

文章编号: 0253-2697(2024)09-1432-11 DOI:10.7623/syxb202409010

岩石可钻性分级标准的改进建议

石祥超 陈 帅

(西南石油大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室 四川成都 610500)

摘要: 岩石可钻性分级是指导钻井工艺技术优化、提高钻井效率的重要依据,对推动钻井工程技术进步具有重要意义。在过去几十年,岩石可钻性分级标准不断完善,但随着工业的进步和钻井深度的不断增加,岩石可钻性分级标准也逐渐与钻井工业技术的进步不相适应,存在难以区分难钻地层、难以指导钻井工艺技术优化等问题。因此,有必要对可钻性分级方法进行改进以便适应当前和未来技术的发展。通过回顾岩石可钻性分级方法的发展历史及其局限性,开展了大量覆盖三大类岩性的可钻性试验并进行统计分析。分析结果表明,不能依据可钻性测试结果的统计分布情况建立分级标准,两种微钻头测试的结果相关性较差,PDC微钻头可钻性测试结果可重复性较好,作为可钻性测试方法更科学;通过对岩石可钻性计算模型进行讨论,建议未来可钻性的分级标准应将区分硬地层为重要目标进行改进;针对PDC微钻头和牙轮微钻头提出了可钻性指数概念及计算方法;建议将PDC微钻头有效钻进时间0~60s、60~360s、360~600s和大于600s分别归为“软”、“中下—中—中上”、“硬下—硬—硬上”和“极硬”,可钻性指数分别对应0~10、10~60、60~100和大于100;建议将牙轮微钻头有效钻进时间0~40s、40~280s、280~400s和大于400s分别归为“软”、“中下—中—中上”、“硬下—硬—硬上”和“极硬”,可钻性指数分别对应0~10、10~70、70~100和大于100。

关键词: 钻井工程; 岩石; 可钻性; 分级; 可钻性指数; PDC微钻头; 牙轮微钻头

中图分类号: TE21

文献标识码: A

Suggestions for improving the grading standards of rock drillability

Shi Xiangchao Chen Shuai

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Sichuan Chengdu 610500, China)

Abstract: The grading of rock drillability can provide an important basis for guiding the optimization of drilling technology and improving drilling efficiency, which is of great significance to promote the progress of the engineering technology of drilling. In the past few decades, the standards for grading rock drillability have been continuously improved. However, with the advancement of industry and the continuous increase of drilling depth, the standards for grading rock drillability have gradually become unapplicable to the increasingly advanced drilling technology; moreover, there are certain difficulties in identifying the strata that are difficult to drill and guiding the optimization of drilling technology. Therefore, it is necessary to improve the drillability grading methods to adapt to the development of current and future technologies. The author reviewed the development history and limitations of the methods for grading rock drillability, conducted a large number of drillability tests covering three types of lithology, and performed statistical analysis. The analysis results indicate that the grading standards can not be established based on the statistical distribution of drillability test results. There is a poor correlation between the test results of the two types of microbits. The drillability test results of PDC microbits has good repeatability, so it is more scientific to use PDC bit for the drillability test method; by exploring the calculation model of rock drillability, it is suggested that in the future, the standards for grading drillability should be improved in terms of identifying hard strata; the concept and calculation methods of drillability index are proposed for PDC microbit and roller microbit; it is recommended to classify the effective drilling time of PDC microbits 0-60 s, 60-360 s, 360-600 s, and >600 s as being “soft”, “medium-lower + medium + medium-upper”, “hard-lower + hard + hard-upper”, and “extremely hard”, respectively, corresponding to the drillability indexes of 0-10, 10-60, 60-100, and >100; it is recommended to classify the effective drilling time of roller microbits 0-40 s, 40-280 s, 280-400 s, and >400 s as being “soft”, “medium-lower + medium + medium-upper”, “hard-lower + hard + hard-upper”, and “extremely hard”, respectively, corresponding to the drillability indexes of 0-10, 10-70, 70-100, and >100;

Key words: drilling engineering; rock; drillability; grading; drillability index; PDC microbit; roller microbit

引用: 石祥超, 陈帅. 岩石可钻性分级标准的改进建议[J]. 石油学报, 2024, 45(9): 1432-1442.

Cite: SHI Xiangchao, CHEN Shuai. Suggestions for improving the grading standards of rock drillability[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(9): 1432-1442.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 52474009)和中国石油-西南石油大学创新联合体项目(2020CX040103)资助。

第一作者及通信作者: 石祥超, 男, 1981年7月生, 2011年获西南石油大学博士学位, 现为西南石油大学石油与天然气工程学院教授、博士生导师, 主要从事石油工程岩石力学方面的教学与科研工作。Email: sxcdream@163.com

岩石可钻性分级是指导钻井工艺技术优化,提高钻井效率的重要依据,对推动钻井工程技术进步具有重要意义。在过去几十年,岩石可钻性分级标准不断完善,但随着工业的进步和钻井深度的不断增加,岩石可钻性分级标准也逐渐与钻井工业技术的进步不相适应,存在难以区分难钻地层、难以指导钻井工艺技术优化等问题。因此,有必要对可钻性分级方法进行改进以便适应于当前和未来技术的发展。

1 岩石可钻性标准发展历程

岩石可钻性分级作为钻头选型及钻井参数优选最重要的参数之一,在油气勘探领域一直是被关注的热点。White^[1]在1969年提出岩石可钻性的概念,即钻头破碎岩石的难易程度。尹宏锦^[2]将Rollow提出的牙轮微钻头测试岩石可钻性的方法引入中国,并在1982年对大批岩石的可钻性实验结果统计分析后提出将其作为岩石可钻性的计算方法,并建议将可钻性级值分为10级^[3]。励美恒等^[4]基于自主研发的微钻实验装置发现,岩石可钻性比单一岩石物理机械性质能更好表征岩石抵抗破碎的能力。尹宏锦^[5]提出了运用概率原理处理非均质地层岩石可钻性的新方法,成为岩石可钻性行业标准(第1版)(SY/T 5426—1991)^[6]的主要参考文献。1991年版岩石可钻性行业标准的分级依据就来源于尹宏锦在1982年使用牙轮微钻头测试的324组岩石样本。随着地层深度的增加和钻遇的岩性更复杂,牙轮钻头在高研磨地层的磨损严重,PDC钻头得到了更多的应用。因此,邹德永等^[7]引入PDC微钻头评价岩石可钻性,并在岩石可钻性行业标准第2版(SY/T 5426—2000)^[8]中引入了PDC微钻头测试可钻性的方法,但牙轮微钻头和PDC微钻头均延续使用1991年版岩石可钻性行业标准(SY/T 5426—1991)提出的分级方法。21世纪以来,许多学者针对钻井参数^[9-13]、钻头类

型^[14-15]、井底环境^[16-21]、岩石物理机械性质^[22-23]对可钻性的影响规律及机理开展了深入研究,对推动中国钻井行业的提速、降本增效工作提供了重要的理论和技术支持。随着中国钻井深度的不断突破,可钻性分级方法越来越不能满足钻井工艺技术的发展,严重制约了超深层油气勘探开发的进程。为此,2016年的第3版岩石可钻性行业标准(SY/T 5426—2016)^[24]针对坚硬岩石提出了PDC微钻头测试可钻性的新方法,并更新了PDC微钻头的分级方法(表1)。2016年版的岩石可钻性行业标准通过增加测试钻压的方法解决了无法测得坚硬岩石可钻性的问题,但不同钻压下测试得到的结果如何进行对比还缺少充足依据。2023年,笔者团队^[9]在现有岩石可钻性测试方法的基础上对两种微钻头结构和钻进参数提出了改进及优化建议。但岩石可钻性分级方法仍然面临着3点不可忽视的问题:①可钻性分级标准过于粗略,指导钻井工程设计和实践可能导致较大工程误差。由于是对相同钻深(牙轮微钻头为2.4 mm、PDC微钻头为3.0 mm)记录钻进时间 t ,可钻性级值为 $K_d = \log_2(t)$ 。由此可见,每一级之间钻进时间翻倍,在标准中把可钻性级值8~10归为Ⅲ(硬)级类别,这通常会误导工程师认为8~10属于一类,工艺工具相同则提速效果相同,但实际却差别悬殊,每相隔一级,难钻程度提高了一倍。②Ⅰ(软)级、Ⅱ(中)级、Ⅲ(硬)级分级界限不再适于当前技术的发展。随着近几十年的技术进步,软地层的钻井提速问题已基本解决,中等硬度的问题也得到很大程度的解决,应适当将部分中等硬度的地层划分到软地层范围,调整Ⅰ(软)级、Ⅱ(中)级、Ⅲ(硬)级分级界限,以适应当前技术的发展。③目前的分级数值不适用于机械钻速方程的建立。使用取对数的方式进行分级,岩石可钻性每相差一级,其钻进难度翻倍。因此,不能客观反映地层难钻程度,从而影响机械钻速方程的预测精度。

表1 岩石可钻性分级对照

Table 1 Comparison of rock drill ability grading

分级界限	级别	级值 K_d	钻进时间/s		
			牙轮钻头	PDC钻头	
				1级钻压(500 N)	2级钻压(1000 N)
Ⅰ(软)	1	<2	<2 ²	<2 ²	
	2	2~3	2 ² ~2 ³	2 ² ~2 ³	
	3	3~4	2 ³ ~2 ⁴	2 ² ~2 ³	
	4	4~5	2 ⁴ ~2 ⁵	2 ³ ~2 ⁴	
Ⅱ(中)	5	5~6	2 ⁵ ~2 ⁶	2 ⁴ ~2 ⁵	
	6	6~7	2 ⁶ ~2 ⁷	2 ⁵ ~2 ⁶	
	7	7~8	2 ⁷ ~2 ⁸	2 ⁶ ~2 ⁷	
Ⅲ(硬)	8	8~9	2 ⁸ ~2 ⁹	2 ⁵ ~2 ⁶	
	9	9~10	2 ⁹ ~2 ¹⁰	2 ⁶ ~2 ⁷	
	10	≥10	≥2 ¹⁰	≥2 ⁷	

针对目前可钻性分级方法存在问题,笔者通过微钻试验得到覆盖自然界三大类(沉积岩、火成岩和变质岩)岩性的可钻性方法,并充分考虑分级方法对当前钻井技术发展的适用性和实用性,对当前岩石可钻性的分级标准提出改进建议。

2 实验设备及测试方案

依托西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室自主研发的岩石可钻性试验设备开展研究(图1)。该设备可以实现钻压 $0\sim 10\text{ kN}$ 任意可调,转速为 $0\sim 200\text{ r/min}$ 任意可调,破碎后岩屑通过重力

掉落避免重复破碎,数据可以实现以 0.005 s 为间隔实时采集,可以更换PDC微钻头和牙轮微钻头,能够满足PDC微钻头和牙轮微钻头高精度测试岩石可钻性的要求。岩样尺寸为 $80\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ (高度 \times 直径),测试样品表面无大于 0.5 mm 裂缝,样品内部经声波测试仪检测较为均质。参照SY/T 5426—2000^[8],使用PDC微钻头测试了325组可钻性,使用牙轮微钻头测试了125组可钻性。岩样覆盖了沉积岩、火成岩和变质岩,其中沉积岩覆盖了泥岩、页岩、砂岩、砾岩和碳酸盐岩,火成岩覆盖了花岗岩、玄武岩、安山岩和英安岩,变质岩覆盖了砂卡岩、片麻岩、板岩和大理岩。

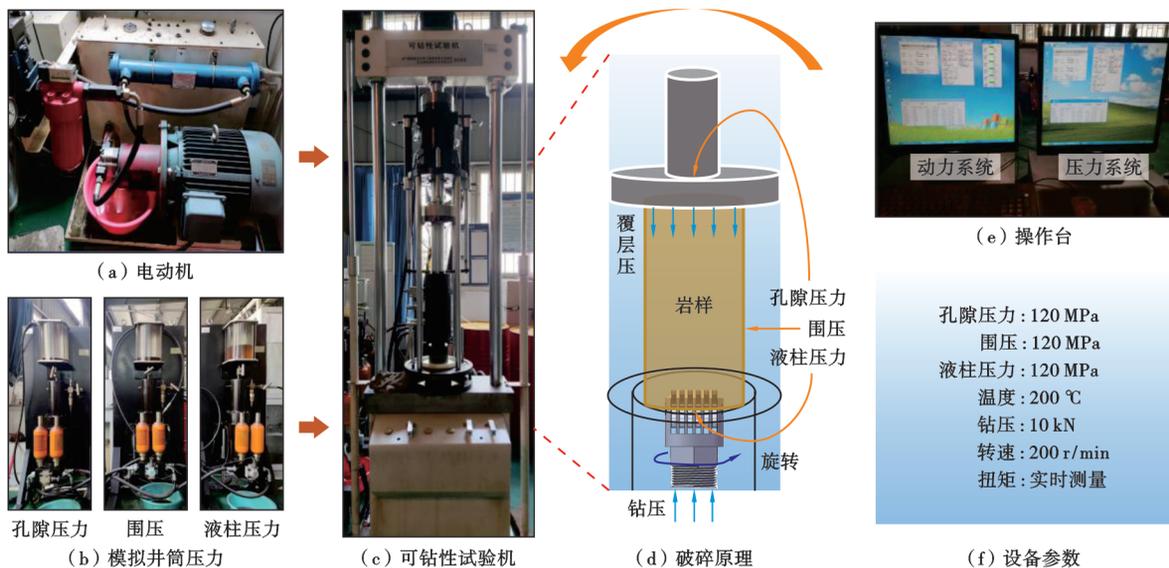


图1 岩石可钻性试验设备

Fig. 1 Rock drill ability test equipment

3 岩石可钻性的测试结果及统计规律

不同岩石的成因差异显著,沉积岩与物质的侵蚀、搬运、沉积和后续的压实和胶结过程有关,即使同为沉积岩,还有成分、颗粒的大小及结构、胶结物质的类型和含量、孔隙度和渗透率、裂隙等差异。火成岩主要与岩浆的冷却和固化有关,岩石的可钻性也受到岩浆的化学成分、矿物的晶体大小以及形状和排列方式的影响。变质岩则涉及已存在岩石在高温高压环境下发生物理和化学反应,原始岩石的类型和变质的程度决定了各岩性力学特征的差异。由图2可以发现,岩性对可钻性的影响不容忽视,具体表现在3个方面:①不同岩性的可钻性级值分布范围均较为广泛;②火成岩的可钻性级值要普遍高于沉积岩和变质岩的可钻性级值;③沉积岩中可钻性级值的平均值表现为碳酸盐岩 $>$ 页岩 $>$ 砂岩 $>$ 砾岩 $>$ 泥岩。岩石可钻性的分布范围受到岩性的影响,因此,基于沉积岩为主的可钻性测试结果

所得到的分级方法来指导现阶段钻井工程设计存在严重局限性。

樊翼安等^[25]使用PDC微钻头测得的岩石可钻性符合正态分布,其样本数量为333件,岩性主要包含泥岩、页岩、砂岩和白云岩。通过生成符合均值为4.3464和方差为1.987的正态分布随机数来还原数据,得到了樊翼安等^[25]测试得到的333组PDC可钻性级值,可钻性在 $0\sim 10$ 级的分布见图3(a)。尹宏锦^[3]使用牙轮微钻头测试了324组可钻性数据,测试的岩性中主要包括泥岩、砂岩和石灰岩,可钻性数据呈现典型的正态分布规律,平均值为5.4438,方差为1.750,通过生成符合正态分布的随机数还原数据[可钻性在 $0\sim 10$ 级的分布详见图3(b)]。笔者在测试所得的325组PDC微钻头可钻性结果和125组牙轮微钻头可钻性结果中均没有发现正态分布的规律。其中,可钻性在 $0\sim 10$ 级的分布详见图3(c),可钻性在 $0\sim 10$ 级的分布详见图3(d)。如图3所示,笔者使用PDC微钻头测试的可钻性中

I(软)级、II(中)级、III(硬)级所占的比例分别为49.54%、35.69%、14.77%，相较于文献[25]测试结果中的I(软)级比例减少了12.32%，II(中)级的比例增加了6.56%，III(硬)级的比例增加了5.76%。笔者使用牙轮微钻头测试的可钻性中I(软)级、II(中)级、III(硬)级所占的比例分别为35.2%、53.6%、11.2%，相

较于文献[3]测试结果，I(软)级的比例减少了5.41%，II(中)级的比例增加了1.44%，III(硬)级的比例增加了3.79%。由此看出，测试结果的分布特征依赖于样本的选取，中等硬度的样本居多，会导致测试结果呈现正态分布。因此，不应采用测试结果数据的分布特征作为可钻性分级的依据。

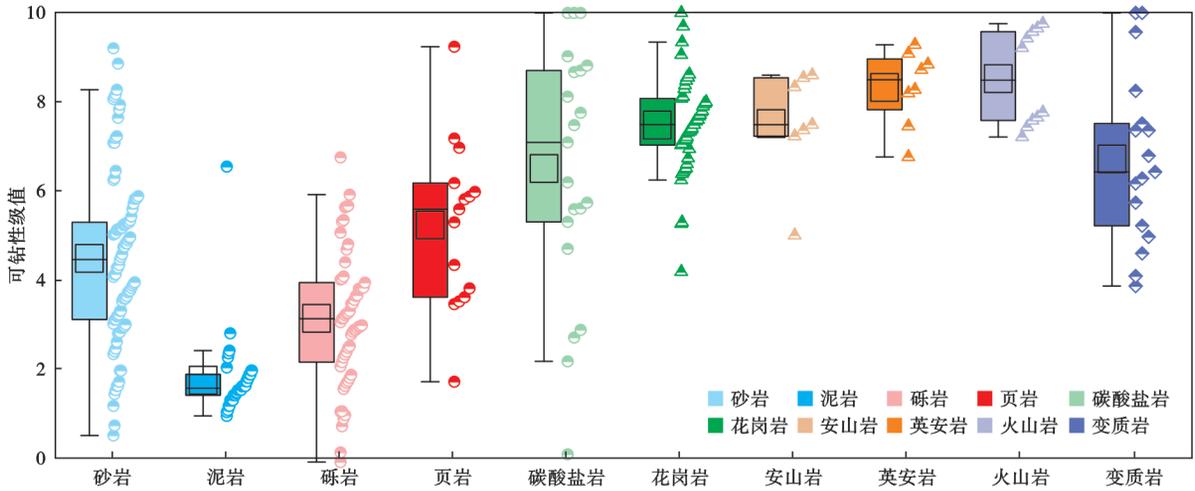


图2 不同岩性可钻性级值分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of drillability grade of different lithologies

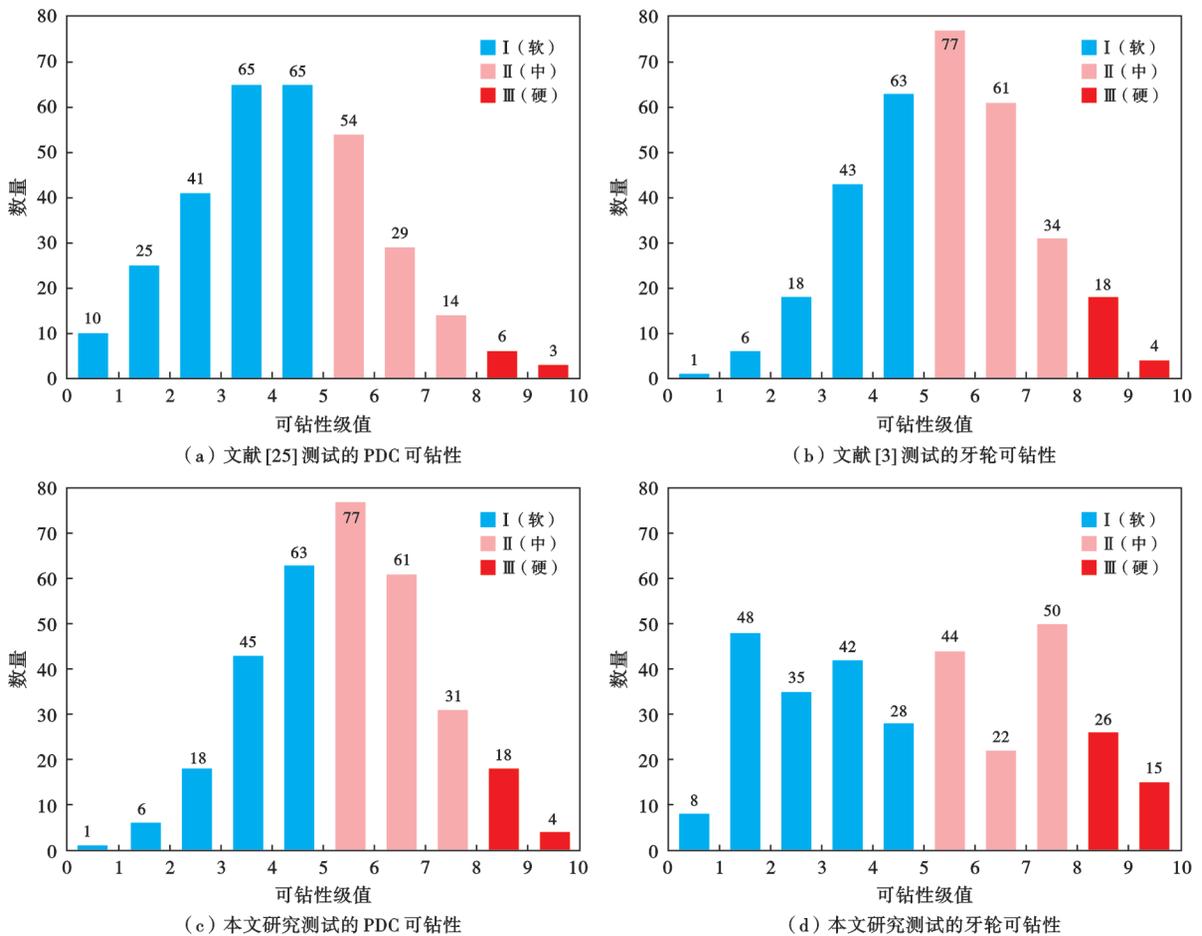


图3 PDC微钻头和牙轮微钻头可钻性

Fig. 3 Drillability of PDC microdrills and roller microdrills

4 牙轮和 PDC 可钻性的一致性讨论

尹宏锦等^[26]认为,引起岩石可钻性变化的真正原因是岩石的成分与结构,使用不同试验工具及条件测试得到的结果所反映的岩石破碎难易性规律完全一致,无需对 PDC 钻头等各类破岩工具都制定出相应的地层可钻性分级表。但笔者认为,PDC 微钻头的破岩方式主要是剪切作用,而牙轮微钻头主要依赖于冲击和压碎破岩方式。微钻头破岩机理的差异和岩石非均

质性的特征使两种微钻头测试得到的结果很难高度一致。樊冀安等^[25]使用 PDC 微钻头和牙轮微钻头测试了大量岩石的可钻性。由该测试数据进行线性拟合分析[图 4(a)]可以看出,PDC 微钻头和牙轮微钻头可钻性的相关系数 R^2 为 0.75,说明两种测试结果存在一定的相关性。由有效钻进时间的拟合结果[图 4(b)]可以看出,两者的相关性较差,相关系数 R^2 为 0.67,说明两种测试方法得出的结果一致性更差,尤其对高钻时的硬地层,表现出更大的离散性。

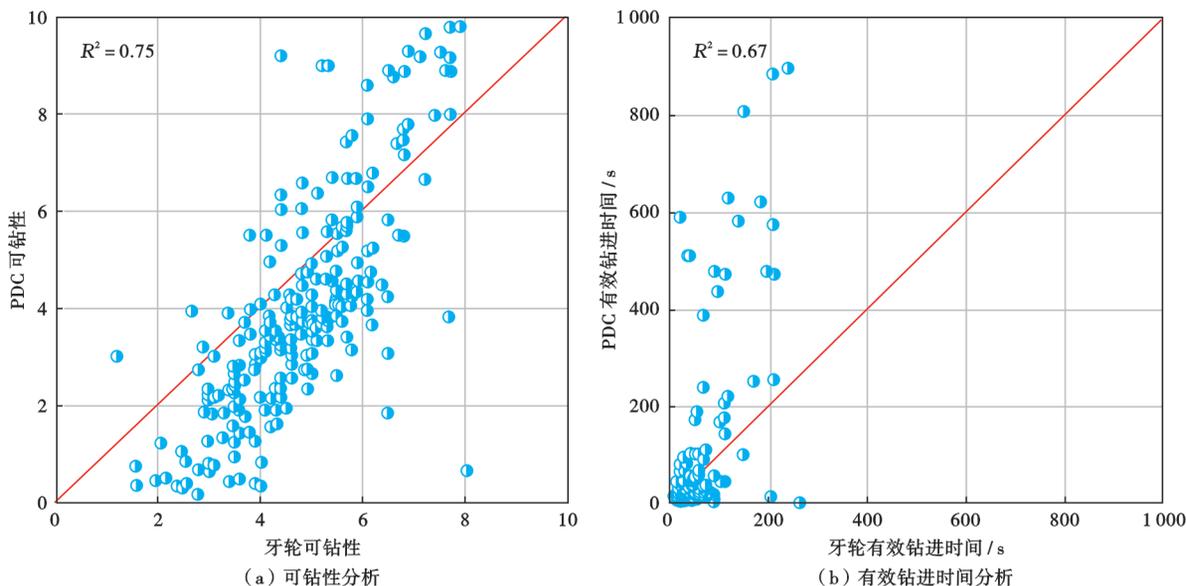


图 4 PDC 微钻头测试结果与牙轮微钻头测试结果的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between the test results of PDC microbits and roller microbits

为了进一步讨论牙轮和 PDC 微钻头可钻性的一致性,笔者使用两种微钻头对不同岩石开展了测试。鉴于 PDC 微钻头变钻压测试结果无法在同一个尺度上进行分析,采用 2000 年版岩石可钻性测定及分级方法^[8]作为两种微钻头岩石可钻性的测试方法,牙轮微钻头则采用了改进后的微钻头结构^[9]。试验结果发现,在排除微钻头磨损所带来的影响后,PDC 微钻头和牙轮微钻头对不同岩石中的破岩效率有显著差异(图 5)。其中,PDC 微钻头在测试飞仙关组灰岩[图 5(a)]、须家河组砂岩[图 5(d)]、泥岩[图 5(e)]和花岗岩[图 5(f)]时得到的有效钻进时间要显著低于牙轮微钻头所测得结果,PDC 微钻头有效钻进时间分别仅是牙轮微钻头的 26.83%、31.67%、44.67%和 45.65%。而在测试金宝石组砂岩[图 5(b)]和茅口组灰岩[图 5(c)]时,牙轮微钻头测试得到的有效钻进时间要低于 PDC 微钻头测试得到的结果,分别仅为 PDC 微钻头有效钻进时间的 42.06%和 69.88%。进一步说明了牙轮和 PDC 微钻头测试可钻性的一致性

较差。

岩石具有非均质强的特征,多次测试得到的岩石可钻性相差太大会对地层可钻性评价造成困扰。为了更进一步评判测试数据的一致性和测试的可重复性,定量化表征的离散度为:

$$S = \sum (x - \bar{x})^2 / n \quad (1)$$

笔者团队使用 PDC 微钻头和牙轮微钻头对不同岩石进行 3 次重复性测试,测试结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,PDC 微钻头和牙轮微钻头的离散程度差异很大,其中 PDC 微钻头测试结果的最大离散度仅为 0.278,平均离散度为 0.067;牙轮微钻头测试结果的最大离散度为 2.901,平均离散度为 0.662。从 3 次重复性测试结果看,PDC 微钻头测试结果的离散性更小,测试结果的可重复性和一致性更好。鉴于 PDC 微钻头和牙轮微钻头测试结果的差异性显著,不建议采用牙轮微钻头的测试结果用于岩石可钻性的分级,但由于牙轮测试方法仍然具有较广的应用范围,仍将对两种分级方法做进一步改进建议。

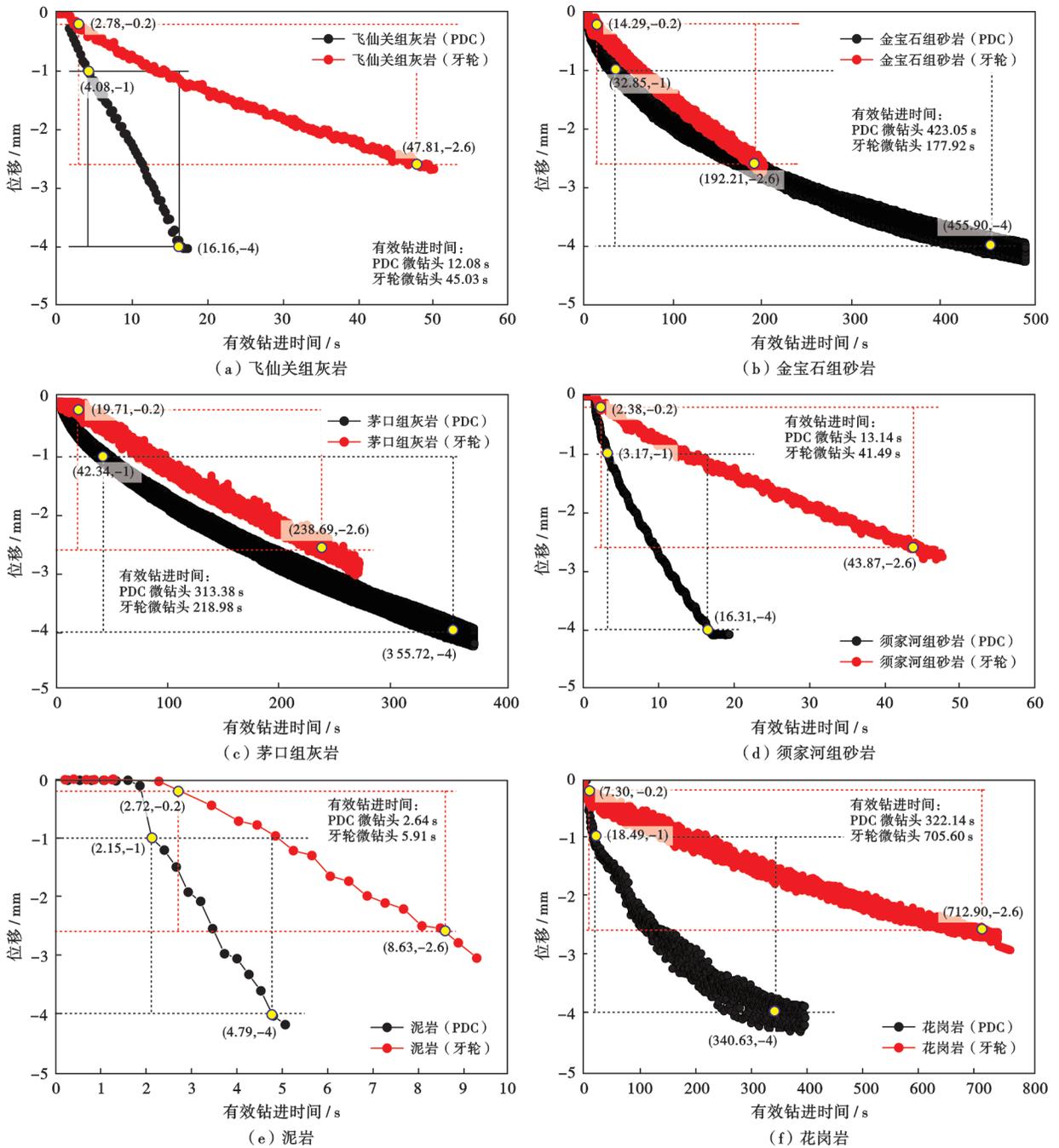


图5 两种微钻头试验结果对比

Fig. 5 Comparison of the test results of two types of microbits

5 岩石可钻性分级标准存在的主要问题

牙轮微钻头通过微钻试验得到钻进深度在 0.2~2.6 mm 内的有效钻进时间后,岩石可钻性(2016 年版)标准计算式为:

$$K_d = \log_2(t) \quad (2)$$

PDC 微钻头通过微钻试验得到钻进深度在 1~4 mm 的有效钻进时间后,岩石可钻性(2016 年版)标准计算式为:

$$K_d = \log_2(t) + G_i \quad (3)$$

当量转化级值为:

$$G_i = 2^{i-1} - 1 \quad (4)$$

可钻性是表征岩石抵抗破碎能力的指标。按照岩石可钻性的定义来看,计算得到的可钻性级值不应该为负值。无论是式(2)还是式(3)和式(4),在理论上均存在可钻性级值为负值的可能性,即有效钻进时间小于 1 s,并且在实际试验过程中也发现了部分泥岩可钻性好、级值为负值的情况。

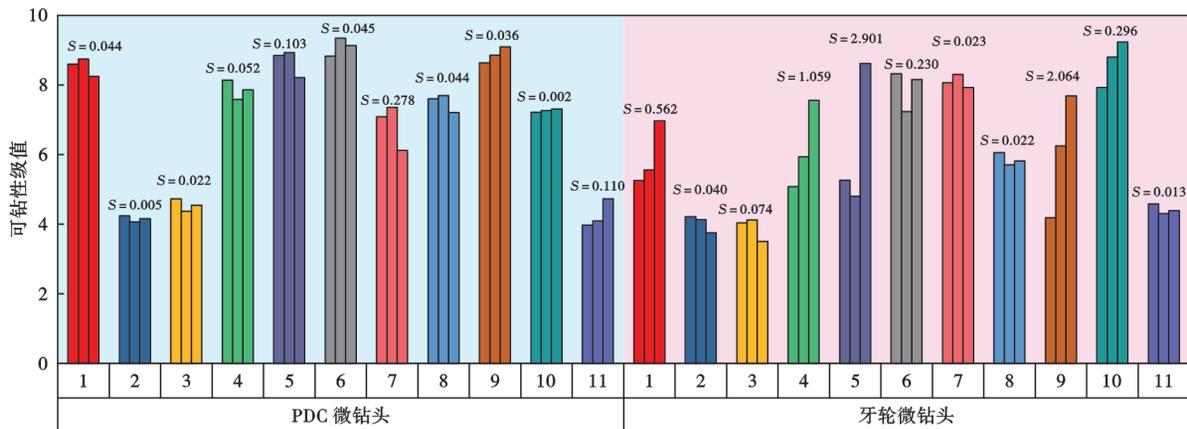


图6 PDC微钻头和牙轮微钻头可钻性重复性结果对比

Fig. 6 Comparison of the drillability repeatability results between PDC microbits and roller microbits

2016版岩石可钻性标准中把PDC微钻头按照增加钻压的方式重新进行了分级。重新分级的主要依据是钻压增加一倍,有效钻进时间减少50%。笔者团队针对玄武岩、花岗岩、灰岩和砂岩开展了不同钻压下的微钻试验^[9],测试结果如图7所示。对比可钻性级值的差异[图7(a)]发现,0.5 kN钻压比1.0 kN钻压测试得到的玄武岩、花岗岩、灰岩和砂岩平均可钻性级值分别高2.03、4.28、1.11和1.23,不同钻压测试得到的可钻性级值差异显著。对比有效钻进时间的差异[图7(b)]发现,0.5 kN钻压比1.0 kN钻压测试得

到的玄武岩、花岗岩、灰岩和砂岩平均有效钻进时间分别高309%、1821%、115%和130%。仅有灰岩和砂岩的测试结果相对符合分级依据中“钻压增加一倍会导致有效钻进时间减少50%”的假设,但玄武岩和花岗岩的测试结果差异较大,与假设不相符合。

综上所述可以得出,钻压增加一倍并不会使PDC微钻头的有效钻进时间减小50%,因此,式(3)所列的计算方法不适用于所有岩性。鉴于钻压对不同岩石钻进速度的敏感性不同,应对目前可钻性分级方法进行改进。

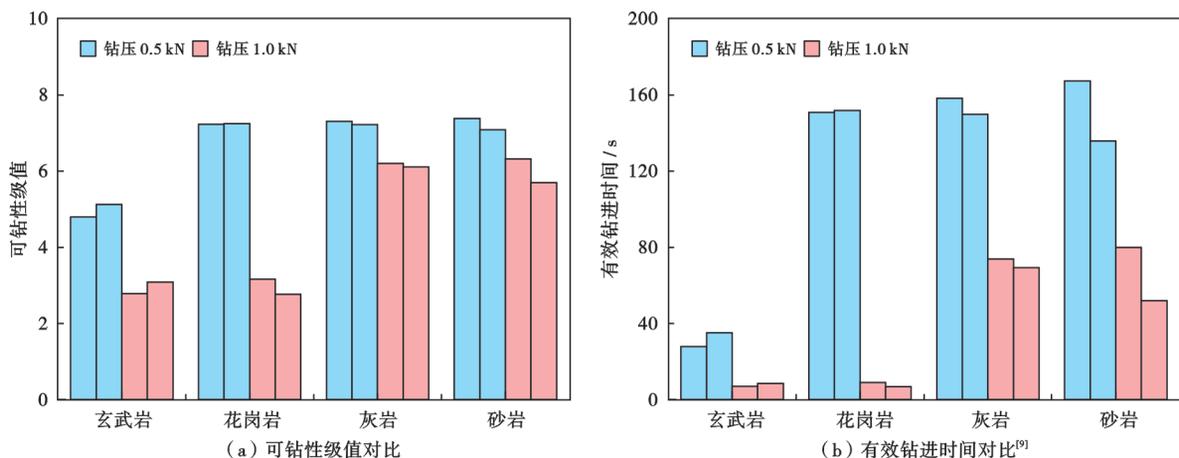


图7 不同钻压下可钻性级值和有效钻进时间对比

Fig. 7 Comparison of drillability grade and effective drilling time under different bit pressures

牙轮微钻头可钻性分级方法存在的另一问题是对Ⅲ(硬)级的分级划分较为粗糙,而对Ⅰ(软)级的分级划分较为精细。牙轮微钻头分级方法把有效钻进时间0~32 s划分了4级,均针对Ⅰ(软)类岩石。Ⅲ(硬)级区间内第8级的有效钻进时间为256~512 s,第9级的有效钻进时间为512~1024 s,有效钻进时间大于1024 s为第10级。可以看出,可钻性级值越大,对应的

有效钻进时间范围越宽。造成的结果是工程师会误以为可钻性级值为9和8的差距要小于7和3的差距。但可钻性级值为9和8的有效钻进时间差距为256 s,而可钻性级值为7和3的有效钻进时间差距仅为120 s。

目前四川盆地^[27-28]和塔里木盆地^[29-30]的钻井深度多数超过7000 m,正在朝着万米深井迈进^[31],分级的依据也需要更新。综上所述,为了试验测试结果在

理论上更符合可钻性的定义,也为了在实际应用中更容易区分硬地层岩石可钻性特征,需要对目前标准中规定的可钻性分级方法及计算模型进行改进。

6 岩石可钻性指数与分级标准改进建议

岩石可钻性分级对指导钻井工程设计和实践具有重要意义,以往3版岩石可钻性分级标准^[6,8,24]对推动中国钻井技术的发展发挥了重要作用。随着钻井技术的提高以及钻井深度的不断突破,结合笔者对两种微钻头测试结果一致性的讨论以及岩石可钻性分级标准

存在的问题,为了使岩石可钻性分级结果可以满足深井超深井钻井提速需求,分级标准有必要做适当的调整。

6.1 PDC微钻头分级方法的改进及优化建议

通过文献[25]和笔者使用PDC微钻头测得的有效钻进时间分布规律(图8)可以发现,文献[25]和笔者测试的数据均集中分布在200s以内;整体数据中多数岩石测得的结果小于600s的比例分别占总数的95.1%和98.5%。因此,区分有效钻进时间在600s以内的岩石可钻性是研究的重点。

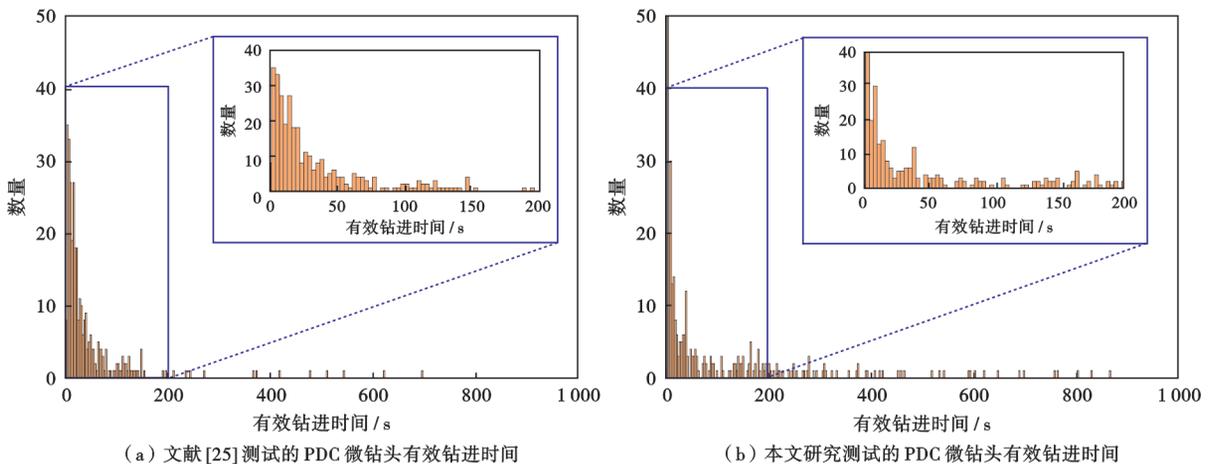


图8 PDC微钻头有效钻进时间分布

Fig. 8 Distribution of effective drilling time of PDC microbits

近年来,中国钻井技术得到了迅猛发展,提速工具和工艺开发成效显著,在I(软)级地层的钻井提速问题得到了很大程度的解决,在II(中)级地层的钻井提速问题也在不断解决。

PDC微钻头重新分级应着重考虑以下方面:①为了确保多数岩石可以被分级结果覆盖,对有效钻进时间按照从小到大排序,取不低于前95%的有效钻进时间为 T_{pmax} 。②为了精细量化分级和使用方便,提出岩石可钻性指数概念,即对 $0 \sim T_{\text{pmax}}$ 进行归一化处理。可钻性计算方法为:

$$K_{\text{pd}} = \frac{100t}{T_{\text{pmax}}} \quad (t \leq 600) \quad (5)$$

计算结果中 K_{pd} 为PDC微钻头岩石可钻性指数,将 T_{pmax} 以内的测试结果分为100级。③有效钻进时间超出 T_{pmax} 的岩石,不对岩石可钻性指数的上限进行限定,以10s间隔为1级,计算方法为:

$$K_{\text{pd}} = 100 + \frac{t-600}{10} \quad (t > 600) \quad (6)$$

综合笔者和文献[25]的测试结果,超过95%的有效钻进时间分别为592.0s和187.4s以内,建议 T_{pmax} 取其最大值600s。

岩石可钻性标准把 $0 \sim 32$ s归为I(软)级、 $32 \sim 256$ s归为II(中)级、大于256s归为III(硬)级,根据目前钻井技术的发展和进步情况,需要对岩石的软硬程度重新定义。考虑到目前钻井过程中软地层的破岩已经不是难题,可以把目前分级方法中归为II(中)级这类岩石划分一部分到I(软)级这一类别。PDC微钻头岩石可钻性按照“软、中、硬”重新划分为“软、中下、中、中上、硬、极硬”(图9)。建议将有效钻进时间 $0 \sim 60$ s归为“软”,可钻性指数对应为 $0 \sim 10$ 。建议将有效钻进时间 $60 \sim 360$ s分别归为“中下”、“中”和“中上”,可钻性指数分别对应为 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 和 $40 \sim 60$ 。把有效钻进时间 $360 \sim 600$ s分别归为“硬下”、“硬”和“硬上”,可钻性指数分别对应为 $60 \sim 70$ 、 $70 \sim 85$ 和 $85 \sim 100$ 。有效钻进时间大于600s归为“极硬”,可钻性指数大于100。

6.2 牙轮微钻头分级方法的改进及优化建议

从文献[3]和笔者测试得到的有效钻进时间分布规律(图10)可以看出,多数岩石测得的有效钻进时间小于400s,比例分别占总数的97.8%和96.0%。牙轮可钻性分级不仅需要区分硬地层岩石抗破碎能力的差异,更需要细分有效钻进时间400s以内岩石的可钻性。

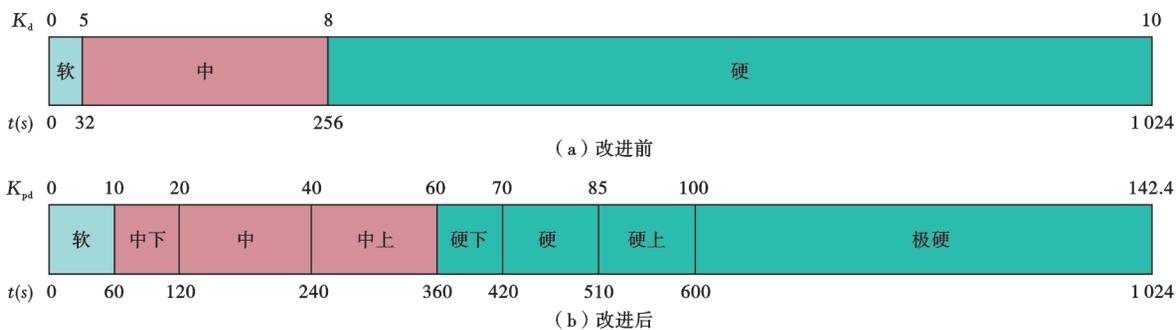


图9 PDC微钻头可钻性指数分级结果

Fig. 9 Drillability index Grading results of PDC microbits

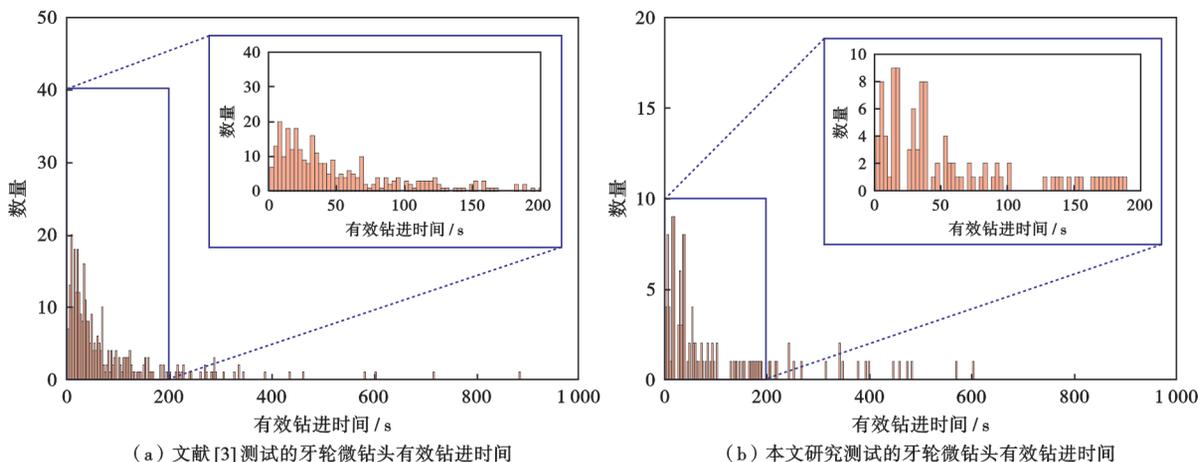


图10 牙轮微钻头有效钻进时间分布

Fig. 10 Distribution of effective drilling time of roller microbits

现有的数据虽未充分显示 PDC 微钻头和牙轮微钻头测试的结果具有显著相关性, 但为便于工程应用的可靠性, 建议牙轮微钻头可钻性分级的原则上应与 PDC 微钻头保持一致。因此, 牙轮微钻头可钻性指数(K_{cd})的计算方法为:

$$K_{cd} = \frac{100t}{T_{cmax}} \quad (t \leq 400) \quad (7)$$

$$K_{cd} = 100 + \frac{t - 400}{10} \quad (t > 400) \quad (8)$$

综合笔者和文献[3]的牙轮微钻头测试结果, 超过

95%的有效钻进时间分别在 398.1 s 和 286.4 s 以内, 建议 T_{cmax} 取其最大值 400 s。牙轮微钻头岩石可钻性指数按照“软、中、硬”重新划分为“软、中下、中、中上、硬、极硬”(图 11)。建议将有效钻进时间 0~40 s 归为“软”, 可钻性指数对应为 0~10。将有效钻进时间 40~280 s 分别归为“中下”、“中”和“中上”, 可钻性指数分别对应为 10~30、30~50 和 50~70。把有效钻进时间 280~400 s 分别归为“硬下”、“硬”和“硬上”, 可钻性指数分别对应为 70~80、80~90 和 90~100。有效钻进时间大于 400 s 归为“极硬”, 可钻性指数大于 100。



图11 牙轮微钻头可钻性指数分级结果

Fig. 11 Drillability index grading results of roller microbits

7 结 论

(1) 通过对岩石可钻性测试结果和分级方法的系统性研究认为,现行的可钻性分级方法存在不适于现在技术发展、分级粗略、一致性较差等问题,建议对其进行改进。

(2) 基于 PDC 微钻头和牙轮微钻头可钻性的相关性分析认为,两者测试结果的一致性较差,PDC 微钻头测试结果的离散性更小,可重复性和一致性更好。

(3) 提出了 PDC 微钻头和牙轮微钻头的可钻性指数概念和计算方法,建议将 PDC 微钻头测试有效钻进时间的 600 s 和牙轮微钻头有效钻进时间的 400 s 作为从“硬”到“极硬”的分界线,对应的可钻性指数为 100,并利用归一化方法将可钻性指数从 0~100 进行细分。

(4) 建议将 PDC 微钻头有效钻进时间 0~60 s 归为“软”,60~360 s 归为“中下”、“中”和“中上”,360~600 s 归为“硬下”、“硬”和“硬上”,大于 600 s 归为“极硬”;建议将牙轮微钻头有效钻进时间 0~40 s 归为“软”,40~280 s 归为“中下”、“中”和“中上”,280~400 s 归为“硬下”、“硬”和“硬上”,大于 400 s 归为“极硬”。

符号注释: S —离散度; x —测试值; \bar{x} —测试平均值; n —测试总数; K_d —可钻性级值; K_{pd} —PDC 微钻头可钻性指数; K_{cd} —牙轮微钻头可钻性指数; T_{pmax} —PDC 微钻头有效钻进时间超过 95% 测试结果的最小值, s; T_{cmax} —牙轮微钻头有效钻进时间超过 95% 测试结果的最小值, s; t —有效钻进时间, s; G_i —当量转化级值; i —钻压级数(第 1 级 $G_i = 0$; 第 2 级 $G_i = 1$; 第 3 级 $G_i = 3$)。

参 考 文 献

- [1] WHITE C G. A rock drillability index[J]. *Rocks & Minerals*, 1969, 44(7): 490.
- [2] 尹宏锦. 石油钻井中地层可钻性的统计分级法[J]. 华东石油学院学报, 1980, 4(2): 24-36.
YIN Hongjin. Statistical classification of the drillability of the formations drilled in oilfields[J]. *Journal of East China Institute of Petroleum*, 1980, 4(2): 24-36.
- [3] 尹宏锦. 油田岩石可钻性统计分级法[J]. 石油学报, 1982, 3(3): 75-82.
YIN Hongjin. Statistical grading of the drillability of the formations in oil fields[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1982, 3(3): 75-82.
- [4] 励美恒, 孔健. 金刚石钻进微钻头岩石可钻性分级的探讨[J]. 地球科学—武汉地质学院学报, 1985, 10(3): 21-28.
LI Meiheng, KONG Jian. On the grading of drillability of rocks for micro-diamond bit[J]. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology*, 1985, 10(3): 21-28.
- [5] 尹宏锦. 实用岩石可钻性[M]. 东营: 石油大学出版社, 1989: 218.
YIN Hongjin. *Practical rock drillability*[M]. Dongying: Petroleum University Publishing House, 1989: 218.
- [6] 石油勘探开发科学研究院钻井所. 岩石可钻性测定及分级方法: SY 5426—1991[S]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 1-15
Drilling Research Department of Sinopec Petroleum Exploration and Development Institute. *Drillability measurement and its grading*: SY 5426-1991[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 1-15.
- [7] 邹德永, 尹宏锦. PDC 钻头钻进的岩石可钻性研究[J]. 石油大学学报: (自然科学版), 1993, 17(1): 31-36.
ZOU Deyong, YIN Hongjin. Study on rock-drillability for PDC bit drilling[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 1993, 17(1): 31-35.
- [8] 石油勘探开发科学研究院钻井工艺研究所. 岩石可钻性测定及分级方法: SY/T 5426—2000[S]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 3-31.
Drilling Technology Research Institute of Sinopec Petroleum Exploration and Development Institute. *Rock drillability measurement and its classification*: SY/T 5426-2000[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 3-31.
- [9] 石祥超, 陈帅, 孟英峰, 等. 岩石可钻性测定方法的改进和优化建议[J]. 石油学报, 2023, 44(9): 1562-1573.
SHI Xiangchao, CHEN Shuai, MENG Yingfeng, et al. Suggestions for improvement and optimization of rock drillability determination methods[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1562-1573.
- [10] 陈红. PDC 钻头岩石可钻性测定与分级方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
CHEN Hong. *Research on rock drillability measuring and grading method of PDC bit*[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [11] 冯上鑫, 王善勇. 旋切作用下岩石破碎机理及岩石可钻性的试验研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1395-1404.
FENG Shangxin, WANG Shanyong. Experimental study of rock-bit interaction mechanism for rock drillability assessment in rotary drilling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1395-1404.
- [12] 谢志江, 常雪, 杨林, 等. 基于机械比能理论的煤岩可钻性分级方法[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 236-243.
XIE Zhijiang, CHANG Xue, YANG Lin, et al. Classification method of coal and rock drillability based on mechanical specific energy theory[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(3): 236-243.
- [13] 杨迎新, 高翔, 陈红, 等. PDC 钻头岩石可钻性测定与分级新方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(3): 811-819.
YANG Yingxin, GAO Xiang, CHEN Hong, et al. A new method for measuring and grading of PDC bit rock drillability[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(3): 811-819.
- [14] 林敏, 陈红, 杨迎新, 等. 岩石可钻性微钻头结构的分析与改进研究[J]. 钻采工艺, 2017, 40(3): 23-25.
LIN Min, CHEN Hong, YANG Yingxin, et al. Structure analysis and improvement on standard micro bit used in rock drillability test[J]. *Drilling & Production Technology*, 2017, 40(3): 23-25.
- [15] 闫铁, 李玮, 李士斌, 等. 牙轮钻头的岩屑破碎机理及可钻性的分

- 形法[J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(2): 27-30.
- YAN Tie, LI Wei, LI Shibin, et al. Breaking cuttings mechanism of cone bits and fractal method for rock drillability[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29(2): 27-30.
- [16] CHEN Shuai, SHI Xiangchao, WANG Yuming, et al. Drillability characteristics of sandstone with different pores under simulated bottom hole conditions[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 861(2): 022055.
- [17] CHEN Shuai, SHI Xiangchao, BAO Heng, et al. Experimental study of shale drillability with different bedding inclinations under varying wellbore pressure conditions[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production, 2021, 11(4): 1751-1759.
- [18] 陈帅, 石祥超, 高雷雨, 等. 不同冷却时间对高温花岗岩可钻性实验研究[J]. 地质科技通报, 2023, 42(2): 356-364.
- CHEN Shuai, SHI Xiangchao, GAO Leiyu, et al. Experiment research of the influence of different cooling times on the drillability of high-temperature granite[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 356-364.
- [19] 陈帅, 石祥超, 包恒, 等. 高温对玄武岩可钻性及微观结构影响的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(6): 1898-1905.
- CHEN Shuai, SHI Xiangchao, BAO Heng, et al. Experimental study on high temperature on the drillability and microstructure of basalt[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(6): 1898-1905.
- [20] 周波, 汪海阁, 张富成, 等. 温度压力对岩石可钻性和破岩效率影响实验[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(5): 547-552.
- ZHOU Bo, WANG Haige, ZHANG Fucheng, et al. Experiments on the influences of temperature and pressure on rock drillability and rock breaking efficiency[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(5): 547-552.
- [21] 赵金昌, 万志军, 李义, 等. 高温高压条件下花岗岩切削破碎试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1432-1438.
- ZHAO Jinchang, WAN Zhijun, LI Yi, et al. Research on granite cutting and breaking test under conditions of high temperature and high pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1432-1438.
- [22] 张旭, 翟应虎, 李祖光, 等. 利用分形理论评价地层可钻性[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 124-128.
- ZHANG Xu, ZHAI Yinghu, LI Zuguang, et al. Formation drillability evaluation using fractal theory[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 124-128.
- [23] 李士斌, 闫铁, 李玮. 地层岩石可钻性的分形表示方法[J]. 石油学报, 2006, 27(1): 124-127.
- LI Shibin, YAN Tie, LI Wei. Fractal representation of rock drillability[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1): 124-127.
- [24] 国家能源局. 石油天然气钻井工程岩石可钻性测定与分级: SY/T 5426—2016[S]. 北京: 石油工业出版社, 2016: 1-7.
- National Energy Administration. Drilling engineering for the petroleum and natural gas—rock drillability measurement and its grading: SY/T 5426-2016[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016: 1-7.
- [25] 樊冀安, 高学之. PDC钻头岩石可钻性分级研究[C]// 岩石破碎理论与实践——全国第五届岩石破碎学术论文集. 西安: 陕西科学技术出版社, 1992.
- FAN Jian, GAO Xuezhi. Research on rock drillability grading of PDC bit[C]// Theory and practice of rock fragmentation: Selected Papers of the Fifth National Academic Conference on Rock Fragmentation. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1992.
- [26] 尹宏锦, 邹德永. 油矿地层可钻性统一分级的探讨[C]// 水电与矿业工程中的岩石力学问题——中国北方岩石力学与工程应用学术会议文集. 北京: 科学出版社, 1991.
- YIN Hongjin, ZOU Deyong. Discussion on unified grading of drillability of oil ore strata[C]// Rock mechanics problems in hydropower and mining engineering: Proceedings of the Academic Conference on Rock Mechanics and Engineering Applications in Northern China. Beijing: Science Press, 1991.
- [27] 杨雨, 文龙, 周刚, 等. 四川盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2045-2069.
- YANG Yu, WEN Long, ZHOU Gang, et al. New fields, new types and resource potentials of hydrocarbon exploration in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2045-2069.
- [28] 杨雨, 谢继容, 曹正林, 等. 四川盆地天府气田沙溪庙组大型致密砂岩气藏形成条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2023, 44(6): 917-932.
- YANG Yu, XIE Jirong, CAO Zhenglin, et al. Forming conditions and key technologies for exploration and development of large tight sandstone gas reservoirs in Shaximiao Formation, Tianfu gas field of Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(6): 917-932.
- [29] 张君峰, 高永进, 刘亚雷, 等. 塔里木盆地柯坪断隆构造特征及油气勘探潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(7): 1041-1057.
- ZHANG Junfeng, GAO Yongjin, LIU Yalei, et al. Tectonic characteristics and hydrocarbon exploration potential of Keping fault-uplift in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(7): 1041-1057.
- [30] 王清华, 徐振平, 张荣虎, 等. 塔里木盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 15-32.
- WANG Qinghua, XU Zhenping, ZHANG Ronghu, et al. New fields, new types of hydrocarbon explorations and their resource potentials in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 15-32.
- [31] 刘岩生, 张佳伟, 黄洪春. 中国深层—超深层钻完井关键技术及发展方向[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 312-324.
- LIU Yansheng, ZHANG Jiawei, HUANG Hongchun. Key technologies and development direction for deep and ultra-deep drilling and completion in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 312-324.

(收稿日期 2024-05-21 改回日期 2024-07-05 编辑 王培玺)