

油藏水驱后蒸汽驱增油机理实验

庞进,刘洪,李泓涟
(重庆科技学院,重庆 401331)

摘要:水驱后的油藏条件与初始状态有很大不同,导致蒸汽驱油机理变得更加复杂。通过水驱后蒸汽驱物理模拟实验,可以深入认识其增油机理,指导水驱油田蒸汽驱的方案设计。在充分调研水驱、蒸汽驱物理模拟实验的基础上,建立了水驱、蒸汽驱联动物理模拟实验相似准则,并以此准则为依据,对某实际水驱砂岩油藏进行了模型化,建立了二维和三维物理模型。在此基础上进行平面均质油藏和纵向非均质油藏的水驱后蒸汽驱2组实验。实验结果表明,在均质油藏中,蒸汽带扩散均匀,蒸汽驱阶段的采出程度是水驱阶段的2.45倍,总采出程度达到68.54%;在非均质油藏中,蒸汽带优先沿着物性较好的油层扩散,蒸汽驱阶段的采出程度是水驱阶段的2.36倍,总采出程度达到64.22%。蒸汽的蒸馏作用和驱替作用是蒸汽带中主要的增油机理,油藏的非均质性对蒸汽驱的效果有一定影响。

关键词:蒸汽驱 水驱 物理模拟 驱油机理 实验 相似准则
中图分类号:TE357.41 **文献标识码:**A

文章编号:1009-9601(2013)04-0072-03

稠油油藏室内驱油实验多是在油藏初始条件下针对某单一过程开展的^[1-4]。而中国稠油油藏多是早期进行了注水开发^[5-7],水驱后的油藏条件与初始状态差别很大。转蒸汽驱时,与国外开展的蒸汽驱也差别较大,可借鉴经验少。因此,笔者通过物理模拟实验,研究了水驱后转蒸汽驱微观增油机理。

1 物理模型的建立

1.1 实验参数模型化

物理模拟实验是现场采油在实验室中的再现,它是将原型的几何条件、物理条件和定解条件等,按一定比例转化到模型上,然后将模型的实验结果按相同比例转回原型,此过程的依据是相似理论。建立一个物理模型,然后根据数学模型采用某种相似准则数求解方法推导出一些相似准则数,根据所模拟物理过程的重要现象,对这些相似准则数进行取舍,从而得到进行物理模拟需要的相似准则数,这些准则数将成为油藏原型参数转化为物理模型参数的依据。在充分调研和论证水驱、蒸汽驱物理模拟实验的基础上^[8-10],通过对水驱、蒸汽驱相似理论研究,建立了油藏水驱后转蒸汽驱全过程相似准则(表1),据此,以某实际水驱砂岩油藏为原型,建立了对应的二维物理模拟模型。

相似准则数	物理意义	模拟参数
$R = \frac{L_m}{L_f}$	相似比	井距和厚度
$\frac{t_m}{t_f} = R^2 \frac{\alpha_{of}}{\alpha_{om}}$	无因次时间	生产时间
$\frac{\Delta p_m}{\Delta p_f} = R \frac{\Delta \rho_m}{\Delta \rho_f}$	无因次压差	生产压差
$\frac{q_m}{q_f} = R \frac{\alpha_{om} \phi_m}{\alpha_{of} \phi_f}$	无因次质量注入速率	蒸汽注入速率
$\frac{K_m}{K_f} = \frac{1}{R} \times \frac{\alpha_{om} \Delta p_f}{\alpha_{of} \Delta p_m}$	无因次流度	渗透率
$p_D = \frac{p - p_{min}}{p_{max} - p_{min}}$	无因次压力	初始压力
$T_D = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$	无因次温度	初始温度

注: R 为相似比; L_m 和 L_f 分别为模型和油藏的井距, m; t_m 和 t_f 分别为模型和油藏的生产时间, d; α_{of} 和 α_{om} 分别为油藏和模型的热扩散系数, m^2/s ; Δp_m 和 Δp_f 分别为模型和油藏的生产压差, MPa; $\Delta \rho_m$ 和 $\Delta \rho_f$ 分别为模型和油藏中的油水密度差, kg/m^3 ; q_m 和 q_f 分别为模型和油藏的日注入量, m^3/d ; ϕ_m 和 ϕ_f 分别为模型和油藏的孔隙度; K_m 和 K_f 分别为模型和油藏的渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; μ_{om} 和 μ_{of} 分别为模型和油藏中的原油粘度, $mPa \cdot s$; p_D 为无因次压力; p , p_{min} 和 p_{max} 分别为平均、最小和最大压力, MPa; T_D 为无因次温度; T , T_{min} 和 T_{max} 分别为平均、最小和最大温度, $^{\circ}C$ 。

1.2 物理模型

纵向上的物理模型为非均质模型,其参数见表2,一注一采井网,模拟注采井间的剖面。

收稿日期:2013-05-30。

作者简介:庞进,男,讲师,博士,从事油气藏工程研究。联系电话:15923207146, E-mail: crab1981@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2008ZX05015-001)。

模拟层	油 藏		模 型	
	厚度/cm	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	厚度/cm	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
K_1 层	3.1	1 966	1.10	497.23
K_2 层	2.6	1 889	0.92	477.76
隔层1	2.9		1.03	
K_3 层	1.87	1 166	0.66	294.90
K_4 层	2.3	1 456	0.82	368.24
隔层2	2.1		0.74	
K_5 层	2.7	1 546	0.96	391.01
合计	17.57		6.23	

平面上采用均质模型,一注三采井网,模拟九点井网的1/4,模型长度、宽度和高度分别为50,50和4 cm。其他模型参数包括:注采井距为0.5 m,油层厚度为4.46 cm,渗透率为 $405.83 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为33.98%,热扩散系数为 $5.79 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$,初始模型压力为10 MPa,生产时间为7.6 min,注汽速度为30 mL/min;地面脱气原油粘度均为3 500 mPa·s,地面脱气原油密度为968.6 kg/m³,油藏初始温度为65 ℃。

实验模型底部和四周安装耐压、耐高温隔热板进行保温隔热。油管柱采用直径为6 mm的不锈钢管线,在油层部位割缝以模拟现场井的射孔段。纵向非均质模型根据油藏分层情况,共7个模拟层,分别是 K_1, K_2, \dots, K_5 层和2个隔层(表2),布置热电偶7层,每层17个;平面均质模型模拟单一渗透率带,布置热电偶9行12列。模型装填满足配制要求的模型砂,用不同粒度的砂进行配比,采用管式模型测试其空气渗透率,使其渗透率与模型渗透率相等。

2 蒸汽驱物理模拟实验

2.1 实验方案设计

设计了2套实验方案,均为水驱无明显增油效

果后转为蒸汽驱,实验1压力为5 MPa,注汽温度为264 ℃,蒸汽干度为40%,主要研究蒸汽驱平面波及规律;实验2压力为0.5 MPa,注汽温度为151.9 ℃,蒸汽干度为40%,主要研究蒸汽驱纵向波及规律。

2.2 实验步骤

水驱后转蒸汽驱实验步骤包括:①测定模型的孔隙体积。将试压时模型中的水放出,注入1倍孔隙体积乙醇,用氮气吹干;然后接入抽空流程,将模型内的气体抽出,当真空度达到133.3 Pa后,再连续抽空5 h;饱和地层水,根据饱和地层水量计算模型的孔隙体积和孔隙度。②模型初始化。将模型调整为实际油层位置,接入饱和油流程。将实验用油以恒定的低速注入模型进行油驱水,建立束缚水,同时各个泄流口计量被油驱出的水量。为了充分饱和油,需要观察油水界面的推进程度并调整入口阀门的开启程度,使油水界面均匀推进;也可以通过切换不同位置的泄流口,使得饱和油均匀、充分。直到泄流口均无水流且压差稳定后,计量流出的总水量,计算模型的原始含油饱和度和束缚水饱和度。③水驱过程的模拟。模拟现场水驱过程,水驱采出程度接近油藏实际值的23%,压力缓慢降至转蒸汽驱压力设计值。④模拟2个不同实验方案下的蒸汽驱过程,实验1和实验2的注汽速度分别为50和30 mL/min。

实验过程中,采用人工方式记录瞬时产油量和产水量,用微机连续记录储存瞬时温度、压力数据,并对实验过程进行了实时拍摄。

3 实验结果分析

3.1 平面均质模型蒸汽驱实验

1号井注蒸汽之前,由于注水温度与油藏温度相同,水驱阶段温度场没有变化。开始注入蒸汽后,油层温度逐渐升高(图1)。当注入蒸汽量达到

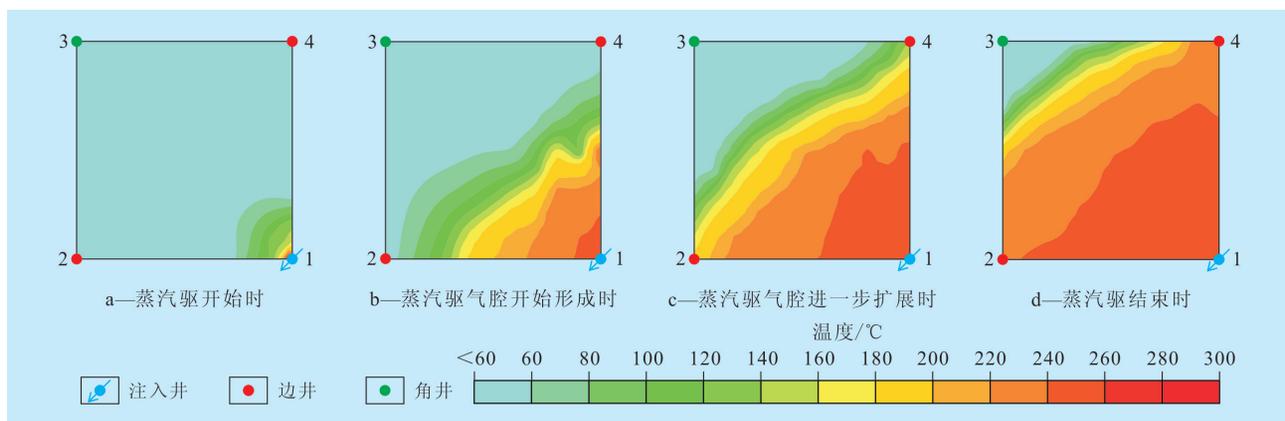


图1 平面均质模型蒸汽驱温度场发育过程

1.2倍孔隙体积时,蒸汽在平面上不断扩展形成蒸汽带。蒸汽带的扩展较为均衡,向距离较近的2口生产井(2号和4号边井)的方向扩展速度较快,向距离较远的生产井(3号角井)的方向扩展速度略慢。当蒸汽在边井突破后,蒸汽带向角井的方向扩展速度变得非常缓慢,甚至不再向角井的方向扩展,蒸汽波及体积小。关闭2口边井,继续蒸汽驱替,蒸汽带向角井的方向推进,蒸汽最终波及体积较大。

由平面均质模型蒸汽驱物理模拟实验各阶段采出程度和含水率变化(图2)可见,水驱和蒸汽驱阶段总的采出程度为68.54%,其中,水驱阶段采出程度为19.86%,蒸汽驱阶段采出程度为48.68%。蒸汽在边井突破后,边井产油量几乎为0。关闭边井后,含水率没有明显变化。

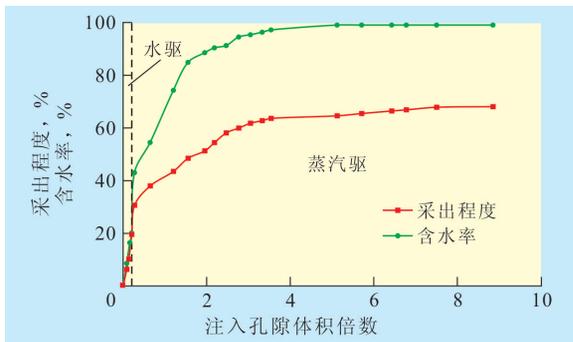


图2 平面均质条件下蒸汽驱开采曲线

3.2 纵向非均质模型蒸汽驱实验

1号井开始注入蒸汽后,油层温度逐渐升高。当注入蒸汽量达到0.7倍孔隙体积时,在3个渗透层(K_1-K_2, K_3-K_4, K_5)都形成了蒸汽带,并逐步向前推进。由于纵向非均质程度较弱,蒸汽带推进比较均匀,上部的较高渗透层(K_1-K_2)推进速度稍快一些。注汽井—采油井方向最终温度场:蒸汽带的扩展距离较大,接近井距的近1/2;其余部分为热水带;蒸汽带仍然没有扩展到生产井(图3)。

实验2水驱阶段采出程度为19.13%,蒸汽驱阶段采出程度为45.09%,总采出程度为64.22%(图4)。由此可见,蒸汽驱的效果较好,含水率上升速度慢;随着蒸汽干度的升高,含水率上升速度有所减缓,高含水时间长。究其原因,水驱后注水井附近存水多,地层温度低,需要经过较长时间的蒸汽注入,油层温度升高到接近蒸汽温度时才能够形成蒸汽带。这段时间大量的蒸汽冷凝,释放的热量加热原油和岩石,原油粘度降低并在其驱动下被采出,油层的含油饱和度降低。蒸汽带逐步扩展时,含水率依然较高,原油在蒸汽的驱动下继续被采出,使得采出程度得到提高。蒸汽带扩展的距离越

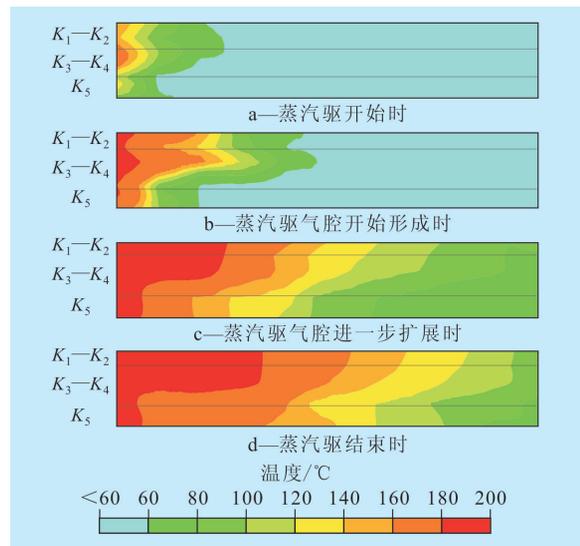


图3 纵向非均质模型蒸汽驱温度场发育过程

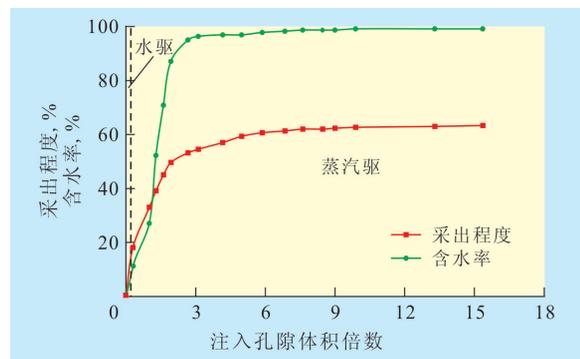


图4 纵向非均质条件下蒸汽驱开采曲线

大,采出程度越高。蒸汽的蒸馏作用和驱替作用是蒸汽带中的主要增油机理,在这2种作用下残余油饱和度降低,采出程度提高。

对比实验1和实验2,随着注汽压力、温度的降低,蒸汽带形成的时间缩短,蒸汽注入量减少。这是因为压力越高,注汽温度越高,与油层温度差越大,地层热量损失就越大。根据物理模型的相似准则换算,实验1蒸汽带形成的时间为1.2 a,实验2蒸汽带形成的时间为0.7 a,相差近1倍。

4 结论

蒸汽的蒸馏作用和驱替作用是蒸汽带中主要的增油机理,致使残余油饱和度降低,进而提高了采出程度。

油藏非均质程度对蒸汽驱的效果具有一定的影响。实验结果表明:均质模型和非均质模型采出程度相差不大,可以看出非均质程度较弱,对蒸汽驱的效果影响较小。

(下转第78页)