

基于专利情报的盾构急曲线隧道施工技术综述

徐 朔

(上海隧道工程有限公司, 上海市 200032)

摘 要: 随着我国城市化进程的加速和地下空间开发需求的增长, 盾构隧道在高密度城市区域采用急曲线方式施工的情况日益增加。针对上海市桃浦污水处理厂初期雨水调蓄工程的急曲线施工需求, 开展技术调研, 探讨了盾构急曲线技术的原理及其国内外发展现状, 并基于全球专利情报数据, 分析了整体发展态势、竞争格局及重点专利。进一步选取管片附袋技术优化作为案例, 通过系统分析日本高价值发明专利, 筛选出技术成熟度高且高度契合需求的核心专利, 并将相关专利情报提供给技术研发团队, 助力其优化技术方案、提升施工质效, 验证了专利调研在工程中的应用价值, 体现了专利情报在企业战略布局及全球地下工程技术竞争中的重要作用。

关键词: 盾构急曲线技术; 专利情报; 整体态势; 竞争格局; 管片附袋技术

中图分类号: U45

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)07-0261-07

Review on Construction Technology of Shield Sharp Curve Tunnel Based on Patent Intelligence

XU Shuo

(Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization and the growth of the demand for underground space development in China, the cases where shield tunnels are constructed in a sharp curve manner in high-density urban areas are increasing day by day. Focusing on the demand for the sharp curve construction of the initial rainwater storage project in Shanghai Taopu Wastewater Treatment Plant, the technical investigation and survey are carried out. The principle of shield sharp curve technology and its current development status at home and abroad are discussed. And based on the global patent intelligence data, the overall development trend, competitive pattern and key patents of this technology are analyzed. Taking the optimization of the bagging technology for segments as a case, by systematically analyzing the high-value patents for inventions in Japan, the core patents with high technical maturity and a high degree of alignment with the requirements of this project are screened out. And the relevant patent intelligence is provided to the technology research and development teams, which help the teams optimize the technical schemes and improve the quality and efficiency of construction. The application value of patent research in engineering has been verified, and the important role of patent intelligence in the strategic layout of enterprises and the competition of global underground engineering technology is reflected.

Keywords: shield sharp curve technology; patent intelligence; overall situation; competitive pattern; bagging technology for segment

0 引 言

在城市核心区域, 隧道施工面临着诸多复杂挑战, 传统的盾构隧道施工方式在穿越高密度建筑群及复杂地下环境时, 受制于地形条件、既有结构及空间限制, 难以满足现代城市轨道交通和管线工程的需求, 急曲线技术成为应对这一挑战的关键^[1]。相

比传统直线或大半径曲线施工, 急曲线施工面临更高的技术难度, 包括盾构机姿态控制、掘进稳定性、管片适配性、地层扰动控制以及施工安全等多个方面, 因此对施工装备、工艺方法及配套技术提出了更高要求^[2]。上海市桃浦污水处理厂初期雨水调蓄工程TP1.4标(在建)是盾构急曲线施工技术的典型应用案例, 该项目位于普陀区闹市区, 为优化原设计线路转折处的工作井, 隧道平面设置R65 m、R70 m、R75 m三段急曲线, R/D(最小平面半径/隧道外径)最小为13.8。盾构机需在3个十字路口实现直角转弯,

收稿日期: 2025-03-17

作者简介: 徐朔(1986—), 女, 博士, 工程师, 从事地下工程科技信息分析研究工作。

如此小半径的急曲线掘进对盾构机的适应性、管片结构以及施工稳定性提出了极大挑战,因此,需要在施工装备、管片结构优化及掘进参数控制等方面进行深入研究,以确保工程顺利推进。基于上述背景,本次调研围绕桃浦工程的技术需求,聚焦急曲线盾构施工中的关键技术要素,系统梳理了全球范围内急曲线施工的相关专利情报。通过对专利数据的宏观分析,揭示急曲线技术的发展趋势及竞争格局,同时针对其中关键技术要素,筛选出技术成熟度高且与该工程需求高度契合的高价值发明专利,为本工程的技术开发与优化提供精准的情报支撑。

1 盾构急曲线施工技术

根据《盾构法隧道施工与验收规范》(GB 50446—2017)中定义:曲线半径 $R\leq 40D$ (R 为隧道平面曲线半径, D 为盾构直径)的曲线段定义为急曲线段^[3]。日本的《日本隧道标准规范(盾构)及解释(2016年版)》中“第1章3.3隧道轴线”章节对于隧道曲线的定义是“盾构机无须配备铰接装置或采用辅助工法即可掘进的曲线半径为一般曲线半径,小于该曲线半径的曲线为急曲线”^[4]。这是由于曲线施工会受到地

质条件、开挖断面尺寸、盾构机长度、管片类型和环宽等多种因素影响。同样,在欧洲,如伦敦 Crossrail 项目部分曲线段,虽然不符合 40D 的标准,但该项目的部分区间盾构机依然使用了铰接系统和定向控制系统^[5],也可以将其归为急曲线施工。

盾构急曲线施工技术最早在日本得到应用^[6],20 世纪 70 年代,日本的盾构施工技术逐步突破了传统直线隧道的限制,应用于小半径曲线段施工,提出超挖、铰接和盾尾密封等多项创新技术。20 世纪 90 年代后期,欧洲和美国等地区也开始逐步采用急曲线施工技术,对盾构机的设计和控制系统进行了提升。中国的急曲线盾构隧道技术起步较晚,但随着城市轨道交通和城市基础设施建设的飞速发展,其应用需求不断增长,自 2000 年初,中国通过引进国外技术并结合本土化需求,逐步开展相关研究与应用^[7]。表 1 列举了具有不同功能的急曲线隧道案例,可见该技术已经在世界各地的地铁隧道、公路隧道、输水隧道、电缆隧道等多个领域应用,其在城市基础设施建设中的重要性不言而喻,应用情景广阔,亟需进一步的研发与调研,以推动技术创新和工程实践的持续发展。

表 1 部分国内外工程应用案例列举

国家	工程名称	地点	最小曲线半径/m	隧道类型	盾构直径/m	施工时间
日本	东京地铁 7 号线	东京	400	地铁隧道	6.5	1990—1995 年
	环状七号线地下广域调节池	东京	100	排水隧道	13.45	2017—2013 年
	横滨湘南道路隧道	横滨	100	公路隧道	13.59	2018—2023 年
中国	深圳地铁 7 号线	深圳	250	地铁隧道	6.4	2012—2016 年
	北京地铁 14 号线	北京	260	地铁隧道	6.6	2013—2018 年
	上海北横通道隧道	上海	500	公路隧道	15.4	2019—2023 年
其他	伦敦 Crossrail 项目	英国伦敦	600	地铁隧道	9.7	2015—2021 年
	巴黎 RER E 线隧道	法国巴黎	500	地铁隧道	8.6	2017—2023 年
	曼谷 Chidlom 电缆隧道	泰国曼谷	35	电缆隧道	3.2	2019 年至今

2 专利情报调研

根据文献调研,国内外关于急曲线隧道施工的研究主要集中在超挖系统、铰接结构、盾尾密封、测量控制、管片设计等方面^[8]。国内多家企业和研究机构也在积极开展盾构急曲线隧道施工技术的攻关,并在多个工程应用,如上海北横通道工程中山公园工作井—筛网厂工作井 15 m 级盾构机以 $R=500\text{ m}$ 小曲线半径掘进施工,武汉市清水入江二期工程 4 m 盾构最小转弯半径 $R=120\text{ m}$ 等,包蓁^[9]、由广明^[2]、罗云峰^[1]等学者专家对该工法施工技术、掘进装备、应用情况等进行了阐述。尽管急曲线隧道技术在国内

得到了研究和应用,但在实际工程中,仍面临着技术难题和挑战,尤其是在隧道曲线半径较小的情况下,盾构机轴线控制技术、隧道稳定控制技术、地面沉降控制技术等^[10]。

在调查研究中发现,早在 1976 年,日本的 KYB 株式会社就针对盾构曲线掘进施工方法申请了技术专利保护(JP1984016638B2),提出通过超挖盾构本体前部开挖面的弯曲侧实现转向,并指出在土体自立性较差的地层中,可采用盾构本体分割为多个环形断面段进行间接连接的方法,实现大曲率转向。此时,还未出现“急曲线”这一说法。在随后的 1979 年,日本的石川岛播磨重工业株式会社针对盾构曲线施

工技术申请了专利保护(JP1983028080Y2),该专利明确指出用于解决盾构机“急曲线”施工时,盾尾管片与隧道围岩之间的注浆材料的密封装置,随后日本清水建设株式会社、株式会社小松制作所等都相继申请了大曲率工作方法、仿形刀等急曲线相关技术的专利,“急曲线”一词开始频繁出现在专利申请中。技术的发展促进了企业对于相关专利的申请,一方面增加了企业的无形资产价值^[11],另一方面为核心技术提供法律保障,知识产权已经成为企业发展的战略性资源和国际竞争的核心要素^[12]。据世界知识产权组织(WIPO)统计,全世界每年发明创造的90%~95%都体现在专利信息中,其中大约70%最先体现在专利信息中^[13]。

因此,除了文献调研外,专利情报调研作为研究手段,对于发现技术创新点、跟踪技术发展趋势、评估国内外竞争态势具有重要意义。尽管全球范围内急曲线技术的相关文献、专利已有相当的积累,但是目前较少有从专利角度对盾构急曲线隧道施工技术进行分析。本文在文献分析的基础上,提取主要技术要素,通过技术框架图结合IPC国际专利分类精准检索^[14],对盾构急曲线隧道施工技术相关专利情报进行深度挖掘,对技术发展历程、整体态势及竞争格局等进行了多维度研究,为该领域技术人员提供参考,助力企业在盾构急曲线技术的快速发展中抢占先机。基于PATSNAP及THE LENS专利数据库,检索采用总-分-总策略,专利数据检索范围涵盖WIPO(世界知识产权组织)、EPO(欧洲专利局)、USPTO(美国专利商标局)、JPO(日本专利局)及CNIPA(中国国家知识产权局)等专利数据,确保数据的完整性与覆盖面^[15]。检索结果截至2024年12月31日,共检索出1703件数据,对检索出的数据,采用布尔逻辑结合关键词,对标题/摘要/权利要求/说明书中明确提到急曲线/曲线/曲率等相关数据进行进一步高级过滤,利用Open Refine工具对数据进行清理,基于专利族归并同一技术方案的多申请,并去除信息不全的专利数据,再根据技术框架图将盾构急曲线技术进行标引,经过人工去噪后,最终获得780件申请数据,为本次基础数据(不含外观设计),数据处理和可视化采用EXCEL和TableauPublic软件,如图1所示。

2.1 整体态势分析

图1给出了日本、中国及其他国家地区在盾构急曲线技术领域的发展趋势,日本从1976年起直至

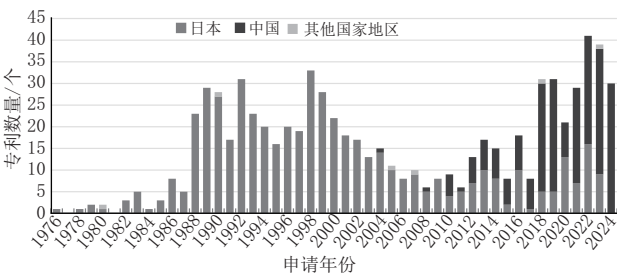


图1 整体态势分析

2010年,在该领域都占据主导地位,尤其在20世纪末达到峰值。这一时期,日本的城市地下空间开发需求旺盛,复杂地质条件和高密度城市布局催生了对急曲线盾构技术的研究。然而,进入21世纪后,由于市场需求变化、技术逐步标准化、产业应用趋于稳定,以及研发重点向其他领域转移等原因,日本在该领域的创新开始呈减弱趋势。相比之下,中国在2010年后研发活跃度迅速上升,近年来更是超越日本,成为该领域的主要创新力量,使技术创新从引进消化逐步转向自主突破。从整体趋势来看,该技术领域全球创新主导权正从日本向中国转移,尤其是近五年中国的增长态势尤为突出,预示着未来技术竞争可能更多围绕中国展开,而日本的影响力或将进一步减弱。其他国家地区的参与度相对较低。

国内,最早在2004年,由上海市第二市政工程有限公司提出一种自动化盾构三维姿态监测系统(CN1584290B),可以解决现有盾构急曲线转向时适应性差的问题;2008年中铁十六局集团有限公司申请了一种小半径盾构隧道施工技术(CN101737058A),并应用于广州地铁五号线杨箕一动物园区间长距离特急曲线隧道工程($R=200\text{ m}$,曲线长度375 m,盾构机直径6.2 m);进入2010年后,急曲线相关专利的申请开始增长,上海隧道工程有限公司、中铁工程装备集团有限公司、中铁十五局集团有限公司、北京工业大学等多家企业、高校开始该方向的研究活动。

2.2 竞争格局研究

对该领域的国际竞争格局进行研究,图2给出申请量的分析结果排名,日本株式会社小松制作所、株式会社奥村组在急曲线盾构技术领域处于明显的领先地位,技术实力和创新能力最为突出,反映出其在该技术领域的深厚积累,紧随其后的是清水建设株式会社、日立建机株式会社、大成建设株式会社、鹿岛建设株式会社等,展现出日本企业在该领域强劲的研发实力。日本企业的专利布局不仅覆盖急曲线广泛的技术领域,还通过强大的技术壁垒确保其在

市场中的竞争优势。国内企业在该领域的创新集中在中铁工程装备集团有限公司、上海隧道工程有限公司、中铁十五局集团有限公司这3家大型企业,通过对这些企业的发明专利进行梳理(通常涉及较为复杂的技术创新,代表了较高的技术门槛和研发深度)。在这3家企业中,上海隧道工程有限公司最先于2012年开展该项技术的深层研究,且涵盖的细分领域较为广泛,涉及施工方法、智能控制、注浆技术、测量技术等多方面;中铁工程装备有限公司在创新总数上优势明显,但从研发深度来看,以实用新型为主,发明专利占比较低,研发范围涉及领域主要为测量技术、排土系统等;中铁十五局集团有限公司在该领域技术上也有一定创新,但其主要侧重点在控制及土体保护等,其成果多与高校、机构合作,偏重理论研究。尽管近5 a来,多家中国企业在急曲线技术领域积极布局,但技术积累需要时间,尚处于追赶阶段,相较日本在该领域的深厚技术基础,仍存在一定差距。因此,系统研究日本的专利技术对于掌握前沿创新、借鉴成熟经验、优化本土技术体系具有重要意义。

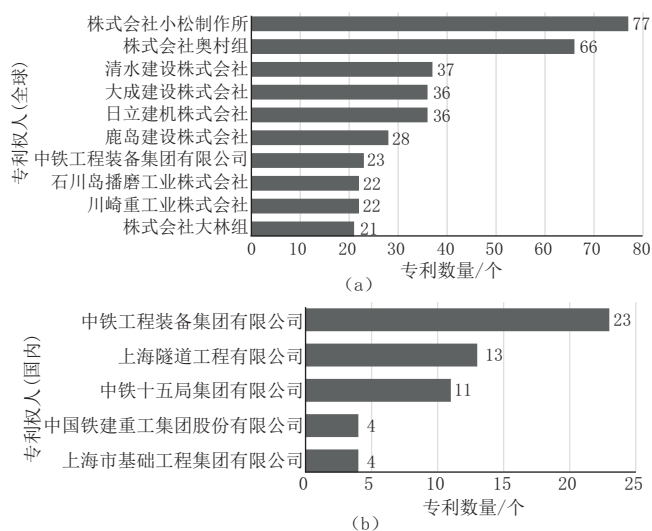


图2 专利申请量分析结果

3 调研在实际工程中的应用

本次调研的开展基于上海桃浦污水处理厂初期雨水调蓄工程的实际需求,旨在应对小半径急曲线掘进过程中施工稳定性、管片拼装、线形控制等一系列技术挑战。因此,本研究围绕急曲线盾构施工的多个关键技术方向进行了系统的专利检索,涵盖盾构机设计、掘进控制、管片结构优化等多个领域。鉴于曲线段施工对管片线性适应性、注浆控制、拼装密封性提出更高要求,在广泛调研的基础上,选取管片

附袋技术作为案例进行具体阐述,通过对日本相关技术专利的梳理和分析,为工程技术方案优化提供支撑,同时也进一步验证了专利情报在工程实践与技术创新中的应用价值。

3.1 工程概况

上海桃浦污水处理厂初期雨水调蓄工程 TP1.4 标(在建)位于普陀区闹市区,隧道外径 $\phi 4\,700\text{ mm}$ 、内径 $\phi 4\,000\text{ mm}$,区间采用 $\phi 4\,910\text{ mm}$ 泥水平衡盾构机一次掘进 3.2 km ,隧道平面设置了 $R80\text{ m}$ (试验段)以及 $R65\text{ m}$ 、 $R70\text{ m}$ 、 $R75\text{ m}$ 三段急曲线, R/D (最小平面半径/隧道外径)最小为 13.8 ,隧道在3个十字路口实现直角转弯,同时优化了原设计中的5座工作井(见图3)。

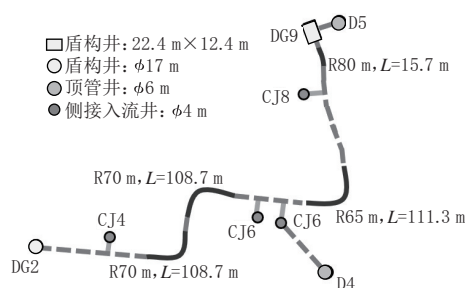


图3 工程急曲线段示意图

区间主要穿越地层为黏土、粉质黏土、粉砂,最大顶覆土埋深为 32.7 m 。针对急曲线掘进的高难度施工条件,工程采用的急曲线盾构机配备主动球面V形铰接,可适应最小 $R50\text{ m}$ 的隧道曲线需求,同时在急曲线段采用了小环宽、大楔形量的钢制管片。

3.2 日本专利技术调研

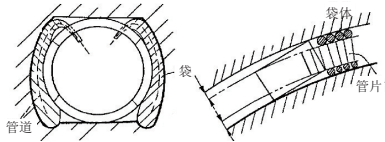
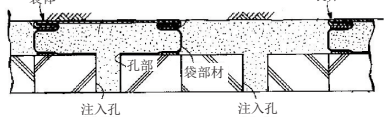
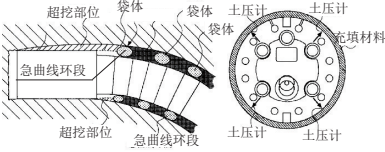
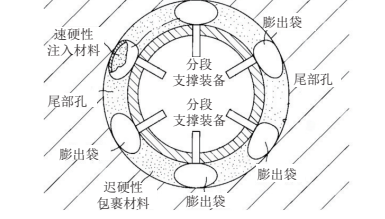
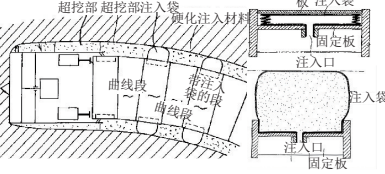
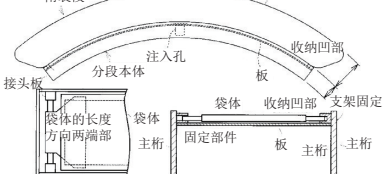
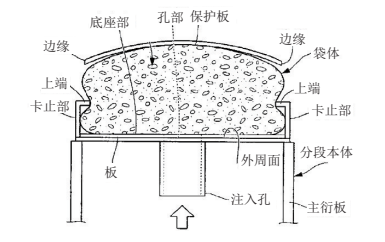
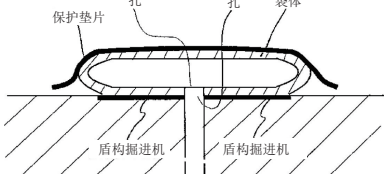
为获取对本工程最具参考价值的急曲线管片附袋技术专利,本文围绕专利创新性、法律状态、专利价值、PCT国际申请等关键要素,重点调研了8家企业的核心发明专利(见表2),这些专利成熟度高(部分达到最长保护期 20 a)、部分已申请PCT国际保护,且对技术细节描述详尽。相较于学术论文,专利文献在技术关键点、功能实现、结构设计等方面具有更详细的说明,例如附袋的材料选择、填充介质、折叠方式、填充速度控制、展开过程等,并通过结构示意图、剖面结构图、工序流程图等直观形式呈现,有助于技术人员能够精准理解并应用,从而降低试错成本,提高技术复现和优化效率。通过引入和分析这些专利,技术人员在借鉴日本先进经验的基础上,结合自身的施工需求、地质条件等,对管片结构和附袋设计进行优化调整,进一步推动技术创新,加快研发进程,有效解决工程实践中的技术

难题。

技术人员通过对相关专利的系统研究,从结构适应性、施工可行性、密封与保护性能、安装便捷性

等多个维度进行分析比对,最终选取石川岛建材工业株式会社、大成建设株式会社、旭化成株式会社的三项专利作为桃浦调蓄工程的创新借鉴。这些专利

表 2 急曲线管片附袋技术专利调研表

调研企业	重点专利	申请时间	保护期时长	说明附图
清水建设株式会社	JP1988055600B2 盾构法中曲线段施工方法 一种袋状体填充固定法,在管片与地层之间的超挖空隙放置袋状填充体,通过管片上的注浆孔向填充袋中施加压力,同时对填充袋材质及填充物质进行了说明	1982-09-03	15 a 权利期满	
石川岛建材工业株式会社	JP2648665B2 囊袋管片 涉及一种改进型囊袋管片,采用布状透气袋体+外部密封片,通过可拆卸式结构(如拉链或扣件),袋体可在施工现场安装,避免运输过程中损坏	1995-03-23	20 a 权利期满	
西松建设株式会社	JP3396650B2 盾构超挖部位的预充填置换工法 一种先行充填置换工法,通过在管片的外侧布置密封充填袋+分阶段注入不同充填材料的方法,控制盾构施工中的超挖区域稳定性,确保盾构机的姿态调整和管片拼装的精度	1999-01-29	20 a 权利期满	
TAC 株式会社	JP3715968B2 急曲线施工方法 盾构机内部通过充填口向超挖空间注入高黏性非硬化填充材料,在管片内部安装可扩展的膨出袋,并向其中注入速凝材料,提供足够的地层反力,保证管片的稳定性	2003-02-04	20 a 权利期满	
株式会社奥村组	JP4480619B2 盾构机施工曲线隧道段方法 采用注浆袋技术,交替拼装普通曲线管片和带有注浆袋的管片,填充硬化性注浆材料,精确控制注浆压力和流量,形成稳定的“支撑环”,确保隧道结构的稳定性	2005-04-25	20 a 权利期满	
旭化成株式会社	JP2006226057A 囊袋管片 针对现有的袋体管片,提出了一种优化方案,简化袋体折叠和安装,确保袋体均匀膨胀,优化注浆孔固定方式,改进防护板设计	2005-02-21	20 a 权利期满	
大成建设株式会社	JP4805071B2 囊袋管片 提供了一种改进型的附袋管片,其外侧设置有保护板,用于覆盖保护袋体,且不会发生位移,解决了急曲线现有技术中保护板移位、尾刷下陷、施工不稳定等问题	2006-09-13	20 a 权利期满	
株式会社钱高组	JP5620073B2 背填材料注入施工套件、背填材料注入袋体、管片及隧道施工方法 提供了一种无需对管片进行额外加工,且可在施工现场快速安装的背填材料注入装置,包括袋体和保护片的组合	2009-07-14	15 a 权利期内	

在袋体构造、保护措施、安装方式及展开特性等方面均具有较高的工程适配性,与本项目的技术需求高度契合(见表3)。基于表中所述专利的技术优势,本项目在借鉴其核心技术的基础上,结合工程需求,对

袋体结构、防护装置、安装工艺及注浆控制策略进行针对性优化,使其更符合本项目的急曲线施工需求,工程实践应用效果良好。

表3 急曲线管片附袋技术专利分析

专利来源	主要技术特征	适用性分析	本项目优化方向
石川岛建材工业株式会社	透气布袋+外部密封片;采用现场安装,避免运输损坏	囊袋材料结构形式具有较好的折叠性能且透水性好,能有效控制袋体膨胀效果,但安装复杂	调整外部保护结构,确保运输过程不受损坏,同时优化安装工艺,提高施工效率
大成建设株式会社	袋体上方增设保护板,防止袋体移位,增强稳定性	解决了急曲线掘进中盾尾刷作用导致的袋体位移、下陷,但保护板固定方式复杂不稳定	调整保护板固定方式,提高其适应性,并减少盾尾刷影响
旭化成株式会社	优化袋体折叠展开方式,提升膨胀均匀性;软质和硬质两层合成树脂保护板及薄钢板	避免了膨胀不均、固定装置操作繁琐等问题;但过度保护,可能导致囊袋打开不充分	优化袋体展开设计及注浆工艺;保护板的形式及材料

3.3 工程应用概况

在桃浦调蓄工程的急曲线隧道管片结构研发中,围绕管片附袋工法,开展了两项关键技术研究:附着囊袋式预填混凝土钢管片综合技术研究和免开孔式预装注浆袋管片技术研究。相较于日本专利,本次研究进一步优化了管片囊袋结构(见图4),通过材质性能试验提升其适应性,并在囊袋上方增设交叠弹簧保护钢板,提高囊袋在盾尾刷反复接触下的耐久性;针对上海地质条件,模拟0.5 MPa水土压力,囊袋未破损,注浆后打开充分,确保了填充效果。在免开孔预装注浆袋管片技术方面,优化了注浆袋的布置形式(见图5),预装于管片注浆孔中,避免现场开孔作业,从而减少施工渗漏风险,并通过曲线内侧布置1个、外侧布置4个注浆袋,有效限制管片位移,确保隧道结构稳定。此外,本次研究创新性地采用囊袋注浆与注浆袋注浆交替施工的方式,每两环注浆袋管片间隔一环囊袋注浆,形成定向填充盾尾间隙的袋体环,增强同步注浆与二次注浆的控制能力,从而提升管片姿态稳定性,为盾构纠偏提供支撑力,有效提高急曲线隧道施工的安全性和成型质量。

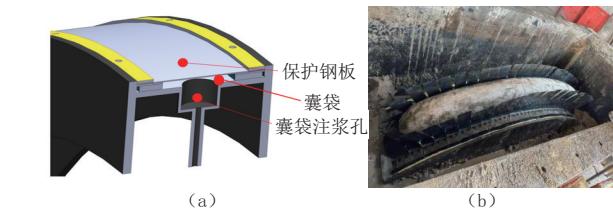


图4 囊袋式预填混凝土钢管片

目前,该工程正在推进工程中,在盾构始发后的一段R=80 m急曲线隧道中,成功开展施工验证,隧道成型效果良好,如图6所示,隧道轴线偏差<1 cm,隧道沿线沉降<1 cm。为后续长距离急曲线施工提供

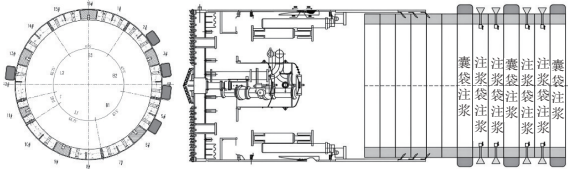


图5 免开孔式预装注浆袋管片

重要实践参考。



图6 R=80 m急曲线隧道实景

4 结 语

本文首次从全球专利视角对盾构急曲线隧道施工技术进行调研,通过整体态势分析及竞争格局分析,表明日本企业在该领域全球专利布局中占据明显优势,其专利申请量和技术先进性领先于其他国家,创新主体对多项技术进行长期保护巩固其主导地位。本研究结合桃浦工程急曲线施工需求展开技术调研,重点分析日本专利技术,并列举管片附袋技术的应用案例,为工程提供切实可行的技术借鉴和创新解决方案。

本文研究通过宏观调研与技术分析相结合的方式,揭示急曲线技术全球竞争格局及领先企业的专利布局,进一步证明了专利分析在技术发展中的关键作用。合理的专利布局不仅能够有效保护技术创

新成果,提升企业在全球市场中的竞争力,还能复杂工程项目提供必要的技术支撑,确保技术的可持续发展与应用。展望未来,随着盾构隧道技术向更高精度、智能化和复杂化的方向发展,强化专利布局和技术储备将成为推动行业技术进步的重要战略。

参考文献:

[1] 罗云峰,李吉勇,刘桂荣.淤泥质软土地层急曲线盾构隧道施工关键技术研究及应用[J]. 建筑施工,2024,46(8):1207-1211.
[2] 由广明,温竹茵,刘念,等.急曲线超大直径盾构隧道设计关键技术研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(增刊1):221-227.
[3] GB 50446—2017,盾构法隧道施工及验收规范[S].
[4] 金慧瑛.日本盾构法隧道的技术发展——盾构急曲线施工概述[J]. 盾构隧道科技,2023(2):49-54.
[5] Lorenzo S G. In situ behaviour of an instrumented ring subjected to incipient TBM steering around a curve[J]. Engineering structures, 2021 (249): 113-124.
[6] 王木.软土地区急曲线隧道盾构钢管片加工工艺研究[J]. 建筑科技,2025,9(1):66-70.
[7] 由广明.深埋大直径盾构隧道接缝防水设计与试验研究[J]. 城市

道桥与防洪,2020(1):196-200.
[8] 陈剑,李智明.急曲线隧道盾构超挖量及铰接角的理论算法[J]. 中国公路学报,2017,30(8):66-73.
[9] 包蓁.特殊工况超大直径盾构施工地表变形分析研究——以上海市北横通道Ⅱ标盾构隧道施工为例[J]. 现代隧道技术,2020,57(增刊1):394-403.
[10] 杨明,杨志浩,王亚.急曲线电力盾构隧道侧穿桥桩扰动特性研究[J]. 建筑科学与工程学报,2024,41(2):124-133.
[11] 张一博,徐海青.知识产权成果转化模式初步研究[J]. 中国品牌与防伪,2025(2):57-59.
[12] 黄先海,高亚兴.数实产业技术融合与企业全要素生产率——基于中国企业专利信息的研究[J]. 中国工业经济,2023(11):118-136.
[13] 陈玉,胡泽文,周西姬.国际高价值专利:概念内涵、主题范畴、多维价值指标与评估预测方法综述[J]. 现代情报,2024,44(8):153-170.
[14] 孙晓慧,孟涛涛,申江涛,等.专利情报视角下的盾构机智能感知技术现状及发展趋势研究[J]. 中国发明与专利,2024,21(增刊2):46-54.
[15] 陈亮,陈利利,许海云,等.国内外专利挖掘研究进展与前瞻[J]. 图书情报工作,2024,68(2):110-133.

(上接第 228 页)

[13] 柯明勇.集美污水处理厂污泥深度脱水技术探讨[J]. 给水排水,2011,37(5):40-43.
[14] 周非,龚靖云,刘海峰,等.污泥调理添加药品的优化研究[J]. 广州化工,2024,52(21):172-174.
[15] 李地超,吴玉凤,刘飞,等.新型超高压污泥带式脱水机结构与性能分析[J]. 中国科技产业,2023(4):62-64.
[16] 文彪.生物沥浸工艺在污泥深度处理中的应用研究[J]. 科技创新与应用,2021,11(26):115-117.
[17] 徐培嘉,姜伟毅,张群,等.上海某水厂的污泥调质研究[J]. 四川

环境,2012,31(6):4-8.
[18] 龙国兵,梁茂杰,李敏,等.PAC与铁盐对污泥深度脱水性能的对比较研究[J]. 广东化工,2014,41(13):78-79.
[19] 吴见平,靳紫恒,长英夫,等.污水处理厂生物除臭技术及其应用进展[J]. 化工进展,2021,40(5):2774-2783.
[20] 杨胜鑫,何嘉辉.某污水处理厂污泥深度脱水工艺的探讨与设计[J]. 城市道桥与防洪,2023(3):129-132.
[21] 李银波,周建华.某污水处理厂污泥深度脱水工程设计及处理成本[J]. 中国市政工程,2015(2):51-53.