

# 基于旋转侵入理论的牙轮钻头钻速模型

冯福平<sup>1</sup>, 艾池<sup>1</sup>, 吕媛媛<sup>2</sup>, 邢均<sup>3</sup>, 徐海粟<sup>1</sup>, 高见<sup>1</sup>, 严茂森<sup>1</sup>

1. 东北石油大学石油工程学院, 大庆 163318
2. 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院, 盘锦 124010
3. 大庆油田工程有限公司, 大庆 163712

**摘要** 针对旋转钻井牙轮钻头对井底岩石垂向压入和水平刮切联合作用的特点, 基于牙轮钻头旋转侵入理论, 建立了机械钻速预测模型, 并通过室内实验确定了楔形齿纯滚动多齿联合作用对破岩效果的综合影响系数, 机械钻速预测平均误差为 4.1%。研究认为, 考虑钻头旋转引起的水平刮切力时, 侵入深度比只考虑垂向压入时有所增加; 摩擦系数和刃尖角较小时两者相差不大, 随着摩擦系数和刃尖角的增大, 两者的相对差值越来越大, 摩擦系数和刃尖角较大时钻头旋转引起的水平刮切作用对机械钻速的影响不容忽视。

**关键词** 牙轮钻头; 旋转侵入; 机械钻速; 水平刮切力; 剪切破碎

**中图分类号** TE21

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.12.004

## Penetration rate model of roller bit based on revolving indentation theory

FENG Fuping<sup>1</sup>, AI Chi<sup>1</sup>, LÜ Yuanyuan<sup>2</sup>, XING Jun<sup>3</sup>, XU Haisu<sup>1</sup>, GAO Jian<sup>1</sup>, YAN Maosen<sup>1</sup>

1. School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China
2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin 124010, China
3. Daqing Oilfield Engineering Company Limited, Daqing 163712, China

**Abstract** The roller bit acts on the bottom hole rock jointly by a vertical indentation and a level shave shear during the rotary drilling. For its analysis, this paper establishes a prediction model for the rate of penetration based on the revolving indentation theory of the roller bit, and through the laboratory tests, obtains the influence coefficient for rock breaking caused by the chisel teeth true rolling pluridentate linkage. The prediction error for the rate of penetration is 4.1% in average. The model provides a theoretical basis for the accurate prediction of the rate of penetration of the roller bit in the rotary drilling. It is concluded that, taking the level shave shear force into consideration, the intrusive depth of the roller bit is increased as compared with the case of only vertical pressing. The difference is smaller for the case of small frictional coefficient and cutting tip angle. However, it becomes greater with the increase of the frictional coefficient and cutting tip angle, so the effect of the horizontal scrapping cannot be ignored.

**Keywords** roller bit; revolving indentation; rate of penetration; level shave shear force; shearing breakup

牙轮钻头是旋转钻井使用的主要破岩工具之一, 其机械钻速的准确预测是制定钻井消耗和进度的重要依据。20 世纪 50 年代开始了牙轮钻头机械钻速预测方面的研究, Bourgoyne 等<sup>[1-6]</sup>通过室内实验和现场数据统计分析机械钻速的影响因素, 采用多元回归和数理统计的方法建立机械钻速预测模型, 这些钻速模型对钻井生产起到了很好的指导作

用, 但无法反映钻头对岩石的破坏机制, 其模型系数的确定需要大量的实验和现场数据反演, 具有一定的局限性; 林元华等<sup>[7-9]</sup>通过建立真实井底模型、钻头仿真模型以及牙齿与岩石的相互作用模型, 用计算机仿真方法预测机械钻速, 该方法对于钻头及牙齿的优化设计具有重要的指导作用, 但由于其仿真模拟过程的复杂性不适合现场应用; 李玮等<sup>[10-12]</sup>基于

收稿日期: 2014-11-17; 修回日期: 2015-04-22

基金项目: 黑龙江省自然科学基金青年基金项目(QC2012C021)

作者简介: 冯福平, 副教授, 研究方向为油气井工程力学, 电子信箱: fengfuping2005@163.com

引用格式: 冯福平, 艾池, 吕媛媛, 等. 基于旋转侵入理论的牙轮钻头钻速模型[J]. 科技导报, 2015, 33(12): 29-32.

单齿侵入理论建立了实钻条件下牙轮钻头机械钻速预测模型,该模型反映了井底岩石的真实受力特点和破坏机制,但只考虑了垂向压入作用对井底岩石破坏和机械钻速的影响,与牙轮钻头旋转钻进工况特点有一定的差别。

旋转钻井是在一定的钻压作用下驱动钻头旋转破碎岩石形成井眼的钻井技术,牙齿在钻压作用下垂向压入岩石的同时,钻头自身的旋转还会对井底岩石产生水平刮切作用,井底岩石的破碎是在垂向压入和水平刮切联合作用下造成的,本研究考虑钻头旋转对井底岩石产生的水平刮切作用,基于牙轮钻头旋转侵入理论,建立机械钻速预测模型。

### 1 旋转钻井条件下井底岩石受力分析

钻头破碎岩石形成井眼后,井底岩石除了受地应力、孔隙压力和井眼内液柱压力的影响外,还受钻头牙齿吃入地层后形成的局部应力作用。牙齿吃入岩石一般包括压入碎裂形成密实核,继续压入密实核膨胀使周围岩石崩裂破坏从而形成体积破碎等过程。岩石压碎形成密实核过程复杂,且密实核形状难以描述,因此将密实核和牙齿截面一起简化为三角形<sup>[3]</sup>,并认为三角形的顶角为刃尖角。钻头牙齿在钻压作用下压入岩石的同时,还在地面或井下动力的作用下不断旋转,这也是旋转钻井区别于顿钻、激光钻井和热熔钻井等钻井工艺的主要特征。钻头在向下钻进的过程中不断旋转,即使钻头不存在超顶、复锥和移轴效应,也会由于钻头的旋转对井底岩石产生水平刮切力,该水平刮切力是整个钻井系统扭矩消耗的主要部分,因此旋转钻井引起的水平刮切力对井底岩石的破碎作用不容忽视。

钻头牙齿两侧岩石发生剪切破碎时受力如图1所示。

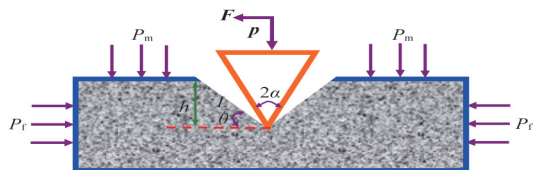


图1 井底岩石受力分析

Fig. 1 Bottom rock stress analysis

设钻头牙齿的刃尖角为 $2\alpha$ ,牙齿侵入地层深度为 $h$ ,剪切破裂面长度为 $L$ ,破裂面与水平面夹角为 $\theta$ ,两向水平地应力相等即围压为 $P_r$ ,钻井液液柱压力为 $P_m$ ,地层孔隙压力为 $P_p$ ,剪切破碎时牙齿所受的垂向载荷为 $p$ 。此时破裂面上的剪应力和正应力由两部分组成,一部分由围压、钻井液的液柱压力和地层孔隙压力引起,在破裂面上产生的剪应力和正应力分别为

$$\tau_1 = \frac{1}{2}(P_r - P_m)\sin 2\theta \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(P_r + P_m) - \frac{1}{2}(P_r - P_m)\cos 2\theta - P_p \quad (2)$$

牙齿对井底岩石的垂向压入作用和水平刮切作用也会在破裂面上产生剪应力和正应力,并且牙齿所产生的作用力是导致井底岩石发生剪切破坏的主要原因。由图1的井底岩

石受力分析可以得出,左侧刃面上的力 $R_1$ 和右侧刃面上的力 $R_2$ 满足

$$R_1 \sin \alpha + R_2 \sin \alpha = p \quad (3)$$

$$R_1 \cos \alpha - R_2 \cos \alpha = F \quad (4)$$

式中, $F$ 为钻头旋转过程中牙齿对井底岩石产生的水平刮切力,其与所施加的钻压和牙齿与井底岩石相对滑动的摩擦系数成正比,钻压越大、摩擦系数越大则水平刮切力就越大:

$$F = \mu p \quad (5)$$

式中, $\mu$ 为牙齿与井底岩石相对滑动的摩擦系数,无因次。

取单位刃长,并以左侧刃面作为分析对象,则楔形齿左侧刃面作用于破裂面上的剪应力和正应力分别为

$$\tau_2 = \frac{R_1}{L} \cos(\alpha + \theta) \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{R_1}{L} \sin(\alpha + \theta) \quad (7)$$

破裂面的长度与侵入深度满足

$$L = \frac{h}{\sin \theta} \quad (8)$$

考虑井底岩石真实受力特征,则破裂面上的总剪应力和正应力分别为

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (9)$$

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (10)$$

### 2 井底岩石旋转侵入深度计算模型

在井底岩石破裂面上,剪应力与正应力的关系满足摩尔-库仑准则。将破裂面上的正应力和剪应力代入摩尔-库仑准则,联合式(1)~式(10)整理可得:

$$\tau - \sigma \tan \phi = C = \frac{\sin(2\theta + \phi)}{2 \cos \phi} (P_r - P_m) - \frac{(P_r + P_m - 2P_p)}{2} \tan \phi + \frac{p \sin \theta \cos(\alpha + \theta + \phi)(\cos \alpha + \mu \sin \alpha)}{h \sin 2\alpha \cos \phi} \quad (11)$$

式中, $\phi$ 为内摩擦角, $^\circ$ ;C为内聚力,MPa。任一深度岩石的内聚力和内摩擦角可以通过邻井声波测井资料反演得到。

式(11)是关于破裂角 $\theta$ 的函数,求一阶导数并令其等于0,可得 $\theta = 45 - 0.5(\alpha + \phi)$ 时 $(\tau - \sigma \tan \phi)$ 取得最大值。当 $\tau - \sigma \tan \phi = C$ 时,岩石沿角度为 $\theta$ 的平面剪切破裂。

将 $\theta = 45 - 0.5(\alpha + \phi)$ 代入式(11),整理可得左侧刃面侵入深度表达式为

$$h = \frac{p \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha + \phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha + \phi}{2}\right) (\cos \alpha + \mu \sin \alpha)}{\left[ C \cos \phi - \frac{\cos \alpha}{2} (P_r - P_m) + \frac{(P_r + P_m - 2P_p)}{2} \sin \phi \right] \sin 2\alpha} \quad (12)$$

同理,可得出右侧刃面侵入深度表达式为

$$h^* = \frac{p \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha + \phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha + \phi}{2}\right) (\cos \alpha - \mu \sin \alpha)}{\left[ C \cos \phi - \frac{\cos \alpha}{2} (P_r - P_m) + \frac{(P_r + P_m - 2P_p)}{2} \sin \phi \right] \sin 2\alpha} \quad (13)$$

对比式(12)、式(13)可以发现,在相同的垂向载荷作用下,左侧刃面的侵入深度大于右侧刃面,即考虑钻头旋转引起的水平刮切作用时牙齿两侧岩石的侵入深度不一致,但由于左侧刃面岩石一旦发生剪切破碎,右侧刃面岩石的阻碍作用会在右侧刃面上产生突然的应力集中,促使右侧刃面岩石迅速发生再次剪切破碎,达到左侧刃面的侵入深度,由于其过程短暂,可认为刃面两侧同时发生同样的侵入深度。

当 $\mu=0$ 时,由式(12)可得到只考虑垂向压入时的侵入深度表达式。考虑钻头旋转引起的水平刮切力时侵入深度比只考虑垂向压入时有所增加,其增加的侵入深度主要受 $\mu\sin\alpha$ 的影响,即考虑水平刮切力时的侵入深度与只考虑垂向压入时侵入深度的差值主要受摩擦系数和刃尖角的影响。图2为考虑水平刮切力时的侵入深度与只考虑垂向压入时侵入深度的相对差值随摩擦系数和刃尖角的变化规律,可以看出,摩擦系数与刃尖角较小时两者相差不大,随着摩擦系数和刃尖角的增大,两者的相对差值越来越大,钻头旋转引起的水平刮切作用对机械钻速的影响不容忽视,尤其是在牙轮轴承损坏旋转困难或井底净化不好引起的摩擦系数增大和刃尖角较大或钻头磨损引起刃尖角增大的条件下。

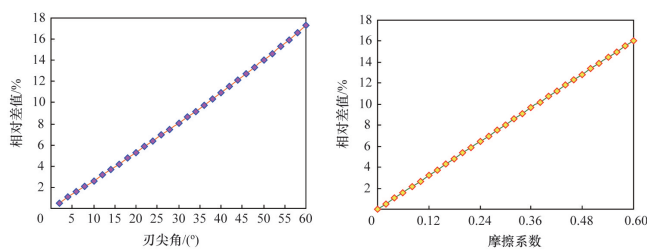


图2 旋转侵入深度与单独垂向侵入深度相对差值变化  
Fig. 2 Relative difference of depth between rotary penetration and vertical penetration

### 3 旋转侵入条件下牙轮钻头机械钻速模型

引入牙轮钻头多齿联合旋转破岩综合影响系数 $C$ 、实际钻井条件下水力净化系数 $C_H$ 及压差影响系数 $C_p$ ,可以得到牙轮钻头每转旋转侵入井底岩石的深度为

$$v = CC_H C_p h$$

$$= \frac{CC_H C_p \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha + \phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha + \phi}{2}\right) (\cos\alpha + \mu \sin\alpha)}{\left[ C \cos\phi - \frac{\cos\alpha}{2}(P_f - P_m) + \frac{(P_f + P_m - 2P_p)}{2} \sin\phi \right] \sin 2\alpha}$$

(14)

综合影响系数 $C$ 体现了3个因素对破岩效果影响:1)不同牙齿形状对破岩效果的影响;2)多齿联合旋转侵入的相互影响对破岩效果的影响;3)钻头纯滚动效应和滑动效应(超顶、复锥、移轴)对破岩效果的影响。对于不同的牙齿类型和钻头结构,该值可以通过室内实验确定。

为了确定模型综合影响系数 $C$ ,进行相应的室内实验。

实验装置为岩石可钻性测试仪,采用直径为31.75 mm微牙轮钻头,牙齿为楔形,厚度为2.50 mm,由硬质合金材料制成;测试选用岩样为吉林油田某井砂岩,内聚力25.6 MPa,内摩擦角 $29.8^\circ$ ,摩擦系数取为0.25;实验钻压为907.2 N,转速为55 r/min,钻进深度为2.4 mm。

每次实验前用砂轮将试样测试表面磨平,实验过程中不考虑牙齿磨损引起的机械钻速降低问题,通过测量钻进相同深度所需要的时间计算出机械钻速。

由式(12)计算牙齿单齿侵入深度 $h$ ,由实测机械钻速根据式(14)反演出模型综合影响系数 $C$ ,如表1所示,实验共计10组,取10次的平均值作为最终综合影响系数值。

表1 室内实验综合影响系数 $C$ 测试结果  
Table 1  $C$  test for the comprehensive influencing coefficient

岩样编号	计算单齿侵深/mm	实测侵入速度/(mm·r <sup>-1</sup> )	综合影响系数	综合影响系数平均值
1		0.01561	1.215	
2		0.01487	1.158	
3		0.01496	1.165	
4		0.01501	1.168	
5		0.01492	1.161	
6	0.012847	0.01537	1.196	1.176
7		0.01504	1.171	
8		0.01476	1.149	
9		0.01482	1.154	
10		0.01573	1.224	

根据实验反演得出的综合影响系数 $C$ ,将式(14)转化为现场常用单位可得机械钻速的表达式为

$$V = CC_H C_p N h$$

$$= \frac{0.07056 C_H C_p N P \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha + \phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha + \phi}{2}\right)}{m \left[ C \cos\phi - \frac{\cos\alpha}{2}(P_f - P_m) + \frac{(P_f + P_m - 2P_p)}{2} \sin\phi \right] \sin 2\alpha} (\cos\alpha + \mu \sin\alpha)$$

(15)

式中, $P$ 为钻压,kN; $N$ 为转速,r/min; $m$ 为某一时刻牙轮钻头与井底接触的牙齿个数。

### 4 现场应用

根据本研究建立的机械钻速预测模型在英台气田进行了现场应用检验,该气田属于低压致密气藏,下部地层岩石可钻性差、压力系数低,地层岩石可钻性级值在7~9之间。某井登娄库组2553.96~2621.08 m井段使用215.9 mm HA537G牙轮钻头,牙齿齿形为楔形,牙轮纯滚动无超顶、复

锥、移轴等滑动效应,与室内实验微牙轮钻头结构及破岩机理一致。该钻头实际钻进时间42.67 h,钻压150 kN,转速70 r/min,平均机械钻速1.573 m/h。

通过邻井的声波测井资料计算得到任一深度处的岩石内聚力和内摩擦角,利用本研究建立的机械钻速预测模型计算得到的结果如图3所示,模型机械钻速预测结果与实际机械钻速吻合度较好,模型预测该段钻进平均机械钻速为1.638 m/h,平均预测准确率为95.9%,说明本研究建立的模型具有较高的精度,并且该模型反映了井底岩石的真实受力特征和破坏机制,在室内测定不同齿形和钻头结构综合影响系数的基础上,就可以用于现场机械钻速的预测。

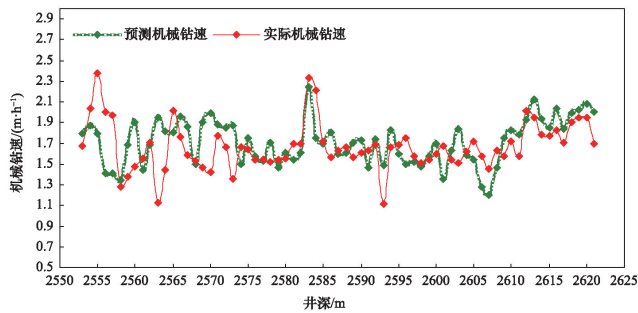


图3 预测机械钻速与实际机械钻速对比

Fig. 3 Comparison between predicted and actual mechanical drilling speeds

## 5 结论

1) 旋转钻井井底岩石在钻头牙齿垂向压入和水平刮切联合作用下破碎,本研究考虑钻头旋转对井底岩石产生的水平刮切作用,基于牙轮钻头旋转侵入理论建立了机械钻速预测模型,为旋转钻井牙轮钻头机械钻速的准确预测提供了理论依据。

2) 考虑钻头旋转引起的水平刮切力时,侵入深度比只考虑垂向压入时有所增加;摩擦系数和刃尖角较小时,两者相差不大,随着摩擦系数和刃尖角的增大两者的相对差值越来越大,摩擦系数和刃尖角较大时钻头旋转引起的水平刮切作用对机械钻速的影响不容忽视。

3) 综合影响系数C体现不同牙齿形状、多齿联合旋转侵入作用以及钻头滑动对破岩效果的影响,通过室内实验反演得到了纯滚动楔形齿的综合影响系数值,机械钻速预测平均误差为4.1%,具有较高的精度,而且便于现场应用。

### 参考文献(References)

[1] Bourgoyne A T, Young F S. A multiple regression approach to optimal drilling and abnormal pressure detection[J]. SPE Journal, 1974, 14(4): 371-384.  
[2] Warren T M, Smith M B. Bottom hole stress factors affecting drilling rate at depth[J]. Journal of Petroleum Technology, 1985, 37(8): 1523-1533.

[3] 石祥超, 万尚贤, 孟英峰, 等. 气体钻井钻速方程的建立与验证[J]. 天然气工业, 2010, 30(11): 56-58.  
Shi Xiangchao, Wan Shangxian, Meng Yingfeng, et al. Establishment and verification of the gas drilling ROP equation[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(11): 56-58.  
[4] 李昌盛. 基于多元回归分析的钻速预测方法研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(7): 1740-1743.  
Li Changsheng. Study of method for predict rate of penetration based of multiple regression analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(7): 1740-1743.  
[5] 杨谋, 孟英峰, 李皋, 等. 地层渗透性对岩石强度及机械钻速影响因素分析[J]. 地质科技情报, 2011, 30(3): 127-131.  
Yang Mou, Meng Yingfeng, Li Gao, et al. Analysis of formation permeability to the influence factors of rock strength and rate of penetration[J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(3): 127-131.  
[6] 景宁, 樊洪海, 纪荣艺, 等. 基于数据挖掘技术的深井钻速预测方法研究[J]. 石油机械, 2012, 40(7): 17-20.  
Jing Ning, Fan Honghai, Ji Rongyi, et al. Data mining technology-based research on the prediction method of deep well ROP[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(7): 17-20.  
[7] 林元华, 施太和, 梁政, 等. 冲旋钻井机械钻速仿真研究[J]. 石油学报, 2004, 25(5): 88-92.  
Lin Yuanhua, Shi Taihe, Liang Zheng, et al. Simulation of penetration rate of air percussion drilling bit[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(5): 88-92.  
[8] 况雨春, 伍开松, 杨迎新, 等. 三牙轮钻头破岩过程计算机仿真模型[J]. 岩土力学, 2009, 30(增1): 235-238.  
Kuang Yuchun, Wu Kaisong, Yang Yingxin, et al. Simulation model of drilling process of three-cone bit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Suppl 1): 235-238.  
[9] 邓嵘, 唐东, 安美, 等. 单牙轮钻头钻进过程的计算机仿真[J]. 石油机械, 2014, 42(8): 45-48.  
Deng Rong, Tang Dong, An Mei, et al. Simulation of single-cone bit drilling process[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(8): 45-48.  
[10] 李玮, 郑浩然, 开月, 等. 基于单齿侵入理论的牙轮钻头钻速方程[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(1): 85-89.  
Li Wei, Zheng Haoran, Kai Yue, et al. Drilling rate equation of cone bit based on single tooth intrusive theory[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2013, 37(1): 85-89.  
[11] 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.  
Li Wei, Li Yanan, Chen Shichun, et al. Drilling rate model of cone bit in bottom hole and field application[J]. Journal of China University of Petroleum: Nature Science Edition, 2013, 37(3): 74-77.  
[12] 李玮, 许兴华, 闫铁, 等. 欠平衡下牙轮钻头牙齿侵入系数及钻速研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(3): 168-172.  
Li Wei, Xu Xinghua, Yan Tie, et al. Study on the tooth invasion coefficient of cone bit and penetration rate in under-balance drilling [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2013, 35(3): 168-172.  
[13] 郑德师, 高德利, 冯江鹏. 实钻条件下井底岩石可钻性预测模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 859-863.  
Zheng Deshuai, Gao Deli, Feng Jiangpeng. A model for downhole rock drillability prediction under real drilling condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 859-863.

(责任编辑 吴晓丽)