

济南轨道交通 1 号线区间盾构施工效能分析*

黄永亮 哈月亭 门燕青

(济南轨道交通集团有限公司, 250014, 济南//第一作者, 工程师)

摘要 为节约盾构施工资源, 强化绿色施工管理, 依托济南轨道交通 R1 线玉符河站至王府庄站区间盾构隧道工程, 对典型地层因素、施工参数、盾构掘进和管片安装中的施工电能、工业用水与材料的消耗进行了统计分析, 总结了盾构施工中能源和材料消耗与地层因素、掘进参数间的相关性, 为类似盾构项目的绿色施工提供参考。

关键词 城市轨道交通; 隧道; 盾构施工; 效能分析

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.06.010

Construction Efficiency Analysis of Shield Tunnel Section on Rail Transit Line 1 in Jinan City

HUANG Yongliang, HA Yueting, MEN Yanqing

Abstract In order to promote energy conservation and strengthen green construction management during shield construction, a section shield tunnel project between Yufuhe Station and Wangfuzhuang Station on Jinan rail transit Line 1 taken as the research object, the typical stratum parameters, construction parameters, energy and material consumption in shield tunneling and segment installation are statistically analyzed. The correlations between the consumption of energy and material and the stratum factors plus shield construction parameters are summarized, in order to provided reference for green shield construction in other projects.

Key words urban rail transit; tunnel; shield construction; efficiency analysis

Author's address Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., 250014, Jinan, China

在盾构施工掘进施工的资源消耗和环境保护领域研究方面, 文献[1]、文献[2]进行了绿色施工技术在地铁盾构施工中的应用研究; 文献[3]研究了地铁盾构工程环境保护技术; 文献[4]研究了全

断面黏土地质条件下超大直径盾构泥浆绿色处理技术; 文献[5]进行了一类特殊的泥水盾构掘进绿色泥浆实验研究; 文献[6]研究了强渗透地层泥水盾构绿色泥浆的配制及其适应性; 文献[7]进行了拼装机液压系统仿真与拼装轨迹的能耗分析; 文献[8]进行了盾构隧道施工碳排放测评研究; 文献[9]采用模糊综合评价法进行了泥水盾构越江隧道段绿色施工评价; 文献[10]采用统计分析方法进行了盾构隧道建造阶段低碳化影响因子及其措施的研究。

综上所述, 盾构绿色施工的研究多集中在施工技术、泥浆处理、能耗、碳排放及绿色施工评价等方面, 但缺少盾构施工技术在资源消耗方面绿色实施效果的实例报道。鉴于此, 本文结合济南轨道交通 1 号线玉符河站—王府庄站区间盾构隧道工程, 采用现场实测数据分析方法, 对盾构掘进过程中的能耗、水耗和材耗等进行分析, 研究能源消耗规律, 评价盾构施工的绿色效果, 以期对 1 号线盾构绿色施工进行反馈, 并为其他盾构施工项目提供参考。

1 工程概况

1.1 工程背景

本文所研究的盾构区间全长 1 303 m, 盾构段结构底板埋深约 13.7 ~ 24.0 m, 底板标高 17.8 ~ 26.5 m。济南轨道交通在设计之初就秉持了绿色节能的理念, 为了减小隧道阻塞比、降低运营能耗, 设计时将盾构区间内径由传统的 5.40 m 增大至 5.80 m, 外径设计为 6.40 m, 每环管片的尺寸为 1.20 m。

1.2 地层概况

该盾构区间地层可归为 3 大类: 人工堆积层、第四系全新统冲洪积层和第四上更新统冲洪积层, 并按地层岩性及其物理力学性质进一步细分为 12 层。

* 中国博士后基金面上项目(2019M652303); 山东省博士后创新项目(201903053); 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2019JZZY010428); 山东省交通运输厅科技计划项目(2019B06)

盾构施工穿越地层主要为素填土、粉质黏土、细砂层和卵石层,部分物理力学参数见图1所示。

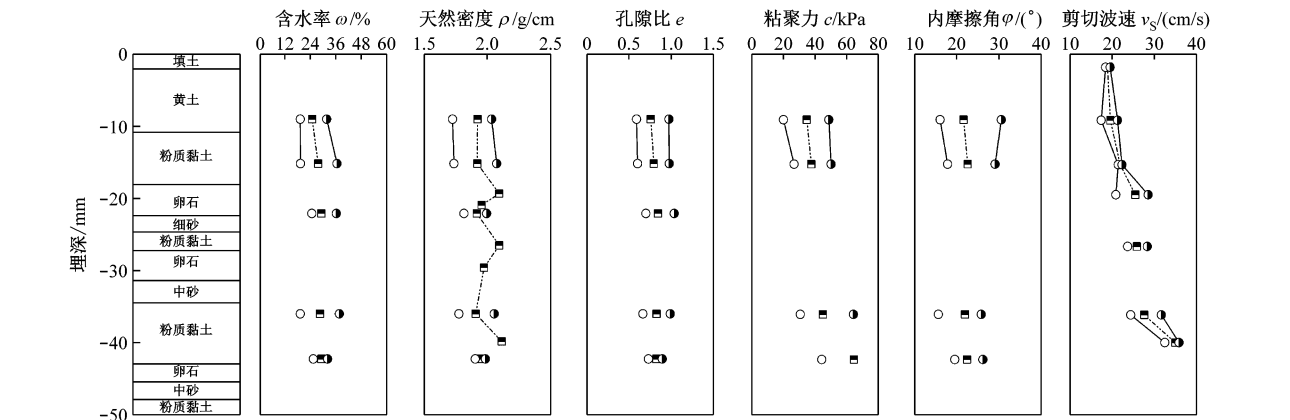


图1 盾构施工穿越地层的物理力学参数

2 盾构施工效能分析

2.1 盾构施工电能消耗

2.1.1 盾构施工能耗系统

该隧道盾构施工由济南重工集团设计制造的山东省首台大直径地铁隧道盾构机——“开拓一号”承担掘进任务。隧道开挖直径达6.68 m,总长为85 m,总重超过500 t,最小转弯半径为250 m。该区间所选用的盾构主轴承直径为3 217 mm,最大使用推力荷载为4 086 t,有效使用寿命≥10 000 h。该盾构由9组液压驱动,其额定扭矩为7 070 kNm,脱困扭矩为8 610 kNm,可以在砂层等对扭矩要求较高的地层中掘进;刀盘的最高转速为3.15 r/min,可以满足在中风化岩中要求快转速的掘进要求。盾构主驱动最高转速为3.15 r/min,主轴承外密封4道,内密封3道,且可进行调整,密封最大承压能力为0.5 MPa。该盾构主要能耗系统的技术参数如表1所示。

表1 盾构主要能耗系统技术参数表			
kW			
项目	功率	项目	功率
刀盘驱动	945.0	超挖刀	7.5
螺旋输送机	250.0	空压机1	55.0
主推动	75.0	空压机2	55.0
管片安装机	55.0	膨润土泵	18.5
注浆系统	55.0	盾壳膨润土泵	7.5
辅助泵	22.0	膨润土搅拌	12.0
液压油箱过滤泵	11.0	双液注浆泵功率	11.0
主驱补油泵	55.0	泡沫混合液泵	9.0
铰接泵	18.5	增压水泵	11.0
控制油泵	11.0		

由表1可以看出,盾构处于工作状态主要有2

种耗电的运行模式:掘进模式和管片安装模式。其他工作状态则为清渣和运土,这些工作虽然会消耗一定时间,但总体对能量的消耗量较小。

2.1.2 盾构施工能耗分析

图2统计了等效土层剪切波速与环累计耗电量之间的关系。可以看出,随着等效土层剪切波速的逐渐增大,盾构的环累计耗电量也有增大的趋势,即环累计耗电量与地层有较为明显的线性关系。

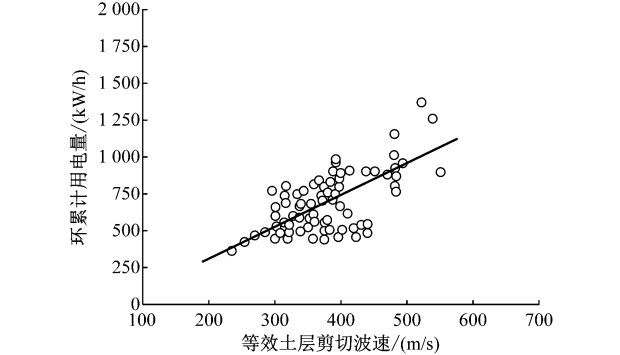


图2 环累计用电量与等效土层剪切波速关系图

图3为环累计耗电量与环刀盘工作时间的关系图。可以看出,每环刀盘工作时间多集中在20~40

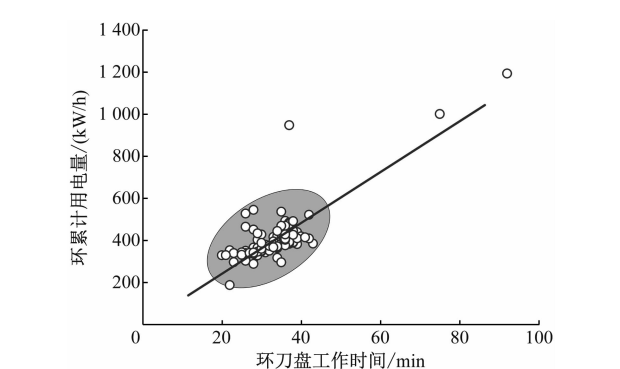


图3 环累计用电量与环刀盘工作时间关系

min 内,极少数的环刀盘开挖时间超过 40 min。随着每环耗时的增加,盾构的环累计耗电量随之增加,二者呈现出较为明显的正相关关系。

查阅盾构机型参数可知,该盾构机的装机额定功率为 1 815 kW,驱动总额定功率为 945 kW,螺旋输送机额定功率为 250 kW。在额定功率范围内,实际运转功率越大,则能源的利用率越高。对刀盘开挖时的实际工作功率及其影响因素进行分析,结合刀盘信息及设计参数可知,刀盘部件的功率主要受刀盘转速及刀盘扭矩的影响。考虑到济南的复杂地层,环刀盘工作时间以 20~40 min 为宜,刀盘功率约 200~600 kW,小于刀盘驱动额定功率。

图 4 为该施工区段盾构推进刀盘功率与扭矩的关系图。可以看出,刀盘功率主要集中在 440~530 kW 之间,而刀盘扭矩主要集中在 1 350~1 750 kNm 之间,刀盘扭矩与刀盘功率呈现较为明显的相关性。结合对减少无用功率的理论可得,为提高刀盘的能源利用率,避免发热等不必要的能源耗费,可在额定功率的限额范围内,通过提高刀盘扭矩来提高刀盘功率,进而提高盾构机刀盘部分的能源使用率。

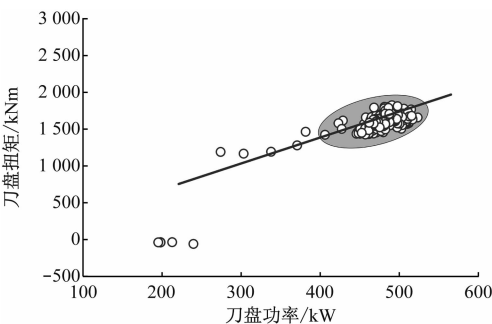


图 4 刀盘扭矩与刀盘功率关系

图 5 为盾构机推进速度与总功率的关系图。可以看出,该区段盾构机推进速度主要集中在 0~5.5 cm/min 之间,总功率集中在 330~590 kW 之间,盾

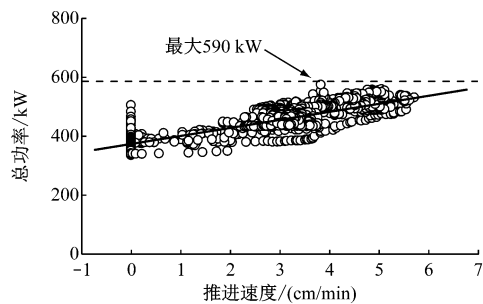


图 5 总功率与推进速度关系图

构机推进的总功率与推进速度有明显的相关性。随着推进速度的增大,盾构的总运行功率也增大,因此在额定功率的范围内也能提高有用能源的使用效率。

2.2 盾构施工用水消耗

该项目采用土压平衡盾构机。该区段的工业用水主要用于盾构冷却系统中,其工业供水及冷却系统的技术参数如表 2 所示。

表 2 盾构工业供水及冷却系统技术参数

项目	参数
设备要求工业水供应量/(m ³ /h)	54
设备要求供水压力/MPa	0.4~0.8
额定进水温度/℃	28
管路公称直径/mm	80
水管卷筒数量/个	1
卷筒水管有效长度/m	30(双联)
冷却系统型式	内、外循环
内循环冷却水泵型式	离心泵
内循环冷却水泵功率/kW	7.5
内循环冷却水泵流量/(m ³ /h)	30
增压水泵功率/kW	11

图 6 为环累计耗水量与环刀盘工作时间的关系图。可以看出,环累计用水量主要集中于 1 100~4 050 L 之间,与环刀盘工作时间之间有较为明显的对应线性相关性。这是由于冷却水系统的启停不仅与温度相关,还与正常工作状态相关。所以由图 6 可以反映出,由于该区间盾构推进速度较快、渣土运输时间短、施工时间紧凑,使得盾构机温度较高,因此增加了冷却水的消耗。总体而言,该区间盾构施工的冷却水以循环冷却为主。据统计,其循环水量基本达到 50% 以上,因此总体耗水量相对较少。

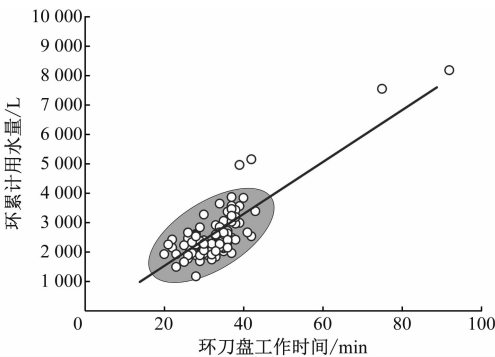


图 6 环累计用水量与环刀盘工作时间关系

2.3 盾构施工材料消耗

盾构施工过程中涉及的耗材较多,本文主要讨

论土体改良剂(泡沫)与注浆液2个方面。

2.3.1 土体改良剂

图7为该区间盾构环累计泡沫原液量/混合液量与环刀盘工作时间之间的关系图。可以看出,环累计泡沫原液量主要集中在800~2 700 L之间,而环累计泡沫混合液用量约为60~220 L之间。不难看出,环累计泡沫原液用量/混合用量与环刀盘工作时间之间有较为明显的线性相关性。然而,泡沫原液用量不仅与盾构的推进时间和距离相关,还在很大程度上依赖于施工员的判断。因而,可以通过加强对盾构司机的培训力度,提高司机的技能素质,从而达到更优的经济性效果。

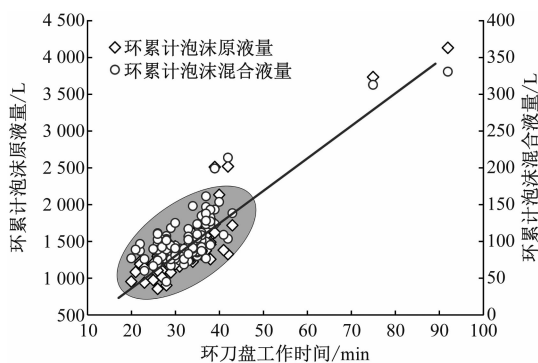


图7 环累计泡沫原液/混合液量与环刀盘工作时间关系

2.3.2 注浆液

盾构机配置了2个注浆泵,每个泵有2个出口,注浆系统使用4根注浆管。盾尾配置了10条注浆管,其中4用6备。为了实现自动注浆的功能,在管路的注入端安装了压力传感器,用于检测注浆压力。为了适应不同的掘进速度,注浆系统会根据压力控制注浆量,其最小和最大注浆量可以预先选择。

图8为该区间盾构环累计注浆量与环刀盘工作时间之间的关系图。可以看出,环累计注浆量基本集中于3 100~7 000 L之间。环累计注浆液量与环

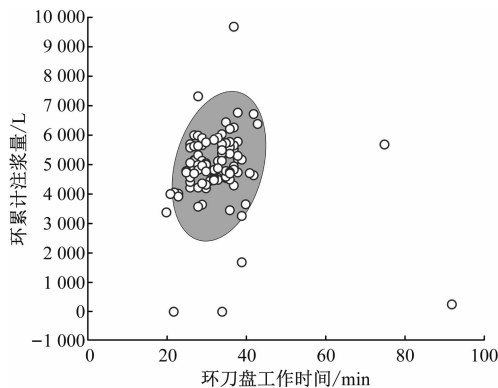


图8 环累计注浆液量与环刀盘工作时间关系

刀盘工作时间之间并没有明显的对应相关性,这是因为该区间地层因素较为复杂多变,但整体密实度较好,因而浆液的消耗量相对较低。

3 结论

1) 济南轨道交通1号线玉符河站—王府庄站区间工程盾构机在工作时,主要电耗发生在掘进和管片安装2种模式下。盾构机环刀盘的工作时间集中在20~40 min内,其环累计耗电量主要与地层条件、刀盘工作时间、施工参数相关。

2) 环累计耗电量与等效土层剪切波速有较为明显的相关性,地层的相对硬度越大,环累计耗电量越大;环累计耗电量与环刀盘工作时间呈出较为明显的正相关关系;刀盘扭矩与刀盘运转功率为线性对应关系;盾构机推进的总功率与推进速度有明显的相关性。

3) 盾构施工耗水主要为冷却系统所耗工业用水,环累计用水量主要集中于1 100~4 050 L之间,环累计用水量与环刀盘工作时间之间有较为明显的对应线性相关性。

4) 盾构施工过程中涉及的耗材主要有土体改良剂与注浆液。环累计泡沫原液量主要集中于800~2 700 L之间,而环累计泡沫混合液用量约为60~220 L之间。环累计泡沫原液用量/混合用量与环刀盘工作时间之间有较为明显的线性相关性。环累计注浆量基本集中于3 100~7 000 L之间,且环累计注浆液量与环刀盘工作时间之间并没有明显的对应相关性。

参考文献

- [1] 柴庆水. 绿色施工技术在地铁盾构施工中的应用研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.
- [2] 温法庆, 张立泉, 皮膺海, 等. 绿色施工技术在地铁盾构施工中的应用[C]//中国城市科学研究会数字城市专业委员会轨道交通学组. 智慧城市与轨道交通论文集. 常州: 中国城市科学研究会数字城市专业委员会轨道交通学组, 2016:320.
- [3] 张鹏. 地铁盾构工程环境保护技术[J]. 隧道建设, 2012, 32(增刊2):98.
- [4] 李东升. 全断面黏土地质条件下超大直径盾构泥浆绿色处理技术[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2014, 27(增刊1):72.
- [5] 张子新, 胡欣雨, 黄昕. 一类特殊的泥水盾构掘进绿色泥浆实验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(11):1574.

(下转第48页)

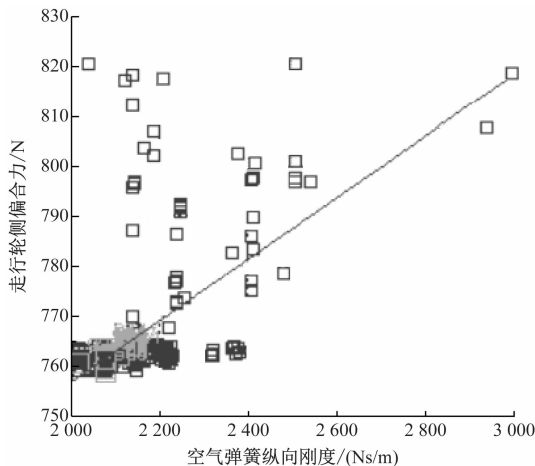


图 12 走行轮侧偏合力与空气弹簧纵向阻尼的线性关系

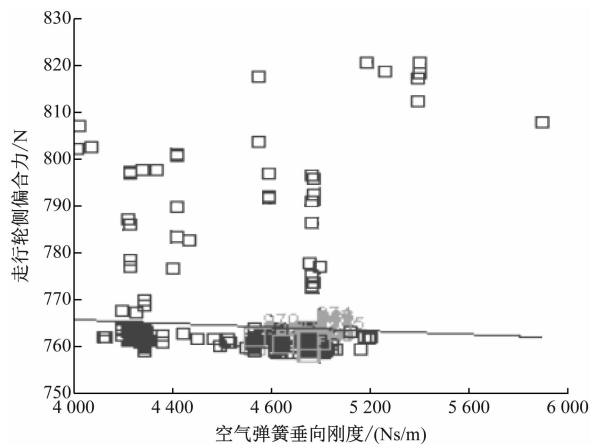


图 13 走行轮侧偏合力与空气弹簧垂向阻尼的线性关系

4 结语

本文通过对单轴式单轨转向架结构及空气弹簧工作原理进行分析,建立了单轴式单轨车辆动力学仿真模型。通过对空气悬架参数进行灵敏度分析,以导向力矩和走行轮侧偏合力作为优化目标,

筛选出影响显著的参数,分别为空气弹簧的纵向刚度、纵向阻尼和重向阻尼。对影响显著的空气悬架参数进行多目标优化,在保证车辆稳定性、舒适性的前提下,使得导向力矩较优化前减小了 4.76%,走行轮侧偏合力较优化前减小了 7.57%,达到了优化目的。

参考文献

- [1] 孙天助,付茂海,卜继玲.单轴转向架在城轨车辆中的应用前景分析[J].电力机车与城轨车辆,2007,30(3):4.
- [2] 杜子学,梁志华,文孝霞.跨坐式单轨车辆导向力矩研究[J].机车电传动,2014(3):74.
- [3] 黄运华,赵晓莉,卜继玲.城轨车辆单轴转向架关键技术综述[J].电力机车与城轨车辆,2007(4):1.
- [4] 李芾,戚壮.轨道车辆空气弹簧悬挂系统应用与研究[J].中国铁路,2014(4):42.
- [5] 周维江.单轮对动力转向架的设计研究[D].成都:西南交通大学,2008.
- [6] 付伟.单轴转向架动力学性能研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [7] YOHIIHIRO S, KAZUHIKO S, AKIRA M, et al. Dynamic characteristics of a single-axle truck for compatibility between stability and curving performance[J]. Vehicle System Dynamics Supplement, 2002(37):616.
- [8] 韩林山,李向阳,严大考.浅析灵敏度分析的几种数学方法[J].中国水运,2008,8(4):177.
- [9] 文孝霞,杜子学,左长永.曲线工况下跨座式单轨走行轮侧偏刚度对轮胎偏磨损的影响[J].交通运输工程学报,2014,14(2):41.
- [10] KALYANMOY D, AMRIT P, SAMEER A, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(4):182.

(收稿日期:2018-06-07)

(上接第 43 页)

- [6] 王廷.强渗透地层泥水盾构绿色泥浆配制及其适应性研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [7] 崔晋征.拼装机液压系统仿真与拼装轨迹的能耗分析[D].上海:上海交通大学,2014.
- [8] 皮膺海.盾构隧道施工碳排放测评研究[D].南昌:南昌大学,2016.
- [9] 李岳,陈超.泥水盾构越江隧道段绿色施工的模糊综合评价[J].施工技术,2015,44(增刊1):280.
- [10] 李乔松,白云,李林.盾构隧道建造阶段低碳化影响因素与措施研究[J].现代隧道技术,2015,52(3):1.

(收稿日期:2018-05-24)