

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0455

## 覆土真空爆炸容器内部载荷及动态响应分析\*

周德政<sup>1</sup>, 李晓杰<sup>1,2</sup>, 王小红<sup>1,2</sup>, 王宇新<sup>1,2</sup>, 闫鸿浩<sup>1,2</sup>

(1. 大连理工大学力学与航空航天学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学工业装备结构分析优化与CAE软件全国重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 为了研制超大型真空爆炸焊接容器, 探索覆土真空爆炸容器内的冲击载荷及结构动态响应, 设计了一座可以满足实验需要的0.55 m<sup>3</sup>小型真空爆炸容器, 在其内部开展了一系列真空爆炸实验; 应用AUTODYN有限元应用程序, 对真空爆炸实验进行了数值模拟分析, 深入探索了冲击波在容器内部的传播规律、冲击载荷分布状态、结构动态响应以及覆土厚度对平板结构消振作用的影响等问题。实验和数值模拟结果表明: 爆炸容器内冲击载荷时程曲线的第2次脉冲峰值明显高于第1次脉冲峰值, 且冲击波的叠加和反射总是发生在封盖内壁; 随着容器内部真空度的不断下降, 冲击载荷的峰值也被明显削弱; 容器封盖的动态响应分为阶跃上升、脉冲随动、惯性滞后和静压稳定4个发展阶段; 随着真空度的下降以及覆土厚度的增加, 爆炸容器的动态响应逐渐被削弱。降低容器内部环境压力和增加覆土厚度均可削减爆炸容器的受迫振动, 可为超大型真空爆炸容器的结构设计提供参考。

**关键词:** 真空爆炸容器; 冲击载荷; 动态应变; 冲击波; 真空度; 覆土作用

中图分类号: O382

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Analysis of internal load and dynamic response of vacuum explosion containment vessel with sand covered for explosive welding

ZHOU Dezheng<sup>1</sup>, LI Xiaojie<sup>1,2</sup>, WANG Xiaohong<sup>1,2</sup>, WANG Yuxin<sup>1,2</sup>, YAN Honghao<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanics and Aerospace Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

**Abstract:** Explosive welding production in a vacuum explosion containment vessel can not only restrict the shock wave and noise generated by explosive explosion in a certain space range, but also effectively improve the quality of explosive welding products. Meanwhile, it also alleviates the problems of unstable product quality and rainy season shutdown caused by the influence of weather and climate during explosive welding production, which is an invention that can promote the development of the explosive processing industry. In order to develop a super large vacuum explosion containment vessel for explosive welding, it is necessary to explore the internal blast load and dynamic response of vacuum explosion containment vessel with sand covered for explosive welding. In order to meet the requirements of the experiment, a 0.55 m<sup>3</sup> small cylindrical vacuum explosion containment vessel with the cap covered by a certain thickness of sand was designed, and a series of vacuum explosion experiments were carried out in it. At the same time, using the AUTODYN finite element analysis program, the numerical simulation analysis of the corresponding experimental groups is carried out. The evolution of shock wave inside the container, the distribution of blast load, the dynamic response of the structure, and the mechanism of sand covering on the end of the container on the damping of the plate structure are explored in depth. By analyzing the results of experiment and

\* 收稿日期: 2023-12-09; 修回日期: 2024-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(12072067, 12172084)

第一作者: 周德政(1991—), 男, 博士研究生, [zhouz19911108@163.com](mailto:zhouz19911108@163.com)

通信作者: 李晓杰(1963—), 男, 博士, 教授, [robinli@dlut.edu.cn](mailto:robinli@dlut.edu.cn)

numerical simulation, it is concluded that the peak value of the second impulse of the time-history curve of the blast load in the explosion containment vessel is obviously higher than that of the first impulse, and the superposition and reflection of the shock wave always occur in the inner wall of the cover. With the decrease of vacuum degree inside the container, the peak value of the blast load is weakened obviously. According to the time-history curves of blast load and dynamic strain calculated by the numerical simulation, the dynamic response of the container cover is divided into four development phases: step-up phase, impulse follower phase, inertial lag phase and static pressure stabilization phase. With the decrease of vacuum degree, the amplitude of dynamic response is weakened obviously. With the increase of the thickness of sand cover, the dynamic response of explosion vessel is gradually weakened. Ultimately, it is concluded that reducing the environmental pressure inside the vessel and increasing the thickness of the sand covered on the cap of the container can be used as an effective method to reduce the forced vibration of the explosion containment vessel. The conclusions of the study are useful for the structural design of super large vacuum explosion containment vessels.

**Keywords:** vacuum explosion containment vessel; blast load; dynamic response; shock wave; vacuum degree; sand covering

爆炸焊接是一种利用炸药释放的能量将不同类型的金属板材固相结合的复合材料加工方法<sup>[1-3]</sup>。爆炸焊接的复合金属材料具备良好的力学性能,并且拥有单一金属材料无法比拟的性价比。爆炸焊接复合板还兼具耐高温、耐高压以及抗腐蚀等优点,已经广泛应用于电力、船舶、航天、化工以及核工业等相关领域,并得到一致的好评<sup>[4]</sup>。

大板幅的金属复合板材是工业发展的刚需品。在当前的生产条件下,炸药爆炸瞬间产生的冲击波、噪声、有害气体以及粉尘不利于周边人员的健康和环境的长期和谐发展。在真空环境下进行爆炸焊接生产,可以最大限度地削弱生产对周边人员和生态的影响,且能提高爆炸焊接板材的复合率,降低生产成本<sup>[5]</sup>。因此,研制超大型真空爆炸焊接容器可以推进爆炸焊接生产的工厂化进程,也可以缓解爆炸焊接生产受天气和气候影响造成的质量不稳定和雨季停产等问题,从而提高爆炸焊接板材的产量,为施工单位提高产值。

然而,关于大型真空爆炸容器的研制少有文献报道,且没有系统性的工程标准,可参考的公开实验数据也十分有限。秦小勇<sup>[6]</sup>和李晓杰等<sup>[7]</sup>结合爆炸容器和爆炸洞的设计思路研制了一座爆炸焊接半球消波器,其结构为部分掩埋于砂土之下的加筋半球壳,由于该消波器没有完全封闭,无法开展真空爆炸焊接的施工作业。2022年,大连理工大学与太原钢铁集团合作开发了当量为 100 kg TNT、容积为 270 m<sup>3</sup> 的真空爆炸容器,这是国内当量最高的真空爆炸容器<sup>[8]</sup>。然而,270 m<sup>3</sup> 的容积依然无法满足大板幅复合板材的施工条件,开发更高当量的真空爆炸焊接容器是爆炸焊接产业工厂化进程中亟待解决的难题。为此,有必要进行覆土真空爆炸容器内的冲击载荷及容器结构的动态响应的前期探索。

本文中,将设计一台能够满足实验需求的底部覆土的 0.55 m<sup>3</sup> 小型真空爆炸容器,在其内部开展一系列真空爆炸实验;同时,应用 AUTODYN 有限元应用程序对相应的爆炸实验开展数值模拟分析,探索冲击波在容器内部的传播规律、冲击载荷分布状态、结构动态响应以及覆土厚度对平板结构消振作用的影响等问题,以期超大型真空爆炸焊接容器的研制提供实验数据和理论支持。

## 1 爆炸冲击载荷

与无限域或半无限域内的冲击波不同,爆炸容器内的冲击波受到限制无法及时向外扩散,在容器内不断反射和叠加,形成复杂的多脉冲爆炸冲击载荷<sup>[9]</sup>。以下将系统地讨论爆炸容器内部的冲击载荷随真空度和炸药量的变化规律,以及爆炸容器内的冲击载荷分布特点。

### 1.1 实验装置

为了近似模拟实际的爆炸焊接工况,设计了一台容积为 0.55 m<sup>3</sup>、底部覆土的小型井式真空爆炸容器,如图 1 所示。在容器底部填充 450 mm 厚的砂土和铁屑吸收部分冲击波,用以削弱爆炸冲击载荷的强度。

实验测试系统如图 2(a) 所示, 冲击测试仪的采样频率为 4 MHz, 触发电平为 0.1%, 采样时长为 1.0 s, 引爆炸药后, 通过触发压力传感器采集作用在容器封盖特征位置处的冲击载荷信号。4 个压力传感器(A~D)的量程为±5 V, 灵敏度为 0.73 V/MPa, 其分布如图 2(b) 所示。实验采用集中装药的形式, 装药选用密度为 8.952 g/cm<sup>3</sup>、爆速为 2 800 m/s 的颗粒状铵油炸药。根据炸药量和容器内部真空环境的不同, 将实验分为 4 组, 如表 1 所示, 其中: 实验编号中的希腊数字表示铵油炸药量, 阿拉伯数字表示容器内部的真空度,  $\bar{p}_v$  为无量纲真空度,  $\bar{p}_v = p_v/101.325 \text{ kPa}$ ,  $p_v$  为真空度。

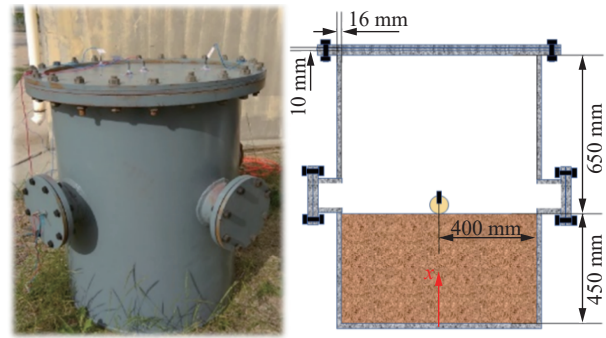


图 1 0.55 m<sup>3</sup> 井式真空爆炸容器  
Fig. 1 0.55 m<sup>3</sup> pit type vacuum explosion containment vessel

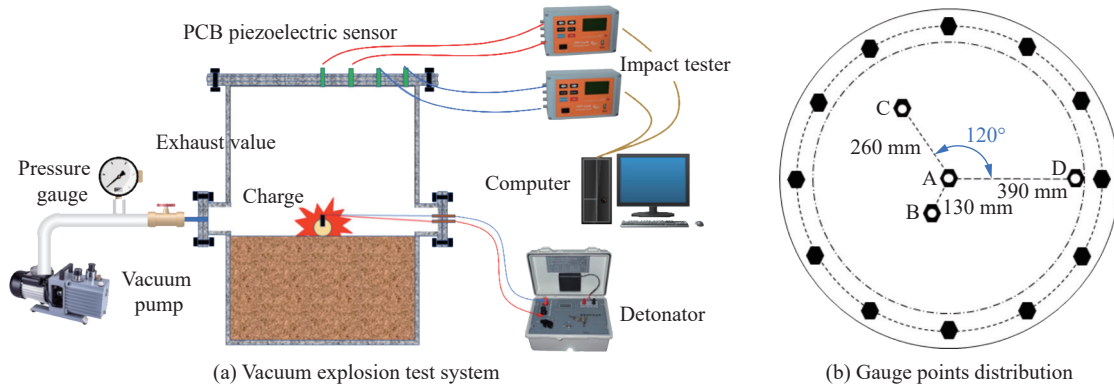


图 2 真空爆炸实验测试系统和测点分布

Fig. 2 Vacuum explosion test system and gauge points distribution

表 1 实验分组及实验参数

Table 1 Experimental grouping and experimental parameters

实验编号	铵油炸药量/g	TNT当量/g	$\bar{p}_v$
Exp III-012	30	22.80	0.12
Exp III-050	30	22.80	0.50
Exp III-100	30	22.80	1.00
Exp II-100	20	15.20	1.00

## 1.2 实验结果

炸药爆炸时, 爆轰产物高速膨胀强烈压缩周围介质形成冲击波, 冲击波作用在容器封盖上。爆炸冲击载荷的前 2 次脉冲呈现出明显的阶跃式上升现象, 随后进入指数衰减阶段, 最终逐渐趋于平稳。图 3 为实验 Exp III-100 前 2.0 ms 的冲击载荷时程曲线。空中爆炸的典型冲击载荷时程( $p-t$ )曲线<sup>[10]</sup>如图 4 所示, 其中:  $p_0$  为标准大气压强,  $\Delta p_m$  为空中爆炸载荷的峰值超压,  $t^*$  为冲击波到达时间,  $t^+$  为爆炸载荷的正压作用时间,  $i^+$  为冲击波正压作用区的比冲量。

由图 3 可知, 传感器 A 最先采集到冲击载荷信号。2.0 ms 内, 传感器 A 和 B 均采集到 2 次冲击波峰, 相较于第 1 次脉冲, 第 2 次脉冲的压力峰值更大, 正压作用时间更长, 比冲量也更高。这是因为, 第 1 次脉冲为冲击波在爆炸容器平板封盖处产生的反射超压, 第 2 次脉冲为各处反射波相互叠加形成的冲击载荷。传感器 A~D 在首个波峰处均发生 2 处小波动, 分别对应爆轰产物-空气界面前沿的冲击波压力峰值和界面后端的爆轰产物压力峰值。

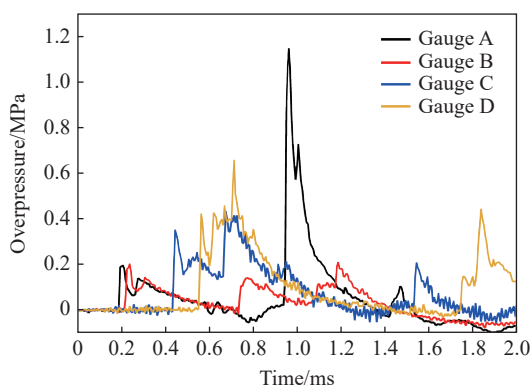


图 3 爆炸冲击载荷 (Exp III-100)

Fig. 3 Explosion impact loads (Exp III-100)

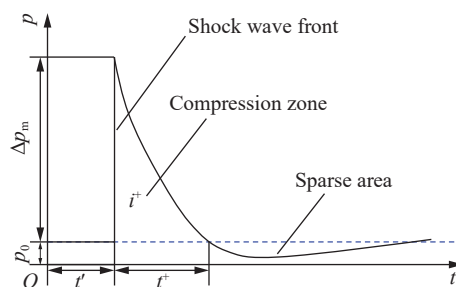


图 4 空中爆炸的冲击载荷时程曲线<sup>[10]</sup>

Fig. 4 Impact load time-history curve of air explosion<sup>[10]</sup>

Zhou 等<sup>[9]</sup>开展了 Exp II-100 和 Exp III-100 实验,总结了标准大气压下容器内爆炸载荷的变化规律:随着炸药量的增加,其峰值超压和比冲量增大。Zhou 等<sup>[11]</sup>测试了 Exp III-100、Exp III-050 和 Exp III-012 实验中传感器 A 的  $p-t$  曲线,总结了  $p-t$  曲线各特征参量随爆炸容器内  $\bar{p}_v$  的变化规律,如图 5 所示。可以看出:真空环境可以削弱爆炸冲击载荷强度,且对第 2 次脉冲的削弱效果明显好于第 1 次;真空环境也可以衰减冲击波,  $\bar{p}_v$  越低,冲击波的传播速度越快。

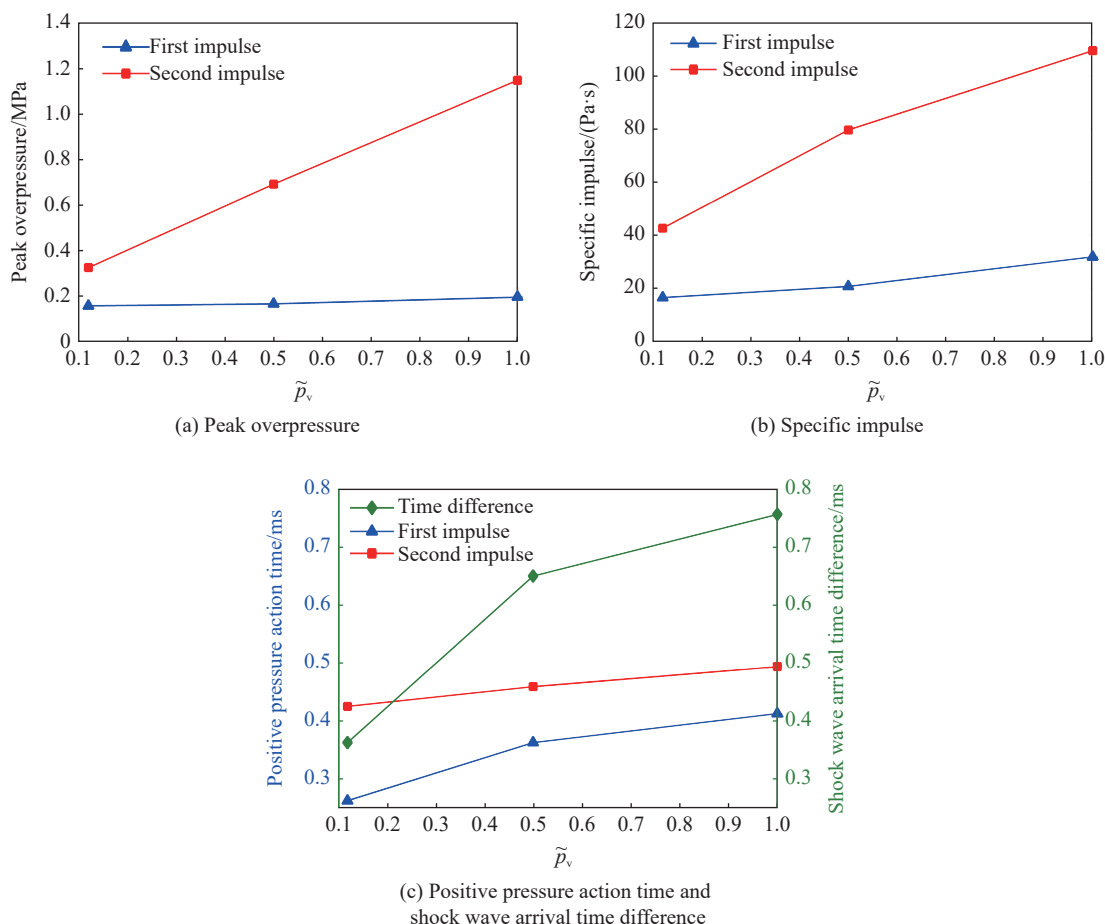


图 5 爆炸冲击载荷时程曲线的特征参量随真空度的变化<sup>[11]</sup>

Fig. 5 Characteristic parameters of time-history curves of explosion impact load change with vacuum degree<sup>[11]</sup>

### 1.3 数值模拟

为了探索真空度对有限域内冲击波的传播规律以及爆炸冲击载荷分布的影响, 采用 AUTODYN 有限元应用程序中的二维轴对称模型对爆炸容器的纵剖面进行建模, 设置空气域底部的边界条件为固壁反射, 侧向和顶端的边界条件为无反射边界, 数值模型如图 6 所示。从爆炸容器封盖中心到边缘均匀设置 81 个测试点, 用于测试容器内部的冲击载荷分布状态, 数值模拟分组与实验相同。

图 7 比较了封盖中心位置(传感器 A)处数值模拟和实验的  $p-t$  曲线, 可以看出, 最大峰值和比冲量的计算误差均在 15% 以内, 且  $p-t$  曲线的变化趋势基本一致, 验证了数值模型以及计算方法的可靠性。

图 8 为  $\bar{p}_v=1.00$  时数值模拟得到的爆炸容器内部压力场云图。  $t=0.8201$  ms 时, 空气中的冲击波首先接触封盖中心传感器(传感器 A), 并产生第 1 次脉冲; 作用在容器侧壁的冲击波发生非正规斜反射(马赫反射), 如图 8(a) 所示, 反射过程产生马赫杆以及三波点, 冲击波的入射角度  $\phi_0=53.97^\circ$ 。随着冲击波的不断演进,  $t=1.0800$  ms 时, 封盖和侧壁的反射冲击波在容器主体和封盖的连接处叠加, 该位置承受的冲击载荷较大, 正压时间较长, 容易产生失效破坏。随后, 两侧叠加的反射冲击波继续沿封盖向中心移动,  $t=1.5000$  ms 时, 两侧反射波在中心位置再次碰撞, 压力峰值再次叠加, 中心位置的冲击载荷峰值达到 1.295 MPa, 如图 8(c) 所示。冲击波的叠加和反射总是发生在封盖内壁附近, 在侧壁内表面仅发生了 1 次反射, 且载荷的峰值较小, 因此, 需要格外关注爆炸容器上封盖的设计。

不同真空度下冲击波的传播速度不同, 封盖内反射波叠加的位置即最大峰值超压发生的位置也不相同, 如图 9 所示, 其中, 模拟编号与实验编号类似, 希腊数字表示铵油炸药量, 阿拉伯数字表示容器内部的真空度。  $\bar{p}_v=0.30$  时, 下中轴线的叠加波先到达封盖, 反射后在距爆炸容器封盖圆心 60 mm 处与边缘的反射波再次叠加。真空度仅对封盖中心区域(0~80 mm)的冲击载荷峰值有削弱作用, 随着真空度的下降, 峰值超压逐渐下降。在真空爆炸容器的设计过程中, 需要考虑爆心与封盖之间的距离对冲击波的影响, 尽量避免因多处反射波同时叠加在封盖结构某处, 造成瞬间压力集中从而毁伤容器结构。

图 10 为不同真空度下的比冲量分布。总体看来, 各测试点的比冲量均随真空度的下降而下降, 5 组曲线的比冲量峰值均发生在封盖中心。相较于  $\bar{p}_v=1.00$ ,  $\bar{p}_v=0.75$  时封盖中心和边缘的比冲量均有明显削弱;  $\bar{p}_v$  从 0.75 下降至 0.12 的过程中, 边缘位置的比冲量衰减并不显著。

综上所述, 真空度对冲击波强度有显著影响, 真空度越低, 冲击波的强度越弱。研究结果可为“真空消爆”的防爆方式提供有效的理论支撑。

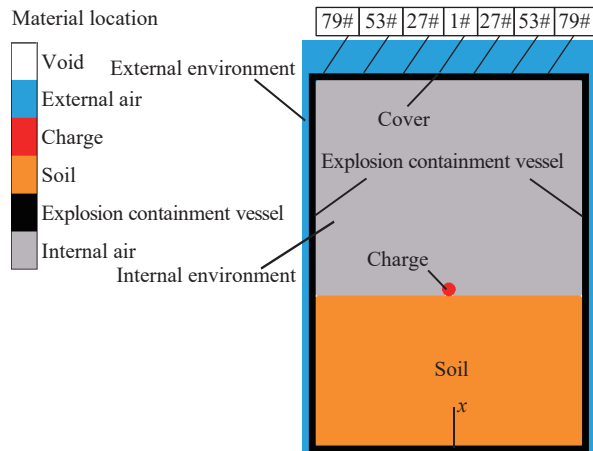


图 6 实验真空爆炸容器的数值模型

Fig. 6 Numerical model of experimental vacuum explosion vessel

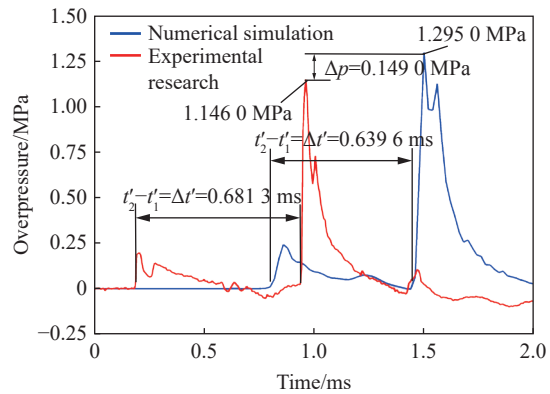


图 7 数值模拟和实验得到的爆炸冲击载荷时程曲线对比 (Exp III-100, 传感器 A)

Fig. 7 Comparison of explosive load time-history curves of impact load between numerical simulation and experiment (Exp III-100, gauge A)

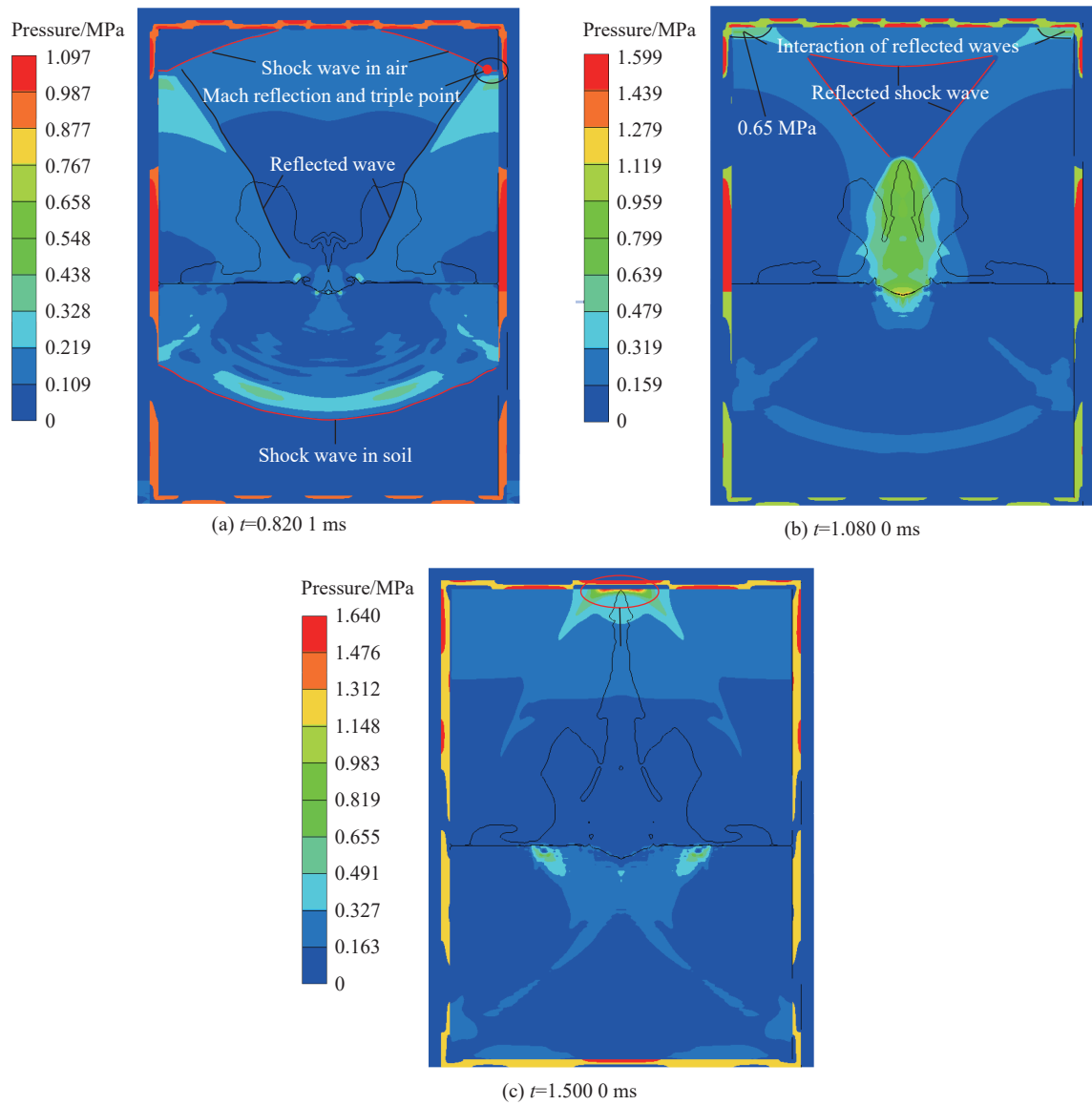


图 8 数值模拟得到的爆炸容器内部压力场分布 ( $\bar{p}_v=1.00$ )

Fig. 8 Pressure field distribution obtained by numerical simulation inside the vacuum explosion containment vessel ( $\bar{p}_v=1.00$ )

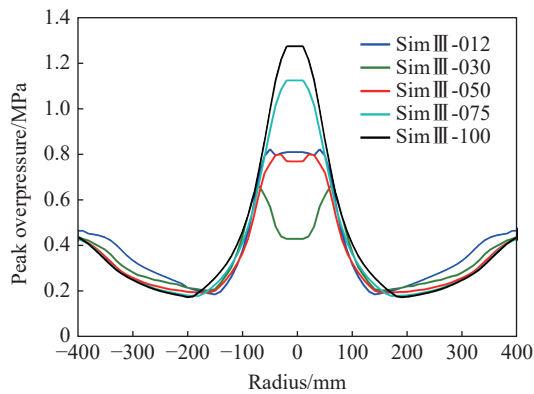


图 9 不同真空度下的峰值超压分布

Fig. 9 Distribution of peak overpressure under different vacuum degrees

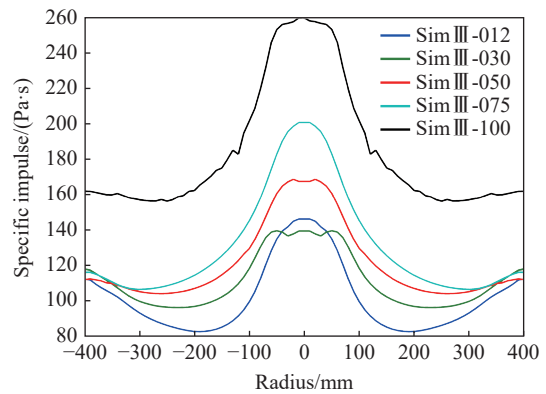


图 10 不同真空度下的比冲量分布

Fig. 10 Distribution of specific impulse under different vacuum degrees

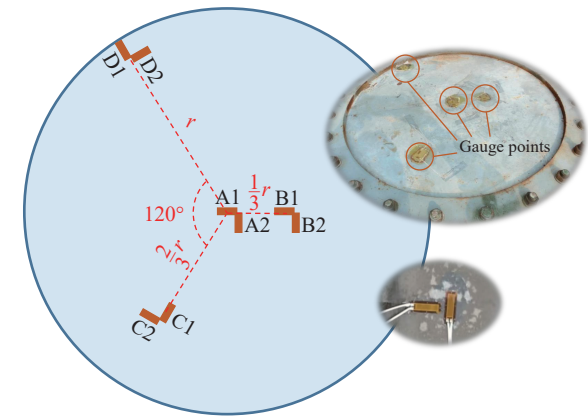
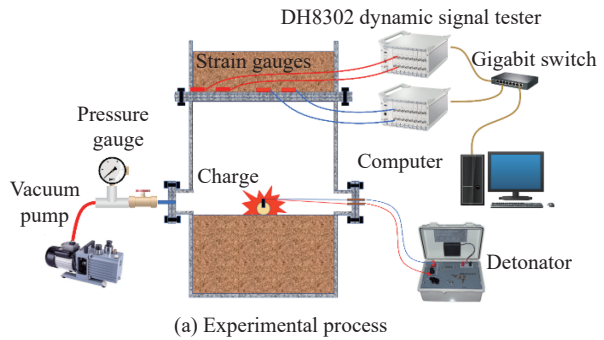
## 2 动态响应

对超大型真空爆炸焊接容器进行覆土处理,既可以有效提高爆炸容器的防爆性能,又能降低建造成本。本节在爆炸容器的封盖上预置不同厚度的砂土,采集封盖特征点的动态应变,分析覆土厚度对圆板封盖动态响应,以及真空度和炸药量对爆炸容器动态响应的影响。

### 2.1 实验装置

采用 1.1 节的实验爆炸容器,在封盖上方预置不同厚度的砂土,开展一系列的爆炸实验。测试系统由均匀分布在爆炸容器封盖上的 8 个单轴应变片、2 台 DH8302 动态信号测试仪、1 台千兆交换机和计算机组成。实验的采样频率设置为 1.0 MHz,采样时长为 1.0 s,采集模式为信号自触发形式。实验流程和测点(传感器 A1、A2、B1、B2、C1、C2、D1 和 D2)分布如图 11 所示,其中  $r$  为容器封盖的半径,取  $r=400$  mm。

实验中的炸药均选择黑索金粉末,并采用球形装药形式,密度为  $1.15 \text{ g/cm}^3$ 。炸药爆炸产生冲击波,容器封盖受迫振动从而触发动态信号分析仪,完成封盖动态应变的信号采集。覆土实验分组及实验参数如表 2 所示,实验容器内部的初始压力均为标准大气压强。其中:编号以 Exp X\*开头的实验,封盖厚度为 10 mm,炸药量为 30 g;编号以 Exp VIII\*开头的实验,封盖厚度为 8 mm,炸药量为 20 g;编号以 Exp VI\*开头的实验,封盖厚度为 6 mm,炸药量为 20 g。当容器的封盖厚度为 10 mm、覆土厚度为 240 mm 时,根据爆炸容器内部真空度和炸药量的不同开展了 7 组真空爆炸实验,以讨论动态应变随真空度和炸药量的变化规律。真空爆炸实验的分组如表 3 所示。



(b) Gauge point distribution

图 11 实验流程及测点分布

Fig. 11 Experimental process and gauge point distribution

表 2 覆土实验分组及实验参数

Table 2 Experimental grouping of soil covering and experimental parameters

实验编号	覆土厚度/mm	实验编号	覆土厚度/mm	实验编号	覆土厚度/mm
Exp X*-240	240	Exp VIII*-450	450	Exp VI*-300	300
Exp X*-180	180	Exp VIII*-300	300	Exp VI*-150	150
Exp X*-120	120	Exp VIII*-150	150	Exp VI*-000	0
Exp X*-060	60	Exp VIII*-000	0		
Exp X*-000	0	Exp VI*-450	450		

表 3 真空爆炸实验分组及实验参数

Table 3 Experimental grouping and experimental parameters of vacuum explosion

实验编号	黑索金炸药量/g	TNT 当量/g	$\bar{p}_v$
Exp III*-100	30	45	1.00
Exp III*-075	30	45	0.75
Exp III*-050	30	45	0.50
Exp III*-020	30	45	0.20
Exp II*-020	20	30	0.20
Exp IV*-020	40	60	0.20
Exp V*-020	50	75	0.20

2.2 实验结果

相较于其他测试点, 传感器 A1 和 A2 的应变峰值最高, 选择传感器 A1 和 A2 处的动态应变曲线进一步考察覆土厚度和真空度对封盖变形的影响。图 12 为 Exp VIII\*-000 和 Exp VIII\*-450 实验中传感器 A1 处容器封盖的应变时程 ( $\epsilon-t$ ) 曲线。动态应变曲线可分为两部分: 一部分为阶跃式上升的应变峰值  $\epsilon_{max}$ , 另一部分为呈逐渐衰减的振动回复过程。t=1 000 ms 时, 各测试点均产生了残余应变  $\epsilon_{res}$ , 这是由于容器内爆炸产生的高温气体无法及时排放引起的, 随着气体温度的下降, 残余应变也逐渐降低。相较于 0 mm, 覆土厚度为 450 mm 时, 容器封盖的应变峰值  $\epsilon_{max}$  减小 41.15%, 残余应变  $\epsilon_{res}$  减小 25.14%。覆土作用可以有效削弱容器封盖的应变峰值  $\epsilon_{max}$ 、残余应变  $\epsilon_{res}$  和自振幅度  $\Delta\epsilon$ 。

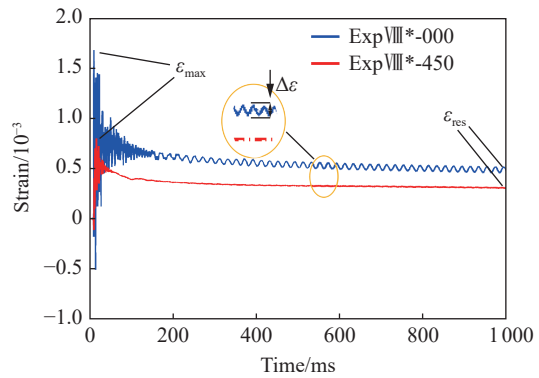


图 12 覆土作用下容器封盖的动态应变(传感器 A1)  
Fig. 12 Dynamic strain on the cover of container under sand covering (Gauge A1)

图 13 为 Exp VIII\*-000 实验中传感器 A1 和 A2 处前 50 ms 的动态应变, 图中标注出了动态应变的特征参量。由于传感器 A1 和 A2 的动态应变基本相同, 为此后续的研究均围绕传感器 A1 讨论。图 14 显示了覆土厚度对容器封盖动态应变的影响, 可以看出, 随着覆土厚度的减小,  $\epsilon_{max}$  和  $\Delta\epsilon$  也逐渐减小。无覆

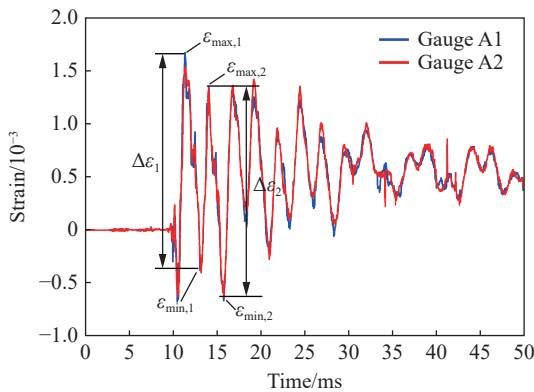


图 13 Exp VIII\*-000 中不同测试点的动态应变  
Fig. 13 Dynamic strain at different gauge points in Exp VIII\*-000

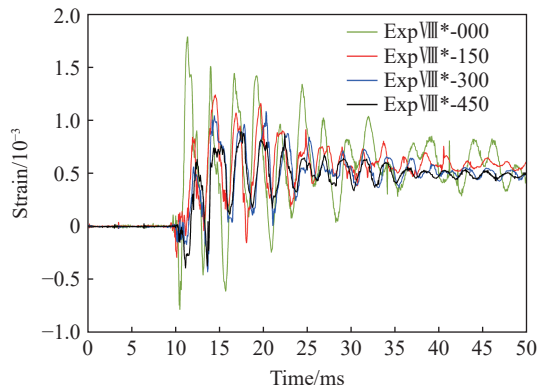


图 14 覆土厚度对动态应变的影响(传感器 A1)  
Fig. 14 Effect of soil covering thickness on dynamic strain (Gauge A1)

土作用时, 应变峰值出现在振动的首个周期; 覆土厚度为 150 和 300 mm 时, 应变峰值发生在振动的第 2 个周期; 覆土厚度为 450 mm 时, 应变峰值发生在振动的第 3 个周期。覆土作用下, 容器封盖的  $\varepsilon-t$  曲线发生了应变增长现象, 但容器封盖的振动周期几乎不变。

相较于  $\bar{p}_v=1.00$ ,  $\bar{p}_v=0.20$  时封盖的  $\varepsilon_{\max}$  衰减了 26.26%, 如图 15 所示。 $\bar{p}_v=0.20$  的工况下, 相较于 50 g, 黑索金炸药量为 20 g 时封盖的  $\varepsilon_{\max}$  下降了 53.01%, 如图 16 所示。降低炸药量和真空度可以有效抑制封盖的动态响应。随着覆土厚度的增加, 容器的  $\varepsilon_{\max}$  和  $\varepsilon_{\text{res}}$  逐渐降低。在容器封盖厚度为 8 mm (6 mm) 的工况下, 相较于无覆土条件, 覆土厚度为 450 mm 时  $\varepsilon_{\max}$  衰减了 46.65%(40.98%), 封盖的  $\varepsilon_{\text{res}}$  衰减了 25.54%(19.53%)。

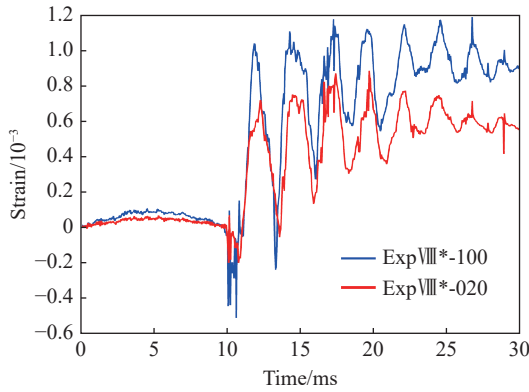


图 15 真空度对动态响应的影响 (传感器 A1)

Fig. 15 Influence of vacuum degree on dynamic response (Gauge A1)

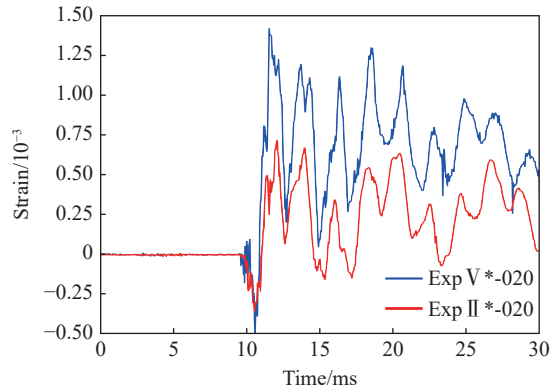


图 16 炸药量对动态响应的影响 (传感器 A1)

Fig. 16 Influence of charge weight on dynamic response (Gauge A1)

### 2.3 数值模拟

采用 1.3 节中的算法和材料参数, 应用 AUTODYN 有限元应用程序建立数值模型(图 17), 模拟覆土厚度为 0~450 mm 时封盖(厚度为 8 和 10 mm)的动态响应, 模拟分组和参数与表 2~3 相同。

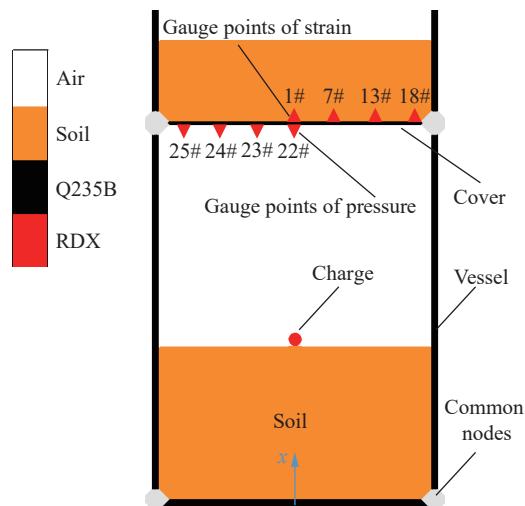


图 17 数值模型

Fig. 17 Numerical model

表 4 对比了封盖厚度为 8 mm 时不同测试点处实验和模拟的应变峰值, 可以看出, 实验和模拟的误差基本在 15% 以内。图 18 对比了 Exp VIII\*-450 工况下数值模拟和实验得到的封盖动态应变, 二者的变化趋势基本吻合, 验证了数值模拟的可靠性。

表 4 封盖厚度为 8 mm 时不同测试点处实验和模拟的应变峰值

Table 4 Peak strains at different gauge points obtained by experiment and numerical simulation on the cover with a thickness of 8 mm

实验编号	$\varepsilon_{\max}(A1)$			$\varepsilon_{\max}(B1)$		
	实验	模拟	误差/%	实验	模拟	误差/%
ExpⅧ*-450	$8.932 \times 10^{-4}$	$1.012 \times 10^{-3}$	13.3	$8.073 \times 10^{-4}$	$7.635 \times 10^{-4}$	-5.4
ExpⅧ*-300	$1.085 \times 10^{-3}$	$1.234 \times 10^{-3}$	13.7	$9.312 \times 10^{-4}$	$9.583 \times 10^{-4}$	2.9
ExpⅧ*-150	$1.239 \times 10^{-3}$	$1.431 \times 10^{-3}$	15.5	$1.041 \times 10^{-3}$	$1.039 \times 10^{-3}$	-0.3
ExpⅧ*-000	$1.784 \times 10^{-3}$	$1.724 \times 10^{-3}$	-3.3	$1.323 \times 10^{-3}$	$1.223 \times 10^{-3}$	-7.5
实验编号	$\varepsilon_{\max}(C1)$			$\varepsilon_{\max}(D1)$		
	实验	模拟	误差/%	实验	模拟	误差/%
ExpⅧ*-450	$6.977 \times 10^{-4}$	$6.662 \times 10^{-4}$	-5.1	$-5.801 \times 10^{-4}$	$-5.557 \times 10^{-4}$	9.4
ExpⅧ*-300	$8.336 \times 10^{-4}$	$8.939 \times 10^{-4}$	7.2	$-5.481 \times 10^{-4}$	$-5.908 \times 10^{-4}$	7.8
ExpⅧ*-150	$9.232 \times 10^{-4}$	$1.013 \times 10^{-3}$	-2.3	$-7.205 \times 10^{-4}$	$-6.662 \times 10^{-4}$	-7.5
ExpⅧ*-000	$1.196 \times 10^{-3}$	$1.167 \times 10^{-3}$	-2.5	$-6.313 \times 10^{-4}$	$-6.619 \times 10^{-4}$	4.9

图 19 为 ExpⅧ\*-100 工况下模拟得到的封盖应变时程曲线和压力时程曲线, 可以看出, 封盖的动态应变主要分为 4 个阶段: (1) 阶跃上升阶段, 在 4.7 ms 之前, 封盖的应变呈稳定增长, 冲击载荷的阶跃式变化对封盖的应变发展影响不大; (2) 脉冲随动阶段, 在 4.7~9.0 ms 范围内, 容器内部的压力场逐渐稳定, 封盖的应变随着冲击载荷的波动而振动; (3) 惯性滞后阶段, 在 9.0~14.3 ms 范围内, 封盖的应变由惯性主导, 应变峰值滞后于压力峰值约半个周期; (4) 静压稳定阶段, 在 14.3 ms 之后, 容器内部的载荷相对稳定, 封盖的应变由容器内部的静载压力主导。

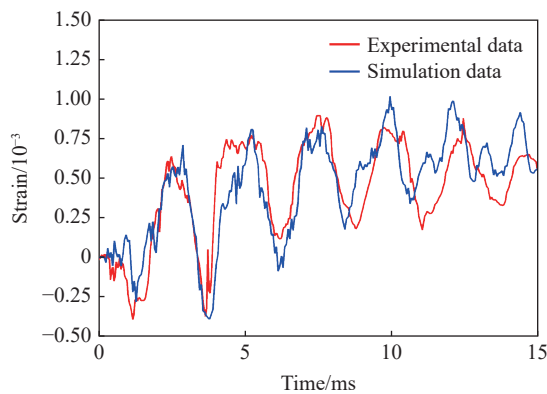


图 18 ExpⅧ\*-450 工况下数值模拟和实验得到的封盖动态应变 (传感器 A1)

Fig. 18 Dynamic strains of container cover calculated by numerical simulation and experiment under ExpⅧ\*-450 (Gauge A1)

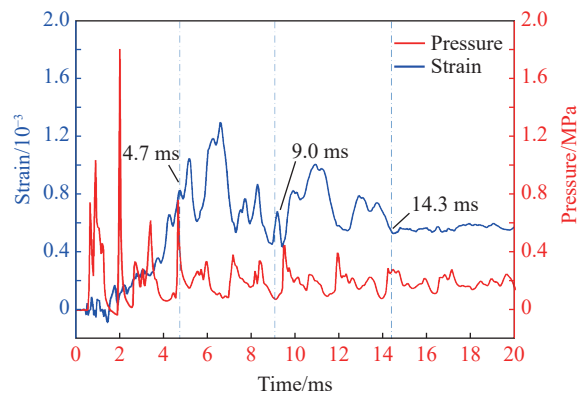


图 19 ExpⅧ\*-100 工况下模拟的封盖应变时程曲线和压力时程曲线 (传感器 A1)

Fig. 19 Explosive load time-history curve and dynamic strain time-history curve calculated by numerical simulation under ExpⅧ\*-100 (Gauge A1)

图 20(a)~(c) 为图 19 中压力峰值时刻爆炸容器的内部压力场分布, 可以看出, 压力集中在封盖中心位置。t=6.6 ms (图 20(d)) 时, 封盖的应变达到峰值, 容器内部的压力场逐渐趋于稳定, 但冲击波依旧逐渐演进。在 11.0~13.0 ms 范围 (图 20(e)~(f)) 内, 容器内部的压力场接近准静态压力场。

综上所述, 提高覆土厚度可以提升容器自重并吸收冲击波能量, 降低爆炸容器内部真空度能够减少爆炸冲击波的传播介质, 二者均可以有效降低爆炸容器的动态响应, 提高爆炸容器的防爆性能。

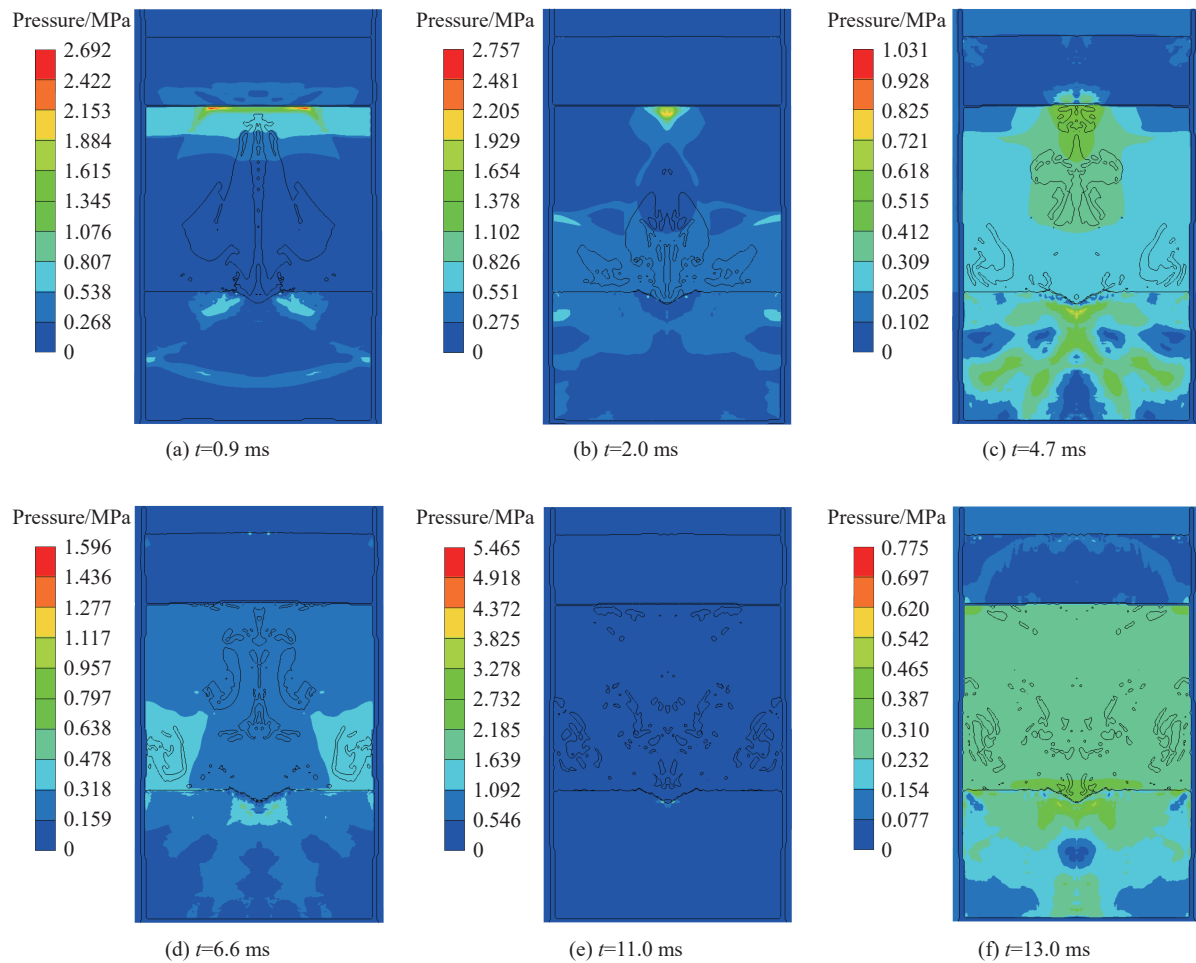


图 20 数值模拟得到的爆炸容器内部压力场分布

Fig. 20 Pressure field distribution of numerical simulation inside the vacuum explosion containment vessel

### 3 结 论

为了研制超大型覆土真空爆炸焊接容器,对  $0.55 \text{ m}^3$  真空爆炸容器进行了实验和数值模拟研究,讨论了爆炸容器内部冲击载荷的分布规律,分析了真空度对爆炸容器内部冲击载荷以及覆土厚度和真空度对爆炸容器动态响应的影响,主要结论如下。

(1) 真空爆炸容器内部的冲击载荷呈现出多脉冲特点。在封盖的中心位置,冲击载荷时程曲线的第 2 次脉冲的峰值明显高于第 1 次。冲击波的叠加和反射总是发生在封盖内壁附近,在侧壁内表面仅发生 1 次反射,且冲击载荷的峰值较小。封盖的中心和边缘承受较大的超压和比冲量。

(2) 随着真空度的降低,冲击波的压力峰值、比冲量和正压作用时间变小,而传播速度增大。不同的真空度下,冲击波的传播速度不同,封盖内壁反射冲击波叠加的位置也不同。真空度是影响冲击载荷峰值超压的重要因素。

(3) 封盖的动态应变呈现出阶跃式上升的剧烈振荡和逐渐衰减的振动回复 2 个阶段。随着覆土厚度的增加,平板封盖的应变峰值和残余应变均减小;随着炸药量和真空度的降低,封盖的应变峰值和残余应变均降低。降低炸药量和真空度可以有效降低爆炸容器的动态响应。

(4) 覆土作用后,爆炸容器封盖的动态应变分为阶跃上升、脉冲随动、惯性滞后和静压稳定 4 个阶段。增加覆土厚度可以提升爆炸容器的防爆性能。

## 参考文献:

- [1] RINEHART J S, PEARSON J. Explosive working of metals [M]. New York: Pergamon Press, 1963.
- [2] ZENG X Y, LI X J, CHEN X, et al. Numerical and experimental studies on the explosive welding of plates with different initial strength [J]. *Welding in the World*, 2019, 63(4): 967–974. DOI: 10.1007/s40194-019-00733-0.
- [3] WANG Y X, LI X J, WANG X H, et al. Fabrication of a thick copper-stainless steel clad plate for nuclear fusion equipment by explosive welding [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2018, 137: 91–96. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.08.017.
- [4] 闫鸿浩, 李晓杰. 爆炸焊接技术应用扩展 [J]. *爆破*, 2005, 22(1): 13–15, 24. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2005.01.003.  
YAN H H, LI X J. The extended application of explosive welding technology [J]. *Blasting*, 2005, 22(1): 13–15, 24. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2005.01.003.
- [5] 牛爱红. 金属复合材料真空爆炸焊接实践与研究 [J]. *工程爆破*, 2018, 24(4): 67–70. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2018.04.013.  
NIU A H. Research and practice of vacuum explosion welding for metal cladding product [J]. *Engineering Blasting*, 2018, 24(4): 67–70. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2018.04.013.
- [6] 秦小勇. 大型爆炸焊接半球消波器研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.  
QIN X Y. The study on large scale hemispherical shock-waves trap structure for explosive welding [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [7] 李晓杰, 秦小勇, 闫鸿浩. 半球阻波结构体底部的约束形式 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(1): 7–11. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0007-05.  
LI X J, QIN X Y, YAN H H. Base constraint forms of hemispherical shock-waves trap structures [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(1): 7–11. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0007-05.
- [8] 程赛伟. 大型真空爆炸容器用组合结构椭圆抗爆门研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [9] ZHOU D Z, LI X J, WANG Y X, et al. Research on evolution of shock wave of ground explosion in pit type explosion containment vessel [J]. *Structures*, 2023, 50: 1164–1172. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.02.082.
- [10] 李科斌, 李晓杰, 闫鸿浩, 等. 不同真空度下空中爆炸近场特性的数值模拟研究 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(17): 270–276. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.17.038.  
LI K B, LI X J, YAN H H, et al. Numerical simulation for near-field characteristics of air explosion under different degrees of vacuum [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(17): 270–276. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.17.038.
- [11] ZHOU D Z, LI X J, WANG Y X, et al. Research on the influence of vacuum degree on the shock wave in pit type explosion containment vessel [J]. *Structures*, 2023, 56: 105033. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105033.

(责任编辑 王小飞)