

DOI: 10.7672/sgjs2025070123

盾构地铁隧道冷冻法施工及灾变控制研究*

刘招伟

(中铁电气化局集团有限公司, 北京 100036)

[摘要] 以苏州地铁 8 号线娄中路站端头始发工程为例,采用冷冻法技术解决了承压水和土体自稳能力差的问题,防止了端头坍塌和涌水、涌砂等风险。具体分析了冷冻法施工流程,以及在冷冻始发条件下可能产生的灾变控制措施与效果。施工中,通过在围挡区域内注入双液浆进行加固,使得累计沉降量得到有效控制,最大沉降量为 11mm。此外,冷冻时间过长导致的土体强度过高和盾构掘进参数不合适是导致娄中路站端头超挖的主要原因。

[关键词] 地铁;盾构;隧道;冷冻法;灾变控制;施工技术;沉降

[中图分类号] U459

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0123-06

Study on Freezing Method Construction and Disaster Control of Shield Subway Tunnel

LIU Zhaowei

(China Railway Electrification Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100036, China)

Abstract: Taking the end launching project of Louzhong Road Station of Suzhou Metro Line 8 as an example, the freezing method is used to solve the problem of poor self-stability of confined water and soil, and to prevent the risk of terminal collapse, water gushing, and sand gushing. The construction process of the freezing method and the possible disaster control measures and effects under the condition of freezing initiation are analyzed in detail. In the construction, to deal with the accident and disaster, double liquid slurry is injected into the enclosure area for reinforcement so that the cumulative settlement is effectively controlled, and the maximum settlement is 11mm. In addition, the excessive soil strength caused by too long freezing time and the inappropriate shield tunneling parameters are the main reasons for the over-excavation at the end of Louzhong Road Station.

Keywords: subways; shields; tunnels; freezing method; disaster control; construction; settlement

0 引言

地铁隧道施工过程中,由于受地质条件和环境因素的影响,常常面临各种复杂的工程问题,尤其是在高承压水层中。盾构始发和到达前,富水地层中端头如果处理不当可能引起涌水、涌砂等风险,严重时可能引起洞门塌方,影响周围构筑物的安全^[1-4]。在传统的隧道施工技术中,冷冻法作为一种有效的土体加固技术,在处理这类高风险工程问题时显示出其独特的优势^[5-6]。

众多研究也同时说明在盾构端头加固中冷冻法可以显著提高土体的自稳能力,有效防止涌水和

涌砂等灾变性风险,从而保障隧道施工的安全性和可靠性。吉武军等^[7]在盾构隧道端头加固中采用冷冻法加固与钢套筒相结合的技术,施工效果好,没有发生涌水、涌砂事故。向亮^[8]研究了地铁盾构隧道联络通道在动水条件下冻结工程的设计、施工监测等,解决了联络通道难以加固、钻孔困难、高压涌水、施工风险高等一系列难题。

虽然在富水地层中,冷冻法加固技术解决了许多工程难题,但在实施过程中仍存在一些挑战和限制^[9-10]。曹红林^[11]认为冷冻法引起的土体冻胀融沉问题对环境产生了负面影响。江杰等^[12]总结出土体温度变化、冷冻壁形成规律,并针对联络通道冻结施工存在的问题提出了具体对策。

本文以苏州工业园区地铁 8 号线娄中路站为工程背景,总结了冷冻法的具体施工流程,并针对冷

* 中铁电气化局集团有限公司科研课题:多线叠合隧道近距离穿越施工灾变机理与控制技术

[作者简介] 刘招伟,教授级高级工程师,享受国务院政府特殊津贴专家,E-mail:1713378400@qq.com

[收稿日期] 2024-10-25

冻法产生的土体过硬导致的过量土体损失问题进行探究。

1 工程概况

娄中路站位于苏州工业园区,区间线路出唐庄站后沿葑亭大道向东敷设,后下穿蠡塘河桥、渔泾河到达娄中路站。该站是苏州市轨道交通 8 号线第 17 个车站,西侧接唐庄站,东侧接苏州工业园区火车站。车站外包长度 173.6m,标准段外包宽度 19.7m,站台宽度 11m,采用 2 层双跨框架结构。有效站台中心里程处底板埋深约为 17.5m。车站采用明挖顺作法(局部盖挖顺作法)施工,车站顶板覆土为 3.35~3.85m。车站大里程端均为盾构始发,小里程端均为盾构接收。现设计采用水平冻结+钢套筒始发,在盾构端头冻结达到设计要求后,在钢套筒内完成盾构始发。

根据地质资料,娄中路站自上而下地层信息如表 1 所示。盾构始发洞门位置所处土层为③₃黏质粉土、④₂粉砂夹砂质粉土、⑤₁粉质黏土,其中③₃黏质粉土、④₂粉砂夹砂质粉土为微承压水层,自稳能力差,易扰动、易坍塌,盾构始发时有涌砂冒水风险。

2 端头冻结加固技术

2.1 冻结壁设计

考虑微承压水的影响,娄中路站小里程端采用冷冻法对洞门外一定范围土体进行加固处理,以提高土体的强度和降低渗透性。盾构始发设计采用杯形冻结壁进行土体加固,设计冻结壁有效厚度为杯底 2.5m,杯壁 1.6m(长度为 8.0m)。冷冻加固的平面和剖面如图 1,2 所示。共计冻结时间为 73d,冻结平均温度为-10℃,地下连续墙与冻结壁界面温度≤-5℃。

在冻结壁形成期间,冻结壁外 200m 区域内的透水砂层不得采取降水措施。在整个施工过程中,

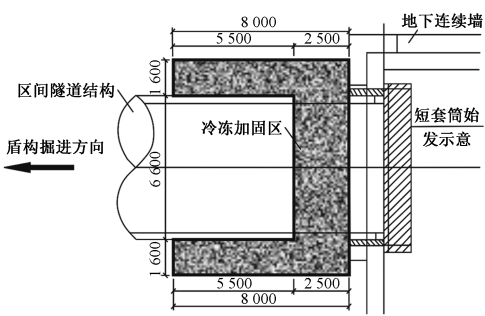


图 1 冷冻加固平面
Fig. 1 Plane of frozen reinforcement

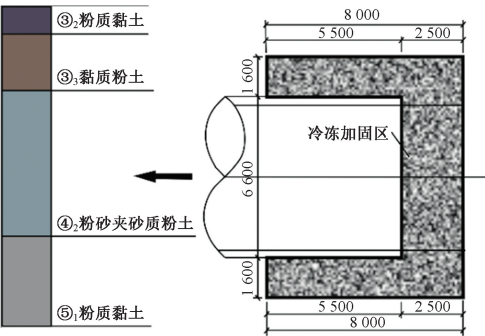


图 2 冷冻加固剖面
Fig. 2 Section of frozen reinforcement

要加强对周围环境的监测,并根据监测结果及时采取有效措施,将施工对周围环境的影响控制在允许范围内。娄中路站冻结壁为Ⅲ类冻结壁,既承载又止水,经加固的土体单轴抗压强度为 3.6MPa,弯折强度 1.8MPa,直剪强度 1.5MPa(-10℃)。

本部分利用有限元进行实际覆土工况的冻结壁强度与安全系数计算,利用 ANSYS 软件建立盾构始发洞门与土体三维有限元模型进行冻结壁强度分析,其中模型的整体尺寸为 35m×8m×35m。冻结壁力学分析采用均质线弹性模型,其力学特性参数取冻结壁平均温度下的冻土力学特性值。设计采用杯形冻结壁进行土体加固,杯壁的宽度为 1.6m,

表 1 始发端地层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of starting formation

层号	土层名称	重度 $\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	静止侧压 力系数 K_0	黏聚力 $c/$ kPa	内摩擦角 $\varphi/$ ($^\circ$)	厚度/ m	层底高程/ m
① ₁	杂填土	19.1	0.65	5.0	12.0	3.0	0.550
③ ₁	黏土	19.7	0.49	57.6	15.0	3.0	-2.450
③ ₂	粉质黏土	19.3	0.51	28.4	14.1	2.3	-4.750
③ ₃	黏质粉土	19.2	0.45	8.0	29.6	2.2	-6.950
④ ₂	粉砂夹砂质粉土	19.6	0.43	5.8	31.0	5.8	-12.750
⑤ ₁	粉质黏土	19.2	0.55	23.1	14.8	6.0	-18.750
⑥ ₁	黏土	20.3	0.45	61.0	15.6	4.2	-22.950
⑥ ₂	粉质黏土	19.5	0.48	26.5	14.5	5.8	-28.750
⑦ ₂	砂质粉土	19.5	0.45	6.7	30.4	2.7	-31.450

长度为 5.5m。杯底冻结体在盾构始发过程中起到临时替代基坑地下连续墙封水挡土的作用,为此,要求杯底冻结体能承受基坑地下连续墙洞口处水土压力,杯底为直径 9.8m,长度 2.5m 的圆柱体。另外杯壁冻结体仅作为盾构机机头止水措施,不计入强度计算。

数值模拟时热导率为 $1.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,比热容为 $2\,000\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,热膨胀系数为 $5\times10^{-5}/\text{K}$,杨氏模量为 15GPa ,泊松比为 0.3。模型采用四节点四边形单元进行网格划分,在下边界采用竖向约束,侧边界采用水平约束,上边界为自由边界。热边界条件初始温度设为 10°C ,目标冷冻温度设为 -10°C ,随着土壤温度的下降,冻结区域内的土壤性质将发生改变,冻结土的强度和刚度会增加。在进行有限元数值模拟时土体的物理力学参数如表 1 所示。洞门冻结壁应力、位移计算值及安全系数如表 2 所示。

表 2 洞门冻结壁应力、位移计算值及安全系数

Table 2 Stress, displacement and safety factor of frozen wall of portal

项目	弯拉应力 σ_1/MPa	压应力 σ_3/MPa	剪应力 $\tau_{\max}/\text{MPa}$	位移 $U_{\max}/\text{mm}$
计算值	0.020	0.57	0.20	4.5
强度指标	1.8	3.6	1.5	—
安全系数	90.0	6.32	7.50	—
位置	洞门圈 中间	洞门圈 底部	洞门圈 底部	洞门圈 中间

冷冻法数值模拟在洞门圈位置处的应力-变形分布云图如图 3 所示。从图中可以看出,洞门圈的弯拉应力 σ_1 在中间位置最大,最大值约 0.2MPa;压应力 σ_3 在底部最大,最大值约 0.57MPa;竖向位移 U 在中间最大,最大值约 4.5mm;剪应力 τ 在底部最大,最大值约 0.2MPa。有限元模拟计算表明,冻结壁的强度和刚度都满足相关规范要求。

2.2 冻结孔布置

根据冻结帷幕设计,水平冻结孔在工作井内利用钻机施工,在工作井底板及盾构上边缘圈梁上布置俯仰冻结孔加固地层,使盾构机外围及开洞口范围内土体冻结,形成圆柱体板块、强度高、封闭性好的冻结帷幕。

圆柱体冻结孔沿开洞口 $\phi 8.36\text{m}$ 圆形布置,冻结孔数 33 个(见图 4),冻结孔 W1~W33 长度为 10m,开孔间距 0.8m(不包含俯仰冻结孔,俯仰冻结孔 2 个,长度 4.4m)。中圈板块冻结孔沿开洞口 $\phi 5.4\text{m}$ 圆形布置,冻结孔数为 15 个,冻结孔长度为 3.7m,开孔间距为 1.12m。内圈板块冻结孔沿开洞口 $\phi 3\text{m}$ 圆形布置,冻结孔数为 9 个,冻结孔长度为

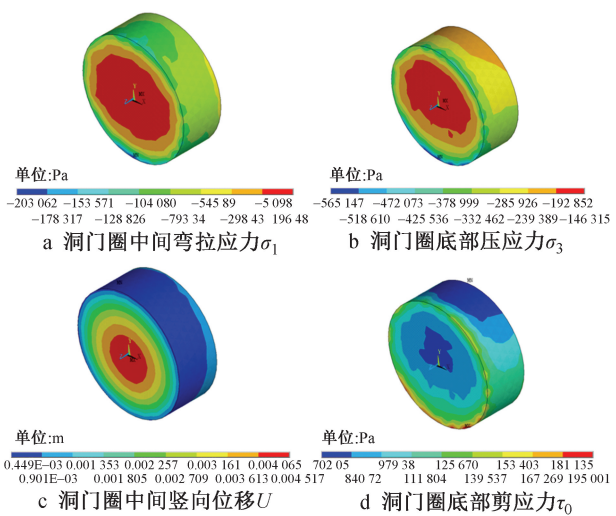


图 3 冷冻法数值模拟应力-变形分布云图

Fig. 3 Numerical simulation of stress-deformation distribution of freezing method

3.7m,开孔间距为 1.03m(见图 4,5)。开洞口中心布设 1 个冻结孔,冻结孔长度为 3.7m。冻结孔共计 58 个,冻结管选用 $\phi 89\times 8, 20$ 号优质碳素结构钢无缝钢管。

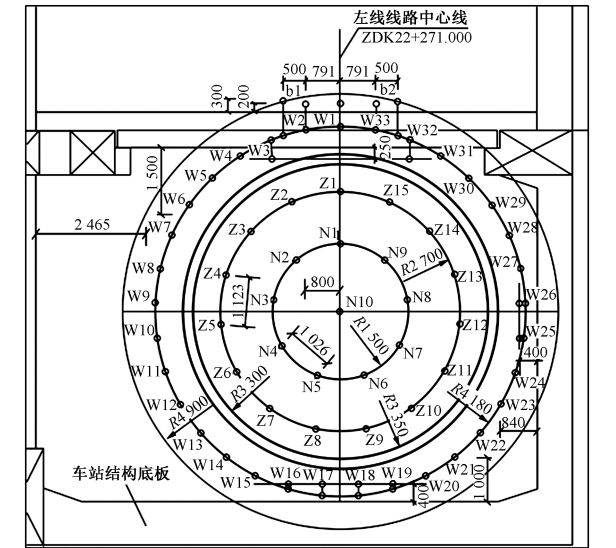


图 4 水平冻结孔开孔位置

Fig. 4 Opening position of horizontal freezing hole

共布置 6 个测温孔,深度 10,9,3.7m 各 2 个,目的是测量冻结帷幕范围内不同部位的温度发展状况,以便综合采用相应控制措施,确保施工安全。测温孔管材选用,20 号优质碳素结构钢无缝钢管。浅孔 $\phi 32\times 3.5$,深孔 $\phi 89\times 8$,为确保冻结加固区域的全面温度监测,此 6 个测温孔优化后均设置在冻结孔钻孔完成后,钻孔测斜结果的最大距离的薄弱区内,根据冻结测温监测系统实时监测,最终确定冻结壁的发展厚度与冻结效果。

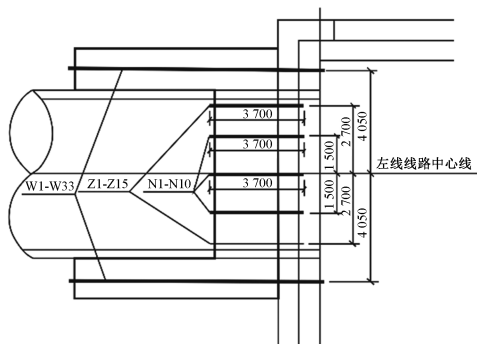


图 5 水平冻结孔平面投影

Fig. 5 Plane projection of horizontal freezing hole

2.3 冷冻法加固工艺流程

始发端头采用水平冻结加固地下连续墙前方土体,使加固后的土体临时替代地下连续墙起到封水挡土的作用,然后凿除地下连续墙,拔出盾构推进区域内冻结管,接着回填并封闭钢套筒,最后盾构在钢套筒内完成始发。

在工作井内利用钻机施工水平冻结孔,在工作井底板及盾构上边缘圈梁上布置俯仰冻结孔冻结加固地层,使盾构机外围及开洞口范围内土体冻结,形成圆柱体板块、强度高、封闭性好的冻结帷幕。通过测温孔观测计算,确定冻结帷幕交圈、冻土与槽壁完全胶结,在达到设计强度后,开始破除洞门连续墙直至最后一层钢筋混凝土(不少于300mm),再将洞口内冻结管拔出,洞门完全破除,最后实施盾构进洞推进,外侧未拔除冻结管进行切割封堵。冻结站安装与钻孔施工同时进行,钻孔施工结束即可转入冻结器安装和冻结阶段。水平地层加固和盾构进洞的主要施工工艺及顺序如图6所示。

冻结站机组尺寸约6m×24m,设备主要包括冷冻机、盐水箱、盐水泵、清水泵、冷却塔及配电控制柜等。盐水和冷却水管路用法兰连接,盐水管路要远离地面安装,避免浸水和高低起伏。在冷冻机进水管上安装温度计,在去、回路盐水管路上安装压力表、温度传感器和控制阀门;在盐水管出口安装流量计;在盐水箱上安装液面传感器;在去路盐水干管上安装单向阀;在盐水管路的高处安装放气阀。盐水和冷却水管路耐压分别为0.7MPa和0.3MPa。

在始发期间保留外圈35根冻结管继续进行维护冻结。洞门凿除后可见掌子面土体坚硬,自稳性良好。掘进中通过观察口观察到掌子面无坍塌失稳现象,刀盘切削掌子面土体留下切刀行走轨迹,土体冻结良好。冷冻法可以对端头进行止水,防止

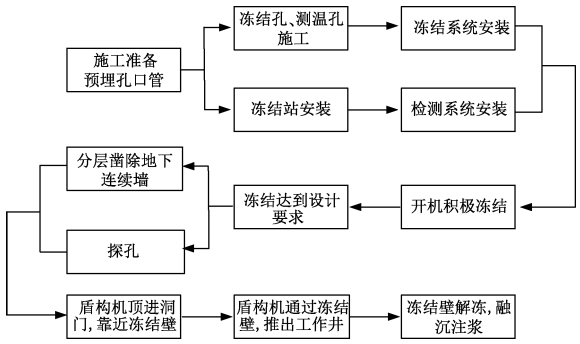


图 6 冷冻法加固工艺流程

Fig. 6 Process flow chart of frozen reinforcement

涌水、涌砂风险出现,同时可以保障周边建(构)筑物的安全,有利于盾构始发和到达的姿态控制。

2.4 施工控制要点

2.4.1 积极冻结

此阶段为冻结帷幕的形成阶段,积极冻结期盐水温度为-28~-30℃,设计冻结时间35d,要求冻结孔单孔流量不小于5m³/h;积极冻结7d盐水温度降至-18℃以下,盐水去回路温差不大于2℃。如盐水温度和盐水流量达不到设计要求,应延长积极冻结时间。

2.4.2 维护冻结

在积极冻结过程中,要根据实测温度资料判断冻结帷幕是否交圈和达到设计厚度,同时要监测冻结帷幕与隧道的胶结情况,测温判断冻结帷幕交圈并达到设计厚度且与隧道完全胶结后,可进入维护冻结阶段,维护冻结盐水温度≤-28℃,冻结时间贯穿盾构进洞全过程。

2.4.3 拔管及封孔

外圈(W圈)水平冻结孔在盾构接收完成后,应割除孔口管;割除孔口管或冻结管后留下的孔口应用速凝堵漏剂封堵或其他耐久性材料、密封性高的工艺封堵;割除孔口管、冻结管至混凝土结构内深度不小于100mm,对遗弃在地层中的冻结管进行充填,充填前应用压缩空气吹干管内盐水。充填冻结管材料采用M10以上水泥砂浆,对于上仰角冻结管充填长度应不小于管口以内1.5m,对于下俯角冻结管应全段充填。孔口管割除部位采用10mm厚钢板焊接封堵,焊缝高度6mm。焊缝处涂抹遇水膨胀止水胶后,在割除区域混凝土结构侧壁施工不少于2根M12膨胀螺栓(外侧预留长度不小于3cm),并与孔口管残留部分焊接连接。

2.4.4 融沉注浆

- 1) 充填注浆应在停止冻结后3~7d内进行。
- 2) 隧道沉降速度大于0.5mm/d或隧道累计沉

降大于 3.0mm 时,应进行融沉注浆,当隧道隆起达到 3.0mm 时应暂停注浆。

3) 注浆顺序为隧道底板→隧道两侧→隧道顶板,融沉注浆应遵循“多点、少量、多次、均匀”的原则,注浆压力 $\leq 0.5\text{MPa}$,注浆范围为整个冻结区。

4) 融沉补偿注浆材料以单液水泥浆为主,水泥-水玻璃双液浆为辅,水泥和水玻璃的溶液体积比为 1:1,其中水泥浆的水灰比为 1:1,水玻璃溶液采用 35~40°Bé 水玻璃加 1~2 倍体积的水稀释。

5) 冻结壁已全部融化,且未注浆的情况下持续实测地层沉降 1 个月,每半个月沉降不大于 0.5mm,即可停止融沉补偿注浆,融沉注浆期间施工单位须每日对冻结壁温度进行监测并记录。

2.4.5 实施冻结过程中主要参数控制要点

1) 冻结管下放后应注入清水试压,试验压力为冻结工程工作面盐水压力的 1.5~2.0 倍,且不低于 0.80MPa,经试压 30min 压力下降不超过 0.05MPa,再延续 15min 压力保持不变为合格。

2) 冻结管下入地层深度不得小于设计深度,不大于设计深度 0.5m,冻结管管头中无法循环的部分长度不得大于 150mm。

3) 各种钻孔施工开孔误差 $\leq 100\text{mm}$,钻孔最大偏斜值 $\leq 150\text{mm}$,且所有钻孔均应进行终孔测斜,并绘制钻孔偏斜图和各钻孔位置成孔图,据此确定是否补孔及补孔位置。

4) 在满足冻结壁厚度和平均温度达到设计要求的基础上,凿除最后一层槽壁还必须具备如下条件:①各探孔温度 $\leq -5^{\circ}\text{C}$;②冻结壁与墙体完全胶接,交界面处平均温度 $\leq -5^{\circ}\text{C}$;③盐水温度 $-28\sim 30^{\circ}\text{C}$;④盐水去回路温差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 。

3 工程灾变案例及控制

娄中路站在进行始发掘进施工时,-1 环推进完成时出土量约 68m³(理论出土量 48m³+10m³添加剂),超排 10m³,造成杯底交界面与杯壁交界面之间地面局局部区域(+5 环与+8 环之间)发生沉降,最大沉降量为 67.1mm,在 DB3-10 监测点(+8 环)位置(见图 7)。

发生上述事件后,立即采取应急处置措施:将施工区域封闭、地面注双液浆加固以及提高监测频率。具体措施主要为以下几步。

1) 在土压发生突变后立即组织人员对施工区域用围挡进行封闭,隔绝社会人员、车辆,以防止事态扩大,危及社会人员人身安全。

2) 组织人员在围挡区域注双液浆进行加固,初凝时间控制在 20~35s,总计注浆量 19m³(见表 2)。

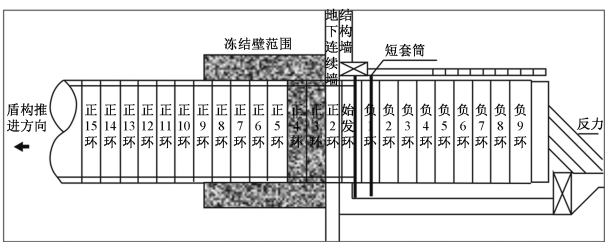


图 7 超排时盾构机位置

Fig. 7 Position of shield machine when over dumping

表 2 注浆加固汇总

Table 2 Summary of grouting reinforcement

孔位	深度/m	注浆量/m ³	注浆压力/MPa
孔 1	6.0	4.0	0.40
	5.0	2.5	0.36
	2.0	1.0	0.32
孔 2	5.0	2.0	0.38
	4.0	1.5	0.36
	2.5	1.5	0.35
孔 3	6.0	3.0	0.34
	3.0	2.5	0.35
	2.0	1.0	0.32

3) 同时加强地面监测,注浆期间每隔 15min 采集 1 次沉降区数据,得到在采取措施后的累计沉降量最大为 11mm(见表 3),表明沉降得到有效控制,地表沉降量和隧道收敛值都满足要求。

表 3 监测数据

Table 3 Monitoring data mm

监测点	DB3-10	DL2	DB3-9	DB4-10
沉降数据	-61.7	-3.2	-26	-60
注浆后数据	-10	-0.58	-9	-11

对本次沉降事故的根本原因进行总结归纳,认为主要是土仓建压不及时造成的,可分为以下几个方面:①冷冻时间过长,冷冻土体的强度较高且盾体未完全进入地层,在推力加大过程中,刀盘的扭矩增大,为了防止盾体旋转未及时建压;②在增大推力过程中,螺旋机喷涌加剧,土仓压力不稳定难以达到设计土压,如果继续增大推力,可能会推翻反力架;③由于土体冻结时间过长,土体强度较高,在推进过程中需添加大量泡沫、水与气混合液改良渣土,从而导致土仓内渣土过稀,水、土分层离析,以及泡沫消散后土仓内的气压占比较大,增大推力提高土压过程中,更易发生螺旋机喷涌现象。

在地面沉降得到有效控制后,改变掘进参数,增大总推力来提高土压至 1.5bar 以上。之后盾构安全、快速、平稳通过冷冻加固区,沉降得到有效控制,未持续发展。

4 结语

通过对苏州地铁 8 号线娄中路站端头冷冻法施工案例的深入分析,得到以下结论,不仅验证了冷冻法在盾构隧道施工中的实际应用价值,也为类似工程提供了重要参考。

1)冷冻法能有效增强高承压软土层的自稳能力,极大地减少了盾构隧道施工中的涌水、涌砂风险。特别是在施工初期,通过实施冷冻加固,成功防止了端头坍塌,确保了整个施工区域的安全稳定。此外,冷冻法加固技术在处理富水承压地层端头始发问题时,表现出了良好的隔水和封堵性能。

2)采用冷冻法过度冻结会导致土体强度过大,有引发盾构机超挖的风险。因此,针对高承压软土层需进一步优化冻结参数,提高实时监测准确度,进一步控制工程风险。

3)盾构机采用的双液浆壁后注浆可以很好地降低超挖带来的土体损失。这也证明了冷冻法与壁后注浆的联合施工方法对高承压软土层的灾变控制具有良好的效果。

参考文献:

[1] 张贺,于静涛. 高承压水粉细砂层中隧道联络通道冷冻法施工工艺应用研究[J]. 工程技术研究,2023,8(4):89-91.
ZHANG H, YU J T. Research on the application of freezing method construction technology for tunnel contact channel in high pressure water and fine sand layer[J]. Engineering technology research,2023,8(4):89-91.

[2] 郭海. 超浅覆土大直径盾构工作井端头冷冻加固技术研究[J]. 中国水运,2022,22(10):135-137.
GUO H. Research on freezing reinforcement technology at the end of large diameter shield working well with ultra-shallow overburden[J]. China water transport,2022,22(10):135-137.

[3] 刘阳君,杨智麟,羊涛,等. 密闭钢套筒+冷冻法加固盾构接收技术[J]. 现代隧道技术,2020,57(S1):974-979.
LIU Y J, YANG Z L, YANG T, et al. Reinforcement shield receiving technology by confined steel sleeve and freezing method[J]. Modern tunneling technology, 2020, 57 (S1):974-979.

[4] 王云峰,王延辉,王伟,等. 富水地层大直径泥水盾构始发洞门垂直冷冻加固技术[J]. 现代隧道技术,2022,59(S1):964-971.
WANG Y F, WANG Y H, WANG W, et al. Vertical freezing reinforcement technology of tunnel portal for large diameter slurry

shield launching in water-rich stratum[J]. Modern tunneling technology, 2022, 59(S1):964-971.

[5] 吕晓明. 冷冻法在地铁盾构联络通道施工中的应用[J]. 国防交通工程与技术,2016,14(S1):88-90,87.
LÜ X M. Application of the freezing method in the construction of metro shield contact channel[J]. Defence transportation engineering and technology,2016,14(S1):88-90,87.

[6] 苗立新,齐修东,邹超. 冷冻法在盾构接收端头土体加固中的应用[J]. 铁道工程学报,2011,28(9):105-109.
MIAO L X, QI X D, ZOU C. Application of freezing method in reinforcing soil on shield ends[J]. Journal of railway engineering,2011,28(9):105-109.

[7] 吉武军. 地铁隧道盾构机接收的冷冻钢套筒施工技术研究[J]. 现代隧道技术,2019,56(S2):660-664.
JI W J. Research on frozen steel sleeve construction technology for shield machine reception in metro tunnels[J]. Modern tunneling technology,2019,56(S2):660-664.

[8] 向亮. 黄河岸滩强透水卵石层动水条件下冷冻地铁隧道联络通道修建技术[J]. 城市轨道交通研究,2020,23(3):85-89.
XIANG L. Connecting passage construction technology in frozen metro tunnel under high permeability condition of the Yellow River beach pebble layer[J]. Urban rail transit research,2020,23(3):85-89.

[9] 张英智,阮雷,张玉伟. 盾构隧道端头加固技术研究与应用进展综述[J]. 四川建筑,2022,42(4):138-14.
ZHANG Y Z, RUAN L, ZHANG Y W. A review of the progress of research and application of shield tunnel end reinforcement technology[J]. Sichuan architecture, 2022, 42(4):138-14.

[10] 林克昌,张文智. 冷冻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.

[11] 曹红林. 地铁隧道冷冻法施工融沉控制方案及实施[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(2):387-390,395.
CAO H L. Thawing settlement control of subway tunnel construction by artificial ground freezing[J]. Journal of underground space and engineering,2010,6(2):387-390,395.

[12] 江杰,邱居涛,陈先枝,等. 人工冷冻法在圆砾地层地铁联络通道施工中的应用[J]. 现代隧道技术,2020,57(2):192-197.
JIANG J, QIU J T, CHEN X Z, et al. Application of artificial freezing method in construction of metro cross passage in gravel stratum[J]. Modern tunneling technology, 2020, 57(2):192-197.