

城市轨道交通联络通道冻结法技术规范

Technical specification of freezing method in urban rail transit connecting passage

2024 - 11 - 28 发布

2024 - 12 - 28 实施

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 工程勘察与调查 2

 4.1 工程勘察 2

 4.2 水文环境调查 2

 4.3 环境调查 2

5 冻结设计 2

 5.1 通用要求 2

 5.2 冻结壁设计 3

 5.3 冻结孔和测温孔布置设计 6

 5.4 制冷系统设计 7

6 冻结施工 10

 6.1 一般规定 10

 6.2 冻结孔施工 10

 6.3 冻结器的安装 11

 6.4 冷冻站安装 12

 6.5 冷冻站运转 12

7 开挖与结构施工 13

 7.1 隧道支撑和防护门 13

 7.2 开挖 14

 7.3 初期支护 15

 7.4 结构施工 16

 7.5 冻结孔封堵 16

 7.6 充填注浆和融沉注浆 16

8 施工监测 17

 8.1 通用要求 17

 8.2 冻结施工监测 17

 8.3 变形监测 17

 8.4 质量验收 19

参考文献 24

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山东省交通运输厅提出并组织实施。

本文件由山东省交通运输标准化技术委员会归口。

城市轨道交通联络通道冻结法技术规范

1 范围

本文件规定了城市轨道交通联络通道冻结法的工程勘察与调查、冻结设计、冻结施工、开挖与结构施工、施工监测的技术要求。

本文件适用于城市轨道交通采用冻结法施工的联络通道。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 8163 输送流体用无缝钢管
- GB 50007 建筑地基基础设计规范
- GB 50017 钢结构设计标准
- GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范
- GB 50264 工业设备及管道绝热工程设计规范
- GB/T 50299 地下铁道工程施工质量验收标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

联络通道 connecting bypass

连接同一线路上两条单线区间隧道的通道，在列车于区间遇火灾等灾害、事故停运时，供乘客由事故隧道向无事故隧道疏散逃生的过道。

[来源：GB 50157—2013，2.0.56，有修改]

3.2

冻结壁 freezing wall

用人工制冷技术在构筑物周围地层中形成的，具有一定厚度和强度的连续冻结岩土体。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。

[来源：GB/T 15663.2—2023，8.19，有修改]

3.3

冻结壁交圈 closure of freezing wall

各相邻冻结孔的冻结圆柱逐渐扩大，互相连接开始形成封闭的冻结壁的现象。

[来源：GB/T 15663.2—2023，8.23]

3.4

冻结壁形成期 formtion period of freezing wall

从地层开始冻结至冻结壁达到设计厚度和强度要求的时段。

注：也称积极冻结期。

[来源：GB/T 15663.2—2023，8.21，有修改]

3.5

冻结壁维护期 maintenance period of freezing wall

冻结壁形成并达到设计要求后，为了保证联络通道掘砌过程中的安全，继续向冻结器输送冷量，以维持冻结壁满足设计要求的时段。

注：也称维护冻结期。

3.6

冻结孔 freeze hole

布置在联络通道周围用于安装冻结器的钻孔。

3.7

冷冻站 refrigeration plant

在拟建联络通道附近集中安设制冷设备和设施的场所。

[来源：MT/T 1124—2011，2.1.8，有修改]

4 工程勘察与调查

4.1 工程勘察

4.1.1 采用冻结法施工的联络通道应在隧道勘察资料基础上开展专项工作，查明施工影响范围内的土层分布、工程特性、各岩土层物理力学性质及热物理性质指标等，必要时查明相关土层的冻胀率和融沉率等。

4.1.2 联络通道的详勘钻孔在平面距离联络通道中心线 10 m~25 m 范围内，且两侧各不少于 1 个；当联络通道处隧道线间距大于 20 m 时，宜在中间位置增加 1 个钻孔；勘探孔深度应超过开挖深度不少于 15 m。

4.1.3 勘察资料应说明含水层及地下水活动特征，包括含水层埋深、厚度、渗透系数、地下水水位及其变化幅度、地下水含盐量，以及含水层与地表水体的水力联系等。应对承压含水层与联络通道结构的相对位置及其对设计与施工的影响进行详细分析。当工程附近含水层地下水活动频繁、施工期间地下水流速度超过 2 m/d 时，应提供该含水层的地下水流向、流速等资料。

4.2 水文环境调查

4.2.1 应对联络通道附近的水井、降水井进行调查，收集水井、降水井的用途、数量、方位、距离、水质、深度，抽水层位，抽水时间，日抽水量以及抽水影响半径等资料。

4.2.2 对于处于强渗透性地层的联络通道施工前宜对场区进行地下水流速监测。

4.2.3 沿海地区冻结法施工应对地下水进行含盐量测试，并测定其冰点。

4.3 环境调查

应核查场地条件、联络通道施工影响范围内的建（构）筑物、设备、管线等情况及相应的保护要求等。

5 冻结设计

5.1 通用要求

- 5.1.1 联络通道冻结设计应满足冻结施工期间土方开挖和结构施工的安全，并有环境保护措施。
- 5.1.2 冻结壁作为开挖后临时承载结构，应及时设置初期支护及保温层形成复合承载和封水体系。
- 5.1.3 联络通道冻结设计应包含冻结壁、冻结孔布置、制冷系统、应急防护门结构设计，及冻结壁监测与保护、周围环境和建（构）筑物影响分析、冻胀量对隧道衬砌的影响分析、融沉注浆工艺、工程风险评估等内容。
- 5.1.4 在地层冻结区域内有以下情况时，设计中应进行分析评价并采取针对性措施：
- 地下水流速大于 2 m/d，有集中水流或地下水水位有明显波动；
 - 土层结冰温度低于 - 2 ℃或有地下热源可能影响土体冻结；
 - 土层含水量低可能影响土体冻结强度；
 - 用其他施工方法扰动过的地层；
 - 存在沼气、古河道等地质条件的地层；
 - 有其他可能影响地层冻结或地层冻结可能严重影响周围环境的情况。
- 5.1.5 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。
- 5.1.6 在冻结壁形成期间，联络通道周边 200 m 区域内的强渗透性地层中采取降水措施的，应采取保护性措施。
- 5.1.7 冻结设计的基础资料应包含以下内容：
- 联络通道处详勘资料；
 - 联络通道及附近主隧道结构施工图；
 - 联络通道里程、高程、左右线隧道轴线夹角及有关隧道测量数据；
 - 联络通道附近隧道施工的有关情况、隧道内附近的交通及场地条件、地区气象资料。

5.2 冻结壁设计

5.2.1 冻结壁结构形式

冻结壁按其功能与要求分为三类，见表1。应根据冻结壁功能要求分类选择不同形式和安全性能的冻结壁结构。

表 1 冻结壁功能分类表

类别	功能与要求	说明
I	仅用于止水而无承载要求	如岩石裂隙和混凝土界面缝隙止水
II	仅用于承载而无止水要求	如弱透水粘性土层的加固
III	既要求承载又要求止水	如含水砂土层的加固与止水

5.2.2 冻结壁设计

- 冻结壁设计符合下列规定：
- 冻结壁设计使用时间包括冻结壁形成期和冻结壁维护期；
 - 冻结壁应按封闭形式设计；冻结壁的几何形状宜与拟建地下结构的轮廓接近，并易于布置冻结孔；
 - 冻结壁结构形式的选择应有利于控制土层冻胀与融沉对周围环境的影响；
 - 开挖后冻结壁应设初期支护或内支撑，冻结壁承载力设计应按承受全部外荷载计算。

5.2.3 冻结设计参数

5.2.3.1 冻结壁的外荷载计算符合下列规定：

- 冻结壁的荷载应包括土压力、水压力、土方开挖影响范围以内地表建（构）筑物荷载、地表超载及其它临时荷载；
- 地下水位以下的土层土压力和水压力根据渗透系数采用水土分算或合算；
- 竖向压力按计算点以上覆土重量及地面建筑物荷载和地面超载计算；侧向土压力宜按朗肯主动土压力计算；基底土反力宜按静力平衡计算。

5.2.3.2 冻结壁平均温度应根据冻结壁承受荷载大小（或开挖深度）、盐水温度、冻结孔间距、冻结壁厚度、冻结管直径、冻结时间综合确定。联络通道冻结壁平均温度可按表 2 选取。冻结壁与隧道管片交界面平均温度不应高于-5℃。冻结壁平均温度也可采用成冰公式法[见公式（1）]、面积法或数值分析法进行计算。

$$T_p = T_c(1.135 - 0.352\sqrt{l} - \frac{0.785}{\sqrt[3]{E}} + 0.266\sqrt{\frac{l}{E}}) - 0.466 \dots\dots\dots (1)$$

式中：
 T_p ——单排孔冻结壁的平均温度，单位为摄氏度（℃）；
 T_c ——冻结管外壁温度，单位为摄氏度（℃）；
 l ——冻结管间距，单位为米（m）；
 E ——冻结壁厚度，单位为米（m）。

表 2 冻结壁平均温度设计参考值

项目	参考值		
开挖深度 (H_f) m	小于 12	12~30	>30
冻结壁平均温度 (T_p) ℃	-6~-8	-8~-10	≤-10

5.2.3.3 在进行冻结设计时，应收集冻土的物理力学参数。对于工程所处土层无相似冻土试验数据可参考的情况下，宜参照 MT/T 593 的要求进行冻土物理力学性能试验。

5.2.3.4 盐水温度与盐水流量的要求如下。

- 盐水温度与盐水流量应在规定的时间内使冻结壁厚度和平均温度达到设计值。
- 最低盐水温度应根据设计的冻结壁厚度、平均温度、地层环境及气候条件确定，可按表 3 选取。设计冻结壁平均温度低、地温高时应取较低的盐水温度。

表 3 最低盐水温度设计参考值

项目	参考值		
冻结壁平均温度 (T_p) ℃	-6~-8	-8~-10	≤-10
最低盐水温度 (T_y) ℃	-26~-28	-28~-30	-30~-32

- 积极冻结 7 d 后盐水温度宜降至-18℃以下，积极冻结 15 d 后盐水温度应降至-24℃以下，开挖构筑时盐水温度应降至设计最低盐水温度以下，施工初期支护后冻结盐水温度不宜高于-25℃。开挖时，去、回路盐水温差不宜高于 2℃。

——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。冻结孔单孔盐水流量可按表 4 选取，冻结管直径大时宜取较大的盐水流量。

表 4 单孔盐水流量设计参考值

项目	参考值		
冻结孔串联长度 (L_k) m	≤ 40	40~80	> 80
单孔盐水流量 (Q_{yk}) m^3/h	3.0~5.0	5.0~8.0	≥ 8.0

5.2.4 冻结壁厚度设计

5.2.4.1 冻结壁厚度设计应根据联络通道的结构、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综合确定。II 类和 III 类冻结壁应按承载力要求设计冻结壁厚度。

5.2.4.2 冻结壁的计算方法符合下列要求：

- 冻结壁内力宜采用结构力学或数值计算方法确定；
- 冻结壁的力学计算模型宜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。

5.2.4.3 开挖后应及时进行初期支护，冻结壁的暴露时间不宜大于 24 h。

5.2.4.4 按公式（2）进行冻结壁的强度验算，应包括抗压、抗折和抗剪强度检验。

$$K\sigma \leq R \cdots \cdots (1)$$

式中：
 K ——安全系数，III类冻结壁强度检验安全系数宜按表5选取，II类冻结壁强度检验安全系数宜取 III类冻结壁的0.9倍；
 σ ——冻结壁应力，单位为兆帕（MPa）；
 R ——冻土的强度指标，单位为兆帕（MPa）；

表 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

5.2.4.5 进行冻结壁设计时应验算冻结壁的变形，计算冻结壁最大变形不应超过 30 mm。

5.2.4.6 联络通道与隧道管片交界处的冻结壁设计厚度不应小于 1 m，其它部位的冻结壁设计厚度不应小于 1.4 m。

5.2.4.7 冻结壁有效厚度可按公式（3）计算：

$$E_{yj} = 2v_{dp}t - E_{qr} \cdots \cdots (2)$$

式中：
 E_{yj} ——设计冻结壁有效厚度，单位为毫米（mm）；
 v_{dp} ——冻结壁单侧平均扩展速度，单位为毫米每天（mm/d）；
 t ——冻结时间，单位为天（d）。
 E_{qr} ——冻土侵入开挖面以内厚度，单位为毫米（mm）。

5.2.4.8 冻结壁单侧平均扩展速度宜采用测温数据计算，或按表 6 选取。

表 6 单排孔冻结壁（或冻土圆柱）单侧扩展速度设计参考值

项目	参考值				
冻结时间（t） d	0~20	21~30	31~40	41~50	51~60
冻结壁单侧平均扩展速度（v _{dp} ） mm/d	34	28	24	22	20

5.2.4.9 冻结壁交圈时间可按公式（4）估算：

$$t_{jq} = \frac{S_{max}}{2v_{dp}} \dots\dots\dots (3)$$

式中：
t_{jq} ——预计冻结壁交圈时间，单位为天（d）；
S_{max} ——冻结孔成孔控制间距，单位为毫米（mm）；
v_{dp} ——冻结壁单侧平均扩展速度，单位为毫米每天（mm/d）。

5.2.4.10 在冻结壁形成期，预计冻结壁厚度不应小于设计要求值，同时预计冻结壁平均温度不应高于设计要求值。

5.3 冻结孔和测温孔布置设计

5.3.1 冻结孔布置

5.3.1.1 对于线间距小于 20 m 的联络通道，宜采用从一侧布置冻结孔；对于线间距大于 20 m 的联络通道，宜采用从隧道两侧布置冻结孔。

5.3.1.2 当单排冻结孔不能满足冻结壁设计要求时，可布置多排冻结孔。

5.3.2 冻结孔偏斜

5.3.2.1 冻结孔偏斜精度应符合表 7 规定。

表 7 冻结孔最大允许偏斜值要求表

冻结孔类型	水平或倾斜冻结孔				竖直冻结孔		
冻结孔深度（H） m	≤ 10	10~20	20~30	30~60	≤30	30~40	40~100
冻结孔最大偏斜值 mm	150	150~250	250~350	350~600	150	250	250~400
注：冻结孔最大偏斜值为冻结孔成孔轨迹与设计轨迹之间的最大偏差距离。							

5.3.2.2 单排冻结孔成孔控制间距应符合表 8 规定。

表 8 单排冻结孔成孔控制间距设计值

冻结孔类型	水平或倾斜冻结孔			竖直冻结孔	
冻结孔深度 (H) m	≤10	10~30	30~60	≤40	40~100
最大允许终孔间距 mm	1 100~1 300	1 300~1 600	1 600~2 000	1 200~1 400	1 400~1 800
注：冻结孔最大允许终孔间距指设计冻土范围内冻结孔终孔位置和相邻冻结孔的最大允许垂直距离。					

5.3.3 冻结管

5.3.3.1 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。

5.3.3.2 冻结管外径宜选用Φ89 mm~Φ127 mm，管壁厚度不宜小于 6 mm。

5.3.4 测温孔和测温管

5.3.4.1 测温孔位置和数量应满足冻结壁厚度、冻结壁平均温度、冻结壁与隧道管片界面温度和开挖区附近地层冻结情况监测的要求。

5.3.4.2 测温孔宜布置在冻结孔间距较大的冻结壁界面上或预计冻结薄弱处。

5.3.4.3 监测冻结壁厚度的测温孔不应少于 2 个，在冻结壁内、外设计边界上均应布置测温孔，测温孔深度不应小于 2 m。检测冻结壁平均温度的测温孔不宜少于 4 个。在冻结壁的上、下设计边界上均应布置不少于 1 个测温孔，深度应不小于 2 m。在泵房中部应布置不少于 1 个测温孔。检测冻结壁与隧道管片界面温度的测温孔深度应进入地层不小于 0.1 m。

5.3.4.4 测温管宜采用钢管，且不应渗漏。

5.4 制冷系统设计

5.4.1 制冷能力计算宜按照以下规定计算：

——冻结管吸热能力按公式（5）计算：

$$Q_g = qA \cdots \cdots (1)$$

式中：

Q_g ——冻结管总吸热能力，单位为千焦每小时（kJ/h）；

q ——冻结管吸热系数，单位为千焦每平方米每小时（kJ/m²h），可取1 047 kJ/m²h~1 172 kJ/m²h；

A ——冻结管总表面积，单位为平方米（m²）。

——冷冻站所需制冷能力按公式（6）计算：

$$Q_z = mQ_g \cdots \cdots (2)$$

式中：

Q_z ——需要制冷能力，单位为千焦每小时（kJ/h）；

m ——冷量损失系数，取1.20~1.25。

5.4.2 冷冻机选择，应符合下列要求：

——制冷剂循环系统的冷凝温度比冷却水循环系统的出水温度高 3℃~5℃；

——制冷剂循环系统的蒸发温度比设计最低盐水温度低 5℃~7℃；

- 冷冻机的型号与数量根据需要制冷能力、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小于需要制冷能力，并备用至少一台冷冻机。对风险性较高的联络通道，增加备用机的数量。

5.4.3 地层冻结盐水，符合下列要求：

- 地层冻结用盐水（冷媒剂）宜采用氯化钙水溶液；
- 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 1.27；
- 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；
- 氯化钙水溶液应充满循环系统中所有的容器和管路。氯化钙用量可按下式计算确定：

$$G = \frac{1.2\rho(V_1+V_2+V_3)}{\rho'} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- G ——氯化钙用量，单位为千克（kg）；
- ρ ——单位盐水体积固体氯化钙含量，单位为千克每立方米（ kg/m^3 ）；
- V_1 ——冻结器内盐水体积，单位为立方米（ m^3 ）；
- V_2 ——干管及集、配集液圈内盐水体积，单位为立方米（ m^3 ）；
- V_3 ——蒸发器和盐水箱内盐水体积，单位为立方米（ m^3 ）；
- ρ' ——固体氯化钙纯度。

5.4.4 盐水管路设计，符合下列要求：

- 按盐水流速计算供液管、干管和配、集液管管径。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 $1.5 \text{ m/s} \sim 2.0 \text{ m/s}$ ；
- 盐水干管及配、集液管可选用普通低碳钢无缝钢管、焊接钢管或聚乙烯增强塑料管，并应满足耐压值要求。供液管可选用钢管或聚乙烯增强塑料管，供液管接头应有足够强度以防断裂；
- 在盐水干管中宜安装软接头以减小温度应力和制冷设备运转引起的震动。

5.4.5 盐水泵设计，应符合下列要求：

- 盐水循环总流量按公式（8）计算：

$$W = \frac{Q_z}{\Delta T \cdot \rho \cdot c} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- W ——盐水循环计算总流量，单位为立方米每小时（ m^3/h ）；
- Q_z ——计算制冷能力，单位为千焦/时（ kJ/h ）；
- ρ ——盐水密度，单位为千克每立方米（ kg/m^3 ）；
- c ——盐水比热，单位为千焦每千克·摄氏度 [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$]；
- ΔT ——去回路盐水温差，单位为摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ），一般取 $\Delta T = 1^{\circ}\text{C} \sim 2^{\circ}\text{C}$ 。
- 盐水泵扬程按公式（9）计算：

$$H_c = 1.15(h_1 + h_2 + h_3 + h_4) + h_5 + h_6 + h_7 \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- H_c ——盐水泵计算扬程，单位为米（m）；
- h_1 ——盐水干管和集配液圈中的压力损失，单位为米（m）；
- h_2 ——供液管中的压头损失，单位为米（m）；
- h_3 ——冻结器环形空间的压头损失，单位为米（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%，单位为米（m）；

h_5 ——盐水泵的压头损失，可取3 m~5 m；

h_6 ——封闭式循环系统中回路盐水管高出盐水泵的高度，宜取1.5 m；

h_7 ——蒸发器内的盐水压头损失，单位为米（m）。

其中， h_1 、 h_2 、 h_3 的计算见公式（10）~公式（13），其中紊流见公式（11），层流见公式（12）。

$$h_i = \lambda_i \frac{L_i}{d_i} \cdot \frac{v_i}{2g} (i = 1, 2, 3) \dots\dots\dots (6)$$

$$\lambda_i = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{R_{ei}}} \dots\dots\dots (7)$$

$$\lambda_i = \frac{64}{R_{ei}} \dots\dots\dots (8)$$

$$R_{ei} = \frac{v_i \cdot d_i \cdot \rho}{\mu} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

d ——盐水管的直径，单位为米（m）；

L ——盐水管的长度，单位为米（m）；

g ——重力加速度，单位为米每二次方秒（m/s²），取9.81；

v ——盐水流速，单位为米每秒（m/s）；

λ ——盐水流动阻力系数；

R_e ——雷诺数；

μ ——盐水动力粘度系数，单位为帕·秒（Pa·s）。

——盐水泵电动机功率按公式（14）确定：

$$N = 1.25 \frac{W \cdot H_c \cdot \rho}{102 \times 3600 \times \eta_1 \cdot \eta_2} \dots\dots\dots (10)$$

式中：

η_1 ——盐水泵的效率，取0.75；

η_2 ——电动机的效率，取0.85；

——按盐水循环计算总流量、盐水泵扬程和电机功率选择水泵型号和台数，配备盐水泵在计算扬程下的总流量不小于计算流量，并设足够的备用泵。

5.4.6 冷却水系统，符合下列要求：

——冷冻站冷却水总循环量按公式（15）计算：

$$W_0 = W_1 + W_2 \dots\dots\dots (11)$$

式中：

W_0 ——冷却水计算总循环量，单位为立方米每小时（m³/h）；

W_1 ——冷凝器冷却水用量，单位为立方米每小时（m³/h），按公式（16）计算：

$$W_1 = \frac{Q'_z}{1000 \cdot \Delta T} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

Q'_z ——冷冻站总制冷能力，单位为千焦每小时（kJ/h）；

ΔT ——冷凝器进出水温差，单位为摄氏度（℃），取3℃~5℃。

W_2 ——冷冻机冷却水用量，单位为立方米每小时（m³/h），按公式（17）计算：

$$W_2 = \frac{3.6Q_1}{1000 \cdot c \cdot \Delta T} \dots\dots\dots (13)$$

式中：

Q_l ——冷凝器负荷，单位为千焦（kJ）；

c ——水的比热容，单位为千克每摄氏度（ $\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ），取4.186 8；

ΔT ——冷凝器进出水温差，单位为摄氏度（ $^\circ\text{C}$ ），取3 $^\circ\text{C}$ ～5 $^\circ\text{C}$ 。

补充水量宜按公式（18）计算：

$$W_3 = \frac{W_0(t_2 - t_1)}{t_2 - t_0} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

W_3 ——补充水量，单位为立方米每小时（ m^3/h ）；

t_2 ——冷凝器出水温度，单位为摄氏度（ $^\circ\text{C}$ ）；

t_1 ——冷凝器进水温度，单位为摄氏度（ $^\circ\text{C}$ ）；

t_0 ——补充水温度，单位为摄氏度（ $^\circ\text{C}$ ）。

——冷却水应采用不结垢冷却水，水温宜低于 28 $^\circ\text{C}$ ；

——应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 12 m～40 m 为宜。冷却水循环泵应有足够备用。

5.4.7 低温容器及管路保温设计应符合 GB 50264，并符合下列要求：

——制冷剂循环系统的低温容器和管路应保温，包括中压、低压容器及管路、盐水箱、盐水干管和配集液管等；

——保温层外表面温度不低于环境露点温度 2 $^\circ\text{C}$ ，保温层不产生凝结水；

——保温层均铺设防潮层。

6 冻结施工

6.1 一般规定

6.1.1 联络通道的开口位置及相邻两环隧道管片应采取加强措施或采用钢管片；管片上宜预留排水管接口，并做好保护措施。

6.1.2 冻结壁质量达到设计要求，且开挖准备工作验收合格后方可转入开挖工序。

6.2 冻结孔施工

6.2.1 钻孔施工平台应牢固平整且稳定。

6.2.2 冻结孔成孔方法可选用跟管钻进法、夯管法等施工方法。

6.2.3 冻结孔孔口应避开隧道管片接缝、螺栓孔，宜避开混凝土管片主筋。

6.2.4 在承压含水层中施工联络通道前，应在隧道管片壁后进行注浆。

6.2.5 在隧道管片上施工冻结孔时，应采取二次开孔工艺，即先安装孔口管和阀门后再开透隧道管片。孔口管应在隧道管片上牢固固定，孔口管与管片之间不应有渗漏点。

6.2.6 冻结孔钻进的要求如下：

——跟管钻进或夯（顶）进冻结管时，孔口管与冻结管之间采取密封措施，不漏水漏泥。采用跟管钻进时，循环液从孔口管上的旁通排出，并控制排出土体体积不大于冻结孔体积，否则立即用水泥单液浆或水泥—水玻璃双液浆进行注浆补偿。注入量不小于流出量的 1.5 倍；

——用钻进法施工冻结孔时，在黏性土或淤泥等弱透水地层中可采用清水钻进；在粉土、砂土和碎石土等强透水地层中应采用泥浆钻进，并根据地层情况调整泥浆成份、配比。

6.2.7 冻结孔施工结束后应采用水泥浆或水泥—水玻璃双液浆封堵冻结管与孔口管之间的缝隙。待浆

液凝固后，应采用厚度不小于 5 mm 的钢板将冻结管与孔口管间的外端部间隙焊接密实。

6.2.8 施工冻结孔时采用以下措施控制冻结孔成孔间距：

- 冻结孔施工方位应根据实际开孔误差调整，以减小冻结孔的最大偏斜值；
- 先施工穿透联络通道两端隧道的透孔，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 100 mm 时应修正冻结孔设计方位；
- 宜间隔施工冻结孔，必要时通过调整中间冻结孔的设计施工轨迹，减小冻结孔最大成孔间距，使冻结孔间距均匀；
- 开孔孔位、方向和冻结孔后视点应准确布设，校验、控制冻结孔施工方向；用经纬仪和罗盘确定开孔倾角和方位角；
- 施工第一个冻结孔时，应复核地质、水文情况，根据施工情况优化冻结孔施工工艺参数；
- 应确保冻结管加工质量，先配管确认冻结管连接顺直后再用于施工；
- 在开始钻进或下入冻结管时，应检查钻杆或冻结管的方位与倾角，确保孔口段冻结管方位满足设计要求。

6.2.9 冻结孔施工过程中应及时测斜。对于深度小于 20 m 的冻结孔可在冻结孔成孔后，采用经纬仪测斜；对于深度大于 20 m 的冻结孔，在施工时应每隔 10 m~15 m 采用陀螺测斜仪等方法测斜。

6.2.10 实际冻结孔成孔间距不能满足设计要求时应增加冻结孔。

6.2.11 冻结孔施工完成后应根据测斜数据绘制成孔三维图及通道与两侧隧道管片交界处、正常通道、泵房等断面的冻结孔偏斜孔位图。

6.3 冻结器的安装

6.3.1 冻结管安装的要求如下：

- 每节冻结管材宜有长度及顺序编号记录；
- 冻结管连接可采用螺纹对焊连接或带内衬管对焊连接。当采用螺纹连接时，冻结管管壁厚度不宜小于 8 mm；当采用内衬管连接时，冻结管管壁厚度不宜小于 6 mm，管壁厚度不宜大于 10 mm；
- 冻结管接头强度不宜小于母管强度的 60%；当需要拔管或预计冻结壁变形大，有可能引起冻结管断裂时，冻结管接头强度应不小于母管强度的 80%，并宜采用加内衬管的对焊连接接头。跟管钻进时冻结管连接宜采用螺纹接头，接缝处采用坡口焊进行满焊连接；夯管时冻结管宜采用带内衬管对焊连接；
- 冻结管材与接头内衬管的材质应一致，管端宜留坡口，选用焊条应与管材材质相匹配，焊缝应饱满且与管壁齐平。冻结管焊接后，应将焊缝冷却 5 min~10 min，再将冻结管下入地层。
- 冻结管管材及连接应顺直，不应有明显弯曲。冻结管内不应留有任何杂物；
- 冻结管下入地层深度不应小于设计深度，不宜大于设计深度 0.5 m。冻结管管口露出口口管不宜小于 100 mm；
- 冻结管下入地层后应进行试压。试验压力应为冻结工作面盐水压力的 1.5 倍~2 倍，且不宜低于 0.70 MPa。经试压 30 min 压力下降不超过 0.05 MPa，再延续 15 min 压力保持不变为合格。

6.3.2 渗漏的冻结管处理的要求如下：

- 试压不合格的冻结管应进行处理达到密封要求后方可使用，无法处理时应补冻结孔；
- 冻结管出现渗漏时，可在漏管中下入小直径冻结管的方法进行处理，并在小直径冻结管外侧充满清水或泥浆。小直径冻结管应采用低碳钢无缝钢管，内径不应小于 57 mm，管壁厚度宜为 3 mm~4 mm，宜采用直接对焊连接。下套管的冻结孔数不应多于冻结孔总数的 5%。小直径冻结管下放深度和耐压要求应与普通冻结管相同。

6.3.3 供液管安装的要求如下：

- 供液管可采用聚乙烯增强塑料管或钢管。供液管的管径应以供液管内截面积和供液管与冻结管之间环向间隙截面积相近为原则选用，供液管内和供液管与冻结管间隙的盐水流动速度宜满足 5.2.3.4 的要求；
- 供液管下入冻结管时连接应牢固、严密，并应下放至距离冻结管管底 100 mm 位置。供液管管端应留有断面面积不小于供液管断面面积的回水通道；
- 冻结管端盖和去、回路管路的连接应牢固、严密；
- 冻结器宜采用串、并联方式分组与配、集液圈连接，每组串联冻结器长度宜适中并基本一致，以保证各冻结器盐水流量均匀并满足设计要求。冻结器与配、集液圈之间宜用软管连接，软管在工况温度下耐压不应低于 1 MPa。管路连接应便于安装流量计监测单孔盐水流量，每组冻结器的进出口应安装阀门和温度测点，以便控制单孔流量；
- 冻结器安装完成后，先用清水对系统进行试压检漏，试压值不小于正常盐水系统压力的 1.2 倍。若发现渗漏应重新补焊。

6.4 冷冻站安装

- 6.4.1 冷冻站可设置在车站地面广场、车站地下站厅层或冻结工作面附近的隧道内，如冷冻站布设在冻结工作面，宜采用高压供电。
- 6.4.2 冷冻站应通风良好。采用冷却塔给冷却水降温时，冷却站应加强通风排热，冷却站通风条件不能满足设备降温需求时可安装轴流风机强制通风。
- 6.4.3 冷冻站设在地面时，制冷系统的高压部分不应阳光直晒。
- 6.4.4 冷冻站采用的设备、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。
- 6.4.5 冻结站盐水系统的管路可采用钢管或聚乙烯增强塑料管，管件、法兰盘等应采用耐低温的碳素钢制作。
- 6.4.6 冷却水源水质不符合冷凝器等设备的使用要求时，应安设冷却水水质处理装置，提高冷却效率。
- 6.4.7 盐水循环系统最高部位处应设置排气阀，盐水箱应安设盐水液面可视自动报警系统。干管上及位于配液管首尾冻结器的供、回液管上，应设置流量计。
- 6.4.8 冷冻站制冷剂循环系统、盐水干管、配集液管应进行密封性试验，且应符合下列规定：
 - 盐水管路系统应进行压力试验，试验压力不应小于冻结工作面盐水压力的 1.5 倍，并应持续 1 h 压力不下降；
 - 冷冻机充制冷剂前，制冷系统各部位应进行试漏检验，并应符合表 9 的规定或设备其他相关规定的要求。

表 9 试漏压力

部位	高压系统	低压系统
试压表压力 MPa	1.6~1.8	1.2

- 6.4.9 冷冻站管路密封性试验合格后，对制冷系统的低压、中压容器、管路及盐水箱、盐水干管、配集液管等应按设计要求铺设保温层和防潮层。

6.5 冷冻站运转

- 6.5.1 冷冻站正式运转前应对冷却水、冷媒剂及制冷剂系统进行试运转，各系统的要求如下：
 - 补充水量、水温及水质应达到设计要求，冷却水循环水系统运转正常；
 - 盐水比重及总流量应达到设计要求，盐水循环系统正常运转，空气放净，无杂物堵塞；

——冷却水、盐水系统试运转合格后充制冷剂。在充制冷剂前宜用专用仪器检漏。

6.5.2 冷冻站正式运转前应满足下列要求：

- 在充制冷剂过程中，制冷剂、盐水、冷却水系统应运转正常，盐水温度逐渐下降；
- 配电系统应连续正常供电；同时应做好应急供电准备；
- 冷冻站内灭火器材、防雷装置、电器接地等安全设施应齐全有效；
- 冷冻机易损件、仪表、制冷剂和冷冻机油均应配备足够。

6.5.3 冷冻站运转要求如下：

- 制冷剂、盐水、冷却水循环系统温度、流量、压力应正常，经过 3 d~7 d 盐水温度应逐渐下降并达到设计要求，各冻结器回液温度宜正常、基本一致，头部、胶管结霜宜均匀；
- 制冷剂冷凝压力和蒸发压力应与冷却水温度、盐水温度相对应；
- 冷媒温度应比制冷剂蒸发温度高 5℃~7℃，冷凝温度应高于冷却水温度 3℃~5℃；
- 冷却水进出水温差宜为 3℃~5℃；
- 开挖期间联络通道盐水去回路温差不应大于 2℃。

6.5.4 冻结施工时隧道管片保温要求如下：

- 在冻结壁附近隧道管片内侧应敷设保温层，保温层应与管片表面密贴，粘结牢固。保温层敷设范围不应小于设计冻结壁边界外 2 m；
- 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 0.04 W/m·h，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 30 mm，可取 30 mm~50 mm；
- 在冻结辅面的隧道管片表面敷设冷冻排管用于冻结壁补强和保温。冷冻排管的敷设范围不应小于冻结壁设计厚度。冷冻排管的冷量一般由冻结站低温盐水供应，冷冻排管的内径不应小于 30 mm，管间距不应大于 500 mm。冷冻排管与管片间应密贴。

6.5.5 冻结施工时，现场压力监测应符合下列要求：

- 制冷系统和盐水系统的工作压力，通过系统上安装的压力表量测，每 2 h~3 h 测量 1 次；
- 泄压孔孔口应按安装压力表和用于泄水的联络通道和控制阀门。压力表的精度应达到 ±0.02 MPa 以上；
- 冻结站运转前期，应通过泄压孔每隔 12 h~24 h 观测一次地层水压。水压开始上涨后，应每隔 6 h~12 h 测量不少于 1 次。

6.5.6 在联络通道开挖和构筑期间应采用双回路供电或备用发电机。

6.5.7 在开挖期间不应擅自停止或减少冻结孔供冷。若确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，并制定相应技术措施，确保开挖和结构施工安全。

6.5.8 联络通道主体结构施工结束后方可停止冻结，拆除制冷设备和管路。

7 开挖与结构施工

7.1 隧道支撑和防护门

7.1.1 在联络通道开挖前，应确认冻结壁满足设计要求。应按隧道结构设计要求安装隧道支撑。在联络通道结构设计无明确规定时，隧道支撑的设计和安装符合下列要求：

- 联络通道处两侧隧道内各布置不少于 2 榀隧道支撑，应分别安装在洞口两侧的隧道管片中心处。隧道支撑安装偏离隧道管片中心处截面不宜大于 20 mm；
- 每榀隧道支撑应设不少于 7 个支撑点均匀地支撑隧道管片上，支撑点与管片之间宜设置不小于 16 mm 厚的钢垫板。每个支撑点能够提供的最大支撑力不应小于 500 kN；
- 支撑上半部的 4 个~5 个支撑点上应安装最大顶力 500 kN 的千斤顶以调整支撑力；

- 隧道支撑框架宜用型钢制作，应满足 GB 50017 的要求。隧道支撑之间应有效连接，确保其稳定性；
 - 隧道支撑安装完毕后，应顶实千斤顶，每个千斤顶的顶力应不大于 100 kN，且各个千斤顶的顶力应均匀；
 - 各千斤顶的顶力应根据实测隧道收敛变形进行调整。千斤顶顶力达到设计最大值后隧道仍继续变形时，应采取其它加固措施。
- 7.1.2 开挖前应在开挖侧通道预留洞口上安装应急防护门，且应符合下列要求：
- 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，有效阻止联络通道内水、土流出，开启后应不影响正常的开挖和结构施工；
 - 防护门应采取措施固定牢靠且密封完好；
 - 防护门耐压设计值应根据隧道埋深及水土压力确定。在防护门上应安设注浆管及控制阀门，防护门安装完成后应进行水密性或气密性试验；
 - 防护门应启闭灵活；
 - 联络通道开挖时发生透水、冒砂事故时，应立即关闭防护门，并向防护门内压水，使防护门内水压维持在设计压力；
 - 防护门应在通道挖通并施工初期支护后拆除，透水砂层联络通道应在主体结构全部完成后拆除防护门。
- 7.1.3 在泵房位置有透水的砂性土层时应设泵房口防护门或盖板，且应能承受所在深度的水土压力。
- 7.2 开挖
- 7.2.1 开挖前应进行试挖，试挖判定具备开挖条件后进行条件验收，验收合格再进行正式开挖。
- 7.2.2 试挖应具备下列资料：
- 地层检查孔报告及地层剖面图；
 - 冻结壁检测已满足开挖条件要求的分析报告，内容包括：
 - 冻结孔和测温孔的施工资料；
 - 冷冻站运行情况；
 - 干管盐水温度变化；
 - 冻结器盐水流量；
 - 测温孔温度变化；
 - 泄压孔水压变化及泄水情况；
 - 实测冻结壁厚度；
 - 平均温度和冻结壁与隧道管片交界面温度；
 - 根据测温结果绘制的重要部位的冻结壁剖面图等施工记录、图表与分析结论；
 - 经审批的施工组织设计、安全技术措施及应急预案。
- 7.2.3 试挖前应完成以下施工准备工作：
- 隧道支撑和防护门按设计要求安装完成；
 - 搭设开挖和构筑施工平台；
 - 施工材料与施工机具准备就绪；
 - 水、电供应能满足施工需要；
 - 按应急预案准备好应急材料与设备；
 - 周边环境监测措施实施到位；
 - 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。
- 7.2.4 试挖时应在联络通道入口未冻区内管片上开设不少于 4 个直径 80 mm~120 mm 的探孔，探孔挖深

400 mm~600 mm，检查孔内无泥、水连续流出，则可判定具备正式开挖条件。

7.2.5 联络通道开挖应采取短段掘砌的作业方法，随挖随支，严格控制冻结壁温度升高和变形。

7.2.6 通道开挖中心线偏差不应大于 20 mm。且单侧超挖不应大于 30 mm。

7.2.7 开挖循环进尺宜取 500 mm~800 mm，并应与初期支护的钢格栅间距一致。开挖面稳定性差时宜采用台阶法。

7.2.8 冻结壁暴露时间应控制在 24 h 内，冻结壁暴露面最大收敛位移不应大于 30 mm。

7.2.9 单侧泵房上部结构开挖时，应在端墙部位设置临时壁座。

7.2.10 夏季开挖过程中，宜对隧道与管片交界面处的初期支护内侧采取保温措施。

7.2.11 正式开挖应采用以下施工顺序：

- a) 施工完通道二次衬砌后再施工泵房；
- b) 通道施工可按下列步骤进行：
 - 1) 开洞门；
 - 2) 通道开挖和初期支护；
 - 3) 通道与隧道管片交接处开挖（刷大）和初期支护；
 - 4) 隧道管片拆除；
 - 5) 外防水施工；
 - 6) 钢筋绑扎、预埋件安设和立模；
 - 7) 混凝土浇注。
- c) 泵房施工可按下列步骤进行：
 - 1) 开挖和初期支护；
 - 2) 外防水施工；
 - 3) 钢筋绑扎、预埋件安设和立模；
 - 4) 混凝土浇筑。

7.3 初期支护

7.3.1 初期支护可采用由钢筋格栅（或型钢及木背板）、钢筋网和喷射混凝土层组成的复合结构形式。

7.3.2 钢筋格栅及钢筋网加工，应符合下列要求：

- 钢筋格栅及钢筋网采用的钢筋种类、型号、规格等应满足设计要求，其施焊应满足设计及钢筋焊接规范要求；
- 拱架应圆顺，直墙架应直顺，允许偏差为拱架矢高及弧长 0 mm~+20 mm，强架长度±20 mm，拱、墙架横断面尺寸（高、宽）0 mm~+10 mm；
- 钢筋格栅组装后应在同一平面内，允许偏差为高度±30 mm，宽度±20 mm，扭曲度 20 mm；
- 钢筋网加工允许偏差为钢筋间距±10 mm，钢筋搭接长度±15 mm。

7.3.3 钢筋格栅安装应符合下列规定。

- 钢筋格栅应垂直通道中线，允许偏差为：横向±30 mm，纵向±50 mm，高程±30 mm，垂直度 5‰。
- 钢筋格栅与壁面应楔紧，每片钢筋格栅节点及相邻格栅纵向应分别连接牢固。

7.3.4 初期支护钢支架可采用 18 号~22 号工字钢等型钢制作，钢支架内侧净尺寸按联络通道结构轮廓外放 20 mm~30 mm 计算；木背板厚度可取 30 mm~50 mm；充填层可采用粗砂或水泥砂浆，并充填密实。

7.3.5 喷射混凝土原材料，符合下列要求：

- 水泥：应选用普通硅酸盐水泥；
- 细骨料：宜采用中粗砂；
- 粗骨料：粒径不大于 15 mm；
- 掺合剂：应掺入适量的防冻剂。

7.3.6 喷射混凝土作业，符合下列要求：

- 混凝土应自下而上、分层喷射；
- 每次喷射厚度宜为：边墙 70 mm~100 mm；拱顶 50 mm~60 mm；
- 喷层混凝土回弹量，边墙不宜大于 15%，拱部不宜大于 25%。

7.3.7 喷射混凝土应密实、平整、无裂缝、脱落、漏喷、漏筋、空鼓、渗漏水等现象。平整度允许偏差为 30 mm。

7.4 结构施工

7.4.1 联络通道结构及防水层应按照设计和有关施工规范施工。

7.4.2 泵房开挖应在浇筑完通道二次衬砌混凝土且其强度达到设计值的 60% 以上后再进行。

7.4.3 混凝土初凝时间应根据施工工序安排和混凝土需要二次倒运等情况确定。每次浇筑混凝土时应到现场用试模制成标准试块，用于检测混凝土抗压强度等级和抗渗等级。同时应考虑环境温度较低可能对混凝土强度增长的影响。

7.4.4 混凝土浇注宜采用混凝土输送泵，应采取措施确保通道拱部混凝土浇筑密实。

7.4.5 在结构混凝土与隧道管片接触部位应按设计要求施工锚筋，且纵筋与隧道管片应按设计要求锚固连接。

7.4.6 排水管应包裹在结构混凝土层里，不应与土层直接接触；排水管与隧道连接处应密封严实。

7.5 冻结孔封堵

7.5.1 结构施工完成停冻后尽快割除隧道管片上的孔口管与冻结管，并应分组停冻、割管，完成冻结孔的充填与封堵。

7.5.2 冻结孔封堵质量，应符合下列要求：

- 停冻后应对遗弃在地层中的冻结管采用强度等级不低于 M10 的水泥砂浆或 C20 以上混凝土进行充填，自冻结管口向孔内充填长度不应小于 1.5 m，充填时要排出冻结管内盐水；
- 充填后应及时割除隧道管片上的孔口管和冻结管，隧道管片上割除孔口管或冻结管深度应进入管片不小于 60 mm；
- 混凝土管片上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它耐久性材料、密封性高的工艺封堵，并预埋注浆管进行注浆堵漏；
- 钢管片上的孔口应焊接厚度不小于 12 mm 钢板，然后按设计用混凝土填满钢管片格仓；
- 冻结管充填和封孔应有原始记录；
- 遗留的冻结管环境评价。

7.6 充填注浆和融沉注浆

7.6.1 停止冻结并完成冻结孔封堵工序后应进行衬砌后充填注浆和地层融沉补偿注浆。

7.6.2 充填注浆结束后，冻结壁解冻一般采用自然解冻方式，并应根据地层沉降监测情况进行冻结壁融沉补偿注浆。融沉补偿注浆应遵循少量、多次、多点、均匀的原则。

7.6.3 注浆管应在联络通道初期支护施工时预埋。注浆管预埋深度应穿透初期支护层，注浆管头部应用丝堵拧紧，布孔密度宜为 2 m²/个~4 m²/个。可使用联络通道位置相关管片预留注浆孔进行注浆。

7.6.4 充填注浆主要填充初期支护与冻土帷幕之间的空隙。衬砌后充填注浆应在停止冻结后 3 d~5 d 内实施。注浆时衬砌混凝土强度应达到设计强度的 60% 以上。

7.6.5 充填注浆宜采用水灰比为 0.8~1 单液水泥浆。注浆宜按由下而上的顺序进行，当上一层注浆孔连续返浆后即可停止该层注浆，直至拱顶充满为止。注浆压力不应大于静水压力。

7.6.6 融沉补偿注浆浆液宜以单液水泥浆为主，水泥-水玻璃双液浆为辅。水泥-水玻璃双液浆的配比

要求如下：

- 水泥浆与水玻璃溶液体积比宜为 1:1，其中水泥浆水灰比宜为 0.8~1，水玻璃溶液可采用 Be35~Be40 水玻璃，波美度宜根据设计浆液凝结时间进行调整；
 - 注浆压力不应大于 0.5 MPa 或设计要求的允许值；
 - 注浆范围应为整个冻结区域。
- 7.6.7 注浆设备宜采用双液注浆泵，注浆泵应配备压力表、流量计等量测仪表。
- 7.6.8 地层平均沉降大于 0.5 mm/d 或累计地层沉降大于 3 mm 时，应进行融沉补偿注浆；地层隆起达到 3 mm 时应暂停注浆。
- 7.6.9 冻结壁已全部融化，且实测地层相对周边非冻区沉降持续一个月每半月不大于 0.5 mm 时，可停止融沉补偿注浆。
- 7.6.10 融沉注浆结束后，应割除露出结构表面的注浆管，并在管口段填充深度不小于 100 mm 的速凝堵漏剂。

8 施工监测

8.1 通用要求

- 8.1.1 冻结施工的过程中应对冻结温度、变形、冻结压力等内容进行监测和检测。
- 8.1.2 监测单位应对监测数据和现场巡查情况分析整理，确保数据正确、可靠，按时提交监测报表；当监测值达到预警值，应立即发出预警通知。
- 8.1.3 监测方案应包括工程概况、工程地质条件、周边环境状况、监测目的、监测依据、测点布置及布点图、监测方法及精度、监测频率、监测周期、监测预警值、监测成果的主要内容、监测人员组成及主要仪器设备、信息反馈制度等，同时应针对项目特点提出相应防范措施。

8.2 冻结施工监测

- 8.2.1 在联络通道施工期间应监测冻结盐水温度、冻结加固范围内地层温度、冻结站运转情况。
- 8.2.2 联络通道在冻结施工期间内应对去、回路盐水温度进行监测，包括干管去、回路盐水温度、工作面各分组管路的回路盐水温度。
- 8.2.3 在联络通道施工期间冻结加固土体温度以及冻结壁与结构接触面的温度可采用在测温孔内相应位置安装测温传感器的方式进行监测。
- 8.2.4 冷冻站的运转监测应包括下列内容：
- 冷冻机及其辅助设备中的温度、压力、流量、液位、电流、电压等的记录；
 - 盐水、清水循环系统运转情况，包括盐水系统管路压力、清水系统管路压力、盐水箱液位、盐水进水和回水温度、清水进水和回水温度、补充水的流量及水温、水泵运转情况等数据。
- 8.2.5 温度监测的频率。
- a) 在开始冻结前应测量原始地温。地层内所有测点温度应每天监测并记录不少于 2 次；结构施工完成后可停止监测。
 - b) 制冷系统、盐水循环系统和清水循环系统的温度每 2 h~3 h 监测并记录 1 次。

8.3 变形监测

- 8.3.1 在联络通道施工和融沉注浆期间应监测冻结施工影响范围内的隧道管片、地表、地下管线及邻近建（构）筑物的变形；融沉注浆期间还应监测联络通道及泵房结构沉降。
- 8.3.2 联络通道监测应从钻孔开始至融沉注浆后 3~5 个月为止，且满足监测数据稳定的要求。
- 8.3.3 联络通道的施工监测范围，应符合下列要求：

- 隧道管片变形监测范围不小于联络通道两侧隧道管片各 20 m；
- 地面及周围建构筑物 and 管线变形监测范围以联络通道中心为圆心、半径不小于联络通道埋深的 1.5 倍。地面及周围建构筑物 and 管线变形监测范围且不小于联络通道正上方地面投影外侧 20 m。

8.3.4 联络通道施工期间监测点的布置，应符合下列要求：

- 地面监测点在隧道纵向和横向上布设成监测剖面，分别布设深层监测点。在地面布设深层监测点时穿透路面结构硬壳层，埋设进入原状土 60 cm 以上的沉降标杆；
- 隧道内垂直位移监测点在联络通道两侧各 20 m 范围内按先密后疏的原则布置，联络通道两侧 10 环范围内每 2 环布设一个测点，10 环外每 4 环布设一个测点，监测点按环号进行编号；
- 隧道管径收敛监测断面布设在联络通道邻近两侧管片上，然后往两端按 2 环、4 环间距延伸各布设 2 个断面，每条线布设 6 个断面，上下行线共计布设 12 个断面，监测断面按环号进行编号，监测断面布置的部位应与隧道垂直位移监测点同环。

8.3.5 隧道变形及周边环境监测点应在施工开始前连续采集 3 次稳定的数据作为初始值，联络通道施工期间应按信息化监测要求实施同步监测。联络通道施工监测应尽量利用隧道施工监测测点。在施工过程中监测频率宜按表 10 确定，可根据监测数据变化幅度进行适当调整。

表 10 监测频率

监测内容	监 测 频 率			
	钻孔期间	冻结期间	开挖	融沉注浆
地下管线垂直位移监测	1 次/d	1 次/2 d	1 次/d	前 3 个月 1 次/（2 d~5 d）； 第 4、5 个月 1 次/（5 d~10 d）
邻近建（构）筑物垂直位移监测	1 次/d	1 次/2 d	1 次/d	
地表剖面垂直位移监测	1 次/d	1 次/2 d	1 次/d	
隧道垂直位移监测	1 次/d	1 次/2 d	1 次/d	
隧道收敛监测	1 次/2 d	1 次/2 d	1 次/d	

8.3.6 隧道管片监测预警值应根据地质条件、设计参数及当地经验确定，当无具体预警值，可参照表 11 确定。

表 11 隧道管片监测预警值

监测内容	监 测 预 警 值				
	日预警值 mm/d				累计预警值 mm
	钻孔期间	冻结期间	开挖	融沉注浆	
隧道垂直位移监测	±1	±1.5	±2	±2	±10
收敛监测	±2				±10

8.3.7 联络通道施工周边地下管线监测预警值应在调查分析管线功能、材质、工作压力、铺设年代等的基础上，结合工程经验综合确定。当无具体预警值，可参照表 12 确定。

表 12 地下管线监测预警值

监测对象		项目	
		日预警值 mm/d	累计预警值 mm
刚性管线	压力管	±2	±10
	非压力管	±2~±3	
柔性管线		±3~±5	

8.3.8 联络通道施工地表剖面沉降及邻近建（构）筑物的监测预警值应根据主管部门的要求确定，当无具体预警值，可参照表 13 确定。

表 13 地表剖面沉降及邻近建（构）筑物监测预警值

监测内容	监 测 报 警 值				
	日预警值 mm/d				累计预警值 mm
	钻孔期间	冻结期间	开挖	融沉注浆	
地表沉降	±3	±2	±3	±3	- 30~+10
临近建（构）筑物垂直位移	±2	±2	±2	±2	10~30

- 8.3.9 对变形有特殊要求的建（构）筑物垂直位移的累计预警值应根据建（构）筑物对变形的适应能力确定。
- 8.3.10 建（构）筑物的变形控制指标应符合 GB 50007 中关于倾斜、局部倾斜、沉降量和沉降差控制的要求。
- 8.3.11 融沉注浆的结束应以地面沉降变形稳定为依据。当冻结壁已全部融化，且不注浆的情况下实测地表沉降持续一个月每半个月不大于 0.5 mm 时，可停止监测。

8.4 质量验收

8.4.1 一般规定

- 8.4.1.1 工程质量验收合格应具备下列条件：
- 分项工程质量验收合格；
 - 分部工程质量验收合格；
 - 质量控制资料齐全完整。
- 8.4.1.2 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：
- 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；
 - 经审定的专项施工方案、专家论证意见及回复单；
 - 冻结站设备及冻结管布设验收表；
 - 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；
 - 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；
 - 探孔结果验收表；
 - 安全技术及应急交底记录；

- 第三方监测初始值采集表；
- 冻结站接入双回路电源或备用发电机。

8.4.1.3 联络通道防水、结构验收应符合 GB 50204 及 GB/T 50299 相关规定。

8.4.2 冷冻站安装

8.4.2.1 主控项目包括以下内容。

- a) 制冷系统、冷却水系统、载冷系统的设备型号、规格、数量和安装质量应符合冻结设计要求。
 - 1) 检查数量：全数检查。
 - 2) 检验方法：检查产品说明书、出厂合格证、安装质量验收报告。
- b) 冻结壁形成并进入冻结维护期载冷干管和每个冻结器的载冷温度应不大于设计值 2℃。
 - 1) 检查数量：每个冻结器每日检查 1 次。
 - 2) 检验方法：温度计测量。
- c) 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。
 - 1) 检查数量：全数检查。
 - 2) 检验方法：对照设计检查冷却水系统的安装施工记录。
- d) 制冷系统的低温设备、管路和地面载冷管路的保温质量应符合冻结施工方案的要求。
 - 1) 检查数量：全数检查。
 - 2) 检验方法：对照设计检查冻结站内、外低温设备、管路的安装施工记录。

8.4.3 冻结孔施工

8.4.3.1 主控项目包括以下内容。

- a) 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。
 - 1) 检查数量：逐批检查。
 - 2) 检验方法：检查出厂合格证和有关试验检验报告。
- b) 冻结管的直径和壁厚应满足冻结设计要求。
 - 1) 检查数量：逐孔检查。
 - 2) 检验方法：检查下管记录和现场抽查。
- c) 冻结管的压力试漏应符合冻结设计要求。
 - 1) 检查数量：逐孔检查。
 - 2) 检验方法：检查试压记录、自检报告或现场抽查复试。
- d) 检查取芯钻孔的岩芯，验证冻结段的范围和冻结深度。
 - 1) 检查数量：逐孔检查。
 - 2) 检验方法：取芯孔的岩芯和该孔的施工报告和地质报告。
- e) 冻结钻孔的偏斜、最大孔间距应符合 5.3.2.1 和 5.3.2.2 的规定及设计要求，测温孔应符合 5.3.4 的规定及设计要求。
 - 1) 检查数量：逐孔检查。
 - 2) 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%。
- f) 冻结管、供液管的下管深度应不小于设计深度。
 - 1) 检查数量：逐孔检查。
 - 2) 检验方法：检查冻结管、供液管的下管记录或现场抽查复测。

8.4.3.2 一般项目包括以下内容。

- a) 钻机、钻具和泥浆的循环系统应符合设计要求。
 - 1) 检查数量：抽查比例不小于 30%。
 - 2) 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。
- b) 钻孔泥浆性能应符合冻结施工组织设计要求。
 - 1) 检查数量：逐孔检查。
 - 2) 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。

8.4.4 冻结器安装

8.4.4.1 主控项目包括以下内容。

- a) 冻结器的安装材料的品种、规格、质量应符合 GB/T 8163 以及设计要求。
 - 1) 检查数量：每个检验批不少于 3 组。
 - 2) 检验方法：检查材料出厂合格证，现场抽查送试验室检验。
- b) 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。
 - 1) 检查数量：每个检验批不少于 3 组；底锥逐根试验。
 - 2) 检验方法：现场水压试验。
- c) 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。
 - 1) 检查数量：全数检查。
 - 2) 检验方法：查阅施工记录。
- d) 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。
 - 1) 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%。
 - 2) 检验方法：现场查看，检查阀门合格证，查阅施工记录。
- e) 水文观测孔安装应符合工艺及设计要求。
 - 1) 检查数量：全数检查。
 - 2) 检验方法：现场查看，查阅施工记录。
- f) 测温孔的安装深度、防水部件质量和测温系统调试验收应符合设计要求。
 - 1) 检查数量：全数检查。
 - 2) 检验方法：现场查看，查阅施工记录。

8.4.4.2 一般项目包括以下内容：冻结器安装完成后，应进行载冷供、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 15 min 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。

8.4.5 开挖与初期支护施工

8.4.5.1 主控项目包括以下内容。

- a) 隧道支撑和防护门安设应符合 7.1.1 和 7.1.2 的要求。
 - 1) 检查数量：全数检查。
 - 2) 检验方法：现场查看，查阅施工方案。
- b) 土方开挖质量控制要求应符合 7.2.6 的规定。
 - 1) 检查数量：逐项检查。
 - 2) 检验方法：现场查看测量记录。
- c) 初期支护质量控制要求应符合 7.3.3 的规定。

- 1) 检查数量：逐项检查。
- 2) 检验方法：现场查看测量记录。

8.4.5.2 一般项目包括以下内容。

- a) 冻结壁暴露时间应控制在 24 h 之内。
 - 1) 检查数量：每循环一个检查点，并做好工序验收记录，中间验收时按每 3 m 一个检查点抽查，但应不少于 3 个检查点。
 - 2) 检验方法：抽查工序验收记录。
- b) 冻结壁暴露面最大变形应不大于 30 mm。
 - 1) 检查数量：每循环一个检查点，并做好工序验收记录，中间验收时按每 3 m 一个检查点抽查，但应不少于 3 个检查点。
 - 2) 检验方法：挂线尺量检查。

8.4.6 防水施工

主控项目包括以下内容。

- a) 防水材料、防水层的材质、规格、型号应符合设计文件要求。
 - 1) 检查数量：全数检查。
 - 2) 检验方法：检查防水材料质量证明。
- b) 防水层短边和长边的搭接宽度均不应小于 100 mm。
 - 1) 检查数量：全数检查。
 - 2) 检验方法：观察和尺量检查。
- c) 防水层施工符合设计文件要求。
 - 1) 检查数量：全数检查。
 - 2) 检验方法：现场查看，检查防水层完整性、表面无破损情况。

8.4.7 结构施工

8.4.7.1 主控项目包括以下内容。

- a) 模板的材质、结构、强度、规格、刚度应符合设计、施工方案及有关规范的规定。
 - 1) 检查数量：按批检查。
 - 2) 检验方法：对照设计、规范的规定进行检查。由施工单位自行设计、加工的非定型模板，应在出厂前进行整体组装、调试、检测，由监理单位组织检查验收。
- b) 钢筋和钢筋加工件的品种、规格、质量、性能应符合设计要求和规范的有关规定。
 - 1) 检查数量：按批检查。
 - 2) 检验方法：检查产品合格证、出厂检验报告和进场复检报告。
- c) 采用组合模板，组装规格尺寸应符合设计要求，其允许偏差为：净宽 $+10\text{ mm}\sim+30\text{ mm}$ ；净高 $+10\text{ mm}\sim+30\text{ mm}$ 。
 - 1) 检查数量：每 3 m 为一个检查点。
 - 2) 检验方法：尺量检查。
- d) 立模前，应进行钢筋隐蔽工程验收，其内容包括：
 - 1) 纵向、横向钢筋的品种、规格、数量、位置；
 - 2) 钢筋的连接方式、接头位置、接头数量、接头面积百分率；
 - 3) 箍筋的品种、规格、数量、间距；
 - 4) 预埋件的规格、数量、位置；
 - 5) 检验方法：检查钢筋隐蔽验收记录。

- e) 混凝土强度及抗渗等级应符合设计要求。
 - 1) 检查数量：按每批次连续浇筑现场取样一组试块，总体不少于 3 组试块。
 - 2) 检验方法：检查混凝土试验报告及混凝土抗渗试验报告。
 - f) 钢筋混凝土工程的规格应符合设计要求，净宽、净高的允许偏差为 ± 50 mm。
 - 1) 检查数量：每 3 m 为一个检查点。
 - 2) 检验方法：挂线尺量检查。
 - g) 混凝土壁厚应符合设计要求：其允许偏差为 0 mm $\sim$ +30 mm。
 - 1) 检查数量：每 3 m 一个检查点，但不少于 3 个检查点。
 - 2) 检验方法：抽查模板分项工程验收记录。
 - h) 混凝土支护的表面无明显裂缝，1 m² 范围内蜂窝、孔洞等不超过 2 处。
 - 1) 检查数量：每 3 m 一个检查点，不少于 3 个检查点。
 - 2) 检验方法：现场实查。
 - i) 联络通道建成后表面可有少量偶见湿渍但不应滴水。
 - 1) 检查数量：全数检查。
 - 2) 检验方法：现场观察。
- 8.4.7.2 一般项目：施工缝的位置应在混凝土浇筑前按设计要求和施工技术方案确定。施工缝的处理应按施工技术方案执行。
- 检查数量：全数检查。
 - 检验方法：观察，检查施工记录。
- 8.4.8 封孔、融沉注浆施工
- 8.4.8.1 主控项目包括以下内容。
- a) 隧道管片上割除孔口管或冻结管深度应进入混凝土管片不小于 60 mm。
 - 1) 检查数量：全数检查，分项验收时抽查总数不少于 20%。
 - 2) 检验方法：现场尺量检查。
 - b) 冻结孔充填的长度不小于 1.5 m。
 - 1) 检查数量：全数检查，分项验收时抽查总数不少于 20%。
 - 2) 检验方法：检查施工记录。
 - c) 注浆浆液质量符合设计要求，检验方法为检查原材料合格证或质保单和浆液性能试验记录。
 - d) 注浆压力不应大于 0.5 MPa 或设计的允许值，检验方法为检查注浆记录。
 - e) 冻结壁已全部融化，且实测地层沉降持续一个月每半个月不大于 0.5 mm，可停止融沉补偿注浆，检验方法为检查测量记录。
- 8.4.8.2 一般项目中，冻结管充填和封孔质量应符合设计要求，检查要求如下。
- 检查数量：全数检查。
 - 检验方法：现场查看，检查施工记录。

参 考 文 献

- [1] GB 50157—2013 地铁设计规范
 - [2] GB/T 15663.2—2023 煤矿科技术语 第2部分：井巷工程
 - [3] MT/T 593—2011 人工冻土物理力学性能试验
 - [4] MT/T 1124—2011 煤矿冻结法开凿立井工程技术规范
-