

# 小断面隧道快速掘进爆破方案优化研究

蔡 濮

中石化中原建设工程有限公司 河南 濮阳 457001

**摘要：**针对小断面隧道快速掘进中的爆破方案进行全面优化研究。通过深入分析现有爆破技术的不足，结合智能化与数字化技术的最新进展，提出包括水压爆破技术增强、准直眼掏槽形式优化及毫秒延时爆破技术精细化调整在内的多项创新策略。研究旨在提高爆破效率，减少超欠挖现象，同时确保施工安全与环境友好。实验与数值模拟结果表明，优化后的爆破方案显著提升小断面隧道的掘进速度与质量。

**关键词：**小断面隧道；快速掘进；爆破方案

## 1 小断面隧道快速掘进爆破理论基础

### 1.1 爆破原理与分类

**爆破原理：**爆破是利用炸药在有限空间和极短时间内迅速释放大能量过程。炸药爆炸时，产生高温高压的爆轰气体和冲击波，这些能量作用于周围介质，造成其破坏或移动。爆破的基本原理可以归纳为三种主要理论；爆轰气体压力作用破坏理论，炸药爆炸时产生的高温高压气体直接作用于岩石等介质，形成压缩和破坏。应力波反射作用破坏理论，炸药爆炸产生的冲击波在岩石内部传播，遇到界面（如自由面）时发生反射，增强的反射波进一步加剧岩石的破坏。应力波与爆轰气体综合作用破坏理论，当前主流理论认为，爆破作用首先是应力波的作用，随后爆轰气体的压缩和楔入作用进一步加剧破坏。

**爆炸分类：**根据爆炸产生的原因及特征，爆炸现象可分为三类：（1）物理爆炸：由物理变化（如压力、温度急剧升高）引起的爆炸，不涉及化学变化。（2）化学爆炸：炸药爆炸属于化学爆炸，是化学能迅速转化为机械能的过程。化学爆炸应具备三个条件：化学反应过程大量放热、反应过程极快、生成大量的气体。（3）核爆炸：由原子核裂变或聚变反应所释放的能量引起的爆炸，具有极高的能量释放和破坏力。

### 1.2 小断面隧道爆破特点

小断面隧道爆破相比大断面隧道具有其独特的特点，第一、钻孔精度要求高：由于隧道断面小，钻孔的精度直接影响爆破效果和隧道成型质量。必须严格控制钻孔的位置、方向和深度，以确保爆破后隧道断面达到设计标准，避免超挖和欠挖。第二、炸药用量控制严格：小断面隧道爆破时，炸药用量需精确计算和控制。药量不足会导致爆破效果不佳，药量过多则可能破坏围岩稳定，增加施工风险。必须根据岩石性质、炸药性

能、开挖断面尺寸等因素，合理确定炸药用量<sup>[1]</sup>。第三、爆破效果要求高：小断面隧道爆破效果要求更高，必须确保爆破后隧道轮廓平整、无欠挖超挖现象。这要求采用先进的爆破技术和控制爆破方法，如光面爆破和预裂爆破，以减少对围岩的扰动和破坏。第四、施工环境复杂：小断面隧道多处于地质条件复杂多变的地段，如浅埋隧道、岩石风化破碎等。这些复杂的地质条件对爆破效果产生较大影响，需充分考虑岩层的节理、裂隙、软弱夹层等因素，制定合理的爆破方案。第五、爆破作业难度大：由于隧道断面小，施工空间有限，爆破作业难度相对较大。必须确保爆破作业的安全性和高效性，同时尽量减少对围岩的扰动和破坏，确保隧道施工质量和进度。

## 2 小断面隧道快速掘进的爆破施工优化设计原则

小断面隧道快速掘进的爆破施工优化设计原则应围绕提高掘进效率、确保施工安全、保护围岩稳定性及提升隧道成型质量等核心目标展开。基于详细的工程地质勘察结果，精确计算炸药用量、孔距、排距等爆破参数，确保爆破能量分布合理，既能有效破碎岩石，又能减少超挖和欠挖现象，提高隧道成型精度。优先采用光面爆破、预裂爆破等先进爆破技术，通过控制爆破能量和方向，减少爆破对围岩的扰动和破坏，保持隧道围岩的稳定性，同时提高隧道壁面的平整度。根据隧道断面尺寸和岩石特性，合理设计钻孔布局，确保钻孔位置准确、方向一致、深度达标。通过优化钻孔参数，提高爆破能量的利用效率，降低施工成本。严格遵循爆破设计方案进行装药作业，确保炸药用量精确无误。采用先进的起爆系统，实现精准起爆，控制爆破波的传播方向和能量分布，减少不必要的能量损失和对周围环境的影响。建立健全的安全管理体系，加强爆破施工过程中的安全监测和预警机制。对爆破作业人员进行专业培训，

提高其安全意识和操作技能,加强爆破振动、飞石等安全风险的监测和控制,确保施工安全。在爆破施工过程中,注重环境保护和生态恢复工作。采取有效措施减少爆破对周边环境和生态的影响,如设置防护网、洒水降尘等。施工完成后,及时进行生态恢复工作,恢复植被覆盖和生态平衡。根据爆破施工过程中的实际情况和反馈意见,不断优化和改进爆破设计方案和施工工艺。通过技术创新和管理提升,不断提高小断面隧道快速掘进的爆破施工效率和质量水平。

### 3 小断面隧道爆破施工中存在的问题

#### 3.1 速度慢

在小断面隧道的爆破施工中,速度慢是一个显著的问题。由于隧道断面较小,施工空间受限,导致钻孔、装药、起爆等作业难以高效进行。操作人员需要更加精细地操作,以确保每个步骤都准确无误,这无形中增加了施工时间,爆破参数的优化和调整也需要时间,如果设计不当或调整不及时,可能导致爆破效果不佳,需要反复进行爆破作业,从而进一步延长了施工周期。爆破后的清渣和支护工作也相对繁琐,特别是在空间有限的隧道内,这些工作更加耗时耗力。

#### 3.2 质量难以保证

小断面隧道爆破施工中的另一个问题是质量难以保证。这主要体现在几个方面:一是爆破效果不稳定,由于隧道地质条件复杂多变,不同地段的岩石性质差异较大,导致爆破参数难以统一确定,容易出现超挖或欠挖现象,影响隧道成型质量。二是爆破对围岩的扰动较大,小断面隧道在爆破过程中容易受到爆破波的影响,导致围岩稳定性下降,出现裂缝、塌方等安全隐患<sup>[2]</sup>。三是施工精度要求高,但由于施工空间有限,操作难度大,容易导致钻孔位置偏差、装药不均匀等问题,进而影响爆破效果和隧道质量。施工人员的技术水平和操作经验也是影响质量的重要因素之一,如果施工人员技术不过关或经验不足,也容易导致施工质量问题的。

### 4 小断面隧道快速掘进爆破方案优化

#### 4.1 水压爆破技术优化

水压爆破技术是一种利用水作为介质传递爆破能量的新型爆破方法,其小断面隧道掘进中具有显著优势。传统爆破中,炸药爆炸产生的能量直接作用于岩石,而水压爆破则通过水作为耦合介质,将爆炸能量更加均匀地传递给岩石。为进一步提升爆破效果,可优化水压耦合系统,确保水与岩石之间形成良好的耦合界面,减少能量损失。通过精确计算水层厚度、压力分布及岩石的渗透性,调整注水参数,使水在爆破瞬间达到

最佳耦合状态,从而提高爆破能量的传递效率。炸药与水压之间的协同作用是决定水压爆破效果的关键因素,优化过程中,需深入研究炸药类型、装药结构以及水压参数之间的匹配关系。通过试验与数值模拟相结合的方法,探索不同炸药种类在水压作用下的爆炸特性,优化装药结构,使炸药爆炸产生的冲击波与高压水射流形成合力,共同作用于岩石,提高破碎效率。水压爆破技术相较于传统爆破方法,在环保与安全方面具有显著优势,在实际应用中仍需进一步优化。

#### 4.2 准直眼掏槽形式优化

准直眼掏槽是小断面隧道爆破中常用的掏槽方式之一,其掏槽效果直接影响后续爆破作业的效率与质量。掏槽孔的布置是影响掏槽效果的关键因素,优化过程中,需根据隧道断面尺寸、岩石性质及爆破参数等因素,合理确定掏槽孔的数量、位置、角度及深度。通过数值模拟与现场试验相结合的方法,探索不同布置方案下的掏槽效果,选择最优方案以提高掏槽效率与精度。炸药类型与装药结构对掏槽效果具有重要影响,优化过程中,需根据掏槽孔的具体布置情况,选择合适的炸药类型与装药结构。掏槽效果的好坏直接影响后续爆破作业的进行,在掏槽作业完成后,需及时对掏槽效果进行监测与评估。通过测量掏槽孔的深度、直径及岩石破碎程度等指标,评估掏槽效果是否满足设计要求。建立掏槽效果反馈机制,根据监测结果及时调整爆破参数与掏槽方案,确保后续爆破作业的顺利进行。

#### 4.3 毫秒延时爆破技术优化

毫秒延时爆破技术是一种通过控制各炮孔起爆时间差来实现有序爆破的技术手段。在小断面隧道快速掘进中,毫秒延时爆破技术的应用对于提高爆破效率、降低爆破振动及改善爆破效果具有重要意义。毫秒延时爆破技术的核心在于精确控制各炮孔的起爆时间差。优化过程中,需采用高精度的延时起爆系统,确保延时时间的精确性与稳定性。通过试验与数值模拟相结合的方法,研究不同延时时间对爆破效果的影响规律,选择最优延时时间组合以提高爆破效率与效果<sup>[3]</sup>。炮孔的布置与起爆顺序是影响毫秒延时爆破效果的重要因素,优化过程中,需根据隧道断面尺寸、岩石性质及爆破参数等因素,合理确定炮孔的数量、位置、角度及深度,并设计合理的起爆顺序。通过数值模拟与现场试验相结合的方法,探索不同布置方案与起爆顺序下的爆破效果差异,选择最优方案以提高爆破效率与岩石破碎质量。毫秒延时爆破技术在提高爆破效率的同时,也需关注爆破振动对周围环境的影响,优化过程中,需采取有效措施控制

爆破振动强度与频率。毫秒延时爆破技术的成功应用不仅依赖于精确的设计与执行,还需要对爆破效果进行细致的评估与及时的调整。在每次爆破作业完成后,应组织专业人员对爆破效果进行全面评估,包括但不限于岩石破碎程度、块度分布、超欠挖情况、隧道轮廓平整度以及爆破振动对周围环境的影响等。评估过程中,可借助先进的测量技术和设备,如激光测距仪、三维扫描仪等,对隧道断面进行精确测量,获取详尽的数据支持。结合现场观察和记录,对爆破效果进行综合分析,识别存在的问题与不足。基于评估结果,及时调整爆破方案,包括但不限于调整炮孔布置、优化延时时间、改变炸药类型或装药结构等。通过迭代优化,逐步形成一套适用于特定地质条件和隧道断面尺寸的毫秒延时爆破技术体系,实现小断面隧道的快速、高效、安全掘进。

## 5 小断面隧道爆破快速掘进方案优化未来发展方向

### 5.1 智能化技术的应用

随着科技的飞速发展,智能化技术正逐步渗透到隧道工程领域,为小断面隧道爆破快速掘进提供了全新的发展方向。未来,智能化技术将广泛应用于爆破设计过程中。通过集成地质勘察数据、岩石力学参数、历史爆破记录等多源信息,利用大数据分析和人工智能算法,可以实现对爆破参数的精确计算和智能优化。这不仅能够减少人工设计的误差和主观性,还能根据实时地质变化动态调整爆破方案,确保爆破效果的最优化。智能化技术的应用还将推动自动化施工装备的发展。例如,智能钻机能够根据预设的钻孔参数自动完成钻孔作业,减少人工干预和误差;智能装药系统能够精确控制装药量,确保炸药分布均匀;智能起爆系统则能够实现毫秒级精度的延时起爆,提高爆破的协同性和效果。这些自动化施工装备的应用将极大提升施工效率和质量。智能化技术还将为爆破施工提供实时监测与反馈控制功能。通过在隧道内布置传感器网络,可以实时监测爆破振动、应力变化、岩石破碎情况等关键参数。结合物联网技术和云计算平台,可以实现对爆破过程的远程监控和数据分析。一旦发现异常情况或偏离预设目标,系统将自动触发预警机制并给出调整建议,确保施工安全和爆破效果。

### 5.2 数字化技术的应用

数字化技术也是小断面隧道爆破快速掘进方案优化的重要方向之一。数字化技术可以基于地质勘察数据和隧道设计参数,构建精确的三维地质模型和隧道模型,通过仿真分析软件,可以模拟不同爆破方案下的岩石破碎过程、应力分布情况以及隧道变形情况等,为爆破设计提供科学依据。这种三维建模与仿真分析的方法能够直观展示爆破效果,提高设计的准确性和可靠性。数字化技术还可以应用于隧道爆破施工的管理过程中,通过建立数字化施工管理系统,可以实现对施工进度、质量、安全等方面的全面管理<sup>[4]</sup>。系统能够自动收集和分析施工数据,生成各类报表和图表,为管理人员提供决策支持,数字化施工管理系统还可以实现施工信息的实时共享和协同工作,提高团队协作效率和施工管理水平。在隧道爆破施工完成后,数字化技术还可以用于隧道的监控与维护工作,通过在隧道内布置传感器和监控设备,可以实时监测隧道的结构安全、交通流量、环境状况等关键指标。结合数据分析技术,可以及时发现潜在的安全隐患并采取相应的维护措施,数字化监控与维护系统还可以为隧道的长期运营管理提供数据支持,提高隧道的整体运行效率和安全性。

### 结束语

小断面隧道快速掘进爆破方案的优化研究对于提升隧道工程效率与质量具有重要意义。通过引入智能化与数字化技术,不仅实现爆破参数的精准控制与爆破效果的显著提升,还促进施工管理的现代化与精细化。未来,随着技术的不断进步与应用实践的深入,小断面隧道爆破掘进技术将朝着更加高效、安全、环保的方向发展,为隧道工程领域的发展注入新的活力。

### 参考文献

- [1]何广沂.隧道掘进水压爆破技术发展[J].工程爆破.2021,27(5):53-58.
- [2]王树成.何广沂.隧道掘进水压爆破技术发展与创新[J].铁道建筑技术.2021(7):1-7+38.
- [3]何祥松.水压爆破技术在隧道掘进施工中的运用[J].黑龙江交通科技,2021,44(9):156-157.
- [4]万嗣鹏,陶铁军,陈二平等.小断面隧道快速掘进爆破方案优化研究[J].中国矿业,2020,29(11):178-183.