

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.06.008

# 基于 HJC 损伤本构模型的灰岩隧道光面爆破数值模拟及工程验证<sup>\*</sup>

秦桂芳<sup>①</sup> 曾 灿<sup>①</sup> 徐间锋<sup>①</sup> 贺 睿<sup>②</sup>

①贵州路桥集团有限公司(贵州贵阳,550000)

②中南大学土木工程学院(湖南长沙,410075)

[摘 要] 为解决六枝至安龙高速公路隧道爆破施工中光面爆破效果不良的问题,利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件开展了径向不耦合装药系数及周边眼间距的多工况计算;进而基于不同爆破参数条件下的围岩损伤特征分析,优化得到了合适的爆破参数;径向不耦合系数 1.25,炮孔间距为 55 cm。进一步开展了隧道周边眼整体模型的数值计算,获取了优化参数条件下的隧道爆破成型预测效果。将优化的爆破参数应用于现场爆破后发现,隧道轮廓线平整,形成的隧道开挖轮廓线与设计轮廓线基本吻合,应用效果良好。

[关键词] 光面爆破;不耦合系数;灰岩;炮孔间距;HJC 损伤本构模型

[分类号] TD235.37

## Numerical Simulation and Engineering Verification of Smooth Blasting in Limestone Tunnel Based on HJC Damage Constitutive Model

QIN Guifang<sup>①</sup>, ZENG Can<sup>①</sup>, XU Jianfeng<sup>①</sup>, HE Rui<sup>②</sup>

①Guizhou Road & Bridge Group Co., Ltd. (Guizhou Guiyang, 550000)

②School of Civil Engineering, Central South University (Hu'nan Changsha, 410075)

[ABSTRACT] In order to solve the problem of poor smooth blasting outcome during blasting construction of Liuzhi-Anlong Expressway Tunnel, calculation of radial decoupling charge coefficient and peripheral hole spacing under multiple working conditions was carried out by using ANSYS/LS-DYNA software. Then, based on the analysis of damage characteristics of surrounding rock under different blasting parameters, the appropriate blasting parameters were optimized. The radial decoupling coefficient is 1.25, and the blast hole space is 55 cm. Numerical calculation of the model of the tunnel peri-pheral hole was further carried out, and prediction outcome of the tunnel shape after blasting under the optimized parameters was obtained. After application of the optimized blasting parameters to the site, it was found that the tunnel contour was flat, the tunnel excavation contour formed by blasting was basically consistent with the design contour, and the application outcome was good.

[KEYWORDS] smooth blasting; decoupling coefficient; limestone; blast hole space; HJC damage constitutive model

## 引言

近年来,我国高速铁路规模越来越大<sup>[1]</sup>。作为高速铁路的一个重要组成部分,隧道的数量和长度均在逐渐增大。在隧道爆破施工中,爆破方案的选

择决定了隧道爆破开挖成型效果的好坏,进而影响隧道的掘进成本和开挖效率<sup>[2-3]</sup>。因成本低、效率高、灵活性好等优点,钻爆法被广泛运用于隧道施工过程中<sup>[4-5]</sup>。陈学松等<sup>[6]</sup>通过优化现场孔网参数,控制了爆破块度,降低了炸药的单耗。王圣涛等<sup>[7]</sup>在施工现场进行了多次空间间隔光面爆破试验,不

<sup>\*</sup> 收稿日期:2022-04-25

基金项目:贵州省交通运输厅科技项目(2021-122-047);贵州路桥集团有限公司科技计划项目(LATJ-12-KY01)

第一作者:秦桂芳(1980-),女,高工,主要从事土木工程施工与管理工作。E-mail: 648395965@qq.com

通信作者:贺睿(1997-),男,硕士研究生,主要从事隧道与地下工程建造技术研究。E-mail:869023223@qq.com

断优化爆破参数后,提出了适合的爆破方案。岳中文等<sup>[8]</sup>利用试验和数值模拟的方法分析了在不同不耦合系数下混凝土的爆破漏斗,发现存在最佳的不耦合系数,此时能尽可能地利用炸药的能量;杨哲峰等<sup>[9]</sup>针对武汉地铁二号线工程,通过分析关键节点上的有效应力规律,确定出最佳的径向不耦合系数。张理维等<sup>[10]</sup>发现,炮孔连线间岩体的损伤程度随炮孔间距的增大而减小,损伤区由贯通变为不贯通。蔡峰等<sup>[11]</sup>利用 Matlab 编程和弹性理论求解了冲击波初始参数和沿爆破孔径向传播到爆破孔孔壁处的参数;并利用数值计算和现场试验验证了结果的正确性。

隧道爆破效果受装药结构、岩体性质等多种因素的影响<sup>[12-13]</sup>,相关参数变异性大,作用机理复杂,尚缺乏可直接借鉴应用的系统性成果。而盲目套用既有研究成果很可能导致爆破效率低或材料浪费等现象。根据前人的研究成果发现,周边眼设计参数优化是实现隧道爆破控制最为有效的方法之一<sup>[14]</sup>。为保证六枝至安龙高速公路隧道的顺利施工,现针对灰岩的爆破效果开展研究,分析周边眼不同的径向不耦合系数、炮孔间距对硬岩光面爆破的影响,并结合现场情况对所提出的方案进行了验证。

## 1 工程概况

六枝至安龙高速公路隧道项目地处贵州高原西部。场区属溶蚀地貌单元,海拔介于 938.9~1 414.5 m。隧道轴线通过段海拔为 1 029.1~1 414.5 m 之间。进口端为陡坡地形,自然坡度为 40°~50°;洞身段穿越山脊,最高点处海拔为 1 414.5 m;出口端为陡坡地形。洞身穿越地层主要为 III 级中风化灰岩。隧道按照时速 80 km 的标准进行设计。

原设计采用全断面施工,循环进尺 2 m,每循环装药炮眼总数 229 个。前期施工发现,该爆破方案存在炮眼总数过多(每循环炮眼钻设耗时 3~5 h)、炸药用量过大(单耗超过 2 kg)、超挖严重(平均超挖量超过 30 cm)等现象。因此,综合分析后,采用钻爆法施工。

## 2 基于显示动力学的爆破模拟方法

### 2.1 基本思路

隧道钻爆法施工过程中,周边眼合理的装药结构能有效地减小超挖量和欠挖量。为此,基于显示动力学 ANSYS/LS-DYNA 软件,将周边眼爆破时对

围岩的冲击作用简化为二维尺度下的平面应变问题,并从损伤控制的角度,提出适用于六枝至安龙高速公路隧道的周边眼装药参数。

具体思路为:

1) 改变周边眼单孔装药的径向不耦合系数,建立多种工况,对比分析得到合适的径向不耦合系数取值区间;

2) 根据初拟定的径向不耦合系数建立周边眼双孔爆破模型,探讨不同炮孔间距下的爆破破岩效果,总结出合适的炮孔间距取值范围;

3) 建立精细化隧道爆破数值模型,并对爆破效果做出评价;

4) 将初始拟定的周边眼爆破参数应用于爆破现场,并分析爆破效果。

### 2.2 材料本构模型及参数

为模拟炸药瞬时爆炸产生的巨大能量使岩石处于大应变、高应变率的状态,岩石采用 HJC (Holmquist-Johnson-Cook) 动态本构模型<sup>[15]</sup>,屈服方程为

$$\sigma^* = [A(1 - D) + Bp^{*N}](1 + C \ln \varepsilon^*) \quad (1)$$

式中: $\sigma^*$  为标准化等效应力,为实际应力与静态抗压强度的比值; $p^*$  为标准化静水压力,为实际静水压力与静态抗压强度的比值; $\varepsilon^*$  为无量纲应变率,为实际应变率与参考应变率的比值; $D$  为损伤变量; $A$ 、 $B$ 、 $N$  和  $C$  为试验后确定的常数。

爆破载荷作用下,岩石的损伤演化方程为

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_{f,p} + \mu_{f,p}} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{f,p} + \mu_{f,p} = D_1 (p^* + T^*)^{D_2} \geq \varepsilon_{f,\min} \quad (3)$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 、 $\Delta \mu_p$  分别表示岩石在一个计算循环内的等效塑性应变和塑性体积应变; $(\varepsilon_{f,p} + \mu_{f,p})$  表示常压下岩石断裂时的塑性应变; $T^*$  表示岩石所能承受的最大特征化静水拉力; $D_1$ 、 $D_2$  为损伤常量; $\varepsilon_{f,\min}$  为岩石断裂时的最小塑性应变。

爆破载荷作用下,岩石的状态方程包括线弹性、过渡和压密 3 个阶段。压密阶段的状态方程为

$$p = \begin{cases} K_1 \bar{\mu} & (\text{卸载}); \\ K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3 & (\text{加载}). \end{cases} \quad (4)$$

式中: $K_1$  为塑性体积模量; $K_2$  和  $K_3$  为材料的压力常数; $\bar{\mu}$  为修正后的体积应变。

结合现场地质勘察报告和经验取值,选定岩石的 HJC 本构模型参数,见表 1。

炸药选用常用的 2<sup>#</sup> 岩石乳化炸药,材料模型为 \* Mat\_High\_Explosion\_Burn, 状态方程为

表 1 岩石 HJC 本构模型参数

Tab. 1 Parameters of HJC constitutive model of rock

$\rho_0/$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$G/\text{MPa}$	$f_c/\text{MPa}$	$A$	$B$
2 300	10 093	125	0.55	1.23
$T/\text{MPa}$	$p_c/\text{MPa}$	$\mu_c$	$p_1/\text{MPa}$	$\mu_1$
4	20	0.001 25	2 000	0.174
$C$	$N$	$S_{\max}$	$D_1$	$D_2$
0.009 7	0.89	20	0.04	1
$K_1/\text{GPa}$	$K_2/\text{GPa}$	$K_3/\text{GPa}$	$\varepsilon_0/\text{s}^{-1}$	$\varepsilon_{f,\min}$
39	-223	550	$1 \times 10^{-6}$	0.01

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E_0}{V}。$$

(5)

式中: $p$  为爆轰压力; $V$  为相对体积; $E_0$  为初始比内能; $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为常数。

炸药材料参数见表 2。

表 2 2<sup>#</sup>岩石乳化炸药材料参数

Tab. 2 Material parameters of 2<sup>#</sup> rock emulsion explosive

$\rho/$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$D/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$A/$ GPa	$B/$ GPa
1 000	3 400	229	0.55
$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0/\text{GPa}$
6.5	1.0	0.35	3.51

空气采用线性多项式状态方程 \* Eos\_Linear\_Polynomial 进行描述:

$$p=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+(C_3\mu^3+C_4+C_5\mu+C_6\mu^2)E_0。$$

(6)

式中: $C_0 \sim C_6$  为常数; $\mu$  为体积比。

空气材料参数见表 3。

表 3 空气材料参数

Tab. 3 Material parameters of air

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
1.29	0	0	0	0
$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E_0/\text{GPa}$	
0.4	0.4	0	0.025	

2.3 计算工况

主要分析了径向不耦合系数和炮孔间距等对爆破效果的影响。为方便计算,模型采用厚度为一个单元尺寸的准三维薄片性计算模型。

1) 在分析径向不耦合系数对爆破效果的影响

时,岩体采用单孔爆破。如图 1 所示,模型直径为 100 cm,炮孔位于模型中心位置,药卷直径为 3.2 cm。通过改变炮孔直径,设定径向不耦合系数  $k_d$  分别为 1.00、1.15、1.25、1.50 和 1.75 共 5 个工况。

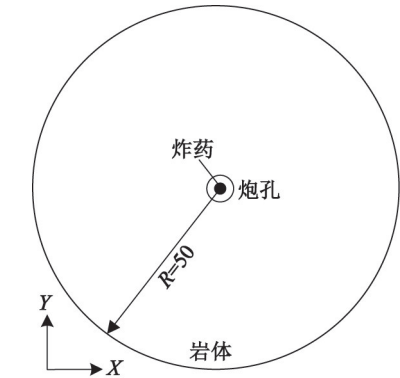


图 1 单孔爆破模型(单位:cm)

Fig. 1 Single-hole blasting model (unit:cm)

2) 在分析炮孔间距对爆破效果的影响时,岩体采用双孔爆破。如图 2 所示,模型尺寸为 300 cm × 300 cm,炮孔在模型中呈左右对称布置并设置中心起爆,药卷直径为 3.2 cm。径向不耦合系数由图 1 中分析得到。保持径向不耦合系数不变,设定炮孔间距分别为 45、50、55 cm 和 60 cm 4 种工况。

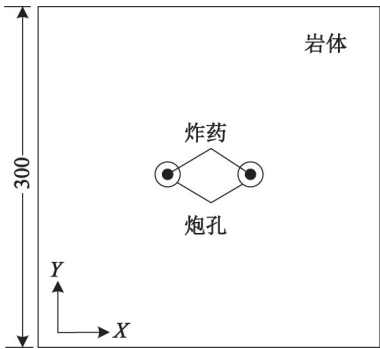


图 2 双孔爆破模型(单位:cm)

Fig. 2 Double-hole blasting model (unit:cm)

3) 以选定的径向不耦合系数和炮孔间距,建立隧道上台阶爆破开挖精细化爆破数值模型。模型的整体尺寸为 1 500 cm × 800 cm,周边眼共 33 个,光面爆破层厚度为 70 cm,如图 3 所示。

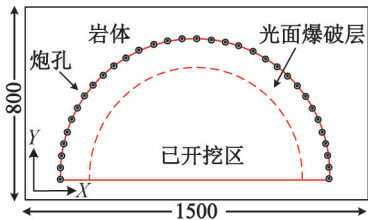


图 3 爆破模型(单位:cm)

Fig. 3 Blasting model (unit:cm)

模型中,岩石采用 Lagrange 网格建模,单元类型为 3D Solid 164,使用 Lagrange 算法。炸药和空气采用 ALE 网格建模,单元类型为 3D Solid 164,使用多物质算法。岩石与炸药和空气之间的相互作用通过定义耦合算法来实现。模型的左、右两侧边界分别施加  $X$  向位移约束,上、下两侧边界分别施加  $Y$  向位移约束,厚度方向施加位移约束,四周添加无反射边界条件。

3 基于 HJC 本构模型的岩体损伤演化特征分析

3.1 单孔爆破岩体损伤特征

图 4 给出了当径向不耦合系数为 1.00 时,炸药起爆后灰岩的损伤变量  $D$  随计算时间的演化情况。图 5 给出了径向不耦合系数  $k_d$  分别为 1.00、1.15、1.25、1.50 和 1.75 时岩体的损伤云图。

图 4 和图 5 中,红色区域代表完全损伤区(压碎区),损伤变量  $D = 1.00$ ;蓝色以外的灰色区域代表无损伤区(弹性区), $D < 0.05$ ;介于红色与蓝色之间区域的是损伤区(裂隙区), $0.05 < D < 1.00$  [16]。

分析可见:  
1) 炸药起爆后,应力波以柱面波的形式向四周扩散传播。冲击载荷压力先作用在炮孔孔壁上,形

成压碎区;衰减的应力波对压碎区之外的岩体产生切向拉伸力,形成放射状的径向裂隙区;在破裂区之外,应力波已衰弱,只能引起岩体的弹性振动,而不能破坏岩体,此区域即为弹性区。

2) 在不同的径向不耦合系数下,岩体的损伤分布规律很相似,都呈现交叉放射絮状,由中心向外部扩展。

为更加清晰地剖析爆破作用下的破岩机理,分别在不同工况下提取炮孔附近岩体的孔壁压力  $p$ 。从图 6 可知:炮孔孔壁压力随径向不耦合系数  $k_d$  的增大而减小;当  $k_d < 1.25$  时,孔壁压力变化较显著;当  $k_d > 1.25$  时,孔壁压力变化较平稳。

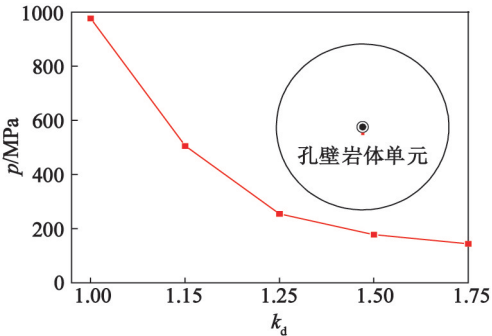


图 6 孔壁压力与径向不耦合系数的关系  
Fig. 6 Relationship between hole wall pressure and radial decoupling coefficient  
为定量地探讨爆破作用下岩体损伤的空间分布

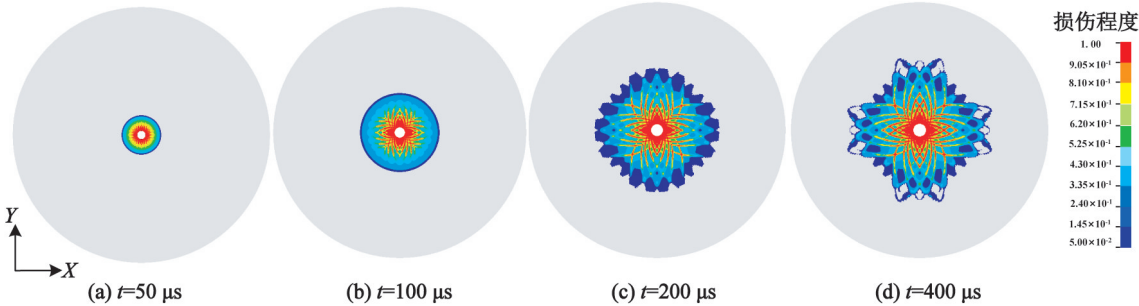


图 4 径向不耦合系数为 1.0 时单孔爆破下灰岩的损伤演化图  
Fig. 4 Damage evolution of limestone in single-hole blasting with radial decoupling coefficient of 0.1

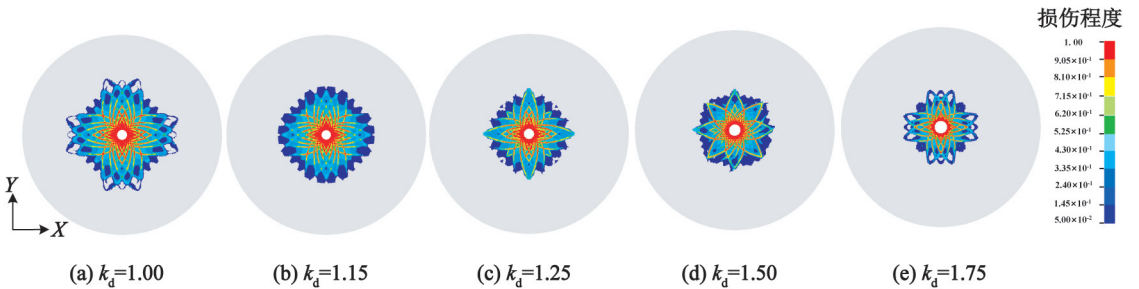


图 5 不同径向不耦合系数下岩体的损伤云图  
Fig. 5 Damage nephograms of rock mass with different radial decoupling coefficients

规律,分别在各个工况下,提取沿同一爆心距  $R$  圆周上间隔  $10^{\circ}$  的岩体单元,以其算术平均值来表征该爆心距下的岩体受爆破作用的损伤程度,如图 7 所示。从图 7 可知: $k_d = 1.00$  时,压碎区和裂隙区半径分别为 13 cm 和 40 cm; $k_d = 1.75$  时,压碎区和裂隙区半径分别为 7 cm 和 36 cm。因此,合理地增大径向不耦合系数,能够有效地减少炮孔周围的损伤。

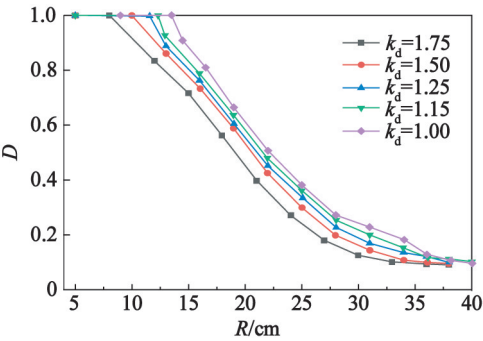


图 7 岩体损伤变量与爆心距的关系

Fig. 7 Relationship between damage variable of rock mass and blasting center distance

综合分析结果和现场施工器械的可操作性,拟定炮孔直径为 4 cm,径向不耦合系数为 1.25。这样既一定程度上降低了围岩的损伤程度,也提供了足够大的孔壁压力,保证了破岩效果。

3.2 双孔爆破岩体损伤特征

隧道周边眼光面爆破的炮孔间距一般设定在 40 cm 以上。由单孔爆破数值模拟结果可推知,周边眼单孔爆破的损伤仅能影响相邻炮孔区域。因此,开展双孔爆破岩体损伤特征分析。

图 8 给出了炮孔间距依次为 45、50、55 cm 和 60 cm 4 种工况下的岩体损伤云图。分析可知:双孔爆破时,岩体的损伤分布和单孔爆破时的损伤演化规律类似,都呈交叉放射状向外扩散;炮孔之间的岩体受爆破应力波的叠加作用,形成较大的压碎区;炮孔连线中心岩体单元主要受到拉伸破坏。

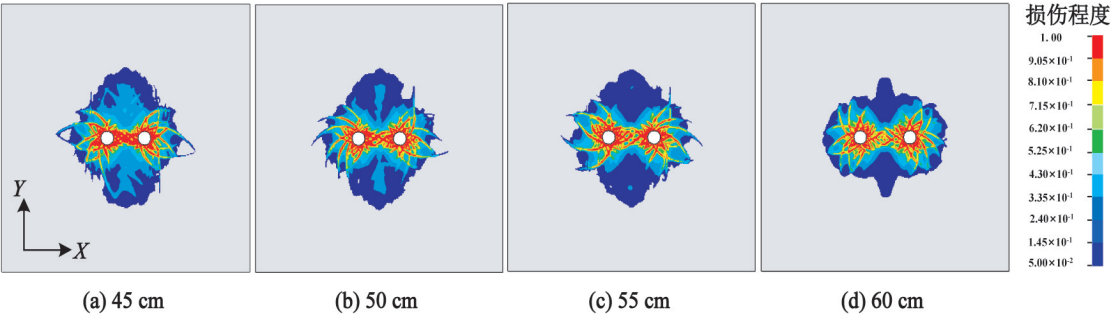


图 8 不同炮孔间距下岩体的爆破损伤演化图

Fig. 8 Blasting damage evolution of rock mass with different blast hole spaces

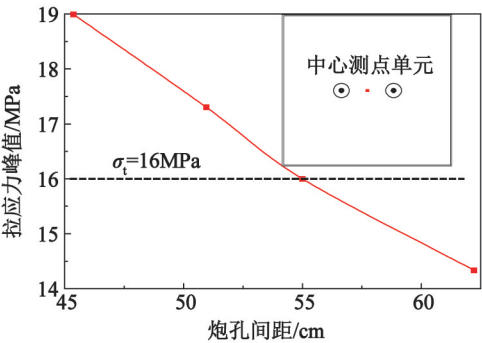


图 9 测点拉应力峰值与炮孔间距的关系

Fig. 9 Relationship between peak tensile stress at measuring points and blast hole space

图 9 是炮孔中心测点岩体单元的拉应力峰值与炮孔间距的关系。凝灰岩的抗拉强度  $\sigma_t = 4 \text{ MPa}$ 。岩体的动态抗拉强度是静态时的 1~10 倍,这里取定灰岩的动态抗拉强度  $\sigma_t$  为 16 MPa。

由图 9 可知,随着炮孔间距的增大,中心测点单元的拉应力峰值逐渐减小,且当炮孔间距大于 55 cm 时,中心测点单元达不到动态抗拉强度。以  $D > 0.05$  来界定岩体受到爆破作用的影响,提取各个炮孔间距下在  $X$ (炮孔中心连线)、 $Y$ (垂直炮孔中心连线)方向上的最大损伤长度,如图 10 所示。

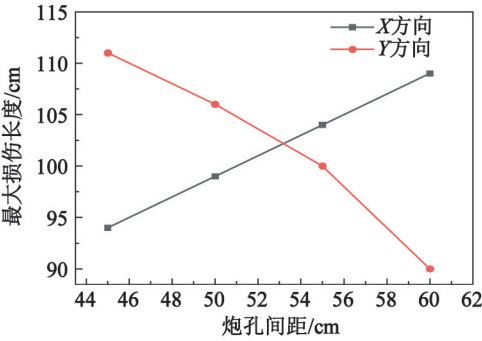


图 10 最大损伤长度与炮孔间距的关系

Fig. 10 Relationship between maximum damage length and blast hole space

由图 10 可知:当炮孔间距增大时,沿着  $X$  方向的损伤长度逐渐增大;沿着  $Y$  方向的损伤长度逐渐减小。因此,在隧道周边眼爆破时,炮孔间距的大小会影响当前爆破掌子面的径向损伤范围。为保证足够的爆破破岩效果,也尽量降低围岩的损伤范围,拟定炮孔间距为 55 cm。

3.3 隧道爆破成型效果数值模拟

周边眼径向不耦合系数为 1.25、周边眼间距为 55 cm、光面爆破层厚度为 70 cm 时,隧道光面爆破的数值模拟效果见图 11。

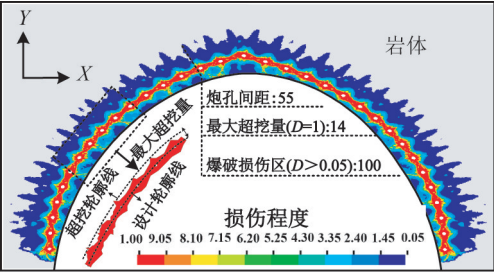


图 11 隧道光面爆破的数值模拟效果图(单位:cm)

Fig. 11 Numerical simulation outcome of smooth blasting of tunnel (unit:cm)

与隧道爆破成型效果直接相关的因素是隧道的超挖和欠挖。根据《锚杆喷射混凝土支护设计施工规定》,爆破方式采用光面爆破时,平均线性超挖应小于 15 cm。

$$\Delta R = \frac{\Delta S}{L} \tag{7}$$

式中:  $\Delta S$  为超挖面积,  $m^2$ , 由数值模拟结果得  $\Delta S = 1.51 m^2$ ;  $L$  为隧道断面设计周长,  $m$ , 取  $L = 18.84 m$ ;  $\Delta R$  为平均径向超挖差,  $m$ 。

由数值模拟结果可知,平均径向超挖差  $\Delta R$  为 8 cm。由此可以判定,当光面爆破层厚度为 70 cm 时,径向不耦合系数取 1.25、炮孔间距取 55 cm 是可行的。

4 工程应用

将上述推荐参数应用于六枝至安龙高速公路隧道 III 级灰岩段的现场爆破,爆破效果如图 12 所示。可以看出,爆破参数优化后,轮廓线平整,极大地减少了局部的超挖和欠挖,降低了造价,既达到了良好的爆破开挖效率,同时也控制了岩体振速,使隧道爆破对周边环境的影响在允许范围内。爆破结束后形成的隧道开挖轮廓线与设计轮廓线基本吻合,说明设定的爆破参数是合理的。



图 12 爆破效果

Fig. 12 Blasting outcomes

5 结论

为提高硬质灰岩地层隧道爆破开挖效果,基于显示动力学中的 HJC 损伤本构模型,通过有限元数值模拟方法分析了周边眼径向不耦合系数、炮孔间距对隧道爆破效果的影响,得出的主要结论如下:

1) 单孔爆破工况中,炮孔孔壁压力随径向不耦合系数的增大而减小;炮孔周围围岩的损伤程度随径向不耦合系数的增大而减小。

2) 双孔爆破工况中,当炮孔间距增大时,沿着  $X$  方向的损伤长度逐渐增大;沿着  $Y$  方向的损伤长度逐渐减小。

3) 基于数值模拟结果,优化得到适用于工程应用的爆破参数,即:径向不耦合系数为 1.25,炮孔间距为 55 cm。该爆破参数应用于现场后,隧道轮廓线平整,爆破形成的隧道开挖轮廓线与设计轮廓线基本吻合,应用效果良好。

采用的爆破损伤模型及计算方法可以为类似工作提供一定的参考。但隧道光面爆破效果与其他诸多爆破参数(光面爆破层厚度、装药量、炮孔孔径、起爆时差等)的设定有关,高应力条件下各爆破参数对岩体爆破损伤的影响还需要进一步研究。同时,应加强对光面爆破成型现场的监测,实时合理地调整爆破参数。

参 考 文 献

[1] SHIN J H, MOON H G, CHAE S E. Effect of blast-induced vibration on existing tunnels in soft rocks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(1): 51-61.

[2] 王立川, 张学民, 马明正, 等. 隧道爆破水介质轴向不耦合装药振动规律三维数值模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(2): 96-102, 120.

WANG L C, ZHANG X M, MA M Z, et al. 3D Numerical simulation of tunnel blasting vibration laws under axial uncoupled charge with water medium[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(2): 96-102, 120.

[3] 刘志刚, 曹安业, 朱广安, 等. 不耦合爆破技术在高应力区域卸压效果[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2): 390-396.

LIU Z G, CAO A Y, ZHU G A, et al. Stress relieving effect of non-coupling blasting technique on high stress area [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2): 390-396.

[4] JIANG N, GAO T, ZHOU C B, et al. Effect of excavation blasting vibration on adjacent buried gas pipeline in a metro tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81(11): 590-601.

[5] 赵晨阳, 雷明锋, 施成华. 大跨地铁站爆破施工优化设计研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1): 747-755.

ZHAO C Y, LEI M F, SHI C H. Study on optimization design of blasting construction for large span metro station [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(Suppl. 1): 747-755.

[6] 陈学松, 欧任泽, 林卫星, 等. 爆破参数优化对块度控制的影响研究[J]. 采矿技术, 2021, 21(6): 134-137.

[7] 王圣涛, 潘强, 郑爽英, 等. 光面爆破在广州地铁隧道 21 号线中的应用[J]. 工程爆破, 2019, 25(4): 26-31.

WANG S T, PAN Q, ZHENG S Y, et al. Application of smooth blasting in Guangzhou Metro Tunnel Line 21[J]. Engineering Blasting, 2019, 25(4): 26-31.

[8] 岳中文, 胡晓冰, 陈志远, 等. 不耦合装药对炸药能量利用率影响的实验研究[J]. 爆破, 2020, 37(3): 34-39.

YUE Z W, HU X B, CHEN Z Y, et al. Experimental study on the effect of uncoupled charge on energy utilization efficiency of explosive [J]. Blasting, 2020, 37(3): 34-39.

[9] 杨哲峰, 高诗明, 陈建平. 光面爆破径向不耦合系数优化研究[J]. 公路, 2015, 6(4): 292-296.

[10] 张理维, 王卫华, 戴怡文. 基于岩石爆破损伤的炮孔布置优化研究[J]. 爆破, 2020, 37(1): 32-39.

ZHANG L W, WANG W H, DAI Y W. Blast hole arrangement optimization based on rock blasting damage [J]. Blasting, 2020, 37(1): 32-39.

[11] 蔡峰, 刘泽功. 水不耦合装药对深孔预裂爆破应力波能量的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(8): 16-21.

CAI F, LIU Z G. Impact of water decoupling charging on the energy of stress waves generated by blast in the process of deep-hole presplit blast in coal-bed [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(8): 16-21.

[12] 康永全, 薛里, 孙崔源, 等. 间隔不耦合装药结构形式及特点分析[J]. 工程爆破, 2020, 26(5): 62-67.

KANG Y Q, XUE L, SUN C Y, et al. Structural form and characteristic analysis of charge structure with deck decoupling [J]. Engineering Blasting, 2020, 26(5): 62-67.

[13] 龚玖, 汪海波, 王梦想, 等. 空气和水不耦合装药对爆破块度影响分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(9): 105-110.

GONG J, WANG H B, WANG M X, et al. Analysis on influence of water and air decoupling charge on blasting fragmentation [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(9): 105-110.

[14] 李江华, 叶义成, 姚团, 等. 缓倾斜薄:中厚矿床浅孔落矿对围岩爆破损伤的数值模拟研究[J]. 爆破, 2017,34(1):85-93.

LI J H, YE Y C, YAO N, et al. Numerical simulation study of blasting damage caused by short hole mining in gently inclined thin-medium thick ore deposit [J]. Blasting, 2017, 34(1): 85-93.

[15] 方秦, 孔祥振, 吴昊, 等. 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 197-204.

FANG Q, KONG X Z, WU H, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 197-204.

[16] 黄佑鹏, 王志亮, 毕程程. 岩石爆破损伤范围及损伤分布特征模拟分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(5): 95-102.

HUANG Y P, WANG Z L, BI C C. Simulation analysis of blast-induced damage scope and its distribution characteristics of rocks [J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(5): 95-102.