

·油气采收率·

海上稠油油藏早期注聚压力与注聚时机研究

张贤松^{1,2}, 郑伟², 唐恩高^{1,2}, 谢晓庆^{1,2}

(1.海洋石油高效开发国家重点实验室,北京 100027; 2.中海油研究总院,北京 100027)

摘要:渤海油区属于典型的海上稠油油藏,目前水驱采收率不高,聚合物驱提高采收率潜力较大。鉴于海上油田开发平台寿命的时效性和开发投资的风险性,使得海上稠油油藏早期注聚时机和注聚压力特征不同于陆地油田中后期注聚。利用数值模拟手段和油藏工程方法,研究了渤海油区典型常规稠油油藏早期注聚压力特征、注聚时机及其影响因素;利用中心组合实验设计方法,建立了早期注聚压力变化与其影响因素之间的关系式。结果表明:海上稠油油藏早期注聚压力受5个因素影响,影响程度由大到小依次为聚合物溶液粘度、油藏渗透率、注入速度、注聚时机和原油粘度;注聚时机受原油粘度和油藏渗透率制约,原油粘度越大、油藏渗透率越低,注聚时机则越晚,渤海油区稠油油藏早期注聚的合理时机在含水率大于20%以后,极限注聚时机在含水率为10%。

关键词:海上稠油油藏 聚合物驱 压力特征 影响因素 注聚时机

中图分类号: TE357.431

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)05-0068-04

陆地油田由于不受开发时间和空间的限制,注聚时机通常较晚^[1-2]。而海上油田具有开发时间短、投资风险大、生产成本高的特点,为了在较短时间内提高油田采收率,获得最大经济效益,要求尽早实施提高采收率技术^[3-4]。早期注聚可有效增强流量控制能力,改善海上稠油油藏的波及效率,不但可在平台有效的寿命期内提高油田采收率,还可节约大量水资源,减少生产污水,从而提高海上油田的开发效益。海上稠油油藏早期注聚不同于陆地油田中后期注聚,两者的注入特征和开发规律均不同^[5-8]。目前,早期注聚在渤海油区正处于探索阶段,为此,笔者根据渤海油区典型常规稠油油藏的特点,利用数值模拟和油藏工程方法,研究了海上稠油油藏渗透率、原油粘度、聚合物溶液粘度、注入速度及注聚时机等因素对注聚压力及其相对变化幅度的影响;应用中心组合试验设计方法^[9-10],建立注聚压力相对变化幅度与各影响因子之间的数学模型,可快速获取不同油藏条件、不同注入参数下的注聚压力和注聚时机,以期海上油田实施早期注聚提供技术依据。

1 油藏开发特征及注聚特点

渤海油区正在开发的主力油藏均属于陆相沉

积,由于其地层原油粘度、地层水矿化度、渗透率均较高,且油层厚度和井距大,注水开发采收率不高。由于渤海油区聚合物驱条件较好的I类和II类油藏所占的石油地质储量分别为26.0%和65.2%,故进行聚合物驱提高采收率潜力大^[11-12]。对于这类海上稠油油藏,早期注聚虽可获得较好的开发效果,但由于聚合物溶液粘度较高,早期注聚压力要高于常规水驱和开发中后期聚合物驱,为了降低技术风险,须研究海上稠油油藏早期注聚的压力特征和合理的注聚时机^[13-15]。为此,以S油藏为例,利用其流体参数和聚合物溶液参数,建立纵向非均质、一注四采五点井网典型模型。其中,油藏参数包括:油藏温度为65℃,地层原油粘度为75 mPa·s,平均渗透率为 $2\ 000\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$;开发参数包括:井距为350 m,注入速度为0.04 PV/a,注采比为1:1;聚合物参数包括:聚合物溶液的质量浓度为1 600 mg/L,聚合物溶液粘度为8 mPa·s,聚合物段塞用量为0.24倍孔隙体积。分析稠油油藏注聚期间的压力变化(图1)可知,由于聚合物溶液粘度较大,其进入油藏后,注入井井底流压相对于水驱上升了5 MPa。因此,在满足一定配注量的条件下,稠油油藏早期注聚存在临界注聚时机,过早注聚将使注入压力迅速上升,可能造成井底流压大于地层破裂压力,使储层遭受破坏。

收稿日期:2013-07-03。

作者简介:张贤松,男,教授级高级工程师,从事油田开发及提高采收率研究。联系电话:(010)84523522,E-mail:zxsong6563@126.com。
基金项目:国家科技重大专项“海上稠油高效开发新技术”(2011ZX05024-004)。

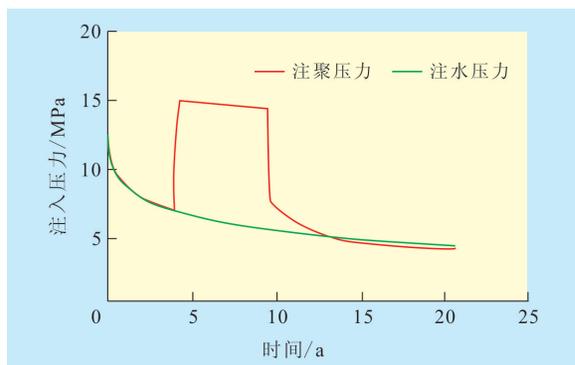


图1 稠油油藏注聚压力与注水压力变化

2 注聚压力影响因素及其变化特征

运用油藏数值模拟结果,研究了海上稠油油藏早期注聚压力的影响因素及其变化规律,主要影响因素包括油藏渗透率、原油粘度、聚合物溶液粘度、注入速度和注聚时机等。

2.1 不同影响因素下注聚压力变化特征

在研究同样注入速度下注聚压力和注水压力变化特征的基础上,笔者将注聚压力与注水压力之差与注水压力的比值定义为注聚压力相对变化幅度,用该指标来对比注聚与注水2种驱替方式下注入压力的相对变化特征。

油藏渗透率 由油藏渗透率对注入压力的影响(图2)可以看出:当渗透率小于 $2\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,注聚与注水压力均随着油藏渗透率的增大而下降,且注聚压力下降幅度更大,说明渗透率对注聚压力的影响程度大于注水压力;当渗透率大于 $2\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,两者降低幅度均变缓;注聚压力相对变化幅度下降趋势更明显,下降幅度高达83.4%,这表明油藏渗透率对注聚压力相对变化幅度影响较大。

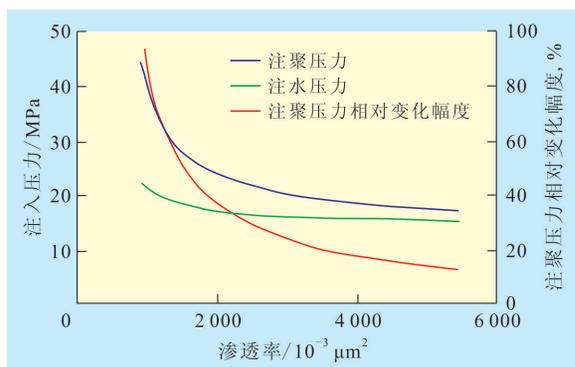


图2 油藏渗透率对注入压力的影响

原油粘度 原油粘度对注入压力的影响结果(图3)表明:随着原油粘度的增大,注聚压力和注水

压力均近似呈直线上升,但变化幅度不大;注聚压力相对变化幅度也呈逐渐增大趋势,但变化趋势比注聚压力和注水压力大,变化幅度为9.1%。

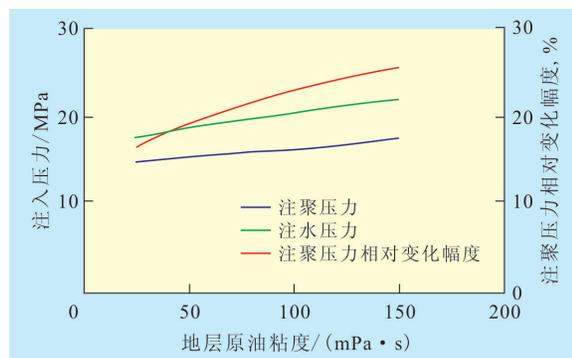


图3 原油粘度对注入压力的影响

聚合物溶液粘度 聚合物溶液粘度对注入压力的影响结果(图4)表明:随着聚合物溶液粘度的增大,注聚压力呈直线增大,注水压力基本保持不变;注聚压力相对变化幅度增大趋势明显,变化幅度达46.5%。

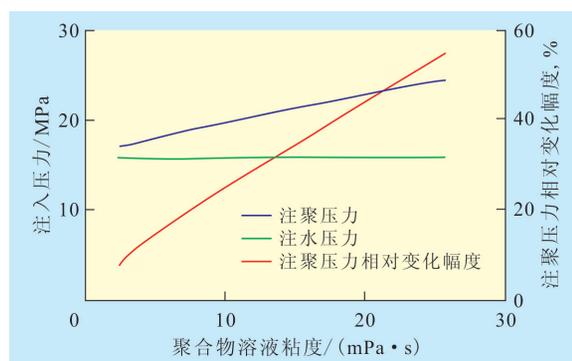


图4 聚合物溶液粘度对注入压力的影响

注入速度 通过分析注入速度对注入压力变化的影响(图5)可知:随着注入速度的增大,注聚压力、注水压力和注聚压力相对变化幅度均呈增大趋势,注聚压力相对变化幅度增幅最大,为23.5%,注聚压力增幅较大,而注水压力增幅最小。

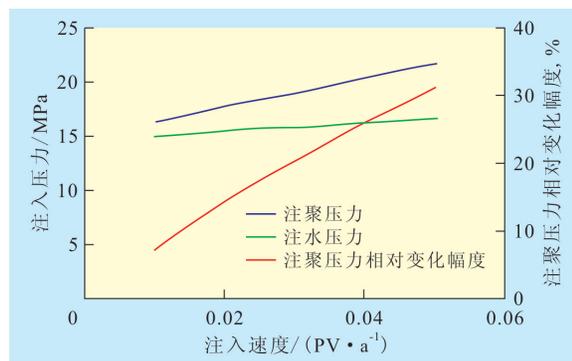


图5 注入速度对注入压力的影响

注聚时机 注聚时机(用油藏含水率表示)对

注入压力的影响结果(图6)表明:不同油藏渗透率下,注聚压力和注水压力变化随注聚时机的提前而增大,但不同含水率下其变化幅度不同;当含水率小于20%时,渗透率为 $1\ 000\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 时的注聚压力相对变化幅度较大,而渗透率为 $3\ 000\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 时的注聚压力相对变化幅度很小,当含水率大于20%后,注聚压力相对变化幅度基本不受注聚时机和渗透率的影响。

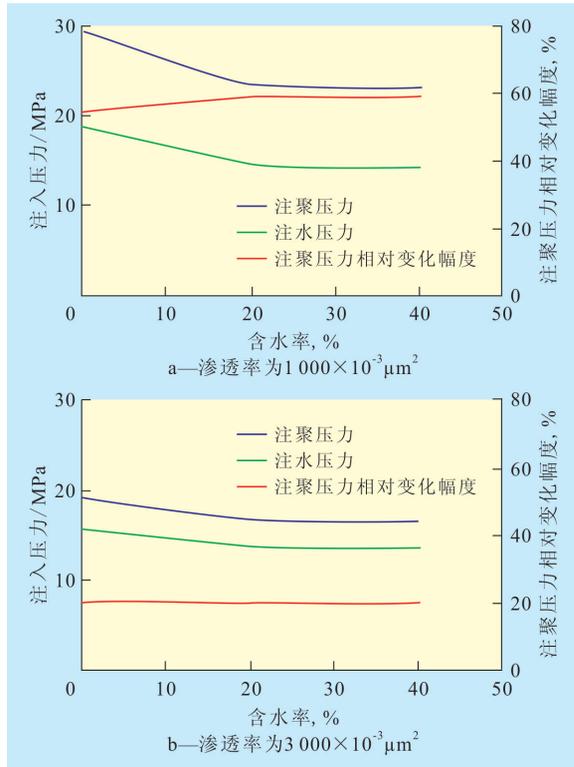


图6 注聚时机对注入压力的影响

2.2 注聚压力相对变化幅度的数学模型

根据注聚压力与各影响因素之间的变化关系,采用中心组合实验设计方法,设计了油藏渗透率、地层原油粘度、聚合物溶液粘度、注入速度和注聚时机共5个影响因子,每个因子取5个水平值,共50个实验样本,影响因素及取值水平见表1。基于代理模型方法,建立注聚压力相对变化幅度与各影响

水平序号	油藏渗透率/ $10^{-3}\ \mu\text{m}^2$	地层原油粘度/(mPa·s)	聚合物溶液粘度/(mPa·s)	注入速度/(PV·a ⁻¹)	注聚时机,%
1	500	25	5	0.02	0
2	1 000	50	10	0.035	20
3	1 500	75	15	0.05	40
4	2 000	100	20	0.065	60
5	2 500	125	25	0.08	80

因子之间的数学模型为

$$y = (1.59 - 4.26 \times 10^{-3}x_1 - 4.04 \times 10^{-4}x_2 + 0.52x_3 + 0.032x_5 + 2.12 \times 10^{-5}x_1x_2 - 8.19 \times 10^{-5}x_1x_3 + 0.027x_1x_4 - 0.46x_2x_4 - 3.35 \times 10^{-4}x_2x_5 + 2.59x_3x_4 - 7.07 \times 10^{-3}x_3^2 - 1\ 864.94x_4^2)^2 \quad (1)$$

式中: y 为注聚压力相对变化幅度,%; x_1 为油藏渗透率, $10^{-3}\ \mu\text{m}^2$; x_2 为地层原油粘度,mPa·s; x_3 为聚合物溶液粘度,mPa·s; x_4 为注入速度,PV/a; x_5 为注聚时机,%。

根据方差分析原理,由注聚压力影响因素的方差分析结果(表2)可见,影响程度由大到小依次为聚合物溶液粘度、油藏渗透率、注入速度、注聚时机和地层原油粘度。

影响因素	偏差平方和	均方差	F值	P值
油藏渗透率	65.81	65.81	330.37	<0.000 1
地层原油粘度	0.64	0.64	3.21	0.081 5
聚合物溶液粘度	97.7	97.7	490.46	<0.000 1
注入速度	51.78	51.78	259.95	<0.000 1
注聚时机	0.89	0.89	4.45	0.042

3 稠油油藏合理和极限注聚时机

对于海上稠油油藏,注聚时机越早,注聚压力上升越快,一旦注聚压力达到地层破裂压力就应停止继续注聚或降低注入速度,后者会导致地层能量不足,从而影响注聚效果;为满足注聚时达到注水条件下相同的注入速度,需要在转注聚前注入一定量的水。分析图6发现:当含水率大于20%后,注聚压力相对变化幅度明显变缓,尤其是当渗透率为 $3\ 000\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 时,基本不变,说明稠油油藏早期注聚的合理注聚时机是在含水率大于20%以后。

在满足一定配注量的条件下,分析不同渗透率和不同原油粘度对注聚时机的影响(图7)发现:当地层原油粘度为50,75,100,125和150 mPa·s时,在其油藏渗透率分别大于 $2\ 000\times 10^{-3}$, $2\ 200\times 10^{-3}$, $2\ 500\times 10^{-3}$, $3\ 000\times 10^{-3}$ 和 $3\ 500\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 后,无需注水即可直接注聚,当其渗透率小于该值时,则须先注入一定量的水后才能注聚,渗透率越小,需要注入的水量越多;在渗透率相同的条件下,随着原油粘度的增大,注聚前期需要注入的水量越多。以渗透率 $2\ 000\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 为例,在满足注聚速度为0.04

PV/a的前提下,当地层原油粘度为 $50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时,仅注入 0.001 1倍孔隙体积的水即可实施早期注聚;当地层原油粘度为 75 和 $150 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时,需要提前注水的孔隙体积倍数分别为 0.012 和 0.059 ,后者是前者的 4.9 倍。因此,原油粘度越高,早期注聚时机应大大延后。

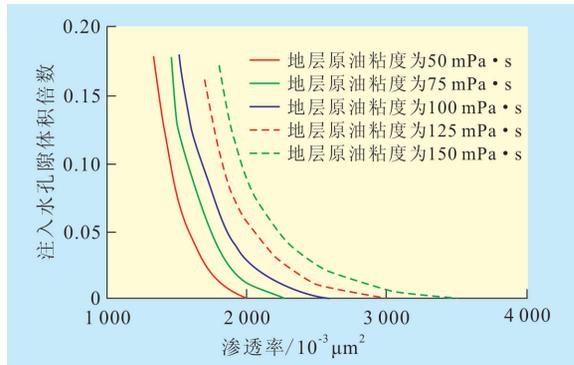


图7 注聚前期注入水孔隙体积倍数与地层原油粘度和渗透率的关系

根据所建的典型稠油油藏模型,设计了3种方案进行注聚:方案I注聚压力大于地层破裂压力,如要继续注聚,则必须降低注入速度;方案II注聚时井底流压正好等于地层破裂压力,此时注入速度刚刚满足要求,此时油藏的含水率为极限注聚时机;方案III注聚压力低于地层破裂压力,可按正常的注入速度注聚。这3种方案下注聚压力和油藏含水率随开发年限的变化结果(图8)可以看出,在方案II的极限条件下的油藏含水率为 10% ,由此可以得出,注水开发含水率达 10% 为极限注聚时机。

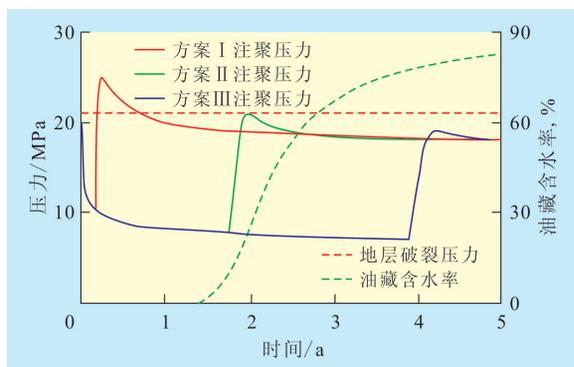


图8 不同注聚条件下的注聚压力及注聚时机

4 结论

海上稠油油藏注聚压力受油藏渗透率、原油粘

度、聚合物溶液粘度、注入速度和注聚时机等因素影响,影响程度由强到弱依次为聚合物溶液粘度、油藏渗透率、注入速度、注聚时机和原油粘度。

注聚时机受原油粘度和油藏渗透率制约,原油粘度越大、油藏渗透率越低,注聚时机则越晚,当地层原油粘度为 $75 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时,在油藏渗透率大于 $2\ 200\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 后,实施早期注聚的时机窗口较宽,无需注水也可直接注聚。

渤海油区稠油油藏早期注聚的合理时机在含水率大于 20% 以后,极限注聚时机在含水率为 10% 。

参考文献:

- [1] 周守为.海上油田高效开发技术探索与实践[J].中国工程科学,2009,11(10):55-60.
- [2] 隋军,廖广志,牛金刚.大庆油田聚合物驱油动态特征及驱油效果影响因素分析[J].大庆石油地质与开发,1999,18(5):17-20.
- [3] 周守为.中国海洋石油高新技术与实践[M].北京:石油工业出版社,2005:407-417.
- [4] 王增林,王敬,刘慧卿,等.非均质油藏开发规律研究[J].油气地质与采收率,2011,18(5):63-66.
- [5] 张贤松,孙福街,冯国智,等.渤海稠油油田聚合物驱影响因素研究及现场试验[J].中国海上油气,2007,19(1):30-34.
- [6] 刘超,马奎前,陈剑,等.旅大油田非均质性定量表征及开发调整[J].油气地质与采收率,2012,19(5):88-90,103.
- [7] 沈平平,袁士义,邓宝荣,等.非均质油藏化学驱波及效率和驱替效率的作用[J].石油学报,2004,25(5):54-59.
- [8] 苏建栋,黄金山,邱坤态,等.改善聚合物驱效果的过程控制技术——以河南油区双河油田北块H3IV1—3层系为例[J].油气地质与采收率,2013,20(2):91-94,98.
- [9] George E P Box, Norman R Draper. Empirical model building and response surfaces[M]. New York: Wiley-Interscience, 2005.
- [10] 隋允康,宇慧平.响应面方法的改进及其对工程优化的应用[M].北京:科学出版社,2010:14-18.
- [11] 张爱美.胜利油区聚合物驱资源分类标准修订及其评价[J].油气地质与采收率,2004,11(5):68-70.
- [12] 张贤松,王海江,唐恩高,等.渤海油区提高采收率技术油藏适应性及聚合物驱可行性研究[J].油气地质与采收率,2009,16(5):56-59.
- [13] 薛新生,张健,舒政,等.剪切方式对疏水缔合聚合物溶液性能的影响[J].油气地质与采收率,2013,20(1):59-62.
- [14] 刘歆,周凤军,张迎春,等.海上油田稀井网大井距聚合物驱应用与分析[J].特种油气藏,2012,19(2):104-107.
- [15] 宋新旺,李哲.缔合聚合物在多孔介质中的渗流运移特征[J].油气地质与采收率,2012,19(4):50-52.

编辑 常迎梅