

深埋隧洞穿越破碎带的地表灌浆技术实践分析

刘成杰

云南恒诚建设监理咨询有限公司 云南 昆明 650000

【摘要】：深埋隧洞穿越破碎带时，断层、溶洞、涂泥及涌水等不良地质问题频发，易引发隧洞坍塌、施工停滞等隐患，制约工程推进。地表灌浆技术作为有效应对手段，可通过精准钻孔、合理注浆，实现破碎岩体加固与地下水封堵，保障施工安全与工程质量。结合施工实际，分析不良地质危害与灌浆技术应用要点，优化工艺与质量控制措施，为同类工程地表灌浆实践提供可靠参考。

【关键词】：深埋隧洞；破碎带；地表灌浆；断层涌水；溶洞处理

DOI:10.12417/2811-0528.26.08.038

深埋隧洞穿越破碎带时，断层、溶洞、涂泥及涌水等不良地质问题频发，易引发隧洞坍塌、施工停滞等安全隐患，严重制约工程推进。地表灌浆技术作为应对此类地质难题的有效手段，可通过精准钻孔、合理注浆，实现破碎岩体加固与地下水封堵，保障隧洞施工安全与工程质量。结合深埋隧洞施工实际，分析不良地质问题的危害与地表灌浆技术的应用要点，优化施工工艺与质量控制措施，解决技术应用中的各类难题，为同类工程的地表灌浆技术实践提供可靠参考。

1 深埋隧洞破碎带主要不良地质问题及危害

1.1 断层破碎带的地质特征及危害

深埋隧洞穿越的断层破碎带由断裂活动形成，岩体破碎、裂隙发育且无完整结构，整体强度显著下降。其内部岩体颗粒松散、连接性差，在深埋高地应力作用下易变形、坍塌，阻碍隧洞开挖^[1]。同时，断层作为地下水渗透通道，会导致地下水渗入隧洞，加剧岩体软化、降低稳定性，严重时引发突水、坍塌等灾害，威胁施工安全。其分布与发育程度直接影响施工难度，也对后续地表灌浆技术应用提出更高要求，需针对性制定加固与堵水方案。

1.2 溶洞地质的分布特点及危害

深埋隧洞施工中遭遇的溶洞，多形成于可溶岩地层，其分布无固定规律，形态、大小差异较大，部分溶洞内填充有软弱土体或地下水，地质条件极具不确定性。溶洞的存在会导致隧洞开挖过程中出现空洞坍塌风险，若溶洞规模较大，还可能造成隧洞断面变形、衬砌结构破坏。当溶洞与地下水连通时，会形成持续涌水，不仅软化周边岩体，还会带走岩体颗粒，扩大溶洞范围，加剧施工风险。溶洞的隐蔽性较强，施工前难以精准探测其具体位置与形态，易出现突发坍塌、涌水等意外情况，增加施工管控难度，需通过科学的技术手段实现溶洞填充与加固，消除地质隐患。

1.3 涂泥与涌水的共生危害及影响

涂泥层多分布于断层破碎带或溶洞周边，由细颗粒黏土物质组成，遇水后极易软化、崩解，形成流塑状土体，丧失承载能力。涌水现象则常与断层、溶洞相伴而生，地下水沿岩体裂隙、溶洞通道持续涌入隧洞，不仅会浸泡涂泥层，加速其软化进程，还会形成突泥涌水灾害，裹挟大量泥沙涌入隧洞，堵塞施工通道，损坏施工设备。涂泥与涌水的共生作用，会进一步破坏深埋隧洞周边岩体的稳定性，导致隧洞开挖过程中出现边坡坍塌、掌子面失稳等问题，严重时会造成施工停滞，增加工程建设成本，同时给施工安全带来严重威胁，需同步采取堵水与加固措施，破解二者共生带来的施工难题。

2 深埋隧洞地表灌浆技术核心原理及适用条件

2.1 地表灌浆技术的核心作用原理

地表灌浆技术的核心原理是在地表布设钻孔，将适配灌浆材料加压注入深埋隧洞破碎带及不良地质体，通过其胶结、填充作用，填补岩体裂隙、溶洞及涂泥层空隙，形成稳定灌浆帷幕与加固体^[2]。灌浆材料凝结硬化后，可提升岩体整体性、强度及抗变形、抗渗透能力，同时封堵地下水渗透通道、切断涌水来源，实现堵水与加固双重效果，且无需占用隧洞掌子面，可同步作业，规避空间限制与安全风险、提升施工效率。

2.2 地表灌浆技术的适用范围界定

地表灌浆技术适用于深埋隧洞穿越破碎带时各类不良地质问题的处理，尤其针对断层破碎带加固、溶洞填充、涂泥层改良及涌水封堵具有显著效果。对于断层破碎带，可通过灌浆形成加固帷幕，提升岩体整体性；对于空洞型溶洞，可注入灌浆材料填充空洞，消除坍塌隐患；对于涂泥层，可利用灌浆材料胶结细颗粒黏土，提升其强度与稳定性；对于各类涌水问题，可通过灌浆封堵渗透通道，实现地下水控制。该技术适用于深埋、地质条件复杂且洞内施工空间受限的场景，能够有效解决

洞内灌浆难以覆盖、施工难度大的问题，同时可配合其他施工技术，形成协同防控体系，适配不同类型的不良地质工况。

2.3 地表灌浆技术的核心应用优势

地表灌浆技术相较于洞内灌浆等其他处理技术，具有显著的应用优势。其施工场地位于地表，不受隧洞内部空间、施工进度限制，可同步开展灌浆作业与隧洞开挖准备工作，大幅提升施工效率。该技术灌浆范围广、深度深，能够精准覆盖深埋隧洞破碎带及不良地质体，形成全方位的加固与堵水帷幕，处理效果更为彻底。地表灌浆施工过程便于管控，可通过实时监测调整灌浆参数，有效避免洞内灌浆易出现的串浆、漏浆等问题，提升施工质量。该技术施工工艺成熟、设备适配性强，可根据不同地质条件优化灌浆方案，适配断层、溶洞、涂泥、涌水等各类复杂工况，实用性极强，在同类深埋隧洞工程中具有广泛的应用价值。

3 深埋隧洞地表灌浆技术施工工艺及优化措施

3.1 施工前期地质勘察与方案制定

地表灌浆施工前，需开展全面地质勘察，精准探明破碎带分布、断层发育、溶洞形态、涂泥层分布及地下水等水文地质条件，通过钻孔取芯、声波测井等方式明确核心隐患点。结合勘察结果制定针对性施工方案，明确钻孔参数、适配的灌浆材料与设备及灌浆关键参数，兼顾各类不良地质特殊性，优化工艺细节，保障方案科学可行，为后续施工奠定基础。

3.2 核心施工工序的规范实施要点

地表灌浆核心施工工序包括钻孔、制浆、灌浆及封孔，各工序的规范实施直接影响灌浆效果。钻孔施工需选用适配的钻机，采用定向钻孔技术，严格控制钻孔轨迹与偏斜率，避免钻孔偏差导致灌浆盲区或串浆问题，钻孔至设计深度后，对钻孔进行清理，去除孔内杂物与浮渣，确保灌浆通道畅通。制浆环节需按照设计配合比，选用符合要求的灌浆材料，确保浆液初始黏度低、流动性好、可注性强，能够渗透到细小的裂隙或空隙内，同时控制浆液凝胶时间，满足施工需求^[3]。灌浆施工采用高压注浆方式，根据地质条件调整注浆压力与流量，确保浆液充分填充岩体裂隙与空洞，对于涌水严重区域，可采用双液注浆快速胶结封堵。灌浆完成后，及时进行封孔处理，防止浆液流失与地下水倒灌，确保灌浆体的完整性与稳定性。

3.3 施工工艺的针对性优化策略

针对不同不良地质问题，需对地表灌浆施工工艺进行针对性优化。对于断层破碎带，优化钻孔布局，采用多分支钻孔方式，扩大灌浆覆盖范围，选用高强度灌浆材料，提升岩体加固效果；对于溶洞，根据溶洞大小与填充情况，调整灌浆压力与

浆液浓度，对于大型空洞，可采用分段灌浆方式，确保浆液充分填充，避免出现空洞残留；对于涂泥层，选用适配的灌浆材料，降低浆液黏度，增强浆液与涂泥层的结合能力，提升涂泥层强度；对于涌水区域，优化灌浆顺序，先封堵涌水通道，再进行全面灌浆，采用间歇注浆方式，避免高压涌水冲散浆液，同时选用不溶水注浆材料，提升堵水效果。可改进套阀管结构，避免灌浆过程中出现绕渗问题，优化灌浆方式，提升施工效率与灌浆质量。

4 地表灌浆技术在不良地质处理中的实践应用

4.1 断层破碎带的灌浆加固实践应用

在断层破碎带地表灌浆实践中，首先根据断层发育情况布设钻孔，钻孔沿断层走向均匀分布，确保灌浆体能够全面覆盖断层破碎区域。采用高压劈裂灌浆方式，将灌浆材料注入断层裂隙中，利用浆液的胶结作用，将松散的岩体颗粒胶结为整体，提升断层破碎带的整体性与强度^[4]。施工过程中，实时监测灌浆压力与浆液注入情况，根据岩体吸浆量调整灌浆参数，对于裂隙发育密集区域，适当提高灌浆压力，确保浆液充分渗透。针对断层与地下水连通的情况，同步采取堵水措施，通过灌浆封堵地下水渗透通道，切断涌水来源，避免地下水浸泡软化岩体。灌浆完成后，对加固效果进行检测，确保断层破碎带岩体强度与稳定性满足施工要求，为隧洞开挖提供安全保障。

4.2 溶洞与涂泥层的协同处理实践

对于溶洞与涂泥层共生的不良地质区域，采用地表灌浆技术进行协同处理，兼顾溶洞填充与涂泥层加固。针对溶洞，根据其形态与大小，采用填充灌浆与帷幕灌浆相结合的方式，先向溶洞内注入适量灌浆材料，填充空洞，再在溶洞周边布设帷幕灌浆钻孔，形成封闭的灌浆帷幕，防止地下水渗入与岩体坍塌。对于溶洞周边的涂泥层，选用适配的灌浆材料，通过低压慢灌的方式，将浆液缓慢注入涂泥层空隙中，胶结涂泥颗粒，提升涂泥层的强度与抗软化能力，避免涂泥层遇水崩解引发突泥风险。施工过程中，注重灌浆顺序的把控，先处理涂泥层，再处理溶洞，确保二者处理效果相互协同，形成稳定的地质体，消除施工隐患。

4.3 涌水灾害的灌浆封堵实践应用

在涌水灾害处理中，地表灌浆技术的核心是封堵地下水渗透通道，控制涌水量，保障施工安全。首先通过地质勘察明确涌水来源与渗透通道的分布，精准布设灌浆钻孔，钻孔直达涌水通道核心区域。采用高压顶水注浆方式，选用不溶水灌浆材料，快速封堵涌水通道，降低地下水水压与涌水量。对于涌水量较大的区域，采用分段灌浆与间歇灌浆相结合的方式，先封堵表层渗透通道，再逐步深入底层，避免高压涌水冲散浆液，

确保封堵效果。同时,在灌浆过程中加强监控量测,若出现串浆、漏浆等异常情况,及时调整灌浆参数,对窜浆部位进行封堵。灌浆完成后,持续监测涌水量与水压变化,确保涌水得到有效控制,为隧洞开挖创造干燥、稳定的施工环境。

5 地表灌浆施工质量控制及实践应用保障

5.1 施工材料质量的严格管控措施

地表灌浆施工质量的核心保障是灌浆材料的质量,需建立严格的材料管控体系,确保材料符合施工要求。灌浆材料选用以水泥系材料为主,根据不同地质工况搭配适配的外加剂,提升浆液的可注性、胶结强度与抗渗性。材料进场前,需进行严格的质量检测,核查材料的规格、性能指标,杜绝不合格材料进场。材料储存过程中,做好防潮、防晒措施,避免材料受潮、变质,影响浆液性能。制浆过程中,严格按照设计配合比进行配料,控制浆液的浓度、黏度与凝胶时间,确保浆液性能稳定。同时,定期对浆液质量进行抽检,及时调整配合比,保障灌浆材料能够充分发挥胶结、填充与堵水作用,为施工质量奠定基础。

5.2 施工过程中的全程质量监控

地表灌浆施工过程中,需建立全程质量监控体系,对各施工工序进行全面管控,及时发现并解决施工中的质量问题。钻孔施工中,监控钻孔的位置、深度、偏斜率,定期对钻孔轨迹进行复核,确保钻孔符合设计要求,避免出现灌浆盲区^[5]。灌浆施工中,实时监测灌浆压力、流量、浆液注入量等参数,确

保参数符合设计标准,同时观察浆液扩散情况,防止出现串浆、漏浆、断浆等问题。若出现参数异常或施工隐患,及时停止施工,分析原因并采取整改措施,整改完成后再恢复施工。加强对施工记录的管理,详细记录各工序的施工参数、施工时间等信息,为质量追溯与后续检测提供依据。

5.3 施工后期效果检测及隐患处置

地表灌浆施工完成后,需开展全面的效果检测工作,评估灌浆加固与堵水效果,确保满足隧洞施工要求。采用钻孔取芯、声波测井等多种检测方式,核查灌浆体的完整性、胶结强度,以及岩体的抗渗透能力、稳定性。对于检测中发现的灌浆不密实、存在空洞、堵水效果不佳等隐患,及时制定针对性的处置方案,通过补充灌浆、加固处理等方式,消除质量隐患,确保灌浆效果达到设计标准。同时,建立长期监测机制,持续监测灌浆体及周边岩体的变形、地下水水压与涌水量变化,及时发现后期可能出现的地质隐患,采取相应的防控措施,保障深埋隧洞施工安全与工程长期稳定性。

6 结语

本文围绕深埋隧洞穿越破碎带的地表灌浆技术实践展开,针对断层、溶洞、涂泥、涌水等不良地质问题,探究了该技术的应用原理、施工工艺及实践要点。地表灌浆技术通过规范施工与工艺优化,可有效实现岩体加固、空洞填充与涌水封堵,破解施工难题。严格的材料管控、全程质量监控与后期效果检测,是保障应用效果的关键,为同类工程不良地质处理提供可行路径,助力深埋隧洞工程安全高效推进。

参考文献:

- [1] 宋志忠,张仁君,施华堂,等.深埋隧洞穿越断层带瞬态渗流机制与渗透失稳风险评价[J/OL].地球科学,1-14[2026-02-28].
- [2] 王彦军.穿越破碎带的深埋引水隧洞围岩变形及稳定性研究[J].建筑机械,2025,(06):191-193+197.
- [3] 崔红英,张兴昊,韩章怡,等.深埋隧洞穿越断层带施工期渗流场动态分析与渗流控制措施评价[J].水力发电,2025,51(07):57-64+123.
- [4] 喻久康,童蕾,严俊,等.深埋长隧洞穿越富水断层带涌水突泥风险预判与处理措施研究[J].水利水电技术(中英文),2024,55(S2):371-378.
- [5] 刘通.深埋供水隧洞穿越高速公路的设计与施工[J].水与水技术,2024,(00):93-97.