

复杂地质条件下隧道爆破参数优化设计研究

白玉龙 牛启东 陈园宁

甘肃兰金民用爆炸高新技术有限责任公司 甘肃 兰州 730000

摘要: 为应对复杂地质条件对隧道爆破施工的挑战,解决传统爆破参数设计方法的不足,研究聚焦于爆破参数与地质条件的适配性、优化设计方法论、影响因素及评价标准。通过理论分析与实际应用实例相结合,验证了基于地质条件的爆破参数优化设计方法的有效性。实例评估显示,优化后的爆破参数显著提升隧道施工的安全性与效率,降低施工成本。研究结果为复杂地质条件下的隧道爆破施工提供科学、合理的技术指导。

关键词: 复杂地质; 隧道爆破; 参数优化; 适配性分析

引言

地质条件复杂度评估是隧道爆破工程中的关键环节,软弱围岩、断层破碎带等不良地质体的存在,增加爆破参数设计的非线性特征^[1]。传统经验公式法基于均质岩体假设,难以准确反映节理裂隙发育、地应力异常等复杂条件下的能量传递规律,导致超欠挖控制精度不足,甚至引发围岩失稳等工程事故^[2]。复杂地质环境对炸药能量传播的调控作用存在明显的非均质性和方向性差异。断层带附近岩体的波阻抗差异会导致应力波反射叠加效应增强,而软弱夹层的存在则可能改变爆破漏斗形态^[3]。地质和爆破相互作用的复杂机制,使得依赖静态参数的传统设计手段难以适应,所以迫切需要构建能够动态调整的优化体系。

1 复杂地质条件下隧道爆破参数优化设计的必要性

1.1 复杂地质条件对隧道爆破的挑战

复杂地质条件下的隧道爆破施工,常面临岩石力学性质多变、断层破碎带发育等核心问题。软弱围岩的物理力学特性,像单轴抗压强度和弹性模量等,一般都比完整岩体差,这会使爆破能量传递效率变低,进而容易出现超挖或欠挖等施工质量问题。地质构造薄弱区域里的断层破碎带,内部节理和裂隙高度发育,这让爆破应力波的传播路径变得复杂,可能会造成围岩结构失稳,甚至引发塌方等工程灾害。再者,地下水文状况对爆破成效影响很大,在高压水体环境下,炸药能量释放效率会降低,施工过程中的安全隐患也会增加。程三建等^[4]在露天爆破研究中指出,地质构造的复杂性直接导致传统经验公式预测误差超过30%,进一步印证复杂地质条件对爆破参数设计的挑战性。

1.2 现有爆破参数设计方法的不足

传统爆破参数设计一般用经验公式或者类比法,这类方法的关键问题是很难有效应对地质条件的动态变

化。单位炸药消耗量(q)计算一般依据岩体完整性系数(K_v),可这种方法没把断层破碎带内 K_v 值明显波动的影响充分考虑进去,使得实际用药量和理论需求之间有20%~40%的误差。在装药结构设计里,连续式和间断式装药方式的选用是技术人员凭经验来判断的,还没构建出能和岩层波阻抗特性相匹配的量化分析体系。起爆顺序规划时要是没充分利用地震波叠加效应的数值仿真技术,就很难有效预测邻近巷道或工程设施可能出现的振动超限情况。

1.3 爆破参数优化设计的重要性

爆破参数的优化设计是提高复杂地质环境里隧道施工效率的关键技术办法。基于安全考虑,要把孔网参数(孔距 a 、排距 b)设定得精确些,合理限制单段装药量的上限,让爆破引发的振动速度在《爆破安全规程》规定的限值区间内,防止对周围环境有不良影响。从经济角度来说,对装药量和装药结构进行动态调控,能够让炸药单耗降低5%至15%,并且还能同时把二次破碎所需的成本降下来。优化后的爆破参数使露天矿山的综合成本下降12%,且显著提升岩石破碎块度的均匀性。参数优化设计的应用能增强施工过程的可控性。调节起爆延时实施微差爆破技术,可让地震波的主频范围偏离建构物的固有振动频率区间,有效降低共振可能性。

2 复杂地质条件下隧道爆破参数优化设计的关键问题

2.1 爆破参数与地质条件的适配性

在复杂地质环境下,隧道爆破作业时参数设置得不合理,对爆破成效和施工安全起着决定性作用。各类地质环境,像软弱岩层、断裂破碎区域以及岩溶发育地带等,对爆破参数选取的要求明显不一样。软弱围岩强度不高,可塑性变形能力强,要是用高强配比、作用时间短的爆破方案,岩体容易过度破裂,可能引发塌方;对于断层破碎区域,因其内部裂隙系统发育,要优

化钻孔布置参数和装药形式, 减弱爆破震动对断层面的扰动, 防止出现滑动失稳风险。在单一隧道断面中, 软岩与硬岩的接触带以及层面倾向变化等多种非均匀性地地质特征可能会出现, 进而引发炸药能量释放不均衡的状况。采用三维数值仿真办法, 把地质雷达探测到的信息融合进去, 建立高精度地质模型, 接着研究各部位爆破应力场的分布特点。在软硬岩层交汇区域, 调整周边炮眼间距和装药参数, 能实现“软岩破碎、硬岩保留”的爆破效果, 确保坚硬岩体有效破裂, 同时减轻对软岩的破坏程度。参数和地质条件的动态搭配, 是优化设计的关键。

2.2 爆破参数优化设计方法论

爆破参数优化设计的方法论要以地质条件作为基础输入, 将爆破效果、施工安全性以及经济效益当作输出目标, 从而建立起多目标优化体系。参数确定得依照地质特征, 还要根据实际情况做动态优化调整。在软弱岩层条件下, 要合理把炮孔布置参数(像孔间距和排间距)减小, 用这个办法来控制单次起爆的药量; 同时, 要选分段装填或者空气间隔装填的装药方式, 让对周边岩体的震动影响减弱。优化算法选取要综合考虑运算效率和求解精度。遗传算法有全局搜索能力, 能模拟生物进化机制来找最优参数配置。响应面法通过建参数与响应值的二次回归模型, 高效逼近最优解。

在具体实施的时候, 该方法得把实地监测的数据和数值仿真输出融合起来, 进而构建出“规划-执行-响应-改进”的动态循环体系。在某一断层破碎带隧道项目里, 初期设计方案按传统经验取值, 结果爆破振动超出限值, 进而让围岩局部失稳。通过引入粒子群优化算法, 结合振动监测数据, 重新调整孔网参数与装药量, 使振动速度降低了40%, 围岩稳定性显著提升^[5]。

2.3 影响爆破参数优化设计的因素

影响爆破参数优化设计的因素能归纳成岩体属性、爆破材料以及作业条件这三个方面。岩石的物理力学特性是关键要素, 包括单轴抗压强度、弹性模量以及波阻抗等指标。高波阻抗的岩体得选用爆速快的炸药, 能提高能量传递效率; 强度低的岩体呢, 就得合理控制装药密度, 防止岩体过度崩解。爆破器材的性能对能量释放效率影响大。不同炸药, 像乳化炸药、铵油炸药, 能量输出特性有差异。雷管延期精度, 比如毫秒雷管、电子雷管, 在爆破时序控制中的作用不同。起爆系统选用, 例如导爆索、导爆管, 也会影响能量传递的均匀性和效率。电子雷管能精准调控延迟时间, 达成微差起爆工艺, 进而有效降低爆破时振动的叠加影响。

3 复杂地质条件下隧道爆破参数优化设计的应用实例

3.1 应用实例的选取

选取发育断层破碎带的某特长隧道工程来说, 该隧道区段经过F3断层影响区域, 岩体破碎等级处于Ⅲ到Ⅳ级, 节理裂隙特别发育, 围岩自稳性能相当低。此类地质环境下, 设定爆破参数会遇到很大难题。一方面, 得严格限制爆破震动对脆弱围岩结构的干扰; 另一方面, 还得保证开挖界面的平整程度符合初期支护施工的标准。实例选取参考《爆破安全规程》(GB6722-2014)里针对复杂地质环境下隧道施工的相关技术标准, 结合工程地质勘察报告给出的岩体质量参数(RQD)以及地质强度指数(GSI), 保证所选实例有典型性和代表意义。

该区段岩石力学参数有明显间断性变化趋势, 具体是: 剪切变形系数从0.25一下增加到0.32, 而刚度指标从15GPa降到8GPa。参数突然变化, 致使依赖传统经验公式的装药量计算出现超过35%的偏差, 从而引发超挖或欠挖现象。用地质统计学手段构建岩体参数的空间变异函数模型, 能有效弄清楚参数非均质性对爆破效果的具体作用机制。实例工程中, 在断层影响区采用不耦合装药结构, 配合空气间隔器使用, 使爆破振动速度从32cm/s降至18cm/s, 显著提升了施工安全性。

3.2 爆破参数优化设计的实施步骤

参数优化设计的实施过程是依照“地质勘察—数值仿真—实地试验—动态调控”这一技术路径来进行的。优先把系统性的地质测绘以及地球物理勘探工作做好, 用来测定岩体纵波速度、动态弹性模量等核心指标。用LS-DYNA有限元分析平台搭建三维仿真体系, 研究多种装药配置状况下应力波的传播特性。构建数值分析框架时, 选用HJC本构关系描述岩体在动态荷载作用下的力学行为。运用正交试验方法, 对模型参数进行系统优化, 筛选出最佳匹配参数集。

优化方法选改良型粒子群优化(PSO)算法, 把爆破成效、震动抑制、成本要素整合, 构建多目标优化模型。在算法设计里融入惯性权重的自适应调节机制, 在搜索过程中就能有效平衡全局搜索和局部优化的性能。在实际应用中, 选取单段最大装药量、孔网布置参数以及起爆时间间隔作为优化变量, 同时设定振动速度峰值(PPV)不超20cm/s、保留半孔比例不低于90%、单位体积炸药消耗量不大于1.2kg/m³这些限制条件。经二十轮迭代运算确定最佳配置情况: 孔间距为0.8米, 排间距是0.6米, 单孔装药质量为1.2千克, 延时起爆间隔为50毫秒。

动态调整机制基于实时监测数据与数值模拟结果的对比分析。当检测到振动速度超出限定值, 系统会自动

启动参数调整程序：先调节延期时间改变应力波叠加模式，若效果不好，就进一步改进装药配置。监测数据表明，某次爆破作业结束后，左侧边墙的振动速率峰值达到了23cm/s，已经超过了设定的阈值。研究判断，节理密集区域会增强应力波反射效应，所以把这个区段的延期时间从50毫秒增加到75毫秒，还引入了分段装药设计，就能将后续爆破产生的振动速度控制在16厘米每秒。

3.3 爆破参数优化设计的效果评估

评估体系涵盖爆破成效、作业安全性以及成本效益这三个方面。效果评价标准依据残孔率、超挖与欠挖量以及表面平整度等参数来量化分析。实测结果显示，优化后的半孔率从原来的82%提高到94%，平均每米超挖深度由18厘米减少到6厘米，开挖轮廓的平整度误差被严格控制在正负5厘米范围内。在实验区域内设置十六处振动监测设施，同时采集三个维度的振动速率参数。数据分析发现，实行改进措施后，PPV指标离散程度明显降低，标准差从优化前的8.2cm/s降到3.5cm/s。而且，振动能量主要集中在80~120Hz的安全频段内。在飞石防控措施里，加装钢丝网并优化孔口封堵长度，把飞石抛掷的最大距离从35m有效压缩到18m，而且整个施工过程没出现任何因飞石导致的安全责任事件。经过参数优化，单位体积炸药的消耗从1.5kg/m³降低到1.1kg/m³，钻爆工序的成本降低22%。此外，超挖和欠挖的控制效果非常好，初期支护用的混凝土量减少18%，整体成本降低15%，施工效率提高30%，月进尺从四十五米增加到六十米，有效缩

短工期。

结论

通过引入地质力学参数修正系数与能量分配模型，有效解决复杂地质条件下炸药能量传递的非线性控制难题。工程实践结果显示，改进后的掏槽眼布置间距参数让岩体破碎均匀性有效提高，其达标比例上升23.6%。同时，周边眼不耦合系数的优化调整，使开挖轮廓超挖幅度降低18.2%。这些成果充分说明地质与爆破相互作用机制在爆破参数调控中的核心价值。本研究构建起动态评价架构，融合岩石完整性指数、地应力场特性等十二个地质要素，让爆破参数能依据地质状况动态调整，给同类工程实践提供有量化依据的参数优化模式，切实提高隧道工程在复杂地质环境下施工的安全性与成本控制能力。

参考文献

- [1]肖武宁, 李学锋, 杨一豪, 等.复杂地质条件下隧道爆破工艺优化[J].价值工程, 2024,43(14):59-62.
- [2]王月栋.复杂地质条件下隧道聚能爆破施工技术研究[J].施工技术(中英文),2024,53(05):118-123.
- [3]黄君, 田书广, 陈贺, 等.复杂地质条件下盾构隧道下穿马骝洲水道施工技术优化研究[J].施工技术, 2019,48(07):65-69.
- [4]程三建, 陶明, 罗福友, 等.复杂地质条件下露天爆破技术方案优化研究[J].采矿技术, 2018,18(03):84-86.
- [5]袁红所, 张家铭, 贺立新, 等.复杂地质条件下隧道爆破方案优化设计[J].爆破, 2016,33(01):50-54+67.