

注浆堵漏技术在深埋矿山法隧道的应用

李质朴

中铁隧道局集团(上海)特种高新技术有限公司 上海 浦东新区 200120

摘要: 深埋矿山法隧道地质条件复杂,渗漏水问题频发,严重影响工程安全与运营耐久性。本文分析了深埋矿山法隧道的地质特点及渗漏水风险,阐述了注浆堵漏技术的核心原理与材料体系,探讨了该技术在超前注浆、开挖后补注浆及特殊地质段的关键应用场景,明确了施工工艺流程、关键参数及控制要点。通过工程实践验证,注浆堵漏技术能有效封堵渗漏水通道、加固围岩,适配深埋隧道高水压、复杂地质工况,为深埋矿山法隧道渗漏水防控提供了可靠的技术支撑与实践参考。

关键词: 深埋矿山法隧道; 注浆堵漏技术; 应用场景; 施工工艺

引言: 随着我国交通与地下工程的快速发展,深埋矿山法隧道应用日益广泛,但此类隧道深埋地下,常穿越断层破碎带、岩溶发育区等不良地质段,高地应力、高水压等因素导致渗漏水问题突出。渗漏水不仅损害隧道结构性能,延误施工进度,还会引发安全隐患,制约工程长期稳定运营。注浆堵漏技术因适配性强、堵漏效果显著,成为深埋矿山法隧道渗漏水防控的核心手段。基于此,本文系统研究注浆堵漏技术在深埋矿山法隧道的应用,结合实际施工场景优化工艺与参数,为工程实践提供理论与技术指导。

1 深埋矿山法隧道工程特点与渗漏水风险分析

1.1 工程地质条件复杂性

深埋矿山法隧道的核心工程特点之一是地质条件极具复杂性,给施工和防水带来极大挑战。隧道深埋地下时,常穿越断层破碎带、软弱夹层、岩溶发育区等典型不良地质段,断层破碎带岩体松散、胶结性差,软弱夹层承载力低且易变形,岩溶发育区则存在不规则溶洞、暗河,均易形成地下水渗透通道。深埋环境下高地应力、高水压、高地温呈现耦合作用,高地应力易导致围岩变形、衬砌开裂,高水压直接加剧渗漏水风险,高地温则影响施工环境与材料性能,三者相互叠加,进一步增加了隧道工程的施工难度和渗漏水防控压力。

1.2 渗漏水的主要来源与危害

深埋矿山法隧道渗漏水的主要来源的渗漏路径具有多样性,核心包括地下水渗透、施工缝开裂、衬砌结构缺陷三大类。地下水通过围岩裂隙、岩溶通道直接渗透,施工缝因浇筑工艺不当、伸缩变形出现开裂,衬砌结构在施工过程中产生的蜂窝、孔洞等缺陷,均会成为渗漏水的主要通道。渗漏水会对隧道造成长期且严重的危害,不仅会侵蚀衬砌结构、降低其强度和耐久性,威胁隧道结

构安全,还会干扰施工进度、增加施工成本,同时可能污染周边地下水环境,影响周边生态平衡,长期渗漏水还会导致隧道内部设备损坏、路面湿滑,给后期运营带来安全隐患^[1]。

2 注浆堵漏技术原理与材料体系

2.1 注浆堵漏的核心原理

注浆堵漏技术是深埋矿山法隧道渗漏水防控的核心手段,其核心原理是通过专业设备将注浆材料以一定压力注入隧道围岩裂隙、施工缝及衬砌缺陷等渗漏水通道,借助浆液的物理化学作用实现堵水防渗,最终形成稳定可靠的隔水屏障。具体作用机制主要包括以下三点:(1)渗透、劈裂与压密作用:针对深埋隧道的细微裂隙,浆液在注浆压力作用下,凭借良好的流动性渗透至裂隙内部,填充所有空隙;当注浆压力超过围岩抗劈强度时,会将原有细微裂隙劈裂扩大,使浆液更充分地扩散填充;同时,浆液在渗透和凝固过程中,会对周围松散岩体产生挤压作用,实现岩体压密,减少渗漏水通道,提升围岩自身抗渗能力。(2)浆液固化后的力学与隔水特性:注浆材料注入通道后,通过化学反应或物理凝结完成固化,固化后形成的结石体具有良好的力学强度和隔水性能。结石体与隧道围岩、衬砌结构紧密结合,形成连续完整的隔水屏障,能够有效阻挡地下水渗透,同时增强围岩整体性和承载力,实现“堵水与加固”双重效果,适配深埋隧道高水压、复杂地质的实际工程需求。

2.2 注浆材料分类与性能要求

结合深埋矿山法隧道高水压、地质复杂、渗漏路径多样的实际特点,注浆材料需满足适配性强、性能稳定、施工便捷的要求,主要分为水泥基材料和化学材料两大类,各类材料的适用性及性能要求如下:(1)水泥基材料:以普通水泥、超细水泥为核心,是深埋隧道注浆堵

漏的常用材料,具有成本低、来源广、与围岩相容性好的优势。普通水泥适用于裂隙较宽(大于0.5mm)、渗水量较大的场景,但其颗粒较粗,难以渗透至细微裂隙;超细水泥颗粒粒径更细,可渗透至0.1~0.5mm的细微裂隙,适配深埋隧道复杂的裂隙分布,固化后结石体强度高、抗渗性好,能够承受高压作用,适合作为深层围岩加固与堵水的基础材料。(2)化学材料:主要包括丙烯酸盐、聚氨酯等,具有快速固化、渗透性能优异的特点,适配深埋隧道紧急堵漏及细微裂隙封堵需求。丙烯酸盐浆液流动性好、固化速度可调(几秒至几十分钟),固化后形成弹性凝胶体,抗渗性强,且能适应围岩微小变形,不易开裂;聚氨酯浆液分为水溶性和油溶性,固化后形成高强度、高弹性的结石体,不仅能有效堵水,还能填充衬砌结构的细微缺陷,耐久性强,可长期承受高压和地下水侵蚀,适用于复杂渗漏场景的补充封堵^[2]。

3 注浆堵漏技术在深埋矿山法隧道中的关键应用场景

3.1 超前注浆加固与止水

超前注浆加固与止水主要用于隧道开挖前对前方围岩进行预处理,提前封堵渗漏水通道、加固围岩,为后续开挖施工创造安全环境,尤其适用于富水地层、高压等复杂工况,实际工程中应用广泛。(1)富水地层中的帷幕注浆技术:在深埋富水砂层、砾石层等透水地层中,帷幕注浆是核心止水手段。施工时沿隧道轮廓线外一定距离布设注浆孔,采用环形或半环形布置方式,将注浆材料以高压注入地层,形成一道连续、完整的隔水帷幕,阻断地下水向隧道开挖区域渗透。例如某深埋矿山法隧道穿越富水砂卵石层,地下水位埋深仅3m,开挖前采用水泥-水玻璃双液浆进行帷幕注浆,注浆孔间距1.2m,注浆压力控制在1.5~2.0MPa,形成厚度1.5m的隔水帷幕,有效将隧道周边地下水位降至开挖面以下,杜绝了涌水、流沙等隐患,保障了开挖施工顺利进行。(2)掌子面稳定性控制与涌水风险降低:深埋隧道掌子面受高地应力、高压影响,易出现坍塌、涌水等事故,超前注浆可有效提升掌子面稳定性。施工中通过掌子面超前钻孔注浆,将浆液注入掌子面前方围岩裂隙及松散区域,固化后与围岩形成整体,增强掌子面岩体强度和整体性,同时封堵地下水通道,降低涌水风险^[3]。

3.2 开挖后补注浆与缺陷修复

开挖后补注浆与缺陷修复主要针对隧道开挖及衬砌施工后出现的围岩空洞、衬砌缺陷、渗漏水等问题进行针对性处理,弥补施工过程中的不足,保障隧道结构长期稳定性,是工程收尾阶段的关键工序。(1)衬砌背后空洞的回填注浆:深埋隧道衬砌施工中,由于混凝土浇

筑不密实、振捣不到位或围岩沉降等原因,易在衬砌背后形成空洞,空洞不仅会降低衬砌承载能力,还会成为渗漏水通道。回填注浆采用低压慢注的方式,通过衬砌预留注浆孔,将水泥浆或水泥砂浆注入空洞区域,直至浆液从周边缝隙溢出,确保空洞被完全填充,使衬砌与围岩紧密贴合,消除空洞隐患,同时增强衬砌结构的整体性和抗渗性。(2)施工缝、变形缝的精细化注浆处理:施工缝、变形缝是深埋隧道渗漏水的高发部位,由于施工缝浇筑衔接不紧密、变形缝伸缩变形导致密封失效,极易出现渗漏。精细化注浆处理需针对缝隙宽度、渗水量调整注浆材料和参数,对于宽度较小的缝隙,采用丙烯酸盐化学浆液,利用其良好的渗透性填充细微缝隙;对于宽度较大的缝隙,先采用聚氨酯浆液快速封堵,再用水泥浆加固,确保注浆后缝隙完全密封,同时在注浆完成后进行封孔处理,防止后期复漏,适配深埋隧道高压环境下的长期防水需求。

3.3 特殊地质条件下的注浆策略

深埋矿山法隧道常穿越岩溶发育区、断层破碎带等特殊地质段,此类区域地质条件极端复杂,渗漏水风险高、治理难度大,需采用针对性的注浆策略,结合地质特点优化注浆方案,确保堵漏效果。(1)岩溶发育区的充填注浆与溶洞治理:岩溶发育区存在不规则溶洞、暗河等,渗漏水通道复杂,注浆堵漏需兼顾充填与止水。对于小型溶洞,采用水泥-水玻璃双液浆进行充填注浆,快速固化填充溶洞,形成隔水层;对于大型溶洞,先采用块石、砂石等材料进行回填,再注入浆液加固,确保溶洞被完全封堵,同时对溶洞周边裂隙进行全面注浆,阻断地下水渗透路径,避免溶洞坍塌和大规模涌水。(2)断层破碎带的动态注浆设计:断层破碎带岩体松散、裂隙发育、渗水量大,且受高地应力影响易变形,需采用动态注浆策略。施工前通过超前地质探测明确断层范围、破碎程度及渗水量,分段布设注浆孔,采用“先稀后密、先浅后深、逐步升压”的方式注浆,根据注浆过程中的压力变化、浆液扩散情况,实时调整注浆参数和浆液配比。例如某深埋隧道穿越断层破碎带,断层宽度达8m,岩体松散且渗水量大,采用动态注浆设计,先注入聚氨酯浆液快速堵水,再注入超细水泥浆液加固,全程监测注浆压力和流量,确保浆液充分扩散,有效控制了断层破碎带的渗漏水 and 围岩变形^[4]。

4 深埋矿山法隧道注浆堵漏施工工艺与参数设计

4.1 注浆堵漏施工工艺流程

深埋矿山法隧道注浆堵漏施工需遵循规范流程,具体流程分为以下四个环节:(1)施工准备:清理隧道渗

漏区域杂物、浮渣,采用地质雷达、钻孔探测等方式,明确渗漏位置、裂隙分布及渗水量;调试注浆泵、搅拌机、钻孔机等设备,确保设备运行正常;按设计配比准备注浆材料,做好材料存放、防潮措施,同时划分施工区域,设置安全警示标识。(2)钻孔施工:根据渗漏情况确定孔位、孔径及孔深,采用精准钻孔技术作业,钻孔角度根据裂隙走向调整,避免钻孔偏离渗漏通道;钻孔完成后,清理孔内岩粉、积水,插入注浆管并固定,确保注浆管与孔壁贴合紧密,防止浆液泄漏。(3)浆液制备与注入:按照设计配比搅拌浆液,搅拌时间不少于3分钟,确保浆液均匀无结块;采用分段注浆方式,从下至上、从里至外逐步注入,控制注浆速度,避免压力骤升;注入过程中观察浆液扩散情况,及时调整注浆压力和流量。(4)注浆结束与封孔:当注浆压力达到设计值、浆液不再渗入或渗出量满足规范要求时,停止注浆;待浆液初凝后,采用水泥砂浆封堵注浆孔,压实抹平,确保封孔严密,避免后期复漏。

4.2 关键施工参数设计

结合深埋矿山法隧道高压、地质复杂的特点,关键施工参数需精准设计,适配实际工程需求,核心参数如下:(1)注浆压力:根据隧道埋深、水压及围岩特性确定,一般控制在1.5~3.0MPa,富水断层、岩溶区域可适当提高至2.5~4.0MPa,注浆压力需略高于地下水压力,确保浆液充分渗透,同时避免压力过高导致围岩破裂。(2)注浆孔参数:孔间距控制在1.0~1.5m,裂隙密集区可缩小至0.8~1.0m;孔径采用42~50mm,孔深根据渗漏深度确定,一般为1.5~3.0m,穿越断层、溶洞时需加深至5.0m以上,确保浆液覆盖整个渗漏区域。(3)浆液配比与凝结时间:水泥基浆液水灰比控制在0.8:1~1.2:1,超细水泥浆液水灰比为0.6:1~0.8:1;化学浆液根据材料类型调整配比,丙烯酸浆液固化时间控制在5~30分钟,聚氨酯浆液固化时间控制在10~60分钟,适配不同渗漏场景的施工需求。

4.3 施工过程控制要点

施工过程要严格把控各环节质量,杜绝施工隐患,核心控制要点如下:(1)钻孔质量控制:钻孔前复核孔位坐标,施工中实时监测钻孔角度和深度,避免钻孔偏差;钻孔完成后检查孔内情况,若出现塌孔,及时采用套管防护或填充水泥砂浆处理,确保钻孔畅通。(2)注浆压力与流量控制:注浆过程中采用压力表实时监测压力,设置压力预警值,若压力骤升或骤降,立即停止注浆,排查管路堵塞、孔壁破裂等问题;控制注浆流量为10~20L/min,保持流量稳定,避免浆液扩散不均。(3)施工安全控制:作业人员佩戴安全帽、防护手套等防护用品,高空作业设置防护架;注浆设备定期检修,避免设备故障导致浆液泄漏;施工现场配备应急物资,应对突水、浆液泄漏等突发情况,确保施工安全^[5]。

结束语:本文围绕注浆堵漏技术在深埋矿山法隧道的应用展开全面研究,结合工程实际需求,明确了技术原理、材料选型、应用场景及施工管控要点,解决了深埋隧道复杂地质条件下渗漏水治理的关键难题。实践证明,科学选用注浆材料、优化施工参数、严格把控施工过程,能有效提升堵漏效果,保障隧道结构安全与运营稳定。后续可进一步探索智能化注浆技术的应用,优化特殊地质段注浆方案,推动注浆堵漏技术向高效、精准、绿色方向发展。

参考文献:

- [1]刘香会,王利民,王浩,张恺伦,白磊.矿山法隧道止水帷幕注浆钻孔施工控制关键技术研究[J].建筑技术,2022,53(9):1146-1148.
- [2]梁智鹏.矿山法地铁隧道渗漏水注浆治理技术研究[J].建井技术,2022,43(3):47-52.
- [3]张永顺,王万仁,朱帆,张伟.模袋法分段注浆技术在复杂地质隧道中的应用[J].山西建筑,2021,47(4):129-131.
- [4]尉继东.隧道工程施工中灌浆法加固技术的应用[J].工程机械与维修,2022(3):143-145.
- [5]张平.深孔注浆技术在暗挖隧道施工中的应用[J].黑龙江交通科技,2021,44(5):126-127.