

DOI: 10.11779/CJGE201508004

锚固洞室在顶爆作用下破坏形式及破坏过程研究

王光勇^{1, 2, 3}, 顾金才³, 陈安敏³, 徐景茂³, 张向阳³

(1. 河南理工大学深部矿井建设重点学科开放实验室, 河南 焦作 454000; 2. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230026;
3. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 利用抗爆模型试验和数值分析方法, 研究锚固洞室在顶爆作用下的破坏形式及破坏过程。根据锚固洞室破坏模型试验, 发现锚固洞室主要有: 受拉破坏、剪切破坏、受压破坏和压剪破坏 4 种破坏形态。通过分析试验解剖图和应力波传播规律发现: 爆炸应力波作用下, 锚固洞室首先在拱顶锚固区发生“层裂”现象, 在自由面附近有类似半椭圆拱岩石介质脱落; 同时两侧容易形成“八”字型剪切裂纹, 随着爆炸荷载强度增加, 如果锚杆加固较弱会在洞顶产生局部坍塌, 一旦锚杆加固较强就会发生从爆心至洞室整体坍塌。最后利用数值分析方法分析了洞室受力情况和塑性区发展过程, 进一步探讨了锚固洞室在顶爆作用下破坏形式和破坏过程。

关键词: 地下工程; 爆炸应力波; 锚固洞室; 破坏形式; 破坏过程; 模型试验; 数值分析

中图分类号: TU 457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)08-1381-09

作者简介: 王光勇(1977-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土工程动载试验方面的教学与研究工作。E-mail: wgy2003@ustc.edu.cn。

Failure modes and process of tunnels reinforced by rockbolts under top explosion

WANG Guang-yong^{1, 2, 3}, GU Jin-cai³, CHEN An-min³, XU Jing-mao³, ZHANG Xiang-yang³

(1. Opening Project of Key Laboratory of Deep Mine Construction, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. The Third Research Institute of the Corps of Engineers, General Staff of PLA, Luoyang 471023, China)

Abstract: Based on model tests and numerical analysis, failure modes and process under top explosion are studied. According to the results of the model tests, the tunnels reinforced by rockbolts under top explosion have four kinds of failure modes, that is tensile failure, shearing failure, compressive failure, compressive and shearing failure. By analyzing the experimental profile and the propagation rules of stress waves, when the stress waves reach the surface of the tunnel, spalling failure will appear, which may make similar half elliptical rock mass peel off. Both sides of the tunnel produce cracks easily. With the increase of blast load, if the anchor reinforcement strength is weak, local collapse will appear, and once the intensity of anchorage zone is large, it will lead to collapse of the tunnel from spandrel to explosion center. Finally, in accordance with the action process of stress waves, the stress distribution and the development process of plastic zone, failure modes and process are further discussed through numerical analysis.

Key words: underground engineering; explosion stress wave; rockbolt-reinforced tunnel; failure mode; failure process; model test; numerical analysis

0 引言

既有洞室的安全稳定性问题始终是人们关注的重点, 科研工作者为此也做了大量研究工作, 提出了卓有成效的加固技术, 如锚杆、锚索、土钉加固等^[1]。试验研究与工程实践均已表明, 上述加固技术在静载条件下都能发挥较好的加固效果^[2-3], 但是洞室还常面临有外界爆炸动载的不利影响, 如矿区相邻巷道的掘进爆破, 铁路复线隧道的施工, 水电站的地下厂房建设等^[4]。因此, 研究既有洞室的抗爆炸动载性能是一

个热点问题。

国内外学者对此也做了一定的理论与试验研究, 并取得了一些有价值的成果。杨苏杭等^[5]采用抗爆模型试验研究了预应力锚索对洞室的抗爆加固效应。顾金才等^[6]利用物理模型试验对洞室在平面装药和集中装药

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(142102210433); 河南省教育厅科学技术研究重点项目科技攻关计划(14A440003); 深部矿井建设省级重点实验室开放基金项目(2014KF-05)

收稿日期: 2014-09-12

爆炸荷载作用下不同加固方案的对比抗爆效果进行研究, 给出了在爆炸荷载条件下几类锚固洞室模型的破坏形态。为比较锚杆间距对洞室围岩加固效果及抗爆性能的影响程度大小, 杨自友^[7]通过实验室地质力学模型试验, 研究了在集中装药爆炸应力波作用下, 锚杆长度和间距对洞室围岩加固效果的影响。张亮亮等^[8]通过模型试验和数值分析, 研究了在集中装药产生的爆炸波作用下两种类型预应力锚索的索端张力变化特征和锚索锚固段轴应变变化波形, 探讨了两种锚索类型的预应力变化特征和规律。为研究爆炸动载对加固洞室锚杆的影响, 余永强等^[9]通过模型试验分析了地下洞室加固时的全长黏结式锚杆和自由式锚杆的受力特性。马海春^[10]从喷锚支护洞室抗爆现场试验角度, 介绍长密锚杆、短密锚杆、常规锚杆 3 种不同条件下洞顶部位在上部爆炸条件下洞顶位移的特征, 并分析了碗形垫板支护效果好于板形垫板支护效果。根据 Froude 相似理论, 徐景茂等^[11-12]对普通锚杆、中密锚杆、长密锚杆、短密锚杆、长短相间密锚杆加固洞室的抗爆性能进行了研究, 并分析各洞室受力变形特性和围岩破坏形态。单仁亮等^[13], 周纪军^[14]通过相似模型试验研究了集中装药爆炸荷载作用下临近工作面端锚锚杆的应力状态和锚固结构不同部位在掏槽爆破作用下的振动规律与损伤。利用数值模拟的方法, Zhang 等^[15]研究了锚杆在地震波作用下的力学响应。在国外, Tannant 等^[16]通过现场爆破试验研究了端头锚固锚杆在爆炸载荷作用下的动力特性, 测量了锚杆的动态应变和岩体表面质点速度, 指出爆炸载荷对锚杆预应力的影响主要有爆炸脉冲振幅、持续作用时间和载荷循环 3 个因素。通过对爆炸载荷作用下锚杆的拉拔试验, Gisle 等^[17]得出近距离 (3.4 m) 的爆破所产生的震动对灌浆锚杆的力学性能无大的影响。Ortlepp 等^[18]研究了受静态和动载荷的条件下, 大变形坑道的加固形式, 指出屈服锚杆可以吸收大量能量而不发生破坏。Ana Ivanovic 等^[19-20]采用试验和有限差分法的集中参数数值模型计算分析了冲击荷载作用下预应力对树脂锚杆动力响应影响, 及树脂锚杆锚固力与加载频率的变化规律, 并且根据试验和数值模拟的结果, 提出一种非破坏性的测试方法。Rajmeny 等^[21]通过爆破试验研究了临近采场高应力区洞室围岩破坏的预测方法, 并得到爆破使得洞室围岩产生了剥离和崩塌现象。在露天开采爆破时, Singh^[22]对地下煤矿洞室破坏问题进行了研究, 指出决定洞室围岩产生裂缝和剥离程度的主要因素是爆破造成围岩振动幅度值。Hagedorn^[23]采用 UDEC 程序评估了喷锚支护洞室在两次相继冲击作用后稳定性。但是在爆炸动载条件下, 洞室的围岩

破坏效应非常复杂, 受爆源、介质和洞室自身三大条件的影响, 影响因素也比较复杂。虽然试验能够得到可信的结果, 但是由于费用昂贵, 得到的测试数据有限, 并不能全面反映洞室的破坏过程, 故本文主要通过相似模型试验和数值分析方法研究了爆炸应力对锚固洞室的破坏形式和破坏过程, 从而为进一步提高锚固洞室的抗爆能力提供指导。

1 相似模型试验

1.1 试验装置及模型

试验装置采用自行研制的抗爆模型试验装置, 如图 1 所示。该设备是由 4 个可以前、后移动的刚性侧限装置组成, 并在每个侧限装置的迎爆面上利用含孔率达 50% 的铝制消波板消除爆炸波在侧面的反射, 从而可以模拟现场试验时的无穷边界。



(a) 就位前模型侧限装置



(b) 就位状态下的模型装置

图 1 岩土工程抗爆结构模型试验装置

Fig. 1 Model test apparatus for anti-explosion structures in rock and soil engineering

试验所建模型见图 2, 长宽高分别为 2.4, 1.5, 2.3 m, 沿着模型的长度方向开挖跨度 60 cm、高 42 cm、圆拱半径为 35 cm 的直墙圆拱形孔洞。

1.2 相似要求

根据量纲理论, 描述物理现象的物理量通常可选择长度、时间、质量或力来作为基本物理量, 把其它的物理量都示为导出量。在岩土工程动力模型试验考虑相似规律的方法通常有弗洛得比例因数和复制比例因数。

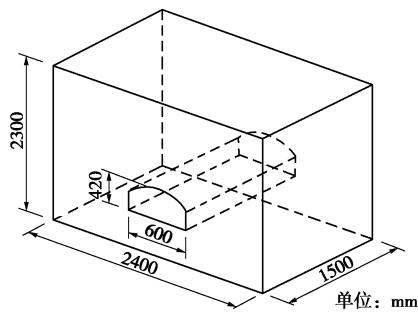


图 2 试验模型结构尺寸

Fig. 2 Model sizes

按 Froude(弗洛得)比尺因数进行试验比较合适, 因为该比尺因数 $a=1$, 即加速度比尺等于 1。如果按复制比尺因数进行试验, 则要求加速度比尺 $a=1/l$, 因而, 试验中需要增大加速度才能满足重力相似要求, 因此, 这就需要在离心机上进行试验, 并要采用原型材料制作模型, 目前的设备条件不具备。按 Froude 比尺因数进行试验需要满足的重要比尺因数是 $\sigma=\rho \cdot l$, 即应力比尺等于密度比尺与几何比尺的乘积。因为 σ 和 ρ 都是材料本身的性质, 所以试验中的几何比尺 l 便不能任意选取, 它要由模型材料性质决定。

1.3 材料选取

本次模型试验主要是按浅部地下工程经常碰到的 III类均质围岩考虑, III类岩体条件的围岩和相似材料的相关力学参数范围如表 1 所示。

根据 Froude 重力相似准则, 取密度比尺、应力比尺、几何比尺分别为 0.67, 0.06, 0.09。根据相似比尺, 模型试验材料主要由砂、水泥、水、速凝剂组成, 其配合比为: $m_{\text{砂}} : m_{\text{水泥}} : m_{\text{水}} : m_{\text{速凝剂}} = 15 : 1 : 1.6 : 0.0166$ 。在试验中采用直径为 $\phi 1.84$ mm 的铝棒来模拟锚杆。垫板用厚度为 2~3 mm 铝板制成, 其长和宽均为 12 mm, 螺母选用标准件 M2 螺母。

1.4 洞室破坏形式分析

洞室的破坏形式在宏观方面主要体现在锚固洞室裂缝分布上, 当每次爆炸结束后, 立即对洞室内的最终破坏形态进行拍照, 当整个洞室试验完毕后, 会及时对试验模块进行解剖, 并进行拍照, 从而可以得到裂缝在顶爆作用下的分布情况。

表 1 III类围岩和模型材料物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock Grade III and materials

介质	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	变形模量 E/GPa	泊松比 ν	抗压强度 R_c /MPa	抗拉强度 R_t /MPa
III类 围岩	2450~ 2650	0.70~ 1.50	39~50	6.00~ 20.00	0.25~ 0.30	15.0~ 30.0	0.83~ 1.40
模型 材料	1600~ 1800	0.06~ 0.12	39~50	0.48~ 1.60	0.25~ 0.30	1.5~ 2.0	0.07~ 0.11

图 3~5 是锚固洞室在爆炸荷载作用下的剖面图、拱顶仰视图和拱脚仰视图。通过对 3 个图的破坏形态进行综合分析, 可以发现: 在集中装药爆炸作用下, 由于在拱顶上方介质内产生不均匀压力及应力波的反射作用使锚固洞室圆拱两侧产生多条“八”字型分布的剪切裂缝; 并在拱顶部位由于受拉出现龟裂状裂纹, 这些裂纹基本分布在锚杆的垫板之间, 走向大致沿着洞室轴线方向; 同时, 由于应力波的反射拉伸致使拱顶表面发生剥落破坏, 而侧墙底部有可能由于压应力集中和反射拉伸导致受压破坏和压剪破坏。故锚固洞室在顶爆作用下主要破坏形式有拱顶受拉破坏、拱两侧剪切破坏以及侧墙底部受压破坏和压剪破坏。



图 3 锚固洞室剖面图

Fig. 3 Profile of tunnels reinforced by bolts

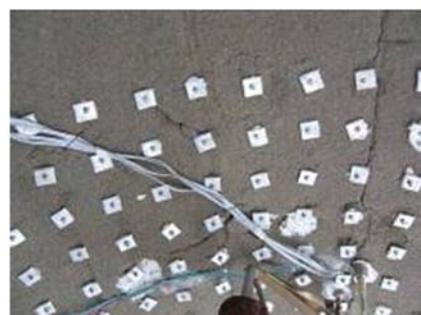


图 4 锚固洞室拱顶仰视图

Fig. 4 Upward view of vault of tunnels reinforced by bolts

1.5 破坏过程分析

其实锚固洞室的破坏过程是动荷载作用与锚杆抗动荷载的过程。图 6 是锚杆间距分别为 9, 6, 3 cm 锚固洞室在炸药质量 w 为 100 g TNT、埋深 H_e 为 85 cm 的集中装药动载作用下的破坏形态。从图中分析可能



图 5 锚固洞室拱脚仰视图

Fig. 5 Upward view of arch foot of tunnels reinforced by bolts



(a) 间距为9 cm普通锚杆支护洞室



(b) 间距为6 cm普通锚杆支护洞室



(c) 间距为3 cm加密锚杆支护洞室

图 6 不同间距锚杆加固洞室破坏形态($w=100$ gTNT, $H_e=85$ cm)

Fig. 6 Damage patterns of tunnels reinforced by rockbolts under different separation distances

知道: 当锚杆间距为 9 cm 时, 锚固洞室在顶爆作用下主要在受动载作用较强的拱顶五根锚杆加固区形成两个破坏区: ①在自由面附近有类似半椭圆拱岩石介质脱落; ②两侧形成“八”字型的剪切裂缝, 但剪切裂

缝没有向爆心延伸的趋势, 只在锚固区内及附近形成贯穿裂缝。这是由于爆炸产生的压应力波传到洞室表面产生反射拉伸波, 反射拉伸波在拱部介质内产生拉应力, 发生“层裂”现象, 按照最大拉应力瞬时断裂准则^[24], 根据计算“层裂”厚度公式:

$$\delta_l = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\sigma_c}{\sigma_m} \quad , \quad (1)$$

式中, δ_l 是第一层裂的厚度, λ 是波长, σ_c 为动态断裂强度, σ_m 应力波幅值。

具体发生“层裂”范围的大小取决于波长采波长、动态断裂强度和应力波幅值, 即产生最大拉应力的地方与波长成正比, 与应力波幅值成反比, 而应力随着传播距离的增加, 幅值越来越小, 波长越来越长, 故在拱顶表面附近发生类似半椭圆拱岩石介质脱落, 而此时由于相对间距为 6 cm 和 3 cm 的锚杆抗爆能力较弱, 故在锚固区内形成“八”字型的剪切裂缝在锚固区与非锚固区弱交界处形成贯通, 而并没有向爆心延伸, 如图 6 (a) 所示。

随着锚杆间距的减小, 加固的围岩抗拉强度得到进一步提高, 此时产生“层裂”破坏的区域仍是类似半椭圆拱, 但范围在减小, 直到锚杆间距为 3 cm 时, “层裂”没有造成明显的脱落; 而由于集中装药在拱顶上方介质内产生的压力分布是不均匀及爆心下方正是洞室临空面, 造成拱部和边墙之间位移不协调, 在洞室两侧拱脚部位产生的“八”字型剪切裂缝, 逐渐远离洞室, 当锚杆间距为 3 cm 时剪切裂缝在锚固区之外, 见图 6 (b) 和 6 (c), 洞室两侧的裂纹并逐渐向爆心方向延伸, 一旦爆炸荷载足够强时, 裂纹就有可能穿过锚固区, 如图 6 (b) 所示。

为了得到洞室的破坏情况, 在试验中加足量的炸药, 把拱顶彻底炸穿。图 7 是经过洞室彻底破坏后的破坏图, 从图可以知道洞室是从爆心向下“八”字型的区域整体坍塌, 破坏后的脱落部分是整体脱落, 主要在拱的部位, 这说明在正常的锚杆设计下锚杆能够起到锚固作用, 使整个加固部位形成一个整体。

从以上分析可以得到: 锚固洞室在顶爆作用下, 一般是先在拱顶发生“层裂”, 另外在洞室两侧形成“八”字型的裂纹, 如果锚杆的加固效果相对较弱, “八”字型的裂纹会在锚固区周围形成贯通, 导致洞室局部坍塌, 如果锚固强度较大, 则裂纹分布在加固区外, 锚固洞室稳定; 一旦动载强度足够大, 两侧剪切裂纹就会向下穿过锚固区, 向上延伸到爆心 (如图 6 (c) 右边所示), 最终导致洞室从爆心至洞室大面积坍塌, 见图 7。



图 7 锚固洞室坍塌形态

Fig. 7 Collapse patterns of tunnels reinforced by rockbolts

2 数值计算

2.1 数值模型的设计

材料模型选用莫尔-库仑材料模型, 材料参数如下: 密度 $\rho=1800 \text{ kg/m}^3$, $E=2.03 \times 10^3 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu=0.16$, 黏聚力 $c=0.57 \text{ MPa}$, 摩擦角 $\phi=48^\circ$, 抗拉强度为 0.177 MPa 。

计算模型大小与模型试验的模型体大小相一致: x 方向 (水平方向) 为 1.5 m , y 方向 (垂直纸面向里) 1.5 m , z 方向 (竖直向上) 为 2.3 m 。在横截面共上分布 15 根锚杆, 锚杆长度为 20 cm ; 沿轴线共布置 16 排, 每排锚杆轴向间距为 4 cm 。锚杆计算参数为: 密度 $\rho=1100 \text{ kg/m}^3$, 杆体和注浆体构成的锚柱的弹性模量 $E=8.1 \times 10^3 \text{ MPa}$, 注浆孔直径为 6 mm , 锚柱与孔壁的之间的黏结刚度为 $gr_k=7.2 \times 10^3 \text{ MPa}$, 锚柱与孔壁之间的黏结强度为 $grcoh=7.6 \times 10^9 \text{ N/m}$, 锚柱的抗拉屈服强度为 3000 N 。

2.2 爆破荷载及边界条件

由于该程序不能模拟爆炸源, 因此, 在爆点位置用一作用于半径为 10 cm 的球腔内壁上的压力来模拟爆炸, 见图 8 所示。该压力为一动载, 动载曲线见图 9。为了模拟出半无限体中的应力波的传播规律, 左右、前后边界水平位移为零边界, 上表面为自由边界, 下边界 3 个方向都固定, 忽略岩体自重对应力波传播造成的影响。为了消除模型的固定边界对传来的应力波产生的反射问题, 专门在边界施加特殊的边界条件,

即引入特殊的非反射边界条件。本次计算采用了 FLAC^{3D} 计算程序中所提供的黏滞边界 (viscous boundary), 可以完全吸收传播至约束边界的波。

2.3 数值分析结果

在试验中, 由于测量仪器价格昂贵, 故只能在模型介质内测试有限点的应力波的波形特征, 这对探索锚固洞室在应力波作用下破坏过程的研究还不够。为了弥补这一不足, 只能通过数值计算来描述应力波在有复合结构的介质中的作用过程。



图 8 拱顶上方的爆炸腔

Fig. 8 Explosive cavity of vault

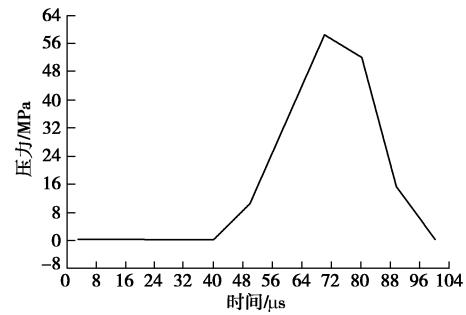


图 9 作用在球腔壁上的模拟动载曲线

Fig. 9 Dynamic curves on explosive cavity

(1) 试验与数值模拟拱顶垂直应力对比分析

为了验证数值分析的合理性, 取试验和数值分析相同位置 4 点 (见图 10) 压应力时程曲线进行对比分析。图 11, 12 是相同位置实测和模拟时程曲线图, 从图中可知: 围岩在爆炸荷载作用下首先产生压应力波, 试验和数值分析应力波时程曲线在形态上是相似的, 传播趋势是一致的; 爆炸应力波都是先上升, 后下降, 最后在零点附近振动达到平衡; 模拟时程曲线的上升段比实测时程曲线的上升段陡, 应力波幅值的下降也较实测时程曲线的快, 从波的作用时间来看, 实测作用时间明显比模拟的要长。这可能是与洞室围岩的地质条件有关, 数值模拟中把围岩看成各向同性介质, 而试验中模型是用水泥砂浆制成, 类似岩土介质, 围岩的密实是一层一层进行, 从而留下许多层面, 同时在施工时还人工预留岩体层面和节理面, 另外试验里面难免有空隙和孔洞, 造成围岩比较酥松, 从而造成

试验中应力波与围岩作用的上升、下降及整个作用时间比数值模拟的长。以上说明数值模型比较合理。

(2) 在应力波作用下锚固洞室的力学特性

从最大和最小主应力等值线图分析可以知道: 随着应力波向外传播, 当应力波传播了 0.002 s 时, 应力波已经传到洞室了, 由于应力波的反射拉伸, 此时拱顶受拉最严重, 容易发生“层裂”和劈裂, 如图 13 (c) 和图 14 (c) 所示。当应力波进一步向远处传播时, 应力波经过 0.003 s 时, 此时在洞室两侧形成“八”字型受拉带, 此处可能形成裂纹, 见图 13 (d) 和图 14 (d)。同时在洞室两侧侧墙底部出现一定面积的受压较强三角形区域, 随着受压区域发展, 最终可能压坏。以上分析结果与试验的破坏形式比较一致。

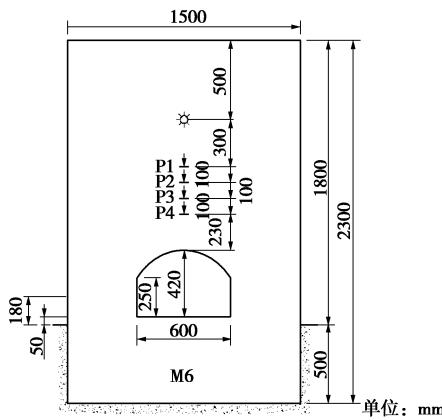


图 10 数值计算模型

Fig. 10 Model of numerical analysis

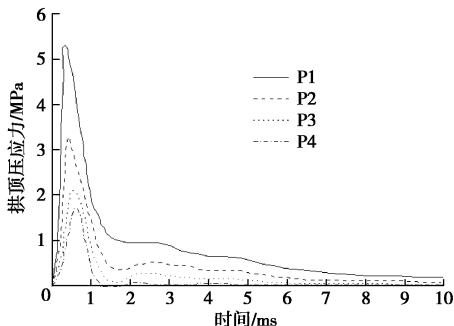


图 11 试验实测垂直应力时程曲线

Fig. 11 Time-history curves of stress of model tests

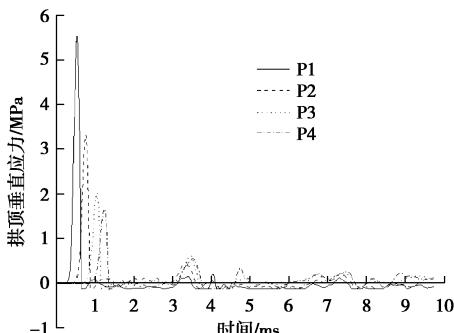


图 12 数值模拟垂直应力时程曲线

Fig. 12 Time-history curves of stress of numerical analysis

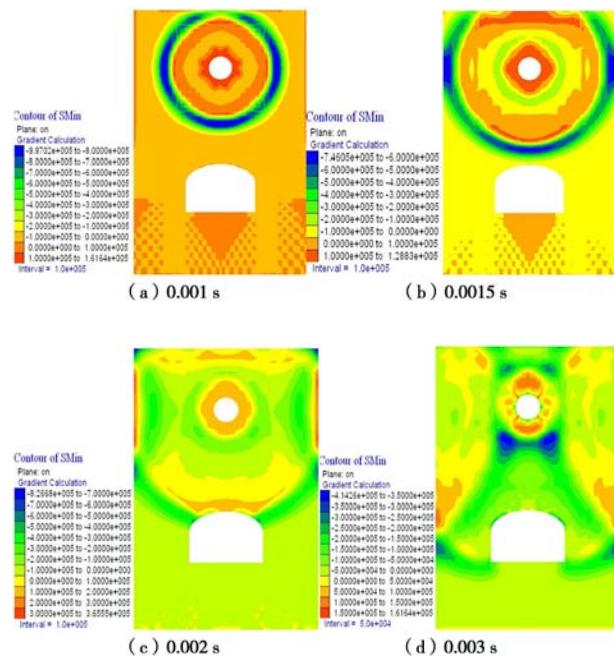


图 13 最小主应力等值线

Fig. 13 Contours of minimum principal stress

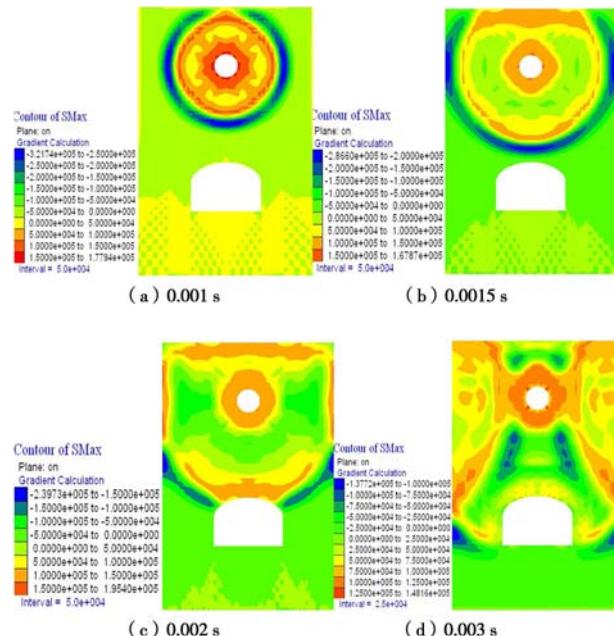


图 14 最大主应力等值线

Fig. 14 Contours of maximum principal stress

(3) 在应力波作用锚固洞室的塑性状态

由于主要是分析应力波对洞室的影响, 故图 15 分别取 0.001 s、0.0015 s、0.002 s、0.0025 s 洞室及周边介质单元的塑性状态。从图中可以看出: 锚固洞室在应力波的作用下会发生受拉和受剪两种塑性状态, 当应力波没有传到洞室时, 接处的介质一开始是受拉屈服, 但当应力波碰到洞室时, 除了由于距离增加应力波减弱外, 洞室明显减弱应力波的强度, 故受拉屈服的发展明显减弱。当应力波传到洞室时, 首先会在拱

顶发生多次“层裂”现象, 见图 15 (a), 与试验结果比较一致。从图 15 (b) 中可以看到在拱脚蓝色处, 受拉屈服继续发展, 结合试验的洞室破坏图 6, 故此处有可以发生受拉剪破坏, 最终形成裂纹。数值分析的图 15 拱脚处正在受拉的屈服区域可以与试验中的拱脚剪切区域一致, 这是因为在试验中由于最终的“八”字型裂纹是经过多次放炮形成的最终裂纹, 已经发生了严重损伤破坏, 所以拉剪比较明显, 而数值分析中只考虑第一炮的结果, 此时洞室在锚杆的支护下损伤破坏很小, 几乎不发生破坏, 所以剪切破坏不明显, 在数值分析结果中主要体现是受拉屈服, 但是通过对裂纹产生机理分析, 可以知道最终试验拉剪裂纹产生区域应与数值分析中的受拉区域相对应的。随着时间的推移, 离拱脚径向稍远的局部范围也有可能受拉产生裂纹。结合动载作用下洞室坍塌图 7, 可以发现如果动荷载足够大时, 受拉破坏范围会逐渐由拱脚逐延伸到爆心造成的裂缝区, 一旦贯通, 导致如图 7 所示的整体坍塌, 这一点也可以从图 15 (c) 和 15 (d) 得到验证。

产生受拉破坏由拱脚向爆心延伸可能是由于当应力波传到拱脚时, 一开始拱脚周围介质可能会产生受拉屈服, 但此时并不一定发生破坏, 当再一次受到自由面上的反射拉伸力时, 就有可能产生破坏, 如果在洞室周围进行了较强锚杆加固, 在锚固区附近不会产生坍塌, 只有当动载强度非常大时, 就有可能发生从爆心至洞室大面积坍塌现象。

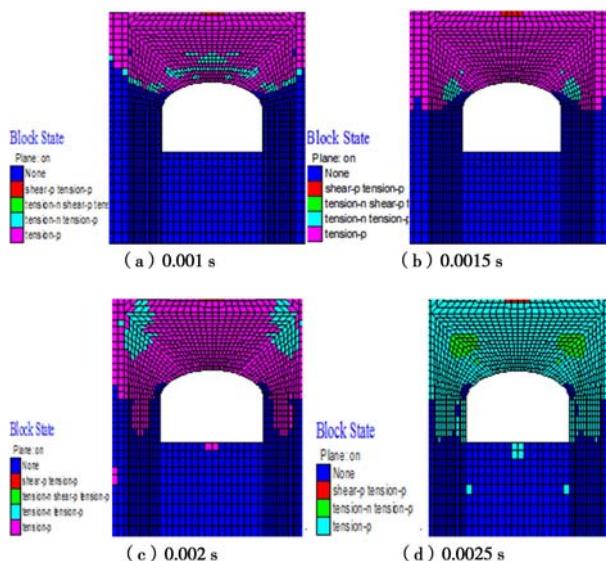


图 15 单元塑性状态图

Fig. 15 Plastic patterns of unit

3 讨 论

(1) 本文中主要是分析了局部破坏和整体破坏的

过程及机理, 具体发生以上破坏的条件与许多因素有关, 例如比例距离、锚杆的间距及长度、裂纹的分布等^[7, 25]。

(2) 本文中试验是通过调整比例距离来研究爆炸荷载对洞室破坏程度的影响。试验中分五级爆炸荷载进行, 每次装药量及埋深分别如表 2 所示, 试验药量由低向高依次进行。前四炮洞室有一定的局部破坏, 但没有形成坍塌, 当进行第五次爆炸时, 锚固洞室已发生了如图 7 所示的整体坍塌。

表 2 模型试验药量及埋深

Table 2 Explosion charges of model tests and embedded depths

放炮顺序	装药量	埋深	爆距	比例埋深	比例距离
	w/g	h/cm	H/cm	(h/w ^{1/3})	(H/w ^{1/3})
第一炮	25.0	50.0	83.0	17.1	28.4
第二炮	39.4	58.2	74.8	17.1	22.0
第三炮	64.9	68.7	64.3	17.1	16.0
第四炮	118.2	83.9	49.1	17.1	10.0
第五炮	160.0	93.0	40.0	17.1	7.4

4 结 论

本文主要是通过抗爆模型试验和数值分析研究锚固洞室在顶爆作用下的破坏形式及破坏过程, 得出以下结论:

(1) 通过抗爆模型试验, 发现锚固洞室主要有受拉破坏、剪切破坏、受压破坏和压剪破坏 4 种破坏形态。

(2) 锚固洞室在动荷载作用下, 洞室拱顶周围形成两个破坏区: ①在自由面附近有类似半椭圆拱岩石介质脱落, 随着锚杆加固强度越大, 脱落的面积越小; ②两侧形成“八”字型的剪切裂缝, 当锚杆加固强度越小, 越容易在锚固区内及附近形成贯穿裂缝, 导致小面积的局部坍塌, 但当锚杆加固强度足够大时, 这些裂纹会随着动载强度的增加, 向上逐渐向爆心发展, 向下逐渐向洞室靠近, 一旦强度足够大, 两侧的裂纹会贯穿爆心和洞室, 导致洞室大面积整体坍塌。

(3) 利用数值模拟方法分析了应力波作用过程中锚固洞室的应力分布及塑性区发展过程, 进一步验证了试验的结果。

参考文献:

- [1] 曾宪明, 陈肇元. 锚固类结构安全性与耐久性问题探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2235–2242. (ZENG Xian-ming, CHEN Zhao-yuan. Research on safety and durability of bolt and cable-supportal structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13):

2235 – 2242. (in Chinese))

[2] 程良奎. 岩土锚固研究新进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3803 – 3811. (CHENG Liang-kui. Research and new progress in ground anchorage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3803 – 3811. (in Chinese))

[3] 方从严, 卓家寿. 锚杆加固机制的试验研究现状[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2005, 33(6): 696 – 700. (FANG Cong-yan, ZHOU Jia-shou. Experimental study of status of rock bolts reinforcement mechanism[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2005, 33(6): 696 – 700. (in Chinese))

[4] 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. (ZHANG Xiang-yang, GU Jin-cai, SHEN Jun, et al. Tunnel deformation and bolt bearing state under explosion load[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(4): 678 – 684. (in Chinese))

[5] 杨苏杭, 梁斌, 顾金才, 等. 锚固洞室抗爆模型试验锚索预应力变化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3749 – 3756. (YANG Su-hang, LIANG Bin, GU Jin-cai, et al. Research on characteristics of prestress change of anchorage cable in anti-explosion model test of anchored cavern[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3749 – 3756. (in Chinese))

[6] 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, 27(7): 1315 – 1320. (GU Jin-cai, CHEN An-min, XU Jing-mao, et al. Model test study of failure patterns of anchored tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1315 – 1320. (in Chinese))

[7] 杨自友. 锚固洞室的抗爆性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008. (YANG Zi-you. Study on the anti-detonaing characteristics of underground opening reinforced by rockbolts[D]. Hefei: University of Science & Technology of China, 2008. (in Chinese))

[8] 张亮亮. 抗爆洞室不同部位预应力锚索受力特征研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009. (ZHANG Liang-liang. Study on stress character of prestressed anchorage in different regional antiknock chamber effected[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese))

[9] 余永强, 顾金才, 杨小林, 等. 动载下洞室加固锚杆受力的实验研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(增刊 2): 263 – 266. (YU Yong-qiang, GU Jin-cai, YANG Xiao-lin, et al. Experimental study on applied force of reinforcement cavity rock bolts under dynamic loading conditions[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(S2): 263 – 266. (in Chinese))

[10] 马海春. 锚固洞室抗爆能力现场实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011. (MA Hai-chun. Research on explosion resistinhg capacity site tests of underground cavern reinforced by grouted rockbolts[D]. Hefei: University of Science & Technology of China, 2011. (in Chinese))

[11] 徐景茂, 顾金才, 陈安敏, 等. 锚杆长度和间距对洞室抗爆性能影响研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 3489 – 3496. (XU Jing-mao, GU Jin-cai, CHEN An-min, et al. Study of anti-explosion ability of reinforced tunnels with different anchor lengths and spacings[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 3489 – 3496. (in Chinese))

[12] 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. (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))

[13] 单仁亮, 周纪军, 夏宇, 等. 爆炸荷载下锚杆动态响应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1540 – 1546. (SHAN Ren-liang, ZHOU Ji-jun, XIA Yu, et al. Experimental investigation on dynamic response of rockbolt under blasting load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1540 – 1546. (in Chinese))

[14] 周纪军. 爆炸动载对近区锚杆支护结构影响的试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2011. (ZHOU Ji-jun. Effects of blast loading on rockbolt anchorage structure near the working face in the model test[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2011. (in Chinese))

[15] ZHANG C S, ZOU D H, MADENGA V. Numerical simulation of wave propagation in grouted rock bolts and the effects of mesh density and wave frequency[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006(43): 634 – 639.

[16] TANNANT D D, BRUMMER R K, YI X. Rockbolt behaviour under dynamic loading- field tests and modelling[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1995, 32(6): 537 – 550.

[17] GISLE S, ARNE M. The Influence of blasting on grouted rockbolts[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, 13(1): 65 – 70.

[18] ORTLEPP W D, STACEY T R. Performance of tunnel support under large deformation static and dynamic loading[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1998, **13**(1): 15 - 21.

[19] ANA Ivanovic, RICHARD D Neilson, et al. Influence of prestress on the dynamic response of ground anchorages[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, **128**(3): 237 - 249.

[20] ANA Ivanovic, ANDY Starkey, RICHARD D. Neilson, et al. The influence of load on the frequency response of rock bolt anchorage[J]. *Advances in Engineering Software*, 2003, **34**: 697 - 705.

[21] RAJMENY P K, SINGHB U K, SINHA B K P. Predicting rock failure around boreholes and drives adjacent to stopes in Indian mines in high stress regions[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2002, **39**(2): 151 - 164.

[22] SINGH P K. Blast vibration damage to underground coal mines from adjacent open-pit blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2002, **39**(8): 959 - 973.

[23] HAGEDORN H. Dynamic rock bolt test and UDEC simulation for a large carven under shock load[C]// Proceeding of International UDEC/3DEC Symposium on Numerical Modeling of Discrete Materials in Geotechnical Engineering, Civil Engineering, and Earth Sciences. Bochum, 2004: 191 - 197.

[24] 王礼力. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. (WANG Li-li. Foundation of stress waves[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese))

[25] DENG X F, ZHU J B, CHEN S G, et al. Numerical study on tunnel damage subject to blast-induced shock wave in jointed rock masses[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, **43**: 88 - 100.

城市地下空间开发利用前沿论坛（一号通知）

（2015, 杭州）

随着我国新型城镇化的推进, 城市地下工程快速发展, 呈现出巨大的社会需求, 对地下空间资源的开发利用及城市安全也提出了更高的要求。针对城市地下空间开发利用重大国家需求, 将于2015年10月31—11月1日在杭州浙江大学召开“城市地下空间开发利用前沿论坛”研讨会, 会议将围绕城市地下空间特殊环境与科技创新重大任务, 开展城市地下空间开发利用的前沿问题进行研讨, 为提升我国城市地下空间开发利用的

科研水平和人才培养做出努力。

会议主题: 城市地下空间开发规划; 城市地下空间开发基础理论; 城市地下综合体; 城市地下交通; 城市地下综合管线; 城市地下空间防灾减灾。

主办单位: 中国工程院土木、水利与建筑工程学部; 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会; 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心; 浙江省城市化发展研究中心。