

冻结法冷冻钢管片在深埋富水砂层中更换盾尾刷的研究应用

文 / 刘学东 中铁二十五局集团有限公司

摘要: 本文以南珠(中)城际NZZ-3标二工区十六涌工作井~1#盾构井区间右线更换盾尾刷为例,探讨在大理深、复杂地质条件下,利用冻结法冷冻钢管片技术更换盾构机盾尾刷的可行性与应用效果。主要从停机位置地质情况、冷冻钢管片形式、温度控制、有效冻结壁计算、管片拆除、盾尾刷更换、管片重新拼装、解冻恢复施工等方面阐述冻结法更换盾尾刷的施工技术。以此探索冻结法冷冻钢管片在深埋富水砂层中更换盾尾刷技术应用的安全性、可靠性、环保性、经济性等多方面的特征,为类似工程提供了宝贵的经验和参考价值。

关键词: 冻结法; 冷冻钢管片; 深埋富水砂层; 盾尾刷; 更换技术

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.04.042

引言

随着目前城市地下工程建设不断发展,盾构法施工因其自身安全性高、对周边环境影响小等优势而被广泛应用。但在实际应用中,盾尾刷作为关键的密封部件,由于地层、盾构姿态、掘进长度、自身性能等因素,盾尾刷会出现不同程度的磨损,进而直接影响到隧道施工的安全与质量,因而有必要建立一个良好、安全的盾尾刷更换环境。

特别是当盾构机处于深埋富水砂层中时,盾尾刷的更换成为影响施工进度和安全性的重大问题。富水砂层具有高渗透性和高水压,容易导致涌水、涌砂等事故,给盾尾刷的更换带来极大的安全风险。并且砂层稳定性较差,在更换盾尾刷过程中,可能会引起土体坍塌等工程问题,进一步增加施工难度^[1]。基于此,为了解决深埋富水砂层中盾尾刷更换的难题,提出了一种冻结法冷冻钢管片技术,其基本原理是通过向特殊钢管片循环注入低温介质(如氯化钙),利用低温将土体冻结,形成坚固的冻结帷幕,从而有效地阻隔地下水,提高土体的稳定性,为盾尾刷的更换提供安全可靠的施工环境^[2]。

文章为了直观地阐述冻结法冷冻钢管片在富水砂层更换盾尾刷良好的应用效果,以南沙至珠海(中山)城际NZZ-3标二工区十六涌工作井~1#盾构井区间右线盾尾漏浆、冻结法更换盾尾刷为例,分析其应用技术和应用效果。通过实际工程应用,验证了冻结法在富水软弱地层条件下更换盾尾刷的可行性和有效性。本文的研究不仅为类似工程提供了技术参考,也为进一步完善和发展地层人工冻理论和技术体系提供了实践依据。

一、工程概况

南沙至珠海(中山)城际NZZ-3标二工区十六涌工作井~1#井区间设计总长度2225m,本段区间左右线分别设2处平面曲线,线路纵断面最大坡度24%,最小坡度2%,隧道结构拱顶埋深9.5~35.8m。根据勘察情况,线路范围地形平坦,主要为鱼塘、河涌、荒地、湿地、道路等,局部为景区、村居等,地貌主要为珠江三角洲冲洪积平原地貌,区间投入2台直径8.8m泥水/土压双模平衡盾构机。成型隧道管片外径8.5m、内径为

7.7m,衬砌厚度为0.4m,环宽1.6m。

盾构机在543环推进过程中盾尾出现漏浆,采取措施后,544、545环推进过程中盾尾仍然漏浆漏水。经专家组综合研判,在此处停机,采用常规注浆加固土体方法检查更换第一道盾尾刷。第一次更换完盾尾刷复推至650环盾尾出现漏浆,再次邀请专家进行评估分析,并对K块位置(18号油缸)尾刷进行检查,采取控制掘进速度、纠偏量及注浆压力,辅以掘进过程停机单点补注康达特油脂、二次注浆做止水环等措施,推进至745环停机位置,对前两道盾尾刷进行检查及更换。此处为6#联络通道,也是隧道最低点,隧底埋深41.1m。当前盾尾处于固结淤泥质粉质黏土、砾砂、中粗砂地层,根据实际打孔观察,盾尾处底部2.1~2.8m范围内有局部粉细砂及中粗砂层。盾尾处地质情况如图1所示。

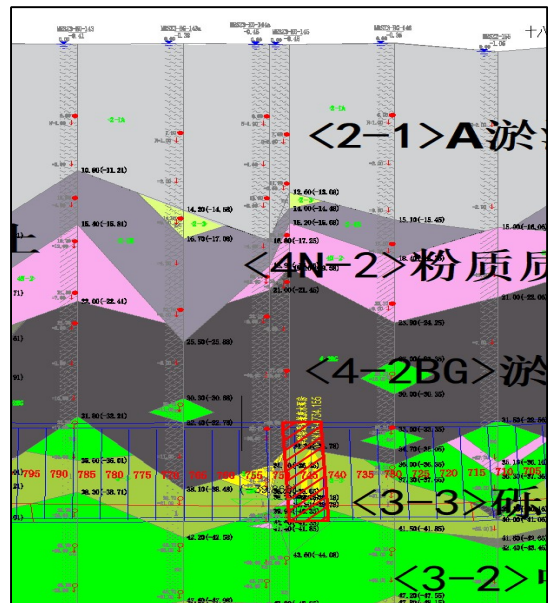


图1 盾尾处地质情况示意图

该工程盾构段剩余1034米,距离较长,且洞身范围内砂层较多,地层偏软且存在液化可能,导致盾构机姿态异常,进而造成盾尾间隙不均匀损伤盾尾刷;加之先前盾尾顶部渗漏后仅更换第一道盾尾刷,盾尾密封系统

顶部仅有一道完整尾刷，密封效果不足。因此，综合考虑后期盾构掘进的安全性，决定采用冻结法冷冻钢管片进行盾尾刷更换。

二、冷冻钢管片分析与设计

(一) 冻结法基本原理

冻结法是通过外部冷冻机将低温冷冻液输送至冷冻钢管片冻结腔体，通过钢管片与地层的接触，将冷量传递至土体，将土体中的水冻结成冰，从而使土体强度增加、渗透性降低的一种施工方法。在冻结过程中，低温冷冻液通过管片冷冻腔循环流动，将冷量传递给周围土体。随着温度的降低，土体中的水逐渐结冰，形成冰晶体。冰晶体的不断生长和扩展，使土体的强度和稳定性得到提高^[3]。采用冻结法对富水砂层土体性质进行改变，增强土地强度及密度，降低其渗透性，使得土体体积膨胀之后，对周围土体产生一定程度的挤压作用，从而增加土体密度。

(二) 冷冻钢管片设计

冷冻钢管片与混凝土管片尺寸一致，由7块管片组成。其作为永久结构，除具有冻结功能，还需要承受土体压力，主要由20mm钢板和30mm圆弧钢背板组成。每块钢管片其内部冷冻腔设计外径8440mm、内径8340mm，腔体净空50mm，宽1540mm。作为在深埋富水砂层更换盾尾刷采用的预设冷冻腔的管片，它是利用冷冻腔将冷媒温度传递给钢管片、进而传递给周围土体以达到冻结目的。冷冻钢管片每片之间通过软管相连，形成环向回路，保证冻结帷幕在整个环向的连续性。通过冷冻机组将冷媒输送至冷冻钢管片之后，根具热传递原理吸收土体中的热量，从而实现盾构机尾部土层冻结的目的。冷冻钢管片的设计截面如图2所示。

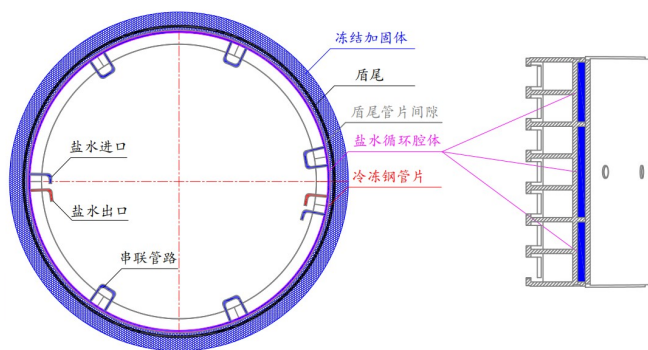


图2 冷冻钢管片的设计截面

三、冻结法冷冻钢管片在富水砂层更换盾尾刷的应用流程

(一) 前期准备工作

在进行冻结法冷冻钢管片施工前，需要进行详细的工程勘察，了解工程地质条件和水文地质情况。根据勘察结果，制定合理的施工方案，包括冷冻钢管片的设计、制冷设备的选型、施工工艺、应急处置等。根据施工方案，准备好所需的设备和材料，包括冷冻钢管片、制冷设备、保温材料、注浆材料、防水材料等。确保设备和材料的质量符合要求，为施工的顺利进行提供保障。

1. 制定施工部署方案

(1) 更换盾尾刷为高风险，施工作业前，必须清楚管片与盾尾的相对位置关系（如图3所示），施工过程才能精确控制。

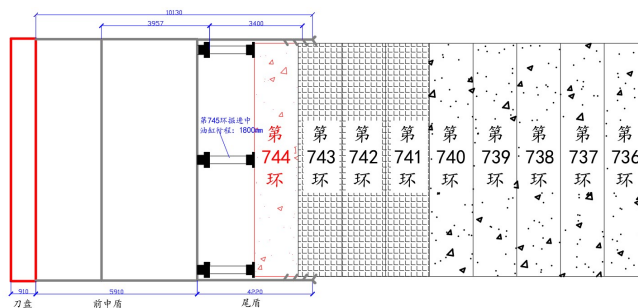


图3 盾构与管片现状关系图

(2) 现有条件，增设一道尾刷，不满足后续管片拼装条件，所以选择检查更换尾刷的方案。

(3) 要进行尾刷更换，必须解决盾尾涌水涌砂的问题，根据目前情况，拟采用盾尾注浆的方式封堵盾尾。

(4) 对盾尾末端与管片交接环缝处进行径向2m深孔注浆封堵，使该处土体在盾尾刷检查更换过程中有一定堵水、自稳及承载能力，阻挡外界水土从盾尾刷处涌入，拆除一环管片后，盾尾与管片有一定的搭接长度，方可保证安全。

(5) 鉴于此处隧底埋深41.1m，且盾尾地层处于富水砂层中，盾尾注浆加固无法100%保证加固和止水效果。为保证安全可靠，增加盾尾冻结措施，形成“注浆加固”+“冻结加固”双保险措施，确保尾刷更换作业安全。

2. 冷冻机选型

冷冻机的选择需要依据其需冷量进行选择，需冷量计算公式如式(1)所示。

$$Q = S \times 2 \times 350 \text{Kcal/h} \quad (1)$$

式中：Q-需冷量；S-管片表面积；

冷冻站放置于隧道盾构机8#台车后端一侧，冷冻机组选用水冷螺杆式冷冻机组（标况制冷量 $11.27 \times 10^4 \text{Kcal/h}$ ）2台，拟定1用1备。

另外，为了保障冻结系统正常运行，选择单台流量超过 $240 \text{m}^3/\text{h}$ ，电机功率为 $35 \sim 40 \text{kW}$ 之间，扬程符合工程地形地质情况的盐水循环泵，冷却水采用盾构掘进时自身循环水系统。

(二) 冷冻钢管片施工与运行

按照施工方案的要求，到达停机位置之前的掘进控制好盾构机姿态，合理选择管片，控制油缸行程差，管片四周的盾尾间隙均匀一致，便于盾构后方止水；744环F块拼装4号油缸位置，更换完盾尾刷后安装到7号油缸位置，743环冷冻钢管片拼装时，注意点位错开，确保744环和743环错缝拼装。

盾构机在拼装744环管片时，每一块管片和盾壳间应铺填盾尾油脂拌合的棉絮。拼装完成744环的管片继续掘进745环至停机位置，在745环掘进过程中，当油缸

最小行程达到1800mm±20mm时必须立即停止掘进，此时需要拆换的第1道和第2道盾尾刷刚好脱出到744环管片壁后。行程差不超过20mm，考虑管片的楔形量，盾尾和743环搭接523mm。

在到达停机位置后，进行制冷设备的调试和运行。调试过程中，需要检查制冷设备的运行状态、制冷效果和温度控制等参数，确保设备正常运行。在运行过程中，根据土体温度的变化情况，及时调整制冷设备的运行参数，以保证冻结效果。

在施工过程中，主要针对743环进行钢管片积极冻结。其冻结壁的范围为743环整环及向742和744环各发展500mm长度，所以冻结壁长度为2600mm，厚度为500mm（如图4所示）。

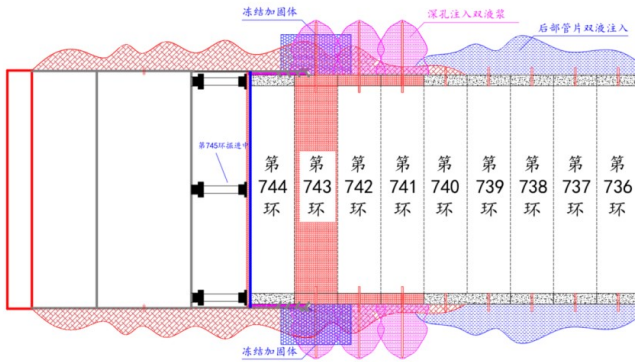


图4 冻结壁位置示意图

采用智能化冻结温控系统，实施监测各测温孔每个测点的实时温度及降温曲线、盐水干管去、回路温度，每隔10min自动记录一次温度并自动生成降温曲线。冻结壁宽度辐射范围包裹整个4道盾尾刷，其中前两道为弱冻结区，后两道为强冻结区。最后通过钢管片预埋的测温孔检查冻结效果，冻结壁的合格检验标准为：各测温孔每个测点（100mm、200mm、300mm、400mm、500mm）最高温度均要达到-2℃以下，有效冻结壁的平均温度（作图法，500mm以内）要达到-12℃以下，各探孔无渗水，合格后进入下道工序。对736~742环进行纵向加固，加固于注浆结束后完成，加固方式为用6条C16槽钢制作的连梁将736~742环纵向拉紧，槽钢上对应管片吊装孔位置开孔。测温孔布设及实时温度监控（如图5所示）。



图5 测温孔布设及实时温度监控

（三）盾尾刷更换

制冷冻系统积冻结期间，采用测温器进行温度实时监控，并且在判定盾构管片周边环形冻壁厚度达到50cm以上，且管片无渗漏水现象，即可以将预拆环拆除，其过程应该是自上而下进行的。管片拆除后，立即进行清理工作，2人同时用铲刀将盾壳、油脂腔内附着的砂浆、油脂等杂物清理干净。在清理杂物同时，检查油脂注入孔是否通畅。

盾尾刷安装顺序为依次搭接安装，在最后1块焊接时，根据实际尺寸必要时进行切除，确保两块尾刷之间有足够搭接长度。尾刷安装质量经过值班工程师验收后进行油脂涂抹。在盾尾刷更换完成后，进行冻结系统的拆除。拆除前，需要进行解冻过程的控制，避免解冻过快导致土体坍塌等事故的发生。可以采用缓慢升温的方式进行解冻，同时加强对土体变形的监测。管片拆装流程示意图（如图6所示）

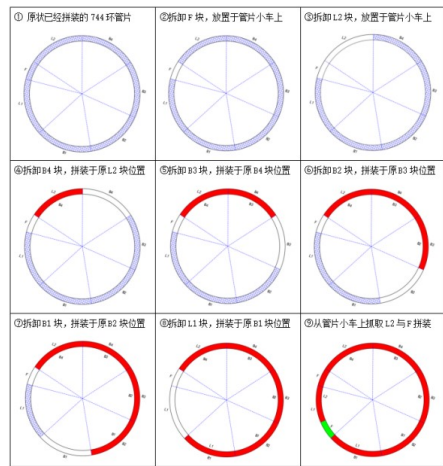


图6 管片拆装流程示意图

结语

综上所述，通过理论分析和工程实践，冻结法冷冻钢管片在深埋富水砂层中更换盾尾刷有着较高的可行性与有效性。该技术能够有效地提高施工安全性，保证工程质量，为类似工程提供了一种新的解决方案，通过冷冻钢管技术能够有效地防止涌水、涌砂和土体坍塌等事故的发生。并且在施工过程中不会对周边建筑物和地下管线造成明显破坏，对周边环境影响小。因此，本研究对于同类工程有着良好的借鉴意义，在实际工程中，可以根据工程地质条件和水文地质情况，合理选择冻结法冷冻钢管片技术，制定科学合理的施工方案，确保工程的顺利进行。

参考文献

[1]李忠虎, 蔡超君, 马超, 等. 冻结法冷冻钢管片更换盾尾刷技术及温度场研究[J]. 珠江水运, 2023(8): 22-24.
[2]姚奋宗. 冷冻工法在全断面砂层中更换盾构机尾刷探析——以福州地铁4号线某区间为例[J]. 福建建筑, 2020(11): 90-94.
[3]周凌焱. 富水软弱地层盾尾刷更换技术研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9(9): 74-76.