

机采油井井口温度的影响因素分析

薛向东 周济福¹⁾ 刘曰武

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 基于传热学理论, 建立了机采油井井筒及其周围地层温度场的数学模型, 对不同参数下的井口温度进行了模拟, 分析了油井产量、含水率、井深、油管半径、环境温度及地温梯度等参数的影响。

关键词 井口温度, 机采式竖直井, 传热

中图分类号: TE355.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2010)05-018-04

INFLUENCE OF RELATED FACTORS ON WELLHEAD TEMPERATURE IN MECHANICAL RECOVERY WELL

XUE Xiangdong ZHOU Jifu¹⁾ LIU Yuewu

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The physical property and rheological behavior parameters of the flow in the wellbore are sensible functions of temperature. It is of fundamental importance to calculate the temperature field for the optimization design of an oil/gas production scheme. Based on the thermal conduction theory, a mathematical model is formulated for the temperature calculation of the wellbore for mechanical recovery wells. The influences of such factors as the well yield, water content, well depth, pipe radius, ambient temperature and geothermal gradient, on the wellhead temperature are investigated.

Key words wellhead temperature, mechanical recovery well, heat transfer

在原油开采过程中, 原油从井底到井口, 温度会发生很大的变化. 井筒内的原油在井底时温度与地层温度相等, 在提升过程中原油与环境地温进行热交换, 其温度会不断下降. 原油及天然气的物性参数都是随着压力和温度的变化而变化, 在一定温度下会出现结蜡现象, 这对采集和地面集输都造成一定的影响. 另外, 原油在井口的温度作为现场集输管网流动的内部边界条件, 对现场油气集输方案优选有重要影响.

自 1962 年 Ramey^[1] 的文章发表以来, 国内外已经建立了许多井筒热传递的数学模型并取得了一定的成果. Sagar^[2] 将 Ramey 方法扩展应用于多相流. 汪泓^[3] 模拟了不同产量、不同含水的井筒温度剖面. 宋辉^[4] 应用有限元方法, 分析了异常条件下对井筒温度场的影响程度. 石颖等^[5] 在对经不同注

入时间和停注时间后的二维温度分布模拟计算的基础上, 分析了注入聚合物溶液的密度、导热系数、比热容、井筒半径等因素对井下温度分布的影响.

这些研究主要集中在电加热、注聚合物等采油方式, 而对机采油井的井口温度计算相对较少. 这些采油方式与机采式有所不同, 它们大多是基于原油自喷或受到外部压力作用的情况, 井筒中油气混合物从井底到井口都是保持不间断的运动状态, 而机采油井中原油的运动是间歇的, 在下冲程时井筒中原油基本保持静止状态. 在工程实际中, 目前多数采用现场实测的方式对井口温度进行测量, 这样不但加大了工程投资, 也对前期设计造成极大的不便. 或者利用经验公式进行计算, 但精度很差. 因此, 对机采油井井口温度进行建模, 并分析其影响因素, 对油气集输工艺流程设计有实际工程意义.

2009-05-31 收到第 1 稿, 2009-06-22 收到修改稿.

1) 周济福, 1965 年生, 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为环境力学. E-mail: zhoujf@imech.ac.cn

本文基于传热学理论,建立了机采油井垂直井筒中原油与周围地层的热交换数学模型,对不同参数下的井口温度进行了计算,分析了油井产量、含水率、井深、油管尺寸、环境温度及地温梯度等对井口温度的影响。

1 模型建立

1.1 井筒传热物理模型

地层温度场从地表往下可分为 3 层^[6]: 变温层、恒温层及线性增温层。地表层为变温层,主要受太阳辐射的影响,厚度约 2 m; 变温层之下为恒温层,是地球内热与太阳辐射热相互影响达到平衡的地带,厚度约 30 m,本文针对后面的算例取该层温度为 18°C; 恒温层之下为线性增温层,此层地温温度场主要受地球内热影响,随着地层深度的增加而升高。

地层温度随地层深度增加是逐渐增大的,所以井筒中原油在上升过程中不断向井筒周围地层传热。将机采的一个冲程考虑成一个微元段,在上半冲程中,原油近似可看成匀速向上运动;在下半冲程中,原油静止。所以经过一个完整的冲程,下部微元段的原油上升到上部相邻微元段,直至井口。原油在某一深度的径向散热量趋于稳定,考虑径向截面,原油在油管中通过油管、环空、金属套管和水泥环将温度传至地层,井筒结构如图 1 所示。

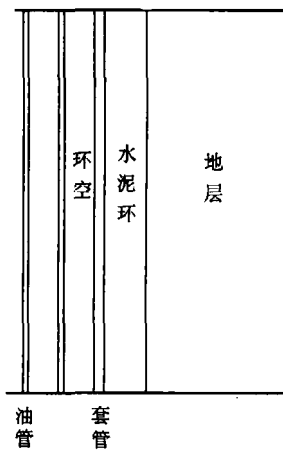


图 1 井筒结构示意图

1.2 井筒传热数学模型

在井筒径向系统中,根据能量守恒有

$$K_l(T - T_x)dl = -GCdT \quad (1)$$

式中, K_l 为油管中单位管长流体向地层的传热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; T 为微元油管内部原油温度, $^\circ C$; T_x 为距油管中心 50 m 以外同深度地层温度, $^\circ C$; G 为

原油质量流量, kg/s ; C 为原油比热, $J/(kg \cdot ^\circ C)$ 。其中

$$T_x = \begin{cases} T_0 & x \leq 2 \\ T_1 & 2 < x \leq 30 \\ T_1 + a(x - 30) & x > 30 \end{cases} \quad (2)$$

式中, T_0 为环境温度, $^\circ C$; T_1 为恒温层温度,本文针对后续算例取为 18°C; a 为地温梯度系数, $^\circ C/m$; x 为深度, m 。

总传热系数 K_l 可以认为是由油管内的对流换热、油管导热、环空内的自然对流与热辐射、套管导热、水泥环导热以及地层岩石导热 6 部分组成。可由下式表示

$$K_l = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6)^{-1} \quad (3)$$

式中, $R_1 \sim R_6$ 分别对应 6 个部分的热阻。

油管内的对流换热热阻 R_1

$$R_1 = \frac{1}{2\pi h_f r_{yi}} \quad (4)$$

式中, r_{yi} 为油管内部半径, m ; h_f 为油管内部对流换热系数, $h_f = 0.0115 Re^{0.8} Pr^{0.4} \cdot \lambda / r_{yi}^{[7]}$, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; λ 为流体的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数。

油管导热热阻 $R_2^{[7]}$

$$R_2 = \frac{\ln(r_{yo}/r_{yi})}{2\pi\lambda_y} \quad (5)$$

式中, r_{yo} 为油管外部半径, m ; λ_y 为油管的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

环空内自然对流和热辐射热阻 $R_3^{[7]}$

$$R_3 = 1/[2\pi(h_c + h_r)r_{yo}] \quad (6)$$

式中, h_c 为环空对流换热系数^[7], $h_c = 0.049\lambda_h(Gr \cdot Pr)^{1/3} Pr^{0.074} / [r_{yo} \ln(r_{ti}/r_{yo})]$, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; λ_h 为环空介质的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; Gr 为格拉晓夫数; r_{ti} 为套管内部半径, m ; h_r 为环空内部辐射传热系数^[7]

$$h_r = \sigma [(T_{yo} + 273.15)^4 - (T_{ti} + 273.15)^4] /$$

$$\left\{ (T_{yo} - T_{ti}) \left[\frac{1}{\varepsilon_{yo}} + \frac{r_{yo}}{r_{ti}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{ti}} - 1 \right) \right] \right\}$$

$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; 式中, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; T_{yo} 为油管外部壁温度, $^\circ C$; T_{ti} 为套管内部壁温度, $^\circ C$; ε_{yo} 为油管外表面黑度, 无量纲; ε_{ti} 为套管内表面黑度, 无量纲。

$R_4 \sim R_6$ 的计算同 R_2 , 只需替换成相应的半径和导热系数即可。

2 模型验证

将上述井筒传热模型应用于华北油田, 对两口井进行实例计算, 油井主要参数见表 1。认为油管、套管、水泥环和地层的导热系数是常数, 分别取 0.25, 46.2, 0.3 和 2, 量纲为 $W/(m \cdot K)$, 油管外壁和套管内壁黑度为 0.6。计算结果与实测数据对比见表 2。可以看出, 计算结果与实测数据吻合很好。

表 1 油井主要参数

油井号	1	2
产量 / ($m^3 \cdot d^{-1}$)	18.2	20
含水率 / %	79.1	94.4
井深 / m	2800	2556
地温梯度系数 / ($^{\circ}C \cdot m^{-1}$)	0.035	0.034
油管内径 / mm	62	62
环境温度 / $^{\circ}C$	0	0

表 2 结果对比

第 1 口井	实测温度 / $^{\circ}C$	计算温度 / $^{\circ}C$
停点 1(2425 m)	113.19	112.97
停点 2(2325 m)	111.16	111.38
第 2 口井	实测温度 / $^{\circ}C$	计算温度 / $^{\circ}C$
停点 1(2508 m)	104.87	104.80
停点 2(2408 m)	104.60	104.44

高, 但产量越高, 井口温度的升幅越小。原因是随产量的上升, 单位体积原油在井筒中散热减少, 从而使井筒保温能力加强。

在油田生产后期, 由于地下原油很少, 需要通过对井注水的方式将油开采上来, 导致含水率较之前期会有很大变化, 所以需要含水率的变化进行对比。图 3 为针对 3 种管径的油管模拟的井口温度随含水率的变化, 可见, 井口温度随着含水率的上升而升高, 趋于线性增长。原因是由于水的比热比油的比热大, 含水率上升导致混合物比热升高, 致使井口温度升高。

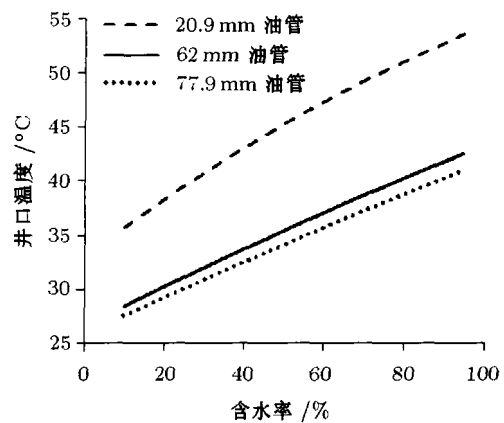


图 3 井口温度随含水率变化
(产量 $20 m^3/d$, 井深 2700 m, 地温梯度 $0.027^{\circ}C/m$)

3 影响因素分析

在保持其他条件不变的情况下, 改变某一种因素, 来观察该因素对井口温度的影响。

图 2 为针对 3 种管径的油管模拟的井口温度与产量的关系。可见, 井口温度随着产量的上升而升

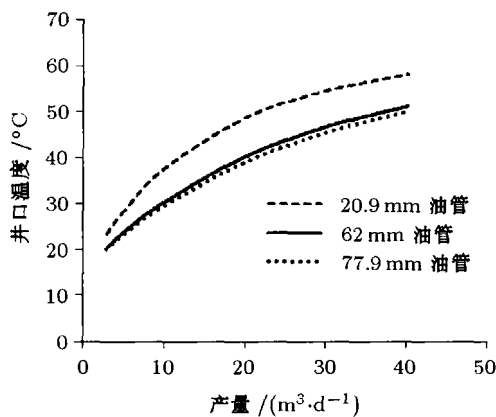


图 2 井口温度随产量变化
(井深 2000 m, 含水率 90%, 地温梯度 $0.027^{\circ}C/m$)

图 4 为针对 3 种管径的油管模拟的井口温度与井深的关系, 可见, 井口温度随着井深的增大而升高, 井越深, 井口温度的升幅越小。原因是由于原油沿径向散热量不如地层温度增幅量高, 所以越深的井, 在同深度的油液温度越高。

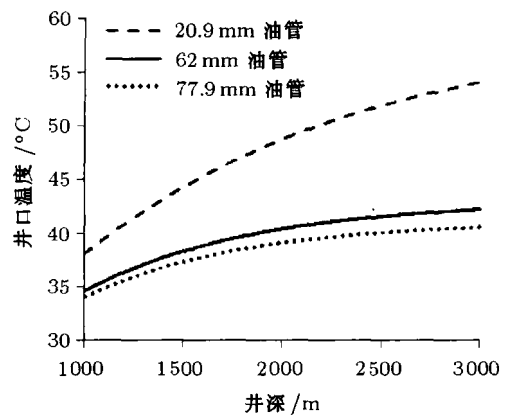


图 4 井口温度随井深变化
(产量 $20 m^3/d$, 含水率 90%, 地温梯度 $0.027^{\circ}C/m$)

不同油田的地温梯度有所不同，例如大庆油田的地温梯度约为 $0.027^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ，而华北油田的地温梯度约为 $0.035^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ，所以需要不同的地温梯度进行对比。图 5 为针对 3 种管径的油管模拟的井口温度随地温梯度的变化，可见，井口温度随着地温梯度的上升而升高，趋于线性增长。

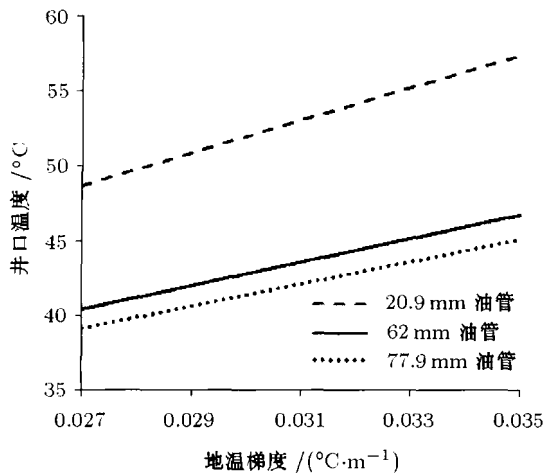


图 5 井口温度随地温梯度变化
(产量 $20\text{ m}^3/\text{d}$, 含水率 90%, 井深 2000 m)

由图 6 可见，井口温度几乎不受环境温度影响。原因是由于环境温度仅影响靠近地表的变温层，而在那一层里，原油停留时间很短，所以基本上没有影响。

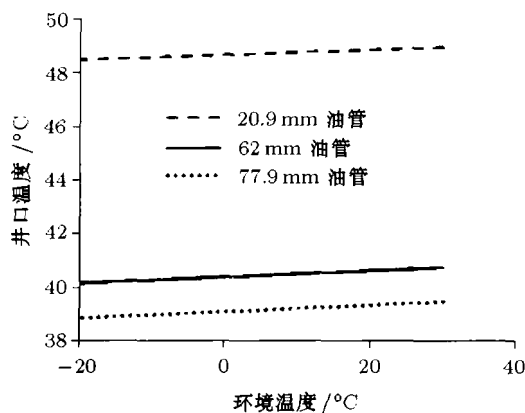


图 6 井口温度随环境温度变化
(产量 $20\text{ m}^3/\text{d}$, 含水率 90%, 井深 2000 m, 地温梯度 $0.027^{\circ}\text{C}/\text{m}$)

上述图 2~ 图 6 均给出了 3 种不同管径的油管的模拟结果，比较可以发现，油管半径越小，井口温度越高。原因是由于油管半径减小导致散热面积减小，从而使井筒保温能力加强。

4 结 论

(1) 建立了机采油井井口温度模型，模拟结果与华北油田实测数据吻合很好。

(2) 开展了井口温度的参数影响分析，结果表明，井口温度随着油井产量的升高而增高，增幅逐渐减小；含水率的提高会使井口温度升高；井深增加，井口温度升高，井越深，温度升高幅度越小；井口温度随地温梯度的升高趋于线性增长关系；井口温度基本上不受环境温度的变化影响；粗油管比细油管井口温度低。

参 考 文 献

- 1 Ramey HJJr. Well bore heat transmission. *JPT*, 1962, 14(4): 427-435
- 2 Sagar RK, Dotty DR. Predicting temperature profiles in a flowing well. Paper SPE 19702 Presented at the 1989 SPE Annual Technical Conference & Exhibition, San Antonio, TX Oct.8-11
- 3 汪泓. 电加热井的井筒温度场数学模型. *油气井测试*, 2003, 12(3): 1-4 (Wang Hong. The mathematic model of elect-heating well in the well bore temperature field. *Well Testing*, 2003, 12(3): 1-4 (in Chinese))
- 4 宋辉. 高凝稠油井瞬态温度场研究. *石油钻采工艺*, 2004, 26: 74-79 (Song Hui. Study on the transient temperature field of oil wells with highly viscous crude. *Oil Drilling & Production Technology*, 2004, 26: 74-79 (in Chinese))
- 5 石颖, 宋延杰等. 注聚合物井井下温度分布的若干影响因素分析. *测井技术*, 2008, 32(1): 18-21 (Shi Ying, Song Yanjie. Analysis on influence factors of temperature distribution in polymer injection well. *Well Logging Technology*, 2008, 32(1): 18-21 (in Chinese))
- 6 奥弗琴尼科夫著. 张介涛等译. 普通水文地质学. 北京: 地质出版社, 1960
- 7 杨世铭, 陶文铨. 传热学 (第三版). 北京: 高等教育出版社, 1998

(责任编辑: 刘俊丽)