

DOI: 10.11883/bzycj-2026-0018

激波与油气爆炸耦合作用下浅埋混凝土油库的破坏损伤模式

宋鹏¹, 邱艳宇², 徐观淦¹, 胡玉凤¹, 毛相铮¹, 邢化岛¹, 解立峰¹

(1.南京理工大学, 江苏 南京 210094)

(2.中国人民解放军陆军工程大学, 江苏 南京 210042)

摘要: 为了研究激波与油气爆炸耦合作用下浅埋式混凝土结构油库的破坏损伤模式, 设计制作了浅埋式钢筋混凝土结构油库缩比模型, 研究了油库结构、油气类型、含量及爆源位置对混凝土油库破坏损伤模式的影响机制。研究表明: 爆炸激波作用于油库顶盖引起迎爆面冲切贯穿破坏和背爆面剥离损伤, 且50%柴油含量时顶盖的破坏程度大于100%柴油含量; 100%柴油加装顶盖时, 冲击波超压上升阶段会出现两个峰值, 50%柴油加装顶盖情况下由于内部空腔的界面反射作用, 相比满油情况, 超压上升阶段出现三个峰值, 并且冲击波正压持时明显增加; 库体底部起爆时, 油库顶盖和整体均产生严重破坏, 冲击波在角隅处反射叠加, 会导致油库主体角隅处出现明显的剪切开裂; 相比于50%柴油, 50%汽油爆炸产生的火球范围更大, 燃烧时间更长, 但油库主体结构并不会产生破坏。

关键词: 浅埋油库; 混凝土结构; 损伤模式; 冲击波

Damage modes of shallow-buried RC oil depots subjected to the coupling of shock waves and oil-gas explosions

SONG Peng¹, QIU Yanyu², XU Guangan¹, HU Yufeng¹, MAO Xiangzheng¹, XING Huadao¹,
XIE Lifeng¹

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu, 210094, China)

(2. Army Engineering University of PLA, Nanjing, Jiangsu, 210042, China)

Abstract: Scaled models of shallow-buried reinforced concrete (RC) oil depots were designed and explosion tests were conducted by changing depots structure, the type and volume of oil, and explosion source locations to investigate the damage modes and mechanisms of shallow-buried RC oil depots subjected to the coupling of shock waves and oil-gas explosions. A high-speed camera was used to record the damage and failure process of oil depots, and PCB wall pressure sensors were employed to obtain the explosion overpressure. The damage and failure mechanisms of the oil depot were revealed through comparative analysis of the damage and failure modes, damage degree, peak explosion overpressure, and positive pressure duration of the oil depot under different working conditions. The research indicates that the shock wave loading on the oil depot cover causes punching-perforation failure on the blast-facing side and spalling failure on the blast-opposite side. The damage degree of the oil depot cover is greater when the depot contains 50% diesel. Two peaks appear in the overpressure rise stage of the shock wave when the

oil depot contains 100% diesel. Due to multiple interface reflection in the internal cavity, three peaks appear with the increase of the positive pressure duration of the shock wave when the depot contains 50% diesel. The explosion source located at the bottom of the oil depot causes severe damage to both the cover and the main depot structure. The reflection and superposition of shock waves at the corners lead to significant shear cracking at the edges of the main depot structure. Compared to the explosion of 50% diesel, the explosion of 50% gasoline produces a larger fireball with a longer burning duration, which does not cause damage to the main structure of the oil depot. This study can provide key data support for the protective performance design of shallow-buried RC oil depots and a theoretical basis for the construction and layout of such oil depots.

Keywords: Shallow-buried oil depot; RC structure; Damage mode; Shock wave

非最终出版稿

1、引言

当今世界局势动荡，地区武装冲突不断加剧。油料能源的存储对于现代战争至关重要，一旦遭受武器打击将造成人员伤亡和经济损失，甚至直接左右战争局势。目前军用燃油的存储主要有露天储罐、埋地式储库等形式。其中浅埋式混凝土结构油库相比其它形式的油库具有结构强度高、耐候性好、便于维护和隐蔽性强的优势^{[1][2]}，在军事领域内应用前景广泛，因此有必要研究武器打击下浅埋式混凝土结构油库破坏损伤模式，对军民燃油库的安全设计提供有力的数据支撑，对于保障化工企业生产和储存过程的安全性具有非常重要的意义。

国内外关于爆炸载荷下大型燃油储罐的爆炸特性及破坏机理已有大量研究。如路胜卓等^[3]通过缩比模型试验和数值模拟仿真的方法，研究了爆炸冲击波荷载下缩比油罐模型的破坏机理。试验表明迎爆面破坏荷载最大，呈现塑性变形形式，该区域周围形成不规则塑性铰线，其余区域则呈现弹性振动过程，顶端位置存在应力集中现象，是整体结构抗爆的最薄弱部位；张博一等^[4]通过数值模拟仿真的方法研究了爆炸载荷下大型浮顶储油罐的动力响应及破坏机理，主要表现为迎爆面顶部罐体的凹陷和屈曲变形，以及变形区域周围的不规则塑性铰环。王世茂等^[5]通过模型试验对半地下覆土立式油罐内部油气爆炸冲击荷载进行了研究，结果表明随着油气浓度不同，爆炸超压荷载先增大后减小，在1.71%浓度处最大。蔡运雄等^[6]通过模型模拟立式拱顶油罐油气内爆炸试验，结果表明油气体积分数在1.7%时爆炸危险性最高；油气爆炸超压特性受点火位置影响较大，位置越靠近油罐底部，爆炸威力越大。

国内外对于爆炸载荷下混凝土结构的动力响应及破坏机理研究也十分广泛，例如匡志平等^[7]采用数值模拟方法研究了三层框架结构在爆炸荷载作用下动力响应及破坏形式。结果表明在结构节点、柱

子根部和跨中以及梁的跨中等部位破坏较为严重，且随着结构截面积的增大，可以有效提高构件抗爆性能；孙加超等^[8]通过试验验证和数值模拟相结合的方法，研究了基于细观建模的素/钢筋混凝土板在不同爆炸荷载下的结构响应及破坏形式。结果表明：在低药量爆炸荷载下，混凝土板的破坏主要表现为纵横塑性铰线破坏；在高药量爆炸荷载下，混凝土板的破坏形式表现为以爆坑为中心，产生环向与径向裂纹。汪维等^[9]通过模型试验和数值模拟仿真结合的形式，分析了钢筋混凝土板在近场爆炸荷载作用下从开裂、底部层裂碎片形成、钢筋屈服到局部震塌的动态演变过程。结果表明随着爆炸荷载的不断增强，钢筋混凝土板的破坏形式呈现由整体弯曲破坏逐渐转变为板中央局部冲切破坏的演化规律。Pan Y 等^[10]在对爆炸荷载下浅埋混凝土板的破坏形式研究当中也得到了类似的结论。

综上所述，爆炸荷载下油库的破坏模式及机理研究主要针对于各类大型储罐，关于浅埋式混凝土结构油库的研究鲜有报道，且现有的爆炸荷载下混凝土动力响应研究主要针对单一构件，并未考虑爆炸荷载直接作用于油库整体及其内部可燃介质下的破坏形式。因此本文采用模型试验方法，构建混凝土油库试验模型，研究爆炸荷载与内部油气爆炸耦合作用下浅埋式混凝土油库结构破坏，分析不同的油气类型、油气含量、爆源位置下浅埋油库的破坏情况和损伤模式，揭示爆炸激波与油气爆炸耦合作用下浅埋式混凝土油库破坏损伤机理，对浅埋式混凝土结构油库的防护效能及设计提供关键数据支持、为此类油库的建造及平面布置提供理论依据。

2、试验部分

2.1 试验模型设计

试验选取油库和低阻航空炸弹作为原型，根据 Hopkinson 比例定律^[11]进行缩比，可根据以下公式计算模型尺寸及对应 TNT 当量。

$$\frac{a_B}{a_A} = \frac{b_B}{b_A} = \frac{c_B}{c_A} = k \quad (1)$$

$$\frac{W_A}{W_B} = \frac{V}{V'} = \frac{1}{k^3} \quad (2)$$

其中， a_A 、 b_A 、 c_A 、 W_A 、 V 代表全尺寸模型的几何尺寸，装药量以及空间体积， a_B 、 b_B 、 c_B 、 W_B 、 V' 则代表缩比模型的几何尺寸，装药量以及空间体积， k 为缩比系数。

根据缩比计算结果，得到试验模型长宽高以及壁厚分别为 2.54 m、1.48 m、0.5 m 和 0.14 m。炸药质量为 0.64 kg。

试验模型采用钢筋混凝土结构制作，如图 1 所示为模型配筋情况，顶盖采用单层钢筋绑扎，钢筋采用直径 12 mm 的带肋钢筋，型号为 HRB400 ϕ 12。绑扎间距为 100 mm*100 mm；库体采用双层钢筋绑扎，同样采用 HRB400 ϕ 12 型号钢筋，底面与侧面采用拉筋固定，绑扎间距均为 150 mm*150 mm，层间距均为 50 mm。底面四角采用四道钢筋加固，间距为 100 mm。

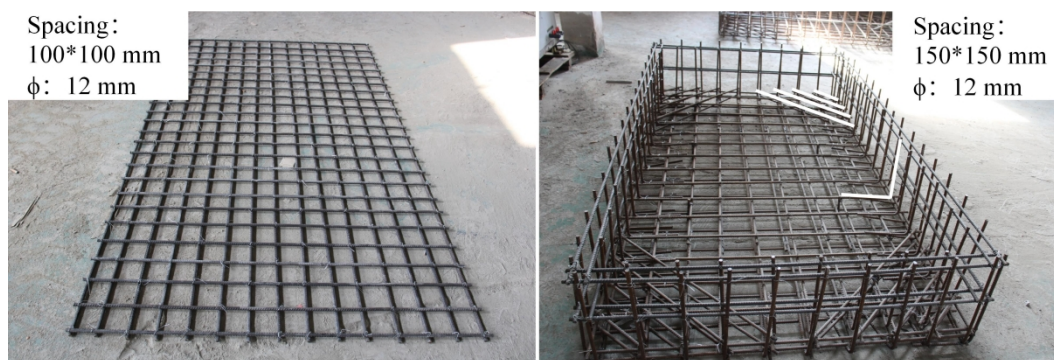


图 1 试验模型钢筋绑扎

Fig. 1 Rebar tying of the test model

模型采用 C50 标号混凝土浇筑,水泥 (P·O 52.5) : 砂 (中砂, 细度模数 2.7) : 碎石 (5-20 mm) : 水的质量配比为 1:1.4:2.3:0.36, 并添加聚羧酸高效减水剂 (水胶比 0.36), 如

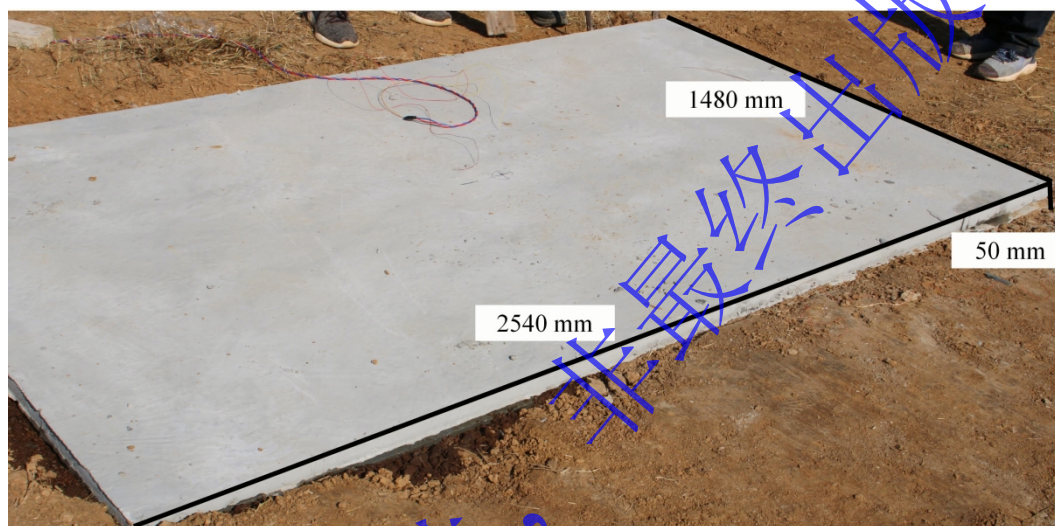
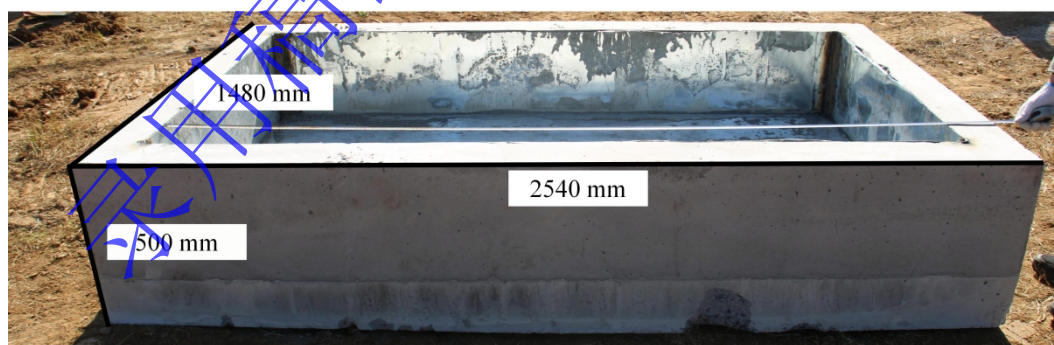


图 2 所示浇筑完成后模型主体长 2.54 m、宽 1.48 m、高 0.5 m、壁厚 0.14 m, 为防止油库内液体渗漏, 内部设置 1.4 mm 厚度 Q235 材质钢板内衬; 顶盖长 2.54 m、宽 1.48 m、厚度 0.04 m。



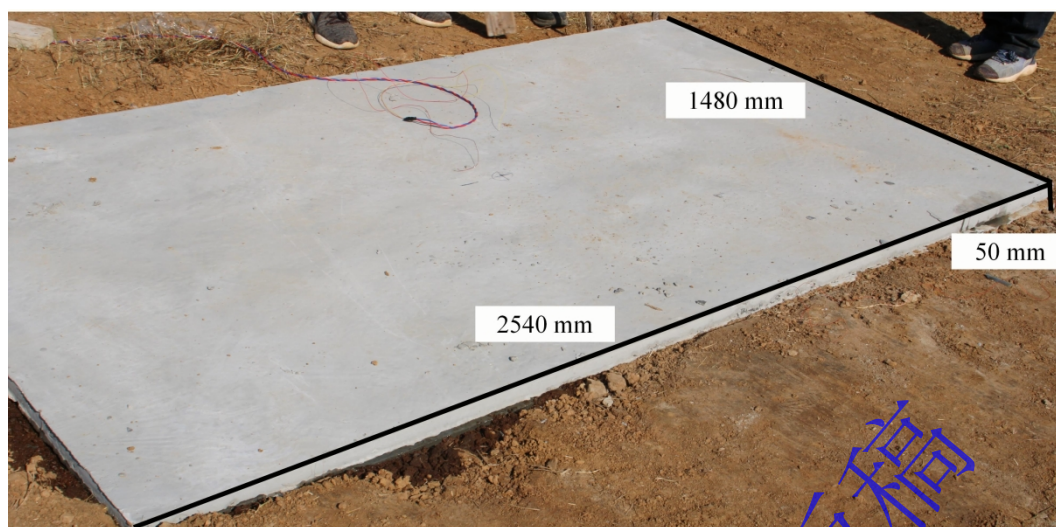


图2 试验模型
Fig. 2 Test model

2.2 试验设计

低阻航空炸弹是一种应用最成熟、广泛的航空炸弹，常用于打击地面设施或浅埋结构设施 **Error! Reference source not found.** 同样根据 Hopkinson 比例定律计算结果，试验采用压制圆柱形 TNT 药柱，质量为 0.64 kg，密度为 1.58 g/cm³，药柱长径比为 1:1，如所图 3 示。为确保炸药稳定、完全爆轰，利用 8 gRDX 传爆药柱和 8#电雷管进行分级起爆。

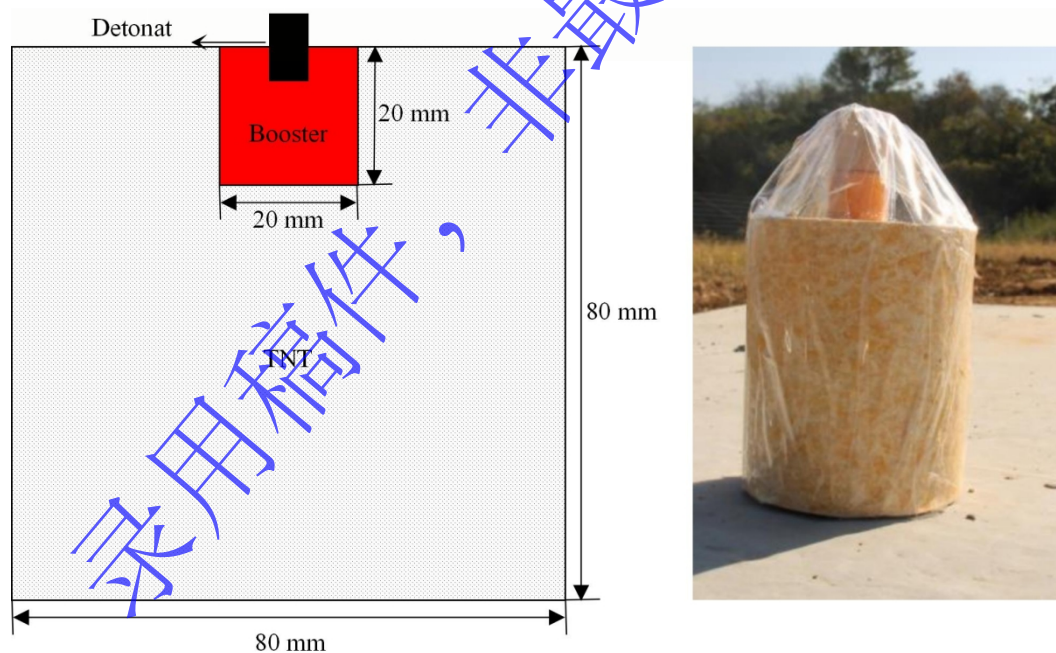


图3 试验爆源

Fig. 3 Test explosion source

试验采用美国 PCB 壁面压力传感器（精度 $\leq 1.0\%$ F.S.；谐振频率 ≥ 500 kHz）测试油库模型外部自由场压力变化；传感器数据采用东华测试技术有限公司生产的 DH8302 数据采集仪（采样频率 500 kHz）进行采集记录；试验过程采用 FASTCAM NOVAS16 高速摄像机（拍摄速率 4000 帧/秒）及大疆 DJI Mavic3 无人机拍摄记录爆炸过程。

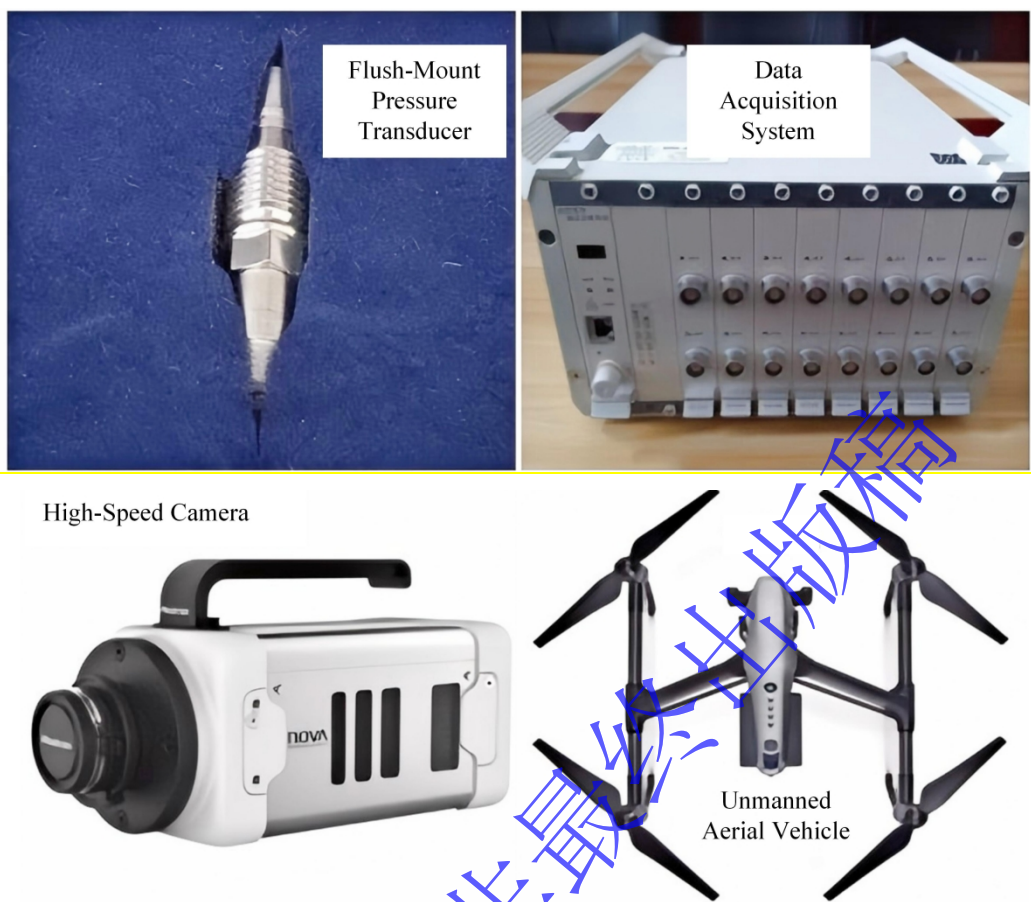
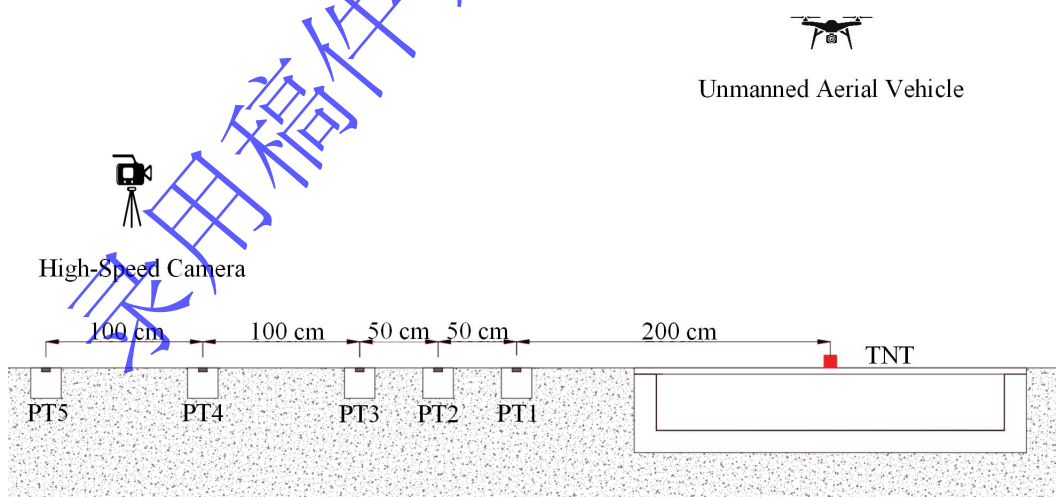


图4 试验仪器设备

Fig. 4 Test instruments and equipment

在距离爆源中心 200 cm、250 cm、300 cm、400 cm、500 cm 处分别布置壁面压力传感器 PT1、PT2、PT3、PT4、PT5。试验布置如图 5 所示。



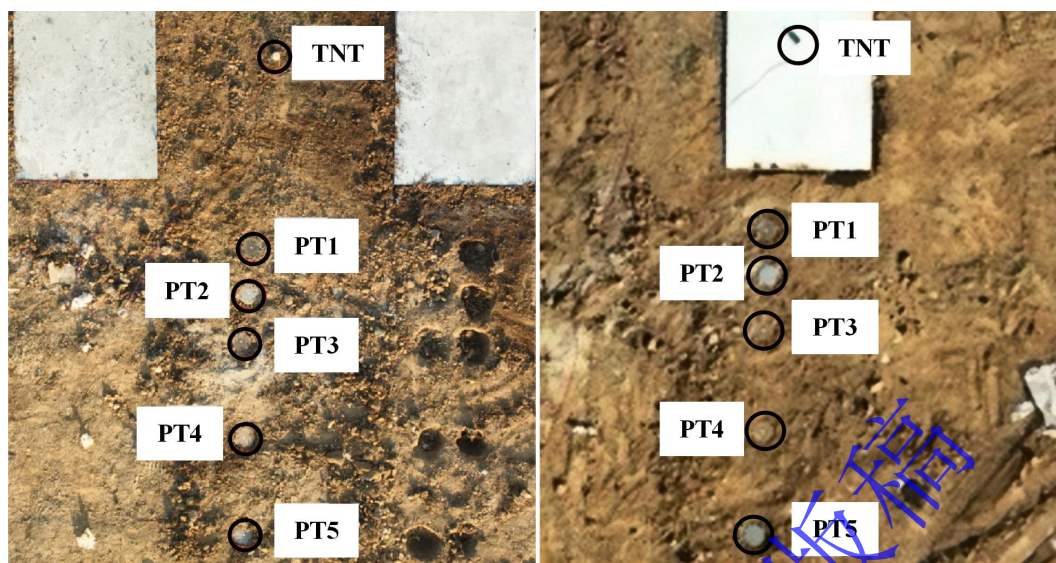


图 5 传感器布置

Fig. 5 Sensor layout

在实际情况当中，随着油料的使用、加注、和油库清洗过程，油库主要存在满油、非满油、有顶盖及无顶盖等状态。Cai Y 等^[13]研究表明，液位变化对油气爆炸的内外场超压都有较大影响，且 50% 液位是危险性最大的液位，考虑油气爆炸的最危险条件，以及油料含量对油库结构破坏损伤情况的影响，试验共开展 5 种工况下的油库爆炸毁伤研究。其中，1#试验模型内装 100%柴油并加装顶盖，爆源设置在顶盖几何中心；2#试验在两模型之间地面中心起爆，模型间距 2.5 m；3#试验库内装 50%柴油并加装顶盖，爆源设置在顶盖几何中心；4#试验库内装 50%汽油且不加装顶盖，爆源设置在顶部油气中心部位；5#试验库内装 100%水并加装顶盖，爆源设置在水底中心，具体如表 1 所示。

表 1 试验工况

Table 1 Test conditions

序号	爆源质量/kg	是否安装顶盖	爆源位置	介质	介质含量
1#	0.64	是	油库顶部中心	柴油	100%
2#	0.64	是	两库中心地面	/	/
3#	0.64	是	油库顶部中心	柴油	50%
4#	0.64	否	油库顶部中心	汽油	50%
5#	0.58	是	油库底部中心	水	100%

3、试验结果与分析

3.1 油气含量对模型破坏模式影响分析

图6、图7分别为100%柴油、50%柴油工况下顶盖迎爆面和背爆面破坏情况。可知炸药在油库顶盖中心起爆时，仅顶盖破坏损伤，油库主体并未见明显破坏，顶盖迎爆面均呈现出圆形贯穿性冲切损伤、顶盖内部配筋发生向下挠曲变形；背爆面呈剥离性破坏损伤，顶盖短边方向混凝土剥离损伤范围较大。其破坏损伤具体数据如

表2所示。

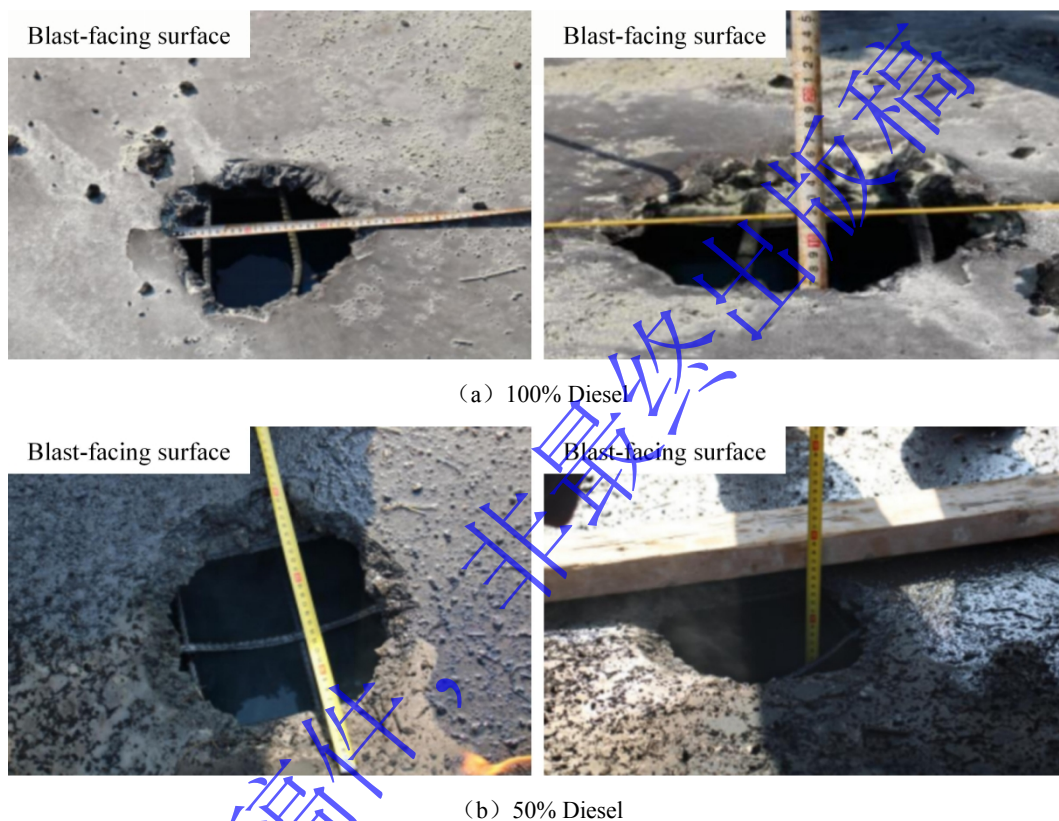
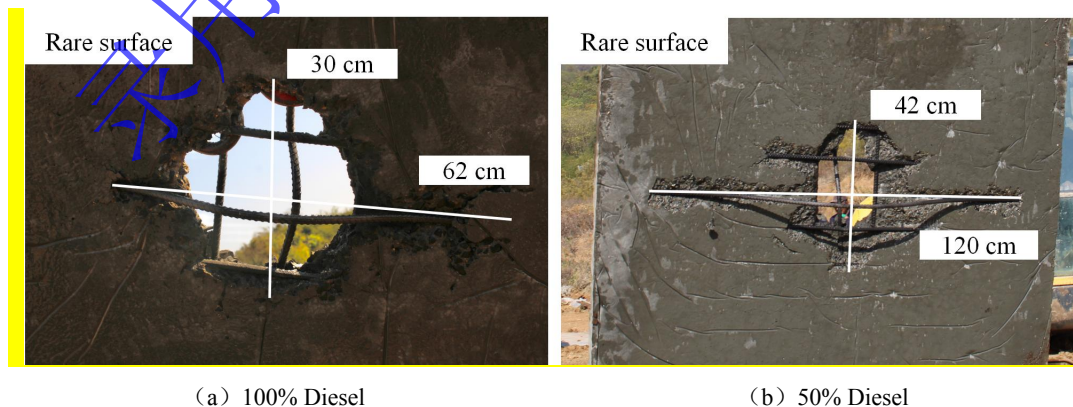


图6 油库顶盖迎爆面破坏损伤情况

Fig. 6 Damage and destruction conditions of the explosion-facing side of the oil depot roof cover



(a) 100% Diesel

(b) 50% Diesel

图7 油库顶盖背爆面破坏损伤情况

Fig. 7 Damage and destruction conditions of the back-explosion side of the oil depot roof cover

表 2 顶盖破坏损伤数据

Table 2 Damage and destruction data of the roof cover

编号	试验工况		最大贯穿直径 (cm)	配筋最大挠度 (cm)	背爆面最大剥离距离 (cm)	
	柴油含量	顶盖			横向	纵向
1#	100%	有	27	12	52	30
3#	50%	有	27	26	120	42

由

表 2 数据可得顶盖贯穿性损伤直径基本一致，背爆面则在贯穿损伤基础上进一步向横向、纵向扩展为剥离性损伤，如图 7 所示。这是因为混凝土抗压强度远小于抗拉强度，如图 8 所示，在接触爆炸作用下，顶盖迎爆面受到的冲击波峰值超压远大于其理论抗压强度（50 MPa），受压缩波作用出现贯穿性冲切破坏，而当冲击波传至顶盖背爆面时，由于混凝土波阻抗远大于柴油和空气

Reference source not found.，因此压缩波在界面处发生强反射，在混凝土改版内部再次形成拉伸波，造成顶盖背爆面混凝土的层裂和剥离^[15]。另外，背爆面表面剥离性损伤程度呈现出中心大于外围，横向大于纵向的规律。这是由于越接近爆源中心冲击波作用越强，顶盖制作时横向配筋在下纵向配筋在上，虽然纵向配筋距爆源较近，但受横向配筋的约束，使得纵向配筋的挠度相对较小，而横向配筋不仅受到直接爆炸冲击影响，还会受到纵向配筋向下挠曲变形作用影响，从而产生的变形挠度较大。

通过分析背爆面破坏情况发现：柴油含量 50% 情况下配筋最大挠度和背爆面剥离性损伤范围均明显大于柴油含量 100% 工况。这是因为油库冲装 50% 柴油时，油库内部与顶盖存在一定空腔，爆炸产生的冲击波经由混凝土-空气界面进行传播，相比于混凝土-液体界面，混凝土与空气波阻抗差异远大于混凝土与液体，导致只有少量冲击波透射，更多的冲击波被重新反射至混凝土盖板当中形成强拉伸波，从而导致更严重的层裂和剥离^[16]。

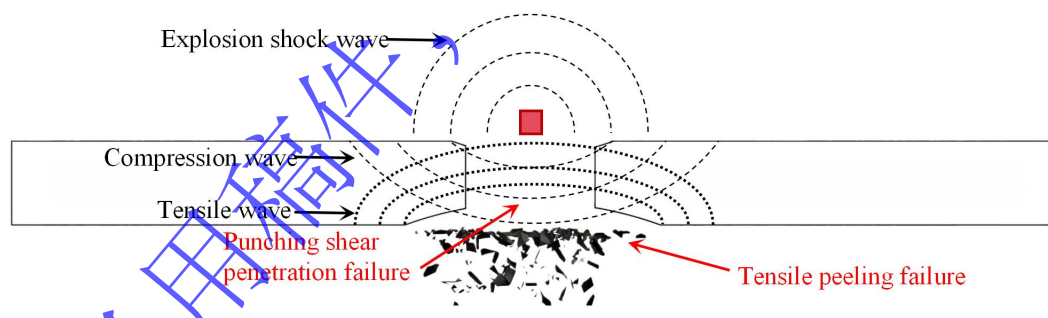


图 8 盖板损伤机理示意

Fig. 8 Schematic diagram of the cover plate damage mechanism

3.2 油气种类对模型破坏模式影响分析

如图 9 对比分析 50% 油气含量下的柴油和汽油爆炸过程可知，汽油起爆过程中油气燃烧更加剧烈，火球范围更大。两种油气爆炸过程均未对油库主体结构造成破坏，但汽油爆炸后燃烧影响地面范围更广，燃烧持续时间更长，可能会对周围地面设施造成破坏。

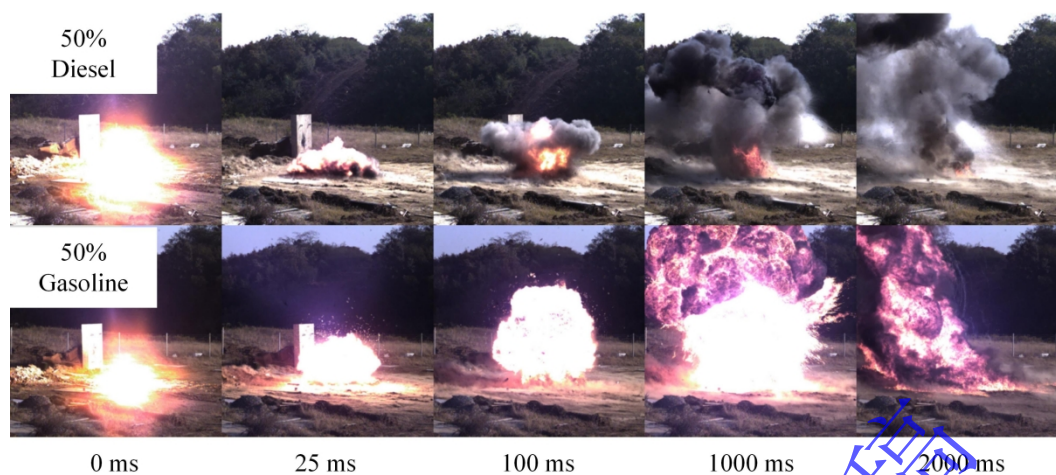


图 9 柴油、汽油爆炸过程对比

Fig. 9 Comparison of diesel and gasoline explosion processes

3.3 炸药位置对油库结构破坏损伤影响分析

如 3.1 所述，当炸药位于顶盖中心起爆时，虽然随着油气含量不同，破坏程度存在差异，但总体可以概括为顶盖迎爆面的贯穿性冲切破坏和背爆面的剥离性损伤，油库主体结构未发生破坏。

当炸药在两库之间土体表面爆炸时，仅在爆炸中心形成最大直径 55 cm，最大深度 28 cm 的爆坑，整体呈现漏斗形状，如



图 10 所示。这是由于爆炸产生的冲击波使得土体破碎形成自由面，紧接着冲击波在自由面反射形成拉伸波^[17]，土体发生层裂破坏，最后由于爆炸能量充足，在膨胀气体的作用下完成抛洒，最终在爆源处形成漏斗状爆坑。试验发现爆炸并未对两侧油库主体及顶盖造成明显破坏损伤。

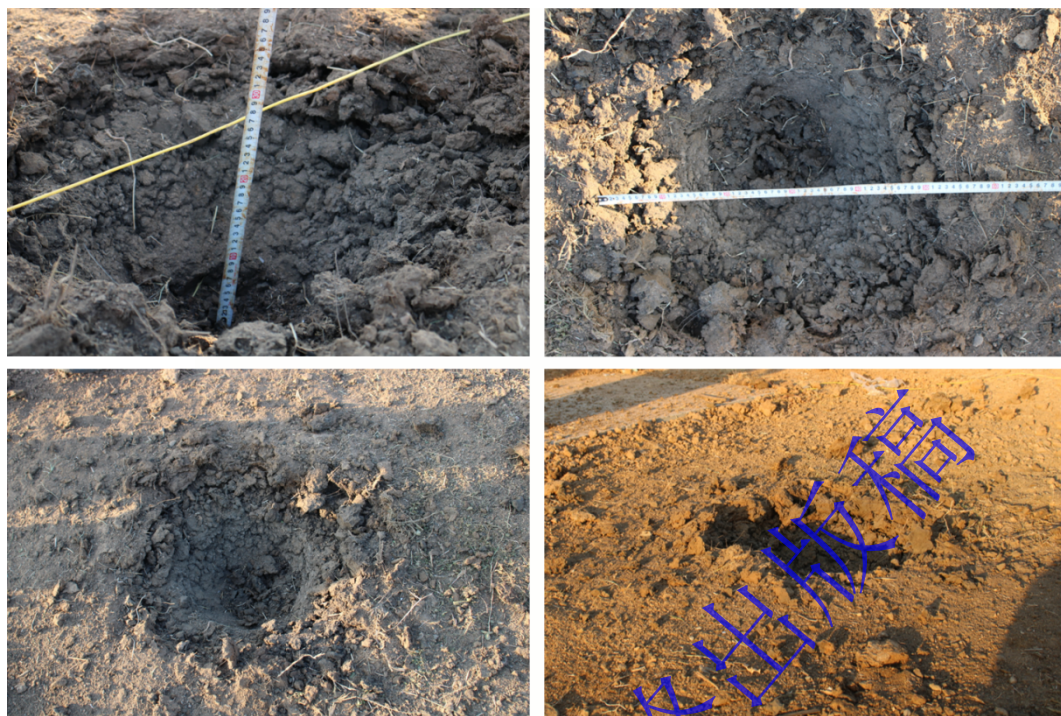


图 10 2#试验爆坑及库体情况

Fig. 10 Explosion crater and depot body conditions in Test No. 2

炸药位于油库底部中心起爆时，为实现炸药爆炸和油气爆对油库结构破坏损伤的解耦，试验时，油库内部装满水介质，并通过高速摄影机记录了油库顶盖部分的破坏演化过程（图 11）。结果表明该工况下油库破坏情况最严重，最开始顶盖中心出现与 1#、3#试验类似的冲切破坏，内部水从顶盖坡口处涌出，由于其内部封闭环境，TNT 炸药爆炸产生的冲击波不断反射叠加并作用于顶盖^[18]，导致顶盖冲切破坏范围不断扩大，进而使得内部液体不断向竖向涌出形成水柱，随着顶盖的完全破坏，油库内水介质的开始向水平方向抛洒，逐渐演化成水球状，最终完全抛洒殆尽，水柱最大高度约 15 m，抛洒范围最大半径约 12 m。

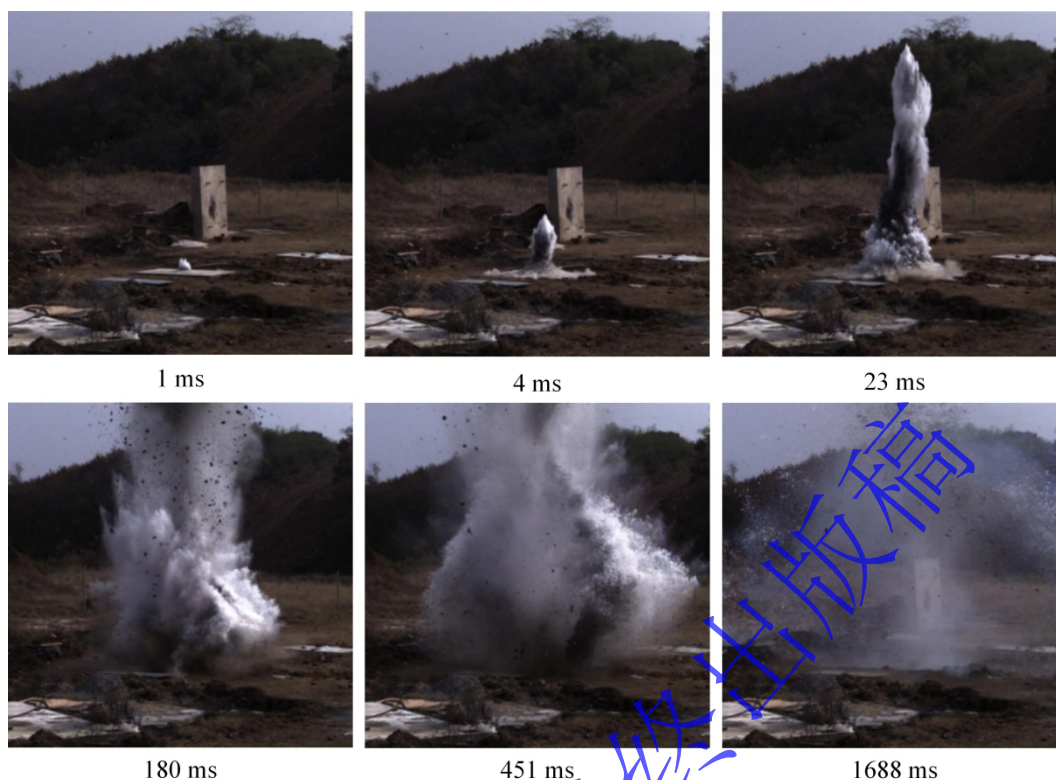


图 11 5#试验高速摄影图像

Fig. 11 High-speed photography images of Test No. 5

图 12 为爆炸后油库主体的破坏情况，分析可知其破坏损伤模式主要表现为内部介质的完全抛洒、顶盖的大范围，贯穿性的冲切破坏、库体长边壁面中心范围的冲切破坏以及库体角隅处的开裂破坏，符合混凝土结构在爆炸荷载下容易在节点、根部以及中部发生破坏的特征。具体的，油库顶盖发生大范围贯穿性冲切破坏，横向破坏范围贯穿整个顶板，纵向破坏范围约 1.5 m，碎片被完全抛洒飞散，残余部分均完全开裂，但由于钢筋结构的连接并未被抛洒；库体长边壁面中心部分产生贯穿性冲切破坏，破坏长度约 80 cm，但由于土体的约束作用，碎块基本维持在原位置并未被抛洒；库体短边壁面未发生明显的破坏现象；库体角隅处则由于冲击波的汇聚效应^[9]发生不同程度的开裂破坏，最小开裂约 1 cm，最大开裂约 4 cm，长侧底边开裂从中心向两侧逐渐减小，中心最大处开裂约 5 cm。



图 12 5#试验油库模型破坏情况

Fig. 12 Destruction conditions of the oil depot model in Test No. 5

该工况下当炸药在水底起爆时，由于水具有不可压缩性，相比于空气中炸药爆炸产生的能量更多地转化为初始冲击波的能量，因此炸药水底爆炸的初始冲击波超压峰值更大^[20]。炸药爆炸冲击波一方面经由水体向上传播到达顶盖混凝土结构，更大的冲击波能量使顶盖瞬间产生贯穿性的冲切破坏。另一方面炸药爆炸冲击波在油库底部经由水-混凝土界面发生反射，由于水和混凝土的波阻抗存在差异，此时反射冲击波的强度可达入射冲击波强度的 1.708 倍，强反射冲击波继续作用于顶盖，大幅增加了顶盖的冲切破坏程度，因此该工况下顶盖破坏程度最为严重。

在本工况中，爆心距离库体长边壁面中心和短边壁面中心比例爆矩分别为 $0.789 \text{ m/kg}^{1/3}$ 和 $1.392 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。由库尔公式^[21]：

$$\Delta p_{\text{water}} = \frac{52.4}{r^{1.13}} \quad (3)$$

可以计算水中爆炸超压，式中 Δp_{water} 为水中爆炸超压峰值， r 为比例距离。计算可得油库长边壁面中心和短边壁面中心超压峰值分别为 68.49 MPa 和 36.06 MPa。试验模型采用 C50 钢筋混凝土浇筑，理论抗压强度为 50 MPa，因此油库主体仅在长边中心约 80 cm 范围内发生破坏，短边壁面由于峰值超压小于混凝土抗压强度，因此未发生破坏。

此外该工况可以近似看作密闭空间内起爆的情况，炸药爆炸冲击波除了直接作用于顶盖和库体壁

面以外，也在库体内部空间发生复杂的反射叠加，最终作用于库体并产生破坏作用。研究表明，当炸药在密闭舱室内起爆时，其冲击波会在空间的角隅处发生汇聚现象，使得角隅处的冲击波峰值超压及冲量均显著高于壁面区域，这也是为什么本试验中油库除了顶盖和长边壁面中心发生破坏以外，角隅处也出现明显的开裂破坏现象。

当炸药位于油库顶部油气中心，介质为 50%汽油时，油库主体未发生明显破坏，这是由于爆源位于油库顶部中心且不直接接触库体，爆炸产生的冲击波在库体内部多次反射后在空气中迅速衰减，强度低于混凝土库体破坏强度^[19]。

3.4 爆炸冲击波超压分析

如图 13 所示为试验测得的典型冲击波超压时程图。存在顶盖结构时最大冲击波超压强度明显高于无顶盖及土体表面起爆，且满油时最大冲击波超压强度最高；从衰减趋势上来看试验测得冲击波基本符合指数衰减规律，且存在顶盖结构时衰减速度更快。

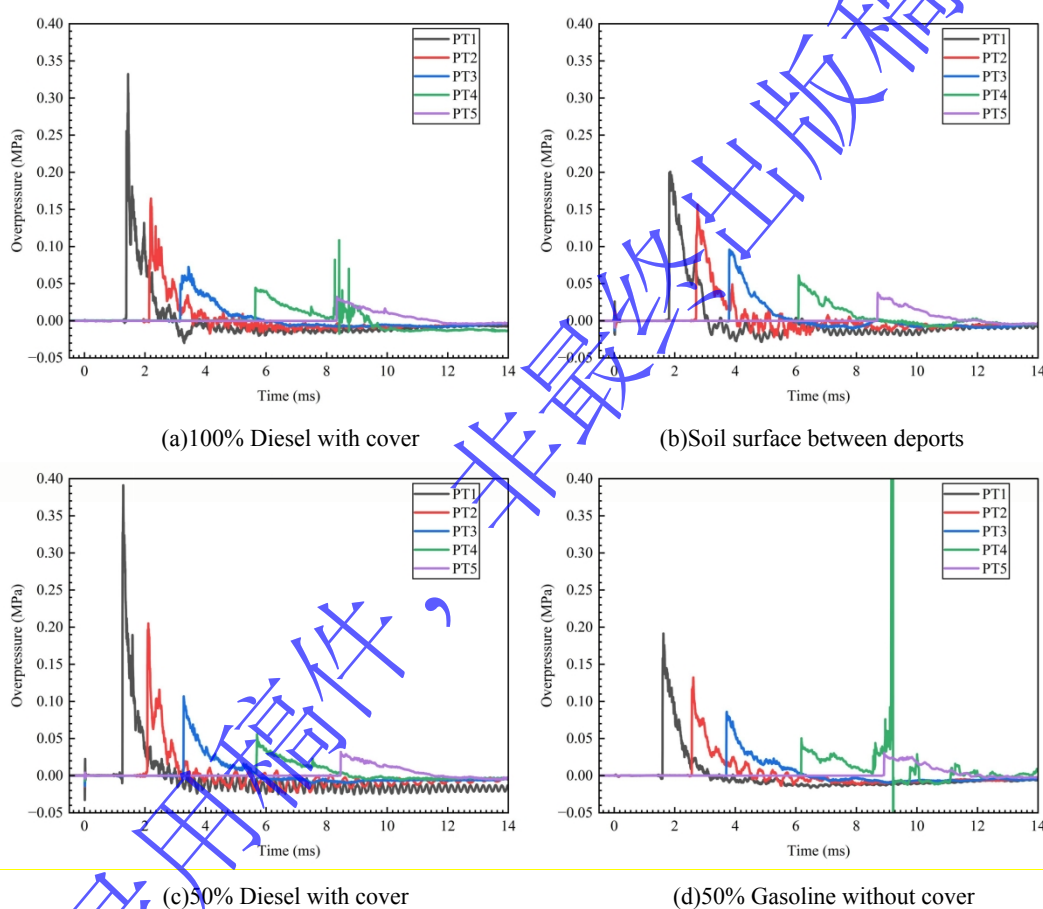
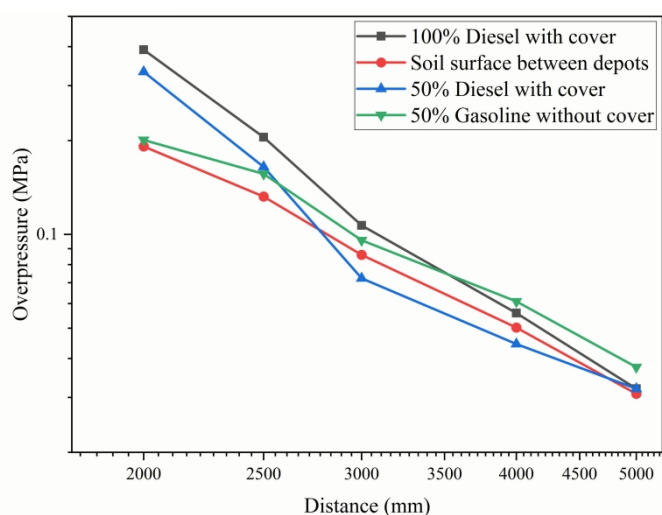


图 13 冲击波超压时程图

Fig. 13 Shock wave overpressure time-history diagram



如

图 14 所示对比分析四种工况冲击波超压在空间上的衰减情况可知 100%柴油加装顶盖及 50%柴油加装顶盖时，在 PT1 测点处初始超压峰值更高，且 100%柴油情况高于 50%柴油。这是由于 50%柴油加装顶盖时，顶盖在冲击波作用下发生形变并消耗冲击波能量，部分冲击波透过顶盖在空腔内反射后由经由顶盖向外传播，冲击波强度进一步衰减，而满油的情况下由于液体的不可压缩性，顶盖接近于完全刚性壁面，冲击波能量更多的被壁面反射，导致冲击波压力增加，使得满油情况在 PT1 测点冲击波峰值超压略高于半油^[22]。土体表面起爆、50%汽油无顶盖工况下 PT1 测点处初始峰值超压更低，前者是由于土体的形变和破坏传递和吸收了部分冲击波能量，后者则是因为非接触式起爆导致大量冲击波能量在空气中传播并迅速衰减，一定程度上降低了向外传播的冲击波能量。从后续冲击波衰减情况来看存在顶盖结构时，试验初始超压峰值更高但衰减更快；结构无顶盖时，试验初始超压峰值更低但衰减更慢，到达 PT5（距离爆源 5m）时所有试验峰值超压水平相差不大。

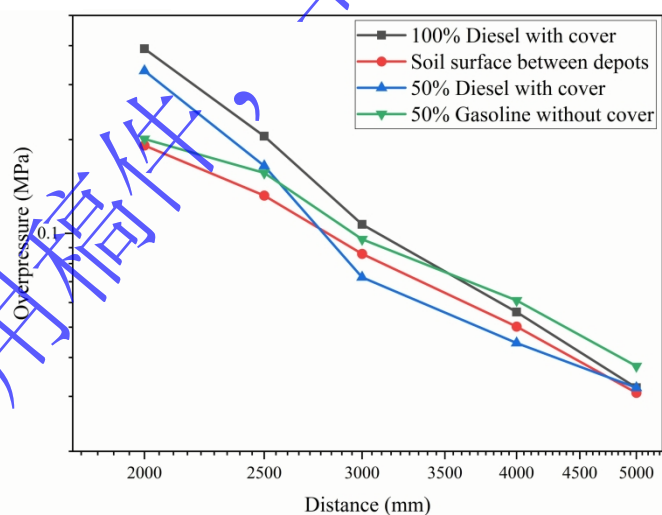
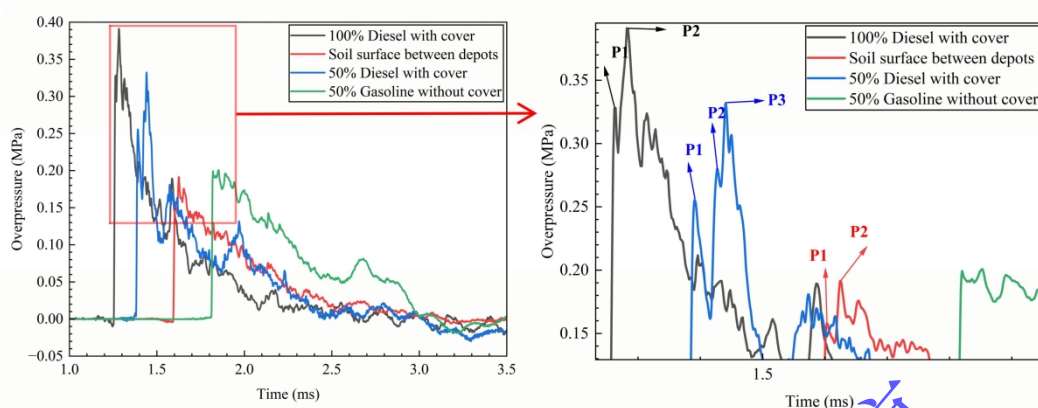


图 14 爆炸峰值超压空间衰减规律

Fig. 14 Spatial attenuation law of explosion peak overpressure



如

图 15 所示, 选取 PT1 测点对各工况爆炸冲击波超压进行进一步分析发现, 当存在壁面反射时, 冲击波超压在上升阶段会存在多个峰值^[23], 其中 100%柴油加装顶盖工况及两库体之间土体表面之间起爆工况时, 上升阶段存在两个峰值, 这是由于 TNT 爆炸后冲击波以超音速向外传播, 首次到达 PT1 测点时产生第一个峰值, 之后由于壁面对冲击波的反射作用, 反射波与初始冲击波叠加后到达 PT1 测点产生第二个峰值。在 50%柴油加装顶盖工况下, 冲击波超压时程曲线在上升阶段出现了三个峰值, 且与满油起爆相比, 后续峰值到达 PT1 测点时间稍晚, 这是由于半油起爆情况下, 顶盖刚性相对较弱, 因此反射冲击波波速有所降低, 强度也有所减弱^{[24][25]}, 在与初始冲击波叠加后到达 PT1 测点产生第二个峰值。

对比 50%柴油加装顶盖工况与 100%柴油加装顶盖工况、两库体之间土体表面工况的区别可知, 50%柴油加装顶盖工况下出现第三个峰值主要是因为该工况下顶盖与柴油液面之间存在空腔, 分别在库体中部和顶部及四周形成了空气-柴油界面和空气-混凝土界面。爆炸产生的冲击波一部分经由混凝土顶盖反射后到达 PT1 测点形成第二个峰值, 另一部分则从混凝土顶盖透射入库内空腔, 此时, 由于柴油和混凝土的波阻抗均远大于空气, 透射冲击波在空气-柴油界面和空气-混凝土界面发生强反射并不断反复叠加, 最终从顶盖处绕射并沿地面传播至 PT1 测点, 形成第三个峰值。

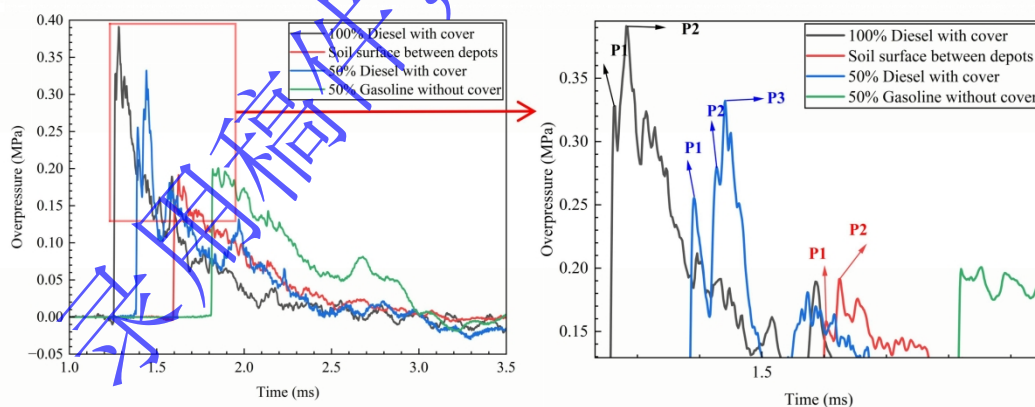


图 15 PT1 测点各工况冲击波超压时程图

Fig. 15 Shock wave overpressure time-history diagrams at PT1 measurement point under various test conditions

结合表 3, PT1 测点各工况冲击波超压峰值到达时间及正压持时数据分析发现, 从到达先后顺序来看, 100%柴油加装顶盖工况下由于液体的不可压缩性, 反射壁面接近完全刚性, 因此反射冲击波强度最大, 速度最快, 最先到达 PT1 测点。随后依次是 50%柴油加装顶盖工况、土体表面起爆工况以及 50%汽油无顶盖工况。由此可见随着反射壁面的刚性不断下降, 爆炸冲击波到 PT1 测点时间逐渐增加; 从正压持续时间来看, 50%汽油无顶盖工况下正压持时最短, 这是由于该工况下不存在反射

壁面，冲击波不存在与反射波的叠加情况，PT1 测点仅测得以超音速传播的初始冲击波，因此正压持时最短。相比之下 100%柴油加装顶盖工况下虽然存在反射冲击波的叠加作用，可以一定程度延长冲击波正压持续时间，但由于接近完全刚性壁面反射冲击波波速最快，与初始冲击波叠加后以更快的速度经过 PT1 测点，使得 100%柴油加装顶盖工况与 50%汽油无顶盖工况正压持时相比仅略微增加。在土体表面之间起爆时，由于土体的可压缩性，使得反射冲击波强度及波速都较低，因此正压持时较长。50%柴油加装顶盖工况下顶盖刚性不及满油，反射波速及强度均稍低于满油工况，再加之库内空腔对冲击波的二次反射叠加，进一步延长了冲击波的正压持续时间，因此最终正压持时最长。

表 3 PT1 测点冲击波到达时间及正压持时

Table 3 Arrival time and positive pressure duration of shock wave at PT1 measurement point under various test conditions

介质含量	顶盖情况	起爆位置	到达 PT1 时间 (ms)	正压持时 (ms)
100%柴油	有	顶盖中心	1.26	1.37
/	/	两库之间地面中心	1.59	1.55
50%柴油	有	顶盖中心	1.37	1.65
50%汽油	/	顶部油气中心	1.77	1.34

4、结论

试验开展了不同油介质种类、含量，不同油库顶盖结构以及不同起爆位置下的油库耦合爆炸试验，通过分析爆炸载荷下油库结构、油气类型和含量以及起爆位置对油库破坏损伤模式、冲击波特性的影响，得出以下结论：

1、爆源位于油库顶盖中心时，油库破坏损伤模式表现为顶盖迎爆面的贯穿性冲切破坏和背爆面的层裂剥离破坏。接触爆炸作用于盖板的冲击波峰值超压远大于其抗压强度，因此在压缩波作用下，盖板出现局部的贯穿损伤。混凝土波阻抗远大于空气和柴油，压缩波在盖板底部界面处发生强反射拉伸，造成盖板背面的层裂剥离破坏；

2、采用柴油起爆时，油库顶盖的破坏范围和程度都呈现出横向大于纵向，半油大于满油的规律。相比于 50%柴油，50%汽油爆炸产生的爆炸火球范围更大，燃烧时间更长，但无论采用柴油还是汽油起爆，油库主体结构都不会产生破坏；

3、水底密闭起爆时，炸药水中爆炸冲击波超压峰值显著增强并在角隅处发生聚集效应，导致油库盖板贯穿性冲切损伤范围最大，库体长边壁面中心也出现贯穿性损伤并伴随油库主体结构角隅处的开裂损伤；

4、由于顶盖和地面的壁面反射作用，满油情况下 PT1 测点处超压时程曲线上升阶段出现两个峰值，当油库内柴油含量为 50%时，顶盖与柴油液面之间存在空腔，透射冲击波在波阻抗较小的空气介质内产生反射叠加，经顶盖绕射形成第三个峰值并明显增加冲击波正压持时。

5、反射壁面的形变和破坏会吸收爆炸产生的能量导致冲击波峰值超压及波速下降，由于液体的不可压缩性，随着油库内油量的降低，反射壁面的形变量逐渐增大，破坏程度也逐渐增大，因此爆炸产生的冲击波超压峰值及波速也随之下降。

参考文献

- [1] 蒋新生, 秦希卓, 储汇, 等. 油气爆炸荷载对储罐结构的毁伤机制及评估[J]. 油气储运, 2024,43(12):1365-1377.DOI:10.6047/j.issn.1000-8241.2024.12.005
JIANG X S, QIN X Z, CHU H, et al. Damage mechanism and assessment of oil tank structure under oil-gas explosion

- load [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43 (12): 1365-1377. DOI:10.6047/j.issn.1000-8241.2024.12.005
- [2] 黄达海, 尤旭升. 地中式混凝土油罐的数值模拟[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005,31(2):187-191. DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2005.02.018.
HUANG D H, YOU X S. Numerical simulation of underground concrete oil tank [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31 (2): 187-191. DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2005.02.018.
- [3] 路胜卓, 王伟, 张博一. 大型浮顶式储油罐的爆炸破坏机理实验[J]. *爆炸与冲击*, 2011,30(2):158-164.
LU S Z, WANG W, ZHANG B Y. Experimental study on explosion failure mechanism of large floating roof oil storage tank [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 30 (2): 158-164.
- [4] 张博一, 李前程, 王伟, 等. 大型浮顶储油罐爆炸动力响应及破坏机理[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014,46(10):23-30.
ZHANG B Y, LI Q C, WANG W, et al. Dynamic response and failure mechanism of large floating roof oil tank under explosion [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46 (10): 23-30.
- [5] 王世茂, 杜扬, 高建丰, 等. 半地下覆土立式油罐内部油气爆炸冲击荷载实验研究[J]. *振动与冲击*, 2017,36(22):239-244. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2017.22.037.
WANG S M, DU Y, GAO J F, et al. Experimental study on internal oil-gas explosion impact load of semi-underground covered vertical oil tank [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36 (22): 239-244. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2017.22.037.
- [6] 蔡运雄, 蒋新生, 王世茂, 等. 模拟立式拱顶油罐内油气爆炸实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2022,42(10):150-166.
CAI Y X, JIANG X S, WANG S M, et al. Experimental study on oil-gas explosion in simulated vertical dome oil tank [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42 (10): 150-166.
- [7] 匡志平, 杨秋华, 胡坚尉. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土框架结构的动力响应研究[J]. *力学季刊*, 2010,31(3):443-447. DOI:10.15959/j.cnki.0254-0053.2010.03.021.
KUANG Z P, YANG Q H, HU J W. Dynamic response of reinforced concrete frame structure under blast load [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2010, 31 (3): 443-447. DOI:10.15959/j.cnki.0254-0053.2010.03.021.
- [8] 孙加超, 陈小伟, 邓勇军, 等. 爆炸荷载下基于细观建模的素/钢筋混凝土板破坏模式[J]. *爆炸与冲击*, 2019,39(11):29-39.
SUN J C, CHEN X W, DENG Y J, et al. Failure modes of plain/reinforced concrete slab based on meso-modeling under blast load [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39 (11): 29-39.
- [9] 汪维, 刘光昆, 赵强, 等. 近爆作用下方形板表面爆炸载荷分布函数研究[J]. *中国科学(物理学力学天文学)*, 2020,50(2):140-148.
WANG W, LIU G K, ZHAO Q, et al. Study on surface blast load distribution function of square plate under near-field explosion [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2020, 50 (2): 140-148.
- [10] Pan Y, Zong Z, Li J, et al. Dynamic response of calcareous sands shallow-buried reinforced concrete slab under surface explosion[J]. *STRUCTURES*, 2024,67:13. DOI:doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107012.
- [11] 谷鸿平, 姚术健, 张舵, 等. 结构内部爆炸冲击波载荷的相似特性[J]. *火炸药学报*, 2019,42(6):621-625, 630. DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.201809010.
GU H P, YAO S J, ZHANG D, et al. Similarity characteristics of internal blast shock wave load in structure [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2019, 42 (6): 621-625, 630. DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.201809010.
- [12] Deng G, Yu X. Numerical study on the case effect of a bomb air explosion[J]. *DEFENCE TECHNOLOGY*, 2021,17(4):1461-1470. DOI:10.1016/j.dt.2020.08.003.
- [13] Cai Y, Jiang X, Wang S, et al. Experimental study on explosion overpressure and flame propagation characteristics of simulated vertical dome oil tank[J]. *JOURNAL OF LOSS PREVENTION IN THE PROCESS INDUSTRIES*, 2022,76:12. DOI:10.1016/j.jlp.2022.104752.

- [14] Smith T A, Bempedelis N. The reflection of a planar impulsive shock wave at a liquid-gas interface[J]. JOURNAL OF FLUID MECHANICS, 2024,999:36.
- [15] Zhang C, Gholipour G, Mousavi A A. Blast loads induced responses of RC structural members: State-of-the-art review[J]. Composites Part B: Engineering, 2020,195:108066. DOI:doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108066.
- [16] Foundations of Stress Waves[M]. Elsevier Ltd: 2007-01-01.
- [17] 李二宝, 杨恒, 杨海涛, 等. 爆破漏斗成形规律数值模拟及试验研究[J]. 现代矿业, 2020,36(4):59-63.
LI E B, YANG H, YANG H T, et al. Numerical simulation and experimental study on blasting crater forming law [J]. Modern Mining, 2020, 36 (4): 59-63.
- [18] 陈公轻, 吴昊, 欧渊, 等. 内爆炸作用下含填充墙 RC 框架结构破坏分析[J]. 振动与冲击, 2025,44(05):289-301. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2025.05.031.
CHEN G Q, WU H, OU Y, et al. Failure analysis of RC frame structure with infill walls under internal explosion [J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44 (5): 289-301. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2025.05.031.
- [19] 贾晓兵. 抗爆间室内爆炸荷载特性分析与简化模型[D]. 天津大学建筑与土木工程, 2022. DOI:10.27356/d.cnki.gtjdu.2022.000696.
JIA X B. Analysis on internal blast load characteristics and simplified model of blast-resistant room [D]. Tianjin University, 2022. DOI:10.27356/d.cnki.gtjdu.2022.000696.
- [20] Arons A B. Underwater explosion shock wave parameters at large distances from the charge[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1954,26:343.
- [21] Surhone L M, Tennoe M T, Henssonow S F, et al. Underwater Explosion[J]. Betascript Publishing, 2010.
- [22] 张彬彬. 爆炸冲击波超压场重建技术研究[D]. 中北大学电子信息, 2024. DOI:10.27470/d.cnki.ghbgc.2024.001325.
ZHANG B B. Study on reconstruction technology of blast shock wave overpressure field [D]. North University of China, 2024. DOI:10.27470/d.cnki.ghbgc.2024.001325.
- [23] 崔瑞杰, 王长利, 王文廉, 等. 基于遗传算法的箱型结构内爆壁面超压重构方法研究[J]. 现代应用物理, 2024,15(6):187-194.
CUI R J, WANG C L, WANG W L, et al. Study on internal blast wall overpressure reconstruction method of box structure based on genetic algorithm [J]. Modern Applied Physics, 2024, 15 (6): 187-194.
- [24] 郭荣君. 坑道内爆炸冲击波传播规律及坑道动力响应研究[D]. 南京理工大学兵器发射理论与技术, 2021. DOI:10.27241/d.cnki.gnjgu.2021.000058.
GUO R J. Study on propagation law of blast shock wave in tunnel and dynamic response of tunnel [D]. Nanjing University of Science and Technology, 2021. DOI:10.27241/d.cnki.gnjgu.2021.000058.
- [25] 董永香, 冯顺山, 李学林. 爆炸波在硬-软-硬三明治介质中传播特性的数值分析[J]. 弹道学报, 2007(01):59-63.
DONG Y X, FENG S S, LI X L. Numerical analysis of blast wave propagation characteristics in hard-soft-hard sandwich medium [J]. Journal of Ballistics, 2007, (1): 59-63.