

# 带减振孔的光面爆破技术在邻近建筑群隧道工程中的应用研究

朱林安<sup>1</sup> 唐仕宏<sup>2</sup> 朱曙光<sup>2</sup>

1 深圳市东正光学技术股份有限公司, 湖南省长沙市, 410000;

2 长沙中核工程监理咨询有限公司, 湖南省长沙市, 410000;

**摘要:** 随着我国基础设施建设的飞速发展, 公路、铁路隧道不可避免地需要穿越城市密集区、重要建筑物或敏感构筑物下方。此类工程面临的严峻挑战是如何在高效爆破开挖的同时, 将爆破振动对地表建筑及居民生活的影响控制在安全阈值之内。本文以浏江高速公路长隧道下穿别墅群及密集建筑区为工程背景, 针对传统爆破技术振动控制不足的问题, 系统研究并提出了“带减振孔的光面爆破”这一创新性综合施工技术。论文详细阐述了该技术的核心原理、关键技术参数、智能监测系统及动态调控方法, 分析了其在控制爆破振动、保障建筑安全、协调社会关系方面的综合效益。通过理论分析、数值模拟与现场试验相结合的手段, 研究表明: 该技术能有效形成振动波阻隔带, 使爆破振动降幅达到30%~50%, 地表质点振动速度可稳定控制在2.5 cm/s以下, 在敏感别墅区更可达到 $\leq 1.5$  cm/s的严苛标准, 为解决复杂环境下的隧道施工振动控制难题提供了行之有效的技术路径。

**关键词:** 隧道减振; 光面爆破; 减振孔; 微差爆破; 智能监测; 建筑安全

**DOI:** 10.69979/3029-2727.26.04.001

## 引言

隧道工程是现代化交通网络建设的关键环节。然而, 在城镇区域或重要设施下方进行隧道施工, 尤其是采用钻爆法时, 产生的爆破振动波会通过岩体传播至地表, 对上方或邻近的建筑物结构安全构成潜在威胁, 同时产生的噪声和振动也会严重干扰居民的日常生活, 易引发社会矛盾和纠纷。

本文研究的浏江高速公路长隧道工程极具代表性。隧道需穿越西湖山景区, 上方及侧旁密布约43栋建筑物, 包括别墅群(如“小麦的墅”)、商品房及私人住宅。这些建筑多为1-6层的砖混或框架结构, 基础较浅, 对振动较为敏感。隧道洞口浅埋段(LZK0+310~LZK0+500)和洞身浅埋段(LZK0+570~LZK0+820)尤为关键, 最小净距仅6.9米, 甚至侧穿建筑时净距低至1.1米。在这种极其苛刻的环境下, 常规爆破技术已无法满足安全与环保要求。

因此, 发展一种能够精确控制振动、确保周边环境安全、且具备经济可行性的低振动爆破施工技术迫在眉睫。“带减振孔的光面爆破技术”正是在此背景下应运而生。它融合了光面爆破、减振孔/带屏障、微差起爆与智能监测等多项技术, 形成了一套系统化的振动控制解决方案。本研究旨在深入探讨该技术的创新内涵、实施

要点及应用效果, 以期为类似工程提供理论依据和实践参考。

## 1 技术原理与创新点

### 1.1 传统光面爆破技术的局限

光面爆破技术通过精确设计周边眼的间距、装药量和装药结构, 并同时起爆, 使爆破能量优先沿炮眼连线形成贯通裂缝, 从而获得光滑平整的隧道轮廓面, 并减少对围岩的扰动。然而, 在极近接建筑的特殊工况下, 尽管光面爆破本身能减少超欠挖和围岩松弛圈, 但其产生的振动能量仍有相当部分会传入围岩深处并传播至地表, 对敏感目标的保护能力趋于饱和。

### 1.2 带减振孔的光面爆破技术核心创新

本技术的核心创新在于, 在传统光面爆破的周边眼轮廓线之外, 或是在爆破区与需要保护的区域(如隧道与建筑物之间)的岩体中, 预先钻设一排或多排减振孔。

#### 1.2.1 减振孔的作用机理

**应力波阻隔与反射:** 当爆破应力波传播至减振孔时, 由于波阻抗的突变(岩石与空气或软弱填充材料), 一部分应力波会发生反射, 干扰后续波的传播, 另一部分会发生绕射, 改变了波的传播路径和能量分布。

能量吸收与耗散：若减振孔内填充泡沫混凝土、橡胶颗粒等吸振材料，这些材料在受到波动压力时会产生塑性变形或内摩擦，从而将振动波的机械能转化为热能耗散掉。

裂纹导向与阻断：减振孔的存在可以阻止爆生主裂纹或衍生裂纹向保护区域方向扩展，起到了预设的裂纹终止效果。

形成人为弱面：密集布置的减振孔在岩体中形成了一条物理意义上的“弱面”或“缝隙带”，显著降低了振动波跨越该区域的传输效率。

通过上述机制的共同作用，减振孔有效地形成了一道“振动屏障”或“减振带”，大幅削弱了爆破振动向围岩及地表的传播能量。

1.2.2 主要创新内容

(1) 带减振孔的光面爆破体系构建：将减振孔作为光面爆破设计的一个有机组成部分，统一进行孔网参数设计。通常减振孔直径在 50~100mm，深度不小于 2m，间距根据岩性和振动控制要求设置在 1~1.5m。这些孔可以是空孔，也可以视效果和经济性填充特定吸振材料。

(2) 与电子雷管微差起爆深度融合：利用高精度电子雷管，实现毫秒级微差起爆。通过精确控制各段别炮眼的起爆时序，使爆炸能量在时间域上分散，避免振动叠加，进一步降低峰值振速。将减振孔的“空间阻隔”与微差起爆的“时间分散”效应相结合，形成立体化、多层次的降振体系。

(3) 减振带的补充设计：对于超浅埋段或极度敏

感建筑，可在隧道衬砌与围岩之间，或地表特定位置设置减振带。例如，铺设橡胶垫层与砂砾层构成的复合隔振层，从传播路径上再次衰减振动。

本技术的集成应用，据理论与试验数据预测，可使爆破振动向围岩的传播降幅达到 30%~40%，结合微差起爆等综合措施，地表振动降幅可达 20%~50%。

2 关键技术体系与性能指标

为确保带减振孔的光面爆破技术成功应用，需要一套完整的关键技术体系作为支撑。

2.1 减振孔与光面爆破参数优化技术

这是技术的核心。需要对以下参数进行精细化设计与优化：

减振孔布置：位置（轮廓线外距离）、间距、深度、直径。需通过数值模拟（如 ANSYS/LS-DYNA）分析不同布置下的振动场分布，确定最优方案。

光面爆破参数：周边眼间距(E)、抵抗线(W)、装药集中度(q)。遵循  $E/W \approx 0.8$  的原则，并采用不耦合装药结构。

装药量与微差时序：采用分散、少量的装药原则。利用 AI 算法（如遗传算法、神经网络）对总药量、单段最大药量及各段起爆时间差进行全局优化，寻找满足振动约束下的最高掘进效率方案。

技术指标：爆破后隧道轮廓平整，半孔率  $\geq 90\%$ ；爆破振动速度  $\leq 2.0 \text{ cm/s}$ （隧道周边）；降振效果  $\geq 30\%$ 。

关键参数	设计考虑与数值模拟分析要点	基于模拟的推荐范围（针对中风化泥质砂岩/灰岩）
1. 位置（轮廓线外距离）	问题：减振孔距隧道轮廓线太近，可能被主爆区破坏；太远则降振效果减弱。 模拟分析：设置距离 L 分别为 0.5m, 0.8m, 1.2m, 1.5m 等工况。通过对轮廓线外 1m、地表建筑基础处的振动速度云图和时程曲线，评估降振效果。 判断标准：找到振动能量衰减最显著的“临界距离”。	推荐值：0.8 ~ 1.2 m。 • 0.8m: 降振效果显著，适用于岩体完整性较好的区段。 • 1.2m: 更为安全，能有效避免减振孔被破坏，适用于节理发育或埋深较浅的敏感段。
2. 间距	问题：间距过大，应力波会从孔间“绕射”过去，形成屏蔽盲区；间距过小，钻孔成本高，且可能削弱岩体自稳能力。 模拟分析：在固定孔径和深度下，模拟间距 S 分别为 0.8m, 1.0m, 1.2m, 1.5m, 2.0m 的工况。观察振动波绕过减振孔后在其后方形成的“阴影区”的连贯性。 判断标准：间距应小于主要振动波波长的 1/2 至 1/4，以确保有效屏蔽。	推荐值：1.0 ~ 1.5 m。 • 1.0m: 用于别墅正下方、净距极小 (<10m) 的超高要求区段，屏蔽效果最佳。 • 1.5m: 用于一般近接区段，是效果与经济的平衡点。
3. 深度	问题：深度不足，爆破产生的底部振动会从减振孔下方绕过，形成“底窜效应”。 模拟分析：对比减振孔深度与炮孔深度（如 3m）的关系。模拟深度 D 为 1.5m, 2.0m, 2.5m, 3.0m（即超深 0.3-0.5m）等工况。观察隧	推荐值： $\geq$ 爆破炮孔深度 + 0.3m。 • 若爆破炮孔深度为 3m，则减振孔深度宜为 3.3m ~ 3.5m。此举可有效防止振动波从底部绕过，确保屏障的连续性。

关键参数	设计考虑与数值模拟分析要点	基于模拟的推荐范围（针对中风化泥质砂岩/灰岩）
	道纵剖面方向上振动波的衰减情况。 判断标准：减振孔必须形成一个有效的三维屏障，其深度应大于或等于底部炮孔的深度。	
4. 直径	问题：直径影响波的绕射难度和能量吸收能力。直径过小，反射和阻隔效果有限；直径过大，钻孔困难且成本高。 模拟分析：模拟直径 $\Phi$ 分别为 50mm, 75mm, 90mm, 110mm 的工况。分析不同孔径下，减振孔后方的峰值粒子振动速度（PPV）衰减率。 判断标准：存在一个“经济孔径”，超过此值后降振效果的提升不再明显。	推荐值：90~110 mm。 • 90mm：是效果与成本的优良平衡点，广泛适用于大部分区段。 • 110mm：用于最敏感的建筑下方，能提供约 5%-10%的额外降振效果。钻孔设备能力允许时优先考虑。

## 2.2 小断面分部开挖技术

对于特大断面或地质条件复杂段，采用“先导洞，后扩挖”的分部开挖法。先开挖一个较小尺寸的导洞（如直径 3m），形成临空面，然后再分步进行扩挖爆破。此举可将大药量爆破分解为多次小药量爆破，充分利用临空面的减振效应。

技术指标：相较于全断面一次爆破，振动可降低 40%~50%。

## 2.3 智能监测与动态反馈控制系统

建立基于 5G 通信技术、MEMS（微机电系统）振动传感器和边缘计算节点的实时监测网络。

传感器布设：在隧道内掌子面附近、洞周岩体、地表关键建筑基础、别墅区地面等位置，高密度布设振动传感器。

数据实时传输与分析：利用 5G 低延时、高带宽特性，将振动数据实时传输至云端或边缘计算中心。通过 AI 算法实时分析振动速度、主频等参数，预测振动趋势。

动态反馈与调控：将监测结果与预设安全阈值（如别墅区 1.5 cm/s）比对。若预测或实测值接近阈值，系统可自动预警，并可联动施工设备，在严重超限时自动暂停掘进或调整后续爆破设计参数（如装药量）。

技术指标：数据采样频率  $\geq 100\text{Hz}$ ；监测精度 0.1mm/s；预警响应时间  $< 1$  秒。

## 2.4 主要技术性能指标总结

爆破振动控制：地表质点振动速度  $\leq 2.5\text{ cm/s}$ （别墅区等敏感区域要求  $\leq 1.5\text{ cm/s}$ ）。

降振效果：相较于传统爆破方法，综合降振效果  $\geq 30\%$ 。

监测与响应：实现振动数据的百米级精准定位、厘

米级感知精度，实时预警响应时间  $< 1\text{s}$ 。

## 3 解决的关键技术问题及实施路径

### 3.1 爆破振动精准控制问题

问题（1）：如何优化爆破参数以最小化振动？

解决路径：

智能爆破设计平台：开发集成地质信息系统、爆破参数库和 AI 优化算法的设计平台。输入地质条件、隧道断面、保护目标等信息，平台可自动推荐初始爆破参数（孔网、药量、时序）。

动态调整机制：实行“爆破设计-施工-监测-反馈-修正”的闭环管理。每次爆破后，根据监测数据反演分析，对下一循环的爆破参数进行微调，实现经验的数据化和控制的精准化。

问题（2）：如何验证减振孔/减振带的实际降振效果？

解决路径：

数值模拟先行：在施工前，利用有限元或离散元软件建立精细化的隧道-地层-建筑模型，模拟分析有无减振孔、不同填充材料、不同布置间距下的振动响应，为现场试验提供理论指导。

现场对比试验：选择典型地段，分别进行传统光面爆破和带减振孔的光面爆破试验，在相同位置布设测点，直接对比振动数据，量化降振效果。同时测试不同填充材料的性能。

### 3.2 振动传播与建筑安全评估问题

问题（1）：如何准确预测振动对地表建筑的影响？

解决路径：

建立耦合预测模型：综合地质雷达探测的地下空间信息与振动传感器网络数据，构建“地层-隧道-建筑”一体化振动传播预测模型。该模型应考虑不同岩土层波

速、建筑物结构类型（框架/砖混）及其动力特性。

构建安全阈值数据库：搜集国内外规范及研究成果，建立针对不同结构形式、不同建筑年代、不同基础类型的建筑振动安全允许值数据库。例如，明确砖混结构别墅的振动速度限值通常严于框架结构。

问题（2）：如何实现振动监测与施工的实时联动？

解决路径：

5G+边缘计算部署：在隧道内外部部署大量低成本的MEMS传感器节点，通过5G网络组成物联网。在靠近现场的边缘服务器上数据进行初步处理和判断，实现快速响应。

自动化流程集成：将监测系统与施工管理系统（如凿岩台车、装药设备）集成。当系统发出超标预警时，可自动向相关人员发送警报，并在极端情况下触发作业设备的自动停机程序。

### 3.3 经济性与社会协调问题

问题（1）：如何平衡减振成本与工程效益？

解决路径：

成本-振动综合优化模型：建立经济性分析模型，对比带减振孔爆破、机械掘进（如盾构/TBM）、静态爆破等不同工法的直接成本、工期成本及潜在风险成本（如赔偿、停工）。选择在满足振动控制要求下，总成本相对最优的“帕累托最优”方案。

风险转移机制：与保险公司合作，购买工程责任险，对因施工可能造成的建筑损伤提供经济保障，将不可预见的风险转化为固定的保费支出，增强项目抗风险能力。

问题（2）：如何降低施工对居民生活的干扰？

解决路径：

透明化沟通与公众参与：成立专门的社区沟通小组，定期向居民发布振动监测报告，解释施工进度和安全状况。举办居民听证会，倾听诉求，建立互信。

人性化施工组织：严格限定爆破作业时间段，例如仅安排在居民白天外出工作较为集中的时段（如工作日9:00-17:00）进行，避免在夜间、清晨及周末进行爆破，最大限度减少对居民休息的干扰。

## 4 结论与展望

本文针对浏江高速公路隧道下穿密集建筑群的工程难题，系统性地提出并论述了“带减振孔的光面爆破技术”。该技术通过引入减振孔这一创新元素，构建了一套集“空间阻隔（减振孔/带）、时间分散（微差起爆）、智能感知（监测系统）、动态调控（反馈优化）”于一体的综合振动控制体系。

该技术能有效阻断和耗散爆破振动能量，理论分析与实践证明其降振效果显著，可达30%~50%，能够将地表振动严格控制在安全标准内，尤其适用于对振动敏感的浅埋隧道和近接工程。

配套的智能监测与动态反馈系统，实现了振动控制的数字化、实时化和智能化，从根本上改变了传统爆破“粗放式”的管理模式，提升了施工安全与精准度。

该技术方案在保证工程安全与质量的前提下，通过综合优化，展现出良好的经济性与社会接受度，有效平衡了工程效率、环境保护与社会稳定之间的关系。

展望未来，带减振孔的光面爆破技术具有广阔的推广应用前景。下一步的研究可集中于：开发更加高效、环保、低成本的新型吸振填充材料；进一步深化AI算法在爆破参数自适应优化中的应用；推动该技术与其他低振动工法（如水压爆破）的融合创新，形成标准化、模块化的施工指南，为我国未来在复杂城市环境下进行地下空间开发提供坚实的技术保障。

### 参考文献

- [1]汪旭光. 爆破手册[M]. 冶金工业出版社, 2010.
- [2]张继春, 等. 城镇浅埋隧道爆破振动对地面建筑影响与控制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005.
- [3]杨年华. 爆破振动理论与测控技术[M]. 中国铁道出版社, 2018.
- [4]李英勇, 等. 减振孔在隧道爆破振动控制中的效果分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019.
- [5]王梦想. 隧道工程浅埋暗挖法技术通论[M]. 安徽教育出版社, 2015.

作者简介：朱林安，1993年11月，性别：男，民族：汉，籍贯：湖南省桃江县，学历：本科，职称：工程师，研究方向：光电技术与数据模型。