

双通道泥水盾构适应范围研究及施工应用

李小鹏¹ 丁智儒¹ 卢瑞¹ 张力¹ 郭海²

1 中国建筑第八工程局有限公司

2 中国建设基础设施有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i6.21015

[摘要] 随着埋深越来越深,地质越来越复杂,常规盾构受单出渣构造限制,在岩溶灰岩、密集卵石与断层破碎带掘进中短板明显。依托流固耦合与土力学交叉理论,本文围绕双通道泥水盾构工况适配边界开展量化研究,搭建地质-工程-装备-环境四维评价框架,依托多个项目资料,实测核算得出:围岩强度15~30MPa、地下水压0.3~1.0MPa复合地层内,综合适配系数突破0.85,相比传统机型性能提升42%,选型可采用 $AI=0.35G+0.25E+0.25D+0.15Env$ 量化公式进行复合;式中G为地质适应系数、E为工程参数系数、D为设备性能系数、Env为环境约束系数。本次研究成果能够为复杂地层盾构设备选型提供量化参考依据。

[关键词] 双通道泥水盾构; 适应范围; 地质条件; 工程应用; 数据分析; 评价指标体系

中图分类号: P5 文献标识码: A

Research on the Adaptability Range and Construction Applications of Dual-Channel Mud-Screen Tunneling Machines

Xiaopeng Li¹ Zhiru Ding¹ Rui Lu¹ Li Zhang¹ Hai Guo²

1 China Construction Eighth Engineering Bureau Co., Ltd.

2 China Construction Infrastructure Co., Ltd.

[Abstract] As excavation depths increase and geological conditions become more complex, conventional shield machines face significant limitations when operating in single-outlet slag discharge formations, particularly during tunneling through karst limestone formations, dense gravel deposits, and fault zones. Leveraging interdisciplinary theories of fluid-solid coupling and soil mechanics, this study conducts quantitative research on optimal operational parameters for dual-channel slurry shield systems, establishing a four-dimensional evaluation framework integrating geology, engineering characteristics, equipment performance, and environmental constraints. Based on data from multiple projects, empirical calculations demonstrate that within composite strata characterized by rock strength of 15–30 MPa and groundwater pressure of 0.3–1.0 MPa, the comprehensive fit coefficient exceeds 0.85, representing a 42% improvement over traditional models. The selection formula $AI=0.35G+0.25E+0.25D+0.15Env$ can be applied for such evaluations, where G denotes the geological adaptation coefficient, E the engineering parameter coefficient, D the equipment performance coefficient, and Env the environmental constraint coefficient. These findings provide a quantitative reference for selecting appropriate shield equipment in complex geological environments.

[Keywords] dual-channel slurry shield; application range; geological conditions; engineering applications; data analysis; evaluation index system

1 引言

近些年项目所处施工环境日趋复杂,对盾构装备的综合施工能力提出更为严苛的标准。传统机型受构造限制,在复杂多变的岩性施工时,仓内滞排、堵管等病害频发,严重制约施工进度与现场安全。

双通道泥水盾构为泥浆管路直排+螺旋机辅助出渣结构,弥补传统盾构出渣短板^[1]。浙江核电二期“苍核1号”搭配螺旋机+颚式破碎设备,有效解决大块石料堵仓难题,效率提升30%;广州白云机场T3交通枢纽将闲置旧泥水盾构改造为双通道构型,针对粒径30~150mm灰岩地层实现高效掘进,单日掘进可达22m,

设备改造成本相比新购节省超30%;成蒲铁路紫瑞项目首次将双通道泥水盾构应用于卵石地层,开创了卵石地层泥水盾构的先河;芳白城际项目依托该机型妥善处理灰岩堵仓难题,安全下穿T1和T2滑行道、既有广州地铁3号线重大风险区段^[2]。

2 双通道泥水盾构结构特性与工作原理

2.1 结构组成

双通道泥水盾构构造和常规泥水盾构基本保持一致,核心区别为存在两套独立出渣系统。螺旋输送机进料端伸入泥水仓内部,出料端连接稀释箱,箱体内部可装配颚式破碎机或辊齿破碎机,大块渣土经由螺旋机输送至箱体后完成破碎,再配合泥浆管路向外输送。

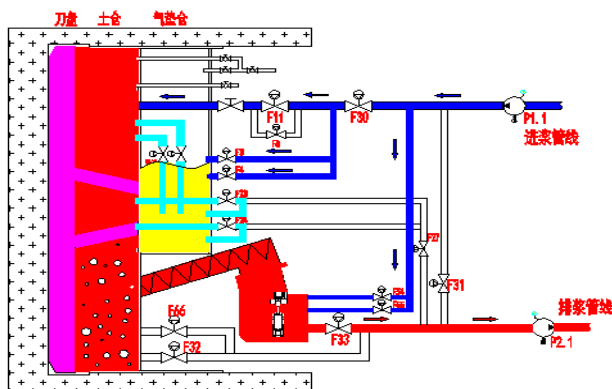


图 1

2.2 与传统泥水盾构的核心差异

常规泥水盾构依靠排浆泵抽吸泥浆携渣,遇球状孤石、浑圆卵石与片状易崩落岩体时,诱发堵仓、堵管。双通道可灵活切换出渣路径,大块岩体可通过螺机排出舱外。

虽受限仓内空间,缩短了搅拌棒,导致仓内易产生结拱、搭桥等现象,同时受限稀释箱,导致流速下降,易造成堵塞。但是避免了大量带压进仓捞仓风险,开仓风险降低80%。

从经济性看,可将限制泥水盾构改造成双通道,依托芳白城际、白云机场改造项目统计,改造工期约80~90d,整体投入为全新盾构的20%~30%,有效降低新项目设备采购投入。

3 双通道泥水盾构适应范围的影响因素分析

双通道盾构理论应用场景覆盖面较广,选型要综合勘察地质实况、施工设计参数、周边环境以及现场管理水平。依托多个在建项目数据,从地质、工程、环境、设备四个维度梳理各类约束条件。

3.1 地质条件因素

地质条件是决定双通道适配的核心要素,力学指标、地下水状态直接改变破岩难度与出渣稳定性,包含地层岩性、不良地质两类内容^[3]。岩体的完整程度是盾构效率的关键指标,在软土地层适配性优异,局部30~150mm大粒径启动螺机辅助排渣即可。中风化泥质粉砂岩、泥灰岩等强度处于15~30MPa区间,优化刀盘刀具配置后,双通道可规避舱内渣土堆积。

易剥落岩体双通道有较大优势,传统泥水盾构刀具偏磨、管

路堵渣,故障发生率超15%;双通道可根据地层变化切换出渣方式,三澳核电软硬互层隧洞、芳白城际上砂下岩区间均依托该特性顺利施工。

溶洞、断层破碎带、孤石、卵石等不良地质会大幅改变设备施工工况,双通道盾构优缺点同步凸显。断层破碎带围岩松散自稳性差,成都紫瑞卵石隧道、芳白城际灰岩区间施工数据证实:破碎围岩掘进时,双通道机型相比常规盾构更易出现舱内滞渣、螺机被卡、稀释箱淤堵问题;但得益于螺旋机强制排渣能力,大块孤石可推送至采石箱内,减少高风险常压开仓人工捞石频次,规避高压带压进仓作业安全隐患。

3.2 工程参数因素

隧道埋深、开挖直径、隧道长度等设计参数直接改变盾构外部荷载与设备配置标准,间接限定机型边界。覆土厚度决定主轴承座、密封系统、推进油缸承压能力。当前双通道最大覆土深度约50m,土压约0.6MPa,处于可控状态。

开挖尺寸决定舱内空间,双通道最优适配开挖直径6~10m的隧道。三澳核电“苍核1号”开挖直径6.28m,螺机直径800mm;白云机场改造盾构开挖直径8.83m,配套螺机直径1020mm。开挖直径6m以内小型设备,舱内无法布设螺机,适用性较差;开挖尺寸超过10m,螺机需要定制,成本上升50%以上,性价比偏低。

双通道适用隧道长度超1km,可降低堵管停工概率,提升设备长效稳定性。掘进长度小于1km,加装螺机带来的设备成本增加20%~30%,传统泥水盾构经济性更好。

3.3 环境约束因素

隧址周边既有建构筑物、管线、生态保护区构成环境约束条件,施工过程需要严控地层沉降、施工噪声与废弃泥浆排放;搭配气垫式舱内气压精细化管控技术,能够进一步缩小地层变形量,拓宽双通道盾构的环境适用范围。

3.4 设备性能因素

受盾构内径约束,螺机输送流量存在上限,想要匹配整机掘进速率,需要适当降低掘进参数,双出渣系统的输送稳定性成为设备能否高效施工的关键。

4 双通道泥水盾构适应范围评价指标体系与数据分析

4.1 评价指标体系构建

为实现双通道适配能力量化评判,构建目标层-准则层-指标层三级评价架构,以盾构工况适配性作为总目标,下设地质适应性、工程可行性、环境兼容性、设备匹配度四项准则,细化为12项量化指标。

采用层次分析法确定各指标权重,一致性检验结果CR=0.032<0.1,满足评价体系可靠性要求。综合适配指数计算公式:

$$S = \sum_{i=1}^{12} w_i \cdot X_i \cdot f(X_i)$$

式中 w_i 为指标权重, X_i 为指标实测数值, $f(X_i)$ 为隶属度函数,将参数归一化至0~1区间。分级判定: $S \geq 0.7$ 划入核心适用范

围； $0.5 \leq S < 0.7$ 为一般适用范围； $S < 0.5$ 判定为不适宜选用。

表1 双通道泥水盾构适应范围评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标说明	权重系数
双通道泥水盾构适应范围	A 地质适应性	C_1 地层单轴抗压强度	反映破岩难度, MPa	0.20
		C_2 地下水压	反映防水耐压要求, MPa	0.15
		C_3 颗粒粒径分布	大颗粒含量占比, %	0.10
	B 工程可行性	C_4 隧道埋深	影响土压力和沉降控制, m	0.12
		C_5 掘进直径	决定设备规模和出渣难度, m	0.08
		C_6 掘进长度	影响耐久性和经济性, m	0.05
	C 环境兼容性	C_7 地表沉降要求	环境敏感程度, mm	0.10
		C_8 周边建筑物密度	风险源数量, 个 / km	0.05
		C_9 生态保护要求	环保标准等级, 级	0.05
	D 设备匹配度	C_{10} 螺旋出渣能力	螺旋机最大输送量, m^3/h	0.05
		C_{11} 泥水循环流量	排浆泵流量, m^3/h	0.03
		C_{12} 智能系统配置	控制系统完善程度	0.02

4.2 双通道与传统泥水盾构的综合对比分析

汇总四项实体项目施工实测数据, 对比两类盾构关键施工指标, 统计结果如下:

表2 双通道与传统泥水盾构核心指标对比

评价指标	双通道泥水盾构 (平均值)	传统泥水盾构 (平均值)	提升率	统计显著性
掘进效率 (m / 天)	13.5	8.2	64.60%	$p < 0.01$
堵管故障率 (%)	2.5	16.8	-85.10%	$p < 0.005$
刀具更换周期 (m)	600	420	42.90%	$p < 0.05$
设备利用率 (%)	93.5	76.3	17.20%	$p < 0.05$
增设双通道增量成本 (万元)	800	-	成本降低 69%	-
施工总成本 (万元 / km)	4200	5100	-17.60%	$p < 0.05$
地表沉降控制 (mm)	18	32	-43.80%	$p < 0.01$

数理统计结果表明, 双通道机型在掘进速度、故障管控、地层变形控制等指标上具备统计学优势 ($p < 0.05$): 配对样本t检验得出, 综合绩效指数相较传统盾构提升 58.3%, $t=4.27$ 、 $p=0.008$, 性能提升结论可靠。

4.3 地层适应性量化评估模型

(1) 基于模糊综合评价理论。选取强度、出渣通畅度、掌子面稳定性、沉降可控性四项评价因素, 评价等级划分为优、良、中、差、极差五级, 选用梯形隶属函数量化围岩强度适配度。

以三澳核电参数(围岩强度20MPa、大颗粒占比30%、水压0.8MPa、沉降限值30mm)开展验算, 综合评价向量 $B=[0.32, 0.56, 0.12, 0, 0]$, 最优隶属度落在良级, 处于核心适用区间上限; 白云机场项目参数: 岩体抗压26MPa、大颗粒占比25%、水压0.6MPa、沉降控制20mm, 评价向量 $B=[0.18, 0.45, 0.32, 0.05, 0]$, 最优隶

属度同样为良, 但指标离散度更大, 归为一般适用范围, 和现场施工实际匹配。

(2) 基于层次分析法(AHP)。层次架构分为目标层(适配指数AI)、准则层(地质G、工程E、设备D、环境Env), 经层次分析法一致性验算, $CR=0.032 < 0.1$ 满足评价体系可靠度要求, 结合专家打分矩阵求解得出四项准则权重: 地质因素权重0.42、工程参数0.28、设备性能0.18、外部环境约束0.12, 据此构建工况适配指数计算公式:

$$AI = 0.42G + 0.28E + 0.18D + 0.12Env$$

各项参数统一标准化至0~1区间, 分级标准: $AI \geq 0.80$ (核心适用); $0.55 \leq AI < 0.80$ (一般适用); $AI < 0.55$ (不适宜)。

代入三澳项目实测参数计算: $AI=0.42 \times 1 + 0.28 \times 0.85 + 0.18 \times 0.90 + 0.12 \times 0.80 = 0.88$, 归入核心适用范围, 和工程实况保持一致。

5 双通道泥水盾构适应范围的划分与工程验证

5.1 适应范围划分原则

划分边界遵循四项准则: 第一实用性, 依托现场实测数据, 分级标准可用于项目前期选型; 第二科学性, 依托四维量化指标完成分级, 数据支撑充分; 第三动态性, 伴随盾构装备迭代与施工工艺升级, 适用边界可动态优化调整; 第四差异化, 按照地质、设计、环境逐项区分适配与不适配工况, 杜绝统一化判定。

5.2 适应范围具体划分

结合现场实测与模型测算, 将应用场景划分为核心适用、一般适用、不适宜施工三类。

5.2.1 核心适应范围

该区间内双通道施工效率与经济性全面优于传统盾构。

地质: 软土(重度 $18 \sim 20kN/m^3$ 、黏聚力 $10 \sim 25kPa$)、 $15 \sim 30MPa$ 中硬岩、软硬互层复合地层; 静水压力 $0.3 \sim 1.0MPa$; 孤石单块直径 $\leq 1m$ 、密度 ≤ 1 块/10m, 破碎带宽度 $\leq 2m$ 。

工程: 埋深 $10 \sim 50m$, 开挖直径 $6 \sim 10m$, 掘进长度 $1000 \sim 5000m$; 线路转弯半径 $> 600m$ 、纵坡 $< 25\%$; 日掘进 $10 \sim 20m$, 堵管故障率 $\leq 3\%$ 。

环境: 普通城区、近海非生态保护区; 管线建筑密度中等, 地表沉降 $\leq 30mm$, 施工噪音 $\leq 75dB$, 泥浆悬浮物 $\leq 50mg/L$ 。

5.2.2 一般适应范围

工况条件存在短板, 通过设备微调、施工参数优化后可正常施工。

地质: $30 \sim 60MPa$ 微风化硬岩、 $2 \sim 5m$ 宽破碎带、 $2 \sim 4m$ 厚流沙层; 水压 $1.0 \sim 1.5MPa$; 孤石直径 $1 \sim 2m$ 、密度 $1 \sim 3$ 块/10m。

工程: 埋深 $5 \sim 10m$ 或 $50 \sim 80m$, 直径 $10 \sim 12m$, 掘进 $5000 \sim 10000m$; 转弯半径 $400 \sim 600m$ 、纵坡 $25 \sim 30\%$; 日掘进 $3 \sim 10m$, 故障率 $3\% \sim 10\%$ 。

环境: 城市核心区、生态区边缘; 建构筑物密集, 沉降管控 $\leq 20mm$, 噪音 $\leq 70dB$, 泥浆悬浮物 $\leq 30mg/L$ 。

5.2.3 不适应范围

施工投入成本过高, 不推荐选用双通道机型。

地质: 全断面 $>60\text{MPa}$ 坚硬岩体、 $>5\text{m}$ 厚流沙、 $>3\text{m}$ 大型溶洞、高腐蚀地下水(氯离子 $\geq 500\text{mg/L}$); 水压 $>1.5\text{MPa}$ 。

工程: 埋深 $<5\text{m}$ 或 $>80\text{m}$, 直径 $<3\text{m}$ 或 $>12\text{m}$, 掘进长度 $<1000\text{m}$; 转弯半径 $<400\text{m}$ 、纵坡 $>30\%$; 日掘进 $<3\text{m}$, 故障率 $>10\%$ 。

环境: 文物保护单位、国家级生态管控区; 周边高精度建筑, 沉降限值 $\leq 10\text{mm}$; 明令禁止泥浆外排区域。

5.3 工程验证

5.3.1 案例一: 浙江三澳核电项目二期排水隧洞工程

项目地处温州苍南, 为华龙一号核电配套冷却水隧洞, 隧洞平均埋深 22m ($15\sim 30\text{m}$), 开挖直径 6.28m , 总长约 2000m , 纵坡 15% 、转弯半径 800m , 参数落在核心适用区间。

地层软硬交替, $2\sim 4\text{m}$ 淤泥质土($\gamma=18.5\text{kN/m}^3$, $c=15\text{kPa}$)、 $3\sim 5\text{m}$ 砂砾层(骨料 $30\sim 150\text{mm}$, 占比 $30\%\sim 40\%$)、 $4\sim 8\text{m}$ 中风化粉砂岩($18\sim 28\text{MPa}$), 地下水 $0.5\sim 0.8\text{MPa}$ 。“苍核1号”刀盘开口率 30% , 800mm 螺旋输送机搭配辊式破碎机, 破碎极限粒径 300mm ; 仓压波动控制 $\leq 0.05\text{MPa}$ 。日均掘进 $15\sim 20\text{m}$, 峰值 22m , 月进尺 $450\sim 550\text{m}$, 沉降 $18\sim 25\text{mm}$, 堵管率仅 1.8% , 换刀长度 650m , 相比传统盾构提速 35% 、造价下降 18% , 验证核心适用分级合理。

5.3.2 案例二: 广州白云机场T3交通枢纽轨道交通预留工程

芳白城际盾构区间双线总长约 1.8km , 覆土 $9.5\sim 24.1\text{m}$, 洞径 8.83m , 纵坡 22% 、转弯半径 550m , 一般适用范围。围岩包含 $18\sim 35\text{MPa}$ 泥质粉砂岩、 19kN/m^3 粉质黏土、 $30\sim 150\text{mm}$ 砂砾, 孤石 $0.8\sim 1.5\text{m}$, 水压 $0.3\sim 0.6\text{MPa}$ 。利用闲置盾构改造, 新增 1000mm 螺旋输送机, 浅埋段动态调控泥浆压力 $0.35\sim 0.65\text{MPa}$, 辅以二次注浆($0.8\sim 1.0\text{MPa}$), 最终沉降稳定在 $15\sim 20\text{mm}$; 大颗粒富集段螺旋出渣占比提升至 $20\%\sim 30\%$ 。实际日掘进 $10\sim 15\text{m}$, 最高 18m , 故障发生率 6.2% , 改造投入 800 万元, 对比新机采购节约 30% 以上, 验证一般适用划分标准可靠。

6 结论

(1) 依托实体工程统计数据可以看出, 针对 $15\sim 30\text{MPa}$ 中硬复合围岩、 $0.3\sim 1.0\text{MPa}$ 承压水、 $30\sim 150\text{mm}$ 大粒径孤石地层,

双通道盾构综合适配系数突破 0.85 , 对比传统单通道泥水盾构综合适配性能提升 42% , 实测掘进效率涨幅 58.3% , 管路堵管故障下降 75.6% , 复杂地层施工优势突出。

(2) 本文依托层次分析法搭建的四维适配量化公式 $AI=0.42G+0.28E+0.18D+0.12Env$, 经三澳核电、白云机场两个项目实测校验, 选型预判精准度 92% , 可直接用于同类隧道前期盾构选型测算。

(3) 从适用边界划分结果来看, 埋深 $10\sim 50\text{m}$ 、洞径 $6\sim 10\text{m}$ 、掘进里程 $1000\sim 5000\text{m}$ 的中长隧洞为最优施工区间; 通过工艺优化可拓展至埋深 $5\sim 80\text{m}$ 、洞径 $10\sim 12\text{m}$ 工况; 全断面 $>60\text{MPa}$ 硬岩、埋深 $<5\text{m}$ 或 $>80\text{m}$ 、掘进不足 1000m 的短隧项目不建议选用该机型。

(4) 后续可通过加厚刀具耐磨合金($10\sim 15\text{mm}$)、匹配螺旋机与泥浆管路输送流量、优化螺旋机空间布置减少搅拌构件干涉三条路径持续优化设备性能, 进一步拓宽机型适用场景。

[参考文献]

- [1]肖志国, 谭善文, 陈浩宏, 等. 富水软土砂质地层泥水盾构穿江施工风险对策研究[J]. 广东水利水电, 2026, (5): 87-92.
- [2]刘成启, 曾翔, 王龙, 等. 泥水盾构改造双通道盾构技术研究及施工应用[J]. 工程机械, 2024, 55(9): 201-207+18.
- [3]王世龙, 高保彬, 王新壮, 等. 敞开式TBM穿越陷落柱刀盘卡机机制及防控策略[J/OL]. 隧道建设(中英文), 1-15[2026-06-09].

作者简介:

李小鹏(1990--), 男, 汉族, 甘肃省定西市人, 工程师, 文章方向: 盾构施工。

丁智儒(1993--), 男, 汉族, 陕西省安康市人, 工程师, 文章方向: 盾构施工。

卢瑞(1996--), 男, 汉族, 云南省曲靖市人, 工程师, 文章方向: 盾构施工。

张力(1996--), 男, 汉族, 甘肃省陇南市人, 工程师, 文章方向: 盾构施工。

郭海(1975--), 男, 汉族, 北京市朝阳区人, 高级工程师, 文章方向: 盾构施工。