

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves
ISSN 1001-1455, CN 51-1148/O3

《爆炸与冲击》网络首发论文

题目： 浅埋炸药爆炸形貌及其冲击作用效应
作者： 赵振宇，周贻来，任建伟，卢天健
收稿日期： 2021-09-08
网络首发日期： 2021-12-02
引用格式： 赵振宇，周贻来，任建伟，卢天健. 浅埋炸药爆炸形貌及其冲击作用效应 [J/OL]. 爆炸与冲击.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1148.o3.20211130.1919.036.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

浅埋炸药爆炸形貌及其冲击作用效应

赵振宇^{1,2}, 周贻来^{1,2}, 任建伟^{1,2}, 卢天健^{1,2}

(1. 南京航空航天大学机械结构力学与控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016;

2. 南京航空航天大学多功能轻量化材料和结构工信部重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 现代战争中, 地雷、简易爆炸装置等典型浅埋炸药的爆炸给车辆和乘员带来严重威胁。为研究浅埋炸药爆炸形貌及其冲击作用效应, 提出了一套新型试验工装, 通过浅埋砂爆试验, 系统探究了浅埋爆炸过程中冲击波的传播、爆炸产物与砂土的喷射轨迹、靶板的变形形貌以及爆炸载荷的空间分布情况。结果表明: 浅埋爆炸在空气中产生冲击波, 其传播速度大于爆炸产物与砂土的喷射速度; 起爆后的爆炸产物与砂土迅速向外喷射, 体积随时间不断膨胀, 撞击到靶板后向四周扩散; 通过特殊设计的试验工装与靶板, 定性得出浅埋砂爆载荷产生的冲量在空间中呈非均匀分布, 即中间最大, 向四周逐渐减小。对比分析两次不同试验, 发现炸药埋深影响爆炸产物和砂土喷射时的相对位置: 埋深较小时, 爆炸产物会冲破覆盖的砂层, 直接作用到靶板; 埋深较大时, 爆炸产物基本被砂层包覆, 随砂土共同作用到靶板; 此外, 增大炸药埋深会延缓爆炸产物与砂土的喷射时间。砂土的类型直接影响靶板的变形形貌, 按北约标准配做的砂土不仅使靶板产生整体弯曲变形, 还在靶板上形成大量凹坑, 产生侵彻效果, 而普通的河砂仅使靶板产生整体弯曲变形, 无明显的侵彻效果。

关键词: 浅埋爆炸载荷; 试验工装; 冲击波; 喷射轨迹; 冲量分布

文献标识码: A

Explosion morphology and impacting effects of shallow-buried explosives

ZHAO Zhenyu^{1,2}, ZHOU Yilai^{1,2}, REN Jianwei^{1,2}, LU Tianjian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

2. MIIT Key Laboratory of Multifunctional Lightweight Materials and Structures,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: In modern warfare, shallow-buried explosives, such as landmines and improvised explosive devices, pose serious threats to civil/military vehicles and passengers. To study the explosion morphology and impacting effects of shallow-buried explosives (TNT), a novel set of test facility was proposed in this study and used to perform shallow-buried sand explosion tests. By changing the type of sand and the buried depth of the explosives, the propagation of shock wave, the ejection trajectory of explosion products and sand, the deformation morphology of target plate, and the spatial distribution of explosion load were systematically investigated. It was demonstrated that shallow-buried sand explosion generates a shock wave in air, which has a propagation velocity significantly greater than the ejection velocity of explosion products and sand. Upon detonation, the explosion products and sand were rapidly ejected outwards, with continuously increasing volume, and spread around after hitting the target plate. The impulse generated by shallow-buried sand explosion was non-uniformly distributed in space, largest in the

*收稿日期: 2021-09-08; 修回日期: 2021-10-08;

基金项目: 国家自然科学基金(11972185、12002156); 中国博士后科学基金(2020M671473);

第一作者: 赵振宇(1986—), 男, 博士, 副研究员. E-mail: zhenyu_zhao@nuaa.edu.cn;

通信作者: 卢天健(1964—), 男, 博士, 教授. E-mail: tjlu@nuaa.edu.cn.

central explosion area and gradually decreasing outwards. The buried depth of explosives in sand affected the relative position of explosive products and sand when they were ejected. When the buried depth was relatively small, the explosive products would break through the covered sand layer and directly act on the target plate. When the buried depth was sufficiently large, the explosive products were essentially covered by a sand layer, which acted on the target plate together at a delayed instant. The type of sand used significantly affected the deformation morphology of the target plate. The sand purposely prepared in accordance with the NATO standard not only caused overall bending deformation of the target plate, but also formed a large number of pits on the target plate, thus generating a penetration effect. In contrast, the ordinary river sand only caused overall bending deformation of the target plate, with little penetration effect observed. The results obtained in this study are helpful for designing more effective protective structures against intense blast impacting from shallow-buried explosives.

Keywords: shallow-buried explosion; new test facility; shock wave; jet trajectory; impulse distribution

伊拉克和阿富汗战争中，以地雷与简易爆炸装置为主的典型非对称作战方式对美军造成严峻威胁^[1]。此外，据日内瓦国际人道主义排雷中心的报告，2018年全球共发生199起反装甲车地雷事件，导致343人受伤，226人死亡^[2]。1999年以来，全世界有近10万人死于地雷、简易爆炸装置和战争遗留爆炸物^[3]，故迫切需要研发新型防护结构，充分保护人员和设施免受或减轻浅埋爆炸带来的巨大危害^[4]。但是，浅埋爆炸会在防护结构上引起一系列复杂的加载现象，例如：爆炸发生在土壤中时，由于土壤是一种由固体、液体和气体组成的混合物^[5]，与在空气爆炸中相比，相关的冲击载荷传递过程更加复杂。因此，准确描述浅埋炸药爆炸的载荷特性，成为地雷防护结构设计的核心关键问题。

作为载荷输入，充分了解浅埋爆炸载荷的特性是设计合理防护结构的必要前提。一般而言，爆炸呈现两种极限情况：其一，爆炸发生于地下深处，能量完全被土壤/岩石吸收，地面空气中无爆炸产物和土壤的喷射，也无冲击波的传播；其二，爆炸发生在空气中，向地面传递的能量较少，仅有爆轰产物和冲击波在空气中传播^[6]。本文重点关注的浅埋砂爆介于上述两种极限之间，即爆炸发生时，空气中既有土壤的喷射，又有爆轰产物和冲击波的传播。目前，针对浅埋砂爆载荷特性的研究在试验方面取得了一些进展。Westine等^[7]基于试验数据，给出了浅埋爆炸载荷冲量的经验公式，这是目前应用最为广泛的浅埋爆炸载荷冲量计算手段；在该经验公式中，靶板迎爆面上的冲量分布主要取决于以下三方面：炸药材料参数、砂土材料参数及炸药与靶板的布设位置。随后，在已有试验数据及模型的基础上，Grujicic等^[8]采用量纲分析法，修正了考虑炸药、砂土材料特性及炸药与靶板布设位置的爆轰冲量计算方法；虽然该方法未考虑爆炸冲击波在传递过程中的衰减现象，但仍可为砂爆冲量的定量分析提供有力帮助。上述计算模型均为基于试验数据的经验模型，故仅适用于特定的炸药、砂土类型和布设条件，一旦炸药、砂土类型等发生变化，只能借助新的浅埋爆炸试验以探究其载荷特性的变化。Grujicic等^[8]组装了一套竖向冲量测量装置，即在靶板上方放置固定的冲量捕捉检测装置，通过垂直导轨连接检测装置和靶板：浅埋炸药爆炸时，爆轰载荷作用于靶板，后者产生垂直向上的位移，该位移被检测装置捕捉，进而由该位移反推出本次砂爆载荷产生的冲量；但是，该装置仅能测量浅埋爆炸产生的整体冲量，无法得出冲量在靶板上的空间分布。在此基础上，Denefeld等^[9]提出了一种测量浅埋爆炸载荷冲量空间分布的新型装置，即多环套嵌装置，通过测量不同时刻各圆环的上升速度，求得该圆环区域上分布的冲量，由此可估计爆炸产生的冲量在空间中的分布情况。此外，作为冲击动力学的常见测量设备，Hopkinson压杆(又称Kolsky杆)被广泛应用于测定固体材料在冲压载荷下的力学行为。Clarke和Rigby等^[10,11,12]将Hopkinson压杆阵列排布，分别测定各杆在浅埋爆炸载荷下的应力变化，相邻杆之间采用插值法进行计算，由此可获得浅埋爆炸载荷的冲量在靶板表面上的空间及时间分布规律。

综上，国内外目前已开发的试验装置大多仅适用于小当量的浅埋爆炸试验，且试验装置结构复杂，加工制造精度要求严格，成本较高。结合前人研究基础，本文设计了一套简单易行且方便实施的试验装置，对浅埋炸药爆炸形貌及其冲击作用效应开展系统研究。依托本套新型试验装置，我们开展不同的浅埋爆炸试验，通过对比分析揭示浅埋爆炸的基本特性，为优质防护结构的设计提供参考。

1 浅埋砂爆试验设置

本研究采用不同的砂土类型和炸药埋深,开展了两次浅埋爆炸试验,分别命名为试验 1 与试验 2。以下给出试验细节。

1.1 试验工装

为研究浅埋炸药爆炸形貌及其冲击作用效应,设计了一套易加工且搭建方便的工装,由底座、立柱、横梁、配重、基板、斜撑、压板以及高速摄像机组成,如图 1 所示。为防止工装在爆炸过程中发生移动,在基板上放置四块由混凝土块制成的配重,配重总质量为 6 吨。为增加工装的稳定性,在横梁与立柱之间设置斜撑。工装材料为 Q345 钢。为获得浅埋爆炸载荷产生的冲量在空间中的分布情况,在工装基板上分散布置 9 根完全相同的矩形梁作为试验靶板,按照顺序为每块靶板设置编号,如图 1(b) 所示。与一整块靶板相比,本文提出的分布式靶板可更准确的显示浅埋爆炸冲量在空间中的分布。靶板的厚度为 10 mm,平面尺寸见图 2。试验中,在工装正前方设置高速摄像机(帧率 20000 帧),拍摄整个浅埋爆炸过程。此外,在面向高摄方向的立柱与横梁上涂上具有特定长度和宽度、红白相间的标尺,爆炸完成后对其进行图像处理,可定量得出喷射产物形貌的几何参数。

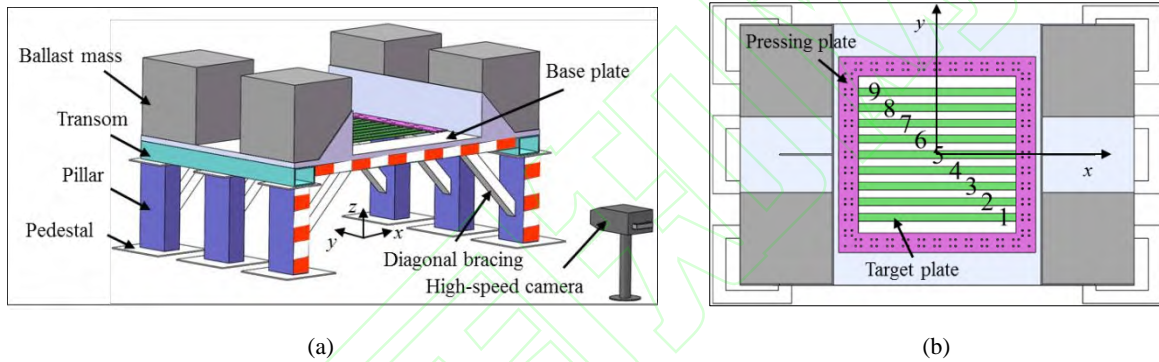


图 1 试验工装: (a) 斜视图 (b) 俯视图

Fig. 1 Schematic of test set-up: (a) oblique view and (b) top view

1.2 靶板材料

靶板材料选用铝合金 AL6063-T6, 采购自易迈铝业(江苏)集团有限公司。为获得靶板的物理材料参数,参考标准 GB-T228.1-2010,在 MTS 拉伸试验机上对靶材进行单轴拉伸试验,速度为 0.5 mm/min。图 3 给出拉伸应力应变曲线,由此得弹性模量 $E_s = 68.9 \text{ GPa}$, 屈服强度 $\sigma_y = 251 \text{ MPa}$ 。

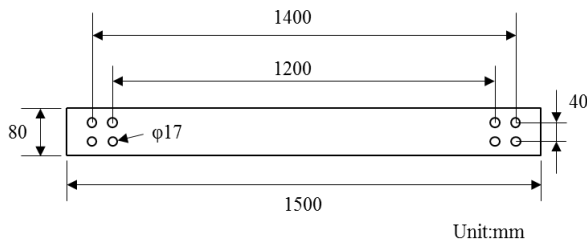


图 2 靶板平面尺寸

Fig. 2 In-plane geometric dimensions of target plate

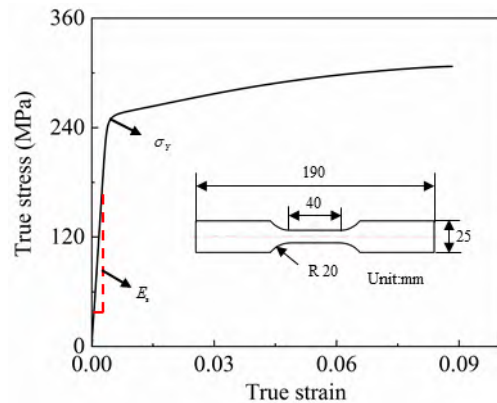


图 3 AL6063 真实应力-应变曲线

Fig. 3 True stress-strain curve of AL6063

1.3 试验工况

1.3.1 砂层的铺设与砂土参数

两次试验采用的砂土类型不同，试验 1 采用按北约标准 AEP-55 配做的砂土，试验 2 采用普通河砂。对于北约标准砂，按照 AEP-55 的要求，铺设的地层范围是 2 m×2 m，深度约 1.5 m。铺设地层时，采取分层铺设的方法，即每铺设 400 mm 厚的砂土夯实一次；夯实过程中，采用特定容器不断取样，测量密度，确保其满足 AEP-55 的密度要求。上一层砂土满足密度要求后，再次填入 400 mm 厚的砂土，继续夯实，测量密度。如此循环，直到整个沙坑被填满，确保其密度误差在可控范围。对于普通河砂，地层铺设范围与北约标准砂一致，且同样采取分层铺设的方法，但铺设过程中未特意控制密实度，仅把砂层夯实，不至于松散。图 4 比较了两次试验中砂土的形貌：可见，北约标准砂土的粒径较大，现场测量其密度约 2261 kg/m³，而普通河砂的粒径较小，现场测量其密度约 1387 kg/m³。图 5 给出两种类型砂土的级配，可见在试验 1 砂土中，5 mm 以下粒径质量占比 51%，满足北约标准 AEP-55，而在试验 2 砂土中，5 mm 以下粒径质量占比 100%，两者粒径分布呈现明显差异。

现场对砂土进行采样并测量其质量 $m_{\text{采样}}$ ，随后把采样砂土放入烘箱，烘干其水分后测量其质量 $m_{\text{干砂}}$ 。采用下式计算砂土的含水量^[9]：

$$w = \frac{m_{\text{采样}} - m_{\text{干砂}}}{m_{\text{干砂}}} \quad (1)$$

由此可得试验 1 中砂土的含水量为 4.49%，试验 2 中砂土的含水量为 18.98%。

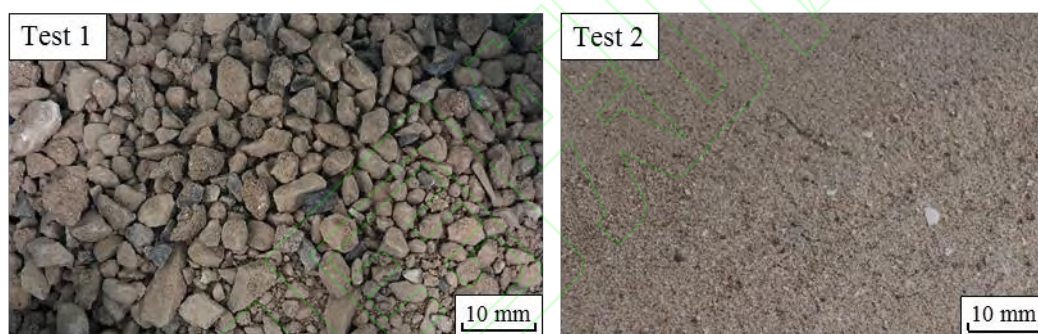


图 4 试验 1 和试验 2 采用砂土的形貌

Fig. 4 Morphologies of sand used in Test 1 and Test 2

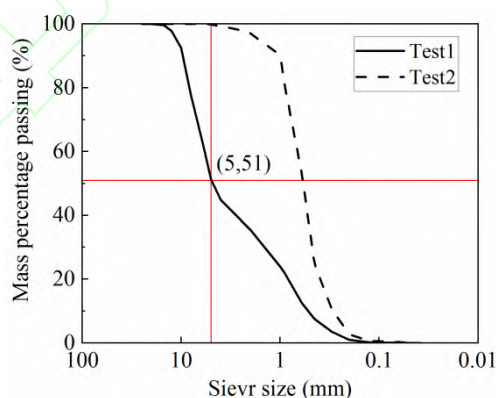


图 5 试验 1 和试验 2 采用砂土的粒径分布

Fig. 5 Particle size distribution of sand used in Test 1 and Test 2

1.3.2 炸药与靶板的布设

浅埋炸药采用圆柱形 TNT，其直径与高度均为 90 mm，质量为 1 kg，如图 6 所示。采用引爆药对 TNT 进行起爆，引爆药质量约为 2 g，引爆点位于 TNT 的上表面（见图 6）。试验时，TNT 被竖直埋设在砂土中，且位于靶板中心正下方，如图 7 所示。



图 6 试验用 TNT 及其起爆方式
Fig. 6 TNT and its initiation charge

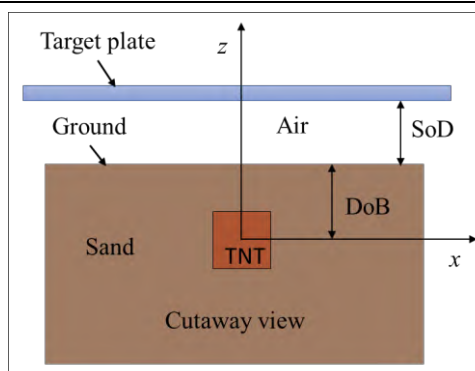


图 7 炸药、砂土、靶板的相对位置
Fig. 7 Relative position of explosive, sand and target plate

炸药、砂土、靶板三者之间的位置关系是浅埋试验的关键参数，直接影响爆轰产物的喷射和靶板的动态响应。炸药的相对位置由两个具体参数控制，即埋深与炸高，如图 7 所示：炸药埋深(DoB)代表炸药中心到地面的距离，炸高(SoD)代表地面到靶板下表面的距离。炸高对靶板接收到的冲量有显著影响，炸高越大，直接作用于靶板的冲量越小，相应的靶板变形越小^[13]。为保证靶板在爆炸后有适当的变形，且更多的捕捉爆炸时砂土的喷射形貌，同时考虑高速摄像机的帧率，本文试验的炸高固定不变(1000 mm)。炸药的埋深不仅影响爆轰产物的喷射和靶板的变形，还影响爆炸后炸坑的大小：炸坑太大，会影响工装稳定性。通过估算靶板的变形与爆炸后炸坑的大小，确定试验 1 炸药埋深 100 mm，试验 2 炸药埋深 145 mm。

1.3.3 靶板边界条件

所有靶板采用固支边界条件，即采用压板与 8 颗螺栓将每根靶板固定于基板，如图 8 所示：螺栓限制靶板的平动，压板限制靶板边界处的转动。压板外框尺寸 1500 mm×1500 mm，内框尺寸 1200 mm×1200 mm，故每根靶板的实际有效跨度为 1200 mm。



图 8 靶板边界条件

Fig.8 Boundary conditions of target plates

综上，为方便查看与对比，将两次试验的相关参数列于表 1 中。

表 1 浅埋砂爆试验参数

Table 1 Parameters of shallow buried sand explosion

试验		炸药参数			砂土参数			炸药位置参数	
编号	类型	质量/kg	直径/mm	高度/mm	类型	密度/(kg/m ³)	含水量/%	DoB/mm	SoD/mm
1	TNT	1	90	90	北约标准砂	2261	4.3	100	1000
2	TNT	1	90	90	河砂	1387	18.6	145	1000

2 浅埋砂爆试验结果

2.1 爆炸过程

图 9 给出高速摄像机捕捉到的爆炸过程，左列为试验 1，右列为试验 2。试验 1 中，一团火光首先

从地面喷射而出，这是起爆后高温高压的爆炸产物，其冲破炸药上层覆盖的砂层后，向外喷射。在火光（即爆炸产物）底部围绕着一层砂土，其向外喷射的动力有二：一是爆炸产物向外喷射时，携带了部分砂土；二是爆炸产生的冲击波在砂层中传播时不断的挤压砂土，促使其向外喷射。由图 9 可见，浅埋 TNT 起爆后，爆炸产物与砂土迅速向外喷射，其体积随时间不断膨胀，在接触到靶板后受到工装的阻碍，迅速向周围扩散。与试验 1 显著不同，在试验 2 中首先从地面喷射而出的是被砂土包围的爆炸产物；随后，砂土与爆炸产物迅速向外喷射。高速摄像显示，在喷射过程中，爆炸产物始终被砂土包围，故砂土首先接触到靶板，受到靶板阻碍后迅速向四周扩散。已有研究表明，100 g C4 炸药在北约标准砂中埋深 30 mm 起爆后，沙土的喷射速度可达 900 m/s^[14]。本次试验中，通过图中标尺计算，从 0.1 ms 到 0.4 ms，试验 1 爆炸产物和砂土上升约 500 mm，其前沿平均抛射速度约为 1666.67 m/s。从 0.4 ms 到 1.0 ms，试验 2 爆炸产物和砂土上升约 475.61 mm，其前沿平均抛射速度约为 792.68 m/s。

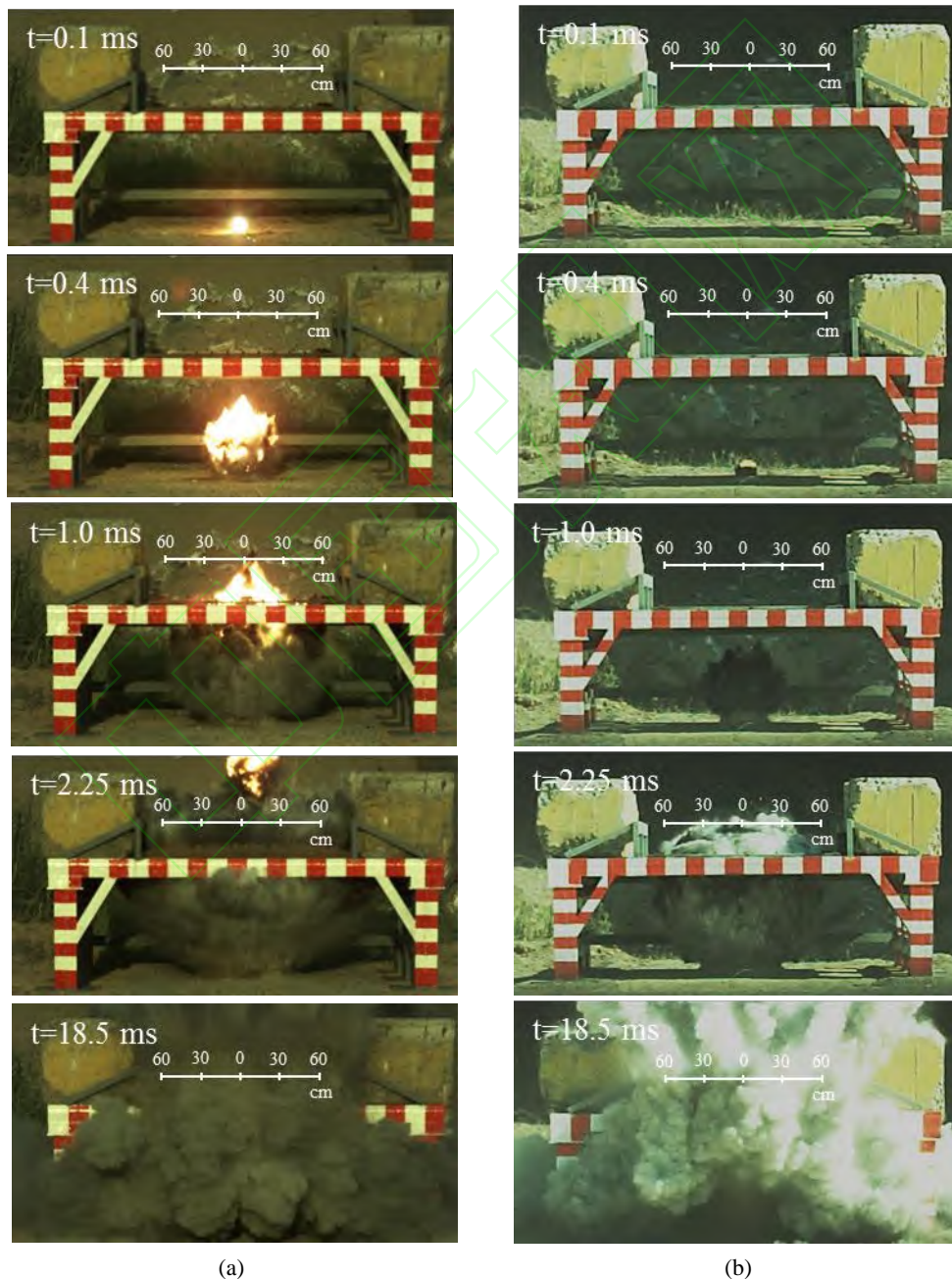


图 9 爆炸过程：(a) 试验 1，(b) 试验 2

Fig. 9 Explosion process of (a) Test 1 and (b) Test 2

2.2 冲击波的传播

浅埋于砂土中的炸药被引爆后产生冲击波，冲击波先以压缩波的形式在砂土中传播，到达砂土与空气交界处，大部分以拉伸波的方式返回砂土，少量透射进入空气^[15]。与此同时，爆轰产物向周围空气中膨胀时也会形成冲击波。冲击波是一种强压缩波，在波阵面前后伴随有很大的密度差，光的传播受到影响和改变^[14]，故可采用高速摄像捕捉冲击波。以试验 1 为例，由于爆炸产物和砂土的干扰，首次看到冲击波波阵面的时间是炸药起爆后的 0.60 ms，波阵面随后向外传播，如图 10 所示。通过图像处理，可得冲击波波阵面与砂土的横向(与地面平行方向)传播速度，结果见图 11。可见，随着传播距离增大，由于空气的阻碍，波阵面横向速度不断衰减，砂土的横向喷射速度也逐渐减小；在同一时刻，波阵面的横向传播速度明显大于砂土的横向喷射速度，且两者之间的差异逐渐增大。此后，冲击波继续向外传播，遇到工装的立柱后，部分在立柱表面发生反射，产生反射冲击波，其余部分穿过立柱，继续向外传播。

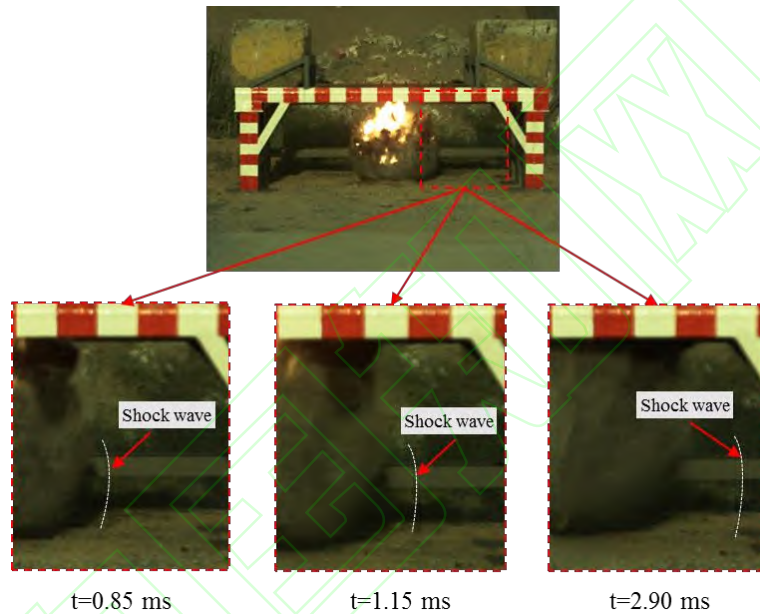


图 10 冲击波横向传播过程(为清晰标识冲击波位置，图中用虚线标注波阵面位置)

Fig. 10 Transverse propagation process of shock wave (to clearly identify the location of shock wave, the location of wavefront surface is marked using dashed line)

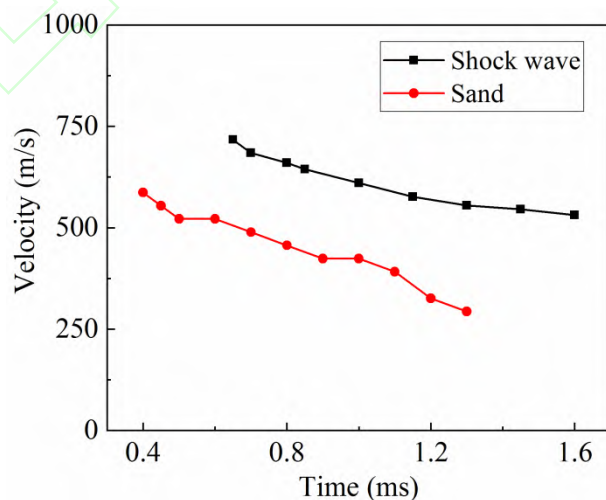


图 11 冲击波与砂土的速度时程曲线

Fig. 11 Velocity versus time curves for both shock wave and sand

2.3 靶板变形

图 12 给出两次试验后靶板的变形情况。由图可见，所有靶板均发生整体弯曲变形，但未断裂。在 x 向靶板两端，由于压板与螺栓的约束作用，靶板未发生变形。为进一步分析靶板的变形，图 13 给出靶板从夹具上拆下后的变形轮廓图，其中图 13(a)与图 13(b)是三维轮廓图，图 13(c)与图 13(d)是二维轮廓图。

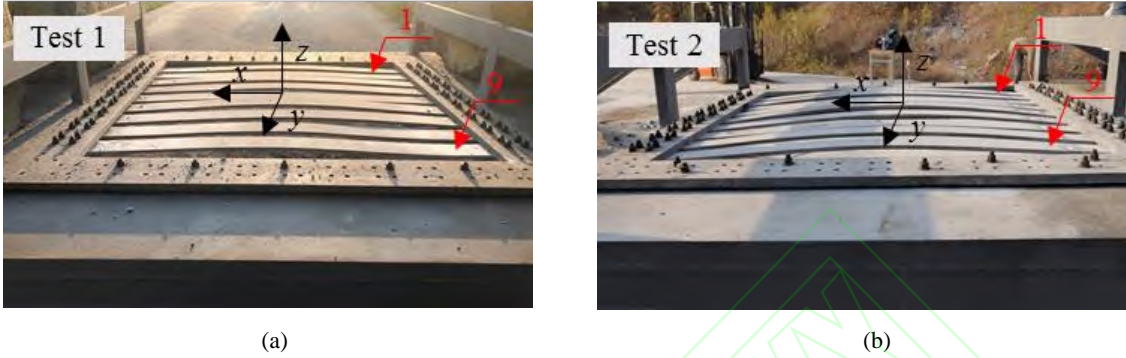
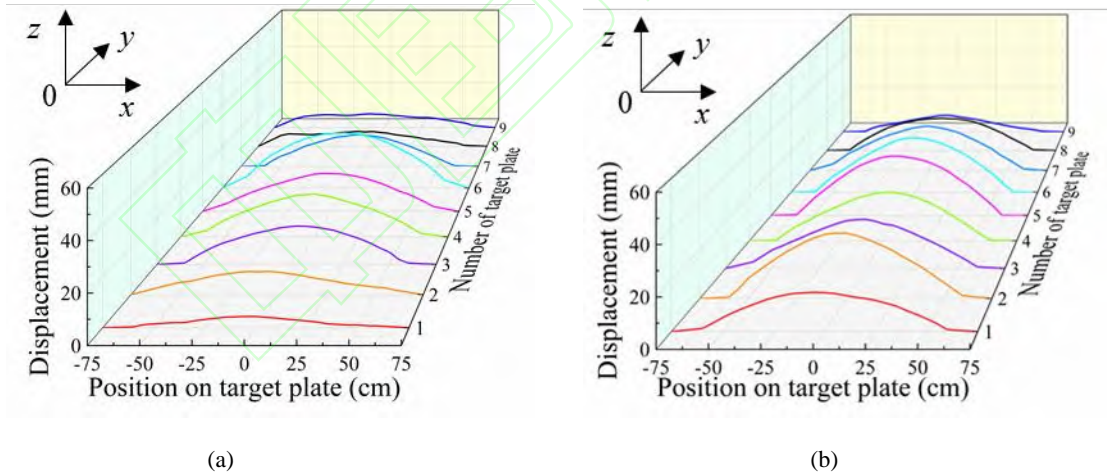


图 12 靶板变形 (a) 试验 1 (b) 试验 2

Fig. 12 Deformation of target plates: (a) Test 1 and (b) Test 2

有图 13 可见，沿 x 方向，每根靶板变形呈拱形，即中间最大，向两端逐渐减小，且挠度基本呈对称分布。在靶板两端($-75\text{ cm} < x < -60\text{ cm}$ 和 $60\text{ cm} < x < 75\text{ cm}$)，由于压板与螺栓的约束作用，靶板变形挠度本应为零，但由于靶板从夹具上拆下后，发生回弹，导致靶板在边界处产生了变形挠度。沿 y 方向，靶板变形并未以 5 号靶板为中心呈对称分布，究其原因，可能有三：一是埋设时未将炸药置于 5 号靶板中心正下方，有一定的位置误差；二是埋设时未将炸药竖直放置，与靶板迎爆面之间呈一个夹角；三是未将不同粒径的砂土均匀分布于炸药四周。



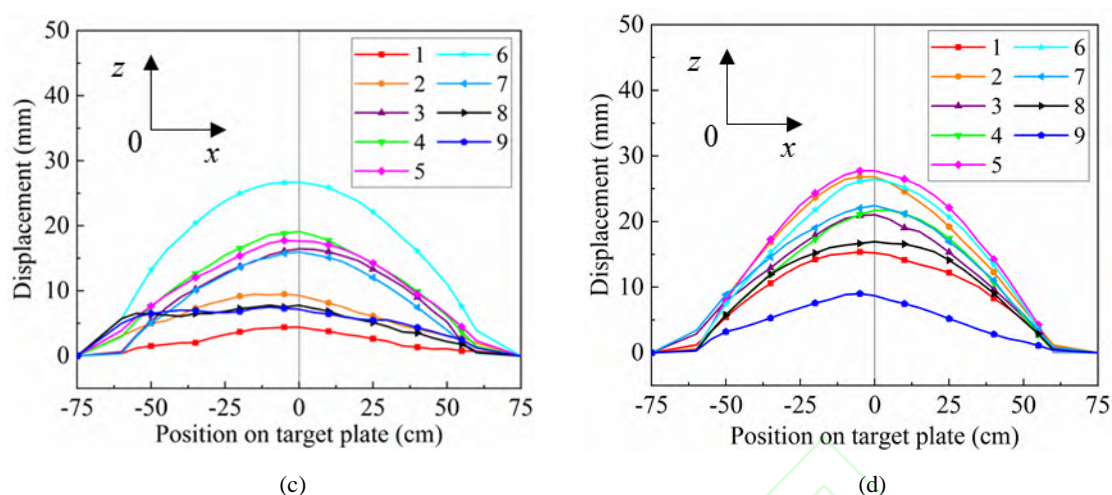


图 13 靶板变形轮廓 (a) 试验 1 (b) 试验 2 (c) 试验 1 (d) 试验 2

Fig. 13 Deformed profiles of target plates: (a) Test 1, (b) Test 2, (c) Test 1 and (d) Test 2

拆下靶板后，测量出每个靶板跨度中点的最终挠度，结果如图 14 所示。靶板的最终变形沿 y 向基本呈拱形分布，中间位置处的挠度最大，向两边逐渐降低，对比试验 1 与试验 2 靶板变形发现，前者更向中部位置集中，后者更为均匀。在试验 1 中，靶板从基板上拆卸后发生回弹，导致未拆卸时靶板的挠度大于拆卸后的最终挠度。有鉴于此，在试验 2 中既测量了靶板的最终挠度，也测量了其未拆卸时的挠度，后者如图 14 中蓝色三角线所示。可见，靶板未拆卸时的挠度明显大于拆卸后的最终挠度，表明靶板未拆卸时，其内储存了一定的弹性变形能。

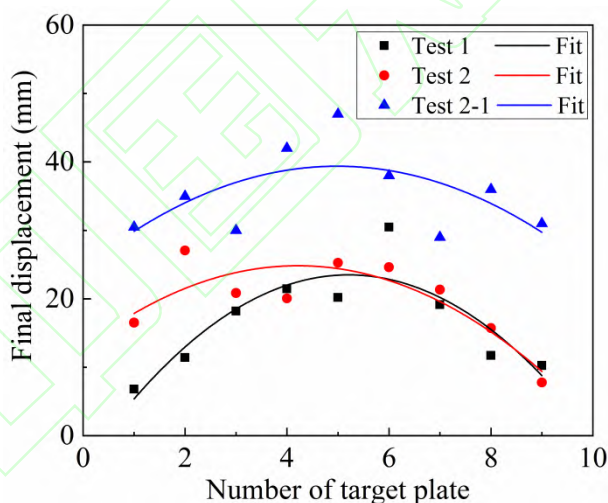


图 14 靶板的变形挠度

Fig. 14 Deformation of target plates

综上，沿 x 、 y 两个方向，试验 1 与试验 2 中靶板的整体变形均呈拱形分布，由此表明，浅埋砂爆炸荷载产生的冲量在空间中呈非均匀分布，即中心区域大，向四周逐渐降低。

2.4 炸坑形貌

图 15 对比了两次浅埋爆炸试验产生的炸坑，可见两个炸坑的形状均呈倒锥形，炸坑顶部近似圆形，且炸坑顶部均高于地面。试验现场发现，炸坑周围高于地面的这部分砂土很松软，间隙大，故可确定这部分砂土是爆炸初始向四周喷射的砂土回落而形成。同时发现，两次试验中形成的炸坑的颜色明显不同，我们认为这是砂子的类型不同造成的。试验 1 中的砂子采用粒径不同的石子和土壤配做而成，颜色较深，故爆炸后炸坑的颜色也较深。试验 2 中的砂子为普通河砂，粒径较小，爆炸后，被蒸干水分的浅色砂子回落炸坑；此外，由于高温高压的爆炸产物的挤压，部分砂子变成粉末状后回落炸坑。

坑。因此，试验 2 形成了浅色炸坑。

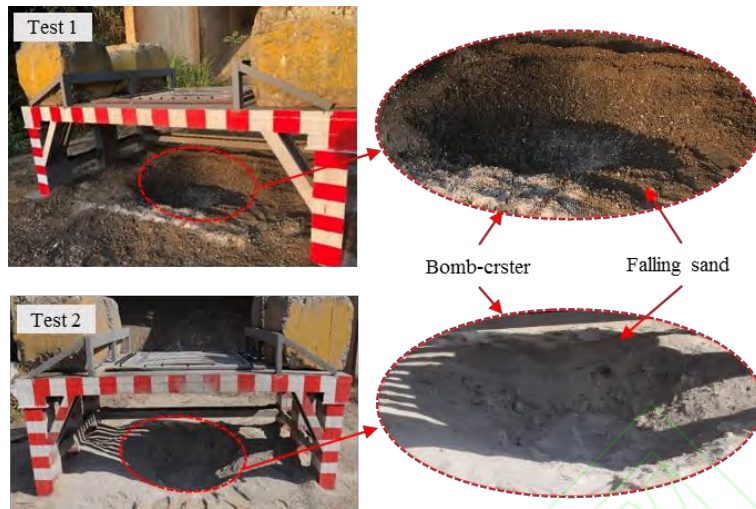


图 15 试验 1 和试验 2 产生的炸坑形貌

Fig.15 Morphologies of bomb-craters in Test 1 and Test 2

经现场测量，炸坑的具体尺寸参数列于表 2。试验 2 炸坑的最大直径与最大深度均比试验 1 炸坑的相应值大，因为前者的炸药埋深更大，使得砂层吸收更多的爆炸能量，促使更多的砂土被抛射而出。

表 2 炸坑参数

Table 2 Parameters of bomb-craters

试验编号	炸坑形状	炸坑最大直径/mm	炸坑最大深度/mm
1	倒锥形	1300	345
2	倒锥形	2100	430

3 分析与讨论

3.1 靶板迎爆面形貌

爆炸后的靶板迎爆面形貌如图 16 所示。试验 1 中，由于高温高压的爆炸产物直接与靶板相互作用，靶板迎爆面被严重烧灼，留下大量黑色印记。试验 2 中，虽然靶板的迎爆面也出现黑色的烧灼印记，但明显没有试验 1 中靶板的烧灼严重。同时发现，靶板的中心区域覆盖了一层白色物质，仔细观察后发现是直径非常小的粉末状砂土粘附于靶板迎爆面。试验 1 与试验 2 靶板的迎爆面形貌明显不同，主因是二者的炸药埋深和砂土类型不同。试验 1 中的炸药埋深较浅，爆炸产物冲破砂层的覆盖后直接作用于靶板，在靶板上形成黑色的烧灼印记。试验 2 中的炸药埋深较深，爆炸后，覆盖在爆炸产物之上的砂土层首先作用于靶板，爆炸产物未与靶板直接接触，砂土层的存在减弱了爆炸产物对靶板的烧灼，故靶板迎爆面的烧灼印记较弱，且在中心区域的迎爆面上留下了粉末状砂土。

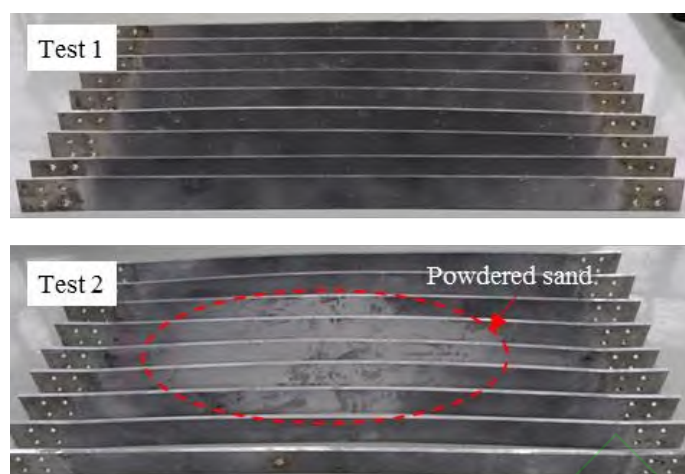


图 16 靶板变形形貌对比

Fig. 16 Comparison of deformation morphologies of target plates

3.2 爆炸产物与砂土的喷射形貌

对比试验 1 和试验 2 的浅埋爆炸过程时序图,发现二者在喷射初始阶段呈现显著差异。试验 1 中,爆炸产物率先冲破炸药表面覆盖的砂层,之后带动周围的砂土向外喷射:在整个喷射过程中,爆炸产物未被砂土包围(覆盖)。但是,在试验 2 中,爆炸产物始终未冲破砂层,爆炸产物被砂层包裹着向外喷射,直至撞击到靶板。图 17 对比了采用图像处理方法得到的爆炸产物和砂土随时间变化的喷射轨迹,可见试验 2 中爆炸产物喷射到相同空间位置时对应的时间明显迟于试验 1,这种现象也源自于炸药埋深和砂土类型的不同,也和砂子内部的孔隙分布及连通情况有关。S.D. Clarke 等^[16]的研究表明,土壤的孔隙分布及连通情况是影响靶板变形的主要因素之一,这主要是因为土壤的孔隙分布及连通情况不同,其对爆炸产物的限制作用也不同。就无粘性的土壤而言,孔隙越小意味着可压缩性越小,对爆炸产物的限制就越大,荷载也就更加集中。由于本文试验条件的限制,其详细影响机理将在后续研究工作中讨论。

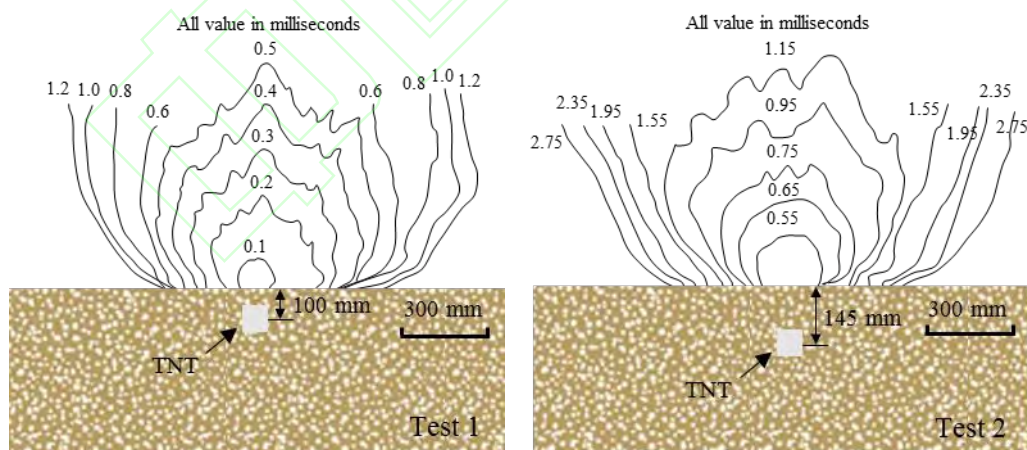


图 17 试验 1 和试验 2 中爆炸产物和砂土的喷射轨迹对比

Fig. 17 Comparison of ejection trajectories of explosive products and sands in Test 1 and Test 2

3.3 砂土对靶板的侵彻

试验 1 中的靶板在迎爆面产生诸多大小不一的凹坑,如图 18 所示,这是因为爆炸过程中高速喷射的砂土直接撞击靶板,在靶板上形成了侵彻的效果。但是,在试验 2 靶板的迎爆面未发现明显的凹坑,这是因为两次试验采用的砂土类型不同。试验 1 采用按北约标准 AEP-55 配做的砂土,大直径的

砂粒占比较多，而试验 2 采用普通河砂，小直径的砂粒占比较多。在砂粒喷射过程中，大直径砂粒携带的动能更大，故在靶板上产生侵彻效果并形成凹坑，而小直径砂粒的动能小，无法在靶板上形成凹坑。经统计，试验 1 靶板迎爆面上不同直径凹坑的频数分布结果如图 19(a)所示，由于直径小于 1 mm 的凹坑过于密集，不易统计，故图中仅统计了直径在 1~17 mm 之间凹坑的频数分布。可见，3~5 mm 直径的凹坑数量最多，而直径大于 11 mm 的凹坑仅占很小比例。图 19(b)给出试验 1 中每个靶板的迎爆面上不同直径凹坑的频数分布，可见编号 1~6 的靶板拥有最多的 1~5 mm 直径凹坑，编号 7~9 的靶板则拥有最多的 5~9 mm 直径凹坑。此外，6 号靶板拥有的 9~13 mm 和 13~17 mm 直径凹坑数量明显多于其它靶板，说明其受到更多的含有较大动能的大直径砂粒的撞击，这也解释了图 14(a)中 6 号靶板的最终挠度大于其它靶板的原因。

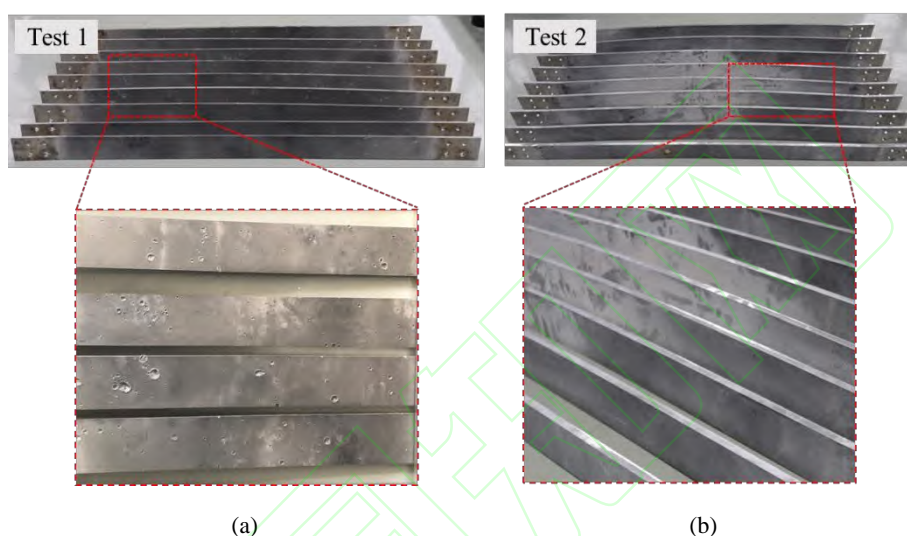


图 18 砂土对靶板的侵彻作用：(a) 试验 1 (b) 试验 2

Fig. 18 Penetration of sand particles into target plates: (a) Test 1 and (b) Test 2

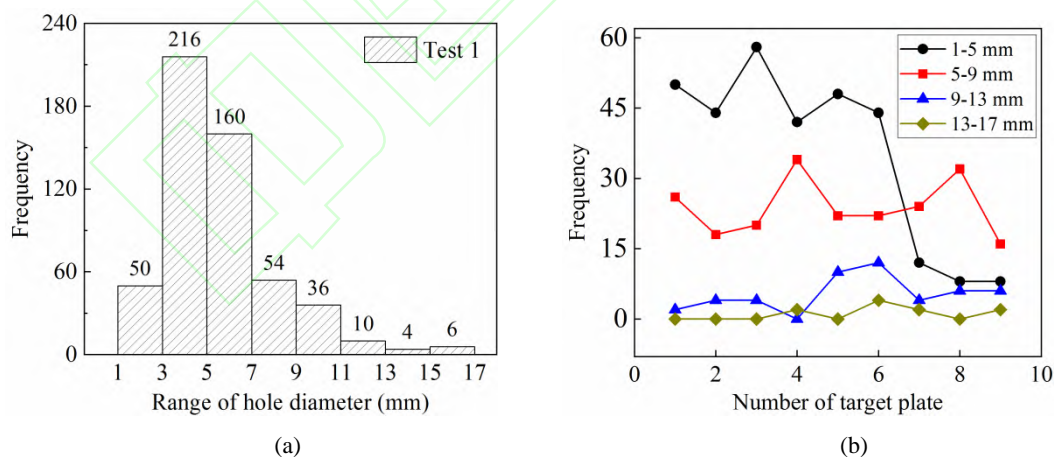


图 19 试验 1 靶板上凹坑数量统计：(a) 不同直径凹坑频数分布 (b) 靶板上凹坑频数分布

Fig. 19 Statistics of pits formed on target plates after shallow-buried explosion: (a) frequency distribution of pits with different diameters in all target plates and (b) frequency distribution of pits with different diameters on each target plate

基于图 19(a)中的数据，取每个直径范围内的中点直径作为代表，取每个直径范围内的中点直径为 代表，得到不同直径凹坑所占的比例。同时，从原稿图 5 中计算得到不同直径的砂子所占的比例，将 两组数据绘制到图 A2 中，如下所示。可见，两者的分布趋势基本一致，即中等直径占比较多，小 直径与大直径占比较少。但两者也有一定区别：相较于砂子直径，峰值占比的凹坑直径偏小，即 曲线向左偏移，分析认为与砂子的冲击效果有关。砂粒撞击靶板时会产生碎裂，且因为砂子并未穿 透靶板，

其直径一般略大于靶板上凹坑的直径。因此，7~9 mm 粒径的砂子可能仅产生 4~5 mm 直径的凹坑，导致峰值占比的凹坑直径偏小。

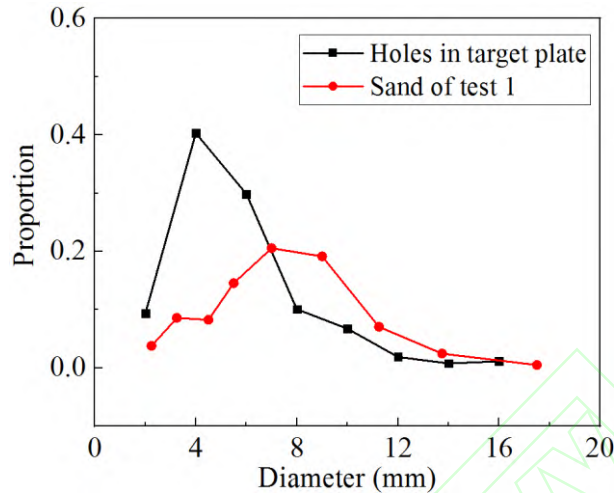


图 20 不同直径凹坑与砂子所占比例

Fig. 20 Proportion of holes and sand particles having different diameters

4 结论

本文依托新型试验装置，通过两次浅埋砂爆试验，研究了浅埋爆炸时冲击波的传播、爆炸产物与砂土的喷射轨迹、靶板的变形形貌以及浅埋爆炸产生的冲量在空间中的分布情况，得出以下结论：

- (1) 浅埋爆炸在空气中产生冲击波，其传播速度大于爆炸产物与砂土的喷射速度。
- (2) 浅埋炸药起爆后，高温高压的爆炸产物及其周围的砂土向外喷射，接触靶板后受到靶板和工装的阻碍，迅速向四周扩散；爆炸后在地面形成倒锥形炸坑，部分抛射而出的爆炸产物及砂土回落地面，聚集在炸坑口。
- (3) 炸药埋深影响爆炸产物和砂土喷射时的相对位置：埋深较小时，爆炸产物冲破覆盖的砂层，直接作用于靶板；埋深较大时，爆炸产物基本被砂层包覆，随砂土一起作用于靶板，且炸药埋深较大时会延缓爆炸产物与砂土的喷射时间。
- (4) 砂土类型影响靶板的变形形貌：采用北约标准配做的砂土，不仅使靶板产生整体弯曲变形，还在靶板上形成大量凹坑，产生侵彻的效果（即砂土与爆炸产物形成一种联合载荷），采用普通河砂，仅使靶板产生整体的弯曲变形，未产生明显的侵彻效果。
- (5) 通过特殊设计的试验工装与靶板，定性得出浅埋砂爆载荷产生的冲量在空间中呈非均匀分布，在靶板中央区域最大，向四周逐渐减小。

参考文献

- [1] 张钱城, 郝方楠, 李裕春等, 爆炸冲击载荷作用下车辆和人员的损伤与防护[J]. 力学与实践, 2014,36(005):527-539.
ZHANG Q C, HAO F N, LI Y C, et al. Research progress in the injury and protection to vehicle and passengers under explosive shock loading[J]. Mechanics in Engineering, 2014,36(5): 527-539. DOI: 10.6052/1000-0879-13-539.
- [2] GICHD-SIPRI. Global mapping and analysis of anti-vehicle mine incidents in 2018, GICHD-SIPRI, Geneva, June 2019 ISBN: 978-2-940369-76-8
- [3] RIGBY S E, FAY S D, TYAS A, et al. Influence of particle size distribution on the blast pressure profile from explosives buried in saturated soils[J]. Shock Waves, 2017(2):1-14. DOI: 10.1007/s00193-017-0727-7

- [4] DENEFFELD V, HEIDER N, HOLZWARTH A. Measurement of the Spatial Specific Impulse Distribution Due to Buried High Explosive Charge Detonation[C]// 30th International Symposium on Ballistics. 2017. **DOI:** info:doi/10.1016/j.dt.2017.03.002
- [5] LINFORTH S, TRAN P, RUPASINGHE M, et al. Unsaturated Soil Blast: Flying Plate Experiment and Numerical Investigations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 125. **DOI:** 10.1016/j.ijimpeng.2018.08.002
- [6] DESHPANDE V S, MCMEEKING R M, WADLEY H, et al. Constitutive model for predicting dynamic interactions between soil ejecta and structural panels[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2009, 57(8):1139-1164. **DOI:** 10.1016/j.jmps.2009.05.001
- [7] WESTINE P, MORRIS B, COX P, et al. Development of computer program for floor plate response from land mine explosions[R]. US Army Tank-Automotive Command, Warren, 1985.
- [8] GRUJICIC M, GLOMSKI P, CHEESEMAN B. Dimensional analysis of impulse loading resulting from detonation of shallow-buried charges[J]. Multidiscipline Modelling in Materials and Structures, 2013,9(3):3673-390. **DOI:** 10.1108/mmms-01-2013-0002
- [9] DENEFFELD V, HEIDER N, HOLZWARTH A. Measurement of the spatial specific impulse distribution due to buried high explosive charge detonation[J]. Defense Technology, 13(2017):219-227. **DOI:** info:doi/10.1016/j.dt.2017.03.002
- [10] RIGBY S E, FAY S D, CLARKE S D, et al. Measuring spatial pressure distribution from explosive buried in dry Leighton Buzzard sand[J]. International Journal of Impact Engineering, 96(2016):89-104. **DOI:** 10.1016/j.ijimpeng.2016.05.004
- [11] RIGBY S E, FAY S D, TYAS A, et al. Influence of particle size distribution on the blast pressure profile from explosives buried in saturated soils[J]. Shock Waves,(2018)28:613-626. **DOI:** 10.1007/s00193-017-0727-7
- [12] CLARKE S D, FAY S D, WARREN J A, et al. A large scale experimental approach to the measurement of spatially and temporally localised loading from the detonation of shallow-buried explosives[J]. Measurement Science and Technology, 26(2015),015001. **DOI:** 10.1088/0957-0233/26/1/015001
- [13] PICKERING E G, YUEN S C K, NURICK G N, et al. The response of quadrangular plates to buried charges[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 49(none):103-114. **DOI:** 10.1016/j.ijimpeng.2012.05.007
- [14] ROGER E, LORET B, CALVEL J P. Detonation of Small Charges Buried in Cohesionless Soil[J]. physical review d particles & fields, 2016. **DOI:** 10.1007/978-3-319-22449-7_13
- [15] DESHPANDE V S, Mcmeeking R M, Wadley H , et al. Constitutive model for predicting dynamic interactions between soil ejecta and structural panels[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2009, 57(8):1139-1164. **DOI:** 10.1016/j.jmps.2009.05.001
- [16] CLARKE S D, FAY S D, WARREN J A, et al. Predicting the role of geotechnical parameters on the output from shallow buried explosives[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 102:117-128. **DOI:** 10.1016/j.ijimpeng.2016.12.006