# 泡沫欠平衡钻地热井井筒多相流特性研究

曹献平1 旷曦域1 刘英波2 李海旭1

1.西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500;
 2.中国石油胜利石油管理局孤岛采油厂垦利油藏经营管理区,山东 东营 257231

摘 要:针对泡沫钻超高温地热井井筒泡沫流体可能发生相态变化的情况,提出了地热井泡沫 钻井井筒物性参数计算方法。基于泡沫相变判别模型,结合泡沫钻井理论模型和气体钻井理论模 型,建立了适用于超高温地热钻井的高温泡沫相变耦合流动计算模型。通过数值计算,得到了井筒 物性参数分布。计算结果表明,井筒是否相变取决于气液注入比和地层温度;同时,泡沫流体在高温 下发生相变后,其物性参数均有较大突变,但在一定的注入气液比条件下仍能保证有效携岩。

关键词:地热井;超高温;温度分布;理论模型;相变 DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2013.04.014

## 0 前言

地热资源是蕴藏丰富且无污染的清洁能源,主要 用途为地热发电、供暖、务农和行医等。全世界地热资 源总储量 1.45×10<sup>22</sup> kJ,相当于 4.948×10<sup>15</sup> t标准煤燃 烧时释放出的能量。随着石油、煤炭等传统能源逐渐 枯竭,地热资源将成为未来缓解能源危机的一个重要 途径。

地热钻井施工的地层岩性主要是火山岩或变质 岩,具有地层温度超高、可钻性极差、裂缝发育等钻 井难点。井下超高温对地热钻井循环介质要求极为 苛刻,而水基泥浆(抗温<200 ℃)和油基泥浆(储层伤 害)一般不适合于超高温地热井钻井<sup>[1-2]</sup>。采用超高温 泡沫钻井能有效地解决地热井钻井难题,但将现有 泡沫钻井井筒多相流计算模型用于地热井钻井其计 算结果必然相差较大。主要原因在于泡沫在超高温 低压状态下是否会发生相变,因此有必要针对地热 井特殊情况,分析泡沫在高温低压下的相态,建立多 相流模型,计算井筒物性参数,有效地指导地热井钻 井施工<sup>[1-2]</sup>。

## 1 数学模型的建立与求解

#### 1.1 泡沫液相变判别模型

由物理化学理论可知,单组分水所处温度越高, 饱和蒸汽压越高,忽略空气在水中的溶解度,不考虑 泡沫钻井液中化学添加剂和表面张力对泡沫液相饱 和蒸汽压的影响,同时空气的存在会增加泡沫液相的 饱和蒸汽压,基于分压定律理论,得到了井下泡沫流 体相变判别模型方程<sup>[3-4]</sup>。

$$\begin{cases}
\frac{p_{\hat{\omega}} - p_{\pi \underline{x}\underline{x}\underline{\gamma}}}{p_{\pi \underline{x}\underline{x}\underline{\gamma}}} = \frac{Z_{\underline{\varphi}\underline{\gamma}} \ n_{\underline{\varphi}\underline{\gamma}}}{Z_{\pi \underline{x}\underline{x}\underline{\gamma}} \ n_{\pi \underline{x}\underline{\gamma}\underline{\gamma}}} \\
\ln \frac{p'_{\pi \underline{x}\underline{\gamma}\underline{\gamma}}}{p_{\pi \underline{x}\underline{x}\underline{\gamma}}} = \frac{V_m^l}{RT} (P_{\hat{\omega}} - p_{\pi \underline{x}\underline{x}\underline{\gamma}}^*)
\end{cases}$$
(1)

式中: $p_{\pm}$ 为井筒压力, Pa;  $p_{*,\underline{x}}$ 为水蒸气分压, Pa;  $Z_{2\mathbb{T}}$ 、 $Z_{x\underline{x}}$ 、分别为空气和水蒸气的偏差因子, 无量纲;  $p_{*,\underline{x}}^*$ 、为单组分水的饱和蒸汽压, Pa;  $p'_{*\underline{x}}$ 、为考虑惰性 气体后修正后的饱和蒸汽压, Pa; R 为气体常数, J/ (kg·K)。

由式(1)可知,当 $p_{x_{3}} > p'_{x_{3}}$ 时,泡沫基液不会发 生相变;当 $p_{x_{3}} < p'_{x_{3}}$ 时,泡沫基液会发生相变;两者 相等时,即为相变分界点。

收稿日期:2013-03-05 基金项目:西南石油大学青年科研创新团队"欠平衡钻井方向"基金(2012XJZT003) 作者简介:曹献平(1988-),男,湖北宜都人,硕士研究生,主要从事气体钻井相关研究。

## 1.2 地热井钻井井筒多相流模型

为了精确模拟计算相变后井筒物性参数分布,需要分别建立泡沫动力学计算模型和气体动力学计算模型<sup>[5-8]</sup>。

- 1.2.1 泡沫钻井井筒流动控制方程
- 1.2.1.1 q相连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\partial_{q}\rho_{q}) + \nabla (\partial_{q}\rho_{q}v_{q}) = 0$$
(2)

1.2.1.2 q 相动量平衡方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_{q} \rho_{q} v_{q}) + \nabla (\alpha_{q} \rho_{q} v_{q}^{2})$$
  
=- $\alpha_{q} \nabla p + \nabla \tau_{q} + \sum_{p=1}^{n} (R_{pq} + m_{pq} v_{pq}) + \alpha_{q} \rho_{q} (F_{q} + F_{\text{lift},q} + F_{\text{Vm},q})$  (3)

- 1.2.2 气体钻井井筒流动控制方程
- 1.2.2.1 连续性方程

а

 $\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\rm m}) + \nabla (\rho_{\rm m} v_{\rm m}) = 0 \tag{4}$ 

1.2.2.2 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\rm m}v_{\rm m}) + \nabla(\alpha_{\rm q}v_{\rm m}^2) = -\nabla p + \nabla[\mu_{\rm m}(\nabla v_{\rm m} + \nabla v_{\rm m}^T)] + \rho_{\rm m}\bar{g} + \bar{F}$$
(5)

式中: $\tau_q$ 为第q相的压力应变张量,Pa;  $R_{pq}$ 为相间相 互作用力,kg·m/s<sup>2</sup>;  $v_{pq}$ 为相间速度,m/s;  $F_q$ 为外部体 积力,kg·m/s<sup>2</sup>;  $F_{int,q}$ 为q相所受升力,kg·m/s<sup>2</sup>;  $F_{Vm,q}$ 为 q相所受虚拟质量力,kg·m/s<sup>2</sup>;  $\rho_q$ 、 $\rho_m$ 分别为q相和混 合物的密度,kg/m<sup>3</sup>;  $v_q$ 为q相的速度,m/s;  $\alpha_q$ 为q相 所占体积百分数,%;  $v_m$ 为质量平均速度,m/s;  $\overline{F}$ 为体 积力,kg·m/s<sup>2</sup>。

#### 1.3 模型的求解

考虑稳定流动,式(2)~(5)模型中含有对时间偏 导数的项为0,对上述模型采用迭代法求解,得到初始 井筒物性参数和相平衡参数,采用相变模型判别是否 发生相变。若发生相变,采用耦合模型再次计算井筒 物性参数,若没有发生相变,则初始井筒物性参数为 最终井筒物性参数。

## 2 实例计算及分析

肯尼亚 OLKARIA 地区地热井井深 3 000 m,地 层温度最高可达 350 ℃<sup>[4-6]</sup>,现场采用的注气量为 75 m<sup>3</sup>/min,注液量为 15~20 L/s。模拟了该气液 75m<sup>3</sup>/min 注 气量下的井筒压力、井筒相态、携岩能力,结果见图 1。

图 1 表明了泡沫钻井液循环至井深 2 700 m 段时 发生了相态变化,井筒泡沫由泡流转变为蒸汽流动, 其相变位置与泡沫液温度和压力有关。

## 第 31 卷 第 4 期 OIL AND GAS FIELD DEVELOPMENT 油气田开发

49

图 2~3 表明了注入气液比增大,则环空质量数增 大,有利于携岩的同时会造成井筒高温低压的情况出 现,井筒易发生相态变化。因此,注入气液比是影响相 变的关键因素。



图 4~5 表明了当泡沫流体在高温下发生相变后, 其环空流速、岩屑浓度发生了较大突变,但在一定的 气液比条件下仍能保证有效携岩。因为基液汽化后会 产生一定气量,加上原始注气量,其井筒实际循环气





量较大,较常规气体钻井汽化后井筒流体密度更大,携岩比动能更强。

## 3 结论

根据实例中肯尼亚 OLKARIA 地区地层温度分布 情况分析,当注入气液比较小时,井筒循环动压高,泡 沫基液理论分压高,相变井段变短;反之,注入气液比 较大时,井筒循环动压低,相变井段相应较长,因此可 以根据实际情况,调节井口气液注入量,控制相变井 段。地热井钻井时,在保证井筒温度不高于发泡剂抗 温极限基础上,应该适当增大注入气液比,减小甚至 尽量避免井下发生相变,因为地热井产出主要为水蒸 气,水蒸气对岩屑有一定的润湿作用,容易发生泥包 钻头,引发井下复杂事故。

## 参考文献:

 [1] 黄 鑫, 董秀成, 肖春跃. 非常规油气勘探开发现状及发展 前景[J]. 天然气与石油, 2012, 30(6): 38-41.
 Huang Xin, Dong Xiucheng, Xiao Chunyue. Present Situation

and Development Prospect of Unconventional Oil and Gas Exploration and Development [J]. Natural Gas and Oil,2012,30 (6):38–41.

[2] 蔡义汉. 地热直接利用[M]. 天津:天津大学出版社,2004. 122-130.

Cai Yihan. Direct Use of Geothermal [M]. Tianjing: Tianjing University Press, 2004.122–130.

[3] 朱志昂. 近代物理化学 (第三版)[M]. 北京:科学出版社, 2004. 327-329.

Zhu Zhiang. Modern Physical Chemistry (volume of third edition)[M]. Beijing: Science Press, 2004. 327–329.

- [4] 王文勇,龙俊西,刘博伟,等. 超高温地热井泡沫钻井井筒压 力剖面计算方法[J]. 天然气工业,2012,32(7):59-60.
  Wang Wenyong, Long Junxi, Liu Bowei, et al. The Calculation Method of Borehole Pressure Profile in Ultra-high Geothermal Wells While Foam Drilling [J]. Natural Gas Industry,2012,32 (7):59-60.
- [5] 王 龙,张子桥,张华伟. 肯尼亚 OLKARIA 高温地热井钻 井技术应用[J]. 国外油田工程,2010,26(10):32-35.
  Wang Long, Zhang Ziqiao, Zhang Huawei. The Application of High Temperature Geothermal Well Drilling Technology in Kenya OLKARIA[J]. Foreign Oil Field Engineering,2010,26 (10):32-35.
- [6] 赖晓晴,楼一珊,屈沅治,等.超高温地热井泡沫钻井流体技术[J]. 钻井液与完井液,2009,26(2):38-40.
  Lai Xiaoqing,Lou Yishan,Qu Yuanzhi,et al. The Foam Drilling Fluid Technology in Vltra-high Temperature Geothermal Wells[J]. Drilling and Completion Fluids,2009,26 (2):38-40.
- [7] 张小宁,李根生,黄中伟,等. 泡沫钻井液在井筒中的流动与 传热[J]. 石油学报,2010,31(1):131-137.
  Zhang Xiaoning,Li Gensheng,Huang Zhongwei, et al. The Wellbore Flow and Heat Transfer of Foam Drilling Fluid [J]. Petroleum Technology,2010,31(1):131-137.
- [8] 魏臣兴,练章华,林铁军,等. 气体钻井双稳定器钟摆钻具的 模拟仿真分析[J]. 天然气与石油,2012,30(5):75-77.
  Wei Chenxing, Lian Zhanghua, Lin Tiejun, et al. Analog Simulation Analysis on Gas Drilling Double Stabilizer Pendulum Drill Assembly [J]. Natural Gas and Oil,2012,30(5):75-77.