

铁路隧道工程防水施工技术探索

王 强

中铁上海工程局集团工程检测有限公司 上海 200000

摘 要：铁路隧道穿越地层水文地质条件复杂，渗漏水问题一直是施工与运营阶段的突出难题。本文从隧道渗漏水成因出发，梳理了围岩水文地质、衬砌结构变形与接缝渗漏等多重致渗因素，构建了分层阻隔、分区防控的防水施工技术体系。文章围绕主体结构防水关键技术、特殊部位防水处理、质量控制及新型材料应用等层面展开分析，探讨了防水板铺设、施工缝处理、穿墙管道封堵及洞口段防水等施工工艺的具体实施路径，并对新型防水材料复合防水结构的应用前景加以梳理，为铁路隧道防水施工提供技术参考。

关键词：铁路隧道；防水施工；衬砌结构；渗漏治理；复合防水

引言：铁路隧道穿越地层水文地质条件复杂多变，围岩含水状态与岩土特性对防水施工形成多重约束。衬砌结构变形、施工缝渗漏及穿墙管件周边渗水等问题，使隧道防渗面临严峻考验。传统防水施工工艺在精度与适应性方面逐渐显露不足，难以匹配复杂地质条件下的长期防渗需求。系统梳理渗漏水成因与防水施工技术体系，从主体结构到特殊部位逐层展开技术分析，对提升隧道防渗施工水平具有现实意义。

1 铁路隧道渗漏水成因与防水施工技术体系

1.1 隧道围岩水文地质条件对防水施工的制约分析

铁路隧道施工区间穿越的地层结构复杂多变，不同地层的含水状态与岩土特性会对防水施工开展形成不同程度的约束。地层岩土孔隙结构的差异会改变水体渗透的传播路径，岩土密实度会直接影响水体渗透的难易程度，让防水作业需要适配地层固有属性调整施工模式。地下水的赋存形态存在多样化特征，稳定含水层与裂隙渗水层的分布状态，会改变防水施工的作业重点与施工难度。地质层内部的岩体破碎程度会影响支护结构的贴合效果，增加水体渗透的潜在通道，提升防水施工的作业难度^[1]。水文地质环境的不确定性，要求防水施工开展前充分适配场地地层条件，调整施工布置与技术手段，规避地层环境带来的施工阻碍。

1.2 衬砌结构变形与接缝渗漏的施工诱因

隧道衬砌结构施工过程中的工序管控偏差，会造成结构成型后出现细微形变，破坏结构整体的密闭性能。混凝土浇筑过程中材料拌合均匀度不足、养护管控不到位等施工行为，会让衬砌结构产生细微裂隙，为水体渗透提供流通空间。结构接缝施工阶段的表层处理不平整，会造成接缝位置贴合密实度不足，弱化接缝区域的密闭防水能力。衬砌结构施工过程中的应力管控失衡，

会让结构成型后出现持续性的微量形变，逐步扩大结构缝隙的空间尺度。施工工序的精细化管控不足，会持续影响衬砌结构整体密封性，引发隧道内部常态化的渗漏问题。

1.3 铁路隧道防水施工技术体系的构成逻辑

铁路隧道防水施工技术体系依托隧道整体防渗需求搭建，围绕结构密闭、水体阻隔、隐患防控多个维度形成完整作业框架。体系搭建遵循分层阻隔、分区防控的核心思路，结合隧道围岩状态与结构布局规划对应的施工技术。各类防水施工技术依据作业层级进行合理排布，覆盖前期围岩防渗、中期结构防水、后期接缝处理的全施工流程。技术体系内部各施工环节相互衔接互补，消除单一施工技术的作业短板，构建全方位的隧道防渗防护格局。整体体系围绕隧道长期防渗稳定的核心需求搭建，适配铁路隧道复杂的施工环境与结构特征。

1.4 防水等级划分与施工技术选型的对应关系

铁路隧道根据使用功能与运营需求划分不同防水标准，不同防水标准对应差异化的施工技术方案。防水标准层级的提升，会对施工材料选型、工艺精度、作业流程提出更为严格的要求。低层级防水标准适配常规防渗施工工艺，侧重基础水体阻隔作业，满足隧道基础防渗运营需求。高层级防水标准需要搭配精细化施工工艺与高性能防渗材料，强化结构密闭性与长效防渗能力。防水等级的差异化设定，让施工技术选型更具针对性，实现施工资源合理调配与防渗质量精准把控。

2 铁路隧道主体结构防水施工关键技术

2.1 初期支护与二次衬砌防水层铺设技术

铁路隧道双层支护结构之间的防水层铺设，是主体结构防渗防护的核心工序，直接决定整体防水体系的完整程度。初期支护作业完成后，结构表层会留存粗糙基

面与细微凸起结构,基面打磨与整平处理能够保障防水层贴合状态均匀稳定^[2]。柔性防水卷材的铺设作业需要把控张拉松紧程度,维持材料平铺舒展的状态,规避褶皱堆积引发的局部防渗薄弱区域。卷材搭接区域的贴合处理需要保持连续规整,保障双层衬砌之间形成密闭的隔水夹层。二次衬砌施工推进过程中,需要做好防水层的防护管控,规避混凝土浇筑作业对防水卷材造成的磨损与移位问题。精细化的铺设流程能够强化支护结构整体隔水能力,筑牢隧道主体结构的基础防渗屏障。

2.2 隧道施工缝、变形缝防水处理技术

隧道分段施工形成的接缝结构,属于整体防水体系中的薄弱区域,也是渗漏问题的高频发生区域。接缝位置需要开展基面清理与杂质剔除作业,保障防水填充材料与结构本体充分结合。止水构件的安装作业需要把控埋设深度与平直程度,让构件与混凝土结构形成稳固结合状态。接缝填充材料的铺设需要保持密实连续,杜绝空隙与夹层等施工缺陷产生。结构形变产生的位移余量需要纳入施工考量,适配隧道运营阶段的结构形变特征,避免刚性约束引发的防水结构破损。针对性的接缝处理工艺能够弱化结构缝隙带来的渗水隐患,提升隧道整体防渗连续性。

2.3 穿墙管道与预埋件周围防水封堵技术

隧道各类管线穿行布设与构件预埋施工,会打破衬砌结构的整体密闭性,产生零散渗水通道。管道与预埋件安装就位后,周边空隙需要采用适配的封堵材料进行分层填充压实,缩小结构间隙。柔性封堵材料可以适配结构微小形变,缓解构件与混凝土结构材质差异带来的贴合缝隙。表层密封处理需要覆盖所有衔接界面,阻断水体沿构件外壁渗透的路径。封堵作业需要贴合构件布设形态调整施工方式,适配异形构件与管线的封堵作业需求,消除局部防渗盲区。稳定的封堵施工能够还原衬砌结构的密闭属性,细化隧道细部防渗管控。

2.4 喷射混凝土表面防水层施工工艺

喷射混凝土成型后的结构表层存在孔隙率偏高、表面不平整的结构特点,整体抗渗性能偏弱。表层预处理作业需要填补表层孔隙、修整凹凸结构,打造平整均匀的防水作业基面。防水涂层的喷涂作业需要遵循分层均匀的施工原则,控制单次喷涂厚度与覆盖范围,保障涂层成型厚度均匀统一。涂层固化阶段需要做好环境管控,规避外界扰动影响涂层成型质量。适配的喷涂工艺可以提升防水涂层与混凝土基层的结合强度,强化喷射混凝土结构表层的整体抗渗能力,完善隧道初期支护的防水体系。

3 铁路隧道特殊部位与薄弱环节防水施工技术

3.1 隧道洞口段防水施工技术

隧道洞口段直接连通外部自然环境,土体长期暴露在大气环境中,岩土含水率极易受天气与地表径流影响产生波动。洞口区域土体结构稳定性偏弱,岩土松散程度更高,水体渗透通道更为发育,整体防渗条件相对恶劣^[3]。防水施工开展过程中需做好地表径流疏导处理,减少积水堆积对洞口土体的持续浸润侵蚀。坡面防渗处理作业能够加固表层土体结构,阻断地表水向下渗透的路径。洞口衬砌结构施工需强化表层密闭处理,细化结构衔接位置的防渗作业,弱化外部水体对隧道内部结构的渗透影响。针对性的施工处理方式可以提升洞口区域整体防渗稳定性,弥补洞口位置先天防水短板。

3.2 隧道底部仰拱与排水沟防水施工技术

隧道底部结构长期汇集围岩渗水与路面积水,水体堆积停留时间更长,是隧道内部防渗防护的重点区域。仰拱混凝土施工需严控基面清理质量,消除基底松散杂质,保障结构成型的密实度。结构浇筑过程中均匀把控材料填充状态,减少内部孔隙产生,提升基底结构自身抗渗能力。排水沟布设施工需合理控制坡度与线型,保障积水可以顺畅排出,降低水体长期滞留带来的渗透风险。沟槽与仰拱衔接区域需做密闭强化处理,封堵结构缝隙,避免水体沿衔接位置渗入底层围岩结构。

3.3 明洞与暗洞过渡段防水衔接施工技术

明洞结构与暗洞结构的施工工艺存在差异,两类结构衔接位置容易形成防水断层,成为隧道防渗体系的薄弱区域。过渡段施工需要统一衔接基面的处理标准,保证防水结构连续延展,杜绝防渗空白区域出现。防水层搭接施工需要延伸覆盖两类结构的衔接界面,保持隔水结构整体连贯统一。结构浇筑成型阶段强化衔接位置的振捣作业,提升混凝土结合密实程度,弱化结构分界带来的防渗缺陷。精细的衔接施工工艺可以打通不同结构防水体系的关联壁垒,维持隧道整体防渗体系的完整性。

3.4 富水地段与断层破碎带防水加强施工技术

富水地层与断层破碎带岩土整体性较差,围岩裂隙发育密集,地下水渗透动力更强,常规防水工艺难以满足防渗需求。施工前期可通过围岩加固作业稳定地层状态,缩减岩土内部裂隙空间,从源头降低水体渗透通量。防渗施工可增设多层防水结构,叠加隔水屏障,提升地层水体阻隔能力。结合地层渗水特征调整施工工艺,强化结构整体抗渗等级,适配高含水地层的复杂施工环境。针对性的加强处理方式可以有效应对复杂地质带来的防渗压力,提升特殊地质区段隧道运营的防渗稳

定性。

4 铁路隧道防水施工质量控制与技术改进方向

4.1 防水材料进场检验与施工过程质量控制要点

防水工程整体质量依托材料基础性能支撑,材料质检工作是把控隧道防水施工质量的核心前置环节^[4]。各类防水主材与辅助用材进场后,需要开展系统化性能核验,筛查材料表层成型缺陷与性能不稳定问题。规范材料储存与堆放管理模式,隔绝潮湿环境与外力磨损带来的材料性能损耗,保证用材投入施工前保持稳定状态。施工现场需要搭建常态化质量管控机制,严格规范基面处理、材料铺设、结构浇筑的各项作业标准。施工人员需要规范操作行为,严控材料铺设厚度、搭接宽度与贴合密实程度,从施工源头减少防水结构成型缺陷。全流程的管控模式可以稳定防水结构基础性能,为隧道防渗体系搭建提供可靠基础保障。

4.2 防水层破损检测与渗漏修复施工技术

隧道防水结构在施工成型与后续建设工序推进中,容易受机械扰动、结构微变形、人工操作影响产生隐性破损。针对性的检测作业可以全面排查防水层开裂、孔洞、脱空及搭接失效等各类隐患,精准定位结构薄弱区域。各类破损问题需要匹配适配的修复工艺,对局部破损区域进行清理、补强与密封处理,恢复防水层连续完整的隔水能力。渗漏治理作业需要兼顾表层封堵与深层结构加固,处理结构内部的渗水通道,规避表层修补后渗漏问题反复出现的情况。常态化的检测修复作业能够持续维护防水体系完整性,提升隧道结构防渗耐久性能。

4.3 新型防水材料 with 复合防水结构的施工应用

传统防水用材性能局限逐步凸显,难以适配复杂地质条件下隧道长期防渗运营的建设需求。行业迭代升级催生多款高韧性、高抗渗、耐老化的新型防水材料,能够适配隧道复杂施工环境与结构形变特征。单一防水材料构建的防水结构存在防护短板,多层材料搭配组成的复合防水结构可以形成多级隔水屏障。不同材质的防水构件可以互补性能优势,提升整体结构抗渗能力与形变

适应能力。依据隧道不同区段的地质条件与防渗需求,合理搭配材料组合方式,优化复合结构布设形式,能够显著提升隧道防水体系的整体稳定性。

4.4 防水施工工艺的精细化改进与工效提升路径

传统防水施工工艺作业模式较为粗放,工序划分不够精细,容易引发施工精度不足、资源浪费等各类问题。对现有施工工艺进行精细化升级,细化各道工序的作业标准与操作细节,缩小施工偏差范围。优化各施工环节的衔接流程,理顺作业推进顺序,减少工序停滞与重复作业情况^[5]。结合隧道施工现场环境与结构特点调整工艺细节,提升施工工艺对各类作业场景的适配程度。工艺体系的持续优化可以在稳定施工质量的前提下,精简无效作业环节,提升防水施工整体作业效率,推动隧道防水施工技术朝着精细化、标准化方向稳步升级。

结束语

铁路隧道防水施工已从单一材料封堵演进为多层级、多技术协同的系统化作业模式。围岩防渗、主体结构防水、特殊部位处理及质量管控等环节的技术衔接日趋紧密,新型防水材料 with 复合防水结构的引入进一步拓宽了施工技术的适用边界。施工工艺的精细化改进与检测修复机制的常态化运行,为隧道防渗体系的长期稳定提供了技术保障。伴随材料性能升级与工艺标准完善,铁路隧道防水施工正朝着精细化与标准化方向持续推进。

参考文献

- [1]孙胜利.铁路隧道工程防水施工技术与质量控制探讨[J].高铁速递,2024(5):150-152.
- [2]王强.高寒地区铁路隧道防水施工技术分析[J].运输经理世界,2022(30):74-76.
- [3]高立军,杜向凡.高速铁路工程中的隧道支护与防水技术研究[J].现代工程科技,2025,4(23):53-56.
- [4]梁晨义.富水铁路隧道仰拱开挖及衬砌防水施工技术[J].建筑机械化,2025,46(1):100-103.
- [5]李金澳.铁路隧道防水层的施工技术 & 质量控制策略[J].设备管理与维修,2022(8):141-142.