

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.027

多因素影响下大跨度地下硐室抗爆稳定性分析*

罗军洪¹,刘宏伟¹,林振荣¹,付安琪²,蔚立元²

(1. 中国人民解放军空军勤务学院 机场勤务保障系,徐州 221000;

2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,徐州 221116)

摘要: 为研究多因素影响下大跨度地下硐室的抗爆稳定性,以模型试验为基础,利用FLAC^{3D}软件进行模拟,并改变爆炸强度、爆源位置、硐室跨度等参数,获得了不同条件下硐室围岩及衬砌结构应力、位移以及塑性区的变化规律。研究表明:爆炸施加之后,应力波自爆心呈球面向四周传播,传播过程中强度快速衰减,传播到地表和硐室自由面处发生反射,反射拉伸波使附近围岩受拉屈服,产生“层裂”现象,硐室两侧出现“八字形”裂纹;爆炸强度增加后,测点应力值及拱顶变形量增加,硐室上方的受拉区域及塑性区变大,甚至会连成一片,此时硐室可能会塌落;硐室跨度增加后,各测点应力值变化较小,拱顶变形量显著增加,抗爆性能变差;相同的爆炸强度下,顶爆作用的破坏效应最严重,爆源越偏离硐室,测点应力值、硐室变形及塑性区越小。增加硐室埋深、进行地表伪装可减轻爆炸破坏效应,加大衬砌结构强度、对拱顶拱脚进行锚固可增强硐室稳定性。该研究可为地下工程的设计和防护提供一定的借鉴。

关键词: 大跨度地下硐室; 爆炸荷载; 稳定性; 动力响应; 数值模拟

中图分类号: TD235.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2022)03-0181-09

Analysis of Anti-explosion Stability of Large-span Underground Chamber Under Multi-factor Effects

LUO Jun-hong¹, LIU Hong-wei¹, LIN Zhen-rong¹, FU An-qi², YU Li-yuan²

(1. Department of Airfield Logistics Support, Air Force Logistics College, Xuzhou 221000, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to study the anti-explosion stability of a long-span underground chamber under the influence of multiple factors, simulation using FLAC3D, based on model tests, was conducted by changing the parameters of explosion strength, explosion source location and chamber span, so that to obtain the variation laws of stress, displacement and plastic zone of the surrounding rock and lining structure of the chamber under different conditions. The research results show that the stress wave propagates in a spherical form from the explosion center. In the process of propagation, the strength of the stress wave rapidly attenuates, and the reflection occurs when the wave spreads to the earth's surface and the free surface of the chamber. The reflected tensile wave makes the surrounding rock damaged, producing the phenomenon of "spalling", and splayed cracks appear on both sides of the chamber. After the explosion intensity increases, the stress values of the measuring points and the deformation of the vault increase. The tensile area and plastic zone above the chamber also become larger, and even join together, which might make the chamber collapse. With the increase of the chamber span, the stress value of each measuring point changes little, while the deformation of the vault increases significantly, which results in a worse anti-explosion performance. Under the same explosion intensity, the damage effect of top explosion is the most serious. The more the explosion source deviates from the chamber, the smaller the stress values of measuring points, deformation and plastic zone of chamber are. As a practice, increasing the buried depth of the chamber and making some surface camouflage can reduce the explosion

damage effect, while increasing the strength of lining structure and anchoring the arch foot and the vault can enhance the stability of the chamber.

Key words: large-span chamber; explosion load; stability; dynamic response; numerical simulation

随着世界形势的变换和军事技术的不断发展,国防建设工程面临着诸多新的挑战^[1]。当今的现代战争中,钻地武器的制导精度越来越高,毁伤效果越来越强,大量的地下防护工程面临直接打击命中的严重威胁,尤其是大跨度的地下洞室(地下指挥所、地下飞机洞库等)更加不利于抵抗地冲击的破坏^[2]。因此,深入研究地下洞室在爆炸冲击下的动态响应和破坏机理已成为燃眉之急,对于保障国家安全具有十分重要的战略意义。

现场试验、物理模型试验和数值分析是研究该类问题最常用的手段,其中物理模型试验与数值分析成本较低、可重复性强、可信度高,一直备受专家学者的青睐。在模型试验研究方面,顾金才团队研制出岩土工程抗爆结构模型试验装置^[3-5],并对不同类型锚固洞室的抗爆性能进行了研究。徐景茂等通过模型试验,分析总结了不同加固方式的洞室在爆炸荷载下的受力变形特征和围岩破坏形态^[6,7]。陈安敏通过抗爆结构模型试验,分析了爆炸荷载和超载条件下毛洞与衬砌洞室围岩的损伤破坏特征^[8],结果表明衬砌支护能够有效提高洞室的抗爆性能。袁伟泽通过模型试验获得了不同爆炸荷载作用下洞库周边及衬砌的压力、加速度、位移的分布规律^[9]。杨自有由模型试验得到了加速度-时程曲线,研究了爆炸条件下不同锚固参数洞室围岩的加速度响应特征^[10]。徐干成提出了围岩交叉锚固方法,并对加固后的洞室模型进行了爆炸试验^[11]。史新帅通过自主研发的大尺度三维巷道冲击地压灾变演化与失稳模拟试验系统,对巷道在动静组合下的冲击失稳过程进行了研究^[12]。

此外,利用数值分析手段对洞室抗爆能力进行的研究也层出不穷。王光勇基于模型试验结果^[13,14],通过动态数值模拟软件研究了不同方向、不同强度爆炸荷载下锚固洞室中爆炸应力波的传播规律和裂纹形成机理。鞠杨通过 LS-DYNA 有限元软件分析了爆炸发生时岩层中应力波传递和巷道地板的破坏过程^[15]。姚庆等利用 LS-DYNA 有限元软件研究了埋深和跨度对穹顶洞室变形规律与破坏荷载

的影响^[16]。王光勇通过 FLAC^{3D} 数值分析软件模拟了锚固洞室在顶爆作用下的破坏形式和破坏过程^[17]。

综上所述,针对毛洞以及各种锚固洞室在爆炸冲击下的动态响应、破坏机理等方面已做了大量的工作,但这些洞室跨度大多处于 2.5 ~ 6 m 之间,矢跨比处于 0.25 ~ 0.7 之间,针对飞机洞库、地下厂房等大跨度洞室(跨度大于 20 m,矢跨比小于 0.2)的研究还较少。本文基于大跨度洞室抗爆模型试验结果,利用 FLAC^{3D} 数值分析软件对不同爆炸强度、不同爆破方位作用下不同跨度地下洞室的抗爆性能进行了模拟分析,该研究可为未来地下防护工程的建设提供一定的借鉴。

1 研究方案

本文以浅埋大跨度地下洞室抗爆模型试验为基础,对试验工况进行相应的数值模拟,并将两者结果对比以验证模拟的可靠性,然后改变爆炸强度、爆源位置、洞室跨度等相关参数,以进行多因素影响下的大跨度地下洞室抗爆稳定性分析。

1.1 模型试验方案

原型工程为埋深 30 m 的直墙拱顶形洞室,跨度为 24 m,直墙高 3 m,拱高 4 m。该洞室防护层为Ⅲ级围岩,衬砌结构层厚度为 2 m,采用 C40 钢筋混凝土。某钻地武器的爆炸威力相当于 300 kg 当量的 TNT 炸药,在Ⅲ级围岩中的侵彻深度约为 8 m。

模型试验在中国矿业大学的动静组合加载物理模型试验系统上进行,模型的长、宽、高分别为 1.2 m、0.3 m 和 1.2 m。选取低标号水泥砂浆来模拟围岩,配比为砂:水泥:水 = 17:1.1:1.8,选取石膏配铝丝网模拟衬砌结构,配比为石膏:水 = 1:1,围岩及衬砌结构的力学参数如表 1 所示。根据模型尺寸与材料参数确定几何相似比为 0.017,密度相似比为 0.8,应力相似比为 0.014。

试验选择普通导爆索作为爆源施加爆炸荷载,利用瞬发式雷管起爆,采用集中装药的方式,装药密度为 1000 kg/m³,根据爆炸应力波峰值相似确定装药量为 4.0g 当量 TNT。本次试验对爆炸应力场、洞壁位移进行监测,压力传感器布置在模型轴向中截面上,具体布置如图 1 所示,位移传感器 U_1 、 U_2 分别布置在距离洞室洞口 100 mm 与 50 mm 处。

收稿日期:2022-06-06

作者简介:罗军洪(1973-),男,福建上杭人,副教授,主要从事空军机场勤务和军事装备等方面的研究工作,(E-mail) 1874235904@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(52179118)

表 1 模型围岩及衬砌结构材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock and lining structural model

介质	质量密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ $^\circ$	弹性模量/ GPa	泊松比
模型围岩材料参数	1855	0.90	0.034	0.02	44.6	0.23	0.28
模型衬砌材料参数	1920	0.38	0.060	0.03	42.5	0.26	0.26

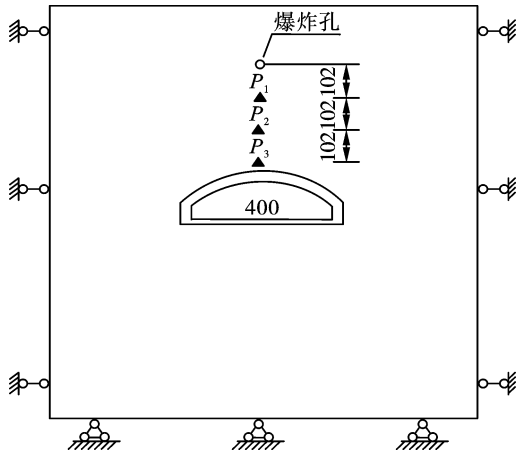


图 1 模型整体示意图

Fig. 1 Overall schematic diagram of the model

1.2 数值模拟方案

数值模拟采用 FLAC^{3D} 有限差分软件开展,计算模型的大小与试验模型的大小相一致,已知材料的静态物理力学参数,根据转换公式可以计算出材料的动态力学参数,列于表 2,转换公式具体如下

$$E_d = \frac{\rho C_s^2 (3C_p^2 - 4C_s^2)}{C_p^2 - C_s^2} \quad (1)$$

$$\mu_d = \frac{C_p^2 - 2C_s^2}{2(C_p^2 - C_s^2)} \quad (2)$$

式中: E_d 为材料的动态弹性模量; μ_d 为材料的动态泊松比; C_s 为材料的横波波速; C_p 为材料的纵波波速。此外,材料的动态抗拉强度取为静态抗拉

强度的 5 倍。

岩体采用摩尔-库伦本构模型,模型的左右、前后边界设置水平方向约束,下边界设置 3 个方向约束,上边界保持自由,忽略材料自重对应力波传播的影响,在约束边界上施加独立阻尼器的黏性边界,根据 FLAC^{3D} 动态计算的特点,把动载荷以等效应力的方式加载于爆点球腔内壁的网格节点上,根据爆炸荷载计算公式以及爆炸参数,获得单孔炸药爆炸的脉冲荷载作用时程曲线,如图 2 所示。

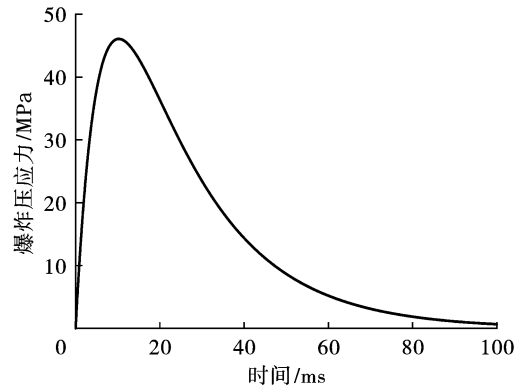


图 2 爆炸脉冲荷载作用时程曲线

Fig. 2 Time-history curve of explosion pulse load

利用模型 M1 对试验过程进行模拟,洞室尺寸、测点布置、爆炸荷载施加均与试验相一致,试验中 4.0 g TNT 对应的爆炸峰值为 46 MPa。在此基础上依次改变爆炸强度、洞室跨度以及爆源位置,具体工况如表 3 所示。

表 2 模型材料动态计算参数

Table 2 Dynamic calculation parameters of the model material

材料	质量密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	纵波波速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	横波波速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa
围岩	1855.15	2200	620	2.08	0.30	0.17
衬砌	1920.02	2700	755	2.16	0.30	0.30

2 数值模拟与试验结果对比分析

图 3 为模型 M₁ 取自相同测点 P₁ 处的试验和数值模拟压应力时程曲线对比图。从图中可以看出:试验和数值模拟压应力时程曲线在形态上是相似的,都是先快速上升到达峰值,然后下降,最后在零点附近振动趋于平衡。总体来看,模拟与试验曲线

特征具有较好的一致性,说明数值仿真结果具有较高的置信度,该数值计算模型可以很好地对试验工况进行模拟。

图 4 是爆炸应力波作用下模型 M₁ 洞室围岩应力和塑性区的变化规律图,图 5 是爆破后模型破坏形态。由图可知:应力波施加之后,炮孔处围岩在极短时间内产生塑性区,并呈球形对称分布;而后压应

力波继续呈球面向四周传递,围岩中的压应力值开始逐步增大,当应力波传播至上边界时发生反射,形成拉伸波,使炮孔上方区域产生受拉屈服,模型试验结果也显示地表周围因受拉产生了明显的“层裂”破坏。同理,压应力波向下传播到硐室自由面后发生反射会导致拱部岩体受拉破坏,而图4显示硐室周围并未产生塑性区,这是因为应力波在岩石介质中传播时强度会快速衰减,其强度不足以使岩体破坏,图5显示硐室周围未出现裂纹,硐室仍处于稳定状态。

表3 模拟工况汇总

Table 3 Numerical simulation conditions

影响因素	模型编号	爆压峰值/ MPa	硐室跨度/ mm	爆源位置
爆炸强度	M_1	46	400	顶爆
	M_2	59	400	顶爆
	M_3	70	400	顶爆
	M_4	80	400	顶爆
	M_5	90	400	顶爆
硐室跨度	M_6	46	100	顶爆
	M_7	46	133	顶爆
	M_8	46	233	顶爆
	M_9	46	317	顶爆
爆源位置	M_{10}	80	400	左偏 50 mm
	M_{11}	80	400	左偏 100 mm
	M_{12}	80	400	左偏 150 mm
	M_{13}	80	400	左偏 200 mm

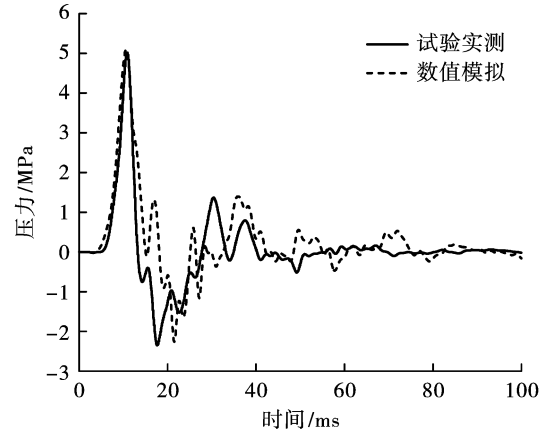


图3 模型 M_1 P_1 测点试验实测与数值模拟曲线对比

Fig. 3 Comparison of measured and numerically simulated stress wave curves of model M_1 in P_1 test

3 不同爆破条件下模型动态响应规律

3.1 不同强度顶爆作用下模型动态响应规律

图6为5种不同爆炸强度下模型最终的状态图,由图对比可知:随着爆压峰值的增大,炮孔周围的受压区域与塑性区体积逐渐扩大,即爆炸强度越大,爆腔越大。除此之外,随着爆压峰值的不断增加,硐室上方的受拉区域不断扩大,但值得注意的是侧墙周围的受拉情况并不严重,这一方面是因为经绕射、反射到达侧墙的应力波强度不足以使岩体受拉;另一方面,该硐室跨度大,侧墙低,应力波对该区域的影响范围较小。而侧墙底部由于硐室的反射和绕射对该区域衰减影响并不明显,因此该处易受拉剪破坏出现裂缝,这与实际情况相吻合。

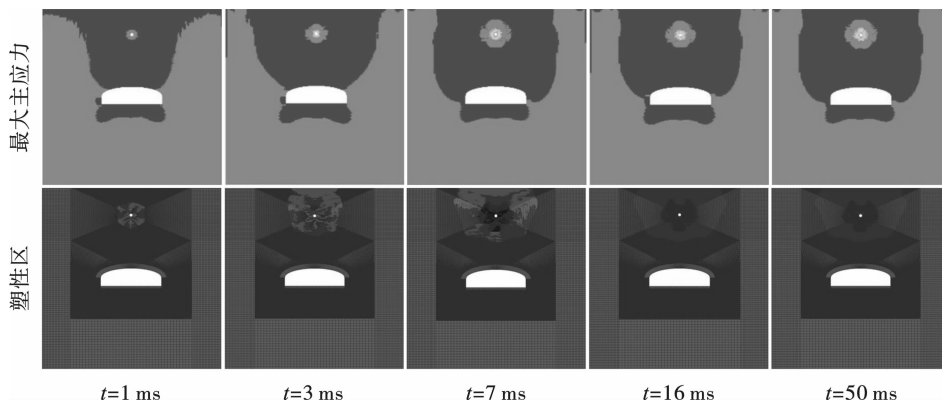


图4 模型 M_1 最大主应力、塑性区和竖向位移分布图

Fig. 4 Distribution of maximum principal stress, plastic zone and vertical displacement of model M_1

硐室上方和拱脚处是较易出现裂纹的区域,地表反射拉伸波与硐室拱顶反射形成的拉伸波会在炮孔下方相遇并发生叠加,使硐室上方围岩产生大量的“八字形”裂缝^[18],当爆炸强度继续增加时,硐室

上方拉剪塑性区会连成一片,衬砌结构塑性区也不断扩展,此时硐室可能会出现塌落。

不同爆破强度下应力测点峰值的变化规律如图7所示,由图可知:爆压峰值由46 MPa增加到

90 MPa, $P_1 \sim P_3$ 应力峰值分别增加了 134%、139%、120%;爆压峰值为 46 MPa 时, P_1 测点应力峰值是 P_3 测点的 4.25 倍,爆压峰值为 90 MPa 时, P_1 测点应力峰值是 P_3 测点的 5.9 倍,这说明应力波在围岩介质中传播时会发生较大程度的衰减。硐室拱顶变形规律如图 8 所示,由图可知:爆压峰值越大,位移越大;爆心距越小,位移越大。爆压峰值为 46 MPa 时, U_1 、 U_2 测点对应的峰值分别为 0.29 mm、0.17 mm,爆压峰值增加到 90 MPa 时,两测点峰值为 0.8 mm、0.5 mm,分别增加了 1.7 倍、1.9 倍。



图 5 试验模型破坏形态

Fig. 5 Failure mode of test model

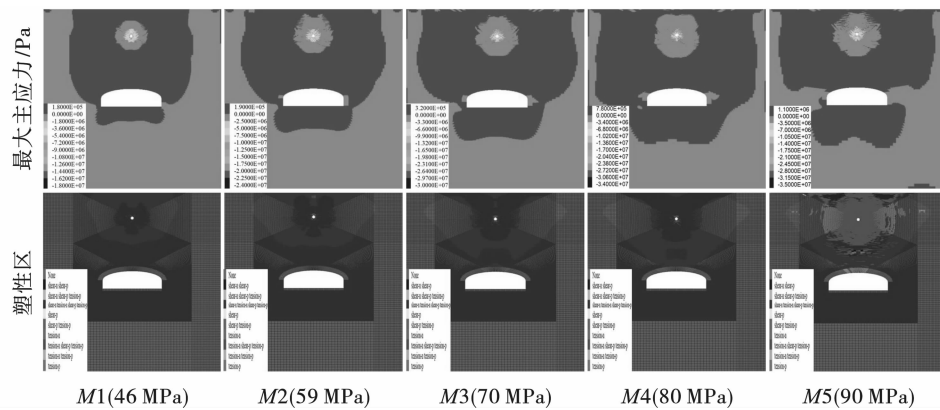


图 6 不同爆压峰值下模型主应力和塑性区最终状态图

Fig. 6 Final state diagram of maximum principal stress and plastic zone under different explosion pressure peaks

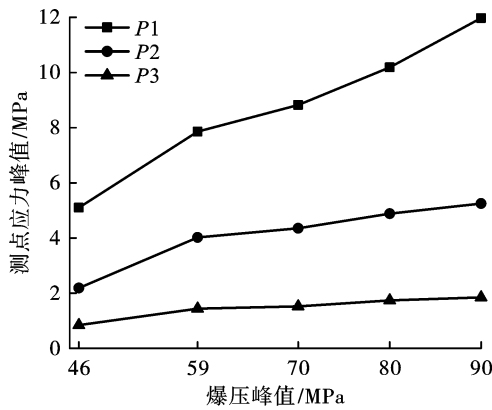


图 7 应力测点峰值随爆压峰值的变化规律

Fig. 7 Variation law of peak values of stress test points with peak values of explosion pressures

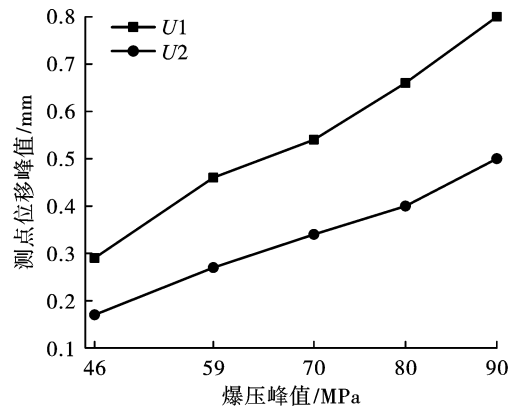


图 8 位移峰值随爆压峰值的变化规律

Fig. 8 Variation law of peak values of displacements with peak values of explosion pressures

由以上分析可知采用强度较大的衬砌结构或加长加密的锚杆对硐室表面及拱脚进行加固可提高抗爆性能^[6],增加稳定性。除此之外,增加硐室埋深也可减弱爆炸作用对硐室的损伤和破坏。

3.2 顶爆作用下不同跨度硐室模型动态响应规律

本次模拟分析了在相同的顶爆作用下 5 种不同跨度硐室的动态响应规律,最终状态如图 9 所示,由图可知:5 个模型炮孔上方围岩受拉区域与塑性区

并无明显差别,说明硐室跨度对炮孔上方应力波的传播并无影响;炮孔下方围岩的受力区域随硐室跨度的变化而变化,当跨度为 100 ~ 233 mm 时,硐室临空面过小,影响不了应力波的传播趋势,整个模型的受拉区域主要是由地表反射的拉伸波导致。当硐室跨度足够大时,临空面会阻挡压应力波的传播使其发生反射,此时整个模型的受拉区域由多种反射拉伸波与绕射拉伸波导致。

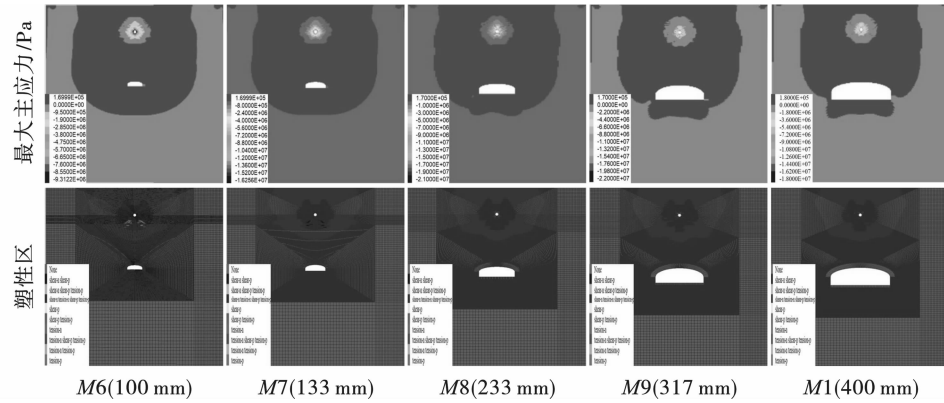


图9 不同跨度硐室模型最大主应力和塑性区最终状态图

Fig. 9 Final state diagram of maximum principal stress and plastic zone of chambers with different spans

顶爆作用下不同跨度硐室模型应力测点峰值的变化规律如图10所示,拱顶变形规律如图11所示。分析可知:各测点应力峰值随硐室跨度的变化较小,但当硐室跨度由100 mm增加到400 mm,两位移测点峰值分别增加了1.63倍和3.25倍。说明硐室跨度越大,拱顶变形越严重,硐室抗爆性能越差。

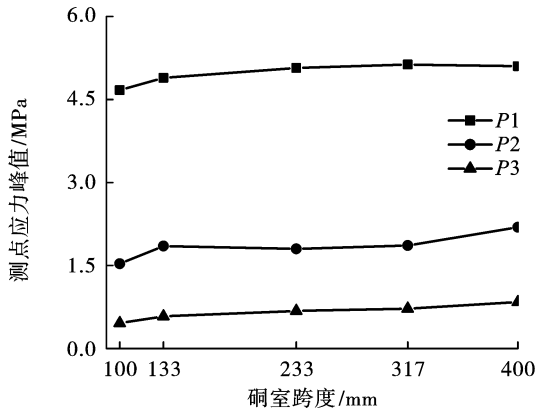


图10 应力关键点峰值随硐室跨度的变化规律

Fig. 10 Variation law of peak values of stress test points with different chamber spans

所示,对比可知,随着炮孔位置向左偏移,逐渐形成自左上角到右下角的受拉带;5个模型衬砌结构均出现了塑性区,但随着炮孔左偏,塑性区域逐渐变小;炮孔左偏后仍会形成“八字形”裂纹,但与顶爆作用不同,该“八字形”两区域内的裂纹程度有明显差异,拱顶上方迎爆区域的裂纹会更严重,且炮孔越往左偏,该现象越明显。

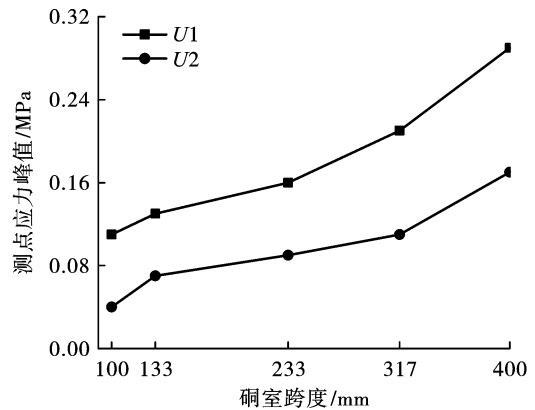


图11 位移峰值随硐室跨度变化规律

Fig. 11 Variation law of peak values of displacements with different chamber spans

3.3 不同爆炸方位作用下模型动态响应规律

5种不同爆炸方位作用下模型最终状态如图12

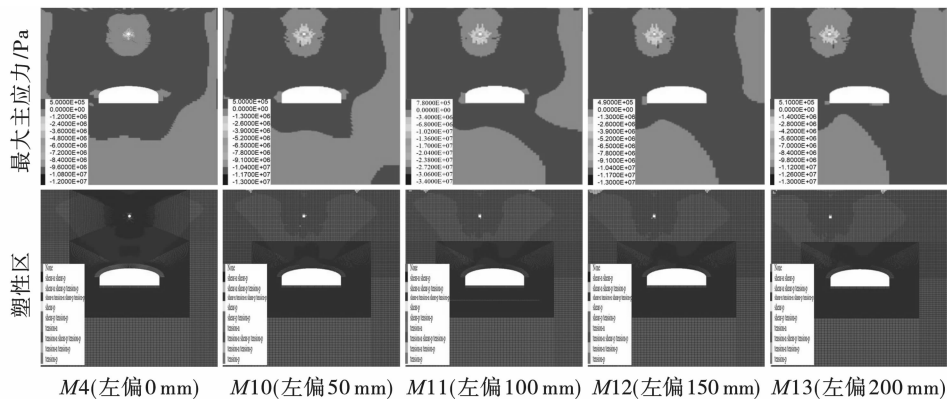


图12 不同爆方位所用下模型最大主应力和塑性区最终状态图

Fig. 12 Final state diagram of maximum principal stress and plastic zone of model used in different blasting directions

图13是测点应力峰值随炮孔偏移距离的变化规律,由图可知:随着炮孔左偏距离的增大,测点爆心距增加,其应力峰值减小,但减小的幅度不大。炮孔偏移对拱顶变形的影响规律如图14所示。由图可知:随着炮孔左偏距离的增大,拱顶变形逐渐变小,从顶爆到炮孔左偏200 mm,测点 U_1 、 U_2 的位移峰值减幅分别为60.6%和75.0%。

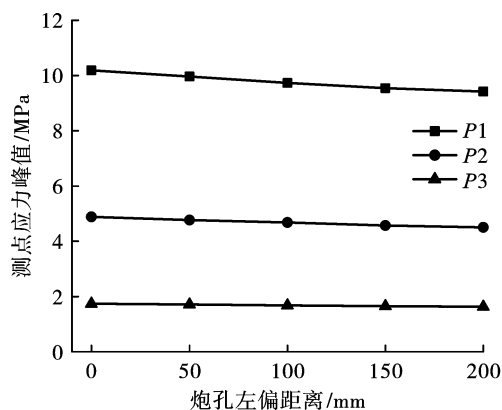


图13 应力关键点峰值随炮孔方位的变化规律

Fig. 13 Variation law of peak values of stress test points with different borehole orientations

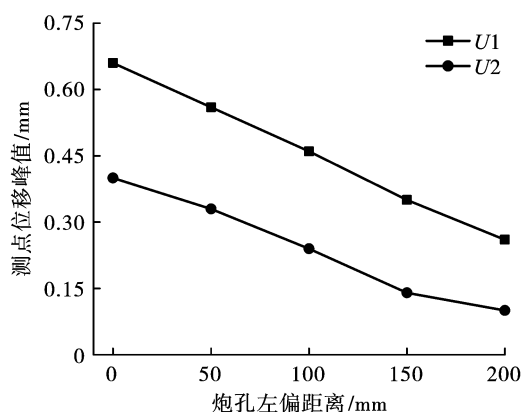


图14 位移关键点峰值随炮孔左偏距离变化规律

Fig. 14 Variation law of peak values of displacements with left deviation distance of blast hole

由上述分析可知,炮弹侵彻深度一定时,在硐室正上方爆炸造成的破坏最严重,爆炸位置越偏离硐室,破坏效应越小。因此,对于已建成的硐室可以采取在地表隐蔽伪装等措施诱导炮弹偏离目标,从而减轻打击强度。

4 结论

1) 应力波传播到地表和硐室自由面处发生反射,反射拉伸波使附近围岩受拉屈服,产生“层裂”现象;爆炸强度由46 MPa增加到90 MPa,应力测点峰值分别增加134%、139%、120%,位移测点分别

增加1.7倍、1.9倍,硐室上方拉剪塑性区、衬砌塑性区显著增加,此时硐室可能会塌落。

2) 硐室跨度改变对各应力测点峰值的影响较小,对拱顶变形量的影响较大,硐室跨度由100 mm增加到400 mm,两位移测点峰值分别增加了1.63倍和3.25倍。

3) 相同的爆炸强度下,顶爆作用对硐室的破坏程度最严重;随着爆源自中心向左偏移,模型会产生由左上角到右下角的受拉带,围岩塑性区也随之向左偏移;爆源左偏导致爆心距增加,应力测点峰值减小,拱顶变形减小,衬砌结构塑性区减小。

4) 可通过增加硐室埋深、采取隐蔽伪装等措施减轻爆炸物的打击强度;利用加长加密的锚杆对拱顶、拱脚进行加固或利用强度较大的衬砌结构进行加固可提高硐室的抗爆性能,增加稳定性。

参考文献 (References)

- [1] 党爱国,李晓军,李世民. 防护工程科研发展战略一体化论证初探[J]. 防护工程,2017(3):54-59.
- [1] DANG Ai-guo, LI Xiao-jun, LI Shi-min. Preliminary study on integrated demonstration of scientific research development strategy of protective engineering[J]. Protective Engineering, 2017(3):54-59. (in Chinese)
- [2] 梁斌,卢永刚,陈忠富,等. 纤维增强攻坚战斗部在混凝土中爆炸威力试验研究[J]. 爆破,2008(2):1-5, 11.
- [2] LIANG Bin, LU Yong-gang, CHEN Zhong-fu, et al. Experimental investigation of concrete blast effect for fibre reinforced warhead[J]. Blasting, 2008(2):1-5, 11. (in Chinese)
- [3] 沈俊,顾金才,陈安敏,等. 岩土工程抗爆结构模型试验装置研制及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2007(6):1077-1080.
- [3] SHEN Jun, GU Jin-cai, CHEN An-min, et al. Development and applications of the model test apparatus on anti-explosion structures in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007(6):1077-1080. (in Chinese)
- [4] 顾金才,陈安敏,徐景茂,等. 在爆炸荷载条件下锚固洞室破坏形态对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(7):1315-1320.
- [4] GU Jin-cai, CHEN An-min, XU Jing-mao, et al. Model test study of failure patterns of anchored tunnel subjected to explosion load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(7):1315-1320. (in Chinese)
- [5] 顾金才,徐干成,张向阳,等. 用交叉锚索加固表层岩体洞室的抗爆能力研究[J]. 防护工程, 2013(4):5-

- 10.
- [5] GU Jin-cai, XU Gan-cheng, ZHANG Xiang-yang, et al. Research on the anti-explosion capacity of tunnels with the surface rock mass reinforced by cross anchor cables [J]. *Protective Engineering*, 2013 (4): 5-10. (in Chinese)
- [6] 徐景茂, 顾金才, 陈安敏, 等. 拱脚局部加长锚杆锚固洞室抗爆模型试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(11): 2182-2186.
- [6] XU Jing-mao, GU Jin-cai, CHEN An-min, et al. Model test study of anti-explosion capacity of anchored tunnel with local lengthening anchors in arch springing [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(11): 2182-2186. (in Chinese)
- [7] 徐景茂, 顾金才, 陈安敏, 等. 爆炸平面波作用下大跨度洞室稳定性模型试验研究 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(S1): 47-53.
- [7] XU Jing-mao, GU Jin-cai, CHEN An-min, et al. Model test study of stability of large span tunnel under explosive plane wave [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(S1): 47-53. (in Chinese)
- [8] 陈安敏, 顾金才, 徐景茂, 等. 平面装药条件下洞室受力特征试验研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(9): 2603-2608.
- [8] CHEN An-min, GU Jin-cai, XU Jing-mao, et al. Model test study of tunnel mechanical characteristics under plane charge explosion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(9): 2603-2608. (in Chinese)
- [9] 袁伟泽, 徐干成, 顾金才, 等. 大跨度地下洞库爆炸荷载下破坏形态试验研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(2): 601-606.
- [9] YUAN Wei-ze, XU Gan-cheng, GU Jin-cai, et al. Test study on damaged effects of large-span underground cavern under explosion [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(2): 601-606. (in Chinese)
- [10] 杨自友, 杨本水, 顾金才. 顶爆下锚固洞室拱顶变形与加速度响应模型试验 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(2): 590-597.
- [10] YANG Zi-you, YANG Ben-shui, GU Jin-cai. Model test on deformation and acceleration response of anchorage tunnels' arch vaults under top explosion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(2): 590-597. (in Chinese)
- [11] 徐干成, 顾金才, 袁伟泽, 等. 洞室围岩交叉锚固结构抗爆性能模型试验研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2014, 10(5): 1078-1085.
- [11] XU Gan-cheng, GU Jin-cai, YUAN Wei-ze, et al. Model test study on explosive resistance of intercross bolted rock mass structure in underground space [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(5): 1078-1085. (in Chinese)
- [12] 史新帅, 靖洪文, 赵振龙, 等. 大尺度三维巷道冲击地压灾变演化与失稳模拟试验系统研制与应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(3): 556-565.
- [12] SHI Xin-shuai, JING Hong-wen, ZHAO Zhen-long, et al. Development and application of large scale 3D roadway rockburst disaster evolution and instability simulation test system [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(3): 556-565. (in Chinese)
- [13] 王光勇, 吕小师, 王超, 等. 侧爆作用下洞室锚杆受力动态响应数值分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(6): 1511-1515.
- [13] WANG Guang-yong, LV Xiao-shi, WANG Chao, et al. Numerical analysis on the dynamic stress response of rock Bolts reinforced cavern under adjacent blasting [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(6): 1511-1515. (in Chinese)
- [14] 王光勇, 王超, 余永强, 等. 不同方向爆炸荷载作用下地下洞室抗爆效果研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(6): 1645-1653.
- [14] WANG Guang-yong, WANG Chao, YU Yong-qiang, et al. Research on anchored effect of tunnels under explosion load in different directions [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(6): 1645-1653. (in Chinese)
- [15] 鞠杨, 夏昌敬, 谢和平, 等. 爆炸荷载作用下煤岩巷道底板破坏的数值分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004(21): 3664-3668.
- [15] JU Yang, XIA Chang-jing, XIE He-ping, et al. Numerical analysis on rupture of subfloor of coal mine tunnel subjected to blasting loads [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004(21): 3664-3668. (in Chinese)
- [16] 姚庆, 张亚栋, 安笑静. 爆炸荷载作用下穹顶洞室动力响应的数值模拟研究 [J]. *防护工程*, 2017, 4(6): 53-59.
- [16] YAO Qing, ZHANG Ya-dong, AN Xiao-jing. Numerical investigation into the dynamic responses of dome cavity under explosive loadings [J]. *Protective Engineering*, 2017, 4(6): 53-59. (in Chinese)
- [17] 王光勇, 顾金才, 陈安敏, 等. 顶爆作用下锚杆破坏形式及破坏机制模型试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(1): 27-31.
- [17] WANG Guang-yong, GU Jin-cai, CHEN An-min, et al. Model test research on failure forms and failure mechanism of anchor bolts under top explosion [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012,

- 31(1):27-31. (in Chinese)
- [18] 王光勇,王超,余永强. 锚固洞室中不同方向爆炸应力波传播规律及裂纹形成机理研究[J]. 应用力学学报,2016,33(6):1027-1032.
- [18] WANG Guang-yong, WANG Chao, YU Yong-qiang. Study

on propagation law of explosion stress wave in different directions and crack formation mechanism in anchored cavern [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016, 33(6): 1027-1032. (in Chinese)

英文编辑:柯波

(上接第99页)

- [3] 李书萱,王雁冰,王宝珠,等. 水耦合装药不耦合系数对爆破效果的影响研究[J]. 爆破,2021,38(3):6-9,18.
- [3] LI Shu-xuan, WANG Yan-bing, WANG Bao-zhu, et al. Influence of decoupling coefficient of water-coupled charge on blasting effect [J]. Blasting, 2021, 38(3): 6-9, 18. (in Chinese)
- [4] 胡砚军. 铜山口铜矿露采爆破参数优化及爆破减振的试验研究[D]. 长沙:中南大学,2002.
- [4] HU Yan-jun. Experimental study on blasting parameter optimization and blasting vibration reduction in open-pit mining of Tongshankou copper mine [D]. Changsha: Central South University, 2002. (in Chinese)
- [5] 杨超. 露天矿台阶深孔爆破大块成因及解决措施[J]. 工程爆破,2019,25(6):32-37,55.
- [5] YANG Chao. Solved measures and causes of boulder in bench deep-hole blasting of open pit mines [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(6): 32-37, 55. (in Chinese)
- [6] 尹岳降,朱子晗,陈明,等. 长九神山灰岩矿开采爆破试验研究[J]. 爆破,2020,37(4):43-47,88.
- [6] YIN Yue-jiang, ZHU Zi-han, CHEN Ming, et al. Experimental study on mining blasting of Chang-jiu limestone mine [J]. Blasting, 2020, 37(4): 43-47, 88. (in Chinese)
- [7] 李顺波,李泽华,李宏伟,等. 顶部空气间隔装药对岩石爆破块度影响的试验研究[J]. 爆破器材,2020,49(6):61-64.
- [7] LI Shun-bo, LI Ze-hua, LI Hongwei, et al. Experimental study on the influence of top air-deck charge on rock fragmentation in blasting [J]. Explosive Materials, 2020, 49(6): 61-64. (in Chinese)
- [8] 梁冰. 利用延时爆破降低矿石贫化的应用研究[J]. 爆破,2021,38(3):58-61.
- [8] LIANG Bing. Application study on reducing ore dilution by delayed blasting [J]. Blasting, 2021, 38(3): 58-61. (in Chinese)
- [9] 张袁娟,赵强,吕鑫,等. 基于LS-DYNA的露天矿合理孔距确定方法[J]. 煤炭技术,2016,35(3):9-10.
- [9] ZHANG Yuan-juan, ZHAO Qiang, LYU Xin, et al. Determination method of reasonable hole distance of open-pit mine based on LS-DYNA [J]. Coal Technology, 2016, 35(3): 9-10. (in Chinese)
- [10] 张艳军,陈岩武,雷美荣,等. 钻孔爆破炮孔堵塞长度分析[J]. 爆破,2021,38(3):45-49,129.
- [10] ZHANG Yan-jun, CHEN Yan-wu, LEI Mei-rong, et al. Analysis of stemming length of borehole in blasting [J]. Blasting, 2021, 38(3): 45-49, 129. (in Chinese)
- [11] 岳中文,胡晓冰,陈志远,等. 不耦合装药对炸药能量利用率影响的实验研究[J]. 爆破,2020,37(3):34-39.
- [11] YUE Zhong-wen, HU Xiao-bing, CHEN Zhi-yuan, et al. Experimental study of effect of uncoupled charge on energy utilization efficiency of explosives [J]. Blasting, 2020, 37(3): 34-39. (in Chinese)
- [12] 罗志华,史秀志,陈飞,等. 径向不耦合装药对粉矿控制的影响研究[J]. 爆破,2020,37(3):47-55.
- [12] LUO Zhi-hua, ZHI Xiu-zhi, CHEN Fei, et al. Study on influence of radial decoupling charge on fine ore control [J]. Blasting, 2020, 37(3): 47-55. (in Chinese)
- [13] CRNOGORAC L, TOKALIC R, LUTOVAC S, et al. Application of JKSimBlast software in drifting operations [J]. Podzemni Radovi, 2019(35):37-48.
- [14] ONEDERRA I, ROSA D, RIIHIOJA K, et al. Engineering tools for design, analysis and information management applied to underground drilling and blasting [J]. Fragblast, 2002, 6(3-4):273-285.
- [15] CUNNINGHAM C V B. The Kuz-Ram fragmentation model-20 years on [C] // Brighton Conference Proceedings. European Federation of Explosives Engineers, England, 2005:201-210.
- [16] LILLY P A. An empirical method of assessing rock mass Blastability [J]. The Aus, 1986, 24(6):89-92.
- [17] ONEDERRA I, ESEN S. An alternative approach to determine the Holmberg-Persson constants for modelling near field peak particle velocity attenuation [J]. Fragblast, 2004, 8(2):61-84.

英文编辑:柯波