

# 长沙盆地红层岩石地层可钻性研究及应用

李奋强, 粟琼玉, 刘素平, 叶见玲, 邓拓, 陈潇, 刘梅, 胡文辉, 王羲  
(湖南省工程地质矿山地质调查监测所, 湖南长沙 410014)

**摘要:**中深层地热能是一种储量丰富、分布较广、稳定可靠可再生能源,具有绿色低碳、清洁环保、安全优质、供能持续稳定等特点,在碳达峰碳中和实施路径中发挥着重要的作用。结合长沙盆地一个工程案例,采用岩石压入硬度计、电动应力式直剪仪和偏光显微镜分别对岩石样品的压入硬度、单轴抗压强度和岩性特性进行测试,从岩石的胶结物质、矿物颗粒、层理发育程度等方面对岩层可钻性的影响进行了分析研究,构建了该套地层的岩性可钻性等级,并对钻头的优选提出了建议,对本地区和类似地区的钻探工程具有一定的借鉴意义。

**关键词:**地热钻井;岩石可钻性;钻头优选;长沙盆地

**中图分类号:**P634.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)01-0051-07

## Research and application on drillability of red strata in Changsha Basin

LI Fenqiang, SU Qiongyu, LIU Suping, YE Jianling, DENG Tuo,  
CHEN Xiao, LIU Mei, HU Wenhui, WANG Xi

(*Engineering Geology and Mine Geology Survey and Monitoring Institute of Hunan Province,  
Changsha Hunan 410014, China*)

**Abstract:** Medium and deep geothermal energy is a kind of renewable energy which is abundant, widespread, stable and reliable. It is characterized of green and low-carbon, clean and environmental protection, safe and high quality, sustainable and stable energy supply, which plays an important role in the implementation path of carbon peak and carbon neutrality. Combined with an engineering case in Changsha Basin, this paper tests the hardness, uniaxial compressive strength and lithology of rock samples using the rock pression sclerometer, electric-stress direct shear instrument and polarizing microscope. The influence of rock cementing material, mineral particles and bedding development degree on the drillability of the strata is analyzed and studied. The drillability grade of the strata is established, and some suggestions on the drill bit optimization are put forward, which has certain reference significance for drilling engineering in this area and such similar areas.

**Key words:** geothermal drilling; rock drillability; drill bit optimization; Changsha Basin

长沙机场地热探采结合井是中南地区第一口中深层地热科学研究试验井,也是国内大型机场中第一个地热利用为主多能互补的航站楼供能项目,钻进工程一开选用 $\varnothing 406.4$  mm钻头钻至井深59.17 m,下入 $\varnothing 339.7$  mm导管,二开采用 $\varnothing 215.9$  mm钻

头钻至井深2611.58 m完钻。该井采用取热不取水同轴套管换热技术,主要目的是获取地层岩性、温度、厚度和单井换热量等相关参数,为后续的中深层地热井施工与优化设计提供技术支撑,本文就该套地层的岩石可钻性和钻头的优选进行分析探讨。

收稿日期:2023-04-20;修回日期:2023-09-27 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.01.007

基金项目:湖南省重点工程项目“长沙机场中深层地热探采结合井施工及换热测试”(编号:HNSDLSJY-FW-43NC400901-ZBCGZX-2022-010)

第一作者:李奋强,男,汉族,1964生,研究员,探矿工程专业,博士,主要从事非常规油气地质、煤炭地质、深部钻井(钻探)施工与科研等工作,湖南省长沙市雨花区万家丽中路三段76号,873092872@qq.com。

引用格式:李奋强,粟琼玉,刘素平,等.长沙盆地红层岩石地层可钻性研究及应用[J].钻探工程,2024,51(1):51-57.

LI Fenqiang, SU Qiongyu, LIU Suping, et al. Research and application on drillability of red strata in Changsha Basin[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 51-57.

岩石可钻性是指在一定钻头规格、类型及钻进工艺条件下岩石抵抗钻头破碎的能力<sup>[1-2]</sup>,它反映了钻进作业中岩石破碎的难易程度,是指导地质分层及钻头选型工作的重要参数<sup>[3-7]</sup>。岩石可钻性大小及分布规律的准确认识对提高机械速和减少钻井周期具有重要意义<sup>[8-12]</sup>。由于可钻性与许多因素有关,要找出它与诸影响因素之间的定量关系十分困难,目前国内外仍采用试验的方法来确定岩石的可钻性。不同部门使用的钻进方法不同,其测定可钻性的试验手段,甚至可钻性指标的量纲也不尽相同。

本文采用岩石压入硬度计、电动应力式直剪仪和偏光显微镜分别对岩石样品的压入硬度、单轴抗压强度和岩石特性进行测试,对岩石可钻性的影响因素进行分析研究,初步确立构建该套地层的岩性可钻性等级,并对钻头的优选提出建议,为本地区和类似地区的钻探工程提供借鉴。

## 1 研究区域地质特征

长沙盆地大地构造位于华南断块区、长江中下游断块凹陷西南部的幕阜山隆起地区内,本区构造体系属嘉义—柏家山新华夏系,以北捞刀河、以南浏阳河为湘江东岸支流,其地貌属白垩系陆相低矮剥蚀残丘,地势高低波状起伏,多为新生界—中生界地层;在白垩纪末期,本地区地壳不断下沉,形成陆相残丘,最大沉积厚度>600 m的白垩系泥质粉砂岩等红色地层,形成冲积阶地基座;新近纪末期,地壳经历多次上升旋回,构造运动极为强烈,其形迹主要表现为断裂,同时逐渐形成湘江五级阶地和浏阳河二级阶地。研究区处于丘陵地貌单元,根据区域地质资料、机场改扩建(飞行区)勘测成果和钻孔揭露,项目区覆盖层以第四系(Qh)残积粉质粘土为主,下伏基岩为白垩系上统戴家坪组(K<sub>2</sub>d)、下统神皇山组(K<sub>1</sub>s)、冷家溪群第二岩组(Pt<sub>1</sub>n<sup>2</sup>)地层。岩性如下:

(1)冷家溪群第二岩组(Pt<sub>1</sub>n<sup>2</sup>):上部浅灰色厚层条带状绢云母板岩与粉砂质板岩互层;厚层状粉砂质板岩夹绢板岩或灰绿色绢云母板岩夹云母碎片的粉砂质板岩。下部为灰、浅灰色绢云母板岩、粉砂质板岩夹中厚层状变质细砂岩,变质粘土质粉—细砂岩、凝灰质细砂岩等。厚度>3011 m。

(2)戴家坪组(K<sub>1</sub>s):下部为紫红色厚—巨厚层状砾岩与紫红色中—厚层状钙质细砂岩、钙质粉砂岩呈韵律,向上渐变为细粒钙质石英砂岩与钙质石英粉

砂岩互层;上部为紫红色中厚层状细粒钙质石英砂岩、钙质石英粉砂岩及钙质泥岩,三者互层产出,且以前二者为主,顶部夹多层细砾板岩质砾岩透镜体。厚度560 m~850 m。

(3)戴家坪组(K<sub>2</sub>d):下部紫红色钙质细砂岩夹钙质粉砂岩、粉砂岩及砂质泥岩,厚约360 m;中部为紫红色粉砂质钙质泥岩、钙质泥岩及粉砂质泥灰岩为主,夹灰绿色泥灰岩及少许薄层钙质粉砂岩,厚约700 m;上部为紫红色细—粗粒砂岩或钙泥质细砂岩与粉砂岩、砂质泥岩、粉砂质泥岩互层,厚约250 m。

(4)第四系(Qh):红褐、棕红色粘土、粉质粘土,含少量碎石,残坡积成因,厚0.5~10 m。

## 2 研究方法原理

研究区域主要以沉积岩为主,局部有变质岩入侵。组成沉积岩的物质成分有颗粒和胶结物两大部分,胶结物对沉积岩的强度有很大的影响。胶结物按其成分可分为:(1)泥质胶结物(如泥土或粘土),胶结成的岩石强度小,易碎,断面呈土状;(2)钙质胶结物(成分为CaCO<sub>3</sub>),胶结成的岩石强度比泥质胶结的大些;(3)铁质胶结物(成分为FeO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>或Fe(OH)<sub>3</sub>),胶结成的岩石强度比前两种都大;(4)硅质胶结物(成分为SiO<sub>2</sub>),所胶结的岩石强度最大。为使研究区域的岩石可钻性等级划分能够更加贴近实际生产效果,对岩石样本进行了分类,分别以压入硬度和单轴抗压强度为主要力学性能指标对岩石进行了可钻性等级划分。为了获得对送检岩样的整体认知,以及形成对岩石各向异性的整体把控,同时对送检岩样进行了岩性测试。

### 2.1 按压入硬度划分

岩石可钻性可依据岩石压入硬度划分。岩石的压入硬度反映岩石抵抗外部更硬物体压入其表面的能力<sup>[13]</sup>。岩石的压入硬度( $H_y$ )用专门仪器或液压机确定,为破碎压力( $P$ )与压模面积( $S$ )之比:

$$H_y = P/S \quad (1)$$

式中: $H_y$ ——压入硬度,MPa; $P$ ——在压入作用下岩石产生局部脆性破碎时的轴载,N; $S$ ——压头端面面积,mm<sup>2</sup>。

### 2.2 按单轴抗压强度划分

岩石可钻性可依据岩石坚固性系数划分,岩石坚固性系数由单轴抗压强度计算而得。岩石单轴抗压强度是指岩石试件在单向受压至破坏时,单位面

积上所能承受的荷载<sup>[14]</sup>。单轴抗压强度( $\sigma_c$ )在液压机上试验,按下式计算:

$$\sigma_c = P_c / S \quad (2)$$

式中: $\sigma_c$ ——单轴抗压强度,MPa; $P_c$ ——岩石破坏瞬间的轴向荷载,N; $S$ ——岩石试样的截面积,mm<sup>2</sup>。

岩石坚固性系数表征的是岩石抵抗破碎的相对值,可把岩石单轴抗压强度极限的1/10作为岩石的坚固性系数<sup>[15]</sup>,即

$$n = \sigma_c / 10 \quad (3)$$

式中: $n$ ——岩石的坚固性系数; $\sigma_c$ ——岩石的单轴抗压强度,MPa。

### 3 测试结果分析

#### 3.1 岩层采样与编号

本次探采结合井,取心段深度为400、700、1000、1300、1600、1900、2090、2370 m,各层的取心深度编号依次为1、2、3、4、5、6、7、8。

每层岩石取心 $\leq$ 3组,每组长度 $\leq$ 30 cm,各组的编号依次为1、2、3。岩层的编号由深度号和组号构成,编号为1-1至8-3,共24组。

#### 3.2 压入硬度测试结果

分别对岩样2-1、2-2、2-3、3-1、3-3、4-1、4-2、6-2、6-3和8-3号进行了压入硬度测试,结果见表1。

表1 岩石压入硬度测试结果

Table 1 Results of rock indentation hardness tests

岩样号	碎屑(占70%左右)/%					胶结物(占30%左右)/%			压入硬度/ MPa
	石英	硅质岩	钾长石	酸性斜长石	千枚岩、黑云母、白云母、铁质碎屑	钙质	硅质	杂基质	
2-1	81	5	5	5	4	50	40	10	821.66
2-2	80.5	5	5	5	4.5	55	10	35	1605.10
2-3	85	5	8		2	73	6	21	1681.53
3-1	76	5	8	7	4	80	10	10	3909.24
3-3	84.5	3	4	4	4.5	79	15	6	705.41
4-1	85	3	2	2	8	48	10	42	2877.39
4-2	83.5	3	3	2	9.5	63	7	30	1577.49
6-2	99				1	80		20	1403.40
6-3	91	3	4	1	1	85	5	10	1380.04
8-3	99				1	20	5	75	1294.06

6-2号岩样中,碎屑颗粒占岩石的68%左右。碎屑几乎全部为石英,含量约为99%;少量白云母含量1%,偶见硅质岩、长石和电气石碎屑;胶结物占岩石的32%左右;杂基(80%),铁质(20%)。对6-2号岩样深砖红色含铁质泥质粉砂岩中的粗粉砂层和细粉砂层,分别进行10倍镜单偏光和正交镜测试,测试结果如图1所示。

岩性组分含量及其胶结物含量对岩石压入硬度影响变化规律见图2。为了对比分析需要,将石英含量和钙质胶结物放大30倍、硅质岩含量和硅质胶结物放大300倍,岩性组分及其胶结物变化与压入硬度的变化呈现一致性的变化规律。

#### 3.3 单轴抗压强度测试结果

对14组岩样进行岩性和单轴抗压强度测试,结

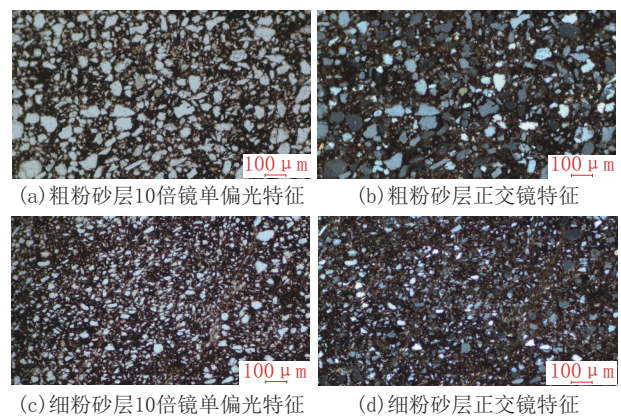


图1 6-2号岩样电镜测试结果

Fig.1 Electron microscopy test results of rock sample No.6-2

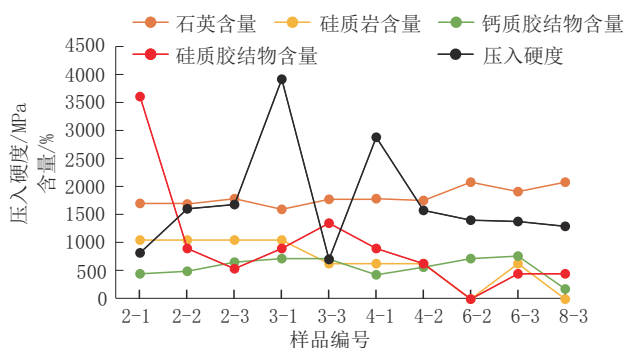


图2 岩性组分及其胶结物对压入硬度的影响

Fig.2 Influence of lithologic constituent and cementation on rock indentation hardness

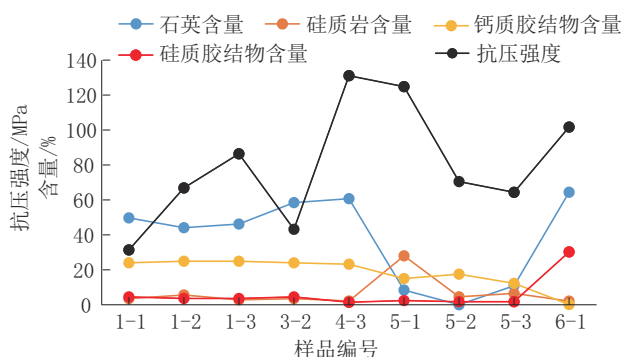


图3 岩性组分及其胶结物对抗压强度的影响

Fig.3 Influence of lithologic constituent and cementation on the compressive strength

果见表2;1-1至6-1号岩样的组分及其胶结物对抗压强度的影响见图3,可见石英含量、硅质含量及其胶结与抗压强度变化呈现一致性。

从偏光显微镜的岩性测试结果可以看出,5-2号碎屑的石英含量为0,变质砂砾岩占60%;5-3号碎屑的石英含量为14%,变质砂砾岩占43%;7-1号及以后无胶结物。

对7-1号岩样白云质泥晶石灰岩进行茜素红染色,分别进行20倍和10倍镜单偏光和正交镜测试,测试结果如图4所示。7-1号岩样主要矿物:方解石(含量65%左右),白云石(含量25%左右);次要矿物:泥质(含量5%左右),有机炭质(含量5%左右);岩石为具微晶结构,薄层状构造。

表2 岩石单轴抗压强度测试结果

Table 2 Results of uniaxial compressive strength tests

岩样号	碎屑(占70%左右)/%					胶结物(占30%左右)/%			抗压强度/MPa	
	石英	硅质岩	钾长石	酸性斜长石	千枚岩、黑云母、白云母、铁质碎屑	变质砂砾岩	钙质	硅质		杂基质
1-1	71	5	12	8	5		80	15	5	31.37
1-2	63	8	13	12	5		83	12	5	66.85
1-3	66	4	14	12	4		83	12	5	86.38
3-2	83.5	5	4	4	3.5		80	12	8	43.19
4-3	85.5	3	2	2	8.5		80	5	15	131.09
5-1	12	40	12	1	35		50	8	42	124.83
5-2		7	5		28	60	50	5	45	70.49
5-3	14	10	5		28	43	35	5	60	64.35
6-1	92	3	4		1		0.5	94.5	5	101.69
7-1	65	25	5	5						23.21
7-2	62	30	4	2	2					17.94
7-3	67	20	6	5	2					7.89
8-1		0.5		98	1					109.65
8-2		2.5	1	91	5.5					49.38

## 4 地层可钻性及钻头选择

### 4.1 岩石可钻性等级界定

从偏光显微镜的岩性测试结果可知,该套地层

的变质程度较高,对钻进工艺参数选择和钻头优选提出了较高的要求。为更好使用并与压入硬度划分的12个等级相对应,基于单轴抗压强度进一步提出



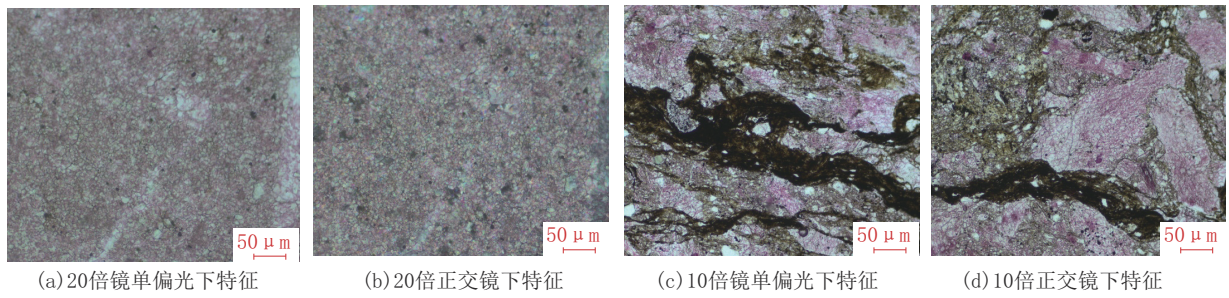


图 4 7-1号岩样电镜测试结果

Fig.4 Electron microscopy test results of rock sample No.7-1

了普氏强度系数法<sup>[15-16]</sup>,普氏强度系数计算公式 由式(4)、文献[15],可推得岩样的可钻性等级, 如下: 见表 3。

$$f = \sigma_c / 30 + \sqrt{\sigma_c} / 3 \quad (4)$$

表 3 岩石可钻性等级界定

Table 3 Classification of rock drillability

岩石编号	岩石定名	压入硬度/ MPa	抗压强度/ MPa	普氏强度系数 $f$	可钻性等级(试验)		可钻性等级 (综合)
					压入硬度	单轴抗压强度	
1-1	钙质粉砂岩	/	31.37	4.28	/	IV	IV
1-2	钙质粉砂岩	/	66.85	6.95	/	V	V
1-3	钙质细砂岩	/	86.38	8.25	/	VII	VII
2-1	钙质砂岩	821.66	/	/	4	/	IV
2-2	含泥钙质砂岩	1605.10	/	/	5	/	V
2-3	钙质砂岩	1681.53	/	/	5	/	V
3-1	砂质泥岩	3909.24	/	/	8	/	VIII
3-2	砂泥岩互层	/	43.19	5.23	/	IV	IV
3-3	砂泥岩互层	705.41	/	/	4	/	IV
4-1	含砾钙粉砂岩	2877.39	/	/	7	/	VII
4-2	钙质粉砂岩	1577.49	/	/	5	/	V
4-3	钙质粉砂岩	/	131.09	10.98	/	VIII	VIII
5-1	砂砾岩	/	124.83	10.61	/	VIII	VIII
5-2	砂砾岩	/	70.49	7.20	/	VI	VI
5-3	砂砾岩	/	64.35	6.78	/	V	V
6-1	泥砂岩互层	/	101.689	9.21	/	VIII	VIII
6-2	泥岩	1403.40	/	/	5	/	V
6-3	砂质泥岩	1380.04	/	/	5	/	V
7-1	含砾泥质粉砂岩	/	23.21	3.56	/	III	III
7-2	泥岩	/	17.94	3.04	/	III	III
7-3*	泥砂岩互层	/	7.89	1.88	/	II	II
8-1	粉砂质板岩	/	109.65	9.70	/	VII	VII
8-2	粉砂质板岩	/	49.38	5.70	/	IV	IV
8-3	粉砂质板岩	1294.06	/	/	5	/	V

\*岩样存在缺陷,试验数值偏小。

## 4.2 地层可钻性分析

长沙机场地热探采结合井实际钻遇地层如下:

0~1375 m为白垩系上统戴家坪组上段,岩性主要为紫红色钙质粉砂岩、钙质细砂岩与粉砂质泥岩互层,局部夹灰、灰绿色泥岩,岩屑中可见少量石膏和方解石脉发育;

1375~1615 m为白垩系上统戴家坪组下段,岩性主要杂色砂砾岩,颜色以紫红、灰绿、灰白色为主,砾石成分较为复杂,有石灰岩砾石、火山碎屑角砾、泥岩砾石、大理石砾石及砂岩砾石,可见少量石英颗粒,发育少量石膏和方解石脉;

1615~1850 m为白垩系下统神皇山组下段,岩性主要杂色砂砾岩,颜色以暗紫红、灰、灰白色为主,砾石成分较为复杂,有火山碎屑角砾、泥岩砾石、砂岩砾石、石英砂岩砾石,发育少量石膏和方解石脉;

1850~2055 m为泥盆系中统跳马涧组紫红色细砂岩、泥岩、灰色石英砂岩互层,泥岩较纯较脆,岩屑整体滴稀盐酸无明显反应。

2055~2611.58 m为板溪群:上部为深灰色夹紫红色含砾砂、泥岩互层,砾石为灰色含钙质砾石,局部夹少量灰黑色泥质,发育少量方解石脉;下部为深灰色泥质板岩与浅灰色砂质板岩互层。

该套地层的平均钻时及其可钻性见表4。

## 4.3 钻头选择

工程实践中,先后采用了取心钻头、牙轮钻头、PDC钻头、金刚石钻头,从钻井井段、进尺、纯钻时间、钻速、钻压、转速、排量和泵压等不同参数下的钻头磨损程度作了对比分析。

一开0~60 m地层可钻性较好,可采用5刀19片PDC钻头,加大PDC切削齿仰角,增强钻头碎岩效率,配合高速螺杆提高机械钻速;二开59~1537 m井段使用PDC+螺杆复合钻具组合,钻进1537 m后因地层砾石含量增高,容易造成PDC钻头切削齿早期崩齿,不适合PDC钻头钻进,推荐使用牙轮钻头。

## 5 结论及建议

(1)岩石可钻性分级是一个复杂的问题,研究目的在于指导具体的工程实践。在长沙红层盆地首次取得2376 m的岩样进行测试分析和岩石可钻性界定,具有重要工程指导意义。

(2)从偏光显微镜的岩性测试结果和平均钻时

表4 地层可钻性分析

Table 4 Formation drillability analysis

序号	井段/m	平均钻时/ (min·m <sup>-1</sup> )	可钻性分析
1	0~1375	12.54	该层段主要使用PDC钻头,地层较均质、压实度不高,研磨性不强,可钻性较好
2	1375~1615	18.11	该段主要使用PDC钻头,部分层段含砾,造成PDC钻头早期崩片,研磨性不强,可钻性较好
3	1615~1850	30.28	该段主要使用617牙轮钻头,地层含砾,容易造成牙轮钻头崩齿,导致钻头寿命变短,可钻性较好
4	1850~2055	35.05	该段主要使用617牙轮钻头,地层硬脆,研磨性极强,容易造成钻头保径磨损。可钻性极差
5	2055~2611	34.61	该段使用了金刚石钻头、牙轮钻头。地层研磨性极强、压实度好。可钻性差

可推断出,该套地层自上而下地层致密度越来越高,整体可钻性逐渐降低。

(3)1537 m以浅地层,建议选择PDC+螺杆复合钻具组合;1537 m以深地层,推荐使用牙轮钻头。

## 参考文献(References):

- [1] 陈庭根. 钻井工程理论与技术[M]. 东营:中国石油大学出版社,2000.  
CHEN Tinggen. Drilling Engineering Theory and Technology [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2000.
- [2] 李春山,李伟,何亚彬. 利用岩屑元素含量评价岩石可钻性方法研究[J]. 钻采工艺,2018,41(4):25-26.  
LI Chunshan, LI Wei, HE Yabin. Study on rock drillability evaluation by element content in cutting [J]. Drilling & Production Technology, 2018,41(4):25-26.
- [3] 陈锋. 岩石可钻性分级研究进展[J]. 工程技术,2015(7):264.  
CHEN Feng. Research progress of rock drillability classification [J]. Engineering Technology, 2015(7):264.
- [4] 尹宏锦. 实用岩石可钻性[M]. 东营:中国石油大学出版社,1988.  
YIN Hongjin. Practical Rock Drillability [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 1988.

- [5] 纪慧,朱亮,楼一珊,等.南海深部温压地层岩石可钻性评价及应用[J].科学技术与工程,2022,22(33):14707-14713.  
JI Hui, ZHU Liang, LOU Yishan, et al. Evaluation and application of rock drillability of deep thermobaric strata in the South China Sea[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(33):14707-14713.
- [6] 韩栋材,陈显,赵铁峰.平顶山市区北部平顶山砂岩可钻性研究[J].西部探矿工程,2021,33(9):72-74,76.  
HAN Dongcai, CHEN Xian, ZHAO Tiefeng. Drillability of sandstone in northern Pingdingshan urban area[J]. West-China Exploration Engineering, 2019,33(9):72-74,76.
- [7] 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..
- [8] 石昆山.岩石的主要物理机械性质与岩石可钻性相关性的试验研究[J].地球科学,1987(6):657-664.  
SHI Kunshan. Experimental study on the correlation between the main physical and mechanical properties and the drillability of rock[J]. Earth Science, 1987(6):657-664.
- [9] 吴其干.岩石可钻性及岩石破碎机理探讨[J].西部探矿工程,2015,27(1):70-72.  
WU Qigan. Discussion on rock drillability and rock crushing mechanism [J]. West-China Exploration Engineering, 2015, 27(1):70-72.
- [10] 王亚飞,张占荣,刘华吉,等.基于模型融合的钻进参数识别岩石类型研究[J].钻探工程,2023,50(2):17-25.  
WANG Yafei, ZHANG Zhanrong, LIU Huaji, et al. Data-driven model for the identification of the rock type by drilling data[J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):17-25.
- [11] 熊虎林,徐龙生.泉子街地区地层可钻性分析及钻头选型[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(2):30-34.  
XIONG Hulin, XU Longsheng. Formation drillability analysis and drill bit selection for the Quanzijie area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(2):30-34.
- [12] 闫吉曾.红河油田地层可钻性研究与钻头优选[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(6):63-66.  
YAN Jizeng. Research on the Formation drillability and bit selection in Honghe Oilfield[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(6):63-66.
- [13] 郭臣业,鲜学福,吴轩洪,等.岩石破碎功、坚固性系数、强度关系的实验研究[J].重庆建筑大学学报,2008,30(6):28-31.  
GUO Chenye, XIAN Xuefu, WU Xuanhong, et al. The relationship among rock crushing energy, the protodyakonov coefficient and rock strength[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008,30(6):28-31.
- [14] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.  
CAI Meifeng. Rock Mechanics and Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [15] E.T.巴拉诺夫,徐小荷.岩石普氏坚固性系数的应用[J].国外金属矿采矿,1985(1):17-18.  
E.T. Baranov, XU Xiaohe. Application of Platts coefficient of rock firmness[J]. Metal Mining Abroad, 1985(1):17-18.
- [16] 维特,C.G.岩石可钻性指数[M].北京:煤炭工业出版社,1980.  
Witt C.G. Drillability Index of Rock[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1980.

(编辑 王文)