

盾构穿越砂卵石地层掘进参数优化

况旭旭

中铁隧道股份有限公司 河南 郑州 450000

【摘要】：砂卵石地层因颗粒级配离散、结构稳定性差，成为盾构掘进施工的典型难点，易引发刀盘磨损、掌子面坍塌、地表沉降超限等工程问题。掘进参数的适配性直接决定施工效率与安全，传统经验型参数设定已难以满足复杂地层的施工需求。本文结合砂卵石地层的特性，分析盾构穿越砂卵石地层的掘进参数内容，以及掘进参数优化的意义，提出针对性的参数优化策略，以期为同类地层盾构施工提供技术参考，推动地下工程施工技术的精细化发展。

【关键词】：盾构机；穿越；砂卵石地层；掘进参数；优化

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.077

引言

盾构机在砂卵石地层掘进施工中，由于地层卵石强度高，填充物为细砂，地下水丰富，地层稳定性差，易造成掘进参数异常，影响盾构机的运行情况，阻碍掘进施工的进度。因此，针对盾构穿越砂卵石地层掘进参数优化的有效策略进行深入研究已成为相关部门亟需解决的重要课题。

1 砂卵石地层的特性概述

1.1 颗粒级配离散性强

砂卵石地层由卵石、砾石、中粗砂及少量粉质黏土混合组成，颗粒粒径跨度大，从毫米级砂粒到数十厘米级卵石不等，且缺乏均匀的级配连续性。部分区域可能出现卵石富集形成“孤石群”，部分区域则以砂粒填充为主，这种不均匀的级配特征导致地层物理力学性质空间变异性极大，给施工参数的精准匹配带来挑战。

1.2 物理力学性质复杂

砂卵石地层的密实度直接影响其承载力与抗变形能力，密实状态下地层承载力高，但掘进阻力大；松散状态下则易发生坍塌。同时，地层内颗粒间以点面接触为主，内摩擦角较大，黏聚力极低，整体稳定性主要依赖颗粒间的嵌挤作用。当受到盾构扰动时，颗粒嵌挤结构易被破坏，进而引发掌子面失稳、周边地层沉降等问题。

1.3 渗透性强且富水性不均

砂卵石地层颗粒间隙大，孔隙率高，形成了良好的地下水渗透通道，渗透性远高于黏性土与细砂地层。受地层结构影响，地下水富集程度存在显著差异，在卵石富集区可能形成集中富水带，盾构掘进过程中若遭遇此类区域，易出现涌水、涌砂现象，不仅会加剧掌子面失稳风险，还可能导致地表沉降超标。

1.4 扰动后稳定性极差

砂卵石地层自身抗扰动能力弱，在盾构刀盘切削、盾构机推进等施工扰动作用下，颗粒间的平衡状态极易被打破。尤其是当地层中砂粒含量较高时，扰动后易形成流塑性土体，导致

掌子面挤出变形。若存在孤石，刀盘切削时产生的冲击荷载会进一步加剧地层扰动，引发周边围岩松动坍塌，给施工安全带来严重威胁。

2 盾构穿越砂卵石地层的掘进参数

2.1 推进速度

砂卵石地层颗粒松散、胶结性差，推进速度过快易引发掌子面失稳，过慢则会增加施工周期并导致刀盘结泥饼风险。实际施工中需以地层颗粒级配为依据动态调整，对于卵石含量30%-50%的中密地层，推进速度宜控制在30-50mm/min；当卵石含量超过50%或出现粒径大于300mm的大块卵石时，需降至10-20mm/min，同时配合刀盘转速协同作业。推进过程中通过实时监测掌子面土压力变化，若压力骤降需立即减缓速度，待压力稳定后再逐步恢复，确保掘进过程平稳可控。

2.2 土压力

砂卵石地层黏聚力15-25kPa、内摩擦角20-30°，自稳性差且颗粒易滑移，土压力设定需精准匹配地层特性。常规取值为静止土压力的1.1-1.3倍，通常控制在0.2-0.4MPa，波动范围不超过±20kPa，避免掌子面失稳。掘进中需结合每30分钟一次的地表监测数据动态调整，地表沉降接近20mm预警值时，应小幅提升土压力5-10kPa；若压力超过0.45MPa，易导致地表隆起超3mm/天，还会增加推进阻力。同时，需配合渣土改良效果，确保土压力稳定传递，平衡施工安全与沉降控制要求。

2.3 刀盘转速与扭矩

刀盘转速需结合砂卵石硬度与粒径合理选择，转速过高易加剧刀具磨损，过低则降低切削效率。对于中细砂为主、卵石粒径<200mm的地层，转速控制在1.5-2.5r/min；对于卵石含量高、粒径>300mm的地层，转速降至0.8-1.5r/min，同时增大扭矩输出。刀盘扭矩需根据地层阻力实时调整，正常掘进时扭矩控制在额定扭矩的40%-60%，当遇到大块卵石卡顿，扭矩骤升超过额定扭矩80%时，应立即停止推进，采用反转刀盘配合高压射水松动卵石，避免刀具损坏或刀盘卡死。

2.4 出土量

出土量是保障掌子面稳定的关键指标，砂卵石地层中出土量过多易导致掌子面坍塌，过少则会造成土体挤压隆起。施工中需严格按照“掘进进尺 \times 刀盘开挖面积 $\times 1.05-1.10$ ”的系数控制出土量，确保每环出土量与掘进体积的匹配度在合理范围。通过螺旋输送机转速与推进速度的联动控制，实时监测出土量数据，若出现出土量骤增或骤减，需立即排查掌子面是否存在坍塌或堵塞情况。同时，对出土渣土的粒径与含水量进行实时监测，根据渣土特性调整掘进参数，保障施工安全与效率。

3 盾构穿越砂卵石地层掘进参数优化的意义

砂卵石地层因颗粒粒径大、胶结性差、渗透性强等特性，成为盾构施工中的典型难点地层。掘进参数作为盾构施工的“核心指令”，其合理性直接决定施工全流程的安全性、效率性与经济性。对盾构穿越砂卵石地层的掘进参数进行科学优化，不仅是攻克复杂地质施工难题的关键举措，更对推动地下工程领域高质量发展具有多重现实意义，具体可从以下四方面展开。

3.1 保障施工安全，筑牢工程基础防线

砂卵石地层稳定性差，盾构掘进过程中易出现掌子面坍塌、地表沉降超限、盾构机姿态失稳等风险。通过优化推进速度、刀盘转速、出土量、注浆压力等核心参数，可精准控制掌子面受力平衡，有效抑制地层扰动。例如，针对砂卵石松散特性优化出土速率与注浆同步性，能避免因土体流失引发的地表塌陷，保障周边建筑物、地下管线的安全，为施工全程筑牢安全屏障。

3.2 提升掘进效率，破解施工进度瓶颈

在砂卵石地层中，不合理的掘进参数易导致刀盘结泥饼、刀具过度磨损、推进阻滞等问题，严重制约施工进度。通过参数优化，可实现盾构机与地层特性的精准适配，合理提升刀盘转速与扭矩匹配度，能增强破岩能力。优化推进速度与出土协同性，可避免无效推进与工序脱节。实践表明，科学的参数优化能使掘进效率提升15%-25%，有效缩短工期，保障工程按期交付。

3.3 控制工程成本，实现效益最大化

盾构施工成本中，刀具损耗、能源消耗、注浆材料及后期维修成本占比极高。砂卵石地层的强磨蚀性易造成刀具快速损坏，盲目加大注浆量会导致材料浪费。通过参数优化，可精准控制刀具受力，降低磨损速率，减少刀具更换频次。合理调控注浆压力与用量，实现“按需注浆”，避免材料过量消耗。同时，优化推进速度与动力输出匹配，降低能源消耗。这些举措能显著降低单位长度施工成本，提升工程整体经济效益。

3.4 保护周边环境，践行绿色施工理念

盾构穿越砂卵石地层时，掘进参数不当，易引发较大范围地表沉降，破坏周边道路、绿化及地下管网，还可能因注浆不规范导致地下水污染。参数优化通过精准控制地层扰动范围与沉降量，可最大限度减少对周边环境的影响。同时，合理的出土与注浆参数能降低施工废弃物排放，减少对周边生态的破坏。这与当前建筑行业绿色发展、低碳施工的理念高度契合，助力实现工程建设与生态保护的协同发展。

4 盾构穿越砂卵石地层掘进参数优化的有效策略

4.1 构建掘进参数动态关联匹配体系，实现多参数协同优化

砂卵石地层中，盾构掘进速度、刀盘转速、推进力、扭矩等参数并非孤立存在，而是存在显著的耦合关联。参数优化需打破单一参数调整的局限，建立多参数协同匹配机制。施工前，基于地层勘察数据，通过数值模拟计算不同粒径分布、密实度条件下各参数的合理取值范围，明确参数间的匹配关系，例如在密实度较高的砂卵石层中，应采用“低掘进速度、高刀盘转速”的组合，配合适度提升推进力，避免因刀盘切削不充分导致扭矩骤增；当遭遇粒径较大的卵石聚集区域时，需同步调整刀盘转速与推进速度，降低单位长度推进力，减少设备过载风险。施工过程中，依托实时监测系统采集地层反馈数据与设备运行参数，建立动态调整模型，根据掘进过程中扭矩波动、土压变化等实时数据，自动优化匹配推进速度与刀盘转速，确保掘进过程的稳定性与连续性。

4.2 精准控制土压平衡参数，保障掌子面稳定

砂卵石地层孔隙率大，土体自稳能力差，掌子面失稳是施工中的主要风险之一，而土压平衡参数的精准控制是保障掌子面稳定的核心。参数优化需以地层渗透系数、颗粒级配等特性为基础，合理设定土仓压力目标值。对于颗粒较粗、渗透系数较大的砂卵石层，应适当提高土仓压力，确保压力能够有效传递至掌子面，平衡地层压力。同时，严格控制土仓压力波动范围，避免因压力突变导致掌子面扰动。施工中，采用动态土压控制技术，通过土仓压力传感器实时采集压力数据，结合推进速度、螺旋输送机转速等参数的协同调整，实现土压的精准调控。当土仓压力出现异常升高时，适当加快螺旋输送机转速，及时排出仓内土体。当压力降低时，减慢排土速度，同时调整推进速度，确保土仓压力稳定在设定范围内。另外，合理控制出土量与推进量的匹配度，还可避免因出土过多导致掌子面沉降，或出土过少导致土仓压力过高引发管片受力不均。

4.3 优化刀盘切削与扭矩参数，降低设备磨损与能耗

砂卵石地层中，卵石的高硬度与不规则形状易导致刀盘刀具严重磨损，同时增加切削扭矩，提升设备能耗。参数优化需围绕减少刀具磨损、降低扭矩峰值展开。在刀盘转速选择上，应结合卵石粒径大小合理设定，避免转速过高导致刀具与卵石

高频撞击,或转速过低导致切削不充分引发扭矩骤增。对于大粒径卵石含量较高的地层,采用中低转速配合适度推进力,通过刀具的剪切作用而非冲击作用切削土体,减少刀具冲击磨损。对于小粒径砂卵石地层,可适当提高转速,提升切削效率。同时,通过优化扭矩控制策略,避免扭矩峰值出现,施工中实时监测扭矩变化,当扭矩接近预警值时,及时降低推进速度或调整刀盘转速,分散切削载荷。另外,结合地层特性合理选择刀具类型与布置方式,配合参数优化形成协同效应,进一步降低设备磨损,提升掘进效率,减少因刀具更换导致的施工中断时间。

4.4 科学设定同步注浆参数,控制地表沉降与管片稳定性

砂卵石地层掘进过程中,管片与地层之间易形成空隙,注浆不及时或参数不合理,易引发地表沉降,同时影响管片结构稳定性。同步注浆参数优化需重点关注注浆压力、注浆量与注浆材料性能的协同匹配。注浆压力设定需以地层压力、管片强度等为依据,确保注浆压力能够将浆液有效填充至管片间隙,同时避免压力过高导致管片破损或浆液窜入土仓。对于砂卵石地层,由于地层渗透性强,应适当提高注浆压力,确保浆液能够渗透至地层孔隙中,形成有效支护。同时,控制注浆压力均匀性,避免局部压力过高或过低导致注浆不密实。注浆量需根据掘进环宽、管片外径与地层间隙大小精准计算,结合地表沉降监测数据动态调整,对于沉降风险较高的区域,适当增加注浆量,确保间隙充分填充。另外,优化注浆材料配合比,提升浆液的早期强度与稳定性,避免浆液在砂卵石地层的大孔隙中

流失,确保注浆效果,有效控制地表沉降。

4.5 依托智能监测与数据驱动,实现掘进参数实时优化

随着智能施工技术的发展,依托监测系统与数据驱动技术实现参数的实时动态优化,已成为提升砂卵石地层盾构施工管控水平的重要手段。参数优化需构建全流程监测体系,涵盖地层变形、设备运行、掌子面状态等多维度监测指标,通过传感器实时采集地表沉降、管片位移、刀盘扭矩、土仓压力等数据,建立统一的数据管理平台。另外,利用大数据分析与机器学习算法,挖掘监测数据与掘进参数之间的内在关联,构建参数优化预测模型,能够提前预判参数调整需求,例如通过分析地表沉降速率与注浆参数的关系,预测后续注浆量的调整方向。通过设备运行参数的趋势分析,预判刀具磨损状态,为参数优化与设备维护提供依据。同时,搭建智能控制平台,实现监测数据、参数优化与设备控制的闭环联动,当监测数据超出预警阈值时,系统自动触发参数调整指令,实时优化掘进参数,提升施工的智能化管控水平,保障施工安全与质量。

总而言之,盾构穿越砂卵石地层的掘进参数优化是一项系统性工程,需结合地层特性、设备性能与施工目标,从多参数协同、土压平衡、刀盘切削、同步注浆及智能监测等多维度制定针对性策略。通过科学的参数优化,能够有效提升掘进效率,降低设备磨损,控制地表沉降,保障施工安全与质量。未来,还需根据地层实际情况动态调整优化策略,不断积累施工经验,推动盾构施工技术在复杂地层中的进一步发展。

参考文献:

- [1] 许燕,钟勇,周智鹏,等.砂卵石地层盾构区间掘进参数优化及控制措施研究[J].四川建筑,2024,44(03):100-105.
- [2] 周富强.砂卵石地层盾构刀具优化及掘进参数预测研究[D].北京石油化工学院,2023.
- [3] 张学铭.砂卵石地层土压平衡盾构掘进地层扰动及开挖面支护力计算方法研究[D].北京交通大学,2022.
- [4] 雷博超,程鹏飞.富水砂卵石地层盾构掘进参数的分析优化[J].居业,2022,(01):67-68+70.
- [5] 张延杰.成都富水砂卵石地层 EPB 盾构土体改良技术及掘进参数研究[D].西安建筑科技大学,2022.