文章编号:1673-5005(2019)05-0092-09

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2019.05.010

基于机械比能与滑动摩擦系数的 PDC 钻头 破岩效率试验

管志川1,呼怀刚1,王 斌1,孙美伟2,刘永旺1,许玉强1

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛 266580; 2. 青岛石大华通科技有限公司,山东青岛 266580)

摘要:为探究机械比能理论指导下 PDC 钻头破岩效率的影响因素,通过简化钻头与地层相互作用模型并推导滑动摩擦系数,结合室内试验分析各因素对钻头滑动摩擦系数的影响。结果表明:钻压通过切削齿的吃入深度影响摩擦系数,当切削齿完全吃入地层所产生的摩擦系数最大;钻速过快导致的岩屑过多且无法有效移除时摩擦系数会减小; 转速增加会使摩擦系数减小;不同类型的岩样其最终稳定的摩擦系数不同,但一般在 0.4~0.6;钻头直径不会影响 摩擦系数最终稳定值;钻进软至中硬地层时,应选取尽量大的钻压和转速,即使较大钻压和转速对于提升破岩效率 并无裨益,但却会明显提升机械钻速,此时机械比能增加并不明显,说明钻头能量利用率保持在一个稳定的阶段;钻 进较硬地层时,提升钻压、转速水平会明显提高机械钻速,增大机械比能,降低破岩效率,钻头机械能量利用率下降, 此时钻进参数的选取就需要综合钻速、机械比能、破岩效率等因素判定。

关键词:PDC 钻头; 破岩效率; 滑动摩擦系数; 参数优选; 机械钻速; 机械比能

中图分类号:TE 242 文献标志码:A

引用格式:管志川,呼怀刚,王斌,等.基于机械比能与滑动摩擦系数的 PDC 钻头破岩效率试验[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(5):92-100.

GUAN Zhichuan, HU Huaigang, WANG Bin, et al. Experimental study on rock-breaking efficiency of PDC bit based on mechanical specific energy and sliding frictional coefficient[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2019,43(5):92-100.

Experimental study on rock-breaking efficiency of PDC bit based on mechanical specific energy and sliding frictional coefficient

GUAN Zhichuan¹, HU Huaigang¹, WANG Bin¹, SUN Meiwei², LIU Yongwang¹, XU Yuqiang¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. Qingdao Shidahuatong Technology Company Limited, Qingdao 266580, China)

Abstract: In order to investigate the influencing factors of the rock-breaking efficiency of PDC bits based on the mechanical specific energy(MSE) theory, a simplified bit-formation interaction model was established and the sliding frictional coefficient was derived, along with the analysis of the effect of various factors on the sliding frictional coefficient based on the relevant experimental results. The results show that the weight on bit (WOB) can exert an effect on the sliding frictional coefficient(μ) value through the depth of cutting, and the μ value becomes the largest when the cutting teeth completely penetrates into the formation. The μ value will decrease when drlling debris cannot be removed effectively due to high rate of penetration (ROP) and when the revolutions per minute (RPM) increases. The μ value will change in different types of rocks, but it is generally in the range of 0.4–0.6. The diameter of the drill bit has little effect on the stable μ value. When drilling in soft to medium hard strata, maximum WOB and RPM should be applied, even if it is not beneficial to en-

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05022-002);国家留学基金项目(201806450093);长江学者和创新团队发展计划(IRT_14R58) 作者简介:管志川(1959-),男,教授,博士,博士生导师,国家"万人计划"教学名师,研究方向为油气井力学、井下测控技术、深井超深井钻 井。E-mail;guanzhch@upc.edu.cn。

收稿日期:2019-05-14

hance the rock-breaking efficiency. Large WOB and RPM will significantly improve the ROP, meanwhile the MSE value will not increase obviously, indicating that the energy utilization rate of the drill bit remains in a stable stage. When drilling in harder strata, reducing WOB and RPM will obviously improve the ROP. It can also increase the MSE, reduce the rock-breaking efficiency and decrease the mechanical energy utilization rate of the bit. The selection of optimal drilling parameters needs take ROP, MSE, rock-breaking efficiency and other factors into consideration.

Keywords:PDC bit; rock-breaking efficiency; sliding frictional coefficient; parameters optimization; rate of penetration; mechanical specific energy

对于钻进效率的评价一般通过现有钻井数据 与临井的统计数据进行对比,这种方法对于监测 较为熟悉的油田、一定井段的钻进性能和趋势较 为理想,但具有一定的主观性和不确定性,同时由 于缺乏理论模型使其很难建立一种统一的技术标 准。鉴于此,国外学者从能量平衡的角度建立了 机械比能理论^[14],用于钻进过程的监测与趋势预 测、钻井工程设计等方面,取得了良好的效果。国 内研究主要将机械比能理论用于钻头选型^[5]、钻 头磨损监测[6]、钻头工作效率实时评估[7-8]以及工 作状态的实时监测^[9]等。机械比能理论作为一种 可以定量化研究钻进过程中所出现的问题、评价 钻头性能和工作效率的工具被提出,经过多年的 发展与改进,该理论在提高钻进效率、减少或避免 井下事故、节约钻井成本等方面显示了极大的优 越性,但利用此理论针对 PDC 钻头的钻进参数如 何影响破岩效率及其影响程度与规律,即使用机 械比能理论优化钻进参数却鲜有研究。为使机械 比能理论更加适合于国内钻井实际,笔者设计并 加工两种直径的常规 PDC 钻头,进行 5 种岩性、硬 度各异岩样下的室内钻进试验,探究机械比能理 论指导下的 PDC 钻头钻进参数对破岩效率的影 响,研究地层硬度特性等因素对特定 PDC 钻头滑 动摩擦系数的影响。

1 机械比能理论

Teale^[4]提出的机械比能公式为

$$E_{\rm s} = \frac{4W}{\pi D_{\rm B}^2} + \frac{480NT}{D_{\rm B}^2 R}.$$
 (1)

式中, E_s 为比能, 10^3 MPa;N为转速,r/min;R为机 械钻速,m/h;W为钻压(WOB), $kN;D_B$ 为钻头直 径,mm;T为钻头扭矩, $kN \cdot m_o$

钻头扭矩 T 是一个非常重要的参数,在实验室 或现场使用随钻测量装置很容易获得钻进过程中的 破岩扭矩,但是多数情况下现场数据是以指重表钻 压、转盘转速、机械钻速等形式呈现。国内外诸多学 者对牙轮钻头、微型钻头进行了理论与试验研究,得 到了钻压与扭矩之间的线性函数关系^[3,5,10-15];Pessier^[3]引入特定的钻头滑动摩擦系数表征破岩扭矩 与钻压之间的函数关系,即

$$T = \int_{0}^{2\pi} \left[\int_{0}^{\frac{1}{2}D_{\rm B}} \frac{4\mu W}{\pi D_{\rm B}^{2}} \rho^{2} d\rho \right] d\theta = \int_{0}^{\frac{1}{2}D_{\rm B}} \frac{8\mu W}{D_{\rm B}^{2}} \rho^{2} d\rho = \frac{\mu W D_{\rm B}}{3}.$$
(2)

式中,T为破岩扭矩; μ 为钻头滑动摩擦系数; ρ 为微 元长度; θ 为钻头转过的弧度。

式(2)的推导过程如图1所示。这样研究重点 从获取破岩扭矩数据到试验获取特定钻头的滑动摩 擦系数,而滑动摩擦系数本身与钻头类型、区域地层 特性、岩性特征等紧密相关。由于前人的研究结果 差异性较大,也没有根据钻头类型、岩石强度等特征 进行分类探讨,因此有必要对特定钻头的滑动摩擦 系数进一步深入研究。



Fig. 1 Simplified model for relationship between WOB and TOB

图1中F为钻头摩擦力。

最小破岩比能与实钻机械比能的比值即为破岩 效率,而最小破岩比能理想状态下应该等于所钻岩 样的抗压强度,即

$$E_{S_{\min}} \approx \sigma. \tag{3}$$

式中, $E_{s_{\min}}$ 为最小破岩比能, MPa; σ 为岩样抗压强度, MPa。

破岩效率为

$$E_{\rm FFE} = \frac{E_{S_{\rm min}}}{E_{\rm S}}.$$
(4)

式中, $E_{\rm s}$ 为机械比能, MPa; $E_{\rm FFE}$ 为破岩效率。

特定钻头的滑动摩擦系数 μ 根据式(2) 推导得

$$\mu = \frac{3T}{WD_{\rm p}}.$$
 (5)

值得注意的是式(5)虽然可以在已知钻压和 扭矩等试验数据的条件下对μ进行计算,但其并 不是决定μ的关键因素,μ更倾向于是一种在特定 钻进条件下的钻头属性,是钻头吃入深度的函 数^[3]。

2 试验方案

2.1 试验方案设计

钻进试验在中国石油大学(华东)油气井工程 研究所的高效破岩试验架上完成(图2)。



图 2 高效破岩试验装置

Fig. 2 Efficient rock-breaking experimental device

采用不同转速(52、103、221 r/min)和不同钻压 (5、7.5、10、12.5、15、17.5、20、22.5、25 kN)组合。 选用钻井现场常见的红色砂岩、黄色砂岩、灰色砂 岩、石灰岩 I型、石灰岩 II型作为试验材料,其压入 硬度分别为1185.99、1278.21、1507.8、1694.57 和 1789.14 MPa;其可钻性级值分别为 3.621(Ⅲ)、 4.238(Ⅳ)、5.165(Ⅴ)、5.943(Ⅴ)和 6.671(Ⅵ); 其单轴抗压强度分别为 16.58、18.32、24.68、31.57 和 42.684 MPa。试验中使用清水作为循环介质, 并实时记录钻进过程中钻压、转速、扭矩、进尺、钻 时等参数,计算试验钻头的滑动摩擦系数、机械比 能、破岩效率等。

2.2 试验钻头设计

为了真实反映钻井现场所使用 PDC 钻头的工 作状态,试验用 PDC 钻头设计方法与制造工艺与全 尺寸常规 PDC 钻头保持一致,设计内容主要包括剖 面形状选取、布齿设计、水力结构设计等^[16-17]。试 验分别加工了 Φ50 mm 和 Φ120 mm 两种 PDC 钻 头,用于各钻进参数下滑动摩擦系数的测定、研究钻 进参数对破岩效率的影响。

2.2.1 冠部剖面形状选取

冠部剖面形状是 PDC 钻头最重要的设计参数 之一,试验用 Ф50 mm 和 Ф120 mm PDC 钻头剖面形 状设计特点:①内锥角取 150°,冠顶部位比较平缓, 增大钻压的利用率;②冠顶旋转半径为钻头半径的 60%,适用于中硬及以上地层,能提高破岩效率;③ 钻头肩部采用平滑过渡方式,为肩部加强齿布置提 供了空间。

2.2.2 布齿设计

PDC 钻头设计的核心内容之一就是布齿设计, 包括切削齿尺寸选择、切削齿数量以及布置方式、切 削齿工作角度设计等内容。基于所钻试验用岩样的 物性参数,依据 PDC 钻头布齿方法和原则,得到的 布齿样式如图 3 所示。

2.2.3 水力结构设计

有效清除井底岩屑、冷却切削齿、防止泥包是 水力结构设计的主要目标。对于 PDC 钻头, 排量 对机械钻速的影响极其显著, 故在试验过程中应 该尽量加大钻井液的排量, 以保证充足的水力能 量、排除水利因素对钻头滑动摩擦系数以及破岩 效率的影响。

应用流体力学计算软件 Fluent 对钻头使用过程 中岩屑运移能力以及钻头清洗和冷却情况进行分 析。图4为 Φ50 mm PDC 钻头流体力学模拟结果。 采用4喷嘴近周向布置方式,井底流场实现全覆盖; 井底最大湍流强度为70%,湍流强度高处与井底岩 屑运移通道重叠;井底最大漫流速度为21.60 m/s, 能够实现井底岩屑有效移除。

根据上述钻头设计原则和工艺,加工了直径为 **Φ**50 mm(A钻头)、**Φ**120 mm(B钻头)的两种常规 PDC钻头,如图5所示。



(a) Φ50 mm PDC钻头井底覆盖布齿设计





(c) Φ120 mm PDC钻头井底覆盖布齿设计

图 3 **Φ50 mm** 和 **Φ120 mm PDC** 钻头的布齿设计 Fig. 3 Tooth design Φ 50 mm and 120 mm PDC bit





(b) *Φ*50 mm PDC钻头周向布齿设计



(a) Φ 50 mm PDC 钻头 (b) Φ 120 mm PDC 钻头

图 5 试验用 PDC 钻头 Fig. 5 PDC bits for experiment

钻头滑动摩擦系数μ影响因素 3

利用试验数据可对 Φ50 mm 和 Φ120 mm PDC 钻头滑动摩擦系数μ进行计算,确定影响μ的因素。 由于围压对于特定钻头µ的影响不大[3],故此试验 均在大气压力下进行。

3.1 钻进参数

钻进参数中钻压和转速是两个可控变量,通过 钻压、转速两者联合控制钻头吃入深度的变化对机 械比能、破岩效率和滑动摩擦系数等产生影响。关 于滑动摩擦系数μ的上限,可认为当钻头切削齿完 全吃入地层所产生的μ最大,因为如果产生的岩屑 无法及时被清洗或存在岩屑压持效应,就会产生井 底泥包或钻头泥包,岩屑将阻止钻头切削齿与井底 岩石进一步接触,破岩效率及μ也将会随机械钻速 的增加而迅速减小。

 Φ 50 mm 和 Φ 120 mm PDC 钻头钻进黄砂岩时 的 μ 值如图 6 所示。 Φ 50 mm PDC 钻头钻进黄砂岩 时,不同转速条件下随钻压增加 μ 均会不同程度的 下降,此时钻压增加导致岩屑积聚且不能及时排空, 井底泥包影响了切削齿进一步对岩样的切削,导致 μ 下降。对于 Φ 120 mm PDC 钻头,随钻压增加其 μ 值逐渐增加,表明对于此大直径钻头,其吃入深度随 钻压变大而逐步加大;由于试验条件限制无法施加 更大的钻压,此钻头在黄砂岩中的 μ 上限值将无法 测量。滑动摩擦系数 μ 也并非恒定值, Φ 50 mm PDC 钻头钻进黄砂岩时 μ 为 0. 43 ~ 0. 74。

转速主要影响单位体积岩屑产生速度以及高压 射流对岩屑的冲刷时间,进而对µ产生间接的影响, 而以上两方面也同时取决于岩石物性以及井底状况。

如图 6 所示,对于 Φ50 mm PDC 钻头,转速从 52、103 到 221 r/min,转速越大μ越小,可以理解为 转速大时钻头在单位时间内破碎的岩屑体积也较 大,在一定钻井液排量下岩屑无法及时清除,导致钻 头泥包或井底泥包,影响了钻头吃入深度的进一步 增加。



図 6 450 mm 和 420 mm PDC 拍头拍近奥砂石时的µ 恒 Fig. 6 Sliding frictional coefficient µ of 450 mm & 4120 mm PDC bit when drilling in yellow sandstone

3.2 岩性对µ 的影响

对于不同硬度的岩样,钻头在单位钻压条件下 的吃入深度不同,滑动摩擦系数 μ 在不同岩样中对 钻压的响应速率和变化规律也不同。如图 6 和 7 所 示,试验条件下随着岩样抗压强度的逐步增大,μ 随



Fig. 7 Change rules of sliding frictional coefficient μ in different rock samples

钻压增加其变化规律也会发生显著的变化;后期还 需要增加试验组数或进行现场试验以进一步验证所 得结论的正确性。在红砂岩和黄砂岩这类可钻性较 强、硬度较小的岩样中,μ随钻压增加会呈现逐渐减 小的趋势(红砂岩 0.62~0.48,黄砂岩 0.74~0.43) (图 6、7(a));而在灰色砂岩和石灰岩 I型这类可 钻性适中的岩样中,μ随着钻压增加其值虽有波动 但始终会限定在一定范围内(灰色砂岩 0.4~0.45, 石灰岩 I型0.5~0.6)(图7(b)、(c));对于硬度较 大的石灰岩 II型,μ 会随钻压增加而呈现小幅上升

趋势,最终稳定在0.45~0.5(图7(d))。

3.3 钻头直径对µ 的影响

钻头直径主要是通过钻压在切削齿上的分布影 响钻头吃入深度,进而对 μ 产生影响。如图 8 所示, 在钻压小于 20 kN 时, ϕ 50 mm PDC 钻头的 μ 值要 明显大于 ϕ 120 mm PDC 钻头,此时分布在后者上 的钻压稍有不足导致其吃入深度不足, μ 较小; ϕ 50 mm PDC 钻头由于直径较小,其 μ 处于一个比较稳 定的范围(0.5~0.6),钻压大于 20 kN 后,两钻头 μ 处于相同的水平。



Fig. 8 Sliding frictional coefficient μ of Φ 50mm and Φ 120 mm PDC bit drilling in limestone I

4 破岩效率的影响因素

4.1 钻 压

在讨论破岩效率时,可以将岩石物性相似的岩 样进行合并讨论而不影响结果的准确性(图9)。在 硬度较小的黄砂岩中钻进时(图9(a)),随钻压增 大机械钻速逐步增加至稳定值约为25 m/h,滑动摩 擦系数μ从0.7 逐渐减小至约0.5,机械比能先降 低至最小值100 MPa 后升至120 MPa,破岩效率先 升至18%后回落至15%,表明增加钻压并不能使破 岩效率持续提高。



图 9 *Ф*50 mm PDC 钻头在不同岩样钻进时各指标变化 Fig. 9 Indexes change of *Ф*50 mm PDC bit drilling different rocks

钻进硬度适中的石灰岩 I 型时(图9(b)),随 钻压的逐渐增大,机械钻速逐步增加至稳定值约为 17 m/h,滑动摩擦系数 μ 稳定在 0.5~0.55,机械比 能先降低至最小值 153 MPa 后小幅上升,而破岩效 率从 8% 逐步增至 20.5% 后小幅回落,说明钻压超 过一定值后再次加压会导致破岩效率的降低,因此 存在钻压最优值。 钻进硬度较大的石灰岩 II 型时(图 9(c)),随 钻压增大机械钻速逐步增加至 13.7 m/h,且趋于稳 定,滑动摩擦系数 μ 小幅波动上升 0.43 ~0.47,机 械比能逐步降低并平稳至约 180 MPa,破岩效率从 10.6% 逐步增稳至 23.5%。

4.2 岩石物性

破岩效率在不同岩样中变化规律略有差异, 随着岩石硬度增大,机械钻速、摩擦系数μ的最终 稳定值会逐步降低(图 10);破岩效率的最终稳定 值随着岩石硬度的增加而提高,说明硬岩石中钻头 的机械钻速虽相对较低,但其能量利用率却较高; Φ50mmPDC钻头在黄砂岩、石灰岩I型岩样中其



图 10 不同类型岩样中破岩效率与钻压的关系 Fig. 10 Relationship between rock-breaking efficiency

and WOB in different types of rock samples

破岩效率呈先增大后减小的趋势,在较硬的石灰 岩Ⅱ型岩样中其破岩效率随钻压增加呈波动上升 趋势。

4.3 转 速

相对于钻压和岩性,转速对于破岩效率的影 响并不明显。对于相对较软红砂岩(图11(a)), 转速增减并不能明显改变破岩效率,钻压的改变 会使破岩效率产生小幅度(1%~2%)的变化。对 于较硬的石灰岩 II 型(图11(b)),转速增加会引 起破岩效率下降(约5%),这是因为岩石硬度较 大,增加旋转速度并不能使钻头每次切削相同体 积的岩石,反而会损耗钻头的旋转机械能;在较硬 地层中钻压对破岩效率的影响会更加显著,例如 平均破岩效率从 5 kN 时的 11% 到 25 kN 时的 23%(图11(b))。

钻进相对较软的地层(图 12(a)),钻头在单位 钻压和转速下吃人地层相对较容易,应选取尽量大 的钻压和转速,即使较大钻压和转速对于提升破岩 效率并无裨益,但是会明显提升机械钻速,此时机械 比能增加并不明显,说明钻头的能量利用率一直保 持在一个稳定的阶段;钻进较硬的地层(图 11(b)、 图 12(b)),提升钻压、转速水平会明显提高机械钻 速,降低破岩效率,机械比能也随转速增加呈增大的 趋势,说明钻头机械能量利用率在一直下降,此时钻 进参数的选取须综合钻速、机械比能、破岩效率等因 素判定。



图 11 Ф50 mm PDC 钻头不同岩样中钻进时破岩效率的变化

Fig. 11 Variation of rock-breaking efficiency of \varPhi 50 mm PDC bit drilling different rocks





5 结 论

(1)钻压通过切削齿的吃入深度影响滑动摩擦 系数μ,切削齿完全吃入地层所产的μ最大;机械钻 速过大导致的岩屑过多且无法有效清除时μ会减 小;转速增加使μ减小;不同类型的岩样其最终稳定 的μ也不同,但一般为0.4~0.6;钻头直径不影响μ 最终稳定值。

(2)钻进软到中硬地层时,钻头在单位钻压和 转速下吃入地层相对较容易,应选取尽量大的钻压 和转速,虽然较大钻压和转速对于提升破岩效率并 无裨益,但会明显提升机械钻速,此时机械比能增加 不明显,说明钻头的能量利用率一直保持在一个稳 定的阶段;钻进较硬地层时,提升钻压、转速水平会 明显提高机械钻速,增大机械比能,降低破岩效率, 钻头机械能量利用率下降,此时钻进参数的选取须 综合钻速、机械比能、破岩效率等因素判定。

参考文献:

- HAMMOUTENE C, BITS S. FEA modelled MSE/UCS values optimize PDC design for entire hole section [R].
 SPE 149372-MS, 2012.
- [2] DUPRIEST F E, KOEDERITZ W L. Maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy[R]. SPE 92194, 2005.
- [3] 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.
- [4] 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.

[5] 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. Evaluate the bit by specific energy [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1993,15(2):20-24.

[6] 樊洪海,冯广庆,肖伟,等. 基于机械比能理论的钻头 磨损监测新方法[J]. 石油钻探技术,2012,40(3):116-120.

FAN Honghai, FENG Guangqing, XIAO Wei, et al. New approach for real-time bit wear monitoring based on the theory of MSE [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012,40(3):116-120.

- [7] 孟英峰,杨谋,李皋,等. 基于机械比能理论的钻井效率随钻评价及优化新方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(2):110-114.
 MENG Yingfeng, YANG Mou, LI Gao, et al. New method of evaluation and optimization of drilling efficiency while drilling based on mechanical specific energy theory [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2012,36(2):110-114.
- [8] 李昌盛,赵金海,杨传书,等. 钻头工作效率实时评估 新方法[J]. 石油钻采工艺,2012,34(6):36-40.
 LI Changsheng, ZHAO Jinhai, YANG Chuanshu, et al. Novel approach for assessing real-time bit working efficiency [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012,34(6):36-40.
- [9] 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.
- [10] SUTKO A A, MYERS G M. The effect of nozzle size, number, and extension on the pressure distribution un-

der a tricone bit[J]. Journal of Petroleum Technology, 1971,23(11):1299-1304.

- [11] WARREN T M. Factors affecting torque for a roller cone bit[J]. Journal of Petroleum Technology, 1984,36(9): 1500-1508.
- [12] RABIA H, FARRELLY M, BARR M V. A new approach to drill bit selection [R]. SPE 15894, 1986.
- [13] RASHIDI B, HARELAND G, NYGAARD R. Real-time drill bit wear prediction by combining rock energy and drilling strength concepts [R]. SPE 117109, 2008.
- [14] CAICEDO H U, CALHOUN W M, EWY R T. Unique ROP predictor using bit-specific coefficient of sliding friction and mechanical efficiency as a function of con-

fined compressive strength impacts drilling performance [R]. SPE 92576, 2005.

- [15] 徐济银,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, JIANG Jie. Application of specific energy in bit selection [J]. Drilling & Production Technology, 1996,19(6):86-89.
- [16] LYONS W C, PLISGA G J. Standard handbook of petroleum and natural gas engineering[M]. USA, Massachusetts, Burlington: Elsevier, 2011.
- [17] 管志川,陈庭根.钻井工程理论与技术[M].东营:石 油大学出版社,2000.

(编辑 李志芬)