

爆炸地冲击扰动诱发含结构面围岩破坏模拟试验

熊自明¹, 李志浩¹, 高磊^{1,2}, 程祥珍³, 马超¹, 陈焕新⁴

(1. 陆军工程大学 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏南京 210007; 2. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏南京 210094;

3. 32391 部队, 广东广州 510000; 4. 96911 部队, 北京 100011)

摘要: 为研究远区爆炸作用产生的地冲击扰动对深埋洞室破坏的影响机制, 采用地冲击效应模拟试验装置开展了相似模拟试验研究。采用边长为 1.3 m 的立方体试件, 实现了从地应力加载(1 000 m 埋深)、洞室开挖到爆炸地冲击扰动加载全过程的模拟。试验过程中, 将各类传感器放置在试件和洞室内部, 监测试验过程中的应力、应变、位移变化, 以及洞室内部的破坏情况。通过在试件顶部施加不同峰值的冲击扰动荷载, 再现了碎屑崩出、裂隙连通导致块体崩出、块体滑移和断层激活等破坏现象, 初步得到了深埋洞室的安全阈值。分析得到了含裂隙围岩、块系围岩和含断层围岩在不同地冲击扰动作用下的破坏机制。试验结果表明, 较小的动力扰动即可诱发深埋洞室的破坏, 并且随冲击扰动次数的增加和冲击荷载峰值的增大, 洞室破坏程度会加剧; 此外, 在爆炸远区, 地冲击扰动仍可诱发工程灾害。

关键词: 爆炸地冲击扰动; 含结构面围岩; 深埋洞室; 灾害模拟; 相似模拟试验

中图分类号: O38

文献标志码: A

Experimental Simulation of Explosive Impact Disturbance Induced Damage of Surrounding Rock Containing Structural Surfaces

XIONG Ziming¹, LI Zhihao¹, GAO Lei^{1,2}, CHENG Xiangzhen³, MA Chao¹, CHEN Huanxin⁴

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 3. Troops 32391, Guangzhou 510000, China; 4. Troops 96911, Beijing 100011, China)

Abstract: In order to investigate the mechanism of the effect of ground impact disturbance generated by the blast action in the remote zone on the damage of deeply buried

caverns, a similar simulation test was conducted using a ground impact effect simulation test device. A cube specimen with its side length of 1.3 m was used to simulate the entire process from ground stress loading (1 000 m burial depth), cavern excavation to blast ground impact disturbance loading. During the test, sensors were placed inside the specimen and the cavern to monitor the change of stress, strain, displacement and damage inside the cavern. Damage phenomena such as debris crumbling out, fracture connectivity leading to block crumbling out, block slip and fault activation were reproduced by applying impact disturbance loads with different peak values on top of the specimen. Ultimately, preliminary safety thresholds for deeply buried cavern chambers were obtained. The damage mechanisms of fractured, block and fault-bearing rocks under different ground impact disturbances were obtained. Tests have proven that smaller dynamic disturbances can induce damage in deeply buried cavities. Moreover, the degree of chamber damage increases with the number of impact perturbations and the peak of impact load. The test results demonstrate that ground shock disturbances in the distant area of the explosion can still induce engineering hazards.

Key words: explosive ground impact disturbance; surrounding rock containing structural surfaces; deeply buried cavern; disaster simulation; similar simulation tests

近年来, 随着采矿、隧道、水利和国防工程等重大项目逐渐向地球深部迈进, 深部工程灾害日益凸出^[1-4]。随着埋深的增加, 地应力随之增大, 高应力的存在, 会使得围岩内储存大量的弹性能。在洞室开挖过程中, 围岩内部应力会发生转化和转移, 同时,

收稿日期: 2023-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(52278419)

第一作者: 熊自明(1980—), 男, 副教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为综合防护技术及材料。

E-mail: xzm992311@163.com

通信作者: 李志浩(1995—), 男, 博士生, 主要研究方向为深地工程防护。E-mail: 17865191593@163.com



论文
拓展
介绍

开挖产生的洞室为围岩变形和移动提供了临空面。现场监测显示,开挖过程中发生的岩爆、大变形等工程灾害^[5-7],会严重威胁人身财产安全。

外界扰动荷载的作用同样是诱发工程灾害的重要原因。研究表明,扰动作用会加速岩体内的能量转移。为揭示动力扰动对深部围岩的破坏机制,众多学者开展了大量的研究。何满潮等^[8]研制了冲击岩爆模拟系统,模拟了动力扰动作用下灾害的发生过程。苏国韶等^[9-11]开展了低频扰动作用下岩块和含孔洞岩石试样的破坏试验,研究了岩石试样的破坏机制和能量演化机制。宫凤强等^[12]开展了不同静载下硬岩在动力扰动作用下的试验研究,分析了静应力水平和扰动频率对岩石试件破坏的影响。赵光明等^[13]研究了扰动作用下,卸荷岩体的破坏特征。刘闽龙等^[14]研究了多次动力扰动作用下岩石的变形破坏特征,得到冲击次数的增加,会加速岩石破坏的结论。

不同于爆炸近区强冲击荷载引起的强度破坏,当洞室距离爆源较远时,爆炸产生的动力扰动远小于岩块的强度,地冲击扰动引发洞室破坏的主要原因在于初始结构面的存在^[15]。地质调查结果表明,岩石内部含有众多结构面,结构面的存在,使得岩体被分割成众多岩块^[16]。动力扰动的存在,使得块体间出现超低摩擦现象,引发块体的滑移失稳^[17-20]。在工程灾变模拟方面,众多学者通过研究突破了变形破坏的时间相似问题^[21],实现了采用低强度高脆性相似材料模拟开挖过程中的工程灾害^[22],同时还研究了扰动作用下,结构面的滑移失稳^[23]。

综上所述,现有研究中所采用的试件多为硬岩,结构面的模拟采用的是真实岩块的拼接,未充分考虑深埋洞室的初始地应力环境,动力扰动作用下,含软弱结构面的围岩如何破坏,块体滑移如何在围岩中发生,仍有待于进一步的研究。为充分模拟现场施工环境,研究裂隙、块系岩体以及断层等地质结构面的存在对围岩破坏机制的影响,本文通过开展相似模拟试验,分析了远区大当量爆炸作用下,含结构面围岩的破坏规律。

1 试验准备

1.1 工况设计

1.1.1 地应力计算

对于深埋洞室而言,高埋深带来的一个重要问题就是岩体中的高地应力特征。根据地质调查结

果,垂直地应力的大小和埋深为线性相关^[24]。取水平地应力和垂直地应力的比值为1,可得到垂直地应力 σ_H 和水平地应力 σ_z 的计算结果为

$$\sigma_H = \sigma_z = \rho g H \quad (1)$$

式中: ρ 为岩体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; g 为重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; H 为洞室埋深, m 。

1.1.2 动力扰动计算

为研究远距离爆炸对深埋洞室的影响,需计算得到作用在洞室的地冲击扰动。根据现有的试验结果可知,随着爆心距 r 的增加,冲击扰动的幅值逐渐减小。并且应力波在传播过程中,波会被拉长,升压时间和正压时间会随之增加。当洞室距离爆心较远时,相对于洞室而言,波阵面的曲率较大,可将其简化为平面波。因此,根据测试得到的粒子运动速度,地冲击扰动的峰值可按照下式计算^[25]:

$$p_i = \rho c_p v_m = \rho c_p A (r/Q^{1/3})^{-n} \quad (2)$$

式中: c_p 为纵波波速; v_m 为粒子运动速度; Q 为等效封闭爆炸当量; A 和 n 为系数。

对于坚硬岩石来说,各参数取值为 $\rho = 2640 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c_p = 4250 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $A = 8.94 \times 10^4$, $n = 2.21$ 。因此,可以计算得到

$$p_i = 1 \times 10^6 (r/Q^{1/3})^{-2.21} \quad (3)$$

应力波的升压时间 t_r 和正压时间 t_+ 分别为

$$t_r/Q^{1/3} = 2.17 \times 10^{-3} \left(\frac{Q^{1/3}}{r} \right)^{-1.86} \quad (4)$$

$$t_+/Q^{1/3} = 2.58 \times 10^{-3} \left(\frac{Q^{1/3}}{r} \right)^{-2.06} \quad (5)$$

1.1.3 相似比计算

根据力学原理和量纲分析,可以计算得到各个参数的相似关系。设定原型和模型试件的尺寸相似比为50:1,密度相似比为1:1,则可以得到各参数的取值,如表1所示^[26]。另外,弹性模量相似比、强度相似比和应力相似比是相同的,在表中不再赘述。

表1 相似比取值
Tab. 1 Similarity ratio values

参数	单位	符号	相似比
密度	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	C_ρ	1
尺寸	m	C_L	50
峰值应力	MPa	$C_{p_i t}$	50
泊松比		C_μ	1
时间	s	C_t	7.07
速度	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	C_v	7.07

1.1.4 试验方案设计

设定洞室为埋深1000 m的圆形洞室,比例爆距

$(r/Q^{1/3})$ 处于 $120\sim 340\text{ m}\cdot\text{kt}^{-1/3}$ 之间,则可以计算得到模型试验所需的地应力为 0.5 MPa ,冲击扰动压力峰值为 $0.05\sim 0.51\text{ MPa}$,升压时间为 $18.85\sim 46.37\text{ ms}$,正压时间为 $58.38\sim 177.65\text{ ms}$ 。为研究爆炸地冲击扰动作用下隧洞围岩的破坏规律,得到围岩的地冲击阈值,试验对比了比例爆距在 320 、 170 和 $140\text{ m}\cdot\text{kt}^{-1/3}$ 左右的爆炸地冲击扰动作用下,完整围岩、含结构面围岩、含断层围岩的破坏特征。为分析结构面对围岩破坏的影响机制,在试件内部设置了多种不同的结构面。

1.2 试验装置

采用图1所示的地冲击效应模拟试验装置开展本次试验研究。装置由5部分组成,可以实现从地应力加载、洞室开挖、冲击扰动加载全过程的模拟。装置可实现真三轴柔性加载和长时间稳定静压加载。可开挖的最大洞室直径为 200 mm ,开挖速率可根据需要调节。此外,装置可在试件顶面实现顶部平面波均匀加载。应力波峰值可达 3 MPa ,正压时间可以达到 300 ms ,升压与正压时间比可根据需要调节。试件为边长 1.3 m 的立方体。

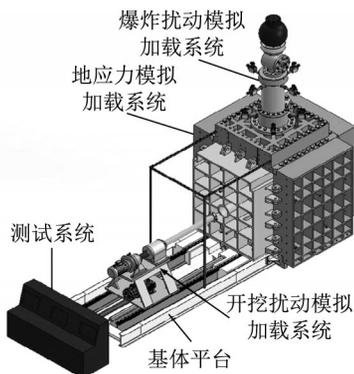


图1 地冲击效应模拟试验装置示意图

Fig. 1 Ground impact effect simulation test device

1.3 模型制作及传感器布置

根据装置的容纳空间,设置试件为边长 1.3 m 的立方体,大尺寸试件可以清晰地模拟出洞周围岩的破坏情况。试验所采用的相似模拟材料由石英砂、重晶石砂、重晶石粉、松香、95%的酒精配制而成^[27]。参考Ⅱ类围岩,材料的基本参数取值见表2,其中,相似材料的参数符合与实际岩体 $1:50$ 的相似比^[26]。

模型尺寸如图2a所示。底部高度 500 mm 的部分整体浇筑而成,浇筑过程中采用密度控制法,分层制作,一层的酒精挥发完成后再浇筑下一层。模型

上部 800 mm 高度范围内,从后到前分6部分依次制作完成。其中,第Ⅰ部分厚度为 300 mm ,完整浇筑而成,后期不开挖,模拟掌子面的存在并满足模型背面均匀加载的需要。第Ⅱ~Ⅵ部分厚度均为 200 mm ,除第Ⅳ部分,均为完整浇筑而成。第Ⅳ部分采用块体拼接而成,块体为提前制作,材质和完整浇筑部分一样。

表2 材料参数确定

Tab. 2 Determination of material parameters

密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量/ GPa	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
2 540	0.441	1.14	0.1

试验过程中,对模型施加的三向静应力相同,并且在模型顶部施加的动荷载是均匀的面荷载,根据受力特点可知,第Ⅱ~Ⅵ部分的力学环境基本一致。由于前立面的加载和开挖完成后掌子面的存在,第Ⅱ部分靠近掌子面的 15 cm 和第Ⅵ部分不作为研究对象。图2b为后期开挖完成后模型的示意图。将第Ⅱ部分的 5 cm 厚度和第Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ部分作为对象,研究不同冲击荷载作用下,含不同结构面围岩的破坏情况。

结构面根据大小可以分为裂隙和断层。当结构面数量较多时,可将岩体分割成块系岩体。为充分对比结构面对围岩破坏的影响机制,沿洞轴方向,设置了含裂隙围岩、块系岩体和断层。其中,在第Ⅱ部分靠近第Ⅲ部分的 5 cm 范围内设置了裂隙(图2c),为消除围岩内部的黏结力,在围岩内部放置亚克力板模拟裂隙,亚克力板的尺寸为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,厚度为 2 mm 。第Ⅲ部分为不含结构面部分,作为对照组和其他工况对比(图2d)。第Ⅳ部分由块体拼接而成,块体为边长 100 mm 的立方体。其中,第Ⅳ部分含两排块体(截面3和截面4),在截面3块体处设置关键块体,模拟块体的滑移失稳(图2e)。在截面4块体上粘贴光纤光栅传感器,监测围岩的应变(图2f)。在第Ⅴ部分设置了断层,长度和宽度均为 20 cm (图2g),断层到洞壁的距离为 2 cm 。为消除材料间的黏结力,在断层内填充了细沙。

试件制作过程中,内部埋设了动态压力传感器和光纤光栅位移计,监测冲击过程中围岩的应力、应变。洞室开挖完成后,在洞室内部放置位移计和微型相机,监测位移和洞室内的破坏情况。

1.4 试验过程

将试件放入仪器后,开始加压。采用分级分向加压,加压顺序依次为前后、左右、顶部,单次加压幅

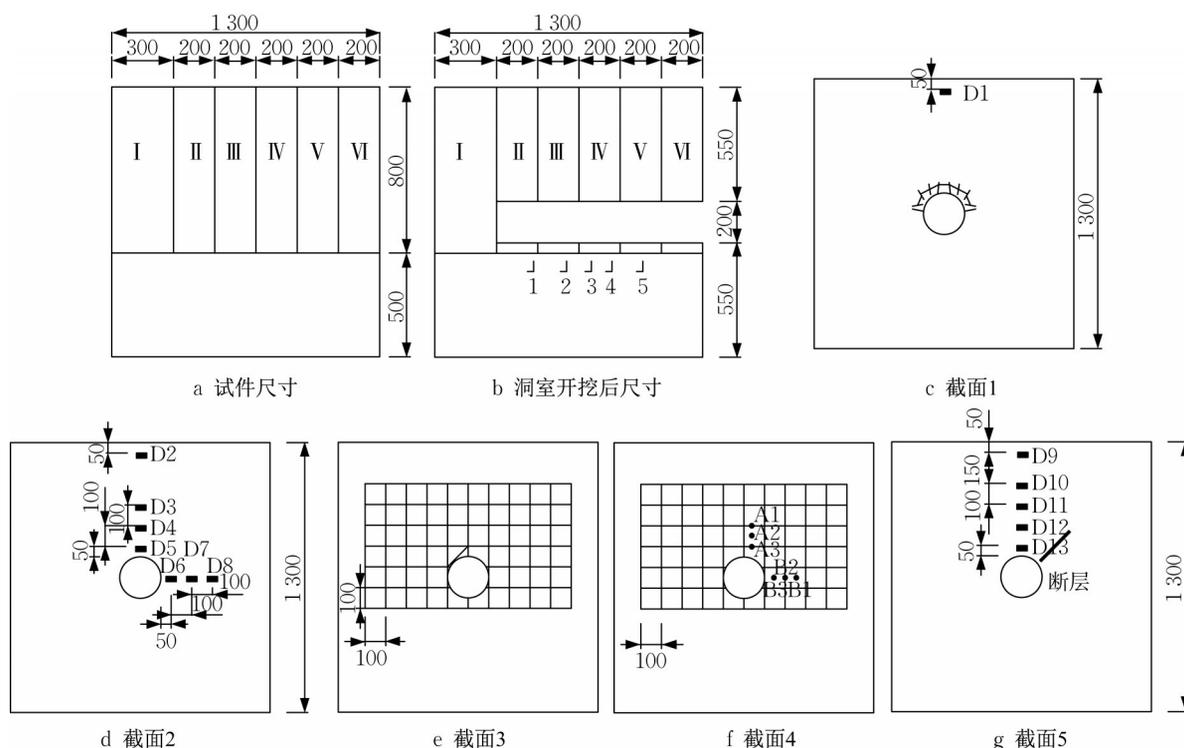


图2 试件尺寸及传感器布置图(单位:mm)

Fig. 2 Test specimen size and sensor arrangement (unit: mm)

值为0.1 MPa。一级加载稳定后,才继续下一级加载。当加载至顶部、前后、左右压力均为0.7 MPa时,维持压力不动,进行保压加载。保压3 d后,将三向压力均降低至0.5 MPa,而后保持压力不变,待试件内部应力均达到0.5 MPa,开始洞室开挖。

为模拟实际场地中洞室的开挖过程,试验采用分段开挖。单次开挖长度为10 cm,控制开挖速率为每10 min开挖10 cm。两次开挖的间歇时间为10 min。洞室开挖完成且洞室内无明显变化时,开始冲击加载试验。

为研究爆炸地冲击扰动作用下深埋洞室的破坏特征,控制比例爆距在320、170和140 $\text{m} \cdot \text{kt}^{-1/3}$ 左右,则可以计算得到模拟试验中,施加在试件顶面的平面波的峰值为0.06、0.24和0.36 MPa。升压时间在20~50 ms左右,正压时间在70~200 ms左右。为更加清楚地观察洞室的破坏特征,控制冲击压力略大于第3次冲击时的冲击压力,对试件施加冲击扰动,直至洞室出现严重破坏。

2 不同冲击荷载作用下监测结果分析

2.1 冲击过程中的压力监测

冲击过程中的压力监测情况如图3~5所示。其

中,图3为布置在试件顶部埋深5 cm处传感器的监测结果。对比3次冲击过程中顶部压力监测结果可以看出,冲击作用下,布置在顶部的传感器监测结果基本一致,证明了装置可以在试件顶面施加均匀的平面波。同时,也证明了沿洞径设置的各部分可以受到相同的地冲击扰动,证明了工况设置的合理性,进而可以对比相同地冲击扰动下,不同结构面形式对围岩破坏程度的影响。

为监测应力波在试件中的传播,在洞室上方沿高度方向布置了多个传感器,传感器的布设位置如图2所示。为分析应力波自上而下的传播规律,取第V部分在3次冲击下的传感器监测结果进行说明。监测结果如图4所示。对比同一次冲击下5个传感器的监测结果可以发现,监测波形基本一致,说明了传感器监测结果的准确性。另外,从图4中可以看出,3次冲击下,冲击扰动的传播规律较为一致,均为随埋深的增加,峰值逐渐降低。说明应力波在试件内部传播过程中不断衰减。

为进一步厘清应力波自上而下的传播规律,取第III部分(完整部分)和第V部分(含断层部分)的应力波峰值进行对比,如图5所示。由图5可以看出,3次冲击下,两部分的峰值衰减规律基本一致,说明装置可以对试件的不同部分施加相同的地冲击扰动,

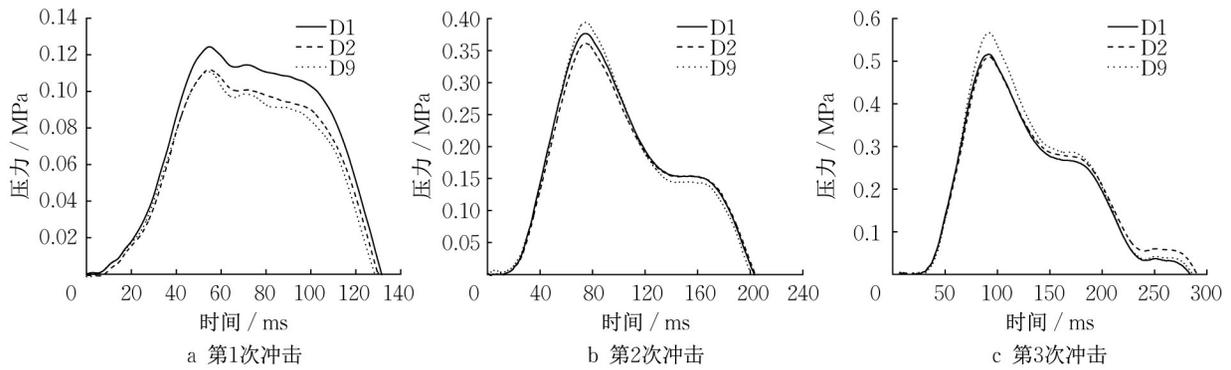


图3 试件顶部压力对比

Fig. 3 Comparison of pressure conditions at the top of the specimen

证明了工况设置的合理性和科学性。另外,当材料相同时,不同位置处的应力波传播规律基本一致,说明了测试结果的准确性。从变化规律可以看出,距离洞室越近,冲击压力峰值衰减越快。埋深 50 cm 处位于洞室上方 5 cm,开挖完成后,洞周围岩的松动对此处的应力测试结果影响较大。因此综合考虑应力波衰减和洞周围岩松动的影响,将埋深 40 cm 处

的应力测试结果作为深埋洞室承受的地冲击扰动。由含断层部分的测试结果可知,3次冲击下洞室承受的地冲击扰动峰值分别为 0.057、0.230、0.330 MPa。根据公式(2)和相似比,可计算得到3次冲击对应的比例爆距 ($r/Q^{1/3}$) 分别为 322.0、171.3、148.0 $m \cdot kt^{-1/3}$ 。与设计所需的地冲击压力基本一致。

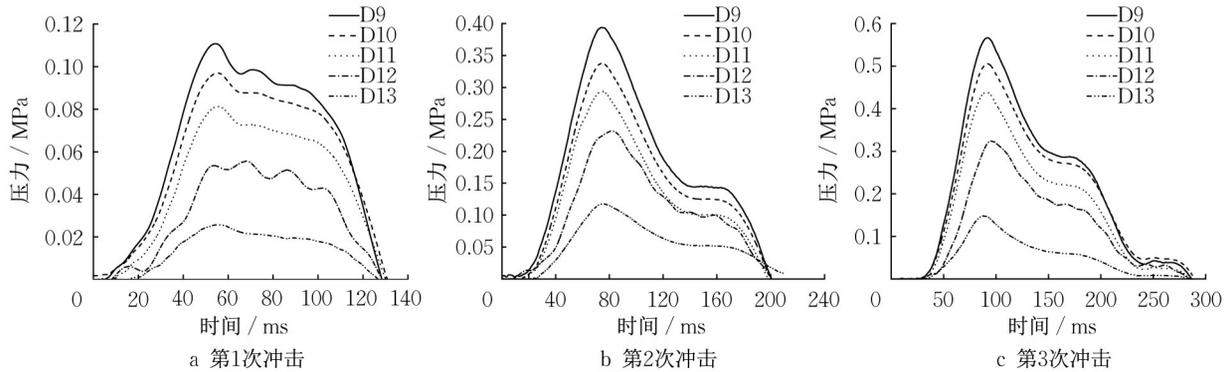


图4 试件内部应力传播

Fig. 4 Stress propagation within the specimen

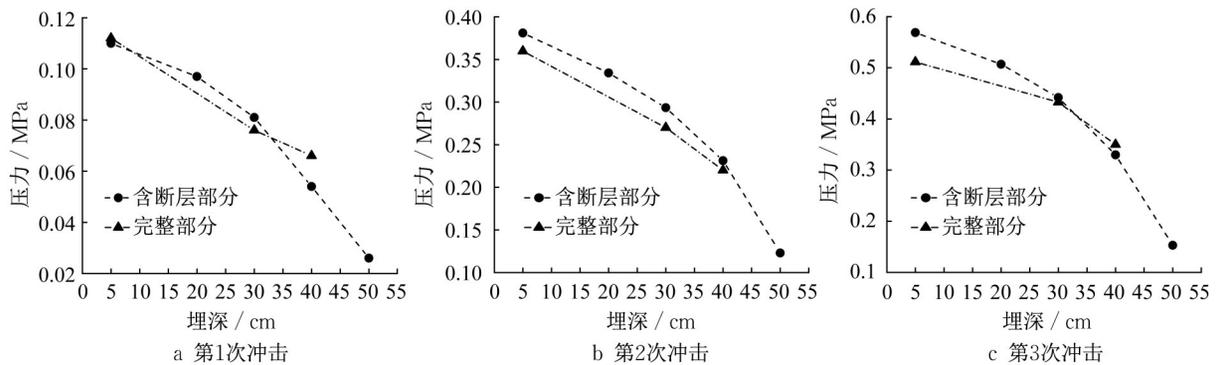


图5 完整部分和断层部分压力对比

Fig. 5 Pressure comparison between intact and faulted sections

2.2 冲击过程中的位移监测

为量化不同比例爆距下洞室的破坏程度,在洞

室顶部和左右斜45°拱肩处放置了位移传感器,监测洞室内的位移。图6为布置在第Ⅲ部分(完整部分)

位移计测试得的位移情况。由图6可知,冲击作用下,顶部位移最大,说明在冲击作用下洞室沿上下方向被压缩。因为模型试验为对称加载,左右拱肩处位移基本一致,验证了试验结果的准确性。此外,冲击完成后产生的残余位移表征了洞室破坏的剧烈程度。第1次冲击后,洞顶的残余位移为0.01 mm左右,说明洞室内的变形基本为弹性。第2次冲击后,洞室顶部的残余位移为0.13 mm左右,说明洞室内

出现破坏,但破坏程度较轻,对于后期较大的冲击来讲,该次冲击造成的损伤可忽略不计。第3次冲击后洞室顶部的残余位移为0.30 mm左右,左右斜45°的监测结果出现了一定的差异,说明洞室内出现了部分损伤,但整体而言,此时洞室还处于轻微损伤阶段。3次试验的位移监测结果和对应比例爆距下现场试验的破坏程度基本一致^[28]。

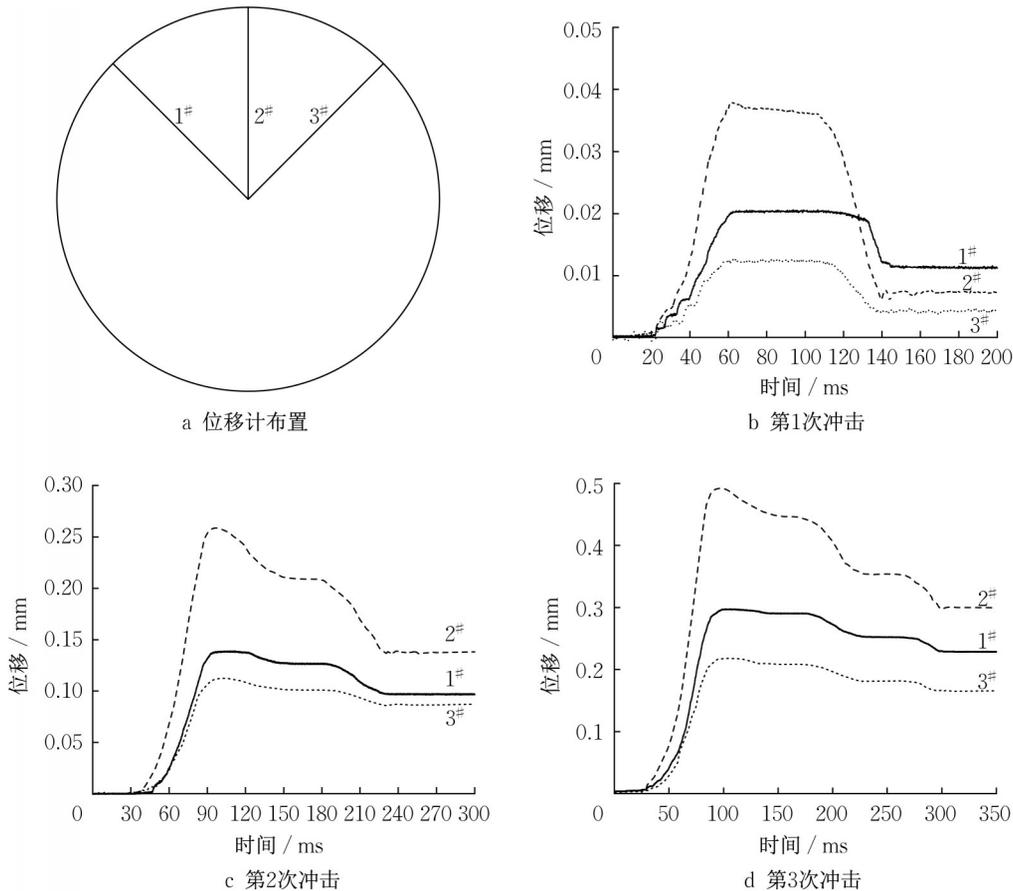


图6 冲击过程中的位移监测

Fig. 6 Displacement monitoring during impact

2.3 冲击过程中的应变监测

为监测冲击过程中洞周围岩的应变情况,在试件内部粘贴了光纤光栅应变传感器。距离洞壁最近的监测点为5 cm,两监测点间的间距为5 cm。第1次冲击时,应变幅值较小,最大的应变幅值为 1×10^{-5} 左右,此时洞室内没有破坏。第2、3次冲击试验中,应变监测结果如图7所示。从图7中可以看出,洞室顶部的应变监测波形和应力波形基本一致,且洞室顶部有先受压而后向受拉方向转变的趋势。第2次冲击时,A1处的拉应变达到了 9×10^{-5} ,说明在冲击作用下,洞室顶部的块体出现了一定程度的

移动。但A2和A3处的应变较小,说明洞室内没有严重破坏。洞室右侧受拉明显,说明在冲击作用下洞室右侧在挤压作用下,会向内部移动。顶部冲击作用下,会在洞室右侧产生竖直方向的压应力集中和水平方向的径向拉应力。第2次和第3次冲击试验表明,当冲击扰动较小时,洞室右侧块体的运动会处于主导地位。而当冲击扰动较大时,由于应力集中的出现,导致洞室左右两侧距离洞室较近的围岩出现较大的变形,在一定程度上限制了块体的整体运动。从监测数据来看,隧洞内部未发生严重破坏。

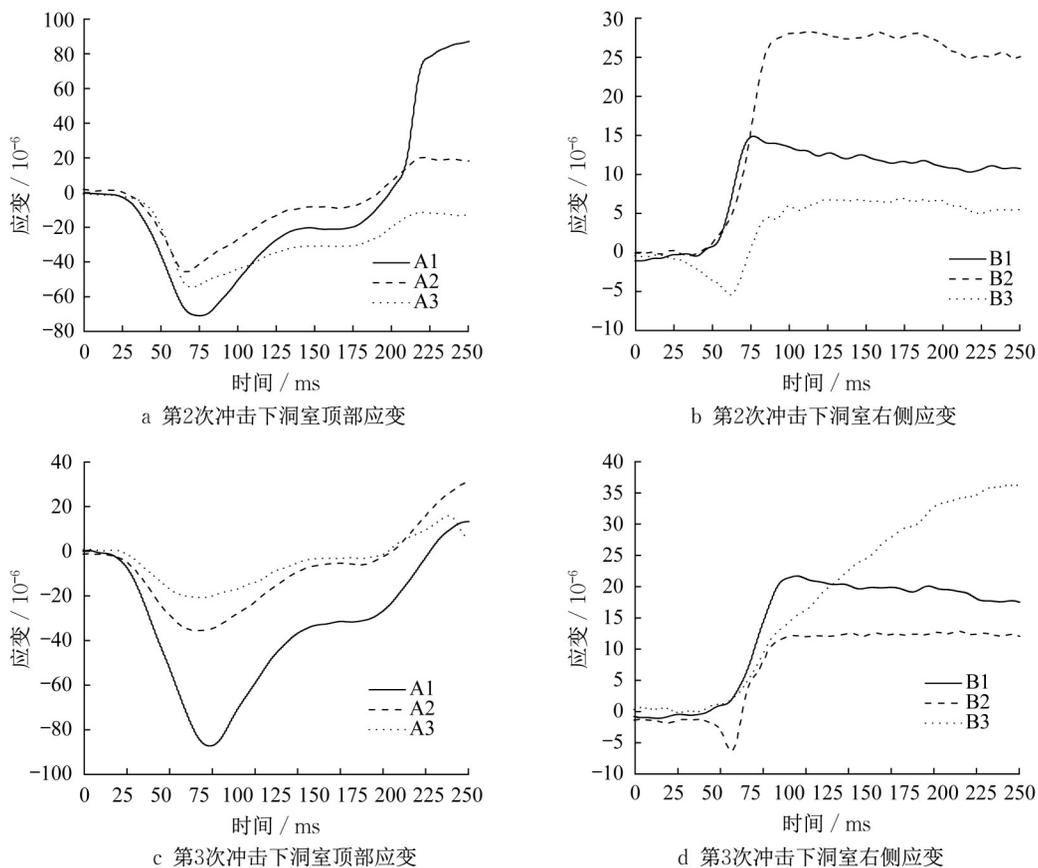


图7 冲击过程中的应变监测

Fig. 7 Strain monitoring during impact

3 洞室破坏过程

3.1 开挖完成后围岩的破坏情况

开挖完成后的洞室情况如图8所示。从图8中可以看出,开挖完成后,第Ⅱ部分由于预制裂隙的存在,在隧洞顶部出现了一定程度的损坏,但靠近掌子面的部分并未出现破坏。第Ⅳ部分(块体拼接)的关键块体在开挖扰动作用下脱落,表明开挖会导致试件内部的应力状态发生变化,进而使得块体出现滑移,引发洞室内的破坏。另外,由于高应力的存在和块体的挤压,第Ⅳ部分边墙处也出现了一定程度的损伤。此外,第Ⅳ、Ⅴ部分交接处,在隧洞拱肩处出现了块体的脱落。

对比第Ⅲ部分和第Ⅱ部分可以看出,裂隙的存在会降低岩体的承载力,受开挖扰动作用,裂隙会进一步开裂扩展,进而引起洞室内围岩的损伤。对比第Ⅲ部分和第Ⅳ部分可以看出,块体的存在,导致围岩内部应力状态改变,在开挖时,会引起应力集中,进而导致围岩的破坏。并且,当存在关键块体时,开挖导致的应力状态改变会引起块体的运动,进

而导致洞室内垮塌。对于深埋洞室,高地应力的存在使围岩内部储存了大量的弹性能,开挖时弹性能释放。围岩压力越高,洞室开挖过程中的损伤越剧烈。



图8 开挖完成后洞室的破坏情况

Fig.8 Damage to the cavity after excavation completion

3.2 前3次冲击过程中的破坏情况监测

为监测洞室内的破坏情况,在洞室内部布置了

微型相机。监测情况如图9所示。第1次冲击没有出现破坏,相机监测结果与位移监测和应变监测结果互相印证,说明在比例爆距($r/Q^{1/3}$,根据埋深40 cm处的应力监测结果和公式(2)计算得到)为 $322.0 \text{ m} \cdot \text{kt}^{-1/3}$ 时,没有造成围岩的破坏,此范围内洞室是安全的。第2次冲击时,洞室内的监测情况如图9a所示。其中,在块体部分有碎屑脱落,在其他部分有轻微的碎屑弹出,但不影响洞室的安全性。从监测情况分析,此时洞室处于轻微破坏区和安全区的边

界(比例爆距为 $171.3 \text{ m} \cdot \text{kt}^{-1/3}$),当冲击扰动增加时,洞室内的破坏程度会加剧,而当冲击扰动减小时,洞室内则不会出现破坏。比例爆距为 $148.0 \text{ m} \cdot \text{kt}^{-1/3}$ 时,洞室内的破坏情况如图9b所示。从图中可以看出,在此冲击扰动作用下,断层部分被激活,填充在断层内的细沙喷涌而出。块体部分出现了碎屑的脱落,但整体而言,碎屑尺度不大。隧洞内的监测结果和各类传感器的监测结果相互印证,证明了试验的准确性。



a 第2次冲击下洞室内的破坏情况

b 第3次冲击下洞室内的破坏情况

图9 地冲击扰动作用下洞室内的破坏情况

Fig. 9 Damage within the cavern in ground impact disturbance

通过对比3次冲击试验可知,当隧洞到爆心的比例爆距为 $171.3 \text{ m} \cdot \text{kt}^{-1/3}$ 时,洞室处于安全区和轻微破坏区的边界。当隧洞到爆心的比例爆距为 $148.0 \text{ m} \cdot \text{kt}^{-1/3}$ 时,会造成临近断层的激活。因此,当隧洞处于断层周围时,需要加强隧洞的支护。

3.3 多次冲击荷载作用下含不同结构面围岩破坏情况

3次冲击后,试件内部出现了损伤,内部应力波的传播机制发生了变化。因此,后续冲击不再考虑具体的比例爆距,仅通过试验现象对比各部分的破坏情况,分析其破坏机理。在第4次冲击过程中,施加到试件顶面的应力波峰值分别为0.63和0.83 MPa,均大于第3次冲击的应力波峰值0.57 MPa。

图10为第4次冲击过程中洞室内部的破坏情况。从图10中可以看出,冲击作用下,填充在断层内部的细沙喷涌而出。并且,块体部分也出现了碎屑的崩出。整体而言,第4次冲击的破坏程度大于第3次冲击,但完整部分洞室无明显破坏。出现上述现象的主要原因是冲击压力的增加和损伤的累积。

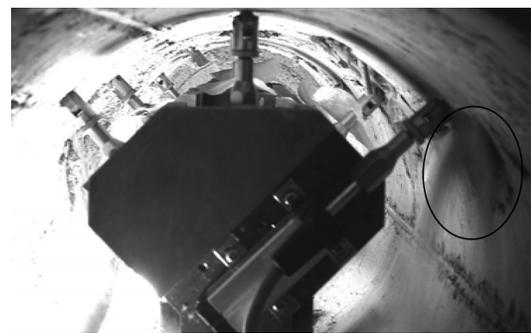


图10 第4次冲击下的洞室内部

Fig. 10 Interior of the cavern in the fourth impact

图11为第5次冲击过程中洞室内部的破坏情况。图中4张照片按照时间顺序排列。第②张照片显示,冲击过程中,隧洞顶部碎屑崩出,在含裂隙部分和块体部分较为明显,完整浇筑部分较少。整体而言,碎屑崩出的量较多,对洞室安全造成了一定的威胁。当碎屑崩出过程结束后,断层部分的细沙继续喷涌而出(第③张照片),说明含断层部分的破坏程度在进一步增加。当冲击结束一段时间后,块体部分出现了大尺寸块体的滑落,说明在冲击结束后,

脱落块体和周围部分脱离,导致的块体的脱落。

对比第3次、第4次和第5次冲击结束后洞室的破坏情况(图12)可以看出,第3次冲击过程中,断层部分被激活,出现断层的喷砂现象。随着冲击次数的增加,洞室内部的损伤区域不断增加,第5次冲击后,断层部分的破坏程度明显大于之前,并且裂缝开始沿垂直方向延伸,给洞室安全造成了极大的威胁。冲击过程中,填充在断层内的细沙不断被喷出,从图12a~12c可以看出,随着冲击扰动的施加,喷出的细沙不断增加。由图12c可以看出,第5次冲击下脱落的块体是较为完整的,没有产生强度破坏,证明了块体是由于内部应力状态的变化,产生了滑移。

3.4 含结构面洞室围岩破坏过程分析

通过对比冲击结束后不同部分的破坏现象(图12d),可以看出5次冲击后,完整部分在冲击前后变化不大,几乎没有破坏出现。而含裂隙部分、块体部分和含断层部分均出现了一定程度的损伤。通过分析可知,当结构面尺寸及数量发生变化时,围岩的破坏机理也会随之改变。

3.4.1 含裂隙围岩破坏过程分析

一方面,开挖会引起洞室周围应力状态发生变化,在洞周形成一定程度的应力集中。另一方面,开挖完成后,形成的临空面,为围岩的变形移动提供了

空间。同时,裂隙的存在会消除围岩间的黏结力,在集中应力的作用下,围岩会产生变形以及拉伸和剪切破坏。在高应力作用下,裂纹会扩展连通。当裂隙将围岩和周围块体分割开后,块体就会脱落。顶部冲击荷载作用下,应力波自上而下传播,接近临空面时,形成拉伸波。在拉伸波作用下,洞室顶部形成拉伸裂纹,裂纹和初始裂隙相交后,顶部块体脱落(图13)。并且,顶部受冲击荷载作用时,洞室左右边墙会形成压应力集中,形成竖向裂纹,当冲击荷载足够大时,就会导致左右边墙的压溃破坏^[26]。

3.4.2 块系围岩破坏过程分析

对于块系岩体而言,围岩的破坏是由岩块的运动主导的。开挖形成的洞室为岩块运动提供了空间。如果上部岩块的摩擦力和支撑力不足以支撑岩块重量时,岩块就会滑落。因为天然岩块的尺寸一般大于裂隙发展形成的岩块,所以天然岩块的滑落会更加危险。如图14所示,在洞室开挖过程中,洞室上方的块体①在重力作用下脱落。第5次冲击后,块体②发生脱落。前期,由于周围块体的挤压和摩擦,块体②并未脱落。在冲击荷载的作用下,块间发生振动,振动过程中,摩擦力减小,块间挤压力变小。当摩擦力无法支撑时,就会出现块体脱落。因此,需要特别注意多次扰动环境中的块体滑移。

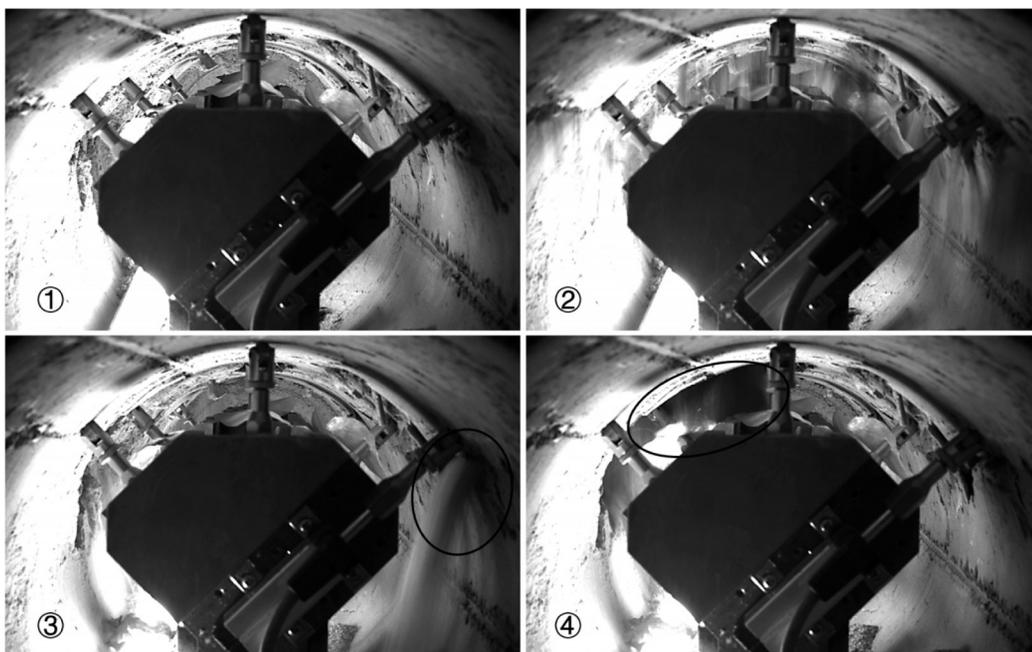


图11 第5次冲击下的洞室内部

Fig. 11 Interior of the cavern in the fifth impact

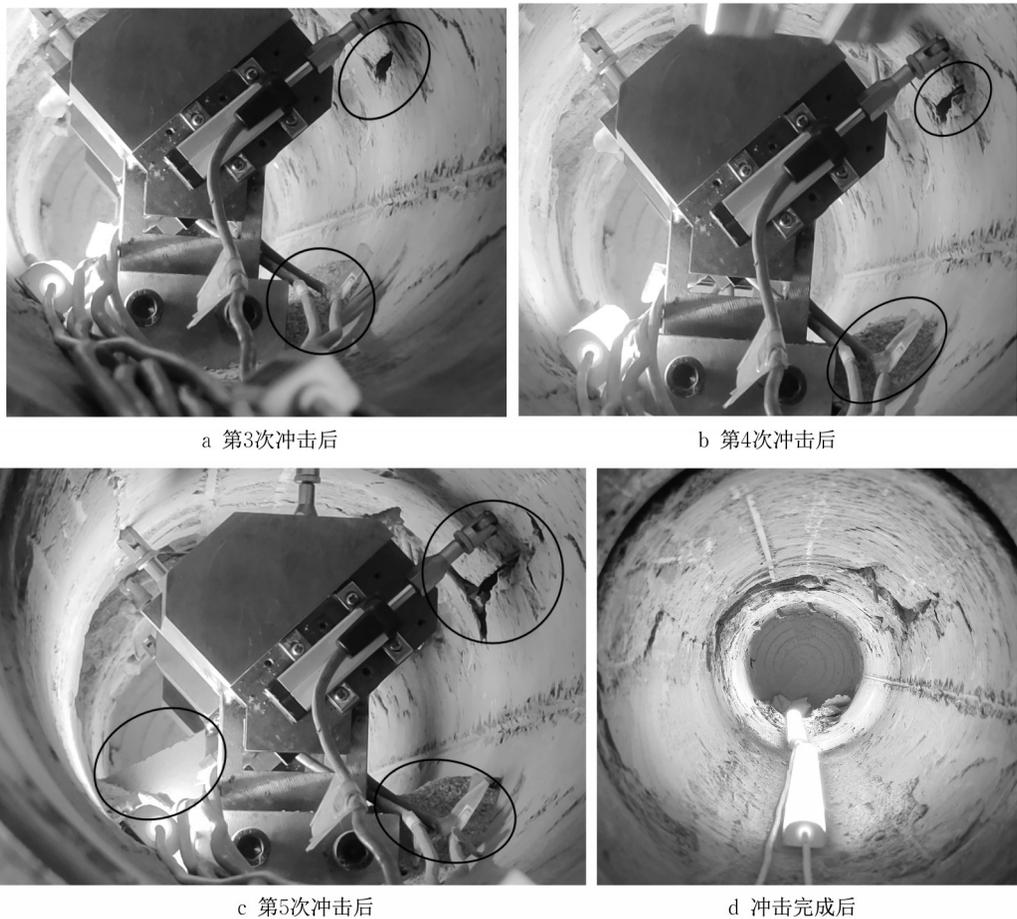


图12 冲击导致的洞室内破坏情况

Fig. 12 Damage within the cavern caused by impact

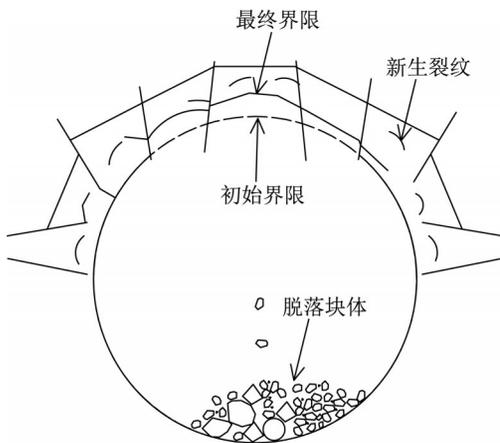


图13 含裂隙围岩破坏模式

Fig. 13 Fractured enclosure failure pattern

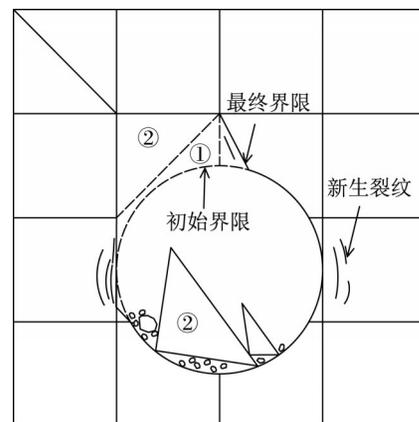


图14 块系围岩破坏模式

Fig. 14 Block system enclosure damage pattern

3.4.3 含断层围岩破坏过程分析

洞室开挖完成后,围岩内部应力将重新分布,导致洞周环向应力增大,引发裂纹的萌生、扩展。冲击作用下,洞周的环向应力增加,洞室沿径向受拉。动静耦合荷载的作用,使得洞周的裂纹不断发育、扩展。当洞室附近有断层存在时,尖端效应使裂纹沿

最短路径将断层和洞室连接,逐渐增多的裂纹,最终导致断层内断层泥的喷出和洞周围岩的脱落。当空间足够时,冲击扰动还会引起断层的错动,导致更大的工程灾害,如图15所示。因此,对于深埋洞室而言,断层严重威胁了洞室安全,较小的扰动,就可引发断层的激活,给洞室造成严重的灾害。

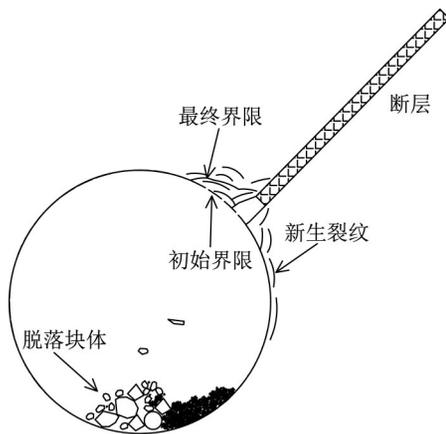


图15 含断层围岩破坏模式

Fig. 15 Fault-bearing enclosure damage pattern

4 结论

采用深埋洞室地冲击模拟试验装置,开展了相似模拟试验,模拟了埋深1 000 m的圆形洞室,在比例爆距分别为322.0、171.3、148.0 $\text{m} \cdot \text{kt}^{-1/3}$ 的爆炸地冲击扰动作用下的破坏情况。具体结论如下:

(1)模拟了深埋洞室洞周围岩的破坏情况,再现了碎屑崩出、含裂隙岩体破坏、块体滑移脱落、断层激活等破坏现象。

(2)对比了不同冲击扰动作用下含结构面围岩的破坏情况,得到安全和轻微破坏的边界比例爆距约为171.3 $\text{m} \cdot \text{kt}^{-1/3}$ 。当隧洞到爆心的比例爆距为148.0 $\text{m} \cdot \text{kt}^{-1/3}$ 时,会造成临近断层的激活。在多次地冲击扰动下会出现关键块体的滑移,对洞室安全造成严重威胁。

(3)通过对比含不同结构面岩体的破坏特征,得到了含不同结构面围岩的破坏机制。

作者贡献声明:

熊自明:思路设计及文章撰写。

李志浩:数据处理及文章撰写。

高磊:试验数据采集。

程祥珍:研究思路指导。

马超:试验数据采集。

陈焕新:研究思路指导。

参考文献:

[1] 钱七虎. 战略防护工程面临的核钻地弹威胁及连续介质力学模型的不适用性[J]. 防护工程, 2005, 26(5): 1.
QIAN Qihu. Threat of nuclear missile faced in strategic protection works and inapplicability of continuum mechanical model[J]. Protective Engineering, 2005, 26(5): 1.

[2] 王明洋, 李杰. 爆炸与冲击中的非线性岩石力学问题Ⅲ: 地下核爆炸诱发工程性地震效应的计算原理及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 695.
WANG Mingyang, LI Jie. Nonlinear mechanics problems in rock explosion and shock. Part III: the calculation principle of engineering seismic effects induced by underground nuclear explosion and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 695.

[3] 李夕兵, 宫凤强. 基于动静组合加载力学试验的深部开采岩石力学研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 846. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.YT21.0176.
LI Xibing, GONG Fengqiang. Research progress and prospect of deep mining rock mechanics based on coupled static-dynamic loading testing [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 846. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.YT21.0176.

[4] LI X B, GONG F Q, TAO M, *et al.* Failure mechanism and coupled static-dynamic loading theory in deep hard rock mining: a review [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(4): 767.

[5] FENG Xiating, YANG Chengxiang, KONG Rui, *et al.* Excavation-induced deep hard rock fracturing: methodology and applications [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(1): 1.

[6] FENG X T, XU H, QIU S L, *et al.* In situ observation of rock spalling in the deep tunnels of the China Jinping underground laboratory (2 400 m depth) [J]. Rock Mech Rock Eng, 2018, 51(4): 1193.

[7] LIU G F, FENG X T, JIANG Q, *et al.* In situ observation of spalling process of intact rock mass at large cavern excavation [J]. Eng Geol, 2017, 226: 52.

[8] 何满潮, 刘冬桥, 宫伟力, 等. 冲击岩爆试验系统研发及试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1729. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.09.001.
HE Manchao, LIU Dongqiao, GONG Weili, *et al.* Development of a testing system for impact rockbursts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1729. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.09.001.

[9] 苏国韶, 胡李华, 冯夏庭, 等. 低频周期扰动荷载与静载联合作用下岩爆过程的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1309. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1249.
SU Guoshao, HU Lihua, FENG Xiating, *et al.* True triaxial experimental study of rockburst process under low frequency cyclic disturbance load combined with static load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1309. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1249.

[10] SU G S, FENG X T, WANG J H, *et al.* Experimental study of remotely triggered rockburst induced by a tunnel axial dynamic disturbance under true-triaxial conditions [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(8): 2207. DOI: 10.1007/s00603-017-1218-y.

[11] 刘岩鑫, 蒋剑青, 苏国韶, 等. 弱动力扰动对花岗岩圆形隧洞

- 岩爆影响的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(9): 88.
- LIU Yanxin, JIANG Jianqing, SU Guoshao, *et al.* Experimental study on influence of weak dynamic disturbance on rockburst of granite in a circular tunnel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(9): 88.
- [12] 宫凤强, 张乐, 李夕兵, 等. 不同预静载硬岩在动力扰动下断裂特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 1841. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2016.1439.
- GONG Fengqiang, ZHANG Le, LI Xibing, *et al.* Experimental study on fracture behaviors of hard rock under dynamic disturbance with different pre-static loads [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(8): 1841. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2016.1439.
- [13] 赵光明, 刘崇岩, 许文松, 等. 扰动诱发高应力卸荷岩体破坏特征实验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 412. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.xr20.1860.
- ZHAO Guangming, LIU Chongyan, XU Wensong, *et al.* Experimental study on the failure characteristics of high stress unloading rock mass induced by disturbance [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(2): 412. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.xr20.1860.
- [14] 刘闽龙, 陈士海, 石伟民, 等. 多次动态扰动下红砂岩时效变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(10): 1917.
- LIU Minlong, CHEN Shihai, SHI Weimin, *et al.* Time-dependent deformation characteristics of red sandstone under multiple dynamic disturbances [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(10): 1917.
- [15] 李志浩, 李杰, 王明洋, 等. 大当量爆炸地冲击毁伤效应的理论与试验研究 I: 深埋洞室地冲击破坏的现场实测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(5): 865.
- LI Zhihao, LI Jie, WANG Mingyang, *et al.* Theoretical and experimental study on ground impact damage effect under large equivalent explosion. Part I: field measurement analysis of ground impact failure phenomenon of deep buried caverns [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(5): 865.
- [16] 戚承志, 钱七虎, 王明洋, 等. 岩体的构造层次及其成因[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2838.
- QI Chengzhi, QIAN Qihu, WANG Mingyang, *et al.* Structural hierarchy of rock massif and mechanism of its formation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2838.
- [17] 李杰, 陈伟, 施存程, 等. 基于块系构造的大规模地下爆炸不可逆位移计算方法[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(6): 1271.
- LI Jie, CHEN Wei, SHI Cuncheng, *et al.* Calculation method of irreversible displacement region radius based on block hierarchical structure under large-scale underground explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6): 1271.
- [18] CHARYAN G G, SPIVAK A A, BUDKOV A M. Movement of rock blocks during large-scale underground explosion. Part II: estimates by analytical models, numerical calculations, and comparative analysis of theoretical and experimental data [J]. *Journal of Mining Science*, 2001, 37(2): 149.
- [19] 李杰, 蒋海明, 王明洋, 等. 爆炸与冲击中的非线性岩石力学问题 II: 冲击扰动诱发岩块滑移的物理模拟试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 291.
- LI Jie, JIANG Haiming, WANG Mingyang, *et al.* Nonlinear mechanical problems in rock explosion and shock. Part II: physical model test on sliding of rock blocks triggered by external disturbance [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(2): 291.
- [20] 李利萍, 唐垒, 潘一山, 等. 应力波扰动下孔洞块体超低摩擦效应试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(5): 1605.
- LI Liping, TANG Lei, PAN Yishan, *et al.* Experimental study of anomalously low friction effect of porous block under stress wave disturbance [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(5): 1605.
- [21] LI Lang, WANG Mingyang, FAN Pengxian, *et al.* Strain rockbursts simulated by low-strength brittle equivalent materials [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 2016: 5341904.
- [22] 范鹏贤, 王明洋, 邢灏喆, 等. 模型试验中材料变形破坏的时间相似问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1843.
- FAN Pengxian, WANG Mingyang, XING Haozhe, *et al.* Time-dependent problems of deformation and failure in geomechanical model tests [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(9): 1843.
- [23] 杨嘉楠, 范鹏贤, 王德荣. 深埋岩体结构面受扰破坏失稳研究进展[J]. 防护工程, 2022, 44(5): 68.
- YANG Jia'nan, FAN Pengxian, WANG Derong. Review on dynamic disturbance induced failure and instability of deep-buried rock mass discontinuity [J]. *Protective Engineering*, 2022, 44(5): 68.
- [24] 赵德安, 陈志敏. 中国地应力场分布规律统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1266.
- ZHAO Dean, CHEN Zhimin. Statistical analysis of distribution law of geostress field in China [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(6): 1266.
- [25] 乔登江. 地下核爆炸现象学概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- QIAO Dengjiang. An introduction to the phenomenology of underground nuclear explosions [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [26] LI Zhihao, LI Jie, FAN Pengxian, *et al.* Experimental investigation on engineering disaster simulation of deep buried cavern under impact load [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022. DOI:10.1007/s00603-022-03058-5.
- [27] FAN Pengxian, YAN Zechen, WANG Mingyang, *et al.* Recyclable resin-based analogue material for brittle rocks and its application in geomechanical model test [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10(1): 29.
- [28] ADUSHKIN V V, SPIVAK A. Underground explosions [M]. Lexington: Weston Geophysical Corp, 2015.