DOI: 10.11883/bzycj-2017-0144
文章编号: 1001-1455(2018)06-1333-11

大当量浅埋地下爆炸抛掷成坑效应的缩比模拟实验装置*

徐小辉[1,2],邱艳宇[1,2],王明洋[1,2],邵鲁中[2]
(1.南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094;
2.陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室,江苏 南京 210007)

摘要: 针对当前地下爆炸物理模型实验无法模拟大当量地下爆炸抛掷弹坑和疏松鼓包现象的难题,基于相似理论,采用地下爆炸效应真空室模型实验方法,研制了考虑重力影响的大当量地下爆炸效应模拟实验装置。整套装置由容器罐体、快开门密闭机构、爆源系统、真空泵组、量测控制系统等组成,提出的新型爆源模拟装置可以实现精确起爆控制。该装置可模拟 0.1～100 kt TNT、埋深 20～400 m 范围内不同比尺的地下核爆炸成坑和隆起实验,同时也能够模拟不同装药配置方案、不同地质条件下的大当量地下浅埋化爆抛掷实验。典型的核爆抛掷成坑模型实验结果表明,装置实验参数精确可调,实验过程可控,实验结果可信,为钻地核武器地下爆炸毁伤效应分析和大型工程爆破效果预测预报提供了实验室模拟和科学研究设备,填补了爆炸离心机无法模拟大当量地下爆炸抛掷成坑效应的空白。

关键词: 大当量浅埋爆炸;相似模型实验;装置研制;地下核爆炸;工程爆破
中图分类号: O382.2;TP91 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

近年来,巨型钻地武器和小型钻地核导弹的研制和使用受到高度重视,其爆炸效应与大当量地下浅埋爆炸现象相似,揭示大规模地下爆炸效应的规律和破坏特征,可为地下防护工程的优化和钻地武器战斗部的研发提供参考。

对于大当量地下爆炸的研究对象——天然岩体而言,爆炸作用下岩石抛掷弹坑的形成受到爆炸当量、爆炸源能量的高密度、核弹围岩的特性以及岩块和地质构造的影响,对于这样复杂的物理过程,通过理论分析、数值模拟完成爆炸作用力学参数的计算还存在很大困难,而现场实地实验也受到场地、人力物力的限制难以开展系统研究。采用相似物理模拟实验的方法可以研究地下爆炸过程中各种影响因素对弹坑和鼓包形成的影响,实验成本低、周期短,是目前条件下获取钻地核爆和大当量地下爆炸过程影响因素量化指标的有效手段。

当前关于地下浅埋爆炸的物理模拟实验主要采用土工离心机爆炸模拟装置和真空室爆炸模拟装置,土工离心机尽管在小当量、浅埋深爆炸模拟方面具有明显的优势,但是造价昂贵、实验成本高,受到离心机加速度和模拟装药当量的限制,模拟比尺有限,只适用于一定规模的地下爆炸效应研究[1-3]。真空室爆炸模拟装置最早由前苏联地球物理研究所的 M. A. Sadovskii 等[4]和 V. V. Adushkin 等[5-6]报道,他们研制了用于研究核爆炸和化学爆炸抛掷成坑的真空室模拟装置,该装置直径 2.3 m、高 3 m、体积 12 m^3,模拟比尺从 1∶100 到 1∶1 000,真空室内置 1～10 个爆炸源,可瞬时爆炸或延迟爆炸,爆源装置采用球形镍铬丝金属栅格内置薄壁橡胶气囊做成,通过低压电流加热镍铬丝烧裂橡胶球达到释放压缩气体的目的。但是,这种起爆方式不仅镍铬丝的加热时间长短不可控,对于多组爆源的延期起爆也无法做到精确起爆控制,而且橡胶气囊很可能随机地从某处开一裂口造成喷出气体的不均匀,对实验结果造成影响。20 世纪 90 年代,Y. S. Vakhrameev[7]和 I. M. Blinov 等[8-9]发展了自然重力场中大当量抛掷

* **收稿日期**: 2017-05-02; **修回日期**: 2017-09-18
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51409257)
第一作者: 徐小辉(1983—),男,硕士,讲师,xuxiaohui168@126.com。

爆炸的真空室实验技术，研究了抛掷爆炸弹坑及疏松鼓包的形成机制，其爆源采用的是 0.2 g 微型炸药，但是如何制作毫克级微型炸药并保证其性能稳定是一个关键技术难题。

综上所述，国内尚未有大当量地下爆炸效应模拟实验装置的相关报道，国外此类装置尽管起步早，但是整套装置自动化程度低，量测技术落后，爆源装置的起爆控制也有待升级改进。本文中以大当量地下爆炸真空室模拟方法为基础，自主设计研制用于地下浅埋爆炸抛掷成坑效应缩比模拟的实验系统，提出一种新型爆源装置，采用柔性导爆索传爆震碎玻璃球罩的方式实现爆源的精确起爆控制。

1 设计原理

本实验装置以化爆实验中建立的抛掷岩石爆炸能量转移机制为物理模拟基础，把大当量地下爆炸成坑过程看作爆炸气状生成物推出碎裂岩石的结果，主要模拟与弹坑形成和岩石移动相关的气体加速阶段和惯性抛掷阶段，而冲击波作用阶段已经结束，此时已知爆炸腔体的大小，腔体周围岩石受到破坏，模型的初始参数为爆腔的大小和腔体气体能量。地下爆炸弹坑的主要特征参数包括：弹坑半径 R、深度 H、体积 V、拱顶最大质点速度 v_{m} 以及气体加速运动时间 t_{m}。该模型的支配参数为爆炸源、破碎岩石介质和外部环境的特性，爆源的关键参量为空腔半径 r_{n}、腔体气体能量 E(或压力 P)、装药埋深 h、绝热线参数 χ；对于岩石的抛掷过程，忽略介质的压缩性，破碎岩石的关键参数为密度 ρ、岩块间的摩擦因数 k_{T}、破碎岩块脱离母岩的内聚力 c；外部环境参数包括重力加速度 g 和自由面大气压 P_{a}。根据相似理论量纲分析法[10]，M. A. Sadovskii 等[4]最早给出了描述弹坑形成发展过程与抛掷岩石初始条件和特性间的关系式为：

$$\begin{cases} \dfrac{R}{h}=f_1\left(\dfrac{E}{\rho g h^4},\quad \dfrac{E}{P_{\mathrm{a}}h^3},\quad \dfrac{E}{ch^3},\quad \dfrac{h}{r_{\mathrm{n}}},\quad k_{\mathrm{T}},\quad \chi\right) \\ \dfrac{H}{h}=f_2\left(\dfrac{E}{\rho g h^4},\quad \dfrac{E}{P_{\mathrm{a}}h^3},\quad \dfrac{E}{ch^3},\quad \dfrac{h}{r_{\mathrm{n}}},\quad k_{\mathrm{T}},\quad \chi\right) \\ \dfrac{v_m^2}{gh}=f_3\left(\dfrac{E}{\rho g h^4},\quad \dfrac{E}{P_{\mathrm{a}}h^3},\quad \dfrac{E}{ch^3},\quad \dfrac{h}{r_{\mathrm{n}}},\quad k_{\mathrm{T}},\quad \chi\right) \\ \dfrac{gt_m^2}{h}=f_4\left(\dfrac{E}{\rho g h^4},\quad \dfrac{E}{P_{\mathrm{a}}h^3},\quad \dfrac{E}{ch^3},\quad \dfrac{h}{r_{\mathrm{n}}},\quad k_{\mathrm{T}},\quad \chi\right) \end{cases} \tag{1}$$

根据相似准数恒定的要求，各物理量相似常数之间的关系为：

$$\frac{\alpha_E}{\alpha_\rho \alpha_g \alpha_h^4}=1,\quad \frac{\alpha_E}{\alpha_{P_{\mathrm{a}}}\alpha_h^3}=1,\quad \frac{\alpha_E}{\alpha_c\alpha_h^3}=1,\quad \frac{\alpha_h}{\alpha_{r_{\mathrm{n}}}}=1,\quad \alpha_{k_{\mathrm{T}}}=1,\quad \alpha_\chi=1 \tag{2}$$

设线性几何比尺 $\alpha_h=\alpha_{r_{\mathrm{n}}}=1/N$，采用与原型材料相等密度的模拟材料，如果实验在惯性力场中进行，即 $\alpha_\rho=1$，$\alpha_g=N$，由关系式(2)得：

$$\alpha_{r_{\mathrm{n}}}=\alpha_h=\frac{1}{N},\quad \alpha_{P_{\mathrm{a}}}=1,\quad \alpha_c=1,\quad \alpha_E=\alpha_h^3=\frac{1}{N^3},\quad \alpha_{k_{\mathrm{T}}}=1,\quad \alpha_\chi=1 \tag{3}$$

如果实验在自然重力场中进行，即 $\alpha_\rho=1$，$\alpha_g=1$，由关系式(2)得：

$$\alpha_{r_{\mathrm{n}}}=\alpha_h=\frac{1}{N},\quad \alpha_{P_{\mathrm{a}}}=\frac{1}{N},\quad \alpha_c=\frac{1}{N},\quad \alpha_E=\alpha_h^4=\frac{1}{N^4},\quad \alpha_{k_{\mathrm{T}}}=1,\quad \alpha_\chi=1 \tag{4}$$

由关系式(1)可知，当忽略重力对抛掷弹坑的影响时，即不考虑参数 $E/(\rho g h^4)$，就得到了爆炸几何相似律，即爆炸能量比尺是线性比尺的 3 次方，其必要条件为 $\rho g h$ 与 P_a 和 c 相比数值要小，属于小当量浅埋爆炸情形；当爆炸当量增大时，蕴含能量的主要参数是 $E/(\rho g h^4)$，该参数的作用将随着爆炸当量的增大而增大，此时爆炸能量比尺是线性比尺的 4 次方(式(4))。钱七虎[11]通过抛掷爆破原型实验与模型实验数据对比分析指出，重力在大型爆破特别是软弱岩层形成漏斗坑时起决定性作用。为了在模型实验中再现大当量抛掷爆炸，当材料密度变化不大时，有两种方式实现模型和实物中各量纲的对等关系，其中一种就是利用离心机使实验场中的惯性加速度增加到重力加速度的 N 倍，而模拟材料采用原型材料。另一种方式就是使用相似材料，让模型中自由面气压变为大气压力的 $1/N$，内聚力为原型材

料的 $1/N$，从而使参数 $E/(P_a h^3)$ 和 $E/(ch^3)$ 的影响降至最低，保证了支配参数 $E/(\rho g h^4)$ 的决定性作用。

以上述相似理论为基础，在大当量地下爆炸效应模拟装置的设计中，爆炸源采用充有一定体积压缩气体的空腔模仿真实条件下充满气状生成物的地下爆炸腔体。通过对密闭容器抽真空，降低模型材料自由面的大气压力 P_a，采用与原型材料密度相近的散体材料如细石英砂，减小模拟材料的内聚力值 c。这样将石英砂放置在真空室中，石英砂内一定深度处放置充有压缩气体的球壳，当球壳破裂后，释放的压缩气体把石英砂推挤出去，形成飞散弹坑，整个抛掷过程由高速摄影机记录。整套装置的设计原理图如图 1 所示。

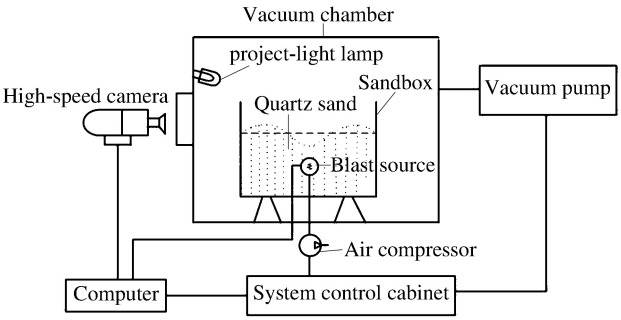


图 1　地下爆炸真空室模拟装置设计原理示意图

Fig. 1　Schematic diagram of experimental apparatus

2　实验装置研制

根据装置的设计原理，自主研制了大当量地下爆炸效应模拟实验装置（见图 2～3），主要由容器罐体、快开门密闭机构、爆源系统、真空泵组、量测控制系统组成，其中爆源系统为整个装置的核心。



图 2　地下爆炸效应模拟装置容器系统图

Fig. 2　Container of underground explosion effect simulation

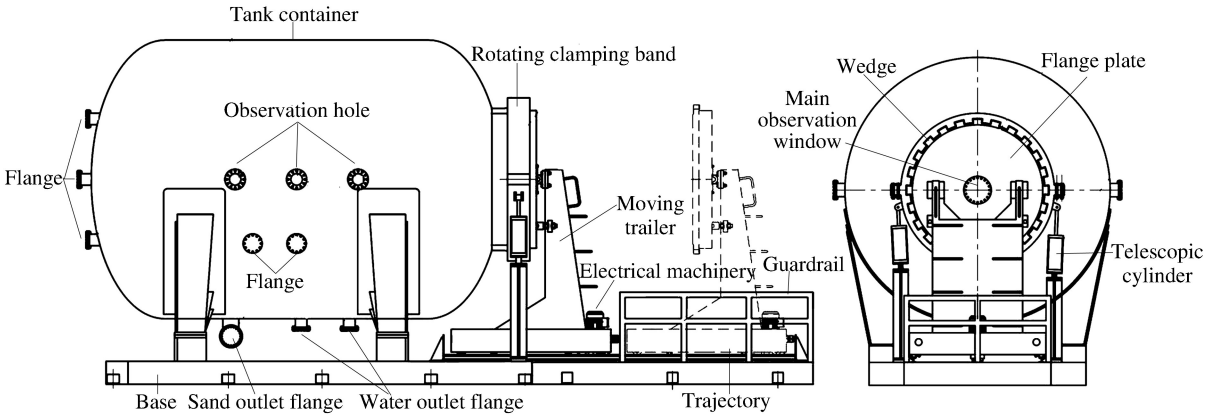


图 3　地下爆炸效应模拟装置主体结构示意图

Fig. 3　Main structure of underground explosion effect simulation container

2.1　容器罐体

容器罐体为整个装置的主体，是样品试件和其他系统的搭载平台，主要包括基座、罐体和辅助设备。基座是整个装置的支撑部件，为保证容器罐体的整体稳定性，基座基础由钢筋混凝土浇筑而成。罐体主体结构采用卧式设计，尺寸为∅3.0 m×3.93 m，由不锈钢板和 Q345R 容器板组成的复合钢板加工而成。罐体外部缠绕隔音材料和玻璃钢层，内部放置模型沙箱，罐体一端有直径为 1.5 m 的法兰盘，法兰盘中心有直径为 20 cm 的观察窗口，用于样品的进出和高速摄影的观察。辅助设备包括轨道、护栏和各类标准法兰接管，用于测控线缆、起爆线缆的进出。罐体的承压指标为：绝对气压 0.2 MPa，绝对水压 0.3 MPa。

2.2 快开门密闭机构

快开门密闭机构主要用于实现容器罐体的快速开启和密闭，由法兰盘、移动小车、旋转卡箍、伸缩气缸和空压机等组成(见图 3)。法兰盘置于移动小车上，通过电机驱动小车前后移动实现法兰盘与容器罐体的分开和闭合。采用齿啮式卡箍连接结构实现法兰盘和容器罐体的密闭连接。旋转卡箍两端与气动伸缩杆相铰连，气动伸缩杆的另一端固定在基座上，并通过换向电磁阀、气管与空压机相连。旋转卡箍和法兰盘外圆周方向上有均匀分布的楔块，两者楔块的倾斜方向相反，当空压机压力达到一定值时，气动伸缩缸驱动旋转卡箍转动一定角度，法兰盘楔块和卡箍楔块之间利用斜面摩擦自锁原理实现旋转卡箍的锁紧和错开，达到容器罐体密闭和承压的功能要求，旋转卡箍旋转角度的大小由气动伸缩杆的伸缩行程控制。

2.3 爆源系统

2.3.1 爆源初始参数设计

为了对模型中抛掷弹坑大小的关系式、运动发展变化参数和现场爆炸的数据进行对比，本装置爆源的初始参数为地下爆炸空腔形成完成时空腔的大小和气体生成物的能量信息。对于不同类型的岩石，爆炸空腔半径大小 r_n 满足几何相似律：$r_n=\bar{r}_n q^{1/3}$，其中 q 为等效 TNT 当量，比例系数 $\bar{r}_n$ 为弹药围岩的强度和弹性参数的函数。根据大当量地下爆炸腔体大小的经验公式[13]有，凝灰岩：$\bar{r}_n=16.2$；冲积层：$\bar{r}_n=15$；白云岩：$\bar{r}_n=9.2$；内华达花岗岩：$\bar{r}_n=11.1$；撒哈拉花岗岩：$\bar{r}_n=7.3$；超过 100 kt 当量的凝灰岩和冲积层：$\bar{r}_n=70/(\rho g h)^{1/4}$；当爆炸发生在硬岩中且无腔体大小记录时，可根据岩石的强度和弹性特性计算：$\bar{r}_n=354.6/(\rho c_P^2\sigma_*^2)^{1/9}$，其中 c_P 为纵波速度，σ_* 为抗压强度。

本装置物理模拟方法中，采用空腔气体压力 P 膨胀到自由面气体压力 P_a 时的势能 A 来表征气体抛掷破碎岩石的能量[13]，其与空腔气体能量 E、压力 P、空腔体积 V_n 和气体绝热指数 χ 之间的关系为：

$$\frac{A}{E}=1-\left(\frac{P_a}{P}\right)^{\frac{\chi-1}{\chi}},\quad E=\frac{PV_n}{\chi-1} \tag{5}$$

不同岩石中地下爆炸空腔气体势能 A 的计算表达式[13]见表 1，其中 η_w 为岩石的含水量，η_{CO_2} 为岩石的含气量，η_m 为岩石的混合含气量。

表 1 地下爆炸空腔气体势能计算表达式

Table 1 Formula for the energy of the gas potential energy of the cavity in underground explosion

岩石特性	空腔气体势能
不含气体岩石	$A=0.49q/\bar{r}_n^{0.84}$
仅含自由水的硅酸盐类岩石(适用于花岗岩、凝灰岩、冲积层等岩石)	$A=\frac{0.49q}{\bar{r}_n^{0.84}}(1+5.8\eta_w^{0.7})$
仅含碳酸气的碳酸盐类岩石(适用于硬石膏、方解石、石灰岩等岩石)	$A=\frac{0.49q}{\bar{r}_n^{0.84}}(1+1.96\eta_{CO_2}^{0.7})$
混合含气岩石	$A=\frac{0.49q}{\bar{r}_n^{0.84}}(1+5.8\eta_m^{0.7})$，$\eta_m=\eta_w+\eta_{CO_2}/4.7$

这样，不同岩石中地下爆炸空腔大小 r_n 和气体生成物能量 A 就作为模型实验的两个已知参数。当采用半径为 r 的球壳模拟爆炸空腔时，模拟比尺为 $N=r_n/r$，根据能量比尺关系确定模型中的气体势能 $(A)_M=(A)_P/N^4$(下标 P 表示实物中的参数，下标 M 表示模型中的参数)，利用式(5)就可以确定模型中球壳内气体的压力 $(P)_M$。

2.3.2 爆源装置研制

爆源装置由玻璃球罩、柔性导爆索、电雷管、起爆器、空压机、真空泵、电磁阀以及密封连接构件组成(见图 4)，各部件连接设计原理如图 5 所示。采用薄壁玻璃球罩模拟爆炸空腔(见图 6)，玻璃球中心处内置一定长度的螺旋状柔性导爆索，利用导爆索爆炸产生的冲击波击碎玻璃球罩，从而达到释放压缩气体的目的。为了减少导爆索爆生气体对玻璃球内部气体能量的影响，柔爆索与不锈钢管的穿入端进行

了密封处理。当模拟比尺较大时，由地下爆炸的能量比尺关系(4)可知，玻璃球罩中的压力可能低于大气压，因此也配置了小型真空泵。

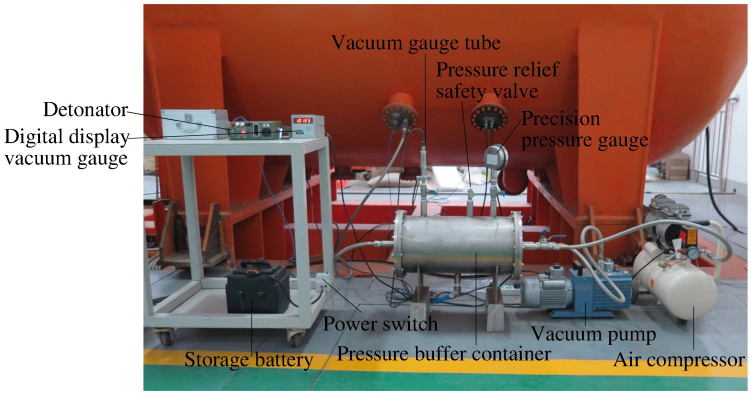


图 4　爆源系统

Fig. 4　System of detonation device

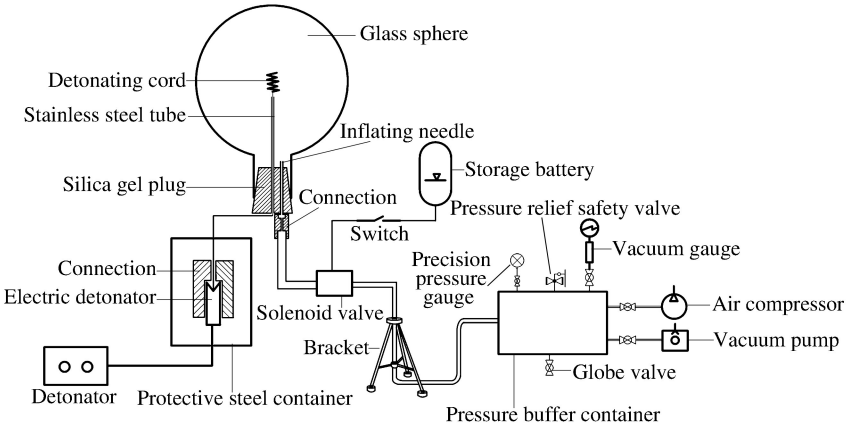


图 5　爆源装置设计原理图

Fig. 5　Schematic diagram of detonation device

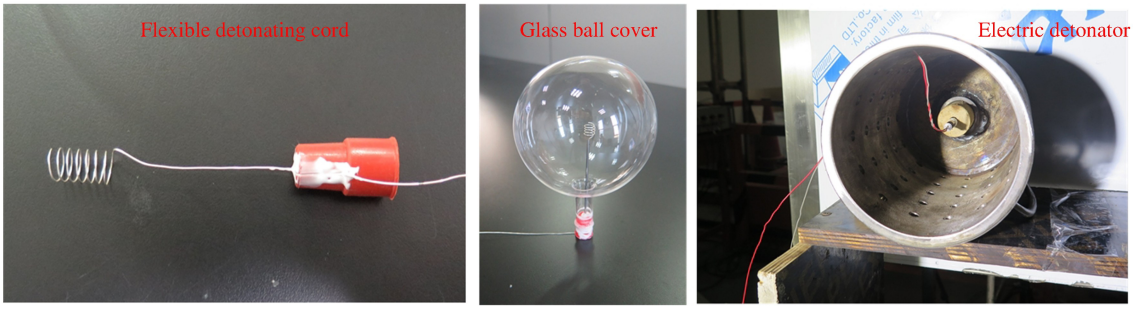


图 6　爆源装置

Fig. 6　Experimental devices for simulating explosion cavity

2.3.3　爆源适用性分析

为了检验玻璃球罩爆破的球形度，并证明爆源装置的可靠性和其力学效应的相似性，分别在空气、沙和水三种介质中开展了玻璃球罩爆炸的高速分幅摄影实验，实验参数及结果见表 2，其中玻璃球罩水中爆炸的情形分别选取长度为 20 cm 和 10 cm 螺旋状导爆索。通过玻璃球罩爆破过程高速摄影镜头(见图 7)以及回收的玻璃碎片(见图 8)可以看出，玻璃球罩碎片的膨胀运动是球形的，尽管柔爆索入口

处玻璃球罩爆破的球形度稍差，当经过几个微秒的传播后，球形度就变得很好，以球形面的长轴直径和短轴直径的相对差别定义的不对称度小于 5%，此外玻璃碎片的尺寸大小对压缩气体的释放过程不会产生影响。采用 10 cm 长的螺旋状柔性导爆索中心起爆比采用 20 cm 长的可以减少其自身爆炸对玻璃球罩内气体能量的影响，爆破效果满足大当量地下爆炸效应模拟装置的功能设计要求，能够实现对爆源起爆的精确控制。

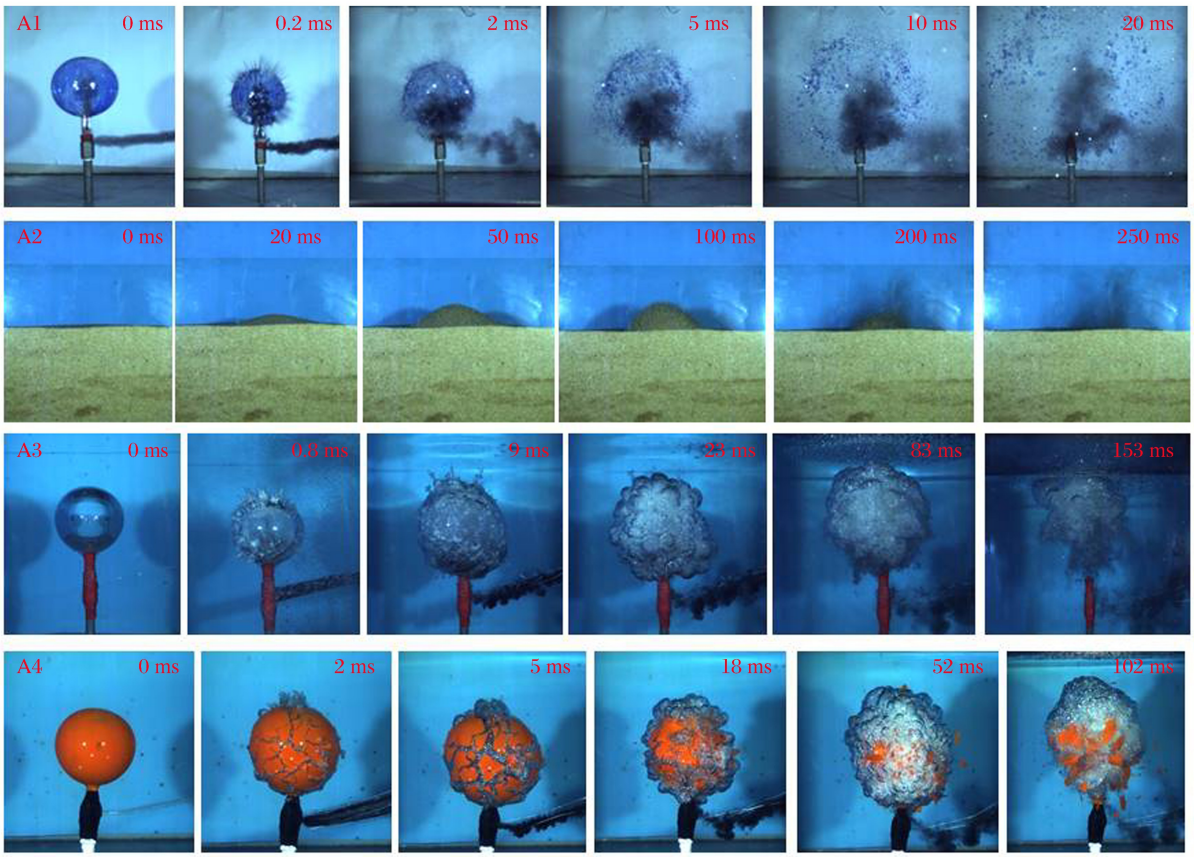


图 7 不同介质中玻璃球罩爆破镜头

Fig. 7 Blasting pictures of glass enclosure with three different medias

为了评估柔爆索爆炸对抛掷成坑的影响，在石英砂中开展了模拟验证实验。实验方法如下，玻璃球罩和沙箱容器中均不抽真空，即没有所谓的高压气体，将玻璃球埋置在 10 cm 深的石英砂中，之后起爆柔爆索，由高速摄像机记录石英砂自由面变化情况。通过回收的玻璃碎片及回填实验结果（玻璃球罩和漏斗沙坑的体积均为 480 cm^3）可以看出（见图 9），玻璃球罩的碎片较大，并且布满了裂纹，柔爆索的爆炸能量主要用于击碎玻璃球罩，石英砂自由面并无观察到隆起和抛掷现象，只是形成了漏斗沙坑。由此可见，采用 10 cm 长的螺旋状柔性导爆索中心起爆对抛掷成坑的影响微乎其微。

表 2 爆源球形度实验

Table 2 Sophericity experiments for the detonation device

实验编号	螺旋状柔爆索长度/cm	玻璃球罩中绝对气压/kPa	玻璃球罩埋深/cm	高速摄影拍摄帧数/s^{-1}	玻璃球罩碎片平均直径/mm
A1（空气）	20	100		5 000	5
A2（沙）	20	180	10	3 000	13
A3（水）	20	180	13	5 000	10
A4（水）	10	180	13	5 000	25

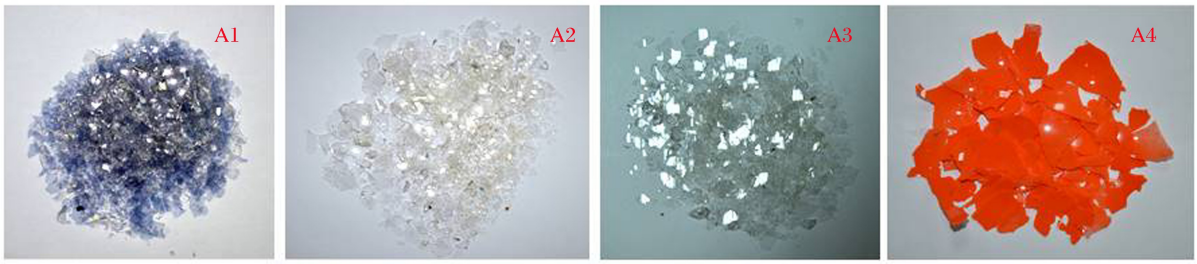


图 8 不同介质中玻璃球罩爆破碎片图

Fig. 8 Blasting debris pictures of the glass enclosure with three medias



图 9 柔性导爆索爆炸抛掷成坑影响实验

Fig. 9 Assessment test for the ejection explosions of flexible detonating cord

2.4 真空泵组

真空泵组主要为容器罐体提供真空环境，由旋片泵、罗茨泵和各类连接管道和截止阀组成。真空泵组的技术性能为极限压力 0.05 Pa、抽速 1 200 L/s、总功率 33.5 kW，可在 0.5 h 内使容器罐体内部的真空度达到 100 Pa。整个容器罐体（容积为 30 m^3）的真空度指标为 10～10^5 Pa。

2.5 量测控制系统

量测控制系统主要是相似散体材料基本力学性能参数测量、抛掷飞散介质的动态追踪和整套装置的联动控制。相似模拟材料的内聚力值和内摩擦因数采用 FT4 多功能粉末流动性测试仪的剪切盒测试模块测得。飞散介质的动能参数主要通过高速摄影机、LED 投光灯、数据采集设备及分析软件测得，采集速度一般为 2 000 s^{-1}。操控平台实现快开门密闭机构、光源、真空泵组、高速摄像机和爆源装置的联动控制。

表 3 不同当量浅埋地下抛掷爆炸成坑效应模拟实验主要参数

Table 3 Key parameters for the simulation of large-scale underground cratering explosions

爆炸代号	原型参数				模型参数				
	等效 TNT 当量/kt	埋深/m	空腔半径/m	空腔气体能量/GJ	小球半径/cm	模拟比尺	小球埋深/cm	小球压力/kPa	真空度/Pa
Neptun	0.115	30.5	7.29	62.31	5	146	21.0	135.219	686.0
1003 竖井	1.100	48.0	13.32	452.76	5	266	18.0	87.036	375.4
Schooner	31.000	108.0	47.12	12 499.20	5	942	11.5	15.933	106.0
Sedan	100.000	193.0	69.62	48 720.00	5	1 392	13.9	12.825	71.8

2.6 装置模拟指标

基于真空室爆炸模型实验方法[4]以及爆源初始参数设计方法，对已有的大当量浅埋地下核爆炸抛掷成坑原型实验[13]计算给出了模型实验的主要参数（见表 3），由表 3 可知，对于装药当量 0.1～100 kt 范围内的原型地下核爆炸，该装置的主要模拟指标参数如爆源小球压力、容器罐体的真空度等均可在实

验室条件下实现,在进行实验时,可以通过调整爆源小球的几何大小改变模拟比尺,进而调整小球压力和容器罐体真空度以实现实验条件。

3 大当量爆炸抛掷成坑模拟实验分析

3.1 实验方案

以美国火山凝灰岩中的大当量抛掷爆炸 Neptun 实验为例,进行真空室模型实验。该爆炸等效 TNT 装药当量 $q=0.115$ kt,埋设在坡度为 30°的倾斜山坡中,埋深为 30.5 m,爆炸空腔 $r_n=7.3$ m,用于抛掷破碎岩石的能量 $A=62.31$ GJ,爆炸结果形成了半径为 33 m、深为 10.5 m、体积为 17 000 m^3 的抛掷弹坑。该地区凝灰岩的主要物理特性为:密度 $\rho=2\ 000$ kg/m^3,纵波速度 $c_P=2\ 200$ m/s,抗压强度极限 $\sigma_*=360$ MPa,抗拉强度极限为 $\sigma_P=12$ MPa,泊松系数 $\nu=0.12$,岩石含气属性为 $\eta_m=0.153$。

模型实验主要参数:玻璃球罩半径 $r=5$ cm、模拟比尺 $N=r_n/r=146$、玻璃球罩中气体压力 $P=135.219$ kPa、埋设深度 $h=21$ cm、容器罐体真空度 $P_a=686$ Pa,采用平均粒径为 0.3 mm 的干石英砂作为模拟材料,其密度 $\rho=1.4$ g/cm^3,利用 FT4 多功能粉末流动性测试仪的剪切盒测试模块测得试样的剪切强度参数[12]:内聚力 $c=92$ Pa,内摩擦因数 $k_T=0.8$,内摩擦角为 38.6°,其中内摩擦角符合破坏岩石天然坡度角的变化范围(36°~45°)。对关系式(1)中包含能量的量纲一组合参数进行简化,有:

$$\frac{E}{\rho g h^4}\sim\frac{P}{\rho g h},\quad \frac{E}{P_a h^3}\sim\frac{P}{P_a},\quad \frac{E}{c h^3}\sim\frac{P}{c} \tag{6}$$

本模型实验中各参数作用力之间的关系为:$P/\rho g h=47$,$P/P_a=197$,$P/c=1\ 470$,由此可见,本模型实验参数大气压力和内聚力与模拟材料的重力相比小 1 ~ 2 个量级,突出了支配参数 $E/\rho g h^4$ 的决定性作用,符合大当量地下爆炸抛掷成坑效应模拟的相似条件。爆源装置及实验布置如图 10 所示。

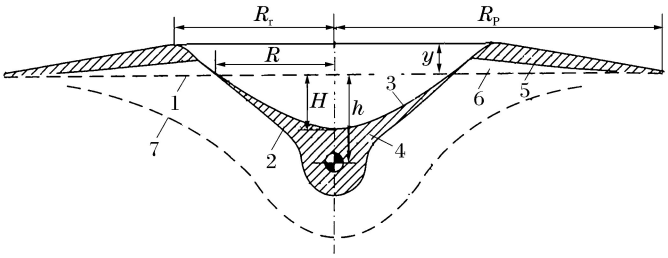


图 10 爆源装置及模型实验布置图

Fig. 10 Detonation device and layout of experiment

3.2 实验过程及结果分析

一般的抛掷弹坑的构造可以分出可视弹坑、真实弹坑和岩石堆置物(见图 11)。可视弹坑的大小反映了抛掷岩石的有效性,R_r 为弹坑顶部半径,比真实弹坑半径 R 大,堆置物由碎裂岩石形成,它们通过爆炸被掀起到空中,然后落到弹坑以外的自由面上(外边堆置物)和弹坑底部(内部堆置物),其中 y 为堆置物距离地表的最大高度,R_P 为岩块飞散的最远距离。



1. Initial position of the ground surface;
2. Contour of the ture crater;
3. Contour of the visible crater;
4. Inner ejecta blanket;
5. Outer ejecter blanket;
6. Zone of residual deformations;
7. Boundary of the damaged rocks.

图 11 抛掷弹坑构造示意图

Fig. 11 Cross-section view of ejection crater

按照实验参数，将玻璃球罩中心埋设在距离石英砂自由面 21 cm 处，开启控制柜，为装置各系统供电，开启移动小车，利用旋转卡箍将法兰盘锁紧，开启 LED 投光灯，将高速摄像采集系统调试到位；启动真空泵组，当容器罐内达到额定真空度时，关闭容器罐体截止阀；对玻璃球罩进行充气加压，当达到指定压力 135 kPa 时，关闭电磁阀；同时启动高速摄像机和起爆器，对实验过程进行记录。由于容器罐体容量大，真空度低于 1 kPa 时，罐内真空度稳定时间很短，起爆瞬时罐内真空度的实际值为 740 Pa，略高于额定值。

实验过程中，高速摄影机的拍摄速度为 2 000 s^{-1}，图 12 为模型实验抛掷弹坑的发展演化进程，弹坑的最终形态和玻璃球罩爆破碎片见图 13。由实验回收的玻璃碎片（平均直径为 15 mm）可知，爆源装置正常起爆，碎片大小对压缩气体的释放不会产生影响。模型实验抛掷弹坑的形态与大当量地下浅埋爆炸弹坑的典型构造形态相似，具有双曲线形状。依据抛掷弹坑的构造组成（见图 11），对弹坑顶部直径、弹坑直径和深度进行测量，实验结果见表 4。其中弹坑的体积采用公式 $V=\frac{1}{3}\pi R^2 H$ 得到。

表 4 模型实验结果

Table 4 Results of blasting crater

计算条件	弹坑半径/cm	弹坑深度/cm	体积/cm^3	抛掷指数
原型试验	3 300.0	1 050.0	1.7×10^{10}	1.0
相似计算结果	22.6	7.2	5 462	
模型试验	25.6	6.3	4 321	1.2
相对误差/%	13.3	12.5	20.0	20.0

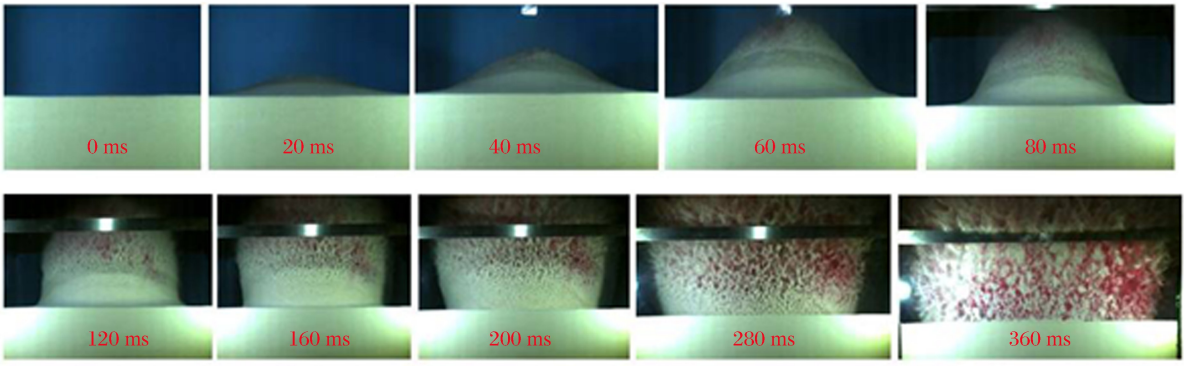


图 12 模型中抛掷弹坑发展变化镜头

Fig. 12 Snapshots of ejection crater evolution in experiment

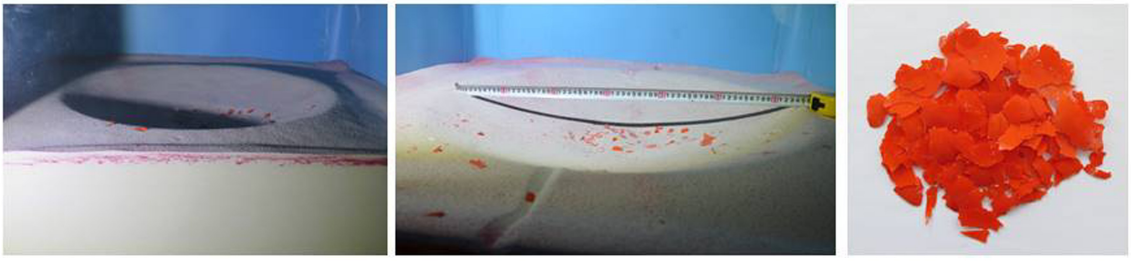


图 13 模型中抛掷弹坑最终形态及玻璃球罩碎片

Fig. 13 Skeleton map of ejection crater and the glass enclosure blasting debris

由表 3 可知，模型实验的弹坑半径比原型相似计算结果大 13.3%，而弹坑深度比原型小 12.5%，成坑体积小约 20%，抛掷指数的相对误差为 20%，从原型和模型实验的对比分析结果可知，大当量地下爆

炸效应模拟实验装置开展的抛掷爆炸模型实验结果与原型现场实验结果相符,利用该装置可以开展不同规模的地下爆炸抛掷成坑实验研究。实验结果存在的误差,究其原因一方面由于原型 Neptun 爆炸发生在坡度为 30°的倾斜山坡上,由于弹坑上翼的倒塌,弹坑底部和下部被覆埋,对弹坑的形态及几何尺寸造成了影响;另一方面此装置的物理模拟基础是把大当量地下爆炸看作是爆炸空腔气体推动破碎岩石抛掷运动的过程,采用柔性导爆索传爆震碎玻璃球罩的方式虽然保证了爆腔的破裂效果,解决了爆源的起爆控制难题,但是玻璃球罩内部 10 cm 长度的导爆索爆炸可能对爆腔内的初始准静态气体压力造成影响,从而影响实验结果,此外,模拟相似材料石英砂的密度比原型凝灰岩的密度略小,忽略相似材料石英砂的内聚力,容器罐体的低真空度值稳定时间很短等因素均可能对实验结果造成误差。

4 结 论

对大当量地下爆炸抛掷成坑物理过程进行了简化,基于大当量地下爆炸效应模型实验方法,研制了考虑重力影响的浅埋地下爆炸抛掷成坑效应缩比模拟实验装置,并进行了模型实验,得到以下结论:

(1)研制的大当量地下爆炸效应模拟实验装置主要包括容器罐体、快开门密闭机构、爆源系统、真空泵组、量测控制系统等,主要实验参数(爆源气体压力、容器罐体真空度值)可调可控,通过调整模拟比尺,能够模拟 0.1～100 kt、埋深 20～400 m 范围内不同比尺的地下爆炸抛掷成坑现象;

(2)采用齿啮式卡箍连接结构实现法兰盘和容器罐体的快速开启和密闭连接,不仅承压密闭性能好,而且操作方便、自动化程度高;

(3)建立了考虑弹药围岩特性的爆源初始参数的计算方法,提出的柔性导爆索传爆震碎玻璃球罩的新型爆源装置,不仅能够实现精确起爆控制,安全可控,而且柔爆索爆炸对抛掷成坑的影响很小,提高了模型实验结果的可靠性;

(4)相比于爆炸离心机动辄几千万甚至上亿的制造成本,本装置造价成本低,无需提供额外的加速度,在模拟大当量地下浅埋爆炸抛掷成坑现象时具有明显的优势,可为钻地核武器地下爆炸成坑毁伤机制和大型工程爆破效果的预测预报等方面的科学研究提供实验平台。

参考文献:

[1] 马立秋,张建民,张武.爆炸离心模型试验研究进展与展望[J].岩土力学,2011,32(9):2827-2833.
MA Liqiu, ZHANG Jianmin, ZHANG Wu. Development and prospect for centrifugal blasting modeling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(9):2827-2833.

[2] 范一锴,陈祖煜,梁向前,等.砂中爆炸成坑的离心模型试验分析方法比较[J].岩土力学与工程学报,2011(suppl 2):4123-4128.
FAN Yikai, CHEN Zuyu, LIANG Xiangqian, et al. Comparison of three methods for geotechnical centrifuge model tests of explosion cratering in sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011(suppl 2):4123-4128.

[3] 岳松林,邱艳宇,王德荣,等.岩石中爆炸成坑效应的模型试验方法及对比分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(9):1925-1932.
YUE Songlin, QIU Yanyu, WANG Derong, et al. Modeling experiment methods for crating effects of explosions in rocks and comparative analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33(9):1925-1932.

[4] SADOVSKII M A, ADUSHKIN V V, RODIONOV V N, et al. A method of modeling large cratering explosions [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1967,3(1):73-79.

[5] ADUSHKIN V V, PERNIK L M. Large-scale blasting-down in opening-up the tyrnyauz deposit[J]. Journal of Mining Science, 1976,12(4):381-384.

[6] ADUSHKIN V V, PERNIK L M. Characteristics of the formation of subsidence craters[J]. Fizika Goreniya I Vzryva, 1972,8(4):541-552.

[7] Vakhrameev Y S. Physical principles of modeling excavation explosions[J]. Combustion, Explosion, and Shock

Waves, 1995,31(1):123-130.

[8] Blinov I M, Vakhrameev Y S. Method of modeling of large excavation explosions by microexplosions of explosive [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1995,31(2):102-109.

[9] Blinov I M. Mechanism and conditions of hill formation at the crater bottom in an excavation explosion[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2004,40(6):679-685.

[10] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，2005：9-18.

[11] 钱七虎. 大型抛掷爆破中重力的影响[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版)，2010，11(2)：103-105.
QIAN Qihu. Influence of gravity in large-scale throw blasting[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science), 2010,11(2):103-105.

[12] CHIKOSHA S, MAHLATJI L M, CHIKWANDA H K. Characterisation of titanium powder flow, shear and bulk properties using the FT4 powder rheometer[J]. Advanced Materials Research, 2014,1019:218-224.

[13] ADUSHKIN V V, SPIVAK A. Underground explosions: WGC-2015-03[R]. 2015.

Development of the testing apparatus for modeling large equivalent underground cratering explosions

XU Xiaohui[1,2], QIU Yanyu[1,2], WANG Mingyang[1,2], SHAO Luzhong[2]

(1. *College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *State Key Laboratory of Explosion & Impact and Disaster Prevention & Mitigation, Army Engineering University of PLA, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*)

Abstract: Aiming at solving the difficult problem of simulating the ejection crater and loose bulging under underground explosion, a method of vacuum chamber for simulating underground explosion effects is presented based on the similarity theory, and a testing apparatus is developed. The core assemblies of this apparatus consist of pressure vessel, fast-open door enclosed mechanism, explosive source simulation system with accurate burst control, vacuum pump air-removal system and instrumentation system. This set of apparatus could model the underground explosions with the equivalent of 0.1—100 kt TNT and the buried depth of 20—400 m, and it also could simulate the large-scale explosions with different charge schemes under complicated geological conditions. The typical modeling experimental results show that the apparatus is accurately adjusted and technically controllable, and that the experimental results are reliable. The testing apparatus for large-scale underground cratering explosions could provide assistances for both the damage effect analysis of the ejection explosions subject to earth-penetrating nuclear weapons and the prediction and forecast of the large-scale engineering blasting, and fill the shot of centrifuge cratering experiment which cannot model the large-scale underground explosions.

Keywords: large equivalent cratering explosion; similarity model test; development device; underground nuclear explosion; engineering blasting

(责任编辑　曾月蓉)