

Long-Distance Shield Tunneling Through Flexible Casings and Atmospheric Pressure Chamber Opening for Obstacle Removal in Urban Central Areas

Yuwei Su

Shanghai Municipal Water Conservancy Construction Project Safety and Quality Supervision Center Station, Shanghai 200237, China

Abstract

In shield tunneling projects within urban central areas, shield machines increasingly encounter abandoned underground trenchless pipelines, posing a persistent and challenging obstacle to smooth construction progress. To address this issue, this paper proposes three core countermeasures: equipment modification, pre-grouting of casings, and forward-reverse flushing circulation technology. Additionally, to accommodate stoppage conditions during long-distance tunneling, intermediate reinforcement zones have been established to facilitate atmospheric-pressure chamber opening for obstacle removal. These measures have been successfully implemented and validated in the Section 2#–5# (a 3-km-long DN3500 shield tunnel) of the Longhua Wastewater Treatment Plant's Initial Rainfall Storage Project in Xuhui District, Shanghai, demonstrating their feasibility and effectiveness, thereby offering valuable reference for similar engineering projects.

Keywords: *Slurry Pressure Balance Shield; Obstacle Removal; HDPE Flexible Trenchless Pipeline; Chamber Opening*

中心城区长距离盾构穿越柔性套管及常压开仓清障施工技术

苏雨威

上海市水务建设工程安全质量监督中心站，上海 200237

摘要: 在中心城区盾构隧道施工中，盾构机遭遇地下废弃非开挖管线的问题愈发频繁，已成为制约施工顺利推进的棘手难题。针对该问题，本文提出三大核心应对方案，包括设备改造、套管预注浆及正反冲循环技术；同时，为适配长距离掘进中的停机工况，增设中途加固区用于开仓清障。上述措施已在上海市徐汇区龙华污水处理厂初期雨水调蓄工程 2#~5# 区段（3 公里 DN3500 盾构隧道）中得到实践验证，证实了其可行性与有效性，可为同类工程的施工提供重要借鉴。

关键词: 泥水平衡盾构；清障；HDPE 柔性非开挖管线；开仓

1 引言

在盾构施工切削障碍物的诸多工况中，穿越柔性非开挖管线工况成为日益棘手的问题。类似穿越 mpp 管群工况，宁波市 2 号线二期 TJ2218 标工程运用定向钻进及洗切工艺实现长距离套管拖拔^[1]；上海电力隧道采用管内注浆，将柔性管转换为刚性体，再微动切削排出^[2]。

本文以上海市徐汇区龙华污水处理厂初期雨水调蓄工程 2#~5# 区段 3 公里 DN3500 盾构隧道为背景，在盾构掘进时十数次遭遇柔性 HDPE 非开挖管线且管线未充分切削，使得残渣淤积，阻碍泥水正常循环，推进

难以为继的工况下，通过设备改造、套管预注浆、及正反冲洗措施，使得盾构机保持掘进能力，并在 3 公里轴线中途设置 MJS 加固区，实现浅覆土盾构开仓清障。采取该措施后，盾构维持掘进作业进入中途清障加固区，并完成后续掘进作业顺利贯通。该处置措施可为类似工程提供参考。

2 工程概述

2.1 盾构区间概况

龙华初期雨水调蓄工程厂外管道中 DN3500 盾构隧道内径 3.5m，外径 4.1m，隧道总长 3184m。盾构隧道掘进涉及主要土层有第③层灰色淤泥质粉质黏土、第④层灰色淤泥质黏土，局部涉及③T 灰色粘质粉土。隧道覆土厚度为 5.120~7.980m。



图 1 盾构区间线路示意图

2.2 盾构沿线非开挖管线情况

隧道主要在现状市政道路钦州北路和钦州路下方穿行（图 1），道路下方存在 17 处非开挖电力、信息管线，部分管线埋深较深，位于盾构隧道掘进路径上，盾构机穿越过程中，可能导致管线缠绕刀盘，造成刀盘掘进阻力增大，刀盘结构受损甚至卡死，排泥管堵塞以及管线周围土层扰动过大而出现大规模沉陷等情况。图 2 展示了隧道与部分非开挖管线断面，表 1 统计了道路下方部分非开挖管线的详细信息。

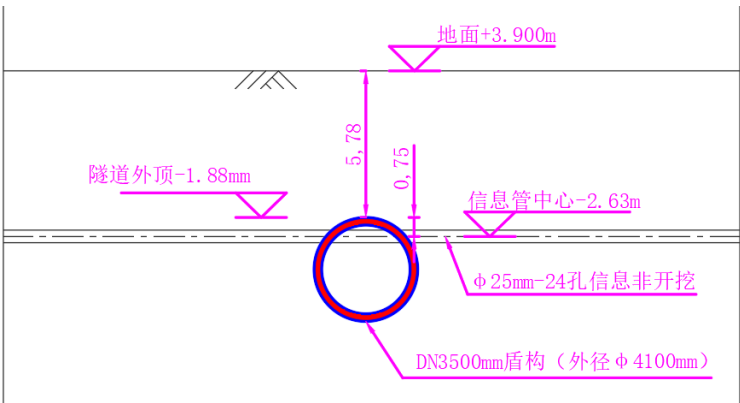


图 2 隧道与部分非开挖管线断面示意图

2.3 掘进受阻及原因分析

盾构机开始推进时，正常转速 1.1rpm 左右，进浆和排泥都畅通情况下，推进速度 20~50mm/min，合理的泥水仓压力为 1.2bar~1.3bar。

受阻工况描述：进排泥循环启动正常后，开始推进提高速度至 30mm/min，前方泥水仓压力也随着增大，增大到正常顶进压力 1.3bar 以后仍然往上增加，最高上升到 1.6bar。同时推进速度也在逐渐下降，最后降到

10mm/min 以下。严重时从推进开始到泥水仓压力增高再到推进速度降至 0，整个过程发生时间 1 分钟左右，推进作业基本陷入停滞状态。

原因分析：

设备端排查：结果无故障，各项设备工作正常，阀门启闭控制灵敏。

地勘报告排查：当前掘进区段未显示有障碍物或复杂地质。

循环泥浆排查：发现少量 HDPE 管残片漂浮于泥浆表面。

根据掘进期间的泥水循环参数分析，判断为泥水仓吸口受阻，致使泥水循环不畅通，产生推进时泥水仓压力难以控制的现象。障碍物可能为地下柔性 HDPE 非开挖管线。

表 1 道路下方部分非开挖管线统计表

序号	管线名称	材质	埋深	管线高程(m)	属性	备注	所在位置
1	信息	光	5.18~5.60	-1.53~-1.95	24 孔	XX582-XX591	15~32 环
2	移动	光	5.58~5.79	-1.73~-1.93	8 孔	YD37-YD39	300~306 环
3	信息	光	5.88~6.53	-2.06~-2.72	24 孔	XX298-XX305	471~480 环
4	信息	光	4.49~4.52	-0.52~-0.58	36 孔	XX310-XX313	489~491 环
5	信息	光	4.41~5.73	-0.33~-1.92	20 孔	XX226-XX227	650~652 环
6	联通	光	5.40~5.77	-1.63~-1.99	8 孔	LT11-LT13	676~684 环
7	信息	光	4.27~5.14	-0.42~-1.30	36 孔	XX28-XX31	797~810 环
8	电力	铜	8.10~9.70	-4.17~-5.75	8 孔	DL63~DL66	844~860 环 (侧接电力管)
9	信息	光	7.05~7.10	-3.07~-3.31	20 孔	XX110-XX111	970~974 环
10	雨水	砼	/	-0.97	Φ 1350	YS263-YS264	宜山路
11	电力	铜	9.01~9.53	-5.28~-5.80	14 孔	DL574-DL577	1723~1726 环
12	信息	光	7.39~8.06	-3.57~-4.19	20 孔	XX426-XX393	1730~1732 环
13	信息	光	6.12~6.52	-2.28~-2.71	8 孔	XX550-XX549	1891~1905 环

3 处置方案比选和确定措施

表 2 处置方案比选分析表

备选方案	需面对的工况	实施难度	可行性
大开挖清障	地表位于城市市政道路，交通繁忙	交通组织难度大。实施周期长	难以实行
开仓清障	停滞位置位于道路下方，双车道两侧均有敏感建筑物；管顶覆土厚度仅 1D，其中③、④土层流塑状、渗透性较差，含水量高、孔隙比大、灵敏度高，高压缩性、强度低，具触变和流变特性，土质较差，必须经过加固方可具备开仓条件	交通组织难度大。实施周期长覆土浅，土质差，保压能力弱。气压施工对人员素质要求高，作业环境差，作业审批难度高。	停滞位置难以实行，需选择合适位置进行开仓位置的加固
设备改造+正反冲循环	盾构机泥水仓胸板上配置了 2 个 3 寸球阀，盾尾后方进排泥管道具备新接入管道条件；盾构设备具备掘进模式、旁路模式、停机模式、逆洗模式等泥水输送工作模式	需准备合适长度的 3 寸管将泥水仓和盾尾后方进排泥管路相连，两根 3 寸管之间形成旁路。现场具备管路和接管人员，实施难度低，实施周期短	可行

3.1 设备改造与正反冲循环流程

确定采用设备改造+正反冲循环处置措施后，细化处置流程如下（图 3）：在确保进排泥管路排空泄压的情况下在进排泥管路旁通管后方合适位置各新接入一个 3 寸球阀，两根 3 寸管将球阀和泥水仓胸板上的球阀相连。两根 3 寸管之间连接 1 根旁通管和控制阀门。两根 3 寸管之间连接 1 根旁通管和控制阀门。

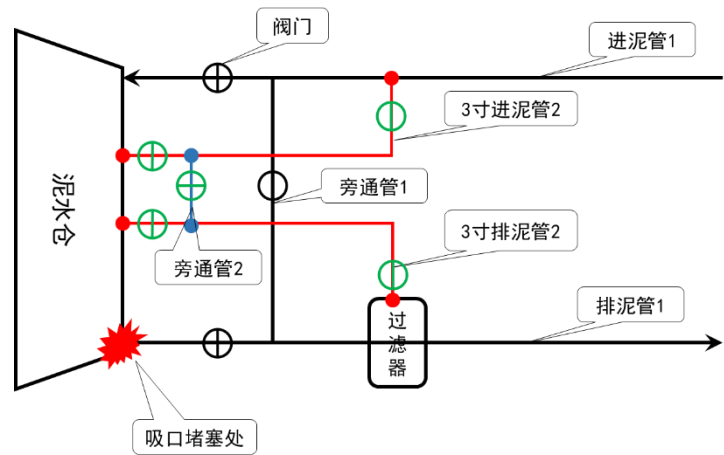


图 3 反冲管路构建示意图

反冲循环流程 1（图 4），用于将泥水仓内淤积管线磨碎后带出：控制稀泥浆沿着以下路径运行：进泥管 1→旁通管 1→排泥管 1→吸口堵塞处进入泥水仓，同时刀盘提高转速，快速切削→3 寸排泥管 2→过滤器→排泥管 1，将 HDPE 管线充分磨碎后排出。

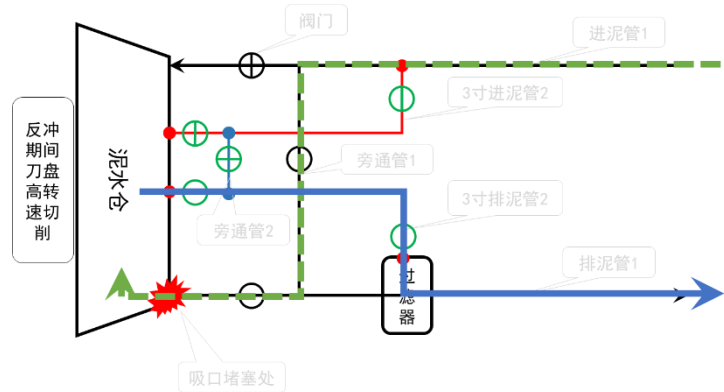


图 4 反冲循环流程 1 示意图

反冲循环流程 2（图 5），用于疏通反冲期间堵塞的排泥管：控制稀泥浆沿着以下路径运行：进泥管 1→3 寸进泥管 2→旁通管 2→3 寸排泥管 2→过滤器→排泥管 1，将可能发生堵塞的排泥管 2 疏通。

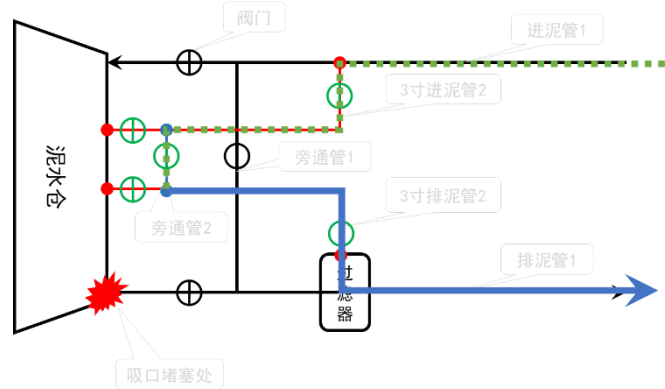


图 5 反冲循环流程 2 示意图

正常泥水循环流程 3（图 6），待得反冲循环有效将泥水仓内废弃管线切削排出吸口堵塞得以疏通后，仍按正常泥水循环开展推进作业。泥水流向如下：排泥管 1→泥水仓，同时盾构机掘进期间保持低速推进高转速切削→排泥管 1→过滤器→排泥管 1。反冲管路保留，后续可重复使用。

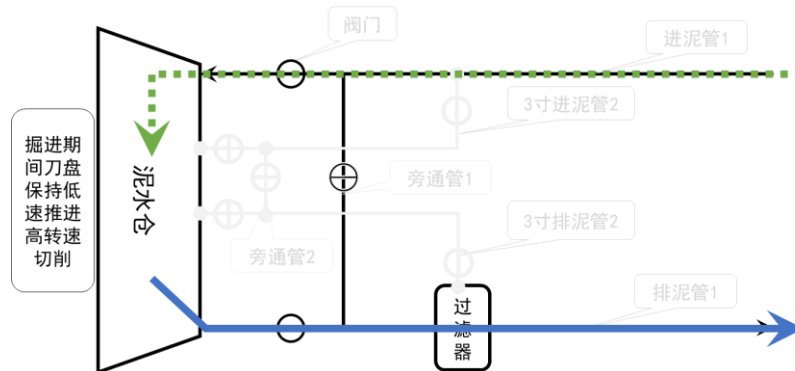


图 6 正常推进时泥水循环示意图

3.2 套管内预注浆措施

在下次掘进穿越类似非开挖管线前，提前在废弃柔性管内注入水泥浆固化。固化的作用一是将套管内空隙进行填充，避免后续盾构切削时浆液的流失和乱窜，保障穿越后的地层稳定；其二是将柔性管道转换为刚性材质，有利于盾构的切削和充分磨碎后排出。浆液采用水灰比 1：1 的自拌水泥浆。并在盾构预计到达套管位置前 1 月注浆填充完毕，以保障水泥浆具备足够的强度和填充效果而不因强度过高形成新的切削阻碍。

3.3 切削参数控制

- （1）提前套管内预压浆增强套管群整体的刚度以利于刀盘充分切削。
- （2）提前预警，在平剖面图上设置提前预警环，设置为管线所在位置前第 5 环，盾构机刀盘掘进到预警位置时，技术人员及时通报，并调整掘进参数。
- （3）掘进参数调整：①合理的泥水仓压力为 1.2bar~1.3bar；②适当提高刀盘转速至 1.5rpm；③降低掘进速度，控制在 10~20mm/min；④刀盘扭矩控制在 500KN·m 以内；⑤同步注浆采用 4 点同步压注，注浆量按照建筑空隙的 150%控制，并根据监测结果做适应性调整。⑥并根据泥水仓压力和进排泥管路流量情况及时在排泥管过滤装置中将磨碎的废弃管线带出。

3.4 实施结果

采取设备改造和正反循环冲洗措施后，在排泥管过滤器内和井上泥浆池中排出大量 HDPE 管线残片，如图 7 所示。



图 7 过滤器和井上泥浆池排出管线残片图

泥水仓清淤或部分清淤后原泥水循环恢复正常，掘进工作逐渐恢复，泥水仓压力可控。

布置反冲装置和实施反冲循环的时间约为 24 小时，处置效果良好，且管路保留以备后续掘进工况，可重复使用。

反冲期间监测数据波动范围可控，待得盾构掘进顺利通过该段区间后，实施二次补浆，降低对周边环境和地下管线的影响。

并根据测量数据提前预警刀盘前方障碍所在位置，提前调整掘进速度和刀盘转速，并做好相应清障准备。现场实践表明，提前注浆硬化柔性管，并结合刀盘低速推进高转速切削，可满足穿越柔性管道工况。

4 加固区内开仓清障措施

考虑工程掘进 3 公里，且沿线数次穿越轨道交通、侧穿道路两侧建构筑物和在中心城区市政道路及密布管线下方掘进，在采取以上穿越柔性管处置措施使得盾构恢复掘进能力的基础上，仍需对设备前未清除的残余物进行彻底根除。故参照以往开仓清障经验^[3]，结合本项目 3#井用于地下 T 接的 MJS 加固区用于盾构设备的中途开仓清障。

盾构机至加固区的覆土深度为 6.4m，所处土层为③粉质黏土和④号淤泥质黏土土层，加固区采用 MJS 加固，水泥掺量不小于 40%，水灰比 1.0，水泥土加固体的 28 天无侧限抗压强度 q_u 不低于 1.0MPa。加固范围为 8.4m*13.1m*10.1m（长宽高），保证盾构管道至每边加固体边缘的宽度超过 3m（其中：北侧超出盾构外边线 6m，南侧超出盾构外边线 3m，上下超出盾构外边线 3m），形成良好的止水加固效果。根据地下水情况设置气压清障压力为 0.5bar，保证地下水位压力平衡。具体如下图 8 所示。

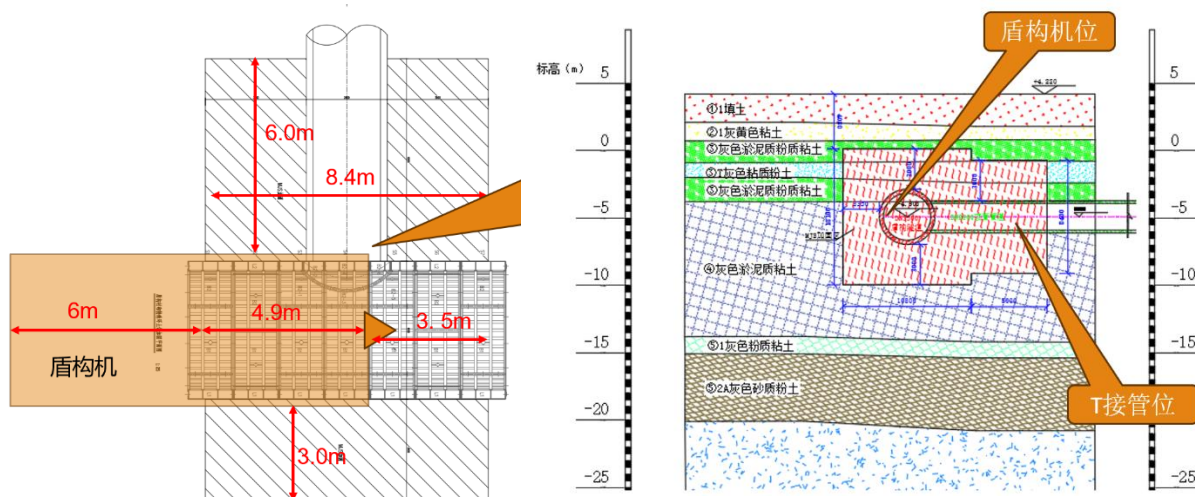


图 8 盾构隧道进入加固区平、剖面图

4.1 开仓清障前准备

人员准备：进出仓作业人员由专业人员组成，分为进舱人员及外部支撑人员：进舱作业人员每班 4 人定岗：1 人专职观察，负责沟通；3 人作业。外部支撑人员：操舱人员 1 名、设备技师 1 名、监督员 1 名。

设备准备：盾构开仓施工前需对（1）空压机、（2）人闸、（3）人舱加减压试验、（4）电源、（5）仪表显示系统、（6）通讯系统设备等进行彻底检修清理，排除盾构机上存在的各种故障及隐患，保证开仓期间设备正常运转，防止作业过程中出现故障停机。

保压试验：通过保压试验来验证加固体施工质量及确保盾尾第一道止水屏障可靠。

降低泥水仓液位和有害气体监测。

4.2 清障作业内容

带压进舱作业流程：盾构机停机后，保压试验合格后做进舱准备工作，人舱气密性检查合格，通过进舱

作业条件验收后确定进舱压力，人员逐步加压后进入舱内作业，进舱作业完成后，进舱人员逐步减压出舱，下一舱人员再进舱作业。泥舱作业时，需保持掌子面稳定与切口压力稳定。掌子面稳定判断方式：进仓人员打开腰子门之后首先通过手电观察刀盘面板之间土体的表观形态，土层紧致无裂缝，也无从刀盘面板之间空隙挤出趋势，说明掌子面较为稳定。

1) 第一次出仓仅作为探明具体情况的初步检查，首先对刀盘前方掌子面加固体效果和稳定情况进行查看，稳定后再由上至下对舱内和刀盘前管线和障碍物进行排查探摸，弄清障碍物形态、尺寸、材质、数量等。

2) 通过气动切割机具，小铲、蛇皮袋等将地下管线残余物，堵塞泥水仓排泥管吸口的麻绳、垃圾等障碍物少量多次清理出泥水仓。进入气压仓作业时，人员严禁携带易燃易爆物品，全程不进行动火作业。

3) 通过分段切割刀盘面板空隙中露出的管线及垃圾，少量多次清理出泥水仓。人员出仓清障处理作业过程中，严禁盾构机任何操作，尤其是刀盘转动。

4) 在进仓作业人员换班的间隙，确保全部人员撤离出气压仓情况下，间歇性启动刀盘，将刀盘刀具之间夹杂的障碍物充分暴露出来后，下一班进仓人员进仓清理。

5) 清理完成后，人员撤离前根据进仓物品清单整理工具和器械，确认将工具全部带出。严禁将工具滞留在刀盘、泥水仓及工作仓内。

4.3 开仓作业成果

盾构刀盘掌子面、泥水仓内、和排泥管吸口位置残余废弃管线和垃圾全部清除完毕，盾构刀盘检修完成。重新掘进后工效恢复正常水平，并顺利完成后续掘进和穿越任务，实现隧道贯通。

5 结论

盾构掘进遭遇非开挖柔性 HDPE 管道使得掘进作业难以为继时，通过改造设备构建正反循环管路结合刀盘低速高转速切削的方法可有效将淤积管线切削排出，恢复盾构掘进能力。该方法具有清障效率高，作业安全可靠，且可反复利用等优点。若在长距离盾构施工中为保障后续推进的顺利，中途设置加固区进行开仓作业，可减少停机风险。本研究可为类似工程和工况提供借鉴。

参考文献

- [1] 陈沈玮.一种盾构断面内非开挖管线处理技术[J].中文科技期刊数据库（全文版）工程技术, 2021.
- [2] 宁寅.盾构切削穿越高强度 MPP 套管群施工技术[J].中国市政工程, 2018(3):3.DOI:CNKI:SUN:ZGSZ.0.2018-03-026.
- [3] 郁进峰.管道顶进中的全气压清障施工技术[J].建筑施工, 2011, 33(3):3.DOI:CNKI:SUN:JZSG.0.2011-03-025.