

# 关键链法在 3000 m 小口径深钻工程管理中的应用

田国亮<sup>1,2</sup>, 董泽训<sup>1,2</sup>, 王文龙<sup>1,2</sup>, 张 辉<sup>1,2</sup>, 李凯舟<sup>1,2</sup>

(1.山东省第六地质矿产勘查院,山东 招远 265400; 2.黄永堂技能大师工作室,山东 招远 265400)

**摘要:**山东省第六地质矿产勘查院施工的招远水旺庄 3000 m 科钻项目是招平断裂带第一深孔,终孔孔深 3000.58 m,历时 232 d,创造了全国金矿小口径绳索取心钻探同类型钻孔效率之最。以该项目进度管理为研究课题,在前期设计中深入分析了项目施工过程中的各个环节,并用 WBS 对其进行分解,查找出影响工程进度的主要因素,设置汇入缓冲区,在施工过程中采用关键链法对施工进度优化并最终取得成果。关键链法使项目管理人员对整个工程有一个既动态又实时的掌控,对深孔钻探及规模性钻探工程的工期控制有重要的意义。

**关键词:**深孔钻探;WBS 分解;关键链法;进度管理

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2019)09-0104-06

## Application of key chain technology in 3000m small-diameter drilling project

TIAN Guoliang<sup>1,2</sup>, DONG Zexun<sup>1,2</sup>, WANG Wenlong<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui<sup>1,2</sup>, LI Kaizhou<sup>1,2</sup>

(1.The Sixth Geological and Mineral Exploration Institute of Shandong Province,  
Zhaoyuan Shandong 265400, China;

2.HUANG Yongtang Skills Master Studio, Zhaoyuan Shandong 265400, China)

**Abstract:** The 3000m drilling project undertaken by the Sixth Geological and Mineral Exploration Institute of Shandong Province in Shuiwangzhuang, Zhaoyuan is the deepest hole in Zhaoping Fault Zone with the completion depth at 3000.58m, operation period of 232 days, and a record in the drilling efficiency for the similar holes in small diameter wireline drilling. In this paper, the project schedule management is taken as the research topic, and the various aspects of the drilling process are deeply analyzed in the preliminary design. WBS was used to break down the work to find out the main aspects that affect the progress of the project with the import buffer set up. The key chain technology was used to optimize the drilling progress and achieved good results. The key chain technology enables project managers to have a dynamic and real-time control of the entire project, which is of great significance to deep hole drilling and large-scale drilling works.

**Key words:** deep hole drilling; WBS breakdown; critical chain technology; schedule management

## 0 引言

《国土资源“十三五”科技创新发展规划》明确提出了全面实施深地探测战略,实施深地探测战略目标之一是:到 2020 年形成 3000 m 矿产资源勘探成套技术能力。根据这一阶段的要求,部分野外队积极开展深地钻探项目,安徽省地质矿产勘查局 313 地质队施工的 LZSD-1 孔,位于安徽省安庆市

枞阳县钱铺乡虎栈村境内,完钻孔深 3008.29 m,历时 308 d。山东省第三地质矿产勘查院施工的 zk96-5 钻孔,位于山东莱州西岭矿区内,施工孔深 4006.17 m,历时 971 d<sup>[1]</sup>。

由于深孔钻探周期长,受自然条件、地质条件、外部环境等因素影响较大<sup>[2]</sup>,这些特点使得钻探项目运营的工期比较难于把握和控制。为保证工期,

**收稿日期:**2019-06-03; **修回日期:**2019-07-03 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2019.09.014

**基金项目:**山东省地质勘查委托项目(编号:鲁勘字(2018)22 号);山东地矿局深部找矿创新团队项目“胶东深部金矿资源评价方法与预测”(编号:KY2018002)

**作者简介:**田国亮,男,汉族,1987 年生,工程师,勘查技术与工程专业,硕士,从事小口径绳索取心钻探技术研究工作,山东省招远市金城路 126 号,634348643@qq.com。

**通信作者:**董泽训,男,汉族,1967 年生,钻探技师,全国技术能手,从事小口径绳索取心钻探技术研究工作,山东省招远市金城路 126 号,lytkgc@126.com。

**引用格式:**田国亮,董泽训,王文龙,等.关键链法在 3000 m 小口径深钻工程管理中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):104-109.

TIAN Guoliang, DONG Zexun, WANG Wenlong, et al. Application of key chain technology in 3000m small-diameter drilling project [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(9):104-109.

常需要调动过多的人力、物力等资源,造成了一些浪费<sup>[3]</sup>。

关键链法是一种进度网络分析技术,可以根据有限的资源对项目进度计划进行调整。关键链法结合了确定性与随机性办法。对深钻工程进度管理有重要的应用意义。

### 1 项目概况

山东省第六地质矿产勘查院(以下简称山东六院)承担的“山东省招远市水旺庄—李家庄大型金矿床深部及外围金矿调查评价”项目钻探工作。钻孔设计深度 3000 m,是招平断裂带第一深孔。

据地质钻探资料,本孔可能遇到下列 3 个构造破碎带,即栾家河断裂带、破头青断裂带、招平断裂带。本孔设计四级钻孔结构:0~10 m(视地层完整情况可调整)Φ150 mm 硬质合金钻头开孔,下入 Φ146 mm 表层套管;S122 绳索取心施工 10~1000 m(穿过栾家河组破碎带,为更好地维护孔内不可预见的失稳地层,减轻孔内阻力,减少冲洗液的漏失,视地层完整情况调整),下入 Φ114 mm 套管;S98 绳索取心施工 1000~2100 m(穿过破头青断裂带,视地层完整情况调整);S76 绳索取心钻进至终孔。实际钻孔结构见图 1。

钻探设计工期 2018 年 8 月—2019 年 8 月。

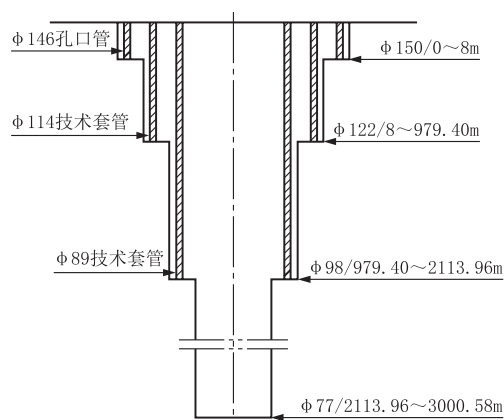


图 1 钻孔结构示意图  
Fig.1 Borehole structure

## 2 项目实施情况

### 2.1 对本项目的 WBS 分解

根据工作分解结构 WBS (Work Breakdown Structure)的分解原则和步骤,按照实际的工程运作流程可以将项目大致分为:工程设计、钻前准备、工

程钻探、物探测井、抽水实验、设备撤场移交报告等 6 个任务 28 项工序。水旺庄科钻项目 WBS 分解项目见表 1。

表 1 水旺庄科钻项目 WBS 分解  
Table 1 WBS of the Shuiwangzhuang drilling project

序号	任务名称	工期/ d	预计开始 时间	预计完成 时间	前置任 务序号
1	签订合同	1	2018-08-01	2018-08-01	
2	现场踏勘	1	2018-08-02	2018-08-02	1
3	收集资料	2	2018-08-02	2018-08-04	1
4	协商水电路	7	2018-08-02	2018-08-08	1
5	设备检修	4	2018-08-02	2018-08-06	1
6	编写施工设计	5	2018-08-04	2018-08-08	2,3
7	通过会审	2	2018-08-08	2018-08-10	6
8	修地盘	5	2018-08-10	2018-08-16	7
9	设备进场	1	2018-08-16	2018-08-17	4,5,8
10	接水接电	1	2018-08-17	2018-08-17	9
11	设备安装调试	1	2018-08-18	2018-08-18	10
12	一开钻进	2	2018-08-18	2018-08-20	11
13	下套管	1	2018-08-20	2018-08-21	12
14	二开钻进	43	2018-08-21	2018-10-03	13
15	冲洗液实验	4	2018-08-20	2018-08-24	12
16	设备保养、维修	7	2018-08-20	2018-08-27	12
17	质量、安全检查	7	2018-08-20	2018-08-27	12
18	下技术套管	1	2018-10-03	2018-10-04	14
19	三开钻进	40	2018-10-04	2018-11-13	18
20	二次下技术套管	1	2018-11-13	2018-11-14	19
21	四开钻进	147	2018-11-15	2019-04-11	20
22	终孔验收	1	2019-04-12	2019-04-13	15,16, 17,21
23	岩土实验	6	2019-04-13	2019-04-19	22
24	物探测井	8	2019-04-13	2019-04-21	22
25	水文实验	12	2019-04-13	2019-04-25	22
26	岩心入库	3	2019-04-13	2019-04-16	22
27	设备撤场,场地 恢复	4	2019-04-25	2019-04-29	23,24, 25,26
28	提交报告	15	2019-04-29	2019-05-13	27

### 2.2 工程的关键路径

根据水旺庄科钻项目 WBS 分解表绘制网络计划图(见图 2)。从图 2 中可以看出本项目的关键路径就是:1→3→6→7→8→9→10→11→12→13→14→18→19→20→21→22→25→27→28。也就是:签订合同→收集资料→编写施工设计→通过会审→修地盘→设备进场→接水接电→设备安装调试→一开钻进→下套管→二开钻进→下技术套管→三开钻进→二次下技术套管→四开钻进→终孔验收→水文实验→设备撤场,场地恢复→提交报告<sup>[4]</sup>。据此得到的总工期为 256 d。

### 2.3 工序时间的估算

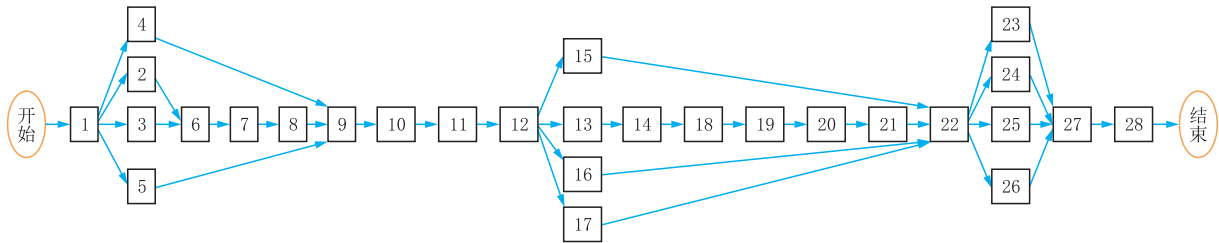


图2 优化前网络计划图

Fig.2 Pre-optimization network plan

工序时间的估算是关键链的重点问题,为尽可能减少工期估算的主观因素,科钻施工前期,我们邀请了山东地矿局探矿专家、项目团队及一线机长共同参与对工序时间进行估算,并对结果进行加权平均得出了最可能时间。由于研究对象不确定因素多,仅凭人为的估算很难做到科学、准确<sup>[5]</sup>。本项目采用的是PERT三点估算法,也是当下工程施工普遍认可的算法。该算法提供了一种思路:对于深孔钻进这种不确定性强的项目工序,可以采用某一项工作的3个估计时间确定。3个时间均需服从正态分布。3个时间分别为乐观时间( $t_0$ ),悲观时间( $t_p$ ),最可能时间( $t_m$ ),然后利用这3个时间计算得到该工序的期望工期( $t_e$ )。

乐观时间:高德拉特博士建议使用50%的概率来消除过程的安全时间,并将活动期从原来的一半中移除,这是乐观的时间。悲观时间:即为最长的工序时间。最可能时间:是根据最易得到的资源、对资源可用时间的现实预测、资源对其它参与者的依赖程度以及可能产生的所有干扰等,所得到的时间。

每项活动的期望工期就是在确定了乐观时间、悲观时间、最可能时间基础上求得的。期望工期见表2。期望工期计算方法:

$$期望工期 t_e = (乐观时间 t_0 + 悲观时间 t_p + 4 \times 最可能时间 t_m) / 6 \quad (1)$$

### 2.4 缓冲区的设置

缓冲区分为项目缓冲(即:PB)、汇入缓冲(即:FB)和资源缓冲(即:RB)。项目缓冲一般设置在关键链末端,汇入缓冲设置在非关键链汇出关键链处,资源缓冲是紧前紧后工序使用不同资源时,在紧后工序之前插入资源缓冲。

缓冲区的设置方法主要有:高德拉特博士的50%法,剪切一粘帖法,根方差法。前两者的计算思路相似,是以所有链路上的工序时间总和为基础进行计算,缺点在随着链路的的增长,精准度会降低。

表2 水旺庄科钻项目时间优化

Table 2 Time optimization of the Shuiwangzhuang drilling project

序号	工序	紧前工作序号	乐观时间 $t_0/d$	悲观时间 $t_p/d$	最可能时间 $t_m/d$	期望工期 $t_e/d$
1	签订合同		0.5	1.0	0.8	0.8
2	现场踏勘	1	0.75	1.5	0.9	1.0
3	收集资料	1	1.5	3.0	1.7	1.9
4	协商水电路	1	4.5	9.0	6.0	6.3
5	设备检修	1	2.5	5.0	3.0	3.3
6	编写施工设计	2,3	3.5	7.0	5.0	5.1
7	通过会审	6	1.5	3.0	2.0	2.1
8	修地盘	7	3.5	7.0	3.5	4.1
9	设备进场	4,5,8	0.8	1.5	1.0	1.0
10	接水接电	9	0.8	1.5	1.0	1.0
11	设备安装调试	10	0.5	1.0	1.0	0.9
12	一开钻进	11	1.3	2.5	1.5	1.6
13	下套管	12	0.8	1.5	1.0	1.0
14	二开钻进	13	21.0	42.0	38.0	35.8
15	冲洗液实验	12	2.5	5.0	3.0	3.3
16	设备保养、维修	12	6.5	13.0	5.0	6.6
17	质量、安全检查	12	6.0	12.0	5.0	6.3
18	下技术套管	14	0.5	1.0	1.0	0.9
19	三开钻进	18	18.0	36.0	30.0	29.0
20	二次下技术套管	19	0.5	1.0	1.0	0.9
21	四开钻进	20	60.0	120.0	114.0	106.0
22	终孔验收	15,16,17,21	0.5	1.0	1.0	0.9
23	岩土实验	22	3.0	6.0	4.0	4.2
24	物探测井	22	4.0	8.0	6.0	6.0
25	水文实验	22	7.0	14.0	8.0	8.8
26	岩心入库	22	2.0	4.0	2.0	2.3
27	设备撤场,场地恢复	23,24,25,26	2.5	5.0	3.0	3.3
28	提交报告	27	8.0	16.0	10.0	10.7

目前根方差法是普遍采取的一种方法。根方差法符合中心极限定理,假设一个项目中资源约束不存在,根方差法能有效的提高项目缓冲区的精确度。

根据实际选取了6个汇入缓冲,即:开 1→2→6; 1→4→9; 1→5→9; 22→23→27; 22→24→27; 22→26→27。6个汇入缓冲均应放在非关键链汇入关键链的地点,也就是  $FB_1$  放在工序2之后工序6之前,  $FB_2$  放在工序4之后工序9之前,  $FB_3$  放在工

序 5 之后工序 9 之前,  $FB_4$  放在工序 23 之后工序 27 之前,  $FB_5$  放在工序 24 之后工序 27 之前,  $FB_6$  放在工序 26 之后工序 27 之前。根据根方差公式计算  $FB_1$ 、 $FB_2$ 、 $FB_3$ 、 $FB_4$ 、 $FB_5$ 、 $FB_6$ , 得:

$$FB_1 = \sqrt{(1.5-1)^2} = 0.5 \quad FB_2 = \sqrt{(9-6.3)^2} = 2.7$$

$$FB_3 = \sqrt{(5-3.3)^2} = 1.7 \quad FB_4 = \sqrt{(6-4.2)^2} = 1.8$$

$$FB_5 = \sqrt{(8-6)^2} = 2 \quad FB_6 = \sqrt{(4-2.3)^2} = 1.7$$

$$PB = \sqrt{0.2^2 + 1.3^2 + 1.9^2 + \dots + 6^2 + 1.7^2 + 6^2} \approx 18.89$$

项目缓冲(PB)应放在关键链的最末端, 经计算

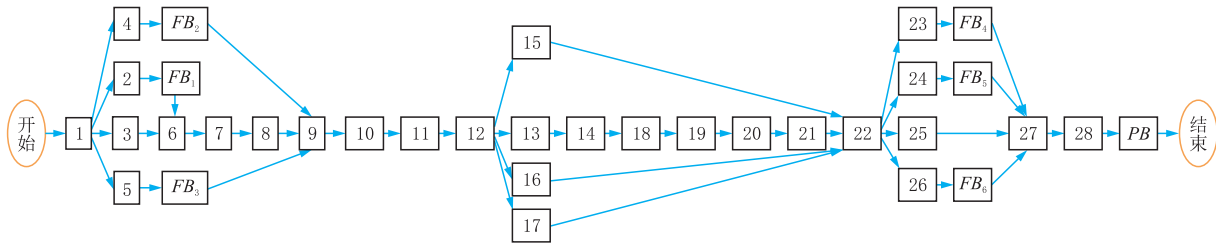


图 3 优化后网络计划图

Fig.3 Optimized network plan

优化后的科研钻探项目, 工期由原来的 286 d 缩短到 264.79 d, 这其中包括 18.89 d 的项目缓冲, 工程预计在 2019 年 4 月 24 号完工。

### 2.6 优化进度设计的控制

在本项目主要采用了优化的三色监控缓冲机制。将缓冲区分成消耗安全区、消耗警示区、消耗危险区, 分别用绿色、黄色和红色表示(如图 4 所示), 横轴代表项目的完成比, 纵轴表示缓冲区的消耗比。在项目开展初期, 缓冲区消耗 20% 左右最为理想, 当消耗超过 30% 就进入危险区域, 需要采取相应措施。项目推进过程中, 由安全区进入警告区。如果监控行为和项目实际执行情况一致, 那么进度控制最为理想。如果安全区和警示区的截止点设置得太低, 项目经理将过早制定行动计划并将产生一些额外的费用。如果警示区能有效地减少和危险区的边界点设置得太低, 将触发不准确的预警机制, 过早采取不必要的控制措施, 这将大大增加项目成本, 最终导致项目延迟或预算超支。这种动态的缓冲机制符合供应链的原理, 也符合深孔钻探实际。既减少资源浪费又可以避免因资源不足导致的进度延迟现象, 保证项目低耗高效的运行。

### 2.7 进度控制机制

进度设计理论体系建立之后的关键是对各个项目环节的进度控制。为此, 项目组做了以下工作:

项目缓冲约为 18.89 d。

### 2.5 优化后的项目进度

将 PB 和 6 个 FB 分别插入到网络计划图中, 可以得到本科研钻探项目的优化设计(见图 3)。项目优化后消除了安全时间, 使每道工序按照期望的持续时间工作, 大大缩短了工期。其次, 优化设计中加入了缓冲的概念。汇入缓冲加入在非关键链进入关键链的节点之后, 项目缓冲加入在关键链末端, 对整个项目进度可进行有效的保护。

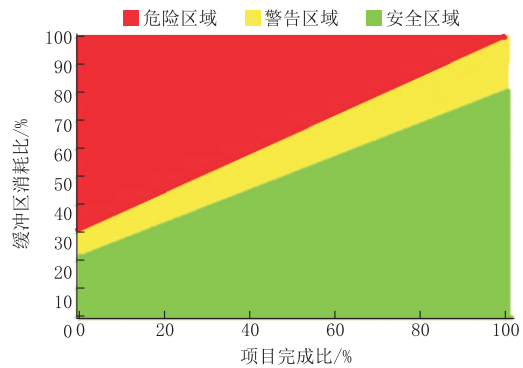


图 4 三色监控缓冲机制改进图

Fig.4 Three-color monitoring buffer mechanism improvement diagram

(1) 详实编写施工设计, 根据地质资料及本矿区以往钻探经验, 设计合理的钻孔结构<sup>[6]</sup>。对项目人员进行技术交底, 全面培训。本孔将钻遇 3 个破碎带, 采取措施是提前预防, 将冲洗液调至合适性能, 快速穿过破碎带下入套管。

(2) 采用先进的上下联动一体化设备, 实现上下可视化操作, 大大减少了提下钻辅助时间<sup>[7-8]</sup>。

(3) 采用山东六院自主研发的钻头, 使用寿命大幅增加, 延长了提下钻间隔时间。

(4) 定期组织技术培训, 交流生产中遇到的问题, 进一步统一思想<sup>[9]</sup>。

(5) 采用先进的冲洗液体系, 并有泥浆专家现场



指导<sup>[10-11]</sup>。

(6)四开之后,要求每班做到设备自检、维护,顺序为自上而下,从场内到场外<sup>[12]</sup>。

(7)执行设备 TPM 管理制度,设备定期有专人负责保养、维修<sup>[13]</sup>。

(8)相关人员每周上报物资使用计划<sup>[14]</sup>,急需物资保证白天 1 h、夜间 2 h 送达现场。

**2.8 施工过程中遇到的难题及解决措施**

(1)深孔内管到位监测系统。据统计,小口径钻探内管到位率在 90% 以上<sup>[15]</sup>。科钻项目钻至 2200 m 以深后,内管总成到位开始监测不到声音,为保险,常用打捞器送内管,到位后再用脱卡器脱开,提起打捞器。此操作每回次浪费时间 1 h 以上。采用增加内管配重的方式进行监测,同时在送内管时使用更加灵敏的泵压表监测泵压,结合时间,来确定内管是否到位,起到了很好的效果。

(2)钻头制造技术革新。本孔主要岩石为绢英岩化花岗岩、二长花岗岩。岩石压入硬度  $H_y$  为 4000~6000 MPa,摆球回弹次数  $H_n$  为 65~75 次。通过上述两种力学指标,用线性回归方程来确定岩石的可钻性  $K_d$  的值。

$$K_d = 3.198 + 8.854 \times 10^{-4} H_y + 2.578 \times 10^{-2} H_n \quad (2)$$

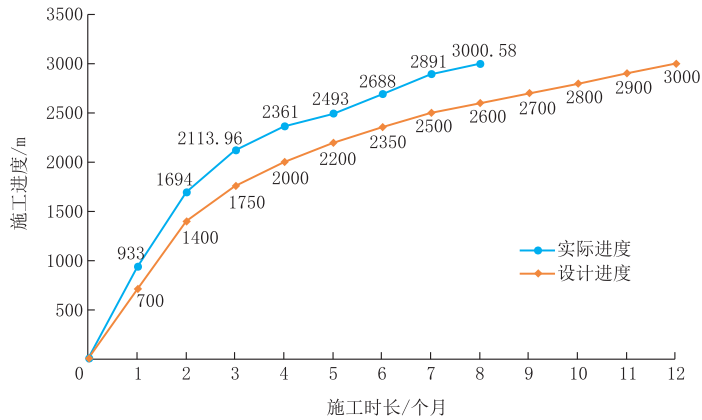
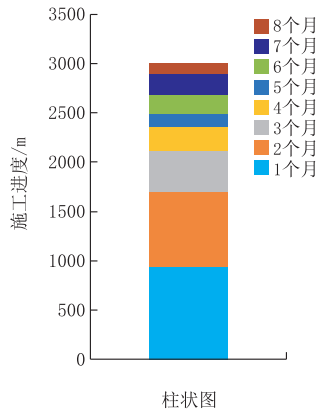


图 5 3000 m 科钻施工进度图

Fig.5 3000m drilling progress chart

表 4 水旺庄科钻项目总体施工进度

Table 4 Overall drilling schedule of the Shuiwangzhuang drilling project

机台	孔号	倾角/(°)	开孔日期	终孔日期	施工天数/d	平均效率/(m·d <sup>-1</sup> )	终孔孔深/m
611	ZK3401	90	2018-08-19	2019-04-11	232	12.93	3000.58

取中间值  $H_y = 5000$  MPa;  $H_n = 70$  次代入式 (2), 计算得出  $K_d = 9.43$ , 即岩石的可钻性等级为 9.4 级, 据《地质岩心钻探规程》(DZ/T 0227—2010) 岩石可钻性分级表分类, 钻进时效 0.80~1.20 m/h。深孔钻探钻头使用寿命延长不仅增快施工进度, 也降低事故隐患<sup>[16]</sup>。山东六院科研团队针对胶东花岗岩“硬、脆”的特点, 在原经典配方上进一步优化, 特制了一批钻头, 起到了很好的效果。使用情况见表 3。

表 3 3000 m 科钻钻头使用情况

Table 3 Drill bit consumption for 3000m drilling

钻孔口径/mm	钻头数量/只	总进尺/m	平均进尺/m	最高进尺/m
122	16	980	61.25	162
98	19	1134	59.75	146
77	17	886	52.12	77

**2.9 关键链法取得的成果**

项目团队依靠科学的进度管理方法, 通过全体项目成员的共同努力, 顺利完成了施工任务, 极大地提高了生产效率, 同时也积累了深部钻孔施工经验, 达到了预期的科研目的及经济效益。施工进度如图 5、表 4 所示。

**3 结语**

通过该项目的顺利实施, 总结出了小口径深孔

钻探施工管理方面的关键点:

(1) 项目经理要能运用专业的管理学知识, 项目团队要有良好的执行力。项目管理人员应对施工过

程中的每一个环节了熟于心,且有相应的应急预案,做好施工设计。

(2)牢记“预防大于治理”的理念,定期巡检制度及例会制度可以集思广益,发现并解决问题。

(3)深孔施工设备、管材一定要质量可靠,杜绝此类隐患。推行设备 TPM(Total Productive Maintenance)管理体系能有很好的效果。

(4)深孔施工提高效率关键是减少辅助时间,关键链法通过缓冲区的设置很好地控制了辅助时间。

### 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 耿印,周恩波,于保国,等.承德大乌苏沟矿区大规模深孔钻探生产管理与施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(3):80-83.  
GENG Yin, ZHOU Enbo, YU Baoguo, et al. Large scale deep drilling production management and construction technology in a mining area of Chengde[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(3):80-83.
- [3] 罗冠平.绳索取心工艺在盐矿深部钻探中的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(6):8-13.  
LUO Guanping. Application research on wire-line core drilling technology for deep drilling in salt mine[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(6):8-13.
- [4] 田国亮.化学凝胶堵漏剂在胶西北红布矿区的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):56-60.  
TIAN Guoliang. Application of chemical gel plugging agent in the northwest Jiaodong Hongbu mining area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(1):56-60.
- [5] 曾石友,杨宽才,田敏,等.地质钻探施工管理信息系统研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(4):83-87.  
ZENG Shiyou, YANG Kuancai, TIAN Min, et al. Study on construction management informations system of geological drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(4):83-87.
- [6] 刘治,李宁,刘长江.谈钻探项目施工管理[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(2):82-84.  
LIU Zhi, LI Ning, LIU Changjiang. Discussion on drilling project construction management[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(2):82-84.
- [7] 方啸虎.我国深孔钻探装备现状与发展[J].矿业装备,2013(5):68-71.  
FANG Xiaohu. Present situation and development of deep hole drilling equipment in China[J]. Mining Equipment, 2013(5):68-71.
- [8] 何宗常,宋海燕,张士勇,等.XY-8型钻机的研制与使用情况[J].地质装备,2012,13(3):11-13.  
HE Zongchang, SONG Haiyan, ZHANG Shiyong, et al. Development and application of XY-8 drill[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2012,13(3):11-13.
- [9] 田国亮.谈探矿工程项目标准化管理[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(11):88-92.  
TIAN Guoliang. Standardized management of prospecting projects[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(11):88-92.
- [10] 张正,朱恒银.深部钻探关键设备选择原则及配置优化[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(9):17-20.  
ZHANG Zheng, ZHU Hengyin. Selection principles and configuration optimization of the key equipment in deep drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(9):17-20.
- [11] 朱芝同,伍晓龙,董向宇,等.松辽盆地页岩油勘探大口径取心技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):45-50.  
ZHU Zhitong, WU Xiaolong, DONG Xiangyu, et al. Large diameter coring technology for shale oil exploration in Songliao Basin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(1):45-50.
- [12] 王强,朱恒银,杨凯华.深部钻探金刚石钻头设计思路[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(5):84-87.  
WANG Qiang, ZHU Hengyin, YANG Kaihua. Design idea of diamond bit in deep hole drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(5):84-87.
- [13] 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.
- [14] 秦如雷,段隆臣.地质钻探中孔内复杂情况的应对措施[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(10):6-9.  
QIN Rulei, DUAN Longchen. Discussion of the solutions to the borehole accident in geological drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(10):6-9.
- [15] 汤士博,熊伟,彭万利,等.加强钻探工程管理工作的措施和建议[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(8):68-70,79.  
TANG Shibo, XIONG Wei, PENG Wanli, et al. Measures and suggestions for strengthening the management of drilling project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(8):68-70,79.
- [16] 张金昌.深部找矿关键钻探技术问题与对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(11):1-6.  
ZHANG Jinchang. Challenges and countermeasures of key drilling techniques for the deep prospecting[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(11):1-6.

致谢:该科钻项目在施工过程中,得到山东地矿局、中国地质调查局勘探技术研究所、中国地质大学(北京)、延安朝政泥浆工程公司、烟台众杰岩土工程公司的大力支持,在此一并致谢!

(编辑 韩丽丽)