

# 张家岩隧道水平层状泥岩段爆破优化研究

陈正林<sup>1</sup>, 蒲文明<sup>1,2</sup>, 陈 钊<sup>1</sup>, 潘家奇<sup>1</sup>, 马龙浩<sup>2</sup>, 任 松<sup>2</sup>

(1. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100048; 2. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 以重庆江习张家岩Ⅳ级泥岩段隧道为爆破研究对象, 根据张家岩隧道实际工程的地质结构与地层岩性, 基于 X 射线衍射试验和室内力学试验, 获得泥岩的基本物理力学参数。从微差、孔间距、孔径、装药量四个方面综合分析其对爆破效果的影响, 采用正交试验制定了泥岩隧道爆破模拟方案, 并借助 ANSYS/LS-DYNA 显示动力分析程序, 对隧道的爆破参数进行优化, 得到了泥岩隧道的爆破优化方案, 通过对比分析, 筛选出最优爆破方案。最后, 将最优爆破方案与现场测试结果进行对比, 结果表明模拟结果和测试结果基本吻合, 且优化后的爆破效果要明显好于原爆破效果。研究成果可在类似隧道提出针对性爆破参数设计建议并推广应用。

**关键词:** 泥岩隧道; 爆破优化; 数值模拟

中图分类号: TU45; O382.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)06-0865-08

## Research on blasting optimization of horizontal layered mudstone section in Zhangjiayan Tunnel

CHEN Zhenglin<sup>1</sup>, PU Wenming<sup>1,2</sup>, CHEN Fan<sup>1</sup>, PAN Jiaqi<sup>1</sup>, MA Longhao<sup>2</sup>, REN Song<sup>2</sup>

(1. Power China Road Bridge Group Co. Ltd., Beijing 100048, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Taking the Zhangjiayan IV mudstone section tunnel of Chongqing Jiangxi as the blasting object, according to the geological structure and lithology of the actual project of the Zhangjiayan tunnel, the basic physical and mechanical parameters of the mudstone were obtained based on X-ray diffraction test and laboratory mechanical test. From the four aspects of the differential, hole spacing, aperture, and charge amount, the impact of the blasting on the blasting effect was analyzed comprehensively. The simulation scheme of the mudstone tunnel blasting was formulated using orthogonal test, and the dynamic analysis program was displayed with ANSYS/LS-DYNA. The blasting parameters were optimized to obtain a blasting optimization program for a mudstone tunnel. Through comparative analysis, an optimal blasting scheme was selected. Finally, the optimal blasting scheme is compared with the field test results. The results show that the simulation results are basically consistent with the test results, and the optimized blasting effect is obviously better than the original blasting effect. The research results can be proposed in a similar tunnel to the design of targeted blasting parameters and promote their application.

**Key words:** mudstone tunnel; blasting optimization; numerical simulation

随着我国隧道工程建设的不断发展, 隧道爆破施工中所遇到的地质问题也变得愈加复杂, 尤其对于西南地区, 广泛分布着砂质泥岩体, 该类岩体为典型的极软岩, 在该围岩中进行钻爆法开挖, 极易发生超欠挖现象, 严重影响隧道施工安全及围岩变形稳定性。

目前, 国内外相关学者对隧道光面爆破技术、作用原理等都做了较为深入的研究, 黄宝龙<sup>[1]</sup>等基于工程类比与分析计算的方法, 综合考虑炮眼直

径与不耦合系数、孔深和角度、炮眼间距、炮眼数目、总装量、起爆顺序以及装药结构等方面因素, 对京承高速公路工程横城子隧道的爆破参数进行了计算, 最终获得适合该隧道爆破施工的光爆参数; 王立功<sup>[2]</sup>阐述了光面爆破作用机理, 并借助工程实例讨论了光面爆破参数的计算方法; 顾义磊<sup>[3]</sup>等从超欠挖量、炮眼孔痕率以及围岩损伤程度三个方面提出了光面爆破质量检验标准; 安静<sup>[4]</sup>通过工程类比及经验分析的方法对砂质泥岩隧道

收稿日期: 2018-03-31

修改稿日期: 2019-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774057)

第一作者: 陈正林(1970—), 男, 高级工程师, 主要从事隧道工程相关研究。E-mail: 842149198@qq.com

通信作者: 任 松(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩石力学与工程方面的教学和研究工作。E-mail: re\_rwx@cqu.edu.cn

光面爆破技术参数进行了优化设计;杨勇<sup>[5]</sup>对巷道光面爆破参数的优化设计进行了相关研究;宗琦<sup>[6]</sup>对软弱岩石的爆破破坏特征进行了分析,基于此,通过理论分析构建了巷道掘进时光爆参数的结构模型,并结合工程实践,进行参数优化,最终得到适合软岩巷道距今施工的光面爆破参数;汪雪清<sup>[7]</sup>等以实验巷道为研究对象,综合考虑各种因素,通过工程类比和计算分析的方法,获得了适合该巷道光面爆破参数及技术措施。

根据以上研究可知,软弱围岩隧道光面爆破参数优化一般是通过工程类比以及经验分析的方法进行分析研究,抑或采用计算分析的方法,并在工程实践中进行进一步的优化与完善,而通过爆破过程数值模拟及现场验证对比分析的研究还需要进一步的完善与补充。基于此,本文采用 ANSYS/LSDYNA 软件对重庆江习张家岩隧道泥岩段的爆破参数进行了优化研究,以有效保证隧道爆破施工安全、施工质量、施工效率,降低爆破施工成本。

1 张家岩隧道爆破模拟

1.1 工程概况

张家岩隧道隧址区内地形最高点标高 750.52 m,位于右线中部 YK55+380 山脊线上,

最低点标高 586.23 m,位于右线进洞口 YK53+930 处。隧道内轮廓面为拱高 7.05 m,上半圆半径为 5.45 m 的三心圆曲边墙结构,净空面积 64.28 m<sup>2</sup>,周长 31.17 m。

隧道左洞起讫里程为:K53+950~K56+295,右线起讫里程为:YK53+930~YK56+300,最大埋深 135.92 m。隧道爆破炮孔布置如图 1 所示。

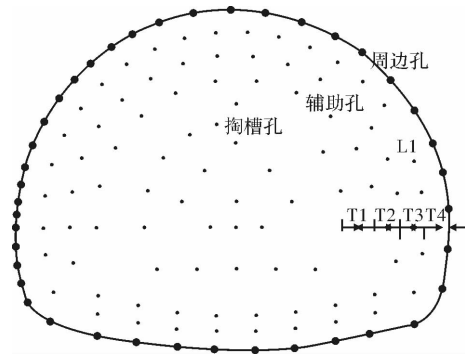


图 1 隧道爆破炮孔布置图

Fig. 1 Tunnel blasting hole layout

遂址区的围岩类别主要是 V 级泥岩、IV 级砂岩、IV 级泥岩。在爆破的施工的过程中,必须按照标准控制循环进尺和装药量,尽可能降低爆破振动。全断面爆破时,按起爆顺序依次分别装入多段毫秒电雷管。爆破参数设计见表 1 和表 2。

表 1 隧道洞身上导洞开挖爆破参数表

Tab. 1 The upper excavation blasting parameters

序号	炮眼名称	炮孔直径	炮孔数	装药结构	药卷	单孔装药量	小计	起爆毫秒雷管级别
1	掏槽孔	42	1.5	5	连续	0.6	3	1
2	辅助孔	42	1.3	48	连续	0.4	19.2	3、5、7
3	周边孔	42	1.3	55	间隔	0.15	8.25	9
4	共计			108			30.45	
5	开挖面积				46.7 m <sup>2</sup>			
6	炮孔个数				2.3 个/m <sup>2</sup>			
7	单位用量				0.65 kg/m <sup>2</sup>			
8	利用率				88%			
9	预计进尺			1.2 m/每循环, 2.4 m/d, 72 m/月				
10	预计药量			30.45 kg/每循环, 60.9 /d, 1 827 kg/月				

表 2 隧道洞身下导洞开挖爆破参数表  
Tab. 2 The lower excavation blasting parameters

序号	炮眼名称	炮孔直径	炮孔深	炮孔数	装药结构	药卷	单孔装药量	小计	起爆毫秒雷管级别
1	二台孔	42	1.3	29	连续	32	0.3	8.7	5
2	底板孔	42	1.3	19	连续	32	0.3	5.7	3
3	共计			48				14.4	
4	开挖面积					30.3 m <sup>2</sup>			
5	炮孔个数					1.6 个/m <sup>2</sup>			
6	单位用量					0.43 kg/m <sup>2</sup>			
7	利用率					88%			
8	预计进尺				1.2 m/每循环, 2.4 m/d, 72 m/月				
9	预计药量				14.4 kg/每循环, 28.8 kg/d, 864 kg/月				

1.2 室内力学试验

在研究泥岩段隧道爆破机制之前, 需要首先清楚泥岩的矿物成分及基本力学性质, 这是开展爆破研究的前提.

1.2.1 泥岩矿物成分分析

基于不同的矿物具有不同的晶体构造, 结合 X 射线的衍射原理, 根据衍射峰值计算出晶面间距, 并与已知表对照, 即可确定泥岩的物质成分. 本次试验采用日本理学 D/MAX-1200 转靶 X 射线衍射仪, 对已制备好的样本进行定性分析, 并在定性分析的基础上, 进行精确的定量分析.

通过泥岩的 X 衍射图(图 2), 可以得出: 泥岩的主要成分为高岭石、绿泥石等粘土矿物以及石英. 其中, 石英占 60%~70%左右, 粘土矿物占 30%~40%左右; 泥岩的天然含水率 $\omega_0=0.491\%$ .

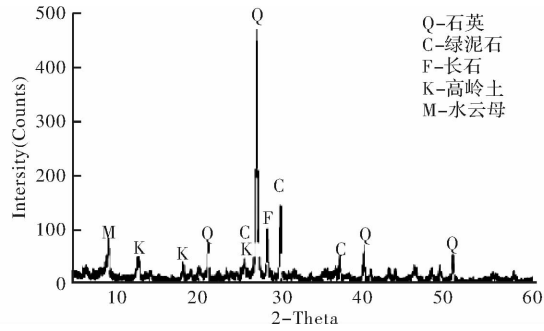


图 2 泥岩矿物成分

Fig. 2 Mudstone mineral composition

1.2.2 泥岩基本力学试验

采用重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室 AGI250 电子拉压材料试验机, 对泥岩进行基本力学试验, 得到的基本力学参数如表 3 所示.

表 3 泥岩常规力学参数表

Tab. 3 Mudstone conventional mechanical parameters

岩样	单轴抗压 强度 /MPa	单轴抗拉 强度 /MPa	弹性模 量/GPa	内摩擦 角/°	粘聚力 /MPa
泥	57.2	2.44	4.13	26.57	1.64

1.3 模型建立

基于张家岩隧道工程实际, 结合现场爆破施工方案, 建立三维有限元模型, 如图 3. 模型尺寸 20 m×20 m×2 m, 计算模型根据隧道的实际尺寸(洞高 7.05 m, 宽 10.66 m), 隧道建在Ⅳ级泥岩中. 对模型进行了简化, 不考虑重力与地应力对隧道爆破模拟结果的影响, 这是因为重力与地应力和爆破所产生的爆破应力波相比较小.

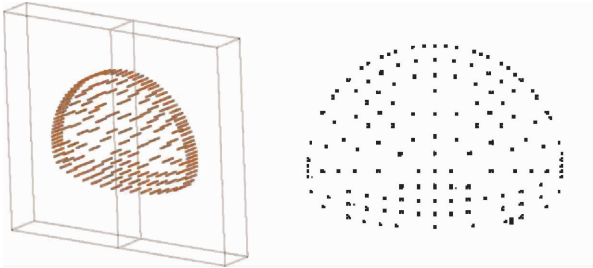


图 3 模型示意图

Fig. 3 Blasting model diagram

1.4 材料模型和状态方程的构建

本文模拟隧道爆破涉及岩石、空气、炸药三种材料, 具体材料模型及状态方程如下:

(1)泥岩材料模型

泥岩的材料模型选用弹塑性材料, 各项参数如表 4 所示.

表 4 岩石的各项参数

Tab. 4 Rock parameters

名称	密度/kg·m <sup>-3</sup>	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	内摩擦角/°	粘聚力/MPa
泥岩	2 550	12.39	0.29	3.66	26.57	1.64

该材料模型与应变率相关, 可以用应变来考虑失效. 可以通过在 0(仅随动硬化)和 1(仅各向同性硬化)间调整硬化参数  $\beta$  来选择各向同性或随动硬化. 应变率用 Cowper-Symonds 模型来建立, 用与应变率有关的因数表示屈服应力.

$$\sigma_y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{eff}^p) \quad (1)$$

式中:  $\sigma_0$  为初始屈服应力;  $\epsilon$  为应变率;  $c$  和  $p$  为 Cowper Symonds 应变率参数;  $\beta$  为硬化指数( $0 < \beta < 1$ );  $\epsilon_{eff}^p$  为有效塑性应变,  $E_p$  由下式给出:

$$E_p = \frac{E_{tan} E}{E - E_{tan}} \quad (2)$$

式中,  $E$  为杨氏模量,  $E_{tan}$  为切成模量.

#### (2) 炸药材料模型及状态方程

炸药采用 LS-DYNA 中自带的高强爆炸模型, 涉及的主要参数有炸药的密度、爆速、爆压, 并通过 JWL 状态方程来描述其爆炸特性, 其状态方程为

$$P_e = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (3)$$

式中:  $E_0$  为炸药燃烧质量分数;  $P_e$  为来自于状态方程的炸药爆轰产物压力;  $V$  为相对体积;  $E$  为单位体积的内能密度;  $A, B, R_1, R_2, \omega$  为输入参数. 基于现场爆破方案, 本文选择乳化炸药来进行模拟, 炸药的各参数如表 5 所示.

表 5 乳化炸药各项参数

Tab. 5 Emulsion explosive parameters

材料名称	速度 $\rho$ /kg·m <sup>-3</sup>	爆速 $D$ /m·s	PCJ 压力/GPa	$A$	$B$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0$
乳化炸药	1 200	5 000	7.62	326.42	5.8	5.80	1.56	0.57	2.67

#### (3) 空气材料模型及其状态方程

空气状态方程通过 LINEAR \_ POLYNOMIAL 来进行描述, 线性多项式状态方程为

$$P_a = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \mu = \frac{1}{V} - 1 \quad (4)$$

式中:  $P_a$  为爆轰压力;  $E$  为内能;  $V$  为相对体积.

表 6 空气的各项参数

Tab. 6 Air parameters

材料参数	速度/kg·m <sup>-3</sup>	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	比体积 $\mu$	比内能/Pa	初始相对体积 $V_0$
空气	1.22	0	0	0	0.4	0.4	0	1.4	2.5E5	1.0

## 2 计算结果分析

根据张家岩隧道工程原有的爆破参数, 通过数值模拟, 得到Ⅳ级泥岩的原爆破成型模拟结果.

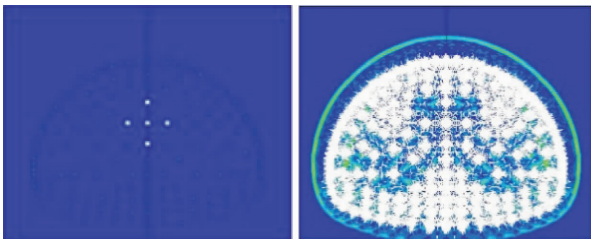


图 4 Ⅳ级泥岩隧道原爆破成型结果

Fig. 4 Numerical simulation of the original blasting forming of grade IV mudstone tunnel

从原爆破成型结果可以看出, 拱顶, 拱腰,

边墙部分周边轮廓成型较好, 但内部存在较大欠挖, 内部岩体也并未完全炸开, 仰拱超挖 35 cm<sup>2</sup>, 局部欠挖超过 45 cm, 整体爆破效果较差.

针对张家岩Ⅳ级泥岩现场隧道爆破成型差这一情况, 并结合相关隧道工程的光面爆破参数表(表 7), 选取装药不耦合系数( $\eta$ )、周边眼间距( $d$ )、相对距( $\omega$ )为主要光面爆破参数, 同时考虑微差和装药量对爆破成型效果的影响, 制定出相应的泥岩爆破方案, 具体实施方法为: 采用五因素四水平正交试验, 共计 16 组试验. 其中, 微差变化范围设置为 5~20 ms, 间隔为 5 ms; 装药不耦合系数介于 1.7~2.5; 周边孔孔间距范围介于 34~46 cm; 装药量范围介于 42.35~45.05 kg; 相对距的范围介于 0.68~0.92. 在确定了爆破待

优化参数后, 根据公路工程质量检验评定标准(JTJ071-98, 确定了本模拟对于光爆成型效果的评价标准(表 8), 数值模拟结果如图 5 所示(由于试验较多, 仅列举部分方案结果).

表 7 光面爆破参数表  
Tab. 7 Smooth blasting parameter table

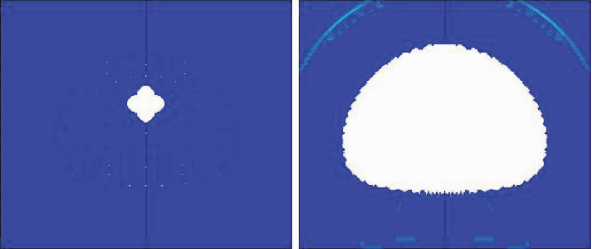
参数	饱和单轴抗压强度/MPa	装药不耦合系数 $\eta$	周边眼间距 $d/\text{cm}$	周边眼最小抵抗线 $W/\text{cm}$	相对距 $d/W$	周边眼装药集中度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$
硬岩	$>60$	1.25~1.50	55~70	70~85	0.8~1.0	0.3~0.35
中硬岩	30~60	1.50~2.00	45~60	60~75	0.8~1.0	0.2~0.30
软岩	$\leq 30$	2.00~2.50	30~50	40~60	0.5~0.8	0.07~0.15

表 8 光面爆破质量评价标准  
Tab. 8 Smooth blasting quality evaluation standard

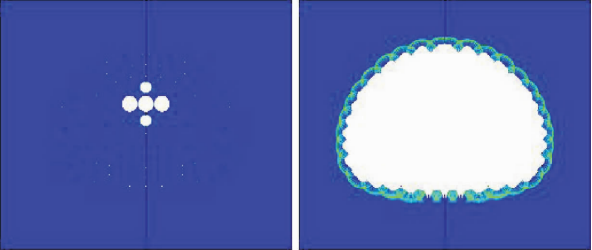
序号	指标	硬岩	中硬岩	软岩
1	围岩	无剥落	无剥落	无大坍塌
2	最大线性超挖量/cm	$<20$	$<25$	$<25$
3	局部欠挖量/cm	$<5$	$<5$	$<5$
4	炮孔利用率/%	$\geq 90$	$\geq 95$	100
5	半眼孔痕率/%	$\geq 80$	$\geq 70$	$\geq 50$
6	不平整度/cm			$\pm 15$
7	质点振动速度/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$<12$	$<8$	$<5$



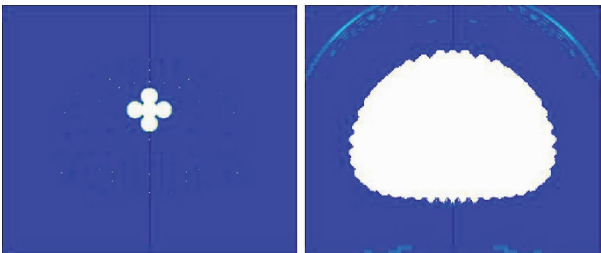
(a) IV级泥岩爆破方案1成型效果图



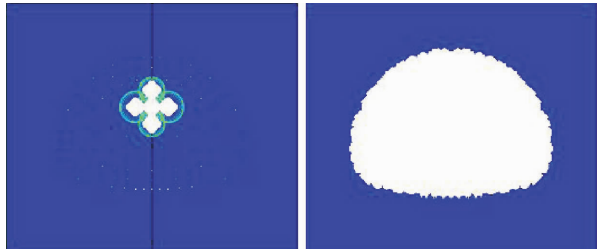
(b) IV级泥岩爆破方案2成型效果图



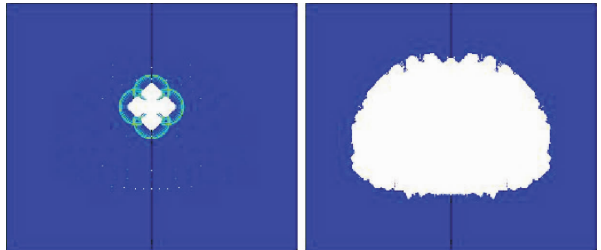
(c) IV级泥岩爆破方案3成型效果图



(d) IV级泥岩爆破方案4成型效果图



(e) IV级泥岩爆破方案5成型效果图



(f) IV级泥岩爆破方案6成型效果图

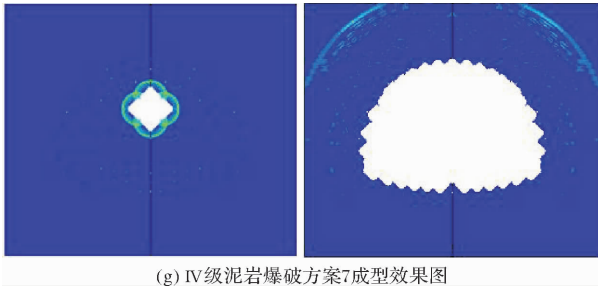


图5 爆破方案爆破成型结果

Fig. 5 Blasting program simulation results

从图5(a)~(g)的模拟结果可以得出:方案1,拱肩、拱腰、仰拱周边围岩轮廓较为平整,未出现较明显裂隙,对围岩的损伤扰动较小,上部拱顶出现超欠挖,局部最大线性欠挖量超过15 cm.方案2,周边围岩总体轮廓比较规整,基本达到设计轮廓线,但是在拱顶以及拱腰的位置出现较小程度的欠挖,欠挖范围介于8~10 cm,同时,周边岩体爆破后未出现较明显裂隙,对围岩的损伤扰动较小.方案3,周边围岩爆后存在严重的欠挖现象,上部拱顶欠挖范围超过20 cm,仰拱及拱腰部分的欠挖小于拱顶,欠挖范围约为10~15 cm.方案4,拱腰、仰拱、拱肩处围岩轮廓比较平整,尤其在拱肩部位,围岩轮廓十分平整光滑,效果好,但在拱顶部位存有超挖,约为12 cm,拱腰局部地方有较小范围(最大线性超挖量小于7 cm)的超挖.方案5,各段炮孔爆炸后,周边围岩轮廓即为规整光滑,无较明显的超欠挖现象,唯一不足之处是在拱顶与拱肩交界的地方存在欠挖(小于4.5 cm),但符合光面爆破质量标准,同时达到设计轮廓线,且半眼孔痕率大于65%,围岩扰动深度小于1 m,基本符合要求.方案6,周边轮廓极不规整,存在较大范围超欠挖量,其中拱顶最大线性超挖约为30 cm,爆破效果差,不满足爆破设计要求.方案7,拱顶处的围岩轮廓平整度相较拱肩、仰拱、拱腰部位要好,拱腰处轮廓呈现波浪状,超欠挖现象明显,且超欠挖量大,对后续的施工造成较为严重的影响,不满足设计要求.综合图5爆破成型模拟结果以及上述分析,得到不同爆破方案下隧道在拱顶、拱肩、拱腰以及拱底位置处的超欠量,如图6所示.

由图6中隧道爆破不同位置处的超欠挖量,可以明显发现,方案2、5的超欠挖量相较其他爆破方案来说,其超、欠挖量值均在5 cm以内,满足表8隧道光面爆破质量评价标准中规定的隧道超欠挖质量控制要求,同时也直观反映出不同爆破方案下隧道的爆破成型效果.

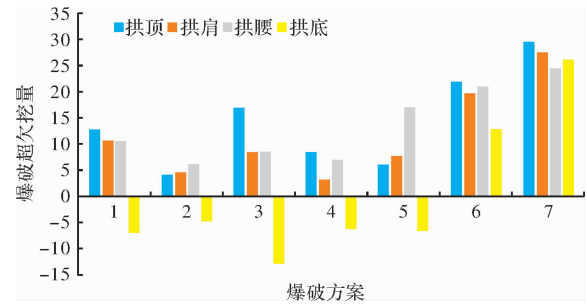


图6 隧道爆破不同位置处的围岩超欠挖量

Fig. 6 Surrounding rock over-excavation at different locations of tunnel blasting

此外,根据张家岩IV级泥岩隧道现场实际爆破开挖轮廓线设计,结合隧道爆破成型模拟结果,绘制出现场爆破轮廓线与模拟结果的对比图,如图7所示.

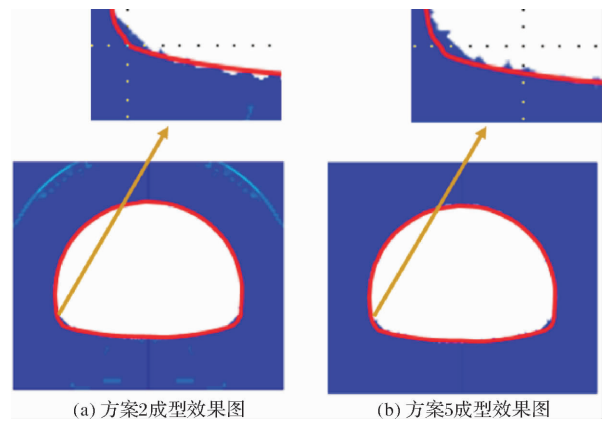


图7 IV级泥岩方案2与方案5比较图

Fig. 7 Comparison of Scheme 2 and Scheme 5 of Grade V Surrounding Rock of Sand-mud Interlayer

对比分析爆破方案2与方案5,不同爆破微差,方案5(10 ms)的空气隙厚度要比方案2(5 ms)薄,方案5的装药量小于方案2,周边孔的孔间距相同,均为38 cm.且两组方案的爆破效果都较好,尽管均存在超欠挖现象,但相较其他方案以及原有爆破效果有很大程度的改善,此外,方案2与方案5周边轮廓都非常平整,围岩的损伤范围都较小,但对比方案2与方案5,不难发现,方案2的装药量小于方案5,这就意味着方案2中各段炸药爆炸后在孔壁处产生的爆炸峰值压应力要比方案5要低,相应的减弱了传入围岩中的爆炸能量,进一步减弱了周边围岩中不可见微小裂隙的产生,此外,由于方案2的不耦合系数大于方案5,相同爆炸条件下,炸药产生的爆炸冲击波经由空气层时会繁盛衰减,空气层厚度越大,相应的爆炸能量的衰减幅度就越大,传入围岩的爆炸能量也会相应的有所减小,更进一步减弱了围岩损伤.综合上述,方案2通过利用空气隙的气楔作用,能够在较小药量下,有效地破碎周边围岩,保证周边轮廓的



规整, 保证隧道开挖过程中不易出现较大的超欠挖现象, 所以, 对于Ⅳ级泥岩隧道爆破, 优选方案 2, 遵循“装药量少、不耦合系数大”的原则。

将优选得到的方案 2 与原爆破方案进行比较, 可

以得到以下结论: 优化后的Ⅳ级泥岩隧道周边轮廓规整, 超欠挖现象得到很好的控制, 欠挖量 $<70\text{ cm}^2$ , 爆破整体效果较好。线性欠挖量减少 90%, 炸药利用率 $>89\%$ 。达到标准, 具体结果如表 9 所示。

表 9 Ⅳ级泥岩爆破结果  
Tab. 9 Grade IV mudstone blasting results

	围岩	最大线性超挖量	局部欠挖量	半眼孔痕率	炮孔利用率	轮廓平整度
优化前	有剥落	$>30\text{ cm}$	$>50\text{ cm}$	$<50\%$	$<60\%$	不规整
优化后	无剥落	$<5\text{ cm}$	$<5\text{ cm}$	$>65\%$	100%	规整

3 现场测试结果分析

根据张家岩隧道Ⅳ级泥岩隧道施工实际情况, 进行现场测试来验证模拟方法的可靠性; 另外, 对于施工过程中忽略了层理对周边轮廓的影响, 导致周边轮廓平整度不足的事实, 提出了优化思路, 并找出了最佳优化方案。

根据数值模拟所优选出的爆破方案, 应用到张家岩层状围岩Ⅳ级泥岩段隧道实际工程中, 得到现场经过优化改进的爆破效果, 并与模拟效果进行对比验证, 如图 8、表 10 所示。

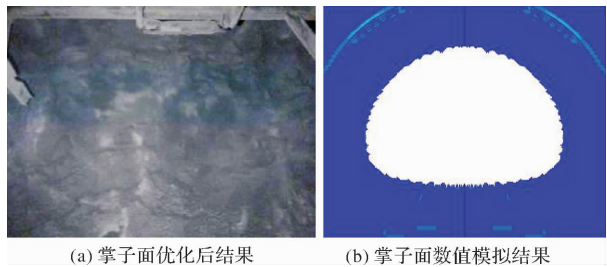


图 8 现场结果与数值结果对比(优化后)  
Fig. 8 Comparison of blasting results after optimization

表 10 Ⅳ级泥岩隧道优化后模拟数值与实测值对比  
Tab. 10 Comparison between simulated and measured values of mudstone tunnel optimization

Ⅳ级 泥岩	拱顶线性 超挖量/cm	局部欠 挖量/cm	围岩	轮廓平 整度
实测值	$<5.8$	$<5.2$	无剥落	平整
模拟值	$<5$	$<5$	无剥落	平整

4 结论

基于张家岩隧道工程地质状况及现场爆破方案, 采用数值模拟与现场试验的手段对张家岩Ⅳ级泥岩隧道进行了爆破优化, 研究成果有助于解决类泥岩隧道爆破超欠挖及围岩损伤严重的问题, 获得了以下结论:

(1)根据现场爆破情况, 结合已有相关工程爆破参数表, 确定了微差、孔间距、装药不耦合系

数、装药量、相对距作为爆破优化参数。

(2)对比分析 16 组爆破模拟计算结果, 结合光面爆破质量评价标准, 优选爆破方案 2, 即微差 5 ms, 孔径 40 mm, 孔间距 38 cm, 装药量 43.25 kg, 该方案数值模拟结果显示有较好的轮廓成型效果, 且拱顶落石少, 超欠挖及围岩损伤现象有很好的改善。

(3)将优化后的爆破方案运用到实际工程中, 结果显示数值模拟与现场结果基本一致, 无论是超欠挖量、围岩剥落程度还是围岩成型效果都十分接近, 这表明数值模拟的有效性与可行性, 相应的研究成果也可应用到其它类似隧道爆破施工中。

参考文献 References

[1] 黄宝龙, 单仁亮, 殷凯, 等. 光面爆破技术在软弱围岩隧道掘进中的应用研究[J]. 中外公路, 2010, 6(30): 176-179.  
HUANG Baolong, DAN Renliang, YIN Kai, et al. Application of smooth blasting technology in tunneling of weak surrounding rock tunnels [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 6(30): 176-179.

[2] 王力功. 光面爆破技术研究及其在隧道掘进中的应用[C]//光面预裂爆破论文汇编. 北京: 中国铁道学会、铁道部建设司, 2007, 5.  
WANG Ligong. Research on Smooth Blasting Technology and Its Application in Tunneling [C]//Glossy pre-splitting blasting paper compilation. Beijing: China Railway Society, Ministry of Railways Construction Division, 2007, 5.

[3] 顾义磊, 李晓红, 杜云贵, 等. Reasonable smooth blasting factor used in tunnel[J]. Journal of Chongqing University, 2005, 28(3): 95-97.  
GU Yilei, LI Xiaohong, DU Yungui, et al. Reasonable smooth blasting factor used in tunnel[J]. Journal of Chongqing University, 2005, 28(3): 95-97.

[4] 安静. 泥岩隧道光面爆破的技术参数研究及应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(1): 210-213.  
AN Jing. Research and application of smooth blasting technical parameters in mudstone tunnel[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(1): 210-213.

- [5] 杨勇. 基于减小爆破振动对围岩松动圈影响的巷道光面爆破掘进技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.  
YANG Yong. Research about roadway's smooth blasting excavation based on the reducing effects of blasting vibration the surrounding rock loose circle[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- [6] 宗琦. 软岩巷道光面爆破技术的研究与应用[J]. 煤炭学报, 2002, 27(1): 45-49.  
ZONG Qi. Study and application of smooth blasting technique in weak rock tunnel[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(1): 45-49.
- [7] 汪雪清, 单仁亮, 黄宝龙. 光面爆破技术在破碎的软岩巷道掘进中的应用研究[J]. 爆破, 2008, 25(3): 12-16.  
WANG Xueqing, DAN Renliang, HUANG Baolong. Application research on smooth blasting for cracked soft rock tunneling[J]. Blasting, 2008, 25(3): 12-16.
- [8] 石少卿, 康建功, 汪敏, 等. ANSYS/LS-DYNA 在爆炸与冲击领域内的工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
SHI Shaoqing, KANG Jiangong, WANG Min, et al. ANSYS/LS-DYNA engineering applications in the field of explosion and shock[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [9] 杨善元. 岩石爆破动力学基础[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.  
YANG Shanyuan. Rock blasting dynamics foundation [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1991.
- [10] FORDYCE D L, FOURNEY W L, DICK R D, et al. Effect of open joints on stress wave transmission[C]// Fourth International Journal of Conference on Fragmentation by Blasting. Vienna, Austria: [S. l.], 1993: 47-54.
- [11] 王明洋, 钱七虎. 爆破应力波通过节理裂隙带的衰减规律[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 42-46.  
WANG Mingyang, QIAN Qihu. Attenuation law of explosive wave propagation in cracks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 42-46.
- [12] 杨峰, 陈咏泉, 王新明, 等. 水平层状围岩隧道光面爆破效果分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 6(12): 956-959.  
YANG Feng, CHEN Yongquan, WANG Xinming, et al. Analysis of tunnel smooth blasting in horizontal layered rockmass [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 6(12): 956-959.
- [13] 孙从煌, 曲艳东, 孔祥清, 等. 岩石介质中双孔爆破效应的数值模拟研究[J]. 爆破, 2017, 34(3): 37-46.  
SUN Conghuang, QU Yandong, KONG Xiangqing, et al. Numerical simulation of explosion effects of double-hole blasting in rock medium[J]. Blasting, 2017, 34(3): 37-46.
- [14] 李新平, 陈萍萍, 罗忆, 等. 非对称不耦合装药结构对预裂爆破效果的影响[J]. 爆破, 2017, 34(3): 25-30.  
LI Xinping, CHEN Pingping, LUO Yi, et al. Impacts of asymmetric decoupling charge structure on presplitting blasting effect[J]. Blasting, 2017, 34(3): 25-30.
- [15] 璩世杰, 刘际飞. 节理角度对预裂爆破成缝效果的影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 189-204.  
QU Shijie, LIU Jifei. Numerical analysis of joint angle effect on cracking with presplit blasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 189-204.

(编辑 吴海西 桂智刚)

(上接第 858 页)

- [10] 张智, 屈智炯. 粗粒土湿化特性的研究[J]. 成都科技大学学报, 1990(5): 51-56.  
ZHANG Zhi, QU Zhijiong. The study of wetting properties of coarse grained soils[J]. Journal of University of Science and Technology of Chengdu, 1990(5): 51-56.
- [11] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程: SL237-1999 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.  
Ministry of Water Resources of the People's of China. Specification of soil test: SL237-1999[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.
- [12] 徐志华, 孙大伟, 张国栋. 堆石料应力-应变特性大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1565-1572.  
XU Zhihua, SUN Dawei, ZHANG Guodong. Study on stress-strain behavior of rockfill using large-scale triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1565-1572.
- [13] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.  
QIAN Jiahuan, YIN Zongze. Principle and calculation of geotechnical engineering [M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 1996.
- [14] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill [C]// In Embankment dam engineering. Casagrand volume, New York: Wiley, 1973, 109-200.
- [15] EINAV I. Breakage mechanics-part I: theory [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55(6): 1274-1297.
- [16] 姚世恩. 复杂应力路径下粗粒土在湿化作用下的颗粒破碎研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.  
YAO Shien. Study on particle breakage of coarse granular soil under wetting effect in the complex stress path [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.

(编辑 吴海西 桂智刚)