

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.01.018

长距离盾构隧道掘进的主要问题及发展趋势

朱伟^{1,2}, 钱勇进^{3,4}, 王璐^{3,4}, 方忠强^{1,5}, 陆凯君^{3,4}, 魏斌^{3,4}, 孟立夫^{3,4}

- (1. 华设设计集团股份有限公司, 江苏南京 210014; 2. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098;
3. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098;
4. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098;
5. 水下隧道智能设计、建造与养护技术与装备交通运输行业研发中心, 江苏南京 210014)

摘要: 对盾构隧道工程区间施工距离变化的现状进行梳理, 基于4个典型的长距离盾构隧道工程实例, 对盾构隧道长距离掘进中出现的刀盘刀具磨损、盾尾密封系统失效、管路磨损、复杂地层盾构开舱、地下对接等问题以及其主要技术原理、技术流程、适用范围及优缺点进行归纳总结, 并对我国智能化快速施工技术发展进行了展望。

关键词: 隧道工程; 长距离掘进; 刀具更换; 盾尾密封修复; 地层加固; 开挖面稳定; 盾构机对接

中图分类号: U455 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)01-0138-12

Main problems and development trends of long-distance shield tunneling

ZHU Wei^{1,2}, QIAN Yongjin^{3,4}, WANG Lu^{3,4}, FANG Zhongqiang^{1,5}, LU Kaijun^{3,4}, WEI Bin^{3,4}, MENG Lifu^{3,4}

(1. China Design Group Co. Ltd., Nanjing 210014, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

5. Research and Development Center of Transport Industry of Technologies and Equipments for Intelligent Design, Construction and Maintenance of Underwater Tunnel, Nanjing 210014, China)

Abstract: This paper sorted out the current situation of the variation of shield tunnel distance and introduced four typical long-distance shield-tunneling engineering examples. Combined with the typical engineering, five problems in the long-distance excavation, such as the cutter wear, shield tail sealing failure, pipeline wear, opening chamber in complex stratum and underground junction of shield, were systematically analyzed. The principle, technical process, application scope, advantages and disadvantages of main technologies in the long-distance excavation were summarized. The development of intelligent and rapid construction technology has also been prospected. It can provide some references for the formation of a systematic and standardized long-distance shield construction technology in the future.

Key words: tunnel engineering; long-distance tunneling; cutter replacement; shield tail sealing repair; stratum reinforcement; excavation face stability; junction of shield machine

随着我国城市轨道交通、大型过江过河隧道工程的大规模兴建, 盾构隧道技术的应用越来越广泛。已建成的上海、南京、武汉等穿越长江隧道, 济南及兰州等穿黄隧道等工程都采用盾构隧道技术进行施工^[1-2], 拟建、正在建设中的多个城市地铁隧道工程及穿江河隧道工程中也计划采用盾构隧道技术^[3], 盾构隧道技术已成为我国重大地下工程领域不可或缺的关键技术。

鉴于我国战略性发展的需求, 琼州湾、渤海湾等海峡隧道工程也纳入了研究范围, 隧道建设的断面越来越大, 埋深越来越深, 尤其是隧道区间距离越来越长^[4]。由于我国幅员辽阔, 不同地区地质条件差异较大, 长距离隧道开挖过程中遇到的复杂地层情况越来越多, 隧道区间会遇到上土下岩地层、超软弱土地层和砂卵石地层等复杂的地质状况, 盾构刀盘刀具磨损问题更加突出^[5-6], 此外盾尾密封、泥浆管路磨损、开舱检修等

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC1908702); 2020年江苏省省级战略性新兴产业发展专项资金(苏发改高技[2020]645)

作者简介: 朱伟(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事盾构隧道、环境岩土工程研究。E-mail: zhuweiteam.hhu@gmail.com

通信作者: 钱勇进(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事盾构隧道开挖面稳定性研究。E-mail: kevinqyj@163.com

引用本文: 朱伟, 钱勇进, 王璐, 等. 长距离盾构隧道掘进的主要问题及发展趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 138-149.

HU Wei, QIAN Yongjin, WANG Lu, et al. Main problems and development trends of long-distance shield tunneling[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(1): 138-149.

问题也常发生在长距离掘进过程中。

本文对目前我国盾构隧道长距离施工情况进行了归纳及总结,并结合几个长距离盾构隧道工程实例,分析其施工过程中出现的问题,为未来盾构隧道长距离施工技术的发展提供一定的借鉴。

1 隧道区间距离的发展与变化

随着我国盾构隧道技术的不断发展,盾构机单次掘进的距离也在不断增加。我国主要盾构隧道工程的区间距离见图 1,由图 1 可以看出我国典型盾构隧道掘进距离的发展趋势。在 2000 年左右,盾构隧道的区间距离一般在 1.5~2.0 km,但到 2020 年左右,区间距离达 4.0~5.0 km,最长的已超过 7.0 km。在 20 年盾构隧道掘进技术发展过程中,区间距离的增加非常突出。除了已经建成的长距离隧道外,目前我国在建的长距离隧道(3 km 以上)有:上海北横通道、北京东六环隧道、深圳春风隧道、江阴靖江长江隧道等。随着我国正在规划的一些重大穿江越海隧道工程以及大型综合管廊项目的不断推进,盾构隧道技术的应用正在发挥着不可替代的作用,而盾构隧道较长区间距离的需求^[7]也成为盾构隧道技术发展的方向之一。

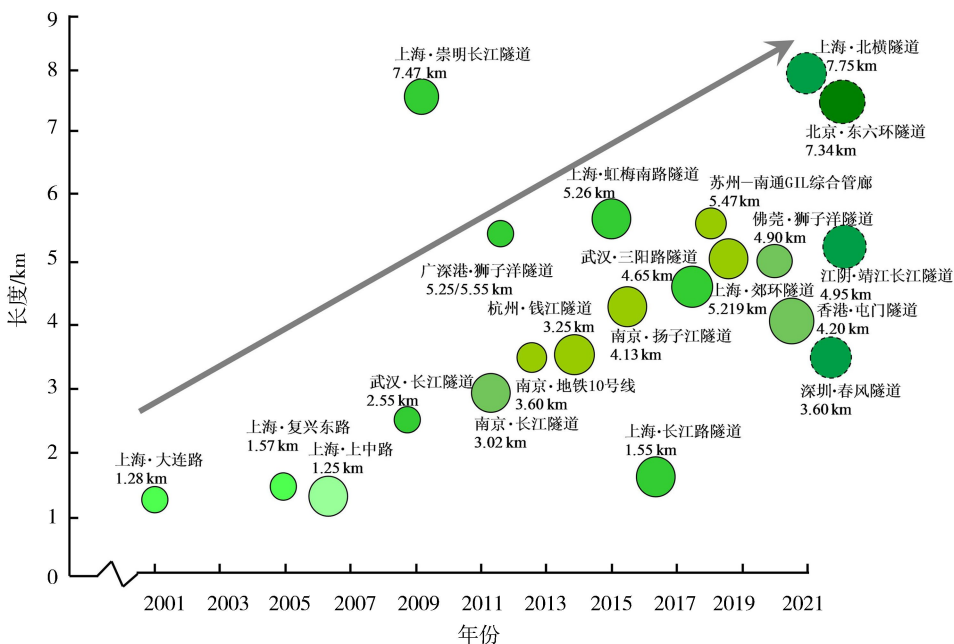


图 1 我国盾构隧道区间掘进距离发展简图

Fig. 1 Development diagram of internal excavation distance of shield tunnel in China

盾构隧道的施工需要设置用于盾构机拼装和拆卸的始发井及接收井,每个工作井的间距决定了该盾构机的单次连续掘进长度。日本盾构隧道标准规范认为,盾构机推进中较为合适的区间距离在 1.5 km 左右,超过这个范围应作为长距离掘进施工进行考虑^[8],而我国盾构隧道相关的规范中并没有对长距离施工进行具体的定义。随着盾构隧道技术的不断发展,隧道区间距离不断加长,对盾构隧道长距离施工的认识也在逐渐发生变化。

从近 20 年盾构隧道施工的实际情况来看,盾构机单次掘进距离不断增加的主要原因为:①穿越江河湖的隧道数量越来越多。由于在水域中设置工作井的成本、工期、对水域航运的干扰以及技术难度等因素的制约,大多数工程考虑了单区间穿越。如已建成的狮子洋隧道,区间掘进距离达 9.3 km;上海长江隧道、上海北横通道等工程,单次掘进距离超过 7 km,区间距离远远超过之前长距离隧道(大于 2.0 km)的认知。而正在规划的琼州海峡通道,其隧道过海段距离超 22 km^[9],超长的区间施工难以避免。②避免对城市环境的干扰。基于城区建筑密度的提高以及对城市内环境保护等原因,城市繁华区的隧道难以在市区中间设置工作井,使得盾构隧道的区间掘进距离越来越长。如莞惠城际线某标段下穿大量密集老龄浅基房屋群,盾构隧道区间长度达 2.9 km^[10];武汉地铁 8 号线某标段下穿长江及高密度棚户区,棚户区总长达 754 m,区间长度达 3.2 km^[11]。未来随着城市群不断发展,更多交通线路需求的不断增加,部分城际铁路盾构隧道施工区间必将向更长距离的方向发展,因此,城市隧道区间距离的加长成为不可避免的发展趋势。

虽然一些特殊情况下盾构隧道的区间距离不断加长,但我国地铁建设中盾构隧道区间距离稳定在 2.0 km 左右。截至 2020 年 12 月 31 日,我国有 38 个城市开通地铁,总里程为 6 483 km^[12]。以我国地铁运营线路较多的 6 个典型城市为例,对其主要运营线路中隧道区间平均距离及区间最大距离进行简单统计及分析(图 2),可以看出,除广州外,各城市地铁隧道区间平均距离为 1.5~2.0 km,广州地铁隧道区间平均距离达 2.5 km。这可能与施工技术关系不大,应主要是地铁站点规划布局的需要。

我国已经建设了大量的盾构隧道,基于积累的经验及成果^[13]进行分析,认为盾构的单个施工距离应与 3 个方面的因素有着直接的关系。

a. 机械损耗:主要是刀头、刀盘及主轴承的磨损,另外盾壳的磨损、主轴承的耐久性等也属于机械损耗。在大多数盾构隧道长距离施工中都遇到了刀头磨损造成掘进停滞的问题,因此在机械损耗中刀头磨损是长距离施工最先遇到的问题。当盾构隧道处于黏性土等软土地层时,刀头及各方面的磨损较小,一般可以完成长距离的掘进。当盾构隧道处于硬岩地层时,采用适应性较好的滚刀,刀头一般也能完成较长距离的施工。但是遇到上土下岩、卵石等软硬复合的地层时,适用于软土的齿刀等切削卵石和岩石时磨损严重,而适用于岩石的滚刀在软土等地层中偏磨较严重,长距离施工会遇到一些困难。

b. 防渗等辅助系统:主要是盾尾密封的耐久性问题,盾尾刷的磨损和严重变形无法保证盾尾良好的防渗作用也是盾构隧道长距离施工容易遇到的问题。

c. 施工效率:长距离越江的盾构隧道大多采用泥水盾构,造成泥浆的输送距离较长,管道的磨损比较严重,输送的效率也会降低。除此以外,在盾构隧道长距离施工中还需要考虑通风、防灾等方面的因素。

2 盾构隧道长距离施工的典型实例

2.1 东京湾海底公路隧道

东京湾海底公路隧道是早期使用人工岛和海底对接技术解决长距离施工的盾构隧道实例。隧道由两条长 9.6 km、外径 13.6 m 的盾构隧道组成,工程自 1989 年 5 月开工,于 1997 年 11 月贯通并开始使用。隧道采用双层衬砌结构,每环管片由 11 个分块用螺栓联结而成,管片厚 65 cm,宽 150 cm,二次衬砌为厚 35 cm 的钢筋混凝土结构。隧道主要在软弱黏土地层中掘进施工,海水平均深度为 27.5 m,最大水压为 0.6 MPa。

设计隧道长度为 10 km,全部处于海底黏土地层之中。为了缩短距离,在中间建设了人工岛,将隧道分割为 5.0 km 左右的两个区间,这一区间距离也超过了当时盾构隧道的掘进能力,因此采用在一个区间隧道两侧用盾构机相向掘进,在海底对接的方法。川崎人工岛采用 2.8 m 厚的地下连续墙围筑了一个直径 200 m、深 70 m 的圆形筒仓结构,利用直径为 14.14 m 的泥水加压盾构机进行施工。4 台盾构机由川崎人工岛始发井始发,两台向东在海底与木更津人工岛始发井推来的 2 台盾构机在海底对接,2 台向西与川崎始发井推来的 2 台盾构机在海底对接,长距离施工方法如图 3 所示^[14]。

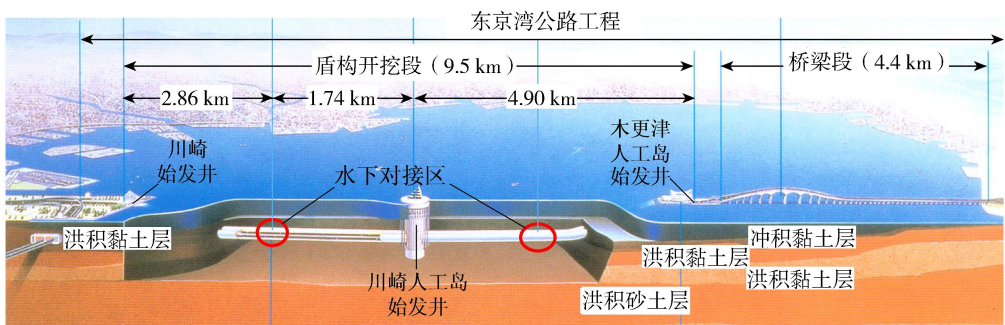


图 3 东京湾海底公路隧道示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the Tokyo Bay Subsea Highway Tunnel

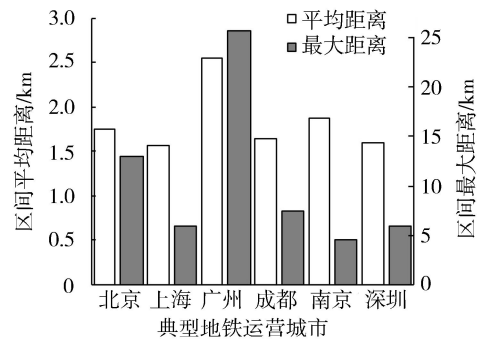


图 2 典型城市地铁隧道区间长度变化

Fig. 2 Section length variation of typical urban subway tunnels

为保证 4 个位置水下对接顺利,对接前对地层利用冻结法加固。先行盾构机到达预定的对接位置后停止推进,拆除泥水舱内隔板后的部分设备(第一次解体);后行盾构机分别在距离先行盾构机 50 m 及 30 m 处停止推进,测定两台盾构机的相对位置,根据探测结果修正掘进路线,在后行盾构机缓慢掘进至距离先行盾构机 30 cm 间隙时,盾构中心错位偏差为 2 mm。

2.2 广深港高速铁路狮子洋隧道

狮子洋隧道为高速铁路跨海双洞单线隧道,全长 10.8 km,隧道线型要求高,隧道盾构段全长 9.3 km,为我国第一条采用盾构隧道技术施工的铁路水下隧道。该工程自 2007 年 11 月开始,2011 年 9 月完工。盾构隧道大部分穿越砂岩、砂砾岩及泥质粉砂岩地层,岩体最大单轴抗压强度达 82.8 MPa,部分穿越软硬不均的岩土复合地层及软土地层,如图 4 所示。隧道管片外径为 10.8 m,厚度为 500 mm,管片宽 2.0 m,每环管片采用 8 个楔型分块错缝拼装。隧道最小覆土 7.8 m,设计水压达 0.67 MPa,岩体渗透系数为 $6.4 \times 10^{-4} \text{ m/s}$,岩体石英含量高。

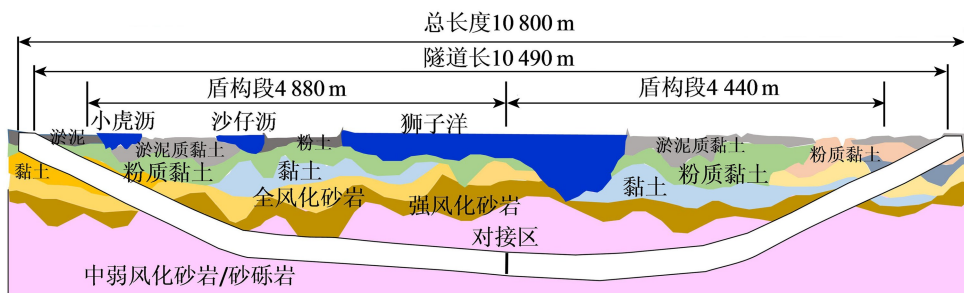


图 4 狮子洋隧道地质剖面

Fig. 4 Geological profile of the Shiziyang Tunnel

由于穿越地层非常复杂,单台盾构机难以在预计工期内完成单线区间施工。为了缩短盾构机单次掘进距离及施工工期,将 9.3 km 盾构段分为两段,采用 4 台盾构机从隧道两侧同时掘进约 4.5 km 的区间距离、最后在水下对接的方法。该工程为国内首次水下盾构对接施工,在对接过程中主要遇到了对接精度控制、开挖面稳定等问题^[15]。在砂岩地层对接前先对周围地层注浆加固辅助对接,施工过程中在两台盾构机相距 20 ~ 30 m 时,1 台盾构机停止掘进并拆除部分盾构部件,第 2 台盾构机向前缓慢掘进至对接地点,观察隧道内压力稳定和地下水的渗流情况,最终在常压下进行最后的拆机工作。狮子洋隧道对接后水平精度偏差为 28.5 mm,高程偏差为 19.6 mm,满足安全、精准的对接要求^[16]。

2.3 日本伊势湾输气隧道

日本伊势湾输气隧道是由川越火力发电厂和东邦煤气株式会社共同建设的输送天然气的小直径隧道,其中 I 工区盾构隧道穿越伊势湾海底,主要穿越洪积砂土及洪积黏土地层,隧道管片外直径 3.34 m,厚度 170 mm,于 2013 年完工。盾构段全长 13.3 km,为单管隧道,使用两台泥水加压盾构机分别从川越侧及知多侧同时沿规划线路向伊势湾海底掘进,在海底 0.4 MPa 的高水压下进行对接,川越侧隧道区间距离达 6.517 km,知多侧达 6.797 km,是日本区间距离最长的盾构隧道,平面布置如图 5 所示。该工程盾构机于 2009 年 6 月始发,2010 年 6 月完成贯通,高效完成 13.3 km 的掘进。通过海底对接完成全长 13.3 km 的盾构机隧道掘进,除区间距离以外,对接精度控制、对接处土体稳定是工程的关键。

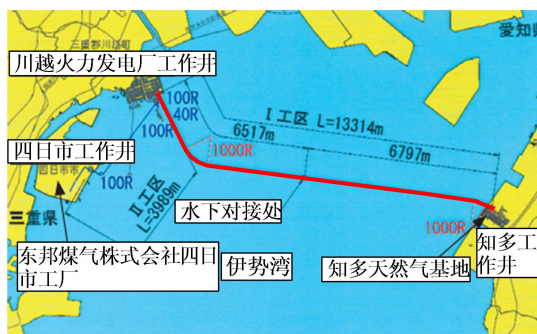


图 5 伊势湾输气隧道线路示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the Ise Bay gas pipeline tunnel

与东京湾海底公路隧道工程的对接相同,日本伊势湾输气隧道工程采用冻结法辅助加固地层,当第 2 台盾构机掘进至第 1 台盾构机内部,在对接点将周边地层土体冷冻,拆除盾构机内部构件后浇筑管片。最终对接相对水平误差为 9 mm,垂直误差为 1 mm^[17]。

2.4 上海长江隧道

上海长江隧道为上海崇明越江通道隧桥工程的一部分,南端接浦东新区,下穿长江后北端接长兴岛,按双向 6 车道公路标准设计,为双管盾构隧道,盾构段全长 7.47 km,于 2009 年贯通。主要穿越淤泥质黏土、黏

土、粉质黏土及粉土地层(图6),管片外径15 m,宽2 m,厚650 mm,由10个楔形分块组成。隧道采用两台15.43 m直径的泥水加压盾构机单次同向掘进。隧道区间距离为7.47 km。由于是大断面盾构隧道,掘进过程中遇到了刀具的磨损和盾尾刷密封系统失效的问题。一方面软土中刀头磨损相对缓慢,另一方面该工程主要通过刀盘上预先布置的64把可更换刮刀、7把可更换中心刀进行常压换刀,解决了刀具磨损的问题。对于长距离施工后盾尾刷密封失效的问题,通过在盾尾设置冷冻管路以及在盾尾刷前设置一道密封气囊,成功完成了盾尾刷的更换,确保了盾尾刷密封系统在长距离施工中的效果^[18]。该工程盾构机于2006年9月始发,2008年9月双线隧道贯通。

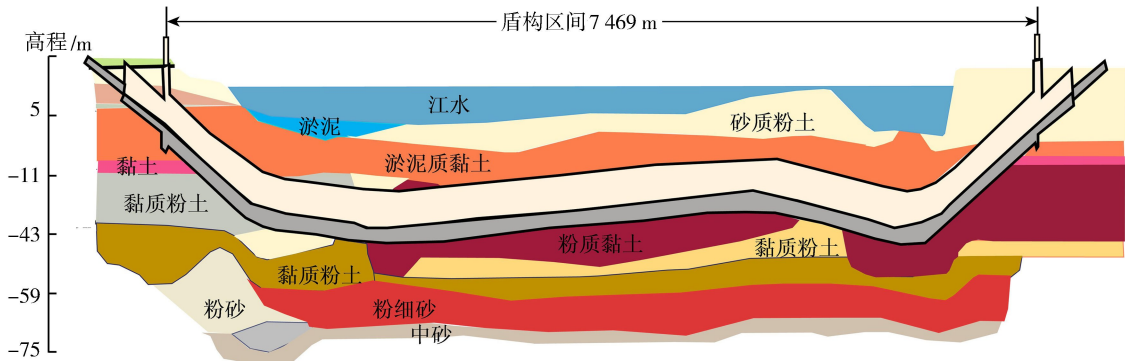


图6 上海长江隧道剖面示意图

Fig. 6 Geological profile of the Shanghai Yangtze River Tunnel

3 长距离盾构隧道掘进的常见问题

3.1 刀盘刀具磨损及主轴承损坏

当盾构机在各种复杂的地层中掘进时,经常会遇到刀具磨损严重的情况,尤其是长距离穿越江河及海底隧道时,几乎都会遇到上软下硬地层甚至砂卵石地层,刀盘刀具的非正常磨损、脱落等现象频繁发生^[19],刀具的磨损是影响盾构机掘进速度、刀盘旋转切削效率的重要因素。在长距离穿越上软下硬地层或砂卵石地层时,盾构机掘进过程中主轴承不断运转,轴承主要部件由于摩擦、振动等原因不可避免地产生接触疲劳进而造成轴承的损坏,尤其是盾构长距离掘进时,需重点考虑由于接触疲劳造成的主轴承损坏。另外盾构机长距离掘进时主轴承的密封性非常重要,密封系统失效时泥砂或浆液进入轴承会直接造成主轴承的损毁,致使盾构机无法继续掘进^[20]。

南京纬三路隧道建设过程中,盾构机刀盘共装配切削刀628把,滚刀89把。在上土下岩地层掘进至596环时,掘进参数显示异常,检查发现刀具严重磨损,随后进舱检修,更换滚刀51把(占总滚刀数的57%)、切削刀58把(占总切削刀数的9%)。在后续101环掘进过程中,又进行了5次大规模的刀具检修及更换,共计更换104把滚刀,而后续第6次开舱检修共完成68把滚刀及34把切削刀的更换,整个掘进过程中共更换滚刀223把(223%)、切削刀91把(15%)。

南水北调中线穿黄隧道工程盾构机在穿越高石英含量的砂地层时,全部16把边缘铲刀均严重损坏(占总铲刀数的100%);3把滚刀严重损坏(占总滚刀数的38%),其余滚刀仅刀圈磨损;全部的24把先行刀合金块均损坏,刀盘外边缘均受到一定程度的磨损^[1]。

济南黄河隧道工程泥水加压盾构机穿越黏土及粉质黏土地层时,由于主轴承密封系统失效,不得不停机进行原位密封系统的修复。广深港隧道泥水加压盾构机由于主轴承密封系统中油脂注入不充分,在高水压下,泥浆窜入盾构机轴承密封系统,致使主轴承损坏^[7]。

3.2 盾尾密封系统失效

盾构机盾尾密封系统主要由两部分组成:①多道钢丝刷与钢板组成的密封刷;②填充于密封刷之间的密封油脂,如图7所示。部分盾构机在设计过程中会进一步增加密封措施,如增加1~2道密封刷以增加密封作用;

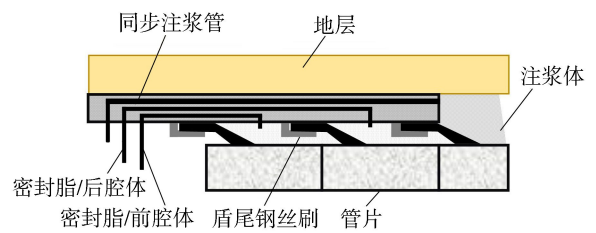


图7 盾尾密封系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of shield tail sealing system

为阻止壁后注浆沿间隙流入密封刷,一些盾构机还会在外层密封刷外增设止浆板^[21]。

常见的盾尾密封系统失效主要有3种情况:①由于盾构机操作原因造成钢丝刷产生异常塑性变形,钢板局部变形折断;②密封油脂密封性差,压力不高,油脂填充不足,盾尾泥浆、壁后注浆、砂土等进入密封刷之间的间隙;③密封刷长时间与管片摩擦超过服役寿命,或因密封刷中进入硬质异物,致使密封系统加速损坏^[22]。

在进行长距离掘进过程中,由于盾构机曲线开挖、姿态调整、盾尾密封系统油脂填充不足或品质不好等问题,盾尾密封刷遭受到不同程度的磨损破坏,致使盾尾密封系统失效,引发盾尾渗漏甚至发生盾尾涌砂、涌水等情况。越来越多的盾构隧道因盾尾密封系统的突然失效而影响盾构机的正常掘进。

杭州庆春路过江隧道西线工程在第124环掘进过程中,由于盾尾密封系统油脂填充不足,在强透水粉砂地层纠偏掘进过程中,盾尾刷受到挤压损坏,盾尾发生大量的漏浆及涌水情况,渗漏情况持续约5 h后使用同步注浆浆液掺加油田堵漏剂才完全封堵^[23]。南京纬三路过江通道S线工程在第780环掘进过程中,由于盾尾密封刷严重破损而发生了严重渗漏、涌砂冒水等状况,采用海绵条及注入盾尾油脂等措施才完全封堵^[24]。在佛山轨道交通2号线“2·7”隧道坍塌重大事故发生前,由于盾构机穿越粉砂、中砂及圆砾复合地层,盾尾密封刷磨损较大,已多次发生盾尾漏浆及涌水情况^[25]。

3.3 管路磨损及淤塞

长距离泥水加压盾构隧道施工中泥浆输送管道的磨损要大于一般的隧道。泥浆循环输送系统起到稳定地层开挖面及持续排出开挖渣土的重要作用,主要由送泥管及送泥泵、排泥管及排泥泵、送排泥延伸管线及相关辅助设备组成。盾构隧道长距离施工过程中,随着盾构机掘进距离的增加,排泥管延长一定距离时需增加中继的排泥泵以增大管路中的压力,提高排泥管的输送效率。排泥管泥浆中携带大量地层开挖的卵石、砂砾石及破碎岩石等颗粒,在泥浆输送过程中可能会在管路中形成淤堵并对管壁造成磨损,严重时会造成管路被击穿,泥浆喷漏、爆管、泥浆泵损坏等情况^[26]。

北京站—北京西站地下铁路直线工程穿越卵石层、圆砾层,排泥过程中卵石严重磨损排泥管路,造成管路频繁更换^[27]。狮子洋隧道在盾构机掘进4 000 m后,半年间由于泥浆循环系统出现问题频繁停机,检修泥浆输送管路等所用时间占盾构机总停机时间的30%以上,大大影响了隧道施工效率。南京地铁10号线过江隧道近50%的区段穿越卵石及砾石地层,排泥管由于大量卵砾石的冲击磨损非常严重^[26]。兰州地铁穿黄隧道工程穿越砂卵石地层,地层开挖产生了大量的卵石及漂石,积聚在泥水舱底部对泥浆循环系统造成了严重的淤堵,且排泥管不断受到大颗粒卵石的撞击与摩擦作用,管壁频繁被磨穿,影响了盾构机的正常掘进^[19]。

3.4 复杂地层盾构开舱检修问题

盾构机开舱检修主要包含分析盾构机停机故障的原因、开挖面是否足够稳定、舱内设备器械是否需要维修、舱内检修技术及施工人员的安全保障等,开舱过程中主要技术问题为保证地层中开挖面的稳定性以及进舱作业人员的安全、高压下焊接作业的顺利等。基于开舱检修过程中舱内的压力状态,开舱方式分为常压开舱和带压开舱。①常压开舱是通过刀盘前方的开挖面土体进行加固后,将舱内压力降为大气压(常压),操作人员从地面向刀盘前方开挖竖井,并在竖井内作业,而保证地层土体的加固效果并保持地层开挖面的稳定是常压开舱检修的关键,目前主要采用降水和常规的土体加固措施,其工艺和技术操作简单,但难以保证复杂地层的加固效果。②当隧道上方有重要建筑物或在湖泊等富水区域难以常压开舱时,多采取带压开舱的方法进行盾构开舱检修作业,而提高地层开挖面的气密性、满足气压支护开挖面的要求是其关键。泥膜支护带压开舱技术目前应用较多,在砂砾石及卵石等高透水性地层,如何形成泥膜,以确保压气条件下泥膜的闭气性是带压开舱的重要问题。

南水北调中线穿黄隧道工程进行了常压开舱作业。隧道开挖过程中盾构机因故障停于黄河滩地,水位为地下4 m,隧道拱顶覆土为29 m。使用水泥搅拌桩加固地层,再采用局部井点降水的方法实现常压下技术人员进舱检修,并完成对刀盘刀具的维修^[1]。南京长江(纬七路)隧道工程建设过程中,由于刀盘刀具磨损严重,无法继续掘进而于江面下方约50 m处停机,隧道覆土约22.5 m,地层开挖面上部为粉砂地层,下部为砾砂地层。采用泥膜支护带压开舱技术进行开舱检修,这是我国较早使用该技术的典型工程^[28]。开舱前先使用低密度膨润土泥浆向地层中渗透,然后再使用高密度改性泥浆在开挖面继续渗透,形成良好闭气性的泥膜,工作人员可以在拱顶的高压气体中进舱检修。

3.5 相向掘进地下对接问题

在长距离盾构隧道建设过程中,尤其是穿江越海隧道,受地形限制及工期的影响,单台盾构机无法完成单线隧道的掘进,要采用两台盾构机相向掘进,利用地下对接技术进行区间隧道的施工。盾构机在地下对接的过程中,遇到的主要问题有:①盾构机掘进过程中对接精度的控制;②对接处附近岩土体的稳定性^[29]。由于公路、铁路等隧道工程对横向贯通误差及高程贯通误差有严格的限制,对平面及高程测量精度的要求非常高,寻找完善的测量控制方法是盾构机对接精度控制的关键。若对接点地层性质较稳定,如硬岩地层,可不考虑地层加固措施直接进行对接施工;若掘进过程中地层开挖面稳定性不能满足施工要求,则需要加固地层以保证对接过程中周边地层的稳定性,因此应针对不同的地层选取加固措施,保证地层的稳定效果。

4 长距离盾构隧道掘进关键技术

4.1 常压换刀和带压开舱换刀技术

按盾构机换刀时所处的压力状态,常用的换刀技术分为常压换刀技术和带压开舱换刀技术,其中常压换刀技术又根据刀盘开口率及结构的不同,分为常规刀盘中常压换刀技术和常压刀盘中换刀技术两种。

4.1.1 常压换刀技术

a. 常规刀盘中常压换刀技术:指在使用常规刀盘的盾构机施工过程中,工作人员在常压条件下对刀盘的刀具进行检修更换。按是否需对开挖面所处地层进行加固处理,该技术又可分为直接常规刀盘中常压换刀技术和地层加固后常规刀盘中常压换刀技术。地层加固后常规刀盘中常压换刀技术的主要流程可以概括为:①确定加固地点及加固范围;②进行井点降水及相应的地层加固;③人员由通道进入刀盘前进行刀盘和刀具的检查;④拆除破损刀具,焊接刀盘并安装新的刀具;⑤对整个刀盘进行检查,确认盾构机中各装备的工作性能,恢复掘进^[30]。该技术安全性高,一般适用于地层条件好、地面可以实施大面积加固作业的工程,但不适用于施工工期短、不具备地层加固条件的工程中。

b. 常压刀盘中换刀技术:指在设计空心式辐臂和可更换刀筒的刀盘中,工作人员进入空心的刀盘辐臂中,通过刀筒在常压下完成刀具的更换(图8)。以更换刮刀等软土刀具为例,常压刀盘中换刀技术的主要流程为:①排出舱内的渣土,转动刀盘使需更换刀具到指定位置准备换刀;②安装伸缩油缸、刀筒托架、套箍;③伸出油缸,松开刀筒螺栓;④将油缸半收回,抽回刀筒后关闭闸门;⑤通过球阀泄出刀筒内的压力,平衡刀筒内外的压力差;⑥完全收回油缸,拆除对应支架并抽出刀筒,换下刀具;⑦将新更换的刀具装入刀筒,刀筒按之前相反的操作重新装入;⑧安装油缸支架并插入刀筒后,半伸出油缸,平衡筒内外压力;⑨打开阀门全部伸出油缸,拧紧螺栓后收回油缸,拆除相关辅助设备^[31]。该技术比地层加固后常压换刀技术具有更高的安全性,施工周期非常短,平均2h更换一把刀,换刀过程不影响地面交通及周边地层的环境,但需要在盾构机刀盘选型时预先配备空心式辐臂和可更换刀筒。由于刀筒体积较大,整个盾构机刀盘最多仅能布置1/3的可更换刀筒,与常规刀盘相比刀具布置密度降低,刀盘中心开口率较小,在黏性土地层中结泥饼的风险较大。武汉地铁8号线过江隧道工程在粉细砂及砾岩地层掘进过程中,由于刀具严重磨损,盾构机被迫停机,采用常压刀盘换刀技术,在土岩复合地层中共进行6次常压下滚刀及齿刀的更换作业^[31]。

该技术比地层加固后常压换刀技术具有更高的安全性,施工周期非常短,平均2h更换一把刀,换刀过程不影响地面交通及周边地层的环境,但需要在盾构机刀盘选型时预先配备空心式辐臂和可更换刀筒。由于刀筒体积较大,整个盾构机刀盘最多仅能布置1/3的可更换刀筒,与常规刀盘相比刀具布置密度降低,刀盘中心开口率较小,在黏性土地层中结泥饼的风险较大。武汉地铁8号线过江隧道工程在粉细砂及砾岩地层掘进过程中,由于刀具严重磨损,盾构机被迫停机,采用常压刀盘换刀技术,在土岩复合地层中共进行6次常压下滚刀及齿刀的更换作业^[31]。

4.1.2 带压开舱换刀技术

带压开舱换刀技术是根据压气施工原理,采用气压支护地层开挖面,在确保开挖面稳定的前提下,作业人员在气压环境下进入压力舱对刀具进行维修和更换的技术。保证开挖面的稳定是该技术成功的关键,而提高地层闭气性以确保开挖面的稳定是该技术重要的辅助措施^[32]。一般采用泥浆渗透成膜技术,在地层开挖面处形成一层气密性良好的泥膜(图9),使得压力舱中的气压转化为有效应力以平衡地层中的水土压力。常用的带压开舱换刀技术有常规压缩空气带压开舱换刀技术和饱和法带压开舱换刀技术。这两种技术的区别主要为工作人员呼吸的气体和所处的压力及作业的时间有所不同,开挖面支护方式和刀具更换的流

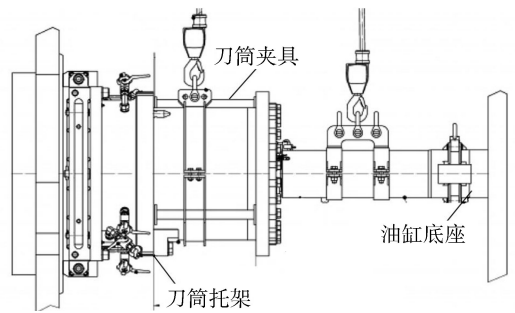


图8 托架与刀筒夹具示意图

Fig. 8 Schematic diagram of bracket and cutter barrel clamp

程相差不大。刀具更换的主要流程为:①配制泥浆在舱内完成泥浆置换,降低泥水舱液位后确保舱内气压稳定;②作业人员从生活舱进入穿梭舱,通过隧道运至人闸舱处并完成两舱的对接;③人员进入人闸舱,在一定气压下拆除破损刀具,焊接刀盘并安装新的刀具^[33]。与常压换刀技术相比,带压开舱换刀技术的适用范围更广,能在构筑物下方和水下隧道中使用,且不需要对地层进行大范围的加固处理,仅需进行一些提高地层气密性的辅助施工,对周围环境的影响较小。由于泥膜在气压下保持闭气的时效决定了带压换刀的时长,因此泥浆材料的选择及配制对泥膜闭气性能的影响、气压支护开挖面的稳定性分析等研究仍是需要关注的方向^[34-35]。南京纬三路隧道工程在穿越江底砾砂与砂岩复合地层时,大量的刀具发生严重磨损,采用带压开舱换刀技术更换了大量的刀具^[36]。



图9 开挖面处的泥膜

Fig.9 Mud films on excavation face

4.2 盾尾刷更换技术

盾尾刷磨损会引起盾尾密封系统失效,需要在地层中对部分失去密封作用的盾尾刷进行更换。因大部分隧道均处于地下水环境中,盾尾刷更换过程存在一定的风险,尤其是江底等大埋深盾构隧道工程,盾尾刷更换前有必要对盾尾及对应的管片周围地层进行密封止水加固^[37]。鉴于止水加固方法的不同,盾尾刷更换技术有一定的差异,其主要的流程概括为:①盾尾刷更换部位以及盾构机停机位置的确定;②盾构机掘进参数的控制,采用较小推力及扭矩掘进,适当提高同步注浆及二次注浆量;③拼装预制的临时管片,完成后继续推进一定距离,使待更换盾尾刷处于待拆除临时管片范围内;④对盾尾周边地层进行止水加固,完成后进行止水效果检测;⑤止水效果合格后,逐块拆除临时管片,清除盾尾刷周边的油脂及砂浆等物质,更换新盾尾刷;⑥完成所有盾尾刷的更换及管片的拼装后,向盾尾泵送密封油脂,均匀涂抹盾尾油脂,监测新更换盾尾刷的密封效果。

盾尾的止水加固技术是盾尾刷更换技术的关键,常见的盾尾止水加固技术有注浆加固法、旋喷搅拌法、冻结法^[38]等。

a. 注浆加固法操作简单,大部分采用管片上的二次注浆孔向地层注双液浆等材料进行止水加固处理,也有部分工程会在管片上钻孔或预先增设注浆孔,提高注浆止水加固的效果。注浆加固法具有施工工期短,成本低等优点,但在高渗透性地层中止水效果难以保证,浆液对周边环境有一定的影响。广深港狮子洋隧道及南京纬三路隧道N线^[39]工程为典型的采用注浆加固法进行盾尾刷更换的工程。

b. 旋喷搅拌法是将高压喷射出的硬化浆液与围岩进行搅拌混合,在一定范围内形成圆柱形加固体的技术。与注浆加固法类似,其施工工艺简单,成本低,在一定范围内可以加固土体形成良好的止水效果。但由于混合土体在高水压、高渗透条件下具有不能成桩的风险,因此在富水地层中较少使用^[37]。

c. 冻结法是利用人工制冷方法将地层中的土冻成硬质冰土,提高该部分土体的强度及稳定性,隔绝地下水渗透的方法。按照冻结介质不同可分为盐水冻结和低温液化气(液氮)冻结。目前隧道施工过程中常用液氮冻结方式进行止水加固,其具有操作简单、冻结速度快、密封效果好、加固强度高等优点,但其施工成本较高,在高渗透性地层中,由于地下水流速会影响冻结的速度,还需结合注浆加固法降低流速。杭州庆春路过江隧道工程^[23]、南京纬三路隧道S线工程^[24]、南京地铁10号线过江隧道工程^[37]为典型的采用冻结法进行盾尾刷更换的工程。

4.3 管路磨损监测及耐磨改进技术

泥水平衡盾构排泥管中携带了大量在粗颗粒地层中开挖的颗粒砂石,其对管壁产生了较大的磨损。借助超声波测厚仪等设备对泥浆循环系统中排浆管易磨损处的管壁厚度进行监测,重点监测弯管及管路形式变化(接头)处。已有研究表明,泥浆管壁的磨损主要与泥浆的流速、泥浆中固体颗粒性质以及管道的线型布置等有关。弯管处管壁的磨损大于直管,管路凸出面的磨损大于凹面,管路接头及泥浆泵附近管壁的磨损要大于远离接头及泥浆泵的管壁^[26]。在泥浆管路设计及管路异常磨损需要更换时,常见的耐磨改进措施有:①确定会出现大量磨损的管壁位置,对相应位置管壁进行加厚处理,如弯管处泥浆冲刷一侧;②尽量减少管路接头数量,采取整体铸造方式,对管路接头及焊接处附近内衬耐磨材料进行加固处理,提高管壁的耐磨

性及强度;③将管路内泥浆流速控制在临界流速附近,使管路中粗颗粒砂石尽可能悬浮,以降低砂石与管壁的碰撞及摩擦。兰州轨道交通1号线工程下穿黄河区段,采用直径6.48 m的泥水加压盾构机进行施工,隧道穿越全断面卵石层,大于20 cm的卵石及漂石含量超过60%。盾构机掘进过程中排浆管路频繁被磨穿。通过对管路冲刷面加厚处理、增加耐磨环、管路接头处采用整体铸造等改进后,显著提高了管路的耐磨性能^[40]。清华园隧道总长6 020 m,采用两台直径12.64 m的泥水加压盾构机掘进,当遇到大颗粒卵石层时,排浆管路磨损非常严重。通过对弯管及易磨损处进行耐磨处理,有效增加了管路使用寿命^[41]。目前常用的耐磨改进措施大多从管路材料方面入手。针对盾构机在复杂地层长距离掘进时泥浆管路的磨损问题,排浆管内泥浆参数优化、管路材料选择、管路线型的设计、粗颗粒石块的处理等仍是需要研究的重点。

4.4 地下对接技术

地下对接技术包括辅助式对接技术及直接式对接技术。

a. 辅助式对接是指两台盾构机相向掘进到接合地点时,对接合点附近地层进行加固后完成对接贯通。接合点地层加固措施一般有注浆加固法、冻结法等(图10)。①采用注浆加固法进行辅助式对接。两台盾构机掘进至距接合点一定距离时(大于30 m),各自使用机身预设超前注浆装置对前盾周边地层进行预注浆地下水封堵及土体加固,再次掘进一定距离再进行注浆加固,直到接合点周边地层均完成加固后进行对接贯通施工。注浆加固法操作简单,施工成本低,可以长期保持接合点周边地层的稳定。②采用冻结法进行辅助式对接。当两台盾构机掘进至接合区域时,在保持两台盾构机舱内压力平衡的情况下使两个刀盘尽量靠近,利用各自盾构机内预留的钻孔设备向接合点周边地层环向布设冷冻管,使接合点及盾壳外土体冻结加固,最终完成对接贯通施工。冻结法加固效果好,加固区域小,但施工成本偏高。

b. 直接式对接则是利用预先在盾构机中设计的特殊机械装置,在接合点完成对接施工。对接过程中在两台盾构机相遇时回缩后一台盾构机刀盘,伸出预留在盾壳内的贯入环,使其缓慢进入前一台盾构机预留的接收端内,实现两侧盾壳与贯入环精准连接。直接式对接不需要进行地层加固,可以有效缩短工期,但特殊设计的装置造价昂贵,对盾构机的对接精度要求较高。

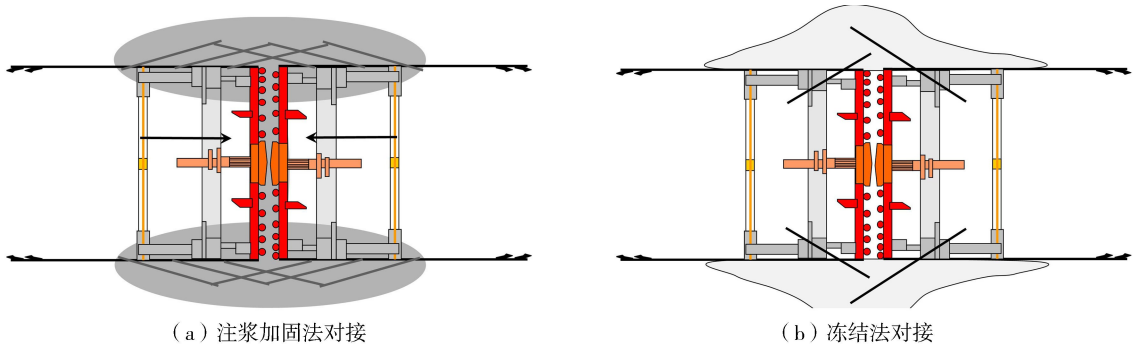


图10 盾构机水下对接示意图

Fig.10 Schematic diagram of underwater junction of shield machine

4.5 智能化快速施工技术

盾构机单次掘进距离越长,施工工期越长,所花费的人工成本越高,盾构机在复杂地层中带来的安全风险越大。随着机械智能化技术的不断发展,未来长距离盾构隧道建设将从盾构机快速开挖技术、渣土及浆液快速输送技术、盾构机开挖同时拼装管片技术、管片高速运送及智能化拼装技术、盾构设备故障智能化检测技术^[42]等方面实现盾构机快速施工,缩短施工工期,降低人工成本及安全风险。①盾构机快速开挖技术指通过增大刀盘开口率、增加刀具的数量等方法加快土体开挖速度,减少一环管片开挖所需的时间。②渣土及浆液快速输送技术是指在提高盾构机掘进速度的基础上,提高浆液输送能力或增加渣土的运送设备,进一步减少盾构开挖所需的时间。③盾构机开挖同时拼装管片技术指在盾构机开挖过程中,通过控制千斤顶轴向及纵向对管片的作用力,收缩一组千斤顶并在相应位置完成管片的拼装,从而提高隧道的施工效率^[43]。④管片高速运送及智能化拼装技术是指通过自动化运输系统,将管片从管片场地快速运送到盾构机管片拼装处,减少管片材料的运输时间;同时通过提高管片宽度,研发新型管片接头结构,使用自动组装机进行管片自动拼装等方法,进一步提高管片拼装速度^[44]。⑤盾构设备故障智能化检测技术则是通过大数据对盾构设备各参数进行实时监测及分析^[45-46],如对盾构刀具异常磨损、轴承密封性及耐久性、盾尾密封性等影响正

常施工的问题及时快速给出预警,便于技术人员及时处理。

5 结 论

a. 随着盾构技术的不断发展,跨越江河湖海的隧道数量越来越多,盾构隧道区间距离不断增加,目前在建最长的过江盾构隧道是上海北横通道,长度达 7.75 km。各城市地铁隧道区间的平均距离变化不大,一般在 1.5~2.0 km。

b. 盾构机在长距离掘进过程中,因机械设备与土体相互作用,会遇到刀盘刀具磨损及主轴承损坏、盾尾密封系统失效、管路磨损及淤塞等问题。为缩短工期,采用两台盾构机相向掘进时会遇到地下对接问题,而在复杂的地层刀盘刀具损坏时又会遇到盾构开舱检修等问题。

c. 常压换刀技术包括常规刀盘中常压换刀技术及常压刀盘中换刀技术,常规刀盘中常压换刀技术的关键在于保证地层加固效果,维持开挖面土体稳定;常压刀盘中换刀技术可快速进行换刀作业,其关键在于如何设计可更换刀具的位置及数量,保证刀具布置的密度及切削效率。带压开舱换刀技术的关键在于提高地层开挖面的气密性,以气压维持开挖面的稳定,目前常用泥浆向地层渗透成膜来提高开挖面的气密性,因此泥浆材料及配比选择、泥膜闭气规律的研究是该技术的主要发展方向。

d. 盾尾刷更换技术的关键是盾尾地层的止水加固技术,目前常使用注浆加固法及冻结法。注浆加固法操作简单,工期短,但在高渗透性地层止水效果难以保证;冻结法止水密封效果好,加固强度高,但其工期较长,冻结速度受地层水流速度的影响,成本较高。

e. 管路耐磨改进技术的关键在于管路线型设计、排浆管泥浆参数的控制、粗颗粒石块的处理及易磨损部分的耐磨处理。

f. 地下对接技术包括辅助式对接技术及直接式对接技术。辅助式对接的关键是维持对接处周围地层土体的稳定以及盾构机对接精度的控制,而直接式对接则仅需保证盾构机的对接精度。

g. 未来盾构隧道的区间距离仍将不断增加,长距离盾构隧道掘进相关理论体系尚需构建,结合大数据智能化及自动化设备进行相关新技术的开发迫在眉睫。

参考文献:

- [1] 朱伟,钱勇进,闵凡路,等. 中国泥水盾构使用现状及若干问题[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(5):724-735. (ZHU Wei, QIAN Yongjin, MIN Fanlu, et al. The current status and some problems of slurry shield in China[J]. Tunnel Construction,2019,39(5):724-735. (in Chinese))
- [2] 陈林,葛坤龙,王涛. 基于盾构隧道环缝点云的中轴线提取方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):73-78. (CHEN Lin, GE Kunlong, WANG Tao. Central axis extraction method of shield tunnel based on ring seam point cloud[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(1):73-78. (in Chinese))
- [3] 杨文武. 盾构法水下隧道工程技术的发展[J]. 隧道建设(中英文),2009,29(2):145-151. (YANG Wenwu. Development of underwater shield-bored tunnels[J]. Tunnel Construction,2009,29(2):145-151. (in Chinese))
- [4] 陈馈. 盾构刀具关键技术及其最新发展[J]. 隧道建设(中英文),2015,35(3):197-203. (CHEN Kui. Key technologies for cutting tools of shield and their latest development[J]. Tunnel Construction,2015,35(3):197-203. (in Chinese))
- [5] 朱伟,赵笛,范惜辉,等. 渣土改良为流动化回填土的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):134-139. (ZHU Wei, ZHAO Di, FAN Xihui, et al. Research on application of residue soil-based flowable fill[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(2):134-139. (in Chinese))
- [6] 叶治,付岸然,刘华北. 盾构隧道拱顶渗流侵蚀对地表沉降及结构变形的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):279-287. (YE Zhi, FU Anran, LIU Huabei. Effects of seepage erosion of shield tunnel vault on surface subsidence and structural deformation[J]. Journal of Hohai University(Natural Science),2021,49(3):279-287. (in Chinese))
- [7] 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. (in Chinese))
- [8] (日)土木学会. 隧道标准规范盾构篇及解说[M]. 朱伟,译. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [9] 宋超业,贺维国,吴钊君. 高水压过海盾构隧道建设关键技术可行性初探[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(5):717-726. (SONG Chaoye, HE Weiguo, WU Yijun. Feasibility analysis on key technologies to cope with high water pressure and long distance of subsea shield tunnel[J]. Tunnel Construction,2020,40(5):717-726. (in Chinese))

- [10] 魏龙刚. 盾构下穿大量老龄浅基民居沉降控制技术[J]. 铁道建筑技术, 2014(增刊1):197-200. (WEI Longgang. Settlement control technology for shield tunneling through a large number of aged and shallow foundation dwellings[J]. Railway Construction Technology, 2014(Sup1):197-200. (in Chinese))
- [11] 张哲. 超大直径盾构下穿棚户区沉降控制技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5):1541-1548. (ZHANG Zhe. Research on settlement control technology of oversized shield tunneling through sheds area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(5):1541-1548. (in Chinese))
- [12] 城市轨道交通 2020 年度统计和分析报告[R]. 北京:中国城市轨道交通协会, 2021.
- [13] 朱伟, 钱勇进, 王璐, 等. 土压平衡盾构不满舱施工遇到的问题及对策[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12):224-234. (ZHU Wei, QIAN Yongjin, WANG Lu, et al. Problems and measures of earth pressure balance shield during construction with the unfilled chamber[J]. Chinese Journal of Highways, 2020, 33(12):224-234. (in Chinese))
- [14] 路石. 日本东京湾海底公路隧道[J]. 铁道建筑, 2002(6):35. (LU Shi. Undersea highway tunnel in Tokyo Bay, Japan[J]. Railway Construction, 2002(6):35. (in Chinese))
- [15] 洪开荣, 杜闯东, 王坤. 广深港高速铁路狮子洋水下盾构隧道修建技术[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(增刊1):312-316. (HONG Kairong, DU Chuangdong, WANG Kun. Construction technology of Shiziyang underwater shield tunnel of Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong High-speed Railway[J]. Modern Tunnel Technology, 2008, 45(Sup1):312-316. (in Chinese))
- [16] 洪开荣. 高速铁路水下盾构隧道结构力学特征及掘进与对接技术研究[D]. 北京:北京交通大学, 2011.
- [17] 林文晴, 辻井孝. 海底长距離シールドの施工--伊勢湾横断ガスパイプライン シールドトンネル工事(特集 特殊条件下のシールド工事)[J]. 基礎工, 2011, 39(3):78-81.
- [18] 黄融. 上海崇明越江通道长江隧道工程综述(一):长江隧道工程设计[J]. 地下工程与隧道, 2008(1):2-8. (HUANG Rong. Review of Yangtze River tunnel engineering of Shanghai Chongming Cross-river Passage(1):engineering design of Yangtze River tunnel[J]. Underground Engineering and Tunnel, 2008(1):2-8. (in Chinese))
- [19] 霍滨, 徐朝辉, 胡相龙, 等. 砂卵石地层泥水盾构施工技术难点及控制措施分析:以兰州地铁穿黄隧道工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(5):846-850. (HUO Bin, XU Zhaohui, HU Xianglong, et al. Analysis of technical difficulties and control measures for slurry shield boring in sandy cobble strata:a case study of Yellow River-crossing tunnel of Lanzhou Metro [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(5):846-850. (in Chinese))
- [20] 陈健, 薛峰, 苏秀婷, 等. 高水压大直径盾构隧道刀盘配置与刀具更换关键技术[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(7):1057-1065. (CHEN Jian, XUE Feng, SU Xiuting, et al. Key technologies of cutterhead configuration and cutter replacement for large-diameter shield under high water pressure[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(7):1057-1065. (in Chinese))
- [21] 胡向东, 程烨尔. 盾构尾刷冻结法更换的温度场数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2):3516-3525. (HU Xiangdong, CHENG Yeer. Numerical analysis of temperature field during replacement of shield tail brush by freezing method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup2):3516-3525. (in Chinese))
- [22] 李勇成, 张志鹏. 强透水地层下更换盾尾密封刷技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008(4):80-81. (LI Yongcheng, ZHANG Zhipeng. Replacing shield tail sealing brush technology in highly permeable stratum [J]. Prospecting Engineering (Geotechnical Drilling and Excavation Engineering), 2008(4):80-81. (in Chinese))
- [23] 张忠苗, 林存刚, 吴世明, 等. 杭州庆春路过江隧道施工风险控制实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊2):3471-3480. (ZHANG Zhongmiao, LIN Cungang, WU Shiming, et al. Analysis of engineering projects of risk control in Hangzhou Qingchun Road cross-river tunnel construction, 2011, 30(Sup2):3471-3480. (in Chinese))
- [24] 姚梦威, 杨平, 张英明, 等. 南京纬三路过江通道液氮冻结盾尾刷更换技术及温度实测研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(3):186-192. (YAO Mengwei, YANG Ping, ZHANG Yingming, et al. Research on the replacement technology of liquid nitrogen freezing shield tail brush and temperature measurement in Nanjing Weisan Road crossing river channel [J]. Modern Tunnel Technology, 2018, 55(3):186-192. (in Chinese))
- [25] 任广艳. 透水涌砂冒险堵漏 隧道坍塌撤人不及:广东省佛山市轨道交通2号线“2.7”透水坍塌重大事故分析[J]. 吉林劳动保护, 2019(8):40-42. (REN Guangyan. The collapse of seepage tunnel with sand flooding risk is not enough to evacuate people-analysis of “2.7” seepage collapse of Foshan Rail Transit Line 2 in Guangdong Province [J]. Jilin Labor Protection, 2019(8):40-42. (in Chinese))
- [26] 黄波, 李晓龙, 陈长江. 大直径泥水盾构复杂地层长距离掘进过程中的泥浆管路磨损研究[J]. 隧道建设(中英文), 2016, 36(4):490-496. (HUANG Bo, LI Xiaolong, CHEN Changjiang. Study of abrasion of slurry pipe of large-diameter slurry shield boring in complex strata [J]. Tunnel Construction, 2016, 36(4):490-496. (in Chinese))
- [27] 刘东. 繁华城区富水砂卵石地层大直径泥水盾构隧道施工关键技术[J]. 隧道建设(中英文), 2011, 31(1):76-81. (LIU Dong. Key technologies for large-diameter mud-water shield tunnel construction in water-rich sand and pebble strata in the prosperous urban area [J]. Tunnel Construction, 2011, 31(1):76-81. (in Chinese))
- [28] 陈健, 刘红军, 闵凡路, 等. 盾构隧道刀具更换技术综述[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10):36-46. (CHEN Jian, LIU

- Hongjun, MIN Fanlu, et al. Technical review of cutter replacement in shield tunneling[J]. Journal of China Highway and Transportation, 2018, 31(10):36-46. (in Chinese)
- [29] 耿哲,袁大军,王滕. 水下盾构对接拆机后管片应力松弛控制措施研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊1):155-161. (GENG Zhe, YUAN Dajun, WANG Teng. The control measures of stress relaxation of segment after underwater shield junction and dismantling[J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 2020, 53(Sup1):155-161. (in Chinese))
- [30] 王志成. 常压更换刀具换刀程序和改进方案[J]. 隧道建设(中英文), 2010, 30(3):339-343. (WANG Zhicheng. Procedure of replacing of cutting teeth under atmospheric pressure and its optimization[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(3):339-343. (in Chinese))
- [31] 陈健. 大直径盾构刀盘刀具选型及常压换刀技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(1):110-117. (CHEN Jian. Study of cutter head and cutting tool selection and cutting tool replacement of large-diameter shield under atmospheric condition[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(1):110-117. (in Chinese))
- [32] MIN F, ZHU W, LIN C, et al. Opening the excavation chamber of the large-diameter size slurry shield; a case study in Nanjing Yangtze River tunnel in China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 46:18-27.
- [33] 朱伟, 闵凡路, 姚占虎, 等. 盾构隧道开舱技术现状及实例[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(1):9-18. (ZHU Wei, MIN Fanlu, YAO Zhanhu, et al. Status and example of shield tunnel opening technology[J]. Modern Tunnel Technology, 2015, 52(1):9-18. (in Chinese))
- [34] 姜腾, 夏鹏举, 闵凡路. 泥浆性质对泥水盾构泥膜闭气性影响试验研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(2):134-140. (JIANG Teng, XIA Pengju, MIN Fanlu. Experimental study on the effect of mud properties on the air-sealing property of mud film in a mud-water shield[J]. Modern Tunnel Technology, 2016, 53(2):134-140. (in Chinese))
- [35] MIN F, ZHU W, HAN X. Filter cake formation for slurry shield tunneling in highly permeable sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38:423-430.
- [36] 张士龙. 南京纬三路过江通道工程技术难点分析[J]. 隧道建设(中英文), 2013, 33(2):147-150. (ZHANG Shilong. Analysis on technical difficulties in construction of Yangtze River-crossing Tunnel on Weisan Road in Nanjing[J]. Tunnel Construction, 2013, 33(2):147-150. (in Chinese))
- [37] 陈驰, 杨平. 高水压大直径过江隧道盾尾渗漏防治研究[J]. 林业工程学报, 2021, 6(1):155-162. (CHEN Chi, YANG Ping. Study on the prevention and control for shield tail leakage of large-diameter river-crossing tunnel at high hydraulic pressure[J]. Chinese Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(1):155-162. (in Chinese))
- [38] RUSSO G, CORBO A, CAVUOTO F, et al. Artificial ground freezing to excavate a tunnel in sandy soil-measurements and back analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50:226-238.
- [39] 李家洋, 鞠义成. 浅覆土高水压强透水地层注浆法更换盾尾刷技术[J]. 隧道建设(中英文), 2015, 35(增刊2):108-114. (LI Jiayang, JU Yicheng. Method of replacing shield tail brushes under high water pressure and shallow highly-permeable cover; case study on Weisanlu Yangtze River crossing tunnel in Nanjing[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(Sup2):108-114. (in Chinese))
- [40] 董伯让. 泥水盾构泥浆管路磨损与减振处理技术[J]. 隧道建设(中英文), 2016, 36(11):1385-1388. (DONG Borang. Countermeasures for reducing wear and vibration of slurry pipe of slurry shield[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(11):1385-1388. (in Chinese))
- [41] 崔建, 徐公允, 陈焱, 等. 清华园隧道泥水环流系统泥浆输送管路磨损分析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1):1224-1231. (CUI Jian, XU Gongyun, CHEN Yan, et al. Wear analysis of slurry conveying pipeline in slurry circulation system of Tsinghuayuan Tunnel[J]. Modern Tunnel Technology, 2020, 57(Sup1):1224-1231. (in Chinese))
- [42] 藤生和也, 西尾誠高, 明神和夫, et al. シールドトンネルの長距離・急速施工技术[J]. トンネル工学研究発表会論文・報告集, 2000, 10:325-330.
- [43] 後藤広治, 水内満寿美, 谷口敦. 大断面長距離シールドにおける一次覆工の高速施工と品質向上[J]. トンネル工学報告集, 2011, 21:403-406.
- [44] 安村秀樹. 土砂岩盤複合地盤における小口径長距離シールドの施工報告:高知市送水幹線二重化(3工区)管渠築造工事(都市における各種制約下でのトンネル, 地下構造物工事:新設, 改良再構築の施工事例)[J]. 施工体験発表会, 2019, 85:81-88.
- [45] 余佳, 焦铮, 苏哲, 等. 考虑风险因素影响的引水隧洞施工方案优选[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(2):155-161. (YU Jia, JIAO Zheng, SU Zhe, et al. Construction scheme optimization of diversion tunnel considering influence of risk factors[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(2):155-161. (in Chinese))
- [46] 张哲铭, 李晓瑜, 姬建. 基于LS-SVM的TBM掘进参数预测模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4):373-379. (ZHANG Zheming, LI Xiaoyu, JI Jian. TBM excavation parameter prediction model based on LS-SVM method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(4):373-379. (in Chinese))