + a_{ne} \\ M & M & M & M & M \\ -a_{1n} + a_{1e} & -a_{2n} + a_{2e} & -a_{3n} + a_{3e} & L & -a_{nn} + a_{ne} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $a_{ij} = \xi_i (2nh + z_{wi}, x_{wj}, y_{wj}, z_{wj}) + \xi_i (2nh - z_{wi}, x_{wj}, y_{wj}, z_{wj})$ 。

$$b = \begin{bmatrix} p_{w1} - p_e + \rho g(z_{w1} - z_e) \\ p_{w2} - p_e + \rho g(z_{w2} - z_e) \\ p_{w3} - p_e + \rho g(z_{w3} - z_e) \\ M \\ p_{wn} - p_e + \rho g(z_{wn} - z_e) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ M \\ q_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

水平井井筒内的流动可以看成是无数个水平井井筒微元组成,刘想平^[3]根据质量守恒定律与动量定理推导了水平井井筒内变质量流动时的压降计算公式:

$$\Delta p_{wj} = [8f_{ob}\rho(Q_i + q_i/2)^2 \Delta x] / (\pi^2 D^5) + [32\rho q_i(Q_i + q_i/2)] / (\pi^2 D^4) \quad (10)$$

因此,在已知水平井跟端流压的情况下,可由上式计算水平井井筒内任意一点的压力:

$$p_{wi} = p_{wi-1} + 0.5 \times (\Delta p_{wi} + \Delta p_{wi-1}) \quad (11)$$

2 模拟应用

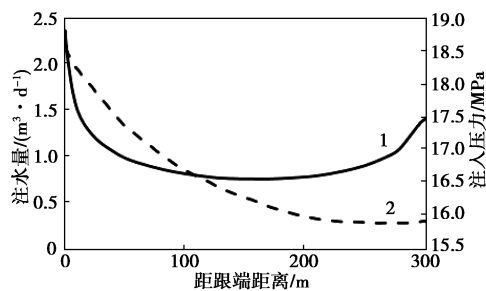
2.1 均质油藏水平井注水注入压力与注水量特点

渤海油田某相对均质油藏水平水井相关油藏参数如表 1 所示。

表 1 油藏基本参数

油藏参数	数值	油藏参数	数值
油藏厚度/m	30	日注水量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	400
原油密度/($kg \cdot m^{-3}$)	0.8	井筒高度/m	7.5
原油黏度/($mPa \cdot s$)	2.3	井筒长度/m	300
地层压力/MPa	15	渗透率/ μm^2	140

当考虑水平井井筒摩擦阻影响时,注水量与注入压力的沿程分布情况如图 4 所示。注入水受到井筒内摩擦阻力的影响,注入压力从水平井跟端到水平井趾端逐渐降低。水平井井筒内的压力越低,注入地层内的流体越少,因此,水平井跟端的注水量明显高于趾端的注水量。越靠近井筒两侧的位置,泄流形状越接近半球形;越接近井筒中部的部分,渗流特点越接近平面径向流。在注入压力与泄流状态 2 种因素的共同作用之下,水平井的沿程注水量呈现“U”型分布,井筒中部注水量最低^[11-14]。



1—注水量;2—注入压力

图 4 均质油藏注入压力与注水量的沿程曲线

2.2 非均质油藏水平井注水注入压力与注水量分布特点

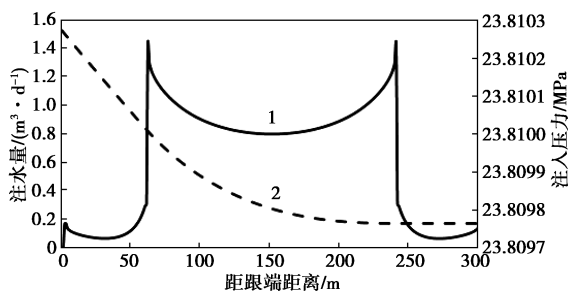
在非均质储层中,水平井的注水量与注入压力变化更复杂,以渤海油田某三段渗透率的地层为例,分析地层非均质性对沿程分布的影响,油藏和井筒参数如表 2 所示。长度为 300 m 的水平井井筒按照渗透率可以划分为 3 段,假设各段地层孔隙度均为 30%,渗透率为 $220 \mu m^2$ 的地层长度为 60 m,渗透率为 $380 \mu m^2$ 的地层长度为 180 m,渗透率为 $210 \mu m^2$ 的地层长度为 60 m。

表 2 油藏基本参数

油藏参数	数值	油藏参数	数值
油藏厚度/m	30	日注水量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	400
原油密度/($kg \cdot m^{-3}$)	0.8	井筒高度/m	7.5
原油黏度/($mPa \cdot s$)	2.3	井筒长度/m	300
地层压力/MPa	15	渗透率/ μm^2	220/300/210

考虑井筒内摩擦阻的影响,压力与注水量的沿程分布情况如图 5 所示,井筒跟端的注入压力略高于趾端。跟端起始注入压力为 23.81 MPa,随着水平段距离的延长,注入压力逐渐减小。

注水量沿着水平井筒的分布出现较大差异,在渗透率较高层段的注水量远大于其他层段的注水量。这是由于渗透率较高层段的渗流阻力较小,



1—注水量;2—注入压力

图5 调剖前非均质油藏注入压力与注水量的沿程分布曲线

注入水的流动阻力较低,导致了注水剖面变得非常不整齐。在注水过程中,注入水会沿着高渗透层段向油井快速推进,使得油井见水时间提前,采收率降低。

在非均质储层中,注入压力、相邻井段渗透率、井段在井筒上的位置等因素共同决定了每个井段内注水量的分布情况,每个井段起始端的注水量不一定大于该井段末尾端的注水量。第一个井段的起始端的泄流面积较大,起始端注水量大于末尾段。第二个井段起始端左侧是长度为60 m、渗透率为 $220 \mu\text{m}^2$ 的地层,末尾段是长度为60 m、渗透率为 $210 \mu\text{m}^2$ 的地层,起始端的注入压力大于末尾段,因此起始端的注水量略大于末尾端。第三个井段的末尾端位于水平井筒的趾端,泄流面积非常大,这一因素使得第三个井段末尾端的注水量超过了起始端。

2.3 注凝胶调剖后非均质油藏水平井注水注入压力与注水量分布特点

选用 Cr^{3+} 聚合物弱凝胶、强凝胶和聚合物微球进行调剖,浓度和封堵效果如表3所示。其中,聚合物选用部分水解聚丙烯酰胺干粉(固含量为91%,相对分子质量为 1850×10^4),聚合物微球为微米级微球(有效含量100%),交联剂选用 Cr^{3+} 交联剂(有效含量为2.15%)。

表3 聚合物浓度和封堵能力

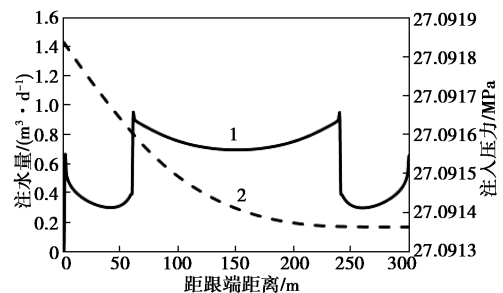
参数	聚合物浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	交联剂浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	注入黏度/ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	阻力系数	残余阻力系数	封堵率/ %
强凝胶	4300	3100	52.7	1458.4	1198.4	99.8
弱凝胶	3200	2100	31.2	1123.2	712.2	99.8

聚合物的黏度随时间的变化情况(60°C)如表4所示。

表4 聚合物黏度测试结果

	0 h	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h
强凝胶黏度	52	73	1625	7984	53651
弱凝胶黏度	19	31	298	2354	13578
	3 h	4 h	6 h	12 h	24 h
强凝胶黏度	118500	208700	221500	242100	252300
弱凝胶黏度	59235	118000	149700	163300	163200

在三段地层中依次注入调剖剂,第一段地层注入0.3 PV的弱凝胶,第二段地层注入0.6 PV的强凝胶,第三段地层注入0.3 PV的弱凝胶。调剖之后的压力与注水量的沿程分布情况如图6所示。注入凝胶后,注入水的渗流阻力增加,注入压力升高,由图可知,跟端起始注入压力为27.09 MPa,相对于调剖前注入压力上升了3.28 MPa。说明注入凝胶后在井筒内建立了一定的流动阻力,起到了封堵效果^[1-2,15]。



1—注水量;2—注入压力

图6 调剖后非均质油藏注入压力与注水量的沿程分布曲线

从注入量沿程分布情况来看,在每个层段内,注入水仍呈现“U”型分布的规律。相对于调剖前各段注入水在井筒内的沿程分布变得更均匀,高渗透层段的注水量减少,低渗透层注入量有所增加,高低渗透层段的注水量差距减小,吸收剖面更均匀。这表明上述凝胶调剖方案在注水井上效果变化明显,起到了剖面改善的效果。

3 结论

(1) 基于镜像反应原理与势叠加原理求解了水平井注水的势函数,通过求解,分别得到了均质条件或非均质条件下水平井井筒内任意一点注水压力分布公式。

(2) 根据理论研究,考虑井筒摩阻影响的情况下,模拟预测了均质油藏下水平井注入压力与注水

(下转第217页)

表 13 不同产业链风险指标情况

产业链风险指标	RI	SI	TI
丙烷→丙烯腈	0.94	4.21	5.15
丙烷→丙烯腈→丙烯酰胺	1.14	3.79	4.93
增幅/%	21.28	-9.98	-4.27

4 结论

通过对丙烯腈实证分析得出,氰乙醇法、丙烯法、丙烷一步法和丙烷两步法对比,风险值排序专家预测排序一致,说明该系统具有合理性。丙烷一步法和丙烷两步法对比,两步法的风险更高,说明某些反应步骤的增加会导致整体产业链风险增加。所有产业链产生的丙烯腈进一步生产丙烯酰胺,总体普遍降低,说明可以通过延长产业链、将高危产品转化为低危产品的方法降低整体产业链风险。

参考文献

- [1] Adu I K, Sugiyama H, Fischer U, *et al.* Comparison of methods for assessing environmental, health and safety (EHS) hazards in early phases of chemical process design[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2008, 86(2): 77-93.
- [2] Kletz T A. *Plant design for safety: A user-friendly approach* [M]. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1991.

(上接第 211 页)

量沿程分布特点。注水量呈现“U”型分布,跟端的注入压力随着水平井段沿趾端方向降低。

(3) 同样考虑井筒摩阻影响,模拟预测了非均质储层调剖前后水平注入压力与注入量的分布特点。每一个井段内的注水量仍然呈现“U”型分布的趋势,但是具体形态取决于井段长度、井段位置、临近井段地层渗透率大小等因素的共同作用。调剖后水平井段注入压力明显高于调剖前,各段注入水量差距变小,吸收剖面更均匀。

参考文献

- [1] 李华斌,赵化廷,赵普春,等.中原高温高盐油藏疏水缔合聚合物凝胶调剖剂研究[J]. *油田化学*, 2006, 23(1): 50-53.
- [2] 张兵,蒲春生,于浩然,等.裂缝性油藏多段塞凝胶调剖技术研究及应用[J]. *油田化学*, 2016, (1): 46-50.
- [3] 刘想平.底水驱油藏水平井三维稳态解产能公式[J]. *石油天然气学报*, 1998, (1): 54-58.
- [4] 黄学军,崔桂香,周海兵.水平井变质量管内流动损失的数值研究(二):多支管流动[J]. *石油钻采工艺*, 2000, 22(3): 50-53.

- [3] Rahman M, Heikkilä A M, Hurme M. Comparison of inherent safety indices in process concept evaluation[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2005, 18(4): 327-334.
- [4] Bollinger R E, Crowl D A. *Inherently safer chemical processes: A life cycle approach* [M]. Wiley-AIChE, 1997.
- [5] Kletz T A. Inherently safer plants [J]. *Plant/Operations Progress*, 1985, 4(3): 164-167.
- [6] Edwards D W, Lawrence D. Assessing the inherent safety of chemical process routes: Is there a relation between plant costs and inherent safety? [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 1993, 71(B4): 252-258.
- [7] Heikkilä A M, Hurme M, Järveläinen M. Safety considerations in process synthesis [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1996, 20: S115-S120.
- [8] Koller G, Fischer U, Hungerbühler K. Assessing safety, health, and environmental impact early during process development [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2000, 39(4): 960-972.
- [9] Palaniappan C, Srinivasan R, Tan R. Selection of inherently safer process routes: A case study [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2004, 43(5): 641-647.
- [10] Palaniappan C, Srinivasan R, Tan R. Expert system for the design of inherently safer processes. 1. Route selection stage [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2002, 41(26): 6698-6710.
- [11] Lees F P. *Loss prevention in the process industries* [M]. Butterworths, 1980.
- [13] King R. *Safety in the process industries* [M]. Netherlands: Elsevier, 2013. ■

- [5] 刘想平,蒋志祥,江如意,等.水平井筒内压降对水平井向井流动态关系的影响[J]. *石油钻采工艺*, 2000, 22(1): 42-45.
- [6] 张雷.关于水平井注水管柱的受力分析[J]. *中国新技术新产品*, 2012, 19(1): 144.
- [7] 谢昆,俞理,董汉平,等.无限导流水平井动态压力分布研究[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(31): 8201-8204.
- [8] 刘承杰.复杂流体边界油藏注水井井底压力响应特征研究[J]. *钻采工艺*, 2011, 34(1): 36-38.
- [9] 裴承河,陈守民,陈军斌.分层注水技术在长 6 油藏开发中的应用[J]. *西安石油大学学报:自然科学版*, 2006, 21(2): 33-36.
- [10] 朱平.复合交联聚合物凝胶调剖体系在杨家坝油田杨 10-3 井组的应用[J]. *油气地质与采收率*, 2007, 14(5): 95-97.
- [11] 曹伟佳,卢祥国,闫冬,等.海上油田深部调剖组合方式实验优选[J]. *中国海上油气*, 2018, 30(5): 107-112.
- [12] 郑俊德,魏兆胜,陈家琅,等.水平井有杆泵抽油井井筒压力分布预测方法[J]. *油气田地面工程*, 1995, 14(5): 6-7.
- [13] 刘慈群,杨玠.水平井瞬时压力动态分析[J]. *石油学报*, 1991, 20(3): 76-82.
- [14] 李保柱,宋文杰,纪淑红,等.水平井水平段压力分布研究[J]. *石油学报*, 2003, 24(3): 97-100.
- [15] 陈洪,张三辉,储玉宝,等.高温高盐油藏用疏水缔合聚合物凝胶调剖剂研制与应用[J]. *油田化学*, 2004, 21(4): 343-346. ■