

地铁18号线江浦路站大断面冻结暗挖施工监测技术研究

林翔宇, 陈 姣

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 上海轨道交通18号线江浦路站采用冻结法结合高压旋喷注浆加固(metro jet system, MJS)、管棚、开挖面全断面注浆和矿山暗挖技术进行施工。工程分2段暗挖法施工, 具有超大断面(暗挖段南侧长度15.899 m×宽23.0 m×高12.4 m, 北侧长度10.101 m×宽22.8 m×高13.7 m)、超浅覆土(顶板覆土约2.476 m)、复杂环境等技术特点。通过对江浦路站地表沉降、围护结构变形、土体温度场、管线变形等关键参数的实时监测, 获得了大量监测数据。研究结果表明: 南井施工期间MJS加固阶段监测点地表日均变化量为0.8 mm, 冻结阶段为1.2 mm; 北井施工期间地表日均变化量为1.1~1.3 mm, 3期冻结后隆起速率增大1倍; 冻结28 d后土体温度稳定在-10℃以下, 冻结壁厚度达905 mm; $\phi 500$ 、 $\phi 300$ 燃气管线最大差异沉降分别达142.5、133.2 mm, 均通过工程措施得到有效控制。该工程为全国首例大断面超浅埋地铁车站整体冻结暗挖工程, 成功实现了城市中心区域地下管线“零”迁移和繁忙交通“零”干扰, 标志着我国在复杂环境下大断面冻结暗挖施工技术达到国际先进水平。

关键词: 地铁施工; 大断面; 冻结法; 暗挖技术; 监测数据分析; MJS加固

中图分类号: U456.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0282-06

Research on Monitoring Technology of Large Cross-Section Freezing Underground Excavation for Jiangpu Road Station in Metro Line 18

LIN Xiangyu, CHEN Jiao

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Jiangpu Road Station in Shanghai Metro Line 18 is constructed by using the freezing method combined with high-pressure rotary jet grouting reinforcement (metro jet system, MJS), pipe shed, full-section grouting of the excavation face and mine underground excavation technology. This project is divided into two sections for underground excavation, which has the technical characteristics of ultra-large section (the length at the south side of the underground excavation section is 15.899 m long × 23.0 m wide × 12.4 m high, and at the north side is 10.101 m long × 22.8 m wide × 13.7 m high), ultra-shallow soil cover (about 2.476 m on the roof), and complex environment. By real-time monitoring of key parameters such as surface subsidence, deformation of retaining structures, soil temperature field and pipeline deformation of Jiangpu Road Station, a large amount of monitoring data has been obtained. The research results show that during the MJS reinforcement stage in the construction of the south shaft, the average daily variation of the surface at the monitoring point is 0.8mm, and during the freezing stage, is 1.2 mm. During the construction of the north shaft, the average daily change of the surface is 1.1~1.3 mm, and the uplift rate doubles after the third stage of freezing. After 28 days of freezing, the soil temperature is stabilized below -10℃, and the frozen wall thickness reaches 905 mm. The maximum differential settlement of the $\phi 500$ and $\phi 300$ gas pipelines reach 142.5 mm and 133.2 mm, respectively, which are effectively controlled through engineering measures. This project is the first integral freezing underground excavation project of large-section ultra-shallow embedded metro station in China, which has successfully achieved the "zero" removal of underground pipelines and "zero" interference of busy traffic in the central area of the city, marking that the large-section freezing underground excavation construction technology in complex environments has reached the international advanced level in China.

Keywords: metro construction; large cross-section; freezing method; underground excavation technology; monitoring data analysis; metro jet system (MJS) reinforcement

收稿日期: 2025-06-28

作者简介: 林翔宇(1980—), 男, 学士, 高级工程师, 从事市政工程进度及周边环境的信息化监测工作。

0 引言

上海市轨道交通18号线江浦路站采用地下2层

岛式站台结构,站台中心位置顶板覆土约2.476 m,位于控江路与江浦路交叉口,沿江浦路南北走向,与8号线江浦路站地下3层岛式站台结构(已投入使用)构成十字交叉换乘模式(见图1)。由于地面管线难以迁改,采用冻结法结合高压旋喷注浆加固(MJS加固)、管棚、开挖面全断面注浆和矿山暗挖技术进行施工。工作井内衬厚0.6 m,地下连续墙厚1.0 m,暗挖段长度南端为15.899 m,北端为10.101 m,北侧结构截面尺寸均为22.8 m(宽)×13.7 m(高),南侧结构宽度23.0 m,高度12.4 m。该工程风险等级为一级,监测等级为一级。



图1 车站冻结暗挖段总平面图

人工地层冻结技术(artificial ground freezing, AGF)作为一种重要的地基改良技术,自19世纪80年代在欧洲矿业领域出现以来,已经历了140多年的发展历程。AGF技术的发展可以追溯到1862年在威尔士斯旺西的首次地下建设应用,随后在1883年由德国工程师Poetsch获得专利。德国在该技术的深度应用方面起步较早,实现了约600 m的冻结深度;加拿大在1950年代达到了900 m的应用深度;英国在1970年代达到了975 m的记录深度^[1]。这些深度应用主要集中在矿井竖井和露天矿坑的建设中,为后续城市地下工程的应用奠定了技术基础。在城市地下交通系统的应用方面,瑞典在1886年率先将AGF技术应用于行人隧道建设^[1]。此后,AGF技术在欧洲、北美等发达国家的城市轨道交通建设中得到了广泛应用,特别是在人口密集的沿海城市中表现出了独特的优势。从技术原理角度,国外研究主要集中在2种冷却系统的发展和完善上。Manassero^[2]指出,现代AGF技术主要包括3种冻结方法:间接法或盐水法、直接法或液氮法,以及两者的组合方法。间接法采用闭路系统,使用工业制冷设备将盐水(通常为氯化钙)冷却至-28~-35℃;直接法采用开路系统,使用-196℃的液氮,蒸发后排放到大气中;组合法则结合了前2种方法的优势,在快速冻结阶段使用液氮,在维持阶段使用盐水。国

外研究特别强调AGF技术的适用性和深度优势。Harris^[3]指出,AGF技术可能是唯一适用于所有类型土壤和岩石的地基改良方法,前提是有足够的水分可以冻结。在处理深度方面,AGF技术可以达到1 000 m的深度,这是许多其他地基改良技术无法实现的。相比之下,高压喷射注浆和深层搅拌最深只能达到150 m,而碎石桩和夯实骨料桩通常不能超过20 m。然而,国外研究也指出了AGF技术的主要挑战。该技术的临时性和高成本是其主要缺点。土壤在停止循环后会很快解冻,而AGF的成本包括钻孔、安装、冻结和维护冻结等多个环节,可能显著高于其他方法^[1]。

中国在AGF技术的应用和发展方面起步相对较晚,但发展迅速,特别是在城市轨道交通建设中表现突出。根据Zhou等^[4]的统计,到2010年,仅中国使用AGF建造的竖井总长度就达到了227 km;到2016年,中国已完成700多个城市地下AGF项目,主要集中在大型沿海城市。在技术深度方面,Wu等^[5]和Zhang等^[6]报告了中国多个深度超过800 m的AGF项目,其中最深的达到了990 m,打破了国际冻结深度记录。中国在地铁隧道AGF技术应用方面的研究起步于1997年。Qiao等^[7]报告了北京地铁线路首次使用水平冻结技术的成功案例,该项目采用水平钻孔技术安装冻结管,创建拱形冻结区域以防止饱和和流砂坍塌。随后,Li^[8]报告了广州地铁建设中140 m超长水平冻结的应用案例,进一步推动了该技术在中国的发展。姚直书等^[9]通过人工冻土试验获得了土体冻结的物理力学指标,并通过有限元数值模拟分析了冻结壁厚度对其强度和稳定性的提高作用。在超大断面冻结暗挖技术方面,中国取得了突破性进展。任辉等^[10]研究了港珠澳大桥珠海连接线拱北隧道超浅埋暗挖隧道管幕冻结法的积极冻结方案。该项目采用管幕冻结预支护体系,其中包括实顶管内“圆形主力冻结管”与空顶管内“异形加强冻结管”的不同组合和3种积极冻结模式。最具代表性的是上海轨道交通18号线江浦路站南段冻结暗挖工程,这是全国首例大断面超浅埋地铁车站整体冻结暗挖工程^[11]。该工程采用冻结法结合MJS加固、管棚、开挖面全断面注浆和矿山暗挖技术,实现了城市中心区域地下管线“零”迁移和繁忙交通“零”干扰。该工程的技术特点包括:超浅埋(顶板覆土约2.476 m)、超大断面(23.7 m×12.92 m,开挖断面达306 m²)、复杂环境(与8号线十字换乘,地处商业中心)以及富水

软弱地层(以滨海淤泥质土为主)。该工程的成功实施标志着中国在复杂环境下大断面冻结暗挖技术达到了国际先进水平。针对江浦路站开挖断面达 306 m^2 的技术挑战,项目采用了“MJS+管棚+冻结”加固技术的创新组合。该技术的主要施工流程包括:首先对地层进行水平MJS加固;然后将管棚孔和冻结孔打入地层中,在部分管棚内下入冻结管,利用人工制冷技术在冻结管中循环低温盐水,将软弱土层变成有一定强度的冻土帷幕;最后在冻土帷幕保护下进行开挖构筑施工^[12-14]。这一技术创新有效解决了常规设计因冻结壁厚度过大导致的冻结时间长以及冻胀融沉大的技术难题。

1 江浦路站大断面冻结暗挖施工监测项目及监测方法

1.1 监测项目

基坑监测项目的设计需综合考量基坑的等级分类、支护结构的详细构造以及周边环境的潜在影响程度。该监测体系应能全面揭示基坑本体及其周边环境的变形特征,反映支护结构在基坑施工期间的性能状态,并为施工过程提供有效的指导,确保提供精确且可靠的变形数据。

冷冻暗挖区主要监测项目为:(1)围护墙顶位移;(2)支撑轴力;(3)收敛。

本区域周边建构筑物、周边管线和地表的监测重点项目为:(1)建筑物的沉降;(2)周边重要管线沉降;(3)地表沉降。

1.2 监测方法

该项目的垂直位移监测通过构建1条闭合或附合水准线路,将高程基准点与工作基点相联测,从而确定工作基点的精确高程。随后利用该工作基点对各个监测点进行高程测量。监测点的本次垂直位移量为本次高程与前次高程的差值。

钢支撑轴力的监测借助表面应变计技术实施。具体操作为在钢支撑表面粘贴或焊接表面应变计。监测点应位于钢支撑长度的 $1/3$ 处,每组监测点由单一表面应变计构成,并安装于钢管支撑的轴线位置^[15]。表面应变计在埋设前需在室内进行率定,监测过程中利用频率仪读取频率值,并依据率定曲线将频率值转换为轴力值。

净空收敛监测常规方法为采用激光测距仪直接测量井壁固定标志之间距离的方法,显然具有更显著的效率和精度水平综合优势。通过收敛监测,可

调整开挖断面大小和开挖步距,确保掘进和支护安全。沿竖向每隔 $3\sim 5\text{ m}$ 布设1个监测断面,每个监测断面在井结构的长、短边中部布设监测点,每个监测断面不应少于2条测线。使用手持激光测距仪进行监测,直接测量内壁两侧距离,通过比较获得结构收敛变形情况。

2 江浦路站大断面冻结暗挖施工监测点位优化设计

上海地区采用冻结法施工时,监测范围由计算分析所得的周围环境影响范围和实际工程经验确定。在监测范围内,比如在联络通道中心线两侧,隧道结构竖向位移、隧道结构净空收敛监测等均按先密后疏的原则布设监测点,且监测点宜对应布设在一个断面上,便于数据之间相互分析和校核;布置在道路上方的地表竖向位移监测点,横向是根据隧道直径的大小,纵向是根据盾构管片的宽度按先密后疏原则布设的。

本次大断面冻结区域的特点为:顶板覆土仅约 2.5 m ,地面管线错综复杂,难以迁改,施工期间还需保证交通畅行。为提高监测数据反映周边环境变化的效率,利用有效的监测数据进一步科学指导施工,保证道路的安全,应根据施工条件,围绕冻结过程温度变化情况,进行监测点位的优化布设。

2.1 地表竖向位移监测点优化

结合冻结管位置,采用格网式布设地表监测点,且应布设在容易渗漏且冻结壁较薄处。监测点平面、剖面布置图见图2、图3。

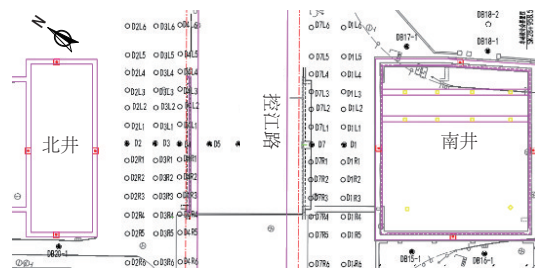


图2 监测点平面布置图

地表沉降剖面的设置垂直于江浦路道路的中心线,剖面的中心点位于基坑的中心位置,并且位于基坑的中部区域。监测点的布置间距为 5 m ,沿江浦路南侧共设置3道剖面,北侧则设置2道剖面。剖面点的编号为D1~D7。

每组剖面根据现场情况,按 $3\sim 5\text{ m}$ 间距(先密后疏)设置 $10\sim 14$ 个测点。点号为L1~L7或R1~R7。

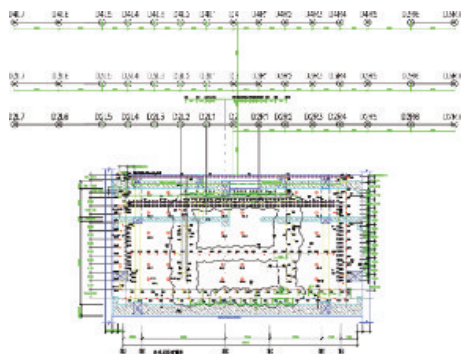


图3 监测点剖面布置图

监测点布设可根据冻结管位置进行调整。通过点位优化,对冻结温度场进行实时监测,能更好地根据测温数据及时分析冻土向内、向外的扩展速度,分析并评价冻结壁的发展状况,从而判断土体稳定情况。

2.2 周边管线竖向位移监测点优化

现状管线主要分布在江浦路与控江路交叉路口。其中南侧有2根上水管线,管径分别为 $\phi 150$ 和 $\phi 500$;1根管径 $\phi 300$ 燃气管线,埋深均在1 m左右。北侧有2根燃气管线,管径分别为 $\phi 150$ 和 $\phi 500$;1根管径 $\phi 300$ 上水管线,埋深均在1 m左右(见图4、图5)。



图4 北侧燃气管线布置图



图5 南侧燃气和上水管线布置图

冻结施工会造成土体冻胀和融沉,易对周围管线造成不利影响。上层覆土较浅,采用水平MJS工法对冻结暗挖段进行土体改良,对上部管线也有不利影响。为了减少施工对管线的影响,在无法改迁的条件下,进行如下优化措施:

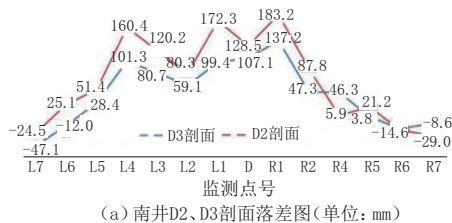
- (1)在不影响交通的前提下,浅埋压力管线开槽验证。
- (2)管线监测点结合冻结管位置并排布设。
- (3)交叉管位和转弯薄弱点进行加密布设。
- (4)冻结影响区域管线点间距按3~5 m间距布设。

3 江浦路站大断面冻结暗挖施工监测数据分析及讨论

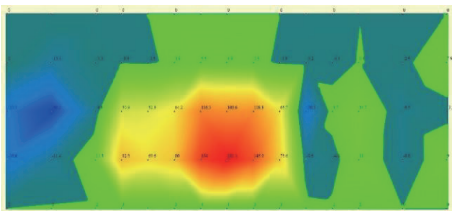
3.1 南北井周边环境监测点数据分析

在冻结暗挖区域,主要土层为:①₁填土层、③灰色淤泥质粉质黏土层;土层厚度为0.90~3.50 m,状态流塑,压缩性高。周边主要地表水体有杨树浦港和走马塘。在浅层覆土的交叉路口下方是运营中的轨道交通8号线和不能搬迁的密集管线。如此复杂的环境下采用冻结法结合MJS加固、管棚、开挖面全断面注浆和矿山暗挖技术进行施工,每项施工工艺均会对周围土体和管线造成影响。因此,通过不间断的监测并进行有效的监测数据分析,在该项目中尤其重要。以下针对冻结区域南北井土体和管线数据进行重点分析。

江浦路站冻结暗挖南北井周边环境监测点数据见图6、图7。



(a) 南井D2、D3剖面落差图(单位: mm)



(b) 南井上方地表沉降热力图(红色代表地表隆起最大)

图6 南井监测断面数据趋势图

冻结暗挖南井分3期冻结,由内向外延伸,施工从2020年4月16日至2021年1月21日暗挖完成。前期MJS水平加固中,在对应的土体上方,监测点地表沉降日均变化量为+0.8 mm;随后冻结区中部开始1期冻结,监测点地表沉降日均变化量为+1.2 mm;待冻结壁已交圈时,地表隆起量开始缓慢变小直到稳定。监测点L4位于2期冻结左洞区域,L5位于冻结区域外。根据测算,此处冻结壁厚度为905 mm,因

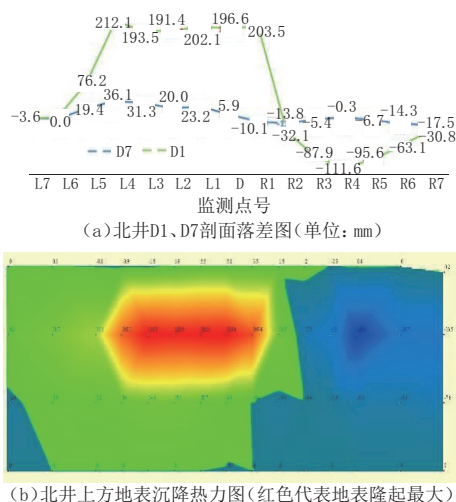


图7 北井监测断面数据趋势图

此测点L4与L5之间形成了断崖式的差异沉降。随着冻结壁形成,两侧隆起趋势在2期左、右洞下台阶开挖至2期开挖完成阶段有所收敛,主要原因是初期取土泄压措施对冻胀隆起趋势具有明显的抑制效果。在2期开挖后期至3期冻结开挖施工完成阶段,因地下土体已基本无土可取,所以后期取土泄压效果并不明显。南井施工区域压力管线未开挖前,监测数据变化量相对较小。为保证监测数据可靠性,对部分管线进行开槽验证。在管线暴露初期阶段,未受原状土的约束,部分管线基本呈隆起态势,随后应力释放,暴露管线与土体连接处被掏空,使得管线处于悬空状态,坑内压力管线在1期开挖后期至2期开挖完成阶段变化较小;3期冻结开机后,因3期冻结管埋深较浅,冻胀影响较为明显,结合监测数据变化采取进一步掏挖措施后,隆起趋势明显变缓,直至3期开挖期间,上水、燃气压力管线的变化缓慢收敛。

冻结暗挖北井与南井相同,分3期冻结。施工自2020年6月11日至2021年1月7日暗挖完成。冻结期间地表测点在冻结开机后呈隆起趋势,1期至2期冻胀施工期间,地表变化量日均1.1~1.3 mm;3期冻结横排与竖排开机后,隆起速率明显增大,地表日均变化相较前期增大1倍。总体地表变化量相对一致,冻结效果较好。结合现场条件分析:3期冻结管埋深较浅;区域土层含水量较为丰沛,受杨树浦港潮汐影响较大,浅层地下水的丰沛导致土体冻胀体积明显增大;北井西侧1根 $\phi 600$ 雨污水管因1期、2期冻胀导致管体破损,雨污水渗入土体中加剧了土体冻胀效果。北井开挖暴露出来的燃气压力管线在冻结暗挖施工期间隆起量十分明显, $\phi 300$ 、 $\phi 500$ 这2根燃气管线南北端差异沉降较大, $\phi 500$ 燃气管线上最

大差异沉降达142.5 mm,发生测点为RQ500和RQ39; $\phi 300$ 燃气管线上最大差异沉降达133.2 mm,发生测点为RQ300和RQ300-A。结合现场情况分析:因管线一端受混凝土箱涵约束,另一端位于冻结区上方,整体形成跷跷板格局,使得管线产生较大差异沉降。经过后期对管线下方土体的掏挖,上述变化量有所减缓。

江浦路站南北井在暗挖结构施工完成后,进入融沉阶段。前期对已开槽管棚底部进行充填注浆,已形成相对稳定结构。因此在融沉阶段,原隆起较大区域测点虽然有一阶段持续的小幅下沉,但总体下沉量较小,且未回落至原状。融沉注浆后期,环境监测点变化速率逐渐趋小直至稳定。

3.2 冻结暗挖施工的变形规律

冻结暗挖工程的变形具有明显的阶段性特征。冻结期间总体变形幅度大于其他阶段,距冻结管越近的监测点变形数值相对越大。南井施工中,MJS水平加固阶段监测点地表沉降日均变化量为0.8 mm,1期冻结阶段增至1.2 mm;北井施工中,1期至2期冻胀期间地表日均变化量为1.1~1.3 mm,3期冻结后隆起速率显著增大。冻结壁形成过程呈现明显的时空演化规律,冻结28 d后土体温度稳定在 -10°C 以下,冻结壁厚度达905 mm,为安全施工提供了可靠保障。

3.3 管线保护措施的成效

针对复杂的地下管线环境,通过开槽验证、加密监测、及时掏挖等综合措施,有效控制了管线变形。虽然 $\phi 500$ 燃气管线最大差异沉降达142.5 mm, $\phi 300$ 燃气管线最大差异沉降达133.2 mm,但通过及时的工程措施,管线变形得到了有效控制,未发生重大险情。这为城市中心区域管线“零”搬迁提供了技术保障。

3.4 技术创新的工程价值

冻结法结合MJS加固、管棚、开挖面全断面注浆和矿山暗挖技术,成功解决了超大断面(开挖面积达 306 m^2)、超浅覆土(约2.476 m)条件下的施工难题。该技术创新不仅确保了工程安全,还实现了对周边环境的有效保护,为国内外类似工程提供了宝贵的技术经验和工程范例。

通过对大量监测数据的分析,揭示了冻结暗挖施工过程中的变形机理和发展规律。监测数据显示,初期取土泄压措施对冻胀隆起趋势有明显的抑制效果,融沉阶段通过充填注浆形成相对稳定结构,

原隆起区域虽有小幅下沉但总体下沉量较小。这些规律性认识为优化施工工艺、完善监测方案提供了科学依据。

4 结 语

(1)冻结期间总体变形幅度大于其他阶段,距冻结管越近的监测点变形数值相对越大。南井施工中MJS水平加固阶段监测点地表沉降日均变化量为0.8 mm,1期冻结阶段增至1.2 mm;北井施工中1期至2期冻胀期间地表日均变化量为1.1~1.3 mm,3期冻结后隆起速率显著增大。

(2)冻结28 d后土体温度稳定在 -10°C 以下,冻结壁厚度达905 mm以上,为安全施工提供了可靠保障。冻结壁形成过程呈现明显的时空演化规律,冻结效果满足设计要求。

(3)通过开槽验证、加密监测、及时掏挖等综合措施,有效控制了管线变形。虽然 $\phi 500$ 燃气管线最大差异沉降达142.5 mm, $\phi 300$ 燃气管线最大差异沉降达133.2 mm,但通过及时的工程措施,管线变形得到有效控制,实现了城市中心区域管线“零”搬迁。

(4)冻结法结合MJS加固、管棚、开挖面全断面注浆和矿山暗挖技术进行施工,成功解决了超大断面(开挖面积达 306 m^2)、超浅覆土(约2.476 m)条件下的施工难题。该技术创新确保了工程安全,实现了对周边环境的有效保护。

参考文献:

[1] MAO H, HUANG J, JOHNSON D W. Artificial ground freezing for underground construction - a brief review of the theory, practice and

challenge[J]. *Frontiers in Built Environment*, 2024(10): 1453407.

[2] MANASSERO V. Key points in artificial ground freezing techniques[J]. *Tunnels & Tunnelling International: T&T International*, 2022(11): 22-27.

[3] HARRIS J S. Ground freezing in practice[M]. London: Thomas Telford, 1995.

[4] ZHOU M M, MESCHKE G, ZHAN M L. A three-dimensional numerical model for artificial ground freezing[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 144: 104629.

[5] WU Y, WANG L, ZHANG N, et al. Application of artificial ground freezing technology in deep shaft construction[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 171: 102983.

[6] ZHANG N, WANG L, WU Y, et al. Deep shaft construction using artificial ground freezing technology[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 32: 28-43.

[7] QIAO L, LI S, WANG M. Application of horizontal ground freezing technology in Beijing subway tunnel construction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(15): 2521-2526.

[8] LI S. Extra-long horizontal freezing application in Guangzhou metro construction[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2007, 44(3): 45-52.

[9] 姚直书,蔡海兵,程桦,等.采用长距离水平冻结暗挖法的浅埋大断面地铁隧道施工技术[J]. *中国铁道科学*, 2011, 32(1): 53-59.

[10] 任辉,胡向东,洪泽群,等.超浅埋暗挖隧道管幕冻结法积极冻结方案试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(2): 320-328.

[11] 全国首例地铁站整体冻结暗挖工程完工[N]. *科技日报*, 2021-04-09.

[12] 陈旭志.钢管冻土围护结构冻结壁力学特性研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.

[13] 王坤.钢管冻土复合结构温度场研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.

[14] 向阳生.浅覆土超大断面冷冻暗挖施工技术应用分析——以上海市轨道交通18号线江浦路站建设为例[J]. *建筑科技*, 2024, 8(6): 138-141; 157.

[15] 张文祥,夏晓明,常鹏海.地铁换乘车站支撑轴力监测与数据变化分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2025, 48(4): 214-216.