

# 泉子街地区地层可钻性分析及钻头选型

熊虎林<sup>1</sup>, 徐龙生<sup>2</sup>

(1.新疆地质矿产勘查开发局第九地质大队,新疆乌鲁木齐 830009; 2.核工业二三〇研究所,湖南长沙 410007)

**摘要:** 泉子街地区页岩气参数井钻进过程中存在地层可钻性差、研磨性较强,钻进速度慢,单只钻头(牙轮、PDC)进尺少且报废率高等问题。本文通过对泉子街区块岩石可钻性进行分析、评价,可以为该区页岩气勘查钻井施工钻头选型和钻井工程设计优化提供依据,从而达到提高该区钻井施工效率、降低钻井成本、缩短项目工作周期的目的。

**关键词:** 页岩气参数井; 地层可钻性; 分析评价; 钻头选型

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2019)02-0030-05

## Formation drillability analysis and drill bit selection for the Quanzijie area

XIONG Hulin<sup>1</sup>, XU Longsheng<sup>2</sup>

(1. No. 9 Geological Team, Xinjiang Geology and Mineral Resources Exploration and Development Bureau, Urumqi Xinjiang 830009, China; 2. Nuclear Industry 230 Research Institute, Changsha Hunan 410007, China)

**Abstract:** During drilling of shale gas parameter wells in the block of Quanzijie area, there were some problems such as poor formation drillability, strong abrasiveness, slow drilling rate, less footage per drill bit (cone, PDC) and high abandonment rate. Through the analysis and evaluation of the rock drillability of the Quanzijie block, this paper provides the basis for shale gas exploration drilling bit selection and the optimization of the drilling design in this area so as to achieve the purpose of improving drilling efficiency, reducing drilling cost and shortening the construction duration.

**Key words:** shale gas parameter well; formation drillability; analysis and evaluation; drill bit selection

### 0 引言

2016—2017年,新疆地矿局第九地质大队承担了新疆吉木萨尔县泉子街区块页岩气战略选区调查任务,该项目为新疆维吾尔自治区地质勘查基金项目。项目施工以二叠系芦草沟组上段烃源岩为主要目的层,采用油气勘探线剖面测量、油气二维地震、钻探施工和录井、测井技术,调查区内页岩气烃源岩有机质丰度、类型、成熟度、厚度分布、埋深、构造、储层物性及含气性等特征,获取气层评价参数;探索区内页岩气分布与富集条件,综合确定泉子街区块内先导试验区范围。在先导试验区内进行参数井施工,获取页岩气产能评价资料。

### 1 钻井施工情况

#### 1.1 区块内钻井情况

区块内施工了准页4井,该井为参数井,设计井深3300.00 m,  $\varnothing 215.9$  mm口径完钻井深3439.50 m;全井取心20回次,取心段总长117.81 m,岩心总长110.56 m,平均采取率93.8%。施工周期209 d,钻机月速度493.63 m/台月,机械钻速697.10 m/台月。目的层烃源岩气测反应良好,通过测井资料优选压裂层段,现该井已进入压裂施工阶段。

#### 1.2 钻遇地层情况

区内地层主要包括第四系全新统,新近系上新统昌吉河群( $N_2ch$ ),三叠系中一晚三叠统小泉沟群( $T_{2-3}xq$ )、早三叠统烧房沟组( $T_1s$ )、韭菜园组( $T_1j$ ),二叠系梧桐沟组( $P_3w$ )、泉子街组( $P_3q$ )、芦

收稿日期:2018-05-16; 修回日期:2018-11-27 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.02.005

基金项目:新疆维吾尔自治区地质勘查项目“新疆准噶尔盆地南缘重点远景区页岩气调查评价”(编号:N41-2-LQ01)

作者简介:熊虎林,男,汉族,1986年生,勘查技术与工程专业,从事钻探施工与管理工作,新疆乌鲁木齐市沙依巴克区西山路67号,447573557@qq.com。

引用格式: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.

草沟组( $P_2l$ )。以芦草沟组黑色炭质泥页岩夹油页岩为主要目的层,完钻层位为芦草沟组下段。准页 4 井实际揭露地层情况见表 1。

表 1 准页 4 井实际揭露地层情况  
Table 1 Actual stratum of Zhunye-4 well

| 地层名称 | 地层代号        | 底界深度/m  | 岩性                                     |
|------|-------------|---------|----------------------------------------|
| 第四系  | Q           | 332.29  | 主要为河流冲积、山前洪积等,成分主要为砾石层夹砂层,砾径 0.5~10 cm |
| 昌吉河群 | $N_2ch$     | 880.39  | 以砂泥岩为主,上部砾岩增多,变为砂砾岩与泥岩互层               |
| 小泉沟群 | $T_{2-3xq}$ | 1474.15 | 砾岩、砂岩与泥岩、炭质泥岩互层夹薄煤;中部为泥岩夹少量薄层细砂岩       |
| 烧房沟组 | $T_{1s}$    | 1607.98 | 棕红色泥岩、砂质泥岩夹灰绿色薄层细砂岩、粉紫色粉砂岩             |
| 韭菜园组 | $T_{1j}$    | 2133.99 | 灰绿色厚层一块状砂岩、砂砾岩与灰绿色、暗红色泥岩、砂质泥岩互层        |
| 梧桐沟组 | $P_3w$      | 2552.40 | 灰绿色、黄绿色、灰黑色夹紫红色粉砂质泥岩、泥岩夹粉砂岩及少量细砂岩      |
| 泉子街组 | $P_3q$      | 2753.24 | 主要为紫红色、棕红色砾岩、砾质泥岩、褐色泥岩夹灰绿色泥岩、砂岩        |
| 芦草沟组 | $P_2l$      | 3439.50 | 灰黑色炭质泥页岩夹油页岩及多层白云质灰岩、泥灰岩               |

## 2 可钻性分析及评价

岩石可钻性是指岩石抵抗钻进破碎的能力,主要包括两方面的内容,即岩石本身强度和破碎难度,另一方面就是岩石在一定的钻井工艺技术和钻井工具条件下,被破碎的难易程度。通过岩样测试、实钻数据结合测井地层声波时差数据综合分析岩石可钻性并提出钻头选型、井身结构优化建议。

大量研究表明,岩石的纵波时差、密度和泥质含量是影响岩石弹性和强度的重要因素。声波时差可得出声波在地层中的传播速度,从而间接反应地层岩石硬度、弹性模量、泊松比等力学性质。

### 2.1 声波时差与可钻性级值相关关系模型建立

国内石油钻井研究者通过微钻试验、岩石力学测试、实钻数据收集等方法,表明牙轮钻头钻进时地层可钻性与声波时差的相关关系,对数函数相关性最大。其表达式虽各有差别,但总体变化趋于一致。一般的,岩石密度高,声波时差值越低,地层可钻性级值越高<sup>[1]</sup>。

按《岩石可钻性测定及分级方法》(SY/T 5426—2000)规定,可通过微钻试验确定岩样可钻性级值。即使用特制微牙轮钻头,以一定的钻压(890 N±20 N)和转速(55 r/min±1 r/min)在岩样上钻 3 个深度为 2.4 mm 的孔,取 3 个孔钻进时间的平均值为岩样的钻时( $t_d$ ),对  $t_d$  取以 2 为底的对数值作为该岩样的可钻性级值  $K_d$ ,计算公式为  $K_d = \log_2 t$ 。

取目的层段岩样在全自动可钻性测试仪上进行了牙轮钻头微钻试验,获取了岩样牙轮钻头可钻性级值;并通过 TAW2000 微机控制岩石三轴试验机

完成了岩样硬度测试。表 2 为岩样可钻性级值及硬度试验数据,并根据测井资料对应列出了相应取样深度的岩石声波时差。

表 2 准页 4 井岩样牙轮钻头可钻性试验数据  
Table 2 Cone bit drillability experimental data of Zhunye-4 well core sample

| 岩性层位  | 取样深度/<br>m | 牙轮可钻<br>性级值 | 硬度/<br>MPa | 声波时差/<br>( $\mu s \cdot m^{-1}$ ) |
|-------|------------|-------------|------------|-----------------------------------|
| 炭质泥岩  | 3057.43    | 6.18        | 808.6      | 220                               |
| 泥质灰岩  | 3073.00    | 5.70        | 756.6      | 211                               |
| 炭质泥岩  | 3135.48    | 6.02        | 1652.0     | 210                               |
| 泥质灰岩  | 3160.52    | 6.11        | 1139.5     | 208                               |
| 砂岩    | 3214.85    | 5.30        | 924.5      | 222                               |
| 炭质泥岩  | 3285.45    | 6.70        | 1814.2     | 170                               |
| 炭质泥岩  | 3310.03    | 6.45        | 784.1      | 176                               |
| 泥质粉砂岩 | 3375.45    | 5.21        | 1025.1     | 184                               |

利用表 2 中岩样的 8 个可钻性试验数据,对应声波时差数据,结合该地区实钻资料,以声波时差数据为横坐标,可钻性级值为纵坐标,选用对数函数模型来拟合岩石可钻性和声波时差间的关系。

图 1 为所测试岩样牙轮钻头可钻性级值试验数据对应深度处声波时差数据所获得的相关关系曲线<sup>[2-3]</sup>。

参考前人对准噶尔盆地地层可钻性研究资料,孙连环等以声波时差和岩石密度表征地层可钻性<sup>[4]</sup>。通过回归分析建立牙轮钻头可钻性级值与声波时差值之间的关系如下:

$$K_d = -6.13 \ln(Ac) + 38.45$$

式中: $K_d$ ——地层牙轮钻头可钻性级值; $Ac$ ——声波时差, $\mu s/m$ 。

应用 F 检验法对上式进行回归显著性检验,初步判断,回归效果显著。

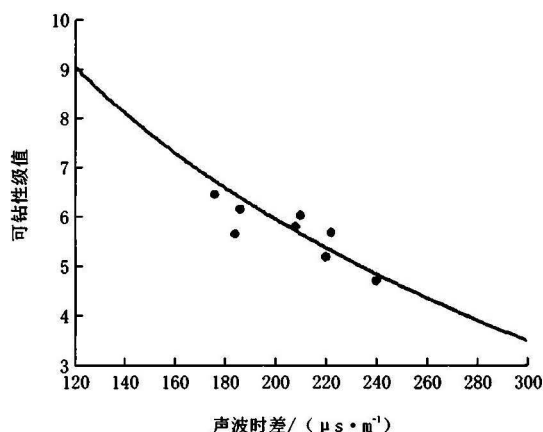


图1 所测地层牙轮钻头可钻性级值与声波时差的关系  
Fig.1 Relationship between the cone bit drillability and the interval transit time

## 2.2 可钻性级值对应地层钻时分析

准页4井第四系以砾石层为主,砾径0.5~10 cm,昌吉河群上部砾岩较多,砂砾岩与泥岩互层为其主要特征。钻井过程中出于井斜控制需要,采用小钻压吊打。钻时较高,在此不作讨论。

根据可钻性评价模型,对照准页4井1000 m以深声波时差测井资料及岩石密度资料。做出声波时差与可钻性级值对应图见图2。

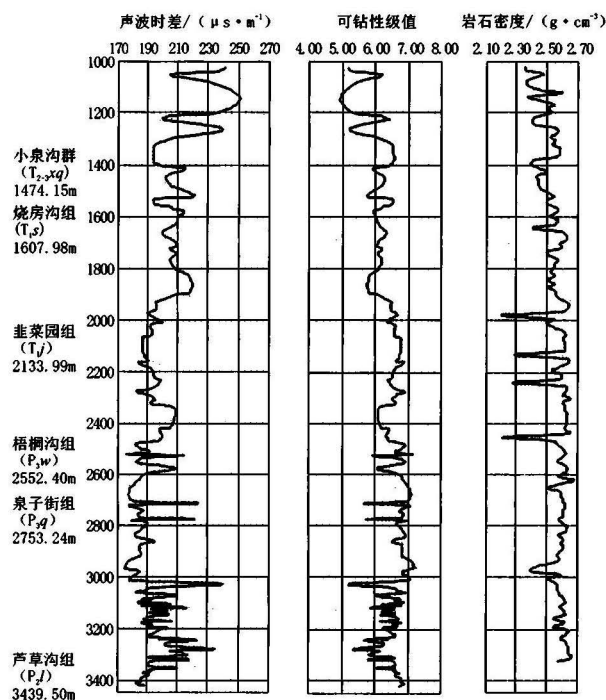


图2 准页4井声波时差与可钻性级值对应图  
Fig.2 Corresponding chart of the drillability and the interval transit time of Zhunye-4 well

分析图2,小泉沟群地层平均可钻性级值5.94,

变化较大;牙轮钻头平均钻速2.63 m/h。结合岩屑录井资料,小泉沟群(1000~1474.15 m)砾岩、砂岩与泥岩、炭质泥岩互层,夹薄煤,故地层可钻性级值表现在图上起伏明显。

烧房沟组—韭菜园组(1474.15~2133.99 m),平均可钻性级值6.05,平均机械钻速2.58 m/h,地层以砂岩、砂砾岩、泥岩互层,砂岩硅质含量高。

梧桐沟组—泉子街组(2133.99~2753.24 m),牙轮钻头平均钻速2.14 m/h,可钻性级值6.43。

钻井自2753.24 m进入芦苇沟组目的层,间断取心,全面钻进全部使用牙轮钻头,取心使用PDC钻头。牙轮钻头可钻性级值6.48,平均机械钻速1.52 m/h。据测井资料,去铀伽马相对减小,中子和密度分开度减小,钍钾分开度相对减小,表明泥质含量相对降低。对应深度段硅质含量相对增加,平均为53.7%<sup>[5]</sup>。按《岩石可钻性测定及分级方法》(SY/T 5426-2000),属中硬—硬地层。

## 3 岩样力学测试数据分析

准页4井全井仅在目的层段间断取心,故力学试验岩样全部取自目的层段(2753.24~3439.50 m)。累计取力学岩样10个,围压取值0及30 MPa条件下,试验数据如表3所示。

从表3岩心岩石力学试验结果来看,芦苇沟组岩样泊松比参照围压为0时数据在0.104~0.315之间,平均值为0.178。单轴抗压强度较高。

分析岩样抗压强度,围压为0时,可视作单轴抗压强度,但也仅能作为岩石抗压强度下限。围压为30 MPa时,抗压强度63.71~236.75 MPa,平均值为137.90 MPa。受围压影响,岩石的三轴抗压强度明显大于单轴抗压强度,比值范围1.4~5.3。且岩样致密程度很高,表现出很高的单轴抗压强度。

综合分析10组岩样抗压强度,弹性模量为4.94~32.31 GPa,脆性特征不明显。从硬度分析,测试8组样品中,硬度714.2~1814.2 MPa,平均为1113.07 MPa。

## 4 结合钻头使用综合分析地层可钻性

表4列出了具备较高钻速的钻头的使用情况,全井牙轮、PDC钻头交互使用。

准页4井第四系和新近系昌吉河群使用牙轮、钻头钻进,卵砾石层砾径大,采用轻压吊打,控制

表 3 准页 4 井岩样力学试验数据

Table 3 Mechanical experimental data of Zhunye-4 well core sample

| 岩样编号       | 取样井深/m          | 弹性模量/GPa | 泊松比   | 抗压强度/MPa | 围压(22.8℃)/MPa | 单轴抗拉强度/MPa |
|------------|-----------------|----------|-------|----------|---------------|------------|
| ZY04-LX-1  | 2847.18~2847.38 | 28.99    | 0.142 | 145.28   | 0             | 21.91      |
|            |                 | 30.91    | 0.170 | 210.03   | 30            |            |
| ZY04-LX-2  | 3057.22~3057.43 | 11.73    | 0.263 | 105.03   | 0             | 18.68      |
|            |                 | 28.24    | 0.162 | 236.75   | 30            |            |
| ZY04-LX-3  | 3072.85~3073.00 | 16.99    | 0.104 | 66.59    | 0             | 14.56      |
|            |                 | 27.25    | 0.201 | 172.30   | 30            |            |
| ZY04-LX-4  | 3135.24~3135.48 | 26.09    | 0.278 | 58.11    | 0             | 16.57      |
|            |                 | 9.78     | 0.285 | 94.30    | 30            |            |
| ZY04-LX-5  | 3160.11~3160.52 | 13.57    | 0.175 | 20.48    | 0             | 4.65       |
|            |                 | 4.94     | 0.218 | 69.78    | 30            |            |
| ZY04-LX-6  | 3214.52~3214.85 | 5.80     | 0.315 | 29.57    | 0             | 12.68      |
|            |                 | 24.90    | 0.186 | 156.27   | 30            |            |
| ZY04-LX-7  | 3285.08~3285.45 | 12.10    | 0.127 | 46.27    | 0             | 14.51      |
|            |                 | 23.87    | 0.121 | 167.36   | 30            |            |
| ZY04-LX-8  | 3309.76~3310.03 | 15.05    | 0.133 | 28.19    | 0             | 7.77       |
|            |                 | 15.30    | 0.259 | 69.97    | 30            |            |
| ZY04-LX-9  | 3375.29~3375.45 | 11.72    | 0.125 | 20.37    | 0             | 13.78      |
|            |                 | 6.96     | 0.241 | 63.71    | 30            |            |
| ZY04-LX-10 | 3433.35~3433.60 | 19.31    | 0.121 | 65.16    | 0             | 23.76      |
|            |                 | 32.31    | 0.234 | 138.87   | 30            |            |

表 4 准页 4 井钻头使用情况

Table 4 Bit usage of Zhunye-4 well

| 钻头编号  | 直径/mm | 类型  | 型 号                    | 地层代号               | 井段/m            | 钻速/(m·h <sup>-1</sup> ) | 钻进方式 |
|-------|-------|-----|------------------------|--------------------|-----------------|-------------------------|------|
| 1     | 311   | 牙轮  | HJ517G                 | T <sub>2-3xq</sub> | 880.39~1049.60  | 1.85                    | 旋转   |
| 2     | 311   | 牙轮  | HJ517G                 | T <sub>2-3xq</sub> | 1049.60~1474.15 | 2.25                    | 旋转   |
| 3     | 311   | PDC | DF1606BU               | T <sub>1s</sub>    | 1474.15~1555.83 | 1.90                    | 旋转   |
| 4     | 216   | 牙轮  | HJ537G                 | T <sub>1s</sub>    | 1558.83~1607.98 | 2.25                    | 旋转   |
| 5-6   | 216   | PDC | BKSH1655LOY、BKSH1955LT | T <sub>1j</sub>    | 1607.98~2133.99 | 2.68                    | 旋转   |
| 7-8   | 216   | PDC | DB117、GS605            | P <sub>3w</sub>    | 2133.99~2552.40 | 1.04                    | 复合   |
| 9     | 216   | 牙轮  | HG517                  | P <sub>3q</sub>    | 2552.40~2554.13 | 0.69                    | 复合   |
| 10-12 | 216   | PDC | DF3456、SKH613M、DF3446  | P <sub>3q</sub>    | 2554.13~2650.14 | 1.69                    | 复合   |
| 13-14 | 216   | 牙轮  | HG517、HJT537GK         | P <sub>3q</sub>    | 2650.14~2753.24 | 0.97                    | 复合   |
| 15-16 | 216   | 牙轮  | LST617GL、T517G         | P <sub>2l</sub>    | 2753.24~3439.50 | 1.32                    | 复合   |

井斜, 钻时很高。以下汇总典型层位钻头使用情况 & 可钻性级值分析。

#### 4.1 韭菜园组(T<sub>1j</sub>)

前期采用 HG517 牙轮钻头钻进, 机械钻速仅 1.05 m/h。换贝克休斯 PDC(BKSH1955LT) 钻头, 该钻头采用平滑切削技术控制切削深度, 减轻钻头振动; 肋骨式切削齿设计, 提升切削齿强度。钻速提升明显, 达到 2.68 m/h。该层位平均可钻性级值 6.15。

#### 4.2 梧桐沟组(P<sub>3w</sub>)

使用 DB117 及 GS605 型 PDC 钻头, 采用转盘 + 高速螺杆驱动, 均出现掉、崩、碎齿等问题, 造成钻

头的先期损坏。主要原因为布齿设计存在一些不合理的地方, 布齿设计的不足使得某些部位的切削齿受力较大容易产生先期损坏。应使用自锐性强、抗冲击性能好的切削齿, 并优化钻头结构形式, 提高钻头的工作稳定性。该层位平均可钻性级值 6.37。

#### 4.3 泉子街组(P<sub>3q</sub>)

井段夹层多, 岩性复杂, 钻遇软硬交错层段 6 层, 可钻性级值 4.00~6.90, 不均质现象明显, 推荐选用具有减震结构的 PDC 钻头以提高钻头穿越夹层的能力。

#### 4.4 芦苇沟组(P<sub>2l</sub>)

芦苇沟组为钻井目的层, 全面钻进使用

LST617GL及T517G型牙轮钻头。该层位可钻性级值平均6.46,最高达7.45。两类钻头从齿形设计到布齿数量均不能满足地层钻进要求。

牙轮钻头可钻性试样均取自该层位,通过声波时差曲线建立的可钻性级值剖面与实测可钻性级值对比,8个试验岩样平均可钻性级值5.91,处理后目的层位平均可钻性级值6.41,相对偏差7.8%。

## 5 结论

(1)通过建立可钻性级值求取模型,结合实钻资料,获取了泉子街地区昌吉河群至芦苇沟上段地层可钻性剖面。牙轮钻头可钻性测定岩样均取自芦苇沟组,存在样本选取层位单一及数量不足等问题。

(2)泉子街地区昌吉河群至芦苇沟上段地层可钻性级值平均为6.03,最大值为7.45。可钻性级值剖面与实钻情况基本吻合。

(3)芦苇沟组上段为页岩气成藏段,也是钻井目的层位,泥质含量高,岩石平均密度 $2.73\text{g}/\text{cm}^3$ 。推荐使用HJ537G宽齿三牙轮钻头。该钻头采用宽顶勺形齿为主切削齿,提高了牙轮的井底破碎体积和钻头井底覆盖率;大偏移值设计,提高了牙齿在井底的剪切滑移距离,增强了钻头破碎岩石的体积。

## 参考文献(References):

- [1] 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.  
ZHAO Jun, CAI Yaxi, LIN Yuanhua. Application of sonic logs to rock drillability and bit selection[J]. Well Logging Technology, 2001, 25(4): 305-307.
- [2] 段隆臣,刘鹏,高元宏,等.青海野马泉矿区岩石可钻性的分析和应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(10):1-4.

- DUAN Longchen, LIU Peng, GAO Yuanhong, et al. Analysis and application of rock drillability in Qinghai Yemaquan mine [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(10): 1-4.
- [3] 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.
- [4] 孙连环,鲍洪志,杨红歧,等.准噶尔盆地地层岩石可钻性研究[J].石油地质与工程,2009,23(3):86-88.  
SUN Lianhuan, BAO Hongzhi, YANG Hongqi, et al. Study on drillability of rocks in Junggar basin[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2009, 23(3): 86-88.
- [5] 刘向君,宴建军,罗平亚,等.利用测井资料评价岩石可钻性研究[J].天然气工业,2005,25(7):69-71.  
LIU Xiangjun, YAN Jianjun, LUO Pingya, et al. Evaluation on rock drillability by well logging data[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(7): 69-71.
- [6] 夏宏南,杨明合,谭家虎,等.一种利用测井资料预测岩石可钻性的计算机方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(1):47-49.  
XIA Hongnan, YANG Minghe, TAN Jiahu, et al. A computerized methods to calculate the rock drillability with logging data[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2004, 31(1): 47-49.
- [7] 王玉玺,张思慧,李欢欢.根据钻速方程分析提高钻速的有效途径[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(3):14-17.  
WANG Yuxi, ZHANG Sihui, LI Huanhuan. Effective approach to improving drilling rate according to the analysis on drilling rate equation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(3): 14-17.
- [8] 白胜.库车山前地区抗钻特性及钻头优选技术研究[D].湖北荆州:长江大学,2015.  
BAI Sheng. Kuqa piedmont region drilling resistance characteristic and bit drilling optimization technology research[D]. Jingzhou Hubei: Yangtze University, 2015.

(编辑 韩丽丽)