

基于机械比能理论的钻头磨损监测新方法

樊洪海¹, 冯广庆¹, 肖伟¹, 马金良², 叶志¹, 赵聪¹

(1. 石油工程教育部重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249; 2. 中国石化西南石油局测井公司, 山东临邑 251500)

摘要:现有基于机械比能理论的钻头磨损监测方法,都是通过机械比能趋势线对钻头钝化趋势作定性分析,没有一种定量计算钻头磨损等级的有效方法。在前人研究成果的基础上,选取合理机械比能模型,通过优化钻头扭矩回归数据对其进行优化;综合考虑钻头设计参数、切削结构、钻井参数及钻头磨损等的影响,选取了合适的牙轮钻头和 PDC 钻头钻速方程,提出了一种定量计算与定性分析相结合的钻头磨损监测新方法。该方法充分考虑了钻速、钻压、转速、扭矩以及钻头设计参数等因素,采用钻速方程和测录井数据计算机械比能、岩石抗压强度和钻头磨损等级分级系数。该方法在南海油田宝岛区块 A 井、准噶尔盆地风城区块 B 井、吐哈油田某区块 C 井等的多个井段进行了 PDC 钻头和牙轮钻头的磨损监测,结果表明,较之钻头磨损实测数据,PDC 钻头的平均相对误差为 9.87%,牙轮钻头为 21.15%,即新方法能有效监测钻头磨损情况且更适用于 PDC 钻头。

关键词: 机械比能 钻速方程 抗压强度 钻头磨损 监测方法

中图分类号: TE921⁺.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-0890(2012)03-0116-05

New Approach for Real-Time Bit Wear Monitoring Based on the Theory of MSE

Fan Honghai¹, Feng Guangqing¹, Xiao Wei¹, Ma Jinliang², Ye Zhi¹, Zhao Cong¹

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering (China University of Petroleum (Beijing)), Beijing, 102249, China; 2. Logging Company of Southwest Petroleum Bureau, Sinopec, Linyi, Shandong, 251500, China)

Abstract: Previous bit wear monitoring methods which based on theory of MSE analyzed the normal trend line of MSE, which is qualitative analysis method. There was not a quantitative calculation method for bit wear. This paper chooses a reasonable torque calculation model to optimize the MSE calculation model and chooses appropriate ROP equation of PDC and cone bits which consider bit design parameter, cutting structure, drilling parameters and bit wear fully. This paper proposes a new method that combines the qualitative analysis and considering such factors as ROP, WOB, RPM, torque and bit design parameters etc, the new approach uses ROP models and some logging data to calculate MSE, Cs and bit wear grade factor. It has been applied in several bits wear monitoring, such as Well B in Junggar Basin, Well A in South China Sea Basin and Well C in Tuha Basin. Compared with measured data, the relative error of accuracy of calculated results of PDC bits is 9.87%, and that of cone bits is 21.15%, therefore, this new method has great accuracy and is more suitable for PDC bits.

Key words: mechanical specific energy; ROP equation; compressive strength; bit wear; monitoring method

对钻头磨损的准确监测,能有效预防井下复杂情况、优化钻井参数、提高机械钻速。但是,国外只有少数石油公司在钻头磨损监测方面进行了一些研究,取得了一些成果。由于随钻测量技术难度大、成本高,国内到目前为止还没有形成监测钻头磨损的有效方法。国外钻头磨损监测方面的研究主要是以机械比能理论为基础,不但可以应用该理论

计算钻速、钻压、转速和扭矩等参数定量分析钻头

收稿日期: 2011-10-10; 改回日期: 2012-05-02。

作者简介: 樊洪海(1962—), 男, 1984 年毕业于华东石油学院钻井工程专业, 2001 年获石油大学(北京)油气井工程专业博士学位, 教授, 博士生导师, 主要从事地层压力确定、油气井信息工程及油气井流体力学等方面的教学与研究工作。

联系方式: (010)89733221, fanhh@cup.edu.cn。

工作状况,而且能够通过分析机械比能趋势线定性分析钻头磨损趋势。1992 年, R. C. Pessier 等人^[1]利用机械比能分析了钻井过程中的钻头钝化问题,通过机械比能趋势线对钻头磨损情况进行了趋势分析,但没有定量计算钻头磨损等级系数。2002 年, R. J. Waugham 等人^[2-4]建立了实时机械比能监控系统,利用该系统可以尽早发现 PDC 钻头的磨损,但是其对 PDC 钻头磨损现象的研究也只局限于钻头钝化趋势分析,并没有提出一种精确计算钻头磨损等级的方法。为此,笔者在调研国内外文献的基础上,优选了机械比能模型和分别适合于牙轮钻头与 PDC 钻头的钻速方程,提出了一种机械比能与钻速方程相结合的钻头磨损监测方法,可以利用测录井资料和钻头设计数据对钻头磨损进行准确监测。

1 机械比能模型的建立

1.1 机械比能模型的发展

1964 年, R. Teale^[5]提出了钻头在岩石中钻进的比能概念,该比能即钻压和扭矩破碎单位体积岩石时单位时间所需的机械能。该比能模型(简记为 Teale 模型)为^[5]:

$$M_{SE} = \frac{W}{A_b} + \frac{120\pi NT}{A_b R} \quad (1)$$

由于 Teale 模型在参数选择上存在一定的不准确性,1985 年, R. Teale 对该模型的相关系数进行了修正。修正后的 Teale 模型为^[1,6]:

$$M_{SE} = 0.35 \left(\frac{W}{A_b} + \frac{120\pi NT}{A_b R} \right) \quad (2)$$

表 1 钻头扭矩回归数据

Table 1 The data of bits torque by regression analysis

岩 性	钻头扭矩	产生的扭矩所占比例, %		抗压强度/MPa
		钻压与直径	转速与钻头比水功率	
砂岩	$6.23 \times 10^{-3} WD_b$	99.31	0.69	151
灰岩	$6.11 \times 10^{-3} WD_b$	98.82	1.18	138
花岗岩	$5.87 \times 10^{-3} WD_b$	97.97	2.03	166

表 1 还表明,不同岩性岩石中的钻头扭矩比较接近。为了应用方便取其平均值,因此结合式(5)可以得到扭矩计算公式:

$$T = 6.07 \times 10^{-3} WD_b \quad (6)$$

确定扭矩后,将值代入式(1),得到一种比较理想的机械比能模型,即:

$$M_{SE} = \frac{4W}{\pi D_b^2} + \frac{2.91 NW}{D_b R} \quad (7)$$

1992 年, R. C. Pessier 结合机械比能效率和扭矩进一步优化了机械比能模型,该模型(简记为 Pessier 模型)为^[7]:

$$M_{SE} = W \left(\frac{1}{A_b} + \frac{13.33 \mu N}{D_b R} \right) \quad (3)$$

式中: M_{SE} 为机械比能, MPa; W 为钻压, kN; A_b 为钻头面积, mm^2 ; N 为转速, r/min ; T 为钻头扭矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; R 为钻速, m/h ; D_b 为钻头直径, mm ; μ 为滑动摩擦因子。

1.2 机械比能模型的合理选取

修正后的 Teale 模型和 Pessies 模型在计算精度上有一定的提高,但在工程条件下,钻头扭矩和滑动摩擦因子并不能直接通过测量获得,所以工程应用中一般仍选用初始的 Reale 模型。

但在机械比能计算中,钻头扭矩是非常重要的参数,扭矩值的精度决定比能值的精度。徐济银等人^[8-10]考虑岩石类型(选择了砂岩、花岗岩和灰岩 3 种岩性)、水功率、转速和钻压 4 项因素进行了室内模拟试验,建立了钻头扭矩的多元线性回归模型:

$$T = k_0 + k_1 WD_b + k_2 N + k_3 E \quad (4)$$

式中: k_0 , k_1 , k_2 和 k_3 为回归系数; E 为钻头水功率, kW/cm^2 。

根据边界条件,在 $W=0$ 、 $N=0$ 、 $E=0$ 条件下 $T=0$,进而 $k_0=0$,则模型变为:

$$T = k_1 WD_b + k_2 N + k_3 E \quad (5)$$

试验结果见表 1。由表 1 可知,转速与钻头比水功率破岩时产生的扭矩之和仅相当于钻头扭矩的 0.69%~2.03%,因此计算扭矩时可将其忽略。

2 钻头磨损监测中钻速方程的选取

2010 年, G. Hareland 等人^[11]建立了牙轮钻头钻速方程,该钻速方程综合考虑了不同钻头设计参数、切削结构和钻井参数的影响;2008 年, H. R. Motahari 等人^[12]建立了 PDC 钻头钻速方程,该钻速方程考虑了钻头磨损影响。

牙轮钻头钻速方程:

$$R = k \frac{80 N^b m n_t^a}{D_b^2 \tan^2 \psi} \left(\frac{W}{100 C_s} \right)^c W_f \quad (8)$$

PDC 钻头钻速方程:

$$R = W_f \frac{14.14 W N^b \cos \alpha}{C_s D_b \tan \theta} \quad (9)$$

式中: k 为综合系数; a, b, c 为系数; m 为轮头速比; n_t 为每转牙齿数; ψ 为地层切削角, ($^\circ$); C_s 为岩石抗压强度, MPa; W_f 为钻头磨损系数; α 为 PDC 钻头的后倾角, ($^\circ$); θ 为侧倾角, ($^\circ$)。

岩石抗压强度可以通过对钻速方程反向推导求得, 也可以利用式(10)进行求取:

$$C_s = U_{cs} + D_p + 2 D_p \sin F_A / (1 - \sin F_A) \quad (10)$$

式中: D_p 为压差, 等于钻井液压力和正常地层压力之差, MPa; F_A 为岩石的内摩擦角, ($^\circ$); U_{cs} 为单轴抗压强度, MPa, 可利用测井数据计算得出。

3 钻头磨损系数的求取

笔者提出的钻头磨损监测新方法是, 采用钻速方程和测录井资料计算机械比能和岩石抗压强度, 以此来监测钻头磨损情况。假设起始状态下没有钻头磨损, 可利用钻速方程反算得到岩石抗压强度, 最终综合考虑岩石抗压强度和机械比能计算钻头磨损分级系数^[2,13-16]。

根据式(7)计算机械比能值, 由钻速方程反向推导得出岩石抗压强度。岩石抗压强度是关于钻头磨损系数的函数:

$$C_s = C'_s W_f \quad (11)$$

式中: C'_s 为无磨损情况下的岩石抗压强度, MPa。

机械比能越接近岩石抗压强度, 说明钻头越高效, 在理想状态下, 机械比能等于岩石抗压强度。当然理想状态是难以实现的, 而一般情况下钻头工作效率只有 30%~40%。钻头工作效率的计算公式如下:

$$e = \frac{C'_s}{M_{SE}} \quad (12)$$

式中: e 为钻头工作效率。

联立式(11)、(12)得:

$$M_{SE} = \frac{C_s}{e W_f} \quad (13)$$

钻头磨损系数和钻头工作效率均小于 1, 故把 W_f 和 e 值合为一项, 即系数 d , 则机械比能和岩石抗压强度有以下关系:

$$M_{SE} = d C_s \quad (14)$$

系数 d 可以通过对录井资料分析处理而获得,

然后对其进行归一化处理。利用该系数可以精确计算出钻头磨损分级系数:

$$\frac{1}{d} = 1 - A h^B \quad (0 < h < 1) \quad (15)$$

式中: h 为钻头磨损分级系数; A, B 为回归系数。

假设钻头完全磨损, 钻头磨损分级系数是 1, 即方程两边等于 0, 所以 A 值等于 1, 因此式(15)可简写为:

$$\frac{1}{d} = 1 - h^B \quad (16)$$

由录井数据和钻头磨损实测数据可以回归得出指数 B 的值, 通过机械比能和岩石抗压强度计算出系数 d , 因而可通过式(16)算出磨损分级系数 h 。

机械比能考虑了钻头磨损的影响, 通过反算三轴岩石抗压强度可以计算出钻头磨损分级系数。根据钻头磨损分级系数可以确定钻头磨损等级, 两者存在以下转换关系(根据 IADC 标准, 钻头磨损分为 8 个等级):

$$B_G = 8h \quad (17)$$

式中: B_G 为标准钻头磨损等级系数。

PDC 钻头的磨损等级如图 1 所示, 图中圆形为钻齿横截面。

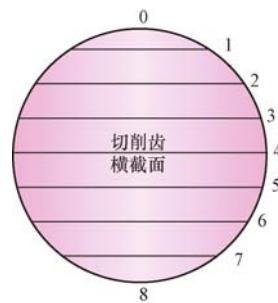


图 1 PDC 钻头的磨损等级示意

Fig. 1 Schematic of wear grade of PDC bits

牙轮钻头的磨损等级如图 2 所示。

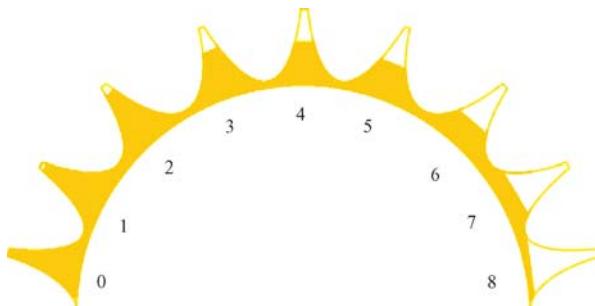


图 2 牙轮钻头的磨损等级示意

Fig. 2 Schematic of wear grade of cone bits

相关模型参数的确定如图 3 所示。

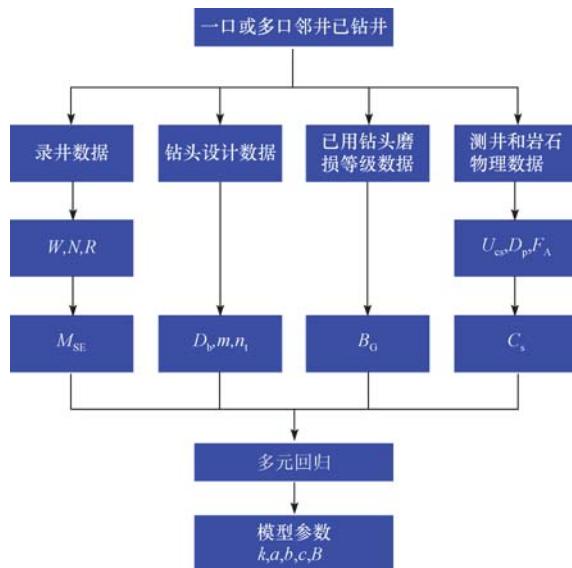


图3 确定相关模型参数的流程

Fig. 3 The process of calculating related model parameters

4 应用实例

由于PDC钻头和牙轮钻头的钻速方程不同,所以钻头磨损的计算方法也略有不同。笔者选取了南海油田、准噶尔盆地及吐哈油田采用PDC钻头和牙轮钻头所钻井的测录井数据进行了实例计算。

在南海油田宝岛区块A井的3个井段(2 392~2 707, 3 012~3 712, 4 750~5 150 m)分别采用MS1963SS、G447XL和HC606型PDC钻头钻进,分别计算了其机械比能、三轴抗压强度、系数d和磨损分级系数。其中,2 392~2 707 m井段(采用MS1963SS型PDC钻头)机械比能、三轴抗压强度、系数d、钻头磨损分级系数与井深的关系曲线如图4所示。

在新疆准噶尔盆地风城区块B井5 240~5 342 m井段和吐哈油田某区块C井的1 175~1 388, 2 270~2 509, 2 957~3 223 m井段采用了牙轮钻头。其中,B井5 240~5 342 m井段机械比能、

表2 实测与计算所得钻头磨损分级系数对比

Table 2 Comparison of the measured data and calculated results of bit wear grade factors

钻头类型	应用井	钻头直径/mm	下钻深度/m	起钻深度/m	钻头磨损分级系数		
					实测	新方法计算	相对误差, %
MS1963SS型PDC钻头		444.5	2 392	2 707	1.5	1.6	6.67
G447XL型PDC钻头	A井	311.1	3 012	3 712	1.1	1.3	18.18
HC606型PDC钻头		219.5	4 750	5 150	4.2	4.0	4.76
	B井	231.5	5 240	5 342	1.8	1.5	16.67
牙轮钻头		311.1	1 175	1 388	1.2	1.5	25.00
	C井	219.5	2 270	2 509	1.9	1.5	21.05
		219.5	2 957	3 223	3.2	2.5	21.88

三轴抗压强度、系数d和磨损分级系数与井深的关系曲线如图5所示。

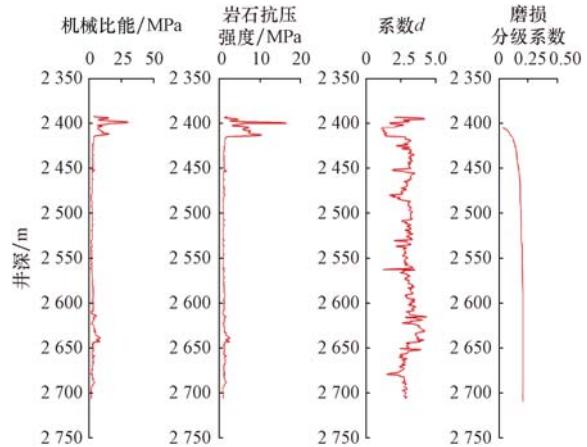


图4 A井2 392~2 707 m段机械比能、抗压强度、系数d和磨损分级系数曲线

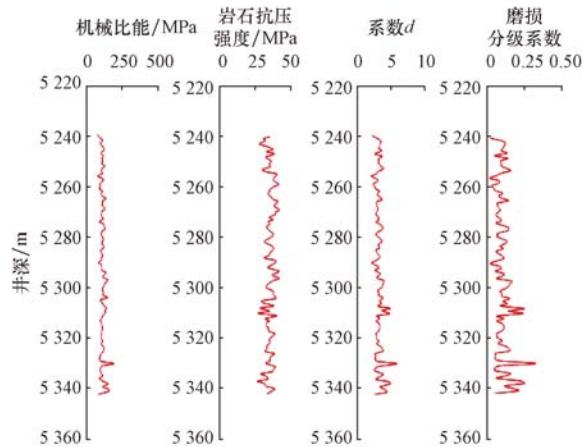
Fig. 4 Curves of MSE, C_s, d and wear factor for 2 392 to 2 707 m section in Well A

图5 B井5 240~5 342 m段机械比能、抗压强度、系数d和磨损分级系数曲线

Fig. 5 Curves of MSE, C_s, d and wear factor for 5 240 to 5 342 m section in Well B

综合A、B、C等3口井的录井资料和根据新方法计算得到的钻头磨损分级系数,对比分析了计算所得数据和钻头磨损实测数据,对比结果见表2。

由表 2 可知,利用基于机械比能理论建立的钻头磨损监测新方法计算的钻头磨损分级系数,与录井资料钻头磨损实测数据较为接近:PDC 钻头磨损分级系数计算值与实测值的平均相对误差为 9.87%,牙轮钻头为 21.15%。虽然计算的相对误差值不算很小,但因为现有钻头磨损评价多是对钻头磨损趋势进行定性分析,很少有定量计算,加之该监测新方法的计算结果能较好地反映钻头的磨损等级情况,所以该方法适用于对钻头磨损的监测。相比较而言,磨损后 PDC 钻头的相关参数比牙轮钻头容易确定,因而其磨损等级计算结果与实测值的误差更小,即该方法更适用于 PDC 钻头的磨损预测及监测。

5 结 论

1) 提出了一种定量计算与定性分析相结合的钻头磨损监测方法,该方法采用钻速方程和录井数据计算机械比能、岩石抗压强度和钻头磨损等级分级系数,以此来监测钻头磨损情况。

2) 基于机械比能理论的钻头磨损监测新方法能有效监测 PDC 钻头和牙轮钻头的磨损情况。与钻头磨损实测数据相比,PDC 钻头的计算精度高于牙轮钻头,该新方法更适用于 PDC 钻头的磨损监测。

3) 基于机械比能理论的钻头磨损监测新方法还存在一些不足,如钻速方程中相关系数的确定不够科学、不同类型钻头的计算精度不够一致等,会对最终计算结果的精度产生一定影响。但与传统的钻头磨损计算方法(如泥页岩密度法、标准钻速法、 d_c 指数法等)相比,其准确性已大大提高。

参 考 文 献

References

- [1] Pessier R C, Fear M J. Quantifying common drilling problems with mechanical specific energy and a bit-specific coefficient of sliding friction[R]. SPE 24584, 1992.
- [2] Waughman R J, Kenner J V, Moore R A, et al. Real-time specific energy monitoring reveals drilling inefficiency and enhances the understanding of when to pull worn PDC bits[R]. SPE/IADC 74520, 2002.
- [3] Rafatian N, Miska S, Ledgerwood III L W, et al. Experimental study of MSE of a single PDC cutter under simulated pressurized conditions[R]. SPE/IADC 119302, 2009.
- [4] Waughman R J, Kenner J V, Moore R A. Real-time specific energy monitoring enhances the understanding of when to pull worn PDC bits[J]. SPE Drilling & Completion, 2003, 18(1): 59-67.
- [5] Teale R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1965, 2(1): 57-73.
- [6] Rabia H. Specific energy as a criterion for bit selection[J]. Journal of Petroleum Technology, 1985, 37(7): 1225-1229.
- [7] Pessier R C. Different shales dictate fundamentally different strategies in hydraulics, bit selection, and operating practices [R]. SPE 28322, 1994.
- [8] 徐济银, 王吉东, 蒋杰. 比能在钻头选型中的应用[J]. 钻采工艺, 1996, 19(6): 86-89.
Xu Jiyin, Wang Jidong, Jiang Jie. The application of specific energy in bits selection[J]. Drilling & Production Technology, 1996, 19(6): 86-89.
- [9] 樊顺利, 郭学增. 用比能法评判钻头[J]. 石油钻采工艺, 1993, 15(2): 20-24.
Fan Shunli, Guo Xuezeng. Specific energy as a criterion for bit evaluation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1993, 15(2): 20-24.
- [10] 景宁, 樊洪海, 翟应虎, 等. 基于比能理论的钻头工作状态监测方法[J]. 断块油气田, 2011, 18(4): 538-540.
Jing Ning, Fan Honghai, Zhai Yinghu, et al. Monitoring method of drilling bit working status with mechanical specific energy theory[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(4): 538-540.
- [11] Hareland G, Wu A, Rashidi B. New drilling rate models for tricone bits and its application to rock confined compressive strength: proceedings of the 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium, Salt Lake City, June 27-30, 2010[C].
- [12] Motahari H R, Hareland G, James J A. Improved drilling efficiency technique using integrated PDM and PDC bit parameters[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2010, 49(10): 45-52.
- [13] Rashidi B, Hareland G, Wu Z. New approach in real-time bit wear prediction[R]. SPE 136008, 2010.
- [14] Mohan K, Adil F, Samuel R. Tracking drilling efficiency using hydro-mechanical specific energy [R]. SPE/IADC 119421, 2009.
- [15] Armenta M. Identifying inefficient drilling conditions using drilling-specific energy[R]. SPE 116667, 2008.
- [16] Bailey J R, Gupta V, Ertas D, et al. Drilling vibrations modeling and field validation[R]. IADC/SPE 112650, 2008.