

CCS 水电站引水隧洞 TBM 断层带卡机脱困技术

杨继华, 杨风威, 姚 阳, 苗 栋

(黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:厄瓜多尔 CCS 水电站引水隧洞采用大直径双护盾 TBM 施工, 开挖洞径 9.11 m, 在掘进至桩号 K16+127.0 m 时, 由于断层破碎带围岩塌方掩埋及堵塞刀盘造成卡机事故。在分析地震法物探成果和钻孔岩芯的基础上, 确定断层破碎带及影响带宽度约 70 m, 围岩稳定性差, 以 IV 类为主, 局部 V 类。拆除刀盘后方 16.26 m 处管片的上半部分后, 沿洞壁两侧开挖旁洞, 至刀盘后沿引水隧洞轴线进行导洞顶拱扩挖直至通过断层破碎带, 导洞开挖前采用超前锚杆、固结灌浆等超前支护措施, 开挖后采用钢拱架、系统锚杆、挂网喷射混凝土支护措施; 支护完成的导洞防止了 TBM 掘进时的洞顶塌方, TBM 在断层破碎带内掘进时, 每环掘进前均对掌子面前方围岩进行固结灌浆以防掌子面围岩塌方; 采用以上技术措施后, TBM 成功脱困并穿过了断层破碎带。

关键词: CCS 水电站; 引水隧洞; 双护盾隧洞掘进机; 断层破碎带; 卡机; 脱困技术; 厄瓜多尔

中图分类号: TV732; U455.43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2017)05-0089-06

Technology for TBM unblocking in a fault zone at CCS Hydropower Station headrace tunnel// YANG Jihua, YANG Fengwei, YAO Yang, MIAO Dong (*Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China*)

Abstract: The CCS Hydropower Station headrace tunnel in Ecuador was constructed by a large diameter double-shields tunnel-boring machine (TBM) with an excavation diameter 9.11 m. The cutterhead was blocked due to the collapse of the surrounding rock in a fault fracture zone when it reached K16+127.0 m. Based on the results of geophysical prospecting by seismic method along with borehole core analysis, the width of the fault fracture zone and its influencing zone was determined to be about 70 m. The main composition of the surrounding rock was graded as class IV and class V locally, indicating a very poor stability. The upper part of the segment 16.26 m behind the cutterhead was removed to excavate flank tunnels along the two sides of the main tunnel wall. When the flank tunnels reached the cutterhead, the pilot tunnel was enlarged along the headrace tunnel axis as far as it passed through the fault fracture zone. The advanced anchor bolts and consolidation grouting were used for advanced support before the pilot tunnel excavation. Steel arch, system anchor bolts, hanging net and shotcrete were used for system support after the pilot tunnel excavation. With these support methods, top arch collapse of the pilot tunnel could be prevented during TBM tunneling. When TBM tunneling in fracture zones, the consolidation grouting to the surrounding rock ahead of the tunnel face should be performed at every tunnel cycle to prevent rock collapse. With the employment of above technologies, the TBM was back in normal operation and it successfully passed through the fault fracture zone.

Key words: CCS Hydropower Station; headrace tunnel; double-shields TBM; fault fracture zone; TBM blocked; unblocking technology; Ecuador

TBM 隧洞施工具有掘进速度快、成洞质量好、对围岩扰动小、人员和设备安全性高及对环境保护好等技术特点, 已在国内外的水利水电工程隧洞、铁路隧道、公路隧道、城市地铁隧道等领域得到了广泛的应用^[1-4]。

TBM 设备庞大, 对地质条件的适应性远没有钻爆法灵活, 尤其是对不良地质条件适应性差, 在不良地质条件下如果操作不当, 容易发生卡机事故, 如云南昆明上公山引水隧洞^[5-7]、辽宁大伙房输水隧洞^[8]、台湾坪林公路隧道^[9]、印度 Dul Hasti 水电工

程引水隧洞^[10]等, 这些隧洞的卡机脱困处理少则 3~5 个月, 多则数年, 甚至个别隧洞中 TBM 被埋或者严重损坏, 导致 TBM 被拆除、工期延误数年, 造成巨大的经济损失^[6]。

一旦发生卡机 TBM 事故, 采取合适的处理措施与技术使 TBM 尽快脱困就成为一项重要的工作。目前根据卡机原因, 卡机一般可分为卡刀盘、卡护盾及刀盘和护盾同时被卡 3 种类型^[11], 不同类型的卡机事故采取的脱困措施也各不相同, 如固结灌浆、侧壁导坑等。本文就厄瓜多尔 CCS 水电站引水隧洞

大直径双护盾 TBM 卡机事故,在分析卡机原因的基础上,有针对性地提出了脱困处理措施及技术方法,可为类似工程的双护盾 TBM 脱困提供参考。

1 工程概况

1.1 工程背景

厄瓜多尔 CCS 水电站工程^[12-14]位于 Napo 省和 Sucumbios 省境内的 Coca 河中游,为一座引水式电站。电站在首部枢纽建坝拦蓄河水,通过 1 条引水隧洞将库水引至调蓄水库,再由引水发电洞引水至地下厂房,利用调蓄水库与地下厂房之间 530 m 的水头差发电。工程平面布置如图 1 所示,电站总装机容量 1 500 MW。

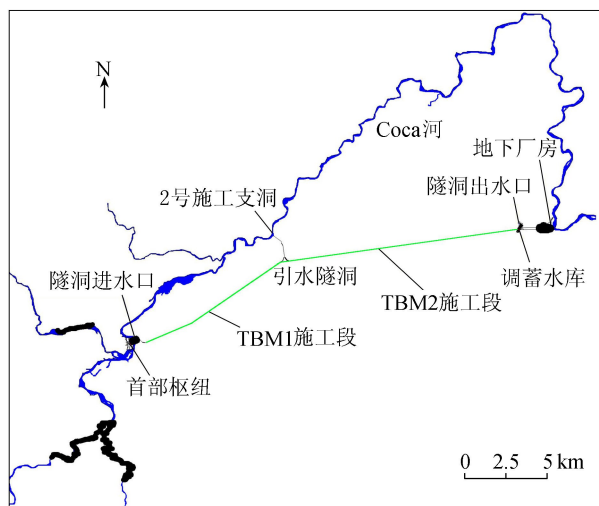


图 1 CCS 水电站工程平面布置示意图

CCS 水电站引水隧洞全长约 24.8 km,采用 2 台双护盾 TBM 和钻爆法联合施工,其中 TBM1 由位于隧洞中部的 2 号施工支洞向隧洞进水口方向掘进,掘进总长度约 10.0 km,TBM2 由隧洞出水口向 2 号施工支洞方向掘进,掘进总长度约 13.8 km。引水隧洞洞身断面为圆形,开挖洞径 9.11 m,为大直径隧洞,设计流量 222 m³/s,进水口洞底高程 1 250.00 m,出水口洞底高程 1 204.50 m,纵坡 0.173%。

1.2 工程设计概况

CCS 水电站引水隧洞为无压明流隧洞,其中 TBM 施工段采用预制钢筋混凝土管片衬砌,衬砌后洞径 8.20 m,管片与洞壁之间采用豆砾石回填灌浆。每环管片由 7 块组成,管片厚度 30 cm,每环管片纵向长度 1.80 m,对应的 TBM 每循环掘进进尺也为 1.80 m。共设计了 3 种型号的管片,即 B、C、D 型,其中 B 型管片适用于 I、II、III 类围岩,C 型管片适用于 IV 类围岩,D 型管片适用于 V 类围岩,在实际施工过程中,根据揭露的围岩条件选用对应的管片。3 种型号的管片外形尺寸完全相同,但管片的配筋

量和混凝土等级逐渐增加。

1.3 工程地质条件

CCS 水电站引水隧洞沿线地形起伏较大,地势总体呈西高东低,最高点海拔 1 998 m,最低点海拔 1 205 m,隧洞埋深一般洞段为 300 ~ 600 m,局部洞段超过 700 m。

隧洞沿线穿过的地层主要为侏罗纪 ~ 白垩纪 Misahualli 地层(JKm)安山岩、凝灰岩,白垩纪下统 Hollin 地层(Kh)砂、页岩,局部分布有花岗岩侵入体(Gd)。隧洞区为一单斜地层,沿线共发育有不同规模的断层 33 条,断层宽度多小于 2 m,少量断层及破碎带宽度大于 10 m,断层产状多陡倾,与洞轴线大角度相交。区内地应力为中至低地应力水平,最大主应力 8 ~ 10 MPa,方向为 315° ~ 340°。区内隧洞地下水类型主要是 Hollin 地层及 Misahualli 地层的基岩裂隙水,补给来源主要是大气降水、地表水及相邻含水层的越流补给,由于工程区多年平均降雨量在 5 000 mm 以上,地表补给充足,初步估计隧洞会出现 0.5 ~ 1.0 m³/s 的集中涌水。

2 卡机事故经过

2013 年 12 月 9 日凌晨,TBM 掘进至桩号 K16+130.0 m ~ K16+127.0 m 洞段时,掌子面围岩破碎、稳定性差,发生了较严重塌方,掘进 1 环进尺(1.80 m)的出渣量相当于正常情况下 2 环的渣量,最终导致出渣量超过皮带机的出渣能力,皮带机被压停,后配套皮带局部倾覆,岩渣散落洞底,掩埋小火车轨道,此时被迫停机清理皮带机上与洞底的岩渣;清理完后启动 TBM 准备正常掘进时发现 TBM 刀盘水泵出现故障,不得不再次停机维修水泵。12 月 10 日夜,水泵修好后启动刀盘时刀盘无法转动。对刀盘检查后发现掌子面塌方体呈散体状,部分块石进入滚刀与刀盘之间的空隙,于是对掌子面前方塌方体及围岩进行化学灌浆固结,于 12 月 12 日晚间再次启动刀盘,但刀盘仍无法转动,启用 TBM 的脱困扭矩(最大扭矩达到了 19 179 kN·m)直至主驱动电机过热报警,刀盘仍无法转动。2013 年 12 月 13 日至 2014 年 1 月 5 日在刀盘前进行了多次化学灌浆处理,2014 年 1 月 5—6 日多次尝试启动 TBM 都未成功。经业主、设计、监理及施工单位四方会商并征求多位 TBM 专家的意见后,认定本次事故为掌子面破碎岩体塌方引起的 TBM 刀盘被卡的卡机事故,由图 2 可以看出,刀盘前方围岩坍塌,散落的碎块石将刀盘掩埋,导致刀盘无法转动。

3 卡机段工程地质条件

根据 TBM 开挖揭露地质情况,在桩号 K16+

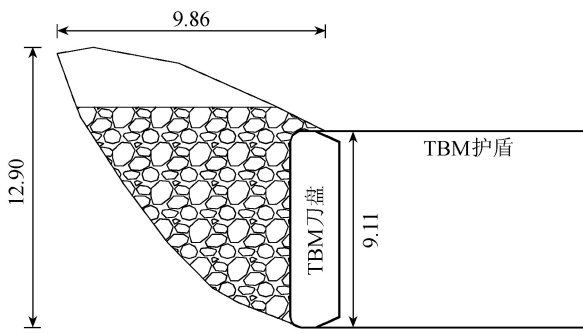


图2 引水隧洞 K16+127.0 m 处 TBM 卡机示意图(单位:m)

130.0 m ~ K16+127.0 m 洞段出露侏罗系 ~ 白垩系 Misahualli 地层,岩性以青灰色、深灰色安山岩为主,岩体破碎,以碎裂结构为主,局部呈散体状,蚀变严重,岩石强度低,围岩稳定性差,岩石微风化 ~ 中等风化,洞壁干燥,基本无地下水。受 TBM 掘进时刀盘扰动的影响,桩号 K16+130.0 m ~ K16+127.0 m 洞段发生掌子面和洞顶塌方,初步估计塌方量为 150 ~ 200 m³,塌方岩体最大粒径 60 ~ 80 cm,塌方体掩埋了刀盘和部分护盾。刀盘前和伸缩护盾处的岩体见图 3 和图 4。

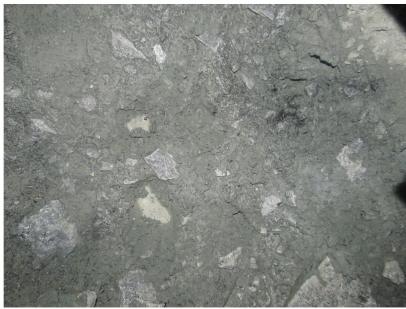


图3 刀盘处散落的岩体



图4 伸缩护盾处围岩

为查明掌子面前方围岩情况,采用 ISIS 地震法物探设备——综合地震成像系统(integrated seismic imaging system)对掌子面前方进行探测,探测数据解译结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,掌子前方约 10 m 范围内岩体反射面扭曲变形、左右不连贯且厚度较大,推测是由隧洞上部岩体松动、塌方引起的;掌子面前方约 60 m 范围内岩体反射面密集、厚

度大,显示结构面密集发育,推测岩体破碎。

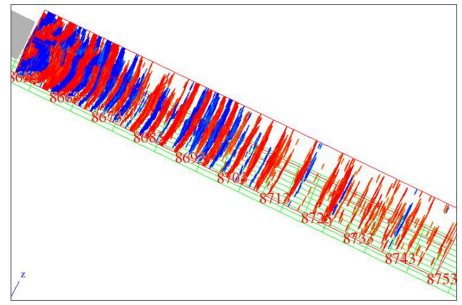


图5 K16+127.0 m 掌子面前方围岩地震法探测成果示意图

为进一步确认掌子面前方围岩地质条件,在掌子面附近洞壁两侧的旁洞内向前方水平钻孔,钻孔方向与洞轴线平行。GA1 钻孔位于右侧旁洞,钻孔深度 61.0 m,对应隧洞桩号 K16+128.7 m ~ K16+67.7 m;GA2 钻孔位于左侧旁洞,钻孔深度 50.2 m,对应隧洞桩号 K16+132.6 m ~ K16+82.4 m。钻孔方式为回转清水钻进绳索取芯,采用“多回次,少进尺”的方法,提高岩芯采取率。对钻进岩芯现场编录,编录内容主要包括岩石的颜色、矿物成分、风化程度、坚硬程度等,并对节理、裂隙发育情况及裂隙面特征、充填胶结情况进行描述统计,计算岩芯采取率、岩石质量指标(RQD)等定量指标,评价岩体质量。钻孔部分岩芯如图 6 所示。



(a) GA1 钻孔 4.0 ~ 8.0 m 岩芯



(b) GA1 钻孔 33.0 ~ 38.0 m 岩芯



(c) GA2 钻孔 8.0 ~ 12.0 m 岩芯



(d) GA2 钻孔 28.0 ~ 32.0 m 岩芯

图6 钻孔部分岩芯

根据钻孔岩芯编录资料,可以看出 2 个钻孔岩芯破碎,岩芯 RQD 值较低,在破碎段一般低于 20%,岩石强度低,同时结合旁洞开挖揭示的地质情况(图 7),判定引水隧洞桩号 K16+131.0 m ~ K16+61.0 m 处发育有一断层。断层破碎带及影响带宽度约 70 m,断层带岩性主要为深灰色安山岩,岩体破碎,呈镶嵌~碎裂~散体结构,多处可见断层泥、糜棱岩及碎裂岩,地下水不发育。断层产状 $10^{\circ} \angle 78^{\circ}$,与引水隧洞轴线小角度相交,对隧洞稳定性不利(图 8)。综合物探、钻孔岩芯及旁洞地质编录资料,认为断层破碎带及影响带按照 RMR 围岩分类标准以 IV 类围岩主,局部夹泥段为 V 类,围岩自稳时间短,自稳能力差,TBM 掘进时,在刀盘的扰动下,洞顶及掌子面极易塌方。



图 7 左旁洞 K16+130.87 m ~ K16+128.67 m 塌方

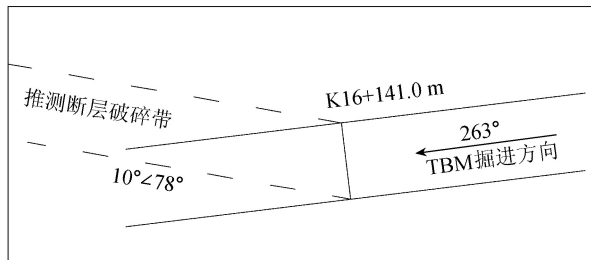


图 8 断层与洞轴线位置关系示意图

4 脱困处理措施

目前对于 TBM 刀盘被埋的卡机脱困处理一般是在护盾上方或侧壁开设 1 条旁洞,绕到刀盘前方,清理塌方体为刀盘解困,但 CCS 水电站引水隧洞洞径大,1 条旁洞的处理能力有限,因此在洞壁两侧分别开挖 1 条旁洞。根据已查明的地质条件,刀盘前方 70 m 范围内为断层破碎带,围岩稳定性差,刀盘解困后利用 TBM 掘进,则围岩塌方导致 TBM 再次被卡的风险极大,因此决定用钻爆法开挖整个断层破碎带,具体措施如下:

a. 采用 I16 工字钢在拟开洞口高程位置(距刀盘后方 16.26 m 处,桩号 K16+141.8 m,第 4793 环管片)搭建 TBM 保护平台,搭建平台的目的是为旁洞

开挖提供工作场地,还可以为 TBM 后配套设备提供保护。平台上满铺 10 cm 厚木板,并用铅丝与平台固定,平台中部预留 1.0 m×1.0 m 溜渣口。平台具体布置见图 9。

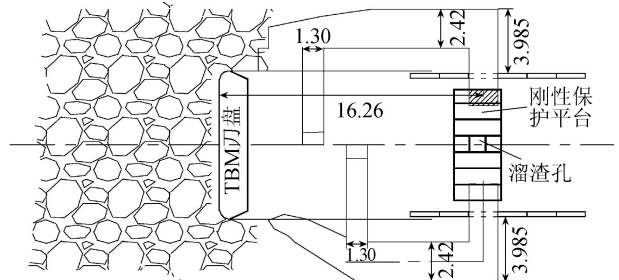


图 9 保护平台及旁洞开口位置(单位:m)

b. 为保证已安装好管片的稳定性,对管片底部注入水泥砂浆,两侧及底拱采用豆砾石回填并灌浆。拆除 4793 环管片隧洞上部 120° 范围内相关管片的上半部分,对未拆除的 4793 环顶部管片和侧壁管片进行锚杆固定。

c. 从已拆除的管片开口处沿与洞轴线相垂直方向开挖旁洞,左右两侧旁洞同时开挖,旁洞为圆拱直边墙型。旁洞宽 2.42 m,高 2.01 m,在开挖 2.05 m 后转为与引水隧洞轴线平行方向,直至开挖到刀盘位置。旁洞开挖时,保持 1% 的纵坡以利于排水。开挖方式为人工手风钻钻孔、浅孔弱爆破、多循环、短进尺,每循环的进尺不超过 1 m,人工手推车出渣。开挖前采用直径 25 mm、长 3.0 m、间距 30 cm 的自进式锚杆对旁洞顶拱进行超前加固,开挖后对于 IV 类围岩采用直径 25 mm、长 1.5 m、间距 2.0 m 的系统锚杆对顶拱和边墙支护,同时挂网($\phi 6 @ 0.15 \text{ m} \times 0.15 \text{ m}$)喷 10 ~ 15 cm 厚 C20 混凝土;对于 V 类围岩,在 IV 类围岩支护的基础上增加钢拱架支护,钢拱架为 I12 工字钢,间距 50 ~ 80 cm。

d. 右侧旁洞开挖至桩号 K16+128.7 m,左侧旁洞开挖至桩号 K16+132.6 m,待支护完成后,在旁洞掌子面上沿与主洞轴线平行方向水平钻孔,目的是查明前方地质条件。

e. 钻孔完成后,由旁洞沿径向朝中间开挖,以形成圆弧形扩大顶拱,扩大顶拱中点距原隧洞洞底 11.36 m。

f. 沿洞轴线方向向前开挖扩大顶拱直至穿过整个断层破碎带。导洞分 4 块开挖,开挖方式为人工手风钻钻孔、浅孔弱爆破、多循环,每循环进尺控制在 1.0 m 以内。

g. 扩大顶拱开挖前采用直径 25 mm、长 6.0 m、间距 35 cm 的自进式锚杆对顶拱进行超前加固,同时对围岩进行固结灌浆处理。开挖后进行钢拱架支

护,钢拱架为 120 工字钢,纵向间距 50 ~ 80 cm,采用直径 25 mm、长 4.0 m、间距 1.0 m 的系统锚杆对顶拱进行系统支护,同时挂网($\phi 6@0.15\text{ m}\times 0.15\text{ m}$)喷 10 ~ 15 cm 厚 C20 混凝土。扩大顶拱开挖支护后的情况见图 10。



图 10 顶拱扩挖支护后情况

h. 扩大开挖支护完成后,在导洞顶拱中心线 120°范围内布孔进行围岩固结灌浆处理;左右拱脚各安装 2 根直径 25 mm、长 4.5 m 锁脚锚杆,1 根水平,1 根与水平呈 40° ~ 60° 夹角斜向下。安装锚杆前对拱脚部位围岩进行固结灌浆处理。

i. 扩大顶拱下部的围岩未进行人工开挖,待清理掉刀盘前方的散落体使刀盘解困后,启动 TBM 刀盘进行掘进出渣。掘进过程中,为防止掌子面围岩塌方,在每环掘进前均对掌子面前方围岩进行固结灌浆处理,待围岩稳定后方可掘进。

j. TBM 掘进出渣的同时安装管片,管片与扩大顶拱之间的空腔采用混凝土回填。TBM 启动后,第一环管片安装完成后开始洞室下部的豆砾石回填,安装一环回填一环,直到第 5 环安装完成,开始进行第 1 环的上部混凝土回填,循环进行,直至通过整个断层破碎带。

k. 待 TBM 通过整个断层破碎带后,对旁洞采用混凝土回填,对断层破碎带的围岩进行系统的固结灌浆处理,灌浆深度为 5.0 m。

采用开挖扩大顶拱并加强支护的措施后,顶拱围岩在掘进过程中,未出现较大的变形,支护措施满足了围岩稳定性的要求。TBM 在断层破碎带内掘进时,顶拱围岩不再塌方,仅掌子面出现了少量的塌方,但对掘进影响较小。从卡机到恢复正常掘进,共历时 173 d。

5 结 语

断层破碎带塌方是造成 CCS 水电站引水隧 K16+127.0 m 处双护盾 TBM 卡机的主要原因,通过地质分析、物探及水平钻孔的方法查明了卡机处掌子面前方的地质条件。采用了拆除管片、人工开挖两侧旁洞至掌子面前方,然后开挖扩大顶拱的方法通

过断层破碎带。人工开挖过程中,为保证顶拱围岩的稳定,采用了超前锚杆、固结灌浆等超前支护措施,开挖后采用钢拱架、系统锚杆、挂网喷射混凝土支护措施。TBM 在断层破碎带内掘进时,对掌子面前方围岩进行固结灌浆处理,以防止围岩大量塌方。采用以上技术措施后,TBM 成功脱困并通过了断层破碎带。

参考文献:

- [1] 张镜剑,傅冰骏.隧道掘进机在我国应用的进展[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):226-238. (ZHANG Jingjian,FU Bingjun. Advances in tunnel boring machine application in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (2): 226-238. (in Chinese))
- [2] 张镜剑. TBM 的应用及其有关问题和展望[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18 (3): 363-367. (ZHANG Jingjian. The application and some problems of TBM and its prospects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(3):363-367. (in Chinese))
- [3] 尹俊涛,尚彦军,傅冰骏,等. TBM 掘进技术发展及有关工程地质问题分析和对策[J]. 工程地质学报, 2005, 13 (3): 389-397. (YIN Juntao, SHANG Yanjun, FU Bingjun, et al. Development of TBM-excavation technology and analyses & countermeasures of related engineering geological problems[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(3):389-397. (in Chinese))
- [4] 茅承觉. 我国全断面岩石掘进机(TBM)发展的回顾与思考[J]. 建设机械技术与管理, 2008, 21 (5): 81-84. (MAO Chengjue. Review and thoughts of developmental full face rock tunnel boring machine(TBM) in China[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2008, 21(5):81-84. (in Chinese))
- [5] 尚彦军,史永跃,曾庆利,等. 昆明上公山隧道复杂地质条件下软弱围岩中 TBM 卡机及护盾变形问题分析和对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (21): 3858-3863. (SHANG Yanjun, SHI Yongyue, ZENG Qingli, et al. TBM jamming and deformation in complicated geological conditions and engineering measures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21):3858-3863. (in Chinese))
- [6] 尚彦军,杨志法,曾庆利,等. TBM 遇险工程地质问题分析和失误的反思[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 27 (12): 2404-2411. (SHANG Yanjun, YANG Zhifan, ZENG Qingli, et al. Retrospective analysis of TBM accidents from its poor flexibility to complicated geological conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 27(12):2404-2411. (in Chinese))
- [7] 宋天田,肖正学,苏华友,等. 上公山 TBM 施工“2·22”卡机事故工程地质分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (增刊 1): 4544-4546. (SONG Tiantian, XIAO Zhengxue, SU Huayou, et al. Engineering geological analysis on “2·22” blockage accident in TBM

- construction of shanggongshan tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (Supl): 4544-4546. (in Chinese)
- [8] 杨晓迎,翟建华,谷世发,等. TBM 在深埋超长隧洞断层破碎带卡机后脱困施工技术[J]. 水利水电技术, 2010, 41 (9): 68-71. (YANG Xiaoying, ZHAI Jianhua, GU Shifa, et al. Technology for unblocking TBM blocked in fault zone of sper-long and deep-buried tunnel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41 (9): 68-71. (in Chinese))
- [9] WALLIS S, 邓应详. 台湾坪林隧道施工近况[J]. 隧道及地下工程, 1999 (2): 5-15. (WALLIS S, DENG Yingxiang. Recent situation of Pinglin Tunnel in Taiwan [J]. Tunnel and Underground Engineering, 1999 (2): 5-15. (in Chinese))
- [10] WINTER T, BINQUET J, SZINDROI A, et al. From plate tectonics to the design of the Dul Hasti Hydroelectric Project in Kashmir (India) [J]. Engineering Geology, 1994, 36(3/4) : 211-241.
- [11] 王江. 引水隧洞双护盾 TBM 卡机分析及脱困技术[J]. 隧道建设, 2011, 31 (3): 364-368. (WANG Jiang. Analysis on jamming of double-shield TBM in construction of water diversion tunnel and jamming releasing technology [J]. Tunnel Construction, 2011, 31 (3): 364-368. (in Chinese))
- [12] Yellow River Engineering Consulting Co. ,Ltd. . The basic design report of Coca-Codo Sinclair Hydroelectric Project [R]. Zhengzhou: Yellow River Engineering Consulting Co. ,Ltd. ,2011.
- [13] 杨继华,齐三红,郭卫新,等. 厄瓜多尔 CCS 水电站 TBM 法施工引水隧洞工程地质条件及问题初步研究 [J]. 隧道建设, 2014, 34(6) : 513-518. (YANG Jihua, QI Sanhong, GUO Weixin, et al. Case study on engineering geological conditions and problems in construction of headrace tunnel of CCS Hydropower Station in Ecuador by TBM method[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(6) : 513-518. (in Chinese))
- [14] 杨继华,苗栋,杨风威,等. CCS 水电站输水隧洞双护盾 TBM 穿越不良地质段的处理技术 [J]. 资源环境与工程, 2016, 30 (3): 539-542. (YANG Jihua, MIAO Dong, YANG Fengwei, et al. Treatment technology of crossing unfavorable geological tunnel section by double shield TBM at CCS Hydropower Station conveyance tunnel[J]. Resources Environment & Engineering, 2016, 30(3) : 539-542. (in Chinese))

(收稿日期:2016 - 10 - 13 编辑:熊水斌)

(上接第 88 页)

- [11] 卢小琳,兰文改,张洪波,等. 氧化镁水化产物的微观结构特点表征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38 (5): 555-558. (LU Xiaolin, LAN Wengai, ZHANG Hongbo, et al. Microstructural characteristics of MgO hydration products[J]. Journal of Hehai University(Natural Sciences), 2010, 38(5) : 555-558. (in Chinese))
- [12] 陈胡星,马先伟. 粉煤灰对氧化镁微膨胀水泥膨胀性能的影响及其机制[J]. 材料科学与工程学报, 2010, 28 (2): 181-185. (CHEN Huxing, MA Xianwei. Effects of fly ash on expansion of MgO expansive cement and its mechanism [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2010, 28 (2): 181-185. (in Chinese))
- [13] 申献平,赵其兴. 贵阳市沙老河水库拱坝设计优化[J]. 贵州水力发电, 2004, 18 (2): 57-60. (SHEN Xianping, ZHAO Qixing. The design optimization of Shalaohe arch dam in Guiyang City [J]. Guizhou Water Power, 2004, 18 (2): 57-60. (in Chinese))
- [14] 刘其文,代富红. 沙老河拱坝裂缝成因探讨及其处理措施[J]. 人民长江, 2011, 42 (5): 59-61, 97. (LIU Qiwen, DAI Fuhong. Discussion on crack formation of Shalaohe Arch Dam and its treatment [J]. Journal of Yangtze River, 2011, 42(5) : 59-61, 97. (in Chinese))
- [15] 申献平,杨波,张国新,等. 沙老河拱坝整体应力仿真与掺 MgO 效果分析[J]. 水利水电技术, 2004, 35 (2): 38-40. (SHEN Xianping, YANG Bo, ZHANG Guoxin, et al. The analysis of integral stress simulation and admixed MgO effect about Shalaohe arch dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35 (2): 38-40. (in Chinese))
- [16] 张国新,杨波,申献平,等. MgO 微膨胀混凝土拱坝裂缝的非线性模拟[J]. 水力发电学报, 2004, 23 (3): 51-55. (ZHANG Guoxin, YANG Bo, SHEN Xianping, et al. Nonlinear analysis of cracks in gentle volume expansive concrete arch dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(3) : 51-55. (in Chinese))
- [17] 张国新,杨卫中,罗恒,等. MgO 微膨胀混凝土的温降补偿在三江拱坝的研究和应用[J]. 水利水电技术, 2006, 37 (8): 20-23. (ZHANG Guoxin, YANG Weizhong, LUO Heng, et al. Application and study of MgO micro-expanding concrete for construction of Sanjiang Arch Dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(8) : 20-23. (in Chinese))
- [18] 赵其兴. 氧化镁混凝土拱坝的宏观变形[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35 (6): 73-107. (ZHAO Qixing. Macroscopic deformation of MgO concrete arch dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(6) : 73-107. (in Chinese))
- [19] 朱伯芳. 论微膨胀混凝土筑坝技术[J]. 水力发电学报, 2000, 70 (3): 1-13. (ZHU Bofang. On construction of dams by concrete with gentle volume expansion [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2000, 70(3) : 1-13. (in Chinese))

(收稿日期:2016 - 12 - 20 编辑:熊水斌)