DOI: 10.3969/j.issn.2097-583X.2026.04.019　　文章编号：2097-583X(2026)04-0654-09

沉井式竖井掘进机关键装备及工程应用

闫高闯[1,2,3]，彭世龙[4*]，花燕舟[1,2,3]，周　维[1,2,3]，李依宸[5]，张俊峰[4]

(1. 中铁四局集团工程技术研究院，安徽 合肥 230022；
2. 中铁四局集团有限公司，安徽 合肥 230023；
3. 中铁四局集团有限公司城市轨道交通工程分公司，安徽 合肥 230022；
4. 安徽建筑大学 安徽省岩土工程智能建造与灾变防控重点实验室，安徽 合肥 230601；
5. 万邦工程管理咨询有限公司，浙江 杭州 310000)

摘　要：针对传统竖井工法在城市复杂地层中施工效率偏低、地层扰动显著、作业安全性不足，以及国内机械法沉井技术体系尚不完善等问题，探讨我国自主研发的沉井式竖井掘进机(sinking well type vertical shaft excavation machine，SCJM)的关键技术与工程应用效果，为深层地下空间开发提供高效、低扰动的竖井施工解决方案。通过梳理机械法竖井掘进原理与技术发展，阐述了SCJM装备的系统构成与核心技术特征。同时结合江南水厂盾构接收井工程实例，构建了完整的SCJM施工技术方案，并对掘进过程的关键参数与地层扰动进行了实时监测与数据分析。工程应用结果表明，我国自主研发的SCJM可有效适配软土至硬岩的复杂地层，掘进效率随地层硬度自适应调整，且施工精度高，地层扰动控制效果显著，周边地表沉降始终控制在15 mm以内，满足城市环境安全要求，为国内深大竖井机械化施工提供了技术支撑与工程参考。

关键词：沉井式竖井掘进；地下空间开发；机械法施工；复杂地层；工程应用

中图分类号：TU94^{+}1　　**文献标志码：**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID)：**

Key equipment and engineering application of the sinking well type vertical shaft excavation machine

Yan Gaochuang[1,2,3], Peng Shilong[4*], Hua Yanzhou[1,2,3], Zhou Wei[1,2,3], Li Yichen[5], Zhang Junfeng[4]

(1. Engineering Technology Institute of China Railway No. 4 Engineering Group, Hefei 230022, China;
2. China Railway No.4 Engineering Group Co., Ltd., Hefei 230023, China;
3. Urban Rail Transit Engineering Branch of China Railway No.4 Engineering Group Co., Ltd., Hefei 230022, China;
4. Anhui Provincial Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Disaster Prevention, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
5. Wanbang Project Management and Consultation Co.,Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the problems of the low construction efficiency, significant formation disturbance and insufficient operation safety of traditional shaft construction method in urban complex strata, the key technologies and engineering application performance of the sinking well type vertical shaft excavation machine(SCJM) independently developed by China were investigated, and an efficient and low-disturbance shaft construction solution was provided for deep underground space development. By integrating the principles of mechanized shaft excavation and the technical characteristics of SCJM, a complete construction technology system was established, and the key construction parameters and surrounding strata disturbance characteristics were monitored and analyzed in real time

收稿日期：2026-05-04；**修回日期：**2026-06-12；*.**通信联系人，**E-mail：psl@ahjzu.edu.cn

基金项目：国家自然科学基金项目(52004003)；安徽省教育厅项目(2025AHGXZK31187)

作者简介：闫高闯(1988—)，男，河南临颍人，高级工程师，学士，主要从事城市基础建设领域相关技术研究；彭世龙(1991—)，男，安徽六安人，副教授，博士，主要从事岩土工程、地下结构设计与计算理论方面研究。

引用格式：闫高闯，彭世龙，花燕舟，等.沉井式竖井掘进机关键装备及工程应用[J].信阳师范大学学报(自然科学版)，2026，39(4)：654-662.

Yan Gaochuang, Peng Shilong, Hua Yanzhou, et al.Key equipment and engineering application of the sinking well type vertical shaft excavation machine[J].Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2026, 39(4):654-662.

based on an engineering case of a shield receiving shaft at Jiangnan Water Plant. The engineering application results showed that the adaptability of SCJM independently developed by China to complex strata ranging from soft soil to hard rock was effectively verified, the excavation efficiency was adjusted according to geological conditions, and the construction accuracy was significantly improved. The disturbance control performance of surrounding strata was demonstrated, and the maximum surface settlement was controlled below 15 mm, satisfying the requirements of urban environmental safety. Technical support and engineering references were provided for the mechanized construction of deep and large-diameter shafts in China.

Key words: sinking well type vertical shaft excavation; underground space development; mechanical construction; complex strata; engineering applications

0 引言

随着我国城市化进程进入深度开发阶段，地面空间资源稀缺与城市功能扩容的矛盾日益凸显。《“十四五”全国城市基础设施建设规划》明确提出“推进城市地下空间深度开发利用，构建多层次、立体化的地下空间体系”，将深层地下空间开发纳入城市高质量发展的核心支撑领域[1]。地下空间开发不仅能有效缓解城市土地资源紧张、改善城市环境，还能拓展交通、市政、能源、商业等多维功能，是支撑城市可持续发展的重要途径[2-3]。

竖井作为地下空间的“垂直枢纽”，其施工效率与安全质量直接决定深层开发工程的推进节奏，而传统人工挖孔、爆破开挖等工法因效率低、风险高、地层适应性差等问题，已难以满足复杂地质条件下的施工需求[4]。

沉井式竖井掘进机（sinking well type vertical shaft excavation machine，SCJM）作为机械法竖井施工的核心装备，通过集成掘进、出渣、导向、支护等功能，实现了竖井施工的机械化、智能化、安全化，尤其适配富水、卵石、硬岩等复杂地层，已成为国际深层竖井施工的主流技术方案[5-7]。国外对该类装备的研发与应用起步较早，技术成熟度高，以德国海瑞克公司为代表的企业占据主导地位。其代表性装备包括截削式竖井掘进机SBR（shaft boring roadheader）和下沉式竖井掘进设备VSM（vertical shaft sinking machine），其中SBR系列直径覆盖7.5～12.0 m，在英格兰伍德史密斯杂卤石矿项目中，两台SBR设备成功掘进深度达1600 m的竖井，创造了同类设备施工纪录[8-9]；VSM系列直径可达19 m，曾在试验项目中完成115 m深的竖井掘进，展现出在深层、大直径工程中的强大适配能力。目前该类装备已在欧洲、美国和中东等地区的地铁通风竖井、矿山生产竖井、城市污水井等工程中广泛应用，累计完成超百个重点项目，形成了完善的装备系列与施工体系[10]。

我国沉井式竖井掘进机的研发与应用起步较晚，初期完全依赖进口设备。2020年，南京市建邺区沉井式地下智能停车库工程首次引入德国海瑞克VSM设备，这是国内首个应用案例，标志着我国开始探索机械法沉井施工技术。尽管进口设备性能先进，但存在价格高昂、售后响应滞后、适配国内复杂地质能力不足等问题，制约了其规模化应用。为此，国内多家大型机械制造企业与科研单位联合攻关，在吸收国外技术经验的基础上，针对我国富水砂卵石、软硬互层等典型复杂地层，自主研发国产沉井式竖井掘进机以打破国外技术垄断，推动我国竖井施工技术迈向国际先进水平[11]。

基于此，本文聚焦我国自主研发的SCJM的关键装备研发与工程应用，系统梳理装备技术特征，结合实际工程案例验证其应用效果，为我国深层地下空间开发提供技术支撑。

1 国内外沉井式竖井掘进机关键装备对比

1.1 沉井式竖井掘进原理及工艺流程

沉井式竖井掘进机（如图1）以机械破岩-同步支护-精准控沉为核心原理，通过液压驱动的截割滚筒或多刀盘铣挖机构切削破碎掌子面岩土，破岩功率可根据地层硬度动态调整；利用已施工井壁管片作为支撑反力点，通过支腿系统锁定设备位姿，平衡掘进反扭矩与地层侧压力；掘进中以泥浆填充开挖面平衡水土压力，同时携带渣土排出，搭配多源监测设备把控掘进位姿，确保竖井成型精度。

沉井式竖井掘进机的核心是实现竖井连续高效成型，包括机械集成化破岩和动态平衡控制两方面，适配从软土到硬岩的多元地层。

掘进前期筹备阶段：通过三轴搅拌桩加固锁



图 1　沉井式竖井掘进机[3]

Fig. 1　Sinking well type vertical shaft excavation machine[3]

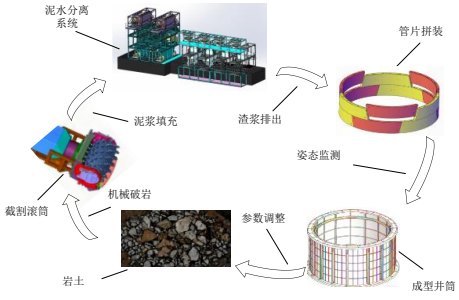


图 2　沉井式竖井掘进工艺流程图

Fig. 2　Process flow chart of sinking well type vertical shaft excavation

口圈梁下方地层,施作临时支护并现浇锁口圈梁,完成掘进机及配套设备的吊装、组装与联调;核心循环阶段:采用分幅开挖模式,由中心向周边覆盖全断面,单次铣挖地层深度为 50～100 mm,渣土与泥浆混合后输送至地面分离处置;每完成 1～2 m 进尺后,通过提拉系统控制地面拼装预制管片同步下沉,注入触变泥浆减小摩擦;收尾阶段:掘进至设计深度后,拆除设备、浇筑封底混凝土,置换壁后泥浆并施工二衬,完成竖井成型,流程如图 2 所示。

1.2　国外沉井式竖井掘进工程实践

目前,国外沉井式竖井掘进工程实践以德国 VSM 工法、日本气压沉箱工法及 SOCS(super open caisson system)自动化开放式沉井工法为代表,形成了适应不同地质与工况的成熟技术路线,在安全、效率、环保与大深度/大直径方面表现突出,如表 1 和图 3 所示。

国外沉井式竖井掘进主流工法基本保持以下发展方向:1)针对大深度/大直径竖井,保持无人化操作性与环保优势,如 VSM 系列机械法;2)适应特殊工况要求,如依托高压工况控制技术为主的气压沉箱工法;3)对特殊地层,尤其是上软下硬的富水地层,可采用灵活性较高的咬合桩＋喷锚组合工法。根据近几年国外工程实践数据,国外沉井式竖井掘进已逐渐向智能化、大型化、绿色化发展,而其中适配大部分工况的仍以 VSM 机械法与气压沉箱法为主。

1.3　国内沉井式竖井掘进工程实践

相较于国外,国内沉井式竖井掘进工程实践发展呈现以下 3 个方面:1)技术引进消化,2)自主创新突破,3)场景多元拓展。同时依托城市地下空间开发、能源通道建设、水环境治理等核心需求,形成以机械法 VSM 及国产装备为主导,传统沉井法为补充,适配软土、富水、滨海等复杂地质

表 1　国外沉井式竖井掘进工法统计

Tab. 1　Statistics of foreign caisson shaft excavation methods

工法	深度/m	直径/m	地质适应性	典型工程
VSM 工法	30～100	6～19	软土/软岩/富水,岩石单轴抗压强度≤80 MPa	新加坡深隧 K1 竖井[12-13]
气压沉箱工法	50～80	5～12	软土/粉土/砂层,高压工况	日本磁悬浮中央新干线紧急出口[14]
SOCS 工法	40～105	15～35	软土/黏土/砂土/富水地层	东大和立坑[15]



(a)　VSM 工法[12-13]



(b)　气压沉箱工法[14]



(c)　SOCS 工法[15]

图 3 国外典型沉井式竖井掘进工法

Fig. 3　Foreign typical caisson shaft flow chart excavation method

的技术体系,相关工法如表2所示。

表2　国内沉井式竖井掘进工法统计

Tab. 2　Statistics of sinking shaft excavation methods in China

工法类型	深度/m	直径/m	地质适应性	典型工程
改进VSM机械法	≤110	8～23	软土、富水、城区密集地层	南京沉井式地下智能停车库[16]
CJM机械法	40～70	12～18	土质类、砂卵石、软岩、硬岩地层	深大线区间2标段工作井[17]
包络成型	20～60	6.5～14.5	黄土、砂层复合砂卵石、黏土地层等	河南驻马店城市储油井

当前,国内沉井式竖井施工装备按技术来源可分为下列两类:

1) 国产VSM工法以德国VSM技术为基础,经国产化改进与装备升级,逐渐适配城市深大竖井,可实现水下无人作业、精准位姿控制与低扰动施工[18];

2) 国内自主研发的装备涵盖中铁装备CJM/SCJM(含干法CJM和湿法SCJM两种作业模式)、中信重工包络成型、中铁山河SSM(Shaft Sinking Machine)等装备,其基于国内复杂地质独立研发,已实现核心技术自主可控,施工效率与地层适应性达到国际先进水平[19]。

国内沉井式竖井掘进工程实践已从跟跑阶段进入部分领跑阶段,通过引进技术本地化与自主创新双轮驱动,在城市核心区开发、水环境治理、能源基础设施等场景形成成熟方案。综合目前施工实践,机械法沉井施工凭借井下无人化、地层低扰动、施工高效率的核心优势,已成为破解城市核心区竖井施工难题与实现地下工程技术自主可控的关键支撑。

1.4　沉井式竖井掘进机与国外主流沉井式竖井装备技术差异及性能对比

相较于国外VSM下沉式竖井掘进机和气压沉箱法施工装备,SCJM在地层适应性、开挖方式、出渣系统、控沉方式、智能化水平等技术特点上有所差异,如表3所示。

表3　SCJM与国外主流沉井式竖井装备技术性能对比

Tab. 3　Comparison of technical performance between domestic SCJM and foreign mainstream sinking shaft excavation equipment

工法类型	直径/m	深度/m	地层适应性	开挖方式	控沉方式	作业安全性	典型案例
国外VSM下沉式竖井掘进机	6～19	30～100	软土、软岩、富水地层	伸缩式截割臂自由断面开挖	自重下沉结合导向纠偏	水下无人化程度较高	新加坡深隧K1竖井[12]
气压沉箱法施工装备	5～12	50～80	软土、粉土、高压富水地层	气压平衡辅助开挖	气压控制沉箱下沉	高气压作业风险较大	日本磁悬浮中央新干线紧急出口[14]
国产SCJM沉井式竖井掘进机	14～18	≤75	软土、砂卵石、软岩、中硬岩	伸缩式截割臂自由断面开挖	钢绞线同步提拉控沉	地面远程操控、水下无人化开挖	江南水厂盾构接收井工程

除与国外VSM和气压沉箱法施工装备相比外,SCJM与国内CJM、包络成型等同类装备也存在一定差异。CJM主要适用于大直径竖井全断面开挖,包络成型侧重通过摆动式钻具实现变径成孔,而SCJM机械法更强调沉井结构与掘进装备协同作业,适用于富水砂卵石、软硬互层、中硬岩等复杂城市地层。

SCJM的主要创新在于构建了适应我国富水砂卵石、软硬互层等复杂地层条件的国产化装备体系,实现了“机械开挖—泥水排渣—同步控沉—位姿监测”一体化施工模式,在地层适应性、施工安全性及国产化应用方面具有明显优势。

2　SCJM关键装备研发与技术创新

2.1　SCJM核心技术指标

SCJM通过多系统协同设计实现高效施工,核心设计围绕开挖、稳定、提吊、出渣、监控全流程形成闭环。开挖环节采用伸缩式作业臂搭配专用截割装置,以大功率驱动系统实现大直径全断面破岩;稳定与提吊依托多组高强度提拉组件,精准控制管片下放位姿与竖井成型精度;出渣系统采用大流量湿式输送方案,保障各类粒径渣土顺畅排

出,避免堵塞;施工全程通过智能控制系统与多维度监控设备实时采集运行参数,结合各类传感器实现地面远程操控,完成深层竖井施工,技术指标如表4所示。

表4　SCJM技术指标

Tab. 4　Technical indexes of SCJM

指标类别	核心参数
基础作业参数	开挖直径14～18 m,掘进深度≤75 m,开挖硬度≤80 MPa
核心动力指标	截割头功率315 kW,扭矩80 kN•m,转速0～76 r/min
出渣系统性能	泥浆泵最大流量450 m^3/h,允许通过粒径75 mm
提拉控制指标	钢绞线提拉能力6×5000 kN,PLC系统实时监测位移
设备适配参数	主机质量≈160 t,高度约11 m,主控室尺寸4.3 m×2.4 m×2.7 m

2.2　SCJM核心关键装备

SCJM由中铁工程装备集团联合中铁四局等单位研发,适配复杂拥挤的城市垂直竖井施工场景。采用沉井井壁集成式结构设计,将掘进主机直接安装于沉井井壁内侧,搭配多自由度伸缩式挖掘臂完成水下全断面精准开挖,同时装备可伴随竖井同步下沉,实现竖井结构与掘进设备的深度融合。

SCJM系统(如图4)按作业场景明确分为井下核心装备与地面配套装备,两类装备功能互补形成完整施工链。整机主要分为井下主机和地面配套系统两大部分,井下主机主要包括支腿撑紧系统、主驱动总成、截割开挖系统、泥水环流系统;地面配套系统主要包括回收卷扬系统、钢绞线提拉系统、管线主动输送系统、后配套系统等。

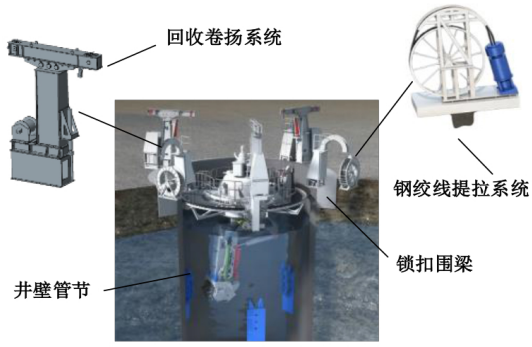


图4　SCJM整体结构

Fig. 4　The overall structure of SCJM

2.2.1　支腿撑紧系统

支腿撑紧系统(如图5(a))用于支撑整个设备,将主机锁紧在井壁上,当设备开挖时为设备提供支撑反力,平衡掘进反扭矩与地层侧压力;当掘进完成或设备检修时,锁紧机构脱开,主机可通过回收卷扬系统独立提升出井,与管片结构分离。

2.2.2　主驱动总成

主驱动采用钢板拼装焊接而成,焊接件上加工出减速机的安装座以及回转支撑的定位凹台。回转支撑一端和主驱动箱体连接,另一端和回转座连接。回转座和主驱动箱体之间设计有多重回转密封结构,可有效防止泥浆与渣土进入驱动箱内部,保障设备在水下环境的可靠运行。

2.2.3　截割开挖系统

开挖系统(如图5(b))采用悬臂式、自由断面复合运动开挖的形式。设备主要由支腿、主机、摆臂油缸、伸缩臂、截割滚筒等部件组成。

截割臂集成截割电机及截割减速机,连接回转驱动装置及截割头,在摆臂油缸的推动下,可以改变工作半径,覆盖整个开挖截面,承受截割头工作的反作用力。

2.2.4　泥水环流系统

泥水环流系统(如图5(c))是竖井掘进机湿式出渣模式的主要组成系统,该系统由泥浆泵、泥浆管路、检测元器件等组成。通过地面冲刷泵、回流泵实现地面向井内注浆,通过排浆泵将开挖渣土输送至地面,经三级泥水分离系统处理后,实现渣浆分离,处理后的泥浆可继续循环使用,直至成为废浆。

2.2.5　回收卷扬系统

回收卷扬系统(如图5(d))用于提升/下放主机,回收卷扬架上预留有下压油缸的安装接口。回收卷扬系统主要由安装基座、回收卷扬架、上部横梁、卷扬小车、钢丝绳和滑轮组等组成,具备同步提升与单点微调功能,保障主机位姿平稳。

2.2.6　钢绞线提拉系统

钢绞线提拉系统(如图5(e))包括固定在井口

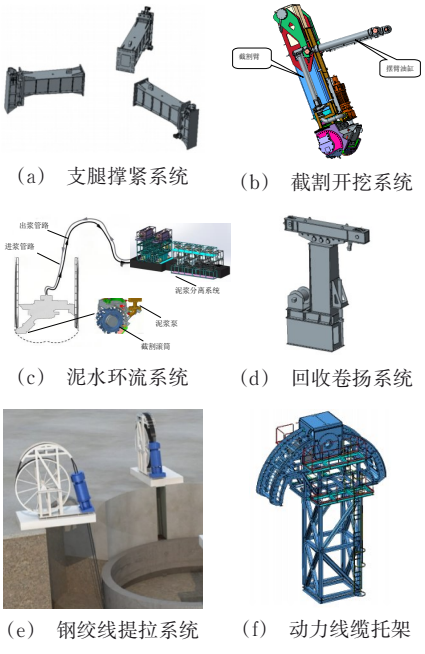
周边的6组提拉装置，控制井壁下沉的速度及下沉位置，同时调节井壁下沉位姿，负责井筒、主机和其他附属设备的悬挂，可实现毫米级同步控沉。

2.2.7　管线主动输送系统

动力线缆托架（如图5(f)）主要用于管线输送，当主机下放或提升时，线缆架随动下放或提升管线。其结构组成包括马达减速机、线缆架、托辊、托板、圆环链等附件及爬梯、平台等，可有效避免管线缠绕与拉伸损伤。

2.2.8　后配套系统

后配套系统是SCJM运作的辅助配套设施集合，主要用于支撑主机的施工运作。后配套系统包括触变泥浆系统、工业水和冷却水、压缩空气供应、油脂系统、消防系统和导向系统等。



（a）支腿撑紧系统　（b）截割开挖系统

（c）泥水环流系统　（d）回收卷扬系统

（e）钢绞线提拉系统　（f）动力线缆托架

图5　SCJM装备示意图

Fig. 5　Schematic diagram of SCJM equipment

2.3　SCJM核心施工技术与控制机理

SCJM的核心施工技术主要围绕复杂地层适配、高精度成井和安全绿色施工等3个方面，具体核心技术包括多地层自适应掘进技术、位姿导向技术和悬吊下沉技术等3大核心模块：

2.3.1　多地层自适应掘进技术

依托超前地质探测成果，PLC控制系统实时采集截割负载、泥浆参数等运行数据，结合地层岩土特性动态优化截割滚筒转速、切入深度与断面超挖量；软土区段提高切削效率，卵石与硬岩区段减小单次吃刀量，实现掘进参数与地层条件动态匹配，减少冲击载荷带来的机件损耗。

2.3.2　位姿导向技术

系统集成拉绳位移传感器、双轴倾角仪和激光测距装置，多源监测数据经误差补偿算法解算后，得到井筒实时偏移与倾斜量；通过分区调整开挖参数与钢绞线拉力完成动态纠偏，克服传统人工监测时效性差、精度不足的短板，实现井筒位姿毫米级管控。

2.3.3　悬吊下沉技术

以预制井壁作为受力载体，6组井口钢绞线提拉装置协同调控，施工中动态平衡井体自重、侧壁摩阻力、刃脚阻力与钢绞线提拉力；依托各处沉降差值单点微调油缸出力，从受力机理层面实现同步下沉，规避井筒突沉、局部偏斜问题。

3　江南水厂盾构接收井工程应用实践

3.1　工程背景

江南水厂盾构接收井为厂区改扩建核心节点，位于富春江畔，距防洪堤仅26 m，是盾构接收与供水管网衔接的关键构筑物。该接收井设计为圆形结构，外径14.9 m、内径13.0 m，底板埋深达44.6 m，采用预制管片与现浇二衬相结合的叠合受力体系，需同步满足盾构接收、管网转接及后期运维等综合功能，其施工质量与进度直接关联周边区域供水系统的稳定运行，周边情况见图6。

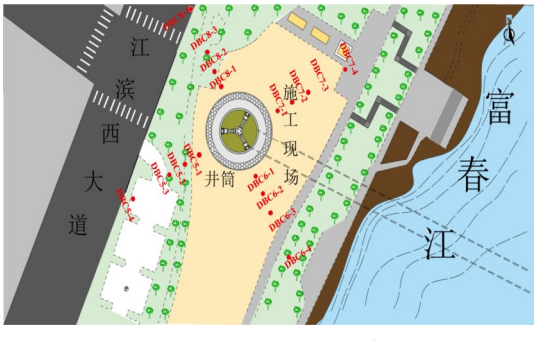


图6　接收井周边环境情况

Fig. 6　The surrounding environment of the receiving well

场地周边市政设施密集，水文地质条件复杂，紧邻富春江，承压水水位高，地层自上而下为杂填土、粉质黏土、砂卵石层及中风化凝灰质砂岩，其中砂卵石层透水性强、中风化凝灰质砂岩单轴抗压强度最高达78.98 MPa。鉴于传统明挖法易引发管涌、钻爆法环境扰动大的局限，该工程确定采

用SCJM进行施工。

3.2　施工方案设计

3.2.1　装备适配选型

结合江南水厂盾构接收井外径14.9 m的结构设计及复杂地质条件，工程选用中铁装备CREC1364号SCJM系列掘进机，匹配15.2 m开挖直径，以预留施工操作空间，保障管片拼装精度。为适配富水砂卵石及硬岩地层施工需求，装备配套拉绳传感与激光测距组合的位姿监控系统，实现竖井下沉过程中位姿的实时精准监测；配置450 m^3/h大流量泥浆泵及分级泥水分离系统，强化渣浆输送效率与环保处理能力。

3.2.2　施工流程设计

工程施工流程(如图7)按前期加固、循环作业与后期收尾等3个阶段进行，前期采用三轴搅拌桩加固地层，施作钢板桩与锁口圈梁形成围护体系，并完成设备吊装、组装与调试。

核心施工阶段采用开挖、排渣、拼装以及下沉的循环作业模式，结合地层特性，控制每循环进尺在200～500 mm，实现掘进效率与施工安全的平衡。每循环开挖完成后，通过泥浆泵将渣浆输送至地面分级处理系统，分离后泥浆循环利用；管片拼装完成后，依托钢绞线提拉系统精准控制沉井下沉位姿，避免出现倾斜或偏移。掘进至设计深度后，拆除掘进设备，浇筑封底混凝土，置换壁后触变泥浆并施工现浇二衬，完成竖井结构施工。

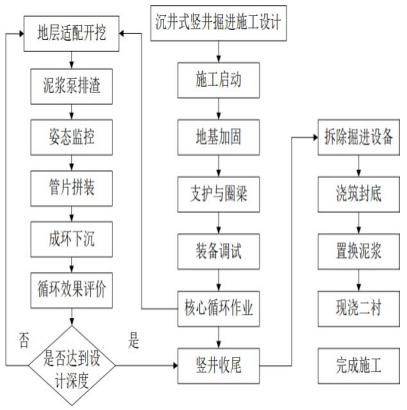


图7　SCJM掘进施工设计流程图

Fig. 7　SCJM tunneling construction design flow chart

施工过程中实施关键参数动态控制，泥浆密度始终维持在1.18～1.35 g/cm^3区间，通过泥浆压力平衡水土压力，防止砂卵石层管涌及坍塌；同时，在掘进施工过程中对井筒周围地层进行扰动分析，实时监测调控，防止施工对周边建筑物及市政设施造成不利影响。

3.3　应用效果分析

3.3.1　掘进效率分析

SCJM于2025年2月18日启动开挖作业，该工程累计掘进深度达50.9 m，全程历时174 d(包含设备调试、管片拼装等非掘进工序)，综合日均进尺0.29 m，纯掘进日均进尺达0.42 m，整体效率贴合复杂城市地层的施工节奏(如表5和图8)。

表5　不同地层条件下SCJM关键施工参数统计

Tab. 5　Statistics of key construction parameters of SCJM under different formation conditions

地层编号	地层名称	标高范围/m	厚度/m	日均进尺/(m/d)	单循环进尺/mm	截割滚筒转速/(r/min)	泥浆密度/(g/cm^3)
1-0	杂填土	+7.94～+11.94	4.0	—	—	—	—
2-1	粉质黏土	+2.64～<+7.94	5.3	1.10	400～500	40～76	1.18～1.25
2-2	黏质粉土	−10.46～<+2.64	13.1	1.10	400～500	40～76	1.18～1.25
5	粉砂	−16.96～<−10.46	6.5	0.40～0.60	300～400	30～60	1.20～1.30
6	卵石	−34.16～<−16.96	17.2	0.23	200～300	20～40	1.25～1.35
10-2	强风化凝灰质砂岩	−35.06～<−34.16	0.9	0.12～0.20	200～300	0～40	1.20～1.30
10-3	中风化凝灰质砂岩	−41.56～<−35.06	6.5	0.12	200～300	0～40	1.20～1.30

注　截割滚筒转速40~76 r/min为高速区间；30~60 r/min为中高速区间；20~<40 r/min为中低速区间；0~<40 r/min为低速区间。

从分层数据看，黏质粉土层掘进效率最高，日均进尺达1.1 m；粉砂层因需提升泥浆密度以平衡水土压力，效率有所下降；卵石层、风化砂岩受大粒径颗粒、高岩体强度影响，截割与排渣阻力大幅增加，需减小进尺、降低转速，掘进效率最低，纯掘进日均进尺分别为0.23 m、0.12 m。综合上述结

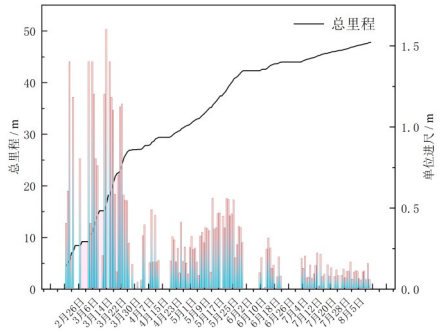


图8　SCJM掘进进尺统计图

Fig. 8　SCJM tunneling footage statistics

果，SCJM在富水砂卵石及中硬岩复合地层中保持了连续掘进，施工效率满足复杂城市竖井工程施工组织要求。

3.3.2　SCJM掘进盾体位姿控制效果

SCJM掘进盾体位姿监控包括盾体在X、Y方向上（东向、北向）的角度偏差，偏差统计见图9。在黏质粉土层等软质地层段，盾体东向、北向偏差角度波动相对平缓，整体维持在±3°以内；进入卵石层与中等风化凝灰质砂岩段后，因地层硬度、摩擦阻力增大，位姿偏差波动幅度略有增大，东向最大偏差为3.2°，北向最大偏差为4.8°，该现象主要与地层软硬不均、局部摩阻力差异及截割阻力变化有关，说明复杂地层条件是造成位姿波动的主要工况因素。整体施工过程中偏差未出现持续放大趋势，且可通过钢绞线同步提拉系统进行动态纠偏，满足沉井下沉过程中的位姿控制要求。

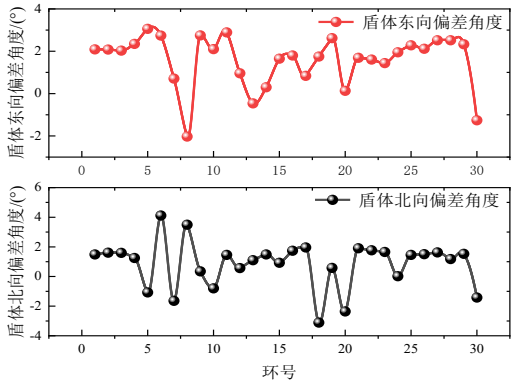


图9　SCJM掘进盾体位姿偏差统计

Fig. 9　SCJM tunneling shield posture deviation statistics

3.3.3　地层扰动分析

本次地表沉降监测依据现场施工监测方案开展，在沉井周边布置4个方位测点，分别为DBC5、DBC6、DBC7、DBC8，每个方位按距离各布置4个测点，共计16个测点，用于反映沉井施工过程中周边地表及道路区域的变形响应。监测采用水准测量方法，以施工前稳定观测值作为初始值，施工期间结合掘进、下沉等关键工序进行跟踪监测，DBC5—DBC8测点布置如图6，各方位沉降曲线见图10—图13，选取DBC5—DBC8典型方位测点进行展示，其余测点用于最大沉降统计和整体变形趋势判断。图12中曲线DBC7-1测量仪器读数部分缺失，数据无效，故未列出。

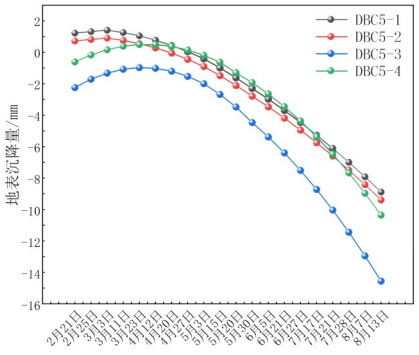


图10　拟合后DBC5方位地表沉降变化曲线

Fig. 10　The fitted DBC5 azimuth surface settlement change curve

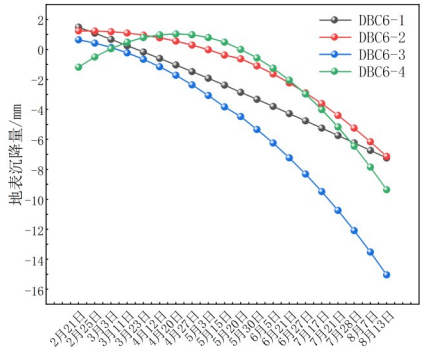


图11　拟合后DBC6方位地表沉降变化曲线

Fig. 11　The fitted DBC6 azimuth surface settlement change curve

由测点沉降曲线分析可知：施工全程各方位地表沉降呈先缓增后收敛的趋势，其中DBC5—DBC8方位最大沉降量为14.62 mm，地表累积沉降量仅1～2 mm，现场各监测点累计沉降实测统计值控制在12～15 mm，结合《城市轨道交通工程监测技术规范》（GB50911—2013）中城市地下工程地表沉降控制要求，盾构法隧道工程地表沉降控制值通常可取30 mm，实测值远低于城市工程地表沉降安全阈值；因地层特性差异，靠近江滨大道的DBC5/DBC6方位沉降略大于其他区域，但通

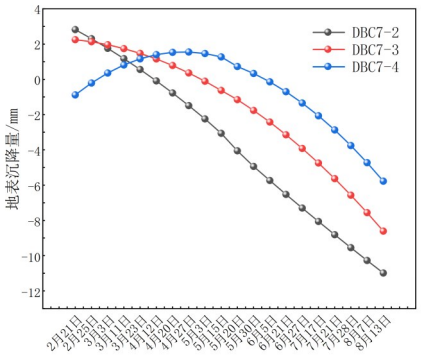


图 12　拟合后 DBC7 方位地表沉降变化曲线

Fig. 12　The fitted DBC7 azimuth surface settlement change curve

过泥浆压力与掘进参数的动态调控，沉降曲线无突增波动，全程未出现管涌、流沙等地质灾害，验证了SCJM装备在复杂地层下的低扰动控制能力，有效保障了周边市政设施与地层稳定性。

4　结论

围绕沉井式竖井掘进机SCJM的关键装备研发、核心技术创新及工程应用展开系统研究，主要结论如下：

1）SCJM采用模块化设计，井下主机与地面系统协同工作，配备伸缩式截割滚筒、多源融合监控等核心装备，可覆盖18 m开挖直径与75 m掘进深度，满足主流工程需求，具备复杂竖井机械化施工适应性。

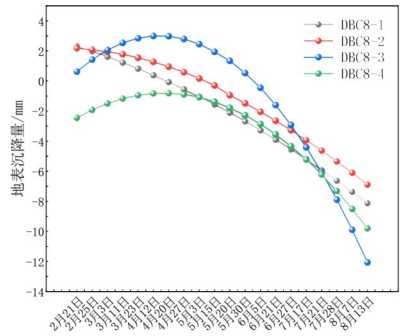


图 13　拟合后 DBC8 方位地表沉降变化曲线

Fig. 13　The fitted DBC8 azimuth surface settlement change curve

2）多地层自适应掘进、位姿导向、悬吊下沉技术，解决了复杂地层施工难题，实现了毫米级定位与高安全性，施工精度高、绿色环保。

3）工程应用性能可靠，在江南水厂工程中累计掘进50.9 m，日均进尺0.29 m，盾体位姿最大偏差≤4.8°，竖井周边最大沉降14.62 mm，无管涌灾害，验证了其高效、精准、低扰动优势。

参考文献：

[1] 彭芳乐，乔永康，董蕴豪，等. 新发展阶段城市地下空间开发利用发展战略研究[J]. 中国工程科学，2024，26(3)：176-185.
[2] 石峰旭. 城市地下空间开发与利用规划关键技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版)，2026(3)：16-18.
[3] Zhu Chun，Nie Renjie，Lu Jun，et al. Development of underground space for engineering applications[J]. Buildings，2025，15(24)：4400.
[4] 赵文洋. 沉井式竖井水下机械法掘进工艺与姿态智能控制研究[J]. 铁道建筑技术，2026(3)：170-174.
[5] 周凯. 复合地层沉井式竖井机械法掘进施工技术[J]. 价值工程，2024，43(11)：93-96.
[6] 徐光亿，肖威，赵飞，等. 一种沉井潜入式竖井掘进机结构设计与研究[J]. 隧道建设(中英文)，2022，42(1)：145-153.
[7] 高昂，刘昱玮，卢成绪. 国内外城市地下空间标准现状与发展[J]. 地质与勘探，2024，60(1)：1-8.
[8] 徐辉东，刘林林，付新鹏. 竖井全断面机械破岩装备技术现状及发展方向[J]. 建井技术，2020，41(6)：51-57.
[9] 刘志强，宋朝阳. 我国大直径井筒机械破岩钻井技术与装备新进展[J]. 建井技术，2022，43(1)：1-9.
[10] 杨仁树，陈骏. 立井施工装备与技术发展现状和展望[J]. 建井技术，2015，36(2)：1-4.
[11] 包鹤立，姜弘. 装配式竖井预制混凝土管片结构设计[J]. 隧道建设(中英文)，2022，42(增刊1)：376-381.
[12] Brocard D，Gan S J，Koh L Y，et al. Deep tunnel sewerage system phase 2-hydraulics[J]. Water Practice and Technology，2019，14(2)：409-422.
[13] Stevens F，Weiner S. Deep tunnel sewerage systems Singapore′s success story[J]. Water & Sanitation Africa，2022，17(3)：19-23.
[14] 隧道网微信公众平台. 户田建设采用超缓凝混凝土技术，浇筑110 m日本最深气压沉箱法竖井[J]. 隧道建设(中英文)，2025，45(7)：1352.
[15] Tani Y，Nakano M，Okoshi M，et al. Research and development of automatic system for open caisson method[C]// Proceedings of the 13th ISARC. Tokyo：IAARC，1996：323-332.
[16] 张振光，徐杰，汪盛，等. 富水地层超深装配式竖井水下机械法掘进施工技术：以南京某沉井式停车设施建设项目为例[J]. 隧道建设(中英文)，2022，42(3)：492-500.
[17] 薛永涛，赵修旺，贾正文，等. 上软下硬地层中大直径竖井机械化施工方法[J]. 地下空间与工程学报，2024，20(增刊1)：324-334.
[18] 赵德成，苏延奇，范宜，等. VSM掘进机在城市竖井施工中的优势与展望[J]. 机械工程与自动化，2024，53(1)：223-226.
[19] 马春景，洪海件，文威，等. 沉井建造VSM工艺与成套装备及其工程应用[J]. 建井技术，2024，45(2)：10-15.

责任编辑：申晓伟　郭红建