超大断面市政公路隧道的原位扩建控制爆破技术研究

李松林
中国水利水电第十一工程局有限公司　河南　三门峡　472000

摘　要：本文研究了超大断面市政公路隧道原位扩建的控制爆破技术，分析了超大断面隧道的结构特征和爆破约束条件，提出了分区爆破设计、掏槽方式选择及起爆网络设计等关键爆破方案。通过优化单响药量、钻孔参数和装药结构等关键参数，实现对爆破振动的有效控制。同时，介绍了爆破振动监测技术和振动控制措施，以及安全防护措施。研究结果为超大断面隧道原位扩建提供理论和技术支持，确保施工安全和环境保护。

关键词：超大断面隧道；原位扩建；控制爆破；振动控制；围岩稳定

1　超大断面市政公路隧道原位扩建的工程特性与爆破约束

1.1　隧道结构特征

超大断面市政公路隧道原位扩建的结构特征主要体现在断面、空间及地质三个方面。原隧道多为双向4车道，跨度10-12m，面积50-70㎡，采用曲墙拱形结构。扩建后变为双向6-8车道，跨度增至16-20m，面积扩大至100-150㎡，断面形态优化为扁平拱形以提升空间利用。扩建与既有结构的连接形式有单侧、双侧及上下分层扩建。在某城市隧道扩建中，双侧扩建使新老结构净距仅1.8m，需严格控制爆破对既有衬砌的扰动。地质条件影响显著：软岩地层采用复合式衬砌，初期支护厚30-50cm；硬岩地层可采用喷锚支护，厚度减至20-30cm；破碎带区域需设置格栅拱架强化支护，间距加密至50-75cm。

1.2　爆破约束条件

1.2.1　既有结构保护要求

既有隧道结构的安全性是爆破施工的首要约束。钢筋混凝土衬砌的允许振动速度需严格控制：龄期 < 28d的新浇筑衬砌 ≤ 1.2cm/s，龄期 > 90d的既有衬砌 ≤ 2.0cm/s。某工程检测数据显示，当振动速度超过2.5cm/s时，衬砌表面会出现长度 > 50cm的横向裂缝，裂缝宽度随振动强度呈线性增长（速度每增加0.5cm/s，宽度增加0.1mm）。结构内力变化同样需监控，爆破产生的应力波会导致既有衬砌轴力波动，在拱腰部位可能出现拉应力集中，其值不得超过混凝土轴心抗拉强度（C30混凝土为2.01MPa）。此外，防水层的完整性需重点保护，爆破振动引发的衬砌错动不得超过2mm，否则会导致止水带撕裂。

1.2.2　周边环境敏感

隧道周边环境的敏感性主要体现在地表建筑物、地下管线及交通设施三个方面。距离隧道轴线50m范围内的居民楼，爆破振动速度需 ≤ 0.5cm/s（GB6722-2014），否则可能引发墙体开裂或门窗变形。某扩建工程中，隧道上方30m处有一栋6层砖混结构居民楼，通过控制单响药量 ≤ 5kg，成功将振动速度控制在0.35cm/s以内；地下管线的保护要求更为严苛，直径 > 1000mm的给水管线允许振动速度 ≤ 1.0cm/s，天然气管道则 ≤ 0.8cm/s，避免接头松动导致泄漏。在管线密集区（如城市核心区），需采用“预裂爆破+机械开挖”组合工艺，在管线外侧2m处设置防震沟（深度 ≥ 1.5m，宽度 ≥ 0.8m），降低振动传递效率[1]。

1.2.3　施工空间限制

超大断面隧道扩建施工空间狭小，多干扰。既有隧道需保留通行车道，施工区域宽度受限，需采用小型化设备。作业面高度亦受限，需采用可折叠式钻臂。空间干扰导致工序交叉，钻爆循环时间压缩，要求爆破参数设计高效，单循环进尺同时确保爆破块度小，减少二次破碎时间。

2　超大断面隧道原位扩建控制爆破方案设计

2.1　分区爆破设计

根据超大断面的几何特征，采用“分层分块、由内向外”的分区爆破策略，将整个断面划分为5-8个独立爆破单元（每单元面积15-20㎡）。以双侧扩建断面为例，从中心向两侧依次划分为：中央掏槽区、左侧扩挖区、右侧扩挖区、拱部成形区及底部找平区。中央掏槽区采用楔形掏槽，掏槽面积占总断面的10%-15%，为后续扩挖创造临空面。左侧扩挖区分上、下两层，上层高度2.5-3.0m，下层与上层保持0.5m错台，避免爆破应力叠加。拱部成形区作为最后爆破单元，采用光面爆破工艺，确保轮廓平整度。分区爆破的顺序遵循“先软后硬、先弱后强”原则：对围岩完整性差（Kv < 0.3）的区域优先

爆破，单段药量降低20%；硬岩区域（单轴抗压强度 > 60MPa）延后爆破，可适当提高装药密度。某工程通过分区设计，使各单元爆破振动相互干扰率降低40%，最大振动速度控制在1.2cm/s。

2.2 掏槽方式选择

针对不同地质条件选择适配的掏槽方式：软岩及破碎地层采用“复式楔形掏槽”，设置2-3对对称掏槽孔，槽孔深度比掘进进尺大10%-15%（如进尺1.5m时，孔深1.65-1.80m），角度70°-80°，确保掏槽深度与抛掷效果。中硬岩地层（30-60MPa）适用“桶形掏槽”，中心设置1个空孔（直径100-120mm），周边布置6-8个装药孔，孔距30-40cm，形成柱状空腔，提高破碎效率[2]。某中风化砂岩隧道采用该方式，掏槽体积达12m³/循环，较楔形掏槽增加30%。硬岩地层需采用“多级接力掏槽”，将掏槽孔分为3-4组，每组孔深递增0.5m，采用毫秒延时起爆（段间隔50ms），实现能量逐级释放。这种方式可减少硬岩中的“盲炮”率，某工程应用后盲炮发生率从8%降至1.5%。

2.3 起爆网络设计

起爆网络采用“数码电子雷管+导爆管”混合系统，数码雷管用于控制主要爆破分区的延时（精度±1ms），导爆管用于同区内炮孔的同步起爆。整个网络呈“树形”结构，每个分区设置1个起爆站，通过总线连接至主控台，实现远程操控。延时设计遵循“三段式”原则：掏槽孔先爆（第1-2段），扩挖孔紧随（第3-5段），周边孔最后（第6-8段），段间延时 ≥ 50ms，避免振动叠加。同区同段内的炮孔采用“等间隔”布置，确保能量均匀分布，如周边孔采用“隔孔起爆”方式，减少孔间干扰；网络可靠性通过“双备份”保障：每个关键炮孔（如掏槽孔、周边孔）设置2发雷管，起爆线采用双线并行敷设，接地电阻 ≤ 5Ω。某工程的网络检测显示，采用该设计后起爆成功率达100%，无拒爆现象。

3 控制爆破关键参数优化

3.1 单响药量计算

单响药量按萨道夫斯基公式Q = R³（V/K）^（3/α）计算，其中R为保护对象至爆破区的距离（m），V为允许振动速度（cm/s），K、α为场地系数（软岩K = 180-200，α = 1.7-1.8；硬岩K = 120-150，α = 1.5-1.6）。对既有衬砌保护时，取R = 3-5m，V = 1.5cm/s，计算得单响药量 ≤ 10kg（软岩）或 ≤ 15kg（硬岩）。某双侧扩建工程中，距既有结构3m处的单响药量控制在8kg，实测振动速度1.2cm/s，符合安全要求；周边环境敏感区需进一步降额，如距离民房30m时，V = 0.5cm/s，计算得单响药量 ≤ 3kg。通过“多段分散”方式，将总药量分配至8-10段，每段药量2-3kg，使振动能量均匀释放。

3.2 钻孔参数设计

3.2.1 孔径与孔深

根据岩石硬度选择孔径：软岩及破碎带采用φ42mm钻头，硬岩采用φ50mm钻头，周边孔统一采用φ38mm钻头以提高轮廓精度。钻孔直径与药卷直径的匹配关系为：不耦合系数2.0-2.5（如φ42mm孔配φ25mm药卷）。孔深根据循环进尺确定，通常为1.5-2.0m，掏槽孔比扩挖孔深10%-15%，周边孔比扩挖孔浅5-10cm，避免超挖。在断层破碎带，孔深缩短至0.8-1.2m，采用“短进尺、多循环”策略[3]。

3.2.2 孔距与排距

掏槽孔孔距30-40cm，排距40-50cm，形成菱形布置；扩挖孔孔距60-80cm，排距50-60cm，采用梅花形排列；周边孔孔距40-50cm，抵抗线50-60cm，确保光爆效果。孔距与岩石强度呈正相关：硬岩孔距可增加10%-15%，软岩则需减少10%。某石灰岩隧道（单轴抗压强度80MPa）将扩挖孔孔距增至80cm，爆破块度仍控制在30cm以内，减少钻孔数量15%。

3.3 装药结构优化

3.3.1 周边孔装药

周边孔采用“空气间隔装药”结构，将φ25mm药卷（每卷长20cm，重100g）按“2卷间隔30cm”布置，线装药密度控制在0.15-0.25kg/m。底部1m范围内适当加密（线密度0.25-0.30kg/m），补偿孔底阻力。药卷与孔壁间设置空气柱（长度30-50cm），通过PVC管固定位置，确保不耦合系数 ≥ 2.0。某工程采用该结构后，半孔率从65%提升至90%，超挖量控制在3-5cm。

3.3.2 掏槽孔与扩挖孔装药

掏槽孔采用连续装药结构，药卷直径φ32mm（软岩）或φ40mm（硬岩），装药长度为孔深的70%-80%，堵塞长度20-30cm（采用炮泥+砂袋组合）。扩挖孔采用“分段装药”，将孔深分为2-3段，每段装药量相等，段间用炮泥分隔（长度20cm）。中硬岩段装药长度占孔深60%-70%，软岩段降至50%-60%，避免过粉碎。

3.4 延时时间确定

相邻爆破段的延时时间按“振动波形不叠加”原则确定，通过现场试验得出：软岩地层需 ≥ 60ms，硬岩地层 ≥ 50ms。某软岩隧道采用65ms延时，使前后两段的振动峰值间隔达0.12s，无明显叠加。同段内炮孔的起爆时差 ≤ 10ms，确保能量同时作用于岩体。周边孔与扩挖孔的延时 ≥ 100ms，待扩挖区岩体充分破碎后再起爆周边

孔，减少对轮廓的扰动。底部孔的起爆时间滞后拱部孔150-200ms，利用重力作用提高出碴效率，某工程采用该方式后，装碴时间缩短20%。

4 爆破振动控制与安全防护技术

4.1 振动监测技术

监测系统由“传感器+数据采集仪+分析软件”组成，传感器选用三向加速度计（量程0-10cm/s，分辨率0.01cm/s），布设原则为：既有衬砌表面每5m设1个点，最近点距爆破区3m；地表建筑物基础设2-3个点，记录垂直向振动。数据采集仪采样频率 ≥ 10kHz，连续记录爆破前10s至爆破后30s的振动信号，通过4G模块实时传输至监控中心。分析软件自动计算峰值振动速度、主频、持续时间等参数，生成振动时程曲线与频谱图。监测频率为每循环1次，特殊地段（如断层带、管线密集区）加密至每循环2-3次。某工程通过监测发现，拱腰部位振动速度比拱顶高30%，及时调整该区域单响药量，从8kg降至6kg。

4.2 振动控制措施

（1）主动控制措施包括：采用数码电子雷管实现“多段微差”起爆（最多15段），使总药量分散在多个时间段；掏槽区采用“小直径药卷+空气间隔”装药，降低爆轰压力；在既有结构与爆破区之间设置预裂带（孔距30cm，不耦合系数3.0），通过预裂缝阻断振动传播路径，可使振动衰减30%-40%。

（2）被动控制措施有：在既有衬砌表面粘贴5cm厚高密度泡沫板+2cm厚橡胶垫，形成缓冲层，降低振动传递效率15%-20%；爆破区周边设置钢制挡板（高度2m），吸收部分冲击波能量[4]。

（3）动态调整机制是关键：当监测振动速度超过阈值80%时，自动预警并暂停施工，通过减少单响药量（降低10%-20%）、增加分段数量等方式优化参数。某工程通过3次动态调整，将振动速度从1.4cm/s降至1.1cm/s。

4.3 安全防护措施

飞石防护采用“双层覆盖”法：第一层为钢筋网（φ8mm，网格20×20cm），第二层为帆布（厚度 ≥ 5mm），用钢丝绳将覆盖物固定在周边围岩上，确保爆破时不被掀起。对孔口采用炮泥堵塞（长度 ≥ 30cm）+沙袋压盖（重量 ≥ 5kg），防止药卷冲出。粉尘控制措施包括：爆破前30min对掌子面洒水（湿度 ≥ 80%）；爆破后启动轴流风机（风量 ≥ 1000m³/min）和雾炮机（射程 ≥ 30m），30min内使粉尘浓度降至2mg/m³以下；出碴车辆加盖篷布，运输道路定时洒水（每2h1次）。既有结构保护需专项措施：对衬砌裂缝预先注入环氧树脂浆液封堵；止水带接头处采用钢板加固，防止错动撕裂；隧道内电缆、水管等管线用U型螺栓固定在衬砌上，减少振动位移。

结束语

超大断面市政公路隧道原位扩建的控制爆破技术是一项复杂而重要的工程任务，本文围绕爆破方案的设计与实施、关键参数的优化、振动控制与安全防护等方面进行了系统研究，取得了一系列重要成果。这些研究成果不仅为隧道扩建工程提供了科学依据和技术支撑，也为类似工程提供了有益的参考和借鉴。未来，还需进一步探索更高效、更安全的爆破技术，以适应更复杂的工程环境。

参考文献

[1]张在晨,林从谋,李家盛,董艺,沈雅雯.我国公路隧道改扩建技术发展现状及研究展望[J].隧道建设(中英文),2022,42(4):570-585.

[2]徐春明,汪春桃,吴家铭.高速公路改扩建工程勘察技术要点概述[J].中外公路,2020,40(S2):1-4.

[3]叶红宇,杨小林,卓越.频繁爆破下隧道内振动传播的数值研究[J].现代隧道技术,2020,57(02):149-156.

[4]刘强,何鑫和.隧道爆破振动在地层中的传播规律分析[J].工程建设与设计,2023,(15):92-96.