

# 井底牙轮钻头的钻速方程及现场应用

李 玮<sup>1</sup>, 李亚楠<sup>1</sup>, 陈世春<sup>2</sup>, 丛长江<sup>2</sup>, 霍明宇<sup>1</sup>, 杨 斌<sup>1</sup>

(1. 东北石油大学 石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318;

2. 中国石油渤海钻探工程有限公司 塔里木第四勘探公司, 新疆 库尔勒 841000)

**摘要:**以岩石侵入理论为基础,在考虑井底压力的条件下,建立牙轮钻头的钻速模型。结果表明:在地层由软、中硬到硬地层过渡过程中,钻速方程能够解释不同破岩方式下牙轮钻头的机械钻速问题;随着刃尖角的增大,锥形齿和楔形齿的牙齿侵深都呈指数递减趋势;随着井眼内钻井液柱压力的增大,侵入深度呈指数递减趋势,其中锥形齿递减趋势大于楔形齿;模型理论钻速计算结果与实际钻速数据接近,最小欧式距离为25.8。

**关键词:**钻井; 油气井工程; 钻速方程; 牙轮钻头; 破岩机制; 地层压力

**中图分类号:**TE 21      **文献标志码:**A

## Drilling rate model of cone bit in bottom hole and field application

LI Wei<sup>1</sup>, LI Ya-nan<sup>1</sup>, CHEN Shi-chun<sup>2</sup>, CONG Chang-jiang<sup>2</sup>, HUO Ming-yu<sup>1</sup>, YANG Bin<sup>1</sup>

(1. College of Petroleum Engineering in Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

2. The Fourth Exploration Department, Tarim Oilfield Branch Company, Bohai Drilling Engineering Company Limited, Korla 841000, China)

**Abstract:**Based on rock intrusive theory and considering the bottom hole pressure, the problems of rock breaching of cone bit were studied, a drilling rate model in actual drilling was built. The results show that in the process of transition from soft, medium-hard to hard formation, drilling rate model can explain the problems of penetration rate of cone bit in different rock breaking ways. The invasion depths of conical insert and chisel teeth decrease exponentially with bit angle and fluid column pressure increasing, and conical insert is more obvious than chisel teeth. The calculation results of drilling speed of model are close to the data of drilling speed in field. The minimum euclidean distance is 25.8.

**Key words:**drilling; oil and gas well engineering; drilling rate equation; cone bit; rock breaking mechanism; formation pressure

牙轮钻头、刮刀钻头及金刚石材料钻头是油气井工程中常用的3类钻头,牙轮钻头<sup>[1]</sup>的机械钻速受多压力(上覆地层压力、水平应力、孔隙压力和钻井液柱压力)、钻头结构和岩石破碎方式等因素的影响<sup>[2-5]</sup>。当前钻井常用的钻速模型有宾汉钻速方程、杨格钻速方程、阿姆科方程等,这些钻速方程是在考虑地层可钻性系数的基础上通过分析机械参数和水力参数建立的,忽视了牙轮钻头破岩机制的自身特点<sup>[6-10]</sup>。这使得方程无法有效分析不同牙齿类型、不同地层条件下牙轮钻头的机械钻速的差别。笔

者考虑深部地层压力环境和牙轮钻头牙齿破岩的特点,基于单齿侵入理论,建立井底牙轮钻头的钻速模型,为实时分析井下牙轮钻头的机械钻速提供依据。

## 1 牙齿侵入井底岩石的力学分析

井底工作面上的岩石被牙轮钻头牙齿破碎的过程,可简化为单一牙齿的侵入过程,如图1所示。在载荷 $F$ 作用下,刃尖角为 $2\theta$ 的牙齿侵入内聚力为 $C_\phi$ 、内摩擦角为 $\phi$ 的岩石,牙齿刃面会对岩石形成剪切力 $\tau$ 和法向力 $\sigma$ 。根据摩尔-库伦破坏准则,当

剪应力  $\tau$  超过内聚力  $C_\phi$  和内摩擦力  $\tan \phi \sigma$  时,井底岩石便发生剪切破坏,其剪切破坏面与井底平面的夹角为  $\varphi$ 。

单一牙齿侵入井底岩石的侵深公式为

$$h = \frac{F \sin \varphi \cos(\varphi + \theta) - \sin(\varphi + \theta) \tan \phi}{2 \sin \theta \sigma_1 \tan \phi + C_\phi - \tau_1} \quad (1)$$

其中

$$\sigma_1 = \frac{(\sigma_{Hh} + p_m)}{2} - \frac{(\sigma_{Hh} - p_m)}{2} \cos 2\varphi - p_p,$$

$$\tau_1 = \frac{(\sigma_{Hh} - p_m)}{2} \sin 2\varphi.$$

式中,  $\sigma_1$  和  $\tau_1$  分别为井底各种压力在岩石剪切破坏面上产生的法向应力和剪切应力, MPa;  $p_p$  为地层压力, MPa;  $p_m$  为井眼内钻井液柱压力, MPa;  $\sigma_{Hh}$  为水平地应力, MPa。

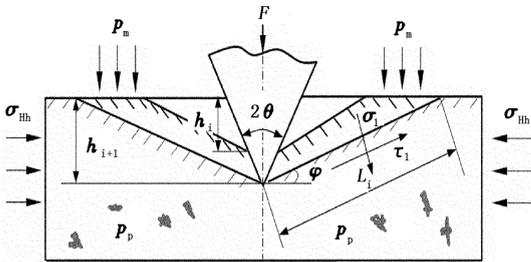


图1 单一牙齿侵入井底岩石的受力分析

Fig. 1 Force analysis of rock in bottom under single-tooth intrusion

对式(1)进行简化,可得地面条件下单一牙齿的侵深公式为

$$h = \frac{F}{2C_\phi} \frac{\sin \varphi \cos(\varphi + \theta + \phi)}{\sin \theta \cos \phi} \quad (2)$$

## 2 井底牙轮钻头的钻速方程

牙轮钻头的牙齿形状以锥形齿和楔形齿为主。为提高其破岩效率,通过超顶、移轴和复锥等结构设计实现牙齿在冲击侵入的过程中进行回转剪切破岩。不同牙齿、不同运动形式下的岩石破碎坑不同。

室内微牙轮钻头的齿形为楔形,形成的破碎坑可以用三棱柱形描述。根据三角关系可知一个牙齿破碎坑的体积为

$$V = \int_0^{h_p} \frac{1}{2} 2xL_h dh = \frac{\tan \varphi}{2} L_h h_p^2 \quad (3)$$

其中

$$x = h \tan \varphi.$$

式中,  $x$  为破碎坑半长, mm;  $L_h$  为楔形齿宽, mm。

考虑到破碎过程中井底工作面不平相邻牙齿之间的影响,引入多齿联合破岩影响系数  $C$ ,得单位

时间内微牙轮钻头的钻速为

$$v_R = \frac{2Cmn_b L_h \tan \varphi}{\pi d_b^2} \left( \frac{F}{2C_\phi} \frac{\sin \varphi \cos(\varphi + \theta + \phi)}{\sin \theta \cos \phi} \right)^2 \quad (4)$$

式中,  $C$  为多齿联合破岩影响系数;  $m$  为在某一时刻牙轮钻头每个牙轮与井底接触的牙齿个数;  $d_b$  为微牙轮钻头的直径, mm;  $n_b$  为钻头的旋转速度, r/min。

纯滚动运动形式下,锥形齿侵入岩石产生的破碎坑为圆锥形。一个齿破碎的井底岩石体积为

$$V = \int_0^{h_p} \frac{1}{3} \pi x^2 dh = \frac{\pi \tan^2 \varphi}{9} h_p^3 \quad (5)$$

考虑实际钻井条件下水力净化系数  $C_H$ 、压差影响系数  $C_p$ ,则锥形齿牙轮钻头的钻速方程为

$$v_R = \frac{CC_p C_H m n_b Z \tan^2 \varphi}{45 d_b d_c} \times \left( \frac{F \sin \varphi \cos(\varphi + \theta) - \sin(\varphi + \theta) \tan \phi}{2 \sin \theta \sigma_1 \tan \phi + C_\phi - \tau_1} \right)^3 \quad (6)$$

式中,  $d_c$  为牙轮直径, mm;  $n_c$  为牙轮绕牙轮轴自转转速, r/min;  $Z$  为钻头牙轮外排齿圈齿数。

同理,纯滚动下楔形齿牙轮钻头的钻速方程为

$$v_R = \frac{CC_p C_H m n_b Z \tan \varphi L_h}{10 \pi d_b d_c} \times \left( \frac{F \sin \varphi \cos(\varphi + \theta) - \sin(\varphi + \theta) \tan \phi}{2 \sin \theta \sigma_1 \tan \phi + C_\phi - \tau_1} \right)^2 \quad (7)$$

对于滚动冲击和滑动剪切联合破岩的地层,锥形齿侵入岩石产生的破碎坑用三棱柱描述,钻速方程为

$$v_R = \frac{CC_p C_H n_b a m (m + 1) Z L_h \tan \varphi}{20 \pi d_b d_c} \times \left( \frac{F \sin \varphi \cos(\varphi + \theta) - \sin(\varphi + \theta) \tan \phi}{2 \sin \theta \sigma_1 \tan \phi + C_\phi - \tau_1} \right)^2 \quad (8)$$

式(6)~(8)给出了滚动、滚动和滑动条件下锥形齿、楔形齿牙轮钻头的钻速方程,该方程考虑了井底压力和牙齿结构对机械钻速的影响。

## 3 试验

试验包括微牙轮钻头和围压下的侵入。微牙轮钻头试验装置为岩石可钻性测试仪。微牙轮钻头直径 31.75 mm,由 8 片厚 2.5 mm 硬质合金片组成。试样为砂岩,其物理力学参数为:体积密度 2.31 g/cm<sup>3</sup>、弹性模量 1.32 × 10<sup>4</sup> MPa、内聚力 8.6 MPa、内摩擦角 25°。试样尺寸根据试验需要来确定。

微牙轮钻头试验结果如图 2 所示。破岩试验结果表明,微牙轮钻头的机械钻速随转速的增加呈直

线增加,随轴向载荷增大呈指数增加。

井底条件下,  $\sigma_{hh} = 42 \text{ MPa}$ ,  $p_m = 20 \text{ MPa}$ , 单一牙齿侵入试验结果如图3所示。

试验结果表明,刃尖角增大,牙齿变钝,侵入深度减小,锥形齿和楔形齿的牙齿侵深都呈指数递减

趋势,与试验结果相符;随着井眼内钻井液柱压力的增大,工作面岩石压持效应增大,岩石硬度增强,侵入深度呈指数递减趋势,其中锥形齿递减速率大于楔形齿;当液柱压力相同时,锥形齿比楔形齿侵入深度大。

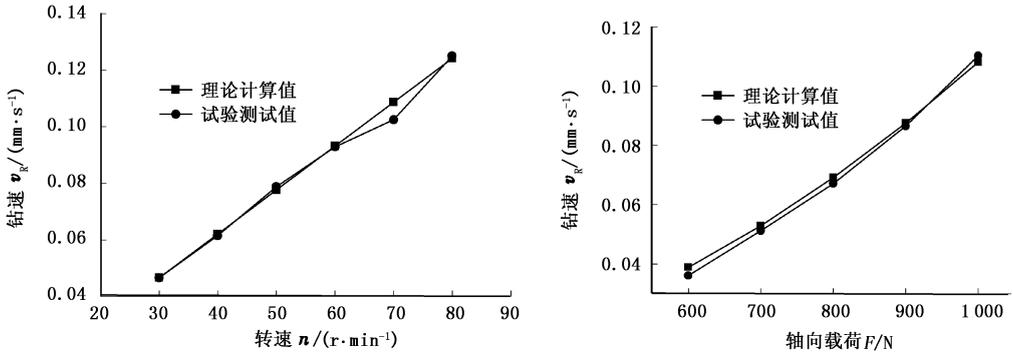


图2 微牙轮钻速随转速、轴向载荷的变化

Fig.2 Variation of drilling rate of micro bit with rotation rate and axial load

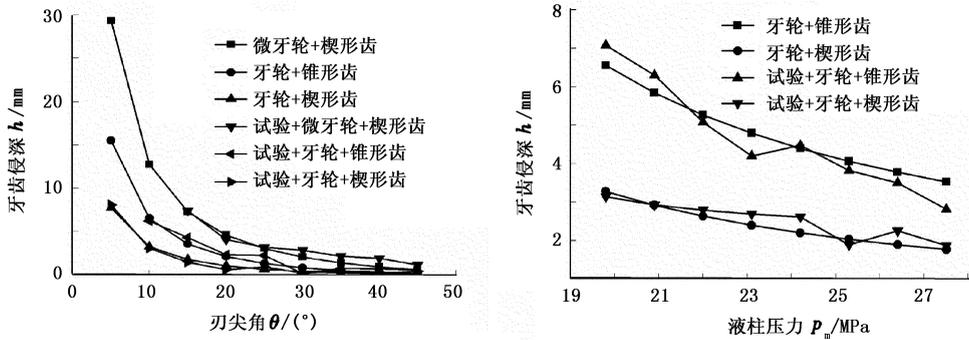


图3 牙齿侵深随刃尖角、液柱压力的变化

Fig.3 Variation of teeth invasion depth with bit angle and fluid column pressure

### 4 应用实例

大庆徐深气田是大庆油田主要的深井钻探区,钻井深度约为4.0 km。以徐深X8为例,应用式(6)~(8)分析该井2.5~4.2 km井段的机械钻速。该井段地层岩石的硬度为704~4648 MPa,平均硬度为2460.27 MPa,可钻性级值为5~10,平均可钻性级值为7.41。地层的高硬度、高可钻性是该区块机械钻速低的一个重要因素。

该井使用的钻头有牙轮钻头和金刚石钻头,牙轮钻头为江汉的HJT617GH、HJT537GH、HJT637GH和HJT737GH,金刚石钻头为瑞德DSX259和川克SC279。钻头使用的钻压和转速如图4所示,图4中钻压在50、60、80和120 kN等情况为金刚石钻头。钻头使用数量和平均转速如图5所示。

图6为模型分析的理论钻速和实际钻速对比曲线。图中虚线描述范围为金刚石钻头钻进井段。纯

滚动锥形齿牙轮钻头钻速方程计算的理论钻速与实际钻速最为接近,这与该井段实际使用的纯滚动锥形齿牙轮钻头相对应。应用欧式距离法分析数据点之间的关系,

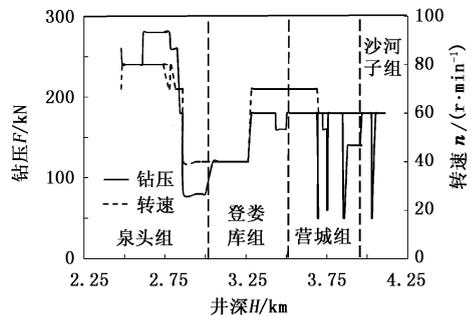


图4 钻压和转速随井深的变化

Fig.4 Variation of bit pressure and rotation rate with well depth

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{m=1}^M (x_{mi} - x_{mj})^2}$$

式中,  $d_{ij}$  为欧式距离;  $M$  为数据点总数。

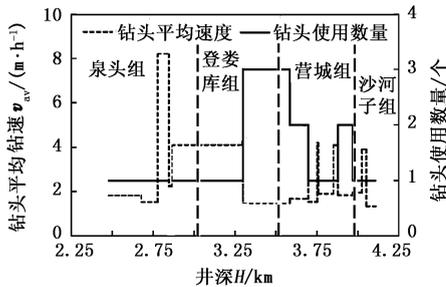


图5 各钻头使用情况和平均钻速变化曲线

Fig. 5 Use circumstances of bits and variation of average drilling rate

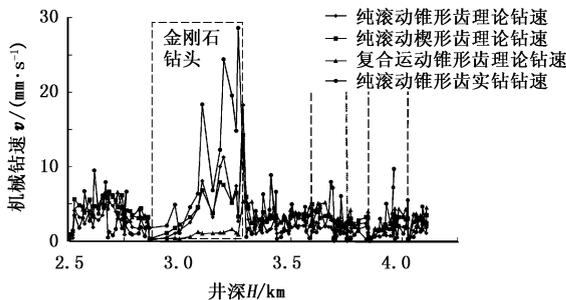


图6 理论钻速和实际钻速随深度变化曲线

Fig. 6 Variation of theoretical and practical drilling rate with depth

137 个数据点计算结果表明,纯滚动锥形齿牙轮钻头欧式距离为 44.4,纯滚动楔形齿牙轮钻头的欧式距离为 739.6,复合运动的锥形齿牙轮钻头欧式距离为 55.6。由于这些计算考虑了金刚石钻头钻进井段,欧式距离较大。去除金刚石钻头的影响,剩下 111 个数据点。纯滚动锥形齿牙轮钻头欧式距离为 25.8,纯滚动楔形齿牙轮钻头的欧式距离为 121,复合运动的锥形齿牙轮钻头欧式距离为 26.4。纯滚动复合运动的锥形齿牙轮钻头钻速与实际钻速最接近。

## 5 结论

(1) 井底条件下牙轮钻头的钻速方程能够解释地层由软、中硬到硬地层过渡中不同破岩方式下牙轮钻头的机械钻速。

(2) 随着刃尖角的增大,锥形齿和楔形齿的牙齿侵深都呈指数递减趋势;随着井眼内钻井液柱压力的增大,侵入深度呈指数递减趋势,其中锥形齿递减速率大于楔形齿。

(3) 模型理论钻速计算结果与实际钻速吻合,最小欧式距离为 25.8。

## 参考文献:

[1] 陈涛平,胡靖邦.石油工程[M].北京:石油工业出版社,2000:50-77.

- [2] 李士斌,窦同伟,董德仁,等.欠平衡钻井井底岩石的应力状态[J].石油学报,2011,32(2):329-335.  
LI Shi-bin, DOU Tong-wei, DONG De-ren, et al. Stress state of bottom-hole rocks in underbalanced drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 329-335.
- [3] 杨进.岩石抗钻强度与地层孔隙压力关系模型及其应用[J].石油大学学报:自然科学版,2001,25(2):1-5.  
YANG Jin. Correlation model of rock strength and formation pore pressure and application of the model[J]. Journal of the University of Petroleum, China( Edition of Natural Science), 2001, 25(2): 1-5.
- [4] 闫铁,李玮,毕雪亮,等.一种基于破碎比功的岩石破碎效率评价新方法[J].石油学报,2009,30(2):291-293.  
YAN Tie, LI Wei, BI Xue-liang, et al. A new evaluation method of rock crushing efficiency base on the crushing work ratio fractal representation of rock drillability[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 291-293.
- [5] 郑德帅,冯江鹏.井底压力对岩石破碎的影响机制及应用研究[J].岩土力学,2011,32(1):205-208.  
ZHENG De-shuai, FENG Jiang-peng. Mechanism of effect of down hole pressures on rock failure and its applications[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 205-208.
- [6] 刘永贵,王洪英.徐深气田气体钻井破岩机理的初步研究[J].石油学报,2008,29(5):773-776.  
LIU Yong-gui, WANG Hong-ying. Initial research on rock-breaking mechanism for gas drilling in Xushen gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5): 773-776.
- [7] 闫铁,李士斌.深部井眼岩石力学理论与实践[M].北京:石油工业出版社,2002:1-5.
- [8] YOUNG F S. Computerized drilling control[J]. JPT, 1969, 21(4): 483-496.
- [9] 闫铁,李玮,毕雪亮,等.旋转钻井中岩石破碎能耗的分形分析[J].岩石力学工程学报,2008,27(2):3649-3654.  
YAN Tie, LI Wei, BI Xue-liang, et al. Fractal analysis of energy consumption of rock fragmentation in rotary drilling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 3649-3654.
- [10] 张辉,高德利.钻头下部未钻开地层的可钻性预测新方法[J].石油学报,2006,27(1):97-100.  
ZHANG Hui, GAO De-li. A new method for predicting drillability of un-drilled formation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1): 97-100.

(编辑 李志芬)