

地铁盾构隧道冰冻法进洞施工工法

主编单位：宏润建设集团股份有限公司

1 前言

为改善城市交通环境，轨道交通建设已成为众多大中城市在“十一五”期间的重要任务之一；地铁盾构施工风险的控制也成为城市建设安全控制的重点，其中盾构进洞施工是风险控制的关键节点。

宏润建设集团股份有限公司在上海、杭州、苏州、武汉等地区均参与了地铁工程建设，积累了丰富的盾构隧道施工经验，并参与编制上海市《地铁隧道工程盾构施工技术规范》。针对在南京、上海、杭州等全国大部分地区，盾构进洞常处于富含微承压水的砂性土层中施工，若采用常规深层搅拌桩、高压旋喷桩等工艺进行洞口地基加固，易发生流砂现象，甚至对已成隧道造成破坏，施工风险高等特点，我公司多次组织专家论证进洞方案，经过实践证明，采用地铁盾构隧道冰冻法进洞施工工艺，能安全、优质、高效的确保盾构进洞，并具有一定的经济效益与社会效益。本工法经上海科学技术情报研究所提供的科技查新报告说明，在国内具有创新性与先进性。本工法应用工程实例如下：

1.0.1 2008年4月～7月，上海市轨道交通10号线外环路站～虹井路区间施工，上下行线均在虹井路端头井采用盐水冰冻加固，盾构顺利进洞。

1.0.2 2008年6月～8月，上海市轨道交通10号线吴中路停车场～虹井路站区间施工，出段线在虹井路端头井采用盐水冰冻加固，盾构顺利进洞。

1.0.3 2008年6月～9月，上海市轨道交通9号线大木桥路站～打浦桥站区间施工，上下行线均在打浦路站端头井采用盐水冰冻加固，盾构顺利进洞。

见图1.0.3-1 盾构冰冻法进洞照片。



图1.0.3-1 盾构冰冻法进洞照片

2 工法特点

2.0.1 本工法适用范围广，适用于所有含水地层的地铁盾构进洞施工。

2.0.2 盾构进洞采用冰冻法地基加固与其它地层加固方法相比较，具有冻结加固体强度高、均匀性和封水性好，且与周围原有地下结构之间粘接紧密、冻结加固质量容易检测等优点，能有效控制盾构进洞施工风险，确保工程实施安全。

2.0.3 盾构进洞采用冰冻法地基加固施工方法灵活，场地要求小，加固形式多样；冻结加固体形状、深度、厚度、强度，可根据需要灵活设计和施工，不需要时加固体可迅速解冻，恢复地层原来特性。

2.0.4 盾构进洞采用冰冻法地基加固与其它地层加固方法相比较，施工时无污染排放物，机械设备噪声低、振动小，无扬尘，大大减小对环境的污染，有利于文明施工。

2.0.5 盾构冰冻法进洞施工安全可靠，可有效降低工程实施风险，从全局上节约工程造价，加快工程进度，确保在工期内顺利完成。

3 适用范围

本工法适用于所有含水地层的地铁盾构进洞施工，特别是在富含地下水的砂性土层中具有施工风险低、安全性好的优点；同时在施工场地窄小区域，无法进行深层搅拌桩施工，宜采用冰冻法进洞施工工艺。

4 工艺原理

地铁盾构隧道冰冻法进洞是利用人工制冷技术临时改变土层特性使之变成具有一定强度与隔水作用的冻土，在冻土帷幕的保护下进行盾构进洞施工的工艺。

人工制冷技术是利用氟里昂作制冷剂，通过氟里昂循环系统、盐水（ CaCl_2 溶液）循环系统和冷却水循环系统等三大循环系统完成地基冰冻加固。地基冰冻加固基本原理：地热通过冻结孔由低温盐水传给氟里昂循环系统，再由氟里昂循环系统传给冷却水循环系统，最后由冷却水循环系统排入大气。随着低温盐水在地层中的不断流动，周围含水地层与盐水发生热交换，形成以冻结管为中心的冻土圆柱，冻土圆柱不断扩展，最后相邻的冻结圆柱连为一体并形成具有一定厚度和强度的冻土墙或冻土帷幕。

通过测温孔温度验算，冻土墙应达到设计厚度和强度，然后凿除洞门。盾构抵达冻土墙，严格控制与切口平衡压力有关的施工参数，如出土量、推进速度、总推力、实际土压力围绕设定土压力波动的差值等。在盾构进入冻土墙加固区后，土压和总推力适当减小，推进速度放慢，进入加固区后推进速度控制在 1cm/min ，尽量做到均衡施工，顺利进洞。推进过程中必须保持刀盘持续旋转，油路被冻结，使液压系统无法工作，导致盾构无法正常推进。

5 施工工艺流程及操作要点

5.1 工艺流程

见图 5.1-1 冰冻法进洞施工工艺流程图

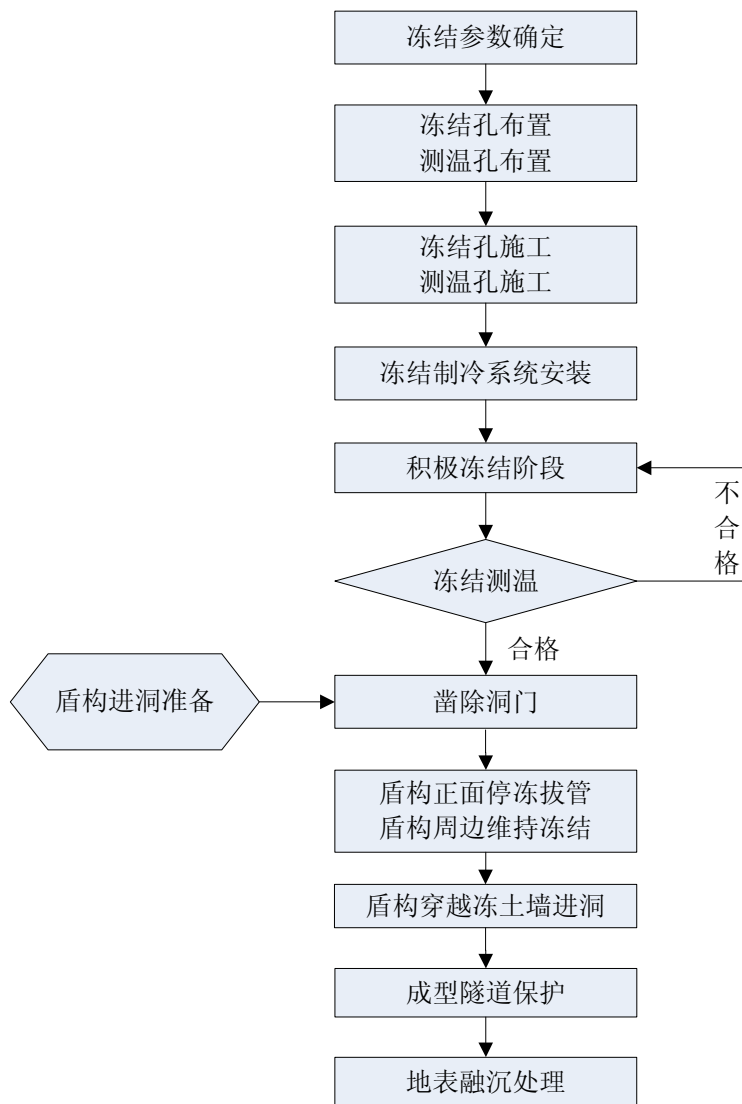


图 5.1-1 冰冻法进洞施工工艺流程图

5.2 操作要点

5.2.1 冻结参数确定

冻结参数主要指冻土墙强度、厚度、深度与宽度。一般情况下，地铁盾构冻土墙抗剪强度均取 1.6MPa、抗弯强度取 2.0MPa，深度范围为超出洞圈上下各 2m，宽度为超出洞圈两侧各 1.5m，冻土墙厚度由计算决定。

盾构进洞洞口冻土墙厚度设计参照日本和我国建筑结构静力计算公式，并考虑类似工程的施工经验。冻土墙受力计算按周边固定圆板考虑（见图 5.2.1-1 冻土墙厚度计算简图），

冻土的相关参数取值，原则上应考虑较大的安全储备。冻土墙平均温度取 -10°C ，抗剪强度均取 1.6MPa 、抗弯强度取 2.0MPa ，抗弯和抗剪安全系数均取 2.0 。

1 荷载计算

冻土墙外侧受土层侧压力作用。

$$P = k_0 \gamma h + q_n$$

式中：P——侧压力（包括地下水）、

γ ——土体的平均重度

h——隧道埋深

k_0 ——土的侧向静止平衡压力系数，取 0.7

q_n ——超载（ 20kPa ）

2 冻土墙厚度（取下述三个计算结果的最大值）

1) 按日本关于加固体厚度 h 的计算公式为

$$h = \left[\frac{kBP D^2}{4\sigma} \right]^{1/2}$$

式中： σ ——冻土抗弯强度（ 2.0MPa ）

P——荷载（ MPa ）

D——开挖直径（ 6.7m ）

B——系数（ 1.2 ）

K——安全系数（ 2.0 ）

2) 按我国建筑结构静力计算公式

$$h = \left[\frac{3(3+\mu)kPD^2}{32\sigma} \right]^{1/2}$$

式中：P——荷载（ MPa ）

D——开挖直径（ 6.7m ）

μ ——泊松比（ 0.3 ）

σ ——冻土抗弯强度（ 2.0MPa ）

h——冻土墙厚度（ m ）

3) 按工作井开洞口周边冻土墙承受的剪力最大计算公式

$$h = \frac{kPD}{4\tau}$$

式中：P——荷载（ MPa ）

D——开挖直径（ 6.7m ）

K——安全系数（ 2.0 ）

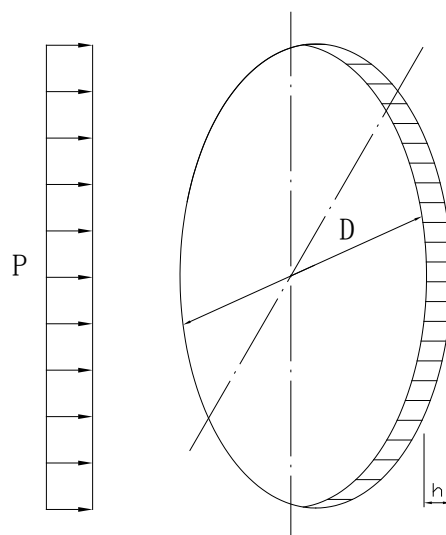


图 5.2.1-1 冻土墙厚度计算简图

τ ——冻土抗剪强度 (1.6MPa)

h ——冻土墙厚度(m)

5.2.2 冻结孔、测温孔布置

冻结孔布置根据计算的冻土墙厚度决定, 采用串并联方式布置, 每 2~3 个孔串联成 1 组; 冻结管常规采用 $\Phi 108 \times 5\text{mm}$ 低碳钢无缝钢管, 单孔盐水流量一般不小于 $6\text{m}^3/\text{h}$ 。由于地下连续墙混凝土的导热性好, 冻土墙与地下连续墙之间不易冻结, 所以要求冻结管布置尽量靠近地下连续墙, 一般距地下墙 300~400mm, 开孔间距 800mm; 在地面打钻空间受地下连续墙导墙限制情况下, 靠近地下连续墙的冻结孔可以适当向地下连续墙倾斜钻进。

在盾构进洞阶段, 盾构正面冻结管需拔除, 为防止盾构进洞时水、砂涌入, 在盾构进洞口底部增设 8 个水平加强冻结孔维持冻结, 冻结孔深度均在垂直冻结孔中部。水平冻结孔预先与冻结器连接好, 在垂直冻结管第一次拔管后即开始水平冻结管内盐水循环, 以加强底部冻结区, 确保盾构进洞的安全。为减少开孔时对结构的破坏和开孔时间, 建议在施工工作井结构时在水平冻结孔位置上预留空洞, 空洞直径为 130mm。

一般情况下, 在每个进洞口地面布置 4 个测温孔, 深度比冻结深度小 0.5m; 在每个洞口地下墙上布置 2 个测温孔, 深度以孔底距离土层 100mm 为准。

冻结孔、测温孔布置情况见图 (图 5.2.2-1 冰冻法进洞冻结孔平面布置图、图 5.2.2-2 冰冻法进洞冻结孔正面布置图、图 5.2.2-3 冰冻法进洞冻结孔侧面布置图)。

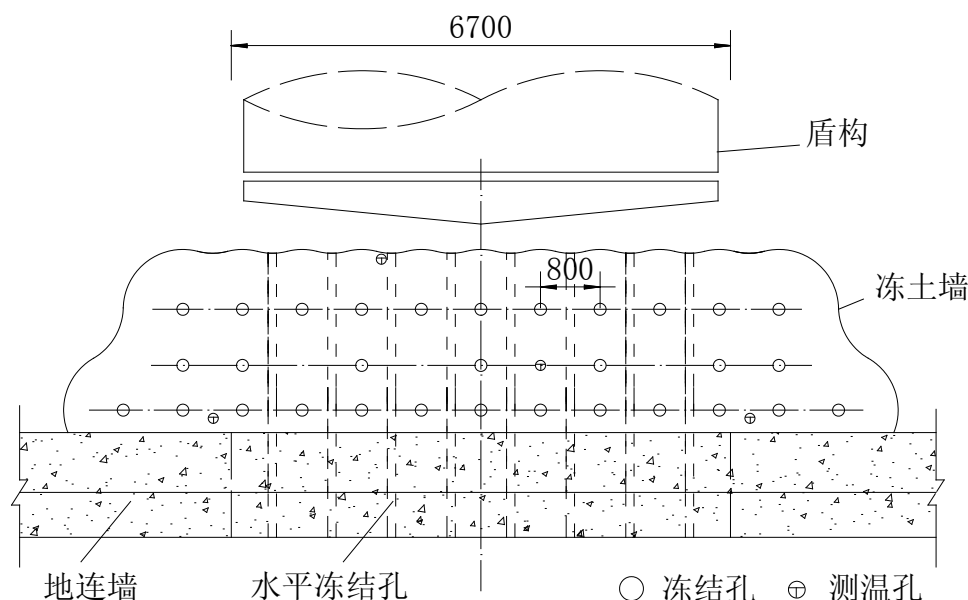
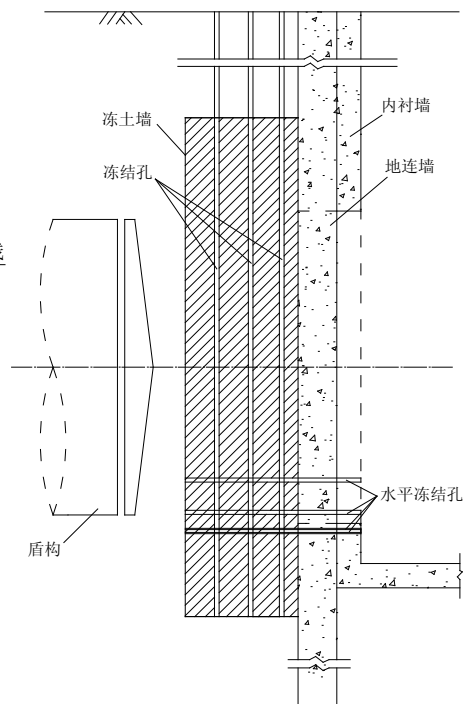
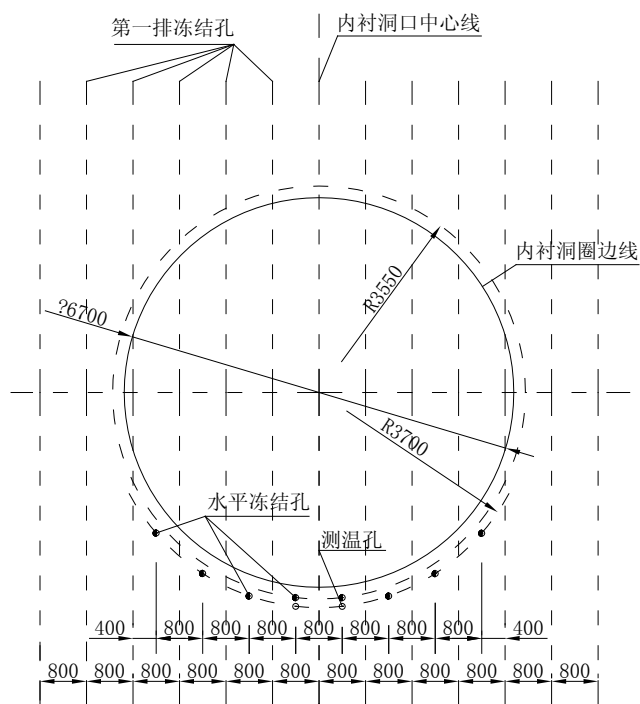


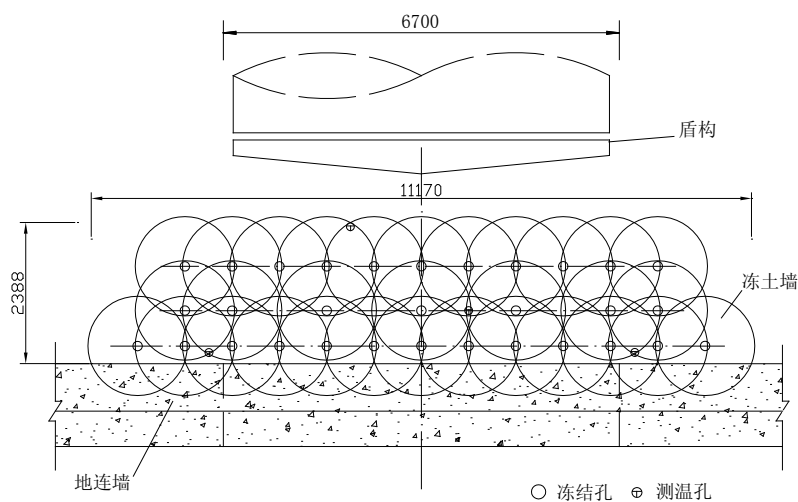
图 5.2.2-1 冰冻法进洞冻结孔平面布置图



冻土墙形成按表 5.2.2-1 所列单排冻结孔冻土圆柱扩展速度经验值预计。如为密集布孔，内部冻结孔之间的冻结壁扩展速度可比表 5.2.2-1 给出的设计参考值增加 10%~30%。据此可以绘制冻土墙形成胶结圈图（见图 5.2.2-4），计算出冻土墙交圈时间与不同冻结时间的冻土墙厚度。

表 5.2.2-1 单排冻结孔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



5.2.3 冻结孔、测温孔施工

垂直冻结管和地面测温管常采用规格为 $\Phi 108 \times 5\text{mm}$ 或 $\Phi 127 \times 5\text{mm}$ 低碳钢无缝钢管；水平冻结管规格为 $\Phi 89 \times 8\text{mm}$ 或 $\Phi 108 \times 8\text{mm}$ 低碳钢无缝钢管；水平测温管和供液管规格为 $\Phi 48 \times 3\text{mm}$ 焊接钢管。

1 打钻设备选型

冻结孔钻进可选用 XY-4 型钻机 2 台，电机功率为 22 kw。土层用 $\Phi 190\text{mm}$ 的三翼刮刀钻头或牙轮钻头钻进，硬化地面和导墙钢筋混凝土翻边用 $\Phi 200\text{mm}$ 金刚石取芯钻头钻进。钻孔用经纬仪灯光测斜。泥浆泵选用 BW-200/50 泥浆泵 1 台，流量为 200L/min，每台电机功率为 14.5kw。

2 冻结孔钻进与冻结管下放

1) 按冻结孔设计位置固定钻机，用 $\Phi 200\text{mm}$ 取芯钻开孔，正常钻进时根据地层软硬情况采用三翼钻头或牙轮钻头。

2) 为了保证钻孔精度，开孔段钻进是关键。钻进前 5m 钻孔时，要反复校核钻杆垂直度和水平度，调整钻机位置，并采用减压钻进。

3) 冻结管下入钻孔内前要先配管，保证冻结管同心轴线重合，焊接时，焊缝要饱满，保证冻结管有足够强度，以免拔管时冻结管断裂。

4) 冻结管安装完毕后，用木塞等封堵管口，以免异物掉进冻结管。

5) 在冻结管内下入供液管，供液管底端连接 0.3m 高的支架。然后安装去、回路羊角和冻结管端盖。

6) 在局部冻结位置，非冻结段的冻结管外套 $\Phi 108 \times 20\text{mm}$ 的软质保温筒保温，外面再用塑料薄膜包裹扎紧。

3 测斜和试漏

1) 下好冻结管后，采用灯光测斜法测斜，并复测冻结孔深度。

2) 完成测斜后进行打压试漏。冻结管试漏压力控制在 1.0~1.2MPa 之间，稳定 30 分钟不降者为试漏合格。

4 供液管与冻结器头部安装

1) 冻结管测斜与试漏合格后，在冻结管内下入供液管，供液管规格为 $\Phi 48 \times 3\text{mm}$ 焊接钢管。供液管采用管箍或直接对焊连接。

2) 在供液管底端焊接 $\Phi 12 \sim 18\text{mm}$ 钢筋棒，使供液管管口与孔底间隔 0.2~0.3m 距离。

3) 安装去、回路羊角管和冻结管端盖。羊角管连接应避免急弯以减小盐水流动阻力。

5 水平冻结孔施工

根据预留孔位，用开孔器（配金刚石取芯钻）按设计位置开孔，开孔直径 125mm，当开到 1500mm 时停止 125mm 孔的取芯钻进，安装孔口管，孔口管的安装方法为：首先将孔口处凿平，安装四个膨胀螺丝，而后在孔口管的鱼鳞扣上缠好麻丝或棉丝等密封物，将孔口管砸

进去，用膨胀螺丝上紧，上紧后，再去掉螺母，装上 DN125 闸阀，再将闸阀打开，用开孔器从闸阀内开孔，开孔直径为 91mm，一直将混凝土墙开穿，这时，如地层内的水砂流量大，就及时关好闸门。（见图 5.2.3-1 孔口密封装置示意图）。

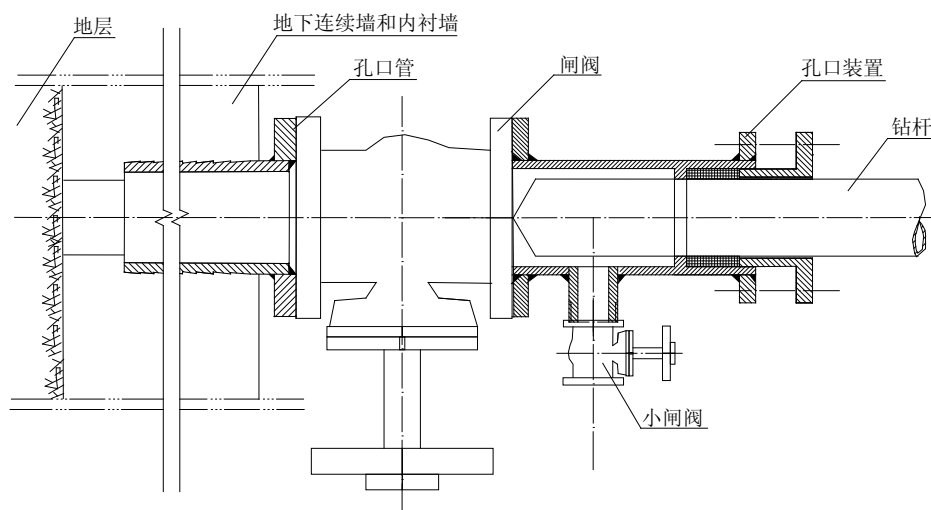


图 5.2.3-1 孔口密封装置示意图

5.2.4 冻结制冷系统安装

1 冻结制冷设备选型与管路设计

1) 根据冻结需冷量计算和快速冻结的要求，决定冷冻机的型号和套数，可选用 W—YSLGF300 II 型、YSKF212.5 型等。

2) 选用 IS150-125-315 盐水循环泵一台，流量 200m³/h，扬程 32m，电机功率 30kw。

3) 选用 IS125-100-250 冷却水循环泵 1 台，流量 100 m³/h，扬程 20m，电机功率 11kw；

4) 选用 DBNL3-50 型冷却塔 4 台，每台电机总功率 1.5kw。

5) 设盐水箱一个，容积 3.4m³。

6) 盐水干管和集配液管均选用 $\Phi 159 \times 5$ mm 钢管，集、配液管与羊角连接选用 1.5" 高压胶管。

7) 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。盐水箱安装液面传感器。

8) 在配液圈与冻结器之间安装阀门，以便控制冻结器盐水流量。

9) 冻结器连接采用串并联方式，每组串联 2~3 个冻结孔。

10) 冻结站冷却水新鲜用量为 10m³/h。

11) 选用 N46 冷冻机油，R22 制冷剂。

12) 氯化钙溶液（盐水）比重为 1.260~1.265。

2 冻结站布置与设备安装

站内设备主要包括配电柜、冷冻机组、盐水箱、盐水泵、清水泵、冷却塔及清水池等（见图 5.2.4-1 冻结站布置示意图）。设备安装按设备使用说明书的要求进行。

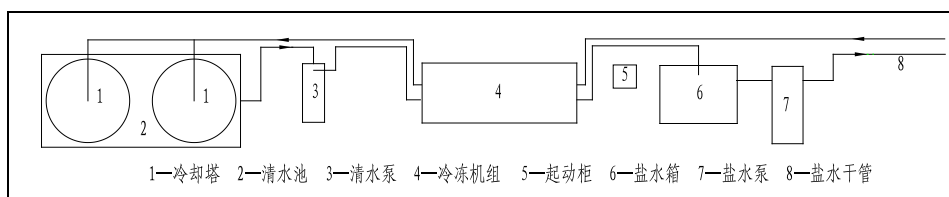


图 5.2.4-1 冻结站布置示意图

3 管路连接、保温与测试仪表安装

盐水和冷却水管路铺在地面管架上，法兰连接。温度计、压力表和流量计安装要按有关规范进行。盐水管路经试漏、清洗后用聚苯乙烯泡沫塑料保温，保温层厚度为 50mm，保温层的外面用塑料薄膜包扎。集配液圈与冻结管的连接用耐高压胶管。

冷冻机组的蒸发器及低温管路用软质泡沫塑料保温材料保温，盐水箱和盐水干管用 50mm 厚的聚苯乙烯泡沫塑料保温。

4 溶解氯化钙和机组充氟加油

先在盐水箱内注入约 1/4 的清水，然后开泵循环并逐步加入固体氯化钙，直至盐水浓度达到设计要求。溶解氯化钙时要除去杂质。盐水箱内盐水不能太满，以免高于盐水箱口的冻结管盐水回流时溢出盐水箱。

机组充氟和冷冻机加油按照设备使用说明书的要求进行。首先进行制冷系统的检漏和氮气冲洗，在确保系统无渗漏后，再充氟加油。

5 设备安装完毕后进行调试和试运转。

在试运转时，要随时调节压力、温度等各状态参数，使机组在有关工艺规程和设计要求的技术参数条件下运行。冻结系统运转正常后进入积极冻结。

5.2.5 积极冻结阶段

设计积极冻结期最低盐水温度为 $-28\sim-30^{\circ}\text{C}$ ，并要求冻结 7d 达到 -20°C 以下，打开洞门时盐水温度达到最低值，一般积极冻结期为 30 天；在冻结过程中，定时检测盐水温度、盐水流量和冻土墙扩展情况，必要时调整冻结系统运行参数。（见图 5.2.5-1 积极冻结施工照）

1 积极冻结完成的标志是：

- 1) 冻结孔完成相互搭接；
- 2) 冻土墙完全成型，且实测冻土墙厚度达到设计要求；
- 3) 是否达到设计要求，通过测温孔温度验算判断。



图 5.2.5-1 积极冻结施工照

2 在积极冻结阶段，盾构施工应根据冻结施工情况调整施工要求如下：

- 1) 盾构推进必须根据洞门冻结进度控制推进速度。
- 2) 及时根据测量结果进行姿态调整，确保盾构以最佳姿态进入冻结区。

3) 在靠近冻土墙前解除盾构联锁, 确保刀盘 24 小时连续转动, 以防冻住。解除联锁工作由盾构安装调试单位负责完成, 并现场指导盾构司机熟练掌握解锁后的盾构操作要领。

4) 盾构逼近冻土墙时, 班长及盾构司机应密切注意刀盘马达的油压显示, 如有升压趋势, 即可认为切口已至冻土墙边缘, 此时应立即降低推进速度, 同时适度调低密封舱压力。

5) 提高盾构机的检查和保养频率, 确保进洞阶段盾构机的正常运转。

6) 在进洞前 10~20 环位置, 在管片脱出盾尾后, 间隔 1~2 环, 连打三道环箍, 防止进洞时水土流失。

5.2.6 冻结测温

完成积极冻结后, 通过实测测温孔温度, 计算验证冻土墙平均温度和厚度是否达到设计值, 并检查冻土墙与地下连续墙界面温度应不高于 -5°C 。

为进一步确保进洞安全, 在洞门上有分布的打若干探孔 (见图 5.2.6-1 探孔布置图), 以判断冻土与槽壁的胶结情况。各探孔按照布点位置采用风镐进行凿窝, 窝直径 400mm, 窝深在 200~400mm, 凿窝打好后, 用电锤打探孔穿透剩下槽壁进入冻土内, 探孔进入冻土内深度控制在 10~15cm, 采用高精度的温度计或测温仪进行量测, 各探孔实测温度必须低于 -5°C 。当通过探孔实测温度判断冻土墙与槽壁完全可靠胶结方可全部破壁。

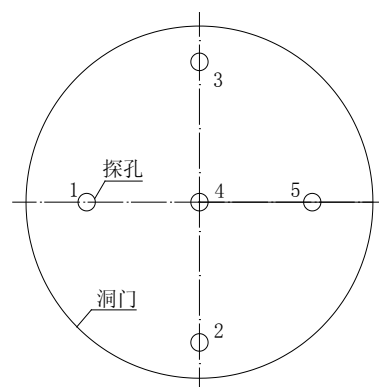


图 5.2.6-1 探孔布置图

5.2.7 盾构进洞准备

为确保盾构顺利进洞, 在进洞前应做好各项准备及预防工作, 如洞圈注浆球阀布设和止水装置安装、洞门凿除脚手架搭设、盾构进洞前姿态复核测量、安装洞门插板做好二次进洞准备及阻止泥沙的挡土板安装等。

1 盾构进洞前姿态复核测量

在盾构进洞前 40 米, 应精确做好轴线贯通测量工作, 以后根据盾构推进的轴线偏差情况, 每推 10~15m, 复核一次。最后 10 环的推进, 盾构轴线与设计轴线的偏差, 应尽可能控制在 30mm 内, 使盾构以最佳姿态进洞。

2 盾构基座安放与脚手架搭设

在盾构基座定位加固完成后, 在洞圈上搭设稳固的脚手架, 便于洞门凿除施工。见图 5.2.7-1 基座安装图。



图 5.2.7-1 基座安装图

3 洞圈注浆球阀布设和止水装置安装 (含插板)

为了防止盾构进洞时漏泥浆，及时压注液浆，在洞圈周围布设 5~8 个注浆球阀。洞圈止水装置安装结束后，当洞圈特殊环管片脱出盾尾后，立即用弧形钢板与其焊接成一个整体，完成洞门封堵。

为了防止盾构进洞时漏泥浆，及时在渗漏点压注液浆，在洞门圈上焊接螺杆，安装预先加工好的插板(见图 5.2.7-1 洞门插板图)，在插板上预留 5 只 1.5 寸注浆球阀。当盾构支撑环脱出后即封闭插板进行注浆，实现二次进洞（或是二次以上进洞）。

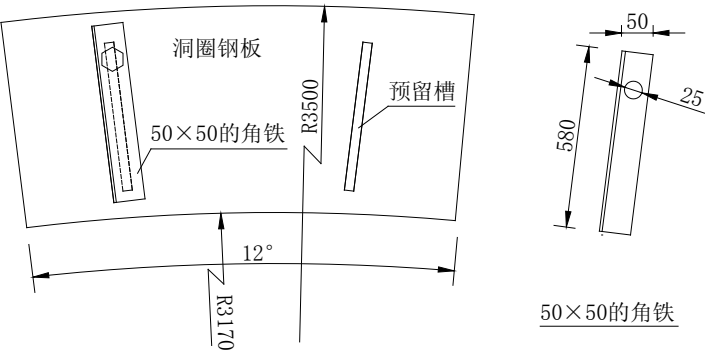


图 5.2.7-1 洞门插板图

4 洞门圈上安装两道挡土板

在洞门钢圈的内侧预先设置“泥沙阻止装置”，方法是在洞圈内焊接二道弹性钢板，在二道弹性钢板上割缝，钢板之间放入成环海绵。在洞门圈的外侧安装一道增强型挡土板（见图 5.2.7-2 洞门泥沙阻止装置图、照片 5.2.7-3 泥沙阻止装置弹性钢板上割缝）。

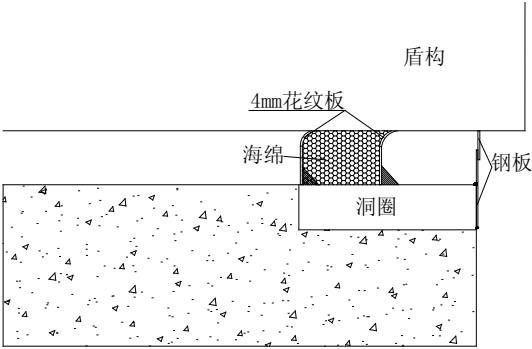


图 5.2.7-2 洞门泥沙阻止装置图



照片 5.2.7-3 泥沙阻止装置弹性钢板上割缝

5.2.8 凿除洞门

在冻结孔、探孔测温判断冻土墙强度、厚度及与槽壁胶结情况符合要求后，方可破壁凿除洞门。凿除洞门宜采用全断面粉碎与分块相结合的方式开凿，一般分三层逐层进行，其中第一层宜 20cm，最后一层宜 20cm。凿除洞门施工必须准备充裕的施工力量，以最快的速度破除洞门混凝土。分层凿除过程中，若发现地连墙出现渗水点，要及时进行封堵，以防水土流失，影响冻土墙交圈；如未发现异常情况，可直接进入下一层破壁。

在洞门破壁过程中,应密切注意破地连墙时是否破坏冻结管,如一旦发现冻结管漏盐水,及时关闭该冻结器,并用焊接补好漏点。

5.2.9 盾构正面停冻拔管、盾构周边维持冻结

在盾构抵达冻土墙、凿除洞门完全凿除后,可停止与盾构机进洞冲突的正面冻结孔冻结,盾构机周边及水平冻结孔维持冻结,确保冻土墙参数满足进洞要求。正面已停止的冻结管应拔至盾构机顶面以上再维持冻结,拔管方法与步骤为:

1 用一只 1m^3 左右的盐水箱储存盐水,在盐水箱中安装总功率为 $100\sim 150\text{kW}$ 电热管加热盐水。

2 以每 2~3 组冻结孔为一批,利用流量为 $50\text{m}^3/\text{h}$ 以上盐水泵循环盐水,先用 $40\sim 50^\circ\text{C}$ 的盐水循环 10 分钟左右,待冻结管周围冻土融化 $3\sim 5\text{cm}$ 时,即可进行边循环边试拔。

3 冻结管拔起 0.5m 左右,便可停止循环热盐水,用压风将管内盐水排出,然后快速起拔冻结管。拔管时应注意冻结管与挂钩要成一线,冻结管不能整劲,拔管时要常转动冻结管;冻结管不能硬拔,如拔不动时,要继续循环热盐水解冻,直至拔起冻结管。热盐水循环及吹盐水系统(见图 5.2.9-1 热盐水循环及吹盐水系统图)。

4 用起重机或卷扬机将已松动的冻结管拔离盾构上部外壳 0.3m ,然后再进行二次冻结。待所有冻结管全部拔到位后,即可恢复冻结,确保冻结加固体的可靠性。

5 若全部拔管后,应用低标号水泥砂浆封孔。

5.2.10 盾构穿越冻土墙进洞

1 准备工作

1) 充分做好前期准备工作,确保连续施工。

2) 解除盾构连锁,确保刀盘连续转动。

3) 在洞门混凝土清理干净,且冻结孔已拔管并灌入盐水后,盾构立即尽快推进并拼装管片,尽量缩短进洞时间。

4) 按一次进洞计划,作二次进洞准备,现场准备充分的二次、三次进洞设备、物资和人力。

5) 进洞施工期间,安排技术、施工和安全人员进行全程监督,杜绝安全事故隐患,安排专人对洞口上的密封装置做跟踪观察,确保防水密封装置安全、牢靠。

2 进洞段施工技术措施

1) 严格控制盾构正面平衡压力

在进洞段盾构施工过程中,必须严格控制切口平衡土压力,使得盾构切口处的地层有微

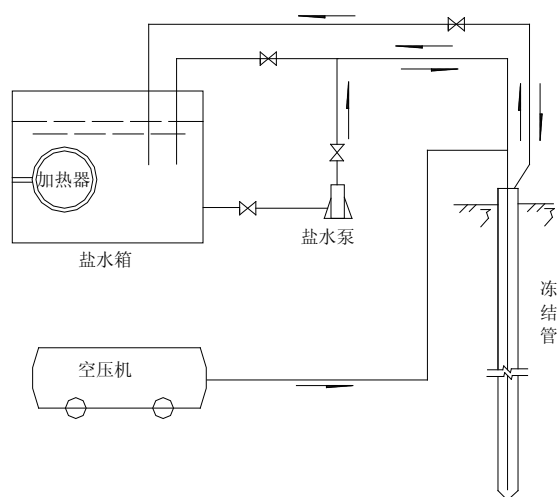


图 5.2.9-1 热盐水循环及吹盐水系统图

小的隆起量来平衡盾构背土时的地层沉降量。同时也必须严格控制与切口平衡压力有关的施工参数，如出土量、推进速度、总推力、实际土压力围绕设定土压力波动的差值等。防止超挖、欠挖尽量减少平衡压力的波动。在盾构进入加固区以后，土压和总推力适当减小，保证洞门的安全。（见图 5.2.10-1 盾构进洞段施工控制照片）

2) 严格控制盾构推进速度

盾构进洞段施工时，推进速度应放慢，尽量做到均衡施工，减少对周围土体的扰动，避免在途中有较长时间耽搁。如果推得过快则刀盘开口断面对地层的挤压作用相对明显，在加固区前的推进速度在 2~3cm/min，进入加固区以后推进速度控制在 1cm/min。



图 5.2.10-1 盾构进洞段施工控制照片

3) 严格控制盾构纠偏量

在确保盾构正面沉降控制良好的情况下，使盾构均衡匀速施工，盾构姿态变化不可过大。每环检查管片的超前量，隧道轴线和折角变化不能超过 0.3%。推进时不急纠、不猛纠，多注意观察管片与盾壳的间隙，相对区域油压的变化量随出土量和千斤顶行程逐渐变化。采用稳坡法、缓坡法推进，以减少盾构施工对地面的影响。在盾构进入加固区前应根据洞门中心调整好盾构进洞位置与姿态，避免在进入加固区以后再调整盾构姿态。

4) 严格控制同步注浆量和浆液质量

严格控制同步注浆量和浆液质量，务必做到三点：保证每环注浆总量、保证每箱浆液要均匀合理地压注、浆液的配比和稠度必须符合质量标准。

通过同步注浆及时充填建筑空隙，减少施工过程中的土体变形。每环的压浆量一般为建筑空隙的 200%~250%，即每推进一环同步注浆量为 $2.76\text{m}^3 \sim 3.45\text{m}^3$ 。泵送出口处的压力应控制在 0.3MPa 左右，稠度控制在 9~11cm。

5) 严格控制盾尾油脂压注

在同步注浆量充足的前提下，盾构机的盾尾密封功能就显得特别重要。为了顺利、安全的进洞，必须切实地做好盾尾油脂的压注工作。每班上班时，检查并保证储桶内有充足的油脂；推进时，油脂开关用自动档根据压力情况自动补压（同时配备专人观察，需要时人工压注），杜绝因人为欠压造成的漏浆、漏水现象。

6) 防止管片被拉开加固措施

当二次进洞注浆注好后，盾尾将与管片脱开，在摩擦力的作用下管片容易受拉，使环缝拉开，故脱开时盾构机中上部千斤顶使用预先加工好的顶块撑牢后，盾构推进实现盾尾与管片的分离。分离后洞门圈焊接弧形板密封洞门，保证洞门安全。

7) 打设降压井

如在出洞地基加固范围内存在微承压水和承压水，为防止在进洞过程中出现透水现象，应及时有效的采取补救措施，打设降压井降微承压水和承压水。

8) 隧道内二次衬砌壁后注浆

在进洞段施工中，要进行二次壁后注浆，特别是在推进最后几环盾尾进入加固区，同步注浆无法进行时候。浆液采用双液浆（每 3 环压一环），每环 2~3m³（在实际压注中将根据各监测数据及压力进行适当的调整）。在管片脱出盾尾 5 环后，对管片的建筑空隙进行双液二次注浆。浆液通过管片的注浆孔注入地层，并在施工时采取推进和注浆联动的方式，注浆未达到要求，盾构暂停推进，以防止土体变形。壁后二次注浆根据监测情况随时调整，从而使进洞段地层变形量减至最小。二次注浆结束后，必须立即将闷头拧紧。

5.2.11 成型隧道保护

盾构进洞施工前后，应加强对成型隧道的保护工作，主要做好以下几点：

1 及时、多次复紧最后 20 环管片纵、环向螺丝。

2 在进洞过程中，用槽钢将最后 15 环管片连接成一体，防止盾构管片间出现张缝，整环管片共拉 5 道 12#槽钢对拼(图 5.2.11-1 拉接部位放大图)，通过拉接板与管片连接（拉接板固定在环向螺栓上）。

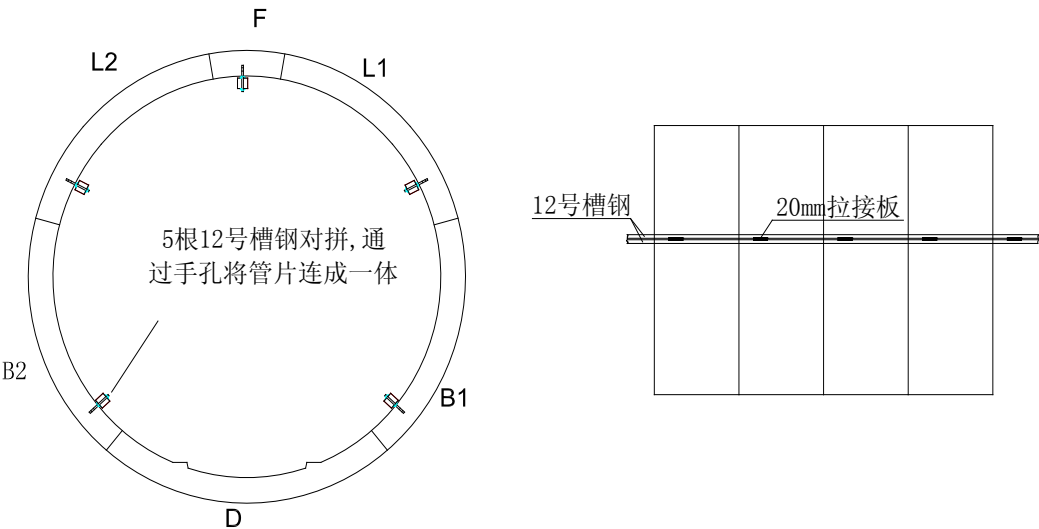


图 5.2.11-1 拉接部位放大图

3 洞圈特殊环管片脱出盾尾后，立即用弧形钢板与其焊接成一个整体，并立即进行洞门注浆，用浆液充填管片和洞圈间隙，防止水土流失。并在洞口向内 15 环的 B 块上隔环安装 2 寸注浆球阀，并在现场配备两台注浆设备，作为融沉注浆及应急注浆之用；

4 盾构进洞后在冻结孔内充填 1：1 的水泥浆封孔。

5 洞门注浆完成后，立即着手安排井接头施工。

6 通过隧道内管片注浆孔完成融沉注浆，直至稳定。

5.2.12 地表融沉处理

地表融沉主要是冻土融化时排水固结引起的，滞后于冻土的融化，冻土融化时的沉降量与冻土厚度、冻土的特性有关。根据施工经验和土工试验，冻土融化后，其标高可能略低于原始地层的标高，为减少融沉量，采用局部冻结，减小冻土体积。地层融沉可采用从地面注浆和隧道内注浆相结合的方式处理。隧道底部的冻土体可以应用倾斜冻结孔进行强制分两组化冻，利用隧道内管片上预留的注浆球阀进行注浆，从而控制隧道的沉降。顶部和两侧也从隧道内进行分层跟踪注浆处理。冻结管拔除后及时预埋注浆管，根据监测报表数据分析指导施工，适时注浆；隧道沉降控制措施主要利用隧道管片注浆孔进行适当的跟踪注浆，减小冻结对周围环境的影响。

6 材料与设备

表 6-1 主要设备表

序号	设备名称	数量	规格尺寸	主要性能	备注
一	打钻				
1	钻机	2 台	XY-4	22KW	
2	泥浆泵	2 台	BW-200/50	14.5KW	
3	除砂泵	1 台	自制		
4	测斜仪	1	经纬仪	最大测深 50m	
5	电焊机	3 台	ZX-400		
6	泥浆测定仪	1 台			
7	试压泵	1 台		最大泵压 2.5MPa	
8	孔口管	8 只	DN125		
9	闸阀	8 只	DN125		
二	冻结				
1	冷冻机	2 台	YSLGF300	电机功率 125KW	
2	冷却塔	2 台	DBNL3-100		
3	盐水泵	1 台	IS200-150-315	电机功率 30KW	
4	清水泵	1 台	IS125-150-250	电机功率 11KW	
5	流量计	2 台			
6	抽氟机	1 台			
7	测温仪	1 套			
8	盐水箱	1 个	自制		

表 6-2 主要材料表

序号	设备名称	数量	规格尺寸	主要性能	备注
1	无缝钢管	2320	Φ 108×5mm		冻结管
2	无缝钢管	20	Φ 102×5.5mm		接箍
3	无缝钢管	150	Φ 159×7mm		盐水干管
4	无缝钢管	50	Φ 133×5mm		水管
5	聚乙烯塑料管	2320	Φ 62×5mm		供液管
6	高压胶管	420	1.5"		冻结器与集配液管连接
7	焊管	100	1.5"		羊角器
8	钢板	36	4mm		水箱
9	三翼钻头	6	Φ 140mm		
10	牙轮钻头	6	Φ 140mm		
11	金刚石钻头	12	Φ 160mm		
12	钻杆	30	Φ 75mm		
13	氟里昂	600	R22		
14	冷冻机油	250	N40		
15	氯化钙	28	纯度 70%		
16	重铬酸钠	30			
17	氢氧化钠	20			
18	截止阀	12	Φ 150mm		
19	截止阀	2	Φ 100mm		
20	截止阀	135	1.5"		
21	法兰	25	Φ 150mm		
22	法兰	10	Φ 100mm		
23	角钢	50	50×50mm		
24	方木	3			
25	螺栓、螺母	200			
26	保温材料	25			

表 6-3 劳动力组织表

序号	岗位工种	人数	说明	序号	岗位工种	人数	说明
1	钻工	20		6	技术负责人	1	
2	冻结运转	7		7	施工员	1	
3	电工	1		8	质量员	1	
4	焊工	4		9	安全员	1	
5	勤杂工	2		10	材料员	1	

7 质量控制

7.0.1 冻结孔布置孔位偏差不应大于 50mm。

7.0.2 冻结管下放深度不小于设计深度，不大于设计深度 0.5m。

7.0.3 冻结孔钻孔的偏斜率控制在 1%以内。

7.0.4 工作井周边的冻结孔距围护墙的距离不大于 0.4m。

7.0.5 冻结管和测温管耐压不低于 1.0MPa。

7.0.6 冻结管拔除后，保证冻结孔的充填质量，以防沉降。

7.0.7 为了预防冻胀和融沉，设计选用标准制冷量较大的冷冻机组，在短时间内把盐水温度降到设计值，以加快冻土发展，提高冻土强度，减少冻胀和融沉量。

7.0.8 预计融沉量较大的部位可采取压浆充填，把融沉造成的危害降低到最低限度。

7.0.9 考虑到冻胀力对于结构造成的影响，积极冻结期内，通过测温孔监测冻土向外国发展情况，依据冻土发展状态调整盐水温度和盐水流量，必要时可采取间歇式冻结，控制冻土发展量；维持冻结期采取提高盐水温度，以减少冻胀和融沉。

7.0.10 在打第一个冻结孔时，分析主要地层钻进过程的参数变化情况，检查地质、水文情况，如有异常，及时采取针对性措施。

7.0.11 制订严格的冻结施工质量标准。控制冻结孔间距。如个别超标，应整体分析交圈情况，决定是否采用补孔措施。

7.0.12 不同的地质条件采用不同的钻进参数，严格控制钻进压力。

7.0.13 钻进过程中严格监测孔斜，施工前几个孔时要增加测斜频率。测斜后要及时绘制钻孔偏斜透视图，发现超偏及时纠正。

7.0.14 每个冻结器都要安装控制阀门，及时调整各个冻结器的流量。通过流量和温度测定，随时掌握冻结器的运行情况。

7.0.15 盾构在进洞之前，必须具备如下条件方可进洞(见表 7.0.15-1 盾构进洞条件)。

表 7.0.15-1 盾构进洞条件

序号	内容	指标
1	冻土墙厚度设计厚度	\geq 设计厚度
2	冻土的平均温度	$\leq -10^{\circ}\text{C}$
3	各探孔温度	$\leq -5^{\circ}\text{C}$
4	盐水温度	$-28^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$
5	盐水去回路温度差	$\leq 2^{\circ}\text{C}$

8 安全措施

8.0.1 在冻结施工期间，所有冻结施工设备必须检查验收合格后，方可使用。

8.0.2 在冻结施工期间，电缆线路应采用“三相五线”接线方式，电气设备和电气线路必须绝缘良好。

8.0.3 在盾构穿越冻土墙时，要连续作业，避免推进中途停顿。

8.0.4 在盾构进洞段施工期间，对地面及管线进行沉降监测，及时观察变形情况，采用先进的通讯手段，将监测数据及时、准确地反馈给各相关人员和盾构司机，使得盾构司机能够根据地面所反映的情况，进行正确判断，及时调整施工参数和压浆量。

8.0.5 当进洞发生渗漏时，应组织人员进行堵漏，通过压浆泵将聚氨脂压入，从而起到防水作用，再对土体压注双液浆，以起到加固土体的作用。同时在地面上根据沉降情况，进行压密注浆，确保地表的稳定。

8.0.6 相应的配备足够的材料，一旦发生意外，可在第一时间投入使用，具体的材料有：水泥、水玻璃、聚氨脂、砂、海绵等。

8.0.7 制定盾构进洞应急预案，并确保有效。

9 环保措施

9.0.1 在施工中严格遵照《中华人民共和国污染防治法》的有关规定。

9.0.2 以预防为主，加强宣传，合理布局，节约资源，争取最佳的经济效益和社会效益。

9.0.3 为了减少和避免对周围的干扰，采取有效措施，在冻结站周围进行隔音处理，使冻结站冷冻机的噪声控制在国家《施工场界噪声限值》的标准内。

9.0.4 为了创造良好的施工环境，必须对施工现场进行文明施工管理，围蔽工地。临设布置应方便生产和生活，临时房屋布置要符合防火安全和工地卫生的规定。

9.0.5 冰冻站拆除时，宜回收盐水，严禁任意排放污染环境。

9.0.6 拆除设备、管路应有技术措施，设备、容器应清洗、防腐后入库。

10 效益分析

通过多次工程实践证明，地铁盾构隧道冰冻法进洞施工工艺与传统地基加固进洞相比较，在工期、经济与社会效益、环保等方面具有以下优势：

10.1 工期

有利于缩短工期，提前具备进洞条件。传统水泥深层搅拌桩或高压旋喷桩等地基加固，从开始施工到加固体强度达到设计要求一般需要 45 天，而冰冻法洞口地基加固从开始施工

到加固体强度达到设计要求一般只需 35 天，可以提前 10 天。

10.2 经济与社会效益

传统水泥深层搅拌桩或高压旋喷桩等地基加固与冰冻法洞口地基加固费用相当，但在富含水的砂性地层或施工现场窄小地区，传统加固工艺无法有效确保加固质量或无法施工，在盾构进洞施工时可能发生流砂现象，导致发生工程事故；而冰冻法加固能有效达到设计加固要求，确保盾构顺利进洞，具有良好的经济效益与社会效益。

10.3 环保

本工法施工时，机械设备噪声低、振动小，无扬尘，无污染排放物，具备良好的环保优势；而传统盾构进洞地基加固由于采用大型机械施工与水泥加固材料，施工噪音大，有扬尘，并对地下水存在一定的污染，不符合环保要求。

10.4 与传统加固工法比较

表 10.4-1 与传统加固工法比较表

序号	进洞加固方法	适用范围	工法可代替情况	环境影响
1	旋喷桩	管线与周边构建筑物复杂	可用冰冻法代替	扬尘、噪音较大
2	搅拌桩+旋喷桩	常规淤泥质土层	可用冰冻法或旋喷桩法代替	扬尘、噪音较大
3	降水	较浅的砂土层	可用冰冻法代替	噪音较大，周边环境沉降影响范围大
4	冰冻	各种复杂含水土层，特别是以上施工方法相对风险较大的环境。目前，以成功应用的主要有：深层含砂层（特别是承压水层）、管线与周边构建筑物等环境复杂处、施工场地狭小处、过深基坑（水平冻结）、加固范围内有障碍物、其他加固方法失败后局部不满足加固要求的补充加固	不可代替或用其他方法代替成功率较低；可用于其他工法加固失效后的抢险施工	无扬尘，噪音小沉降影响小且缓慢易于控制

11 应用实例

地铁盾构隧道冰冻法进洞施工工法于 2008 年 4 月～9 月分别应用于上海轨道交通 10 号线外环路站～虹井路站区间隧道工程、10 号线吴中路停车场～虹井路站区间隧道工程、9 号线大木桥路站～打浦桥站区间隧道工程。

11.1 上海轨道交通 10 号线外环路站～虹井路站区间隧道工程

11.1.1 工程概况

本工程地处上海市，工法应用时间：2008/4～2008/7，应用效果良好，实物工作量：两

台盾构进洞的冰冻加固。虹井路站地处青杉路两侧的虹井路上，呈南北走向，为地下二层车站，底板埋深约 16~21.08m。车站主体结构南端头井地下墙厚 1000mm，深度为 37 米，基坑开挖深度为 21.08 米。(图 11.1.1-1)

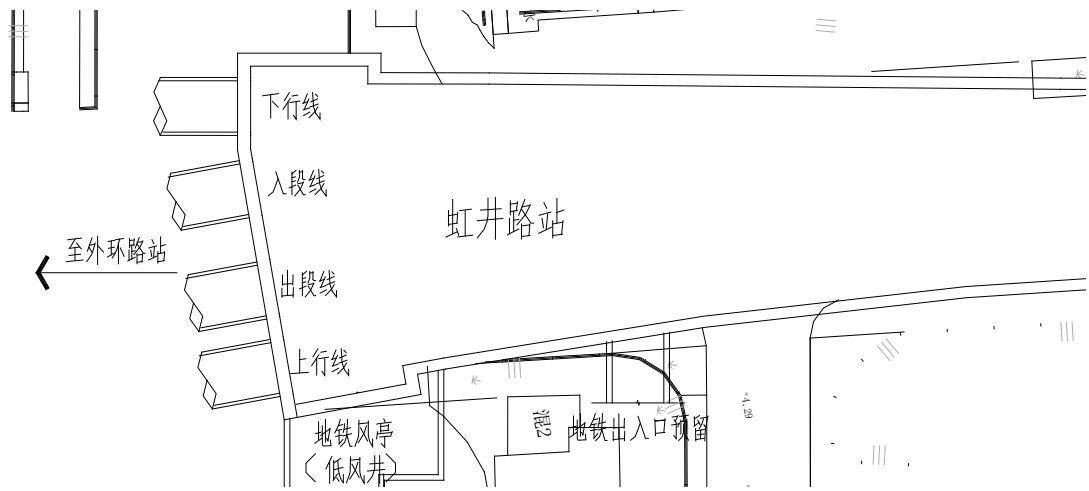


图 11.1.1-1 盾构进出洞口位置平面图

11.1.2 地质条件

进洞范围内土层为④1 灰色淤泥质粘土层和④2 灰色粉砂与⑤2 粉质粘土互层。

1 ④1 层具有含水量高、孔隙比大、强度低、渗透性差、灵敏度较高的特点，易产生流变现象，粉性土夹层则可能产生流砂现象；

2 ④2 层具有含水量较高、压缩性小、强度较高及渗透性好的特点，易发生塌方、流砂、涌土等不良地质现象，须配合必要的止水、降水措施；

3 ④2 层和⑤2 层连通，⑤1⑥层缺失。地下水一直连通到⑦层，无隔水层。

11.1.3 冻结设计情况

1 冻土墙厚度：参照日本和我国建筑结构静力计算公式设计，并考虑类似工程的施工经验，冻土墙厚度设为 2m。

2 冻土墙深度：按超过进出洞口以下 2m 确定。

3 冻土墙宽度：以超过进出洞口两侧各 1.5m 确定。

4 冻结孔布置：布置三排共 31 个冻结孔。其中：第一排冻结孔距离地下墙 300mm，13 个，开孔间距 800mm；第二排冻结孔距离地下墙 900mm，7 个，中间开孔间距 1600mm，两端开孔间距 800mm；第三排冻结孔距离地下墙 1500mm，11 个，开孔间距 800mm。

11.1.4 应用效果

通过在本工程盾构端头井采用冰冻法进洞施工工法的使用，监测单位的数据显示，地表土体的隆起与融沉均未超出警戒值，达到了加固土体、安全的设计要求和使用要求，盾构顺利进洞，并得到了政府部门的一致好评和认可。(见图 11.1.4-1)

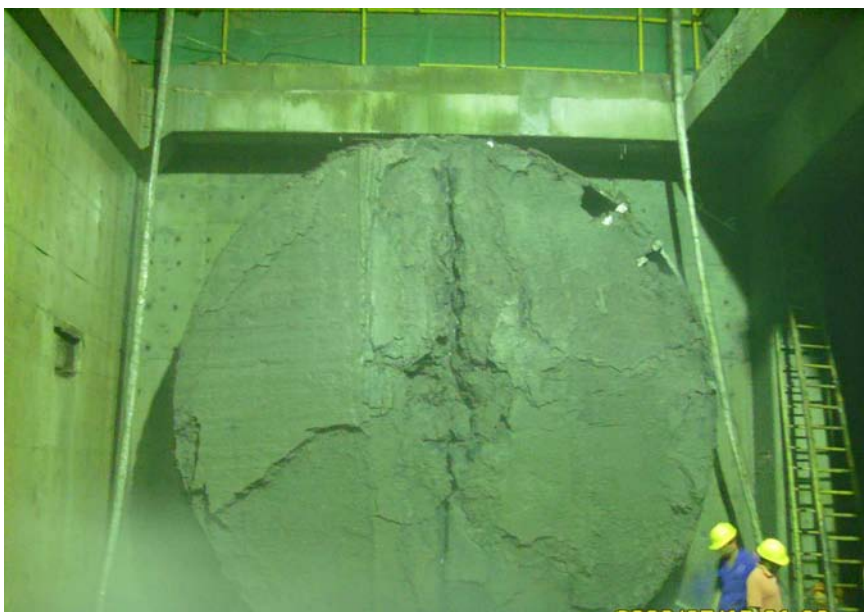


图 11.1.4-1 盾构进洞照片

11.2 上海轨道交通 10 号线吴中路停车场～虹井路站区间隧道工程

11.2.1 工程概况

本工程地处上海市，工法应用时间：2008/6～2008/8，应用效果良好，实物工作量：一台盾构进洞的冰冻加固。工程自吴中路停车场北端头井过吴中路沿虹井路方向向北延伸，最终到达虹井路站南端头井，调头后推进至吴中路停车场，虹井路站南端头井进洞地基加固采用冰冻法进洞施工工法，见图 11.2.1-1 冰冻法施工照片。



图 11.2.1-1 冰冻法施工照片

11.2.2 冻结设计情况

冻土墙厚度参照日本和我国建筑结构静力计算公式设计，并考虑类似工程的施工经验，据计算冻土墙厚度设为 2m；冻土墙深度按超过进出洞口以下 2m 确定；冻土墙宽度以超过进出洞口两侧各 1.5m 确定。

11.2.3 应用效果

通过在本工程盾构端头井采用冰冻法进洞施工工法的使用，监测单位的数据显示，地表土体的隆起与融沉均未超出警戒值，达到了加固土体、安全的设计要求和使用要求，盾构顺利出洞，得到了建设单位的一致好评。

11.3 上海轨道交通 9 号线大木桥路站～打浦桥站区间隧道工程

11.3.1 工程概况

本工程地处上海市，工法应用时间：2008/6~2008/9，应用效果良好，实物工作量：两台盾构进洞的冰冻加固。工程包括大木桥路站~打浦桥站单圆双线区间盾构隧道及旁通道等土建工程，隧道采用装配式单层衬砌结构。区间采用两台 $\phi 6340$ 土压平衡式盾构机由大木桥路站东端头井出洞，沿肇家浜路行走，途经瑞金南路、瑞金二路，最后盾构在打浦路站西端头井进洞，由于受地质条件和进洞场地条件限制，采用冻结法加固洞门区域。

11.3.2 地质条件

打浦路站进洞场区内土层主要涉及⑤1-1、⑤1-2、⑤3 层为灰色粘性土层，⑤2 灰色粘质粉土。其中：

1 第⑤1-1、⑤1-2、⑤3 层为灰色粘性土层，软塑，其中⑤1-1 土质较均匀，高压缩性；⑤1-2、⑤3 层为中压缩性，⑤3 层局部夹较多粉土。第⑤2 层为粉性土，中压缩性，埋藏深度在 26.0~48.0m。

2 第⑤2 层为承压含水层，具有一定的承压水头，需注意上述粉性土和砂土中的承压水头对盾构掘进的影响。根据土层资料与类似工程施工经验，该土体内聚力小、承载力低，透水性强、无法自稳。

11.3.3 冻结设计情况

1 冻土墙厚度：参照日本和我国建筑结构静力计算公式设计，并考虑类似工程的施工经验，据计算冻土墙厚度设为 2.2m；

2 冻土墙深度：按超过进出洞口以下 2m 确定；

3 冻土墙宽度：以超过进出洞口两侧各 1.5m 确定；

4 冻结孔布置：共 41 个孔。其中第一排 15 个孔，孔间距 800mm；第二排 11 个，孔间距 1000；第三排 13 个，孔间距 800。

11.3.4 应用效果

通过在本工程盾构端头井采用冰冻法进洞施工工法的使用，监测单位的数据显示，地表土体的隆起与融沉均未超出警戒值，达到了加固土体、安全的设计要求和使用要求，盾构顺利进洞，得到了建设单位的一致好评（见图 11.3.4-1 盾构进洞照片）。



图 11.3.4-1 盾构进洞照片