

基于RHT本构的隧道爆破参数优化与振动损伤数值研究

汪大为, 王志亮, 汪书敏

Numerical study of tunnel blasting parameter optimization and vibration damage based on the RHT constitutive model

WANG Dawei, WANG Zhiliang, and WANG Shumin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

花岗岩循环爆破振动衰减规律与损伤演化机理试验

An experiment of attenuation law of vibration and evolution mechanism of damage of granite under cyclic blasting

钟靖涛, 王志亮, 田诺成 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 101-101

锦屏大理岩单轴压缩过程中的微结构演化

A study of mineral compositions and micro-structure characteristics for the Jinping marble

封陈晨, 李傲, 王志亮, 王浩然 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 90-96

动态冲击下锦屏大理岩力学响应与能量特性

Mechanical responses and energy characteristics of the Jinping marble under the dynamic impact

李傲, 王志亮, 封陈晨, 巫绪涛, 卢志堂, 李松玉, 贾帅龙 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 112-118

动态载荷下大理岩断口形貌特征试验研究

An experimental study of the fracture morphology of marble under dynamic loading

王伟祥, 王志亮, 贾帅龙, 卢志堂 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 118-124

基于微地震数据的增强型地热储层参数及采热的数值模拟研究

A study of numerical simulations for enhanced geothermal reservoir parameters and thermal extraction based on microseismic data

马子涵, 邢会林, 靳国栋, 谭玉阳, 闫伟超, 李四海 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 190-199

中试尺度下可渗透反应墙位置优化模拟——以铬污染地下水场地为例

A numerical simulation study of the position optimization of a pilot-scale permeable reactive barrier: a case study of the hexavalent chromium contaminated site

吕永高, 蔡五田, 杨骊, 边超, 李敬杰 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 189-195



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210009

汪大为, 王志亮, 汪书敏. 基于 RHT 本构的隧道爆破参数优化与振动损伤数值研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 129-136.

WANG Dawei, WANG Zhiliang, WANG Shumin. Numerical study of tunnel blasting parameter optimization and vibration damage based on the RHT constitutive model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 129-136.

基于 RHT 本构的隧道爆破参数优化与 振动损伤数值研究

汪大为, 王志亮, 汪书敏

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为了解决爆破参数优化问题以及考虑炮孔间相互作用对围岩损伤空间分布的影响, 先利用数值试算与冲击试验对照的方法, 标定出大理岩 Riedel-Hiermaier-Thoma 本构模型参数。接着, 对隧道全断面爆破开挖开展模拟计算, 考察了多炮孔间相互作用下围岩爆破损伤演化过程。最后, 基于起爆顺序、径向不耦合系数和分段间隔装药 3 种方法来优化爆破参数, 并对质点振动和围岩损伤进行了深入分析。结果表明: 标定所得的本构参数可准确描述大理岩动态应力-应变响应, 且模拟结果能很好地揭示爆破损伤演化规律; 岩石损伤从爆心处向外发展, 随后在炮孔连线上连接贯通; 相比于上述其他 2 种方法, 当径向不耦合系数 k 小于 1.33 时, 在保证爆破效果前提下改变 k 值能有效地降低围岩的爆破损伤; 隧道竖向平均振动速度要大于水平向的对应值, 且竖向拱顶和底板中部对爆破振动呈现较高的敏感性。研究结果为工程实践中爆破参数优化选取和围岩损伤精确评估等可提供参考。

关键词: 大理岩; 隧道爆破; 参数优化; 损伤演化; 数值模拟

中图分类号: U45

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)06-0129-08

Numerical study of tunnel blasting parameter optimization and vibration damage based on the RHT constitutive model

WANG Dawei, WANG Zhiliang, WANG Shumin

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: To solve the optimization problem of blasting parameters and consider the influence of interaction between blastholes on the spatial distribution of surrounding rock damage, the Riedel-Hiermaier-Thoma constitutive model parameters of marble were first calibrated from numerical trial calculation and impact test. Then, the blasting excavation of a tunnel in full section was numerically simulated, and the evolution process of blasting damage of surrounding rocks under the interaction of multiple boreholes was investigated. Finally, the blasting parameters were optimized based on the three methods of initiation sequence, radial uncoupling coefficient and segmented interval charge, and the particle vibration and surrounding rock damage were further analyzed. The results show that the obtained constitutive parameters accurately describe the dynamic stress-strain

收稿日期: 2022-10-08; 修订日期: 2023-02-17

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1965101); 国家自然科学基金项目(12272119)

第一作者: 汪大为(1998-), 男, 硕士研究生, 从事岩石动力学研究。E-mail: DavidW0564335@163.com

通讯作者: 王志亮(1969-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学特性与损伤破坏机理研究。E-mail: cviewzL@hfut.edu.cn

response of the marble, and the simulated results can well reveal the evolution law of blasting damage. The rock damage develops outward from the blasthole center, and then the damage is connected and coalesced along the borehole connection line. Compared with the aforementioned other two methods, when the radial uncoupling coefficient k is less than 1.33, the blast damage of surrounding rock can be effectively reduced by changing the k value on the premise of ensuring the blasting effect. The average vibration velocity in the vertical direction of tunnel is greater than that in the horizontal direction, and the apex of arch and the middle of floor in this direction are more sensitive to blasting vibration. The research results in this study can provide reference for optimum selection of blasting parameters and accurate evaluation of surrounding rock damage in practical engineering.

Keywords: marble; tunnel blasting; parameter optimization; damage evolution; numerical simulation

随着经济与科技的快速发展,地下空间的开发程度也随之增加,深部岩体中的复杂应力条件使得隧道开挖面临日趋严峻的挑战^[1]。未来相当长一段时期内,爆破仍将是岩石隧洞开挖的主要手段^[2-4]。因此,钻爆开挖损伤数值模拟与参数设计优化是土木和采矿等领域非常重要的课题之一。

为了合理进行爆破参数的优化以节约成本并保证开挖效果和围岩的稳定性,国内外学者做了大量的研究:王子琛等^[5]设计正交模拟试验对预裂爆破试验数据进行拟合和验证,获得了一组最优化爆破参数;刘优平等^[6]通过分析爆破模拟中的 Von Mises 有效应力信息,并结合破岩机制与屈服理论,确定了深孔爆破的最佳炮孔装药结构;杨跃宗等^[7]对径向不耦合系数、轴向不耦合装药位置和轴向不耦合系数等因素进行对比分析,发现随着径向不耦合系数增大,岩石破坏区逐渐减小,裂隙区占破坏区的比例逐渐增大;殷锦训等^[8]通过分析炮孔在爆破过程中关键时刻的有效应力云图,并将有效峰值应力与岩石最大动态抗拉强度对比,获取某铜矿扇形深孔中最优的孔网参数;He 等^[9]研究了预裂爆破的炮孔间距与起爆延时时对岩石裂纹形成的影响,得到了不同炮孔间距对应的合理起爆延时时;Yang 等^[10]通过三维数值模拟得到了基于应力失效准则的统计损伤演化规律,揭示了应力重分布和爆破损伤对围岩的综合影响;王海亮等^[11]对处于不同地应力水平下的单个岩石进行了爆破模拟,分析了裂隙的扩展、贯通过程。

上述研究为爆破参数的优化奠定了基础,但这些研究主要是基于局部模型和少量炮孔爆破的模拟效果来进行分析,未能考虑爆破时工作面炮孔间的相互影响。此外,关于围岩在空间分布上受振动影响的研究较少,爆破损伤演化规律阐述也不够深入。本文基于 Riedel-Hiermaier-Thoma(RHT)本构模型,运用 ANSYS/LS-DYNA 商业软件,构建三维隧道掌子面开挖全数

值模型进行计算,拟探究起爆顺序、装药不耦合系数和分段间隔装药等对围岩损伤的影响,并选用围岩振动速度来衡量爆破参数的优化效果,对实际工程中爆破参数优化及围岩开挖支护研究有一定指导意义。

1 岩石本构模型及参数

Holomquis-Johnson-Cook (HJC)模型^[12]和 RHT^[13]模型经常被用来模拟岩体工程爆破,研究表明 RHT 损伤本构模型能更好地描述岩石在动载荷下的损伤开裂和破碎失稳^[14]。

1.1 RHT 模型参数确定

采用锦屏二级水电站大理岩进行了一系列的物理力学试验,获得其密度 $\rho_0=2\ 812\text{ kg/m}^3$ 、单轴抗压强度 $f_c=130\text{ MPa}$ 、弹性剪切模量 $G=16.9\text{ GPa}$ 和单轴抗拉强度 $f_t=10.9\text{ MPa}$ 。本构中的应变率、破坏面及损伤参数的确定可参考李洪超等^[15]的大理岩 RHT 参数标定过程。

1.2 剩余参数的调整与优化

经参数敏感性分析发现,对数值结果影响较大的有拉伸屈服面参数 G_c^* 和 G_t^* 、失效面参数 A_t 和 N_t 以及剪压强度比 F_s^* 。本部分将根据模拟结果对它们进行调整和优化,而对模拟结果不敏感的参数取用 Borrvall 等人^[13]给定的数值。

剩余较难确定的参数采用 SHPB 冲击试验标定,岩样取自锦屏二级水电站埋深 2 000 m 隧道壁,经打磨加工后直径 50 mm、高 25 mm。试验装置主要由高压气腔室、子弹、入射杆、透射杆、缓冲装置、数据采集及分析系统等构成(图 1)。其中,子弹长度为 30 cm,入射杆和透射杆长度分别为 240 cm 与 140 cm。子弹和所有杆件均采用高强度合金钢制成,密度为 $7\ 900\text{ kg/m}^3$,波速为 $5\ 172\text{ m/s}$,弹性模量为 210 GPa 。通过预冲击

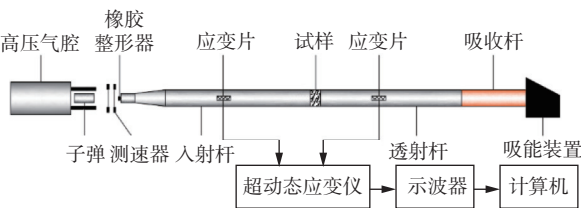


图 1 SHPB 装置
Fig. 1 SHPB device

确定合理的弹速区间, 最终的试验弹速为 15.61 m/s。
根据 SHPB 试验系统的入射杆、透射杆及试样的

实际尺寸按 1 : 1 的比例建模, 刚杆采用弹性本构, 试样采用 RHT 本构。以其它大理岩 RHT 参数^[14]为基础, 经反复试错, 选取模拟结果与试验数据吻合度高的一组参数(表 1)。数值模拟的应力-应变曲线与试验所得对比如图 2 所示, 可见二者峰值应力和峰值应变几乎相同。图 3 显示在动态冲击荷载下, 随着内部损伤不断积累, 试样破裂成较多碎块, 与试验结果较接近, 部分差异源于岩样内裂纹的离散性及数值方法的局限性。

表 1 锦屏大理岩 RHT 模型参数
Table 1 RHT model parameters of the Jinping marble

参数	取值	参数	取值	参数	取值
$\rho_0 /(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 812	F_1^*	0.10	$P_{\text{crush}}/\text{MPa}$	87
G/GPa	16.9	F_2^*	0.19	G_c^*	0.8
f_c/MPa	130	A_1/GPa	30.42	G_t^*	0.7
N	0.615	A_2/GPa	51.47	XI	0.7
β_1	0.013 3	A_3/GPa	31.46	D_1	0.04
B_0	0.9	Q_0	0.7	D_2	1
B_1	0.9	B	0.010 5	β_c	0.009 7
α_0	1.0	$EOC/(\text{s}^{-1})$	3.0E-5	A_f	1.3
T_1/GPa	30.42	$EOT/(\text{s}^{-1})$	3.0E-6	N_f	0.7
$P_{\text{lock}}/\text{GPa}$	8	A	2.34	N_p	3

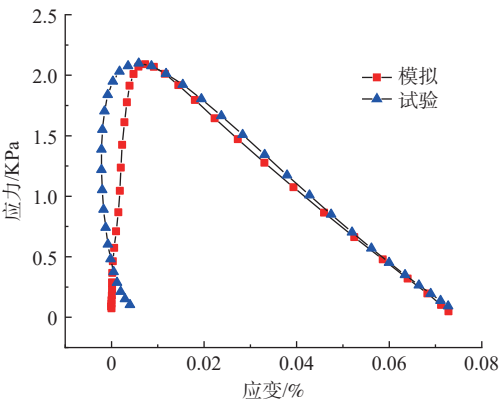


图 2 试样应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of rock samples

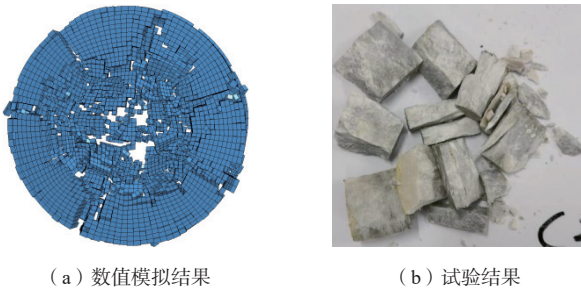


图 3 试样的破坏形态对比
Fig. 3 Comparison of failure mode of sample

2 隧道爆破开挖数值模拟

本次数值模拟工程背景为锦屏二级水电站引水发电系统引水隧洞的施工排水洞^[16], 其最大埋深 2 375 m, 实测最大主应力为 46 MPa, 隧洞主轴线方位为 58°。隧洞直径 7.2 m, 拟采用台阶法钻爆开挖, 取圆形隧洞的上半圆部分作为研究对象, 探究其爆破开挖损伤演化规律以及对爆破参数进行进一步优化。

2.1 基本爆破参数的确定

Wang 等^[17]对半圆形隧道爆破开挖进行模拟分析, 本文拟在其基础上开展深入研究。隧道开挖常用的炮孔直径为 35 ~ 40 mm, 本次模拟采用 40 mm; 炮孔间距一般为 12 ~ 20 倍炮孔直径, 本次模拟底板孔间距取 15 倍炮孔直径即 600 mm, 崩落孔和周边孔分别布置 15 和 18 个, 炮孔间距可近似为 600 mm, 掏槽孔的炮孔间距则根据距离崩落孔的距离做适当调整, 周边孔距围岩的距离为 500 mm。调整后的掌子面炮孔布置如图 4 所示。

2.2 数值建模及网格划分

数值模拟采用流固耦合算法, 岩石采用 Lagrange 算法, 炸药和空气采用 ALE 算法, 建立 3D-SOLID 全模型, 单位制为 g-cm-μs。其中, 炮孔深度 200 cm, 直径为

半径的 10 ~ 15 倍。本文装药半径为 2 cm, 理论上损伤域半径在 20 ~ 30 cm 之间, 通过测量, 图中圆形损伤域的半径处于 20 ~ 29 cm, 符合裂隙区半径在 10 ~ 15 倍装药半径的结果^[18]。

3 爆破参数的优化

爆破效果可以通过“炮痕率”来判断, 而围岩所受到的扰动则根据围岩的振动速度进行分析。本文定义达到爆破要求部分区域的颜色面积占工作面总面积的比例即为“炮痕率”, 具体判断方法为利用 Matlab 图像分析工具箱, 提取达到爆破要求部分区域的颜色面积占工作面总面积的比例。

3.1 起爆顺序的影响

在其它条件不变的前提下, 仅将上述起爆顺序改成先引爆周边孔和底板孔, 再依次引爆掏槽孔和崩落孔, 形成一个预裂爆破的控制效果。图 7 给出了不同时刻的爆破损伤分布, 可以看出周边孔的炸药起爆后, 在外轮廓形成了一圈连续损伤区域, 相同爆炸持续时间下, 后续损伤扩展与连通后的最终损伤域表明开挖效果较好。

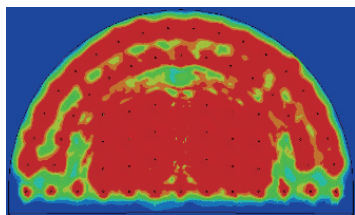


图 7 预裂爆破损伤

Fig. 7 Blasting damage of pre-split blasting

3.2 径向不耦合系数的影响

已有研究表明, 在不改变炮孔数量和炮孔间距的情况下增大不耦合系数, 可以节约成本和改善超挖现象, 并且降低对周边围岩的损伤。图 8 给出了 969 μ s 时 3 种不同耦合系数 ($k=2.0$ 、 $k=1.33$ 和 $k=1.14$) 下的损伤分布。

图中显示随着不耦合系数 k 的增大, 整体损伤连通区域和围绕炮孔的圆形损伤域均逐渐减小。 $k=2.0$ 时, 主爆区的损伤区域没有完全贯通形成整体, 仅在左右掏槽孔部分的中间连线位置产生了“十”字损伤区。 $k=1.33$ 时, 主爆区基本完成损伤的扩展与贯通, “炮痕率”超过了 50%, $k=1.14$ 时损伤演化程度较高, 故认为这两种情况都基本达到了爆破效果, 而 $k=1.14$ 时掌子面损伤域分布范围更大。

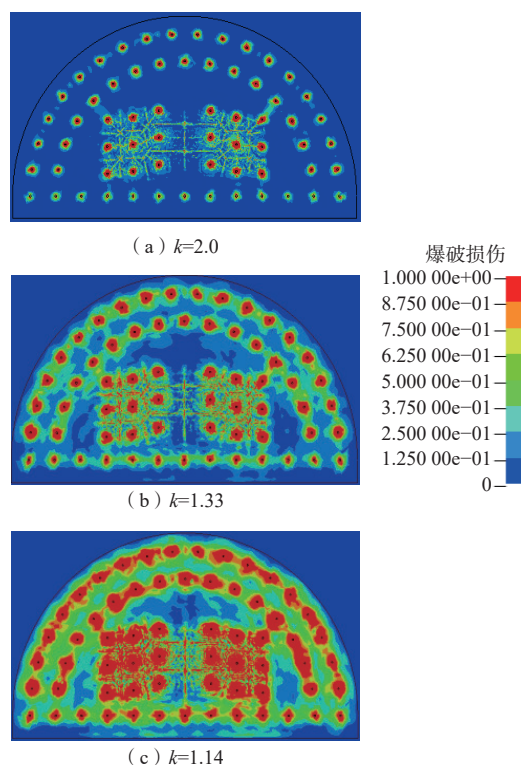


图 8 不同耦合系数爆破损伤

Fig. 8 Blasting damage with different coupling coefficients

3.3 间隔分段装药效应

图 9 为典型的三种装药结构, 它们的前端均采用 50 cm 的炮孔堵塞, 剩余部分分别是装药结构 I: 80 cm 炸药+40 cm 空气+80 cm 炸药; 装药结构 II: 60 cm 炸药+20 cm 空气+50 cm 炸药+20 cm 空气+50 cm 炸药; 装药结构 III: 30 cm 炸药+50 cm 空气+120 cm 炸药。



图 9 装药结构分类

Fig. 9 Classification of charge structure

从图 10 可以发现, 装药结构 I 的开挖效果最好, 爆破损伤区域覆盖范围大且炮孔之间均有损伤

贯通相连接,主爆区损伤域也相对完整;装药结构Ⅱ主爆区基本完成损伤的扩展与贯通,“炮痕率”超过了50%,周边孔和崩落孔的损伤区域连通也较好,裂纹可以顺利展开;装药结构Ⅲ则明显达不到爆破开挖的效果,岩块可能无法顺利被破碎。

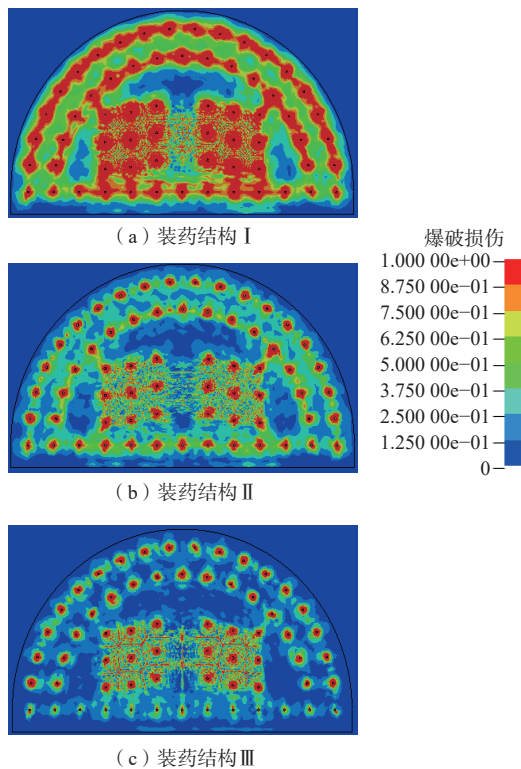


图 10 不同装药结构爆破损伤
Fig. 10 Blasting damage of different charging structures

3.4 优化参数对围岩的损伤影响研究

为了研究爆破参数优化方法对开挖工作面周边围岩的影响,分别在开挖工作面截面拱顶、拱肩、底脚和底板中部选取测点 A、B、C、D 进行振动速度监测,如图 11 所示。

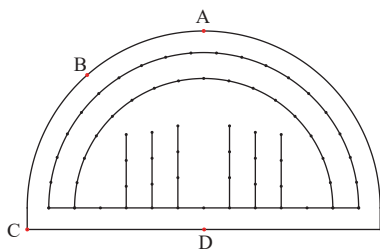


图 11 代表性监测点
Fig. 11 Representative monitoring points

图 12 展示了 4 个测点在各优化方法下振动速度的时程曲线。围岩的振动速度规律类似,即优化后最

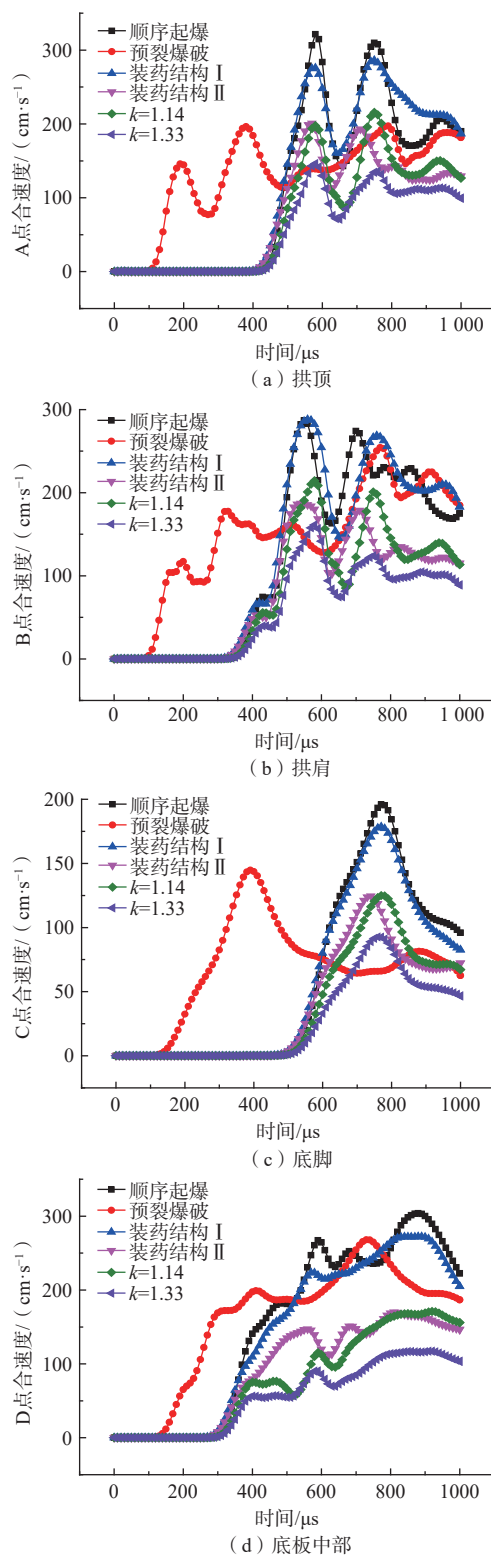


图 12 不同位置的合速度时间曲线
Fig. 12 Changes of velocity with time at different positions

大合速度均小于未经优化值,说明这几种方案都可以有效降低对围岩造成的损伤。拱顶和拱肩处顺序起爆方案的围岩在 600 μs 和 800 μs 前后产生两个速度

波峰, 对应先后起爆的崩落孔与周边孔将能量传递到工作面边缘的时间。底脚处, 预裂爆破在 $400\ \mu\text{s}$ 达到合速度峰值且后续都有下降的趋势, 推测是预裂缝的形成有效阻止了后续损伤区域的扩展; 底板中部处围岩振动速度呈稳步上升趋势, 相比其他位置最晚达到速度峰值。

图 13 为各测点在三个空间方向上的峰值振动速度, 其中 X 、 Y 和 Z 方向如图 5(a) 所示。可见装药结构 I 虽爆破效果好, 但其在各测点处、各个方向上的速度峰值均较大, 不利于降低围岩的损伤和扰动。预裂爆破则在水平轴向拱肩处振动速度偏大, 综合开挖爆破结果和对围岩造成的损伤, 改变径向不耦合系数的

优化效果最佳。围岩的竖直 Y 方向各位置平均振动速度大于 X 和 Z 方向, 所受损伤最为明显。同时, 不同位置围岩对爆破损伤的敏感性有所不同, 拱顶和底板中部在竖直方向受爆破产生的扰动较大, 拱肩则在 X 向受到最大程度的爆破振动影响。

4 结论

(1) 通过数值“试错”法, 可以标定出锦屏大理岩 RHT 本构模型中部分难以直接确定且敏感性较高的参数, 计算所得的应力-应变曲线与冲击试验测试结果基本一致, 采用标定后的一套本构参数能较好地揭示出此岩石的爆破损伤演化规律。

(2) 爆破损伤从炮孔处往外部扩展, 最终和周边炮孔的损伤区相互作用直到连接贯通, 两侧掏槽孔连线间先形成“十”字形损伤域再逐步连通; 主裂隙扩展明显, 裂隙区半径在 $10 \sim 15$ 倍装药半径之间, 与已有理论解析解等的结果基本一致。

(3) 为了达到预期的开挖效果, 改变径向不耦合系数 k 是个较好的方法。当 $k < 1.33$ 时, 调整 k 能有效降低爆破损伤; 竖向 Y 上平均振动速度要大于 X 和 Z 两水平方向上值, 且在拱顶和底板中部围岩对爆破振动敏感程度较高, 拱肩处的 X 向爆破扰动较大。

参考文献 (References) :

- [1] 王伟祥, 王志亮, 贾帅龙, 等. 动态载荷下大理岩断口形貌特征试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 118 - 124. [WANG Weixiang, WANG Zhiliang, JIA Shuailong, et al. An experimental study of the fracture morphology of marble under dynamic loading [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 118 - 124. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 吴运杰. 高地应力隧道岩爆破破坏机理及硐室稳定性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019. [WU Yunjie. Study on rock burst failure mechanism and chamber stability of high geostress tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 钟靖涛, 王志亮, 田诺成. 花岗岩循环爆破振动衰减规律与损伤演化机理试验 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 101 - 107. [ZHONG Jingtao, WANG Zhiliang, TIAN Nuocheng. An experiment of attenuation law of vibration and evolution mechanism of damage of granite under cyclic blasting [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 101 - 107. (in

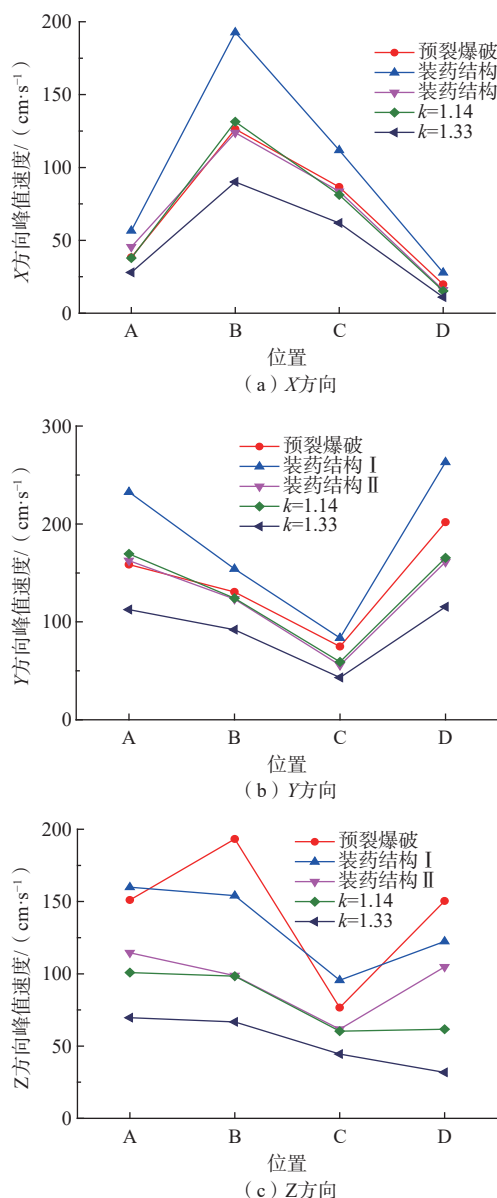


图 13 速度峰值空间分布图

Fig. 13 Spatial distribution of the peak velocity

- Chinese with English abstract)]
- [4] 姜守国, 罗帅兵, 蒋楠, 等. 深埋层状围岩引水隧洞直眼掏槽爆破技术优化 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 20 – 26. [JIANG Shouguo, LUO Shuaibing, JIANG Nan, et al. Optimization of direct-hole cutting blasting technology for deep-buried layered surrounding rock diversion tunnels[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 20 – 26. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王子琛, 李祥龙, 王惠芬, 等. 基于正交设计模拟实验的预裂爆破参数优化方法研究 [J]. 有色金属工程, 2021, 11(5): 96 – 101. [WANG Zichen, LI Xianglong, WANG Huifen, et al. Study on optimization method of pre-splitting blasting parameters based on orthogonal design simulation experiment[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(5): 96 – 101. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘优平, 龚敏, 黄刚海. 深孔爆破装药结构优选数值分析方法及其应用 [J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1883 – 1888. [LIU Youping, GONG Min, HUANG Ganghai. Numerical analysis method for optimizing charging structure of deep-hole blasting and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1883 – 1888. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 杨跃宗, 邵珠山, 熊小锋, 等. 岩石爆破中径向和轴向不耦合装药的对比分析 [J]. 爆破, 2018, 35(4): 26 – 33. [YANG Yuezong, SHAO Zhushan, XIONG Xiaofeng, et al. Comparison of radial and axial uncoupled charge in rock blasting[J]. Blasting, 2018, 35(4): 26 – 33. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 殷锦训, 王维, 游喻豪, 等. 湖北三鑫金铜矿扇形中深孔爆破参数优化数值模拟研究 [J]. 爆破, 2022, 39(2): 85 – 93. [YIN Jinxun, WANG Wei, YOU Yuhao, et al. Numerical simulation of Sanxin gold and copper mine in Hubei Province blasting parameters[J]. Blasting, 2022, 39(2): 85 – 93. (in Chinese with English abstract)]
- [9] HE Meng, HU Yehong, CHEN Jin, et al. Numerical simulation study on parameter optimization of time sequential controlled blasting[J]. Shock and Vibration, 2022, 2022: 1 – 12.
- [10] YANG Jianhua, LU Wenbo, HU Yingguo, et al. Numerical simulation of rock mass damage evolution during deep-buried tunnel excavation by drill and blast[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(5): 2045 – 2059.
- [11] 王海亮, 高尚, 张海义. 高地应力岩石双孔爆破损伤演化研究 [J]. 工程爆破, 2022, 28(2): 1 – 6. [WANG Hailiang, GAO Shang, ZHANG Haiyi. Research on damage evolution of rock caused by double-hole blasting under high *in situ* stress[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(2): 1 – 6. (in Chinese with English abstract)]
- [12] HOLMQUIST T, JOHNSON G R. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures[J]. Journal of Applied Mechanics, 2011, 78: 051003.
- [13] BORRVALL T, RIEDEL W. The RHT concrete model in LS-DYNA[C]//Proceedings of the 8th European LS-DYNA users conference. Strasbourg, 2011.
- [14] WANG Zhiliang, WANG Haochen, WANG Jianguo, et al. Finite element analyses of constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 135: 104172.
- [15] 李洪超, 刘殿书, 赵磊, 等. 大理岩 RHT 模型参数确定研究 [J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(8): 801 – 806. [LI Hongchao, LIU Dianshu, ZHAO Lei, et al. Study on parameters determination of marble RHT model[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(8): 801 – 806. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李傲, 王志亮, 封陈晨, 等. 动态冲击下锦屏大理岩力学响应与能量特性 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 112 – 118. [LI Ao, WANG Zhiliang, FENG Chenchen, et al. Mechanical response and energy characteristics of Jinping marble under dynamic impact[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 112 – 118. (in Chinese)]
- [17] WANG Jianxiu, YIN Yao, LUO Chuanwen. Johnson-holmquist-II(JH-2) constitutive model for rock materials: parameter determination and application in tunnel smooth blasting[J]. Applied Sciences, 2018, 8(9): 1675.
- [18] 戴俊. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001, 20(2): 144 – 147. [DAI Jun. Calculation of radii of the broken and cracked areas in rock by a long charge explosion[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2001, 20(2): 144 – 147. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农