

# 围岩外加固抗爆炸成坑试验研究

徐干成<sup>1</sup>, 袁伟泽<sup>1, 2</sup>, 顾金才<sup>3</sup>, 张向阳<sup>3</sup>, 顿旭虎<sup>1</sup>

(1. 空军工程设计研究局, 北京 100068; 2. 中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 北京 100038;  
3. 军委后勤保障部工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** 为进一步提升洞库围岩的抗爆炸性能, 采用相似模型试验方法对采用交叉锚索进行加固的均质、层状和块状围岩进行2组爆炸成坑试验, 并对分析加固前后围岩模型的宏观破坏形态、隆起形态、裂缝形态及爆坑尺寸。研究表明: (1) 交叉锚索对岩体提供了较大的抗拉、抗剪能力, 从而对岩体抗爆炸成坑具有较强的加固作用; (2) 岩体特征对成坑试件破坏程度有较大影响; (3) 从有加固的试件表面隆起高度上看, 均质和层状岩体试件的都较小, 块状岩体试件的较大; (4) 岩体特征不同, 试件表面的裂缝形态不同; (5) 有加固试件的爆坑平面尺寸均质岩体试件的最小, 块状的较大, 层状的最大。研究结果可为地下防护工程设计和坑道围岩加固提供参考。

**关键词:** 岩石力学; 抗爆炸性能; 模型试验; 加固; 锚索; 岩体特征

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2017)10 - 2441 - 08

## Modeling test on explosion cavity to study anchored surface rock around cavern

XU Gancheng<sup>1</sup>, YUAN Weize<sup>1, 2</sup>, GU Jincan<sup>3</sup>, ZHANG Xiangyang<sup>3</sup>, XIE Xuhu<sup>1</sup>

(1. *The Air Force Engineering Design and Research Institute, Beijing 100068, China*; 2. *Geotechnical Research Institute, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 3. *The Third Engineer Scientific Research Institute of Logistic Support Department, CMC, Luoyang, Henan 471023, China*)

**Abstract:** The homogeneous, layered and block surrounding rocks anchored by crossing cables were studied in two groups of modeling tests to improve the explosive resistivity of country rocks. The macroscopic failure mode, the swelled shape, the distribution of cracks and the size of the explosion cavity of both reinforced and unreinforced surrounding rocks were studied. The research results showed that the crossing cables increased the tension strength and shear strength of rock, the explosive resistivity of country rocks was improved notably. The degree of model destruction was significantly influenced by rock characteristics. For the anchored rocks, the swelled height of the block models are bigger than the ones of homogeneous and layered models. The rock characteristics are the main factors affecting the crack distribution of the models. The size of explosion cavity of the homogeneous model anchored by the crossing cable is the smallest, of the block model is medium, and of the layered rock is the biggest.

**Key words:** rock mechanics; explosive resistivity; model test; reinforcement; anchor cable; rock characteristics

## 1 引言

地下洞库具有抗毁性高、封闭性强、隐蔽性好

等优点。然而, 已建地下洞库受当时技术水平的限制, 抗爆炸能力不足的问题较为突出。目前国内外研究重点是通过采用新结构、新材料的方法来提工程结构的抗力等级, 如采用高强混凝土结构, 或

**收稿日期:** 2016 - 12 - 29; **修回日期:** 2017 - 04 - 11

**作者简介:** 徐干成(1958 -), 男, 博士, 1982年毕业于空军工程学院地下建筑专业, 现任高级工程师、博士生导师, 主要从事地下防护工程方面的研究工作。E-mail: xugancheng\_xgc@163.com; 通讯作者: 袁伟泽(1981 -), 男, 博士, 现任工程师。E-mail: 09ywwzly@tongji.edu.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1646

对地下建筑混凝土衬砌结构采取加固措施, 增强其抗震塌能力<sup>[1-3]</sup>。除了上述方法还包括对岩体进行加固, 提高围岩抗力, 以期提升整个地下工程的抗力等级。在岩土加固领域, 锚索加固技术得到广泛应用<sup>[4]</sup>。在静载条件下, 国内外科研人员对锚索加固性能的研究已比较系统, 相关研究成果得到广泛应用, 而在爆炸荷载条件下, 其抗爆加固机制、设计计算方法及优化设计方法方面存在很多问题有待研究, 从而限制了锚索在爆炸荷载条件下的推广应用<sup>[5]</sup>。为了对锚索及被加固岩体在动载作用下的破坏机制作深入的研究, 国内外研究机构进行了大量喷锚支护爆炸试验, 研究重点是洞室的动态反应及破坏, 岩体加固也是从洞室内部进行的, 而对原岩及被加固原岩的抗爆性能研究不够<sup>[6-11]</sup>, 从而影响了在不破坏洞室内部原有衬砌结构, 对洞室上部岩体从表面进行合理加固这一领域的研究进展及应用。为此, 笔者课题组提出采用交叉锚索对洞库围岩进行外加固的新方法, 并展开了一系列抗侵彻、爆炸试验研究<sup>[12-14]</sup>; 在此基础上, 本文进行了2组爆炸成坑试验来探讨交叉锚索对不同岩体(均质、层状、块状)抗拉、抗剪能力的增强效果以及抗爆炸成坑能力。

## 2 模型试验设计与内容

### 2.1 模型相似比

爆炸试验模型是对实际工程中爆点附近一定范围的岩体介质受力变形状态进行模拟。被选择的模拟范围也称隔离体。爆炸试验模型要与该隔离体在几何、物理及边界条件上保持相似<sup>[15]</sup>。

根据 Froude 相似关系, 当模型试验的重力场与原型相同时  $K_g = 1$ , 选取的模型材料需要满足的基本相似关系式为

$$K_\sigma = K_\rho K_L \quad (1)$$

式中:  $K_\sigma$ ,  $K_\rho$ ,  $K_L$  分别为模型与原型之间应力、密度、几何尺寸的量纲相似比。由于爆炸力比重力大得多, 所以试验中可以忽略重力的影响, 即重力可以取不同的数值, 从而原型和模型的应力、几何尺寸的量纲相似比例系数可独立选取。根据现有模型试验装置条件及材性试验结果, 确定本次试验几何比尺  $K_L = 35/370 = 0.095$ , 密度比尺  $K_\rho = 1.8/2.5 = 0.72$ , 根据弗洛得相似关系及上述2个基本比例系数, 可以求出模型与原型之间其他关键参数的

相似比例系数, 应力相似比例系数:  $K_\sigma = 0.068$ , 集中力比尺:  $K_p = 0.000\ 61$ , 质量比尺:  $K_m = K_\rho K_L^3 = 0.000\ 61$ , 能量相似比尺:  $K_E = K_\sigma K_L^3 = 0.000\ 058$ 。

### 2.2 模型材料选择

#### (1) 炸药

模拟试验中使用的炸药为块状 TNT, 其密度为  $1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

#### (2) 模拟岩体材料

试验选取中等强度岩体(III级)作为原型岩体, 岩体模拟材料采用水泥砂浆。配比为: 水泥: 砂: 水 = 1: 10: 1.1(质量比), 材料的力学参数见表1。

表1 岩体、所需模拟材料及选定模拟材料物理力学参数  
Table 1 Mechanical parameters of rock, required and selected materials

围岩级别	抗压强度 $R_c/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_t/\text{MPa}$	黏聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	变形模量 $E_m/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
原岩(III)	30	0.83~1.4	0.7~1.5	35~45	6.0~20	0.20~0.25	2 500
所需模拟材料	2.04	0.056~0.1	0.05~0.1	35~45	0.41~1.36	0.20~0.25	2 500
选定的模拟材料	2.56	0.43	1.5	41	5.2	0.15	1 820

#### (3) 模拟锚索

按照原型试验与模型试验锚索抗拉强度相似的原则来选取锚索, 模型锚索与原型锚索抗拉强度需满足如下要求:

$$\frac{F_p}{F_m} = \frac{(\sigma_b A)_p}{(\sigma_b A)_m} = K_\sigma K_L^2 \quad (2)$$

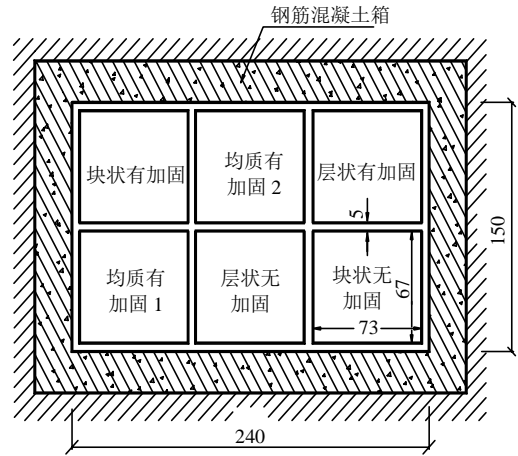
原型锚索为实际工程常用规格锚索, 一个孔内设三束锚索, 每束的规格为  $1 \times 7\phi\ 5 \text{ mm}$  标准钢绞线, 其弹性模量  $E = 196 \text{ GPa}$ , 抗拉强度为  $1\ 860 \text{ MPa}$ , 公称截面面积  $A = 139 \text{ mm}^2$ , 公称直径  $15.2 \text{ mm}$ 。三束钢绞线编制后的面积  $A = 417 \text{ mm}^2$ , 等效直径为  $\phi = 23 \text{ mm}$ 。模拟锚索采用3根直径为  $\phi\ 1.5 \text{ mm}$  的纯铝丝机械绞制而成见图1, 力学性能等相关参数见表2。

原型锚索的注浆体选用配比为水泥: 砂: 水 = 2: 1: 0.8 的水泥砂浆作为注浆材料, 其弹性模量  $E = 10 \sim 15 \text{ GPa}$ , 抗压强度为  $R_c = 30 \sim 40 \text{ MPa}$ ; 试验采用石膏: 水 = 1: 0.65, 石膏注浆体模拟注浆体, 抗压强度为  $5.0 \text{ MPa}$ , 弹性模量为  $4.0 \text{ GPa}$ 。



图 1 模拟锚索

Fig.1 Anchor wire used modeling tests



(b) 第二组成坑试件布置

图 2 2 组成坑试件的布置(单位: cm)

Fig.2 The sample arrangement (unit: cm)

表 2 钢绞线、所需模拟材料及选定铝绞线力学参数

Table 2 Mechanical parameters of cable, required material and selected stranded aluminum wire

锚索类型	变形模量 $E_m/\text{GPa}$	抗拉强度 $R_t/\text{MPa}$	外形	公称直径/ mm	公称面积/ $\text{mm}^2$
钢绞线(原型)	196.0	1 860.0	3 束 $7\phi 5 \text{ mm}$	23.05	417.00
所需模拟材料	13.3	126.5	-	2.19	3.76
铝绞线(模型)	62.6	170.0	$3\phi 1.5 \text{ mm}$	2.60	5.30

### 2.3 试验分组与加固方案

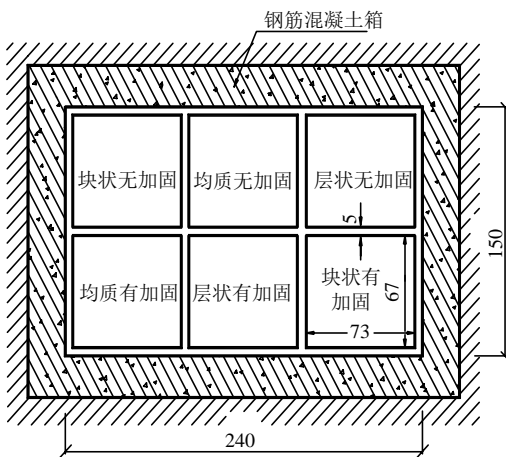
本次试验共做 2 组见图 2。2 组试验内容基本相同，都是对均质、层状、块状岩体进行有交叉锚索加固试件与无交叉锚索加固试件的爆炸成坑对比试验。试验是在抗爆结构模型试验箱中进行的。试验箱尺寸是 150 cm×240 cm×50 cm。将试验箱均等分成 6 份，每份构成一个成坑试件(其尺寸为 67 cm×73 cm×50 cm)，试件与试件之间用 5 cm 厚的黄土隔

开，以消除相邻爆炸的影响。试验中炸药均埋在试件中心 20 cm 深度处。试验中层状模型软弱面的处理方法是：当模型材料达到设计厚度时不对上表面进行拉毛处理并在上表面撒一薄层干砂，以降低与下一次夯筑材料的黏结强度和黏接面积；块状模型软弱面的处理方法是：除与层状模型软弱面的处理方法相同外，还需按照一定的角度和间距在材料上表面划深度约 5 cm 的缝，并在缝隙内撒干砂，从而将该层模型材料分割为若干小块。

2 组试验的区别是药量不同，第一组试验药量为 10 g，第二组试验药量为 15 g。由于第一组试验时均质无筋试件产生了严重破坏，而其他各有筋试件只产生轻微破坏，为了使各有筋试件也产生明显破坏，故在第二组试验中未再进行均质无加固试件的试验。在图 2 中标有均质加固 1 的试件是第一组试验结果，均质加固 2 是第二组试验结果。

锚索在成坑试件内的布置见图 3，锚索成排布置，排与排之间间距 5 cm，每排内锚索间距也为 5 cm，前后两排锚索倾斜方向相反，但锚索轴线均与岩面法线成 45° 夹角。锚索倾斜方向均为 SN 向，即沿成坑试件的长边方向。

成坑试件中的模拟锚索注浆时先将模拟锚索插入注射器外连的注浆管中，然后将注浆管与模拟锚索一同插入锚索孔内(见图 4)，从锚索孔底部开始注浆，边注边拔注浆管，但模拟锚索不动。直到整个锚索孔注满浆为止。然后保持锚索不动，硬化 7 d 后进行试验。



(a) 第一组成坑试件布置

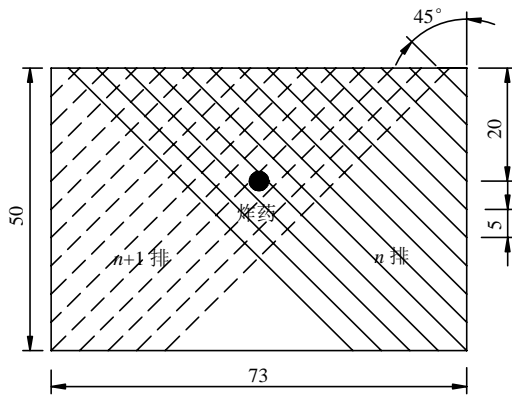


图3 锚索布置方案(单位: cm)

Fig.3 Arrangement of crossing cable(unit: cm)



图4 模拟锚索安装与注浆

Fig.4 The installation of and grouting on crossing cable

### 3 试验成果分析

#### 3.1 试件表面宏观破坏形态比较

2组试验试件表面宏观破坏形态见图5, 6。

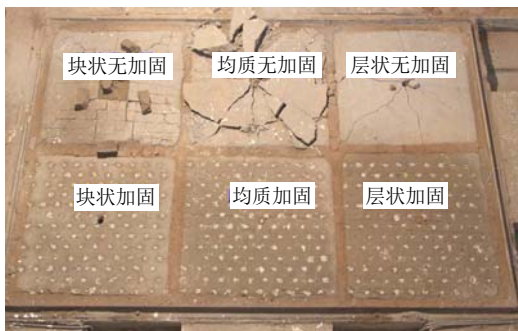


图5 第一组成坑试件破坏形态(W = 10 g)

Fig.5 The damage shapes of the first group (W = 10 g)

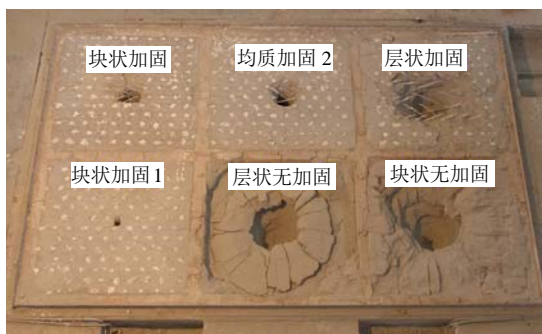


图6 第二组成坑试件破坏形态(W = 15 g)

Fig.6 The damage shapes of the second group(W = 15 g)

由图5, 6可知: (1) 在第一组试验的无加固试件中, 均质岩体试件表层碎裂成几个大块, 层状岩体表层产生几条放射状(径向)裂缝, 块状岩体试件表层产生多条块体之间的裂缝。对于各加固试件, 均在表层产生多条近似放射状裂缝, 未见块体脱落现象。这反映了交叉锚索对各成坑试件都有明显的加固效果。(2) 在第二组试验中, 不仅各无加固试件均产生了严重的表面宏观破坏形态(均质无加固试件未列在其中), 各加固试件也产生了较严重的表面宏观破坏形态。但其破坏规律仍然是无锚固试件破坏严重, 各锚固试件破坏轻微, 这再一次表明交叉锚索对各成坑试件都有明显的加固效果。综合第一、二组试验的破坏现象可知, 交叉锚索可对爆坑的内岩体提供较大的拉、剪抗力, 从而对岩体起到加固作用。(3) 从各试件破坏程度上看, 对于无加固试件, 只能在小药量作用下进行对比, 因为在大药量作用下都产生严重破坏无法区别轻重程度; 而对各加固试件只能在大药量作用下进行对比, 因为药量较小时各加固试件破坏程度轻微, 也不便比较其轻重程度。因此, 对于无加固试件破坏程度的比较用 10 g 的 TNT 炸药的试验结果(见图5)。在小药量荷载作用下, 均质岩体的破坏程度较重、层状和块状岩体的破坏程度较轻。对各加固试件破坏程度的比较用 15 g 的 TNT 炸药的试验结果(见图6)。在较大药量荷载作用下, 层状岩体破坏程度较重, 而均质和块状岩体破坏程度较轻; 2 块均质岩体试件在不同药量爆炸下, 其破坏形态基本相同, 只是破坏程度有差别, 药量大破坏重, 药量小破坏轻。

在同样爆炸威力作用下, 关于无加固试件破坏程度的轻重, 主要由 2 种因素决定, 一是试件本身材料强度高, 材料强度越高, 破坏程度越轻, 反之亦然; 二是爆炸时岩体中泄露的能量多少, 显然, 爆炸能量泄露的多, 破坏程度就轻<sup>[16-17]</sup>。均匀性好的匀质岩体泄露的爆炸能量少, 而层状和块状等不均匀岩体泄露的爆炸能量多。而对于加固试件破坏程度的轻重, 除上述 2 个因素外, 岩体与模拟锚索的黏结性能也是决定试件破坏程度的因素之一。均质加固试件破坏程度最轻, 可能是因为它自身整体强度高, 同时岩体与锚索黏结性能较好产生的, 虽然它相比于层状、块状岩体泄露的爆炸能量少, 但对于加固岩体爆炸能量可能占了次要地位。综合分析上述 2 种爆炸荷载条件下试件破坏的严重程度可知, 岩体的材料强度、爆炸能量的泄露多少以及与锚索的黏结性能可能是造成上述结果的主要原因。

为了更清楚地说明交叉锚索对岩体试件的加固效果，还对第二组试验中层状和块状同种岩体各试件之间宏观破坏形态比较，见图 7。

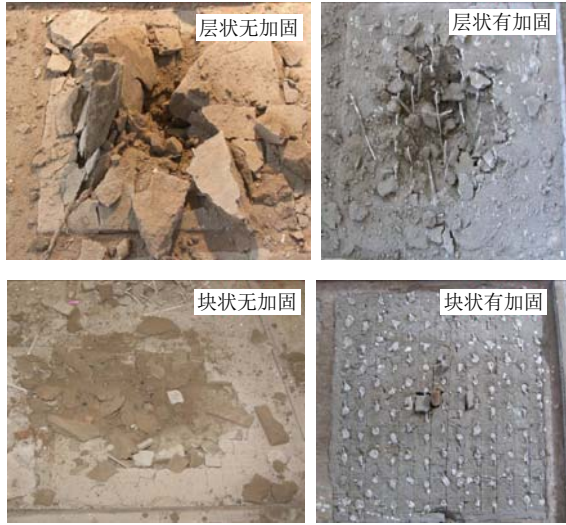


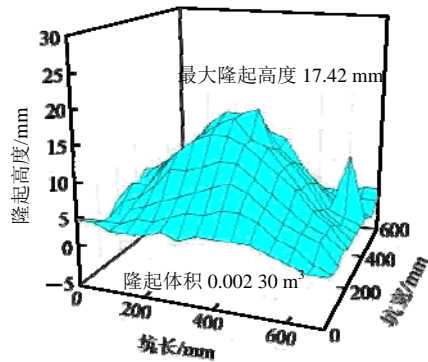
图 7 第二组试件宏观破坏形态对比

Fig.7 The comparison of macroscopic damage shapes of the second group

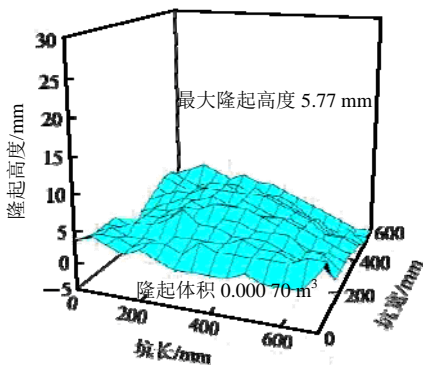
### 3.2 试件表面表面隆起形态对比

爆炸试验完成后，用水平尺及钢尺每隔 5 cm 测量出对应点的隆起高度，然后根据测得的数据，应用绘图软件，绘制出各试件表面的隆起形态。

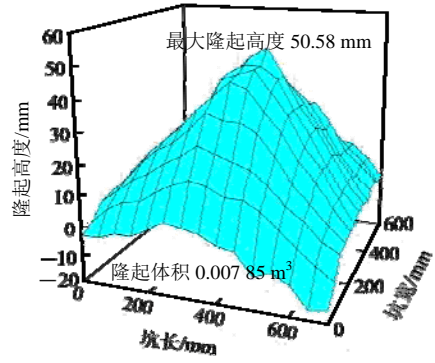
图 8 是第一组试验结果各试件的隆起形态(图



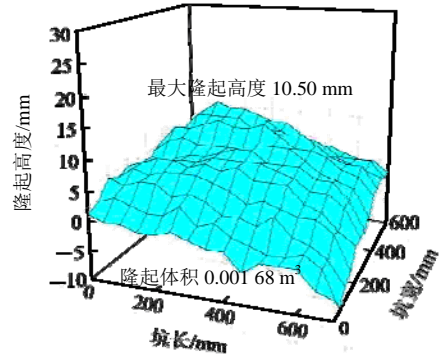
(a) 层状无加固试件



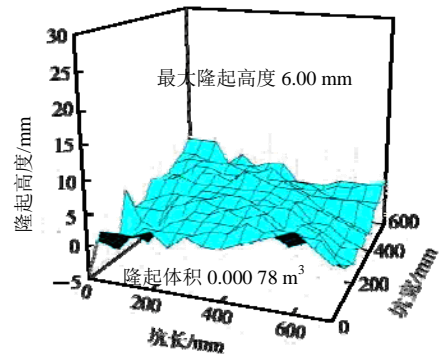
(b) 层状有加固试件



(c) 块状无加固试件



(d) 块状有加固试件



(e) 均质有加固试件

图 8 第一组试件表面隆起形态

Fig.8 The swell shape of first group

中未给出均质无加固试件表面的隆起形态图，因其破坏严重，无法对其进行高度测量)，图中不仅给出了试件表面的隆起形态，还给出了最大隆起高度和隆起体积(见图示数值)。

由图 8 中可以看到各试件的隆起形态有其共性，即各试件隆起都是中间高，四周低，但不同试件隆起的高度互有差别。从同种岩体试件来看，不加固的比加固的试件隆起的高度大；从不同种岩体加固试件来看，块状岩体的最大，均质的次之，层状的最小。例如，从有加固试件最大隆起高度来看，块状岩体的是 10.50 mm，层状的是 5.77 mm，均质的是 6.00 mm。无加固岩体试件最大隆起高度：块

状岩体的是 50.58 mm，层状岩体的是 17.42 mm。前者是后者的 2.9 倍。上述岩体表面隆起高度大小看与各试件表面宏观破坏形态严重程度是基本一致的。

图 9 为第二组试验中均质和块状有加固试件表面隆起形态图。将其与图 8 中均质和块状岩体试件表面隆起图相比较可以看出，当爆炸药量由 10 g 增加到 15 g 时，均质和块状有加固试件的隆起高度，分别由 6.00，10.50 mm 增加到 9.00 和 14.96 mm，反映出随着药量的加大隆起高度也有显著的增加。

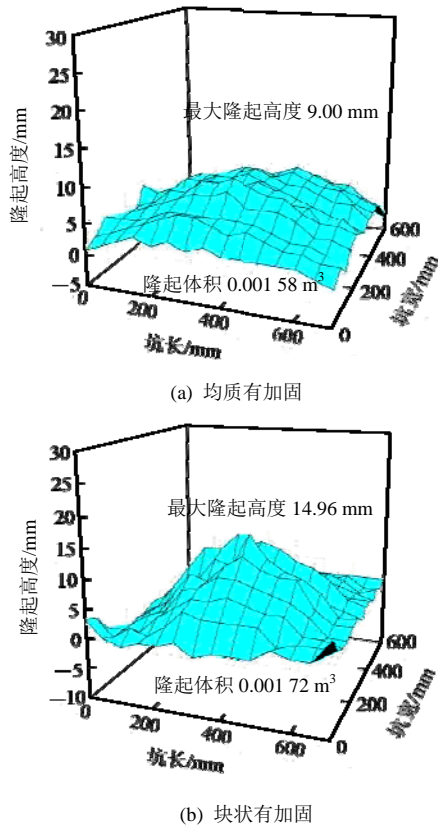


图 9 第二组试验中 2 个试件表面隆起形态

Fig.9 The swell shapes of second group

### 3.3 试件表面裂缝开裂形态对比

为了进一步对比各试件的破坏程度，又用绘图软件绘制出各试件表面岩体裂缝开裂形态，见图 10，11。图中未给出均质无加固试件表面裂缝开裂图，原因同上。

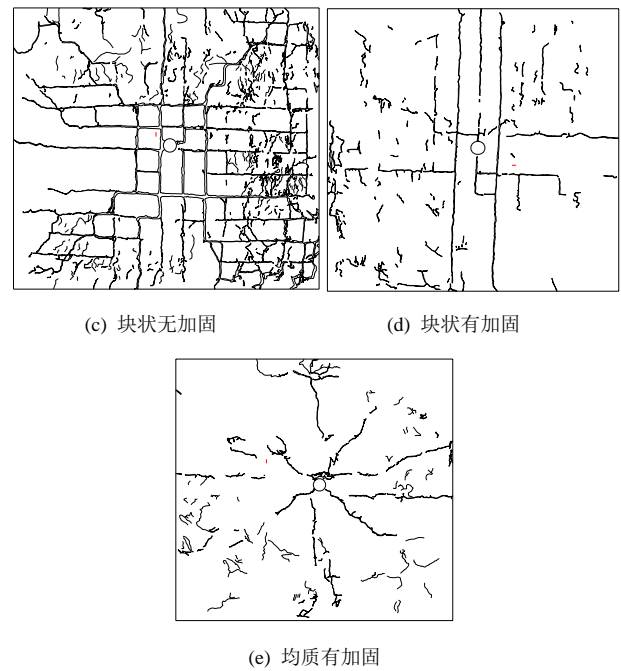
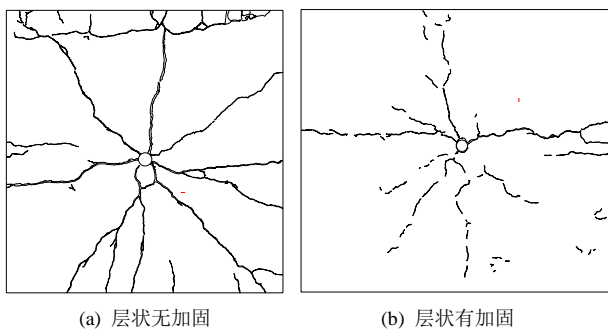


图 10 第一组试件表面裂缝开裂形态

Fig.10 The crack distributions of first group

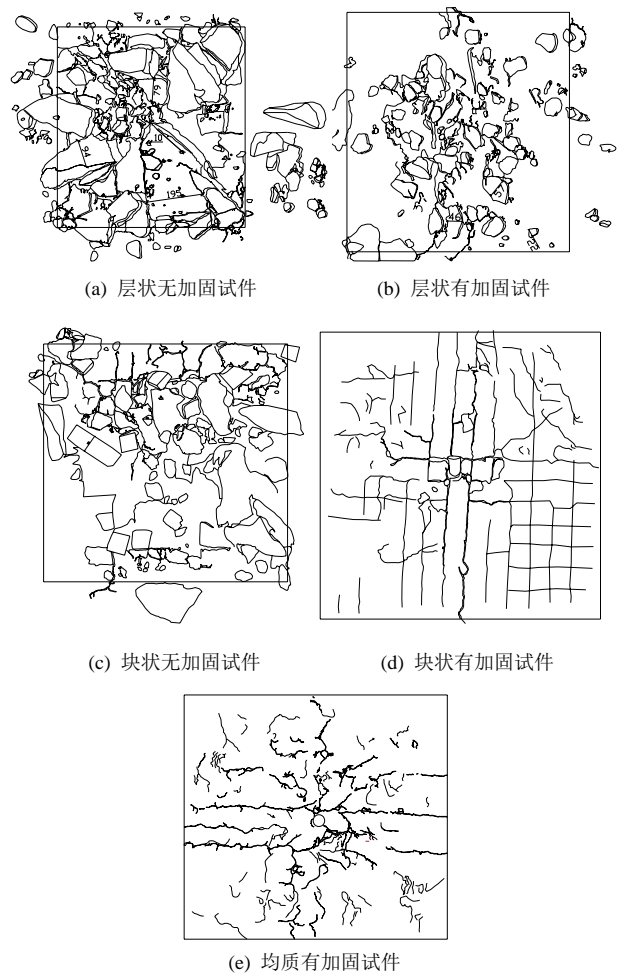


图 11 第二组试件碎块与裂缝分布形态

Fig.11 The crack distributions of second group

由图 10 可以看出：(1) 各加固试件裂缝的开裂

程度和数量明显轻于无加固试件的；(2) 均质和层状岩体试件表面的开裂基本上呈放射状，块状岩体试件表面的开裂缝大多数是沿着块与块之间的接触缝发展的。

从图 11 中可以看出：(1) 均质加固试件表面裂缝较多，但没有碎块。(2) 层状加固试件表面裂缝少，但碎块多，层状无加固试件表面碎块尺寸小，数量少。(3) 块状加固试件表面裂缝少，且裂缝形态基本与块体分割缝相重合，表面没有碎块；但块状无加固试件表面碎块多且尺寸大。

### 3.4 爆坑尺寸对比

将各试件爆坑进行清理其爆坑尺寸见图 12，由图 12 可知：对于无加固试件，破坏都很严重，爆坑尺寸不好比较。但各加固试件的爆坑轮廓清楚可见，故可进行其大小比较。从宏观上看，爆坑平面尺寸均质岩体试件的最小，块状的较大，层状的最大，这表明在 3 种典型岩体中层状岩体的受力最为不利。这可能是由于层状岩体强度比均质岩体低，爆炸泄漏的能量又比块状少造成的。3 种岩体试件其爆坑深度基本相同，均为 25.5 cm 左右。

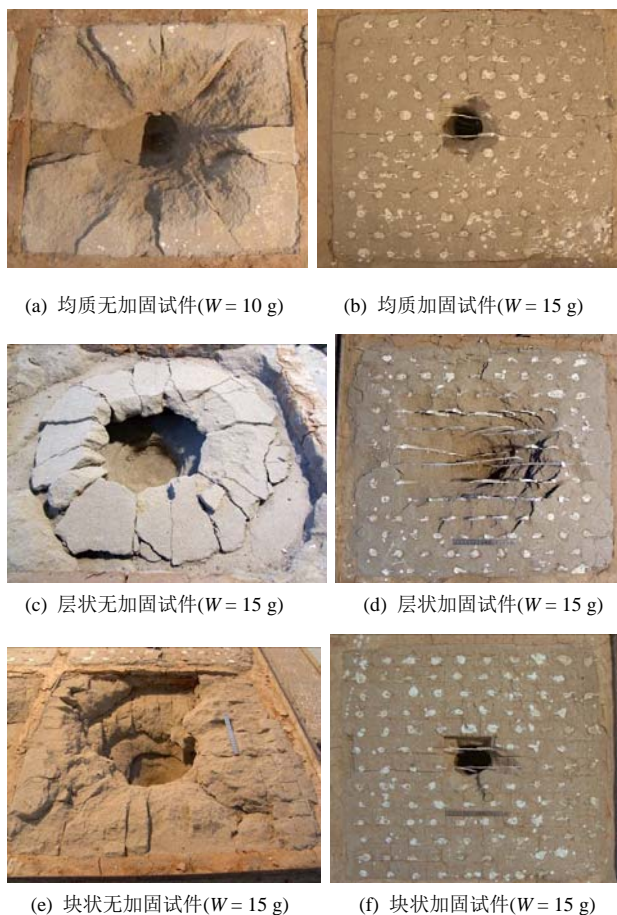


图 12 各试件爆坑尺寸

Fig.12 The explosion cavity sizes of samples

## 4 结 论

(1) 所有加固试件均比对应无加固试件破坏程度轻，反映出交叉锚索对岩体成坑具有较强的加固作用，这种加固作用是因为交叉锚索可对岩体提供较大的抗拉和抗剪能力产生的。

(2) 岩体特征对成坑试件破坏程度有较大影响，试验表明，对于无加固的试件，其破坏程度是均质岩体的最重，块状岩体的次之，层状岩体的最轻。对于有加固的试件，其破坏程度是层状岩体的最重，块状岩体的次之，均质岩体的最轻。

(3) 决定爆炸成坑试件破坏程度轻重的主要因素：一是岩体自身强度，二是岩体泄漏爆炸能量的多少，三是岩体与模拟锚索的黏结性能，三者的组合结果确定了试件的破坏程度。均质加固试件破坏程度最轻，可能就是因为它自身整体强度高与模拟锚索黏结性能较好产生的，虽然它相比于层状块状岩体泄漏的爆炸能量少，但该因素可能占了次要地位。

(4) 从加固的试件表面隆起高度上看，均质和层状岩体试件的都较小，块状岩体试件的较大。

(5) 岩体特征不同，试件表面的裂缝形态不同，均质和层状岩体试件其表面裂缝基本呈由爆心向外的放射状；而块状岩体试件表面裂缝一般是沿块与块的交接线发展。

(6) 通过比较加固试件爆坑的平面尺寸可知均质岩体试件的最小，块状岩体试件的较大，层状岩体试件的最大，表明在 3 种典型岩体中层状岩体的受力最为不利。

上述结论仅是通过本次试验得到的，如果要获得规律性、机制性的认识还需要进行大量试验的深入研究。

### 参考文献(References):

- [1] 杨自友. 锚固洞室的抗爆性能研究[博士学位论文][D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.(YANG Ziyou. Study on the anti-detonating characteristics of underground opening reinforced by rock bolts[Ph. D. Thesis][D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008.(in Chinese))
- [2] TANNANT D D, BRUMMER R K. Rock bolt behavior under dynamic loading field tests and modeling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, 32(6): 537 - 550.

- [3] ANDERS A. Laboratory testing of a new type of energy absorbing rock bolt[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, 20(4): 291 - 300.
- [4] 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 Congyan, ZHUO Jiashou. Experimental study actuality of rock bolts reinforcement mechanism[J]. *Journal of Hohai University: Natural Science*, 2005, 33(6): 696 - 700.(in Chinese))
- [5] 张亮亮. 抗爆洞室不同部位预应力锚索受力特征研究[博士学位论文][D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.(ZHANG Liangliang. Study on stress character of prestressed anchorage in different regional antiknock chamber effected[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.(in Chinese))
- [6] 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 Ziyong, GU Jincai, CHEN Anmin, et al. Model experiment study on influences of reinforcement on intervals of rock bolts in surrounding rock under explosive waves[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(4): 757 - 764.(in Chinese))
- [7] 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.
- [8] 陈剑杰, 孙 钧, 林俊德, 等. 强爆炸应力波作用下岩石地下洞室的破坏现象学[J]. *解放军理工大学学报*, 2007, 8(6): 582 - 588.(CHEN Jianjie, SUN Jun, LIN Junde, 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.(in Chinese))
- [9] 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.(WANG Guangyong, GU Jincai, CHEN Anmin, 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))
- [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2): 3 749 - 3 756.(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.2): 3 749 - 3 756.(in Chinese))
- [11] 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): 2 182 - 2 186.(XU Jingmao, GU Jincai, CHEN Anmin, 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): 2 182 - 2 186.(in Chinese))
- [12] 徐干成, 顾金才, 张向阳, 等. 地下洞库围岩外加固抗炸弹侵彻性能研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(10): 2 064 - 2 070.(XU Gancheng, GU Jincai, ZHANG Xiangyang, et al. Penetration resistivity research on anchored cavern surface rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(10): 2 064 - 2 070.(in Chinese))
- [13] 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): 1 078 - 1 085.(XU Gancheng, GU Jincai, Yuan Weize, 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): 1 078 - 1 085.(in Chinese))
- [14] 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): 1 767 - 1 776.(XU Gancheng, YUAN Weize, GU Jincai, et al. Explosive resistivity research on anchored Cavern surface rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(9): 1 767 - 1 776.(in Chinese))
- [15] 王光勇. 提高锚固洞室抗爆能力技术措施研究[博士学位论文][D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.(WANG Guangyong. Technic study on enhancing the explosion resisting capacity of underground opening reinforced by rockbolts[Ph. D. Thesis][D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.(in Chinese))
- [16] 张志呈, 王 刚, 杜云贵. 爆破原理与设计[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1992: 31 - 32.(ZHANG Zhicheng, WANG Gang, DU Yungui. Principle and design of blasting[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1992: 31 - 32.(in Chinese))
- [17] 吴 亮, 卢文波, 宗 琦. 岩石中柱状装药爆炸能量分布[J]. *岩石力学*, 2006, 27(5): 735 - 739.(WU Liang, LU Wenbo, ZONG Qi. Distribution of explosive energy consumed by column charge in rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(5): 735 - 739.(in Chinese))