

# 富水砂层地质条件下地铁盾构隧道掘进参数优化研究

姜宝, 屈德镇, 朱超

(青岛地铁集团有限公司第三建设分公司, 山东 青岛 266100)

**摘要** 本文聚焦富水砂层地铁盾构隧道工程, 针对其渗透能力强、稳定性能差造成的喷涌、地表沉降及刀具磨损等施工难题进行掘进参数优化研究。通过分析土压平衡机理及参数耦合关系, 依托青岛地铁 5 号线工程实例, 聚焦土仓压力、渣土改良、注浆工艺及姿态控制等关键参数进行协同优化, 提出动态调控措施, 旨在有效稳固开挖面、抑制地层变形、提升掘进效率, 为相同地质条件下盾构安全高效施工提供借鉴。

**关键词** 富水砂层; 盾构隧道; 掘进参数优化; 土压平衡; 地表沉降控制

中图分类号: U231

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.039

## 0 引言

城市轨道交通不断延伸进复杂地质区域, 富水砂层是盾构隧道建设的主要挑战, 这类地层自稳能力弱, 地下水含量高, 易造成开挖面失稳、螺旋机喷涌、地表过量沉降, 对施工安全和工程进度构成严重威胁。已有的研究多数针对单一参数做分析, 没有针对富水砂层多参数耦合影响做系统性优化。本文以研究富水砂层地质地铁盾构隧道掘进参数优化问题为目标, 在深入探究土压平衡原理以及各因素相互影响作用的基础上, 针对青岛地铁 5 号线工程中遇到的问题进行具体分析, 提出相应的动态调整措施, 旨在解决富水砂层施工过程中面临的技术性难题, 保证开挖面稳定、减少地层扰动、加快掘进进度, 同时对类似地质条件下盾构的安全快速施工具有理论指导意义以及实际应用参考价值。

## 1 富水砂层地质与盾构施工特点

### 1.1 富水砂层地质特征

富水砂层是典型的不良地质, 在我国沿海、沿江及冲积平原地带多有分布。地质特点集中表现为: 地层结构松散、颗粒间粘结力弱、透水性能强、含水量高, 这类地层成分以细砂、中砂及粉砂为主, 不论是静水还是动水环境, 都极易出现流动与渗透。从水文地质层面考察, 富水砂层常和地表水体或深层地下水系相接, 形成高渗透性含水层, 季节性降水及潮汐作用显著影响水位, 动水压力偏高, 易产生渗透路径, 给地下工程施工造成严重威胁<sup>[1]</sup>。

### 1.2 盾构在富水砂层中的施工难点

富水砂层渗透效率高, 地下水含量多, 盾构掘进阶段易出现螺旋输送机喷涌现象, 大量水砂混合物自出土口失控喷出, 难以稳住土仓压力, 开挖面坍塌, 甚至引发地面坍塌。刀盘切削砂土阶段, 高温高压环境里, 细颗粒容易黏附刀盘面板和土仓内壁, 结成致密“泥饼”, 强力阻止渣土进入土仓, 影响掘进效率, 加重刀具磨损。富水砂层易流动, 同步注浆浆液易被地下水稀释冲散, 无法有效填充盾尾空隙, 引发管片后方空洞, 导致管片不均匀上浮、错台及渗漏水, 还会加大地表沉降管控难度。砂层对刀具的磨损作用较强, 尤其在存有石英颗粒的砂层中, 刀具磨损速率大幅升高, 多次开仓换刀会加大施工风险, 还严重影响工期、增加成本。

## 2 盾构掘进参数理论分析

### 2.1 土压平衡机理

土压平衡盾构掘进的核心逻辑是构建并动态维持掘进面水土压力的平衡, 以最低地层扰动完成隧道开挖。相关方法的理论依据是管控盾构密封土仓内的渣土压力, 让它抵消开挖面前方的静止水土压力, 稳定掌子面围岩, 防范地层失稳、塌陷或过量变形。盾构向前推进阶段, 刀盘切削形成的渣土进入土仓, 调控螺旋输送机排土速率与盾构千斤顶推进速度, 能管控土仓内渣土的充满程度和密实度, 进而生成并维持所需土压力。富水砂层渗透性好、自稳能力差, 开挖面易发生失稳, 设定土仓压力时要精准考虑地下水压力、

作者简介: 姜宝 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 地铁土建施工。

土体侧向压力及地表超载,借助添加泡沫、膨润土等改良剂,增强仓内渣土的流塑性、止水性与压力传递效率,使土压传感器精准反映实际压力状况。守住这套动态平衡,是控制地表沉降、防止喷涌、保障掘进顺畅的核心理论前提。

## 2.2 掘进参数系统构成

盾构掘进是多参数协同调控实现的复杂系统工程,施工控制的直接变量就是主要掘进参数系统。土仓压力为保障开挖面稳定的核心参数,设定值一般在静止土压力和被动土压力之间,需依据地层条件、埋深及监测数据做动态微调。推进速度与总推力是相互关联的动力参数,推进快慢直接影响施工效率。总推力要克服刀盘正面阻力、盾壳与地层的摩擦阻力等,分布情况和形体大小直接关联盾构姿态和管片受力状态。刀盘转速与扭矩直接反映刀盘破碎地层的做功状态,转速作用切削效率,扭矩直接反映地层抗剪强度与刀盘负载,二者要和推力、速度契合,防止刀具异常磨损或设备过载。螺旋输送机转速和出土量是控制排土、维持土压平衡的核心执行参数,需保证排土速率和开挖体积一致,杜绝超挖或欠挖。同步注浆的压力、流量和浆液性能,以及二次注浆的时机和注入量,都属于注浆参数,一致目标是及时、紧密填充盾尾建筑空隙,控制地层变形,搭建隧道防水屏障。这些参数共同搭建完整的施工控制闭环<sup>[2]</sup>。

## 2.3 参数间的耦合关系分析

盾构掘进的各项参数彼此依存,而且伴随强烈非线性耦合和动态相互作用,共同影响掘进过程的稳定性、效率和安全性。提升推进速度一般要对应加大总推力和刀盘扭矩,但同时可能受渣土进入土仓的速率变化干扰土仓压力稳定。若此时螺旋输送机排土速率未实现同步协调,就容易造成土仓压力波动,最终造成开挖面失衡。刀盘转速与扭矩的关系受地层特性限制,面对坚硬或软硬不均地层,高转速搭配低贯入度(即单位转速下的推进量)能保护刀具,但可能削减掘进效率。注浆参数与掘进参数存在紧密的时空耦合,同步注浆的压力、流量应契合推进速度,若注浆滞后或量少,盾尾空隙没法及时填充,易造成地层沉降与管片上浮;但注浆压力偏高,还可能破坏盾尾密封,或是搅乱周边土体。像富水砂层一样的敏感地层里,土仓压力、渣土改良效果、出土量控制与注浆效果的耦合关系复杂度更高,任何参数出现失调都可能被极速放大,招致喷涌、沉降超标等连锁反应,要把掘进参数系统当作整体看待,依靠理论分析、实时监测和

智能反馈,实现多参数协同优化和动态平衡控制。

## 3 富水砂层地质条件下地铁盾构隧道掘进参数优化策略

### 3.1 土仓压力优化控制

优化控制土仓压力是富水砂层盾构施工成功的关键前提。构建一套精准、动态的压力设定和调控系统,压力设定不能直接采用静止土压力或水土压力之和,需要凭借精细化的地层解析和三维渗流场分析。在富水砂层内部,因为地下水活性高且存在压力梯度,计算理论土压力值时,要全面纳入动水压力效应及土体有效应力原理。优化控制依照“微压力波动、预判性调整”的标准,设定值一般落在围绕理论计算值的合理区间,并比静水压力稍高,抵消潜在渗流力,更核心的是动态调整策略,这依托一套完整的“监测—反馈—决策”闭环系统,盾构司机要实时紧盯土压传感器数据、螺旋机扭矩、出土状态及地表监测信息。监测数据显示地表出现微量隆起趋势,说明土压设定或许偏高,可适度降低推进速度或小幅扩大螺旋机开口率,慢慢释放压力;沉降速率出现加快趋势,应及时提升推力或临时关闭部分螺旋机闸门,快速回补舱压并稍作提升,穿越重要构建筑物、管线阶段,还得引入更保守的“压力舱”概念,预先注入高粘度泥浆构建压力缓冲层,顺畅过渡压力且精确维持,最大限度减少地层扰动。

### 3.2 推进系统参数匹配优化

推进系统参数匹配优化工作,核心目标是协调推力、推进速度和刀盘驱动参数,实现高效破岩与排土同步进行,维持盾构姿态平稳,防护关键部件。在富水砂层内部,优化匹配的核心是破解地层低承载力与高流动性的冲突,推力与推进速度需按“稳速匀推”原则匹配。过大推力加过高速,极易造成刀盘前方砂土遭猛烈挤压,产生超孔隙水压力,甚至造成局部液化、扰动波及范围扩大;推力过小易造成盾构“叩头”或姿态失控现象,优化策略一般把推进速度控制在20~40 mm/min的平缓区间,靠分区油压调节实现,保持总推力方向稳定,再均匀施加。刀盘转速和扭矩的匹配,需聚焦渣土改良和切削效率的平衡,对比硬岩掘进,面对砂层作业,可把刀盘转速适度提高到1.8~2.5 rpm,但需搭配高效的泡沫或膨润土注入,使切削后的砂土迅速转化为流塑状,进而降低切削转矩,杜绝刀盘结存泥饼。扭矩值可充当地层变化的“晴雨表”,数值异常上涨一般说明渣土改良失效或遭遇障碍物,必须及时调整,优化整套推进系统,核心做

法是把推力、速度、转速、扭矩归为联动统一单元，建立两者间的经验函数关联，依托司机经验和智能控制系统，实现掘进过程“柔顺”和“高效”的兼顾<sup>[3]</sup>。

### 3.3 渣土改良技术应用

渣土改良扮演富水砂层盾构掘进的“润滑剂”与“稳定剂”角色，优化该技术应用，直接关乎喷涌防治、刀具保护和掘进效率。优化应用的关键，是凭借砂层粒径分布、含水率及渗透系数的实时反馈，动态调整泡沫与膨润土两大改良系统的参数。泡沫系统优化的核心是精准把控发泡率、注入比率与注入点。聚焦富水细砂层，采用中等程度发泡率（约 8~15 倍）的泡沫，气泡结构应均匀稳定，可有效隔绝砂粒、减小内摩擦角，也不会因密度过高阻碍排土，注入比率要结合掘进速度和出土量动态计算，每立方米渣土注入泡沫溶液量为 50~100 升，优先经刀盘面板注入口、土仓隔板注入口注入，使泡沫和新鲜渣土充分预混。用膨润土浆液做备用和强化手段，泡沫改良效果差、地层水压特别高或出现轻微喷涌迹象时启动，优化重点为浆液粘度和注入时机，一般用钠基膨润土调配中高粘度浆液，由螺旋机注入口或土仓壁注入口泵入，要把砂粒间的孔隙堵住，形成挡水的“泥膜”效用。两种改良剂不会孤立施用，最优对策常为“泡沫为主，膨润土为辅”的复合改良模式，依靠传感器检测土仓内渣土的摩擦系数、温度及流动性指标，采用自动调节或人工干预调整两种介质的注入比例与参数，直到渣土达到理想的“流塑状”工作状态，彻底消除喷涌风险，为平稳掘进配齐物质支撑。

### 3.4 同步注浆与二次注浆参数优化

调整注浆参数至最优状态，是控制地层长期变形、保障隧道结构稳定和防水的最后一道核心工序。在富水砂层内部，地下水极易稀释、冲刷浆液，优化工作需围绕“早强、速凝、抗分散”和“及时、足量、精准补偿”两大核心落实。同步注浆优化第一步是革新浆液配比，传统单液水泥砂浆凝固时间久、收缩程度大，动水砂层效果不好，优化路径为采用惰性浆液（以粉煤灰、膨润土为主要成分）或快凝型双液浆体系，针对富水砂层，建议采用瞬凝型双液浆，调整双液比例，能把初凝时间限定在数十秒内，赶在地下水冲散浆液前快速凝结，做出有效防水固结体<sup>[4]</sup>。

### 3.5 掘进姿态控制与纠偏策略

软流态的富水砂层里，盾构机就像在“豆腐”里行进，优化姿态控制与纠偏策略，要恪守“预防为主、微调勤纠、多源感知”的柔性控制理念。优化姿

态控制的第一步是设定合理的“目标姿态走廊”。由于砂层中管片易受注浆力不均或水浮力作用产生上浮，盾构机掘进阶段需主动将姿态控制在设计轴线下 10~30 mm 区间内，预留空间应对管片后期上浮风险。推进阶段维持姿态，依托精准操控分区油缸的推力差达成，优化策略执行准则，杜绝用单组油缸开展生硬的“扳舵”式纠偏，转而采用多组油缸推力的线性组合，生成平稳的纠偏合成力矩，引导盾构机循平缓曲线回归设计轴线，单次纠偏量每环不超 2~3 mm，降低对周围砂体的剪切干扰。纠偏决策需采用多元依据，除采用导向系统提供的盾构机自身姿态数据外，还需综合考虑盾尾间隙的实时测量值、管片选型的匹配度。另外，更关键的是地层阻力反馈。察觉盾构机有朝某一侧偏转的苗头时，第一步核查该侧盾尾间隙是否过小、该区域地层是否突然变软或存在空洞，不直接开展生硬校正。调整该侧土仓压力或注浆参数，优化地层约束条件，是比直接调整油缸效果更好的“地质纠偏”手段。紧密结合机械控制和地层响应的智能型自适应纠偏策略，是实现富水砂层中长距离、高精度隧道掘进的关键<sup>[5]</sup>。

## 4 结束语

通过系统梳理富水砂层地质特性和盾构施工的相互作用机制，打造以土压平衡为核心，多参数协同调控的掘进优化体系。经工程实际应用检验证明，优化后的动态压力控制、复合渣土改良和精准注浆工艺可有效强化开挖面稳定性，切实控制喷涌和地表沉降。研究成果对开发出针对富水砂层的整套施工控制技术，具有很高工程实用价值，后续研究可进一步结合智能预测算法，实时自适应优化掘进参数。

## 参考文献：

- [1] 李杨帆.富水砂层地质条件下公路路基沉降处理技术研究[J].交通科技与管理,2025(08):56-58.
- [2] 刘宇.富水砂层地质盾构掘进技术与成本分析研究[J].工程机械与维修,2024(05):16-18.
- [3] 黄光钰.富水砂层区域内隧道开挖变形规律分析[J].企业科技与发展,2025(03):109-113.
- [4] 何先虎.深厚富水砂层地质条件下的盾构始发关键技术研究[J].工程技术研究,2024,09(08):41-44.
- [5] 娄寅,徐银波,李逸凡.富水含砂层矿山法地铁车站密贴下穿变形特性与施工参数研究[J].城市轨道交通研究,2025,28(11):117-123.