

引用格式:程柯扬,戚志林,田杰,等.稠油油藏高轮次吞吐储层变化规律——以HJ油田为例[J].油气藏评价与开发,2022,12(5):816-824.
CHENG Keyang, QI Zhilin, TIAN Jie, et al. Change law of reservoir property during multi-cycle steam stimulation in heavy oil reservoir:
A case study of HJ Oilfield[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(5): 816-824.
DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.05.014

稠油油藏高轮次吞吐储层变化规律

——以HJ油田为例

程柯扬^{1,2},戚志林²,田杰²,严文德²,黄小亮²,黄诗文²

(1.东北石油大学石油工程学院,黑龙江大庆163318;2.重庆科技学院石油与天然气工程学院,重庆401331)

摘要:HJ油田高轮次蒸汽吞吐后储层物性变化明显而又难确定,对后续开发措施的设计与实施造成了严重阻碍。针对这一问题,以J151和J117两口井为研究对象,在计算油层冲刷倍数的基础上对一维物理模拟实验参数进行设计,研究了蒸汽吞吐开发过程中储层孔隙度、渗透率以及润湿性的变化规律。结果表明,高温蒸汽对地层的长期冲刷可导致储层的物性参数发生变化,各小层蒸汽波及范围内的孔隙度和渗透率随吞吐轮次的增加而增大,储层岩石的亲油性逐渐减弱,亲水性逐渐加强。结合实验研究结果,建立了油层冲刷倍数与储层孔隙度增长率之间的关系式,以及油层冲刷倍数与渗透率增长率之间的关系图版。运用以上关系式和图版可以预测储层在蒸汽吞吐开发过程中不同阶段的孔渗参数,关系式和图版也可推广至其他同类稠油油藏。

关键词:稠油;蒸汽吞吐;冲刷倍数;储层参数;热力开采

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Change law of reservoir property during multi-cycle steam stimulation in heavy oil reservoir: A case study of HJ Oilfield

CHENG Keyang^{1,2}, QI Zhilin², TIAN Jie², YAN Wende², HUANG Xiaoliang², HUANG Shiwen²

(1. School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2. School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: After multi-cycle steam stimulation in HJ Oilfield, the changes of reservoir physical properties are obvious and difficult to determine, which brings serious obstacles to the design and implementation of subsequent development measures. In order to solve this problem, the relationships among porosity, permeability, wettability and steam stimulation cycles are conducted by using one-dimensional physical simulation experimental setup after the design of sweep multiples based on two wells, Well-J151 and Well-J117 in HJ Oilfield. The results show that the physical property parameters of reservoir will change under the long-term sweep of high temperature steam. In the scope of steam sweep, both porosity and permeability all increase with the increase of the steam stimulation cycles. With the increase of steam stimulation cycles, the lipophilicity of reservoir rocks gradually weakened and the hydrophilicity gradually strengthened. Based on the experimental results, the relationship between sweep multiples and porosity growth rate, as well as the chart of the relationship between oil layer sweep multiples and permeability growth rate are established. The parameters of the porosity and permeability of reservoirs in different stages of steam stimulation development can be predicted by the above relationship and chart, and the relationship and chart can be also extended to other similar heavy oil reservoirs.

Keywords: heavy oil; steam stimulation; sweep multiples; reservoir property; thermal recovery

收稿日期:2022-05-18。

第一作者简介:程柯扬(1984—),男,在读博士研究生,从事稠油油藏提高采收率研究。地址:黑龙江省大庆市高新技术产业开发区学府街99号,邮政编码:163318。E-mail:305481924@qq.com

基金项目:重庆市教育委员会科学技术研究项目“溶剂辅助SAGD快速预热机理与数学模型研究”(KJQN201901542)。

蒸汽吞吐是稠油油藏的重要开发方式,大量的稠油产量来自蒸汽吞吐^[1-4]。在蒸汽吞吐的开发过程中,多周期重复注入的高温碱性蒸汽不断冲刷地层,汽、液、岩石之间发生强烈的物理和化学作用,引起一系列的反应^[5-7]。岩石颗粒和胶结物的溶解,黏土矿物的变化,沥青质的沉积,对储层的孔隙类型、孔隙大小、孔喉分布等微观参数产生影响,宏观上表现为储层孔隙度、渗透率和岩石润湿性等物性参数变化^[8-11]。前人主要通过岩心分析、测井解释、室内实验和流体分析等方法研究注蒸汽前后储层参数的变化规律,而对于蒸汽吞吐过程中储层参数的变化及预测研究较少^[12-18]。HJ油田地层胶结疏松,成岩性差,原油黏度高,高轮次蒸汽吞吐后储层物性变化规律复杂,汽窜通道网状发育,现有抑制汽窜堵剂适应性差,影响了该油田的蒸汽吞吐开发效果。为此,该文依据油田实际地质及流体参数和注汽参数进行理论计算和实验参数设计,在此基础上开展了单井蒸汽吞吐一维物理模拟实验和润湿性测定实验。实验描述了蒸汽吞吐轮次与储层物性的关系,建立了储层孔隙度和渗透率大小预测的新方法,可为蒸汽吞吐过程中储层参数监测和采收率的提高提供理论依据。

1 储层变化规律实验方案设计

1.1 实验参数设计

采用理论计算和实验研究相结合的方法,开展储层参数变化规律研究。首先,依据每个轮次各小层的吸汽量数据和各井的地质及流体参数,计算矿场实际条件下吞吐过程中地层的冲刷倍数。然后,结合实验用填砂管模型参数,运用同样的方法计算填砂管尺度下的冲刷倍数,并确定填砂管实验的周期注入量,按照计算结果开展高轮次蒸汽吞吐物理模拟实验。最后,利用冲刷倍数和填砂管实验数据,综合分析高轮次吞吐储层物性的变化规律。

冲刷倍数是指单位体积地层内累计通过水相(蒸汽+热水)的体积。HUANG等^[9]考虑稠油油藏蒸汽驱过程中比容和油水流量比的变化,根据渗流力学、热力学和热传导理论建立的油层冲刷倍数计算模型如式(1)一式(3)所示。

热水区的冲刷倍数为:

$$N_w = \frac{1 + \frac{\mu_w}{10^{10^C - D \lg T(t)}} \left\{ A_i + e^{B[m(T(t) - T_i)]} \right\} e^{-bS_w}}{\frac{\mu_w}{10^{10^C - D \lg T(t)}} \left\{ A_i + e^{B[m(T(t) - T_i)]} \right\} b e^{-bS_w}} \left[1 + \frac{\mu_w}{10^{10^C - D \lg T(t)}} \left\{ A_i + e^{B[m(T(t) - T_i)]} \right\} e^{-bS_{wf}} - \frac{\mu_w}{10^{10^C - D \lg T(t)}} \left\{ A_i + e^{B[m(T(t) - T_i)]} \right\} b e^{-bS_{wf}} \right] - S_w + S_{wf} \quad (1)$$

蒸汽区的冲刷倍数为:

$$N_s = \frac{\rho_w i_s (t - t_s)}{\rho \pi r^2 h \phi} \quad (2)$$

距井筒位置 r 处的总冲刷倍数为:

$$N = N_w + N_s \quad (3)$$

式(1)一式(3)中: N_w 为热水区的冲刷倍数, m^3/m^3 ; N_s 为蒸汽区的冲刷倍数, m^3/m^3 ; N 为总冲刷倍数, m^3/m^3 ; r 为距井筒半径, m ; ϕ 为油层孔隙度; i_s 为蒸汽注入冷水当量速率, g/s ; t 为累计注入时间, s ; t_s 为蒸汽腔扩展到 r 处截面的时间, s ; S_w 为蒸汽驱前缘含水饱和度; S_{wf} 为 t 时刻距井筒 r 处截面的含水饱和度; μ_w 为水的黏度, $mPa \cdot s$; T 为油层温度, K ; T_i 为油层原始温度, K ; m 为相渗曲线随温度变化系数; ρ 为蒸汽腔内水相密度, kg/m^3 ; ρ_w 为热水密度, kg/m^3 ; A_i 、 B 为相对渗透率比值曲线拟合系数; C 、 D 为原油黏温曲线拟合系数。

研究对象为J151和J117两口井,其中J151井的研究区域为正韵律储层,分上下两个小层,孔隙度分别为25%和34.87%,渗透率为 $0.89 \mu m^2$ 和 $7.64 \mu m^2$,目前地层压力为0.4 MPa,共蒸汽吞吐9轮次。J117井的研究区域为复合韵律储层,共5个小层,孔隙度为20.4%~30.9%,渗透率为 $0.25 \sim 4.42 \mu m^2$,目前地层压力为0.4 MPa,共蒸汽吞吐30轮次。各井的基本参数和注汽参数见表1,区块油层的平均热容为 $2431 \times 10^3 J/(m^3 \cdot K)$ 、顶底层导热系数为 $1.51 W/(m \cdot K)$ 、顶底热扩散系数为 $1.33 \times 10^{-6} m^2/s$ 。对该区块原始油藏温度下相渗曲线回归后得到 $A_1=9\ 801\ 645$ 、 $B=27.446$,相关系数 $R=0.998\ 7$ 。

J151和J117各小层冲刷倍数见图1。从计算结果可见,各小层在每个轮次吞吐后,地层内各点冲刷倍数是不一致的,距离井筒越近,冲刷倍数越高;距离井筒越远,冲刷倍数越低。其原因在于,蒸汽注入地层后,先在井筒附近形成蒸汽腔,而远处则是热水以及未加热区,蒸汽的比容远大于热水,故而距离井

表1 各层基本参数和注汽参数
Table 1 Basic parameters and steam injection parameters of each layer

井号	层位	油层厚度 (m)	油层原始温度 (°C)	原始含油饱和度 (%)	孔隙度 (%)	原始渗透率 (μm^2)	蒸汽干度 (%)	注汽速率 (t/d)	周期注汽量 (t)
J151	Ⅲ ₈₋₉ ¹	3.2	23.0	60.42	25.19	0.89	75	71.2	123.6
	Ⅲ ₈₋₉ ²	7.6	23.0	40.62	34.87	7.64	75	119.8	2 550.4
J117	Ⅲ ₅₋₆ ¹	2.8	28.7	59.10	26.50	0.41	75	6.4	14.7
	Ⅲ ₅₋₆ ²	2.0	28.7	24.10	20.40	0.25	75	42.0	128.7
	Ⅲ ₅₋₆ ³	1.2	28.7	43.50	30.20	1.41	75	81.1	420.4
	Ⅲ ₅₋₆ ⁴	3.2	28.7	79.80	36.00	4.42	75	12.6	80.4
	Ⅲ ₅₋₆ ⁵	0.8	28.7	24.20	30.90	0.75	75	9.9	115.8

筒近的地方,经受蒸汽+热水的冲刷,而较远的地方只有热水的冲刷。同时从计算结果中可见,各小层冲刷倍数分布呈现较为一致的规律,距离井筒较近的范围内,冲刷倍数随吞吐轮次增加且变化较为明显;而距离井筒距离稍大之后,各吞吐轮次的冲刷倍数变化不大,其原因可能是加热范围不够大或纯粹只有热水作用。

依据填砂管模型参数,运用油层冲刷倍数计算模型对填砂管尺度下的冲刷倍数进行计算,确定单井蒸汽吞吐一维物理模拟实验的周期注入量。实验填砂管基本参数见表2,填砂管长度为100 cm,直径为38 cm。

1.2 实验材料与设备

实验中所用稠油为我国中部HJ油田所取脱水原油,原油黏温关系见表3。矿场砂样取自J151和J117两口井。

设备主要包括DSA100型接触角测量仪和实验室自制的稠油一维物模实验装置。单井蒸汽吞吐一维物模实验装置见图2,该装置由注入泵、蒸汽发生器、中间活塞容器、填砂管、高温电加热套、压力传感器和温度传感器等组成,工作压力0~35 MPa,工作温度0~425 °C。

1.3 实验方法与步骤

1.3.1 储层孔渗测定实验

实验模拟单井蒸汽吞吐生产过程,在高轮次的蒸汽冲刷下,通过吐出水量的确定孔隙度的变化情况,根据压差和流量数据计算渗透率,具体实验步骤如下:

表2 实验填砂管的参数

Table 2 Parameters of sand-packs in experiment

实验组号	井号	层位	孔隙度 (%)	渗透率 (μm^2)	周期注入量 (mL)
1	J151	Ⅲ ₈₋₉ ¹	28.78	0.97	120
2		Ⅲ ₈₋₉ ²	35.01	7.98	600
3	J117	Ⅲ ₅₋₆ ¹	24.32	0.59	50
4		Ⅲ ₅₋₆ ²	22.37	0.38	150
5		Ⅲ ₅₋₆ ³	36.71	1.12	330
6		Ⅲ ₅₋₆ ⁴	37.25	4.19	105
7		Ⅲ ₅₋₆ ⁵	29.82	0.88	115

表3 原油样品黏温关系

Table 3 Viscosity-temperature relationship of crude oil samples

原油样品	黏温关系	油层条件下的黏度 (mPa·s)
J151	$\lg \mu = -3.4415 \lg T + 9.1893$	33 081
J117	$\lg \mu = -3.7019 \lg T + 9.8265$	27 014

1) 采用矿场实际砂样充填填砂管,计算填砂管孔隙度和渗透率,并饱和油。

2) 按照设计流量向填砂管中注入一定量的蒸汽而后焖井,焖井结束后开井生产,计量吐出的水量。提高填砂管另一端出口回压,向填砂管内注入热水,记录压差和流量数据。

3) 重复上述吞吐过程,直至达到实验设计要求。

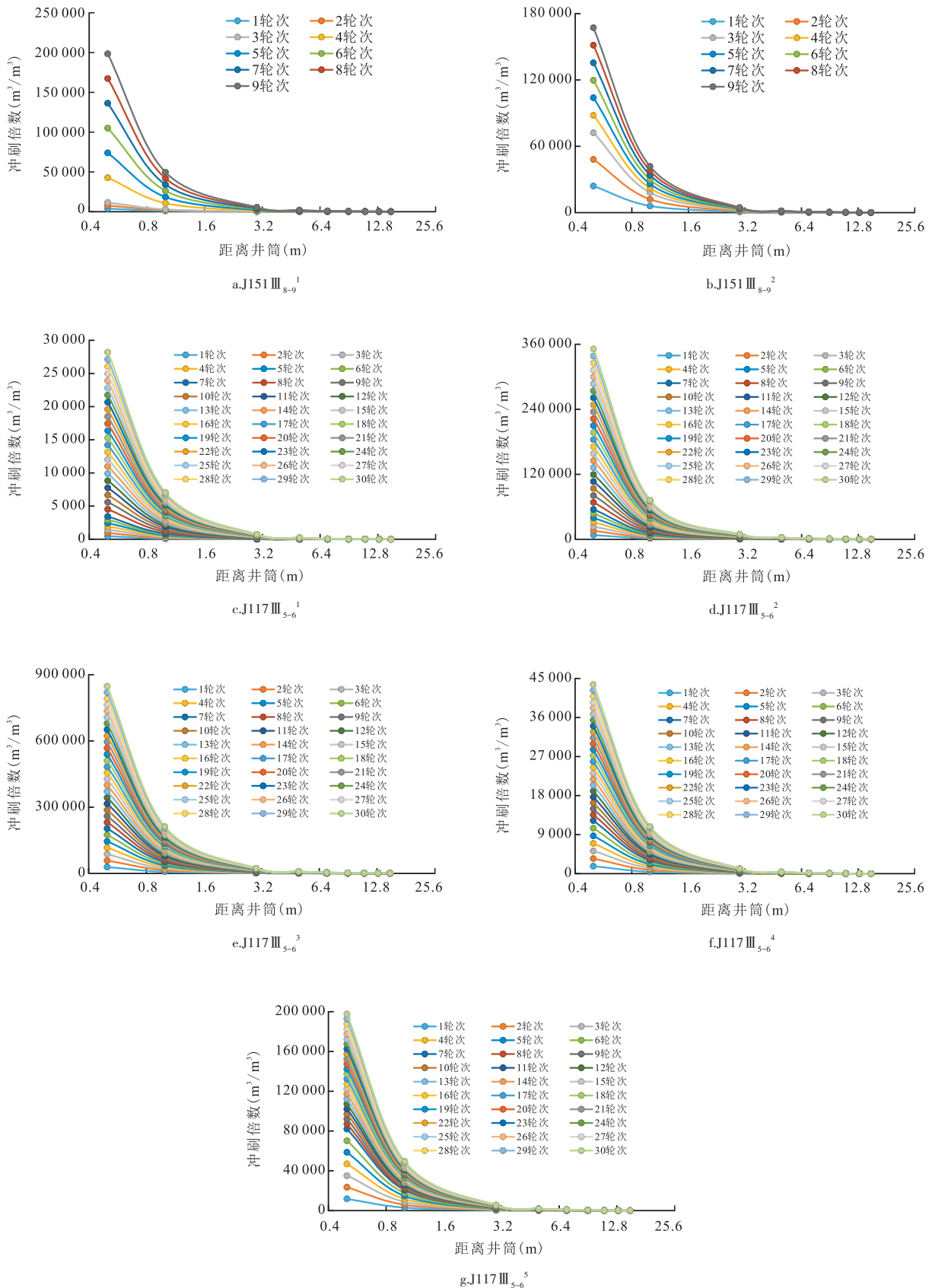


图1 各小层冲刷倍数

Fig. 1 Sweep multiples of each layer

4) 对实验记录数据整理和计算,分析孔隙度和渗透率变化情况。

1.3.2 储层润湿性测定实验

由于地层岩心散碎不成形,实验采用填砂管进行实验材料预处理,从而获取不同吞吐轮次后的油层砂样。具体方法是將散碎岩样装填入口,按照设计流量进行蒸汽吞吐实验,达到一定轮次后,取出入口处的岩样作为润湿性测试待测样品。利用DSA100型接触角测量仪测定水在岩样上的静态接触角,具体测试步骤如下:

- 1) 将干燥后的岩样通过红外压片机压制成片状。
- 2) 将片状岩样置于测量仪的测量台上,通过测试仪注射口滴出一滴水到样品上。

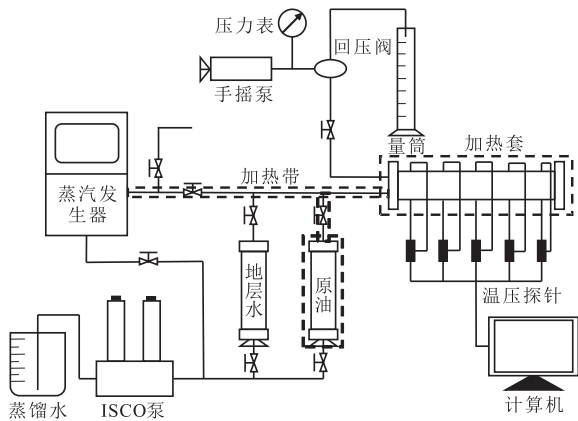


图2 单井蒸汽吞吐一维物模实验装置示意图
Fig. 2 One-dimensional physical model experiment equipment of steam stimulation by single well

3) 连续采集水滴图像,待水滴稳定后,通过计算机图像处理系统确定接触角。

2 实验结果与分析

2.1 高轮次吞吐储层孔渗变化特征

为描述蒸汽吞吐开发过程中储层孔隙度和渗透率的变化程度,定义孔隙度增长率和渗透率增长率如下:

$$I_{\varphi} = \frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_0} \times 100\% \quad (4)$$

$$I_K = \frac{K - K_0}{K_0} \times 100\% \quad (5)$$

式(4)一式(5)中: I_{φ} 为孔隙度增长率,%; I_K 为渗透率增长率,%; φ 为蒸汽吞吐后填砂管的孔隙度; K 为蒸汽吞吐后填砂管的渗透率, μm^2 ; φ_0 为填砂管初始孔隙度; K_0 为填砂管初始渗透率, μm^2 。

J151井和J117井各小层孔隙度增长率与吞吐轮次的关系曲线见图3。从图中可以发现,各小层孔隙度增长率呈现较为一致的规律。J151井两个小层的孔隙度增长率在第2个注汽轮次出现拐点,之后增速放缓,蒸汽吞吐9个轮次后孔隙度增长率分别为13.66%和12.01%。对比两个小层孔隙度增长率与吞吐轮次的关系曲线可以看出,同一个注汽轮次内两个小层的孔隙度增长率不同,9个轮次后Ⅲ₈₋₉¹层孔隙度增大了3.93%,Ⅲ₈₋₉²层增大了4.21%。J117井Ⅲ₅₋₆²、Ⅲ₅₋₆³、Ⅲ₅₋₆⁴和Ⅲ₅₋₆⁵4个小层的孔隙度增长率在第4轮次出现拐点,Ⅲ₅₋₆¹层的孔隙度增长率在第2轮次出现拐点,拐点之前增加较快,之后增速放

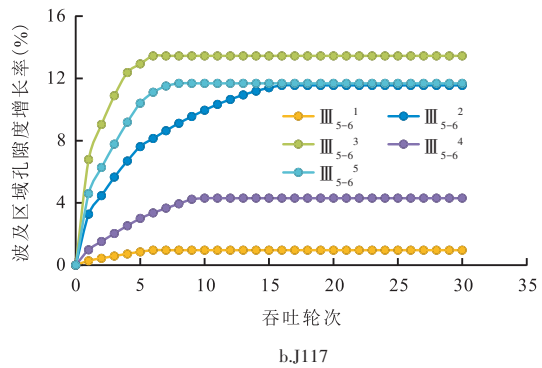
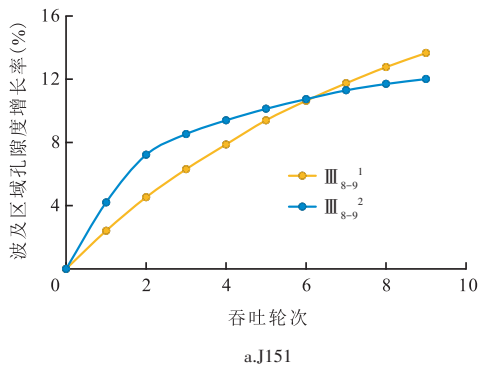


图3 各小层孔隙度增长率与吞吐轮次关系曲线
Fig. 3 Relationship between porosity growth rate and steam stimulation cycles of each layer

缓,最后不再变化,蒸汽吞吐30轮次后各小层孔隙度增长率分别为0.96%、11.55%、13.45%、4.31%和11.68%。对比5个小层孔隙度增长率与吞吐轮次的关系曲线发现,Ⅲ₅₋₆¹层孔隙度增长率变化幅度较小,Ⅲ₅₋₆³层的孔隙度增长率变化幅度最大,Ⅲ₅₋₆²层孔隙度增长率在第16轮次后才不再变化。出现这个现象的原因是蒸汽吞吐初期岩石骨架和黏土矿物溶解产生的细小颗粒被大量带出,使孔隙变宽,增大了储层孔隙度。随蒸汽吞吐轮次的增加,被蒸汽带出的细小颗粒逐渐减少,储层孔隙度将不再变化。不同小层孔隙度增长率增大程度不同的原因是储层基础物性和蒸汽周期注入量的不同,影响了“水-岩”反应的程度,从而导致高轮次吞吐后储层孔隙结构存在差异。综合两口井的填砂管实验结果发现,对于一个特定地层,每个轮次的注汽量是影响储层孔隙度变化的主要因素,注汽量不同,不同小层的孔隙度变化规律也不同。

各小层渗透率增长率和吞吐轮次关系曲线见图4。从图中可以发现,随着蒸汽吞吐轮次的增加,各小层的渗透增长率表现出一致的变化规律,总体表现为增大趋势。J151井两个小层的渗透率增长率在第1个轮次后增速变缓,9个轮次后各小层的渗透率增长率分别为175.26%和149%。J117井各小层的渗透率增长率均在第1个轮次增加幅度较大,之后缓慢增长,最后在不同注汽轮次后趋于稳定,30个轮次后各小层的渗透率增长率分别为72.88%、165.79%、188.39%、97.15%和176.14%。对比J117井5个小层渗透率增长率与吞吐轮次的关系曲线发现,Ⅲ₅₋₆¹层渗透增长率变化幅度较小,Ⅲ₅₋₆³层渗透

增长率变化幅度最大,Ⅲ₅₋₆⁴层渗透增长率在第10个轮次后才不再增加。产生这个现象的主要原因是微小颗粒的迁移不仅使孔隙度增大,同时也使相互连通的孔隙和吼道数增加,减小了液体流动阻力,从而使渗透率增加。蒸汽吞吐初期细小颗粒迁移剧烈,相互连通的孔隙和吼道大量增加,使渗透率上升较快。当细小颗粒迁移现象减弱后,相互连通的孔隙不再增加,储层的孔隙结构趋于稳定,储层渗透率将不再增加。不同小层渗透率增长率增大程度不同的原因是储层基础物性和蒸汽注入量的不同,使孔隙分布存在差异,从而使各小层的最终渗透率也不同。综合两口井的实验数据发现,与储层孔隙度的变化情况一样,每个轮次的注汽量是影响储层渗透率变化的主要因素,也是各小层渗透率增长率存在差异的原因所在。

2.2 蒸汽吞吐储层孔渗预测

从前面的实验数据可见,各填砂管中蒸汽驱扫过的区域内孔隙度和渗透率变化相似而又不尽相同。由于每口井工作制度不同,不能建立蒸汽吞吐轮次和储层参数之间的普适性关系。鉴于此,将各填砂管的实验数据绘制在同一个图中,可以更好地分析规律见图5。从图中可以发现,冲刷倍数的常用对数和孔隙度增长率具有较好的相关性。

拟合冲刷倍数和孔隙度增长率之间的关系得到如下关系式:

$$I_{\varphi} = 1.6159(\lg n)^2 - 7.7698 \lg n + 9.0447 \quad (6)$$

式中: n 为冲刷倍数。据此,就能确定蒸汽吞吐开发过程中不同阶段的储层孔隙度增长率。

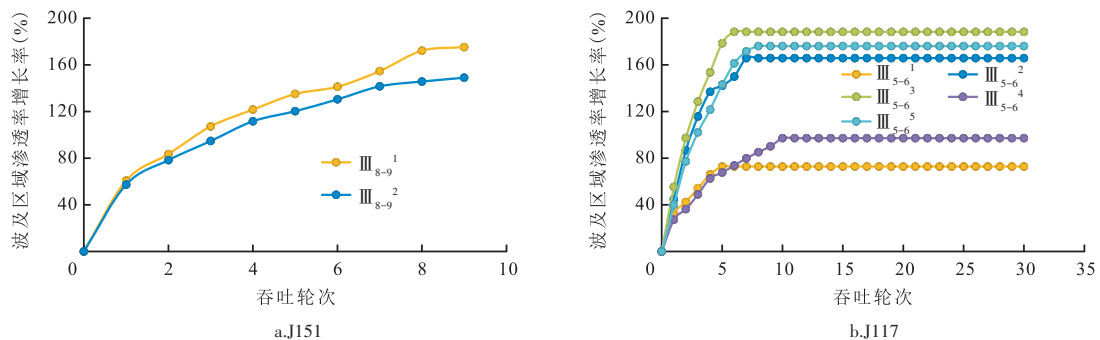


图4 各小层渗透率增长率与吞吐轮次关系曲线

Fig. 4 Relationship between permeability growth rate and steam stimulation cycles of each layer

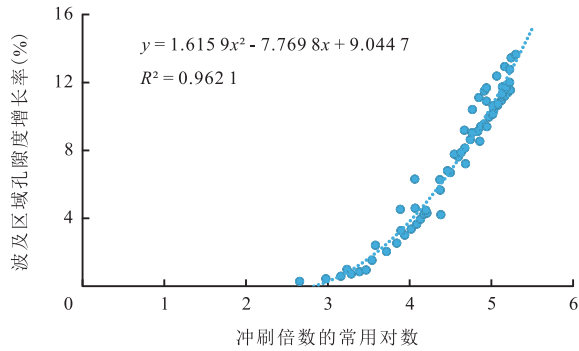


图5 孔隙度增长率与冲刷倍数关系拟合

Fig. 5 Fitting of the relationship between porosity growth rate and sweep multiples

而渗透率增长率与冲刷倍数之间关系拟合情况相对较差,原始渗透率不同时,渗透率增长率与冲刷倍数的关系曲线之间相差较远,说明原始渗透率对于渗透率增长情况有一定影响。为描述蒸汽的长期冲刷对油田储层渗透率的影响,以冲刷倍数的常用对数作为横轴,以原始渗透率为纵轴,利用插值的方法绘制了渗透率增长率与冲刷倍数的常用对数图见图6。依据油层原始渗透率以及冲刷倍数的常用对数数值,查得的对应斜线,即可确定不同时间渗透率的增长率。

2.3 高轮次吞吐储层润湿性变化特征

稠油的胶质、沥青质含量较高,这些极性物质吸附在岩石颗粒表面使岩石的润湿性为亲油特性^[20-24]。由于稠油具有非常强的温敏性,高温蒸汽的不断冲刷油层,岩石颗粒表面的极性物质将不断解除吸附,同时由于黏土矿物成分的改变,岩石的润湿性将由亲油性逐渐变为亲水性。另一方面,蒸汽吞吐后期,沥青质沉积使岩石又表现出较强的亲油性,同时改变了储层的孔隙结构。

J151井岩样不同吞吐轮次静态接触角测定见图7,图中水为黑色液球,底部为岩样。从图中可以发现,原始状态下的油砂与水的接触角为124.7°,属于亲油状态。吞吐1轮次后,油砂与水的接触角为122.3°,接触角有所减小,说明亲油性变弱。吞吐3、5、7轮次后,油砂与水的接触角分别为112.7°、104.3°和98.9°,油砂与水的接触角不断减小,说明吞吐过程中蒸汽作用后,岩石颗粒表面的原油被逐渐剥离,亲

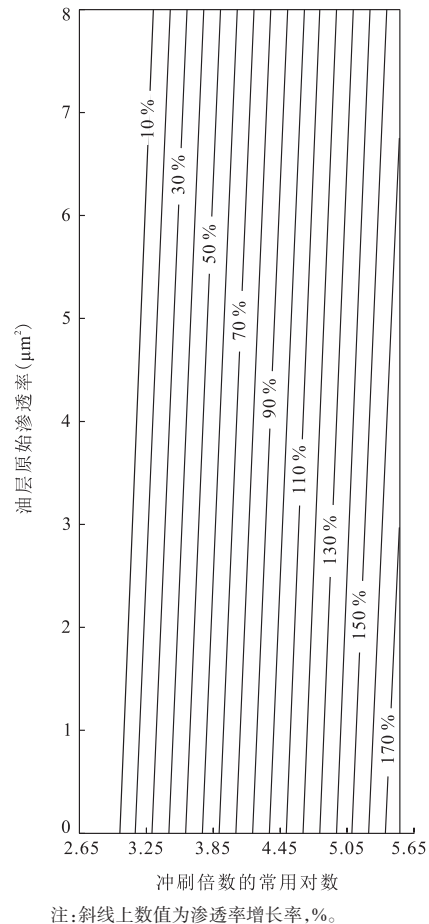


图6 渗透率增长率与冲刷倍数关系

Fig. 6 Relationship between permeability growth rate and sweep multiples

油性逐渐减弱。当吞吐到第9轮次,接触角已降低至85°,说明岩石颗粒表面已呈现弱亲水状态,出现润湿反转现象。从实验结果中发现,随着吞吐轮次的增加,高温蒸汽不断冲刷地层,近井区域岩石颗粒的亲水特性将逐渐加强。

3 结论

1) 在蒸汽吞吐一维物理模拟实验中,研究储层的渗透率和孔隙度均有不同程度的增大,储层润湿性向亲水性转变。

2) 蒸汽吞吐开发过程中不同井工作制度差异明显,无法建立吞吐轮次与储层物性之间的普适性关系。为此,引入了油层冲刷倍数这一无量纲量,油层冲刷倍数与储层孔渗变化率之间具有较好的相关性。

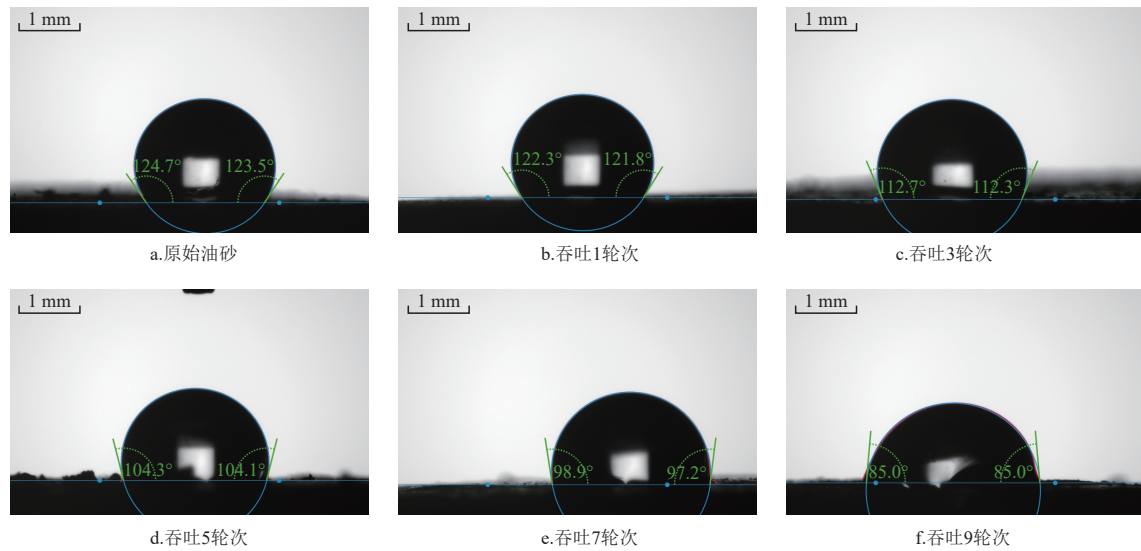


图7 不同吞吐轮次后油砂接触角

Fig. 7 Contact angle of sand samples after different steam stimulation cycles

3) 以实验实测结果为依据,建立了油层冲刷倍数与储层孔隙度增长率之间的关系式,以及油层冲刷倍数与渗透率增长率之间的关系图,能够较好地预测储层在蒸汽吞吐开发过程中不同阶段的孔隙参数。

4) 由于油层冲刷倍数与储层孔渗变化率之间具有较好的相关性,采用蒸汽吞吐开发的同类稠油油藏亦可通过本研究中的方法建立针对该油藏的储层孔渗变化率预测关系式和图版。

参考文献

[1] 张蔓,张军,叶锋,等.稠油蒸汽吞吐油汽比经济界限预测模型[J].特种油气藏,2020,27(3):121-124.
ZHANG Man, ZHANG Jun, YE Feng, et al. Prediction model of economic oil steam ratio limit for heavy-oil stimulation[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(3): 121-124.

[2] 杨勇.胜利油田稠油开发技术新进展及发展方向[J].油气地质与采收率,2021,28(6):1-11.
YANG Yong. New progress and next development directions of heavy oil development technologies in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(6): 1-11.

[3] 郑伟,谭先红,王泰超,等.海上稠油油田蒸汽吞吐产量确定新方法[J].新疆石油地质,2020,41(3):344-348.
ZHENG Wei, TAN Xianhong, WANG Taichao, et al. A new method to determine initial production of steam stimulation in offshore heavy oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(3): 344-348.

[4] 赵红雨.稠油油藏组合蒸汽吞吐的分区方法[J].特种油气藏,2018,25(3):77-81.

ZHAO Hongyu. Zoning of combined steam huff-puff in heavy oil reservoir[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2018, 25(3): 77-81.

[5] 张双源,韩登林,李峻颀,等.稠油蒸汽驱过程中储集层伤害模式分析——以辽河盆地西部凹陷齐40区块为例[J].科学技术与工程,2017,17(12):39-44.
ZHANG Shuangyuan, HAN Denglin, LI Junjie, et al. Research on reservoir damage model during the heavy oil steam flooding: An example from Qi40 Block in Western Sags, Liaohe Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(12): 39-44.

[6] 闫红星,杨俊印,刘家林,等.辽河油田齐40块蒸汽驱二氧化碳成因分析[J].科学技术与工程,2021,21(22):9337-9342.
YAN Hongxing, YANG Junyin, LIU Jialin, et al. Analysis of the origin of carbon dioxide from steam flooding exploitation in Block Qi-40 of Liaohe Oilfield[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(22): 9337-9342.

[7] 张关龙,陈世悦,王海方.稠油热采过程储层中粘土矿物转化研究进展[J].矿物学报,2009,29(1):113-118.
HANG Guanlong, CHEN Shiyue, WANG Haifang. Advances in research on clay mineral alteration in heavy oil reservoirs during thermal recovery[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(1): 113-118.

[8] 张吉磊,罗宪波,何逸凡,等.基于储层物性时变的稠油底水油藏高含水期精细挖潜技术[J].石油钻探技术,2020,48(4):111-117.
ZHANG Jilei, LUO Xianbo, HE Yifan, et al. A new potential fine trapping technology for high water cut stage in heavy oil reservoirs with bottom water based on physical properties of the reservoir varying over time[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(4): 111-117.

[9] 吴春燕,王宁,白嵩,等.新安边地区长7致密油储层孔隙结

- 构对可动流体赋存的影响[J].西北大学学报(自然科学版), 2022,52(2):318-326.
- WU Chunyan, WANG Ning, BAI Ru, et al. Effect of pore structure on the occurrence of movable fluid in Chang 7 tight oil reservoir in Xin'anbian Area[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(2): 318-326.
- [10] 陈丹馨,李金宜,朱文森,等.海上疏松砂岩稠油油藏水驱后储层参数变化规律实验研究[J].中国海上油气,2016,28(5):54-60.
- Chen Danqing, Li Jinyi, Zhu Wensen, et al. Experimental research on reservoir parameters variation after water flooding for offshore unconsolidated sandstone heavy oil reservoirs[J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(5): 54-60.
- [11] 田巍.老油田注CO₂开发提高注气能力的方法[J].石油与天然气化工,2020,49(3):72-77.
- TIAN Wei. A method of improving gas injection capacity by CO₂ injection for old oilfield[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2020, 49(1):72-77.
- [12] 张朋祥.稠油油藏蒸汽驱过程中储集层微观变化——以辽河盆地西部凹陷欢曙上台阶齐40块为例[J].科学技术与工程,2019,19(14):127-135.
- Zhang Pengxiang. Reservoir microscopic variations during steam flooding for heavy oil reservoirs—an case study from Block Qi 40 in western sag of Liaohe Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(14): 127-135.
- [13] 李伟忠.金家油田低渗敏感稠油油藏适度出砂室内评价[J].断块油气田,2019,26(6):810-815.
- LI Weizhong. Laboratory evaluation on reasonable sand production of low permeability sensitive heavy oil reservoir in Jinjia Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2019, 26(6): 810-815.
- [14] 白玉印,赵彦平,李群德,等.利用测井资料研究稠油油藏注汽前后物性变化规律:以河南油田为例[J].石油天然气学报,2005,27(6):732-735.
- BAI Yunyin, Zhao yanping, Li Qunde, et al. Study on physical property changing rules both before and after steam injection in heavy oil reservoirs[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(6): 732-735.
- [15] 吴迎彰,陈科贵,木合塔尔,等.稠油蒸汽吞吐前后储层参数变化规律及机理研究[J].断块油气田,2012,19(S1):5-8.
- Wu Yingzhang, Chen Kegui, Muhetaer, et al. Law and mechanism of reservoir parameters change both before and after steam stimulation in heavy oil reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2012, 19(S1): 5-8.
- [16] 杨春梅,陆大卫,张方礼,等.蒸汽吞吐后期近井地带储层的变化及其对油田开发效果的影响[J].石油学报,2005,26(3):74-77.
- YANG Chunmei, LU Dawei, ZHANG Fangli, et al. Reservoir characteristics in the near region of thermal recovery wells and their effects on development of oilfield in the later period of steam stimulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(3): 74-77.
- [17] CHEN H Q. Influences of heavy oil thermal recovery on reservoir properties and countermeasures of Yulou oil bearing sets in Liaohe Basin in China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(11): 1-9.
- [18] 高军,闫治东,魏本兴,等.青西油田多元复合吞吐研究与应用——以柳5X井为例[J].钻采工艺,2020,43(4):43-46.
- GAO Jun, YAN Zhidong, WEI Benxing, et al. Research and application of multiple composite steam stimulation in Qingxi Oilfield: Taking Well Liu 5X as an example[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(4): 43-46.
- [19] HUANG X L, WANG P K, TIAN J, et al. A novel method to assess steam injection rate in the steam-flooding process of shallow heavy oil reservoirs[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 2020: 1-17.
- [20] 王千,杨胜来,拜杰,等.CO₂驱油过程中孔喉结构对储层岩石物性变化的影响[J].石油学报,2021,42(5):654-668.
- WANG Qian, YANG Shenglai, BAI Jie, et al. Influence of pore throat structure on changes in physical properties of reservoir rock during CO₂ flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(5): 654-668.
- [21] 程亮,施雷庭,叶仲斌,等.稠油重组分对砂岩储层润湿性变化的影响[J].油田化学,2016,33(2):325-332.
- CHENG Liang, SHI Leiting, YE Zhongbin, et al. Effect of heavy constituent in crude oil on wettability change of sandstone[J]. Oilfield Chemistry, 2016, 33(2): 325-332.
- [22] 耿斌,闫华,周德志,等.疏松砂岩稠油层含油饱和度测井解释校正方法探讨——以济阳拗陷沾化凹陷馆陶组为例[J].油气地质与采收率,2020,27(4):45-51.
- GENG Bin, YAN Hua, ZHOU Dezhi, et al. Correction method of oil saturation in unconsolidated sandstone heavy oil reservoirs: A case study of Guantao Formation in Zhanhua Sag, Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(4): 45-51.
- [23] 李晓晓,岳湘安,闫荣杰,等.稠油油藏表面活性剂辅助CO₂驱油效果及主控性能[J].油气地质与采收率,2021,28(6):94-100.
- LI Xiaoxiao, YUE Xiang'an, YAN Rongjie, et al. Study on effect of surfactant-assisted CO₂ and dominating behavior of surfactant in heavy oil reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(6): 94-100.
- [24] 邓宏伟.超深层低渗透稠油CO₂增溶降黏体系研发与应用[J].油气地质与采收率,2020,27(1):81-88.
- DENG Hongwei. Development and application of CO₂ solubilizing and viscosity reducing system for ultra-deep and low-permeability heavy oil reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(1): 81-88.

(编辑 尹淑容)