

◀ 油气开采 ▶

doi:10. 3969/j. issn. 1001-0890. 2012. 04. 021

同轴式双空心抽油杆下入深度设计方法

付亚荣

(中国石油华北油田分公司第五采油厂,河北辛集 052360)

摘 要:同轴式双空心抽油杆加热系统可有效解决高凝油井井筒易结蜡、稠油井产液黏度较高的问题,但考虑油井生产效率、开采成本及综合的经济效益,需要计算出最佳的抽油杆下入深度。以井口出油温度最优为目标,同轴式双空心抽油杆下入深度、循环水进口温度为约束条件,建立了井口出油温度 C 计算模型。利用该模型进行求解时,先用迭代法进行同轴式双空心抽油杆下入深度优化,然后在优化结果基础上进行抽油机载荷校核。建立的井口出油温度计算模型及同轴式双空心抽油杆下入深度确定方法,在现场 13 口油井进行了应用。结果表明,该方法避免了以前设计人员凭经验确定抽油杆下深的弊端,可靠性更高,且有效时率平均提高 14.1 百分点,既满足了生产需要又节省了油井开发成本。

关键词:高凝原油 稠油开采 空心抽油杆 下入深度 数学模型 迭代法

中图分类号:TE933⁺.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2012)04-0107-04

Determination Method for the Landing Depth of Coaxial Dual Hollow Rod

Fu Yarong

(No. 5 Oil Production Plant of Huabei Oilfield Company, PetroChina, Xinji, Hebei, 052360, China)

Abstract: Coaxial hollow rod heating system is effective in solving the problem of wax deposition in borehole for high pour point oil well and high viscosity for heavy oil well. However, considering oil well production efficiency, cost and comprehensive economic benefit, it's necessary to calculate the optimal landing depth of the sucker rod. Aiming at wellhead oil temperature optimum and taking sucker rod depth and circulating water inlet temperature as constraints, the wellhead oil temperature $C(x, t)$ relation model was established. In the model, it first uses iterative method to optimize the landing depth of coaxial hollow rod and then checks the pumping load based on the optimization results. This model has been used in 13 oil wells instead of sucker rod depth estimation from experience. The effective rate increased by 14.1 percentage which meets the production needs and saves the cost of well development.

Key words: high pour point crude; viscous oil recovery; hollow rod; landing depth; mathematical model; iteration method

同轴式双空心抽油杆是为解决稠油及高凝油的降黏问题而设计的井筒加热系统^[1-2],是在普通空心杆内又设计了一个独立的空心通道,通过特制终端沟通 2 个通道,双向密封,形成了与外部完全隔离的闭路循环系统^[3]。在稠油开采中,该空心杆可起到节能、降黏、减少热洗费用的作用^[4],实现延长油井免修期的目的。林日亿等人^[5]提出采用空心杆内加隔热管的密闭流体循环降黏工艺,建立了井筒内流体数学模型,对温度场、压力场进行了求解,该模型下井筒内流体压力和温度是相互耦合的。车洪昌等

人^[6]在蒸汽吞吐过程中采用重力热管井筒伴热技术减小井筒流体温度的下降幅度。但上述研究均未明确给出同轴式双空心抽油杆下入深度的确定方法。而同轴式双空心抽油杆的下入深度既要考虑油井的正常生产,又要考虑开采成本及综合经济效益。为

收稿日期:2011-11-22;改回日期:2012-06-12。

作者简介:付亚荣(1965—),男,四川平昌人,1987年毕业于重庆石油学校油田应用化学专业,高级工程师,主要从事油气田开发技术研究与应用工作。

联系方式:(0317)2742299, cy5_fyr@petrochina.com.cn。

此,笔者建立了井口出油温度计算模型,通过迭代法计算不同油井同轴式双空心抽油杆的下入深度,然后校核抽油机载荷^[7-8]。

1 数学模型的建立及求解

1.1 目标函数

热载体软化水在循环泵的驱动下,克服管壁摩擦阻,高速流至同轴式双空心抽油杆的下端,在该处流入外空心通道;然后,从外管返回时通过散热对油管内的原油加热;最后,液流通过环空返至地面换热器(热源)再次加热。以井口出油温度最优为目标,以同轴式双空心抽油杆的下入深度、循环水进口温度为约束条件^[9],建立井口出油温度的计算模型:

$$C = \frac{m}{2A_c(\pi Dt)^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{(x+k_v t)^2}{4Dt} - k_e t\right] - \frac{k'_v}{k'_v + \sum k_i} \frac{p}{k_H} [1 + \exp(-k_e t)] \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad k'_v = \frac{k_v + k_p}{D} \quad (2)$$

$$k_e = \frac{k'_v - \sum k_i}{1 - k_p S} + \sum k_i k_p \quad (3)$$

$$k_v = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (4)$$

式中: C 为井口出油温度, $^{\circ}\text{C}$; m 为同轴式双空心抽油杆内热载体软化水的单位长度质量, g/m ; A_c 为油管横截面面积, mm^2 ; D 为同轴式双空心抽油杆下入深度, m ; t 为同轴式双空心抽油杆热载体软化水进口温度, $^{\circ}\text{C}$; x 为同轴式双空心抽油杆下入深度处的温度, $^{\circ}\text{C}$; k_v 为同轴式双空心抽油杆内热载体软化水的流动速率, m/s ; Q 为离心循环泵排量, m^3/h ; d 为双空心抽油杆横截面直径, mm ; k_p 为分配系数^[10], 指一定温度下, 处于平衡状态时, 水与空气在固定相和流动相中的浓度之比; $\sum k_i$ 为一级动力学转化速率, 取 $0.55 \sim 0.60$; p 为油井井口回压, MPa ; k_H 为 O_2 的亨利常数^[11]; S 为同轴式双空心抽油杆横截面面积, mm^2 。

1.2 约束条件

循环热载体自井口从同轴式双空心抽油杆内管(隔热管)中注入, 从隔热管和空心抽油杆的环空(外管)返回。原油从抽油杆和油管的环空流出, 该过程中流体与流体之间进行了热量传递, 并有部分热量

通过油套环空、水泥环传递给地层。循环热载体在流动过程中, 其温度是逐渐降低的, 依据文献^[5]给出的能量平衡方程, 描述循环热载体温度变化的微分方程为:

$$\frac{\partial A_c}{\partial t} + \frac{\partial m}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x + \frac{\partial c}{\partial x} \right) - A_c \sum k_i \quad (5)$$

式中: k_x 为纵向离散系数, 是反映双空心杆内、外通道混合输送能力的重要参数。纵向离散是指双空心杆断面流速分布不均匀所引起的纵向分散现象。

1.3 模型求解

采集拟下入同轴式双空心抽油杆油井的油井参数和同轴式双空心抽油杆的技术参数, 然后采用迭代法对井口出油温度计算模型进行求解, 其计算程序如图1所示。

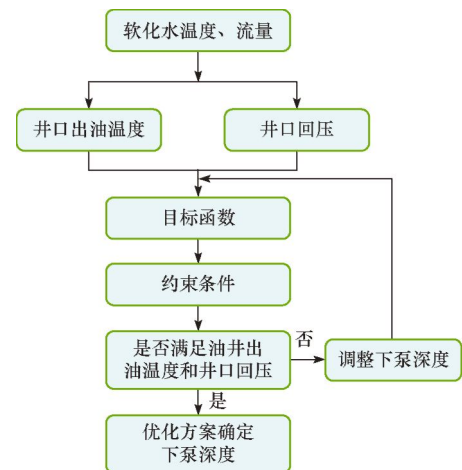


图1 同轴式双空心抽油杆下入深度迭代法求解流程

Fig.1 The iteration method landing depth determination of coaxial dual hollow rods

1.4 抽油机悬点载荷的校核

确定同轴式双空心抽油杆下入深度后, 需要校核抽油机悬点载荷^[12]。在井下工作的抽油杆, 其受力较为复杂, 计算的悬点最大载荷只能是近似结果。在考虑惯性载荷的情况下, 按下式近似计算:

$$p_{\max} = w_1 + w_2 \left(1 + \frac{sn^2}{1790} \right) \quad (6)$$

$$\text{其中} \quad w_1 = (f_p - f_r) L \rho_1 g \quad (7)$$

$$w_2 = qgL \quad (8)$$

式中: $p_{\max}$ 为抽油机悬点载荷, kN ; f_p 为柱塞截面积, m^2 ; f_r 为抽油杆截面积, m^2 ; ρ_1 为液体密度, kg/m^3 ; q 为抽油杆的线质量, kg/m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; L 为抽油杆柱长度, m ; s 为抽油机冲程, m ; n 为抽油机的冲次, 次/min 。

2 模型应用

以晋 401 井为例详细说明同轴式双空心抽油杆下入深度的确定。该井原油 20 ℃ 时的密度为 0.916 4 kg/L, 50 ℃ 时的黏度为 1 148.3 mPa · s, 凝固点为 41 ℃, 含蜡量为 25.8%, 胶质、沥青质质量分数为 47.34%。

2.1 采集参数

- 1) m 为 600 g/m;
- 2) 离心循环泵的泵效按 60% 计算, Q 取 2 m³/h, d^2 取同轴式双空心抽油杆横截面面积 S 的 1/2 代替, 计算得到 k_v 为 0.962 8 m/s;
- 3) 油井井口回压 p 在 1.0~1.5 MPa 间取值, 取值间隔为 0.1 MPa^[13];
- 4) 内径 76 mm(外径为 89 mm) 的加厚油管的内横截面面积 A_c 取 4 534.16 mm²;
- 5) 同轴式双空心抽油杆横截面面积 S 取 1 384.74 mm²;
- 6) 同轴式双空心抽油杆下入深度处的地层温度 x 按地温梯度(3.1 ℃/100 m)计算;
- 7) 同轴式双空心抽油杆热载体软化水进入内管时的温度 t 取 85 ℃;
- 8) 同轴式双空心抽油杆下入深度 D , 在 700~1 200 m 间取值, 取值间隔为 50 m;
- 9) $\sum k_i$ 取 0.55~0.60, k_H 取 4.40×10^6 , k_p 取 1.0。

2.2 模型计算

将采集的参数代入井口出油温度计算关系模型, 用迭代法按计算程序求解, 结果见表 1。

表 1 晋 401 井迭代法求解结果

Table 1 Results of Well Jin 401 with iteration method

软化水温度/℃	双空心杆下入深度/m	井口出油温度/℃
85	700	52.6
85	750	58.2
85	800	63.3
85	850	66.7
85	900	69.1
85	950	71.5
85	1 000	72.3
85	1 050	72.7
85	1 100	72.9
85	1 150	72.9
85	1 200	73.1

通过求解, 可知在井口回压为 1.0 MPa 时计算结果与现场情况较为符合, 因此最佳计算结果选择井口回压为 1.0 MPa 时(对应同轴式双空心抽油杆下入深度为 800~900 m)的数据。由表 1 可知, 晋 401 井同轴式双空心抽油杆最佳下入深度为 800~900 m, 对应的井口出油温度为 63.3~69.1 ℃。从表 1 还可以看出: 当同轴式双空心抽油杆热载体软化水进入内管的温度一定时, 随着下入深度的增加, 井口出油温度增加; 当深度超过某一值时, 随着深度的增加, 井口出油温度基本保持不变。

2.3 抽油机悬点载荷校核

同轴式双空心抽油杆下入深度为 800~900 m 时, 根据现场实际情况设抽油机冲程为 4 m、冲次为 4 次/min, 由式(3)计算可得: 下泵(泵径 38 mm)深度 1 997.76 m, 抽油机悬点载荷 89.3~91.6 kN。此时, 14 型抽油机能满足生产要求。

3 现场应用效果

自 2010 年起, 同轴式双空心抽油杆下入深度确定方法先后在晋 401 井等 13 口油井应用, 减少热洗 67 井次, 增加油井有效时率 3.45 个百分点, 节省清蜡剂、降黏剂 24.7 t, 增油 5 782.9 t。其中, 在晋 401 井 $\phi 38.0$ mm 管式泵下深 1 997.78 m, 杆柱组合为双空心 $\phi 42.0$ mm 抽油杆 $\times 831.65$ m + HY 级 $\phi 22.0$ mm 抽油杆 $\times 480.62$ m + HY 级 $\phi 19.0$ mm 抽油杆 $\times 656.84$ m。油井起抽后, 同轴式双空心抽油杆热载体软化水进入内管的温度控制在 82~85 ℃, 井口出油温度 59~62 ℃, 井口回压 0.85~0.92 MPa, 两次监测正常生产负荷分别为 86.6 和 86.9 kN, 与理论校核的 89.3~91.6 kN 相当。实现了油井 24 h 连续正常生产, 有效时率平均提高 14.1 百分点, 避免了频繁热洗、加药等作业, 减轻了员工的劳动强度。

4 结 论

1) 以井口出油温度最优为目标, 同轴式双空心抽油杆下入深度、循环水进口温度为约束条件, 建立了井口出油温度计算模型。利用所建立的模型采用迭代法可计算出同油井同轴双空心抽油杆的下入深度, 避免了原来设计人员凭经验确定同轴双空心抽

油杆下入深度的弊端,可靠性更高。

2) 利用建立的井口出油温度计算模型,理论校核的抽油机悬点最大载荷与生产负荷基本吻合,既满足了生产需要,同时节省了抽油井开发成本。

3) 井口出油温度计算模型在地面原油 50 ℃黏度大于 5 000 mPa·s 时慎用,因为 50 ℃条件下地面原油黏度大于 5 000 mPa·s 的稠油,现场一般采用螺杆泵生产。另外,对动液面小于 800 m 的稠油井,全井杆柱都为同轴式双空心抽油杆,不需要该模型。

参 考 文 献

References

- [1] 李国栋,刘树林,王剑飞,等.一种空心抽油杆:中国,200820106412.3[P].2008-10-30.
Li Guodong, Liu Shulin, Wang Jianfei, et al. A hollow rod: CN, 200820106412.3[P]. 2008-10-30.
- [2] 张勇,李小刚,张德彬,等.双空心杆闭式循环加热工艺[J].油气田地面工程,2011,30(2):55-56.
Zhang Yong, Li Xiaogang, Zhang Debin, et al. Dual hollow rod closed loop heating process[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2011, 30(2): 55-56.
- [3] 苗彦平,李金永,刘治河,等.双空心杆内循环热采技术应用[J].石油钻采工艺,2009,31(增刊2):96-98.
Miao Yanping, Li Jinyong, Liu Zhihe, et al. Application of double hollow pumping rod heating technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(supplement 2): 96-98.
- [4] 王丽娜,崔金榜,李金永,等.双空心抽油杆内循环技术[J].油气田地面工程,2010,29(2):88-89.
Wang Lina, Cui Jinbang, Li Jinyong, et al. Dual hollow rod inner loop technology [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2010, 29(2): 88-89.
- [5] 林日亿,梁金国,杨德伟,等.空心抽油杆内密闭热水循环降黏技术[J].中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(3):104-108.
Lin Riyi, Liang Jinguo, Yang Dewei, et al. Viscosity reduction technology by closed hot water circulation in hollow sucker rod [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2010, 34(3): 104-108.
- [6] 车洪昌,鄢德华,任耀宇,等.重力热管井筒伴热技术在稠油热采中的应用研究[J].石油钻探技术,2011,39(2):108-111.
Che Hongchang, Yan Dehua, Ren Yaoyu, et al. Research on wellbore gravity heat pipe heating technology in thermal recovery of heavy oil[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(2): 108-111.
- [7] 付亚荣,刘春平,付茜,等.一种确定同轴式双空心抽油杆下入深度的方法:中国,201110343401.3[P].2011-11-03.
Fu Yarong, Liu Chunping, Fu Qian, et al. Coaxial dual hollow rod depth to determine: CN, 201110343401.3[P]. 2011-11-03.
- [8] 姚锦宝,姚宝珍.基于迭代法优化换乘枢纽布局[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2010,34(1):76-79.
Yao Jinbao, Yao Baozhen. An iteration algorithm for transfer hub optimization[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2010, 34(1): 76-79.
- [9] 姚传进,雷光伦,蒋宝云,等.高凝油井筒温度场计算及流态转变分析[J].石油钻采工艺,2011,33(3):42-46.
Yao Chuanjin, Lei Guanglun, Jiang Baoyun, et al. Wellbore-temperature distribution calculation and of flow pattern changing analysis in high pour-point oil wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(3): 42-46.
- [10] 王庆,吴晓东,刘长宇,等.高含CO₂原油井筒流动压力和温度分布综合计算[J].石油钻采工艺,2010,32(1):65-69.
Wang Qing, Wu Xiaodong, Liu Changyu, et al. Coupling calculations of the temperature and pressure distribution of crude oil with high CO₂ flow in wellbore[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(1): 65-69.
- [11] 王振东,姜会钰,邓丽君.有机物亨利常数与其结构的相关性研究[J].武汉科技学院学报,2007,20(2):40-42.
Wang Zhendong, Jiang Huiyu, Deng Lijun. Study of correlation between organic Henry's Law Constants and it's structure[J]. Journal of Wuhan University of Science and Engineering, 2007, 20(2): 40-42.
- [12] GB 50350—2005 油气集输设计规范[S].
GB 50350—2005 Code for design of oil-gas gathering and transportation systems[S].
- [13] 林日亿,李兆敏,董斌,等.塔河油田自喷深井井筒电加热降黏技术研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(4):67-70.
Lin Riyi, Li Zhaomin, Dong Bin, et al. Research on viscosity reduction by electric heating technology in ultra-deep flowing well in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2006, 30(4): 67-70.
- [14] 张琪.采油工程原理与设计[M].东营:石油大学出版社,2002:117.
Zhang Qi. Production engineering principles and design[M]. Dongying: Petroleum University Press, 2002: 117.