

文章编号: 1674—8247(2024)02—0001—09

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.02.001

# 成都平原地区大直径盾构选型研究

齐春 喻渝 王闯 胖涛

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**为满足成都平原地区大直径盾构隧道建设需求,本文基于已建紫瑞隧道和锦绣隧道盾构选型经验,依托在建成渝中线铁路蜀安隧道工程,研究了大直径盾构选型问题,给出了盾构机适应性配置建议。研究表明:(1)土压平衡和泥水平衡均可适用于成都平原地区大直径盾构隧道修建;(2)当穿越地层以泥岩为主时建议优先选择土压平衡盾构;对于局部存在高水压或强透水地层地段,可辅以地表降水+注浆加固后采用土舱上部注浓泥浆保压掘进土压平衡模式;当泥岩和砂卵石地层长度相当时,建议优先选择泥水平衡盾构或土压-泥水双模盾构;当穿越地层以砂卵石为主时,建议优先选择泥水平衡盾构;(3)城区大直径盾构隧道对地层变形控制要求高,建议盾构机预留同步注双液浆和盾体外注克泥效等惰性浆液功能。

**关键词:**成都平原地区;大直径盾构;泥岩地层;盾构选型;盾构适应性

中图分类号:U45

文献标志码:A

## Study on Selection of Large Diameter Shields in the Chengdu Plain

QI Chun YU Yu WANG Chuang PANG Tao

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** To meet the demands of large-diameter shield tunneling in the Chengdu Plain, this paper introduced the experience of selecting the shield for the previously constructed Zirui Tunnel and Jinxiu Tunnel, as well as the performance of shield in the construction of Shu'an Tunnel in Shanghai-Chongqing-Chengdu High-speed Railway (Chongqing-Chengdu Section) under construction, and discussed how to select large-diameter shield, and offer guidance on the adaptable configuration of shield machines. Key conclusions are as follows: (1) Both Earth Pressure Balance (EPB) and Slurry Pressure Balance (SPB) shield technologies are viable for the construction of large-diameter shield tunnels in the Chengdu Plain. (2) When the predominant geology consists of mudstone, EPB shields should be prioritized. For sections with high groundwater pressures or highly permeable strata, a strategy involving surface dewatering coupled with grouting reinforcement, followed by excavation using an upper chamber mud injection with EPB mode under pressure, is recommended. Where mudstone and sandy gravel strata are of comparable length, SPB shields or dual-mode EPB-SPB shields are favored. In cases where sandy gravel formations predominate, SPB shields are the preferred option. (3) In urban areas where large-diameter shield tunneling necessitates stringent control over ground settlement, shield machines should be provisioned with capabilities for synchronous injection of cement-sodium silicate grouts and application of Clayshock and other inert slurries to the exterior of the shield body.

**Key words:** Chengdu Plain; large-diameter shield; mudstone strata; shield selection; shield adaptability

收稿日期:2024-02-22

作者简介:齐春(1988-),男,高级工程师。

引文格式:齐春,喻渝,王闯,等.成都平原地区大直径盾构选型研究[J].高速铁路技术,2024,15(2):1-9.

QI Chun, YU Yu, WANG Chuang, et al. Study on Selection of Large Diameter Shields in the Chengdu Plain [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(2):1-9.

随着我国隧道工程的建设发展,盾构法以其快速、安全、环保、低碳、智能化等优势而得到广泛应用,并不断向超大埋深、超大断面、超长距离等方向发展<sup>[1]</sup>。现阶段大直径盾构隧道的工程应用处于高速发展期,所面临的地质、环境等建设条件将越来越复杂,而特定条件下盾构设备选型是保证隧道施工安全、质量、工期、成本等目标实现的关键<sup>[2]</sup>。

在盾构隧道选型问题方面,国内诸多专家学者进行了分析研究和应用实践。黄新森<sup>[3]</sup>等统计了16座城市30个区间盾构选型及关键参数选取情况,研究了关键参数与地层之间、关键参数内部之间的规律性和差异性;竺维彬<sup>[4]</sup>等分析了超大直径盾构在花岗岩、灰岩、碎屑岩三大典型岩类为基础的复合地层中的施工风险,提出了盾构选型与配置的针对性设计;李义华<sup>[5]</sup>等以京沈高速铁路望京隧道为依托,分析了大直径泥水盾构在全断面黏土、粉质黏土层等细颗粒地层中的施工问题,就盾构机的主要部位进行了针对性设计;孔少波<sup>[6]</sup>从盾构装备的地质适应性方面探讨了海底大直径盾构在不同地层条件下刀盘设计优化问题;刘继国<sup>[7]</sup>等根据海底大直径盾构隧道的工程地质、水文条件等影响因素,综合对比了泥水平衡和土压平衡盾构的适应性;蒋超<sup>[8]</sup>在总结广深港高速铁路狮子洋隧道工程实例的基础上,探讨了佛莞城际狮子洋隧道的盾构选型方案;田四明<sup>[9]</sup>等从工程地质、水文地质、周边环境及风险控制等方面,对大直径土压平衡盾构的设计与选型进行适应性分析与探讨;程国良<sup>[10]</sup>等依托武汉大直径越江泥水平衡盾构隧道,在适应性风险分析的基础上针对刀盘系统、推进驱动系统和密封系统进行了选型结果分析。相关文献调研可知,国内针对大直径盾构选型的研究已取得一定成果,但因泥水平衡盾构在掌子面稳定和地层变形控制方面更有优势,结合大直径盾构隧道的发展历程和施工习惯,国内大直径盾构隧道施工中泥水平衡盾构应用具有明显优势(占比超过90%)。既有研究主要集中于大直径泥水平衡盾构的配置方面,大直径土压平衡盾构相关选型及配置的相关研究较少。

成渝中线铁路是成渝地区双城经济圈标志性项目,线路自成都枢纽成都站向东引出,经成都市东部新区,资阳市乐至县、安岳县,重庆市大足区、铜梁区和重庆市科学城后引入重庆枢纽重庆北站<sup>[11]</sup>。成渝中线铁路蜀安隧道全长10 380 m,其中盾构段长9 824 m,盾构开挖直径达14.5 m。隧道位于成都市中心城区,主要穿越泥岩夹砂岩,局部穿越粗圆砾土地层。从穿越地层角度初步判断,该隧道采用土压平

衡盾构具有一定的可行性,但考虑到成都平原地区大直径盾构隧道修建尚处于起步阶段,可供借鉴的施工方案有限。因此,本文依托在建的蜀安隧道工程,并结合成都近年建成的两座大直径盾构隧道——成蒲铁路紫瑞隧道和成自高速铁路锦绣隧道,开展成都平原地区大直径盾构选型研究,为本工程提供技术支撑,并为今后类似工程提供借鉴。

## 1 成都平原已建大直径盾构选型

成都平原地区盾构隧道主要为地铁小断面隧道,建设初期曾进行过泥水平衡盾构和土压平衡盾构的试验对比,后均采用土压平衡盾构施工。近年来,随着成都地区铁路路网的扩展和完善,大直径盾构隧道已逐步开始应用,已先后建成成蒲铁路紫瑞隧道和成自高速铁路锦绣隧道两座大直径盾构隧道。由于铁路隧道穿越城区,为避让地铁、管道及减小对建(构)筑物的影响,线路埋深较常规地铁隧道大幅增加,盾构施工地层由地铁的富水砂卵石地层向泥岩地层转换,随之也带来新的问题,导致常规地铁盾构选型不一定适合。

### 1.1 成都平原地层特点

成都平原地处岷江冲积区,表层为含有大粒径、高强度、饱水砂卵石地层,基岩为川西红层泥岩。其中泥岩属白垩系上统灌口组( $K_{2g}$ ),具有以下特性<sup>[12-13]</sup>:

#### 1.1.1 软岩遇水软化

不同风化程度泥岩抗压强度1.28~8.31 MPa,软化系数0.18~0.31,属极软岩~软岩。

#### 1.1.2 黏土质矿物

成都泥岩为以蒙脱石、伊利石为主的片状黏土矿物,泥岩较粉砂质泥岩片状黏土矿物含量高,成层性更强,各向异性特征更明显,且结构更疏松,胶结程度更低。

#### 1.1.3 膨胀性

泥岩含有较多亲水矿物,含水率变化时发生较大体积变化,具一定膨胀性。

#### 1.1.4 基岩裂隙水

富含基岩裂隙水,水量主要受裂隙发育程度、连通性及裂隙充填特征等因素的控制,水量一般不大,局部地段水量丰富。

### 1.2 成蒲铁路紫瑞隧道盾构选型

紫瑞隧道位于成(都)蒲(江)铁路成都南站至红牌楼区间,隧道全长1 940 m,其中盾构段1 300 m,隧道采用单洞双线结构形式,按80 km/h设计,隧道内径11.3 m,外径12.4 m。盾构隧道段结构覆土厚度7.8~

12.8 m,纵坡为“V”型坡,最大坡度为 25.5‰,最小坡度为 3‰。盾构隧道段穿越的地层主要是 <5> 卵石土和 <6> 泥岩。该隧道盾构段地质剖面如图 1 所示。

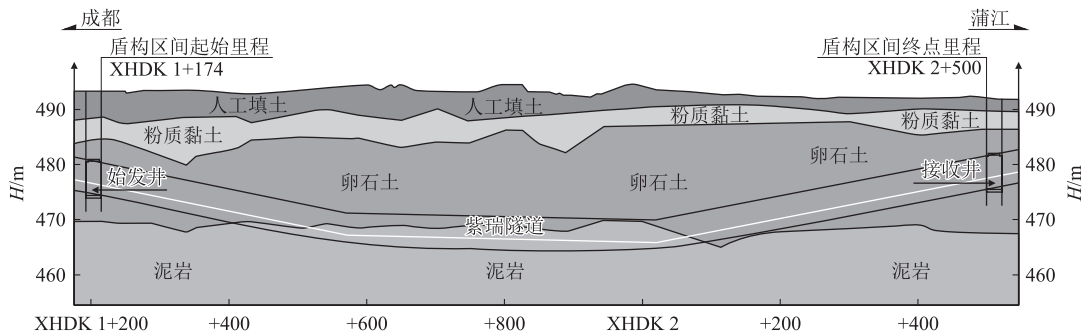


图 1 紫瑞隧道盾构段地质剖面图

考虑到紫瑞隧道盾构段穿越地层中卵石土和泥岩长度基本相当,选择了 1 台泥水-土压双模盾构,并计划在砂卵石地层中采用泥水平衡模式,泥岩地层中采用土压平衡模式掘进。实施过程中,施工单位采用泥水平衡模式掘进泥岩地层时也取得了较快的施工进度,同时考虑到若在隧道中部泥岩地层中切换为土压平衡模式,则在接收端砂卵石地层中需要再次切换为泥水平衡模式,对工期和施组安排有影响,且模式切换存在一定风险,故实际全隧均采用泥水平衡模式掘进。紫瑞隧道已于 2022 年 1 月贯通。

1.3 成自高速铁路锦绣隧道盾构选型

锦绣隧道位于成(都)自(贡)高速铁路成都东-天府新区区间,隧道全长 3 655 m,其中盾构段长 2 620 m,隧道采用单洞双线结构形式,按 80 km/h 设计,隧道内径 11.3 m,外径 12.4 m。盾构隧道段最大埋深约 56 m。本隧道线路纵坡设计为“V”型坡,最大坡度为 30‰,最小坡度为 3‰。盾构隧道段穿越的地层主要为 <15-1> 泥岩,如图 2 所示。

由于锦绣隧道盾构段穿越单一的泥岩地层,选用了 1 台土压平衡盾构施工,隧道已于 2022 年 12 月贯通。

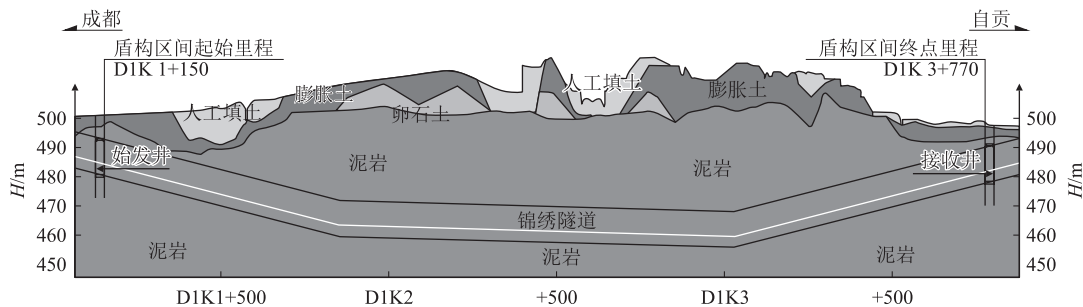


图 2 锦绣隧道盾构段地质剖面图

2 蜀安隧道工程概况

蜀安隧道位于成渝中线铁路简州站至成都站区间,沿既有铁路通道敷设,处于成都市中心城区,是全线控制性工程。隧道全长 10 380 m,纵坡为“W”坡,最大埋深约 49 m,为单洞双线隧道,采用“盾构法+明挖法”施工,设置 3 座盾构井。盾构段总长 9 824 m,采用 2 台盾构机施工,分别从 1 号盾构井和 2 号盾构井始发,在 2 号盾构井和 3 号盾构井处接收。考虑隧道位于进入成都站加减速段落,1 号盾构井与 2 号盾构井间盾构段(以下简称“小里程盾构段”)长 5 262 m,

按照时速 350 km 设计,管片外径 14 m;2 号盾构井与 3 号盾构井间盾构段(以下简称“大里程盾构段”)长 4 562 m,按照时速 250 km 设计,管片外径 13.5 m。隧道纵断面如图 3 所示。

蜀安隧道洞身盾构段主要穿越泥岩夹砂岩地层,出口端约 828 m 穿越中密粗圆砾土地层。粗圆砾土中粗圆砾含量 50%~60%,卵石含量约 10%~30%,颗粒 60~200 mm 范围粒径占比约 29%,20~60 mm 范围粒径占比约 48%,20 mm 以下粒径颗粒占比 23%。泥岩夹砂岩为泥质结构,以薄~中厚层状为主,主要矿物成分为黏土矿物(68%~73%)、石英(6%~8%)、长石



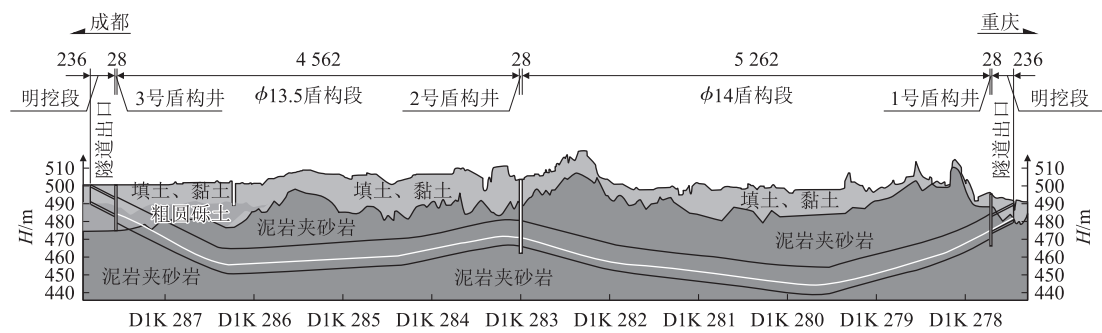


图3 蜀安隧道纵断面图

(2%~3%)、白云母(1%~2%)、方解石(12%~17%)、透明矿物(1%~2%),岩石单轴饱和抗压强度4.58MPa;强~弱风化泥岩具有弱膨胀性。地层渗透性方面,泥岩夹砂岩地层渗透系数约为 $4.6\times10^{-6}\text{m/s}$ ,粗圆砾土渗透系数约为 $2.9\times10^{-4}\text{m/s}$ 。

隧道区域内有害气体为浅层天然气,分布具有不均匀性、无规律性及复杂性,全隧低瓦斯段落长2950m,其余段落为微瓦斯段。

3 蜀安隧道盾构选型研究

3.1 盾构选型总体要求

盾构选型是一个多因素评价与决策问题,需要考虑工程与水文地质、场地条件、施工进度、环境影响和经济性等条件,一般根据地层渗透性、岩土颗粒组成、水土压力、施工场地、建筑物变形控制要求、施工效率和建设成本等各方面因素综合确定。目前盾构隧道应用最为广泛的是土压平衡盾构和泥水平衡盾构;同时兼具土压、泥水平衡盾构及硬岩掘进机功能的多模式盾构设备也越来越多地被应用于多类型复杂地质条件下的盾构隧道中。盾构选型要保证以下工程需求:(1)适应工程地质、水文地质条件;(2)在安全可靠的前提下,统筹考虑技术先进性和经济合理性;(3)满足隧道开挖直径、埋深、周围环境条件要求;(4)满足质量、工期、造价及环保要求。

3.2 影响因素分析

3.2.1 地层渗透性

盾构类型与地层渗透系数的关系如图4所示,当地层的渗透系数小于 $10^{-7}\text{m/s}$ 时,可选用土压平衡盾构;当地层的渗透系数大于 $10^{-4}\text{m/s}$ 时,宜选用泥水平衡盾构;当渗透系数介于 $10^{-7}\text{m/s}$ 和 $10^{-4}\text{m/s}$ 之间时,既可选用土压平衡盾构也可选用泥水平衡盾构。考虑地层渗透系数,蜀安隧道主要穿越泥岩夹砂岩地层,该地层透水性差,吸水能力弱,渗透系数约 $4.6\times10^{-6}\text{m/s}$ ,土压平衡盾构和泥水平衡盾构均可采用。

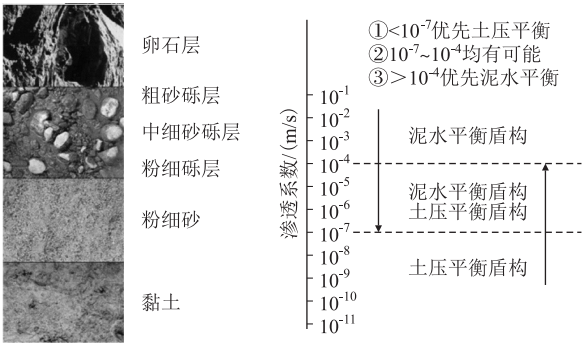


图4 盾构类型与渗透系数关系图

3.2.2 颗粒级配因素

为保证开挖面的稳定性,土压平衡盾构要求渣土具备一定的流动性和保压性,形成类似牙膏状的不透水流塑体;泥水平衡盾构要求地层土颗粒间有一定大小的间隙,从而形成泥膜并有效传递泥水压力。地层细颗粒含量多时渣土易形成不透水的塑流体,有利于建立土仓压力支撑开挖面土体,且不发生堵仓;粗颗粒含量高的渣土难以形成不透水流塑体,只能借助泥水平衡盾构大比重的泥浆悬浮来传递压力。一般来说,当地层中的粉粒(绝对大小通常以0.075mm为界)和黏粒的总量达到40%以上时,宜选用土压平衡盾构,反之选择泥水平衡盾构比较合适。盾构类型与颗粒级配的关系如图5所示。

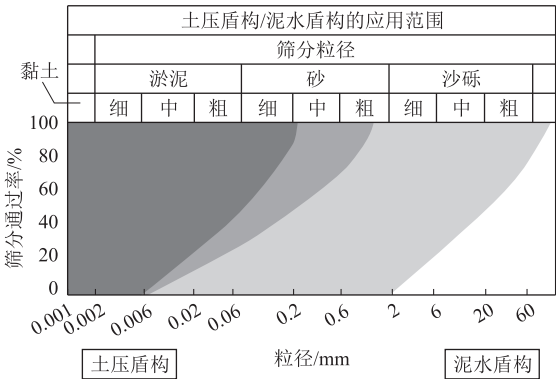


图5 盾构类型与颗粒级配关系图

蜀安隧道长距离穿越泥岩夹砂岩地层,泥岩极细颗粒含量高,膨胀率高,强度低,崩解性强。对于泥水平衡盾构,通过排浆管路排至泥水分离站后细颗粒难以分离,影响开挖仓泥浆的质量;当泥浆比重过高时,渣土易出现结泥团、糊刀盘、堵泥浆门、堵仓等现象,增加泥浆泵负荷及管路磨损;当泥浆比重过低时,会出现泥浆悬浮能力不足、携渣困难等问题,开挖面泥膜形成压力时间长不利于掌子面的稳定;且常规泥水分离设备难以分离 20 μm 及以下的细小颗粒,长时间下弃浆量大。考虑泥岩夹砂岩地层的颗粒级配,土压平衡盾构不存在以上问题,使用条件更好。

3.2.3 水土压力分析

土压平衡盾构通过螺旋输送机排土,土仓密闭性和止水性差,在高水压力作用下螺旋输送机排土闸门处可能会发生水、土砂喷涌现象。当地下水压小于 0.3 MPa 时,宜选用土压平衡盾构;当地下水压大于 0.3 MPa 时,宜选用泥水平衡盾构;高水压条件下若采用土压平衡盾构,则需加大螺旋输送机长度,采用二级螺旋输送机、保压泵等设备。

蜀安隧道拱顶最大埋深约 49 m,盾构管片外径 14 m,结构承受最大水压约 0.63 MPa,宜选用泥水平衡盾构。但隧道主要穿越地层以强、弱风化的泥岩夹砂岩为主,地层隔水效果好,隧道地下水不发育,泥水盾构需求不明显。当始发、接受浅覆土段局部水压力较高时,土压平衡盾构可通过添加聚合物、控制螺旋机出闸门开合等防渣土喷涌措施。

此外,出口端盾构段约 828 m 穿越中密粗圆砾土地层,地层渗透性强,从盾构开挖面保压的角度而言小里程盾构段采用土压-泥水双模式平衡盾构较为合适,但中密粗圆砾土地层段落短,埋深小,在地表降水和加固等辅助措施下可保证土压盾构开挖面的稳定;而如果采用土压-泥水双模式盾构,施工过程中保压模式的转换需要一定的时间,土压和泥水平衡两套模式涉及的设备、场地也会增加工程的成本。

3.2.4 施工场地

相较于土压平衡盾构,泥水平衡盾构的泥水处理系统需占用大量的场地。参考类似工程,蜀安隧道若采用泥水平衡盾构,临时施工场地则需增加约 30%。蜀安隧道 1 号、2 号盾构始发井位于既有空地,场地条件均能满足土压平衡盾构和泥水平衡盾构的用地需求。综合考虑土压平衡盾构占地更少,且不存在泥水平衡盾构隧道泥浆处理时的噪音问题,对周边环境影响相对更小,因此在施工场地方面土压平衡盾构更具优势。

3.2.5 既有建筑变形控制

土压平衡盾构通过改良渣土形成土仓压力来稳定掌子面,整体对土压力波动的敏感度低,掘进过程中地层损失和土体扰动大,对地层沉降的控制精度低;泥水平衡盾构采用压力泥浆稳定掌子面,泥水压力传递速度快且均匀,开挖面平衡水土压力的控制精度高,对周围土体的干扰小,对地层沉降的控制精度高。

蜀安隧道处于成都市城区,线路环境敏感点多。盾构段近接建(构)筑物和地下管线达 56 处,其中重点交叉干扰点如表 1 所示。

表 1 蜀安隧道盾构段重点交叉干扰点表

序号	近接工点	近接型式	最小净距/m
1	既有达成铁路龙潭寺特大桥	侧穿	15.3
2	既有绕城高速公路路基	下穿	8.7
3	拟建石板滩联络左线桥梁	下穿	15.6
4	既有成昆铁路货运外绕线成渝立交中桥	下穿	19.7
5	既有西成高速铁路北湖道岔特大桥	侧穿	6.6
6	成都站动车所既有食堂浴室楼	下穿	16.8
7	成都站既有信号楼	下穿	15.2
8	成都站轮机诊断整体道床	下穿	16.8
9	既有市政昭青隧道	下穿	7.6
10	成都枢纽线路(约 1 640 m)	并行下穿	-

考虑本隧道邻近及穿越建(构)筑物变形情况,沿线地层对变形控制要求高,选用泥水平衡盾构更适合。但考虑隧道平均埋深较大,小里程盾构段穿越泥岩夹砂岩地层,拱顶埋深大于 2D(D 为开挖直径)和 1D 段落占比分别为 81.8%、91.1%;大里程盾构段主要穿越弱风化泥岩夹砂岩地层,局部中密粗圆砾土地层,拱顶埋深大于 2D 和 1D 段落占比分别为 52.4%、84.7%。隧道开挖断面虽大,但泥岩夹砂岩地层具有一定的自稳性,土压盾构在充足的渣土改良剂和搅拌,保证渣土流塑性、精准控制开挖仓内部压力以及后期及时注浆填充的条件下,即使在始发和接收端浅覆土地层,采取辅助措施后也可保证地层变形的控制要求。

此外,参考既有大直径土压平衡盾构的经验,成自高速铁路锦绣隧道泥岩地层中土压平衡盾构邻近建(构)筑物施工时变形整体可控,上海诸光路隧道大直径土压盾构下穿库里港桥桩基(桩尖与隧道顶最小净距约 1.92 m)施工时,砂性地层沉降最大累计值-19.23 mm,表明大直径土压平衡盾构在既有建(构)筑物变形控制方面是可行的。综合蜀安隧道地层条件和建(构)筑物情况,土压平衡盾构可有效控制沿线建筑物变形。

3.2.6 施工效率

蜀安隧道施工效率主要受盾构的掘进速度和出



渣效率影响。一方面,蜀安隧道长距离穿越夹砂岩地层,泥岩富含亲水性矿物黏粒,在泥水环境下具有较强的吸水膨胀能力和吸附功能,易造成刀盘结泥饼,降低掘进速度。受刀盘开口率、刀具布置型式、土仓内渣土流塑性的影响,土压平衡盾构较泥水平衡盾构更易出现刀盘结泥饼的现象。目前成都地区泥岩地层中成功实施土压平衡盾构的工程案例通过刀盘刀具改造、渣土改良等技术基本可解决泥岩地层刀盘结泥饼的问题。另一方面,泥水平衡盾构通过泥水管路出渣,且需要一套处理系统进行泥水分离、调制浆、余浆处理等后再通过渣车运输;土压平衡盾构可采用连续皮带机或矿车将渣土运出洞外后直接运出。蜀安隧道的泥岩夹砂岩地层极细颗粒含量高,泥水平衡盾构长距离掘进时面临泥浆分离困难、堆渣无法及时运出等问题,影响施工进度;土压平衡盾构可采用皮带机进行连续出渣并配合渣车快速出土,效率更高。根据工程调研,成都地铁3号线泥岩地层土压平衡盾构最高掘进27 m/d,上海地区14.27 m直径土压平衡盾构单环出土量近320 m<sup>3</sup>时推进速度可以达到18 m/d<sup>[14-15]</sup>。因此,蜀安隧道采用土压平衡盾构施工效率更高,工期风险更小。

### 3.2.7 建设成本

根据国内外盾构设备制造商的调研,直径14 m左右的土压平衡盾构裸机整套设备造价较泥水平衡盾构裸机整套设备造价少约0.3亿元,泥水处理设备造价约0.2亿元,土压平衡盾构机械设备造价较泥水平衡盾构整体少约0.5亿元。此外,蜀安隧道穿越泥岩夹砂岩地层,普通泥水分离设备很难将泥岩的细颗粒分离,一般会增加四级泥水分离系统提升泥岩地层中的泥水分析效果,使用泥水平衡盾构的施工成本增加。据调研统计,考虑盾构机及后配套、泥水分离系统、刀具、泡沫、渣土输送泵系统等主要设备,13.5 m直径泥水平衡盾构较土压平衡盾构主要设备费用高约14%<sup>[16]</sup>,泥水平衡盾构每延米掘进成本比土压平衡盾构高约10%~38%<sup>[17]</sup>,蜀安隧道采用土压平衡盾构的经济指标更优,建设成本更低。

### 3.2.8 选型建议

综合盾构隧道选型分析结果,在地层适应性、开挖面水土压力平衡方面土压平衡盾构和泥水平衡盾构均具有一定的适应性;在施工场地影响、工期风险控制、施工经济性和出渣控制方面土压平衡盾构具有明显的优势;而在城区敏感建筑物变形控制方面泥水平衡盾构的优势更为突出。综合考虑本隧地层条件和周围环境条件,结合成都地区既有大直径盾构隧道

施工的成功经验,建议本隧道两盾构段均采用土压平衡盾构施工,并根据隧道特点采取针对性设计。

## 4 蜀安隧道盾构适应性分析

### 4.1 盾构适应性风险分析

盾构机与工程环境相适应是隧道高效施工的关键。考虑蜀安隧道的地质条件及周边环境影响,土压平衡盾构机配置需要适应隧道超大直径、长距离、大埋深、城区建(构)筑物密集、工期要求高等工程条件,盾构主要面临如下几个方面的适应性风险。

#### 4.1.1 长距离掘进设备失效风险

大直径盾构隧道的轴承损坏和密封失效风险高,刀具磨损损坏的概率大。蜀安隧道长距离穿越泥岩地层,近接敏感建筑物多,对刀具磨耗和土仓保压能力的要求高,刀盘在荷载作用下主轴承受损或主轴承密封破损的风险大。

#### 4.1.2 泥岩地层刀盘结泥饼风险

成都地区泥岩地层黏粒含量大,胶结成分较多,黏土矿物成分占比高,在刀具和刀盘的切削作用下,岩层变成粉末状颗粒后附着在刀盘上,并在水环境、压力和温度的作用下固结形成泥饼。泥饼的形成会增大推力和扭矩、降低掘进速度并加速刀具磨损,严重影响盾构掘进效率和安全。

#### 4.1.3 膨胀性泥岩地层“裹”机风险

成都地区泥岩具有一定的膨胀性,泥岩遇水膨胀后易“包裹”主机,施工中盾构姿态难以控制。

#### 4.1.4 近距离穿越建(构)物变形风险

蜀安隧道位于城市密集区,建(构)筑物环境敏感。大直径盾构掘进过程中对周边土体的应力扰动明显,过大的地层变形则会引起既有建(构)筑物的不均匀沉降变形,引发开裂等灾害。

#### 4.1.5 开挖面喷涌风险

蜀安隧道约800 m穿越粗圆砾土地层,且局部穿越复合地层,盾构开挖面可能发生突涌水喷涌。

#### 4.1.6 管片上浮风险

泥岩地层隧道成型较好,受同步浆液凝结时间影响,同步浆液无法及时填充地层和管片之间的间隙和凝固约束管片,管片上浮问题突出。

#### 4.1.7 瓦斯地层掘进安全风险

蜀安隧道为低瓦斯隧道,施工期存在瓦斯事故风险。

### 4.2 盾构适应性建议

#### 4.2.1 盾构长距离掘进设备失效

针对大直径盾构长距离掘进设备失效问题,可作

如下适应性设计:(1)保证主轴承及主驱动密封寿命满足施工工期要求,主驱动密封具备定期检修、保养转力,并预留主驱动密封洞内更换的条件;(2)主驱动内外密封采用多道密封提高承压能力,采用1道端面指型密封和5道唇口密封;(3)密封润滑控制采用压力+流量控制模式阻挡渣土;(4)刀盘刀具和密封系统配置磨损自动监测、检测 and 智能判识功能,刀盘及螺旋机加强耐磨设计,如图6所示。

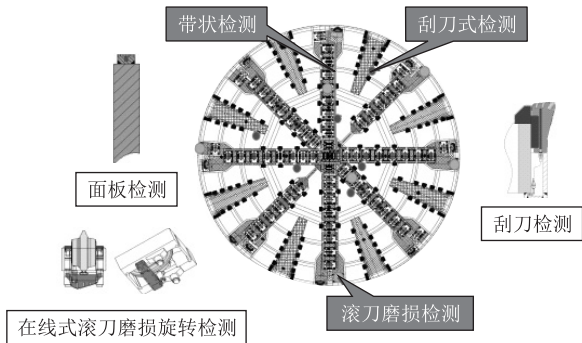


图6 刀盘、刀具磨损检测、监测示意图

4.2.2 泥岩地层刀盘结泥饼

针对刀盘结泥饼问题,可作如下适应性设计:(1)优化刀盘刀具布置,增大刀盘中心开口,合理布置滚刀、撕裂刀的间距,提高中心渣土流动性能;(2)减小中心圈梁厚度,在和渣土接触的倒角处采用圆弧形设计,便于渣土进入土仓;(3)土仓中心配备固定搅拌棒及高压水冲刷通道,盾体被动搅拌棒配合刀盘主动搅拌棒工作,整体提高土仓中心渣土流动性能;(4)配置多路单管单泵泡沫注入系统,刀盘布置多路渣土改良口,提升改良效果,避免渣土和刀盘粘结。盾构机刀盘主要参数如表2、图7所示。

表2 蜀安隧道盾构刀盘主要参数表

序号	项目	参 数
1	结构型式	8主梁+8副梁
2	开挖直径/mm	φ14 500
3	开口率/%	43(中心开口率45)
4	中心双联滚刀(19°)/把	4
5	单刃滚刀(19°)/把	78
6	边刮刀/把	16
7	刮刀/把	124
8	仿形刀/把	1(超挖量40 mm)
9	搅拌棒/个	10
10	泡沫口/个	20
11	膨润土口/个	8(与泡沫口共用)

4.2.3 膨胀性泥岩地层“裹”机

针对“裹”机问题,可作如下适应性设计:(1)主机采用前大后小的梭形设计,配置充足推力,增加主

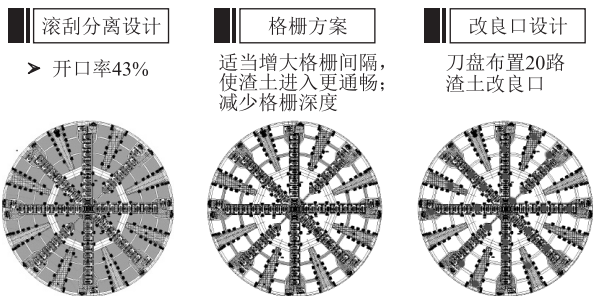


图7 刀盘改良设计图

机纠偏调向能力;(2)配置超挖刀,合理扩大开挖间隙;(3)进行渣土改良配比试验,提升土仓渣土改良效果。

4.2.4 近距离穿越建(构)物变形控制

针对地表变形控制问题,可作如下适应性设计:(1)增加主驱动扭矩能力储备,实现下穿构筑物时保压掘进;(2)同步注浆预留注入双液注浆的能力,盾体顶部预留给注浆孔,提高设备同步连续注浆泵功效;(3)盾体上安装盾尾间隙自动测量等信息化设备,适时进行补注浆;(4)前、中、尾盾各布置一定数量的注入孔,满足盾体外同步注入克泥效浆液、浓泥浆等材料的功能需求,填充盾体与土体之间的间隙;(5)配置二次注浆系统,满足管片拼装成型后的二次注浆需要。盾体顶部浓泥浆注入口如图8所示。

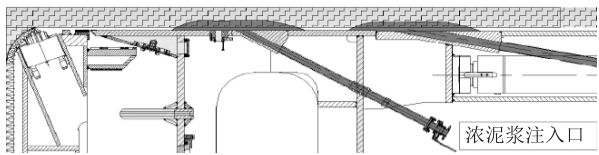


图8 盾体顶部浓泥浆注入口示意图

4.2.5 局部高水压下盾构开挖面防喷涌

针对防喷涌问题,可作如下适应性设计:(1)螺旋机采用双闸门形式,闸门开度可控,双闸门可交替开启,降低喷渣压力;(2)螺旋机筒体外壁设计渣土改良剂和聚合物注入接口,设备配置有泡沫、膨润土系统,通过注入改良剂缓解螺旋机的喷渣压力;(3)螺旋机尾部预留保压泵接口,一定情况下可在螺旋机出口接管路进行排渣;(4)大里程端盾构出口段约800 m主要穿越粗圆砾土,盾构段可设计为双螺机出渣形式;(5)盾构通过前开展地表降水和注浆加固。螺旋机防喷涌针对性设计如图9所示。

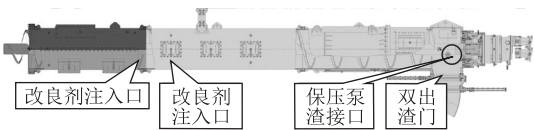


图9 螺旋机防喷涌针对性设计图



#### 4.2.6 管片上浮控制

针对管片上浮问题,可作如下适应性设计:(1)注浆方面通过拱部同步注双液浆、二次补强注浆系统降低浆液对管片的浮力;(2)盾构管片环间设置凹凸榫,并采用螺栓加强连接,提高隧道纵向整体稳定性;(3)施工期间根据需要采取抗浮措施,如采用盾构车架配重;(4)配置管片上浮监测系统,实现对管片上浮量的监测和预警功能。盾尾同步注浆系统设计如图10所示。

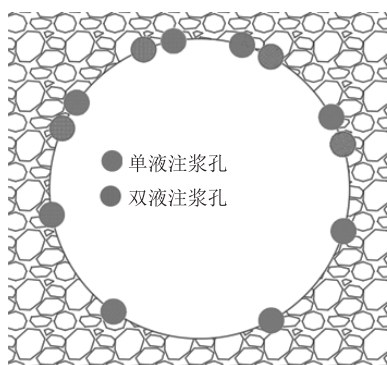


图10 盾尾同步注浆系统设计图

#### 4.2.7 瓦斯地层掘进安全保障

针对瓦斯地层掘进安全保障问题,可作如下适应性设计:(1)盾构段采用压入式主通风+局部风机的加强通风方案,配置二次风机克服设备段风阻,二次风机入口与一次通风进风封闭连接,主机及拖车顶部等瓦斯易聚集区域配置多个局部风机保证瓦斯局部积聚区的风速不低于 $1\text{ m/s}$ ;(2)机电设备采用防爆型,如主配电柜、变频柜、刀盘驱动电机、管片拼装机控制盒、插座等均采用防爆型,高压电缆与变压器之间安装防爆开关,电缆、电气设备、皮带输送机防火防静电;(3)进行风速监测实现“风电闭锁”,布置多处风速传感器实时检测风速,当系统检测到风速小于设定值( $0.5\text{ m/s}$ )时,系统发出声光报警;当检测到无风(通风中断)时,盾构自动停机,15 min后无法恢复通风,本地高压柜跳闸,切断高压供电;(4)进行瓦斯浓度监测实现“瓦电闭锁”,布置多处有害气体检测装实时检测瓦斯浓度,当甲烷浓度达到 $0.3\%$ 时,进行声光报警,同时盾构机自动停机,螺旋输送机闸门自动关闭;当甲烷浓度高于 $0.5\%$ 时,本地高压柜跳闸,切断高压供电。

## 5 结论

本文依托在建的成渝中线铁路蜀安隧道工程,并结合成都近年建成的两座大直径盾构隧道——成蒲

铁路紫瑞隧道和成自高速铁路锦绣隧道,对成都平原地区大直径盾构隧道选型进行了探讨,并在适应性问题分析的基础上提出了盾构机配置的针对性建议。得到主要结论如下:

(1)土压平衡和泥水平衡均可适用于成都平原地区大直径盾构隧道修建;当穿越地层以泥岩为主时建议优先选择土压平衡盾构;对于局部存在高压或强透水地层地段,可辅以地表降水+注浆加固后采用土舱上部注浓泥浆保压掘进土压平衡模式;当泥岩和砂卵石地层长度相当时,建议优先选择泥水平衡盾构或土压-泥水双模盾构;当穿越地层以砂卵石为主时建议优先选择泥水平衡盾构。

(2)基于工程地质条件适宜,场地占用小、地层变形可控、环境污染小、施工进度快、建设成本低等特点,蜀安隧道优选采用土压平衡盾构。

(3)城区大直径盾构隧道沿线建(构)筑物密集,对地层变形控制要求高,建议盾构机预留同步注双液浆和盾体外注克泥效等惰性浆液功能。

## 参考文献:

- [1] 代洪波,季玉国. 我国大直径盾构隧道数据统计及综合技术现状与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(5): 757-783.  
DAI Hongbo, JI Yugu. Statistical Analysis of Chinese Large-diameter Shield Tunnel and State-of-art and Prospective of Comprehensive Technologies [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(5): 757-783.
- [2] 钱七虎,陈健. 大直径盾构掘进风险分析及对特大直径盾构挑战的思考[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 157-164.  
QIAN Qihu, CHEN Jian. Analysis of Tunneling Risks of Large-diameter Shield and Thoughts on Its Challenges [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 157-164.
- [3] 黄新森,张军伟,李雪,等. 城市地铁盾构选型及关键参数区域化研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(7): 1209-1216.  
HUANG Xinmiao, ZHANG Junwei, LI Xue, et al. Shield Type Selection for Urban Metro and Regionalization Study of Key Parameters [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(7): 1209-1216.
- [4] 竺维彬,钟长平,米晋生,等. 超大直径复合式盾构施工技术挑战和展望[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(3): 6-16, 42.  
ZHU Weibin, ZHONG Changping, MI Jinsheng, et al. Challenges and Prospects of Construction Technology for Extra-large Diameter Composite Shields [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(3): 6-16, 42.
- [5] 李义华,翟志国,花楠. 基于低碳理念的城市细颗粒地层泥水盾构选型及应用:以京沈高铁望京隧道为例[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S1): 22-31.  
LI Yihua, ZHAI Zhiguo, HUA Nan. Selection and Application of Slurry Shield in Urban Fine-grained Strata Based on Low-carbon Concept: Taking Wangjing Tunnel of Beijing-Shenyang High-speed Railway as an Example [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022,



- 59(S1): 22–31.
- [6] 孔少波. 海底复杂地层超大直径盾构刀盘设计与优化[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(6): 1030–1037.  
KONG Shaobo. Design and Optimization for Cutterhead of an Extra-large Diameter Slurry Shield Boring in Submarine Complex Strata [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(6): 1030–1037.
- [7] 刘继国,郭小红. 超大直径海底隧道盾构选型研究[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(1): 51–56.  
LIU Jiguo, GUO Xiaohong. Study on the Selection of Super-large-diameter Shield for an Undersea Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2009, 46(1): 51–56.
- [8] 蒋超. 佛莞城际铁路狮子洋隧道盾构选型研究[J]. 施工技术, 2016, 45(23): 67–71.  
JIANG Chao. Shield Selection of Foshan-Dongguan Intercity Railway Shiziyang Tunnel [J]. Construction Technology, 2016, 45(23): 67–71.
- [9] 田四明,赵勇,王丽庆,等. 大直径铁路盾构隧道设计及选型技术研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(2): 1–9.  
TIAN Siming, ZHAO Yong, WANG Liqing, et al. Study on Design and Selection Techniques for Large-diameter Shield Railway Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(2): 1–9.
- [10] 程国良,李彦锦,杨俊,等. 复合地层越江大直径地铁隧道盾构地层适应性风险及选型分析[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(1): 48–54.  
CHENG Guoliang, LI Yanjin, YANG Jun, et al. Analysis of Stratigraphic Adaptability Risk and Large Diameter Shield Type Selection for River-crossing Subway Tunnel with Composite Stratum [J]. Construction Technology, 2023, 52(1): 48–54.
- [11] 赵怡婧. 成渝中线高速铁路功能定位及运输需求研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(3): 87–91.  
ZHAO Yijing. Study on Functional Orientation and Transport Demand of the Second Chengdu-Chongqing High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3): 87–91.
- [12] 康景文,田强,颜光辉,等. 成都地区泥质软岩地基主要工程特性及利用研究[J]. 工程勘察, 2015, 43(7): 1–10, 22.  
KANG Jingwen, TIAN Qiang, YAN Guanghui, et al. Study on Engineering Characteristics and Utilization of Soft Rock Ground in Chengdu Area [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(7): 1–10, 22.
- [13] 俞丰平. 成都地区泥岩盾构掘进常见问题及处置方法[J]. 安徽建筑, 2018, 24(4): 144–145.  
YU Fengping. Common Problems and Solutions of Mudstone Shield Tunneling in Chengdu Area [J]. Anhui Architecture, 2018, 24(4): 144–145.
- [14] 曹智,李剑祥. 成都地铁盾构选型设计及实用性比较[J]. 隧道建设, 2014, 34(10): 1005–1010.  
CAO Zhi, LI Jianxiang. Case Study on Type Selection of Shields for Chengdu Metro [J]. Tunnel Construction, 2014, 34(10): 1005–1010.
- [15] 戴仕敏. 超大直径土压平衡盾构隧道施工关键技术[J]. 施工技术, 2011, 40(18): 1–5, 17.  
DAI Shimin. Key Construction Technologies of Super Large-diameter Earth-pressure-balance Shields [J]. Construction Technology, 2011, 40(18): 1–5, 17.
- [16] 蔡仲银,董崇民,汪雪英,等. 南水北调中线工程潮河段隧洞盾构选型设计研究[J]. 隧道建设, 2010, 30(1): 91–96.  
CAI Zhongyin, DONG Chongmin, WANG Xueying, et al. Case Study on Shield Type Selection of Chaohe Tunnel on Central Route of South-to-north Water Transfer Project [J]. Tunnel Construction, 2010, 30(1): 91–96.
- [17] 杨书江. 成都地铁泥水平衡及土压平衡盾构法施工对比[J]. 建筑机械化, 2011, 32(6): 24–27.  
YANG Shujiang. Chengdu Metro: Comparing SPB Shield with EPB Shield [J]. Construction Mechanization, 2011, 32(6): 24–27.