

# 自适应黏性土地层泥水盾构气压辅助掘进技术与应用

文/林玉曼 深圳地铁建设集团有限公司

**摘要:** 泥水盾构在黏性土地层掘进存在掘进速度慢, 推力、扭矩高, 泥浆管滞排等问题, 滞排严重的甚至因“拉风箱效应”导致掌子面失稳, 复合地层泥水盾构辅助气压掘进属于盾构工程行业的前沿难题。拟通过在泥水盾构上加装气压辅助掘进系统, 在气密性自稳性良好的黏性土地层开展自适应地层泥水盾构气压辅助掘进技术研究, 构建泥水盾构气压辅助掘进“气密性评价-原位测试-循环提升”的自适应地层工艺体系, 明确泥水盾构气压辅助掘进技术的工作流程、适应范围、限定条件和控制标准。通过工程实践, 自适应地层泥水盾构气压辅助掘进技术使刀盘扭矩、推力显著降低, 掘进速度显著提升, 盾构掘进过程参数稳定、效率大幅提升, 刀盘未出现泥饼, 盾构机保持了高效、安全、稳定的掘进状态, 具有较高的应用推广价值。

**关键词:** 自适应; 黏性土地层; 泥水盾构; 气压辅助掘进

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.03.021

## 引言

进入21世纪以来随着经济的持续发展、综合国力的不断提升及高新技术的不断应用, 我国隧道及地下工程(含城市轨道交通)得到了前所未有的迅速发展<sup>[1]</sup>。复合地层盾构隧道建造技术经历了三十年发展, 在掘进方法、设备改造方面取得一系列行业前沿成果, 但泥水盾构在黏性土地层掘进存在掘进速度慢, 推力、扭矩高, 泥浆管滞排等问题, 滞排严重的甚至因“拉风箱效应”导致掌子面失稳, 泥水盾构辅助气压掘进属于盾构工程行业的前沿难题<sup>[1]</sup>。

气压辅助技术基于土压盾构研究取得一系列行业前沿成果, 气压辅助掘进是指利用空压机向土舱内注入压缩空气与舱内尚未满舱的渣土共同平衡开挖面以实现盾构气压辅助掘进, 气压辅助掘进模式的具有小扭矩、高速度、低功耗的特点, 对于提升盾构施工效率降低刀盘结泥饼风险具有显著效果<sup>[3-4]</sup>。常规泥水盾构施工方法难以“一招鲜”通达天下, 为了提升盾构在复合地层中的掘进效率和安全性, 国内外设计泥水+土压双模盾构甚至三模盾构, 配套大量的辅助设备, 无论是设备制造成本还是施工成本都很高<sup>[5-6]</sup>。因此, 盾构设备制造商提出了在泥水盾构上增加气压辅助掘进系统以提升泥水盾构在不同地层中的适应能力<sup>[7]</sup>, 但这种方法商缺乏大量的工程实践, 在复合地层泥水盾构施工中采用辅助气压掘进模式是前沿难题亟须开展深入研究<sup>[2]</sup>。

从2019年开始为了提升泥水盾构在黏土地层中的掘进效率和安全性, 气压辅助掘进技术在泥水盾构上应用。田勇坚、武慧韬、吴玉礼等学者分别结合泥水盾构气压辅助掘进在郑州城际铁路、厦门地铁2号线、青岛地铁6号线应用案例, 认为泥水盾构气压辅助掘进有利于提高掘进效率和降低刀盘结泥饼率, 提出采用气压辅助掘进要求地层条件必须满足整体稳定性要求和气压损失量要求, 但应用过程中存在气密性判定不够严谨、工艺流程不够成熟及地面沉降超标等问题<sup>[8-10]</sup>。

为提升复合地层泥水盾构气压辅助掘进技术水平, 依托深圳地铁13号线北延工程在复合地层中的自稳性气密性地段开展实践, 提出一种自适应复合地层的泥水盾构气压辅助掘进方法, 拟实现一机多用, 提升泥水盾构

在黏土地层中的掘进效率, 降低能耗, 降低刀盘结泥饼风险。

## 一、泥水盾构气压辅助掘进技术原理

泥水盾构半舱气压法就是在泥水盾构掘进过程中, 使盾构机开挖舱与气垫舱联通, 平衡开挖面的介质由泥浆为以泥水与空气混合的液相+气相介质, 开挖舱呈全舱泥水开挖状态的盾构掘进方法<sup>[10]</sup>。

## 二、自适应黏性土地层泥水盾构气压辅助掘进方法

### (一) 泥水盾构增加气压辅助掘进系统

黏性土黏性由黏粒与水之间的相互作用产生, 黏性土及其土粒本身大多是由硅酸盐矿物组成。黏性土保水能力强, 但孔隙小, 通气透水性能差, 湿时粘干时硬。泥水平衡盾构适应砂层掘进, 但盾构掘进断面隧道范围内存在全断面黏性土易结泥饼地层时, 结泥饼后开仓处置的次生风险非常高, 开展针对防治泥饼的设备改造, 提升预防和治理刀盘泥饼的能力。

在盾构选型阶段应充分考虑增加泥水盾构气压辅助掘进系统, 使泥水盾构机具备在黏性土地层中采用气压辅助模式掘进的能力。在气垫舱和开挖舱之间设置联通阀, 加装空气保压系统<sup>[9]</sup>, 使泥水盾构设备具备气压辅助掘进能力, 可以根据地层情况切换调整成气压辅助掘进模式。

### (二) 气密性初步评价

盾构始发前开展针对性勘察, 进行岩土颗粒含量分析, 开展渗透性试验, 分析验证地层的气密性。补勘点位应选择在地层变化处和覆盖层薄弱处并加密到10m-25m。当覆盖层渗透系数 $<10^{-5}$ m/s且粉粒和黏粒(粒径 $<0.075$ mm)含量 $>40\%$ 时, 评价为地层气密性良好。当不透水的覆盖层厚度 $\geq 0.3D$ ( $D$ -盾构直径), 且长度 $\geq 10D$ ( $D$ -盾构直径)时, 覆盖层不容易被气压击穿, 可设定为气压辅助掘进工法段落。反之, 则划分为满仓法掘进段落。

### (三) 原位测试

在气密性自稳性好的黏性土地层中采用气压辅助掘进方法前进行原位测试, 在划分为气压辅助掘进方法的段落开启进气管路上的各阀门, 使开挖舱上部为压缩空气, 启动空压机使开挖舱和气垫舱的压力稳定在设定压

力。开启气压模式维持30min，维持期间，应满足：仓压波动小于设定值的20%且小于0.3bar，液位波动小于设定液位高度的20%且小于1m。若符合要求，则采用气压辅助模式掘进。

(四) 循环提升

循环提升在于每掘进10环的速度、扭矩、地面沉降变化数据反馈，是否达到预设的标准，每10环进行一个“气压原位测试—参数控制—效果验证”的自适应循环，最终实现泥水盾构自适应地层的气压辅助掘进模式，控制标准如表1所示。

表1 泥水盾构气压辅助掘进控制标准

步骤	项目	标准	备注
地层气密性分析	渗透系数	$< 10^{-7} \text{m/s}$	
	黏粒粉粒含量	$> 40\%$	
	覆盖层厚度	$> 2\text{m}$ 或 $> 0.3D$	满足其中一项
气压原位测试	持压时间	$\geq 30\text{min}$	
	压力波动	20%P, 且 $< \pm 0.3\text{bar}$	同时满足
	液位波动	20%H, 且 $< \pm 1\text{m}$	同时满足
气压辅助掘进参数控制	压力波动	20%P, 且 $< \pm 0.3\text{bar}$	同时满足
	液位波动	20%H, 且 $< \pm 1\text{m}$	同时满足
效果验证	10环平均推进速度	$> 120\%v_0$	$v_0$ - 模式切换前10环平均掘进速度
	10环平均扭矩	$< 80M_0$	$M_0$ - 模式切换前10环平均扭矩
	地表沉降	-30mm ~ +10mm	
	建构筑物变形	符合对应规范要求	

(五) 自适应参数设置

自适应参数设置通过100m试验掘进以后，结合表1所示的控制标准在盾构PLC控制系统软件上设定阈值，超出控制标准的压力、液位波动时启动保护程序，关闭气压辅助掘进系统切换为满仓泥水掘进模式达到自适应地层的目的。

三、实施案例

研究依托深圳地铁13号线北延工程项目开展，项目采用2台泥水平衡盾构机于2022年5月从下村站始发，2022年11月全线洞通。区间在距始发端0m~480m隧道断面范围内为黏性土地层，480m~630m隧道断面上部为砂层，如图1。

50m~480m范围采用气压辅助掘进，对比0~50m满仓掘进，扭矩由1582kN·m降低到1080kN·m，降低率31.92%；推力由15080kN降低到11500kN，降低率23.74%；其掘进速度由15mm/min提升到29mm/min，提升了93%；掘进工效由2.3环/天提升到5.3环每天，提升了230.43%，如图2至图4所示。

结论与建议

(1) 采用自适应地层泥水盾构气压辅助掘进技术，通过气密性初始评价、原位测试评价、掘进过程循环提升等系列方法联合，显著提升了气压辅助掘进技术。在黏性土地层中与区间满舱泥水掘进模式相比，自适应地层泥水盾构气压辅助掘进技术使刀盘扭矩、推力显著降低，掘进速度显著提升，盾构掘进过程参数稳定、效率大幅提升，刀盘未出现泥饼，盾构机保持了高效、安全、稳定的掘进状态。

(2) 盾构选型阶段应根据隧道断面内存在较大比例的自稳性、气密性好的地层，针对性的要求对设备进行加强或者改造，使泥水盾构具备气压辅助掘进能力，间接控制式泥水盾构机具有良好的设备改造条件，直排

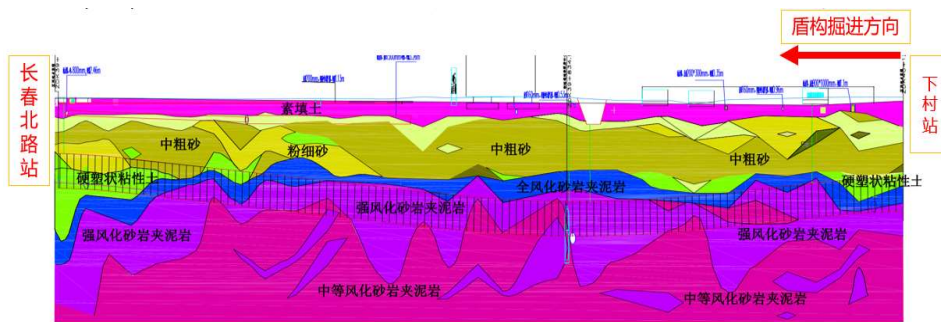


图1 深圳地铁13号线北延某工程地质纵断面图

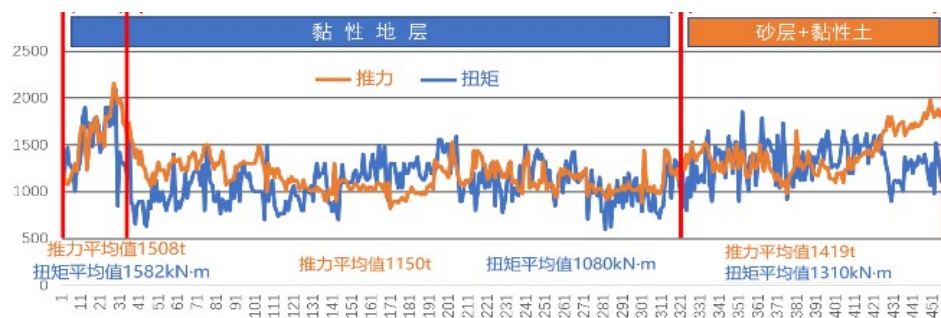


图2 气压辅助模式与满仓模式推力扭矩变化曲线图

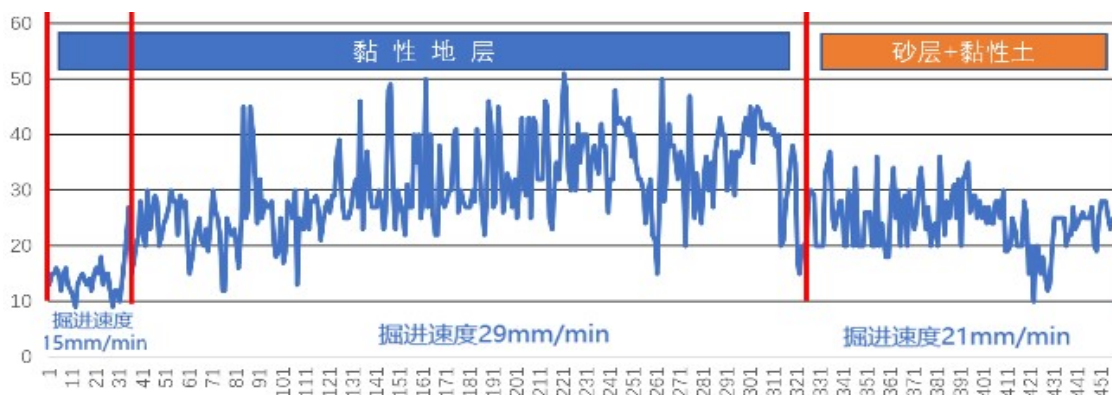


图3 气压辅助模式与满仓模式掘进速度变化曲线图

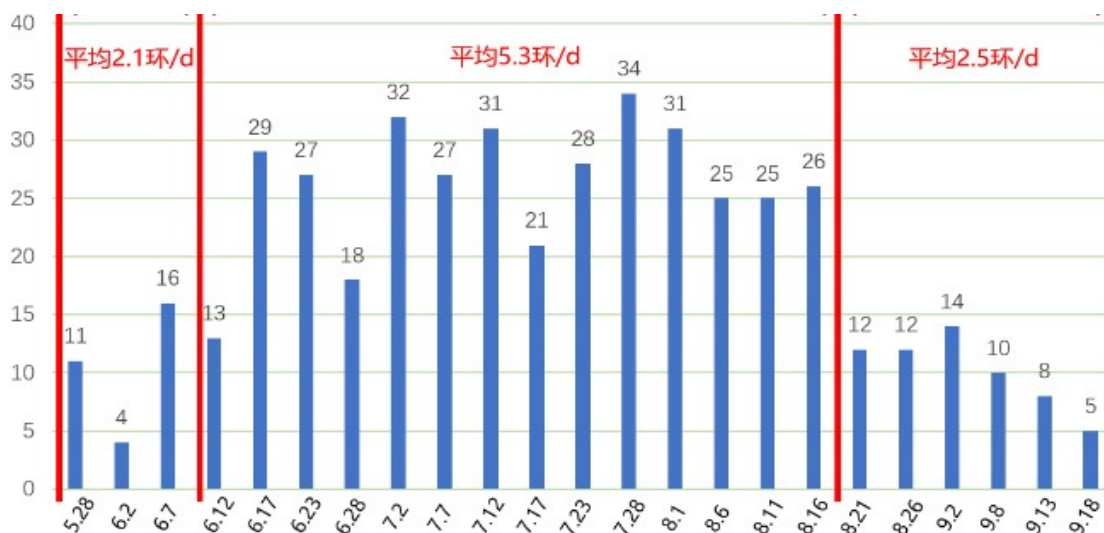


图4 气压辅助模式与满仓模式工效图

式泥水盾构应慎重选择气压辅助控制模式。

(3) 提升地质勘察的针对性，获取更多评价地层气密性和自稳性参数。为避免地层自稳性判断，试验阶段采用气压辅助掘进的位置应避开地面构筑物复杂地段，避开断裂带、地下水丰富的不良地质区段。盾构始发、接收范围因车站-区间接口气密性难以保障，故而盾构始发、接收前10m不应采用半舱气压法推进。

(4) 切换气压辅助掘进期间进行加密监测，按照监测方案加密监测点、加大监测频率。切换过程和半舱掘进期间，应该密切关注参数变化，为保证掌子面稳定，持舱期间仓压波动超过±0.3bar与液位波动超过±1m出现较大波动后，按照自适应设定参数立即建仓恢复间接式泥水循环。

(5) 为了进一步提升泥水盾构气压辅助掘进水平，对于复合地层的认知水平有待提高，应该结合新型勘察技术和手段进一步研究。泥水盾构自适应地层的气压辅助掘进方法在地层气密性评价与循环提升两个方面可以结合智能化勘察和识别手段进一步研究。

参考文献

[1] 洪开荣. 我国隧道及地下工程发展现状与展望[J]. 隧道建设, 2015, 35 (2): 95.  
 [2] 竺维彬, 米晋生, 王晖, 等. 复合地层盾构隧

道修建技术创新与展望[J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (2): 90-104.

[3] 朱伟, 钱勇进, 王璐, 等. 土压平衡盾构不满舱施工遇到的问题及对策[J]. 中国公路学报, 2020, 33 (12): 224-234.

[4] 杨志勇, 杨星, 漆伟强, 等. 盾构舱内空气损失计算及影响因素分析[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40 (8): 1147-1153.

[5] 洪开荣, 陈馈, 孙振川, 等. 盾构与掘进关键技术[M]. 北京: 人民交通出版, 2018.

[6] 朱伟, 钱勇进, 闵凡路, 等. 中国泥水盾构使用现状及若干问题[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39 (05): 724-735.

[7] 刘飞香, 程永亮, 彭正阳, 等. 一种用于泥水平衡盾构机的掘进工法[P]. 湖南省: CN201811645964.6, 2021-01-22.

[8] 田勇坚. 黏土地层大直径泥水盾构半舱气压法掘进应用研究[D]. 导师: 杜守继. 上海交通大学, 2021.

[9] 武慧韬. 大直径泥水平衡盾构辅助气压工法应用研究[J]. 北方建筑, 2024, 9 (01): 32-35.

[10] 吴玉礼. 泥水平衡盾构气压辅助模式掘进应用与研究[J]. 铁道建筑技术, 2022 (10): 154-157.