

水冷却干热岩地层的热应力模型^{*}

卢劲锴 李 络 胡永鹏 付文萱

(中南大学 地球科学与信息物理学院 湖南 长沙 410000)

摘 要: 在干热岩钻井过程中,井壁与钻井液接触产生热作用。干热岩地层在钻井液持续冷却的条件下,由于内外温度差,在岩体内部产生极大的热应力。这对于控制井壁稳定是不利的,而对于后续水力压裂来说是有利的。通过建立模型的方法来评估和了解这种热应力的分布和变化规律。由在热作用影响范围内的温度的数学模型,分析得到温度变化的规律。同时根据弹性力学中平面轴对称热应力问题的基本解,建立了径向和切向热应力的数学模型,从而分析得到热应力随位置和时间变化规律。

关键词: 干热岩 热应力 弹性力学 数学模型

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 2095-2945(2018)10-0026-03

Abstract: During dry-hot rock drilling, the contact between borehole lining and drilling fluid produces thermal effect. Under the condition of continuous cooling of drilling fluid, the dry hot rock formation produces great thermal stress in the rock mass due to the difference of internal and external temperature. This is unfavorable for controlling wellbore stability and favorable for subsequent hydraulic fracturing. The distribution and variation of the thermal stress are evaluated and understood by establishing a model. Based on the mathematical model of temperature in the range of thermal effect, the law of temperature change is obtained. At the same time, according to the basic solution of plane axisymmetric thermal stress in elastic mechanics, the mathematical model of radial and tangential thermal stress is established, and the variation law of thermal stress with position and time is obtained.

Keywords: dry hot rock; thermal stress; elastic mechanics; mathematical model

引言

随着我国经济的迅猛发展,能源需求量与日俱增。干热岩(Hot Dry Rock,简称HDR)型地热能作为一种绿色可再生的新型能源近年来受到社会的广泛关注。干热岩所处的地层一般为花岗岩地层,具有完整坚硬、致密低渗的特点。为使地下换热面积增大,人们采取在干热岩地层中制造增强型地热系统(EGS)的方法,来更加有效利用干热岩地层所储存的热能。增强型地热系统是通过水力压裂的方法来使两个(或更多)井体之间的裂隙贯通。干热岩所处的地层温度一般为200-300℃,甚至更高。井壁接触循环钻井液时迅速降温,井壁到围岩的区间产生温度差,这将会使井壁附近一定范围内的干热岩地层产生巨大的热应力。因此,建立一个数学模型来衡量其产生的热应力具有重要意义。

1 模型的建立

1.1 地层环境的抽象

从地面向干热岩目标地层打一口竖直井,由于钻井液与井壁接触产生热作用的时间是有限的,因此在有限时间内热影响区域为一个圆筒体。

由热学定理可得,热影响的距离 $R-r_0$ 为:

$$R-r_0 = 2\sqrt{\frac{kt}{\rho C}} \quad (1)$$

式中 R 为热作用半径 k 为干热岩地层的导热系数;
 t 为热作用时间 C 为干热岩地层的比热容。

1.2 冷却后干热岩温度变化模型

由于钻孔截面为沿轴向无变化的轴对称截面,且不考虑轴向热流和渗透作用的情况下,温度场仅为点到钻孔中心距离 r 的函数,满足定常无热源的热传导方程^[1]:

$$\frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{d^2T}{dr^2} = 0 \quad (2)$$

$$\text{其一般解为 } T = A \ln r + B \quad (3)$$

在钻井液循环一定时间后,钻井液与井壁岩体充分热交换,假定井壁处温度与钻井液循环温度 T_0 相等,即 $T_{r=r_0} = T_0$ 。

在热作用半径处,岩体温度为与原始地层温度 T_r 相等,即 $T_{r=R} = T_r$ 。

由液固界面与围岩温度的边界条件带入热传导方程的一般解中可求得常数 A 、 B ,得到 T 的表达式为

$$T = T_0 + (T_r - T_0) \frac{\ln \frac{r}{r_0}}{\ln \frac{R}{r_0}} \quad (4)$$

对应其一般解 $T = A \ln r + B$ 中 A 、 B 为:

$$A = T_r - T_0 \quad (5)$$

$$B = T_0 + (T_r - T_0) \left(-\frac{1}{\ln \frac{R}{r_0}} - \ln r_0 \right) \quad (6)$$

^{*} 基金项目:中南大学国家级大学生自由探索项目(编号:201710533239)

1.3 冷却后干热岩热应力变化的模型

抽象后的地层为一个厚壁圆筒,由于低温梯度的变化比较小,在干热岩钻井底部区域内的轴向作用可忽略不计。利用弹性力学中平面轴对称热应力问题的一般解^[1]如下:

$$\begin{cases} \sigma_r = -\frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \int_{r_0}^r T r dr + D_1 + \frac{D_2}{r^2} \\ \sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left[-T + \frac{1}{r^2} \int_{r_0}^r T r dr \right] + D_1 - \frac{D_2}{r^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中 σ_r, σ_θ 分别为钻孔壁径向、切向应力, α, E, ν 分别为井壁岩石材料的膨胀系数、弹性模量和泊松比, T 为沿径向变化的温度值,即 r 的函数。其中,

$$\int_{r_0}^r T r dr = \frac{A}{2} \left(r^2 \ln r - r_0^2 \ln r_0 + \frac{r_0^2 - r^2}{2} \right) + \frac{B}{2} (r^2 - r_0^2)$$

将钻井井壁表面和热作用半径面无面力的边界条件

$$(\sigma_r)_{r=R} = 0, (\sigma_\theta)_{r=R} = 0$$

代入即可解得常数 D_1, D_2 。

$$D_1 = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{T}{2}$$

$$D_2 = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left[\int_{r_0}^R T r dr - \frac{TR^2}{2} \right] =$$

$$\frac{\alpha E}{1-\nu} \left[\frac{A}{2} \left(R^2 \ln R - r_0^2 \ln r_0 + \frac{r_0^2 - R^2}{2} \right) + \frac{B}{2} (R^2 - r_0^2) - \frac{TR^2}{2} \right]$$

将上式代入应力分量表达式,并将 T 的表达式代入后积分可得:

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{T_0 - T_r}{2 \ln \frac{R}{r_0}} \left[-\ln \frac{R}{r} + \frac{r_0^2}{R^2 - r_0^2} \left(\frac{R^2}{r^2} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_0} \right] \quad (8)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{T_0 - T_r}{2 \ln \frac{R}{r_0}} \left[1 - \ln \frac{R}{r} - \frac{r_0^2}{R^2 - r_0^2} \left(\frac{R^2}{r^2} + 1 \right) \ln \frac{R}{r_0} \right]$$

点到钻井中心的距离相等时热应力大小相等,则把由这样的点构成的圆定义为等热应力圆。

1.4 钻井液与井壁岩体的热传导模型

由牛顿冷却定律可知液体从外界下到孔底时,液固界面满足方程^[2]:

$$k \frac{dT}{dr} \bigg|_{r=r_0} - h(T - T_0) = 0 \quad (9)$$

式中 h 为钻井液和岩石的热交换系数。

当井壁内表面与钻井液循环温度相等时,热作用半径为

$$R = r_0 \sqrt{e^{\frac{k}{r_0 h}}} \quad (10)$$

2 模型的分析

为了方便研究模型中变量的相互关系,不妨取变量的值为一般经验值。其中,岩石密度、比热容、导热系数的取值参考了文献[3],热膨胀系数、对流换热系数、泊松比和弹性模量的取值参考了文献[4]。

2.1 时间与热作用半径的关系

由式(1)可知,热作用半径与时间和导热系数为正相关,与密度和比热容成负相关。在钻井周围,热作用半径的大小能够衡量岩石受热应力影响的范围,其关系为:随着时间的延长,热作用半径不断增加,当在钻井液循环 11.6 天时,热作用半径约为 2.5m。如果需要更大的热应力作用范围,则需要更长的钻井液循环时间。

2.2 热作用范围内温度的变化规律

由于模型在水岩截面引入等温假定,即井壁表面岩石温度等于钻井液循环温度。在钻井液刚刚通入钻井内与井壁接触时,二者实际温度并不相等,由式(9)可推求温度相等时所用的时间。此时间与岩石表面对流换热系数有关,一般情况下不超过 10 秒。因此式(4)适用于热作用时间超过 10 秒的情况。

钻井内温度保持在钻井液循环温度,在热作用半径以外温度始终为地层温度。在由式(4)可知,在热作用范围内,温度与等应力圆半径的自然对数值成正比,二者关系如图 1 所示:

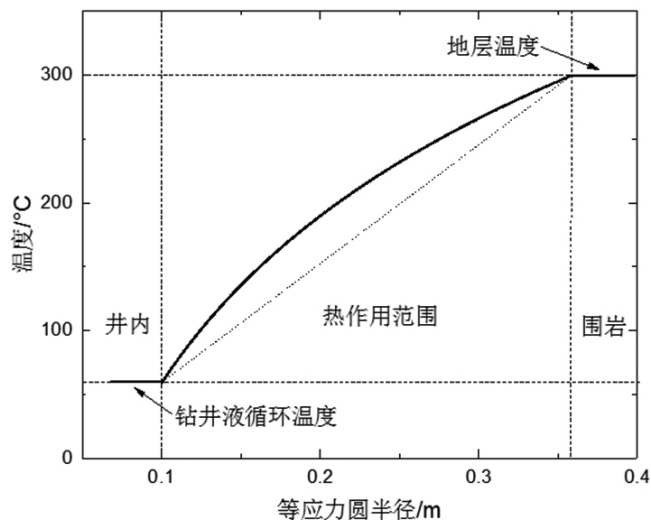


图 1 等应力圆半径与温度关系曲线

2.3 热应力的变化规律

由式(8)可知,在热作用时间确定时,热应力的大小与等应力圆半径有关;在等应力圆半径确定时,热应力的大小随热作用时间而改变。下面分别研究其中的变化规律。

2.3.1 热应力与等应力圆半径的关系

我们得到,径向热应力始终是拉力,100 秒时径向热应力的最大值为 1.59MPa,10000 秒时径向热应力的最大值为 8.15MPa,1000000 秒时径向热应力的最大值为 15.6MPa。径向热应力的最大值随时间延长而逐渐增大。时间很短时,热应力的变化趋势类似抛物线,径向热应力最大值位于热作用范围内的中点附近;而随着时间的延长,热应力的趋势发生改变,径向热应力最大值向钻井壁移动,且热应力的变化率逐渐增大。

切向热应力在热作用范围内切向热应力方向发生一次改变,由拉力逐渐减小到 0,然后变为压力。时间很短时,切向热应力的趋势近似线性,最大切向拉应力值位于井壁处,最大切向压应力值位于热作用半径处,即最大等热应力

圆处。随着时间的延长,切向热应力的下凸的趋势越来越明显,切向最大拉应力的增长幅度要小于径向最大拉应力,切向最大压应力的值逐渐减小。

2.3.2 同一位置下热应力随时间的改变规律

计算出等热应力半径为 0.2m 处,热应力随时间(10000 秒到 100000 秒)的变化和等热应力半径为 1m 处,热应力随时间(100000 秒到 1000000 秒)的变化。变化如图 2、3 如下:

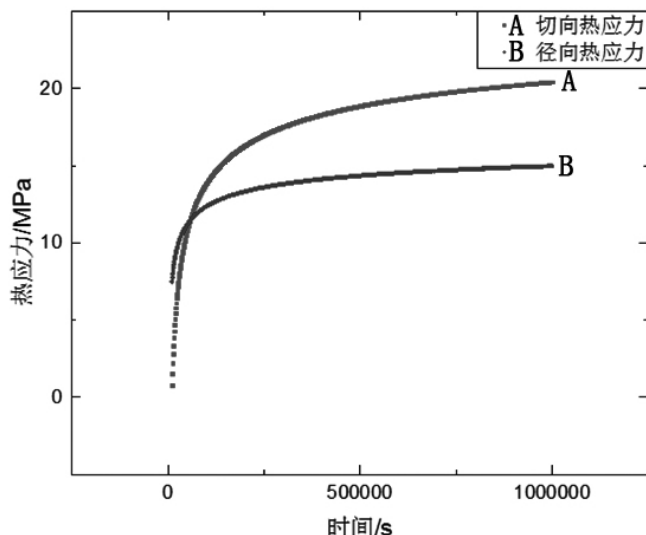


图 2 $r=0.2\text{m}$ 热应力变化曲线

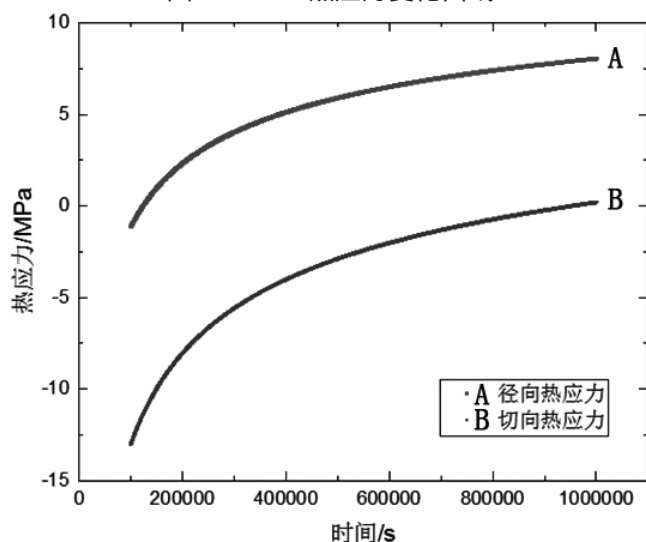


图 3 $r=1\text{m}$ 热应力变化曲线

开始很快,经过某一时间节点后突然变慢。切向热应力的增长速度比径向热应力快,在增速拐点处切向热应力大于径向热应力,此后二者之间差距逐渐增大。图 3 也反映了应力增长速度变慢的规律。

3 结束语

(1)热作用半径与时间和导热系数为正相关,与密度和比热容成负相关。当在钻井液循环 11.6 天时,热作用半径约为 2.5m。如果需要更大的热应力作用范围,则需要更长的钻井液循环时间。

(2)径向热应力是拉力,最大值随时间延长单调递增。时间很短时,变化趋势类似抛物线,最大值位于热作用范围内的中点附近;而随着时间的延长,径向热应力最大值向钻井壁移动。

(3)在热作用范围内,切向热应力方向由拉力逐渐变为压力。时间很短时,切向热应力的趋势近似线性,最大切向拉应力值位于井壁处,最大切向压应力值位于热作用半径处,即最大等热应力圆处。切向最大压应力的值随时间逐渐减小。

(4)某位置岩石受到的热应力随着时间的延长而增加,热应力增长速度开始很快,经过某一时间节点后突然变慢。

(5)由模型可得,通过地面上钻井液冷却降温系统使钻井液循环温度降低,可使热应力变大,增加钻井液的循环时间,也可以使热应力变大。

参考文献:

- [1]徐秉业,刘信声.应用弹性力学[M].北京:清华大学出版社,1995:382-392.
- [2]余志清,徐华义.井壁围岩热应力分析[J].石油钻探技术,1997,4,13-15.
- [3]罗爽,宋二祥.热储岩层单条裂隙换热概念模型的解及相关讨论[J].防灾减灾工程学报,2017,4,627-635.
- [4]郑慧慧,刘希亮,湛伦建.高温下岩石单向约束的热应力分析[J].路基工程,2008,5,12-13.