使用随钻录井资料计算地层静温 *

卢德唐[1]　郭冀义[2]
(1. 中国科学技术大学工程科学软件研究所　2. 大庆油田录井公司)

卢德唐等.使用随钻录井资料计算地层静温.天然气工业,2005;25(2):81～83

摘　要　根据随钻录井中热力学参数、泥浆参数及井身结构参数等,并给地层温度梯度一个初值,从热力学及流体力学等有关方程出发,经过推演得到井壁上温度随深度变化以及地层温度分布的数学模型用于计算泥浆出口温度。将此计算值与实测的泥浆出口温度值比较,根据比较结果再修正地层温度梯度,如此反复,直至计算值与实测的泥浆出口温度值相等,从而得到钻头所在的初始地层静温。由于钻井过程中泥浆、岩石及其温度场间是相互作用、相互影响的,这为研究热—流—固耦合过程的理论与应用提供了一种新的方法。

主题词　钻井　温度梯度　随钻录井　钻井液　热力学　井身结构

钻井时,由于地层温度梯度的影响,钻井液通过与地层交换热量,使得地层出现温度分布不均现象,这种分布使钻井液温度有所升高,导致泥浆入口与进口温度有所不同。如何通过入口与进口泥浆温度差来反算地层的静温是录井工作中一个很有意义的研究课题。

地层静温对石油的勘探与开发非常重要,目前一般使用测井的温度数据,采用 Horner 半对数方法得到[1,2,3],这种方法不仅费时,而且很多情况下 Horner 半对数图上不出现直线段,得到的地层静温也就不准确。本文利用录井数据,将钻井液视为液固两相非牛顿流体,并考虑流体的自然对流传热、流体与固壁之间的表面换热及岩石的热传导[4,5],通过数值计算方法得到井底静温,不需要特殊的工艺。由泥浆入口温度和出口温度计算井底静温的原理是:在所有热力学参数、泥浆有关参数及井身结构参数等已知的情况下,给一个地层温度梯度,可通过有关计算得到泥浆出口温度,将这个计算温度与实测的泥浆出口温度进行对比,如果两者不相符合,则改变地层温度梯度后再进行计算。如此反复,直至计算的出口温度与实测的泥浆出口温度一致为止,此时的地层温度梯度可被用来计算该井深下的地层静温。因此,研究地层静温的关键是从热力学及流体力学有关方程出发,通过数值差分或其他方法得到井壁上的温度随深度的变化及地层的温度分布。

一、数学模型的建立

(1)流体的视粘度(有效粘度):钻井液可认为是不可压流体,但由于泥浆的粘稠性,不可能用牛顿流体来处理,必须采用非牛顿流体来处理,对非牛顿流体这里研究的是宾厄姆流体和幂律流体。如高固相泥浆及加重泥浆,其流变特征近似宾厄姆流体,低固相泥浆可加入稀释剂,其流变特征近似幂律流体。

对于幂律流体,其有效粘性系数 μ_{eff} 可定义如下:

$$\mu_{\text{eff}} = M\gamma^{n-1} \tag{1}$$

式中:M 幂律流体的粘性系数(MPa),n 幂律流体指数系数,γ 剪切应变力(L/s)。对于流体速度为 v,半径为 R 的圆管,剪切应变力 γ 可写成:

$$\gamma = \frac{v(3n+1)}{nR} \tag{2}$$

对于内外径为 R_1、R_2 的环形管道其剪切应变力 γ 可写成:

$$\gamma = \frac{2v(2n+1)}{n(R_2 - R_1)} \tag{3}$$

对于宾厄姆流体,有效粘度系数 μ_{eff} 定义为:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_p + \frac{\tau_0}{\gamma} \tag{4}$$

式中:μ_p 为塑性粘度(mPa·s),τ_0 为屈服点(Pa)。流体体积流量为 Q,半径为 R 的圆管,剪切应变力 γ 可写成:

* 本文系国家自然科学基金(10102020)及 973 项目(G1999032805)资助。

作者简介:卢德唐,1966 年生,教授,博士生导师;现从事渗流力学及工程科学软件的教学科研工作。地址:(230026)安徽省合肥市中国科学技术大学力学系。电话:(0551)3603674。E-mail:dtlu@ustc.edu.cn

$$\gamma=\frac{4v}{R}=\frac{4Q}{\pi R^3} \tag{5}$$

对于内、外径分别为 R_1、R_2 的环形管道 γ可写成：

$$\gamma=\frac{6v}{(R_2-R_1)}=\frac{6}{\pi}\frac{Q}{(R_2-R_1)(R_2^2-R_1^2)} \tag{6}$$

(2)流体的对流过程：由于泥浆是液固混合物，那么密度为 ρ的泥浆中固相份额为 $SF=(\rho-1000)/\rho$，泥浆的热容量 $C=4190.5-3256.1SF$(J/kg·K)，泥浆的导热系数 $K=0.69+16.61SF$(W/m·K)。当泥浆流过固壁时，泥浆与固壁之间的传热称为对流传热，井筒内的对流传热由表面对流系数 h来决定，对直径为 D的管道，表面对流系数 $h=\frac{N_{Nu}K}{D}$，其中 Nusselt 数 N_{Nu}可用 Reynold 数 N_{Re}与 Prandlt 数 N_{pr}来表示，实验可得出三个无量纲数之间关系：

$$N_{Nu}=\begin{cases}0.023N_{Re}^{0.8}N_{pr}^{0.35} & (N_{pr}\leqslant 100)\\ \dfrac{(f/8)N_{Re}N_{pr}}{1.2+11.8(N_{pr}-1)N_{pr}^{-0.35}\sqrt{f/8}} & (N_{pr}>100)\end{cases} \tag{7}$$

式中：Reynol 数 $N_{Re}=\frac{\rho vD}{\mu}$，Prandlt 数 $N_{pr}=\frac{\mu C}{K}$，f沿程摩擦系数可表示如下：

$$f=\begin{cases}\dfrac{64}{N_{Re}} & (N_{Re}<2000)\\ \dfrac{64+0.007735(N_{Re}-2000)}{2000} & (2000<N_{Re}<4000)\\ \dfrac{0.316}{N_{Re}^{0.25}} & (4000<N_{Re}<350000)\\ 0.013 & (N_{Re}>350000)\end{cases} \tag{8}$$

(3)流体的自然对流传热：环空中的流体自然对流使流体沿径向的热导系数增大，由实验可得出环状空间中自然对流的有效导热系数值 K_{eff}：

$$K_{eff}=0.049K\left(\frac{(R_2-R_1)^3\rho^2\beta g\Delta T}{\mu^2}N_{pr}\right)^{0.333}N_{pr}^{0.074} \tag{9}$$

式中：$\beta=-\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_p$为热膨胀系数，$1/K$；$\mu$为流体粘度，Pa·s；$\Delta T$为环状空间径向温度差，K。这样流体的自然对流传热就等效于导热。

(4)井筒和地层之间的传热：确定井及地层的温度分布是一件复杂的工作，这是因为影响温度分布的因素很多，包括井筒内流体的流动类型、井身结构、流体、井壁、水泥、岩石的热导特性等。这些因素中的许多参数又是随时间变化的，联立求解能量方程、动量方程、连续方程和状态方程十分困难。经过大量数值实验，如果在能量方程中略去了与其它方程的耦合项，则精度仅降低5%，但可以独立求解相关方程。为此，对能量方程做了简化，略去了与其它方程耦合项，从而可以独立求解相关方程，以确定井壁及地层的温度分布。从钻铤到地层可能要经过多层套管及套管的水泥层，它们之间的传热是较复杂的，必须要考虑导热、对流(包括表面对流和自然对流)，但辐射项可以忽略。这样热传导差分形式的方程为：

$$q_r=-\Delta ZU\Delta T \tag{10}$$

式中：$U=\frac{2\pi}{\frac{1}{hr_1}+\frac{\ln(r_2/r_1)}{K_1}+\frac{\ln(r_3/r_1)}{K_2}+\cdots}$传导系数，$h$是流体表面对流系数，W/m²·K；$K_1$，$K_2$，…为各环形介质的导热系数，W/m·K；$r_1$，$r_2$，…介质交界处的半径，m；$\Delta T$温度差，K；$\Delta Z$垂向距离，m。固体的导热系数等随温度变化较小，可以看作常数，而流体的表面对流系数和导热系数都是温度函数，这样方程(10)就成为非线性的，实际计算中可以用上一步的温度求出系数，从而使方程线性化。

(5)井筒内温度分布的差分：当钻井时，处于钻进期间的流体，其能量方程可表示成：

$$\rho\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}+\Phi+\nabla(K\nabla T)+\rho q \tag{11}$$

式中：h为流体(泥浆)的焓，Φ为势函数。方程(11)的差分形式为：

$$A\Delta Z\rho C\frac{\Delta T}{\Delta t}+A\Delta Z\frac{\Delta\rho}{\Delta t}(1-\beta T)+Av[\rho C\Delta T+\Delta\rho(1-\beta T)]=A\Delta Z\frac{\Delta\rho}{\Delta t}+Av\nabla\rho+\nabla(K\nabla T)+\rho q+\Phi \tag{12}$$

式中：A为流体占据的面积。动量方程可表示成：

$$\rho\frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}=\rho\vec{g}-\nabla p+\mu\Delta\vec{v} \tag{13}$$

方程(13)的差分形式为：

$$Av\nabla p=-\rho\frac{\partial v}{\partial t}\Delta ZA-Av\rho\Delta\left(\frac{v^2}{2}\right)+v\rho gA\Delta Z-Av\mu\Delta Z\Delta v \tag{14}$$

将方程(14)代入方程(12)，考虑到研究区域内无热源，并略去两个方程中的耦合项及耗散项 Φ后得到如下形式的差分方程：

$$T_{k,i}^{n+1}=A_{k,i}T_{k-1,i}^{n+1}+B_{k,i}T_{k,i-1}^{n+1}+C_{k,i}T_{k,i+1}^{n+1}+D_{k,i}T_{k,i}^{n}+E_{k,i}T_{k-1,i-1}^{n}+F_{k,i}T_{k-1,i+1}^{n+1} \tag{15}$$

式中：

$$H=\frac{2vA\rho C}{\Delta Z}+U_{k,i-1}+U_{k,i}+\frac{(\rho CA)_f+(\rho CA)_{st}}{\Delta t}$$

$$A_{k,i}=\frac{2vA\rho C}{H\Delta Z}-\frac{U_{k,i-1}}{H}-\frac{U_{k,i}}{H}-\frac{(\rho CA)_f+(\rho CA)_{st}}{H\Delta t}$$

$$B_{k,i}=\frac{U_{k,i-1}}{H},C_{k,i}=\frac{U_{k,i}}{H},D_{k,i}=\frac{(\rho CA)_f+(\rho CA)_{st}}{H\Delta t}$$

$E_{k,i}=\frac{U_{k-1,i-1}}{H}$，$F_{k,i}=\frac{U_{k-1,i}}{H}$，下标f表示流体，下标

st 表示钢铁。

(6)岩石中的温度分布计算:岩石中的传热较简单,只有导热项,而无对流传热项,考虑径向及轴向传热,经整理后,差分形式的方程为:

$$T_{k,i}^{n+1} = A_{k,i}T_{k-1}^{n+1},_i + B_{k,i}T_{k+1}^{n+1},_i + C_{k,i}T_{k,i-1}^{n+1} + D_{k,i}T_{k+1}^{n+1},_i + E_{k,i}T_{k,i}^{n} \quad (16)$$

式中:

$$H = \frac{A}{4}\left[\Delta Z_{k-1}(K_{k-1}+K_k)+\Delta Z_{k+1}(K_k+K_{k+1}) + \Delta Z_k\left(U_{k,i-1}+U_{k,i}+\frac{\rho CA}{\Delta t}\right)\right]$$

$$A_{k,i}=\frac{A}{4H\Delta Z_{k-1}}(K_{k-1}+K_k),B_{k,i}=\frac{A}{4H\Delta Z_{k+1}}(K_k+K_{k+1}),$$

$$C_{k,i}=\frac{\Delta Z_k U_{k,i-1}}{H},D_{k,i}=\frac{\Delta Z_k U_{k,i}}{H},E_{k,i}=\frac{\Delta Z}{H}\frac{\rho CA}{\Delta t},$$

$$\Delta Z_{k-1}=Z_k-Z_{k-1},\Delta Z_{k+1}=Z_{k+1}-Z_k,$$

$$\Delta Z_k=\frac{Z_{k+1}+Z_k}{2}-\frac{Z_{k-1}+Z_k}{2}$$

(7)网络划分及计算方法概述:在本文中,我们将地层、井身结构体系视为径向和轴向的二维区域,地层中的轴向网格结点与井筒中处于同一高度。轴向网格的格长度为 20 m,钻头位置向下扩展 2 个网格。而径向温度在井筒附近变化最快,因此,井筒附近需要进行网格加密,网格的宽度随半径呈指数增长。如果轴向网格数为 N_z,径向网格数为 N_r,则地层中的总结点数为 $N_z\times(N_r-3)$,井筒中径向有 3 个网格,故井筒中有 $3N_z$ 个方程,而地层中有 $N_z\times(N_r-3)$个方程。本文中采用 Gauss—Seide 迭代法同时求解井筒中的 $3N_z$ 个方程及地层中 $N_z\times(N_r-3)$个线性方程组,作为边界条件轴向最底下的一个网格点的温度可保持不变。采用 Gauss—Seide 迭代法,有些格点的收敛速度快于另外的格点,程序中自动检查,使这些点不再参加迭代,以便加快计算速度。另外,合适选取松弛因子,也可加快收敛速度。

二、在录井中的应用

在钻井中随钻录井可以获取泥浆及地层的相关参数,根据随钻录井中的泥浆出口、入口的密度、温度、体积等数据,采用表 1 所示的套管、水泥环及岩石的热力学参数,通过计算可以得到地层静温。由分析可看出,在地层深度较小时,计算出来的地层静温数据振荡较大,随着深度增加计算的地层静温明显呈现出一定的规律性。产生这种情况的主要原因,当井深较浅时,由于泥浆还来不及与地层交换热量,就已经流出地面,因此计算出来的地层静温误差较大。但当深度较深时,泥浆与地层充分交换热量,泥浆出口温度能充分反应地层静温,这种情况下计算出来的地层静温,准确率较高。

表 1　套管、水泥环及岩石的热力学参数

名　称	密度 (kg/m³)	比热 (J/g·K)	导热系数 (W/m·K)
套管	7849	461	45.16
水泥	1666	838	1.04
<200 m 地层	1998	1157	1.63
200～400 m	2100	1180	1.65
400～600 m	2180	1190	1.67
600～800 m	2220	1200	1.69
800～1000 m	2240	1210	1.70
1000～1200 m	2260	1215	1.71
1200～1400 m	2270	1219	1.72
1400～1600 m	2280	1225	1.73
1600～1800 m	2290	1230	1.74
1800～2000 m	2300	1238	1.75
2000～2200 m	2310	1250	1.76
2200～2400 m	2315	1257	1.77

三、结　论

(1)本文通过地层温度梯度初值计算泥浆出口温度,并将此温度与实测的泥浆出口温度比较,通过迭代不断修正地层温度梯度,直至计算值与实测值相同。以此来计算钻头所在处的地层静温;

(2)通过数值差分方法,求解岩石中温度分布,并计算出各点的温度;

(3)计算所得的地层静温为钻井液的配制、钻头速度的确定等钻井工艺数的优化选定,提供了理论依据。

参 考 文 献

1　Dowdle W L, Cobb W M. Static formation temperature from well log—an empirical method. J Pet Tech, 1975; 27(12): 1326—1330

2　Roux, Brian. An improved approach to estimating true reservoir temperature from transient temperature dada. World oil (October 1987): 77—89

3　Schoeppel R J, Gilarranz S. Use of well log temperature to evaluate regional geothermal gradients. J Pet Tech, 1986; 38(6): 667—673

4　卢德唐,曾亿山,郭永存.多层地层中的井筒及地层温度解析解.水动力学研究与进展,2002;17(3)

5　Woodley G R. Computing downhole temperature in circulation, injection and production wells. J Pet Tech, 1980; 32(12): 1509—1522

6　吴望一.流体力学.北京:北京大学出版社,1982

(收稿日期　2004-06-26　编辑　钟水清)