

文章编号: 1000-7393(2008)05-0077-03

热流体循环在超深井中的应用

吴晗¹ 吴晓东¹ 师俊峰¹ 闫荣堃²

(1. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京昌平 102249; 2. 冀东油田分公司高尚堡采油作业区, 河北唐海 063200)

摘要: 针对塔河稠油油藏超深的特点, 对传统的热流体循环工艺加以改进, 将加热点从井底向上移, 使热流体部分加热原油。建立了该方法分析井筒温度分布的数学模型, 并进行求解。通过分析影响井筒温度参数的敏感性, 优化出热流体循环的运行参数。该方法能够有效解决热流体循环工艺在超深稠油井中所遇到的困难, 有效利用了能量, 并达到较好的加热效果。

关键词: 超深井; 热流体循环; 稠油; 温度模型

中图分类号: TE345 **文献标识码:** A

Application of hot fluid circulation to ultra-deep well

WU Han¹, WU Xiaodong¹, SHI Junfeng¹, YAN Rongkun²

(1. Key Laboratory for Petroleum Engineering of the Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Gaoshangbao Production Operational Area of CNPC Jidong Oilfield Company, Tanghai 063200, China)

Abstract: In view of the ultra-deep feature of TaHe heavy oil reservoir, traditional hot fluid circulation technique was improved, in which heating point moved upward from bottom hole so that hot fluid could heat part of crude oil. This paper develops the mathematical model of wellbore temperature distribution and solves it. By analyzing sensitivity of the parameters influencing wellbore temperature, optimal operation parameters of hot fluid circulation are obtained. Field practice shows that the new technology can effectively solve the problems existed in hot fluid circulation technique used in ultra-deep heavy oil well, with effective utilization of energy and preferable heating effect.

Key words: ultra-deep well; hot fluid circulation; heavy oil; temperature model

稠油在井筒中上行过程中, 随着热量向地层的散失温度不断降低, 原油黏度增大, 原油上行困难。循环热流体加热原油是解决该问题的有效途径。传统循环热流体工艺^[1-2]热载体经加热炉升温后, 被送至油井的内套管, 流向井底, 从井底开始加热原油, 内套管与外套管在底部相通, 热载体沿油井外套管向上流动, 经泵升压, 将热流体置于热交换器中, 提高热流体温度, 由此形成一闭路循环系统。

对于油藏埋藏深、原油黏度高、凝固点高的超深稠油井^[3-4], 由于举升高度大, 产液在井筒内温度下降后, 原油黏度升高, 流动阻力增大, 若用套管循环加热方法(塔河油田一口井), 原油出口温度仅升高 2~3℃, 且热流体载体出口温度低, 能耗大, 效果不

明显。若将套管热流体循环工艺加热点向上移动, 选取油井中部为加热点, 这样既可以降低能耗, 加热效果又明显。建立了该方法研究井筒温度分布的数学模型, 并进行求解。通过分析影响井筒温度的敏感性, 优化出热流体循环的运行参数。

1 改进后套管热载体循环工艺井筒温度分布模型^[5-7]

Wellbore temperature distribution model of improved casing hot fluid circulation technique

为便于计算又不失问题的真实性, 对模型简化

如下:

(1)流体为单相均匀介质,某些热物性参数,如导热系数,密度以及比热,随温度而变化相对于黏度而言要小得多,故近似假设为常数。

(2)流体一维流动,其温度、压力仅沿流动方向变化,沿径向无温度、压力变化。

(3)稳定流动,即温度、压力等参数的分布不随时间而变化。

井底到加热点这段油管中的原油温度分布,可以按照常规冷采计算,公式如下^[4]

$$T = \left[-\frac{G_m W}{\lambda_1} \right] e^{\frac{\lambda_1}{W}(L-l)} + (T_{cd} - G_m l) + \frac{aW}{\lambda_1} \quad (1)$$

式中, W 为油管内原油水当量, $W/^\circ\text{C}$; T 为油管中原油的温度, $^\circ\text{C}$; T_{cd} 为井底原始地层温度, $^\circ\text{C}$; G_m 为地温梯度, $^\circ\text{C}/\text{m}$; L 为井深, m ; l 为沿井深方向的长度, m ; λ_1 为井筒不加热时,产液与地层间的导热系数, $W/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 。

根据能量平衡,油管中的原油与热流体、热流体与地层之间能量平衡微分方程如下式所示

$$\begin{cases} W_1 \frac{dT_1}{dl} = K_{12}(T_2 - T_1) \\ W_2 \frac{dT_2}{dl} = K_{12}(T_1 - T_2) + K_{23}(T_3 - T_2) \\ W_3 \frac{dT_3}{dl} = K_{23}(T_2 - T_3) + K_{3e}(T_e - T_3) \end{cases} \quad (2)$$

式中, W_1 、 W_2 、 W_3 为油管内原油、油套环空和外环空内热流体的水当量; T_1 、 T_2 、 T_3 为油管内原油、油套环空和外环空内热流体的温度; K_{12} 、 K_{23} 、 K_{3e} 为油管与套管间、内层套管与外层套管间、外层套管与地层间的传热系数。

2 模型求解

Model solution

根据公式(1),易求解井底到加热点这段油管中的原油温度分布,而加热点到井口这段油管的温度分布,需求解微分方程组(公式2),具体方法如下。

以加热点为基准面,沿着竖直方向选取一维坐标 z , z 轴正方向从加热点指向井口,把井口到加热点这段油管离散成 N 个小单元,每个小单元的长度为 $\Delta l=L/N$,得到差分方程($i=1,2,\dots,N$),并整理得到如下形式

$$\begin{cases} T_{1,i} = F_1 T_{1,i-1} + F_2 T_{2,i} \\ T_{2,i} = F_3 T_{1,i} + F_4 T_{2,i+1} + F_5 T_{3,i} \\ T_{3,i} = F_6 T_{2,i} + F_7 T_{3,i-1} + F_8 T_{e,i} \end{cases} \quad (3)$$

式中,

$$F_1 = \frac{W_1}{A}, F_2 = \frac{K_{12}\Delta l}{A}, A = W_1 + K_{12}\Delta l,$$

$$F_3 = \frac{K_{12}\Delta l}{B}, F_4 = \frac{W_2}{B}, F_5 = \frac{K_{23}\Delta l}{B},$$

$$B = W_2 + K_{12}\Delta l + K_{23}\Delta l,$$

$$F_6 = \frac{K_{23}\Delta l}{C}, F_7 = \frac{W_3}{C}, F_8 = \frac{K_{3e}\Delta l}{C},$$

$$C = W_3 + K_{23}\Delta l + K_{3e}\Delta l$$

方程组的边界条件和初始条件为:

(1)热流体井口温度已知,即 $T_{2,N}$ 已知;

(2)原油加热点温度可由公式(1)求得,即 $T_{1,0}$ 已知;

(3)加热点处, $T_{2,N}=T_{3,N}$;

(4)加热点到井口的原始温度分布 $T_{e,i}$ 可以由地温梯度求出。

将上述条件带入式(4),给出计算精度,用迭代法即可求出加热点到井口的井筒温度分布,然后加上式(1)求出的井底到加热点的井筒温度分布,可得到整个井筒温度分布。

3 敏感性分析

Sensitivity analysis

塔河TK1204井油藏埋深5880 m,地层温度140 $^\circ\text{C}$,产液量100 m^3/d ,原油密度0.9950~1.0164 g/cm^3 ,平均1.0094 g/cm^3 ,地面原油黏度48170~1 100 000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$,属于超稠油,开采难度较大,因此采取套管循环加热方法,加热点深度为3850 m,针对影响井口采出液体温度的3个主要因素^[8],即热流体的入口温度、注入排量及油井产液量,对井口液体温度敏感性进行分析。

3.1 油井产液量对井口温度的影响

Effect of liquid output of oil well on wellhead temperature

图1为热流体入口温度为150 $^\circ\text{C}$ 、注入速度为35 m^3/h 时,不同产液量条件下井筒温度曲线。随产液量增加,井口温度逐渐减小,而且减小幅度和趋势没有明显的变化,因此,当热流体入口温度一定时,从图1中很难确定产液量的最佳值。但是,可以能耗为判断标准,根据能耗大小,确定油井产液量。

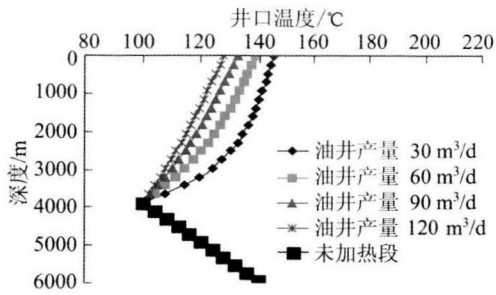


图1 油井产液量对井口温度的影响

Fig.1 Effect of liquid output of oil well on wellhead temperature

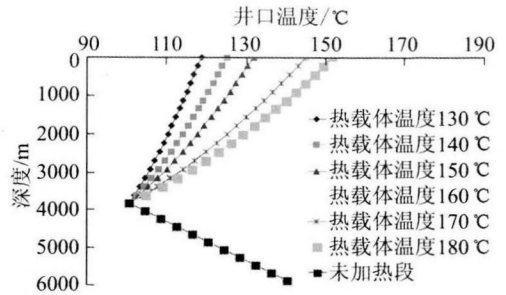


图3 热流体入口温度对井口温度的影响

Fig.3 Effect of inlet temperature of hot fluid on wellhead temperature

3.2 热流体流量对井口温度的影响

Effect of hot fluid flow rate on wellhead temperature

图2为油井产液量为100 m³/d、热流体入口温度为150 °C时,不同热流体流量下的井筒温度曲线,可见加大热流体流量,井口温度升高。流量增加到一定程度后,井口温度趋于稳定。因此,在实际生产中可找到一个热流体流量最佳值。而在现场实际生产中,可以通过加大热流体的循环量来升高采出流体的温度。

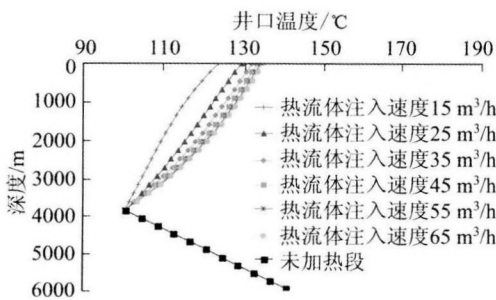


图2 热流体流量对井口温度的影响

Fig.2 Effect of hot fluid flow rate on wellhead temperature

4 结论

Conclusions

(1) 对于超深稠油井,运用传统套管热流体循环加热,效果不明显,将加热点向上移动合适距离后,能达到预期加热效果。

(2) 建立了加热点不在井底的套管循环热流体的井筒温度分布模型,并用迭代法进行求解,方法简单,结果准确。

(3) 对于改进后的套管循环热流体加热方法,热流体的入口温度对井口温度影响较大,热流体流量和油井产液量对井口温度影响幅度较小。

参考文献:

References:

[1] 任英. 加热开采稠油工艺的讨论—井筒中的热流体循环[J]. 华东石油学院学报, 1982, 6(4): 53-65.
REN Ying. Thermal production of viscous oil with recycling of hot fluid in wellbore [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1982, 6(4): 53-65.

[2] 梁金国, 任英, 王弥康. 热流体闭式循环采油工艺[J]. 石油钻采工艺, 1990, 12(2): 83-88.
LIANG Jinguo, REN Ying, WANG Mikang. Hot fluid circulation technology [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1990, 12(2): 83-88.

[3] 彭苏萍, 王虎. 塔河油田深井稠油开采技术[J]. 油气田地面工程, 2002, 21(6): 133-134.
PENG Suping, WANG Hu. Development technology of deep well heavy oil reservoir in Tahe oilfield [J]. Oil-gasfield Surface Engineering, 2002, 21(6): 133-134.

[4] 曲日涛, 苏海芳, 曹嫣红. 中深层稠油油藏开采新技术[J]. 油气田地面工程, 2006, 25(3): 19-24.
QU Ritao, SU Haifang, CAO Yanhong. New technology to develop middle and deep heavy oil reservoir [J]. Oil-gasfield Surface Engineering, 2006, 25(3): 19-24.

3.3 热流体入口温度对井口温度的影响

Effect of inlet temperature of hot fluid on wellhead temperature

图3为油井产液量为100 m³/d、热流体流量为35 m³/h时,不同热流体入口温度下的井筒温度曲线。增大热流体入口温度,井口产液温度升高,升高幅度与热流体井口注入温度升高幅度有关。在实际生产中,可通过提高热流体的注入温度来增加产液出口温度,但这一方法受现场设备的限制。如果使用热油,温度太高会出现轻质成分蒸发的现象。

丰富,设计结果更加合理,尤其适用于不均匀的地层砂。但由于其原始文献描述模糊、设计过程电算化困难并且部分参数的取值范围不明确等原因,该方法在国内应用较少。

(2)对 DePriester 砾石尺寸设计方法进行了推导与解析,得到了各系数之间的内在定量关系,并给出了相关系数的推荐取值范围。对一些限制条件的矛盾之处进行了完善,建议根据方程(14)确定 B 的取值。总结了其应用计算步骤和程序,并使用计算机实现。

(3)使用 DePriester 方法依据地层砂筛析曲线设计砾石尺寸范围,其设计结果并不是唯一的,取决于系数 A 、 C_{\min} 、 C_{\max} 的取值。上述系数确定后,系数 B 有一个确定的取值范围。任取一个系数 B 的值都可以得到一个砾石尺寸范围。因此,DePriester 方法的设计结果是一个推荐范围而不是一个固定的砾石尺寸范围,这样为现场应用提供了更大的选择余地。

(4)对 DePriester 方法的解析和改进为国内防砂井砾石尺寸的设计与选择提供又一条可靠的途径。

参考文献:

References:

- [1] 董长银,张琪,孙炜,等.砾石充填防砂工艺参数优化设计方法[J].中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(5):57-61.
DONG Changyin, ZHANG Qi, SUN Wei, et al. New considerations in optimization design of sand control methods concerning gravel pack [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(5): 57-61.
- [2] 何生厚,张琪.油气井防砂理论及其应用[M].北京:中国石化出版社,2003-03.
HE Shenghou, Zhang Qi. Theory and application of oil-gas well sand control [M]. Beijing: China Chemical Press, 2003-03.
- [3] OYENEYIN M B, et al. Investigation of pore-blocking mechanism in gravel packs in the management and control of fines migration [R]. SPE 27 342, 1994.
- [4] 董长银,张琪,曲占庆,等.筛套环空砾石层压降的简化计算模型[J].石油大学学报:自然科学版,2001,25(2):28-30.
DONG Changyin, ZHANG Qi, QU Zhanqing, et al. A simplified method for predicting pressure drop across gravel pack [J]. Journal of China University of Petroleum, 2001, 25(2): 28-30.
- [5] 董长银,张琪,李志芬,等.筛管砾石充填井筒附近压降计算方法研究[J].西安石油学院学报,2002,17(2):33-36.
DONG Changyin, ZHANG Qi, LI Zhifen, et al. A new calculation method of the pressure drop around the wellbore of a gravel-packed perforated well [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute, 2002, 17(2): 33-36.
- [6] 赵东伟,董长银,张琪.砾石充填防砂砾石尺寸优选方法[J].石油钻探技术,2004,32(4):28-32.
ZHAO Dongwei, DONG Changyin, ZHANG Qi. A new model for gravel size evaluation and the optimization [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 32(4): 28-32.
- [7] SAUCIER R J. Consideration in gravel pack design [J]. JPT, 1974, 26(2): 205-206.
- [8] STEIN N. Designing gravel-pack for changing well conditions [J]. World Oil, 1983, 196(2): 41-47.

(修改稿收到日期 2008-08-18)

[编辑 付丽霞]

(上接第79页)

- [5] 陈月明.注蒸汽热力采油[M].山东东营:石油大学出版社,1996:128-133.
CHEN Yueming. Thermal production through steam injection [M]. Dongying, Shandong: China University of Petroleum Press, 1996: 128-133.
- [6] 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.
- [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):57-61.
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): 57-61.
- [8] 单学军.稠油开采中井筒温度影响因素分析[J].石油勘探与开发,2004,31(3):136-138.
SHAN Xuejun. The factors influencing the wellbore temperature in heavy oil production [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 136-138.

(修改稿收到日期 2008-08-19)

[编辑 付丽霞]