DOI：10.11883/bzycj-2025-0095

大当量多点聚集爆炸成坑效应的真空室模拟实验系统*

梁益帆[1]，徐小辉*,[1]，郭纬[1]，徐天涵[1]，陈亮羽[1]，

纪玉国[1]，时本军[1]

（1. 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：新型低当量钻地核弹的多点聚集爆炸对深地工程构成严重威胁。针对传统单点模拟难以复现此类多点协同毁伤爆炸成坑效应的难题，创新性地设计并开发了基于真空室的大当量多点聚集爆炸成坑效应模拟试验系统。该系统的核心创新点在于利用真空室模拟试验技术可以高效、快捷的模拟大当量多点爆炸成坑效应，并且实验成本低，试验结果可重复。基于真空室爆炸模拟理论，建立了大当量多点聚集爆炸成坑效应的相似律，确定了真空室压力、多点模拟爆腔压力等关键参数，并通过同步性试验验证了多爆源之间的同步性。以美国“Palanquin”地下核爆炸成坑原型试验为参照，开展了深埋（4.3 kt，埋深 85 m）与浅埋（5 kt，埋深 20 m）两组不同工况下的三点爆源真空室爆炸成坑模拟试验，并与单点爆炸成坑原型试验统计结果及经验公式进行了对比。结果表明：相较于单点爆炸，多点爆炸显著提升了成坑半径、体积及自由面投影面积，极大扩展了毁伤区域；爆源埋深对毁伤效应影响显著。研究中首创的真空室多点爆炸模拟系统及方法，为准确评估钻地核弹多点聚集爆炸对深地下工程的毁伤机制与效能，提供了不可替代的试验平台和坚实的理论基础，具有重要的工程应用价值。

关键词：多点聚集爆炸；真空室模拟试验；地下爆炸成坑效应

中图分类号：0383；0389　　**国标学科代码：**13035　　**文献标识码：**A

Vacuum Chamber Simulation Test System for Large-Yield Multi-Point Concentrated Explosion Cratering Effects

LIANG Yifan[1], XU Xiaohui*,[1], GUO Wei[1], XU Tianhan[1], CHEN Liangyu[1], JI Yuguo[1], SHI Benjun[1]

(1. State Key Laboratory of Explosion & Impact and Disaster Prevention & Mitigation, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

Abstract: The multi-point focused explosions of new low-yield earth-penetrating nuclear weapons pose a serious threat to deep underground engineering projects. Addressing the challenge that traditional single-point simulations struggle to replicate the cratering effects of such multi-point synergistic damage, and considering that current explosive testing, while efficient, faces significant limitations hindering normal operations, research innovatively designs and develops a vacuum chamber-based simulation test system for large-yield multi-point focused explosion cratering effects. The core innovation lies in applying

*收稿日期：2025-03-25；　修回日期：2025-07-25；
基金项目：江苏省自然科学基金(BK20221528)；国家自然科学基金(12072371)
第一作者：梁益帆（1998- ），男，博士研究生. E-mail: 849203660@qq.com
通信作者：徐小辉（1983- ），男，博士，副教授. E-mail: 304837845@qq.com

similarity theory to convert prototype tests into simulated tests. The vacuum chamber simulation technology enables efficient and rapid simulation of large-yield multi-point explosion cratering effects, with low experimental costs and repeatable results. Based on vacuum chamber explosion simulation theory, the similarity laws governing large-yield multi-point focused explosion cratering were established, defining key parameters such as vacuum chamber pressure and multi-point simulated blast cavity pressure. Synchronization tests verified the simultaneity of multiple explosive sources. Referencing the US "Palanquin" underground nuclear test, we conducted vacuum chamber simulations for three-point sources under deep burial (4.3 kt, 85 m depth) and shallow burial (5 kt, 20 m depth) scenarios, comparing results with single-point explosion prototype data and empirical formulas. Through synchronization tests and three-point explosive source cratering tests, differences in cratering parameters under varying burial depths and yields were quantitatively analyzed. This revealed a significant advantage in damage range for multi-point sources compared to single-point sources when the total yield is identical. Key results indicate: A vacuum chamber simulation system is successfully developed, relying on a miniature explosive device based on the two-stage gas gun principle and the vacuum chamber. Synchronization tests confirmed good simultaneity among explosive sources using a common detonation control switch; Compared to single-point explosions, multi-point explosions significantly increased crater radius, volume, and free surface projection area, greatly expanding the damage zone; Explosive source burial depth significantly impacts the damage effect. The pioneering vacuum chamber multi-point explosion simulation system and methodology developed in this study provide an invaluable experimental platform and a solid theoretical foundation for accurately assessing the damage mechanisms and efficacy of multi-point focused explosions from earth-penetrating nuclear weapons against deep underground engineering structures, demonstrating significant engineering application value.

Keywords: Multi-point explosion source systems; Vacuum chamber simulation test; Underground explosion cratering effect

近年来，美俄等国积极发展非战略核武器，新一代低当量钻地核武器（等效 TNT 当量 5kt）已列装部队，分导式多弹头低当量钻地核弹的聚集爆炸能够有效打击深埋地下坚硬目标，对深地下工程的安全防护造成了巨大的威胁。由于受物理法则的限制，钻地武器侵彻钻深度有限而无法保证完全封闭爆炸，其爆炸毁伤效应与地下浅埋核爆炸效应相似。

对于大当量地下爆炸而言，爆炸抛掷成坑过程受到爆炸当量、爆源能量密度、围岩特性等参数影响，通过理论分析、数值模拟方法分析该物理过程难度较大，原型试验更是受到限制而无法开展。大当量地下抛掷爆炸成坑效应真空室模拟试验方法中，把爆炸弹坑的形成过程看作是爆炸气状生成物推出碎裂岩石的结果[1]。相似模拟是研究大当量地下爆炸破坏效应的一种有效方法，当前主要有离心机爆炸模拟和真空室爆炸模拟两种方法。离心机模拟试验方法基于离心力场和重力场等价原理，将 1/N 缩比爆炸模型放置于 N 倍重力加速度场中爆炸，使模型和原型对应点处应力-应变相同、变形相似、破坏机制相同。其优点在于对相似材料和气压环境无特殊要求，但模拟比尺有限，无法模拟大当量、大比例埋深的地下爆炸成坑试验；真空室爆炸模拟试验方法是在自然重力场中进行，采用动力变换的思想，通过降低模型自由面压力和使用相似散体材料，突出重力加速度对爆炸成坑的影响，使模型和原型保持相同的力比例关系。该试验方法无需额外提供加速度，并且真空室的压力和爆源压力调节范围广，模拟比尺大，满足大当量、大比例埋深的地下爆炸抛掷成坑效应的研究需求。国外最早由前苏联 Adushkin 等[2-3]学者设计开发了大型真空室模拟试验装置，通过线性分布装药爆炸成坑试验，探究了线性阵列装药的延时起爆、装药相对距离等参数对弹坑形成机制的耦合影响；美国 Blinov 与 Vakhrameev[4-5]等学者改进了大当量地下浅埋爆炸的相似理论，建立了微型装药真空室爆炸模拟试验技术，并探究了介质参数与大气条件对爆坑形貌的影响以及对爆炸过程中疏松鼓包的形成机理。国内陆军工程大学徐小辉等[6-7]和王明洋等[8]研制了考虑重力作用的真空室单点爆炸模拟试验系统，成功复现了 Neptune 地下核爆试验的成坑效应[9]。

真空室爆炸模拟系统中，前苏联采用薄壳橡胶球型容器封存压缩气体作为模拟爆源，在容器外布置金属丝，通过高压大电流击穿金属丝形成电爆炸，利用电爆炸击穿橡胶球释放高压气体，完成爆源

爆炸模拟过程；美国采用微型药球作为模拟爆源，但微型药球制备困难，存在火工品审批严格、操控安全难题。国内学者持续优化模拟爆源，徐小辉等[6-7]和王明洋等[8]创新性地应用薄壁玻璃球封装高压气体，通过导爆索传爆精准控制玻璃球释放球内高压气体，为了进一步提高模拟试验的安全性和操作性，郭纬等[10]基于二级炮的工作原理创新设计了二级高压驱动阵列弹珠同步弹射微型爆源装置，该装置利用少量二级高压气体驱动球头钢珠高速弹射玻璃球来释放球内高压气体，实现了爆源的精确起爆。

当前随着分导式多弹头钻地武器的发展，多点聚集爆炸的破坏效应成为爆炸冲击领域的研究热点，但是当前已有的爆炸装置仅仅适用于单点爆炸模拟，对于大当量多点地下爆炸模拟的研究工作相对较少。本文在陆军工程大学国家重点实验室真空室单点爆炸模拟试验系统的基础上，基于二级高压驱动阵列弹珠同步弹射微型爆源装置，开发设计了大当量多点聚集爆炸成坑效应的真空室模拟试验系统。以美国“Palanquin”地下核爆炸成坑原型试验为参照，开展了深埋（4.3 kt，埋深 85 m）与浅埋（5 kt，埋深 20 m）两组不同工况下的三点爆源真空室爆炸成坑模拟试验，并与“Palanquin”原型试验成坑试验结果进行了对比分析。当下小型钻地核弹设计当量为 5kt，为了探究该当量下多点爆源在浅埋和深埋情况下的成坑效应，为此设计了两种不同的模拟试验工况。由于当下已知的原型试验结果中，“Palanquin”原型试验当量与小型钻地弹的设计当量相近，埋深较大，并且该原型试验结果以有成坑效应的相关数据，因此以该原型试验工况为基准模拟深埋工况下的多点爆源成坑结果。多点浅埋试验将依照 5kt 为当量，按照理论计算出该工况下单点的成坑效应，并将理论计算结果与模拟试验结果进行比较。通过两组试验，反映出多点爆源在深埋、浅埋工况下的成坑效应与原型单点试验结果之间的差异。

然而，当前针对地下核爆炸成坑效应的研究，主要基于单点爆炸模型的试验（如缩比爆炸试验、数值模拟）和经验公式。多点爆炸成坑效应研究欠缺，特别是低当量钻地核弹的精准聚集爆炸，其毁伤模式与单点爆炸存在差异，可能产生远超单爆源叠加成坑与毁伤效应。因此，发展能够物理模拟多点同步爆炸及其协同毁伤效应的试验方法与系统，成为评估此类新型威胁、防护深地下工程的关键和迫切需求，也是当前研究领域的重要挑战与空白。本文的核心创新点在于：突破传统单点模拟局限，原创性地设计并实现了大当量多点聚集爆炸成坑效应的真空室模拟试验系统。该系统的独特性与核心价值体现在与真空环境下的多点爆炸协同效应模拟平台。结合真空室试验装置，构建了可精确控制环境压力（模拟不同埋深上覆层效应）的试验环境。

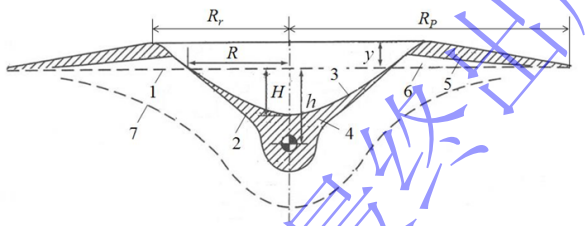
本研究的核心目标即是利用这一独创的试验系统，直观和量化多点聚集爆炸相较于单点爆炸的毁伤增强效应，揭示爆源布局（如埋深、布局）对毁伤效果的影响规律，从而填补多点爆炸毁伤效应物理模拟的空白，为防护工程设计提供直接、可靠的试验数据和理论支撑。其应用价值直接服务于国家深地下工程的安全防护需求。

1 真空室爆炸相似模拟理论

以地下爆炸抛掷岩石能量转移机制为物理模拟基础，真空室爆炸模拟试验方法把大当量地下爆炸成坑过程看作是爆炸 ZXC 高压气体推出破碎岩石形成抛掷弹坑的行为。M.A.Sadovskii 等[1]首先描述了抛掷弹坑形成过程与爆源参数、岩石特性之间的相似关系式：

$$\begin{cases} \dfrac{R}{h}=f_1\left(\dfrac{E}{rgh^4},\dfrac{E}{P_a h^3},\dfrac{E}{ch^3},\dfrac{h}{r_n},k_r,c\right) \\ \dfrac{H}{h}=f_2\left(\dfrac{E}{rgh^4},\dfrac{E}{P_a h^3},\dfrac{E}{ch^3},\dfrac{h}{r_n},k_r,c\right) \\ \dfrac{v_m^2}{gh}=f_3\left(\dfrac{E}{rgh^4},\dfrac{E}{P_a h^3},\dfrac{E}{ch^3},\dfrac{h}{r_n},k_r,c\right) \\ \dfrac{gt_m^2}{h}=f_4\left(\dfrac{E}{rgh^4},\dfrac{E}{P_a h^3},\dfrac{E}{ch^3},\dfrac{h}{r_n},k_r,c\right) \end{cases} \tag{1}$$

其中，爆源参数包括：爆源半径 r_n、气体生产生成物能量 E (爆腔压力 P)、爆源埋深 h 和绝热系数 χ；围岩特性参数包括：岩石密度 ρ、岩块间摩擦系数 k_r 和岩石的内聚力 c。弹坑主要特征参数包括：弹坑半径 R、弹坑深度 H、弹坑体积 V、拱顶最大质点速度 v_m 和气体加速运动时间 t_m，R_r 为弹坑顶部半径，R_p 为岩块抛掷最远距离；外部环境参数包括：重力加速度 g 和大气压力 P_a；抛掷弹坑构造如图 1 所示。



1-地表面初始位置；2-真实弹坑轮廓；3-可视弹坑轮廓；4-内部堆置物；
5-外部堆置物；6-永久变形带；7-裂纹区边界

图 1 抛掷弹坑构造示意图

Fig.1 Ejecta Crater Schematic Diagram

根据相似准数恒定原则，各参数相似常数的关系：

$$\frac{\alpha_E}{\alpha_\rho \alpha_g \alpha_h^4}=1,\quad \frac{\alpha_E}{\alpha_{P_a}\alpha_h^3}=1,\quad \frac{\alpha_E}{\alpha_c \alpha_h^3}=1,\quad \frac{\alpha_h}{\alpha_{r_n}}=1,\quad \alpha_{k_r}=1,\quad \alpha_\chi=1 \tag{2}$$

其中，α 为模型试验与原型试验的相似常数，记为 $\alpha=M/R$ (M 为模型试验的参数，R 为原型试验的参数)。设线性几何比尺 $\alpha_h=\alpha_{r_n}=1/N$，模型试验采用与原型材料密度相等的材料，试验在自然重力场中进行，即 $\alpha_\rho=1$，$\alpha_g=1$，因此由上式可知：

$$\alpha_{r_n}=\alpha_h=\frac{1}{N},\quad \alpha_{P_a}=\frac{1}{N},\quad \alpha_c=\frac{1}{N},\quad \alpha_E=\alpha_h^4=\frac{1}{N^4},\quad \alpha_{k_r}=1,\quad \alpha_\chi=1 \tag{3}$$

根据以上的相似理论，确定原型试验与模拟试验之间的相似比尺，利用原型试验主要参数，通过相似转换就可获得模拟试验中各参数的指标。

2 真空室多点爆炸模拟实验系统

真空室多点爆炸实验模拟系统是基于陆军工程大学自主研制的二级高压驱动阵列弹珠同步弹射微型爆源装置[10]和真空室爆炸模拟装置[6]开发设计的。整套实验系统分为模拟爆炸试验环境、爆源击发装置、数据采集系统三部分，包含了真空室、多点爆源系统、真空泵组、爆源压力调节系统、高速摄影机等，其中多点爆源系统是整套装置的核心。整套系统组成如图 2 所示。

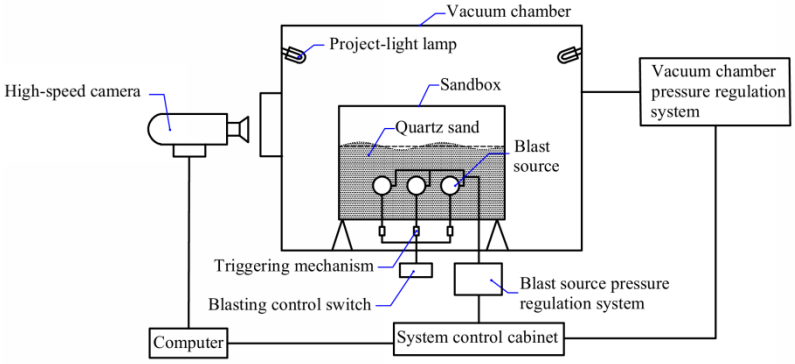


图 2 真空室多点爆炸模拟系统

Fig.2 Vacuum Chamber Multi-Point Blast Simulation System

2.1 真空室

真空室是爆源系统和其它系统的平台，主要包括：罐体、快开门密闭机构、沙箱组成，罐体采用卧式设计，材料采用不锈钢和 Q345R 组成的复合钢板，尺寸为ϕ3.0m×3.93m。真空室采用快开门密闭机构，通过齿啮式卡箍结构将法兰与罐体实现密闭连接，内部放置沙箱，爆源安置于沙箱内。法兰中心留有直径为 20cm 的观察孔，用于高速相机拍摄。真空室装置结构如图 3 所示。

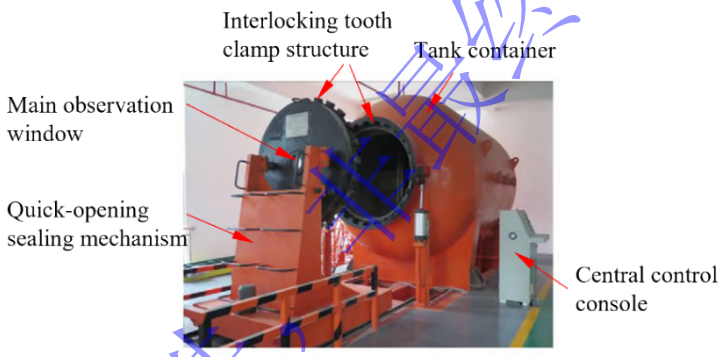


图 3 真空室装置

Fig.3 Vacuum Chamber Equipment

2.2 真空泵组

真空泵组为容器罐体提供模型试验所需的真空环境，由旋片泵、一级罗茨真空泵、二级罗茨真空泵以及管路原件组成。真空泵组的极限压力为 0.05 Pa，抽速为 1200 L/s，总功率为 33.5 kW，可为真空室(容积为 30 m^3)实现 $10\sim10^5$ *Pa* 的空气压力调节。

2.3 爆源压力调节系统

真空室爆炸模拟试验方法中，采用玻璃球腔模拟原型爆腔，利用相似原理可以确定玻璃球内的压力值，通过空压机和真空泵调节球内压力。爆源压力调节系统如下图 4 所示，该系统通过四通气路元件并联各爆源，确保爆源压力保持一致。当爆源压力值到达试验设定值后，通过电磁阀的关闭与开启确保各个爆源内部压力保持独立，保证试验精度。

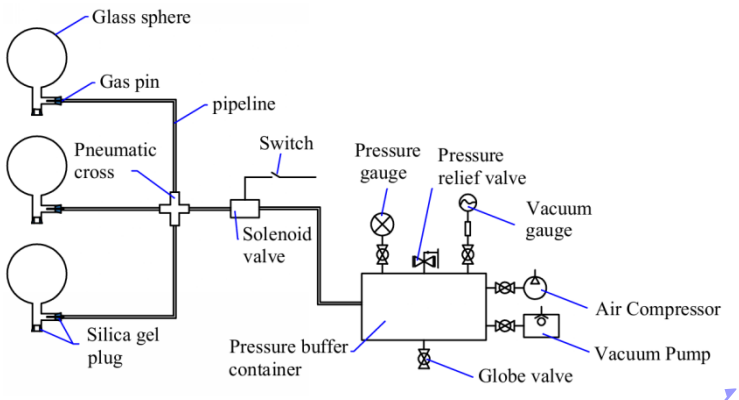


图 4 爆源压力调节系统

Fig.4 Blast Source Pressure Control System

2.4 多点爆源系统

2.4.1 工作原理

多点爆源系统(图 5)作为真空室多点爆炸模拟系统(图 2)的爆源装置，该子系统是模拟系统中不可或缺的一部分。不同于单个爆源的试验系统，多点爆源之间需要满足相同的压力、独立释放互不干扰，并且需要满足同步起爆要求。因此对于多点爆源气路需要重新进行设计调节，控制方式需要优化。

以二级高压驱动阵列弹珠同步弹射微型装置[9]为基础，自主开发了多点爆源系统，该系统结构设计如图 5 所示，三组爆源采用“一入多出”控制模式，由高压气罐同时对三个高压气室充气，达到预定压力后，由多路电磁阀同时启动，高压气室内的气动活塞同时动作，释放的高压气体驱动炮管内 PE 棒高速运动，在炮管顶部形成局部压缩气体，达到预定压力后，膜片破裂，压缩气体驱动弹珠同步弹射，撞击玻璃球壳，释放爆腔气体压力。整个过程大致分为三个阶段：高压气室充压阶段、炮管内 PE 棒做功阶段、膜片破裂弹珠弹射阶段。高压气室的充气压力为 4 MPa，玻璃球壳内由于发射装置系统造成的残余稳态气体压力约为 3 KPa[6]，对玻璃球壳内爆源气体压力的影响可以忽略不计。

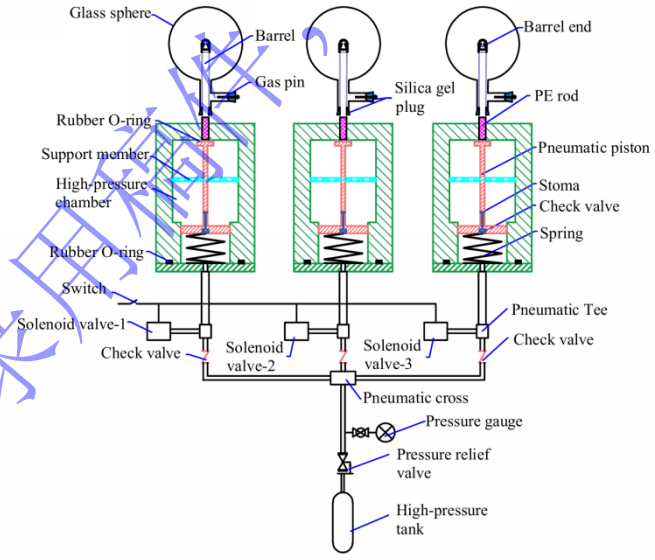


图 5 多点爆源系统结构

Fig.5 The structure of Multi-Point Blast Source System

在高压气室充压阶段，高压气罐内的高压气体通过四通分别进入各个高压气室中，待填充至额定压力时，关闭高压气罐。高压气室内的气动活塞下表面面积远大于上表面面积，当高压气体由底部进

入高压气室内时，气动活塞在上下表面巨大压差作用下，向上挤压密封圈使气动活塞上端面始终与高压气室的顶面紧紧贴合，形成密闭气腔。

炮管内 PE 棒做功阶段，是高压气室内气体驱动 PE 棒高速运动的过程。各高压气室独立配置电磁阀，当同步启动电磁阀时，高压气室内气体快速泄出，气动活塞上下表面形成巨大压差而快速向下动作，高压气室内的气体从顶部喷出，作用于炮管内的 PE 棒底端，驱动 PE 棒向上高速运动，炮管内部在 PE 棒与膜片之间形成一个新的压缩气室。

膜片破裂弹珠发射阶段，当 PE 棒高速运动压缩炮管内的气体达到破膜压力时，膜片破裂，炮管端部形成的压缩气体驱动弹珠高速弹射而撞碎玻璃球壳，从而达到释放爆源气体的目的。由于炮管端部球头内部设有锥体结构 (见图 6(a))，当 PE 棒高速冲击嵌入锥体后起到密封作用，可以避免 PE 棒尾部的高压气体进入玻璃球壳而影响试验精度。试验破裂膜片及 PE 棒入锥的试验图片如图 6(b-c)所示。

(a) 炮管球头结构　　(b) 变形 PE 棒与刺破膜片　　(c) PE 棒嵌入球头

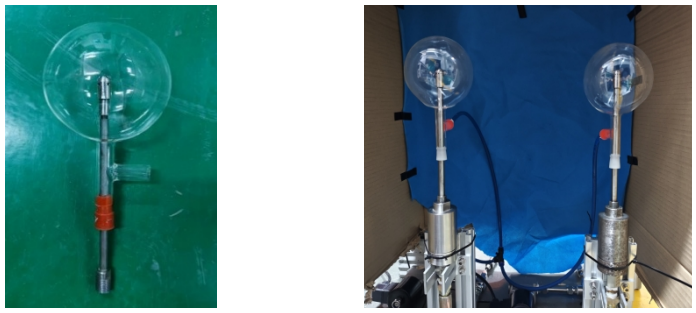
图 6 PE 棒击穿膜片嵌入发射球头

Fig.6 PE Rod Penetrating Membrane with Projectile Barrel End

2.4.2 同步性测试

将两个爆源放置于空气中，开展多点爆源系统的同步性测试。两点爆源同步性试验测试系统如图 7 所示，测试中爆源内部绝对压力为 150 KPa，通过高速摄影采集弹珠弹射及玻璃球壳破碎时刻，进而确定爆源之间的爆破时差。高速相机采集帧率为 10000 s^{-1}，两点爆源高速爆破镜头如图 7 所示，当启动电磁阀后，在 0.4 ms 和 1.1ms 左右两侧炮管球头上的钢珠高速飞出，2.4 ms 时，左侧玻璃球先被击破，3.2 ms 时右侧玻璃球破碎，两个玻璃球壳爆破存在 0.8 ms 的时差。

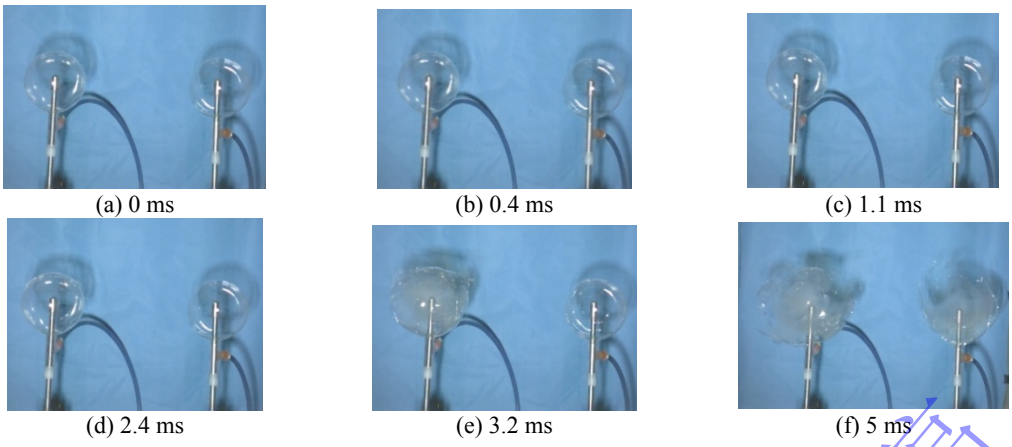
分析爆源系统存在的时差原因，由图 8 可知，左右两侧钢珠从球头飞出到击破玻璃球的时间是一致的，两者分别相差 2ms 和 2.1ms，可见钢珠弹射获得的动能基本相同，破膜压力基本相同，造成时差的原因主要来源于电磁阀启动时间的微小偏差造成高压气室底端泄气速率的快慢不同造成的，属于系统误差。对于大当量地下多点聚集爆炸成坑效应模拟，0.8ms 的起爆偏差对相似散体材料的抛掷移动过程影响较小，满足真空室爆炸模拟试验要求。



(a)玻璃球与炮管结构　　(b)多点爆源结构

图 7 多点爆源系统测试装置

Fig.7 Multi-Point Blast Source Test Rig



(a) 0 ms (b) 0.4 ms (c) 1.1 ms

(d) 2.4 ms (e) 3.2 ms (f) 5 ms

图 8 两点爆源空气中同步爆破试验镜头

Fig.8 Test Footage of Dual-Point Blast Sources in Simultaneous Air Detonation

3 大当量多点聚集爆炸成坑效应模型试验设计

在多点爆源系统真空室模型试验方法中，模型的初始参数为原型试验爆源空腔半径大小 r_n 和气体生成物总能量 E。爆腔大小满足几何相似律，可表示为：

$$r_n = \bar{r}_n q^{1/3} \tag{4}$$

其中，r_n 为爆源空腔半径，单位为 m；q 为等效 TNT 当量，单位为 kt；比例系数 $\bar{r}_n$ 是与爆源的围岩强度和弹性参数有关的函数 $\bar{r}_n = f(\rho, C_p, \sigma_*)$，单位为 m/kt$^{1/3}$，$\rho$ 为围岩密度，C_p 为纵波速，σ_* 为围岩抗压强度。

根据地下抛掷爆炸理论[8]可知，大当量地下爆炸地冲击阶段完成时，爆炸空腔内形成的气体压力为 P_n，自由面上的气压为大气压 P_a。由爆腔高压气体 P_n 向外膨胀做功至自由面 P_a 的势能为 A，爆腔体积为 V_n 以及爆腔气体生成物的能量为 E，这些参数之间的关系为：

$$\begin{cases} \dfrac{A}{E} = 1 - \left(\dfrac{P_\mathrm{a}}{P_\mathrm{n}}\right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} \\ E = \dfrac{P_\mathrm{n} V_\mathrm{n}}{\chi - 1} \end{cases} \tag{5}$$

其中，χ 为气体绝热指数，取 $\chi = 1.4$。爆炸空腔气体势能 $A = 0.49q(1 + 5.8\eta_\varepsilon^{0.7}) / \bar{r}_\mathrm{n}$，$\eta_\varepsilon = \eta_w + \eta_{CO_2}/4.7$，$\eta_\varepsilon$ 为岩石中混合气体的含量，η_w 为岩石中的含水量，η_{CO_2} 为岩石中的含气量。

在真空室爆炸模型试验中，根据原型试验爆腔半径 r_n 和模拟爆源爆腔半径 r 可以得到模拟比尺：

$$N = r_\mathrm{n} / r \tag{6}$$

确定模型模拟比尺后，根据相似律，就可以确定模拟试验与原型试验中爆源压力、爆源势能、自由面压力等参数之间的相似比尺关系(其中，下标 R 表示原型试验参数，M 表示模型试验参数)：

$$\begin{cases} \dfrac{(A)_{\mathrm{R}}}{(A)_{\mathrm{M}}} = N^4 \\ \dfrac{(P_{\mathrm{n}})_{\mathrm{R}}}{(p)_{\mathrm{M}}} = N \\ \dfrac{(P_{\mathrm{a}})_{\mathrm{R}}}{(p_{\mathrm{a}})_{\mathrm{M}}} = N \end{cases} \tag{7}$$

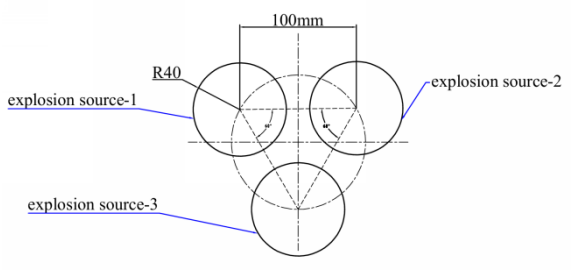
对于多点聚集爆炸，在爆源总当量保持不变的前提下，平均分为几个独立的爆源，基于每个独立爆源试验参数，确定相似比尺，进而获得真空室模型试验参数。

本文以美国“Palanquin”地下核爆炸原型试验为参照，分别开展了浅埋和深埋两组三点聚集爆炸成坑作用的模型试验，主要目的是验证真空室多点爆炸模拟系统的可行性和探究多点聚集爆炸与单点爆炸成坑作用的差异。美国“Palanquin”原型爆炸试验中，围岩类型为流纹岩，ρ 为 2500 kg/m^3，C_p 为 4000 m/s，σ_* 为 96MPa。爆源当量 4.3 kt，埋深 85 m，比例埋深为 52.3 m/kt$^{1/3}$，按照破碎岩体运动特征划分，该原型试验属于疏松爆炸类型。三点聚集爆炸成坑模型试验中有两组，一组与“Palanquin”原型试验总当量一致，分为三个爆源；另一组结合新型低当量钻地核武器的设计爆炸当量 5kt，开展了埋深为 20m 的三点浅埋爆炸试验。其中，围岩类型为花岗岩，ρ 为 2640 kg/m^3，C_{p} 为 4250 m/s，σ_* 为 200MPa。真空室多点爆炸模型的试验参数如下表 1 所示。三点爆源采用等边三角形布置，模型布局参数（见表 2）和试验布置图（见图 9）。

表 1 多点爆炸成坑模拟试验参数

Table 1 Crater Formation Simulation Parameters for Multi-Point Blast Testing

	三点爆源	
总当量 $q_{总}$	4.3 kt	5 kt
单个爆源当量 q	1.43 kt	1.67 kt
爆源埋深 W	85 m	20 m
比例半径 $\bar{r}_{\mathrm{n}}$	11	15
多点模型爆腔半径 r_{n}	12.40 m	17.8 m
气体生成物势能 $(A)_{\mathrm{R}}$	8.48×10^{11} J	9.04×10^{11} J
原型试验爆腔压力 $(P_{\mathrm{n}})_{\mathrm{R}}$	$5.11\times10^{7}\cdot$Pa	$1.97\times10^{7}\cdot$Pa
原型试验自由面压力 $(P_{\mathrm{a}})_{\mathrm{R}}$	$1.01\times10^{5}\cdot$Pa	$1.01\times10^{5}\cdot$Pa
混合含气量 η_{ε}	0.01	0.153
玻璃球半径 r	0.04 m	0.04 m
模拟比尺	310	445
玻璃球气体压力 $(p)_{\mathrm{M}}$	164.9 KPa	44 KPa
真空室压力 $(p_{\mathrm{a}})_{\mathrm{M}}$	325.77 Pa	227 Pa



(a)爆源分布示意图

(b)试验中的爆源分布

图 9 三点爆源沙箱内布局图

Fig.9 Layout Diagram of Triple-Point Blast Sources in Sandbox

表 2 真空室三点爆源模型试验布局参数

Table 2 Layout Parameters for Triple-Point Blast Source Model Testing in Vacuum Chamber

	爆炸总当量 $q_{总}$ / kt	单个爆源当量 q / kt	模拟比尺	原型埋深 W / m	原型间距 D / m	模型间距 d / mm	模型埋深 h / mm
模型一	5	1.67	445	20	44.5	100	45
模型二	4.3	1.43	310	85	31	100	274

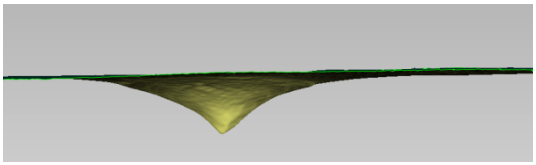
4 真空室三点聚集爆炸模型试验结果及分析

4.1“Palanquin”原型试验模拟缩比成坑试验

为了验证模型缩比试验的可行性，以“Palanquin”原型试验参数为基准进行了单点爆源成坑试验。原型试验工况当量为 4.3kt，埋深 85m。通过计算得到爆腔半径大小为 17.89m，模拟爆源玻璃球爆腔半径为 0.04m，相似比为 447.18。通过相似转换可得缩比试验的试验工况，爆源埋深 19cm，玻璃球壳内气压 13.75KPa，真空室压力 225.8Pa。

(a) 单点爆坑

(b) 爆坑扫描俯视图



(c) 爆坑扫描正视图

图 10 “Palanquin”原型试验成坑结果

Fig.10 Cratering Results from "Palanquin" Prototype Test

通过对爆坑进行扫描得到缩比试验爆坑的半径和深度为 150mm 和 40.1mm，通过相似关系转换可知缩比试验模拟结果进行还原可知弹坑半径为 33.5m，深度为 17.9m。试验中爆坑向下塌陷形成弹坑，因此讲试验结果数据与 underground explosion[9]中以地表为测量基准的原型试验数据进行对比，其中，弹坑为 36.3m，深度为 21m。从试验结果可知，结果与原型试验结果误差半径误差为 8.5%，深度误差为 14.76%。

通过试验对比缩比试验与原型试验结果可知，该缩比试验进行爆炸成坑模拟试验是可行的。

4.2 三点浅埋爆炸成坑模拟试验

按照表 2 试验参数设计，开展真空室三点浅埋爆炸成坑模拟试验。试验中，高速摄影机拍摄速度为 3600 帧/秒，分辨率 768×512。高速摄影机记录爆破全过程，如下图 11 所示。在 0 ms 时按下起爆

按钮，由图可知，0.83ms 时左右两侧小球同时起爆，中间小球略与前两个小球之间相差 0.81ms 时差。

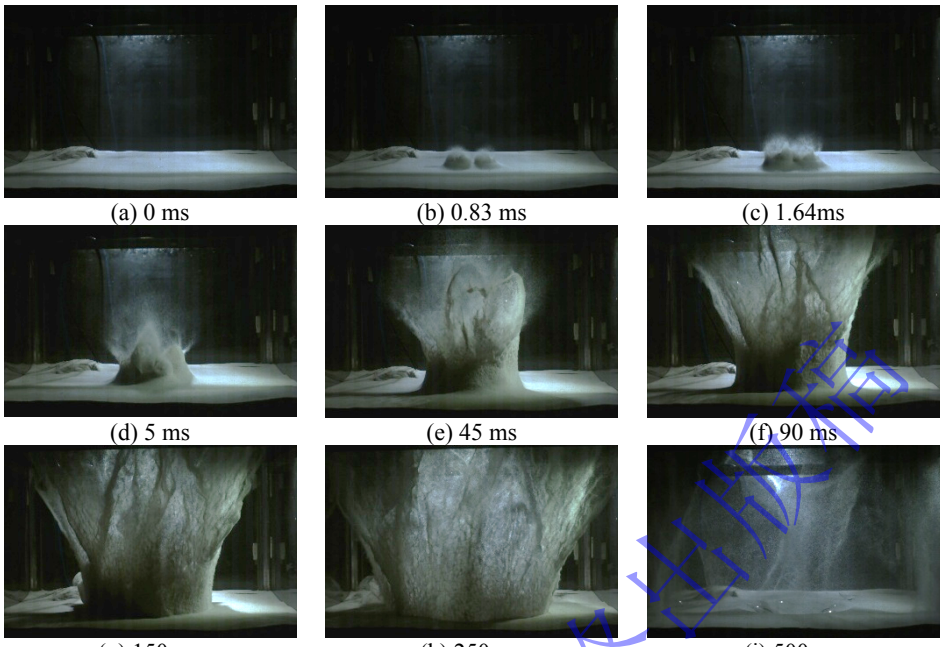


图 11 三点爆源浅埋模拟试验成坑抛掷过程

Fig.11 Cratering and Ballistic Ejecta Process in Shallow-Buried Triple-Point Blast Simulation Test

利用 3D 扫描仪记录模型试验抛掷弹坑的动态演化进程及弹坑的最终形态。如图 12 所示，该工况下抛掷弹坑自由面表观形状为圆形，弹坑平均直径为 385 mm，自由面到三个爆源 1、2 和 3 的锥坑底部的深度分别为 77.3 mm、85 mm 和 79.5 mm，爆坑的体积为 3.06×10^{6} mm^3。

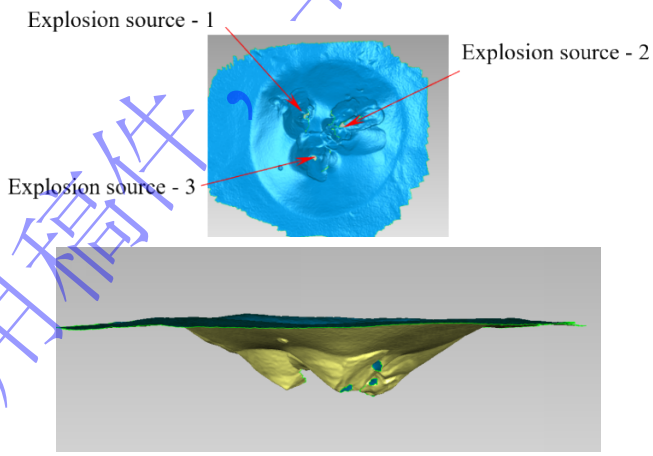
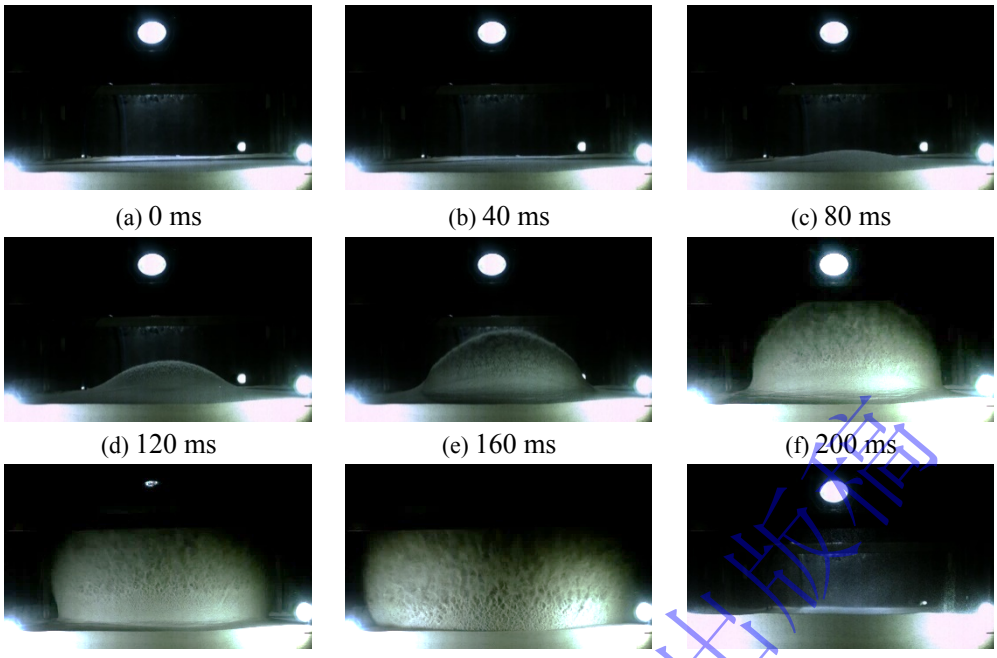


图 12 模拟试验爆坑形态 3D 扫描图

Fig.12 3D Scan Reconstruction of Blast Crater Morphology from Simulation Test

4.3 三点深埋爆炸成坑模拟试验

按照表 2 试验参数设计，开展真空室三点深埋爆炸成坑模拟试验。爆炸成坑过程如图 13 所示，爆坑形状为一个向下凹陷的塌陷弹坑，塌陷弹坑的形态如图 14 所示，弹坑平均直径为 736 mm，深度为 114.9 mm，弹坑体积为 1.85×10^{7} mm^3。整个爆破过程从起爆开始，到自由面开始隆起大约经过 40ms，再经过 200ms，鼓包顶部有气体喷出，这说明多点爆源系统 0.8ms 左右的起爆时差占整个抛掷过程的 0.33%左右，时差影响较小，满足大当量多点聚集爆炸真空室模拟要求。



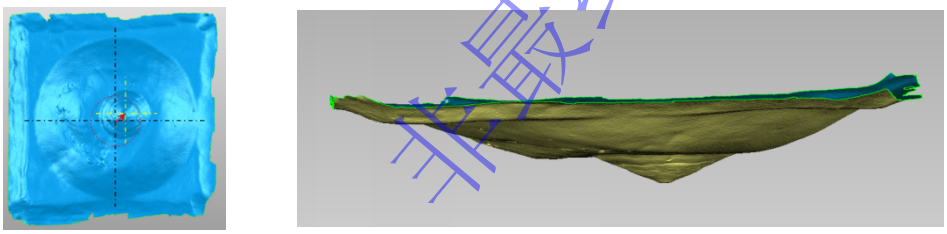
(a) 0 ms (b) 40 ms (c) 80 ms

(d) 120 ms (e) 160 ms (f) 200 ms

(g) 240 ms (h) 320 ms (i) 800 ms

图 13 三点爆源深埋模拟试验成坑抛掷过程

Fig.13 Cratering and Ballistic Ejecta Process in Deep-Buried Triple-Point Blast Simulation Test



(a) 成坑俯视图 (b) 成坑正视图

图 14 三点爆源深埋模拟试验爆坑形态 3D 扫描图

Fig.14 3D Scan Reconstruction of Blast Crater Morphology from Simulation Test

4.4 试验结果及对比分析

4.4.1 单点原型试验统计结果及经验公式

美国“Palanquin”地下核爆炸原型试验的弹坑统计结果[8]为：弹坑半径 46 m，深度 28 m，体积为 6.2×10^4 m^3。为了与工况二 5kt 地下多点聚集爆炸成坑试验结果作比较，我们采用美俄根据地下核试验爆炸成坑统计结果给出的浅埋抛掷成坑经验公式。

抛掷弹坑半径经验公式[8]为：

$$\frac{R}{q^{1/3}}=0.9\frac{W}{q^{1/3}}\lg\frac{8.8\cdot10^8(1+5.8\eta_e^{0.7})}{(\bar{r}_n)^{0.84}(\gamma W+10)(W/q^{1/3})^3} \tag{8}$$

抛掷弹坑深度和体积的经验公式[8]为：

$$H=(0.52\pm0.06)R\,;V=(1.45\pm0.15)R^2H \tag{9}$$

其中，R 为弹坑半径，W 为爆源埋深，H 为弹坑深度，V 为弹坑体积，$\bar{r}_n$ 为比例爆距，η_e 为岩石含气量，γ 表示装药上方整个岩柱的容重，$\gamma=\sum_i\gamma_iW_i/\sum_iW_i$，$\gamma_i$ 和 W_i 是各个不同特性岩层的容重与厚度

基于现场爆炸弹坑统计结果和经验公式获取的弹坑大小的数据结果如表 3 所示。

表 3 同当量单点爆源弹坑数据

Table 3 Ballistic Crater Data for Equivalent-Yield Single-Point Blast Source

	模拟当量 /kt	钻地埋深 /m	爆腔半径 r_n/m	弹坑半径 /m	弹坑深度 /m	成坑体积 /m^3	投影面积 /m^2
“Palanquin” 原型试验	4.3	85	17.8	46	28	6.2×10^4	0.66×10^4
5kt 单点浅埋爆炸试验	5	20	25.6	69.82	32.12	2.51×10^5	1.49×10^4

4.4.2 结果对比分析

基于两组模型试验工况弹坑大小的结果数据，依据相似理论，可推算得出三点聚集爆炸成坑的原型弹坑尺寸大小如半径、深度，体积、投影面积等数据。并将推算结果与单点结果进行对比。

首先，将 5kt 三点爆源聚集爆炸成坑的模拟试验结果与同埋深同当量的单点爆炸经验公式计算结果相比较，结果如表 4 所示。当单点爆源变为三点爆源后，三点聚集爆炸弹坑的半径、深度、体积和自由面上的成坑投影面积得到提高，分别为 18.4%、10.2%、7.04%和 28.4%。

表 4 三点浅埋埋爆源成坑数据与 5kt 单点浅埋爆炸试验经验公式结果对比

Table 4 Comparison Between Cratering Data from Triple Shallow-Buried Blast Sources and Empirical Formula Results of 5kt Single-Point Shallow Buried Explosive Test

	当量 /kt	间距 /m	埋深 /m	成坑半径 /m	成坑深度 /m	成坑体积 /m^3	投影面积 /m^2
5kt 单点浅埋爆炸试验	5		20	69.82	32.12	2.51×10^5	1.49×10^4
三点浅埋真空室模拟试验		31	20	85.6	35.8	2.70×10^5	2.08×10^4
对比结果				18.4%	10.2%	7.04%	28.4%

将“Palanquin”原型试验结果与“Palanquin”三点真空室模拟试验结果相比较，结果如表 5 所示。相较于原型试验，真空室三点爆源聚集爆炸成坑效率显著提高，弹坑的半径、深度、体积和自由面上的成坑投影面积得到提高，分别为 59.7%、21.3%、88.8%和 91.4%。

表 5 三点深埋爆源成坑数据与“Palanquin”原型试验对比

Table 5 Comparison of three-point deep-buried explosion sources crater formation data with the "Palanquin" prototype test

	当量 /kt	间距 /m	埋深 /m	成坑半径 /m	成坑深度 /m	成坑体积 /m^3	投影面积 /m^2
“Palanquin” 原型试验	4.3		85	46	28	6.2×10^4	0.66×10^4
真空室三点模型试验		31	85	114.1	35.6	5.52×10^5	8.09×10^4
对比结果				59.7%	21.3%	88.8%	91.8%

将真空室模拟试验结果与单点试验结果对比可知，在总当量一致的条件下，多点爆源的成坑效应以及毁伤范围更加充分。在深埋的工况下，弹坑的各项参数提升更加显著，爆炸的成坑效率更高。

两组真空室模拟试验结果进行横向对比可以看出，如表 6 所示。4.3 kt 三点爆源模拟试验成坑的效率较高，相较于 5kt 三点浅埋真空室模拟试验，弹坑的半径、体积和自由面投影面积分体扩大了 24.9%、51.1%和 74.3%，弹坑的深度变化两组差距较小。自由面投影面积反映了爆源的毁伤范围，对比两组工况试验，“Palanquin”真空室模拟试验当量虽然稍小，但该组的深度远大于 5kt 三点浅埋真空室模拟试验深度，对比爆源的弹坑数据可知，“Palanquin”真空室模拟试验弹坑成坑效率以及毁伤范围更大。

表 6 三点钻地核爆成坑相似原型推算数据

Table 6 Calculated Data for Hypothetical Crater Formation from Three-Point Earth-Penetrating Nuclear Explosions

	当量 /kt	间距 /m	埋深 /m	成坑半径 /m	成坑深度 /m	成坑体积 /m^3	投影面积 /m^2
5kt 三点浅埋真空室模拟试验	5	44.5	20	85.6	35.8	2.70×10^5	2.08×10^4
“Palanquin”真空室三点模型试验	4.3	31	85	114.1	35.6	5.52×10^5	8.09×10^4
对比结果				24.9%	0.5%	51.1%	74.3%

爆源埋深对成坑毁伤效应影响显著，埋深越大，自由面投影面积和成坑体积偏差较为明显，爆源的毁伤范围越大。通过合理的提高侵彻深度不仅能有效提高爆炸在地下耦合的能量，有效提高爆源在自由面上的毁伤范围，达到打击效果的目的，该结果为钻地核弹多弹头聚集爆炸提供数据支持。

5 结论

单点爆源成坑效应以及毁伤效应当下给已有大量的研究工作。得益于二级高压驱动阵列弹珠同步弹射装置与真空室装置，本文设计开发了用于多点聚集爆炸成坑效应的真空室模拟试验系统，并成功模拟了多点爆源成坑效应。该工作对于大当量多点地下爆炸成坑效应研究具有较大帮助。本文解决了传统单点爆源模拟的局限性和火工品爆源的安全性问题，通过同步性测试与三点爆源成坑试验，量化分析了不同埋深与当量条件下成坑参数的差异，揭示了总当量相同的情况下，多点爆源相较于单点爆源在毁伤范围方面的显著优势。通过本文研究得到如下结论：

(1) 本文开发了一种真空室模拟系统，以二级气炮原理的微型爆源装置和真空室为依托，利用同一起爆控制开关，控制多个支路电磁阀动作，通过爆源击发装置同步击破各支路的玻璃球，释放各支路玻璃球内高压气体，实现多点爆源地下爆炸成坑模拟试验。利用高速相机实时记录多点爆源爆炸成坑抛掷过程，通过三维扫描仪对弹坑数据进行记录分析。从同步性试验测试了多点爆源间的时差。

(2) 本文结合真空室模拟试验方法与相似理论，实现了大当量、大比例埋深爆炸的多点爆源成坑效应的模拟，拓展了爆炸成坑研究的试验边界。通过设计三点聚集爆炸地下成坑模拟试验，成功模拟了“Palanquin”原型试验在多点工况下的成坑效应与及抛掷过程。并将模拟结果与原型试验进行比较。从结果可知，多点爆源相较于单点有在成坑效应和毁伤范围有较大提升。

(3) 在多点爆源毁伤效应角度，本文首次通过对比模拟试验结果与原型试验结果证明，深埋多点爆源的成坑效率（半径、体积、投影面积）显著优于单点爆源，为钻地核弹多弹头协同打击策略提供了数据支持。

参考文献

[1] ADOVSKII M A, ADUSHKIN V V, RODIONOV V N, et al. A method of modeling large cratering explosions [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1969, 3(1): 73-79. **DOI**: 10.1007/BF00741616.

[2] ADUSHKIN V V, PERNIK L M. Design of linear charges for caving a slope by a large-scale explosion [J]. Soviet Mining, 1989, 25(6): 505–509. **DOI**: 10.1007/BF02528298.

[3] ADUSHKIN V V, KAMALYAN R Z, KOROLEV K D. Character of the interaction of concentrated excavation charges detonated at different times [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1989, 25(6): 782–785. **DOI**: 10.1007/BF00758751.

[4] BLINOV I M, VAKHRAMEEV Y S. The method for modelling large-scale outburst explosions by micro-explosions of explosive charges [J]. Fizika Goreniya I Vzryva, 1995, 31(2): 102–109.

[5] VAKHRAMEEV Y S. Physical foundations for approximately modeling explosions with ejecta [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1995, 31(1): 120–125. **DOI**: 10.1007/BF00755969.

[6] 徐小辉, 邱艳宇, 王明洋, 等. 大当量浅埋地下爆炸抛掷成坑效应的缩比模拟实验装置 [J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(6): 1333–1343. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0144.
XU X H, QIU Y Y, WANG M Y, et al. Development of the testing apparatus for modeling large equivalent underground cratering explosions [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(6): 1333–1343. **DOI**: 10.11883/bzycj-2017-0144.

[7] 徐小辉, 邱艳宇, 王明洋, 等. 大当量地下浅埋爆炸真空室模拟相似材料研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(

S1): 3550–3556. **DOI**: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1539.
XU X H, QIU Y Y, WANG M Y, et al. Similar materials for vacuum chamber model test under large scale t hrow blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3550–3556. **DOI**: 10.1372 2/j.cnki.jrme.2016.1539.

[8] 王明洋, 徐小辉, 邱艳宇, 等. 一种用于模拟爆炸效应的爆源装置: CN201710295250.6 [P]. 2018-11-13.

[9] ADUSHKIN V V, SPIVAK A. Underground explosions: WGC-2015-03 [R]. Lexington: Weston Geophysical Corp, 2015.

[10] 郭纬, 徐小辉, 李干,等. 二级高压驱动阵列弹珠同步弹射微型爆源的研制 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(08): 121-131. **DOI**：10.11883/bzycj-2021-0343
GUO W, XU X H, LI G, LI J, JIANG H M, LI Z H. Development of a miniature explosion device initiated by a synchronous launcher of marbles driven by two-stage high-pressure gas. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(08): 121-131. **DOI**：10.11883/bzycj-2021-0343