

# 古近系地层取心钻进速度影响因素初步分析

张丽, 白永辉, 王长城, 景龙  
(河北省地矿局第四水文工程地质大队, 河北 沧州 061000)

**摘要:**河北平原古近系地层主要发育有东营组、沙河街组和孔店组,其岩性以泥灰岩、泥岩、钙质泥岩、石膏泥岩和砂岩为主。影响取心钻探钻进速度的物理力学因素较多,本文主要以岩石密度、抗压强度和弹塑性为主进行了研究分析。研究得出岩石密度和抗压强度均随着地层深度的增加而增加,古近系东营组和沙河街组一段至三段岩石密度明显低于沙河街组四段和孔店组,钻进取心速度差异明显;古近系地层中的泥岩段由于粘土矿物成分占比增加造成岩石弹塑性增强,对钻进速度的影响比较明显;文中提出了古近系地层取心钻探过程中地层的可钻性级别及合理的钻头类型匹配。

**关键词:**古近系地层;岩石密度;岩石抗压强度;取心钻探;钻进速度;岩石弹塑性

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2019)12-0024-05

## Preliminary analysis of the influencing factors of core drilling rates in the Paleogene strata

ZHANG Li, BAI Yonghui, WANG Changcheng, JING Long

(The Fourth Hydrological Engineering Geological Team of Hebei Bureau, Cangzhou Hebei 061000, China)

**Abstract:** The Paleogene strata in Hebei Plain mainly consist of Dongying Group, Shahejie Group and Kongdian Group, which are lithologically marl, mudstone, calcareous mudstone, gypsum mudstone and sandstone. There are many physical and mechanical factors that affect the core drilling rate. The study shows that the rock density and compressive strength increase with the formation depth. The rock density of the first to the third member of Dongying Group and Shahejie Group is significantly lower than that of the fourth member of Shahejie Group and Kongdian Group. The higher content of clay minerals in the mudstone section of the Paleogene strata results in greater elasticity and plasticity of the rock, which has a significant influence on the drilling rate. In this paper, the drillability of the Paleogene strata and the reasonable matching bit types are presented for core drilling.

**Key words:** Paleogene strata; rock density; rock compressive strength; core drilling; drilling rate; rock elastoplastic behavior

## 0 引言

古近系包括了古新统、始新统和渐新统,其顶界年龄为 23.03 Ma,底界年龄为(65.5±0.3) Ma。河北平原古近系地层主要发育有东营组、沙河街组和孔店组地层,本文研究的古近系地层埋藏深度在 1650~3450 m,岩性主要为泥灰岩、钙质泥岩、石膏泥岩和砂岩。在河北平原古近系地层连续沉积,仅在台拱区古近系底部地层有缺失,其岩性相近,矿物成分大体相同,其物理力学性质也基本相同。

取心钻探作业的对象是岩石,岩石的物理力学性

质是选择钻进工艺和指导钻探生产的重要依据。地层岩石的基本性质是影响钻头破碎效率所不可更改的客观因素<sup>[1-2]</sup>。为了提高钻进效率,对不同地层岩石物理力学性质进行分析研究是十分必要的。岩石的物理力学性质有许多,本文主要选取对取心钻探影响较为明显的岩石密度、岩石硬度、抗压强度以及针对泥岩的弹塑性等物理力学因素进行分析研究。

本文的研究主要是基于我队 2012—2016 年完成的河北省沧县盐矿普查项目及 2017 年开展的沧州深部大口径盐矿钻进技术研究项目。其中盐矿普

收稿日期:2019-02-20; 修回日期:2019-11-22 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.12.005

作者简介:张丽,女,回族,1973 年生,工程师,水文地质与勘查技术专业,从事水文地质工程地质勘查工作。

通信作者:白永辉,男,回族,1974 年生,总工程师,正高级工程师,水文工程地质专业,从事水文地质工程地质勘查工作,河北省沧州市黄河东路蔡御街,swsdyh@163.com。

引用格式:张丽,白永辉,王长城,等.古近系地层取心钻进速度影响因素初步分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(12):24-28.

ZHANG Li, BAI Yonghui, WANG Changcheng, et al. Preliminary analysis of the influencing factors of core drilling rates in the Paleogene strata[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(12):24-28.

查项目共施工取心钻孔 3 个,孔深分别为 3000、3250 和 3450 m,终孔孔径 216 mm,取心口径为 90~102 mm,终孔层位为孔店组地层。本文所研究的样品测试数据和钻进速度数据等均来自这 3 个钻孔。

## 1 岩石物理力学特性分析

### 1.1 岩石密度、抗压强度

岩石密度是指岩石原状结构岩块的单位质量,可以直观反映岩石的硬度。通常情况下岩石的密度大,其硬度一定会高<sup>[3-4]</sup>。研究过程中岩石的硬度对取心钻进速度的影响可以用岩石密度替代分析。岩石强度是其抵抗外力破坏的能力,根据外力性质的区别可分为抗压、抗拉、抗剪和抗弯强度,本文仅对抗压强度进行分析。抗压强度可以反映破碎孔底岩石所需加在钻头上荷载(钻压)的大小。

钻探施工采用 RT30/1700 型石油钻机及 QS-98-II 型单动双管取心钻具,通过钻孔连续取心进行密度测试和抗压强度测试,对比不同深度、不同地质时代的差异,同时也可分析其对钻速的影响。在 2017 年开展的钻进技术研究项目中在 3 个钻孔中取得 41 件密度测试样品数据和 26 件抗压强度测试数据,岩石密度测试按照《煤和岩石物理力学性质测定方法第 2 部分:煤和岩石真密度测定方法》(GB/T 23561.2-2009)进行;抗压强度参照《煤和岩石物理力学性质测定方法第 7 部分:单轴抗压强度测定及软化系数计算方法》(GB/T 23561.7-2009)进行,最终通过汇总统计形成表 1 所示的数据。

表 1 岩石密度、抗压强度测试数据统计

Table 1 Summary of rock density and compressive strength test data

层 位	岩石密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	抗压强度/ MPa	地层岩性
东营组 Ed	2.50~2.54	11.8~12.5	钙质泥岩
古 近 系	沙一段 Es <sup>1</sup> 、沙二段	14.3~19.4	钙质泥岩
	Es <sup>2</sup> 、沙三段 Es <sup>3</sup>	16.6~28.4	泥灰岩
	沙四段 Es <sup>4</sup>	19.9	钙质泥岩
	2.73~2.96	29.2~74.1	石膏泥岩
孔店组 Ek	2.50~2.65	25.9	砂岩

由表 1 分析研究可初步得出如下 4 个认识:

(1)单孔内,岩石密度随着深度的增加具有增大趋势,不同时代的地层,岩石密度有所区别,老地层较新地层密度大,这种现象与固结程度逐步增强、地层逐步密实相一致<sup>[5-7]</sup>。施工现场在进行岩心整理期间,同样取心直径的岩心,下部层段的岩心明显要

比上部层段重,这与岩石密度测试结果逐步增加相吻合。岩石密度的差异一定程度上表现了不同地质时代地层的成岩程度。

(2)古近系地层与古老地层相比,其岩石抗压强度较低,但随深度增加,其抗压强度呈缓慢增加趋势。

(3)不同岩性之间,沙河街组四段石膏泥岩密度和抗压强度均最高,平均值达  $2.83 \text{ g/cm}^3$ 、42.9 MPa。泥灰岩密度和抗压强度相对较低。同一种岩性,其密度随地层时代和埋藏深度不同而不同,即地质时代越老,密度越大,抗压强度越大。埋藏深度越深,密度越大,抗压强度越大。这种现象与固结程度逐步增强、地层逐步密实的基本认识相一致。

(4)从单孔钻进难易程度分析,浅部地层固结不完全,密度稍低,钻进刻取岩石较容易,钻进速度较快;深部地层固结程度高,密度增大,钻进刻取岩石较困难,钻进速度下降明显。密度变化幅度较大的孔段,钻速变化也较大,同一时代的地层,密度越低,钻进速度越高。

### 1.2 岩石的弹塑性

岩石在外力作用下,只改变其形状和大小而不破坏自身的连续性,该性能称之为塑性。岩石的塑性反映吸收残余形变或吸收岩石未破碎前不可逆形变的机械能量的特性。岩石在外力作用下,首先发生弹性变形,然后产生塑性形变,最后发生脆性破坏,该类岩石称之为弹塑性岩石。

由于古近系地层泥岩相对较多,从岩心表面观察判断古近系地层均具有脆性特征,在样品切割过程中岩样也的确表现出了脆性特征,容易开裂,甚至不能加工成形(如图 1 所示)。但在实际钻进期间,个别层段却发生蠕变缩径现象,塑性特征明显。因此在古近系地层取心钻进过程中分析地层岩石的弹塑性影响,有助于对孔内钻进情况进行正确判断,从



图 1 试样加工崩散照片

Fig.1 Photo of the broken sample during processing

而指导钻进工艺。

在2017年开展的钻进技术研究项目中共取得5件弹塑性测试样品数据,均为沙河街组一段—三段地层测试样。按岩性分类,钙质泥岩1件,泥灰岩4件。经测试,岩样的塑性指数介于1.44~2.12。按照岩石塑性指数分类,均属于弹塑性岩石。

## 2 钻进速度影响因素分析

### 2.1 取心钻进影响因素

为了更好地分析研究上述岩石物理力学特性对钻进速度的影响,找出规律,本文对古近系不同地质时代、不同岩性地层的岩石密度、抗压强度测试结果与对应深度范围内地层的平均钻速进行了汇总统计(见表2)。

表2 岩石密度、强度与钻速统计分析

Table 2 Summary of rock density, strength and drilling rates

层位	地层岩性	岩石密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	抗压强 度/MPa	钻进速度/ ( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )
东营组 Ed	钙质泥岩	2.52	12.2	1.43
古近系	沙一段 Es <sup>1</sup> 、沙二段	钙质泥岩	17.4	1.31
	Es <sup>2</sup> 、沙三段 Es <sup>3</sup>	泥灰岩	22.0	1.30
	钙质泥岩	2.57	19.9	2.00
	石膏泥岩	2.83	42.9	0.67
孔店组 Ek	砂岩	2.58	25.9	0.49

由表2分析研究可以初步得出如下3条认识:

(1)随着深度的增加,岩石密度和抗压强度具有增加之势,造成了钻进取心速度、难度增加,表现为机械钻速下降趋势。

(2)岩石密度越大,其强度也越大,影响岩石破碎工具的选择,即钻头类型的选择。浅部地层,岩石密度小、抗压强度低,采用硬质合金为主的切削刃钻进效率较高;深部地层,岩石密度大、抗压强度高,采用金刚石复合片为主的切削刃钻进效果较好<sup>[8-9]</sup>。

(3)在同类钻头使用条件下,密度较低、抗压强度较小的孔段,钻速较高;密度较大、抗压强度较高的层段,钻速较低。

### 2.2 影响因素分析

为了进一步分析不同深度、不同地质时代古近系地层取心钻进过程中各影响因素的具体影响程度,本文绘制了某钻孔岩石密度随深度的变化曲线(见图2),绘制了同一钻孔取心钻进的平均钻进速度随深度的变化曲线(见图3)。

由图2可发现,该取心钻孔古近系地层基本可

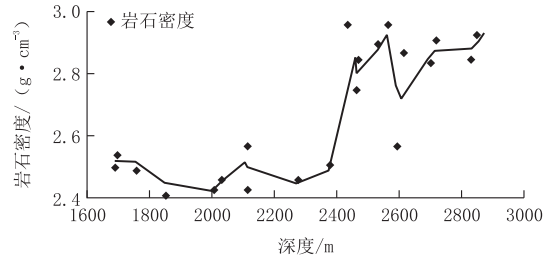


图2 岩石密度随深度变化趋势曲线

Fig.2 Trend line of rock density vs depth

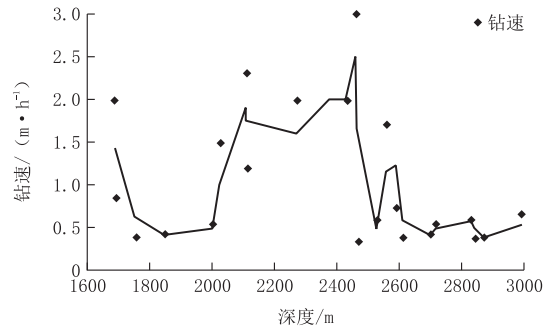


图3 钻速随深度变化趋势曲线

Fig.3 Trend line of drilling rate vs depth

以2400 m为界,浅部岩石的密度明显小于深部地层的密度,浅部岩石密度平均 $2.5 \text{ g/cm}^3$ 左右,深部岩石密度平均 $2.9 \text{ g/cm}^3$ 左右。钻探地质编录表明,2400 m左右是沙河街组三段和四段交界处,也就是说古近系沙河街组四段以深地层岩石密度远大于浅部地层密度,浅部以泥灰岩为主,下部以石膏泥岩和砂岩为主。针对平均钻速而言,古近系沙河街组四段以深的钻进速度应远低于沙河街组四段以浅地层,与表2反映出的统计规律基本吻合。

由图3可见,该取心钻孔古近系地层基本可以2500 m为界,浅部地层平均钻速在 $1.5 \sim 2.0 \text{ m/h}$ ,深部地层平均钻速在 $0.5 \text{ m/h}$ 左右,与图2所反映的规律基本一致,即岩石密度小,钻速快,岩石密度大,钻速慢。

由图3可以发现局部钻速异常,该取心钻孔在1750~2080 m段的取心钻速明显比前后地层偏低,最低的仅 $0.40 \text{ m/h}$ 左右。同时从图2可见该段地层的岩石密度与前后地层基本相同,该段地层的钻进速度与前所述岩石密度小钻速快,岩石密度大钻速慢这一基本规律明显不符。

为分析查找1750~2080 m段钻进速度异常的原因,通过查阅地质钻探班报记录,记录显示:该段钻遇地层岩性以泥灰岩、泥岩为主,钻进过程中出现

了严重缩径以致产生“抱钻”现象,但取出的岩心其硬度并无异常;该段钻进过程中起钻阻力较大,甚至出现“拔活塞”现象<sup>[10-12]</sup>;同时局部岩心采取率降低,岩心脱落严重。上述现象的产生表明孔内压力失衡产生钻孔形变,压力失衡导致地层蠕变,地层蠕变,挤抱钻头,导致钻速缓慢。这些现象反映出钻速受岩石弹塑性特征影响明显。该段地层的弹塑性较强,是造成钻进速度降低的主要原因,它的影响比岩石密度对钻速的影响更为明显。

岩石物理力学性质主要受岩石矿物成分的控制。为此,对古近系不同地质时代、不同深度的地层取样进行矿物成分化验分析,从而可以从更深层次研究岩石矿物成分对钻进速度的影响。在 2017 年开展的钻进技术研究项目中共采取古近系地层岩样矿物成分分析 58 件,采用 X 射线衍射分析了岩样的矿物成分。据统计,古近系地层的岩石矿物成分可达到 20 多种,将各类矿物进行分类统计,主要成分按含量大小排序为石英、粘土矿物(蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石等)、方解石、白云石、石膏、云母,含少量的长石、黄铁矿等。为了更好地研究上段所述钻速异常,本文绘制了该取心钻孔对应层段的地层岩石矿物成分随深度变化的曲线(如图 4 所示)。

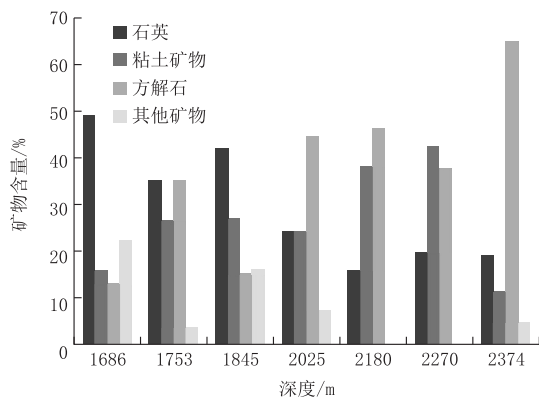


图 4 不同深度岩石矿物成分含量统计

Fig.4 Mineral composition of rocks at different depths

根据一般规律,岩石中石英含量及其它坚硬矿物或碎屑含量愈多,岩石的硬度越大,钻头切削刃钻进难度越大,切削刃磨损严重,钻速降低<sup>[13]</sup>;方解石含量愈多,岩石的脆性越大,钻头切削刃钻进难度越小,钻速加快;岩石中的粘土矿物含量愈多,岩石的韧性越高,即岩石的弹塑性越强,钻进取心速度降低。

由图 4 可见,该段地层的矿物成分中石英含量随着孔深增加逐渐降低,方解石含量增加,1750~2080

m 段地层中的粘土矿物含量相比前后占比明显偏高。反映到地层的物理力学性质是岩石的硬度降低,脆性增强,单从取心钻探而言,钻探速度应该加快。而实际钻进速度却很慢,也就是说粘土矿物含量的增加,岩石弹塑性的增强,大大降低了钻进取心速度。对该段地层取心钻探而言,地层中粘土矿物含量的影响明显高于石英和方解石含量对钻进速度的影响。

### 3 地层可钻性与钻头类型选择

#### 3.1 地层可钻性

岩石的可钻性反映了钻进时岩石被破碎的难易程度。影响可钻性的因素有岩层的物理特征、力学特性、技术条件、工艺因素等。根据《地质钻探手册》按压入硬度将岩石可钻性分为 12 级(如表 3 所示)。

表 3 按压入硬度对岩石的可钻性分级

Table 3 Classification of rock drillability by indentation hardness

岩石类别	级别	硬度/MPa
软	I	≤100
	II	100~250
	III	250~500
中硬	IV	500~1000
	V	1000~1500
	VI	1500~2000
硬	VII	2000~3000
	VIII	3000~4000
	IX	4000~5000
坚硬	X	5000~6000
	XI	6000~7000
	XII	>7000

据本次测试数据,古近系地层岩样的压入硬度测试值分布在 200~700 MPa,对应岩石可钻级别为 II 到 IV 级,属于软—中硬地层。

#### 3.2 钻头类型选择

取心钻进碎岩形式存在塑性剪切破碎和脆性压切破碎两种情况,其中在较松软的半固结状泥岩中以塑性碎岩为主;在固结较好的砂岩、泥岩以脆性碎岩为主。在实际的钻探过程中应采取必要的措施加强防范,重点是选择合理的钻头类型<sup>[14-15]</sup>。

本文研究的古近系地层深度范围 1650~2500 m 主要为弹塑性地层和软脆性地层,深度范围 2500~3450 m 主要为硬脆性地层和胶结较好的坚固地层。在钻头类型的选择上,使用合金系列钻头,以剪切破碎为主,随着地层胶结强度的增加,下部的层段(左右)主要使用金刚石复合片系列钻头,钻头破碎地层

的方式也由塑性破碎为主转变为脆性碎岩为主。

根据实际钻进经验对钻头类型进行了优选,针对古近系地层 1650~1750 m 应对软脆性地层优选 H-1-I 型硬质合金钻头,1750~2000 m 应对弹塑性层段优选 H-4-II 型硬质合金钻头,2000~2500 m 应对脆性层段优选 H-4-II 型硬质合金钻头,2500~3000 m 应对硬脆性层段优选 F-3 型(M124)复合片钻头,3000~3450 m 应对坚固层段优选 F-6 型(M433)复合片钻头。

#### 4 结语

综上所述,在取心钻探过程中影响钻进速度的因素较多,本文仅针对个别影响因素进行了分析研究,得出了岩石密度大则钻进速度低,岩石密度小则钻进速度快的结论。结合钻孔数据分析得出了河北平原古近系地层中的东营组、沙河街组一至三段地层岩石密度明显要比沙河街组四段和孔店组低,钻进取心速度差异明显;文中对古近系地层中的泥岩段由于粘土矿物成分占比增加造成岩石弹塑性增强,对钻进速度的影响比较明显;文中提出了古近系地层取心钻探过程中古近系地层的可钻性及合理的钻头类型匹配。

考虑到测试样品数量有限,提供分析研究的数据偏少,研究深度仍不足,本文的研究结论可能存在一定的片面性和局限性,如对钻头类型的匹配建议等,有必要在今后的工作中进一步加强研究。

#### 参考文献(References):

- [1] 王达,何远信,鄢泰宁,等.地质钻探手册[M].长沙:中南大学出版社,2014.  
WANG Da, HE Yuanxin, YAN Taining, et al. Geological drilling manual [M]. Changsha: Central South University Press, 2014.
- [2] 孙宁,秦文贵,张镇,等.钻井手册(第二版)[M].北京:石油工业出版社,2013.  
SUN Ning, QIN Wengui, ZHANG Zhen, et al. Drilling manual (second edition)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [3] 景龙,徐树,常林祯,等.沧州深部盐矿钻探施工关键技术探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(5):8-12.  
JING Long, XU Shu, CHANG Linzhen, et al. Discussion of essential technologies for drilling construction in deep salt mine of Cangzhou[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(5):8-12.
- [4] 张金昌.深部找矿关键钻探技术与对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(11):1-6.  
ZHANG Jinchang. Challenges and countermeasures of key drilling techniques for the deep prospecting[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(11):1-6.
- [5] 窦同伟,刘清友,任海涛,等.地层岩石抗钻特性横向分布规律[J].石油学报,2016,37(S2):144-149.  
DOU Tongwei, LIU Qingyou, REN Haitao, et al. Lateral distribution law of formation rock anti-drilling property [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016,37(S2):144-149.
- [6] 赵虹,张永忠,泰建民,等.大港小集油田钻井提速提效问题探讨[J].石油钻采工艺,2010,32(S1):66-68.  
ZHAO Hong, ZHANG Yongzhong, TAI Jianmin, et al. Study on improvement of drilling rate and efficiency in Xiaoji Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010,32(S1):66-68.
- [7] 刘天科.东营凹陷中央隆起带北部深层钻井技术难点与对策[J].石油钻探技术,2011,39(3):77-80.  
LIU Tianke. Difficulties and countermeasures of deep drilling technology in north central uplift of Dongying Sag[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011,39(3):77-80.
- [8] 靳红兵.深部岩盐取心钻探技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(10):10-12.  
JIN Hongbing. Coring drilling technology for deep rock salt [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(10):10-12.
- [9] 彭朝洪,肖长波,徐飞,叶舞凹陷 ZKX 井深部盐层钻井液技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(2):28-32.  
PENG Chaohong, XIAO Changbo, XU Fei. Drilling fluid technology for Well ZKX of deep salt bed in Yexian-Wuyang Depression[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(2):28-32.
- [10] 景龙,李伟,崔国树,等.CY-1 钻孔盐水泥浆护壁技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(6):48-52.  
JING Long, LI Wei, CUI Guoshu, et al. Wall protection technology with saltwater mud in Borehole CY-1[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(6):48-52.
- [11] 胡继良,陶士先.深部地质钻探钻井液体系设计因素及其分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(4):17-21.  
HU Jiliang, TAO Shixian. Design factors of drilling fluid system for deep geological drilling and the analysis[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(4):17-21.
- [12] 黄河,乌效鸣,景龙,等.深部盐矿勘探钻井液研究与应用[J].盐湖研究,2016,24(4):16-22.  
HUANG He, WU Xiaoming, JING Long, et al. Research and application of drilling fluid in salt mine exploration[J]. Journal of Salt Lake Research, 2016,24(4):16-22.
- [13] 柳孝荣.盐井施工技术[J].探矿工程,1991(6):24-26.  
LIU Xiaorong. Salt well construction technology[J]. Exploration Engineering, 1991(6):24-26.
- [14] 朱永宜,王稳石.松科一井(主井)取心钻进工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(9):1-5,10.  
ZHU Yongyi, WANG Wenshi. Coring drilling technology in Well-1 (main shaft) of Songliao Scientific Drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008,35(9):1-5,10.
- [15] 蓝海峰,鲜保安,高彦尊.盐岩层大直径岩心取心技术[J].钻采工艺,2005,28(4):9-11.  
LAN Haifeng, XIAN Baoan, GAO Yanzun. Coring technology of full diameter core in salt bed[J]. Drilling & Production Technology, 2005,28(4):9-11.