

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2019096

# 指向式旋转导向系统内外环转速对 PDC 钻头 破岩效率的影响

张光伟, 高嗣土, 乔 阳, 田 帆

(西安石油大学机械工程学院, 陕西西安 710065)

**摘 要:** 为了提高指向式旋转导向钻井工具的破岩效率, 在钻头运动学研究的基础上, 利用 Matlab 软件建立了数字化 PDC 钻头模型和数字化岩石模型, 结合岩石模型的离散化处理, 模拟了旋转导向钻进条件下, PDC 钻头与岩石的相互作用过程, 并给出了破岩效率的定量计算方法; 分析了指向式旋转导向系统内外偏心环转速对 PDC 钻头破岩效率的影响, 得到了不同时间步长下的破岩规律。研究表明, 抗剪强度为 11 MPa、内摩擦角为 22°、摩擦系数为 0.2 的岩石, 其最佳破岩转速比在 1.0 左右, 且指向式旋转导向系统在钻进过程中均存在稳态切削, 其破岩效率与内外偏心环的转速比密切相关, 随着内外偏心环转速比增大, 破岩效率也相应增大, 但最终趋于稳定。研究结果对提高指向式旋转导向系统的钻井效率具有一定的理论指导作用。

**关键词:** 旋转导向钻井; PDC 钻头; 破岩效率; 转速比; 数字化; 数值模拟

**中图分类号:** TE921<sup>+</sup>.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-0890(2019)06-0027-07

## Influence of the Rotary Speeds of the Internal and External Rings of Pointed Rotary Steering System on the Rock-Breaking Efficiency of PDC Bit

ZHANG Guangwei, GAO Situ, QIAO Yang, TIAN Fan

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China)

**Abstract:** The goal was to improve the rock-breaking efficiency of the pointed rotary steering drilling system. To do so, a new process was developed, based on the research of bit kinematics, the digital PDC bit model and the digital rock model. The team used Matlab software, which, combined with the discretization processing of rock model, was able to simulate the interaction between PDC bit and rock under the condition of rotary steering drilling, and further obtain the quantitative calculation method of rock-breaking efficiency. The influence of the rotary speeds of the internal and external rings of pointed rotary steering system on rock-breaking efficiency of PDC bit was analyzed, and the rock-breaking law at different time steps was obtained. The results showed that for the rock with a shear strength of 11 MPa, an internal friction angle of 22° and a friction coefficient of 0.2, it had an optimal rock-breaking speed ratio of about 1.0, and the pointed rotary steering system presented a steady state cutting during the drilling process. Its rock-breaking efficiency was closely related to the speed ratio of the inner and outer eccentric rings. As the speed ratio increased, the rock-breaking efficiency also increased, but it eventually stabilized. The research results demonstrated a possible theoretical guidance for improving the drilling efficiency of pointed rotary steering system.

**Key words:** rotary steerable drilling; PDC bit; rock breaking efficiency; speed ratio; digitization; numerical simulation

近年来, 国内外研制出多种形式的旋转导向钻井工具, 其与 PDC 钻头配合可以显著提高硬地层的钻速<sup>[1-3]</sup>。为了进一步提高硬地层的钻进效率, 人们开展了大量理论与试验研究<sup>[4-8]</sup>, 但多集中于复合钻进条件下 PDC 钻头破岩效率研究, 对旋转导向钻井条件下 PDC 钻头破岩效率的研究则较少。有人利用 Matlab 软件建立数字化 PDC 钻头和数字化岩石模型, 模拟了复合钻进条件下岩石的破碎过程, 并将

收稿日期: 2018-11-29; 改回日期: 2019-08-23。

**作者简介:** 张光伟 (1961—), 男, 江苏无锡人, 1983 年毕业于西安交通大学动力机械专业, 1990 年获西安交通大学工程力学专业硕士学位, 教授, 主要从事石油机械力学分析与计算方面的研究工作。E-mail: zhang-guangwei@163.com。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目“井下闭环可控弯接头导向机构基础理论研究”(编号: 51174164)、陕西省自然科学基金项目“基于旋转导向钻井技术的井下闭环可控弯接头系统动力学特性研究”(编号: 2018JM5015)联合资助。

模拟结果与试验数据进行了对比,发现两者吻合良好<sup>[9-10]</sup>。笔者借鉴前人的研究思路,以指向式旋转导向钻井工具可控弯接头为研究对象,利用 Matlab 软件对岩石进行离散化处理,研制了数字化导向钻进破岩仿真程序,给出了钻头切削岩石效率的表示方法,分析了可控弯接头导向机构中内外偏心环转速对 PDC 钻头破岩效率的影响,以期对提高指向式旋转导向系统的钻井效率有一定的指导作用。

## 1 PDC 钻头的数字化模型

### 1.1 切削齿工作面的数字化

采用直角坐标系下的矩形等弧划分数字化方法建立 PDC 钻头齿工作面的数字化模型<sup>[11-12]</sup>,其数学表达式为:

$$\begin{cases} x_p = R \cos[(i-1)\theta_{\text{step}}] \\ y_p = R \sin[(j-1)\theta_{\text{step}}] \\ z_p = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x_p$ ,  $y_p$  和  $z_p$  为切削齿工作面数字化节点  $p$  的坐标;  $R$  为 PDC 钻头切削齿的半径, mm;  $\theta_{\text{step}}$  为切削齿的角度步长, ( $^\circ$ );  $0 \leq i, j \leq 360/\theta_{\text{step}}$ 。

切削齿工作面数字化方法及模型如图 1 所示。

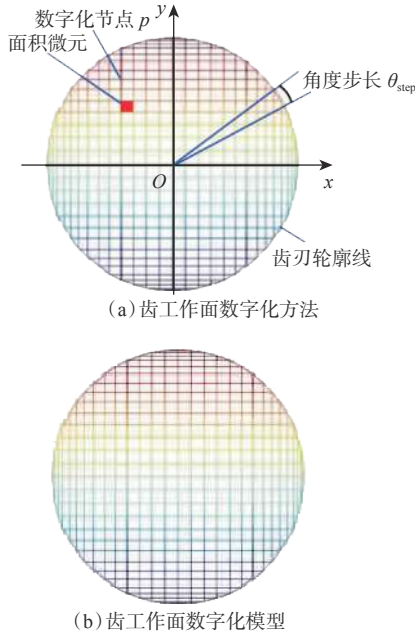


图 1 切削齿工作面数字化方法及模型

Fig. 1 Digitization method and model of cutting tooth surface

### 1.2 切削齿侧面的数字化

PDC 钻头主切削齿的侧面为圆柱面,为了得到

其数字化模型,将其在周向及轴线方向等分,设某数字化节点  $m$  的坐标为  $(x_m, y_m, z_m)$ , 则:

$$\begin{cases} x_m = R \cos(i\theta_{\text{step}}) \\ y_m = l_{\text{step}} j \\ z_m = R \sin(i\theta_{\text{step}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $l_{\text{step}}$  为轴线方向上的长度步长, mm;  $0 \leq j \leq l/l_{\text{step}}$ ;  $l$  为切削齿圆柱部分长度, mm。

切削齿侧面数字化方法及模型如图 2 所示。

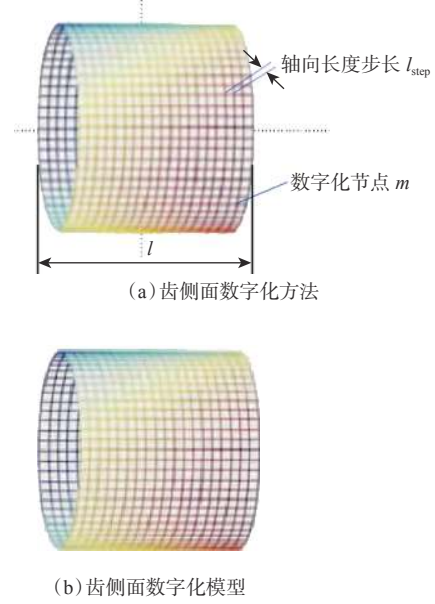


图 2 切削齿侧面数字化方法及模型

Fig. 2 Digitization method and model of cutting tooth side

### 1.3 规径齿的数字化

规径齿一般是由常规切削齿经过线切割加工获得的,如图 3(a)所示。由于  $A$  点所代表的齿侧节点微元与钻头中心点  $O$  之间的距离大于钻头半径,属于被切割部分。在获得规径齿时,将  $A$  点向沿 PDC 切削齿工作平面平行的方向,投影到大圆柱面即钻头外圆柱轮廓面,得到  $A'$  点,坐标为  $(x_{A'}, y_{A'}, z_{A'})$ 。设  $A$  点在  $Oxy$  平面内的坐标为  $(x_A, y_A, z_A)$ , 则:

$$\Delta\alpha = \arctan \left[ \frac{\tan \sqrt{(x_A^2 + y_A^2) - r}}{r} \right] \quad (3)$$

式中:  $\Delta\alpha = \angle OAA'$ ;  $\alpha = \angle OAA'$ , 即近似取切削齿前倾角, ( $^\circ$ );  $r$  为钻头标准半径, mm。

根据几何关系  $\angle xOA' = \phi + \Delta\alpha$ , 可以求出  $A'$  点的坐标为:

$$\begin{cases} x_{A'} = r \sin(\alpha + \Delta\alpha) \\ y_{A'} = r \sin(\alpha + \Delta\alpha) \\ z_{A'} = z_A \end{cases} \quad (4)$$

规径齿数字化模型如图 3(b)所示。

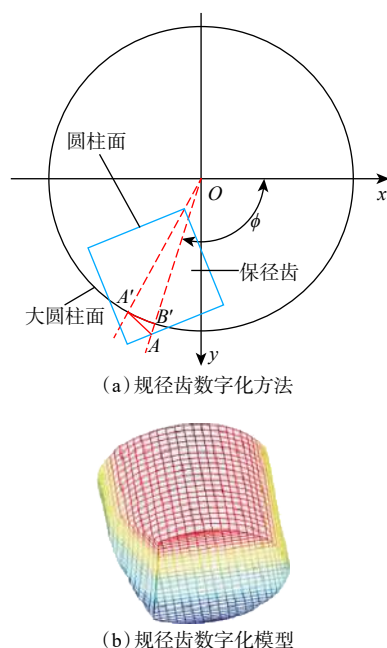


图 3 规径齿数字化方法及模型

Fig. 3 Digitization method and model of gauge teeth

至此, PDC 钻头主要特征的数字化就已完成, 根据每颗切削齿在钻头坐标系中的位置和方向参数, 利用 PDC 钻头几何学基本方程<sup>[13]</sup>, 基于 Matlab 平台进行矩阵的平移、旋转操作, 即可绘制出由 24 颗规径齿构成的 PDC 钻头数字化模型, 如图 4 所示。

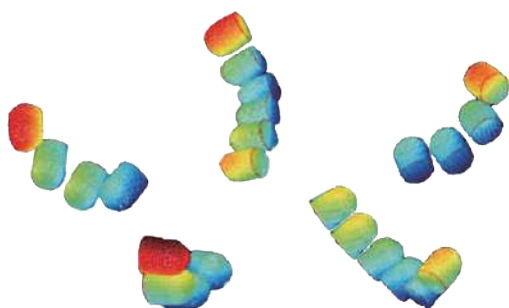


图 4 PDC 钻头的数字化模型

Fig. 4 Digital model of PDC bit

## 2 岩石的数字化模型

将岩石抽象为由小立方体微元组成的离散化对象, 微元的每个顶点为一个数字化节点, 假设岩石为长方体岩样, 以岩石上表面的形心为原点  $O$ , 沿钻头垂直向下钻进的方向为  $Z$  轴, 建立直角坐标系  $OXYZ$ , 如图 5(a)所示。设岩样的长宽高分别为  $l$ ,

$w$  和  $h$ , 则岩石上任意节点  $P(x, y, z)$  有:

$$\begin{cases} -\frac{l}{2} \leq x \leq \frac{l}{2} \\ -\frac{w}{2} \leq y \leq \frac{w}{2} \\ 0 \leq z \leq h \end{cases} \quad (5)$$

岩石的三维数字化模型如图 5(b)所示。

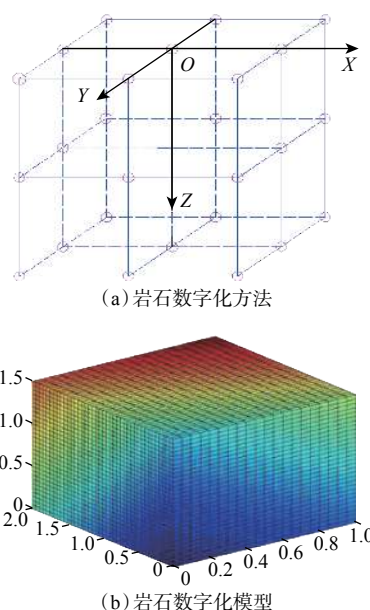


图 5 岩石数字化方法及模型

Fig. 5 Digitization method and model of rock

PDC 钻头与岩石相互作用的实质是切削齿与岩石数字化节点的相互作用。因此, 对岩石三维区域内的数字化节点赋予不同的抗剪强度、研磨性等物性参数, 即可表示不同材质的数字化岩石。

## 3 PDC 钻头破岩过程的模拟

将 PDC 钻头所有的数字化节点存放于 Matlab 矩阵中, 按所需要的方式进行平移、旋转操作<sup>[14-15]</sup>。在旋转导向钻井条件下, 将 PDC 钻头移至岩石表面、使钻头轴线与岩石  $Z$  轴重合, 定义钻头沿自身轴线旋转, 沿岩石  $Z$  轴竖直向下钻进, 即可模拟钻头与岩石的作用过程。齿面节点与岩石的相互作用关系如图 6 所示。

设外部切削齿刃上某节点  $P$  在  $t$  时刻的坐标为  $P_t(x_t, y_t, z_t)$ , 在  $t-1$  时刻坐标为  $P_{t-1}(x_{t-1}, y_{t-1}, z_{t-1})$ , 由于模拟过程中每个时间步长钻头转过的角度和进尺都远小于钻头半径, 故可认为节点  $P$  在  $t$  时刻的速度方向矢量为  $\mathbf{P}_{t-1}\mathbf{P}_t$ ; 同时,  $P$  点在  $t$  时刻周围

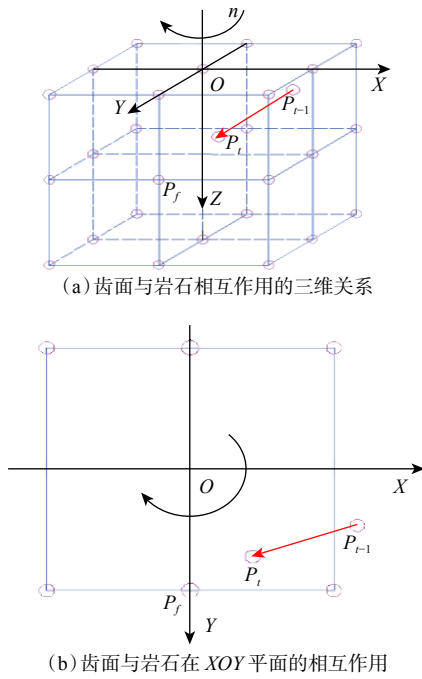


图6 齿面节点与岩石的相互作用关系

Fig. 6 Interaction between tooth surface nodes and rock

有8个岩石数字化节点,这8个节点构成一个岩石正方体微元,通过对速度矢量 $P_{t-1}P_t$ 向上和向下圆整,可得到 $P_t$ 点在所处岩石微元的指向点 $P_f$ 的坐标。

同理,对速度矢量 $P_{t-1}P_t$ 向上和向下圆整,可得 $P_t$ 点在所处岩石微元经过点 $P_b$ 的坐标。

经圆整处理后可获得 $t$ 时刻 $P$ 点在三维岩石上的“指向点”和“经过点”,其中“经过点”为被去除的岩石节点,去除“经过点”后,将 $P_t$ 点的坐标值赋给 $P_f$ ,就得到 $t$ 时刻井底与井壁的坐标,将其进行三角剖分、曲面重构即可得到模拟井底与井壁的可视化模型。同理,齿面节点经过相应的圆整处理,如果能在岩石上找到其对应的“指向点”,则判定该节点与岩石接触,即可为计算切削齿接触面积做准备。

## 4 内外偏心环转速比对破岩效率的影响

### 4.1 破岩效率的定量表示

破岩效率可用岩石切削量定量表示,相同时间步长的切削量越大,意味着其破岩效率越高。切削量包括切削面积和切削体积,切削齿的工作区域由齿面工作区域与齿刃工作区域组成,如图7所示。

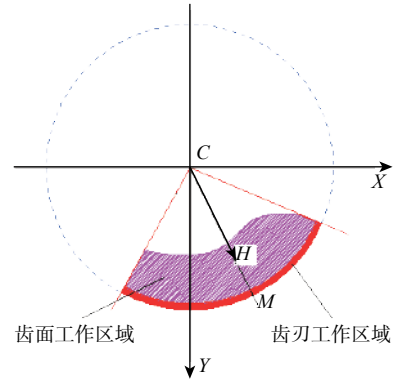


图7 齿刃与齿面工作区域

Fig. 7 Tooth blade working area and tooth surface working area

数字化过程中,齿面和齿刃节点均匀分布,设切削齿工作面由 $N$ 个数字节点组成,切削齿工作区域内包含 $n$ 个节点,设第 $j$ 个节点的坐标为 $(x_j, y_j, z_j)$ ,则齿面接触区域的形心 $H$ 的坐标为:

$$\begin{cases} x_H = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \\ y_H = \frac{\sum_{j=1}^n y_j}{n} \\ z_H = \frac{\sum_{j=1}^n z_j}{n} \end{cases} \quad (6)$$

在PDC切削齿齿刃上,采用齿刃等效接触点 $M$ 来代替齿刃接触点进行切削参数的计算与分析,点 $M$ 为齿面中心点 $C$ 与齿面工作区域等效点 $H$ 的连线与齿刃的交点,其坐标为:

$$\begin{cases} x_M = x_C + \frac{R(x_H - x_C)}{R_H} \\ y_M = y_C + \frac{R(y_H - y_C)}{R_H} \\ z_M = z_C + \frac{R(z_H - z_C)}{R_H} \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{其中 } R_H = \sqrt{(x_H - x_C)^2 + (y_H - y_C)^2 + (z_H - z_C)^2} \quad (8)$$

式中: $R_H$ 为 $H$ 点到 $C$ 点的距离,m。

根据接触面区域节点占齿工作面节点的比例,可得接触面积 $S$ 为:

$$S = \frac{n}{N} \pi r^2 \quad (9)$$

切削面积是接触面在过齿面定位点钻头轴线上投影的面积。由此,假设 $t$ 时刻齿面中心点坐标为 $C(x_2, y_2, z_2)$ , $t+1$ 时刻的坐标为 $C'(x'_2, y'_2, z'_2)$ ,齿



面法向量为  $\mathbf{n}(x_n, y_n, z_n)$ 。钻头与岩石互作用的过程中, 由于钻头每步转过的角度步长很小, 可近似认为  $\mathbf{C}'\mathbf{C}(\mathbf{C}'\mathbf{C} = (x' - x, y' - y, z' - z))$  与齿面中心点在  $t$  时刻的速度方向一致, 即为该时刻过  $C$  点钻头轴线的法向量。向量  $\mathbf{C}'\mathbf{C}$  与向量  $\mathbf{n}$  夹角的余弦为:

$$\cos \alpha = \frac{|x_n(x' - x) + y_n(y' - y) + z_n(z' - z)|}{\sqrt{x_n^2 + y_n^2 + z_n^2} \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2}} \quad (10)$$

切削面积  $S_{st}$  为:

$$S_{st} = S \cos \alpha \quad (11)$$

式中:  $\alpha$  为过  $C$  点钻头中心线法向量与切削齿工作平面法向量的夹角, ( $^\circ$ )。

切削体积为  $t$  到  $t+1$  时间步之间的切削面积与齿面中心点行程的乘积 ( $\Delta V_t = S_{st} |\mathbf{C}'\mathbf{C}|$ ), 则在  $T$  时间步内, 单切削齿的切削体积  $V = \sum_{t=0}^T \Delta V_t$ 。

## 4.2 导向轴指向角的确定

井下闭环可控弯接头是指向式旋转导向钻井系统的重要组成部分, 由旋转外套、导向轴、导向机构、驱动电机和电子控制系统组成, 如图 8 所示。可控弯接头导向机构为指向钻井工具的核心, 主要由内、外偏心环组成, 导向轴的一端由可控弯接头导向机构控制, 另一端安装钻头<sup>[16]</sup>。

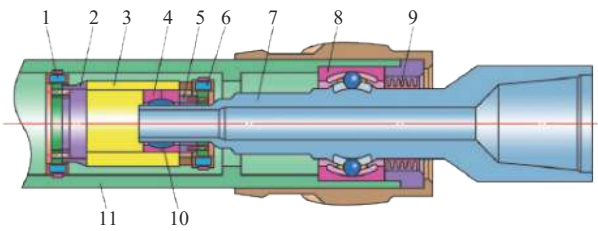


图 8 可控弯接头的结构

Fig. 8 Structure of the controllable bending joint

1. 外偏心环驱动电机; 2. 外偏心环连接法兰; 3. 外偏心环; 4. 内偏心环; 5. 内偏心环连接法兰; 6. 内偏心环驱动电机; 7. 导向轴; 8. 扭矩传递机构; 9. 密封结构; 10. 球座; 11. 旋转外套

钻井过程中, 井下闭环可控弯接头通过调整旋转外套、外偏心环和内偏心环的相对位置, 可以改变导向轴的空间姿态, 实现可控弯接头工具角和工具面角的调整, 从而实现定向钻进, 可控弯接头导向机构的运动简化模型如图 9 所示。设内偏心环的角速度为  $\omega_1$ , 几何中心为  $E$ ; 外偏心环的角速度为  $\omega_2$ , 几何中心为  $E_1$ ; 偏心环组的几何中心为  $E_2$ , 旋转外套的角速度为  $\omega_3$ , 用 2 个向量代替内、外偏心环的偏心距  $e$ 。

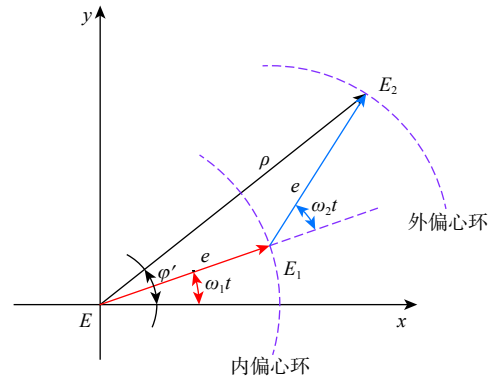


图 9 导向机构运动模型简化示意

Fig. 9 Schematic diagram of the movement model of the steering mechanism

根据导向机构运动简化模型的几何关系建立数学方程, 可得偏心环组中心点  $E_2$  与可控弯接头导向轴线的夹角  $\varphi'$  为:

$$\varphi' = \omega_1 t \left( 1 + \frac{m}{2} \right) \quad (12)$$

考虑旋转外套的旋转, 其夹角变为:

$$\varphi = \left[ \omega_1 \left( 1 + \frac{m}{2} \right) + \omega_3 \right] t \quad (13)$$

式中:  $m$  为内外偏心环的转速比;  $t$  为时间步长。

钻进过程中, 井下闭环可控弯接头指向角为钻头中心线与钻井工具轴线的夹角  $\varphi$ 。因此, 理想状况下, 一定时间步长内的可控弯接头指向角只与内、外偏心环的转速比有关。

## 4.3 内外偏心环转速比对切削量的影响

对于可控弯接头, 影响切削量的主要因素为可控弯接头导向轴的指向角  $\varphi$  和旋转外套的长度  $L$ , 因为它们决定了钻头中心与井眼中心的偏心距  $\rho = L \sin \varphi$ 。由于旋转外套的长度是固定的, 所以内、外偏心环转速比对可控弯接头的破岩效率起着主导作用。

导向钻进过程中, 井下闭环可控弯接头带动钻头在井底旋转一周, 钻头上的每个切削齿都经过井眼参考垂直平面, 各切削齿的切削面积为各齿切削轨迹和上一次作用的叠加区域, 不利于计算, 笔者选用距离井眼中心 40 mm 的外部单齿为研究对象, 切削齿半径  $R$  为 16.0 mm, 齿的前倾角为  $12^\circ$ , 进齿深度为 2.0 mm, 模拟钻进总深度为 16.0 mm (2 个钻井循环), 整个过程需要 756 时间步, 定义可控弯接头与转盘的转速比为 3:1, 旋转外套的长度  $L$  为 1 000 mm, 岩石的抗剪强度为 11 MPa, 内摩擦角为  $22^\circ$ , 摩擦系数为 0.2, 然后进行模拟计算。

当  $m = -2 \left( \frac{\omega_3}{\omega_1} + 1 \right)$  时, 可控弯接头自转 1 周的切

削面积曲线如图10所示。由图10可以看出:随时间步长增加,切削面积近似为一条直线,即破岩效率只是发生轻微波动,几乎是稳态切削。这是因为当转速比 $m = -2\left(\frac{\omega_3}{\omega_1} + 1\right)$ 时,可控弯接头导向轴指向角 $\varphi$ 为 $0^\circ$ ,即钻头中心线与井眼轴线重合,由于钻压恒定,钻头与岩石的接触面积基本不变,其破岩效率趋近于稳态。

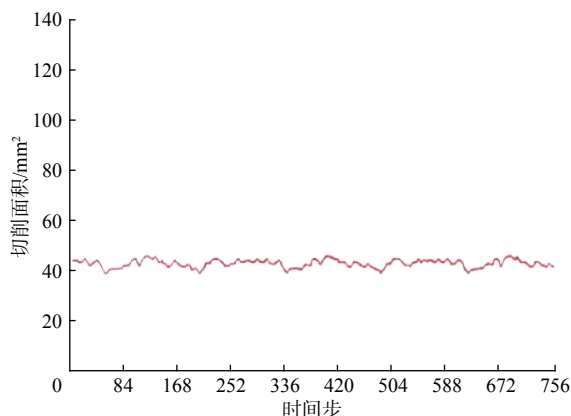


图10 外部单齿在 $m = -2\left(\frac{\omega_3}{\omega_1} + 1\right)$ 时的切削面积

Fig. 10 Cutting area of external single teeth at the time  $m = -2\left(\frac{\omega_3}{\omega_1} + 1\right)$

当 $|m| < 1.0$ 、且 $|m| \neq 0$ 时,偏心环组中心点 $E_2$ 的运动轨迹为螺旋线,且 $|n|$ 越小,螺旋线的条数越多<sup>[17]</sup>。转速比 $m$ 取0.5,模拟所得岩石切削面积与时间步长的关系如图11所示。由图11可知:整个时间步长内,由于偏心环组中心点 $E_2$ 的运动轨迹为螺旋线,切削面积波动较大,当中心点 $E_2$ 处于螺旋线外侧时,导向轴指向角较大,岩屑积累区域比较大,导致切削接触面积大,破岩效率高,反之,其破岩效率较低。并且在整个过程中,切削面积也存在类似直线变换,说明转速比 $m$ 为0.5时也存在稳态切削。

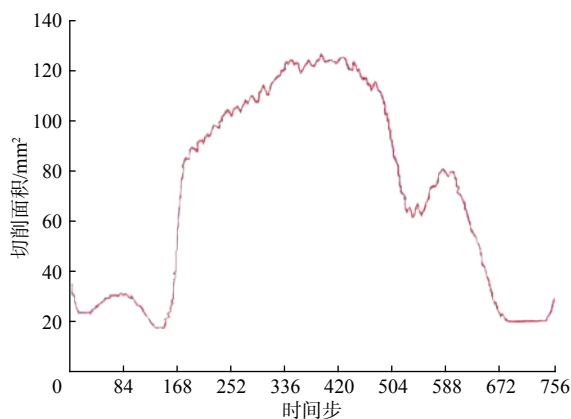


图11 外部单齿在 $m = 0.5$ 时的切削面积

Fig. 11 Cutting area of external single teeth at  $m = 0.5$

当 $|m| \geq 1.0$ 时,且 $m \neq -2\left(\frac{\omega_3}{\omega_1} + 1\right)$ 时,中心点 $E_2$ 的运动轨迹随着 $|m|$ 增大,存在相应变化。转速比 $m$ 取1.0,模拟所得可控弯接头自转1周的切削面积曲线如图12所示。由图12可知:时间步长在163~450时,由于转速比 $|m| = 1.0$ ,可控弯接头导向轴指向角增加较快,导致钻头切削深度增加,再加上岩屑积累,接触面积显著增大,破岩效率呈线性增大,随后,切削深度处于不变状态,接触面积缓慢增加,其切削面积达到最大;在450~760时间步长内,由于岩屑积累过多,使切削深度减小,再加上导向钻具结构的限制,切削面积减小。在整个过程中,切削面积也存在类似直线变换,说明转速比 $m = 1.0$ 时也存在稳态切削。

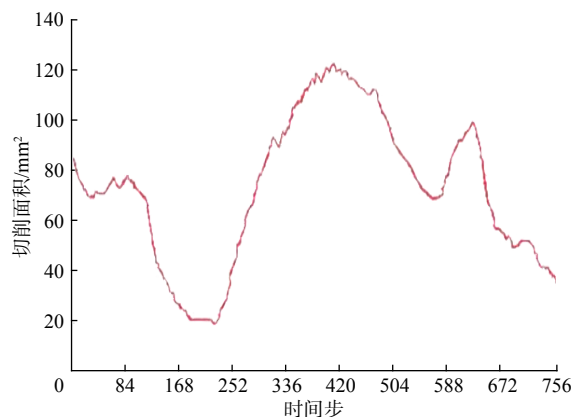


图12 外部单齿在 $m = 1.0$ 时的切削面积

Fig. 12 Cutting area of external single teeth at  $m = 1.0$

图13所示为不同转速比下切削体积随时间步长的变化曲线。从图13可以看出:可控弯接头中的内外偏心环转速比由0逐渐增大到0.8左右过程中,其切削体积呈线性增加,这是因为内外偏心环转速比增大,导向轴指向角增大,岩屑积累量增大,此时岩屑随着钻头共同作用,导致破岩接触面积显著增大,破岩效率明显增大。若持续增大内外偏心环转速比,则岩屑积累厚度增加导致钻头切削深度减小,再加上钻井工具自身造斜条件的限制,其切削体积趋于恒定。

## 5 结 论

1) 基于 Matlab 软件建立了一种模拟旋转导向钻井模式下 PDC 钻头钻进的方法,模拟了旋转导向钻井条件下数字化 PDC 钻头与数字化岩石的相互作用过程,给出了破岩效率的定量表示方法,为研究提高旋转导向钻具破岩效率提供了思路。

2) 在相同条件下,转速比 $|m| \geq 1.0$ 时切削岩石的

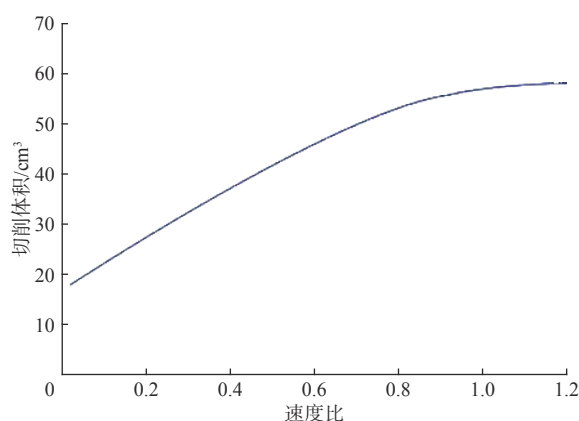


图 13 外部单齿在不同转速比下的切削体积

Fig. 13 Cutting volumes of the external single tooth at different speed ratios

面积明显比  $|m| < 1.0$  时大, 转速比  $m = -2\left(\frac{\omega_3}{\omega_1} + 1\right)$  时的切削面积近似为一条直线, 说明井下闭环可控弯接头在破岩过程中也存在稳态切削, 且在整个过程中均存在稳态切削。

3) PDC 钻头外部切削齿的切削体积随着转速比增大发生相应变化, 切削体积在初始阶段近似呈线性增加; 转速比达到 0.9 左右时, 切削体积增大速度趋于平缓, 最终达到平衡状态。

4) 模拟结果表明, 对于抗剪强度为 11 MPa、内摩擦角为  $22^\circ$ 、摩擦系数为 0.2 的岩石, 最佳破岩转速比在 1.0 左右; 岩石切削量最大的时间步长区间为 300~450。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 田志欣, 李文金, 雷鸿, 等. 大位移定向钻井工艺在 PY10-8/5 油田的应用 [J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(1): 42-46.  
TIAN Zhixin, LI Wenjin, LEI Hong, et al. Application of extended-reach directional well drilling technology in PY10-8/5 Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(1): 42-46.
- [2] 许礼儒, 李一岚, 陈川平. 元坝 121H 超深水平井钻井技术 [J]. 断块油气田, 2015, 22(3): 388-393.  
XU Liru, LI Yilan, CHEN Chuanping. Drilling technology of Yuanba 121H ultra-deep horizontal well[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(3): 388-393.
- [3] 丁红, 宋朝晖, 袁鑫伟, 等. 哈拉哈塘超深定向井钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(4): 30-35.  
DING Hong, SONG Zhaohui, YUAN Xinwei, et al. Drilling technology for ultra-deep directional wells in the Halahtang Area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(4): 30-35.
- [4] 薛启龙, 丁青山, 黄蕾蕾. 旋转导向钻井技术最新进展及发展趋势 [J]. 石油机械, 2013, 41(7): 1-6.  
XUE Qilong, DING Qingshan, HUANG Leilei. The latest progress and development trend of rotary steering drilling technology[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(7): 1-6.
- [5] 刘建华, 吕洁茹, 耿艳峰, 等. 动态指向式旋转导向钻井工具测控系统设计与性能分析 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(6): 59-64.  
LIU Jianhua, LYU Jieru, GENG Yanfeng, et al. Design and performance analysis of the measurement and control systems of the dynamic point-the-bit rotary steerable drilling tool[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(6): 59-64.
- [6] 刘鹏飞, 和鹏飞, 李凡, 等. Power Drive Archer 型旋转导向系统在绥中油田应用 [J]. 石油矿场机械, 2014, 43(6): 65-68.  
LIU Pengfei, HE Pengfei, LI Fan, et al. Application of Power Drive Archer in Suizhong Oilfield[J]. Oil Field Equipment, 2014, 43(6): 65-68.
- [7] PERSSON P O, STRANG G. A simple mesh generator in MATLAB[J]. SIAM Review, 2004, 46(2): 329-345.
- [8] PERSSON P O. Mesh generation for implicit geometries[D]. Cambridge Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [9] 肖仕红. PDC 钻头与岩石互作用过程的计算机仿真 [D]. 成都: 西南石油学院, 2004.  
XIAO Shihong. Computer simulation of interaction process between PDC bit and rock[D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2004.
- [10] 杨迎新, 杨燕, 陈欣伟, 等. PDC 钻头复合钻进破岩机理及个性化设计探讨 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 565-575.  
YANG Yingxin, YANG Yan, CHEN Xinwei, et al. Discussion on rock-breaking mechanism and individuation design of PDC drill bit in compound drilling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 565-575.
- [11] 吴泽兵, 马德坤, 况雨春. 钻柱、钻头与岩石系统计算机仿真 [J]. 系统仿真学报, 2000, 12(6): 675-677.  
WU Zebing, MA Dekun, KUANG Yuchun. Computer simulation of drill string, bit and rock system[J]. Journal of System Simulation, 2000, 12(6): 675-677.
- [12] 肖仕红, 杨迎新. PDC 钻头在复杂运动条件下钻进过程仿真 [J]. 石油矿场机械, 2005, 34(2): 40-42.  
XIAO Shihong, YANG Yingxin. The computer simulation of the drilling progress between the PDC bit and rock[J]. Oil Field Equipment, 2005, 34(2): 40-42.
- [13] GLOWKA D A. Use of single-cutter data in the analysis of PDC bit designs: part 2: development and use of the PDCWEAR computer code[J]. Journal of Petroleum Technology, 1989, 41(8): 850-859.
- [14] 况雨春, 董宗正, 伍开松, 等. 三牙轮钻头数字化钻进仿真评价系统开发及应用 [J]. 石油钻探技术, 2013, 41(1): 103-107.  
KUANG Yuchun, DONG Zongzheng, WU Kaisong, et al. Development and application of numerical simulation system for three-cone bit drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(1): 103-107.
- [15] 陈欣伟. 复合钻井 PDC 钻头破岩机理研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2016.  
CHEN Xinwei. Study on rock breaking mechanism of composite drilling PDC bit[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [16] 张光伟, 刘畅. 可控弯接头钻井工具的偏心机构控制仿真实验 [J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(6): 723-729.  
ZHANG Guangwei, LIU Chang. Simulation experiment on the control method for eccentric mechanism of the drilling tool with variable angle bent sub[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(6): 723-729.
- [17] 王可可. 井下闭环可控弯接头的设计和仿真分析 [D]. 西安: 西安石油大学, 2013.  
WANG Keke. Design and simulation analysis of closed loop controllable bending joints[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2013.

[编辑 刘文臣]