

复杂地质条件下水工隧洞衬砌结构优化设计与安全分析

王修伟

国家能源集团新疆开都河流域水电开发有限公司 新疆 库尔勒 841000

摘要：本文分析断层破碎带等不同地质条件特征，阐述其与衬砌结构相互作用的力学机制。介绍优化设计理论方法，探讨安全分析方法，研究优化设计与安全分析的集成，通过耦合关系构建统一分析框架，实现协同推进，为复杂地质下隧洞衬砌结构设计提供理论与技术支持。

关键词：水工隧洞；衬砌结构；复杂地质条件；优化设计；安全分析

引言：水工隧洞建设常面临复杂地质条件，如断层破碎带、软弱夹层、高地应力及高水压等。这些地质因素严重影响隧洞围岩稳定性，给衬砌结构设计带来巨大挑战。合理的衬砌结构需适应复杂地质环境，确保隧洞安全稳定运行。深入研究复杂地质条件下水工隧洞衬砌结构优化设计与安全分析方法，具有重要的理论意义和工程实用价值。

1 复杂地质条件对水工隧洞衬砌结构的影响

1.1 不同地质条件特征分析

断层破碎带由地壳运动的断裂作用形成，其走向与隧洞轴线夹角直接影响围岩稳定性，倾角决定破碎带物质滑移趋势，宽度关乎影响范围^[1]。物质组成中，断层角砾棱角分明、胶结差，断层泥遇水易软化，导致围岩整体性降低，难以形成稳定承载结构，隧洞开挖后易坍塌，迫使衬砌承担更大荷载。软弱夹层多因沉积时物质差异形成，强度和变形模量低，受力易发生塑性变形。其空间分布呈层状或透镜状，与隧洞相交时改变围岩应力传递路径，使衬砌局部受力集中，长期可能引发开裂。高地应力指地下岩体中超过常规水平的应力状态，多由板块运动或地层自重长期积累形成。此环境下，隧洞围岩应力分布非均匀，洞室周边形成高应力集中区。

1.2 地质条件与衬砌结构相互作用的力学机制

建立的力学模型需体现地质条件的不均匀性，如断层破碎带与完整岩体的力学参数差异，各向异性则需考虑不同方向上岩体强度和变形特性的变化，这些因素均会使衬砌结构受力状态复杂化。围岩与衬砌结构的相互作用始于隧洞开挖，围岩因原始应力释放产生变形，通过接触面向衬砌传递压力。衬砌结构在压力作用下发生变形，反过来约束围岩进一步变形，形成动态平衡。当地质条件发生变化，如断层活动或水压升高，这种平衡被打破，围岩压力重新分布，衬砌结构应力随之调整。

2 水工隧洞衬砌结构优化设计理论与方法

2.1 衬砌结构设计原则与目标

安全性原则要求衬砌结构能够承受复杂地质条件下的各种荷载，包括围岩压力、水压力等，避免因结构破坏导致隧洞失稳。适用性原则强调衬砌结构需满足隧洞的使用功能，如保证过流能力、维护检修空间等，适应运行过程中的各种工况变化。耐久性原则关注结构在长期使用中的性能保持，抵御地下水侵蚀、地质介质腐蚀等环境作用，减少后期维修成本。经济性原则需通过精准设计降低投资，如优化材料用量减少浪费，同时简化施工工艺缩短工期。优化设计目标需多维度平衡，降低结构内力可减少材料消耗，避免局部应力集中引发的开裂风险；

2.2 结构优化设计方法概述

尺寸优化通过调整结构构件的几何参数，如厚度、配筋量等，实现结构性能提升，适用于对已有结构形式的局部改进，优点是计算简便，缺点是难以突破原有结构框架的限制。形状优化聚焦结构外部轮廓的调整，如改变截面曲线形态，可更高效地分配应力，适用范围较广，但对施工工艺要求较高^[2]。拓扑优化从结构内部布局出发，优化材料分布，能发现全新的结构形式，不过结果需结合工程实际验证可行性。结合水工隧洞衬砌特点，单一方法难以满足需求，可先通过拓扑优化确定结构大致形式，再用形状优化调整轮廓，最后以尺寸优化细化参数，形成多层次优化体系，

2.3 基于力学性能的衬砌结构优化设计

材料优化需匹配地质条件，混凝土适用于一般地质，强度等级选择结合围岩压力；钢筋混凝土可提高抗拉能力，适合断层破碎带等拉应力区域；钢纤维混凝土抗裂性好，能适应高地应力变形需求。材料参数优化通过调整配合比，增加纤维掺量提升韧性，或用掺合料改善抗渗性，使材料性能适配受力状态。截面形式优化需分析力学特性，圆形截面受力均匀，抗高水压有效；马

蹄形截面底部承载强，适合软土地层；城门洞形截面顶部空间大，便于施工检修。优化结合地质条件，高地应力区优先选圆形截面，软弱夹层区用马蹄形增强底部支撑，调整截面尺寸让应力分布更均匀。结构布置优化需协调多因素，分段长度据地质完整性确定，完整岩体段可加长，断层破碎带需缩短适应变形；伸缩缝设置考虑温度变化和地质沉降，间距过大易开裂，过小增加施工复杂度；与其他结构连接用柔性节点，减少不均匀沉降附加应力，提升整体协同能力。合理分段与标准化设计减少模板更换，缩短工期；精准计算材料用量避免过量采购，从而降低成本，提升经济合理性。

2.4 考虑地质不确定性的衬砌结构鲁棒优化设计

地质参数的不确定性会影响设计精度，岩土体力学参数的波动可能导致计算荷载与实际偏差，地质构造分布的随机性可能使结构遭遇未预见的薄弱部位。这些不确定性会降低设计可靠性，甚至引发安全隐患。鲁棒优化设计理念强调结构对参数波动的适应性，通过建立包含地质参数波动范围的优化模型，使设计方案在参数变化时仍能保持性能稳定。模型需纳入多种可能的地质场景，通过调整结构参数，增加关键部位厚度或采用更坚韧材料，减少地质不确定性带来的影响。优化过程需平衡安全储备与经济性，避免过度设计造成浪费，确保结构在不利地质条件下仍能正常工作，提升整体可靠性。

3 复杂地质条件下水工隧洞衬砌结构安全分析方法

3.1 安全分析的基本概念与指标

水工隧洞衬砌结构安全分析是评估结构在复杂地质作用下能否维持稳定和正常工作的过程。目的是识别潜在风险，为设计优化和运维决策提供依据^[3]。常用的结构安全指标包括强度安全系数、稳定安全系数、可靠度指标等。强度安全系数反映结构实际承载能力与设计荷载的比值，比值越大说明抵抗破坏的能力越强。稳定安全系数用于衡量结构整体抗失稳的能力，体现衬砌与围岩协同工作的平衡状态。可靠度指标则综合考虑参数不确定性，描述结构在规定时间内完成预定功能的概率。不同安全指标的适用范围各有侧重。强度安全系数适用于评估构件局部受力状态，却难以反映整体稳定性。稳定安全系数更适合分析结构整体抗滑移或倾覆的能力，但对局部应力集中不敏感。

3.2 确定性安全分析方法

有限元法基于连续介质力学原理，将衬砌结构和围岩离散为单元，通过数值模型求解力学响应，步骤包括网格划分、边界条件设定、荷载施加和方程求解。复杂地质条件下，模型需体现地层岩性变化、断层分布和

地下水作用，经分析得应力分布、变形特征和稳定性系数。能直观呈现局部应力集中，模拟施工受力变化，适合处理复杂地质非均匀受力问题。边界元法仅对结构边界离散，求解边界积分方程得整体力学响应，计算量小，适合无限域问题，隧洞分析中简化围岩为无限介质，重点算接触界面应力和位移。优势是精准反映边界条件变化影响，适用于高水压渗流-应力耦合问题，对复杂地质非均质性模拟稍逊。块体理论基于岩体结构面分布，识别结构面切割的块体组合，分析块体在自重、水压力下的失稳模式，评估衬砌约束作用。通过判断块体坠落或滑动趋势，确定衬砌附加荷载，评价结构安全性，适用于断层破碎带等多裂隙区域。

4 复杂地质条件下水工隧洞衬砌结构优化与安全分析的集成研究

4.1 优化设计与安全分析的耦合关系

衬砌结构优化设计与安全分析存在不可分割的耦合关系。优化设计的每一步调整都需以安全分析结果为基准，通过安全分析揭示结构在复杂地质作用下的受力特征和潜在风险，为优化方向提供具体指引。比如安全分析发现某一部位在高地应力作用下易产生塑性变形，优化设计便可针对性强化该区域的结构刚度或选择更耐变形的材料^[4]。

4.2 集成研究的方法与流程

集成研究需构建统一的分析框架，将优化设计算法与安全分析方法深度融合。首先通过安全分析明确结构必须满足的安全指标，如最大允许位移、最小安全系数等，将这些指标转化为优化设计的约束条件，融入目标函数的构建中。优化算法在迭代搜索过程中，每生成一个候选方案，都需即时调用安全分析模块进行全面评估。完整的流程始于地质数据的系统采集，结合工程功能需求设定优化目标，如材料消耗最低或施工难度最小。优化模块生成初始设计参数后，安全分析模块对其进行受力验算和稳定性评估，若结果不符合安全要求，则将具体的超标参数反馈给优化模块，指导其进行针对性调整。经过多轮迭代，最终得到同时满足安全约束和优化目标的设计方案，实现两者的协同推进。

4.3 集成研究的应用与展望

(1) 工程概况

霍尔古吐水电站位于新疆巴州和静县的开都河上，工程等级属大(2)型工程，其主要建筑涵盖首部枢纽、发电引水系统以及地面厂房等。发电引水洞长达17.5km，采用一洞三机引水式开发模式，总装机容量达426.5MW（3×140MW（主机）+2×3.25MW（生态小

机），最大坝高29.3m，总库容463.5万m³。C2标为隧洞标，施工内容包括引水隧洞及其跨沟暗涵段、4条施工支洞。本标段引水隧洞起始桩号为：引4+360.055m~引15+225.88m（其中76.8m为跨沟段），该标段引水隧洞总长10.789025km。作为发电引水系统的关键构成部分，在整个工程中起着极为重要的输水作用。其施工质量、进度以及安全状况，直接关乎水电站能否顺利建成并投入运营。

（2）目前存在的问题

①根据超前地质预报及现场地质编录情况，隧洞某些洞段围岩类别应为Ⅲ1、Ⅲ2类围岩，初期支护采用喷锚挂网等柔性支护，但受断层破碎带、软弱夹层、不利结构面组合等因素影响，洞室内沿不良地质结构面存在塌方、掉块问题。Ⅲ1、Ⅲ2类围岩洞段局部需要采取刚性支护，这将导致围岩类别与支护方式不匹配问题。

②Ⅳ类围岩支护类型有两种：一是喷锚挂网支护（圆形），二是喷锚挂网+钢支撑支护（马蹄形）。结合现场

围岩条件，Ⅳ类围岩多采用喷锚挂网+钢支撑支护（马蹄形），这导致钢支撑、锁脚锚杆及喷砼工程量增多。

③地质缺陷超挖量约7000方，其余超挖（重点在底板超挖）约28189.63方（施工单位预估），累计超挖量约35189.63方。超挖导致超挖开挖量、超填回填混凝土量、超填喷射混凝土量增多。

④Ⅲ2、Ⅳ围岩洞段需要二衬，Ⅱ、Ⅲ1围岩洞段不需要二衬，现场开挖揭露围岩类别，二衬段增多380.3m（预估）。

⑤渐变段偏多，引水隧洞长约17.5km，沿线地质情况复杂，围岩类别变化频繁，Ⅲ2类、Ⅳ类加强段与其它围岩之间变化均存在渐变段，渐变段施工难度较大。

（3）集成研究方法的运用

在实际工程应用中，围岩类别及衬砌的变化是集成研究应用的重要体现。目前C2标隧洞已开挖10278.397m，设计围岩类别划分、实际开挖揭露围岩类别及集成研究优化后围岩类别对比详见表1。

表1 设计围岩类别、实际围岩类别及集成研究优化后围岩类别对比表

设计围岩类别			实际围岩类别		集成研究优化后围岩类别	
围岩类别	长度(m)	百分比	长度(m)	百分比	长度(m)	百分比
C2标						
Ⅱ	0	0.00%	37	0.36%	37	0.36%
Ⅲ1	5571.071	51.64%	4964.331	48.30%	5625.531	54.73%
Ⅲ2	3156.08	29.25%	920.56	8.96%	2456.16	23.90%
Ⅳ	2061.874	19.11%	4356.506	42.39%	2159.706	21.01%
引水洞总长度	10789.025	已开挖总长度	10278.397	已开挖总长度	10278.397	/

这些实际工程中的变化数据，进一步验证了集成研究在应对复杂地质条件下围岩和衬砌结构变化方面的实际价值，也为后续类似工程的优化设计和安全分析提供了实践参考。

（4）集成研究的展望

集成研究方法能有效解决传统分离模式的弊端。传统模式中优化设计与安全分析分步进行，易导致方案因安全考量不足而返工，或因缺乏设计细节导致安全评估失真，集成方法通过实时交互可避免此类问题。应用中需应对复杂地质参数动态变化的挑战，地质条件的不确定性会同时影响优化算法的收敛性和安全分析的精度。未来可增强模型自适应能力，使集成系统能根据实时地质勘察数据动态调整分析参数，提升对复杂环境的适应能力。

结束语

复杂地质条件下的水工隧洞衬砌结构优化设计与安

全分析至关重要。通过剖析地质条件影响、阐述优化设计方法、探讨安全分析手段以及研究集成方法，实现了优化与安全的协同。未来需进一步增强模型的自适应能力，以更好应对地质参数动态变化，为实际工程提供更完备的理论支撑与技术保障，推动水工隧洞建设技术持续进步。

参考文献

- [1]张传健,王博士,张存慧,等.铺设排水板的水工隧洞组合衬砌受力特性研究[J].人民长江,2024,55(10):182-189,196.
- [2]刘志勇.水工隧洞衬砌结构设计理论与应用[J].水利学报,2023, 45 (3) : 45-52.
- [3]李晓燕.复杂地质条件下水工隧洞施工技术研究[J].工程技术, 2022, 34 (5) : 67-73.
- [4]陈伟.水工隧洞衬砌结构安全分析与优化设计[J].水利水电技术, 2024, 46 (2) : 89-95.