

姜威振,徐景茂,唐海,等.裂隙岩体洞室抗爆稳定性影响参数[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(4):12-23.
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.04.002

JIANG W Z, XU J M, TANG H, et al. Parameters Influencing Anti-explosion Stability of Fractured Rock Caverns[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(4): 12-23. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.04.002

裂隙岩体洞室抗爆稳定性影响参数

姜威振^{1,2,3,4}, 徐景茂^{2*}, 唐海¹, 石晓燕², 谢冰³

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;2.军事科学院国防工程研究院 工程防护研究所,河南 洛阳 471023;
3.洛阳理工学院 土木工程学院,河南 洛阳 471023;4.中国建筑第五工程局有限公司,湖南 长沙 410000)

摘要:为研究裂隙岩体洞室抗爆稳定性的影响因素,采用 Froude 相似理论开展不同隙跨比洞室的抗爆模型试验,分析不同工况下围岩压力、洞壁位移及应变的变化规律,通过数值模拟对试验结果进行验证,进一步探究节理范围、倾角以及爆点位置对洞室抗爆稳定性的影响.研究表明:隙跨比对洞室抗爆稳定性的影响较大,其中,隙跨比大的洞室未出现明显损伤,整体稳定性较好,隙跨比小的洞室的破坏现象较为严重;数值模拟与模型试验的结果较为一致,证明研究方法的合理性和可行性;侧邦及底板处节理范围的变化对洞室抗爆稳定性的影响较小,拱部节理倾角的增加可提高洞室的抗爆稳定性;在结构面倾向边爆炸时,模型洞室的破坏最为严重.所得结果可为地下工程选址以及支护提供一定的参考.

关键词:节理岩体;抗爆模型试验;数值模拟;抗爆因素分析

中图分类号:U455 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2023)04-0012-12

Parameters Influencing Anti-explosion Stability of Fractured Rock Caverns

JIANG Weizhen^{1,2,3,4}, XU Jingmao², TANG Hai¹, SHI Xiaoyan², XIE Bing³

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Institute of Engineering Protection, Academy of National Defense Engineering, Chinese Academy of Military Sciences, Luoyang 471023, China;
3. School of Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China;
4. China Construction Fifth Engineering Division Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: In order to study the factors influencing the anti-explosion stability of the tunnel with fissure rock mass, Froude similarity theory is used to carry out the anti-explosion model test of the tunnel with different gap and span ratios, and the variation rules of surrounding rock pressure, tunnel wall displacement and strain under different working conditions are analyzed. Numerical simulation is used to verify the test results, and to further explore the influence of joint range, angle and location of explosion point on anti-explosion stability of the chamber. Results show that the gap span ratio has a great influence on the anti-explosion stability of the cavern. The chamber with a large gap span ratio has no obvious damage and the overall stability is better, while the failure of the chamber with a small gap span ratio is more serious. The results of numerical simulation and model test are in good agreement, and the research method is reasonable and feasible. The change of the joint range at the side and bottom plate has almost no effect on the anti-explosion stability of the chamber, and the increase of

收稿日期:2021-10-19

基金项目:湖南省教育厅科研项目资助(20A196)

*通信作者, E-mail: 21179521@qq.com

the arch joint angle can improve the anti-explosion stability of the chamber. The damage of the model chamber is the most serious when the inclined side explosion occurs. The results can provide some references for the site selection and support of underground engineering.

Keywords: jointed rock mass; anti-explosion model test; numerical modeling; analysis of anti-knock factors

在现代化战争条件下,为应对常规武器以及钻地武器对人民生命财产的威胁,从当前防护措施来看,建设地下人防、国防洞室依然是最为基础可靠的手段.然而,在实际工程地质环境中,天然岩体往往存在复杂的结构面,爆炸武器产生的冲击波会不可避免地造成地下洞室周围的节理发生压剪、滑移以及松弛等^[1],进而导致防护洞室的失稳破坏.

为分析爆炸应力波在岩体结构面中的传播规律以及对洞室稳定性的影响特征,国内外学者开展了大量研究.WALSH^[2]对岩体内应力波的传播衰减规律进行研究;SEINOV等^[3]采用相似试验的方法,研究节理的组数、几何尺寸以及填充物的特性对应力波在岩体中传播规律的影响;JU等^[4-5]分析应力波在节理岩体与完整岩体中传播规律的差异性,并对应力波在不同特征节理面的传播规律进行研究;KING等^[6-7]通过降低应力波的传播速度及改变应力波相位的方式研究应力波的传播规律;王明洋等^[8]基于实际工程的地质特点,运用应力波在裂隙中的传播理论,分析爆炸波在节理岩体中的传播规律;孙冰等^[9]基于Froude相似理论制备节理岩体模型,通过在模型顶部施加动荷载的方法,研究应力波在层状节理中的透反射以及衰减规律;郭易圆等^[10-13]采用数值模拟软件对爆炸波的传播规律进行分析.在爆炸荷载作用下洞室模型试验研究方面,杨自友等^[14-18]采用模型试验、数值模拟以及理论分析等方法,对不同支护方式洞室在爆炸荷载作用下的动态响应进行分析;徐景茂等^[19-20]研究洞室在爆炸平面波作用下的受力及变形特征等问题;徐干成等^[21]提出对洞库顶部围岩采用交叉锚杆进行加固的方法,并取得了很好的支护效果.

综上所述,现有成果着重研究均质岩体洞室在动载作用下的动态响应和破坏现象,而天然岩体往往不是均质岩体,其岩体研究背景与实际有较大出入,所得结论有一定的局限性.以往关于爆炸波在节理岩体中传播的研究侧重于分析波的衰减规律,在实际工程领域很难直接应用.本文采用模型试验与数值模拟相结合的方法,系统研究裂隙岩体背景下,隙跨比、节理范围、节理倾角及爆点位置等参数对洞室围岩抗爆稳定性的影响,所得结果对地下工程选址及其支护具有一定的参考价值.

1 研究方法

1.1 模型试验

1.1.1 试验原理

模型试验广泛采用的2种相似理论分别为复制相似理论和Froude相似理论.复制相似理论中的试验模型通常由原型材料构成,其比例定律表明加速度比例系数应该是长度比例系数的倒数,这一要求需要由离心机来满足;Froude相似理论中的基本变量由长度、质量密度和加速度组成,加速度被作为基本变量并且指定它的比例系数为单位1,因而不需要采用离心机进行试验,相比复制相似理论更为便利.

张向阳等^[22]采用Froude相似理论开展爆炸试验,并与原型化爆炸试验进行比较,试验结果表明:2种模型的破坏形态规律基本相同,也充分证明了利用Froude相似理论进行小比尺爆炸模型试验的可行性.本文采用Froude相似理论开展洞室抗爆模型试验,材料参数需满足 $K_{\sigma} = K_{\rho} \cdot K_L$ (K_{σ} 为应力比尺; K_{ρ} 为密度比尺; K_L 为几何比尺),其中 $K_L = 0.01$, $K_{\rho} = 1.2$, $K_{\sigma} = 0.012$.

1.1.2 试验内容

常见的围岩分类或岩体质量分级方法在考虑岩体完整性时没有考虑所建洞室跨度对围岩分类和分级的影响,本文采用相对裂隙间距,即裂隙间距与洞室跨度之比(隙跨比)来描述洞室围岩的完整程度.为探究洞室围岩的完整程度与裂隙岩体洞室抗爆稳定性之间的关系,利用岩土工程多功能模型试验装置建立3种不同跨度的洞室模型进行爆炸试验,通过实测数据以及围岩洞室的宏观破坏现象,分析不同隙跨比洞室的抗爆稳定性.

1.1.3 试验概况

1) 模型工况

原型洞室为直墙拱形结构,洞室矢高与跨度之比为 1/4,侧墙高度与跨度之比为 1/5.为分析不同隙跨比对洞室围岩抗爆稳定性的影响,共设计 T_1, T_2, T_3 这 3 组模型工况,具体试验参数如表 1 所示.

表 1 模型试验参数

工况	药量 W/g	炸药埋深 L/m	节理间距 D/mm	洞室跨度 H/mm	隙跨比
T_1				250	1/10
T_2	15	0.3	25	500	1/20
T_3				750	1/30

天然岩体的节理发育错综复杂,为简化分析隙跨比与洞室抗爆稳定性之间的变化规律,试验模型未考虑节理走向的影响,设定节理走向均与洞室轴向平行,节理倾角为 25° ,其洞室与节理的平面位置关系如图 1 所示.

2) 材料配比

为满足模型试验相似条件,进行了多组材料配比试验,所得模型材料的力学参数基本满足相似要求.其中模型岩块材料选用 0.50~0.85 mm 和 2.85~3.57 mm 的硫化铁砂,水泥和水混合制成,其物理力学参数见表 2.结构面选用干砂与水进行夯筑填充,其物理力学参数见表 3.

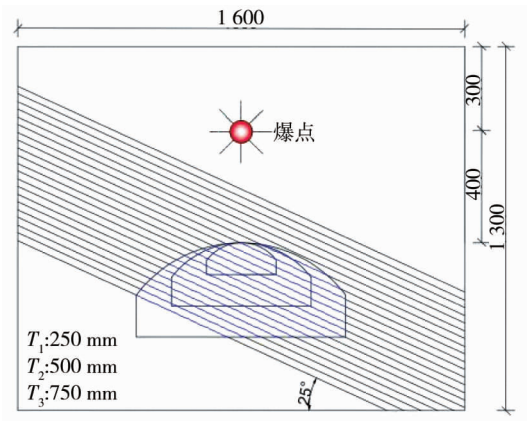


图 1 模型洞室工况位置(单位:mm)

表 2 原型岩体和模型介质物理力学参数

类型	密度 $\gamma/(kg/m^3)$	变形模量 E_m/GPa	黏聚力 C/MPa	内摩擦角 $\Phi/(^\circ)$	泊松比 μ	抗拉强度 R_t/MPa	抗压强度 R_c/MPa
原型岩体	2 600	16~33	1.5~2.1	50~60	0.25~0.35	1.4~3.2	40~80
模型	3 150	0.22	0.024	57	0.32	0.018	0.92

表 3 结构面和模型介质物理参数

类型	倾角 $\varphi'/(^\circ)$	间距 D/m	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\Phi/(^\circ)$	抗拉强度 R_t/kPa
原型结构面	16~33	2~3	50~120	20~25	60~150
模型	25	0.025	4.3	30	2.4

3) 数据监测及测点位置

试验主要对洞室围岩压力、洞壁环向应变以及拱顶-底板相对位移进行监测,并对其数据进行分析.(1)围岩压力测量:每块模型截面处布置 $P_1 \sim P_4$ 这 4 个压力测点,压力测点的位置如图 2 所示,用于测量爆炸产生的垂直压力.(2)洞壁位移测量:每块模型洞室中的截面拱部布置 $u_1 \sim u_3$ 这 3 个位移测点,位移测点的位置如图 3 所示,用于测量洞室拱顶与底板的相对位移.(3)洞壁应变测量:每块模型洞室中的截面拱部布置 $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_7$ 这 7 个应变监测点,应变监测点的位置如图 4 所示,用于测量洞壁环向应变.

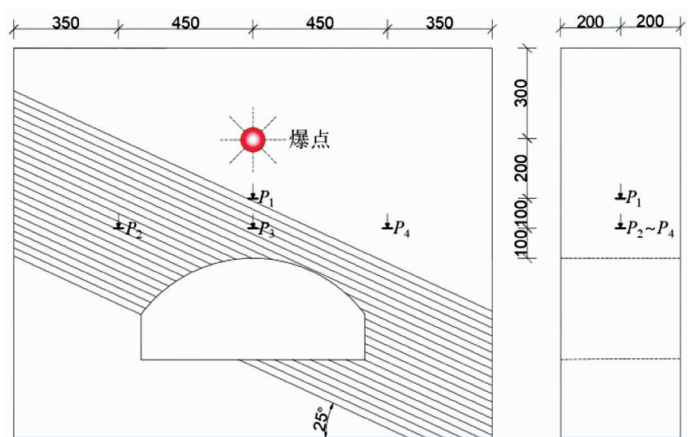


图 2 压力测点布置(单位:mm)

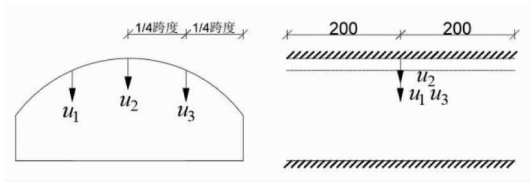


图 3 位移测点布置(单位:mm)

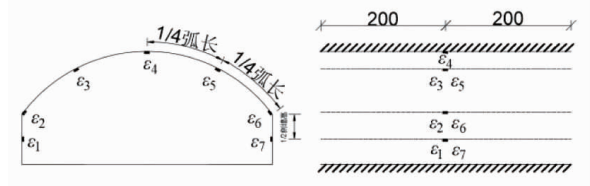


图 4 应变测点布置(单位:mm)

1.2 数值模拟

1.2.1 数值模拟软件选用

为研究裂隙岩体硐室的动态响应,考虑结构面模型建立的同时,硐室围岩在爆炸作用下具有大位移及非连续性、非均匀性变形等特点,选用 3DEC 离散元软件作为主要的计算分析工具.3DEC 是一款具有裂隙划分功能的三维离散元程序,能够自动识别块体之间可能不断变化的接触状态,更符合爆炸荷载作用下结构面的实际情况,已帮助很多学者在节理岩体动态响应问题上取得丰富成果^[23-25].

1.2.2 爆炸荷载获取方法

3DEC 可以模拟爆炸波在节理岩体中的传播,但由于自身不具有炸药单元,无法直接产生爆炸效果,需要输入代码进行计算.模型试验及数值模拟均可获取荷载数据,但考虑爆炸试验的瞬时性及破坏性,一般传感器难以捕捉爆腔周围的实测荷载,为了获取试验模型爆腔附近处的应力曲线,采用 LS-DYNA 动力学软件模拟炸药爆炸过程.

1.2.3 模拟研究内容

将 LS-DYNA 获取的荷载曲线通过 FISH 代码导入 3DEC 模型中,分析爆炸作用下不同跨比硐室的位移情况,并将模拟结果与试验结果进行对比,证明模拟方法有效性.利用同样的方法进行工况拓展,通过改变节理分布范围、拱顶节理倾斜状态以及爆炸作用位置等进一步对硐室的抗爆稳定性进行研究.

2 模型试验结果分析

2.1 硐室围岩应力分析

表 4 为模型试验硐室围岩应力峰值实测值,图 5 为 T_2 模型工况的应力实测曲线.由表 4 和图 5 可知:由于爆距不同, P_1 测点的峰值明显大于其他测点; P_2 与 P_4 测点关于模型对称,按照原理其峰值应该相同,但由于节理层对应力波的衰减作用, P_2 测点的应力峰值略小于 P_4 测点.

表 4 模型试验硐室围岩应力波峰值

工况	应力波峰值/MPa			
	P_1	P_2	P_3	P_4
T_1	1.027 7	0.023 4	0.168 6	0.034 3
T_2	1.112 1	0.030 1	0.204 3	0.044 9
T_3	1.469 8	0.054 0	0.213 5	0.077 5

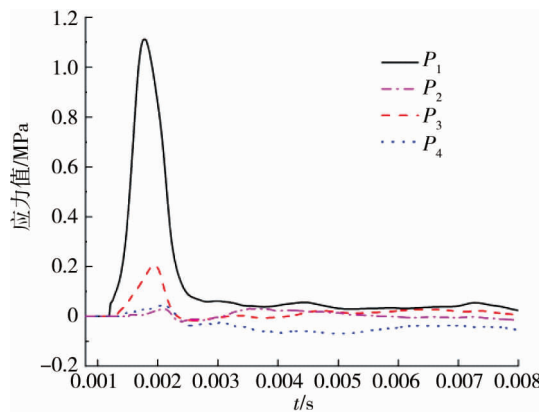


图 5 T_2 模型工况应力实测值

2.2 洞壁相对位移分析

表5为拱顶相对位移实测值.由表5可知:随着洞室跨径比的减小,拱顶相对位移随之增大,且洞室回弹量也有所增加.当跨径比减小时,拱顶位移峰值与洞室跨度之比增加,表明模型破坏的严重程度逐步增加.

表5 模型工况拱顶测点相对位移实测值

工况	跨径比	位移峰值 U_m /mm	残余峰值 U_z /mm	回弹量 (U_m-U_z) /mm	$(U_m/H)/10^{-3}$
T_1	1/10	0.505 7	0.339 7	0.166 0	2.022 8
T_2	1/20	1.128 6	0.665 1	0.463 5	2.257 2
T_3	1/30	2.171 2	1.244 8	0.926 4	2.894 8

图6为模型洞室相对位移变化规律.由图6可知:由于节理的影响,同一工况下右拱腰测点的峰值位移明显大于左拱腰测点.其中, T_3 模型工况下 u_3 测点的残余位移大于拱顶残余位移,主要因为在爆炸波作用下,右拱腰处发生环形拉伸破坏,产生塑性变形.

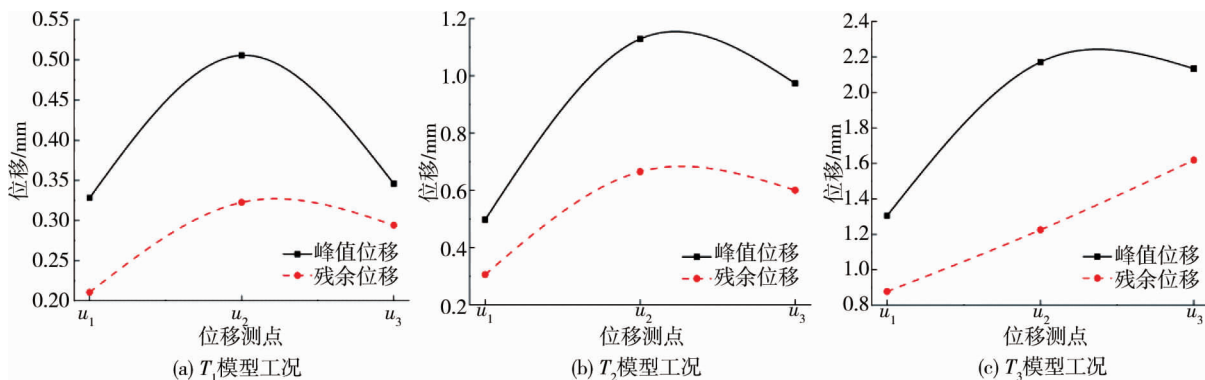


图6 模型洞室相对位移变化规律

2.3 洞壁环向应变分析

布置的7个应变监测点用于监测洞壁环向应变,其中拉应变为正,压应变为负.本文各工况下洞室的结构形状相同,可将其应变变化曲线放在一起进行分析比较.图7为各应变测点的分布曲线.由图7可知: T_1 模型工况拱脚及侧墙处的应变较大,而 T_3 模型工况拱顶及拱腰处的应变更明显.主要因为小跨度洞室易于将拱部受力传递到拱脚及侧墙处,从而导致其受力变形,随着跨度的增加,洞室拱部的应力传递能力减弱,拱顶及拱腰易出现应力集中,使其应变增大.

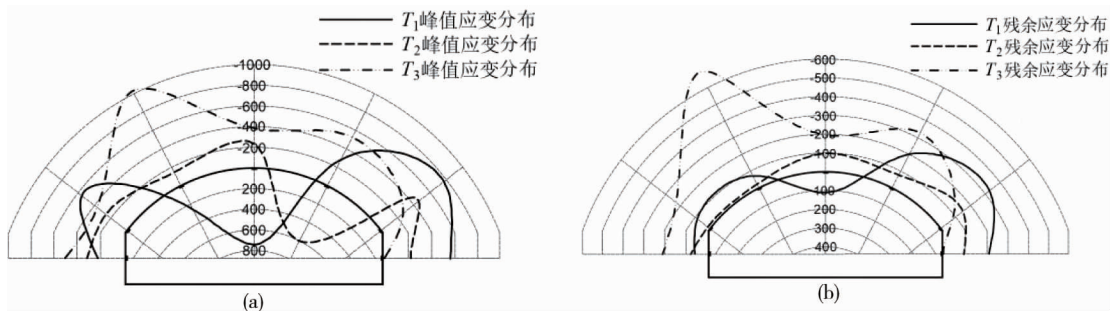


图7 工况洞室应变分布(单位: $\mu\epsilon$)

2.4 洞室模型破坏分析

2.4.1 洞室围岩破坏分析

模型洞室的剖面破坏形态如图8所示.由图8可知: T_1 , T_2 模型工况的节理层未产生明显破坏,而 T_3 模型工况的拱部上方出现“八”字形裂纹.主要原因:(1)爆炸波在岩体中传播时,遇到节理等非均质地质构造时会发生反射与透射现象,其中反射拉伸应力波与入射波、透射波的压缩应力波叠加作用于围岩,使节理层产生压剪裂纹;(2)相同爆炸荷载作用下, T_3 模型工况洞室的整体位移较大,拱部上方围岩与周围

岩体产生位移差,造成局部拉裂破坏.

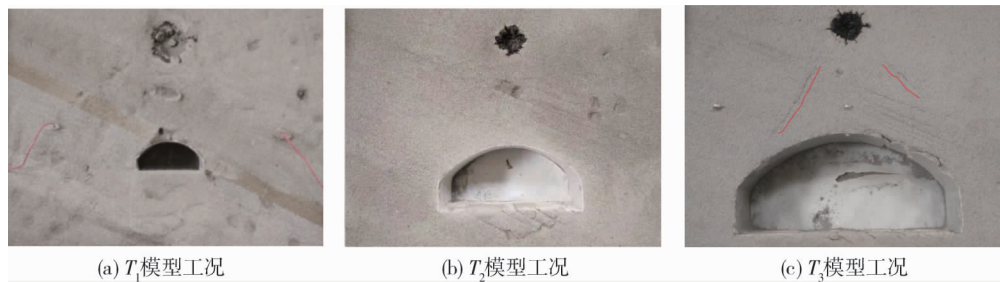


图8 模型硐室剖面破坏形态

2.4.2 硐室破坏分析

图9为 T_1 、 T_2 模型工况的整体损伤形态.由图9可知:在相同爆炸荷载作用下, T_1 模型工况无明显破坏, T_2 模型工况的右拱腰处产生轻微破坏,硐室的整体稳定性良好.

图10为 T_3 模型工况的硐室破坏形态.由图10可知:图10a中左拱腰涂层出现脱落现象,主要因为爆炸应力波在拱部自由面反射形成拉伸波,产生的拉应力大于拱部涂层的抗拉强度,形成局部层裂破坏;图10b中拱顶及右拱腰出现轴向裂纹,主要因为爆炸荷载造成硐室拱部向下的弯曲变形,形成局部环向拉应力集中区域,导致下表面处的拉应力大于岩体材料的抗拉强度,产生环向拉伸破坏.

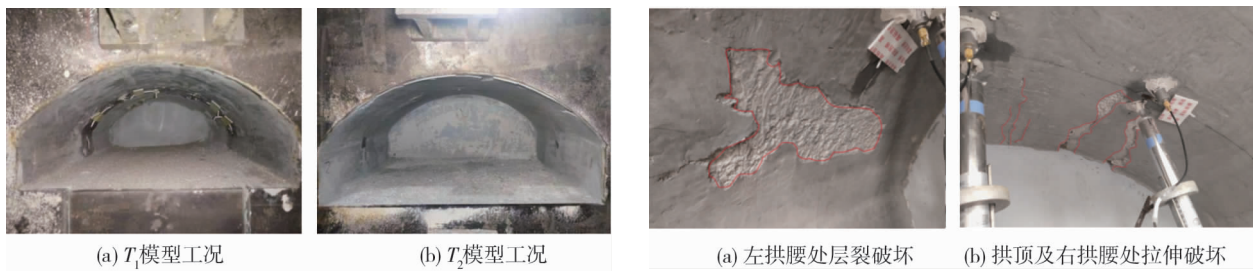


图9 模型硐室整体损伤形态

图10 T_3 模型工况硐室破坏形态

3 数值模拟结果分析

3.1 爆炸荷载模拟结果

采用LS-DYNA模拟试验产生的爆炸荷载,岩体模型网格划分如图11所示.模型的建立以及网格的划分分别采用Workbench和HyperMesh软件,为了计算方便,模型岩体尺寸为 $30\text{ cm}\times 30\text{ cm}\times 5\text{ cm}$,为保证炸药质量与试验相同,炸药半径设为 0.77 cm ,中间部分为炸药单元.在距离炸药中心 20 cm 处设置压力测点,将该测点所计算的数值与试验测点进行比较,分析模拟结果的可靠性.

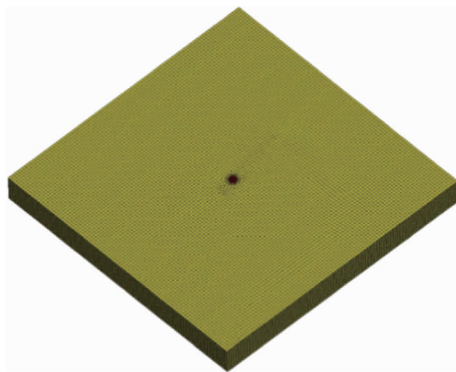


图11 岩体模型网格划分

炸药材料选自 LS-DYNA 中自带的 8 号材料 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN, 并采用 JWL 状态方程模拟爆炸, 炸药状态方程为

$$P_{\text{eos}} = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 B}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V}$$

式中: P_{eos} 为 JWL 状态方程决定的压力, Pa; A, B, R_1, R_2, ω 为与炸药相关的材料常数; V 为相对体积; E_0 为初始比内能, Pa. 计算中采用的各参数及 JWL 方程参数如表 6 所示.

表 6 爆炸参数

炸药密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	传播速度 $/ (\text{m}/\text{s}^3)$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
1 630	6 930	374	3.23	4.15	0.95	0.3	6×10^9

图 12 为模拟测点与试验测点的压力对比曲线. 由图 12 可知: 数值计算的爆炸应力峰值及作用时间与实测值相近, 爆炸荷载的获取方法具有可行性.

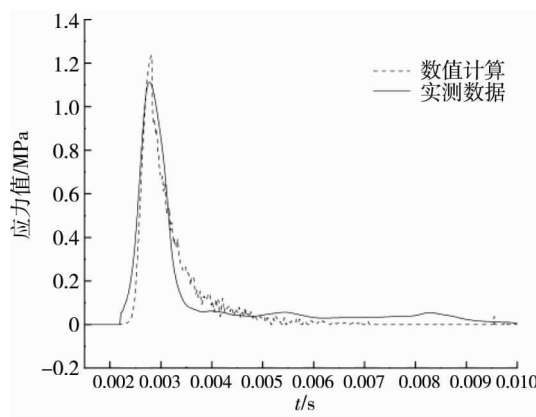


图 12 数值计算与实测数据压力对比

图 13 为模型试验爆腔. 由图 13 可知: 在 15 g 的 TNT 作用下, 岩体爆腔半径约为 5 cm. 因此, 将 LS-DYNA 模型中距爆心 5 cm 处的荷载曲线施加于 3DEC 爆腔内壁, 进行下一阶段数值分析.



图 13 模型试验爆腔

3.2 隙跨比对洞室稳定性的影响

为研究洞室结构抗爆性的影响, 选用最具有代表性的拱顶垂直位移进行分析. 图 14 为爆炸波在节理岩体中的传播过程. 由图 14 可知: 爆炸波首先呈圆形向外扩散, 0.7 ms 左右到达节理层, 受岩体节理面的影响, 爆炸波在传播过程中出现透射现象, 1.7 ms 左右洞室拱部开始变形.

表 7 为不同隙跨比下洞室拱顶位移的数值试验和模拟试验结果, 图 15 为拱顶位移的波形对比. 由表 7 和图 15 可知: 从波形上看, 数值模拟与模型试验的波形相似, 均为先增加到位移峰值, 随后逐步减小, 最后趋于平缓; 从洞室变形规律上看, 隙跨比越小的洞室, 拱顶位移量及回弹量越大; 从作用时间上看, 随着隙跨比的减小, 拱顶位移波形的上升与下降时间均随之增加; 从数值上看, 2 种方法的峰值位移与残余位移总体接近, 说明数值模拟与模型试验的吻合性较好.

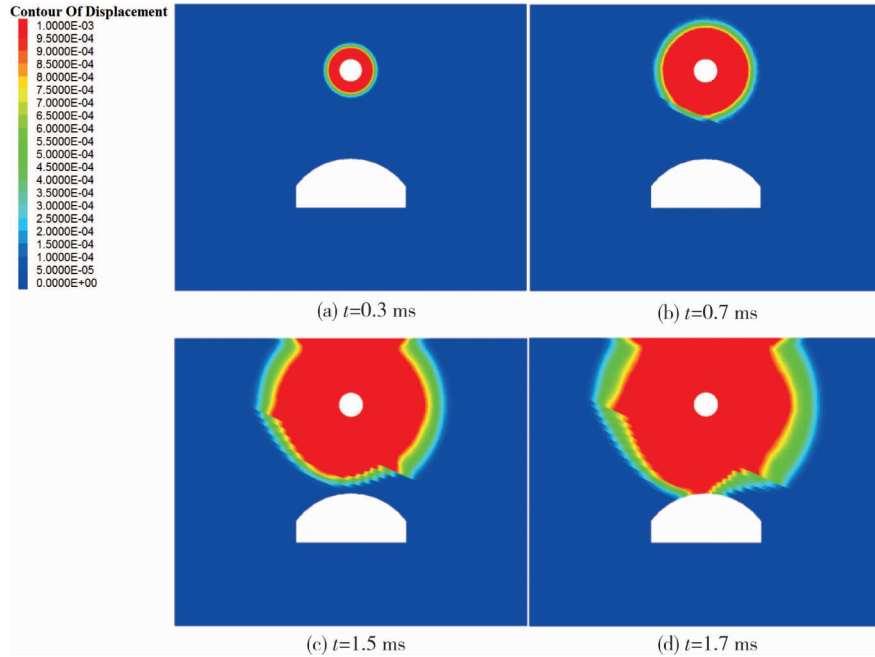


图 14 爆炸应力波传播过程

表 7 不同隙跨比下硐室拱顶位移

工况	隙跨比	数值试验拱顶测点		模拟试验拱顶测点	
		峰值位移/mm	残余位移/mm	峰值位移/mm	残余位移/mm
T_1	1/10	0.505 7	0.339 7	0.527 9	0.357 9
/	1/15	/	/	0.933 1	0.607 3
T_2	1/20	1.128 6	0.665 1	1.298 3	0.716 7
/	1/25	/	/	1.684 2	1.084 2
T_3	1/30	2.171 2	1.244 8	2.350 8	1.348 9

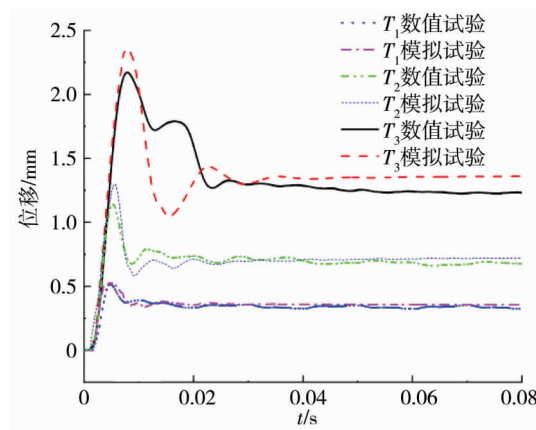


图 15 拱顶位移波形

3.3 节理范围对硐室稳定性的影响

通过对不同隙跨比硐室的研究,得到的数值模拟结果与试验结果一致,在此基础上,分析节理覆盖范围对硐室抗爆稳定性的影响,共设计 5 个工况进行数值模拟.拟定模型硐室隙跨比为 1/30,硐室跨度为 0.75 m,节理倾角为 25°,初始节理设为 21 层,节理数量向底板方向以 2 层梯次增加,最终全部覆盖硐室截面,节理数量与硐室位置的关系如图 16 所示.

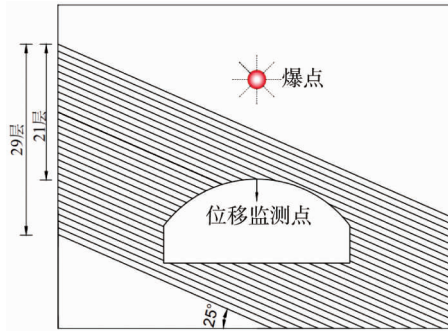


图 16 节理数量与硐室的位置关系

5个工况的硐室位移值见表8.由表8可知:当拱部下方的节理数量增加时,拱顶位移略有增加.图17为数值模拟拱顶位移曲线.由图17可知:各工况拱顶测点的位移变化规律一致,位移的变化幅度较小.由此可见,侧墙及底板处的节理分布对硐室的整体抗爆稳定性的影响较小.

表 8 节理范围硐室拱顶位移

工况	隙跨比	倾角/(°)	节理数量/层	峰值位移/mm	残余位移/mm
1			21	2.350 8	1.348 9
2			23	2.410 1	1.405 8
3	1/30	25	25	2.441 5	1.429 5
4			27	2.459 4	1.466 9
5			29	2.493 7	1.480 8

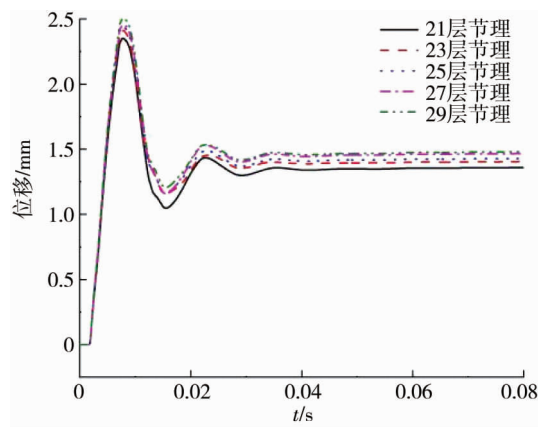


图 17 硐室拱顶位移曲线

通过对节理范围分布的数值模拟可知,当拱部以下的节理数量增加时,拱顶峰值位移及残余位移的变化并不明显,其主要原因:(1)爆炸应力首先作用于硐室拱部,由于模型硐室的跨度较大,应力难以向侧墙及底板传递,导致该部位的受力变形较小,对硐室整体位移的影响较弱;(2)随着节理数量的增加,爆炸波难以对深部节理造成破坏,使得深部节理对硐室稳定性的影响十分有限.

3.4 节理倾角对硐室稳定性的影响

天然岩体中存在错综复杂的节理面,其分布规律会对周围硐室的稳定性产生影响.为研究节理倾角对硐室稳定性的影响,共设计了5个工况进行数值模拟.拟定模型硐室的隙跨比为1/30,硐室跨度为0.75 m,初始节理倾角为5°,以10°梯次增加,为保证节理层完全覆盖硐室拱部,本次节理层设为23层,节理倾角与硐室位置关系如图18所示.

不同节理倾角条件下硐室拱顶位移如表9所示.由表9可知:随着节理倾角的改变,硐室位移发生较大变化.图19为硐室拱顶位移曲线.由图19可知:当节理倾角增加,位移曲线上升和下降的作用时间随之减小,位移变形量也逐渐减小.

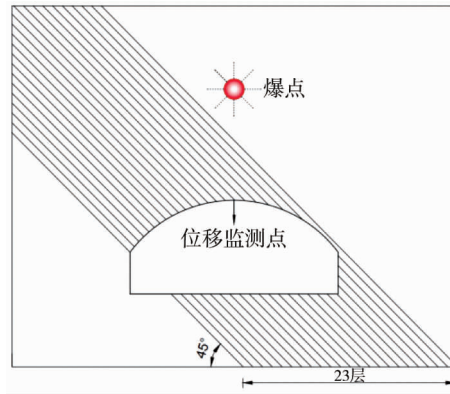


图 18 节理倾角与硐室位置关系

表 9 不同节理倾角下硐室拱顶位移

工况	隙跨比	节理数量/层	倾角/(°)	峰值位移/mm	残余位移/m
1	1/30	23	5	4.863 9	2.807 4
2			15	4.097 8	2.564 7
3			25	2.696 4	1.740 1
4			35	1.541 4	0.903 3
5			45	0.678 1	0.455 1

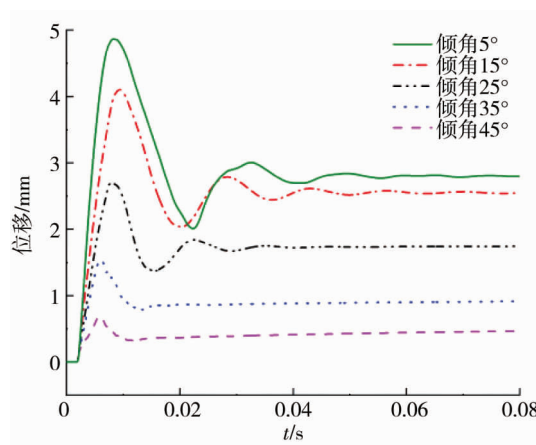


图 19 硐室拱顶位移曲线

通过对拱顶节理倾角的数值模拟可知:当节理倾角趋于平缓时,硐室顶部的位移量最大,随着节理倾角的增加,拱顶位移量逐渐减小.主要原因:(1)当节理倾角较缓时,节理层临空面与拱部交接的面积较大,硐室围岩更为破碎,在爆炸荷载与重力的共同作用下,拱顶更容易产生变形破坏;(2)硐室的变形破坏通常与爆炸反射拉伸波有关,当节理倾角接近水平时,模型节理面与拱顶和爆点连线的夹角更接近 90°,更有利于反射拉应力的形成,使硐室产生破坏变形.

3.5 爆点位置对硐室稳定性的影响

除了要考虑硐室正截面拱顶上方的爆炸以外,侧爆对硐室也有较大影响,现分析在硐室侧面爆炸荷载作用下的硐室稳定性.本次数值模拟共设计 5 个工况,硐室隙跨比为 1/30,硐室跨度为 0.75 m,节理倾角拟定为 25°,岩体节理数量为 21 层,爆点位置分别布置在左侧墙、左拱腰、拱顶、右拱腰以及右侧墙正上方,垂直方向距拱顶均为 0.4 m,爆点与硐室位置关系如图 20 所示.

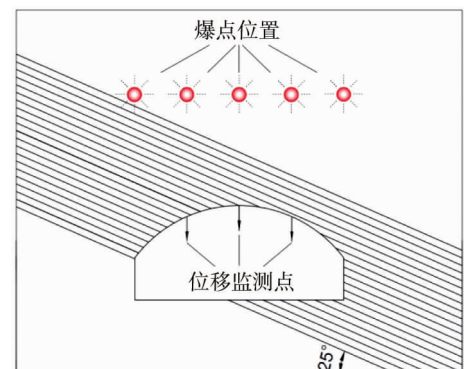


图 20 爆点与硐室位置关系

不同爆点位置洞室的拱顶位移值如表 10 所示.由表 10 可知:由于爆点位置的不同,各测点的位移有很大差异,其中,在结构面倾向边爆炸时,洞室整体的位移最大,洞室破坏更为严重.

表 10 不同爆点位置洞室拱顶位移

工况	爆点位置	隙跨比	倾角/(°)	洞室测点峰值位移/mm		
				左拱腰	拱顶	右拱腰
1	左侧墙正上方			0.472 4	0.496 9	0.372 9
2	左拱腰正上方			0.949 9	1.123 1	0.607 4
3	拱顶正上方	1/30	25	0.887 0	2.350 8	1.541 3
4	右拱腰正上方			0.459 1	1.654 9	2.646 4
5	右侧墙正上方			0.232 0	0.976 6	2.492 9

图 21 为左拱腰及右拱腰正上方起爆时的位移时程曲线.由图 21a 可知:当在洞室左拱腰上方起爆时,由于爆源距离的影响,左拱腰测点上升的时间略早于右侧,测点最大位移仅为 1.12 mm,洞室的整体位移量较低.由图 21b 可知:当在洞室右拱腰上方起爆时,右拱腰的位移达到 2.65 mm,洞室变形最为严重.主要原因:(1)洞室右侧与左侧起爆相比,爆炸波到达洞室拱部时穿过的节理层数更小,造成的能量损失也更小,传递到拱部时的应力更大,造成洞室的变形量增加;(2)在洞室右边起爆时,爆点和右拱腰的连线与节理面的夹角更接近垂直,此处更容易形成反射拉应力,造成洞室的变形破坏,而在洞室左侧起爆时,节理层更容易产生滑移现象,但由于岩体摩擦力与黏聚力的作用,很难出现大面积滑移导致洞室变形.

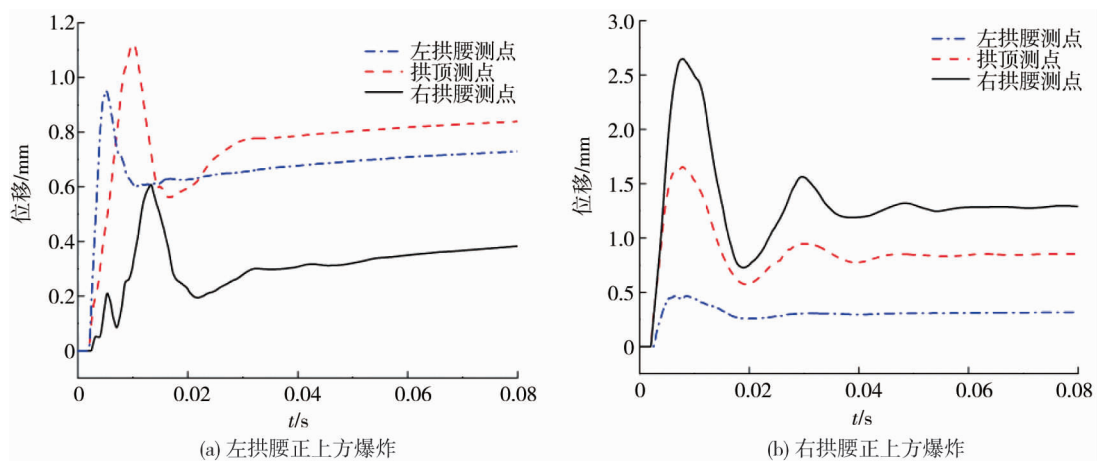


图 21 洞壁监测点位移时程曲线

4 结论

1) 在节理裂隙相同的岩体中,隙跨比较大的洞室围岩相对较完整,但随着隙跨比的减小,洞室围岩显得越来越破碎,相对完整性降低,在岩体自重和爆炸荷载的共同作用下,围岩洞室易产生变形破坏.

2) 采用 LS-DYNA 和 3DEC 等模拟软件能较好地模拟爆炸荷载作用下裂隙岩体洞室的动态响应,计算得到的围岩洞室变形规律与模型试验的实测结果较为一致.

3) 侧邦及底板处节理的分布范围对洞室抗爆稳定性的影响较低,而拱部节理倾角的改变对洞室稳定性的影响较大,爆炸荷载作用下,洞室拱顶的位移随节理倾角的增加而减小.

4) 受节理构造的影响,在节理侧起爆时洞室的位移较小,安全稳定性较高,而在结构面倾向边起爆时位移的变形量较大,洞室面临较高的破坏风险.

参考文献:

- [1] 张建聪,江权,郝宪杰,等.高应力下柱状节理玄武岩应力-结构型塌方机制分析[J].岩土力学,2021,42(9):2556-2568.

- [2] WALSH J B. The effect of cracks on the compressibility of rock [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, 70(2): 381-389.
- [3] SEINOV N P, CHEVKIN A I. Effect of fissure on the fragment of a medium by blasting [J]. *Soviet Mining Science*, 1968, 4(3): 254-259.
- [4] JU Y, SUDAK L, XIE H P. Study on stress wave propagation in fractured rocks with fractal jointsurfaces [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44(13): 4256-4271.
- [5] MYER L R, PYRAK-NOLTE L J, COOK N G W. Effects of single fractures on seismic wave propagation [C]//The International Conference on Rock Joints. Loen, Norway, 1990.
- [6] KING M S, MYER L R, REZOWALLI J J. Experimental studies of elastic-wave propagation in a columnar-jointed rock mass [J]. *Geophysical Prospecting*, 1986, 34(8): 1185-1199.
- [7] PYRAK-NOLTE L J. The seismic response of fractures and the interrelations among fractureproperties [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1996, 33(8): 787-802.
- [8] 王明洋,钱七虎.爆炸应力波通过节理裂隙带的衰减规律[J].*岩土工程学报*,1995,17(2):42-46.
- [9] 孙冰,郭闪闪,曾晟,等.应力波在层状节理岩体中的透反射与衰减规律[J].*防灾减灾工程学报*,2015,35(6):828-832.
- [10] 郭易圆,李世海.有限长岩柱中纵波传播规律的离散元数值分析[J].*岩石力学与工程学报*,2002,21(8):1124-1129.
- [11] 王洋,叶海旺,李延真.裂隙岩体爆破数值模拟研究[J].*爆破*,2012,29(3):20-22.
- [12] 张秀丽,焦玉勇,刘泉声,等.节理对爆炸波传播影响的数值研究[J].*岩土力学*,2008,29(3):717-721.
- [13] 赵坚,陈寿根,蔡军刚,等.用 UDEC 模拟爆炸波在节理岩体中的传播[J].*中国矿业大学学报*,2002,31(2):111-115.
- [14] 杨自友,杨本水,顾金才.爆炸荷载下锚固洞室拱脚的变形破坏规律研究[J].*振动与冲击*,2019,38(14):254-259.
- [15] 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.
- [16] 王光勇,顾金才,陈安敏,等.锚固洞室在顶爆作用下破坏形式及破坏过程研究[J].*岩土工程学报*,2015,37(8): 1381-1389.
- [17] 张向阳,顾金才,沈俊,等.爆炸动载条件下短密锚杆受力特点及洞室破坏特征[C]//中国土木工程学会第十五届年会暨隧道及地下工程分会第十七届年会论文集.昆明,2012:199-205.
- [18] 张向阳,顾金才,沈俊,等.爆炸荷载作用下洞室变形与锚杆受力分析[J].*地下空间与工程学报*,2012,8(4):678-684.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 徐干成,袁伟泽,顾金才,等.地下洞库围岩外加固抗炸弹爆炸性能研究[J].*岩石力学与工程学报*,2015,34(9): 1767-1776.
- [22] 张向阳,顾金才,沈俊,等.锚固洞室模型与原型抗爆试验结果对比[J].*防护工程*,2012,34(1):6-12.
- [23] 代青松,李鸿,余红兵.基于 3DEC 的节理裂隙岩体爆破传播规律的研究[J].*采矿技术*,2016,16(4):100-102.
- [24] 黄少平,晏鄂川,尹晓萌,等.不同临空条件的层状反倾岩质边坡倾倒变形几何特征参数影响规律[J].*地质科技通报*, 2021,40(1):159-165.
- [25] 杨忠民,张玉芳,李健,等.软弱围岩节理性质对隧道塌方范围影响研究[J].*中国安全生产科学技术*,2020,16(12): 143-149.