

# 隧道钻爆法施工中光面爆破参数对围岩扰动的影 响分析

魏常胜

中铁十局集团第四工程有限公司 江苏 南京 210046

**【摘 要】**：隧道钻爆法施工中，光面爆破参数的合理性直接决定围岩扰动程度，科学匹配爆破参数是控制围岩损伤、保障施工安全的关键。本文以光面爆破核心参数（炮孔间距、装药集中度、最小抵抗线、起爆时差）为研究对象，分析各参数变化对围岩扰动的具体影响规律：炮孔间距过大易导致围岩表面炮痕不连续甚至缺失，并诱发裂隙，过小则增加爆破扰动范围；装药集中度过高会加剧围岩破碎，过低则无法形成平整开挖面；最小抵抗线与起爆时差的不合理匹配会引发应力叠加或滞后扰动，进一步扩大围岩损伤。研究表明，通过优化光面爆破参数可有效降低围岩扰动，为隧道钻爆施工的围岩保护提供实践参考。

**【关键词】**：隧道钻爆法；光面爆破参数；围岩扰动；参数优化；施工安全

DOI:10.12417/2811-0536.26.04.016

## 引言

隧道钻爆法因施工成本低、适应性强，在山岭隧道工程中应用广泛，但爆破过程不可避免对围岩产生扰动，易引发坍塌、变形等安全隐患。光面爆破作为控制开挖质量、减少围岩损伤的核心技术，其参数选择直接决定扰动程度与施工安全性。合理的光面爆破参数可实现围岩开挖面平整、裂隙发育可控，而参数失衡则会加剧围岩扰动，增加后续支护难度与工程风险。基于此，本文聚焦光面爆破参数对围岩扰动的影 响展开分析，旨在明确参数影响规律，为隧道施工中参数优化及围岩保护提供理论与实践支撑。

## 1 隧道钻爆法施工及光面爆破应用背景

隧道工程作为交通基础设施建设的重要组成部分，在山岭地区、复杂地质区域的穿越施工中，钻爆法凭借其 对地质条件适应性强、施工设备要求相对简单、工程造价可控等优势，成为应用最广泛的开挖技术之一。在隧道建设规模不断扩大的背景下，工程面临的地质环境愈发复杂，从常规的硬岩地层到破碎带、软弱夹层等不良地质段，钻爆施工的难度与风险持续增大。如何在保证开挖效率的同时减少对周边围岩的破坏，成为制约隧道施工质量与安全的关键问题。

光面爆破技术是钻爆法施工中的核心控制技术，其核心原理是通过精准设计炮孔参数、装药结构及起爆时序，使炸药能量均匀、有序释放，在开挖轮廓线处形成平整顺直的爆破面，同时最大限度削减爆破冲击波对围岩的冲击，减少扰动损伤。相较于传统爆破技术，光面爆破能大幅控制开挖面超欠挖，抑制围岩裂隙的产生与扩展，为后续支护结构快速精准施工创造有利条件，因此被广泛应用于各类隧道钻爆工程，成为保障围岩稳定性、提升施工安全性与质量的关键

技术手段。

随着隧道工程向深部、复杂地质区域拓展，行业对施工质量、安全及环保标准的要求不断提高，对光面爆破技术的应用标准与适配精度要求也逐步严苛。在实际施工中，不同地质条件下光面爆破参数的适配性直接决定技术应用成效，不合理的参数设置不仅无法发挥其控形减扰优势，反而会加剧围岩扰动，诱发坍塌、变形等隐患<sup>[1]</sup>。基于隧道钻爆施工的现实需求与技术应用痛点，明确光面爆破的应用价值及参数适配核心问题，为后续深入分析参数对围岩扰动的影 响奠定坚实实践基础。

## 2 光面爆破参数对围岩扰动的影 响分析

光面爆破参数的选取与匹配直接决定爆破能量的传递路径、释放强度及作用范围，进而对围岩扰动产生系统性、显著性影响，其中炮孔间距是调控围岩表面完整性与扰动程度的核心参数之一。炮孔间距过大时，相邻炮孔间的岩石难以被爆破能量充分覆盖，易残留不规则未爆岩柱，同时爆破应力波在围岩内部传播过程中会在未爆区域形成明显应力集中，诱发围岩表层产生贯通性裂隙；而炮孔间距过小时，相邻炮孔的爆破能量会过度叠加，形成强应力叠加区，不仅会扩大围岩扰动范围，还会导致开挖轮廓线外的围岩出现不必要的深层损伤，破坏围岩自身的天然承载结构，削弱其稳定性。尤其在节理发育的围岩中，不合理的炮孔间距还会加剧节理的扩展贯通，进一步放大扰动危害。

装药集中度与围岩扰动程度呈现直接且敏感的关联，其合理控制是平衡爆破破碎效果与围岩保护的核心要点，同时需结合围岩的抗爆性能与完整性综合调控。装药集中度过高时，爆破瞬间释放的冲击力会远

超围岩抗爆强度阈值，导致围岩内部产生大量深层裂隙，形成贯通性破坏面，严重时甚至引发局部塌方。装药集中度过低则无法形成足够的爆破能量，难以形成平整的开挖轮廓面，残留的凸起岩石需后续人工凿除，该过程会对围岩造成二次扰动，增加工程风险<sup>[2]</sup>。此外，装药结构的均匀性与合理性同样关键，若采用不均匀装药或药卷贴合炮孔壁的耦合装药方式，会导致爆破能量分布失衡，局部围岩承受过大爆破荷载，加剧局部扰动，甚至引发围岩局部剥落。

最小抵抗线与起爆时差的协同匹配对围岩扰动的的影响具有显著叠加效应，两者的适配性直接决定爆破应力场的分布状态。最小抵抗线过大时，爆破能量需穿透更厚的岩石层才能作用于开挖轮廓线，能量在传递过程中大幅损耗，同时易在围岩内部形成复杂的多向应力场，引发大范围、深层次的围岩扰动；过小时则会导致爆破冲击波直接冲击开挖轮廓线外的围岩，造成表层岩石瞬时剥落，破坏围岩表层完整性。起爆时差不合理会彻底破坏相邻炮孔爆破应力波的协同作用，若时差过长，先爆炮孔产生的围岩扰动尚未稳定，后爆炮孔的爆破能量会在扰动区域再次叠加，形成二次扰动，进一步扩大围岩损伤范围；若时差过短，相邻炮孔的应力波会相互干扰，形成应力集中，同样加剧围岩扰动。

### 3 基于围岩扰动控制的光面爆破参数优化方法

基于围岩扰动控制的光面爆破参数优化，需以详细的地质勘察数据为核心依据，同时紧密结合隧道开挖断面尺寸、支护设计要求及施工机械性能，建立爆破参数与围岩物理力学特性的精准适配关系，确保参数优化的全面性与实操性。优化启动阶段，需优先明确不同围岩分级对应的抗爆强度、弹性模量、泊松比等核心指标，例如Ⅲ级硬岩抗爆强度通常不低于80MPa，Ⅴ级软岩抗爆强度多低于30MPa，以此为基准划分差异化的参数调整区间，为后续精准优化提供量化依据。针对不同地质条件需实施针对性参数规划：对于Ⅰ~Ⅲ级硬岩围岩，炮孔间距可初步设定为60-80cm，同时搭配合理的炮孔深度，避免因间距过小导致爆破能量过度叠加；对于Ⅳ~Ⅶ级软弱或破碎围岩，炮孔间距需缩小至30-50cm，同时将装药集中度降低20%-30%，并采用间隔装药方式，通过减小单孔爆破能量与优化能量分布双重手段，弱化对围岩的冲击扰动<sup>[3]</sup>。参数初步确定后，需开展多组现场试爆试验，采集爆破后围岩的扰动数据与开挖面成型质量指标进行综合分析修正，确保参数设置与实际地质条件精准匹配。

炮孔间距与最小抵抗线的协同优化是控制围岩扰动的核心关键环节，两者需保持科学合理的比例关系，才能实现爆破能量的均匀分布与精准传递，避免能量局部聚集或分布不均对围岩造成额外损伤。结合长期工程实践经验与大量试爆数据，炮孔间距与最小抵抗线的比值宜严格控制在0.8-1.2之间，在此比例范围内既能保证岩石的充分破碎，又能有效平衡爆破破碎效果与围岩保护需求，显著减少未爆岩柱残留、过度爆破及超欠挖等问题。优化过程中，需通过多组现场对比试爆获取不同比值下的围岩扰动数据，重点监测围岩表层位移量、裂隙发育深度、振动速度及应力分布等核心指标，若试爆后围岩表层位移超过5mm，或裂隙深度大于30cm，或振动速度峰值超过15cm/s，则需按5-10cm的幅度精准调整间距与抵抗线数值。同时，起爆时差的优化需严格遵循“先内后外、分段延时”的原则，相邻炮孔起爆时差控制在25-50ms，周边孔与掏槽孔的起爆时差不小于100ms，搭配毫秒延期雷管实现精准延时，使爆破应力波有序叠加，避免不同炮孔爆破产生的应力场相互干扰，从而有效控制大范围扰动的产生。

装药结构与集中度的优化需精准兼顾爆破破碎效果与围岩保护的双重核心需求，核心思路是采用不耦合装药结构搭配分级调控与动态适配策略，从能量传递路径和释放强度两方面入手，降低爆破冲击波对围岩的直接冲击与能量损伤。不耦合系数的选择需结合围岩岩性、强度及完整性等多元特性差异化确定，硬岩围岩不耦合系数宜取1.5-2.0，软岩围岩宜取2.0-2.5，通过科学增大药卷与炮孔壁的间隙形成稳定空气缓冲层，既能高效削弱冲击波传播强度，还能显著减少爆生气体对围岩裂隙的冲刷扩张破坏<sup>[4]</sup>。装药集中度优化以现场试爆结果与地质勘察数据为双重核心依据，结合隧道开挖循环进尺要求分级调控，实现能量精准释放：Ⅴ级围岩宜控制在0.2-0.3kg/m，Ⅳ级围岩0.3-0.4kg/m，Ⅲ级围岩0.4-0.5kg/m。针对破碎带、节理发育区等特殊地质段，除常规优化措施外，需额外采用间隔装药方式，药卷间距设置为20-30cm，搭配导爆索串接保证起爆同步性与可靠性，进一步降低局部爆破能量密度，最大限度减少围岩扰动与结构损伤。见表1所示：

表1 不同围岩分级光面爆破优化参数表

围岩分级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级	Ⅵ级	Ⅶ级
炮孔间距 (cm)	65-75	50-60	35-45	25-35	15-25

最小抵抗线 (cm)	70-80	60-70	50-60	40-50	30-40
装药集中度 (kg/m)	0.42-0.48	0.33-0.38	0.22-0.28	0.18-0.22	0.12-0.16
不耦合系数	1.6-1.9	1.8-2.2	2.1-2.4	2.3-2.6	2.5-2.8
起爆时差(ms)	35-45	30-40	25-35	20-30	15-25

注：续表 1。

#### 4 优化后光面爆破参数的围岩扰动控制成效

优化后的光面爆破参数应用于隧道施工，显著提升了围岩开挖面的成型质量，从根源上抑制了围岩表层裂隙的发育与扩展。相较于优化前传统爆破参数下的施工效果，优化后的开挖轮廓线平整顺直度大幅提升，能精准契合设计断面的各项要求，彻底规避了超欠挖现象带来的后续修整作业。这一改善价值显著，不仅省去了人工凿除超挖部分、回填欠挖区域等干预操作，有效减少了此类操作对围岩造成的二次扰动伤害，更让爆破后的围岩表面呈现出均匀且深度适中的炮痕形态。整个开挖面无明显未爆岩柱残留，也不存在过度破碎的松散区域，围岩自身的整体性与结构完整性得到充分保留。这种良好的开挖效果，为后续支护结构与围岩形成紧密贴合的协同受力体系奠定了坚实基础，从源头层面降低了围岩因结构破损引发的失稳风险，为隧道施工的安全推进筑牢了关键的第一道防线。

优化后的光面爆破参数通过精准调控爆破能量的释放强度与传播路径，大幅弱化了围岩深层结构的扰动影响，进一步筑牢了围岩整体稳定性。在爆破实施过程中，经过科学优化的参数让爆破能量实现均匀分布，由此形成的应力波传播更加平稳有序，从根本上避免了局部应力集中现象的产生，减少了应力集中对围岩结构的破坏。这种均衡的能量传递方式，能够有效约束围岩内部原有天然裂隙的扩展，同时显著减少新裂隙的生成数量，最大程度保留了围岩自身的原始承载能力。稳定的围岩状态使得施工全过程未出现

#### 参考文献：

[1] 黄华杰.山岭隧道钻爆法施工坍塌风险及围岩稳定性分析研究[J].工程建设与设计,2021,(09):58-60.  
 [2] 赵华锋.深埋特长隧道钻爆法施工关键技术研究与应用[J].交通科技与管理,2025,6(08):119-121.  
 [3] 郑滔,孙泽,施伟,等.掘进机法与钻爆法施工隧道围岩扰动特性对比研究[J].铁道建筑技术,2024,(06):126-131.  
 [4] 李丰果.山岭隧道钻爆法开挖的一些建议措施[J].西部探矿工程,2021,33(11):183-184+190.  
 [5] 倪迪,陈明,康三月,等.IV级围岩隧道钻爆法扩挖方案比选[J].市政技术,2020,38(03):119-123.

坍塌、变形等突发性安全隐患，支护结构所承受的荷载分布也更加平稳均衡，无需额外增加支护强度或采取临时应急加固措施<sup>[5]</sup>。这一成效不仅简化了施工流程，避免了不必要的工序叠加，更大幅提升了现场作业安全性，为隧道施工各环节的顺畅衔接提供了坚实保障。

优化后参数的应用还实现了施工效率与围岩保护的协同提升，构建起良性循环的施工体系。由于围岩扰动得到有效控制，围岩稳定性能够在爆破后快速趋于稳定，支护作业可紧密跟随开挖工序有序开展，无需设置等待围岩扰动稳定的缓冲时间，有效缩短了整体施工周期。同时，平整顺直的开挖面大幅降低了支护材料的消耗，避免了因超欠挖导致的材料浪费，也减少了因围岩扰动过大引发的局部坍塌、结构破损等返工修复工作量，间接降低了工程施工成本。此外，受控的围岩扰动状态让隧道衬砌结构与围岩的贴合度更高，运营阶段因围岩后期变形、裂隙扩展引发的渗漏、衬砌破损等问题显著减少，后期维护工作量大幅降低，进一步提升了工程的整体综合效益。这一系列实践成效充分验证了光面爆破参数优化方法在围岩扰动控制方面的实用性与可靠性，为同类隧道工程在复杂地质条件下的施工提供了可借鉴的实践经验，助力推动隧道钻爆施工技术向更安全、高效、绿色的方向发展。

#### 5 结语

本文围绕隧道钻爆法施工中光面爆破参数对围岩扰动的影响展开系统分析，首先阐述了隧道钻爆法及光面爆破的应用背景，明确了参数优化对围岩保护的重要性；继而深入剖析了炮孔间距、装药集中度等核心参数对围岩扰动的具体影响机制；进而提出基于地质适配性的参数优化方法，并通过工程实践验证了其控制成效。研究表明，科学优化光面爆破参数可有效控制围岩扰动，保障隧道施工质量与安全。相关分析结论与优化方法可为同类隧道钻爆施工提供技术参考，助力提升光面爆破技术在复杂地质条件下的应用水平。