

富水软硬交接花岗岩地层液氮冻结盾构开仓施工技术研究与应

文 / 艾琳 广州市市政集团有限公司

温亦品 广州市市政集团有限公司

摘要: 富水软硬交接花岗岩地层条件下采用液氮冻结加固盾构刀盘周边土体, 通过合理设置冻结参数, 精准控制, 土体加固效果好, 形成有效止水帷幕, 创造了盾构常压开仓条件。采用事故树分析法, 建立液氮冻结开仓施工事故树模型, 分析事故发生概率, 针对发生概率较大事件加强技术管理措施, 可有效降低液氮冻结盾构常压开仓施工安全风险。

关键词: 盾构开仓; 液氮冻结; 安全风险; 事故树分析法

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.19.040

引言

在复杂的环境条件与地质条件下, 刀具磨损的不确定性, 增加了盾构开仓作业施工的难度, 如何在复杂条件下安全、高效完成盾构开仓作业, 是盾构施工需解决的问题。当前常用的盾构开仓方法有气压开仓、地面预加固常压开仓、常压刀盘开仓^[1, 8]。现阶段关于冻结加固开仓施工技术研究不多, 袁守谦等^[2]通过刀盘结构改造, 增设冷冻管路、制冷设备等, 提出了冷冻刀盘开仓技术。廖先斌等^[3]针对液氮和盐水联合冻结加固刀盘周边岩土体的开仓技术进行研究, 介绍了超大埋深富水复合地层液氮、盐水联合冻结的施工流程及技术要点。谭善文等^[7]以实际工程案例介绍了液氮冻结法加固在盾构开仓作业中的应用。本文以某城市地下综合管廊为研究案例, 以液氮冻结施工技术、安全分析为切入点, 开展富水软硬交接花岗岩地层盾构液氮冻结常压开仓施工研究。

一、工程概况

某城市地下综合管廊盾构区间线路全长约1.98km, 区间线路最大纵坡约64.6%, 最小转弯半径为250m, 最大中心线埋深约38m, 采用泥水平衡盾构机施工。液氮冻结盾构开仓作业位于刀盘里程KBO+682.34, 该处盾构顶部埋深约23m, 地面为空旷场地, 地下水稳定水位约4.2~4.3m, 地层自上往下为①1素填土、③1粉质粘土、③3细砂、④1粉质粘土、④2中、粗砂、⑥2砂质粘性土(硬塑)、⑧1全风化花岗岩、⑧4微风化花岗岩, 盾体所处地层为⑧1全风化花岗岩、⑧4微风化花岗岩。

二、液氮冻结加固技术

(一) 液氮冻结加固原理

富水软硬交接花岗岩地层中全风化花岗岩含砂率高, 孔隙率发育, 孔隙内地下水呈饱和状态。在地层中布设冻结管, 冻结管内注入液氮, 液氮在管内气化吸收周围土体热量, 使土体快速降温冻结, 孔隙水固结, 形成坚硬的冻土壳, 土体变稳定, 起到隔水作用。在盾构机刀盘周边布设垂直冻结管, 管内供给液氮, 液氮气化吸收刀盘周围土体热量, 形成冻结加固体, 使刀盘周边土体变稳定并具有隔水作用。

(二) 液氮冻结加固设计

1. 冻结加固厚度计算

假定加固体为整体板块而承受水土压力, 采用日本计算理论计算水土压力作用下冻土帷幕厚度, 计算公式为^[1, 7]:

$$h = \left(\frac{k\beta \cdot p \cdot D^2}{4\sigma} \right)^{\frac{1}{2}}$$

式中k为安全系数, 取2.0; β 为冻土强度系数, 取1.8; p为刀盘底部侧向水土压力, 可采用水土合算法计算; D为盾构刀盘直径, 取6.28m; σ 为冻土的弯拉强度, 取3.0MPa。根据相关资料及经验取值, 计算加固厚度为2.1m。

2. 冻结加固验算

沿刀盘土仓周边验算加固体剪切应力, 计算公式为:

$$\tau_{max} = \frac{P \cdot D}{4h}$$

计算得冻结加固体剪切应力为0.28MPa。当温度为-10℃时冻土抗剪强度为1.5MPa, 故安全系数k为5.36。

刀盘中心所受最大弯拉应力采用建筑结构静力计算理论公式验算, 计算公式为:

$$\sigma_{max} = \frac{p \cdot \left(\frac{1}{2}D\right)^2 \cdot (3 + \mu)}{16} \cdot \frac{6}{h^2}$$

式中, σ_{max} 为加固体最大弯拉应力, 单位MPa; μ 为冻土泊松比, μ 取0.35。

计算得冻结加固体最大弯拉应力为 $\sigma_{max} = 1.05$ MPa。因-10℃时的冻土弯拉强度 $\sigma = 2.0$ MPa, 计算得安全系数k为1.9。验算结果表明, 冻结壁厚度取2.1m, 可以满足设计要求。

3. 冻结加固设计参数

依据盾构机构件的抗冻性能, 结合地质资料及验算结果, 冻结壁厚度设计指标为: 刀盘前方1.5m、后方0.9m、宽度7.63m、刀盘上部2m, 刀盘下部深入到⑧4层1m(图1所示)。冻结温度设计指标为: 冻土平均温度 ≤ -10 ℃; 刀盘交界面平均温度 ≤ -5 ℃; 液氮进口温度: -150~-170℃; 出口温度: -50~-60℃。

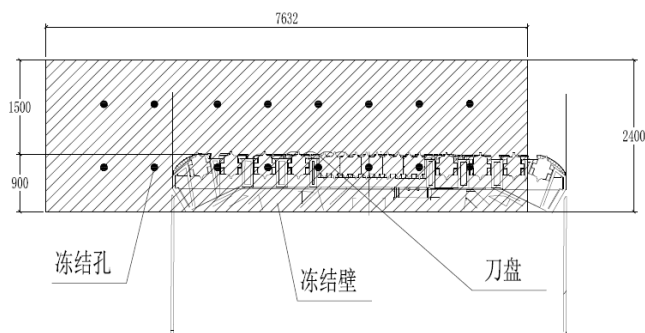


图1 液氮冻结平面图

4. 冻结孔布置

冻结管选用 $\phi 108 \times 5\text{mm}$ 不锈钢管，供液管采用 $\phi 32 \times 3\text{mm}$ 不锈钢管。冻结孔布设为 A、B 两排，A 排布设于距离刀盘正前方 1m，B 排布设于刀盘正上方，每排设 8 个孔，孔间距为 0.8m ~ 1m（图 2 所示）。A 排冻结管深度为 24.68 ~ 27.41m，B 排冻结管深度为 22.78 ~ 27.41m。测温孔布设于刀盘前方、后方，分别为 T1、T2、T3（图 3 所示）。

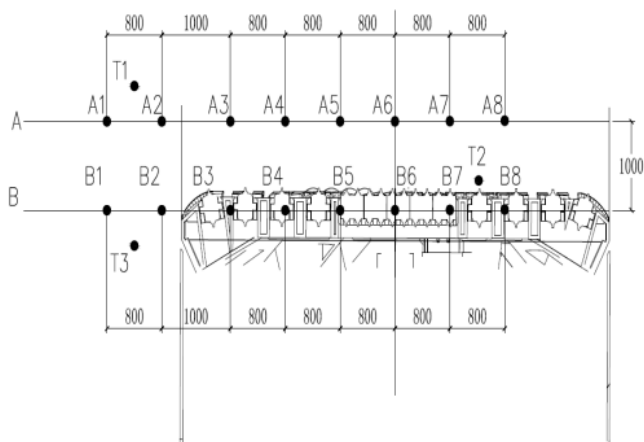


图2 冻结孔布置平面图

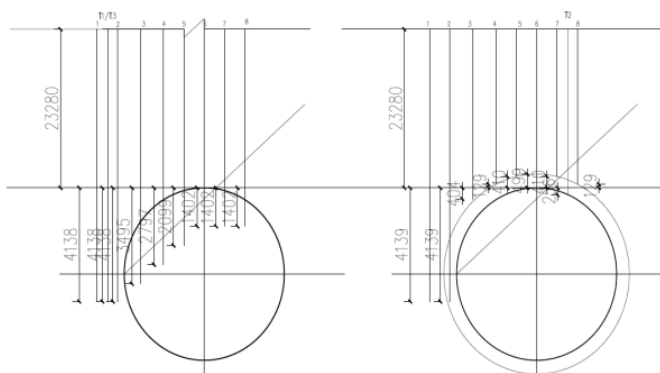


图3 冻结孔布置剖面图

(三) 冻结加固施工

1. 冻结管及测温管埋设

采用测量仪器进行孔位放样，并做好标识。地质钻机钻孔过程中控制好转速、压力及冲洗量，做到匀速钻进。加尺或更换钻头时，钻具应下到距孔底 0.3 ~ 0.5m 处扫孔，防止钻具在固定深度长期冲洗。终孔时应复核

钻孔深度确保满足要求。孔内沉渣清洗干净后方可下放冻结管。冻结管布设后进行冻结孔密封检测，试验压力为 0.8MPa，经试压 30min 压力下降不超过 0.05MPa，再延续 15min 压力不变为合格^[1, 7]。

2. 冻结系统安装

冻结管内安装不锈钢供液管，供液管采用不锈钢金属软管与液氮分配器连接，液氮通过分配器输入每根供液管。为减少液氮冷量损失，地面上的管路、不锈钢软管、控制阀、连接接头等均采用橡塑保温板和保温棉进行保温包裹，保温层厚度不小于 5cm。为避免地面排气管路排气误伤人员，排气管口应高于地面 2m 以上，并做保温处理。

3. 液氮冻结施工

液氮冻结施工分为冻结系统预冷、积极冻结以及维护冻结三个阶段。冻结系统预冷时，控制阀门使进入供液管内的氮气维持在 -30°C 以上，预冷 1 小时后，逐渐降低输入的氮气温度，一般在 15 ~ 24 小时后开始积极冻结。积极冻结时，根据测温数据及时调整液氮供应压力和供应量，液氮储罐出口的液氮温度控制在 $-150^{\circ}\text{C} \sim -170^{\circ}\text{C}$ ，压力控制在 0.1MPa ~ 0.15MPa，液氮排气口温度控制在 $-30^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ ，压力控制在 0.05MPa ~ 0.1MPa。当土体冻结厚度达到设计厚要求时，进入维护冻结阶段，直至盾构开仓作业结束。

4. 冻结帷幕监测

液氮冻结期间，为避免温度过低对刀盘、盾壳造成损伤，同时保证冻结壁的均衡和厚度，应进行温度监测。温度监测采用智能化冻结温控系统，实行自动化监测，包括冻结管排气口温度监测、测温孔温度监测以及仓内温度监测。

5. 冻结土体厚度判定

冻结土体厚度判定采用径向冻结速度法，假设冻结管的半径为 r_0 ，冻结锋面半径 $r_s(t)$ 计算公式为：

$$r_s(t) = r_0 + k\sqrt{t} \quad k = \sqrt{\frac{2\lambda(T_0 - T_f)}{\rho L + c(T_0 - T_f)}}$$

式中 k 为常数， λ 为土体导热系数， ρ 为土体密度，T 为土体初始温度； T_f 为土体冻结温度（冰点），L 为水的相变潜热，c 为土体比热容。

6. 冻结体解冻

冻结体采用土体解冻和刀盘解冻进行强制解冻。土体解冻采用热盐水循环进行冻结管解冻，待冻结管周围冻结体解冻后立即拔除冻结管。冻结管拔出后灌入封闭泥浆并立即插入注浆管至设计深度，然后进行注浆加固。刀盘解冻采用泥浆内参入氯化钙进行泥浆循环解冻，当满足刀盘转动需求后停止泥浆循环，然后恢复掘进。

三、液氮冻结开仓施工风险分析管理

液氮冻结开仓施工存在一定的施工安全风险，为精准分析安全风险，采用事故树分析法建立液氮冻结开仓施工事故树模型^[5, 6]开展研究。以液氮冻结盾构常压开仓施工事故作为顶事件，确定导致顶事件发生的中间事件和底事件（表 1）。依据有关资料及施工经验，假设底事件发生概率（表 2），采用容斥原理计算中间事件发生概率及顶事件发生概率。计算结果为：中间事件 M1

发生概率为 2.28%，中间事件 M2 发生概率为 8.26%，中间事件 M3 发生概率为 6.49%，中间事件 M4 发生概率为 5.85%，顶事件 T 发生概率为 19.24%。研究分析表明液氮冻结盾构常压开仓施工事故发生的可能性相对较高，底事件结构重要程度相同，发生概率相对较高的液氮泄

露（管路破裂）、人员操作失误对顶事件概率影响较大。针对发生概率高的底层事件，采取技术管理措施进行预防处理。液氮泄露（管路破裂）事件可采用配置备用管路、压力自动监测系统及加强巡查检查方式。人员操作失误事件采用加强培训，实行验收、双确认方式。

表 1 事故树事件含义

层次	事件类型	事件内容	层次	事件类型	事件内容
顶事件	T	液氮冻结盾构常压开仓施工事故	底事件	B10	冻结效果不佳
中间事件	M1	钻孔施工突发事件	底事件	B11	设备故障
中间事件	M2	液氮冻结施工突发事件	底事件	B12	人员操作失误
中间事件	M3	开仓施工中突发事件	底事件	B13	仓内气体异常
中间事件	M4	融沉注浆事故	底事件	B14	未执行安全准入制度
基本事件	B1	钻孔定位不准确	底事件	B15	监测数据延迟、出错
底事件	B2	钻孔垂直度偏差	底事件	B16	注浆材料不合格
底事件	B3	钻孔深度不足	底事件	B17	设备故障
底事件	B4	钻孔涌水涌沙	底事件	B18	注浆参数控制不当
底事件	B5	钻孔导致盾构机损伤	底事件	B19	人员操作失误
底事件	B6	冻结管安装偏差	底事件	B10	冻结效果不佳
底事件	B7	液氮供应不足	底事件	B11	设备故障
底事件	B8	冻结时间不足	底事件	B12	人员操作失误
底事件	B9	液氮泄露（管路破裂）			

表 2 底层事件发生概率

事件	概率	事件	概率
钻孔定位不准确	0.005	设备故障	0.02
钻孔垂直度偏差	0.002	人员操作失误	0.02
钻孔深度不足	0.001	仓内气体异常	0.01
钻孔涌水涌沙	0.01	未执行安全准入制度	0.01
钻孔导致盾构机损伤	0.005	监测数据延迟、出错	0.005
冻结管安装偏差	0.01	注浆材料不合格	0.01
液氮供应不足	0.005	设备故障	0.02
冻结时间不足	0.01	注浆参数控制不当	0.01
液氮泄露（管路破裂）	0.03	人员操作失误	0.02
冻结效果不佳	0.03		

结语

1、富水软硬交接花岗岩地层条件下采用液氮冻结加固刀盘周边土体，加固范围设置为刀盘前方 1.5m、后方 0.9m、宽度 7.63m、刀盘上部 2m，冻结温度指标取值为：冻土平均温度 ≤ -10℃，刀盘交界面平均温度 ≤ -5℃，冻结加固效果良好，形成有效止水帷幕，创造了盾构常压开仓条件。

2、采用智能化冻结温控系统，实行温度自动化监测，根据测温数据及时调整液氮供应压力和供应量，积极冻结时液氮供给压力控制在 0.1Mpa ~ 0.15Mpa，供给温度控制在 -150℃ ~ -170℃，液氮排放口压力控制在 0.05Mpa ~ 0.1Mpa，排放温度控制在 -30℃ ~ -50℃，可以有效保证土体冻结加固厚度。

3、采用事故树分析法进行安全风险分析表明顶事件 T 发生概率为 19.24%，事故发生可能性相对较高，需加强安全管控，尤其需加强液氮泄露（管路破裂）、人员操作失误事件的技术管理措施，可以有效降低施工安全风险。

参考文献

[1] 刘占英, 赵书银, 姜景双等. 富水砂砾地层

盾构液氮冻结常压开仓施工技术 [J]. 铁道建筑技术, 2020 (02): 81-92.

[2] 袁守谦, 方恩权, 李学科. 基于冷冻刀盘的盾构安全开仓技术研究 [J]. 市政技术, 2020. 38 (06): 140-145.

[3] 廖先斌, 汪波, 董涛. 基于冻结法的盾构开仓技术研究与应用 [J]. 施工技术, 2024. 53 (13): 49-53.

[4] 吕晓明. 液氮冻结技术在盾构隧道土体加固中的应用 [J]. 工程与建设, 2022, 36 (06): 1169-1172.

[5] 姜群, 张钦礼, 王浩. 事故树分析法在露天边坡稳定性分析中的应用 [J]. 黄金, 2018, 39 (06): 69-71.

[6] 牛青川, 宋晓冰, 张辉. 基于故障树分析的 建筑运维风险评估 [C]. 工业建筑学术交流会议论文集, 20220: 389-392.

[7] 谭善文, 严永冬, 魏坤华. 液氮冻结法加固在盾构开仓作业中的应用 [J], 广东水利水电, 2019 (2): 25-29.

[8] 梁修锐. 地层冻结法在盾构开仓作业的应用 [J]. 建筑机械化, 2018 (3): 60-62.