

高温高压复杂井身结构气井井筒温度计算方法

肖香姣^{1,2}, 姜汉桥¹, 刘曰武³, 张建业², 万义钊³, 王小培², 欧阳伟平³

1. 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249
2. 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000
3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190

摘要 西气东输的气源井以高温高压气井为主, 气井生产依赖于井底温度和压力, 生产过程中温度起着重要的作用。为了确保高温高压气井的正常生产, 必须对井筒温度压力进行深入研究。井筒压力的研究已有较为成熟的结果, 但对井底温度的研究还很不成熟, 尤其是井身结构对井筒温度的影响国内外尚未见报道。本文基于 Ramey 经典井筒温度计算模型建立了两种考虑复杂井身结构井的井筒温度分布计算模型, 即在复杂井筒条件下从井底到井口的温度计算模型和从井口到井底的温度计算模型。通过与实测资料对比, 给出了计算模型的误差对比, 分析了井身结构对井筒温度分布计算的影响。研究结果表明, 从井底到井口的温度分布模型计算结果优于从井口到井底的温度分布模型。

关键词 复杂井身结构; 气井; 井筒温度; 计算方法; 高温高压

中图分类号 TE33+2

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.29.004

Temperature Computational Method of Complicate Bore Frame Gas Well Wellbore with High Temperature and Pressure

XIAO Xiangjiao^{1,2}, JIANG Hanqiao¹, LIU Yuewu³, ZHANG Jianye², WAN Yizhao³, WANG Xiaopei², OUYANG Weiping³

1. Key Laboratory of Petroleum Engineering, Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina Company Limited, Korla 841000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China
3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract The source gas wells for the west to east gas pipeline are mainly high temperature and high pressure gas wells. The production capacity of these gas wells highly depends on the pressure and temperature of well bottom. Temperature in the production process plays an important role. In order to ensure normal production of high-temperature and high-pressure gas wells, in depth study of wellbore temperature and pressure must be carried out. There are many mature research results involving wellbore pressure, however, the study on well bottom temperature is still immature, and especially the impact of complex wellbore on the wellbore temperature has not been reported at home and abroad. Based on the classic Ramey wellbore temperature model, two kinds of mathematical models for calculating the well wellbore temperature distribution in the well with complex structure wellbore are built. The models include the one calculating temperature from well bottom to wellhead and the other calculating temperature from wellhead to well bottom. By comprising with the data of field test, the calculation errors are given, and the impact of the wellbore structure on wellbore temperature distribution is analyzed. The results indicate that the calculating result by using the model from the well bottom to the wellhead is better than that by using the model from the wellhead to the well bottom in the temperature distribution calculation.

Keywords complex wellbore; gas well; wellbore temperature; calculating method; high temperature and pressure

收稿日期: 2011-09-14; 修回日期: 2011-09-30

基金项目: 国家重大油气专项示范工程项目(2008ZX05046)

作者简介: 肖香姣, 高级工程师, 研究方向为高压气藏及凝析气藏开发, 电子信箱: xiaoxj-tlm@petrochina.com.cn

0 引言

塔里木油田西气东输的气源井以高温高压气井为主,这些气井生产依赖于井底温度和压力,在生产过程中温度对产量起重要作用。高温高压气井井筒温度分布和压力分布对高温高压气藏开发方案的制定和调整有着重要的意义。无论是确定合理生产制度、规划产能,还是确定高温高压气藏开发速度,都需要了解高温高压气井井筒温度和压力的动态变化。但高温高压气井井筒温度计算一直是国内外难以解决的问题之一。

1962年,Ramey^[1]提出了井筒传热的简化模型,得到了井筒温度与井深的关系式。模型假设油管、套管或环空中有流体流动,而地层没有流体流动。Ramey模型迄今为止仍然被广泛应用,许多国内外学者在此基础上提出了适合各种情况的模型。1967年,Willhite^[2]利用Ramey模型的公式给出了求解井筒热传导系数的表达式。1978年,Herrera,Blrdwell和Hanzllk^[3]计算了井筒中热量的损失,在一定条件下,整个井筒的热损失可达22%。1980年,Shiu和Beggs^[4]改进了Ramey公式中与传热系数、导热率和油管内径有关的参数A的计算方法;1989年,Sagar^[5]将Ramey模型扩展到多相流,建立考虑动能和焦耳-汤姆逊效应的温度计算模型。1990年,Wu和Pruess给出了不同热物性分层地层的井筒传热问题的解析解。他们发现Ramey方法在生产时间较长时是适用的,而对较短生产时间的情况会有较大的误差。

1991年,Kabir等^[6]根据能量守恒建立了两相流的井筒温度分布模型。提出预测井筒两项流第二界面温度的方法。2000年,Tian和Finger^[7]建立计算井筒温度的水力学模型。2004年,Hagoort^[8]对Ramey模型针对较短生产时间情况的不适用做出修正,给出了一个图形关系表示了Ramey模型不适用的时间段的长度。2005年,Cazarez-Candia和Vasquez-Cruz^[9]在Alive模型的基础上,将压力作为变量处理,提出了更为合理的计算模型。2009年,唐圣来等^[10]建立了高压气井井筒温度、压力的计算模型,分为开井和关井两个阶段进行计算。但这些研究所使用的井身结构只是均匀的垂直井筒,没有考虑深层高压气井井身结构的复杂性对井筒温度变化的影响,因此导致了模型计算结果与实测结果存在较大误差,对于无法下入仪器直接测取温压资料的井,将会导致较大的误差,给生产决策带来影响。

通过分析国内外的研究状况并结合高温高压油气田的实际需要,基于Ramey的经典井筒温度计算模型,建立了2种考虑复杂井身结构井的井筒温度分布计算模型。通过与实测资料对比,认为井身结构井对井筒温度分布计算有较大的影响,从井底到井口的温度分布模型计算结果优于从井口到井底的温度分布模型。

1 经典 Ramey 计算模型

Ramey模型的主要假设条件为:(1)地层和井筒的热力参数不随温度变化,即为常量;(2)井筒的传热是稳定的,井

筒与周围地层间的传热是非稳定的;(3)井筒中流体不发生相变;(4)忽略流体摩擦生热等其他能量损失。其计算模型示意如图1所示。

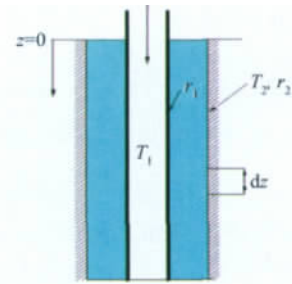


图1 Ramey计算模型示意

Fig. 1 Sketch of Ramey's mathematical model

在井筒中取小段距离 dz ,其能量方程为

$$dH + \frac{g dz}{gJ} + \frac{u du}{gJ} = dQ - \frac{dW}{J} \quad (1)$$

其中, H 为热焓, J/kg ; g 为重力加速度, $9.81m/s^2$; g_c 为转换因子, 9.81 ; u 为流动速度, m/s ; J 为热功当量, 4.1840 ; Q 为热量, J/kg ; W 为外界做功, J/kg 。

假设稳定流动过程中,气体和外界之间不相互做功,即 $W=0$,则式(1)为

$$dH + \frac{g dz}{gJ} + \frac{u du}{gJ} = dQ \quad (2)$$

1.1 液体情况

如果井筒中流动的是可忽略压缩性的液体时,动能项 $\frac{u du}{gJ}$ 可以忽略,式(2)化简为

$$dH + \frac{g dz}{gJ} = dQ \quad (3)$$

而热焓的定义为

$$dH = dE + \frac{d(pV)}{J} \quad (4)$$

其中, E 为内能, V 为体积, p 为压力,对于不可压缩的液体,式(4)可化为:

$$dH = c_p dT + \frac{V dp}{J} \quad (5)$$

其中, c_p 为定压比热。在忽略摩擦的情况下, $V dp$ 项等于水头的变化,则式(5)可化为

$$dH = c_p dT + \frac{g dz}{gJ} \quad (6)$$

对于注入井,由于压力增加产生的热焓的增加近似等于势能的减少;对于生产井,因为压力减少造成的热焓的减少近似等于势能的增加。因此,最终的能量方程为

$$c_p dT = dQ \quad (7)$$

式(7)便是不可压缩液体沿均一管柱垂直气井流动时的总能量方程。

假设无相态变化,则在 dz 长度上损失的热量等于从油管传递到套管的热量。可表示为

$$dq = -wc_p dT = 2\pi r_1 U (T_1 - T_2) dz \quad (8)$$

其中, q 为热流量, J/d ; w 为质量流量, kg/d ; T_1 为油管内部流体温度, $^{\circ}C$; T_2 为套管外表面温度, $^{\circ}C$; r_1 为油管内径, m ; U 为总传热系数。

总传热系数 U 由下式计算:

$$\frac{1}{U} = \frac{dA_{ii}}{h_1 dA_{ii}} + \frac{x_1 dA_{ii}}{k_1 dA_{ii}} + \frac{dA_{ii}}{h_2 dA_{ii}} + \frac{dA_{ii}}{h_2 dA_{ci}} + \frac{x_c dA_{ii}}{k_c dA_{co}} \quad (9)$$

其中, $A_{ii} = \frac{A_{io} - A_{ii}}{\ln(A_{io}/A_{ii})}$, A_{ii} 为油管内部范围的面积, m^2 ; A_{io} 为油管外径范围的面积, m^2 ; A_{ci} 为环空内径范围内面积, m^2 ; A_{co} 为环空外径范围内面积, m^2 ; x_c 为套管内径, m ; x_1 为油管外径, m 。 h_1 为油管内部流体的热对流系数, $J/(s \cdot m^2 \cdot ^{\circ}C)$; h_2 为环空内部流体的热对流系数, $J/(s \cdot m^2 \cdot ^{\circ}C)$; k_1 为油管材料的导热系数, $J/(s \cdot m^2 \cdot ^{\circ}C)$; k_c 为套管材料的导热系数, $J/(s \cdot m^2 \cdot ^{\circ}C)$ 。

从套管外表面传向周围地层的的热量可表示为

$$dq = \frac{2\pi k_c (T_2 - T_e)}{f(t)} \quad (10)$$

其中, k_c 为地层的导热系数, $J/(s \cdot m^2 \cdot ^{\circ}C)$; T_e 为地层温度, $^{\circ}C$; $f(t)$ 为与时间和热传导条件有关的函数, 无量纲。

以上热传导方程均建立在热量是从井筒向四周径向传递的假设之上。无因次时间函数 $f(t)$ 由式(10)定义, 假设一个线热源向一个圆柱体传热, 利用傅里叶热传导定律计算热量, 求解在各时刻的 $f(t)$ 值, 绘制曲线, 通过曲线即可查取 $f(t)$ 值。

假设地层温度沿井筒线性分布, 并利用边界条件可以得到井筒温度的解为

$$T_1(z) = az + b - aA + [T_1 + aA - b]e^{-z/A} \quad (11)$$

其中, a, b 为温度分布常数, A 可表示为

$$A = \frac{wc_p [k_c + r_2 U f(t)]}{2\pi r_2 U k_c} \quad (12)$$

1.2 气体情况

如果井筒流动的是气体, 需要考虑其压缩性, 则 $dH = c_p dT + \frac{g dz}{g_0 J}$, 经过与液体相同的推导后可得气体情况的温度计算公式

$$T_1(z) = az + b - A \left(a \pm \frac{1}{79.3c_p} \right) + \left[T_1 + A \left(a \pm \frac{1}{79.3c_p} \right) - b \right] e^{-z/A} \quad (13)$$

式(13)中的加号适用于流体沿气井向下流动, 且井深原点在井口, 向下为正的情况; 减号适用于流体沿气井向上流动, 井底为坐标原点, 沿井筒向上为正的情况。

总结 Ramey 经典模型, 存在以下几个问题:

- (1) 只适合单相流, 不适合多相流;
- (2) 地层中的热传导计算需要查图确定无因次时间函数, 操作不方便且结果不准确;
- (3) 未考虑焦耳-汤姆森效应;
- (4) 假设井筒半径无穷小, 不适合某些情况;
- (5) 热力参数以常量处理, 例如定压比热 c_p , 实际上 c_p 与温度等因素有关;
- (6) 未考虑井身结构对温度的影响。

2 复杂井身结构井筒温度分布模型建立

2.1 物理模型

根据钻井资料, 真实的气井井身结构一般包含表层套管段、技术套管、油层套管(图2)。技术套管是连接表层套管和油层套管之间的套管, 技术套管可以是一个层段也可以是多个层段。表层套管段、技术套管、油层套管外有水泥环, 不同的套管段水泥环和套管的层数不同。

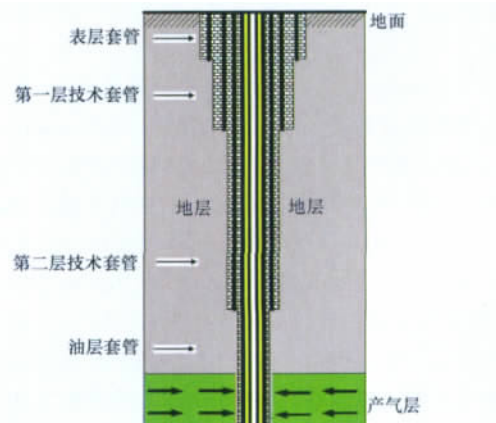


图2 井身结构示意图

Fig. 2 Sketch of wellbore structure

气井在生产过程中主要是通过油管产气。流体在油管中流动时, 会通过油管、环空、套管、水泥环最后向地层作热量传递, 如图3所示。

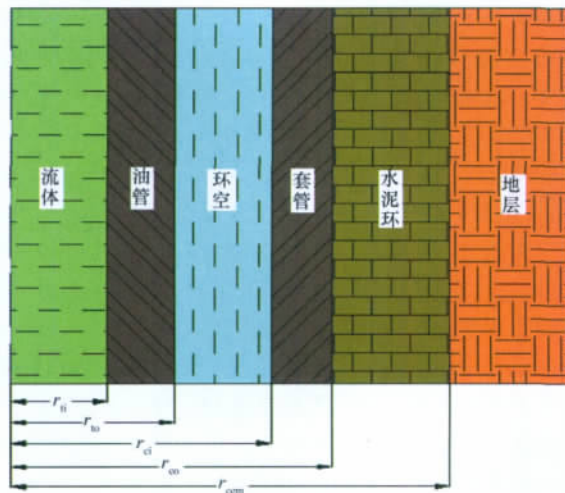


图3 井身结构纵向局部示意

Fig. 3 Partial sketch of wellbore structure

热量的传递过程有以下几个环节:

- (1) 油管中的高温流体在流动时经对流把热量传递给油管内壁;
- (2) 经过热传导, 热量从油管内壁传递到外壁;
- (3) 经对流和热辐射的形式, 热量从油管外壁经油管和套管间的环形空间传递到套管内壁;
- (4) 经热传导, 能量从套管内壁传递到套管外壁;

(5) 最后以导热形式热量从套管外壁经水泥环传到地层。

2.2 基本假设条件

通过以上对物理模型的描述和传热过程的分析,为简化计算,作如下假设:

- (1) 井筒内的传热为稳态传热,周围地层中的传热为非稳态传热,并且满足 Ramey 无因次时间函数;
- (2) 井筒及地层间的传热是径向的,不考虑沿井身方向的传热;
- (3) 井筒中任一截面上各点的温度都相等;
- (4) 油管套管和水泥环为同心圆;
- (5) 忽略井筒内流体流动过程中的摩擦生热;
- (6) 井筒周围地层温度是分段线性的。在地面以下的一定深度 h 内,地层的温度受外界环境影响,在这个深度内呈斜率为 k_1 的线性分布;在 h 以下至井底深度,地层温度呈斜率为 k_2 的线性分布,且这段线性分布与环境温度(主要是地面温度)无关。

2.3 数学模型
以井口为坐标原点,垂直向下为正建立坐标系。在油管上取一长为 dz 的微段。根据能量守恒,从微段进口流入的热量等于从微段出口流出的热量与微段向套管和地层接触面间传递的热量之和,如图 4 所示。

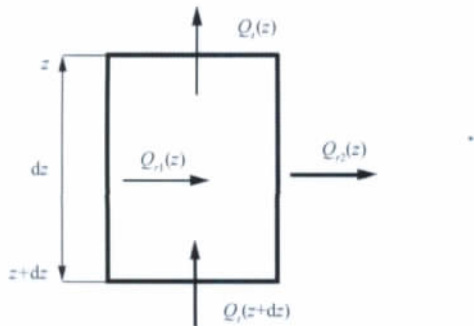


图 4 井筒能量守恒微元体分析

Fig. 4 Element analysis diagram for the energy conservation in the wellbore

流出微元体的热量为

$$Q_i(z) = w_i C_p T_i(z) \quad (14)$$

流入微元体的热量为

$$Q_i(z+dz) = w_i C_p T_i(z+dz) \quad (15)$$

其中, w_i 为进入微元体的流动流体的质量流量, kg/m^3 ; C_p 为气体的定压比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; T_i 为井筒内流体温度, $^\circ\text{C}$; Q_i 为井筒周围某点的热量, J 。

由于 dz 很小,可以认为径向的热量损失为从井筒到井筒与地层的交界面之间温差引起的热量传递。所以井筒中流体向井筒和地层交界面之间的传递的热量为

$$Q_{r1} = 2\pi r_{ii} U_{ii} (T_i - T_h) dz \quad (16)$$

其中, r_{ii} 为油管内径, m ; U_{ii} 为以油管内径为起算点的总传热系数, W/m^2 ; T_h 为水泥环和地层交界面的温度, $^\circ\text{C}$ 。

由能量守恒可得

$$Q_i(z+dz) = Q_i(z) + Q_{r1}(z) \quad (17)$$

将式(14)、(15)代入式(17),可得

$$w_i C_p \frac{\partial T_i}{\partial z} = 2\pi r_{ii} U_{ii} (T_i - T_h) \quad (18)$$

从第二接触面(水泥环和地层的交界面)向周围地层传递的热量服从 Ramey 无因次时间函数:

$$Q_{r2} = \frac{2\pi k_e (T_h - T_e)}{f(t)} dz \quad (19)$$

$$f(t) = \begin{cases} 1.1281 \sqrt{\frac{\alpha t}{r_h^2}} (1 - 0.3 \sqrt{\frac{\alpha t}{r_h^2}}) & t \leq 1.5 \frac{r_h^2}{\alpha} \\ \left(\frac{1}{2} \ln \left(\frac{\alpha t}{r_h^2} \right) + 0.4063 \right) \left(1 + \frac{0.6 r_h^2}{\alpha t} \right) & t > 1.5 \frac{r_h^2}{\alpha} \end{cases}$$

井筒向第二接触面传递的热量与第二接触面向周围地层传递的热相等,故有

$$Q_{r1} = Q_{r2} \quad (20)$$

将式(19)、式(16)代入式(20),可得

$$2\pi r_{ii} U_{ii} (T_i - T_h) = \frac{2\pi k_e (T_h - T_e)}{f(t)} dz \quad (21)$$

可解得第二接触面温度

$$T_h = \left[\frac{T_i f(t) r_{ii} U_{ii} + k_e T_e}{r_{ii} U_{ii}} \right] / \left[f(t) + \frac{k_e}{r_{ii} U_{ii}} \right] \quad (22)$$

将式(22)代入式(8),可得

$$w_i C_p \frac{\partial T_i}{\partial z} = \frac{2\pi r_{ii} U_{ii} k_e}{k_e + f(t) r_{ii} U_{ii}} (T_i - T_e) \quad (23)$$

令 $A = \frac{2\pi r_{ii} U_{ii} k_e}{w_i C_p (k_e + f(t) r_{ii} U_{ii})}$, 则式(23)可表示为

$$\frac{\partial T_i}{\partial z} - A T_i + A T_e = 0 \quad (24)$$

周围地层温度根据假设为分段线性,其表达式为

$$T_e = \begin{cases} T_s + g_{T_1} z & 0 \leq z \leq h \\ T_a + g_{T_2} z & h < z \leq H \end{cases} \quad (25)$$

其中, h 为地层深度, m ; T_s 为受环境温度影响的地层温度, $^\circ\text{C}$; 地层温度; g_{T_1} 为 h 深度范围内的地温梯度, $^\circ\text{C}/\text{m}$; g_{T_2} 为 h 深度范围外的地温梯度, $^\circ\text{C}/\text{m}$; T_a 为影响层深度外的环境温度, $^\circ\text{C}$; H 为井深, m 。

式(24)是一个一元一次非齐次偏微分方程,其解为齐次方程的通解与非齐次方程的特解叠加。对式(24)求解,将井筒分为许多小段,认为在每一小段内井筒压力为定值,气体定压比热为定值, A 为定值。式(24)的解为

$$T_i = C e^{Az} + T_e + b/A \quad (26)$$

每一段的入口处边界条件为 $z = z_{in}$ 时, $T_e = T_{e, in}$, $T_i = T_{i, in}$, 代入式(26)可得

$$C = \frac{T_{i, in} - T_{e, in} - b/A}{e^{Az}}$$

将 C 代入式(26)可得每段出口口的温度为

$$T_{i, out} = T_{e, out} + (T_{i, in} - T_{e, in} - b/A) e^{Az} + b/A \quad (27)$$

在井口处, $z = 0$ 时, $T_e = T_s$, $T_i = T_1$, T_1 为井口温度。

以上是以井口为坐标原点建立方程求解的数学模型。

同样可以得到以井底为原点垂直向上为正建立坐标求解的数学模型:

$$T_{\text{out}} = T_{\text{out}} + (T_{\text{in}} - T_{\text{em}} - b/A) e^{-A \cdot z} + b/A \quad (28)$$

式(28)中 a 和 b 在两段线性中分别取不同的值,且在自井底向井口计算和从井口向井底计算时所取的值不一样。当从井底向井口计算时,将井底的井筒温度和地层温度看作是已知量,假设井底周围地层的温度与井筒井底相等;当从井口向井底计算时,将井口的井筒温度和地层温度看成已知量,此时井口温度为地面温度,这一温度与井底向井口计算中,假设井底地层温度为井筒井底温度时,按照双线性地温梯度折算到地面的温度不相等,所以从井底向井口计算与从井口向井底计算时的地层温度分布不同。

3 计算实例

以现场某油田一口实际井 X1 井为例进行计算分析,该井井身结构分为 4 段,井流物组分及基础数据如表 1 所示。

表 1 X1 井基础数据表
Table 1 Base data of well X1

组分	物质的量分数/%	气井情况
甲烷	82.67	测量深度:3000m 油管内径:0.0635m 产气量:580000m ³ /d 产油量:5t/d
乙烷	2.74	
丙烷	1.68	
异丁烷	0.44	
正丁烷	0.95	
异戊烷	0.42	
正戊烷	0.59	
己烷	0.9	
庚烷	0.93	
辛烷	1.01	
壬烷	0.75	
癸烷	0.6	
十一烷	1.33	
二氧化碳	0.16	
氮气	4.83	

3.1 自井底向井口计算结果及分析

利用所得到模型和实际井的基础数据,可以计算自井底向井口井筒中任意点的温度,所得的计算结果与实际测量结果如图 5 所示,分析对比误差如表 2 所示。

由图 5 和表 2 可以看出,从井底算到井口的温度计算结果与实测数据拟合的较好,最大误差出现在井口处:绝对误差 0.642℃,最大相对误差 0.6359%。

3.2 自井口向井底计算结果及分析

利用所得到模型和实际井的基础数据,可以自井口向井底计算井筒中任意点的温度,所得到的计算结果与实际测量结果如图 6 所示,分析对比误差如表 3 所示。

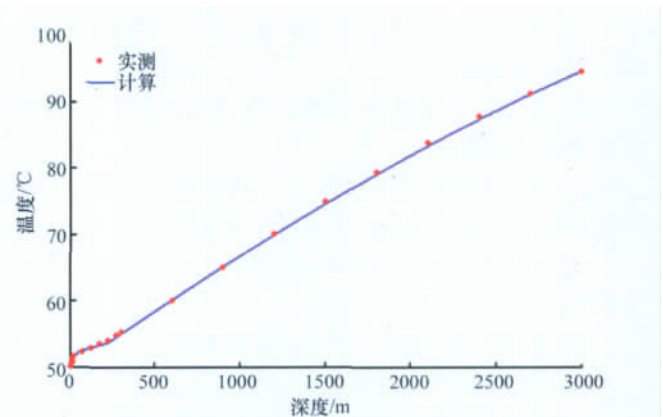


图 5 X1 井自井底向井口计算温度与实测温度拟合图
Fig. 5 Upward calculating results and measured data for well X1

表 2 X1 井自井底向井口计算温度数据与实测温度数据分析表
Table 2 List of data error analysis between upward calculating results and measured data for well X1

序号	实测深度/m	实测温度/°C	计算温度/°C	绝对误差/°C	相对误差/%
1	0	50.18900	50.831410	0.642410	0.635921
2	5.00	50.57700	51.005063	0.428063	0.421397
3	10.00	50.71900	51.135240	0.416240	0.408663
4	15.00	51.43500	51.265363	-0.169637	0.165177
5	20.00	51.76900	51.438775	-0.330225	0.319961
6	70.00	52.29900	52.460377	0.161377	0.154045
7	120.00	53.04800	52.852443	-0.195557	0.184662
8	170.00	53.61600	53.250496	-0.365504	0.342019
9	220.00	54.12100	53.631082	-0.489918	0.454672
10	270.00	54.84200	54.461995	-0.380005	0.347659
11	300.00	55.36000	54.981686	-0.378314	0.342857
12	600.00	60.15500	60.105783	-0.049217	0.040925
13	900.00	65.21000	65.088086	-0.121914	0.093565
14	1200.00	70.16700	69.914124	-0.252876	0.180521
15	1500.00	75.03400	74.567986	-0.466014	0.311502
16	1800.00	79.47700	79.032154	-0.444846	0.280643
17	2100.00	83.84100	83.287300	-0.553700	0.331303
18	2400.00	87.84300	87.312052	-0.530948	0.303131
20	3000.00	94.57300	94.573000	0.000000	0.000000

由表 3 和图 6 可以看出,从井口算到井底的温度与实测温度拟合较好,但与从井底向井口计算相比其误差较大。最大误差为 1.19588℃,最大相对误差为 1.078537%。

3.3 井身结构的影响分析

为了研究井身结构的影响,利用相同的基础数据和计算方法分别计算考虑井身结构和不考虑井身结构的压力温度分布,如图 7 所示。

考虑井身结构时将井周围的水泥环分为 4 段,从井口至

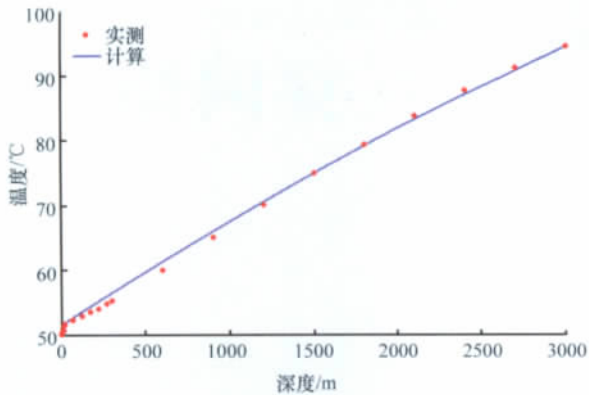


图6 X1井自井口向井底计算温度与实测温度拟合
Fig. 6 Downward calculating results and measured data for well X1

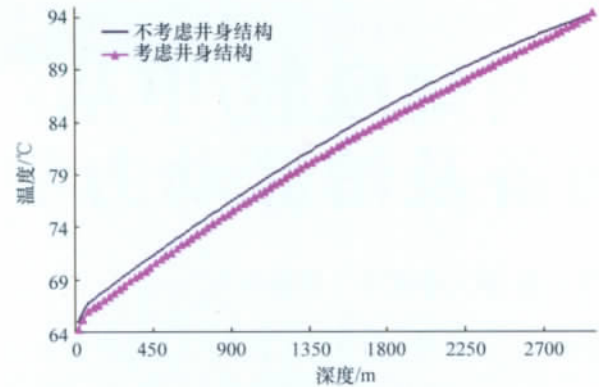


图7 井身结构对井筒温度影响
Fig. 7 Impact of wellbore structure on the temperature

表3 X1井自井口向井底计算温度数据与实测温度数据分析表

Table 3 List of data error analysis between downward calculating results and measured data for well X1

序号	深度/m	实测温度/°C	计算温度/°C	绝对误差/°C	相对误差/%
1	0	50.18900	50.189000	0	0
2	5.00	50.57700	50.484277	-0.092723	0.091750
3	10.00	50.71900	50.779493	0.060493	0.059600
4	15.00	51.43500	51.173022	-0.261978	0.255320
5	20.00	51.76900	51.468098	-0.300902	0.291467
6	70.00	52.29900	52.730433	0.431433	0.410773
7	120.00	53.04800	53.574321	0.526321	0.493631
8	170.00	53.61600	54.390372	0.774372	0.716968
9	220.00	54.12100	55.203407	1.082407	0.990087
10	270.00	54.84200	56.037880	1.195880	1.078537
11	300.00	55.36000	56.527211	1.167211	1.043203
12	600.00	60.15500	61.355580	1.200580	0.988046
13	900.00	65.21000	66.058482	0.848482	0.646372
14	1200.00	70.16700	70.624633	0.457633	0.325043
15	1500.00	75.03400	75.041754	0.007754	0.005167
16	1800.00	79.47700	79.296470	-0.180530	0.113703
17	2100.00	83.84100	83.355199	-0.485801	0.290557
18	2400.00	87.84300	87.156451	-0.686549	0.392315
20	3000.00	94.57300	94.585718	0.012718	0.006723

井底每段水泥环的半径依次减小。不考虑井身结构时,类似于 Ramey 方法只取油层套管的水泥环半径作为整个井筒的水泥环半径计算。从图 7 可以看出,考虑井身结构时,由于水泥环的导热系数比地层小,这样井筒向周围地层的热量传递更快,因此温度降低。

4 结论

(1) 分析了经典的 Ramey 井筒温度计算模型,指出了该模型存在的问题。

(2) 基于经典的 Ramey 井筒温度计算模型建立了 2 种

考虑复杂井身结构井的井筒温度分布计算模型,即从井底到井口的温度分布计算模型和从井口到井底的温度分布计算模型。

(3) 通过与实测数据对比给出了计算模型的误差分析对比情况,说明了井身结构并对井筒温度分布计算的影响。

(4) 从井底到井口的温度分布模型计算结果优于从井口到井底的温度分布模型。

参考文献 (References)

- [1] Ramey H J Jr. Wellbore heat transmission[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1962, 14(4): 427-435.
- [2] Willhite G P. Over-all heat transfer coefficients in steam and hot water injection wells [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1967, 19 (5): 607-615.
- [3] Herrera J O, Blrdwell B F, Hanzllk E J, et al. Wellbore heat losses in deep steam injection wells [C]. SPE California Regional Meeting, San Francisco, California, April 12-14, 1978. doi: 10.2118/7117-MS.
- [4] Shiu K C, Beggs H D. Predicting temprature in flowing oil wells[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 102(1): 1-11.
- [5] Sagar R K, Doty D R, Schidt Z, et al. Predicting temperature profiles in a flowing well[J]. *SPE Production Engineering*. 1992, 6(4): 441-447.
- [6] Kabir C S, Hasan A R. Heat transfer during two-phase flow in wellbore, part I formation temperature [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, Oct 6-9, 1991. doi: 10.2118/22866-MS.
- [7] Tian S, Finger J T. Advanced geothermal wellbore hydraulics model[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2000, 122(3): 142-147.
- [8] Hagoort J. Ramey's wellbore heat transmission revisited [J]. *SPE Journal*, 2004, 9(4): 465-474 .
- [9] Cazarez-Candia O, Vasquez-Cruz M A. Prediction of pressure, temperature, and velocity distribution of two-phase flow in oil wells [J]. *Jouranal of Petroleum Science and Engineering*, 2005, 46(3): 195-208.
- [10] 唐圣来, 刘成林. 高压气井井筒压力温度分布研究 [J]. *油气井测试*, 2009, 28(5): 23-25, 29.

Tang Shenglai, Liu Chenglin. *Well Testing*, 28(5): 23-25, 29.

(责任编辑 刘志远)