

基于岩石力学特性和机械比能理论的钻头评价和优选

赵向阳¹, 张顺科², 鲍洪志¹

(1.中国石化石油工程技术研究院,北京 100101; 2.西南石油大学石油与天然气学院,四川 成都 610500)

摘要:针对川西某构造的地质构造和地层特征,本文以井史资料和测井数据为基础,建立了地层强度参数和岩石力学参数剖面,得出了分布规律,即岩石强度和可钻性级值普遍较高,且变化趋势同弹性模量、粘聚力、内摩擦角等力学参数一致,在 2500~2700 m 地层达到峰值,而泊松比则相反,达到最低值。提出了基于岩石力学特性和机械比能理论的钻头评价和优选方法,得出了每段地层钻头的机械比能值,对已使用钻头的使用效果进行系统评价,发现采用的 PDC 钻头效果不理想,形成了牙轮钻头、孕镶钻头为主的钻头推荐方案,为工区钻井提速设计提供指导。

关键词:岩石力学特性;机械比能理论;钻头评价和优选;提速潜力分析

中图分类号:TE21;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)05-0079-06

Bit evaluation and optimization based on rock mechanics and mechanical specific energy theory

ZHAO Xiangyang¹, ZHANG Shunke², BAO Hongzhi¹

(1.Research Institute of Petroleum Engineering, SINOPEC, Beijing 100101, China;

2.Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China)

Abstract: In reference to the geological structure and formation characteristics of Western Sichuan, the paper establishes the profile of the formation strength and rock mechanics parameters according to the well history data and logging data, and derives the distribution rule which shows general high rock strength and drillability and consistency of the change trend with the elastic modulus, cohesion, and internal friction angle. The mechanical parameters reach the maximum at 2500 to 2700m deep formation, while the poisson's ratio decreases to the minimum. The bit evaluation and optimization method based on the theory of rock mechanics properties and the mechanical specific energy theory is proposed with the mechanical specific energy of the bit concluded for each section of formation. The performance of the bit which has been used is also evaluated, and it is found the PDC bit performance is not satisfactory. As a result, a bit recommendation which puts priority to the rock bit and the impregnated bit is presented to provide guidance for drilling speed design for the work area.

Key words: rock mechanical properties; mechanical specific energy theory; bit evaluation and optimization; acceleration potential analysis

0 引言

川西海相地层由下至上为上三叠统须家河组、侏罗系下统自流井组、中统沙溪庙组和上统遂宁组、蓬莱镇组和白垩系的夹关组,地表为夹关组。属于中硬到硬地层,岩性主要为细砂岩夹泥岩,岩石强度高、可钻性差且地层情况复杂,因此基于岩石力学特

性和机械比能理论的钻头评价和优选,是提高机械钻速,减少井下事故,达到高速、经济钻井目的的重要保障。

1 岩石力学特性理论计算模型与评价分析

声波时差能较好的反映岩石的物理性质,为此

收稿日期:2020-03-16; 修回日期:2020-04-24 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.05.013

基金项目:国家十三五重大专项“海上油气田关键工程技术”(编号:2016ZX05033-004);国家科技重大专项“高压低渗油气藏固井完井技术”(编号:2016ZX05021-005)

作者简介:赵向阳,男,蒙古族,1985年生,副研究员,博士,主要从事气体、欠平衡与控压钻井、井筒多相流理论研究工作,北京市朝阳区北辰东路8号北辰时代大厦, zhaoxy.sripe@sinopec.com。

引用格式:赵向阳,张顺科,鲍洪志.基于岩石力学特性和机械比能理论的钻头评价和优选[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(5):79-84.
ZHAO Xiangyang, ZHANG Shunke, BAO Hongzhi. Bit evaluation and optimization based on rock mechanics and mechanical specific energy theory[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(5):79-84.

本文利用声波测井数据,建立了岩石力学和可钻性剖面。

泊松比和弹性模量计算公式如下^[1-5]:

$$\mu_d = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (1)$$

$$E = 2.8156 \left[\frac{DEN \cdot V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2) \cdot 10^{-3}}{V_p^2 - V_s^2} \right]^{0.8634} \quad (2)$$

式中: V_p ——纵波速度, m/s; V_s ——横波速度, m/s; DEN ——地层密度, g/cm^3 。

内摩擦角 φ 和粘聚力 C_o :

$$\varphi = \frac{\pi}{12} [2(1 - \mu_d) + 1] \quad (3)$$

$$C_o = 5.45 \times 10^{-15} (1 - 2\mu_d) \left(\frac{1 + \mu_d}{1 - \mu_d} \right)^2 \cdot$$

$$DEN^2 \cdot V_p^4 (1 + 0.78V_{cl}) \quad (4)$$

式中: V_{cl} ——泥质含量, 无量纲。

$$V_{cl} = \frac{2^{G \cdot \Delta G} - 1}{2^G - 1} \quad (5)$$

式中: G ——地层新老系数, 在新地层取 3.7, 在老地层取 2.0, 此处取 3.7; ΔG ——与伽玛曲线有关的系数。

$$\Delta G = \frac{GR - \min(GR)}{\max(GR) - \min(GR)} \quad (6)$$

式中: GR ——地层自然伽马。

岩石单轴抗压强度公式为:

$$S_c = \frac{2C_o \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} [10^{-3} (\rho_m - \rho_p) g H] + \frac{2C_o \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (8)$$

利用川西某构造的测井数据, 得出弹性模量与泊松比计算结果见图 1。从图 1 可以看出, 变化的趋势完全是呈相反的规律, 泊松比较小则弹性模量较大, 弹性模量增大则泊松比减小。这与其物理意义是分不开的, 弹性模量是弹性材料的一种最重要、最具特征的力学性质, 表征物体弹性变形的难易程度。弹性模量越大, 则物体抵抗变形的能力越强, 而变形越难, 泊松效应就越弱, 泊松比就越小。在 2066~2500 m 地层的弹性模量较小, 在 25000 MPa 左右, 到 3000 m 处增大到 30000 MPa, 而后又减小至 25000 MPa, 然后在 25000 MPa 附近上下波动。泊松比在 2066~2500 m 间为 0.33 左右, 2500~2700 m 之间又降低到 0.30 附近, 然后逐渐回升, 但

是上下波动较大。从后面的研究可以知道, 泊松比变化的趋势与岩石强度、岩石可钻性等力学参数均相反。

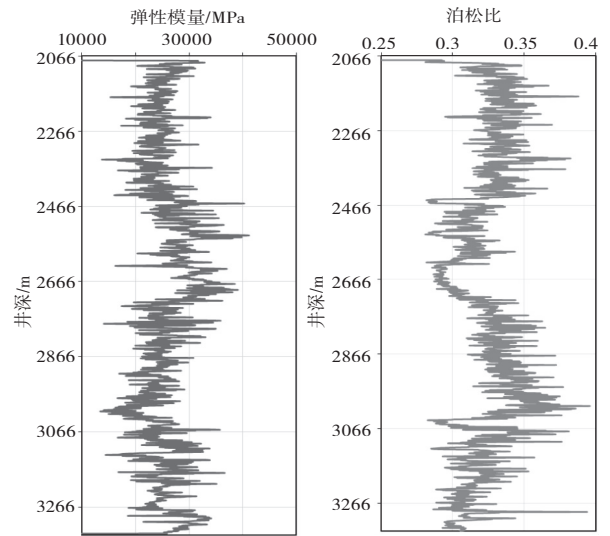


图 1 岩石力学参数剖面

Fig.1 Profile of rock mechanical parameters

从图 2 可以看出, 岩石单轴抗压强度和三轴抗压强度对应井深的点的位置几乎相同, 横坐标轴的刻度三轴抗压强度较单轴抗压强度要大几十兆帕, 说明围压下的岩石强度是大于无围压下的岩石强度的。2500m 以浅井深的岩石单轴抗压强度变化不大, 在 100MPa 左右, 在 2500~2700m 井段上升到了 180MPa 以上, 然后迅速下降至 120MPa 附近上下大幅度波动。

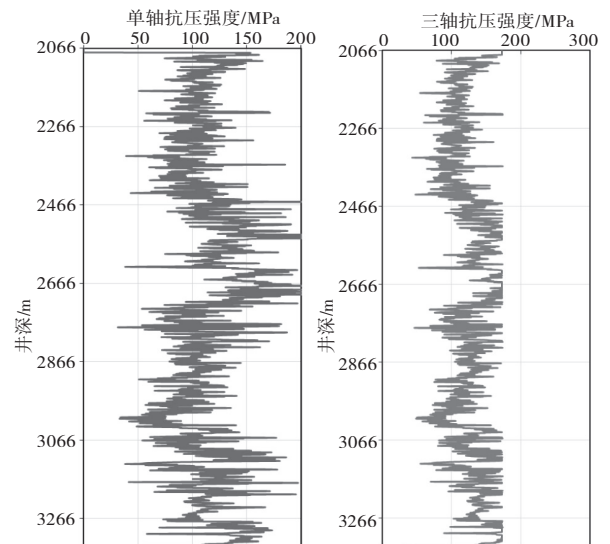


图 2 岩石强度剖面

Fig.2 Profile of rock strength

2 基于岩石力学特性和机械比能理论的钻头评价和优选方法

建立了基于岩石力学特性和机械比能理论的钻头评价和优选方法^[6-17],对钻头的使用情况进行分

析,评价和优选流程如图 3 所示。机械比能方法是基于输入能量对岩石破坏的有效性而提出的,关注了两个破岩过程的两个方面,即:地层因素和输入能量因素,是分析钻头是否适应地层的有效反应。

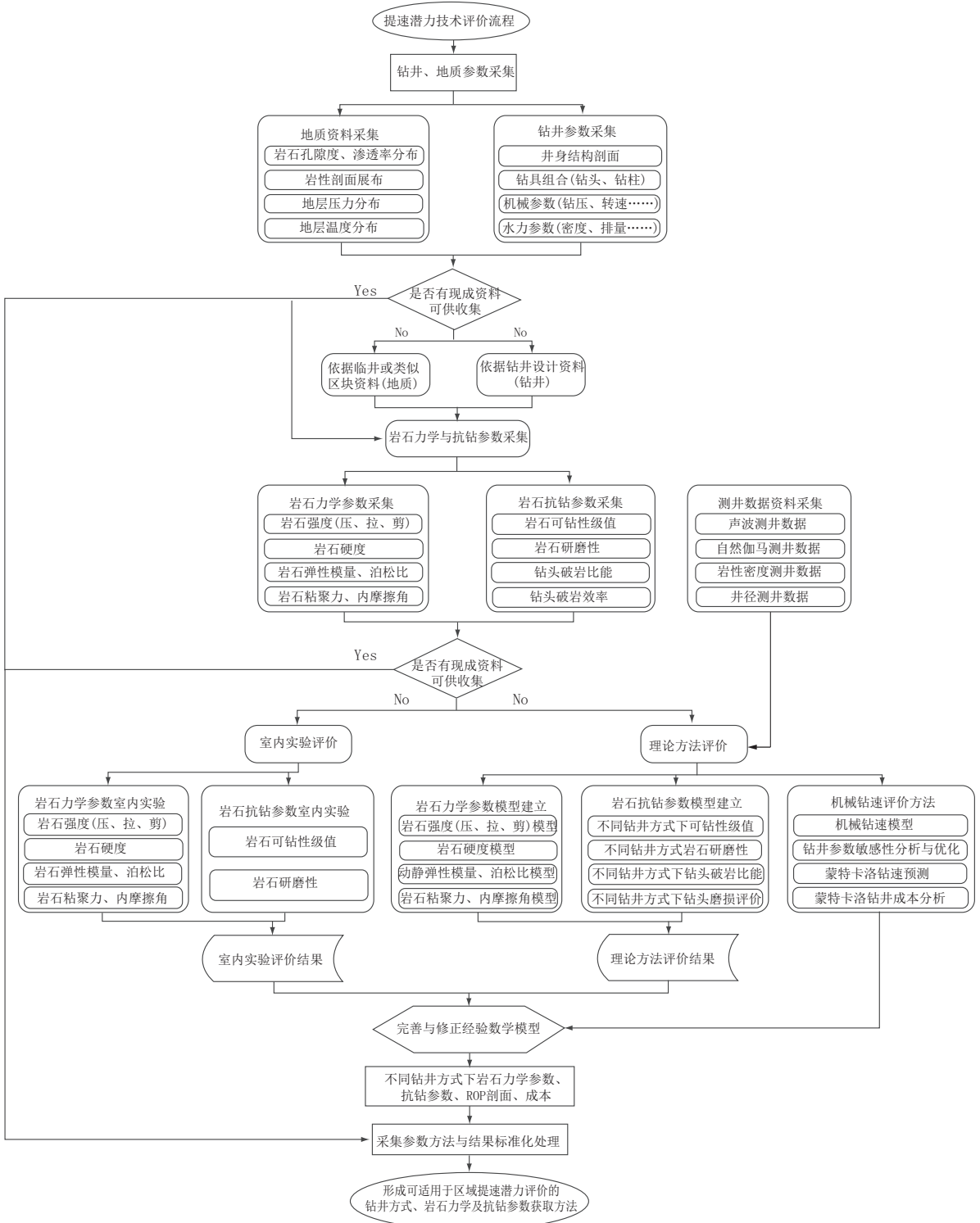


图 3 基于岩石力学特性和机械比能理论的钻头评价和优选流程

Fig.3 Flowchart of bit evaluation and optimization based on rock mechanics and mechanical specific energy theory

2.1 机械比能参数求取

$$E_{MH} = \frac{40W_e}{\pi d_b^2} + \frac{110TN}{V_{pc}d_b^2} + \frac{4\eta\Delta P_b Q}{\pi d_b^2 V_{pc}} \quad (9)$$

式中: E_{MH} ——机械比能, MPa; W_e ——有效钻压, $W_e = W - \eta F_j$, kN; W ——地面钻压, kN; d_b ——钻头直径, cm; T ——扭矩, kN·m; V_{pc} ——机械钻速, m/h; Q ——钻井液的排量, L/s; ΔP_b ——钻头压力降, MPa; η ——水功率的主要影响参数; F_j ——射流冲击力, kN。

Hector 通过大型实验建立了钻头的滑动摩擦系数与围压下岩石强度、钻井液密度及钻头直径之间的关系模型^[18-19]:

$$\mu' = (0.3402 \times e^{-8E-870\sigma_{ccs-mix}}) \cdot [1.963 \ln(\rho_d) + 2.998](0.0697d_b + 0.667) \quad (10)$$

式中: μ' ——钻头滑动摩擦系数; $\sigma_{ccs-mix}$ ——围压下岩石强度, MPa。

通常情况下牙轮钻头、PDC 钻头滑动摩擦系数分别为 0.21 与 0.8 左右。

2.2 机械钻速预测

结合上述机械比能的求取方法, 则钻进时钻头传递机械能量效率为:

$$\eta_e = \frac{E_{MH(\min)}}{E_{MH}} \times 100\% \quad (11)$$

式中: η_e ——钻头传递机械能量效率, 即钻头破岩效率。

破岩比能的最小值通常等于围压下岩石强度。即:

$$E_{MH(\min)} = C_{ccs-mix}$$

Hector 通过大型实验建立了钻头破岩效率与井底岩石围压、钻井液密度的关系模型:

$$\eta_e = (0.0247\sigma_{ccs-mix} + 11.319) \cdot [2.15 \times \ln(\rho_m) + 3.2836] \quad (12)$$

牙轮钻头、PDC 钻头破岩效率分别为 35%~40% 和 30%~35%。

因此经过机械比能模型推导, 机械钻速模型表述如下。使用钻压、滑动摩擦系数计算:

$$V_{pc} = \frac{110\pi\mu'W_e d_b N + 12\eta\Delta P_b Q}{3\pi d_b^2 \left(\frac{C_{ccs-mix}}{\eta_e} - \frac{40W}{\pi d_b^2} \right)} \quad (13)$$

使用扭矩计算:

$$V_{pc} = \frac{110\pi TN + 4\eta\Delta P_b Q}{ud_b^2 \left(\frac{C_{ccs-mix}}{\eta_e} + \frac{40W_e}{\pi d_b^2} \right)} \quad (14)$$

3 钻头选型评价分析和推荐方案

岩石力学性质是影响机械钻速的重要因素, 需要获得岩石力学性质来评价与预测机械钻速的大小。岩石抗钻参数包括岩石可钻性与研磨性, 该参数是影响钻头优选的关键因素, 应用室内实验评价的岩石抗钻参数, 结合理论模型与测井数据, 评价岩石可钻性级值的分布, 为钻头优选提供重要参考依据。钻压、转速、扭矩、机械钻速、水力参数和钻头尺寸等录井工程参数整合成一个机械比能参数。

机械比能理论是作为一种用来描述钻头性能的概念被提出的, 它提供了一种实时评价钻井性能的工具。其值的大小取决于钻头类型、钻头新旧、磨损程度、钻屑清除效果及岩石的类型和性质。但对于给定的钻头类型, 由于其对各种岩石的适应性不同以及钻头本身的使用情况, 机械比能值也有所不同。机械比能值越低, 表明该钻头的破岩效率越高, 钻头与地层越相适应。反之, 则说明该钻头不适应于破碎该种岩石。所以, 机械比能可用于优选与评价钻头。

利用本文建立的基于岩石力学特性和机械比能理论的钻头评价和优选方法, 以川西 X-1 井为例, 进行了模拟计算分析(见表 1)。从表 1 中可以看出各段地层使用的钻头机械比能值越大, 则说明钻头在钻进该地层时的使用效果越差。第 5 段和第 8 段地层的钻头使用效果最差, 第 3、4、6、7 段地层钻头使用效果中等, 说明选用的钻头对所钻地层机械钻速的影响很大。

2442.90~2470.66 m 井段为须六段地层, 灰一灰白色细砂岩夹灰黑、黑灰色页岩, 底部为一套较纯的灰白色细一中砂岩, 平均可钻性级值为 7, 岩石单轴抗压强度为 100 MPa, 为中等硬度地层。使用的江钻的 HJ537G 钻头按理说是很合理的, 但实际机械钻速并不高, 仅为 0.56 m/h。查看了井史资料, 发现钻井至该处发生了井漏, 钻井液漏失情况严重。根据此段软硬交错, 软泥岩的塑性变形, 可以考虑使用江钻的 HF627 钻头或者川石克锐达公司的 S278 孕镶钻头。

表 1 X-1 井钻头扭矩与机械比能
Table 1 Bit torque and mechanical specific energy for Well X-1

井段	钻头直径 D_b / mm	钻压 W / kN	滑动摩擦系数 μ'	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	机械钻速 ROP/ ($m \cdot h^{-1}$)	扭矩 T_b / ($N \cdot m$)	机械比能 M / MPa
1	215.9	120	0.21	65	1.07	15113	5675.7
2	215.9	40	0.80	90	2.06	1919	5181.2
3	215.9	120	0.21	70	0.56	15113	11675.4
4	215.9	60	0.80	90	1.02	2879	15697.0
5	215.9	80	0.80	90	0.71	3838	30061.3
6	215.9	180	0.21	80	0.90	2267	12455.4
7	215.9	180	0.21	80	0.86	2267	13034.5
8	214.4	60	0.80	70	0.44	2859	28498.9

2470.66~2807.35 m 井段地层为须六段到须五段的过渡段,选用的是迪普的 DM564 钻头。平均岩石单轴抗压强度为 130 MPa,平均可钻性级值为 9,为硬质地层。可以选用江钻的 HF737 钻头、川石的 I437 孕镶钻头。

2807.35~3069.42 m 井段为须五段地层,为灰黑、黑灰色页岩与灰、深灰色细、粉砂岩互层,夹碳质页岩及煤层。可钻性级值在 8 左右,平均岩石单轴抗压强度 100 MPa,推荐江钻的 HF637 钻头和川石的 I379 孕镶钻头。

4 结论与建议

(1)本文基于岩石力学特性和机械比能理论的钻头评价和优选技术为钻头的选型工作提供了重要的理论依据。

(2)通过研究得出的岩石力学参数计算模型,取得了工区地层的岩石力学剖面,并总结出了工区地层岩石力学参数的特点和分布规律;岩石强度和可钻性级值普遍较高,且变化趋势同弹性模量、粘聚力、内摩擦角等力学参数一致,在 2500~2700 m 地层达到峰值,而泊松比则相反,达到最低值。

(3)通过对已使用钻头的使用效果评价分析,发现采用的 PDC 钻头效果不理想,三牙轮钻头相比较为合理,故本文推荐的适应工区地层的钻头以牙轮钻头为主,孕镶钻头和天然金刚石钻头为辅。

参考文献 (References):

[1] 邹德永,孟祥雨,袁军,等.基于模式识别的钻头选型新方法[J].石油钻探技术,2016,44(2):40-45.
ZOU Deyong, MENG Xiangyu, YUAN Jun, et al. A new method for bit selection based on pattern recognition[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(2):40-45.

[2] 熊天文.大港油出定向井钻头优选研究[D].北京:中国石油大

学(北京),2016.
XIONG Tianwen. Study on the optimization of directional well bits in Dagang Oilfield[D]. Beijing:China University of Petroleum (Beijing), 2016.

[3] 刘向君,罗平亚.岩石力学与石油工程[M].北京:石油工业出版社,2004.
LIU Xiangjun, LUO Pingya. Rock mechanics and petroleum engineering[M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2004.

[4] 尤明庆,苏承东,杨圣奇.岩石动静态参数间关系的研究[J].焦作工学院学报(自然科学版),2002,21(6):413-419.
YOU Mingqing, SU Chengdong, YANG Shengqi. Relation between static and dynamic parameters of rocks[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology (Natural Science), 2002, 21(6):413-419.

[5] 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):110-114,119.
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):110-114,119.

[6] 夏家祥.川西深井提速的实践与认识[J].钻采工艺,2009,32(6):1-4.
XIA Jiexiang. Practice and cognition of improving drilling rate Chuanxi deep well [J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(6):1-4.

[7] 尤明庆.复杂路径下岩样的强度和变形特性[J].岩石力学与工程学报,2002,21(1):23-28.
YOU Mingqing. Strength and deformation of rock under complex loading path[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1):23-28.

[8] 尤明庆.岩石试样的强度及变形破坏过程[M].北京:地质出版社,2001.
YOU Mingqing. Strength and deformation failure process of rock sample[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001.

[9] 江波,任茂,王希勇.彭州气田 PZ115 井钻井提速配套技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(8):73-78.
JIANG Bo, REN Mao, WANG Xiyong. Complete technology for ROP improvement for Well PZ-115 in Pengzhou Gas Field [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(8):73-78.

- [10] 李玮,李世昌,闫立鹏,等.脉冲射流式液动冲击工具的研制及现场应用[J].天然气工业,2018,38(5):87-93.
LI Wei, LI Shichang, YAN Lipeng, et al. Development and field application of a pulse-jet hydraulic impactor[J]. Natural Gas Industry, 2018,38(5):87-93.
- [11] 孔华,兰凯,刘香峰,等.基于振动实测的非均质地层钻头失效分析与对策[J].天然气工业,2019,39(12):110-115.
KONG Hua, LAN Kai, LIU Xiangfeng, et al. Analysis of and countermeasure for bit failures in heterogeneous strata based on vibration measurement[J]. Natural Gas Industry, 2019,39(12):110-115.
- [12] 田家林,朱志,程文明,等.新型随钻取心钻头破岩提速工作原理[J].天然气工业,2018,38(6):97-104.
TIAN Jialin, ZHU Zhi, CHENG Wenming, et al. Rock breaking and ROP improvement mechanisms of a new CWD drill bit[J]. Natural Gas Industry, 2018,38(6):97-104.
- [13] 赵向阳,孟英峰,杨顺辉,等.钻井液液压作用下裂缝性定容封闭地层压力的变化规律[J].天然气工业,2018,38(6):91-96.
ZHAO Xiangyang, MENG Yingfeng, YANG Shunhui, et al. Changing laws of formation pressure of constant-volume fractured enclosed reservoirs under the hydraulic pressure of drilling fluid[J]. Natural Gas Industry, 2018,38(6):91-96.
- [14] 史玉才,滕志想,白璟,等.静态推靠式旋转导向钻井系统的钻压传递效率[J].天然气工业,2018,38(11):83-88.
SHI Yucui, TENG Zhixiang, BAI Jing, et al. Analysis on the weight-on-bit transmission efficiency of the static push-the-bit rotary steerable system[J]. Natural Gas Industry, 2018,38(11):83-88.
- [15] Kou S Q, Liu H Y, Lundquist R G. Rock fragmentation mechanisms induced by a drill bit[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004,41(3):1-6.
- [16] Liu H Y, Kou S Q, Lindqvist P A. Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002,39(4):491-505.
- [17] Liu H Y. Numerical model of rock fragmentation process by mechanical tool[D]. Sweden:Luleå University of Technology, 2004.
- [18] 张华礼,杨盛,刘东明,等.页岩气水平井井筒清洁技术的难点及对策[J].天然气工业,2019,39(8):82-87.
ZHANG Huali, YANG Sheng, LIU Dongming, et al. Wellbore cleaning technologies for shale-gas horizontal wells: Difficulties and countermeasures[J]. Natural Gas Industry, 2019,39(8):82-87.
- [19] 赵春兰,殷慧敏,王兵,等.基于结构方程与蒙特卡洛方法的钻井现场作业风险评价[J].天然气工业,2019,39(2):84-93.
ZHAO Chunlan, YIN Huimin, WANG Bing, et al. Risk assessment of drilling site operation based on the structural equation and Monte Carlo Method[J]. Natural Gas Industry, 2019,39(2):84-93.

(编辑 王建华)

专题征稿

“海洋钻探技术与装备”专题

建设海洋强国,是建设中国特色社会主义的重要组成部分。我国“十三五”规划纲要提出了“深海、深地、深空、深蓝”四个领域的战略技术部署。其中“深海”方面,亟待在深海资源勘探等方面关键技术有所突破,是一项重要的任务目标。以“一核两深三系”为主体的自然资源重大科技创新战略,也把深海探测列为核心内容之一。

近年来,我国海洋地质调查和资源勘探方面取得了丰硕成果。我国两次的大海域天然气水合物试采成功,钻探工程技术在其中都发挥了不可或缺的重要作用。然而,我国海洋钻探技术和装备基础相对还比较薄弱,需要加大研究和攻关力度,不断总结提高,才能更好地为海洋强国、科技强国提供强有力的技术支持。

本刊“海洋钻探技术与装备”专题,征集以下内容稿件(但不限于):

- 海洋地质调查钻探取样技术
- 海上钻探及取样器具
- 海水钻井液、环保钻井液
- 海域天然气水合物勘探技术
- 钻探船及海上(水上)钻探平台

●海上油气钻井技术

●水域钻探技术等

稿件要求:参见《探矿工程(岩土钻掘工程)》投稿指南:
http://jour.tkgc.net/ch/first_menu.aspx?parent_id=20150106042322001

论文提交截止时间:2020年8月30日

投稿网址:www.tkgc.net

投稿流程:探矿工程在线(www.tkgc.net)→作者登录→注册→登录→按提示上传稿件(注:选择栏目时请选“海洋钻探专题”)。

欢迎广大科研人员和工程技术人员投稿!

联系人:韩丽丽(879017787@qq.com, 13473688373, 0316-2096324)

李艺(617140994@qq.com, 18515466615, 010-68320471)

《探矿工程(岩土钻掘工程)》编辑部

2020年4月