

高埋深引水隧道软岩大变形地层中双护盾TBM卡机脱困技术

刘勇

中铁二局集团有限公司城通分公司

摘要：双护盾TBM工法具有快速、高效、安全等突出优势，但其较长的盾体结构，使其在挤压岩、软岩大变形、断层破碎带等不利地质条件下易发生卡机。本文围绕某引水隧道工程深入研究双护盾TBM在高埋深山岭隧道中遭遇全断面膨胀性软岩导致卡机原因，系统介绍软岩大变形地层中双护盾TBM卡机过程处置及旁通道开挖技术，成功实现TBM脱困，研究成果可供类似工程借鉴。

关键词：高埋深；软岩大变形；双护盾TBM；卡机；旁通道；脱困

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6288.2023.10.239

一、工程简介

该引水隧道设计长度13316米，采用双护盾TBM工法施工，开挖洞径6.4米，成型隧道5.5米。隧道采用预制混凝土管片衬砌，管片外径6.1米，管片内径5.5m，厚度0.3m，环宽1.4m，独头上坡掘进，坡度2.4%。隧道

为高埋深山岭隧道，最大埋深1320米。

二、TBM受困段工程地质条件

根据地勘报告，TBM受困段的地质构造主要为Bg板岩段，具体如表1所示：

三、TBM受困过程及现场处置

表1 地勘报告中TBM受困段地质信息概述

里程	地质构造	主要岩石种类	强度	主要地质风险
4.52~4.90km	Bg板岩段	白云岩（40%），板岩（17%） 片岩（23%）、石英岩（20%） III（30%）、IV（50%）V（20%）	10~30MPa	软岩变形、板岩片岩节理发育

（一）卡机经过及现场初步处理措施

当TBM掘进至里程K4+667.332米时，掌子面地质突然由中等风化白云岩变为强风化全断面绢云母千枚岩（含石英脉、软岩），强度低于5MPa，无地下水，自稳性差，渣样粉末状较多，约占80%，潮湿滑腻，遇水后软化似弹簧土，泥化呈淤泥状，具有很强的致密性。TBM刀盘扭矩和推力迅速升高，出渣量增加至正常情况下的1.5倍，掌子面不断发生坍塌。为避免TBM盾体抱死，决定连续掘进不停机，同时通过旋转刀盘利用铲斗

齿清理掌子面垮塌渣土，释放刀盘扭矩压力。

然而，当渣土车完成换车重新启动刀盘旋转时，刀盘启动扭矩上升至刀盘设计扭矩极限值，依然无法实现掘进。经检查，整个刀盘滚刀均已嵌入埋置在掌子面已垮塌的粉末状千枚岩体中。后经采取清理刀仓、刀牙、铲斗齿，增加推力、地层加固、盾体外注射润滑油和单护盾模式等措施均未能实现复推，撑靴盾撑靴压力持续增大。TBM卡机位置刀盘里程为K4+667.332m，埋深约396m。详细如表2：

表2 主要脱困处理经过及现场措施汇总表

日期	时间段	TBM设备参数			掘进进尺	出渣量及地质情况	现场情况	现场措施
		推力 (KN)	扭矩 (KN.m)	撑靴压力 (Bar)				
3月31日	11:00 ~ 18:00	5000 ~ 7000	200 ~ 1400	215 ~ 230	1.4m	1. 地质情况：片岩（40%），千枚岩（50%）白云岩（10%），无地下水。 2. 出渣情况：掌子面有塌方，继续掘进1环，超排约9m³。	主推力和扭矩持续上升	根据地质情况判定停止掘进会导致卡机风险大，决定连续掘进不停机。
	18:00 ~ 1:05	7000 ~ 14800	1400 ~ 5800	215 ~ 258	1.4m	1. 地质情况：千枚岩100%，变形破坏严重，无地下水。 2. 出渣情况：掌子面塌方严重，继续掘进1环（1.4m），超排65m³，累计74m³。	刀盘扭矩、主机皮带超压	该环掘进完成后，决定停机清理刀仓、刀牙、铲斗齿，上方持续有土体塌方，决定尝试复推。
4月1日	3:40 ~ 4:05	19300 ~ 21300	2700 ~ 6018	238 ~ 269	0	1. 地质情况：千枚岩100%， 2. 出渣情况：原位置出渣70m³，累计超排130m³。	尝试复推主推力持续上升，刀盘扭矩达到极限，TBM复推失败。	对刀盘上方围岩注射聚氨酯。

4月2日	23:30 ~ 1:30	/	1800 ~ 4000	250	0	1.地质情况:千枚岩100%, 2.出渣情况:原位置出渣105m ³ ,累计超排235m ³ 。	清理刀仓渣土过程中有聚氨酯原液流出,未发生反应。	聚氨酯注射效果不理想,刀盘扭矩未降低,掌子面依旧处于持续塌方状态。增注聚氨酯。
4月3日	18:40 ~ 19:10	29300 ~ 33000	2700 ~ 400	215 ~ 235	0	1.地质情况:千枚岩100%, 2.出渣情况:原位置出渣105m ³ ,累计超排340m ³ 。	尝试复推,刀盘扭矩降低至正常状态,但上方依旧处于持续塌方状态,推力达到极限推力,未能实现掘进。	启动刀盘,扭矩下降至正常状态,证明刀盘上方塌方得到控制,但尝试双护盾及单护盾模式复推失败。决定采用高压泵将润滑油注入前盾四周土体,尝试减小土体摩擦力。
4月4日	16:20 ~ 17:00	27000 ~ 29400	50 ~ 700	235 ~ 245	0	1.地质情况:千枚岩100%, 2.出渣情况:原位置出渣14m ³ ,累计超排354m ³ 。	采用高压泵通过前盾预留向前盾外侧压注润滑油,以减小盾体和围岩接触面积及润滑降低土体摩擦力,	复推未成功,但刀盘扭矩正常,撑靴盾和尾盾能正常拉缸收回,判断前盾和伸缩盾被挤压抱死,决定开挖旁通道,减小土体摩擦力。

(二)地质核查情况

TBM受困后,通过现场核查,TBM受困段属于Bg板岩段,主要地质信息如表3所示:

表3 TBM受困段实际地质情况

TBM受困位置	地质构造	主要岩石种类	强度	主要地质风险
K4+669.32m	Bg板岩段	全断面绢云母千枚岩 无水、粉末状(80%)、自稳性差	0~5MPa	变形、遇水膨胀、坍塌、堵塞刀盘

(三)卡机原因分析

经对TBM掘进参数和应急处置反应分析,初步判断TBM受困原因为TBM掘进过程突遇全断面千枚岩软弱岩层,岩层受开挖扰动后掌子面出现坍塌,前盾和伸缩盾径向范围内围岩变形挤压,将前盾和伸缩盾范围盾体抱死,无法推进。根据卡机过程及地质核查分析,刀盘前方掌子面围岩稳定,尾盾及撑靴盾拉缸换步正常。因此,可确定TBM受困主要原因是前盾和伸缩盾区域被围岩包裹挤压所致。

四、总体脱困方案

通过上述卡机原因分析,在常规脱困方案无效的情况下,拟从在盾体左右两侧开挖旁通道,以将盾体被包裹区域的土体进行开挖移除达到卸载的效果,降低盾体与土体之间的摩擦以达到盾体脱困的目的。

(一)施工筹划

旁通道开挖施工严格按照“管超前、严注浆、短开挖、强支护、快封闭、勤量测”十八方针组织制定和实施,主要施工思路如下:

(1)确定开挖范围。经计算对比,计划按照方案2在盾尾左右两侧2:30(10:30)-5:30(6:30)区域开挖旁通道,有效脱困系数为1.32。垂直盾尾开挖旁通道进口,进口断面高度2m,宽度1.5m,深度2m,表4。

表4 TBM卡机旁通道开挖范围计算

项目	单位	方案1	方案2	方案3
人工掏挖顶部点位	-	3点位置	2点半位置	2点位置
旁通道开挖完成后脱困所需推力	KN	25070.90	21749.37	18427.83
TBM主推最大推力	KN	28800	28800	28800
有效脱困系数	-	1.15	1.32	1.56

(2)完成进口段开挖后,随即平行盾尾进行渐变段的开挖施工。

(3)渐变段开挖完后,继续沿盾体方向向前开挖脱困段。

(4)左右旁两侧通道开挖同步进行,但左右通道开挖进尺差不得小于2米。

(二)施工工艺流程

旁通道开挖总体施工顺序为:洞门定位→进口超前支护→洞门破除→土方开挖→拱架、锚杆、钢筋网片施工→喷射混凝土施工→封闭掌子面→渐变段洞门定位→超前小导管→洞门破除→土方开挖→格栅、锚杆、钢筋网片施工→喷射混凝土施工……→脱困段封闭掌子面。

五、施工工艺技术

(一)施工准备

(1)平台搭设:为满足施工作业材料堆码、人员进出方便,将盾尾及喂片机区域采用木板搭设平整。

(2)测量放样:测量人员对盾尾体开口区域进行放样,并进行现场标示。

(3)盾尾防变形措施:由于通道开口需割除盾尾区域的钢板,为确保开口区域盾体钢板割除后盾体不变形,在盾尾采用工字钢将尾盾底部开口处两侧焊接连接加固,型钢上部铺设3mm厚钢板,增强尾盾刚度,防止挤压变形,同时可作为施工平台。

(二)进口超前支护

在尾盾左右两侧5:30和7:30向上约61°位置开口割除宽1500mm×高800mm钢板,作为施打超前小管棚加固围岩的窗口。

超前小管棚采用YT-28钻机施工,长度3.5米,角度10~15度。施工完成后及时进行孔位检查、清孔、填塞锚固剂、锚杆或锚管安装。锚管安装完成后需及时注浆。注浆时孔口最高压力应严格控制在设计允许范围内,既能使单管注浆扩散到管周0.5~1.0 m半径范围内,又应避免压裂开挖面,注浆压力一般为0.1~0.35MPa。

(三) 洞门破除

在超前小管棚施工完成后,割除右侧5:00点以上61°宽1500mm×高2300mm范围剩余钢板,做好进洞暗挖施工准备。

(四) 进口段开挖及支护

1. 土方开挖

尾盾钢板割除后,开始进洞通道土体开挖。在进口段区域由于设计净空高度为2m。自上而下开挖,严禁反掏。开挖完成后及时进行掌子面封闭及反压。左侧通道开挖工序和右侧完全一致。

2. 进口段拱架设置

当进尺达到350mm后,安装前两榀型钢拱架,然后按照设计间距进行后续开挖立拱,掌子面端头位置也采用双榀拱架布置。拱架断面形状设计为矩形,封闭成环。盾体与拱架间的间隙预留50mm并用木楔子塞填紧实。为保证拱架安装时不下沉,在拱架底侧焊接1块300×300mm钢板。相邻拱架间采用 $\phi 16$ mm纵向连接筋连接,内外侧按照1m间距交替布置,同时在拱架顶部和底部的四个角点沿开挖纵向焊接150mm型钢加强。

3. 挂网喷浆

施打 $\phi 25$ mm@800mm钢筋锚杆,梅花形布置,L=3m,锚固剂锚固。最后对所有暴露开挖面采用挂网喷浆覆盖。

(五) 渐变段开挖及支护

入洞段施工完成后,开始沿盾体轴线方向进行暗挖施工,该段长度3.87m范围内为非挤压区,开挖高度为渐变高度,宽度不变。开挖前首先施做DN32厚壁钢管小管棚。同时,在外伸缩盾位置切割盾体窗口设置应急逃生口。由于开挖高度相对较小,可通过放坡开挖、一次成型、快速支护,整个开挖方式方法参见进口段要求执行。

(六) 脱困段开挖及支护

前盾和伸缩盾区段高度达3.6m,分两台阶自上而下开挖。开挖完后及时进行锚喷封闭或回填反压,在满足上下台阶开挖时,上下台阶前后步距差控制在1.8~2.0m。按照设计验算要求,该段型钢拱架采用 $\#150$ mm焊接制作,相邻拱架中心间距500mm,单次开挖进尺500mm。上台阶开挖完成后立即安装上部型钢拱架,施打DN32锁脚锚管和侧墙钢筋锚杆,底部焊接150mm水平型钢封闭成环,最后对开挖面挂网喷浆覆盖。旁通道支护结构体系需和盾体分离,为防止开挖过程中侧墙围岩变形,导致支护结构变形,可在拱架结构和盾体间填塞木楔。

进行下台阶开挖,待下台阶开挖至设计进尺后,立

即安装下部拱架,同时打设DN32mm锁脚锚管,上下拱架采用双面焊接连接,封闭成环。然后进行系统钢筋锚杆、内外侧纵向连接筋和挂网喷浆施工。

六、施工监控量测

在TBM盾体两侧旁通道开挖时,为确保施工安全,必须对旁通道顶部进行沉降监测,对侧壁进行收敛监测,同时监测盾体变形情况。对监测数据及时测取、计算、分析和预警。

七、工后处理及TBM复推

(一) 工后处理

旁通道施工完成后,使用袋装豆粒石对旁通道进行填充,不对支撑进行拆除,豆粒石沙袋填充旁通道时应保证与盾体存在一定间隙,不可完全抵死盾体,旁通道填充完成后对切割的进口进行恢复焊接。当盾尾脱离旁通道开挖区域后,通过已拼装的管片注浆孔对其背后豆粒石进行水泥浆注浆固结。

(二) 恢复掘进

恢复掘进后,由于两侧区域无法提供撑靴作业面,故采用假双护盾模式进行掘进。具体操作如下:

1. 撑靴伸出接触豆粒石袋,仅抵住即可,短接PLC信号,撑靴仅用于稳定盾体,避免推进过程中盾体摆动过大使姿态偏差更大。

2. 琐死辅推油缸,使用主推油缸推进,由盾尾管片提供支撑反力,每隔300~700mm进行1次换步。

3. 采用上述方法掘进直到整个盾体区域完全通过旁通道开挖区域,再次恢复双护盾模式掘进。本次卡机经过13天旁通道连续开挖施工作业,最终实现了TBM成功脱困。

八、结语

因双护盾TBM的盾体结构较特殊,受制于超前地质预报技术能力的限制,其在突然遭遇千枚岩等软弱易变形地层时极易发生卡机。卡机发生后,首先应考虑通过增大推力、切换单护盾模式等常规措施进行脱困。如常规措施无效,应抢抓战机、快速决策,缩短软岩特别是膨胀岩的变形时间,避免盾体受压持续增大。当围岩挤压盾体超过盾体极限承载力后,存在盾体变形、凹陷、TBM更难脱困等风险。旁通道施工虽然保守但依旧不失为一种有效可靠的脱困方法,施工过程中应特别重视具体地质情况分析和超前加固,严格遵循暗挖“八字”方针,稳扎稳打,确保施工安全。

参考文献

- [1] 王焕明,陈方明.复杂地质区TBM卡机成因分析及脱困技术[J].人民长江,2014,45(3):66-69.
- [2] 崔光耀,麻建飞,王明胜.双护盾TBM不良地质段卡机脱困技术研究[J].中国安全科学技术,2021,17(11):152-157.
- [3] 王江.引水隧洞双护盾TBM卡机分析及脱困技术[J].隧道建设,2021,31(03):367-368.
- [4] 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.