

成都地铁大直径盾构带压开仓施工关键技术

吴宗林, 李学谦

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213)

摘要:成都地区的盾构施工因其独特的高富水砂卵石地层导致开挖面存在不稳定及大量地下水涌入盾构的可能性,同时因砂卵石地层空隙大、保气性差的特点使换刀这一程序更加复杂化,换刀施工的难度变得非常大。以成都轨道交通 19 号线工程盾构施工为背景,重点对其带压开仓技术展开分析,具体涉及到作业流程、技术要点、质量控制措施等内容,旨在为广大工程技术人员及现场施工人员在成都地区复杂地层中带压开仓施工提供参考。

关键词:成都地铁;大直径盾构;带压开仓;关键技术

中图分类号:U231;U231+.3;U231+.1

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2022)04-0076-05

Key Technology of Soil Cabin Opening under Pressure for Large-Diameter Shield Machine in Chengdu Metro

WU Zonglin, LI Xueqian

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd, Chengdu, Sichuan 610213)

Abstract: Due to the unique sand gravel stratum with high water content in Chengdu area, the excavation face is usually unstable, with possibility that a large amount of groundwater flows into the shield machine. At the same time, the large gap in sand gravel stratum and poor gas retention make the procedure of cutter replacement more complicated and difficult. Taking the shield-machine construction of Line 19 in Chengdu Metro as the background, this paper focuses on the analysis of its pressurized cabin opening technology, specifically involving the operation process, technical points, quality control measures, etc., to provide a practical reference for the majority of engineering and technical personnel and on-site construction personnel when they have project in Chengdu's complex strata.

Key words: Chengdu metro; Large-diameter shield machine; Cabin opening under pressure; Key technology

1 概述

成都轨道交通 19 号线二期工程龙桥路站~双流机场站区间共计 2 次穿越江安河,2 次穿越牧马山干渠,穿越既有线(地铁 3/10/成贵高铁)3 处,所穿越的建筑物共计 35 栋,施工难度大,安全风险极高。

盾构穿越的地层主要为砂卵石、砂卵石与泥岩复合地层。在砂卵石地层掘进过程中,刀盘、刀具由于卵石土切削的不均匀性和冲击易产生异常损坏,导致刀盘、刀具和螺旋输送机的磨损均比较严重。在复合地层掘进过程中,泥岩具有微膨胀性与高黏性,当刀盘搅动土体时破坏了其原有的平衡状态,通过盾体后方或上方的来水,导致土体

内的水分增加,吸水后的膨胀土粘附在刀盘上容易导致刀盘及土仓结饼,刀具偏磨,如果长时间停机,还可能导致盾体被裹死等恶劣情况出现。

在地下复杂的地质条件、地面条件苛刻的要求下,对于盾构机的换刀必须找到一种切合实际、高效、经济、安全的方式,既能保障盾构机的正常掘进,同时也能保障地下及地上的安全。

以成都轨道交通 19 号线二期工程龙桥路站~双流机场站区间带压开仓施工为例,对大直径盾构带压开仓施工关键技术进行了研究,所取得的成果希望能为后续成都地铁盾构带压开仓施工提供借鉴。针对该区间共计进行了 12 次带压开仓作业,其中 7 次在砂卵石与泥岩复合地层中进行,5 次在砂卵石地层中进行。12 次带压开仓作业均一次性建设泥膜成功,从而为项目安全稳步

收稿日期:2022-06-10

推进提供了较好的条件,取得了良好的经济效益。

该区间穿越的地层主要为密实砂卵石地层,占比为51%,其次为泥岩地层,占比为33%,砂卵石与中等风化泥岩复合地层,占比为16%。颗粒分析及地质勘察报告揭示:卵石(Q_3^{fgl+al})原岩多为中等风化花岗岩、灰岩及石英砂岩,其卵石含量为50%~80%,粒径为2~20 cm,最大达47 cm。砂卵石综合含水层渗透系数 K 为25~35 m/d,强透水。中等风化泥岩(K_2g)为膨胀岩,泥质结构,泥钙质胶结,节理裂隙较发育,易风化,遇水易软化。整个区间地质条件复杂,需要寻求合适的施工方式。

2 盾构带压开仓施工

2.1 带压换刀的工作原理

在盾构机内对刀盘前方地层进行改良或加固处理后,在保证刀盘前方周围地层和土仓满足气密性要求的条件下,利用空气压缩机将空气加压并注入土仓,以气压代替土压,通过在土仓内建立合理的气压用以平衡刀盘前方的水与土压力,达到稳定掌子面和防止地下水渗入的目的。作业人员在盾构带压的条件下进入土仓进行检查、维修保养和刀具更换等过程作业。

气压对开挖面起到的稳定作用可以分为下述三种:

- (1)可以阻止来自开挖面的涌水,防止开挖面坍塌。
- (2)因气压压力本身的挡土作用使开挖面稳定。
- (3)由于气压对围岩缝隙起到排挤水的作用,增加了粉砂、黏土层或含有粉砂黏土成分的砂质土的强度,进而增加了开挖面的稳定性。

其中以高压空气防止开挖面坍塌的作用是气压法能够起到的最显著的作用,但其挡土作用视围岩的性质不同而有所区别。对于透气性小的黏性土或粉砂质土地层中这种效果比较明显;而在透气性大的砂质土和砂砾石层中,即使采用与地下水压相适应的气压力亦会出现漏气现象,而且其往往阻止不了开挖部下部的涌水及其上部的坍塌,因此,需要对刀盘前方的地层进行适当的改良。

带压开仓换刀的施工流程见图1。

2.2 到达停机位置前的渣土改良

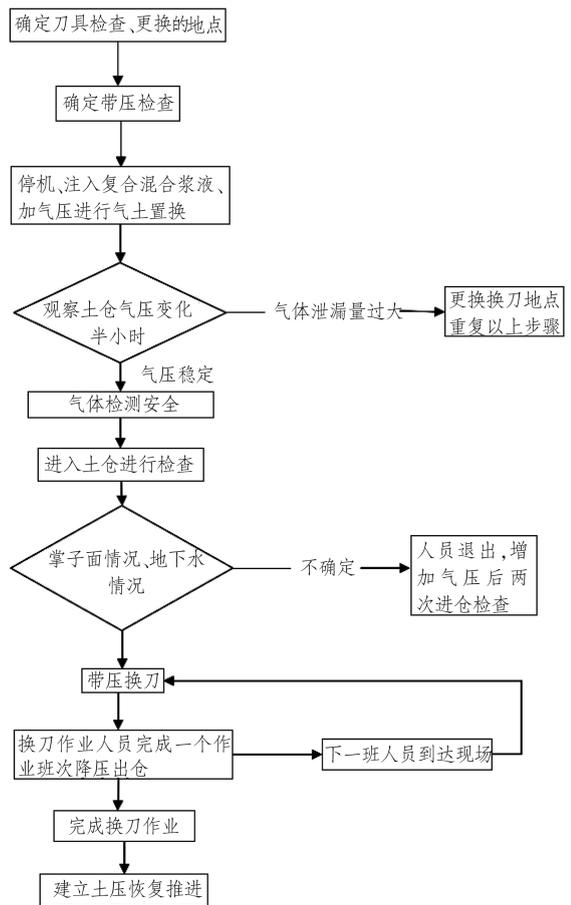


图1 带压开仓换刀施工流程图

盾构机到达开仓位置之前,必须加强对盾构机土仓内的渣土进行改良,采用泡沫剂及膨润土提高渣土的和易性和不透水性,使渣土处于流塑状态,以便于螺旋输送机排渣,同时还能形成“土塞”效应,防止螺旋输送机尾部喷涌。钙基膨润土配比情况见表1。

表1 钙基膨润土配比表

钙基膨润土 /kg	水 /kg	外加剂
100	200~300	根据试验结果添加

2.3 土仓气压的确定

带压进仓压力值的设定系根据地下水埋深及隧道埋深确定。通过计算可以得出土仓中需要建立的气压,根据该工区12次带压开仓施工经验总结,其工作面最终的压力要求比设定的土压力高0.2~0.3 bar左右。区间带压开仓统计情况见表2。

掌子面稳定开仓气压 P 的计算方法为:

$$P = P_w + P_r$$

表 2 区间带压开仓统计表

盾构机 编号	开仓 次数	环号	地面 埋深 /m	地下水 埋深 /m	带压开仓 压力 /bar	带压开仓地层	地面环境
5 号盾构机	1	343	21.9	4.4	1.8	砂卵石地层	位于市政绿化带内
	2	736	27.3	5.1	2.4	砂卵石地层	位于市政绿化带内
	3	968	23.4	5.2	2.1	砂卵石地层	位于城市主干道下方
	4	1 061	21.9	10.1	1.4	砂卵石地层	位于某小区房屋下方
6 号盾构机	1	264	20.8	4.3	1.8	砂卵石地层	位于市政绿化带内
	2	716	29.9	5.1	2.5	砂卵石地层	位于市政绿化带内
	3	959	23.9	5.2	1.9	砂卵石地层	位于城市主干道下方
7 号盾构机	1	250	26	3.8	2.4	砂卵石及泥岩复合地层	位于房屋下方
	2	281	27	3.8	2.5	砂卵石及泥岩复合地层	位于房屋下方
	3	1 350	22	3.6	2	砂卵石及泥岩复合地层	位于某办公大院内
8 号盾构机	1	1 195	26.5	3.1	2.5	砂卵石及泥岩复合地层	位于管线下方
	2	1 360	22.1	3.6	2	砂卵石及泥岩复合地层	位于某办公大院内

$$P_w = \gamma_w \times h$$

式中 P_w 为地下水位至隧道开挖中心的水头压力; γ_w 为水的比重; h 为地下水位到盾构机底部的高度; P_r 为考虑不同地层条件、地面环境及开挖面位置的调整值。

2.4 泥膜的制作及渣土的置换

泥膜施工是整个带压换刀的关键工序。通过注入填充及挤压、置换渣土、转动刀盘搅拌及挤压,在盾体外壁和盾构开挖掌子面前方建立起具

有一定厚度、强度、防水性、持久性的保压泥膜。复合黏土混合浆液效果与泥膜效果见图 2。对土仓采用复合黏土混合液进行置换,复合黏土混合液的主要成分为钙基膨润土、钠基膨润土、消石灰、甲基纤维素和水玻璃。复合黏土混合液配合比见表 3。

表 3 复合黏土混合液配合比表

石灰 /kg	膨润土 /kg	水 /kg	纤维素 /kg	水玻璃 /kg
250~300	280~320	600~800	6~8	60~65

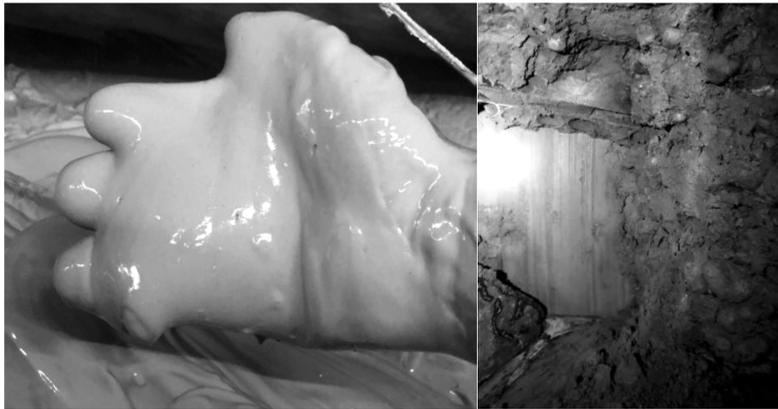


图 2 复合黏土混合浆液效果与泥膜效果图

泥膜与土仓渣土的置换具体分为以下十二个步骤进行:

第一步:封环。停机后,对管片拖出盾尾 6~7 环后进行 1~2 环的双液注浆,将凝固时间控制在 10~20 s,以达到止水的目的。注浆完成后开孔检查以确定止水效果是否符合相关标准。若止

水效果不佳,应增加二次注浆封堵环数以确保止水效果。二次注浆配合比见表 4。

表 4 二次注浆配合比表

水灰比	A 液 : B 液 (体积比)	浆液密度 /g · cm ⁻³	凝结时间 /s
1 : 1	1 : 1	1.4~1.6	20~25

第二步:通过同步注浆系统注入膨润土浆液保护管道,注入完成后关闭盾尾球阀。

第三步:利用地面砂浆搅拌站制作膨润土浆液(含有钙基、钠基膨润土、消石灰、纤维素),每次制作量为 $6\sim 8\text{ m}^3$ 并通过电瓶车运至隧道内,浆液进隧道后在浆车内搅拌 3 min ,然后利用砂浆泵抽至砂浆罐中。

第四步:在盾构机同步注浆箱中添加设计量 $1/3$ 体积的水玻璃进行充分搅拌均匀形成呈稍黏稠膏状的复合黏土混合液(复合黏土混合液:膨润土浆液中添加了配合比中 $1/3$ 体积水玻璃用量的浆液)。

第五步:拆除一路同步注浆管配合变径头接至土仓口的球阀位置,通过此管往土仓内注入复合黏土混合液,将土仓压力稳定在 $3\sim 3.5\text{ bar}$,使复合黏土混合液充分填充至盾构机四周地层的间隙。

第六步:暂停注入,观察仓内的压力下降速度;若其降低较快,需继续往仓内注入复合黏土混合液,重复上述流程,直至仓内压力维持在 $3\sim 3.5\text{ bar}$ 。

第七步:通过同步注浆系统,往土仓内边注入复合黏土混合液、边对土仓内的渣土进行置换。复合黏土混合液注入过程中,同时启动螺旋输送机缓慢排渣、控制上部土仓的压力,此时的土仓压力维持在 $2.7\sim 2.8\text{ bar}$,以避免螺旋输送机压力大造成漏气现象的出现。当排出来的渣土明显含有复合黏土混合液时,现场从螺旋输送机出渣口采取渣样放置量筒内,通过观察渣样颜色、含砂量和加入水玻璃拌和试验判定仓内渣土的置换位置(渣土降至刀盘中心以下并且以螺旋输送机出土不漏气为原则)。

第八步:准备一台单液注浆机(回浆泵十三相异步电动机),注浆管与入仓口位置由另外一个平衡阀连接,作为补充水玻璃液的注入口。

第九步:根据注入土仓复合黏土混合液的总量,核算需补充注入剩余 $2/3$ 体积的水玻璃用量,采用二次注浆机间歇性补充注入水玻璃形成复合黏土混合浆液的方式;启动刀盘,刀盘转速为 0.5 rpm ,刀盘转向始终保持同一方向旋转,持续转动刀盘 0.5 h 左右,在该过程中详细观察土仓压力变化与扭矩波动情况;若土仓压力和扭矩相对稳

定,其维持时间不少于 1 h 。停机 1 h ,观察土仓压力变化速率,待其相对稳定(将压力上下波动幅度控制在 0.05 bar/h)后最终形成保压泥膜(泥膜形成后严禁转动刀盘)。

第十步:打开 $3、9$ 点球阀,置换土仓内的空气,降低土仓内的温度,对球阀出气孔的气体进行气体检测(特别注意对瓦斯气体的检测)。

第十一步:观察土仓压力变化情况且时间不少于 1 h ,每 10 min 施测一次空压机加卸载情况;若加载时间小于卸载时间,证明泥膜质量满足要求,土仓保气性良好;加载时间小于卸载时间的差值越大,表明掌子面稳定性及泥膜质量越好。若加载时间大于(等于)卸载时间,则证明泥膜建立失败,需重新建立泥膜(特别需要注意观察地面是否有漏气现象)。

第十二步:按照正常流程进行带压开仓作业操作,首批入仓人员的任务主要是观察掌子面泥膜稳定性情况;若泥膜效果良好,则可进仓清理刀箱,检查刀具磨损情况,开始后续换刀作业。

2.5 保压试验

开仓前,为验证地层的气密性,有必要进行一次保压试验。保压试验的时间不得低于 4 h ,同时观察土仓传感器的变化、samson系统开度及空压机的运行情况。要求土压传感器的土压变化值不得大于 0.05 bar/h ,samson的开度不得大于 0.2 ,空压机的储气罐压力为 $6.5\sim 7\text{ bar}$,且空压机的加载时间要小于卸载时间,同时,入仓处的压力不得低于 5.5 bar 。与此同时,安排相关人员观察地表、铰接以及盾尾漏气是否严重,若土仓压力无法达到要求,则需重新恢复注浆或重新推进。

保压试验成功后,在开仓作业过程中应尽量维持此压力,并通过进气阀的操作控制气压的变化值在可控范围之内;当土仓内的土体排空至一号传感器时,如果传感器的读数接近排土前的压力,说明土仓加压成功;当排至二号传感器时其读数与一号传感器读数一样且压力稳定,说明土仓密闭性达到进仓作业要求,土仓建压成功,可以进行带压换刀(或检查刀具)操作。

2.6 施工人员入仓作业

(1)入仓步骤。

①检查所有的显示设备,如时钟、温度计、电话和闸阀等,检查仓门的清洁程度;

- ②入仓人员进入入仓；
- ③关闭主仓和副仓的仓门并确保其正确关闭；
- ④确保操仓人员与带压人员之间的电话联系；
- ⑤缓慢打开通向主仓的通风球阀。向仓内增压，直至达到操作压力。

⑥待主仓内的压力等于土仓仓内的压力后，即完成土仓与主仓之间的压力均衡后球阀必须关闭。人员进入土仓的程序见图 3。

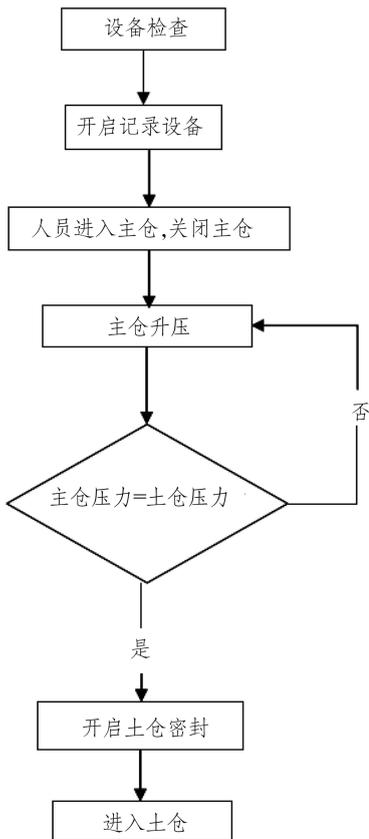


图 3 人员进入土仓程序图

(2) 加压过程。

- ①原始位置： $P_1 > P_0$ 。
 P_0 为大气压力； P_1 为支撑压力。

原始状态时，主仓与副仓的压力为大气压力。原始状态仓压力示意图见图 4。

- ②主仓的加压： $P_1 > P_2 > P_0$ 。
 P_2 为主仓压力，介于 P_1 和 P_0 之间。

关闭主仓仓门后，打开通风球阀对主仓进行加压。加压状态仓压力示意图见图 5。

- ③土仓与主仓压力平衡： $P_1 = P_2$ 。

土仓与主仓实现气压平衡后停止加压。此时，可以开启土仓闸门进入土仓，同时副仓始终保

持不加压。土仓、主仓压力平衡示意图见图 6。

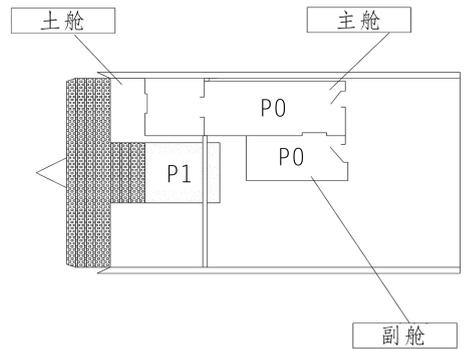


图 4 原始状态仓压力示意图

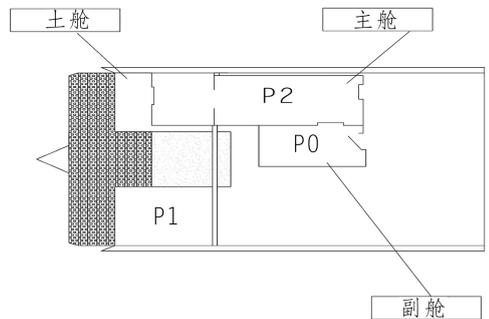


图 5 加压状态仓压力示意图

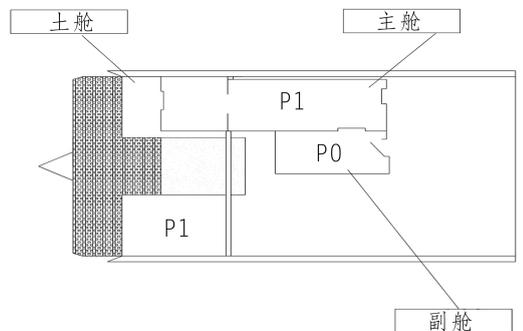


图 6 土仓、主仓压力平衡示意图

2.7 施工人员出仓

减压作业严格按照《盾构法开仓及气压作业技术规范》(CJJ217-2014) 气压作业的工作时间和减压时间执行。打开排气减压阀缓慢降低入仓气压，同时观察入仓中设置的压力计。减压过程中，根据仓内人员的身体感觉和每一阶段压力的保持时间调整通气速率、直至常压状态。入仓里的加热系统必须根据国家规定进行配置。操仓员需要定期查看流量计以保证入仓的通风量。作业人员经过减压过程离开入仓后，操仓员关闭记录仪，作好减(加)压的详细记录。

(下转第 84 页)

试敏感性;

(2)减水剂以及絮凝剂掺量对水下不分散混凝土的流动性与抗分散能力的影响成正比;

(3)水胶比的降低增加了水下混凝土的抗分散能力,且其与絮凝剂产生了叠加效应;

(4)采用掺合料(细粉料)替代部分水泥可以增加水下混凝土的抗分散性能且存在最优替代率。

参考文献:

- [1] Sikandar M A, Ahmad W, Khan A. Effect of various anti-washout admixtures on the properties of non-dispersible underwater concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 34(10):1-10.
- [2] 武纪刚. 改良水下不分散混凝土在水利工程中的应用研究[J]. 水利技术监督, 2020, 27(5):220-222.
- [3] Khayar K H, Gattioui M E, Nmai C. EFFECT OF SILICA FUME AND FLY ASH REPLACEMENT ON STABILITY AND STRENGTH OF FLUID CONCRETE CONTAINING ANTI-WASHOUT ADMIXTURE. 1997.
- [4] Khatib J M, Wright L, Mangat P S. Effect of fly ash-gypsum blend on porosity and pore size distribution of cement

pastes[J]. Advances in Applied Ceramics, 2013, 112(4): 197-201.

- [5] F. T. Olorunsogo. Particle size distribution of GGBS and bleeding characteristics of slag cement mortars[J]. Cement & Concrete Research, 1998, 27(6):907-919.
- [6] Juhart J, David G A, Saade M, et al. Functional and environmental performance optimization of Portland cement-based materials by combined mineral fillers[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 48(8):157-178.

作者简介:

- 吴 伟(1985-),男,重庆万州人,工程师,硕士,从事高性能混凝土材料研发工作;
- 相福壮(1994-),男,山东青岛人,助理工程师,硕士,从事高性能混凝土材料研发工作;
- 丁建彤(1970-),男,四川宜宾人,教授级高级工程师,博士,从事高性能混凝土材料开发与科研管理工作;
- 李晓华(1986-),男,湖北宜昌人,工程师,学士,从事水利水电工程试验检测工作;
- 许文英(1989-),女,四川绵阳人,工程师,学士,从事混凝土新材料研发与水利水电工程试验检测工作。

(责任编辑:李燕辉)

(上接第 80 页)

2.7 换刀结束后的掘进恢复

由于砂卵石地层具有一定的稳定性,因此最终决定采用加气推进的模式,即更换刀具后,启动刀盘与千斤顶恢复盾构掘进,同时保持土仓内的气压,暂不出土,逐渐恢复土仓内的存土量,增加土压,同步逐渐减小气压,最终实现土压完全代替气压平衡。

在恢复掘进第一环时,根据实际掘进情况逐渐增加推力及扭矩,逐步提高推进速度至 50 mm/min 以上。开始掘进时应注意有无喷涌的现象发生,发生喷涌时必须降低闸门的开度,加大螺旋输送机的转速,掘进速度应与出土匹配,出土量较大时需注意增加掘进速度。

3 结 语

随着大直径盾构逐步由郊区走向城区,且因带压开仓施工技术具有不占用地面空间,对市政道路、管线、房屋、民居等影响小,费用较低、效率较高的特点,在穿越繁华城区盾构施工换刀时具有常压换刀无法比拟的优越性而逐步得到应用。但是,由于该施工工艺要求相对较高,且因成都地

层的特殊性而导致施工风险极大。经过中国水电第七工程局 19 号线土建 2 工区项目部的多次试验与实践,在砂卵石及复合地层中成功解决了带压换刀的技术难题,取得了较好的效果,所阐述的内容可供同仁参考。

参考文献:

- [1] 康洪信. 广州地铁 4 号线盾构带压进仓换刀技术[J]. 建筑机械化. 2011, 37(6):67-69.
- [2] 唐伟,张继清,吴邵殇. 卵石地层中长距离大直径盾构换刀及地面加固研究[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(2):19-24.
- [3] 王晖. 广州地铁三号线北延段盾构隧道工程施工技术研究[M]. 北京:人民交通出版社, 2012.
- [4] 吴云林. 地铁隧道复合地层盾构开仓况与施工技术探讨[J]. 工程机械与维修, 2021, 28(4):87-89.
- [5] 王江卡. 深圳地铁复合地层盾构换刀加固施工技术[J]. 工程建设与技术, 2015, 50(4):139-143.

作者简介:

- 吴宗林(1990-),男,四川绵阳人,项目经理助理,工程师,一级建造师,学士,从事城市地下工程施工技术与管理工作;
- 李学谦(1996-),男,四川成都人,助理工程师,学士,从事城市地下工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)