

# 旋切钻头的纵向振动与破岩性能研究

田家林<sup>1,2</sup>, 杨志<sup>1</sup>, 付传红<sup>1</sup>, 杨琳<sup>1</sup>, 朱永豪<sup>1</sup>, 李友<sup>1</sup>, 吴纯明<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学机电工程学院, 四川成都 610500; 2. 西南交通大学机械工程学院, 四川成都 610031)

**摘要:**针对现有钻头的破岩问题与井底模型的特点,提出了一种以旋切运动方式破岩的新型钻头.基于旋切钻头的结构和运动学原理对其进行动力学的振动分析,建立切削齿的振动方程,得到旋切钻头不同齿圈上切削齿的振动位移和速度.然后进行旋切钻头的破岩特性研究,根据建立的钻头不同齿圈切削齿破岩特性分析模型,得到不同齿圈切削齿的冲击力、剪切力、破岩体积等结果并对比分析.研究表明:与现有钻头技术相比,旋切钻头利用冲击与剪切作用复合破岩,大圈齿过中心,可有效提高钻头心部破岩效率;井底模型呈旋风状,可实现所有齿圈切井壁,实现破岩过程钻头的保径功能.同时,建立的分析模型通过对应参数的变换,也可用于其他类型包括复合钻头的分析.

**关键词:**钻头; 钻井; 旋切; 振动; 破岩; 机械钻速

**中图分类号:** TE21      **文献标识码:** A      doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2015.06.008

**引用格式:** Tian Jialin, Yang Zhi, Fu Chuanhong, et al. Research on longitudinal vibration and rock breaking characteristics of rotary cutting drill bits[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015, 45(6): 476-484.

田家林, 杨志, 付传红, 等. 旋切钻头的纵向振动与破岩性能研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2015, 45(6): 476-484.

## Research on longitudinal vibration and rock breaking characteristics of rotary cutting drill bits

TIAN Jialin<sup>1,2</sup>, YANG Zhi<sup>1</sup>, FU Chuanhong<sup>1</sup>, YANG Lin<sup>1</sup>,  
ZHU Yonghao<sup>1</sup>, LI You<sup>1</sup>, WU Chunming<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Aiming at the rock-breaking problems of drill bits and characteristics of bottom hole model, a new type of drill bit that breaks rock with rotary-cutting motion was proposed. Based on the structure and the kinematics principles of rotary-cutting drill bit, its dynamics was analyzed, and the vibration displacement and speed of the cutter on different gear rings were obtained by establishing the vibration equation of the cutters. After that, rock-breaking properties of the rotary-cutting drill bit were researched. On the basis of an analysis model for the rock-breaking characteristics of the cutters on different gear rings, the cutters' impact force, shear force and

**收稿日期:** 2014-12-21; **修回日期:** 2015-04-10

**基金项目:** 石油天然气装备教育部重点实验室开放课题(OG E201403-05), 国家自然科学基金(51074202, 11102173), 四川省教育厅成果转化重大培育项目(12ZZ003, No. 667)资助.

**作者简介:** 田家林(通讯作者), 男, 1979年生, 博士/副教授. 研究方向: 井下工具、钻井力学及理论研究.

E-mail: tianjialin001@gmail.com

rock-breaking volume were obtained and compared. The results showed that compared with the existing drilling technology, the rotary-cutting drill bit breaks rock with shock and shear together and the largest gear ring through the center, which can improve the rock-breaking efficiency of the drill bit center effectively; the bottom hole model is tornado-like which can make all gear rings cut the wall and achieve bit gauge function in the rock-breaking process. At the same time, the analysis model can also be used for other types of bits like composite drill bits by changing corresponding parameters.

**Key words:** drill bit; drilling; rotary cutting; vibration; rock breaking; rate of penetration

## 0 引言

提速增效一直是钻井工程领域的研究重点,钻头作为与岩石直接接触的工具,其工作性能将直接影响钻井过程的机械钻速、钻井成本与质量,相关研究需要结合钻井工程实际情况,利用结构设计、动力学、现代计算以及实验分析展开.以现场使用最广泛的牙轮钻头、PDC 钻头为例,已有研究与实验结果表明,其主要问题包括齿圈等效破岩体积差别大、切削齿失效寿命迥异、钻头有效使用时间不能满足实际需求等<sup>[1-3]</sup>.为解决这些问题,相关领域进行的研究有改变钻头的结构、优化布齿参数<sup>[4-9]</sup>,或者使用复合钻头技术等;也有利用井下工具产生复合运动,并结合钻头结构设计改变,提高破岩效率并保证一定的使用寿命等<sup>[6,10-11]</sup>.

随着油气资源需求的不断增加,钻井工程面临着更复杂、个性化需求的状况<sup>[12-13]</sup>,包括超深井、非常规油气井等的开采,因此进行新型油气条件下的钻头技术的研究具有重要的实际意义和应用价值.通过对现有研究与技术进行分析,结合钻头破岩特性、井底模型、保径以及造斜性等特点<sup>[14-16]</sup>,本文提出一种旋切方式破岩的新型钻头,与现有钻头技术相比,新钻头大齿圈过井底中心,井底模型呈旋风状;切削齿破岩过程同时具有冲击破碎、切削作用;且可实现不同齿圈切削齿过井壁,达到优化切削齿等效破岩体积与钻头保径效果.根据旋切钻头的结构参数和岩石参数以及实际钻井条件设定钻压、转速、扭矩等载荷参数,基于运动学、动力学理论,建立数学模型,分析旋切钻头不同齿圈上的加速度以及纵向振动情况,然后根据岩石力学理论,建立旋切钻头的破岩模型,求得旋切钻头在不同齿圈上的纵向冲击力、剪切力、破岩体积,分析旋切钻头心部破岩效率高以及切削齿磨损原因,为旋切钻头的理论研究和现场应用提供理论基础.

## 1 新钻头结构与分析模型

### 2.1 旋切钻头结构

根据对旋切钻头破岩特性与井底模型的设想,首先进行其结构设计.如图1所示,新钻头的结构主要由钻头主体、牙轮、切削齿、储油囊、喷嘴等部分组成.钻头轴线与牙轮轴径平面的夹角为 $\beta$ ,钻头的直径为 $D$ ,半径偏移量为 $s$ ,牙轮的序号为 $i$ ,牙齿的序号为 $j$ .

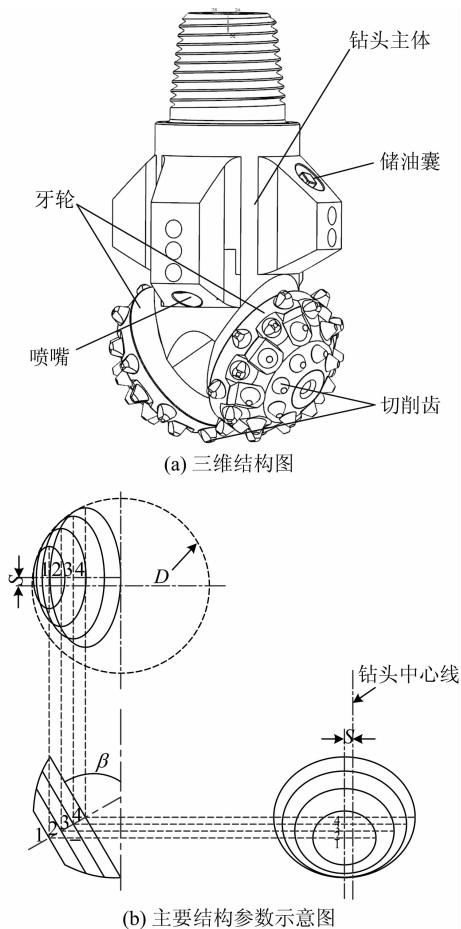


图1 旋切钻头结构

Fig. 1 Structure of rotary-cutting drill bit

建立旋切钻头的运动学分析方法,根据其结构特点,将牙轮绕其轴线的自转(相对于钻头)作为相

对运动,钻头相对于岩石的运动为牵连运动,利用圆柱坐标系建立切削齿分析模型.定义空间中任意一点的坐标为  $P$ ,点  $P$  在圆柱坐标中的位置如图 2 所示.

### 1.2 分析模型

根据旋切钻头的结构和相对关系,建立  $P$  点的位置方程计算公式为

$$\rho_P = \sqrt{(C_0 - h_P \cos \beta + r_P \sin \beta \cos \alpha_P)^2 + (r_P \sin \alpha_P - s)^2} \quad (1)$$

$$\theta_P = \theta_0 - \theta_i - \tan^{-1} \left( \frac{r_P \sin \alpha_P - s}{C_0 - h_P \cos \beta + r_P \sin \beta \cos \alpha_P} \right) \quad (2)$$

$$Z_P = Z_0 - h_P \sin \beta - r_P \cos \beta \cos \alpha_P \quad (3)$$

式中,  $\rho_P$  为静矢径,  $\theta_P$  为静极角,  $Z_P$  为静竖高,  $C_0$  为旋切钻头的轮底中心臂长,按照不同的齿圈位置分别定义齿圈 1、齿圈 2、齿圈 3、齿圈 4...  $\theta_0$  为旋切钻头初始位置角,  $\theta_i$  表示第  $i$  个牙轮与第一个牙轮之间的夹角,且有  $\theta_i = \frac{2\pi(i-1)}{3}$ .  $Z_0$  为钻头体初始位置参数,  $r_P$  为动矢径,  $\alpha_P$  为动极角,  $h_P$  为动竖高.

根据建立的位置方程与相对运动关系,可得旋

切钻头切削齿的径向、切向、纵向加速度结果,其中,纵向加速度表达式为

$$a_{PZ} = \frac{d^2 Z_P}{dt^2} = a_{OZ} + r_P \epsilon_i \cos \beta \sin \alpha_P + r_P \omega_i^2 \cos \beta \cos \alpha_P \quad (4)$$

式中,  $a_{PZ}/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-2})$  为纵向加速度;  $t/\text{s}$  为时间;  $a_{OZ}/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-2})$  为钻头体的纵向上下加速度;  $\epsilon_i/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$  为旋切钻头牙轮的“自转”角加速度;  $\omega_i/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$  为切削齿  $p$  的自转角速度.

由于旋切钻头在井底运动时各齿圈上的加速度不同,造成旋切钻头不同齿圈上的受力也不同,并且可得关系式:

$$F_{\text{bit}} = m_{\text{bit}} a_{PZ} = m_{\text{bit}} (a_{OZ} + r_P \epsilon_i \cos \beta \sin \alpha_P + r_P \omega_i^2 \cos \beta \cos \alpha_P) \quad (5)$$

式中,  $m_{\text{bit}}/\text{kg}$  为钻头的质量.

旋切钻头与钻杆在井底振动时,作用在旋切钻头上的载荷除了静钻压之外,还有钻头产生的动载荷等,因此,作用在旋切钻头上的力如图 3 所示.

作用在旋切钻头上的纵向力  $F$  为

$$F = m_{z1} g + m_{z2} g + F_{\text{wob}} + m_{\text{bit}} g + F_{\text{bit}} \quad (6)$$

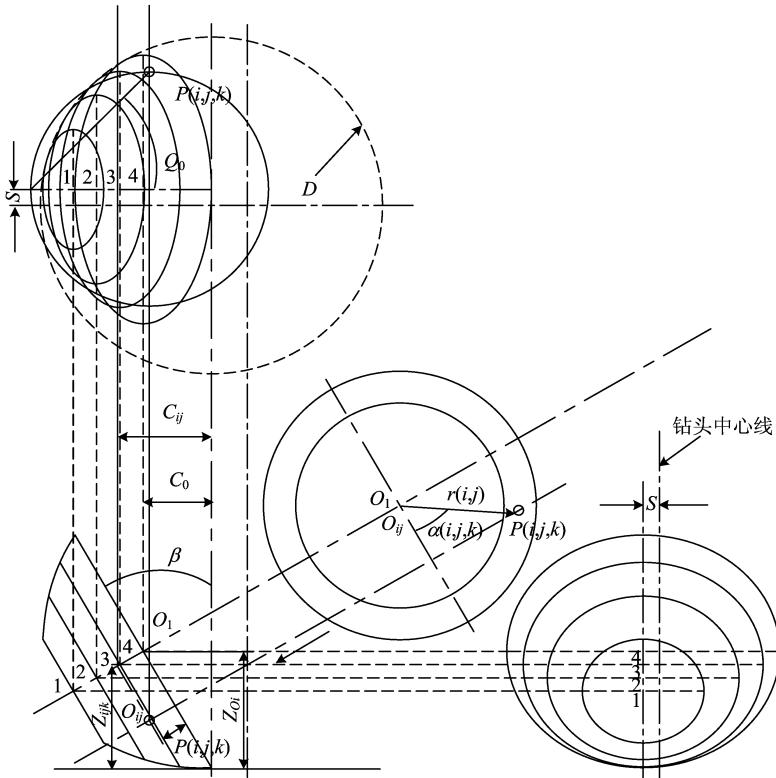


图 2 切削齿在圆柱坐标中的位置

Fig. 2 Position of cutting element in cylindrical coordinates

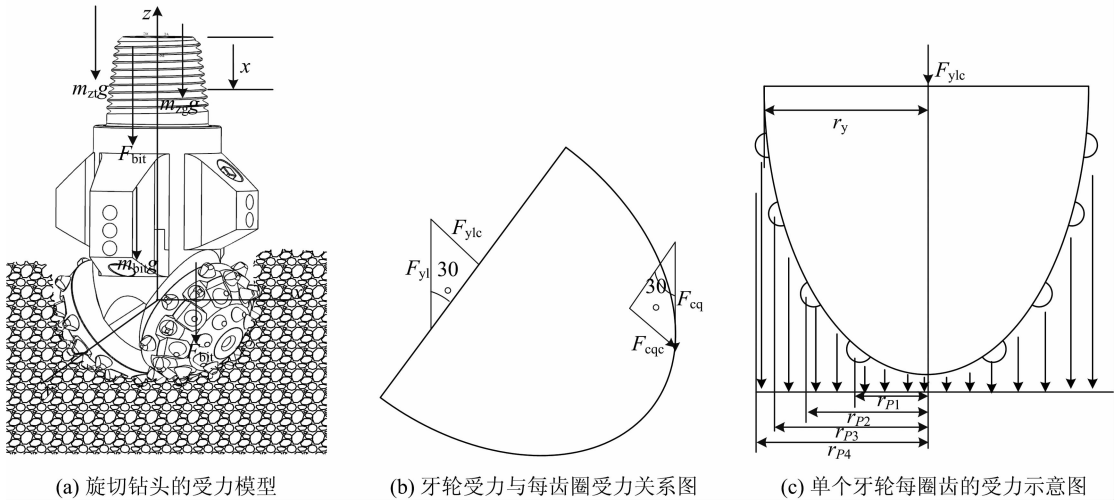


图 3 旋切钻头的动力学模型

Fig. 3 Dynamics model of rotary cutting drill bit

式中,  $m_{zt}/\text{kg}$  为钻铤的质量;  $m_{zg}/\text{kg}$  为钻杆的质量;  $F_{wob}/\text{N}$  为钻压;  $g$  为重力加速度, 取  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

由旋切钻头的结构可知, 设该钻头由两个牙轮组成, 两牙轮对称分布, 牙轮所受的纵向力  $F_{yl} = \frac{1}{2} F$ .

根据弹性力学理论以及

$$F_{ylc} = \sin 30^\circ F_{yl}, F_{cqi} = \frac{F_{cqc}}{\sin 30^\circ},$$

可得齿圈上的受力为

$$F_{cqi} = \frac{F}{4\pi \sqrt{(r_y)^2 - (r_{pi})^2} / r_y} \quad (7)$$

式中,  $F_{ylc}/\text{N}$  为牙轮所受的垂直与牙轮面的力;  $F_{cqc}/\text{N}$  为每圈切削齿所受的垂直于牙轮面的力;  $r_y/\text{mm}$  为牙轮的半径;  $F_{cqi}/\text{N}$  为齿圈  $i$  所受的纵向力.

旋切钻头在井底运动时, 设同一齿圈上的切削齿受力过程相同, 因此, 用齿圈上所受的力进行切削齿的破岩性能研究. 通过离散单元方法, 把建立的旋切钻头纵向振动动力学系统转化为一个有限自由度的离散系统, 其微分振动方程可以写成矩阵形式:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = [F_{qxc}] \quad (8)$$

式中,  $[M]$  为整体结构的质量矩阵;  $[C]$  为整体阻尼矩阵;  $[K]$  为整体刚度矩阵;  $[F_{qxc}]$  为切削齿的整体载荷矩阵;  $\{\ddot{x}\}$  为切削齿的加速度向量;  $\{\dot{x}\}$  为切削齿的速度向量;  $\{x\}$  为切削齿的位移.

对旋切钻头的破岩特性进行分析, 作为一种新型钻头, 与常规钻头相比, 旋切钻头兼有牙轮钻头的冲击破岩与 PDC 钻头的剪切破岩效果. 旋切钻头冲击岩石的过程实际上就是一种碰撞过程, 影响其冲击力的因素很多, 包括旋切钻头的质量、岩石参数、

冲击高度、冲击速度、钻井参数、动力特性等, 其简化模型如图 4 所示.

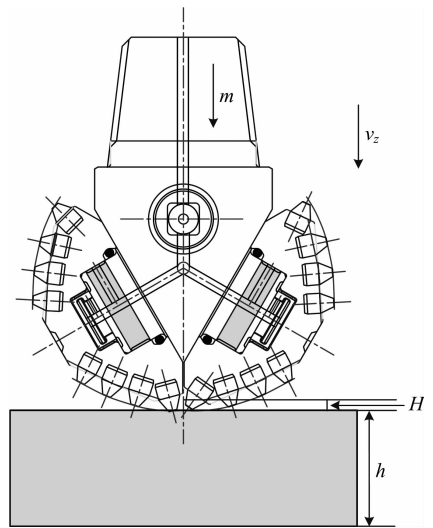


图 4 旋切钻头的冲击破岩模型

Fig. 4 Rock breaking model with shock effect of rotary cutting drill bit

根据冲击理论和对旋切钻头的冲击简化模型分析可知, 旋切钻头在不同齿圈上的最大冲击力计算公式为

$$F_{\text{max-shock}} = k \left[ \frac{m_{\text{bit}} v_z}{\Delta t} + m_{\text{bit}} g \right] \quad (9)$$

式中,  $k$  为冲击力放大系数;  $v_z/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$  为不同齿圈上的纵向振动速度;  $\Delta t/\text{s}$  为冲击过程所用时间, 根据冲击过程历时计算的方法, 可得  $\Delta t$  的计算方法为

$$\Delta t = \frac{(0.097mg + 2.21h + \frac{0.45}{H} + 1.2)}{100} \quad (10)$$

式中,  $h/m$  为缓冲岩石的厚度;  $H/m$  为旋切钻头与岩石之间的冲击高度, 且其计算关系式为

$$H = \frac{v_z^2}{2g} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)得到冲击过程历时  $\Delta t$ , 即

$$\Delta t = \frac{(0.097mg + 2.21h + \frac{0.09}{v_z^2} + 1.2)}{100} \quad (12)$$

将式(12)代入式(9)可求出旋切钻头在不同齿圈上的最大冲击力, 并和钻压、钻杆和钻铤等产生的重力进行叠加, 得到作用在旋切钻头上的总的纵向冲击力, 即

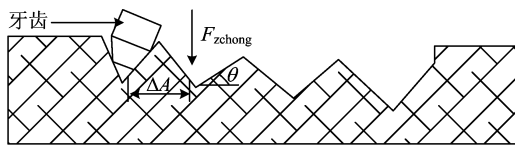
$$F_{z\text{zhong}} = m_{zt}g + m_{zg}g + F_{wob} + F_{\text{max-shock}} \quad (13)$$

由岩石破碎理论, 切削齿在破碎岩石时可以简化为圆柱或球形齿对其进行力学分析, 根据旋切钻头切削齿的特性, 本文将其简化为圆柱齿进行计算. 且当旋切钻头施加冲击载荷时, 冲击坑之间形成了近似三角形的脊岩, 如图 5(a) 所示. 利用 L-A 准则对旋切钻头存在“脊岩”时的切削进行分析, 由实验得到的井底模型分析可知, 旋切钻头的剪切力能把所有的冲击坑脊岩体从根部全部剪切掉, 因此, 可得旋切钻头的剪切力计算公式为

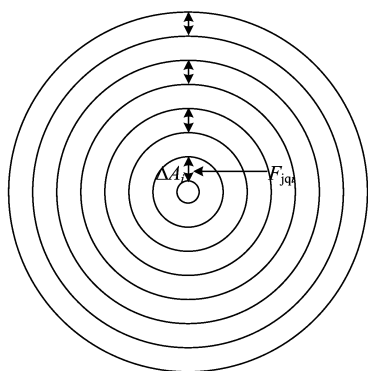
$$F_{jq} = F_{z\text{zhong}} \tan\varphi + A_i c \quad (14)$$

式中,  $F_{jq}/N$  为不同齿圈上的剪切力;  $F_{z\text{zhong}}/N$  为旋切钻头总冲击力;  $\varphi/(\circ)$  为岩石的内摩擦角;  $c/MPa$  为岩石的黏结力;  $A_i/mm^2$  为不同齿圈的切削面积.

破岩功耗是评价钻头钻进效率和破岩效率的重



(a) 剪切破岩主视示意图



(b) 剪切破岩每圈齿切削面积俯视示意图

图 5 旋切钻头的剪切破岩

要指标之一, 由破岩功耗计算公式可得旋切钻头在单位时间内不同齿圈的破岩体积为

$$V_i = \frac{n\pi r_i}{30} A_i \cos\theta \quad (15)$$

式中,  $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$  为旋切钻头的转速;  $r_i/mm$  为旋切钻头不同齿圈上的切削齿到钻头中心的距离;  $\theta/(\circ)$  为旋切钻头切削岩石的切入角.

## 2 算例分析

根据建立的旋切钻头纵向振动与破岩分析模型, 进行算例分析. 首先, 利用给定的算例参数进行旋切钻头的运动加速度求解, 得到旋切钻头切削齿在井底的位移、速度结果; 再根据其破岩分析模型以及相关参数进行旋切钻头在不同齿圈上的纵向冲击力、剪切力和破岩体积等参数的求解与分析. 算例的初始参数如表 1 所列.

表 1 具体参数

Tab. 1 Specific parameters

齿圈 1 对应的半径 $r_{p1}/mm$	20
齿圈 2 对应的半径 $r_{p2}/mm$	32
齿圈 3 对应的半径 $r_{p3}/mm$	43
齿圈 4 对应的半径 $r_{p4}/mm$	52
轮体夹角 $\beta/(\circ)$	30
轴颈偏移量 $s/mm$	6
中心臂长 $C_0/mm$	-24.25
大齿圈纵向距离原点坐标 $h_p/mm$	10.47
钻头体的纵向移动速度 $v_{0Z}/(mm \cdot s^{-1})$	-1.02
轮体速比 $R_i$	0.46
钻头体的“公转”角速度 $\omega_b/(\text{rad} \cdot s^{-1})$	$3\pi$
钻杆长度/m	8
钻铤长度/m	2
阻尼系数	0.2
钻杆的单位质量/ $(kg \cdot m^{-1})$	9.32
钻铤的单位质量/ $(kg \cdot m^{-1})$	36.99
钻压/N	20 000
旋切钻头的质量为/kg	13
单个牙轮的半径为/mm	60
冲击力放大系数 $k$	2
缓冲岩石的厚度 $h/m$	0.55
岩石的内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	57
岩石的黏结力 $c/MPa$	10
齿圈 1 的切削面积 $\Delta A_4/mm^2$	4 371
齿圈 2 的切削面积 $\Delta A_3/mm^2$	3 115
齿圈 3 的切削面积 $\Delta A_2/mm^2$	1 859
齿圈 4 的切削面积 $\Delta A_1/mm^2$	603
旋切钻头的转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	60
旋切钻头切削岩石的切入角 $\theta/(\circ)$	47
齿圈 1 切削齿到钻头中心的距离 $r_1/mm$	59.5
齿圈 2 切削齿到钻头中心的距离 $r_2/mm$	45.5
齿圈 3 切削齿到钻头中心的距离 $r_3/mm$	31.5
齿圈 4 切削齿到钻头中心的距离 $r_4/mm$	14.5

Fig. 5 Rock breaking with shear effect of rotary cutting drill bit

由旋切钻头运动分析的计算公式(1)~(4)和初始参数,可求得旋切钻头的纵向加速度. 齿圈 1~4 接触段上切削齿的纵向加速度变化规律如图 6 所示,从图中可以看出,随着齿圈半径增大,齿圈上切削齿的加速度也在增加,在接触段的起点处加速度值比较大,冲击破岩效果比较明显. 计算表明破岩过程中,不同齿圈切削齿受力以及破岩效果不同,在同等材质条件下,不同齿圈切削齿的失效形式以及寿命也不同,加速度的计算结果是后面进行动力学与失效机理研究的基础.

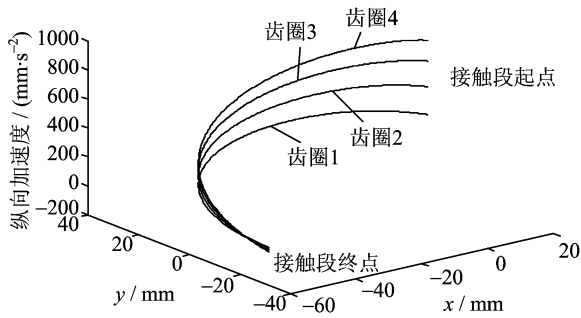


图 6 各齿圈切削齿纵向加速度分析

Fig. 6 The longitudinal acceleration analysis of cutting element on each ring

根据旋切钻头的纵向振动分析模型以及利用图 6 所示的结果,可求得钻进过程中旋切钻头不同齿圈、不同加速度条件下的振动位移和振动速度,如图 7 和 8 所示. 结果表明:钻进过程中,齿圈 1 上的振动位移和振动速度最小,齿圈 4 上的振动位移和振动速度最大,旋切钻头在心部产生的纵向振动最强烈,有利于提高心部破岩效率.

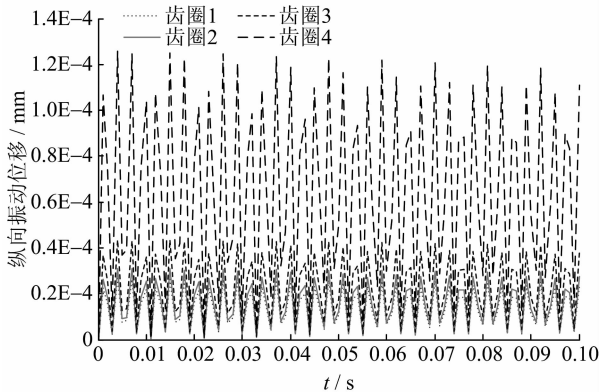


图 7 不同齿圈上的纵向振动位移

Fig. 7 Longitudinal vibration displacement on different ring

根据旋切钻头冲击破岩理论公式,可求得旋切钻头在不同齿圈上的最大冲击力,如图 9 所示. 然后

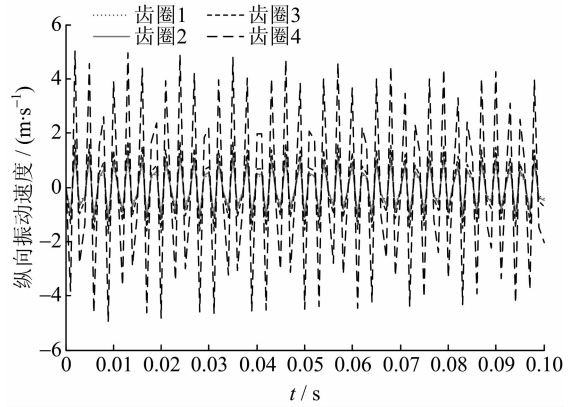


图 8 不同齿圈上的纵向振动速度

Fig. 8 Longitudinal vibration velocity on different ring

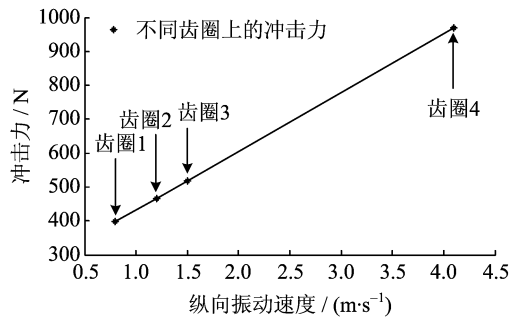


图 9 纵向振动速度与冲击力的关系

Fig. 9 Relationship between longitudinal vibration velocity and shock force

根据式(13)求得旋切钻头在不同齿圈上的总纵向冲击力,将其代入剪切破岩理论的具体公式(14)~(15),求得不同齿圈上的剪切力和破岩体积等,并将所求结果进行曲线拟合,其结果如图 10 和 11 所示. 结果表明,旋切钻头齿圈 1 的总的纵向冲击力最小,齿圈 4 的总的纵向冲击力最大,且中心切削齿冲击力最大;而不同齿圈上的剪切力与冲击力恰好相反,齿圈 1 的剪切力最大,齿圈 4 的剪切力最小;对于破岩体积而言,齿圈 1 的破岩体积最多,齿圈 4 的破岩

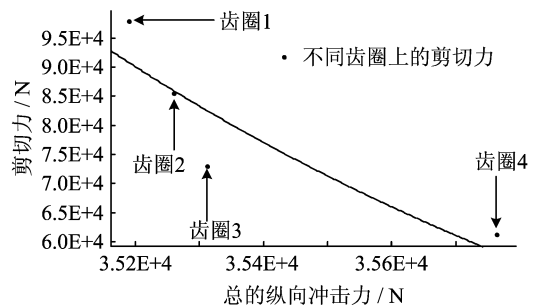


图 10 不同齿圈上的总纵向冲击力与剪切力的关系

Fig. 10 Relationship between total longitudinal shock force and shear force on different ring

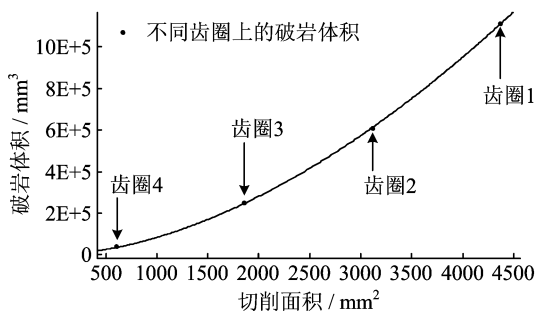


图 11 不同齿圈上的切削面积与破岩体积的关系

Fig. 11 Relationship between cutting area and rock-breaking volume on different ring

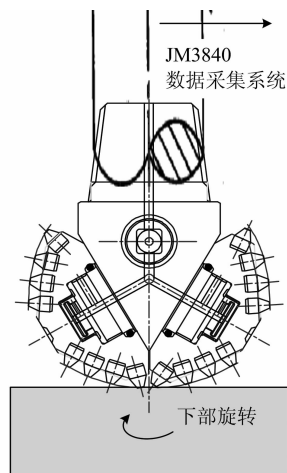
体积最少。

### 3 实验与分析

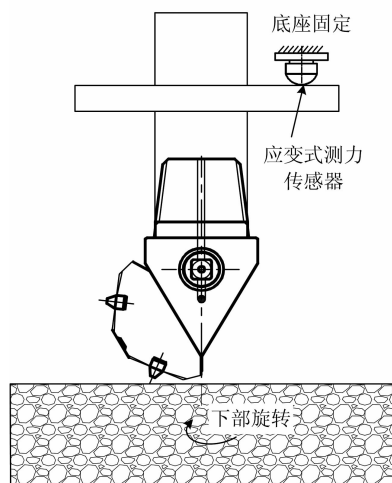
为验证计算方法与模型的正确性,我们进行了相应的实验测试与分析,包括分析钻头破岩特性、井底模型、切削齿有效破岩体积、磨损情况、纵向冲击力等,并将实验结果与理论结果进行对比,分析误差原因。实验所用的主要设备有钻头实验架和单齿实验机,我们利用钻头实验架完成不同类型钻头的钻进实验,利用单齿实验机完成旋切钻头不同齿圈的破岩实验,实验方案设计如图 12 所示。

实验有以下 3 个关键点:①所用的旋切钻头型号为 6"钻头,其主体参数、牙轮结构、布齿结果等与算例中的参数相同。为了对比旋切钻头与其他类型钻头,加工了相同规径的三牙轮钻头、PDC 钻头,在钻头实验架进行了相关实验。为了得到旋切钻头的不同齿圈实验结果,将齿圈 1~齿圈 4 进行剥离,在单齿实验机上进行实验。②岩样为灰岩,尺寸为 225 mm×200 mm×55 0mm,对岩样取芯并利用 RTR-1000 岩石实验机测试其相关力学参数,包括实验条件下的本构关系。③为分析不同参数对结果的影响,实验过程中除了改变钻头类型、切削齿齿圈,还改变了钻压、转速等参数。钻头实验架和单齿实验机是作者所在研究机构的自研设备,为满足实验要求,进行了部分改造,采用 JM3840 数据采集系统测试实验过程的钻压、扭矩等参数,如图 12(a)所示;采用型号为 CL-YB-7/5t 的传感器测试实验过程的纵向冲击力,如图 12(b)所示。

实验如图 13 所示,包括钻头实验、单齿圈实验、岩屑分析。其中,对岩屑进行收集、晾干、测试,利用岩屑的相关物性参数,得到了不同齿圈的有效破岩体积。



(a) 钻头实验方案



(b) 齿圈实验方案

图 12 实验方案设计

Fig. 12 Experience design

实验得到的不同类型钻头井底模型如图 14 所示。从图中可以不仅能看出切削齿的运动轨迹,还发现与三牙轮、PDC 钻头相比,旋切钻头切削齿的破岩行为兼有冲击与剪切的作用,并具有从里往外、从下往上“刨”的效果。同时,对切削齿的磨损情况进行分析,发现旋切钻头的齿圈 1(小齿圈)磨损比较严重,各齿圈的磨损程度不同,这是由于单个切削齿的有效破岩体积不同造成的。因此,在一定钻井参数与结构参数的条件下,进行旋切钻头的布齿优化,应综合考虑切削齿的材料、形状、数目等因素。对单齿圈的实验结果如图 15 所示,实验结果与理论值比较吻合,相对误差较小(与测试精度与基数有关),验证了理论研究的准确性。此外,不同齿圈的冲击力、剪切力、有效破岩体积、切削面积是多参数耦合的结果,对于齿圈 4 而言,其冲击力最大,但剪切力、有效破

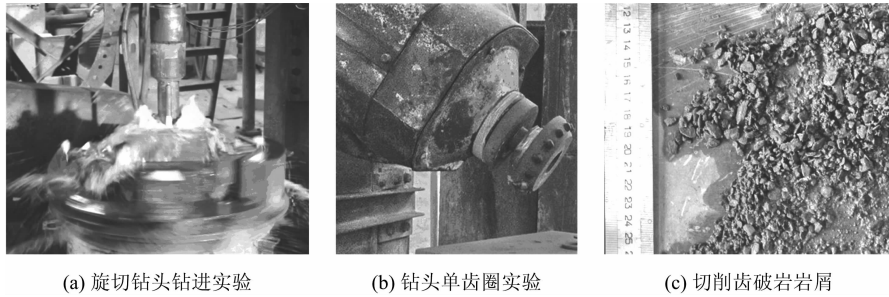


图 13 旋切钻头实验

Fig. 13 Experience of rotary cutting drill bit

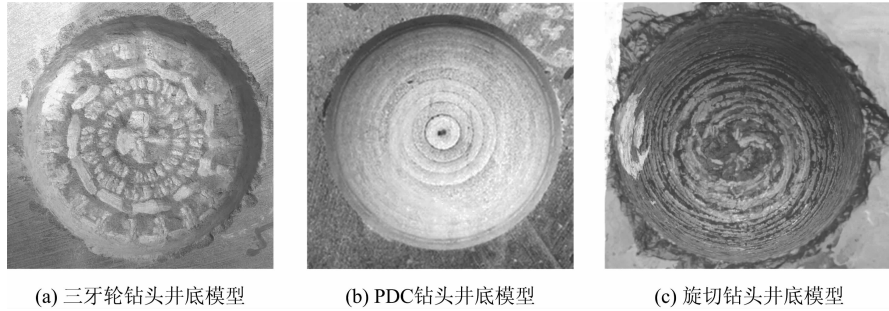


图 14 不同类型钻头的井底模型

Fig. 14 Bottom hole model with different types of drill bit

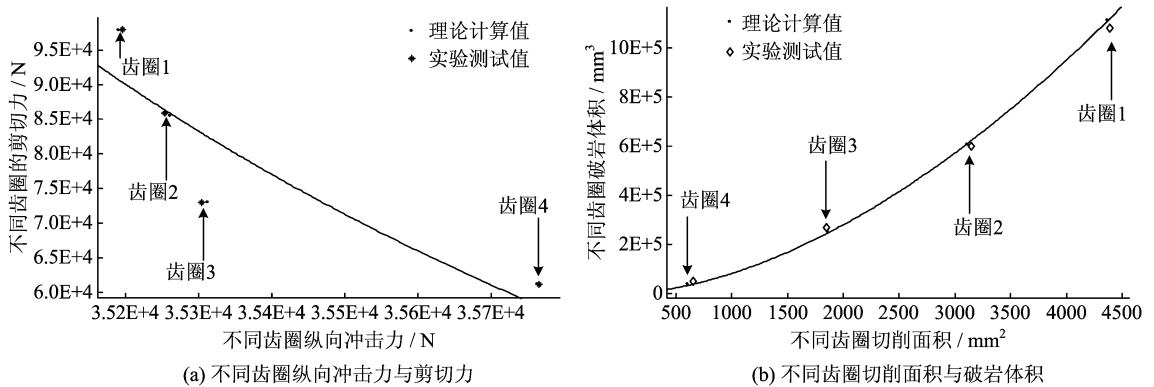


图 15 理论值与实验值对比

Fig. 15 Comparison of theoretical value and experimental value

岩体积小,与切削面积小有关.同时,实验结果证明,旋切钻头可实现所有齿圈切削齿接触井壁,即参与井壁破岩,利用这个特性,可优化不同齿圈切削齿的有效破岩体积,从而提高钻头寿命与总进尺.

## 4 结论

旋切钻头与现有钻头技术相比,其切削齿利用冲击与剪切作用复合破岩;井底模型呈旋风状,大圈齿过中心,可实现破岩过程具有从里往外、从下往上“刨”的效果以及可实现不同齿圈同时切削井壁的功能.通过布齿参数变化,可优化不同切削齿的有效破岩体积.在旋切钻头结构设计、运动分析的基础上,

本文建立了新钻头的纵向振动与破岩性能分析模型.利用算例分析与实验结果进行特性分析,结果表明,旋切钻头实验过程从齿圈1到齿圈4的振动位移和振动速度越来越大,总的纵向冲击力也在不断地增加,其中中心齿圈的冲击力大,破岩效率高;齿圈1到齿圈4的切削面积、剪切力和破岩体积在不断地减小,其中齿圈1(小齿圈)磨损最严重,这是切削齿的冲击力、剪切力与有效破岩体积等因素综合影响的结果.

建立的研究方法与分析模型是旋切钻头性能分析的基础,但对于钻井现场条件而言,特别是新型油气资源条件下更加复杂的钻井工况,应结合钻井参



数,包括井身结构、地质参数、泥浆参数、BHA 组合等,基于钻柱动力学进行钻头的性能分析,才能得到钻头破岩特性如机械钻速、使用寿命、总进尺等参数的准确结果.对深井、超深井、长井眼水平井而言,更需要在现有钻柱动力学基础上,考虑钻柱迟滞效应、涡动等重要因素对钻头破岩特性的影响,建立钻头分析的新方法与模型,才能得到与实际情况吻合的结果.

本文建立的分析方法与计算模型,同样可适用于其他类型的钻头研究,包括轮式钻头或复合钻头,但应用于其他类型钻头时需要注意部分参数的变换与处理.研究成果可为新型油气井条件下的钻井工程高效破岩、提速增效理论研究与工具研制提供参考.

### 参考文献(References)

- [1] Franca L F P. Drilling action of roller-cone bits: Modeling and experimental validation[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2010, 132(4): 043101.
- [2] Yang Yingxin, Zhang Wenwei, Li Bin, et al. Effect evaluation on insert penetration to rock and optimization of insert shape[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(1): 110-113.  
杨迎新,张文卫,李斌,等. 牙齿破岩效率的评价及牙齿优选探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(1): 110-113.
- [3] Wang Qingfeng, Zhu Caichao, Song Chaosheng, et al. Non-linear dynamic analysis of a roller cone bit-well rock system with rock-cone bit interaction[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(10): 108-112.  
王清峰,朱才朝,宋朝春,等. 牙轮钻头单牙轮的破岩仿真研究[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(10): 108-112.
- [4] Richard T, Detournay E. Influence of bit-rock interaction on stick-slip vibration of PDC bits[R]. SPE, 2006: SPE 77616.
- [5] Gradl C, Eustes A W, Thonhauser G. An analysis of noise characteristics of drill bits[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2012, 134(1): 013103.
- [6] Hamade R F, Manthri S P, Pusavec F, et al. Compact core drilling in basalt rock using PCD tool inserts: Wear characteristics and cutting forces[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(10): 1 326-1 339.
- [7] Zhu Caichao, Xie Yongchun, Qin Datong, et al. Study on dynamic action of integrated drill string-bit system[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(2): 69-74.  
朱才朝,谢永春,秦大同,等. 牙轮钻头纵向横向扭转振动动力学仿真研究[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(2): 69-74.
- [8] Yigit A S, Christoforou A P. Stick-slip and bit-bounce interaction in oil-well drillstrings[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2006, 128(4): 268-274.
- [9] Richard T, Germay C, Detournay E. Self-excited stickslip oscillations of drill bits[J]. *Comptes Rendus Mécanique*, 2004, 332(8): 619-626.
- [10] Wang Minsheng, Li Zukui, Geng Yingchun, et al. Laboratory study on rock breaking mechanism and its application [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(3): 711-716.  
王敏生,李祖奎,耿应春,等. 室内岩石破岩机制试验及应用研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(3): 711-716.
- [11] Li Wei, Li Yanan, Chen Shichun, et al. Downhole drilling rate equation cone bits and field application[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(3): 74-77.  
李玮,李亚楠,陈世春,等. 井底牙轮钻头的钻速方程及现场应用[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(3): 74-77.
- [12] Zhu H Y, Deng J G, Xie Y H, et al. Rock mechanics characteristic of complex formation and faster drilling techniques in western South China Sea oilfields[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 44: 33-45.
- [13] Deng Jingen, Zhu Haiyan, Xie Yuhong, et al. Rock mechanical properties and rock breaking mechanism of the complex formation of the western South China Sea oilfields [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(7): 2 097-2 109.  
邓金根,朱海燕,谢玉洪,等. 南海西部海域难钻地层特征及破碎机制研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(7): 2 097-2 109.
- [14] Tian Jialin, Pang Xiaolin, Liang Zheng, et al. Kinematic features of a new drill bit of the tornado-like bottom-hole model [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(6): 1163-1167.  
田家林,庞小林,梁政,等. 旋风状井底模型的新型钻头运动特性[J]. *石油学报*, 2013, 34(6): 1163-1167.
- [15] Tian Jialin, Fu Chuanhong, Yang Lin, et al. Influence of the tooth-distributing angle of PDC bit on wear of composite plate under torsion vibration [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2014, 35(6): 574-582.  
田家林,付传红,杨琳,等. 基于扭转振动的 PDC 钻头布齿角度对复合片磨损规律的影响研究[J]. *固体力学学报*, 2014, 35(6): 574-582.
- [16] Tian Jialin, Fu Chuanhong, Yang Lin, et al. Rock-breaking characteristics of a new PDC drill bit with modular tooth-distribution [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015, 39(1): 136-141.  
田家林,付传红,杨琳,等. 模块化布齿的新型 PDC 钻头破岩特性[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(1): 136-141.