

文章编号:1006-9941(2020)03-0261-07

舱内设备对爆载荷毁伤效应影响的对比分析

谭波¹,王伟力¹,严平¹,董军²

(1. 海军工程大学兵器工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 舰艇舱室内常按其功能要求安装布置有不同的设备,目前舱室内爆毁伤相关研究主要关注毁伤元对无设备舱室结构的毁伤,而很少考虑舱室内设备对于毁伤效应的影响。基于有限元软件 ANSYS/LS-DYNA,建立了带加强筋舱室模型,分别分析了没有安装设备、安装一台设备和对称安装两台设备等三种工况的舰艇舱室,在受战斗部装药内部爆炸载荷作用时舱室结构和设备机柜等效物的毁伤情况,对比分析了设备对毁伤效应的影响。通过对比分析三种工况下毁伤过程、测点压力变化及舱壁飞散速度的结果表明,爆炸发生后,受设备遮挡作用,不同数量的设备将对舱室内流场分布及角隅部位冲击波的汇聚产生影响,降低了舱室内的最大超压值、改变了最大超压出现的位置,使舱室结构的破坏过程发生变化。

关键词: 内爆;设备;舰船舱室;仿真分析

中图分类号: TJ410.3

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2019094

1 引言

反舰导弹战斗部,尤其是半穿甲爆破战斗部,穿透舷侧外板在舰艇舱内爆炸,是舰艇结构最重要的毁伤载荷形式^[1]。舰艇舱室的内部环境颇为复杂,通常按照各舱室功能要求布置有不同的设备,舱内设备对爆炸载荷下舰体结构破坏的影响主要表现在:舱室内容积大小和空间形状受到影响,使爆炸冲击波的反射和交汇发生变化;设备的遮挡作用,使因冲击波和破片引起的结构损伤程度降低。因此在实战条件下,反舰战斗部进入舱室内部爆炸后,将受到设备影响而使战斗部毁伤效应更趋复杂。

目前,相关研究人员从理论、仿真、试验等多个方面对舱室内爆毁伤效应开展了研究。朱建方^[1-2]等对舰艇舱室在爆炸荷载下的动态响应过程进行了数值模拟,分析了舰艇舱室在爆炸冲击波作用下的响应特性和破坏

机理。虞德水^[3]等以舰船典型结构为目标,设计了两个1:1模拟舰船船舱,以研究半穿甲战斗部在模拟舱内爆炸的毁伤效应。李承俊^[4]等采用有限元分析软件,模拟多个舱室结构在内部爆炸冲击载荷作用下的变形和破坏过程。鄢顺伟^[5]等仿真计算了不同壁厚舱室结构在反舰导弹战斗部内爆作用下的毁伤效应。李伟^[6]等通过导弹模拟战斗部舱室内爆试验,研究了高速破片和爆炸冲击波对舱室结构的联合毁伤效应。侯海量^[7]等通过试验观察和数值模拟,分析了舱内爆炸载荷的特征以及舱内爆炸下舱室板架结构的失效模式。从已公开发表文献看,目前舱室内爆毁伤相关研究主要关注内爆载荷对无设施设备舱室结构的毁伤,而很少考虑舱室内存在机柜或其他大型设备对于爆轰波传播的影响,但事实上,舰艇基本不存在完全空置的舱室,机柜或其他大型设备对于毁伤效应的影响不可忽略。

本研究基于有限元软件 ANSYS/LS-DYNA,采用了流固耦合 ALE 算法,针对不同数量的设备机柜等效物对战斗部装药在舰船舱室内部爆炸所产生的冲击波效应的影响展开了数值模拟研究,对比了含有不同数量设备机柜等效物时,舱室内爆状态下舱内的冲击波超压及舱壁飞散速度的差异,分析结果对于实战条件下反舰武器毁伤效果评估及舰船防爆结构设计都具有一定的参考价值。

收稿日期: 2019-04-08; 修回日期: 2019-11-25

网络出版日期: 2019-12-12

基金项目: 中国博士后科学基金面上资助(2019M653924)

作者简介: 谭波(1979-),男,副教授,主要从事战斗部与毁伤研究。e-mail: turbo1996@126.com

通信联系人: 董军(1982-),男,副研究员,主要从事炸药及装药技术研究。e-mail: 94180853@qq.com

引用本文: 谭波,王伟力,严平,等. 舱内设备对爆载荷毁伤效应影响的对比分析[J]. 含能材料, 2020, 28(3):261-267.

TAN Bo, WANG Wei-li, YAN Ping, et al. Comparative Analysis of the Damage Effect of Equipments on the Internal Blast Loading in a Cabin[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(3):261-267.

2 仿真模型描述

2.1 几何模型建立

舱室采用长方体结构,根据对有关小型舰船的调研数据,典型舱室尺寸为^[8]:5 m×4 m×2.5 m,上下甲板、舱壁各面板厚度均为8 mm,采用T型钢、球扁钢与各面板焊接组成甲板和舱壁,T型钢尺寸为8 mm×0.6 mm/16 mm×0.6 mm,球扁钢尺寸为6 mm×0.6 mm。舱室上甲板加强筋布置在迎爆面方向,下甲板加强筋布置在背爆面;舷侧舱壁、纵舱壁、前后横舱壁加强筋均为迎爆面布置。T型钢、球扁钢等间距均匀间隔布置,间距为500 mm,上下甲板沿纵向扁钢等间距布置,间距为500 mm,纵壁上扁钢中间四道等间距,左右七道等间距,间距均为500 mm,下甲板T型钢间距同上甲板。舱室面板、加强筋结构及位置、设备结构及位置如图1所示。

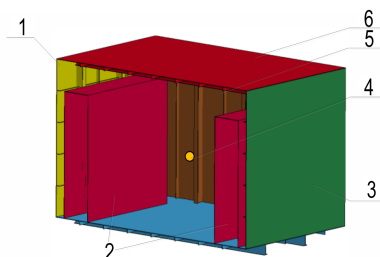


图1 舱室及设备结构示意图

1—舷侧舱壁, 2—设备, 3—纵舱壁, 4—装药, 5—横舱壁, 6—上甲板

Fig.1 Schematic of the cabin and equipment structure

1—longitudinal bulkhead, 2—equipments, 3—side bulkhead, 4—explosive, 5—transverse bulkhead, 6—upper deck

舰船设备及构件的抗冲击能力是舰船生命力的重要组成部分^[9-10]。设备易损性可分为功能易损性和结构易损性两类,受水下爆炸影响,尤其是非接触性爆炸冲击作用时,舰艇内部的设备受到冲击后出现功能丧失,可导致舰艇的战斗力急剧下降;而舱室内爆将主要导致设备结构损伤。由于本研究主要试图研究受舱室内爆作用时,设备结构对舱室结构破坏以及冲击波汇聚、准静态压力形成过程的影响,因此采取以设备机柜等效物替代的方式进行仿真分析。考虑舰艇舱室中设备种类繁多,尺寸大小不一,在舱内布置的位置变化极大,本文设备机柜等效物采用长方体结构,选取典型尺寸为2 m×0.5 m×1.8 m,壳体厚度为6 mm,布置于舱室纵舱壁一侧或同时布置于纵舱壁与舷侧舱壁两侧,与T型钢相接触。舱室及设备机柜等效物结构示意图如图2所示。图中仅给出了有两台设备的舱室结构,一台设备和没有设备的情况与之类似,仅在设备数量上有所不同。

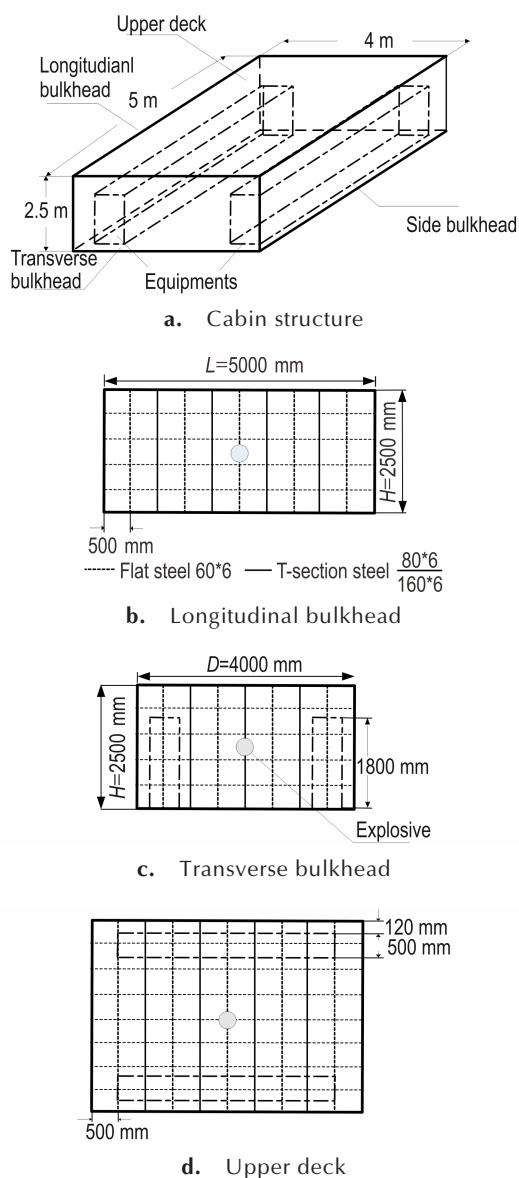


图2 舱室面板与加强筋、设备位置布局示意图

Fig.2 Schematic of the stiffener distribution on the deck and side structure

舰艇设备通常会通过减振元件与甲板连接,但当受到强冲击波作用时,减振元件很难起到缓冲效果,因此本文忽略减振元件作用,通过在设备机柜等效物底部均匀选取16个节点与下甲板固接,背部选取16个节点与舱壁T型钢连接的方式模拟设备与舰船结构的连接。

等效战斗部为TNT圆柱形裸装药,质量为14.7 kg,装药按半穿甲战斗部侵入舱室内部方向设置,其中心位于舱室几何中心。

2.2 有限元模型建立

采用非线性有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建模,

单位制为 $\text{cm-g-}\mu\text{s}$, 根据舱室对称性, 建立二分之一模型。有限元模型如图 3 所示。

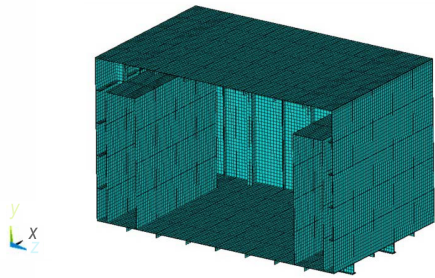


图 3 舱室内爆炸数值模拟模型示意图

Fig.3 Internal blast simulation model of the cabin

有限元模型包括三部分组成: 中心装药, 舱室结构, 以及舱室内外的空气域。为便于观察内部结构的毁伤效果和破口撕裂过程, 隐去了空气网格。所有单元均采用 solid164 八节点实体单元, 其中舱室结构单元采用 Lagrange 网格描述, 炸药和空气采用 Euler 网格描述; 采用多物质 ALE 算法, 通过罚函数传递能量。炸药为中心点起爆, 利用关键字 *INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY 建立^[11], 可将一部分空气定义成炸药的材料属性, 也可通过该关键字改变炸药的半径和形状, 使网格划分更加方便。空气域四周采用无反射边界, 对称面约束方式为对称约束。二分之一模型中, 设备底部与下甲板共有 8 处共节点, 均匀分布。因分析中战斗部侵入形成的孔洞对结果影响不大^[8], 因此未建立孔模型。

舱室设备与舱室、舱室角隅部位均为焊接而成, 结构屈服强度有所降低, 同时冲击作用下材料和结构容易出现断裂、绝热剪切等动破坏现象, 因此在计算模型中使用等效接触法^[12]模拟舱壁交界处的焊缝, 增加最大剪切应变失效准则。利用单元删除技术模拟舱室的破坏, 当单元变形引起塑性变形和剪切应变超过临界值时, 认为该单元破坏。

2.3 材料本构关系

选取 LS-DYNA 程序提供的 ALE 算法建立流体与固体间的联系, 模拟战斗部装药在舱室内爆炸后设备和舱室结构的响应和破坏^[13]。

反舰导弹进入舱室内部爆炸后, 结构材料在高温高压下的动力学性能非常复杂, 必须考虑大变形、高应变率的影响。舱室与设备结构材料选用应变率与失效结合的各向同性随动硬化模型, 应变率由 Cowper-Symonds 模型表达, SRC 和 SRP 分别设定为 4×10^5 和 12, 材料参数见表 1。采用 Mises 屈服准则定义其失效, 其中失效应变设定为 0.2。装药为 TNT 裸装药,

采用 High-Explosive-Burn 材料模型和 JWL 状态方程描述, 参数为见表 2。空气采用理想气体模型, 用 NULL 模型描述, 其中 $\rho_0 = 1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 比内能 $e = 2 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 多方指数 $\gamma = 1.4$ 。

表 1 舱室结构与设备材料参数

Table 1 Material parameters of the cabin structure and equipment

Parameters	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	E / GPa	ν	σ_0 / MPa	ε
	7.80	201	0.28	480	0.28

表 2 装药性能参数

Table 2 Performance parameters of the charge

Explosive	$\rho_0 / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$D / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	P_{C1} / GPa	$E / \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
TNT	1.64	6930	25.5	4853

3 数值模拟结果及对比分析

3.1 舱室毁伤过程及对比

通过数值模拟分别得到了未安装设备(工况 1)、安装有一台设备(工况 2), 和安装有二台设备(工况 3) 等三种工况下的舱室内爆炸后不同瞬时的应力云图, 以及工况 3 舱内的压力云图, 如图 4~图 7 所示。

三种工况下的舱室内爆毁伤过程基本类似: 当装药在舱室几何中心爆炸后, 形成爆轰产物和冲击波以近似球形向舱壁和舱室设备传播。因距离的关系, 先后作用于各舱壁或舱室设备表面, 冲击波达到结构后一部分向爆心反射形成反射冲击波同时形成稀疏波, 一部分透射进入板结构形成应力波向板四周传播。由于舱壁有加强筋支撑, 冲击波作用后板面形成的应力波并不呈规则圆形, 沿加强筋附近应力相对集中。作用于设备后, 在设备面板结构呈半圆形应力波扩散, 设备底部与舱室下甲板连接处首先产生应力。冲击波在舱室内部发生多次反射后, 在各舱壁之间以及舱壁与设备面板连接角隅处形成汇聚, 并在舱室内部形成准静态压力, 在角隅处强度叠加超出材料屈服极限而使结构发生破坏撕裂, 设备受挤压严重变形破损, 最终舱室结构解体。

但由于舱室设备的存在, 导致冲击波及准静态压力对舱室结构的作用过程发生了变化, 三种工况在毁伤效果上也有显著区别。在工况 1 舱室中, 约 $1300 \mu\text{s}$ 时, 载荷作用于舷侧舱壁和纵舱壁, 此时各舱壁中心部位发生变形, 产生较大应力, 应力波首先沿加强筋扩散, 横舱壁由于离爆心相对较远, 未受到冲击波影响; 约 $1950 \mu\text{s}$ 时, 上下甲板与舷侧舱壁、纵舱壁焊缝处均

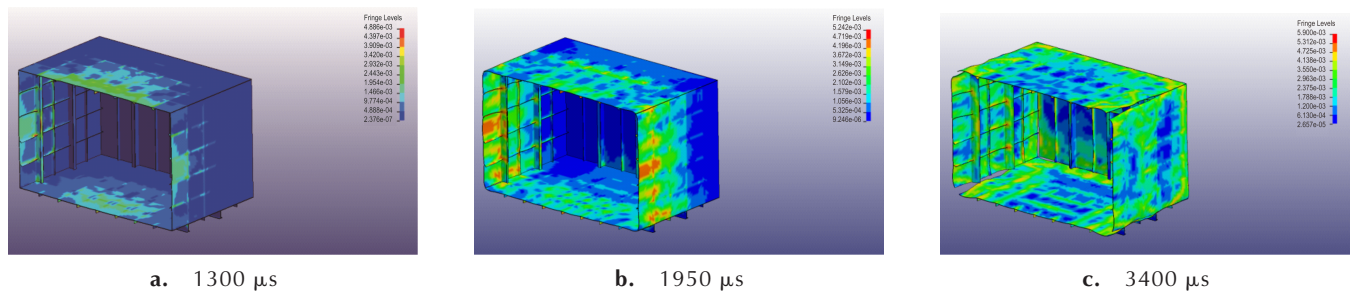


图4 未安装设备(工况1)舱室爆炸不同瞬时的应力图

Fig.4 Instantaneous stress contours of the cabin with no equipment

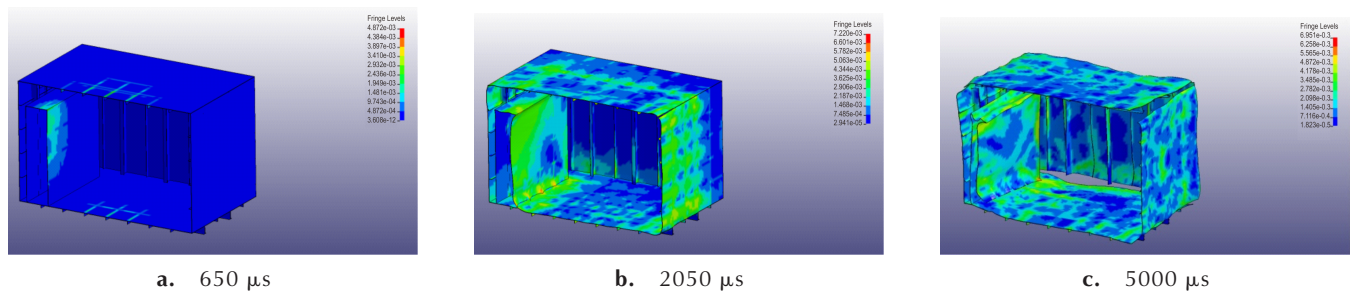


图5 安装一台设备(工况2)舱室爆炸不同瞬时的应力图

Fig.5 Instantaneous stress contours of the cabin installed with one equipment

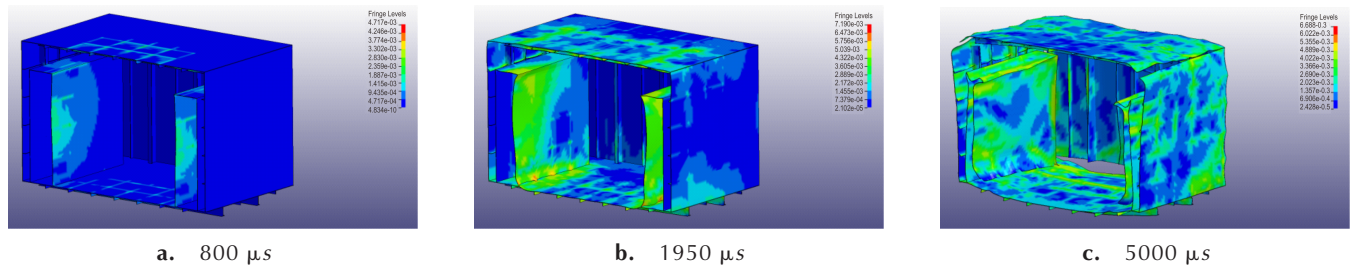


图6 安装二台设备(工况3)舱室爆炸不同瞬时的应力图

Fig.6 Instantaneous stress contours of the cabin installed with two equipments

出现裂缝;3400 μs 时舱室开始解体,舱壁向爆心相反方向飞散。在工况2舱室中,650 μs 时,设备在冲击波作用下首先发生变形;约2050 μs 时,变形加剧,设备与下甲板连接处应力集中,未受设备遮挡的舱壁、以及甲板相互连接焊缝处开始出现裂缝,因设备的遮挡作用,纵舱壁与下甲板连接处受冲击波影响较小;5000 μs 时,舱室解体,设备严重损毁。在工况3舱室中,800 μs 时,设备在冲击波作用下首先发生变形;约1950 μs 时,上甲板与舷侧舱壁、纵舱壁焊缝处出现裂缝,设备变形严重,受设备遮挡的部位受冲击波影响较小;至5000 μs ,同样受设备遮挡作用,下甲板与舷侧舱壁、纵舱壁连接焊缝处分解,舱室解体,设备严重损毁。

图7为显示方便,隐去了上甲板和舷侧舱壁。由图中可见,约1950 μs 时,准静态压力在作用于设备结

构的同时,经多次反射后,往由上甲板、侧舱壁、设备顶部构成的半封闭空间内扩散;约3500 μs 时,压力经由焊缝裂缝处往外泄漏,与上甲板接触的流场压力分布变得非常杂乱,准静态压力继续挤压设备结构,并往设备与侧舱壁、横舱壁构成的半封闭空间内扩散;约5000 μs 时,设备迎爆面及顶部变形严重,舱室结构解体,舱室内流场压力分布变得更加复杂。

3.2 舱室各测点压力载荷变化与对比

在舱室中选取压力测量点分别位于模型舷侧舱壁中央左侧的A点,舷侧舱壁中央的B点,舷侧舱壁与上甲板角隅部位中央的C点,角隅部位左侧F点,上甲板、舷侧舱壁与横舱壁角隅部位的D点,以及横舱壁中央的E点。为了表现安装一台设备时的遮挡作用,还在该舱室纵舱壁相对的位置选取了L~Q点测量压

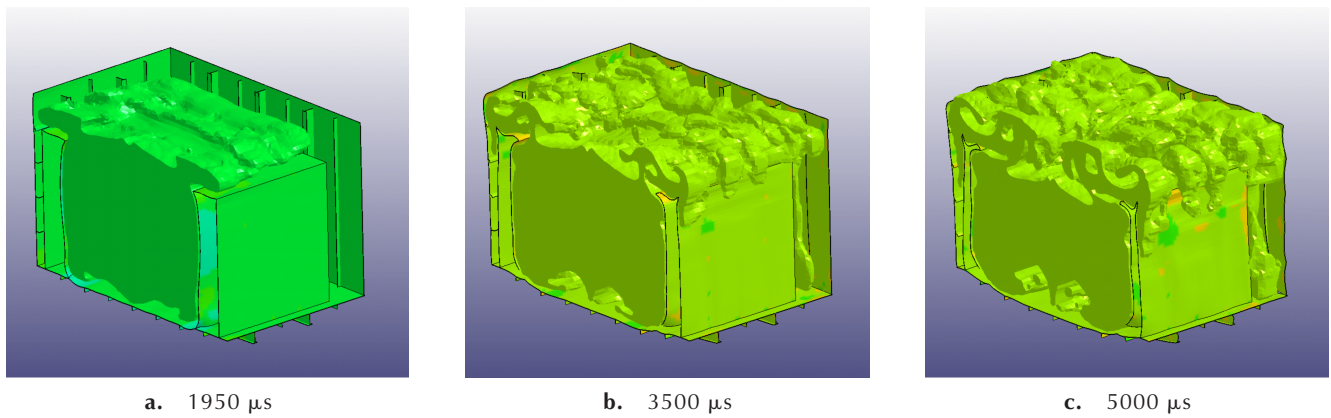


图7 安装二台设备(工况3)舱室爆炸不同瞬时的压力图
 Fig.7 Instantaneous pressure contours of cabin installed with two equipments

力。舱室压力各测点位置如图8所示,分别读取三种设备安装情况下的各位置压力值如图9所示。

读取未安装设备舱室各位置空气中的超压值如图9a所示。从图中曲线可看出,爆炸冲击波依次先后到达A、F、B、C、E、D位置点,并且在各位置点均形成了多次反射、汇聚;F处超压峰值最高,约为4.5 MPa,C处次之,约为4 MPa;上甲板、纵舱壁与横舱壁三者汇聚的角隅部位D处压力相对维持较久,达到约3.2 MPa;

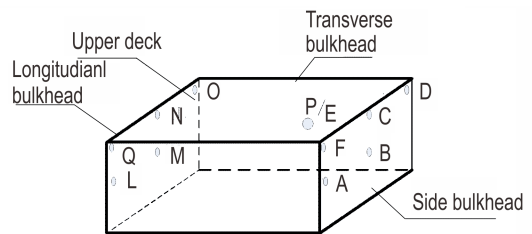


图8 舱室压力各测点位置
 Fig.8 Pressure measuring positions in the cabin

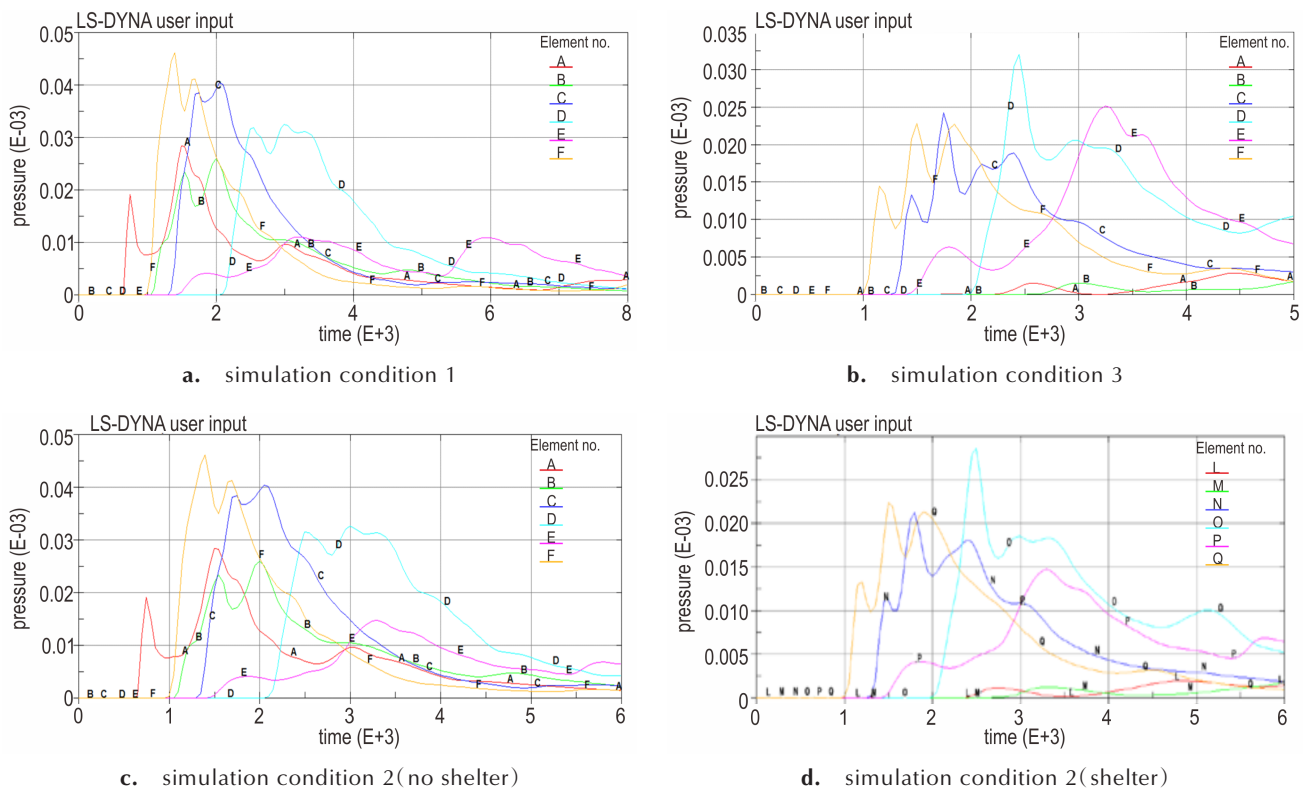


图9 舱室各测点压力变化曲线
 Fig.9 Pressure history curves in cabin

E处压力最低, 仅为 1.5 MPa 左右。

读取安装二台设备舱室各位置空气中超压值如图 9b 所示。爆炸冲击波的影响依次先后到达 F、C、E、D、A、B 位置点, 反射汇聚后形成的压力明显高于初始冲击波压力, 可见由于设备占据了舱室内空间, 使冲击波的反射作用加强; C 点超压值上升较快, 最大压力接近 2.4 MPa, D 点为上甲板、纵舱壁与横舱壁三者汇聚的角隅部位, 峰值压力最大, 达到约 3.2 MPa, 且随后压力保持在 2 MPa 持续时间较长; 横舱壁中央 E 点超压值约为 2.5 MPa; 受到设备遮挡, A、B 处最大压力仅为约 0.3 MPa。

读取安装一台设备舱室各位置空气中的超压值如图 9c 所示。对比前两种情况可见, 在该舱室中, 未遮挡面的压力形成过程与未安装设备舱室所测压力时程曲线所显示的特点非常相似, 仅在压力幅值和脉宽上稍有差异; 而有设备遮挡面的压力时程曲线则与安装二台设备舱室的情况类似, 如图 9d 所示, 其压力幅值相比明显要低, N、Q 点超压值约为 2.2 MPa, O 点超压值约为 2.8 MPa, 随后压力保持在 1.8 MPa 持续较长时间; 横舱壁中央 P 点超压值约为 1.5 MPa; 受到设备遮挡的 L、M 处最大压力低于 0.3 MPa。

3.3 舱壁飞散速度情况及对比

在三种工况下各舱室均发生解体, 舱壁飞散, 读取各舱壁飞散速度时程曲线如图 10 所示。图中曲线 A~E 依次分别为上甲板、下甲板、舷侧舱壁、纵舱壁、横舱壁的飞散速度曲线。

由图中可见, 当舱室中未安装设备时, 由于上下甲板距离爆心最近, 最先飞离, 两侧的舷侧舱壁和纵舱壁随后飞散, 最后冲击波作用于横向舱壁, 使之飞离。安装有一台设备舱室的情况从趋势上看最大区别在于受设备遮挡的纵舱壁, 受设备影响, 纵舱壁与下甲板并未断开连接, 仅从顶部向外运动, 其飞散速度显著低于其他舱壁。安装有二台设备舱室的情况显著不同, 最先飞离的是上下甲板, 随后是受设备遮挡的舷侧舱壁和纵舱壁, 与下甲板保持相连, 并从顶部往外张开, 最后飞散的是横向舱壁, 但其速度上升很快。

4 结论

本研究建立了未安装与安装不同数量设备舱室的有限元模型, 通过数值模拟研究了在舱内装药爆炸后, 设备与舱室的毁伤情况、舱室内既定测点处压力载荷变化情况, 以及舱壁飞散速度情况。通过仿真结果及对比分析表明:

(1) 由于设备的存在, 舱室纵舱壁与下甲板连接

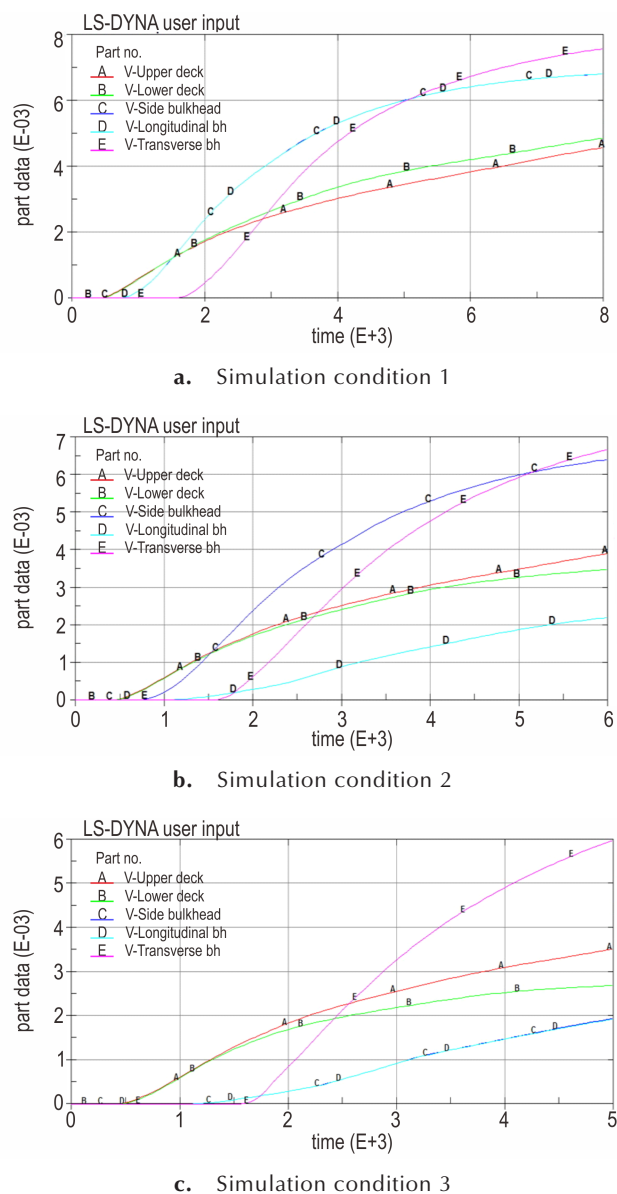


图 10 舱壁飞散速度曲线

Fig.10 Dispersion velocity history curves of the bulkhead

处的角隅部位所受冲击波影响很小, 连接处未发生撕裂, 爆炸能量部分消耗在了对舱室设备的破坏上; 而没有设备遮挡的舱室角隅部位, 受到冲击波叠加效应, 从焊缝处破损解体。冲击波在角隅处的反射叠加效应和应力波的叠加效应造成舱室焊缝结构及设备与下甲板连接处的破坏; 舱室内准静态气体的外泄加剧了舱室破口的延伸导致了舱室最终解体。

(2) 设备对舱室结构产生了一定的保护作用, 且设备占据了一定的空间, 对冲击波脉动规律的影响与舱壁反射类似, 但安装设备后, 舱室内压力幅值并未显著增加, 可能在变形毁伤时吸收了部分冲击波能量。

(3) 设备对受其遮挡作用的舱壁飞散速度产生了

较大的影响,设备后面的舱壁飞散速度显著较低,而与爆心距离较远的横舱壁能够获得最高的飞散速度。

参考文献:

- [1] 朱建方, 王伟力, 曾亮等. 爆炸荷载下舰艇舱室的破坏预估 [C]//第一届全国工程安全与防护学术会议, 2007: 149-153.
ZHU Jian-fang, WANG Wei-li, ZENG Liang, et al. Failure prediction of Ship Cabin subject to blast load [C]//The 1st conference on engineering safe and protection, 2007: 149-153.
- [2] 朱建方, 王伟力, 曾亮. 舰艇舱室内爆毁伤的建模与仿真分析 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(22):7066-7068.
ZHU Jian-fang, WANG Wei-li, ZENG Liang. Modeling and Simulation of Damage Effect of Ship Cabin Subject to Internal Explosion [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(22): 7066-7068.
- [3] 虞德水, 于川, 张元平等. 半穿甲战斗部对模拟舰船结构毁伤效应试验研究 [C]//第四届全国爆炸力学实验技术学术会议, 2006: 294-299.
YU De-shui, YU chuan, ZHANG Yuan-ping, et al. The experimental researching on damage effect of warhead to simulation ship structure [C]//The 4th explosion physics experimental technology national conference, 2006:294-299.
- [4] 李承俊, 余春祥, 牛公杰等. 内爆荷载作用下多舱室结构的破坏仿真分析 [J]. 舰船科学技术, 2015, 37(8): 7-11.
LI Jun-chen, YU Chun-xiang, NIU Gong-jie, et al. Simulation analysis to the warship cabins subject to internal blast loading [J]. *Ship Science And Technology*, 2015, 37(8): 7-11.
- [5] 鄢顺伟, 杜茂华, 王伟力等. 战斗部内爆对舰艇舱室的毁伤效应仿真 [J]. 海军航空工程学院学报, 2013, 28(2): 181-188.
YAN Shun-wei, DU Mao-hua, WANG Wei-li, et al. Damage effect simulation on the warhead inner- explosion loading on ship cabin [J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical*, 2013, 28(2): 181-188.
- [6] 李伟, 朱锡, 梅志远等. 战斗部内爆炸对舱室结构毁伤的实验研究 [J]. 舰船科学技术, 2009, 31(3):34-37.
LI Wei, ZHU Xi, MEI Zhi-yuan, et al. Experimental studies on damage effect of missile warhead on cabin's structure under internal explosion [J]. *Ship Science and Technology*, 2009, 31(3): 34-37.
- [7] 侯海量, 朱锡, 梅志远等. 舱内爆炸荷载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.
HOU Hai-liang, ZHU Xi, MEI Zhi-yuan, et al. Analysis on failure mode of cabin board structure under internal explosion loading [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2007, 27(2):151-158.
- [8] 苗润, 王伟力, 吴世永等. 半穿甲战斗部对带有复合装甲舱室的毁伤分析 [J]. 中国测试, 2018, 44(12): 1-8.
MIAO Rung, WANG Wei-li, WU Shi-yong, et al. Damage analysis of semi-armor-piercing warhead to typical cabin with composite armor [J]. *China Measurement & Test*, 2018, 44(12): 1-8.
- [9] 张海华. 冲击荷载作用下船用设备与构件强度评估数值实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
ZHANG Hai-hua. Numerical experiment research on the strength evaluation of the warship equipment and structure under shock loadings [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [10] 刘世明. 基于船体-设备动力学耦合特性的设备冲击阈值研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
LIU Shi-ming. Equipment Shock Threshold Based on Dynamical Coupling Property between Ship Hulls and Equipments [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [11] 张如林, 程旭东, 张艳美, 等. 空中爆炸冲击波作用的数值仿真实验研究 [J]. 实验技术与管理, 2017, 34(2): 110-115.
ZHANG Ru-lin, CHENG Xu-dong, ZHANG Yan-mei, et al. Application of numerical simulation experiment method of explosive shock wave in the air [J]. *Experimental Technology and Management*, 2017, 34(2): 110-115.
- [12] 黄雪峰, 樊壮卿, 王伟力, 等. 基于 LS-DYNA 对于舰艇舱室焊缝模拟方法 [J]. 海军航空工程学院学报, 2014, 29(4): 365-368.
HUANG Xue-feng, FAN Zhuang-qing, WANG Wei-li, et al. The simulating method to welding of ship cabin based on LS-DYNA [J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2014, 29(4): 365-368.
- [13] Weizheng Xu, Weiguo Wu, Yongshui Lin. Numerical method and simplified analytical model for predicting the blast load in a partially confined chamber [J]. *Computers and Mathematics with Applications*, *Computers and Mathematics with Applications* (2018).

Comparative Analysis of the Damage Effect of Equipments on the Internal Blast Loading in a Cabin

TAN Bo¹, WANG Wei-li¹, YAN Ping¹, DONG Jun

(1. College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Hubei Wuhan 430033, China; 2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Shaanxi Xi'an 710065, China)

Abstract: Different types of equipments are installed in the warship cabins according to their functions. However, present research of cabin internal blast damage mainly focuses on the effects of damage elements on vacant cabin, and the effects of the equipments installed in the cabin are seldomly considered. By using the finite element software LS-DYNA, three types of rib-reinforced cabin models, including the one installed with no equipment, the one with one equipment, and the one with two equipments, were built. The analysis of the damage of cabin structure and equipments caused by the internal blast of warhead charge and the comparative analysis of the influence of equipments on the damage effect were conducted. The comparative analysis results show that, because of the obstruction of the equipments, different arrangements of equipments affect the internal flow field distribution of shock waves in a cabin and convergence of shock waves in corners, reduce the maximum overpressure value and change its location, which finally lead to the change of the cabin structure's damage process.

Key words: internal blast; equipment; warship cabin; simulation analysis

CLC number: TJ410.3

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019094

(责编:高毅)