

高水压条件下地铁盾构机防水密封施工技术要点

徐东升

中铁一局，江苏 无锡 065200

DOI:10.61369/ETQM.2025110014

摘 要： 随着城市的建设与发展，地铁项目不断增多，由于施工地面临复杂地质结构，尤其在高压条件下，防水施工就成为了关键施工环节。因此，盾构机防水密封作为确保施工安全与隧道质量的关键环节，其技术要点的把控至关重要。本文深入剖析高压环境对盾构机防水密封的挑战，系统阐述盾构机主驱动、盾尾、铰接等关键部位的防水密封技术，包括密封结构选型、密封材料选择以及施工工艺控制等方面要点，并探讨防水密封施工过程中的质量控制手段，旨在为高压条件下地铁盾构机防水密封施工提供全面的技术参考，保障地铁工程的顺利建设与长期稳定运行。

关 键 词： 高压；地铁盾构机；防水密封；施工技术

Key Technical Points for Waterproof Sealing Construction of Subway Shield Machines under High Water Pressure Conditions

Xu Dongsheng

China Railway First Bureau Group Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 065200

Abstract： With the continuous construction and development of cities, the number of subway projects is increasing. Given the complex geological structures encountered during construction, especially under high water pressure conditions, waterproofing construction has become a critical aspect. Therefore, controlling the technical key points of waterproof sealing for shield machines is crucial for ensuring construction safety and tunnel quality. This paper deeply analyzes the challenges posed by high water pressure environments to the waterproof sealing of shield machines and systematically elaborates on the waterproof sealing technologies for key parts of shield machines, such as the main drive, shield tail, and articulated joints. This includes aspects such as the selection of sealing structures, choice of sealing materials, and control of construction processes. Additionally, it explores quality control measures during the waterproof sealing construction process, aiming to provide comprehensive technical references for waterproof sealing construction of subway shield machines under high water pressure conditions, ensuring the smooth construction and long-term stable operation of subway projects.

Keywords： high water pressure; subway shield machine; waterproof sealing; construction technology

引言

在城市地铁建设蓬勃发展的当下，盾构法凭借其诸多优势成为隧道施工的主要方法之一。然而，当盾构机穿越富水地层、江河湖底等区域时，会面临高压的严峻挑战。高压条件下，一旦盾构机防水密封出现问题，地下水和泥沙可能大量涌入，不仅会引发盾构机故障、施工停滞等问题，还可能导致隧道坍塌等严重安全事故，对工程进度、成本以及周边环境造成巨大影响^[1]。因此，深入研究高压条件下地铁盾构机防水密封施工技术要点，对于保障地铁工程安全、高效建设具有重要的现实意义。

一、高压对盾构机防水密封的挑战

高压环境是地铁盾构施工中防水密封系统面临的核心考验，其通过力学作用、介质侵蚀及施工干扰等多重途径，对密封结构的稳定性、材料性能及施工可靠性构成显著威胁。

（一）高压对密封结构的力学冲击

高压对盾构机密封结构的力学作用具有直接性和持续性，主要表现为：第一，压力荷载的动态叠加。地层水压随盾构掘进深度、地质变化而动态波动，密封结构需长期承受交变荷载。当水压超过设计阈值时，密封件与密封面的贴合压力失衡，可能导

致间隙产生，形成渗漏通道。第二，结构变形的连锁影响。高压水易引发盾构机壳体、管片等结构的微变形，尤其在软硬不均地层中，盾构机姿态调整时的铰接部位、盾尾与管片的相对位移增大，可能导致密封结构压缩量不足或过度挤压，破坏密封连续性。第三，密封失效的连锁反应。若某一部位密封失效，高压水会沿缝隙快速渗透，对相邻密封结构形成二次冲击，加速整体密封系统的崩溃，增加应急处理难度。

（二）高压水对密封材料性能的劣化作用

密封材料是防水密封的核心载体，高压水环境会从物理和化学层面加速其性能衰减。长期高压作用下，橡胶类密封材料易出现弹性疲劳，压缩永久变形率上升，导致密封件无法回弹填充间隙；纤维增强类密封件则可能因水压冲击导致纤维倒伏、断裂，降低密封屏障效果。同时，高压水环境常伴随地下水的腐蚀性，密封材料会发生溶胀、硬化或龟裂，丧失原有的粘结性和密封性。例如，普通丁腈橡胶在高矿化度水中长期浸泡后，硬度可能上升30%以上，弹性显著下降。另外，高压水下，密封件与金属结构或管片表面的摩擦力增大，加之水流携带的泥沙颗粒冲刷，会加速密封材料的磨损，缩短其有效使用寿命^[2]。

（三）高压水对施工过程的干扰与风险

高压水不仅影响密封系统的静态性能，更对施工环节的操作精度和稳定性构成挑战。在高压水环境中，密封件的安装易受水流冲击干扰，可能出现错位、褶皱等问题，导致初始密封性能不达标。同时，管片拼装时的微小错台在高压水下会被放大，使接缝密封垫受力不均，形成局部渗漏隐患。盾构掘进中，需对盾尾密封油脂、主驱动密封润滑脂等进行动态补充，高压水会导致油脂注入压力难以控制，压力不足则无法形成有效密封屏障，压力过高又可能击穿密封结构或造成油脂浪费。此外，密封件更换需在带压环境下进行，操作空间受限且易引发涌水风险。高压水下，一旦出现渗漏，水流速度快、携砂能力强，若不能在短时间内封堵，可能迅速发展为大规模涌水涌砂，威胁施工安全。因此，对密封系统的实时监测和应急响应提出了更高要求。

二、盾构机关键部位防水密封技术要点

（一）主驱动密封技术

主驱动密封是盾构机防水密封的关键部位之一，常见的密封结构有唇形密封、迷宫密封和组合密封等。在高压水条件下，组合密封结构因其良好的密封性能而被广泛应用。例如，采用多道唇形密封与迷宫密封相结合的方式，唇形密封可有效阻止介质的泄漏，迷宫密封则通过增加泄漏路径和阻力，进一步提高密封效果。这种组合密封结构能够适应高压、高转速的工作环境，确保主驱动系统的密封可靠性。另外，主驱动密封的安装质量直接影响其密封性能。在安装过程中，需严格按照安装工艺要求进行操作，确保密封件的安装位置准确、密封间隙均匀。例如，唇形密封的唇边应正确贴合在密封面上，避免出现扭曲或损伤。定期对主驱动密封进行维护检查，及时更换磨损或老化的密封件，确保密封系统的正常运行。同时，加强对主驱动密封处的润滑管

理，合理选择润滑油脂，保证密封件在良好的润滑条件下工作，降低磨损程度^[3]。

（二）盾尾密封技术

盾尾密封通常采用多道钢丝刷密封结构，一般设置3-4道钢丝刷。在高压水条件下，可适当增加钢丝刷的道数或优化钢丝刷的排列方式，提高密封效果。例如，采用交错排列的钢丝刷结构，能够增加密封路径的曲折程度，有效阻挡泥水和浆液的侵入。同时，在钢丝刷之间设置密封油脂腔，通过注入密封油脂来填充钢丝刷之间的间隙，形成一道可靠的密封屏障。同时，密封油脂是盾尾密封的重要组成部分，其性能直接影响盾尾密封效果。在高压水条件下，应选用高粘度、高耐压、抗冲刷性能好的密封油脂。例如，含有特殊添加剂的膨润土基密封油脂，具有良好的粘附性和抗水性，能够在高压水下形成稳定的密封膜。密封油脂的注入量和注入压力需根据盾构机的掘进速度、地层水压等参数进行精确控制。一般来说，掘进速度越快、水压越高，密封油脂的注入量和注入压力也应相应增大。通过安装在盾尾的压力传感器和流量传感器，实时监测密封油脂的注入情况，确保密封油脂的注入满足密封要求。除此之外，在盾构机掘进过程中，盾尾密封刷会因磨损而逐渐失去密封性能，需要定期进行更换。在高压水条件下，盾尾密封刷的更换难度较大，风险也较高。因此，在设计盾构机时，应考虑密封刷的更换便利性，例如设置专门的密封刷更换装置。同时，制定完善的应急处理预案，当盾尾出现大量涌水涌砂等紧急情况时，能够迅速采取有效的应急措施，如注入双液浆或聚氨酯等堵漏材料，进行封堵处理，确保施工安全。

（三）铰接密封技术

盾构机铰接密封主要用于防止泥水和浆液从盾构机的铰接部位泄漏。常见的铰接密封结构有橡胶密封带、钢质密封环和组合密封等。橡胶密封带具有良好的柔韧性和弹性，能够适应盾构机铰接部位的变形，但在高压水下其密封性能相对较弱。钢质密封环则具有较高的强度和耐压性能，但安装和维护较为复杂。在高压水条件下，常采用橡胶密封带与钢质密封环相结合的组合密封结构，充分发挥两者的优势，提高铰接密封的可靠性。铰接密封材料应具备良好的耐水性、耐腐蚀性和抗挤压性能。橡胶密封带一般采用三元乙丙橡胶等耐水、耐腐蚀性能好的橡胶材料制作。钢质密封环则需选用高强度、耐磨损的钢材，并进行表面防腐处理，如镀锌、镀铬等，以提高其抗腐蚀性能。此外，为提高密封材料的密封性能，可在橡胶密封带与钢质密封环之间添加密封垫或密封胶，增强密封效果。铰接密封的安装精度要求较高，安装过程中需确保密封结构的各个部件安装牢固、密封间隙均匀。例如，橡胶密封带应紧密贴合在铰接部位的密封槽内，不得出现松动或扭曲现象。钢质密封环的连接螺栓应均匀拧紧，保证密封环的密封性能。在盾构机调试阶段，对铰接密封进行严格的密封性测试，检查是否存在泄漏现象。如有泄漏，及时查找原因并进行调整，确保铰接密封在盾构机掘进过程中正常工作^[4]。

三、防水密封施工工艺控制要点

（一）管片制作与拼装精度控制

管片作为盾构隧道的永久衬砌结构，其制作精度对防水密封至关重要。在高水压条件下，应采用高精度钢模制作管片，严格控制管片的尺寸偏差。例如，管片的宽度偏差应控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内，弧长和弦长偏差控制在 $\pm 1.0\text{mm}$ 以内。同时，优化管片混凝土配合比，提高混凝土的密实性和抗渗性，确保管片自身的防水性能。在管片制作过程中，加强对原材料质量的检验和生产过程的质量控制，保证管片质量的稳定性。管片拼装时，严格按照设计要求和拼装顺序进行操作，确保管片的定位准确。采用先进的管片拼装设备，如具有高精度定位功能的拼装机，提高管片拼装的精度。控制管片拼装的错台量，环向错台量一般控制在 5mm 以内，纵向错台量控制在 3mm 以内。错台量过大会导致管片接缝处的防水密封垫无法有效压紧，从而降低防水密封效果。在管片拼装完成后，及时对管片的椭圆度进行测量和调整，确保管片衬砌环的椭圆度符合设计要求，一般控制在 $6\% D$ 以内。

（二）密封垫的粘贴与安装

根据高水压条件和隧道工程的特点，选择合适的密封垫材料和型号。常用的密封垫有三元乙丙橡胶密封垫、遇水膨胀橡胶密封垫等。三元乙丙橡胶密封垫具有良好的耐老化、耐水性和弹性；遇水膨胀橡胶密封垫则在遇水后能够膨胀，填充密封间隙，提高密封性能。在密封垫采购过程中，严格按照相关标准进行检验，确保密封垫的尺寸、硬度、拉伸强度等性能指标符合要求。对密封垫的外观质量进行检查，不得有气泡、裂纹、缺胶等缺陷。在管片粘贴密封垫前，对管片粘贴面进行清洁处理，去除油污、灰尘等杂质，确保粘贴面干燥、平整。采用专用的粘贴胶将密封垫牢固地粘贴在管片上，粘贴过程中注意密封垫的位置准确，不得出现偏移或扭曲现象。密封垫的接头应采用搭接或硫化对接的方式进行处理，搭接长度一般不小于 100mm ，硫化对接时应确保对接质量，保证接头处的密封性能。粘贴完成后，对密封垫的粘贴质量进行检查，确保密封垫粘贴牢固，无松动现象。在管片吊运和拼装过程中，采取有效的保护措施，防止密封垫受到损坏。例如，在管片吊运时，使用专用的吊具，避免管片与吊具

之间的碰撞对密封垫造成损伤。在管片拼装过程中，操作人员应轻拿轻放，避免密封垫被刮伤或挤压变形。当发现密封垫有损坏时，及时进行修补或更换，确保密封垫的密封性能不受影响。

（三）嵌缝施工工艺

嵌缝材料应具备良好的粘结性、弹性、耐水性和抗老化性能。在高水压条件下，可选用环氧树脂类、聚硫橡胶类等嵌缝材料。环氧树脂类嵌缝材料具有较高的粘结强度和硬度，但弹性相对较差；聚硫橡胶类嵌缝材料则具有良好的弹性和耐水性，能够适应管片接缝的变形。根据工程实际情况，也可采用两种或多种嵌缝材料复合使用的方式，取长补短，提高嵌缝效果。嵌缝施工前，对管片接缝进行清理，去除杂物、灰尘和积水等。使用专用的工具将嵌缝材料均匀地嵌入管片接缝的嵌缝槽内，嵌入深度一般不小于 20mm 。嵌缝过程中，注意嵌缝材料的密实度，避免出现空洞或气泡。嵌缝完成后，对嵌缝表面进行修整，使其与管片表面平齐，并保证嵌缝材料的表面光滑。在嵌缝材料固化前，采取保护措施，防止嵌缝材料受到外力破坏。嵌缝施工完成后，按照相关标准和规范对嵌缝质量进行检验和验收。检查嵌缝材料的填充密实度、粘结牢固程度以及表面平整度等。采用外观检查、敲击检查等方法进行质量检验，对于不合格的部位，及时进行返工处理。同时，对嵌缝施工的相关资料进行整理和归档，确保施工质量的可追溯性^[5]。

四、结束语

总之，高水压条件下地铁盾构机防水密封施工技术要点涵盖了盾构机关键部位的密封技术、施工工艺控制以及质量控制与监测等多个方面。通过合理选择密封结构和密封材料、严格控制施工工艺精度、加强施工质量控制与监测等措施，可以有效提高盾构机防水密封的可靠性，保障高水压条件下地铁盾构施工的安全与顺利进行。随着地铁建设向更复杂地质条件区域的推进，还需不断深入研究和创新盾构机防水密封技术，以应对未来工程建设中可能面临的各种挑战，为城市地铁事业的可持续发展提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 张志萌. 富水地层地铁盾构管片接缝和车站关键部位防水技术研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2023, (02): 73-78.
- [2] 沈子贺, 郭义, 王浩楠, 等. 地铁盾构管片接缝的防水施工分析 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(19): 120-122.
- [3] 罗拥辉. 地铁盾构管片连接处密封垫防水性能分析 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [4] 龚国栋, 丁超, 李宏亮, 等. 地铁盾构隧道管片接缝复合型密封垫防水研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(05): 1563-1568+1579.
- [5] 朱耀民. 浅谈地铁盾构隧道的防水技术 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2020, (15): 68.