

水电站引水隧洞硬岩掘进施工中的围岩稳定性控制技术

张 雷

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

【摘 要】：水电站引水隧洞大多穿过深山岩体，硬岩地层遍布，硬岩掘进施工时受到高地应力、岩体裂隙、施工扰动等众多因素的影响。本文根据硬岩地层岩体力学特性，对引水隧洞硬岩掘进围岩失稳类型及诱发机理进行分析，整理出超前防控、动态支护、实时监测一体化的稳定性控制技术体系，并通过实际水电工程案例来检验各种控制技术的效果。研究表明，采用分级围岩控制、应力主动释放、精细化支护改善和全过程动态监测等方法可以有效地抑制硬岩围岩变形破坏，大幅度降低岩爆、坍塌风险，保证硬岩引水隧洞掘进施工的连续性和安全性，可以给同类水利隧洞工程施工提供技术借鉴。

【关键词】：水电站；引水隧洞；硬岩掘进；围岩稳定性；支护技术；动态监测

DOI:10.12417/2705-0998.26.13.056

引言

现阶段硬岩隧洞掘进施工中，部分工程还使用着传统的固定支护方式，没有根据围岩等级和应力状态的变化来改变支护参数，造成支护滞后、强度不够或者过度支护的现象出现，进而使得围岩稳定性控制的效果不好，施工安全隐患时有发生。因此，本文以硬岩引水隧洞施工的特点为基础，对围岩失稳机理进行分析，把优化的稳定性控制技术结合起来，利用工程实测数据来检验技术的可行性，形成一套适合硬岩掘进施工的围岩稳定控制体系，为水电站引水隧洞施工标准化、精细化提供支持。

1 硬岩引水隧洞围岩特性与失稳机理

1.1 硬岩岩体基本力学特性

水电站引水隧洞硬岩地层主要有致密花岗岩、硬质灰岩、石英砂岩等，岩体整体具有高强度、高脆性、低透水性的力学性质。完整硬岩岩体单轴抗压强度一般大于 60MPa，岩体结构致密、孔隙率低，在天然状态下整体性好、稳定性高。但是深埋隧洞所处的地下应力环境比较复杂，垂直地应力和水平地应力数值较大，岩体内部存有大量的弹性应变能。天然硬岩地层不是完全均质完整的岩体，存在着节理、裂隙、层理等结构面，在某些地方还存在着小型断层破碎带。结构面的存在破坏了岩体的完整性，降低岩体整体强度和抗变形能力，是围岩失稳的主要薄弱部位。掘进施工扰动会使结构面裂隙扩大、贯通，最终造成岩体松动、坠落或者坍塌。

1.2 硬岩掘进围岩主要失稳类型

根据大量的水电站隧洞施工经验可知，在硬岩地层的掘进过程中，围岩失稳类型大致可以分为三大类，各类失稳形态特点及诱发因素各有不同。第一类为岩爆破坏，多发生于完整致密、高地应力硬岩地层，掘进后洞壁应力迅速集中，弹性应变能瞬间急剧释放，岩体爆裂剥落、弹射飞出，破坏突然性强、破坏力大，是深埋硬岩隧洞最主要的灾害类型。第二类是裂隙扩张型失稳，多发生在节理裂隙发育的硬岩区段，施工扰动使

原有的裂隙不断延伸、贯通，岩体逐渐松弛，出现表层开裂、小块脱落、围岩鼓包等现象，破坏过程比较缓慢，有明显的阶段性特点。第三类为结构面失稳，主要集中在有软弱结构面、小型断层的硬岩区段，结构面抗剪强度低，掘进后围岩应力重新分布，结构面岩体发生滑移、错动，造成局部壅堵、拱顶掉块等。

1.3 围岩失稳诱发机理

硬岩引水隧洞围岩失稳的主要原因就是岩体应力平衡状态的失衡，分为内因和外因两个方面。内因是岩体自身性质和地应力状况，深埋硬岩地层天然地应力水平高，岩体脆性强、延展性差，结构面分布不均，给失稳破坏提供物质和能量基础。外因是施工扰动影响，掘进作业破除围岩原有约束，使临空面应力集中，爆破震动、机械掘进振动都会使岩体裂隙发育，破坏岩体结构完整性。

隧洞掌子面和周围围岩在掘进施工时会形成应力松弛区、应力集中区和原始应力区。应力松弛区岩体失去原来的支撑，裂隙迅速发展，岩体强度急剧下降。应力集中区岩体的应力远远大于岩体的屈服强度，硬岩不能通过塑性变形来释放应力，最后以脆性破坏或者岩爆的形式释放能量。如果施工支护不及时、支护参数不合理，松弛区范围就会不断扩大，应力集中程度就会不断增大，最后造成大面积围岩失稳破坏。

2 硬岩掘进围岩稳定性核心控制技术体系

2.1 超前地质预判与风险分级技术

超前地质预判属于围岩稳定性控制的前置关键工序，可以提前知晓掌子面前方岩体结构、地应力状况、裂隙发育状况以及不良地质体的散布情况，从而给后面掘进参数的调节、支护方案的改良给予支撑。目前水电站硬岩隧洞施工主要使用综合超前探测方式，以地质雷达探测为主、超前钻孔复核为辅，根据前期勘察的地质资料进行地质情况的预判。

施工过程中根据岩体完整性、单轴抗压强度、地应力水平、结构面发育程度把硬岩围岩分为三个风险等级。一级稳定围岩

岩体完整、裂隙少、地应力低，没有失稳危险。二级中等稳定围岩岩体较完整、局部裂隙发育、地应力中等，存在轻微开裂、掉块的风险。三级不稳定围岩岩体裂隙发育，有软弱结构面，高地应力富集，有岩爆、局部坍塌的危险。根据风险等级进行控制措施的落实，防止由于施工管理上的疏忽而产生的安全问题和资源浪费。

2.2 高地应力主动释放防控技术

对于深埋硬岩隧洞高地应力造成的岩爆、脆性失稳问题，利用主动应力释放技术，在掘进前就消解岩体内部的弹性应变能，降低围岩应力集中程度，从根本上降低围岩失稳的风险。常用的有超前应力释放孔、预裂爆破卸压、超前导洞卸压这三种方法。

超前应力释放孔适用于中等地应力、岩爆风险低的完整硬岩区段，在掌子面和拱顶周边布置深度8~12米、直径110毫米的钻孔，孔间距控制在0.8~1.2米，通过钻孔破除岩体应力封闭状态，使内部应力慢慢释放，防止能量突然爆发。预裂爆破卸压适合于高地应力、强岩爆危险的地段，在正式掘进爆破前沿隧洞轮廓线做微差预裂爆破，形成连续裂隙卸压带，切断内部高应力向临空面传播，减小洞壁应力峰值。超前导洞卸压适用于超大埋深、极高地应力区段，先开挖小导洞释放围岩应力，然后扩大开挖，大大减少大面积岩体失稳的几率。

2.3 差异化精细化支护技术

支护是控制围岩变形、保持岩体稳定的手段，抛弃传统的统一支护方式，按照围岩风险等级的不同采取差异化的支护措施，坚持跟随开挖、及时封闭、快速成型的支护理念，形成多层次的协同支护体系。

一级稳定围岩整体完整性好，自稳能力强，掘进后只做岩面清理，用薄层素混凝土封闭防护，厚度3~5厘米，主要防止岩体表层风化、细微裂隙扩大，不需要设置锚杆和钢支撑，在保证安全的前提下节省施工成本、加快施工进度。

二级中等稳定围岩有局部裂隙和掉块的风险，用喷射混凝土加钢筋网加系统锚杆的联合支护方式。初喷4~5厘米厚钢筋纤维混凝土封闭岩面，快速固结表层松散岩体。然后布置全长粘结型锚杆，锚杆间距为1.2米乘以1.2米，长度为4~6米，挂设双层钢筋网加强混凝土的整体性。最后用8~10厘米厚的复喷混凝土约束表层裂隙扩展，提高围岩整体稳定性。

三级不稳定围岩和不良地质区段，失稳风险大，采用强支护体系，在常规支护的基础上加设钢拱架和固结灌浆加固。采用工字钢拱架，间距0.6~0.8米，与锚杆、钢筋网焊接成刚性支撑骨架。对围岩深部裂隙进行固结灌浆，用普通硅酸盐水泥浆，灌浆压力控制在0.5~0.8MPa，填充岩体深部裂隙，提高岩体整体性和力学参数，从根本上改善围岩受力状态。

2.4 全过程动态监测与预警技术

硬岩隧洞的围岩失稳具有突发性特点，单纯的被动支护已经不能满足防患于未然的需求了，必须配备全过程动态监测技术，对围岩变形和应力的变化规律进行持续的观察，从而达到早发现、早处置的目的。施工监测主要是对围岩收敛变形监测、锚杆应力监测、岩爆实时监测、围岩内部位移监测这四个主要方面进行监测。

在隧洞典型断面布置监测点位，每5~10米一个收敛监测点，每天观测拱顶沉降、边墙收敛变形数据，了解围岩整体变形趋势。利用锚杆应力传感器对支护锚杆的受力进行实时监测，分析围岩应力调整情况。利用微震监测系统收集岩体破裂所引起微震信号，从而准确预测岩爆的发生几率和强度。对监测数据进行实时汇总分析，设定变形速率、应力阈值，当数据超过阈值时立即发出预警，停止掘进、补强支护，对施工全过程实施动态控制。

3 工程应用案例分析

3.1 工程概况

某水电站引水隧洞工程总长8.6公里，隧洞开挖断面为圆形，直径6.8米，最大埋深820米，属于典型的深埋硬岩隧洞。隧洞穿越的花岗岩、硬质石英砂岩为岩体单轴抗压强度65~90MPa，岩体整体坚硬致密。根据施工勘察数据可知，隧洞中段4.2-6.5公里处地应力水平高，最大水平主应力为32~38MPa，有中强岩爆危险，局部区段节理裂隙发育，夹杂小型断层破碎带，围岩稳定性极差。工程采取机械配合爆破掘进的方式，施工初期由于支护方案单一、应力控制不好，多次出现岩爆、局部掉块病害，严重危及施工安全和进度。后期使用本文所提出围岩稳定性控制技术体系，进行分级管控、主动卸压、差异化支护、动态监测，施工工况得到明显改善。

3.2 施工技术方案

根据工程地质条件和围岩风险等级来制定相应的施工方案。全过程做好超前地质预报工作，掘进20米做一次地质雷达探测，在高危地段加大超前钻孔复核次数，准确掌握前方地质情况。二是针对高地应力岩爆风险区段采用超前应力释放孔联合预裂爆破卸压技术来改善爆破参数，减小施工扰动。三是严格按分级支护要求，对不同级别的围岩采用不同的支护参数，高危区段增设钢拱架和固结灌浆加固。四、设置全程监测系统，实时获取围岩变形、应力、微震数据，建立动态预警机制。

3.3 应用效果数据对比分析

为了直观地证明技术体系的应用效果，选择工程施工中没有使用优化技术的前期区段和使用优化技术的后期区段的数据进行对比，统计围岩变形量、病害发生率、支护耗材、施工效率等主要指标，具体数据如下表所示。

表1 应用效果数据对比

施工阶段	围岩最大收敛变形量 (mm)	岩爆及坍塌病害发生率 (%)	日均掘进进尺 (m)	单位长度支护耗材成本 (元/m)
优化技术应用前	18.6	12.8	4.2	2160
优化技术应用后	6.3	2.1	5.8	1820

从表格数据可知,在应用优化的围岩稳定性控制技术体系之后,隧洞围岩最大收敛变形量大幅度减小,降幅达到66.1%。岩爆和局部坍塌病害发生率由原来的12.8%下降到现在的2.1%,施工安全风险得到了根本的控制。差异化支护模式避免了过度支护的问题,单位长度支护成本降低了15.7%,围岩稳定无隐患,施工停滞次数大大减少,日均掘进进尺提高了38.1%。

通过观测可知优化施工后围岩变形速率均匀、无突变变形、锚杆应力均匀无超限,岩体应力趋于稳定。高地应力区段采用主动卸压技术消除了岩体内部的弹性应变能,岩爆控制效果好,全过程没有发生强岩爆灾害,证明了该技术体系在深埋硬岩引水隧洞施工中的实用性、可靠性。

3.4 施工针对性优化对策

根据施工实践提出相应的优化改进措施。首先精准优化卸

压施工参数,根据各个区段地应力实测数据、岩体完整性等实际情况动态调节应力释放孔间距、深度、数量,在地应力区段加密钻孔、加深孔深,保证应力充分释放,防止过度卸压造成岩体松动。其次严格控制支护的时效性,实行开挖、清面、初喷、锚杆、复喷流水施工工艺,缩短围岩裸露时间,使开挖成型后立即封闭支护,最大限度地保留岩体原始强度。

其次,加强监测数据的智能化分析,创建起监测数据的动态分析模型,联系实时数据变动的规律来预估围岩稳定发展的趋向,从而达成由被动应对转向主动预判防控的目的,提早作出施工和支护方案的调整。最后细化不良地质区段的管控,对断层破碎带、裂隙密集带加大固结灌浆范围和灌浆压力,加密钢拱架和锚杆布设密度,采用小进尺、弱扰动、快支护的施工方式,杜绝大范围开挖扰动,保证复杂地质区段围岩稳定。

4 结论

本文通过对水电站硬岩引水隧洞围岩力学特性及失稳机理的分析,建立了一种以超前预判、主动卸压、差异化支护、动态监测为特点的围岩稳定性控制技术体系,并通过工程实践对技术体系进行检验。工程实践证明,该技术体系可以大幅度减小围岩变形量和病害发生率,提高施工效率,适合深埋、大跨度硬岩引水隧洞施工。随着水利工程施工技术的智能化发展,可以将BIM技术、智能监测机器人、自动化支护设备等融合起来,对围岩地质进行预判、对应力进行调控、对支护进行施工、对监测进行预警,从而达到围岩稳定性控制的精细化和高效化的目的,在复杂的地质条件下,给水电站隧洞工程提供更加先进的技术支持。

参考文献:

- [1] 刘霄,方星桦,阳军生,等.硬岩地层悬臂掘进机镐型截齿磨损状态及更换决策——以LTTG输水隧洞分水支线A线为例[J/OL].科学技术与工程,1-8[2026-09-04].
- [2] 宋占栋.TBM施工在水工隧洞中的适应性与关键技术研究[J].全面腐蚀控制,2026,40(4):416-418.
- [3] 吴文兵.硬岩掘进机刀座损坏的原因及解决措施——以厄瓜多尔MINAS水电站工程引水隧洞施工中TBM的应用为例[J].产业创新研究,2018,(7):108-109.
- [4] 吴世勇,周济芳.锦屏二级水电站长引水隧洞高地应力下开敞式硬岩隧道掘进机安全快速掘进技术研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(8):1657-1665.