

# 巨厚砂砾层裸孔钻进施工技术

殷宝兵, 黄留新, 张瑞琼

(江苏省地质矿产局第三地质大队, 江苏 镇江 212021)

**摘要:**在江苏沿海地区进行城市地质及水文地质等区域性地质调查,主要的野外工作手段就是全孔取心岩心钻探,但江苏沿海地区沉积层厚度300~500 m不等,最深处800 m之多。在如此之深的巨厚沉积层中钻探取心、且取心率要求之高在江苏乃至全国没有先例。结合某钻孔的施工实例,从钻探设备的选择、施工工艺的确定、泥浆控制技术等方面入手,全面总结了江苏沿海地区巨厚砂砾层全孔取心施工技术,对类似钻探项目的实施具有很好的借鉴作用。

**关键词:**沉积层;第四系;裸孔钻进;取心

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2017)09-0026-06

**Construction Technologies Employed for Open Hole Drilling in Super-thick Gravel Layer/YIN Bao-bing, HUANG Liu-xin, ZHANG Rui-qiong** (The 3rd Geological Brigade of Jiangsu Geology & Mineral Exploration Bureau, Zhenjiang Jiangsu 212021, China)

**Abstract:** In the regional geological survey of urban geology and hydrogeology in coastal area of Jiangsu Province, full coring drilling is the main field work means. The sedimentary layers thickness are of 300~500m inequality, the deepest place is up to more than 800m. There is no precedent of coring in such thick sedimentary layer with such requirement in Jiangsu Province even in China. According to a drilling construction case, this paper summarizes the full coring drilling construction technology in very thick gravel layer of Jiangsu coastal area starting with drilling equipments selection, construction technologies determination and mud control technology, which could be referred in similar drilling projects in the future.

**Key words:** sedimentary layer; Quaternary System; open hole drilling; coring

## 1 概述

在江苏沿海地区开展城市地质调查是一项区域性、基础性、前瞻性的公益性地质工作,主要采用钻探技术手段,查明工作区内第四系地层沉积体系的变迁规律、海陆相互作用特征,为江苏沿海地区的规划布局、防灾减灾、环境保护等提供科学的基础数据,为经济发展的决策服务。这项工作得到了江苏省人民政府、国土资源部和中国地质调查局的高度重视。

根据现有资料,江苏沿海地区第四系沉积层厚度300~500 m,沉积物基本上以粗细砂、砾石为主,间见粘性土粒。地质调查对野外钻探施工要求非常严格,要求全孔取心、心样连续完整、不得扰动;且由于测孔的需要,全孔不得采用套管护壁,只能裸孔钻进。具体钻探施工要求如下。

(1)岩心采取率:全孔连续取心,粘性土层岩心采取率 $\leq 90\%$ ,砂性土层岩心采取率 $\leq 80\%$ ,较破碎地层、松散砂砾和卵石层 $\leq 70\%$ ;岩心排放顺序不得颠倒,岩心直径 $\leq 91$  mm。

(2)岩心钻进,回次进尺不得超过钻具本身长

度或净空长度,一般不超过3 m,以满足高采率要求为准。

(3)钻进深度、岩土分层界面深度、地下水位深度的测量允许误差为 $\pm 50$  mm。

(4)所有钻孔开孔口径127 mm;成孔口径 $\leq 110$  mm。每钻进50 m及终孔时各校正孔深一次,允许误差0.1%。钻孔倾角偏差每50 m应小于 $1^\circ$ ,每100 m不得超过 $2^\circ$ 。

近年来,我队与相关单位通力合作,已在江苏沿海地区南通、盐城等地先后完成了数十个钻孔的施工,钻孔深度100~500 m不等,最深钻孔达728 m。在江苏沿海地区巨厚松散沉积层中施工如此深的全孔取心钻孔尚属首次,施工成败的关键在于施工工艺技术措施的建立与完善,施工难度很大。

## 2 钻孔概况及地层特点

ZKA5孔位于泰州市姜堰张甸镇尹庄村,设计深度 $H=800$  m(目标深度700 m),直孔,全孔取心,全孔测孔,倾角 $\geq 2^\circ/100$  m。

收稿日期:2017-05-16;修回日期:2017-06-08

作者简介:殷宝兵,男,汉族,1965年生,高级工程师,从事地质钻探及工程地质钻探施工管理工作,江苏省镇江市乔家门,13505284872@139.com。

根据区域地质资料,钻孔范围内沉积物以含砾粗砂、中—细砂为主,夹少量的粉砂质粘土及粘土。具体地质资料简述如表1所示。

表1 地层描述情况

埋深/m	地 层 描 述
0~118	粉砂、细砂、中粗砂为主,粒径逐渐变粗,灰色—灰黑色,饱和、稍密—中密,80 m以深逐渐夹带小砾石,分选性好,砂质以石英、长石、云母为主
118~135	粘土及粉质粘土为主,青灰色—黄褐色为主,硬塑、中密
135~342	粉砂、细砂、中粗砂为主,灰色—灰黄色,饱和—密实,夹带小砾石
342~352	粉质粘土,青灰色,硬塑,夹钙质结核
352~459	中砂、细砂,灰色—灰黑色,饱和、密实,分选性好,砂质以石英、长石、云母为主,中间夹薄层粉质粘土层
459~485	粉质粘土、粘土,黄褐色,硬塑,夹有少量钙质结核及小姜石
485~500	细砂,灰黄色,饱和、密实,夹有小砾石,含量>7%
500~524	粘土,青灰色—棕黄色,硬塑,夹大量钙质结核
524~611	粉砂,棕黄色,饱和、密实,分选性好,中间夹粘土薄层
611~630	粘土,棕红色,硬塑
630~653	中粗砂,灰黄色,饱和、密实,局部夹小砾石
653~668	粘土地,棕红色,硬塑,夹钙质结核
668~680	泥岩,棕红色,硬塑,岩心完整,手掰不开,锤击易碎
680~690	粘土,浅棕色,硬塑,夹钙质结核,局部见3 cm左右的姜石
690~750	泥岩,浅棕色,硬塑,岩心完整,手掰不开,锤击易碎

### 3 钻进难点

从表1可以看出本区域的钻进难点主要如下。

上部300 m以浅地层基本以中粗砂为主,成孔简单,取心、保护孔壁非常困难。原因有:(1)砂性土没有胶结性,自稳性能较差,极易造成孔壁坍塌;(2)沿海地区地下水位较高,成孔后孔壁承受的地层压力较大,一旦孔内泥浆性能失稳、由外向内产生压差,孔壁极易坍塌;(3)由于需要全孔连续取心,全套钻具需在孔内来回上下频繁抽动,不可避免会刮扫孔壁,造成钻孔坍塌。

300 m以深地层以硬塑状粘性土、泥岩等为主,钻进施工时必须加压钻进取心,一旦加压钻进钻具产生弯曲,定会破坏孔壁的稳定,形成坍塌。

综上所述,在如此巨厚的砂性地层中裸孔钻进,必须采用超越常规的施工技术措施。

## 4 钻进施工技术

### 4.1 钻进工艺选择

根据地层情况及设计要求,采用 $\varnothing 110$  mm单管普通取心钻具、泥浆护壁、正循环回转钻进法,一径到底。具体施工工艺要求如下。

#### 4.1.1 开孔

场地地表为一层约1.5 m厚的粉质粘土层,采用轻压慢转方式开孔,以最小流量控制泥浆泵量。钻进5.0 m后下入5.5 m长的孔口管,四周用粘土回填、捣实,并采取措施固定。

#### 4.1.2 上部(0~300 m)施工工艺

0~300 m均为第四系沉积的中粗砂地层,中间夹带大小不等的砾石。由于技术要求是全孔取心、无扰动、原状样,故采用常规方法不可能完成。为此,采取以下措施。

(1)采用无泵干钻法取心。每个回次需提钻下钻取心,下钻时轻提轻放,遇阻时开泵送浆并轻压慢转。取心钻具到达孔底后先正常循环泥浆30 min左右,确保孔壁泥皮得到修复后再停泵慢速回转取心。尽量控制回次进尺 $>1.0$  m。

(2)由于地层以中粗砂为主,比较松散,需减压钻进取心。即在取心时适当吊紧钻具,以防钻具自重过大钻头切入地层过深导致回转阻力过大而无法取心。

(3)由于砂性地层的研磨性较强,采用肋骨式硬质合金钻头钻进,镶焊大八角硬质合金。

#### 4.1.3 下部(300~800 m)施工工艺

300 m以深地层以硬塑状粘性土、含砾砂土、泥岩为主,且相互互层,其施工工艺与浅部的有所不同。

(1)硬塑状粘性土、泥岩地层较致密、坚硬,完整性较好,采取常规的正循环回转钻进法取心。

(2)含砾砂性地层仍需采用无泵取心。由于地层埋藏太深,采用干钻取心极易造成烧钻,故采用孔底局部反循环法钻进取心。即开始取心时先在钻杆内腔中投入弹子封堵泥浆循环通道,然后停泵回转取心。但取心时钻具要在孔内以不超过50 cm的幅度上下来回抽动,以便在孔底形成局部反循环,确保取心质量。抽动时注意快提慢放。

(3)300 m以深地层需加压钻进。由于上部地层十分松散,一旦加压,钻具在孔内必然产生弯曲变形,必然会破坏孔壁稳定、造成钻孔坍塌,故只能采用钻铤孔底加压法钻进。即在取心钻具的上部根据孔深的不同配制单根质量为500 kg的2~6根不等的钻铤,实行孔底加压。

(4)根据地层情况采用金刚石复合片钻头钻进。

## 4.2 施工设备

由于ZKA5孔设计孔深达800 m,经研究采用XY-2000型岩心钻机。该钻机具有结构紧凑、钻进扭矩大、操作方便、性能可靠等特点,且配有水刹车可保证提下钻平稳、安全,同时具有较多的转速级数(8级)和合理的转速范围,便于操作人员掌握孔内情况,加之配有18.5 m高四角钻塔,立根长度可达13.5 m,可大大缩短提下钻时间,有效地提高钻进效率。泥浆泵采用NBB280/8型,具有5级调速、流量调节幅度大等特点,最高压力可达12 MPa,可保证孔内泥浆循环正常、有序,是深孔配备的钻探施工的理想设备。主要施工设备配置如表2所示,现场设备布置如图1所示。

表2 主要机械配置

设备名称	型号规格	数量	功率/kW	产能	作用
岩心钻机	XY-2000	1台	120	1500 m	取心
泥浆泵	NBB280/8	1台	22.5	250 L/min	取心
钻杆	Ø50 mm	800 m		1000 m	取心
钻铤	Ø89 mm	6根			孔底加压
测斜仪	KXP-2X	1套		0°~80°	孔斜校正
除砂器	TGZDS-01	1套	5.5	8 m <sup>3</sup> /h	泥浆处理



图1 现场设备布置图

## 4.3 护壁泥浆性能要求

### 4.3.1 泥浆性能分析

在第四系地层钻孔过程中对泥浆的原则要求是:高密度、高粘度、良好的润滑性、较低的含砂率。

泥浆密度大,维护孔壁稳定的能力就越强,就不易造成孔壁坍塌,但泥浆的润滑性就较差。综合考虑:泥浆密度应控制在1.1~1.5 g/cm<sup>3</sup>,钻孔越深密度越大。

常规岩心钻探泥浆粘度一般控制在20~30 s,但在第四系地层中钻进时,由于地层均为松散的泥砂,会产生大量的钻屑,不能按常规的粘度要求控制,经过总结将钻孔深度100~300 m的泥浆粘度指标调整为30~60 s,随着孔深的增加,粘度指标还要

适当增加,最大增至90 s。

常规泥浆含砂率 $\geq 5\%$ ,但在第四系地层中钻进,可以控制含砂率 $\geq 10\%$ 。如果含砂率过高,需采取措施除砂。一是增加泥浆循环沟槽的长度、设置沉淀池等人工方法除砂,二是利用除砂器振动除砂。

### 4.3.2 泥浆性能参数

根据上述分析,最终确定的泥浆配方及性能如下。

(1)0~100 m孔段。

水:膨润土:纯碱:CMC=100:5:0.25:

0.1。

泥浆性能参数控制指标为:密度1.05~1.15 g/cm<sup>3</sup>、粘度20~30 s、含砂率 $< 10\%$ 。

(2)100~300 m孔段。

水:膨润土:纯碱:CMC=100:5:0.25:

0.2。

泥浆性能参数控制指标为:密度1.10~1.20 g/cm<sup>3</sup>、粘度20~60 s、含砂率 $< 10\%$ 。

(3)300~500 m孔段及以深。

水:膨润土:纯碱:PHP=100:5:0.25:

0.15。

泥浆性能参数控制指标为:密度1.15~1.25 g/cm<sup>3</sup>、粘度60~90 s、含砂率 $< 10\%$ 。

## 4.4 提高岩心采取率措施

提高软硬互层取心质量:采用短钻具钻进,限制回次进尺,减少岩心对磨,降低岩心受破坏时间;增大孔径和增大岩心直径以提高岩心的抗扭强度;提高钻具稳定性和减少钻头晃动,主要调整钻进参数和泥浆润滑性能使钻具不产生剧烈振动。

提高砾石层取心质量:采取增大岩心直径,以提高岩心强度;提高卡心的可靠度,防止岩心途中脱落;采用单动双管钻具,可有效保护岩心采取率;用优质泥浆局部反循环,使岩心呈悬浮状态,防止岩心被二次破碎。

## 4.5 预防钻孔弯曲措施

(1)钻机安装要平稳、周正;使用刚度好的立轴,且立轴要竖直,主动钻杆不得有弯曲或扭曲现象;提引器中心、立轴中心、孔口中心要在同一直线上。

(2)开孔时主动钻杆不得有偏摆,中心压力要均匀,要随钻孔的加深逐渐加长钻具。

(3)在砾石地层中钻进时要根据实际情况提高

轴心压力、降低转速。

(4) 钻具应带上下2个扶正器(扩孔器),相隔距离 $\leq 4$  m。

(5) 遇到卵砾石、软硬互层等地层时,应使用直、重、厚的钻具,适当控制转速,配套钻铤孔底加压施工。

## 5 钻探效果简述

### 5.1 工艺的适应性

本次施工从开孔到终孔,钻进非常顺利,提下钻顺畅,没有发生孔壁坍塌掉块现象,孔壁比较稳定。终孔后进行物探测井时,曾停工等待了3 d,但测井时探头直放到底,不需重新清孔、扫孔,说明孔壁的稳定性和证明选配的钻进工艺比较合适,能适应第四系地层的钻进需求,经得起考验。

### 5.2 泥浆护壁效果

从整个施工过程来看,钻机的回转能力完全满足要求、可顺利完成回转、取心的操作,没有出现憋车、断钻杆等事故;泥浆泵在钻进过程中运转正常,没有出现异常磨损,易损件不需频繁更换,说明采用的泥浆工艺与钻进成孔工艺比较匹配,施工比较顺利。施工过程中测试的泥浆性能参数见表3。

由表3数据不难发现:与事先分析预估的情况比较一致。当然,由于每个工作台班内进行换浆或除砂的时间不一致,进行泥浆检测的时间也没有统一,所以相邻时间段内的泥浆检测数据可能有些差异,但结合钻孔深度后进行统计分析,可以说明事先制定的泥浆工艺技术措施能适应第四系地层钻进的需求,可以满足第四系地层全孔取心钻进的施工需要。

### 5.3 钻进效率

本次施工钻孔用时65 d;其中0~300 m用时10 d,300~410 m用时14 d,410~510 m用时11 d,510~650 m用时18 d,650~728 m用时12 d。当中,有3 d由于连续下雨停工,实际施工时间62 d。前300 m的效率与以前施工相比,缩短了3 d时间,后面的施工由于深度不同、地层不同无法比较,但总的钻进效率较高。根据施工原始报表统计,本次施工的时间利用率与之前的类似项目相比有明显提高,比较结果见表4。

### 5.4 取心效果

施工结束后,甲方组织有关专家根据现场实际取心情况,严格按照相关验收要求,对钻孔的全部

表3 泥浆参数测试汇总表(部分摘录)

日期	时间	孔深/ m	泥浆参数			备注
			密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	粘度/ s	含砂 率/%	
2014-09-24	8:30	4.0	1.02	20	1.5	CMC
2014-09-24	15:00	15.0	1.05	22	3.5	砂质土
2014-09-25	8:30	38.0	1.02	20	2.0	
2014-09-27	15:30	96.5	1.09	26	6.5	
2014-09-28	10:00	124.0	1.05	22	5.5	
2014-09-29	4:30	145.0	1.08	27	6.5	
2014-09-29	18:00	179.0	1.12	29	3.5	
2014-10-01	14:30	215.0	1.15	35	4.5	
2014-10-02	3:30	241.0	1.18	45	8.5	
2014-10-02	15:00	250.0	1.20	40	9.5	
2014-10-03	14:30	283.0	1.19	55	10.0	
2014-10-04	2:00	295.0	1.22	40	9.5	
2014-10-04	15:30	315.0	1.25	58	10.5	
2014-10-05	14:30	341.0	1.21	73	6.0	PHP
2014-10-06	3:30	350.0	1.15	75	5.5	
2014-10-09	17:00	360.0	1.23	60	5.5	碎石土
2014-10-10	8:00	368.0	1.30	65	8.5	
2014-10-14	4:00	385.0	1.19	75	7.5	
2014-10-14	10:30	395.0	1.19	85	7.5	
2014-10-15	4:00	408.0	1.21	75	8.0	
2014-10-15	15:30	415.0	1.18	80	6.5	
2014-10-16	12:00	421.0	1.16	75	4.5	泥岩
2014-10-17	15:30	425.0	1.16	80	5.0	
2014-10-18	12:00	435.0	1.17	70	5.5	
2014-10-19	10:30	439.0	1.17	75	5.5	
2014-10-20	14:30	445.0	1.22	80	5.5	

表4 钻孔时间利用率对比

孔深/m	以往施工/%	本次施工/%	备注
0~100	92	95	
100~200	88	91	
200~300	73	86	
300~400	70	83	
400~500		76	没有比较
500~600		71	没有比较
600~700		63	没有比较
700~750		54	没有比较

取心岩样按层位顺序进行了综合评比,认为:取心连续完整、顺序摆放正确、心样没有受到扰动破坏,全孔岩心采取率符合要求,其中,粘性土层采取率93.1%、砂性土及砾石土层采取率88.6%,完全满足设计要求。该钻孔的部分连续取心图片见图2~图7。

### 5.5 钻孔质量

施工结束后,甲方立即对钻孔进行了综合测井,其井深728 m、井斜13.4°,全部满足设计要求,且井斜低于规范要求,说明钻孔质量优良。具体测孔数据见表5。

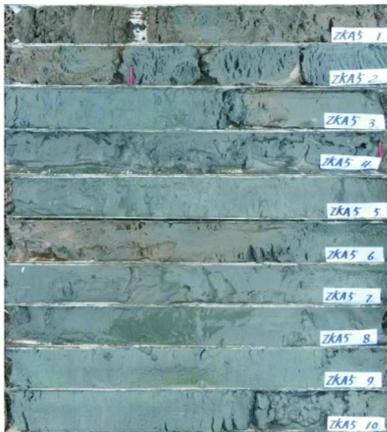


图2 现场取样岩心

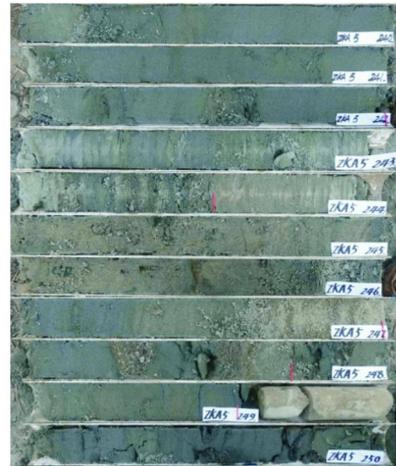


图5 现场取样岩心

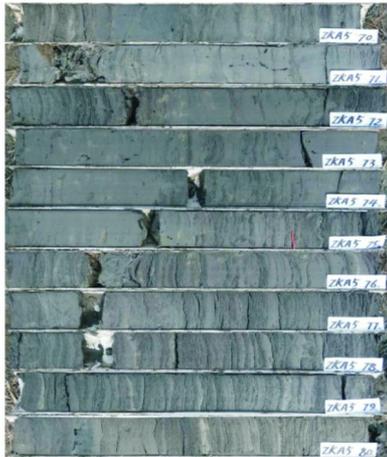


图3 现场取样岩心

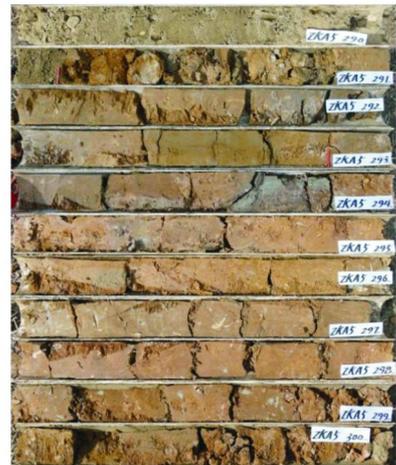


图6 现场取样岩心

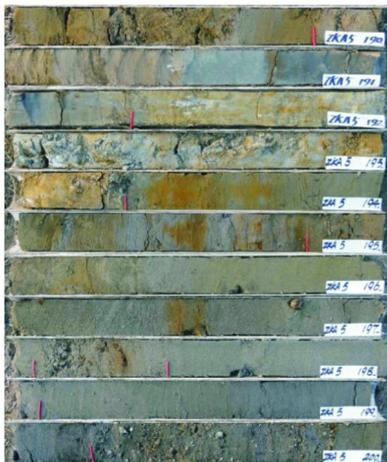


图4 现场取样岩心



图7 现场取样岩心

### 6 结语

(1)采用常规钻探技术在超深巨厚砂砾石地层中全孔取心钻进完全可以顺利实现。其中,在松散沉积的中粗砂地层中需无泵取心,在硬塑状粘性土

中钻进需正循环钻进取心。

(2)300 m 以浅地层需减压钻进,300 m 以深地层需孔底加压钻进。

(3)在超深巨厚砂砾石地层中裸孔钻进,护壁

表5 钻孔倾角测量记录

序号	深度/ m	倾角/ (°)	序号	深度/ m	倾角/ (°)	序号	深度/ m	倾角/ (°)
1	20.00	0.37	13	260.00	0.53	25	500.00	3.40
2	40.00	0.49	14	280.00	1.02	26	520.00	3.51
3	60.00	0.81	15	300.00	1.10	27	540.00	4.22
4	80.00	0.76	16	320.00	1.23	28	560.00	4.45
5	100.00	0.85	17	340.00	1.25	29	580.00	4.75
6	120.00	0.56	18	360.00	1.13	30	600.00	7.65
7	140.00	0.15	19	380.00	1.49	31	620.00	8.38
8	160.00	0.35	20	400.00	1.91	32	640.00	10.14
9	180.00	0.41	21	420.00	2.03	33	660.00	10.15
10	200.00	0.70	22	440.00	2.66	34	680.00	12.11
11	220.00	0.66	23	460.00	2.11	35	700.00	12.68
12	240.00	0.44	24	480.00	3.52	36	720.00	13.39

泥浆非常重要,但其性能要求与固体矿产钻探截然不同。它需要超重的密度(最大可达 $1.5\text{ g/cm}^3$ )、超高的粘度(最大可达 $90\text{ s}$ )和较高的失水量,同时在循环过程中要控制好含砂率 $>10\%$ 即可。

总之,最终经专家组验收,全孔平均岩心采取率 $>90\%$ ,经终孔后测井认为该孔全孔通畅无孔壁坍塌现象,20 m一测点表明全孔倾角均 $<2^\circ/100\text{ m}$ 的

(上接第25页)

变形,对磁力线的屏蔽较为规则。实际应用中,磁发射源即螺线管的摆放位置十分重要,要注意避开套管接箍或其它厚度不均匀位置,使发射源经过套管扭曲作用后的磁力线保持各向同性。此外,在仪器下井前可在地面使用同类型套管做地面实验,确定屏蔽系数,计算磁矩大小,为井下实际测量做好准备。

#### 参考文献:

- [1] 杨立强,陈月明,王宏远,等.超稠油直井水平井组合蒸汽辅助重力泄油物理和数值模拟[J].中国石油大学学报(自然科学版),2007,31(4):64-69.
- [2] 杨明合,夏宏南,屈胜元,等.磁导向技术在SAGD双水平井轨迹精细控制中的应用[J].钻采工艺,2010,33(3):12-14.
- [3] 路宗羽,刘颖彪,罗增,等.套管内磁导向技术应用[J].西部探矿工程,2015,(12):46-48.
- [4] GRILLS T L. Magnetic ranging technologies for drilling steam assisted gravity drainage well pairs and unique well geometries: a comparison of technologies [R]. SPE 79005,2002.
- [5] VANDAL B, GRILLS T, WILSON G. A comprehensive comparison between the magnetic guidance tool and the rotating magnet ranging service [C]//Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta: Petroleum Society, 2004:176-181.
- [6] 吴志永,高德利,刁斌斌. SAGD双水平井随钻磁导向系统的研

规范要求,各项质量记录齐全,综合评定:钻孔质量优秀。

#### 参考文献:

- [1] 吴金生,张伟,李旭东,等.汶川地震断裂带科学钻探项目FSD-4孔钻探施工概况和关键技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):120-125.
- [2] 徐云龙.川西采气厂首口地质导向水平井钻井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(2):1-3.
- [3] 姜桂春.聚炳烯酰胺无固相冲洗液在复杂地层中的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(1):34-37.
- [4] 徐波,王智洪.钾铵基聚合物钻井液抑制性研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(7):30-33.
- [5] 卢予北,李艺,陈莹,等.国家地下水监测井建设关键问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(6):1-6.
- [6] 郑继天,李小杰,关晓琳.水文地质钻探冲洗液的选用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):242-244.
- [7] 吴跃钢,徐菁.无固相弱凝胶钻井液在水井施工中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):261-264.
- [8] 李友东,王国辉.滨海复杂地层超深旋挖钻孔灌注桩质量问题改进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(11):80-83.
- [9] 制[LM]及应用[J].电子测试,2014,(11):107-109.
- [7] 胡汉月,向军文,陈剑奎.“慧磁”SmartMag钻井中靶导向系统加强性工业试验研究[J].中国井矿盐,2011,42(3):12-15.
- [8] 陈剑奎,胡汉月.SmartMag定向钻进高精度中靶系统及其应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(4):10-12.
- [9] 武程亮,商敬秋,陈剑奎,等.两水平井“点对点”精确中靶对接施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(5):4-7.
- [10] ROGER H. VanNOORT, CHIP Abrant, JAMES N. TowleWell, Planning Based On Passive Magnetic MWD Ranging And Magnetized Casing[C]. SPE159404, 2012, Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition, Texas, USA, October 8-10.
- [11] 刁斌斌,高德利.螺线管随钻测距导向系统[J].石油学报,2011,32(6):1061-1066.
- [12] 周耀忠,张国友.舰船磁场分析计算[M].北京:国防工业出版社,2004:141-142.
- [13] 李刚,张勇,肖桂龙,等.垂直套管周围磁场分布规律研究[J].石化技术,2015,(11):144-144.
- [14] 胡叶青,林春生,周建军.多层圆柱壳屏蔽体的径向静磁屏蔽效能分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2012,36(6):1306-1309.
- [15] 赵代弟,张晓明,王宇,等.磁性套管中磁测斜仪误差建模分析[J].科学技术与工程,2015,15(6):226-230.
- [16] 任志平,党瑞荣.套管磁化与过套管介质识别[J].仪器仪表学报,2009,30(9):1813-1816.
- [17] 陈剑奎,岳刚.螺线管磁定位技术初探[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(8):53-57.