

# 根据钻速方程分析提高钻速的有效途径

王玉玺<sup>1</sup>, 张思慧<sup>2</sup>, 李欢欢<sup>1</sup>, 刘永贵<sup>1</sup>, 贾仲宣<sup>1</sup>

(1. 大庆钻探工程公司钻井工程技术研究院, 黑龙江 大庆 163413; 2. 大庆钻井六公司, 吉林 吉林 138000)

**摘要:** 在安全条件下, 提高钻井速度是钻井工程技术人员追求的目标和紧迫任务。根据大庆长垣通用钻速方程, 分析影响钻速的主要因素及提高钻速的有效途径, 以供钻井工程设计及现场工程技术人员参考, 并用莺深1井、达深2井实钻数据在通用钻速方程中验证, 其预测钻速与实际钻速误差仅为4.3%和4.8%, 取得较好的符合率。

**关键词:** 钻井工程; 机械钻速; 钻速方程; 比钻压; 比水功率; 可钻性极值

**中图分类号:** TE2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2010)03-0014-04

**Effective Approach to Improving Drilling Rate According to the Analysis on Drilling Rate Equation/WANG Yu-xi<sup>1</sup>, ZHANG Si-hui<sup>2</sup>, LI Huan-huan<sup>1</sup>, LIU Yong-gui<sup>1</sup>, JIA Zhong-xuan<sup>1</sup>** (1. Drilling Engineering and Technology Research Institute of the Drilling and Exploration Group Company of Daqing Petroleum Administration, Daqing Heilongjiang 163413, China; 2. No. 6 Drilling Company of Daqing Petroleum Administration, Jilin Jilin 138000, China)

**Abstract:** Under safety condition, improving drilling rate is the goal and urgent task for the drilling engineers and technicians. According to Daqing Changyuan general drilling rate equation, the analysis was made on main factors affecting drilling rate and effective approach to improving drilling rate, which was helpful for drilling engineering design. Actual drilling data of well Yingshen 1 and Dashen 2 were verified by general drilling rate equation with the fault only 4.3% and 4.8% between the predict and actual drilling rate, good coincidence rate was acquired.

**Key words:** drilling engineering; penetration rate; drilling rate equation; specific drilling pressure; specific hydraulic power; drillability extreme value

## 0 前言

提高钻井速度、加快勘探步伐和油田开采效果, 以降低钻井成本, 达到少投入、多产出、取得最大的经济效益, 这是钻井工程技术人员的主要任务。钻井技术发展的过程, 就是钻井速度不断提高的过程。从经验钻井、科学钻井、最优化钻井到智能化钻井, 都是以提高钻井速度和质量为核心的。影响钻井速度除客观的地质条件(岩性、地层压力、流体性质、区域构造等)和地面条件(山区、沙漠、海滩、沼泽等)外, 钻井设备、钻井工具、钻井器材以及生产组织等都制约着钻井速度的提高。以上因素我们可以看成是影响钻速的硬件。那么影响钻速的软件便是钻井工艺技术了。为提高钻速, 我们开展了钻井参数的优选, 建立了钻速方程, 开展了水力参数对钻速影响的试验等, 从而使钻井速度不断提高。根据钻速方程, 分析提高钻速的途径, 可开阔思路, 更好的发展钻井工艺技术。

## 1 影响钻井机械速度的主要参数

通用钻速方程是在室内用牙轮钻头对不同可钻

性级值的岩石进行系统试验的基础上进行回归建立起来的, 并对其他影响因素进行了修正。

影响机械钻速的主要因素是地层岩石的可钻性、钻井参数和水力参数(根据地层选择适合的钻头)。钻井参数中影响钻速的主要因素是钻压、转速与排量, 而水力参数对水力辅助破岩、井底岩屑清除、井底压差有着重要的影响。大庆长垣通用钻速方程为<sup>[1]</sup>:

$$V_m = K_v \left( \frac{W_p}{60} \right)^A \left( \frac{N}{70} \right)^B N_p^C e^{D(\rho_m - \rho_d)} \quad (1)$$

$$W_p = W/D_b \quad (2)$$

$$N_p = 10.95 \times 10^{-2} \cdot \frac{\rho_m Q_m^3}{d_c^4 D_b^2} \quad (3)$$

式中:  $K_v$ ——与地层岩石可钻性级值有关的钻速系数,  $K_d \leq 3.5$  时  $K_v = 130 \sim 135$ ,  $3.5 < K_d \leq 6.0$  时  $K_v = 110 \sim 125$ ,  $K_d > 6.0$ ,  $K_v = 100 \sim 105$ ;  $W_p$ ——比钻压, kN/cm;  $N$ ——转速, r/min;  $N_p$ ——比水功率, kW/cm<sup>2</sup>;  $\rho_m$ ——钻井液密度, g/cm<sup>3</sup>;  $\rho_d$ ——地层压力当量密度, g/cm<sup>3</sup>;  $W$ ——钻压, kN;  $D_b$ ——钻头直径, cm;  $Q_m$ ——钻井液排量, L/s;  $d_c$ ——钻头喷嘴当

收稿日期: 2009-12-02

作者简介: 王玉玺(1980-), 男(汉族), 甘肃人, 大庆钻探工程公司钻井工程技术研究院助理工程师, 机械设计制造及其自动化专业, 从事钻井技术工作, 黑龙江省大庆市八百垅, wangyuxi@cnpc.com.cn。

量直径, cm。

系数  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  与地层埋藏深度有关, 大庆长垣地层平均可钻性级值与井深的关系为<sup>[2]</sup>:

$$K_d = 0.00245H + 0.1063 \quad 0 < H \leq 700 \text{ m} \quad (4)$$

$$K_d = 0.00165H + 0.635 \quad 700 \text{ m} \leq H \leq 5000 \text{ m} \quad (5)$$

$$A = 0.53 + 0.2K_d \quad (6)$$

$$B = 0.9 - 0.03K_d \quad (7)$$

$$C = 0.7 - 0.05K_d \quad (8)$$

$$D = 0.9K_d - 7.0 \quad (9)$$

## 2 钻井参数对机械钻速的影响

### 2.1 钻压 $W$ 对钻速 $V_m$ 的影响

在公式(1)中, 比钻压  $W_p$  与  $V_m$  成正比, 即其它参数不变, 若增加钻压  $W$ , 机械钻速  $V_m$  也相应提高,  $V_m \propto (W_p/60)$ 。若钻压  $W$  相同, 机械钻速  $V_m$  与钻头直径  $D_b$  成反比。但钻压大小受以下条件的制约。

(1) 钻头强度的制约。主要是钻头轴承(牙轮钻头)和切削齿(牙齿与 PDC 钻头切削齿)。一定尺寸和结构的钻头, 允许施加的轴向压力有确定的规定值。

(2) 地层可钻性、硬度、塑性、研磨性的制约。钻头破碎岩石时, 牙齿或切削刃需最低的轴向压力吃入地层, 对不同可钻性的地层, 存在一个破岩所需的初始钻压。随着压力的增加, 牙齿吃入深度也随着增加, 但当压力增加到一定程度时, 牙齿或切削刃完全吃入地层岩石, 钻速也不再增加。因此对不同结构的钻头在不同地层岩性中钻进时, 存在一个合理的钻压范围。这表明钻压的大小是受制约的。

(3) 井身质量的制约。为勘探或开采油气的需要, 钻进中要求控制井斜在一定范围。当钻进大倾角地层, 破碎带(断层)地层和软硬夹层时, 要求减小钻压, 以控制井斜。即牺牲钻速保井身质量。

(4) 井底清岩程度的制约。破碎后的岩屑, 须及时清除, 避免重复破碎。影响清岩效果的因素主要是钻井液排量和钻井液性能。钻井液性能根据需要可以处理, 钻井液排量是受钻井设备的限制。钻速快破碎岩屑量大, 排量不足以将岩屑携带出地面, 发生重复破碎, 影响钻速的提高。

钻压受以上 4 个主要因素的制约, 因此提高钻压以加快钻速, 也存在一定的局限性。

### 2.2 转速 $N$ 对钻速 $V_m$ 的影响

钻速  $V_m \propto (N/70)^B$ , 即钻速  $V_m$  与转速  $N$  成正比。在一定钻压下, 牙齿吃入地层深度一定, 单位时

间内转速越高, 破碎地层岩石体积越多, 钻速越快。特定的钻井设备, 转盘的最高转速是限定的。同时转速还受以下条件的制约。

(1) 钻头轴承寿命(牙轮钻头)。牙轮钻头的轴承结构不同, 润滑与冷却方式直接影响轴承寿命。因此, 每种钻头型号都有出厂规定的最高允许转速限定。在此转速范围内, 钻头轴承寿命是确定的。在软或中硬地层中钻进时, 转速较钻硬地层敏感。因此, 在软或中硬地层中钻进时, 提高转速比在硬地层中钻进时提高钻速效果更好些。

(2) 破岩方式的影响。牙轮钻头破岩时, 牙齿吃入地层岩石, 需经吃入、挤压、清离过程, 需要一定的破岩时间。若转速过快, 破岩效果反而下降。但对切削型钻头, 如 PDC 或刮刀钻头, 就不存在“破岩时间”问题。

(3) 钻柱强度的限制。在钻进中, 当钻达软硬交错的夹层时, 产生憋钻, 此时钻柱产生较大的附加扭矩。附加扭矩与转速  $N$  成正比。当转速很高时, 产生憋钻所产生的附加扭矩, 足以使钻柱扭断。因此, 在钻进中为避免钻柱事故, 也限定转速在一定的范围内。

尽管提高转速  $N$  同时可提高钻速  $V_m$ , 但根据以上 3 个主要制约因素, 提高转速也是有一定局限性的。

### 2.3 比水功率对钻速的影响

钻头比水功率对钻速的影响, 主要体现在水力破岩和井底净化两方面。依靠钻头喷嘴的水力射流产生的冲击力, 起辅助破岩作用, 其冲击力大小主要与钻头喷嘴的尺寸、钻井液排量有关。喷嘴尺寸越小, 在相同排量下, 对地层产生的冲击力越大, 辅助破岩作用明显, 有利于提高钻速。尤其是对软地层, 水力破岩效果更明显。

钻井液通过钻头喷嘴产生的射流冲击力  $F_j$  为:

$$F_j = 1.273 \cdot \frac{\rho_m Q_m^2}{d_e^2} \quad (10)$$

式中:  $\rho_m$ ——钻井液密度,  $\text{g/cm}^3$ ;  $Q_m$ ——流经钻头喷嘴的钻井液排量,  $\text{L/s}$ ;  $d_e$ ——钻头喷嘴当量直径,  $\text{mm}$ 。

改变钻头喷嘴组合与喷嘴型式, 可改变钻头井底流场, 从而改善清岩效果, 避免钻头牙齿重复破碎岩屑, 提高机械钻速。理论分析与现场资料统计表明, 不同钻头喷嘴组合的水力效果如下:

单喷嘴 > 双等径喷嘴 > 三不等径喷嘴 > 三等径喷嘴, 而加长喷嘴 > 中长喷嘴 > 普通喷嘴。

但减小喷嘴尺寸,提高钻头比水功率,提高钻速的方法也受到一定的限制,主要表现在2个方面。

### (1) 沿程压耗

钻头喷嘴减小,钻头压降增大,钻头压降与喷嘴尺寸的4次方成反比,与钻井液排量的平方成正比,即:

$$P_d = 899.27 \cdot \frac{\rho_m Q_m^2}{d_e^4} \quad (11)$$

提高排量  $Q_m$ ,通过钻柱内水眼的压耗也增加,过大的压耗,增加了钻井泵功率的消耗和零配件材料的磨损,钻柱联接螺纹的刺蚀,增加更换频率,延误钻井时间,反而降低了钻井效率。

(2) 钻头喷嘴尺寸过小,容易产生堵塞,以及刺蚀喷嘴和钻头,降低钻头的使用寿命。

因此,提高钻头比水功率,改变井底流场,增加清岩效果,有利水力辅助破岩,从而可提高钻速。

## 2.4 井底压差 $\Delta P$ 对钻速的影响

井底压差  $\Delta P = \rho_m - \rho_d$ ,在通用钻速方程中,压差以压力当量密度表示,压差对钻速的影响为  $e^{D(\rho_m - \rho_d)}$ 。

(1) 当  $\rho_m - \rho_d = 0$  时,  $e^0 = 1$ ,表明平衡压力钻井。

(2) 当  $\rho_m - \rho_d > 0$  (近平衡压力钻井),  $\Delta P$  为正值,系数  $D$  为负值,  $D\Delta P$  为负值,

则  $e^{D\Delta P} < 1$ ,在相同钻井参数与水力参数条件下,近平衡压力钻井,将降低钻速。压差越大,地层可钻性级值越小,钻速降低越严重,对钻速影响越大。这是由于松软地层,岩石孔隙较大,渗透率较高,水力渗透压持作用相对硬地层大,因而影响钻速的程序越严重。

(3) 当  $\rho_m - \rho_d < 0$  (欠平衡压力钻井) 时,  $\Delta P$  为负值,系数  $D$  为负值,则  $D\Delta P$  为正值,  $e^{D\Delta P} > 1$ ,在相同钻井参数与水力参数条件下,钻速提高。欠压值越大,钻速提高程度越大。因为欠压条件下,被破碎的钻屑解除了压持作用,岩屑迅速离开井底,避免重复破碎,同时在欠压条件下,地层压力被释放,对地层岩石颗粒之间的结构力有减弱作用,产生推离效应,因此欠平衡压力钻井,对提高钻速具有最大的潜力。

## 3 应用与说明

### 3.1 应用实例

#### 3.1.1 实例一

在大庆油田莺深1井营城组地层,3740~3990

m井段(平均井深3865 m)使用8½ in HTS617钻头钻进。地层压力当量密度  $\rho_d = 1.08 \text{ g/cm}^3$ ,钻井液密度  $\rho_m = 1.15 \text{ g/cm}^3$ 。钻压  $W = 160 \text{ kN}$ ,转速  $N = 60 \text{ r/min}$ ,钻井液排量  $Q_m = 32 \text{ L/s}$ 。钻头喷嘴当量直径  $d_e = 1.9 \text{ cm}$ ,实际机械钻速为1.40 m/h。

解:(1)应用通用钻速方程计算机械钻速

#### ①求比钻压

$$W_p = \frac{160}{21.59} = 7.41 \text{ kN/cm}$$

#### ②求比水功率

$$N_p = 10.95 \times 10^{-2} \times \frac{1.15 \times 32^3}{1.9^4 \times 21.59^2} = 0.68 \text{ kW/cm}^2$$

#### ③用公式(5)求地层岩石可钻性级值

$$K_d = 0.00165 \times 3865 + 0.635 = 7.0$$

#### ④求系数 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$

$$A = 0.53 + 0.2 \times 7.0 = 1.93$$

$$B = 0.9 - 0.03 \times 7.0 = 0.69$$

$$C = 0.7 - 0.05 \times 7.0 = 0.35$$

$$D = 0.9 \times 7.0 - 7.0 = -0.70$$

#### ⑤取 $K_v = 100$

将以上参数代入通用钻速方程(1)中求钻速  $V_m$

$$V_m = 100 \left( \frac{7.41}{60} \right)^{1.93} \left( \frac{60}{70} \right)^{0.69} 0.68 \times e^{-0.70(1.15 - 1.08)} \\ = 1.34 \text{ m/h}$$

#### (2) 计算钻速与实际钻速的误差

$$\sigma = \frac{1.40 - 1.34}{1.40} \times 100\% = 4.3\%$$

①为提高机械钻速  $V_m$ ,若其它参数不变,将钻压由160 kN提高到180 kN,求出钻速  $V_m = 1.65 \text{ m/h}$ 。

②其它参数不变,将转速  $N$  提高到90 r/min,求出钻速  $V_m = 1.75 \text{ m/h}$ 。

③其它参数不变,减小钻头喷嘴直径,若当量直径  $d_e = 1.8 \text{ cm}$ ,求出钻速  $V_m = 1.40 \text{ m/h}$ 。

④其它参数不变,若减少井底压差,若钻井液密度  $\rho_m = 0.94 \text{ g/cm}^3$ ,求出钻速  $V_m = 1.52 \text{ m/h}$ 。

### 3.1.2 实例二

在大庆油田达深2井营城组地层,3064~3793 m井段(平均井深3429 m)使用8½ in HJT617GH钻头钻进。地层压力当量密度  $\rho_d = 1.04 \text{ g/cm}^3$ ,钻井液密度  $\rho_m = 0.90 \text{ g/cm}^3$ 。钻压  $W = 180 \text{ kN}$ ,转速  $N = 60 \text{ r/min}$ ,钻井液排量  $Q_m = 30 \text{ L/s}$ 。钻头喷嘴当量直径  $d_e = 2.4 \text{ cm}$ ,实际机械钻速为1.68 m/h。

解:(1)应用通用钻速方程计算机械钻速

## ①求比钻压

$$W_p = \frac{180}{21.59} = 8.34 \text{ kN/cm}$$

## ②求比水功率

$$N_p = 10.95 \times 10^{-2} \times \frac{0.90 \times 30^3}{2.4^4 \times 21.59^2} = 0.17 \text{ kW/cm}^2$$

## ③用公式(5)求地层岩石可钻性级值

$$K_d = 0.00165 \times 3429 + 0.635 = 6.29$$

## ④求系数A、B、C、D

$$A = 0.53 + 0.2 \times 6.29 = 1.79$$

$$B = 0.9 - 0.03 \times 6.29 = 0.71$$

$$C = 0.7 - 0.05 \times 6.29 = 0.39$$

$$D = 0.9 \times 6.29 - 7.0 = -1.34$$

⑤取  $K_v = 100$ 

将以上参数代入通用钻速方程(1)中求钻速  $V_m$

$$V_m = 100 \left( \frac{8.34}{60} \right)^{1.79} \left( \frac{60}{70} \right)^{0.71} 0.17^{0.39} e^{-1.34(0.90 - 1.04)}$$

$$= 1.60 \text{ m/h}$$

## (2)计算钻速与实际钻速的误差

$$\sigma = \frac{1.68 - 1.60}{1.68} \times 100\% = 4.8\%$$

①为提高机械钻速  $V_m$ ,若其它参数不变,将钻压由180 kN提高到190 kN,求出钻速  $V_m = 1.75 \text{ m/h}$ 。

②其它参数不变,将转速  $N$  提高到90 r/min,求出钻速  $V_m = 1.99 \text{ m/h}$ 。

③其它参数不变,减小钻头喷嘴直径,若当量直径  $d_e = 2.0 \text{ cm}$ ,求出钻速  $V_m = 2.13 \text{ m/h}$ 。

## 3.2 说明

(1)通用钻速方程是通过室内实验室对地层岩石进行系统测试,回归建立得到的预测钻速的模型,它是宏观预测的模式,与现场实际钻速有一定的误差,其主要原因是地层并非均质,存在硬夹层,在相同井段地层中,岩石可钻性也是变化的。在钻速模式中,取岩石可钻性为平均值,另外地层压力系数的不确定性(目的层除外),也影响了模式的精度。但

用来预测钻速,特别是以大段地层来预测其平均机械钻速,仍可保持足够的精确度。

(2)钻速模式适合液体欠平衡,但不能用来预测气体钻井的钻速。因为建立此模式时是存在液柱条件下的破岩模式。气体钻井的钻速比液体钻井的钻速高得多,破岩机理也不相同(气柱条件)。

(3)通过分析钻速通用方程在莺深1井和达深2井的应用,我们可以得出:在硬地层提高钻压,当钻压分别提高12.5%和5.56%时,钻速分别提高23%和4.2%;当转速提高50%时,钻速分别提高31%和18.5%;若喷嘴直径分别减小5.3%和16.7%,钻速分别提高4.5%和26.8%;莺深1井中当钻井液密度降低18.3%时,钻速可提高13.4%。

## 4 结论与建议

(1)用通用钻速方程来预测钻速,较适合实钻资料丰富的探区,预测钻速与实际钻速的误差较小。

(2)在硬地层钻进时,提高钻压,比提高转速、水功率和井底压降等,对钻速的影响更大。

(3)在现场应根据设备条件,井下具体情况,综合考虑改变钻井参数,在安全条件下,提高钻井速度。

## 参考文献:

- [1] M. Roehrich, K. - U. Belohlavek. Improve ROP in Uitrahard Rock[J]. JPT, 2006, (12): 76-77.
- [2] 田津杰,李春兰,黄世军,等.新的气藏拟压力计算经验公式[J].石油钻采工艺, 2009, 4(2): 65-67.
- [3] 刘向军,孟英峰.岩石可钻性和钻速预测[J].天然气工业, 1999, 19(5): 61-63.
- [4] 徐济银,李祖奎,王绍先,等.胜利油田通用钻速预测方程的建立与验证[J].石油钻探技术, 1995, 23(1): 15-18.

注:本文在引用大庆钻井研究院赵太俊高级工程师的科研项目“岩石力学参数与钻速关系研究”中的内容时,根据现场资料,进行了部分修正,即提出了钻速系数  $K_v$  和应用井底实际压差  $(\rho_m - \rho_d)$ ;此外本文还引用了赵太俊高级工程师科研项目“大庆分区块岩石可钻性研究”中的内容。

## 2401.12 m! 山东省地矿局第六次打破国内孔深记录

**本刊讯** 山东省地矿局第六地质大队在莱州施工的ZK605钻孔,终孔孔深2401.12 m,刷新了国产机具小口径绳索取心钻探孔深记录。

这一破纪录钻孔位于莱州一矿区内,由山东省地矿局第六地质大队612号钻机承担施工任务。施工单位全部采用国产钻机和钻具,自2009年9月17日开钻,经周密组织,科学施工,优化各项钻探技术措施,于2010年3月10日终孔。开孔直径127 mm,终孔直径75 mm,终孔孔深2401.12 m,圆满完成施工任务。

目前,我国东部地区地质找矿的努力方向是深部和盲区,这次创造的钻孔孔深记录,标志着我国国产钻机和钻探施工技术达到了新水平,对实施东部“攻深找盲”战略具有重要意义。

山东地矿局的机械岩心钻探技术,在全国同行业中处于领先水平,已经连续两年完成钻探工作量突破百万米,6次打破国产机具小口径绳索取心钻探国内孔深纪录。上次最深纪录由山东省地矿局第三地质大队在临沂苍山实现,终孔深度是2188.28 m。

(山东省地矿局 秦幸福、张敏、孙丙伦 供稿)