

# 北京铁路地下直径线盾构选型及功能设计

韩亚丽<sup>1</sup>, 吕传田<sup>2</sup>, 张宁川<sup>1</sup>

(1. 中铁隧道装备制造有限公司, 河南新乡 471000; 2. 中铁隧道集团北京地下直径线项目部, 北京 100045)

**[摘要]** 根据隧道直径的大小和地质等条件, 分析北京铁路地下直径线隧道工程盾构法施工中盾构设备选型考虑的因素及选择的机型, 确定盾构机型配置的主要功能及对地质的适应性, 并对盾构主要结构数据和配备能力进行了计算和描述。提出了盾构选型和设计中需要注意的事项和问题。

**[关键词]** 铁路; 地下直径线; 盾构选型; 盾构功能设计

**[中图分类号]** U455 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)12-0029-06

## 1 前言

城市地下隧道工程施工首要考虑的是地面建筑和各种设施的安全<sup>[1]</sup>。砂卵石地层的盾构施工是一个世界难题, 北京富水砂卵石地层的盾构掘进更加艰难, 不管是土压平衡盾构还是泥水平衡盾构, 都会遇到较大的困难, 适应性仅是相对而言。由于北京铁路地下直径线工程的管片外径为  $\phi 11.6$  m, 隧道直径大, 掘进时保持地层稳定的难度大于常规 6 m 直径管片的地铁隧道, 因此盾构选型及盾构功能配置的合理与否, 对工程的安全性、进度、经济性影响更为直接和敏感。根据对隧道直径大小和地质条件的分析, 最终选择了泥水平衡盾构。沿线建构物密集、风险点多, 穿越了西便门、天宁寺立交桥、护城河、既有地铁及煤气、上水、热力、污水等多种管线, 且地下水位高。

## 2 工程概况

北京铁路地下直径线工程全长 9 151 m, 其中, 隧道全长 7 238 m, 盾构段长 5 175 m, 采用一台盾构从天宁寺桥附近的 4 号井从西向东掘进。盾构隧道开挖断面  $\phi 12.04$  m、外径  $\phi 11.6$  m、内径  $\phi 10.5$  m、环宽 1.8 m, 采用 6+2+1 通用环形式。管片环缝

设 18 根  $\phi 36$  mm 斜直螺栓, 纵缝设 50 根  $\phi 30$  mm 的斜直螺栓连接, 管片设计强度为 C50, 抗渗等级为 S12。沿线建(构)筑物密集、风险点多, 穿越了西便门、天宁寺立交桥、护城河、既有地铁及煤气、上水、热力、污水等多种管线, 且地下水位高。

### 2.1 工程特点及难点

**主要特点:** 国内第一条在市区地下修建的铁路全电气化隧道; 第一条在国内同类地质条件下采用直径 12.04 m 的泥水盾构施工的隧道; 北京市首次采用泥水盾构施工的隧道; 是北京市风险最大、难度最高的地下在建工程; 目前国内盾构独头掘进最长的隧道; 第一个进行全线风险评估的工程。

**主要难点:** 施工工艺复杂; 地质条件差异大; 长距离掘进; 进度指标高, 刀具磨损快; 换刀难度大; 泥水处理复杂。

## 3 盾构选型

### 3.1 盾构类型的选择

根据本标段地层富水、强渗透性、基本不能自稳的情况, 无疑需选用压力平衡盾构, 可供选择的有土压平衡盾构和泥水平衡盾构两种机型。该两种类型盾构的优缺点如表 1 所示。综上分析, 在本标段采用泥水平衡盾构更为有利。

**[收稿日期]** 2010-08-12

**[作者简介]** 韩亚丽(1963—), 女, 陕西西安市人, 教授级高级工程师, 主要从事隧道掘进机设计、制造、施工及研究工作;

E-mail: hyl56@163.com

表1 土压平衡盾构与泥水平衡盾构对比表

Table 1 Comparison between earth pressure balance shield and slurry balance shield

| 比较项目                | 土压平衡盾构   | 泥水平衡盾构  |
|---------------------|--|---|
| 实现开挖面平衡的难易程度及地面沉降控制 | 本标段大粒径卵石含量过大,细颗粒成分少,碴土很难改良成为流塑性良好的碴土,一旦土仓建立压力,极易形成堵仓现象,导致刀盘堵转。土仓建立压力与刀盘堵转的矛盾非常突出,采用平衡模式掘进非常困难。地下水涌入土仓稀释碴土造成螺机喷涌,螺机不能形成土塞,更加剧了土仓建压的困难 | 泥浆在开挖面上渗透形成泥膜,泥浆在土仓内可完全充满,建立均衡准确的平衡压力。地层的性质与土仓建压没有直接关系(在形成泥膜条件下)。任何类型的碴土均在土仓内与泥浆形成悬浮体,刀盘搅拌扭矩均相差不大,且搅拌扭矩绝对值小于土压平衡盾构。易于建立并确保土仓压力,避免地表沉降 |
| 需要的刀盘扭矩             | 需要的刀盘扭矩巨大。驱动功率会大到不合理或极不经济的程度   | 根据各工程案例的统计数据,需要的刀盘扭矩仅为土压平衡盾构的30%左右  |
| 刀具及刀盘磨损             | 由于土仓需要充满碴土才能建压,卵石碴土的相互挤压对刀具的二次磨损和损坏强烈,换刀次数增多,增加工程风险  | 泥浆的润滑作用对刀具减磨有利,大大减少换刀次数而降低工程风险。刀具磨损仅为土压平衡盾构的50%   |
| 螺旋输送机磨损             | 卵石碴土对螺机的磨损强烈。区间隧道长度较长,可能需要在洞内进行螺机修复,造成的工程风险较大  | 卵石碴土对环流系统的磨损同样强烈。洞内修复破碎机的难度和造成的工程风险较大   |
| 大粒径卵石的处理            | 如形成大粒径卵石挡在刀盘前面(刀盘开口限制尺寸),会加剧刀具的荷载。大粒径卵石也对螺机形成堵塞。该矛盾很难处理  | 破碎机可以处理大粒径卵石,从而可加大刀盘开口尺寸,减轻刀具荷载。但破碎机的磨损问题同样存在   |
| 大直径的影响              | 大直径增大坍塌的可能性,对平衡的要求更高。刀盘直径大、转速低、土仓容积大,碴土不易被搅拌为流塑性良好的碴土  | 由于易于建立土仓压力,大直径的影响不明显。碴土与泥浆被搅拌成为分散的悬浮体略受影响   |

3.2 泥水压力控制模式的选择

泥水盾构压力控制模式可以分为直接控制和间接控制模式。直接控制模式的盾构开挖面后面只有一个舱室,泥水直接从该舱室进入、排出,适用于开挖面自稳性较好的工程。间接控制模式(见图1)的特点是盾构前部分为两个舱:开挖舱和气垫

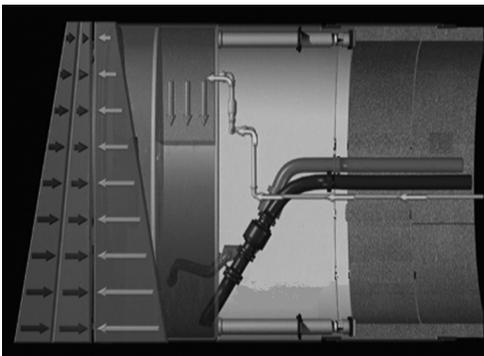


图1 泥水盾构原理图

Fig. 1 Schematic of slurry shield

舱,刀盘以及其背后的空间为开挖舱,平时充满膨润土浆液;开挖舱后面有一个气垫舱,气垫舱下部为跟开挖舱连通的浆液,上部为压缩空气,开挖舱和气垫舱之间通过下部的一个通道连通。通过设定气垫舱压缩空气的压力和调整气垫舱的泥水液

位就可以间接控制刀盘开挖面的泥水压力。

直接控制模式对操作人员的要求较高,正常情况下开挖面的压力波动会较大,一般为±0.05~0.1 MPa;间接控制模式由于压缩空气的特点,开挖面的压力波动较小,一般为±0.005 MPa。根据直径线工程的特点选用了气垫式的间接控制模式。

3.3 主要机构的选型和配置

3.3.1 刀盘类型的选择

盾构的刀盘大致可以分为辐条式和面板式,辐条式刀盘适用于淤泥质地层和砂层,砂卵石地层和岩石地层宜采用面板式刀盘<sup>[2]</sup>。为了在刀盘前破碎大直径卵石、刀盘便于更换滚刀、带压进仓更换刀具的便利,直径线盾构采用了面板式刀盘。

3.3.2 刀具配置

刀盘(见图2)上配置了32把先行撕裂刀,撕裂刀可以与滚刀互换,确保刀盘适用范围更广。配备了296把切刀(中心10把),其中5把带有磨损检测装置。配备了16把周边刮刀,刀盘外缘面配备了32把保护刀;在刀盘135°位置安装了一把仿形刀,各种刀具形式见图3。

盾构试掘进期间对刀盘刀具配置进行了改造,见本刊专文论述(北京铁路地下直径线泥水盾构刀

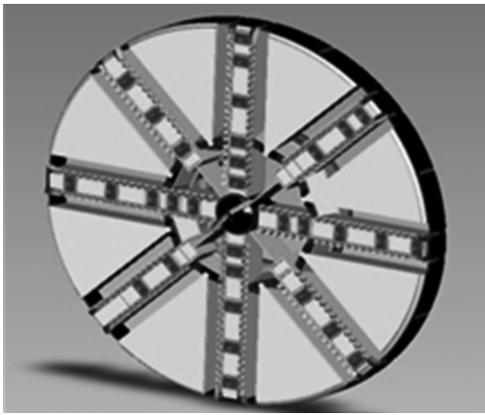
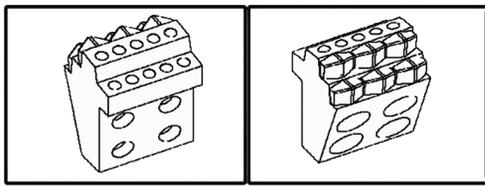
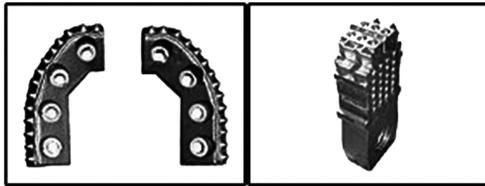


图2 刀盘

Fig. 2 Cutter



(a)



(b)

图3 刀具

Fig. 3 Cutting tools

盘、刀具适应性分析,何峰)。改造采用了立体切削概念,滚刀增加到42把,切刀360把,刮刀32把,撕裂刀52把,周边保护刀25把,耐磨合金保护刀96把。

### 3.3.3 刀具检测装置

带检测装置的切刀有液压回路(见图4)。液压管路连接到辅助泵站油泵上,如果刀具被磨损到一定程度,这个漏油孔就被打开,使压力断开,意味着刀具已磨损。

### 3.3.4 盾体

护盾由前盾、中盾和尾盾三部分构成。前盾遮罩刀盘、刀盘驱动装置和人闸;中盾遮罩推进油缸,支承管片拼装机;尾盾提供管片周边的密封性。护盾结构按承受0.6 MPa的静水压力进行设计。尾盾的结构采用整体焊接。为适应曲线掘进,护盾的设计为倒锥形,尾盾的直径比中盾和前盾的直径小一些。在盾构前方沿盾壳周圈间隔预留超前注浆孔。保证超前钻机可以安装在管片拼装机上,可以进行

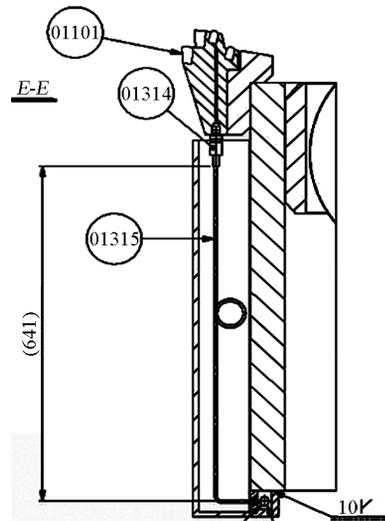


图4 刀具磨损监测原理图(单位:mm)

Fig. 4 Schematic of tool wear monitoring(unit:mm)

超前钻孔和注浆作业。

### 3.3.5 盾尾密封

盾尾密封包括三排金属钢丝刷和一道钢板束,四排密封之间形成环形空间,持续不断地用密封油脂填充。

### 3.3.6 后配套拖车

后配套按照盾构施工组织中的运输方案进行设计。后配套拖车由4节门架拖车组成。第一节拖车的前部安装有一对橡胶轮,可以直接在管片上行走,服务列车的轨道第二、第三节拖车也安装在轮子上,并行走在轨道上。平台上安装有动力及控制设备以及保证盾构机正常运行的辅助设备等等。第四节拖车为后来增加的,主要配有二次注浆设备和材料。

## 3.4 盾构刀盘驱动系统

刀盘驱动系统包括减速箱、变频刀盘驱动电机及其控制元件。刀盘驱动采用变频电机驱动,具有脱困功能。连接减速箱与驱动小齿轮的轴是经过特殊设计的,配有驱动保护装置,这种轴的设计就像一个保险装置,在达到一定的扭矩时自动剪切断裂,以避免部分关键机械部件(如主轴承大齿圈、驱动小齿轮、齿轮箱等)扭矩过载。

## 3.5 主轴承密封装置

主轴承配备了2排,每排有5道唇形密封(见图5),分别位于轴承的内圈和外圈。腔室1:使用连续流量计注射HBW型油脂。由于迷宫密封中的压力损失,压力 $p_1$ 比土压 $p_0$ 高。腔室2和腔室3注入恒量流速的油脂,并在腔室1和腔室4之间进行着

压力的传递: $p_0 < p_1 > p_2 > p_3 > p_4 = p_5 = p_6$ 。腔室4:使用液压油进行周期性的注入,对腔室清洁度进行确认。腔室5:泄漏测试腔。

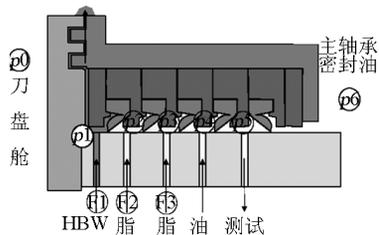


图5 主轴密封  
Fig.5 Main bearing seal

### 3.6 推进系统

推进系统主要由推进油缸、液压泵站和控制装置组成。推进油缸为双缸设计,每对油缸都均匀分布于盾体周围。油缸作用在前一环的混凝土管片上,借助铰接的撑靴,将力均匀地分散在接触表面,以防止对混凝土管片的任何一点损坏。25对油缸(共50根)分为4组。每组油缸均能单独控制压力的调整,为使盾构机沿着正确的方向开挖,可以调整4组油缸的压力,油缸也可以单独控制。油缸直接顶推在靠近机器重心的前体上,方便主机的方向操纵。为了测量机器的开挖进尺,4组推进油缸装行程传感器和速度传感器,推进速度通过控制面板可以连续地调整。管片安装模式时,可通过管片安装机操作面板单独控制任何一对油缸,以满足封顶块的安装在不同的点位上。

### 3.7 管片安装系统

管片安装系统(见图6)具有进行管片的吊卸、存储、安装以及为辅助系统(如超前地质钻机)提供安装条件等功能。主要包括安装在盾壳内的真空吸盘式管片安装机、方便管片连接螺栓安装的工作平台、真空吸盘式管片吊机、管片卸载装置等。

### 3.8 泥浆输送系统

泥水输送系统由以下部分组成:

- 1) 双鄂式岩石破碎机。
- 2) 膨润土泥浆的供给管线,即进浆管路。
- 3) 膨润土泥浆的排出管线,即排浆管路。

4) 膨润土泥浆供给泵,即进浆泵。膨润土泥浆通过进浆泵( $p_{1.1}$ )泥水调整池泵送到泥浆供应管道。对泥浆流进行调节,使气垫室里的泥浆能保持恒定的液面高度。泥浆主供应回路在盾构机内被分成5路。开挖室上部有2个喷口、下部有2个,还

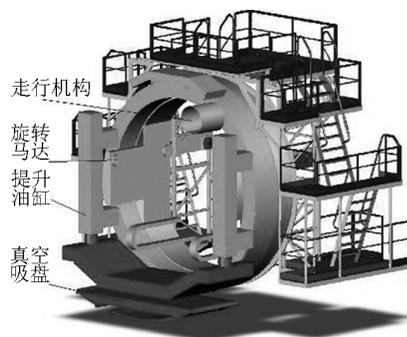


图6 管片安装机  
Fig.6 Segment installed machine

有1个从回转接头出来接到刀盘的中心区域。随着掘进距离的增加,隧道内增加进浆泵 $p_{1.2}$ 、 $p_{1.3}$ 。

5) 排浆泵。后配套拖车上的排浆管线上安装有一个变量离心泵 $p_{2.1}$ ,在隧道内设有中继排浆泵 $p_{2.2}$ 、 $p_{2.3}$ 、 $p_{2.4}$ 、 $p_{2.5}$ ,将泥浆泵送到地面。

6) 排浆泵的关键部件(泵壳体和叶片等)采用耐磨设计。

7) 泥浆管延伸机构。直径线盾构使用球塞式的泥浆管延伸系统,即在泥浆管延伸时,使用高压水将球塞推入管道,通过检测用水量,可以确定球塞的确切位置,直至满足管路延伸的需要。

泥浆输送系统包含一道泥浆舱门,该门在开挖舱与气垫仓下部,关闭时用以封闭开挖舱或打开时用以实现气垫模式。

### 3.9 压缩空气系统

压缩空气系统包含人闸、压缩空气调节器、压缩空气供应系统等装置。

#### 3.9.1 人闸

人闸(见图7)用来进入开挖室和隧道掌子面,以便在压缩空气下进行维修操作。



图7 人闸  
Fig.7 Man cabin

为满足作业人员在带压情况下快速作业的要求,采用并列式双舱人闸。人闸由主人闸室和应急人闸室构成,主人闸室可容纳3个人,应急人闸室可

容纳 2 个人。应急人闸室的功能是在需要时,医务人员可以进入主人闸室进行急救,同时也可向主人闸室内运送工具和材料等,以提高工作效率。

### 3.9.2 压缩空气调节器

压缩空气调节器是一种全气动的压力调节装置,安装在盾体内,用于调节气垫室内的支撑压力和人闸的空气压力,以便保持恒定压力。

安装在开挖室内的压力传感器随时检测泥水舱内的实际压力值,压力调节器比较测得值与设定值,然后控制进气阀,调节气垫室的压力使之保持恒定压力。压缩空气调节器的调压精度为  $\pm 0.005$  MPa。

### 3.10 同步注浆系统

同步注浆系统(见图 8)通常包含注浆泵、储浆罐、注浆管、阀和控制系统等。

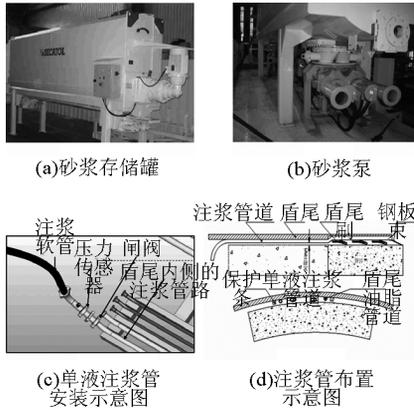


图 8 注浆系统

Fig. 8 Grouting systems

注浆泵为双柱塞型,液压驱动。泵直接装在砂浆罐的下方用于提高泵的效率,安装有清洁水箱,泵的活塞部分浸在水箱内便于活塞杆的清洗。每个柱塞连续可调,负责一个独立的注浆管路;注浆的压力、流量和每条线的注入量通过控制系统监测。

注浆管内置于盾尾内侧。在每条管线靠近盾尾注入点处都安装有一个压力传感器。

### 3.11 激光导向系统

PPS 激光导向系统,精度小于 2",有效工作距离为 500 m。包括下列硬件:a. 工业用 PC 机;b. 激光全站仪;c. 双轴倾斜计;d. PC 机与激光全站仪之间的无线电联系;e. 激光全站仪的电源;f. 2 个电动棱

镜,1 个参考棱镜;g. 1 套电缆。

### 3.12 电气系统

电气系统包括高压电缆卷筒、高压开关柜、变压器、配电柜、各系统电机,盾构供电采用了电容补偿,确保功率因素达标。盾构及拖车上还安装了插座和应急动力(发电机)。

盾构的操作基本设置在主控制室内,操作人员可以通过液晶监视器察看各种运行参数和故障,通过控制盘上的各种按钮和开关实现对盾构的操控。

### 3.13 控制系统

直径线盾构采用了先进的自动控制系统,工业可编程逻辑控制器(PLC)管理着所有的控制、控制回路、报警及故障(提醒进行预防性的和(或)纠正性的维修)、指令和安全装置,包括连锁装置。通过 PLC 程序的设定可以分步启动各电机(使瞬时起峰电流最小),自动开动油过滤装置和刀盘轴承润滑。

盾构采用了数据采集、显示与传输系统,该系统包含工业计算机、通信装置、监控器、软件。设备检测器提供的所有数据连续不断地通过 PLC 读取。PLC 使用这些数据参数进行程序控制。采集来的数据通过计算显示,在 3 个计算机屏幕上,主要包含盾构总体状况、泥水系统状况、推进刀盘系统状况等。系统控制设有手动和自动两种控制模式,能控制推进、液压、泥水、润滑、密封、注浆等相关盾构掘进参数。

### 3.14 其他系统

盾构还包含水循环系统、电话通信和电视监视系统、有害气体和氧气的自动监测系统、安全设施等。

## 4 盾构基本参数的确定

1) 盾构外径。  $D = D_0 + 2(X + t) = 11.60 + 2(0.11 + 0.06) = 11.94$  m,前盾外径为 11.952 m,刀盘外径为 11.97 m,将撕裂刀更换为滚刀后,最大开挖外径为 12.04 m。 $D$  为盾构外径、 $D_0$  为管片外径、 $X$  为盾尾间隙、 $t$  为尾盾厚度。

2) 盾构长度。经过计算,盾构长度取  $L = 11.52$  m。

3) 盾构重量。盾构主机  $G = 1\ 004$  t,其中,刀盘 164 t、前盾 235 t、中盾 314 t、尾盾 100 t。

4) 盾构推力计算见表 2。

表2 盾构推力计算表

Table 2 Thrust computation of shield

| 参数                 | 公式  | 数值         |
|--------------------|---|------------|
| 盾构壳体与地层的摩擦阻力 $F_1$ | $F_1 = \mu[\pi D_1 L(\rho_v + \rho_h)0.5 + g]$              | 29 361 kN  |
| 土仓内泥水压力产生的阻力 $F_2$ | $F_2 = 360 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2} \times D_1^2 / 4$ | 40 966 kN  |
| 由刀具挤压产生的阻力 $F_3$   | $F_3 = (296 + 32 + 16) \times 10.5 \text{ kN}$              | 3 612 kN   |
| 管片与盾尾密封的阻力 $F_4$   | $F_4 = \pi D_2 \times \text{经验值}$                           | 364 kN     |
| 后续台车的牵引阻力 $F_5$    | —   | 1 000 kN   |
| 所需最大推力 $F_{\max}$  | —   | 75 303 kN  |
| 装备推力 $F_0$         | —   | 140 700 kN |
| 安全系数 $\alpha$      | $F_0 / F_{\max}$  | 1.87       |

注:  $\mu$  为盾体与地层的摩擦系数;  $\pi$  为圆周率;  $D_1$  为前盾外径;  $L$  为盾构主机长度;  $\rho_v$  为垂直方向土压力;  $\rho_h$  为水平方向土压力;  $g$  为重力加速度;  $D_2$  为管片外径

5) 盾构扭矩计算。盾构配备的扭矩由刀具的切削扭矩  $M_1$ 、刀盘正面推力荷载产生的抵抗旋转阻力矩  $M_2$ 、密封装置产生的摩擦力矩  $M_3$ 、刀盘前表面上的摩擦力矩  $M_4$ 、刀盘圆周面上的摩擦力矩  $M_5$  等 5 部分组成。刀盘扭矩  $M$  为  $M_1 \sim M_5$  之和, 盾构配备的扭矩计算为  $7\ 656 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

实际配备: 转速为  $0 \sim 0.85 \text{ r/min}$  时扭矩为  $0 \sim 15\ 700 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 脱困转速为  $0 \sim 0.05 \text{ r/min}$  时扭矩为  $20\ 410 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 最高转速  $2.3 \text{ r/min}$  时扭

矩为  $5\ 802 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

6) 刀盘驱动功率。原配置 9 台  $92 \text{ kW}$  变频电机, 后增加一台, 总功率为  $920 \text{ kW}$ 。

## 5 结语

在城市砂卵石地层大直径盾构隧道施工中, 盾构设备设计的重点主要是: a. 刀盘的设计和刀具的配备; b. 盾构的耐磨设计; c. 泥水系统小型化、长距离设计; d. 压缩空气下作业装置的设计配备, 有必要配备带压动火辅助装置。

在国内外同类地层与直径的盾构隧道工程案例中, 采用泥水平衡盾构进行施工的居多。开挖直径越大, 泥水平衡盾构的优势越明显。当然, 如果地质条件良好, 如主要地层均为软土, 则土压平衡盾构可以克服本标段工程列举的种种不利因素时, 采用土压盾构更为有利。毕竟土压盾构不需要在地面配置庞大的泥水分离站, 盾构设备的投资成本和施工成本也比泥水盾构低  $30\% \sim 40\%$ 。但针对工程和地质条件选择合适的盾构形式确实是保证隧道工程安全最重要的技术之一。

## 参考文献

- [1] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [2] 地盘工学会. 盾构法的调查、设计、施工[M]. 牛清山, 陈凤英, 徐华译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

# Shield selection and function design of Beijing underground diameter line

Han Yali<sup>1</sup>, Lv Chuantian<sup>2</sup>, Zhang Ningchuan<sup>1</sup>

(1. China Railway Tunnel Equipment Co., Ltd., Xinxiang, Henan 471000, China;

2. Beijing Underground Diameter Project Department, China Railway Tunnel Group, Beijing 100045, China)

[Abstract] According to the diameter of the tunnel and the geological conditions, considered factors of equipment selection and the choice of models of the large diameter tunnel of the Beijing underground diameter tunnel project were analysed, the main functions and geological suitability of shield type configure were described, and the main data of the structure and equipped capability were calculated and described. The issues and problems that need to be paid attention for selection and design of shield were proposed.

[Key words] railways; underground diameter line; shield selection; shield functional design