

闭式热流体循环井筒温度分布规律研究

唐述凯^{1,2}, 李明忠¹, 刘陈伟¹, 张国栋¹

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 胜利油田东胜精攻石油开发集团股份有限公司, 山东东营 257000)

摘要:为了合理配备闭式热流体循环降黏设备、设定循环参数,利用传热学相关理论,建立了闭式热流体循环井加热段和非加热段的井筒温度场模型,结合模型的定解条件,对井筒压力和温度进行耦合求得数值解。利用建立的模型对采用闭式热流体循环降黏4口井产出液和上返液的井口温度进行了预测,并探讨了生产参数和循环参数对井筒加热效果的影响,结果表明:预测的产出液和上返液的井口温度与实测结果相比平均相对误差分别为3.08%和1.38%,符合工程要求;产出液量每增加1 t/d,产出液温度降低0.134 5 ℃;含水率每升高10%,产出液温度降低0.161 ℃;随注入循环量的增大和注入温度的升高,产出液温度升高,但注入温度对产出液温度影响较大。利用闭式热流体循环井筒温度场模型分析井筒温度场,可以为闭式热流体循环降黏设计提供依据。

关键词:闭式热流体循环 数学模型 温度分布 循环参数 生产参数

中图分类号:TE355 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2014)05-0104-05

Temperature Distribution in Closed Wellbore with Hot Fluid Circulation

Tang Shukai^{1,2}, Li Mingzhong¹, Liu Chenwei¹, Zhang Guodong¹

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China; 2. Dongsheng Group Co. Ltd. of Shengli Oilfield, Dongying, Shandong, 257000, China)

Abstract: To configure the closed equipment with hot fluid circulation and set its circulation parameters properly, the temperature field model was established for heating and non-heating sections of a closed wellbore with hot fluid circulation on the basis of relevant heat transfer theories. Under the condition of definite solution, the model was used to determine the coupling values of pressure and temperature in wellbore. Moreover, the model was also used to predict the wellhead temperature of fluids produced and returned in four closed wells in which hot fluids were circulated, and the influences of production and circulation parameters on wellbore heating were discussed. The results showed that the average error of predicted wellhead temperature of fluids produced and returned was 3.08% and 1.38% respectively, compared with the measured values, which meet the engineering requirements; the temperature of fluid produced declined by 0.134 5 ℃ if fluid volume increased one ton per day, and declined 0.161 ℃ if water cut increased by 10%; and the temperature of produced fluids rises with the increase of circulation rate and injecting temperature, which is the main factor to affect the heating effects. The method can provide basis for the design of the hot fluid circulation in closed wellbore to lower viscosity of produced fluids by modeling the temperature field.

Key words: closed hot fluid circulation; mathematic model; temperature distribution; circulation parameter; production parameter

原油自油藏流入井筒后,在上行过程中随着热量的散失或溶解气的析出,黏度不断升高,特别是稠油,由于其黏度对温度极敏感,温度下降会大大增加流动阻力,造成在生产过程中经常出现抽油杆卡死、断脱^[1]等故障,严重影响开采效果。为此开展了井筒降黏工艺技术研究,开发了一系列井筒降黏工艺^[2],包括电加热、热流体循环、掺稀油^[3]、掺水及加入化学剂乳化降黏等。其中,热流体循环^[4-6]降黏技术因适于开采高凝固点、高黏度的原油而得到广泛

应用。准确预测热流体循环井筒温度场,对于设备的配备和循环参数的设定至关重要。为此,在分析

收稿日期:2014-01-04;改回日期:2014-05-30。

作者简介:唐述凯(1980—),男,山东文登人,2004年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,2007年获中国石油大学(华东)油气田开发工程专业硕士学位,在读博士研究生,工程师,目前从事油田采油工艺技术应用与配套研究。

联系方式:76497428@qq.com。

基金项目:长江学者和创新团队发展计划项目“复杂油藏开发和提高采收率的理论与技术”(编号:IRT1294)资助。

闭式热流体循环井筒传热规律的基础上,建立了相应的温度场数学模型,并就模型在现场的实际应用进行了介绍。

1 闭式热流体循环井筒温度场数学模型

闭式热流体循环井身结构如图 1 所示,循环液自隔热管流入,将一部分热量传递给隔热管与空心抽油杆环空中的上返液,同时上返液与空心抽油杆和油管环空间的产出液进行热量交换,以提高产出液的温度,实现降低原油黏度的目的。

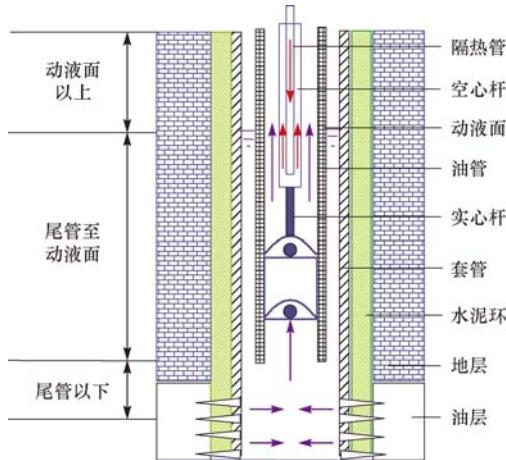


图 1 闭式热流体循环井身结构示意

Fig. 1 Casing program for closed wellbore with hot fluid circulation

1.1 基本假设

1) 油井产量恒定;2) 地层温度随深度呈线性变化,地温梯度已知;3) 井筒与水泥环外缘间的传热为一维稳态传热;4) 井筒管柱材料、结构尺寸和热物理性质一致。

1.2 温度场模型

依据产出液的热量传递情况,可将整个井段划分为加热段和非加热段。

1.2.1 非加热段

非加热段只包含产出液的举升通道,其能量平衡方程为:

$$-Wd\theta = k_3(\theta - t_e)dz \quad (1)$$

式中: W 为产出液水当量(流量与比热容之积), $W/\text{m}^3 \cdot \text{℃}$; θ 为产出液温度, $^\circ\text{C}$; k_3 为产出液与地层间的传热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{℃})$; t_e 为地层温度, $t_e = t_{ed} - mz$, $^\circ\text{C}$; t_{ed} 为井底地层温度, $^\circ\text{C}$; m 为地温梯度, $^\circ\text{C}/\text{m}$; z 为离井底的距离, m 。

1.2.2 加热段

加热段包括循环液流入、上返和产出液举升 3 个流动通道,根据能量守恒可得:

$$\begin{cases} -W_1 dt = k_1(t - t_b) dz \\ -W_1 dt_b = k_1(t - t_b) dz - k_2(t_b - \theta) dz \\ -W d\theta = k_2(t_b - \theta) dz - k_3(\theta - t_e) dz \end{cases} \quad (2)$$

式中: t 为任一井深处注入液的温度, $^\circ\text{C}$; k_1 为注入液与上返液间的传热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{℃})$; k_2 为隔热管与空心抽油杆的环空内流体和空心抽油杆与油管的环空内流体之间的传热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{℃})$; W_1 为隔热管内循环液水当量, $\text{W}/\text{℃}$; t_b 为上返液在任一井深处的温度, $^\circ\text{C}$ 。

1.3 传热系数的确定

1.3.1 k_1 的确定

$$k_1 = \left[\frac{1}{\pi h_{ii} d_{ii}} + \frac{1}{2\pi\lambda_{ai}} \ln \frac{d_{io}}{d_{ii}} + \frac{1}{\pi h_{io} d_{io}} \right]^{-1} \quad (3)$$

式中: h_{ii} 为隔热管内壁对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$; d_{ii} 为隔热管内径, m ; d_{io} 为隔热管外径, m ; λ_{ai} 为隔热管视导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{℃})$; h_{io} 为隔热管外壁对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$ 。

1.3.2 k_2 的确定

$$k_2 = \left[\frac{1}{\pi h_{ki} d_{ki}} + \frac{1}{2\pi\lambda_k} \ln \frac{d_{ko}}{d_{ki}} + \frac{1}{\pi h_{ko} d_{ko}} \right]^{-1} \quad (4)$$

式中: h_{ki} 为空心杆内壁对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$; d_{ki} 为空心杆内径, m ; d_{ko} 为空心杆外径, m ; λ_k 为空心杆导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{℃})$; h_{ko} 为空心杆外壁对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$ 。

1.3.3 k_3 的确定

如图 1 所示,根据产出液与地层间传热热阻的不同,可将整个井身分为 3 段。

尾管以下:

$$k_3 = \left[\frac{1}{\pi h_{ti} d_{ci}} + \frac{1}{2\pi\lambda_c} \ln \frac{d_{co}}{d_{ci}} + \frac{1}{2\pi\lambda_s} \ln \frac{d_{so}}{d_{co}} \right]^{-1} \quad (5)$$

尾管至动液面之间:

$$k_3 = \left[\frac{1}{\pi h_{ti} d_{ti}} + \frac{1}{2\pi\lambda_t} \ln \frac{d_{to}}{d_{ti}} + \frac{1}{2\pi\lambda_o} \ln \frac{d_{ci}}{d_{to}} + \frac{1}{2\pi\lambda_s} \ln \frac{d_{so}}{d_{co}} \right]^{-1} \quad (6)$$

动液面以上:

$$k_3 = \left[\frac{1}{\pi h_{ti} d_{ti}} + \frac{1}{2\pi\lambda_t} \ln \frac{d_{to}}{d_{ti}} + \frac{1}{2\pi\lambda_g} \ln \frac{d_{ci}}{d_{to}} \right]^{-1} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\pi h_r d_{ci}} + \frac{1}{2\pi\lambda_s} \ln \left(\frac{d_{so}}{d_{co}} \right)^{-1} \quad (7)$$

式中: h_r 为油管内壁对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$; d_{ti} 为油管内径, m ; λ_t 为油管导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{°C})$; d_{to} 为油管外径, m ; λ_g 为气体导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{°C})$; d_{ci} 为套管内径, m ; d_{co} 为套管外径, m ; h_r 为油套环空辐射传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$; λ_s 为水泥环导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{°C})$; d_{so} 为水泥环外径, m 。

2 模型求解

2.1 边界条件

非加热段:

$$\begin{cases} z = 0, p = p_{wf} \\ z = 0, \theta = \theta_0 \end{cases} \quad (8)$$

加热段:

$$\begin{cases} z = Z, p = p_i \\ z = Z, t = t_{in} \\ z = z_h, t_h = t_{hb} \\ z = z_h, \theta = \theta_h \end{cases} \quad (9)$$

式中: θ 为井底产出液的温度, °C ; p_{wf} 为井底流压, MPa ; p_i 为油压, MPa ; t_{in} 为循环液初始注入温度, °C ; θ_h 为循环深度处产出液的温度, °C ; t_h 为循环深度处对应的注入液温度, °C ; t_{hb} 为循环深度处对应的上返液温度, °C ; z_h 为循环深度到井底的距离, m 。

2.2 求解方法

非加热段, 对其能量方程变形后积分可得:

$$\theta = \left[(\theta_0 - t_{ed}) - m \frac{W}{K_3} \right] e^{-\frac{K_3}{W} z} + (t_{ed} - mz) + m \frac{W}{K_3} \quad (10)$$

对于加热段, 能量方程经消元后, 可得到三阶非齐次线性常微分方程, 由于方程本身的特点, 其解析解形式不固定^[7]。另外, 由于传热系数等参数与流体物性参数、流动参数密切相关^[8], 因而沿井筒是变化的。综合上述原因, 将井筒离散为 N 个单元(非加热段包括 n_l 个单元, 泵以下段包括 n_e 个单元, 且 $n_l > n_e$), 采用数值方法迭代求解^[9], 在计算井筒压力时, 采用了 Beggs-Brill 方法^[10]。具体求解步骤参见文献[9-10]。

3 实例计算与分析

3.1 结果分析与对比

为验证所建模型的准确性, 利用建立的模型对现场 4 口采用热流体循环降黏技术油井的温度进行了预测, 并与实测温度进行了对比, 结果见表 1。

由表 1 可看出, 利用所建模型可以精确预测闭式热流体循环井筒中的温度分布, 且产出液井口温度预测误差不超过 5%, 上返液井口温度预测误差不超过 3%。

表 1 模型预测温度与现场实测温度的对比

Table 1 Comparison of model predicted temperature and measured temperature

井号	产液量/ (t·d ⁻¹)	含水率, %	循环流量/ (t·d ⁻¹)	注入温度/°C	加热深度/m	产出液井口温度/°C		上返液井口温度/°C	
						实测	预测	实测	预测
金 10-平 5	5.8	42.0	48	85	542	57	54.4	75	77
金 17-平 8	6.7	31.0	48	88	568	55	56.5	80	79.4
金 17-平 15	4.6	10.5	48	83	629	55	53.0	75	74.9
金 17-平 74	4.4	29.8	48	80	665	50	50.7	73	72.5

3.2 敏感因素分析

胜利油田东胜公司自 2008 年 5 月开始引入并应用空心杆闭式热流体循环加热降黏技术, 截至目前, 该技术已在黏度低于 30 000 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 的 30 口油井应用, 取得了明显的经济效益。下面以金 17-平 5 井为例, 对闭式热流体循环加热的井筒温度场进行敏感性分析。

基础数据: 油层中深 1 114.10 m; 油层温度 48.89 °C; 油管内径 159.4 mm; 套管内径 255.3 mm, 抽油杆包括两级, 空心杆长 542.00 m, 外径 42.0 mm, 实心杆长 41.00 m, 直径 22.0 mm; 双真空保温连续管外

径 24.0 mm, 视导热系数 0.1 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{°C})$; 产液量 5.8 t/d, 质量含水率 42%; 原油密度 964.1 kg/m^3 ; 生产气油比 10 m^3/m^3 ; 动液面 431.00 m; 循环介质为水, 循环流量 2 m^3/h , 循环液注入温度 85 °C。

图 2 为计算出的闭式热流体循环加热井筒温度和压力的剖面。由图 2 可看出: 在非加热段(542.00~1 114.10 m), 由于沿程热量的损失, 产出液温度随着井深的减小逐渐降低; 进入加热段后, 产出液温度迅速升高, 随着其与上返液温差的减小, 升高幅度降低, 在近井口处, 由于产出液从上返液获得的热量低于其向地层散失的热量, 出现温度下降的趋势; 上返液和注入液温度沿井深的分布规律相反, 但两者的

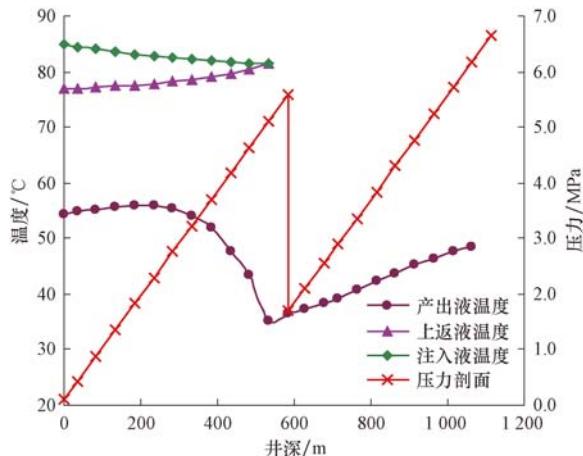


图 2 闭式热流体循环井筒温度和压力剖面

Fig. 2 Profile of temperature and pressure in closed wellbore with hot fluid circulation

变化幅度均较小；由于该井的产量较低，井筒流体过流面积较大，导致井筒内流体处于缓慢的层流状态，此时井筒内摩阻较小，泵上和泵下压力分布主要受井筒流体重力支配，从而导致压力分布呈线性变化。

3.2.1 生产参数的影响

产出液量的影响 图 3 为计算出的产出液温度随产出液量的变化趋势。由图 3 可看出：在非加热段，产出液量越少，温度降幅越大；进入加热段后，产出液温度开始升高，且产出液量越小，温度升高幅度越大。这是因为，产出液量越小，其流动越慢，与外界进行的热量交换越多，故而温度变化越大。该例中，虽然产出液量越小，最终（井口）温度越高，但由于其在抽油泵处温度最低，因此，从产出液能否顺利进泵考虑，大产液量应该是更好的选择。

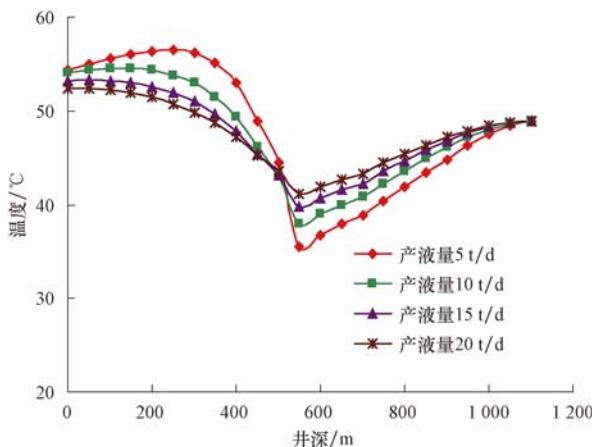


图 3 不同产液量下产出液温度分布

Fig. 3 Temperature distribution at different production rates of fluids

含水率的影响 油井生产过程中，产出液的含水率不断变化，因而有必要研究含水率对加热效果的影响。图 4 为计算出的含水率对产出液温度分布的影响。由图 4 可看出，产出液温度随含水率的变化趋势同其随产出液量的变化趋势基本相同，高含水率下，虽然产出液进泵温度高，但在加热段，产出液温度升高幅度小，而且由于大部分热量用来加热水，造成能源浪费，利用率低。

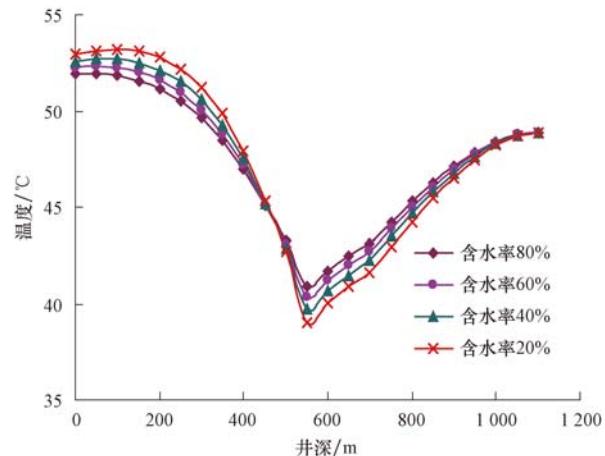


图 4 产出液温度随含水率的变化趋势

Fig. 4 Temperature changing tendency of produced fluids with water cut

3.2.2 循环参数的影响

循环量的影响 图 5 为计算出的产出液温度随循环量的变化规律。由图 5 可看出：非加热段不受循环量的影响；在加热段，循环量越大，产出液温度升高越快。这是因为，循环量越大，上返液的温度越高，传递给产出液的热量越多；另外，同一井深处，产出液温

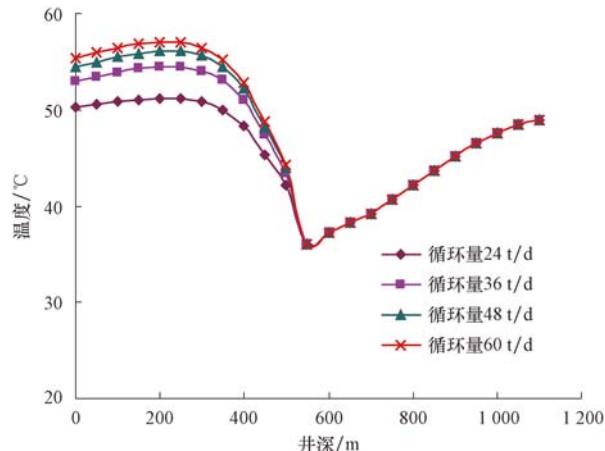


图 5 不同循环流量下产出液温度分布

Fig. 5 Distribution of produced fluid temperature at different circulation rates

度随循环量的增大升高幅度减小,这是由上返液温度随循环量的增大升高幅度逐渐减小造成的。

注入温度的影响 图 6 为计算出的不同注入温度下产出液温度分布规律。由图 6 可看出:非加热段产出液温度不受注入温度的影响,加热段随注入温度的升高,产出液温度相应升高。

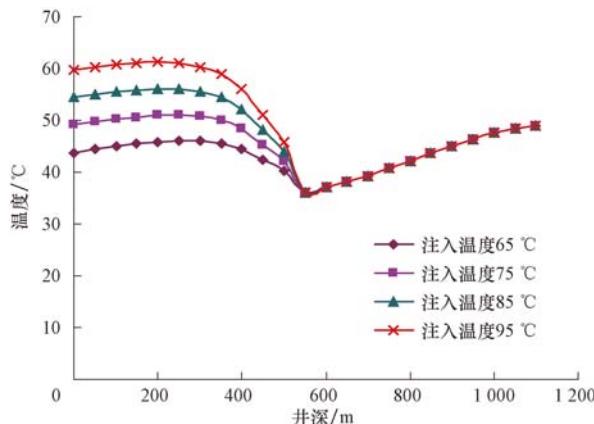


图 6 不同注入温度下产出液温度剖面

Fig. 6 Temperature profile of produced fluids at different injecting temperatures

双真空保温连续管直径的影响 目前现场常用的双真空保温连续管有 $\phi 24.0$ 和 $\phi 19.0$ mm 两种规格,图 7 为计算出的双真空保温连续管直径对产出液温度的影响。由图 7 可看出,在加热的初始阶段, $\phi 24.0$ mm 双真空保温连续管对应的产出液温度略高于 $\phi 19.0$ mm 双真空保温连续管对应的产出液温度,随着加热距离的增长,两者的差距逐渐增大。

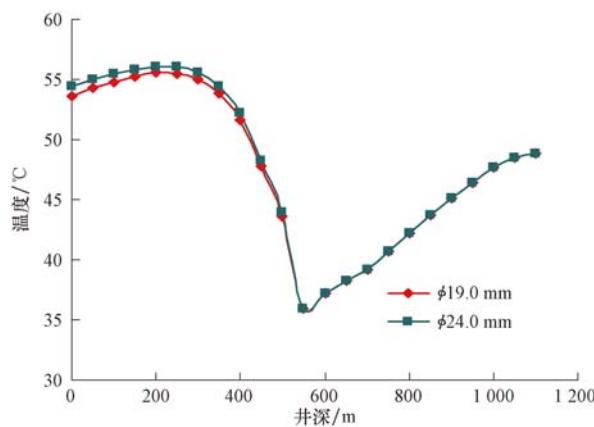


图 7 保温连续管直径对产出液温度的影响

Fig. 7 Effects of heat preservation coiled tubing size on produced fluid temperature

4 结束语

基于闭式热流体循环井筒传热规律,建立了描述

井筒温度场的数学模型,通过耦合压力和温度求解,提高了计算精度。并根据东胜公司闭式热流体循环井现场实测数据进行了计算对比分析,探讨了生产参数和循环参数对井筒加热效果的影响,结果表明,注入温度是影响闭式热流体循环加热效果的主要因素。

参 考 文 献

References

- [1] 姚传进,雷光伦,吴川,等.高凝油井电伴热优化计算[J].石油学报,2010,31(5):843-848.
Yao Chuanjin, Lei Guanglun, Wu Chuan, et al. An optimization calculation of electric heat tracing for high-pour-point-oil wells [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 843-848.
- [2] 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.
- [3] 梅春明,李柏林.塔河油田掺稀降黏工艺[J].石油钻探技术,2009,37(1):73-76.
Mei Chunming, Li Bolin. Mixing light oil to reduce oil viscosity in Tahe Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37 (1): 73-76.
- [4] 吴晓东,师俊峰,竺彪.循环热流体开采稠油优化设计方法研究[J].石油钻探技术,2006,34(6):1-3.
Wu Xiaodong, Shi Junfeng, Zhu Biao. A study of recovering heavy-oil reservoir with hot fluids [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(6): 1-3.
- [5] 吴哈,吴晓东,师俊峰,等.热流体循环在超深井中的应用[J].石油钻采工艺,2008,30(5):77-79,84.
Wu Han, Wu Xiaodong, Shi Junfeng, et al. Application of hot fluid circulation to ultra-deep well [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(5): 77-79, 84.
- [6] 任瑛,梁金国,杨双虎,等.稠油与高凝油热力开采问题的理论与实践[M].北京:石油工业出版社,2001:7-15.
Ren Ying, Liang Jinguo, Yang Shuanghu, et al. Theory and practice of heavy oil and high pour-point oil thermal production [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 7-15.
- [7] 赵刚,马远乐,鲁港.井筒热流体循环的数学模型及其解析解[J].西南石油学院学报,1996,18(4):59-63,124.
Zhao Gang, Ma Yuanle, Lu Gang. Mathematical model of wellbore hot fluid circulation and its analytical solution [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1996, 18(4): 59-63, 124.
- [8] 梁金国,徐明海.稠油井闭式热流体循环井筒温场计算与抽油杆柱设计[J].石油大学学报:自然科学版,1993,17(3):46-51.
Liang Jinguo, Xu Minghai. Wellbore hot fluid circulation and sucker-rod design for heavy oil wells [J]. Journal of the University of Petroleum, China; Edition of Natural Science, 1993, 17 (3): 46-51.
- [9] 李维国,同登科.数值计算方法[M].东营:中国石油大学出版社,2009:19-37.
Li Weiguo, Tong Dengke. Numerical computation method [M]. Dongying: China Petroleum University Press, 2009: 19-37.
- [10] 张琪.采油工程原理与设计[M].东营:石油大学出版社,2000:41-53.
Zhang Qi. Principle and design of production engineering [M]. Dongying: Petroleum University Press, 2000: 41-53.

[编辑 刘文臣]