

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.04.013

## 节理岩体隧道爆破周边孔分区布设方法与 应用研究\*

张凯<sup>1a</sup>, 陶铁军<sup>1b</sup>, 田兴朝<sup>1a</sup>, 刘璇<sup>2</sup>, 覃鹤<sup>2</sup>, 张明伟<sup>3</sup>

(1. 贵州大学 a. 土木工程学院; b. 矿业学院, 贵阳 550025; 2. 贵州建工集团第一建筑工程有限责任公司, 贵阳 550002;  
3. 贵州省公路工程集团有限公司, 贵阳 550000)

**摘要:** 节理的存在会影响爆炸应力波传播,其走向与周边孔连的夹角和相对位置的变化会对爆破效果产生不同的影响。基于应力波在不同角度节理岩体中的衰减规律,提出了节理岩体隧道爆破周边孔分区布设方法,对节理与周边孔连线夹角为 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 以及平行时的周边孔参数进行了优化。结合LS-PREPOST数值仿真和现场爆破试验,从岩体损伤深度和爆破振动速度方面对分区布设方法进行了验证。结果表明:通过对周边孔的分区布设,岩体的损伤深度与爆破振动速度明显优于原始周边孔布设方案。结合铜梁至安岳高速公路巴岳山隧道研究段地质条件,将节理与周边孔连线夹角为 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 以及平行时的周边孔间距分别设置为43 cm、50 cm、58 cm、60 cm。爆破后平均超挖值可控制在18 cm,每延米混凝土超耗均控制在100%以内。研究结果为大断面节理岩体隧道爆破超欠挖控制提供参考。

**关键词:** 隧道爆破; 数值仿真; 分区布设; 节理

中图分类号: TD235 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)04-0107-09

## Research on Zoning Layout Method and Application of Contour Holes for Blasting of Jointed Rock Mass Tunnel

ZHANG Kai<sup>1a</sup>, TAO Tie-jun<sup>1b</sup>, TIAN Xing-chao<sup>1a</sup>, LIU Xuan<sup>2</sup>, QIN He<sup>2</sup>, ZHANG Ming-wei<sup>3</sup>

(1. a. School of Civil Engineering; b. School of Mining and Technology, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Construction Group First Construction Engineering Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 4. Guizhou Highway Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

**Abstract:** The rock mass joints can affect the propagation of explosive stress waves. The angle between their direction and the surrounding holes and the relative position changes have different effects on the blasting effect. Based on the attenuation law of stress waves at different jointed angles, a method was proposed for zoning the surrounding holes of tunnel blasting in jointed rock masses. The parameters of the surrounding holes are optimized when the angle

收稿日期 (Date of reception): 2023-12-04

网络首发日期 (Published online): 2024-03-21

作者简介: 张凯 (1999-), 男, 硕士, 主要从事隧道工程、结构工程研究, (E-mail) 510833583@qq.com。

通讯作者: 陶铁军 (1984-), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事隧道工程、爆破工程科研, (E-mail) tjtao@gzu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目 (52064008); 贵州省高层次创新型人才 (百层次) 项目 (黔科合平台人才-GCC[2022]004-1); 贵州省科技计划项目 (黔科合成果[2021]一般087); 贵州省科技计划项目 (黔科合支撑[2023]一般358)

**About the author:** ZHANG Kai (1999-), male, master degree, mainly engaged in research on tunnel engineering and structural engineering, (E-mail) 510833583@qq.com.

**Corresponding author:** TAO Tie-jun (1984-), male, Ph. D, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in research on tunnel engineering and blasting engineering, (E-mail) tjtao@gzu.edu.cn.

**Fund Programs:** National Natural Science Foundation of China Regional Science Foundation Project (52064008); Guizhou Province High level Innovative Talents (Hundred Level) Project (Guizhou Science and Technology Cooperation Platform Talents-GCC[2022]004-1); Guizhou Provincial Science and Technology Plan Project (Qianke Synthetic Fruit[2021] General 087); Guizhou Provincial Science and Technology Plan Project (Supported by Qiankehe[2023] General 358)

between the joint and the surrounding hole is  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ , and  $0^\circ$  (parallel). The zoning layout method was validated by combining LS-PREPOST numerical simulation and on-site tests regarding rock damage depth and blasting vibration speed. The results show that the rock mass's damage depth and blasting vibration speed under the zoning arrangement of surrounding holes are significantly better than that of the original layout plan of surrounding holes. Based on the geological conditions of the research section of the Bayueshan Tunnel of the Tongliang Anyue Expressway, the angles between the joints and the surrounding holes are set to  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , and  $90^\circ$ , respectively. The spacings between the surrounding holes are set to 43 cm, 50 cm, 58 cm, and 60 cm when the joints parallel the surrounding holes. The average over-excavation value can be controlled at 18cm after blasting, and the over-consumption of concrete is controlled within 100% per linear meter.

**Key words:** tunnel blasting; numerical simulation; zoning layout; joint

钻爆法由于其经济高效的优点,在我国隧道及地下工程开挖中始终占据主导地位。而如何解决超欠挖问题一直是爆破施工中的难点,超欠挖不仅会影响隧道开挖轮廓效果,也会增加施工成本,降低施工进度。同时,在节理的影响下爆破超欠挖控制变得更为复杂,节理与周边孔连线的夹角和相对位置的变化会对爆破效果产生不同程度的影响。因此,提出节理影响下的隧道爆破周边孔分区布设,进行不同区域周边孔参数优化对爆破超欠挖控制具有重要意义。

张继春等人使用低爆速、小直径的专用光面爆破炸药有效地减弱围岩爆破损伤、控制超欠挖问题<sup>[1]</sup>。于飞飞等通过对炮孔间距<sup>[2]</sup>、“长短眼”加“空眼”的组合布孔,增加辅助眼等进行优化进而减少超欠挖面积,达到良好的爆破效果。张运良等根据大林隧道工程特点<sup>[3]</sup>,通过控制周边孔的外插角,不断调整光面爆破参数进行优化。节理存在会使爆炸应力波形成反射、透射和应力集中作用等现象。Perino A. 等推导了交叉节理中应力波的传播与衰减规律<sup>[4]</sup>。李新平等通过模型试验对弹性波在深部裂隙岩体中的传播衰减规律进行了研究<sup>[5]</sup>。杨仁树等基于 ABAQUS/EXPLICIT 的有限元数值模型研究<sup>[6]</sup>,得到了爆炸应力波传播在节理岩体中的传播规律。邓祥辉等针对水平层状岩隧道拱顶处<sup>[7]</sup>,即与周边孔连线平行位置,通过内移周边眼、适当增加周边眼间距、减少装药量以及非连续装药等措施来控制超挖、欠挖等问题。李国庆等通过数值模拟分析了节理和地应力对周边孔爆破的影响<sup>[8]</sup>,对周边孔间距进行了优化,降低了超欠挖面积得到良好的爆破效果。徐帮树等针对节理裂隙发育的水平层状岩体隧道<sup>[9]</sup>,提出周边孔“长短孔+空孔”的布设,采用优化的爆破参数进行开挖,隧道轮廓最大线性超欠挖明显减小。

以上学者对节理岩体隧道爆破机理与周边孔参数优化展开了诸多研究,显著改善了隧道爆破效果,

但基本集中在周边孔整体的参数优化方面,由于周边孔连线与节理的夹角和相对位置变化,岩体损伤和超欠挖程度也将产生较大变化<sup>[10,11]</sup>,因此,迫切需要开展节理岩体隧道爆破周边孔分区布设方法研究。本文以巴岳山隧道为工程背景,基于应力波在不同角度节理岩体中的衰减规律,提出了节理岩体隧道爆破周边孔分区布设方法。通过室内实验测定层理板岩的动静力学参数,确定了节理与周边孔连线平行以及夹角为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  时的周边孔间距。结合 LS-PREPOST 数值仿真和现场爆破试验,从岩体损伤深度和爆破振动速度方面对分区布设方法进行了验证。本文的研究结果可为大断面节理岩体隧道爆破超欠挖控制提供参考。

## 1 节理作用下周边孔孔距的确定

炮孔起爆后,应力波在完整岩体中的传播随着距离增加而产生几何衰减和物理衰减<sup>[12]</sup>,应力波的空间能量分布的增加导致的衰减是几何衰减,波阵面上质点振速和应力均以  $r^{-1/2}$  衰减<sup>[13]</sup>, $r$  为波阵面与炸药之间的距离,波阵面上任一点的衰减速度  $v_r$  为

$$v_r = v_0 \sqrt{r_0/r} \quad (1)$$

式中: $r_0$ 、 $v_0$  分别为初始波阵面的半径和振速。完整岩体中波阵面的物理衰减是由介质传播内部微裂缝的效应产生的。且质点振速随距离增加呈负指数衰减

$$v_r = v_0 \sqrt{r_0/r} + e^{-\alpha r} \quad (2)$$

根据应力波传播理论,柱状波阵面引起岩体内部某点的径向应力为  $\sigma_r$ ,

$$\sigma_r = \rho c_r v_r \quad (3)$$

根据弹性力学理论,在切向应变  $\varepsilon_\theta$  不考虑的情况下,认为岩体内的径向应力为  $\sigma_r$ ,

$$\sigma_r = E_d \varepsilon_r \quad (4)$$

综合式(3)和式(4),可得

$$\varepsilon_r = \frac{\rho c_r}{E_d} \quad (5)$$

式中: $E_d$  为动态弹性模量。假定模型材料的密度、径向波速和弹性模量在爆破过程中均保持不变,则波阵面上任一质点的径向应变和振速近似成正比关系,可认为质点的径向应变和振速近似相同,即

$$\varepsilon_r = \varepsilon(\sqrt{r_0/r} + e^{-\alpha r}) \quad (6)$$

本文针对不同走向节理对隧道爆破效果的影响进行研究,在文中提到的节理与周边孔连线的夹角均指节理的走向与周边孔连线的夹角。董千通过模型试验得到了不同节理角度下应力波的透射系数<sup>[14]</sup>,并得出完整岩石中柱面波的物理衰减系数  $a$  随围压  $\sigma$  的变化关系

$$\alpha = 0.0332\sigma^3 - 0.08596\sigma^2 - 0.0036\sigma + 0.649 \quad (7)$$

由于本文参考工程研究段为浅埋隧道,可忽略地应力的影响,故取围压  $\sigma = 0$ ,得到不考虑围压时完整岩石中柱面波物理衰减系数  $a = 0.649$ ,则不考虑围压时完整岩石中的径向应力衰减规律

$$\sigma_r = \sigma_0(\sqrt{r_0/r} + e^{-0.649r}) \quad (8)$$

节理的存在会对爆炸应力波产生衰减作用,应力波在节理处会产生多次折射、反射,会大大地影响质点的径向应力衰减规律,因此,需建立含层面质点的径向应力衰减关系

$$\sigma_r' = K\sigma_0(\sqrt{r_0/r} + e^{-0.649r}) \quad (9)$$

式中: $K$  为层理修正系数<sup>[15]</sup>,与层理性质相关,  $0 \leq K \leq 1$ 。

据式(8),考虑节理存在的影响,距炮孔中心  $r$  处的径向应力和切向应力分别为

$$\sigma_r' = KP_0[\sqrt{r_0/r} + e^{(-0.649)r}] \quad (10)$$

$$\sigma_\theta = b\sigma_r' \quad (11)$$

式中: $r_0$  为炮孔半径; $b$  为侧压力系数,  $b = \mu_d / (1 - \mu_d)$ ,  $\mu_d$  为动泊松比。

应力波与爆生气体共同作用理论认为,岩体裂隙的形成条件为

$$2r_b P_b = (D_p - 2R)\sigma_{td} \quad (12)$$

式中: $D_p$  为周边孔孔距; $P_b$  为炮孔内充满爆生气体时的压力,Pa。基于熵膨胀理论,炮孔内充满爆生气体时的压力  $P_b$  为

$$P_a = (P_a/P_k)^{k/h} (V_c/V_b)^k P_k \quad (13)$$

式中: $P_a$  为爆压,MPa; $P_k$  为爆生气体膨胀过程中的临界压力,取 100 MPa; $V_c$ 、 $V_b$  分别为药卷和炮孔体积; $k$  为炸药绝热系数; $h$  为炸药等熵系数,  $k = h = 3.0$ 。

由此得出节理作用下的周边孔孔距计算表达式

$$D_p = 2(R + r_b P_b / \sigma_{td}) \quad (14)$$

当周边孔连线与节理走向平行时,虽然炮孔间应力波未穿越节理,没有受到节理的衰减作用,但应力波在平行炮孔的节理或层理面处反射,形成反射拉伸波,导致靠近节理一侧岩石损伤程度增大<sup>[15]</sup>,爆破后软弱结构面失效而脱离围岩的岩体受到重力因素的影响,容易造成正常岩体大面积脱落。且因为岩体抗压能力远大于抗拉能力,位于平行层理之间的岩体受到拉伸破坏,更容易形成超挖现象。

当周边孔连线与节理走向平行时,在两炮孔间能形成贯通裂缝的基础上,适当增大炮眼间距,可减轻节理弱面的破坏,改善光面爆破效果<sup>[16]</sup>。

## 2 基本力学参数确定

巴岳山隧道位于重庆市位于铜梁区,研究段围岩级别为IV级,围岩岩性以板岩为主,且存在多条与水平成  $30^\circ$  的节理裂隙,其与炮孔连线形成不同的夹角和相对位置。对地勘资料选取地址情况变化稳定的同一施工段的同一岩块进行取样,在室内按照国际岩石学会实验要求将岩石打磨成标准试件,试样尺寸分别为:单轴和三轴岩样  $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 、劈裂岩样  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 、SHPB 岩样  $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 。按照层理角度将试件分为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  的层理板岩试样,开展动静力学试验,为理论计算和数值模拟提供基本力学参数。巴岳山隧道及各角度层理板岩试样如图 1 所示。

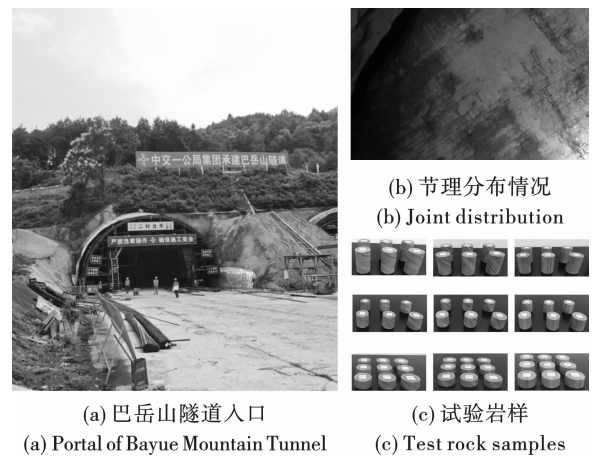


图 1 巴岳山隧道

Fig. 1 Bayue mountain tunnel site

由实验得到的静力学参数如表 1 所示。

动力学实验采用阿基米德工业科技有限公司研制的分离式 Hopkinson 压杆测试系统 ALT100,如图 2 所示。主要部件包括操作台、压杆主体部分以及

数据采集部分。压杆主体部分包括炮管、撞击杆、入射杆、透射杆、能量吸收器以及相应的气压装置。

表 1 不同角度节理板岩静力学参数

Table 1 Static parameters of jointed slate at different angles

节理角度/ $^{\circ}$	密度 $\rho/$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	抗拉强度 $f_c/\text{MPa}$	抗压强度 $T/\text{MPa}$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比
30	2 762.64	8.81	68.72	77.09	0.27
60	2 746.28	5.94	34.43	45.49	0.22
90	2 749.36	3.27	164.44	108.77	0.25

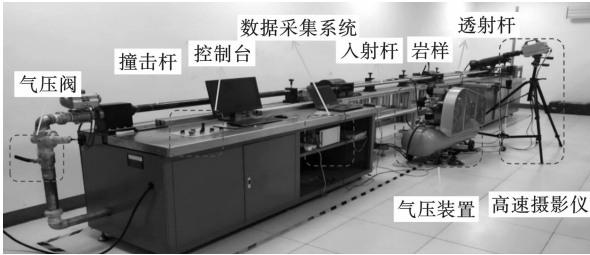


图 2 SHPB 试验系统  
Fig. 2 SHPB test system

分别以 0.15 MPa、0.2 MPa 和 0.3 MPa 的冲击气压对 30°、60°、90° 节理板岩岩样进行冲击压缩试验。得到各角度节理岩样不同冲击气压下破坏的峰值应力如表 2 所示。

表 2 各角度节理岩样不同冲击气压下破坏的峰值应力(单位:MPa)

Table 2 Peak stress of jointed rock samples at different angles under different impact pressures(unit:MPa)

节理角度/ $^{\circ}$	冲击气压/MPa		
	0.15	0.2	0.3
30	89.83	106.12	138.14
60	73.81	91.25	114.86
90	163.74	184.56	229.96

### 3 数值分析

#### 3.1 模型建立

结合隧道现场实况,计算周边孔连线与节理夹角为 30°、60°、90° 的周边孔间距,现场采用 2#乳化炸药<sup>[15]</sup>,密度为 1240  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,爆速为 4200  $\text{m}/\text{s}$ ,炮孔直径 42 mm,药卷直径 32 mm,以倾角为 90° 为例,节理修正系数  $K$  为 0.409,动态泊松比  $\mu_d = 0.8\mu = 0.2$ , $b = \mu_d / (1 - \mu_d) = 0.25$ ,动态抗拉强度为 3.27 MPa,计算得裂隙区半径  $R = 20.1$  cm。爆压  $P_a = 3.7774$  GPa, $P_b = 24.6$  MPa。则周边孔孔距为

$$D_p = 2(R + r_b P_b / \sigma_{td}) = 58 \text{ cm}$$

田兴朝定义节理修正系数  $K$  为穿越节理前的

应力时程曲线峰值与式(8)计算的应力峰值的比值<sup>[15]</sup>,结合董千的模型试验<sup>[14]</sup>,采用模型试验中测点应力时程曲线峰值数据与(8)计算测点的应力峰值相比,计算出了不同角度节理修正系数  $K$ ,将  $K$  值代入式(10),结合式(14)即可计算出不同节理与周边孔连线夹角的周边孔间距如表 3 所示。

表 3 不同节理倾角的周边孔间距

Table 3 Contour hole spacing at different joint angles

节理倾角	30°	60°	90°
节理修正系数 $K$	0.490	0.440	0.409
周边孔间距/cm	43	50	58

结合 LS-PREPOST 软件,分别建立周边孔分区布设和均匀布设下(周边孔间距固定为 50 cm)的节理岩体隧道爆破三维数值分析模型,如图 3 所示。模型尺寸为 20 m  $\times$  20 m  $\times$  2 m,炮孔直径 42 mm,炮孔深度 1.4 m,药卷直径 32 mm。岩石定义为固体,采用 HJC(Holmquist-Johnson-Cook)本构模型,参数如表 4 所示。节理参数如表 5 所示。炸药、空气定义为流体,参数如表 6 和表 7 所示。流体采用共节点方式划分网格,固体与流体之间通过流固耦合方式连接。除自由面外,所有面皆设置为无反射边界条件。

对于周边孔均匀布设方案,结合现场,从断面整体上考虑节理对爆破效果的影响,将周边孔孔距设置为 50 cm,如图 3(a)所示。

对于周边孔分区布设方案,将周边孔按不同节理与周边孔连线的夹角和相对位置将周边孔分成 7 个区域布设,如图 3(b)所示。为方便计算和现场施工,位置 1、5、7 节理与炮孔连线角度可视为 60°,周边孔间距设为 50 cm;位置 2、4 节理与炮孔连线角度可视为 30°,周边孔间距设为 43 cm;位置 6 节理与炮孔连线角度可视为 90°,周边孔间距设为 58 cm;位置 3 周边孔连线与节理方向平行处,由于应力波在节理面出现反射拉伸作用,易使节理弱面岩体产生拉伸破坏,且在岩体自重作用下,会形成大面积脱

落。结合崔新壮等人对周边孔连线与节理方向平行处的周边孔参数进行优化的研究<sup>[12,13]</sup>,通过适当增加炮孔间距,考虑到 90°节理对应力波传播影响最小<sup>[14]</sup>,炮孔间距为 58 cm,将平时孔距由原方案 50 cm 调整为 60 cm,略大于节理为 90°的孔距,炮孔间既能形成贯通裂缝,也能降低对节理面的破坏作用。

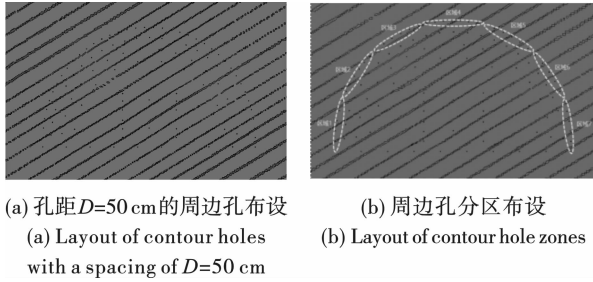


图 3 三维模型图

Fig. 3 Three-dimensional model

### 3.2 材料模型与参数确定

#### (1) 岩石模型与参数

板岩本构模型选用 HJC 本构模型<sup>[17]</sup>,HJC 本构模型包含基本物理及力学参数,强度参数,损伤参数以及压力参数。

由动、静力学实验得出基本力学参数,如表 4 所示;以 0.15 MPa 冲击气压试验结果为例,从特征化抗拉强度  $T^* = T/f_c$  出发,绘制经过不同应变率下等效强度数据点的直线,以恒定特征化静水压力  $P^* = 1/3$  做垂直于横轴的垂线,与不同斜率直线的交点为特征化等效应力。拟合不同应变率下特征化等效应力得出应变率影响系数  $C = 0.000624$ ,如图 4

所示。

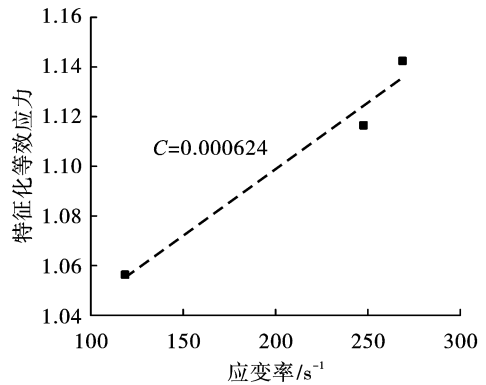


图 4 特征化等效应力与应变率关系

Fig. 4 Relationship between characteristic equivalent stress and strain rate

依据板岩的三轴压缩试验结果,计算得出黏聚力  $c = 19$  MPa,特征化凝聚强度  $A = c(1 + \ln 10^{-4})/f_c$ ,代入应变率影响系数  $C = 0.000624$ ,即可得出特征化凝聚强度  $A = 0.4$ 。依据  $\sigma^* = (\sigma_1 - \sigma_3)/f_c$  和  $p^* = (2\sigma_1 + \sigma_3)/3f_c$ ,绘制  $\sigma^* - P^*$  曲线,拟合可得出参数  $B, N$  的取值分别为 0.632、2.335。 $SFMAX$  和  $EPSO$  依据文献<sup>[17]</sup>分别取 20.0、1.0;损伤参数  $D_1 = 0.01/(1/6 + T^* = 0.02)$ ,  $D_2$  取常数 1.0。 $EFMIN$  和  $F_s$  依据文献<sup>[17]</sup>分别取 0.01、0.004;压力参数  $P_c = f_c/3 = 11.48$  MPa。 $\mu_c = P_c/K = 0.0057$ ,  $\mu_l$  由式  $\mu_l = \rho_g/\rho_0 - 1 = 0.1$  求得,其中  $\rho_g$  为压实密度,取 2900 kg/m<sup>3</sup>。参数  $P_l, K_1, K_2, K_3$  为非敏感参数,本文参考文献<sup>[17]</sup>的研究结果进行取值。板岩本构模型参数如表 4 所示。

表 4 板岩本构模型参数

Table 4 Slate constitutive model parameters

基本物理及力学参数		强度参数		损伤参数		压力参数	
$\rho$	2755.3 kg · m <sup>-3</sup>	$A$	0.4	$D_1$	0.02	$P_c$	11.48 MPa
$f_c$	34.43 MPa	$B$	0.632	$D_2$	1.0	$\mu_c$	$5.7 \times 10^{-4}$
$G$	10.26 GPa	$C$	0.000624	$EFMIN$	0.01	$P_l$	2.0 GPa
$T$	5.94 MPa	$N$	2.335	$F_s$	0.004	$\mu_l$	0.056
		$SFMAX$	20.0			$K_1$	39 GPa
		$EPSO$	1.0			$K_2$	-223 GPa
						$K_3$	550 GPa

#### (2) 节理模型与参数

节理材料本构模型选取 003 号材料模型 \* MAT\_PLASTIC\_KINEMAT,其基本参数如表 5 所示<sup>[18]</sup>。

#### (3) 炸药模型与参数

炸药材料本构模型选取 008 号材料模型 \* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN,其基本参数如表 6

所示<sup>[19]</sup>。

表 5 节理材料基本参数

Table 5 Basic parameters of joint materials

密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa	剪切模量/ GPa
2500	30	0.3	4	11.5

(4)空气模型与参数

\_NULL,基本参数如表 7 所示<sup>[20]</sup>。

空气材料本构模型选取 009 号材料模型 \* MAT

表 6 乳化炸药基本参数

Table 6 Basic parameters of emulsion explosive

密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	爆速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0/\text{GPa}$	$V$
1240	4200	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192	1

表 7 空气材料基本参数

Table 7 Basic parameters of air materials

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E$	$V_0$
1290	0	0	0	0	0.4	0.4	0	$2.5e-6$	1

(5)炮泥模型与参数

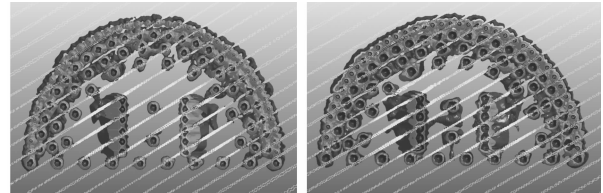
炮泥材料本构模型选取 005 号材料模 \* MAT\_S OIL\_AND\_FOAM,其基本参数如表 8 所示<sup>[21]</sup>。

表 8 炮泥材料基本参数

Table 8 Basic parameters of mortar material

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{GPa}$	$\mu$
1 850	$1.6e-4$	0.3

可用于估算隧道爆破后的超欠挖值<sup>[22]</sup>。因此绘制两种周边孔间距不同设置方案模拟的红色损伤深度轮廓线,如图 6(a)、(b)所示。



(a) 均匀布设 ( $D=50\text{ cm}$ ) 的损伤云图  
(b) 分区布设的损伤云图  
(a) Damage cloud map for uniformly distributed contour holes ( $D=50\text{ cm}$ )  
(b) Damage cloud map for zoning distributed contour holes

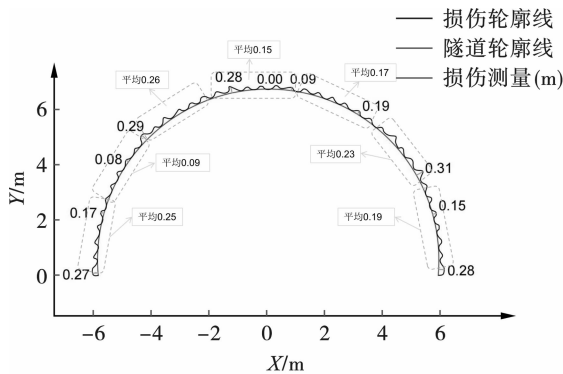
图 5 损伤云图

Fig. 5 Damage cloud map

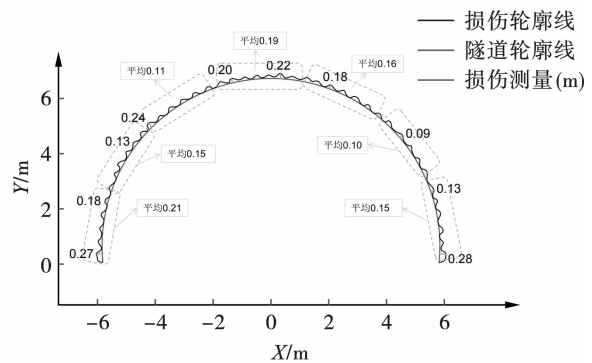
3.3 结果分析

3.3.1 保留岩体损伤深度分析

提取模拟结果的损伤云图,如图 5(a)、(b)所示,从红色时损伤值接近 1 向绿色和蓝色依次下降趋于 0。由 J Wang 等人研究表明红色损伤深度线



(a) 均匀布设 ( $D=50\text{ cm}$ ) 的损伤深度轮廓线  
(a) Contour lines of damage depth for uniformly distributed contour holes ( $D=50\text{ cm}$ )



(b) 分区布设的损伤深度轮廓线  
(b) Damage depth contour line for zoning distributed contour holes

图 6 损伤深度轮廓线

Fig. 6 Damage depth contour line

由损伤深度轮廓线对比可看出周边孔分区布设的平均损伤小于原方案的损伤值。区域 1、区域 5 和区域 7 上节理与炮孔连线角度为  $60^\circ$  左右,计算炮孔间距为  $50\text{ cm}$ ,与原方案炮孔间距相同,保留岩

体的损伤深度较小,且无欠挖现象;区域 2 和区域 4 中节理与炮孔连线角度为  $30^\circ$  左右,由于  $30^\circ$  的节理对应力波的阻碍较大,原方案  $50\text{ cm}$  的孔间距会出现欠挖现象,分区布设的炮孔计算间距为  $43\text{ cm}$ ,岩

体损伤率大于原方案,但无欠挖现象;区域 3 节理与炮孔连线平行,由于应力波在节理界面反射出现应力波叠加,导致靠近节理一侧岩石损伤程度增大,单个炮孔损伤程度增加,通过调整炮孔间距,可减轻层理弱面的破坏<sup>[13]</sup>,原方案周边孔间距为 50 cm,优化后将周边孔间距设为 60 cm,优化后保留岩体的损伤深度减小;区域 6 中节理与炮孔连线角度为 90°左右,由于 90°节理对应力波传播的阻碍较小,原布设孔间距  $D = 50$  cm 保留岩体的损伤深度较大,分区布设计算炮孔间距为 58 cm,保留岩体的损伤深度小于原布设方案,且无欠挖现象。由上述结果分析,通过按节理与炮孔连线的夹角与相对位置对周边孔间距进行分区布设,保留岩体损伤深度小,且超欠挖得到有效控制,明显优于周边孔均匀布设方案。

### 3.3.2 峰值振动速度分析

在模型中取距离隧道轮廓线 0.5 m、1.0 m、1.5 m 和 2.0 m 处布设 4 组峰值振动速度测点,每组 41 个测点均匀分布在隧道轮廓线周围,峰值振动曲线如图 7 所示。随着与隧道轮廓线距离的增加,

平均峰值振动速度值逐渐减小,衰减幅度与节理分布位置有关。随着周边孔孔距的增加,各组的平均峰值振动速度值逐渐降低。周边孔分区布设方案和周边孔均匀布设方案的各位置平均峰值振动速度值如表 9 所示。

由图 7、表 9 可知,峰值振动速度越大,损伤深度越大,依据节理岩体峰值振动速度损伤准则<sup>[23]</sup>,对于硬岩,其阈值为 70 cm/s。结合 3.3.1 节分析结果可知,区域 1、区域 5 和区域 7 分区布设计算炮孔间距为 50 cm,与原方案炮孔间距相同,两方案的平均峰值振动速度相差不大,岩体的损伤深度较小,且无欠挖现象;区域 2、区域 4、区域 6 原方案平均峰值振动速度值相对较小,岩体的损伤深度较小,容易形成欠挖现象;区域 3 原方案平均峰值振动速度值相对较大,岩体的损伤深度较大,容易造成更大的超挖现象。

因此,结合保留岩体损伤深度和峰值振动速度方面考虑,周边孔分区布设方案优于原方案。

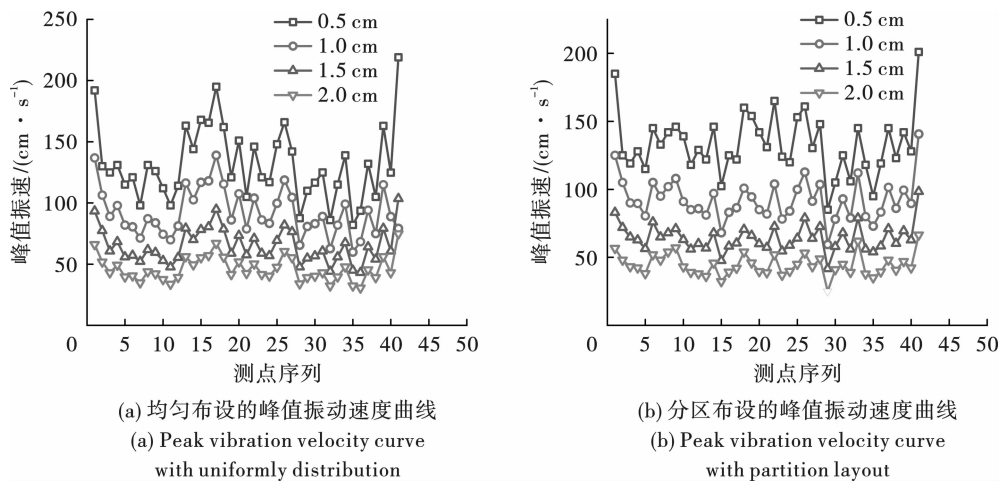


图 7 峰值振动速度曲线

Fig. 7 Peak vibration velocity curve

表 9 平均峰值振动速度

Table 9 Average peak vibration velocity

周边孔布置方案		平均峰值振动速度						
		区域 1	区域 2	区域 3	区域 4	区域 5	区域 6	区域 7
分区 布设	第 1 组	135	137	125	146	133	116	143
	第 2 组	98	98	84	91	92	86	100
	第 3 组	69	66	59	64	63	62	70
	第 4 组	47	48	39	44	43	43	47
$D = 50$ cm	第 1 组	138	112	158	134	129	110	139
	第 2 组	108	79	118	101	96	83	105
	第 3 组	79	59	85	73	71	59	75
	第 4 组	60	44	64	54	53	41	57

## 4 现场应用

基于理论与数值分析结果,在巴岳山隧道研究段开展了3次现场爆破试验。现场原爆破方案周边孔间距为50 cm。将周边孔进行分区布设优化,周边孔间距及孔网布设如图8所示。

上台阶爆破完成后,对各部位超欠挖值进行测量,如图9所示,3次试验超欠挖控制效果较好,最大超挖25 cm,最小超挖为8 cm,平均超挖控制在18 cm内。研究段混凝土设计值为 $15.1 \text{ m}^3$ ,3次现场试验的实际混凝土超耗量分别为 $11.1 \text{ m}^3$ 、 $12.3 \text{ m}^3$ 、

$10.6 \text{ m}^3$ ,平均混凝土超耗量为 $11.3 \text{ m}^3$ ,平均超耗率为75.1%,超耗率均控制在100%以内。

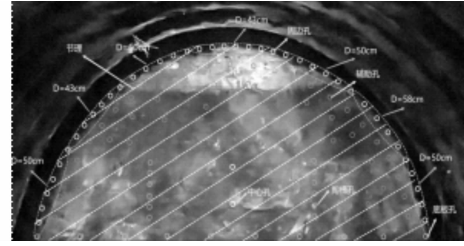
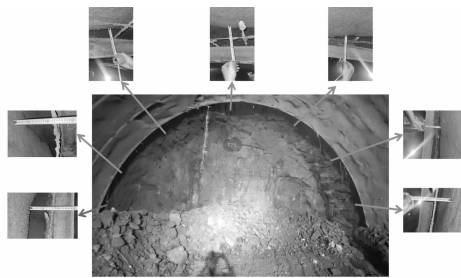


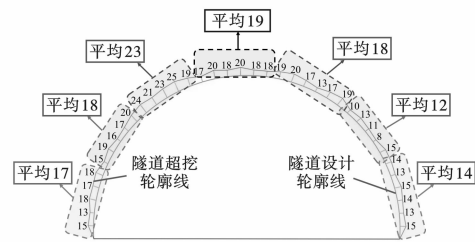
图8 现场爆破试验孔网布设图

Fig. 8 Layout diagram of on-site blasting test hole network



(a) 现场超挖测量图

(a) On-site overbreak measurement map



(b) 全断面隧道超挖示意图

(b) Schematic diagram of overbreak for entire section tunnel

图9 爆破效果

Fig. 9 Blasting effect

## 5 结论

(1)基于应力波在不同角度节理岩体中的衰减规律,针对节理岩体隧道爆破提出了按节理与炮孔连线夹角与相对位置的不同对周边孔进行分区布设的方法。

(2)通过理论分析和计算,将节理与周边孔连线夹角为 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 以及平行时的周边孔间距分别设置为43 cm、50 cm、58 cm、60 cm。在巴岳山隧道IV级围岩段开展了现场爆破试验,平均超挖值可控制在18 cm以内,每延米混凝土超耗均控制在100%以内,超欠挖和混凝土超耗控制效果较好。

(3)通过现场试验验证了本文所提节理岩体隧道爆破周边孔分区布设方法的合理性,有效地控制了超欠挖和混凝土超耗严重的问题,为大断面节理岩体隧道爆破超欠挖控制提供参考。

### 参考文献 (References)

- [1] 张继春,潘强,郑爽英,等. 特大断面公路隧道的光面爆破技术研究[J]. 爆破,2018,35(4):52-57.  
 [1] ZHANG Ji-chun, PAN Qiang, ZHENG Shuang-ying, et al. Technique of smooth blasting of highway tunnel with su-

per-large section[J]. Blasting, 2018, 35(4):52-57. (in Chinese)

- [2] 于飞飞,张娜,张宪堂,等. 水平层状岩隧道炮孔参数优化及爆破成形研究[J]. 爆破,2019,36(1):63-69.  
 [2] YU Fei-fei, ZHANG Na, ZHANG Xian-tang, et al. Blasting parameters optimization and blasting forming of horizontal layer rock tunnel[J]. Blasting, 2019, 36(1):63-69. (in Chinese)  
 [3] 张运良,曹伟,王剑,等. 水平层状岩体隧道超欠挖控制爆破技术[J]. 铁道科学与工程学报,2010,7(5):70-74.  
 [3] ZHANG Yun-liang, CAO Wei, WANG Jian, et al. Blasting technique for controlling excessive and insufficient excavation in tunnel with horizontal layered rock mass[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 7(5):70-74. (in Chinese)  
 [4] PERINO A, ORTA R, BARLA G, et al. Wave propagation in discontinuous media by the scattering matrix method[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2012, 45(5):901-918.  
 [5] 李新平,董千,刘婷婷,等. 地应力下柱面应力波在节理岩体中传播规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(S1):3121-3131.

- [5] LI Xin-ping, DONG Qian, LIU Ting-ting, et al. Research on propagation law of cylindrical stress wave in jointed rock mass under in-situ stress[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3121-3131. (in Chinese)
- [6] 杨仁树,许鹏,杨立云,等. 节理岩体中爆炸应力波传播规律的研究[J]. 金属矿山, 2016, 480(6): 49-54.
- [6] YANG Ren-shu, XU Peng, YANG Li-yun, et al. Study of regularity of explosive stress wave propagation in jointed rock mass[J]. Metal Mining, 2016, 480(6): 49-54. (in Chinese)
- [7] 邓祥辉,陈建勋,罗彦斌,等. 水平层状围岩隧道爆破控制技术[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(2): 73-80, 88.
- [7] DENG Xiang-hui, CHEN Jian-xun, LUO Yan-bin, et al. Blasting control technology of horizontal stratified rock tunnel[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37(2): 73-80, 88. (in Chinese)
- [8] 李国庆,陶铁军,刘霞,等. 地应力作用下节理岩体隧道爆破孔网布设方法研究[J]. 爆破, 2023, 40(3): 59-67.
- [8] LI Guo-qing, TAO Tie-jun, LIU Xia, et al. Research on blasting hole network layout method of jointed rock tunnel under ground stress[J]. Blasting, 2023, 40(3): 59-67. (in Chinese)
- [9] 徐帮树,张万志,石伟航,等. 节理裂隙层状岩体隧道掘进爆破参数试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(6): 1248-1255.
- [9] XU Bang-shu, ZHANG Wan-zhi, SHI Wei-hang, et al. Experimental study of parameters of tunneling blasting in jointed layered rock mass[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2019, 48(6): 1248-1255. (in Chinese)
- [10] 胡荣,朱哲明,张晓燕,等. 节理方位对岩石爆破的影响规律[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(S2): 41-44.
- [10] HU Rong, ZHU Zhe-ming, ZHANG Xiao-yan, et al. Effect of joint orientation on rock blasting[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(S2): 41-44. (in Chinese)
- [11] 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): 189-194, 204.
- [11] QU Shi-jie, LIU Ji-fei. Numerical analysis of joint angle effect on cracking with presplit blasting[J]. Geotechnical Mechanics, 2015, 36(1): 189-194, 204. (in Chinese)
- [12] 崔新壮,陈士海,刘德成. 在裂隙岩体中传播的应力波的衰减机理[J]. 工程爆破, 1999, 5(1): 18-21.
- [12] CUI Xin-zhuang, CHEN Shi-hai, LIU De-cheng. Attenuation mechanism of stress wave propagating in fractured rock mass[J]. Engineering Blasting, 1999, 5(1): 18-21. (in Chinese)
- [13] 王礼立. 应力波基础[M]. 2版. 国防工业出版社, 2005.
- [13] WANG Li-li. Fundamentals of Stress Waves[M]. Second Edition. National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [14] 董千. 不同地应力下节理岩体中爆炸应力波传播与衰减规律研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [14] DONG Qian. Study on propagation and attenuation law of blasting stresswave in jointed rock mass under different in-situ stresses[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [15] TIAN Xing-chao, TAO Tie-jun, LIU Xia, et al. Calculation of hole spacing and surrounding rock damage analysis under the action of in situ stress and joints[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 22331-22331.
- [16] 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): 956-959.
- [16] YANG Feng, CHEN Yong-quan, WANG Xin-ming, et al. Analysis of tunnel smooth blasting in horizontal layered rockmass[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2005(6): 956-959. (in Chinese)
- [17] Q Fang, X Z Kong, H Wu, et al. Method for determining parameters of rock Holmquist Johnson cook model[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 197-204.
- [18] 丁黄平. 节理裂隙岩体隧道爆破成型效果研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [18] DING Huang-ping. Study on the shaping effect of jointed rockmass under blasting in tunnel[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [19] 刘江超,高文学,王林台,等. 水封爆破装药结构优化数值分析及其应用[J]. 振动与冲击, 2020, 39(9): 57-62, 96.
- [19] LIU Jiang-chao, GAO Wen-xue, WANG Lin-tai, et al. Numerical analysis on the charge structure optimization under hydraulic blasting and its application[J]. Vibration and Impact, 2020, 39(9): 57-62, 96. (in Chinese)
- [20] 王平. 大断面隧道楔形掏槽爆破参数的优化[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- [20] WANG Ping. Optimization of wedge cut blasting parameters for large section[D]. Nanning: Guangxi University, 2020. (in Chinese)