

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.02.004

## 复杂岩性隧道超前切割爆破方法研究\*

杨志龙<sup>1a,1b</sup>, 钟冬望<sup>1a,1b</sup>, 白文良<sup>2</sup>, 赵云鹏<sup>2</sup>, 马建军<sup>1a,1b</sup>, 李腾飞<sup>1a,1b</sup>, 何理<sup>1a,1b</sup>, 司剑峰<sup>1a,1b,3</sup>, 蔡路军<sup>1a,1b</sup>

(1. 武汉科技大学 a. 理学院; b 湖北省智能爆破工程技术研究中心, 武汉 430065;

2. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300; 3. 中铁四院集团建设工程有限责任公司, 武汉 430065)

**摘要:** 针对复杂岩性隧道传统爆破开挖效果差的问题, 基于传统光面爆破与预裂爆破的研究, 在隧道周边局部存在软弱围岩情况下, 将软弱围岩区周边孔的爆破提前至掏槽孔爆破之后进行, 提出一种超前切割控制爆破方法。建立了准三维模型, 使用流固耦合(ALE)算法和 ANSYS/Ls-dyna 有限元分析软件, 对超前切割爆破方法与传统预裂、光面爆破方法进行了数值模拟对比研究, 结果表明: 相较于光面爆破与预裂爆破, 对超前切割爆破在隧道轮廓周边损伤深度分别降低了 6.85% 与 10.08%。结合仿真结果设计了现场爆破试验方案, 并开展了光面爆破及超前切割爆破方法的现场对比试验, 爆破结果表明: 采用超前切割的爆破方法后, 隧道的轮廓面成型效果好且软弱围岩区无掉块、坍塌情况, 同时超欠挖得到有效控制。对爆破后的断面进行三维断面扫描数据及统计结果表明: 相较于效果较好的光面爆破, 超前切割爆破的最大超挖降低了 35.98%、平均超挖降低了 25.60%, 混凝土消耗数量降低了 26.3%, 其平整度标准差提高了 24.29%。该方法经过现场实践验证, 在降低超挖的同时还可以减弱复杂岩性区内的爆破损伤, 提升隧道保留围岩平整度。

**关键词:** 隧道爆破; 复杂岩性; 超前切割爆破; 损伤控制; 三维扫描

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)02-0023-09

## Research on Advanced Cutting Control Blasting of Complex Lithologic Tunnel

YANG Zhi-long<sup>1a,1b</sup>, ZHONG Dong-wang<sup>1a,1b</sup>, BAI Wen-liang<sup>2</sup>, ZHAO Yun-peng<sup>2</sup>,  
MA Jian-jun<sup>1a,1b</sup>, LI Teng-fei<sup>1a,1b</sup>, HE Li<sup>1a,1b</sup>, SI Jian-feng<sup>1a,1b,3</sup>, CAI Lu-jun<sup>1a,1b</sup>

(1. a. College of Science; b Hubei Intelligent Blasting Engineering Technology Research Center,  
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

2. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group CO., LTD, Tianjin 300300, China;

3. China Railway Siyuan Survey And Design Group Co., LTD., Wuhan 430065, China)

**Abstract:** In response to the poor excavation effect of traditional blasting in complex lithology tunnels, a method called advanced cutting control blasting is proposed based on the research of traditional smooth blasting and pre-splitting blasting. This method involves conducting the blasting around weak surrounding rock areas after tunnel contouring hole blasting. A quasi-three-dimensional model was established, and numerical simulations were conducted using

收稿日期 (Date of reception): 2023-01-28

网络首发日期 (Published online): 2023-10-18

作者简介: 杨志龙 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事爆炸动力学及应用研究, (E-mail) clean1room@163.com。

通讯作者: 钟冬望 (1963-), 男, 教授、博士生导师, 主要从事工程爆破、控制爆破方面研究, (E-mail) zhongdw123@wust.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51904210, 52274136); 湖北省自然科学基金青年项目 (2022CFB594)

About the author: YANG Zhi-long (1998-), male, master candidate, mainly engaged in explosion dynamics and application research, (E-mail) clean1room@163.com.

Corresponding author: ZHONG Dong-wang (1963-), male, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in engineering blasting and controlled blasting research, (E-mail) zhongdw123@wust.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (51904210, 52274136), Hubei Natural Science Foundation Youth Program (2022CFB594)

the fluid-structure interaction (ALE) algorithm and ANSYS/LS-DYNA finite element analysis software to compare the advanced cutting control blasting method with traditional pre-splitting and smooth blasting methods. The results show that compared to smooth blasting and pre-splitting, advanced cutting control blasting reduced the depth of damage around the tunnel contour by 6.85% and 10.08%, respectively. Based on simulation results, field blast test plans were designed, and comparative tests between smooth surface blasting and advanced cutting control blasting methods were carried out. The blast results demonstrated that after adopting the advanced cutting control method, the tunnel contour had good shaping effects without block falling or collapse in weak surrounding rock areas, while over-excavation was effectively controlled. Three-dimensional cross-sectional scanning data and statistical results of post-blast sections indicated that compared to well-performing smooth surface blasting, maximum over-excavation decreased by 35.98%, average over-excavation decreased by 25.60%, concrete consumption decreased by 26.3%, and flatness standard deviation increased by 24.29%. This method has been verified through field practice as it reduces over-excavation while mitigating blast damage in complex lithology areas, thereby improving tunnel retaining rock flatness.

**Key words:** tunnel blasting; complex lithology; advanced cutting blasting; damage control; three-dimensional scanning

随着技术的进步,桥隧爆破开挖项目逐步趋于专业化管理和低成本化施工,而由于隧道工程施工地质环境复杂多变、爆破后隧道断面情况难以控制等原因,现有的隧道开挖技术在开挖精度及成型效果上面临挑战<sup>[1]</sup>。

目前结合地质预报进行钻爆设计,精细爆破和精确毫秒延期数码电子雷管的大量应用能有效地减少超欠挖<sup>[1,2]</sup>。光面爆破和预裂爆破是能够有效控制隧道爆破超欠挖的传统控制爆破手段,在大断面、破碎带频出、节理发育的软弱围岩条件中,光面爆破被广泛地研究并运用于隧道工程中<sup>[1,3-9]</sup>;而预裂爆破作为隧道爆破掘进中振动控制的主要方法也在隧道工程中被大量的研究<sup>[10-15]</sup>,更有将两者相结合既取得减振效果,又控制了围岩损伤的工程研究<sup>[16,17]</sup>,同时有工程研究表明,在对围岩损伤的角度上,光面爆破与预裂爆破相比能够产生更小的破坏作用<sup>[18]</sup>。除去药量的区别,光面爆破与预裂爆破更大的区别在于其起爆段别时间的不同,对延期时间的种种研究表明,多段别下爆破延时时间对应应力波在岩石中的传播有决定性的影响作用同时也影响着其他炮孔炸药的爆轰性能<sup>[19-21]</sup>。

综合国内外学者的大量研究成果,本文提出一种超前切割爆破的隧道掘进开挖方法,以解决复杂岩性下隧道爆破开挖断面难以成型、保留岩体损伤程度高、后续补救成本高等技术难题。通过数值仿真技术对光面爆破、预裂爆破以及超前切割爆破方法进行对比分析,并将该方法成功应用于隧道现场爆破开挖工程,取得了良好的控制效果。

## 1 工程概况

渝昆高铁云贵段站前一标位于云南省昭通市盐

津县,线路起于盐津县盐井镇,终于彝良县钟鸣镇,标段全长36.41 km,隧道3.5座,其中彝良隧道即本次研究依托工点,该段隧道最大埋深为746.30 m,进行研究的隧道部分位于浅埋段,埋深仅有82.90 m。

此处爆破超挖量、混凝土回填数量过大的问题自工程之初就一直存在,该段隧道主隧左线断面面积为111.22 m<sup>2</sup>,勘察之初就已经探明该段隧道地质情况破碎多变,由于施工影响,当前掌子面处围岩情况更加复杂,存在着明显节理、夹泥以及岩溶等不良地质条件,如图1,主要存在当爆破作业完成后受扰动的软弱岩层会随着最后一段起爆炸药损伤的岩石沿着节理、夹泥一同垮塌的现象,据初步研究,该现象不仅危及施工人员及生产设备,同时也是引起超挖量过大最主要的原因。

面对上述不良地质条件,传统光面爆破对于减少超欠挖、保护保留围岩起到的效果不能达到工程“安全生产、提质增效”的目的,故面对此种特殊、复杂的工程地质情况亟待一种更加行之有效的爆破施工方法。

## 2 超前切割爆破方法的数值仿真对比研究

超前切割爆破方法的核心思路是先掏槽,其次起爆软弱围岩区周边孔形成预裂缝,之后辅助孔起爆崩落岩石,最后对坚硬围岩区的周边孔进行光面爆破。由于仅在软弱围岩区进行预裂切割,故形成裂缝需要的能量更少,故相较于传统预裂爆破的装药量有一定的减少,且未爆破的辅助孔所在的岩体为不稳定围岩提供了短暂的支撑,并且形成的裂缝在减振的同时降低了接下来爆破对周边围岩产生的累积损伤,使得在最后崩落的辅助孔不影响到软弱围岩。通过数值模拟仿真,对超前切割爆破方法与

光面、预裂爆破方法在损伤方面进行对比论证。



图 1 隧道顶部存在夹泥的不良地质条件  
Fig. 1 Adverse geological conditions of mud trapping on the tunnel roof

### 2.1 有限元建模

模拟的目标首先是研究超前切割爆破与一般光面及预裂爆破的区别,故可利用 LS-Dyna 建立准三维平面模型进行研究讨论,建立模型厚度为 10 cm,长度为 2000 cm,宽度为 1300 cm,周边孔间距为 40 cm,隧道断面简化为半圆,炮孔的装药方式也简化为径向耦合装药,  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$  为对比测点,详细如图 2。

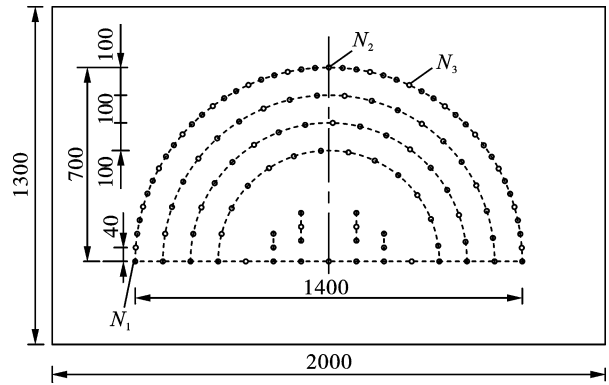


图 2 有限元模型尺寸示意图(单位:cm)  
Fig. 2 Dimension diagram of finite element model(unit:cm)

模型网格尺寸单位为厘米,与计算时间步长相匹配。该模拟运用流固耦合方法,岩石采用 \* MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CONCRETE 材料模型,该模型能够较好地表征岩石在爆破载荷作用下的损伤变化,且假设围岩均处于软弱围岩区,炸药采用 \* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 高能炸药材料模型,并采用 JWL 状态方程描述炸药爆炸过程中爆轰压力与体积之间的关系,空气则采用空白材料 \* MAT\_NULL 填充。炸药、岩石以及空气具体材料参数如表 1 ~ 3<sup>[22]</sup>。

表 1 岩石材料参数表

Table 1 Rock material parameters

密度 $\rho$ / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	剪切模量 G/GPa	归一化 内聚力 $F_1$	归一化 硬化压力 $F_2$	应变率 系数 S	压力硬化 指数 N	准静态单轴抗压 强度 $f_c$ /MPa
2440	17.6	0.79	1.6	0.007	0.61	40

表 2 炸药材料参数表

Table 2 Explosive material parameters

密度 $\rho$ / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	爆速 D/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	C-J 压力 $P_{CJ}$ /GPa	炸药状态方程常数						
			A/GPa	B/GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	E/GPa	
1.1	3800	37	852.4	18.02	4.6	1.30	0.38	10.2	

表 3 空气材料参数表

Table 3 Air material parameters

密度 $\rho$ / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	截止压力 $P_c$ /Pa	动态粘度 $MU$ /( $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^{-2}$ )	空气状态方程常数						
			$C_0 \sim C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	e	v	
0.0012	-1E-10	2.00E-05	0	0.4	0.4	0	0	1	

注:表 1、2、3 中无单位参数皆为无量纲参数

### 2.2 损伤深度对比

改变起爆段别顺序如图 3 所示,遵循 I - II - III 区依次起爆的规律,对比预裂爆破、光面爆破与超前切割控制爆破的损伤范围。其中关于完全损伤边界的定义,依据 HJC 模型中对损伤以等效塑性应变和

塑性体积应变的累积来描述,如式(1)。

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{D_1 (P^* + T^*)^{D_2}} \quad (1)$$

式中:  $D$  为损伤因子;  $\Delta \epsilon_p$  为等效塑性应变;  $\Delta \mu_p$  为塑性体积应变;  $D_1$  与  $D_2$  为材料损伤常数;  $P^*$  为

材料所能承受的极限压应力; $T^*$ 为材料所能承受的极限拉应力。考虑极限情况,以爆破前后密度和泊松比没有变化的前提下进行简化为式(2)。

$$D = 1 - (1 - \eta)^2 \quad (2)$$

式中: $\eta$ 为爆破前后岩体中纵波变化率;此时以

岩体中纵波变化率 $\eta > 10\%$ 为损伤判定界限;可以得到 $D = 0.19$ 时为其损伤因子阈值<sup>[22]</sup>。在后处理界面中将损伤求解结果进行云图渲染,有图4,其中深灰色为损伤岩体。

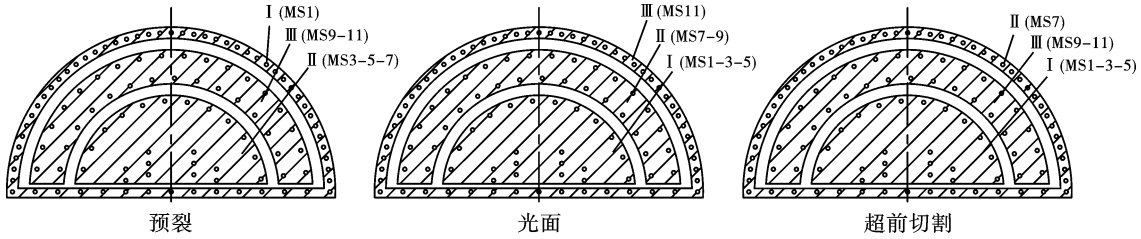


图3 预裂、光面及超前切割起爆段别示意图

Fig. 3 Initiation sequence of presplit, smooth and advanced cutting blasts

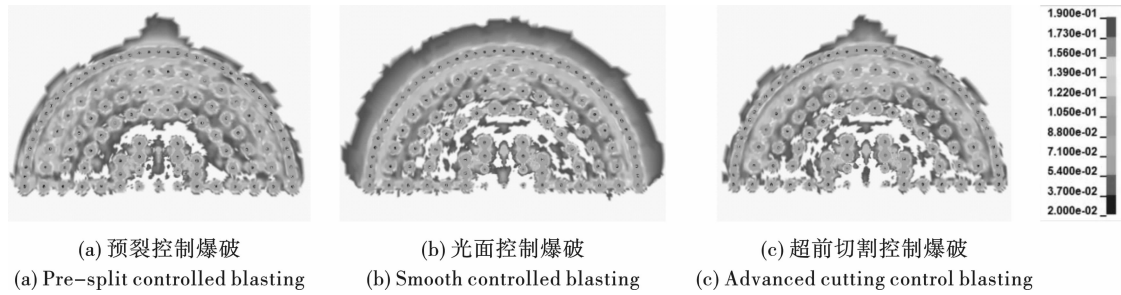


图4 预裂、光面爆破与超前切割的损伤范围对比图

Fig. 4 Damage area comparison diagram of presplit, smooth blasting and advanced cutting blasting

在损伤云图中可以看出超前切割控制爆破和预裂控制爆破对保留围岩的损伤明显小于光面控制爆破,这一点与前人的研究结论适用范围有所差别,值得指出的是,传统严格意义上的预裂爆破周边孔装药量是大于光面爆破的,故在工程试验中的预裂虽然能起到减振的作用但一般会对围岩造成更严重的

损伤,但在模拟中的相同药量前提下,提前分离围岩与待开挖区域就能显著降低分离后爆破对围岩的累计损伤。

对云图进行分析,分别在拱脚、拱顶中心及拱顶一侧选取一点,即图2中 $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 三点,对比三者模拟中的损伤深度,如图5。

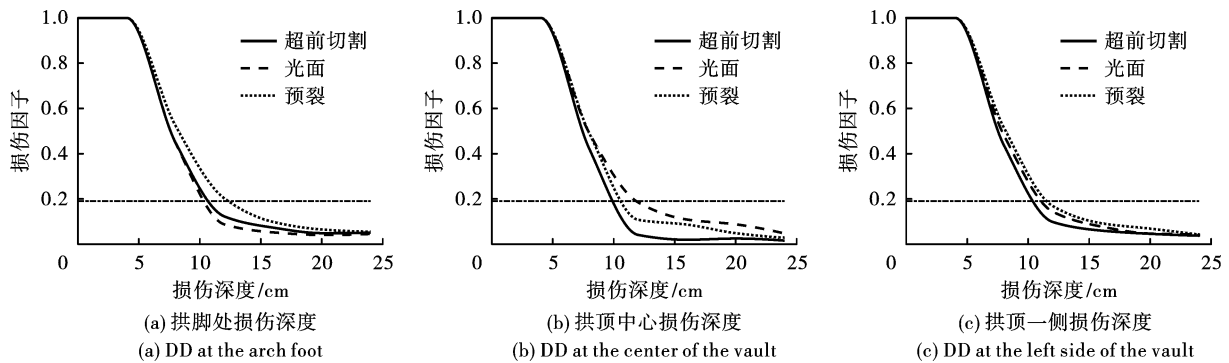


图5 拱脚、拱顶与拱侧的损伤深度对比图

Fig. 5 Damage depth comparison diagram of arch foot, arch top and arch side

在 $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 三点处,超前切割方法相较于预裂爆破以及光面爆破损伤深度都处于较低的水平,在 $N_3$ 点拱顶一侧处,即保护目标软弱围岩处,超前切割方法的损伤深度处于三种起爆次序方法中最低的水平,相较于光面爆破与预裂爆破的损伤深度分

别降低了16.46%与6.29%;而在 $N_2$ 点拱顶处超前切割法的损伤仍处于最低水平,但相对于其他两者并不显著,与光面爆破和预裂爆破对比仅有6.15%及10.60%的降低;最后在 $N_1$ 点拱脚处,光面爆破对保留围岩的损伤处于最低的水平,而预裂爆破产

生了最大的损伤,与这两者相比较,超前切割的损伤水平相较于预裂爆破降低了 13.53%,相较于光面爆破提高 3.4%。综合来看,超前切割方法对于围岩的损伤深度相对于传统光面爆破平均降低了 6.85%,相对于传统预裂爆破平均降低了 10.08%。故从保留围岩损伤的程度来考虑,在同等装药的前提下,超前切割方法对围岩的保护效果最优。

### 3 爆破试验方案设计

在本研究工程项目中,围岩为Ⅳ级围岩夹泥特

殊地质段,掘进方法为两台阶法,其中上断面面积为 81.38 m<sup>3</sup>,进尺为 3.5 m,在炮孔利用率为 90%的前提下,经过有限元模拟的初期探索研究,根据以往设计经验,结合现场大断面中既存在硬岩也存在夹泥的实际情况,设计单耗为 0.94 kg/m<sup>3</sup>。

现给出两种方案,图 6 为方案一光面爆破与方案二超前切割爆破的孔网与段别对比图;图 7 为周边孔装药对比图;方案一光面爆破装药具体装药参数如设计表 4,方案二超前切割装药设计如表 5。

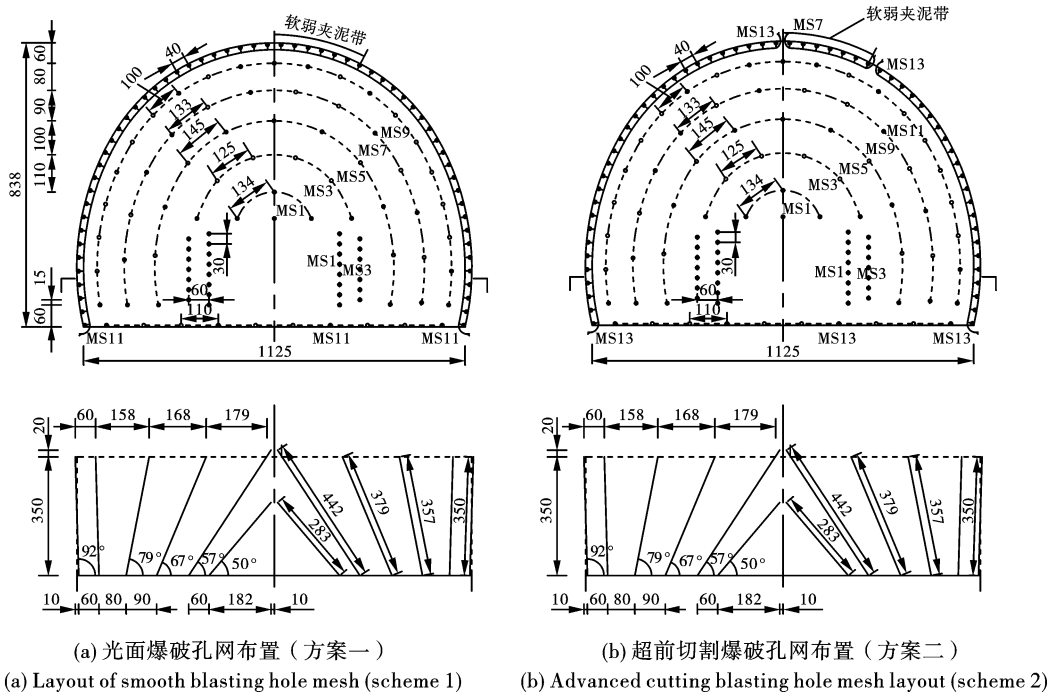


图 6 钻爆设计对比图(单位:cm)

Fig. 6 Drill blast design comparison chart(unit:cm)

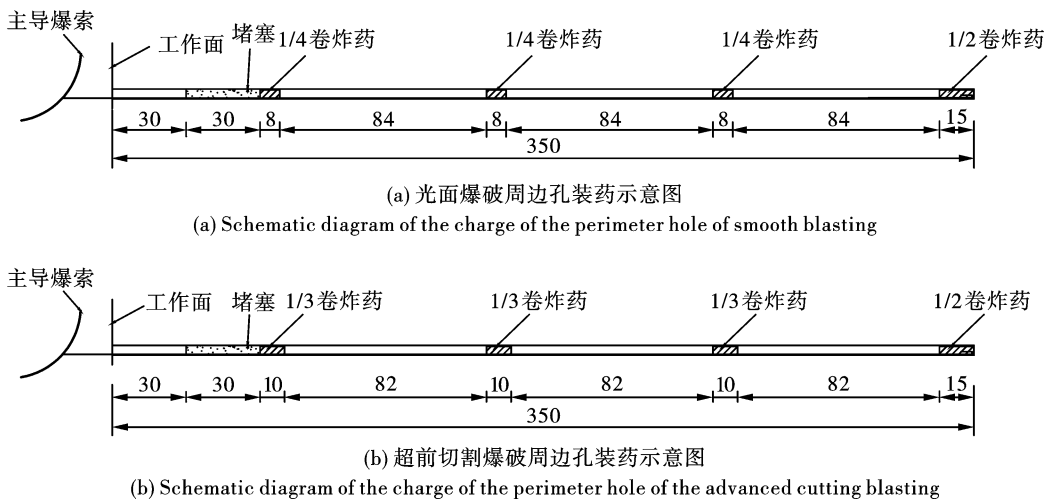


图 7 周边孔装药对比示意图(单位:cm)

Fig. 7 Comparison charging diagram of peripheral holes(unit:cm)

表4 方案一光面爆破装药设计表

Table 4 Smooth blasting charge design table

炮孔名称	炮孔数量/个	孔长/cm	单孔药量/条	药量/kg	雷管段别
掏槽孔(短)	14	283	8.0	33.6	1
掏槽孔(长)	16	426	11.0	52.8	3
辅助孔	35	370	7.5	78.8	1、3、5、9
内圈孔	21	350	4.0	25.2	9
底孔	10	370	9.0	27.0	11
周边孔	58	350	1.3	21.8	11
总计	154			239.2	

表5 方案二超前切割装药设计表

Table 5 Advanced cutting blasting charge design table

炮孔名称	炮孔数量/个	孔长/cm	单孔药量/条	药量/kg	雷管段别
掏槽孔(短)	14	283	8.0	33.6	1
掏槽孔(长)	16	426	11.0	52.8	3
辅助孔	35	370	7.5	78.8	1、3、5、9
内圈孔	21	350	4.0	25.2	11
底孔	10	370	9.0	27.0	13
周边孔(切割)	7	350	1.5	3.2	7
周边孔(光面)	51	350	1.3	19.9	13
总计	154			240.4	

图中的方案一光面爆破钻爆的雷管段别顺序依次为1、3、5、7、9、11,记为 $M_s:1-3-5-7-9-11$ ;方案二超前切割钻爆方案的雷管段别顺序从掏槽到周边,依次为1、3、5、9、11、13(7),记为 $M_s:1-3-5-9-11-7(13)$ 。

## 4 现场试验

### 4.1 现场试验结果

前三次依照方案一光面爆破进行施工,出现有夹泥坍塌、超挖过大的情况,第四次依照方案二超前切割进行施工,第四次爆破完成后进入隧道检视,辅助孔未出现盲炮,软弱围岩带未出现掉块、垮塌,整体切割效果较好,半孔率有85%以上,夹泥软弱围岩带半孔如图8,爆堆堆积均匀,块度大小适宜装车,同时本次掘进在排险完成时拱顶右侧夹泥软弱围岩带保留围岩完整,说明周边孔切割的药量适中,能够在不剧烈损伤岩体的前提下,取得良好的切割效果,证明了超前切割的方法在实际隧道掘进中能够进行工程实践运用。

### 4.2 不同爆破方法的超欠挖对比

在观测结果的基础上,利用三维断面扫描对隧道超欠挖效果进行分析<sup>[23]</sup>。

表6给出包含试验组的四次爆破超挖工程数量,这四次内爆破掘进围岩情况较为稳定,一直存在右侧拱顶有夹泥软弱围岩带的特殊地质条件,对比

这四次超挖相关的各项数值,利用超前切割爆破的掘进方法取得了最好的结果,就混凝土消耗方量这一方面,相较于效果较好的第二、三次光面爆破工程量均值,超前切割的混凝土消耗数量降低了26.3%,最大超挖降低了35.98%,平均超挖降低了25.60%。



图8 隧道拱顶侧面软弱带排险后形成的圆顺岩壁  
Fig. 8 Round rock wall formed after the soft zone on the side of the tunnel vault is removed

工程实践中更关注隧道爆破开挖的平均超挖值,在表6中,超前切割方法在平均超挖这一项取得了最好的结果,但直接运用平均超挖评价超欠挖效果不足以说明问题,当超挖与欠挖都存在较高峰值时进行均值统计可能出现平均超挖小,但实际爆破效果差的问题,为解决该问题,引入对保留围岩的平整度的评价,据此对三维断面扫描数据进行分析,如图9,就平整度而言第三次的爆破施工效果要优于

第二次爆破施工,这与表6中平均线性超挖这一项的两者比较上出现了相反的结论,这一差异证明了

研究围岩平整度的必要性。

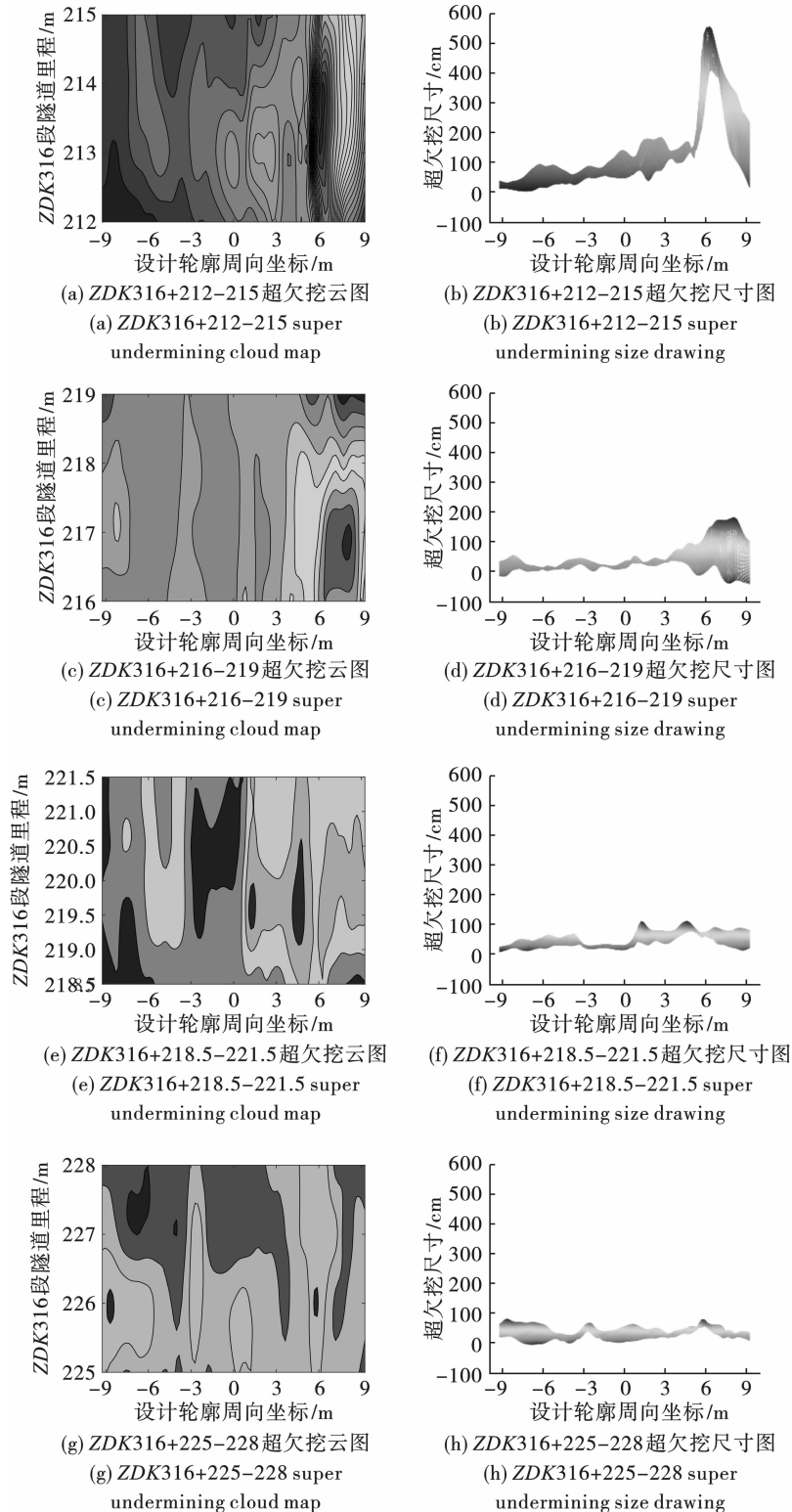


图9 隧道三维断面扫描数据分析云图

Fig. 9 Analysis cloud image of tunnel 3D cross section scanning data

对四次爆破掘进的三维断面扫描的数据进行分析,利用数据的标准差来比较四次爆破环向超欠挖

(OUE)的效果,如图10,图中第四次超前切割的爆破方法依旧取得了最优的结果,并且相较于前三次

中第三次光面爆破掘进的环向超挖标准差降低了24.29%,充分说明就提高环向平整度而言超前切割爆破方法具有良好的效果。

表6 爆破掘进超挖工程数量表

Table 6 Overcutting quantity table of blasting tunneling

次序	开挖方法	米均超挖量/m <sup>3</sup>	回填倍数/%	最大超挖/m	平均超挖/m
第一次	方案一光面爆破	28.535	659.768	4.843	1.477
第二次	方案一光面爆破	6.958	160.879	1.144	0.360
第三次	方案一光面爆破	9.881	228.468	0.949	0.511
第四次	方案二超前切割	6.203	143.422	0.670	0.324

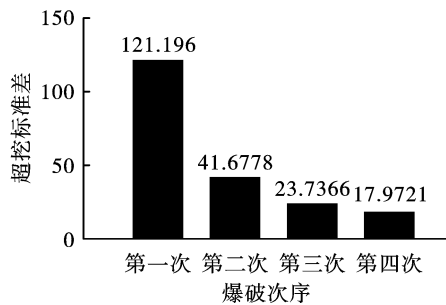


图10 四次爆破掘进三维断面扫描整体均值环向超挖标准差

Fig. 10 Standard deviation of overall overcut in 3D sectional scan of four blasting tunneling

## 5 结论

本文提出一种结合光面爆破与预裂爆破的隧道爆破开挖新方法,利用 Ls-dyna 有限元模拟软件对超前切割爆破方法与传统爆破方法进行数值模拟对比分析,并成功将该方法应用到实际生产中。主要得到了以下成果与结论。

(1) 综合而言,相较于传统光面爆破与预裂爆破,超前切割爆破方法在隧道轮廓周边的损伤深度相较于光面爆破和预裂爆破平均降低了6.85%与10.08%。

(2) 超前切割爆破方法在降低超挖及混凝土回填方面,比光面爆破的最大超挖降低了35.98%、平均超挖降低了25.60%,混凝土消耗数量降低了26.3%。

(3) 经分析后的三维断面扫描数据表明,相较于较好的光面爆破,利用超前切割爆破方法的隧道保留围岩平整度标准差降低了24.29%,综合说明了超前切割爆破方法相较于传统隧道光面爆破的方法,可以减弱复杂岩性区内的爆破损伤,在降低超挖的同时还能提升在软弱围岩区内的隧道保留围岩平整度。

### 参考文献 (References)

[1] 郭建,李兵,刘桂勇,等. 钻爆法施工隧道超欠挖控制研究[J]. 工程爆破,2021,27(1):79-84.

- [1] GUO Jian, LI Bing, LIU Gui-yong, et al. Study on control of backbreak and underbreak in tunnel excavation by drilling-and-blasting [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(1):79-84. (in Chinese)
- [2] 刘敦文,江树林,唐宇,等. 穿越脉状破碎断层隧道光面爆破技术研究[J]. 工程爆破,2021,27(2):79-84.
- [2] LIU Dun-wen, JIANG Shu-lin, TANG Yu, et al. Research on smooth blasting technology of tunnel passing through broken vein fault [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(2):79-84. (in Chinese)
- [3] 刘赶平. 大断面隧道光面爆破设计[J]. 爆破,2019,36(2):65-71.
- [3] LIU Gan-ping. Smooth blasting design for large cross-section tunnel excavation [J]. Blasting, 2019, 36(2):65-71. (in Chinese)
- [4] 丁祥. 互层岩体隧道爆破超欠挖控制技术研究[J]. 铁道工程学报,2022,39(3):75-80.
- [4] DING Xiang. Research on the control technology of over-under-excavation of tunnel blasting in interbedded rock masses [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(3):75-80. (in Chinese)
- [5] 王振浩. 黄柏山隧道光面爆破技术[J]. 爆破,2022,39(2):100-106.
- [5] WANG Zhen-hao. Smooth blasting technology of huang-baishan tunnel [J]. Blasting, 2022, 39(2):100-106. (in Chinese)
- [6] 姚洪瑞. 软弱围岩大断面隧道光面爆破[J]. 爆破,2020,37(2):42-47.
- [6] YAO Hong-rui. Smooth blasting for large cross-section tunneling in weak surrounding rocks [J]. Blasting, 2020, 37(2):42-47. (in Chinese)
- [7] 范勇,孙金山,贾永胜,等. 高地应力硐室光面爆破孔间应力相互作用与成缝机制[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(6):1352-1365.
- [7] FAN Yong, SUN Jin-shan, JIA Yong-sheng, et al. Stress interaction and crack penetration mechanism between smooth blasting holes for tunnel excavation under high in-situ stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2023, 42(6):1352-1365. (in Chinese)
- [8] 朱耀璋. 高地应力互层软岩隧道爆破控制技术研究[J]. 北方交通, 2022(12):57-60.
- [8] ZHU Yao-zhang. Research on blasting control technology of interbedded soft rock tunnel with high crustal stress[J]. Northern Communications, 2022(12):57-60. (in Chinese)
- [9] 李向平, 龚伟毅, 张震. 隧道仰拱部位光面爆破技术及工程应用[J]. 爆破, 2023, 40(2):69-74.
- [9] LI Xiang-ping, GONG Wei-yi, ZHANG Zhen. Smooth blasting technology for tunnel inverted arch and its engineering application[J]. Blasting, 2023, 40(2):69-74. (in Chinese)
- [10] 方宁, 杨成和, 孙俊鹏, 等. 超小净距隧道单双层预裂爆破振动研究[J]. 铁道建筑, 2015(7):58-60.
- [10] FANG Ning, YANG Cheng-he, SUN Jun-peng, et al. Study on single and double layer pre-splitting blasting vibration of ultra-small clean distance tunnel[J]. Railway Engineering, 2015(7):58-60. (in Chinese)
- [11] 李壮清. 地铁隧道中双层预裂爆破技术的应用[D]. 大连:大连理工大学, 2016.
- [11] LI Zhuang-qing. The application of a technology of double-row pre-splitting blasting in Subway tunnel[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [12] 杨忠武. 浅埋隧道爆破周边预裂缝减振法减振效果探究[J]. 采矿技术, 2019, 19(2):135-137.
- [12] YANG Zhong-wu. Study on vibration reduction effect of pre-crack method around blasting of shallow buried tunnel[J]. Mining Technology, 2019, 19(2):135-137. (in Chinese)
- [13] 吴波, 王汪洋, 徐世祥, 等. 聚能预裂爆破技术在林家岙隧道中的应用[J]. 工程爆破, 2020, 26(3):55-62.
- [13] WU Bo, WANG Wang-yang, XU Shi-xiang, et al. Application of cumulative pre-split blasting technology in Linjiaao tunnel[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(3):55-62. (in Chinese)
- [14] 徐行军, 黄树榕, 程玉泉. 公路隧道复式交叉跨越混联预裂爆破网路技术研究[J]. 成都工业学院学报, 2022, 25(3):47-50.
- [14] XU Xing-jun, HUANG Shu-rong, CHENG Yu-quan. Research on the technology of compound crossing and mixed presplitting blasting network in highway tunnel[J]. Journal of Chengdu Technological University, 2022, 25(3):47-50. (in Chinese)
- [15] 孙登林. 双层预裂爆破技术在地铁隧道施工中的应用及减震效果分析[J]. 黑龙江科学, 2023, 14(4):141-143.
- [15] SUN Deng-lin. Application of double-layer pre-split blasting technology in subway tunnel construction and analysis of damping effect[J]. Heilongjiang Science, 2023, 14(4):141-143. (in Chinese)
- [16] 危皓, 薛江龙, 陈宗祥, 等. 大断面软弱围岩隧道爆破振动控制试验研究[J]. 铁道建筑, 2022, 62(3):136-140.
- [16] WEI Hao, XUE Jiang-long, CHEN Zong-xiang, et al. Experimental study on blasting vibration control of tunnel with large section and soft surrounding rock[J]. Railway Engineering, 2022, 62(3):136-140. (in Chinese)
- [17] 张波. 大断面隧道台阶法爆破开挖围岩损伤特征研究[J]. 爆破, 2023, 40(1):69-76.
- [17] ZHANG Bo. Damage characteristics of surrounding rock for large-section tunnel excavated by bench blasting[J]. Blasting, 2023, 40(1):69-76. (in Chinese)
- [18] 郭尧, 袁甲. 光面与预裂爆破对隧道围岩损伤的试验研究[J]. 工程爆破, 2011, 17(4):31-35.
- [18] GUO Yao, YUAN Jia. Test study on damage of surrounding rock from smooth and presplit blasting[J]. Engineering Blasting, 2011, 17(4):31-35. (in Chinese)
- [19] 罗开军. 孔内孔间微差爆破间隔时间的合理选择[J]. 金属矿山, 2006(4):4-6.
- [19] LUO Kai-jun. Rational selection of delay time in in-hole and between-holes microsecond blasting[J]. Metal Mine, 2006(4):4-6. (in Chinese)
- [20] 张志呈, 熊文, 齐曼卿. 浅谈逐孔起爆技术时间间隔的选取[J]. 爆破, 2011, 28(2):45-48.
- [20] ZHANG Zhi-cheng, XIONG Wen, LIN Man-qing. Discussion of delay interval election of hole by hole initiation[J]. Blasting, 2011, 28(2):45-48. (in Chinese)
- [21] 郭侃, 雷战, 艾欣, 等. 延时时间对岩石爆破效果影响的探讨[J]. 工程爆破, 2021, 27(2):85-90.
- [21] GUO Kan, LEI Zhan, AI Xin, et al. Discussion on the influence of delay time on rock blasting effect[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(2):85-90. (in Chinese)
- [22] 李腾飞, 钟冬望, 司剑峰, 等. 基于复合消能爆破技术的海底基坑开挖数值模拟研究[J]. 爆破, 2023, 40(1):139-146.
- [22] LI Teng-fei, ZHONG Dong-wang, SI Jianfeng, et al. Numerical simulation research on submarine foundation pit excavation based on energy dissipation blasting technology[J]. Blasting, 2023, 40(1):139-146. (in Chinese)
- [23] 李瑶, 嵯一, 吴勇生, 等. 基于三维激光扫描技术的超欠挖算法在隧道开挖中的应用[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(10):200-204.
- [23] LI Yao, ZHUO Yi, WU Yong-sheng, et al. Application of over-under-cut algorithm in tunnel excavation based on 3D laser scanning technology[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(10):200-204. (in Chinese)