

软土地层冻结加固工程塑料管冻结壁形成规律及影响因素研究*

丁 航^{1,2} 李方政^{1,2} 崔兵兵^{1,2}

(1. 煤炭科学研究总院建井研究分院, 100013, 北京; 2. 北京中煤矿山工程有限公司, 100013, 北京//第一作者, 高级工程师)

摘 要 针对地铁隧道盾构进出洞冻结加固工程中, 盾构机刀盘无法切割土体中钢制冻结管的难题, 提出采用塑料管作为冻结管, 以实现直接切割。为获得塑料管冻结时的冻结壁发展规律, 采用实体物理模型试验与有限元模型分析相结合的方法进行研究。将模拟计算数据与实体物理模型试验数据进行对比, 验证了有限元计算模型的准确性; 基于该模型, 研究不同因素对冻结壁的影响规律。研究结果表明: PVC (聚氯乙烯) 管冻结时的冻结壁发展速度约为钢管冻结时的 0.85 倍; PVC 管冻结时, 管径与初始地温对冻结壁发展速度有一定影响, 冻结壁发展速度随管径增大而线性增长, 随初始地温上升而线性降低; PVC 管冻结时, 盐水温度对冻结壁发展速度影响较为明显, 两者之间近似呈线性关系, 盐水温度每降低 5℃, 冻结壁发展速度增长 6.2 mm/d。

关键词 软土地层; 冻结加固; 塑料冻结管; 冻结壁形成规律; 冻结影响因素; 温度场

中图分类号 TU472.9

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.08.039

Study on Formation Law and Influencing Factors of Freezing Reinforcement Project Plastic Pipe Frozen Wall in Soft Soil Stratum

DING Hang, LI Fangzheng, CUI Bingbing

Abstract Order to solve the problem that the cutter head of shield machine can't cut the steel freezing pipe in the soil in the freezing reinforcement project of metro tunnel shield entry, it is proposed to use plastic pipe as the freezing pipe to realize direct cutting. To obtain the development law of freezing wall of plastic pipe during freezing, methods of physical model test and finite element model analysis are combined. The accuracy of finite element calculation model is verified by comparing data between numerical calculation results and model test results. Based on the model, the law of different factors influencing

frozen wall is analyzed. Results show that: the development speed of freezing wall of PVC pipe is about 0.85 of that of steel pipe; when the PVC pipe is freezing, pipe diameter and initial ground temperature have certain impact on the freezing development speed, and the development speed of the freezing wall increases linearly with the increase of pipe diameter while decreases linearly with the increase of initial ground temperature; when the PVC pipe is freezing, saltwater temperature has evident impact on the development speed of freezing wall, demonstrating an approximate linear relationship. For every lowering 5℃ of saltwater temperature, frozen wall development speed increases by 6.2 mm/d.

Key words soft soil stratum; freezing reinforcement; plastic freezing pipe; formation law of frozen wall; freezing influencing factor; temperature field

First-author's address Branch Institute of Mine Construction, CCRI, 100013, Beijing, China

人工冻结法是一种特殊的土层加固技术。预先在地层中打入冻结管, 通过在管内循环低温冷媒, 将土体中的水分冻结为冰, 形成设计的冻土帷幕, 以增强土壤的强度和稳定性, 隔绝地下水与地下工程之间的连接, 进而实现在冻土帷幕的保护下进行地下工程的开挖构筑^[1-4]。为提高隧道端头强度、实现充分止水, 冻结法在软土地层盾构进出洞工程中得到了广泛的应用^[5-6]。

冻结法一般采用低碳无缝钢管或不锈钢管作为冻结管, 其在盾构进出洞过程中, 无法直接被盾构机刀盘切除, 必须通过在冻结管中循环热盐水加热后才能人工拔除。但加热后人工拔除可能会产生以下问题: ①由于钢管脆性, 常发生断管事故; ②

* 国家自然科学基金项目(51774183); 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项重点基金项目(2018—TD—ZD004); “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0600904)

当热盐水温度过高时,会使冻结壁融化,导致地面沉降和变形,严重情况下甚至会出现地面坍塌;③冻结工期增长,成本增加。这些因素增加了冻结施工的风险和难度,因此考虑采用塑料管作为冻结管,以便盾构机直接切割,提高施工的安全性。

文献[7]通过模型试验,得出塑料管液氮冻结时的温度场分布规律,提出采用较小管间距以加快冻结速度,发挥液氮冻结的优势;文献[8]通过工业性试验,提出 PVC(聚氯乙烯)管冻结时的施工注意事项;文献[9-10]通过室内试验与工业性试验,对 PVC 管的工艺性能开展研究,分析了低温盐水冻结状态下 PVC 管的渗漏性。冻结壁的形成规律直接影响冻结法施工能否顺利进行,但针对 PVC 管盐水冻结时冻结壁形成规律及影响因素的研究较少。

本文结合实体物理模型试验与数值模拟分析,对 PVC 管盐水冻结时冻结壁的形成规律展开研究,并分析了管径、盐水温度及初始地温等因素对冻结壁的影响规律。

1 单管冻结模型与试验

1.1 含相变人工冻土温度场数学模型

土壤冻结热传导的微分方程可写为:

$$\frac{\partial T_n}{\partial t} = a_n \left(\frac{\partial^2 T_n}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_n}{\partial r} \right) \quad (r_0 < r < \infty, t > 0, n = 1, 2) \quad (1)$$

式中:

r ——径向坐标;

t ——时间;

n ——区域代号;冻结区, $n = 1$, 未冻结区, $n = 2$;

T_n ——区域 n 的土壤温度;

r_0 ——冷冻管的外半径;

a_n ——区域 n 的土壤热扩散率, $a_n = \frac{\lambda_n}{\rho_n c_n}$, 其

中: λ_n 为土壤导热系数; ρ_n 为土壤密度; c_n 为土壤的比热容。

微分方程的初始条件与边界条件为:

$$\begin{aligned} T(r, 0) &= T_0 \\ T(r_0, t) &= T_c \\ T(\infty, t) &= T_0 \\ T(\xi, t) &= T_d \end{aligned} \quad (2)$$

式中:

T_0 ——土体的初始地温;

T_c ——冷冻管壁温度;

T_d ——土壤的凝固点;

ξ ——冻结锋面坐标。

$r = \xi$ 处的热平衡边界条件为:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = L \frac{d\xi}{dt} \quad (3)$$

式中:

L ——土壤的相变潜热。

1.2 相似准则

影响冻结温度场的因素有冻结管外半径、冻土扩展半径、土壤热扩散系数、土体初始地温、冷媒温度、土体结冰温度、相变潜热、土体比热及时间等,共有 6 个相似准则:

$$F\left(\frac{r}{r_0}, \frac{\xi}{r_0}, \frac{a_n t}{r_0^2}, \frac{L}{c_n T_c}, \frac{T_0}{T_c}, \frac{T_d}{T_c}\right) = 0 \quad (4)$$

由式(4)可知,本模型试验中温度准则为 $T = T_0/T_c = T_d/T_c$;几何准则为 $L = r/r_0 = \xi/r_0$ 。由傅里叶准则 $F = at/r_0^2$ 可知,时间相似比为 $C_t = C_L^2$, C_L 表示几何相似比。

1.3 实体物理模型试验系统

本研究选用 PVC 塑料管作为试验组,并选用低碳无缝钢管作为对比组,采用物理模型试验的方法,研究冻结壁的形成规律。

1) 试验箱体。模型试验箱体尺寸为 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$,由 5 mm 厚的钢板焊接而成,并在水平和竖直方向上采用槽钢和等边角钢进行加固。箱体内部土体取自施工现场黏土(无锡⑤粉质黏土层)。该土层含水率为 32.86%,液限为 35%,塑限为 20.37%,计算得出其液性指数为 0.85,为软塑土。采用分层方式进行填筑。箱体底板、侧板、顶部都采用了 50 mm 厚的保温板进行保温,以减少外界空气与箱体之间对流换热造成的热量损失。具体尺寸及位置如图 1 所示。

2) 冻结制冷系统。冻结制冷系统由冷冻机、盐水箱、冻结管、供液管及集配液圈等组成。集配液圈均采用高压耐腐蚀橡胶编织管进行保温。冻结管在试验箱体按单管布置, PVC 管与无缝钢管对应实际工程尺寸均取 $\phi 110 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$,即几何相似比取 1:1;由傅里叶准则可知,模型试验中冻结 1 d,相当于实际工程中冻结 1 d。

3) 温度监测系统。温度监测系统由 CW500 温度监测系统、温度传感器及计算机等组成。箱体共

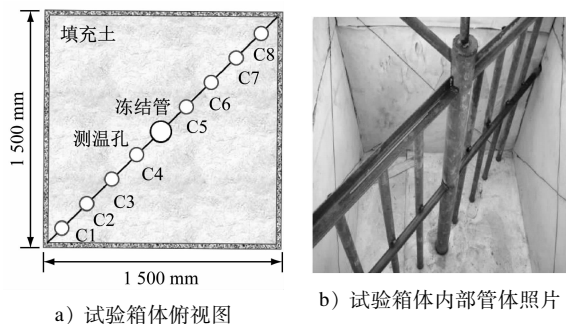


图1 试验箱体结构

布置8根 $\phi 32\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的无缝钢管作为测温管,钢管高1.2 m。在每根钢管高度为0.2 m、0.6 m及1.0 m处设测点布置测温传感器,共布设24个测点。试验中,测点处温度数据由监测系统自动采集存储。

2 冻结温度场模型试验结果

2.1 不同埋深处土体降温曲线

图2为PVC管冻结时,不同埋深条件下C1测温管温度与冻结时间的关系曲线。

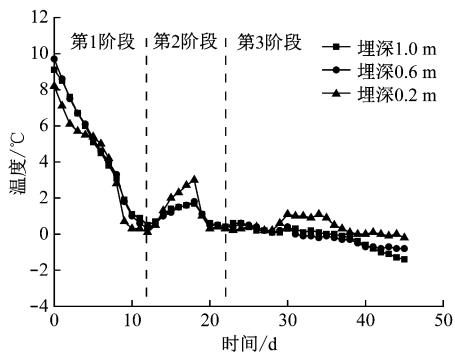


图2 不同埋深条件下的C1测温管降温曲线

由图2可知:冻结前期,埋深1.0 m处的测点温度最高;但随冻结时间增长,测点处温度随土体埋深增加而降低;冻结45 d时,埋深1.0 m处的温度最低,为 $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,埋深0.6 m及0.2 m处测点的温度分别为 $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。究其原因,这可能是由于顶部保温板未能与箱体紧密贴合,导致箱内土体表面和空气直接接触,产生了对流换热,从而使埋深较浅处的土体温度较高。

2.2 冻结壁主面温度分布特征

考虑到热交换及热传导的影响,选取埋深为0.6 m处的土体测温数据进行分析。PVC管与钢管在C1测温管处的降温曲线如图3所示。

由图3可知:PVC管与无缝钢管冻结时,都表

现为快速降温阶段(第1阶段)、相变阶段(第2阶段)及温度平缓阶段(第3阶段);试验组与对照组C1测温管处的温度降至冰点所需时间分别为32 d及28 d,前者较后者延缓4 d;冻结45 d时,试验组与对照组的C1测温管处温度分别为 $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $-2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差为 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可以看出,两者的整体降温规律基本一致,但PVC管冻结时土体降温速率低于无缝钢管冻结时。

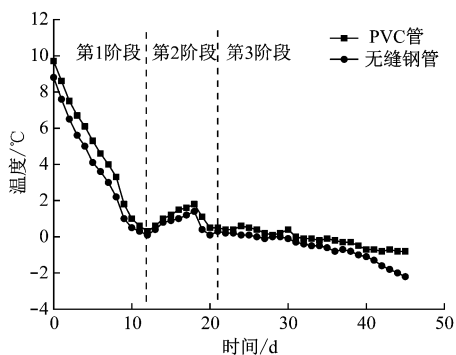


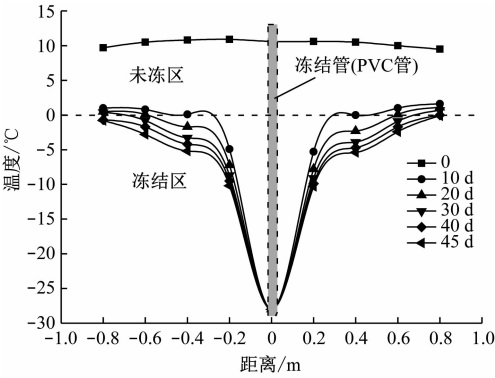
图3 C1测温管埋深为0.6 m处的降温曲线

选取0 d、10 d、20 d、30 d、40 d及45 d等6个时间点,对埋深0.6 m处的PVC管及钢管主面温度分布特征进行分析,如图4所示。灰色投影柱为冻结管沿主面方向截面,从左至右8个测距依次对应C1~C8测温管。

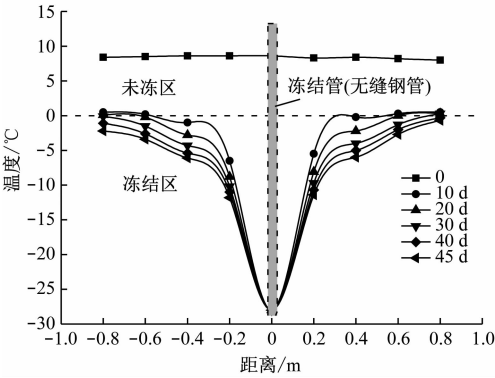
由图4可知,PVC管与无缝钢管冻结时的温度分布特征基本一致。两者都表现为:以冻结管为中心,对称分布,距离冻结管越近,测温点处温度越低,且冻结壁扩展皆呈现为先快后慢,最终趋于平缓。

冻结10 d时:前者冻结壁厚度为383 mm,冻结壁发展速度约为 38.3 mm/d ;后者冻结壁厚度为475 mm,冻结壁发展速度约为 47.5 mm/d 。冻结30 d时:前者冻结壁厚度为685 mm,冻结壁发展速度约为 22.83 mm/d ;后者冻结壁厚度为800 mm,冻结壁发展速度约为 26.67 mm/d 。可以看出,冻结初期,PVC管冻结时冻结壁发展速度明显低于无缝钢管冻结时,但随冻结时间增长,两者冻结壁发展速度的差距逐渐减小。

由上述分析可知,在本试验条件下,当冻结壁平均发展速度趋于稳定时,PVC管冻结壁发展速度约为无缝钢管冻结壁发展速度的0.85倍;因此采用PVC管作冻结管时,要适当延长冻结时间,以保证冻结壁厚度与平均温度。



a) PVC 管



b) 钢管

图4 冻结管主面温度分布基本特征

3 冻结温度场的模拟试验

3.1 基本假定

计算中基本假定如下:①视土层为均匀、连续且热各向同性体;②不考虑冻结过程中水分迁移的作用;③假定土层初始温度场均匀,根据实验数据,初始温度取 10 ℃,土体结冰温度取 0 ℃;④不考虑低温冷媒循环时与冻结管壁的对流换热,视冻结管壁温度为低温冷媒温度,温度荷载按实测的去路盐水温度梯度加载。

3.2 有限元模型的建立

利用 ANSYS 软件建立三维有限元模型如图 5 所示。有限元模型几何尺寸与模型试验箱体几何尺寸一致。模型尺寸为 1.5 m×1.5 m×1.5 m,冻结管取 φ110 mm×7 mm。为提高计算精度,对冻结管附近的网格进行加密。温度场计算模型采用带相变的瞬态导热模型。土体初始温度取 10 ℃。考虑试验箱体顶部与空气的对流换热。基于相关试验报告及经验,土体参数和 PVC 管参数如表 1 所示。

表 1 粉质黏土热物理参数				
部位	$\lambda_n/$ (kJ/(m h ℃))	比热容/ (kJ/(kg ℃))	密度/ (kg/m³)	相变潜热/ (kJ/kg)
冻土	4.17	1.29	1 780	43.08
未冻土	6.70	1.80	1 780	
PVC 管	0.15	0.75	150	/

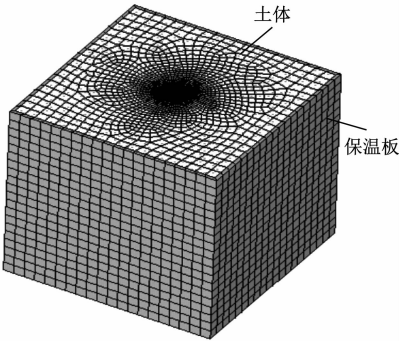
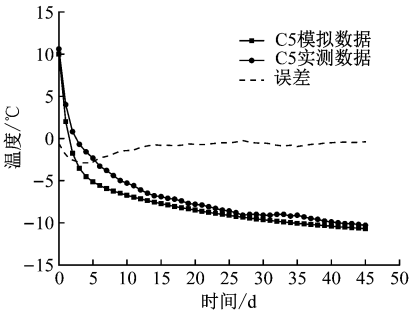


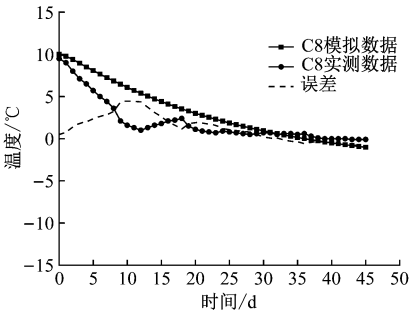
图5 有限元模型

3.3 温度场模拟结果的有效性验证

为验证有限元模型的有效性,选取 C5 及 C8 测温管埋深 0.6 m 测点处的实测温度与模拟温度进行对比,结果如 6 所示。



a) C5 测温管埋深 0.6 m 测点处



b) C8 测温管埋深 0.6 m 测点处

图6 模拟温度与实测温度

由图 6 可见,实测温度与模拟温度在测点处变化趋势基本一致。仔细分析图 6 还可发现,在冻结初期,实测温度与模拟温度在具体数值上存在一定的差异:在 C5 测温管的测点处,两者最大偏差为

2.9℃,出现在冻结第5d;在C8测温管的测点处,两者最大偏差为4.4℃,出现在冻结第10d;随冻结时间增长,实测温度与模拟温度偏差逐渐减小,C5测温管的测点温度偏差最终维持在1.5℃左右,C8测温管的测点温度偏差最终维持在1℃。

经综合分析,两者之间的差异可能是由以下原因造成的:①数值模拟计算中将水分全部转换为冰体来计算相变潜热,未考虑冻结过程的水分迁移;②试验中测点实际布置与设计位置存在一定误差。

综上所述,该数值模拟计算模型在进行塑料管冻结温度场计算时,可以较好地模拟实际工况。因此,利用有限元模型数值计算方法来分析研究PVC管冻结温度场发展规律是合理可行的。

4 温度场影响因素的敏感性分析

PVC管冻结时影响冻结壁发展速度的因素较多。本文根据温度场方程,选取冻结管外径、盐水温度及管壁厚度作为主要因素,进行单因素分析。通过模拟分析C8测温管埋深0.6m处测点的降温情况,来研究各因素对冻结壁的影响规律。C8测温管距冻结管0.8m。

4.1 冻结管外径

PVC管外径分别选取70mm、90mm、110mm及130mm进行模拟计算,结果如图7所示。

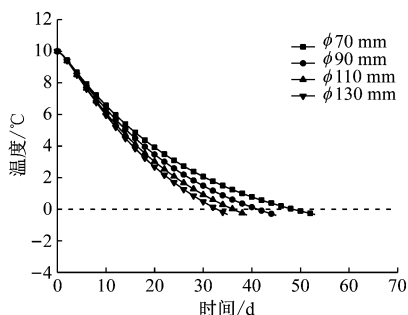


图7 不同管径下测点降温曲线

由图7可以看出,当冻结管外径增大时,测温点处降温速率加快,温度降至冰点时间缩短。经分析,当管径增大时,土体与冻结管的接触面积也相应增大,两者之间单位时间内的热交换随之有所提高。

根据计算结果,当外径为70mm、90mm、110mm及130mm时,该测点温度降至冰点所需时间分别为50d、43d、37d及33d,冻结壁发展速度分别为16mm/d、18.6mm/d、21.6mm/d及24.2

mm/d。当PVC管外径为70~130mm时,外径与冻结壁发展速度近似呈线性关系。外径每增加20mm,冻结壁发展速度增快约2.7mm/d。可见,冻结管外径对冻结壁发展速度有一定影响。

4.2 盐水温度

PVC管内盐水温度分别取-20℃、-25℃、-30℃及-35℃,计算结果如图8所示。

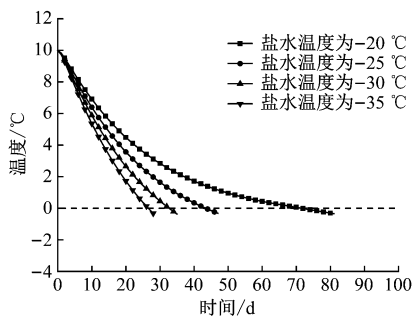


图8 不同盐水温度下的测点降温曲线

由图8可以看出,当盐水温度降低时,测温点处降温速率加快,温度降至冰点所需时间明显缩短。

根据计算结果,盐水温度为-20℃、-25℃、-30℃及-35℃时,测点处温度降至冰点所需时间分别为72d、44d、33d及27d,冻结壁发展速度分别为11.1mm/d、18.2mm/d、24.2mm/d及29.6mm/d。盐水温度为-20~-35℃时,盐水温度与冻结壁发展速度之间近似呈线性关系。盐水温度每降低5℃,冻结壁发展速度增快约6.2mm/d。可见,盐水温度对冻结壁发展速度影响较为明显。

4.3 初始地温

初始地温分别取10℃、15℃、20℃及25℃,计算结果如图9所示。

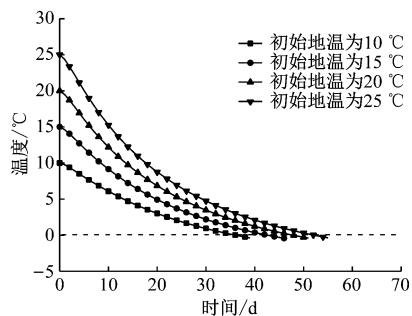


图9 不同初始地温下的测点降温曲线

由图9可以看出,当初始地温升高时,测温点处降温速率减缓,温度降至冰点时间增长。这是由于原始地温较高时,土体温度降至冰点时需吸收更多

(下转第201页)

速^[5-6]。如采用传统施工工艺,本项目工期约为120 d,费用约为108万元,且在施工中常出现交叉施工干扰影响大、质量控制难、劳动强度大、工效低等问题。现采用新工艺后,工期约为45 d,费用约为40万元,不仅提高了施工工效,降低了人工架轨劳动强度,节约了工装成本,还能更好地控制了施工质量。

3 结语

相比人工架轨常规施工工艺,无轨施工新工艺具有以下优点:

1) 在作业面受限,无轨施工具有较大优势,可以快速展开施工,土建移交一段展开施工一段;交叉作业面工程量小,只有绑扎钢筋和安装型钢模具,人工占用作业面小。

2) 安全风险较低,不用提前架轨,只有模具、模板安装和钢筋绑扎;表观质量较好,施工精度能满足规范精度要求。

3) 工效较高,相比常规人工架轨施工工效提高

(上接第191页)

的冷量。

根据计算结果,初始地温为10℃、15℃、20℃及25℃时,测点降至冰点所需时间分别为37 d、44 d、49 d及53 d,冻结壁发展速度分别为21.6 mm/d、18.2 mm/d、16.3 mm/d及15.1 mm/d。初始地温为10~25℃时,初始地温与冻结壁发展速度之间近似呈线性关系。初始地温每升高5℃,冻结壁发展速度降低2.2 mm/d。可见,管径对冻结壁发展速度有一定影响。

5 结语

1) 在实体物理模型试验条件下,当PVC管与无缝钢管冻结时,冻结壁发展速度分别为22.83 mm/d及26.67 mm/d,前者冻结壁发展速度约为后者的0.85倍。因此,在实际工程中采用PVC管冻结时,要适当延长冻结时间,以保证冻结壁厚度与平均温度满足预期。

2) 在PVC管冻结过程中,盐水温度对冻结壁发展速度影响较为明显,两者之间近似呈线性关系。盐水温度每降低5℃,冻结壁发展速度约增快6.2 mm/d。

3) 在PVC管冻结过程中,管径与初始地温对

1倍;节约施工成本,不用钢轨支撑架等工装,降低了施工费用。

可见,采用场段库内立柱式检查坑整体道床无轨施工工艺,能有效提高施工质量和施工效率,具有经济性和实用性,值得推广应用。

参考文献

- [1] 曲腾飞,王媛.地铁工程车辆段内柱式检查坑施工工法对比研究[J].施工技术,2016(19):96.
- [2] 刘道通,杨宝峰.地铁轨道施工常见问题及解决方案[J].铁道工程学报,2010(4):97.
- [3] 史金存.北京市轨道交通房山线阎村车辆段检查坑整体道床轨道施工的质量控制[J].铁道标准设计,2011(1):95.
- [4] 施智亮.轨道交通停车场工程关键施工技术研究[J].建筑施工,2018(3):361.
- [5] 张荣国,冯凯.全自动驾驶模式下地铁车辆基地运用库工艺设计研究[J].铁道标准设计,2019(10):182.
- [6] 程保青.城轨交通车场线轨道结构的探讨[J].铁道工程学报,2008(12):87.

(收稿日期:2019-08-07)

冻结壁发展速度有一定影响,两者与冻结壁发展速度之间都近似呈线性关系。管径每增加20 mm/d,冻结壁发展速度约增快2.7 mm/d;初始地温每升高5℃,冻结壁发展速度约降低2.2 mm/d。

参考文献

- [1] 李方政.市政冻结技术的应用与展望[J].建井技术,2017(4):55.
- [2] 李方政,夏明萍.基于指数积分函数的人工冻土温度场解析研究[J].东南大学学报(自然科学版),2004(4):469.
- [3] 陈湘生,陈朝辉,罗小刚.岩土工程技术最新进展—全向冻结施工技术[J].地下空间,1999(4):297.
- [4] 丁航,李方政,崔灏.地铁联络通道冻结温度场三维数值分析[J].建井技术,2018(1):54.
- [5] 陈湘生.冻结法几个关键问题及在地下空间近接工程中最新应用[J].隧道建设,2015(12):1243.
- [6] 曾华.盾构进出洞处地基本水平型冻结加固的温度场研究[J].城市轨道交通研究,2016(6):112.
- [7] 石荣剑,岳丰田,张勇,等.使用塑料冻结管的液氮冻结温度场试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012(增刊1):2894.
- [8] 康杰.盾构出洞PVC免拔管法水平冻结施工工法研究[J].地下空间与工程学报,2016(增刊2):707.
- [9] 崔兵兵,李方政.聚氯乙烯盐水冻结管在盾构进洞中的工艺性能分析[J].城市轨道交通研究,2013(2):116.
- [10] 崔兵兵,李方政.塑料冻结管冻土温度形成规律[J].地下空间与工程学报,2015(5):1235.

(收稿日期:2020-07-28)