

基于 ABAQUS 的 PDC 钻头切削齿温度场分析与仿真

李 勇 邓 嵘 刘云胜

(西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500)

摘 要:基于有限元分析软件 ABAQUS 的 Drucker-Prager 材料模型以及破坏准则,模拟 PDC 钻头切削齿在切削过程中的温度场,并讨论在切削过程中摩擦产生的热在切削齿后倾角的温度分布和磨损平面的温度分布情况。仿真分析结果能真实地表明在切削齿与岩石作用过程中的温度场、应力场的分布情况,为以后 PDC 钻头的设计提供有效的依据。

关键词:PDC 钻头 切削齿 温度场 仿真

引言

PDC 钻头具有很高的硬度和耐磨性,作为高效切削元件被广泛地用于破碎岩石。由于 PDC 钻头能在低钻压,高转速下取得高钻速和高进尺,所以在许多钻井作用中,能够取得牙轮钻头无法比拟的技术和经济效益,成为高效、经济、安全的优良钻井工具。随着电子计算机硬件的发展以及计算速度的提高,数值模拟计算软件,尤其是有限元软件的发展,使得现代计算机辅助工程技术也迅速发展,可以用计算机仿真模拟的手段来研究 PDC 钻头切削齿在破岩过程中,由于摩擦产生的热量,在切削齿与岩石岩屑上的温度分布情况。

目前,有关于 PDC 钻头切削齿破岩过程中温度场的研究主要集中在理论建模与计算以及有限元模拟仿真分析两方面。PDC 钻头切削齿破岩过程是一个具有很强非线性和复杂接触特点的过程,而已有的研究没有全面的考虑到这些,尤其是破岩过程中材料的本构关系。有限元软件 ABAQUS/Explicit 程序系统可以从原理上处理强非线性问题,并能够定义复杂的接触条件。因此,本文使用 ABAQUS 有限元分析软件,选择适合岩石的 Drucker-Prager 模型以及破坏准则,准确的预测破岩过程温度场、应力场的分布情况,讨论前倾角对温度场的影响^[6,7,12]。

1 切削齿摩擦热理论

1.1 热传导分析^[13]

1.1.1 热传导微分方程

切削齿的温度与岩石、岩屑以及环境因素是密切相关的,要准确的描述切削齿的温度场方便就得把两者的影响因素都予以考虑。对于传热问题,可以由 Fourier 传热定律和能量守恒定律推出传热问题的微分方程,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{\rho c} \quad (1)$$

式中, T 为温度, t 为时间, λ 为热传导系数, ρ 为材料密度, c 为比热, Q 为物体的内部热强度。

1.1.2 温度场的边界条件

(1) 切削齿—岩石摩擦接触面产生的热流密度
根据傅里叶定律,摩擦生热在接触面上产生的热流密度 q 与温度 T 的关系为:

$$q = -\lambda \nabla T \quad (2)$$

式中, ∇T 为法向上的温度梯度。

如果摩擦力所做的功全部转化为摩擦热,则有:

$$q = \mu F v \quad (3)$$

式中, F 为接触面上法向力, v 为摩擦速度。

(2) 对流换热

如果在摩擦过程中有冷却介质参与(泥浆液),那么泥浆液在摩擦接触面周围会起到对流换热的作用,其边界条件为:

$$-\lambda \nabla T_w = h(T_w - T_f) \quad (4)$$

式中, h 为切削齿与流体间的表面传热系数, T_w 为切削齿表面温度, T_f 为流体温度。

微分方法系统展现了摩擦过程中温度的影响因素和这些因素在温度变化过程中的相互关系但是在实际应用中,微分方程的求解一般只能采用数值计算的方法,而且条件要求较高,如想要知道每一时刻具体的温度变化量难以实现。使用有限元仿真模拟的方法对工程现场应用具有很好的指导意义。通过模拟仿真可以很直观地看到在各个阶段各处位置的温度变化值和在切削齿上温度梯度的分布。还可以通过改变相关参数来研究讨论影响摩擦热分布的影响因素。

1.2 切削齿温度的理论求解方法^[1-4,9]

Glowka 等人认为:具有一定切削速度的切削齿在垂直于接触面的力的作用下沿岩石表面滑动不断地产生摩擦热,单位时间内摩擦面上产生的摩擦热与切削速度、垂直压力成正比。摩擦热一部分为切削齿吸收、另一部分被切削齿底下岩石吸收。单位时间内磨平处的单位面积上产生的总的摩擦热流密度为:

$$Q = \alpha \mu F v / A_w \quad (5)$$

切削齿吸收的摩擦热流密度为:

$$q_1 = \alpha Q = \alpha \mu Fv/A_w \quad (6)$$

岩石吸收的摩擦热流密度为:

$$q_f = (1 - \alpha)Q \quad (7)$$

有关移动于半无限恒定性固体上的带状热源的温度场求解已有 Jaeger 在按照与热源接触的表面没有热损失的情况下给出。因为磨损面处于紧密接触过程中的,可以假设岩石与 PDC 切削齿滑动接触面温度相等;对于宽度为 L 的带状热源,移动速度取决于 PDC 切削齿在井下条件中实验用的滑动速度,所以在滑动接触面上岩石的平均温升为,

$$\overline{T_r} = \overline{T_w} - T_f = \frac{4q_f}{3\sqrt{\pi}k} \left(\frac{\alpha L}{v} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

由上式联立得:

$$\alpha = \left[1 + \frac{\overline{T_w} - T_f}{q_f} \frac{3\sqrt{\pi}}{4} k \left(\frac{v}{\alpha L} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \quad (9)$$

综上可得钻头切削齿的磨平处温度计算方程:

$$\overline{T_w} = T_f + \frac{\mu Fv}{A_w} \left[1 + \frac{3\sqrt{\pi}}{4} k \left(\frac{v}{\alpha L} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \quad (10)$$

式中: T_f 为井底流体的温度, μ 为岩石与切削齿的摩擦系数, v 为切削速度, f 为热响应函数, L 为在切削方向上磨损平面的长度, k 为岩石的热传系数, α_f 为岩石的热扩散系数, A_w 为切削齿磨损面面积。

2 建立有限元模型

2.1 切削齿破岩有限元几何建模和边界条件^[5,6,8,11]

采用通用有限元软件 ABAQUS 对切削过程的温度场、应力场进行模拟。采用二维模型模拟切削齿刮削岩石过程,岩石几何模型为 100mm、宽 30mm,岩石初始网格划分采用稳定性好的一阶线性减缩积分平面四边形单元 CPE4RT。岩石采用砂岩,其杨氏弹性模量为 2894.6MPa,泊松比为 0.2805,密度为 2540kg/m³,比热为 920 J/(kg·°C),线胀系数为 4.61e-6/°C,热导率为 1.9w/(m·°C)。切削齿材料参数为:其杨氏弹性模量为 860.073GPa,泊松比为 0.0768,密度为 3485kg/m³,比热为 760 J/(kg·°C),线胀系数为 1.3e-6/°C,热导率为 543w/(m·°C)。模拟时,岩石底面自由度被限制。有限元模拟分析切削齿切削岩石的理论模型和有限元模型如图 1 所示:

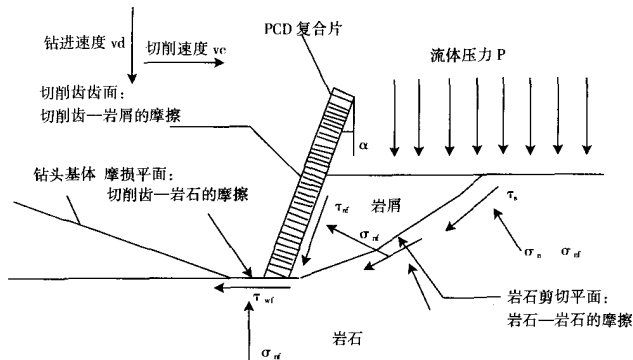


图 1 切削过程理论模型



图 2 切削过程有限元模型

2.2 岩石材料模型^[12]

本文主要针对岩石的弹塑性本构关系和破碎准则进行研究,选择了适用于钻头破碎岩石的线性 Drucker-Prager 材料模型模拟切削过程中岩屑的形态过程。

岩石在切削齿的作用下的弹性变形阶段属于小变形问题,因此采用线弹性模型来建立岩石弹性阶段的本构关系。PDC 钻头切削岩石过程中,岩石主要受到剪切力,根据岩石的组成结构和受力特点,建立扩展的线性 Drucker-Prager 模型来模拟岩石的塑性本构关系。

2.3 岩石的破坏准则

岩石强度理论是研究岩石在各种应力状态下的强度准则的理论。强度准则又称破坏判据,它表征岩石在极限应力状态下的应力状态和岩石强度参数之间的关系,一般可以表示为极限应力状态下的主应力间的关系方程。即

$$\sigma_1 = f(\sigma_2, \sigma_3) \quad (11)$$

岩石的破坏主要是剪切破坏,岩石的强度,即抗摩擦强度等于岩石本身抗剪切摩擦的粘结力和剪切面上法向力产生的摩擦力。亦即,平面中的剪切强度准则为:

$$|\tau| = c + \tan \beta \quad (13)$$

式中: σ 为剪切面上的剪切力, τ 为剪切面上的正应力, c 为粘聚力, β 为岩石的内摩擦角。

3 有限元仿真结果分析

为研究 PDC 破岩过程中,单齿切削岩石温度场分布情况。取切削厚度为 2mm,切削速度为 1046mm/s,切削齿前角为 -200 分别取时间在 0.001s, 0.0025s 时,切削过程的温度分布图。

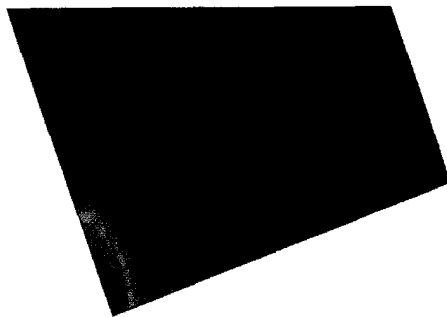
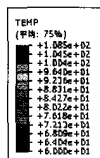


图 3 0.001s 时,切削齿的温度分布

基于ABAQUS的PDC钻头切削齿温度场分析与仿真

作者: [李勇](#), [邓嵘](#), [刘云胜](#)
作者单位: [西南石油大学机电工程学院, 成都, 610500](#)
刊名: [现代制造技术与装备](#)
英文刊名: [Modern Manufacturing Technology and Equipment](#)
年, 卷(期): 2012(2)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_xdzzjsyzb201202004.aspx