

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.02.002

超深竖井爆破掘进围岩损伤规律数值模拟研究*

杨小林,张光然,褚怀保,孙博,徐杰,王东辉,陈璐阳,郭鹏,王少华

(河南理工大学 土木工程学院,焦作 451003)

摘要: 为了分析爆破荷载作用下超深竖井围岩损伤演化规律,基于三山岛金矿西岭副井爆破施工实践,采用数值模拟的方法,基于 ANSYS/LS-DYNA 重启技术,根据爆破设计方案,利用等效爆炸荷载方法,分别对四种地应力(15 MPa、30 MPa、45 MPa 和 60 MPa)和四种侧压系数(1.0、1.25、1.5 和 2.0)条件下超深竖井爆破掘进围岩损伤进行数值计算;分析竖井围岩损伤效应,研究地应力与侧压系数对竖井围岩损伤范围的影响。数值计算结果表明:随着地应力的增大,损伤区域受到明显抑制作用,地应力从 15 MPa 增加到 60 MPa,损伤区域的半径从 5.75 m 减小到 3.4 m;随着侧压系数的增大,爆破损伤区域体现出各向异性,损伤区域向较大地应力方向集中。研究成果为控制竖井围岩爆破损伤提供理论基础。

关键词: 超深竖井;爆破掘进;损伤规律;数值模拟;等效荷载

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)02-0008-07

Numerical Simulation Study on Damage Law of Surrounding Rock in Blasting Excavation of Ultra-deep Shaft

YANG Xiao-lin, ZHANG Guang-ran, CHU Huai-bao, SUN Bo, XU Jie,

WANG Dong-hui, CHEN Lu-yang, GUO Peng, WANG Shao-hua

(School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 451003, China)

Abstract: This study aims to analyze the damage evolution law of the surrounding rock mass in an ultra-deep shaft under blasting load. To achieve this, a numerical simulation method is adopted based on the blasting construction practice of Xiling Auxiliary Shaft in Sanshandao Gold Mine. The simulation utilizes a restart technology based on ANSYS/LS-DYNA and adopts the equivalent explosion load method according to the blasting design scheme. The surrounding rock mass damage of the ultra-deep shaft is calculated under four different ground stresses (15 MPa, 30 MPa, 45 MPa, and 60 MPa) and four different side pressure coefficients (1.0, 1.25, 1.5, and 2.0). Furthermore, this study analyzes the damage effect on the shaft's surrounding rock mass and investigates how ground stress and side pressure coefficient influence the extent of damage to the surrounding rock. The numerical results demonstrate that as ground stress increases from 15 MPa to 60 MPa, there is a significant inhibition in the damage area with a decrease in radius from 5.75 m to 3.4 m. Additionally, it is observed that with an increase in lateral pressure coefficient, there is anisotropy in terms of blasting damage area distribution where greater ground stress leads to concentrated damage areas.

收稿日期 (Date of reception): 2024-01-02

网络首发日期 (Published online): 2024-01-17

作者简介: 杨小林 (1963-), 男, 博士、教授、博士生导师, 从事隧道与地下工程方面研究, (E-mail) yangxl@hpu.edu.cn。

通讯作者: 褚怀保 (1978-), 男, 博士、教授、硕士生导师, 从事爆炸理论及应用方面研究, (E-mail) chuhuaibao@hpu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52130403) 深部金属矿连续智能化安全开采基础研究

About the author: YANG Xiao-lin (1963-), male, Ph. D., professor, doctoral supervisor, mainly engaged in research on tunnel and underground engineering, (E-mail) yangxl@hpu.edu.cn.

Corresponding author: CHU Huai-bao (1978-), male, Ph. D., professor, master supervisor, mainly engaged in research on explosion theory and application, (E-mail) chuhuaibao@hpu.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China, Basic Research on Continuous Intelligent and Safe Mining of Deep Metal Mines, No. 52130403

Key words: ultra-deep shaft; blasting excavation; damage law; numerical simulation; equivalent load

世界经济的发展需要大量资源,我国浅部资源已消耗殆尽,人类需要开采深部资源^[1]。井工开采是开发深部资源的主体方式,竖井建设是深部资源的关键^[2]。当前竖井建设的主要方法是钻爆法,炸药爆炸时产生的能量如果没有得到合理控制,将会对围岩造成严重损伤,使得围岩力学性能劣化,影响竖井安全施工和结构安全^[3]。

国内外学者对爆破荷载作用下围岩损伤规律进行了大量数值分析研究。杨建华等基于 LS-DYNA 程序的二次开发接口^[4],将统计损伤演化模型嵌入到本构材料中,研究爆破过程中圆形隧洞岩体的累积损伤效应;罗笙等提出一种基于法相冲击荷载的爆破损伤模拟方法^[5],并基于该方法研究不同应力下爆破损伤孕育机制;陈明等采用爆破荷载变化曲线模拟爆破作用过程^[6],分析爆破开挖对围岩的损伤效应。刘阳等分析不同地应力条件对岩石爆破裂纹扩展规律的影响^[7];皇新宇等基于 RHT 本构^[8],研究不同地应力条件下掏槽爆破岩石裂纹的演化规律和炮孔周围应力场动态变化过程;吴志超等分析地下洞室围岩累积损伤效应^[9],研究爆破振动与围岩累积损伤范围之间的相关性;Ji Ling 等对比研究了大断面隧道单次全断面爆破和多次全断面爆破对围岩的累积损伤效应^[10,11],分析了起爆顺序对围岩损伤临界 PPV 的影响,提出了隧道爆破开挖中与岩石损伤相关的临界 PPV;Wang Jianxiu 等提出了一种快速简便的确定 JH-2 模型参数的方法^[12]。通过三维数值模拟结果与实验室爆炸加载试验结果的对比,验证了参数的有效;Ling Tianlong 等分析初始损伤对夹层岩体力学性质的影响^[13],模拟结果为研究钻爆累积损伤的岩石损伤机理和演化规律提供了参考;Zhang Hao 等利用拉格朗日-欧拉算法 (ALEEROSION) 建立了巷道开挖模型^[14],分析了岩石破坏的阶段性演化规律;Wang Haochen 等对静载作用下炮孔周围的应力分布进行了理论分析^[15],确定了 RHT 模型的参数,并通过重复爆炸试验进行了验证,研究了围压对花岗岩试件破坏模式的影响,对岩石边坡预裂爆破进行了数值模拟,探讨了地应力条件下岩体的破坏行为;Cheng Li 等进行了地应力测试、围岩扰动应力响应、变形破坏特征、数值模拟等一系列分析^[16]。在此基础上,提出了新主井深挖过程围岩稳定性控制方法。上述研究大多针对不同地应力下隧道爆破过程开展的,而针对深部高应力条件下竖井围岩的爆破损伤规律还缺乏更深入的系

统研究。

以三山岛金矿西岭副井爆破施工为依托,基于 RHT 本构模型,结合等效爆破荷载方法,建立竖井三维损伤计算模型,研究不同地应力及侧压系数对围岩损伤规律的影响机制,保障竖井爆破掘进安全施工。

1 深部岩体爆破破岩机理

深部岩体爆破过程是地应力和爆炸荷载共同作用的结果^[17]。深部岩体受到三向不均匀的地应力作用,根据厚壁圆筒理论^[18],计算出岩体在地应力和爆炸荷载共同作用下应力分布情况

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(P_1 + P_2) \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) + P \left(\frac{r}{R}\right)^\alpha + \frac{1}{2}(P_1 - P_2) \left(1 - \frac{4r^2}{R^2} + \frac{3r^4}{R^4}\right) \cos 2\theta \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(P_1 + P_2) \left(1 + \frac{r^2}{R^2}\right) - \lambda_d P \left(\frac{r}{R}\right)^\alpha - \frac{1}{2}(P_1 - P_2) \left(1 + \frac{3r^4}{R^4}\right) \cos 2\theta \quad (2)$$

式中: σ_r 和 σ_θ 分别为某一位置的径向应力和切向应力; P 为炸药爆炸后炮孔内冲击波压力; P_1 为水平方向地应力; P_2 为垂直方向地应力; θ 为某一位置与炮孔中心的连线与水平方向的夹角; r 为炮孔半径; R 为某一位置到炮孔中心的距离; α 为爆炸冲击波、应力波传播过程中的衰减系数; λ_d 为动态侧压系数。

如果不考虑地应力的影响,即 $P_1 = P_2 = 0$,则式(1)和(2)可简化为

$$\sigma_r = P \frac{r^\alpha}{R^\alpha} \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = -\lambda_d P \frac{r^\alpha}{R^\alpha} \quad (4)$$

由式(2)可知,炮孔壁某一位置受到的冲击波压力为

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= 3P_2 - P_1 - \lambda_d P, \theta = 0 \\ \sigma_\theta &= 3P_1 - P_2 - \lambda_d P, \theta = 90^\circ \end{aligned} \quad (5)$$

对比式(5)与式(4)可以看出,由于地应力的存在。若 $P_1 < P_2$ (非均匀地应力场),仅当 $P > (3P_1 - P_2)/\lambda_d$,炮孔壁才会产生切向拉应力。在深部高地应力岩体爆破时,地应力会抑制爆炸应力波的拉伸致裂作用,往往难以充分破碎岩石,无法得到理想的爆破效果。

2 数值模拟

2.1 计算模型

三山岛金矿西岭副井为 11.50 m 的圆形竖井, 竖井爆破设计方案如图 1 所示, 每次掘进 4.5 m。由内到外, 掘进工作面上布置 7 圈爆破孔, 采用直眼掏槽、分段半秒延时的光面爆破方式, 采用电子雷管起爆, 分别为 MS1、MS3、MS5、MS7、MS9、MS11 和 MS13, 使用 2# 岩石乳化炸药、不耦合装药, 图中 I、II、III、IV、V、VI 和 VII 表示炮孔起爆顺序。具体的炮孔布置参数见表 1。

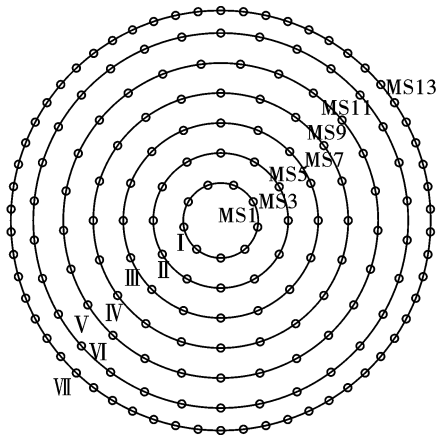


图 1 竖井全断面爆破掘进示意图

Fig. 1 Schematic diagram of full section blasting excavation of shaft

表 1 爆破设计参数

Table 1 Blasting design parameters

起爆顺序	延迟时间/ ms	炮孔名称	圈径/ mm	炮孔间距/ mm
I	0	掏槽孔	2000	684
II	10	辅助孔	3600	931
III	20	辅助孔	5200	1014
IV	30	辅助孔	6800	1063
V	40	辅助孔	8400	1018
VI	50	辅助孔	10 000	1024
VII	60	周边孔	11 200	586

参考竖井实际尺寸, 经过简化, 选取掘进段上下 20 m 部分进行模拟, 使用 LS-DYNA 软件建立如图 2 所示的三维计算模型, 有限元网格共含有 484228 节点和 451212 单元。模型内边界采用 *CONSTRAINED_GLOBAL 命令实现模型对称, 外边界采用无反射边界, 减小反射作用。

在数值计算过程中, 岩石材料利用 *MAT_RHT 本构模型定义, 岩石基本物理力学参数如表 2 所示。RHT 本构方程具体材料参数如表 3 所示。

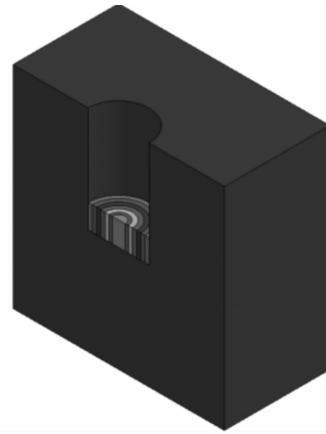


图 2 计算模型

Fig. 2 Calculation model

表 2 岩石物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of rock

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	摩擦角/ $^{\circ}$	粘聚力/ MPa
2610	45	0.24	46.9	6.55

表 3 RHT 模型参数

Table 3 RHT model parameters

$RO/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2610	T_1/GPa	54.04
$ALPHA$	1.0	T_2	0
PEL/MPa	363	$SHEAR/\text{GPa}$	18.67
PCO/GPa	0.06	FC/MPa	109
A_1/GPa	25.70	FT^*	0.1
A_2/GPa	90.79	FS^*	0.18
A_3/GPa	55.48	A	1.6
B_0	1.68	N	0.61
B_1	1.68	Q_0	0.68
B	0.0105	GC^*	0.53
NP	4.0	GT^*	0.7
EOC	3.0×10^{-11}	$EPSF$	2.0
EOT	3.0×10^{-12}	XI	0.5
EC	3.0×10^{19}	D_1	0.04
ET	3.0×10^{19}	D_2	1.0
$BETAC$	0.0026	EPM	0.012
$BETAT$	0.0155	AF	1.60
PTF	0.001	NF	0.61

2.2 爆破荷载

为解决模型负体积问题, 确保计算结果的准确性, 采用施加等效爆破荷载的方法进行数值模拟研究。根据 Chapman-Jouguet 理论^[19], 作用在炮孔壁上的爆炸荷载 P_b 为

$$P_b = \frac{\rho_c (VOD)^2}{2(\gamma + 1)} \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^6 \left(\frac{l_c}{l_b} \right)^3 n \quad (6)$$

式中: ρ_e 和 VOD 分别为炸药密度和爆轰速度, ρ_e 为 1000 kg/m^3 , VOD 为 3600 m/s ; d_c 为装药直径; d_b 为炮孔直径; l_c 为装药长度; l_b 为炮孔长度; γ 为等熵指数,对于常用的工程爆破炸药,近似取 $\gamma = 3$; n 为爆轰气体产物膨胀撞击炮孔壁时的压力增大系数, $n = 8 \sim 11$,对乳化炸药,约取 $n = 10$ 。

作用在等效边界上的荷载峰值 P_e 为

$$P_e = \frac{d_b}{S} P_b \quad (7)$$

式中: S 为相邻两炮孔的间距。

参考文献[20、21]中得到等效弹性边界计算公式,计算出等效弹性边界半径如表 4 所示。

表 4 各段炮孔对应的等效弹性边界
Table 4 The equivalent elastic boundary corresponding to each shot hole

起爆顺序	延迟时间/ ms	炮孔名称	等效弹性 边界半径/m
I	0	掏槽孔	1.27
II	10	辅助孔	1.80
III	20	辅助孔	2.60
IV	30	辅助孔	3.40
V	40	辅助孔	4.20
VI	50	辅助孔	5.00
VII	60	周边孔	5.75

采用简化的三角形爆炸荷载曲线进行动力加载。三角形爆破荷载的上升段时间和正压时间分别按公式(8)和(9)计算

$$t_r = \frac{l_c}{VOD} \quad (8)$$

$$t_d = t_r + \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{2}S\right)^2 + l_c^2}}{c_f} + \frac{l_c + l_s}{c_{u1}} + \frac{l_c + l_s}{c_{u2}} \quad (9)$$

裂纹扩展的平均速度 $c_f = 0.25c_p$, c_p 为岩石纵波波速,取 4600 m/s ;近似认为 c_u 与爆生气体的声速相等,取 $1000 \sim 1500 \text{ m/s}$ 。各段等效荷载、升压作用时间和正压时间如表 5 所示。

3 数值模拟结果及分析

经过调研,最大主应力是最小主应力的 1.25 ~ 1.5 倍,垂直主应力和最小主应力数值大致相等,经过简化设计如表 6 所示的 8 种地应力加载方案。

为对比分析地应力和侧压系数对竖井围岩损伤的影响规律,设计如表 6 所示的 8 种地应力施加方案, a 为无地应力, $b \sim e$ 施加不同的均匀地应力(分别对应 500、1000、1500 和 2000 m), $f \sim h$ 施加不同

侧压系数的非均匀地应力。

表 5 等效荷载峰值及作用时间
Table 5 Equivalent load peak value and action time

起爆顺序	炮孔名称	荷载/ MPa	升压时间/ ms	正压时间/ ms
I	掏槽孔	192.48	1.000	6.583
II	辅助孔	107.94	0.875	6.468
III	辅助孔	99.10	0.875	6.472
IV	辅助孔	94.53	0.875	6.474
V	辅助孔	62.16	0.750	6.349
VI	辅助孔	35.76	0.625	6.223
VII	周边孔	50.84	0.625	6.206

表 6 地应力施加方案
Table 6 Ground stress application scheme

地应力情况	编号	X/MPa	Y/MPa	Z/MPa	侧压 系数 K
无初始地应力	a	0	0	0	-
	b	15	15	15	1
	c	30	30	30	1
均匀地应力	d	45	45	45	1
	e	60	60	60	1
	f	37.5	30	30	1.25
不同侧压系数	g	45	30	30	1.50
	h	60	30	30	2.00

3.1 地应力对竖井围岩损伤的影响

经过数值计算,后三段辅助孔及周边孔爆破过程中岩体损伤不明显,节选取 MS1 ~ MS5 三段爆破损伤演化过程如图 3 所示。

从图(3)可以看出,地应力直接影响爆炸荷载对深部岩体的破坏损伤作用。对比不同地应力下竖井爆破损伤演化过程,发现爆破损伤主要是由掏槽段引起;在无地应力作用下爆破损伤范围集中在半径为 4.2 m (MS1 ~ MS9 段) 区域内,在 15 MPa 地应力作用下爆破损伤范围集中在半径为 5.75 m (MS1 ~ MS13 段) 区域内,在 30 MPa 地应力作用下爆破损伤范围集中在半径为 5 m (MS1 ~ MS11 段) 区域内,在 45 MPa 地应力作用下爆破损伤范围集中在半径为 4.2 m (MS1 ~ MS9 段) 区域内,在 60 MPa 地应力作用下爆破损伤范围集中在半径为 3.4 m (MS1 ~ MS7 段) 区域内。可以看出,随着地应力增大,损伤范围先略增大后减小。当地应力大于 15 MPa 小于 30 MPa 时,损伤区域略有减小;当地应力大于 30 MPa 时,损伤区域极具减小;地应力的抑制作用是非线性的。显然,在竖井爆破掘进过程中,地应力

水平的增大,爆破损伤区受到更大的抑制作用。

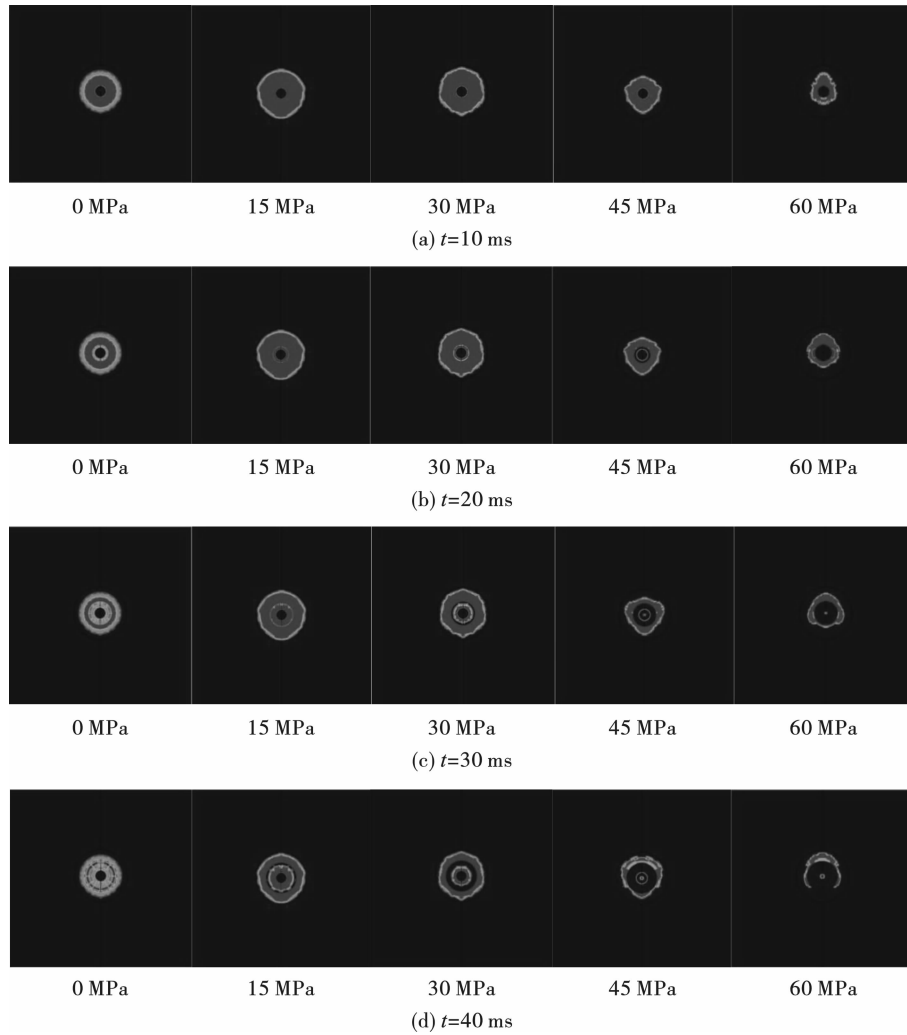


图3 不同地应力条件下围岩损伤演化过程

Fig. 3 Damage evolution of surrounding rock under different ground stress conditions

3.2 侧压系数对围岩损伤的影响

在相同爆破荷载条件下,研究不同侧压系数对竖井围岩损伤的影响。不同侧压系数竖井围岩损伤规律如图4所示。

从图4可以看出,侧压系数对损伤的影响规律。在 $K=1.25$ 条件下爆破损伤范围集中在半径为5 m (MS1~MS11段)区域内,沿 X 方向没有明显变化,沿 Y 方向较小抑制作用;在 $K=1.5$ 条件下爆破损伤范围集中在半径为4.2 m (MS1~MS9段)区域内,沿 X 方向受到明显抑制作用,损伤区域呈现椭圆形;在 $K=2.0$ 条件下爆破损伤范围集中在半径为3.4 m (MS1~MS7段)区域, X 、 Y 方向均受到明显抑制作用。

对比四种不同侧压系数条件下爆破损伤演化过程, $K=1.5$ 和 $K=2.0$ 明显存在地应力较大的方向(X 方向)先产生损伤的现象。从图5可以看出,

$K=1.5$ 和 $K=2.0$ 条件下存在损伤向 X 方向集中的现象。随着侧压系数越大,对损伤区域的导向作用越强,地应力较小的方向损伤区域明显减少。

4 结论

以三山岛金矿副井爆破工程实践为依托,开展爆破损伤数值模拟研究,分析围岩爆破累积损伤规律,得到以下主要结论:

(1)在均匀地应力条件下,地应力对围岩损伤具有明显的抑制作用,随着地应力的增大,竖井围岩损伤范围逐渐减小,而且这种抑制作用是非线性的。

(2)在不同侧压系数条件下,随着侧压系数的增大,损伤区域向较大地应力方向扩展,同时地应力较小方向的损伤效果明显减弱。

在高地应力条件下,围岩产生了较大的约束作

用,增加了爆破难度,降低了炸药能量利用率,不利于竖井爆破掘进,可以通过改变起爆顺序,利用地应

力与炸药协同破岩,获得最佳掘进效果,预防灾害发生,保证竖井施工安全。

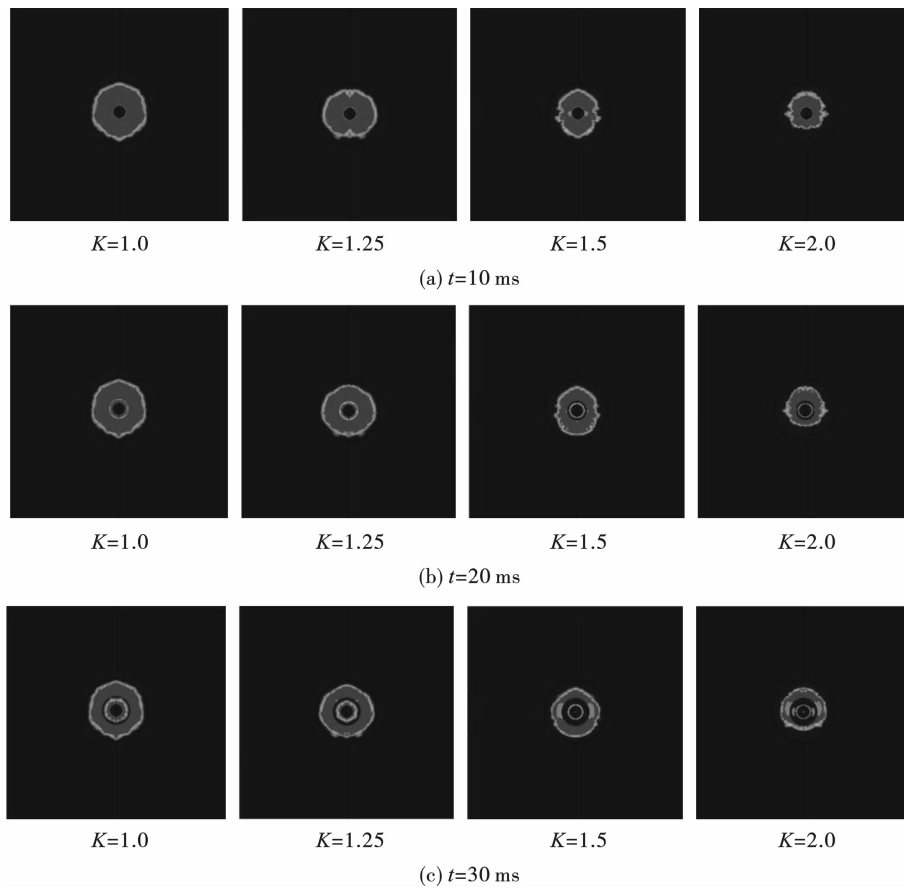


图 4 不同侧压系数条件下围岩损伤演化过程

Fig. 4 Damage evolution of surrounding rock under different lateral pressure coefficients

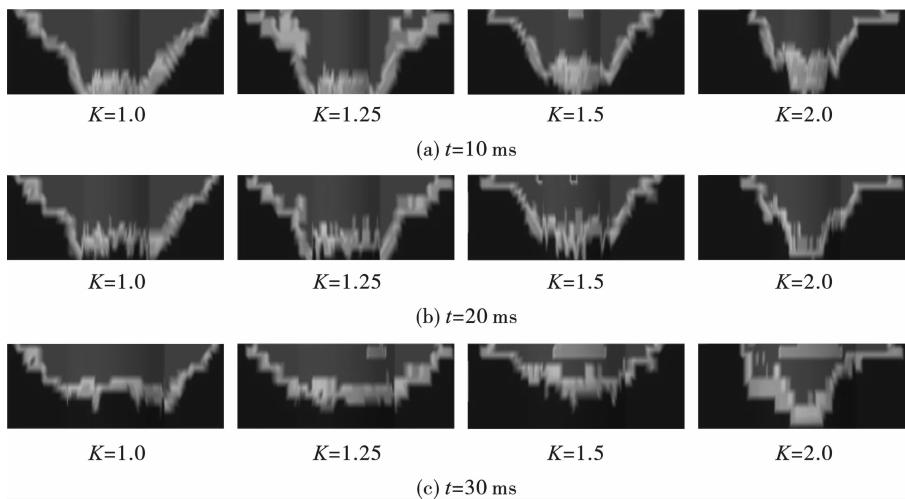


图 5 不同侧压系数地应力场 Y-Z 平面损伤情况

Fig. 5 Damage of Y-Z plane in ground stress field with different lateral pressure coefficients

本文的工作只是一个初步的研究,提出了一些简化。例如,使用三角函数模拟作用在等效边界上的压力,而不考虑气体压力的作用,这不能模拟破碎

区和周围径向裂缝的起始。尽管存在一定的局限性,但本文的模拟结果对循环爆破损伤机理和演化规律的研究仍具有参考价值。

参考文献 (References)

- [1] 赵兴东. 超深竖井建设基础理论与发展趋势[J]. 金属矿山, 2018(4):1-10.
- [1] ZHAO Xing-dong. Basic theory and development trends of ultra-deep shaft construction[J]. Metal Mine, 2018(4):1-10. (in Chinese)
- [2] 黄永辉. 立井硬岩深孔锥形掏槽爆破技术研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2013.
- [2] HUANG Ying-hui. The technology study on long-hole pyramid cut blasting in hard rock vertical shaft[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2013. (in Chinese)
- [3] 宋肖龙, 高文学, 季金铭, 等. 爆破振动对隧道围岩累积损伤效应的影响[J]. 振动与冲击, 2020, 39(24):54-62.
- [3] SONG Xiao-long, GAO Wen-xue, JI Jin-ming, et al. Influence of blasting vibration on cumulative damage of surrounding rock[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(24):54-62. (in Chinese)
- [4] 杨建华, 卢文波, 胡英国, 等. 隧洞开挖重复爆炸荷载作用下围岩累积损伤特性[J]. 岩土力学, 2014, 35(2):511-518.
- [4] YANG Jian-hua, LU Wen-bo, HU Ying-guo, et al. Accumulated damage in surrounding rocks due to repeated blasting loads during blasting excavation of tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2):511-518. (in Chinese)
- [5] 罗 笙, 严 鹏, 卢文波, 等. 深埋隧洞开挖爆破损伤数值模拟及损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S1):2760-2772.
- [5] LUO Sheng, YAN Peng, LU Wen-bo, et al. Research on the simulation of blasting damage and its mechanism of deep tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S1):2760-2772. (in Chinese)
- [6] 陈 明, 胡英国, 卢文波, 等. 深埋隧洞爆破开挖扰动损伤效应的数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, 32(5):1531-1537.
- [6] CHEN Ming, HU Ying-guo, LU Wen-bo, et al. Numerical simulation of blasting excavation induced damage to deep tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5):1531-1537. (in Chinese)
- [7] 刘 阳, 徐业鹏, 黄 丹. 不同地应力条件下楔形掏槽爆破的岩石损伤演化过程研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(12):2096-2104.
- [7] LIU Yang, XU Ye-peng, HUANG Dan. Evolution of rock damage caused by wedge cut blasting under different ground stress conditions[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(12):2096-2104. (in Chinese)
- [8] 皇新宇, 纪 强, 张宪堂, 等. 地应力作用下四孔掏槽爆破破岩机理数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(2):60-69.
- [8] HUANG Xin-yu, JI Qiang, ZHANG Xian-tang, et al. Numerical simulation research on rock breaking mechanism of four-hole cut blasting under ground stress[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(2):60-69. (in Chinese)
- [9] 吴志超, 龚 敏, 仇安兵, 等. 硬岩地下洞室工程爆破振动与围岩损伤范围相关性研究[J]. 爆破, 2023, 40(1):160-169.
- [9] WU Zhi-chao, GONG Min, QIU An-bing, et al. Study on correlation between blasting vibration and surrounding rock damage range of hard rock underground cavern engineering[J]. Blasting, 2023, 40(1):160-169. (in Chinese)
- [9] WU Zhi-chao, GONG Min, QIU An-bing, et al. Study on correlation between blasting vibration and surrounding rock damage range of hard rock underground cavern engineering[J]. Blasting, 2023, 40(1):160-169. (in Chinese)
- [10] JI Ling, ZHOU Chuan-bo, LU Shi-wei, et al. Modeling study of cumulative damage effects and safety criterion of surrounding rock under multiple full-face blasting of a large cross-section tunnel[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 147:104882.
- [11] JI Ling, ZHOU Chuan-bo, LU Shi-wei, et al. Numerical studies on the cumulative damage effects and safety criterion of a large cross-section tunnel induced by single and multiple full-scale blasting[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54:6393-6411.
- [12] WANG Jian-xiu, YIN Yao, LUO Chuan-wen. 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.
- [13] LING Tian-long, LI Sheng-lin, LIU Dian-shu, et al. Blasting damage of tunnel rock mass based on cumulative effect[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(3):1679-1695.
- [14] ZHANG Hao, LI Ting-chun, WU Shuai, et al. A study of innovative cut blasting for rock roadway excavation based on numerical simulation and field tests[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2022, 119:104233.
- [15] WANG Hao-chen, WANG Zhi-liang, WANG Jian-guo, et al. Effect of confining pressure on damage accumulation of rock under repeated blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 156:103961.

- timization of blasting parameters of burn cut in underground mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(5):36-40. (in Chinese)
- [14] 熊亮,郑文强. 巷道爆破掘进中掏槽孔优化设计与应用[J]. 现代矿业, 2018, 34(2):71-73.
- [14] XIONG Liang, ZHENG Wen-qiang. Optimization design and application of cutting slot in blasting excavation of roadway[J]. Modern Mining, 2018, 34(2):71-73. (in Chinese)
- [15] 杨仁树. 我国煤矿岩巷安全高效掘进技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9):18-23.
- [15] YANG Ren-shu. Present status and outlook on safety and high efficient heading technology of mine rock roadway in China [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9):18-23. (in Chinese)
- [16] 冯海暴,蒋万德,曲俐俐,等. 九瑞高速岩质隧道钻爆法施工超欠挖控制措施及成本分析[J]. 隧道建设, 2012, 32(6):887-891.
- [16] FENG Hai-bao, JIANG Wan-de, QU Li-li, et al. Overbreak /shortbreak control technology for and cost analysis on rock tunnels constructed by drilling and blasting method: case study on tunnels on Jiujiang-Ruichang Highway [J]. Tunnel Construction, 2012, 32(6):887-891. (in Chinese)
- [17] LEE T, KIM D, SEO Y. The development of methods for minimizing the overbreak in tunnel blasting [C] // Proceedings of the Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. ISEE, 1999, 2003, 2:57-68.
- [18] SMITH P D, VISMEG P, TEO L C, et al. Blast wave transmission along rough-walled tunnels [J]. International Journal of Impact Engineering, 1998, 21(6):419-432.
- [19] 汪旭光. 爆破手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 2010.
- [19] WANG Xu-guang. Blasting manual [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [20] 王玮,怀平生,降世良. 大断面隧道空孔直线掏槽爆破高效掘进方法[J]. 爆破, 2022, 39(3):76-81.
- [20] WANG Wei, HUAI Ping-sheng, JIANG Shi-liang. Efficient driving method for large section tunnel by burn cut blasting with uncharged holes [J]. Blasting, 2022, 39(3):76-81. (in Chinese)

(上接第14页)

- [16] CHENG Li, WANG Chun-long, WANG Xi, et al. Stability analysis of surrounding rock of large section ultradeep shaft wall [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021:1-10.
- [17] 肖思友,姜元俊,刘志祥,等. 高地应力下硬岩爆破破岩特性及能量分布研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(15):143-149.
- [17] XIAO Si-you, JIANG Yuan-jun, LIU Zhi-xiang et al. Hard rock blasting energy distribution and fragmentation characteristics under high earth stress [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(15):143-149. (in Chinese)
- [18] 王从银. 直眼掏槽的破岩机理及掏槽设计[J]. 爆破, 1995(2):51-55.
- [18] WANG Cong-yin. Rock breaking mechanism and cut design of straight hole cut [J]. Blasting, 1995(2):51-55. (in Chinese)
- [19] 卢文波,杨建华,陈明,等. 深埋隧洞岩体开挖瞬态卸荷机制及等效数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6):1089-1096.
- [19] LU Wen-bo, YANG Jian-hua, CHEN Ming et al. Mechanism and equivalent numerical simulation of transient release of excavation load for deep tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6):1089-1096. (in Chinese)
- [20] 许红涛,卢文波,周小恒. 爆破震动场动力有限元模拟中爆破荷载的等效施加方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008(1):67-71, 103.
- [20] XU Hong-tao, LU Wen-bo, ZHOU Xiao-heng. An equivalent approach for acting blasting load in dynamic finite element simulation of blasting vibration [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008(1):67-71, 103. (in Chinese)
- [21] 刘焕新. 深部高应力下蚀变岩力学特性与采动破裂机理及灾害调控[D]. 北京:北京科技大学, 2023.
- [21] LIU Huan-xin. Mechanical properties and mining induced failure mechanism of altered rock and disaster control under deep high stress condition [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023. (in Chinese)