

地面灌浆处理对深埋隧洞施工安全的作用研究

刘成杰

云南恒诚建设监理咨询有限公司 云南 昆明 650000

【摘要】随着我国地下工程建设向深部延伸，深埋隧洞施工面临的地质风险日益突出，其中垂直埋深 1500m 级隧洞遭遇断层溶洞、涂泥涌水等不良地质时，极易引发施工安全事故，严重制约 TBM 掘进效率。地面灌浆作为一种超前地质加固技术，通过垂直段、造斜段、水平灌段的合理布设，可有效改善不良地质体力学性能、封堵涌水通道，为 TBM 安全高效掘进提供保障。本文结合深埋隧洞施工实际，分析断层溶洞涂泥涌水对 TBM 掘进的危害，阐述地面灌浆各分段施工工艺要点，深入研究地面灌浆对深埋隧洞施工安全的核心作用，结合工程实践验证灌浆处理效果，为同类深埋隧洞不良地质处理提供理论参考和工程借鉴。

【关键词】：深埋隧洞；地面灌浆；TBM 掘进；断层溶洞；涂泥涌水；施工安全

DOI:10.12417/2811-0536.26.04.046

1 引言

近年来，我国交通、水利、能源等领域地下工程建设快速发展，深埋隧洞的建设规模不断扩大，施工深度持续增加。垂直埋深 1500m 的深埋隧洞，受高地应力、高水压、复杂地质构造等因素影响，施工过程中极易遭遇断层破碎带、溶洞、涂泥层及涌水等不良地质条件，给施工安全带来严峻挑战。地面灌浆技术是通过在隧洞地表布设钻孔，向地下不良地质体注入浆液，使浆液胶结松散岩体、封堵涌水通道，从而改善地质体力学性能、提高围岩稳定性的超前加固技术。针对垂直埋深 1500m 深埋隧洞的断层溶洞涂泥涌水问题，地面灌浆需采用垂直段、造斜段、水平灌段相结合的布设方式，实现对不良地质区域的全面覆盖和精准加固。本文结合工程实践，系统研究地面灌浆处理对深埋隧洞施工安全的作用，重点分析灌浆各分段对 TBM 掘进的保障机制，为同类工程施工提供技术支持。

2 深埋隧洞断层溶洞涂泥涌水对 TBM 掘进的危害

2.1 掌子面坍塌风险突出

断层溶洞区域的岩体多为碎裂岩、碎粉岩，结构松散，胶结性差，加之涂泥层的润滑作用，岩体抗剪强度极低。TBM 掘进过程中，掌子面受到的地应力和涌水压力相互叠加，极易导致掌子面岩体失稳、坍塌。坍塌不仅会堵塞掘进通道，还可能造成 TBM 刀盘被埋、设备损坏，甚至危及施工人员生命安全。同时，坍塌产生的松散岩体进入刀盘，会加剧刀具磨损，降低掘进效率，进一步增加施工安全风险。

2.2 涌水引发安全事故

垂直埋深 1500m 的深埋隧洞，地下水位与地表高差大，涌水压力高，断层溶洞作为主要的涌水通道，

易出现大规模涌水现象。涌水不仅会淹没 TBM 设备、电气系统，导致施工停滞，还可能引发围岩软化、泥化，进一步加剧掌子面坍塌风险。若涌水携带大量涂泥，会形成突泥灾害，堵塞隧洞断面，清理难度大，严重时可能导致隧洞报废。此外，高水压涌水还可能对 TBM 密封系统造成破坏，引发设备故障，影响施工安全。

2.3 TBM 掘进效率大幅降低

断层溶洞涂泥涌水段的松散岩体和涂泥层，会增加 TBM 刀盘切削阻力，导致刀具磨损、损坏加快，需要频繁停机更换刀具，严重影响掘进进度。同时，涌水会导致掌子面作业环境恶化，施工人员作业难度增加，进一步降低施工效率。此外，为应对坍塌和涌水风险，需采取临时支护、排水等措施，占用大量施工时间，导致 TBM 掘进效率大幅下降，甚至出现施工停滞。

2.4 围岩变形控制难度大

深埋隧洞本身承受较高的地应力，断层溶洞涂泥涌水段的岩体强度低、完整性差，TBM 掘进后，围岩失去原有平衡，易发生较大规模的变形。若围岩变形得不到有效控制，会导致隧洞衬砌开裂、破损，甚至引发二次坍塌，威胁隧洞施工安全和长期稳定性。同时，围岩变形还会挤压 TBM 设备，导致设备卡阻，增加施工风险。

3 深埋隧洞地面灌浆施工工艺要点

3.1 灌浆孔布设原则

灌浆孔布设需结合隧洞轴线、断层溶洞分布范围、涂泥层厚度及涌水情况，遵循“全面覆盖、精准定位、分段加固”的原则。垂直段主要用于穿越地表松散层和浅层岩体，直达断层溶洞上部；造斜段用于调整钻

孔方向, 实现从垂直向水平的过渡, 确保水平灌段能够精准到达隧洞周边不良地质区域; 水平灌段平行于隧洞轴线, 沿隧洞周边均匀布设, 确保浆液能够均匀扩散, 形成完整的加固帷幕和止水帷幕。灌浆孔间距根据地质条件和灌浆效果要求确定, 一般控制在3-5m, 确保各孔灌浆范围相互衔接, 无加固盲区。

3.2 各分段施工工艺

(1) 垂直段施工: 垂直段是地面灌浆的起始段, 主要作用是穿越地表松散层和浅层稳定岩体, 为后续造斜段和水平灌段施工提供通道。施工时采用地质钻机垂直钻进, 钻孔直径根据灌浆要求确定, 一般为150-200mm。钻进过程中, 需严格控制钻孔垂直度, 避免钻孔偏移, 确保后续造斜段施工顺利进行。当钻孔达到设计深度后, 进行孔壁清理, 去除孔内岩粉和杂物, 然后下入套管, 套管采用钢管, 直径略小于钻孔直径, 套管深度根据地表松散层厚度确定, 确保套管能够有效隔离地表松散层, 防止钻孔坍塌。套管安装完成后, 进行压水试验, 检测钻孔密封性和岩体透水性, 为后续灌浆参数确定提供依据。

(2) 造斜段施工: 造斜段位于垂直段下方, 主要作用是调整钻孔方向, 实现从垂直向水平的过渡, 使水平灌段能够精准到达隧洞周边不良地质区域。造斜段施工采用定向钻进技术, 根据设计的造斜角度和曲率半径, 逐步调整钻孔方向。钻进过程中, 采用高精度随钻测量系统实时监测钻孔轨迹, 及时纠正钻孔偏移, 确保造斜段轨迹符合设计要求。造斜段的长度根据造斜角度和隧洞埋深确定, 一般为50-100m。钻进完成后, 进行孔壁清理和压水试验, 检测钻孔完整性和透水性, 确保满足灌浆要求。

(3) 水平灌段施工: 水平灌段是地面灌浆的核心段, 平行于隧洞轴线, 沿隧洞周边均匀布设, 主要作用是向断层溶洞、涂泥层注入浆液, 实现岩体加固和涌水封堵。水平灌段施工采用水平定向钻进技术, 钻进过程中严格控制钻孔轨迹, 确保钻孔距离隧洞轮廓线的距离符合设计要求, 一般为2-3m。水平灌段采用后退式分段注浆方式, 将水平灌段分为若干注浆段, 每段长度为30-60m, 从孔底向孔口逐步后退注浆。注浆过程中, 采用高压注浆工艺, 确保浆液能够充分扩散到松散岩体和涂泥层中, 形成有效的胶结体。同时, 严格控制注浆压力和注浆量, 根据压水试验结果和地质条件, 动态调整注浆参数, 确保灌浆效果。

3.3 灌浆材料与参数控制

灌浆材料选用高强度、高流动性、抗渗性好的水

泥浆, 结合地质条件, 可掺入适量的水玻璃、膨润土等外加剂, 改善浆液性能, 提高浆液胶结强度和抗渗能力。水泥选用42.5级普通硅酸盐水泥, 水灰比根据地质条件确定, 一般为0.8:1-1.2:1。注浆压力根据隧洞埋深、涌水压力和岩体透水性确定, 垂直段和造斜段注浆压力一般为1.5-2.5MPa, 水平灌段注浆压力一般为2.5-4.0MPa, 确保浆液能够充分扩散, 实现有效加固和封堵。注浆量根据钻孔长度、岩体透水性 and 加固要求确定, 采用分段计量方式, 确保每段注浆量符合设计要求。

3.4 灌浆质量检测

灌浆施工完成后, 需进行全面的质量检测, 确保灌浆效果满足设计要求。检测方法主要包括压水试验、钻孔取芯和声波测井等。压水试验主要检测岩体透水性, 通过测量压水流量和压力, 判断灌浆后岩体的抗渗性能; 钻孔取芯主要观察浆液胶结情况, 检测胶结体强度, 判断岩体加固效果; 声波测井主要检测岩体完整性, 通过测量声波速度, 评估灌浆后岩体的力学性能。对于检测不合格的区域, 需进行补浆处理, 直至满足设计要求。

4 地面灌浆对深埋隧洞施工安全的作用机制

(1) 加固岩体, 提高围岩稳定性: 地面灌浆通过水平灌段向断层溶洞、涂泥层注入浆液, 浆液在岩体孔隙和裂隙中扩散、凝固, 形成坚固的胶结体, 将松散破碎的岩体胶结为一个整体, 提高岩体的抗压强度、抗剪强度和完整性。同时, 垂直段和造斜段的灌浆的作用, 可加固浅层岩体, 防止钻孔坍塌, 为水平灌段施工提供稳定的作业环境。灌浆后, 围岩的承载能力大幅提升, 能够有效抵抗地应力和涌水压力的作用, 减少掌子面坍塌和围岩变形的风险, 为TBM掘进提供稳定的掌子面条件。

(2) 封堵涌水通道, 降低涌水风险: 地面灌浆通过水平灌段向断层溶洞和涌水通道注入浆液, 浆液凝固后形成致密的止水帷幕, 能够有效封堵涌水通道, 切断涌水来源, 降低地下水位和涌水压力。垂直段和造斜段的灌浆可封堵浅层岩体的裂隙, 防止地表水下渗, 减少地下水量, 进一步降低涌水风险。灌浆后, 隧洞周边的岩体透水性大幅降低, 涌水量可控制在设计允许范围内, 避免大规模涌水和突泥灾害的发生, 保护TBM设备和施工人员安全。同时, 止水帷幕还能够减少涌水对围岩的软化作用, 避免围岩因遇水而强度骤降, 进一步提高围岩稳定性, 为TBM掘进创造干燥、安全的作业环境。对于高水压涌水区域, 高

压灌浆可形成高强度的止水帷幕，有效抵抗高水压的作用，防止涌水击穿围岩，保障施工安全。

(3) 改善 TBM 掘进作业条件，提高掘进效率：地面灌浆加固后，断层溶洞涂泥涌水段的岩体稳定性大幅提升，掌子面坍塌风险降低，TBM 可实现连续掘进，减少停机次数。同时，灌浆封堵涌水后，作业环境干燥，施工人员作业条件改善，设备运行稳定性提高，减少设备故障的发生。此外，灌浆后的岩体强度均匀，TBM 刀盘切削阻力减小，刀具磨损速度降低，减少刀具更换次数，进一步提高掘进效率。垂直段、造斜段、水平灌段的协同作用，实现了对不良地质区域的全面覆盖和精准加固，消除了 TBM 掘进过程中的安全隐患，使 TBM 能够在安全、稳定的条件下高效掘进，缩短施工工期，降低施工成本。

(4) 降低施工安全风险，保障施工人员安全：地面灌浆作为超前加固技术，能够从根本上消除断层溶洞涂泥涌水引发的坍塌、涌水、突泥等安全隐患，为施工人员和设备提供安全保障。灌浆后，掌子面稳定性提高，避免了坍塌事故对施工人员的伤害；涌水得到有效封堵，防止了涌水淹没设备和人员的事故发生；围岩变形得到控制，避免了衬砌坍塌和设备卡阻等风险。同时，地面灌浆施工在地表进行，不占用隧洞掌子面，与 TBM 掘进施工互不干扰，可实现平行作业，减少施工人员在隧洞内的作业时间，进一步降低施工安全风险。此外，灌浆质量检测确保了加固效果，为施工安全提供了可靠的技术保障。

5 工程实例验证

(1) 工程概况：某深埋引水隧洞工程，设计长度 12.8km，垂直埋深最大可达 1500m，采用 TBM 掘进施工。隧洞穿越多条断层破碎带，其中 K3+200-K3+500 段为断层溶洞涂泥涌水段，该段断层带宽 5-8m，溶洞发育，充填物主要为涂泥和碎石，透水性强，涌水量较大，最大涌水量可达 80m³/h，给 TBM 掘进带来严重安全隐患。为确保施工安全，该段采用地面灌浆处理技术，布设垂直段、造斜段、水平灌段相结合的

灌浆体系，对不良地质区域进行超前加固和涌水封堵。

(2) 灌浆施工方案：根据该段地质条件，共布设灌浆孔 12 个，每个灌浆孔均包含垂直段、造斜段和水平灌段。垂直段长度为 80-100m，钻孔直径 180mm，下入 159mm 钢管套管；造斜段长度为 60-80m，造斜角度为 30°-45°，采用定向钻进技术调整钻孔方向；水平灌段长度为 300-350m，平行于隧洞轴线，距离隧洞轮廓线 2.5m，采用后退式分段注浆，每段长度为 40m。灌浆材料采用 42.5 级普通硅酸盐水泥浆，水灰比为 1.0:1，掺入 5% 的水玻璃外加剂，垂直段和造斜段注浆压力为 2.0MPa，水平灌段注浆压力为 3.0MPa。

(3) 灌浆效果分析：灌浆施工完成后，对该段进行全面的质量检测，结果表明：灌浆后岩体透水性大幅降低，压水试验透水率均小于 1Lu，满足设计要求；钻孔取芯显示，浆液胶结良好，胶结体强度可达 15MPa 以上，岩体完整性显著提高；声波测井显示，灌浆后岩体声波速度较灌浆前提高 30% 以上，围岩稳定性大幅提升。TBM 掘进过程中，该段掌子面稳定，无坍塌、涌水现象，作业环境干燥，TBM 掘进效率较未灌浆段提高 40% 以上，刀具磨损量减少 35%，实现了安全高效掘进。施工过程中未发生任何安全事故，圆满完成了该段隧洞施工任务，验证了地面灌浆处理技术对深埋隧洞断层溶洞涂泥涌水段施工安全的保障作用。

6 结论

针对垂直埋深 1500m 深埋隧洞断层溶洞涂泥涌水问题，地面灌浆处理技术通过垂直段、造斜段、水平灌段的协同作用，能够有效改善不良地质体的力学性能和抗渗性能，为 TBM 掘进提供安全保障。地面灌浆采用垂直段、造斜段、水平灌段相结合的布设方式，垂直段用于穿越浅层岩体、造斜段用于调整钻孔方向、水平灌段用于精准加固和封堵，各分段工艺合理、协同作用，能够实现不良地质区域的全面覆盖。工程实例验证表明，地面灌浆处理技术能够有效解决深埋隧洞断层溶洞涂泥涌水问题，灌浆效果良好，可为同类工程提供工程借鉴。

参考文献：

- [1] 叶焰中,高健,罗来辉,等.城市深埋隧洞 TBM 施工超前地质预报体系及应用[J].人民长江,2024,55(S1):59-62.
- [2] 张克,罗立哲.城市深埋输水隧洞快速施工方案及施工技术研究[J].人民长江,2024,55(S1):169-172.
- [3] 郭新强.超特长深埋引水隧洞安全管理风险与对策[J].人民黄河,2023,45(S2):146-147.
- [4] 黄宇强,傅兴安,龚仁煌.岩溶区域深埋隧洞施工开挖围岩稳定分析[J].水利科学与寒区工程,2023,6(11):121-125.
- [5] 沈健.深埋长隧洞施工安全监测[J].人民珠江,2023,44(S1):166-170.