

◀ 钻井与完井 ▶

旋冲钻井破岩力学模型的研究

蒋宏伟¹ 刘永胜¹ 翟应虎¹ 潘 洁²

(1. 中国石油大学(北京)石油与天然气工程学院, 北京 102249; 2. 长庆石油勘探局工程技术研究院, 陕西西安 710021)

摘 要: 旋冲钻井技术可有效提高硬地层、易斜地层的机械钻速。以弹性力学、波动理论和冲击动力学为基础, 采用室内试验和力学理论相结合的研究方法, 建立了旋冲钻井破岩力学模型。在该模型的建立过程中, 首先根据冲击器的工作原理, 结合冲击动力学, 对旋冲钻井中冲击动载作用下的破岩过程进行了简化; 假设岩石为弹性介质, 根据弹性力理论, 分析了轴向力和剪切力作用下岩石的受力状态; 对在室内进行的载荷侵入深度曲线的试验结果进行分析, 得出岩石所受外载荷与侵入深度成一定的线性关系; 结合波动理论, 分析了冲击动载作用下岩石的应力状态。建立的破岩力学模型对旋冲钻井的进一步发展具有重要的现实意义。

关键词: 冲击钻井; 旋转钻井; 机械钻速; 波动理论; 岩石力学; 数学模型; 受力分析

中图分类号: TE242.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890 (2006) 01-0013-04

前 言

旋冲钻井是在常规钻井基础上发展起来的一项钻井新技术, 其原理是在钻头上部增加一个液动冲击器, 钻进过程中, 钻头随钻柱旋转, 同时还受到来自液动冲击器的脉动冲击, 在钻压、旋转和脉动冲击下联合作用破碎岩石^[1]。

旋冲钻井中冲击动载作用下的破岩过程可以简化为图 1 所示的模型, 传动短节是一等截面积套管, 钻头齿在传动短节下部; 将砧子、传动短节及钻头体简化为一体, 仍称为传动短节^[2-4]。表示系统各部分位置的坐标系见图 1。

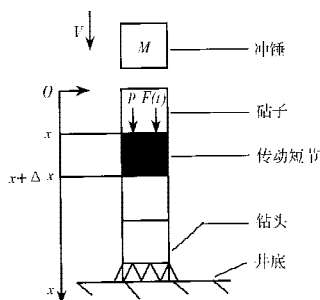


图 1 冲击器冲击系统模型

由图 1 可以看出, 在破碎过程中岩石受到由钻压产生的力 $p_{\text{轴}}$ 、冲击产生的间断冲击力 $F(t)$ 以及钻头旋转扭矩 M 产生的水平推力 $p_{\text{剪}}$ 的共同作用, 如图 2 所示。

目前旋冲钻井的研究较多地集中在工具本身的研究上, 但对旋转和冲击联合作用破岩理论的研究还不够全面和深入^[5]。在旋冲钻井中, 针对不同地区、不

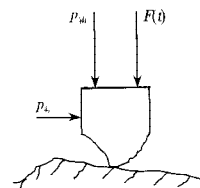


图 2 旋冲钻井破岩时钻头齿的受力示意图

同岩性的地层制订的钻井技术措施尚缺乏足够的理论依据, 因此从理论上分析旋冲钻井的破岩特点, 掌握旋转冲击联合破岩的机理, 建立旋冲钻井破岩的理论模型, 对分析旋冲钻井参数对破岩效率的影响, 确定旋冲钻井工艺技术参数, 为旋冲钻井工艺技术应用提供依据是十分必要的。

1 岩石受轴向力和剪切力的力学模型

对于岩石受到轴向力 $p_{\text{轴}}$ 和剪切力 $p_{\text{剪}}$ 的作用, 笔者作以下假设:

1) $p_{\text{轴}}$ 和 $p_{\text{剪}}$ 为集中力, 对井底岩石的作用点为 O , 井底为平面, 把井底岩体作为半空间体, 建立如图 3 所示的坐标系 $Oxyz$;

2) 岩石为弹性介质, 岩石破碎前的一切变形都

收稿日期: 2005-06-20; 改回日期: 2005-09-20

作者简介: 蒋宏伟 (1978—), 男, 河南鄢陵人, 2001 年毕业于江汉石油学院石油工程专业, 现为中国石油大学 (北京) 在读博士, 从事油气井岩石力学与工程的研究。

联系电话: (010) 89733706

在弹性限度内发生^[6]，用弹性力学原理来分析。

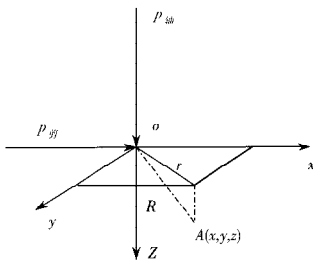


图3 轴向力和剪切力作用下的坐标系

1.1 岩石受轴向力的力学模型

岩石在剪切力作用下的受力如图3所示，在岩体的边界面上作用有轴向力 $p_{\text{轴}}$ 。

由于岩石受力的轴对称性，笔者采用柱坐标系进行分析。任意一点 $A(x, y, z)$ 在圆柱坐标系中为 $A(r, \theta, z)$ 。根据弹性力学^[7]理论，经过简化和运算得到任一点 $A(r, \theta, z)$ 的应力与位移表达式为：

$$\begin{cases} u_r = \frac{(1+\mu)}{2\pi ER} \left[\frac{rz}{R^2} - \frac{(1-2\mu)}{R+z} r \right] \\ u_\theta = 0 \\ u_z = \frac{(1+\mu)}{2\pi ER} \left[2(1-\mu) + \frac{z^2}{R^2} \right] \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{p_{\text{轴}}}{2\pi R^2} \left[\frac{(1-2\mu)}{R+z} - \frac{3r^2 z}{R^3} \right] \\ \sigma_\theta = \frac{(1-2\mu)}{2\pi R^2} p_{\text{轴}} \left(\frac{z}{R} - \frac{R}{R+z} \right) \\ \sigma_z = \frac{3p_{\text{轴}} z^3}{2\pi R^5} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = 0 \\ \tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} = 0 \\ \tau_{rz} = -\frac{3p_{\text{轴}} r z^2}{2\pi R^5} \end{cases} \quad (3)$$

令 $A = \frac{1}{2\pi R^2} \left[\frac{(1-2\mu)}{R+z} - \frac{3r^2 z}{R^3} \right]$, $B = \frac{(1-2\mu)}{2\pi R^2} \left(\frac{z}{R} - \frac{R}{R+z} \right)$, $C = \frac{3z^3}{2\pi R^5}$, $D = -\frac{3rz^2}{2\pi R^5}$ ，则可得：

$$\begin{cases} \sigma_r = Ap_{\text{轴}} \\ \sigma_\theta = Bp_{\text{轴}} \\ \sigma_z = Cp_{\text{轴}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = 0 \\ \tau_{\theta z} = \tau_{z\theta} = 0 \\ \tau_{rz} = Dp_{\text{轴}} \end{cases} \quad (5)$$

则岩石受轴向力作用下的总应力为：

$$\sigma_{\text{轴静}} = p_{\text{轴}} \begin{bmatrix} A & 0 & D \\ 0 & B & 0 \\ D & 0 & C \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)就是旋冲钻井轴向静载作用下的岩石破碎力学模型。

1.2 岩石受剪切的力学模型

岩石在剪切力作用下的受力如图3所示，在岩体的边界面上作用有切向力 $p_{\text{剪}}$ 。利用弹性力学^[7]应力边界条件、伽辽金函数和位移函数，联立弹性方程和平衡方程可以求得：

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{p_{\text{剪}} x}{2\pi R^3} \left[\frac{1-2\mu}{(R+z)^2} (R^2 - y^2 - \frac{2Ry^2}{R+z}) - \frac{3x^2}{R^2} \right] \\ \sigma_y = \frac{p_{\text{剪}} x}{2\pi R^3} \left[\frac{1-2\mu}{(R+z)^2} (3R^2 - x^2 - \frac{2Rx^2}{R+z}) - \frac{3y^2}{R^2} \right] \\ \sigma_z = -\frac{3p_{\text{剪}} x z^2}{2\pi R^5} \\ \tau_{xy} = \frac{p_{\text{剪}} y}{2\pi R^3} \left[\frac{1-2\mu}{(R+z)^2} (-R^2 + x^2 + \frac{2Rx^2}{R+z}) - \frac{3x^2}{R^2} \right] \\ \tau_{yz} = -\frac{3p_{\text{剪}} x y z}{2\pi R^5} \\ \tau_{xz} = -\frac{3p_{\text{剪}} x^2 z}{2\pi R^5} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \tau_{xy} = \frac{p_{\text{剪}} y}{2\pi R^3} \left[\frac{1-2\mu}{(R+z)^2} (-R^2 + x^2 + \frac{2Rx^2}{R+z}) - \frac{3x^2}{R^2} \right] \\ \tau_{yz} = -\frac{3p_{\text{剪}} x y z}{2\pi R^5} \\ \tau_{xz} = -\frac{3p_{\text{剪}} x^2 z}{2\pi R^5} \end{cases} \quad (8)$$

由此可以得出，当任一剪切力作用于岩体表面时，岩体内部岩石某一点受到的总应力为：

$$\sigma_{\text{剪}} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{yz} & \tau_{xz} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)为旋冲钻井过程中岩石受剪切作用下的力学模型。

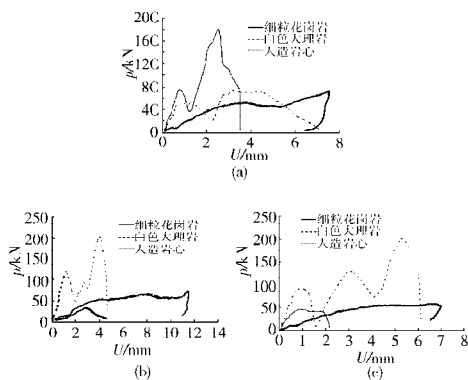
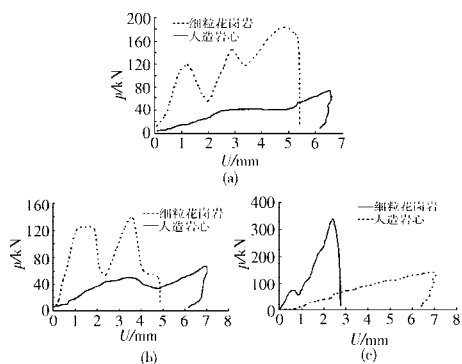
2 岩石受冲击动载作用下的力学模型

2.1 载荷侵入深度曲线的试验研究

钻头在外载作用下，外载荷 p 与侵入深度 U 的关系是建立冲击动载作用下破岩力学模型的基础。为此确定由硬到软的岩石即花岗岩、大理岩、人造岩心为试验研究对象，采用双齿、三齿和牙轮钻头进行了一系列测定试验，研究压力-侵入深度曲线，即 $p-U$ 曲线^[6]，确定外载条件下的钻入系数，寻求系统载荷侵入深度变化规律。双齿钻头 $p-U$ 曲线测定结果见图4（其中 a 、 b 、 c 分别表示齿间距为12、20和29 mm时的试验结果），三齿钻头和牙轮钻头与不同岩石的 $p-U$ 试验结果见图5（其中 a 、 b 、 c 分别表示齿间距为20和25 mm时及牙轮钻头的试验结果）。

通过试验结果分析可得到：

1) 同一种钻头，随岩石硬度增加，外载荷增加，侵入深度减小，岩石上升段斜率（侵入系数 K ）和下降段斜率（回弹系数）相应增大。

图 4 双齿钻头 p - U 曲线图 5 三齿钻头和牙轮钻头 p - U 曲线

2) 岩石所受外载荷与侵入深度成一定比例关系:

$$p = KU \quad (10)$$

2.2 力学模型的建立

冲击器的冲锤冲击传动短节(包括砧子、传动短节、钻头),冲击载荷在极短的时间内变化幅度很大,在这种急剧变化的载荷作用下,冲击能量将以应力波的形式和一定的波速向钻头方向传播,传到钻头齿表面,作用在井底岩石上,破碎岩石。

在冲击作用的过程中,质点或刚体受到外力作用,其运动规律遵循牛顿第三定律,即:

$$F = ma \quad (11)$$

式中, F 为作用力; m 为物体质量; a 为物体运动的加速度。

在时间 $t=0$, 质量为 m 的冲锤以速度 v 冲击钻头。在时刻 $t=t_x$, 在钻头上取一长 Δx , 顶部坐标为 x 的小段, 上部受力为 p , 下部受力为 $p + \Delta p$ 。根据式 (10), 其运动方程为:

$$\Delta p = -\rho A \Delta x \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \quad (12)$$

式中, ρ 为传动短节密度; A 为传动短节截面面积; u 为小段传动短节在相对静止空间的位移。

由式 $\sigma = E\varepsilon$ 可得:

$$\Delta p = -EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Delta x \quad (13)$$

由式 (11) 及式 (12) 可得:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (14)$$

式中, $\alpha = \sqrt{E/\rho}$ 。

传动短节在作用时间极短、变化幅度较大的冲击力的作用下, 它的受力与变形不是整体均匀的, 有一个传播的过程。这种传播方式也就是波动方式, 受力与变形的传播过程也就是应力波的传波过程。

在旋转冲击破岩过程中, 冲锤冲击传动短节, 产生应力波。应力波有两个传递过程, 首先为应力波在传动短节中传递, 传递到钻头齿工作面上; 其次为钻头齿将传递过来的应力波作用在岩石表面。

根据应力波的基本性质, 由波的合成、波的动量守恒条件^[8]和波的衰减特点可以推导出:

$$F(t) = \frac{2K}{\Pi} e^{-\frac{K}{\Pi}t} \int e^{-\frac{K}{\Pi}t} p(t) dt \quad (15)$$

式中, Π 为波阻系数。

将 $p(t) = \Pi v e^{-\frac{\Pi}{M}t}$ 代入式 (8) 得出:

$$\begin{aligned} F(t) &= 2K v e^{-\frac{K}{\Pi}t} \int e^{\left(\frac{K}{\Pi} - \frac{\Pi}{M}\right)t} dt \\ &= \frac{2K \Pi M v}{MK - \Pi^2} e^{-\frac{\Pi}{M}t} \end{aligned} \quad (16)$$

令 $\beta = \Pi/M$, 则

$$F(t) = \frac{2K v e^{-\beta t}}{\frac{K}{\Pi} - \beta} \quad (17)$$

岩石在动载作用下的应力跟轴向静载作用下的应力推导过程一致, 因此可以直接得出动载作用下岩石的总应力为:

$$\sigma_{\text{动}} = F(t) \begin{bmatrix} A & 0 & D \\ 0 & B & 0 \\ D & 0 & C \end{bmatrix} \quad (18)$$

3 旋冲钻井破岩力学模型的建立

对于旋冲钻井来说, 作用于岩石的轴向外载为静载和动载的联合作用, 因此岩石在轴向外载作用下的总应力为:

$$\sigma_{\text{轴}} = [p_{\text{轴}} + F(t)] \begin{bmatrix} A & 0 & D \\ 0 & B & 0 \\ D & 0 & C \end{bmatrix} \quad (19)$$

旋冲钻井条件下的岩石总应力就是岩石在受到轴向外载和剪切力作用下的应力场的叠加。因此可以利用矢量叠加的方法建立旋冲钻井破岩力学模型:

$$\sigma = \sigma_{\text{轴}} + \sigma_{\text{剪}} \quad (20)$$

参 考 文 献

4 结 论

1) 根据弹性力学、波动理论和冲击动力学对钻压和剪切作用下的受力模型进行了推导,建立了旋冲钻井破岩力学模型。

2) 由试验结果得出冲击动载与侵入深度为线性关系,由波动理论和力学分析得到了冲击动载作用下岩石受力的表达式。

3) 牙轮钻头旋冲钻井过程中,岩石受轴向外载荷和旋转剪切力的共同作用,建立了其破岩力学模型。

4) 破岩力学模型应用于旋冲钻具的设计和钻井参数的确定,可以优化钻具组合、优化钻具的性能参数和旋冲钻井的钻井参数,提高破岩效率。

- [1] 张汉林,拓伯民. CQS型旋冲钻井工具的研制与试验 [J]. 石油钻探技术, 1995, 23 (4), 47-49.
- [2] 李国华. 旋冲钻井破岩和冲击器设计基础理论及其应用研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京)石油与天然气工程学院, 2004.
- [3] 李国华. 液动冲击器功率传递理论分析及应用研究 [J]. 石油钻探技术, 2003, 31 (6): 1-4.
- [4] 李国华,鲍洪志,陶兴华. 旋冲钻井参数对破岩效率的影响研究 [J]. 石油钻探技术, 2004, 32 (2): 4-7.
- [5] 刘永胜. 旋冲钻进岩石破碎力学模型研究 [D]. 北京: 石油大学(北京)石油与天然气工程学院, 2003.
- [6] 屠厚泽,高森. 岩石破碎学 [M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [7] 徐芝纶. 弹性力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [8] 徐小荷,余静. 岩石破碎学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.

[审稿 葛洪魁]

Research on Rock-Crushing Mechanics Model in Rotary and Percussive Drilling

Jiang Hongwei¹ Liu Yongsheng¹ Zhai Yinghu¹ Pan Jie²

(1. College of Petroleum and Gas Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Changping, Beijing, 102249, China;
2. Engineering Technology Institute, Changqing Petroleum Exploration Bureau, Xi'an, Shangxi, 710021, China)

Abstract: The rotary and percussive drilling technology can effectively increase ROP in hard formations. By using elastic mechanics, wave dynamics and impacting dynamics, rock crushing mechanics model of rotary and percussive drilling is established based on lab experiments and theoretical analyses. According to impacting dynamics and working principle of impactor, the rock-crushing process of dynamic impacting load is simplified. By means of elastic mechanics and wave theory, the axial force and shearing force of rock is analyzed, and the linear relation between dynamic impacting load and invasion depth is obtained by analyzing the test results. Also the stress state of rock is analyzed. The conclusions made in this paper are important for further development and application of rotating and percussive drilling.

Key words: percussive drilling; rotary drilling; penetration rate; wave theory; rock mechanics; mathematical model; force analysis

稠油物化采油技术

稠油物化采油技术采用物理和化学两种降粘方法,相互补充,共同作用,从而实现稠油在地层内的降粘,有效降低原油在地层及井筒中的流动阻力,达到降粘增产的目的。

该技术主要采用了滴注、耐高温乳化剂及声波振动三项技术。其中滴注技术是在注气的同时,以滴注的方式将超稠油乳化剂均匀地分散在蒸气中,并随蒸气同步进入油层。在蒸气加热油层的同时,乳化剂也均匀地分散在原油中,这种分散注入方式,不仅提高了乳化剂的波及面积,而且延缓了蒸气的指进现象,提高了油层纵向动用程度。

物化采油技术采用了声波技术,利用声波的振动作用使油层孔道内的稠油、超稠油乳化剂、高温水充分混合,形成稳定的水包油乳化液。另外声波的空化作用,热作用也可起到降粘作用,并可在近井地带产生和扩大微裂缝,解除孔道内的堵塞物及水锁、气锁现象,对油层产生一定的物理解堵作用。

在辽河曙光油田的现场应用表明,物化采油技术实现了物理—化学两种降粘方式的有机结合,适合超稠油开发的需要,对延长油井生产周期,提高油气比及周期回采水率有明显效果。