

文章编号: 1673-3363-(2012)02-0245-05

顶爆作用下锚固硐室围岩动态裂纹分布及产生机理

王光勇^{1,2}, 任连伟¹, 郭佳奇¹

(1. 河南理工大学深部矿井建设重点学科开放实验室, 土木工程学院, 河南 焦作 454000;

2. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230026)

摘要 利用动态数值模拟软件, 研究了锚固硐室在顶爆作用下的裂纹分布, 并对裂纹产生机理进行了分析。通过应力波的传播过程与模型试验裂纹分布对比, 得出数值模拟的结果比较可靠。随着爆炸应力波的传播, 主要在地表和硐室表面由于反射拉伸产生“层裂”, 以及在锚杆之间和拱脚侧面产生大量裂纹。通过对比毛硐和锚固硐室裂纹分布, 发现毛硐的裂纹明显比锚固硐室分布广、粗, 这说明锚杆的抗爆效果比较好。

关键词 岩石力学; 隧道工程; 锚固硐室; 动态裂纹; 数值分析

中图分类号 TU 457

文献标识码 A

The Distribution of Cracks and Its Mechanism of Tunnel Reinforced by Bolts Under Top Explosion

WANG Guang-yong^{1,2}, REN Lian-wei¹, GUO Jia-qi¹

(1. Opening Project of Key Laboratory of Deep Mine Construction, School of Civil Engineering,

Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;

2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract Distribution of cracks and its mechanism of the tunnel reinforced by bolts were studied by numerical analysis. It is proved that numerical results are reliable by comparing the law of stress wave propagation and distribution of cracks. With stress wave propagation, cracks produced by stress waves were formed in free surface of top and tunnel, and some cracks were distributed in two sides of arch foots and between bolts. Comparing cracks of the tunnel with no support and the tunnel reinforced by bolts, the cracks of the tunnel with no support are wider and thicker than anchored tunnel. As a result, it shows that the anchored effect is very good.

Key words rock mechanics; tunnel projects; tunnels reinforced by bolts; dynamic cracks; numerical analysis

建造在岩体中的各类硐室、隧道和地下结构可能受到多种多样的动力作用, 例如大型地下硐室工程在进行爆破开挖, 往往会威胁到爆炸源一定范围内地下工程的安全和稳定; 另外, 国防方面的地下

指挥所、防空洞、地下弹药库等地下硐室有可能受到敌人炸弹攻击, 故在许多情况下, 荷载常具有动力特性, 沿用静力学的原理和方法来求解这类课题, 显然是不合适的, 因此研究地下硐室在动力作

收稿日期: 2011-06-02

基金项目: 河南省教育厅自然科学基金项目(2011A580003); 河南理工大学博士基金项目(B2010-58)

作者简介: 王光勇(1977-), 男, 副教授, 博士, 从事岩土工程动载试验方面的研究。

E-mail: wgy2003@mail.ustc.edu.cn

Tel: 13939102117

用下的效应具有重要的实用意义。

锚杆支护作为一种行之有效的加固技术已倍受世界岩土工程界的重视,如今锚杆加固已被广泛应用于煤矿、金属矿山、水利、隧道以及国防等岩土工程中^[1]。目前,许多国内外学者^[2]已经通过试验、数值及理论分析方法对静态下的锚杆支护技术做了比较系统的研究,并广泛的应有于岩土工程中,但对动载作用下锚固硐室抗爆能力的研究比较少。在动载作用方面,虽然国内外学^[3-20]者做了一定的尝试工作,并取得了一定的成果,但对锚固硐室的围岩裂纹分布及产生研究比较少。本文尝试应用数值分析软件 LS-DYNA^{3D} 程序,取自室内模型试验尺寸,数值模拟在顶爆炸条件下的锚固硐室的围岩裂纹分布及产生,并分析了锚杆加固机理,从而为工程实践提供参考。

1 计算模型

1.1 数值模型的设计

计算模型取自总参工程兵科研三所岩土与结构工程重点实验室的地质力学试验模型的一部分,见图 1,根据模型的对称性,宽×高×厚=1 200 mm×2 300 mm×40 mm,即取沿硐室平面的水平方向 1 200 mm,竖直方向 2 300 mm,硐室轴向 40 mm,作近似二维的数值模拟。模型硐室跨度均为 600 mm,加固硐室的锚杆长度为 24 mm,间距 40 mm。

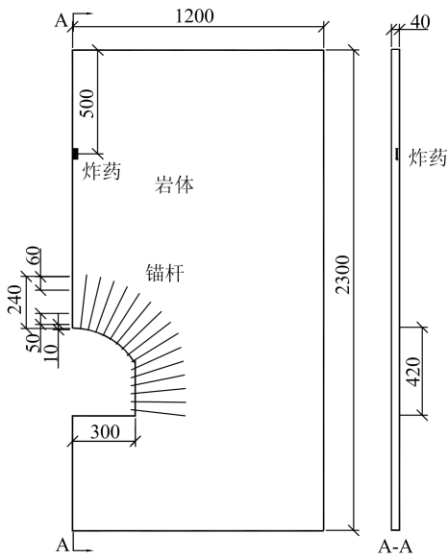


图 1 数值计算模型示意图 (mm)
Fig.1 Sketch of model of numerical analysis

岩体介质选用 SOIL-CONTRETE 材料,密度取 1.7 g/cm³, TNT 炸药单元取总质量的 1/4, 25 g, 采用 JWL 状态方程

$$p=A(1-\frac{\omega}{R_1V})e^{R_1V}+B(1-\frac{\omega}{R_2V})e^{R_2V}+\frac{\omega E}{V}$$

式中: P , E , V 表示爆轰产物的压力、内能和比容(单位体积); A , B , R_1 , R_2 , ω 为 JWL 方程必须输入的常数,见表 1; ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 分别为炸药、模型介质及锚杆材料密度, P_{CJ} 为炸药爆轰压力, D_H 为爆速, E_0 为爆轰初始内能, G , K 分别为模型材料剪切模量、体积模量, E , μ 分别为锚杆材料弹性模量、泊松比。

表 1 TNT 炸药、JWL 方程、模型及锚杆材料参数
Table 1 Material parameters of TNT, JWL, model and bolt

$\rho_1/(\text{g cm}^{-3})$	P_{CJ}/GPa	$D_H/(\text{m s}^{-1})$	A/GPa	B/GPa
1.63	27	6930	371	7.43
R_1	R_2	ω	E_0/GPa	$\rho_2/(\text{g cm}^{-3})$
4.15	0.95	0.3	7	1.7
G/GPa	K/GPa	$\rho_3/(\text{g cm}^{-3})$	E/GPa	μ
0.856	0.958	2.72	76	0.34

1.2 模拟过程及边界条件

炸药、岩体材料选用六面体实体单元模拟,加固锚杆单元用梁单元代替,为了方便计算起见,建立了单排锚杆加固硐室的二维模型。计算模型中,炸药、岩体和锚杆采取共用节点法划分网格。为了模拟出半无限体中的应力波的传播规律,模型右边界、下边界设置为透射边界,左边界设置为水平位移为零边界,上表面为自由边界,忽略岩体自重对应力波传播造成的影响。

2 数值分析结果的分析

2.1 爆炸应力波在锚固硐室中的传播

围岩在集中装药爆炸时,在岩体中产生球面应力波,如图 2 所示。球面波在传播的过程中,其波阵面是连续的,随着时间的推移,应力波逐渐以球面形式向四周传播,当应力波传播到地表时,应力波会在自由面产生反射;当产生的爆炸应力波在围岩中传播遇到硐室时,应力波除了被硐室表面反射外,还会沿硐室周边的绕射和散射,最终向远处传播。其传播规律与实际应力波传播比较相似。

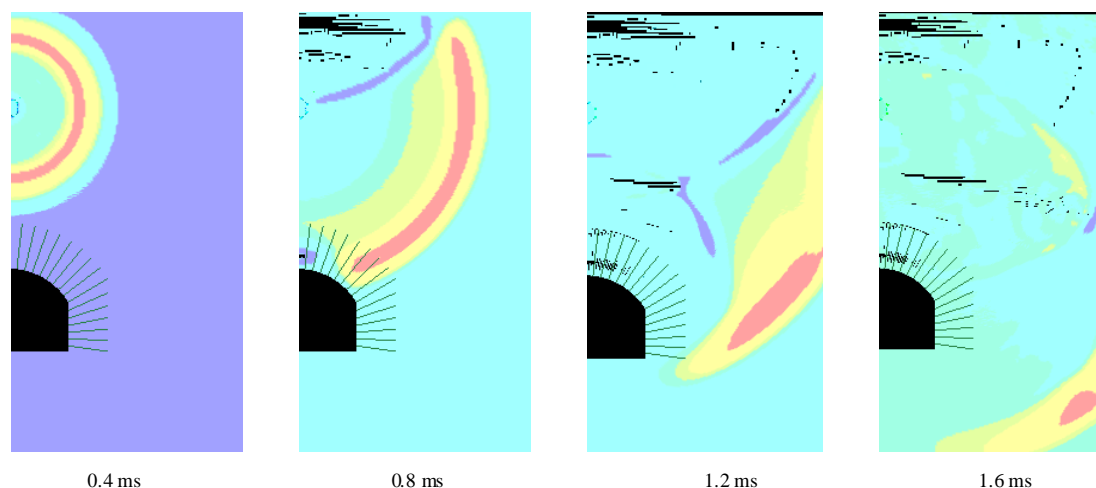


图2 锚固硐室应力波传播及裂纹分布图

Fig.2 Distribution map of cracks and stress wave propagation of tunnels reinforced by bolts

2.2 锚固硐室动态裂纹分布

从图2中可以看出：炸药爆炸时首先是产生压缩波，随着应力波的传播，当应力波传播到地表时，应力波会在自由面发生反射，形成拉伸波，导致岩石受拉破坏，形成“层裂”现象，即在地表形成大量的裂纹。同样，当应力波传播到硐室表面，由于应力波的反射拉伸，也会在硐室自由面产生“层裂”现象。另外，当爆炸应力波在围岩中传播遇到硐室时，还会在拱顶附近锚杆之间产生竖向裂纹，并在锚杆加固范围之外拱腰两侧形成大量的“八”字型裂纹。图3是模型试验有剖面图，与图2对比，在硐室周围也形成大量类似的裂纹，拱顶也产生了“层裂”现象，并也在拱腰两侧形成大量的“八”字型裂纹，但没有在锚杆之间看到大量的竖向裂纹，这是由于当应力波作用时，强度比较大，裂纹劈裂比较明显，但当应力波不作用时，在围岩相互挤压作用下，裂纹又闭合起来了，所以试验中肉眼看不到，这说明数值模拟结果比较可信。针对裂纹的产生，作者认为：由于集中装药爆炸产生球形应力波，在球形波的作用下随着离爆心的距离越大承受压应力波强度越小，因此在同一个平面上，爆心正下方拱顶所受的压应力最大，两旁较小，由于锚杆只在径向支护加固，从而使中心向两旁挤，导致拱顶劈裂，因此，会在锚杆之间产生拉应变，形成很深的裂缝。在顶爆的作用下，会在锚固硐室拱部两侧形成多条“八”字型的裂缝，这主要是由于集中装药在拱顶上方介质内产生的压力分布是不均

匀的，爆心下方较大，离爆心较远处较小。而爆心下方正是硐室临空面，没有支撑力，只有拱效应。而硐室两侧却有边墙材料支撑，就会造成拱部岩体向下位移较大，两侧岩体向下位移较小，造成拱部和边墙之间位移不协调，产生了剪切裂缝，从而在硐室两侧拱脚部位产生一条或多条很深的剪切裂缝。



图3 锚固硐室模型试验剖面图

Fig.3 Profile of tunnels reinforced by bolts in the model test

2.3 锚固硐室抗爆加固效果

在宏观方面硐室加固效果的好坏体现在硐室的破坏形态。通过对比图2中第4个和图4的裂纹分布，从图中可以知道：毛硐的裂纹分布形式比较相似，由于应力波的反射拉伸作用，都是在地表和硐室表面产生“层裂”，在拱脚两侧和锚杆之间形成裂纹，但在相同爆炸动荷载作用下毛硐的裂纹明显比锚固硐室分布广、粗，这说明锚杆的抗爆效果比较好。

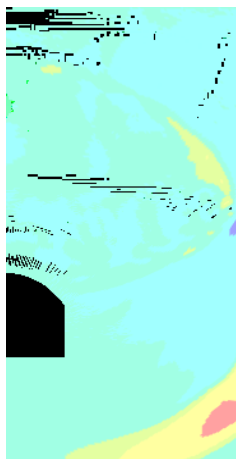


图 4 毛洞裂纹分布图

Fig.4 Distribution map of cracks of the tunnel with no support and the tunnel reinforced by bolts

3 结 论

1) 通过应力波的传播过程和与试验裂纹分布对比, 得出数值模拟的结果比较可靠。

2) 根据应力波与锚固洞室的相互作用, 得到地表和洞室表面是由于反射拉伸而形成大量的裂纹。由于爆炸压力同一个平面上分布不均匀, 而导致锚杆之间产生横向劈裂, 形成竖向裂纹。另外, 由于拱部和边墙之间位移不协调, 从而在洞室两侧拱脚部位产生一条或多条很深的剪切裂缝。

3) 对比毛洞和锚固洞室裂纹分布, 发现毛洞的裂纹与锚固洞室分布形式比较相似, 但在相同爆炸动荷载作用下毛洞的裂纹明显比锚固洞室分布广、粗, 这说明锚杆的抗爆效果比较好。

参考文献:

- [1] 漆泰岳. 锚杆与围岩相互作用的数值模拟[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002.
- [2] 顾金才, 沈俊, 陈安敏, 等. 锚索预应力在岩体内引起的应变状态模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊): 917-921.
GU Jin-cai, SHEN Jun, CHEN An-min, et al. Model testing study on strain distribution regularity in rock mass caused by prestressed anchorage cable [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp): 917-921.
- [3] 李世民, 韩省亮, 曾宪明, 等. 锚固类结构抗爆性能研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊): 3553-3562.
LI Shi-ming, HAN Sheng-liang, ZHENG Xian-ming, et al. Research progress of explosion-resistance behavior of anchorage type of structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(supp): 3553-3562.
- [4] 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.
- [5] GISLE S, ARNE M. The influence of blasting on grouted rock bolts [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(1): 65-70.
- [6] TANNANT D D, BRUMMER R K, YI X. Rockbolt behaviour under dynamic loading field tests and modeling [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1995, 32(6): 537-550.
- [7] ANDERS A. Laboratory testing of a new type of energy absorbing rock bolt [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(4): 291-300.
- [8] ANDERS A. Dynamic testing of steel for a new type of energy absorbing rock bolt [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(5): 501-512.
- [9] 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 and Mining Sciences, 2006, 43(4): 634-639.
- [10] 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): 3749-3756.
YANG Suhang, LIANG Bin, GU Jincai, 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(Supp): 3749-3756.
- [11] 杨自友, 顾金才, 陈安敏, 等. 爆炸波作用下锚杆间距对围岩加固效果影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 757-764.
YANG Zi-you, GU Jin-cai, CHEN An-min, et al. Model experiment study on the influence of reinforcement effects of intervals of rock bolts in wall rock under the effect of explosive waves[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 757-764.
- [12] 王光勇, 顾金才, 陈安敏, 等. 拱顶端部加密锚杆支护洞室抗爆加固效果模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 378-383.
WANG Guang-yong, GU Jin-cai, CHEN An-min, et al.

- Model tests on anti-explosion anchoring effect of tunnels reinforced by dense bolts at arch top [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 378-383.
- [13] 杨自友. 锚固硐室的抗爆性能研究[D]. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 2008.
- [14] 张亮亮. 抗爆硐室不同部位预应力锚索受力特征研究[D]. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 2008.
- [15] 余永强, 顾金才, 杨小林, 等. 动载下硐室加固锚杆受力的实验研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(增刊): 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(Supp): 263-266.
- [16] 李桂林, 余永强, 王新生. 动载下硐室锚杆加固效应的数值模拟[J]. 兵工学报, 2009, 30(增刊): 42-46.
- LI Gui-lin, YU Yong-qiang, WANG Xin-sheng. Numerical simulation of cavity bolt reinforcement effect under dynamic loading [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(Supp): 42-46.
- [17] 陈剑杰, 孙钧, 林俊德, 等. 强爆炸应力波作用下岩石地下硐室的破坏现象学[J]. 解放军理工大学学报, 2007, 8(6): 582-588.
- CHEN Jian-jie, SUN Jun, LIN Jun-de, et al. Failure of rock openings under intensive explosion stress wave [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007, 8(6): 582-588.
- [18] 薛亚东, 张世平, 康天合. 回采巷道锚杆动载响应的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1903-1906.
- XUE Ya-dong, ZHANG Shi-ping, KANG Tian-he. Numerical analysis of dynamic response of rock bolts in mining roadways [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1903-1906.
- [19] 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, 23(21): 3664-3668.
- JU Yang, XIA Chang-jing, XIE He-ping, et al. Numerical analysis of rupture of subfloor of coal mine tunnel subjected to blasting loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3664-3668.
- [20] 顾金才, 陈安敏, 徐景茂, 等. 在爆炸荷载条件下锚固硐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 subjected to explosion load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1315-1320.