

Optimization of tunnel drilling and blasting construction parameters and analysis of surrounding rock stability under complex geological conditions

Yun Wei

Yunnan Jiaotou Public Construction Energy Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

To address the challenges of tunnel drilling and blasting construction safety and surrounding rock stability under complex geological conditions, this study focuses on the optimization of drilling and blasting parameters and the analysis of surrounding rock stability. It employs a comprehensive approach, incorporating theoretical analysis, ANSYS and FLAC3D numerical simulations, and engineering case verification. The study dissects the impact mechanisms of geological factors such as faults, soft rocks, and water inrush on drilling and blasting parameters, clarifying the adaptive relationships between rock lithology, joint fissures, groundwater, explosive unit consumption, and blasthole spacing. It optimizes parameters for different geological sections, adopting a strategy of “more holes, less charge” for soft surrounding rock sections and presplitting blasting for high geostress areas. A stability analysis system is established, incorporating limit equilibrium method, numerical analysis method, and monitoring indicators such as displacement and stress. Verification through two typical tunnel projects shows that after optimization, the blasting vibration velocity is reduced to 15-30mm/s, the overexcavation is limited to ≤ 100 mm, and the maximum deformation of the surrounding rock is < 20 mm, significantly enhancing stability. The results provide scientific guidance for tunnel construction in complex geological conditions and have engineering application value.

Keywords

Complex geology; Tunnel drilling and blasting construction; Numerical simulation; On-site monitoring

复杂地质条件下隧道钻爆施工参数优化与围岩稳定性分析

魏云

云南交投公建能源工程有限公司，中国 · 云南 昆明 650000

摘要

为解决复杂地质条件下隧道钻爆施工安全与围岩稳定性难题，本研究聚焦钻爆参数优化与围岩稳定性分析，综合理论分析、ANSYS及FLAC3D数值模拟、工程案例验证等方法开展研究。剖析断层、软岩、涌水等地质对钻爆参数的影响机制，明确岩性、节理裂隙、地下水与炸药单耗、炮孔间距的适配关系；优化不同地质段参数，软弱围岩段采用“多打眼、少装药”，高地应力区采用预裂爆破，建立含极限平衡法、数值分析法及位移、应力等监测指标的稳定性分析体系。经两个典型隧道工程验证，优化后爆破振动速度15-30mm/s，超挖量 ≤ 100 mm，围岩最大变形量 < 20 mm，稳定性显著提升，成果为复杂地质隧道施工提供科学指导，具工程应用价值。

关键词

复杂地质；隧道钻爆施工；数值模拟；现场监测

1 引言

在基础设施建设中隧道工程应用广泛，但复杂地质条件（断层破碎带、软弱围岩等）及不合理钻爆参数易引发塌方等事故，国内外多有相关案例。围岩失稳会造成重大经济损失与安全风险，因此研究钻爆参数优化与围岩稳定性意义重大。本文将分析地质、设计等因素对爆破参数的影响，运

用数值模拟等方法优化参数、建立围岩力学模型，探究二者内在关系，同时结合文献研究与工程案例验证，为隧道施工提供科学指导。

2 复杂地质条件对隧道钻爆施工的影响

隧道工程中常见的复杂地质条件包括断层、软岩、涌水、岩溶、高地应力、瓦斯地层等，“据《中国隧道建设地质灾害统计报告（2024）》，我国西部地区 70% 的山区隧道会遭遇复杂地质条件，其中断层破碎带出现概率达 30%，西南某高速隧道就因穿越多条断层破碎带多次发生坍塌。这些

【作者简介】魏云（1988-），男，中国云南昭通人，本科，工程师，从事公路施工研究。

地质各有危害：断层带岩体破碎、强度低，软岩易变形软化，涌水和岩溶易引发突水突泥，高地应力可能导致岩爆，瓦斯地层存在爆炸风险。地质条件通过岩石物理力学性质、节理裂隙、地下水等影响钻爆参数：硬岩炸药单耗（如花岗岩 $0.8\text{-}1.2\text{kg/m}^3$ ）高于软岩（如页岩 $0.3\text{-}0.5\text{kg/m}^3$ ），节理裂隙间距小于 0.5m 时炮孔间距需控制在 $0.3\text{-}0.4\text{m}$ ，涌水地段岩体含水量高，炸药能量易被水体吸收导致爆破效率下降，因此炸药单耗需增加 $10\%\text{-}20\%$ ，同时需选用抗水炸药保障爆破效果，软岩区爆破振动速度需控制在 $15\text{-}20\text{mm/s}$ 内。复杂地质给施工带来多重挑战：超欠挖问题突出，某隧道超挖量达设计值 20% ；爆破振动易引发围岩坍塌，且减振措施效果受地质不确定性影响；施工面临坍塌、瓦斯爆炸等多重安全风险；同时需采取超前支护等特殊措施，导致效率低下，某隧道因岩溶和涌水工期延长 6 个月、成本增加 30% ，严重影响工程安全、质量与进度。

3 复杂地质隧道钻爆施工参数优化案例分析

某山区高速公路隧道全长 3500m ，为双向四车道设计，穿越地质极复杂：进口段 500m 为断层破碎带（宽 $50\text{-}80\text{m}$ ，岩体完整性指数 < 0.3 ，涌水量 $50\text{-}80\text{m}^3/\text{d}$ ），洞身 1500m 为页岩-泥岩互层软弱围岩（抗压强度 $3\text{-}10\text{MPa}$ ，遇水易软化），出口段 1000m 为高地应力区（最大水平主应力 $25\text{-}30\text{MPa}$ ，花岗岩易发生岩爆）。初始钻爆方案采用台阶法开挖，炮孔直径 42mm ，掏槽眼/辅助眼/周边眼深度分别为 $1.5\text{m}/1.2\text{m}/1.2\text{m}$ ，间距 $0.5\text{m}/0.6\text{m}/0.4\text{m}$ ，单孔装药量 $0.8\text{kg}/0.6\text{kg}/0.3\text{kg}$ ，微差起爆时间 $50\text{-}75\text{ms}$ 。实施后问题突出：断层破碎带及软弱围岩段平均超挖量 $200\text{-}300\text{mm}$ （超规范 10cm 限值），超挖 30cm 以上断面占比分别达 40% 和 30% ；围岩损伤深度 $1.0\text{-}1.5\text{m}$ ，爆破振动速度 $3\text{-}5\text{cm/s}$ ，高地应力区岩爆频发，造成人员受伤、工程停工^[1]。通过 ANSYS 与 FLAC3D 数值模拟结合现场试验优化参数：断层破碎带及软弱围岩段，掏槽眼/辅助眼/周边眼深度调整为 $1.2\text{m}/1.0\text{m}/1.0\text{m}$ ，间距缩至 $0.4\text{m}/0.5\text{m}/0.3\text{m}$ ，炸药单耗分别降至 0.8kg/m^3 、 0.6kg/m^3 ，周边眼采用不耦合装药（系数 1.5），微差时间调整为 $75\text{-}100\text{ms}$ ；高地应力区采用预裂爆破（预裂孔间距 0.3m ，先于主炮孔起爆）。

优化后成效显著：断层破碎带及软弱围岩段爆破振动速度降至 $1.5\text{-}2.5\text{cm/s}$ （符合规范），平均超挖量控制在 10cm 内；高地应力区岩爆频率与强度大幅降低，围岩稳定性显著提升，支护结构受力优化，保障了施工安全与进度。

4 隧道围岩稳定性分析理论与方法

4.1 围岩稳定性的影响因素

围岩稳定性由地质因素与工程因素共同决定，地质因素为内在基础，工程因素是关键外部影响。地质因素核心包括岩体结构、岩石强度和地下水状况：岩体结构控制破坏形态，软弱结构面不利组合易引发坍塌，某隧道曾因三组结构

面不良组合导致岩块塌落；岩石强度以单轴饱和极限抗压强度为核心，软岩较坚硬岩石更易变形破坏；地下水会软化岩石、冲蚀结构面充填物，某隧道穿越富水断层破碎带时，便因地下水引发大规模坍塌。工程因素主要涉及隧道形状尺寸与施工方法：同一围岩条件下，跨度越大稳定性越差，圆形断面受力最优，某大跨度隧道因跨度问题出现变形裂缝；施工方法影响围岩扰动程度，普通爆破法扰动大，控制爆破法、掘进机法扰动小，某隧道经施工方法优化后，稳定性显著改善。

4.2 围岩稳定性分析的理论模型与方法

当前主流围岩稳定性分析方法包括极限平衡法、数值分析法和地质力学模型法，三者各有优势与适配场景。极限平衡法是经典方法，核心基于岩土体受力分析，通过比较滑动面抗滑力与滑动力计算安全系数。该方法假设岩土体为刚体、忽略变形，需先确定潜在滑动面，经受力分解与抗剪强度计算得出结果，其优点是概念清晰、计算简便，易被工程技术人员掌握，适用于地质条件简单、精度要求不高的小型隧道，可快速完成初步评估，但因忽略岩土体变形特性与应力-应变关系，复杂地质下结果可靠性较低。数值分析法是近年主流，含有限元法、有限差分法等，适用于复杂地质与大型隧道。有限元法通过 ANSYS、ABAQUS 等软件离散求解域，模拟围岩应力、应变及位移；有限差分法借助 FLAC3D 等软件处理岩土大变形问题，可综合考虑多因素，精确模拟力学行为，为施工优化提供科学依据，但需准确获取地质与力学参数，计算复杂且依赖专业软件与技术人员，成本较高。地质力学模型法通过物理模型试验，按相似准则制作含围岩与支护结构的模型，模拟开挖与支护过程并采集数据，能直观反映受力与破坏过程，结果可靠性高，可补充数值分析与理论计算，适用于重要复杂隧道，但模型制作成本高、试验周期长，相似性难以完全保证，成果推广受限^[2]。

4.3 围岩稳定性监测与评估指标

隧道施工中，实时监测与科学评估是安全保障关键，核心涵盖位移、应力及锚杆轴力监测。位移监测为核心手段，通过拱顶沉降和周边收敛的大小、速率及趋势判断稳定：拱顶沉降反映拱顶变形，周边收敛体现围岩相对变形。某隧道初期拱顶沉降速率 5mm/d 、周边收敛 3mm/d 且持续增长，经加强支护后趋于稳定。行业标准：速率 $> 1.0\text{mm/d}$ 需强化支护， $0.2\text{-}1.0\text{mm/d}$ 需加强观察， $< 0.2\text{mm/d}$ 基本稳定。应力监测通过压力盒、应变计等采集数据，聚焦围岩与支护受力，若喷射混凝土应力、锚杆轴力超设计强度，易致失稳，某隧道经增加锚杆、加厚喷射混凝土后应力降低。锚杆轴力监测反映支护与围岩相互作用，轴力异常增长提示失稳风险，某隧道因及时处理轴力急剧上升问题，成功避免事故。

综上，围岩稳定性需综合考虑地质与工程双重因素，选用适配的分析方法，结合多维度监测数据与科学评估指标，才能及时发现风险、采取有效措施，保障隧道施工安全与长期稳定。

5 复杂地质隧道围岩稳定性分析案例研究

案例工程的围岩条件与施工概况：本案例隧道全长 5.2 公里，地处构造复杂区域，穿越砂岩、页岩、泥岩及断层破碎带，是区域重要交通枢纽。各段围岩特性差异显著：砂岩段长 1.8 公里，单轴抗压强度 30-50MPa，节理裂隙影响岩体完整性；页岩段长 1.5 公里，强度 10-20MPa，遇水易软化泥化；泥岩段长 1.2 公里，强度 5-10MPa，具明显流变特性。施工采用台阶法与 CD 法结合：砂岩段用台阶法（上台阶 3.5-4.0m、下台阶 2.5-3.0m），控制开挖扰动；软弱围岩段用 CD 法分侧开挖，及时施作支护。受地质条件影响，平均月进度 50-70 米，砂岩段可达 70-80 米，软弱围岩段仅 30-50 米。

基于数值模拟的围岩稳定性分析：利用 FLAC3D 建立三维模型（轴线方向 100 米，左右各 50 米，上下至地表及隧道底以下 30 米），采用 Mohr-Coulomb 本构模型，依据现场与室内试验确定力学参数，分阶段模拟开挖及支护过程（初期支护为 20cm 喷射混凝土 + 3.5m 长锚杆，间距 $1.0m \times 1.0m$ ；二次衬砌为 400mm 钢筋混凝土）。模拟结果显示：隧道开挖后围岩应力重分布，砂岩段最大主应力 10-15MPa，软弱围岩段达 20-25MPa；位移方面，砂岩段拱顶沉降 5-10mm、周边收敛 8-15mm，软弱围岩段分别为 20-30mm、30-50mm；塑性区范围砂岩段 0.5-1.0m，软弱围岩段 2.0-3.0m 且向深部发展。

现场监测结果与稳定性评价：施工中布置监测断面，采用全站仪、水准仪、压力盒等监测位移、应力及支护受力。监测数据与模拟结果趋势一致：砂岩段实测值与模拟值偏差 $\leq 10\%$ ，软弱围岩段因地质复杂性存在一定偏差，但变化规律相符。整体来看，当前施工与支护措施下围岩稳定性可控：砂岩段位移和应力变化小，支护效果良好；软弱围岩段虽位移、应力较大，但通过及时支护保障了稳定。仅部分软弱围岩段受地下水影响，变形和应力增大。

综合评价后提出改进措施：软弱围岩段优化施工方法、缩短台阶长度、加强支护；断层破碎带采用超前注浆加固。措施实施后，有效保障了隧道施工安全与顺利推进。

6 钻爆施工参数与围岩稳定性的关联分析

6.1 钻爆施工参数对围岩稳定性的影响规律

钻爆参数（装药量、爆破顺序、炮孔间距）直接影响围岩应力、变形及破坏模式。装药量与爆破振动速度呈立方根正比（装药量翻倍，振动速度约增 1.26 倍）：装药量过大易产生大量微裂纹，破坏围岩完整性，某隧道因装药量过大导致围岩损伤深度超 2m；装药量过小则岩石破碎不均，引发局部应力集中。爆破顺序需遵循“先掏槽、后辅助、再周边”原则，掏槽眼创造自由面，周边眼控制轮廓，顺序错误会导致围岩过早失稳，某工程因先起爆周边眼引发坍塌。炮孔间距与岩性适配：坚硬岩石可适当增大，软弱岩石需减小，如花岗岩隧道间距 0.5m 效果良好，页岩隧道需调

整至 0.3m^[3]。

6.2 基于围岩稳定性的钻爆参数优化策略

优化需平衡安全与成本，综合地质、设计、设备等因素，通过理论分析、数值模拟及现场试验确定方案。软弱围岩采用“多打眼、少装药”原则：减小炮孔直径、增加数量，使能量均匀分布，炸药单耗较坚硬围岩降低 20%-30%，某软弱围岩隧道将炮孔直径从 42mm 减至 38mm，孔数增 20%，单耗降 25%，有效控振。推广光面 / 预裂爆破技术：光面爆破通过优化周边眼参数保障轮廓平整，预裂爆破先形成裂缝减弱主爆影响，某隧道采用光面爆破后超挖量从 150mm 降至 50cm 内。实施动态调整机制：利用爆破振动监测仪、全站仪等设备，实时监测振动速度与围岩变形，及时优化装药量、起爆顺序等参数。

6.3 工程实例验证

选取穿越断层破碎带、软弱围岩的某高速隧道验证优化效果。初始参数因未适配复杂地质，导致围岩最大变形量达 50mm，局部出现裂缝。通过 FLAC3D 数值模拟与现场试验优化参数：炮孔直径减至 38mm，孔数增 20%，炸药单耗降 25%，采用光面爆破（周边眼间距 0.3m，不耦合系数 1.5），优化起爆顺序（先掏槽后辅助再周边，微差时间 75-100ms）。

优化后成效显著：爆破振动速度从 50-80mm/s 降至 20-30mm/s（符合规范），围岩最大变形量控制在 20mm 内，裂缝数量与宽度明显减少。长期监测显示围岩稳定性良好，但仍存在部分区域爆破效果待提升、施工条件变化影响参数适配等问题。后续需进一步优化炮孔布置与装药结构，加强地质及施工条件动态监测，确保参数实时调整。

7 结语

本研究聚焦复杂地质条件下隧道钻爆施工参数优化与围岩稳定性分析，通过理论、数值模拟及工程实例结合，明确了地质因素与钻爆参数的内在联系，优化后爆破振动速度降至 1.5-2.5cm/s，超挖量控制在 10cm 内。运用 FLAC3D 建立三维模型，结合现场监测评价围岩稳定性，验证了数值模拟的可靠性，揭示了钻爆参数对围岩稳定性的影响规律，提出优化策略后围岩最大变形量小于 20mm，稳定性显著提升。研究存在数值模型参数与实际有偏差、监测数据准确性受影响、成果普适性待验证等不足。未来将完善数值模拟方法、优化监测方案、扩大研究样本，同时引入人工智能等技术，推动施工参数优化与围岩稳定性分析智能化。

参考文献

- [1] 姜涛.复杂不良地质条件下特长隧道钻爆施工关键技术[J].交通世界,2025,(17):126-128.DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2025.17.007.
- [2] 张平智.复杂地质条件下长大隧道钻爆法施工实践研究[J].现代工程科技,2025,4(08):29-32.DOI:10.26929/j.cnki.issn.2097-1672.2025.08.008.
- [3] 杨微.复杂地质条件下钻爆法隧道施工技术[J].工程机械与维修,2022,(01):208-211.