

一类驱油剂在油藏孔隙中的流变与流动特性*

岳湘安 刘中春 侯吉瑞 张立娟
(石油大学, 北京 102249)

夏惠芬
(大庆石油学院, 黑龙江大庆 163000)

摘要 化学驱中的驱油剂、原油及其混合物是一类在组成结构和性质上均十分复杂的流体, 这些流体在油藏中的流变性和流动特性是影响驱油效率的主要因素。介绍了化学驱中几种复杂流体力学问题及其研究成果。就其流变性而言, 聚合物溶液和碱—表面活性剂—聚合物(ASP)复合体系均属粘弹性流体, 但在中等剪切速率的简单剪切流动条件下, 其流变性可用幂律模式描述。在驱油过程中, 驱油剂的稠度系数沿渗流方向呈指数规律减小, 而幂指数则以线型规律递增。粘弹性流体在结构复杂的油藏孔隙中流动时, 产生的二次流利于驱替孔隙盲端和喉道中的残余油。还探讨了化学驱过程中的宏观渗流特性。

关键词 化学驱 复杂流体 流变性 油藏孔隙 渗流

化学驱是以化学剂作为驱油介质, 改善地层流体物理化学特性和流动特性的提高原油采收率技术。在化学驱油过程中, 地层流体流动的复杂性不仅表现于驱油剂本身组成和性质的复杂, 还表现于驱油剂与原油之间的相互作用以及地层流体物化性质在时间与空间的变化。因此, 地层流体在驱油过程中的流变行为与流动特性是影响微观驱油效率和宏观波及效率的重要因素。本研究主要介绍近几年来对于化学驱中几个典型复杂流体力学问题的研究成果。

1 驱油剂的流变性

1.1 碱剂对驱油体系流变性的影响

聚合物溶液和 ASP 复合体系中由于含有高分子聚合物而呈较强的粘弹性。除聚合物外, 驱油体系中其它组分对其流变性均有不同程度的影响, 现重点讨论碱剂的影响。

在 ASP 体系中, 碱含量是影响其流变性的主要因素之一。流变性实验结果表明, 高碱体系的视粘度与无碱体系相比, 剪切视粘度降低了 1~2 个数量级, 松弛时间降低了约 1 个数量级。由于强碱的使用和碱含量的增加所引起的体系粘弹性损失非常严重, 对于驱油效率的影响不容忽视。

从原子力显微镜照片可以看到, 无碱体系中的聚合物分子很均匀地平铺在云母片的表面, 没有团

块状物产生, 聚合物分子链分子之间虽有缠绕, 但都处于伸展状态。在低碱条件下(质量分数为 0.3%), 体系中的聚合物分子呈现少量的蜷曲, 大部分分子链则以多个分子侧向聚集的方式, 形成一种较弱的聚集体。当碱质量分数增至 0.6% 和 1.2% 时, 聚合物分子链开始明显蜷缩成大小不等的线团, 而且线团之间也没有分子链连接, 每个线团处于相对独立的状态。

化学驱油体系中的碱(NaOH)在水中完全电离, 一部分 Na^+ 吸附在聚合物分子链的负电基团附近, 其余的 Na^+ 扩散进入水中, 形成双电层结构。随着碱浓度的增加, 吸附层的 Na^+ 浓度增加, 与扩散层 Na^+ 浓度差减少, 致使 ξ, φ 电位下降。当 Na^+ 的浓度增大到扩散层消失时, 负电完全被中和, 在聚合物分子链表面上的电位便降到零, 聚合物分子呈现蜷缩构象。在分子链蜷缩的同时, Na^+ 周围溶剂化层的水分子被挤掉, 使分子线团的密度进一步增加, 流体力学等价球缩小。另外, 加碱后的聚合物分子链蜷缩成大小不等的单个线团分散在水中, 线团之间没有分子链的牵连, 没有分子之间的相互缠绕, 分子间的内摩擦力急剧下降, 导致溶液的粘弹性降低。

1.2 驱油剂在岩心中的流变特性

不同结构的孔隙中, 驱油剂的流动可表现为剪切流、拉伸流或剪切—拉伸流动特征, 其宏观渗流特性和流变行为则是这些微观流动的综合效应。因

此,驱油剂在渗流和驱油过程中所表现出的流变性与用流变仪在简单剪切流动条件下所测得的结果有较大的差别(见图1)。图1中的驱油剂配方为:碱(NaOH)1.2%,表面活性剂(ORS)0.3%,聚合物(HPAM)500mg/L,曲线1为流变仪测量结果,曲线2为岩心中的等效视粘度曲线。驱油剂在岩心中的等效剪切速率定义为

$$\gamma_{e,q} = \sqrt{2}v / \sqrt{k_w \phi} \quad (1)$$

式中, v 为渗流速度, $\mu\text{m/s}$; k_w 为岩心的水测渗透率, μm^2 ; ϕ 为岩心的孔隙度,无量纲。

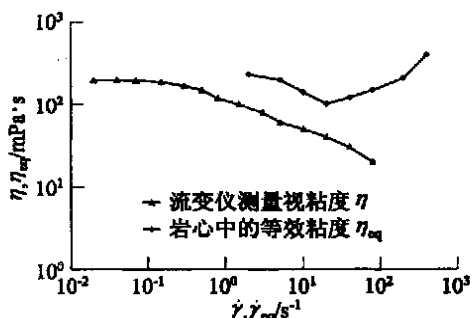


图1 驱油剂粘度与等效粘度

驱油剂在岩心中渗流所表现出的等效粘度是利用实测渗流速度和压力梯度,根据广义达西定律确定。由图1可见,在低剪切速率下,驱油剂在岩心中渗流与流变仪测试具有相同的流变特征,均表现为剪切稀释的非牛顿粘性特征。因为在低速渗流条件(低等效剪切速率)下,驱油剂在油藏孔隙中以表现粘性特征的剪切流动为主,而表现粘弹性特征的流动(如拉伸流动等)很弱,其影响可忽略不计。从油藏孔隙尺度考察,驱油剂实质上是在几何形状复杂的流道中流动,具备产生粘弹性流动条件。随着流速的增大,在油藏孔隙几何形状发生突变处的拉伸流动和粘弹性二次流对于宏观渗流的影响增大,并逐渐趋于主导作用。因此,超过某一临界值后,驱油剂在岩心中的等效粘度随等效剪切速率的增大而明显增大。

驱油剂中聚合物的分子结构对其流变性具有重要影响。图2为部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)溶液和黄原胶溶液在岩心中的等效粘度对比。由流变仪测得这2种溶液视粘度曲线基本相同,但在岩心中渗流表现出的流变特征却差异很大。黄原胶是一种刚性分子结构,其溶液的弹性效应很弱,在油藏孔隙中流动时,一般表现为纯粘性流变特征。因此,黄原胶溶液在岩心孔隙没有明显的粘弹性效应,其流变特征曲线1与流变仪测得的视粘度曲线基本一致。

而作为柔性分子结构的HPAM,在岩心孔隙中粘弹性效应明显,反映在其宏观流变特征曲线2的上翘。

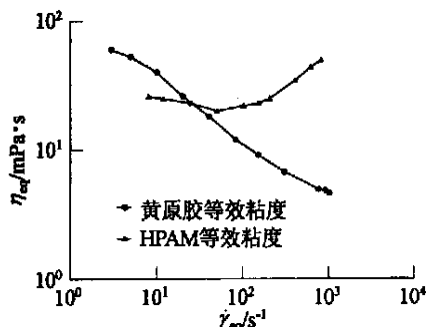


图2 HPAM和黄原胶溶液的等效粘度

1.3 驱油剂流变性在渗流过程中的变化

油藏条件下驱油剂各组分在油藏孔隙中不可避免地发生吸附、滞留以及聚合物的降解。这些都将导致驱油剂流变性在油藏中的变化,对驱油和渗流特性产生不可忽视的影响。现以驱油剂的视粘度为例进行讨论。以幂律模型描述ASP复合驱油体系的视粘度,在长150cm的岩心中考察其流变参数:幂指数 n 和稠度系数 K 沿渗流方向的变化,实验结果见图3。

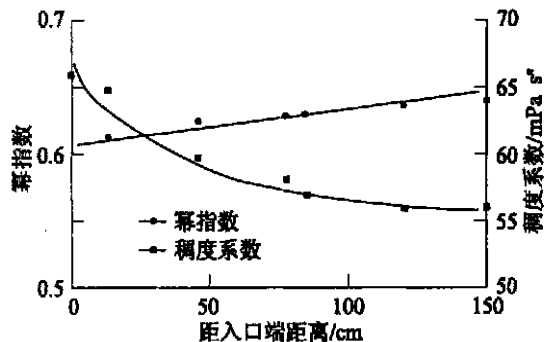


图3 ASP体系流变性在岩心中的变化

由图3可见,幂指数沿渗流方向增大,稠度系数沿渗流方向减小。这表明,由于驱油剂中组分的吸附滞留损失和聚合物的剪切降解,使其非牛顿性减弱,粘性损失较大。在岩心入口附近,稠度系数下降幅度较大;在远离入口处,其下降幅度变缓,并趋于一定值。对实验数据进行统计分析,可建立描述驱油剂流变参数在油藏中变化的模型。

$$K(x) = K_0 \exp(\alpha x / L) \quad (2)$$

$$n(x) = n_0 + \beta x / L$$

式中, K_0 、 n_0 为注入液的稠度系数和幂指数; $K(x)$ 、 $n(x)$ 为距注入端 x 处驱油剂的稠度系数和幂指数; L 为岩心长度(或注采井距); α 、 β 为系数,可由注入液和采出液流变参数确定。

2 化学驱中复杂流体的渗流特性

2.1 地层流体的渗流特性

含有高分子聚合物的化学驱油体系，因聚合物在孔隙中的吸附滞留，使油藏渗透率降低。含聚合物的驱油剂在油藏孔隙中流动所表现出的粘弹效应是不可忽略的。无论是聚合物溶液还是 ASP 复合体系，对其流变性起决定性作用的是聚合物，因此二者在油藏中具有相似的渗流特征。另外，由于 ASP 复合体系的等效粘度随碱浓度增大而大幅度地降低，其渗流阻力随之降低，流度控制能力明显变差。

驱油剂在有残余油和无残余油条件下的渗流特性差别较大。在有残余油条件下，渗流压差明显高于无残余油的渗流压差。因为残余油占据了岩心的一部分孔隙体积，增大了驱油剂流动阻力。在驱油过程中原油与驱油剂发生乳化也是使渗流阻力增大的原因之一。

图4为驱油剂—原油混注渗流实验结果。图中曲线1、2的含水率分别为30%和40%。在低速渗流条件下，驱油剂与原油的乳化程度较低，主要表现为油水两相渗流，此时含水率为30%和40%的渗流压力差别不大。随着注入量的增大，油水在岩心中形成结构复杂的乳状液。低含水率的油水体系与高含水体系相比，更易于形成油包水型乳状液，在岩心中的渗流阻力增大。

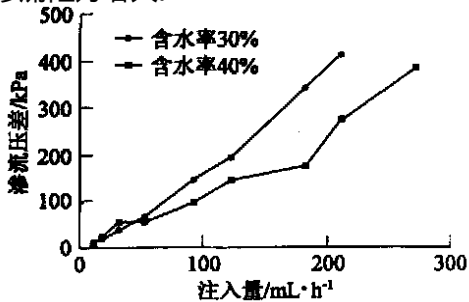


图4 驱油剂—原油渗流曲线

2.2 粘弹性流体渗流模型

粘弹性流体在渗流过程中的等效粘度 η_{eq} 可近似为剪切粘度 η_v 与拉伸粘度 η_e 的线型迭加，即

$$\eta_{eq} = \eta_v + \eta_e \quad (3)$$

其中，剪切粘度为幂律模型，拉伸粘度可按如下近似方法推导。

根据松弛时间 θ_t 的定义式，利用法向应力差与拉伸速率 ϵ 之间的关系以及剪切应力与等效剪切速率 γ_{eq} 之间的关系，可推得粘弹性流体的一维渗流模型

$$\Delta p = \frac{2^{2n+1} v^n (1 + Cv) KL}{(\lambda^2 k / \phi)^{(n+1)/2}} \quad (4)$$

$$C = 2\theta_t D_p / (k_f \tau^{1/2})$$

$$D_p = (1 - \phi) (150 k_f)^{1/2} / \phi$$

式中， k_f 为地层流体在岩心中的实测渗透率； τ 为迂曲度； λ 为与孔隙结构和迂曲度相关的参数； L 为 2 测量点之间距离。

3 粘弹性流体在一类油藏孔隙模型中的流动^[1-4]

从流体力学基本观点来看，油藏中大量几何形状复杂的孔隙流道往往会诱导出二次流，产生旋涡。在油藏孔隙的两相驱替流动过程中，旋涡的大小、强度及波及区域对于残余油的驱替具有非常重要的作用。以驱替孔隙盲端和喉道残余油为例，从粘弹性流体力学基本原理出发，综合模拟实验和数值计算结果，研究聚合物溶液在 T 型微孔隙模型中的流动与驱替特性。

3.1 流动与驱替实验

油藏孔隙盲端和喉道可简化成 T 型流道。流动与驱替实验采用光刻模型，驱替液分别为部分水解聚丙烯酰胺和黄原胶水溶液，被驱替液为与地层原油视粘度相同的模拟油。为研究驱替过程中的弹性效应，调整 2 种聚合物溶液的浓度，使二者的剪切视粘度曲线基本重合，但二者的松弛时间差异却很大。在上述实验条件下，由于 HPAM 与黄原胶溶液的剪切视粘度曲线基本重合，因此可认为 2 种溶液在孔隙盲端所表现出的流动行为和驱替特性差异是由于其弹性效应差异所致。2 种溶液在盲端孔隙模型中驱替流动实验结果见图 5。

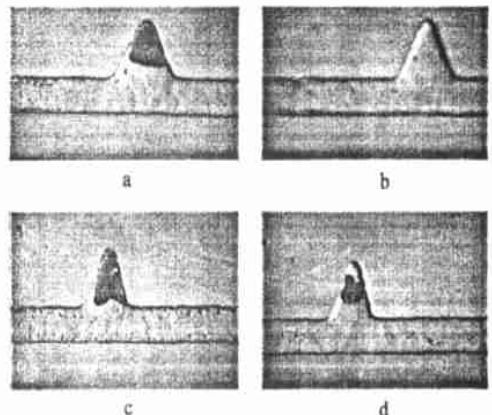


图5 黄原胶和 HPAM 溶液在孔隙盲端的驱替流动

图 5 中的 a、b 和 c、d 分别为 2 组不同结构的孔隙模型；a、c 的驱替液为黄原胶溶液 ($We = 0.052$)，

b、d 的驱替液为 HPAM 溶液 ($We = 0.26$), We 为 Weissenberg 数。显然, 剪切粘性相同(或相近)的 2 种溶液, 弹性效应较强的 HPAM 溶液对孔隙盲端的波及体积比黄原胶溶液大, 可以驱出其中更多的残余油。

3.2 孔隙盲端中的流场

以上随体 Maxwell 本构方程描述聚丙烯酰胺水溶液在油藏孔隙中的流变行为, 对其在盲孔模型中的流动特性进行数值计算。图 6 为 T 型流道中的等速线的数值计算结果, 用来表征粘弹性流体的流动特性及粘弹涡在孔隙盲端的发展。图 7 为 Cochrane 等^[2] (1981) 提供的 1 组实验照片。图 6 与图 7 所示主流道中的流动方向均为由左至右。将二者进行比较可见, 本研究数值计算结果与实验现象在定性规律上是一致的。由于粘弹效应, 孔隙盲端的部分流体将以粘弹涡的方式流动。随着 We 的增大, 粘弹涡逐渐向盲端深部发展。即流体的粘弹性越强, 在孔隙盲端形成的涡流越剧烈, 其涡流区域也明显扩大。这类粘弹涡的产生与发展是粘弹性流体在油藏中微观渗流的主要特征, 有利于孔隙中残余油与主流区流体之间的质量传递。



图 6 T 型流道中的等速线

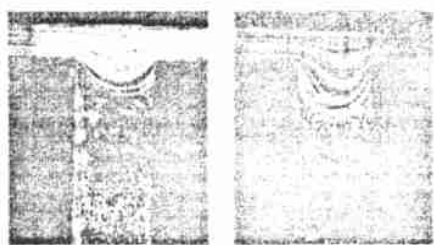


图 7 T 型流道中的流动实验

3.3 孔隙盲端中的应力场

驱油剂能否将滞留在油藏孔隙中的残余油驱替出, 主要取决于它对原油的作用力及携带能力。在油藏孔隙中驱替流动条件下, 粘弹性涡流所形成的应力场可作为估测聚合物溶液对孔隙盲端残余油驱替能力的度量。只有当驱替液与原油界面的应力足以克服原油内部的粘滞力与结构力, 才有可能驱动滞留在孔隙盲端的残余油。原油的结构力在宏观流变性上表现为屈服应力 τ_0 , 据此可确定油藏孔隙中

的驱替条件。根据 Von Mises 屈服条件, 当应力 $\tau > \tau_0$ 时, 滞留在孔隙盲端残余油在聚合物溶液粘弹涡作用下开始流动并被携带至主流区。由实测的原油流变参数和聚合物驱油层条件可计算出无量纲屈服应力 τ_0^* , 其数量级为 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ 。作为一个特例, 在图 8 中绘出了不同 We 条件下无量纲应力 $\tau_0^* = 0.2$ 的应力等值线。

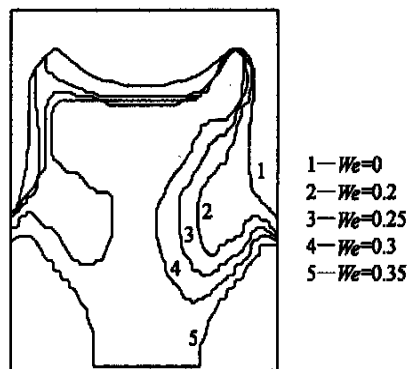


图 8 应力等值线 ($Re = 10^{-2}$, $\tau_0^* = 0.2$)

由图 8 可见, 随着 We 的增大, 该应力等值线所包含的区域逐渐扩大, 聚合物溶液对孔隙盲端残余油的驱替能力大幅度提高。当 We 增大至 0.35 时, 孔隙盲端中除了 2 个底角很小的区域外, 其余大部分区域内均有 $\tau_0^* > 0.2$ 。理论上, 在孔隙盲端满足流动条件的区域内, 其中的残余油均有可能被聚合物溶液驱替出来。

4 结论

作为一类典型的粘弹性流体, 含聚合物的化学驱油剂在油藏孔隙中的流动为典型的剪切—拉伸流, 由流变仪测得的结果很难全面地描述驱油剂在油藏孔隙中的流变行为。由于驱油剂组分的损失、聚合物的降解以及剩余油分布不均, 地层流体的流变性在渗流和驱油过程中是变化的。因此, 在化学驱渗流问题的研究中必须考虑地层流体组成和流变性的变化。驱油剂在流经油藏孔隙盲端和喉道时, 由于其弹性效应而产生的涡流有利于将盲端中的部分残余油剥离并分散成油滴或油丝, 携带至主流区, 成为可驱动原油。

参 考 文 献

- [1] Allen E, Boger D V. The Influence of Rheological Properties on Mobility Control in Polymer-Augmented Waterflooding. SPE 18 097, 1988
- [2] 黄延章, 于大森, 张桂芳. 聚合物微观驱油机理研究.

稠油蒸汽吞吐开采非等温渗流产量预测模型^{*}

李春兰

杨炳秀

(石油大学石油天然气工程学院, 北京 102249) (中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

稠油蒸汽吞吐开采过程中, 由于地层存在温度变化, 渗流机理非常复杂。传统的蒸汽吞吐产能计算方法多采用 Boberg 和 Lantz 等温模型^[1]。其地质模型假设渗流区域分为热区和冷区。热区为等温区, 冷区温度为原始地层温度。这种假设很不合理。因加热区并不是一个等温区域, 而是从井筒往外温度逐渐降低, 直至原始地层温度。而地层油粘度分布由近到远逐渐增加。本研究建立了非等温渗流模型, 推导了加热区半径计算公式和初期产量预测公式。该模型比传统的等温模型更接近实际, 计算结果更准确。模型做了如下几点假设: (1) 加热区径向上温度分布为线性分布; (2) 纵向上温度分布是均匀的; (3) 井筒处油层温度为饱和蒸汽温度。

1 焖井结束后加热半径的确定

设距井 r 处的油层温度为 T_r

$$\frac{T_r - T_i}{R_e - r} = \frac{T_s - T_i}{R_e - R_w} \quad (1)$$

式中 R_e —— 供给半径, m;
 R_w —— 井筒半径, m;
 T_i —— 原始地层温度, °C;

T_r —— 焖井结束后半径 r 处地层温度, °C;

T_s —— 饱和蒸汽温度, °C。

根据能量守恒, 注入地层的热量 = 油层吸收的热量 + 隔盖层热损失。

注入地层的热量: $i_s h_m t_{inj}$ 。

油层吸收的热量:

$$\int_{R_w}^{R_e} M_r 2\pi r h dr (T_s - T_i) = \frac{1}{3} \pi h M_r (T_s - T_i) R_e^2$$

隔盖层热损失:

$$2 \int_0^A \frac{\lambda_s (T_s - T_i)}{\sqrt{\pi \alpha_s t_m}} dA = \frac{2\pi \lambda_s (T_s - T_i) R_e^2}{3 \sqrt{\pi \alpha_s t_m}}$$

则:

$$i_s h_m t_{inj} = \frac{1}{3} \pi h M_r (T_s - T_i) R_e^2 + \frac{2\pi \lambda_s (T_s - T_i) R_e^2}{3 \sqrt{\pi \alpha_s t_m}} \quad (2)$$

式中 A —— 加热区面积, m²;

h —— 油层厚度, m;

h_m —— 饱和蒸汽的焓, kJ/kg;

i_s —— 蒸汽注入速率, kg/h;

M_r —— 油层热容量, kJ/(m³·°C);

R_s —— 溶解气油比;

油田化学, 1990, 7(1): 57~60

[3] 郭尚平. 微观驱油物理化学机理. 北京: 科学技术出版社, 1990

[4] 王德民, 程杰成, 杨清彦. 粘弹性聚合物溶液能够提高岩心的微观驱油效率. 石油学报, 2000, 21(5), 2000: 45~51

[5] Marshall R J, Metzner A B. Flow of Viscoelastic Fluids Through Porous Media. I&EC Fundamentals, Aug. 1967: 393~400

[6] Heemskerk J, Janssen van Rosmalen R, Holtslag R J, Teeuw D. Quantification of Viscoelastic Effects of Polyacrylamide Solution. SPE/DOE 12 652, 1984

[7] Mohammad Ranjbar, Juergen Rupp, Guenter Pusch, Ruediger Meyn. Quantification and Optimization of Viscoelastic Effects of Polymer Solutions for Enhanced Oil Recovery. SPE/DOE 242 154, 1992

[8] 刘振宇, 许元泽. 聚丙烯酰胺溶液微观流变特性研究. 油田化学, 1996, 13(2): 145~148

[9] Cochrane T, Walters K, Webster M F. On Newtonian and Non-Newtonian Flow in Complex Geometries. Philos. Trans. Soc. London Ser. A 301, 1981: 163~181

(收稿日期 2003-07-22)

(修改稿收到日期 2003-08-1)

[编辑 姚晓喻]

The field application proves that the accuracy of identification for the diagnostics software designed with this thought and method is high. Diagnostics efficiency is greatly improved.

Key words diagnostics of working condition dynamometer card difference curve neural networks.

METHOD TO DETERMINE THE REASONABLE SUBMERGENCE PRESSURE OF SUCKER ROD PUMPS

by Chen Dechun, Xue Jianquan, (Institute of Petroleum Engineering, University of Petroleum); Liao Jianguai

Abstract Based on the importance and some improper understandings about the submergence pressure of sucker rod pumps, the relationships between submergence pressure and fluid pressure in pump and the correlation which calculates the pressure loss through the intake valve are discussed. And a method to determine the working parameters and the rational submergence pressure in order to ensure the oil lifting efficiency highly is also established. The result shows that the reasonable submergence pressure of the oil well depends on the reservoir characteristic, oil producing rate, working parameters and fluid property and so on. And these factors effect each other. Accordingly, the determination of the reasonable submergence pressure of pump depends on the harmony of every producing subsystems of the oil well. The dynamic simulation analysis is necessary that must be aimed at the condition of the oil well. It can improve the system efficiency and the economic benefit of the oil well.

Key words submergence pressure sucker rod pump submergence depth lifting efficiency dynamic simulation

DIAGNOSIS OF THE PRODUCTION SYSTEM FROM THE LOAD BORNE BY THE POLISHED ROD

by Wang Haiwen, Chen Lei, (University of Petroleum); Lei Jian

Abstract When the screw pump works, the power is transferred to the pump dipped in the well by the polished and sucker rod from the ground, so the load and torque borne by the rod should reflect the working condition of the production system. Firstly, we make a testing system to monitor the load and torque on the rod at a real time. Then we analyze the corresponding relation between the testing data and the working condition of the produc-

tion system. From the result of diagnosis, we can see this theory is quite true and the successful rate can reach to 90%. At last, we make a program of the working condition diagnosis based on this diagnosis theory.

Key words screw pump working condition diagnosis production rod torque

METHOD TO DIAGNOSE FAULTS FOR OIL EXTRACTION SYSTEM WITH SURFACE-DRIVING PROGRESSIVE CAVITY PUMP USED

by Wu Xiaodong, Wang Shizhan, (Institute of Petroleum and Gas Engineering, University of Petroleum); Wang Zhishen

Abstract This article brings forward a new method to make fault diagnosis for oil extraction system with surface-driving progressive cavity pump used. It selects some predicament variants that represent the well production status through analyzing all of them. And the rules, which are used to derive the well status from the corresponding predicament variants, are also given. This method has shown its definite practicability after applied to some oil fields.

Key words progressive cavity pump faults diagnosis production status predicament variants

RHEOLOGICAL PROPERTY AND FLOW BEHAVIOR OF A KIND OF OIL DISPLACEMENT AGENT IN RESERVOIR PORES

by Yue Xiang'an, Liu Zhongchun, Hou Jirui, Zhang Lijuan, (University of Petroleum); Xia Huifen

Abstract In chemical flooding, the fluids in reservoir such as oil displacement agent, oil and their mixture are complex fluids, their rheological and flow behavior strongly affect oil displacement efficiency. Several results on complex fluid mechanics in reservoir pores are presented in the paper. The compound of Alkali-Surfactant-Polymer (ASP) is a kind of viscoelastic fluid, its rheological behavior can be formulated by power-law model in simple shear flow within medium shear rate. In chemical flooding, consistency coefficient of the oil displacement agent declines exponentially, the power law exponent increases linearly in the direction of percolation flow. The vorticity may be relatively large when viscoelastic fluid flow in complex reservoir pores, this is favourable for displacement of residual oil in dead end and pore throat. The macro percolation character is also discussed.

Key words chemical flooding complex fluid rheological property reservoir pore percolation flow