

水平冻结法在无锡地铁站盾构始发与接收洞门加固中的应用

刘 祥* 赵玉善 解文杰 郭志敏

(中建八局第三建设有限公司,210046,南京//第一作者,硕士研究生)

摘 要 无锡地铁4号线市民中心站—吴都路站区间的市民中心站地处软黏土层,洞门钻孔取芯时存在喷涌情况,且地下管线复杂,因此采用水平冻结法对盾构进出洞门进行加固。以盾构始发与接收水平冻结施工为例,介绍了冻结设计方案、盾构始发与接收过程以及实际应用效果。结果表明,水平冻结设计方案合理,盾构始发与接收技术措施可靠,冻结加固区总去回路盐水温度、内外圈回路盐水温度和各测温孔中测温点温度均存在阶段性变化特征。采用水平冻结法,盾构在市民中心站成功实现始发与接收。

关键词 地铁隧道;水平冻结工艺;盾构;始发与接收;洞门加固;冻结温度

中图分类号 U455.49

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.01.015

Application of Horizontal Freezing Technique in Shield Departure and Reception Portal Reinforcement of Wuxi Metro Station

LIU Xiang, ZHAO Yushan, XIE Wenjie, GUO Zhimin

Abstract The Civic Center station at interval between Civic Center station and Wudu Road station of Wuxi Metro Line 4 is located in soft clay layer. The outpouring phenomenon exists in the process of portal drilling for core, with the complexity of underground pipelines, horizontal freezing method is adopted to reinforce the portal of shield departure and reception. Taking the horizontal freezing construction of shield departure and reception as an example, the freezing design scheme, the departure and reception process of shield and actual application result are introduced. The results show that the horizontal freezing design scheme is feasible, and the technical measures for shield departure and reception are reliable. Characteristics of phased change exist in aspects of the total incoming and outgoing road saline temperature, the outgoing road saline temperature between the inner and outer ring, and measuring point tempera-

ture of each thermometer hole in frozen zone. With horizontal freezing method, the departure and reception of shield is successfully implemented at Civic Center station.

Key words metro tunnel; horizontal freezing technique; shield; departure and reception; portal reinforcement; freezing temperature

Author's address China Construction Eighth Engineering Bureau Third Construction Co., Ltd., 210046, Nanjing, China

地铁隧道建设过程中风险较大的环节是盾构始发与接收。在凿壁破除洞门阶段,当加固效果不好时会引起洞门塌陷、涌水涌砂、地下管线及地面建筑物下沉损坏等问题。因此,达标的洞门加固强度是保证盾构始发与接收的关键。目前常用的加固方法有搅拌桩法^[1]、旋喷法^[2]、SMW(水泥土搅拌桩墙)法^[3]和垂直及水平冻结法^[4]等。当面对复杂的地质条件时,冻结法是洞门加固的理想工法。冻结法的基本原理是通过人工降温在地下开挖土体特定范围内形成负温的、不透水的和有足够强度的冻土结构物,保护地下工程实施。该工法的作用是用低温方法对含水不稳定地层进行地下工程开挖前的预加固,具有安全性高、适应性强、灵活性好、可控性好、污染性小和经济合理等优点,在盾构端头加固施工中具有良好的应用前景^[4-6]。基于无锡地铁市民中心站复杂的地质条件,本文提出采用水平冻结法对盾构进出洞门进行加固。

1 工程概况

无锡地铁4号线市民中心站—吴都路站区间,左线起终点里程左 DK20+880.765—左 DK21+793.155,左线短链0.091 m,左线长912.299 m;右线起终点里程右 DK20+880.765—右 DK21+793.155,

* 通信作者

右线长 912.390 m;左右线全长 1 824.689 m。本区间设一处联络巷,与泵房合建,联络通道及泵房中心里程为右 DK21+208.600(左 DK21+208.600)。总体工程筹划如下:本区间采用一台盾构机掘进,盾构机从吴都路站北端左线盾构井下始发,掘进至市民中心站左线南端头,然后调头掘进区间右线至吴都路站解体吊出,完成本区间施工。只有市民中心站端头接收与始发洞门采用水平冻结法加固。

1.1 工程地质及水文地质条件

在市民中心站地面垂直向下取芯 11 处。根据取芯结果,洞门位置土层自上而下可分述为:①1 层杂填土、③1 层黏土、③2 层粉质黏土夹黏质粉土、③3 层粉质黏土、④2 层砂质粉土夹粉砂、⑤1 层粉质黏土、⑥1-1 层粉质黏土、⑥1 层黏土、⑥2T 层粉质黏土、⑥2A 层砂质粉土和⑥2B 层黏土。

无锡市地处江南水网区,属于长江流域太湖水系,区内地表水系十分发育,河网密布。本工点第四系松散岩类孔隙水主要为:潜水、微承压水和承压水。潜水主要分布于浅部填土中,微承压水赋存于④2 层砂质粉土夹粉砂层中,承压水赋存于⑥2A 层砂质粉土和⑦2A 层砂质粉土夹粉砂层中。市民中心站端头盾构中心埋深约 20.1 m,穿越土体主要为⑥1 黏土,土层位于微承压水和承压水之间。

1.2 建筑物及管线情况

市民中心站是无锡地铁 4 号线与 1 号线的换乘站,其南北端头位于立德道下方。该站周边建筑物情况:南端头东侧为市民中心配套绿化,西侧为银联金融大厦,距车站端头井远大于安全距离。该站周边管线情况:距南端头井 40 m 有一条 DN90K 中压煤气管横穿端头井,距北端头 50 m 有一条 DN500 污水管道横穿端头井,南北方向有一条 DN600 雨水管穿过南北端头;端头井西侧有一条铜/光 11/12 500 mm×300 mm 信息管线和一条铜/光 5/6 600 mm×400 mm 电力电缆;端头井东侧有一条铜/光 11/12 500 mm×300 mm 信息管线及铜/光 3/6 300 mm×200 mm 信息管线、一条 0/15 850 mm×600 mm 电力空管及一条 DN400 雨水管道。鉴于工程地质条件、建筑物与管线情况复杂,采用水平冻结法加固盾构进出洞门。

2 水平冻结设计方案

2.1 冻结帷幕设计

根据工程地质特点,采用杯体冻结加固方案,

即利用水平冻结和部分倾斜孔冻结加固地层,使盾构机外围及开洞口范围内土体冻结,形成圆柱形、强度高和封闭性好的冻结帷幕。盾构机本体长度为 9.5 m,为防漏水和涌砂,盾构接收时加固区杯体长度需能“包住”盾构机本体长度,故多增加 2.5 m 的两环管片长度。本次设计盾构接收加固区长度为 12 m,盾构始发加固区长度为 9 m,冻结壁杯体厚度为 1.65 m。冻结帷幕设计如图 1 所示。

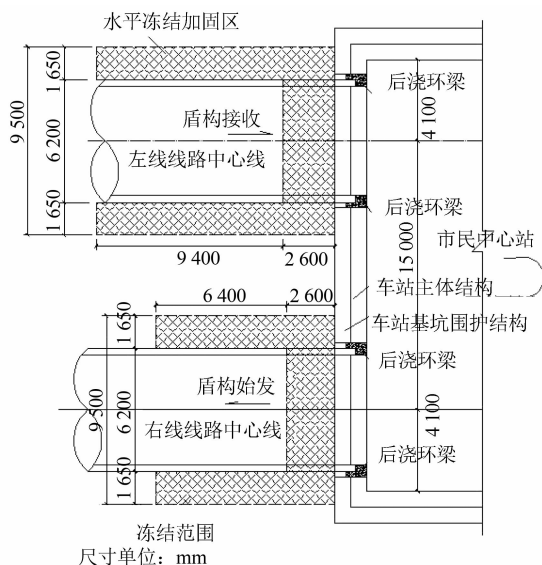


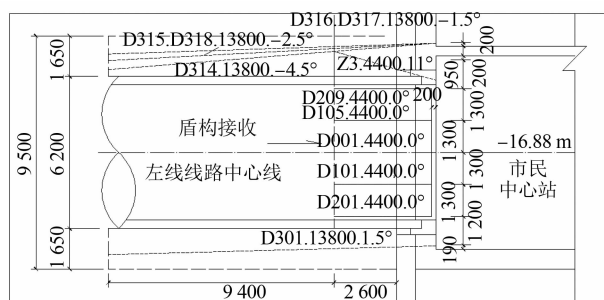
图 1 市民中心站冻结帷幕设计图

Fig. 1 Freezing curtain design at Civic Center station

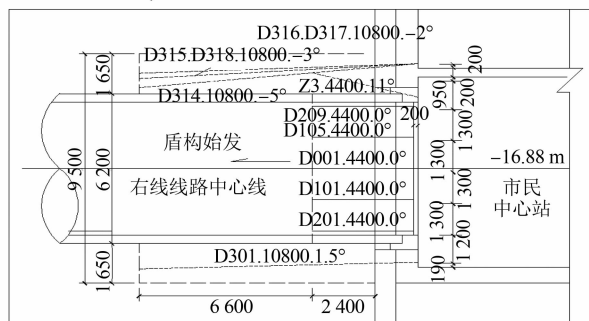
2.2 冻结参数

根据冻结帷幕设计,冻结孔参数确定如下:南端头左右线冻结孔接近水平角度布置,冻结孔共 61 个;圆柱体冻结孔外圈沿开洞口 $\Phi 7.8$ m 圆形布置;外圈孔开孔间距为 0.765 m,冻结孔共 32 个,孔编号为 D301—D332;左线冻结孔有效深度为 13.8 m,右线冻结孔有效深度为 10.8 m。由于洞门顶部 5 个冻结孔距负二层底板太近,无法施工,故将顶部 5 个冻结孔调整到负二层内施工,为保证冻结效果,增加 4 个加强孔,孔编号为 Z1—Z4;中圈沿开洞口 $\Phi 5.2$ m 圆形布置,中圈孔开孔间距为 1.014 m,冻结孔共 16 个,孔编号为 D201—D216,冻结孔有效深度均为 4.4 m;内圈沿开洞口 $\Phi 2.6$ m 圆形布置,内圈孔开孔间距为 0.995 m,冻结孔共 8 个,孔编号为 D101—D108,冻结孔有效深度为 4.4 m;在开洞口中心处布设 1 个冻结孔,孔编号为 D001,冻结孔有效深度为 4.4 m。市民中心站南端头左右线冻结孔平剖面布置如图 2 所示。

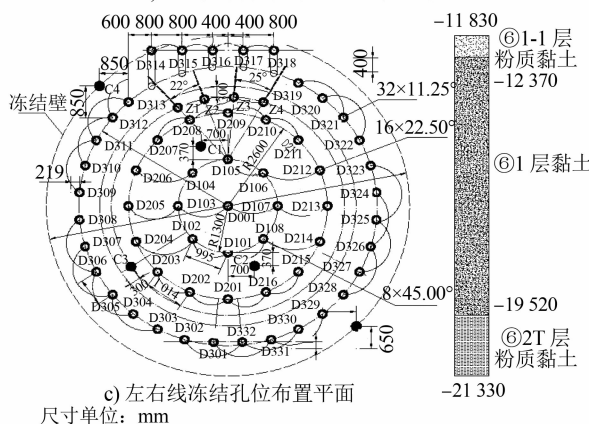
冻结基本参数要求如下:①积极冻结期盐水温



a) 左线盾构接收冻结孔位布置剖面



b) 右线盾构接收冻结孔位布置剖面



c) 左右线冻结孔位布置平面

尺寸单位: mm

图 2 市民中心站南端头左右线冻结孔位布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of freezing hole layout in horizontal line of Civic Center station southern end

度为 $-28 \sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$; ②维护冻结期温度为 $-28 \sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$; ③外围冻结孔开孔间距 $L_{\max} \leq 1\ 000\text{ mm}$, 冻结帷幕交圈时间 20 d; ④积极冻结时间总共为 35 d; ⑤冻结工期安排为总工期 65 d, 其中, 打钻 25 d, 安装 4 d, 积极冻结 35 d, 拔管 1 d。

2.3 冻结施工流程

冻结施工的施工流程: 洞门注浆→冻结孔施工→冻结站安装→积极冻结与维护冻结→冻结质量控制。

3 盾构始发与接收技术措施

3.1 施工流程

水平冻结加固和盾构始发与接收的施工流程

为: 施工准备→同时进行冻结孔施工与冻结站安装→同时进行冻结器系统安装与检测系统安装→积极冻结运转→槽壁破除 0.5 m→探孔→槽壁破除→开洞口内冻结拔管→盾构推进→盾构始发与接收。

3.2 盾构始发与接收技术要求

1) 为保证盾构始发与接收安全, 需确定冻结帷幕应达到的设计强度及厚度; 与槽壁完全胶结后, 方能进行槽壁破除、拔管, 盾构始发与接收施工。

2) 破壁分 4~5 层分层剥离。盾构接收前, 破除槽壁厚度不小于 200 mm, 并保留外排钢筋; 最后一层槽壁要在确保冻结体满足要求后才能完全破除。

3) 槽壁混凝土完全破除后, 盾构靠上洞门, 刀盘尖端与冻土表面应保持 20 cm 距离, 以防止因刀盘挤压土体而造成拔管困难。

4) 盾构穿越冻结区时, 停留时间不宜过长; 拼装管片出现故障时, 每隔 10~15 min 转动刀盘 3~5 min, 以防刀盘冻死。

3.3 拔管

在拔管前, 需进行探孔和槽壁凿除。通过测温孔数据, 确定冻结帷幕达到设计厚度和强度后, 将盾构推进至距圆柱冻结帷幕一定距离处, 破除洞口槽壁 0.5 m; 然后探孔, 孔深为 5~10 cm, 当各探孔实测温度低于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 且无泥无水流流出时, 说明冻结效果良好; 最后将槽壁完全破除后, 即可拔管。

3.4 破壁及盾构穿越冻结区的保证措施

1) 温度控制: 盾构始发与接收时, 必须有效控制外周冻土温度不低于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并接近 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 此时冻土抗剪强度不高于 1 MPa, 所需总推力不大于 3 000 t 为宜。

2) 槽壁探孔: 通过测温孔观测计算, 确定冻结帷幕达到设计厚度及强度。当槽壁厚度还剩不小于 300 mm 时, 在洞门上打探孔。用风镐进行凿窝, 窝直径为 400 mm, 窝深为 200~400 mm。探孔打好后, 用电锤穿透探孔内剩下的槽壁, 最终探孔进入冻土内深度 5~10 cm。各探孔的实测温度需低于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3) 冻结指标监测: 盾构穿越冻结区前, 冻结指标如下: ①总去回路盐水温度为 $-28 \sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$; ②盐水去回路温度差 $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$; ③冻土墙设计厚度 $\geq 1.8\text{ m}$; ④冻土平均温度 $\leq -10\text{ }^{\circ}\text{C}$; ⑤各探孔温度 $\leq -5\text{ }^{\circ}\text{C}$; ⑥冻结时间达 30 d。

3.5 冻胀及融沉控制措施

1) 预注浆: 在钻孔施工期间, 利用孔口上旁通

阀对盾构始发与接收口范围内土层进行注浆,补充钻孔期间泥水流失,控制地面沉降。

2) 冻胀控制:每个泄压孔的端部安装一个压力表,打开泄压孔阀门释放冻胀压力;或打冻结孔加热循环,进行解冻。

3) 融沉控制:在始发与接收区域 8 环管片上设置注浆孔,每环 10 个。利用管片上注浆孔进行跟踪注浆,进而减少融沉。

4 水平冻结温度实测分析

4.1 测温点布置

在盐水管路和冷却水循环管路上设置测温点。洞门外圈每 2~3 个冻结孔串联为一组,外圈 33 个冻结孔分为 11 组;洞门内圈从上往下每一排 4~5 个冻结孔串联为一组,内圈 25 个冻结孔分为 6 组。每组串联回路设一个测温点。

冻结加固区共布置 5 个测温孔。内圈布置 3 个测温孔(C1、C2、C3),孔深为 3.5 m;每个孔内布置 4 个测温点,测温点间隔 0.83 m。外圈布置 2 个测温孔(C4、C5),孔深为 10.3 m;每个孔内布置 7 个测温点,测温点间隔 1.38 m。测温孔位置如图 2 所示。

4.2 总去回路盐水测温分析

端头冻结加固工程于 2019 年 1 月 11 日开始,至 2019 年 2 月 13 日冻结 34 d。本文以右线盾构始发为例,分析冻结效果和盾构始发情况。

总去回路盐水温度及温差是综合反映冷媒吸热量及冻结效果的重要指标。总去回路盐水温度随时间变化曲线如图 3 所示。该曲线分为以下 3 个阶段。

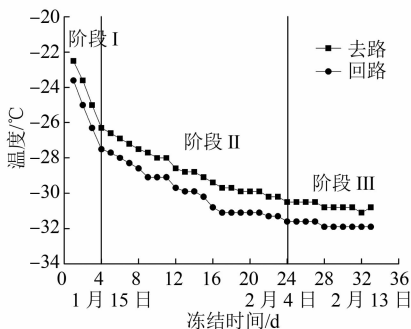


图 3 总去回路盐水温度随时间变化曲线

Fig. 3 Temporal change curve of total ingoing and outgoing road saline temperature

1) 阶段 I——快速下降阶段:总去回路盐水温度快速下降,曲线斜率较大。冻结前 4 d 去回路温

差分别为 1.1℃、1.4℃、1.3℃和 1.2℃。因为初始地温较高,盐水吸热量较大。所以去回路温差略大且有波动。

2) 阶段 II——缓慢下降阶段:总去回路盐水温度缓慢下降,曲线斜率较小。冻结第 24 d 的总去路盐水温度为-30.5℃,总回路盐水温度为-31.6℃,温差为 1.1℃。此时去回路温度都已达到设计标准。

3) 阶段 III——平稳变化阶段:总去回路盐水温度平稳变化,曲线斜率近似为 0。冻结第 34 d 的总去路盐水温度为-30.8℃,总回路盐水温度为-31.9℃,温差为 1.1℃。此阶段温差均小于 1.1℃,说明总去回路温差已达到设计标准。

4.3 内外圈回路盐水测温分析

内外圈冻结孔串联回路分别布置 6 个和 11 个测温点。内外圈回路温度反映各串联冻结管回路中的盐水温度。内外圈回路盐水温度随时间变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知:在外圈冻结孔串联成的 17 个测温点中,回路盐水温度变化趋势与总去回路盐水温度变化趋势基本一致;冻结前 4 d 各测温点回路盐水温度迅速下降,冻结 4~28 d 温度缓慢下降,冻结第 24 d 后温度趋于平稳。其中,内圈测温点回路盐水温度普遍低于外圈,主要由于内圈冻结孔长度远小于外圈冻结孔,盐水冷温能量损失

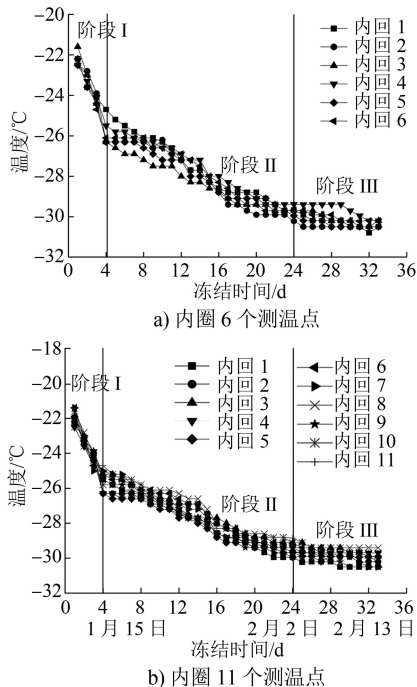


图 4 内外圈回路盐水温度随时间变化曲线

Fig. 4 Temporal change curve of outgoing road between inner and outer ring saline temperature

量较少。通过上述分析可知,冻结开始后,各串联回路中盐水温度分阶段稳步下降,盐水循环正常,符合冻结设计要求。

4.4 测温孔测温效果分析

笔者对 5 个测温孔测温数据均进行了汇总,所呈现的特征规律较为一致。由于篇幅所限,本文从实测数据中选取有代表性的 C4 测温孔进行测温效果分析。

4.4.1 不同深度土体温度变化分析

C4 测温孔共布设 7 个测温点,距槽壁分别为 2.00 m、3.38 m、4.77 m、6.15 m、7.53 m、8.92 m 和 10.30 m。获得不同深度土体温度随时间的变化曲线如图 5 所示。该曲线可分为以下 4 个阶段。

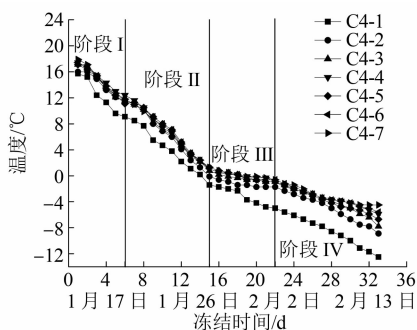


图 5 C4 测温孔中各测点温度随时间变化曲线

Fig. 5 Temporal change curve of temperature of each measure point in C4 thermometer hole

1) 阶段 I:冻结时间为 1~6 d,土层温度由最高 17.9 °C 下降到最低 9.1 °C,平均每天下降 0.7~1.1 °C。在此阶段,C4-1 测温点温度较低,其他不同深度的测温点温度相差不大,基本一致。

2) 阶段 II:冻结时间为 7~15 d,土层温度由最高 11.6 °C 下降到最低 -0.1 °C,平均每天下降为 1.0~1.2 °C。在此阶段,距槽壁最近的 C4-1 测温点温度最低,C4-2 测温点较其他测温点温度略低,而 C4-3、C4-4、C4-5、C4-6 和 C4-7 测温点温度相差不大。

3) 阶段 III:冻结时间为 16~22 d,土层温度由最高 0.8 °C 下降到最低 -5 °C,平均每天下降 0.16~0.47 °C。各测点土层温度下降速度明显减缓。在此阶段,C4-1 温度仍最低,在 19~22 d 期间急剧下降;7 个测温点温度曲线逐渐呈现分离状态,即不同深度的温度逐渐出现差别,且距槽壁越远(深度越大)温度越高。这主要是由于低温盐水先完成水平浅土层的冻结,随着水平深度的增加低温盐水消耗能量越多,低温盐水温度越高,冻结效果越差。因

此,水平入土越深温度越高。

4) 阶段 IV:冻结时间为 23~34 d,土层温度由最高 -1.2 °C 下降到最低 -12.5 °C,平均每天下降 0.3~0.6 °C。该阶段各测点温度下降速度较阶段 III 略有增加,总体仍然较缓。7 个测温点呈现明显的变化规律:入土越深温度越高。其他 4 个测温孔中测温点温度变化规律与 C4 一致,篇幅所限不在赘述。

4.4.2 冻结壁厚度和冻结壁平均温度计算

冻结 34 d 后,测温孔 C4 中,测点 C4-7 温度最高,为 -4.5 °C。根据最不利原则,选取测温点 C4-7 计算冻结壁厚度。根据冻结圆半径公式^[7]计算得到最小冻结圆柱半径为 1.1 m、最小冻结壁厚度为 2.1 m(大于设计冻结壁厚度 1.65 m),满足设计要求。

利用《建井工程手册》冻结施工成冰公式^[8]计算冻结壁平均温度。同理,根据最不利原则对 C4-7 测点进行计算,得冻结壁平均温度为 -10.8 °C,满足冻结壁设计平均温度 -10.0 °C 要求。

4.4.3 探孔温度分析

施工方于 2 月 12 日在洞门内圈布设了 8 个探孔,探孔深度均为 1.1 m,打孔过程未见流水流砂。测得探孔界面测点最高温度为 -22.8 °C、最低温度为 -25.5 °C。探孔温度低于 -5 °C,满足探孔温度要求。

4.5 现场实际效果

冻结开始后,各串联回路中盐水温度稳步下降,盐水循环正常,符合冻结设计要求。工程冻结 34 d 后,总去回路盐水温度分别为 -31.9 °C 和 -30.8 °C,温差 1.1 °C,满足工程要求。最小冻结壁厚度为 2.10 m,满足工程要求的 1.65 m。冻结壁的平均温度为 -10.8 °C,满足工程要求的 -10 °C。测得探孔界面测点最高温度 -22.8 °C,最低温度 -25.5 °C,满足工程要求。积极冻结时间 34 d,满足工程要求。综上所述,冻结 34 d 后,满足了洞门槽壁破除及盾构始发条件。

数据分析和现场勘测的结果表明,本次冻结效果较好,盾构机成功实现接收与始发。

5 结语

本工程的成功实践表明,在软弱复杂地质条件下可采用“杯型”水平冻结法加固洞门。水平冻结加固区总去回路盐水温度、内外圈回路盐水温度和

(下转第 85 页)