

## 深部隧道爆破开挖诱发围岩损伤与扰动效应数值分析

余浪浪, 王志亮, 汪书敏, 李松玉

### Numerical analysis of damage and disturbance effect of surrounding rocks induced by deep tunnel blast excavation

YU Langlang, WANG Zhiliang, WANG Shumin, and LI Songyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208059>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 深埋顺层偏压隧道围岩破坏机理及规律研究——以郑万线某隧道为例

A study of the mechanism and regularity of failures in the surrounding rock of a deep buried bias tunnel embedded in geologically bedding strata: taking one tunnel of the Zhengwan line as an example

胡炜, 谭信荣, 蒋尧, 毛坚强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 60-68

#### 含孔洞裂隙岩体灌浆后力学特性的物理试验与数值模拟

Experimental and numerical simulation of the mechanical characteristics of rocks containing hole and flaw after grouting

张科, 刘享华, 杨红宣, 范文臣 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 79-79

#### 深埋小净距多线平行盾构掘进相互作用分析

An analysis of interaction of deep buried close approaching multi-line parallel shield tunneling

付钊, 柯宁静, 卢康明, 郭萧阳, 张孟喜 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 44-54

#### 斜井盾构掘进时富水围岩变形特性模拟分析

A study of the rich-water ground rock deformation features as shield tunneling along with inclined shaft

马君伟, 王贤能, 林明博 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 126-131

#### 吹淤取样扰动的数值分析——层理分析法

Sample disturbance numerical analysis of hydraulically dredged mud sampling——bedding analysis method

李志杰, 宋晶, 赵洲, 杨守颖, 黄坚森 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 120-125

#### 巴丹吉林沙漠潜水蒸发的数值模拟研究

Numerical simulation of groundwater evaporation in the Badain Jaran Desert of China

周燕怡, 王旭升 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 44-54



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208059

余浪浪, 王志亮, 汪书敏, 等. 深部隧道爆破开挖诱发围岩损伤与扰动效应数值分析 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 117-124.

YU Langlang, WANG Zhiliang, WANG Shumin, *et al.* Numerical analysis of damage and disturbance effect of surrounding rocks induced by deep tunnel blast excavation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 117-124.

## 深部隧道爆破开挖诱发围岩损伤与扰动效应数值分析

余浪浪, 王志亮, 汪书敏, 李松玉

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 现阶段, 不同地应力条件下深部岩体受爆破作用的损伤破坏分析尚显不足。为了研究深部隧道围岩爆破开挖损伤破坏规律, 基于有限元软件 ANSYS/LS-DYNA, 采用 Riedel-Hiermaier-Thoma 本构模型, 对不同地应力环境下隧道爆破效果影响因素、围岩扰动范围等问题进行数值分析。结果表明: 双向等压隧道的断面损伤程度与地应力水平呈负相关; 随着地应力上升, 地应力对隧道底板的损伤抑制作用渐为明显; 隧道腰部围岩受爆破扰动较为突出, 其应力和振动速度均随侧压力系数增大而大幅升高, 且振动速度增幅超过 40%, 明显高于顶部围岩; 在垂直应力 20 MPa 条件下, 腰部测点应力、振动速度幅值随侧压力系数增加而增大的趋势较缓; 当垂直应力升高至 60 MPa 时, 侧压力系数对围岩扰动的影响较大。相关结论对实际工程施工具有重要指导意义, 同时对隧道围岩稳定性监测与支护参数优化具有一定参考价值。

**关键词:** 深部隧道; 爆破开挖; 围岩; 扰动损伤; 数值模拟

中图分类号: U455.6; P642.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)05-0117-08

## Numerical analysis of damage and disturbance effect of surrounding rocks induced by deep tunnel blast excavation

YU Langlang, WANG Zhiliang, WANG Shumin, LI Songyu

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

**Abstract:** The damage and failure analysis of deep rock mass subjected to blasting under different crustal stress conditions is still insufficient at present. To explore the damage and failure law of surrounding rocks of deep tunnel during blasting excavation, based on the finite element software ANSYS/LS-DYNA, the Riedel-Hiermaier-Thoma constitutive model is adopted to carry out numerical analysis on the influencing factors of tunnel blasting effect and surrounding rock disturbance range under different crustal stress environments. The results show that the cross-section damage degree of the bidirectional isobaric tunnel is negatively correlated with the geostress level. With the increasing geostress, the damage of the tunnel floor is more significantly suppressed by geostress. The surrounding rocks at the waist of the tunnel is prominently disturbed by blasting, and its stress and vibration velocity increase significantly with the increasing lateral pressure coefficient, and the vibration velocity increases by more than 40%, much higher than that of the top surrounding rocks. Under the vertical stress of 20 MPa, the amplitudes of stress and vibration velocity at the waist measuring point increase slowly with the increasing lateral

收稿日期: 2022-08-22; 修订日期: 2022-11-28

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目(12272119); 国家自然科学基金雅蓉江联合基金项目(U1965101)

第一作者: 余浪浪(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石动力学方面的研究。E-mail: [yulanglang1999@163.com](mailto:yulanglang1999@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方面的研究。E-mail: [cvevzL@hfut.edu.cn](mailto:cvevzL@hfut.edu.cn)

pressure coefficient. When the vertical stress rises to 60 MPa, the lateral pressure coefficient has a great influence on the disturbance of surrounding rocks. The relevant conclusions obtained are of important guiding significance for actual engineering construction, and are of certain reference value for monitoring the stability of tunnel surrounding rocks and optimizing support parameters.

**Keywords:** deep tunnel; blast excavation; surrounding rock; disturbance and damage; numerical simulation

爆破技术在交通、采矿和引水隧道等大型工程建设中起着不可或缺的作用<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着国家经济建设的快速发展,土木和水利等工程建设逐渐向深部推进,复杂应力条件使得隧洞爆破开挖面临日趋严峻的挑战<sup>[3-4]</sup>。因此,为了揭示爆破诱发的围岩损伤破坏机理,有必要深入探究复杂应力条件下隧道围岩爆破损伤效果及其扰动响应特征<sup>[5-7]</sup>。

爆破引起的岩体振动与损伤演化是爆破工程和岩石力学关注的重点问题之一<sup>[8]</sup>。相关学者已开展了一些卓有成效的研究,如: Xie 等<sup>[9]</sup>利用数值模拟方法研究掏槽爆破隧道开挖,采用 Riedel-Hiermaier-Thoma (RHT)模型研究不同静水压力和侧压力系数下掏槽爆破的损伤机理,为实际掏槽爆破难题提供解决方案;王海亮等<sup>[10]</sup>通过模拟地应力下的双孔爆破,探究了地应力水平和侧压力系数对爆破损伤范围的影响,并依此提出了针对性的爆破参数优化措施;赵建平等<sup>[11]</sup>基于 Holmquist-Johnson-Cook 损伤模型建立岩石双孔爆破模型,模拟地应力下不同侧压力系数对爆破效果的影响,指出侧压力系数对损伤裂纹的扩展有重要作用。可见,在爆破应用方面,前人已做了大量工作,但随着工程建设不断向深部推进,复杂应力条件下岩体的变形失稳机制问题变得尤为突出。

已有研究表明深部围岩开挖爆破损伤效果与浅部岩体相比存在较大差异<sup>[12]</sup>。Yilmaz 等<sup>[13]</sup>探讨了加载速率和各向异性高地应力对爆破损伤区域的作用,验证了主应力大小和方向对钻孔周围裂缝发育的影响。徐耀鉴等<sup>[14]</sup>利用数值软件模拟了深埋硐室高应力下动力扰动对围岩稳定性的影响,以施加外载应力波的方式考察动载强度对硐室围岩的影响,得出竖向扰动波对拱顶和底板围岩影响较大,水平扰动波对侧壁围岩的稳定性影响较大的结论。杨栋等<sup>[15-16]</sup>运用 FLAC3D 软件,引入各向同性损伤模型对高地应力下围岩动力损伤效应进行分析,探究了地应力大小与围岩损伤范围的关系,为高地应力下隧道稳定性分析提供依据。此外,有学者致力于深海隧道工程问题,通过数值模拟研究了侧压力系数对水平和垂直方向的爆破振动效应的影响<sup>[17]</sup>。

综上所述,国内外学者已在深部隧道爆破开挖及动态损伤机理等方面开展了扎实的工作,但对不同地应力条件下隧道爆破开挖诱发围岩损伤破坏机理分析上尚显不足,且大多局限于单孔或双孔爆破模拟,尤其是针对隧道全断面爆破开挖效应方面的研究鲜有报道。本文在已有爆破理论的基础上,基于有限元动力学分析软件 LS-DYNA,采用岩石 RHT 本构模型,对不同地应力条件下隧道爆破开挖机理进行分析,着重探讨不同垂直应力下双向等压和双向非等压时的岩体损伤效果和围岩扰动规律,力求得出具有参考价值的结论。

## 1 深部隧道开挖数值模拟

### 1.1 模型建立及爆破方式

为了很好地指导工程实践,建立与实际工程尺寸类似的断面模型。假定隧道模型断面宽 8.4 m、高 4.5 m,模型宽 10.0 m、高 11.5 m、厚度 2.0 m。考虑到隧道模型和炮孔分布的对称性,故建立 1/2 隧道模型(图 1)。其中, Y 轴为垂直方向, Z 轴负方向为隧道掘进方向。

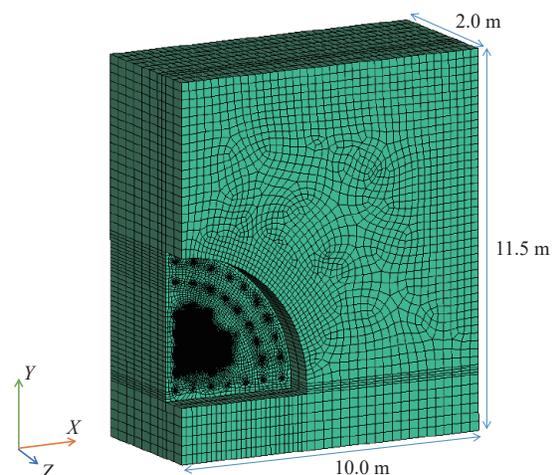


图 1 1/2 隧道有限元模型

Fig. 1 Finite element model of 1/2 tunnel

计算分析采用流固耦合算法,流体部分由空气、炸药和炮孔堵塞组成,整体模型尺寸为 1 000 cm×

1 150 cm×200 cm; 固体部分是岩石材料, 为一个尺寸 1 000 cm×1 150 cm×400 cm 的长方体。通过布尔运算截去一个宽 420 cm、高 450 cm、纵深 100 cm 的柱体, 以此模拟出隧道及周围围岩情况(图 1)。使用相同方法(布尔运算)删除流体与固体的模型叠加部分, 以模拟掌子面的炮孔布置。模型左面设为对称边界, 其余面为无反射边界。在网格划分方面, 除了炸药和炮孔堵塞采用映射划分, 岩石和空气部分均采用扫掠划分。同时, 对炮孔及其周边网格进行加密处理, 最终整体模型共有 524 978 个节点, 456 204 个单元。

本次数值模拟采用光面爆破技术<sup>[18]</sup>, 模拟设置计算时间为 1 000 μs, 在 0, 200, 400 μs 时分别对掏槽孔、崩落孔和周边孔的炸药进行延时起爆。在隧道顶部、腰部和底部围岩布置监测点(图 2), 以记录开挖过程中的围岩的扰动效应。其中, 顶部、腰部和底部测点单元号分别为 124 477、124 515 和 69 685。

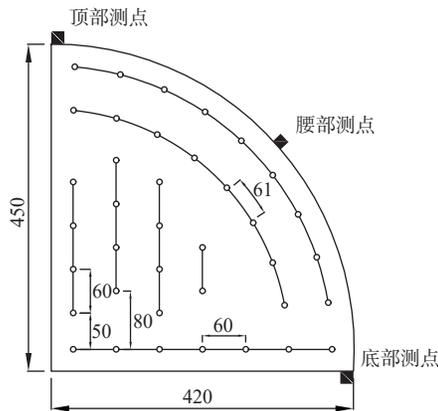


图 2 炮孔与测点布置图(单位: cm)

Fig. 2 Layout of the blasthole and measuring points (unit: cm)

### 1.2 材料参数

在所采用流固耦合算法中, 炮孔堵塞材料为土体, 采用 LS-DYNA 软件自带的关键字 \*MAT\_SOIL\_AND\_FOAM 定义材料参数。炮孔堵塞材料的相关参数如表 1 所示。

表 1 堵塞材料主要参数

Table 1 Main parameters of the stemmed material

参数	密度 (kg·m <sup>-3</sup> )	剪切模量 (GPa)	泊松比	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	P <sub>c</sub>
取值	1 800	0.064	0.3	3.4×10 <sup>-13</sup>	7.03×10 <sup>-7</sup>	0.3	-6.9×10 <sup>-8</sup>

注: A<sub>0</sub>、A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>为屈服函数常量; P<sub>c</sub>为拉伸压力切断值。

基于 LS-DYNA 软件中的 \*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 和 \*EOS\_JWL 关键字对炸药材料的基本物理参数和状态方程进行定义。其中, 状态方程描述了爆炸过程中压力与体积的关系, 其表达式为:

$$P_A = A \left( 1 - \frac{\omega}{VR_1} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{VR_2} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中: P<sub>A</sub>——炸药爆炸产生的压力/MPa;

E<sub>0</sub>——单位体积炸药的初始能量/(J·m<sup>-3</sup>);

V——气体相对体积;

A、B——状态方程参数/Pa;

R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、ω——无量纲参数。

对隧道爆破开挖进行多次模拟试验, 选取了一组模拟效果较好的炸药参数, 列于表 2 中。

表 2 炸药的主要参数

Table 2 Main parameters of explosive

炸药参数	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	爆速/(m·s <sup>-1</sup> )	A/Pa	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	E <sub>0</sub> /(J·m <sup>-3</sup> )
取值	1 500	7 450	6.25×10 <sup>11</sup>	5.25	1.6	0.086×10 <sup>11</sup>

空气使用 \*MAT\_NULL 材料本构模型来描述。其中, 状态方程表达式为:

$$P_B = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (2)$$

$$\mu = \rho / \rho_0 - 1 \quad (3)$$

式中: P<sub>B</sub>——空气压力/Pa;

E——单位体积空气初始能量/(J·m<sup>-3</sup>);

C<sub>0</sub>—C<sub>6</sub>——气体性质相关的常数;

ρ<sub>0</sub>——初始时刻空气密度/(kg·m<sup>-3</sup>);

ρ——当前时刻空气密度/(kg·m<sup>-3</sup>)。

取 C<sub>0</sub> = C<sub>1</sub> = C<sub>2</sub> = C<sub>3</sub> = C<sub>6</sub> = 0, C<sub>4</sub> = C<sub>5</sub> = γ - 1, γ 为比热比; 对于理想气体, γ = 1.4。空气材料主要参数列于表 3 中。

表 3 空气材料主要参数

Table 3 Main parameters of air

空气参数	ρ <sub>0</sub> /(kg·m <sup>-3</sup> )	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	E/(J·m <sup>-3</sup> )
取值	1.2	0.4	0.4	2.5×10 <sup>5</sup>

RHT 本构模型目前已推广应用到岩石材料, 该模型描述了与压力相关的弹性极限面方程、失效面方程和残余强度面方程。本文计算对象为锦屏大理岩<sup>[19]</sup>, 其中各矿物成分质量分数分别为白云石 69.34%、方解石 20.25%、石英 5.41%、其他 5.00%, 其本构参数见表 4<sup>[20]</sup>。

### 1.3 模拟方案

本文模拟研究不同地应力条件下, 完整断面隧道在爆破开挖作用下围岩的损伤及扰动影响规律。主要选取 3 种代表性情形进行模拟分析: ① 双向等压下隧道爆破开挖, 即 σ<sub>x</sub> = σ<sub>y</sub>, σ<sub>x</sub> 为水平方向施加应力, σ<sub>y</sub> 为垂直方向施加应力; ② 相同 σ<sub>y</sub> 和不同侧压力系数(k)下隧道爆破开挖; ③ 不同 σ<sub>y</sub> 和不同 k 下隧道爆破开挖。

表 4 大理岩 RHT 主要参数

Table 4 Main parameters of the marble RHT model

大理岩参数	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>	T <sub>1</sub> /GPa	T <sub>2</sub> /GPa	A	N	f <sub>c</sub> /MPa
取值	2 763	12.43	0.9	0.9	46.72	0	1.65	0.56	130
大理岩参数	f <sub>s</sub> <sup>*</sup>	f <sub>t</sub> <sup>*</sup>	Q <sub>0</sub>	B	E <sub>0</sub> C/s <sup>-1</sup>	E <sub>0</sub> T/s <sup>-1</sup>	EC/s <sup>-1</sup>	ET/s <sup>-1</sup>	β <sub>c</sub>
取值	0.25	0.1	0.010 5	0.7	3.0×10 <sup>-5</sup>	3.0×10 <sup>-6</sup>	3.0×10 <sup>25</sup>	3.0×10 <sup>25</sup>	0.009 756
大理岩参数	β <sub>1</sub>	g <sub>c</sub> <sup>*</sup>	g <sub>t</sub> <sup>*</sup>	ξ	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	ε <sub>p</sub> <sup>m</sup>	A <sub>f</sub>	N <sub>f</sub>
取值	0.013 33	0.78	0.7	0.44	0.037	1	0.01	1.59	0.62
大理岩参数	A <sub>1</sub> /GPa	A <sub>2</sub> /GPa	A <sub>3</sub> /GPa	P <sub>crush</sub> /MPa	P <sub>comp</sub> /GPa	N <sub>p</sub>	α <sub>0</sub>		
取值	46.72	42.05	-4.32	43.33	6	4	1.078		

注: B<sub>0</sub>、B<sub>1</sub>、T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>为状态方程参数; A、N为失效面参数; f<sub>c</sub>为抗压强度; f<sub>s</sub><sup>\*</sup>、f<sub>t</sub><sup>\*</sup>为相对抗压、抗拉强度; Q<sub>0</sub>、B为Lode角相关系数; E<sub>0</sub>C、E<sub>0</sub>T为参考压缩、拉伸应变率; EC、ET为压缩、拉伸应变率; β<sub>c</sub>、β<sub>1</sub>为压缩、拉伸应变率指数; g<sub>c</sub><sup>\*</sup>、g<sub>t</sub><sup>\*</sup>为压缩、拉伸屈服面参数; ξ为剪切模量折减系数; D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>为损伤参数; ε<sub>p</sub><sup>m</sup>为最小损伤残余应变; A<sub>f</sub>、N<sub>f</sub>为剩余表面参数; A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>为Hugoniot系数; P<sub>crush</sub>、P<sub>comp</sub>为挤压、压实强度; N<sub>p</sub>为孔隙指数; α<sub>0</sub>为孔隙度。

## 2 双向等压条件开挖模拟分析

图 3 为完整断面隧道在双向等压场中的爆破损伤云图。对比可见, 当 σ<sub>x</sub>=σ<sub>y</sub>=0 时, 隧道掌子面损伤程度最大。受爆炸波影响, 孔间岩体粉碎区(红色部分)较广, 如图 3(a)所示。随着地应力的增加, 隧道爆破损伤程度减小。应力增至 60 MPa 时, 掌子面损伤度

明显降低。由于应力较高, 爆破范围受到抑制, 爆破效果在高地应力环境下表现较差, 如图 3(d)所示。此外, 随着应力的增加, 底板孔周边岩体爆破效果受地应力水平的抑制作用更强。如当 σ<sub>x</sub>=σ<sub>y</sub>=0 时, 底板孔爆破效果较好; 当应力达到 60 MPa 时, 底板孔周岩体粉碎范围明显减少, 炮孔间由爆炸产生的裂纹难以贯通, 其损伤度显著降低。

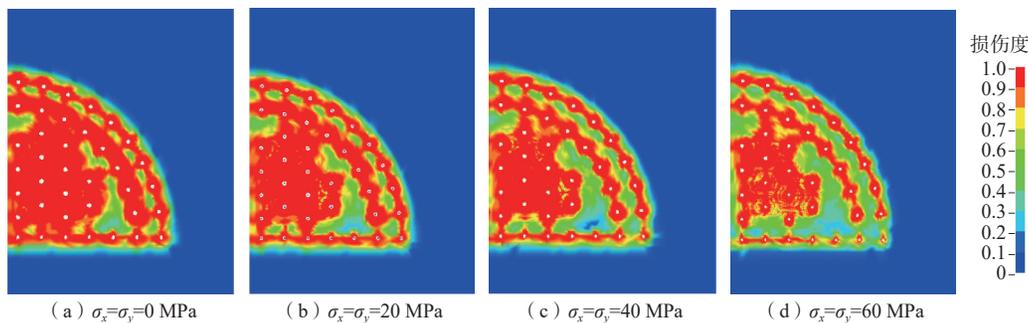


图 3 不同应力水平下开挖损伤分布图

Fig. 3 Excavation damage under different stress levels

为定量分析隧道底板孔受地应力的抑制作用, 与顶部崩落孔作对比, 分别在 20, 40 MPa 下监测顶、底部两测点的应变规律。如图 4 所示, 在 20 MPa 条件下, 隧道顶、底部测点应变峰值为 6.26×10<sup>-4</sup> 和 3.26×10<sup>-4</sup>; 40 MPa 条件下为 6.23×10<sup>-4</sup> 和 1.43×10<sup>-4</sup>, 随应力的增大, 隧道顶、底部应变振幅差距变大, 其宏观表现为在高地应力水平底板炮孔周边围岩爆破效果不理想。

## 3 双向不等压条件开挖模拟分析

### 3.1 相同 σ<sub>y</sub> 和不同 k 下隧道爆破开挖模拟分析

为了探究 k 值对完整断面隧道爆破损伤的影响机理, 考虑到不同 k 值下隧道断面损伤图差别较小(图 5), 以布置监测点的方式在隧道开挖面的顶部和腰部选

取 2 个监测点(图 2)。选取垂直应力为 40 MPa, 侧压力系数 k 设置为 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 和 1.4, 以分析围岩损伤扰动随侧压力系数的变化规律。

#### 3.1.1 k 对应力的影响

不同测点在 k 值影响下 X 方向的应力曲线如图 6 所示。可见, 顶部测点扰动应力峰值与初始应力之差分别为 55.31, 57.22, 54.87, 58.12, 57.78 MPa, 均小于 60 MPa 且波动范围较小, 受 k 值影响较小。腰部测点分别为 54.11, 61.97, 68.95, 77.51, 81.60 MPa, 应力幅值逐渐变大。综合得出, 在隧道掘进中 k 值对腰部应力影响大于对顶部的影响。

#### 3.1.2 k 对振动速度的影响

图 7 为 k 值影响下测点 X 方向振动速度时程图。

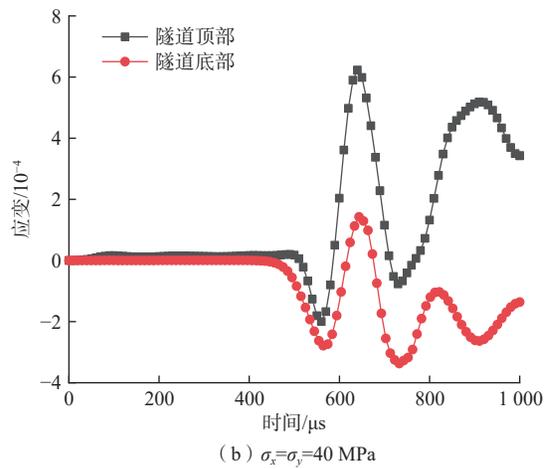
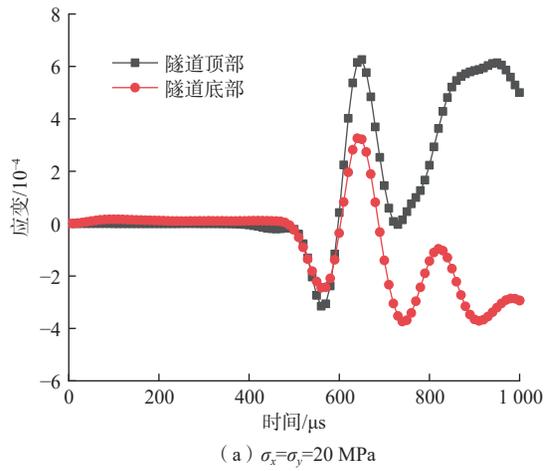


图 4 不同地应力水平下两测点的应变时程曲线

Fig. 4 Strain-time curves under different in-situ stress levels

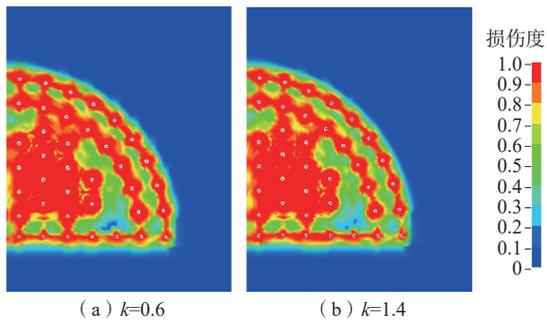


图 5 不同  $k$  值下开挖损伤分布图

Fig. 5 Excavation damage distribution under different  $k$  values

分析得知, 顶部测点最小和最大振动速度峰值为 87.99 cm/s 和 100.57 cm/s, 增幅低于 15%; 腰部为 191.03 cm/s 和 339.53 cm/s, 增幅超过 40%。可见, 腰部测点振动速度明显大于顶部; 随着  $k$  的增大, 测点振动速度相应增加, 且腰部测点增幅较大。

### 3.2 不同 $\sigma_y$ 和不同 $k$ 下隧道爆破开挖模拟分析

为探究  $\sigma_y$  改变时,  $k$  对围岩扰动的变化规律, 以腰

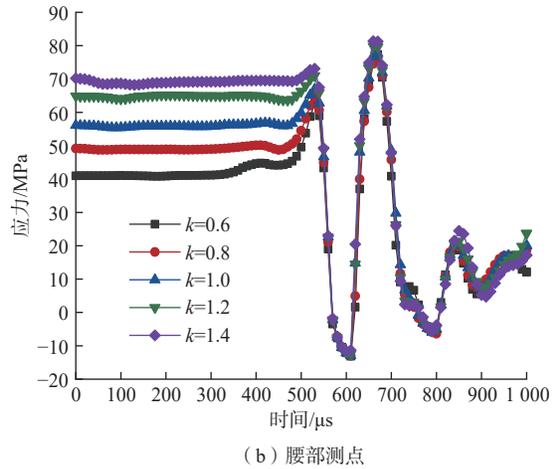
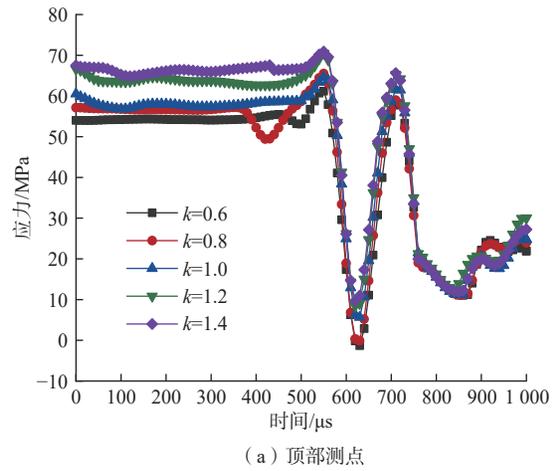


图 6 不同  $k$  值下 X 方向应力时程图

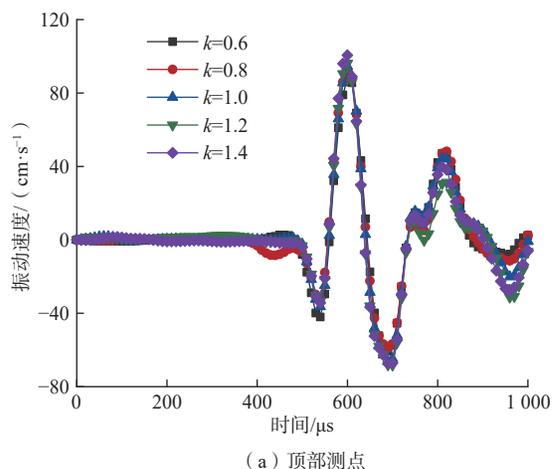
Fig. 6 Stress-time curves in the X direction under different  $k$  values

部测点为对象, 对  $\sigma_y$  为 20, 40, 60 MPa 的情况进行分析。

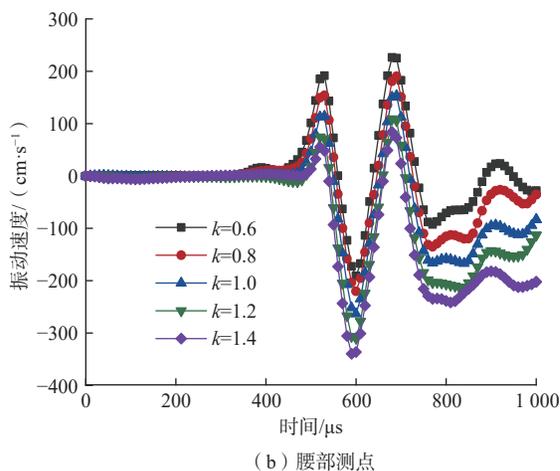
图 8 为  $k$  值对测点的影响随垂直应力的变化。对比显示在  $k$  值相同时, 随着  $\sigma_y$  的增加, 围岩在应力、振动速度方面表现出明显增大的趋势; 且  $k$  值逐渐增大时, 增强幅度随  $\sigma_y$  的增大而增大; 当  $\sigma_y = 60 \text{ MPa}$  时, 围岩受爆破扰动最大, 且扰动幅度与  $k$  值呈正相关性。因此, 在深部隧道爆破开挖中, 隧道掘进方向选取要将侧压力系数纳入考虑范围, 并实时评估开挖中围岩的损伤状况, 以对围岩变形进行及时支护。

## 4 结论

(1) 在双向等压应力场中, 随隧道围岩应力的增大, 爆破开挖效果变差, 部分炮孔间裂纹难以扩展、贯通; 在垂直应力 20 MPa 条件下, 隧道顶、底部测点应变峰值为  $6.26 \times 10^{-4}$  和  $3.26 \times 10^{-4}$ ; 当垂直应力为 40 MPa 时, 爆破导致的底板炮孔损伤开裂受抑制作用更为突出。



(a) 顶部测点



(b) 腰部测点

图 7 不同  $k$  值影响下  $X$  方向振动速度时程图

Fig. 7 Vibration velocity histories in the  $X$  direction under the influence of different  $k$  values

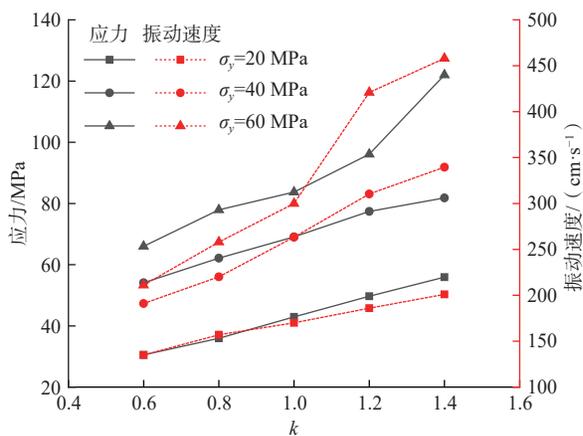


图 8 垂直应力下  $k$  对应力、振动速度峰值的影响

Fig. 8 Influence of  $k$  on stress and peak vibration under different vertical stresses

(2)隧道腰部受爆破开挖的动力响应较为显著;随侧压力系数( $k$ )增大,顶部测点  $X$  方向应力幅值变化均在 56 MPa 左右,振动速度变化低于 15%;腰部测

点对应值则呈递增趋势,且振动速度变幅超过 40%,在不同  $k$  下,腰部围岩受力与变形波动相对较大。

(3)隧道围岩动力响应与侧压力系数呈正相关,在深部隧道施工作业时,其掘进方向选取要考虑  $k$  的影响。随着  $k$  的增加,隧道围岩应力幅值及振动速度呈上升趋势, $k=1.4$  时达到最大值;当垂直应力为 60 MPa 时,其上升趋势愈加明显。

参考文献 (References) :

[ 1 ] 寇绍全. 从第4届岩石爆破国际会议看当前岩石爆破技术的发展趋势 [J]. 力学进展, 1994, 24(1): 132 - 134. [ KOU Shaoquan. Trend analysis of rock blasting technique ifrom the fourth international symposium on rock fragmentation by blasting[J]. Advances in Mechanics, 1994, 24(1): 132 - 134. (in Chinese with English abstract) ]

[ 2 ] 吴丹红, 吴立, 闫天俊, 等. 基于EAHP模型的市政隧道原位二扩四爆破效果评价 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(3): 46 - 54. [ WU Danhong, WU Li, YAN Tianjun, et al. Evaluation of the blasting effects of insitu two-to-four lane expansion in the municipal tunnels based on EAHP model[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(3): 46 - 54. (in Chinese with English abstract) ]

[ 3 ] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展 [J]. 力学进展, 2005, 35(1): 91 - 99. [ ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jianping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 91 - 99. (in Chinese with English abstract) ]

[ 4 ] 路德春, 马一丁, 王国盛. 近接隧道列车运行时地表振动响应数值模拟 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1452 - 1462. [ LU Dechun, MA Yiding, WANG Guosheng. Numerical study on ground surface vibration response under train load in multi adjacent tunnels[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1452 - 1462. (in Chinese with English abstract) ]

[ 5 ] 张国华, 陈礼彪, 夏祥, 等. 大断面隧道爆破开挖围岩损伤范围试验研究及数值计算 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1610 - 1619. [ ZHANG Guohua, CHEN Libiao, XIA Xiang, et al. Numerical simulation and experimental study of damage range of surrounding rock in large tunnel under blasting excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,

- 28(8): 1610 – 1619. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 李占海, 朱万成, 冯夏庭, 等. 侧压力系数对马蹄形隧道损伤破坏的影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊2): 434 – 441. [ LI Zhanhai, ZHU Wancheng, FENG XiaTing, et al. Effect of lateral pressure coefficients on damage and failure process of horseshoe-shaped tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup 2): 434 – 441. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 宁建国, 王成, 马天宝. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. [ NING Jianguo, WANG Cheng, MA Tianbao. Explosion and shock dynamics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese) ]
- [ 8 ] 于建新, 李真珍, 高帅杰, 等. 水下深孔爆破岩石裂纹扩展及损伤规律[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(7): 2907 – 2913. [ YU Jianxin, LI Zhenzhen, GAO Shuaijie, et al. Rock crack propagation and damage regularity due to underwater deep-hole blasting[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(7): 2907 – 2913. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] XIE L X, LU W B, ZHANG Q B, et al. Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high in situ stresses[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 66: 19 – 33.
- [ 10 ] 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) ]
- [ 11 ] 赵建平, 程贝贝, 卢伟, 等. 深部高地应力下岩石双孔爆破的损伤规律[J]. 工程爆破, 2020, 26(5): 14 – 20. [ ZHAO Jianping, CHENG Beibei, LU Wei, et al. Damage law of rock double holes blasting under deep high in situ stress[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(5): 14 – 20. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] WANG Haochen, WANG Zhiliang, WANG Jianguo, et al. Effect of confining pressure on damage accumulation of rock under repeated blast loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 156: 103961.
- [ 13 ] YILMAZ O, UNLU T. Three dimensional numerical rock damage analysis under blasting load[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 38: 266 – 278.
- [ 14 ] 徐耀鉴, 柴文英, 曾凌方. 深埋硐室高围压条件下的围岩动力学响应[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 94 – 98. [ XU Yaojian, QI Wenyong, ZENG Lingfang. Dynamic response of surrounding rock with high stress in deep chamber[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(6): 94 – 98. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 杨栋, 李海波, 夏祥, 等. 高地应力下隧道围岩动力损伤分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊2): 311 – 317. [ YANG Dong, LI Haibo, XIA Xiang, et al. Study of dynamic damage of surrounding rocks for tunnels under high in-situ stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup 2): 311 – 317. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 杨栋, 李海波, 夏祥, 等. 高地应力条件下爆破开挖诱发围岩损伤的特性研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1110 – 1116. [ YANG Dong, LI Haibo, XIA Xiang, et al. Study of blasting-induced dynamic damage of tunnel surrounding rocks under high in situ stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1110 – 1116. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 张宁, 李术才, 徐帮树, 等. 侧压力系数对海底隧道爆破效应影响数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(2): 334 – 340. [ ZHANG Ning, LI Shucui, XU Bangshu, et al. Numerical analysis of the influence of lateral pressure coefficient of subsea tunnel on blasting vibration effects[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(2): 334 – 340. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 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. [ 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 with English abstract) ]
- [ 19 ] 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) ]
- [ 20 ] 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 responses and energy characteristics of the Jinping marble under the dynamic impact[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 112 – 118. (in Chinese with English abstract) ]