



# 敞开式 TBM 在破碎硬岩地层的卡机 处理与脱困技术研究

唐 维<sup>1,2</sup>, 贾文达<sup>2</sup>

(1. 中交中南工程局有限公司, 湖南 长沙 410000; 2. 中交一公局集团有限公司, 北京 100024)

**摘要:** 为了迅速解决类似 TBM 卡机问题, 确保工程施工进度和安全, 文章针对乌鲁木齐至尉犁段在建世界最长高速公路的天山胜利隧道 TBM 掘进施工过程中, 由于隧道左侧围岩破碎和裂隙水发育引发破碎带塌方, 导致 TBM 刀盘及护盾卡死无法正常转动的问题展开研究, 介绍了采用 TGP 超前钻探与预注浆技术保护 TBM 刀盘并对其前方围岩进行加固处理, 通过化学灌浆和超前预注浆技术处理卡盾问题, 最终成功脱困。研究表明: 该方法不仅成功使 TBM 安全脱困, 较其他脱困方法缩短了处理时间, 该研究成果为类似工程处理 TBM 卡机问题提供有效的技术支持和经验参考。

**关键词:** 围岩破碎带; 敞开式 TBM; 卡机; 脱困; 化学灌浆; 超前管棚

中图分类号: TU94<sup>+</sup>9

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)04-0044-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.04.047

## Research on jamming treatment and relief technology of open TBM in crushed hard rock formation

TANG Wei<sup>1,2</sup>, JIA Wenda<sup>2</sup>

(1. CCCC Central South Engineering Co., Ltd., Changsha 410000, Hunan, China;

2. China First Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, China)

**Abstract:** In order to quickly solve the problems such as TBM jamming, so as to ensure the schedule and safety of project construction, this paper focuses on the research of TBM jamming problem during the construction of the Tianshan victory Tunnel, which is part of the Urumqi-Yecheng section of the world's longest highway. The issue was caused by the fracture and crack water development on the left side of the tunnel, resulting in the breakage zone collapse and the TBM cutter head and shield being jammed and unable to rotate normally. The use is introduced of TGP advanced drilling and pre-grouting technology to protect the TBM cutter head and reinforce the surrounding rock in front of it. Through chemical grouting and advanced pre-grouting technology, the jamming problem is successfully resolved. The research shows that this method not only successfully frees the TBM safely but also reduces the processing time compared to other methods. This research provides effective technical support and empirical reference for similar projects dealing with TBM jamming issues.

**Key words:** surrounding rock fracture zone; open TBM; machine jamming; get out of trouble; chemical grouting; lead pipe shed

近年来, TBM(隧道掘进机)设备在长大和高海拔公路隧道的高效掘进施工应用, 对于推动我国高质量共建“一带一路”具有深远的战略意义。然而, TBM 在长大隧道施工遇到围岩突变情况时容易

遇到刀盘卡顿和卡机问题<sup>[1]</sup>。出现设备“被困”现象严重影响了施工进度和安全, 同时 TBM 设备在长岭隧道施工换刀风险和难度较高, 因此寻找一种更安全高效的处理方法显得尤为重要。经研究国内

收稿日期: 2024-08-01

基金项目: 2024 年度中交中南工程局有限公司科技研发项目(富水软土地层承插式管片区间施工技术研究)

作者简介: 唐 维(1989—), 男, 工程师、工程部部长, 从事地下工程与盾构施工管理及技术研究。

外通常解决TBM卡机脱困问题的方法包括:侧壁导坑法、辅助坑道法、爆破法和后退法<sup>[2-3]</sup>,传统方法可能会对周围岩体造成二次震动,延长工期和增加施工安全风险等问题。本文通过总结研究灌浆法处理TBM刀盘卡顿和卡机问题,利用设备护盾作防护进行TGP超前钻探与预注浆施工,创新性地提出使用水泥浆或化学浆液进行固结灌浆或回填灌浆的方法,增强刀盘前面破碎的围岩整体稳定性,从而帮助TBM脱困。与传统方法相比,灌浆法更加高效且对工期影响较小,同时可减少人工作业时的施工安全风险<sup>[4]</sup>,以期可为长大隧道建设提供一种更为可靠的解决方案。

## 1 工程概况

乌鲁木齐至尉犁段(以下简称“乌尉高速”)是国家高速公路G0711乌鲁木齐至若羌的组成部分,是新疆跨越天山连接南北疆的交通干线,是南北资源通道和国防通道,在区域路网中占有重要地位。其中,天山胜利隧道是控制性工程,也是乌尉高速的“咽喉”工程,是目前世界在建的特长高寒、最长高海拔公路隧道。该隧道具有“一长二深五高二新”显著特点,采用三洞四竖井施工方案。其中,服务隧道采用TBM施工工法,隧道桩号PK75+730~PK86+782.25,长度约为11 052.25 m,发挥服务隧道TBM快速施工、超前导洞的优势,利用横通道开辟主洞工作面,实现长隧道短打目的。隧道位于剥蚀构造高山地区,山体地形起伏大,线路相对高差近1 390 m。隧址区山高坡陡,多形成悬崖峭壁,岩石风化破碎,冰川地貌发育,河谷切割较深,多为“V”形谷。隧道穿越多个地质断裂带,服务隧道V级围岩1 264 m,占全长的11.44%,IV级围岩5 356 m,占全长的48.46%,III级围岩4 432.25 m,占全长的40.1%,施工难度较大。

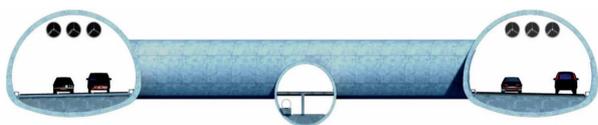


图1 主洞与服务隧道位置关系

## 2 地质情况

### 2.1 施工地质条件

结合TBM机被困施工里程分析,盾尾揭露的

围岩主要为花岗岩、斜长岩,围岩较破碎,护盾左上方出现塌腔;护盾右侧为微风化花岗岩,块状构造,节理裂隙稍发育,岩体较完整;护盾顶部围岩垮塌,护盾顶有1 m高度的洞渣堆积(以大块石为主);护盾左侧围岩垮塌,并形成溜渣体,以细小砂砾为主、含有大块石。

### 2.2 塌方处现场情况

2023年8月26日,施工人员在TBM掘进施工中遭遇障碍。盾尾处拱顶出现塌腔,伴有碎块状掉落,左侧破碎岩石发生溜塌现象。清理后进行试转刀盘操作,导致大量细渣(约20 m<sup>3</sup>)从刀孔和刮渣口涌出,并压停皮带机。护盾出现变形,油缸受压回缩,左、顶护盾与楔形限位块接触,右侧油缸收缩受限。项目部尝试再次旋转刀盘,但扭矩和压力达到预警值,护盾无移动,最终TBM陷入困境无法推进。经超前钻探,确定塌腔范围,其结论如下。

(1)塌腔长度:从护盾尾部后方5 m延伸至刀盘前方2~4 m,纵向长度约为12~14 m。

(2)塌腔高度:护盾顶部的塌腔高度为3~4 m,向左上角方向延伸,最高点在10~15 m之间。

(3)塌腔宽度:塌腔位于护盾的左上方,向11点钟方向延伸,宽度达到10~12 m。

(4)涌水量:在3 500~4 000 m<sup>3</sup>/d,持续有细渣涌出,伴随大量细渣和石块涌入TBM护盾尾部机身内。

(5)塌腔发生次数:截至2023年10月11日共发生4次塌腔事件。2023年8月26日夜间掘进时,拱顶出现塌腔并伴有水流出砂化物,导致拱脚部位堆满砂砾,无法安装拱架,掌子面的主要出水位置在7点钟方向,出水量约4 000 m<sup>3</sup>/d;2023年9月5日中午再次发生二次塌方,造成3榀拱架严重变形,侵限约80 cm;2023年10月4日和8日刀盘前左上方也出现了溜渣现象。

(6)超前探孔情况:搭设的超前探孔深达14.5 m,入口位于护盾10点钟位置,距离护盾体30 cm,向左30°水平仰角4°。探孔出水量很小。根据探孔记录描述,在1.9 m处进入松散层,而在10.1 m深处进入基岩。据此推测刀盘左侧前方约4.8 m才到达基岩。具体处理措施如图2所示。

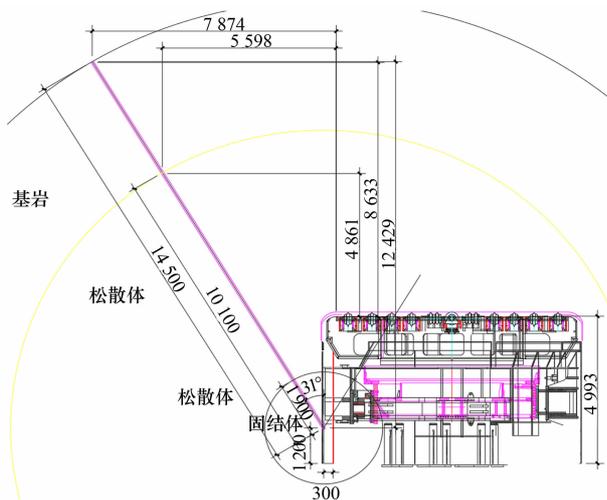


图 2 PK84+714~PK84+724 段塌腔钻探示意 mm

### 3 脱困应对方案与措施

面对隧道 TBM 刀盘及护盾卡机情况，现场采用超前钻探为主、TGP 为辅的方法进行超前钻探工作，探明前方松散体及岩体情况；采用化学灌浆对 TBM 刀盘进行保护工作，再进行超前预注浆对前方护盾周岩破碎带进行加固处理，使其成为一个整体，最后进行刀盘清渣及护盾清渣等脱困工作，满足 TBM 恢复掘进施工。

#### 3.1 化学灌浆保护刀盘

##### 3.1.1 材料选择

化学灌浆材料主要采用聚胺亚脂类(由白色料和黑色料组成)，用发泡材料堵塞出水孔，发泡材料配比主要包括：AB 料浆液(A 料为基异氰酸酯、B 料为组合聚醚多元醇)，该试样经冷却定型后，制成  $70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm}$  的立方体试块进行抗压强度试验，平均强度为  $0.6\text{ MPa}$ ，经现场试验其撕裂强度检测：1) 被测试验截面积： $110\text{ mm} \times 44\text{ mm} = 4\,840\text{ mm}^2$ ；2) 配重为  $42.2\text{ kg}$ ，换算为力值： $42.2 \times 9.8 = 413.56\text{ N}$ ；3) 撕裂强度： $413.56/4\,840 = 0.085\text{ MPa}$ 。



图 3 发泡材料室内试验效果

#### 3.1.2 施工工艺

化学注浆施工采用自下而上顺序灌注，待形成封闭空间后，重新造孔进行注浆。按现场实际情况，将注浆压力上升到最大允许压力  $5\text{ MPa}$ ，以保证注浆的密实性和增大有效扩散范围。化学注浆开始后，应连续注浆，不允许发生中断。化学注浆采用高发泡限量化学注浆，化学注浆必须注浆饱满，常压发泡保护刀盘。注浆工艺如图 4 所示。

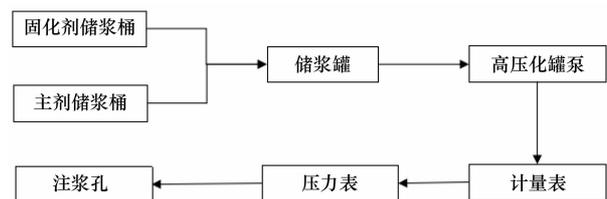


图 4 化学注浆示意

#### 3.2 护盾盾尾帽檐拆除

左线护盾盾尾  $32\text{ cm}$  帽檐是为了保证原 TBM 前护盾与后护盾有效连接设置的，后护盾拆除后，帽檐会直接影响到钢筋排插入，因此必须切除。采用割枪从 8 点钟方向向 1 点钟方向进行割除，在进行 11 点至 1 点段的帽檐割除前，在该段进行径向钻孔注浆，将 11 点至 1 点范围上方的松散渣体进行固结，然后进行该段帽檐的割除施工。具体 TBM 顶护盾外部结构如图 5 所示。

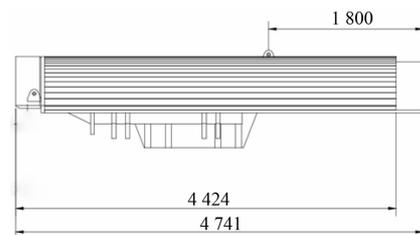


图 5 TBM 顶护盾结构 mm

#### 3.3 超前预钻孔及注浆处理

超前预注浆钻孔采用哈迈管棚钻机在 9 点至 13 点方向钻孔 9 个，钻孔最大深度  $18\text{ m}$ (入岩不小于  $4\text{ m}$ )，采用自下而上跳打工艺施工，正拱顶区域则超前预注浆距离刀盘的最小距离为  $287.1\text{ cm}$ ，超前预注浆根部距离刀盘距离为  $662.8\text{ cm}$ ，外插角度约  $15^\circ$ ，钻孔直径  $120\text{ mm}$ 。结合 TBM 设备型号，为确保超前预注浆孔与管棚导向管安装，需要在压注环法兰盘位置切割窗口，窗口尺寸为  $45\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ ，窗口间距为  $15\text{ cm}$ ，作为超前预注浆孔与管棚导向管安装位置前端。割除窗口后，清除窗

口周边松散的小碎石。具体切割窗口如图 6 所示。



图 6 压注环法兰盘处开窗

预注浆采用前进式分两阶段施工, 第一阶段钻孔钻进深度为 7~8 m, 环向间距 1 m, 注浆固结 4 h; 第二阶段钻孔钻进深度 18 m, 环向间距 1 m, 注浆固结 4 h。超前预注浆孔口管与法兰盘间的空隙采用锚固剂封堵并达到终凝强度要求方可连接注浆设备对施工完成的超前预注浆孔进行注浆, 浆液采用硅酸盐 P. O42.5 水泥、水玻璃双液浆, 水灰比按照 1:1, 注浆浆液先稀后浓(水灰比为 1.5), 根据进浆量和注浆压力的变化调整浆液浓度, 施工考虑长时间不上压力, 进浆量大, 调浓 1

级。压力上升快, 调稀一级的原则, 注浆压力控制在 1 MPa 左右, 终浆压力控制在 1.5 MPa 内。考虑防止串浆, 现场应隔孔交替施工。具体钻孔注浆加固布孔如图 7 所示。

### 3.4 超前大管棚施工

采用 $\varnothing 108$  mm 的无缝管棚, 钢管内插一个直径 25 mm 加工制作的钢筋笼增加其刚度,  $\varnothing 42$  mm 小导管作为中轴焊接支撑点, 3 根 $\varnothing 18$  mm 钢筋环向均匀布置。具体如图 8 所示。

管棚施工起点选择在压注环法兰盘处进行开窗, 导向管长度为 2 m, 保证钻机钻孔角度, 管棚外插角度按 $10^\circ$ 控制。超前管棚从 8 点半至 13 点方向打设, 合计 40 孔(正常孔 35 个, 加密孔 5 个, 加密环向长度为 2 m, 根据钻孔探明围岩情况确定加密部位, 加密孔位于两个正常孔之间), 环向间距 30 cm, 打孔深度最大 17 m(入岩深度不小于 3 m), 正拱顶区域超前预注浆距离刀盘的最小距

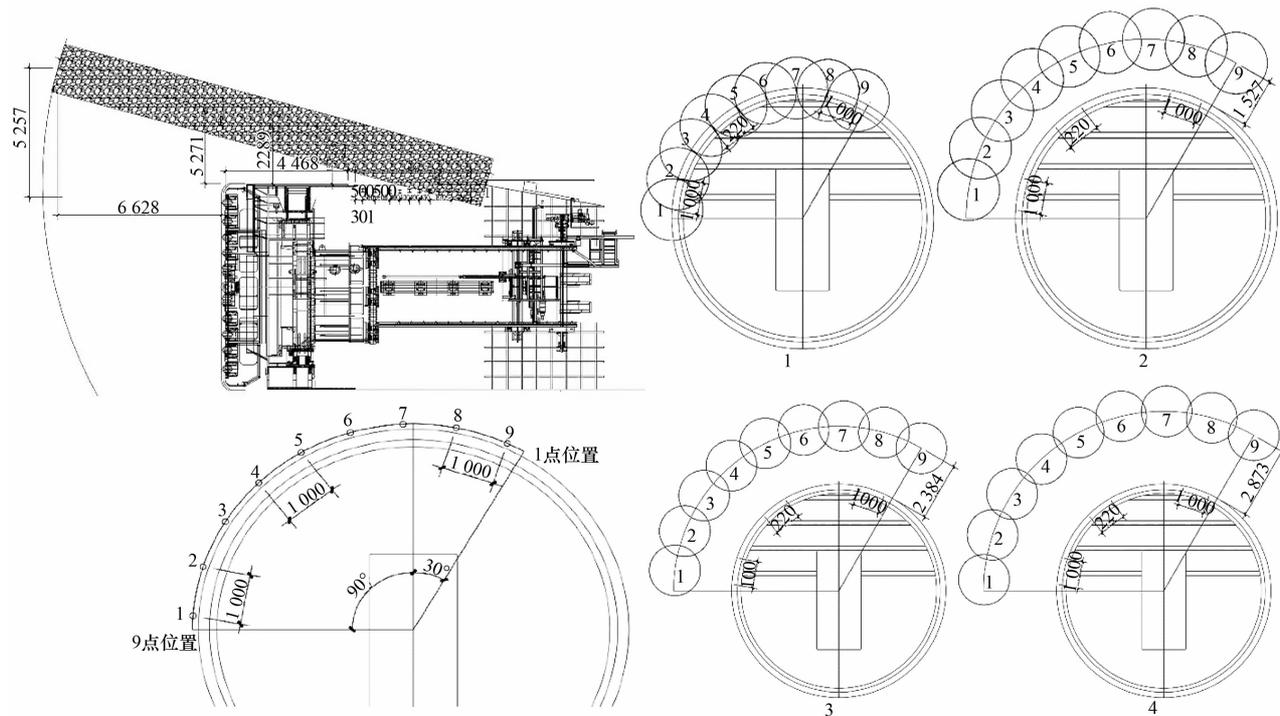


图 7 超前预注浆布置

mm

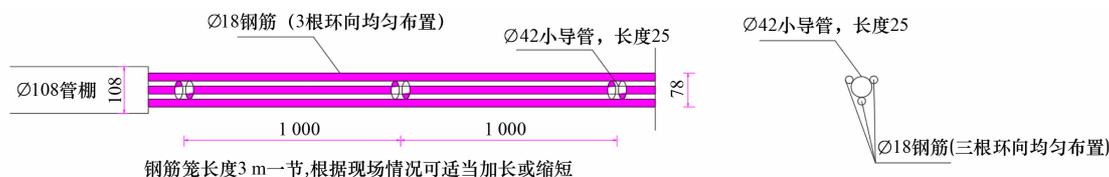


图 8 钢筋笼制作图

mm

离为 190.0 cm, 超前预注浆根部距离刀盘距离为 598.8 cm。外插角度约为  $10^\circ$ , 钻孔直径为 120 mm, 采用  $\varnothing 108 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$  无缝钢管进行注浆, 并利用超前注浆孔验证钻孔工艺参数。具体注浆孔位布置如图 9、10 所示。

### 3.5 刀盘脱困处理

#### 3.5.1 渣土清理

重新排查刀盘被卡的因素, 主要从铲刀口卡石头、护盾与刀盘背部铲牙打架情况、刀盘背部拱腰以下积渣处理这 3 个方面排查处理。结合 TBM 设备分析, 依次拆除中心刀 1、3、2、4 及面刀 25<sup>#</sup>、29<sup>#</sup>、31<sup>#</sup>、38<sup>#</sup>、45<sup>#</sup>; 拆边刀 47<sup>#</sup>、51<sup>#</sup>、57<sup>#</sup>, 刀盘面板拆除如图 11 所示。通过面刀孔将刀盘前方松散体进行清除, 或采用高压水枪将松散体细渣冲入到刀仓内, 再人工进行清理。清理出来的塌腔, 及时采用化灌材料进行充填; 在进行充填前, 采用编织袋将面刀与刀盘之间的缝隙进行填塞, 防止化灌材料回灌。

(1) 刀盘拱腰以上周边洞渣清理: 刀盘周边固结后, 首先对拱腰以上铲刀口打开, 清理铲刀口与周边松散体的洞渣, 尽量将铲刀口外周边 50 cm 内洞渣清理出 10 cm 间隙。

(2) 刀盘拱腰以下周边洞渣清理: 待刀仓内洞渣清理完成, 将边刀 47<sup>#</sup>、51<sup>#</sup>、57<sup>#</sup> 进行拆除; 采用电镐对底部松散体进行松动, 然后采用小型

铲具将边刀周边洞渣掏出。

#### 3.5.2 刀盘试转

清刀仓和刀盘前方、刀仓背部和喇叭后位置围岩, 清干净后摄像观察掌子面围岩情况(摄像镜头严禁来回晃动, 有序旋转拍摄一圈); 当周边围岩稳定性较好时, 方可对刀盘进行试转。刀盘试转第一步是先拆掉 49<sup>#</sup>、53<sup>#</sup>、55<sup>#</sup> 面刀; 刀盘逆转(站在刀盘背部方向看), 57<sup>#</sup> 刀转到 3 点钟方向。刀盘启动前排查, 尝试转动刀盘, 若刀盘转不动, 则继续清理刀盘溜渣, 直至刀盘能够转动为止。

#### 3.6 护盾脱困

刀盘启动前排查, 尝试转动刀盘, 若刀盘转不动, 则继续清理刀盘溜渣, 直至刀盘能够转动为止。刀盘清理完成后仍然无法转动, 拟采用以下措施: 严格控制清理质量, 刀盘与护盾之间保证 20 mm 以上间隙, 保证刀盘周边无阻碍; 盾尾外侧围岩固结清理采用钻孔设备打孔, 高压水冲洗, 如遇到孤石再进行开窗清理, 开窗前先采用摄像探头探明岩体情况, 确保岩体牢固后方可进行清理固结岩体, 开窗位置设置可旋转关闭的封闭窗, 防止开窗位置突泥涌水时无支挡结构。具体开窗位置如图 12 所示。

开窗脱困处理满足要求如下:

(1) 刀盘启动成功进行尝试推进, 如不能脱困, 在护盾内找合适位置开窗, 清理管棚与护盾

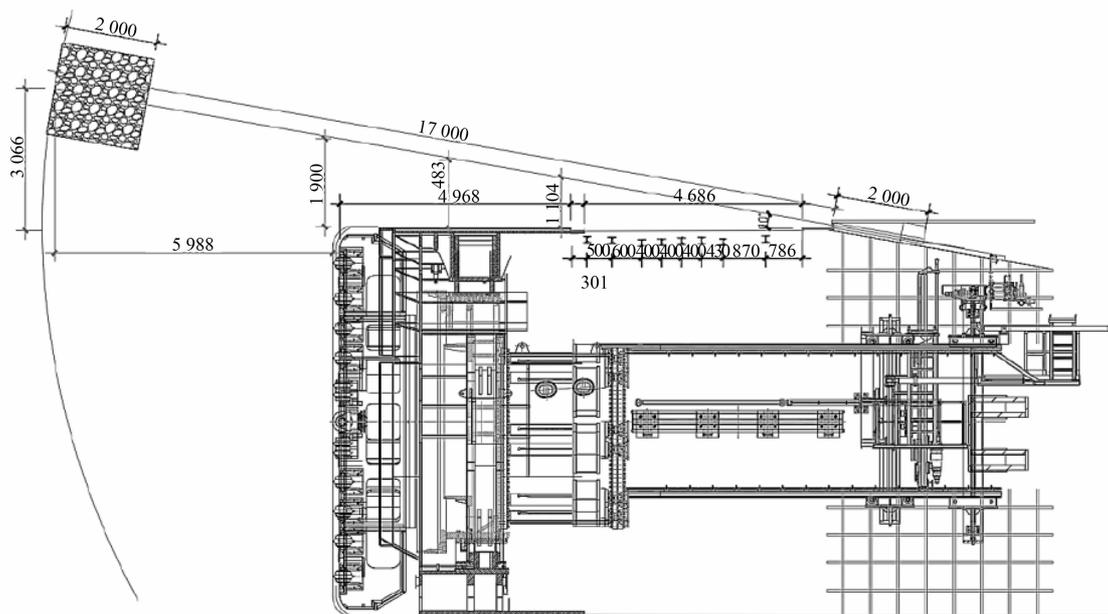


图 9 管棚施工布置

mm

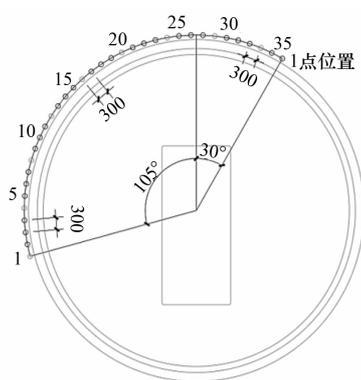


图 10 浆液扩散范围示意

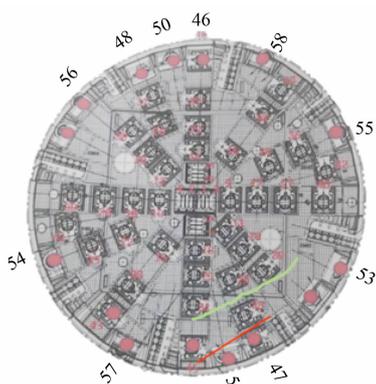


图 11 刀盘面板拆除示意

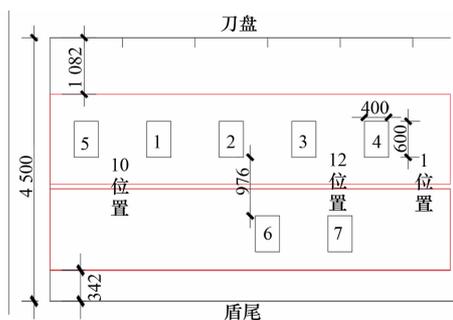


图 12 开窗位置示意

mm

mm

间的固结的围岩, 直至脱困。

(2) 护盾全长 4.5 m, 9 点至 12 点位置需进行开窗处理, 开窗 5~7 处, 每处 40 cm × 60 cm (宽 × 高), 每处窗口有效清理范围为宽度 1.2 m, 高度 1.5 m。

(3) 为防止开窗时发生溜渣体、涌水事故发生, 需优先选择 1# 位置进行开窗, 后续按照编号顺序依次开窗, 待开完 4# 窗口后尝试脱困, 如顺利脱困后续窗口无需在开。

(4) 清理固结岩体时先采用高压水刀进行处理, 无法处理的大块石采用风镐进行人工凿除, 施工过程中专职安全员必须全程监督作业, 并配

备马凳 + 钢板的防护设施。

(5) 天窗焊接恢复, 采用贴筋板焊接。

### 3.7 建议

(1) TBM 刀盘脱困后, 盾体先推进 1.5 m, 使刀盘抵住基岩面, 再进行超前预加固。对于前方破碎围岩, 宜采用超前预固结连续均衡施工, 直至顺利通过断层破碎带。

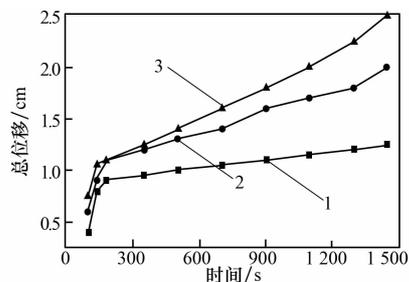
(2) 掌子面注浆加固: 利用面刀刀孔进行超前钻孔, 采用玻璃纤维锚杆超前加固 3~6 m, 宜采用化学浆液进行注浆固结。

(3) 不良地质采用钢筋排连续封闭支护方案, 在护盾尾顶部 180° 范围内安装反扣槽钢, 将钢筋排预留槽口延伸至盾尾, 护盾内侧宜反扣槽钢与钢筋排系统联合使用。

(4) 在盾尾安装密排拱架时, 可以利用专门的拱架安装器来实现 TBM 紧邻护盾处安装钢拱架的功能。采用 HW175 型钢进行安装, 确保纵向间距为 45 cm, 同时及时施工系统锚杆, 以保障施工安全和结构稳定性。

(5) 掘进施工过程中, 发现碎渣涌出时, 应立即进行清理。使用化学灌浆发泡材料充填掌子面的空腔, 并封闭部分铲刀口以降低单位时间的出渣量, 防止压停 1 号皮带。推进过程中采用“低转速、大扭矩”的方式操作 TBM, 确保出渣量与推进速度相匹配, 从而减少前方塌腔出现的风险。

(6) 在断层带施工中, 由于动水和突水突泥环境的影响, 涌水量大, 导致注浆浆液大量流失。初期施工时, 即便注浆压力达到 1.0 MPa, 浆液也难以注入。过高的注浆压力可能增加卡机段的变形量, 并引发二次坍塌或次生灾害。具体的注浆压力参数如图 13 所示。



注浆压力/MPa: 1—1.0; 2—1.5; 3—2.0。

图 13 注浆压力与卡机段变形量关系

(下转第 62 页)

## 参考文献:

- [1] 唐凌霄,姚华彦,徐马云龙,等. 蒸压加气混凝土板研究与应用综述[J]. 材料导报,2022,36(增刊1):237-240.
- [2] 刘志伟. 绿色装配式建筑设计研发与实践[J]. 住宅产业,2018(11):33-37.
- [3] 谢勇,施潇韵,孙杰. 蒸压加气混凝土板结构性能现状分析和对策探讨[J]. 砖瓦,2018(6):81-84.
- [4] 魏斌乾. 高层装配式建筑外围护结构蒸压加气混凝土板承载力计算和施工质量控制[J]. 建筑技术,2023,54(8):922-926.
- [5] 陈凯. 蒸压加气混凝土板裂缝成因及施工控制技术[J]. 建筑安全,2023,38(5):51-54.
- [6] 王晓鹏. 装配式加气混凝土复合保温外墙板热工性能研究[D]. 济南:山东建筑大学,2022.
- [7] 李磊. 装配式建筑用加气混凝土外墙板生产技术及性能研究[D]. 北京:北京建筑大学,2019.
- [8] 林祥武. 蒸压加气混凝土装配式内隔墙设计与施工技术[J]. 福建建设科技,2022(4):75-77.
- [9] 杜中恒. 装配式曲边蒸压加气混凝土墙板组合墙受

力性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2022.

- [10] 李聪,张喜臣,郑恒,等. 装配式蒸压加气混凝土轻钢复合墙体全螺栓连接节点与焊接节点承载力对比分析[J]. 中国建筑金属结构,2022(2):8-10.
- [11] 肖凤春. 蒸压轻质砂加气混凝土板安装技术及质量控制[J]. 中国新技术新产品,2023(23):105-107.
- [12] 郑锦涛,朱文星,王玉山,等. 装配式构造柱约束沙漠砂蒸压加气混凝土砌块墙体的抗震性能试验研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2023,41(6):678-683.
- [13] 宋有志,闫博杰,宋慧聪,等. 蒸压加气混凝土条板施工质量控制[J]. 建筑技术,2024,55(14):1735-1738.
- [14] 王原硕,王罡,于利佳. 蒸压加气混凝土条板现场质量通病梳理与防治[J]. 建筑技术,2023,54(17):2093-2095.
- [15] 李欣忆. 装配式蒸压加气混凝土墙板结构受力性能研究[D]. 北京:北京建筑大学,2021.
- [16] 官志刚. 装配式蒸压加气混凝土板构墙体抗震性能研究[D]. 中国地震局工程力学研究所,2021.
- [17] 张国伟,张品,陈博珊,等. 蒸压加气混凝土板位移延性研究[J]. 工业建筑,2017,47(12):106-110;126.

(上接第 49 页)

## 4 结 论

(1)在实施过程中,发现破碎带宽度的增加和充填介质摩擦角的降低均会导致掘进时刀盘卡机的风险增加。破碎带越宽,过量排渣的时间越长;充填介质摩擦角越小,开挖扰动下围岩自稳性越差。此外,掘进参数相同条件下,开挖扰动范围扩大会使作用在刀盘上的土压力、扭矩和推力增大。通过减小刀盘转速可以有效减少排渣量和超挖率,进而提高开挖面围岩的稳定性。

(2)富水地层采用 AB 料化灌注浆材料能快速膨胀,纯浆液按照 1:1 比例计量充分搅拌均匀, 25 s 里开始发泡,改发泡体积是浆液的 17 倍,纯浆液加 3% 催化剂有助于扩大发泡体积,其体积是原体积的 21 倍。

(3)化灌材料与钢板的黏结力小、渗透性强,约为纯水泥浆的 1/4,接近护盾注浆时,要避免采

用纯水泥浆液,以防止水泥浆与护盾黏结,对脱困产生不利影响。

(4)管棚距离护盾位置过近,对于后续的换拱、取芯空间有较大影响,并且使得常规的盾尾导洞扩挖脱困方案无法实行。

## 参考文献:

- [1] 王川. 复合式 TBM 卡壳原因及处理方案[J]. 科学技术创新,2012(31):295-295.
- [2] 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.
- [3] 董泗龙. 敞开式 TBM 断层破碎带脱困技术[J]. 隧道建设,2016,36(3):326-330.
- [4] 徐虎城. 断层破碎带敞开式 TBM 卡机处理与脱困技术探析[J]. 隧道建设,2018,38(增刊1):156-160.