文章编号:1673-5005(2013)06-0087-05

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2013.06.014

潜油电泵井油套环空泵下掺稀油井筒 流体温度计算模型

陈德春1,李 昂1,2,刘均荣1,朱泽军3,姜 东3

(1.中国石油大学石油工程学院,山东青岛 266580; 2.中海油能源发展股份有限公司钻采工程研究院,天津 300452;3.中国石化股份公司胜利油田分公司采油工艺研究院,山东东营 257000)

摘要:为了解决塔河油田深层稠油井筒流动性差和举升效率差等问题,结合潜油电泵排量高、使用范围广以及管理方便的特点,对潜油电泵井油套环空泵下掺稀油举升工艺进行研究和应用。综合考虑潜油电机以及电缆加热作用和掺入稀油参数的影响,基于热能守恒原理,推导潜油电泵井油套环空泵下掺稀油井筒流体温度计算模型,分析不同井口掺入稀油的温度、掺入稀油量以及掺入点深度对井筒流体温度分布的影响。结果表明:在一定的掺入点深度处,掺入稀油温度的增加,能有效增加上部和近井口处的地层产出液与掺入稀油的混合液的温度,有利于地面集输,但对近掺稀点深度处的混合液的温度影响较小;随着掺入稀油量的增加,近井口段地层产出液与掺入稀油的混合液温度增加,靠近掺稀点深度处混合液温度略有降低;增大掺稀点深度,地层产出液与掺入稀油的混合液的温度略有增加。 关键词:稠油;潜油电泵井;掺稀油;降黏;温度分布;计算模型

中图分类号:TE 355 文献标志码:A

Wellbore temperature calculation model during light oil blending in electrical submersible pump wells

CHEN De-chun¹, LI Ang^{1,2}, LIU Jun-rong¹, ZHU Ze-jun³, JIANG Dong³

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Oilfield Engineering Research Institute, CNOOC Energy Technology & Services Limited Company,

Tianjin 300452, China;

3. Oil Production Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257000, China)

Abstract: Electrical submersible pump (ESP) is efficient artificial lifting equipment, which has large discharge capacity and is convenient for application and management in different types of oil wells. An ESP combined with light oil blending technique was proposed to reduce oil viscosity and increase the mobility of fluid in the wellbore for deep and heavy oil reservoirs in Tahe Oilfield. A wellbore temperature model was established to calculate the fluid temperature in annulus after light oils were blended or injected into the wellbore for the ESP operated wells. The model was based on the energy conservation principles, considering the heating effects from ESP's motor and cable as well as the blended light oils. The influences of the injection depth, the volume and temperature of the blended light oils on wellbore fluid temperature were analyzed. The results show that, at a certain injection depth, increasing the blending oil's temperature can effectively increase the mixture's temperature above the injection point and near the wellhead, while it has little effect on the fluid temperature near the injection point, which is beneficial to the operations of surface gathering and transportation. The increase of the blended oil's volume can also increase the temperature of the mixed fluid near the wellhead, but can slightly decrease the fluid temperature near the blending depth.

Key words: heavy oil; electrical submersible pump; light oil blending; viscosity reduction; temperature distribution; calculation model

收稿日期:2013-01-17

基金项目:中国石油化工股份有限公司项目(12370502000504)

作者简介:陈德春(1969-),男,教授,博士,主要从事采油工程理论与技术研究。E-mail:chendechun2001@sina.com。

塔河油田油层埋深大、原油黏度大、开采难度 大,为改善井筒流体流动条件,采用油套环空掺稀油 降黏举升工艺技术^[15]。目前,塔河油田掺稀油潜油 电泵井 80 口,占潜油电泵井总井数的 64%。由于 掺入稀油,井筒中流体温度受到影响,且与掺入稀油 量、井口掺入稀油温度及掺稀点深度等有关,进而影 响井筒流体的流动特性和潜油电泵的工况。笔者建 立潜油电泵井油套环空泵下掺稀油井筒流体温度模 型,分析其影响因素及影响规律。

1 工艺原理

潜油电泵井油套环空泵下掺稀油举升工艺结构 如图1所示。油套环空为掺入稀油通道,油管内空 间为地层产出流体与掺入稀油的混合流体的流动通 道,掺入稀油与地层产出流体的掺入点在流体导向 护罩的最底端。







2 井筒流体温度计算模型

假设:井筒中各流体流动通道间为稳态径向传 热;电机和电缆的发热及损耗全部用于流体增温。

2.1 井底至掺入点的井筒流体温度计算模型

地层产出流体沿着井筒向上流动至掺稀点(掺 稀点深度大于下泵深度),根据能量守恒,以井底为 坐标原点,垂直向上为正^[6],建立微分方程为

$$-W_2 dt_0 = K_2 (t_0 - T_e) dl , \qquad (1)$$

$$T_{\rm e} = T_{\rm r} - ml. \tag{2}$$

式中,W₂为地层产出液的水当量,W/℃;t₀为此段

产出液的温度, \mathbb{C} ; T_e 为沿井筒地层温度, \mathbb{C} ; K_2 为 套管内地层产出液与地层的传热系数, W/(\mathbb{C} ・ m); l 为井底向上的高度, m; m 为地温梯度, \mathbb{C}/m ; T_r 为地层温度, \mathbb{C}_o 。

解微分方程(1),得

$$t_0(l) = \exp\left(-\frac{K_2}{W_2}l\right) + \frac{mW_2}{K_2} + (T_r - ml).$$
(3)

当l=0,即在井底, $t_0(0) = T_r$,求得积分常数为 $c = -mW_2/K_2$. (4)

由式(3)和式(4)得

$$t_0(l) = -\frac{mW_2}{K_2} \exp\left(-\frac{K_2}{W_2}l\right) + \frac{mW_2}{K_2} + (T_r - ml).$$
(5)

2.2 掺入点至潜油电机的井筒流体温度计算模型

地层产出液和掺入稀油的混合流体沿着井筒从 掺稀点流到潜油电机下端,此过程油套环空掺入稀 油与油管内的混合流体之间存在热交换^[6]。根据 能量守恒,以潜油电机下端为坐标原点,垂直向下为 正,建立微分方程组:

$$\int -W dt_1 = K_1 (T_1 - t_1) dl,$$
(6)

 $\left[-W_{1} dT_{1} = K_{1}(T_{1} - t_{1}) dl + K_{2} \left[T_{1} - (T_{m} + ml)\right] dl.$

式中, W_1 为掺入稀油的水当量, W/\mathbb{C} ; t_1 为此段地 层产出流体和掺入稀油的混合流体的温度, \mathbb{C} ; W为地层产出液与掺入稀油的混合流体的水当量, W/\mathbb{C} ; T_1 为此段掺入稀油的温度, \mathbb{C} ; K_1 为油管内 外的传热系数, $W/(\mathbb{C} \cdot \mathbf{m})$; T_m 为潜油电机下端处 的地层温度, \mathbb{C} 。

万程(6) 的解为

$$\begin{cases}
t_1(l) = C_1 \exp(r_1 l) + C_2 \exp(r_2 l) + T_m + ml - m\left(\frac{W_1}{K_2} - W\frac{K_1 + K_2}{K_1 K_2}\right), \\
T_1(l) = \left(1 - \frac{W}{K_1} r_1\right) C_1 \exp(r_1 l) + \left(1 - \frac{W}{K_2} r_2\right) C_2 \exp(r_2 l) + T_m + ml + m\frac{W - W_1}{K_2}.
\end{cases}$$
(7)

其中

$$r_{1} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{K_{1}}{W} - \frac{K_{1} + K_{2}}{W_{1}} \right) + \sqrt{\left(\frac{K_{1}}{W} - \frac{K_{1} + K_{2}}{W_{1}} \right)^{2} + \frac{4K_{1}K_{2}}{WW_{1}}} \right],$$

$$r_{2} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{K_{1}}{W} - \frac{K_{1} + K_{2}}{W_{1}} \right) - \sqrt{\left(\frac{K_{1}}{W} - \frac{K_{1} + K_{2}}{W_{1}} \right)^{2} + \frac{4K_{1}K_{2}}{WW_{1}}} \right].$$

$$id \mathcal{B} \mathcal{R} \mathcal{H} \mathcal{B}$$

$$\begin{cases} \frac{W_{1}T_{1}(L_{\text{pipe}}) + W_{2}t_{0}(H_{1})}{W} = t_{1}(L_{\text{pipe}}), \\ T_{2}(L_{p}) = T_{1}(0). \end{cases}$$
(8)

式中,H₁为油管底端至井底的距离,m;L_{pipe}为尾管

长度(即掺稀点至电机最底端的距离),m;L_p为泵 体段的长度,m。

其中, $T_2(L_p)$ 可由公式(12)求得, C_1 与 C_2 的值 可由边界条件决定。

2.3 泵出口处流体温度计算模型

潜油电泵泵出口流体的温度变化分3部分:电 机发热;电缆的散热;泵自身由于机械损失、水力损 失和容积损失而产生的增温。由于潜油电机相对较 短,因此简化为加热点。

2.3.1 潜油电机发热

因为产出液流经电机表面会吸收电机的发 热^[7],电机发热使流体升温。根据能量守恒定律有

$$t_{ad} = N_m (1 - \eta_m) / W.$$
 (9)
式中, t_{ad} 为电机发热使流体的升温, \mathbb{C} ; N_m 为电机功率, W ; η_m 为电机效率。

则泵入口的温度为

 $t_{\rm pr} = t_{\rm mr} + t_{\rm ad}$. (10) 式中, $t_{\rm mr}$ 为地层产出液与掺入稀油的混合流体到达 机组前的温度,由式(7)求得,℃。

2.3.2 泵体段流体温度计算模型

在泵体段,小扁电缆对泵体内的流体以及环空中 的流体有加热作用。根据能量守恒定律,以泵出口为 坐标原点,垂直向下为正,泵体段温度的微分方程为

$$\begin{cases} -W_{dt_{2}} = K_{p}(T_{2}-t_{2}) dl + (\alpha q_{x}+WT_{B}) dl, \\ -W_{1} dT_{2} = K_{p}(T_{2}-t_{2}) dl + K_{2} [T_{2}-(T_{p}+ml)] dl - (1-\alpha) q_{x} dl. \end{cases}$$
(11)

其中

$$T_{\rm B} = 4.672 \times 10^{-3} \frac{D}{L_{\rm p}} \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)$$

式中, K_p 为泵体内外的传热系数, $W/(\mathbb{C} \cdot m)$; α 为 小扁电缆作用于泵内流体的加热比例系数; t_2 为此 段地层产出液与掺入稀油的混合流体的温度, \mathbb{C} ; T_2 为此段掺入稀油的温度, \mathbb{C} ; T_p 为泵入口处的地层 温度, \mathbb{C} ; q_x 为单位长度小扁电缆发热量,W/m;D为泵的有效扬程,m; η 为潜油电泵的效率。

方程(11)的解为

$$\begin{cases} t_{2}(l) = C_{3} \exp(r_{3}l) + C_{4} \exp(r_{4}l) + ml + T_{p} - m\left(\frac{W_{1}}{K_{2}} - \frac{K_{p} + K_{2}}{K_{p}K_{2}}W\right) + \frac{\alpha K_{2}q_{x} + K_{p}q_{x} + WT_{B}(K_{p} + K_{2})}{K_{p}K_{2}}, \\ T_{2}(l) = \left(1 - \frac{W}{K_{p}}r_{3}\right)C_{3} \exp(r_{3}l) + \left(1 - \frac{W}{K_{p}}r_{4}\right) \times C_{3} \exp(r_{4}l) + ml + T_{p} + \frac{m(W - W_{1})}{K_{2}} + \frac{q_{x} + WT_{B}}{K_{2}}. \end{cases}$$

$$(12)$$

其中

$$\begin{split} r_{3} &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{K_{p}}{W} - \frac{K_{p} + K_{2}}{W_{1}} \right) + \sqrt{\left(\frac{K_{p}}{W} - \frac{K_{p} + K_{2}}{W_{1}} \right)^{2} + \frac{4K_{p}K_{2}}{W_{1}W}} \right], \\ r_{4} &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{K_{p}}{W} - \frac{K_{p} + K_{2}}{W_{1}} \right) - \sqrt{\left(\frac{K_{p}}{W} - \frac{K_{p} + K_{2}}{W_{1}} \right)^{2} + \frac{4K_{p}K_{2}}{W_{1}W}} \right]. \\ & \dot{U} \,\mathcal{R} \,\mathcal{R} \,\mathcal{H} \,\mathcal{H} \end{split}$$

 $t_2(L_p) = t_1(0) + t_{ad}, T_2(0) = T_3(H_p).$ (13) 式中, H_p 为下泵深度, m_o

其中, $t_1(0)$ 和 $T_3(H_p)$ 可分别由式(7)和(15)求得, C_3 与 C_4 的值可由边界条件确定。

2.4 泵出口至井口段的温度计算

由泵出口至井口段,大扁电缆对油管内流体以 及环空内的流体都有加热作用。根据能量守恒定 律,以井口为原点、垂直向下为正建立的微分方程为

$$\begin{cases} -W dt_{3} = K_{1}(T_{3} - t_{3}) dl + \beta q_{d} dl, \\ -W_{1} dT_{3} = K_{1}(T_{3} - t_{3}) dl + K_{2}[T_{3} - (14)] (T_{0} + ml)] dl - (1 - \beta) q_{d} dl. \end{cases}$$

式中, β 为大扁电缆作用于油管内流体的加热比例 系数; t_3 为此段地层产出液与掺入稀油的混合流体 温度, \mathbb{C} ; T_3 为此段掺入稀油的温度, \mathbb{C} ; q_d 为单位 长度大扁电缆发热量,W/m; T_0 为恒温层温度, \mathbb{C} 。

方程(14)的解为

$$\begin{cases} t_{3}(l) = C_{5} \exp(r_{5}l) + C_{6} \exp(r_{6}l) + ml + T_{0} - m \left(\frac{W_{1}}{K_{2}} - \frac{K_{1} + K_{2}}{K_{1}K_{2}}W\right) + \frac{\beta K_{2}q_{d} + K_{1}q_{d}}{K_{1}K_{2}}, \\ T_{3}(l) = \left(1 - \frac{W}{K_{1}}r_{5}\right)C_{5} \exp(r_{5}l) + \left(1 - \frac{W}{K_{1}}r_{6}\right)C_{6}\exp(r_{6}l) + ml + T_{0} + \frac{m(W - W_{1})}{K_{2}} + \frac{q_{d}}{K_{2}}. \end{cases}$$

$$(15)$$

边界条件为

$$t_2(0) = t_3(H_p)$$
, $T_3(0) = T_{inj}$. (16)

式中, T_{inj} 为井口注入稀油的温度, \mathbb{C} 。

其中,*r*₅和 *r*₆计算同 *r*₁和 *r*₂,*t*₂(0)可由公式 (12)求得,*C*₅与 *C*₆的值可由边界条件确定。

3 计算分析

某油井井深 5.0 km, 潜油电泵下入深度为 2.0 km, 尾管长 30 m, 套管内径为 0.139 m, 外径为 0.177 m, 油管内径为 0.076 m, 外径为 0.089 m, 潜 油电机功率为 11 kW, 地层温度为 128 ℃, 地温梯度 为 0.022 ℃/m, 泵体段长 20 m, 小扁电缆阻值为 0.0015 Ω/m,大扁电缆阻值为0.001 Ω/m,电机效 率为90%,掺入稀油的比热容为2093.4 J/(kg ·℃),密度为850 kg/m³,地层产出液的比热容为 2093.4 J/(kg·℃),密度为950 kg/m³,产出液量 为100 t/d。

3.1 井筒温度分布

当井口掺入稀油的温度为40℃,循环点为 2.05 km,掺入稀油量为80 t/d时,该油井井筒内流 体温度分布如图2所示。





图 2 中曲线 1 的 AC 段为掺稀点以下地层产出 液的温度分布; CD 段为掺稀点深度至电机底端的地 层产出液与掺入稀油的混合流体的温度分布; DE 段 为潜油电泵内流体的温度分布; EF 段为泵入口至井 口段的地层产出液与掺入稀油的混合流体的温度分 布。其中 BC 段的温度跳跃是因为在 C 点(掺稀点) 掺入了稀油, DE 段的温度变化是电机加热、小扁电 缆发热以及泵自身增温作用所致。

3.2 掺稀油参数的敏感性

3.2.1 井口掺入稀油温度

循环点为2.05 km,掺入稀油量为80 t/d,计算 不同井口掺入稀油温度(*T*_{xy})下井筒内地层产出液 与掺入稀油混合液的温度分布,结果如图3所示。 随井口掺入稀油温度的升高,掺稀点至井深700 m 段的混合液的温度变化不大,靠近井口处混合液温 度升高。

3.2.2 掺入稀油量

井口掺入稀油温度为40℃,循环点为2.05

km,计算不同掺入稀油量(*Q*_{xy})下井筒内地层产出 液与掺入稀油的混合流体的温度分布,结果如图 4 所示。随掺入稀油量的增加,近井口段混合流体的 温度增加,靠近掺稀点处混合流体的温度略有降低。 这是由于掺入稀油的温度低,在靠近循环处地层产 出液温度高于掺入稀油的温度,混合液通过散热作 用加热掺入的稀油,并且随着掺入稀油量的增加,散 失的热量也增加,温度降低。



Fig. 3 Temperature distribution of output fluid under different temperature of blending light hydrocarbon



图 4 不同掺入稀油量条件下产出液的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of output fluid under

different volume of blending light hydrocarbon

3.2.3 掺入点深度

井口掺入稀油温度为40℃,掺入稀油量为 80 t/d,计算不同循环点深度(H_{xh})下井筒内地层 产出液与掺入稀油的混合流体的温度分布,结果 如图 5 所示。随循环深度增加,地层产出液与掺 入稀油的混合流体温度升高,但是增温较小。



图 5 不同掺稀深度条件下产出液的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of output fluid under different diluting depth

3.2.4 电缆加热比例系数

井口掺入稀油的温度为40℃,循环点为2.05 km,掺入稀油量为80 t/d时,电缆加热比例系数分 别为0.2、0.5和0.8,井口、井深1.0 km和循环点深 度处的流体温度如表1所示。从表1可以看出,不 同加热系数对油管内地层产出液与掺入稀油的混合 流体及油套环空中掺入稀油的温度影响较小。

表1 不同加热系数条件下井筒流体温度

 Table 1
 Temperature of wellbore fluid under different heating coefficient

井深	掺入稀油温度 T_{exy}/\mathbb{C}			混合产出液温度 T _{ccy} /℃		
km	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
0	40	40	40	46.67	46.81	46.96
1.00	59.21	59.12	59.02	67.11	67.17	67.23
2.05	79.46	79.27	79.09	81.17	81.09	81.01

4 结 论

(1)提高掺入稀油温度,靠近掺稀点处的地层 产出液与掺入稀油的混合流体的温度变化不大,靠 近井口处混合流体的温度明显增加,有利于地面集 输。

(2)随掺入稀油量的增加,近井口段地层产出 液与掺入稀油的混合流体的温度升高,靠近掺稀点 处混合流体的温度略有降低。

(3) 增大掺稀点深度可以提高地层产出液与掺

入稀油的混合流体的的温度,但是增温作用较小。

(4)改变电缆加热比例系数对井筒中流体温度 分布影响较小。

参考文献:

- [1] 王世洁,林江,梁尚斌. 塔河油田碳酸盐岩深层稠油 油藏开发实践[M]. 北京:中国石化出版社,2005.
- [2] 邬军,曹少余,刘文. 超深稠油电潜泵提液采油技术应用效果评价[J]. 吐哈油气, 2008,13(4):362-365.
 WU Jun, CAO Shao-yu, LIU Wen. Evaluation of application effect of raising-fluid recovery technology by electric submersible pump used in ultra-deep viscosity oil [J]. Tuha Oil & Gas, 2008,13(4):362-365.
- [3] 蒋勇. 稠油井掺稀降粘试油工艺技术在塔河油田的应用[J]. 油气井测试, 2004,13(4):73-74.
 JIANG Yong. Application of blending light dropping viscosity testing technology for heavy oil well in Tahe Oilfield [J]. Well Testing, 2004,13(4):73-74.
- [4] 林日亿,李兆敏,王景瑞,等. 塔河油田超深井井筒掺
 稀降粘技术研究[J]. 石油学报,2006,27(3):115-119.

LIN Ri-yi, LI Zhao-min, WANG Jing-rui, et al. Technology of blending diluting oil in ultra-deep wellbore of Tahe Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006,27(3): 115-119.

- [5] 曲占庆,邢建华,张红玲,等. 深层稠油掺稀油举升方法研究[J].油气采收率技术,2000,7(3):26-28.
 QU Zhan-qing, XING Jian-hua, ZHANG Hong-ling, et al. Study of mixing light hydrocarbon in deep heavy oil [J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2000,7(3):26-28.
- [6] 任瑛,梁金国. 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] 王杰祥,张红,樊泽霞,等. 电潜泵井井筒温度分布模型的建立及应用[J]. 石油大学学报:自然科学版,2003,27(5):54-55,59.
 WANG Jie-xiang, ZHANG Hong, FAN Ze-xia, et al. Modeling of temperature distribution in well bore with electric submersible pump[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003,27 (5):54-55, 59.

(编辑 李志芬)