

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.03.010

城区复合地层机械法竖井建造 关键技术研究

刘智成¹, 王 晖¹, 方恩权¹, 章邦超²

(1. 广州地铁集团有限公司, 广州 510355; 2. 中铁建华南建设有限公司, 广州 511458)

摘 要: 为解决空间狭小区域竖井施工中面临的效率低、环境扰动大、姿态控制困难及城区建筑密集等问题, 针对含孤石的地层及高强度岩层, 提出一种以截削式竖井掘进机、装配式管片结构及下沉式施工方法为核心的垂直机械化施工技术, 并通过广花城际京溪路至白云东平区间2号竖井工程的实际应用验证其有效性。研究表明: 采用截削式刀头井内不排水开挖与预制拼装工艺, 显著降低围护结构施工难度, 减少地层扰动, 提升施工效率; 竖井掘进超前模式施工能够有效减少地层沉降和剪应力, 交替掘进模式适用于力学性能良好的地层, 同步掘进模式适用于一般地层(包括含孤石的地层), 可有效抑制地层沉降与变形; 结合滚筒截齿、滚筒格栅及环流系统的优化设计, 改造后的竖井装备在含孤石地层和高强度岩层等复杂地质条件下表现出更强的适应性。研究成果可为类似软硬交替花岗岩复合地层的竖井装备优化与施工工艺提供参考。

关键词: 轨道交通; 垂直机械法; 装配式竖井; 复合地层; 装备优化设计

中图分类号: U45

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)03-0079-08

Research on Key Technologies for Mechanized Shaft Construction in Urban Complex Strata

LIU Zhicheng¹, WANG Hui¹, FANG Enquan¹, ZHANG Bangchao²

(1. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510355;

2. China Railway Construction South China Construction Co., Ltd., Guangzhou 511458)

Abstract: To address the issues of low efficiency, significant environmental disturbance, and difficulties in attitude control in shaft construction in urban areas with dense buildings and limited space, this study proposes an innovative vertical mechanized construction technology centered on a cutting-type shaft boring machine, prefabricated segment structures, and a sinking construction method for isolated-boulder-bearing strata and high-strength rock strata. The effectiveness of this technology has been verified through its practical application in the No. 2 shaft project on the Jingxi Road–Baiyun Dongping section of the Guangzhou–Huadu intercity railway. The engineering practice results indicate that the adoption of undrained excavation with cutting bits and prefabricated assembly technology inside the shaft has significantly reduced the construction difficulty of the retaining structure, minimized stratum disturbance, and improved construction efficiency. The advance shaft advance excavation mode can effectively reduce stratum settlement and shear stress. The alternate excavation mode is suitable for strata with good mechanical properties, while the synchronous excavation mode is applicable to general strata (including those containing boulders), which can effectively control stratum settlement and deformation. Through the optimized design of drum picks,

收稿日期: 2025-10-09 修回日期: 2026-04-27

第一作者: 刘智成, 男, 本科, 教授级高级工程师, 主要研究方向为隧道及地下工程, liuzhicheng@gzmtr.com

通信作者: 方恩权, 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为隧道工程, fensar@163.com

基金项目: 广州市重点研发计划(20220602JBGS01)

引用格式: 刘智成, 王晖, 方恩权, 等. 城区复合地层机械法竖井建造关键技术研究[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(3): 79–86.

Liu Zhicheng, Wang Hui, Fang Enquan, et al. Research on key technologies for mechanized shaft construction in urban complex strata[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(3): 79–86.

the drum grille and the slurry circulation system, the modified shaft equipment demonstrates stronger adaptability under complex geological conditions such as boulder-bearing strata and high-strength rock formations. The research results can provide a reference for the optimization of shaft equipment and construction technology in similar soft-hard alternating granite composite strata.

Keywords: rail transit; vertical mechanized construction method; prefabricated shaft; composite strata; equipment optimization design

竖井施工作为地下工程建设中的重要组成部分,广泛应用于地铁、隧道、地下管廊等复杂地下空间的开挖与支护。随着城市化进程加快和地下空间开发需求增加,如何在建(构)筑物高密度城区高效、安全地完成竖井施工,已成为关键技术挑战^[1]。传统竖井施工方法如明挖法、冻结法、盾构法和钻爆法等虽各具优势,但在建(构)筑物高密度城区及复杂地质条件下存在局限性^[2]。

近年来,随着工程技术的不断进步,竖井施工逐渐向机械化、智能化和环保化方向发展^[3-4]。德国海瑞克公司开发了垂直竖井掘进机(vertical shaft sinking machine, VSM)工法,实现了井身预制与悬挂下沉施工,该工法具有施工速度快、占地面积小、环境影响低的特点,特别适合城市中心区的深竖井建设。姜弘等^[5]首次将VSM工法应用于南京某地下车库工程(竖井内径12 m,深度68 m),研究了装配式竖井设计、防水及下沉控制等关键技术,但该工法主要针对软土地层,对含孤石地层及高强度岩层的适应性未作深入研究。吴文斐等^[6]提出主动控制型装配式机械化沉井工法,实现了富水软土地层中的精准下沉控制,但未研究硬岩及孤石条件下的施工适应性。朱雁飞^[7]等将主动控制型装配式沉井技术应用于上海地铁逃生井工程(竖井内径8 m,深度约31 m),验证了其对周边环境扰动控制效果,但缺乏复杂复合地层中的装备优化研究。佟司淼等^[8]研究了大直径竖井施工设备与气举反循环钻进工艺,提出其在硬岩地层中的应用优势,但设备体积较大,难以适用于城市狭小空间施工。

在竖井施工过程结构受力及地层变形仿真计算方面,周和祥等^[9]建立了沉井侧壁摩阻力分布简化模型,为沉井设计优化提供了参考,但与机械化掘进和装配式管片同步施工过程的耦合分析仍相对不足。曹程明等^[10]考虑土拱效应,通过Plaxis三维有限元模型分析了深竖井侧壁受力与变形的空间效应规律,但对机械法竖井不同掘进模式下的管片受力和地层响应研究仍有待深入。过江等^[11]采用FLAC3D分析不同施工方案对富水冰碛层竖井的影响,但其研究对象主要为富水冰碛层,与城区花岗岩复合地层条件存在差异。

Mamaghani等^[12]对反井钻进竖井稳定性进行了分析,并提出支护措施,但对城市环境下机械法竖井施工扰动控制关注较少。Chehadeh等^[13]利用有限元方法研究圆形竖井支护结构与土体相互作用,但未涉及机械化竖井施工过程中的动态响应问题。

综上所述,机械法竖井施工工艺已初具规模,但与机械法施工及装配化工艺相关的标准和技术研究亟需进一步完善和发展^[14],尤其针对含孤石的地层及高强度岩层等复杂地层的竖井施工装备和工法鲜有报道。因此,本研究依托广州地铁广花城际京白2号竖井工程,提出了一种以截削式竖井掘进机、装配式管片结构和沉井式施工方法为核心的垂直机械施工建造技术。相比国内外同类技术,本项目掘进机可适用开挖直径8~23 m竖井,环形刀盘可解决200 MPa超硬岩地层管片嵌岩问题,通过电驱实现更高开挖效率。同时本设备使用更大的摆臂油缸和进给行程,满足坚硬地层对大推力的需求,并实现更大的扩挖半径。该技术可有效解决隧道掘进设备在穿越含孤石地层、高强度岩层等复杂地层时易发生的管道堵塞问题。在京白2号竖井工程的成功应用,验证了该掘进机装备和施工建造技术的安全性和适用性,能够为国内轨道交通建设领域应用垂直机械法竖井技术提供参考和实践经验。

1 京白2号盾构井工程概况

1.1 工程位置与周边概况

广花城际京溪路至白云东平区间2号盾构井位于白云区同和路西侧地块内,与同和路方向呈锐角布置,周围临近密集房屋建筑群和施工道路(见图1),施工难度大、风险高,对施工控制提出较高的要求。

1.2 工程地质

竖井上部区段采用机械掘进工艺开挖,断面直径为14 m,纵向深度为27 m,作业面终孔于微风化岩层。下部区段则使用明挖法施工,开挖尺寸为8.7 m×9.4 m×14.76 m。井身开挖穿越的地层主要包括:人工填土、粉质黏土、砂质黏土、花岗岩全风化带、强风化带、中风化带与微风化带(见图2)。根据地勘报告,粉质黏土和砂质黏土地层力学特性相近,全风化花岗岩和强风化花岗岩地层力学特性相近。为方便后续的数值建

模计算，将这 4 个地层分别合并为 2 个地层。表 1 展示了合并后各地层的物理力学参数。

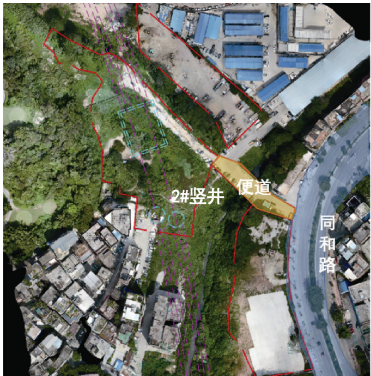


图 1 机械法竖井平面示意

Figure 1 Plan view of mechanized shaft construction

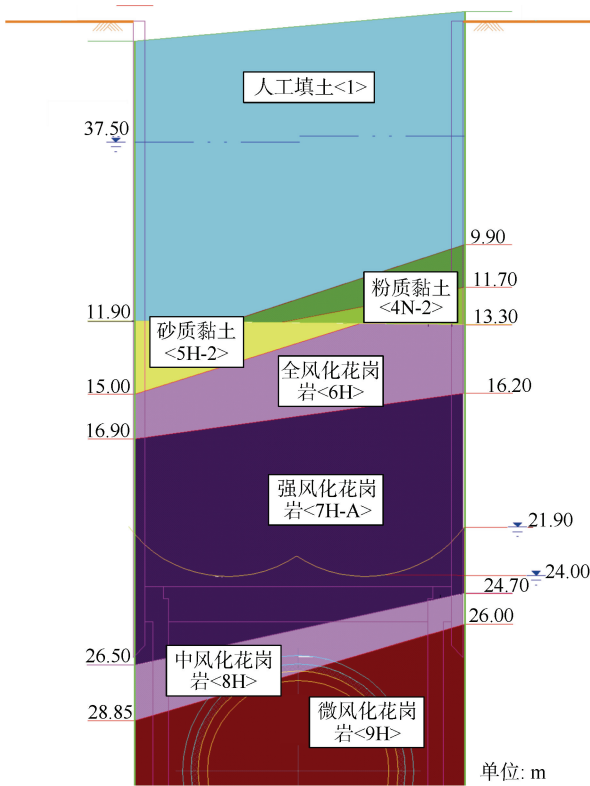


图 2 工程地质断面

Figure 2 Geological cross-section of the project

表 1 各地层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of strata

地层	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/(°)	弹性模量/ MPa	孔隙 比	泊松 比	容重/ (kN/m ³)
人工填土	12	7	10	0.757	0.32	19.0
粉质/砂质黏土	15	10	12	1.310	0.43	16.4
全风化花岗岩	30	23	95	0.774	0.27	19.1
中风化花岗岩	400	35	10 000	0.661	0.20	19.4
微风化花岗岩	1 000	42	30 000	0.550	0.18	24.5

在开挖区域内还识别出 3 处呈球状的中风化花岗岩体，其中 1 处靠近开挖边界，另外 2 处位于开挖面内部，埋深介于 13 m 至 26 m 之间。总体上，竖井开挖范围的地层由软土向微风化花岗岩依次过渡，属于我国华南地区典型的上软下硬复合地层，基岩裂隙水发育，且存在大量孤石和岩面起伏大的不良地质，对设备可靠性要求极高，施工难度极大。

1.3 主体结构设计

竖井主体采用预制管片装配而成。管片内外径分别为 13 m 与 14 m，厚度 0.5 m，单环宽度为 1.5 m。混凝土强度设计等级为 C50，抗渗性能等级 P12。每环衬砌由 6 块尺寸一致的预制管片拼装组成，每片对应的中心角度均为 60°，管片圆环的具体构造如图 3 所示。

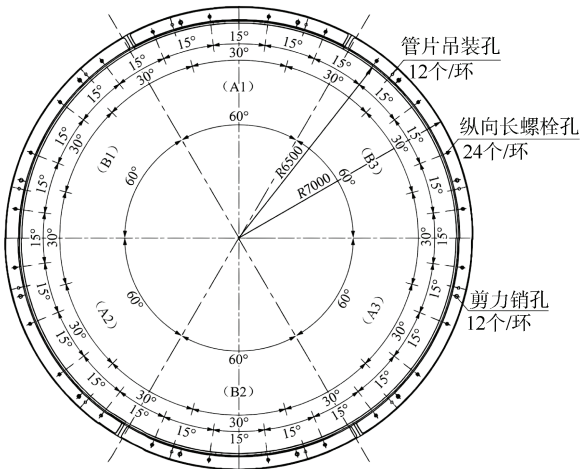


图 3 管片构造设计

Figure 3 Structural design of segments

管片纵向接缝采用 2 根 M27 斜螺栓进行紧固，其安装手孔布置于管片外弧面。相邻管片环之间使用 24 根 M27 纵向长螺栓连接成整体。管片环面设置剪力销孔，拼装时起导向作用，成型后起抗剪作用，管片环采用 30°错缝方式拼装，如图 4 所示。

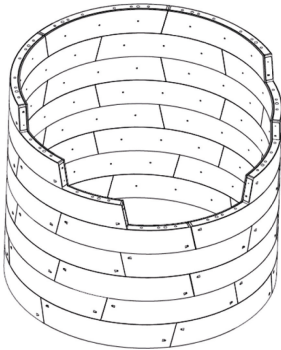


图 4 管片拼装示意

Figure 4 Assembly diagram of segments

2 竖井掘进装备应用与优化

2.1 竖井掘进装备

京白2号盾构工作井采用沉井式竖井掘进装备进行施工,该装备主要包括挖掘机构、回转驱动装置、主机支承框架、井筒起重机构、主机顶升机构、推进液压缸、管线延展支架、壁后注浆装置、液压控制系统、电气控制系统及导向定位系统等部分。

挖掘机构作为该掘进设备的核心工作单元,包含截割头及其运动组件等(见图5),负责破碎开挖面、搅拌渣土并带动截割头执行位移动作。截割头表面布置多组截割齿,在电机驱动下旋转以实现对工作面的掘进,其后方设有渣浆泵,可将破碎后的渣土混合成高浓度泥浆,以流体输送方式排出至地表。

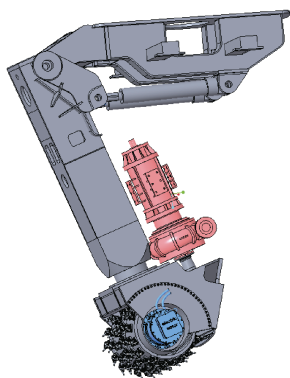


图5 挖掘机构示意

Figure 5 Diagram of the excavation system

回转驱动装置主要由外壳、传动机构、回转拖链、密封组件及润滑装置等部分构成(见图6)。在截割头掘进模式下,该驱动单元的作用是为挖掘机构提供回转动力,无需承担破碎渣土所需的扭矩,因而仅配置一套驱动系统。由于截割头需进行正反交替旋转,回转驱动装置内设有液压与电气管线的随动机构,回转拖链用于实现该功能。

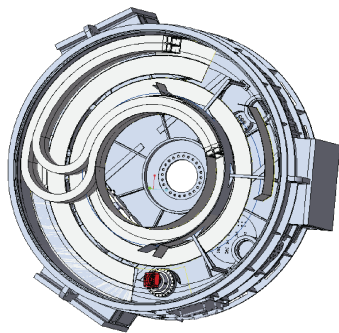


图6 回转系统示意

Figure 6 Diagram of the rotary system

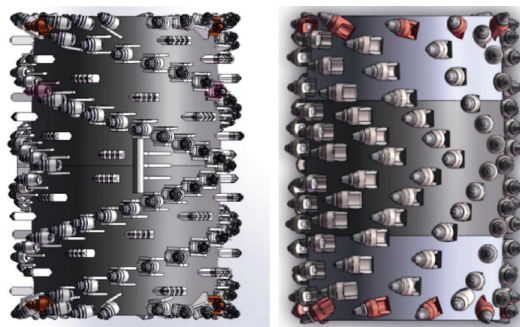
主机支承系统共设置3组,由固定底座、活动支座、支承梁、主机承载平台及挂网支撑等构件组成,通过各部分的协同作用实现对主机的有效固定。

井筒提升系统由液压连续提升装置、井筒提升地锚机构及辅助组件等构成,主要用于钢筋混凝土管片和主机整体的吊装。该系统可对已安装衬砌体的姿态进行调节,以确保井筒垂直度与平面度要求。掘进作业结束后,该系统进一步完成对衬砌体标高、象限角和平面度的精确调整与定位,锁定其最终位置,并承担其全部荷载,直至主机下部拆解作业完毕。

2.2 掘进设备优化

在竖井掘进过程中若遭遇孤石或坚硬岩层,极易引起铣挖滚筒及截齿的剧烈磨损甚至损坏,造成截齿断裂。此外,孤石或断裂的截齿若进入环流系统,易导致出渣管路堵塞、泥浆仓积渣及排浆流量波动等问题,进而引发施工中中断进行检修,严重影响工程进度。基于右线竖井的实际施工经验,对设备及工艺实施了多项改进,旨在提升装备在硬岩和孤石地层中的适应性与掘进效能。

针对沉井式竖井掘进机的改造主要包括开挖滚筒系统、冲刷系统和泥浆环流系统3大模块。首先,为应对孤石强度高导致的截齿断裂和堵管情况,对开挖滚筒系统进行强化。增加截齿布置密度并提高其整体强度,选用大合金截齿及配套齿座,将齿柄直径由38 mm增大至42 mm;采用镶嵌式滚筒结构以增强齿座抗冲击性能,适应含孤石地层的高负荷工况;优化截齿排列方式,调整中心区域齿数、切削角度,并减小截线间距,从而提升截割头的破岩与碎岩能力,具体结构如图7所示。然后,对冲刷系统实施改进以缓解渣土积聚问题。优化基座格栅形态以促进渣土进入泥浆仓(见图8),在滚筒基座开口处、中部及土仓背面



(a) 原有滚筒设计

(b) 优化滚筒设计

图7 滚筒优化

Figure 7 Optimization of the cutting drum

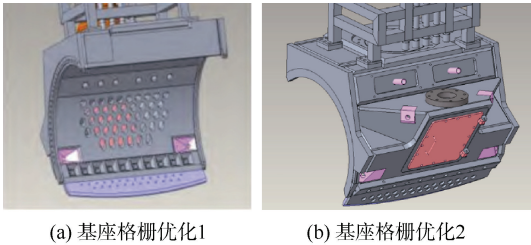


图 8 冲刷系统优化

Figure 8 Optimization of the flushing system

增设泥水注口和高压冲洗口，用以清洁滚筒与格栅孔洞。并通过加大冲刷强度和流速降低积渣风险。同时在伸缩管外部加装防护罩，避免渣石侵入导致卡管。最后，针对泥浆环流系统，通过增设注浆流量分配阀，对各注入点实行压力监测与控制，并对低压点持续补浆；优化注浆管布置形式，将原分支型管路改为单孔单管模式，实现更均衡的注浆分布，如图 9 所示。

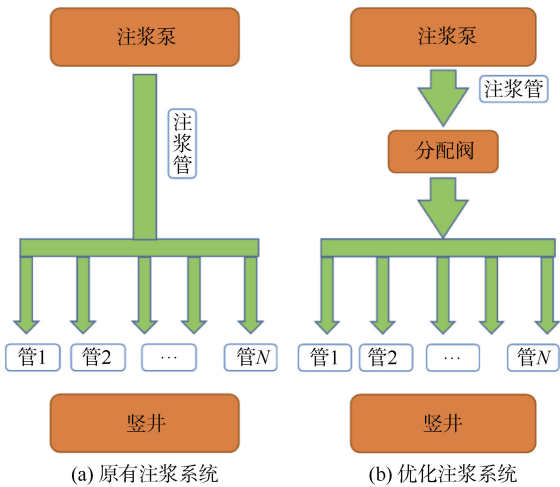


图 9 注浆系统优化

Figure 9 Optimization of the grouting system

3 关键施工工艺

3.1 总体流程

竖井施工主要流程如下：①实施交通疏导、绿化

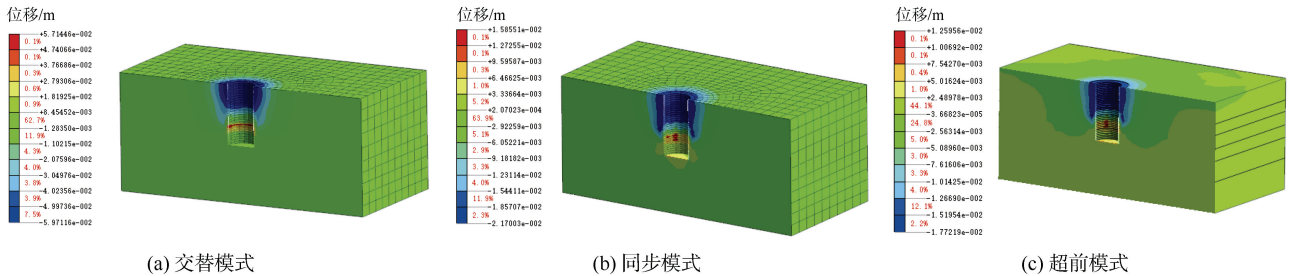


图 10 3 种掘进模式下地层沉降量计算结果云图

Figure 10 Contour plots of stratum settlement under three excavation modes

迁移、管线改移及围挡施工，清除孤石，加固地基，浇筑锁口圈梁；②拼焊钢制刀脚环；③组装调试掘进设备；④水下掘进，保持井内液面，地面拼装管片，通过提升系统控制下沉，刀脚至设计标高后换装环切滚刀盘；⑤采用环切滚刀盘开挖中风化岩，形成深度超 3 m 的环槽；⑥导管法水下浇筑混凝土封底，施作底板环梁及部分侧墙并确保连接；⑦拆除提升系统。

3.2 关键工序

3.2.1 施工工法

竖井掘进机利用伸缩臂带动铣筒，在井底完成对地层的破碎掘进，并通过下沉系统下放管片。根据开挖和管片下放的顺序，盾构井机械法施工包括交替、同步和超前 3 种模式。交替模式指每掘进一环行程后再进行管片下放，循环至开挖完成；同步模式指开挖与管片下放同步进行，直至开挖完成；超前模式指先进行管片下放支护，再进行开挖，循环至开挖完成。

采用 MIDAS GTS-NX 有限元软件建立符合实际情况的盾构井机械法施工三维模型，模型尺寸为 120 m×120 m×53.5 m。混凝土管片等级为 C50，采用线弹性板单元进行模拟。整体模型所含节点数共 11 293 个，模型总单元数 27 237 个。为了确保网格划分的质量，在进行网格划分时，采用尺寸分割的方法对竖井及竖井周围的地层土体网格划分尺寸直接进行设定，同时采用六面体混合网格生成方法，提高网格质量并保证计算稳定性。

参照前述施工工法在数值模型中模拟交替模式、同步模式和超前模式 3 种施工工况，进一步对比分析各工况下竖井周围地层的沉降量、竖井周围地层最大剪应力及其分布、管片剪应力值及其分布计算结果，如图 10~12 所示。在 3 种施工工况下，竖井周围地层均发生沉降，井底及井壁均发生一定回弹。交替模式下，地表最大沉降量为 59.71 mm，竖井周围地层最大剪应力为 205.7 kN/m²，管片最大剪应力值为 4 079.23 kN/m²，

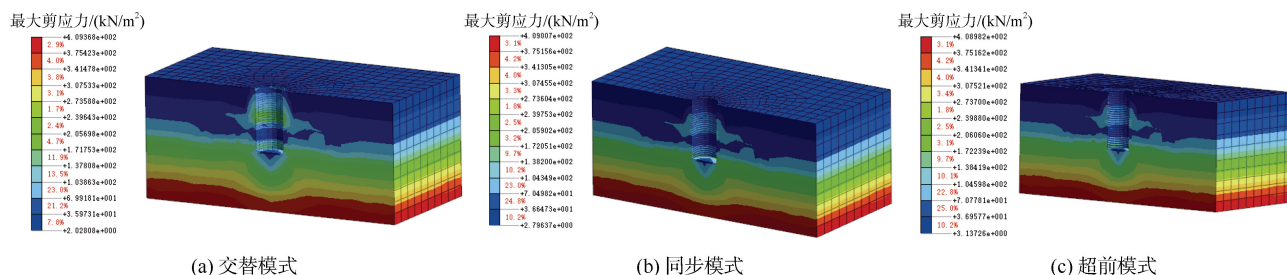


图 11 3种掘进模式下地层剪应力计算结果云图

Figure 11 Contour plots of stratum shear stress under three excavation modes

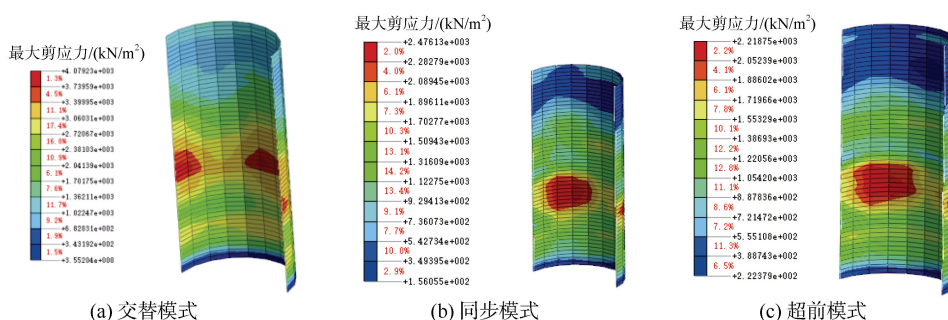


图 12 3种掘进模式下管片剪应力计算结果云图

Figure 12 Contour plots of segment shear stress under three excavation modes

引起较大沉降和管片受力不均,适用于力学性质较好的地层。同步模式下,地表最大沉降量为 21.70 mm,竖井周围地层最大剪应力为 138.2 kN/m²,管片最大剪应力值为 2 476.13 kN/m²,能够较好地控制沉降和剪应力,适用于一般地层(现场采用同步掘进模式施工,右线竖井施工中实测地表最大沉降为 23.202 mm,与数值模拟结果吻合,验证了数值模型的有效性)。超前模式下,地表最大沉降量为 17.72 mm,竖井周围地层最大剪应力为 130.4 kN/m²,管片最大剪应力值为 2 218.75 kN/m²,超前模式能够提供更好的支护强度和更小的地层扰动,适用于软弱地层。

3.2.2 孤石处理

本项目在详细勘察过程中发现机械法竖井区域存在孤石(见图 13),且孤石体积较大,强度较高,需要提前进行孤石补勘探和预处理。

首先对机械法竖井进行孤石补勘,补勘孔间距 2.5 m,沿锁口圈梁内边线布置;对已经发现孤石和后续发现孤石的孔,进行探边勘察,即沿原有孔位四周间距 600 mm 梅花形布置钻孔,若探边孔仍揭露孤石,则继续往四周扩大探边范围,以此类推,直至确定孤石边界。

对于竖井边缘的孤石采用冲击钻锤击方法处理,具体步骤包括:测量定位孤石处理孔位→破除锁口圈梁底部混凝土垫层→锁口圈梁中部开挖出直径 5 m、深

度 1 m 的泥浆池→埋设钢护筒→冲击钻就位→开始冲孔、泥浆池与孔位开挖出连接通道→冲孔完成后回填土→移至下一孔位。

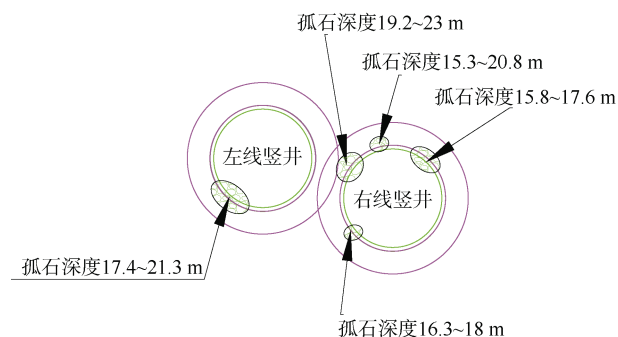


图 13 竖井孤石分布示意

Figure 13 Distribution of boulders within the shaft excavation area

对于竖井中部的孤石,采取爆破方式进行预裂处理,爆破孔间距 600 mm,爆破孔孔径 90 mm,孔内布置直径 75 mm 的 PVC 装药套管。

3.2.3 掘进

结合工程地质条件,确定竖井开挖直径为 14.2 m,单侧超挖量为 0.1 m。每环掘进周期按最快 8 h 控制,该时段内需完成 6 块管片的吊运与转场,以及待延伸管线、螺栓等辅助材料的准备。

掘进过程中,依据地质勘察结果,在管片预设的减阻注浆孔中注入膨润土浆液,以填充管片与外围土体之间的空隙。沉井下沉时,借助搅拌器配置的泥浆泵将膨润土浆液输送至井壁与土体间隙,具体布置如图 14 所示。沉井刃脚外侧下部设有橡胶止浆板,管片接缝处设置止水带,可有效防止膨润土浆液渗入井内。

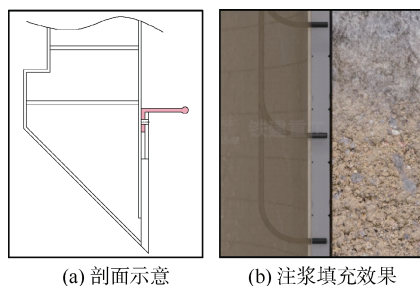


图 14 管片壁后注浆示意

Figure 14 Schematic diagram of backfill grouting behind segments

3.2.4 下沉与导向

竖井下沉以自重为主要作用力,并通过连接刃脚的沉降单元钢绞线调控下沉量与垂直度,保障下沉稳定。若下沉阻力较大,可启动地面推进油缸辅助下沉。作业按以下循环进行:每掘进 0.6 m 后,通过井筒提升机构释放钢绞线,使井筒下沉 0.5 m,随后继续掘进 0.5 m,再下沉 0.5 m;当总掘进距离达到管片环宽 1.5 m 时,在井上拼装一环管片(见图 15)。依托含双轴倾角传感器和测斜仪的导向系统,实时监测调整设备姿态。



图 15 井筒下沉方式及下沉系统示意

Figure 15 Schematic diagram of the shaft sinking method and system

4 竖井施工进度

实际工程右线竖井率先组织施工,采用同步掘进模式,于 2022 年 12 月 22 日开工,总施工周期 59 d,净掘进作业时长 435 h,累计完成进尺 19.8 m,平均掘进速率约为 4.5 cm/h。基于右线施工经验,本项目对设备与工艺进行了以下改进:优化了截割破岩装置

刀具配置,在原截割齿基础上增加重型贝壳刀,并加大了截齿型号,有效提高截割系统抗冲击能力,降低孤石区截齿损耗;优化环流系统泵组配置,首先将管道的排渣粒径限制在 70 mm 内,并增加了一台冲洗泥浆泵,对滚筒表面和泵口持续冲洗,降低泵口堵塞和堵管风险。设备工艺改进后,左线竖井于 2023 年 5 月 1 日开工,同样采用同步掘进模式,仅用时 34 d 即完成全部施工,其中净掘进时间为 292 h,总进尺 21.2 m,平均速率提升至 7.2 cm/h,具体进尺变化情况如图 16 所示。

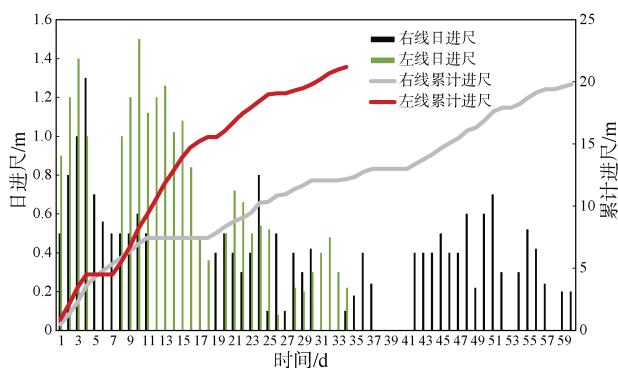


图 16 竖井掘进进尺曲线

Figure 16 Shaft excavation advance curve

设备经优化后在含孤石地层中施工时,滚筒截齿损耗由 0.40 把/m 降至 0.18 把/m,降幅约 55%;掘进效率由 4.5 cm/h 提高至 7.2 cm/h,增幅约 60%。在高强度地层(中风化地层)中施工时,滚筒截齿损耗由 0.94 把/m 降至 0.38 把/m,降幅约 60%;掘进效率由 3.4 cm/h 提高至 4.8 cm/h,增幅约 40%。改进后出渣形态以小块为主,连续性良好,携渣率超过 95%,出渣效率提升 100%,堵管现象显著减少;环流系统携渣率稳定在 95% 以上。实践表明,经改造后的沉井式竖井掘进装备对复合地层的适应性显著增强。

5 结论

本文以含孤石的地层及高强度岩层等复杂地层竖井施工为研究对象,依托广州地铁广花城际京白 2 号竖井工程,提出了一种以截削式竖井掘进机、装配式管片结构和沉井式施工方法为核心的垂直机械施工建造技术,该技术可有效解决隧道掘进设备在这类复杂地层中易发生的管道堵塞问题。主要结论如下:

1) 结合截削式竖井掘进机、装配式管片结构和下沉式施工方法,提出了一种大直径竖井垂直机械化施工技术。该技术具有占地面积小、施工效率高、地层扰动小等优点,尤其在地下水丰富、地质条件复杂及

施工空间有限的城区环境中,表现出显著的技术优势。

2) 通过补充勘察和孤石预处理,有效避免了孤石对施工的影响。加密钻探和探边勘察的精确实施,结合冲击钻和爆破技术,确保了竖井掘进过程地层的稳定性。

3) 通过数值计算明确了交替掘进模式适用于力学性能良好的地层;同步掘进模式适用于一般地层(包括含孤石的地层),可有效抑制地层沉降与变形;超前掘进模式通过先行安装的管片支护提高地层稳定性,适用于软弱地层。

4) 针对含孤石地层和高强度岩层等特殊地质条件,优化后的竖井掘进装备显著缓解了管道堵塞、渣土淤积、出渣不顺及排浆波动等问题,施工效率提升60%。

本文研究成果可为类似软硬交替花岗岩复合地层的竖井工程提供参考和实践经验。随着技术持续进步与相关标准日益健全,机械法竖井施工技术预计将在盾构顶管工作井、调蓄池、地下停车场等市政工程中发挥重要作用,推动高效率、低扰动施工工艺的广泛应用。

参考文献

- [1] 李建斌. 我国掘进机研制现状、问题和展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(6): 877-896.
Li Jianbin. Current status, problems and prospects of research, design, and manufacturing of boring machine in China[J]. Tunnel construction, 2021, 41(6): 877-896.
- [2] Li Jianwang, Qi Wenrui, Li Xinlong, et al. Investigating the construction procedure and safety oversight of the mechanical shaft technique: insights gained from the Guangzhou intercity railway project[J]. Buildings, 2025, 15(1): 129.
- [3] 付文俊, 贾振刚, 罗应奇. 立井施工智能化技术现状与展望[J]. 煤炭工程, 2024, 56(11): 68-75.
Fu Wenjun, Jia Zhengang, Luo Yingqi. Present situation and prospect of intelligent construction technology for vertical shaft[J]. Coal engineering, 2024, 56(11): 68-75.
- [4] 杨仁树, 康一强, 杨立云, 等. 千米竖井硬岩全断面掘进机装备关键技术研究及展望[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6): 1162-1172.
Yang Renshu, Kang Yiqiang, Yang Liyun, et al. Research and application of key technologies for full-face boring machine equipment for kilometer-level shafts with hard rock and its prospects[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6): 1162-1172.
- [5] 姜弘, 包鹤立, 林咏梅. 装配式竖井设计与施工技术应用研究: 以南京某沉井式地下车库项目为例[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(3): 463-470.
Jiang Hong, Bao Heli, Lin Yongmei. Research and application of design and construction technology of assembled shaft: a case study of a sinking shaft underground parking garage in Nanjing, China[J]. Tunnel construction, 2022, 42(3): 463-470.
- [6] 吴文斐, 朱雁飞, 朱叶艇, 等. 主动控制型装配式机械化沉井成套技术[J]. 现代隧道技术, 2025, 62(2): 274-281.
Wu Wenfei, Zhu Yanfei, Zhu Yeting, et al. Active-controlled prefabricated and mechanized open-caisson construction technology[J]. Modern tunnelling technology, 2025, 62(2): 274-281.
- [7] 朱雁飞, 毕湘利, 潘伟强, 等. 富水软土地层中心城区主动控制型装配式沉井工法研究[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(6): 278-285.
Zhu Yanfei, Bi Xiangli, Pan Weiqiang, et al. Research on the active-control press-in prefabricated shaft construction method applied in the central urban areas with water-rich soft soils[J]. Modern tunnelling technology, 2024, 61(6): 278-285.
- [8] 佟司森, 段可璇, 陈晓峰. 大直径竖井施工设备及工法的研究[J]. 建筑机械, 2023(5): 82-85.
Tong Simiao, Duan Kexuan, Chen Xiaofeng. Study on construction equipment and method of large diameter shaft[J]. Construction machinery, 2023(5): 82-85.
- [9] 周和祥, 马建林, 张凯, 等. 沉井下沉阻力离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3969-3976.
Zhou Hexiang, Ma Jianlin, Zhang Kai, et al. Study of sinking resistance of large and deep caisson based on centrifugal model test[J]. Rock and soil mechanics, 2019, 40(10): 3969-3976.
- [10] 曹程明, 龙照, 时轶磊, 等. 小尺寸深竖井侧壁内力与变形分布规律计算分析[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(增1): 51-56.
Cao Chengming, Long Zhao, Shi Yilei, et al. Distribution regulation calculation and analysis of internal force and deformation in side wall of small-size deep shaft[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2022, 18(S1): 51-56.
- [11] 过江, 蒋倪明, 程鑫. 富水冰碛层竖井施工过程数值模拟[J]. 黄金科学技术, 2022, 30(5): 733-742.
Guo Jiang, Jiang Niming, Cheng Xin. Numerical simulation study on shaft construction process of water-rich moraine layer[J]. Gold science and technology, 2022, 30(5): 733-742.
- [12] Shaterpour M A, Erdogan T. Stability analysis of raise bored shaft in Balya Mine, Turkey[C]. Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future. Cappadocia, Turkey. CRC Press, 2016, 1: 391-395.
- [13] Chehadeh A, Turan A, Abed F, et al. Lateral earth pressures acting on circular shafts considering soil-structure interaction[J]. International journal of geotechnical engineering, 2019, 13(2): 139-151.
- [14] 秦政, 陈建伟, 李功子, 等. 复杂环境下竖井掘进与局部爆破开挖组合施工技术研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(3): 105-115.
Qin Zheng, Chen Jianwei, Li Gongzi, et al. Research of the combined construction technology of shaft boring and local blasting excavation under complex environment[J]. Water resources and hydropower engineering, 2023, 54(3): 105-115.

(编辑: 王艳菊)