



Continuous Slag Discharge Construction Technology for Shield Tunneling in Narrow Space Environment

Chen Liqiang, Xu Shunming*, Li Dongni

Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou, China

Email address:

xushunming@gzmtr.com (Xu Shunming)

*Corresponding author

To cite this article:

Chen Liqiang, Xu Shunming, Li Dongni. (2024). Continuous Slag Discharge Construction Technology for Shield Tunneling in Narrow Space Environment. *Science Discovery*, 12(4), 94-100. <https://doi.org/10.11648/j.sd.20241204.14>

Received: 12 June 2024; **Accepted:** 25 July 2024; **Published:** 27 August 2024

Abstract: The shield tunneling method is the main construction method in subway tunnel construction, which has the characteristics of safety, efficiency, mechanization, and high degree of automation. However, the shield tunneling equipment is huge, the supporting facilities are numerous, and the site requirements are high. In response to the problems of slow slag removal speed and low construction efficiency in shield tunneling under the construction conditions of small wellhead shield tunneling sections in urban subways, taking the shield tunneling section of Guangzhou Metro Line 13 Phase II as the background, This article introduces the main components, working principles, installation and transportation processes, fault handling, and benefit analysis of the continuous belt conveyor slag removal system. This article elaborates on the method of using a continuous belt conveyor in the tunnel combined with a vertical lifting system at the wellhead to achieve continuous slag removal during underground shield tunneling construction in a narrow wellhead construction site. This not only improves excavation efficiency but also reduces construction costs, solves construction problems, and provides reference for similar projects in the future.

Keywords: Shield Tunneling Construction, Continuous Belt Conveyor, Slagging, Narrow Space

狭小空间环境下盾构区间连续出渣施工技术

陈礼强, 徐顺明*, 李冬妮

广州地铁集团有限公司, 广州, 中国

邮箱

xushunming@gzmtr.com (徐顺明)

摘要: 盾构法是地铁隧道建设中主要工法, 具有安全、高效、机械化和自动化程度高等特点, 但盾构机设备庞大, 配套设施多, 对场地要求较高, 针对城市地铁小井口盾构区间施工条件下盾构隧道施工出渣速度慢、施工效率低的问题, 以广州市轨道交通十三号线二期十三区段盾构区间为依托背景, 介绍了连续皮带机出渣系统主要构成、工作原理、安装运输流程、故障处理和效益分析等, 阐述了采用洞内连续皮带机结合井口垂直提升机系统的出渣方法, 实现了在狭小井口施工场地下盾构施工连续出渣, 不但提高了掘进效率, 而且降低了施工成本, 解决了施工难题, 为今后类似工程的施工提供参考。

关键词: 盾构施工, 连续皮带机, 出渣, 狭小空间

1. 引言

随着城市基础建设的发展，地铁已经成为城市发展必不可少的交通工具。伴随着地铁发展的同时，盾构施工法作为地铁隧道建设中的重要方法遇到的难题也越来越多。盾构隧道出渣是盾构施工中的基本工序之一[1-3]，在城市土地空间紧张，施工场地空间受限的条件下，无法满足传统的出渣方式所需的空間，从而导致出渣速度慢，施工效率低下，严重制约了施工进度、加大施工成本[4-8]。因此，针对这个问题，通过针对较小空间下盾构长距离掘进出渣的系列问题展开研究，采用基于皮带运输机及立式提升机的盾构施工掘进出渣新工艺，分析了垂直提升皮带运输系统与水平掘进运输系统的各系统结构相匹配特性，形成一套在较小空间下盾构长距离掘进出渣的新方法[9, 10]，从而达到解决短竖井狭小空间工况下盾构施工洞内渣土运输问题，优化皮带出渣系统的转接、卸渣工艺，解决皮带出渣系统掉泥、掉渣等问题，形成一套较完整的狭小空间盾构机连续皮带成套设备出渣技术，增加较小空间下盾构施工掘进速度的目的，对比深圳地铁十四号线皮带机采用C型垂直提升，广州地铁十三号线采用的z型垂直提升设计更合理，垂直运输物料效率更高、掉泥少[11-13]。同时

可以消除频繁吊运渣土的风险，极大地提升了渣土运输效率，取得良好施工效果。

2. 工程概述

广州市轨道交通十三号线二期及同步实施工程土建工程十三区段横贯广州市黄埔区和天河区，呈东西向布置。标段包含两个区间，即鱼珠站（E44#盾构井）~珠村站区间和珠村~E43#盾构井区间，区间单线长约3.4km，采用外径6400mm，内径5800mm管片衬砌，盾构刀盘直径为6680mm。E44#盾构井起初设计为盾构接收井，因工程过程变化现改为始发井，采用明挖法设置20米深的盾构井，作为盾构始发井，因管线迁移问题改为暗挖12米作为盾构始发导洞进行盾构始发。始发竖井周边环境敏感、地质条件复杂、施工制约因素众多，井口长11.5m，宽7.5m，井内可用空间仅为20m，无法满足正常电瓶车编组出渣方式，带来了出渣慢，施工效率低的难题。为此经技术与经济论证，研究采用洞内连续皮带机结合井口垂直提升机系统的出渣方式，解决盾构隧道出渣问题，见图1。

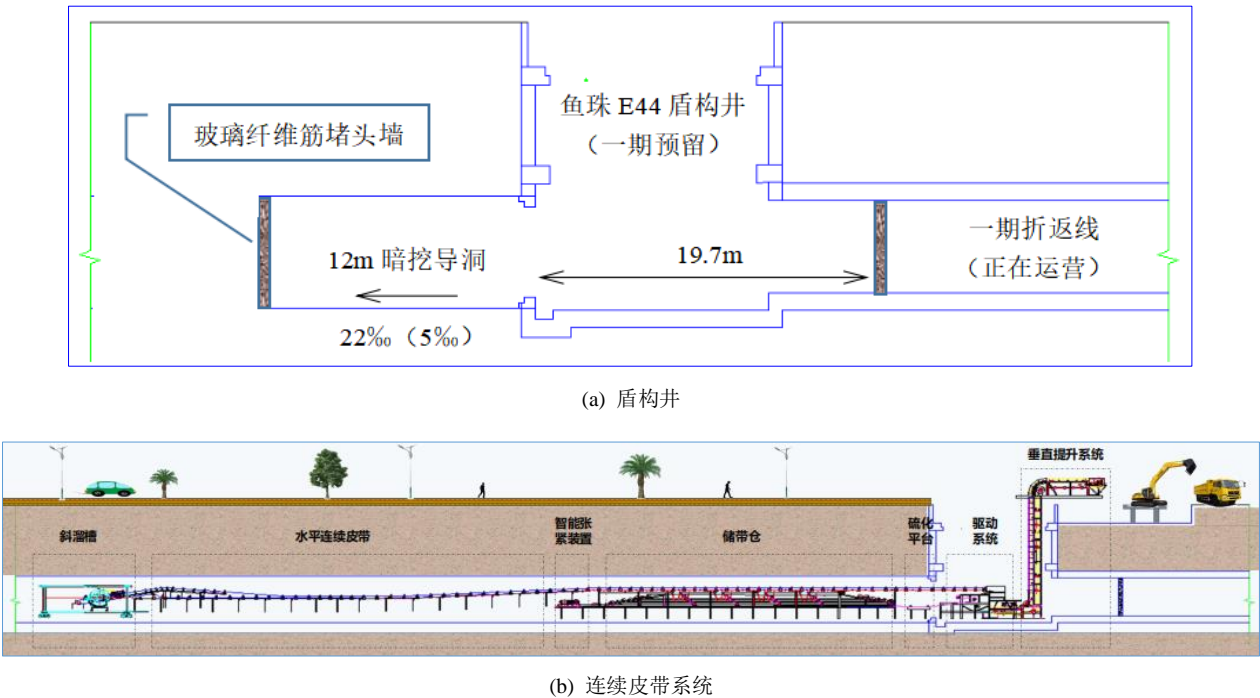


图1 E44盾构井与连续皮带系统示意。

3. 连续皮带机出渣系统概况

3.1. 连续皮带机出渣系统的主要构件

连续皮带机出渣系统：洞内连续皮带机以及井口垂直提升皮带机两部分组成。其主要构件包括斜溜槽、水平连续皮带、智能张紧装置、储带仓、硫化平台、驱动系统、垂直提升机。连续皮带系统整机见图1。

1) 机尾总成：机尾总成安装在盾构机拖车上，随着盾构机掘进向前移动。由机尾改向滚筒支架、机尾改向滚筒、缓冲床、导料槽、机尾漏斗和拖车上机身等组成，长度约 15.5米，搭接在盾构机最后两节拖车上。其结构尺寸符合拖车结构负载和空间尺寸，不影响机车运输，满足输送机的延伸与盾构机掘进保持同步，使机身的安装方便、快捷和安全。



图2 机尾总成示意、水平连续皮带装置实物。

- 2) 水平连续皮带：用于接收盾构机掘进产生的渣土，并运送至井口垂直提升机处。本项目水平连续皮带带宽800mm、运量350t/h、带速0~3.15m/s、提升高度12m。
- 3) 智能张紧装置：给皮带提供一定张紧力，且能根据受力变化自动调节皮带松紧程度的装置。
- 4) 储带仓：用来存储皮带的装置。本项目储带舱总长约63m，分10层，共储存450m皮带，可满足225m掘进。
- 5) 硫化平台：用于储带仓皮带用完后的皮带接长硫化。
- 6) 驱动系统：连续皮带机系统的动力来源，带动滚筒转动，使滚筒与连续皮带产生摩擦力带动皮带循环转动。
- 7) 垂直提升机：采用波状挡边带输送机，结构简单，能耗小，能90°垂直提升渣土。本项目垂直提升皮带带宽1400mm，带速0~3.15m/s，运量700t/m，提升高度19.5m。

3.2. 连续皮带机主要参数

表1 水平连续皮带机与垂直提升系统技术参数。

物料名称	单位	水平机数值	垂直机数值	备注
输送物料		渣石	渣石	
运量	t/h	350	700	
机长	m	约3200	15	
提升高度	m	12	19.5m	
渣石密度	t/m ³	2.0	2.0	
渣石粒度	mm	0-300	0-300	
带宽	mm	800	1400	
带速	m/s	0-3.15	0-3.15	
驱动功率	kW	2×132	1×160	
储带长度	m	450	--	
使用环境温度	℃	-20~40℃	-20~40℃	
电压	V	380	380	

3.3. 连续皮带机出渣系统工作原理

工作时，洞内连续皮带机以输送带作为承载物料的主体，输送带缠绕头尾滚筒，驱动滚筒依据欧拉原理带动输送带做连续的闭环运动，同时机尾在牵引机构的拖曳下有规律地前行，中间机身被逐段增加，将物料从机尾移送至井口卸料端。井口垂直提升机导料槽接受来自连续皮带的物料，通过波状挡边带将物料90°提升至渣池内，来完成整个出渣系统的运输工作。

3.4. 特点

相对于传统电瓶车有轨运输系统，采用连续皮带机出渣系统有以下优点：

- 1) 无需等待电瓶车，可实现连续出渣，提高掘进速度；
- 2) 对外部龙门吊使用要求低，降低吊装频次，大大提高施工安全性；
- 3) 机车轨道、机车能力等要求低；
- 4) 施工管理相对简单，自动化程度高，人工成本降低；
- 5) 布置安装简便，占用空间小，适应性强；
- 6) 出渣线与材料运输线分离，能有效避免施工干扰，提高掘进效率；
- 7) 连续皮带机出渣系统可重复使用。

3.5. 适用条件

连续皮带机出渣系统，是一个成熟的，较为广泛运用的运输系统，其适用条件如下：

- 1) 适用于城市地铁掘进施工场地较小的工程；
- 2) 适用于城市地铁掘进速度快，单环出渣量大的工程；
- 3) 适用于城市地铁长距离运输的工程。

4. 连续皮带机系统的使用及运行

4.1. 连续皮带机系统的启动顺序

连续皮带机系统的正常启动顺序为垂直提升皮带机、连续皮带机、盾构机后配套皮带机、盾构机，正常停机时顺序与其相反。启动时首先垂直提升机运行，紧接着转载皮带机、连续皮带机和盾构机后配套皮带机依次运行，在保证整个皮带机空载运转后，再启动盾构机进行掘进。这样可以保证盾构掘进产生的渣土能及时输送，防止发生渣土堆积现象。

4.2. 连续皮带机系统的出渣流程

盾构机掘进时，推进油缸向前推进，同时刀盘开始旋转，刀具切削破碎岩石，切削的岩石掉落到隧道底部被刀盘铲斗铲起收集到集渣槽，然后通过盾尾螺旋输送机运转到盾构机连续皮带上，经过后配套皮带机溜到水平连续皮带上，再运送至井口垂直提升机进行90°提升至渣池里。连续皮带机系统出渣流程见图3。

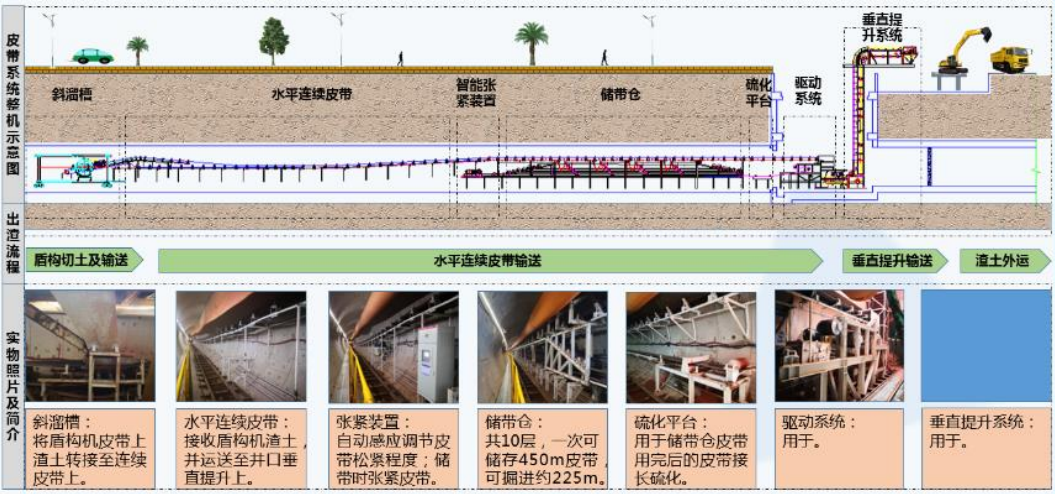


图3 连续皮带机系统的出渣流程。

5. 施工技术及操作要点

5.1. 皮带系统安装要点

(1) 安装空间要求

连续皮带系统的水平连续皮带布设在隧道一侧，占用宽度约1.4m，长度随盾构掘进延伸，地铁隧道空间满足安装要求。水平连续皮带驱动系统部分及垂直提升系统总长度约12.5m，宽度约3m，常规盾构竖井尺寸为13m*9.5m，可满足安装要求。储带舱部分为连续皮带系统最大构部件，宽度为1.5m，长度为63.5m（可根据储带量需求及空间条件增减长度），地铁工程中隧道及车站均具备安装条件。隧道内安装储带舱时须选择直线段，否则可能影响电瓶车运行。

(2) 机尾转载安装

1) 转载装置安装：为保证盾构机渣土顺利转运至水平皮带机上，在6号台车尾部增设7号、8号台车，将原位

于5号台车上的卸渣口延伸至7号台车上，由安装在7号台车右侧的溜槽将渣土滑运至安装在7、8号台车上的水平皮带上。

2) 盾构机改造：以直径6680mm中铁装备盾构机为例，盾构机本身共6节拖车，盾构机皮带出土口位于5号拖车，为完成盾构机与洞内水平连续皮带的转载、衔接，需将5#台车出土口挪至连续皮带机尾总成中的拖车上。

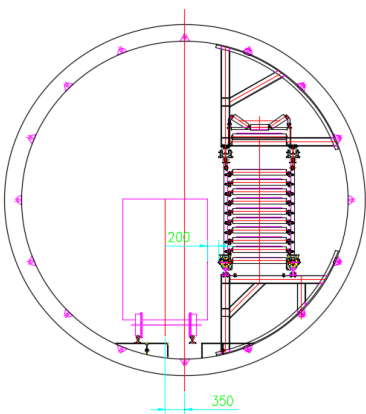
(3) 洞内安装储带舱轨道处理

1) 皮带输送系统储带仓负责存储区间水平输送所需延伸的所有皮带，并向前传递延伸。受场地条件限制，储带舱安装在隧道内，节约了占地面积。储带仓处需平移电瓶车轨道，为设备留出空间。以内径5800mm隧道为例，轨道平移转弯半径不小于18.5m，变轨区长度5m，具体可根据隧道内径及储带舱长度确定。

2) 储带舱安装在隧道内时，为确保储带舱与电瓶车安全距离，需对原安装的电瓶车轨道进行改造，采用型钢马镫适当抬高轨道，将轨道向另一侧平移约35cm。



(a) 储带舱实物



(b) 机头驱动系统实物

图4 井口垂直提升皮带安装图与储带舱布置。

(4) 垂直提升皮带安装

井内安装有垂直提升皮带机，负责将渣土提升至地面，垂直提升皮带机安放于左线井口东侧。垂直提升皮带机与右线水平皮带机靠转渣皮带机连接并输送渣土，转渣皮带机通过中隔墙空洞连接水平皮带机和垂直提升皮带机。

5.2. 盾构切削渣土转载

盾构机螺机出土前，先开启水平连续皮带，切削渣土要顺利从盾构机皮带转载至水平连续皮带，机尾漏斗角度控制以及两条皮带带速匹配是关键。

漏斗尺寸及角度：洞内水平连续皮带与盾构机台车输送带通过机尾漏斗连接。漏斗上部口径为1.25m*1.25m，下部口径为0.8m*0.8m，角度为45度，便于转载盾构渣土。并需在盾构机皮带上设置1道刮泥版。

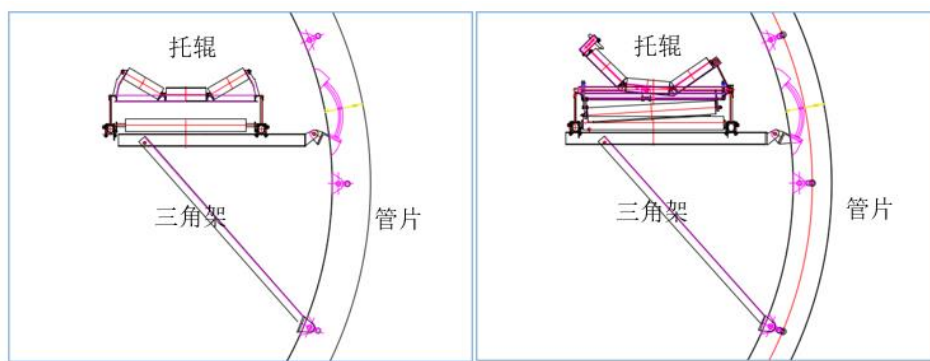
带速控制：洞内水平连续皮带设计带速一般为0~3.15m/s，当盾构机皮带带速大于皮带机带速时，因水平连续皮带运输速度跟不上盾构机皮带运输速度，盾构渣土容易堆积在机尾漏斗内，导致漏斗堵塞；当盾构机皮带带速小于水平连续皮带带速时，水平连续皮带输送渣土不连续，设备工效未得到充分利用，易造成浪费。因此，水平连续皮带带速应等于或略大于盾构机皮带速度，确保切削渣土转载顺畅。

5.3. 盾构渣土水平输送

区别于常规的电瓶车编组水平运输方式，盾构切削的土体转载进入水平连续皮带后，通过水平连续皮带输送至井口垂直提升皮带。在这一过程中，为确保渣土输送效果，需注意以下几个关键点：

托架安装：盾构机掘进时拉动水平连续皮带储带舱内皮带向前延申，一般每掘进3米需在管片上安装一个三角托架及托辊，以保证受力满足要求。托架一般在拼装管片时安装，此时皮带机处于停机状态，既能确保安全，又不耽误掘进时间。

转弯处理：水平连续皮带在通过隧道转弯处时易出现掉泥、皮带跑偏现象。需通过调整转弯处的托辊和托架角度来解决。托辊角度一般为20°~35°。



(a) 直线段托辊安装

(b) 曲线段托辊安装

图5 直线段托辊安装和曲线段托辊安装示意。

水平连续皮带卸料：水平连续皮带做循环闭环运行将渣土从盾构机尾部运送至盾构井口，然后卸料至垂直提升皮带上，部分粘性土可能粘在皮带上并随水平连续皮带返回至隧道内，造成隧道内掉泥严重，文明施工差等后果。因此，需在卸料口的水平连续皮带上安装3道刮泥版和高压水冲洗装置，确保卸料效果。

水平连续皮带停机：当完成1环的盾构掘进后，需停机拼装管片。盾构机皮带停止转动后，不可立即停止水平连续皮带传动，需待连续皮带上方的渣土全部卸载完成后，再关闭连续皮带开关，避免因水平连续皮带上堆积渣土，导致重新启动时负荷超载，损坏设备。

5.4. 盾构渣土垂直输送及卸料

与传统的龙门吊垂直运输盾构渣土的方式不同，连续皮带工法在盾构井口通过1条“Z型”垂直皮带做闭环运动，将盾构渣土连续输送至地面，在地面连续皮带机头高频拍打器和高压水冲洗装置的辅助作用下卸载至渣土池内。该阶段控制要点如下：

- 1) 根据盾构渣土的特性调整地面接头拍打器数量，一般为3~5道。当地层中含黏粒多，土体粘性较强时，应增设1~2道拍打器，增强卸料效果，避免掉泥、积泥等现象。
- 2) 垂直提升皮带带速应与水平连续皮带带速匹配。当垂直提升皮带带速过小时，水平连续皮带卸料时，部分泥土将直接卸至盾构井底，影响垂直提升皮带运行；当垂直提升皮带带速过大时，垂直提升渣土输送不连续，且运行时震动打，易造成浪费和掉泥。

3) 垂直提升皮带地面机头下方易堆积泥土，需安排挖机定时倒渣。

4) 进入垂直提升皮带的渣土中，石块块径不宜超过200mm。

5.5. 垂直运输掉泥回收处理

调整各项参数和设备可基本避免水平连续皮带掉泥、掉渣情况。但在含黏粒较多的地层中，垂直连续皮带每推进1环掉泥约0.5m³，掉落的泥土堆积在垂直连续皮带下方，积累到一定量时，将影响垂直提升皮带运行，故需及时对积泥进行清理。清理方式主要有两种：

人工清理：人工清理方式因空间狭小，工效极低，严重影响盾构掘进进度，故一般不采用该方式。

回收装置：即在垂直连续皮带下方安装一套电动U型螺机回收装置，垂直连续皮带附着的泥土掉落在U型螺机槽内，通过螺机传输至螺机槽的一端，再通过大功率吸污泵重新输送至垂直连续皮带上。

6. 常见的故障及处理措施

6.1. 常见问题

在运行连续皮带机过程中可能会出现各种问题，若不及时处理，将会对生产造成重要的影响。

- 1) 垂直提升机皮带地面皮带距离太短，下料口太低，容易堵塞。

- 2) 强风化砾岩含泥块较多, 皮带冲洗不干净, 井口积泥严重。每天需花大量时间清理井口泥浆。
- 3) 水平皮带刮泥不彻底, 隧道洞门掉泥较多。
- 4) 采用皮带出渣, 无法准备掌控每环的出渣量。

6.2. 处理措施

- 1) 对垂直提升机皮带进行改造, 通过增高延长垂直提升系统, 租赁长臂挖机, 随时清理下料口。
- 2) 在地面增加三道冲洗装置, 对垂直皮带采用高压水枪+气结合的方式进行冲洗, 井口掉泥效果明显减少。

- 3) 由于垂直提升机与隧道底距离低, 人工清泥困难, 自主设计了一套渣土回收装置, 安装在垂直皮带机下方, 可及时自动收集垂直皮带掉下的泥土, 并通过在机尾安装一台泥浆泵, 将收集的泥浆再次输送至垂直提升机波纹带, 减少了人工清泥不便, 提高了盾构施工效率。
- 4) 采购一套皮带称重装置, 安装在盾构机台车皮带上, 通过测算渣土比重, 可以推算每环出渣量。
- 5) 加强皮带维保队伍业务能力培训, 及时发现隐患, 更换易损零件。



(a) 水平带式输送机



(b) 垂直提升带式输送机

图6 鱼珠段皮带机实物图。

7. 应用效果分析

根据广州市轨道交通十三号线二期十三区段土建工程使用连续皮带机出渣系统的应用情况, 和传统电瓶车有轨运输系统进行比较, 主要体现在基本工序、施工效率、安全性、经济性等方面。

(1) 基本工序

传统电瓶车有轨运输系统的出渣工序与材料运输工序相互关联, 在施工时需有效安排各工序先后顺序, 才能保证施工的有效进行。采用连续皮带机出渣系统之后, 出渣工序与材料工序互不干涉, 自动化程度高, 为管理与调度提供了便利性。

(2) 施工效率

使用传统电瓶车出渣, 每天掘进时间按18小时计算, 日掘进效率约6.3环/天, 月掘进效率约189环/月。采用连续皮带机出渣后, 掘进效率变成16环/天, 月掘进效率为480环/月, 掘进环数增加了约10环/天, 一个月掘进环数能增加300环, 优势巨大, 明显加快了施工进度。

(3) 安全性

传统电瓶车出渣需要多次使用龙门吊吊装渣土矿车与施工材料, 这就增加了龙门吊吊装的安全风险, 使用连续皮带机后, 渣土直接从皮带机输送至渣坑, 使用外部龙门吊吊装频次大大降低, 只需用电瓶车运送施工材料, 降低了电瓶车荷载重量, 减少了电瓶车溜车事故, 安全性大大提高。

(4) 经济性

根据本项目区间隧道最长距离3400m考虑, 单线使用电瓶车出渣设备投入约378.4万元, 运行成本约1148万元,

合计1376.4万元。单线使用连续皮带机设备投入约952万元, 运行成本约521万元, 合计1473万元。在不考虑其他成本的条件, 单线采用连续皮带机出渣比电瓶车出渣的成本低63.4万元, 有效降低了经济成本。

8. 结语

城市地铁狭小空间条件下, 将连续皮带机系统应用在盾构出渣中, 出渣能力显著, 有效的提高了施工效率, 成功解决了盾构施工出渣慢, 出渣效率低, 施工进度缓慢等问题。在提高出渣工效的同时, 大大提高了盾构施工吊装与运输的安全性, 有效降低了经济成本, 为今后类似的狭小空间、小井口盾构施工工程提供了一种思路与方法, 具有一定借鉴意义。

参考文献

- [1] 杨志先, 陈丽娟, 夏莹. 连续皮带机配套盾构出渣的设计与施工 [J]. 四川水力发电, 2017, v. 36; No. 195(06): 77-80+84.
- [2] 吴声宇, 尚辉, 王敏, 等. 广州地铁13号线连续皮带机节点转换技术研究 [J]. 广东建材, 2023, 39 (11): 135-138.
- [3] 王敏, 陈礼强, 魏晨亮, 等. 竖立提升皮带机在长距离盾构工程中的应用 [J]. 建筑机械化, 2023, 44 (06): 26-29.
- [4] 田立勇, 唐瑞, 于宁等. 带式输送机更换托辊用皮带举升机构设计与应用 [J]. 工程设计学报, 2023, 30(06): 667-677.

- [5] 王君琴. 煤矿胶带输送机常见故障及处理方法 (J). 内蒙古煤炭经济, 2023(23): 157-159.
<https://doi.org/10.13487/j.cnki.imce.024548>
- [6] 孙继征. 浅谈井下皮带机皮带打滑原因与应对措施研究分析 (J). 中国设备工程, 2023(23): 163-165.
- [7] 郭振海, 姚艳萍. 带式输送机驱动滚筒有限元分析 (J). 机械工程师, 2023(12): 30-32.
- [8] 李渊. 煤矿胶带输送机监测监控与故障诊断系统设计研究 (J). 石化技术, 2023, 30(12): 262-263.
- [9] 王二访. 煤矿带式输送机传动滚筒的受力分析 (J). 矿业装备, 2023(12): 197-199.
- [10] 曹晓平, 宋文学, 李伟伟. TBM施工连续皮带机出渣关键技术 [J]. 水利水电施工, 2014, 000(005): 38-42.
- [11] 王智远, 伍智勇. 连续皮带机配套TBM出渣技术探讨 [J]. 隧道建设, 2011, 31(001): 138-143.
- [12] 杜贻蛟. WSS注浆技术在城市地铁盾构施工中加固土体的应用 [J]. 工程建设与设计, 2016.
- [13] 唐志林, 曲长海, 陈铁仁. 大伙房水库输水工程隧洞连续皮带机出渣技术 [J]. 水利水电技术, 2006(03): 40-41.

作者简介

陈礼强（1978—），男，广东省广州市人，大学本科，工程师，目前在中国广东省广州市广州地铁集团有限公司主要从事轨道交通工程建设管理工作。

徐顺明（1971—），男，海南省儋州市人，工程硕士，教授级高级工程师，目前在中国广东省广州市广州地铁集团有限公司主要从事工程测量和地铁施工技术管理工作。

李冬妮（1983—），女，四川泸州人，工程硕士，高级工程师，目前在中国广东省广州市广州地铁集团有限公司主要从事地铁规划报建、设计管理工作。