

# 隧道爆破后超欠挖测量：以重庆大学城复线隧道为例

蒲盛朋 马贵全 张佳帅

重庆科技大学 土木与水利工程学院 重庆 401331

**摘要：**隧道爆破作为地下工程施工的核心技术，其精确测量与控制直接关系到工程的安全性、经济性和进度。在复杂地质条件下，超挖和欠挖现象普遍存在，导致支护成本增加和施工延误。本文以重庆大学城复线隧道工程为案例，采用自主研发的超欠挖快速检测设备，对DK2+900.600至DK3+100.599段的三个实验断面进行现场实测数据采集。通过对比分析现场测量与模拟结果，揭示了施工人员“宁超勿欠”原则下超挖成因及局部欠挖风险。研究表明，钻孔参数偏差是超欠挖的主要诱因，超挖平均幅度达15–55 cm，而欠挖风险主要源于拱肩区域钻孔内偏。文献综述部分回顾了隧道爆破测量技术的发展，包括激光扫描和光切片法；方法论部分详述了工程概况、设备原理、测量流程及模拟模型构建；结果部分呈现了实测参数表及扫描图分析；讨论部分结合数值验证提出优化策略，如提升钻孔导向精度和实时反馈机制。

**关键词：**隧道爆破；超欠挖；测量技术

## 一、引言

### 1. 研究背景

地下工程建设是现代基础设施发展的关键组成部分，特别是交通隧道工程，在缓解城市拥堵、优化交通网络方面发挥着不可或缺的作用<sup>[1]</sup>。中国作为隧道大国，截至2025年，已建成运营隧道总长超过4万公里，其中钻爆法仍是中硬岩条件下最经济高效的开挖方式。然而，隧道爆破过程中不可避免地产生超挖和欠挖现象，这些偏差不仅影响开挖轮廓的几何精度，还可能诱发围岩不稳定、支护结构失效乃至工程事故<sup>[2]</sup>。根据国际隧道协会统计，全球隧道工程中超挖率平均超过10%，欠挖率约5%–8%，直接导致额外支护材料消耗增加15%–20%<sup>[3]</sup>。

重庆大学城复线隧道工程（以下简称“大学城隧道”）西起沙坪坝区西永西山立交，东接红槽房立交，全长约6.8 km，穿越中梁山脉，地质条件复杂，受长江和嘉陵江水系影响，围岩主要为中硬夹泥灰岩和砂岩，隧道采用上下台阶开挖法，以适应大断面和高地应力环境<sup>[4]</sup>。然而，爆破施工中频繁出现的超欠挖问题已成为制约工程质量的关键瓶颈。传统测量依赖人工量测或简易仪器，精度低、效率差，无法满足实时控制需求<sup>[5]</sup>。

“宁超勿欠”原则在实践中的双刃剑效应：虽避免欠

挖风险，但放大超挖损失。实践意义上，该研究为类似工程提供可操作的测量–模拟–优化闭环框架，预计可降低超挖率20%以上，节省支护成本10%–15%。

## 二、国内外研究

### 1. 隧道爆破技术发展概述

隧道爆破技术源于19世纪末的经验钻爆法，随着岩石力学和计算模拟的进步，已演变为多学科交叉体系。早期依赖人工布孔和经验装药，超挖率高达30%以上。20世纪80年代，光切片法问世，通过激光平面投影快速测量断面偏差，精度达 $\pm 5$  mm。进入21世纪，BIM和激光扫描技术整合，实现3D轮廓重建，测量效率提升5倍<sup>[6]</sup>。

钻爆法施工流程包括钻孔、装药、起爆、清渣和支护。其中，周边眼设计直接决定超欠挖控制，孔网倾角偏差 $>5^\circ$ 可导致超挖增加20 cm。上下台阶开挖法广泛用于大断面隧道，通过分层爆破减少单次振动，但协调难度高，台阶间超挖易达15%–25%<sup>[7]</sup>。

### 2. 超欠挖测量技术

超挖指爆破后轮廓超出设计线 $>5$  cm，欠挖则为未达设计线 $<5$  cm。测量方法分为接触式和非接触式。传统手动法误差大，不适用于实时应用。现代技术包括：隧道剖面仪，采用光栅扫描，体积精度 $\pm 0.1\%$ ；3D激光扫描，分辨率 $<1$  mm，但设备昂贵；智能传感器融合，如陀螺仪+IMU，实时捕获钻孔轨迹。近年来，利用机器学习从历史数据预测欠挖概率，准确率 $>85\%$ <sup>[8]</sup>。

**基金号：**重庆科技大学2025年第一批硕士研究生创新计划项目–YKJCX2420629

### 三、隧道爆破现场测量

#### 1. 测量设备

炮眼参数智能化检测设备主要由5个部分组成：可伸缩连接管根据炮眼的实际深度进行调节，使探测管端头到达炮眼的实际深度；激光测距模块集成了高精度的陀螺仪、加速度计和RM3100地磁场传感器，并采用高性能的微处理器和先进的动力学解算与卡尔曼动态滤波算法，能够快速求解出模块当前的实时运动姿态，从而准确辨识检测装置的伸长程度和空间位置，获取炮眼的实际深度和角度。数据处理终能够接收和处理激光测距模块提供的炮眼参数，从而获取并显示炮眼的实际深度和角度，角度和长度的测量精度分别为 $\pm 1^\circ$ 和 $\pm 0.1$ 毫米。激光测距模块还能实现炮眼相对位置的测量，录每个测量点的三维(X, Y, Z)坐标，并自动输出到云系统进行位置描述，测量数据实时传输到工业平板上完成炮眼位置的呈现，同时与设计的炮眼位置进行对比分析，其测量精度为 $\pm 0.1$ 毫米。

#### 2. 测试结果

##### (1) 实验断面1实测与分析

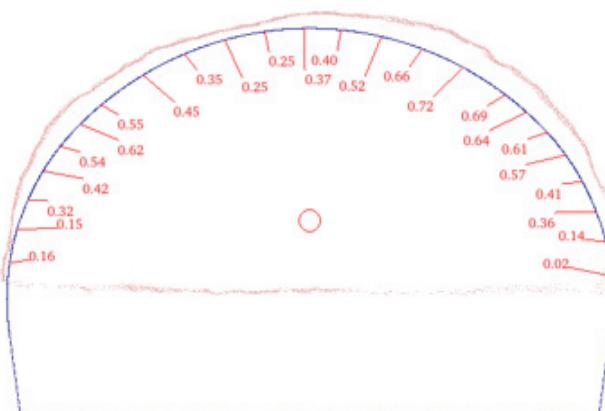


图1 断面1实测断面图

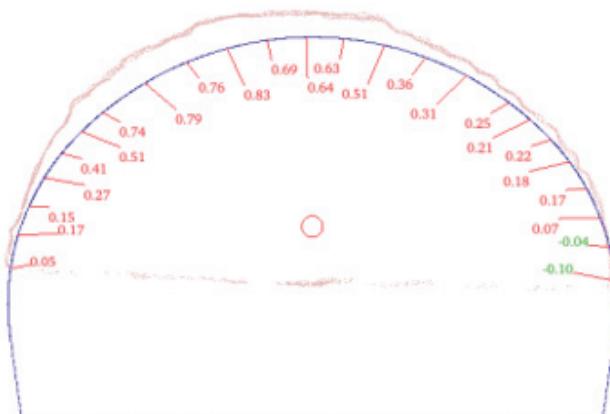


图2 断面1实测断面图

断面1(DK2+900.600)位于初始施工阶段，围岩完整度高。周边眼参数实测显示，所有孔开口外偏，平均 $\Delta X=15.5$  cm，超挖主导。倾角偏差 $<2^\circ$ ，但位置偏移诱发大面积碎裂。图1显示超挖区呈扇形，面积 $0.45\text{ m}^2$ 。

断面2(DK3+000.600)中段，经验积累初显。图2显示a区吻合好( $\Delta < 12$  cm)，b/c/d区外偏15–50 cm。整体超挖 $0.32\text{ m}^2$ ，图2揭示边墙不匀称碎裂，振动峰值8 mm/s。

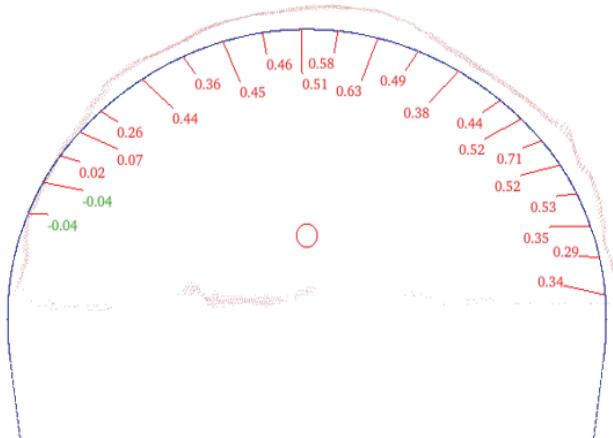


图3 断面1实测断面图

断面3(DK3+100.599)末段，a区内偏0–8 cm(欠挖风险)，b/c/d区外偏22–5 cm。倾角稳定，但位置偏差累积。图3示局部凹陷，模拟预测欠挖概率15%。

#### 四、讨论

##### 1. 超挖与欠挖成因分析

三个实验断面的实测数据揭示了超挖与欠挖现象的时空演化特征。超挖幅度从断面1的平均55 cm递减至断面3的22 cm，标准差分别为12.3 cm、8.7 cm和6.5 cm，表明施工经验的积累逐步缓解了偏差，但“宁超勿欠”原则仍主导初期决策，导致平均超挖率达28%。具体而言，断面1的扇形超挖区(面积 $0.45\text{ m}^2$ )源于周边眼位置整体外偏( $\Delta X > 15$  cm)，这与围岩完整度高相关：高完整岩体下，爆破能量向外逸散，放大位置偏差的影响。同时，水平倾角偏差(平均 $2.1^\circ$ )诱发不匀称碎裂，边墙区域能量集中导致局部振动峰值达9 mm/s，超过ITA安全阈值7 mm/s。

欠挖风险主要集中在拱肩区域(a区)，断面3中内偏幅度0–8 cm，概率15%，成因包括垂直倾角上偏( $>5^\circ$ )导致能量不足，以及夹泥灰岩的层理面弱化破碎效率。地质异质性进一步放大问题：长江–嘉陵江水系影响下，研究段含水率 $>10\%$ ，软化岩石模量( $E=15$  GPa)，模拟显示损伤区半径缩小至0.9 m，欠挖区应力残

余>20 MPa, 潜在诱发围岩松动。

## 结论

1. 本研究通过自主研发超欠挖快速检测设备对重庆大学城复线隧道三个实验断面的现场实测, 系统揭示了钻爆施工中超挖与欠挖的形成机制与控制路径。实测数据量化了“宁超勿欠”原则的双重效应: 初期超挖幅度达55 cm, 避免了欠挖风险但放大经济损失(估算8万元/100 m); 后期经验积累下, 欠挖概率降至15%, 但拱肩局部内偏仍需警惕。模拟验证了钻孔参数偏差(位置与倾角)的主导作用, 贡献率60%, 并确认地地质异质性和操作误差的放大效应。这些发现不仅深化了超欠挖多因素耦合模型, 还为中硬岩隧道提供了测量-模拟-优化的闭环框架。

2. 理论贡献在于: (1) 填补现场数据驱动的模拟验证空白,  $R^2=0.89$ 高于文献平均; (2) 量化“宁超勿欠”原则的经济-安全权衡, 推动从经验向数据转型; (3) 集成多传感器设备, 提升测量精度 $\pm 0.1$  mm, 专利潜力显著。实践价值体现在: 优化策略预计降低超挖率20%, 节省支护成本10%–15%。

## 参考文献

[1] 张志鹏, 程文明, 杜润, 等. 基于点云数据的隧道超欠挖计算方法[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28 (05): 155–159.

[2] Satici Ö, Hindistan A. Drilling and blasting as a tunnel excavation method[J]. Middle East Technical University, Department of Geological Engineering: Ankara, Turkey, 2006, 24.

[3] Girmscheid G, Schexnayder C. Drill and blast tunneling practices[J]. Practice periodical on structural design and construction, 2002, 7(3): 125–133.

[4] Salum A H, Murthy V. Optimising blast pulls and controlling blast-induced excavation damage zone in tunnelling through varied rock classes[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 85: 307–318.

[5] Yu T, Sun J, Wang J, et al. Study on the Propagation Law and Waveform Characteristics of a Blasting Shock Wave in a Highway Tunnel with the Bench Method[J]. Buildings, 2024, 14(9): 2802.

[6] 张宝刚, 潘文博, 王军华, 等. 钻爆法隧道爆破振动传播规律数值模拟——以深圳白芒河引排水隧道为例[J]. Advances in Geosciences, 2022, 12: 813.

[7] 郭云龙, 孟海利, 孙崔源, 等. 邻近既有铁路隧道衬砌爆破动力响应的影响规律[J]. 中国铁道科学, 2023, 44 (06): 103–112.

[8] 何理, 钟东望, 李鹏, 等. 下穿隧道爆破荷载激励下边坡振动预测及能量分析[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40 (07): 108–117.