

DOI: 10.7672/sgjs2025070157

复杂地层盾构下穿既有车站超大断面 冷冻清障关键技术研究

何海为

(中铁南方投资集团有限公司,广东 深圳 518000)

[摘要] 结合南昌地铁4号线丁公路北站—人民公园站区间项目,介绍了在复杂地层环境中盾构下穿南昌地铁1号线丁公路北站时,通过提前暗挖先清除既有车站下方障碍物,构筑通道后盾构再行推进的施工方法。暗挖通道施工采用“水平+竖向联合、双洞超大断面同步冻结”关键技术,有效控制车站站内道床板(通道上方)等结构沉降、上浮、冷冻冻胀和融沉风险,以减轻对1号线轨道交通运营及地面环境的影响,保证了清障暗挖施工过程的整体稳定,避免了安全事故的发生。

[关键词] 地铁;盾构;冷冻;融沉;清障;施工技术

[中图分类号] U25

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0157-06

Research on Key Technology of Obstacle Freezing and Removal for Shield Undercrossing Super-large Sections of Existing Station in Complex Strata

HE Haiwei

(China Railway South Investment Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: Combined with the section project of Dinggong Road North Station to People's Park Station of Nanchang Metro Line 4, this paper introduces the construction method of removing the obstacles under the existing station through underground excavation in advance, and constructing the channel before the shield advancing when the shield underpasses through the Dinggong Road North Station of Nanchang Metro Line 1 in a complex stratum environment. The key technology of “horizontal + vertical combination, synchronous freezing of double-hole super-large cross-section” was adopted in the construction of the underground excavation channel, which effectively controls the settlement, floating, freezing and frost heaving, and thaw settlement risks of the track bed slab (above the channel) in the Station. Engineering practice shows that this technology can reduce the impact on the operation of rail transit and the ground environment of Line 1, ensure the overall stability of the construction process of obstacle clearing and underground excavation, and avoid the occurrence of safety accidents.

Keywords: subways; shields; freezing; thaw collapse; obstacle clearing; construction

0 引言

随着城市化和工业化的不断推进,人口和资源的大量涌入给城市综合承载能力带来极大考验,尤其是由此带来的交通运输压力成为迫切需要解决的问题。地下工程在解决城市轨道交通等方面具有显著优势,但由于各类地下工程都处于地下复杂岩体中^[1],传统的钻爆法在开发利用地下空间过程

中面临着巨大的安全风险问题。冻结法在地下结构施工冻结加固、封水及临时支护等方面能够很好地解决这类问题。

我国人工制冷冻结技术经历了引进、推广和发展几个阶段,冻结技术已取得快速发展^[2]。但对于冻结法的应用,早期主要集中在井筒和地铁联络通道中,近十余年的发展表明,人工冻结法越来越普遍地应用于其他地下工程领域^[3]。

本文就南昌地铁4号线下穿既有1号线丁公路北站过程中超大断面冷冻暗挖破除1号线车站地下

[作者简介] 何海为,高级工程师,E-mail:hevey520@qq.com

[收稿日期] 2024-07-30

连续墙等障碍物施工技术进行介绍,重点对冻结法在盾构下穿大型建(构)筑物中的关键技术进行研究,为今后类似工程积累了重要经验。

1 工程概况

南昌地铁4号线丁公路北站—人民公园站区间位于南昌市西湖区中心地段,丁公路北站端头区间隧道埋深19.75m,拱顶覆土地层自上往下为1.26m厚素填土、3.99m厚粉质黏土、3.84m厚中砂、4.84m厚砾砂、4.91m厚圆砾、0.92m厚砾砂层,隧道处于2.26m厚砾砂、0.5m厚强风化泥质粉砂岩和3.25m厚中风化泥质粉砂岩地层中,为南昌地区典型的上软下硬地层,地下水位9.100m。

4号线与1号线T形换乘,4号线区间盾构需下穿已开通运营的地铁1号线丁公路北站,下穿前需凿除原地铁1号线丁公路北站南、北两端地下连续墙。根据相关资料可知,丁公路北站上方北京西路北侧既有110kV供电管箱涵、DN1 800合流管等构筑物,通过地面竖井清障不具备施工条件,因此采用在车站底部暗挖清障通道的方式清除地下连续墙。为保证该区间清障通道施工安全,并降低车站底板结构变形对1号线运营影响,采用“水平+垂直联合、双洞超大断面冻结法”加固地层,确保清障通道周边土体冻结后,形成强度较高、整体封闭良好的冻结帷幕,然后采用暗挖完成清障通道,破除障碍物后,回填泡沫混凝土,拔出垂直冻结管,继续水平冻结待盾构机通过后进行地层融沉注浆^[4]。

本项目冻结规模大,双洞水平冷冻面积达220m²以上,垂直冷冻面积达80m²以上,同时配置11台冷冻机组,钻设孔数达258个。涉及近距离既有线施工(暗挖通道拱顶与车站下翻梁垂直距离2.0~2.5m)、冷冻冻胀、融沉、暗挖作业及结构沉降、上浮等多种重大施工风险。施工过程中面临沉降难以控制、工序转换繁多、应力不断重新分布等难题^[5],并且同步叠加车站结构施工,交叉作业相互干扰,风险等级极高。文章重点对冻结法在盾构下穿大型建(构)筑物中的关键技术进行研究。

2 设计情况

2.1 冻结帷幕设计

采用杯形冻结壁,抵抗外部水土压力形成开挖通道;冻结壁平均温度 $\leq -10^{\circ}\text{C}$ 。冻结壁厚度:杯壁上部砂层 $\geq 2.5\text{m}$,杯壁下部风化岩 $\geq 2.0\text{m}$,杯底部分 $\geq 2.0\text{m}$ 。清障冻结法工程剖面如图1所示。

2.2 冻结孔设计

站内水平冻结管采用 $\phi 108 \times 10$ 低碳钢管全深冻结;地面垂直冻结管采用 $\phi 127 \times 8$ 低碳钢管局部

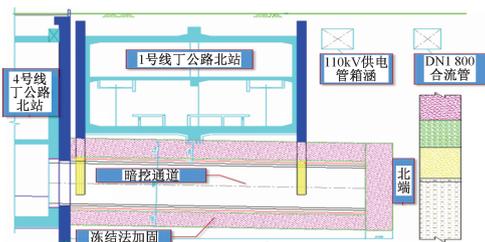


图1 清障冻结法工程剖面

Fig. 1 Engineering section of freezing method for clearing obstacles

冻结;管沟埋深范围内垂直冻结应采用外保温方式,减小冻结对管路的影响。单洞水平冻结孔69个,垂直冻结孔31个,测温孔11个,泄压孔4个,温控孔14个。

2.3 制冷参数设计

1)单洞水平冻结需冷量 $29.1 \times 10^4 \text{kcal/h}$,水平冻结站设置2个,冷冻机组8台;单洞垂直冻结需冷量 $6.75 \times 10^4 \text{kcal/h}$,垂直冻结站设置1个,冷冻机组3台。

2)在冻结过程中,单孔流量 $\geq 5.0 \text{m}^3/\text{h}$ 。为保证安全,需严格控制盐水温度,7d内降到 -18.0°C ,15d内降到 -24.0°C 。开挖过程中,盐水温度应低于 -28.0°C ,并且循环温差不超过 2.0°C 。若无法达到设计要求,则需延长冻结时间,以确保冷却壁厚度和温度符合预期标准。

3)清障通道:积极冻结时间设定45d,过程中加强测温孔、降压孔、辅助探孔、盐水温度、压力等数据监测,以此判断冻结帷幕形成状况。

4)施工期间维护冻结盐水温度不得高于 -25°C ,温差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$;维护冻结时间满足加固效果直至结构施工完成。

5)积极冻结期间,周边300m范围内土层禁止进行降水作业,并应切断土体内集中水流,最大程度降低外部流动水影响。

2.4 冻结壁计算

清障通道冻结壁有效厚度上部为2.5m,下部为2.0m,设计取 -10°C 冻土的弹性模量和泊松比,分别为120MPa和0.25。冻土强度指标分别为:抗压强度3.6MPa,抗折强度2.0MPa,抗剪强度1.5MPa。冻土壁承载力采用许用应力法验算,抗压安全系数2.0,抗剪安全系数2.0,抗折安全系数3.0。通道冻结壁有限元计算模型如图2所示。

冻结壁力学分析采用均质线弹性三维模型^[6],考虑结构埋深较深(27m),初始地应力产生的变形对冻结壁影响较大,故采用中间未冻土开挖模拟的

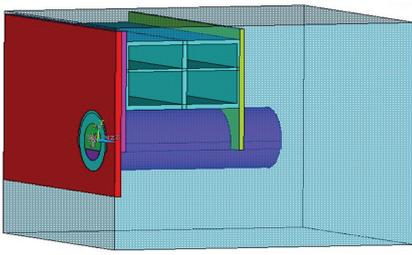


图2 通道冻结壁有限元计算模型

Fig. 2 Finite element calculation model of freezing wall of channel

方式进行计算。冻土力学特性参数取冻结壁平均温度下的冻土力学特性值。根据结构对称性,取结构的 1/2 作为计算模型。

采用有限元法进行冻结壁的受力分析与变形计算,存在应力集中现象,冻土帷幕安全系数计算如表 1 所示,计算所得变形为弹性变形,计算结果未考虑开挖后的初次衬砌作用和未开挖部分土体的作用,因此计算结果和实际相比是偏于安全的。ANSYS 计算结果如图 3 所示。

3 关键技术研究

下穿地铁 1 号线清障冻结法施工采用“水平+垂直联合冻结加固土体,暗挖构筑通道后清障”的总体方案。在 4 号线丁公路北站站内区间隧道周边钻设水平孔和穿越范围内地面钻设垂直孔冻结加固地层,使清障通道周边土体冻结,形成强度较高、整体封闭良好的冻结帷幕,然后采用暗挖完成清障通道,破除障碍物后,回填泡沫混凝土,拔出垂直冻结管,继续水平冻结,待盾构通过后进行地层融沉注浆。

3.1 结构影响分析

为了解盾构施工对既有车站的影响,采用三维有限元对盾构穿越过程进行了模拟分析。计算将土体视为弹塑性体,混凝土结构视为弹性体。计算模拟长度 300m,宽度为 300m,深度为 40m,整个计算区域左右边界设置水平约束,底部边界设置垂直约束,上部为自由边界,分析模型如图 4 所示。

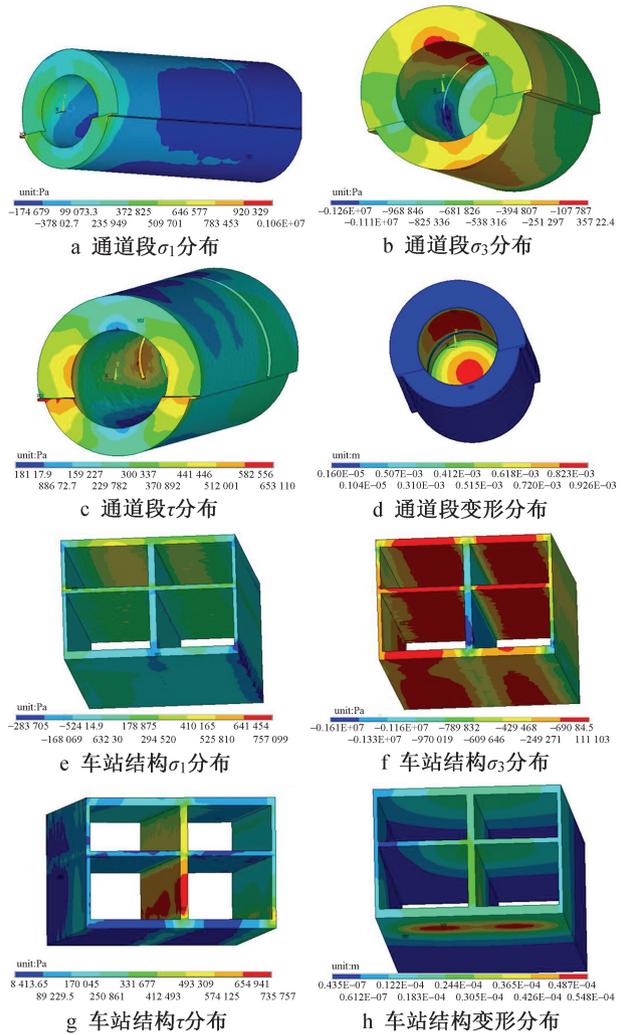


图3 ANSYS 计算结果

Fig. 3 ANSYS calculation result

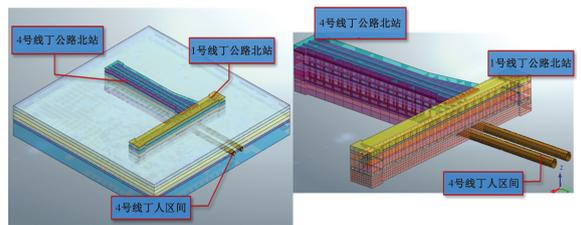


图4 分析模型

Fig. 4 Analysis model

表 1 冻结帷幕应力、强度及安全系数取值

Table 1 Values of stress, strength and safety factor of frozen curtain

项目	中间通道			上部车站结构		
	计算值	强度指标	安全系数	计算值	强度指标	安全系数
弯拉应力 σ_1 /MPa	0.65	2.00	3.1	0.64	300	较大
压应力 σ_3 /MPa	1.26	3.60	2.9	1.50	13.4	8.9
剪应力 τ_{max} /MPa	0.61	1.50	2.3	0.86	150	较大
位移 U_{max} /mm	1.00	—	—	0.10	—	—

注:车站强度指标分别为底板钢筋抗拉强度、底板混凝土抗压强度、底板钢筋抗剪强度,通过设置钢筋单元,利用 ANSYS 三维计算获得

主要分析工况如图5所示。

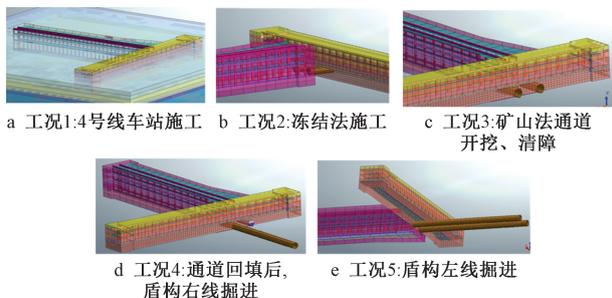


图5 主要分析工况

Fig. 5 Analysis working conditions

根据CJJ/T 202—2013《城市轨道交通结构安全保护技术规范》,由计算结果可知:4号线冷冻暗挖施工对既有运营1号线车站结构影响可控,满足城市轨道交通结构安全控制指标要求,结构影响分析计算数值如表2所示。

表2 结构影响分析计算值

Table 2 Calculated values of structural impact analysis

计算工况	安全控制指标	计算值/ mm	控制值/ mm
冻结法加固开挖	1号线车站水平位移	0.8	<20
	1号线车站竖向位移	3.2	<20
盾构法左线施工	1号线车站水平位移	0.1	<20
	1号线车站竖向位移	0.3	<20
盾构法右线施工	1号线车站水平位移	0.3	<20
	1号线车站竖向位移	0.7	<20

3.2 暗挖清障

开挖原则与工序:首先应完成冻结施工并破除防护门范围内4号线和1号线车站南侧2道地下连续墙,然后采用台阶法分步开挖,施工应遵循“开挖一段加固一段、加固一段开挖一段”和“先探后挖、随挖随支、先支后挖、严禁超挖”的原则。

开挖分上下两个台阶,左右两个区,首先上台阶1区施工到3~5m,然后再施工上台阶2区,开挖步距要与支架间距保持一致,随挖随支。待上台阶2区施工到距洞口大于10m时,方可进行下台阶3区开挖施工,4区开挖要与3区保持3~5m步距,上下台阶步距 ≥ 10 m,采用机械及人工风镐相互配合,暗挖清障顺序如图6所示。

关键技术控制如下。

1)开挖前应进行超前探孔,避免发生漏水涌砂风险,考虑上台阶支撑底部放置在中风化泥质粉砂岩形成的冻土上,开挖中冻土解冻会导致上台阶支撑下沉,新增支架开挖拱脚下沿纵向设置外扩混凝土基础。

2)通道开挖过程中,破坏了原有地层应力平衡

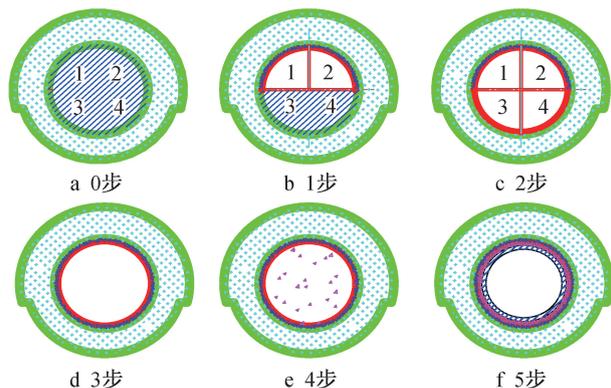


图6 暗挖清障施工顺序

Fig. 6 Construction sequence for underground excavation and obstacle removal

关系,周围地层应力进行重新分布,造成上部地层位移产生变化,并形成新的附加荷载,并不断作用在已经完成加固的帷幕之上,当其承受的荷载超过自身可承受强度时,冻结管及帷幕便会发生力学蠕变,为控制变形不断发展,开挖后要及时施作初期支护。

3)清障通道初期支护既作为保证施工安全、维护地层稳定的重要措施,又作为永久支护的一部分,是整个冷冻清障工程施工技术中至关重要的环节,采用“型钢拱架+钢筋网+喷射混凝土”联合支护工法,并设置“横向+纵向”临时型钢支撑,确保开挖过程土体稳定、安全^[7]。

3.3 融沉注浆

1)按照冻结设计要求,融沉处理采用“自然解冻、跟踪注浆”的总体方案,原则上从隧道底部向上注浆,同时结合沉降监测数据调整部位及注浆量。

2)待盾构进洞结束停冻3~7d后从管片内开始注浆,过程中遵照“多点、多次、少量、均匀”的原则,循序渐进。

3)根据洞内、地表、周边管线及建(构)筑物沉降和解冻温度监测,动态调整注浆量和间隔时间,确保沉降稳定,严格控制注浆压力和注浆量。

4)当隧道沉降大于0.5mm/d或累计沉降大于3.0mm时,应进行融沉补偿注浆;当隧道隆起3.0mm时应暂停注浆,注浆压力不大于0.5MPa,冻结壁全部融化,且地面变形基本保持稳定,可停止融沉补偿注浆。

3.4 结构上浮控制

1)施工监测

为确保冷冻清障暗挖通道施工安全,必须对冻结系统进行监测,根据监测数据及时动态调整冷冻参数、通道施工工法以及采取其他必要的措施。监

测内容包括制冷系统、压力、冻结帷幕、融沉注浆变形监测、清障通道初支变形、车站及周围管线、建(构)筑物变形等^[8]。监测范围为:1号线车站底部,清障通道正上方地面100m范围,施工监测应和第三方自动化监测相互配合,数据共享,做好监测验证。

丁公路北站结构沉降预警值设定为20mm,建设单位按照10mm进行控制;2021年2月施工过程中,第三方监测报表显示,部分测点变形速率明显加快(累计变形最大值达到+16.45mm),车站内部道床板出现上浮,达到轨道运营黄色预警级别,为保证既有轨道交通运营安全,现场立即组织相关人员分析研判预判,结合冷冻施工情况,动态调整后续各项措施。

2) 冷冻减量

2月17日将顶部外圈1号、3号支路流量减小至60%;2月19日关闭顶部外圈1号、3号支路及Z排孔,冷冻机组减载至75%,顶部外圈2号、8号支路流量及顶部内圈6号、7号支路流量减少至60%;2月22日将顶部内圈6号、7号支路关闭;2月26日将右线外圈冷冻孔全部关闭(除去13号支路),并增加W1,Z1,W22为测温孔;3月1日关闭右线垂直冷冻管;3月5日将顶部内圈4号、9号支路流量减少至80%;3月11日将左线垂直内排冷冻孔(16根)流量减少至80%,并对左线水平外圈孔分次进行减量、减组措施,直至外圈孔全部停掉;3月12日将左线水平外圈冷冻孔(8组24孔)流量减少至50%。

3) 工艺调整

左右洞洞内采用钻设多个超前探孔等辅助措施,提前进行泄压;右侧暗挖通道采取提前“掏小洞”的方式,降低土体冻胀压力;缩短工序转换,加快右线开挖进度,为车站结构提供卸载临空面,确保增大冻胀泄载空间;调整部分自动化监测点至轨枕上方,沿轨道方向在原有测点基础上向两侧延伸布置测点;每日申请天窗进行人工复核,对比自动化监测数据,确保监测数据真实有效,并实时动态采取调整措施。

4) 管理措施

强化现场值班,每日组织各方主要管理和技术人员召开现场分析会,研判结构上浮风险;邀请中煤科工、上海申通地铁等国内冷冻及具有类似建设经验的知名专家召开风险咨询会。通过逐级减量冷冻、加快开挖泄压等手段,3月底监测数据开始回落并逐步趋于稳定,最终安全顺利完成清障通道冷

冻及暗挖施工,为类似项目积累了重要的施工经验。

4 主要技术探讨

本工程通过一系列措施,最终顺利完成复杂地层条件下超大断面冷冻清障,盾构近距离安全下穿既有运营车站,根据工程实践,探讨研究几点施工核心技术,以供后续类似项目作为参考。

1) 由于清障范围内地层地质条件较为复杂,地下水系丰富且易形成流动水源,冻结施工前,需认真排查冻结影响范围内的周边环境,当地层环境与设计有重大变化,特别是存在明显影响冻结效果的因素时,应及时联系各相关单位,完善冻结方案。

2) 长距离水平钻孔(30.2m),冻结断面大(水平冻结面积220m²以上、垂直冻结面积80m²以上),地层含有圆砾对钻孔施工影响大,在清障区域合理设置减压孔,以减小土体冻胀后对上方车站内部结构及运营线路的危害,确保既有车站结构及清障通道施工安全。

3) 针对冻结钻孔时可能发生涌水、涌砂风险,应优先选用强力水平钻机无泥浆钻进工艺,施工前应进行应急演练,如发现钻孔泥水流失量过大,及时进行注浆充填。

4) 开挖过程中应注意地面堆载(超载)的影响,做好必要的保护措施,并加强监测和数据分析,保证冻结帷幕的形成过程和状况良好,如有明显变形,应快速加强支护,调整开挖步距,并同步加强冻结。

5) 由于结构冻胀和冻土融沉相互叠加,影响周围土体力学平衡,使其产生位移和沉降,施工过程中,必须做好清障通道冻结壁和初期支护变形监测,采用信息化手段,保证各项预警值处于可控范围内,同时应根据监测数据变化及时跟踪注浆,控制融沉。

6) 因冻土地层遇水后极易融化,冻结壁一旦开窗透水,要避免注浆强行封堵,否则扩大速度更快,应立即关闭防护门并充打压缩空气,待压力平衡后,注入聚氨酯浆液置换,使冻结壁不再漏水,并持续冻结,确保冻结壁窗口完全弥合。

7) 盾构在冻结壁内推进时,应控制姿态、降低推力、保持刀盘不停转动,做到慢速推进,避免盾体对冻结帷幕产生过大压力;推进过程中加强盐水水位观察,一旦发现渗漏,要立即处理。

8) 加强应急组织管理,做好分级响应及对应措施,过程中要加强值班值守,保证施工期间既有轨道交通正常运营和清障通道施工安全。

5 结语

在复杂地层条件下进行超大断面冷冻暗挖,构筑通道清除障碍物后下穿既有地铁车站,涉及近距离既有有线施工、冷冻冻胀、融沉、暗挖作业及结构沉降、上浮等重大风险施工,面临工序转换繁多、应力不断重新分布等工程与力学难题,风险等级极高。本项目施工过程中,土体冷冻控制效果良好,保证了开挖时土体稳定性,虽然因过度冻胀导致车站内部道床板结构出现隆起现象(累计隆起为16.45mm),通过监测分析、风险咨询、加快开挖进度、增加泄压空间、冷冻减组减量等管理和技术措施,确保既有1号线整体运营平稳,安全进度总体可控,达到了预期效果。

参考文献:

- [1] 孔宪立. 岩体工程地质及其灾害[M]. 上海: 同济大学出版社, 1993.
KONG X L. Rock mass engineering geology and its disasters [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1993.
- [2] 王宗金, 曹化春. 我国冻结法施工技术及其发展[J]. 山西建筑, 2006, 32(18): 147-148.
WANG Z J, CAO H C. Freezing construction technology and its development in China[J]. Shanxi architecture, 2006, 32(18): 147-148.
- [3] 林克昌, 张文智. 冻结法在富水粉细砂层盾构始发与接收中的应用[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(13): 13-18.
LIN K C, ZHANG W Z. Application of freezing method in shield originating and arriving in water-rich silt and fine sand layer[J]. Construction technology, 2024, 53(13): 13-18.
- [4] 马西峰. 冻结技术在清除地下障碍物施工中的应用[J]. 建筑机械化, 2015, 36(2): 89-92.
MA X F. Application of freezing technology in the construction of removing underground obstacles [J]. Building mechanization, 2015, 36(2): 89-92.
- [5] 彭智勇. 运营条件下盾构区间扩建地铁车站关键结构力学状态研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
PENG Z Y. Study on the mechanical state of key structures of subway station in shield tunnel expansion under operating conditions[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [6] 吴占瑞. 盾构扩挖地铁车站地层与建筑物变形规律及控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
WU Z R. Study on deformation law and control of strata and buildings in subway station by shield excavation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [7] 李彦风. 探究地铁车站冷冻暗挖隧道防水施工技术[J]. 科技创新与应用, 2019, 9(11): 154-155.
LI Y F. Explore the waterproof construction technology of frozen underground tunnel in subway station[J]. Technology innovation and application, 2019, 9(11): 154-155.
- [8] 秦汉. 增设竖井及暗挖通道清除侵入盾构隧道的锚索障碍物的工程实践[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(4): 674-682.
QIN H. Engineering practice of adding vertical shafts and digging tunnels to clear the obstacles of anchor cables invading shield tunnels[J]. Tunnel construction, 2018, 38(4): 674-682.