

沥青调剖颗粒与大庆喇嘛甸油层配伍关系

李宜强^{1,2}, 向刚³, 王彦升¹, 李彦阅⁴, 李俊键⁵

(1. 中国石油大学提高采收率研究院, 北京 102249; 2. 中国石油三次采油重点实验室, 北京 102249;

3. 中国石油大庆油田第十采油厂, 陕西庆阳 745000; 4. 中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300452;

5. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249)

摘要:大庆喇嘛甸油田经过长期注水冲刷进入高含水期,并且存在注入水无效循环、水窜现象严重等问题,须采取调剖封堵增产措施。沥青颗粒主要是通过封堵高渗透水窜通道和扩大波及体积提高采收率,但现场应用过程中存在注入压力过高的问题,须通过室内试验研究沥青颗粒与地层配伍关系。根据相似准则和近井地带分流效应,研制带测压点的特殊胶结岩心,通过综合分析注入沥青颗粒及后续水驱过程中的阻力系数、残余阻力系数及封堵率,给出沥青颗粒粒径与油层的配伍关系,确定浓度对注入性的影响。结果表明:渗透率为 $2\ \mu\text{m}^2$ 的地层与粒径为(0.1~0.3) mm 沥青颗粒配伍适宜,粒径过大或过小都会限制扩大波及体积作用;沥青颗粒浓度会限制其运移能力,当浓度增加到5 g/L时沥青颗粒会在地层局部大量堆积,高浓度沥青颗粒段塞注入过程可采用与水交替注入方式。

关键词:大庆油田; 沥青颗粒; 调剖; 高渗透带

中图分类号: TE 34 **文献标志码:** A

引用格式: 李宜强, 向刚, 王彦升, 等. 沥青调剖颗粒与大庆喇嘛甸油层配伍关系 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(4): 92-96.

LI Yiqiang, XIANG Gang, WANG Yansheng, et al. Matching of asphalt particles and formation pores for conformance control treatment in Lamadian Oilfield of Daqing [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(4): 92-96.

Matching of asphalt particles and formation pores for conformance control treatment in Lamadian Oilfield of Daqing

LI Yiqiang^{1,2}, XIANG Gang³, WANG Yansheng¹, LI Yanyue⁴, LI Junjian⁵

(1. Enhanced Oil Recovery Institute in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, PetroChina, Beijing 102249, China;

3. The 10th Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Qingyang 745100, China;

4. Bohai Oilfield Research Institute of China National Offshore Oilfield Corporation Limited-Tianjin, Tianjin 300452, China;

5. Ministry of Education Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The Lamadian block in Daqing Oilfield has been water flooded, and it is now at a high water cut stage with serious water channeling and ineffective water circulation. It is necessary to take channel blocking and conformance control measures. Asphalt particles can be used to plug water channeling in high permeability zones in order to increase sweeping volume for improved oil recovery. In field applications, high injection pressure can be induced if the sizes of asphalt particles are not matched with formation pores in the reservoir. Experimental study was conducted using specially designed cement cores, based on similarity criteria to simulate the flow conditions in wellbore, to investigate the blocking effect of asphalt particles. The resistance coefficient, residual resistance factor and plugging rate were measured and analyzed to assess the matching be-

收稿日期: 2014-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374221)

作者简介: 李宜强(1972-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为提高采收率、低渗透油层渗流机制及油藏改造。E-mail: lyq13504598848@163.com。

tween asphalt particles and the pores of the simulated cores, and the influence of particle concentration was also studied. The experimental results show that the cores with permeability $2 \mu\text{m}^2$ can be matched with the asphalt particle size of 0.1–0.3 mm. Undersized or oversized particles can reduce the conformance control effect, and the concentration of asphalt particles in the injectant can limit their migration ability. When the particle concentration is increased to 5 g/L, accumulations of asphalt particles can be caused in the formation, in which a scheme with asphalt particles alternative water injection is proposed to avoid the accumulation.

Keywords: Daqing Oilfield; asphalt particles; conformance control; high permeability zone

喇嘛甸油田是大庆油田的主力油田之一,以发育厚油层为主,层间差异大。目前,油田已经进入特高含水阶段,长期水驱使储集层砂岩孔喉尺寸明显变大^[1-2]。须采取必要措施封堵高渗透渗流通道,提高纵向波及体积以改善开发效果。目前已经发展了凝胶型、沉淀型、颗粒型等适合油藏开发现状的调剖堵水剂^[3-5]。沥青颗粒调剖是利用颗粒的机械堵塞以及高温下的黏结作用封堵高渗透层,使后续注入流体进入其他低渗透层,提高纵向波及体积和采收率^[6]。沥青颗粒调剖已经在喇嘛甸油田进行了矿场试验^[7],并取得了良好的效果,但部分井区出现了注入压力过高等问题。目前对沥青颗粒的室内研究还处于探索阶段,主要通过填砂管进行注入性和封堵性试验,不能有效模拟地层物性。笔者针对沥青颗粒与地层配伍关系,采用多测压点人造胶结岩心进行试验,研究沥青颗粒在地层中的运移规律。

1 沥青颗粒配伍性试验

1.1 试验原理

注入体系与油藏的配伍关系决定着注入体系注入的难易程度和驱油效果。如果注入体系与油藏不配伍,注入体系会堵塞于油藏孔喉,导致注入压力过高,无法达到目的层发挥作用。目前对配伍性认识主要基于聚合物与油藏配伍性的大量研究^[8-10],聚合物是具有一定特征尺寸的柔性基团,与地层孔喉存在一定的配伍关系,可以为油田聚合物优选提供重要的依据。

沥青颗粒的配伍性不同于聚合物的配伍性,主要是由于沥青颗粒为刚性颗粒,并且颗粒尺寸在一定区间变化。无法通过颗粒尺寸与地层孔喉建立直接的关联,须通过设计特定的配伍关系试验建立其关系。沥青颗粒的配伍性是指沥青颗粒粒径对不同渗透率地层的选择性,既要保证沥青颗粒运移性能良好,又要保证封堵性能良好。其中,运移性能可以通过注入过程中不同位置的阻力系数衡量,而封堵性能可以通过残余阻力系数和封堵率评价。

利用不同渗透率的人造岩心进行试验。向人造

岩心中以 1 mL/min 的速率连续注入 $1.5V_p$ (V_p 为孔隙体积) 不同粒径调剖剂体系,观察测压点压力随注入量的变化,以此测定残余阻力系数及封堵率。

沥青颗粒的阻力系数是描述沥青颗粒流度控制能力的重要指标,即沥青颗粒降低流度比的能力,定义为水的流度与沥青颗粒溶液的流度的比值。

阻力系数 R_F 表达式为

$$R_F = \frac{\lambda_w}{\lambda_1} = \frac{k_w}{\mu_w} \frac{k_1}{\mu_1} \quad (1)$$

式中, λ_w 为水相的流度, $\mu\text{m}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$; λ_1 为注入沥青颗粒体系后的流度, $\mu\text{m}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$; k_w 为岩心水相渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ_w 和 μ_1 分别为水相和沥青溶液黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; k_1 为岩心沥青溶液渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

残余阻力系数 R_k 是描述沥青颗粒降低渗透率的能力,定义为沥青颗粒注入前后岩石的水相渗透率的比值,也称为渗透率下降系数,表达式为

$$R_k = \frac{k_{wb}}{k_{wa}} \quad (2)$$

式中, k_{wb} 和 k_{wa} 分别为调剖前后的岩心水相渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

封堵率是指注入沥青颗粒以后岩石水相渗透率降低的百分比,封堵率 E 表达式为

$$E = \frac{k_{wb} - k_{wa}}{k_{wb}} \quad (3)$$

1.2 试验岩心和设备

针对沥青调剖颗粒开展的相关物理模拟试验均在填砂管模型中进行,而用胶结岩心进行试验可能会出现沥青颗粒在端面严重堵塞,使试验无法顺利开展。沥青颗粒现场试验能够顺利进行,主要是因为近井地带井筒紊流、射孔孔眼和长期冲刷大孔道的分流作用(图1)。为了模拟近井地带的大孔道分流作用,研制横向上渐变的带测压点的胶结岩心(图2),前面有一小段(入口端 P_1 到测压点 P_2) 大渗透率渐变岩心,后面(测压点 P_2 到出口端)是按照目的层设计的有效渗透率为 $2 \mu\text{m}^2$ 的岩心。后续

压力分析过程中, P_2-P_3 定义为“前段”, P_3-P_4 定义为“后段”。

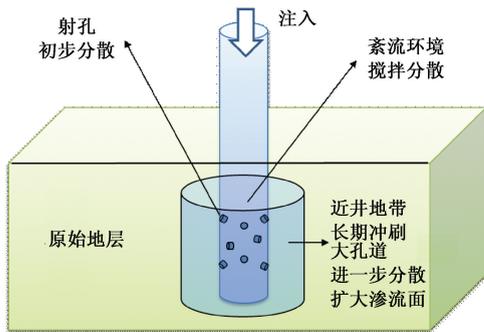


图1 近井地带分流作用示意图

Fig. 1 Near wellbore diversion diagram

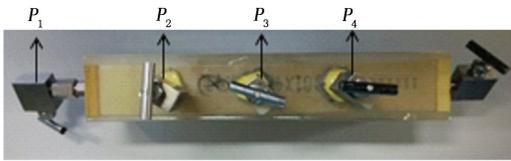


图2 试验用人造胶结岩心

Fig. 2 Artificial cementation core in experiment

为了模拟近井地带的紊流环境和搅拌分散作用,对沥青颗粒注入端装置进行特殊设计(图3)。其中,调剖液注入过程采用带搅拌器的活塞装置,保证沥青颗粒悬浮稳定性(图4)。在沥青颗粒进入岩

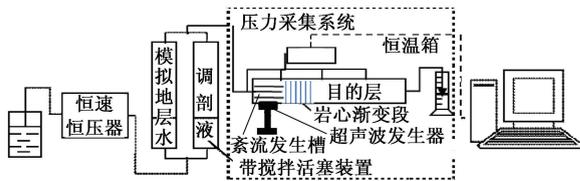


图3 试验设备与流程

Fig. 3 Experimental equipment and procedures



图4 带搅拌器的活塞容器

Fig. 4 Piston container with stirrer

心前,设计一个紊流发生槽,上部为发生槽,下部为超声波搅拌器,其中发生槽中间的空腔为喇叭状结构,前部与外壁同心,后部为渐扩径部分,其结构示

意图见图5。超声波发生器为无极调速,且没有运动部件及电磁辐射,对调剖颗粒的损害程度降到极低的水平。紊流发生槽利用超声波振荡器的振荡原理进一步加大调剖液的紊流程度,使调剖颗粒在调剖液中充分分散。此外,沥青颗粒注入过程注入端采用内径为6 mm的管线,能有效避免注入过程颗粒在管线中堆积。紊流发生槽、岩心渐变段以及目的岩心均为圆柱体结构,端面直径相同,各端面依次首尾相接,由岩心夹持器夹持固定。

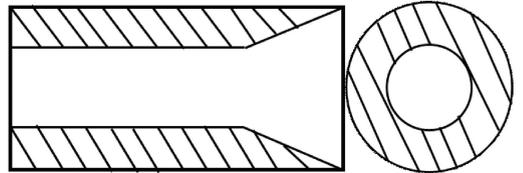


图5 紊流发生槽结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of turbulent slot structure

1.3 试验步骤

首先测量岩心的几何尺寸,然后对目标岩心进行抽真空饱和地层水,进而对岩心进行恒速或定压水测其有效渗透率(经试验测定, P_2 到 P_4 段有效渗透率 $2.089 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,与目的层渗透率相符),接着以 1 mL/min 的速度连续注入调剖体系 $1.5V_p$ (注入速度过低不利于沥青颗粒的悬浮,注入速度过高会造成沥青颗粒在岩心端面堵塞),最后后续水驱至压力相对稳定。试验过程记录各测压点压力和流量变化。

2 试验结果分析

在渗透率一定的条件下研究沥青颗粒粒径和浓度对配伍性的影响。试验首先保证沥青颗粒浓度为 3 g/L ,评价沥青颗粒的粒径对配伍性的影响。在确定粒径与地层配伍性的基础上,采用对应粒径的沥青颗粒进行试验。

试验岩心在不同位置设置了4个测压点,如图2所示。根据试验过程中不同位置的的压力变化,得到沥青颗粒注入性能和封堵性能。其中 P_1 和 P_2 之间的压力差代表沥青颗粒是否正常进入目的层, P_2 与 P_3 之间的压力差代表离注入井相对较近的位置, P_3 与 P_4 之间的压力差代表地层深部。沥青颗粒的配伍关系通过前段和后段之间的阻力系数、残余阻力系数和封堵率3个参数进行分析。

2.1 沥青颗粒粒径对配伍性的影响

不同粒径沥青颗粒注入岩心后对应的前段和后段的阻力系数见表1,残余阻力系数和封堵率见表2。

表1 不同沥青颗粒粒径下的阻力系数试验结果

Table 1 Experimental results of resistance coefficient of different particle size asphalt

粒径 d/mm	阻力系数 R_F		
	综合	前段	后段
0.02	4.73	6.30	2.90
0.02~0.06	9.50	10.10	8.70
0.06~0.1	11.49	12.70	10.10
0.1~0.3	12.67	14.24	10.87
0.3~0.8	16.22	20.25	11.59

表2 不同沥青颗粒粒径下的残余阻力系数和封堵率试验结果

Table 2 Experimental results of residual resistance coefficient and plugging rate of different particle size asphalt

粒径 d/mm	残余阻力系数 R_k			封堵率 $E/\%$		
	综合	前段	后段	综合	前段	后段
0.02	6.08	3.80	8.70	83.56	73.67	88.5
0.02~0.06	5.41	2.53	8.70	81.50	60.50	88.5
0.06~0.1	5.41	3.80	7.25	81.50	73.67	86.2
0.1~0.3	6.33	7.12	5.43	84.21	85.96	81.6
0.3~0.8	9.46	15.19	2.89	89.43	93.42	65.5

从阻力系数试验结果可以看出,随着粒径从0.02 mm增加到(0.3~0.8) mm,沥青颗粒注入过程中阻力系数均增加,说明沥青颗粒能在目的油层产生流动阻力,有利于后续注入流体进入其他渗透率低的油层。沥青颗粒粒径小于0.1 mm时,前段和后段阻力系数之间的差值不大于2.9,表明沥青颗粒能够运移良好。粒径大于0.3 mm时,前段和后段阻力系数之间的差值为8.66,表明沥青颗粒向后段运移更困难。

从残余阻力系数和封堵率试验结果可以看出,沥青颗粒粒径(0.1~0.3) mm是一个变化点。粒径小于0.1 mm时,后段的残余阻力系数和封堵率均大于前段,说明沥青颗粒能在离注入端较远的地方对目的层进行封堵,实现深部调剖的作用。粒径大于0.3 mm时,前段的残余阻力系数和封堵率远大于后段,表明沥青颗粒残留在离注入端较近的地方,无法进入深部地层发挥调剖作用。

对于粒径为(0.1~0.3) mm的沥青颗粒,前段阻力系数、残余阻力系数和封堵率比后段稍大,表明该沥青颗粒不仅在目的层中注入性能和运移性能良好,而且能有效封堵深部地层。

渗透率为 $2\ \mu\text{m}^2$ 的地层与(0.1~0.3) mm粒径的沥青颗粒匹配。该粒径沥青颗粒注入过程中压力变化如图6所示,前段和后段的压力差比较均匀,表

明颗粒在岩心中运移良好,并能在地层中有效地残余和滞留。

2.2 沥青颗粒浓度对配伍性的影响

以往对颗粒性调剖剂的研究表明,调剖体系浓度对调剖效果有明显影响^[11]。在配伍的沥青颗粒粒径确定的条件下,进一步研究沥青颗粒浓度对配伍性的影响。对应的前段和后段的阻力系数见表3,残余阻力系数和封堵率见表4。从阻力系数试验结果可以看出,随着浓度从1 g/L增加到5 g/L,沥青颗粒注入过程中阻力系数均增加,说明沥青颗粒能在目的油层产生流动阻力。当沥青颗粒浓度增加到5 g/L时,前段阻力系数明显大于后段阻力系数,表明沥青颗粒注入量过大会堆积在离注入端较近地方。

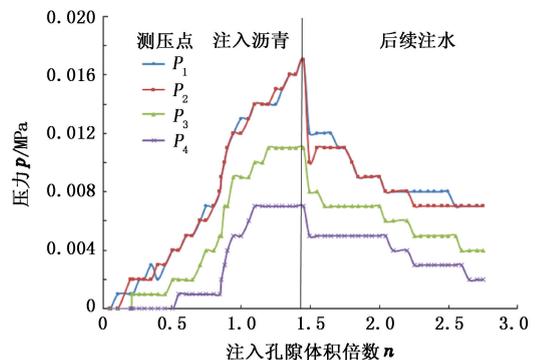


图6 (0.1~0.3) mm 沥青颗粒注入压力变化
Fig. 6 (0.1~0.3) mm asphalt particles injection pressure variation

从残余阻力系数和封堵率试验结果可以看出,浓度从1 g/L增加到5 g/L,综合残余阻力系数和封堵率也增加。当沥青颗粒浓度为1 g/L时,阻力系数和封堵率较小,表明对目的油层的封堵效果相对较差。浓度为5 g/L,残余阻力系数和封堵率明显较大,而且前段与后段差别并不大,主要是后续水驱使堆积在前段的沥青颗粒运移到后段,有利于改善调剖效果。

表3 不同沥青颗粒浓度下阻力系数试验结果

Table 3 Experimental results of resistance coefficient of different asphalt particles concentration

浓度 $c/$ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	阻力系数 R_F		
	综合	前段	后段
1	8.87	9.50	8.15
3	12.67	14.24	10.87
5	24.07	30.85	16.30

以上分析表明,低浓度的沥青颗粒调剖效果相对差,而高浓度容易导致注入过程中注入压力过大。浓度对沥青颗粒的配伍性有重要影响,高浓度沥青颗粒注入可以采用与水交替注入。

表4 不同沥青颗粒浓度下残余阻力系数和封堵率试验结果

Table 4 Experimental results of residual resistance factor and plugging rate of different asphalt particles concentration

浓度 $c/(g \cdot L^{-1})$	残余阻力系数 R_k			封堵率 $E/\%$		
	综合	前段	后段	综合	前段	后段
1	5.07	7.12	2.72	80.27	85.96	63.21
3	6.33	7.12	5.43	84.21	85.96	81.60
5	8.87	11.87	5.43	88.72	91.57	81.60

3 结论

(1) 综合考虑阻力系数、残余阻力系数和封堵率建立了一套沥青颗粒调剖体系与地层孔喉配伍性评价方法。

(2) 与常规试验装置相比, 沥青颗粒注入过程中采用了带搅拌器的活塞、内径 6 mm 的管线和紊流发生槽。设计的横向上渗透率变化的岩心, 该岩心前面有一部分高渗透率岩心, 能够模拟注水井附近射孔孔眼或高渗透大孔道的分流作用, 保证沥青颗粒进入岩心。

(3) 渗透率为 $2 \mu m^2$ 高渗透层与粒径为 (0.1 ~ 0.3) mm 沥青颗粒配伍, 对应合适的沥青颗粒浓度为 3 g/L。当沥青颗粒浓度过高时, 采用与水交替注入能抑制注入过程中压力上升过快。

参考文献:

- [1] 刘钰铭, 侯加根, 宋保全, 等. 辫状河厚砂层内部夹层表征——以大庆喇嘛甸油田为例[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 836-841.
LIU Yuming, HOU Jiagen, SONG Baoquan, et al. Characterization of interlayers within braided-river thick sandstones: a case study on the Lamadian Oilfield in Daqing [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 836-841.
- [2] 林玉保, 张江, 刘先贵, 等. 喇嘛甸油田高含水后期储集层孔隙结构特征[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2): 215-219.
LIN Yubao, ZHANG Jiang, LIU Xiangui, et al. Pore structure features of reservoirs at late high water-cut stage, Lamadian Oilfield, Daqing [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2): 215-219.
- [3] 赵福麟. 采油用化学剂的研究进展[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(1): 163-169.

- ZHAO Fulin. Research advances of chemicals for oil production [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(1): 163-169.
- [4] 殷艳玲, 张贵才. 化学堵水调剖剂综述[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(6): 64-66.
YIN Yanling, ZHANG Guicai. A summary of oil well water plugging & profile control agent [J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2003, 10(6): 64-66.
- [5] 刘翔鄂. 我国油田堵水调剖技术的发展和思考[J]. 石油科技论坛, 2004(1): 41-47.
LIU Xiang'e. Development and thinking of water plugging & profile control technology in oil field in China [J]. Oil Forum, 2004(1): 41-47.
- [6] 王为. 改性沥青堵水调剖剂的室内评价[J]. 精细石油化工进展, 2012, 13(6): 24-26.
WANG Wei. Laboratory evaluation on modified asphalt water shutoff/profile modification agent [J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2012, 13(6): 24-26.
- [7] 高波. 喇嘛甸油田沥青颗粒调剖技术研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(4): 96-97.
GAO Bo. Bitumen particles profile control technique in Lamadian Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(4): 96-97.
- [8] 朱怀江, 刘强, 沈平平, 等. 聚合物分子尺寸与油藏孔喉的配伍性[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(5): 609-613.
ZHU Huaijiang, LIU Qiang, SHEN Pingping, et al. Compatibility between polymer molecular size and pore throat in reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(5): 609-613.
- [9] 祝仰文. 聚合物 MO-400 与油藏渗透率的配伍性研究[J]. 油田化学, 2008, 25(1): 38-41.
ZHU Yangwen. A study on conformity of HPAM MO-400 to reservoir permeability in EOR [J]. Oilfield Chemistry, 2008, 25(1): 38-41.
- [10] ZHANG J, WANG S, LU X, et al. Performance evaluation of oil displacing agents for primary-minor layers of the Daqing Oilfield [J]. Petroleum Science, 2011, 8(1): 79-86.
- [11] 周虔或, 杨旭, 薛丽娜, 等. 一种新型调剖堵水剂的研制[J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(4): 47-49.
ZHOU Qianyu, YANG Xu, XUE Lina, et al. A new profile control and water plugging agent [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2005, 27(4): 47-49.

(编辑 李志芬)