

# 海洋关井井筒温度场瞬态模型

宋洵成<sup>1</sup>, 韦龙贵<sup>2</sup>, 何连<sup>2</sup>, 郭永宾<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057)

**摘要:**基于油井关井期间换热机制,对井筒内区域、界面区(井筒与地层/海水的交界面)和地层分别建立温度控制方程。根据下入保温油管的生产管柱结构和井筒换热物理模型几何特征,应用交替方向全隐式离散技术,对井筒内轴线节点、油管底部节点、内节点和井筒/海水界面等单独离散,建立稳定、收敛的瞬态温度场数值求解方法。结果表明,关井后初始阶段产液温度下降速率大,随关井时间延长,产液温度下降速率逐渐降低,关井24 h后受井筒内产液影响的径向区域半径小于3 m,关井106.1 h后井筒及周围地层温度恢复到原始温度。南海实例井模拟结果与实测数据相对误差小于3%。

**关键词:**钻井; 海洋; 瞬态温度场; 关井; 保温油管

**中图分类号:**TE 142 **文献标志码:**A

## Transient temperature field model of shut-in offshore wells

SONG Xun-cheng<sup>1</sup>, WEI Long-gui<sup>2</sup>, HE Lian<sup>2</sup>, GUO Yong-bin<sup>2</sup>

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

2. Zhanjiang Branch Company, China National Ocean Oil Corporation, Zhanjiang 524057, China)

**Abstract:** Based on transient heat transfer mechanism involved in shut-in offshore oil wells, the temperature governing equations for areas including inside the wellbore, interface between the wellbore and sea water or formation, and formation were developed. According to production tubing structure and the geometry characteristics of wellbore heat transfer physical model, discrete equations for nodes at wellbore axis, oil tubing bottom, inner area and interface between wellbore and sea water were established respectively using implicit finite volume patterns and the alternate-direction method. A stable and convergent numerical simulation method was proposed to solve transient temperature field. The results show that the wellbore temperature decreases rapidly at the initial stage, and then it decreases slowly with shut-in periods extending. In addition, the affected radius is less than 3 m after shut-in 24 h, and the wholesome temperature field is recovered to the origin one after shut-in about 106.1 h. The relative error between simulated results and test data of a cased well in South China Sea is less than 3%.

**Key words:** drilling; offshore; transient temperature field; shut-in; insulated oil tubing

在生产管柱上部采用真空保温油管可以使油井生产期间的液流温度高于析蜡点,从而避免原油析出蜡晶和结蜡。遇台风等恶劣天气时油井关停,产液通过生产管柱和井筒介质与地层发生瞬态热交换,不断变化的温度场对分析关井期间油井产液黏度、产液析蜡特性和制定紧急情况清防蜡措施具有重要意义。笔者采用瞬态换热模型<sup>[1-7]</sup>和方法,通过对海洋生产井筒换热区域进行二维离散,陆地与海

洋区域耦合<sup>[8]</sup>,利用数值模拟技术分析关井期间井筒温度场分布及演变过程。

## 1 物理模型

油井关井期间,产液在井筒内保持静止状态,依据传热过程,将模型求解区域划分为3个区:①井筒内区域(最外层套管内区域);②界面区,井筒与地层/海水的交界面;③地层区。如图1所示。

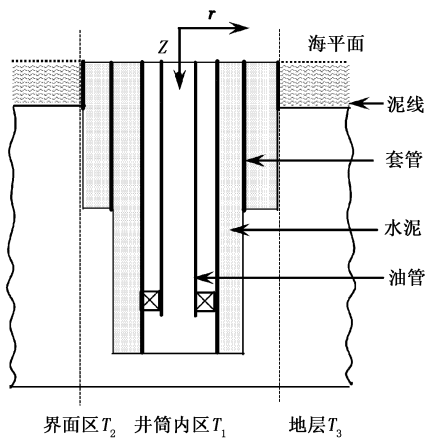


图 1 海洋关井井筒传热模型

Fig. 1 Heat transfer model of offshore shut-in wellbore

## 2 数学模型

假设:井筒内为轴向和径向二维传导换热;地层以井筒轴线为中心轴对称分布,地层内为二维传热,同深度地层均质;海水以井筒轴线为中心轴对称分布,考虑海水与隔水管的强迫对流换热;产液热物性受温度影响而变化。

以油管中心线为圆柱坐标  $Z$  轴,方向向下,建立轴对称圆柱坐标系,取微元控制体如图 2 所示。微元控制体发生的能量传递过程有: $Z$  方向的传导换热  $Q_{zi}$  和  $Q_{zo}$ ;  $r$  方向的传导换热  $Q_{ri}$  和  $Q_{ro}$ 。

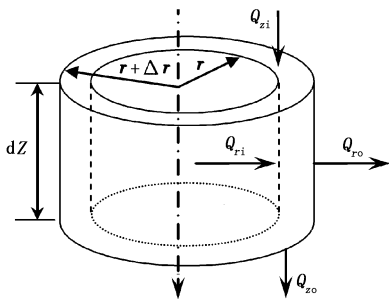


图 2 圆柱坐标微元控制体能量守恒模型

Fig. 2 Energy conservation model for cylinder coordinate infinite control volume

能量守恒原理可表述为

$$Q_{zi} - Q_{zo} + Q_{ri} - Q_{ro} = \Delta Q.$$

式中,  $Q_{zi}$  和  $Q_{zo}$  分别为  $Z$  方向传导入和传导出控制体的热量;  $Q_{ri}$  和  $Q_{ro}$  分别为  $r$  方向传导入和传导出控制体的热量;  $\Delta Q$  为单位时间控制体内能增加量。

推得温度控制方程为

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left( k \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为介质密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $T$  为介质温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $K$  为介质热导率,  $\text{W}/\text{m}/\text{K}$ ;  $c_p$  为质量定压热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $t$  为关井时间,  $\text{s}$ ;  $Z$  为轴向坐标,  $\text{m}$ ;  $r$  为径向坐标,  $\text{m}$ 。介质为油管内产液时,考虑温度压力和气体含气率情况下的产液平均密度  $\rho = \rho_g F_g + \rho_l(1 - F_g)$ , 其中原油、天然气和地层水的密度根据相应状态方程求取,体积含气率则结合文献[9]中溶解气油比方法求取。

## 3 控制方程离散

用有限体积法对控制方程进行离散。通过将控制方程对节点的控制域积分,获得守恒型的离散方程。每个节点的离散方程涉及到 5 个节点,有 5 个未知温度,待解方程组矩阵庞大,求解复杂。为提高求解效率、稳定性和收敛性,采用交替方向法离散和求解。

### 3.1 网格剖分

在图 1 所示的物理模型所划分的 3 个计算区域内,轴向方向上将井筒和地层根据换热介质和井身结构分段,按间距  $\Delta Z$  划分网格,节点位于网格中心,不同井段的  $\Delta Z$  也不同;径向方向上,油管内、油管管体、油管/生产套管环空、井壁(水泥、地层或隔水管)4 个计算区域内各只有一个节点,地层内按照径向步长逐渐增大原则划分节点。

### 3.2 控制体界面热导率和温度梯度

内节点  $(i, j)$  及控制体如图 3 所示。其与上下节点的控制体界面为  $U$  和  $D$ ,与内外节点的控制体界面为  $W$  和  $E$ 。将温度控制方程对控制体积分时,考虑到井筒内轴线方向和径向方向上节点介质不同和节点间距不同,为确保所有控制体界面的热通量相等,需要采取调和平均处理界面热导率和温度梯度。

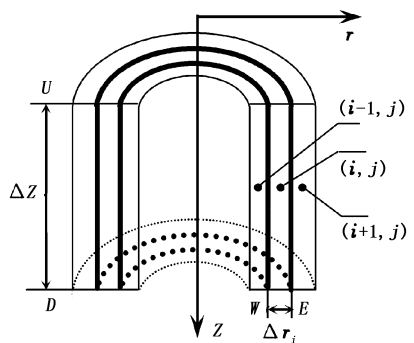


图 3 内节点网格控制体

Fig. 3 Grid control volume of internal node

(1) 界面热导率。采取调和平均处理界面处复

合材料的热导率  $k_0$ 。

U 界面处:

$$k_{i,j-1/2} = \left( \frac{1-f_U}{k_{i,j-1}} + \frac{f_U}{k_{i,j}} \right)^{-1}, f_U = \frac{\Delta Z_{i,j}}{\Delta Z_{i,j} + \Delta Z_{i,j-1}} \quad (2)$$

D 界面处:

$$k_{i,j+1/2} = \left( \frac{1-f_D}{k_{i,j+1}} + \frac{f_D}{k_{i,j}} \right)^{-1}, f_D = \frac{\Delta Z_{i,j}}{\Delta Z_{i,j} + \Delta Z_{i,j+1}} \quad (3)$$

W 界面处:

$$k_{i-1/2,j} = \left( \frac{1-f_W}{k_{i-1,j}} + \frac{f_W}{k_{i,j}} \right)^{-1}, f_W = \frac{\Delta r_{i,j}}{\Delta r_{i,j} + \Delta r_{i-1,j}} \quad (4)$$

E 界面处:

$$k_{i+1/2,j} = \left( \frac{1-f_E}{k_{i+1,j}} + \frac{f_E}{k_{i,j}} \right)^{-1}, f_E = \frac{\Delta r_{i,j}}{\Delta r_{i,j} + \Delta r_{i+1,j}} \quad (5)$$

(2) 界面温度梯度。对节点控制体上下界面处按照线性分布假设温度在节点间的变化,也就是在界面处的温度梯度取相邻节点的线性平均。

U 界面处:

$$\frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{T_{i,j}^{m+1} - T_{i,j-1}^{m+1}}{Z_{i,j} - Z_{i,j-1}} \quad (6)$$

D 界面处:

$$\frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{T_{i,j+1}^{m+1} - T_{i,j}^{m+1}}{Z_{i,j+1} - Z_{i,j}} \quad (7)$$

W、E 两个界面处的温度梯度按照假设圆柱体径向节点间温度为线性平均分布处理。

W 界面处:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_{i,j}^{m+1} - T_{i-1,j}^{m+1}}{r_{i,j} - r_{i-1,j}} \quad (8)$$

E 界面处:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_{i+1,j}^{m+1} - T_{i,j}^{m+1}}{r_{i+1,j} - r_{i,j}} \quad (9)$$

### 3.3 内节点离散方程

将温度控制方程(1)两边同乘以  $r$ ,并在整个控制容积范围内对  $r, \theta, Z$  进行体积积分和时间积分。

(1)  $Z$  方向隐式,  $r$  方向显式。

$$A_{i,j-1} T_{i,j-1}^{m+1/2} + B_{i,j} T_{i,j}^{m+1/2} + C_{i,j+1} T_{i,j+1}^{m+1/2} = D_{i+1,j} T_{i+1,j}^m + D_{i-1,j} T_{i-1,j}^m + D_{i,j}^0 T_{i,j}^m \quad (10)$$

其中

$$A_{i,j-1} = -\frac{k_{i,j-1/2} r_{i,j} \Delta r_{i,j} \Delta t}{Z_{i,j} - Z_{i,j-1}},$$

$$B_{i,j} = D_{i-1,j} + D_{i+1,j} - A_{i,j-1} - C_{i,j+1} + D_{i,j}^0,$$

$$C_{i,j+1} = \frac{-k_{i,j+1/2} r_{i,j} \Delta r_{i,j} \Delta t}{Z_{i,j+1} - Z_{i,j}}, D_{i-1,j} = \frac{k_{i-1/2,j} \Delta Z_{i,j} r_W \Delta t}{r_{i,j} - r_{i-1,j}},$$

$$D_{i+1,j} = \frac{k_{i+1/2,j} \Delta Z_{i,j} r_E \Delta t}{r_{i+1,j} - r_{i,j}}, D_{i,j}^0 = \rho_{i,j} c_{i,j} \Delta r_{i,j} r_{i,j} \Delta Z_{i,j}.$$

(2)  $r$  方向隐式,  $Z$  方向显式。

$$A_{i-1,j} T_{i-1,j}^{m+1} + B_{i,j} T_{i,j}^{m+1} + C_{i+1,j} T_{i+1,j}^{m+1} = D_{i,j+1} T_{i,j+1}^{m+1/2} + D_{i,j-1} T_{i,j-1}^{m+1/2} + D_{i,j}^0 T_{i,j}^m \quad (11)$$

其中

$$B_{i,j} = -A_{i-1,j} - C_{i+1,j} + D_{i,j-1} + D_{i,j+1} + D_{i,j}^0,$$

$$A_{i-1,j} = \frac{-k_{i-1/2,j} \Delta Z_{i,j} r_W \Delta t}{r_{i,j} - r_{i-1,j}},$$

$$C_{i+1,j} = \frac{-k_{i+1/2,j} \Delta Z_{i,j} r_E \Delta t}{r_{i+1,j} - r_{i,j}},$$

$$D_{i,j-1} = \frac{k_{i,j-1/2} r_{i,j} \Delta r_{i,j} \Delta t}{Z_{i,j} - Z_{i,j-1}}, D_{i,j+1} = \frac{k_{i,j+1/2} r_{i,j} \Delta r_{i,j} \Delta t}{Z_{i,j+1} - Z_{i,j}},$$

$$D_{i,j}^0 = \rho_{i,j} c_{i,j} \Delta r_{i,j} r_{i,j} \Delta Z_{i,j}.$$

### 3.4 轴线节点离散方程

对于轴线处节点,径向坐标为 0,无法应用内节点的离散方程,故需要根据传热机制,结合边界条件<sup>[10]</sup>,单独建立轴线处节点的离散方程。

(1)  $Z$  方向隐式,  $r$  方向显式。

$$A_{1,j-1} T_{1,j-1}^{m+1/2} + B_{1,j} T_{1,j}^{m+1/2} + C_{1,j+1} T_{1,j+1}^{m+1/2} = D_{2,j} T_{2,j}^m + D_{1,j}^0 T_{1,j}^m \quad (12)$$

其中

$$A_{1,j-1} = -\frac{k_{1,j-1/2} \Delta r_{1,j}^2 \Delta t}{Z_{1,j} - Z_{1,j-1}}, B_{1,j} = D_{2,j} - A_{1,j-1} - C_{1,j+1} + D_{1,j}^0,$$

$$C_{1,j+1} = \frac{k_{1,j+1/2} \Delta r_{1,j}^2 \Delta t}{Z_{1,j+1} - Z_{1,j}},$$

$$D_{2,j} = \frac{4k_{1+1/2,j} \Delta Z_{1,j} \Delta r_{1,j} \Delta t}{r_{2,j}}, D_{1,j}^0 = \rho_{1,j} c_{1,j} \Delta r_{1,j}^2 \Delta Z_{1,j}.$$

(2)  $r$  方向隐式,  $Z$  方向显式。

$$B_{1,j} T_{1,j}^{m+1} + C_{2,j} T_{2,j}^{m+1} = D_{1,j+1} T_{1,j+1}^{m+1/2} + D_{1,j-1} T_{1,j-1}^{m+1/2} + D_{1,j}^0 T_{1,j}^m \quad (13)$$

其中

$$B_{1,j} = -C_{2,j} + D_{1,j-1} + D_{1,j+1} + D_{1,j}^0,$$

$$C_{2,j} = -\frac{4k_{1+1/2,j} \Delta Z_{1,j} \Delta r_{1,j} \Delta t}{r_{2,j}},$$

$$D_{1,j-1} = \frac{k_{1,j-1/2} \Delta r_{1,j}^2 \Delta t}{Z_{1,j} - Z_{1,j-1}}, D_{1,j+1} = \frac{k_{1,j+1/2} \Delta r_{1,j}^2 \Delta t}{Z_{1,j+1} - Z_{1,j}},$$

$$D_{1,j}^0 = \rho_{1,j} c_{1,j} \Delta r_{1,j}^2 \Delta Z_{1,j}.$$

### 3.5 油管底部节点离散方程

油井中的油管下入到电潜泵位置,淹没在生产套管内的产液中,该轴向位置处存在油管产液节点、油管管壁节点、油套环空中产液节点和生产套管内的产液节点。油管底部节点划分见图 4。

对  $j=N$  的油管底部 3 个节点(1,  $N$ )、(2,  $N$ )、(3,  $N$ ),离散方程不变,进行离散方程求解时可假设下方存在一个虚拟节点,节点介质为产液,节点温度为生产套管内  $j=N+1$  点产液温度。

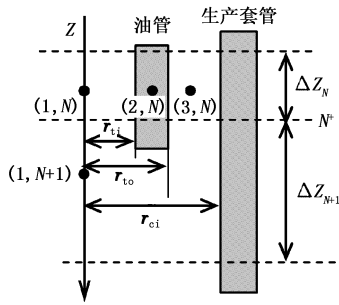


图 4 油管底部节点划分示意图

Fig. 4 Sketch map of grid alignment in oil tubing bottom

对生产套管内  $j=N+1$  的产液节点,利用温度控制方程对其控制容积积分时,  $N^+$  界面处轴向热传导涉及  $j=N$  处 3 个节点。积分后的离散方程为

$$\begin{aligned} & \rho_{1,j} c_{1,j} (T_{1,j}^{n+1} - T_{1,j}^n) \Delta r_{1,j}^2 \Delta Z_{1,j} = k_{1,N+1+1/2} \frac{T_{1,N+2}^{n+1} - T_{1,N+1}^{n+1}}{Z_{1,N+2} - Z_{1,N+1}} \times \\ & \Delta r_{1,N+1}^2 \Delta t - k_{1,N+1-1/2} \frac{T_{1,N+1}^{n+1} - T_{1,N}^{n+1}}{Z_{1,N+1} - Z_{1,N}} \Delta r_{1,N}^2 \Delta t - \\ & k'_{1,N+1-1/2} \frac{T_{1,N+1}^{n+1} - T_{2,N}^{n+1}}{Z_{1,N+1} - Z_{1,N}} 2r_{2,N} \Delta r_{2,N} \Delta t - \\ & k''_{1,N+1-1/2} \frac{T_{1,N+1}^{n+1} - T_{3,N}^{n+1}}{Z_{1,N+1} - Z_{1,N}} 2r_{3,N} \Delta r_{3,N} \Delta t + \\ & 4\Delta Z_{1,j} \Delta t k_{1+1/2,j} \Delta r_{1,j} \frac{T_{2,j}^{n+1} - T_{1,j}^{n+1}}{r_{2,j}} \end{aligned} \quad (14)$$

式中,  $k'_{1,N+1-1/2}$  为根据节点 (1,  $N+1$ ) 和节点 (2,  $N$ ) 参数计算出的在界面  $N^+$  处热导率;  $k''_{1,N+1-1/2}$  为根据节点 (1,  $N+1$ ) 和节点 (3,  $N$ ) 参数计算出的界面  $N^+$  处热导率。

### 3.6 井筒与海水、地层界面离散方程

井筒与海水界面处节点和井筒与地层界面处节点的径向位置记为  $J$ , 海水段界面处温度控制方程离散为

$$-k_{J,i} \frac{(T_{J,i}^{n+1} - T_{J-1,i}^{n+1})}{r_{J,i} - r_{J-1,i}} = h_{w,J} (T_{J,i}^{n+1} - T_{w,J}). \quad (15)$$

地层段界面处温度控制方程离散为

$$-k_{J-1,i} \frac{(T_{J,i}^{n+1} - T_{J-1,i}^{n+1})}{r_{J,i} - r_{J-1,i}} = -k_{J+1,i} \frac{(T_{J+1,i}^{n+1} - T_{J,i}^{n+1})}{r_{J+1,i} - r_{J,i}}. \quad (16)$$

## 4 初边值条件

(1) 初始条件。停产后的初始条件应为停产时刻井下温度场分布, 有

$$T_0 = T \Big|_{t=t_0}. \quad (17)$$

(2) 边界条件。

①海平面处边界条件。假定井筒换热区顶边界为绝热, 有边界条件:

$$\frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=0} = 0. \quad (18)$$

②井底边界条件。在井底增加一组节点, 以真实模拟轴向热传导, 使增加的这一组节点温度等于原始地层温度, 有边界条件:

$$T \Big|_{Z=Z_{\max}} = T_f \Big|_{Z=Z_{\max}}. \quad (19)$$

式中,  $T_f \Big|_{Z=Z_{\max}}$  为增加的节点垂深对应的原始地层温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

③井筒轴线网格节点。

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (20)$$

④距井筒径向无穷远处地层的边界条件。距离井筒无穷远处地层的温度受井筒内流体温度的影响很小, 或者基本不受影响, 故维持地温状态不变, 有

$$T \Big|_{r=r_{\max}} = T_r. \quad (21)$$

⑤海水段隔水管外壁面节点。海水段隔水管外壁面与海水发生横掠圆管强迫对流换热, 径向上隔水管管径径向热流量等于管壁与海水的强迫对流换热量, 有

$$-k_r \left( \frac{\partial T_r}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_r} = h_w (T_r - T_w). \quad (22)$$

式中,  $r_r$  为隔水管外半径,  $\text{m}$ ;  $h_w$  为海水与隔水管的对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $T_r$  为隔水管外壁面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_w$  为海水温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

## 5 实例计算

南海 A 生产井, 海水深 36 m, 海面温度  $28^{\circ}\text{C}$ , 产层温度  $115.20^{\circ}\text{C}$ , 产层压力 18.9 MPa, 井底流压 14.45 MPa, 日产原油  $59.74 \text{ m}^3$ , 产气  $1228.60 \text{ m}^3$ , 产水  $0.21 \text{ m}^3$ 。原油黏度  $1.26 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , 原油析蜡点  $59.8^{\circ}\text{C}$ , 泵挂深度 2.6 km。井身结构见表 1, 生产管柱由 11.43 cm 真空隔热保温油管 (内径 7.599 68 cm, 热导率为  $0.02 \text{ W}/\text{m}/\text{K}$ , 下深 1.098 km) 和 8.89 cm API 油管组成。关井后, 由于井底有单向阀, 故液面基本保持在井口。

表 1 A 井井身结构

Table 1 Casing schematics of well A

管柱类型	外径 $d_o/\text{m}$	井眼尺寸 $d_w/\text{m}$	井段/ $\text{m}$	水泥返高 $h/\text{m}$
隔水管	0.610		0~66	
表层套管	0.340	0.444	0~1351	36
技术套管	0.244	0.311	0~3131	1831
打孔尾管	0.178	0.216	2981~3852	

为验证模型的有效性,在该井200、400、800、1000和1400 m处设置了温度传感器,关井12 h后实测温度与理论模拟温度见表2。

表2 关井12 h 实测温度与模拟温度对比

Table 2 Comparisons between simulation and measured temperatures after shut-in 12 h

位置/m	实测温度 $T_m/^\circ\text{C}$	模拟温度 $T_s/^\circ\text{C}$	相对误差 $R/\%$
200	52.60	51.74	1.63
400	58.00	56.48	2.62
800	66.20	64.60	2.42
1000	69.50	67.94	2.24
1400	74.30	72.46	2.48

关井12 h后5个位置处的产液温度计算结果与实测结果的相对误差均小于3%,验证了模型的有效性。

为分析关井期间井筒产液温度瞬变规律,模拟计算了不同关井时间下的产液温度剖面,见图5。以关井期间原油析蜡点对应深度作为临界析蜡深度,关井120 h期间该深度变化见图6,关井24 h后井筒温度场见图7。

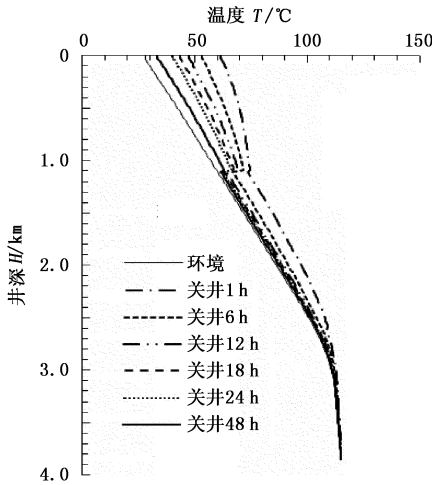


图5 不同关井时间下产液温度分布

Fig. 5 Wellbore temperature distribution at different shut-in periods

计算结果表明:①关井后井筒温度逐渐回落至环境原始温度,起始阶段温度下降速率大,随关井时间延长,井筒温度下降速率逐渐降低,关井48 h后井筒温度接近原始环境温度;②关井后临界析蜡深度迅速下移,关井24 h后临界析蜡深度下移到743.88 m深度处,关井40.5 h后,临界深度下移速度变慢,关井达106.1 h(4.42 d)后,临界析蜡深度下移到1047.41 m,此后不再下移,该位置对应地层原始温度为58.41 °C,比泵挂深度浅1552.59 m;③即使油井下入了保温油管,关井前也必须采取防蜡

措施,防止关井期间油井结蜡;④关井后井筒周围地层温度迅速向原始地层温度场逼近,关井24 h后受井筒内产液影响的径向区域半径小于3 m。

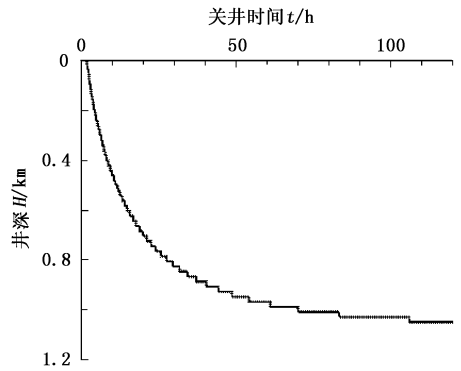


图6 关井120 h期间临界析蜡深度变化

Fig. 6 Variation of critical wax appearance point during shut-in for 120 h

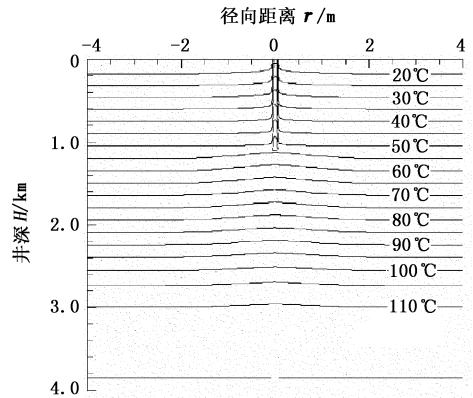


图7 关井24 h后井筒温度场

Fig. 7 Wellbore temperature field after shut-in 24 h

## 6 结论

(1)模型预测结果与实测值吻合程度高,相对误差小于3%,本文模型可用于模拟和分析海洋油井关井瞬态温度场,从而为分析和解决关井期间油井结蜡及水合物生成问题等提供理论依据和基础数据。

(2)关井后井筒温度逐渐回落至环境原始温度,起始阶段温度下降速率大,随关井时间延长,井筒温度下降速率逐渐降低,关井24 h后受井筒内产液影响的径向区域半径小于3 m,关井106.1 h后井筒及周围地层温度恢复到原始温度。

### 参考文献:

[1] RAYMOND L R. Temperature distribution in a circulating drilling fluid[J]. Journal of Petroleum Technology, 1969,21(3):333-341.

- [2] 高学仕,张立新,潘迪超,等. 热采井筒瞬态温度场的数值模拟分析[J]. 石油大学学报:自然科学版,2001,25(2):67-70.  
GAO Xue-shi, ZHANG Li-xin, PAN Di-chao, et al. Numerical simulation of temperature field in steam injection well with Ansys software[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2001,25(2):67-70.
- [3] WOOLEY Gary R. Computing downhole temperatures in circulation, injection, and production wells[J]. Journal of Petroleum Technology, 1980,32(9):1509-1522.
- [4] MARSHALL D W, RAMON G. A computer model to determine the temperature distributions in a wellbore[J]. The Journal of Canadian Petroleum,1982,21(1):63-75.
- [5] CORRE B, EYMARD R, GUENOT A. Numerical computation of temperature distribution in a wellbore while drilling[R]. SPE 13208, 1984.
- [6] BEIRUTE R M. A circulating and shut-in well-temperature-profile simulator[R]. SPE 17591,1991.
- [7] GARCIA A, SANTOYO E, ESPINOSA G, et al. Estimation of temperatures in geothermal wells during circulation and shut-in in the presence of lost circulation[J]. Transport in Porous Media,1998,33(1/2):103-127.
- [8] 宋洵成,管志川. 深水钻井井筒全瞬态传热特征[J]. 石油学报,2011,32(4):704-708.  
SONG Xun-cheng, GUAN Zhi-chuan. Full transient analysis of heat transfer during drilling fluid circulation in deep-water wells [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4):704-708.
- [9] 杨继盛,刘建仪. 采气实用计算[M]. 北京:石油工业出版社,1994:23-29.
- [10] PATANKAR. Numerical heat transfer and fluid flow [M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980:59-60.

(编辑 李志芬)

(上接第87页)

- [9] 闫永维,高德利,吴志永. 煤层气连通井引导技术研究[J]. 石油钻采工艺,2010,32(2):23-25.  
YAN Yong-wei, GAO De-li, WU Zhi-yong. Study on guidance technology for coal-bed methane connected wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(2):23-25.
- [10] 易铭. 水平连通井技术在内蒙古乌兰察布气化采煤工程中的应用[J]. 中国煤炭地质,2009,21:40-43.  
YI Ming. Application of horizontal connected well technology in coal gasifying extraction in Ulanqab, Inner Mongolia [J]. Coal Geology of China, 2009,21:40-43.
- [11] RACH N M. New rotating magnet ranging systems useful in oil sands, CBM developments [J]. Oil & Gas Journal, 2004,102(8):47-49.
- [12] OSKARSEN R T, WRIGHT J W, FITTERER D, et al. Rotating magnetic ranging service and single wire guidance tool facilitates in efficient downhole well connections [R]. SPE 119420, 2009.
- [13] 宗艳波,张军,史晓锋,等. 基于旋转磁偶极子的钻井轨迹高精度导向定位方法[J]. 石油学报,2011,32(2):335-339.  
ZONG Yan-bo, ZHANG Jun, SHI Xiao-feng, et al. A high-precision guidance method of wellbore trajectory based on the rotary magnetic dipole [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(2):335-339.
- [14] 远坂俊昭. 测量电子电路设计:模拟篇(从OP放大器实践电路到微弱信号的处理)[M]. 彭军,译. 北京:科学出版社,2006:10-13.
- [15] 高德利,刁斌斌,张辉. 一种用于邻井距离随钻电磁探测的计算方法:中国,200910210079.X[P]. 2009-11-04.

(编辑 修荣荣)