

文章编号: 1000-7598 (2011) 01-0146-05

爆炸荷载下不同锚固参数围岩的加速度响应分析

杨自友¹, 杨本水¹, 顾金才², 李永池³, 高光发³

(1. 安徽建筑工业学院 土木工程学院, 合肥 230022; 2. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023; 3. 中国科学技术大学 近代力学系, 合肥 230026)

摘 要: 地下洞室岩体加速度过大易造成围岩的不稳定, 通过由模型试验得到的加速度-时程曲线分析, 研究了爆炸荷载作用下不同锚固参数洞室围岩的加速度响应特征。分别阐述了洞室拱顶、底板、两帮加速度时程曲线的形态及其峰值大小, 重点比较了洞室围岩因锚杆加固方式的不同对爆炸产生加速度响应的差异, 结果表明, 拱顶垂直和右帮水平加速度-时程曲线较光滑, 而底板和左帮垂直加速度-时程曲线存在较大震动; 洞室拱顶加速度峰值最大; 4 个洞室中锚杆间距最小的洞室, 其拱顶、两帮加速度比其他洞室的小, 而底板加速度比其他洞室的略大, 可见减小锚杆间距可以增加洞室稳定性。

关 键 词: 模型试验; 爆炸应力波; 时程曲线; 加速度响应; 震动特性

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Acceleration response analysis of surrounding rock with different anchorage parameters subjected to explosive loads

YANG Zi-you¹, YANG Ben-shui¹, GU Jin-cai², LI Yong-chi³, GAO Guang-fa³

(1. School of Civil Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei 230022, China; 2. The Third Research Institute of the Corps of Engineering, General Staff of CPLA, Luoyang, Henan 471023, China; 3. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: If acceleration of rock mass is too large, the surrounding rock of underground cavern is not stable. By analyzing time-history curves of acceleration obtained by model test, the acceleration response characteristics of surrounding rock with different anchorage parameters in underground cavern subjected to explosive loads are studied. The forms and peak values of the time-history curves of acceleration of underground cavern's crown, floor and two sides are explained respectively. Because of the different reinforcing modes, the distinctions of the acceleration response of surrounding rock of underground cavern are compared emphatically. The results indicate that the time-history curves of the vertical acceleration of crown and the horizontal acceleration of floor right side are smooth enough; but the vibration of the time-history curves of the vertical acceleration of floor and the left side are larger than the others. The acceleration of the crown is the largest than the other positions. For the cavern of the smallest spacing of rock bolts in four underground caverns, the acceleration of its crown and two sides is smaller than the other caverns; but the acceleration of its floor is larger slightly than the others'. By means of comparing and analyzing above, reducing the spacing of the rock bolts can enhance the stabilization of underground cavern.

Key words: model test; explosive stress waves; time-history curve; acceleration response; vibration characteristics

1 引 言

爆炸荷载与地下洞室相互作用时, 会引起围岩产生很大的加速度, 造成洞室的不稳定, 由牛顿第二定律知, 加速度因合外力而产生, 炸药爆炸后, 应力波与围岩相互作用的合外力若使岩体加速度过大, 可使围岩发生断裂, 甚至发生大范围的坍塌与

冒落, 因此, 洞室围岩加速度与洞室自身稳定性有紧密联系, 可见研究锚固洞室对爆炸荷载下的加速度响应具有重要的现实意义。锚杆加固作为一种经济、有效的围岩加固方式, 广泛应用于地下开采、边坡工程, 本文即用锚杆作为地下工程围岩加固工具, 探索洞室在加固方式不同时对加速度的响应。

目前, 研究锚固洞室对爆炸产生加速度响应的

收稿日期: 2009-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51074002); 安徽省高等学校省级优秀青年人才基金项目(No. 2010SQRL086); 安徽建筑工业学院博士基金会资助(2009)。

第一作者简介: 杨自友, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 研究方向为岩土工程及矿业工程。E-mail: zyyang75@mail.ustc.edu.cn

文献较少, 阐述爆炸应力波与洞室相互作用的文献相对较多, 如 Rajmeny 等^[1]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, 爆破使得洞室围岩产生了剥离和崩塌。Singh^[2]对露天爆破时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引起的围岩震动幅度大小。刘慧^[3]利用数值模拟和动光弹试验, 研究了近距侧爆条件下的马蹄形隧道的动态响应特点; 曾宪明等^[4]在 TNT 集中装药隔离顶爆条件下, 得到了土钉支护黄土洞室临界抗力现场试验结果; 喻晓今等^[5]研究了洞室土钉支护抗动载试验的基本情况, 并给出了洞室拱顶土钉的测试数据; 王昆明等^[6]利用有限元软件, 研究并指出顶部破碎带使结构的加速度和位移等运动参数有不同程度的降低; 与之相反, 侧部破碎带的存在使结构的加速度和位移等运动参数明显地增大。李海波等^[7]考虑空间非一致性的多点地震动加速度时程步骤, 建立了地下洞室群的三维数值计算模型, 分析一致与非一致两种地震动输入情况下地下洞室群的地震响应特征; 陈剑杰^[8]采用动力有限元和小比例化爆模型研究了深埋岩石洞室受爆炸应力波作用的破坏效应, 总结了洞室宏观破坏的一般图像、变化特征和影响因素等规律; 朱波等^[9]分析了钻地炸弹在岩土介质中的爆炸作用, 对钻地炸弹爆炸引起的地震动进行了数值分析, 给出了地下工事受爆炸作用产生的动力响应。

本文通过对加速度-时程曲线的分析与比较, 研究爆炸荷载作用下不同锚固参数洞室围岩的加速度响应特征及提出维护洞室稳定性方法。

2 模型试验概况

模型试验原型为直墙拱顶型洞室, 埋深 20 m, 跨度 3~5 m, 加固岩体锚杆使用 $\phi 18$ mm 的螺纹钢, 洞室围岩按 III 类岩体性质考虑, III 类围岩参数及模型材料的物理力学参数见表 1。

根据量纲分析理论, 按照 Froude 比例法, 要求 $K_\sigma = K_\rho K_L$, 确定密度、应力、几何相似比尺分别为: $K_\rho = 0.67$, $K_\sigma = 0.06$, $K_L = 0.09$ 。试验模型尺寸为 2.4 m×1.5 m×2.3 m(长×宽×高), 试验模型沿长度方向分为 2 个试验段, 每个试验段为 1.2 m, 锚杆加固段长度为 60 cm, 集中装药量为 100 g TNT, 加固围岩的锚杆用铝棒, 锚固剂为石膏浆, 模型试验材料及其重量比为: 砂: 水泥: 水: 速凝剂 = 15: 1: 1.6: 0.0166, 图 1 为试验模型示意图(左)和洞室横截面, 图中给出了锚杆加固方式及加速度测点的位置。

3 结果分析

试验采用集中装药的方式连线起爆, 分析洞室对爆炸产生加速度的响应, 具体为比较拱顶、底板和两帮加速度-时程曲线及其峰值大小。所有加速度的传感器安装于洞室岩体表面, 所测加速度的方向分别为: 拱顶垂直向下、底板垂直向上、左帮垂直向下和右帮水平向左, 具体见图 1。为了便于比较和说明, 这里将 4 个洞室(M1~M4)加速度-时程曲线对应的峰值列于表 2, 表中的“垂直”、“水平”分别表示垂直加速度和水平加速度, 表中的 a1~a13 为测点编号。

表 1 III 类围岩和模型材料物理力学参数

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

介质	重力密度 $g/(\text{kg}/\text{m}^3)$	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $f/(\text{^\circ})$	变形模量 E/GPa	泊松比 μ	抗压强度 R_c/MPa	抗拉强度 R_t/MPa
III 类围岩	2 450~2 650	0.7~1.5	39~50	6~20	0.25~0.30	15~30	0.83~1.40
模型材料	1 600~1 800	0.06~0.12	39~50	0.48~1.60	0.25~0.30	1.5~2.0	0.07~0.11

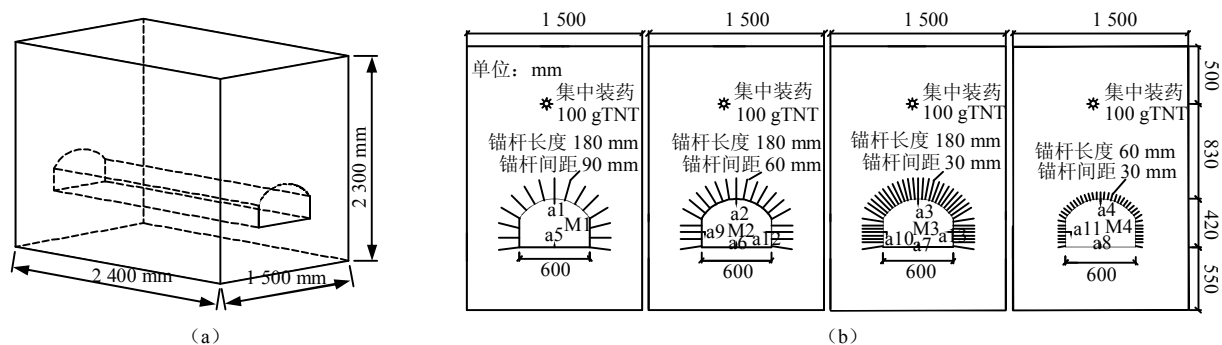


图 1 模型、洞室加固方式及加速度测点布置

Fig.1 Model, cavern reinforcement pattern and acceleration measuring points configuration

3.1 垂直加速度峰值比较

在同一洞室里,位于拱顶、底板和左帮的测点所测为垂直加速度(见表 2),将拱顶加速度与其他部位的相比较,可发现拱顶加速度正负峰值均是最大的,洞室 M2、M4 左帮加速度正峰值比其底板的加速度正峰值大,这些现象与爆炸球面波强度的衰减有关,集中装药点爆炸后产生球面应力波,由爆心向四周传播,由于球面波具有扩散效应^[10-11]而使其能量和强度都要减小,拱顶是最先与球面波相互作用的,故拱顶加速度最大。接着球面波沿着洞室两帮向下传播,先与帮部作用而后到达底板,此过程中球面波强度会进一步衰减,因而左帮加速度比底板加速度大。

表 2 加速度测点位置及其峰值
Table 2 Locations of acceleration measuring points and peak values

洞室位置	M1	M2	M3	M4
	加速度/(m/s ²) (正峰值/负峰值)			
拱顶 (垂直)	a1 667.98 -159.67	a2 373.91 -256.96	a3 335.70 -250.25	a4 316.90 -110.84
底板 (垂直)	a5 10.22 -10.77	a6 21.27 -13.40	a7 83.95 -13.21	a8 12.57 -22.58
左帮 (垂直)		a9 66.38 -12.73	a10 48.16 -11.90	a11 66.74 -19.19
右帮 (水平)		a12 48.55 -66.68	a13 19.07 -30.73	

对于垂直加速度负峰值来说,洞室 M2、M3 和 M4 左帮加速度略小于其底板加速度。不同洞室、不同位置的加速度负峰值无明显规律性。

3.2 拱顶加速度比较

试验所测洞室拱顶垂直向下的加速度-时程曲线如图 2 所示。

由图 2 可看出,洞室拱顶加速度时程曲线较光滑,约在 2 ms 前,由上升段和下降段组成。4 洞室拱顶测点加速度在迅速达到峰值以后,快速地衰减,并且产生了反方向的加速度,除了 a3 测点外,其余 3 测点加速度由反方向加速度减小至 0。拱顶加速度先正后负,说明了拱顶先加速向下运动,再加速向上回缩。加速度方向与合外力方向一致,说明洞室拱顶所受合外力方向是先朝下后朝上的,这样的受力状态可造成洞室围岩短时间的震动,导致洞室处于不稳定状态,若加速度过大,即会使拱顶岩体产生破坏。在历时 6 ms 后,拱顶加速度基本趋于稳定。

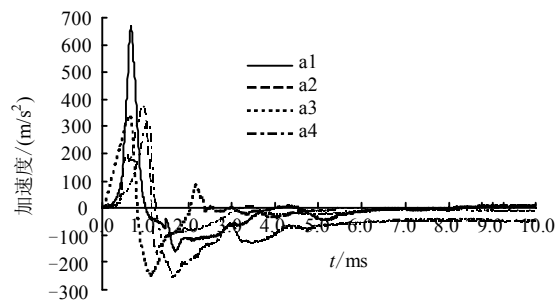


图 2 M1~M4 洞室拱顶垂直向下加速度-时程曲线
Fig.2 Vertical and downward acceleration time-history curves of crown from M1 to M4

随着锚杆间距的减小,洞室 M1~M3 拱顶的加速度正峰值(见表 2,下同)依次减小,由此可知减小锚杆间距,能起到减小拱顶加速度的作用,此时洞室拱顶所受的合外力较小。洞室 M3、M4 锚杆间距相同,但长度方面前者是后者的 3 倍,然而两洞室拱顶加速度正峰值相差无几,说明锚杆的长度对洞室拱顶的加速度影响较小,而锚杆间距的减小能有效控制拱顶加速度,其原因在于锚杆的间距较小时,使得被加固区域内岩体颗粒间的结合更加紧密,即加固区内围岩形成了一个整体。这样,锚杆的加固对围岩有较大的约束力,当爆炸球面波与加固区围岩相互作用时,由于这种约束力而使拱顶不至于产生较大的加速度,从而维护了洞室的稳定性。

对洞室拱顶加速度负峰值来说,负号仅代表加速度方向,随锚杆间距的减小或长度的变化,加速度负峰值的变化几乎没有规律性。

3.3 底板加速度比较

图 3、4 为 4 个洞室底板测点垂直向上的加速度-时程曲线。与图 2 拱顶加速度-时程曲线相比较,洞室底板加速度-时程曲线在研究时间段内很不稳定,也不光滑,且震动较大。洞室底板加速度方向先向下后向上,25 ms 内加速度方向变化很大,无明显的规律;对于洞室 M2、M3 来说(相应加速度测点 a6、a7),约在 17.5 ms 左右,底板加速度才达到峰值。产生这些现象的原因是爆炸产生球面波向下传播,到达拱顶后一直与洞室围岩相互作用,引起了围岩受力状态的变化,底板受力状态也产生相应的变化,而洞室底板未加固,处于自由状态,岩体颗粒间几乎无约束力,底板受力方向发生变化时,其加速度方向必然不稳定,从而导致加速度-时程曲线的震动。

另外,从加速度正峰值大小看,洞室 M1~M3 底板加速度峰值在增大,其原因之一是洞室 M1~M3 的锚杆间距逐渐减小,岩体颗粒间结合越来越紧密,而围岩密度越大,球面波强度衰减越小,从

而使消耗于拱顶加速度的球面波强度也相应减小,传播到底板的球面波强度随锚杆间距减小即会增大,洞室 M3 锚杆间距最小,因而其底板加速度最大;另外,洞室 M2 和 M3 分别相对于洞室 M1、M4 来说,锚杆的间距较小或长度较大,使洞室 M2、M3 围岩颗粒结合的相对较紧密,其中的球面波衰减程度较小,球面波经洞室两帮向下传播,其强度或能量被洞室分成了两部分,当球面波经绕射传播到底板时,两部分球面波在洞室底板相遇并产生强度叠加,再加上传播距离的增大而使 a6、a7 在超过 17 ms 后,加速度才达到峰值,洞室 M1、M4 底板也会出现两部分球面波叠加的情况,但此时两洞室底板球面波强度相对较小,叠加后的强度也较小。

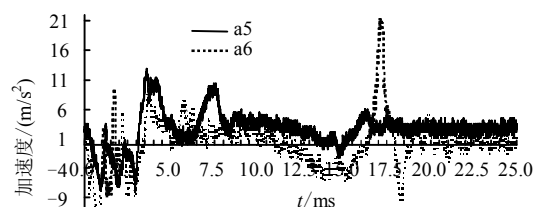


图3 M1、M2 底板垂直向上加速度-时程曲线
Fig.3 Vertical and upward acceleration time-history curves of floors M1 and M2

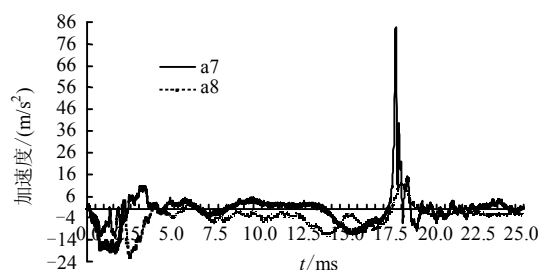


图4 M3、M4 底板垂直向上加速度-时程曲线
Fig.4 Vertical and upward acceleration time-history curves of floors M3 and M4

对洞室底板加速度负峰值来说,锚杆间距或长度的变化时,加速度的变化无一定规律性。

3.4 左帮加速度比较

图 5、6 所示为洞室 M2~M4 左帮测点垂直向下加速度-时程曲线。图中所示加速度-时程曲线不光滑,有较大波动,这一特征与图 3、4 底板加速度-时程曲线类似。约在 5 ms 之前,洞室左帮加速度在震动过程中经历了先增大后减小的变化,5 ms 后洞室左帮加速度方向向上,约 20 ms 后加速度-时程曲线基本无太大变化,测点 a9~a11 加速度-时程曲线类似于不规则的爆炸应力波时程曲线^[12]。a9、a10 测点加速度传感器所测加速度信号可能与测量线路中的交流电信号或外界某种信号相互叠

加,使加速度-时程曲线产生小幅度波动,变成“毛刺”状了。加速度-时程曲线的波动原因是洞室左帮部位的围岩相对较薄,仅有 45 cm,当爆炸球面波到达洞室左帮并与之相互作用时,引起左帮震动,加速度传感器随之震动,使测得的加速度产生忽大忽小的变化。

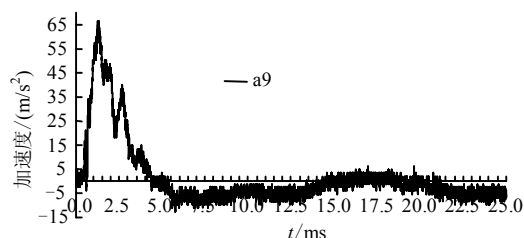


图5 M2 左帮垂直向下加速度时程曲线
Fig.5 Vertical and downward acceleration time-history curves of left side of M2

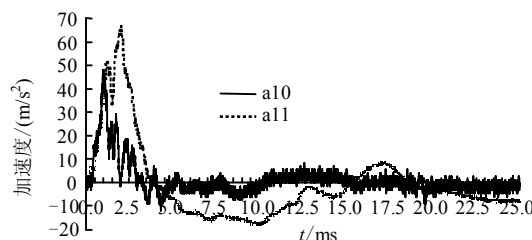


图6 M3、M4 左帮垂直向下加速度时程曲线
Fig.6 Vertical and downward acceleration time-history curves of left side of M3 and M4

从加速度正负峰值大小看,洞室 M3 因锚杆间距与另外 2 个洞室相比最小,长度比洞室 M4 大,其左帮垂直加速度峰值相应也最小。

3.5 右帮加速度比较

试验所测洞室右帮水平加速度-时程曲线如图 7 所示。

洞室 M1、M4 未测右帮水平加速度,这里仅对洞室 M2、M3 右帮水平加速度曲线加以分析。由图 7 可知,两洞室右帮的加速度方向先向右再向左,说明洞室右帮产生短时间的震动。但与底板和左帮垂直向下的加速度相比,右帮水平加速度-时程曲线较光滑,在 3.0 ms 前类似于相差半个周期的不规则正弦曲线,约在 6.0 ms 后右帮加速度基本趋于 0。此过程是因炸药爆炸应力波与洞室拱顶相互作用时,造成向下的压力较大,使拱顶产生了瞬时向下的弯曲,而洞室右帮部位的围岩相对较薄,拱顶向下弯曲引起了右帮向右的合外力,当爆炸应力波与拱顶间的相互作用完成后,便沿着洞室两帮继续向下发生绕射传播,直至到达洞室底板,而这时洞室拱顶回缩,同时也带动了洞室右帮产生向左的合外力,使右帮产生向左的加速度。

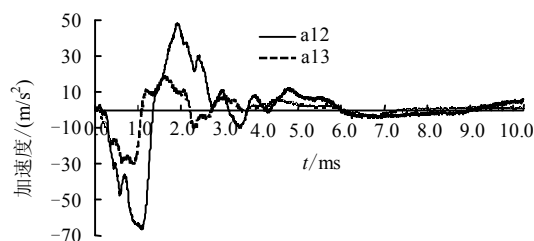


图7 M2、M3右帮水平加速度时程曲线

Fig.7 Horizontal acceleration time-history curves of left side of M2 and M3

加速度正负峰值方面, 洞室 M2、M3 右帮的负峰值均超过了其正峰值。由加速度-时程曲线易知, 在爆炸球面波作用下, 右帮加速度方向先向右后向左, 球面波在传播的过程中扩散, 其强度发生衰减, 故右帮在与强度衰减后的绕射应力波作用时, 产生的向左加速度峰值当然会比向右加速度峰值小。

将两洞室右帮加速度正、负峰值分别进行比较发现, 洞室 M2 的加速度峰值绝对值均比洞室 M3 的大, 其产生原因类似于洞室拱顶加速度, 即洞室 M2 的锚杆间距比洞室 M3 的大, 其加固区内围岩颗粒间相对约束力较小, 故洞室 M2 右帮水平加速度峰值较大。

4 结 论

(1) 由爆炸产生的加速度引起了洞室围岩的震动, 拱顶垂直、右帮水平加速度-时程曲线较光滑, 底板的和左帮的垂直加速度-时程曲线粗糙, 且波动较大。

(2) 锚杆长度一定时, 随着锚杆间距的减小, 洞室拱顶、两帮加速度正峰值在减小, 负峰值无明显规律。因此, 可通过减小锚杆间距来减小洞室围岩加速度, 以维护洞室围岩的稳定性。

(3) 锚杆加固方式变化表现为锚杆间距和长度的不同, 由分析知, 锚杆间距变化对洞室围岩加速度的影响比锚杆长度对其的影响大。在本文研究范围内, 长度为 18 cm, 间距为 3 cm 的洞室, 其拱顶及两帮加速度相对较小, 该洞室稳定性最好。

参 考 文 献

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

- [3] 刘慧. 近侧爆情况下马蹄形隧道动态响应特点的研究[J]. *爆炸与冲击*, 2000, 20(2): 175—181.
LIU Hui. Dynamic responses of hoof-shaped tunnels to adjacent blastings[J]. *Explosion and Shock Wave*, 2000, 20(2): 175—181.
- [4] 曾宪明, 杜云鹤, 李世民. 土钉支护抗动载原型与模型对比试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(11): 1892—1897.
ZENG Xian-ming, DU Yun-he, LI Shi-min. Testing study of prototype and model comparison on resisting dynamical load with soil nail supporting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1892—1897.
- [5] 喻晓今, 余学文, 张豫. 数种情形下土钉的瞬态应变累积效应分析[J]. *华东交通大学学报*, 2006, 23(4): 1—4.
YU Xiao-jin, YU Xue-wen, ZHANG Yu. Analysis of the effect of cumulation of transient strain on soil nail in several cases[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2006, 23(4): 1—4.
- [6] 王昆明, 唐德高, 贺虎成, 等. 破碎带对地下坑道动力响应影响的数值分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2007, 27(1): 74—79.
WANG Kun-ming, TANG De-gao, HE Hu-cheng, et al. Numerical analysis of the effect of fractured zone on dynamic response of underground tunnels[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2007, 27(1): 74—79.
- [7] 李海波, 朱莅, 吕涛, 等. 考虑地震动空间非一致性的岩体地下洞室群地震反应分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(9): 1757—1766.
LI Hai-bo, ZHU Li, LÜ Tao, et al. Seismic response analysis of an underground cavern groups in rock subjected to spatially non-uniform seismic ground motion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(9): 1757—1766.
- [8] 陈剑杰, 孙钧, 林俊德. 深埋岩石洞室受爆炸应力波荷载作用的破坏效应[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2001, 20(4): 402—404.
CHEN Jian-jie, SUN Jun, LIN Jun-de. Failure of deep-buried rock openings under blast stress wave[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2001, 20(4): 402—404.
- [9] 朱波, 赵国志, 阳波. 钻地炸弹近爆地下工事的动力响应数值分析[J]. *火箭与制导学报*, 2005, 25(4): 60—62.
ZHU Bo, ZHAO Guo-zhi, YANG Bo. Numerical analysis of dynamic response about drill-ground bomb nearly on underground engineering[J]. *Journal of Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(4): 60—62.
- [10] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [11] 杨自友, 张速, 顾金才, 等. 球面波传播特性和围岩动态裂纹产生的数值试验研究[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(5): 110—113+244.
YANG Zi-you, ZHANG Su, GU Jin-cai, et al. Numerical test study on spherical explosive wave propagating characteristics and dynamical crack production in wall rock[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(5): 110—113+244.
- [12] 李冀祺, 马素贞. 爆炸力学[M]. 北京: 科学出版社, 1992.