

廖一帆, 劳谦, 丁莉莎, 等. 雷州 2000 m 地震综合观测井土建工程设计与施工[J]. 华南地震, 2023, 43(4): 34–41. LIAO Yifan, LAO Qian, DING Lisha, et al. Civil Engineering Design and Construction of 2000 m Seismic Comprehensive Observation Well in Leizhou[J]. South China journal of seismology, 2023, 43(4): 34–41]

## 雷州 2000 m 地震综合观测井土建工程设计与施工

廖一帆, 劳谦, 丁莉莎, 谭争光, 柯乃琛, 杨建安

(广东省地震局, 广州 510070)

**摘要:** 雷州 2000 m 深井土建工程是国家一带一路地震监测台网项目的重点建设工程。由于地震监测井地层疏松, 深度大, 故四开钻井施工的钻具优选较为困难, 且钻进时易垮塌、漏失。针对以上技术难点, 通过介绍雷州 2000 m 地震监测井设计与施工的整体方案, 包括钻机与钻具的选型、孔口防喷、钻井液配比优选、孔斜控制和固井工艺等, 并在施工过程中采用综合测井方法对钻井围岩的岩性变化进行详细的划分。该工程的顺利完工为其它地震监测深井施工提供了可靠的案例参考。

**关键词:** 地震监测; 深井; 技术难点; 综合测井

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)04-0034-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.04.05

## Civil Engineering Design and Construction of 2000 m Seismic Comprehensive Observation Well in Leizhou

LIAO Yifan, LAO Qian, DING Lisha, TAN Zhengguang,  
KE Naichen, YANG Jian'an

(Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** The Leizhou 2000 m seismic observation deep well civil engineering is the key construction project of the National Belt and Road Seismic Monitoring Network Project. Due to the loose strata and considerable depth of the seismic monitoring well, the selection of drilling tools for the four-open drilling construction is relatively challenging, and there is a risk of collapse and leakage during drilling. To address the aforementioned technical challenges, this paper provides a detailed exposition of the overall plan for the design and construction of the 2000 m seismic monitoring well in Leizhou, including the selection of drilling rig and drilling equipment, blowout prevention at the borehole, drilling fluid ratio optimization, borehole inclination control, and cementing processes, and employs a comprehensive logging method to divide the lithological changes of the surrounding rock formations during the construction process. The successful completion of this project provides a reliable case reference for the construction of other seismic monitoring deep wells.

**Keywords:** Earthquake monitoring; Deep well; Technical difficulties; Comprehensive logging

收稿日期: 2023-10-20

基金项目: 地震科技星火计划攻关项目(XH201905)

作者简介: 廖一帆(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震仪器运维监控、地震工程项目实施和地震观测站网规划等工作。

E-mail: liaoyifan@139.com

## 0 引言

地震是一种对人类造成巨大损害的自然灾害,大震级的地震还会给震区人们带来毁灭性的灾难。我国位于世界两大地震带—环太平洋地震带与欧亚地震带之间,地震断裂带十分发育,且地震活动频度高、强度大、震源浅、分布广,因此,地震监测、预报工作显得尤为重要。目前,国内地震观测台站大多采用井下地震监测,这样可以减少地面噪声干扰,提高地震监测精度,为预报地震和开展各项研究工作提供科学、准确的基础资料<sup>[1]</sup>。

井下地震监测涉及到地震监测深井的设计与施工等工作,国外在超深井钻探方面起步较早,美国早在1949年就完成了6225 m超深井的钻探工作,1972年便完成了9159 m的特超深井钻探工作<sup>[2]</sup>;前苏联更是在1984年创造了12 262 m的世界特超深井纪录,又在1991年将深度钻至12 869 m<sup>[3]</sup>。我国深井超深井技术发展经历三个阶段:第一阶段从1966年我国完成了第一口深度为4 719 m的大庆松基6井开始,之后又陆续在大港、胜利和江汉油田钻进了5口深井,完成了由打浅井和中深井发展的经验积累。第二阶段从1976年开始,我国在四川盆地完成了第一口超6000 m(6011 m)的钻探深井,标志着我国已具有超深井的钻探能力,之后又陆续完成10口超深井的钻探工作,其中,有两口井深已超7000 m。第三个阶段从1986年开始,我国陆续完成深井超深井共678口,其中,最深的塔深1井达到了8408 m,标志着我国已完全具备超深井钻井技术<sup>[4-7]</sup>。

虽然我国钻井技术已完全达到超深井的技术水平,但大多都是用于石油及新能源钻探方面,而很少用于地震监测,本文针对雷州深井土建工程,详细介绍了2000 m地震监测井设计与施工方案,并针对本项目中的施工技术难点,采用了优化泥浆配比、孔斜控制和固井工艺等手段来解决以上难点,最后,采用综合测井技术对孔壁围岩的岩性变化进行了详细的划分,该深井的设计与施工过程可为其它地震监测井项目提供可靠的案例参考。

## 1 项目简介与地质构造

### 1.1 项目简介

“雷州2000 m地震综合观测井”主要利用国际

顶尖的深井高温电学和光学观测设备开展井下长期连续观测,是中国地震局地球物理研究所牵头实施的国家“一带一路地震监测台网项目”的重点国工程,是我国首例新钻2000 m深井的地震重点监测项目,也是世界首例采用光纤传感器及光纤传输的地震监测深井。项目建成后,将进一步丰富我省地震观测手段,有效提升地震监测精确度,为北部湾城市群的高质量发展和湛江海洋经济发展提供更优质的地震安全保障服务。

### 1.2 施工场地地质信息

据已有地质资料分析可知,该施工场地钻遇地层自上至下为:第四系,新近系望楼港组、灯楼角组、角尾组、下洋组,古近系涠洲组、流沙港组,古生界(未穿),所钻地层层序与设计有出入,实钻未钻遇流沙港组流一段、流二段及长流组地层。目的层涠洲组、下洋一角尾组埋深与设计有一定误差。角尾组底界垂深919.4 m,垂厚419.4 m,埋深比设计垂深827.0 m低92.4 m,厚度增加92.4 m。下洋组底界垂深1234.3 m,垂厚314.9 m,埋深比设计垂深1290.0 m高55.7 m,厚度减少148.1 m。涠洲组一段底界垂深1446.8 m,垂厚212.5 m,埋深比设计垂深1450.0 m高3.2 m,厚度增加52.5 m。涠洲组二段底界垂深1725.8 m,垂厚279.0 m,埋深比设计垂深1850.0 m高124.2 m,厚度减少121.0 m。涠洲组三段底界垂深2164.7 m,垂厚438.9 m,埋深比设计垂深2230.0 m高65.3 m,厚度增加58.9 m。流沙港组三段底界垂深2322.7 m,垂厚158.0 m,埋深比设计垂深2665.0 m高342.3 m,厚度减少202.0 m。其中,2000 m地震监测井围岩的岩性划分可根据现场测井资料进行更详细的分析。

## 2 钻井工程设计与施工

### 2.1 钻井设计

本项目中地震监测井设计深度为2000 m,全井采用四开的钻井施工方式钻进,图1为2000 m钻井施工流程图,其中一开、二开与三开钻孔下套管之前需对井壁开展综合测井试验,并利用测井数据对孔壁的岩性特征进行详细的描述,为地震监测提供详细的地质资料。

其中,一开设计井眼直径为 $\Phi 444.5$  mm,井深约20 m,采用 $\Phi 339.7$ 钢级J55石油套管;二开设计井眼直径 $\Phi 311.1$  mm,井深500 m左右,采用 $\Phi$

244.5 mm 钢级为 N80 的石油套管；三开设计井眼直径  $\Phi 215.9$  mm，井深 1 500 m 左右，采用  $\Phi 177.8 \times 8.05$  mm 钢级为 N80 的石油套管；四开设计井眼直

径  $\Phi 152.4$  mm 直至钻至完井。图 2 为 2000 m 四开钻井施工流程图。

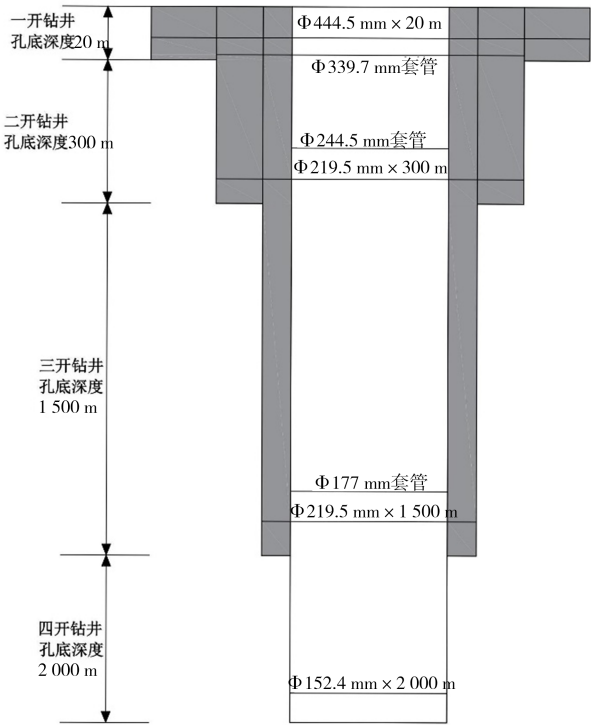


图 1 2000 m 四开地震监测井设计图纸

Fig.1 Design drawing of 2000 m four-open seismic monitoring well

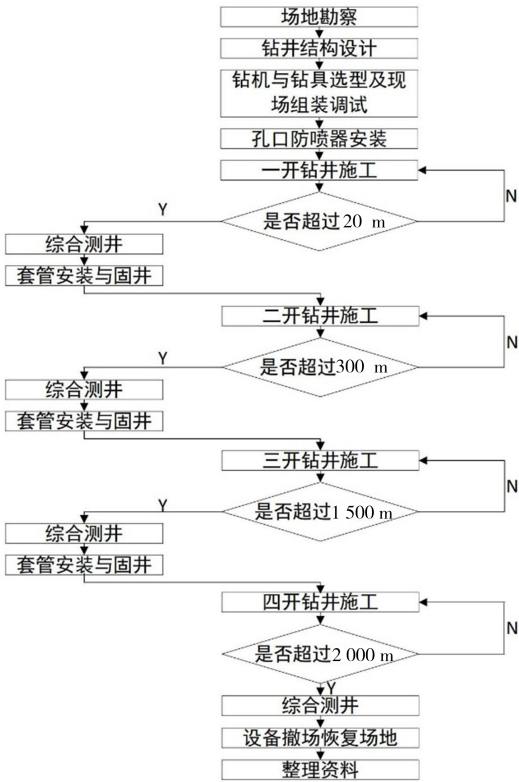


图 2 四开地震监测井施工流程

Fig.2 Construction process of four-open seismic monitoring well

2.2 工程技术难点

该井深度为2000 m，要求井径不小于150 mm，钻井地层主要为粘土、粉砂岩、泥岩及砂质泥岩，地层疏松，胶结性差钻进时易垮塌、扩径及漏失等；四开裸眼井段长，上部井眼尺寸大、环间隙大，下部钻具组合优选困难，孔斜角难控制；钻井深度大，地层压力大，易井斜。



2.3 设备简介

2.3.1 钻机优选

图3为该2000 m地震监测井采用的XSC1200钻机，该钻机最大下压力可达260 kN，最大拉力为1200 kN，当钻孔直径在150 mm以上时，最深可钻3000 m，该钻机的各性能参数如下表1所示。



图3 XSC1200钻机现场施工

Fig.3 Site construction of XSC1200 drilling rig

表1 XSC1200车载式深井钻机性能参数

Table 1 Performance parameters of XSC1200 truck-mounted deep well drilling rig

技术参数	性能指标
最大提升力/(kN)	1200
最大下压力/(kN)	260
最大扭矩/(N·m)	27 500/18 300
转速/(r·min <sup>-1</sup> )	0-120/0-180
中心轴通孔直径/(mm)	0105
最大运动行程/(mm)	15 200
最大提升速度/(m·min <sup>-1</sup> )	30
最大下降速度/(m·min <sup>-1</sup> )	60
最大通过能力/(mm)	0820
力/(kN)	50
型号	卡特彼勒 C18
额定功率/(kW)	571
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	2100
液压系统最大压力/(MPa)	32
最大行走速度/(km·h <sup>-1</sup> )	80
最大爬坡度/(°)	45
最小离地间隙/(mm)	300
工作尺寸/(mm)	14 680×5 184×13 800
总质量/(kg)	55 000

表 2 钻具组合设计表  
Table 2 Combination design table of drilling tools

开钻次序	钻进井段/(m)	钻具组合
一开	0 ~ 20	Φ444.5 mm 钻头+Φ422 mm 扶正器+Φ203.2 mm 钻铤+Φ422 mm 扶正器+Φ203 mm 钻铤+Φ177.8 mm 钻铤+Φ127 mm 钻杆
二开	20 ~ 300	Φ311.1 mm 钻头+Φ203 mm 钻铤+Φ178 mm 钻铤+Φ127 mm 钻杆 Φ311.1 mm 钻头+Φ216 mm 螺杆钻具+钻具止回阀+Φ203.2 mm 钻铤+Φ177.8 mm 钻铤+Φ127 mm 钻杆
三开	300 ~ 1500	Φ215.9 mm 钻头+Φ165 mm 螺杆钻具+钻具止回阀+Φ165 mm 钻铤+Φ158.8 mm 钻铤+Φ89 mm 钻杆+Φ127 mm 钻杆 Φ215.9 mm 反循环牙轮钻头+158.8 mm 钻铤+120.7 mm 钻铤+Φ89 mm 钻杆+Φ127 mm 钻杆+气水混合器+127 mm 双壁钻杆+双壁主动钻杆
四开	1500 ~ 2000	φ89 mm 石油钻杆+Φ120 mm 螺杆钻具+120.7 mm 钻铤+Φ152.4 mm 牙轮钻头和取芯钻头

2.3.2 钻具组合选取

本次钻井工程主要采用全面破碎钻进工艺，四开钻井根据各区段的地质条件和技术要求，应设计不同类型的钻头与螺杆泥浆马达，下表 2 为 2000 m 四开地震监测井各钻孔阶段的钻具组合。

2.3.3 孔口防喷装置

防喷器是钻井施工中的至关重要的安全装置，主要作用有防止井喷事故、控制井压、维护井眼的完整性等，确保钻井过程的顺利进行，由于本此钻井工程中的技术套管和生产套管均不在井口，所以三开共用一套井口装置，考虑地层压力与井身压力，图 4 为本工程选用通径 350 mm 的 FK35-35 双闸板防喷器。

2.4 钻井关键技术

2.4.1 钻井液设计

钻井液是钻井工程中的血液，除了冷却和润滑钻头、钻杆，还可以维护井壁稳定和控制井深，此外，泥浆还能够固定沉积好的岩粉和岩块，减少其在钻井过程中对井壁的破坏，同时也可以防止井壁塌陷，保证钻井的安全施工。

本工程四开 2000 m 深井地层疏松，岩性主要以粘土、粉砂岩、泥岩和砂质泥岩为主，故本次钻井工程主要需要钻井液起到固井及岩屑携带的能力。基于上述要求本次钻井工程所需的钻井液参数如表 3 所示，对应的钻井液配方表如下表 4 所示。

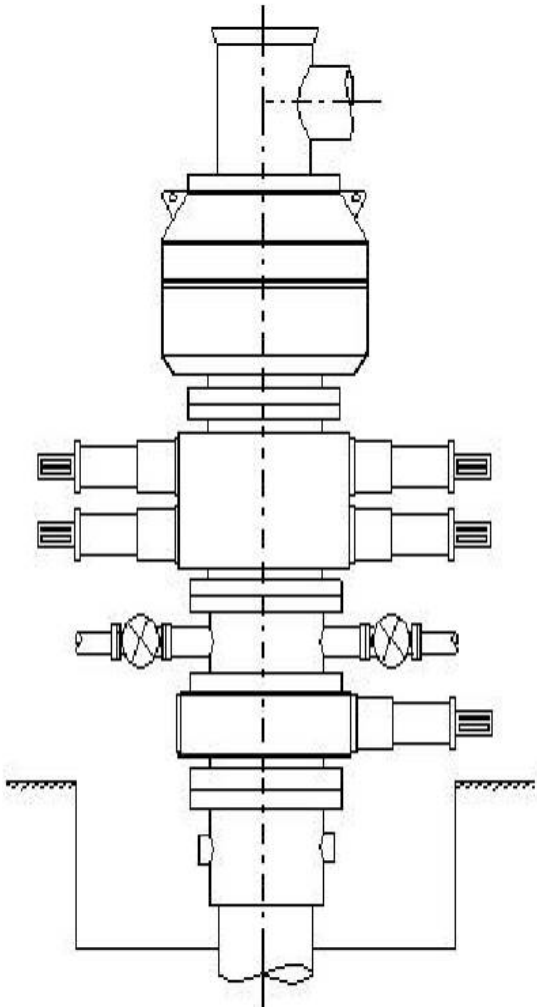


图 4 井口控制装置示意图  
Fig.4 Schematic diagram of wellhead control device



表3 钻井液性能表  
Table 3 Performance table of drilling fluid

项目	性能参数		
钻孔深度/(m)	40 ~ 300	300 ~ 1500	1500 ~ 2000
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	<1.15	<1.15	<1.10
马氏漏斗粘度/(s)	35 ~ 50	35 ~ 45	26 ~ 35
API失水量/(ml/30 min)	<10	<4	<15
API滤饼/(mm)	<1.0	<0.8	<0.2
PH值	8 ~ 9	8.5 ~ 10	7 ~ 8
含砂量/(%)	<4	<2	<0.4
塑性粘度/(mPa·s)	16 ~ 18	15 ~ 18	15 ~ 18
失水量/(mL/30 min)	12	10	10
动切力/(Pa)	6 ~ 8	4 ~ 6	4 ~ 6
流行指数	0.6 ~ 0.8	0.6	0.6

表4 钻井液配方表  
Table 4 Formula table of drilling fluid

项目	参数			
钻孔深度/(m)	0 ~ 40	40 ~ 300	300 ~ 1500	1500 ~ 2000
防塌降失水剂/(%)	0.5	2 ~ 2.5	2 ~ 2.5	2 ~ 2.5
聚丙烯酰胺干粉/(%)	0.3 ~ 0.5	0.3 ~ 0.5	0.3 ~ 0.5	0.3 ~ 0.5
抗盐降失水剂/(%)	0.5	1.5 ~ 2	1.5 ~ 2	1.5 ~ 2
膨润土/(%)	4 ~ 6	1 ~ 2	~ 2	~ 2
火碱/(%)	0.2	0.2 ~ 0.4	0.2 ~ 0.4	0.2 ~ 0.4
聚丙烯腈铵盐/(%)	0.5 ~ 1	0.5 ~ 1	0.5 ~ 1	0.5 ~ 1
聚阴离子纤维/(%)	0.1 ~ 0.3	0.1 ~ 0.3	0.3 ~ 0.5	0.3 ~ 0.5
防塌剂/(%)	0.5 ~ 1	1.5 ~ 2	1.5 ~ 2	1.5 ~ 2

2.4.2 孔斜控制

由于该地区地层比较松散，且钻井有2000 m，在钻进过程中为了保证钻孔的的孔心在同一条垂线上，在钻孔施工过程中每钻进100 m及终孔时均要测定钻孔的倾角、方位角，且严格按照地热钻井规范要求，200 m孔斜≤1°、1 000 m孔斜≤3°、1 000 m以上孔斜≤5°，全角变化率不大于2.25°/30 m，若超差则及时采取纠正措施。

2.4.3 固井施工技术措施

固井的质量的好坏是地震监测井施工的关键环节，主要技术措施有：①优选固井设备，采用2台水泥车施工，控制好水泥浆密度，尽可能保证密度均匀；②水泥浆体系采用低失水常规水泥浆体系，水泥浆稠化时间：220 min/75℃；③采用高粘紊流前置液体系，提高顶替效率，保证固井质

量；④井队备好水罐并提供足量的固井用水，必须做到水罐干净，水质无污染；⑤采用紊流顶替，提高水泥浆顶替效率；⑥由于替浆压力较高，为提高顶替排量，保证施工安全，施工前配好1.50 g/cm<sup>3</sup>的重浆40 m<sup>3</sup>替浆时替入。

3 基于综合测井的孔围岩信息描述

四开钻井上套管之前需采用综合测井方法对钻井围岩的岩性进行精确的划分，图5为自然伽马、声波时差及自然电位等测井参数随钻进深度的变化曲线。

基于图5分析可知，钻井深度0~20 m区间，岩性以灰黄色砂层及黏土层为主，浅层夹灰褐色风化、半风化玄武岩；在20~160 m区间，岩性以灰色砂岩、砾岩为主，灰色砂岩与泥岩互层；在

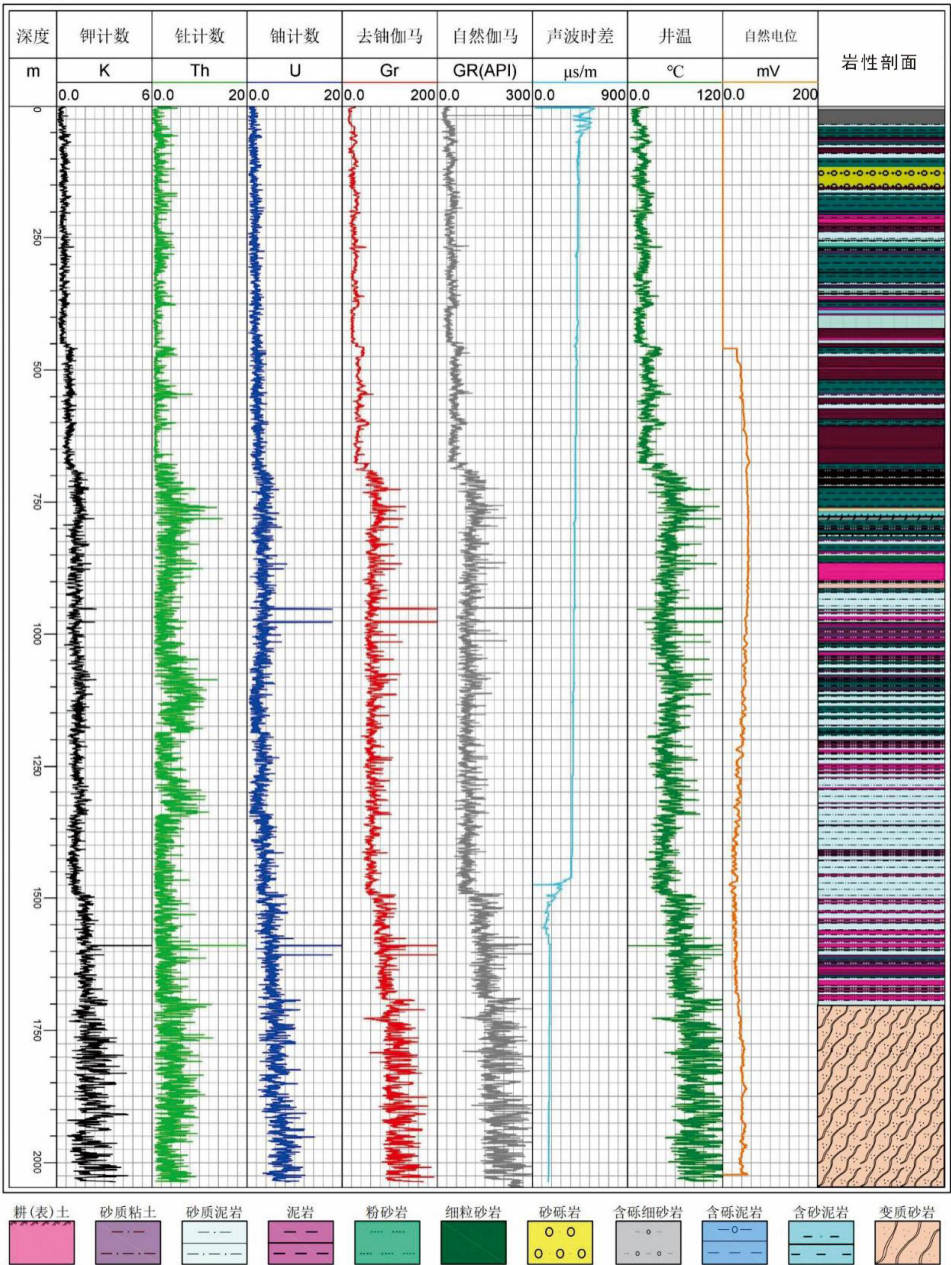


图5 地震监测井综合测井曲线

Fig.5 Comprehensive logging curve of seismic monitoring well

160 ~ 535 m 区间，岩性以灰绿色、灰黄色含砾细砂岩，灰色细砂岩、灰黄色砂砾岩分别与灰色泥岩、砂质泥岩呈不等厚互层；在 535 ~ 998 m 区间，岩性以灰绿色、灰黄色砂砾岩为主，灰色细砂岩与砂质泥岩呈不等厚互层；在 998 ~ 1438 m 区间，岩性主要为砂砾岩夹砂质泥岩；在 1438 ~ 1726 m 区间，岩性以浅灰黄色、灰白色砂砾岩与棕色泥岩呈不等厚互层；在 1726 ~ 2000 m 区间，岩性以变质砂岩为主。图6为完工厚的含有地层信息的地震监测井结构示意图，

4 结论

(1)为了进一步加强雷州半岛和北部湾地区的地震监测能力，本文提出了利用国际顶尖的深井高温电学和光学观测设备对雷州半岛和北部湾地区的构造变形信息进行长期观测的方法，并详细介绍了2000 m四开地震监测井设计与施工方案，包括：钻机钻具优选方案、孔口放喷、钻井液配比优选、孔斜控制及固井工艺等，该项目顺利完工可为其它地震监测深井施工提供了案例参考。

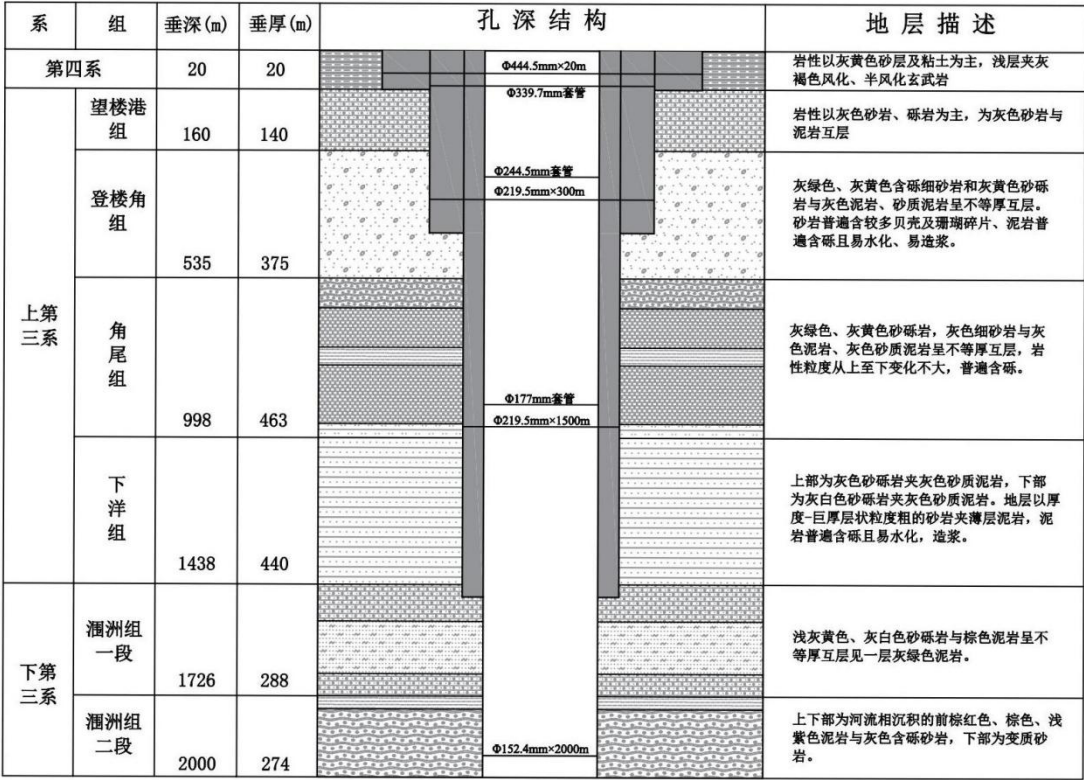


图6 2000 m地震监测井结构示意图

Fig.6 Structure diagram of 2000 m seismic monitoring well

(2)结合现场地质条件与施工情况, 分析了2000 m四开地震监测井施工的技术难点, 并依据相应难点给出了钻井液配比优选、井斜控制和固井工艺等有效的应对措施。

(3)在施工过程中采用自然伽马、声波时差、井温、自然电位等综合物理测井参数对钻孔围岩的岩性进行了详细的划分。

参考文献

[1] 安立强. 基于遥感数据的地震极灾区快速评估[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2022.

[2] 闫光庆,张金成. 中国石化超深井钻井技术现状与发展建议[J].石油钻探技术,2013,41(2):6.

[3] 王志刚. 国内外深井钻井技术比较分析[J]. 长江大学学报:自然科学版,2008,5(1):282-284.

[4] 孙晓东. 深井、超深井钻井技术研究[J]. 中国化工贸易, 2013,5(1):13-14.

[5] 曾义金,刘建立. 深井超深井钻井技术现状和发展趋势[J]. 石油钻探技术,2005,33(5):1-5.

[6] Liu S H, Cai. Drilling technologies for deep wells and ultra-deep wells[J]. Driuing Fluid and Completion Fluld, 2002, 39(5):640-643.

[7] 王鹏飞. 川东北深井超深井优快钻井关键技术研究[D]. 成都:西南石油大学,2017.