

# 水利工程隧洞喷锚支护及衬砌加固施工技术

李云龙, 刘清朴

(中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

**摘要** 水利工程隧洞在长期运行过程中, 受地质应力场动态变化、地下水渗流作用以及结构材料老化等多因素耦合影响, 易产生结构性裂缝、渗漏通道及衬砌变形等典型病害, 严重威胁工程安全与耐久性。针对此类问题, 亟需开展科学加固与施工优化研究。本文以喷锚支护与衬砌加固技术为研究核心, 系统剖析其作用机理、工艺参数设计及施工质量控制方法, 重点论证其在提升结构整体稳定性、增强防渗抗裂性能及延长服役寿命等方面的工程价值。研究成果旨在为水利隧洞加固技术体系完善提供理论参考, 进而提升工程运行安全水平。

**关键词** 水利工程; 隧洞喷锚支护; 衬砌加固

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.018

## 0 引言

水利工程输水及调控系统中, 隧洞作为关键结构单元, 其结构安全性与耐久性直接决定着整个水利工程的长期稳定运行及全生命周期经济性。随着工程服役年限的持续增长及地质环境复杂性的加剧, 早期建成隧洞普遍出现渗漏通道扩展、衬砌结构开裂及围岩渐进性变形等典型病害, 严重威胁工程安全, 亟需开展系统性加固修复。当前, 喷锚支护技术与混凝土衬砌加固作为隧洞加固领域的核心手段, 通过优化围岩一支护结构协同作用机理, 在提升结构整体稳定性、增强防渗抗裂性能及延长工程服役寿命等方面展现出显著技术优势, 为水利隧洞病害治理提供了可靠解决方案。

## 1 隧洞喷锚支护及衬砌加固施工的重要性

隧洞喷锚支护及衬砌加固施工在水利工程建设中起到决定性作用, 其技术水平的好坏直接关系到隧洞结构的安全性、耐久性以及运行稳定性。随着工程服役年限的增长以及地质环境的复杂变化, 围岩应力释放、渗流侵蚀、结构老化等因素会导致衬砌变形、裂缝扩大、防渗能力降低<sup>[1]</sup>。喷锚支护是初期支护体系, 承担围岩荷载并形成稳定的受力框架, 是保证开挖面稳定、防止坍塌、控制变形的关键环节; 衬砌结构承担长期荷载和防渗任务, 是保证隧洞安全运行和输水功能的关键屏障。两者共同构成了隧洞支护与加固体系的主要技术基础, 合理与否决定着围岩、结构、水压力是否达到平衡状态。科学的喷锚支护和衬砌加固施工, 对提高结构的承载能力、改善应力分布、延长结构的使用寿命、保证工程的整体安全具有不可替代的工程价值, 是实现现代水利隧洞长期安全、高效运行的重要保证。

## 2 隧洞喷锚支护加固施工技术要点

### 2.1 施工原理及技术特点

隧洞喷锚支护加固施工的主要原理是通过喷射混凝土、锚杆、钢筋网等支护结构形成一个复合受力结构, 对围岩进行及时支护, 达到长期稳定的目的。该技术是依据岩体与支护体的协同作用原理, 施工时利用高压喷射混凝土来形成连续的支护层, 同时与锚杆、钢筋网共同构成整体受力系统, 进而提高围岩的自承能力<sup>[2]</sup>。

喷锚支护施工的关键是发挥围岩的自稳作用, 控制围岩变形, 减小衬砌荷载。结构特点为初期支护层和围岩之间存在粘结界面, 喷射混凝土层在早期起封闭围岩、防止风化剥落的作用, 后期起传递荷载、保持结构稳定的作用。锚杆利用径向预应力作用, 把局部不稳定岩块和整体围岩连接成一个受力整体, 使围岩成为结构体系的一个组成部分。喷射混凝土与锚杆配合使用, 使支护系统在很短的时间内就具有了较高的抗剪、抗弯、抗拉强度。喷锚支护施工速度快、对地质适应性强、可随开挖面及时支护, 适用于围岩强度低或节理裂隙发育的隧洞结构。该工艺在喷射时形成致密的保护层, 可以有效地防止地下水渗流造成的结构弱化, 提高整个结构的防渗性能<sup>[3]</sup>。喷射层和锚杆共同作用, 使围岩应力分布更加均匀, 显著减小局部集中应力。施工时坚持短进尺、强支护、早封闭的原则, 以防止围岩位移超限。喷射混凝土一般用湿喷工艺, 保证混凝土均匀密实, 提高粘结强度。喷锚支护结构的受力性能与岩体强度、锚杆间距、喷射层厚度等有关, 合理设置上述参数, 可以使喷锚支护结构

整体形成有效的力学闭合结构,为后续的衬砌施工提供稳定的力学环境。

## 2.2 钢筋及钢筋网施工工艺

钢筋和钢筋网在喷锚支护施工中具有提高喷射混凝土层抗拉、抗剪性能的作用,钢筋与钢筋网的施工质量好坏直接关系到支护体系整体受力特性。施工前根据围岩类别和设计要求确定钢筋网参数,常见配置为环向、纵向钢筋间距 200 mm,钢筋直径 6 mm,采用低碳冷拔钢筋或 HRB335 热轧钢筋,表面洁净无锈蚀<sup>[4]</sup>。钢筋网在制作阶段应在地面成型,尺寸精度控制在  $\pm 5$  mm 范围内,节点处采用电弧焊连接,焊缝长度不小于 10 d,保证整体刚度。在隧洞开挖面上及时布置测线,以确定钢筋网的安装位置及弧度,保证钢筋网贴合围岩轮廓。安装时应与预埋锚杆牢固连接,使喷射层和锚杆形成一个统一的受力体系。控制电流和时间,防止烧穿或虚焊。钢筋网安装完成后,保护层厚度控制在 100 mm 左右,以保证钢筋不外露、不偏位。对于洞顶、侧壁和底板的钢筋网布置应根据应力分布调整间距和网片尺寸,洞顶区域应适当加密钢筋,以提高抗裂性能。钢筋加工和焊接过程中严格控制焊缝质量、焊接变形,必要时使用临时支撑固定钢筋网防止下垂。锚杆施工时钻孔直径 40 mm,深度 15 m,孔壁清理干净后插入锚杆,注入 M25 水泥砂浆,保证浆液饱满充填<sup>[5]</sup>。锚杆布置采用梅花形交错布置,间距控制在 1 m 左右,以使支护力分布均匀,如图 1 所示。钢筋安装完毕后,应对其外观及焊接质量进行抽样拉拔试验,检验钢筋锚固强度。施工中防止钢筋受潮、污染,钢筋绑扎完成后立即进行喷射混凝土施工,防止氧化影响粘结性能。

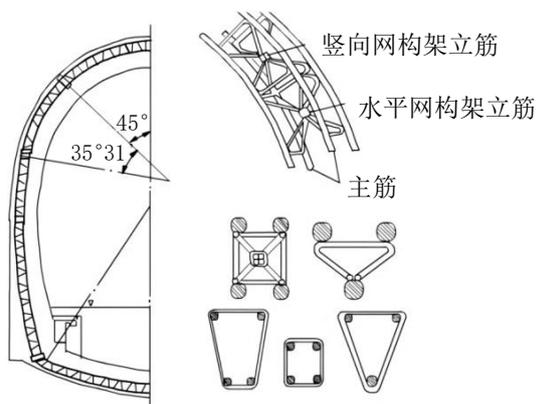


图 1 钢筋网支撑结构示意图

## 2.3 混凝土喷射施工工艺

混凝土喷射是隧洞喷锚支护的重要工序,混凝土喷射施工质量直接影响支护层的密实性和耐久性。喷射混

凝土用普通硅酸盐水泥,强度等级不低于 42.5 MPa,配合比设计根据施工环境湿度、骨料粒径、喷射距离来定。常用的骨料粒径为 0.6~15 mm,细度模数约为 2.5,含水率控制在 6% 以下<sup>[6]</sup>。为了保证喷层的粘结性能和早期强度,加入高效速凝剂,掺量占水泥质量的 4%~6%。喷射工艺采用湿喷法,高压输送系统将混凝土料浆均匀喷射到围岩表面。喷嘴到喷射面的距离控制在 60~100 mm 之间,喷射角度垂直,喷射顺序自下而上、分层推进,每层厚度控制在 5 cm 以内。喷射时混凝土的流动性要合适,不能有离析、回弹、流淌的现象,回弹率不大于 25%。为了提高喷层密实度,应该保持料流连续稳定,喷射中断时立即清理管道和喷嘴内的残余混凝土,防止凝结堵塞。喷层施工完毕后应做表面检查,无裂缝、空鼓、起砂。喷射混凝土强度等级不低于 C25,抗渗标号不低于 W4,喷射厚度一般为 100 mm。喷射施工结束后立即进行养护,用持续洒水或湿麻袋覆盖的方式保持湿润状态,养护时间不少于 7 天。施工环境温度低于 5℃ 时要采取保温措施,防止早期冻害。喷射混凝土层与锚杆、钢筋网紧密结合形成整体支护结构,使围岩应力重新分布,减小变形并提高结构稳定性。施工期间对喷射量、气压、配合比等参数实施实时监测,保证喷层质量一致,厚度符合标准。混凝土喷射工艺的稳定、均匀是保证高强度、高致密支护层的重要技术保证。

## 3 隧洞衬砌加固施工技术

### 3.1 施工总体思路及分段设计

隧洞衬砌加固的总体思路是在保证结构安全、耐久的前提下,根据围岩等级及变形特点制定合理的分层、分段施工方案。衬砌结构属于隧洞长期承载的关键防护体系,其施工顺序一般采取“底板—边墙—拱顶”的自下而上方式,保证施工稳定和受力平衡。根据不同的围岩类型,衬砌的厚度和配筋标准应有差异化设计。III 级围岩区衬砌厚度一般不小于 300 mm,IV 级围岩区衬砌厚度应大于 400 mm。为了减少衬砌应力集中,施工缝和结构伸缩缝的间距要严格控制,一般沿隧洞轴向每隔 10 m 设置一道,缝内嵌入止水橡胶材料,起到防渗和变形缓释的作用。施工分段衬砌,每段长度根据地质条件、模板结构、混凝土浇筑能力综合确定,宜控制在 8~12 m 范围内<sup>[7]</sup>。为了保证结构整体性,分段衬砌需要设置导向槽和定位钢筋,使新旧混凝土能够良好结合。衬砌施工需与喷锚支护系统形成协同效应,衬砌体承受长期荷载,喷射层担负初期支护稳定,二者共同构成完整的受力体系。

### 3.2 模板及支架安装技术

模板、支架安装属于衬砌加固施工的重要环节,结构精度的好坏直接关系到混凝土衬砌的线形、尺寸和表面质量。根据隧洞断面小、施工空间狭小的特点,采用组合式可调钢模板和轻型木模板相结合的方式。顶拱处由于浇筑压力大,采用经力学计算设计的弧形钢模板,配合加劲肋、纵向锁紧螺栓形成整体受力结构;边墙、底板部位使用定型钢模板以提高安装精度和重复利用率。模板拼装前必须在样台上试装,保证弧度、连接缝隙和支撑点位置符合设计要求。支架体系采用钢拱架、立柱、径向支撑相结合的空间刚性结构,保证施工期间不发生位移、变形。模板安装定位精度控制在 $\pm 5$  mm以内,支架立柱底部要垫上钢板或枕木以分散荷载<sup>[8]</sup>。为防止浇筑过程中模板胀模、跑浆,模板拼缝处要加设橡胶密封条,并定期检查紧固情况。模板安装完成后进行整体复测,检查断面尺寸、轴线偏差、标高,确保与设计线形一致。施工过程中应定期检查支架的稳定性,发现松动要立即加固,以保证模板体系受力安全。

### 3.3 钢筋加工及安装工艺

钢筋施工工艺的关键是保证结构受力连续、衬砌整体刚度。钢筋使用HRB335或者HRB400级热轧带肋钢筋,加工前根据设计图纸进行下料、弯曲、编号,允许尺寸偏差在 $\pm 10$  mm以内。钢筋表面应清洁无锈蚀,切断端部平整,无毛刺,无裂纹。安装时采用人工绑扎与焊接固定的方法,焊缝长度不小于 $10d$ ,焊缝处应平整无气孔。底板钢筋的铺设要严格控制保护层厚度,最小不能小于 $50$  mm,防止由于渗水而导致钢筋腐蚀。边墙及顶拱钢筋施工采取分层作业的方式,先安装底层钢筋并加以固定,而后铺设上层钢筋网片,其间距保持在 $150 \sim 200$  mm之间。顶拱处钢筋可适当加密以提高抗裂性能。施工时用定位垫块、卡具保持钢筋间距,防止移位。为了保证钢筋和混凝土的粘结,绑扎完成后应立即进行隐蔽工程验收,保证接头数量、焊缝质量、钢筋间距等符合设计要求。钢筋安装完成后要复测线形,保证衬砌断面尺寸和受力中心一致,防止产生偏心应力。

### 3.4 混凝土衬砌施工及养护

混凝土衬砌采用机械化连续浇筑工艺,根据隧洞断面形状进行定向浇筑。混凝土采用普通硅酸盐水泥,强度等级不低于C25,骨料粒径 $5 \sim 25$  mm,含泥量不大于2%。拌制时控制好水灰比及坍落度,保证混

凝土有良好的流动性和粘聚性。拌合站设在隧洞进口处,混凝土用轨道小车运送,现场采用溜槽或布料管浇筑。浇筑顺序为底板、边墙、顶拱,每层厚度控制在 $300 \sim 400$  mm之间,连续作业,防止冷缝的产生。振捣工序使用插入式振捣器,间距控制在 $50$  cm以内,振捣时间以混凝土表面泛浆为准为宜,防止漏振、过振。衬砌浇筑完毕后,应在 $10$ 小时内进行第一次洒水养护,保持混凝土表面湿润,养护时间不少于 $7$ 天,重要结构不得少于 $14$ 天。洞内通风要维持稳定的湿度,防止水化热聚集造成裂缝。模板拆除时必须混凝土强度达到 $3.5$  MPa以上,拆模顺序为先侧后顶,操作轻缓,防止表面损伤。养护结束后需对表面质量进行检查,确保无裂缝、空鼓、剥落等情况,以保证衬砌结构的密实性和防水性能。

## 4 结束语

水利隧洞安全运行体系中,喷锚支护与衬砌加固施工技术作为核心工程措施,其设计优化与施工精度直接决定了围岩一支护结构协同作用的有效性,进而影响隧洞长期稳定性及防渗性能的可持续性。通过实施高标准的施工质量管理体系、精准的工艺参数控制以及合理的结构匹配设计,可显著提升隧洞整体承载能力与耐久性,为复杂地质条件下水利工程的安全运行提供可靠保障。该技术体系的规模化应用与推广,对推动水利工程建设向高质量、安全化方向发展具有重要的战略意义和实践价值。

## 参考文献:

- [1] 郭领兵. 水利工程隧洞喷锚支护及衬砌加固施工技术[J]. 科学技术创新, 2024(23):183-186.
- [2] 代龙. 水工隧洞衬砌与喷锚支护加固设计及施工分析[J]. 江西建材, 2024(09):162-164.
- [3] 李富强, 康波. 水利水电工程隧洞衬砌及喷锚支护加固施工技术研究[J]. 中国高新科技, 2024(14):139-141.
- [4] 张生武. 水利工程隧洞衬砌及喷锚支护加固施工[J]. 科学技术创新, 2024(07):161-164.
- [5] 熊昕. 水利工程隧洞衬砌及喷锚支护加固施工探讨[J]. 黑龙江水利科技, 2023, 51(10):46-47, 62.
- [6] 刘宁平. 水利工程隧洞回填的灌浆施工技术探究[J]. 水上安全, 2024(04):181-183.
- [7] 林雄伟. 引水隧洞衬砌施工工艺及质量控制措施[J]. 云南水力发电, 2024, 40(02):123-125.
- [8] 吴曙辉. 水利工程隧洞开挖施工探析[J]. 东北水利水电, 2024, 42(01):26-28.