

大直径双护盾硬岩掘进机在厄瓜多尔 CCS 水电站 输水隧洞工程中的应用

张国, 陈勇

(中国水利水电第十工程局有限公司, 四川 成都 610072)

摘要:根据厄瓜多尔 CCS 水电站结构布置、工期要求等特点, 经过前期充分对现场地质情况的掌握与经验判断, 加之前期初步方案研究与基本论证而采用了正在施工的双护盾 TBM, 该 TBM 在实际施工中的效果证实了其能确保输水隧洞的施工安全和工期要求。对该工程前期方案论证、双护盾 TBM 实际应用效果进行了分析总结, 可供同类工程借鉴。

关键词:双护盾硬岩掘进机; 应用与总结; CCS 水电站; 厄瓜多尔

中图分类号: TV7; TV554; TV554+.2; TV52

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2014)04-0001-06

1 工程概述

Coca Codo Sinclair 水电站(简称 CCS)项目位于南美洲厄瓜多尔共和国 Napo 和 Sucumbios 省内, 总装机容量为 1 500 MW。主要建筑物包括首部枢纽、输水隧洞、调蓄水库、压力管道、地下厂房与发电系统等。

CCS 项目输水隧洞总长度 24.8 km, 纵坡为 0.173%, 为无压明流洞, 设计引用流量 222 m³/s。采用全衬砌结构形式。在钻爆开挖隧洞区段内, 开挖直径为 9.7 m, 混凝土衬砌厚度为 0.5 m; 在 TBM 掘进机施工的洞段中, 开挖洞径为 9.1 m; 混凝土管片衬砌采用左右环 6+1 形式(又称万能管片), 厚度为 0.3 m。输水隧洞以 2#支洞为界, 采用 2 台 TBM 施工, 1 台由 2#支洞向上游掘进至 1#支洞出洞, 另外 1 台由输水隧洞出口工作面进入(调节水库库区内)至增设的 2#-B 支洞出洞。

2 隧洞沿线工程地质条件

输水隧洞位于雷本塔尔多火山东南部, 地形起伏较大, 地势总体呈西高东低, 最高处为北部的 REVENTADOR 火山, 海拔 3 500 m 左右。隧洞沿线山体平缓, 无大的地质构造发育, 地表植被茂盛, 多处发现溪流。河道左岸已开挖的进场道路揭露的边坡岩体为页岩, 呈水平状, 为隔水层。在河道两边揭露的基岩呈水平状。河道两侧覆盖物均为火山灰坡积物, 坡面平缓, 不利于隧洞开挖。

输水隧洞穿过的地层基本为侏罗纪~白垩纪迷萨华林(J-km)安山岩体, 进口段 600~700 m

为花岗岩侵入体, 出口段约 4 000 m 为白垩纪下统浩林地层(K1h)砂页岩。根据对厂房和取水口已开挖的探洞及钻孔取芯资料进行分析得知, 迷萨华林地层安山岩岩体完整, 具有良好的工程地质特征, 砂岩和页岩呈水平状。

根据设计提供的资料得知, II 类围岩约占隧洞总长的 60%, 主要为隧洞中部迷萨华林地层的安山岩体; III 类围岩约占隧洞总长的 20%, 岩体以层状结构为主, 质量中等, 包括进口段花岗岩侵入岩和浩林地层的砂岩、页岩; IV 类围岩约占隧洞总长的 20%, 分布不连续, 主要为断层及其影响带与岩层接触的部位。输水隧洞岩性分布情况为:

(1) 桩号 0+000~0+600: 隧洞埋深 0~260 m, 岩性为花岗岩, 为 II 类围岩。

(2) 桩号 0+600~3+000: 隧洞埋深 260~560 m, 围岩岩性为侏罗系-白垩系迷萨华林地层(J-km), 以火山岩构造为主, 表现为安山岩、粗面岩和玄武岩等。能见厚度为 200 m, 估测厚度大于 650 m。该段推测发育有断层 8 条, 断层间距 500~1 000 m, 围岩为 II、III 类岩体, 断层带为 IV、V 类围岩。

(3) 桩号 3+000~11+500: 隧洞埋深 500~560 m, 围岩岩性为侏罗系-白垩系迷萨华林地层(J-km), 山顶多有白垩系奥林地层(Kh)砂岩和那波地层(Kn)石灰岩及泥灰岩分布。该段分布有 9 条断层。

(4) 桩号 11+500~21+000: 隧洞埋深 200~500 m, 围岩岩性为侏罗系-白垩系迷萨华林地层

收稿日期: 2014-08-20

(J-km),山顶分布白垩系奥林地层(Kh)砂岩和那波地层(Kn)石灰岩及泥灰岩。该段发育有 5 条断层。

(5)桩号 21+000~24+779:隧洞埋深 50~200 m,围岩岩性为白垩系奥林地层(Kh)砂岩,山顶有那波地层(Kn)石灰岩及泥灰岩分布。为Ⅲ、Ⅳ类岩体。该段发育有 5 条断层。

3 输水隧洞施工方案初步研究及论证

通过现场实地航空考察及陆地徒步勘察后,对世界上现有的隧洞施工技术方法进行了经济、技术及工期的比较论证与研究。

3.1 钻爆法施工

根据现场地形勘察,有条件且适宜钻爆作业的位置只有现有的 2#施工支洞位置,根据初期设计资料得知,2#支洞所在的位置至主洞长度为 2 003 m。根据实地路线勘察得知,仅在 5.8 km 处有条件布置支洞,其长度最短亦大于 2 km,且为下坡洞,坡度约在 1.5%左右;其它地方不具备条件或支洞更长,特别是因火山灰堆积而导致其水平长度无法预测。

据此条件及长度计算,上游段 10 km 洞段的控制工期需 69~72 个月,无法满足总工期要求。若再考虑增加施工支洞,其支洞长度也将超过 2 km,最终将导致增加的两个施工支洞累计长度超过 4 km,在经济上不可取(备注:在工期计算中未考虑地下水、超长隧洞通风散烟等不良因素的影响。另外,也未考虑当地政府对火工产品和爆破作业专控等因素的不利影响)。

根据地形地貌资料及实地考察情况进行分析得知,从 2#施工支洞至出口段基本不具备布置施工支洞的条件,而该段洞长达 14 km,若采用钻爆法施工,单个工作面的控制长度达 7 km,且为超长隧洞施工。按基准进度 120 m/月考虑,主洞开挖(单个工作面 7km)时间将超过 58 个月,混凝土衬砌 35 个月,从而导致工期无法保障且施工安全及后期通风散烟问题不易解决。

因此,该工期无法满足合同总工期的要求。另外,由于进场施工道路在河道左岸,而输水隧洞布置在右岸,故每增加一条支洞必须修建桥梁、施工道路等工程;同时,考虑到该地区为厄瓜多尔的自然保护区,沿山边开挖施工道路和洞脸必然会造成环境破坏,很难得到当地政府的许可。因此

在现场考察期间,业主非常反对增加施工支洞而破坏环境的施工方案。

结论:若采用钻爆法施工,无论从工期上、经济上,还是政治上都是不可取的。

3.2 两台开敞式 TBM 施工

考虑了以下施工方式:采用 TBM1 从 2#施工支洞进入,1#施工支洞钻出。TBM2 从隧洞出口进入(调节水库库区),新增 2#-B 施工支洞钻出。2#施工支洞处的明槽开挖采用常规开挖施工,火山灰坡积物洞段采用管棚法施工,上游和主洞连接的岩石洞段均采用 TBM 施工,下游和主洞连接的岩石洞段均采用钻爆法施工。根据现场勘探资料得知,隧洞沿线共发育有 27 条断层,其中 2#支洞上游段发育 15 条断层,下游段发育 12 条断层。由于开敞式 TBM 通过断层带需要预先进行处理,按每个断层平均需要 10 d 时间通过进行的计算情况见表 1。

表 1 2 台开敞式 TBM 施工进度分析表

2#施工支洞上游段		下游段 14.8 km 的施工工期	
TBM 设备采购订货期/月	2.5	TBM 设备采购订货期/月	2.5
TBM 制造与运输/月	12	TBM 制造与运输/月	12
TBM 组装/月	2	TBM 组装/月	2
TBM 开挖(450 m/月)/月	23	TBM 开挖(450 m/月)/月	33
通过断层带/月	5	通过断层带/月	5
洞内设施拆除、清理和支洞封堵/月	3	洞内设施拆除、清理和支洞封堵/月	4
洞内二次支护(单个工作控制长度 5 km, 200 m/月)/月	25	洞内二次支护(单个工作控制长度 7 km, 200 m/月)/月	35
总工期:72.5 个月		总工期:93.5 个月	

结论:采用两台开敞式 TBM 施工在工期上无法满足合同要求。同时,考虑到断层带的影响,如果因发生不良地质段或围岩塌落而导致支撑靴无法工作以及混凝土衬砌的时间,不推荐采用开敞式 TBM。

另外,由于开敞式 TBM 仅有一套支撑系统,当遇到围岩坍塌或软弱地层时支撑系统无法工作,必须通过常规方法进行处理,现浇混凝土为支撑掌提供推进力。为此,将要花费的时间难以估计,而且喷锚支护工作在遇到不稳定围岩时必须停机进行加强支护,所要花费的时间亦难以估计。因此,采用开敞式 TBM 存在很多不确定性因素,很难事先预计施工工期。

3.3 两台双护盾 TBM 施工

双护盾 TBM 采用辅助推进缸支撑在已衬砌的管片环上,可顺利地通过中小断层。对于大断层且

不稳定的围岩,可采用超前预固结或灌注聚氨脂泡沫通过。衬砌采用混凝土预制管片加豆砾石回填灌浆和止水条,可实现开挖与支护同步施工。

3.3.1 双护盾掘进机具有的优点

(1)为了使TBM能顺利通过软弱地层、破碎带等不良地质洞段;

(2)为了实现开挖与支护同步进行,充分发挥TBM的掘进优势。

3.3.2 双护盾TBM与开敞式TBM的根本区别

(1)增加了一套辅助推进系统;

(2)采用预制管片支护,实现了开挖与支护同步进行;

(3)推进缸沿护盾周边均布,有利于TBM的方向控制。

3.3.3 工期分析见表2。

表2 2台双护盾TBM工期分析表

2#施工支洞上游段		下游段14.8 km的施工工期	
TBM设备采购订货期/月	2.5	TBM设备采购订货期/月	2.5
TBM制造与运输/月	12	TBM制造与运输/月	12
TBM组装/月	2	TBM组装/月	2
TBM开挖(450 m/月)/月	23	TBM开挖(450 m/月)/月	33
通过断层带/月	2	通过断层带/月	2
洞内设施拆除、清理和支洞封堵/月	2	洞内设施拆除、清理和支洞封堵/月	2
总工期:47.5个月		总工期:53.5个月	

结论:采用两台双护盾TBM,实现了开挖与支护同步施工,能够顺利通过软弱围岩及一般断层带,控制工期为53.5个月,能够满足合同工期要求。故最终决定采用两台德国海瑞克双护盾TBM加混凝土预制管片衬砌的施工方案。

4 S-672型双护盾TBM的主要技术特性、参数

4.1 主要选型因素及技术特性

由于本工程地质条件为多断层、较大的地下水、部分洞段岩石单轴抗压强度高,因此,TBM选型主要考虑了以下几个因素;

(1)刀盘设计:由于本工程岩石偏硬且以安山岩为主,岩石最大单轴抗压强度为250 MPa;需要适合硬岩的刀盘和刀具。最终采用的19in(1in=2.54 cm)刀具可承受较大的推力。刀具的布置以及刀盘主要考虑抗磨特别设计,以实现较高的掘进速度和使用寿命;

(2)在保证掘进行程的前提下,整机的长度应尽量短;

(3)施工地段发育有不少断层等不良地质现象段,在TBM设计时应考虑以下要求:

①刀盘采用扁形设计,尽量减少其外露宽度;

②前护盾+支撑护盾+后护盾的外形按锥形设计,头大身小;

③在前护盾设计周边超前注浆预留孔,以便在刀盘前进行化学固结工作;

④TBM前护盾应有较大的回缩能力,并应具有足够的脱困能力;

(4)由于本工程地下水丰富,故从设备设计上需采取以下措施:

①主机设计需考虑防水,一些主要部件需有较高的防护等级;

②刀盘设计需考虑渣水分离,尽量减少皮带机带水;

③在伸缩护盾及尾盾专门设计有排水设施,从而将伸缩护盾及尾盾部位的水直接排到后配套之后,以减少伸缩护盾中间的石粉和泥砂淤积;

④在尾盾部位专门设计有清渣设备,避免此部位的积渣影响管片的安装。

4.2 主要技术参数

4.2.1 整机

①主机长:12.41 m;②整机长:172 m;③主机及后配套总重:1 986 t;④最小转弯半径:400 m。

4.2.2 刀盘

①开挖直径:9.11 m;②刀具数量:61把(单刀设计荷载315 kN);③滚刀直径:483 mm(19in);④主轴承形式:3轴滚柱轴承;⑤刀盘功率:12×350=4 200(kW);⑥脱困扭矩:21 736 kN·m(约为最大扭矩的1.7倍);⑦刀盘转速:0~5.95 r/min。

4.2.3 护盾

①前护盾外径、长度:9.04 m、2.07 m;②伸缩盾外径、长度:8.94 m、2.1 m;③支撑护盾外径、长度:8.94 m、4.76 m;④尾盾外径、长度:8.94 m、2.69 m。

4.2.4 掘进系统

①主推进最大推力:61 575 kN @ 350 Pa;②主推进油缸数量:14根;③主推进油缸行程:1.9 m;④辅助推进缸最大推力:104 411 kN @ 500 Pa;⑤辅助油缸数量:23根;⑥辅助油缸行程:2.4 m。

4.2.5 电力系统

①初级电压:20 kV (+/- 10%) 50 Hz (+/- 10%);②次级电压:690/380/220 V;③变压器总容量:2×2 700 kVA (690 V) + 1×3 500 kVA (380/220 V)。

4.2.6 出渣系统

隧洞连续皮带机系统,运行速度为 0 ~ 2.5 m/s。

4.2.7 后配套台车

9 台台车 + 1 台桥架,允许列车通过尺寸为(长×宽×高)68 m×6.2 m×4 m。

4.2.8 全机总功率

全机总功率:7 661.5 kW。

4.2.9 主要性能及参数

(1)管片安装机在熟练的操作人员操作下安装一环的时间不大于 20 min。

(2)掘进机换步时间应小于 5 min。

(3)最小转弯半径不小于 500 m。

(4)刀盘、主轴承在偏心荷载大扭矩工况下纯工作时间应保证不小于 15 000 h。

(5)大齿圈传动主密封、主驱动、变频器、减速器、液压马达、阀组、油泵、油缸、PLC、变压器、电器控制柜等主要部件以及后配套上的主要设备纯工作时间应保证不小于 12 000 h。

(6)刀盘具有扩挖措施,扩挖半径不小于 100 mm。

5 双护盾 TBM 施工方案

5.1 施工设施布置

TBM 施工的总体布置主要包括 TBM 工业广场、管片预制厂、12 000 kW 柴油发电厂、给排水系统等设施的布置。

TBM 工业广场:由轨道运输系统、仓库(包括备品备件、材料)、管片堆放场、骨料堆放场、水泥库房、砂浆拌和站、道轨、水管堆放场、刀具修理车间、机修车间、风机房、现场办公室等组成。

管片预制厂:主要由管片生产线、钢筋加工生产线、蒸养生产线、混凝土拌和站、管片堆放场、现场值班室等组成。

施工供电:采用 9 台 C2250D5 柴油发电机,持续总功率 12 150 kW。

给水排水:修建 500 m³ 高位水位供水设施,排水采用水泵抽排与自流排水。

通风:采用压入式通风,选用 3×160 kW 轴

流风机,风筒直径 2.4 m。

隧洞出渣:采用连续皮带机及洞内增设皮带加力站运输至洞外的方式,自卸车转运至渣场。

施工测量:采用德国 VMT 激光制导系统,其集数据采集、处理、存储、显示一体化。

TBM 施工材料运输:采用小火车列车编组、有轨运输加固定错车平台。每列编组列车可满足两个掘进循环材料运输要求。整组列车由 1 列砂浆车、2 列管片车、1 列豆砾石罐车、1 列管路与载人车、1 列水泥车和 1 个内燃机车牵引车组成,总长度为 86 m。

5.2 TBM 的主要部位

TBM 主要由刀盘、刀盘驱动、护盾(前护盾、伸缩护盾、支撑护盾、尾护)、管片拼装机、电气系统、液压系统、数据采集系统、除尘通风系统、后配套台车系统等组成。

5.3 TBM 掘进施工

双护盾掘进机有双护盾和单护盾两种掘进模式。在掘进施工过程中,需根据地质图、石渣、前序掘进参数、超前地质探测结果等对掌子面围岩状态作出准确判断,据此选择相应的掘进模式及掘进参数。

双护盾模式应用于围岩条件较好的情况下掘进。依靠支撑盾上的支撑靴支撑在洞壁上,在掘进的同时可完成在尾盾拼装管片、豆砾石回填等作业,实现掘进与管片安装同步作业。

单护盾模式应用于断层、围岩破碎带及软岩条件下的掘进。撑靴全部收回(不再撑紧洞壁),主推进油缸也收回,前盾和支撑盾作为一个整体动作,掘进过程中辅助推进油缸顶紧已经拼装好的管片提供推进力,TBM 掘进时无法拼装管片,只能在掘进行程完成之后停止掘进,待管片拼装及换步调向等工序完成后方可继续掘进。

TBM 施工采取三班制,两班掘进,一班维护,掘进工班每班工作 8 h,维护工班每班工作 4 h,维护工作安排在每天上午。

5.4 管片预制

管片衬砌结构由 YREC(黄河设计公司)设计,管片形式为 6+1 四边形,其中第七块管片为楔块(又称锁定)管片,分左右环。

管片厚度统一为 0.3 m,宽度为 1.8 m,每环管片(6+1=7 片)混凝土量为 14.286 7 m³,结构

配筋按照Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类围岩分为A、B、C、D型,其中A型管片含筋量为 107 kg/m^3 、B型管片含筋量为 116 kg/m^3 、C型管片含筋量为 128 kg/m^3 、D型管片含筋量为 244 kg/m^3 。管片混凝土强度:A、B型采用C40 MPa,C、D型采用C50 MPa(为圆柱体强度),由于Ⅱ类围岩段权重较小,结合实际生产状况并优化生产程序,提高管片生产效率,故取消A型管片,采用B型管片代替,又由法国克茵公司重新计算校核管片结构配筋率后将B型管片的含筋率调整至 90 kg/m^3 ,降低了22.4%的钢筋用量。

管片环向采用33根M24高强度螺栓连接,管片接缝采用一条复合式橡胶止水条(每环长度为31 m),管片表面接缝设计成燕尾槽,每片管片设有两个安装孔和一个注浆孔,供搬运、安装、充填豆砾石和灌浆之用。

管片预制生产由距离21 km外的预制管片厂生产,采用生产流水线共计6套(6套 \times 7片=42片/套)模具,最高单日产量为126片(18环/32.4 m),但因各种故障及温度等原因,实际生产率一般为每天90~95片。故管片生产需在考虑满足TBM掘进强度时至少提前3~5个月生产。

管片生产采取三班制,钢筋线、浇筑线、运行线需配相应人员作业。管片模具维护的时间一般与混凝土拌和站维护同时进行。

5.5 管片的衬砌与安装

管片由拖车运至工业广场的管片堆放场,由30 t门机吊装至列车编组的管片列车。洞内采用行走于桁架结构上的专用管片运输机将管片从管片车上卸入喂片机上,喂片机上能存2环共14块管片。管片衬砌在TBM护盾的尾部由管片拼装机分片进行安装。

5.6 豆砾石的回填与灌浆

豆砾石储存于后配套第5节台车,每环管片安装完成后立即进行,由豆砾石泵接管泵送。

水泥灌浆在后配套第7节台车,现场搅拌,然后用注浆泵将浆液注入到回填好的豆砾石中。

6 CCS项目双护盾TBM的实际掘进记录与分析

- (1)掘进循环最高速度:20 min/环。
- (2)单环管片安装速度:12 min。
- (3)单日最高进尺:45 m。
- (4)周最高进尺:252 m。
- (5)月最高进尺:1 000.41 m。

2013年TBM2掘进进尺柱状图见图1。

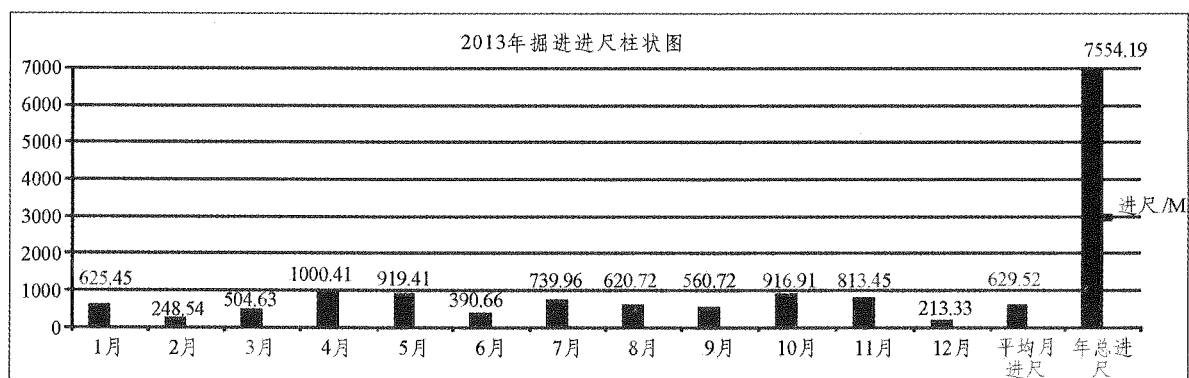


图1 2013年TBM2掘进进尺柱状图

通过对以上数据进行分析可知,TBM掘进与设备故障、不良地质段影响以及组织协调直接相关。2013年2月至3月上旬,突遇超标涌水和涌砂,每天清渣时间约占2/3,严重影响掘进效率。2013年12月9日突遇断层破碎带,塌方量巨大,无法实现皮带运渣,被迫停机处理。当遇到较大断层破碎带时,对任何一台TBM来说都是一个沉重的打击。若TBM设备故障少,围岩状况良好,其施工效率极为明显。如2013年4月,该月掘进

了1 000.41 m,平均每日进尺32.3 m,创造了同等直径TBM世界第三的掘进纪录。

7 TBM在CCS项目遇到的问题及采取的施工措施

7.1 软弱挤压围岩

在掘进至21.5 km时遇到软弱挤压围岩段,伸缩盾及尾盾有被挤压现象,掘进推力逐渐增大。处理措施:认真观察、分析挤压部位,通过切换高压模式,更改PLC程序,在推力达到48 500 kN时

才得以通过。

改进措施:地质工程师每班至少进入刀盘 2 次,认真观察围岩状态;操作手认真总结并对比掘进参数及渣块渣料情况。

7.2 涌水和流砂

2013 年 2 月 3 日,当掘进至桩号 22+992 时,突遇较大涌水和流砂,涌水量达到 120 L/s。该段地质条件为 Hollin 地层和 Missahualli 地层的过渡段,上部为 Hollin 地层的石英砂岩,属强透水层,下部为 Missahualli 地层的火成岩,为弱透水层。由于 TBM 下部为弱透水层,Hollin 地层中的大量涌水通过 TBM 刀盘和护盾与围岩之间的间隙涌入 TBM 机身。另外,所遇到的 Hollin 地层相对稳定,岩性为粗粒石英砂岩,经 TBM 滚刀挤压旋转后变为松散的石英砂,伴随大量涌水通过刀盘旋转和 TBM 刀盘铲斗进入刀盘集料斗,部分流入伸缩护盾和尾护盾并淤积在伸缩护盾和尾护盾处。此外,由于大量的水和砂从 TBM 刀盘集料斗进入 1#皮带和 2#皮带,造成皮带翻渣,直接流到管片喂片机上,导致喂片机经常无法正常工作。

处理措施:(1)为确保 TBM 正常掘进,加大了排水和清渣力度,共计配置了 740 m³/h 水泵抽排。(2)在每天进行的刀盘维修前,事先排空刀盘中的积水和淤砂。(3)伸缩盾、尾护盾及管片喂片机部位是重点,除确保水泵正常运行外,按 3 h 清渣时间定时换人进行清理,确保清渣效率。(4)后配套尾部为确保火车通行,安排固定人员依然按照 3 h 清渣装袋实施。

改进措施:(1)配置效率高、轻便的抽砂泵,配置专用的耐磨软管,以提高抽水及排砂的速度;(2)增大 TBM 机上的清渣泵排量;(3)将 TBM 2#皮带由原来的平板皮带改为挡边皮带,减小了 2#皮带翻渣流砂直接流入管片喂片机和尾盾部位的程度,进而减小了清渣量。

7.3 断层破碎带

2013 年 12 月 9 日,掘进至桩号 16+127.41 时采用单护盾掘进模式,刀盘前方突遇塌方,大量渣料瞬间超过 3#皮带的运渣能力,导致皮带供电系统故障不能运行,大量岩渣外溢,掉落于回程皮带和 TBM 后配套内,小火车轨道被埋不能运输,TBM 被迫停止掘进。后通过清渣及各种掘进参数设置、刀盘实施化学灌浆和水泥灌浆,因掘进出

渣量大,塌方严重,皮带负荷大而导致停机。该段围岩为安山岩,墨绿色~灰黑色,新鲜~微风化,岩体破碎,呈碎块状,略有渗水。

处理措施:从尾盾倒数第三环管片位置先行采用左右各开挖一条旁洞进入断层破碎带,之后根据实际揭露的围岩地质情况确定揭顶开挖位置,采用上导洞揭顶开挖及管棚法处理断层破碎带,直到揭顶开挖至满足 TBM 掘进条件时停止开挖。支护采用 I20 工字钢,系统锚杆加锁脚锚杆,挂网及全封闭包裹式喷混凝土,钢支撑拱脚浇筑钢筋混凝土梁,开挖及支护完成,实施顶拱固结灌浆和钢支撑拱脚加强锁脚及固结灌浆。整个断层破碎带长 50 m,处理周期为 6 个月。

经验及改进措施与思路:(1)改进刀盘内能够充分发挥钻孔设备的空间和位置,在刀盘面多增加孔位,满足覆盖实施化灌的区域;(2)调整并改进 TBM 自带超前液压钻的位置,使其尽量能够靠近刀盘;(3)备足一定数量的化学灌浆材料,以便快速之用;(4)在揭顶开挖空间内,采用机械出渣设备,效率将直线提高;同时,在 TBM 机型上也要考虑该设备的预留空间尺寸;(5)在实施水泥固结灌浆时需慎重,注意观察护盾与围岩之间的变化,若有浆液通过,需及时停止灌浆,以免水泥浆将护盾和围岩裹住;(6)加强钢支撑拱脚部位的安全,在启动 TBM 掘进后,两侧拱脚不能发生较大的塌方,同时,在掘进后的两侧拱脚部位及时回填豆砾石包袋或豆砾石加水泥混装袋;(7)在 TBM 通过揭顶开挖段后,采用最大配备及最快速度回填顶部豆砾石。

7.4 管片错台

在遇到软弱围岩、掘进姿态控制不佳、豆砾石及底部砂浆未及时跟进回填、管片安装位置与尾盾空隙过小等原因时,在 TBM 尾盾伸出或斜向轮压过管片时易造成管片形成错台,其关键在于形成错台后还需进行凿毛修补,即费工费时,又造成外观质量下降及成本增大。

经验及改进措施:(1)当遇到不良地质洞段时,需精准控制掘进姿态,及时调整掘进速度及油缸行程,及时切换掘进模式,采用单护盾掘进。(2)管片安装时,仔细测量管片与尾盾之间的间隙,根据尾盾间隙适当调整管片安装位置。(3)

(下转第 11 页)

弯段长度仅为 CCS 项目输水隧洞长度的 5%，故可认为隧洞整体均为错缝拼装，有利于结构稳定。

4.3 管片的连接方式

目前常用的螺栓连接形式有直螺栓连接、弯螺栓连接、斜螺栓连接、无螺栓连接（砌块）以及销钉连接等。

无螺栓连接（砌块）和销钉连接的接头间没有连接螺栓，也不能施加预紧力，衬砌的整体刚度小，隧洞的抗震和防水性能较差，不适应 CCS 项目多变的隧洞地质情况。在各类螺栓连接方式中，直螺栓构造较简单，施工方便，只需在管片设计和预制时对应埋设和设置螺栓孔位即可，因此而适合 CCS 项目高强度掘进的需要（图 6）。

5 结 语

CCS 项目输水隧洞管片设计结合国内外设计

与施工经验，先期经过大量的考察论证，所设计选用的管片模式较好地解决了后期施工难度，从而提高了管片预制生产和管片拼装的效率，为大洞径下 TBM 高进尺掘进和管片安装提供了有利保证。同样，在管片选型确定后，跟进的各类结构计算有效地解决了隧洞转弯、适应不同地质情况地层等问题。目前，CCS 项目 TBM 平均月进尺达 650 m，最高月进尺为 1 000.41 m，创造了同洞径掘进速度世界第三的好成绩。

作者简介：

陈 勇(1968-)，男，重庆梁平人，副总经理，高级工程师，学士，从事国示工程项目管理工作；

王 生(1987-)，男，山东潍坊人，助理工程师，学士，从事水利水电工程施工技术工作。

(责任编辑：李燕辉)

（上接第 6 页）

延长管路，增设平台，豆砾石回填跟进尾盾倒数第二环管片回填。（4）根据砂浆运输情况，及时进行一次性灌注砂浆，保证尾盾倒数第二环管片底部均有砂浆。

7.5 掘进速度快而导致回填灌浆跟不上，从而形成二次灌浆

从设计后配套豆砾石回填灌浆的设备配置及实际应用效果看，原后配套水泥灌浆设备配置略显不足，从而造成顶部回填不满或不均匀。另外，由于受掘进速度影响，有些管片来不及回填，TBM 需换步前行，从而形成了二次灌浆。

经验及改进措施：（1）增大后配套水泥灌浆设备配置，采用袋装水泥运输。（2）在满足管片底部砂浆回填的同时，采用泵送砂浆的方式回填顶拱（此法在得到正式批准后应用效果较好）。

8 结论及总结

（1）TBM 施工是一个系统工程。对于 TBM

从设备选型、合同谈判到制造、海运、清关，直至陆运、组装、运行以及后期的配件供应维护等各个环节均要求有较好的组织协调；施工中包括施工资源组织调度、与 TBM 厂家人员的沟通、TBM 各个施工岗位的职责与管理等，均将对 TBM 整个系统工程造成重大影响。

（2）TBM 是集土建、机械、电器、液处于一体的、多专业的团队，每个专业的快速反应与判断对 TBM 高效掘进至关重要。

（3）双护盾 TBM 在适宜的各种复杂的地质条件下确实显示出了其具有的优点，但在遇到大断层时，如何实现刀盘或盾内的固结灌浆仍需要进行认真地总结和改进。

作者简介：

张 国(1978-)，男，湖南洞口人，厄瓜多尔 CCS 项目部总工程师，工程师，从事水利水电工程施工组织与技术管理工作；

陈 勇(1968-)，男，重庆梁平人，副总经理，高级工程师，学士，从事国际工程项目管理工作。

(责任编辑：李燕辉)

国家能源局发布 7 月全社会用电量

8 月 14 日，国家能源局网站发布 7 月份全社会用电量等数据。1 至 7 月，我国累计正式投产水电 1 453 万千瓦，截至 7 月底，我国 6 000 千瓦及以上水电厂发电设备容量达到 25 749 万千瓦。数据显示，7 月份，我国全社会用电量为 5 097 亿千瓦时，同比增长 3%。1 至 7 月份，全国全社会用电量累计 31 374 亿千瓦时，同比增长 4.9%。分产业看，第一产业用电量 557 亿千瓦时，同比下降 2.1%；第二产业用电量 23 094 亿千瓦时，同比增长 4.7%；第三产业用电量 3 754 亿千瓦时，同比增长 6.5%；城乡居民生活用电量 3 968 亿千瓦时，同比增长 5.7%。1 至 7 月，全国发电设备累计平均利用小时为 2 482 小时，同比减少 102 小时。其中，水电设备平均利用小时为 1 853 小时，同比减少 29 小时；火电设备平均利用小时为 2 790 小时，同比减少 55 小时。1 至 7 月，全国电源新增生产能力（正式投产）4 265 万千瓦，其中，水电 1 453 万千瓦，火电 1 875 万千瓦。