

文章编号:0253-2697(1999)01-0088-92

聚合物驱杆式泵排量系数计算与分析

郑俊德* 阎熙照 曹广胜 王德喜 赵敏

(大庆石油学院) (石油工业出版社) (大庆石油学院) (大庆采油六厂) (大庆采油工艺研究所)

摘要:根据室内试验,结合杆式泵抽油特点,确定了油田应用的聚合物溶液的流变性,并建立了吸入过程中泵内压力、进液速度、进液高度和泵排量系数方程组。室内试验测试表明吸入过程中泵内压力随柱塞位移的变化基本上呈下凹非对称的抛物线形式;在有气体存在的情况下,泵内压力下降速度加快。现场实例表明,泵的排量系数受生产气油比、聚合物浓度、沉没度、冲程、冲次、泵径等多种因素影响,主要作用的因素是生产气油比、聚合物浓度和沉没度。油田实例分析与现场实践是一致的,进一步证明该理论是正确和可靠的。

主题词:实验室试验;杆式泵;聚合物驱;流变性;排量;系数;影响因素

1 前言

我国经过十多年的科研攻关和矿场试验,聚合物驱油已进入工业化应用阶段。目前反映出的采油工艺问题主要是油井见聚合物后,抽油泵效率随聚合物浓度增加而降低,能耗大,泵抽特性更加复杂。为此本文进行了杆式泵抽聚合物溶液实验,建立了吸入过程中泵内压力、进液速度、进液高度和排量系数的数学模型,分析了聚合物驱杆式泵排量系数影响因素,以使抽油井始终在高效率下正常工作。

2 聚合物溶液流变性

2.1 聚合物溶液配制

实验介质选用大庆油田化工总厂生产的聚合物 HPAM 干粉和油田注入水。聚合物分子量为 1200 万,注入水矿化度控制在 380mg/l 左右。配制步骤:

- (1) 用台秤称取干粉状聚合物(精确到 0.1g);
- (2) 向内壁涂有防腐漆的水箱放一定量的水,一般定为总量的 1/3;
- (3) 继续向水箱放水,并均匀撒入聚合物粉末,同时打开搅拌器;
- (4) 待撒完聚合物粉末,加入所需数量的水,用搅拌器使它们混合均匀;
- (5) 静置 24h。

2.2 测试步骤

- (1) 分别配制(100、200、300、400、500、600、800、1000、1500 和 2000) $\times 10^{-6}$ 浓度的聚合物;
- (2) 对每一浓度聚合物溶液在泵抽前后,用 LS-30 流变仪测出不同剪切速率下的表观粘度和剪应力。

2.3 测试数据分析与处理

以所测数据为基础,根据最小二乘法原理,得到每一浓度聚合物溶液在泵抽前后六种流变模式(宾汉、克罗

* 郑俊德,男,1963年11月生。1998年获大庆石油学院油气田开发工程博士学位,现为油气田开发工程教研室主任,副教授。通讯处:黑龙江省安达市。邮政编码:151400。

斯、卡森、罗伯逊、幂律和屈服幂律^[1,5])的实验参数及平均绝对误差、平均相对误差和相关系数等,从这几个参数对比来看,在所有的聚合物溶液浓度范围内,上述六种模式中只有幂律模式描述通过泵抽实验前后的聚合物溶液流变性的变化规律误差最小,其平均相对误差不超过 8.50%。因此,聚合物溶液的流变性符合幂律定律。

3 泵排量系数表达式的推导

如图 1 所示,设某一时刻 t 柱塞运动到位置 x ,进液高度为 L ,除去漏失量外,从吸入阀进入泵筒内的液量高度为 L_0 ,则泵的充满系数可表示为

$$\beta = L_0/x \tag{1}$$

考虑静载荷和惯性载荷对活塞冲程的影响及漏失因素,则泵的排量系数为

$$\alpha = \alpha_1 \beta_{\max} \tag{2} \quad \beta_{\max} = \frac{L_{0\max}}{S - \lambda + \lambda'} \tag{3}$$

式中 α 为泵的排量系数; α_1 为漏失系数; β_{\max} 为最大泵的充满系数; $L_{0\max}$ 为最大进泵液体高度, m ; S 为活塞冲程, m ; λ 为静载荷作用下的冲程损失, m ; λ' 为惯性载荷作用下增加的活塞冲程, m 。

由(1)、(2)、(3)式可见,要想求出 α , 必须求出 β_{\max} , 可通过非牛顿液体能量方程和气体定律,并结合杆式泵抽油特点来解决。

3.1 假设条件

- (1) 泵筒温度恒定;
- (2) 油、气、水与聚合物混合物按分相流动模型来处理;

在此模型中,假设泵内从液相中分离出的气体全部运动到液面以上,液相中不存在气相,气液两相是分离的,两相之间存在一个分界面,气相位于液相上部。

- (3) 柱塞的运动与抽油杆柱的运动一致,服从简谐运动。

3.2 非牛顿液体能量方程

根据图 1,列 1—1 和 2—2 断面的能量方程,进一步整理得^[6,11]

$$\frac{dV_L}{dx} = A_2 \left[\frac{p_i}{\rho g} - \frac{p}{\rho g} + A_1 V_L^2 - (L_w + L_s + L_0) \right] \tag{4}$$

其中

$$A_1 = \frac{1}{2g} \left\{ K^2 - \left[1 + \lambda_1 \frac{L_w}{d_w} K^2 + \lambda_1 \frac{L_s + L_0}{d_p} + \frac{1}{\mu^2} \left(\frac{A_p}{A_v} \right)^2 \right] \right\} \tag{5}$$

$$A_2 = \frac{g}{L_0 + L_s + L_w K} \frac{30}{\pi N} \frac{1}{\sqrt{(x + \lambda)S - (x + \lambda)^2}} \tag{6}$$

式中 V_L 为进泵液体速度, m/s ; p 为泵内压力, Pa ; p_i 为泵入口压力, Pa ; ρ 为液体密度, kg/m^3 ; S 为冲程, m ; K 为柱塞截面积与尾管截面积之比, 无因次; L_w 为尾管长度, m ; L_0 为进入泵内的液体高度, m ; L_s 为余隙长度, m ; x 为柱塞移动的距离, m ; λ_1 为流体在尾管和泵筒内的沿程摩阻系数; N 为冲次, $1/min$ 。

对幂律流体而言,处于层流状态时的摩阻系数可由下式计算

$$\lambda_1 = \frac{\varphi(n)}{404} \tag{7} \quad \varphi(n) = n \left(\frac{3n + 1}{n} \right)^2 \left(\frac{1}{n + 2} \right)^{\frac{n+2}{n+1}} \tag{8}$$

式中 n 为流性指数。

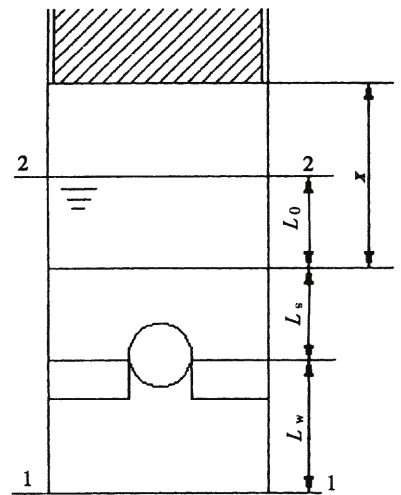


图 1 抽油泵泵抽气液两相的工作示意图

Fig. 1 Work schematic drawing of pumping gas-liquid two phase

处于紊流状态时的摩阻系数与广义雷诺数和流性指数有关。其确定公式为

$$\lambda_1 = a/Re^b \quad (9)$$

Re 为广义雷诺数,经数学回归得出 a, b 的计算表达式

$$a = 0.2343 + 0.1533n - 0.097n^2 + 0.022n^3 \quad (10)$$

$$b = 0.3955 - 0.2762n + 0.1652n^2 - 3.6402 \times 10^{-2}n^3 \quad (11)$$

3.3 泵筒内气体状态方程

见图1,设某一时刻 t 柱塞运动到 x 位置,进液高度 L (包括漏失增加的高度),根据实际气体状态方程得

$$p = z \frac{T p_0 (1 - f_w)}{T_0 B_0} (R_p - R_s) \frac{(L_s + L)}{x - L} \quad (12)$$

式中 p 为泵内压力, Pa; z 为气体压缩因子, 无因次; T 为泵内温度, K; 下标 0 表示标准状态下的参数; R_p 为生产气油比, m^3/m^3 ; R_s 为溶解气油比, m^3/m^3 ; f_w 为体积含水率, 无因次; B_0 为原油体积系数; L 为泵内液体高度(包括漏入的液量), m。

3.4 泵内液体高度的确定

考虑静止条件下漏失量和柱塞向上运动时携带的液量,得到泵筒内液体漏失速度 V_1 , 则泵内液体高度为

$$L = \int_0^x (V_L(x) + V_1) \frac{30}{\pi N} \frac{1}{\sqrt{(x + \lambda)S - (x + \lambda)^2}} dx \quad (13)$$

除去漏失因素后进入泵内的液体高度为

$$L_0 = \int_0^x V_L(x) \frac{30}{\pi N} \frac{1}{\sqrt{(x + \lambda)S - (x + \lambda)^2}} dx \quad (14)$$

式(1)、(2)、(3)、(4)、(12)、(13)、(14)组成求解泵排量系数的方程组,只要给出定解条件就能求得泵排量系数。

3.5 定解条件

3.5.1 固定阀开启条件

固定阀在上行时打开,此时固定阀下端的压力已知(从套压、环空气柱高度及沉没度等参数来计算)。液体对固定阀的总作用力大于阀球的重量时,固定阀打开,即

$$p_u \leq \frac{p_d \left(\cos\phi - \frac{b}{D} \sin\phi \right)^2 - \frac{2}{3} D \rho_s g}{\left(\cos\phi + \frac{b}{D} \sin\phi \right)^2} \quad (15)$$

式中 p_u 为阀球上端的液体压力, Pa; p_d 为阀球下端的液体压力, Pa; b 为阀口研合宽度, m; D 为阀球直径, m; ρ_s 为阀球密度, kg/m^3 ; 2ϕ 为密封锥角, ($^\circ$)。

3.5.2 阀开启时,柱塞上移距离的确定

考虑下冲程末,由于惯性载荷的作用,使活塞比静载荷变形时向下多移动一段距离 λ' , 因此,可推出阀打开时柱塞上移的距离(可称为柱塞的无效位移) x_0 的计算式为

$$x_0 = z \frac{T}{T_0} \frac{p_0}{p} (R_p - R_s) \frac{(1 - f_w)(L_s - \lambda')}{B_0} \quad (16)$$

3.6 公式(4)、(12)、(13)和(14)的求解

(1) 公式(4)无法求得解析解,这里采用预报—校正公式求解。

(2) 公式(12)为一隐式形式,这里采用迭代法进行求解。

(3) 公式(13)、(14)的求解也无法求得解析解,这里采用 Newton-cotes 内差求积公式求解。

4 实例计算

4.1 室内实验的计算与分析

根据前面导出的吸入过程中泵内压力表达式,分别计算了泵抽清水、不同浓度聚合物和空气时泵内压力,并与实测压力值进行了对比,结果表明平均相对误差在 10% 以内,从而证明导出的方法是适用和可靠的。这里仅列出冲次为 12min^{-1} , 泵抽清水、不同浓度聚合物时泵内压力随柱塞位移的变化,见图 2。

从图 2 可以看出:

(1) 泵内压力随柱塞位移的变化基本上呈下凹非对称的抛物线形式,且聚合物浓度增加,这种趋势更加明显;

(2) 随聚合物浓度增加,泵内压力降低幅度增加。这是由于聚合物浓度增大,流体粘度增大,沿程摩阻与局部损失(泵入口与固定阀)增大的缘故。

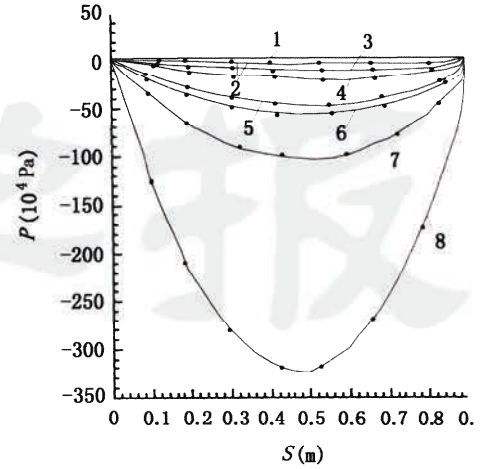
4.2 现场实例

(1) 已知参数:泵径 56mm,冲程 3m,冲次 9min^{-1} ,生产气油比 63,原油密度 860kg/m^3 ,天然气密度 0.865kg/m^3 ,产出水密度 1000kg/m^3 ,含水率 0.794,阀球直径 38mm,套压 0.49MPa,沉没度 365m,动液面高度 800m,日产液 52.5m^3 ,产出液聚合物浓度 3×10^{-4} 。

(2) 分析聚合物浓度、生产气油比、沉没度、冲次、冲程和泵径变化时,泵的排量系数变化。

解:计算与实际泵排量系数分别为 0.54 和 0.548,两者比较接近,说明该项理论是可靠的。

这里仅列出生产气油比、沉没度、冲次和聚合物浓度变化时,泵的排量系数变化,分别见图 3、4、5、6。由这些图可见,生产气油比、冲次和聚合物浓度增加时,泵的排量系数降低;泵沉没度增加,泵入口压力增大,泵的排量系数增加。



- 1 $C_p=0$
 - 2 $C_p=1 \times 10^{-4}$
 - 3 $C_p=2 \times 10^{-4}$
 - 4 $C_p=3 \times 10^{-4}$
 - 5 $C_p=4 \times 10^{-4}$
 - 6 $C_p=5 \times 10^{-4}$
 - 7 $C_p=6 \times 10^{-4}$
 - 8 $C_p=8 \times 10^{-4}$
- $N=12\text{min}^{-1}$

图 2 泵内压力随柱塞位移的变化

Fig. 2 Plot of pressure in pump vs. plunger displacement

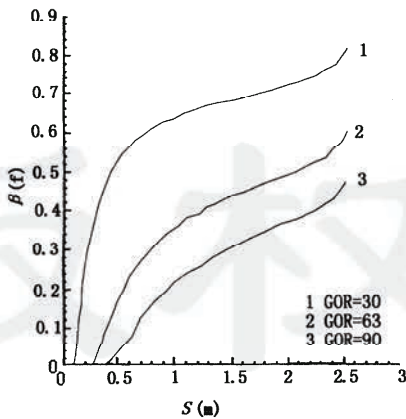


图 3 生产气油比对泵的排量系数影响

Fig. 3 Effect of producing GORs on pump's discharge coefficient

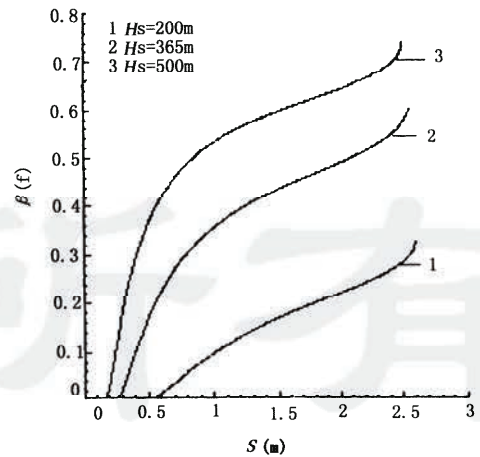


图 4 泵沉没度对泵的排量系数影响

Fig. 4 Effect of pump's submergence depth on pump's discharge coefficient

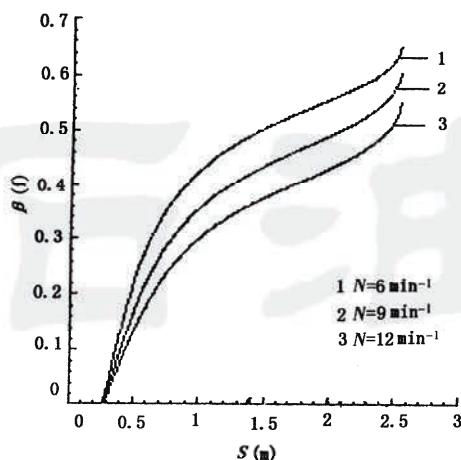


图5 冲次对泵的排量系数影响

Fig. 5 Effect of stroke rate on pump's discharge coefficient

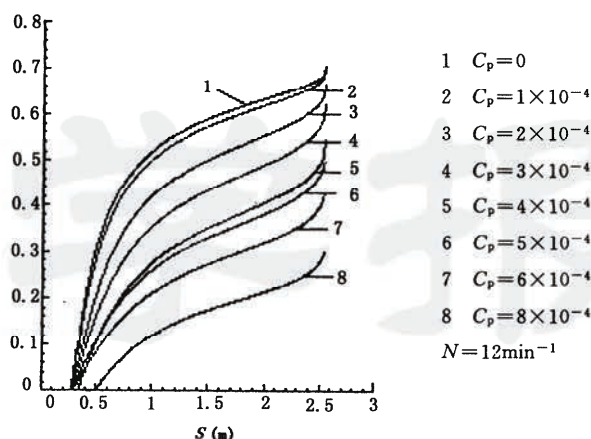


图6 聚合物浓度对泵的排量系数影响

Fig. 6 Effect of polymer concentration on pump's discharge coefficient

另外,分析泵径和冲程的变化可知冲程增加,泵的排量系数并不总是增大,对本例而言,采用3m的冲程,泵的排量系数最大;泵径增加,泵的排量系数稍有降低。

5 认识与结论

1. 室内实验测试分析表明,目前大庆油田使用的聚合物溶液的流变性符合幂律模式。
2. 根据气体—幂律流体两相流理论及抽油泵工作原理,建立了吸入过程中泵内压力及泵的排量系数方程组;室内实验测试与理论计算结果表明,提出的模型在理论上是正确的和可靠的。
3. 现场实例分析表明冲次增加时,泵内压力降低幅度增大。因此对产出液含聚合物的油井,不宜采用快速抽汲的方式。
4. 泵的排量系数受生产气油比、聚合物浓度、沉没度、冲程、冲次、泵径等因素影响,起主要作用的因素是生产气油比、聚合物浓度和沉没度。

参 考 文 献

- [1] Schowateln W R. Mechanics of non-Newtonian fluids. pergamon press, 1978.
- [2] Lenk R S. Polymer rheology. Applied science publishers LTD, 1978.
- [3] Han C D. Rheology in polymer processing. Academic press, 1976.
- [4] Nielsen L E. Polymer rheology. Marcel Dekker, 1977.
- [5] 韩洪升、魏兆胜等编著. 石油工程非牛顿流体力学. 哈尔滨工业大学出版社, 1993.
- [6] 王鸿勋、张琪等编. 采油工艺原理. 北京:石油工业出版社, 1989.
- [7] 陈文芳. 非牛顿流体力学. 北京:科学出版社, 1984.
- [8] 张捷迁等. 真实流体力学. 北京:清华大学出版社, 1986.
- [9] 岳湘安. 非牛顿流体力学原理及应用. 北京:石油工业出版社, 1996.
- [10] Defoe P R. Field wide program improves sucker rod pumping efficiency.
- [11] Ionel A. the influence of gas on deep well sucker rod pumpng. MINE, Petrol si gaze. 1983.

AN OPTIMIZING DESIGN AND ANALYSIS OF OIL-GAS GATHERING SYSTEM OF RING TYPE MIXING HEAT WATER ACTA 1999,20(1):77~81.

Liu Yang et al. (*Daqing Petroleum Institute*)

According to oil-gas gathering process of single or double ring-type pipelinemixing with heat water, a method of calculating hydraulic and thermodynamic parameters such as flow, ratio of water in oil, pressure, temperature, specific heat for oil, gas, water pipe net is presented. A parameter optimization model for multiobjective is established with heat and electricity consumption, system investment as an objective function, and with pressure, temperature, range of diameter of pipes as restrain conditions. A method of solving the problem is given also. The authors pointed out that the higher investment and electricity consumption are resulted from the longer section with mixing heat water in the process of double ring-type pipeline. Mixing water is more concentrated in the ring part of the single ring-type pipeline process, so the heat consumption is larger in this process. Based on the objective function in this paper, the process of double ring-type pipeline for mixing heat water ought to be used.

Key words: oil-gas gathering; system; optimization design; analysis

THE SETTING VELOCITY MODEL ANALYSIS OF THE DROPS IN THE GRAVITY TYPE OIL-GAS-WATER SEPARATION FIELD ACTA 1999,20(1):82~87.

Deng Zhian (*Henan Petroleum Exploration Bureau*)

This paper analyzes the drops behavior characteristics in the gravity separation field under the guidance of fluid mechanics, and discusses the limitations using tradition setting velocity model of the drops in engineering apply. The relation of the settling velocity and separation time with the drops grain size under the collision polymerization of the drops is also discussed in the paper. By comparing the setting velocity, separation time and horizontal displacement between the collision polymerization drops and the single drop, the drop's model of setting velocity under the collision is derived. It is necessary to use the collision polymerization model to design the gravity type oil/gas/water separation equipment in the future.

Key words: separation; settling velocity; collision; model; resistance force

THE CALCULATION AND ANALYSIS OF DISCHARGE COEFFICIENT FOR SUCKER ROD PUMP NUDER POLYMER FLOODING ACTA 1999,20(1):88~92.

Zheng Junde et al. (*Daqing Petroleum Institute*)

Based on the characteristics of rod pump pumping and the indoor experiments, this paper has determined rheology of polymer solution applied in oil field, and have set up the equations of pump pressure, intake flow velocity, intake flow height, and discharge coefficient during suction process. Indoor experimental survey shows that during suction process the plot of pumping pressure vs. plunger displacement is basically concave-down and non-symmetrical parabolic type. In the case gas is present, velocity of pressure drop in pump increases. Practical examples on the spot has shown that pump's discharge coefficient is affected by the producing GORs, polymer concentration, submergence depth, stroke, stroke rate, pump diameter etc., of the factors what have major effect is producing GORs, polymer concentration and submergence depth. Practical analysis in oil field is agreed with practice on the spot, which further verifies that this theory is right and reliable.

Key words: laboratory test; sucker rod pump; polymer flooding; rheology; discharge capacity; coefficient; influence factors