

# 大直径盾构空推通过矿山法隧道段的施工技术研究

毕经东 赵得杰

(中铁第六勘察设计院集团有限公司, 300308, 天津 // 第一作者, 高级工程师)

**摘要** 针对东南沿海地区某城际轨道交通大直径(8.8 m)盾构空推通过矿山法隧道段的施工项目,对盾构进洞前、空推及出洞期间的施工控制措施及变形控制技术进行了研究。结果表明:施工完成后整个空推通过的矿山法隧道段的管片拼装左线水平和高程的最大偏差分别为 11 mm、9.6 mm;右线水平和高程的最大偏差分别为 12 mm、10 mm;左、右线隧道拱顶位置的最大沉降值分别为 2.42 mm、4.61 mm。管片拼装偏差及隧道的变形均满足现有规范的控制要求。此施工工艺保证了大直径盾构机快速、安全和高质量地通过矿山法施工的硬岩区段,既节省了工期,又保证了质量和施工安全。

**关键词** 大直径盾构;空推;矿山法隧道;施工技术

**中图分类号** U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.06.020

## Research on Construction Technology of Large Diameter Shield Advancing Mined Tunnel without Load

BI Jingdong, ZHAO Dejie

**Abstract** Taking the construction project of a large diameter (8.8 meter) shield advancing through an existing tunnel constructed by mining method in the southeast coastal area as subject, the construction control measures and deformation control technology during periods of before entering the tunnel, advancing without load and exiting the tunnel are studied. Results show that after construction, the segment installation of the mined tunnel that is crossed without load has maximum deviation of 11 mm and 9.6 mm in left line level and elevation respectively. The maximum deviation is 12 mm and 10 mm in right line level and elevation respectively. The maximum settlement amount of the tunnel roof is 2.42 mm in the left line and is 4.61 mm in the right line. The segment installation deviation and tunnel settlement both meet the control standards of the specification, and it is guaranteed that large diameter shield machine can pass through the hard rock section quickly, safely, with high quality. Not only the time until completion is saved, but also can it ensure quality and safety of tunnel construction.

**Key words** large diameter shield; advancing without load; mined tunnel; construction technology

**Author's address** China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., 300308, Tianjin, China

## 0 引言

盾构法隧道施工由于其经济、环保且适用性强等特点,已成为当前隧道施工中最普遍采用的施工方法。但是盾构法也存在一些不足,如在硬岩、孤石群和上软下硬区域进行施工时,由于刀盘磨损较大、施工速度慢、停机时间长,以及易造成较大的施工沉降,既影响工期,又增加了施工成本<sup>[1]</sup>。如何使盾构机在此类地层中安全、快速和高质量地推进,仍是隧道施工技术中的一项难题。

诸多学者针对盾构通过坚硬土层的施工进行了研究:文献[2]对盾构空推通过矿山法隧道段时关键部位的质量控制进行了探讨;文献[3]根据武汉某地铁区间施工的实际情况,介绍了盾构在中风化泥岩地层中空推通过矿山法隧道时,盾构到达、推进和接收阶段的关键技术和质量控制措施;文献[4]结合深圳地铁2号线某工程实例,介绍了城市地铁盾构施工遭遇极硬岩、孤石群或上软下硬地层时采用矿山法加盾构法联合施工的方法;文献[5]针对深圳地铁2号线区间盾构空推拼管片通过矿山法隧道段的施工,从空推拼管片渗漏水机理分析入手,分析了渗漏水的控制难点;文献[6-9]研究分析了盾构空推通过既有矿山法隧道现场施工时出现的管片错台、隧道渗漏水、管片上浮、管片破损等质量缺陷及其形成原因,并阐述了预防和控制措施。

综上,既有文献都是针对地铁隧道在硬岩、孤石群及上软下硬地层中的盾构法联合矿山法施工进行研究,且盾构直径较小,一般为6 m左右。本文针对大直径(8.8 m)盾构空推通过既有矿山法隧道的施工技术,对进洞前、空推及出洞过程中的施

工质量控制措施进行了研究,可为以后类似工程的施工提供参考。

## 1 工程概况

东南沿海地区某城际轨道交通车站至4号工作井区间原设计采用盾构法施工,通过现场补勘得知,DK14+592—DK14+709及YDK14+635.155—YDK14+727.155区间隧道范围内硬岩局部强度大于120 MPa。该区间采用盾构法施工将大大增加盾构机停机时间及换刀频率,降低了施工效率和经济效益,故该段采用矿山法施工。盾构空推段为单向上坡,最大坡度为20.1‰。盾构空推施工示意图如图1所示。

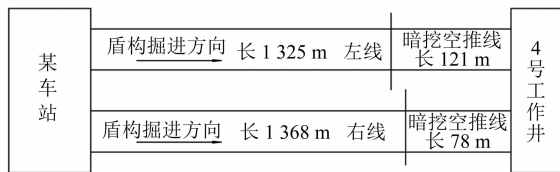


图1 盾构空推施工示意图

## 2 盾构空推通过矿山法隧道段的施工重点

### 2.1 导台与导轨精确定位与施工

盾构机在矿山法隧道中空推步进时,在位于隧底已施作好的混凝土导台上向前推进,导台及导轨要保证盾构机严格按照设计轴线姿态平稳推进,且保证管片的拼装质量及防水效果。因此,混凝土导台与预埋导轨的精确施工,是盾构空推施工的重点之一。

### 2.2 盾构机的安全到达

在盾构机到达矿山法隧道段前,随着剩余岩体长度不断减小,盾构机前进对前方岩体及隧道结合部的扰动和影响逐渐增大。设定合理的前进参数,尤其是推力和推进速度的控制,是保证贯通面的稳定以及盾构安全顺利到达矿山法隧道段的关键。

### 2.3 盾构机推进反力的设置

盾构机在空推前进过程中,如果前方没有阻力的作用,会使安放在管片间的橡胶止水条受到的压力达不到设计要求,管片之间的密封性能会急剧下降,容易发生渗漏水。因此,在刀盘前方采取措施,以提供足够的顶推反力是盾构空推施工的重点。

### 2.4 管片壁后豆砾石的密实充填和防止浆液前窜

管片与初期支护之间空隙较大,且不均匀,豆砾石吹填不易密实;尤其是下坡段,豆砾石及注浆浆液容易向刀盘前方窜流,影响壁后填充效果。因

此,保证填充效果和减少浆液窜流也是盾构空推施工的重点。

## 3 主要施工控制措施

盾构机到达前,应完成矿山法隧道段的初支结构及其堵头墙的封端施工。空推前进时,管片及浆液运输通过电瓶车编组从后方横琴站实施,豆砾石提前放置在刀盘前方导台上;采取刀盘前方喷射豆砾石的方式,混凝土喷射机位于刀盘前方,同时刀盘前方堆放的豆砾石为盾构推进提供反力。盾构进矿山法隧道段开始空推和出矿山法隧道段开始前进时,其分界位置和端头应按照盾构到达和盾构始发形式进行,并提前在隧道端头采取施作堵头墙的措施。矿山法暗挖隧道与盾构隧道交界处采用钢筋混凝土端封墙,矿山法暗挖隧道内设置素混凝土端封墙。

### 3.1 进洞前施工控制措施

1) 为了确保盾构机平稳进入矿山法暗挖隧道,防止土仓压力骤减引起的地面沉降,在做好洞内注浆的同时,矿山法隧道接收段13 m范围内下台阶与中台阶预留不进行开挖,如图2所示。上台阶开挖完成后施作端封墙,端封墙厚60 cm,采用C25钢筋混凝土。端封墙上部钢筋与初支钢架焊接,下部植入中台阶,与下台阶花岗岩地层连接为整体,上台阶与钢筋混凝土挡墙之间回填C15素混凝土。

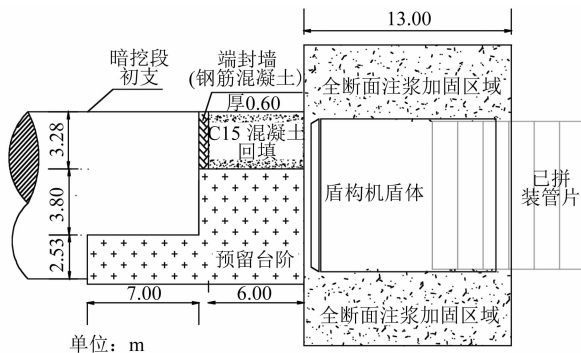


图2 暗挖隧道的盾构接收段及端封墙

2) 当盾构机刀盘前进至距离钢筋混凝土挡墙5 m时停机,对矿山法暗挖段隧道端封墙进行开孔检查处理,主要检查出水量。

3) 在盾构机前进过程中,随着多环管片脱出盾尾,对管片与土层之间的空隙进行同步注浆,确保空隙位置填充密实;停机后继续采取二次注浆做止水环,以有效进行止水。

4) 止水环施作完成后前进至距离端封墙3 m时停机,对预留下台阶进行开挖,施作初支钢架,破

除端封墙。

5) 端封墙破除完毕后,复测盾构机中心,根据复测数据施作下台阶导台。导台与接收断面间应预留 1 m(刀盘厚 0.8 m)的间距,以利于空载和负载的转换。

6) 刀盘周边刀切削外径大于盾体直径,为尽量减少初支及预埋注浆管阻挡刀盘,应拆除刀盘最边缘刀具。

7) 为使盾构机顺利上导台,在预留下台阶开挖完成及初支施作后,施作“引轨”(即下台阶长度为 7 m,预留 1 m 至接收断面,台阶剩余长度为 6 m)。导台施作时从小里程方向往大里程方向按 10‰坡度上坡。

8) 端封墙混凝土凿除:矿山法暗挖段隧道顶覆土平均深度为 10 m,为确保盾构平稳进入矿山法暗挖隧道,待刀盘及盾体完全进入回填区内,随着盾构步进应逐步降低土压至常压状态。为防止端封墙受盾构机推力致使初支钢架受力而导致初支不稳定,在刀盘前进至端封墙 3 m 时,停机将端封墙与初支连接钢筋全部割除。另外,为降低盾构刀盘面对洞门墙体的顶压力,打开洞门中心释放孔释放应力;盾构机距钢筋混凝土端封墙 5 m 时,为降低盾构正面压力对洞门墙体的推力,应逐渐将土压降至 0;打开端封墙释放孔,以降低盾构集中推力;盾构机距离钢筋混凝土端头墙 3 m 位置时,为防止盾构机前进过程中推力传导至端封墙导致初支拉断及端封墙倒塌,盾构应停机,破除端封墙及下台阶硬岩后,施作初支,然后再施作导台。

9) 进入矿山法暗挖隧道段前盾构机的前进姿态控制:盾构机到达暗挖隧道段前 150 m 时,要对所有监测点进行复测,并对各个点位的坐标进行精密计算;盾构机到达暗挖隧道段前 100 m 时,要对盾构机姿态进行人工复测,掌握盾构机的实际坐标并进行相应的纠偏,使盾构机保持良好的正确姿态(竖直方向上要高于设计轴线 20 mm),使其顺利进入到达段。对盾构机的前进参数,如土压、推力、出土量等进行调整,以降低盾构机临近洞门前对洞门结构的影响;盾构机到达暗挖隧道段前 13 m 时,要逐步降低刀盘转速、推力及推进速度(刀盘转速控制在 0.80~1.06 r/min,推进速度保持在 10 mm/min 以内,总推力不大于 8 000 kN);加强洞门及底板的监测频率,并将监测结果及时反映给盾构机车控室以便优化前进控制。

10) 导台施工:导台分为导台底基座和上部导向台。盾构机在导台上空载推进并拼装管片。导台混凝土强度等级为 C30,下部底基座部分为素混凝土。导台厚 150 mm,底部纵向单层布设  $\phi 8$  mm @ 200 mm 钢筋,环向箍筋按  $\phi 10$  mm、@ 200 mm 布设。导台底部两侧铺设 43 kg/m 钢轨,钢轨下方预埋厚 2 cm 钢板垫块供后续安装导轨和焊接挡板,以为盾构机提供反力。钢板下方焊接长 15 cm、 $\phi 22$  mm 钢筋,使其锚入导台底基座。钢轨轨面高出导台混凝土面 2~3 cm。

11) 豆砾石的准备与填充:盾构机在空推过程中,由于前方及周边的阻力相对较小,故需对这些位置喷射豆砾石,以增大盾构机的阻力,从而给盾构机提供足够的反力,使管片止水条挤压密实,也能使水平连接螺栓拧紧牢固,达到抑制成型管片错台漏水的效果。豆砾石直径宜在 5 mm 至 10 mm 之间。在盾构机进入暗挖隧道之前,应将豆砾石提前准备齐全。

12) 空推段反力计算:暗挖空推推力需满足大于止水条最小挤压力的要求。止水条的受压变形试验曲线如图 3 所示。

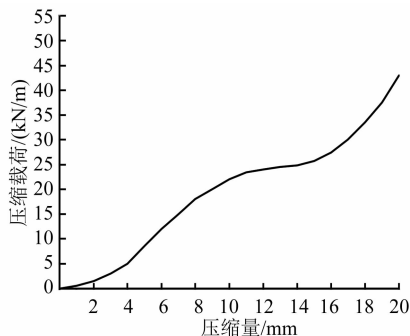


图 3 止水条受压变形试验曲线图

止水条安装直径为 8 416 mm,单环止水条长度为 26.426 m,单环受力为 1 321.3 kN。按设计图纸及图 3 计算,管片止水条受到的总压力可达 2 642.6 kN,满足止水强度要求。

### 3.2 盾构空推的主要施工控制措施

#### 3.2.1 盾构机前进

依据导台与盾构刀盘之间的几何关系,对各个方向推进油缸的油压(下部油缸压力略大于上部油缸压力)进行调整,使得盾构施工时隧道真实轴线尽量接近设计轴线。初期盾构推进速度控制在 15~30 mm/min,后期随着操作技术的熟练,推进速度可达到 30~45 mm/min。盾构推进过程中要对矿山法

暗挖段隧道与刀盘轮廓之间的间距及盾构前体下部与导台的结合情况进行严密监测。导台轨道涂抹油脂润滑,以尽量减少摩擦阻力,确保盾构机在导台上安全顺利步进。

### 3.2.2 盾构轴线控制

依据轴线的设计半径及盾构刀盘直径计算各个方向上千斤顶的行程差。由于本区间为直线段,只需调整上下的铰接油缸和推进油缸行程差值在46 mm(管片楔形量)以内即可,以确保盾构机姿态符合矿山法暗挖段隧道设计轴线的要求。

### 3.2.3 豆砾石填充

管片拼装完成后,要及时进行管片外围与地层间的背衬回填工作。回填材料为喷射的豆砾石。

因所用盾构机在盾尾处设计有止浆板,故将 $\phi 50$  mm 导管的长度设定为11.2 m,使豆砾石充分填充在管片与初支空隙中。导管自盾构机刀盘2及10点位处插入到盾尾后20 cm处(盾构机盾体含刀盘总长为11 m),导管与盾体焊接固定,推进前和随同盾构步进时要从刀盘前向盾体后方喷射粒径为5~10 mm的豆砾石骨料,并进行同步注浆。

若发现管片背后填充不密实,则每步进100 cm,利用管片注浆孔再一次用混凝土喷射机向管片背后吹入豆砾石,以确保管片背后充分密实。回填数量基本达到理论数量后,打开管片顶部的注浆孔观察,直到注浆孔内充满豆砾石。喷射豆砾石时,在盾构机的切口四周要按照每隔5 m设置1个袋装砂石料围堰。为了防止管片后面的砂浆及豆砾石向前窜,围堰高度要控制在时钟的2点位置以下。

### 3.2.4 同步注浆

每环管片安装完成后,要对管片外围喷射豆砾石,豆砾石喷射完成后进行同步注浆。注浆的同时,盾构机正常推进,采用盾构机上自带的同步注浆设备进行注浆。可根据现场实际情况,手动调整注浆压力及注浆量。注浆压力一般设为0.05~0.15 MPa。当注浆量为理论计算值的80%时停止注浆,且在注浆过程中要对盾构机周围进行严密观测,一旦发现漏浆情况,应立即停止注浆。

### 3.2.5 管片外侧二次注浆

管片顶部豆砾石往往很难一次注浆充填密实,会留有少量空洞,为此,当管片脱出盾尾且待第1次注浆凝固后,需每隔2环打穿拱腰以上管片吊装孔,检查第1次注浆效果。盾构每推进4~5环,通过隧道上部的管片注浆孔进行二次注浆。注浆材料采

用水泥浆和水玻璃溶液,注浆压力控制在0.3~0.4 MPa,水灰比为0.5~1.0。

## 3.3 4号工作井盾构接收方案

矿山法暗挖隧道内导台施工完毕后,进行4号工作井内接收导台施工,其施工方法同暗挖隧道内导台。盾构机进洞后继续推进,直至盾构机盾尾处管片完成拼装且管片突出围护结构。此时区间管片拼装已完成,利用千斤顶对盾构机进行顶进;进行过程中盾构机继续注浆,使盾构机完全驶进接收导台。

如发现管片背后填充不密实,则利用管片注浆孔再一次用混凝土喷射机向管片背后吹入豆砾石,以确保管片背后充填密实。回填数量基本达到理论数量后,打开管片顶部的注浆孔观察,直到注浆孔内充满豆砾石。洞门处利用混凝土喷射机对管片与初支间的空隙进行混凝土喷射,确保填充密实。

## 4 施工质量分析

盾构空推施工成功与否是整个区间施工的关键,对整个区间的施工进度起着非常重要的作用。通过对空推施工过程中隧道管片的拼装偏差及隧道拱顶的沉降情况进行统计,来考察整个大直径盾构空推通过既有矿山法暗挖隧道的施工工艺水平。

### 4.1 管片拼装质量

盾构施工质量的好坏绝大部分取决于隧道管片的拼装情况,拼装质量主要取决于管片的水平偏差及高程偏差。拼装质量越好,后期的养护维修费用也会大大降低。左、右线的盾构空推施工中隧道管片的拼装偏差如图4~5所示。

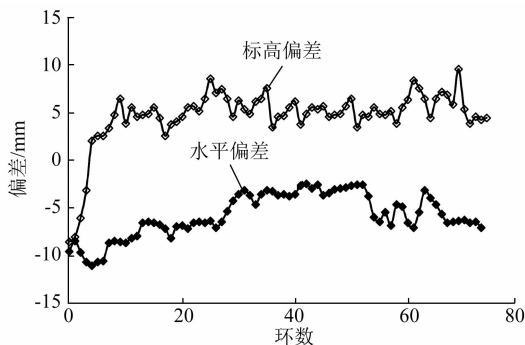


图4 左线盾构空推的管片安装偏差

由图4可以看出:左线隧道的管片拼装高程偏差最大为9.6 mm,前4环标高偏差为负值,随着纠偏的控制,第5环之后标高偏差都为正值,随着施工的进行,总体上偏差值越来越小,均控制在10 mm

以内;水平偏差都为负值,向右偏,最大水平偏差为向右偏 11 mm,总体变化趋势也是偏差越来越小。

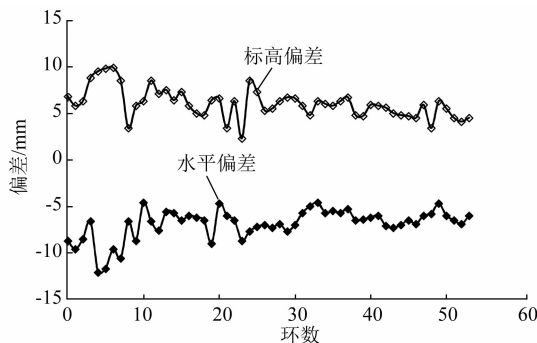


图5 右线盾构空推的管片安装偏差

由图5可以看出:右线隧道的管片拼装偏差情况与左线基本相同,但标高偏差都为正值,最大值为 10 mm;水平偏差都为负值,向右偏,最大值为 12 mm。

#### 4.2 盾构空推施工的隧道拱顶变形

大直径盾构机空推既有矿山法暗挖隧道的施工难度很大,对周边土层的影响也较大,如果处理不好会使周边土层产生较大的变形。本次空推过程中隧道拱顶的竖向位移情况如图6所示(隆起为正,下沉为负)。

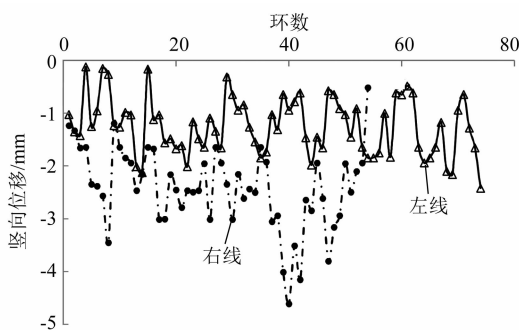


图6 盾构空推过程中左、右线管片拱顶竖向位移

由图6可以看出:空推施工过程中左、右线隧道拱顶变形均表现为下沉,左线最大沉降量为

2.42 mm,右线最大沉降量为 4.61 mm,远远低于规范的控制要求。

## 5 结语

本文研究直径 8.8 m 的大直径盾构空推通过既有矿山法暗挖隧道的施工工艺,施工完成后整个矿山法暗挖隧道的管片拼装左线水平方向最大偏差为 11 mm,高程方向的最大偏差为 9.6 mm;右线水平方向的最大偏差为 12 mm,高程方向上最大偏差为 10 mm;左线隧道拱顶位置的最大沉降位移为 2.42 mm,右线为 4.61 mm。管片拼装偏差及隧道的变形均满足现有规范的控制要求,解决了大直径盾构机空推通过矿山法暗挖隧道的难题,为以后类似项目的施工积累了经验。

## 参考文献

- [1] 赵运臣. 盾构始发与到达方法综述[J]. 现代隧道技术, 2008 (增刊1): 86.
- [2] 王贺昆. 城市地下隧道盾构空推过矿山法段施工技术[J]. 土工基础, 2016(3): 375.
- [3] 徐延召, 李亚巍, 杨俊. 盾构空推过矿山法隧道施工技术及质量控制[J]. 土木建筑工程信息技术, 2016(1): 53.
- [4] 李剑明. 盾构空推过矿山法隧道新工艺[J]. 铁道标准设计, 2011(11): 93.
- [5] 李锦富. 浅议盾构过矿山法隧道空推段施工质量控制[J]. 现代隧道技术, 2012(2): 65.
- [6] 李锦富, 罗忠. 盾构空推管片过矿山法隧道渗漏水控制[J]. 现代隧道技术, 2012(2): 71.
- [7] 邓洋. 地铁施工盾构空推过既有矿山法隧道施工组织设计——以广州地铁6号线二期工程为例[J]. 隧道建设, 2015 (增刊2): 138.
- [8] 赵岗领, 王立川. 城市地铁盾构通过暗挖隧道施工案例[J]. 隧道建设, 2010(3): 298.
- [9] 王春河. 盾构机空推过矿山法段地铁隧道施工技术[J]. 铁道标准设计, 2010(3): 88.

(收稿日期:2018-09-27)

(上接第 89 页)

- [8] SRAMOON A, SUGIMOTO M, KAYUKAWA K. Theoretical model of shield behavior during excavation. II: Application[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2002 (2): 156.
- [9] SUGIMOTO M, SRAMOON A. Theoretical model of shield behavior during excavation. I: theory[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2002(2): 138.
- [10] RUSSO G. Evaluation the required face support pressure balance

control for EPB shield[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52 (10): 2840.

- [11] 孙钧, 易宏伟. 地铁隧道盾构掘进施工市区环境土工安全的地基变形与沉降控制[J]. 地下工程与隧道, 2001(2): 10.
- [12] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2019 年度统计分析报告[R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2020.

(收稿日期:2020-07-13)