

稠油水平井注汽剖面分析

杨德伟¹, 王新伟¹, 肖淑明², 张丁涌², 张东杰¹, 陈晓霞³

(1. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中石化胜利油田现河采油厂, 山东东营 257068;
3. 中国石油独山子石化公司矿区服务事业部公共事务管理公司, 新疆克拉玛依 838600)

摘要:在线测试技术可以探测水平井注汽各个阶段的温度,但缺乏对测得数据的解释方法。应用 FLUENT 软件模拟蒸汽在水平井内的流动,得到蒸汽在水平井内的温度变化规律。结果表明:湿蒸汽在油管内流动时,温度不断下降,当遇到筛管分流时,温度下降幅度会增大,且分流量越大,温度下降幅度越大。分析在线测试系统测试的温度得到注汽过程中水平井的吸汽情况,在测试点等距分布时,相邻两测试点温差越大则两测试点之间注汽量越大。

关键词:水平井; 注蒸汽; 在线测试; 注汽剖面

中图分类号:TE 345 **文献标志码:**A

引用格式:杨德伟,王新伟,肖淑明,等. 稠油水平井注汽剖面分析[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2014,38(5):155-159.

YANG Dewei, WANG Xinwei, XIAO Shuming, et al. Analysis of steam injection profile in horizontal well for heavy oil recovery[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(5):155-159.

Analysis of steam injection profile in horizontal well for heavy oil recovery

YANG Dewei¹, WANG Xinwei¹, XIAO Shuming¹, ZHANG Dingyong¹, ZHANG Dongjie¹, CHEN Xiaoxia³

(1. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Xianhe Oil Production Plant, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257068, China;
3. Public Affairs Management Company of Mining Services Division in Dushanzi Petrochemical Corporation, PetroChina, Karamay 838600, China)

Abstract: The online test technique can measure the temperature of horizontal well steam injection in every stage, but the interpreting technology of the measured data is poor. The vapor flowing process in a horizontal well was simulated by FLUENT, and the temperature changing regularities during the steam flowing process in the horizontal well were obtained. The results show that the steam temperature is decreasing when the steam flows in the pipe, and it will change suddenly when the steam flows through the sieve pore in horizontal well, and the higher the flow rate of steam, the greater the temperature changes. In addition, the injection characteristics are obtained based on the analysis of the steam temperature in horizontal steam injection well, and in the case of the equi-distant test points, the greater the temperature difference between the two adjacent test points, the greater the injected steam volume.

Key words: horizontal well; steam injection; online test; steam injection profile

稠油开采普遍采用注蒸汽开采技术,井底各段孔隙度、渗透率、含水饱和度不尽相同,这些复杂的地质条件导致了各段的吸汽量不同^[1-2]。准确把握水平井各段的注汽情况可以为后续的注汽工作提供技术参考,提高注汽效果。国内外采用的稠油热采水平井在

线测试技术可以探测到水平井在注汽、闷井、放喷各个生产阶段井筒内的温度数据^[3-5]。研究表明,当湿蒸汽经过水平井的筛管分流时,温度会相应变化,并且变化程度与流量相关。通过对测试点温度数据分析可以了解水平井各段的温度、吸汽量的实时情况。

因此,笔者研究湿蒸汽在水平井内的温度变化规律,得到稠油热采在线测试技术所测数据的解释方法,确定吸汽剖面,提高注汽效果。

1 在线测试系统

完整的在线测试系统由数据测试与数据采集两大模块组成,测试系统由测试缆和温度传感器组成,数据采集系统由光电测试仪和光电控制仪组成。测试时,测试缆下入被测水平井中密封,如图 1 所示。通过测试缆上的温度传感器(T1~T10)测量注汽各阶段的温度,通过低电阻远传电缆传至数据采集系统,实现注汽过程中的实时温度监控。

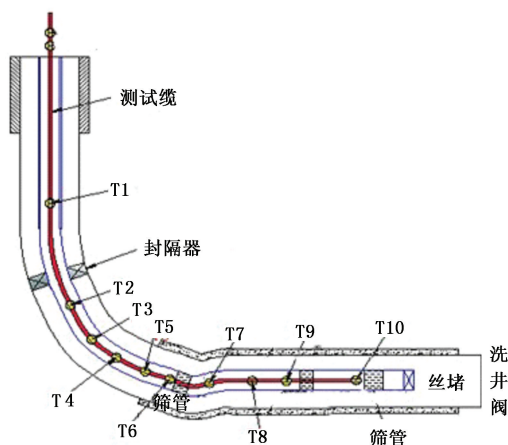


图 1 在线测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of online test system

2 物理模型

为探究在线测试系统测得的温度所反应的注汽规律,建立如图 2 所示的湿蒸汽水平管柱流动模型。选用管内径 62 mm 的油管,筛孔用管柱 26 mm 的开孔代替,管上开两孔,通过调节两孔的流量观察温度变化规律,由于油管对称性,采用二维模型,在靠近管壁边界层以及分流处,对网格进行加密。



图 2 湿蒸汽油管内流动物理模型

Fig. 2 Physical model of steam flowing in pipes

3 数学模型

3.1 质量守恒方程

质量守恒方程又称连续性方程,其形式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m. \quad (1)$$

式中, ρ 为湿蒸汽混合相密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; u_i ($i=1,2,3$) 为蒸汽混合相流速, m/s ; S_m 为从分散相中加入到连续相的质量流量,也可以是任何的自定义源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ [6]。

3.2 动量守恒方程

在惯性(非加速)坐标系中 i 方向上的动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i. \quad (2)$$

式中, p 为静压力, Pa ; τ_{ij} 为应力张量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$; ρg_i 、 F_i 分别为 i 方向上的重力体积力和外部体积力, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$ 。 F_i 包含了多相流模型混合相中的源项 [7]。

3.3 能量守恒方程

能量方程形式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + (\tau_{ij})_{\text{eff}} u_j\right) + S_h, \quad (3)$$

其中

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}.$$

式中, S_h 为包含放(吸)热以及任何其他形式的体积热源; k_{eff} 为有效导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; J_j 为组分 j 的扩散流量, kg/s ; h 为流体的焓, J/kg [8]。

3.4 混合相体积率之间交换方程

由于湿蒸汽是气液两相流,故混合相计算模型中需要混合相体积率之间的交换方程。

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k^r), \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{u}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k}{\rho_m}, \quad \mathbf{u}_k^r = \mathbf{u}_k - \mathbf{u}_m.$$

式中, α_k 为 k 组分的含量, %; ρ_k 为密度, kg/m^3 ; $\mathbf{u}_k$ 为速度矢量, m/s 。

3.5 湍流模型

采用可实现的 $k-\varepsilon$ 模型的湍动能及其耗散率输运方程:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M, \quad (5)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} +$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b, \quad (6)$$

其中

$$C_1 = \max \left[0.43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = \frac{Sk}{\varepsilon}.$$

式中, G_k 为由于平均速度梯度产生的湍动能; G_b 为由于浮力影响产生的湍动能; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响; $C_{1\varepsilon}$ 和 C_2 为常数; σ_k 和 σ_ε 分别为湍动能及其耗散率的湍流普朗特数。本次计算中 $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2^{[9]}$ 。

4 模拟参数设置

由于是湿蒸汽流动,在多相流模型中选用混合模型,并激活滑移速度与体积力方程。经过计算, $Re = 7.5 \times 10^5$,表明为湍流,湍流模型设置为可实现的 k-epsilon 模型,近壁函数采取标准壁面函数处理。湿蒸汽参数:设置水为基本相,蒸汽为次相。边界条件方面,由于存在多出口,采用速度入口,自由出口边界条件;换热方面,采用指定油管温度边界条件,并按照实际情况设定壁面参数。离散格式方面,压力采用标准离散格式,动量、湍动能、湍动能耗散率、能量方程采用一阶迎风格式离散^[10]。

5 数值模拟结果

已知条件:湿蒸汽入口速度(气相 10.9 m/s、液相 9.8 m/s)、湍流强度 3%、温度 543 K、干度 0.3 等物性参数,油管尺寸以及内壁温度(500 K)、导热系数(43.2 W/(m · K))。

利用 Fluent 软件模拟湿蒸汽在油管内流动时经过两个筛管分流的不同流量情况(前后筛管分流比分别为 3 : 7、1 : 1、7 : 3)下油管内的温度场,得到油管内湿蒸汽的温度随分流量的变化规律。

5.1 温度变化规律

在前后筛管分流比为 7 : 3 时得到管内温度云图如图 3 所示。由于流动过程中存在传热损失,湿蒸汽温度沿油管轴向整体下降,径向上由管中心到管壁逐渐降低。在筛管处存在蒸汽分流,蒸汽温度变化较无筛管的管段剧烈。

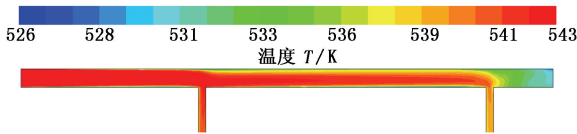


图 3 温度云图

Fig.3 Temperature field cloud picture

为便于观察,现将油管中央的温度表示在坐标图上,得到温度变化曲线,见图 4。

从图 4 可清晰看出:油管中心蒸汽温度的变化趋

势,蒸汽温度沿油管轴线方向下降,在筛管处由于筛管的分流作用,温度较没有筛管分流的管段出现陡降;在没有筛管分流的的管段,蒸汽温度的下降幅度随着管内蒸汽流量减小而增大。为探究温度变化与分流量的关系,保持油管蒸汽入口参数不变,调节图 2 中左右两筛管的分流比为 7 : 3、1 : 1、3 : 7,得到不同分流比下油管中心温度变化情况,如图 5 所示。

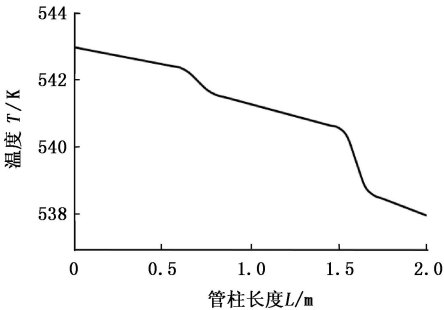


图 4 管中央温度变化曲线

Fig.4 Temperature variation curve of steam in pipes

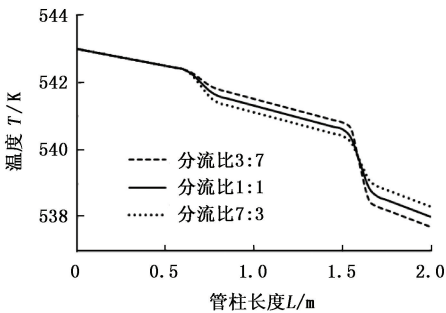


图 5 三种情况下温度变化对比

Fig.5 Contrast of temperature variation in three cases

从图 5 可看出,在 3 种分流比情况下筛管处蒸汽温度都出现陡降,但下降幅度不同,在同一筛管处蒸汽分流量越大,温度下降幅度越大。

5.2 现场测试结果

用数值模拟规律对现场数据进行分析。应用在线测试系统对现河采油厂 C20-P75 井注汽过程进行测定,测试点位置布置如图 1 所示。水平井段等距布置(T5 ~ T10)6 个温度测试点。在注汽初期各测试点温度不断升高,经过一段时间后各测试点温度不再随注汽时间增加有明显变化,达到注汽稳定,此时在水平井段测试点的温度如图 6 所示。

观察图 6 发现,温度在整个水平井段逐渐下降,但相邻两测试点下降幅度有差别,为便于观察将相邻两点温差表示在柱状图上,得到图 7。由数值模拟结果推测,T9 ~ T10 段吸汽量最大,T6 ~ T7、T8 ~ T9 较其他段吸汽量大,T5 ~ T6、T7 ~ T8 段吸汽水平相当,处于整个井段的低值。

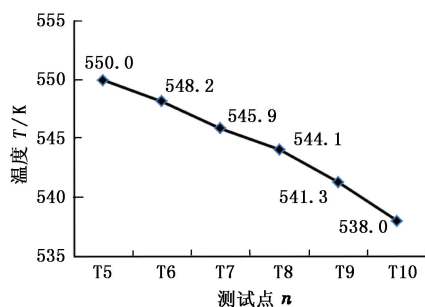


图 6 温度变化曲线

Fig. 6 Temperature variation curve of steam in pipes

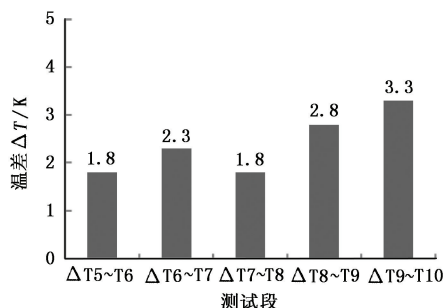


图 7 油管各段温差

Fig. 7 Temperature variation of each section

为验证以上分析的正确性,与分析油井参数得到的相对吸汽量(图 8)进行对比。

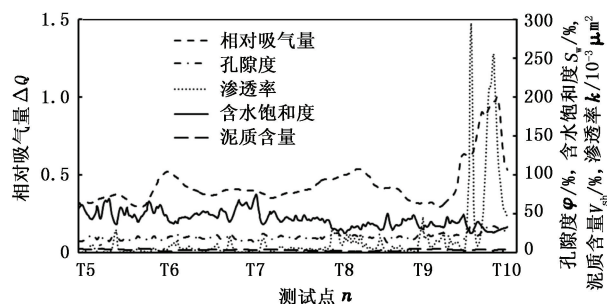


图 8 油井各段吸汽剖面

Fig. 8 Steam injection profile of each section

图中,相对吸汽量曲线在 T9 ~ T10 段处于高值、吸汽量最大,T8 ~ T9、T6 ~ T7 段分别出现两个高峰,较附近井段吸汽量大,T5 ~ T6、T7 ~ T8 段吸汽水平相当,处于整个井段的低值。通过分析现场测井数据所得出的井段吸汽量情况,与由在线测试系统测试数据得到的井段吸汽量相吻合,验证了模拟结果的正确性。由湿蒸汽在水平井内的温度变化规律可了解井下储层吸汽状况,即两个相邻测试点温降越大,则对应井段的吸汽量越大,从而为注蒸汽提供指导,提高注汽效果。

6 结论与建议

(1)湿蒸汽在油管内流动时,温度不断下降,当

遇到筛管分流时,温度下降幅度会增大,且分流量越大,温度下降幅度越大。

(2)通过分析在线测试系统测得的温度能够得到水平井注汽过程中水平井的吸汽情况,在测试点等距分布情况下,相邻两测试点温差越大则两测试点之间注汽量越大。

(3)稠油热采水平井在线测试系统中水平段温度测试点布置影响温度分析结果的精度,故可以增加水平段测温点数量,提高分析精度。

参考文献:

- [1] 曾玉强,刘蜀知,王琴,等. 稠油蒸汽吞吐开采技术研究概述[J]. 特种油气藏,2006,13(6):5-9.
ZENG Yuqiang, LIU Shuzhi, WANG Qin, et al. Overview of heavy oil cyclic steam stimulation recovery technology[J]. Special Oil & Gas Reservoirs,2006,13(6):5-9.
- [2] 丁一萍,刘传喜,凡玉梅,等. 低渗稠油油藏热采效果影响因素分析及水平井优化[J]. 断块油气田,2011,18(4):89-92.
DING Yiping, LIU Chuanxi, FAN Yumei, et al. Influence factors on thermal recovery effect and horizontal well optimization in low-permeability heavy oil reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field,2011,18(4):89-92.
- [3] 阮林华,王连生,吴军,等. 稠油热采水平井测试技术的研究与应用[J]. 石油科技论坛,2009(6):67-68.
RUAN Linhua, WANG Liansheng, WU Jun, et al. Research and application of horizontal well online test in thermal recovery [J]. Oil Forum, 2009(6):67-68.
- [4] 王卓飞,魏新春,江莉,等. 浅层稠油热采水平井测试技术研究及应用[J]. 石油地质与工程,2008,22(6):112-113.
WANG Zhuofei, WEI Xinchun, JIANG Li, et al. The research and application of shallow horizontal well online test in thermal recovery [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008,22(6):112-113.
- [5] 赵业卫,姜汉桥,刘立成,等. 稠油油藏水平井注蒸汽监测资料解释方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(2):86-89.
ZHAO Yewei, JIANG Hanqiao, LIU Licheng, et al. Interpretation method of monitor data in horizontal steam injection well for heavy oil reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(2):86-89.
- [6] 林日亿,李兆敏,李松岩,等. 泡沫流体管流流动与数值换热模拟[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(6):91-94.

LIN Riyi, LI Zhaomin, LI Songyan, et al. Flow and heat transfer numerical simulation of foam fluid in pipes [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(6):91-94.

[7] 张凯,王瑞金,王刚. Fluent 基础与应用实例[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社, 2010.

[8] 江帆,黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京:清
华大学出版社,2008.

[9] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社, 2001:347,353.

[10] 李鹏飞,徐敏义,王飞飞. CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京:人民邮电出版社, 2011.

(编辑 沈玉英)