

# 水工隧洞超前小导管注浆支护技术应用

封晓辉

吉林省水利水电勘测设计研究院 吉林 长春 130021

**摘要:** 在水工隧洞建设中,超前小导管注浆支护技术是保障施工安全与围岩稳定的关键手段。本文详细阐述该技术核心构成,涵盖超前小导管参数设计、注浆材料选用及注浆设备配置;介绍技术施工流程,包括施工准备、超前小导管施工、注浆施工操作与后续处理;分析不同地质条件下的技术适配与施工关键控制要点;指出技术应用中的施工安全注意事项与常见问题处理方法。该技术为水工隧洞建设提供可靠支撑,有效提升工程质量与安全性。

**关键词:** 水工隧洞;超前小导管注浆支护;技术构成;施工流程;应用要点

引言:水工隧洞建设面临复杂地质条件挑战,围岩稳定性差易引发塌方等事故,威胁施工安全与进度。超前小导管注浆支护技术作为有效加固手段,通过向围岩注入浆液,改善其物理力学性质,形成承载拱,增强围岩自稳能力。该技术适用于多种地质条件,在水工隧洞建设中广泛应用。深入研究其技术构成、施工流程、应用要点及注意事项,对提升水工隧洞建设质量、保障施工安全意义重大。

## 1 技术核心构成

### 1.1 超前小导管参数设计

超前小导管参数设计是水工隧洞注浆支护体系的基础环节,其设计精度直接影响围岩加固效果。小导管材质选择需综合考量力学性能与施工适应性,无缝钢管因抗拉强度高、延展性好成为主流选择,尤其适用于地质条件复杂、围岩应力集中的段落;焊接钢管则凭借成本优势及加工便捷性,在普通地层中广泛应用。规格尺寸确定需结合隧洞断面特征与围岩等级,直径通常选取42mm至60mm区间,壁厚控制在4mm至8mm范围内,既能保证注浆通道畅通,又可避免施工变形;长度设计需覆盖开挖轮廓线外一定范围,一般取3m至5m,确保形成有效承载拱。布置方式需遵循“均匀分布、重点加强”原则,环向间距依据围岩破碎程度调整,完整岩体可放宽至40cm,破碎带则需加密至25cm;纵向搭接长度应不小于1m,形成连续支护体系,避免出现薄弱环节。

### 1.2 注浆材料选用

注浆材料性能直接决定加固质量与耐久性。材料类型划分主要依据浆液凝胶时间与适用场景,水泥基材料(如普通硅酸盐水泥)凭借成本低、强度高的特点,成为基础加固首选;化学浆液(如水玻璃类)通过调节双液配比,可实现秒级至分钟级凝胶控制,适用于动水环境或紧急抢险;复合浆液通过水泥与化学材料的协同作

用,兼顾早期强度与后期耐久性,在富水砂层中表现优异<sup>[1]</sup>。材料性能适配要求需匹配地层特性,渗透系数较大的破碎带需选用低粘度、高渗透性浆液,确保裂隙充分填充;软弱黏土层则应采用高粘度、触变性浆液,防止浆液流失;对于腐蚀性地下水环境,需添加防腐剂或选用耐腐蚀材料,保障支护体系长期稳定。

### 1.3 注浆设备配置

注浆设备性能是保障施工质量的关键要素。注浆泵选型需满足压力与流量双重需求,单液泵适用于水泥基材料,压力范围通常设计为2MPa至5MPa;双液泵通过独立控制两种浆液流量,可实现化学浆液精确配比,压力需求提升至8MPa至10MPa。辅助设备搭配需形成完整施工链,高压胶管需具备耐压15MPa以上能力,避免爆管风险;混合器采用动态涡流设计,确保双液充分混合;止浆塞选用膨胀式结构,通过液压控制与孔壁紧密贴合,防止浆液逆流。设备组合需考虑施工效率,移动式注浆站集成储料、搅拌、泵送功能,可减少现场转运时间;自动化控制系统通过压力传感器与流量计实时反馈数据,辅助施工人员动态调整参数,提升注浆质量可控性。

## 2 技术施工流程

### 2.1 施工准备工作

施工场地清理是保障作业安全的基础环节。需彻底清除掌子面浮石、积水及杂物,对突出岩体进行修整,确保开挖轮廓线平顺;对软弱破碎带需提前喷射混凝土封闭,防止施工扰动引发掉块。设备调试需覆盖全流程工具链,注浆泵启动后需空载运行10分钟,检查液压系统密封性及压力表精度;钻机需进行多角度定位测试,验证导向装置可靠性;搅拌机需试运转验证加料均匀性,避免浆液离析。材料预处理需严格遵循配比规范,水泥需过筛去除结块,化学添加剂需按批次抽检活性成分含量;双液浆配制需分别设置独立储料罐,通过流量

计精确控制混合比例,搅拌时间根据浆液类型延长至3至5分钟,确保充分反应。

## 2.2 超前小导管施工

导管定位与钻孔需建立三维坐标控制体系。依据设计图纸在掌子面标出环向布置点,采用激光投线仪校准纵向间距,误差控制在 $\pm 2\text{cm}$ 内;钻孔角度通过定制导向架控制,外插角偏差不得超过设计值 $\pm 1^\circ$ ,避免影响承载拱形成<sup>[2]</sup>。钻孔深度需超出导管长度10cm,为导管插入预留调整空间;遇到岩层突变时,需暂停施工并重新校核参数。导管安装与固定采用“顶入+焊接”双保险工艺,风动顶进装置需保持匀速推进,防止导管弯曲变形;导管外露端与钢拱架焊接时,需采用满焊工艺,焊缝长度不小于导管直径的1.5倍,确保结构整体性;对松散地层,需在导管尾部加设止浆板,通过螺栓与岩体锚固。

## 2.3 注浆施工操作

注浆参数设定需建立地层-压力-流量动态模型。初始压力设定依据地层渗透系数确定,完整岩体取0.5MPa,破碎带提升至1.5MPa;终压值根据设计扩散半径计算,通常为初始压力的2至3倍。注浆施工工序遵循“由下至上、由稀到浓”原则,先注入低浓度浆液填充大裂隙,再逐步提高浓度封闭微细裂隙;双液浆施工需严格控制混合比例,水玻璃与水泥浆体积比误差不得超过5%。注浆施工控制要点包含压力突变处置,当压力骤升时立即停泵检查管路堵塞情况,采用高压水冲洗疏通;压力持续下降则可能存在漏浆通道,需暂停施工并补充速凝剂封堵。

## 2.4 施工后续处理

注浆结束标准采用“压力-流量”双控法,当注浆压力达到设计终压且持续10分钟,或单管注浆量超过理论值的120%时,可判定为合格。处置措施包括及时封堵孔口,采用木楔或速凝水泥砂浆填充导管外露段,防止浆液倒流;对串浆孔需进行二次补浆,确保加固密实度。施工废弃物清理需分类处理,废浆液经沉淀过滤后,清水达标排放,沉淀物运至指定弃渣场;包装材料及破损工具集中回收,避免污染施工环境。

# 3 技术应用要点

## 3.1 不同地质条件下的技术适配

### 3.1.1 软岩地质适配调整

软岩地层自稳能力弱,易发生塑性变形。导管布置需加密环向间距至200mm至250mm,缩短纵向搭接长度至0.8m至1m,形成密集支护网络。注浆材料宜选用低强度、高韧性水泥基浆液,通过添加膨润土提升浆液触变性,增强对软岩的填充效果。导管外插角可适当减小至 $8^\circ$ 至 $10^\circ$ ,避免因角度过大导致导管顶入时引发围岩扰动。

### 3.1.2 破碎岩层适配调整

破碎岩层裂隙发育,浆液易沿优势通道流失<sup>[3]</sup>。需采用分段注浆工艺,先注入水玻璃类化学浆液封堵大裂隙,再注入水泥基浆液填充细小孔隙。导管长度应延长至4m至5m,确保支护范围覆盖松动圈。环向间距可放宽至350mm至400mm,但需配合钢拱架使用以增强整体稳定性。注浆压力需分阶段提升,初始压力控制在0.5MPa至1MPa,待浆液初步固结后逐步升至2MPa至3MPa。

### 3.1.3 富水地质适配调整

富水地层需兼顾加固与堵水功能。注浆材料应选用双液浆体系,通过调节水玻璃与水泥的比例控制凝结时间至30秒至60秒,防止浆液被地下水稀释。导管前端需设置止浆塞,防止注浆过程中发生返浆。钻孔施工应采用跟管钻进工艺,避免孔壁坍塌导致地下水突涌。注浆顺序需遵循“由下至上、由稀至浓”原则,先对下部导管注入稀浆形成挡水帷幕,再对上部导管注入浓浆完成加固。

## 3.2 施工过程中的关键控制

### 3.2.1 钻孔精度控制

钻孔方向偏差需控制在 $\pm 1^\circ$ 以内,避免因孔位偏移导致导管无法形成有效承载拱。钻孔深度应超过导管长度0.2m至0.3m,确保导管能完全顶入设计位置。孔径需比导管外径大10mm至15mm,为浆液扩散提供空间。钻孔完成后需用高压风清孔,防止岩屑残留影响注浆效果。

### 3.2.2 注浆压力控制

注浆压力需根据地层渗透性动态调整。对于密实地层,初始压力可设为1MPa至2MPa,待吸浆量下降后逐步升至3MPa至4MPa;对于松散地层,初始压力应降低至0.5MPa至1MPa,防止压力过大引发地面隆起。压力波动范围需控制在 $\pm 0.2\text{MPa}$ 以内,避免因压力突变导致导管爆裂或浆液回流。

### 3.2.3 导管安装质量控制

导管顶入深度需达到设计长度的95%以上,尾部与钢拱架焊接牢固,焊接长度不小于100mm。导管外露部分需用麻丝缠绕封堵,防止注浆时发生漏浆。安装完成后需检查导管垂直度,偏差超过2%时需重新调整。导管间距误差需控制在 $\pm 20\text{mm}$ 以内,确保支护体系均匀受力。

# 4 技术应用注意事项

## 4.1 施工安全注意事项

### 4.1.1 设备操作安全要求

设备作为施工的重要工具,其操作安全直接影响到施工的顺利进行。以注浆机为例,启动前需对设备的动力系统、液压系统等进行全面检查。动力系统方面,

要确保发动机运转正常,燃油供应充足且无泄漏。液压系统则要检查油管连接是否紧密,液压油油量是否在规定的范围内,油质是否良好。若液压油出现变质或油量不足,会导致设备压力不稳定,影响注浆效果,甚至可能引发设备故障。钻机操作时,要根据不同的地质条件合理调整钻进参数。在坚硬岩石地层中,若钻进速度过快、推进力过大,钻杆可能因承受过大压力而折断,不仅会造成设备损坏,还可能对周围人员造成伤害。搅拌机运转过程中,严禁人员将手或其他工具伸入搅拌桶内。搅拌桶内叶片高速旋转,一旦接触人体,后果不堪设想。操作人员应站在安全距离外,通过观察窗或仪表监控搅拌情况,确保浆液混合均匀。所有设备操作人员都应经过专业培训,熟悉设备的性能、操作规程以及应急处理方法,取得相应资质后方可上岗操作。

#### 4.1.2 现场施工安全防护

现场施工环境复杂多变,存在诸多潜在危险,必须构建完善的现场施工安全防护体系。在掌子面施工区域,应设置醒目的安全警示标识,用鲜明的颜色和清晰的文字提醒人员注意安全。同时,划定明确的危险作业范围,非作业人员严禁进入,防止无关人员误入引发意外。施工人员必须佩戴齐全个人防护用品,安全帽要系紧下颚带,确保在受到物体撞击时能有效保护头部;安全带需高挂低用,选择牢固可靠的悬挂点,防止人员坠落;防护手套要根据作业内容选择合适材质,如在进行钻孔作业时,应选择耐磨、防刺穿的手套,保护手部免受伤害<sup>[4]</sup>。在隧洞内进行钻孔、注浆等作业时,通风管理至关重要。隧洞空间相对封闭,钻孔产生的粉尘和注浆过程中可能释放的有害气体容易积聚,若不及时排出,会严重危害施工人员的身体健康。因此,要安装足够数量的通风设备,合理布置通风管道,确保洞内空气流通顺畅。

### 4.2 技术应用常见问题及处理

#### 4.2.1 导管安装常见问题及处理

导管安装常见问题及处理需精准施策。导管安装过程中可能出现插入困难的情况,这往往是由于钻孔角度偏差或孔内存在杂物导致,此时应暂停安装,重新校准钻孔角度,利用高压风或水冲洗孔内杂物,确保导管顺

利插入;若导管安装后出现松动现象,可能是固定方式不当或焊接质量不佳引起,对于焊接固定的导管,需重新进行满焊处理,确保焊缝长度与质量满足要求,对于采用其他方式固定的导管,需检查固定装置是否损坏,及时更换并加固;导管安装位置偏差也会影响后续注浆效果,若偏差较小可通过调整注浆参数进行弥补,若偏差较大则需拔出导管重新安装,确保导管位置准确。

#### 4.2.2 注浆施工常见问题及处理

注浆施工常见问题及处理需综合考虑多方面因素。注浆过程中若出现漏浆现象,可能是地层存在裂隙或孔口密封不严导致,对于地层裂隙引起的漏浆,可在浆液中添加适量速凝剂,缩短浆液凝固时间,减少漏浆量,同时对漏浆部位进行封堵处理;若是孔口密封不严,需重新检查并加固孔口密封装置,确保密封效果。注浆压力异常也是常见问题之一,压力过高可能是管路堵塞或地层空隙较小导致,此时应停泵检查管路,清理堵塞物,若为地层原因可适当降低注浆速度;压力过低则可能是浆液浓度过低或地层渗透性过强引起,需调整浆液配比,提高浆液浓度,或采用间歇注浆方式,增加浆液在地层中的停留时间,提高注浆效果。

### 结束语

水工隧洞超前小导管注浆支护技术,凭借科学合理的参数设计、精准适配的注浆材料与设备配置,以及严谨规范的施工流程,有效应对不同地质条件挑战,为隧洞围岩提供可靠加固与支护。严格把控施工安全,及时处理技术应用中的常见问题,是保障施工顺利进行与工程质量的关键。该技术的成功应用,为水工隧洞建设领域积累了宝贵经验,推动行业技术不断进步。

### 参考文献

- [1]弓灏.隧洞不良地质段小导管注浆超前支护技术的应用[J].工程机械与维修,2025(9):131-133.
- [2]薛小攀,冯秋丰,韩福,等.小断面引水隧洞超前小导管预注浆施工技术研究与应用[J].陕西水利,2022(6):1-3,6.
- [3]陈小龙.富水段引水隧洞围岩变形及支护技术研究[J].陕西水利,2025(6):131-133,136.
- [4]杨林.不良地质下的水利隧洞支护施工技术探析[J].全面腐蚀控制,2025,39(7):132-134.