

# EPB/TBM 双模盾构机硬岩掘进卡机脱困技术

段岳强

(中交一公局厦门工程有限公司, 361021, 厦门)

**摘 要** [目的] EPB(土压平衡盾构机)/TBM(全断面硬岩掘进机)双模盾构机在掘进过程中由于刀具磨损过于严重,掘进参数设置不当等问题,易引起卡机等事故,进而严重影响施工工期,甚至引发安全事故,需对 EPB/TBM 双模盾构机硬岩掘进卡机脱困技术进行研究。[方法] 依托深圳地铁 8 号线二期三工区大梅沙站—小梅沙站区间隧道工程,基于 EPB/TBM 双模盾构机在全断面微风化硬岩掘进过程中的卡机事故全过程,系统地阐述了 EPB/TBM 双模盾构机的卡机脱困流程,并对卡机至脱困过程的掘进参数演变规律进行分析,总结盾构机卡机事故原因,并提出对应的预防措施及建议。[结果及结论] 盾构机卡机主要由多因素共同作用引起,其中刀盘及刀具的异常磨损是核心原因之一。通过及时排查相关掘进参数的异常变化,如盾构掘进速度骤降,刀盘扭矩骤降,总顶推力显著提升,可提前预警甚至避免卡机现象的发生。排查时结合对刀盘和土仓内渣土堆积情况的综合判定,能够显著减少卡机现象的发生并防止其进一步加剧。通过盾构机卡机位置确定、切口环岩体破除、顶撑工装焊接、盾构机试推进、第一部分盾体切割及岩体破除、第二部分盾体切割及岩体破除、切割盾体原位焊接及盾构机恢复掘进等工序可实现成功脱困。

**关键词** 地铁; EPB/TBM 双模盾构机; 卡机脱困技术; 硬岩

**中图分类号** U455.43

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.01.043

## Unstuck Technology for EPB/TBM Dual Mode Shield Machine Stuck in Rock Stratum

DUAN Yueqiang

(CCCC First Highway Xiamen Engineering Co., Ltd., 361021, Xiamen, China)

**Abstract** [Objective] During the tunneling process of the EPB (earth pressure balance shield machine)/TBM (full-face hard rock tunnel boring machine) dual-mode shield tunneling machine, problems such as excessive wear of the cutting tools and improper setting of tunneling parameters are prone to cause accidents like jamming, which will further seriously affect the construction period and even lead to safety accidents. Therefore, it is necessary to conduct research on the unstuck technology of the EPB/TBM dual-mode shield tunneling machine from jamming during hard rock tunneling. [Method] In the

Dameisha Station- Xiaomeisha Station tunnel of the Construction Area 3, Phase II project on Shenzhen Metro Line 8, based on the whole process of the jamming accident of the EPB/TBM dual-mode shield tunneling machine during the full-face slightly weathered hard rock tunneling, the process of the EPB/TBM dual-mode shield tunneling machine unstuck from jamming is systematically elaborated, and the evolution law of the tunneling parameters from jamming to unstuck is analyzed. Then the causes of the jamming accidents are summarized, and corresponding preventive measures and suggestions are put forward.

[Result & Conclusion] The jamming of shield tunneling machine is mainly caused by the combined effects of multiple factors, among which the abnormal wear of the cutter head and cutting tools is one of the core reasons. By promptly investigating the abnormal changes in relevant tunneling parameters, such as sudden drops in the tunneling speed of the shield machine, or in the torque of the cutter head, and a significant increase in the total thrust force, the occurrence of jamming can be predicted in advance or even avoided. A comprehensive judgment of the muck accumulation in the cutter head and the earth chamber during investigation can significantly reduce the occurrence of jamming and prevent it from further aggravating. Successful escaping can be achieved through procedures such as determining the jamming position of the shield tunneling machine, breaking through the rock mass of the cutting ring, welding the jacking and bracing fixtures, conducting a trial propulsion of the shield tunneling machine, cutting the first part of the shield body and breaking through the rock mass, cutting the second part of the shield body and breaking through the rock mass, in-situ welding of the cut shield body, and resuming the tunneling of the shield tunneling machine

**Key words** metro; EPB/TBM dual mode shield tunneling machine; unstuck technology for stuck shield tunneling machine; hard rock

近年来,随着我国城市轨道交通的发展,区间隧道工程逐渐呈现施工环境复杂化的发展趋势,现有机电设备施工工法的适应性受到了极大的挑战。故此,国内外开始逐步摸索集成 EPB(土压平

衡盾构机)与 TBM(全断面硬岩掘进机)的双模盾构机施工技术<sup>[1]</sup>。当前我国 EPB/TBM 双模盾构机在复合地层中的应用处于初期阶段,在掘进过程中由于刀具磨损过于严重、掘进参数设置不当等问题,易引起卡机等事故<sup>[2]</sup>,进而严重影响施工工期,甚至引发安全事故<sup>[3-4]</sup>。

针对盾构设备在硬岩掘进过程中的卡机问题,国内学者已开展了大量研究。文献[5]基于一系列典型复杂地质 TBM 隧道工程,对卡机等工程难题及创新技术措施进行了分析,提出了对应处置措施;文献[6]针对双护盾 TBM 在节理岩体中掘进易于发生卡机等问题,进行了节理岩体力学参数对围岩与 TBM 接触压力的影响研究;文献[7]提出了考虑双护盾 TBM 掘进施工过程的数值仿真方法,并实现围岩与护盾的相互作用模拟;文献[8]以 TBM 穿越高黎贡山隧道花岗岩地层为背景,通过对比分析卡机段和正常掘进 V 级围岩段的 TSP(隧道地震波法)参数,最终获取 TSP 参数与围岩的相关性,以及卡机段 TSP 参数的波动规律,可作为 TBM 掘进过程中卡机判别的依据;文献[9]结合高黎贡山隧道 TBM 施工情况,从多个关键技术进行分析,总结出掘进参数与卡机的关系,并提出控制措施;文献[10]就地质探测、注浆加固、破碎围岩处理等问题提出了一系列针对性措施,并通过实践证明 TBM 脱困的有效性。

以上研究大多侧重于盾构机卡机过程的理论

和机理性分析,且多数采用数值模拟方式,对于盾构机卡机后的施工应对措施,以及施工前后的掘进参数变化研究较少。而就深圳地区而言,隧道区间内岩体多为微风化硬岩,岩体坚硬,使得刀具贯入岩体并正常掘进所需的顶推力相较其他地区较高。卡机问题同时受断层破碎带、地应力、刀具磨损及扩挖间隙缩小等多因素耦合影响。故此,深圳地铁施工过程中卡机事故频发。本文依托深圳地铁 8 号线二期三工区大梅沙站—小梅沙站区间隧道工程,针对 EPB/TBM 双模盾构机在硬岩掘进中卡机预警以及盾体被卡后的具体处理措施,系统地提出了 EPB/TBM 双模盾构机的卡盾处理技术,以期为同类型微风化地层中的盾构机卡机预测及脱困处理措施研究提供参考。

## 1 工程概况

深圳地铁 8 号线二期工程三工区位于深圳市盐田区,盾构隧道于小梅沙站始发,穿越沿线建筑物,下穿盐梅路桥桩,侧穿大梅沙人工湖,至大梅沙站接收。其中,盾构隧道区间左线起讫里程 ZDK57 + 850.011—ZDKDK59 + 703.933,全长约 1 854.2 m,盾构隧道铺设管片共计 1 232 环。大梅沙站—小梅沙站区间盾构隧道地质剖面如图 1 所示。设备采用 EPB/TBM 双模盾构机,刀盘型式为双模式超重型刀盘,最高转速 5.34 r/min,额定扭矩 7 200 kNm,最大推进速度可达 80 mm/min。

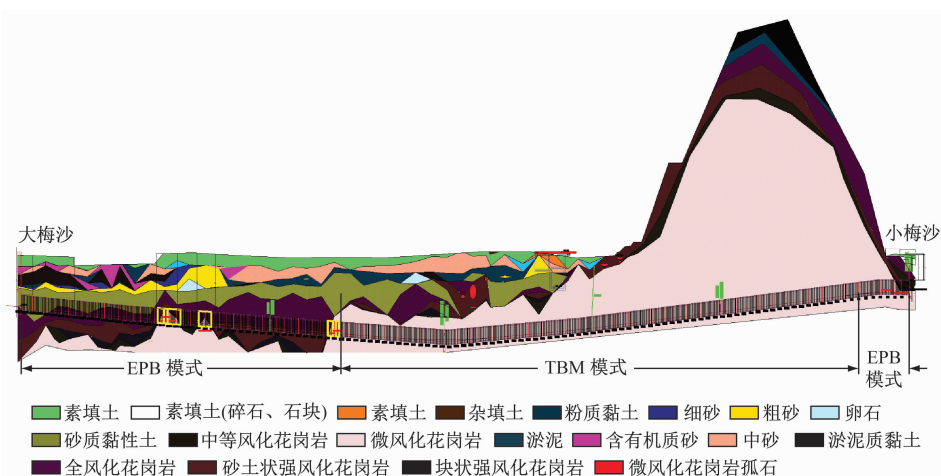


图 1 大梅沙站—小梅沙站区间盾构隧道地质剖面图

Fig. 1 Geological profile of the interval shield tunnel between Dameisha Station and Xiaomeisha Station

大梅沙站—小梅沙站区间穿越地层变化较大,洞身主要穿越黏性土和花岗岩,且有存在孤石的可能性。其中微风化花岗岩地层单轴饱和抗压强度

范围为 55.30 ~ 121.00 MPa,其平均值为 84.11 MPa,RQD(岩石质量指标)一般为 52% ~ 92%,主要为坚硬岩,岩体较完整。盾构隧道区间主要穿越

地层类型及其纵向长度占比统计,见图 2。各地层物理力学参数取值和渗透性分别见表 1 和表 2。

## 2 盾构机卡机事故全过程

### 2.1 盾构机卡机起因

大梅沙站—小梅沙站区间左线 EPB/TBM 双模盾构机掘进至第 374 环位置时,在拼装完管片恢复掘进过程中发现盾构机扭矩、掘进速度骤降,同时油缸行程无变化,经现场检查发现 45A、45B、41#刀具磨损分别为 14 mm、12 mm、15 mm,属于严重偏

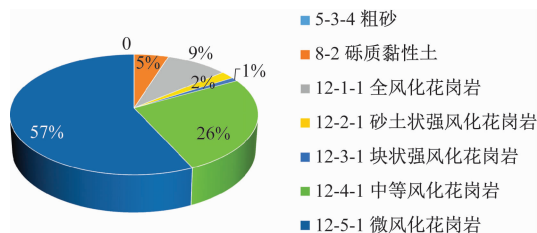


图 2 盾构隧道区间主要穿越地层类型及其纵向长度占比统计

Fig. 2 Main strata types traversed by the shield tunnel section and proportion statistics of their longitudinal length

表 1 各地层物理力学参数取值

Tab.1 Physical and mechanical parameters of each stratum

地层类型	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	天然单轴抗压强度/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	变形模量/MPa
砂质黏性土⑧2	18.7		25.0	25	35
全风化花岗岩⑫1-1	19.2		25.0	33	50
砂土状强风化花岗岩⑫2-1	20.0		30.0	38	100
块状强风化花岗岩⑫3-1	22.0		40.0		150
中等风化花岗岩⑫4-1	27.0	40.0	2 000.0		
微风化花岗岩⑫5-1	27.0	100.5	3 500.0		

表 2 各地层渗透系数

Tab.2 Permeability coefficient of each stratum

地层类型	渗透系数/(m/d)	透水性
砂质黏性土⑧2	0.5	弱透水
全风化花岗岩⑫1-1	0.3	弱透水
砂土状强风化花岗岩⑫2-1	0.5	弱透水
块状强风化花岗岩⑫3-1	1.5	中等透水
中等风化花岗岩⑫4-1	1.0	中等透水
微风化花岗岩⑫5-1	0.5	弱透水

磨现象。刀具磨损情况如图 3 所示。经施工方核查,最近一次盾构机换刀施工位于第 368 环,而第 368 环处 45A、45B、41#刀具测量磨损量分别为 6 mm、7 mm、10 mm,均为正常磨损。进一步检查发现盾体与岩体四周均贴合十分紧密,故最终定性为盾体与岩层出现卡机事故。

### 2.2 盾构机卡机前数据分析

盾构机掘进参数变化对于分析卡机机理和事故发生过程具有重要作用。提取大梅沙站—小梅沙站区间左线 EPB/TBM 双模盾构机在卡机段(第 373 环—第 374 环)前后位置的不同掘进参数,重点分析受卡机段影响较为严重的 3 种掘进参数(掘进速度、刀盘扭矩、总顶推力)随时间的变化规律。对 EPB/TBM 双模盾构机在空推段和异常离群数据点

进行简单清洗。清洗空推段数据过程见图 4。清洗异常离群数据点过程如图 5 所示。

卡机事故过程中的掘进速度、刀盘扭矩、总顶推压力等掘进参数随时间变化曲线如图 6 所示。

由图 6 可知:EPB/TBM 双模盾构机的卡机过程主要经历由掘进正常、掘进受阻和完全卡机等 3 个主要阶段,且掘进参数数据变化较大。以掘进速度为例,在大梅沙站—小梅沙站区间左线 EPB/TBM 双模盾构机卡机前,盾构机正常状态下的掘进速度变化范围为 8 ~ 15 mm/min,平均值约为 10 mm/min;而在进入掘进受阻阶段后,掘进速度骤降至 0.2 ~ 3.0 mm/min,平均值仅为 1.5 mm/min,较正常掘进期间平均掘进速度降低了 85.0%,受阻效应明显。在刀盘扭矩方面,左线盾构正常掘进过程中刀盘扭矩平均值约为 1 250 kNm,在卡机前先由 1 200 kNm 增至 1 750 kNm,进入受阻阶段迅速降至 350 kNm,降低幅度为 78.1%,可见刀盘对岩体切削作用显著降低;而刀盘总顶推压力变化规律与上述掘进参数相反,由正常掘进状态下的平均值 1.7 GPa 陡增至约 4.2 GPa,增大 2.47 倍,可见总顶推压力的陡增,以及刀盘扭矩和掘进速度的骤降为卡机事故发生的主要掘进参数演变规律。该规律可作为卡机事故的判断依据,并据此提供预警





a) 刀具 45A

b) 刀具 45B

c) 刀具 41#

图 3 刀具磨损情况

Fig.3 Tool wear conditions

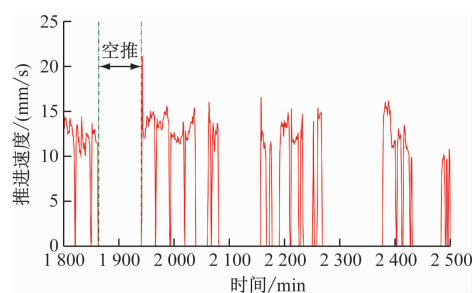


图 4 清洗空推段数据过程

Fig.4 Data cleaning process for the empty pushing section

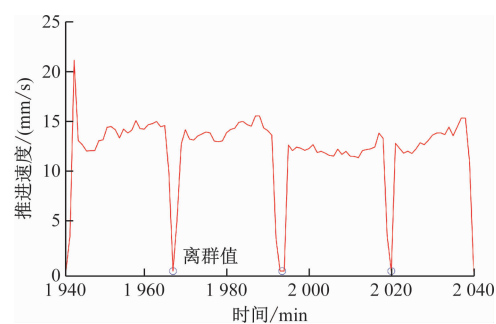
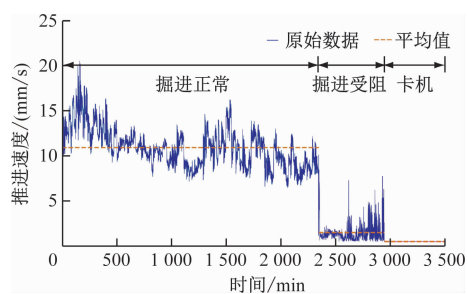
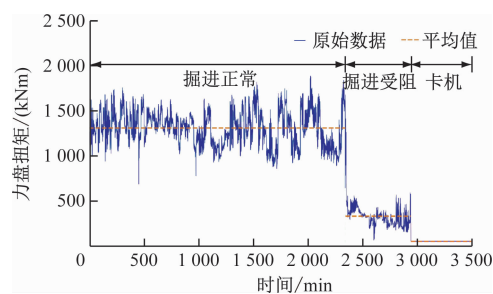


图 5 清洗异常离群数据点过程

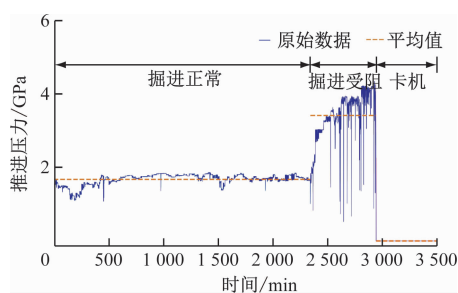
Fig.5 Cleaning process for abnormal outlier data points



a) 掘进速度



b) 刀盘扭矩



c) 总顶推力

图 6 卡机事故过程中的掘进参数随时间变化曲线

Fig.6 Curves of the tunneling parameters changing with time in the process of jamming accident

建议。

### 3 盾构机卡机处理

#### 3.1 卡机处理施工流程

针对此次卡机事故的处理施工进行系统阐述,详细介绍了卡机脱困施工技术的操作过程。卡机处理主要施工流程如图7所示。

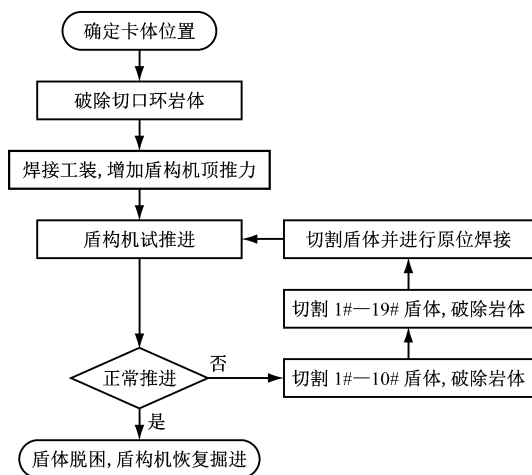


图7 卡机处理主要施工流程

Fig. 7 Main processes for handling the machine jamming

#### 3.2 盾构机卡机位置确定

将盾构机纵向切面分为左上、左下、右下、右上等4个分区,尝试增加一定顶推力进行推进。依据各个分区盾构掘进参数采集情况,确定脱困施工的重点区域。

#### 3.3 切口环岩体破除

在明确分区后,对该分区切口环位置岩体进行破除。采用人工对缩径体对应分区及相邻分区切口环处岩体进行破除,破除深度为3~5 cm,确保盾构机可以顺利顶推。

#### 3.4 顶撑工装焊接

由于盾构机自有顶推力已不满足其脱困所需顶推力,因此由单独油顶提供额外顶推力。油顶位置选取在缩径体相应盾体位置,并在盾尾距成型管片1 m处采用厚5 cm钢板焊接顶撑工装,以保证满足油顶顶推力作用。

#### 3.5 盾构机试推进

待缩径体对应分区岩体破除完成,且盾尾处油顶增加完成后开始试掘进。掘进过程中须严格控制掘进参数,待推进行程超出油顶顶撑行程,将顶撑工装割除后重新焊接,保证一次性脱困。若盾构机仍存在卡机且成型管片不满足继续增加额外顶

撑力时,需对岩体进行进一步破除工作。

#### 3.6 第一部分盾体切割及岩体破除

在盾构机试推进无法脱困后需再次对缩径体进行破除,需先沿切口环位置切割盾体。为保证盾体的完整性,需分阶段进行切割。受作业空间及地下水等综合因素影响,选择对盾体中上部进行分块切割,切割部分共计19块,其中:1#—10#为首次切割盾体(即第一部分切割盾体),切割尺寸因筋板位置而调整,分别为80 cm×100 cm(1#)、80 cm×80 cm(2#)、60 cm×80 cm(4#)、40 cm×80 cm(3#、5#、6#、7#、8#、9#、10#)。切口环切割分块示意图如图8所示。

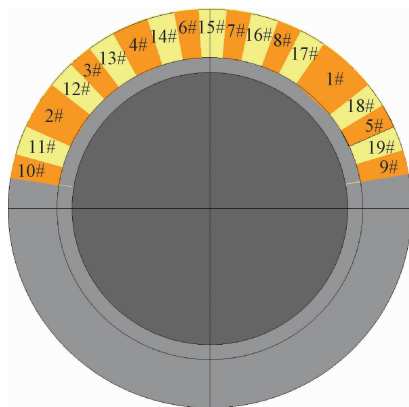


图8 切口环切割分块示意图

Fig. 8 Schematic diagram of segmented cutting of the incision ring

盾体钢板切割完成后,随即安排人员对钢板外侧岩体进行破除。

#### 3.7 第二部分盾体切割及岩体破除

待1#—10#岩体破除完成后对11#—19#位置钢板进行切割作业,切割时需先避开筋板位置(12#、14#、16#、4#)切割,采用氧气乙炔搭配割枪作业。待其余位置作业完毕后,开始对筋板位置钢板进行切割作业。筋板位置钢板切割前需先将附近点位钢板进行焊接,焊接前需对盾体钢板及切割钢板四周开坡口。

#### 3.8 切割盾体原位焊接

待1#—19#位置盾体外侧岩体全部破除完成后,需按照标记对钢板进行复位焊接。焊接前需对此前切割下来的钢板四周进行开坡口。开坡口采用氧气乙炔切割并采用角磨机打磨,坡口深度30 mm,并在钢板两侧焊接吊耳。待所有钢板焊接完成且焊接质量满足要求后方可进行试推进作业。

### 3.9 盾构机恢复掘进

岩体破除和盾体焊接工序完成后,将开始盾构机试掘进流程。在盾构机掘进期间,必须严格对掘进参数进行监测。绘制本区间试掘进阶段的掘进参数时程曲线,见图9。

由图9可见:在掘进恢复阶段,掘进参数主要经历卡机阶段、卡机恢复阶段及正常掘进阶段等三个主要变化阶段。在卡机恢复阶段,掘进速度提升至约2.5 mm/min,恢复至正常掘进时平均速率提升

至6.0 mm/min,基本实现卡机脱困;刀盘扭矩逐渐增至正常掘进状态下的数值水平;盾构机总顶推压力在卡机试掘进时,起初一直保持在4.0 GPa左右的高水平,而后在卡机恢复阶段突然骤降至1.8 GPa左右,标志着盾构机卡机脱困成功,其后总顶推压力平均值约为2.1 GPa,盾构机恢复正常掘进。相较卡机前,卡机恢复后掘进参数也略有不同,主要表现为掘进速度和刀盘扭矩减小,究其原因因为掘进状态刚恢复,需严格监控掘进参数并控制参数设置。

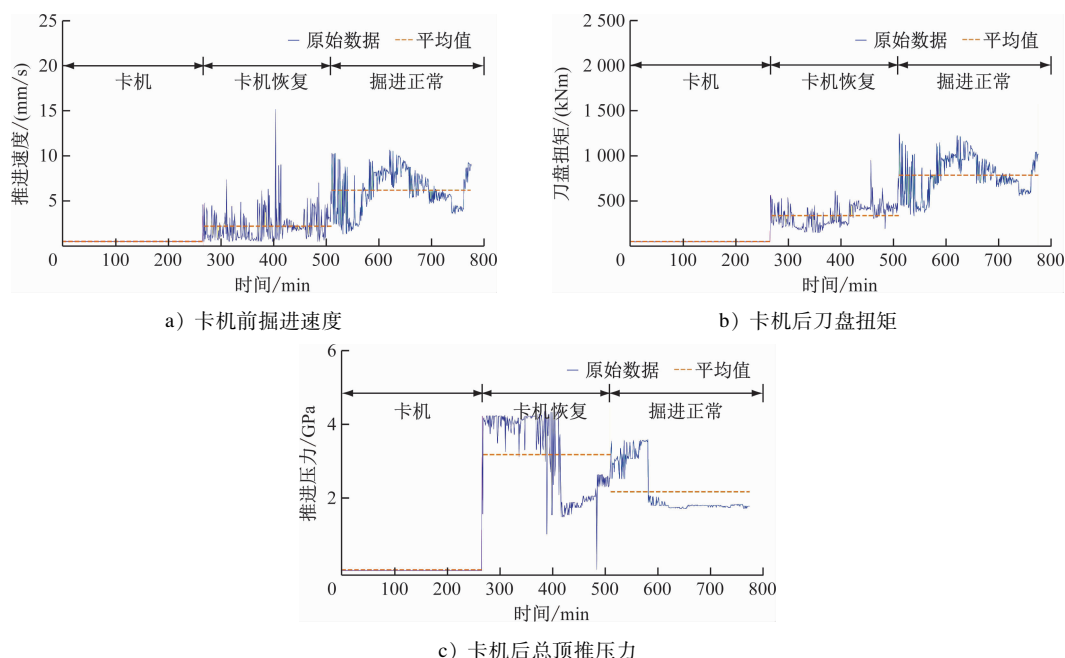


图9 卡机脱困试掘进过程中各掘进参数随时间变化曲线

Fig.9 Curves of each parameter changing with time during the trial excavation process of the stuck machine

## 4 盾构机卡机事故分析及预防措施

### 4.1 事故原因分析

大梅沙站—小梅沙站区间发生的盾构机卡机事故受到设备、地层及施工等多重因素的综合影响。分析事故主要原因为:

- 1) 未及时发觉和预警刀盘边缘滚刀异常磨损,直接造成开挖直径缩小,从而引起卡机。
- 2) 本次卡机事故发生位置处盾构机下部和中下部易出现石粉堆积情况,且遇水混合后具有一定的强度,对盾构机掘进产生一定的影响。
- 3) 盾构区间隧道内存在较多断层破碎带等不良地层,使得地层变形会显著提升,盾构机的掘进速度显著降低,容易出现停机现象。
- 4) 当盾构机在下坡掘进过程中,盾尾钢刷密封

不够紧密或密封油脂压力不足,导致同步注浆浆液反向流进扩挖间隙中,在其凝结硬化后,填充扩挖间隙成为围岩压力的传递介质,从而增加盾构机发生卡机的风险。

### 4.2 预防措施建议

针对上述事故原因分析,对类似地层施工提出如下卡机事故预防措施的建议:

- 1) 加强刀具管理,在盾构隧道区间岩石单轴抗压强度较高时,需对每环管片的刀具磨损情况进行简要检查,发现磨损异常时及时进行刀具磨损量测量并更换对应刀具。
- 2) 适当提高边缘滚刀磨损量更换标准,确保盾构机开挖直径。
- 3) 在EPB/TBM双模盾构机掘进经过下坡段或停机时,应注意保持盾尾油脂压力,防止管片同

步注浆浆液倒流至扩挖间隙中。

4) 由于断层破碎带自稳能力极差,作用在盾壳上的围岩压力相较于普通地层显著提升,故应提前对断层破碎带及富水地层进行注浆加固。

## 5 结论

1) 在盾构机掘进施工卡机前,其相关掘进参数将发生明显异常变化,具体反映在盾构机掘进速度骤降,刀盘扭矩骤降,以及总顶推力显著提升等方面,故在施工过程中应对掘进参数异常变化进行排查,避免盾构机卡机的发生或加剧。

2) 当发现盾构机掘进参数异常后,应及时停止掘进,并通过对比刀盘和土仓内渣土堆积情况的综合判定,确定盾体机是否发生卡机,并及时更换偏磨刀具,开展相关脱困工序。

3) 若盾构机发生卡机事故,应根据卡机的实际情况及缩径体的大小确定合理切割位置及切割大小,从而高效处理缩径体,减少对工期的影响,实践证明在缩径体取出后通过焊接安装的方式仍可保证盾构机完成后续掘进任务。

## 参考文献

- [1] 何川,陈凡,黄钟晖,等. 复合地层双模盾构适应性及掘进参数研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 43.  
HE Chuan, CHEN Fan, HUANG Zhonghui, et al. Tunneling parameters and comparison of adaptability for compound strata of dual-mode shield machine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 43.
- [2] 刘泉声,黄兴,时凯,等. 超千米深部全断面岩石掘进机卡机机理[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 78.  
LIU Quansheng, HUANG Xing, SHI Kai, et al. Jamming mechanism of full face tunnel boring machine in over thousand-meter depths[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 78.
- [3] 尚彦军,杨志法,曾庆利,等. TBM 施工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, 26(12): 2404.  
SHANG Yanjun, YANG Zhifa, 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, 26(12): 2404.
- [4] 尚彦军,史永跃,曾庆利,等. 昆明上公山隧道复杂地质条件下 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.

- 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.
- [5] 冯欢欢,洪开荣,杨延栋,等. 极端复杂地质条件下 TBM 隧道施工关键技术研究及应用[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(1): 42.  
FENG Huanhuan, HONG Kairong, YANG Yandong, et al. Research and application of key construction technologies for TBM-driven tunnels under extreme complex geological conditions[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(1): 42.
- [6] 吴斐,温森,孔庆梅. 节理岩体力学参数对双护盾 TBM 卡机的影响[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(1): 105.  
WU Fei, WEN Sen, KONG Qingmei. Influence of mechanical parameters for jointed rock masses on double-shield TBM jamming[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(1): 105.
- [7] 侯少康,刘耀儒. 双护盾 TBM 掘进数值仿真及护盾卡机控制因素影响分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(8): 809.  
HOU Shaokang, LIU Yaoru. Numerical simulations of double-shield TBM tunneling for analyzing shield jamming control factors[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(8): 809.
- [8] 司景钊,王唤龙,曹贵才,等. 高黎贡山隧道 TBM 掘进卡机段 TSP 法物性参数响应特征分析[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(3): 396.  
SI Jingzhao, WANG Huanlong, CAO Guicai, et al. Analysis of response characteristics of physical parameters of tunnel seismic prediction method in TBM-jammed section of Gaoligongshan tunnel[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(3): 396.
- [9] 王亚锋. 高黎贡山隧道 TBM 不良地质条件下卡机脱困施工关键技术[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(3): 441.  
WANG Yafeng. Key technologies for TBM jamming release of Gaoligongshan tunnel under unfavorable geologies[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(3): 441.
- [10] 秦银平,孙振川,陈馈,等. 复杂地质条件下 TBM 卡机原因及脱困措施研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(8): 92.  
QIN Yinping, SUN Zhenchuan, CHEN Kui, et al. Study on the cause of TBM jam and its relief measures under complex geological condition[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(8): 92.

· 收稿日期:2022-09-22 修回日期:2022-10-24 出版日期:2025-01-10  
Received:2022-09-22 Revised:2022-10-24 Published:2025-01-10  
· 通信作者:段岳强,高级工程师,duanyq2637@163.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license