抽水蓄能电站输水隧洞施工围岩稳定控制实践分析

付若麟
中国水利水电第十一工程局有限公司　河南　郑州　450001

摘　要：抽水蓄能电站输水隧洞多深埋于山体内部，地质构造环境复杂，高地应力、裂隙发育与地下水渗流等多重因素叠加，极易诱发围岩形变与失稳风险。结合现场施工场景梳理围岩赋存特征与应力重分布规律，厘清多因素耦合下的失稳诱发机制，本文从保护性开挖、分层支护、水害处置与动态管控四个维度梳理现场稳定控制工艺，提出适配不同地质区段的精细化优化路径，可为同类深埋输水隧洞的围岩稳定管控提供实操参考。

关键词：抽水蓄能电站；输水隧洞；围岩稳定；施工控制；地质适配性

引言：双碳目标下国内抽水蓄能电站建设规模持续扩大，输水隧洞作为电站输水系统的核心构筑物，施工期围岩稳定管控直接影响工程推进效率与作业安全。深埋隧洞沿线岩体非均质特征突出，不同区段的岩体强度、地应力状态与含水条件差异显著，常规粗放型施工模式极易引发岩体损伤、片帮坍塌等问题。结合现场施工实践梳理围岩失稳的内在逻辑，形成可落地的稳定控制技术体系，对保障隧洞施工安全与结构服役性能具备实际工程价值。

1 抽水蓄能输水隧洞围岩赋存与失稳机理分析

1.1 输水隧洞工程围岩地质赋存特征

抽水蓄能电站输水隧洞多深埋于山体内部，整体地质构造环境复杂多变。隧洞沿线岩体结构存在明显的非均质特性，完整岩体、破碎岩体与软弱夹层交替分布，岩体致密程度与结构强度存在较大差异。地质构造运动形成的节理、裂隙贯穿岩体内部，切割原有完整岩体结构，形成大量离散性结构面。这类结构面会破坏岩体整体性，降低岩体自身的自稳能力[1]。深部围岩长期处于高地应力环境，岩体内部积蓄大量弹性应变能，为后续施工扰动后的结构变化埋下隐患。地下水在裂隙网络中持续渗流，持续软化岩体结构，弱化结构面胶结强度，进一步改变围岩原生地质状态。

1.2 隧洞施工扰动下围岩应力重分布规律

深埋隧洞原始岩体处于封闭平衡的应力状态，开挖作业会直接打破岩体原有应力平衡体系。岩体剥离后洞壁临空面形成自由空间，原本集中的地应力向开挖轮廓周边转移、扩散。围岩不同位置的应力增减趋势存在明显区别，洞顶与边墙区域易出现应力集中现象，深部岩体则呈现应力缓释状态。开挖推进的持续进行，会不断改变应力传导范围与聚集区域，让围岩应力状态始终处于动态调整过程。应力持续的迁移与重构，会改变岩体受力状态，推动围岩进入塑性变化阶段，诱发岩体内部结构的持续调整。

1.3 复杂地质条件下围岩失稳诱发机制

不良地质构造与施工扰动的叠加作用，是引发围岩失稳的核心诱因。节理裂隙发育的岩体结构整体性较差，应力重分布产生的附加作用力会持续挤压结构面，促使原有裂隙持续延展、贯通。地下水的渗透作用会不断冲刷、软化裂隙充填物质，削弱结构面抗剪强度，让岩体结构的约束能力持续下降。高地应力环境下的岩体储能较高，施工扰动释放的应变能会加剧岩体结构的塑性变形。多重地质因素与施工因素相互作用，逐步突破岩体自身稳定阈值，最终触发围岩结构性失稳。

1.4 输水隧洞围岩变形破坏的主要表现形式

输水隧洞围岩的变形破坏会随地质条件与扰动程度呈现不同形态。完整性较好的硬质岩体多出现脆性破坏，表现为表层岩体剥落、片帮与局部崩落。软弱岩体或破碎岩体更易产生塑性变形，呈现围岩挤缩、轮廓收敛等持续性形变特征。裂隙发育区域会出现结构面滑移、错动问题，引发局部岩体坍塌。地下水活跃地段会伴随岩体软化崩解、裂隙扩张等现象，逐步扩大围岩破损范围。各类破坏形态循序渐进发展，持续损害隧洞围岩的整体稳定性。

2 输水隧洞围岩稳定影响因素及施工隐患分析

2.1 地质构造因素对围岩稳定性的制约作用

地质构造条件是决定输水隧洞围岩自稳能力的先天条件。山体内部褶皱、断裂构造会打乱岩体的完整连续性，让隧洞穿越区域岩体破碎、结构松散。密集发育的节理裂隙会切割岩体形成大量独立块体，大幅降低岩体整体承载能力[2]。构造破碎带区域岩体胶结程度薄弱，内部结构松散，抗形变与抗扰动性能偏弱。复杂构造形态会改变地应力的分布状态，造成局部应力集中，提升岩

体发生形变与破损的概率。不良地质构造带来的结构性缺陷，会全程制约隧洞围岩的整体稳定状态，提升施工管控难度。

2.2 地下水环境对围岩岩体结构的弱化作用

地下水是诱发围岩结构劣化的重要环境因素。岩体裂隙网络为水体渗透提供流通通道，持续的渗流作用会不断侵蚀裂隙内部充填介质。长期浸水会软化软弱岩体与夹层结构，降低岩体自身强度与结构面摩擦阻力。水体持续渗透会扩大裂隙开度，打通零散裂隙的连通路径，破坏岩体原有致密结构。水压作用会对围岩产生持续劈裂效应，推动细微裂隙不断延展扩张。岩体结构强度的持续衰减，会让围岩自稳性能逐步下降，滋生各类形变与失稳风险。

2.3 施工扰动行为对围岩稳态的干扰机制

隧洞开挖、掘进等施工操作会打破岩体原始的应力平衡状态。掘进作业产生的动力扰动会传递至周边岩体，引发岩体内部结构产生细微错位与损伤。分层开挖会持续改变隧洞临空面形态，促使围岩应力不断重新分配与调整。频繁的施工扰动会累积形成持续性结构损伤，让岩体塑性变形不断累积。扰动强度的动态变化，会让围岩长期处于不稳定的受力状态，加剧裂隙发育与岩体破损速度。施工带来的持续性结构干扰，会不断突破围岩稳定临界状态，诱发各类不稳定问题。

2.4 支护体系适配性不足引发的围岩稳定隐患

支护结构是维系隧洞围岩施工期稳定的关键人工保障。支护结构布设形式与围岩实际工况不匹配时，无法充分约束围岩形变发展。支护施工时机把控不当，会错过围岩应力调控的关键节点，任由岩体塑性变形持续发展。支护结构间距、布设层次不合理，会出现防护盲区，无法全面抵御围岩应力变化与结构形变。各类适配性问题会削弱支护体系的整体防护能力，无法有效抵消地质缺陷与施工扰动带来的负面作用，持续积累围岩稳定隐患。

3 抽水蓄能输水隧洞围岩稳定控制施工实践

3.1 隧洞开挖工序的围岩稳态保护性施工工艺

输水隧洞深埋山体内部，原始岩体应力状态相对平衡，粗放开挖模式极易引发岩体结构损伤与应力突变。保护性开挖工艺以弱化施工扰动为核心目标，结合隧洞沿线岩体完整程度调整掘进方式与进尺深度。岩体完整性较高的区段，采用分层分块掘进模式，缩减单次开挖断面规模，降低临空面骤然成型带来的应力剧烈波动。岩体破碎、裂隙发育的薄弱区段，采用短进尺、快掘进的作业思路，减少围岩裸露时长，规避长时间空曝引发的裂隙扩张与表层脱落[3]。掘进作业摒弃强冲击开挖手段，依靠温和破岩方式削减动力扰动向深部岩体的传导范围。严格把控开挖轮廓精度，减少超挖、欠挖问题出现，维持隧洞断面形态规整度。规整的开挖轮廓能够弱化局部应力集中现象，让围岩应力重分布过程更加平缓，从施工源头降低形变失稳风险，为后续支护作业提供稳定的岩体基础。

3.2 适配复杂围岩的分层支护施工实施方式

不同区段围岩的结构强度、完整程度存在显著差异，单一支护形式无法适配全段隧洞的稳定防护需求。分层支护施工依托现场岩体实际状态，搭建由表及里、逐层加固的防护体系。表层采用喷射混凝土作业，快速封闭新鲜开挖岩面，封堵岩体表层裂隙，阻挡外部空气与水体对岩体的侵蚀破坏。中层布设锚杆结构，通过深部锚固作用串联松散岩体，提升表层岩体与深部完整岩体的整体性，限制表层岩体的松动与滑移。地质条件偏弱、破碎程度较高的区段，增设钢拱架辅助支撑，强化整体承载能力，抵御围岩应力释放产生的挤压形变。各支护工序依次有序推进，根据围岩形变趋势调整支护布设密度与施工厚度。层级化的支护结构可以逐层分担围岩压力，约束塑性变形持续发展，构建具备较强适配性的围岩稳定防护体系。

3.3 地下水疏导与防渗稳压施工处置方式

地下水渗流是持续弱化围岩结构、滋生稳定隐患的关键因素，水体长期滞留岩体裂隙会持续降低结构面强度。施工过程采用疏导与防渗相结合的处置思路，从水体治理维度保障围岩结构稳定。针对裂隙渗水、局部涌水区段，布设导水孔洞与排水管路，引导岩体内部积水有序排出，降低岩体内部静水压力，缓解水体劈裂作用对裂隙的扩张影响。排水作业完成后，对岩体表层松散裂隙与渗水通道开展封堵处理，采用防渗材料填充固结裂隙缝隙，阻断后续水体渗透路径。涌水问题突出的区段，加厚防渗防护层，强化整体隔水能力，避免水体反复侵入岩体结构。系统化的水害处置模式可以有效改善围岩潮湿软化状态，稳固岩体结构强度，消除渗流作用带来的持续性结构损伤。

3.4 施工全过程围岩动态管控实施流程

隧洞围岩状态会随开挖推进、应力释放与环境变化持续变动，静态管控模式难以适配动态施工场景。全过程动态管控贯穿开挖、支护、治水的全部施工环节，建立持续性的围岩状态管控机制。施工前期针对作业区段开展细致地质复核，掌握岩体结构、裂隙分布与含水状态，匹配对应的施工与防护方案。施工中期持续关注围

岩形变发展趋势与结构状态变化，及时调整开挖进尺、支护参数与治水方式，适配现场动态工况。施工后期完成支护结构成型后的状态管护，排查表层开裂、局部渗水、结构松动等细微隐患，及时开展补强处置。完整的动态管控流程能够精准适配围岩状态变化，及时化解各类潜在失稳风险，保障隧洞围岩在整个施工周期内保持稳定状态。

4 输水隧洞围岩稳定控制的优化提升路径

4.1 精细化开挖施工工艺的优化思路

常规隧洞开挖工艺作业精度粗放，容易造成围岩表层损伤范围扩大，影响岩体原始结构完整性。精细化工艺优化围绕掘进精度与扰动控制展开，对单次掘进进尺实行分级管控。完整硬质围岩区段可将单次掘进深度控制在2.5至3.0米，破碎软弱围岩区段压缩至1.0至1.5米，大幅降低临空面暴露带来的应力剧烈释放。优化断面成型控制方式，严格控制超挖量不超过8厘米，减少不必要的岩体剥离与次生裂隙生成。细化掘进作业分区，针对边墙、拱顶等应力敏感区域调整破岩力度，弱化机械扰动向深部岩体的扩散程度。精细化施工模式能够有效收缩围岩损伤圈层范围，维持岩体结构的完整度，为后续支护施工提供良好的岩体基础。

4.2 复合型围岩支护结构的改良方向

传统单一支护结构防护维度有限，难以应对复杂围岩的多级形变压力。复合型支护结构改良依托围岩形变特征与地质条件，调整支护材料配比与结构布设参数[4]。常规稳定区段可将锚杆布设间距调整至1.2至1.5米，破碎围岩区段缩小至0.8至1.0米，提升深部岩体锚固效果。优化喷射混凝土厚度梯度，基础区段厚度维持在8至10厘米，应力集中区段提升至12至15厘米，增强表层封闭与承压能力。结合钢拱架、钢筋网与注浆固结技术形成组合防护体系，提升支护结构的整体刚度与变形适配性。改良后的复合支护模式可分层抵御围岩形变压力，抑制裂隙延展扩张，提升围岩整体自稳能力。

4.3 围岩动态管控体系的完善策略

传统管控模式多侧重阶段性状态核查，无法覆盖施工全周期的围岩变化。动态管控体系完善着重补齐全过程、常态化的管护短板，建立周期性状态核查机制。施工阶段每间隔10米完成一次围岩状态排查，针对形变增速异常区段提升核查频次。完善状态判别标准，依据岩体开裂程度、表层变形量、渗水状态划分管控等级，匹配差异化的处置手段。规范各施工环节的衔接管护流程，细化开挖后裸岩暴露时长标准，严格把控支护跟进节奏。体系化的管控手段可以及时捕捉围岩状态变化，提前处置潜在不稳定问题，维持施工全程的围岩稳态。

4.4 特殊地质段围岩防护技术升级路径

构造破碎带、高含水软弱夹层等特殊区段，岩体强度偏低、形变风险更高，常规防护技术管控力度不足。技术升级针对特殊地质段的结构缺陷与环境特征，强化超前防护与加固能力。针对裂隙密集破碎岩体，增设超前注浆加固工序，通过浆液填充固结内部裂隙，提升岩体整体胶结强度。高含水地质段优化分层排水工艺，增设间距2米的疏导孔，降低静水压力对围岩的持续破坏。调整特殊区段施工参数，进一步缩短单次开挖进尺，放缓施工推进节奏。针对性的技术升级方式能够有效弱化特殊地质带来的施工风险，强化复杂区段围岩的长期稳定性能。

结束语

抽水蓄能电站输水隧洞围岩稳定管控属于贯穿施工全流程的系统性工作，单一防护手段难以应对复杂多变的地质与施工扰动问题。通过在开挖环节弱化外力干扰，依托分层支护结构逐级抵御围岩形变压力，配合针对性地下水治理与常态化动态监测，能够有效消解深埋隧洞施工过程中的各类稳定隐患。施工过程可结合现场岩体结构与水文状态灵活调整工艺举措，持续提升隧洞围岩在整个施工阶段的整体稳定性能与安全储备。

参考文献

[1]阮金山,左学成. 复杂地质条件下抽水蓄能电站输水隧洞开挖施工技术与风险控制[J]. 工程技术研究,2025,7(17):196-198.

[2]刘畅,臧玉燚. 垣曲抽水蓄能电站输水上平段施工支洞结构设计[J]. 水电与抽水蓄能,2025,11(4):116-120.

[3]罗宗佑. 抽水蓄能电站引水隧洞掘进施工关键技术研究[J]. 科海故事博览,2025(32):52-54.

[4]郭晓磊.抽水蓄能电站引水隧洞斜井导井施工技术研究[J].电气技术与经济,2026,(01):385-387+391.