

文章编号:1009-6582(2024)02-0124-15

DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2024.02.012

引文格式:陈健,袁大军,苏秀婷,等.超大直径水下盾构隧道施工技术进展与展望[J].现代隧道技术,2024,61(2):124-138.

CHEN Jian, YUAN Dajun, SU Xiuting, et al. Progress and Prospects of Construction Technology for Ultra-Large Diameter Underwater Shield Tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(2): 124-138.

超大直径水下盾构隧道施工技术进展与展望

陈健^{1,2,3,4} 袁大军⁵ 苏秀婷^{1,2} 王志奎^{1,2,3}

(1. 中铁十四局集团有限公司, 济南 250101; 2. 中国铁建水下隧道工程实验室, 济南 250101;
3. 大盾构隧道智能化建造与装备再制造山东省工程研究中心, 济南 250101; 4. 中国海洋大学, 青岛 266100;
5. 北京交通大学, 北京 100044)

摘要:随着“一带一路”国家海洋战略、区域经济一体化战略布局发展,大批轨道交通、公路、铁路等大型基础设施工程面临着越江跨海的挑战。从南京长江隧道、上海长江隧道、武汉长江隧道的发端,通过引进、消化、实践、再创新盾构技术,促使我国水下盾构隧道技术进入快速发展阶段,一大批已建和在建超级水下盾构隧道工程极大推动了我国乃至世界水下盾构隧道技术的创新、发展和进步,在水下隧道盾构装备、设计、施工、运维等方面突破了一系列技术瓶颈。文章系统阐述了盾构技术三大要素及其内涵,即土水稳定、盾构设备及控制、结构安全与防水,分析了国内外超大直径水下盾构隧道技术现状与发展趋势,总结了近年来超大直径水下盾构隧道技术方面取得的重要创新成果,提出了大直径、长距离、高水压、复杂地质条件下水下盾构隧道工程的技术挑战、对策及工程应用前景。

关键词:超大直径; 水下盾构隧道; 研究现状; 发展趋势; 技术创新; 挑战与对策

中图分类号:U455.43

文献标志码:A

1 引言

水下盾构隧道,顾名思义是指采用盾构法在江河湖海等水底以下岩土体中修建的隧道。早期,人们普遍将盾构直径在10~12 m级的隧道称为超大直径盾构隧道,以满足单层2车道需求,而近10年来,基于交通需求量的大幅增长和盾构施工技术的进步,盾构直径14 m及以上是当前的主流,以满足双层4/6车道或单层3车道需求,现在普遍认为直径超过14 m以上的盾构称为超大直径盾构,主要应用于公路或公路与轨道交通合建的水下隧道工程。

我国盾构隧道技术引入较晚,虽然上世纪60年代在上海打浦路水下隧道采用了网格式挤压式盾构法,但真正采用现代泥水或土压平衡盾构法是从进入21世纪开始的。随着国家海洋战略、国家能源战略、区域经济一体化、国家大通道建设的逐步实施,大批轨道交通、公路、铁路等大型基础设施工程面临

着越江跨海的挑战。从武汉长江隧道和南京长江隧道工程发端,通过引进、消化、再创新国外盾构先进技术,促使我国超大直径水下盾构隧道技术进入快速发展阶段,一大批已建和在建工程极大推动了我国乃至世界水下盾构隧道技术的进步。仅用十余年时间,我国水下盾构隧道突破了众多技术瓶颈,在盾构装备、隧道建造等多方位赶上甚至超过发达国家。图1所示为2000—2023年新建超大直径水下盾构隧道数量及里程统计数据,我国水下盾构隧道在近十年发展迅猛,新建数量和里程均位居世界第一。

水下盾构隧道的关键在于“水”,与普通盾构隧道相比,水下盾构隧道面临着水压作用“强烈”,水体“巨量”,水源供给“无限”,地质条件“多变”等困难和挑战,施工风险及代价更为巨大。我国水下盾构隧道所遭遇的水文地质状况更为复杂多变,在水下盾构隧道的设计、建造等方面尚有诸多“卡脖子”技术亟待突破。

收稿日期:2024-02-18

修回日期:2024-02-29

基金项目:山东省自然科学基金面上项目(ZR2023ME048);泰山产业领军人才工程专项经费资助(tscx202306015);中国铁建科研开发计划(2023-B04);中铁十四局科技研发计划项目(9137000016305598912021A01)。

作者简介:陈健(1973-),男,博士,正高级工程师,主要从事水下大直径盾构科研及技术管理相关工作,E-mail:chenjian1018@163.com.

通讯作者:苏秀婷(1986-),女,博士,高级工程师,主要从事大直径盾构变形控制及浆渣资源化利用相关研究工作,E-mail:sxting0920@163.com.

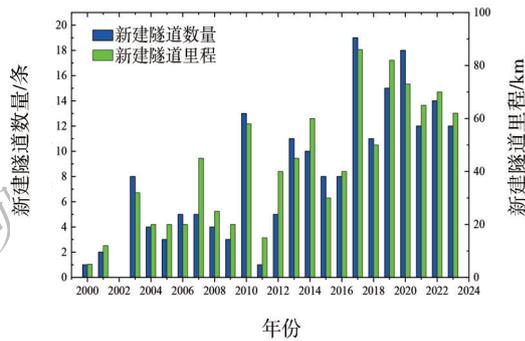


图1 已建水下盾构隧道里程统计

Fig.1 Mileage statistics of built underwater shield tunnels

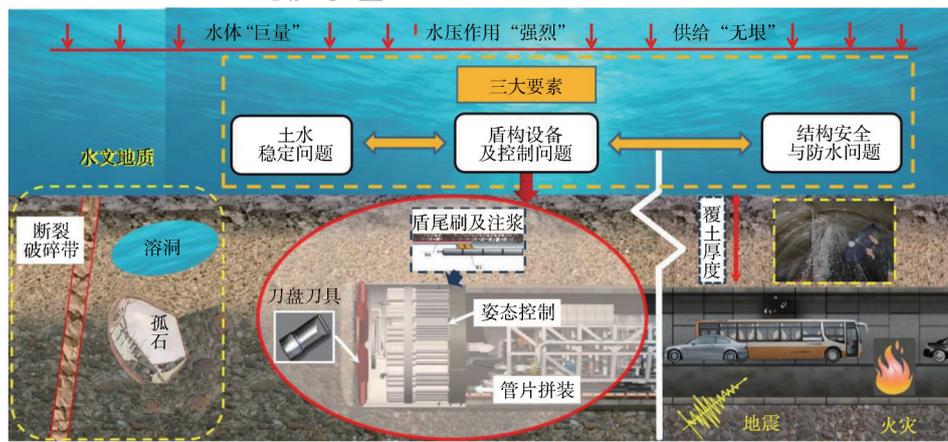


图2 水下盾构隧道的三大要素

Fig.2 The three key elements of underwater shield tunnelling

用,水下复杂地质条件下的开挖面失稳形态难明,刀盘切削扰动与泥浆共同作用下开挖面稳定机理复杂,难以建立盾构掘削及带压开舱条件下的动、静态开挖面稳定控制理论体系,使水下盾构隧道开挖面土水稳定精准评价与控制尤为困难。

盾构设备及控制。盾构机本身就是集机、电、液一体的现代化大型装备,近年来朝着自动化、智能化方向发展。水下盾构隧道的长、大、地质条件复杂特性,给设备研发、制造带来挑战,刀盘设计理论、刀具材料及磨损的评价、关键部件的制造、掘进位姿与管片拼装精细控制等问题,是水下大直径盾构设备及控制的关键所在。

结构安全与防水,贯穿了盾构隧道设计、建造和运营维护阶段。水下复杂的水文地质环境给管片结构及密封垫设计、拼装形式、管片上浮及破损等一系列隧道结构安全和防水问题提出了更高的要求。地震、火灾等灾害对水下盾构隧道威胁极大,提高结构韧性和抗灾能力,是水下盾构隧道结构安全及防水

盾构技术的进步主要围绕三大要素展开,土水稳定、盾构设备及控制、结构安全与防水(图2)。水下盾构隧道的建设属于多元、多场耦合的系统,且具有复杂、开放和动态等特点,不仅需要盾构硬件技术支撑,还涉及岩土、结构等力学,地质、地震、防灾、材料、机电、计算机、交通等多个学科交叉,这也加剧了水下盾构隧道建设安全以及功能保障的难度。

土水稳定。土水是盾构设备和隧道结构依存的大环境,土水稳定是水下隧道建设的前提。水下盾构隧道工程面临盾构-土水-结构三者动态相互作用

性能的保障。

近十年来,我国在长江、珠江、钱塘江、黄浦江、湘江、赣江、黄河和多个内湖与沿海修建了大量的公路、铁路、地铁、电力、市政等隧道工程,仅在长江流域江苏省范围内已建及规划多达十余条越江隧道,有力地推动了超大直径盾构技术的进步。我国超大直径盾构隧道技术整体水平已跻身世界先进行列,目前正朝着模块化、信息化、智能化方向发展。本文比较系统地评述了我国超大直径盾构隧道发展现状,总结了近十年来在理论、技术与工程应用方面取得的主要创新成果,分析了当前超大直径盾构隧道技术面临的挑战,并提出了相应对策。

2 超大直径水下盾构隧道工程领域研究进展与创新

近年来,我国在水下盾构隧道技术方面开展了大量研究,根据 Scopus 数据库,检索"Shield" OR "TBM" AND "Underwater" OR "Submarine" OR

Cross river" OR "Cross sea"等关键词,统计得到了2012—2023年国内外水下盾构隧道中、英文发文量如图3所示。根据知网数据库、Scopus数据库和国家专利局官网,统计得到2012—2023年水下盾构隧道中、英文发文数量及专利数量分布情况,如图4所示。

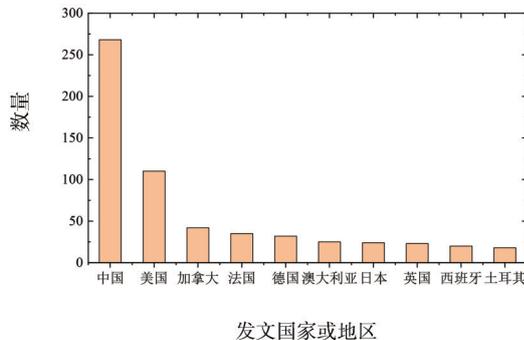


图3 2012—2023年水下盾构隧道发文量统计

Fig.3 Publication statistics for underwater shield tunnels from 2012 to 2023

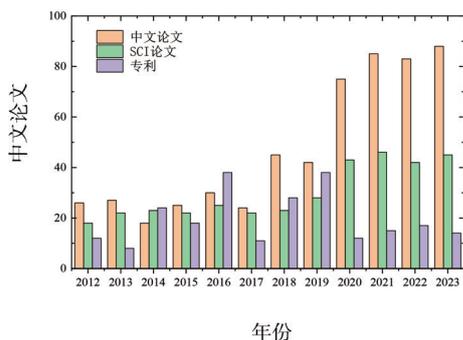


图4 2012—2023年水下盾构隧道发文量及专利数量分布

Fig.4 Distribution of publication and patent numbers for underwater shield tunnels from 2012 to 2023

由图3、图4可知,水下盾构隧道中、英文论文发文量总体呈逐年增多趋势,特别是2023年,中文论文发文量达88篇。专利数量近12年来呈现一定波动和周期性。这也表明中国在水下盾构隧道技术方面的研究力度远远超过其他国家,这与我国基础设施建设的迅猛发展密切相关。

近年来国家对水下盾构隧道技术的发展给予了巨大支持。据不完全统计,近十年科技部批准立项的“973计划”、国家自然科学基金重大项目共6项,国家科技奖励共5项,具体见表1。我国盾构隧道技术起步较晚,但与国际上盾构技术先进国家如日本、

德国、意大利、美国等相比,目前我国在水下盾构隧道领域的整体科技实力已名列前茅,各式各样的建设条件与使用要求,促进了该领域技术的快速迭代和进步。

2.1 土水稳定方向

2.1.1 越江跨海盾构隧道覆土厚度设计

越江跨海软土隧道往往采用泥水平衡盾构进行施工。受到线路线形、地层条件和工程造价等因素制约^[1-3],一般要求隧道覆土厚度尽可能薄。由于隧道覆土浅,开挖面稳定难控、泥水劈裂难防,易引发泥水喷发、地层塌陷和江(海)水倒灌等重大事故。对于硬岩隧道的最小岩层覆盖厚度,国际上有挪威经验法、日本最小涌水量预测法等,李术才等^[1]采用工程类比、数值模拟等方法分析了最小岩石覆盖厚度,确定了厦门翔安海底隧道和青岛胶州湾海底隧道最小岩石覆盖厚度。对于水下软土盾构隧道覆土厚度问题,此前国外学者主要考虑抗浮作用^[4],袁大军^[5]提出了综合性的“合理覆土厚度”概念,以开挖面劈裂压力和主动失稳压力作为泥水支护压力的上下限^[6,7],根据施工中的泥水支护压力波动范围与支护压力上下限的匹配关系给出满足掘进安全的最小覆土厚度^[8],并考虑隧道抗浮、坡率限制、基岩避让等因素综合得出合理覆土厚度^[9,10],成功应用于南京市纬三路过江通道、深圳妈湾跨海通道设计。

2.1.2 盾构施工超前地质预报技术

随着我国隧道建设规模的不断扩大,遭遇异常复杂地质条件的情况也越来越多,暗河、溶洞、断层破碎带、孤石等不良地质条件都会给隧道施工带来重大危害,突水突泥、塌方、卡机、机毁人亡等事故时有发生。超前地质预报是预防该问题的有效方法,但在软土盾构隧道中的超前地质预报是一个世界性难题^[11]。李术才等^[12-14]研发了可搭载于TBM上的超前地质预报技术及设备,其中用于探测含水构造的三维激发极化法(前方30 m)和探测不良地质的三维地震法(前方100 m)已在国内TBM施工中得到应用^[15]。在盾构施工方面,张星煜等^[16]以盾构刀盘切削震动为震源,基于地震波反射法探索了盾构施工超前地质预报方法,预报距离为刀盘前方20 m。总体而言,由于盾构施工时软土介质中电磁、弹性波传播距离短、反应信号较弱,目前盾构施工超前地质预报技术的量化水平及精度较低,难以满足工程实际需要^[17]。另外,现有技术多针对单一不良地质体,缺乏应对上软下硬、上土下岩等多种地层情况的综

表 1 盾构技术领域国家科技奖励及重大项目

Table 1 National science and technology awards and major projects in the field of shield tunnelling technology

| 类别 | 负责人 | 依托单位 | 项目名称 | 奖项/项目类别 | 时间 |
|--------|------|-----------------|-------------------------------|--------------|------|
| 国家科技奖励 | 何川 | 西南交通大学 | 大型及复杂水下隧道结构分析理论与设计关键技术 | 国家科技进步二等奖 | 2011 |
| | 浙江大学 | 浙江大学 | 盾构装备自主设计制造关键技术及产业化 | 国家科技进步一等奖 | 2012 |
| | 肖明清 | 中铁第四勘察设计院集团有限公司 | 高水压浅覆土复杂地形地质超大直径长江盾构隧道成套工程技术 | 国家科技进步二等奖 | 2014 |
| | 何川 | 西南交通大学 | 砂卵石地层盾构隧道施工安全控制与高效掘进技术 | 国家技术发明二等奖 | 2015 |
| | 肖明清 | 中铁第四勘察设计院集团有限公司 | 高速铁路狮子洋水下隧道工程成套技术 | 国家科技进步二等奖 | 2017 |
| 国家重大项目 | 杜修力 | 北京工业大学 | 近海重大交通工程地震破坏机理及全寿命性能设计与控制 | 973 计划 | 2011 |
| | 朱合华 | 同济大学 | 城市轨道交通地下结构性能演化与感控基础理论 | 973 计划 | 2011 |
| | 刘泉声 | 武汉大学 | 深部复合地层围岩与 TBM 的相互作用机理及安全控制 | 973 计划 | 2014 |
| | 李建斌 | 中铁工程装备集团有限公司 | TBM 安全高效掘进全过程信息化智能控制与支撑软件基础研究 | 973 计划 | 2015 |
| | 袁大军 | 北京交通大学 | 高水压越江海长大盾构隧道工程安全的基础研究 | 973 计划 | 2015 |
| | 杜严良 | 山东大学 | 超长跨海隧道的灾害规律和施工控制 | 国家自然科学基金重大项目 | 2019 |

合性探测方法,难以满足与盾构机装备的一体化、探测自动化等更高的需求。

2.1.3 水下盾构隧道施工开挖面稳定控制技术

开挖面稳定是水下盾构隧道施工安全的前提,高水压、大直径盾构隧道开挖面静、动态稳定尤为难控。国外学者的相关研究大部分集中于计算开挖面失稳的极限支护压力^[18-20],为攻克水下盾构开挖面静、动态稳定控制难题,我国在泥浆成膜和泥水劈裂防控方面形成了系列技术成果。在开挖面主动失稳防控方面,闵凡路等^[21-24]聚焦于盾构开挖面泥浆成膜现象,提出了以泥浆颗粒粒径与地层孔径对应关系为核心的泥膜形成理论,研发了基于“渗透带+泥皮”两阶段成膜方法的开挖面稳定控制技术,大幅提升了盾构掘进开挖面稳定性及停机开舱闭气时长,成功应用于国内十余条水下盾构隧道工程。在开挖面泥水劈裂被动失稳防控方面,北京交通大学袁大军团队与中铁十四局集团有限公司联合开展相关研

究,国际上首次进行了盾构原位劈裂试验,形成了泥水劈裂发生、伸展系列理论,提出了盾构开挖面泥水劈裂失稳判定方法,研发了对泥水特性、支护压力和掘进参数系统调控的成套施工技术,成功应用于南京长江隧道等国内大型水下隧道工程,初步解决了水下盾构在高水压、小覆土条件下防控开挖面泥水劈裂失稳的核心问题^[25-31]。

2.1.4 盾构施工姿态控制技术

目前,人工调姿普遍存在纠偏不及时、多偏欠纠、少偏过纠等问题。随着大数据、深度学习等技术的进步,盾构机姿态控制正朝着自动化、智能化方向发展。浙江大学杨华勇团队^[32,33]从电液控制理论入手,基于提出的推进液压系统载荷顺应性和姿态预测性纠偏理论,形成了一套完整的盾构姿态纠偏策略和轨迹精确跟踪方法,该成果荣获国家科技进步一等奖。龚国芳等^[34,35]基于推进系统的运动学分析,提出了一种基于主/从控制策略的多缸控制系

统,形成了一种盾构掘进轨迹自动控制方法,为盾构机姿态自动控制奠定了基础。上海隧道依托人工智能技术,率先研发了具备“自主巡航”功能的“智驭号”盾构机^[36-39],在杭州-绍兴城际铁路区间隧道初步实现了“自主巡航”。

2.2 盾构设备方向

2.2.1 盾构装备制造技术

盾构机是集隧道掘进、出渣、排泥、拼装衬砌、导向纠偏等功能于一体的机电设备,涉及地质、土木、机械、力学、液压、电气、控制、测量等十多门学科^[40]。2005年之前,中国盾构机市场大部分被德、日、美三国企业垄断。如今,中国90%市场、全球2/3市场由铁建重工、中铁装备、中交天和、上海隧道、三三工业、北方重工等中国企业所占有。2021年,在盾构机制造企业全球5强榜单中,中国有4家企业上榜,其中铁建重工超越世界知名厂商德国海瑞克位居榜首^[41]。我国盾构机在大直径^[42](中交天和16.07 m泥水平衡盾构机“运河号”、铁建重工16.07 m泥水平衡盾构机“京华号”)、小直径(铁建重工、中石油管道局联合研发2.77 m泥水平衡盾构“奎河力行号”)、多模式^[43](中铁装备12.84 m土压-泥水双模盾构“紫瑞号”)、异形^[44](上海隧道研制类矩形盾构“阳明号”,断面尺寸11.83 m×7.27 m)等方面均取得显著的成绩。虽然国产大直径盾构已有成功案例,但我国在盾构机部分关键零部件的生产制造技术(主轴承、主密封、减速机、液压配件、检测元器件等)、系统集成技术、控制技术等方面仍然存在“卡脖子”问题。盾构机主轴承技术一直被美国铁姆肯Timken^[45],日本NSK^[46],瑞典斯凯孚SKF^[47]等所掌握。对此,国内的企业和科研单位进行了科研攻关并取得一些成果。中铁隧道局、洛阳LYC轴承公司联合研制出了完全自主知识产权的主轴承(轴承直径4.6 m),并应用于11 m直径泥水盾构机中铁R148号,完成舟山鲁家峙海底隧道掘进任务^[48]。2023年10月,由中国铁建重工自主研发的超大直径主轴承(轴承直径8.61 m)在湖南长沙下线,可用于驱动18 m级超大直径盾构机,使国产超大直径盾构有了全系列的中国“心”^[49]。行星工程机械公司研制出首台自主知识产权的盾构机主驱动减速机,成功应用于重庆市江北机场线地铁隧道工程^[50]。中交天和在国际上首次将光纤磨损检测技术应用于“运河号”盾构机的刀具检测上,服务于北京东六环改造工程。上海隧道首次将盾构推拼同步技术应用于国产盾构机“骥跃号”,施工掘进效率有望提升30%~50%^[51]。国产

盾构机在关键零部件制造方面取得部分进展,也集成了一些较新的技术,但在装备寿命、可靠性、自动化等方面仍需足够的检验。

2.2.2 盾构刀具材料研发、刀具配置及换刀技术

复杂地层水下长大盾构隧道施工时,由于掘进距离长、切削环境复杂、刀盘边缘线速度较大等原因,刀具的正常磨损与异常损伤更为突出,开舱换刀风险更高。为保障水下隧道盾构高效、安全掘进,亟需改进和研发刀具材料,改善生产工艺,优化刀具配置方法,实现刀具磨损量的精准预测,提高换刀技术水平。在刀具材料及生产工艺方面,中国武汉江钻、株洲硬质合金、洛阳九久和山东天工等企业都在进行刀圈模具钢的研发^[52],山东天工参与编制了盾构机切削刀具行业标准^[53]。北京科技大学郭汉杰团队^[54]通过超重力场下的近终形电渣浇铸刀圈试验,确定了浇铸TBM刀圈的最佳工艺参数,形成了有衬电渣低氧冶炼-复合超重力场近终形电渣浇铸刀圈的生产工艺,缩短了刀圈的生产流程,提高了材料的应用率及刀圈的耐磨性。在刀具配置及磨损方面,中南大学夏毅敏团队^[55,56]针对滚刀刀圈的磨损行为进行了研究,分析了刀圈硬度及服役环境对刀圈磨损的影响。何川、周顺华等^[57,58]提出了适用于富水砂卵石地层的刀盘刀具优化配置方法,研发了新型耐磨刀具、地层减磨改良以及小空间常压换刀技术,解决了刀具偏磨、刀盘解体破坏、螺旋机损坏等机具磨损失效难题,获国家技术发明二等奖。在换刀技术方面,汕头大学沈水龙团队^[59]通过采用整合了遗传算法的GMDH神经网络建立了滚刀寿命预测模型,以此对换刀时机进行指导。铁建重工、中铁十四局集团联合研制了首台国产常压换刀式大直径泥水平衡盾构机“沅安号”^[60],实现了常压换刀技术的国产化。

2.2.3 盾构施工管片拼装技术

管片拼装机是专门用于隧道内预制管片实时拼装衬砌的多自由度机械手。人工操作是当前管片拼装的主要方式,存在着工作效率低、拼装误差大等问题,影响盾构隧道施工进度和隧道成形质量。随着科技进步,管片拼装技术正在朝着自动化、多功能化、智能化方向发展。目前,中铁装备^[61,62]研发了一种半自动管片拼装机,解决了现有技术中管片拼装自动化程度低、拼装效率低的问题。上海隧道首创了盾构“推拼同步”技术及模拟试验平台,形成了推拼同步组态控制理论和推进系统力矩矢量控制系统,自主研发了多项专利技术^[63-67],并已集成到“骥跃号”盾构机上,掘进效率较传统方式有望提升30%~50%。中交天和研制出了全自动智能化管片

拼装技术^[68,69],可实现管片的自动运输、抓举和拼装等功能,并在南京市和燕路过江通道工程“振兴号”盾构机上成功应用。浙江大学杨华勇院士团队^[70-73]提出了基于位置-速度复合控制系统的高速-高精度管片拼装技术,可以有效地消除高速和大惯性荷载引起的稳态误差和冲击力,有效降低了管片拼装过程中的能耗。

2.2.4 水下盾构隧道病害智能检测及运维技术

据统计,约占总数 1/3 的隧道存在着衬砌结构开裂和渗漏水等病害,如何保证百年工程的全寿命周期正常运营是未来水下隧道亟待解决的关键问题^[74-77]。水下隧道的健康监测是针对该问题的有效手段^[78]。近年来,我国也提出了几种便捷、高效的水下隧道健康检测方法。朱合华等^[79]发明了一种车载式地铁隧道病害数据自动化采集系统,该系统克服了人工检测的缺陷,具有信息采集准确、病害检测工作效率高的特点。黄宏伟等^[80]提出一种基于全卷积网络的盾构隧道渗漏水病害图像识别算法,能有效地避免管片拼缝、螺栓孔、管线、支架等干扰物的影响,特别是在克服管线遮挡方面具有优越的鲁棒性。袁勇等^[81]发明了一种用于运营地铁隧道结构病害综合快速检测装置,加快了检测的速度和数据处理速度。刘学增等^[82]提出了一种基于隧道环境信息的病害预测方法,可用于施工或运营过程中结构病害预防工作。朱爱玺等^[83]发明了一种基于机器视觉的高速公路隧道检测车系统,该系统采用图像处理 and 激光扫描结合的方式来进行隧道的病害与环境健康监测。

2.3 结构安全与防水

2.3.1 水下盾构隧道的衬砌结构设计

我国建设及规划的水下隧道工程逐渐呈现出高水压、大直径、大埋深、地质条件复杂的发展趋势,给盾构隧道建设、运营安全带来了巨大挑战,提出适用于高水压条件的管片形式及结构设计理论已成为亟需攻破的难点问题。西南交通大学何川团队在 973 项目支持下,独立研发了“多功能盾构隧道结构体试验系统”装置,进行了国内首次大型水下隧道管片通缝与错缝拼装方式原型结构加载试验^[84,85],建立了管片整体刚度和局部强度两项指标^[86],揭示了大直径水下盾构隧道双层衬砌结构在横、纵方向的力学特性,探明了管片与二次衬砌之间的相互作用机理^[87,88],成果获国家科技进步二等奖。铁四院肖明清团队^[89]提出了一种“管片衬砌+非封闭内衬”的衬砌结构,可以大幅度地减少河床冲淤变化时的结

构横向变形,同时确保隧道底部与两侧等重点部位的防水性能及结构的长期稳定性。方勇等^[90,91]研制了外水压加载装置,实现了圆形衬砌结构的均匀外水压模拟,揭示了水下盾构土水压力及拼装方式对管片受力特征的影响机理。

2.3.2 水下盾构隧道的衬砌防水性能

盾构隧道接缝密封垫防水是水下隧道防水的关键。陆明等^[92]利用自主研发的速凝型防水涂层变形缝和裂缝变化试验装置,进行了国内首次防水涂层在变形缝与不规则裂缝变化工况下的抗水压性能测试。同济大学廖少明团队^[93]在 973 项目支持下自主研发了 4 MPa 级 T 字缝防水性能检测试验装置,进行了接缝临界水压与接缝变形关系探索实验,提出了一种橡胶密封垫耐久性多层次评价方法,对水下盾构隧道防水安全性能进行了探讨。丁文其等^[94,95]研发了一种可准确监测接缝在不同开口和偏移量组合下漏水压力的试验装置,提出了一种考虑侧向水压力作用的密封胶失效机制。张冬梅等^[96,97]分析了接缝渗漏、侵蚀对隧道结构的影响及引起的沉降。张稳军等^[98]分析了不同错台量条件下复合型密封垫防水能力失效机制,提出了复合型密封垫长期防水性能预测方法。肖明清等^[99]提出了接缝防水弹性密封垫功能区块设计思路,建立了保障防水可靠性的盾构法隧道接缝设计方法。

2.3.3 水下盾构隧道风险评估及应对策略

水下盾构隧道风险评估与管控涵盖项目的勘察、设计、施工和运维全寿命周期安全,开展风险评估有利于决策科学化,减少工程事故的发生^[100,101]。丁烈云等^[102]以我国首条穿越长江地铁隧道(武汉地铁 2 号线)工程为依托,研发了可对施工过程中环境、结构及人员等安全信息进行综合分析判断的水下盾构隧道联络通道施工风险实时预警系统,实现了高水压条件下盾构隧道施工安全风险“感、传、知、控”一体化功能。黄宏伟等^[103]研发了 0.00017°FS 高精度 MEMS 微型无线倾角支点(功耗为国际一流产品的 1/3 ~ 1/2)和接缝张开无线感知节点,实现了隧道安全风险无线同步“灾变精知”;通过长大隧道工程无线智慧传感网络理论方法,解决了数据精准传输(低于 0.5% 丢包)及超低功耗(2 μ A)智慧组网难题,最后提出安全风险动态可视化预警及可恢复控制技术,该技术亦可用于水下盾构隧道结构风险预测和管控。

2.4 超大直径盾构隧道重大工程创新

(1) 被称为“万里长江第一隧”的南京长江隧道

于2005年开工建设,是我国最早建设的超大直径盾构隧道之一。盾构隧道开挖直径达14.96 m,最大水压为0.65 MPa,江底冲槽区覆土超浅(不足1倍洞径),面临隧道直径大、水压高、距离长、地质复杂、透水性强、覆土超薄等诸多难题,取得了超大直径盾构隧道结构设计、卵石石刀具配置以及高水压浅覆土冲槽区开挖面稳定控制等重大创新成果,获得国家科技进步二等奖、中国土木工程詹天佑奖、国家优质工程金奖等系列重大科技奖励。

(2) 被誉为“中国世纪铁路隧道”的狮子洋海底隧道,全长10.8 km,盾构直径11.18 m,是国内首次采用“相向掘进、地中对接、洞内解体”方式进行施工的盾构隧道。该工程具有刀具磨损严重、江底地中盾构对接等工程难点,在建设、设计和科研部门的联合攻关下,系统解决了在结构安全保障、轨道平顺性控制、长距离掘进、关键装备研发、环保与防灾疏散等方面的多项技术难题,形成的成套创新技术,获国家科技进步二等奖、国家优质工程奖、中国土木工程詹天佑奖等多项科技奖励。

(3) 汕头苏埃跨海通道是我国首座位于8度地震烈度区的超大直径海底隧道,全长6.68 km,其中海底盾构段长度约为3 km,盾构开挖直径达15.03 m。苏埃通道水域段全部采用盾构掘进,其中小于1倍洞径的浅覆土段占到线路总长的57%,且上部覆土层以高触变性的淤泥和淤泥质土为主,部分区间段为极端软硬不均复合地层,施工难度极大。项目在刀盘结构与刀具配置、软硬不均地层滚刀破岩适应性、掘进效能最大化、隧道结构抗震等方面取得了诸多创新成果,获中国交通运输协会科学技术一等奖。

3 超大直径盾构隧道工程领域面临的挑战与对策

近年来,我国建设及规划的水下盾构隧道工程逐渐向着大直径、长距离、高水压、地质复杂化等方向发展,随着工程难度的不断增加,超大直径盾构隧道在理论与技术层面也面临着诸多挑战。

3.1 挑战

(1) 高水压复杂地质开挖面稳定控制。水下超大直径盾构掘进可能面临上软下硬复合地层、高渗透砂层、江海底冲槽等复杂地质地貌。当盾构穿越上软下硬地层时,受下部硬岩的影响,掘进速度较慢,上部软土在刀盘长时间的切削下可能发生坍塌事故。水下浅覆土冲槽的存在则会加剧泥水劈裂喷

发风险。此外,在高水压高渗地层,当盾构在水下带压开舱时,因地层稳定性差、泥浆成膜困难,开挖面稳定控制也是困扰水下盾构施工的重要难题,高水压复杂地质地貌条件下的开挖面稳定控制面临极大挑战。

(2) 盾构设备关键部件国产化与再制造。目前,国产盾构机的主轴承、姿态测量系统、盾尾密封、智能刀具等关键部件主要通过引进国外的技术。盾构主轴承是盾构的核心部件,其国产化正处于初步探索阶段。国产主轴承工作性能的可靠性、耐久性仍需要大量工程实践检验与提升,尚未达到高水压环境下大直径盾构的使用条件。盾构姿态监测等一系列的监测数据是重要的工程信息,存在数据安全风险。盾尾密封系统在高水压长距离掘进过程中易磨损失效,密封安全难以保障。超大断面盾构多层穿越面临刀具切削机理复杂、刀具失效难以预测等问题,缺乏有效监测手段。加速推进主轴承、盾尾密封等关键部件国产化及再制造迫在眉睫。

(3) 盾构智能化掘进控制技术。目前工程中盾构掘进参数,主要是操作手凭经验进行控制,存在掘进参数对地层的不适应性问题。当盾构在更高水压、更深覆土的环境中掘进,对掘进参数的适应性的要求更高,施工风险更大,仅凭经验操作已无法满足未来更为严苛的施工安全要求。盾构智能化掘进是盾构技术的重要发展方向,虽然人工智能已广泛应用于各行各业,但是在盾构领域进行应用还存在诸多问题,如何实现盾构智能化掘进仍需要进一步探索。

(4) 高水压盾构隧道结构及接缝防水安全。在常规条件下,现有水土压力及结构设计理论基本可以满足工程需求,而在高水压作用下,渗流影响是无法忽略的关键性问题,结构受力特性也可能发生变化,常规土水荷载计算及结构设计方法是否满足工程需求仍需验证。此外,水下盾构隧道在长期运营阶段面临江海水侵蚀、复杂围岩荷载、车辆荷载以及灾害等,易产生接缝张开、错台、结构破损、防水材料老化问题,导致高水压作用下隧道结构防水体系失效。如何保持盾构隧道结构及接缝防水的长期安全可靠是水下盾构隧道工程面临的重大难题。

(5) 水下盾构隧道结构双层衬砌工作性能。当前,我国水下盾构隧道大量采用单层衬砌结构,在高水压复杂地质条件下的单层衬砌结构长期耐久性面临较大挑战,施作二次衬砌可以提升盾构隧道力学及防水性能,但是,二次衬砌同样会挤占建筑空间、增加工程成本。因此,水下盾构隧道是否采用二次

衬砌还存在争议,二次衬砌与管片间的相互作用、二次衬砌的承载机理等都未完全明确,缺乏系统的双层衬砌结构力学性能的分析理论与评价方法,水下盾构隧道是否施作二次衬砌、施作二次衬砌后的工作性能如何等一系列基本问题仍需要进一步研究解答。

(6) 水下盾构隧道健康监测与维护。盾构隧道的健康监测与维护对于运营安全具有重要意义,水下盾构隧道面临地质复杂、水压高、腐蚀性强等问题,长期监测对传感设备的防水、防腐蚀、存活率、长距离传输稳定性提出了新的挑战。对于出现病害的隧道,病害的识别诊断与修复迫在眉睫,隧道病害特别是一些深层次的空洞、裂缝、钢筋锈蚀、接缝张开、错台具有隐蔽性,出现的病害也往往难以根治,如何有效维护病害隧道也缺乏系统的理论与技术体系,随着水下盾构隧道大量进入运营期,如何保证百年工程的全寿命周期安全是未来水下隧道亟待解决的重大问题。

(7) 盾构浆渣绿色处理与资源化利用。随着盾构隧道向大直径、超大直径、特大直径发展,对设备选型、参数配置、操控技术及配套工艺要求越高,产生废弃泥浆与渣土量也越大。因施工工艺需要,盾构施工期间采用的密封油脂、絮凝剂等辅助材料会进入盾构浆渣中,巨大量级的盾构浆渣的处理处置不仅提高经济成本,还带来了消纳场地、环境影响等问题,在大力推行绿色环保理念的背景下,如何实现废弃浆渣的减量化、资源化再利用成为盾构工程面临的一大难题。

(8) 水下盾构隧道联络通道设计与施工。水下盾构隧道距离长、救援难度大,双线隧道间的横向联络通道是灾情发生时人群疏散与救援的“生命通道”。水下盾构隧道间的联络通道如何确定合理间距尚无标准可依,缺乏相应的理论与设计方法;修建水下联络通道难度极大,若采用冻结法+矿山法开挖,巨量水体冻结难度大、开挖风险高。机械法联络通道则面临交叉结构稳定性和防水安全的重大挑战,例如,香港屯门海底隧道采用机械法修建联络通道,出现了结构破损、土水涌入隧道的险情。因而,隧道联络通道设计与施工仍然是水下盾构隧道工程的重大挑战。

3.2 对策

(1) 在水下盾构隧道开挖面稳定控制方面:加强高水压复杂地质条件下的盾构开挖面稳定基础理论的研究,通过试验探明高水压复杂地质的开挖面

失稳形态,建立上软下硬地层、成层土的开挖面主动失稳和劈裂破坏模型,揭示盾构刀盘及动态泥膜对开挖面稳定作用机制,构建盾构刀盘与泥水共同作用下开挖面稳定评价理论。大力发展常压换刀技术,减少开舱换刀带来的开挖面失稳风险,将理论成果与实际工程相结合,形成一套成熟的高水压复杂地质条件下盾构开挖面稳定控制技术体系。

(2) 在盾构关键部件国产化及再制造方面:加强特种材料的基础研发,建立可实现多工况多种环境的主轴承工作极限试验平台,形成高能束激光熔覆再制造控形-控性技术和修复方法,研发可承受高速旋转、巨大载荷和强烈温升的盾构主轴承,形成超大直径盾构主轴承再制造抗磨修复技术与工艺方法,最终实现超大直径盾构领域的“中国芯”。倾斜仪作为盾构姿态监测系统的主要部件,国产化的关键在于倾斜仪和转换模块的国产化替代,深入剖析目前已有成熟的盾构姿态监测系统的内在原理及设备构造,结合我国先进的5G技术,并集成于盾构掘进大数据智慧平台。研发耐磨抗疲劳的新型盾构密封刷和耐高压密封性能的新型油脂材料,实现盾尾密封系统耐水压性能大于0.8 MPa,耐磨次数提高至2万次。研发刀具传感器内置集成装置及刀具状态精准感知和无线传输技术,建立信息融合的刀具智能感知与诊断系统,实现毫米级精度刀具磨蚀实时监测。

(3) 在盾构智能掘进方面:盾构掘进必须从仅凭经验操控,向“经验+智能”发展,最终实现“智能”掘进。而盾构智能掘进的实现需要多学科、多技术的交叉融合。通过目前发展迅速的通信、信息、计算机软件、人工智能、管理科学、行为科学、控制工程以及系统科学等理论,进行盾构掘进机械化与智能决策信息化深度融合,形成盾构智能掘进技术体系。

(4) 在水下盾构隧道结构及接缝防水方面:发展高水压条件下海底超大直径盾构隧道荷载计算及结构设计方法,优化密封垫材料与型式,提升防水性能;对于水下盾构隧道结构性能的劣化,可考虑采用双层衬砌结构;发展新型管片结构,研发新型材料,兼具结构安全和防灾功能的提升。

(5) 在水下盾构隧道双层衬砌方面:对于水下盾构隧道的单层衬砌结构,需要考虑长期使用或灾害、事故发生后结构性能的劣化,预留内衬及补强的空间;对盾构管片与二次衬砌间作用机理进行研究,开展盾构隧道二次衬砌结构力学及方式性能足尺试验,探明水土压力作用下双层衬砌结构荷载变化规

律,提出考虑二次衬砌的隧道结构强度、耐久性、稳定性多指标评价体系,建立双层衬砌结构性能评价理论与方法,系统地解答水下盾构隧道何种情况下需要施作二次衬砌、如何合理设计二次衬砌等关键问题。

(6) 在水下盾构隧道监测与维护方面:对于水下盾构隧道监测要考虑高水压海水腐蚀、长距离传输等问题,通过多学科交叉,研发防水性强、防腐蚀性高、耐久性好、能长距离自动监测的传感设备与技术,基于大数据与智能算法研发隧道病害自动化巡检机器人,建立科学的水下盾构隧道健康监测方法与技术标准,完善盾构隧道病害诊断和评估理论体系,研发水下盾构隧道结构新型修复材料和韧性提升技术。

(7) 在盾构浆渣绿色处理与资源化利用方面:厘清不同地层条件下盾构浆渣的基本特性,揭示盾

构浆渣的产生及刀具切削、刀盘旋转与环流携渣机理,提高盾构浆渣泥水分离效率,通过掘进参数、刀盘刀具合理设计,使更多的泥浆进入泥水循环系统中,实现废弃浆渣的减量化。同时,研发盾构浆渣回收利用新技术、新模式,将外运的废弃浆渣经加工处理后用作同步注浆、注浆加固材料和路基基层等,变废为宝,节约资源,同时可减少环境污染。

(8) 在水下盾构隧道联络通道设计与施工方面:结合火灾原型模拟试验和虚拟场景搭建,建立火灾人员疏散模型,为逃生通道间距设计提供理论依据;优化特殊衬砌环结构设计理论,保证机械法高效破洞和结构安全;从新型刀盘刀具型式研制、掘进机姿态控制、始发接收措施、交叉结构防水等方面优化联络通道机械法施工技术,保证水下盾构隧道工程安全。

参考文献

References

- [1] 李术才,徐帮树,丁万涛,等.海底隧道最小岩石覆盖厚度的权函数法[J].岩土力学,2009,30(4):989-996.
LI Shucai, XU Bangshu, DING Wantao, et al. Weighted Function Method for Minimum Rock Cover Thickness of Subsea Tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 989-996.
- [2] CHENG Xuansheng, ZHANG Xiaoyan, CHEN Wenjun, et al. Stability Analysis of a Cross-Sea Tunnel Structure under Seepage and a Bidirectional Earthquake[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(9): 06017008.
- [3] GUO Caixia, QI Jie, SHI Leilei, et al. Reasonable Overburden Thickness for Underwater Shield Tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 35-40.
- [4] MAIDL B, HERRENKNECHT M, MAIDL U, et al. Mechanised Shield Tunnelling[M]. 2nd ed. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2012.
- [5] 袁大军. 越江海盾构隧道合理覆土厚度[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
YUAN Dajun. Reasonable Soil and Rock Cover for Crossing-River or Subsea Shield Tunnel[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [6] 刘学彦,王复明,袁大军,等.泥水盾构支护压力设定范围及其影响因素分析[J].岩土工程学报,2019,41(5):908-917.
LIU Xueyan, WANG Fuming, YUAN Dajun, et al. Range of Support Pressures for Slurry Shield and Analysis of Its Influence Factors [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 908-917.
- [7] 刘学彦. 越江海泥水盾构隧道合理覆土厚度研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
LIU Xueyan. Research on Reasonable Cover Soil Thickness for Shield Tunnels with Mud and Water in the Cross River Sea[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [8] 袁大军,王将,李兴高,等.基于掘进安全的越江海盾构隧道合理覆土设定方法:CN201810264302.8[P].2020-06-23.
YUAN Dajun, WANG Jiang, LI Xinggao, et al. A Reasonable Soil Cover Setting Method for Cross River Sea Shield Tunnels Based on Excavation Safety: CN201810264302.8[P]. 2020-06-23.
- [9] LIU Xueyan, YUAN Dajun. Mechanical Analysis of Anti-Buoyancy Safety for a Shield Tunnel under Water in Sands[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 47: 153-161.
- [10] 刘学彦,袁大军,姜曦.基于抗浮稳定的盾构隧道合理覆土厚度研究[J].中国工程科学,2015,17(1):88-95.
LIU Xueyan, YUAN Dajun, JIANG Xi. Research on Depth of Earth Cover for Shield Tunnel Anti-Buoyancy Security[J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(1): 88-95.
- [11] 钱七虎.隧道工程建设地质预报及信息化技术的主要进展及发展方向[J].隧道建设,2017,37(3):251-263.
QIAN Qihu. Main Developments and Directions of Geological Prediction and Informatized Technology of Tunnel Construction[J].

- Tunnel Construction, 2017, 37(3): 251-263.
- [12] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090-1113.
LI Shucai, LIU Bin, SUN Huaifeng, et al. State of Art and Trends of Advanced Geological Prediction in Tunnel Construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1090-1113.
- [13] 聂利超, 李术才, 刘斌, 等. 隧道含水构造频域激发极化法超前探测研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1151-1160.
NIE Lichao, LI Shucai, LIU Bin, et al. An Advanced Detection Study of Frequency Domain Induced Polarization Method for Water-Bearing Structure of Tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1151-1160.
- [14] 刘斌, 李术才, 李建斌, 等. TBM掘进前方不良地质与岩体参数的综合获取方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(6): 105-112.
LIU Bin, LI Shucai, LI Jianbin, et al. Integrated Acquisition Method of Adverse Geology and Rock Properties Ahead of Tunnel Face in TBM Construction Tunnel[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2016, 46(6): 105-112.
- [15] 杨添任, 贺飞, 宁向可, 等. 高黎贡山隧道TBM超前地质预报系统设计及应用[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(4): 37-42.
YANG Tianren, HE Fei, NING Xiangke, et al. Design and Application of Advanced Geological Prediction System of TBM for Gaoligongshan Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(4): 37-42.
- [16] 张星煜. 盾构法施工超前地质预报初探[D]. 北京: 北京市市政工程研究院, 2016.
ZHANG Xingyu. Preliminary Study on Geological Prediction of Shield Tunneling Method[D]. Beijing: Beijing Municipal Engineering Research Institute, 2016.
- [17] 侯伟清, 张星煜, 叶英. 基于地震波反射法的盾构施工超前地质预报初探[J]. 隧道建设, 2017, 37(8): 1003-1010.
HOU Weiqing, ZHANG Xingyu, YE Ying. Preliminary Study of Advanced Geological Prediction Based on Seismic Reflection Method for Shield Tunneling[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(8): 1003-1010.
- [18] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Continuous Velocity Fields for Collapse and Blowout of a Pressurized Tunnel Face in Purely Cohesive Soil[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(13): 2061-2083.
- [19] IBRAHIM E, SOUBRA A H, MOLLON G, et al. Three-Dimensional Face Stability Analysis of Pressurized Tunnels Driven in a Multilayered Purely Frictional Medium[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49: 18-34.
- [20] ZAMORA HERNÁNDEZ Y, DURAND FARFÁN A, PACHECO DE ASSIS A. Three-Dimensional Analysis of Excavation Face Stability of Shallow Tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 92: 103062.
- [21] MIN Fanlu, ZHU Wei, HAN Xiaorui. Filter Cake Formation for Slurry Shield Tunneling in Highly Permeable Sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 423-430.
- [22] 闵凡路, 朱伟, 魏代伟, 等. 泥水盾构泥膜形成时开挖面地层孔压变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 722-727.
MIN Fanlu, ZHU Wei, WEI Daiwei, et al. Change of Pore Water Pressure in Soil as Filter Cakes Formed on Excavation Face in Slurry Shield[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 722-727.
- [23] MIN Fanlu, SONG Hangbiao, ZHANG Nan. Experimental Study on Fluid Properties of Slurry and Its Influence on Slurry Infiltration in Sand Stratum[J]. Applied Clay Science, 2018, 161: 64-69.
- [24] 朱伟, 闵凡路, 钟小春. 泥水加压盾构泥浆与泥膜[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
ZHU Wei, MIN Fanlu, ZHONG Xiaochun. Slurry and Filter Cake in Slurry Shield[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [25] 刘学彦, 袁大军. 盾构掘进过程中防止泥水劈裂的泥水压力设定[J]. 土木工程学报, 2014, 47(5): 128-132.
LIU Xueyan, YUAN Dajun. Setting of Slurry Pressure Without Soil Fracture during Shield Tunneling[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(5): 128-132.
- [26] 金大龙, 袁大军, 郑浩田, 等. 高压条件下泥水盾构开挖面稳定离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1653-1660.
JIN Dalong, YUAN Dajun, ZHENG Haotian, et al. Centrifugal Model Tests on Face Stability of Slurry Shield Tunnels under High Water Pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1653-1660.
- [27] 刘学彦, 袁大军, 郭小红. 现场泥水劈裂试验及应用研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1901-1907.
LIU Xueyan, YUAN Dajun, GUO Xiaohong. Test and Application of in-Situ Slurry Fracturing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1901-1907.
- [28] LIU Xueyan, YUAN Dajun. An in-Situ Slurry Fracturing Test for Slurry Shield Tunneling[J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2014, 15(7): 465-481.
- [29] 袁大军, 沈翔, 刘学彦, 等. 泥水盾构开挖面稳定性研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 24-37.
YUAN Dajun, SHEN Xiang, LIU Xueyan, et al. Research on Excavation Face Stability of Slurry Shield Tunneling[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 24-37.

- [30] 王滕,袁大军,金大龙,等. 泥水盾构中劈裂压力影响因素研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊1): 31-36.
WANG Teng, YUAN Dajun, JIN Dalong, et al. Influence Factors of Fracturing Pressure during Slurry Shield Tunnelling[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 31-36.
- [31] WANG Teng, YUAN Dajun, JIN Dalong, et al. Experimental Study on Slurry-induced Fracturing During Shield Tunneling[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2021, 15(2): 333-345.
- [32] XIE Haibo, DUAN Xiaoming, YANG Huayong, et al. Automatic Trajectory Tracking Control of Shield Tunneling Machine under Complex Stratum Working Condition[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 32: 87-97.
- [33] 施虎,杨华勇,龚国芳,等. 盾构推进液压系统载荷顺应性指标和评价方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(8): 1444-1449.
SHI Hu, YANG Huayong, GONG Guofang, et al. Definition and Evaluation Method for Compliance of Thrust Hydraulic System for Shield Tunneling Machine[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2013, 47(8): 1444-1449.
- [34] 龚国芳,洪开荣,周天宇,等. 基于模糊PID方法的盾构掘进姿态控制研究[J]. 隧道建设, 2014, 34(7): 608-613.
GONG Guofang, HONG Kairong, ZHOU Tianyu, et al. Research on Shield Boring Attitude Control Based on Fuzzy PID Algorithm [J]. Tunnel Construction, 2014, 34(7): 608-613.
- [35] WANG Lintao, YANG Xu, GONG Guofang, et al. Pose and Trajectory Control of Shield Tunneling Machine in Complicated Stratum [J]. Automation in Construction, 2018, 93: 192-199.
- [36] 陈刚,王浩. 盾构掘进纠偏的智能控制方法: CN201811041242.X[P]. 2019-11-08.
CHEN Gang, WANG Hao. Intelligent Control Method for Correcting Deviation in Shield Tunneling: CN201811041242.X[P]. 2019-11-08.
- [37] 秦元,黄圣,闵锐,等. 盾构机自动姿态修正系统及修正方法: CN201810598431.0[P]. 2020-06-23.
QIN Yuan, HUANG Sheng, MIN Rui, et al. Automatic Attitude Correction System and Correction Method for Shield Tunneling Machines: CN201810598431.0[P]. 2020-06-23.
- [38] 秦元,黄圣,顾健江,等. 盾构机掘进姿态矢量自适应调整方法及系统: CN201910890090.9[P]. 2021-02-09.
QIN Yuan, HUANG Sheng, GU Jianjiang, et al. Adaptive Adjustment Method and System for Shield Tunneling Machine Excavation Attitude Vector: CN201910890090.9[P]. 2021-02-09.
- [39] 周文波,胡珉,吴惠明,等. 盾构智能控制系统及方法: CN202110558142.X[P]. 2021-08-10.
ZHOU Wenbo, HU Min, WU Huiming, et al. Intelligent Control System and Method for Shield Tunneling: CN202110558142.X[P]. 2021-08-10.
- [40] 洪开荣. 盾构与掘进关键技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
HONG Kairong. Key Technologies for Shield Machine and Tunnelling[M]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [41] 欧阳桃花,曾德麟. 拨云见日——揭示中国盾构机技术赶超的艰辛与辉煌[J]. 管理世界, 2021, 37(8): 194-206.
OUYANG Taohua, ZENG Delin. Dispel the Clouds and See the Sun: Reveal the Hardship and Glory of China's Shield Machine Technology Catch-Up[J]. Journal of Management World, 2021, 37(8): 194-206.
- [42] 全球最大盾构整装待进 北京东六环入地按下“快进键”[J]. 建设机械技术与管理, 2021, 34(1): 18-19.
The World's Largest Shield Machine is Ready to Enter Beijing's East Sixth Ring Road and Press the "Fast Forward" Button to Enter the Ground[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2021, 34(1): 18-19.
- [43] 国内最大直径双模盾构下线 成都市域铁路网建设再提速[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(12): 1708.
Further Speed up the Construction of Chengdu Railway Network with the Largest Diameter Dual Mode Shield Tunneling in China [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(12): 1708.
- [44] 全球最大断面类矩形盾构隧道在宁波贯通[J]. 隧道建设, 2016, 36(11): 1301.
The World's Largest Rectangular Shield Tunnel with a Cross-Section is Connected in Ningbo[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(11): 1301.
- [45] IL'VES V G, ZUEV M G, SOKOVNIN S Y. Timken China Ball and Tapered Roller Bearing Factory Inch Bearings[J]. Journal of Nanotechnology, 2015.
- [46] NODA T, SHIBASAKI K, MIYATA S, et al. X-Ray CT Imaging of Grease Behavior in Ball Bearing and Numerical Validation of Multi-Phase Flows Simulation[J]. Tribology Online, 2020, 15(1): 36-44.
- [47] BONDAR S, POTJEWIJD L, STJEPANDIC J. Globalized OEM and Tier-1 Processes at SKF[C]//Concurrent Engineering Approaches for Sustainable Product Development in a Multi-Disciplinary Environment. London: Springer, 2013: 789-800.
- [48] 刘娜. 首台使用国产主轴承再制造盾构机下线[J]. 中国设备工程, 2017(1): 7.
LIU Na. The First Domestically Produced Main Bearing Remanufactured Shield Tunneling Machine Was Taken Offline[J]. China

Plant Engineering, 2017(1): 7.

- [49] 为国之重器装上中国“心”，铁建重工自主研发全球最大直径盾构主轴承在长沙下线[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(10): 1809.
China's "Heart" Has Been Installed on the Country's Important Equipment, and China Railway Construction Heavy Industry Has Independently Developed the World's Largest Diameter Shield Tunnel Main Bearing, Which Has Been Produced in Changsha[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(10): 1809.
- [50] 国产盾构机主驱动减速机通过科技成果鉴定[J]. 设备管理与维修, 2016(2): 5.
The Main Drive Reducer of Domestic Shield Tunneling Machine Has Passed the Scientific and Technological Achievement Appraisal [J]. Plant Maintenance Engineering, 2016(2): 5.
- [51] “推拼同步”盾构机告别“走走停停”，新技术将用于上海机场联络线[J]. 隧道与轨道交通, 2021(2): 63.
“Pushing and Assembling Synchronous” Shield Tunneling Machines Bid Farewell to “Running and Stopping”, and New Technology Will Be Used for the Shanghai Airport Connecting Line[J]. Tunnel and Rail Transit, 2021(2): 63.
- [52] 林国标, 张忠键, 贺军, 等. 一种盘形滚刀刀圈合金及其制备方法: CN201310489566.0[P]. 2015-07-15.
LIN Guobiao, ZHANG Zhongjian, HE Jun, et al. A Disc-Shaped Rolling Cutter Ring Alloy and Its Preparation Method: CN201310489566.0[P]. 2015-07-15.
- [53] 中华人民共和国工业和信息化部. 盾构机切削刀具: JB/T 11861-2014[S]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
Ministry of Industry and Information Technology. Shield Machine Cutting Tool: JB/T 11861-2014[S]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [54] 李少英. 复合超重力场近终形电渣浇铸TBM刀圈工艺基础研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
LI Shaoying. Technological Basis of Near Net Shape Electroslag Casting TBM Cutter Ring in Composite Super-Gravity Field[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [55] ZHANG Xuhui, XIA Yimin, ZHANG Yichao, et al. Experimental Study on Wear Behaviors of TBM Disc Cutter Ring under Drying, Water and Seawater Conditions[J]. Wear, 2017, 392/393: 109-117.
- [56] ZHANG Xuhui, LIN Laikuang, XIA Yimin, et al. Experimental Study on Wear of TBM Disc Cutter Rings with Different Kinds of Hardness[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 82: 346-357.
- [57] 何川, 肖中平, 周顺华, 等. 成都地铁盾构隧道工程建设关键技术[Z]. 四川省, 西南交通大学, 2012-06-07.
HE Chuan, XIAO Zhongping, ZHOU Shunhua, et al. Key Technologies for the Construction of Shield Tunnels in Chengdu Metro [Z]. Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, 2012-06-07.
- [58] 李雪, 周顺华, 周俊宏. 复杂地层大直径泥水盾构刀具磨损规律分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(4): 868-873.
LI Xue, ZHOU Shunhua, ZHOU Junhong. Cutter Wearing Analysis of Large Diameter Slurry Shield in Complex Stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(4): 868-873.
- [59] ELBAZ K, SHEN Shuilong, ZHOU Annan, et al. Prediction of Disc Cutter Life During Shield Tunneling with AI via the Incorporation of a Genetic Algorithm into a GMDH-Type Neural Network[J]. Engineering, 2021, 7(2): 238-251.
- [60] 程永亮, 彭正阳, 暨智勇, 等. 一种具有冷冻功能的常压换刀刀盘: CN201910423963.5[P]. 2019-07-09.
CHENG Yongliang, PENG Zhengyang, JI Zhiyong, et al. A Atmospheric Pressure Knife Changing Disc with Freezing Function: CN201910423963.5[P]. 2019-07-09.
- [61] 李龙飞, 叶蕾, 程永龙, 等. 一种半自动管片拼装机及其拼装方法: CN201810693894.5[P]. 2018-10-09.
LI Longfei, YE Lei, CHENG Yonglong, et al. A Semi-Automatic Pipe Segment Assembly Machine and Its Assembly Method: CN201810693894.5[P]. 2018-10-09.
- [62] 高博, 王昆, 胡鹏, 等. 一种盾构半自动拼装机控制系统: CN202021512356.0[P]. 2021-02-26.
GAO Bo, WANG Kun, HU Peng, et al. A Semi-Automatic Assembly Machine Control System for Shield Tunneling: CN202021512356.0[P]. 2021-02-26.
- [63] 闵锐, 秦元, 朱叶艇, 等. 盾构机推拼同步状态下的匀速推进泵控方法及系统: CN202110256356.1[P]. 2021-05-25.
MIN Rui, QIN Yuan, ZHU Yeting, et al. The Pump Control Method and System for Uniform Speed Propulsion of Shield Tunneling Machine in Synchronous State: CN202110256356.1[P]. 2021-05-25.
- [64] 闵锐, 吴文斐, 朱叶艇, 等. 盾构机推拼同步推进系统的阀控方法及系统: CN202110256339.8[P]. 2021-05-25.
MIN Rui, WU Wenfei, ZHU Yeting, et al. Valve Control Method and System for Synchronous Propulsion System of Shield Tunneling Machine: CN202110256339.8[P]. 2021-05-25.
- [65] 闵锐, 朱叶艇, 秦元, 等. 盾构机推拼同步推进系统的泵控方法及系统: CN202110256329.4[P]. 2021-05-25.
MIN Rui, ZHU Yeting, QIN Yuan, et al. Pump Control Method and System for Synchronous Propulsion System of Shield Tunneling

- Machine: CN202110256329.4[P]. 2021-05-25.
- [66] 闵锐, 秦元, 朱叶艇, 等. 盾构机推拼同步状态下的匀速推进阀控方法及系统: CN202110256055.9[P]. 2021-05-25.
MIN Rui, QIN Yuan, ZHU Yeting, et al. Valve Control Method and System for Constant Speed Propulsion of Shield Tunneling Machine in Synchronous State: CN202110256055.9[P]. 2021-05-25.
- [67] 朱叶艇, 朱雁飞, 张闵庆, 等. 推拼同步模式下盾构推进系统顶力分配计算方法: CN202010720677.8[P]. 2020-10-23.
ZHU Yeting, ZHU Yanfei, ZHANG Mingqing, et al. Calculation Method for Top Force Distribution of Shield Tunnel Propulsion System in Pushing and Splicing Synchronous Mode: CN202010720677.8[P]. 2020-10-23.
- [68] 张阳, 张英明, 张连昊, 等. 一种盾构机掘进同步拼装管片的方法: CN201910830923.2[P]. 2019-11-19.
ZHANG Lin, ZHANG Yingming, ZHANG Lianhao, et al. A Method for Synchronously Assembling Pipe Segments during Shield Tunneling: CN201910830923.2[P]. 2019-11-19.
- [69] 张林, 郭素阳, 张连昊, 等. 一种盾构机管片自动化拼装方法及装置: CN202011171866.0[P]. 2021-01-22.
ZHANG Lin, GUO Suyang, ZHANG Lianhao, et al. A Method and Device for Automated Assembly of Shield Tunneling Machine Segments: CN202011171866.0[P]. 2021-01-22.
- [70] WANG Lintao, SUN Wei, GONG Guofang, et al. Electro-Hydraulic Control of High-Speed Segment Erection Processes[J]. Automation in Construction, 2017, 73: 67-77.
- [71] 王林涛, 龚国芳, 施虎. 基于拼装参数优化的盾构机管片拼装节能技术[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(12): 2259-2267.
WANG Lintao, GONG Guofang, SHI Hu. Energy-Saving Technology of Segment Erecting Process of Shield Tunneling Machine Based on Erecting Parameters Optimization[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(12): 2259-2267.
- [72] WANG Lintao, GONG Guofang, YANG Huayong, et al. The Development of a High-Speed Segment Erecting System for Shield Tunneling Machine[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(6): 1713-1723.
- [73] 王林涛. 盾构掘进姿态控制关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
WANG Lintao. Research on Key Technologies for Attitude Control of Shield Tunneling Machine[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [74] ADACHI T. Modern Tunneling Science and Technology[M]. London: CRC Press, 2001.
- [75] 王梦恕. 水下交通隧道发展现状与技术难题——兼论“台湾海峡海底铁路隧道建设方案”[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2161-2172.
WANG Mengshu. Current Developments and Technical Issues of Underwater Traffic Tunnel—Discussion on Construction Scheme of Taiwan Strait Undersea Railway Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2161-2172.
- [76] 周书明, 潘国栋. 水下隧道风险分析与控制[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(增刊2): 1828-1831.
ZHOU Shuming, PAN Guodong. Risk Analysis and Control on Construction of Underwater Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(S2): 1828-1831.
- [77] 洪开荣. 我国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J]. 隧道建设, 2017, 37(2): 123-134.
HONG Kairong. Development and Prospects of Tunnels and Underground Works in China in Recent Two Years[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(2): 123-134.
- [78] 毛江鸿. 分布式光纤传感技术在结构应变及开裂监测中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
MAO Jianghong. Research on Application of Distributed Optical Fiber Sensor in Structural Strain and Cracking Monitoring[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [79] 朱合华, 刘学增, 朱爱玺. 一种车载式地铁隧道病害数据自动化采集系统: CN201210516017.3[P]. 2013-04-17.
ZHU Hehua, LIU Xuezheng, ZHU Aixi. An Automated Data Collection System for Vehicle Mounted Subway Tunnel Diseases: CN201210516017.3[P]. 2013-04-17.
- [80] 黄宏伟, 李庆桐. 基于深度学习的盾构隧道渗漏水病害图像识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 2861-2871.
HUANG Hongwei, LI Qingtong. Image Recognition for Water Leakage in Shield Tunnel Based on Deep Learning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 2861-2871.
- [81] 袁勇, 艾青. 一种用于运营地铁隧道结构病害的检测装置: CN201410495172.0[P]. 2014-12-24.
YUAN Yong, AI Qing. A Detection Device for Structural Defects in Operating Subway Tunnels: CN201410495172.0[P]. 2014-12-24.
- [82] 刘学增, 何喆卿, 李志国. 一种基于隧道环境信息的病害预测方法: CN201811234372.5[P]. 2019-03-22.
LIU Xuezheng, HE Zheqing, LI Zhiguo. A Disease Prediction Method Based on Tunnel Environmental Information: CN201811234372.5[P]. 2019-03-22.

- [83] 朱爱玺, 朱伟佳, 刘学增. 基于机器视觉的高速公路隧道检测车系统: CN201510247907.2[P]. 2017-08-29.
ZHU Aixi, ZHU Weijia, LIU Xuezheng. Machine Vision Based Highway Tunnel Inspection Vehicle System: CN201510247907.2[P]. 2017-08-29.
- [84] 何川, 封坤, 晏启祥, 等. 水下盾构法铁路隧道管片衬砌结构的原型加载试验研究[J]. 中国工程科学, 2012, 14(10): 65-72+89.
HE Chuan, FENG Kun, YAN Qixiang, et al. Prototype Test Study on Mechanical Characteristics of Segmental Lining Structure of Underwater Railway Shield Tunnel[J]. Strategic Study of CAE, 2012, 14(10): 65-72+89.
- [85] FENG Kun, HE Chuan, QIU Yue, et al. Full-Scale Tests on Bending Behavior of Segmental Joints for Large Underwater Shield Tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 75: 100-116.
- [86] 封坤, 何川, 张力, 等. 高水压水下盾构隧道管片结构破坏现象研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(3): 95-106.
FENG Kun, HE Chuan, ZHANG Li, et al. Study on the Segmental Structure Failure of Underwater Shield Tunnel under High Water Pressure[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2020, 2(3): 95-106.
- [87] 周济民. 水下盾构法隧道双层衬砌结构力学特性[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
ZHOU Jimin. Research on Mechanical Behavior of Double-Layer Lining Structure for Underwater Shield Tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [88] XU Guowen, HE Chuan, WANG Jun, et al. Study on the Mechanical Behavior of a Secondary Tunnel Lining with a Yielding Layer in Transversely Isotropic Rock Stratum[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(7): 2957-2979.
- [89] 肖明清, 邓朝辉, 鲁志鹏. 武汉长江隧道盾构段结构型式研究[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(1): 105-110.
XIAO Mingqing, DENG Chaohui, LU Zhipeng. A Study of the Structure Type of the Shield-Driven Section of the Yangtze River Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(1): 105-110.
- [90] 方勇, 汪辉武, 郭建宁, 等. 下穿黄河盾构隧道管片衬砌结构受力特征模型试验[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 132-142.
FANG Yong, WANG Huiwu, GUO Jianing, et al. Model Test Study on the Mechanical Characteristics of Segment Linings for the Shield Tunnel Undercrossing the Yellow River[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2017, 44(5): 132-142.
- [91] CUI Ge, CUI Jian, FANG Yong, et al. Scaled Model Tests on Segmental Linings of Shield Tunnels under Earth and Water Pressures [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2020, 20(6): 338-354.
- [92] 陆明, 雷震宇, 朱祖熹, 等. 接缝喷涂速凝型防水涂层的水密性试验研究[Z]. 上海市, 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 2016-06-16.
LU Ming, LEI Zhenyu, ZHU Zuxi, et al. Experimental Study on Water Tightness of Seam Spray Quick Setting Waterproof Coating [Z]. Shanghai, Shanghai Tunnel Engineering Rail Transit Design and Research Institute, 2016-06-16.
- [93] 周文锋, 廖少明, 门燕青. 盾构隧道“T字缝”接触应力与防水性能研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2264-2270.
ZHOU Wenfeng, LIAO Shaoming, MEN Yanqing. Contact Stress and Waterproof Capacity of T-joint in Shield Tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(12): 2264-2270.
- [94] DING Wenqi, GONG Chenjie, MOSALAM K M, et al. Development and Application of the Integrated Sealant Test Apparatus for Sealing Gaskets in Tunnel Segmental Joints[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 63: 54-68.
- [95] GONG Chenjie, DING Wenqi, SOGA K, et al. Failure Mechanism of Joint Waterproofing in Precast Segmental Tunnel Linings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 84: 334-352.
- [96] 张冬梅, 高程鹏, 尹振宇, 等. 隧道渗流侵蚀的颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊1): 429-438.
ZHANG Dongmei, GAO Chengpeng, YIN Zhenyu, et al. Particle Flow Simulation of Seepage Erosion Around Shield Tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S1): 429-438.
- [97] ZHANG D M, MA L X, ZHANG J, et al. Ground and Tunnel Responses Induced by Partial Leakage in Saturated Clay with Anisotropic Permeability[J]. Engineering Geology, 2015, 189: 104-115.
- [98] 张稳军, 丁超, 张成平, 等. 不同错台量对复合型密封垫影响及长期防水预测[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(3): 337-345.
ZHANG Wenjun, DING Chao, ZHANG Chengping, et al. Influence of Different Dislocation Amount on Composite Sealing Gasket and Long-Term Waterproofing Performance Prediction[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(3): 337-345.
- [99] 肖明清, 钟元元, 陈鹏, 等. 盾构隧道管片接缝密封垫气密性提升试验研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(6): 262-268.
XIAO Mingqing, ZHONG Yuanyuan, CHEN Peng, et al. Experimental Study on the Improvement of Gasket Gas Tightness at Segment Joints in Shield Tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(6): 262-268.
- [100] YOO J O, KIM J S, RIE D H, et al. The Study on Interval Calculation of Cross Passage in Undersea Tunnel by Quantitative Risk Assessment Method[J]. Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 2015, 17(3): 249-256.

- [101] 杨文武, 吴浩然, 卢耀宗, 等. 论盾构法水下隧道工程的工程特点和风险管理方法[C]//2009GHMT第7届两岸四地工程师(台北)论坛论文集, 台北: 中华土木技师公会全国联合会, 2009: 370-381.
YANG Wenwu, WU Haoran, LU Yaozong, et al. On the Engineering Characteristics and Risk Management Methods of Shield Tunneling Underwater Tunnel Engineering[C]//Proceedings of the 7th Cross Strait and Four Regional Engineers (Taipei) Forum 2009 GHMT, Taipei: National Federation of Chinese Civil Engineers Association, 2009: 370-381.
- [102] 丁烈云, 周诚, 叶肖伟, 等. 长江地铁联络通道施工安全风险实时感知预警研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(7): 141-150.
DING Lieyun, ZHOU Cheng, YE Xiaowei, et al. Study on Real-Time Sensing and Early-Warning of Construction Safety Risk for Metro Crossing Passage under Yangtze River[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7): 141-150.
- [103] 黄宏伟, 张东明. 长大隧道工程结构安全风险精细化感控研究进展[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 46-61.
HUANG Hongwei, ZHANG Dongming. Recent Progress on Refined Sensing and Control of Safety and Risk of Long- and Large-Scale Tunnel Lining Structures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 46-61.

Progress and Prospects of Construction Technology for Ultra-Large Diameter Underwater Shield Tunnels

CHEN Jian^{1,2,3,4} YUAN Dajun⁵ SU Xiuting^{1,2} WANG Zhikui^{1,2,3}

(1. China Railway 14 Bureau Group Co., Ltd, Jinan 250101; 2. CRCC Underwater Tunnel Engineering Laboratory, Jinan 250101; 3. Shandong Engineering Research Center for Intelligent Construction and Equipment Remanufacturing of Large Shield Tunnels, Jinan 250101; 4. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100; 5. School of civil engineering, Beijing jiaotong university, Beijing 100044)

Abstract: With the development of the "Belt and Road" Initiative, the National Maritime Strategy, and Regional Economic Integration Strategic Layout, a large number of rail transit, highway, railway, and other large-scale infrastructure projects are facing the challenge of crossing rivers and seas. Starting from the Nanjing Yangtze River Tunnel, Shanghai Yangtze River Tunnel, and Wuhan Yangtze River Tunnel, by introducing, assimilating, practicing, and re-innovating of shield tunnelling technology, China's underwater shield tunnel technology has entered a rapid development stage. A large number of completed and under-construction super underwater shield tunnel projects have greatly promoted the innovation, development, and progress of underwater shield tunnel technology in China and even the world, breaking through a series of technical bottlenecks in shield equipment, design, construction, operation, and maintenance of underwater tunnel. The article systematically elaborates the three major elements of shield technology and their connotations, namely soil-water stability, shield equipment and control, structural safety and waterproofing, analyzes the current status and development trend of ultra-large diameter underwater shield tunnel technology at home and abroad, summarizes the important innovative achievements in ultra-large diameter underwater shield tunnel technology in recent years, and proposes the technical challenges, countermeasures, and engineering application prospects of underwater shield tunnel with large diameter, long distance, high water pressure, and complex geological conditions.

Keywords: Ultra-large diameter; Underwater shield tunnel; Current research status; Development trend; Technological innovation; Challenges and countermeasures