

加纳水井钻完井施工技术

李保红¹, 欧阳昊²

(1. 湖北省地质局武汉水文地质工程地质大队, 湖北 武汉 430051; 2. 湖北省地质环境总站, 湖北 武汉 430034)

摘要: 饮用水问题是关系到加纳人民健康和社会经济发展的重要问题。为解决这一问题, 包括中国在内的世界多国政府和世界组织提供资金, 建设了一批水井项目以改善该国的饮用水现状。湖北省地质工程有限公司在加纳历经21年的野外工作, 克服各种技术问题, 共完成4000多口水文水井的施工任务, 积累了丰富的水文水井施工经验。本文介绍了加纳的水文地质概况及当地的施工技术要求, 提出了一套适合于当地环境的施工机械设备配套方案。针对该国花岗岩、千枚岩和石英砂岩3大类地层特点, 各提出了一套含开孔、钻进、扩孔和下滤管、投滤料等工序的钻完井施工技术方案。

关键词: 水井; 饮用水; 钻井工艺; 完井工艺; 加纳

中图分类号: P634.5 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2021)05-0106-07

Water well drilling and completion technique in Ghana

LI Baohong¹, OUYANG Hao²

(1. Hydrological & Geo-technical Brigade of Hubei Provincial Bureau of Geology, Wuhan Hubei 430051, China;

2. Hubei Provincial Station of Geo-environment, Wuhan Hubei 430034, China)

Abstract: Potable water supply is a vital problem that relates to the human health and social and economic development in Ghana. In order to solve this problem, many governments including China and international organizations initiated a couple of water well construction projects to improve the situation. Hubei Geological Engineering Co., Ltd has overcome a variety of difficulties, completed over 4000 water wells in Ghana, and accumulated rich experiences in 21 years. In the paper, firstly the hydrological and geological settings, and the technical requirements of water wells in the country are introduced. Then, a set of drilling equipment which is suitable for the local conditions is put forwarded. For each of the 3 main rock types in Ghana, namely granite, phyllite, and quartz sandstone, a well drilling and well completion solution, covering open hole drilling, pilot hole drilling, reaming, RIH of screen pipes and backfilling gravel material is provided respectively.

Key words: water well; potable water; drilling technique; well completion technique; Ghana

1 项目背景

自1957年独立以来, 加纳基础设施严重匮乏, 道路、电力设施、饮用水问题一直是困扰该国经济社会发展的“瓶颈”。其中, 因饮用水问题导致的霍乱、伤寒、疟疾、几内亚血吸虫病致死致残人数逐年上升。为解决饮用水问题, 改善该国人民生活状况, 自20世纪末至今, 利用世界银行、非洲开发银行及欧盟提供的贷款, 该国建设了一批水文水井和自

来水厂项目, 德国、丹麦及我国政府也通过提供贷款或援助等方式, 先后实施了大批旨在促进地下水资源开发利用的水文水井项目。通过20年来的努力, 该国大部分地区和民众的饮用水问题得到了极大改善, 安全卫生饮用水比例从当初的20%提高到70%, 从而控制了传染病的发生, 促进了当地的卫生健康状况, 助力了加纳经济社会发展和非洲千年发展目标。

收稿日期: 2020-09-29; **修回日期:** 2021-01-15 **DOI:** 10.12143/j.ztgc.2021.05.015

作者简介: 李保红, 男, 汉族, 1969年生, 高级工程师, 水工环地质专业, 长期在非洲地区从事水文水井钻探工作, 湖北省武汉市汉阳区江城大道298号麦普利斯广场B座905室, libaohong_gh@163.com。

引用格式: 李保红, 欧阳昊. 加纳水井钻完井施工技术[J]. 钻探工程, 2021, 48(5): 106-112.

LI Baohong, OUYANG Hao. Water well drilling and completion technique in Ghana[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(5): 106-112.

湖北地质工程有限公司自1998年进军加纳水井施工市场,本着诚信经营、效率优先的理念,积极参与国际竞标,先后承担了世界银行、非洲开发银行、丹麦政府、德国政府、中国政府贷款或援助的一系列水文水井项目,足迹遍布加纳全境。通过借鉴国内外类似工程的施工经验^[1-7],结合长期野外钻井工作经验的提炼和总结,由当初的4~5天完成1口井,提高到1天完成1口甚至2口水井的优良业绩,多次被加纳建工部供排水局点名表扬,深得业主单位的信任和支持,许多水井应急项目都采用议标或直接委托形式由公司承担。加纳历年来最大的水井施工项目,该公司都榜上有名,占有相当的市场份额。公司项目部经过科学管理,创造了在加纳市场钻井20年无质量、安全事故发生,无不良工作负面清单的业绩。在加纳钻井行业内有口皆碑,为单位创造了良好的经济效益,为当地人民解决了基本民生,为当地政府奉献了社会效益。

2 加纳水文地质概况

加纳地处西非几内亚湾北部,西邻科特迪瓦,北接布基纳法索,东毗多哥,南濒大西洋,海岸线长约562 km。国土面积238537 km²。该国总体地势北高南低,沿海平原和西南部阿桑蒂高原属热带雨林气候,白沃尔特河谷和北部高原地区属热带草原气候。4—9月为雨季,11月至翌年4月为旱季。各地降雨量差别很大,西南部平均年降雨量2180 mm,北部地区为1000 mm。北部受地势地形、地质条件、气候环境等影响,地下水资源比较匮乏,以纵贯北部的白沃尔特和黑沃尔特2条河流补给为主,南部热带雨林地区,雨量充沛,补给条件好,地下水资源丰富,但开采难度较大。

在地质构造上,加纳可划分成3个主要单元:

(1)位于加纳西北和西南部的古元古代的上地壳侵入岩,其形成时代在22亿~20.5亿年前,以花岗岩为主。

(2)分布于加纳东南部和东部地区的泛非活动带,以片麻岩和上地壳岩石为主。

(3)主要分布在加纳中部和东北部地区,零星分布在沿大西洋海岸的前寒武纪到白垩纪、呈水平产出的大陆架和海相沉积岩,由石英岩、页岩砂岩、玄武质到粗面状的熔岩和火山碎屑岩组成。

在地下水方面,加纳地下水主要可分为3种

类型:

(1)花岗岩侵入体地区,主要分布在该国北部,地下水普遍具有承压性,以强—弱风化带风化裂隙水为主,水量不大,Ø165 mm口径单孔出水量3~20 L/min,但此类水井采用后续水力压裂实验增水效果明显。偶见花岗岩侵入脉体裂隙水和构造裂隙水,水量丰富,单井出水量40~200 L/min,甚至更大,满足机井化条件。此类地区按照加纳手压井出水量标准,成井率中等。

(2)千枚岩地层区,分布在加纳中部北东向成矿构造带地区,风化程度高,风化深度大,地下水以强—半风化裂隙水为主,受构造影响,补给条件好,水量大,具有承压性,适合机井化建造。此类地区成井率高,达90%以上,但钻探成井施工难度大、周期长。

(3)石英砂岩、页岩地区,分布在塔马里盆地,地下水埋藏深,以潜水形式赋存,补给条件差,单井出水量普遍偏小,仅能满足低出水量手压泵安装。此类地区成井率低,大约30%,即使采用后续水力压裂试验,增水效果亦不明显。

3 施工技术要求

按照国际水文水井技术规范和加纳水井建造的成井标准,安装手压泵的最低水量要求为13.5 L/min,最小口径165 mm,最小孔深60 m,下置Ø125/140 mm PVC井管;安装电动水泵的最低水量要求为80 L/min,最小口径200 mm,最小孔深80 m,下置Ø150/165 mm PVC井管。对于出水量低于13.5 L/min的钻孔,将结合声波测井和预抽水试验,甄别出具有潜在水量的钻孔进行水力压裂试验,以期通过疏通裂隙提高水量满足成井要求。对于干井,要求钻探进尺<120 m。

4 配套施工机具

加纳水文水井项目主要目标是解决偏远地区农业农村人口基本饮用水问题,其自然环境比较恶劣,井位偏远分散,设备搬迁距离远,路况条件差,有些村落甚至位于热带雨林深处,无法通行。基于当地实际情况,施工装备轻型化、灵活化、机动化是提高施工效率的最佳手段。湖北地质工程有限公司经过长期摸索,形成了一套适合当地施工条件的水井施工设备,包括:

(1) D-300型车载水文水井钻机。

(2) XP750型空压机,为了设备安全和转场机动性,改装为车载式。

(3) 钻探工具运输车,用于装载 $\Phi 89$ mm钻杆、开孔钻具、潜孔锤、牙轮钻头、工作套管、钻探辅助工具等。

(4) 材料车,用于装载 $\Phi 140$ 、 165 mm规格PVC井管、滤料。

(5) 水罐车,用于泥浆钻进配浆用水补给。

另外还配备了皮卡车,用于员工上下班通勤和燃油补给。图1所示为一套完整的水文水井钻井施工设备。



图1 一套完整的水文水井施工设备

Fig.1 A complete water well drilling fleet

5 水文水井施工技术方法

5.1 花岗岩地区

5.1.1 地层特点

花岗岩地区分布在该国北部。地层情况如图2所示。表层为玄武质粗面状熔岩,俗称“铁帽石”,硬度较大,厚薄不一,1~5 m,其出露地表部分为弱风化、中间微风化、底部强风化—全风化。表层以下为 Q_3 老粘土,厚度4~5 m,粘土上部失水呈硬塑状,遇水易膨胀,下部与花岗岩强风化饱水带接触,为可塑至软塑,粘滞力强。强风化花岗岩层普遍不含水或弱含水,稳定性较差,厚约1~5 m,部分钻孔可达6~10 m,通常情况下,强风化层越厚,底部含水或富水的可能性越大。强风化层以下为半风化层,普遍含水,是花岗岩地区地下水主要富集带,厚度为0.5~5 m不等。强风化层与新鲜基岩之间为半风化层过渡带。最下方地层为新鲜基岩层,该地层岩性强弱不一,底部岩性强度大、刚性强的花岗岩存在岩脉侵入体的可能性更大,脆性裂隙的发育程度更高,

富水、贮水构造更丰富,即使在达到设计孔深时未见可观水量,但具备较强的裂隙发育程度,后续水力压裂效果依然十分明显。反之,强度不大,韧性强的花岗岩层,裂隙发育程度不高,基本无贮水构造,此类地层水井出水以上部强一半风化裂隙水为主。

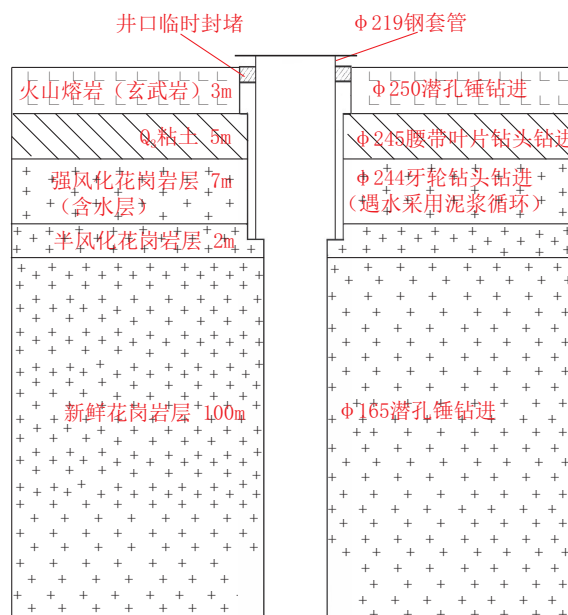


图2 花岗岩地区地层情况和井身结构

Fig.2 Lithology and the well structure in the granite area

5.1.2 钻井工艺

开孔:用 $\Phi 250$ mm潜孔锤开孔钻进,安装孔口管,启动空压机,连接钻具,利用车载钻机加压装置施加钻压,以提高钻进效率。

探孔:目的是了解地层情况,确定工作套管下深。 Q_3 老粘土地层,由于粘土粘滞力强,易包裹钻头。在前期施工过程中,试用过2种钻进工艺:一是采用气动潜孔锤钻进,进尺慢能耗高;二是采用水循环叶片刮刀钻头钻进,但作业程序较复杂,钻进效率低,耗时长。后期结合2种钻探工艺的优缺点,参阅了相关资料^[8-11],采用 $\Phi 180$ mm空气循环钎头钻具钻进,为克服上部粘土层缩径,防止底部粘土包裹钻头,对钻具进行了优化,钻具底部仅焊接3个等位的一字形钎头,钎头在平面上不重合排列,确保钎头对土层切割的最大工作效能,在钻具中部焊接一个与钎头成孔口径等径的圆形腰带,以对螺旋锯齿状孔壁进行镗孔,最大程度减小粘土孔壁表面积,克服粘土的粘滞力,如图3所示。改进后的施工工艺有效

提高了机械钻速。



图3 Ø180 mm 钎头钻具

Fig.3 180mm chisel type drill bit

继续钻进至花岗岩强风化层,该层普遍不含水或弱含水,稳定性较差,使用Ø165 mm潜孔锤钻进能获得较高的机械钻速,钻穿半风化层,直到进入新鲜基岩1~2 m,为工作套管下入位置。

扩孔:用Ø245 mm叶片刮刀钻头(附加等径圆形腰带)或Ø244 mm牙轮钻头。依据Q₃老粘土层、强风化层的厚度选择循环介质和配套钻具。当粘土层较厚、强风化层较薄时,选择风循环叶片刮刀钻进;若粘土层较薄、强风化层较厚时,宜选择风循环牙轮钻头钻进,并严格控制风量;若粘土层和强风化层均较厚时,则应选择泥浆循环叶片刮刀钻进,在底部强风化层再采用牙轮钻头钻进。对于强风化层超厚的情况,扩孔时必须采用泥浆钻进,严禁采用风循环,因为空气扰动性大,极有造成孔壁坍塌和埋钻的风险。

二开钻进:起钻,下入Ø219 mm薄壁钢管至孔底,钢管周边环状间隙进行填充压实处理,随后下入Ø165 mm潜孔锤继续钻进,在下钻过程中要充分考虑地下水位和孔底沉渣的影响,避免钻具下入过快过深,空压机停风过早,造成孔内沉渣反吸、潜孔锤堵塞。

在花岗岩地层中钻进时,底部形成的锤击粉碎屑在上返风力作用下与上部渗下的裂隙水融合,易在潜孔锤上部孔壁粘附堆积形成泥环,影响钻具提升。应每进尺20~30 cm提升一次钻具,让潜孔锤脱离工作状态,借助瞬间释放的空气压力,将泥环

破坏冲出孔口。钻探终孔前,将钻具提离孔底1 m左右,关闭空气开关,等候10 min,使上部裂隙水充分下渗孔底,或从孔口加注清水,借助水的作用分解泥环,最后开启空气开关,用高压气流托举孔内积水和岩屑,对孔壁进行强力冲刷,确保孔内干净,钻具提升顺畅,能大大缩减成井后的洗井时间。

5.1.3 完井工艺

钻进完成后,下入PVC井管(包括滤管和实管)成井。基于花岗岩地区风化裂隙含水层的位置,滤管下入到强一半风化层之间,部分滤管处于工作套管内。因此,在投滤料阶段,需要对细节工作进行严格把控,滤管在强风化层不宜出露过多,否则强风化层中极细颗粒的细沙和云母易造成水质浑浊不清,延长洗井时间^[12-13]。同时投滤过程中采用灌浆预埋深度法,保证滤料在套管内1~2 m后,缓慢起拔套管,边投边拔,确定投滤至预定位置,停止套管起拔,拆卸孔口以上套管,下入风管进行空气洗井,待水清沙净,复测滤料深度,若滤料下沉则进行补充,滤料填充厚度须超出滤管顶部3~5 m,随后提拔全部套管,投入水泥砂浆1 m左右,回填岩屑距孔口4 m,再投入水泥砂浆4 m至孔口,保留井管高出地面0.8 m,至此施工结束。后期抽水试验班组进行6 h非稳定流抽水试验,3 h水位恢复观测及水样采集工作。

5.2 千枚岩地区

5.2.1 地层特点

加纳中部北东向成矿构造带地区,以千枚岩为主,风化程度高,风化深度大,地下水以强一半风化裂隙水为主,受热带雨林气候影响,补给条件好,水量大,具有高承压性。其上覆玄武质粗面状的熔岩风化程度高,近乎完全分解。其下为Q₃老粘土,普遍厚度7~10 m,局部达20 m以上,普遍饱水。粘土层以下依次为强风化、半风化和新鲜千枚岩地层。其中强风化层为主要含水层。如图4所示。

5.2.2 钻井工艺

开孔:首选Ø180 mm钎头钻具钻进,安置孔口管,启动空压机,连接钻具,利用主动钻杆和车载钻机加压装置进行钻进。

探孔:对于Q₃老粘土层,继续采用风动钎头切割钻进,同时提高转盘转速,增加风量,尽可能多地将孔内粘土切割并携带至孔口。钻进至底部饱水带粘土时若产生泥皮包裹钻头现象,应该立即停止风动钻进,改为泥浆循环钻进。

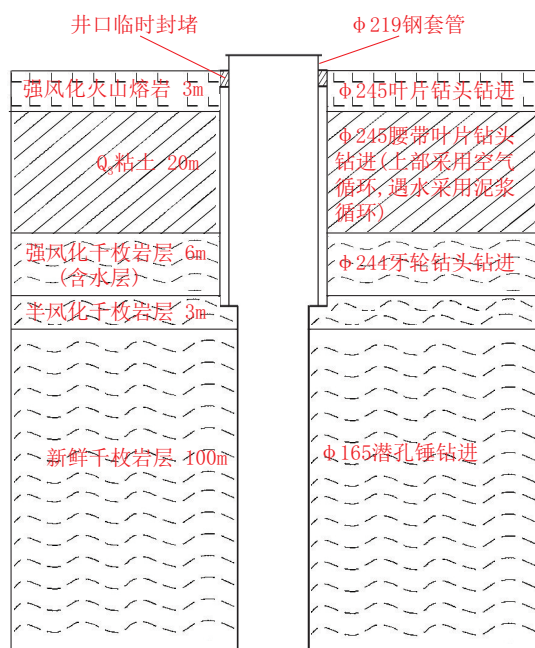


图4 千枚岩地区地层情况和井身结构

Fig.4 Lithology and the well structure in the phyllite area

千枚岩强风化层风化程度高,岩性软弱,钎头钻头易于破碎切割,但碾压挤碎能力不强,加之孔内泥浆浓度、粘度不够,携带岩屑能力较弱,易造成孔底沉渣,因此需提钻更换 $\phi 152$ mm牙轮钻头继续钻进,直到钻进至半风化层,进尺明显变慢,岩屑由棕黄变成灰黑。

扩孔:提钻,换 $\phi 245$ mm叶片刮刀钻头(附加等径圆形腰带)或 $\phi 244$ mm牙轮钻头进行扩孔。在 Q_3 老粘土层段用叶片刮刀钻头钻进,底部采用 $\phi 244$ mm牙轮钻头钻进。由于上部扩孔刮落的粘土泥皮与水充分拌和,泥浆浓度增大,非常有利于底部牙轮钻头的扩孔钻进,加入适量聚丙烯酰胺,携岩能力明显提升。钻进至套管预置孔深时,加水稀释泥浆,反复上下活动钻具,以破坏孔壁泥皮,防止缩径造成下套管困难。对于超厚强风化层扩孔,必须采用泥浆循环钻进,严禁采用扰动性大的空气循环钻进,否则将有孔壁坍塌和埋钻的风险^[14-15]。

二开钻进:冲孔换浆,上提钻具,下入工作套管。千枚岩地区工作套管下置深度普遍较深,达20~50 m,由于 Q_3 老粘土层和千枚岩强风化层都会遇水膨胀并形成粘性物质,对套管的附着粘滞力极强,造成成井后套管起拔困难。在施工过程中,采取了2种方法解决这一问题,一是将食用油、生化泥浆

或聚丙烯酰胺浓溶液均匀涂抹在套管外壁,在套管外壁与孔内泥皮间形成一道“油膜”或“粘膜”,二是用聚乙烯塑料薄膜缠绕套管,在套管外壁与孔内泥皮间形成一道“塑料薄膜”,能有效克服粘滞阻力的影响。

套管下置完毕后,为防止潜孔锤钻进上返空气和高压水流对套管鞋的扰动掏蚀,需要对套管进行预压处理,确保套管鞋与外部环状间隙的密封性,同时对孔口周边环状间隙进行填充压实处理,随后下入 $\phi 165$ mm潜孔锤继续钻进,在下入潜孔锤钻具过程中要充分考虑到地下水位和孔底沉渣影响,避免钻具下入过快过深,空压机停风过早,造成孔内沉渣反吸、潜孔锤堵塞的孔内事故。

钻至终孔时,将钻具提离孔底1 m左右,关闭空气开关,静候几分钟,利于裂隙水充分下渗孔底,借助水的作用沉淀分解孔壁岩屑,考虑到千枚岩地层稳定性较差,应轻微开启空气开关,以低—中压气流托举孔内积水和岩屑,达到预洗井目的。

5.2.3 完井工艺

千枚岩地区地下水普遍赋存于强—半风化地层,含水层厚度大,水量多,因此段地层不稳定,在泥浆循环扩孔钻进后已被套管隔离或部分隔离,为争取水井最大出水量,减小云母含量和浑浊度,在滤管设计上使顶部滤管位于半风化层内,同时准备2种规格滤料。在设计井管下置完成后,进行投滤作业,先投入 $\phi 3\sim 4$ mm粒径滤料,直到滤料层达到套管鞋位置,再投入 $\phi 1\sim 2$ mm滤料,入套管段1~2 m(勿投入过多,以免影响套管起拔),此时迅速起拔所有工作套管,将钻机水泵吸水管连接水罐车放水阀,将钻机主动钻杆放入井管内,利用编织袋缠绕,拨杠压覆密封,开启放水阀,启动水泵进行孔内换浆和动水投滤,逐步投入 $\phi 1\sim 2$ mm滤料,停泵复测滤料深度,补充至设计厚度5 m左右,投入水泥砂浆1 m左右,回填钻探岩屑至井口4 m,投入水泥砂浆4 m至孔口,保留井管距地面高度0.8 m,下入风管进行空气洗井,完井施工结束。

5.3 石英砂岩地区

5.3.1 地层特点

加纳北部塔马里盆地,分布有石英砂岩、泥页岩,地下水位埋藏深,以潜水形式赋存,补给条件差,单井出水量偏小,仅能满足低出水量手压泵安装。此类地区成井率低,大约30%。表层为玄武质粗面

状熔岩,厚薄不一(1~5 m),出露地表部分弱风化、中间微风化、底部强风化—全风化。其下依次为 Q_3 老粘土,石英砂岩强风化、半风化和新鲜石英砂岩层,如图5所示。其中,半风化石英砂岩岩性刚脆,受应力影响裂隙较为发育,为地下水贮存提供了良好条件。不同地区石英砂岩厚度不一,少则50~60 m,多者100~120 m,地下水类型多以潜水为主。

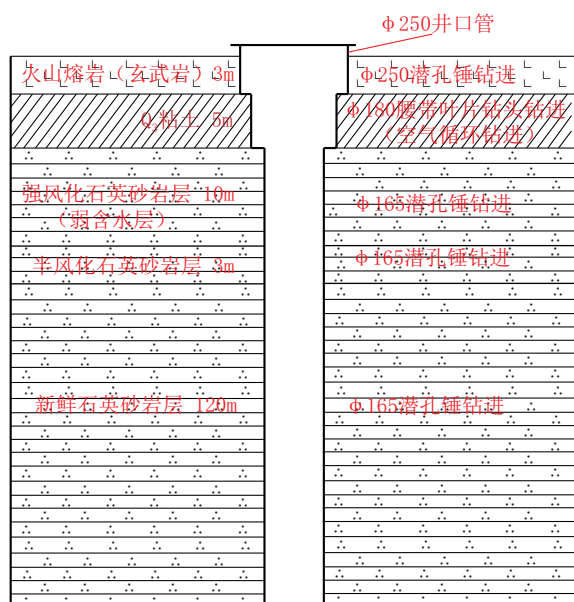


图5 石英砂岩地区地层情况和井身结构

Fig.5 Lithology and the well structure in the quartzite sandstone

5.3.2 钻完井工艺

(1)开孔:采用 $\Phi 250$ mm潜孔锤开孔,安置孔口管,启动空压机,连接钻具,利用主动钻杆、潜孔锤自重及车载钻机加压装置提高钻进效率。

(2)钻进: Q_3 老粘土为相对隔水层,厚度4~5 m,该层普遍失水呈硬塑状,遇水膨胀,粘滞力强,潜孔锤钻进困难,多采用风循环钎头钻进。继续钻进至强风化石英砂岩层,风化程度高,但研磨性强,需更换 $\Phi 165$ mm潜孔锤钻进,沉积岩地层普遍弱含水,地层稳定性好,潜孔锤钻进进尺快、效率高,并且多数钻孔采用无套管钻进。缺点是钻进时粉尘大,需要采取适当的降尘处理措施。

此类地层钻井工艺较简单,一套设备一天可完成2口井各120 m的钻井任务,但成井率极低。在低水量水井钻进过程中一定要对孔内含水层位置、出水量大小判断准确,石英砂岩粉尘遇水有一定的

粘滞性,在潜孔锤上部孔壁极易粘附堆积形成环形泥环,影响钻具提升,遇此情况,每进尺20~30 cm,提升一次钻具,让潜孔锤脱离工作状态,借助瞬间释放的空气压力,将泥环破坏冲出井口。同时粉尘还会吸附和充填在孔壁上的微小含水裂隙,影响孔内真实出水量测试,因此每完成一段进尺,需向孔内注入清水,一则借助水的作用分解孔壁泥环,二则利用高压气流托举孔内积水和岩屑对孔壁进行强力冲刷,疏通含水裂隙。

若出水量满足要求,下入井管,投滤封孔成井;若出水量接近成井标准,通常会做扩径处理或水力压裂试验,尽可能提高出水量以满足成井要求。若出水量过小,无法满足成井要求,则作为干井进行弃井处理。施工完成的水井井场如图6所示。



图6 施工完成的水井井场

Fig.6 Completed water well pad

6 结语

(1)对于陌生地质环境的水文水井施工,宜采用“先探后采”的方式进行钻井作业。对上覆不良和欠稳定地层,利用小口径钻孔稳定性优的特点,摸清地层结构和特性,采用不同的钻井工艺进行钻进和后期扩孔处理。

(2)钻探工作需要掌握基本的岩土力学知识,善于分析总结孔内事故原因,针对不同地层力学性质的差异,探索研究适宜的钻井工艺,达到逐步提高工作效率、减小井内事故的目的。

(3)在非洲地区材料紧缺、物质匮乏、技术落后、加工能力薄弱的条件下,充分发挥自身聪明才智,集思广益,创造性地开展水文水井钻井施工工作。

参考文献(References):

- [1] 邵盛元,温得全,胡菲菲,等.中国援助柬埔寨乡村供水项目水井施工工艺及解决问题的措施[J].探矿工程(岩土钻掘工程),

- 2018,45(3):19-23.
- SHAO Shengyuan, WEN Dequan, HU Feifei, et al. Water well construction technology of China-aided Cambodia rural water supply project [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(3):19-23.
- [2] 张建良. 西非国家水井施工经验及其改进措施[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2005,32(S1):284-285.
- ZHANG Jianliang. Experience and improvement of water well drilling in West Africa [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2005,32(S1):284-285.
- [3] 宋祥昌, 刘海波. 西北地区沙漠边缘细颗粒地层供水井施工方法[J]. 西部探矿工程, 2015,27(7):45-47.
- SONG Xiangchang, LIU Haibo. Water supply well construction method in fine grain formation at desert margin in northwest China [J]. West-China Exploration Engineering, 2015, 27 (7) : 45-47.
- [4] 张统得, 严君凤, 房勇, 等. 空气潜孔锤钻进技术在乌蒙山地下水探采结合工程中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016,43(10):238-241.
- ZHANG Tongde, YAN Junfeng, FANG Yong, et al. Application of pneumatic DTH drilling technology in Wumeng Mountain groundwater exploration and production project [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43 (10):238-241.
- [5] 赵海平, 金江峰, 靳慧洁. 气动潜孔锤钻进技术在非洲地区供水井施工中的应用[J]. 地下水, 2014,36(5):143-145.
- ZHAO Haiping, JIN Jiangfeng, JIN Huijie. Air hammer drilling technique be used in drilling water supply well in Africa [J]. Ground Water, 2014,36(5):143-145.
- [6] 周作明. 空气跟管钻进在南苏丹供水井流沙层中的应用实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017,44(4):36-38.
- ZHOU Zuoming. Application of air drilling in quicksand layer of south Sudan water supply well [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(4):36-38.
- [7] 宋国龙, 李进安, 王超. 空气钻进技术在内蒙古供水井施工中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016,43(11):52-54.
- SONG Guolong, LI Jin'an, WANG Chao. Application of air drilling in water supply well construction in Inner Mongolia [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(11):52-54.
- [8] 郝文奎, 宋宏兵, 康亢, 等. 多工艺空气钻进技术在深水井施工中的应用实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014,41(12):11-15.
- HAO Wenkui, SONG Hongbing, KANG Kang, et al. Application practice of multi-process air drilling technology in deep well construction [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(12):11-15.
- [9] 李建平. 气动潜孔锤钻进技术在水文水井工程中的应用[J]. 西部探矿工程, 2009,21(9):80-82.
- LI Jianping. Application of pneumatic DTH hammer drilling technology in hydrology and water well engineering [J]. West-China Exploration Engineering, 2009,21(9):80-82.
- [10] 聂衍钊, 张祖培, 孙友宏, 等. 泡沫钻进在深孔水文水井钻探中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003(3):387-389.
- NIE Yanzhao, ZHANG Zupei, SUN Youhong, et al. An application of foam drilling technique in deep borehole of hydrological well drilling [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003(3):387-389.
- [11] 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.
- WU Yuegang, XU Jing. Application of solid-free weak gel drilling fluid in water well construction [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(10):261-264.
- [12] 汪子奇, 金朔慧, 史立京, 等. 管内投砾新工艺在水文水井围填滤料中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2016,43(6):35-40.
- WANG Ziqi, JIN Shuohui, SHI Lijing, et al. Application of a new technology to graveling in the casing during the filling of filter materials in a hydrological well [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016,43(6):35-40.
- [13] 郭强. 如何提高水文水井成井工艺中的填砾质量[J]. 新疆地质, 2017(S1):210-211.
- GUO Qiang. The method of improving gravel filling quality of hydrological well during well completion [J]. Xinjiang Geology, 2017(S1):210-211.
- [14] 王金志, 李修刚, 颜廷福, 等. 提高水文水井成井质量的几点体会[J]. 吉林地质, 2009,28(3):61-62.
- WANG Jinzhi, LI Xiugang, YAN Tingfu, et al. Some experiences of improving well completion quality in hydrogeological water well [J]. Jilin Geology, 2009,28(3):61-62.
- [15] 许刘万, 王艳丽, 刘江, 等. 影响水井钻探效率的因素及提高钻井速度的关键技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014,41(4):18-21.
- XU Liuwan, WANG Yanli, LIU Jiang, et al. On factors affecting well drilling efficiency and key technologies of improving drilling speed [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(4):18-21.

(编辑 荐华)