

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0388

## 箱型结构内部爆炸破坏研究进展\*

张舵<sup>1</sup>, 姚术健<sup>2</sup>, 黄河<sup>1</sup>, 胡献磊<sup>1</sup>, 刘双全<sup>1</sup>, 卢芳云<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学文理学院, 湖南长沙 410073;

2. 中南大学交通运输工程学院, 湖南长沙 410075)

**摘要:** 结构内部爆炸破坏机理和规律是常规武器毁伤效能预测与评估、建筑物和舰船抗爆防护设计的重要支撑。基于结构内爆炸载荷、内部爆炸作用下结构塑性响应、内部爆炸作用下箱壁结构破坏模式、内部爆炸作用下多箱型结构破坏模式和分布四个方面详细论述了箱型结构内部爆炸破坏的研究现状及存在的问题, 并对内部爆炸后续研究给出了建议。建议研究并建立更加复杂的结构内部爆炸载荷和破坏效应描述模型、内部爆炸作用下箱壁的动力响应机理、多箱型结构与内部爆炸波产生的耦合效应、内部爆炸作用下结构的破坏模式和破坏范围的快速准确预测方法等。

**关键词:** 内部爆炸; 钢箱结构; 破坏模式; 破坏范围; 无量纲数

中图分类号: O389 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

### A review on internal blast damage effects of multi-box type structures

ZHANG Duo<sup>1</sup>, YAO Shujian<sup>2</sup>, HUANG He<sup>1</sup>, HU Xianlei<sup>1</sup>, LIU Shuangquan<sup>1</sup>, LU Fangyun<sup>1</sup>

(1. College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

**Abstract:** The damage mechanisms of structures under internal blast are important for the prediction and evaluation of damage effects of conventional weapons and the design of anti-explosion structures of buildings and ships. The researches status and existing problems are discussed in this paper, based on the following four aspects as the internal explosion loads on structures, the plastic responses of structures to internal explosion loads, the damage modes of box-wall structures under internal explosion loads, and the damage modes and distribution of multi-box structures under internal explosion loads. With respect to an internal blast load, it is recognized that the blast model can be divided into dynamic high-pressure stage and quasi-static pressure stage. The former is formed by the initial shock wave and reflection wave while the latter is mainly composed of expansion of detonation gas and chemical energy released by explosion. In regard to the plastic response of the structure under the internal blast load, the studies have shown that quasi-static pressure plays an important role in the response process. With respect to the damage mode of the internal blast loaded structure, the damage mode is greatly affected by the pressure relief mode and pressure relief speed, studies on the damage modes of the beam and plate were introduced. As regards the damage mode and distribution of multi-box structures under the internal blast load, the internal explosion damage of the metal box structure of ships was mainly introduced. Most of the current researches focus on the damage features and there is rarely systematic understanding and analysis for the damagemechanisms. Through the review of the research on the damage and damage of the structures under the internal blast load, suggestions are provided for further researches on: (1) the models to describe the internal explosion loads on more complex structures and the corresponding damage effects; (2) the mechanisms of

\* 收稿日期: 2020-10-15; 修回日期: 2021-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(11972371, 11902369)

第一作者: 张舵(1977—), 男, 博士, 副教授, zhangduo@nudt.edu.cn

通信作者: 姚术健(1988—), 男, 博士, 副教授, yaoshujian@126.com

dynamic response of the box walls to internal blast load; (3) the coupling effect of multi-box structures with internal explosion waves and detonation products; (4) the methods to quickly and accurately predict the damage mode, damage range and damage degree of structures under internal explosion loads.

**Keywords:** internal blast; steel box structure; damage mode; damage range; dimensionless number

箱型封闭结构是舰船舱室、建筑物房间、钢箱梁大桥、列车车厢的主要和基本结构单元,多箱型结构是舰船和建筑物的内部基本结构形式。以尼米兹级航空母舰为例,其内部有 2000 多个舱室。相对于敞开空间中的爆炸,由于密闭空间造成的冲击波多次反射和爆轰产物的密封效应,结构内部爆炸载荷及其对结构的破坏具有更加丰富的效应和特点,如图 1 所示。

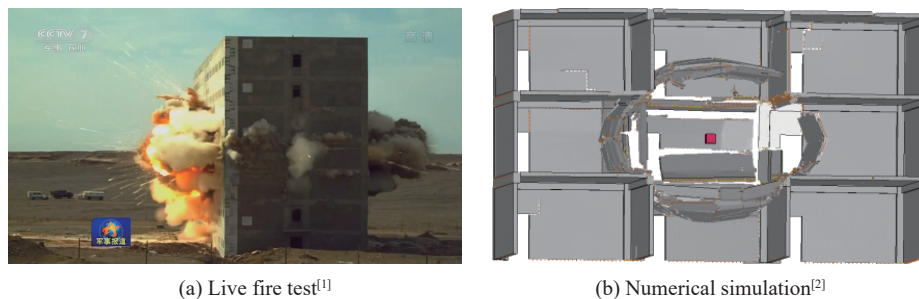


图 1 建筑物内爆炸破坏实验和数值模拟

Fig. 1 Experiment and simulation of explosion damage in buildings

比起结构外部爆炸,结构内部爆炸破坏效应的特殊性主要体现在爆炸载荷、破坏模式和破坏分布等方面。以内部爆炸压力载荷为例,由于结构内壁面的反射作用,内部爆炸引起的载荷一般包括多个压力脉冲,加上冲击波的汇聚和叠加效应,造成内部爆炸压力载荷波形较为复杂<sup>[3]</sup>。此外爆炸产生的热量会使得爆室内产生均匀、整体的压力升高,整体压力会随着高压气体外泄而逐渐降低,压力持续的时间由泄压面积决定。整体压力与反射冲击波的共同作用使得内部爆炸的破坏性更强<sup>[4-5]</sup>。除了对结构内部人员、设备造成毁伤外,内部爆炸还会引起箱室壁板的变形破坏,随着爆心所在箱室内高压气体的扩散,会进一步造成邻近箱室的破坏。内部爆炸造成结构破坏的同时,结构又对爆炸能量产生了约束和导向作用,爆炸波、爆轰产物和结构破坏的耦合作用造成了明显区别于敞开空间中爆炸的破坏效应,因此结构内部爆炸蕴含着丰富而复杂的爆炸力学问题。结构内部爆炸造成的破坏模式和破坏分布将在下文中进一步详细论述。

高层建筑、大型舰船、大型箱型桥梁在国家基础设施和装备中扮演重要角色,既是重点打击对象也是重点防护对象,大多由箱型结构构成,研究其在内部爆炸作用下产生破坏的机理,并建立破坏程度的表征和评估方法是非常必要甚至是迫在眉睫的。本文中将从内部爆炸作用下载荷产生的机理、局部结构破坏模式、破坏分布范围和模式等方面梳理结构内部爆炸的研究现状,并给出后续研究方向的建议。

## 1 结构内部爆炸研究现状

结构内部爆炸破坏机理十分复杂,在内部爆炸载荷、内爆作用下的结构动力响应、破坏模式和整体破坏分布等方面已进行了大量的研究工作。

### 1.1 结构内爆炸载荷

密闭或半密闭结构内部爆炸压力载荷主要由爆炸波和准静态压力两部分组成,根据这种分类方式,针对工程计算需要,目前已经发展出了一些简化或等效载荷计算方法<sup>[3]</sup>。在发生结构内部爆炸时,假设壁面完全刚性和密闭,爆炸波传播到壁面后会发生发射,反射波在向内传播的过程中会发生叠加作用<sup>[4-7]</sup>。根据冲击波在有限区域内多次反射会引起波前波后压力差快速衰减的基本效应可知,爆炸波在多次反射后,密闭空间内的压力分布会趋于均匀,此时爆轰产物气体也会均匀地弥散到整个密闭空间内,从而

形成爆轰产物的准静态力<sup>[3,8]</sup>。对球形绝热刚性密闭空间内爆炸进行计算, 得到其压力载荷典型曲线, 如图 2 所示, 图中给出了结构内部爆炸载荷从冲击波反射载荷逐渐转化为稳定的准静态压力的过程。

从图 2 中静压计算公式可知, 准静态气体的压力  $p$  与总能量  $W_t$ 、密闭空间体积  $4\pi r_c^3/3$  和比热比  $\gamma$  相关。根据统计力学和热力学可知:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{5+l}{3+l} \quad (1)$$

式中:  $c_p$  为比定压热容,  $c_v$  为比定容热容,  $l$  为气体粒子的内部自由度。对于单原子气体(如氦、氩), 内部自由度  $l=0$ , 因此比热比  $\gamma=5/3$ ; 对双原子气体(如氧、氮、空气等), 在温度不高时有两个转动自由度,  $l=2$ , 比热比  $\gamma=7/5=1.4$ 。对于 He(helium) 爆炸, 密闭空间内气体主要由常规炸药的爆轰产物和空气混合组成。常规炸药 TNT 的爆轰产物气体主要由  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  等气体组成, 在爆轰产物气体质量  $M_{\text{He}}$  远大于密闭空间内空气质量  $M_{\text{air}}$  的情况下(大部分关心工况为  $M_{\text{He}}/M_{\text{air}} > 2$ ), 混合气体的  $\gamma$  可以近似取为爆轰产物气体的  $\gamma_{\text{TNT}} = 1.4$ 。当爆轰产物气体质量与密闭空间中空气质量之比远小于 1 时, 可以忽略准静态气体压力的作用。如果在  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$  的房间内有  $100 \text{ kg}$  固体炸药爆炸, 按照空气密度为  $1.29 \text{ kg/m}^3$  来计算, 爆炸后爆轰产物气体质量与房间内空气质量之比约为 1.14。可见这种情况下密闭空间内爆轰产物气体与初始空气的质量是相当的, 因此爆轰产物气体产生的准静态压力显然不能忽略, 这部分载荷对结构的破坏起主要作用。反之, 如果在较大的密闭空间内, 爆轰产物气体的质量远小于空间内部空气的质量, 则可以忽略准静态压力载荷, 近似认为载荷主要由爆炸波及其反射波组成。

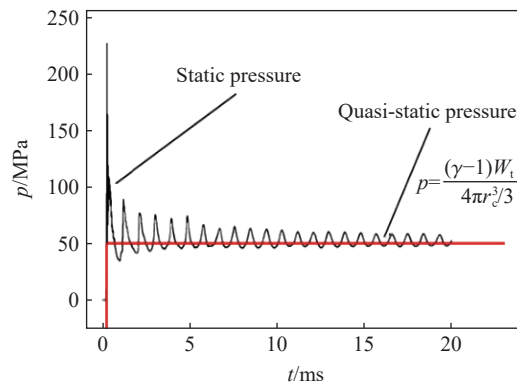


图 2 球形绝热刚性密闭空间内爆炸所产生的压力载荷典型曲线

Fig. 2 Typical curves of pressure load produced by explosion in a spherical adiabatic rigid confined space

在大部分实际情况下, 由于爆轰产物气体的泄漏和热传导等作用, 准静态压力会快速衰减, 典型的内部爆炸载荷波形曲线如图 3 所示, 其中  $p_r$  为首次反射压力峰值,  $p_{qs}$  为准静态压力近似曲线最大值,  $t_b$  为载荷持续时间。

为了工程计算方便, 早在 20 世纪 80 年代, 就有学者对结构内部爆炸简化载荷模型进行了研究。考虑到爆炸波在结构内部发射后逐次减弱, Baker<sup>[3,9]</sup>、Bangash 等<sup>[10]</sup> 提出只需考虑前三次反射引起的载荷, 并且把每个反射波的波形均简化为直角三角形, 反射波每反射一次幅值减半, 持续时间不变, 如图 4 所示。从 Baker<sup>[9]</sup> 的三脉冲模型可以看出, 密闭空间内爆炸产生的冲量是敞开空间中爆炸载荷冲量的约 1.75 倍。由于 Baker 的三脉冲模型没有考虑爆心在腔体内部的不对称性, 理论上只适用于一维或二维问题, 如球腔内中心点爆炸或圆管中心线爆炸, 无法很好地适用于箱型结构内部或非对称爆心爆炸等较复杂的情况, 需要说明的是, Baker 提出的三脉冲模型显然是没有考虑准静态压力载荷的。

在实际工程应用中, 仓库、建筑、舰船等结构常为多箱型结构, 综合考虑爆炸波和准静态压力载荷, 美军技术手册 UFC-3-340-02<sup>[11]</sup> 给出了双直线形式的结构内部爆炸载荷模型, 模型由两个三角形载荷叠加来近似, 分别表示爆炸波和准静态压力载荷, 如图 5 所示。

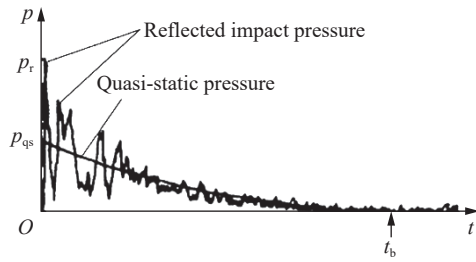


图 3 典型结构内部爆炸压力时程曲线<sup>[8]</sup>

Fig. 3 Time history curves of explosion pressure in a typical structure<sup>[8]</sup>

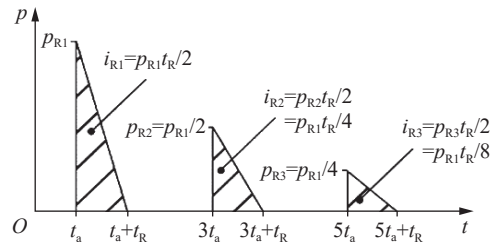


图 4 Baker<sup>[9]</sup>提出的三脉冲内部爆炸载荷模型

Fig. 4 Three-pulse model proposed by Baker<sup>[9]</sup> for internal explosion loads

爆炸波部分峰值压力较高、持续时间短, 准静态压力部分压力值较低、衰减时间较长, 其衰减规律与爆腔的体积和泄压面积相关, 泄压面积越小, 压力衰减越慢, 泄压面积与结构的初始开口面积和爆炸引起的新增破口大小相关。Weibull<sup>[12]</sup>对准静态峰值压力载荷进行了研究, 指出准静态压力峰值  $p_{qs}$  是装药体积密度  $W/V$  的函数(其中  $W$  为等效 TNT 当量,  $V$  为爆腔空间体积), 如图 6 所示。Jackson<sup>[13]</sup>、Anderson 等<sup>[14]</sup>通过实验研究了爆炸引起的准静态压力, Marchand 等<sup>[15]</sup>给出了 4 类炸药爆炸时准静态压力与装药体积密度  $W/V$  之间的关系。基于装药体积密度, 王等旺等<sup>[16]</sup>通过实验数据拟合了准静态压力计算公式。

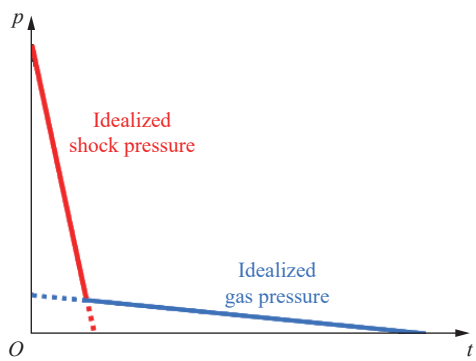


图 5 理想化内爆模型

Fig. 5 An idealized implosion model

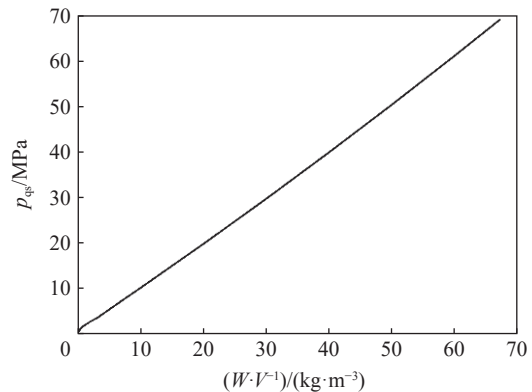


图 6 准静态峰值压力与装药体积密度的关系<sup>[12]</sup>

Fig. 6 Relationship between quasi-static peak pressure and charge volume density<sup>[12]</sup>

Hu 等<sup>[17]</sup>、Feldgun 等<sup>[18]</sup>对炸药形状、尺寸、爆心位置、起爆方式、箱体形状、结构尺寸等参数对内部爆炸载荷的影响进行了研究; Wu 等<sup>[19]</sup>通过实验研究得到了柱状装药轴向区域载荷较高的结论, 并给出了沿柱状装药轴向与径向不同的简化载荷模型; 李营等<sup>[20]</sup>通过实验研究得到了“爆炸当舱破坏由爆炸波引起, 临舱破坏由爆轰产物准静态压力引起”的结论; Codina 等<sup>[21]</sup>采用全尺度试验研究了不同外部爆炸载荷作用下局部通风室内的冲击波泄漏效应, 并将实验结果与用美国国防报告手册 UFC-340 的经验曲线计算的结果进行了对比, 认为多重冲击波反射和约束显著增强了所获得的脉冲, 结构内部、后壁、侧壁和中心的冲击时程比较相似。

箱型结构约束爆炸根据其泄压孔面积与总表面积之比, 还可以分为完全约束、部分泄压及完全泄压爆炸, 由于爆炸对于壁面的破坏作用, 结构内部爆炸可以从完全封闭转化为部分泄压。对于有门窗等联通或开口的箱形结构, 爆炸发生后, 门窗等具有泄爆效应, 其破坏模式与完全密闭结构有一定的差异。Baker 等<sup>[22]</sup>基于大量实验数据<sup>[23-24]</sup>, 讨论了带泄压口的半封闭空间内爆炸引起的准静态压力载荷; Edri 等<sup>[25]</sup>在设置有泄压口的房间内开展了 TNT 药柱爆炸实验, 测量了壁面上典型位置处的超压时间历程曲线, 通

过拟合超压曲线的方式反推得到了准静态超压峰值;徐维铮等<sup>[26]</sup>通过数值计算研究了泄压口大小对舱室内爆炸准静态温度载荷的影响规律,发现爆炸后期准静态温度直线衰减速率随着泄压口边长的增大呈非线性关系。当其他条件不变时,随着泄压口边长的增加,泄压对于温度载荷的降低效果更明显。张玉磊等<sup>[27]</sup>进行了含有泄压口结构的温压炸药内爆炸试验,认为准静态压力峰值、峰值到达时间、上升速率峰值和准静态持续时间均会随着泄压口面积的增加而减小,同时压力下降速率增加。

上述内部爆炸载荷的经验模型中均未考虑角隅处的叠加增强效应,而这种角隅处的叠加增强效应,在一些文献<sup>[4]</sup>中也曾被观察到。谷鸿平等<sup>[28]</sup>通过对比 3 种几何相似箱体内部典型位置的压力峰值与冲量值后,发现在箱体角隅处压力峰值与冲量值不满足 Hopkinson 爆炸几何相似律,几何相似条件下,不同尺寸箱体角隅位置处的压力载荷差异大于 20%,冲量的差异明显小于压力峰值的差异。初步研究表明,这种角隅处的压力增强效应可能会对板结构的破坏模式产生明显的影响,在某些情况下可能产生反常的内凹型的破坏模式。也就是说传统的内部爆炸载荷模型是无法描述角隅处的压力增强效应的,因此也无法准确预测内部爆炸所引起的结构破坏模式。综上所述,包含角隅汇聚效应的内爆炸载荷模型还有待建立和完善。

考虑到目前实际应用的非理想炸药装药,结构内爆炸载荷中的热载荷,包括火球和热流场也是造成结构内部破坏的重要因素。温压炸药是目前常用的非理想炸药,金朋刚等<sup>[29]</sup>对自由场和半密闭条件下的 TNT、852 及 G-1 温压炸药爆炸过程进行了空爆实验,认为在半密闭空间中,相比于理想炸药,温压炸药的热量释放会多一个无氧燃烧的过程,并且半密闭条件有利于提高温压炸药的热量输出。严家佳等<sup>[30]</sup>利用密闭爆炸罐模拟有限空间分析了后燃烧效应对爆炸场压力、温度的影响,指出温压炸药的后燃烧效应可以增加冲击波后时间段的比冲量,同时能明显提升爆炸产物的温度和持续时间。徐维铮等<sup>[31]</sup>基于数值计算对内爆炸温度场演化过程及其分布规律进行了初步探讨,认为密闭空间内爆炸温度载荷在爆炸初期呈现出多峰值特征,随时间逐渐趋近于准静态平稳值,内爆炸温度场在空间上的分布是不均匀的。

## 1.2 内部爆炸作用下结构塑性响应

Baker<sup>[32]</sup>针对薄球壳在内部三角脉冲载荷作用下的动态冲击响应过程,基于等效单自由度模型,在未考虑准静态压力载荷的情况下,分析了弹性和双线性弹塑性薄球壳动态响应的解析解。Jones<sup>[33]</sup>同样利用等效单自由度模型对薄球壳的弹塑性动态响应进行了分析,在考虑屈服发生于脉冲结束后的情况下,得到了在单矩形脉冲作用下薄球壳的弹性-理想塑性、理想刚塑性响应的理论解。

基于内部准静态压力引起的球壳弹性响应研究结果<sup>[32-33]</sup>,孙琦等<sup>[34]</sup>考虑等向强化双线性球壳模型,得到了准静态压力对球壳弹塑性动态响应的影响规律。董奇等<sup>[35]</sup>使用 LS-DYNA 对球壳在内部冲击载荷作用下的弹塑性动态响应进行了数值模拟,得到如下结论:(1)屈服时刻随准静态压力的增大而减小,随着准静态压力的改变,最大位移出现时刻也会发生明显变化,最大位移值随着准静态压力幅值的增大而明显增加;(2)相对于累积冲量,准静态压力幅值对响应过程起主要影响作用,准静态压力的总冲量或作用时长并不能决定最大变形幅值,这一现象可以利用 Yu 等<sup>[36]</sup>提出的饱和冲量进行解释。

## 1.3 内部爆炸作用下箱壁破坏模式

箱型结构壁面的破坏是造成爆室泄压的主要原因之一,舱壁破坏模式会影响泄压方式和泄压速度,外泄压力会增大结构破坏的范围。内部爆炸破坏模式与结构冲击破坏模式的研究既有联系又有区别,内部爆炸作用下结构破坏模式的研究要充分借鉴结构的破坏模式研究成果,同时由于内部爆炸载荷的时空分布更加复杂,从而会引起更加复杂的破坏模式。在梁板等基本结构的冲击破坏模式研究方面,Menkes 等<sup>[37]</sup>提出了两端固支梁在均布冲击载荷作用下发生的三种基本破坏模式:整体塑性大变形(模式 I)、支承处拉伸破坏(模式 II)、支承处剪切破坏(模式 III)。Liu 等<sup>[38]</sup>在 Menkes 的研究基础上,明确了发生模式 II 破坏的判据是梁中的最大正应变达到破坏阈值,发生模式 III 破坏的判据是梁中的最大剪切滑移量与梁的厚度相当。Shen 等<sup>[39]</sup>基于变形能量密度提出总塑性耗散能和剪切塑性耗散能密度共同决定了梁的破坏模式。

研究表明<sup>[40-43]</sup>, 平板结构在冲击作用下也会发生类似梁的破坏模式<sup>[44]</sup>, 根据支座处的颈缩特征可以将弯曲破坏模式(模式 I)细分为 3 个子模式<sup>[43]</sup>。支承处拉伸破坏模式(模式 II)也可分为 3 个子模式<sup>[45]</sup>: 板四周支承处部分拉伸破坏(模式 II\*) ; 支承处全部拉伸破坏(模式 II a), 板中心挠度随冲量增加而增大; 支承处全部拉伸破坏(模式 II b), 板中心挠度随冲量增加而减小。在板的局部冲击加载破坏研究中<sup>[45-50]</sup>, 观察到了塑性大变形与支承处的拉伸破坏模式, 但是没有观察到剪切破坏模式。Nurick 等<sup>[42]</sup>指出, 在相邻两个破坏模式之间存在着临界冲击载荷, 通过对圆盘在冲击载荷作用下的破坏模式进行研究<sup>[40]</sup>, 发现由于边界条件的差异, 相同的冲击载荷可以产生不同的破坏模式。Jacob 等<sup>[51]</sup>总结了爆炸加载下板的破坏模式, 指出除了塑性变形和拉伸破坏模式, 还可能发生冲碟<sup>[45]</sup>和花瓣状破口<sup>[51-53]</sup>等局部破坏模式。朱锡等<sup>[54]</sup>通过实验分析了固支方板在爆炸作用下的破裂形式, 并给出了发生破裂时的临界压力值。研究表明, 爆炸当量<sup>[53,55]</sup>、爆炸距离<sup>[43,51]</sup>以及边界条件<sup>[41,43,46,56-58]</sup>等因素对结构破坏模式均会产生重要影响。

穆朝民等<sup>[59]</sup>运用有限元程序及模型实验对爆室内冲击波和流场的演化及壳体响应规律进行了研究, 认为结构的动力响应主要取决于首次反射压力。Geretto 等<sup>[60]</sup>开展了一系列小尺寸钢箱内部中心爆炸实验, 如图 7 所示, 实验表明结构变形程度随着炸药量的增加而增大。

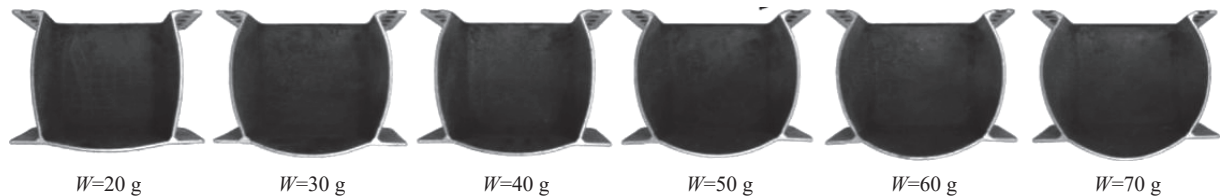


图 7 边长 200 mm、板厚 4 mm 的钢箱内爆部分实验结果<sup>[60]</sup>

Fig. 7 Partial experimental results of explosion insteel boxes with aside length of 200 mm and a wall thickness of 4 mm<sup>[60]</sup>

舰船中常见的加筋板结构的破坏模式与筋条的结构、数量和排布方式密切相关<sup>[61-64]</sup>。Gupta 等<sup>[64]</sup>、Bonorchis 等<sup>[65]</sup>、Yuen 等<sup>[66]</sup>、Nurick 等<sup>[67]</sup>通过对加筋固支方板进行实验和数值模拟研究发现, 加筋板的破裂位置与加筋的刚度有关, 不同加筋刚度条件下, 撕裂可能发生在加筋位置或固支边界处, 如图 8 所示。黄震球<sup>[68]</sup>研究发现, 加筋板主要发生了 3 种运动模式: 加筋相对于平板的刚度较小时, 加筋板产生与平板相似的变形; 加筋相对平板的刚度较强时, 加筋几乎不变形, 这种情况近似于加筋板分成了多个固支板格; 加筋相对刚度介于上述两种情况之间时, 加筋和板发生明显且不一致的变形, 如图 9 所示。侯海量等<sup>[69-70]</sup>、李帆<sup>[71]</sup>对加筋固支板在爆炸载荷作用下的变形模式进行了数值模拟研究(见图 10), 在不同加筋相对刚度下, 得到了与黄震球<sup>[68]</sup>指出的变形模式一致的结果。侯海量等<sup>[69-70]</sup>对相同爆炸当量在舱室内部与敞开空间中的爆炸进行了对比, 发现加筋板结构上的载荷与失效模式均有较大区别。



图 8 爆炸作用下加筋处的撕裂破坏<sup>[66]</sup>

Fig. 8 Tear damage of stiffeners under explosion<sup>[66]</sup>

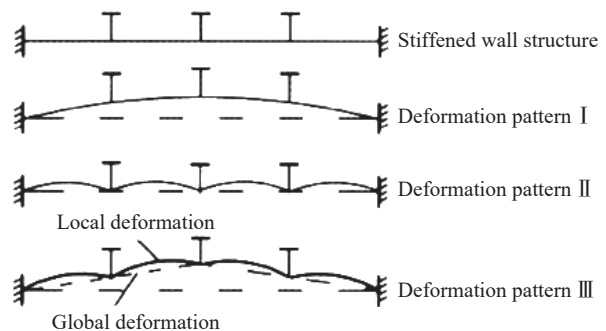
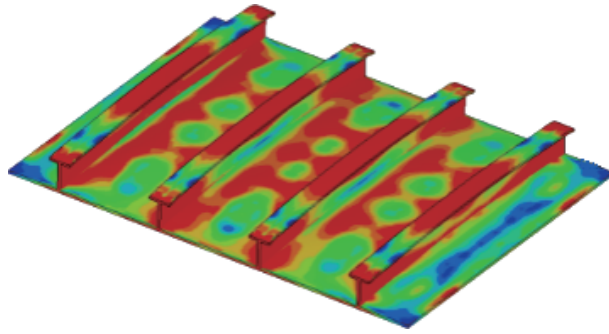


图 9 加筋板的 3 种变形模式<sup>[68]</sup>

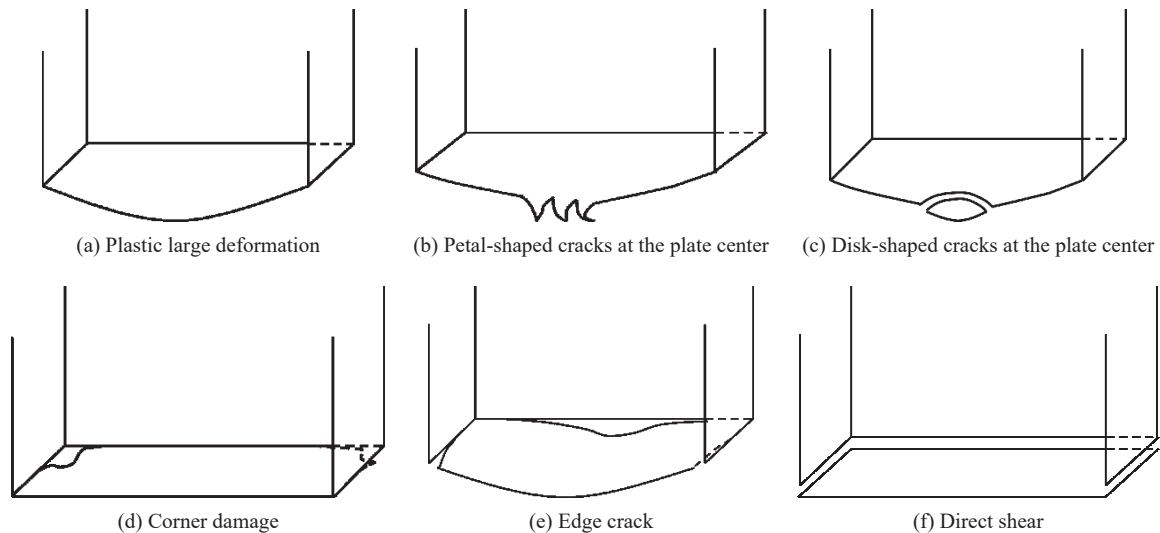
Fig. 9 Three deformation modes of stiffened plates<sup>[68]</sup>

图 10 加筋固支板在爆炸载荷作用下变形模式的数值模拟<sup>[71]</sup>Fig. 10 Numerically simulated deformation mode of the stiffened plate under explosion load<sup>[71]</sup>

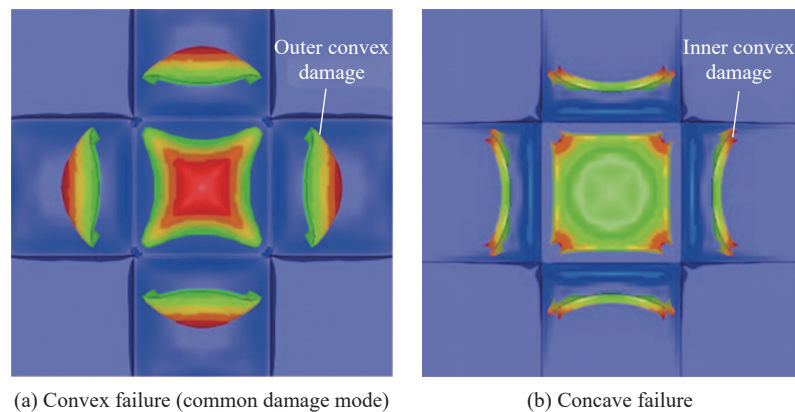
Yuen 等<sup>[66]</sup> 设置了 4 种不同的加筋布置方式来研究加筋形式对破坏模式的影响, 结果表明, 加筋交叉处可能发生颈缩断裂, 加筋方式对撕裂位置和数量影响较大。Langdon 等<sup>[47]</sup> 对上述 4 种加筋布置方式的失效模式进行了研究, 发现随着加载冲量的增加, 加筋板的失效形式依次为: 局部鼓包变形(变形范围受加筋的限制), 板架在加筋连接处发生颈缩, 板架在加筋连接处发生部分撕裂, 板架在加筋连接处撕裂形成花瓣型破口, 加强筋断裂。Bonorchis 等<sup>[65]</sup> 研究了局部爆炸冲击载荷作用下加强筋高度和加筋焊接方式对失效模式的影响。

对于钢筋混凝土结构, 由于不具备金属结构的延展性, 其结构内部爆炸引起的破坏模式与金属箱型结构存在明显的区别。郭志昆等<sup>[72]</sup> 对 2 种钢筋混凝土模型结构进行了药量递增直至结构破坏的内爆炸实验。利用侧墙上的测点测得压力等实验参数, 分析比较了 2 种模型侧墙上的内爆炸荷载, 发现钢筋混凝土的结构破坏形式以顶板的双向受弯破坏为主, 在结构内部设置抗爆隔墙可有效降低冲击波对结构的破坏。

通过对箱型结构内部爆炸进行数值模拟、实验验证及机理分析, Yao 等<sup>[73]</sup> 总结出内部爆炸作用下箱形结构可能发生的塑性大变形、壁板中心破口、箱室角隅处破口、壁板边缘撕裂及壁板直剪破坏等破坏模式, 如图 11 所示。

图 11 单箱室结构破坏模式概念图<sup>[73]</sup>Fig. 11 Conceptual diagram on damage modes of a cabin<sup>[73]</sup>

Zhang 等<sup>[74]</sup>、姚术健<sup>[75]</sup> 通过数值模拟发现, 由于内部爆炸载荷角隅处的会聚增强效应, 内部爆炸对于箱壁的冲击破坏在某些情况下会出现反常的内凸(相对于常见的外凸变形)变形破坏情况(见 图 12)。但是对于这些现象产生的机理需要更深入的研究。

图 12 内部爆炸引起的壁板两种破坏模式<sup>[75]</sup>Fig. 12 Two damage modes of wall panels caused by internal explosion<sup>[75]</sup>

#### 1.4 内部爆炸作用下多箱型结构破坏模式和分布

对于结构内部爆炸引起的毁伤效应,破坏的范围和破坏模式是工程上关注的重点,如图 13 所示,由于壁板的约束与导向作用,常规情况下,破坏会沿图 13(a)中  $d_1$  和  $d_2$  两个方向拓展,但是当爆炸当量较大而壁板约束较弱时,破坏模式将变得不同,如图 13(b)所示。这方面的研究既可用于武器毁伤效果分析和评估,也可用于建筑物和舰船的防护设计。

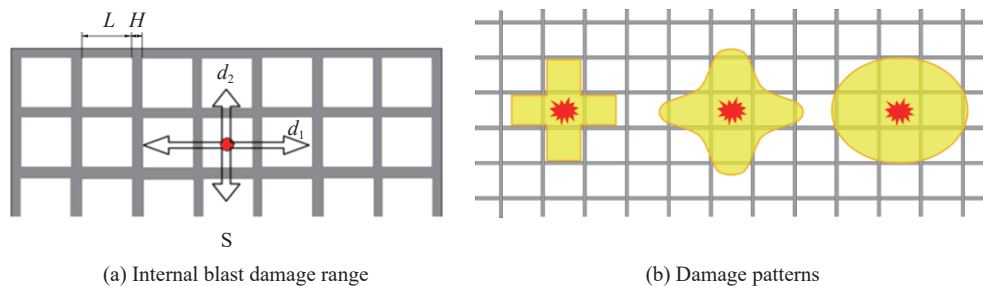


图 13 建筑物、舰船等多箱型结构爆炸破坏范围和模式示意图

Fig. 13 Damage range and patterns of multi-box structures such as buildings and ships under internal explosion

Kurkit<sup>[76]</sup> 采用 ABAQUS 对典型舰船舱室结构内部爆炸过程进行了数值模拟,模型舱室的尺寸为  $10.4\text{ m} \times 3.6\text{ m} \times 2.6\text{ m}$ ,炸药量为  $50\text{ kg TNT}$ ,得到了舱室结构的动态破坏过程,如图 14 所示。这些研究考虑了相邻舱室结构的影响,然而往往受限于计算量过大,并没有对多个完整舱室模型进行数值模拟研究。孔祥韶等<sup>[77-78]</sup> 通过缩比实验及数值模拟对舱室结构在内部爆炸作用下的破坏效应进行了研究,结果表明舱壁开口有利于减小舱室角隅处的汇集压力,保护舱室结构;爆炸作用下舱壁破坏形成的二次破片对相邻舱室结构会产生进一步破坏。Kong 等<sup>[79]</sup> 研究了战斗部在多舱室结构内部爆炸时,破片和冲击波联合作用下的舱室结构的破坏效应,如图 15 所示。孔祥韶<sup>[80]</sup> 还研究了冲击波和破片群耦合作用下的舰船舱壁复合多层防护结构的破坏模式,对比了空舱和液舱在战斗部爆炸载荷作用下的变形和破坏,提出了复合多层防护结构的抗爆设计建议。

余俊等<sup>[81]</sup> 对舰船结构缩比模型进行了药量为  $5\text{ kg TNT}$  的内部爆炸实验研究,得到了多箱型结构的破坏形貌与破坏范围,如图 16 所示,可以看出,多箱型钢结构呈现出“十”字形的破坏分布特征,如图 17 所示。

从图 17 可以看出,箱壁的相互支撑作用对压力载荷具有较强的抵抗能力,组成棱角的两面相互垂直的壁板能够起到相互支撑的作用,同时对爆炸波产生了导向作用,从而引起了近似“十”字形的破坏分布。但是当爆炸载荷足够大时,棱角处的相互支撑作用也会发生失效,破坏形貌也就不再符合“十”字形分布的特征。对于“十”形破坏分布与非“十”形破坏分布的转化以及发生的条件,还没有看到



相关的文献。前期数值模拟的结果表明,破坏分布随着爆炸当量的增加而从“十”形破坏向类椭球形破坏分布转变,如图 18 所示,这与人们的经验认识也是一致的。破坏模式研究目前主要通过数值模拟进行,爆轰产物火球的膨胀与扩散能够直观表现多箱型结构对爆炸能量的导向作用,其对破坏分布的影响是需要重点研究的内容。

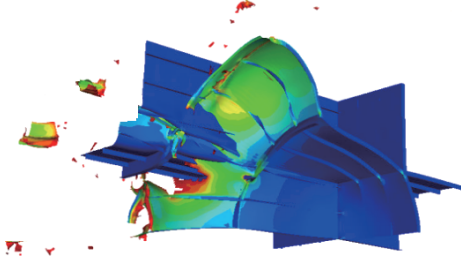


图 14 典型舰船舱室内部爆炸引起的结构破坏<sup>[76]</sup>  
Fig. 14 Structural damage caused by explosion in a typical ship cabin<sup>[76]</sup>

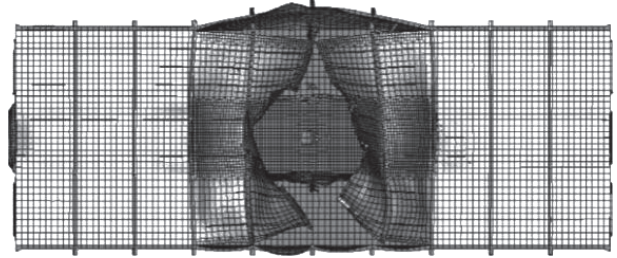


图 15 破片和冲击波联合作用下的舱室结构的破坏效应<sup>[78]</sup>  
Fig. 15 Damage effect of a cabin structure under the combined action of fragments and shock wave<sup>[78]</sup>



图 16 舰船结构缩比模型内部爆炸破坏<sup>[81]</sup>  
Fig. 16 Damage of the scaled ship structural model by internal explosion<sup>[81]</sup>



图 17 多箱型结构“十”形破坏效果<sup>[81]</sup>  
Fig. 17 Cross-shaped damage effect of a multi-box structure<sup>[81]</sup>

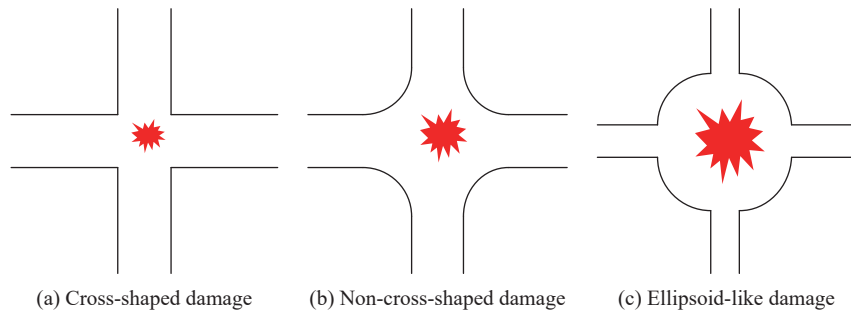


图 18 多箱型结构的“十”形破坏与非“十”形破坏形式  
Fig. 18 Cross-shaped and non-cross-shaped damage modes of multi-cabin structures

为了表征结构内部爆炸破坏模式和破坏范围, Yao 等<sup>[82-83]</sup>通过理论分析引入无量纲数  $D_{in}$ :

$$D_{in} = \frac{Q}{\sigma_0 L^2 H} \quad (2)$$

式中:  $Q$  为爆炸能量,  $\sigma_0$  为舱壁材料强度,  $L$  为舱壁特征跨度,  $H$  为舱壁厚度。  $D_{in}$  的物理意义非常明显, 表明了爆炸能量与板的塑形变形能之比。前期研究表明该无量纲数结合跨厚比 ( $L/H$ ) 能较好地预测结构内爆炸的破坏范围和模式。  $D_{in}$  结合跨厚比 ( $L/H$ ) 可以绘制破坏模式和破坏范围相图<sup>[75]</sup>。在研究中可

将图 11 所示破坏模式与  $D_{in}$  建立联系, 如有必要再考虑引入其他无量纲参数, 比如失效应变  $\varepsilon_f$ 、结构跨厚比  $L/H$  等参数。

建筑物结构内部爆炸载荷和破坏机理与舰船内部爆炸破坏极为相似, 以上介绍以舰船金属箱体结构内部爆炸破坏为主, 建筑内部爆炸破坏也开展了研究, 一些成果可以参考和借鉴<sup>[79-80,84-90]</sup>。目前对于箱型结构, 尤其是对于多箱型结构内部爆炸破坏所开展的研究以效应居多, 对其机理和规律还没有系统的认识和分析方法。

## 2 结论与后续研究建议

由于密闭空间造成的冲击波多次反射和爆轰产物密封效应, 多箱型结构内部爆炸载荷及其对结构的破坏具有更加丰富的效应和特点。

### (1) 内部爆炸载荷方面

由于结构壁面的多次反射作用、冲击波在箱体结构的边/角处发生的角隅汇聚效应、箱型结构对爆轰产物气体的封闭作用, 结构内部爆炸载荷明显区别于自由场爆炸载荷, 更加复杂而特殊。因此需要建立综合考虑冲击波反射、角隅汇聚和爆轰产物扩散等效应的内部爆炸载荷描述模型。

### (2) 内部爆炸作用下箱壁动力响应机理方面

由于内部爆炸载荷的特殊性, 板、梁等基本构件在内部爆炸载荷作用下的破坏机理和效应也更加多样化, 如板结构在不同内部爆炸条件下可以呈现出外凸、中心开口、角隅处撕裂、边中心撕裂甚至内凹破坏等模式。这些破坏模式的机理和产生条件还没有被人们系统认识, 因此需要对内部爆炸载荷的空间分布与箱壁破坏模式之间的关系进行研究, 建立内部爆炸载荷下箱壁的破坏模式判据。

### (3) 内部爆炸作用下结构的破坏模式方面

多箱型结构的排布周期性、各向异性(非正方体箱型)会与内部爆炸载荷产生不同的耦合效应, 引起不同的整体破坏模式, 如当量较小时易产生“十”字形破坏分布, 而大当量时会产生球形破坏分布, 因此需要研究结构几何尺寸、强度与爆炸载荷之间的耦合关系对整体破坏模式的影响规律, 这些规律包括结构对爆炸能量的导向作用、“十”字形破坏和球形破坏分布的产生条件, 需要系统建立起整体破坏分布模式的无量纲判据。如何建立箱型结构长宽高均不相等情况下内部爆炸的破坏效应描述模型也是今后需要研究的重点。

### (4) 破坏程度和破坏范围快速预测方面

快速、准确预测结构在内部爆炸作用下的破坏模式、破坏范围和破坏程度具有很高的应用价值。目前人们根据经验建立起来的一些常用的结构内部爆炸破坏范围预估函数主要是采用  $r = k\omega^b$  的形式, 其中  $r$  为破坏半径,  $k$  是与结构有关的经验系数,  $\omega$  为装药量。可以看出目前常用的破坏预估函数忽略了目标内部结构, 形式比较简单, 只能给出球形的破坏范围, 这与各向异性结构内部爆炸所产生的破坏效果是不相符的。随着人们对爆炸预测准确性的要求越来越高, 建立考虑更多影响因素(变量)、对破坏范围计算更准确、对破坏模式描述更细致的破坏预估方法势在必行。

## 参考文献:

- [1] CCTV-7 国防军事频道. 精武先锋导弹营长罗寅生: 披坚执锐只为亮剑时刻 [EB/OL]. <http://tv.cctv.com>, 2018-6-23.
- [2] 张舵. 建筑物内爆炸的毁伤效应研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [3] BAKER W E. Explosion hazards and evaluation [M]. New York: Elsevier Publishing Company, 1983.
- [4] 邹玉斌, 田宇隆, 张斌. 地下建筑内爆炸冲击波荷载分布规律研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(9): 88-93. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2012.09.019.  
WU Y B, TIAN Y L, ZHANG B. Distribution law of in-underground structure explosion-induced shock wave load [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(9): 88-93. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2012.09.019.
- [5] 侯海量, 朱锡, 李伟, 等. 舱内爆炸冲击荷载特性实验研究 [J]. 船舶力学, 2010, 14(8): 901-907. DOI: 10.3969/j.issn.1007-

- 7294.2010.08.011.
- HOU H L, ZHU X, LI W, et al. Experimental studies on characteristics of blast loading when exploded inside ship cabin [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2010, 14(8): 901–907. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2010.08.011.
- [6] LU Y, XU K. Prediction of debris launch velocity of vented concrete structures under internal blast [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(11): 1753–1767. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.096.
- [7] CHAN P C, KLEIN H H. A study of blast effects inside an enclosure [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1994, 116(3): 450–455. DOI: 10.1115/1.2910297.
- [8] 林俊德. 封闭空间的化爆荷载与沙墙消波 [J]. *解放军理工大学学报 (自然科学版)*, 2007, 8(6): 559–566. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2007.06.001.
- LIN J D. Chemical explosion loads in enclosed space and wave attenuation of sand wall [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2007, 8(6): 559–566. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2007.06.001.
- [9] BAKER W E. 空中爆炸 [M]. 江科, 译. 北京: 原子能出版社, 1982.
- [10] BANGASH M Y H, BANGASH T. Explosion-resistant buildings [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. DOI: 10.1007/3-540-31289-7.
- [11] US Department of Defense. UFC3-340-02 structures to resist the effects of accidental explosions [S]. US, US Department of Defense, 2008.
- [12] WEIBULL H R W. Pressures recorded in partially closed chambers at explosion of TNT charges [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1968, 152(1): 357–361. DOI: 10.1111/j.1749-6632.1968.tb11987.x.
- [13] JACKSON W F. The containment of blast effects from the detonation of small high explosive charges: ADA105164 [R]. US, Defence Technical Information Center, 1981: 87–89.
- [14] ANDERSON J G, KATSELIS G, CAPUTO C. Analysis of a generic warhead part I: experimental and computational assessment of free field overpressure: DSTO-TR-1313 [R]. Edinburgh: DSTO Systems and Sciences Laboratory, 2002.
- [15] MARCHAND K A, COX P A, POLCYN M A. A design guide and specification for small explosive containment structures: SAND-94-2255 [R]. Washington, DC: The Magazine of the American Society of Civil Engineers, 1994. DOI: 10.2172/10120233.
- [16] 王等旺, 张德志, 李焰, 等. 爆炸容器内准静态气压实验研究 [J]. *兵工学报*, 2012, 33(12): 1493–1497.
- WANG D W, ZHANG D Z, LI Y, et al. Experiment investigation on quasi-static pressure in explosion containment vessels [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(12): 1493–1497.
- [17] HU Y, WU C Q, LUKASZEWICZ M, et al. Characteristics of confined blast loading in unvented structures [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2011, 2(1): 21–43. DOI: 10.1260/2041-4196.2.1.21.
- [18] FELDGUN V R, KARINSKI Y S, YANKELEVSKY D Z. Some characteristics of an interior explosion within a room without venting [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2011, 38(5): 633–649. DOI: 10.12989/sem.2011.38.5.633.
- [19] WU C Q, LUKASZEWICZ M, SCHEBELLA K, et al. Experimental and numerical investigation of confined explosion in a blast chamber [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(4): 737–750. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.02.001.
- [20] 李营, 张磊, 杜志鹏, 等. 舱室结构在战斗部舱内爆炸作用下毁伤特性的实验研究 [J]. *船舶力学*, 2018, 22(8): 993–1000. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2018.08.009.
- LI Y, ZHANG L, DU Z P, et al. Experiment investigation on damage characteristic of cabins under warhead internal blast [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2018, 22(8): 993–1000. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2018.08.009.
- [21] CODINA R, AMBROSINI D. Full-scale testing of leakage of blast waves inside a partially vented room exposed to external air blast loading [J]. *Shock Waves*, 2018, 28(2): 227–241. DOI: 10.1007/s00193-017-0733-9.
- [22] BAKER W E, OLDHAM G A. Estimates of blowdown of quasi-static pressures invented chambers: AD-AU25 502 [R]. San Antonio, TX: Southwest Research Institute, 1975.
- [23] ESPARZA E D, BAKER W E, OLDHAM G A. Blast pressures inside and outside suppressive structures: AD-AU25 504 [R]. San Antonio, TX: Southwest Research Institute, 1975.
- [24] KEENAN W A, TANCRETO J E. Blast environment from fully and partially vented explosions in cubicles: ADA019026 [R]. Dover, NJ: Department of the Army Picatinny Arsenal, 1975.
- [25] EDRI I, SAVIR Z, FELDGUN V R, et al. On blast pressure analysis due to a partially confined explosion: I. experimental studies [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2011, 2(1): 1–20. DOI: 10.1260/2041-4196.2.1.1.

- [26] 徐维铮,吴卫国.泄压空间内爆炸温度载荷的影响规律研究(二)——泄压口大小[J].*应用力学学报*,2020,37(3):1337–1342. DOI: 10.11776/cjam.37.03.D107.  
XU W Z, WU W G. Research on influence laws on the explosion temperature inside venting space (2)—venting hole size [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, 37(3): 1337–1342. DOI: 10.11776/cjam.37.03.D107.
- [27] 张玉磊,陈华,韩璐,等.泄压口面积对温压炸药内爆炸准静态压力的影响[J].*火炸药学报*,2020,43(5):521–525. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.201909024.  
ZHANG Y L, CHEN H, HAN L, et al. Effect of venting area on quasi-static pressure of internal explosion for thermobaric explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2020, 43(5): 521–525. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.201909024.
- [28] 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. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.201809010.  
GU H P, YAO S J, ZHANG D, et al. Study on the scaling similarity characteristics of structural internal blast loading [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2019, 42(6): 621–625. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.201809010.
- [29] 金朋刚,王晓峰,郭炜,等.温压炸药爆炸释热特性研究[J].*爆破器材*,2014,43(3):1–4. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2014.03.001.  
JIN P G, WANG X F, GUO W, et al. Research on the heat release characters of TBX explosion [J]. *Explosive Materials*, 2014, 43(3): 1–4. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2014.03.001.
- [30] 严家佳,金朋刚,李鸿宾,等.有限空间中温压炸药后燃烧效应的试验研究[J].*科学技术与工程*,2015,15(17):154–157,163. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2015.17.028.  
YAN J J, JIN P G, LI H B, et al. Experiment investigation of thermobaric explosive afterburn effect in finite space [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(17): 154–157, 163. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2015.17.028.
- [31] 徐维铮,吴卫国.密闭空间内爆炸温度场数值计算及其特性研究[J].*应用力学学报*,2020,37(1):280–285. DOI: 10.11776/cjam.37.01.D099.  
XU W Z, WU W G. Numerical calculation of explosion temperature field and its characteristics in closed space [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, 37(1): 280–285. DOI: 10.11776/cjam.37.01.D099.
- [32] BAKER W E. The elastic-plastic response of thin spherical shells to internal blast loading [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1960, 27(1): 139–144. DOI: 10.1115/1.3643888.
- [33] 诺曼·琼斯.结构冲击[M].许骏,蒋平,译.2版.北京:国防工业出版社,2018:145–159.
- [34] 孙琦,董奇,杨沙,等.内爆炸准静态压力对球形容器弹塑性动态响应的影响[J].*含能材料*,2020,28(1):25–31. DOI: 10.11943/CJEM2019078.  
SUN Q, DONG Q, YANG S, et al. Effects of quasi-static pressure on dynamic elastic-plastic response of spherical vessels under internal blast [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2020, 28(1): 25–31. DOI: 10.11943/CJEM2019078.
- [35] 董奇,胡八一.单层球形金属爆炸容器弹性动力响应研究进展[C]//中国力学大会暨钱学森诞辰100周年纪念大会.哈尔滨,2011.
- [36] YU T X, CHEN X W, CHEN Y Z. Elastic-plastic beam-on-foundation subjected to mass impact or impulsive loading [J]. *Computers & Structures*, 2002, 80(26): 1965–1973. DOI: 10.1016/S0045-7949(02)00292-4.
- [37] MENKES S B, OPAT H J. Broken beams: tearing and shear failures in explosively loaded clamped beams [J]. *Experimental Mechanics*, 1973, 13(11): 480–486. DOI: 10.1007/BF02322734.
- [38] LIU J H, JONES N. Experimental investigation of clamped beams struck transversely by a mass [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1987, 6(4): 303–335. DOI: 10.1016/0734-743X(87)90097-2.
- [39] SHEN W Q, JONES N. A failure criterion for beams under impulsive loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1992, 12(1): 101–121. DOI: 10.1016/0734-743X(92)90359-2.
- [40] TEELING-SMITH R G, NURICK G N. The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1991, 11(1): 77–91. DOI: 10.1016/0734-743X(91)90032-B.
- [41] OLSON M D, NURICK G N, FAGNAN J R. Deformation and rupture of blast loaded square plates—predictions and experiments [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, 13(2): 279–291. DOI: 10.1016/0734-743X(93)90097-Q.
- [42] NURICK G N, SHAVE G C. The deformation and tearing of thin square plates subjected to impulsive loads—An experimental study [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18(1): 99–116. DOI: 10.1016/0734-743X(95)00018-2.

- [43] NURICK G N, GELMAN M E, MARSHALL N S. Tearing of blast loaded plates with clamped boundary conditions [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18(7): 803–827. DOI: 10.1016/S0734-743X(96)00026-7.
- [44] NURICK G N, MARTIN J B. Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review. Part II: experimental studies [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1989, 8(2): 171–186. DOI: 10.1016/0734-743X(89)90015-8.
- [45] CLOETE T J, NURICK G N, PALMER R N. The deformation and shear failure of peripherally clamped centrally supported blast loaded circular plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1): 92–117. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.06.002.
- [46] JACOB N, CHUNG KIM YUEN S, NURICK G N, et al. Scaling aspects of quadrangular plates subjected to localised blast loads—experiments and predictions [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30(8): 1179–1208. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.03.012.
- [47] LANGDON G S, CHUNG KIM YUEN S, NURICK G N. Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates. Part II: localised blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(1): 85–111. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2003.09.050.
- [48] BONORCHIS D, NURICK G N. The effect of welded boundaries on the response of rectangular hot-rolled mild steel plates subjected to localised blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(11): 1729–1738. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.11.002.
- [49] WIERZBICKI T, NURICK G N. Large deformation of thin plates under localised impulsive loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18(7): 899–918. DOI: 10.1016/S0734-743X(96)00027-9.
- [50] WIERZBICKI T. Petalling of plates under explosive and impact loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 22(9): 935–954. DOI: 10.1016/S0734-743X(99)00028-7.
- [51] JACOB N, NURICK G N, LANGDON G S. The effect of stand-off distance on the failure of fully clamped circular mild steel plates subjected to blast loads [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(10): 2723–2736. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.01.021.
- [52] 陈长海, 朱锡, 侯海量, 等. 近距离爆载荷作用下固支方板的变形及破坏模式 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(4): 368–375. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)04-0368-08.
- CHEN C H, ZHU X, HOU H L, et al. Deformation and failure modes of clamped square plates under close-range air blast loads [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(4): 368–375. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)04-0368-08.
- [53] RAJENDRAN R, NARASIMHAN K. Damage prediction of clamped circular plates subjected to contact underwater explosion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(4): 373–386. DOI: 10.1016/s0734-743x(00)00051-8.
- [54] 朱锡, 冯刚, 张振华. 爆炸载荷作用下固支方板的应变场及破坏分析 [J]. *船舶力学*, 2005, 9(2): 83–89. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2005.02.013.
- ZHU X, FENG G, ZHANG Z H. Strain field and damage analysis of clamped square plates subjected to explosive loading [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2005, 9(2): 83–89. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2005.02.013.
- [55] MICALLEFF K, FALLAH A S, POPE D J, et al. The dynamic performance of simply-supported rigid-plastic circular steel plates subjected to localised blast loading [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2012, 65(1): 177–191. DOI: 10.1016/j.ijmesci.2012.10.001.
- [56] GUPTA N K, NAGESH. Deformation and tearing of circular plates with varying support conditions under uniform impulsive loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(1): 42–59. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.05.002.
- [57] BONORCHIS D, NURICK G N. The influence of boundary conditions on the loading of rectangular plates subjected to localised blast loading—Importance in numerical simulations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(1): 40–52. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.03.003.
- [58] SCHLEYER G K, HSU S S, WHITE M D, et al. Pulse pressure loading of clamped mild steel plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(2): 223–247. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00042-8.
- [59] 穆朝民, 任辉启, 李永池, 等. 爆室内爆炸流场演化与壳体动力响应研究 [J]. *振动与冲击*, 2009, 28(10): 106–111. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2009.10.021.
- MU C M, REN H Q, LI Y C, et al. Blast flow field evolution and dynamic response of a blast chamber [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(10): 106–111. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2009.10.021.
- [60] GERETTO C, YUEN S C K, NURICK G N. An experimental study of the effects of degrees of confinement on the response of square mild steel plates subjected to blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 79: 32–

44. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.08.002.
- [61] 朱锡,牟金磊,王恒,等.水下爆炸载荷作用下加筋板的毁伤模式[J].*爆炸与冲击*,2010,30(3):225–231. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)03-0225-07.  
ZHU X, MOU J L, WANG H, et al. Damage modes of stiffened plates subjected to underwater explosion load [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(3): 225–231. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)03-0225-07.
- [62] 牟金磊,朱锡,张振华,等.水下爆炸载荷作用下加筋板的毁伤模式[J].*爆炸与冲击*,2009,29(5):457–462. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)05-0457-06.  
MOU J L, ZHU X, ZHANG Z H, et al. Failure modes of stiffened plates subjected to underwater explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(5): 457–462. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)05-0457-06.
- [63] 刘润泉,白雪飞,朱锡.舰船单元结构模型水下接触爆炸破口试验研究[J].*海军工程大学学报*,2001,13(5):41–46. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3486.2001.05.011.  
LIU R Q, BAI X F, ZHU X. Breach experiment research of vessel element structure models subjected to underwater contact explosion [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2001, 13(5): 41–46. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3486.2001.05.011.
- [64] GUPTA N K, KUMAR P, HEGDE S. On deformation and tearing of stiffened and un-stiffened square plates subjected to underwater explosion—a numerical study [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2010, 52(5): 733–744. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2010.01.005.
- [65] BONORCHIS D, NURICK G N. The analysis and simulation of welded stiffener plates subjected to localised blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(3): 260–273. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.08.004.
- [66] YUEN S C K, NURICK G N. Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates. Part I: subjected to uniform blast load [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(1): 55–83. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2003.09.048.
- [67] NURICK G N, OLSON M D, FAGNAN J R, et al. Deformation and tearing of blast-loaded stiffened square plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 16(2): 273–291. DOI: 10.1016/0734-743X(94)00046-Y.
- [68] 黄震球.固支加筋方板的大挠度塑性动力响应[J].*固体力学学报*,1995,16(1):7–12. DOI: 10.19636/j.cnki.cjism42-1250/o3.1995.01.002.  
HUANG Z Q. Large deflection dynamic plastic response of clamped square plates with stiffeners [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1995, 16(1): 7–12. DOI: 10.19636/j.cnki.cjism42-1250/o3.1995.01.002.
- [69] 侯海量,朱锡,梅志远.舱内爆炸载荷及舱室板架结构的失效模式分析[J].*爆炸与冲击*,2007,27(2):151–158. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)02-0151-08.  
HOU H L, ZHU X, MEI Z Y. Study on the blast load and failure mode of ship structure subject to internal explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(2): 151–158. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)02-0151-08.
- [70] 侯海量,朱锡,古美邦.爆炸载荷作用下加筋板的失效模式分析及结构优化设计[J].*爆炸与冲击*,2007,27(1):26–33. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)01-0026-08.  
HOU H L, ZHU X, GU M B. Study on failure mode of stiffened plate and optimized design of structure subjected to blast load [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(1): 26–33. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)01-0026-08.
- [71] 李帆.舰船舱室内爆炸破坏的数值模拟和实验研究[D].长沙:国防科学技术大学,2012.
- [72] 郭志昆,宋锋良,刘峰,等.扁平箱形密闭结构内爆炸的模型试验[J].*解放军理工大学学报(自然科学版)*,2008,9(4):345–350. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2008.04.008.  
GUO Z K, SONG F L, LIU F, et al. Experiment of closed flat box structure subjected to internal detonation [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2008, 9(4): 345–350. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2008.04.008.
- [73] YAO S J, ZHANG D, LU F Y, et al. Experimental and numerical studies on the failure modes of steel cabin structure subjected to internal blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 110: 279–287. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.03.006.
- [74] ZHANG D, YAO S J, LU F Y, et al. Dynamic response and damage analysis of steel box wall under internal blast loading [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(1): 168781401882260. DOI: 10.1177/1687814018822601.
- [75] 姚术健.箱形结构内部爆炸等效缩比实验方法及破坏特性研究[D].长沙:国防科学技术大学,2016.
- [76] KURKIT M. Contained explosion inside a naval vessel: evaluation of the structural response [D]. Espoo: Helsinki University of Technology, 2007.

- [77] 孔祥韶, 吴卫国, 李俊, 等. 角隅结构对舱内爆炸载荷影响的实验研究 [J]. *中国造船*, 2012, 53(3): 40–50. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2012.03.007.  
KONG X S, WU W G, LI J, et al. Experimental research of influence of corner structure on blast loading under inner explosion [J]. *Shipbuilding of China*, 2012, 53(3): 40–50. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2012.03.007.
- [78] 孔祥韶, 吴卫国, 李晓彬, 等. 舰船舱室内部爆炸的数值模拟研究 [J]. *中国舰船研究*, 2009, 4(4): 7–11. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2009.04.002.  
KONG X S, WU W G, LI X B, et al. Numerical simulation of cabin structure under inner explosion [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2009, 4(4): 7–11. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2009.04.002.
- [79] KONG X S, WU W G, LI J, et al. Experimental and numerical investigation on a multi-layer protective structure under the synergistic effect of blast and fragment loadings [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 65: 146–162. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.11.009.
- [80] 孔祥韶. 爆炸载荷及复合多层防护结构响应特性研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [81] 余俊, 张伦平, 潘建强, 等. 舰船结构舱内爆炸破坏范围计算方法研究 [C]// 第十届全国冲击动力学学术会议论文摘要集. 太原: 中国力学学会, 2011: 1–10.
- [82] YAO S J, ZHANG D, LU F Y. Dimensionless numbers for dynamic response analysis of clamped square plates subjected to blast loading [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2015, 85(6): 735–744. DOI: 10.1007/s00419-015-0986-7.
- [83] YAO S J, ZHANG D, LU F Y. Dimensionless number for dynamic response analysis of box-shaped structures under internal blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 98: 13–18. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.07.005.
- [84] WANG Z Q, WU J G, BAI C H, et al. Response of box-type structures under internal-blast loading [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2006, 12(S1): 112–116.
- [85] 龚顺风, 金伟良, 何勇. 内部爆炸荷载作用下钢筋混凝土板的动力响应研究 [J]. *振动工程学报*, 2008, 21(5): 516–520. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4523.2008.05.016.  
GONG S F, JIN W L, HE Y. Dynamic response of reinforced concrete slab subjected to internal blast loading [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2008, 21(5): 516–520. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4523.2008.05.016.
- [86] KRAUTHAMMER T. Shallow-buried RC box-type structures [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1984, 110(3): 637–651. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:3(637).
- [87] WANG W T. An internal blast analysis of a steel box member [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2009, 36(8): 1332–1339. DOI: 10.1139/L08-108.
- [88] 张舵, 吴克刚, 卢芳云. 建筑物内爆炸波的动压载荷研究 [J]. *采矿技术*, 2009, 9(5): 68–72. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2900.2009.05.026.  
ZHANG D, WU K G, LU F Y. Study on dynamic pressure load of explosion wave in building [J]. *Mining Technology*, 2009, 9(5): 68–72. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2900.2009.05.026.
- [89] 高康华, 金丰年, 王德荣, 等. 建筑物内爆炸荷载研究综述 [J]. *中国工程科学*, 2013, 15(5): 59–64. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2013.05.010.  
GAO K H, JIN F N, WANG D R, et al. Review on internal explosion loading of building [J]. *Engineering Science*, 2013, 15(5): 59–64. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2013.05.010.
- [90] 孙松, 王明洋, 高康华, 等. 大尺度泄爆构件对室内爆燃压力影响的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(2): 359–366. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0211.  
SUN S, WANG M Y, GAO K H, et al. Experimental study on effect of large-scale explosion venting component on interior deglagation pressure [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2): 359–366. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0211.

(责任编辑 曾月蓉)