

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2020047

火成岩研磨性试验研究

邹德永, 王高明, 邢晨

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

摘要: 火成岩钻井设计优化的关键是了解火成岩的可钻性和研磨性, 但至今还未形成一套测试火成岩研磨性的有效方法。为此, 采用自主研发的岩石研磨性测定装置, 测试了不同岩性火成岩岩样的研磨性, 并分析了火成岩研磨性与其单轴抗压强度和矿物成分含量之间的关系。测试结果表明, 在岩样转速 8 r/min、钻压 800 N、钻头转速 198 r/min 的条件下, 以破碎单位体积岩石研磨标准件的磨损质量作为研磨性指标, 可以很好地分辨不同岩性火成岩的研磨性, 且火成岩的研磨性与其单轴抗压强度和等效石英含量均呈较好的幂函数关系。研究结果表明, 以火成岩单轴抗压强度为基础建立的火成岩研磨性预测模型, 可以很好地预测火成岩的研磨性, 可为优化火成岩钻井设计提供理论依据。

关键词: 火成岩; 研磨性; 研磨标准件; 抗压强度; 预测模型

中图分类号: TE21 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2020)03-0041-06

Experimental Study on Igneous Rock Abrasiveness

ZOU Deyong, WANG Gaoming, XING Chen

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, 266580, China)

Abstract: Igneous oil and gas reservoirs are hot spots in well drilling. But, drilling them is extremely difficult due to the highly abrasive nature of the rocks. So, drillability and abrasiveness of igneous rocks must form the basis of drilling optimization design. The problem is, however, that igneous rock abrasiveness testing methods have not yet been formulated. So, in this paper, we describe the development of a rock abrasiveness measuring device used to test the abrasiveness of igneous rock samples with different lithologies. We also examined the relationship between the abrasiveness and their uniaxial compressive strength of igneous rocks, and mineral content. We found that under the conditions of rock sample rotary speed of 8 r/min, WOB of 800 N, and drill bit rotary speed of 198 r/min, the weight loss of grinding standard part of per unit volume broken rock within a certain time can be used as abrasiveness index to distinguish the abrasiveness of igneous rocks with different lithologies. The abrasiveness of igneous rocks shows a good power function relationship between uniaxial compressive strength and equivalent quartz content. The research results show that the abrasiveness prediction model based on the uniaxial compressive strength of igneous rock can predict the igneous rock abrasiveness very well and provide a theoretical basis for optimizing the drilling design for wells in igneous reservoirs.

Key words: igneous rock; abrasiveness; grinding standard part; compressive strength; prediction model

近年来, 火成岩油气藏已成为勘探开发的新领域, 有望成为油气资源新的增长点^[1-2], 但火成岩具有岩性复杂多变、致密坚硬、可钻性差、研磨性高等特点^[3-5], 导致钻井速度慢, 成本高, 严重制约了火成岩油气藏的高效开发。岩石的可钻性和研磨性是优化钻井设计的依据^[6-9], 已经形成了一套定量评价岩石可钻性的行业标准, 但岩石研磨性的测定方法还未统一^[10-12]。目前, 测定岩石研磨性的方法可分为磨铣法和钻孔法 2 大类: 磨铣法的特点是工具在岩石表面作摩擦运动, 反映岩石的研磨性, 适合用来研究岩石研磨性机理, 国内外研究者多采用该方法; 钻孔法接近实钻工况, 多用于预测钻井工具的寿命或磨损量。研

磨性测试采用的标准件有青铜棒、低碳钢棒、银亮钢、硬质合金和铜针等金属材料^[13], 这些金属材料易产生粘连, 在坚硬致密的火成岩上易发生打滑现象, 不能反映钻头研磨火成岩的本质。因此, 研究火成岩研磨性的定量评价方法具有十分重要的意义。本文

收稿日期: 2019-10-31; 改回日期: 2020-03-31。

作者简介: 邹德永 (1962—), 男, 山东威海人, 1984 年毕业于华东石油学院钻井工程专业, 1989 年获石油大学 (北京) 油气井工程专业硕士学位, 2004 年获石油大学 (华东) 油气井工程专业博士学位, 教授, 博士生导师, 主要从事油气井工程方面的教学和研究工作。E-mail: zouyan@upc.edu.cn。

基金项目: 国家科技重大专项"岩石研磨性评价及钻头磨损方程研究" (编号: 2016ZX05033-004-005) 资助。

以特制的金刚石孕镶块为研磨标准件,通过试验测定了常见火成岩岩样的研磨性,分析了火成岩岩样研磨性与其物理力学参数之间的关系,建立了火成岩研磨性预测模型,以便为高效开发火成岩油气藏钻头选型和优化钻井设计提供依据。

1 研磨性试验

1.1 试验方法及装置

自主设计了一套新型岩石研磨性试验装置,该试验装置主要包括控制系统、加压系统、旋转系统、试验钻头、转盘系统和冷却系统,如图1所示。采用钻-磨法测试岩样的研磨性:钻,即试验钻头在旋转系统和加压系统的共同作用下自转,以一定的转速(n)和钻压(W)钻进岩样;磨,即转盘系统带动岩样回转,试验钻头相对岩样公转,标准件磨削岩石表面。钻-磨法中,自转模拟钻头的钻进过程,公转有利于提高研磨性试验的效率,试验后的岩样表面为规整的圆面,保证了岩心的完整性,起到了节省岩心的作用。试验原理如图2所示。



图1 岩石研磨性试验装置

Fig.1 Rock abrasiveness test device

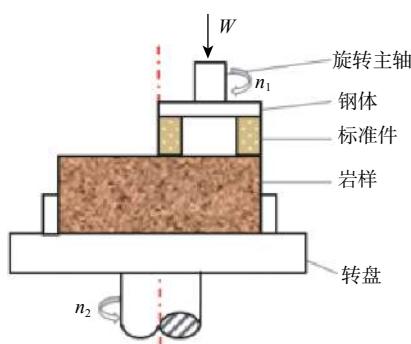


图2 岩石研磨性试验示意

Fig.2 Schematic diagram of rock abrasiveness test

1.2 试验标准件

以663青铜粉作为胎体材料,人造金刚石粉作为骨架材料,采用冷压烧结工艺,制作了洛氏硬度HRC40的研磨标准件,为直径8.0 mm、长13.0 mm的圆柱体。研磨标准件具有以下特点:1)具有足够的强度,能承受轴向力和切向力;2)耐磨性低,能快速磨损,以便在短时间内测定其磨损量;3)具有自锐性,可以吃入火成岩,反映标准件研磨火成岩的本质。

1.3 试验参数优选

选用斜长花岗岩(可钻性级值6.09)和玄武岩(可钻性级值8.40)为试验岩样,岩样转速固定为8 r/min,在不同钻头转速(95, 150, 198, 232和314 r/min)和不同钻压(400, 600和800 N)下进行研磨试验,以优选钻头转速;固定钻头转速,在不同钻压(200, 400, 600, 800和1 000 N)下进行研磨试验,以优选钻压。每种岩样试验3次后取平均值,每次试验10 min,结果如图3—图5所示。

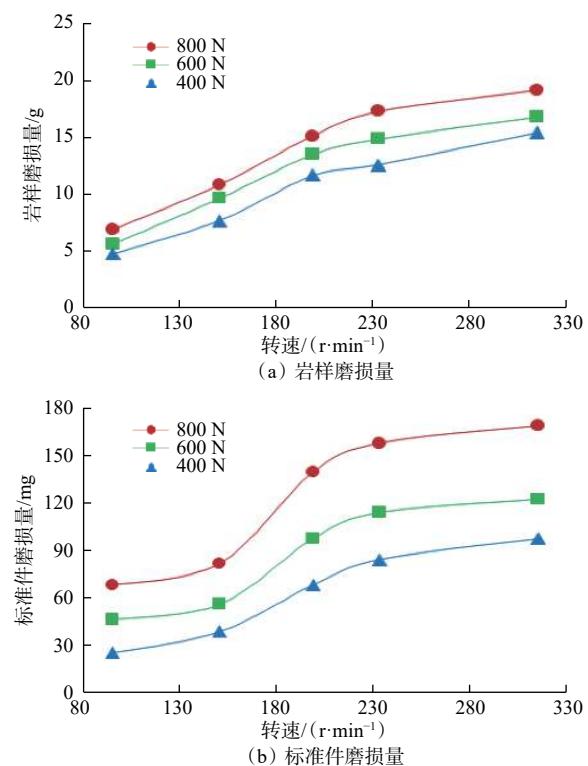


图3 不同钻压下斜长花岗岩岩样和标准件磨损量与钻头钻速的关系

Fig.3 Relationship between the abrasion losses of oblique granite sample and standard part and the drilling speed of drill bit under different WOB

从图3、图4可以看出:当钻压一定时,岩样和标准件的磨损量均随钻头转速增大而增大;当

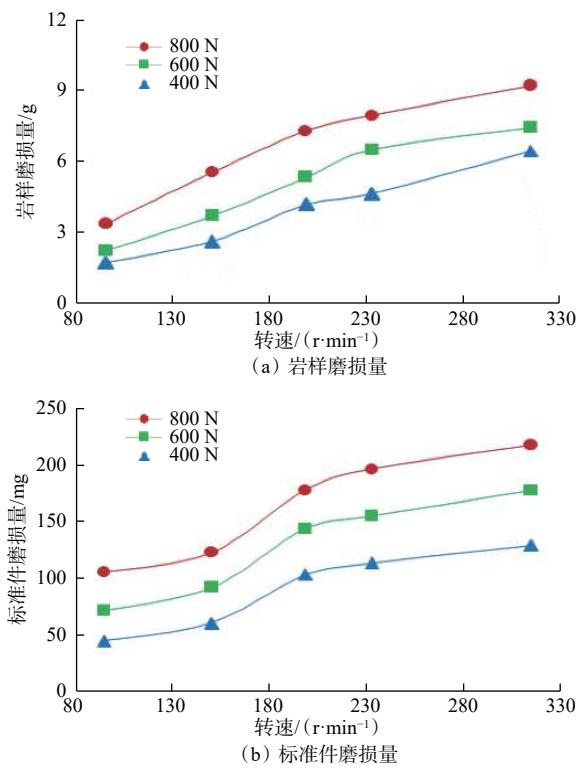


图4 不同钻压下玄武岩岩样和标准件磨损量与钻头转速的关系

Fig. 4 Relationship between the abrasion losses of basalt sample and standard part and the rotary speed of drill bit under different WOB

钻头转速小于198 r/min时,2种岩样磨损量的增加幅度较大;钻头转速大于198 r/min时,岩样磨损量的增加幅度减小,并趋于平稳;标准件磨损量在2种岩样的变化规律与岩样磨损量大致相当,均在钻头转速为198 r/min时出现拐点。其原因是:当钻压一定、钻头转速较小时,标准件与岩样的摩擦路程较小,岩样与标准件的磨损量都较小;当钻头转速较大时,标准件与岩石的摩擦路程增长,岩样磨损量增大,产生的岩屑增多,对标准件造成了重复磨损。为了测试岩石的纯研磨性,钻头转速选择198 r/min。

从图5可以看出,钻头转速为198 r/min时,2种岩样和标准件的磨损量均随钻压增大而增大,但在钻压增至800 N时增大幅度变得很小。其原因是:随着钻压增大,岩样与标准件之间的摩擦力不断增大,岩石和标准件的磨损量不断增大;但钻压过大时,标准件表面的金刚石很快被磨钝,导致岩样进尺减小,标准件的磨损量也随之减小。为了保证岩样和标准件都有明显的磨损,钻压选择800 N。

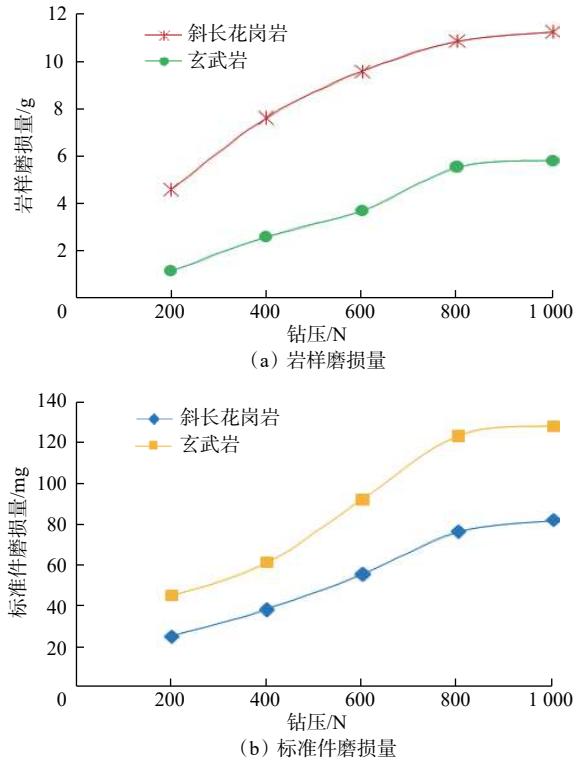


图5 不同岩性岩样和标准件磨损量与钻压的关系(转速198 r/min)

Fig. 5 Relationship between abrasion losses and WOB of rock samples with different lithology and standard parts (rotary speed of 198 r/min)

1.4 指标优选及数据处理

收集了斜长花岗岩、花岗斑岩和石英正长岩等10种常见的火成岩岩样,在钻压800 N、钻头转速198 r/min和岩样转速8 r/min条件下测试了这些岩样的研磨性,每次测试5 min,每种岩样测试5次。每次研磨后用精度为0.02 mm的游标卡尺测量岩样破碎高度和标准件磨损高度并记录,用精度0.001 g的电子天平测量标准件的磨损质量并记录。岩石的研磨性为其固有属性,为了进行量化比较,采用标准件磨损质量与岩样破碎量之比、标准件磨损质量与岩样破碎体积之比和单位时间内标准件磨损质量这3个研磨性指标对其进行量化评价,用这3个指标分别从研磨性指标数值的变化范围和均值2个方面对比分析每种岩样的研磨性。分析发现:标准件磨损质量与岩样破碎量之比不能有效区分花岗斑岩和石英正长岩的研磨性,研磨性范围重叠;标准件磨损质量与岩样破碎体积之比能够将每种岩样的研磨性区分开,具有很高的分辨率;根据单位时间内标准件磨损质量分析出的研磨性范围重叠严重,分辨率最差。因此,采用标准件磨损质量与岩样破碎体积之比作为评价火成

岩研磨性的指标(简记为“研磨性指标”),计算公式为:

$$\omega = \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1)$$

式中: ω 为岩石的研磨性指标, mg/cm^3 ; Δm 为标准件磨损质量, mg ; ΔV 为岩石破碎体积, cm^3 。

斜长花岗岩、花岗斑岩、石英正长岩、石英二长岩、花岗二长岩、英安岩、花岗正长岩、角闪辉长岩、花岗闪长岩和玄武岩等 10 种常见火成岩的研磨性指标测试结果分别为 10.46, 12.49, 14.89, 16.20,

19.35, 21.42, 24.35, 28.43, 36.52 和 41.08 mg/cm^3 。

2 岩样物理力学性质测试

采用 XPert Powder 多功能粉末 X 射线衍射仪测定了斜长花岗岩、花岗斑岩和石英正长岩等 10 种常见火成岩岩样的矿物成分及其含量, 并用岩石单轴测试仪测定了这些岩样的单轴抗压强度, 结果见表 1 (表 1 中: q_e 为岩石等效石英含量; σ 为岩石单轴抗压强度, MPa)。

表 1 火成岩岩样矿物成分及含量和单轴抗压强度测试结果

Table 1 Test results of mineral composition & content and uniaxial compressive strength of igneous rock samples

岩性	矿物各成分含量, %					q_e , %	σ/MPa
	石英	钾长石	斜长石	闪石	辉石		
斜长花岗岩	12	25	59	—	—	84.00	112
花岗斑岩	17	50	29	—	—	84.71	129
石英正长岩	19	51	27	—	—	85.86	147
石英二长岩	18	38	41	—	—	86.00	138
花岗二长岩	24	36	37	—	—	86.57	176
英安岩	36	9	40	11	—	88.21	207
花岗正长岩	31	44	20	—	—	85.86	230
角闪辉长岩	18	22	36	10	13	89.27	268
花岗闪长岩	35	9	54	3	—	90.13	275
玄武岩	—	17	55	5	19	—	308

表 1 和相关理论研究结果均证明, 岩石中所含硬质矿物对其研磨性影响很大, 斜长花岗岩、花岗斑岩和石英正长岩等火成岩岩样所含矿物成分差距较大, 不容易比较其对研磨性的影响程度, 因此采用等效石英的方法, 将除石英之外的其他矿物折算为石英硬度水平, 具体方法为: 取石英硬度为 7.0, 长石硬度为 6.0, 闪石和辉石硬度为 6.5, 计算其等效石英含量, 计算公式为:

$$q_e = q + \sum_{i=1}^n C_i q_i \quad (2)$$

式中: q 为岩石的石英含量; C_i 为 i 类矿物折算系数; q_i 为 i 类矿物含量。

斜长花岗岩、花岗斑岩和石英正长岩等 10 种火成岩岩样等效石英含量的计算结果见表 1。

3 火成岩研磨性预测模型的建立

3.1 单因素分析

分别以表 1 中斜长花岗岩、花岗斑岩和石英正

长岩等 10 种火成岩岩样的单轴抗压强度和等效石英含量为横坐标, 以测试的这 10 种火成岩岩样的研磨性指标为纵坐标绘制散点图, 并进行回归分析, 回归结果见表 2 和表 3。

表 2 火成岩研磨性指标与单轴抗压强度关系回归结果

Table 2 Regression results of relationship between compressive strength and abrasiveness of igneous rocks

函数关系	模型	R^2	F
线性	$\omega=0.144\sigma-6.028$	0.944 3	135.504 1
对数	$\omega=27.244\ln\sigma-120.17$	0.901 4	70.133 6
指数	$\omega=5.78e^{0.0064\sigma}$	0.961 4	199.476 8
幂	$\omega=0.031\sigma^{1.241}$	0.963 1	208.851 6
多项式	$\omega=0.0004\sigma^2-0.0255\sigma+9.712$	0.962 9	91.030 9

由表 2 中的回归结果可知, 火成岩的研磨性指标与单轴抗压强度按照幂函数回归时拟合度最好(见图 6), 据此确定火成岩研磨性指标与单轴抗压强度的关系模型为:

表3 火成岩研磨性指标与等效石英含量关系回归结果
Table 3 Regression results of relationship between equivalent quartz content and abrasiveness of igneous rocks

函数关系	模型	R^2	F
线性	$\omega=3.680q_e-298.74$	0.830 4	34.262 3
对数	$\omega=320.26\ln q_e-1408.7$	0.828 5	33.813 3
指数	$\omega=4\times10^{-6}e^{0.187q_e}$	0.832 7	34.845 0
幂	$\omega=2\times10^{-29}q_e^{15.5}$	0.834 3	35.234 0
多项式	$\omega=0.02q_e^2-138.617$	0.832 1	34.690 8

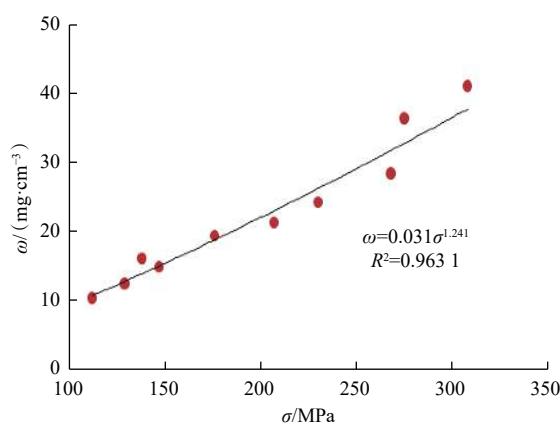


图6 火成岩研磨性指标与其单轴抗压强度的关系

Fig.6 Relationship between abrasiveness and uniaxial compressive strength of igneous rock

$$\omega = 0.031\sigma^{1.241} \quad (3)$$

显著性水平 α 取 0.05, 查 $F(1,8)$ 表得知临界值 λ 为 5.32。由于 $F \gg \lambda$, 说明式(3)有意义, 故火成岩单轴抗压强度对其研磨性的影响显著。

由表3中的回归结果可知, 火成岩的研磨性指标与等效石英含量按照幂函数回归时, 拟合度最好(见图7), 据此火成岩研磨性指标与等效石英含量的关系模型为:

$$\omega = 2 \times 10^{-29} q_e^{15.5} \quad (4)$$

显著性水平 α 取 0.05, 查 $F(1,7)$ 表得知临界值 λ 为 5.59。由于 $F > \lambda$, 说明式(4)有意义, 故火成岩等效石英含量对其研磨性的影响显著。

3.2 多因素分析

由于石油钻井中钻遇的地层复杂多样, 火成岩的研磨性可能受多种因素的影响, 综合考虑, 采用多因素岩石力学参数建立了岩石研磨性预测模型。结合前人的研究成果^[14-15], 假设火成岩研磨性预测模型为:

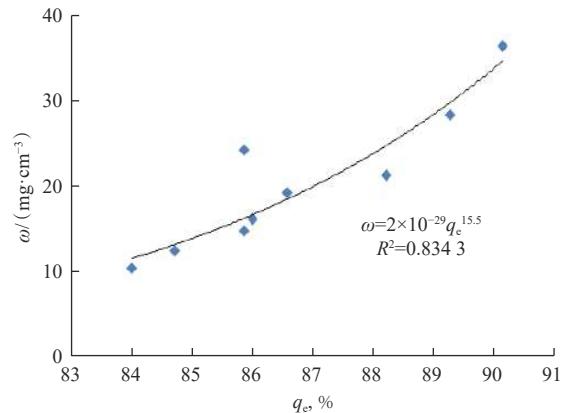


图7 火成岩研磨性指标与等效石英含量的关系

Fig.7 Relationship between abrasiveness and equivalent quartz content of igneous rock

$$\omega = k\sigma^a q_e^b \quad (5)$$

式中: a , b 和 k 为系数。

结合斜长花岗岩、花岗斑岩和石英正长岩等 10 种火成岩岩样研磨性指标测试结果和表1中的等效石英含量和单轴抗压强度数据, 回归求得 a , b 和 k , 则火成岩多因素研磨性预测模型为:

$$\omega = 0.933 \times 10^{-7} \sigma^{0.993} q_e^{3.136} \quad (6)$$

显著性水平 α 取 0.05, 查 $F(2,6)$ 表可得临界值 λ 为 5.14。由于 $F=77.357 9 > \lambda$, 说明式(6)有意义, 故火成岩等效石英含量和抗压强度对其研磨性影响显著。

3.3 预测模型的建立

以决定系数 R^2 和统计检验值 F 为参考指标, 对式(3)、式(4)和式(6)进行分析比较, 结果见表4。由表4可知, 式(3)的效果最好, 因此确定式(3)为基于单轴抗压强度的火成岩研磨性预测模型。

表4 回归关系式比较

Table 4 Comparison of regression relations

引入参数	关系式	R^2	F
σ	式(3)	0.963 1	208.851 6
q_e	式(4)	0.834 3	35.234 0
q_e, σ	式(6)	0.962 7	77.357 9

3.4 模型验证

为了进一步验证火成岩研磨性预测模型的准确性, 收集了 5 种火成岩露头岩样, 通过室内试验测定了其研磨性指标和单轴抗压强度, 用式(3)计算出岩石研磨性指标值, 并与实测研磨性指标进行对比, 结果见表5。由表5可知, 该预测模型的预测误差均在 10% 以内, 精度较高, 所用参数只有一个单轴抗压强度, 且易于获得, 有利于在现场应用。

表 5 研磨性指标预测结果

Table 5 Abrasiveness prediction results of igneous rocks with different lithologies

岩性	单轴抗压强度/MPa	研磨性指标/(mg·cm ⁻³)		相对误差, %
		预测	实测	
正长花岗岩	151	15.63	15.24	2.52
斜长花岗岩	118	11.51	11.95	3.80
粉红花岗岩	273	32.60	30.06	7.80
二长花岗岩	197	21.75	23.17	6.55
二长花岗岩	169	17.98	17.45	2.94

4 结论与建议

1) 以 663 青铜粉和人造金刚石粉制成的金刚石孕镶块为标准件, 采用钻-磨法测试了火成岩的研磨性。

2) 采用自制的岩石研磨性试验装置, 在钻压 800 N、钻头转速 198 r/min、岩样转速 8 r/min 的试验参数下进行钻-磨试验, 以破碎单位体积岩石研磨标准件的磨损质量为研磨性指标, 可将不同研磨性的火成岩区分开, 且分辨率较高。

3) 回归分析表明, 火成岩的研磨性与其单轴抗压强度和等效石英含量分别呈较好的幂函数关系, 具有较强的规律性。

4) 以火成岩单轴抗压强度为基础建立的研磨性预测模型的预测精度较高, 工程上可用其计算火成岩的研磨性。

5) 本文只是基于火成岩研磨性试验建立了火成岩研磨性预测模型, 建议借鉴该方法获得其他岩性岩石的研磨性预测模型。

参 考 文 献

References

- [1] 王洛, 李江海, 师永民, 等. 全球火山岩油气藏研究的历程与展望 [J]. 中国地质, 2015(5): 1610–1620.
WANG Luo, LI Jianghai, SHI Yongmin, et al. Review and prospect of global volcanic reservoirs[J]. *Geology in China*, 2015(5): 1610–1620.
- [2] 姜洪福, 师永民, 张玉广, 等. 全球火山岩油气资源前景分析 [J]. 资源与产业, 2009, 11(3): 20–22.
JIANG Hongfu, SHI Yongmin, ZHANG Yuguang, et al. Potential of global volcanics-hosted oil-gas resources[J]. *Resources & Industries*, 2009, 11(3): 20–22.
- [3] 付茜. 中国火成岩油气勘探开发发现现状及展望 [J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(1): 25–32.
FU Qian. Status and prospect of igneous oil and gas exploration and development in China[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017, 39(1): 25–32.
- [4] 赵洪山, 冯光通, 唐波, 等. 准噶尔盆地火成岩钻井提速难点与技术对策 [J]. 石油机械, 2013, 41(3): 21–26.
ZHAO Hongshan, FENG Guangtong, TANG Bo, et al. Difficulties in igneous rock drilling in Dzungaria Basin and technological solutions[J]. *China Petroleum Machinery*, 2013, 41(3): 21–26.
- [5] 巢贵业. 松南地区火山岩水平井优快钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2013, 41(6): 62–67.
CHAO Guiye. Ultra-fast drilling technology for horizontal wells in volcanic rocks in Songnan Area[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013, 41(6): 62–67.
- [6] 杨明合, 夏宏南, 蒋宏伟, 等. 火山岩地层优快钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2009, 37(6): 44–47.
YANG Minghe, XIA Hongnan, JIANG Hongwei, et al. Optimal and fast drilling technology for volcanic rock formations[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2009, 37(6): 44–47.
- [7] 冯月江. 火成岩油藏钻井完井技术探讨 [J]. 石油钻探技术, 1998, 26(4): 40–41.
FENG Yuejiang. Discussion on drilling and completion technology of igneous reservoir[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 1998, 26(4): 40–41.
- [8] 马凤清. 哈山 3 井火成岩地层快速钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 112–116.
MA Fengqing. Rapid drilling technology of igneous formations in Well Hashan 3[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(2): 112–116.
- [9] 王滨, 李军, 邹德永, 等. 强研磨性硬岩 PDC 钻头磨损机理及磨损分布规律研究 [J]. 特种油气藏, 2018, 25(4): 149–153.
WANG Bin, LI Jun, ZOU Deyong, et al. Mechanisms and distribution pattern of abrasions on PDC bits for highly-abrasive hard-rock[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2018, 25(4): 149–153.
- [10] 邹德永, 王瑞和. PDC 钻头的岩石研磨性试验研究 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(2): 41–43.
ZOU Deyong, WANG Ruihe. Experimental study on rock abrasiveness with PDC bit[J]. *Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science)*, 2003, 27(2): 41–43.
- [11] DAHL F, BRULAND A, JAKOBSEN P D, et al. Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 28: 150–158.
- [12] 孔健. 人造金刚石钻进中岩石研磨性的试验研究 [J]. 地球科学, 1985, 10(3): 53–63.
KONG Jian. Experimental study on the abrasiveness of rock in synthetic diamond drilling[J]. *Earth Science*, 1985, 10(3): 53–63.
- [13] 袁军, 邹德永, 钟洪娇, 等. 适合于石油钻井地层岩石研磨性测定的标准磨损件研制 [J]. 中国科技论文, 2016, 11(11): 1249–1253.
YUAN Jun, ZOU Deyong, ZHONG Hongjiao, et al. Development of standard wear specimen for determination of rock abrasiveness in petroleum drilling formation[J]. *China Sciencepaper*, 2016, 11(11): 1249–1253.
- [14] 赵靖影, 邓金根, 谢玉洪, 等. 通用地层研磨性预测模型的建立及应用 [J]. 中国海上油气, 2011, 23(5): 329–334.
ZHAO Jingying, DENG Jinggen, XIE Yuhong, et al. Establishment and application of a universal prediction model of formation abrasivity[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2011, 23(5): 329–334.
- [15] 邢晨. 火成岩研磨性测定方法及预测模型研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
XING Chen. Study on the determination method and prediction model of igneous rock abrasiveness[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2017.