

山东省市政行业协会团体标准

T/SDSZ X—2021

城市轨道交通工程冻结法施工技术标准

Technical standard for freezing construction of urban rail transit engineering

(征求意见稿)

2021-XX-XX 发布

2021-XX-XX 实施

山东省市政行业协会 发布

前 言

根据山东省市政行业协会《关于印发第一批团体标准制定计划的通知》（鲁市协字〔2020〕11号）要求，标准工作组经过深入调查研究，认真总结实践经验，参考国内外相关标准，在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准的主要技术内容是：总则；术语；基本规定；冻结设计；施工；拆除和充填。

本标准由山东省市政行业协会负责管理，由济南城建集团有限公司负责具体技术内容的解释。

若执行过程中对本标准有任何意见和建议，请寄送济南城建集团有限公司《城市轨道交通工程冻结法施工技术标准》编制组（地址：济南市天桥区汽车厂东路29号，邮编：250031，电话：0531-85829903，邮箱：cjgcgs@sina.com）。

本标准主编单位：

本标准参编单位：

主要起草人员：

主要审查人员：

目 次

1 总 则.....	4
2 术 语.....	5
3 基本规定.....	7
4 冻结设计.....	8
4.1 一般规定.....	8
4.2 制冷系统.....	10
4.3 联络通道冻结壁.....	13
4.4 盾构施工端头冻结加固.....	17
5 施工.....	20
5.1 一般规定.....	20
5.2 制冷站安装与检验.....	21
5.3 冻结孔施工与检验.....	23
5.4 冻结器安装与检验.....	26
5.5 冻结壁检测与判断.....	27
5.6 联络通道.....	28
5.7 盾构施工端头.....	30
5.8 融沉注浆.....	31
6 拆除和充填.....	32
本标准用词说明.....	33
引用标准名录.....	34

1 总 则

- 1.0.1 为规范轨道交通工程冻结法施工技术应用，做到技术先进、安全可靠、经济合理，制定本标准。
- 1.0.2 本标准适用于轨道交通工程中应用盐水制冷系统冻结法的设计、施工与验收。
- 1.0.3 城市轨道交通工程冻结法的设计、施工与验收，除应符合本标准的规定外，尚应符合国家、行业现行有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 冻结法

用人工制冷的方法将拟建地下构筑物周围含水地层冻结，在冻结加固体的保护下进行工程施工作业的一种施工工法。

【条文说明】在地下工程施工中，用人工制冷的方法，将拟建构物周围含水地层进行冻结，形成具有临时承载和隔水作用并满足工程施工安全需要的冻结加固体，在冻结加固体的保护下进行工程施工作业的一种施工工法。

2.0.2 盐水制冷系统

以氯化钙等盐溶液为冷媒剂的间接制冷系统。

2.0.3 制冷站

在拟建构物附近集中安设制冷设备和设施的场所。制冷站主要有制冷剂循环系统、冷媒（盐水等）循环系统、冷却水循环系统及供电系统。

2.0.4 冻结孔

布置在构筑物周围用于安装冻结器的钻孔，有垂直孔、水平孔、倾斜孔之分。

【条文说明】冻结孔一般沿围绕构筑物的环线布置，该环线称冻结孔布置圈。

2.0.5 冻结器

安设在冻结孔内用以循环冷媒剂并与地层进行热交换的装置。一般由冻结管、供液管、回液管和底锥等组成。

2.0.6 冻土圆柱

冻结器与周围含水地层发生热交换并使周围含水地层冻结所形成的近似圆柱体的冻土柱。

2.0.7 冻结壁

用制冷技术在构筑物周围地层所形成的具有一定厚度和强度的连续冻结岩土体。

【条文说明】冻结壁由两两相交的冻土圆柱组成，相邻冻土圆柱的交界面称冻结壁界面。

2.0.8 冻结温度

土体中的水分开始冻结并形成冰晶时的温度，是判断土体是否处于冻结状态的指标。

2.0.9 冻结壁厚度

冻结壁壁上任一点与另一壁面之间的最短距离。冻结壁厚度设计值指在拟建构物开挖面外侧冻结壁所要达到的最小厚度。

2.0.10 冻结壁平均温度

冻结壁任一截面上温度分布的平均值。冻结壁平均温度设计值指拟建构物开挖面外围冻结壁界面处所要达到的平均温度。

2.0.11 冻结壁交圈时间

从地层冻结开始至构筑物周围主要冻结器布置圈上所有相邻的冻结器所形成的冻土圆柱按设计要求完全相交所需的时间。

2.0.12 积极冻结期

从地层冻结开始至冻结壁形成达到设计要求所需的时间。

2.0.13 冻结维护期

冻结壁形成达到设计要求后，为了保证构筑物开挖衬砌过程中的安全，继续向冻结器输送冷量，以维持冻结壁满足设计要求的一段时间。

2.0.14 泄压孔

用来观测和释放土层水土压力的孔（管）。

[条文说明]可以通过观测冻结壁围护结构内泄压孔水压变化来判断冻结壁是否交圈，通过泄压孔泄水、排泥来缓减土层冻胀对周围环境的影响。

2.0.15 温度观测孔

布置在冻结壁及冻结降温区内、用于安装温度传感器监测不同时期地层温度分布状况的钻孔。

[条文说明]测温数据用来计算冻结壁扩展速度、冻结壁厚度和冻结壁平均温度等冻结壁形成特性参数。

2.0.16 冻结孔间距

相邻两冻结孔之间的距离。

[条文说明]冻结孔不同深度处的冻结孔间距一般也是不同的。相邻冻结孔孔口之间的距离称冻结孔开孔间距。实际施工完成的冻结孔间距称为冻结孔成孔间距。

2.0.17 测斜

检查冻结孔、测温孔、泄压孔或水位观测孔在不同深度上的偏斜值和偏斜方位。

[条文说明]测斜应在钻进施工中进行，并于成孔后再进行最终测量。

2.0.18 冻结压力

冻结壁作用于支护上的法向压力的统称。

[条文说明]冻土压力为临时荷载。

2.0.19 联络通道

连接地铁区间上下行隧道之间的横向安全疏散通道。联络通道由水平通道、集水井和水平通道与地铁隧道连接的喇叭口三部分组成。

3 基本规定

3.0.1 轨道交通工程冻结法专项施工方案应经专家论证通过后，由施工单位技术负责人审核签字、加盖单位公章，并由总监理工程师审查签字、加盖执业印章后方可实施。

3.0.2 工程竣工时应按规定做好施工总结，竣工资料应真实、准确、齐全。

3.0.3 工程施工中应建立技术档案，检测记录、隐蔽工程记录、质量检查记录和竣工图纸等文件资料应及时归档。竣工资料应真实、准确、齐全。冻结分部工程质量验收应按本标准附录 H 的规定进行记录。

4 冻结设计

4.1 一般规定

4.1.1 地层冻结加固应在设计的时间内保证土方开挖、结构施工、周围环境和建（构）筑物安全。

4.1.2 设计人员应收集和熟知下列勘察资料：

1 周边地面及地下的建（构）筑物结构、设备、管线特征及其与拟建工程的位置关系，建（构）筑物、设备和管线等的特殊保护要求；

2 勘察孔坐标位置、孔口高程和深度、勘察孔全深范围内的土层分布图、土层名称、层顶标高、层厚、取样点位置、土体性状、包含物及物理特征；

3 含水层埋深、厚度、渗透系数、地下水水位、地下水氯离子含量及其变化幅度，以及含水层与地表水体的水力联系。当工程附近含水层地下水活动频繁、地下水流速度有可能超过 2m/d 时，尚应提供该含水层的地下水流向、流速等资料；

4 土层的密度（容重）、含水率、含盐量、塑性指标、颗粒组成、内摩擦角和黏结力、膨胀量和承载力等常规物理力学特性指标。

4.1.3 设计人员应收集和熟知下列冻土试验资料：

1 原始地温、冻结温度、导热系数、比热、冻胀率和融沉率等土层的热物理特性指标；

2 弹性模量、泊松比、抗压强度、剪切强度、抗折强度、蠕变参数等冻土的物理力学特性指标。

4.1.4 设计人员应收集和熟知下列结构资料：

1 联络通道结构施工图或拟建地下冻结工程结构施工图；

2 车站端头井处围护与主体结构施工图；

3 盾构始发接收处地基加固图；

4 其它与联络通道或拟建地下冻结工程、始发接收冻结加固设计、施工有关的资料。

4.1.5 冻结壁应作为临时结构，开挖暴露后应及时设立初期支护结构或保温层封闭冻结壁，隔绝暴露冻土与空气的接触，形成复合承载体系或封水体系。

4.1.6 采用冻结法施工的联络通道，其二次衬砌结构应按承受全部外荷载进行设计。

4.1.7 地层冻结加固设计应包括下列内容：

1 冻结壁结构形式与选择；

2 冻结壁的承载力和变形验算（I 类冻结壁除外）；

3 冻结孔、泄压孔、测温孔布置与设计；

4 冻结壁形成预计；

5 冻结制冷系统；

6 对冻结壁的检测、监测与保护要求；

7 对周围环境和建（构）筑物产生的影响分析及监测与保护要求。

4.1.8 出现下列情况之一时，设计中应采取针对性措施：

1 工程特征出现下列情况之一时：

1) 联络通道结构顶板覆土厚度小于 5m，或大于 25m；

2) 两个隧道中心距大于 20m，或小于 9m；

3) 区间盾构直径大于 10m；

- 4) 隧道泵房采用侧式结构型式。
- 2 地下水流速 $\geq 2\text{m/d}$ 、有集中水流或地下水位有明显波动；
- 3 土层结冰温度低于 -2°C 或有地下热源影响土体冻结；
- 4 土层含水量低影响土体冻结强度；
- 5 用其它施工方法扰动过的地层；
- 6 同步施工的其它地下工程；
- 7 有其它影响地层冻结或地层冻结严重影响周围环境的情况。

4.1.9 当冻结壁表面直接与大气接触，或通过导热物体与大气产生热交换时，应在冻结壁或导热物体表面采取保温措施。

4.1.10 在冻结壁形成期间，冻结壁附近 200m 范围内的透水砂层中不应采取降水措施。应降水施工时，冻结设计应考虑降水产生的不利影响。

4.1.11 冻结壁的设计应考虑下列各项荷载：

- 1 土压力；
- 2 水压力；
- 3 通道开挖影响范围以内地面建（构）筑物荷载、地面超载及其它临时荷载。

4.1.12 冻结壁的荷载应按下列规定确定：

1 土压力和水压力对砂性土宜按水土分算的原则计算、对黏性土宜按水土合算的原则计算，也可按经验公式计算；

2 垂直土压力按计算点以上覆土重量及地面建（构）筑物荷载、地面超载计算；侧向土压力按主动土压力计算，可采用朗肯土压力理论计算；基底土体反力按主动土压力计算，也可按静力平衡计算；

3 侧向土压力可按式(4.1.12)计算：

$$P_s = KP_t \quad (4.1.12)$$

式中： P_s —侧向土压力（kPa）；

P_t —计算点的垂直土压力（kPa）；

K —侧压系数，一般取 $K=0.7$ 。

【条文说明】静止土压力系数宜由室内试验或现场原位试验等确定。当有工程经验时，可按以下公式计算：

$$K_0 = 1 - \sin\phi'$$

式中： ϕ' —土的有效内摩擦角。

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi_k}{2} \right)$$

$$K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi_k}{2} \right)$$

式中： ϕ_k —土的内摩擦角标准值；

K_a 、 K_p 朗肯主动与被动土压力系数。

4.2 制冷系统

4.2.1 冻结管吸热能力可按式 4.2.1 计算：

$$Q_g = qA \quad (4.2.1)$$

式中： Q_g —冻结管总吸热能力 (kJ/h)；

q —冻结管吸热系数，可取 $1047\text{kJ/m}^2\cdot\text{h}\sim 1172\text{kJ/m}^2\cdot\text{h}$ ；

A —冻结管总表面积 (m^2)。

4.2.2 制冷站所需制冷能力可按式 4.2.2 计算：

$$Q_z = mQ_g \quad (4.2.2)$$

式中： Q_z —计算制冷能力 (kJ/h)；

m —冷量损失系数，可取 $m=1.15\sim 1.25$ 。

4.2.3 冷冻机应符合下列要求：

- 1 制冷剂循环系统的冷凝温度应高于冷却水循环系统的出水温度 $3^\circ\text{C}\sim 5^\circ\text{C}$ ；
- 2 制冷剂循环系统的蒸发温度宜低于设计最低盐水温度 $5^\circ\text{C}\sim 7^\circ\text{C}$ ；
- 3 冷冻机的型号与数量可通过计算制冷能力、制冷剂循环系统的冷凝温度、蒸发温度确定，选定冷冻机的总制冷能力不应小于计算制冷能力，并应考虑足够的备用。

4.2.4 盐水应符合下列规定：

- 1 地层冻结用盐水（冷媒剂）可采用氯化钙水溶液；
- 2 氯化钙水溶液的凝固点应低于设计盐水温度 $8^\circ\text{C}\sim 10^\circ\text{C}$ ，比重不宜高于 1.27kg/m^3 ；
- 3 盐水中可掺加氢氧化钠或重铬酸钠以减轻盐水对金属的腐蚀；
- 4 氯化钙水溶液应充满循环系统中所有容器和管路。氯化钙用量可按式 4.2.4 计算：

$$G = \frac{1.2\rho(V_1 + V_2 + V_3)}{\rho'} \quad (4.2.4)$$

式中： G —氯化钙用量 (kg)；

ρ —单位盐水体积固体氯化钙含量 (kg/m^3)；

ρ' —固体氯化钙纯度，一般无水氯化钙取96%，晶体氯化钙取70%；

V_1 —冻结器内盐水体积 (m^3)；

V_2 —干管及集、配集液管内盐水体积 (m^3)；

V_3 —蒸发器和盐水箱内盐水体积 (m^3)。

4.2.5 盐水管路应符合下列规定：

- 1 供液管、干管和配集液管管径应按盐水流速计算。盐水在冻结器环形空间的流速宜为 $0.1\text{m/s}\sim 0.3\text{m/s}$ ，在供液管中的流速宜为 $0.6\text{m/s}\sim 1.5\text{m/s}$ ，在干管及配集液管中的流速宜为 $1.5\text{m/s}\sim 2.0\text{m/s}$ ；
- 2 盐水干管及配集液管可选用普通低碳钢无缝钢管或焊接钢管，管壁厚度不宜小于 4.5mm 。供液管可选用钢管或聚乙烯增强塑料管，所有管路接头强度不应低于母材强度的60%，且其密闭性应满足密封打压试验要求。当设计对管路接头方式、强度提出要求时，应按设计要求连接。

4.2.6 盐水泵应满足下列要求：

- 1 盐水循环总流量应按式 4.2.6-1 计算：

$$W = \frac{Q_T}{\Delta t \gamma c} \quad (4.2.6-1)$$

式中： W —盐水泵循环计算总流量（ m^3/h ）；

Q_T —计算制冷能力（ kJ/h ）；

γ —盐水密度（ kg/m^3 ）；

c —盐水比热（ $\text{kJ}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ ）；

Δt —去回路盐水温差， $^\circ\text{C}$ ，一般取 $t=1^\circ\text{C}\sim 2^\circ\text{C}$ 。

2 盐水泵扬程应按式 4.2.6-2 计算：

$$H_c=1.15 (h_1+h_2+h_3+h_4) + h_5 + h_6 + h_7 \quad (4.2.6-2)$$

式中： H_c —盐水泵计算扬程（ m ）；

h_1 —盐水干管和集配液管中的压力损失（ m ）；

h_2 —供液管中的压头损失（ m ）；

h_3 —冻结器环形空间的压头损失（ m ）；

h_4 —盐水管路中弯头、三通、阀门等局部阻力，取值为（ $h_1+h_2+h_3$ ）的20%（ m ）；

h_5 —盐水泵的压头损失， $3\text{m}\sim 5\text{m}$ ；

h_6 —封闭式循环系统中回路盐水管高出盐水泵的高度，一般取 1.5m ；

h_7 —蒸发器内的盐水压头损失（ m ）。

3 盐水泵电动机功率可按式 4.2.6-3 确定：

$$N = \frac{1.25WH_c\gamma}{102 \times 3600 \times \eta_1 \eta_2} \quad (4.2.6-3)$$

式中： η_1 —盐水泵的效率，取0.75；

η_2 —电动机的效率，取0.85。

4 水泵型号和台数可按盐水循环计算总流量、盐水泵扬程和电动功率选择，配备盐水泵在计算扬程下的总流量不应小于计算流量，并应设足够的备用泵。

4.2.7 冷却水应满足下列要求：

1 制冷站冷却水总循环量可按式 4.2.7-1 计算：

$$W_0=W_1+W_2 \quad (4.2.7-1)$$

式中： W_0 —冷却水计算总循环量（ m^3/h ）；

W_1 —冷凝器冷却水用量（ m^3/h ）；

W_2 —冷冻机冷却水用量（ m^3/h ）。

2 采用壳管式冷凝器时的冷却水用水量可按式 4.2.7-2 计算：

$$W_1 = \frac{Q_z'}{1000 \Delta t'} \quad (4.2.7-2)$$

式中： Q_z' —冷站总制冷能力（ kJ/h ）；

$\Delta t'$ —冷凝器进出水温差， $^\circ\text{C}$ ，取 $\Delta t'=3^\circ\text{C}\sim 5^\circ\text{C}$ 。

3 采用蒸发式冷凝器时的冷却水用量和冷冻机的冷却水用量可由厂家提供。

4 补充水量可按式 4.2.7-3 计算：

$$W_3 = \frac{W_0(t_2 - t_1)}{(t_2 - t_0)} \quad (4.2.7-3)$$

式中： W_3 —补充水量 (m³/h)；

t_2 —冷凝器出水温度 (°C)；

t_1 —冷凝器进水温度 (°C)；

t_0 —补充水温度 (°C)。

5 补充水量可通过安装冷却塔进行减少；

6 冷却水宜采用生活用水，水温不宜大于 28°C；

7 按冷却水计算总循环量选择冷却水循环泵型号和台数，水泵扬程以 12m~20m 左右为宜，冷却水循环泵应有足够备用。

4.2.8 低温容器及管路保温设计除应符合现行国家标准《工业设备及管道绝热工程设计规范》GB50264 的规定外，尚应符合下列规定：

1 制冷剂循环系统的中压、低压容器和管路、盐水箱、盐水干管和配集液管等低温容器和管路应保温；

2 保温层敷设应使其外表面温度比环境露点温度高 2°C 左右，不应产生凝结水且冷量损失应在允许范围内；

3 低温容器及管路的保温层均应铺设防潮层。

4.3 联络通道冻结壁

4.3.1 冻结壁结构形式按照功能与要求分为三类，应按表 4.3.1 的规定选择不同形式和安全性能的冻结壁结构。

表 4.3.1 冻结壁功能分类表

类别	功能与要求	说明
I	仅用于止水面无承载要求	如岩石裂缝和混凝土界面缝隙止水
II	仅用于承载而无止水要求	如不透水黏性土层的加固
III	既要求承载又要求止水	如含水砂土层的加固与止水

4.3.2 冻结壁结构形式选择应符合下列规定：

- 1 冻结壁宜接受压结构设计；
- 2 在含水土层中应采用封闭的冻结壁结构形式；
- 3 冻结壁的几何形状宜与拟建地下结构的轮廓接近，并易于冻结孔布置；
- 4 冻结壁结构形式选择应有利于控制土层冻胀与融沉对周围环境的影响；
- 5 联络通道的通道部分可采用直墙圆拱冻结壁，集水井可采用“V”字形冻结壁或采取满堂冻结加固。

4.3.3 联络通道开挖时应设初期支护，但冻结壁承载力设计需按承受全部荷载计算。

4.3.4 冻结设计基础参数应符合下列要求：

1 冻结壁平均温度应根据冻结壁承受荷载大小（或开挖深度）、冻胀融沉可能对环境造成影响等综合确定，冻结壁平均温度可采用数值分析法、成冰公式法或面积法进行计算。联络通道冻结壁平均温度可按表 4.3.4-1 选取，冻结壁承受荷载大、安全要求高的工程宜取较低的冻结壁平均温度，冻结壁与隧道管片交界面平均温度不应高于-5℃。

表 4.3.4-1 冻结壁平均温度设计参考值

开挖深度 H , m	≤ 30	> 30
冻结壁平均温度 T_p , °C	-8~-12	≤ -12

注：平均温度设计参考值适用于各土层含盐量不超过 10000mg/kg，如实测含盐量数值超过此标准，建议根据附表适当加强或采取其它措施。

2 盐水温度与盐水流量应满足下列要求：

- 1) 盐水温度与盐水流量应满足在设计的时间内使冻结壁厚度和平均温度达到设计值的需要；
- 2) 最低盐水温度确定应根据设计冻结壁平均温度、地层环境及气候条件确定，一般可按表

4.3.4-2 选取。当设计冻结壁平均温度低且地温高时宜取较低的盐水温度；

表 4.3.4-2 最低盐水温度设计参考值

冻结壁平均温度 T_p , °C	-8~-12	≤ -12
最低盐水温度 T_y , °C	-28~-30	≤ -30

3) 冻结 7 天盐水温度应降至-18℃以下，冻结 15 天盐水温度应降至-24℃以下（设计最低盐水温度高于-24℃时取设计最低盐水温度），开挖过程中盐水温度应降至设计最低盐水温度。施工初期支护后可进行维护冻结，维护冻结盐水温度不宜高于-25℃，冻结壁与隧道管片的交界面温度不宜高于-5℃；

4) 开挖过程中，在保证冻结壁平均温度和厚度达到设计要求且实测判定冻结壁安全的情况下，

盐水温度可适当提高，但不宜高于-25℃；

5) 开挖时，去、回路盐水温差不宜高于 2℃；

6) 冻结孔单孔盐水流量应根据冻结管散热要求，去、回路盐水温差和冻结管直径确定。冻结管内盐水流动状态宜处于层流与紊流之间。并联的冻结孔单孔盐水流量之和不应小于盐水循环总流量。一般情况下冻结孔单孔盐水流量可按表 4.3.4-3 选取，冻结管直径大时宜取较大的盐水流量。

表 4.3.4-3 单孔盐水流量设计参考值

冻结孔串联长度Lk, m	≤40	40~80	>80
单孔盐水流量Qyk, m³/h	3.0~4.0	4.0~8.0	≥8.0

3 冻结管应符合下列要求：

- 1) 冻结管应选用导热和低温性能好的材质，宜采用低碳钢无缝钢管；
- 2) 冻结管外径可选用Φ89 mm~127mm，不宜小于Φ73mm，管壁厚度不宜小于 5mm。

4.3.5 冻结壁厚度与强度检验应符合下列规定：

1 冻结壁厚度设计应根据联络通道的结构形式、几何特征、埋藏深度、工程地质及水文地质条件和可能达到的冻结壁平均温度等条件确定；II类和III类冻结壁应按承载力要求设计冻结壁厚度；

2 冻冻结壁厚度设计与强度检验应符合下列要求：

- 1) 冻结壁内力宜采用结构力学与数值模拟方法计算；
- 2) 采用通用力学计算时，冻结壁的力学计算模型可按均质线弹性体简化，其力学特性参数宜取设计冻结壁平均温度下的冻土力学特性指标；

3) 按式 4.3.5 进行冻结壁的强度检验，一般情况下可只进行抗压、抗折和抗剪强度检验；

$$K \sigma \leq R \quad (4.3.5)$$

式中：σ—为冻结壁应力，MPa；

R—为冻土的强度指标,MPa；

K—为安全系数，III类冻结壁强度检验安全系数按表 4.3.5 选取，II类冻结壁强度检验安全系数取III类冻结壁的 0.9 倍。

表 4.3.5 III类冻结壁强度检验安全系数

项目	抗压	抗折	抗剪
安全系数	2.0	3.0	2.0

4) 有特殊要求时验算冻结壁的变形；

5) 旁通道喇叭口处的冻结壁设计厚度不应小于 0.8m，其它部位的冻结壁设计厚度不应小于 1.4m；

6) 在冻结壁与隧道管片的交接面强度未经计算检验时，冻结壁与隧道管片的交接面宽度不应小于喇叭口处的冻结壁设计厚度，且冻结壁界面上的最低温度不应高于设计平均温度。

3 联络通道喇叭口处的冻结壁设计厚度不应小于 1.0m，其它部位的冻结壁设计厚度不应小于 1.4m；

4 冻结壁设计时应验算冻结壁的变形；

5 开挖后应及时施工初期支护，冻结壁的暴露时间不宜大于 24h。

4.3.6 冻结壁形成预计应包括下列内容：

1 冻结壁形成参数应包括冻结壁交圈时间、冻结壁厚度和冻结壁平均温度等；

2 冻结壁形成期不应少于冻结壁厚度和平均温度达到设计要求的时间；

3 冻结壁交圈后的温度分布可简化为定常温度场计算；冻结壁扩展过程和平均温度可采用通用数值方法、图解法或通用经验公式计算。

4.3.7 冻结孔布置原则应符合下列要求：

1 冻结孔的布置应满足设计冻结壁的厚度和平均温度要求；

2 线间距小于等于 20m 的联络通道，可采用单侧布置主要冻结孔，线间距大于 20m 的联络通道宜采用双侧共同布置冻结孔；

3 单排冻结孔不能满足冻结壁设计要求时，冻结孔可多排布置；

4 冻结孔宜均匀布置并避开地层中的障碍物。在隧道管片上布置冻结孔时，冻结孔开孔应避开管片接缝、螺栓、结构主筋和钢管片肋板；

5 冻结孔设计应布置不少于 2 个透孔，以验证隧道预留通道口位置并为对侧冻结管与冷冻排管供冷。

4.3.8 冻结孔布置参数应满足下列规定：

1 冻结孔布置参数应包括冻结孔成孔控制间距、冻结孔开孔间距、冻结孔孔位、冻结孔深度和冻结孔偏斜精度要求等；

2 冻结孔成孔控制间距应按设计冻结壁厚度、冻结壁平均温度、盐水温度和冻结工期要求等确定。冻结孔最大成孔控制间距应为设计冻结壁范围内相邻两冻结孔最大垂直距离，单排冻结孔时冻结孔成孔控制间距可按表 4.3.8-1 选取。多排冻结孔密集布置时，内部冻结孔成孔控制间距可取边孔的 1.2 倍；

表 4.3.8-1 单排冻结孔成孔控制间距设计参考值

冻结孔类型	水平或倾斜冻结孔			竖直冻结孔	
	≤10	10~20	20~30	≤40	40~60
冻结孔深度H (m)	≤10	10~20	20~30	≤40	40~60
冻结孔成孔控制间距 S _{max} , mm	1100~1300	1300~1500	1500~1600	1200~1400	1400~1600

3 冻结孔开孔间距不宜大于冻结孔成孔控制间距与冻结孔最大偏斜之差；

4 冻结孔深度可按式 4.3.8-1 确定：

$$L_{ks}=L_{sj}+L_0+L_1 \quad (4.3.8-1)$$

式中：L_{ks}—冻结孔深度（m）；

L_{sj}—从冻结孔孔口到冻结壁设计边界的距离（m）；

L₀—不能循环盐水的冻结管端部长度（m）；

L₁—冻结管端部冻结削弱影响深度（m）。

5 应在冻结孔位穿透管片的隧道管片内表面敷设冷冻排管，以补强冻结壁与隧道管片的交接面。冷冻排管的敷设范围不应小于冻结壁设计厚度，冷冻排管的内径不应小于 30mm，管间距不应大于 0.5m；

6 当只需要加固地层深部土体时，可采用浅部冻结管保温或下双供液管的方法进行局部冻结；

7 冻结壁形成预计冻结壁扩展厚度可按式 4.3.8-2 计算：

$$E_{yj}=v_{dp}t \quad (4.3.8-2)$$

式中 E_{yj} —为预计冻结壁厚度 (m)；

v_{dp} —为冻结壁平均扩展速度 (m/d)；

t —为冻结时间 (d)；

单排孔冻结壁（或冻土圆柱）扩展速度可按表 4.3.8-2 选取或采用通用计算方法计算。

表 4.3.8-2 单排孔冻结壁（或冻土圆柱）扩展速度设计参考值

冻结时间 t (d)	20	30	40	50	60
冻结壁平均扩展速度 v_{dp} (mm/d)	34	28	24	22	20

8 如为密集布孔,内部冻结孔之间的冻结壁扩展速度可比上表给出的设计参考值增加 5%~20%;

9 冻结壁交圈时间可按式 4.3.8-3 估算:

$$t_{jq} = \frac{S_{max}}{v_{dp}} \quad (4.3.8-3)$$

式中: t_{jq} —为预计冻结壁交圈时间, d;

S_{max} —为冻结孔成孔控制间距, m;

v_{dp} —为冻结壁平均扩展速度, m/d。

10 冻结壁形成期应不少于预计冻结壁厚度和平均温度达到设计要求的时间;

11 冻结壁交圈后的温度分布可简化为定常温度场计算。冻结壁扩展过程和平均温度可采用通用数值方法或通用经验公式计算。

4.3.9 隧道管片保温应符合下列要求:

1 保温层应敷设在冻结壁附近隧道管片内侧,保温层敷设范围不应小于设计冻结壁边界外 1m;

2 隧道管片保温应采用导热系数和吸水率小、阻燃性好的保温材料。导热系数不应大于 0.04W/mh,吸水率不应大于 2%,可采用聚氨酯、橡塑、聚苯乙烯和聚乙烯软质泡沫等保温材料。保温层厚度不应小于 30mm,在一般情况下可取 30mm~50mm;

3 采用保温板材时,保温板应密贴在隧道管片上,板材之间搭接宽度不应小于 150mm;

4 冷冻排管应在冻结孔未穿透管片的隧道管片内表面敷设,以补强冻结壁与隧道管片交界面处的冷量损失。冷冻排管的敷设范围不应小于冻结壁设计厚度,冷冻排管的内径不应小于 30mm,管间距不应大于 500mm;冷冻排管外侧应用保温材料覆盖严实。

4.4 盾构施工端头冻结加固

4.4.1 冻结加固设计

1 城市轨道交通区间采用盾构法施工时，在水文地质条件符合要求的情况下盾构始发、接收端头可采用冻结法加固；

2 盾构端头冻结加固形式有板块冻结体和杯状冻结体，前者可以采用垂直冻结、水平短孔冻结、垂直与水平组合冻结方法，杯状冻结体可以采用水平长孔与水平短孔组合冻结方法；

3 盾构施工端头冻结加固可以与钢套筒、水下（土中）接收等方法组合使用；

4 盾构施工端头采用冻结法加固时，宜同时采用安装洞门橡胶帘布、弧形钢板等防止涌水、涌泥的措施；

5 冻结加固形式和采用的方法须结合水文地质情况和现场场地情况确定；。

6 板块冻结加固体厚度可按式 4.4.1-1 计算：

$$h = \left(\frac{K \cdot \beta \cdot P \cdot D^2}{4\sigma} \right)^{1/2} \quad (4.4.1-1)$$

式中： k —安全系数，取1.5~2.0；

β —计算系数，取1.2；

P —盾构洞门中心处的水土压力之和（KN/m²）；

D —洞门直径（m）；

σ —冻土的抗折强度（KN/m²）。

7 板块冻结加固体中心（盾构洞门中心）最大弯拉应力可按式 4.4.1-2 计算：

$$\sigma_{max} = \frac{P \cdot (D/2)^2 \cdot (3 + \mu)}{8} \cdot \frac{3}{h^2} \quad (4.4.1-2)$$

式中： μ —冻土泊松比。

8 计算得到的 σ_{max} 不应大于冻土抗折强度折算值 σ_z ，可按式 4.4.1-3 计算：

$$\sigma_z = \frac{\sigma_t}{K_0} \quad (4.4.1-3)$$

式中： K_0 —抗折安全系数，取3.0。

9 板块冻结加固体在盾构洞门边缘最大剪力可按式 4.4.1-4 计算：

$$\tau_{max} = \frac{P \cdot D}{4h} \quad (4.4.1-4)$$

计算得到的 τ_{max} 不应大于冻土抗剪强度折算值 τ_z ，可按式4.4.1-5计算：

$$\tau_z = \frac{\tau_c}{K_0} \quad (4.4.1-5)$$

式中： τ_c —冻土抗剪强度（kN/m²）；

K_0 —抗剪安全系数，取 2.0。

10 采用水平长孔冻结的杯状冻结体可不做力学计算；

11 水平冻结杯状加固体“杯壁”厚度宜控制在 1.5m~2.0m，如实测含盐量数值超过 10000mg/kg，

建议适当加强或采取其它措施；

【条文说明】冻结帷幕按杯形设计，侧壁加固厚度为杯壁体厚度。

12 仅作为对洞门四周工作井围护结构封水的冻结加固体，应在洞门四周一定范围保持负温状态的封水区域，封水区域冻土与围护结构交界面的平均温度不应高于 -5°C 。对于垂直冻结，洞门四周隧道径向封水路径不应小于 2m ；对于水平冻结的杯状加固体，应保证冻结管之间冻土交圈，且厚度不宜小于 1m 。

4.4.2 测温观测孔布置应符合下列原则：

- 1 应布置在便于计算冻结加固体平均温度并且计算误差最小的位置；
- 2 宜布置在能反映冻结加固体厚度的典型部位和冻结孔间距较大的界面上或预计冻结薄弱处；
- 3 宜布置在冻土与结构交界面、冻土与盾构机壳体交界面的位置。

4.4.3 盾构始发与接收冻结加固体设计应按下列规定进行：

- 1 冻结加固体结构形式按照功能与要求分为三类，可按本标准表 4.3.1 进行分类；
- 2 冻结加固体厚度设计及受力验算可按本标准第 4.3.5 条的规定进行。

4.4.4 冻结加固体设计参数应符合下列规定：

1 冻结加固体的平均温度应根据承受荷载大小、冻胀融沉对环境造成的影响及工艺合理性确定。承受荷载大，安全要求高的工程宜取较低的冻结加固体平均温度。冻结加固体平均温度的计算可采用解析法或有限元进行数值验算；

2 根据不同冻结方式的温度场特点和以往工程经验，不同类型的冻结加固体平均温度宜按相应范围控制；

表 4.4.4-1 洞门板块冻结加固体平均温度控制参考值

类型	板块冻结加固体	
	上限	下限
垂直冻结	-10°C	-15°C
垂直冻结+水平冻结	-10°C	-15°C
水平冻结	-12°C	-15°C

注：平均温度控制参考值适用于各土层含盐量不超过 $10000\text{mg}/\text{kg}$ ，如实测含盐量数值超过此标准，建议根据附表适当加强或采取其它措施。

3 水平冻结圆筒形加固体厚度宜控制在 $1.4\text{m}\sim 2.0\text{m}$ 之间，不同盾构类型冻结孔布置与圆筒形加固体厚度相关参数宜按表 4.4.4-2 确定；

表 4.4.4-2 水平冻结圆筒形加固体厚度控制参考值（单位：m）

R=3.1m	R2 (m)	3.9	3.0	3.1
	E (m)	1.46~1.61	1.66~1.83	1.86~2.04
R=3.3m	R2 (m)	3.1	3.2	3.3
	E (m)	1.46~1.61	1.66~1.83	1.86~2.04

注：1 E——加固体厚度；R2——冻结管布置圈的半径；R——隧道外半径；

2 加固体厚度控制参考值适用于各土层含盐量不超过 $10000\text{mg}/\text{kg}$ ，如实测含盐量数值超过此标准，建议根据附表适当加强或采取其它措施。

4 仅作为对洞门四周工作井围护结构封水的 I 类冻结加固体，应在洞门四周一定范围保持负温

状态的封水区域，封水区域冻土与围护结构交界面的平均温度不应高于 -5°C 。对于垂直冻结，洞门四周隧道径向封水路径不应小于 2m ；对于水平冻结的圆筒形加固体，应保证冻结管之间冻土交圈，且厚度不宜小于 1m 。

4.4.5 冻结效果预估的计算方法可按下列规定进行：

1 冻结加固体厚度可按照设计积极冻结时间预估，厚度的预估可采用平均冻结发展速度测算法，也可采用解析法；

2 冻结加固体平均温度应根据设计冻结加固类型和冻结管布置方案进行预估，冻结加固体平均温度应处于本标准规定的范围之内；

3 作为冻结效果预估的冻结加固体平均温度计算可采用解析法、图解法或通用经验公式进行。

5 施工

5.1 一般规定

5.1.1 宜按先冻结孔再测温观测孔、先下部后上部的顺序施工。

5.1.2 采用冻结法施工前，建设单位或监理单位应组织施工前条件验收工作。条件验收应包括下列内容：

- 1 岩土工程勘察报告、施工图及图审意见、设计变更资料及材料代用通知单等；
- 2 经审定的专项施工方案、专家论证意见及回复单；
- 3 制冷站设备及冻结管布设验收表；
- 4 冻结钻孔记录、冻结管钻进角度和长度计算验收表、冻结管终孔偏差分析验收表、供液管下放长度记录验收表等；
- 5 冻结干管去、回路与测温孔温度监测记录、冻结效果验收表及专家意见；
- 6 探孔结果验收表；
- 7 安全技术及应急交底记录；
- 8 第三方监测初始值采集表；
- 9 其它必要的文件和记录。
- 10 盾构机始发接收尚应对接收方式、所处位置、盾构机推进参数、盾构机姿态、设备完好及洞门封水准备情况等验收；

5.1.3 冻结期间加强对冻结区域内构筑物、地下管线的监测，必要时采用打泄压孔、分区冻结等措施减小冻胀影响。冻结前宜沿拟建隧道边缘 2m~3m 设置泄压孔，泄压孔直径宜为 50mm~100mm。

5.1.4 当需要人工破除洞门围护结构和联络通道管片时，应对外露的冻结器采取保护措施。

5.1.5 冻结法施工质量控制应符合下列规定：

- 1 施工材料、设备和构件应符合设计要求及相关标准规定，并应进场复验合格；
- 2 各工序质量控制应符合施工技术标准，每道工序完成后应进行质量检查并形成记录。

5.1.6 工程质量验收应符合下列规定：

- 1 冻结钻孔质量及偏斜控制应符合本标准及冻结方案设计要求；
- 2 工程质量的验收应在施工单位自行检查、验收的基础上进行；
- 3 隐蔽工程在隐蔽前，应由施工单位通知监理工程师和有关单位人员进行隐蔽验收，确认合格，并形成隐蔽验收文件；
- 4 监理工程师应按规定对涉及结构安全的试块、试件和现场检测项目，进行平行检测、见证取样检测并确认合格。

5.1.7 工程质量应按下列程序验收：

- 1 施工单位应对每一工序进行质量自检，并应做好施工自检记录；
- 2 分项工程应由专业监理工程师组织相关单位验收；
- 3 总监理工程师应组织分部工程验收、审查单位工程质量检验资料。

5.1.8 盾构始发接收期间施工记录应包括下列内容：

- 1 盐水温度测量记录、冻结干管去、回路测温记录、测温孔测温温度记录；
- 2 隧道沉降、收敛变形、周边环境监测记录及预应力支架监测记录；

- 3 冻结管拔管、冻结管拔管遗留空洞回填时间、回填材料、剩余测温孔温度变化记录;
 - 4 监理旁站记录;
 - 5 其它必要的文件和记录。
- 5.1.9 冻结法施工质量控制应符合下列规定:
- 1 施工材料、设备和构件应符合设计要求及相关标准规定, 并应进场复验合格;
 - 2 各工序质量控制应符合施工技术标准, 每道工序完成后应进行质量检查并形成记录。
- 5.1.10 工程质量验收应符合下列规定:
- 1 冻结钻孔质量及偏斜控制应符合本标准及冻结方案设计要求;
 - 2 工程质量的验收应在施工单位自行检查、验收的基础上进行;
 - 3 隐蔽工程在隐蔽前, 应由施工单位通知监理工程师和有关单位人员进行隐蔽验收, 确认合格, 并形成隐蔽验收文件;
 - 4 监理工程师应按规定对涉及结构安全的试块、试件和现场检测项目, 进行平行检测、见证取样检测并确认合格。
- 5.1.11 工程质量应按下列程序验收:
- 1 施工单位应对每一工序进行质量自检, 并应做好施工自检记录;
 - 2 分项工程应由专业监理工程师组织相关单位验收;
 - 3 总监理工程师应组织分部工程验收、审查单位工程质量检验资料。

5.2 制冷站安装与检验

- 5.2.1 制冷站的设置应符合下列规定:
- 1 制冷站位置应综合考虑供水、供电、排水和通风条件, 宜建在距离作业面较近位置;
 - 2 制冷站设在地面时, 应搭建临时厂房。临时厂房应符合现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016的规定, 采用轻钢屋架、防火材料;
 - 3 制冷站应通风良好。当采用冷却塔散热时, 制冷站顶部和侧墙应设置通风装置, 必要时可安装轴流风机强制通风;
 - 4 制冷站设备和管路布置应便于维护操作, 并应符合安全文明施工标准化的要求。
- 5.2.2 制冷站制冷剂系统安装应符合国家现行标准《制冷剂制冷系统安装工程施工及验收规范》SBJ 12和《工业金属管道工程施工规范》GB50235的有关规定。
- 5.2.3 制冷站所有低温管路应采用低碳钢无缝钢管, 低温管路及容器应采取保温措施, 保温材料应选择阻燃材料。
- 5.2.4 制冷站采用的设备、压力容器及管道阀门应清洗干净并经压力试验合格。浮球阀、液面指示器、安全阀等安装前应进行灵敏性试验。
- 5.2.5 冷媒系统应设置冷媒渗漏报警系统, 并定期调试灵敏度。冷媒系统宜安装冷媒分配器, 回收的冷媒应能重新进入原冷媒循环系统。
- 5.2.6 制冷剂系统应安装紧急泄制冷剂装置并引至室外水池。当室外气温高于30℃时, 高压贮液器、冷凝器、制冷剂瓶等应设遮阳凉棚。
- 5.2.7 制冷站试运转应符合下列规定:

- 1 冷却水系统的水源供水量及水温达到设计要求，冷却水循环系统运转正常；
- 2 冷媒系统的冷媒浓度及总流量达到设计要求，各冻结器冷媒流量基本均匀，无杂物堵塞，冷媒循环系统运转正常；
- 3 冷却水、冷媒系统试运转正常后，应首先进行试充制冷剂，将系统压力控制在 0.2MPa~0.3MPa 之间，用试纸检漏，合格后才能正式充制冷剂；
- 4 充制冷剂量应达到设计要求，制冷剂纯度不宜小于 99.8%；
- 5 充制冷剂过程中，制冷剂、冷媒、冷却水系统应运转正常且冷媒温度逐渐下降。

5.2.8 制冷站正式运转前应具备下列条件：

- 1 配电系统应能连续正常供电；
- 2 制冷站内消防器材、防毒面具、防雷装置、电气接地等安全设施齐全；
- 3 冷冻机易损件、仪表和冷冻机油均已备足。

5.2.9 制冷站正常运转应符合下列规定：

- 1 制冷剂、冷却水、冷媒循环系统温度、流量、压力正常，冷媒温度应逐渐下降并达到设计要求，各冻结器回液温度正常，冻结器连接处、胶管结霜均匀；
- 2 制冷剂系统冷凝压力和蒸发压力应分别与冷却水温度、冷媒温度相对应；
- 3 冷媒温度比制冷剂蒸发温度高 5℃~7℃，冷凝温度高于冷却水出水温度 3℃~5℃；
- 4 冷却水进出水温差宜为 3℃~5℃；
- 5 冷媒去回路温差：冻结壁形成期 3~8℃；维持冻结期小于 3℃。

5.2.10 制冷站运转日志应包括下列内容：

- 1 制冷剂压缩机运转日志，制冷剂循环系统中的温度、压力、液位的记录，以及每次充制冷剂量、加油量的记录；
- 2 冷媒泵运转日志，冷媒泵压力、流量、冷媒箱水位及冷媒温度记录；
- 3 每路冷媒干管冷媒去回路温度，冻结器冷媒流量及其头部回路冷媒温度、头部胶管结霜情况的记录；
- 4 补充水及循环水水泵班运转日志、补充水的流量及水温、冷凝器进、出水温度记录。

5.2.11 制冷站停冻应符合下列规定：

- 1 开挖期间不应停止或减少冻结孔供冷。如因施工需要停止个别冻结孔供冷时，应分析对冻结壁整体稳定性的影响，并采取相应技术措施；
- 2 当在积极冻结期间发生短暂停冻时，应按停冻时间的 2 倍相应延长积极冻结时间；
- 3 结构主体全部施工完成后方可停止冻结，拆除制冷设备和管路，并对冻结管进行充填处理。

5.2.12 制冷站验收和运行检验应符合下列规定。

主控项目

- 1 制冷系统、冷却水系统、冷媒系统的设备型号、规格、数量和安装质量应符合冻结设计要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：检查产品说明书、出厂合格证、安装质量验收报告。

- 2 冻结壁形成期冷媒干管和每个冻结器的冷媒温度应不高于设计值 2℃。

检查数量：每个冻结器每日检查 1 次。

检验方法：温度计测量。

3 冷却水系统的补给水源位置、水量以及管路、储水池、排水沟的施工质量应能满足冻结施工组织设计的要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：对照设计检查冷却水系统的安装施工记录。

4 制冷系统的低温设备、管路和地面冷媒管路的保温质量应符合冻结施工组织设计要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：对照设计检查制冷站内、外低温设备、管路的安装施工记录。

一般项目

5 冻结管充填和封孔质量符合设计要求。

检查方法：逐管检查。

检验方法：现场查看，检查施工记录。

5.3 冻结孔施工与检验

5.3.1 冻结孔的开孔位置、偏斜值、成孔间距及深度应符合设计要求。

5.3.2 冻结孔施工平台应根据隧道的允许空间搭设，平台应牢固平整，有利于冻结孔成孔设备移位和固定，并应符合有关技术规程的规定。

5.3.3 冻结孔成孔方法可选用跟管钻进法、夯管法和顶管法施工方法。在地层沉降控制要求高的地层中应用跟管钻进法时，宜实施干钻钻进。

5.3.4 在隧道管片上施工冻结孔时，带法兰和旁通阀的孔口管应首先安装。孔口管宜采用低碳钢无缝钢管，孔口管内径宜大于冻结管外径 10mm~20mm、管壁厚度宜为 5 mm~7mm。安装在混凝土管片上孔口管的管端应加工长度不小于 200mm 的鱼鳞扣。

5.3.5 在钢管片上固定孔口管时应采用焊接方法，焊接高度不应小于孔口管管壁厚度；在混凝土管片上固定孔口管时，应先用取芯钻机钻进深 220 mm~250mm、直径大于孔口管管径约 2 mm~4mm 的钻孔，然后插入缠上麻丝的孔口管，并用不少于 3 个膨胀螺栓与隧道管片固定。孔口管插入钻孔深度不应小于 200mm，与钻孔配合要紧密封，不漏浆，必要时可用压浆法在孔口管与钻孔之间充填水泥—水玻璃浆液。固定孔口管用膨胀螺栓直径不应小于 12mm，膨胀螺栓与孔口管之间可用等直径钢筋焊接。

5.3.6 冻结孔开孔位置误差不应大于 100mm，冻结孔开孔间距误差不应大于 150mm。孔口应避免隧道管片接缝，并宜避开混凝土管片主筋和钢管片肋板。

5.3.7 开孔倾角和方位角可采用经纬仪、罗盘或全站仪确定。经纬仪、罗盘和全站仪在开工前和施工过程中应进行检验校核，精度应满足有关规定。

5.3.8 钻孔的偏斜应符合下列规定：

1. 钻孔偏斜值应符合设计偏斜率要求，位于冲积层的钻孔偏斜率不宜大于 3‰，位于基岩或风化带的钻孔偏斜率不宜大于 5‰；

2. 终孔在冲积层时，边排孔的最大孔间距不大于 3.0m；

3. 终孔在基岩或风化带时，应控制边排孔的最大孔间距不大于 4.0m，冻结区域内部中间孔最大孔间距不大于 5.0m；

4. 最大孔间距不满足以上要求时，应补孔。

5.3.9 钻孔的测斜、纠偏和防偏应符合下列规定：

1 钻孔深度小于 100m 时，宜优先选用灯光测斜；钻孔深度超过 100m 时，宜选用陀螺仪测斜。当钻具能保证随钻测斜时，应优先采用；

2 钻孔纠偏一般采用扫孔、扩孔、铲孔纠偏法及移位法，当以上方法达不到要求时，应采用井下动力钻具进行定向纠偏；

3 钻孔结束后，应绘制钻孔偏斜平面图，且应符合下列规定：

1) 冻结孔、温度观测孔及其他用途钻孔的最终测斜资料，应绘制在同一平面图上；

2) 距离井筒有效冻结段垂距 20m 以上部分，应每 30m 绘制一个水平，其他冻结段应每 10m 绘制一个水平，井筒顶板、井筒腰线及底板位置，应各绘制一个水平；

3) 钻孔施工过程应保存施工记录，以便检查和存档。

5.3.10 隧道管片二次开孔应在孔口管上安装阀门和孔口密封装置后进行，可采用钻机进行钻透。

5.3.11 跟管钻进或夯（顶）进冻结管时，孔口密封装置与冻结管之间不应漏水漏泥。采用湿钻钻进，循环液应从孔口管上的旁通排出，并应控制排出土体体积不大于冻结孔体积。

5.3.12 用钻进法施工冻结孔时，清水钻进适用于黏土或淤泥等不透水地层；泥浆钻进适用于流砂或粉土地层，可根据地层情况调整泥浆成份、配比，防止钻孔塌孔引起地层沉降。

5.3.13 冻结孔施工时，如排出土体体积大于冻结孔体积，应立即用水泥浆或水泥—水玻璃双液浆进行注浆补偿。

5.3.14 冻结孔施工过程中应及时测斜。对于深度小于 20m 的冻结孔可采用经纬仪或全站仪灯光测斜，对于深度大于 20m 的冻结孔，应采用水平陀螺测斜仪等方法测斜；对于深度小于 20m 的冻结孔，可在成孔后再进行测斜；对于深度大于 20m 的冻结孔，在施工时应每隔 10m~15m 测斜一次。

5.3.15 施工冻结孔时可采用下列防偏措施：

1 冻结施工方位可根据实际开孔误差调整，以减小冻结孔的偏斜值；

2 冻结孔可间隔施工，必要时可调整中间冻结孔的施工轨迹，减小冻结孔最大成孔间距，使冻结孔间隔均匀；

3 冻结孔开孔孔位和方向应准确，可通过在隧道两帮布点，采用拉线方法校验和控制；

4 先施工穿透联络通道两端隧道的透孔，可验证隧道管片上预留洞门的相对位置，当两预留洞门相对位置偏差大于 100mm 时应修正冻结孔设计方位；

5 施工第一个冻结孔时，冻结孔施工工艺参数可根据施工情况进行优化；

6 应对拟用冻结管预先进行配管，冻结管确认连接顺直后再用于施工；

7 在开始钻进或下入冻结管时，钻杆或冻结管的方位与倾角应反复检查，确保孔口段冻结管方位满足设计要求；

8 其它防偏、纠偏专用技术。

5.3.16 冻结孔施工完成后，应绘制喇叭口、集水井等关键部位的实际孔位图，并预计冻结壁交圈图，当相邻冻结孔成孔间距大于设计要求时，可采取补孔方式，补孔后冻结孔成孔间距应满足设计要求。

5.3.17 温度观测孔的施工应符合以下规定：

1 温度观测孔宜在冻结孔施工结束后施工，并根据冻结孔的实际测斜成果，综合考虑布置温度

观测孔的位置，深度不应小于冻结孔深度；

2 温度观测孔管材质及施工技术要求同冻结孔；

3 温度观测孔管下放安装后，不宜做水压试验，管口宜高出地面 0.5m，并应安设防护。

5.3.18 钻孔施工结束后，施工单位应提交施工报告和测斜成果图等相关资料，经验收合格后，方可拆除钻孔施工设备。

5.3.19 钻机应在全部冻结孔验收合格后拆除。

5.3.20 冻结孔实际开孔孔位、冻结管下入地层深度、冻结管和供液管的材质、规格、接头方式、冻结管耐压和冻结孔成孔间距等应按设计要求和有关标准、规范进行验收。冻结管和供液管的材质、规格、接头方式，冻结管和供液管深度，冻结管耐压，以及冻结孔成孔间距经验收合格后，方可使用。

5.3.21 冻结钻孔验收

主控项目

1 冻结管及其接箍、底锥、焊条的品种、材质应满足冻结设计的有关要求。

检查数量：逐批检查。

检验方法：检查出厂合格证和有关试验检验报告。

2 冻结管的直径和壁厚应满足冻结设计要求。

检查数量：逐孔检查。

检验方法：检查下管记录和现场抽查。

3 冻结管的压力试漏应符合冻结设计要求。

检查数量：逐孔检查。

检验方法：检查试压记录、自检报告或现场抽查复试。

4 检查取芯钻孔的岩芯，验证冻结段的范围和冻结深度。

检查数量：逐孔检查。

检验方法：取芯孔的岩芯和该孔的施工报告和地质报告。

5 冻结钻孔的偏斜、最大孔间距应符合本规范5.2.8规定和设计要求，温度观测孔符合本规范5.2.17规定和设计要求。

检查数量：逐孔检查。

检验方法：检查钻孔成孔测斜记录和成孔总平面偏斜投影图，并抽查原始测斜记录表单，抽查比例不小于30%。

6 冻结管、供液管的下管深度应不小于设计深度。

检查数量：逐孔检查。

检验方法：检查冻结管、供液管的下管记录或现场抽查复测。

一般项目

1 钻机、钻具和泥浆的循环系统应符合设计要求。

检查数量：抽查比例不小于30%。

检验方法：现场查验，检查设备使用合格证以及配备泥浆原材料的合格证、化验单、泥浆性能试验记录及施工组织设计。

2 钻孔泥浆性能应符合冻结施工组织设计要求。

检查数量：逐孔检查。

检验方法：检查原材料合格证或化验单和泥浆性能试验记录。

5.3.22 对于不拔除的冻结管，应进行充填。其充填方式、材料等应在施工方案中明确，经审批后实施。

5.3.23 充填冻结管前，应回收供液管，排出盐水。

5.3.24 隧道管片上的孔口管和冻结管在停冻后应尽快割除，防止孔口管和冻结管周围冻结壁解冻漏水。混凝土隧道管片上割除孔口管和冻结管深度应进入管片，且不应小于 60mm。

5.3.25 遗弃在地层中的冻结管应进行充填，充填时要排除冻结管内盐水。

5.3.26 充填冻结管材料应采用强度等级 M10 以上水泥砂浆或强度等级 C15 以上混凝土，水泥浆的水灰比不应大于 1:0.8，浆液应防止受冻，充填的浆液体积不应小于冻结管容积的 95%。每根冻结管充填量应保留记录。

5.3.27 混凝土管片上割除孔口管或冻结管后留下的孔口应采用速凝堵漏剂封堵，并应预埋注浆管进行注浆堵漏。

5.3.28 钢管片上的孔口应焊接厚度不宜小于 12mm 钢板，并按设计要求采用混凝土填满钢管片格仓。

5.3.29 冻结管充填和封孔应有原始记录。

5.4 冻结器安装与检验

5.4.1 冻结管的安装深度不应小于设计冻结深度。冻结管下放到设计深度后，应立即进行水压试验，试验压力应为全冻结管内冷媒柱与管外清水柱的压力差及冷媒泵工作压力之和的 2 倍，并保持 30min 压力下降不大于 0.05MPa，再延续 15min 压力不变为合格。

5.4.2 冻结器供液宜采用分组串联方式。每冻结器应安装头部温差测量装置，每组冻结器的供液系统应设置阀门控制。

5.4.3 冷媒总管的最高处或终端位置应安装放空装置，区段间应设置阀门，控制不同冻结区域的冷媒流量。

5.4.4 冻结器的安装检验应符合下列规定。

主控项目

1 冻结器的安装材料的品种、规格、质量应符合国家现行有关标准以及设计要求。

检查数量：每个检验批不少于 3 组。

检验方法：检查材料出厂合格证，现场抽查送试验室检验。

2 冻结器的管材和底锥在地面水压试验应符合本标准的规定。

检查数量：每个检验批不少于 3 组；底锥逐根试验。

检验方法：现场水压试验。

3 冻结器的下放安装深度应符合设计要求，对焊缝或螺纹连接位置等施工信息应记录详细。施

工记录应按照附录 A 的格式记录。

检查数量：全数检查。

检验方法：查阅施工记录。

4 冻结器头部安装、阀门控制装置、放空设置以及冻结器分组应易于操作。

检查数量：阀门和放空设置位置全数检查，冻结器安装抽查数量不少于 5%。

检验方法：现场查看，检查阀门合格证，查阅施工记录。

5 水文观测孔安装应符合工艺及设计要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：现场查看，查阅施工记录。

6 温度观测孔的安装深度、防水部件质量和测温系统调试验收应符合设计要求。

检查数量：全数检查。

检验方法：现场查看，查阅施工记录。

一般项目

7 冻结器安装完成后，应进行冷媒供、回液系统的整体水压试验，试验压力不应小于冻结器正常工作压力的 1.5 倍，并检查供液系统和所有冻结器头部安装部分，持续 15min 压力不下降。

检查数量：全数检查。

检验方法：现场查看，查阅施工记录。

5.5 冻结壁检测与判断

5.5.1 温度观测孔检测应符合下列规定：

1 温度观测孔内测温元件设置完成后，管口应封堵；

2 温度观测孔内测点布置，应至少在井筒掘进轮廓线的顶板上 1m、底板下 1m、井筒腰线三个层位各布置 1 个测点，监测水温和地层温度变化。主要含水层或控制层距离井筒掘进轮廓线顶、底板距离小于 5m 时以及地下水流速大时应加密测点；

3 温度观测孔管内可采用热敏电阻或铜-康铜热电偶测温元件，宜采用温度数据采集系统；

4 观测时间，从制冷站正式运转至水文观测孔冒水冻结壁交圈期间，应每隔 8h~24h 观测一次；从井筒正式开挖至套壁结束期间，应每天观测一次；从套壁结束至冻结壁局部融化期间，应定时观测冻结壁温度回升解冻状况并注意井壁有无漏水现象，并做好原始记录。

5.5.2 判断冻结壁形成应符合下列规定：

- 1 水文观测孔内水位应有规律的上升并溢出管口 7d;
 - 2 根据温度观测孔所测井筒顶、底及两侧帮温度资料, 计算冻土发展半径和扩展速度符合设计要求;
 - 3 盐水去回路温差逐渐减小, 且稳定;
 - 4 水文观测孔冒水后, 井筒试挖至静水位以下不少于 3m, 工作面应无外来水源, 同时在井筒顶、底及两帮四个方位探测冻结壁实际厚度, 达到设计要求。
- 5.5.3 当水文观测孔无法判断冻结壁是否交圈时, 应通过工作面探水的方式判断冻结壁交圈状态。
- 5.5.4 开挖后, 应每掘进 3m~5m, 检测一次裸露断面温度分布情况, 温度检测点应不少于 4 个; 根据实测温度资料, 分析冻结壁向内扩展规律, 依次对两帮冻结孔的盐水温度及流量进行调控。

5.6 联络通道

5.6.1 采用冻结法施工联络通道时, 隧道支撑应按联络通道结构设计要求在冻结壁交圈之前(或泄压孔压力未增长前)安装完成。联络通道结构设计无明确规定时, 隧道支撑应按下列要求设计和安装:

- 1 隧道内每个联络通道预留口应设 2 榀隧道支撑, 且分别安装在洞口两侧的第一条隧道管片环缝处, 环缝处相邻管片如有错台应先找平;
- 2 每榀隧道支撑宜设 7~8 个支撑点均匀地支撑隧道管片上, 每个支撑点应提供最大到 500kN 的支撑力;
- 3 支撑上半部的 4~5 个支撑点上应安装最大顶力 500kN 的千斤顶以调整支撑力;
- 4 隧道支撑框架应用型钢制作, 且应满足现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 中的相关要求;
- 5 隧道支撑安装偏离隧道管片环缝处截面不宜大于 20mm;
- 6 安装好隧道支撑后应顶实千斤顶, 但每个千斤顶的顶力不应大于 100kN, 且各个千斤顶的顶力应基本均匀;
- 7 应根据实测隧道收敛变形调整各个千斤顶的顶力, 收敛大的部位要求千斤顶顶力大, 不收敛的部位千斤顶可不加力。隧道收敛达到报警值 10mm 时千斤顶顶力应达到设计最大值 500kN;
- 8 如千斤顶顶力达到设计最大值后隧道仍继续收敛, 则应采取其它措施加强隧道支撑。

5.6.2 联络通道应在开挖侧通道预留洞口上安装应急防护门。防护门设计、安装与使用应符合下列要求:

1 防护门应能灵活开关，关闭后应能承受安装位置的地下水土压力，且能有效阻止联络通道内水、土流出，开启后不应影响正常的开挖和结构施工；

2 防护门上应安设压风管、排水管、注浆管及控制阀门，并应配备风量不小于 $6\text{m}^3/\text{min}$ 的空压机为防护门内供气；

3 防护门可安装在通道预留洞口隧道钢管片上。防护门结构设计和安装应符合相关规范的规定；

4 防护门安装好后应进行气密性试验，要求在不停空压机时试验气压能保持在设计值；

5 防护门开关应便于人工操作，紧固螺栓、风管及连接件、扳手等配件及操作工具应准备到位；

6 当联络通道开挖时发生透水、冒砂事故，防护门应立即关闭，并向防护门内加压空气，使防护门内气压维持在设计压力；

7 通道挖通并施工初期支护完成后方可拆除防护门；对于含水和透水性好的砂性地层，应在主体结构完成后拆除防护门。

5.6.3 在集水井位置有透水的砂性土层时，防护门（或盖板）应设置在集水井井口。开挖集水井时如发生透水冒砂事故，应立即关上防护门，并向集水井内压气或注入聚氨酯等注浆充填材料。防护门应能承受所在深度的地下水压。

5.6.4 联络通道试挖时需在未冻结的开挖区隧道管片上开设直径 $80\text{mm}\sim 120\text{mm}$ 带有安全阀门的探孔，探孔深度进入土层不应小于 500mm ，检查孔内无泥、水连续流出或初期有水而逐渐停止方可进行。否则应关闭探孔阀门，继续积极冻结，直至满足试挖条件为止。

5.6.5 联络通道试挖前应完成下列施工准备工作：

1 隧道支撑和防护门按设计要求安装完成、完成管片拆除；

2 搭设开挖和构筑施工平台；

3 施工人员、施工材料与施工机具准备就绪；

4 水、电供应能满足施工需要；

5 按应急预案准备好应急材料与设备；

6 周边环境监测监护实施到位；

7 地面设开挖工作面的视频监测系统，并具备与冻结和开挖工作面的可靠通讯联络系统。

5.6.6 经试挖判定具备开挖条件后联络通道可进行正式开挖。

5.6.7 联络通道开挖应采取短进尺快支护的作业方法，随挖随支，严格控制冻结壁温度升高和变形。

5.6.8 开挖区内的冻结管应在施工完初期支护后、施工外防水或衬砌之前进行割除，但施工喷射混凝土时可暂停给受影响位置的冻结管供冷 $12\text{h}\sim 24\text{h}$ 。

5.6.9 土方开挖冻结壁暴露时间应控制在 24h 内。冻结壁暴露面最大收敛位移不应大于 20mm 。

5.7 盾构施工端头

5.7.1 冻结孔、测温观测孔施工应符合下列规定：

- 1 施工前应根据端头井结构施工图及实际施工情况准确定位，开孔位置误差不应大于100mm，孔位应避开结构主梁（柱）及结构主筋；
- 2 当开孔位置如受端头井内梁、板等结构限制不能按设计布置时，宜向预留洞门边缘移动，终孔孔底位置宜保持原设计位置。

5.7.2 根据测温观测孔温度推测冻结加固体平均温度和厚度达到设计值后，应在盾构端头冻结加固范围上、中、下部均匀布置9个探孔，探孔深度应进入冻结土体不少于100mm。当探孔内无泥水涌出，且围护结构与冻土交界面温度满足设计要求后，可以停止积极冷冻。

【条文说明】

5.7.3 盾构机穿越冻结区前应拔除侵入盾构机开挖范围内的冻结管，应符合下列规定：

- 1 水平冻结管拔除应符合下列要求：
 - 1) 拔除冻结管前，应在现场提前备好加热用盐水箱、循环胶管、与冻结孔孔径匹配预冷的低强度水泥砂浆柱或预制的粘土柱、拔管器等物资；
 - 2) 应先采用热盐水循环加热土体至可扭动冻结管后进行，热盐水最高温度不宜大于80℃，土体不应过度加热；
 - 3) 拔除的冻结管产生的土体孔应立即用预冷的低强度水泥砂浆柱或预制的粘土柱回填，回填长度不应小于土体孔长的70%。
- 2 垂直冻结管拔除应符合下列要求：
 - 1) 盾构接收、始发推进范围内垂直冻结管拔除应根据地层条件、盾构机位置、推进速度等因素确定。
 - 2) 冻结管一次性直接拔除适用于局部垂直冻结；当垂直冻结为全深冻结时，冻结管可拔除至盾构机壳体上方。
 - 3) 盐水加热方式可与水平冻结管拔除一致。
 - 4) 采用一次性直接拔除时，应立即用预冷的低强度水泥砂浆柱或预制的粘土柱回填，盾构机上方继续冻结的冻结孔可不充填。
- 3 冻结管拔除宜控制在48小时内完成。

5.7.4 盾构机开挖范围外未拔除的冻结管，应恢复冷冻状态，在盾构机穿越冻结体期间做维护冻结。

5.7.5 盾构机穿越冻结加固体施工应符合下列要求：

- 1 盾构施工与冻结加固施工应统筹合理安排、各工序紧密衔接；
- 2 盾构机在穿越冻结加固体前应对相关施工设备进行彻底检修维护，确保施工材料充分及时供应，以保证盾构能够连续、快速穿越冻结加固体；
- 3 穿越冻结区域的管片宜使用多注浆孔管片；
- 4 在穿越加固区过程中，停机状态下保持刀盘至少每15min转动一次；
- 5 当接收施工的盾构刀盘进入加固体后，应根据土仓压力传感器和渣土状态判断加固体封水效果，决定是否采取封水补救措施。

【条文说明】5 当接收施工的盾构刀盘进入加固体后，应根据土仓压力传感器和渣土状态，判断加固体封水效果，确保没有泥水前涌时盾构机可以继续掘进直至安全出洞。否则应判明原因，进一步采取封水补救措施。

5.8 融沉注浆

5.8.1 冻结影响区域产生的地层沉降应采取融沉补偿注浆措施，并应符合下列规定：

- 1 当地层每日沉降量大于0.5mm，或累计沉降量大于3.0mm时，应及时进行融沉注浆；
- 2 注浆过程中应随时监测地层沉降情况，当地层隆起达到 3.0mm 时应暂停注浆；

3 冻结加固体已全部融化，在未注浆的情况下，地层15d累计沉降量不大于0.5mm时可停止注浆。

5.8.2 盾构施工端头采用冻结法作业时，可利用盾构隧道管片上的注浆孔作为地层融沉注浆孔。必要时，也可地面打孔分区注浆。

5.8.3 注浆材料宜采用水灰比0.8：1~1.0：1的水泥单液浆。当封堵滴漏水时，注浆材料可采用水泥-水玻璃双液浆，双液浆配比根据试验确定。

5.8.4 融沉注浆施工应符合下列规定：

- 1 注浆的顺序应遵循先下部、后上部的原则；
- 2 单孔一次注浆量不宜大于0.5m³；
- 3 注浆压力宜控制在0.2 MPa~0.5MPa。

【条文说明】5.8.4 为防止结构受到影响，融沉注浆宜选用小压力、多注次的方式，注浆压力一般不超过0.5MPa。充填注浆和融沉补偿注浆遵循先下部、后上部的原则，使加固的浆液逐渐向上扩展，避免死角，改善结构底部土体，提高充填效果。融沉补偿注浆与冻结体的强制解冻顺序相配合，做到解冻与注浆同步进行。

6 拆除和充填

- 6.0.1 制冷站拆除时，盐水和制冷剂宜回收，不应任意排放污染环境。
- 6.0.2 对于不拔除的冻结管，应按经审批的施工方案充填处理。
- 6.0.3 遗弃在地层中的冻结管应进行充填。充填冻结管前，应回收供液管，排出盐水。
- 6.0.4 隧道管片上的孔口管和冻结管在停冻后应尽快割除，防止孔口管和冻结管周围冻结壁解冻漏水。混凝土隧道管片上割除孔口管和冻结管深度应进入管片，且不应小于60mm。
- 6.0.5 充填冻结管材料宜采用强度等级M10 以上水泥砂浆或强度等级C15 以上混凝土，水泥浆的水灰比不应大于0.8：1，浆液应防止受冻，充填的浆液体积不应小于冻结管容积的95%。
- 6.0.6 混凝土管片上割除孔口管或冻结管后留下的孔口应采用速凝堵漏剂封堵，并应预埋注浆管进行注浆堵漏。
- 6.0.7 钢管片上的孔口应焊接厚度不宜小于 12mm 钢板，并按设计要求采用混凝土填满钢管片格仓。
- 6.0.8 冻结管充填和封孔应保留原始记录。

本标准用词说明

- 1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：
 - 1) 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
 - 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：
正面词采用“应”，反面词采用“不应”；
 - 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
 - 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。
- 2 本标准条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《工业设备及管道绝热工程设计规范》 GB 50264
- 2 《建筑设计防火规范》 GB 50016
- 3 《工业金属管道工程施工规范》 GB 50235
- 4 《钢结构设计规范》 GB 50017
- 5 《制冷剂制冷系统安装工程施工及验收规范》 SBJ 12