

# 南川页岩气田岩石抗钻特性参数分布规律研究及应用

朱亮<sup>1,2,3</sup>, 楼一珊<sup>1,2,3</sup>, 沈建中<sup>4</sup>, 贺庆<sup>4</sup>, 秦杜<sup>4</sup>

(1.长江大学油气钻井技术国家工程实验室防漏堵漏技术研究室,湖北武汉 430100;2.长江大学油气钻采工程湖北省重点实验室,湖北武汉 430100;3.长江大学石油工程学院,湖北武汉 430100;4.中国石化华东油气分公司石油工程技术研究院,江苏南京 210031)

**摘要:**岩石抗钻特性参数是制定钻井方案,实施优快钻井的重要基础参数。通过岩石抗钻特性参数测试建立了岩石抗压强度、岩石可钻性级值、岩石硬度等岩石抗钻特性参数的计算模型,再结合测井数据和地质数据,绘制了南川页岩气井各地层岩石抗钻特性参数随井深变化的剖面图,分析了南川地区各地层岩石抗钻特性参数的分布规律,并据此进行了钻头选型。研究表明,南川页岩气区块梁山组以上地层各特征参数波动较大,说明地层非均质性明显;下部地层变化较为平缓,但从龙马溪组底部开始有逐渐抬升的趋势。依据地层岩石抗钻特性参数,在设计钻头时应选择具有较好耐磨性、5~6刀翼、13~16 mm的高布齿密度的钻头,现场应用表明,所推荐的钻头使用效果良好,机械钻速明显提高。

**关键词:**抗钻特性参数;分布规律;钻头选型;页岩气;南川

中图分类号:TE242

文献标识码:A

## Distribution rule of formation anti-drillability parameters in shale gas block of Nanchuan and its application

ZHU Liang<sup>1,2,3</sup>, LOU Yishan<sup>1,2,3</sup>, SHEN Jianzhong<sup>4</sup>, HE Qing<sup>4</sup>, QIN Du<sup>4</sup>

(1.Leak Resistance and Sealing Technology Research Department, National Engineering Laboratory of Petroleum Drilling Technology, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2.Key Laboratory of Drilling and Production Engineering for Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 3.School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 4.Research Institute of Petroleum Engineering, Sinopec East China Oil and Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210031, China)

**Abstract:** Rock anti-drillability parameters are important basic parameters for making drilling plan and implementing optimal drilling. In this paper, the computational models of formation anti-drillability parameters such as rock compressive strength, rock drillability level value and rock hardness are established through the rock mechanics testing. After that, combined with the logging data and geological data, the profiles of rock anti-drillability parameters varied with the well depth of different strata for shale gas in Nanchuan are also built up. Based on the analysis of its distribution rule, the bits are selected. The study shows that the characteristic parameters of the strata above Liangshan Formation in the shale gas block of Nanchuan fluctuate greatly, which indicates that the stratigraphic heterogeneity is obvious; the lower strata change more gently, but there is a gradual upward trend from the bottom of Longmaxi Formation. According to rock anti-drillability parameters, bits with good wear resistance, 5~6 blades, and 13~16 mm cutting teeth with high density should be selected in bit design. The field application shows that the recommended bit has a good effect and the drilling speed is obviously improved.

**Key words:** parameter of anti-drillability characteristics, distribution rule, bit selection, shale gas, Nanchuan

我国页岩气资源丰富<sup>[1]</sup>,大力推进页岩气勘探开发利用是我国能源结构调整的重要内容。近几年来,我国在四川盆地礁石坝、长宁、威远等地区页岩气勘探开发取得了可喜的成绩<sup>[2]</sup>。地质研究表明,位

于重庆东南部的南川地区拥有可观的页岩气资源量,是国土资源部油气中心首批成立的全国页岩气战略先导实验区<sup>[3-5]</sup>。

自2011年以来,中国石化华东油气分公司在重

收稿日期:2019-08-02。

第一作者简介:朱亮(1980—),男,硕士,副教授,从事岩石力学与钻完井工程技术方面的教学与研究工作。通讯地址:湖北省武汉市蔡甸区大学路111号,邮政编码:430100。E-mail:zhuliang123@yangtzeu.edu.cn

基金资助项目:“十三五”国家科技重大专项“彭水地区岩石抗钻特征参数分析研究”(2016ZX05061-009)。

庆南川地区开展页岩气勘探开发工作。南川页岩气作业区位于重庆的东南部,在地层层序上自上而下依次分布的主要地层为第四系、嘉陵江组、大冶组、长兴组、吴家坪组、茅口组、栖霞组、梁山组、韩家店组、小河坝组、龙马溪组、五峰组、临湘组以及宝塔组等地层,其中龙马溪组为主要页岩含气目的层位<sup>[6-7]</sup>。

通过已钻井资料分析来看,制约该区域钻井提速增效的问题主要表现为钻井周期长,机械钻速偏低,钻采成本高等。因此,针对该区域在钻井工程表现出来的问题,急需解决的是如何进一步提高单井产量和降低工程成本,其中进一步优化钻井技术方案尤为重要<sup>[6-11]</sup>。

钻井提速增效的关键在很大程度上取决于以钻头和钻具为主的钻进工具是否合适,因此,在开展相关研究工作时,其关键核心问题是南川地区的岩石抗钻特性参数分布规律不明确,导致钻头选型针对性不强。故针对以上问题,通过开展岩石力学及岩石抗钻特性参数试验测试,分析岩石抗钻特性参数分布规律,优选出适合南川地区地层特征的钻头,为此类技术提供借鉴。

## 1 岩石抗钻特性参数实验

岩石抗钻特性参数是评价地层特性、进行钻头选型的关键基础参数,为建立岩石抗钻特性参数的计算模型,需要按照国际岩石力学学会标准<sup>[12]</sup>和中华人民共和国石油天然气行业标准<sup>[13]</sup>,加工制备实验岩

心,并开展相关特性参数实验测试。单轴抗压强度在微机控制岩石三轴试验机上进行测试,岩石可钻性在全自动岩石可钻性测试仪上进行测试,岩石硬度在岩石硬度测试仪上进行测试。

利用现场所取岩心,实验测试了5组单轴抗压强度,7组岩石可钻性级值和7组岩石硬度,测试结果见表1、表2。

## 2 抗钻特性参数计算模型的建立

仅靠有限的岩心强度试验难以建立起各井的纵向强度剖面,为此可利用测井资料和岩心单轴抗压强度试验数据的关系模型<sup>[14]</sup>,建立测井资料计算单轴抗压强度的模型如式(1)所示。

$$P_{UCS} = 0.00622(1 - 2\mu_d) \left\{ \frac{1 + \mu_d}{1 - \mu_d} \right\}^2 \rho^2 V_p^4 (1 + 0.78V_{cl}) \quad (1)$$

式中: $P_{UCS}$ 为岩石的单轴强度,MPa; $\mu_d$ 为动态泊松比,无量纲; $\rho$ 为地层密度, $g/cm^3$ ;  $V_{cl}$ 为泥质体积含量,无量纲; $V_p$ 为纵波速度, $km/s$ 。

动态泊松比 $\mu_d$ 可以由下式计算求得:

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

式中: $V_s$ 为横波速度, $km/s$ 。

研究表明,声波与岩石可钻性级值和岩石硬度之间存在良好的相关性,因此,可以通过建立岩石可钻性级值与声波时差之间的关系模型来计算地层岩石可钻性级值和岩石硬度<sup>[15-18]</sup>。利用表2中的岩石可钻性级

表1 南川地区岩石单轴抗压强度测试结果

Table 1 Test results of uniaxial compressive strength for rocks in Nanchuan

序号	深度/m	层位	直径/mm	长度/mm	质量/g	密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	抗压强度/MPa
1	2 708.85	龙马溪组	25.00	54.52	72.018	2.691	37.90
2	3 401.91	龙马溪组	24.92	39.96	52.233	2.663	54.00
3	3 437.70	龙马溪组	24.96	56.24	73.635	2.667	37.25
4	3 798.67	龙马溪组	25.02	44.94	58.138	2.635	19.73
5	3 798.67	龙马溪组	25.00	49.52	63.359	2.606	18.56

表2 南川地区岩石可钻性级值、岩石硬度测试结果

Table 2 Test results of rock drillability grade, rock hardness and plastic coefficient in Nanchuan

序号	井深/m	层位	声波时差/( $\mu s \cdot m^{-1}$ )	硬度/MPa	可钻性级值
1	3 326.68	龙马溪组	234.28	574.27	5.79
2	3 401.91	龙马溪组	230.41	661.66	6.16
3	3 437.70	龙马溪组	217.26	936.31	6.55
4	3 462.68	龙马溪组	226.48	836.43	6.16
5	3 798.67	龙马溪组	210.07	917.58	6.53
6	3 836.73	龙马溪组	230.12	764.65	5.86
7	2 632.55	龙马溪组	238.65	555.54	5.61

值和岩石硬度的测试数据,建立了岩石可钻性级值与声波时差和岩石硬度与声波时差的关系(图1、图2)。

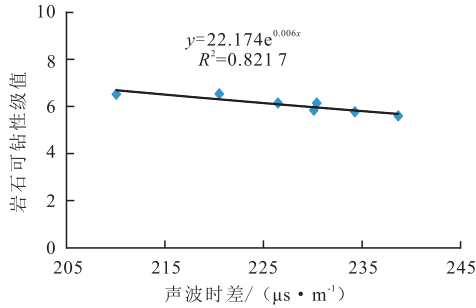


图1 岩石可钻性级值与声波时差的关系

Fig. 1 Relation between rock drillability level value and interval transit time

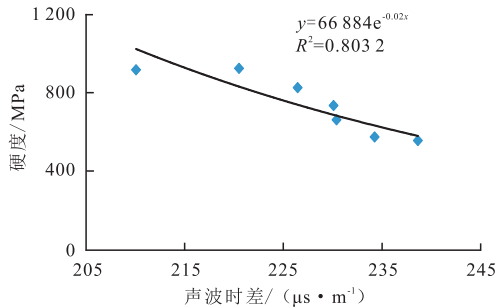


图2 岩石硬度与声波时差的关系

Fig. 2 Relation between rock hardness and interval transit time

由图1和图2回归得到的岩石可钻性级值与声波时差和岩石硬度与声波时差的关系式,即为岩石可钻性级值和岩石硬度的计算模型,分别见式(3)、式(4),由此应用所建立的单轴抗压强度计算模型、岩石可钻性级值计算模型以及岩石硬度计算模型,利用测井数据,即可计算出单轴抗压强度、岩石可钻性级值以及岩石硬度的大小。

$$K_d = 22.174e^{-0.006\Delta t} \quad (3)$$

$$P_y = 66884e^{-0.02\Delta t} \quad (4)$$

式中: $K_d$ 为岩石可钻性级值; $P_y$ 为岩石硬度值; $\Delta t$ 为声波时差, $\mu s/m$ 。

### 3 抗钻特性参数分布规律分析

基于实验数据所建立的单轴抗压强度和岩石可钻性级值的计算模型,利用Y1井、Y2井、Y3井的测井数据,分别计算了这3口井的单轴抗压强度和岩石可钻性级值大小,建立单轴抗压强度和岩石可钻性级值剖面图(图3、图4、图5),并结合IADC地层评价分级对各地层进行了评价。

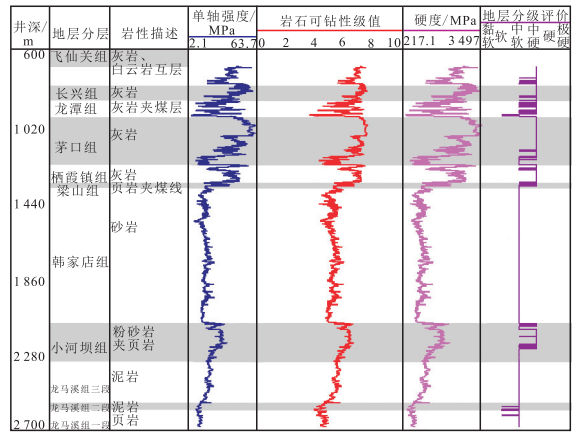


图3 Y1井抗钻特性参数剖面

Fig. 3 Profile of formation anti-drillability parameters of well-Y1

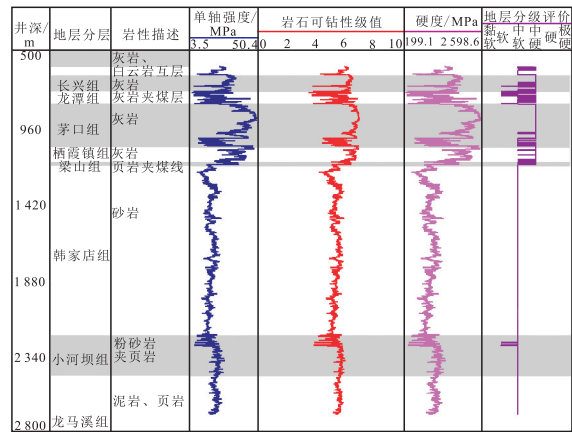


图4 Y2井抗钻特性参数剖面

Fig. 4 Profile of formation anti-drillability parameters of well-Y2

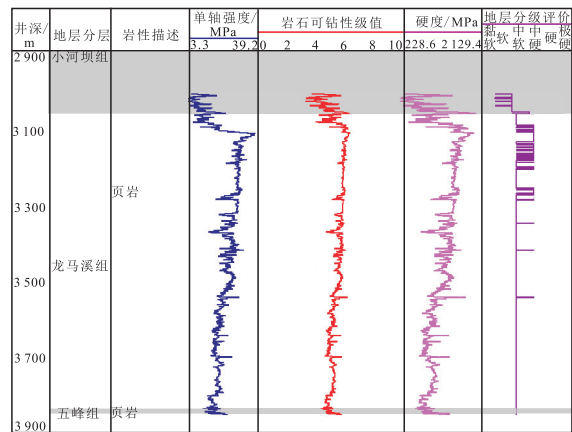


图5 Y3井抗钻特性参数剖面

Fig. 5 Profile of formation anti-drillability parameters of well-Y3

从图3、图4、图5所呈现的岩石抗钻特性参数总体变化趋势来看,梁山组以上地层各特征参数波动较大,说明地层非均质性明显;下部地层变化相对较为平缓,但从龙马溪组底部开始岩石的抗压强度和

可钻性级值有缓慢抬升的趋势。各层位的岩石抗钻特性参数分布见表3。

表3 南川地区各层位岩石抗钻特性参数  
Table 3 Formation anti-drillability parameters of different horizons in Nanchuan

地层	单轴抗压强度/ MPa	岩石可钻性级值	岩石硬度/ MPa
飞仙关组	21.23 ~ 31.39	5.68 ~ 6.30	1 314.73 ~ 1 842.53
长兴组	28.29 ~ 34.89	6.10 ~ 6.45	1 675.23 ~ 2 005.31
龙潭组	17.48 ~ 44.71	5.25 ~ 6.80	1 058.96 ~ 2 419.39
茅口组	36.96 ~ 50.28	6.41 ~ 6.93	2 021.18 ~ 2 598.48
栖霞组	35.75 ~ 47.69	6.44 ~ 6.89	2 009.35 ~ 2 446.16
梁山组	25.62 ~ 36.73	5.73 ~ 6.35	1 361.52 ~ 1 883.64
韩家店组	16.38 ~ 24.53	5.23 ~ 5.82	950.50 ~ 1 384.71
小河坝组	19.59 ~ 26.66	5.64 ~ 6.35	1 108.91 ~ 1 452.40
龙马溪组	20.20 ~ 24.87	5.48 ~ 5.98	1 114.78 ~ 1 546.40

## 4 钻头优选

通过近几年的钻探实践,目前在南川地区各井的井身结构已较为成熟,即:一开封住飞仙关组三段以上地层,二开封住龙马溪组以上易漏易垮地层,三开专打龙马溪组地层。因此,从钻井提速增效的角度来看,依据抗钻特性参数对地层钻进的难易程度进行评价,结合井身结构设计,优选适合地层抗钻特性参数的钻头就是其工程意义所在。

在实际钻进中,南川页岩气作业区的井在二开中下段以及三开段是困扰现场钻井提速的重点井段,就此进行了有针对性的钻头特征功能分析。

### 4.1 二开井段钻头功能特征分析

根据井身结构设计,二开钻遇地层主要包括长兴组、龙潭组、茅口组、栖霞组、梁山组、韩家店组、小河坝组地层。根据表3给出的南川地区各层位岩石抗钻特性参数,二开各地层岩石可钻性级值主要在5~7,硬度在1 000~2 600 MPa;从各参数分布规律上看,栖霞组以上地层较下部地层抗钻特征更强。因此,二开钻进时钻遇的地层总体上属于硬度较高的中—中硬级地层。

该段地层长兴组至茅口组中部岩性以灰岩、泥质灰岩为主,茅口组至韩家店上部岩性以灰岩、泥岩互层为主,韩家店至龙马溪上部地层以灰色泥岩、深灰色粉砂质泥岩为主。地层总体较硬,特别是长兴组、龙潭组、小河坝组地层岩性较致密,研磨性强,地层非均质性较强。根据以上分析,推荐适合

二开地层的钻头类型为PDC钻头,该类PDC钻头功能在设计 and 优选时应考虑如下特性:①具有较好的耐磨性、抗震、保径性能;②刀翼数:5~6个;③切削齿:13~16 mm;④较高的布齿密度。

对于小河坝组地层,可钻性级值达到了5~6级,具有很强的抗钻特性,同时现场使用钻头磨损较大,故该地层应属于高研磨性的难钻地层。对于该类地层应用牙轮钻头,由于地层硬度高,容易导致牙轮齿崩断,如果采用PDC钻头,由于其高研磨性,也容易导致切削齿磨损严重。综合考虑该地层特性,可选择牙轮PDC混合钻头。

### 4.2 三开井段钻头功能特征分析

三开井段主要钻遇龙马溪组地层。从三开地层岩石抗钻特性参数可以看出(表3),龙马溪地层岩石可钻性级值主要在5~6,硬度主要在1 000~1 500 MPa,由此可以认为三开钻进时钻遇的地层总体上属于中等硬度的中级地层。根据以上分析,并考虑井眼轨迹和动力钻进方式,推荐适合三开地层的钻头类型为PDC钻头。设计适合三开地层的PDC钻头功能特点为:①具有较好的耐磨性、抗震、保径性能;②浅内锥设计,定向稳定;③刀翼数:5~6个;④切削齿:13~16 mm;⑤水力设计利于井底清洗。

## 5 应用分析

Y4井是一口位于川东高陡褶皱带万县复向斜平桥背斜的水平井,设计井深4 979.65 m,实际完钻井深5 303 m,该井水平段长1 415 m,完钻层位为龙马溪组。

该井二开段(635~3 414 m)钻遇的地层为飞仙关组、长兴组、龙潭组、茅口组、栖霞组、梁山组、韩家店组、小河坝组地层。根据前述研究,推荐适合该段地层特性的钻头为KSD1663DRT、KPM1663DST,该类钻头为6刀翼、16 mm切削齿的钻头,同时具有较高的布置密度。实钻数据表明该井在二开地层的平均机械钻速为7.29 m/h。

该井三开段(3 414~5 303 m)钻遇的地层为龙马溪组地层。该井段实际使用的钻头为史密斯的SF55H钻头,该钻头为6刀翼、16 mm切削齿、具有大排屑槽、具有大过流面积的钻头,有利于清洗井底岩屑,符合该段地层特性,实钻该段地层的平均机械钻速为12.16 m/h。

综合Y4井的整体情况,全井机械钻速达到了11.67 m/h,钻井周期为58.17 d,这2个指标均创造了2018年中国石化华东油气分公司在南川页岩气钻井施工的纪录。

## 6 结论与认识

1) 由于重庆南川页岩气藏在特征上有别与四川盆地的其他页岩气藏,因此,探索形成一套适合重庆南川页岩气安全高效的钻探开发技术非常重要和关键。

2) 重庆南川页岩气区块各地层按照地层岩石抗钻特性参数的大小进行综合分级评价表明,该地区地层从浅部到深部总体上属于中软—中硬的级别。

3) 通过Y4井的现场应用表明,根据地层岩石抗钻特性参数进行钻头选型和优化,是增强钻头结构功能特征对地层的适应性,发挥钻头破岩效率,提高机械钻速的关键,也是开展地层岩石抗钻特性参数分析研究的工程意义所在。

4) 考虑到重庆南川地区地质构造的特殊性,结合地质构造要素精确描述地层岩石抗钻特性参数的空间分布规律是今后需要做的一项很重要的工作,可以为进一步优化井身结构和井眼轨迹提供依据。

### 参考文献

- [1] 路保平.中国石化页岩气工程技术进步及展望[J].石油钻探技术,2013,41(5):1-8.
- [2] 臧艳彬,百彬珍,李新芝,等.四川盆地及周缘页岩气水平井钻井面临的挑战与技术对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),

2014,41(5):20-24.

- [3] 郭岭.渝东南地区志留系龙马溪组黑色页岩沉积特征及其页岩气意义[D].北京:中国地质大学(北京),2012.
- [4] 方志雄,何希鹏.渝东南武隆向斜常压页岩气形成与演化[J].石油与天然气地质,2016,37(6):819-827.
- [5] 高玉巧,何希鹏,李建青,等.渝东南地区常压页岩气勘探研究进展[J].吉林大学学报:地球科学版,2015,45(S1):1515.
- [6] 袁明进,王彦祺.彭水区块页岩气水平井钻井技术方案优化探讨[J].钻采工艺,2015,38(5):28-31.
- [7] 龙志平,王彦祺,周玉仓,等.平桥南区页岩气水平井钻井优化设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(12):34-37.
- [8] 张锦宏.彭水区块页岩气水平井钻井关键技术[J].石油钻探技术,2013,41(5):9-15.
- [9] 姜政华,童胜宝,丁锦鹤.彭页HF-1页岩气水平井钻井关键技术[J].石油钻探技术,2012,40(4):28-31.
- [10] 龙志平,王彦祺,周玉仓.隆页1HF页岩气井钻井关键技术[J].石油钻探技术,2016,44(2):16-21.
- [11] 陈安明,龙志平,周玉仓,等.四川盆地外缘常压页岩气水平井低成本钻井技术探讨[J].石油钻探技术,2018,46(6):9-14.
- [12] 楼一珊,金业权.岩石力学与石油工程[M].北京:石油工业出版社,2006:27-39.
- [13] SY/T 5426—2016.石油天然气钻井工程岩石可钻性测定与分级[S].北京:石油工业出版社,2016.
- [14] 邓金根,程远方,陈勉,等.井壁稳定预测技术[M].北京:石油工业出版社,2008:45-55.
- [15] 赵军,蔡亚西,林元华.声波测井资料在岩石可钻性及钻头选型中的应用[J].测井技术,2001,25(4):305-307.
- [16] 邹德永,陈永红.利用声波时差资料确定岩石可钻性的研究[J].石油钻采工艺,1996,18(6):27-30.
- [17] 杨进,高德利,郑全方,等.岩石声波时差与岩石可钻性的关系及其应用[J].钻采工艺,1998,21(2):1-3.
- [18] 李二师.利用岩屑检测地层岩石力学参数的方法与实验研究[D].成都:西南石油大学,2016.

(编辑 尹淑容)

## 《油气藏评价与开发》2020年专刊征稿启事

为了进一步办出期刊特色,促进油气勘探开发成果的及时转化,2020年筹划出版页岩气、缝洞型油气藏、CO<sub>2</sub>驱油提高采收率、煤层气等方面的主题专刊、专栏。欢迎从事相关研究的广大作者和读者撰写高质量论文投稿。

**内容要求:**页岩气、缝洞型油气藏、CO<sub>2</sub>驱油提高采收率、煤层气等油气勘探开发以及配套工程工艺技术研究最新成果。

**论文要求:**论文格式参见官网投稿指南,基金项目支持的论文优先录用。

**投稿要求:**请登陆期刊官方网站投稿。 **网址:**http://red.magtech.org.cn

**论文提交截止时间:**缝洞型油气藏 2019年12月

页岩气、CO<sub>2</sub>驱油提高采收率、煤层气 2020年2月

**联系人:**李颖洁

**联系电话:**15895894582

《油气藏评价与开发》编辑部

2019年10月