

控压钻井多相流温度场预测

卿玉¹ 梁海波² 李黔² 江川³ 代峰⁴

1. 中国石油川庆钻探工程公司钻采工程技术研究院 2. 西南石油大学

3. 中国石油川庆钻探工程公司国际工程公司 4. 中国石化西南油气分公司工程技术研究院

卿玉等. 控压钻井多相流温度场预测. 天然气工业, 2012, 32(7): 52-54.

摘 要 控压钻井钻遇储层产生气侵时, 会使井筒内气液两相流在不同井深、温度条件下呈现出不同的流态, 从而影响环空的压力分布。为此, 基于井筒传热方程和能量方程, 建立起了控压钻井井筒多相流温度场计算模型, 并利用循环迭代法和数值分析法求解钻柱内和环空流体温度剖面。用实例分析其随循环时间、钻井液密度及钻井液排量增加而减小的规律; 计算结果与 PWD 实测数据误差小于 2.87%, 能够满足控压钻井数据计算及现场施工需要。

关键词 MPD 钻井 多相流 温度场 压力控制 数学预测模型

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2012.07.012

控压钻井技术(MPD)的核心是精确控制井筒压力, 维持井底压力在安全密度窗口之内^[1-3]。在钻遇储层过程中, 当监测到气侵后不一定采用压井等井控措施, 而是充分利用现有的工艺技术和设备, 采用正常循环排除的方式, 控制井底压力, 阻止地层流体进一步侵入井筒^[4]。然而, 井筒中温度的分布是影响环空多相流井底压力的重要因素; 由于地层气体侵入, 井筒内气液两相流在不同井深、温度条件下呈现出不同的流态, 而流态的不同直接影响井筒内压力分布^[5-6]。因此, 建立合理正确的控压钻井多相流温度场模型预测环空温度场对于控制环空压力分布、实现安全钻进十分必要。

1 数学预测模型的建立及求解

1.1 数学模型建立

首先假设如下: ①流体在井筒内的流动为一维稳态流动, 且同一截面上各点的温度、压力相等; ②井筒中钻柱到水泥环外缘间的传热为径向稳态传热, 井筒周围地层中的传热为非稳态传热; ③井筒及地层中的热损失是径向的, 不考虑沿井深方向的纵向传热。

在井筒上取长为 dz 的微元体, 如图 1 所示。

根据能量守恒定律, dz 上流体损失的热量为:

$$dQ_l(z) = WC_{pm} [T_s z - T_s(z + dz)] \quad (1)$$

在单位时间内, 所取微元段内由井筒内壁向水泥

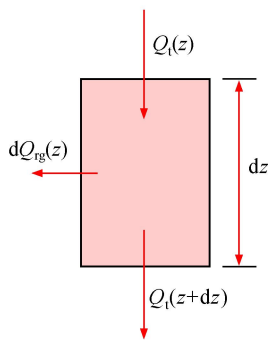


图 1 井筒微元体分析图

环外缘传递的热量可近似地表达为:

$$dQ_{rw}(z) = 2\pi rU(T_s - T_h)dz \quad (2)$$

由微元体的热量平衡 $dQ_l(z) = dQ_{rw}(z)$, 可推出

$$WC_{pm} \frac{\partial T_s}{\partial z} = 2\pi rU(T_h - T_s) \quad (3)$$

从水泥环外缘向周围地层的径向传热为非稳态导热, 地层中瞬态传热函数的精确求解过程比较复杂, 这里作简化处理, 采用无因次地层导热时间函数 $f(t)$:

$$dQ_{rg}(z) = \frac{2\pi\lambda_o(T_h - T_e)}{f(t)} dz \quad (4)$$

$f(t)$ 是反映地层热阻的无因次时间函数, K. chiu 等人给出了经验表达式^[7]:

$$f(t) = 0.982 \ln \left(1 + 1.81 \frac{\sqrt{\alpha t}}{r_h} \right) \quad (5)$$

同样,由热量平衡,即:

$dQ_{rw}(z) = dQ_{rg}(z)$,从而可得:

$$T_h = \frac{\lambda T_e + rUT_s f(t)}{\lambda + rUf(t)} \quad (6)$$

将上式代入(3):

$$WC_{pm} \frac{\partial T_s}{\partial z} = 2\pi Ur\lambda_c \left[\frac{T_e - T_s}{\lambda + rUf(t)} \right] \quad (7)$$

假设 dz 上 C_{pm} 、 U 为常数,且有 $T_e = T_0 + az$,令

$$M = \frac{2\pi}{WC_{pm}} \frac{rU\lambda_c}{\lambda + rUf(t)} \quad (8)$$

则可写为:

$$\frac{\partial T_s}{\partial z} + MT_s - Maz = MT_0 \quad (9)$$

方程(9)即为控压钻井井筒多相流温度分布方程。

1.2 模型求解方法

将温度场计算模型嵌入井筒多相流流动分析模型中(多相流流动分析模型考虑井斜角),通过循环迭代法和数值分析法对温度场模型进行求解,计算步骤如下(图2):

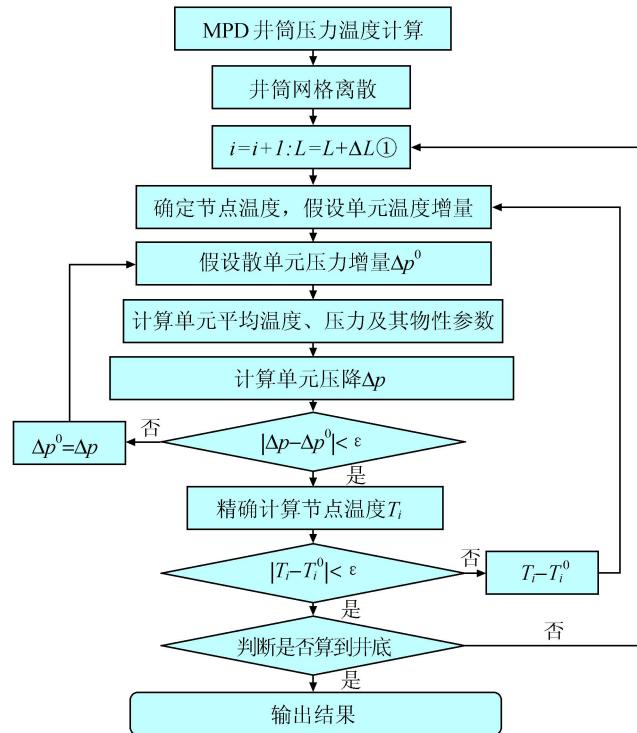


图2 控压钻井多相流温度场模型计算流程图

①对全井筒进行离散处理;②确定初始节点温度 T_i^0 ,假设离散单元体温度增量;③假设单元体压降;④在平均温度、压力下计算单元体气液物性参数;⑤利

用井筒多相流流动分析模型计算离散单元压降;⑥判断计算的压降和假设压降是否满足精度要求,不满足就返回第③步重新计算,否则进行下一步;⑦应用井筒传热方程及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②步重新计算,否则进行下一步;⑨增加步长到计算井深,输出结果。

2 应用实例及效果分析

2.1 基本参数

某井钻至井深 5 452 m(垂深 4 807 m),井眼直径 $\varnothing 152.4$ mm,钻柱外径 $\varnothing 127$ mm,内径 $\varnothing 108.6$ mm,地表温度 9°C ,地温梯度 $2.3^\circ\text{C}/100$ m。钻井液密度 1.05 cm^3 ,排量 12 L/s ,流性指数 0.88 ,稠度系数 $0.18\text{ Pa}\cdot\text{s}^n$,钻井液入口温度 35°C ,钻井液比热容 $1\ 680\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;岩石密度 $2.6\text{ g}/\text{cm}^3$,岩石比热容 $837.3\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,地层导热率 $2.248\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$,钻柱内液体换热系数 $310\text{ J}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{K})$,环空液体换热系数 $83.4\text{ J}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{K})$ 。

2.2 评价分析

2.2.1 循环时间对井筒温度剖面的影响

图3反映了钻柱内和环空钻井液温度随循环时间的变化规律。

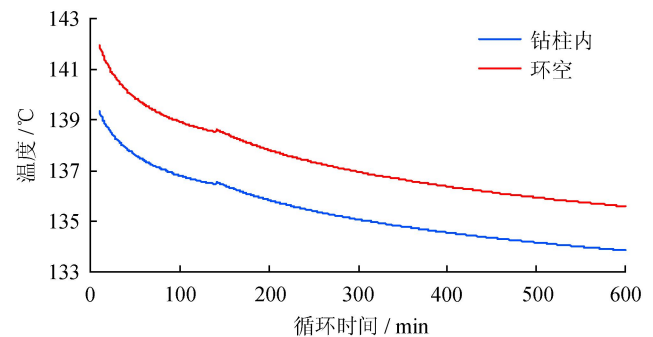


图3 钻井液温度随循环时间变化曲线图

由图3可知,钻井液温度随循环时间的增加逐渐降低。当循环时间约 140 min 时,钻柱内和环空钻井液温度出现拐点,这是由钻井液和地层间热传递发生交换造成的。

2.2.2 钻井液密度对井筒温度剖面的影响

图4反映了钻柱内和环空钻井液温度随钻井液密度的变化规律。

由图可知,当钻井液密度增加时,钻井液温度呈明显下降趋势。

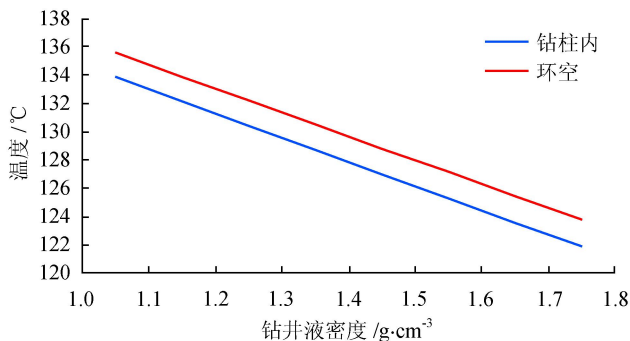


图 4 钻井液温度随钻井液密度变化曲线图

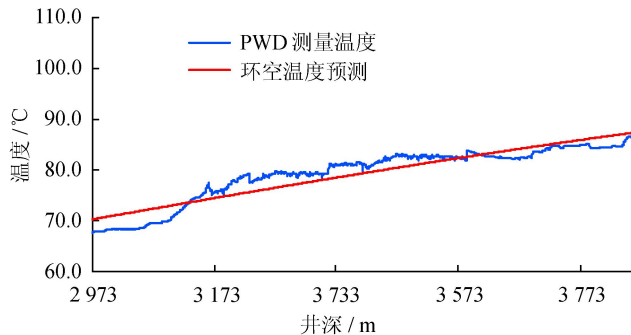


图 6 实测数据与计算结果对比曲线图

2.2.3 钻井液排量对井筒温度剖面的影响

图 5 反映了钻柱内和环空钻井液温度随钻井液排量的变化规律。

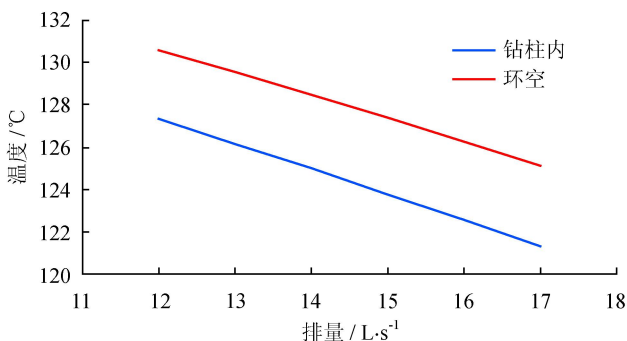


图 5 钻井液温度随钻井液排量变化曲线图

由图 5 可知,当钻井液排量增加时,钻井液温度随之降低。

2.3 实例分析

对该井在井深 2 973~3 861 m 使用 PWD 监测的数据与模型计算结果如表 1、图 6 所示。

表 1 PWD 测量数据与计算结果对比表

井深/m	PWD 测量数据/°C	模型计算结果/°C
2 975	68.6	70.3
3 165	76.5	74.3
3 291	78.4	76.8
3 425	80.5	79.5
3 619	82.7	83.1
3 740	84.8	85.3
3 861	86.6	87.3

可以看出,依据该模型计算的预测值与实际测量值吻合程度较好。环空温度场预测结果的最大误差为 2.87%,能够满足控压钻井现场施工及数据计算需要。

3 结论

1)建立的模型计算结果与实测值吻合较好,能够满足控压钻井施工和计算需要。

2)循环时间对温度剖面有较大影响;随循环时间增长,对温度剖面影响程度逐渐减弱。

3)随着钻井液密度的增加,对温度剖面影响程度逐渐减弱。

4)随着钻井液排量的增加,影响程度逐渐减弱。钻井液排量主要与对流传热的强度及钻井液循环过程中压力循环损耗生热和钻头喷嘴压降生热有关。

符 号 说 明

T_s 为钻井液温度,°C; T_h 为水泥环外缘处温度,°C; R 为热阻, $[W/(m \cdot K)]^{-1}$; dz 为井筒微元长度, m; dQ 为单位时间内 dz 长度上的热损失, W; T_0 为初始地层温度,°C; U 为总传热系数, $W/(m \cdot K)$; T_m 为地表温度,°C; a 为地温梯度,°C/m; Z 为井深, m; λ 为地层导热系数, $W/(m \cdot K)$; a_e 为地层热扩散系数, m^2/d ; t 为时间, h。

参 考 文 献

[1] 陈森,梁大川,李磊.深井超深井安全钻井液密度窗口研究进展[J].天然气工业,2008,28(1):85-87.
 [2] 刘绘新,赵文庄,王书琪,等.塔中地区碳酸盐岩储层控压钻井技术[J].天然气工业,2009,29(11):47-49.
 [3] 樊朝斌,先齐,杨世军.准噶尔盆地复杂火成岩地层防漏堵漏控压钻井技术[J].天然气工业,2011,31(9):88-92.
 [4] 于水杰,李根生,罗洪斌,等.MPD 技术及 UBD 技术在钻井工程中的应用分析[J].西部探矿工程,2009(7):89-92.
 [5] 王延民,孟英峰,李皋,等.充气控压钻井过程压力影响因素分析[J].石油钻采工艺,2009,31(1):31-34.
 [6] 平立秋,汪志明,魏建光.欠平衡钻井多相流模型评价分析[J].西南石油大学学报,2007,29(1):75-78.
 [7] 宋永臣,王志国,刘瑜,等.蒸汽沿井筒流动过程数值模拟[J].水动力学研究与进展,2007,22(4):403-411.