

# Study on stability of high velocity tunnel lining structure in Xinjiang

Yang Wang

Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

## Abstract

The Xinjiang region features complex topography and geomorphology, where tunnel projects play a crucial role in water conveyance and regulation during the development and utilization of water resources. Under high-velocity operating conditions, tunnel lining structures are subjected to the combined effects of impact pressure, hydraulic disturbances, and seepage stresses, making stability issues increasingly prominent. The region's unique geological formations and cold climate further intensify stress concentration and crack propagation risks, which can easily lead to lining deformation, spalling, or even overall failure, thereby severely affecting operational safety and service life. Studying the hydraulic characteristics, stress mechanisms, and influencing factors of high-velocity tunnels helps reveal the evolutionary patterns of stability and provides a theoretical basis for structural design optimization and safety control. Based on the actual conditions of Xinjiang, preventive measures from the perspectives of lining materials, construction techniques, and operational monitoring are proposed to effectively enhance the overall safety level of tunnels and ensure regional water resource security.

## Keywords

Xinjiang region; high-velocity tunnel; lining structure; stability study; preventive measures

## 新疆地区高流速隧洞衬砌结构稳定性研究

王阳

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

## 摘要

新疆地区地形地貌复杂, 水资源开发过程中隧洞工程承担着重要输水和调控功能。在高流速运行条件下, 隧洞衬砌结构面临冲击压力、动水扰动和渗流应力的共同作用, 稳定性问题愈发突出。区域特殊的地质构造与高寒气候进一步加剧了结构应力集中与裂缝扩展的风险, 容易引发衬砌变形、脱落甚至失稳破坏, 严重影响工程运行安全与寿命。研究高流速隧洞的水力学特征、衬砌受力机理及影响因素, 有助于揭示其稳定性演化规律, 并为结构设计优化与安全控制提供理论依据。结合新疆地区实际条件, 从衬砌材料、施工工艺和运行监测等方面提出防控措施, 对提升隧洞工程的整体安全水平和区域水资源保障能力具有重要意义。

## 关键词

新疆地区; 高流速隧洞; 衬砌结构; 稳定性研究; 防控措施

## 1 引言

新疆作为中国西北地区重要的水资源调控与输水枢纽, 其隧洞工程在农业灌溉、水力发电和城镇供水体系中具有举足轻重的地位。随着区域水利工程规模的扩大和高水头输水任务的增多, 隧洞内水流速度普遍加快, 结构所承受的水力冲击和应力扰动愈发显著。特别是在高寒环境和复杂地质条件下, 水流高速引发的动力效应与温度应力叠加, 极易导致衬砌结构在运行过程中产生裂缝、剥蚀和局部破坏, 直接威胁工程的安全运行。当前对新疆高流速隧洞的稳定性研究尚

存在不足, 尤其在揭示水流与衬砌结构相互作用机理方面缺乏系统性成果。通过深入分析衬砌在高速水流和特殊地质条件下的受力规律, 构建影响因素体系并探索有效的控制路径, 不仅有助于提升隧洞结构的耐久性与可靠性, 也能为新疆水利工程的可持续运行提供科学支撑。

## 2 新疆地区隧洞工程建设背景

### 2.1 高流速隧洞在新疆地区的分布与应用需求

新疆地域辽阔, 水资源时空分布不均, 山地与盆地之间的高差为隧洞输水工程提供了天然条件。在伊犁河流域、天山南北及塔里木河干流等区域, 高流速隧洞已成为跨流域调水、农田灌溉和水电开发的重要通道。这类隧洞承担大流量输水任务, 要求在较短时间内完成远距离输送, 因而设计

【作者简介】王阳(1996-), 男, 中国四川达州人, 硕士, 工程师, 从事水利工程中输、泄水建筑物具体设计研究。

流速明显高于常规隧洞。伴随国家水资源战略调整,新疆地区对稳定、高效输水设施的需求不断增加,高流速隧洞建设呈现集中与扩展趋势,服务对象涵盖农田灌溉、城乡供水及工业用水,成为区域经济与社会发展的重要保障。

## 2.2 区域地质与水文条件对隧洞运行的影响

新疆地质构造复杂,山体岩层节理发育,断裂构造活动频繁,部分隧洞工程沿线存在溶蚀岩层与松散堆积层,稳定性相对较差。水文条件方面,高山冰雪融水形成的季节性径流变化幅度大,地下水位受气候和地表径流补给影响显著,导致隧洞运行中渗流压力波动强烈。区域性干旱与高寒气候叠加,加速岩层风化和冻融循环作用,使衬砌结构长期处于高风险环境。岩体稳定性不足与水力扰动共同作用,增加隧洞在高流速条件下的受力复杂性,对衬砌结构的强度与耐久性提出更高要求,运行中存在突发渗漏和结构损伤的隐患。

## 2.3 隧洞衬砌结构稳定性研究的必要性

高流速隧洞在新疆地区广泛应用,但在运行过程中频繁出现衬砌裂缝、剥蚀、渗漏等问题,严重时甚至引发塌陷与停运,直接威胁水资源调控体系的安全与稳定。特殊地质与气候条件放大了结构受力的不均衡性,使常规设计理论难以完全适用。衬砌稳定性研究不仅关系到工程运行寿命,还涉及巨额建设投资与下游用户的供水安全。通过揭示结构在高流速和复杂环境下的演化规律,可以为材料选择、设计参数优化及运行防控提供科学依据,从而减少事故发生,保障水资源合理配置,推动新疆地区水利工程向高质量与长效化方向发展<sup>[1]</sup>。

# 3 高流速条件下隧洞水力特性分析

## 3.1 高流速水流的压力波动与能量作用规律

隧洞内水流速度加快时,水体动能显著增强,沿程压力分布出现明显波动,局部涡流与水击效应频繁发生。高流速状态下,流体惯性力增加,使隧洞断面处压力瞬时变化幅度加大,形成复杂的动态压力场。能量损失主要集中在入口、转弯和衬砌表面粗糙处,增加了结构受冲击程度。随着流速提升,能量转化速率加快,部分区域出现低压区,易诱发气蚀与空化现象。压力波动与能量集中作用共同改变了隧洞运行的水力环境,使衬砌长期承受交变荷载,结构稳定性与耐久性显著降低,对设计安全系数提出更严格要求。

## 3.2 水流冲击对衬砌内壁的动力效应

在高流速条件下,水流冲击力直接作用于衬砌内壁,形成周期性振动与应力集中效应。流速增加时,动水压力呈平方关系增长,使衬砌表层材料持续受到高强度冲击。局部结构如接缝、裂隙处承受应力集中,极易产生裂纹扩展与混凝土剥蚀。长期作用下,结构内部微裂缝逐渐贯通,导致整体刚度下降,耐久性降低。冲击效应还会与隧洞振动耦合,诱发衬砌与基础间的摩擦失衡,增加变形与失稳风险。动力

效应的累积作用不仅缩短衬砌使用寿命,还可能引发运行事故,对工程安全构成严重威胁。

## 3.3 高寒环境对水力特性的放大效应

新疆隧洞普遍位于高寒地区,低温条件显著改变水体物理性质。水温下降时黏度增大,流动阻力提高,局部紊流范围扩大,压力波动幅度增强。低温下溶解气体含量上升,空化核生成率增加,加剧高流速环境中的气蚀破坏。冰雪融水在输送过程中易形成局部冻结,缩小有效断面,造成流速进一步升加快和压力异常分布。冻融循环过程中,水体反复膨胀收缩,与衬砌内壁相互作用,使动水压力的瞬变效应更为剧烈。高寒气候对水力特性的放大效应,使隧洞在运行中面临更高风险,对衬砌结构提出了更加苛刻的适应性要求。

# 4 衬砌结构在复杂荷载下的受力机理

## 4.1 高流速作用下衬砌结构的内力分布特征

隧洞在高流速运行条件下,内壁承受水流压力的不均匀分布,形成复杂的内力状态。直线段主要表现为均布压力,但在隧洞弯道与断面突变位置,动水压力集中,导致弯矩和剪力显著增大。内力分布呈现周期性波动特征,与水流脉动频率密切相关。局部区域因受力突变而出现裂缝萌生,长时间作用会使衬砌截面承载力下降。内力的不均衡还会引起衬砌与周围岩体间的相对位移,增加接触面摩擦与剪切风险。内力分布特征的准确识别对于优化结构厚度与配筋设计具有关键意义。

## 4.2 地下水渗流与高压作用的耦合效应

隧洞运行中,周围岩体地下水与高流速水流形成相互作用,渗流压力与内水压力叠加,改变了衬砌受力状态。地下水渗入裂缝,推动衬砌与岩体间隙逐渐扩大,降低界面结合力。高压水流在渗流条件下容易诱发衬砌背后的孔隙水压力上升,使衬砌处于双向受压环境。耦合作用导致结构应力传递途径更加复杂,部分区域出现张拉应力集中,增加破坏概率。长期运行中,渗流与高压的耦合效应会加速衬砌材料劣化,诱发剥蚀与脱落,严重时可能引起整体失稳,对隧洞安全运行构成持续威胁。

## 4.3 高寒区温度应力与冻融循环的叠加影响

高寒地区隧洞衬砌长期承受显著温度差作用,混凝土结构在昼夜与季节温度变化中反复膨胀收缩,产生较大温度应力。冻融循环作用下,水体在衬砌微裂缝中结冰膨胀,推动裂缝扩展,降低材料密实度和抗渗性能。温度应力与动水压力叠加,使局部受力更趋复杂,裂缝扩展速率显著加快。衬砌结构在热胀冷缩与冻融破坏的反复作用下,耐久性逐步削弱。高寒环境的叠加影响不仅缩短隧洞使用年限,还增加维护与加固频率,给工程运行管理带来长期压力<sup>[2]</sup>。

# 5 衬砌结构稳定性影响因素分析

## 5.1 衬砌材料强度与耐久性参数的敏感性

高流速隧洞中,衬砌材料强度直接决定结构抵抗动水

压力与冲击荷载的能力。混凝土抗压、抗拉和抗折性能的差异会导致应力传递与裂缝扩展规律不同,若强度不足,容易在长期运行中产生剥蚀与碎裂。耐久性参数如抗渗性、抗冻性和抗磨性对稳定性具有显著影响,参数偏低时,结构在渗流作用和冻融循环下会快速劣化。材料性能的波动性使得稳定性对强度与耐久性参数高度敏感,任何微小的衰减都可能放大运行风险。因此,在设计与施工阶段,应重视材料性能的均衡与长期保持,避免因局部劣化引发整体衬砌失稳。

## 5.2 施工工艺与衬砌结构完整性的关联性

隧洞施工过程中,工艺水平决定了衬砌结构的密实性与整体性。浇筑过程中若振捣不足,易形成蜂窝麻面和空隙,成为渗流与冲击破坏的薄弱点。接缝处理不当会导致衬砌出现贯穿性裂缝,降低整体承载力。衬砌厚度不均匀或钢筋布置偏差会造成应力分布不合理,增加局部破坏风险。施工环境复杂时,若未采取温控与防冻措施,混凝土早期强度发展不足,后期耐久性受损。工艺缺陷往往在高流速运行条件下被放大,造成结构快速劣化。因此,施工工艺的规范与质量控制对衬砌完整性具有决定性作用<sup>[3]</sup>。

## 5.3 地质不均匀性与高流速扰动的复合效应

新疆隧洞所处区域地质条件差异显著,岩体硬度、节理发育程度与含水量变化频繁。衬砌结构在运行中需同时对地质不均匀性带来的应力集中与高流速水流的动态冲击,两者叠加易形成复合破坏。软弱岩层段常出现围岩变形与衬砌受压不均,增加内力分布复杂性。断层与破碎带处渗流量大,水力扰动与地质不稳定共同作用,使裂缝扩展加速。不同区域衬砌所承受的风险差异显著,若设计与施工未充分考虑地质不均匀性,容易造成局部破坏向整体失稳演化。复合效应是新疆高流速隧洞稳定性中最难预测与控制的重要因素。

# 6 新疆地区高流速隧洞衬砌结构稳定性控制措施

## 6.1 衬砌结构设计优化与抗冲击能力提升

在设计阶段,通过优化衬砌断面形式与厚度分布,可以有效分散高流速作用下的集中应力。采用合理的配筋方案,使结构具备较强的抗裂与抗弯能力,减少水流冲击引发的裂缝扩展风险。断面形状应结合水力特性进行修正,降低局部紊流与压力波动。增加抗冲击层或设置缓冲结构,可以削弱水流动能对内壁的直接作用。设计中还需考虑温度应力与冻融循环的综合影响,预留结构变形余量,以适应复杂荷载环境。通过设计优化与力学参数提升,可显著增强衬砌在高流速运行中的稳定性与可靠性。

## 6.2 高流速条件下衬砌材料与加固技术应用

衬砌材料选择应注重高强度、高耐久性和抗渗性能,适应新疆地区高寒与高流速环境。可采用高性能混凝土、纤维增强混凝土或耐磨骨料配比,以提升抗冲击与抗磨损能力。加固技术方面,喷射混凝土与钢筋网联合应用可增强衬砌整体性,减少局部破坏概率。在受力复杂或地质薄弱段,可采用复合衬砌或加设防护衬层,提高抵抗渗流与冲击能力。局部裂缝区域需及时实施化学灌浆或高分子材料修补,阻断渗流路径。材料与加固技术的合理结合,是保证隧洞长期稳定运行的重要措施<sup>[4]</sup>。

## 6.3 运行监测与动态风险防控体系的建立

稳定性保障不仅依赖设计与施工阶段,还需要在运行中形成完善的监测与防控体系。通过布设应力传感器、渗压计和裂缝监测装置,可以实时掌握衬砌受力与变形状态。高流速运行条件下,动态监测数据能反映结构在压力波动与冲击作用下的响应规律,为风险评估提供依据。建立数据分析平台,对异常信息及时预警,便于采取快速干预措施。定期开展检测与维护,结合监测结果实施针对性加固,可延缓结构劣化进程。运行监测与防控体系的构建,为新疆地区高流速隧洞的安全运行提供了长期保障和科学支撑。

# 7 结语

新疆地区高流速隧洞工程在区域水资源配置与经济发展中发挥着不可替代的作用,其衬砌结构稳定性直接关系到工程的安全运行和使用寿命。复杂的地质条件、高寒气候与高流速水力环境叠加,使隧洞衬砌在长期运行中面临多重风险。通过对水力特性、受力机理及影响因素的系统分析,可以揭示稳定性问题的内在规律,为结构设计与施工提供科学依据。在此基础上,结合材料优化、工艺改进和监测防控等措施,能够有效提升衬砌的抗冲击能力和整体耐久性。加强研究成果的工程应用与动态管控,将为新疆地区水利工程的可持续发展和供水安全提供坚实保障。

## 参考文献

- [1] 董家兴,张龙,张琰,顾克,刘佳龙.抽蓄隧洞自适应衬砌结构应力特性及调压构件开启压力差取值[J].昆明理工大学学报(自然科学版),
- [2] 李镇,任佳宽,徐建闻.引黄某隧洞衬砌破坏机制分析与处理措施[J].水利水电工程设计,2025,44(03):56-58+76.
- [3] 樊少彪,孙正,王伟,陈嘉敏,邵晓妹.引水隧洞衬砌结构聚脲防渗材料性能试验研究[J].南水北调与水利科技(中英文),
- [4] 程丽荣.水工隧洞钢筋混凝土衬砌结构计算方法初探[J].地下水,2025,47(04):296-299.