

# 软弱围岩隧道开挖进尺控制与稳定性关系研究

张定华

云南省曲靖市设计研究院有限责任公司腾冲勘察分院 云南 腾冲 679100

**【摘要】**：解决软弱围岩隧道开挖进尺与稳定性适配问题，系统分析围岩地质条件、开挖施工方法、支护技术参数及施工环境与工期要求对开挖进尺的影响机制，构建包含围岩变形量、应力分布、支护结构受力及综合评判的稳定性评价指标体系，提出基于围岩级别的参数优化、进尺与支护协同控制、动态调整及多维度效果验证技术。不同级别围岩匹配对应进尺参数与施工技术，可统筹安全与效率，为软弱围岩隧道施工提供理论支撑与技术参考。

**【关键词】**：软弱围岩隧道；开挖进尺；稳定性评价；协同控制；动态调整

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.021

## 引言

软弱围岩隧道施工中，开挖进尺的合理选择是平衡施工安全与工程效率的核心。此类围岩物理力学性质差、节理裂隙发育，易发生坍塌、剥落等失稳现象，进尺过大会加剧风险，过小则造成工期延误与成本增加。当前部分工程存在进尺参数与实际地质条件适配不足、稳定性评价缺乏系统性等问题，引发安全事故与资源浪费。本文聚焦软弱围岩隧道开挖进尺影响因素，建立科学的稳定性评价体系，探索优化控制技术，为提升此类隧道施工的安全性与经济性提供解决方案，具有重要工程实践意义。

## 1 软弱围岩隧道开挖进尺影响因素分析

### 1.1 围岩地质条件对进尺的制约作用

围岩地质条件是制约软弱围岩隧道开挖进尺的核心因素，不同级别软弱围岩的物理力学性质、地质构造特征差异，直接划定进尺选择的安全上限。Ⅲ级软弱围岩多为中厚层状砂岩、灰岩等硬质岩，岩层连续性较好，节理裂隙相对稀疏，岩体完整性与承载能力处于较高水平；Ⅳ级围岩普遍夹杂较多泥岩、页岩等软质岩夹层，节理裂隙发育程度显著提高，部分区域存在小型断层破碎带，岩体整体性明显弱于Ⅲ级；Ⅴ级围岩地质条件最为复杂，常以粉质粘土、泥灰岩、块石土为主，呈微波状或舒缓褶皱构造，垂直与水平节理密集交错，抗压强度仅为Ⅲ级围岩的三分之一甚至更低<sup>[1]</sup>。软弱围岩普遍存在非均质特性，爆破后岩石破碎形态不规则，易沿开挖轮廓线成片剥落，拱顶超挖风险随进尺增加呈几何上升。Ⅴ级围岩区域采用Ⅲ级围岩进尺标准施工，短时间内可能引发拱顶坍塌或边墙内鼓，需通过超前地质预报和开挖过程中的地质编录，依据实际揭露地质状况设定和调整进尺范围。

### 1.2 开挖施工方法与进尺匹配关系

开挖施工方法与进尺存在严密适配逻辑，核心是让开挖方式的风险控制能力与进尺带来的围岩暴露风险相平衡，需根据围岩级别选择开挖方式并匹配对应进尺。稳定性相对较高的Ⅲ级围岩，岩体自稳时间足以支撑全断面开挖作业，可匹配较大

循环进尺，减少开挖作业面转换次数，提升施工效率，全断面一次成型也有利于保持围岩整体性。围岩级别降至Ⅳ级，稳定性明显下降，岩体自稳时间缩短，全断面开挖存在安全隐患，需改用上下长台阶法施工，将隧道断面分阶段开挖，通过缩短单个作业面开挖长度缩减循环进尺，上台阶开挖后及时支护，为下台阶施工提供安全保障。Ⅴ级围岩稳定性更差，岩体自稳能力极弱，可能出现开挖后立即坍塌情况，需遵循“短进尺、弱爆破（或非爆破）、强支护、勤量测、快封闭”的原则，结合围岩具体工况（如含水率、节理发育程度、跨度大小）选择，通常可采用短台阶、中隔壁、交叉中隔壁等方法开挖，严格控制循环进尺在较小范围内，通过快速封闭开挖面降低风险。

### 1.3 支护技术参数对进尺选择的影响

支护技术参数直接影响围岩开挖后的短期稳定性，是决定进尺选择合理性的关键因素，核心作用体现在支护材料特性、参数设定及施工效率与进尺的协同匹配。软弱围岩隧道中，湿式喷射混凝土是应用最广泛的关键支护手段，快凝早强特性能够快速封闭围岩表面，阻断岩体与空气、水的接触，抑制围岩软化和剥落坍塌，为进尺优化提供基础支撑<sup>[2]</sup>。支护参数设定需与围岩级别和进尺适配，围岩等级越低，岩体越破碎，进尺带来的暴露风险越大，对应的爆破装药集中度需越小，避免爆破对围岩过度扰动，同时轮廓预留保护层厚度需越大，为围岩变形预留空间。支护施工的设备配置与工艺控制同样重要，湿喷施工中需选用适配喷射设备，确保混凝土喷射的均匀性和密实度，控制水灰比及速凝剂掺量保障支护强度与成型速度。支护参数不足或施工进度滞后，开挖后长时间未完成支护，即使进尺符合理论计算值，围岩暴露时间过长也会引发失稳。

## 2 不同进尺下隧道围岩稳定性评价指标体系

### 2.1 围岩变形量监测指标

围岩变形量监测是评价不同进尺下隧道稳定性最直观的手段，核心是捕捉位移特征，建立进尺与变形风险的关联，为稳定性判断提供数据支撑。指标体系的核心监测内容包括拱顶

下沉量、周边收敛值及底鼓量，三者分别对应隧道不同部位变形风险，拱顶下沉是软弱围岩隧道最常见变形形式，周边收敛反映边墙挤压变形情况，底鼓易在深埋或富水软岩隧道中出现，共同构成完整变形监测网络。监测频率设定需体现“风险导向”，随围岩等级降低、进尺风险增加而提高，III级围岩大进尺施工可采用每日一次监测频率，V级围岩小进尺施工中，开挖后12小时内需每2小时监测一次，低等级围岩自身强度极低，短期变形速率远快于高等级围岩。变形监测需与支护效果结合，重点分析湿式喷射混凝土支护后的变形收敛情况，喷混凝土施工后围岩变形仍持续超过规范限值，或变形速率未明显下降，表明当前进尺与围岩稳定性不匹配，需及时下调进尺参数并强化支护措施，避免变形持续发展引发失稳事故（见图1）。

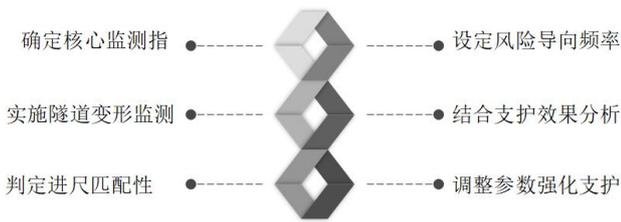


图1 隧道变形监测与支护调整

## 2.2 围岩应力分布特征指标

围岩应力分布特征指标通过分析开挖后岩体内部应力重分布规律，判断进尺与爆破参数的合理性，是评价稳定性的核心力学指标。隧道开挖打破原有岩体应力平衡，引发应力重新分布，进尺大小直接决定应力重分布的范围和强度，不同进尺对应不同爆破扰动范围，进而影响应力分布状态。高等级围岩采用全断面开挖时，应力集中区域主要集中在拱脚及边墙中部，该部位是隧道结构受力关键区，需通过监测确保应力峰值不超过围岩自身承载能力，应力超限可能导致内部裂隙扩展，即使围岩外观无明显变形<sup>[3]</sup>。中低等级围岩采用台阶法爆破时，应力分布更复杂，除常规拱脚、边墙应力集中外，需重点关注上下台阶交接处的应力叠加问题，台阶开挖的间隔时间、开挖顺序都会影响叠加效应，叠加应力超过限值易导致交接部位岩体破碎。低等级围岩本身强度低，对爆破扰动极为敏感，必须采用弱扰动爆破参数，监测中发现应力扰动范围过大，超出支护结构有效控制范围，说明进尺过大导致扰动区域扩大或爆破参数不合理加剧应力扰动，可能引发围岩裂隙扩展，需及时调整施工参数。

## 2.3 支护结构受力状态评价指标

支护结构受力状态指标聚焦湿式喷射混凝土及辅助支护系统的实际工作状态，通过判断其受力均衡性及是否在安全范围内，间接验证进尺选择的适配性。支护结构作为抵抗围岩变形的直接承载体系，受力情况与进尺带来的荷载密切相关，进

尺越大，围岩暴露面积和变形量越大，支护结构承受压力越高。高等级围岩大进尺施工中，湿喷混凝土作为主要支护手段，需确保厚度满足设计要求，厚度不足会导致应力集中，使喷层出现开裂、剥落等破损现象，需通过预埋检测钉等方式实时监测喷层厚度与受力分布。中等级围岩采用台阶法施工时，仰拱与拱墙衔接处成为受力薄弱环节，该部位既要传递拱墙荷载，又要承受底部反力，进尺与支护衔接时机不匹配易导致衔接处应力超限，引发结构破坏，需重点监测该区域应力状态。低等级围岩小进尺施工中，除监测喷层受力，辅助排水设施工作状态也不容忽视，围岩渗水量随暴露面积变化，排水压力异常升高说明进尺与渗水面积不匹配，渗水在支护背后积聚产生附加压力，可能导致支护结构失稳，需及时调整进尺并优化排水系统。

## 2.4 围岩稳定性综合评判指标

围岩稳定性综合评判指标体系通过整合变形、应力、支护受力等多维度数据，建立进尺与稳定性的量化关联模型，实现对进尺合理性的全面评判。综合评判的核心逻辑是“多指标协同验证”，单一指标达标不能代表整体稳定，需所有指标共同满足要求才能确认进尺安全。高等级围岩大进尺施工需同时满足四项核心条件：围岩变形在喷混凝土后快速收敛，无持续变形趋势；围岩内部应力峰值未超过其承载极限；支护结构受力均匀稳定，无局部应力集中；排水系统工作正常，无渗水积聚现象，任一指标不达标需立即下调进尺并排查原因。中等级围岩进尺的评判重点放在动态过程控制，需将周边收敛速率控制在规范允许范围内，避免变形过快引发风险，同时确保台阶交接处等关键部位的应力扰动范围可控，保障结构衔接安全。低等级围岩小进尺施工的评判更侧重风险预警，重点控制拱顶下沉速率这一最敏感指标。

## 3 开挖进尺优化与稳定性控制技术

### 3.1 基于围岩级别的进尺参数优化

基于围岩级别的进尺参数优化是实现软弱围岩隧道安全高效施工的核心技术，核心思路是以实际地质勘察与揭露结果为依据，打破“一刀切”的参数设定模式，细化不同级别围岩的进尺及配套施工参数。III级以上的高等级围岩岩体完整性好、自稳能力强，采用全断面开挖模式的基础上，可采用相对较大的循环进尺，配套常规光面爆破参数即可满足要求，光面爆破能有效控制开挖轮廓，减少对围岩的扰动，使进尺增大的同时不破坏岩体稳定性<sup>[4]</sup>。中等级围岩采用上下台阶法施工时，进尺需比高等级围岩适当缩减，岩体夹层多、稳定性下降，需对爆破参数优化，通过缩小周边眼间距提升光爆效果，降低装药强度减少爆破震动，避免对已开挖区域围岩造成二次扰动。低等级围岩的参数优化更为严格，须采用短台阶、中隔壁等方法，并将进尺严格控制在较小范围，周边眼采用不耦合间隔装药技术，分散爆破能量，减少对围岩的破坏，同时预留更厚的轮廓保护层，为围岩的微小变形提供空间，通过精细化参

数设计,实现进尺与围岩级别的精准匹配,在保障安全的前提下最大化施工效率(见图2)。



图2 围岩级别与进尺匹配

### 3.2 进尺与支护协同控制技术

进尺与支护协同控制技术的核心是建立“开挖-支护”无缝衔接的同步机制,让支护结构的强度形成时机与进尺带来的围岩暴露风险完全匹配,从时间和空间两个维度实现风险控制。高等级围岩大进尺施工中,全断面开挖后围岩暴露面积大,支护不及时会导致岩体强度衰减,需在规定时间内完成湿喷混凝土支护,通过优化混凝土配合比与速凝剂掺量,确保喷层在短时间内初凝并形成强度,快速封闭开挖面,阻断围岩与外界环境的接触。中等级围岩采用台阶法进尺施工时,上台阶开挖后成为独立受力单元,需立即施作薄层混凝土支护形成临时承载结构,严格控制上下台阶的开挖间隔距离,避免上台阶支护未稳定时开挖下台阶导致应力叠加,并同步布设排水设施,及时排出渗水,减少支护附加荷载。低等级围岩的协同控制需升级为“短进尺+快支护”的强化模式,开挖后立即完成初喷形成保护层,缩短初喷与复喷的间隔时间,让支护强度快速叠加,必要时增加径向锚杆与喷层形成联合支护体系,锚杆深入稳定岩体内部,将表层围岩与深部稳定岩体连接,通过支护时机的提前和支护强度的强化,完全抵消小进尺下仍存在的围岩失稳

### 参考文献:

- [1] 赵国军,王均杰,胡召云,等.软弱围岩地区隧道开挖掌子面稳定性研究[J].四川建材,2025,51(11):210-212.
- [2] 毛立夏.软弱围岩隧道开挖支护优化与施工安全风险管理[J].科技创新与生产力,2025,46(10):81-84.
- [3] 张长胜,寇君淑,贾泽旭,等.大断面软弱围岩隧道施工工法分析[J].北方交通,2025,(09):83-87.
- [4] 门鹏程.软弱地层隧道开挖变形特征及控制技术研究[D].山东科技大学,2023.
- [5] 田常青.软弱围岩隧道预收敛变形监测技术及设计施工优化研究[D].中南大学,2023.

风险。

### 3.3 动态调整的进尺控制方法

动态调整的进尺控制方法是应对软弱围岩地质复杂性的关键手段,核心是基于实时监测数据建立“监测-分析-调整-验证”的闭环管理机制,让进尺参数始终与围岩实际稳定性状态保持同步<sup>[5]</sup>。施工过程中,需通过自动化监测设备实时采集围岩变形数据和应力数据,这些数据是判断进尺是否合理的直接依据。高等级围岩在大进尺施工中出現异常变形,如拱顶下沉速率突然加快或变形量超出预警值,说明当前进尺可能突破岩体自稳极限,需立即缩减进尺,同步优化爆破参数,降低爆破对围岩的扰动,待监测数据恢复正常后再稳定进尺。中等级围岩施工中,边墙收敛速率是重要预警指标,收敛速率超标表明台阶开挖引发的应力扰动过大,应缩短进尺并调整掏槽方式,如将斜眼掏槽改为直眼掏槽,减少爆破震动对边墙的影响。低等级围岩小进尺施工中,喷层裂纹和排水压力骤升是典型风险信号,说明围岩可能因进尺相对过大出现局部失稳,需进一步减小进尺,同时强化支护参数。

### 4 结语

本文围绕软弱围岩隧道开挖进尺展开系统研究,明确地质条件是核心制约因素,开挖方法与支护参数需与之精准匹配,施工环境与工期发挥调控作用。构建的多维度稳定性评价指标体系,突破单一指标的局限性,实现对进尺合理性的全面评判。提出的优化与控制技术,形成“参数优化-协同控制-动态调整-效果验证”的完整技术体系。后续可结合智能化监测技术,进一步提升进尺调整的实时性与精准度,针对特殊地质条件下的进尺选择开展专项研究,持续完善软弱围岩隧道施工技术体系。