

超高温地热井泡沫钻井井筒压力剖面计算方法

王文勇^{1,2} 龙俊西¹ 刘博伟¹ 李 泉¹ 孟英峰¹

1.“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学 2.中国石油长城钻探工程有限公司国际钻井公司

王文勇等.超高温地热井泡沫钻井井筒压力剖面计算方法.天然气工业,2012,32(7):59-62.

摘 要 肯尼亚 OLKARI 地区地热井地层温度高达 350 °C,主要采用泡沫钻井,然而其低压和超高温的特点可能造成泡沫流体相态变化,目前尚没有针对相变条件下泡沫钻井井筒压力剖面的计算方法。为此,利用流体高压物性分析仪,绘制出泡沫钻井液“ $p-T$ ”相图,并指出了钻井液相态变化的规律。进而应用现有的欠平衡钻井流体流动模型,建立了一套适应相变的钻井工况参数计算模型。最后,利用 OLKARI 地区某地热井的温度、压力资料,计算了该口井的流体流动参数,得到了该井井筒中的泡沫相态分布规律。通过井筒内流体压力的计算,可以更准确地了解工作液的工作状态,为预防井下复杂事故的发生提供了理论依据。

关键词 泡沫钻井 钻井液 超高温 实验研究 井筒压力 计算方法 肯尼亚 OLKARI 地区 地热井

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2012.07.014

泡沫钻井液具有较高的携岩能力,能够有效地保持井眼清洁、提高钻速。OLKARI 地区地层异常高温,有些地层的温度可达 350 °C,且裂缝性地层高温低压的特性可能使泡沫钻井流体气化,变为气相钻井流体。钻井流体没有足够的携屑能力,必然会导致井下复杂情况的发生,进而延长钻井周期,增加钻井成本。因此,采用泡沫钻井方式,泡沫钻井液在井筒内的相图将是研究的重点。

在以往的泡沫钻井流体的研究中,未曾遇到过类似于肯尼亚地区的超高温地层,泡沫都被简化成为气液比稳定、气相液相无滑脱的模型,未考虑泡沫流体在井筒中的相态变化对钻井参数计算准确性的影响,现有的研究内容,已经不能为超高温地热井泡沫钻井措施的改进提供可靠依据。为此,有必要考虑超高温对泡沫相态的影响,研究泡沫钻井过程中井筒流体的相态分布,并改进钻井参数计算方法。

1 地热井地温分布特点

OLKARI 地区地热井的地温变化极其异常,有的井深只有几百米,地层温度可超过 150 °C;有的井深在 1 000 m 左右,地温超过 250 °C,有的井底温度甚至达到 350 °C。

如图 1 所示,根据该地区某井实测地温数据拟合结果,将地热井地层地温梯度简化为 0~650 m 地温梯度为 43 °C/100 m,650~3 000 m 地温梯度 3 °C/100 m。由此初步确定井筒内温度分布情况。

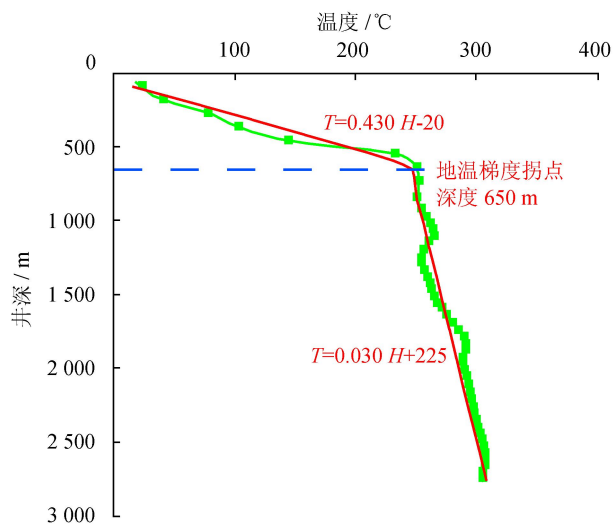


图 1 地热井温度分布图

2 泡沫基液相图研究

研究泡沫的相变与单组分水相变唯一的区别在

基金项目:国家自然科学基金重点项目“气体钻井技术基础研究”(编号:51134004)的研究成果。

作者简介:王文勇,1961年生,博士研究生;主要从事钻井技术管理与科研方面的研究工作。地址:(100101)北京市朝阳区北辰西路8号北辰世纪中心A座11层。电话:(010)84379588。E-mail:wangwy.gwdd@cnpc.com.cn

于泡沫体系中含有空气,即研究含水的真空容器中,空气的引入对其相态变化的影响。忽略空气在水中的溶解度。因此,该体系中液相为水,气相为空气和水蒸气,两者达到平衡。

对于空气和水蒸气组成的混合气体,可以采用分压定律来研究。由分压定律可知,混合气体形成的总压等于空气的分压与水蒸气的分压之和,而各组分的分压等于各组分所占的摩尔质量分数与该系统中气相的总压的乘积。

$$p_{\text{总}} = p_{\text{空气}} + p_{\text{水蒸气}} \quad (1)$$

根据真实气体状态方程式可得:

$$p_{\text{水蒸气}} = Z_{\text{水蒸气}} n_{\text{水蒸气}} \frac{RT}{V} \quad (2)$$

$$p_{\text{空气}} = Z_{\text{空气}} n_{\text{空气}} \frac{RT}{V} \quad (3)$$

由式(1)、(2)、(3)可得:

$$\frac{p_{\text{总}} - p_{\text{水蒸气}}}{p_{\text{水蒸气}}} = \frac{Z_{\text{空气}} n_{\text{空气}}}{Z_{\text{水蒸气}} n_{\text{水蒸气}}} \quad (4)$$

由于当气体中水的分压小于当前温度、压力条件下的饱和蒸气压时,水即可蒸发。通过整理可得泡沫流体相变判别方程组:

$$\begin{cases} \frac{p_{\text{总}} - p_{\text{水蒸气}}}{p_{\text{水蒸气}}} = \frac{Z_{\text{空气}} n_{\text{空气}}}{Z_{\text{水蒸气}} n_{\text{水蒸气}}} \\ \ln \frac{p'_{\text{水蒸气}}}{p_{\text{水蒸气}}} = \frac{V_m^l}{RT} (p_{\text{总}} - p_{\text{水蒸气}}^*) \end{cases} \quad (5)$$

当 $p_{\text{水蒸气}}$ 大于 $p'_{\text{水蒸气}}$ 时,泡沫基液不会发生相变;当 $p_{\text{水蒸气}}$ 小于 $p'_{\text{水蒸气}}$ 时,泡沫基液会发生相变;两者相等时,即为相变分界点。

根据以上的分析可得到泡沫基液相图(图2)。从图2可知,当系统温度到达 546.5 K,压力达到 6.221 MPa 时,理论分压线与修正饱和蒸气压线相交,即该交点为此系统发生相变的分界点,低于该点的系统温度和压力,泡沫流体不会发生相变,高于该点的系统温度和压力,泡沫流体发生相变。

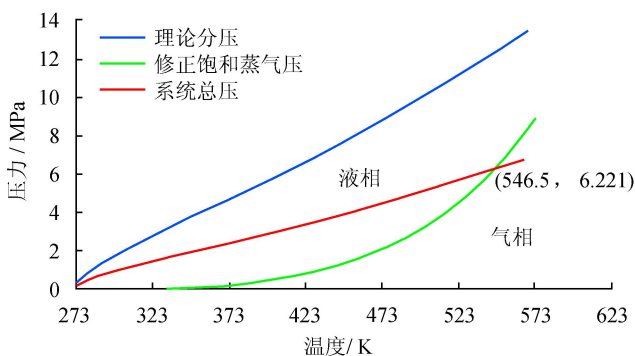


图2 泡沫基液相图

3 井筒内流体压力计算模型

井筒内压力分布情况直接影响着井内流体相态变化的情况。因此,就所涉及的流体流动模型进行介绍。

3.1 气体钻井模型

3.1.1 气体井内流动基本假设

为了对气体钻井时井内流动进行较为准确的描述,作如下假设:①气体在井内作一维流动,因为井内流道面积大大小于流道的纵向尺寸。因此,可以忽略流动参数在径向上的变化,井内气体流动可按一维考虑。②井内流动温度根据地温梯度计算,Mitchell R. F^[1]的计算结果表明,气体钻井过程中,流体处于完全非稳态热力学平衡时,井内流体温度与地层温度相近。因此,井内气体温度可以根据地温梯度求取。③井内流动为拟单相流动,气体钻井流体中,固相浓度较低。因此,将气体钻井流体的流动视为单相流动,岩屑和干粉仅对气体的流动压力有影响。

3.1.2 气体井内流动计算

3.1.2.1 流动计算的基本理论

1) 钻柱中气体流动方程。根据流体力学基本原理,气体在钻杆中流动遵循的流动方程为:

$$\text{质量守恒: } \frac{\partial p}{\partial t} + \Delta(\rho V) = 0 \quad (6)$$

$$\text{动量守恒: } \rho \frac{DV}{Dt} = \rho g - \nabla p + \nabla^2 \mu[\epsilon_{ij}] + \nabla(\lambda \nabla V) \quad (7)$$

$$\text{能量守恒: } \rho \frac{De}{Dt} = \nabla(k \nabla T) + \phi - p \nabla V \quad (8)$$

式中 g 为重力加速度; $\mu = \mu(p, T)$ 为黏性系数; $\lambda = \lambda(p, T)$ 为体膨胀黏性系数; $k = k(p, T)$ 为热传导系数。

2) 环空中气体流动方程组。稳定流动方程:

$$\begin{cases} \frac{d}{dz}(\rho_{\text{mix}} v A) = 0 \\ \frac{d}{dz}(\rho_{\text{mix}} A v^2 + p A) = -\rho g A - \frac{\rho A f v |v|}{2D} \end{cases} \quad (9)$$

3.1.2.2 钻柱内计算

立管压力是指钻井中立管处的压力,钻井中,气体从立管进入钻杆,经钻头后,沿环空返出地面。因此,立管压力为井底压力与钻杆压耗之和。

根据钻杆中气体流动方程组,在忽略等直径微元段内气体流速变化的基础上,可得压耗为:

$$p^2 = \left\{ p_1^2 + b'(T_0 + GH)^2 \left[e^{\frac{2a'\Delta H}{(T_0 + GH)}} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中 p_1 为微元段上游压力, Pa; p_2 为微元段下游压力, Pa; ΔH 为微元段长度, m。

3.1.2.3 钻头流动计算

气体通过钻头水眼时,流道面积突然扩大,将产生较大的压力损失,气流速度增加,同时引起温度的变化。即:

$$\frac{p_a}{p_b} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{-\frac{k}{k-1}} \quad (11)$$

式中 p_b 为下游压力, Pa; p_a 为音速流动时上游压力, Pa; k 为气体比热容。

3.1.2.4 环空流动计算

由环空气体流动方程组可知,对于等直径的环空微元段,假设其中气体流速不变,则由动量守恒方程可得

$$dp = \gamma_{\text{mix}} g \left[1 + \frac{fv^2}{2g(D_h - D_{p0})} \right] dz \quad (12)$$

式中 D_h 为井眼尺寸, m; D_{p0} 为钻柱外径, m; f 为摩擦系数; v 为流体返速, m/s; γ_{mix} 为混合物重度, N/m³。

3.2 泡沫钻井模型

3.2.1 泡沫钻井基本假设

泡沫钻井时,井内的流动通道与气体钻井时相似。因此,二者可以采用相同的物理模型。为了便于对井内泡沫的流动规律进行研究,需作如下假设:①因井内流道横截面尺寸远小于纵向尺寸,故井内泡沫流动考虑为一维流动;②注入井内的泡沫在地面已经充分发泡,在井内的各个位置,流体都以泡沫形式存在;③泡沫是一种高黏度流体,气相和液相之间无滑脱,两相的相速度相同;④泡沫气液相间无化学反应,且相间没有质量交换,只有能量交换;⑤泡沫流体温度由地温梯度或实测数据确定。

3.2.2 泡沫钻井流体计算

3.2.2.1 井内泡沫流体基本理论

1) 连续性方程

气相连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \alpha) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \alpha v) = 0 \quad (13)$$

液相连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \alpha) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \alpha v) = 0 \quad (14)$$

式中 ρ 为液相密度, kg/m³; $\rho \alpha$ 为气相密度, kg/m³; v 为泡沫流速, m/s; α 为泡沫质量。

2) 运动方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m v) + \frac{\partial}{\partial z}(p + \rho_m v^2) + \rho_m g \sin \theta + \frac{f_r \rho_m v^2}{2D} = 0 \quad (15)$$

式中 μ_e 为泡沫的有效黏度, Pa·s, 其值与泡沫质量有关, 由泡沫流变模型决定; ρ_m 为泡沫密度, kg/m³, $\rho_m =$

$\rho_e \alpha + \rho \alpha$; v 为泡沫流动速度, m/s; D 为流道当量直径, m; f_r 为泡沫受到的摩擦阻力系数, 由泡沫流动雷诺数确定^[2-3]。

3.2.2.2 井内泡沫流动的计算

稳定流动时流动参数不随时间变化, 气体在井内稳定流模型为:

$$\begin{cases} \rho \frac{dv}{dz} + v \frac{d\rho}{dz} = 0 \\ \frac{dp}{dz} + \frac{\rho v dv}{dz} = -f_w - \rho g \sin \theta \end{cases} \quad (16)$$

$$\left(\frac{ZRT}{2g} - \frac{d}{f} \right) \ln \left(\frac{\frac{fm^2}{2d} - \frac{gp_a^2}{Z^2 R^2 T^2}}{\frac{fm^2}{2d} - \frac{gp_s^2}{Z^2 R^2 T^2}} \right) + \frac{d}{f} \ln \frac{p_a^2}{p_s^2} = dz \quad (17)$$

上式就是控制体内气体流动的上下段的压力关系, 其中 p_a 为上游压力, p_s 为下游压力, d 为控制体长度, 当给定下游压力, 计算控制体上游压力 p_{a1} , 再以 p_{a1} 下游压力计算上游压力 (p_{a2}), 沿划定网格迭代计算, 直到计算处立管压力 (p_s)。

3.2.2.3 钻头泡沫流动的计算

喷嘴处泡沫流动可作如下假设:①泡沫处于稳定流动状态;②忽略因喷嘴高度变化引起的重位压差;③泡沫在喷嘴中作等熵流动。

$$p_{\text{bottom}} = p_0 \exp \left[\frac{C_2 \Delta p_b}{C_1} - E(v_n^2 - v_0^2) \right] \quad (18)$$

式中 p_{bottom} 为井底压力, Pa; p_0 为喷嘴上游压力, Pa; v_n 、 v_0 分别为喷嘴出口、进口流速, m/s; Δp_b 为钻头喷嘴处的压力降, Pa, 且有:

$$\Delta p_b = p_0 - p_{\text{bottom}} \quad (19)$$

4 井筒内流体相态分析

井筒内流体相态分析主要在前人研究基础上, 通过理论分析与经验结合的方式, 着重分析泡沫相态变化对钻井液在井筒中所处流型的影响, 推导出更为接近存在相态变化的泡沫钻井实际工况的计算方法。

4.1 井筒耦合流动计算方法

首先判断出当前位置泡沫基液是何种相态, 有无发生相变, 然后判定相变后钻井液所处的流型, 根据不同位置钻井液所处的不同流型选择不同的动力参数计算模型, 从而得出泡沫钻井的关键参数。求解计算模型步骤如下:

1) 以井口压力为起点^[4], 按照深度对井筒环空进行离散处理, 内层循环用于计算各个节点单元的压降, 外层循环用于计算温度。在开始计算的时候必须知道

以下参数:稳态流动的气液流量、密度、黏度,井口回压,井身结构和钻具组合几何尺寸,轨迹数据,井口温度,地温梯度,管子内外壁粗糙度等。

2)根据地温梯度计算离散单元的温度增量和节点温度 T_i^0 。

3)假设该离散单元的压降 Δp_0 ,并计算该单元的平均温度和平均压力。

4)在平均压力温度下计算气液物性参数:环空质量数、表观黏度、混合物密度、液相黏度、环空返速、岩屑沉降速度、传输比、岩屑浓度、气液界面张力等。

5)进行泡沫两相流特性参数计算。

6)判断计算的离散单元压耗和假设压耗是否满足精度要求,不满足就返回第4步计算,否则进行下一步计算。

7)应用井筒传热方程和能量方程计算离散单元节点温度。

8)判断计算的离散单元温度和假设温度是否满足精度要求,不满足就返回第4步计算,否则进行下一步计算。

9)应用本文提到的泡沫基液相图,判断钻井液是否发生相变,如果没有发生相变,继续计算下一离散单元,否则选择气体钻井理论模型返回第4步重新计算该离散单元,如此循环计算出泡沫钻井的井筒压力剖面。

4.2 井筒内流体相态分布规律

下面将根据井筒耦合流动计算方法,以 OLKARI 地区某超高温地热井为例进行井筒流体相态分析。泡沫基液的相态变化规律如图 3。

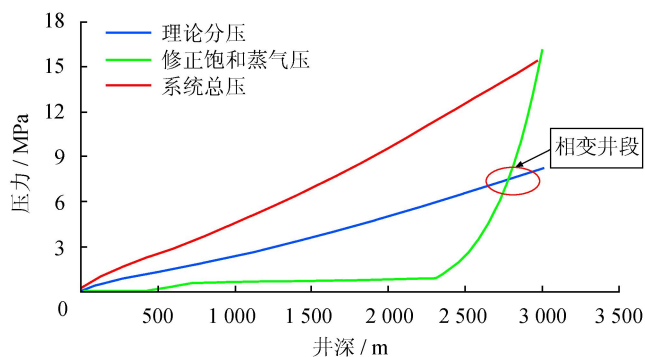


图3 环空泡沫相变分析图

由图3分析可得到以下结论,泡沫钻井液在环空2700 m处发生相态变化,由液相变为气相,是泡沫钻井变为了气体钻井,从而降低了携岩能力,可能导致井眼的净化问题。

5 结论

笔者针对超高温地热井钻井技术难题,通过对稳定泡沫钻井理论模型研究以及气体钻井理论模型研究,最终形成了一套适用于地热钻井的高温泡沫相变耦合流动计算模型,同时进行了现场实例计算,取得以下几点结论与认识。

1)在钻进过程中,如果泡沫流体相态发生变化,其密度等参数将发生变化,直接影响井底压力的推算,并且导致井筒流体流态及工况参数改变,可能导致井下复杂情况的出现。

2)通过对相变基本理论进行研究,基于分压理论,同时考虑惰性气体对液相饱和蒸气压的影响,建立了泡沫流体相变判别模型,并针对不同压力、温度条件下的泡沫流体进行了相变分析,当某温度压力下的理论分压低于该温度压力下的修正饱和蒸气压时,泡沫流体发生相变。

3)基于气基流体多相流理论,建立了井下稳定泡沫钻井理论模型和气体钻井理论模型。并将泡沫基液相变判别模型、稳定泡沫钻井理论模型以及气体钻井理论模型相耦合,最终形成了一套适用于地热钻井的高温泡沫相变耦合流动计算模型。

4)运用 OLKARI 地区某超高温地热井的实际资料进行了实例计算。结合高温泡沫相变耦合流动模型进行分析,可以更准确地了解工作液的工作状态,为高温地热钻井安全钻进提供了科学依据。

参 考 文 献

- [1] MITCHELL R F. Simulation of air and mist drilling of geothermal wells[J]. Journal of Petroleum Technology, 1983, 35(11):2020-2126.
- [2] TAN H C S, MCGOWN J M, MCGO J M. Friction pressure correlation for CO₂ foam fluids[C]// paper 21856-MS presented at the Low Permeability Reservoirs Symposium, 15-17 April 1991, Denver, Colorado, USA. New York: SPE 1991.
- [3] LIU Gefei, MEDLEY G H Jr. Foam computer model helps in analysis of underbalanced drilling[J]. Oil & Gas Journal, 1996, 94(27):114-119.
- [4] 樊世忠,余金海.泡沫流体钻井技术[M].北京:石油工业出版社,1991.