

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

吴金生^{1,2}, 张伟³, 李旭东⁴, 段晓青⁵, 任福建⁵

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 3. 中国地质调查局, 北京 100037; 4. 江苏省地矿局第六地质大队, 江苏 连云港 222023; 5. 陕西煤田地质局一八五队, 陕西 榆林 719000)

摘要:介绍了汶川地震断裂带科学钻探项目 WFSD - 4 孔钻探施工概况及采用的关键技术, 包括螺杆马达 - 液动锤 - 长半合管取心钻进技术、偏心扩孔取心技术、防冲蚀取心钻头技术、大斜度定向钻进技术、活动套管技术、新型钻井液体体系和新型深孔取心钻机等。

关键词:汶川地震断裂带; 科学钻探; 钻探施工; 关键技术

中图分类号: P634 文献标识码: A 文章编号: 1672 - 7428(2014)09 - 0120 - 06

Overview on the Drilling Operation of and Key Technologies used in the WFSD - 4 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project/WU Jin-sheng^{1,2}, ZHANG Wei³, LI Xu-dong⁴, DUAN Xiao-qing⁵, REN fu-jian⁵ (1. Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 3. China Geological Survey, Beijing 100037, China; 4. No. 6 Geological Brigade, Jiangsu Geology & Mineral Exploration Bureau, Lianyungang Jiangsu 222023, China; 5. 185 Brigade, Shaanxi Bureau of Coal Geology, Yulin Shaanxi 719000, China)

Abstract: This paper introduces drilling operation of and some key technologies used in the borehole WFSD - 4 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project. The main drilling technologies used in the drilling operation of WFSD - 4 are positive displacement motor-hydraulic hammer-long split core barrel coring technology, eccentric reaming coring technology, anti-erosion core bit technology, high angle directional drilling technology, retrievable casing technology, the new type of drilling fluid system and new type of drill rig for deep hole coring.

Key words: Wenchuan earthquake fault; scientific drilling; drilling operation; key technologies

1 概述

WFSD - 4 孔是汶川地震断裂带科学钻探项目的主孔之一, 位于平武县南坝镇旧洲村境内的 S205 省道和涪江之间的河滩地上。该孔设计深度 3350 m, 0 ~ 550 m 全面钻进, 550 ~ 1450 m 定向钻进, 方位角 133°, 造斜率 3.89°/100 m, 之后以井斜 35° 姿态一直向下钻进, 1450 ~ 1550 m 取心钻进, 1550 ~ 2000 m 全面钻进, 下部 2000 ~ 3350 m 取心钻进, 终孔直径 150 mm。由于地层条件极其复杂导致多次井内事故以及施工时间和费用的限制, 该井钻进至 2338.77 m 后提前完钻。该井上部采用全面钻进, 然后定向钻进、取心钻进, 期间经历了 6 次侧钻绕障

与 2 次套管开窗, 最后在套管内射孔形成筛管, 清水替浆后完井。完钻井深 2388.77 m, 终孔直径 150 mm, 取心钻进平均岩心采取率 76.7%, 平均回次长度 3.76 m, 平均机械钻速 0.89 m/h, 历时 555 天。WFSD - 4 孔实际的钻孔结构与套管程序见图 1, 钻进施工时间分配见图 2, 井斜方位角见图 3。

WFSD - 4 孔布置在汶川地震断裂带上, 地层条件极其复杂, 地层既软弱、又破碎, 施工过程中井壁严重垮塌和强烈缩径问题同时存在, 导致井内事故频发, 处理事故耗费了大量的时间和费用。

为克服上述的技术难题, 项目钻探技术人员开展了大量的技术研发, 采取了一些特殊的钻探技术

收稿日期: 2014 - 06 - 30

基金项目:科技部科技支撑计划专项“汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)”项目之“科学钻探与科学测井”课题; 中国地质调查局地调项目“破碎和强缩径地层大直径深孔取心钻进技术研究”(1212011120258)、“定向钻进技术在西部地区大直径深孔钻探中的应用”(12120113097600)、“地震断裂带复杂地层钻探施工技术应用示范”(12120114075701)

作者简介:吴金生(1970 -), 男(汉族), 安徽人, 成都理工大学在读博士, 中国地质科学院探矿工艺研究所教授级高级工程师, 汶川地震断裂带科学钻探项目 WFSD - 4 孔现场负责人, 地质工程专业, 主要从事钻探技术及科学钻探研究工作, 四川省成都市郫县成都现代工业港(北区)港华路 139 号。

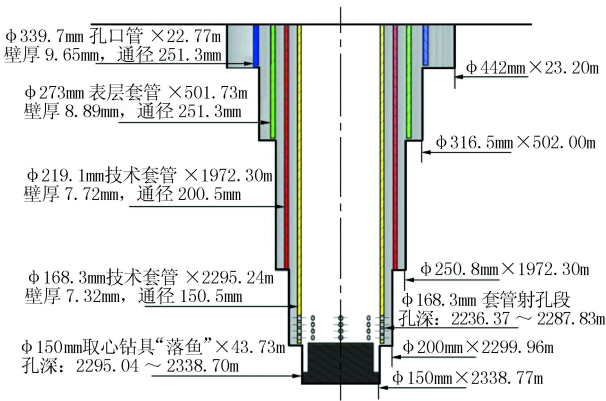


图 1 实际的钻孔结构与套管程序

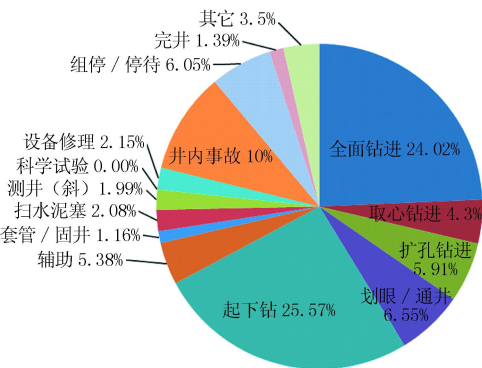


图 2 钻进施工时间分配

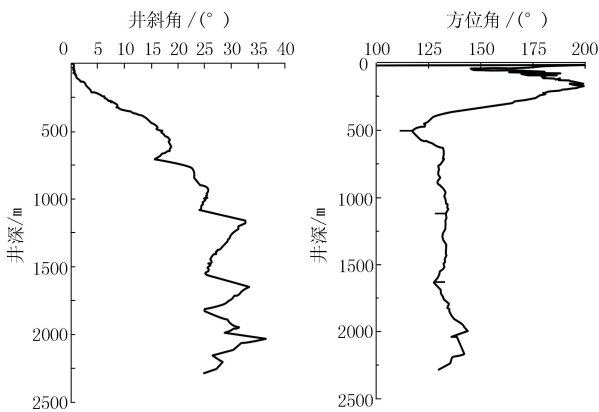


图 3 井斜方位

和施工工艺,包括螺杆马达-液动锤-长半合管取心技术、强缩径地层钻进技术、活动套管技术和复杂地层钻井液技术等,为深孔复杂地层取心钻进摸索和积累了宝贵的经验。

2 WFSD-4 孔钻探施工简况

WFSD-4 孔钻探施工由中国地质科学院探矿工艺研究所负责组织实施,由陕西省煤田地质局一八五队承担日费制钻探施工。钻遇地层情况如下。

(1)0~1550 m 井段。寒武系地层,变砂岩,灰~深灰色,变余砂质结构,块状~层状构造,局部夹

有薄层板岩,上部地层漏失,相对完整。

(2)1550~2065 m 井段。寒武系地层,含钙质变砂岩及含碳质钙质板岩,灰~灰白色,变余砂质/泥质结构,块状构造,组成物质主要为砂质/泥质,部分坍塌掉块。

(3)2065~2338.77 m 井段。震旦系地层,碳质板岩,灰~灰黑色,变余泥质结构,板状构造,组成物质主要为泥质、碳质,夹有钙质变细砂岩薄层。在 2115.76~2119.78、2137.02~2138.61 m 为断层角砾岩。破碎极其强烈,部分无胶结、软弱膨胀缩径、水敏性较强。

2.1 井口导管施工(0~23.20 m)

为避免井口导管偏斜,采用 Ø150 mm 超前导孔取心钻进至 24.55 m,再采用 Ø150/442 mm 领眼扩孔三牙轮钻头扩孔钻进至 23.20 m,下入 Ø339.7 mm 井口导管 22.77 m。

2.2 一开全面钻进(23.20~502.00 m)

Ø316.5 mm 三牙轮钻头全面钻进至 502.00 m,下 Ø273 mm 套管受阻,提出套管后采用 Ø316.5 mm 四翼合金刮刀筒修孔器 5 次修井,清除井壁上的岩屑,再下套管至 501.73 m 并固井。

主要技术指标:机械钻速 1.07 m/h,平均回次进尺 79.6 m,台月效率 597 m,牙轮钻头平均使用寿命 119.4 m。因地层造斜性很强,501 m 处井斜角 17.1°,方位角基本与设计方位一致,相当于提前造斜,故未作处理。

2.3 二开定向钻进(502.00~1980.00 m)

502.00~712.78 m,采用 Ø250.8 mm 三牙轮钻头继续全面钻进,705 m 处井斜角 15.3°,方位角 133.2°,与孔深 501 m 处相比,井斜有下降趋势,方位基本不变,为保持钻井轨迹的平滑过渡,需增井斜。712.78~1435.0 m 井段采用 Ø250.8 mm 三牙轮钻头-螺杆马达弯外管-无线随钻测斜仪(MWD)导向钻进,钻进至 1435.0 m,井斜角 26.4°,方位角 132.6°,满足设计要求。

1435.00~1555.00 m 按设计进行 Ø150 mm 取心钻进,穿越 F3 断层。为降低取心钻进井壁环状间隙,提高泥浆上返流速和岩屑携带能力,取心钻进前先下入 Ø219.1 mm 活动套管。施工中采用螺杆马达-长半合管和螺杆马达-液动锤-长半合管 2 种取心钻进工艺,岩心采取率 90.3%,平均机械钻速 1.33 m/h,平均回次长度 5.26 m。

取心钻进结束后,提出活动套管用 Ø250.8 mm 三牙轮钻头将取心井段的直径扩大,然后继续进行

定向钻进。在 1520 m 处进行了测斜,井斜角 25.6° ,方位角 128° ,井斜有下降趋势,方位基本不变。按设计需增井斜。采取了不下随钻测斜仪器,通过优化稳定器的位置实现增斜的方案(杠杆原理)。在 1970 m 处,测得井斜角 29.8° 、方位角 142° ,因实际钻井轨迹在设计轨迹上部,按井斜角 29° 姿态向下钻进,满足设计要求。定向钻进至 1972.30 m 后,采用 $\varnothing 200$ mm 三牙轮钻头施工测井、固井口袋至 1980 m,后下入 $\varnothing 219.1$ mm 套管至 1972.30 m 并固井。

2.4 三开 $\varnothing 150$ mm 取心钻进(1980.00 ~ 2313.70 m)

三开 $\varnothing 150$ mm 取心钻进施工中,采用了螺杆马达-长半合管取心钻进技术和螺杆马达-液动锤-长半合管取心钻进技术。为提高回次进尺与台月效率,研发了 9 m 长半合管。在相对完整的地层中,获得好的试验效果。后因地层极松软破碎,岩心难以成柱状或膨胀堵心严重而更换为 6 m 半合管。1980.00 ~ 2313.70 m 取心井段,岩心采取率 80.3%,机械钻速 0.88 m/h。后因液动锤下接头与花键套之间的连接卡瓦变形,导致下接头与取心筒总成脱落井内,扩孔套铣处理井内事故时,在井深 2290.73 m 处扩出新井,即 WFS-4-S1 孔,三开取心钻进结束。

2.5 侧钻井施工

取心钻进至 2313.70 m 发生液动锤下接头与取心筒总成脱落井内,扩孔套铣处理井内事故在 2290.73 m 处扩出新井,继续取心钻进至 2319.07 m 发生卡钻,处理事故时,地层复杂,在井深 2200 ~ 2300 m 处又发生 6 次卡钻事故,通过定向侧钻绕障(其中 2 次套管开窗),分别形成 8 个侧钻井段(WFS-4-S1 ~ S8),其侧钻井轨迹如图 4 所示。侧钻绕障轨迹控制较好,没有发生碰撞事故,满足地学研究要求。为顺利下入 $\varnothing 168.3$ mm 套管,采用两步偏心扩孔(双心钻进)成井法:(1)采用 $\varnothing 127/149/168$ mm 双心钻头全面钻进,钻出一个 $\varnothing 168$ mm 井眼;(2)再采用 $\varnothing 168/200/220$ mm 双心钻头扩孔钻进,钻出一个 $\varnothing 220$ mm 井眼至 2300 m,防止缩径卡钻(双心钻头见图 5)。下入 $\varnothing 168.3$ mm 套管至 2295.24 m 并固井。

分析井内事故原因如下。

(1)膨胀缩径。碳质板岩,松软,地应力较大,膨胀缩径,水敏性强。

(2)坍塌扩径。地层破碎,岩层倾角大,斜井,

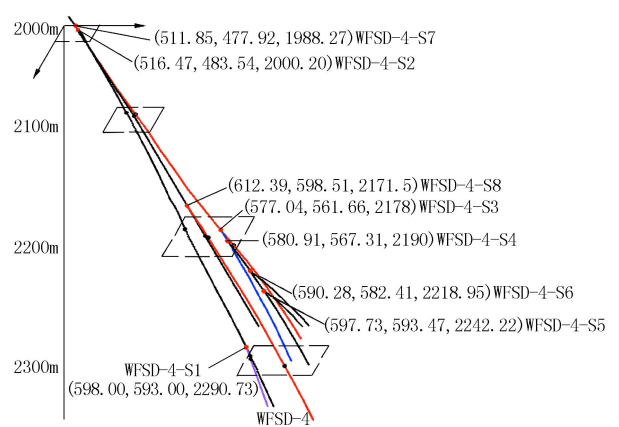


图 4 侧钻井轨迹示意



图 5 双心钻头

沿着最小主应力方向钻进,井壁失稳。

(3)井眼净化差。斜井,钻杆与井壁接触处为低速区,岩屑易沉积,岩屑运移中“爬坡”过长,极易形成“岩屑床”,使井内钻具运动受阻。

2.6 四开 $\varnothing 150$ mm 取心钻进(2300.00 ~ 2338.77 m)

WFS-4-S8 侧钻井施工完成下入 $\varnothing 168.3$ mm 套管固井后,采用常规 $\varnothing 150$ mm 取心钻进和 $\varnothing 127/168$ mm 偏心扩孔取心钻进 2 种工艺。因地层既破碎、又软弱,极易发生埋钻和缩径卡钻事故,而螺杆马达扭矩小,处理事故能力有限,故未采用井底动力驱动。取心钻进井段 2300.04 ~ 2338.77 m,总进尺 38.73 m,岩心采取率 42.3%,机械钻速 0.51 m/h。取心钻进至 2338.77 m 发生卡钻事故,四开取心钻进结束。

2.7 完井

取心钻进至 2338.77 m 发生卡钻事故,用反丝钻杆倒扣打捞出震击器以上的全部钻具,下部钻具因卡死无法打捞,“鱼顶”位置 2295.04 m,在

Ø168.3 mm 套管鞋附近。

完井施工时,首先采用陀螺测斜仪在套管内进行测斜。然后采用投棒式射孔工艺,将 2287.83 ~ 2236.37 m 井段的 Ø168.3 mm 套管射穿,形成筛管与地层的连通,给地学监测提供通道。采用 pH 值 9 弱碱清水替换井内泥浆并打捞净井内的重晶石粉及岩屑后,于 2014 年 2 月 11 日 9:00 完井。

3 采用的关键技术

3.1 螺杆马达-液动锤-长半合管取心钻进技术

WFSD-4 孔 1450 ~ 1550 和 2000 ~ 2338.77 m 井段采用井底动力取心钻进方法,包括螺杆马达-长半合管和螺杆马达-液动锤-长半合管 2 种取心钻进方法。采用井底动力取心钻进不仅能有效地维护井壁稳定,而且提高了机械钻速。采用长半合管(6.9 m)取心钻进,可减少起下钻次数,提高台月效率,并可获取原状性好的高质量岩心。液动锤钻进(冲击回转钻进)比纯回转钻进在机械钻速和回次长度有明显提高。我们将以上几种技术的优点集成在一起,研制成功半合管长度 9 m 的螺杆马达-液动锤-长半合管取心钻具。采用该钻具,在该孔 2014.30 ~ 2065.40 m 井段,连续钻进了 5 个长度超 9 m 的回次,总进尺 45.15 m,平均回次进尺 9.03 m,平均岩心采取率 97.5%,平均机械钻速 1.49 m/h。取出的 9 m 长无扰动连续岩心柱(图 6),举世罕见。



图 6 三开 31 回次 9.0 m 半合管取出的 8.94 m 长岩心

需要指出的是,再好的钻进方法和取心工具不可能解决所有的技术问题。在一些严重破碎或含软泥的岩层,还是经常发生岩心堵塞。在这种情况下,下入 9 m 长的取心钻具也打不满。因此,我们更多的时候采用 6 m 长的取心钻具。我们采用了在半合管内设减摩涂层的取心钻具,以降低岩心与内管间的摩擦阻力,减轻岩心堵塞,提高回次长度。

3.2 强缩径地层偏心扩孔取心技术

Ø127/149/168 mm 偏心扩孔取心钻具是在 Ø127 mm 常规取心钻具的扩孔器上增加偏心扩孔机构所形成。采用该钻具在强缩径地层取心钻进

时,能钻出直径较大的井眼,扩大钻具与井壁的环状间隙,因此减少由缩径导致的卡钻事故发生。在 WFSD-4-S8 四开 2300.04 ~ 2338.77 m 取心钻进中,采用偏心扩孔取心钻具(图 7),起下钻遇阻现象明显减少。



图 7 Ø127/149/168 mm 偏心扩孔取心钻具

3.3 防冲蚀取心钻头技术

WFSD-4 孔地层破碎、松软,采用常规取心钻头,取心率低。为改善取心效果,将钻头设计成多种结构形式(图 8),如不隔水、半隔水、阶梯式全隔水底喷钻头等,根据地层情况进行选择。二开 1450 ~ 1550 m 取心钻进中,地层破碎情况不太严重,半隔水钻头取心效果好,取心率达 92.5%,不隔水钻头取心率 54.79%。但在三开 2290 ~ 2319 m 处,地层为碳质板岩、断层角砾岩等,极破碎松软,无胶结,无法形成柱状岩心。采用不隔水或半隔水取心钻头,岩心采取率都很低,满足不了地学研究要求。后采用 PDC 阶梯式全隔水钻头,取心率达 92.4%,节理裂隙保持原状,岩心未被泥浆冲刷破坏。



阶梯全隔水 半隔水 不隔水

图 8 三种取心钻头

另外,采用 CFD 技术对钻头井底流场进行了数值分析。图 9 显示钻头内侧与岩心表面的速度场,根据速度场大小及分布,优化阶梯式全隔水 PDC 钻头阶梯高度和水力参数,调整泥浆性能,对于提高岩心采取率、预防堵心、提高井壁的稳定性起到了重要作用。

3.4 大斜度定向钻进技术

WFSD-4 孔是一口大斜度定向井,按设计它应以井斜角 35°、方位角 133°姿态进入断层 F4(汶川

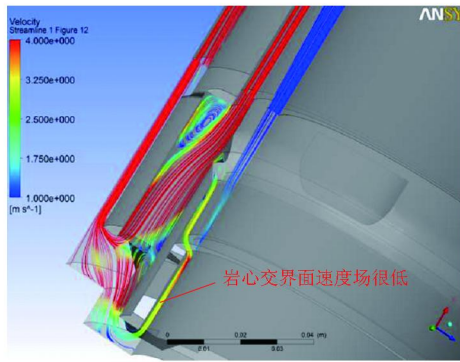


图9 阶梯式全隔水钻头速度场

钻井轨迹的控制采用2种方法,即以无缆随钻测斜为基础的导向钻进和以稳定器组合为基础的定向钻进。

导向钻进系统(图10)由钻头、导向动力钻具(带弯外管的螺杆马达)、无缆随钻测量系统(MWD)和计算机软件组成。钻进施工时,可根据需要变更定向钻进和复合钻进2种工况(地表回转与螺杆马达回转同时进行,进行保直钻进),可在一个钻进回次完成定向造斜、增斜、稳斜、降斜及扭方位多项操作。与传统的定向钻进施工相比,大大减少了起下钻次数,显著提高了施工效率。

地震主断裂带)和F5,相应的井深为2365和3100 m。

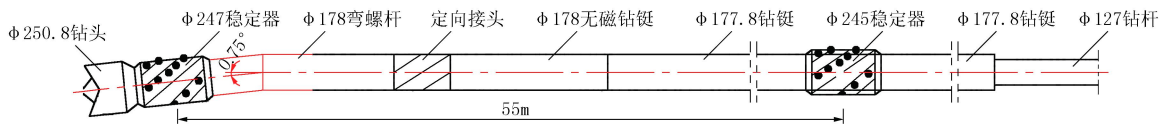


图10 导向钻进钻具组合

在方位不变的情况下,采用不带随钻测斜仪、由稳定器组成的定向钻进系统。该系统通过调整稳定器的位置利用杠杆原理来实现增斜、稳斜或降斜。该系统的不足是无法控制方位角,只能进行井斜角的控制。其优点是,钻具组成和操作程序简单,施工效率高、成本低。

在WFSD-4孔定向钻进施工中,根据钻井轨迹控制的情况,交替地采用了以上2种定向钻进技术,获得了较好的钻井轨迹控制效果。从井深712.78 m开始定向钻进,至1970.30 m结束,1970 m,井斜角 29.8° ,方位角 142° ,因实际钻井轨迹在设计轨迹上部,按井斜角 29° 状态钻进至F4断层,完全满足地质要求。

3.5 活动套管技术

二开 $\Phi 250.8$ mm三牙轮钻头定向钻进至1435 m时,穿越F3断层,需进行 $\Phi 150$ mm取心钻进。为降低取心钻进井壁环状间隙,提高泥浆上返流速和岩屑携带能力,取心钻进前先下入 $\Phi 219.1$ mm活动套管。在经历14 d取心钻进后,以95 t的拉力(套管悬重60 t)成功起拔出套管。

在长裸眼(937 m)、定向斜井条件下顺利下入/拔出活动套管,这在地质和石油钻井行业是较少见的,这与地层的相对稳定和对井内情况分析判断准确是分不开的,同时也充分表明了钻井液体系选择的合理性。活动套管成功拔出其意义重大,为下部的施工创造了极为有利条件。为了活动套管在取心后能顺利拔出,钻井液在套管下入前后采取了以下

措施。

(1)在平时维护处理时注重钻井液的抑制防塌效果(测井显示下入活动套管前平均井径为266.2 mm,井径扩大率为6%)和润滑性的控制。

(2)在通井和下套管前夕,分多次加入FKRH处理剂,降低摩阻,增强润滑性(泥饼粘滞系数控制在0.09以下)。

(3)套管下入后,配制防卡润滑浆 30 m^3 ,泵入环空 24 m^3 ,将环空全部封闭。防卡润滑浆配方:井浆 30 m^3 (内含3%FKRH)+0.6%废机油+0.17%SP-80+1.67%FKRH。

3.6 新型钻井液技术

根据地层复杂情况与钻井结构设计,优选钾石灰-聚磺钻井液体系用于WFSD-4孔钻进施工。这是一种在石灰钻井液、聚磺钻井液基础上发展起来的适合于复杂地层的钻井液体系,具有抑制性强、封堵和防塌能力强、抗污染能力强、流变性好、泥饼质量好等特点。为了抑制地层的强缩径和井壁坍塌,对泥浆体系进行了较大程度的加重。

该泥浆体系的配方如下:4%NV-1+0.2%K-PAM+1%FT-342+0.3% NH_4 -HPAN+2%KCl+0.4%CaO+2%SMP-1+0.5%CMC+2%SMC+0.5%SPNH。

其主要性能参数指标是:密度 $1.24 \sim 1.71\text{ g/cm}^3$,漏斗粘度 $32 \sim 88\text{ s}$,失水量 $2.2 \sim 4.0\text{ mL/30 min}$,泥饼厚度 $0.3 \sim 0.5\text{ mm}$,pH值 $9 \sim 11$,初切 $2 \sim 5\text{ Pa}$,终切 $5 \sim 19\text{ Pa}$,动切力 $6 \sim 21\text{ Pa}$,塑性粘度 15

~42 mPa·s, 含砂量 0.2%, 粘滞系数 0.05~0.1。

3.7 新型深孔取心钻机

为满足钻探施工要求, 中国地质科学院探矿工艺所和中国地质装备集团有限公司联合将 WFSD-2 孔的 KZ3000 型全液压钻机改造成全电驱交流变频 KZ30DB 型钻机。该钻机采用模块化设计, 由主绞车、顶驱、转盘, VFD 电控房、司钻房和钻塔等 6 大部分组成。钻机采用交流变频驱动, 具有工作效率高、操控性好、可靠性好和能耗低的特点。钻机可实现顶驱接立根钻进和扩孔, 一则有利于处理井内复杂情况, 二则可节省施工时间。钻机上既配有高转速顶驱, 满足孕镶金刚石钻头的使用要求; 又配有转盘, 满足大口径全面钻进和扩孔钻进的需要。钻机的钻深能力为 $\varnothing 150$ mm 口径钻进 3000 m。该钻机在 WFSD-4 孔连续使用 555 天, 完成了大口径取心钻进、扩孔钻进、侧钻和全面钻进以及约 10 次处理孔内事故施工。试验结果表明, 钻机使用情况正常, 能满足深孔取心钻进施工的要求。

4 结论

WFSD-4 孔 2012 年 8 月 6 日开钻, 采取了一系列综合技术措施, 解决了地震断裂带钻探施工存在的岩层松软破碎、坍塌扩径、膨胀缩径、卡钻、取心和护壁等诸多技术难题, 于 2014 年 2 月 11 日完井, 总工期 555 天。为地震断裂带的钻探施工摸索和积累了宝贵的经验。

(1) 研发的螺杆马达-液动锤-长半合管取心钻进工艺是适合于大直径、深孔、破碎地层取心钻进施工的最佳方法, 该方法在钻进施工效率、成本和安全以及取心质量、钻杆柱和钻头寿命等方面表现出优于其他方法的综合效益, 是首次在世界上得到应用, 获得了显著的效果。

(2) 采用 $\varnothing 127/168$ mm 偏心扩孔取心钻具, 在大斜度 ($30^\circ \sim 35^\circ$) 膨胀缩径地层取心时, 扩大钻具与井壁的环状间隙, 减少缩径卡钻事故发生。

(3) 采用半隔水金刚石钻头、全隔水阶梯式 PDC 取心钻头, 减少钻井液对岩心的冲刷, 大大提高岩心采取率。同时进行井底流场分析, 对阶梯式

全隔水 PDC 钻头的阶梯高度进行优化, 利用变频器调整泵量的大小, 根据地层情况, 优选钻头结构型式, 岩心采取率和回次长度都得到提高。

(4) 采用无线随钻测斜 MWD 技术实现大直径 (250.8 mm) 大斜度 (35°) 长距离定向钻进任务和多次侧钻绕障成功的绕过井内各种事故钻具, 满足地质学研究要求。

(5) 采用活动套管技术解决了二开井段 (1444.55~1555.0 m) 取心钻进期间的钻具稳定和泥浆上返携带岩屑问题。

(6) 采用钾石灰聚磺钻井液体系, 该体系具有强抑制性、防塌、封堵、优良的造壁性和润滑性, 抗污染能力强, 钻进性能稳定, 解决了井眼垮塌、断层泥膨胀缩径的技术难题, 为钻进任务的完成提供了重要的保障条件。

(7) KZ3000 型全液压钻机成功改造为交流变频全电驱动 KZ30DB 型钻机, 钻机性能稳定, 传动效率高, 维修时间少, 满足汶川科钻四号孔钻探工程施工。

参考文献:

- [1] 张伟, 贾军, 胡时友, 等. 汶川地震断裂带科学钻探项目钻探施工进度综述[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(9).
- [2] 贾军, 李旭东, 樊腊生, 等. 汶川地震断裂带科学钻探项目 WFSD-2 孔钻探施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(9).
- [3] 吴金生, 贾军, 段玉刚, 等. 汶川地震断裂带科学钻探项目钻探事故预防与处理技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(9).
- [4] 王稳石, 朱永宜, 贾军, 等. 汶川地震断裂带科学钻探项目取心钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(9).
- [5] 吴金生, 陈礼仪, 张伟. 破碎地层取心技术孔底流场数值模拟及应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(7).
- [6] 张伟, 樊腊生, 吴金生. 汶川地震断裂带科学钻探项目中取心钻进方法应用的演变[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(7).
- [7] 庄生明, 罗光强, 张伟. 汶川地震断裂带科学钻探取心钻进岩心堵塞机理分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(7).
- [8] 赵远刚, 张伟. 液动锤钻进减轻岩心堵塞机理的研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(7).
- [9] 王三牛, 王聪, 刘玮, 等. 科学深钻扩孔钻头及钻进技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(3).