

文章编号: 0253-2697(2012)06-1064-04

保温油管海洋采油井筒温度压力计算耦合模型

宋洵成¹ 管志川¹ 韦龙贵² 何连² 郭永宾²

(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:生产管柱上部采用真空隔热保温油管是海洋油井提高产液温度,防止油井结蜡的有效手段,科学设计保温油管的合理下深则需要准确预测海洋采油井筒温度剖面。将产液视作气液两相流,分别建立了质量守恒、动量守恒和能量守恒模型,模型中考虑了温度和压力对原油、天然气和地层水热物理性质的影响,井斜角对换热和压力降的影响,以及电潜泵机械能损失引起的热源。采用交错网格和全隐式有限体积法离散技术,建立了适合于海洋生产井筒温度场和压力场耦合求解的数值方法,保证了模型求解的稳定和收敛。利用所建立的模型对1口海洋油井进行了井筒温度分析和保温油管下深设计,结果表明,模型预测精度高(相对误差为0.46%),设计保温油管下深能有效地提高油流温度,避免油井结蜡。

关键词:温度;压力;保温油管;生产井;海洋

中图分类号:TE 535

文献标识码:A

A coupled model of temperature-pressure calculation for offshore production wellbores with insulated tubing

SONG Xuncheng¹ GUAN Zhichuan¹ WEI Longgui² HE Lian² GUO Yongbin²

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

2. Zhanjiang Company, CNOOC(China)Co. Ltd., Zhanjiang 524057, China)

Abstract: Adoption of insulated tubing on the upper part of offshore production strings is an effective method to increase temperature of produced liquids and prevent wellbores from wax deposition. A scientific design for a proper depth of insulated tubing requires accurately predicting the temperature profile of offshore production wellbores. When produced liquids were regarded as a gas-liquid two-phase flow, equations for its mass conservation, momentum conservation and energy conservation could be, respectively, deduced. These equations integrate effects of temperature and pressure on thermophysical properties of oils, gases and formation waters as well as the effect of deviation angle on heat transfer and pressure drop with the internal heat resource caused by mechanical energy loss of an electric submersible pump. A numerical simulation method suitable for a coupling solution to temperature and pressure fields of offshore production wellbores was established using staggered grids and the fully-implicit finite-volume discrete technique, and this method offered a guarantee to make the solution of the model stable and convergent. The established model was applied to analyze temperatures of an offshore production wellbore and design the depth of its insulated tubing. The result shows that the prediction of the model is of high accuracy with a fractional error of 0.46%, and the designed depth of insulated tubing can effectively increase the temperature of oil fluids and prevent the wellbore from wax deposition.

Key words: temperature; pressure; insulated tubing; production well; offshore

对高含蜡且析蜡点高的海洋油田,在生产管柱上部采用真空保温油管是避免原油温度降低导致结蜡的有效技术措施,而耦合求解温度与压力场是合理设计保温油管下深的重要依据。耦合求解温度与压力场,必须合理确定井筒换热及产液的多相流动问题。考虑到海洋油井生产平稳后,产层温度、压力和含水率基本保持稳定,且井筒内热阻(由产液、套管和水泥产生)远小于地层内热阻,井筒与地层和海水的换热达到稳定状态,笔者采用广泛用于石油和地热采掘行业中相关问题研究的半瞬态模型^[1-6]描述海洋采油井筒温度

场^[7]。Beggs-Brill法^[8]是基于水平、垂直和倾斜两相管流实验提出的计算方法,考虑了气体的滑脱作用,算法稳定,故笔者选取该方法描述由油气水组成的油井多相流动问题,进而建立了海洋采油井筒温度场和压力场耦合计算模型和计算方法,以期合理设计保温油管下深提供理论依据。

1 物理模型

海洋井筒上部被海水包围,下部被地层包围。油井生产期间,产液从产层进入井筒并沿油管自井底向

基金项目:教育部自主创新科研计划科技专项(11CX05014A)资助。

第一作者及通讯作者:宋洵成,男,1972年12月生,2010年获中国石油大学(华东)博士学位,现为中国石油大学(华东)副教授,主要从事油气井流体力学与工程方面的研究。Email: songxuncheng@upc.edu.cn

上流至井口,生产管柱由普通油管和真空隔热保温油管组成。依据流动和传热过程,建立如图1所示海洋生产井筒换热物理模型。

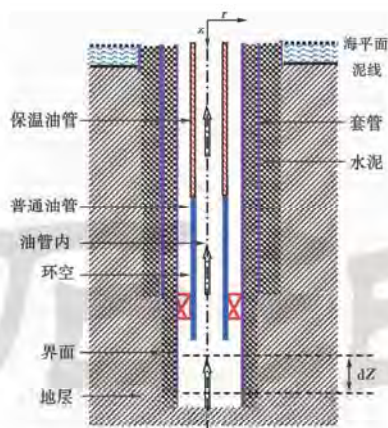


图1 海洋生产井筒换热物理模型

Fig. 1 Model of heat transfer on offshore production wellbore

2 数学模型

2.1 模型假设

模型假设如下:①油管内为一维稳态流动和传热,流速、压力、温度只随轴向位置不同而变化,在径向上相同;②地层以井筒轴线为中心轴对称分布,地层内为二维传热;③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;④产液(原油、天然气和地层水)为气液两相流动,热物理性质受温度和压力影响而变化;⑤考虑产液流动压耗和泵摩擦生热;⑥忽略生产期间的轴向热传导换热。

2.2 产液温度压力控制方程

以井筒中心线为Z轴,其正方向为自井口指向井底,建立一维坐标系,Z轴原点为井深参考点,井斜角为 θ ,油管内微元控制体如图2所示。

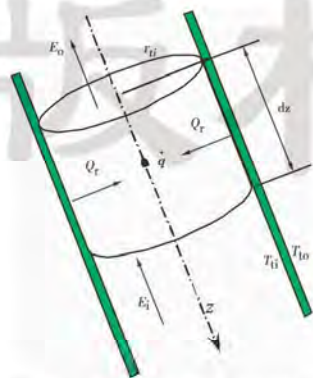


图2 油管内流体微元控制体

Fig. 2 Infinite control volume inside tubing

油管内流体流动方向与Z轴正方向相反,质量守恒方程体现为两相流质量流量不随轴向位置变化:

$$\frac{\partial(\rho_m v_m A)}{\partial Z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ_m 为油管内考虑温度、压力和含气率情况下的产液平均密度, kg/m^3 ; v_m 为气液两相流表观流速, m/s ; A 为流动管路截面积, m^2 ; Z 为轴向坐标, m 。

油管内动量守恒方程表现为控制体两界面的动量变化等于控制体受到的作用力之和,即

$$-\frac{\partial(\rho_m v_m^2)}{\partial Z} = \frac{\partial p}{\partial Z} - \rho_m g \cos \theta - \frac{2 \rho_m f_m v_m^2}{d_{ii}} \quad (2)$$

式中: p 为产液压力, Pa ; g 为重力加速度, m/s^2 ; θ 为井斜角, $(^\circ)$; f_m 为产液摩擦系数; d_{ii} 为产液流动管路内径, m 。

微元控制体发生的能量传递过程有Z方向对流换热(单位时间内流入和流出控制体的能量为 E_i 和 E_o ,包括动能、势能和焓)、油管壁与微元体的传导换热 Q_r 以及微元体内产液流动形成的内热源 q 。依据能量守恒原理,得油管内流体能量守恒方程:

$$G \frac{\partial}{\partial Z} \left(-gZ \cos \theta + \frac{v_m^2}{2} + H_m \right) + h_m (T_{ii} - T_m) \pi d_{ii} + \dot{q} = 0 \quad (3)$$

式中: G 为产液质量流量, kg/s ; H_m 为油管内产液平均比焓, J ; h_m 为油管内壁面处平均对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_{ii} 为油管内壁面温度, $^\circ\text{C}$; T_m 为油管内产液温度, $^\circ\text{C}$; \dot{q} 为油管内单位长度生热, J/m 。

把井筒看作轴线无限长线性热源,井筒与地层换热量表示为

$$q = \frac{2\pi k_f (T_i - T_w) \Delta z}{f(l)} \quad (4)$$

式中: q 为井筒与地层换热量, J ; k_f 为地层热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T_i 为地层原始温度, $^\circ\text{C}$; T_w 为井筒外壁面处温度, $^\circ\text{C}$; $f(l)$ 为瞬时热损失函数。

$f(l)$ 的求解方法主要有渐近线法^[7]、指数积分法^[9]、贝塞尔函数积分法^[10]、恒温拉普拉斯变换法^[11]、恒热流量柱面热源法^[12]和辐射与对流边界法^[13]。通过对上述方法计算结果对比分析,笔者选用与实测数据吻合程度更高的恒热流量柱面热源法计算产液瞬时热损失。

2.3 控制方程离散

产液能量守恒方程为比焓形式,为方便求解温度场分布,依据热力学定律

$$\frac{dH}{dz} = \left(\frac{dH}{dT} \right)_p \frac{dT}{dz} + \left(\frac{dH}{dp} \right)_T \frac{dp}{dz} \quad (5)$$

将定压焓变和定温焓变看作由温度和压力决定的产液热物性,将比焓形式的能量守恒方程转化为用温度表示,此外,借助热阻^[14]概念计算产液与地层或海水的换热量,得温度控制方程:

$$G c_p \frac{dT_m}{dz} + \frac{(T_f - T_m)}{R dz} - G g \cos \theta + G \frac{d}{dz} \left(\frac{v_m^2}{2} \right) + G \left(\frac{dH}{dp} \right)_T \frac{dp}{dz} + \dot{q} = 0 \quad (6)$$

式中: c_p 为产液定压比热, $J/(kg \cdot K)$; R 为产液与地层或海水的换热热阻, K/W 。计算海水段换热热阻时, 按文献^[15]考虑海水横掠隔水管的强迫对流换热。

由于节点和网格划分用于同时计算温度和压力, 考虑到压力梯度的可靠表达, 采用交错网格方式将温度节点布置在控制体中心, 压力和速度节点布置在控制体界面处。将温度控制方程对网格控制体积分, 得离散格式能量守恒方程:

$$G c_p (T_{i-1} - T_i) + (T_{f,i} - T_i)/R_i + \dot{q}_i \Delta z_i - G g \cos \theta \Delta z_i + G \left(\frac{v_{m,i+1/2}^2}{2} - \frac{v_{m,i-1/2}^2}{2} \right) + G \left(\frac{dH}{dp} \right)_T (p_{m,i+1/2} - p_{m,i-1/2}) = 0 \quad (7)$$

考虑到产液流动为稳定状态, 则节点间产液压力降由重力压力降和摩阻压力降组成:

$$\Delta p = \rho_{m,i} g \cos \theta_i \Delta z_i + \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{F,i} \Delta z_i \quad (8)$$

其中

$$\rho_{m,i} = \rho_{g,i} F_{g,i} + \rho_{l,i} (1 - F_{g,i})$$

式中: $\rho_{m,i}$ 为 i 节点处产液平均密度, kg/m^3 , 其中原油、天然气和地层水的密度根据相应状态方程求取; $F_{g,i}$ 为体积含气率, 按文献^[16]中溶解气油比方法求取。

对网格摩阻压降 $\left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{F,i}$, 采用 Beggs-Brill^[8] 方法求取。

3 温度压力场耦合求解方法

由于产液温度场和压力场相互依赖, 产液热物性受温度和压力影响, 故需采取数值模拟求解方法, 经过循环迭代过程, 直至得到各自收敛稳定解, 总体算法流程见图 3, 节点温度和压力计算流程见图 4。

4 实例计算

南海生产井 A1H, 水深为 36 m, 产层温度为 102.4℃, 井底流压为 11.77 MPa, 产油量为 148.84 m³/d, 产气量为 3 423.28 m³/d, 产水量为 1.15 m³/d。原油黏度为 1.26 mPa·s, 原油析蜡点为 59.8℃, 泵挂深度为 1 700 m。井身结构见表 1。

生产管柱由 $\Phi 88.9$ mm (3-1/2") API 油管 and $\Phi 114.3$ mm (4-1/2") 真空隔热保温油管组成, 保温油管内径为 76 mm (2.992"), 热导率为 0.02 W/(m·K)。未下入保温油管情况下的实测井口温度为 52.23℃, 为满足生产期间防蜡要求, 对该井保温油管下深进行了设计, 不同保温管下深情况下的井筒温度剖面见图 5。



图 3 海洋生产井筒温度压力场计算总流程

Fig. 3 Overall flow paragraph for computing temperature and pressure on offshore wellbores

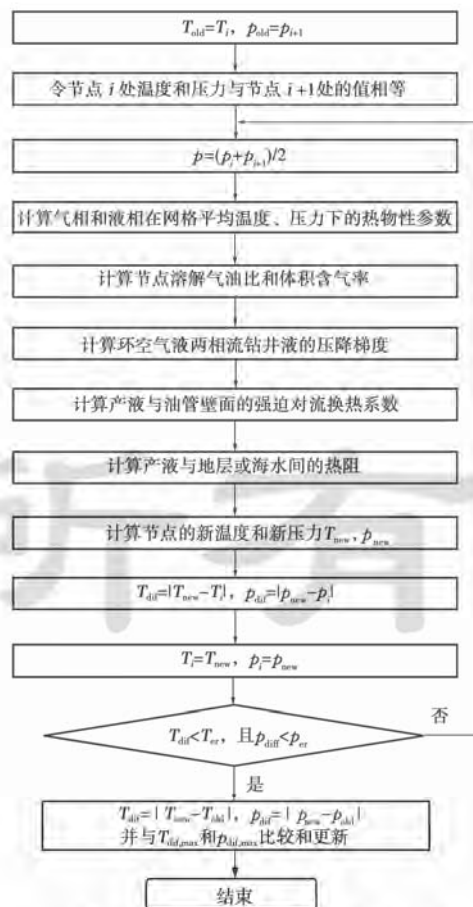


图 4 产液节点温度和压力计算流程

Fig. 4 Flow diagram for computing temperature and pressure on nodes of produced liquids

表 1 A1H 井井身结构
Table 1 Casing schematics on Well A1H

| 管柱类型 | 外径/m | 井眼直径/m | 井段/m | 水泥返高/m |
|------|-------|--------|-------------|--------|
| 隔水管 | 0.610 | | 0~66 | |
| 表套 | 0.340 | 0.444 | 0~1 471 | 30 |
| 技术套管 | 0.244 | 0.311 | 0~2 946 | 1 646 |
| 打孔尾管 | 0.178 | 0.216 | 2 796~3 298 | |

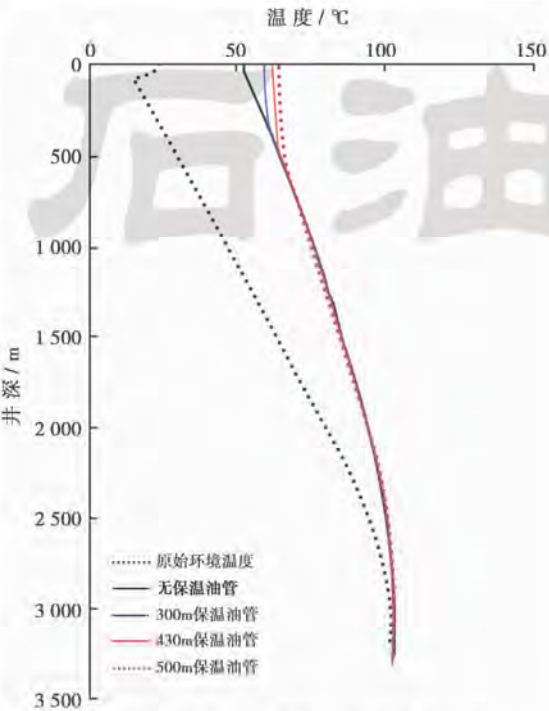


图 5 不同保温油管下深时井筒温度分布
Fig. 5 Wellbore temperature distributions with various setting depth of insulated tubing

由图 5 可见,未下入保温油管情况下的模型计算出口温度为 51.99℃,与实测出口温度的相对误差为 0.46%,表明模型预测值与实测值吻合程度高,可以用于设计保温油管下深和分析海洋生产井筒温度分布。不同保温油管下深时的生产井筒温度分布计算结果表明,保温油管段产液温度下降梯度为 0.32℃/hm,普通油管段产液温度下降梯度为 3.05℃/hm,当保温油管下深达 430 m 时,出口温度达到 62.13℃,超过析蜡点温度,可满足防蜡生产要求。

该井实际施工时考虑到安全余量,实际保温油管下入深度为 450 m,生产过程中井口实测温度均超过析蜡点,未见结蜡现象。

5 结 论

(1) 将产液视作气液两相流,分别建立了质量守恒、动量守恒和能量守恒模型,模型中考虑了温度和压力对原油、天然气和地层水热物性的影响,井斜角对换热和压力降的影响,以及电潜泵机械能损失引起的热源。

(2) 采用交错网格和全隐式有限体积法离散技术,建立了适合于海洋生产井筒温度和压力场耦合求解的数值方法,保证了模型求解的稳定和收敛。

(3) 南海 A1H 井分析表明,模型预测结果与实测值吻合程度高,相对误差为 0.46%,可用于预测海洋生产井筒温度、压力场,以及设计具有防蜡效果的保温油管下深,甚至可以为水合物形成、注氮气或者注蒸汽工艺参数设计提供依据。

参 考 文 献

[1] 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 Xuncheng,Guan Zhichuan.Full transient analysis of heat transfer during drilling fluid circulation in deep-water wells[J].Acta Petrolei Sinica,2011,32(4):704-708.

[2] 马春红,吴晓东,石崇兵.热管改善油井井筒流体温度分布的理论研究[J].石油学报,2006,27(1):114-118.
Ma Chunhong,Wu Xiaodong,Shi Chongbing.Theoretical research for improving temperature distribution of fluid in wellbore using heat pipe[J].Acta Petrolei Sinica,2006,27(1):114-118.

[3] 吴晗,吴晓东,王庆,等.同心双管分注 CO₂ 井筒流动模型及影响因素[J].石油学报,2011,32(4):722-727.
Wu Han,Wu Xiaodong,Wang Qing,et al.A wellbore flow model of CO₂ separate injection with concentric dual tubes and its affecting factors[J].Acta Petrolei Sinica,2011,32(4):722-727.

[4] Izgec B,Kabir C S,Zhu D,et al.Transient fluid and heat flow modeling in coupled wellbore/reservoir systems[R].SPE 102070,2007.

[5] Hasan A R,Kabir C S,Wang Xiaowei.A mechanistic model for circulating fluid temperature[R].SPE 27848,1996.

[6] Hasan A R,Kabir C S,Lin Dongqing.Analytic wellbore-temperature model for transient gas-well testing[R].SPE 84288,2003.

[7] Ramey H J.Wellbore heat transmission[J].Journal of Petroleum Technology,1962,14(4):427-435.

[8] Beggs H D,Brill J P.A study of two-phase flow in inclined pipes [J].Journal of Petroleum Technology,1973,25(5):607-617.

[9] Thompson M,Burgess T M.The prediction of interpretation of downhole mud temperature while drilling[R].SPE 14180,1985.

[10] Carslaw H S,Jaeger J C.Conduction of heat in solids[M].Oxford:Oxford University Press,1959.

[11] Hagoort J.Ramey's wellbore heat transmission revisited[R].SPE 87305,2004.

[12] Kabir C S,Hasan A R,Sarica C.Fluid flow and heat transfer in wellbores[M].[S.l.]:SPE,2002.

[13] Kabir C S,Hasan A R.Simplified wellbore-flow modeling in gas/condensate systems[J].SPE Production & Operations,2006,21(1):89-97.

[14] Willhite G P.Over-all heat transfer coefficients in steam and hot water injection wells[R].SPE 1449,1966.

[15] Churchill S W,Bernstein M.A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in cross-flow[J].Journal of Heat Transfer,1977,99(3):300-306.

[16] 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.
Yang Jisheng,Liu Jianyi.Applied gas recovery computation[M].Beijing:Petroleum Industry Press,1994:23-29.