

# 复合锥单牙轮钻头牙齿磨损研究

郭正伟, 苟俊华, 何伟, 余东坤, 何超, 叶啸天

(重庆科技学院, 重庆 401331)

**摘要:**复合锥单牙轮钻头是基于球形单牙轮钻头的新型单牙轮钻头,其独特破岩方式能提高钻头效率。但现场试验发现,钻头牙轮小端一侧切削齿和保径齿磨损严重,牙轮大端切削齿和保径齿基本没有磨损,导致整个钻头钻进速度降低。为弄清偏磨机理,通过有限元分析方法对钻头各齿圈牙齿载荷变化规律进行了分析,并分析了各齿圈牙齿的切削轨迹形状和牙齿与岩石的接触时间。结果表明:牙轮大端的牙齿载荷大于牙轮小端的牙齿载荷,但牙轮小端牙齿与岩石的接触时间更长。综合分析牙齿破岩时间和牙齿轴向载荷,理论上⑥号齿圈牙齿磨损应该最小。现场试验结果表明:不但⑥号齿圈磨损较小,①、④、⑤号齿圈的磨损更小;钻头一侧保径齿磨损严重,且⑦、⑧号齿圈磨损严重,根据研究结果分析认为钻头钻进过程中向井壁一侧发生倾斜,导致钻头一侧切削齿和保径齿磨损严重。

**关键词:**单牙轮钻头;复合锥;牙齿磨损;牙齿载荷;轨迹长度

**中图分类号:**P634.4;TE921 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)04-0118-09

## Study on tooth wear of compound cone single cone bit

GUO Zhengwei, GOU Junhua, HE Wei, YU Dongshen, HE Chao, YE Xiaotian

(Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** Compound cone single cone bit is a new type of single cone bit based on spherical single cone bit. Its unique rock breaking method can improve the bit efficiency. The field test found that the cutting teeth and diameter retaining teeth on the small end of the drill bit tooth wheel were seriously worn, and the cutting teeth and diameter retaining teeth at the large end of the tooth wheel were basically not worn, resulting in a decrease in the drilling speed of the entire drill bit. In order to find out the reasons for the uneven wear of the drill bit, the tooth load of each ring gear of the drill bit was tested by finite element analysis method, and the cutting trajectory shape of each ring gear tooth and the contact time between the tooth and the rock were analyzed. The results showed that the tooth load at the large end of the tooth wheel was greater than that at the small end of the tooth wheel, but the contact time between the teeth at the small end of the wheel and the rock was longer. Based on the analysis of tooth rock breaking time and tooth axial load, the wear of No.⑥ ring gear teeth should theoretically be minimal. The field test results show that not only the wear of the No.6 ring gear is small, but also the wear of the No.①, ④ and ⑤ ring gear is smaller. The diameter retaining teeth on the side of the drill bit are seriously worn, and the wear of the ring gear No.⑦ and ⑧ is serious, it can be determined that the drill bit is tilted to the side of the well wall during drilling, resulting in serious wear of the cutting teeth and diameter retaining teeth on the side of the drill bit.

**Key words:** single cone bit; compound cone; tooth wear; tooth loading; track length

收稿日期:2023-02-03; 修回日期:2023-05-05 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.04.016

基金项目:重庆市自然科学基金面上项目“复合锥单牙轮钻头破岩机理研究”(编号:cstc2020jcyj-msxmX0169);重庆市教委科学技术研究项目“深井硬岩地层复合锥单牙轮钻头结构与性能关系研究”(编号:KJQN202101504);重庆科技学院硕士研究生创新计划项目“异形单牙轮钻头偏磨机理及牙齿磨损监测”(编号:YKJCX2220301)

第一作者:郭正伟,男,汉族,1987年生,机械工程专业,博士,主要研究方向为钻头与井下工具,重庆市沙坪坝区大学城东路20号,gzw@cqust.edu.cn。

引用格式:郭正伟,苟俊华,何伟,等.复合锥单牙轮钻头牙齿磨损研究[J].钻探工程,2023,50(4):118-126.

GUO Zhengwei, GOU Junhua, HE Wei, et al. Study on tooth wear of compound cone single cone bit[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4):118-126.

## 0 引言

单牙轮钻头对地层的适应性较广,钻进效率高,是当前小井眼钻井的重要工具。当前现场应用较多的单牙轮钻头多为球形单牙轮钻头,球形单牙轮钻头牙齿轨迹为网状切削轨迹(如图1a所示),破岩方式主要依靠牙齿的长距离滑移刮切破碎岩石,但在硬地层和高研磨性地层中牙齿先期磨损严重,造成钻头的机械钻速和寿命降低。长期以来,国内单牙轮钻头牙齿磨损问题未得到解决,极大地限制了单牙轮钻头的使用和发展。为解决上述球形单牙轮钻头存在的问题,项目团队成员提出了一种新型结构单牙轮钻头——复合锥单牙轮钻头,通过改变牙轮结构形式从而改变钻头破岩方式。该钻头的破岩方式主要以冲击和刮切方式联合破岩(轨迹如图1b所示),该方式各齿圈牙齿刮切距离短,冲击作用大,在硬地层和研磨性地层具有较好的破岩效果。复合锥单牙轮钻头的破岩方式决定了比球形单牙轮钻头的钻进效率高,且牙齿磨损速度要慢于球形单牙轮钻头。

单牙轮钻头的寿命主要取决于牙齿和轮轴的耐磨性。长期以来,单牙轮钻头牙齿磨损严重的问题

一直未能得到较好的解决,严重制约了单牙轮钻头的使用与发展。因此,研制具有较高破碎效率、较长使用寿命的单牙轮钻头,对小井眼钻井技术的发展具有十分重要的意义。

对于单牙轮钻头寿命的研究,部分学者通过提高牙齿的强度去减缓牙齿的磨损,但该种方式成本较高。关于石油钻头磨损研究,已有大量的文献做了相关研究。Karasawa等<sup>[1]</sup>利用不同钻头与各种岩石进行钻进试验,得到了钻头扭矩与钻头磨损之间的关系。Naganawa<sup>[2]</sup>建立了牙轮钻头轴向振动的动力学分析模型,对牙轮钻头的磨损进行了定量评价。Das等<sup>[3]</sup>建立了钻头钻进过程的三维有限元分析模型,并分析了磨损影响区。Mostofi等<sup>[4]</sup>采用一系列精密切削试验和钻削试验,研究了金刚石钻头的磨损机理,将磨损响应分解为抛光、破裂和磨尖3个阶段。王昶皓<sup>[5]</sup>详细研究了地层对钻头的磨损机理并对岩石研磨性的分级提出了详细的标准。Zhou等<sup>[6]</sup>利用有限元软件开发了橡胶材料的moon-rivlin本构模型及罚函数接触方法,研究了牙轮钻头轴承处的密封失效。李玮等<sup>[7]</sup>对钻头在高温高压情况下的磨损情况进行了研究,并得出了钻头磨损的相关规律。刘奕呈等<sup>[8]</sup>提出基于自适应噪声完备经验模态分解模型(CEEMDAN)、小波阈值以及卷积神经网络(CNN)的钻头磨损监测模型,通过对振动数据进行处理、重构、识别等操作从而实现了对钻头磨损状态的监测。唐武生等<sup>[9]</sup>通过构建振动信号与AE信号的采集系统,将采集的信号进行分解与运算,判断出钻头的磨损状态。Huang等<sup>[10]</sup>通过试验对牙轮钻头轴承失效进行了分析,并对轴承表面强化技术进行了试验研究。Huang等<sup>[11]</sup>通过显微镜观察,对牙轮钻头轴承失效进行力学和微观结构分析。Yi等<sup>[12]</sup>利用有限元法分析了高温和钻井液压力对牙轮钻头轴承密封的影响。李素萍等<sup>[13]</sup>通过收集现场钻头的磨损特征,将钻头非正常磨损进行分类并提出相关措施。汤凤林等<sup>[14]</sup>研究了钻进速度与规程参数的优化关系,提出了临界规程参数组合的概念,并提出了防止钻头非正常磨损的相关措施。关于复合锥单牙轮钻头的研究,Guo等<sup>[15-16]</sup>曾对钻头钻进过程做了相关牙齿载荷试验。目前大部分主要是对钻头磨损做定性的研究,很少分析造成牙齿磨损的原因。

为此,通过收集现场试验结果,统计复合锥单牙

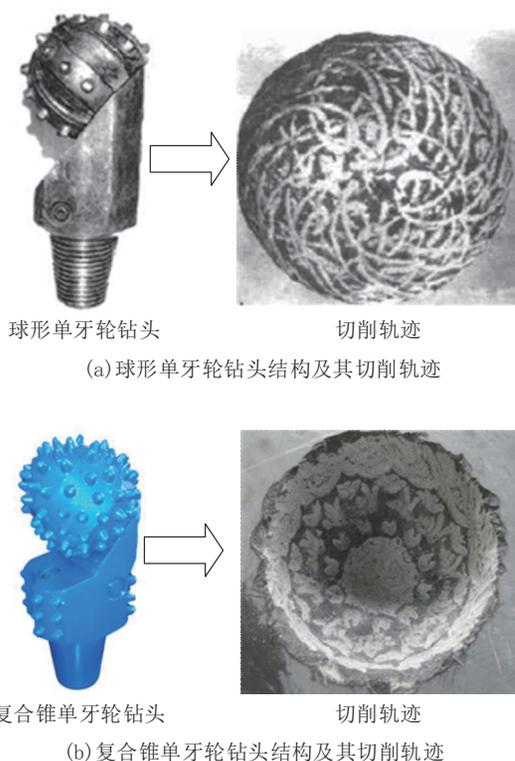


图1 两种钻头试验室的井底切削轨迹

Fig.1 Bottom hole cutting paths for both bit labs

轮钻头各齿圈实际的磨损情况,从理论上对钻头进行动力学分析,并建立钻头钻进岩石的有限元分析模型。统计各齿圈牙齿载荷变化规律和钻头对岩石的损伤规律;结合试验分析各齿圈牙齿轨迹变化规律,并分析钻头各齿圈牙齿与岩石的接触时间。结合牙齿载荷和牙齿与岩石接触时间,综合分析出牙齿的磨损情况。将试验结果与现场实际情况进行验证,预测出钻头出现倾斜的情况。该研究结论对深井油气开发具有重要意义,并为后期钻头结构的优化提供思路。

### 1 复合锥单牙轮钻头现场试验

目前大多数钻井试验都在试验室内进行。由于室内试验受到试验装备条件和试验环境的限制,无法准确地测试钻头在复杂环境条件下的钻进表现和牙齿磨损情况。而相比于室内试验,现场钻井试验能够更加真实地检验试验钻头的实际工作性能,实时记录钻头的机械钻速、进尺情况,与之相对应的钻压、转速等钻井参数,以及地层岩性、失效后的钻头结构和切削齿磨损情况等,这些参数的记录可以为后续钻头结构和切削齿材料性能的优选和改进以及钻井参数优化等提供依据。

#### 1.1 钻井参数

为验证钻头的钻井效率,作者设计了一个6.5 in (1 in=25.4 mm,下同)复合锥单牙轮钻头,在四川省德阳市隆兴1井进行下井试验。该井为四川盆地川西坳陷东坡隆兴场部署的一口预探井,地层属三叠统须家河组二段( $T_3x^2$ )硬岩地层。该井为直井,复合锥单牙轮钻头开始入井井深5150 m,钻压30~80 kN,转速60 r/min,钻井现场及井身结构如图2所示。

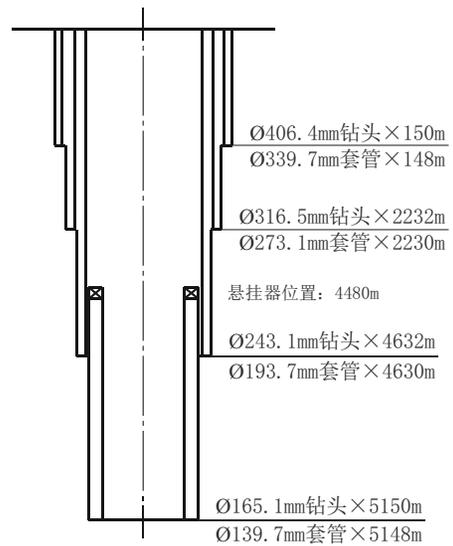
现场试验结果表明,复合锥单牙轮钻头比同井三牙轮钻头机械钻速快2.03倍,比球形单牙轮钻头快1.25倍,论证了异形单牙轮钻头破岩方式能提高深井硬岩地层钻头破岩效率。

#### 1.2 试验钻头的失效分析

现场试验发现,该钻头的钻进速度高于同尺寸的三牙轮钻头和球形单牙轮钻头,说明复合锥单牙轮钻头在高研磨性的复杂地层中破岩效率较高。下钻9 h后发现钻头一侧的切削齿和保径齿出现了严重磨损,导致整个钻头的钻进速度降低,地层钻进困难,说明钻头受损严重,需起钻更换钻头。复合锥单牙轮钻头出井后牙齿磨损如图3所示。



(a) 钻井现场



(b) 井身结构

图2 钻井现场及井身结构

Fig.2 Drilling field and well depth structure

为了弄清每一齿圈牙齿的磨损状况,对每一齿圈牙齿的磨损高度进行测量计算。各齿圈牙齿磨损的平均高度如图4所示。

从图3、图4可以看出,不同齿圈牙齿的磨损程度不同:①、④、⑤号齿圈牙齿的磨损程度最小,⑥号齿圈牙齿有轻微磨损,②、③号齿圈牙齿磨损程度相对⑥号齿圈牙齿稍大,位于牙轮小端的⑦、⑧号齿磨损最为严重,且越靠近牙轮小端的牙齿磨损越严重。通过统计分析发现,钻头牙齿的失效方式主要为牙齿磨损失效,并且各齿圈牙齿的磨损分布不均匀。

在钻进过程中,钻头牙齿直接作用于井底岩石,而影响牙齿磨损最直接的因素便是钻头的稳定状态



图 3 现场试验钻头切削齿和保径齿磨损

Fig.3 Field test bit cutter and gauge tooth wear

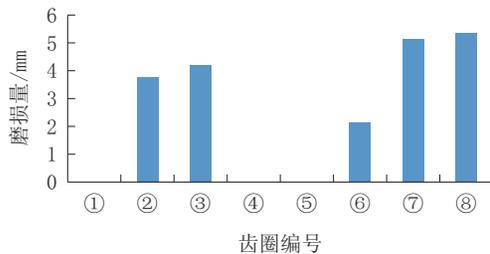


图 4 钻头齿的磨损高度

Fig.4 The wear height of the bit teeth

以及牙齿切削岩石的轨迹长度和牙齿载荷。因此,要想弄清各齿圈牙齿磨损不均匀的原因,就需要弄清钻头各齿圈的牙齿载荷和各齿圈牙齿接触岩石的时间。

## 2 牙齿载荷数值分析

目前牙齿载荷多通过试验方法进行测试,但试验室测试成本较高,且试验室条件下有些井下工况不能完成加载。为了能够更加真实地还原钻井现场,本次牙齿载荷测试采用 LS-DYNA 软件对该钻头钻进过程进行数值模拟。

### 2.1 数值分析模型

钻头在钻进过程中,井底岩石会受到上覆岩层的压力、井筒内液柱的压力、地层的水平侧向压力以及岩石内部的孔隙压力。在进行有限元模拟时,为反映岩石在井底的真实受力状态,需考虑岩层的上覆压力、井筒液柱压力和地层水平侧压力,设置模型为连续介质,并忽略岩石内部的孔隙压力。

因此有限元模拟包括两个阶段:(1)对岩石模型施加围压和上覆岩层的压力并求解,得到岩石的初

始应力分布。(2)在考虑初始应力的岩石模型上进行钻头钻进过程模拟,可以得到钻头钻进过程牙齿的受力和钻头对岩石的影响。

建立有限元模型之前,应有针对性地对钻头结构进行适当简化。根据研究目的,将钻头上的螺纹结构、水力喷射系统、轴承密封系统等次要结构忽略,只保留牙掌、牙轮、切削齿和保径齿。除此之外,实际钻井中影响钻进的因素也有很多,如钻压、转速、泥浆性能、泵的排量、地层岩性、钻具屈曲等,也需忽略次要因素而只考虑主要因素的影响。因此,数值分析时对模型作如下假设:

(1)岩石为连续、均质、各向同性材料,同时不考虑岩石中层理、解理及构造性裂缝等原生裂纹的存在。

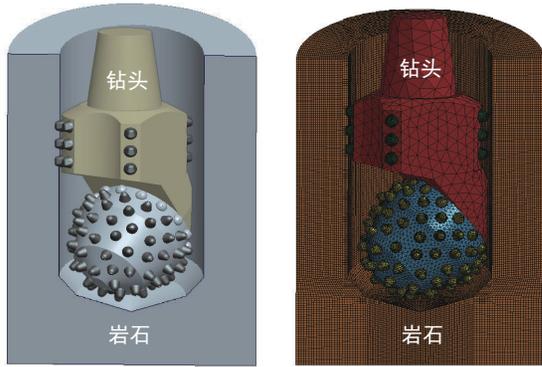
(2)井底时刻保持干净,钻头不存在重复破碎现象。

(3)钻头在水平面内可以自由平移而不允许发生翻转。

(4)忽略井底温度场和流场对破岩过程的影响。

### 2.2 钻头-岩石相互作用的有限元模型建立

为弄清各齿圈牙齿磨损不均匀的原因,笔者建立了试验钻头的简化几何模型、岩石初始井底模型以及钻头-岩石装配模型。钻头模型的大小、形状、齿形以及齿布方式等均与现场试验钻头相同;岩石模型外径 285.7 mm,内径 165.1 mm,总高 400 mm,空穴上部高 287 mm,下部与牙轮齿顶包络面相切。钻头钻进岩石几何模型及有限元模型如图 5 所示。



(a) 几何模型 (b) 有限元模型  
 图5 钻头钻进岩石几何模型及有限元模型  
 Fig.5 Drill bit drilling rock geometry model and finite element model

钻头和岩石分别采用刚体模型和HJC模型描述。通过部分专家学者收集的川西深层须家河组多口井的岩心样品与岩石力学参数的测定,得到的岩石HJC本构模型参数如表1所示<sup>[17]</sup>。

钻头上的约束及边界条件在不同分析阶段是不

表1 川西须家河组岩石的HJC本构模型参数  
 Table 1 HJC constitutive model parameters of Xujiache Formation rocks in western Sichuan

参数项	参数值
材料密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2630
弹性模量 $G / \text{MPa}$	$3.5 \times 10^4$
特征化粘性强度系数 $A$	0.71
特征化压力硬化系数 $B$	1.84
应变量影响参数 $C / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.007
材料所能达到的最大特征等效应力 $S_{\text{max}} / \text{MPa}$	5.0
弹性极限时的静水压力 $P_c / \text{MPa}$	30.45
弹性极限时的体积应变量 $\mu_c$	$8 \times 10^{-4}$
压实静水压力 $P_f / \text{GPa}$	1.035
压实极限时的体积应变 $\mu_f$	0.1
压力硬化系数 $N$	1
准静态单轴抗压强度 $f_c / \text{MPa}$	91.36
材料拉伸强度 $T / \text{MPa}$	13.8
参考应变率 $\dot{\epsilon}_0$	$2.9 \times 10^{-6}$
岩石破碎的最小塑性应变 $\epsilon_{\text{rmin}}$	0.01
损伤常数 $D_1$	0.045
损伤常数 $D_2$	1.0
压力常数 $K_1 / \text{GPa}$	85
压力常数 $K_2 / \text{GPa}$	-1
压力常数 $K_3 / \text{GPa}$	208

同的,岩石模型需要施加围压、上浮压力和泥浆压力。岩石模型和钻头的具体边界条件如下:

(1)在求解岩石应力的动力松弛阶段需将钻头模型完全固定,约束岩石模型底面的法向位移以及岩石外圆周面的水平位移。同时,在岩石模型空穴的圆周面和底面需施加泥浆的液柱压力,在岩石模型顶部端面需施加覆岩层自重产生的压力。其中,液柱压力和上覆岩层压力分别按式(1)、(2)计算:

$$\sigma_h = \rho_1 gh \tag{1}$$

$$\sigma_v = \rho_2 gh \tag{2}$$

式中: $\sigma_h$ ——泥浆液柱压力,MPa; $\sigma_v$ ——上覆岩层压力,MPa; $\rho_1$ ——泥浆密度,根据现场资料取  $1.53 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ; $\rho_2$ ——岩石密度,取  $2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ; $h$ ——试验井段深度,取 5100 m。

(2)根据实际钻井参数,在钻头肩部施加了不同钻压(钻压分别为 7、10、13 kN)和 60 r/min 的钻头转速;在岩石模型的两个端面和外围圆周面上施加了无反射边界条件来模拟地层无限域,减小岩石模型边界条件对模拟结果的影响;为便于牙齿载荷的测试,在每一颗牙齿上都建立了一个局部坐标系,便于比较牙齿各个方向载荷变化规律,牙齿局部坐标系如图6所示。

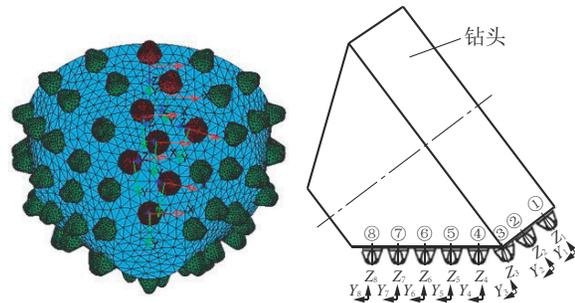


图6 牙齿局部坐标系  
 Fig.6 Tooth local coordinate system

### 3 结果分析

#### 3.1 岩石初始应力

由于岩石模型围压和上覆压力的影响,初始条件下岩石内部存在着初始应力,初始应力会对岩石性质产生较大影响。因此在钻进模拟开始时,需要对岩石周围施加围压及上覆压力。通过数值模拟得到初始情况井壁周围岩石的损伤如图7所示。

通过图7可以看出:(1)在围压和上覆岩层压力

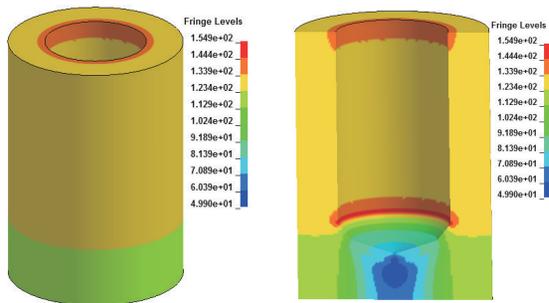


图 7 初始条件岩石模型损伤分布云图

Fig.7 Damage distribution nephogram of rock model with initial conditions

作用下,井壁岩石的应力较大,整体分布较均匀。(2)井底岩石的应力明显比井壁岩石的应力小,且沿井眼径向呈现一定的分布规律;离井眼中心越近,岩石应力越小。这是因为井壁岩石的应力是由围压和上覆岩层重力共同引起的,而井底中心部位岩石的预应力则主要由泥浆的液柱压力引起,受上覆岩层重力的影响较小。(3)在井壁内侧上沿和下沿局部出现了较大的应力,这是由于钻具屈曲在该位置存在应力集中。

### 3.2 钻头井底模式的演化

为还原钻头在井底钻进的真实情况,笔者进行了钻头井底模式演化,钻头钻进过程中岩石模型破碎坑与损伤分布的演化过程如图 8 所示,图中右侧数值代表岩石的损伤度  $D(D=0\sim 1)$ 。钻头与岩石接触之前,岩石模型由于预应力的作用而存在一定的损伤( $t=0\text{ s}$ ),其分布规律与初始应力分布规律一致。在钻压作用下钻头逐渐下降并开始与岩石接触,在接触初期钻头上只有部分牙齿能接触到岩石,因此形成的是零散的破碎坑;随着钻进过程的继续( $t=1\sim 8\text{ s}$ ),接触岩石的牙齿数越来越多,直到形成完整的切削井底。可以看出,岩石损伤最大的位置出现在牙齿与岩石的接触处,与实际情况一致。随着钻进过程的继续,井眼有逐渐扩大的趋势,这是由于复合锥单牙轮钻头不是满眼钻头,在钻进时因钻具屈曲会受到较大的井底横向力作用,造成钻头横向移动,钻头横向移动会导致保径齿与井壁接触而造成的。

### 3.3 牙齿载荷

牙齿载荷分为 3 个方向的载荷,通过对钻头施加不同钻压,可以得到钻头牙齿的各向载荷,各齿圈

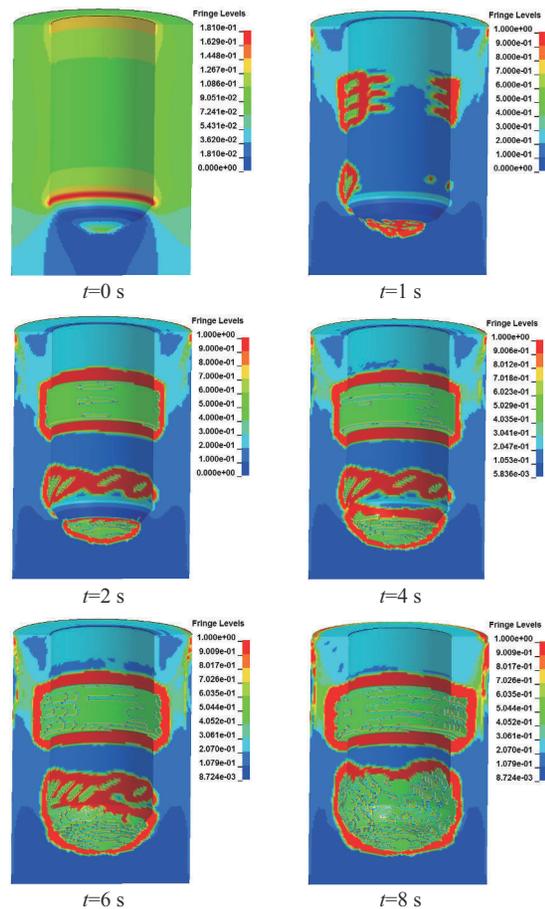


图 8 钻进过程岩石损伤程度变化

Fig.8 Change of rock damage degree during drilling

牙齿的载荷峰值曲线如图 9 所示。

从图 9 中可以看出,不同钻压下牙齿载荷的变化趋势是一致的;钻压越大,牙齿载荷越大;从牙轮大端到小端,牙齿载荷先快速减小,然后变化趋于平稳。说明大端牙齿在钻头破岩过程中分担的钻压更多,是钻头上的主要切削部位;各齿圈牙齿轴向载荷随钻压的增大而非线性增大。

### 4 牙齿切削岩石轨迹

牙齿的磨损主要与 3 个因素有关:齿形、牙齿载荷的大小和牙齿刮削岩石的时间。不同齿圈的牙齿,其轨迹长度和形状不同,任取其中的①、③、⑤号齿圈牙齿切削轨迹形状如图 10 所示。

上述图形反映了牙齿进入岩石在井底的运动轨迹。通过分析可以发现,各齿圈牙齿做变角度运动压入岩石;不同齿圈牙齿的切削轨迹不同。

真实钻进过程中,牙齿具有一定的切削深度,且

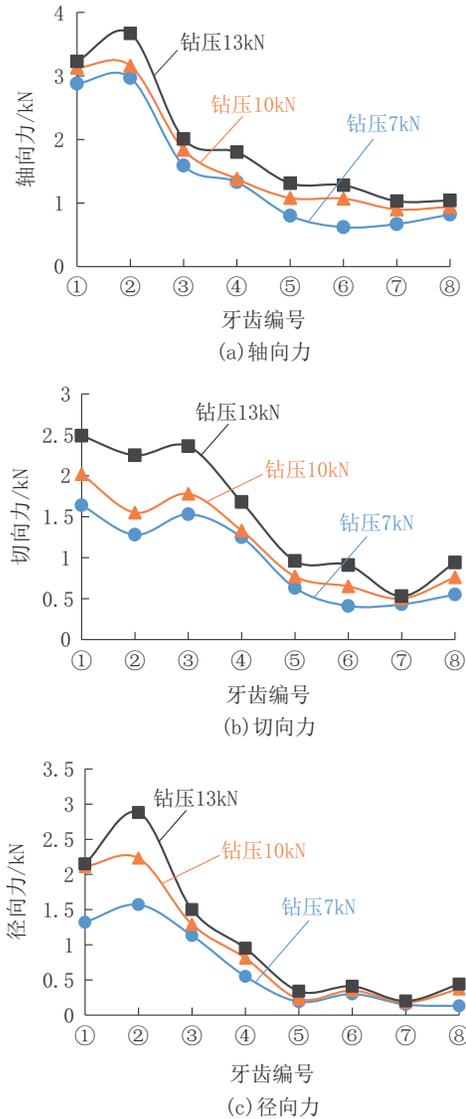


图9 各齿圈牙齿载荷峰值曲线  
Fig.9 Tooth load peak curve of each ring

牙齿在不同位置其切削岩石的厚度不同。通过有限元方法和试验室测试可以得到牙齿切削岩石的井底轨迹形状如图 11 所示。

通过图 11 可发现,与其它两类齿圈相比,③号齿圈的齿顶线发生了一个较大的扭曲偏转,轨迹形状为燕尾形;①、②、④、⑤号齿圈的牙齿刮切距离较长;⑥、⑦、⑧号齿圈刮切位置集中在井底中心一定范围区域。除此之外,不同齿圈牙齿接触岩石的时间不同,通过统计分析得到不同齿圈牙齿刮切岩石的时间如图 12 所示。

从图 12 可以看出,(1)位于牙轮顶端的⑦、⑧号齿与岩石的接触时间明显大于其余齿圈上的牙齿,

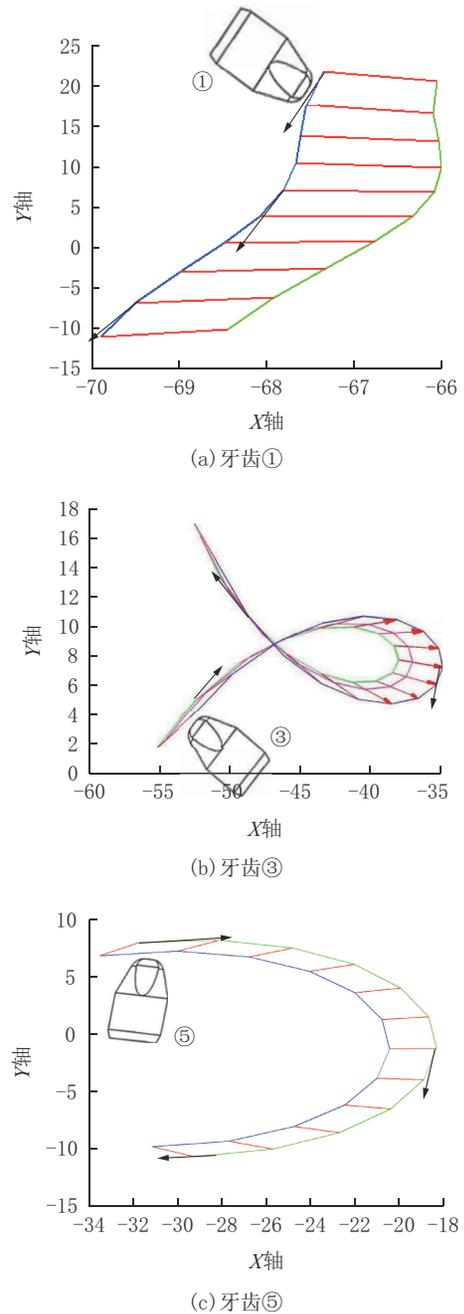
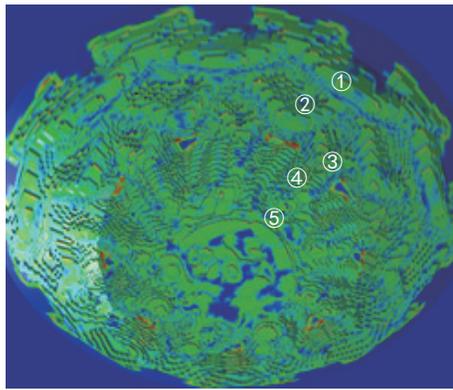


图 10 部分齿圈牙齿顶部切削岩石轨迹  
Fig.10 Some ring teeth cut rock tracks at the top

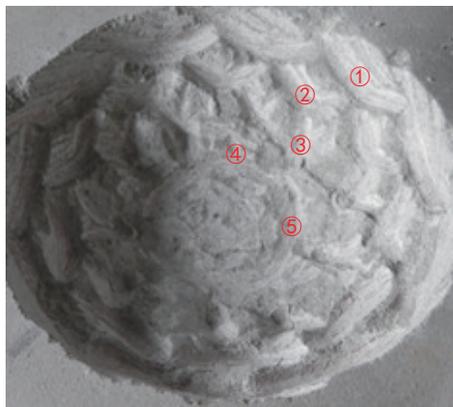
且距离牙轮小端越近,接触时间越长。(2)位于牙轮大端锥面过渡处的③号齿的接触时间比邻近的①、②、④、⑤、⑥号齿稍长,相同载荷条件下其磨损程度也会严重一些。

### 5 讨论

牙齿磨损方式主要为摩擦磨损,牙齿磨损量的大小与牙齿的轴向载荷和牙齿轨迹长度(接触时间)



(a)有限元分析结果



(b)实验测试结果

图 11 牙齿刮切岩石有限元分析结果及试验测试结果

Fig.11 Finite element analysis and experimental test results of tooth scraping rock

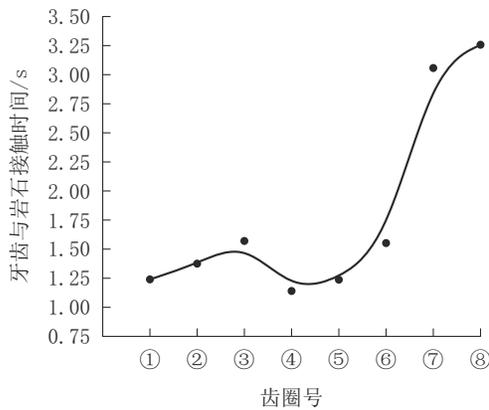


图 12 各齿圈牙齿与岩石接触时间变化趋势

Fig.12 Variation trend of contact time between tooth and rock in each ring

有关。通过上述分析发现,①、②、③、④号齿圈牙齿轴向载荷较大,⑤、⑥、⑦、⑧号齿圈牙齿轴向载荷稍小。⑦、⑧号齿圈的牙齿接触岩石的时间最长,①、②、③、④、⑤、⑥号齿圈牙齿接触岩石的时间相差不

大。综合分析可以确定,⑥号齿圈牙齿的磨损程度最小。

现场试验发现,实际上①、④、⑤号齿圈牙齿磨损程度最小,说明①、④、⑤号齿圈牙齿所受到的载荷或其接触井底的时间较短,且钻头保径齿一侧出现了严重磨损,与实际分析得到的⑥号齿圈磨损程度最小的结果有一定偏差。因此可以判断出,钻具屈曲使钻头在井底发生了倾斜。最终通过分析得出真实钻井钻头在井底的状态如图 13 所示,分析结果与现场结果一致。

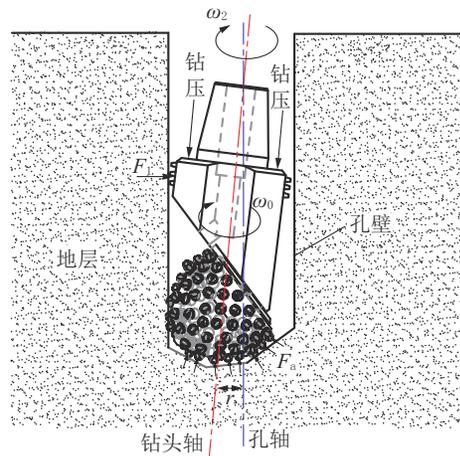


图 13 钻头在井底的真实状态

Fig.13 The actual state of the bit at the bottom of the hole

## 6 结论

复合锥单牙轮钻头作为一种新型单牙轮钻头,钻进效率要比球形单牙轮钻头高。通过现场试验发现,复合锥单牙轮钻头一侧切削齿和保径齿发生了严重磨损。为弄清复合锥单牙轮钻头牙齿磨损不均匀的原因,通过数值分析方法分析了各齿圈牙齿载荷的分布规律和牙齿进入岩石后的切削时间。最终得到如下结论:

(1)牙轮大端牙齿载荷明显大于牙轮小端牙齿载荷,②号齿圈牙齿轴向载荷大于①、③号齿圈,⑥、⑦、⑧号齿圈的牙齿载荷相差不大。

(2)⑦、⑧号齿圈牙齿接触岩石的时间大于其他齿圈牙齿接触岩石的时间,⑥号齿圈牙齿接触岩石的时间最小。

综合牙齿接触岩石的时间和牙齿载荷,可以确定⑥号齿圈牙齿的磨损应该最小。

**参考文献(References):**

- [1] Karasawa H, Ohno T, Miyazaki K, et al. Experimental results on the effect of bit wear on torque response[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 84: 1-9.
- [2] Naganawa S. Feasibility study on roller-cone bit wear detection from axial bit vibration[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2012, 82-83(none): 140-150.
- [3] Das M K, Sarkar S, Choudhary B S. Experimental and numerical analysis of rotary tricone drill bit and its wear prediction[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018, 40(8): 366.
- [4] Mostofi M, Richard T, Franca L, et al. Wear response of impregnated diamond bits[J]. Wear, 2018, 410: 34-42.
- [5] 王昶皓. 地层对钻头磨损机理及岩石研磨性评价研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.  
WANG Changhao. Research on drill wear mechanism and rock abrasiveness evaluation[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018.
- [6] Zhou Y, Huang Z, Tan L, et al. Cone bit bearing seal failure analysis based on the finite element analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 45: 292-299.
- [7] 李玮, 李梅, 白云龙, 等. 高温高压下钻头破岩及磨损规律研究[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(11): 73-78.  
LI Wei, LI Mei, BAI Yunlong, et al. Study on drill bit rock cutting and wearing pattern under high temperature and pressure[J]. Coal Geology of China, 2020, 32(11): 73-78.
- [8] 刘奕呈, 李玉梅, 张涛, 等. 基于CEEMDAN-CNN的钻头磨损状态监测研究[J]. 石油机械, 2022, 50(9): 59-65.  
LIU Yicheng, LI Yumei, ZHANG Tao, et al. Monitoring of bit wear based on CEEMDAN-CNN[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(9): 59-65.
- [9] 唐武生, 魏志远, 尹春梅, 等. 基于双信号融合的超声振动钻削钻头磨损状态监测研究[J]. 制造技术与机床, 2022(3): 34-39.  
TANG Wusheng, WEI Zhiyuan, YIN Chunmei, et al. Research on wear state monitoring of ultrasonic vibration drilling bits based on dual signal fusion[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022(3): 34-39.
- [10] Huang Z, Li Q, Zhou Y, et al. Experimental research on the surface strengthening technology of roller cone bit bearing based on the failure analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 29: 12-26.
- [11] Huang ZQ (Huang, Zhiqiang), Li G (Li, Gang). Failure analysis of roller cone bit bearing based on mechanics and micro-structure[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2018, 18(2): 342-349.
- [12] Yi Z, Xiaodong Z, Xueping C, et al. Wear morphology analysis and structural optimization of cone bit bearing seals[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2018, 70(1): 59-67.
- [13] 李素萍, 何焯, 杜思莲. 混凝土钻进中热压孕镶金刚石钻头磨损研究[J]. 中小企业管理与科技, 2021(36): 176-178.  
LI Suping, HE Ye, DU Silian. Research on wear of hot-pressed impregnated diamond bit in concrete drilling[J]. Small and Medium-sized Enterprise Management and Technology, 2021(36): 176-178.
- [14] 汤凤林, Нескоромных В. В., 宁伏龙, 等. 金刚石钻进岩石破碎过程及其与规程参数关系的研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(10): 43-55.  
TANG Fenglin, NESKOROMNYH V. V., NING Fulong, et al. Research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in diamond drilling[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(10): 43-55.
- [15] Guo Z, Deng R, Liang Z, et al. Non-spherical single cone bit mechanics analysis and tooth load test[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 167: 458-465.
- [16] Guo Z, Deng R, Zhang W. Non-spherical single cone bit tooth failure analysis and tooth load test[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 105: 1-11.
- [17] Vernik L, Zoback M D. Estimation of maximum horizontal principal stress magnitude from stress-induced well bore breakouts in the Cajon Pass scientific research borehole[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1992, 97(B4): 5109-5119.

(编辑 荐华)