

隧道施工堵漏技术应用

古文瑞 武玉波 王 曜 赵福军
北京京能地质工程有限公司 北京 102300

摘要：隧道施工中渗漏水危害显著，威胁结构安全、运营安全，造成经济损失与环境污染。堵漏技术需适应不同条件，材料具高性能，遵循安全、因地制宜等原则。常见技术有注浆、高分子材料、结构补强等。应用时需检测评估、合理选技术、控制工艺质量并监测效果。优化措施包括技术创新、施工管理、人才培养及标准规范与行业协作。

关键词：隧道施工；堵漏技术；注浆法；防水材料

1 隧道施工堵漏需求与原则分析

1.1 隧道渗漏水危害分析

隧道渗漏水是隧道施工与运营过程中极为常见且危害严重的问题。从结构安全层面来看，长期渗漏水会对隧道衬砌结构造成侵蚀，尤其是地下水若含有硫酸盐、碳酸盐等腐蚀性物质，会与衬砌混凝土中的成分发生化学反应，导致混凝土结构强度下降、钢筋锈蚀，进而使衬砌开裂、剥落，严重威胁隧道的整体稳定性与使用寿命。在运营安全方面，渗漏水会使隧道内路面湿滑，增加车辆打滑、失控的风险，影响行车安全；潮湿的环境还可能引发电气设备故障，导致照明、通风、通信等系统无法正常运行，危及隧道内人员和车辆的安全。隧道渗漏水还会带来巨大的经济损失。为修复因渗漏水损坏的结构和设备，需要投入大量的人力、物力和财力；而且，渗漏水导致的隧道维修、养护频率增加，也会大幅提高运营成本。在环境保护方面，隧道渗漏水若未经处理直接排放，可能会对周边地下水环境造成污染，破坏生态平衡。

1.2 堵漏技术需求分析

鉴于隧道渗漏水的诸多危害，对堵漏技术提出了多方面的严格需求。首先，堵漏技术必须具备良好的适应性，能够应对不同地质条件、隧道结构形式和渗漏水状况^[1]。其次，堵漏材料要具备优异的性能。堵漏材料需有高强度、高粘结性，确保与隧道衬砌紧密结合，防止二次渗漏；同时还应具备良好的耐水性、耐腐蚀性和耐久性，能够在长期潮湿、侵蚀性环境下保持稳定的堵漏效果。另外，堵漏技术还需满足施工便捷、高效的要求，尽量缩短施工周期，减少对隧道正常运营的影响；并且要具备一定的经济性，在保证堵漏效果的前提下，合理控制成本。

1.3 堵漏技术应用原则

在隧道施工堵漏技术的应用过程中，需遵循一系列

重要原则。安全第一原则是首要准则，施工过程中必须采取完善的安全防护措施，确保施工人员的生命安全，同时避免因堵漏施工对隧道既有结构造成二次破坏。

“因地制宜，综合治理”原则也至关重要。要根据隧道渗漏水的具体情况，如渗漏部位、渗漏水量、水质特性等，结合地质条件和隧道结构，综合运用多种堵漏技术和材料，制定科学合理的堵漏方案。还应遵循“预防为主，防治结合”原则。在隧道施工阶段，就应做好防水措施，减少渗漏水隐患；一旦出现渗漏水问题，及时采取有效的堵漏措施，并总结经验教训，防止类似问题再次发生。同时要注重环保原则，选用环保型堵漏材料，避免施工过程中对环境造成污染。

2 隧道施工常见堵漏技术分析

2.1 注浆堵漏技术

注浆堵漏技术是隧道施工中应用广泛的堵漏方法之一。该技术通过将具有一定压力的浆液注入隧道渗漏水部位的缝隙、孔洞或空洞中，浆液在压力作用下扩散、填充并固化，从而达到封堵渗漏水通道的目的。根据注浆材料的不同，可分为水泥注浆、化学注浆和混合注浆等，水泥注浆材料来源广泛、成本较低，适用于较大缝隙和孔洞的渗漏水处理，但其凝结时间较长，对于细微裂隙的封堵效果不佳。化学注浆材料如聚氨酯、环氧树脂等，具有良好的渗透性和粘结性，能够渗入细微裂隙，快速固化，止水效果显著，但成本相对较高，部分化学材料还存在一定的毒性和环境污染问题。混合注浆则结合了水泥和化学注浆材料的优点，取长补短，适用于复杂的渗漏水情况。在施工过程中，注浆压力、注浆量和注浆顺序等参数的控制至关重要。合理的注浆压力能够保证浆液充分扩散并填充缝隙，压力过大可能导致隧道结构破坏，压力过小则无法达到预期的堵漏效果；注浆量需根据渗漏水情况和缝隙大小进行精确计算；注浆顺序则要遵循先外后内、先下后上的原则，确保浆液

能够有效封堵渗漏水通道。

2.2 高分子防水材料堵漏技术

高分子防水材料堵漏技术主要利用高分子材料的优异性能来实现堵漏目的。常见的高分子防水材料有防水卷材、防水涂料和密封胶等。防水卷材具有良好的耐水性、耐候性和拉伸强度，施工时通过热熔、冷粘等方式将卷材铺设在隧道衬砌表面，形成连续的防水层，阻止水的渗透。防水涂料则是在隧道衬砌表面涂刷形成一层致密的防水膜，其施工简便，能够适应复杂的形状和部位，对于隧道的阴阳角、变形缝等部位具有良好的防水效果。密封胶主要用于隧道接缝、裂缝的密封处理，它具有良好的弹性和粘结性，能够在接缝处形成紧密的密封，防止水的渗漏。高分子防水材料堵漏技术的关键在于材料的选择和施工工艺。在材料选择上，要根据隧道的使用环境、渗漏水情况和设计要求，选择合适的高分子防水材料。

2.3 结构补强堵漏技术

结构补强堵漏技术是针对因渗漏水导致隧道结构损坏的情况而采用的一种综合堵漏方法。该技术不仅要解决渗漏水问题，还要对受损的隧道结构进行补强加固，恢复其承载能力和稳定性。常见的结构补强方法有粘贴钢板、碳纤维加固和喷射混凝土等。粘贴钢板是将钢板通过结构胶粘贴在隧道衬砌表面，与衬砌共同受力，提高结构的承载能力；碳纤维加固则是利用碳纤维布或碳纤维板的高强度特性，通过粘结剂粘贴在衬砌表面，增强结构的抗拉、抗剪性能；喷射混凝土是在隧道衬砌表面喷射一层混凝土，增加结构的厚度和强度，同时起到防水作用。在进行结构补强堵漏时，首先要对隧道结构的受损情况进行全面检测和评估，确定合适的补强方案^[2]。然后，在处理渗漏水问题的基础上，按照补强方案进行施工。施工过程中要注意材料的质量控制和施工工艺的规范操作，确保补强效果和堵漏效果的双重实现。

2.4 其他堵漏技术

除了上述常见的堵漏技术外，还有一些其他的堵漏技术在特定情况下也能发挥重要作用。另外，电渗排水堵漏技术通过在隧道衬砌中埋设电极，利用电渗原理将地下水排出，降低地下水位，从而减少隧道渗漏水压力，达到堵漏目的。该技术适用于地下水位较高、渗漏水严重的隧道工程。还有微生物诱导碳酸钙沉淀堵漏技术，利用微生物的代谢作用，在渗漏水部位诱导碳酸钙沉淀，封堵渗漏水通道，这是一种环保、可持续的新型堵漏技术。

3 隧道施工堵漏技术应用要点

3.1 渗漏水检测与评估

准确的渗漏水检测与评估是隧道施工堵漏的前提和基础。渗漏水检测方法主要有目视检测、仪器检测和无损检测等。目视检测是最基本的检测方法，通过人工观察隧道表面的水渍、水流情况，初步判断渗漏水的部位和严重程度；仪器检测则利用压力传感器、湿度传感器等设备，对渗漏水的压力、流量、湿度等参数进行精确测量；无损检测技术如地质雷达、超声波检测等，能够检测隧道衬砌内部的缺陷和渗漏水通道，为堵漏方案的制定提供详细信息。在检测的基础上，要对渗漏水情况进行全面评估，评估内容包括渗漏水的类型（点漏、线漏、面漏）、渗漏水量、渗漏水质、渗漏部位的结构状况等。通过综合分析评估结果，确定渗漏水对隧道结构和运营的影响程度，为选择合适的堵漏技术和制定科学的堵漏方案提供依据。

3.2 堵漏技术选择策略

堵漏技术的选择应综合考虑多方面因素。首先，要根据渗漏水检测与评估结果，针对不同的渗漏水情况选择合适的堵漏技术。其次，要结合隧道的地质条件和结构特点。在软弱地层中，应选择对隧道结构扰动较小的堵漏技术；在岩石隧道中，则可根据岩石裂隙发育情况选择合适的注浆或封堵技术。另外，还要考虑施工成本、工期要求和环保要求等因素。在保证堵漏效果的前提下，选择成本合理、施工周期短且环保的堵漏技术，实现经济效益和社会效益的最大化。

3.3 施工工艺与质量控制

严格的施工工艺和质量控制是确保隧道堵漏效果的关键。在施工前，要做好施工准备工作，包括材料的采购、检验，设备的调试，施工人员的培训等。施工过程中，要严格按照施工方案和操作规程进行操作。以注浆堵漏为例，要准确控制注浆压力、注浆量和注浆时间，确保浆液充分填充渗漏水通道；在铺设防水卷材时，要保证卷材的搭接宽度和粘结质量；在进行结构补强时，要确保补强材料与衬砌的粘结牢固。同时要加强施工过程中的质量检测，及时发现和纠正施工中存在的问题，如通过现场取样检测材料的性能，利用无损检测技术检查施工质量等^[3]。

3.4 堵漏效果监测与评价

堵漏施工完成后，要对堵漏效果进行长期监测与评价。监测方法包括定期的目视检查、仪器检测和数据分析等。通过目视检查观察隧道表面是否还有渗漏水现象；利用仪器检测渗漏水压力、流量等参数的变化情况；对监测数据进行分析，评估堵漏效果的稳定性和持久性。如果在监测过程中发现堵漏效果不佳或出现新的

渗漏水问题，要及时分析原因，采取相应的补救措施。同时对堵漏效果的评价结果要进行总结和记录，为后续类似工程提供经验参考，不断提高隧道施工堵漏技术水平。

4 隧道施工堵漏技术应用优化措施

4.1 技术创新与材料研发

技术创新和材料研发是推动隧道施工堵漏技术进步的核心驱动力。在新型堵漏技术研究领域，纳米材料凭借其独特的小尺寸效应与表面效应，展现出巨大潜力。微生物技术也逐渐崭露头角，通过微生物诱导碳酸钙沉淀技术，利用微生物的代谢活动，在渗漏水通道中生成碳酸钙晶体，实现自修复堵漏，这种环保型技术对环境友好且可持续性强。同时对现有注浆、高分子防水等传统技术的工艺和参数优化也至关重要，如通过改进注浆设备和工艺，可提高注浆的精准度和效率。在高性能堵漏材料研发方面，需求极为迫切。传统堵漏材料在强度、耐久性等方面存在不足，研发更高强度、更好粘结性的材料，能确保与隧道衬砌牢固结合，防止二次渗漏。优异的耐水、耐腐蚀性能可使材料在长期潮湿、侵蚀性环境中稳定发挥作用。随着环保意识的增强，无毒、无害、可降解的绿色堵漏材料成为研发热点，这不仅符合环保要求，还能降低施工对环境的影响。通过持续的技术创新与材料研发，可有效提升隧道施工堵漏技术的整体水平，满足复杂隧道工程的多样化需求。

4.2 施工管理与人才培养

科学的施工管理和高素质的人才队伍是保障隧道施工堵漏技术有效应用的关键因素。在施工管理层面，建立完善的管理制度是基础。首先，要制定详细的施工流程和规范，明确各施工环节的操作标准，确保施工过程规范化。加强施工过程的组织协调，合理调配人力、物力和财力资源，保证施工顺利进行。严格的监督机制不可或缺，通过定期检查和随机抽查，及时发现并纠正施工中的问题，保障施工安全和质量。在进度管理上，运用科学的项目管理方法，制定合理的施工计划，对施工进度进行动态监控，及时调整施工安排，提高施工效率，避免工期延误。人才培养是提升施工技术水平的核心，对施工人员开展专业培训，涵盖理论知识讲解和实际操作训练，帮助他们掌握先进的堵漏技术和施工工艺，提高技术水平和操作技能。培养既懂技术又懂管理的复合型人才，使其能够在施工过程中有效组织协调，

解决技术难题，提升项目整体管理水平。积极开展技术交流和学术研讨活动，为技术人员搭建经验分享和知识更新的平台，促进他们及时了解行业最新动态和前沿技术，不断提升自身能力，为隧道施工堵漏技术的应用和发展提供有力的人才支持。

4.3 标准规范与行业协作

目前，隧道施工堵漏领域的标准规范尚存在不完善之处，相关部门和行业协会应发挥主导作用，组织科研机构、高校和企业等多方力量，共同制定和完善涵盖施工工艺、质量要求、检测方法等全方位的标准规范。明确不同地质条件、不同渗漏水状况下的施工工艺标准，规定严格的质量验收指标，统一科学的检测评估方法，为隧道堵漏工程提供统一、明确的技术依据，避免因标准不统一导致的工程质量参差不齐等问题^[4]。在行业协作方面，加强企业、科研机构和高校之间的交流与合作意义重大。建立信息共享平台，促进各方在技术研发成果、工程实践经验等方面的交流与共享，避免重复研发，提高研发效率。联合开展技术研发和攻关，整合各方优势资源，集中力量解决行业共性难题，推动新技术、新材料的研发和应用。积极推广先进的堵漏技术和经验，通过举办技术研讨会、现场观摩会等形式，促进技术在行业内的广泛应用，提升整个行业的技术水平，从而推动隧道工程行业的可持续发展，保障隧道工程的质量和安全。

结束语

隧道施工堵漏技术对工程安全与寿命至关重要。需持续技术创新与材料研发，强化施工管理与人才培养，完善标准规范与行业协作，以提升堵漏技术水平，保障隧道工程质量，推动行业可持续发展。

参考文献

- [1] 刘建丰.瓦斯隧道施工安全控制要点[J].石材,2025(2):28-30.
- [2] 王耀龙,梁庆,尹帆.软岩大变形公路隧道施工控制技术[J].施工技术(中英文),2025,54(9):135-139.
- [3] 赵广资,李克金,李春林,etal.盾构隧道施工诱发邻近单桩的振动响应规律[J].隧道建设(中英文),2025,45(2):295-303.
- [4] 宋剑锋.道路桥梁隧道施工难点及技术措施[J].运输经理世界,2025(5):83-85.