

◀ 试井与开采 ▶

高凝高粘原油井筒粘度计算模型

沈国华

(中国石化股份胜利油田分公司 滨南采油厂, 山东 滨州 256606)

摘要:大港油田高凝高粘原油在不同含水、不同温度下的粘度测试结果表明, 在不同含水条件下, 随温度的升高, 高凝高粘原油的粘度都有不同程度的降低, 表现出了很明显的粘温特性; 在同一温度下, 原油的粘度随着含水率的变化是一个先增加后减小的过程, 峰值含水区间为 20%~40%; 对实测原油粘度数据进行回归得到粘度计算经验模型。根据幂律流体流动规律分别建立了有杆抽油井上冲程和下冲程过程中井筒和杆管环形管道内流体流动的速度场模型和相对应的流体粘度计算模型。计算结果显示, 所建立的井筒粘度计算模型与实测结果误差较小, 大大优于常规油井井筒粘度计算模型, 能够满足工程需要。

关键词:高凝原油;稠油;原油粘度;数学模型;实验数据;井筒流动

中图分类号:TE311 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2008)04-0067-04

高凝高粘(以下简称“双高”)原油包括含蜡量较高的石蜡基原油(含蜡原油)以及胶质、沥青质含量较高且密度较大的重质原油(稠油)。原油粘度是设计与制定油气田开发方案及确定采收率的一项重要数据^[1-2]。在常规油井粘度计算中, 产出液为牛顿流体, 流体的粘度仅取决于流体的物性, 与流体运动无关。双高原油是一种非牛顿流体, 物质结构复杂, 其本构方程中包含多个随流体状态的变化而变化的物质参数。

1 双高原油粘温试验分析

1.1 不同含水下的粘温关系

在室内模拟不同含水(10%、20%、30%、40%、50%、60%)条件, 不同温度场(40、50、60 和 70 °C)情况, 测量了双高原油油水混合物的粘度变化情况。图 1 为其中 2 口井的试验数据。从图 1 可以看出, 不同含水条件下, 随温度的升高, 双高原油的粘度都有不同程度的降低, 但在同一温度下, 双高原油的粘度随着含水的增大先增加后减小。根据所有测试资料统计, 原油粘度峰值出现的含水区间为 20%~40%。因此, 双高原油油井在进行生产设计时应避开含水 20%~40% 区间。

1.2 温度对粘度的影响

根据具体的试验数据, 按照幂律流体本构方程, 对不同温度下双高原油的幂律指数和稠度系数进行了回归, 其幂律指数与稠度系数随温度变化的关系

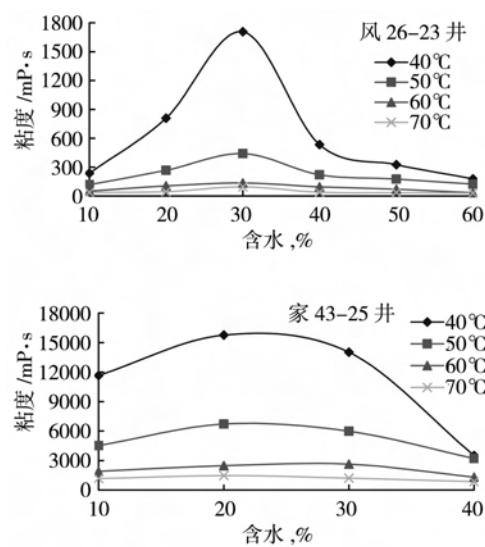


图 1 不同温度下原油粘度与含水之间的关系
如图 2、3 所示。

从图 2、3 可以看出, 双高原油幂律指数随温度升高而增大, 稠度系数随着温度升高而降低, 符合幂律方程规律。因此, 按照幂律方程对试验数据进行回归^[3], 得双高原油的粘度计算方程:

$$\ln \ln(\mu_0 + 1) = A - B \ln t \quad (1)$$

式中, μ_0 为原油粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; t 为试验温度, $^{\circ}\text{C}$; A , B 为粘温关系曲线回归系数。

收稿日期: 2007-07-13; 改回日期: 2008-01-20

作者简介:沈国华(1962—), 男, 1985 年毕业于华东石油学院石油地质专业, 2002 年获中国石油大学(华东)地质工程专业硕士学位, 目前为中国科学院地质与地球物理研究所矿物学、岩石学、矿床学专业在读博士研究生, 高级工程师, 长期从事油田开发生产和科研工作。

联系电话: (0543)3461445

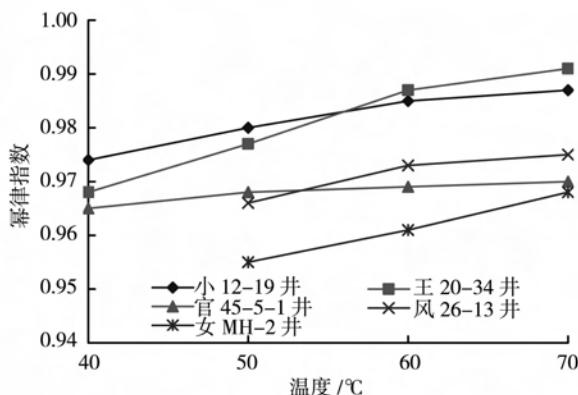


图 2 幂律流体幂律指数随温度的变化

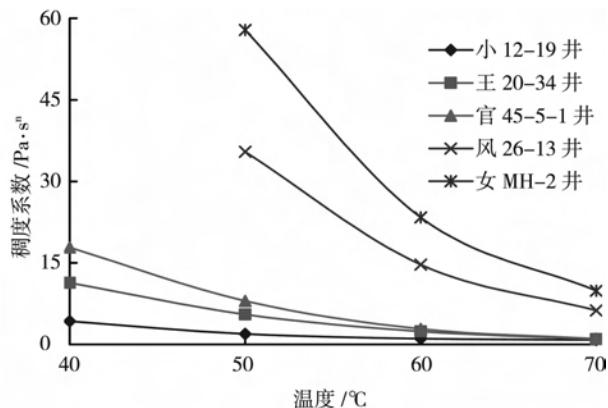


图 3 幂律流体稠度系数随温度的变化

2 双高油井井筒液粘度计算模型

2.1 在井筒中的管流流动

幂律流体管流粘度方程为:

$$\mu = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8v}{D} \right)^{n-1} \quad (2)$$

式中, μ 为流体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; n 为幂律指数; K 为稠度系数, $\text{mPa} \cdot \text{s}^n$; v 为液流的平均流速, m/s ; D 为圆管直径, m 。

井筒直圆管内流体层流流动的速度场具有与两平行平板间流动的同样特性, 即流动是沿管轴的直线运动, 沿管轴方向速度分量不为零, 并且仅是径向坐标的函数。井筒直圆管内的流动属于侧粘流动。

根据运动学与流体力学, 圆柱坐标下的运动方程可化简为^[4]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial T_r}{\partial r} + \frac{T_r - T_\theta}{r} = 0 \\ -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} = 0 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial(rT_z)}{\partial r} - \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

经过变换, 可以得到积分式:

$$u = \frac{R}{\tau_b} \int_{\tau}^{\tau_b} \frac{du}{dr} d\tau \quad (4)$$

由于双高原油属于幂律流体, 由其本构方程及其反函数可得管截面上的速度分布公式为:

$$u(r) = \frac{R}{\tau_b} \frac{1}{K^{\frac{1}{n}} n + 1} \left[\tau_b^{\frac{n+1}{n}} - \tau^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (5)$$

又因为 $\tau_b = \frac{\Delta p R}{L} \frac{2}{2}$, $\tau = \frac{\Delta p r}{L} \frac{2}{2}$, 则平均速度为:

$$\bar{u} = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{\int_0^R 2\pi r u(r) dr}{\pi R^2} = \frac{n}{3n+1} \left(\frac{\Delta p}{2KL} \right)^{\frac{1}{n}} R^{\frac{n+1}{n}} \quad (6)$$

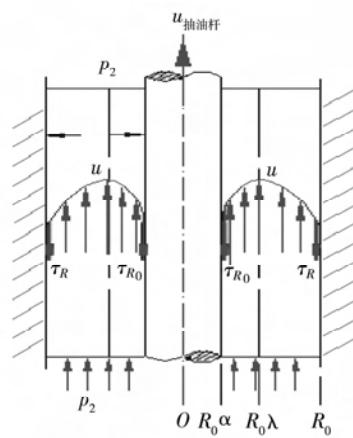
根据式(2), 得管流粘度模型:

$$\mu = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{4}{R} \right)^{n-1} \left[\frac{n}{3n+1} \left(\frac{\Delta p}{2KL} \right)^{\frac{1}{n}} R^{\frac{n+1}{n}} \right]^{n-1} \quad (7)$$

式中, τ 为液流的切应力, N ; T_r 、 T_θ 为应力张量分量, N ; τ_b 为液流在管壁处的切应力, N ; R 为环空半径, m ; L 为圆管长度, m ; Δp 为圆管两端压差, MPa 。

2.2 在井筒环形管道中上冲程的流动

在抽油机上冲程中, 杆管环空通道里, 抽油杆与环空内幂律流体同时向上运动, 油管静止, 同时伴有轴向压力梯度, 构成压力流和拖拽流的组合流, 如图 4 所示。在这种流场中, 两种流动相互作用, 使流动分析复杂化。



4 在井筒环形管道中上冲程的流动

令环空内 y 轴方向的高度为 δ ; z 轴的正方向为上冲程中液体在环空中的流向; x 轴外向为环空宽度方向。假设液体为不可压缩的, 在杆管环空内液体呈层流流动状态; 抽油杆在每一位置的瞬间流动做定常流动处理。

根据一阶 Rivlin-Ericksen 张量, 得其运动方程为^[5]:

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y}(T_{yz}) + \rho g = 0 \quad (8)$$

式中, T_{yz} 为应力张量分量, N; ρ 为流体密度, kg/L; v_0 为柱塞运动速度, m/s。

边界条件为: $p|_{z=0} = p_1$, $p|_{z=l} = p_2$; $u|_{y=0} = 0$, $u|_{y=\delta} = v_0$ 。

可以认为抽油机的悬点按简谐规律运动, 且抽油杆和悬点同步运动, 则抽油杆速度为:

$$v_0 = \frac{S}{2} \omega \sin \omega t \quad (9)$$

式中, S 为冲程, m; ω 为曲柄轴角速度, $\omega = \pi N / 30$, rad/s; N 为冲次, min⁻¹; t 为时间, s。

$$\text{令 } \Phi = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g, \text{ 引入无量纲坐标 } \zeta, \text{ 令 } \zeta = \frac{y}{\delta},$$

则可根据微分方程式推导出速度分布:

$$\frac{du}{dy} = \left[\frac{\Phi}{K} \delta (\lambda - \zeta) \right]^m \quad (10)$$

式中, λ 为积分常数。

当 $du/dy < 0$ 时, 根据幂律流体本构方程知:

$$T_{yz} = K \left(-\frac{du}{dy} \right)^{n-1} \frac{du}{dy} = -K \left(-\frac{du}{dy} \right)^n \quad (11)$$

引入无量纲速度 $\varphi(\zeta) = u/v_0$, 令 $p = \frac{\Phi}{K} \delta \left(\frac{\delta}{v_0} \right)^{\frac{1}{m}}$, 式(10)变为:

$$\frac{d\varphi(\zeta)}{d\zeta} = -[p(\zeta - \lambda)]^m \quad (12)$$

式中, $m = 1/n$ 。

由式(10)和式(12)可知, $0 < \lambda < 1$ 时流场会出现极值。

当 $p > 0$ 时, 在 $\zeta < \lambda$ 区间, $d\varphi/d\zeta \geq 0$; 在 $\zeta > \lambda$ 区间, $d\varphi/d\zeta < 0$, 其相应值分别由式(10)和式(12)表示。根据边界条件有:

$$p = \left[\frac{m+1}{\lambda^{m+1} - (1-\lambda)^{m+1}} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (13)$$

式(12)在 $0 < \zeta < \lambda$ 区间积分得:

$$\varphi(\zeta) = \frac{p^m}{m+1} [\lambda^{m+1} - (\lambda - \zeta)^{m+1}] \quad (14)$$

式(12)在 $\lambda < \zeta < 1$ 区间积分得:

$$\varphi(\zeta) = 1 + \frac{p^m}{m+1} [(1-\lambda)^{m+1} - (\zeta - \lambda)^{m+1}] \quad (15)$$

利用式(14)和式(15)可计算出泵筒缝隙中的速度分布。

在 dy 区域内, 环空半径 R 与 ζ 满足下列关系:

$$\zeta = \frac{R_0 - r}{R_0(1-\alpha)} \quad (16)$$

式中, $\alpha = r/R_0$ 。

由式(16)得出 $r = R_0 - \zeta R_0(1-\alpha)$ 。因此, 边界条件为: $r|_{\zeta=0} = R_0$, $r|_{\zeta=1} = \alpha R_0$ 。

因为通过环空的流量为 $dQ = 2\pi r u dy$, 引入无量纲流量系数, 环空流量可以表示为:

$$Q = 2\pi v_0 \int_0^1 r \varphi(\zeta) d\zeta \quad (17)$$

将 r 与 $\varphi(\zeta)$ 代入式(17)得:

$$Q = 2\pi v_0 R_0 [(1-\alpha)(A+B)+C] \quad (18)$$

$$\text{式中, } A = \frac{\int_0^\lambda \zeta(\lambda - \zeta)^{m+1} d\zeta + \int_\lambda^1 \zeta(\zeta - \lambda)^{m+1} d\zeta}{(1-\lambda)^{m+1} - \lambda^{m+1}}; B = \frac{\lambda^2 - 1}{2} - \frac{\lambda^{m+3} + (1-\lambda^2)(1-\lambda)^{m+1}}{2[(1-\lambda)^{m+1} - \lambda^{m+1}]}; C = 1 - \lambda + \frac{m+1}{m+2} \frac{\lambda^{m+2} + (1-\lambda)^{m+2}}{(1-\lambda)^{m+1} - \lambda^{m+1}}.$$

根据式(18)可以得到环空中的平均流速为:

$$\bar{u} = \frac{Q}{\pi R_0^2 (1-\alpha^2)} = \frac{2v_0 R_0 (A+B+C)}{R_0^2 (1+\alpha)} \quad (19)$$

根据式(2)得双高原油在井筒环形管道中上冲程流动的粘度模型为:

$$\begin{cases} \mu = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8\bar{u}}{D_{\text{当}}} \right)^{n-1} \\ \bar{u} = \frac{2v_0 R_0 (A+B+C)}{R_0^2 (1+\alpha)} \end{cases} \quad (20)$$

式中, $D_{\text{当}} = \sqrt{4(R_0^2 - \alpha^2 R_0^2)}$ 。

2.3 在井筒环形管道中下冲程的流动

在抽油机下冲程中, 杆管环空通道里杆向下运动, 油管与井筒中的幂律流体都处于静止状态, 构成环隙空间的拖拽流, 如图 5 所示。

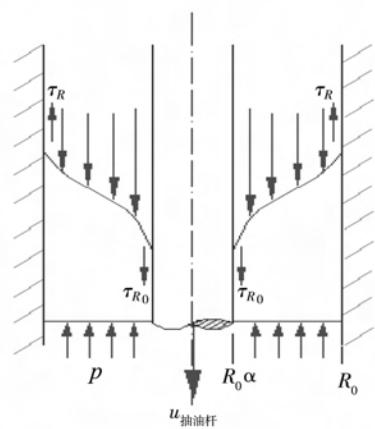


图 5 双高原油在井筒环形管道下冲程中的流动

因为下冲程中, 液体受力主要为抽油杆表面剪切应力、重力与柱塞向上顶托的压力, 所以其运动方程与式(8)相同。

由图 5 可以看出, 最大速度出现在向下运动的

抽油杆表面而不是出现在环空中间。所以 $du/dy \geq 0$, 对式(12)积分得:

$$\varphi(\zeta) = \frac{p^m}{m+1} [\lambda^{m+1} - (\lambda - \zeta)^{m+1}] \quad (21)$$

当 $\zeta=1$ 时, 令 $\varphi(\delta)=1$ 迭代可求得 λ 。

同上冲程, 下冲程时环空流量可表示为:

$$Q = \frac{2\pi v_0 R_o p^m (D+E)}{m+1} \quad (22)$$

式中, $D = (1-\alpha) \int_0^1 \zeta (\lambda - \zeta)^{m+1} d\zeta$;

$$E = \left(1 + \frac{\alpha-1}{2}\right) \lambda^{m+1} + \frac{\lambda^{m+2} - (\lambda-1)^{m+2}}{m+2}.$$

所以下冲程过程中环空中的平均流速为:

$$\bar{u} = \frac{Q}{\pi R_o^2 (1-\alpha^2)} = \frac{2v_0 p^m (D+E)}{R_o (1-\alpha^2) (m+1)} \quad (23)$$

根据式(2)得双高原油在井筒环形管道中下冲程流动的粘度模型为:

$$\begin{cases} \mu = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8\bar{u}}{D} \right)^{n-1} \\ \bar{u} = \frac{2v_0 p^m (D+E)}{R_o (1-\alpha^2) (m+1)} \end{cases} \quad (24)$$

3 与常规油井井筒粘度计算模型对比

利用双高原油粘度回归公式、常规油井和双高油井的井筒粘度计算模型计算自6-30井上冲程中原油的粘度, 并与实测数据进行对比, 对比结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 双高油井回归公式和理论粘度计算模型计算结果与实测数据偏差较小, 而常规油井井筒粘度模型计算结果与实测数据偏差较大。

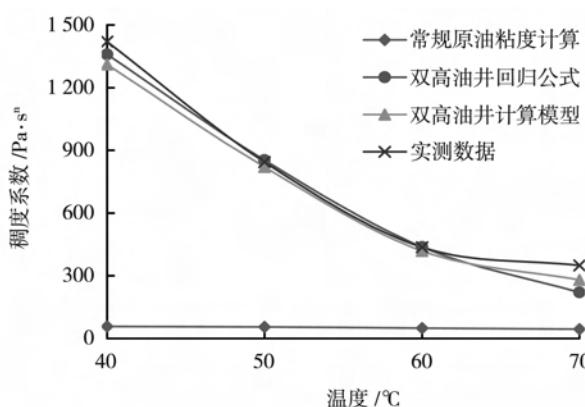


图 6 双高油井粘度计算模型与常规模型计算结果对比

4 结束语

双高油井产出液是一种非牛顿流体, 采用常规原油粘度计算模型会产生很大误差。根据大港油田双高油井的实际情况, 在室内测定了双高原油在不同含水、不同温度下的粘度变化并对测定结果进行回归得到了经验计算公式, 同时推导了双高油井井筒液体粘度的理论计算模型。计算结果显示, 理论计算模型与实测结果误差较小, 能够满足工程需要。

参 考 文 献

- [1] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学 [M]. 山东东营: 石油大学出版社, 2001: 72-76.
- [2] 耿宏章, 秦积舜, 周开学, 等. 影响原油粘度因素的试验研究 [J]. 青岛大学学报, 2003, 18(1): 83-87.
- [3] 董长银, 张宗元, 张琪. 脱气原油粘度计算的校正方法及对比分析 [J]. 石油钻探技术, 2005, 33(1): 52-54.
- [4] 李兆敏, 蔡国琰. 非牛顿流体力学 [M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1998.
- [5] 郑俊德, 刘合, 阎熙照, 等. 聚合物产出液在抽油泵的缝隙中流动 [J]. 石油学报, 2000, 21(1): 71-75.

[审稿 刘慧卿]

Computational Model for Fluid Viscosity in Wellbore of High-Freezing-Point and High-Viscosity Oil Reservoirs

Shen Guohua

(Binnan Production Plant, Shengli Oilfield Branch Co., Sinopec, Dongying, Binzhou, 256606, China)

Abstract: The viscosity measurement result of high freezing point and high viscosity crude oil under different water content and temperature indicates that the viscosity reduces with the increase of temperature under same water content. Under the same temperature, the viscosity of high freezing point and high viscosity crude oil increase and then decrease, the maximum occurs in the range of 20% to 40% of water concentration. An empirical model was obtained by regressing experimental data. Velocity and viscosity models in well bore and the annular space between pumping rod and oil pumping were established during the upstroke and downstroke according to the flow law for power law fluid. The calculated results agree with experimental data and are better than conventional model. This model meets the requirement of field application.

Key words: high pour point crude; viscous crude oil; crude viscosity; mathematical model; experimental data; well bore flow