

湘南3000 m科学深钻孔内事故处理及对策

翟育峰^{1,2}, 赵辉^{*1,2}, 王鲁朝^{1,2}, 杨芳^{1,2},
曲艺¹, 王超¹, 文一卓³, 王勇军^{4,5}

(1. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东烟台 264004; 2. 山东省地矿局钻探工程技术研究中心, 山东烟台 264004;
3. 湖南省矿产资源调查所, 湖南郴州 423000;
4. 山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院), 山东德州 253072;
5. 山东省地热能清洁能源探测开发与回灌工程技术研究中心, 山东德州 253072)

摘要:湘南3000 m科学深钻为湖南首个3000 m地质岩心钻探特深孔,位于复杂褶皱转折带,钻遇了粘土缩径、全孔漏失、水敏性坍塌缩径和垂直节理发育坍塌等多种复杂地层,发生多次孔内事故。针对卡钻和塌孔等主要孔内事故,优化钻孔结构、冲洗液体系和钻具组合,采用侧钻绕障、循环捞砂、成膜冲洗液护壁和水泥浆护壁等多种技术措施,有效应对施工中的各种难题。终孔孔深3008.93 m,平均岩心采取率98.16%,实现了预期目标,为该区深部矿产成矿理论研究及资源勘查,提供了合格的地质钻孔和实物岩心资料。

关键词:复杂地层;科学钻探;深孔钻探;垂直节理;成膜低固相冲洗液;事故处理

中图分类号:P634.8 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2023)04-0032-09

Down-hole incident treatment and prevention for the 3000m scientific deep borehole in southern Hunan

ZHAI Yufeng^{1,2}, ZHAO Hui^{*1,2}, WANG Luzhao^{1,2}, YANG Fang^{1,2},
QU Yi¹, WANG Chao¹, WEN Yizhuo³, WANG Yongjun^{4,5}

(1. Shandong No.3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China;
2. Drilling Engineering Technology Research Center of Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China;
3. Investigation of Mineral Resources of Hunan Province, Chenzhou Hunan 423000, China;
4. The Second Team of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Shandong Provincial Lubei Geo-engineering Exploration Institute), Dezhou Shandong 253072, China;
5. Shandong Engineering Technology Research Center for Geothermal Clean Energy Exploration and Reinjection, Dezhou Shandong 253072, China)

Abstract: The 3000m scientific deep borehole in southern Hunan is the first 3000m geological core drilling extra-deep hole in Hunan province. It is located in the transition zone of complex folds, and many complex formations, such as borehole shrinkage in clay, total hole leakage, water-sensitive collapse shrinkage and vertical joint development collapse, have been drilled, resulting in many down-hole incidents. In view of the main down-hole incidents such as bit

收稿日期:2022-08-17; 修回日期:2022-11-16 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.04.005

基金项目:国家重点研发计划“深地资源勘查开采重点专项”之“钦杭成矿带湘南段铜锡多金属矿产深部探测技术示范”(编号:2018YFC0603905);山东省地矿局局控科技创新项目“3000m超深科学钻探关键技术研发应用”(编号:KY202102)、山东省地矿局2022年度科技攻关项目“深孔地质岩心钻孔轨迹控制技术研发及应用”(编号:KY202205)

第一作者:翟育峰,男,汉族,1984年生,山东省地矿局钻探工程技术研究中心技术室主任,高级工程师,地质工程专业,硕士,从事钻探技术研究工作,山东省烟台市芝罘区机场路271号,282163880@qq.com。

通信作者:赵辉,男,汉族,1976年生,山东省地矿局深部钻探工程技术创新团队核心成员,高级工程师,海洋地质专业,从事钻探技术管理工作,山东省烟台市芝罘区机场路271号,578376667@qq.com。

引用格式:翟育峰,赵辉,王鲁朝,等.湘南3000 m科学深钻孔内事故处理及对策[J].钻探工程,2023,50(4):32-40.

ZHAI Yufeng, ZHAO Hui, WANG Luzhao, et al. Down-hole incident treatment and prevention for the 3000m scientific deep borehole in southern Hunan[J]. Drilling Engineering, 2023,50(4):32-40.

sticking and hole collapse, the drilling structure, drilling fluid system and drill assembly were optimized, and various technical measures were adopted to effectively deal with various difficulties in drilling, such as sidetracking, circulating sand bailing, wall protection with film forming drilling fluid and wall protection with cement slurry. The final hole depth is 3008.93m, and the average core recovery rate is 98.16%, which has achieved the expected goal. Qualified geological boreholes and physical core data are provided for the theoretical study of deep mineral mineralization and resource exploration in this area.

Key words: complex formation; scientific drilling; deep drilling; vertical joints; low solid film-forming drilling fluid; incident treatment

0 引言

“深孔钻探验证与探测技术示范——湘南3000 m科学深钻(ZK16508孔)项目”为国家重点研发计划深地资源勘查开采重点专项“钦杭成矿带湘南段铜锡多金属矿产深部探测技术示范”的下设子课题,项目设计孔深3000 m,实际终孔孔深3008.93 m,终孔孔径76 mm,全孔平均岩心采取率98.16%。是湖南省首个3000 m地质岩心钻探特深孔。钻孔自1716.90~2734 m期间恰好位于测水组地层由倒转背斜的倒转翼转为陡倾的向斜翼,直至2734 m左右才穿过石炭系测水组地层。钻探揭露的1716.90 m以深的测水组地层岩性以薄—中厚层状粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩为主,夹炭质泥岩、钙质泥岩、泥质灰岩及灰岩,岩石中的泥质、粉砂质及钙质含量变化较大,常出现过过渡性岩性组合,有时同一岩层出现由泥岩过渡至泥质灰岩的现象,岩性组合极其复杂。该项目创造了在南方深部连续软弱复杂岩层中完成超长钻进的先例,实现了湘南地区深部探测技术示范,为国家深部资源勘查开采提供了技术支撑,实现了铜、锡等国家紧缺资源增储示范效果,取得了找矿重大突破。

1 钻孔基本情况

1.1 地质概况

ZK16508孔位于坪宝地区,该地区处于耒阳—临武南北向构造带的中段,属马田—临武帚状构造的一部分。平面上为一系列南北向—北北东—北东向的紧密线状褶皱和逆冲断裂组成向北撒开、向南收敛、北宽南窄、向北西微凸的弧形褶断带。同时在东南方侧向挤压应力作用下,伴生了一系列北西—北西西向的横断层。这些大致等距分布的横断层与南北向—北北东向—北东向的逆冲断层相互交织成网格状构造格架。在剖面上,由一系列褶皱与上陡下缓的逆

冲断层群组成叠瓦式推覆构造体系。褶皱构造多为紧密的线状斜歪或倒转褶皱,西部褶皱轴向近南北,往东逐渐转为北北东或北东。受走向断层破坏使大多数褶皱不完整。区内主要褶皱自西向东有:(1)斜角岭—中和圩向斜,(2)朝东寨—洞水塘背斜,(3)金子岗—昭金祠复向斜,(4)石碗水—杉山复背斜,(5)桂阳林场—方元复向斜,(6)桂阳—下高头岭复背斜,(7)黄腊塘—神下东复向斜,断裂构造十分发育^[1]。

ZK16508孔揭露的地层有第四系、下石炭统梓门桥组、测水组和石磴子组。其中,第四系地层主要为粘土。下石炭统梓门桥组由浅灰色白云岩、灰—深灰—灰黑色细晶白云岩和碎裂白云岩组成。石磴子组地层的岩性主要由不同组分的碳酸盐岩组成,包括细晶灰岩、泥晶灰岩、碎裂灰岩以及少量的炭质泥岩、白云质灰岩、灰质白云岩等,测水组地层的岩性主要包括炭质泥岩、含粉砂质炭质泥岩、含泥炭质细—粉砂岩和含泥炭质灰岩等。

1.2 主要钻探设备

钻机采用XD-30DB型岩心钻机(见图1),钻机主要技术参数见表1。

1.3 施工概况

ZK16508孔于2019年9月7日开钻,2022年4月15日终孔,孔深为3008.93 m。钻孔施工期间在孔深0~1716.90 m之间遇多层全孔漏失、坍塌掉块、缩径卡钻的岩层,下4层套管隔离。钻进到1716.90 m之后一直在测水组(C_1c)薄层状角岩化泥质粉砂岩、角岩化含炭含粉砂泥岩、绢云母(二云母)角岩夹灰岩透镜体等岩性地层中钻进,垂直节理发育,水敏性缩径坍塌,卡钻、埋钻事故频发,严重影响施工效率,先后5次侧钻作业,采用复合钻进工艺方法终孔^[2-6]。ZK16508孔实际钻孔结构从设计的五开(含 $\varnothing 76$ mm备用口径)增加到六开,如图2所示。



图1 XD-30DB型顶驱钻机
Fig.1 XD-30DB top-drive rig

表1 XD-30DB 钻机性能参数

Table 1 Specifications of XD-30DB

序号	项目	参数项	参数值
1	钻进能力	Ø89 绳索钻杆/m	3000
		Ø114 绳索钻杆/m	2200
2	钻塔	井架型式	K 型
		钻塔高度/m	29
		钻塔载荷/kN	900
3	顶驱	驱动型式	交流变频直驱
		电机额定功率/kW	2×55
		转速/(r·min ⁻¹)	0~650
		最大扭矩/(kN·m)	8
		通孔直径/mm	445
4	主绞车	最大输入功率/kW	160
		单绳最大拉力/kN	125
5	泥浆泵 (备用一台)	驱动型式	交流变频
		型号规格	BW300/16B 型
		最大流量/(L·min ⁻¹)	300
		最高压力/MPa	16

2 事故原因分析及处理

2.1 孔深 1928 m 卡钻事故

2.1.1 事故经过

2020年5月3日, Ø98 mm 绳索取心钻具(Ø98 mm 绳索取心钻头+下扩孔器+Ø91 mm 绳索取心外管总成+上扩孔器+Ø89 mm 绳索取心钻杆)钻进至孔深 1928.32 m, 钻具悬重 195 kN, 白班接班取心后, 慢速扫孔(转速 40~50 r/min)至孔深 1928.12 m, 扭矩激增至 4 kN·m(正常钻进约 1.2 kN·m), 憋

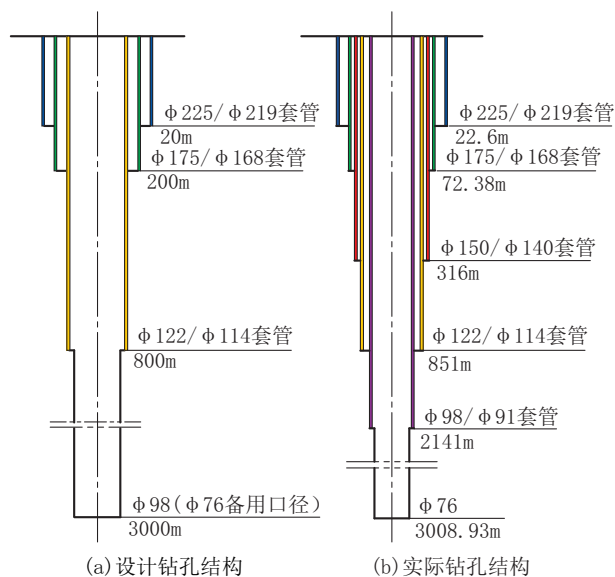


图2 ZK16508 孔钻孔结构

Fig.2 Drilling structure of ZK16508

泵, 停泵卸压后, 边回转边上提钻具, 距离孔底约 1.0 m 遇阻, 上下活动、旋转无效后, 强拉至 300 kN, 钻杆在 1772.62 m 处反开(丝扣无损坏)。经判断, 钻具已经卡死, 如果再次下钻对扣, 拉动的可能性不大, 而且有再次反开的风险。因此, 决定下水力割刀割断钻杆, 逐步打捞孔内钻杆。

2.1.2 原因分析

2.1.2.1 客观原因

(1) 地层原因: 从孔深 1720 m 开始, 地层以灰岩、泥岩为主, 垂直节理发育, 孔壁岩石应力释放及受到孔内冲洗液的“激动”压力容易块状剥落, 从 1812m 开始, 每回次钻进需扫孔 4~5 m 才能到底, 地层的不稳定是导致卡钻的主要原因。地层岩性见图 3。



图3 孔深 1770~1820 m 垂直节理裂隙发育地层岩心
Fig.3 Cores from vertical joint and fracture developed formation at depth of 1770m to 1820m

(2)疫情影响:由于疫情影响,2020 年 1—3 月,钻孔在孔深 1812 m 处停待近 3 个月,孔内冲洗液无法正常循环,起不到很好的护壁效果,导致 1720~1812 m 破碎地层更加不稳定。

2.1.2.2 主观原因

(1)在该事故发生前,在孔深 1812 m 以深,连续发生几次掉块卡钻事故,冲洗液泵泄压后,通过强拉硬扭能够解卡,为了追求进度,冒险继续钻进造成本次卡钻事故。

(2)未及时采用水泥灌浆技术封孔来维护孔壁稳定。

(3)冲洗液性能未能达到预期(见表 2)。一方面冲洗液密度偏低,未及时进行加重处理;另一方面冲洗液经过前几次水泥灌浆封孔后,未进行处理,冲洗液的流变性变差(直接反应在泵压上,泵压由原来正常钻进的 5 MPa,增加至 8 MPa),泥皮厚度增加(由 0.3 mm 增加至 2 mm),导致地层“激动”压力增加,掉块、坍塌更加严重。

表 2 1720~1928 m 坍塌孔段冲洗液配方及主要性能
Table 2 Drilling fluid formula and main properties for the caving section from 1720m to 1928m

冲洗液体系	冲洗液配方	pH 值	马氏漏斗 粘度/s	相对密度	API 滤失 量/mL	泥皮厚 度/mm
低固相聚合物 体系	水+0.05%~0.1% 烧碱+2%~4% 膨润土+1%~2% 褐煤树脂+2%~5% 防塌剂+0.1%~0.2% +0.1%~0.2% 包被剂	9~11	35~45	1.04~1.06	8~15	0.3~2

2.1.3 事故处理

事故发生后,钻杆在 1772.62 m 处反开,下水力割刀配合打捞矛处理孔内卡钻事故^[7-11],先后在钻具上扩孔器位置、离孔底 10 m、离孔底 40 m 和离孔底 100 m 的位置下入割刀 4 次,割开钻杆后,下钻打捞都未拉动。判断孔内钻杆可能已经被掉块、沉渣及岩粉沉淀卡住,或者被岩粉吸附,拉不动。换用造斜钻头侧钻的方式处理,在 1783 m 绕过事故孔段取出岩心。

2.2 孔深 1937 m 卡钻事故

2.2.1 事故经过

2020 年 7 月 16 日,Ø98 mm 绳索取心钻具钻进至孔深 1937 m,钻具悬重 195 kN,白班回次进尺结束上提钻具,上提过程扭矩不稳,逐渐增加至 4 kN·m(从 1914 m 开始,正常钻进扭矩从 1.2 kN·m 增加至 1.4 kN·m)。钻具上提至离孔底 1 m 泵压激增,停泵后,泵压不降,扭矩不降。泄压后上下活动钻具,回转钻具无效,强拉至 350 kN 仍无法解卡,经判断,钻具已经卡死,决定采取先拉紧钻具反开,再采用水力割刀处理孔内剩余钻具。

2.2.2 原因分析

2.2.2.1 客观原因

上次绕钻后,1783~1865 m 孔段采用了水泥灌浆封孔,稳定住地层,但是从 1865 m 以后地层垂直

节理裂隙发育加重,回次进尺岩心管上部有上部地层掉块(无水泥块)。从 1932 m 开始岩心中的泥质含量增高,又极易缩径造成卡钻事故。

2.2.2.2 主观原因

当地层发生变化以后,为了抢进度,未及时进行水泥灌浆封孔维护孔壁(总是希望尽可能完全穿过破碎带再封孔),未能避免此次事故。当地层岩性发生变化以后(泥质含量增多),冲洗液未及时调整,不能有效抑制地层缩径,也为事故发生埋下隐患。

2.2.3 事故处理

事故发生以后,钻杆在孔深 1814 m 反开,孔内剩余事故钻杆及钻具 123 m,采用水力割刀配合打捞矛 2 次取出 70 m 事故钻杆(见图 4),再次下水力割刀,事故钻杆处被掉块挡住下不去,综合分析后再次采用侧钻绕障方式处理,在 1902 m 穿过事故孔段取出岩心。

2.3 塌孔事故

2.3.1 塌孔孔段复杂情况

钻孔从 1720 m 以后出现垂直节理裂隙,1720~1920 m 未见完整地层,施工中经常发生掉块卡钻,每回次进尺取心后,需扫孔才能到底,扭矩比回次钻进结束有所增加,孔内坍塌严重,沉渣多且密度大(现场测试密度 ≥ 3.59 g/cm³,见图 5),受绳索取心



图4 水力割刀割断的事故钻杆

Fig.4 Drill pipe section cut by the hydraulic cutter

钻探环状间隙小影响,大颗粒沉渣无法通过冲洗液携带出孔外,造成别车、憋泵严重,进尺困难,严重影响施工进度。



图5 捞取的孔底沉渣

Fig.5 Settlements from the bottom of the hole

从孔深 1922 m 开始采用异径钻具($\varnothing 75$ mm/ $\varnothing 98$ mm 钻头+变丝扩孔器+ $\varnothing 75$ mm 绳索取心钻具总成+ $\varnothing 71$ mm 绳索取心钻杆 90 m+ $\varnothing 71$ mm/ $\varnothing 89$ mm 钻杆变丝+ $\varnothing 89$ mm 绳索取心钻杆)钻进,同时优化冲洗液性能,采用水泥封孔、干烧等多种措施坚持施工至孔深 1947 m,地层更加破碎,岩心水敏性增强,极易缩径,孔内沉渣愈发严重,正常钻进取心后无法扫到孔底,离孔底 4.5 m 就别车、憋泵严重,坚持钻进至 1955 m 岩心仍为粉末状(见图 6),未见好转。且异径钻具发生卡钻事故,采用强扭(扭矩加大至 4 kN·m,正常钻进 0.9 kN·m)处理出来(钻头断入孔内,钻具变形严重)。为此,现场更换了特制的 $\varnothing 60$ mm 石油钻杆及 $\varnothing 98$ mm 复合片全面钻头,加大环状间隙,同时,优化冲洗液性能,提高相对密度

及 1.16 来平衡地层压力;增加动切力来提高携粉能力;增加封堵材料,提高冲洗液的封堵性,稳定孔壁;适当控制漏斗粘度,稳定冲洗液循环泵压;降低失水量,防止水敏性地层坍塌。坚持钻进至 1962 m,再次发生坍塌、缩径卡钻事故。从孔深 1937 m 钻进到 1962 m,历时 5 个月,异常艰难。



图6 孔深 1947~1955 m 岩心照片

Fig.6 Cores from 1947m to 1955m

1962 m 发生塌孔事故后,在 1916 m 进行第三次绕钻,采用全面钻进工艺,钻进至 2141 m,下入 $\varnothing 91$ mm 套管

下 $\varnothing 91$ mm 套管隔离上部复杂地层后,采用 $\varnothing 76$ mm 绳索取心钻进工艺,钻进至 2200 m,再次出现破碎地层,孔内掉块卡钻、别车憋泵。其中 2201~2209 m 孔段钻遇严重破碎带,别车、憋泵,每次提钻后需在该孔段扫孔,坚持钻进至 2236 m(其中在 2214、2236 m 发生两次断钻杆事故,打捞事故钻具需上划眼)。处理完断钻杆事故后,在 2201 m 下钻下不去,在该孔段采用多级扩孔器钻具、取粉钻具、绳索取心反循环、单管局部反循环、干烧、封孔等措施,均无法通过,最终进行第五次侧钻,在 2171 m 处侧钻成功后换全面钻进工艺钻进至终孔。

2.3.2 塌孔事故原因分析

(1)复杂的地层条件是发生塌孔事故的主要原因,地层水敏性强、胶结差,是造成塌孔事故的直接原因。

(2)钻遇易塌孔孔段,冲洗液的失水量、密度、流变性满足不了要求,无法平衡地层压力,是造成塌孔的外因。

(3)地质岩心钻探钻孔环空间隙小,为了平衡地

层压力,势必提高冲洗液密度,造成冲洗液流变性能变差,正常钻进泵压高,停泵以后“激动”压力大也是造成塌孔的外因。

(4)频繁提下钻,钻具对孔壁的抽吸作用,也是造成钻孔塌孔的外因^[12-15]。

2.3.3 塌孔事故处理

塌孔事故处理主要从3方面着手,一是减少孔壁坍塌,二是处理孔底坍塌后的沉渣,三是下套管或水泥灌浆护孔。采取的技术措施主要有:

(1)优化冲洗液性能,减少孔壁坍塌。

针对1720~1920 m孔段出现的垂直节理裂隙坍塌地层,主要采用低固相聚合物冲洗液体系,加大冲洗液密度平衡地层应力,同时加大封堵材料、防塌材料用量,降低孔壁掉块风险,采用该冲洗液体系,孔内掉块情况明显减少。

针对1947~1955 m孔段出现破碎严重的水敏性地层,主要采用成膜体系冲洗液,该类型冲洗液对于破碎严重地层能有效形成硬膜(见图7),同时适当提高冲洗液密度,同时增加适量黄原胶提高冲洗液的动切力,进而提高携粉能力,保持孔底清洁。有效降低了孔壁坍塌及孔底沉渣。冲洗液性能见表3。

(2)通过取粉管、取粉钻具、干烧等方式处理孔底沉渣。

小口径钻探受钻孔环状间隙限制,许多大颗粒岩屑无法通过环状间隙返出,大量岩屑在孔底堆积,造成泵压升高、扭矩增大,更加严重的情况出现别车、憋泵,无法正常钻进。因此,在1944~1949 m、2201~2220 m等孔段多次采用取粉管、取粉钻具、干烧捞渣的方式清理孔底。



图7 成膜体系冲洗液浸泡的岩样

Fig.7 Rock samples soaked by low solid film-forming drilling fluid

(3)优化深孔水泥灌浆封孔工艺,提高封孔质量。

深部塌孔地层,处理掉孔底沉渣后,采用G级油井水泥,添加水泥外加剂、精确控制替浆水量等方式提高水泥强度,形成人造孔壁。

(4)当地层已经发生大规模坍塌,上述措施效果不理想的情况下,采用螺杆钻具进行侧钻作业、绕过坍塌地层。

3 事故应对措施

针对施工过程中遇到的复杂情况,现场多次召开钻探技术研讨会,从钻孔结构、冲洗液体系、钻进工艺等方面采取相应的应对措施^[16-21]。

表3 冲洗液配方及主要性能

Table 3 Drilling fluid formula and main properties

冲洗液体系	冲洗液配方	pH值	马氏漏斗粘度/s	相对密度	API滤失量/mL	动切力/Pa
低固相聚合物体系	水+0.05%~0.1%烧碱+2%~5%膨润土+2%~3%降失水剂+2%~5%防塌剂+2%~5%封堵剂+0~2%随钻堵漏剂+0.1%~0.2%增粘剂+2%~5%超细碳酸钙+0.1%~0.2%包被剂	10~12	40~50	1.08~1.18	8~12	3~6
成膜体系	水+0.1%~0.2%烧碱+2%~5%成膜A剂+2%~5%成膜B剂+0~5%封堵剂+0~2%随钻堵漏剂+2%~3%降失水剂+0.2%~0.4%增粘剂+0.1%~0.2%包被剂+0.05%~0.1%黄原胶+2%~5%超细碳酸钙	11~13	34~45	1.10~1.18	5~8	5~12

3.1 根据实际钻遇地层及时优化钻孔结构

根据提供的地质资料,钻探设计采用五开钻孔结构,但是在三开 316 m 处发生卡钻断钻杆事故,孔内情况复杂,为了上部钻孔安全及为下部钻孔施工留有套管余地,在该开次增加 $\varnothing 150$ mm 口径,钻孔结构由五开增加到六开,来保障下部施工。

3.2 针对不同地层情况,及时调整冲洗液体系并做好维护

针对 1720~1920 m 孔段出现的垂直节理裂隙地层,主要采用低固相聚合物冲洗液体系,针对 1947~1955 m 出现破碎严重的水敏性地层,主要采用成膜体系冲洗液,同时现场建立简易冲洗液测试台,及时测试冲洗液性能并进行调整,同时配备了离心机,做好冲洗液净化工作(见图 8)。



图 8 现场配备离心机及搭建的简易冲洗液测试台

Fig.8 Centrifuge and the simple mud test bench provided for site use

3.3 采用异径钻具降低孔内卡钻风险

采用异径钻具(见图 9),增大了钻具和孔壁间的环状间隙,发生卡钻的时候使孔底沉渣不至于完全抱死钻具,给钻具活动空间,尽可能降低卡钻风险。

3.4 采用全面钻进工艺技术

钻孔进行第三次侧钻作业后,在 1916~2141



图 9 特制异径钻具及钻头

Fig.9 Special small-diameter drill string and drill bit

m,孔内沉渣变多,异径钻具钻进困难,孔内掉块严重,采用全面钻进工艺($\varnothing 60$ mm 石油钻杆+ $\varnothing 98$ mm 全面钻头钻进)。

钻孔在 2171 m 处第五次侧钻作业后地层还是以节理发育的泥岩、页岩为主,坍塌严重,回次进尺需扫孔到底,憋车憋泵,进度缓慢。考虑到钻孔安全采用 $\varnothing 76$ mm 全面钻头加特制石油钻杆全面钻进工艺,提高环状间隙,增强冲洗液性能,降低卡钻风险。

3.5 采用套管护壁技术

套管护壁技术是钻探施工中最有效的护壁方式,针对上部复杂地层,采用五级套管护壁。针对深部复杂地层,在孔深 2141 m 下入 $\varnothing 91$ mm 套管后,换 $\varnothing 76$ mm 绳索取心钻进工艺。

3.6 采用侧钻技术

现场多次组织行业专家进行技术指导,先后进行 5 次侧钻作业,并最终采用特制的石油钻杆加 PDC 钻头全面钻进,通过加大环状间隙,顺利完成钻探施工任务。以第三次侧钻作业为例,作业流程为:查看地层情况确定造斜孔段→水泥灌浆制造人工孔底→下螺杆钻具侧钻→下绳索取心钻具取心验证是否侧钻成功。

根据地层情况,确定侧钻孔段控制在 1850~1870 m 之间,因此加工木头塞子在 1870 m 架桥,然后采用水泥灌浆封孔 1800~1870 m。封孔候凝 72 h 后下钻透水泥,水泥强度能支撑钻杆柱质量即可,一直透水泥至 1850 m。

侧钻钻具组合: $\varnothing 98$ mm 金刚石造斜钻头+5LZ73 $\times$ 7.0 $\times$ 1.5°弯螺杆+ $\varnothing 89$ mm 绳索取心钻

杆。下钻至孔底0.5~1.0 m开泵冲孔,接触孔底前轻压慢放,在钻具接触孔底开始工作后固定机上钻杆不得回转。从孔深1850 m开始侧钻,泵量控制在120~180 L/min,进尺速度控制在0.2~0.3 m/h。进尺约1 m后,钻具处于悬停状态,磨孔1~2 h啃台,然后再正常钻进。随着侧钻进尺增加,查看孔口循环槽岩屑情况,从岩屑返出情况判断侧钻情况。历时35 h造斜进尺5.0 m,孔深1855 m。提钻后造斜钻头中心有小岩心柱,为了判断侧钻情况,下 $\varnothing 98$ mm绳索取心钻具钻进2.0 m后取心,取出完整岩心,侧钻成功。侧钻采用的螺杆钻具及造斜钻头如图10所示。



图10 侧钻采用的螺杆钻具及造斜钻头

Fig.10 PDM and the deflecting bit used for sidetracking

4 结论

(1)深孔钻探施工技术方案要在了解详细的地质情况下进行设计,深部地层情况不明的情况下尽量取得详细的物探资料,如没有详细的物探资料,钻孔结构设计要为深部不可预见地层留有足够的套管程序。

(2)低固相成膜冲洗液具有较好的护壁性、润滑性和流变性,减轻了钻孔测水组地层水敏坍塌掉块,较好地解决了超深孔小口径连续取心钻进的难题。

(3)深部复杂地层钻进,不能过分追求进度,在没有套管硬护壁的前提下,水泥封孔能起到一定的护壁效果,只有牺牲进度来保证孔内安全。

(4)当深孔钻探孔内发生卡钻、坍塌、落物等复杂孔内事故无法处理时,采用螺杆钻具侧钻技术绕过事故孔段是有效的解决方案。

(5)湘南3000 m科学深钻顺利终孔,孔深3008.93 m,创造了湘南地区小口径固体矿产勘查孔深纪录,实现了预期目标,为该区深部矿产成矿理论研究及资源勘查提供了合格的地质钻孔和实物岩心资料。

参考文献(References):

- [1] 文一卓,孟雨红,许以明,等.湖南首个固体矿产勘查3000m科学深钻选址研究[J].地质与勘探,2022,58(5):975-988.
WEN Yizhuo, MENG Yuhong, XU Yiming, et al. Site selection of the first 3000 m Hunan scientific drilling for mineral exploration[J]. Geology and Exploration, 2022, 58(5):975-988.
- [2] 张晓西,胡郁乐,张惠,等.科学钻探选区预导孔钻探技术方案设计、组织实施与随钻研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(S1):6-12.
ZHANG Xiaoxi, HU Yule, ZHANG Hui, et al. Scientific drilling constituency pre-pilot hole drilling program design, organization, implementation and research while drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(S1):6-12.
- [3] 朱恒银,等.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.
ZHU Hengying, et al. Technology and Management in Deep Coring Drilling [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [4] 翟育峰,仲崇龙,刘峰.羌塘盆地羌资-14井钻探施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(7):92-95.
ZHAI Yufeng, ZHONG Chonglong, LIU Feng. Drilling construction technology for Qiangzi Well-14 in Qiangtang Basin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(7):92-95.
- [5] 秦国栋.山东莱州吴一村ZK01科学钻孔钻探施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(4):36-39.
LUAN Guodong. Drilling technology for scientific drilling ZK01 in Shandong province[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(4):36-39.
- [6] 翟育峰.西藏甲玛3000m科学深钻施工技术方案[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(6):8-12,53.
ZHAI Yufeng. Technical proposal for the 3000 m deep scientific drilling borehole in Jiama, Tibet [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(6):8-12, 53.
- [7] 田志超,翟育峰,林彬,等.西藏甲玛3000米科学深钻施工技术[J].钻探工程,2022,49(3):100-108.
TIAN Zhichao, ZHAI Yufeng, LIN Bin, et al. Drilling technology for 3000m deep scientific drilling in Jiama, Tibet[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3):100-108.
- [8] 刘振新,翟育峰,宋世杰,等.川西甲基卡锂矿3000 m科学深钻关键技术探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(10):

- 29-32.
- LIU Zhenxin, ZHAI Yufeng, SONG Shijie, et al. Discussion on key technology for the 3000m deep scientific drilling project of Jiajika Lithium Mine in west Sichuan[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10): 29-32.
- [9] 陈师逊, 宋世杰. 中国东部海区科学钻探施工技术探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(12): 1-5.
- CHEN Shixun, SONG Shijie. Discussion of scientific drilling construction technology in eastern sea area of China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(12): 1-5.
- [10] 杨芳, 陈师逊. 深部地质钻探钻孔结构设计与施工分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(11): 21-26.
- YANG Fang, CHEN Shixun. Analysis of design and construction of deep geo-drilling boreholes[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(11): 21-26.
- [11] 吴金生, 张伟, 李旭东, 等. 汶川地震断裂带科学钻探项目 WFSD-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 WFSD-4 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9): 120-125.
- [12] 陈师逊, 翟育峰, 王鲁朝, 等. 西藏罗布莎科学钻探施工对深部钻探技术的启示[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(11): 1-3, 9.
- CHEN Shixun, ZHAI Yufeng, WANG Luzhao, et al. Enlightenment to deep drilling technology from scientific drilling in Luobusha of Tibet[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(11): 1-3, 9.
- [13] 罗光强, 张伟, 李正前, 等. 汶川地震断裂带科学钻探项目 WFSD-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 WFSD-4 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9): 130-132, 138.
- [14] 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.
- [15] 尹浩, 梁健, 孙建华. 特深钻探柱组合优化设计研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(4): 56-62.
- YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua. Research on optimum drilling string assembly design for extra deep hole drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(4): 56-62.
- [16] 董海燕, 王鲁朝, 杨芳, 等. 国产 CNH(T) 绳索取心钻杆在中国岩金勘查第一深钻工程中的应用分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(1): 49-53.
- DONG Haiyan, WANG Luzhao, YANG Fang, et al. Analysis on the application of China-made CNH(T) wire-line drill pipe in the first deep drilling engineering construction by China rock gold exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(1): 49-53.
- [17] 翟育峰. 汶川地震断裂带科学钻探项目 WFSD-4S 孔卡钻事故处理[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(1): 15-17.
- ZHAI Yufeng. Treatment of sticking accident in WFSD-4S of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(1): 15-17.
- [18] 张英传, 翟育峰, 王年友. 可退式捞矛在深孔钻探事故处理中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(5): 31-33.
- ZHANG Yingchuan, ZHAI Yufeng, WANG Nianyou. Application of retrievable spear for drill rod fishing[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(5): 31-33.
- [19] 宋世杰, 李晓东, 陈师逊. 南黄海大陆架科钻 CSDP-2 井第四系、新近系地层海水冲洗液研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(4): 10-13.
- SONG Shijie, LI Xiaodong, CHEN Shixun. Study on seawater flushing fluid and its application in quaternary and neogene strata for CSDP-02[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(4): 10-13.
- [20] 李攀义, 单文军, 徐兆刚, 等. 成膜防塌无固相冲洗液体系在金鹰矿区 ZK1146 井中的应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(10): 26-30.
- LI Panyi, SHAN Wenjun, XU Zhaogang, et al. Research and application of solid free film-forming and anti-sloughing drilling fluid system in Well ZK1146 of Jinying Mining[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(10): 26-30.
- [21] 翟育峰, 王鲁朝, 丁昌盛, 等. 西藏罗布莎科学钻孔冲洗液技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(4): 1-4.
- ZHAI Yufeng, WANG Luzhao, DING Changsheng, et al. Flush fluid technique in scientific drilling hole situated in Luobusha of Tibet[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(4): 1-4.

(编辑 荐华)