

刘晓阳, 李博, 段志强. 相山铀矿田深部探测3 000 m科学深钻施工技术[J]. 世界核地质科学, 2025, 42(1): 1-12. doi: 10.3969/j.issn.1672-0636.2025.01.001

LIU Xiaoyang, LI Bo, DUAN Zhiqiang. Drilling technology for 3 000 meter borehole in Xiangshan uranium field[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(1): 1-12(in Chinese).

## 相山铀矿田深部探测3 000 m科学深钻施工技术

刘晓阳<sup>1,2,3</sup>, 李博<sup>1,2,3</sup>, 段志强<sup>4</sup>

1 铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 北京 100029

2 核工业北京地质研究院, 北京 100029

3 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029

4 核工业二七〇研究所, 江西 南昌 330200

**摘要** 为了揭露相山火山盆地完整地质结构, 探索盆地中部成矿前景和潜力, 相山铀矿田深部探测二期项目在盆地中部杏树下地区部署了3 000 m科学深钻, 孔号CUSD2-1。为保障深钻顺利施工, 采用先进的交流变频电动顶驱式地质岩心钻机、大口径绳索取心钻进工艺、防斜控斜绳索取心钻具、高效金刚石钻头和高效减阻冲洗液, 成功解决坚硬岩石钻进时效低、破碎地层孔壁稳定、钻孔漏失、强造斜地层防斜控斜、大口径绳索取心安全钻进等复杂地层深孔钻探施工技术难题, 顺利钻探至预定深度, 创造我国地质岩心钻探S( $\phi 150$  mm)口径绳索取心最深纪录, 揭示深部地层结构, 为深部铀资源探测提供宝贵的地质资料。此次深钻不仅对深部铀资源科学探索研究具有特殊意义, 同时也对深孔-特深孔地质岩心钻探工程技术提升具有重大意义。

**关键词** 相山铀矿田; 深部探测; 科学深钻; 施工技术; 钻探设备

中图分类号 P634 文献标志码 A 文章编号 1672-0636(2025)01-0001-12

## Drilling technology for 3 000 meter borehole in Xiangshan uranium field

LIU Xiaoyang<sup>1, 2, 3</sup>, LI Bo<sup>1, 2, 3</sup>, DUAN Zhiqiang<sup>4</sup>

1 National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, Beijing 100029, China

2 Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

3 CNNC Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Technology, Beijing 100029, China

4 Research Institute No.270, CNNC, Nanchang 330200, China

**Abstract:** In order to reveal the complete geological structure of Xiangshan volcanic basin and explore the metallogenic prospect and potential in the central part of the basin, the Xiangshan Uranium Field Deep Scientific Exploration phase II project deployed a 3 000 meter deep scientific borehole, named CUSD2-1, at “Xingshuxia” in the central part of the basin. To insure the smooth conduction of the drilling, we adopted the advanced AC frequency conversion electric top drive geological core drill, large diameter wireline core drilling technology, anti-inclination and control wireline core drilling tools, high efficiency diamond bit and efficient drag reducing lubricating drilling fluid, which successfully solved the technical problems of deep

**基金项目:** 核能开发项目(编号: 地HXS1403)和中国核工业地质局项目“铀矿勘查钻探施工数字化监测与控制技术研究”(编号: 202347-1)联合资助

**收稿日期:** 2024-12-30 **改回日期:** 2025-01-26

**第一作者:** 刘晓阳, 男, 1967年生, 正高级工程师, 博士, 主要从事地质岩心钻探技术研究工作。E-mail: 250050462@qq.com  
Supported by Nuclear Energy Development Project (No. 地HXS1403), China Nuclear Industry Geological Bureau Project (No. 202347-1).

**Received date:** 2024-12-30 **revised date:** 2025-01-26

**First author:** LIU Xiaoyang, male, born in 1967, senior engineer, PhD, focusing on geological core drilling technology research. E-mail: 250050462@qq.com

drilling in complex formation, such as low drilling speed in hard rock, stable hole wall in broken formation, hole leakage, anti-inclination and control in strongly deflecting formation, and safe drilling with large diameter wireline coring, and finally drilled to the predetermined depth, creating the deepest record of S ( $\varphi 150$  mm) diameter wireline coring in geological core drilling in China, and revealed the deep formation structure. This deep drilling provides valuable geological data for deep uranium resource exploration in Xiangshan, which not only has special significance for the scientific research and exploration of deep uranium resources, but also has great significance for the improvement of engineering technology for deep-ultra deep geological drilling.

**Keywords:** Xiangshan uranium field; deep exploration; scientific deep drilling; drilling technology; drilling equipment

深部科学钻探是探索深部铀资源的望远镜,对许多重大科技和找矿问题的深入研究有着特殊意义,特别是大型热液型铀矿深部成矿机理、深部铀成矿潜力、深部构造和地质体及重要地质要素界面识别、深部铀矿化示踪、深部找矿模式和综合预测模型、深部地球动力学对岩浆-流体活动和成矿作用的控制、地质构造作用与成矿作用的偶合关系等,这些问题的深入研究和解决,对进一步阐明深部铀成矿的本质规律、成矿作用机理,深部成矿环境条件和前景,对解决盲矿预测难度大,扩大老矿区铀资源、指导找矿及扩大铀资源量均具有重要的实际和理论价值<sup>[1-3]</sup>。

江西相山铀矿为特大型火山岩型铀矿,过去对该矿田的研究程度虽然比较高,但主要限于浅表的(一般钻探深度小于 500 m)研究。科学深钻项目开展之前,该矿田最大钻探深度为 1 206 m,对深部的研究和成矿前景涉及较少<sup>[4-9]</sup>。

2012—2021 年核工业北京地质研究院在相山矿田开展了深部探测科研项目,共完成 3 个深度超 2 500 m 的科学深钻: CUSD1 孔 2 818.88 m、CUSD2-1 孔 3 016.36 m 和 CUSD2-2 孔 2 622.56 m, 钻孔终孔直径涵盖了 H( $\varphi 95$  mm)、P( $\varphi 122$  mm)、S( $\varphi 150$  mm) 系列绳索取心口径。CUSD-1 孔和 CUSD2-1 孔分别创下国内 P 口径( $\varphi 122$  mm) 和 S 口径( $\varphi 150$  mm) 绳索取心施工深度纪录<sup>[10-12]</sup>。铀矿科学深钻工程的成功实践,不仅对深部铀资源科学探索研究有着特殊的意义,同时也对深孔-特深孔地质岩心钻探工程关键技术难题攻关有着重大意义<sup>[13-17]</sup>。深孔钻探需要解决一系列的技术问题,例如钻探设备、钻孔结构、孔内钻具及

其级配、钻探工具与钻进工艺、孔内复杂情况的预防与处理等等,采用常规小口径岩心钻探施工工艺技术难以满足钻探施工需要。CUSD2-1 孔施工克服坚硬岩石钻进时效低、破碎地层孔壁稳定、钻孔漏失、强造斜地层防斜控斜和大口径绳索取心安全钻进等难题,本文从施工装备、钻孔结构、钻井液、钻头选型与应用和钻孔防斜控斜等方面介绍相山铀矿田深部科学探测二期项目 CUSD2-1 孔 3 016.36 m 科学深钻钻探施工技术,为今后施工类似的深孔-特深孔地质岩心钻探工程提供参考借鉴。

## 1 工程概况

CUSD2-1 钻孔为《相山大型铀矿田科学钻探 II 期铀多金属深部探测研究》科研课题中的钻探工程,设计深度为 3 000 m,钻孔位于江西相山铀矿田杏树下地区。工程要求终孔孔径不小于 95 mm;全孔段取心,岩矿心采取率全孔平均 90% 以上,矿化带或构造破碎带为 85% 以上;钻孔终孔顶角 $\leq 15^\circ$ 。

项目总负责单位为中国核工业集团有限公司核工业北京地质研究院,钻探施工承担方为北京中核大地矿业勘查开发有限公司,具体工程实施方为核工业二七〇研究所。

CUSD2-1 钻孔自 2019 年 12 月 26 日正式开钻至 2021 年 1 月 13 日完钻,历时 385 d,完钻孔深 3 016.32 m。

## 2 钻遇地层

0~29.47 m: 第四系土壤、坡积物和砂砾。

29.47~1 550.68 m: 碎斑流纹岩。岩石呈灰白色,斑状结构,块状构造。斑晶主要有石

英、碱性长石、斜长石和黑云母组成。斑晶约占35%,石英含量约占15%,碱性长石约占12%,斜长石约占5%,黑云母约占3%。构造作用局部较强,整体上发育20°和50°轴心角张性构造裂隙。该段岩石石英含量高,致密坚硬,研磨性不强,钻头不易出刃,钻进时效偏低。使用金刚石钻头26个,均为同心圆环齿钻头,钻头平均寿命54.83 m,平均钻进时效1.42 m·h<sup>-1</sup>。1 451.15 m前使用3 m长岩心管,平均回次进尺长度2.69 m;自1 451.15 m开始使用4.5 m长岩心管,平均回次进尺长度3.94 m。使用4.5 m长岩心管后,回次长度增加,辅助时间减少,生产效率大幅提高。

1 550.68~1 565.29 m:晶玻屑凝灰岩和紫红色粉砂岩、砂砾岩。相比碎斑流纹岩,钻进时效明显提高,岩心完整。

1 565.29~1 772.96 m:流纹英安岩。岩石呈紫红色或灰绿色,斑状结构,块状构造。局部发育红色铁质条带和浅色条带状长石晶屑,呈假流纹构造。斑晶主要矿物为斜长石(20%)、碱性长石(10%)、石英(5%)和黑云母(1%)。岩石整体较为完整,未见强烈构造破碎带。该段岩心石英含量不高,岩石较软,研磨性较强,对钻头金刚石出刃有利,钻进时效稍有提高。该段使用金刚石钻头2个,均为同心圆环齿钻头,平均钻进时效1.65 m·h<sup>-1</sup>,平均回次进尺长度4.11 m。该段钻头寿命和钻进时效相比于碎斑流纹岩段显著提高。

1 772.96~2 065.05 m:紫红色砂岩。整体上,该段岩石属于相山火山岩浆活动早期爆发相产物,包括凝灰岩、晶玻屑凝灰岩、凝灰质砂岩、凝灰质砾岩、紫红色砂岩、熔结凝灰岩等。岩石成分复杂,粒径大小悬殊。该段岩石较软,易吸水膨胀,岩心易堵管,回次长度明显降低。该段钻进平均时效1.67 m·h<sup>-1</sup>,平均回次长度3.17 m。

2 065.05~3 016.36 m:基底变质岩,主要岩性为碳质板岩、千枚状板岩和千枚岩。该段岩石呈黑色、灰黑色,板状构造或千枚状构造,主要组成矿物为石英和岩屑,石英约占20%~30%、岩屑约占10%~15%、含少量黑云母、炭

质、绢云母。该段岩石较完整,局部发育多段多金属矿化脉。由于受地层压力影响,岩石致密,地层产状较陡,属于强造斜地层,岩心取出内管后由于岩石内应力,岩心易产生“岩爆”、“饼化”现象,钻进过程中,易出现岩心堵管现象,回次长度较短。该段平均钻进时效1.52 m·h<sup>-1</sup>,平均回次长度3.10 m。

### 3 主要施工设备

#### 3.1 XD-40DB交流变频电驱动顶驱式岩心钻机

CUSD2-1 钻孔设计深度3 000 m,要求全孔取心,孔斜要求顶角不超过0.5°/100 m。项目组在综合考虑钻孔设计深度、工程质量要求、钻孔结构及以往施工经验的基础上,决定采用交流变频电驱动顶驱式岩心钻机施工CUSD2-1 钻孔。XD-35DB交流变频电驱动顶驱式岩心钻机曾成功完成中国铀矿第一科学深钻CUSD-1 钻孔(2013年5月完工,终孔深度2 818.88 m)的钻探任务。此次工程对钻机顶驱进行升级,将原来的XD-35DB交流变频电驱动顶驱升级为XD-40DB顶驱,钻深能力由3 500 m升级至4 000 m,钻机主要性能参数见表1。

XD-40DB交流变频电驱动顶驱式岩心钻机采用K型钻塔加长导轨型式,顶驱电机直接驱动旋转钻杆柱,可沿导轨上下长行程移动。通过绞车送钻系统实现恒钻压或恒钻速钻进。采用交流变频方式驱动钻机主要执行部件,实现顶驱、绞车全程无级调速,辅助动作采用液压驱动。全数字化交流变频控制,通过电传系统PLC、触摸屏、气电液及仪表参数一体化设计,实现钻机智能化司钻控制。采用液压吊卡、液压动力钳实现加减钻杆、拧卸钻杆丝扣机械化。采用气动孔口夹持装置,稳定可靠。绳索取心绞车设置电机转矩、打捞张力和深度传感器,控制精确。实际应用证明,该钻机具有钻进能力强、机械化程度高、控制智能化和参数显示数字化的特点<sup>[7]</sup>。图1为XD-40DB型交流变频电动顶驱式地质岩心钻机照片。

#### 3.2 泥浆泵

采用湖南衡阳探矿机械厂生产的BW400—

表 1 XD-40DB 型交流变频电动顶驱式地质岩心钻机主要参数

Table 1 Main parameters of XD-40DB type AC variable frequency electric top drive geological core drill

|             |  |
|-------------|--|
| 钻深能力        | 4 000 m (HQ— $\phi$ 89 mm 绳索钻杆)            |
| 最大载荷        | 120 t                                      |
| 水道          | $\phi$ 50 mm                               |
| 额定循环压力 (泥浆) | 35 MPa                                     |
| 系统重量        | 9 t (不含单导轨和运移架)                            |
| 工作高度        | 5.5 m (提环面到吊卡上平面)                          |
| 电源电压        | 690 V/3AC                                  |
| 额定功率        | 200 kW                                     |
| 环境温度        | -35~+55 °C                                 |
| 转速范围        | 0~600 r·min <sup>-1</sup> 连续可调             |
| 工作扭矩        | 7 639.2 N·m (0~250 r·min <sup>-1</sup> 连续) |
| 最大扭矩        | 12 000 N·m (间断, 25 rpm 以下)                 |
| 最高转速        | 600 r·min <sup>-1</sup> (180 kW)           |



图 1 XD-40DB 型钻机

Fig. 1 XD-40DB drilling rig

30A 三缸往复式单作用泥浆泵。该泵具有结构紧凑、运转平稳、流量变化范围广、输出压力较高、易损件寿命较长、性能稳定、强度、刚性好、通用件和标准件多等特点。图 2 是泥浆泵照片。

该泥浆泵采用汽车变速箱,通过活塞和柱塞的组合使用,可获得多级的流量、压力,满足不同的施工工艺要求,主要用于 3 000 m 以深的岩心钻探、煤层钻进或煤田地质、冶金地质

和水文地质工程孔钻进中供给冲洗液。BW400—30 A 主要技术参数见表 2。

## 4 钻探施工技术

### 4.1 CUSD2-1 钻孔结构与钻具组合

借鉴相山铀矿深部探测一期中国铀矿第一科学深钻 2 818 m 钻孔成功施工经验,并调研分析了国内已完成岩心钻探超 2 500 m 深孔-特深孔的钻孔结构与套管层序<sup>[18-23]</sup>,结合



图 2 BW-400/30A 型泥浆泵

Fig. 2 BW-400/30A mud pump

表 2 BW-400/30A 型泥浆泵性能参数

Table 2 Performance parameters of BW-400/30A mud pump

| 型号   | BW-400/30A 型高压泥浆泵       |     |     |     |    |    |     |     |     |     |    |    |
|--|-------------------------|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|----|----|
| 行程/mm                                      | 110                     |     |     |     |    |    |     |     |     |     |    |    |
| 缸径/mm                                      | $\phi 85$               |     |     |     |    |    |     |     |     |     |    |    |
| 档位   | 快                       |     |     |     |    |    | 慢   |     |     |     |    |    |
| 泵速/( $\text{min}^{-1}$ )                   | 217                     | 178 | 126 | 83  | 49 | 31 | 178 | 146 | 103 | 68  | 40 | 25 |
| 流量/( $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) (活塞) | 400                     | 300 | 210 | 140 | 82 | 52 | 300 | 245 | 173 | 114 | 68 | 42 |
| 压力/MPa (活塞)                                | 5                       | 6   | 8   | 13  | 13 | 13 | 6   | 7   | 10  | 13  | 13 | 13 |
| 流量/( $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) (柱塞) | 150                     | 125 | 88  | 58  | 34 | 22 | 125 | 102 | 72  | 48  | 28 | 18 |
| 压力/MPa (柱塞)                                | 12                      | 14  | 21  | 30  | 30 | 30 | 14  | 18  | 25  | 30  | 30 | 30 |
| 驱动功率/kW                                    | 45                      |     |     |     |    |    |     |     |     |     |    |    |
| 进水管直径/mm                                   | 76 ( $\phi 51$ )        |     |     |     |    |    |     |     |     |     |    |    |
| 排水管直径/mm                                   | $\phi 51$ ( $\phi 32$ ) |     |     |     |    |    |     |     |     |     |    |    |

交流变频顶驱式地质岩心钻机特点, 决定继续采用中国铀矿第一科学深钻大口径绳索取心钻进工艺技术体系。

CUSD2-1 钻孔结构总体设计思路是以大口径绳索取心为主导, 即以 P 口径 (122 mm) 及以上口径为打口径。在钻机设备能力许可的前提下, 钻孔口径尽量选择大尺寸, 在地层条件允许的情况下, 每级口径钻探深度尽量向下延伸, 尽量多储备几级变径空间, 保证深部岩心钻探施工的安全性和后续复杂地层换径的主动性。

CUSD2-1 钻孔结构设计方案见表 3。一开

采用  $\phi 176$  mm 单动双管取心钻进, 下  $\phi 168$  mm 套管, 穿过覆盖层后二开换用  $\phi 150$  mm 绳索取心钻进, 设计  $\phi 150$  mm 口径施工至 1 200~1 500 m, 如施工顺利, 可考虑施工至 2 000 m, 将  $\phi 150$  mm 绳索取心钻杆作为套管, 三开换用  $\phi 122$  mm 口径绳索取心裸孔钻进至设计深度 3 000 m。这样只有 2 000~3 000 m 段是裸孔钻进, 裸孔长度进一步缩短, 保证钻孔整体孔壁稳定性, 保障后续施工安全性。四开  $\phi 95$  mm 绳索取心作为应急备用口径, 特殊情况下把  $\phi 122$  mm 口径绳索取心钻杆作为套管, 换  $\phi 95$  mm 绳索取心继续钻进。

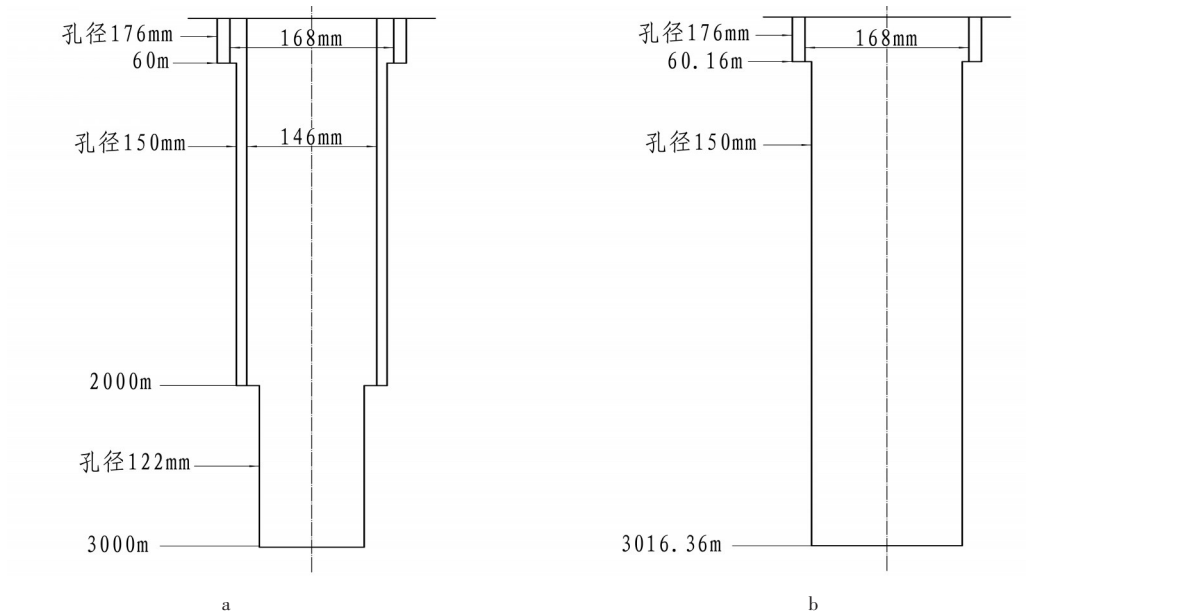
表 3 设计钻孔结构与套管情况一览表

Table 3 List of designed drilling structures and casing series

| 开钻次数 | 钻头尺寸/mm    | 井段/m                | 套管尺寸/mm        | 壁厚/mm | 钢级    | 套管总长/m      | 备注      |
|------|------------|---------------------|----------------|-------|-------|-------------|---------|
| 一开   | $\phi 176$ | 0~50                | $\phi 168$     | 6.5   | DZ40  | 50          | 水泥封孔至井口 |
| 二开   | $\phi 150$ | 50~(1 200~2 000)    | $\phi 139.7$   | 5     | ZT750 | 1 200~2 000 | 绳索取心    |
| 三开   | $\phi 122$ | (1 200~2 000)~3 000 | ( $\phi 114$ ) |       | ZT750 |             | 绳索取心    |
| 四开   | $\phi 95$  | 应急备用口径              |                |       |       |             |         |

在 CUSD2-1 钻孔实际施工过程中,根据岩层变化、钻进工艺参数与扭矩变化、孔内复杂程度等对钻孔结构进行调整,实际钻孔完工结构为两开钻孔结构。一开采用  $\phi 176\text{ mm}$  单动双管取心钻进,穿过覆盖层后钻至  $60.18\text{ m}$ ,下入  $\phi 168\times 7\text{ mm}$  套管,水泥固井;一开钻具组合: $\phi 176\text{ mm}$  金刚石取心钻头+ $\phi 176.5\text{ mm}$  扩孔器+ $\phi 168\text{ mm}$  单动双管取心钻具+变丝接头+ $\phi 140\text{ mm}$  绳索取心钻杆+主动钻杆。二开

$\phi 150\text{ mm}$  口径采用 S150 mm 金刚石绳索取心钻具施工至  $3\ 016.36\text{ m}$ ,二开孔段为裸孔,裸孔长度达到  $2\ 956.18\text{ m}$ 。二开钻具组合: $\phi 150\text{ mm}$  金刚石取心钻头+ $\phi 150.5\text{ mm}$  扩孔器+ $\phi 150\text{ mm}$  绳索取心钻具+ $\phi 150.5\text{ mm}$  扩孔器+ $\phi 140\text{ mm}$  绳索取心钻杆+ $\phi 149.5\text{ mm}$  扶正器(数量若干)+ $\phi 140\text{ mm}$  绳索取心钻杆+主动钻杆。CUSD2-1 设计钻孔结构与实际施工结构见图 3。



a—CUSD2-1 设计钻孔结构; b—CUSD2-1 实际施工结构。

图 3 CUSD2-1 设计钻孔结构与实际施工结构

Fig.3 Design drilling structure and actual structure of CUSD2-1

4.2 钻孔冲洗液与护壁堵漏

根据相山地区典型岩层特点和地层情况,结合以往铀矿科学第一深钻 CUSD1 和龙灿工程 CUSD2、CUSD3 和 CUSD4 号钻孔地层情况,项目组针对设计深度  $3\ 000\text{ m}$  的 CUSD2-1 钻孔可能遇到的复杂地层情况进行分析,对深部绳索取心钻进中小环空、大流阻

条件下可能存在的岩心打捞阻力、钻杆柱回转阻力、冲洗液对岩屑的携返能力等因素进行研判,决定采取铀矿科学第一深钻 CUSD1 高效减阻泥浆体系。

主要成分有四种:聚丙烯酰胺、HV—CMC 纤维素、磺化沥青和高效润滑剂,具体配方见表 4。

表 4 冲洗液配比

Table 4 Mud formulation

| 名称         | 加量/ (kg·m <sup>-3</sup> ) |
|------------|---------------------------|
| 聚丙烯酰胺      | 3~5                       |
| HV—CMC 纤维素 | 3~5                       |
| 磺化沥青       | 10~15                     |
| 高效润滑剂      | 10~15                     |

冲洗液净化措施采用自然沉淀加机械除砂的方法进行泥浆净化,以自然沉淀方法为主,设计了泥浆循环系统,有长度超过 20 m 的循环槽、1 个储浆池和 3 个沉淀池。储浆池和沉淀池的容量大于 40 m<sup>3</sup>。在泥浆循环槽

中每隔一段距离放置隔板,再通过 3 个沉淀池进行自然沉淀。同时配备 KALW452 卧式离心机。

经过统计,CUSD2-1 钻孔各阶段扭矩变化如图 4。

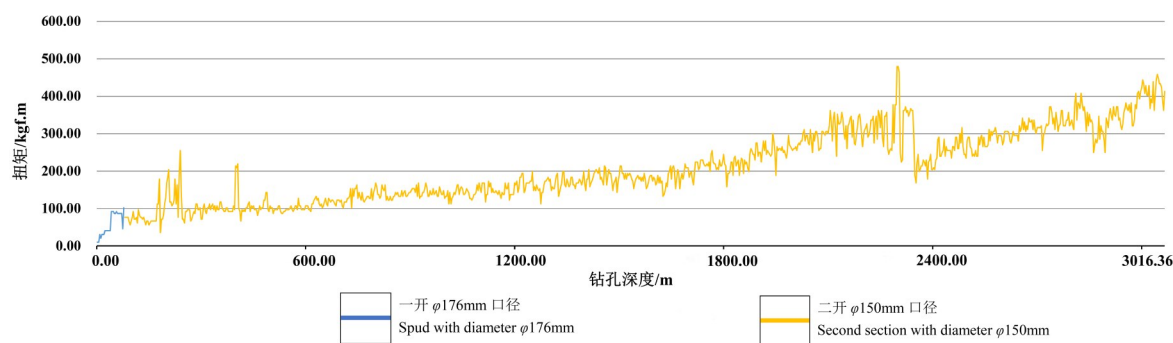


图 4 CUSD2-1 钻孔各孔段扭矩变化趋势图

Fig. 4 Drilling process torque variation trend of CUSD2-1

破碎漏失地层堵漏措施:CUSD2-1 钻孔从孔深 160 m 开始,地层较破碎(图 5),出现冲洗液漏失现象,漏失量介于 2.4~3.3 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>之间,严重漏失层段失返性漏失。观察取出的岩心破碎情况,结合该地区漏失特点,判断为地层破碎带裂隙漏失。为有效控制漏失,防止钻孔坍塌掉块,施工现场在冲洗液中加入随钻堵漏剂、锯末和黏土等材料进行随钻堵漏。严重漏失段,通过绳索取心钻杆内孔通道由孔口灌入胶联堵漏材料,通过泥浆泵送入到漏失层位,反复多

次,直到钻井液循环正常。为了防止胶联堵漏材料被孔内泥浆和地下水稀释,影响堵漏效果,采取活塞堵漏方法:往钻杆内孔灌注胶联堵漏材料前,先在钻杆内孔中放置一个海绵塞,然后灌入胶联堵漏材料,灌注量视孔内情况定,原则上尽可能多灌。当钻杆中的胶联堵漏材料下沉速度很慢或者不下时,再在胶联堵漏材料的上部放置一个海绵塞,接上泥浆泵进行泵送。根据孔内漏失情况,反复多次循环灌注,直到钻井液循环正常。活塞堵漏原理图见图 6。



图 5 漏失地层破碎岩心

Fig. 5 Leakage and fractured formation

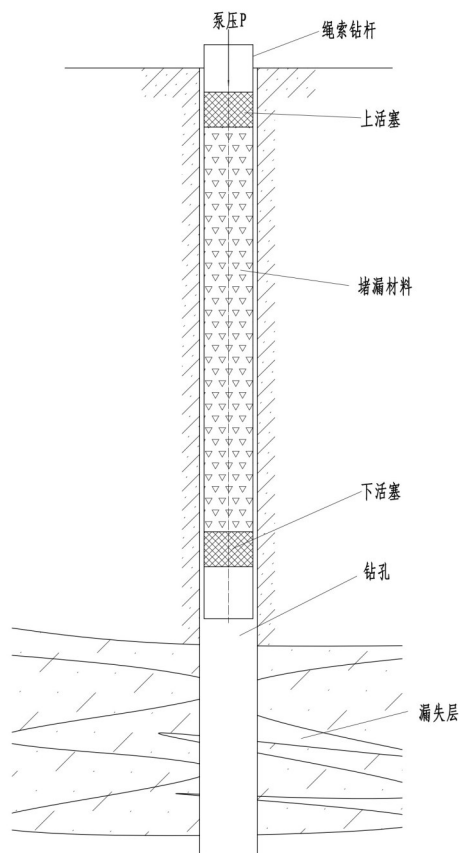


图 6 堵漏冲洗液泵送示意图

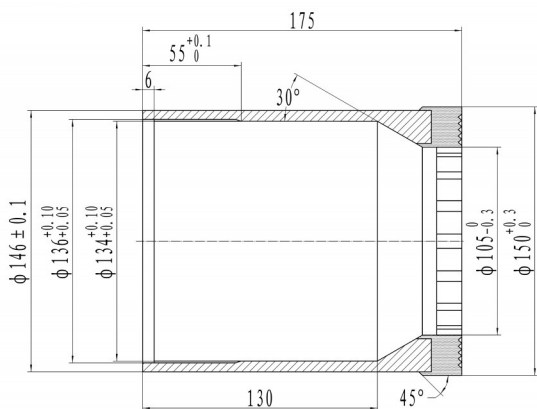
Fig. 6 Schematic diagram of pumping plugging fluid

### 4.3 金刚石钻头应用

在铀矿第一科学深钻 CUSD1 中共试验齿型、同心圆四环槽型、主副水口型和同心圆尖环齿型四类型的钻头。综合比较,同心圆型(三环和四环)在 CUSD1 钻孔各类地层中钻头寿命与钻进时效综合表现最优<sup>[7]</sup>。因此,本项目在钻头唇面结构方面仍以同心圆尖环齿型钻头为主(图 7 和 8)。钻头内外保径材料采用方条形聚晶,加密

交叉双层布置,以增强保径效果提高使用寿命。同时根据钻头尺寸规格不同,钻头圆周均布 10~14 个水口,胎体高度介于 10~16 mm 之间。

CUSD2-1 钻孔使用  $\phi 176$  mm 金刚石钻头 3 个,钻头平均使用进尺 20.33 m,平均机械钻速  $1.17 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 。使用  $\phi 150$  mm 金刚石钻头 50 个,钻头平均使用进尺 59.12 m,平均机械钻速  $1.44 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

图 7  $\phi 150$  mm 钻头结构图Fig. 7 Structural diagram of  $\phi 150$  mm drill bit图 8  $\phi 150$  mm 绳索取心金刚石钻头Fig. 8  $\phi 150$  mm wireline coring diamond drill bit

#### 4.4 绳索取心钻进防斜控斜

相山地区部分地层岩石片理倾角大,属于钻探施工易斜地层,孔斜问题是该地区钻探难题;而钻遇的碎斑流纹岩和流纹英安岩可钻性级别均在 7 级以上,一旦钻孔偏斜后的纠斜工作难度大、耗时多、效果有限和事故隐患多。针对上述难题,把工作重点放在绳索取心钻进“防斜控斜”上。结合铀矿第一科学深钻地层特点、孔斜规律和 3 000 m 深度 CUSD2-1 科学深钻的工程质量要求,项目组设计绳索取心防斜控斜钻具组合(图 9)。

S150 绳索取心防斜控斜钻具具体技术措施如下:采用绳索取心多级扶正器组合,扶正器外径  $\phi 150$  mm,公差介于 0~0.5 mm 之间,扶正胎块采用螺旋设计,胎块上镶有保径聚晶,外形类似扩孔器(图 10),但其上下螺纹扣型与钻杆扣型一致。钻柱下方最靠近钻具的两个

立根中,每个立根(4 根钻杆)加 2 个扶正器,即每两个钻杆间连接 1 个扶正器;再向上 20 个立根中,每根立根间连接 1 个扶正器,总计 24 个扶正器,加装扶正器的钻杆长度达到 396 m。加装扶正器钻杆钻具重量约为 9 t,满足正常钻进时孔底所需压力,钻柱中和点位于安装扶正器的钻杆段内,上部未安装扶正器的钻杆处于拉伸状态,下部安装扶正器的钻杆段大部分处于受压状态,扶正器外径略小于钻头,可限制底部钻具较大幅度地摆动,保证下部钻柱在钻进过程中具有极好的稳定性,减少对取心钻具和岩心的扰动,既能间接提高钻头使用寿命,又可以保证钻具整体稳定,有效防控钻孔偏斜可能,保证孔内安全。

CUSD2-1 终孔后测斜顶角偏差为  $14.5^\circ$ ,满足设计要求。图 11 为 CUSD2-1 钻孔偏斜趋势。



图 9 防斜控斜取心钻具组合

Fig. 9 Anti-deflection and deviation control core drilling tool assembly



图 10 钻杆扶正器

Fig. 10 Drill pipe stabilizer

从图 11 显示的 CUSD2-1 钻孔偏斜趋势可看出,CUSD2-1 钻孔在 2 200 m 以浅时钻孔顶角偏斜控制在  $2.5^\circ$  以内,最大  $2.3^\circ$ ,偏斜距约 23 m。深度在 2 200 m 以深顶角偏斜逐渐增大,终孔顶角约  $14.5^\circ$ 。主要原因有两个:1)钻杆柱长度超过 2 200 m 后柔度增加;2)基底变质岩主要岩性为碳质板岩、千枚状板岩和千枚岩,

岩层节理发育地层产状较陡,属于强造斜地层。

## 5 工程施工进度情况

CUSD2-1 钻孔自 2019 年 12 月 26 日正式开钻至 2021 年 1 月 13 日完钻,历时 385 d,完钻井深 3 016.36 m。自开钻至终孔,每月实际进尺

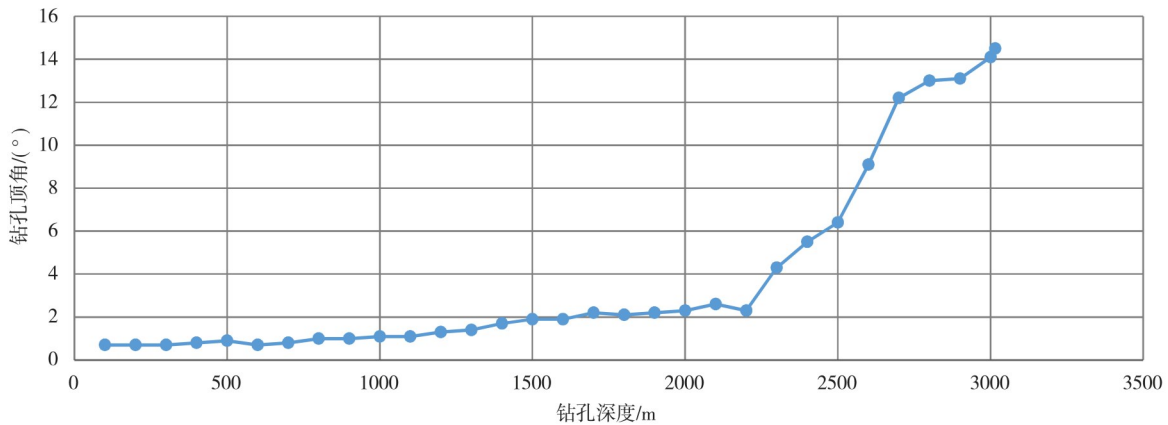


图 11 CUSD2-1 钻孔偏斜趋势

Fig. 11 Apex angle deviation trend of CUSD2-1

与台月效率情况见表 5。2020 年 7—9 月由于地层因素导致孔内回转阻力异常以及设备故

障,有近 70 d 时间进行孔内阻力异常处理和设备维修维护,月实际进尺和台月效率偏低。

表 5 CUSD2-1 钻孔每月实际进尺与台月效率

Table 5 Actual monthly footage and drilling rig efficiency unit per month of CUSD2-1

| 时间          | 钻进孔段/m            | 进尺/m   | 台月时间/h | 台月数     | 台月效率/(m·台月 <sup>-1</sup> ) |
|-------------|-------------------|--------|--------|---------|----------------------------|
| 2019 年 12 月 | 0~40.29           | 40.29  | 113    | 0.156 9 | 257                        |
| 2020 年 1 月  | 40.29~315.05      | 274.46 | 588    | 0.816 7 | 336                        |
| 2020 年 2 月  | 315.05~756.08     | 441.03 | 696    | 0.966 7 | 456                        |
| 2020 年 3 月  | 756.08~1 166.09   | 410.01 | 720    | 0.95    | 432                        |
| 2020 年 4 月  | 1 166.09~1 517.60 | 351.51 | 720    | 1       | 352                        |
| 2020 年 5 月  | 1 517.60~1 873.98 | 356.38 | 720    | 0.883 3 | 403                        |
| 2020 年 6 月  | 1 873.98~2 030.53 | 156.55 | 492    | 0.683 3 | 229                        |
| 2020 年 7 月  | 2 030.53~2 170.56 | 140.03 | 528    | 0.733 3 | 191                        |
| 2020 年 8 月  | 2 170.56~2 228.67 | 58.11  | 216    | 0.3     | 194                        |
| 2020 年 9 月  | 2 228.67~2 271.95 | 43.28  | 192    | 0.266 7 | 162                        |
| 2020 年 10 月 | 2 271.95~2 478.83 | 206.88 | 552    | 0.766 7 | 270                        |
| 2020 年 11 月 | 2 478.83~2 671.35 | 192.52 | 504    | 0.7     | 275                        |
| 2020 年 12 月 | 2 671.35~2 934.62 | 263.27 | 648    | 0.9     | 293                        |
| 2021 年 1 月  | 2 934.62~3 016.36 | 81.74  | 252    | 0.35    | 234                        |

## 6 结 论

1) 相山铀矿田深部探测科学钻探采用绳索取心+防斜控斜扶正器+高效长寿孕镶金刚石钻头+无固相高效减阻钻井液组合钻进工艺,克服深度大、岩石高硬度、钻孔漏失和钻孔易偏斜等工程难题,形成铀矿科学深钻大口径绳索取心深孔-特深孔钻探工艺技术体系。CUSD2-1 孔创下国内地质岩心钻探 S 口径( $\varphi$  150 mm)3 016.36 m 绳索取心施工深度纪录,标志着核工业深孔-特深孔钻探技术装备与施工工艺技术的重大突破。

2) 交流变频电传动顶驱式地质岩心钻机结合大口径金刚石绳索取心钻探工艺成功应用于 3 000 m 科学深钻工程,解决传统地质岩心钻机施工深孔-特深孔在效率、安全、能耗和操控等方面凸显若干重大问题,推动地质岩心钻探装备自动化、数字化、信息化和智能化的发展进程。

3) 铀矿科学深钻工程实践,把深孔-特深孔(大于 3 000 m)地质岩心钻探终孔直径由 N( $\varphi$ 75 mm)提升到 S( $\varphi$ 150 mm),国产化深钻装备和钻杆钻具得到实践验证,为今后施工更大深度全孔取心钻孔提供示范。

## 参考文献

- 1 李子颖. 中国找铀,向深部发掘[J]. 中国核工业,2011(7):42-44.  
LI Ziyang. China uranium exploration, delving into the depths[J]. China Nuclear Industry, 2011(7):42-44(in Chinese).
- 2 翟裕生,邓军,王建平,等. 深部找矿研究问题[J]. 矿床地质,2004,23(2):142-149.  
ZHAI Yusheng, DENG Jun, WANG Jianping, et al. Researches on deep ore prospecting [J]. Mineral Deposits, 23(2):142-149(in Chinese).
- 3 翟裕生,邓军,崔彬,等. 成矿系统及综合地质异常[J]. 现代地质,1999,13(1):99-104.  
ZHAI Yusheng, DENG Jun, CUI Bin, et al. Ore-forming system and comprehensive geo-anomaly [J]. Geosciences, 1999, 13(1):99-104(in Chinese).
- 4 张万良,李子颖. 江西邹家山铀矿床成矿特征及物质来源[J]. 现代地质,2005,19(3):369-374.  
ZHANG Wanliang, LI Ziyang. Metallogenetic characteristics and material source of Zoujiashan uranium deposit, Jiangxi province [J]. Geoscience, 2005, 19(3):369-374(in Chinese).
- 5 范洪海,凌洪飞,王德滋,等. 相山铀矿田成矿机理研究[J]. 铀矿地质,2003,19(4):208-213.  
FAN Honghai, LING Hongfei, WANG Dezi, et al. Study on metallogenetic mechanism of Xiangshan uranium ore-field[J]. Uranium Geology, 2003, 19(4):208-213(in Chinese).
- 6 张万良. 相山矿田铀矿地质研究进展与趋势[J]. 资源调查与环境,2012,33(1):22-27.  
ZHANG Wanliang. Progress and trend in the research on uranium geology in Xiangshan ore field [J]. Resources Survey & Environment, 2012, 33(1):22-27(in Chinese).
- 7 刘晓阳,李大昌,叶雪峰. 中国铀矿第一科学深钻施工概况[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会. 第十七届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集. 北京:地质出版社,2013:310-312+317.  
LIU Xiaoyang, LI Dachang, YE Xuefeng. Construction overview of China's first uranium scientific drilling project[C]// Exploration Engineering Committee from Geological Society of China. The 17<sup>th</sup> academic exchange annual conference proceedings of Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling). Beijing: Geology Press, 2013: 310-312+317(in Chinese).
- 8 王健,聂江涛,郭建,等. 江西相山矿田深部多金属矿化特征[J]. 地质与勘探,2016,52(1):47-59.  
WANG Jian, NIE Jiangtao, GUO Jian, et al. Characteristics of deep polymetallic mineralization in the Xiangshan uranium ore field of Jiangxi province[J]. Geology and Exploration, 2016, 52(1):47-59(in Chinese).
- 9 王健,聂江涛,郭建,等. 江西相山深钻孔位遴选与主要钻探成果[J]. 地质论评,2015,61(增刊1):385-386.  
WANG Jian, NIE Jiangtao, GUO Jian, et al. Location selection and main drilling results of deep borehole in Xiangshan Jiangxi province[J]. Geological Review, 2015, 61(Sup.1):385-386(in Chinese).
- 10 李子颖,秦明宽,范洪海,等. 我国铀矿地质科技近十年的主要进展[J]. 矿物岩石地球化学通报,2021,40(4):845-857+1001.  
LI Ziyang, QIN Mingkuan, FAN Honghai, et al. Main progresses of uranium geology and exploration techniques for the past decade in China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(4):845-857+1001(in Chinese).
- 11 聂江涛. 中国铀矿第一科学深钻[J]. 铀矿地质,2014,30(2):128.  
NIE Jiangtao. China's first uranium scientific drilling project[J]. Uranium Geology, 2014, 30(2):128(in Chinese).
- 12 李博,刘晓阳,叶晓平,等. 铀矿科学深钻液动冲击器射吸结构仿真分析[J]. 铀矿地质,2022,38(3):554-566.  
LI Bo, LIU Xiaoyang, YE Xiaoping, et al. Simulation and analysis of jet structure parameters in hydraulic impactor of uranium scientific drilling[J]. Uranium Geology, 2022, 38(3):554-566(in Chinese).
- 13 段书新,汪硕,万汉平,等. 井中瞬变电磁法在探测火山岩中良导电体的应用研究——以铀矿科学深钻CUSD3为例[J]. 世界核地质科学,2016,33(4):223-228+243.  
DUAN Shuxin, WANG Shuo, WAN Hanping, et al. Application of BHTEM in detecting good conductors in volcanic area: A case study of deep drilling borehole CUSD3 for uranium science[J]. World Nuclear Geoscience, 2016, 33(4):223-228+243(in Chinese).
- 14 冯延强,焦仓文,邵帅,等. 小口径高温伽马能谱测井仪关键技术及应用[J]. 世界核地质科学,2023,40(3):796-804.  
FENG Yanqiang, JIAO Cangwen, SHAO Shuai, et al. Key technology and application of small caliber high

- temperature gamma spectrum logging tool[J]. World Nuclear Geoscience, 2023, 40(3): 796-804 (in Chinese).
- 15 秦明宽,刘祐,叶发旺,等.铀资源勘查技术国际科技前沿动态[J].世界核地质科学,2024,41(1):1-11. QIN Mingkuan, LIU Hu, YE Fawang, et al. Latest global developments in uranium resources exploration technology [J]. World Nuclear Geoscience, 2024, 41(1):1-11(in Chinese).
- 16 蔡煜琦,李子颖,刘武生,等.铀矿大基地资源扩大与评价技术研究[J].世界核地质科学,2022,39(2): 173-185. CAI Yuqi, LI Ziyang, LIU Wusheng, et al. Resource expansion and evaluation technology of large uranium mining base[J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(2):173-185(in Chinese).
- 17 李博,刘晓阳,段志强.国外铀矿勘查钻探技术现状及发展趋势[J].世界核地质科学,2022,39(1): 153-164. LI Bo, LIU Xiaoyang, DUAN Zhiqiang. Current situation and development trend of drilling technology for uranium exploration abroad [J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(1): 153-163(in Chinese).
- 18 朱恒银,蔡正水,王强,等.赣州科学钻探 NLS-1 孔施工技术研究与实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程), 2014,41(6):1-7. ZHU Hengyin, CAI Zhengshui, WANG Qiang, et al. Study and practice of construction technology for scientific drilling hole NLS-1 in Ganzhou [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(6):1-7(in Chinese).
- 19 吴金生,张伟,李旭东,等.汶川地震断裂带科学钻探项目 WFS-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. WU Jinsheng, ZHANG Wei, LI Xudong, et al. Overview on the drilling operation of and key technologies used in the WFS-4 of Wenchuan earthquake fault scientific drilling project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9): 120-125(in Chinese).
- 20 王达,张伟.科钻一井钻探施工技术总论[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(增刊1):16-22. WANG Da, ZHANG Wei. General drilling technology of first deep scientific drilling well CCSD-1 [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2005, 32(Sup.1): 16-22(in Chinese).
- 21 罗光强,张伟,李正前,等.汶川地震断裂带科学钻探项目 WFS-4 孔强缩径地层钻进工艺研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):130-132+138. LUO Guangqiang, ZHANG Wei, LI Zhengqian, et al. The research on drilling technology used for strong hole shrinkage borehole condition in borehole WFS-4 of Wenchuan earthquake fault scientific drilling project [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9): 130-132+138 (in Chinese).
- 22 张伟.科学深孔复杂地层钻进技术难题与对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):7-12. ZHANG Wei. Technical problems and countermeasures for the drilling operation in complex formations of scientific deep drilling projects[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9):7-12(in Chinese).
- 23 黄帆.基于纵横弯曲理论的绳索取心满眼防斜技术研究与应用[D].武汉:中国地质大学(武汉),2014. HUANG Fan. Research and application of anti-deviation technology of wireline coring assembly with packed hole stabilizers based on vertical and horizontal bending theory [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2014(in Chinese).