

DOI: 10.11883/bzyjc-2019-0438

# 基于仿真与量纲分析的不同药量 TNT 内爆下 多舱室结构毁伤规律研究\*

焦晓龙<sup>1,2</sup>, 赵鹏铎<sup>1</sup>, 姚养无<sup>2</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 李旭东<sup>1,2</sup>, 池海<sup>1,2</sup>

(1. 海军研究院, 北京 100161;

2. 中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 利用流固耦合算法, 模拟了不同药量 TNT 内爆下大尺寸多舱室结构的毁伤效应。将各舱室划分为爆炸舱、共面邻舱、共边界邻舱和共点邻舱, 再划分内爆下多舱室结构的毁伤等级。通过量纲分析, 研究了内爆载荷下舱壁的变形失效规律, 推导了内爆下多舱室结构的无量纲毁伤数, 该毁伤数考虑了内爆载荷、材料性能和作用空间等因素, 最后给出快速毁伤预测方法。研究表明: (1) 内爆下多舱室结构的毁伤特点主要表现为舱壁挠曲变形、舱壁中心冲切失效、舱壁边界撕裂; (2) 舱壁挠曲变形的挠厚比  $\delta/H$  和固定边界撕裂的裂缝长厚比  $l/H$  均与药量-单舱室容积比  $m/V$  有明显线性关系; (3) 提出的无量纲毁伤数和快速预测方法能够反映内爆下多舱室结构的毁伤情况, 可为舰船毁伤研究提供参考。

**关键词:** 舱内爆炸; 多舱室结构; 毁伤等级; 无量纲毁伤数; 快速毁伤预测

中图分类号: O383.3 国标学科代码: 1303520 文献标志码: A

## Regulation of different quantity TNT blasting in multi-cabin structure based on simulation and dimensional analysis

JIAO Xiaolong<sup>1,2</sup>, ZHAO Pengduo<sup>1</sup>, YAO Yangwu<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, LI Xudong<sup>1,2</sup>, CHI Hai<sup>1,2</sup>

(1. Naval Research Academy, Beijing 100161, China;

2. School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

**Abstract:** This paper simulated damage effect of the large size multi-cabin structure under internal blast. Cabins were divided into: explosion cabin, coplanar cabin, common boundary cabin and common point cabin, and the damage grade was presented to reflect the destructiveness. This paper studied the regulation of deformation and failure of bulkhead under internal blast by the dimensional analysis, in which a dimensionless damage number was deduced. Furthermore, the number can reflect the characteristics of internal explosive load, material properties and structure. Finally, a rapid damage prediction method was given. The analysis result shows: (1) the characteristics of damage include large deflection deformation, punching failure in the center of plate, tearing along the boundary; (2) the ratio of deflection to thickness ( $\delta/H$ ) has clear linear relationship with the ratio of the quantity to the volume of the cabin ( $m/V$ ), and so is the ratio of length to thickness of tearing ( $l/H$ ); (3) the dimensionless damage number and method of rapid damage assessment can reflect the destructiveness, which means the result and analysis method of this paper can provide valuable reference for the research of ship damage.

**Keywords:** internal blast; multi-cabin structure; damage grade; dimensionless damage number; rapid damage prediction

舰艇作为掌握海洋守卫主动权的利器, 只有具备较强生命力时, 才能有机会发挥舰载武器的威力, 才能说具备出色的作战能力。随着半穿甲武器的迅速发展, 学者们对炸药在舰艇空间有限的封闭舱室

\* 收稿日期: 2019-11-18; 修回日期: 2020-03-28

第一作者: 焦晓龙(1993—), 男, 硕士研究生, 419277865@qq.com

通信作者: 赵鹏铎(1983—), 男, 博士, 工程师, zhaopengduo@163.com

内爆炸的相关问题进行了研究。侯海量等<sup>[1]</sup>进行了典型单舱室结构内爆模型实验,分析了内爆载荷和舱室板架结构失效模式,指出角隅部位的汇聚冲击波强度远大于壁面反射冲击波、主要失效模式为沿角隅撕裂并发生大挠度外翻。另外,樊壮卿等<sup>[2]</sup>利用流固耦合算法,对该实验进行了进一步研究,不仅验证了毁伤过程的一致性,还得到了单舱室结构的失效特征和主要破坏载荷。随着对内爆下单舱室结构毁伤效应研究的不断深入,学者们对内爆下多舱室结构的毁伤情况也进行了探索。孔祥韶等<sup>[3-4]</sup>、严波等<sup>[5]</sup>对内爆炸环境下舷侧防护结构的响应进行了研究;孔祥韶等<sup>[3-4]</sup>通过数值模拟和实验研究,分析了高速破片和冲击波耦合作用下舷侧防护结构的冲击响应;严波等<sup>[5]</sup>利用数值模拟,分析了隔板间距疏密对破坏形式的影响。李营等<sup>[6]</sup>开展了3个并连舱室结构在舱内爆炸作用下的毁伤特性实验,测量了爆炸破片形态尺寸、破片速度和冲击波载荷等,分析了塑性变形、毁伤模式等结构毁伤特点。姚术健<sup>[7]</sup>基于固支方板的运动方程,先通过量纲分析法,给出了适用于爆炸舱(爆炸发生所在舱室)的无量纲毁伤数,再根据实验结果和数值模拟,指出单层多箱室结构主要有十字形和非十字形两种破坏模式,最后给出了破坏模式快速预测方法,该方法考虑了结构的尺度效应和应变率的影响且适用于工程应用。

目前,对内爆下多舱室结构毁伤效应的研究多集中于爆炸舱,而涉及邻舱(邻近舱室)的还很少。实际上,半穿甲反舰武器能对多个舱室甚至舱段造成破坏,内爆载荷对邻舱的设备和人员的威胁非常大<sup>[8]</sup>。所以,需要对内爆载荷作用下包括邻舱在内的整个多舱室结构毁伤效应进行研究,本文中探讨在不同药量 TNT 内爆下大尺寸多舱室结构的毁伤效应。

## 1 数值计算模型和方法

采用 AUTODYN 软件的多物质流固耦合算法,能够模拟计算舱内爆炸过程中载荷与结构间的相互作用,可以准确模拟爆轰波的产生、反射以及汇聚等载荷特性,并能准确反映结构的响应。

### 1.1 有限元模型

多舱室结构模型由边长 2 m 的立方体单舱室按 3×3×3 堆叠而成,图 1 为完整模型和 1/8 模型。

有限元模型包括舱室结构有限元模型、空气域有限元模型和炸药有限元模型 3 种。模型舱壁和甲的厚度均为 6 mm,远小于舱壁结构尺寸,因此舱室结构模型采用 4 节点壳单元,空气和炸药有限元模型均采用 8 节点体单元。考虑结构会发生大变形,为保证变形后的结构依然能受到爆炸载荷作用,多舱室模型完全浸没在空气域中。结构具有对称性,为简化计算和节省时间,采用 1/8 结构模型,如图 2(a)所示,整体有限元模型共有约 196 万个单元。

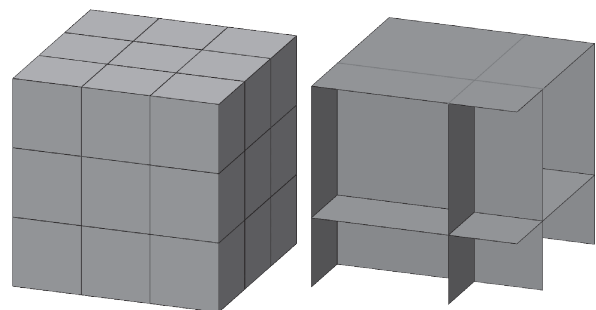


图 1 多舱室结构模型和 1/8 模型

Fig. 1 Whole model and 1/8 model of multi-cabin structure

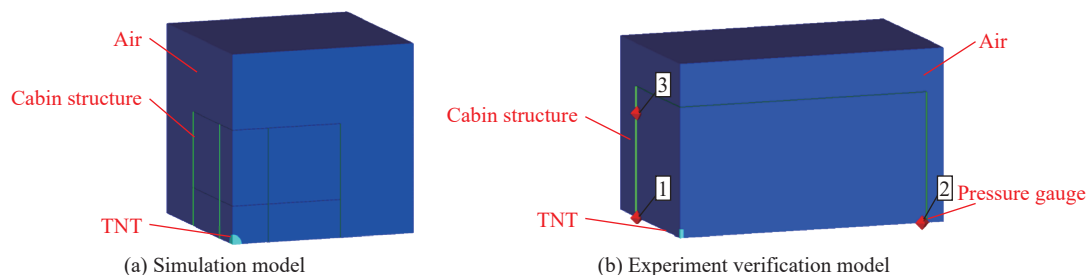


图 2 多舱室结构有限元模型

Fig. 2 Finite element model of multi-cabin structure

## 1.2 模型材料和参数

材料均从 AUTODYN 材料库中选取,各参数采用材料库中的默认参数。其中,多舱室结构材料选用抗爆性能较好的 4340 钢,用 Johnson-Cook 强度模型描述,拟较好模拟舰艇结构的抗爆性能。该模型是一个以经验为主的模型,主要适用于大应变、高应变率和高温变形,常用于高速碰撞或爆炸引起的材料变形。强度模型一般形式为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \varepsilon_p^*) (1 - T_H^m) \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为等效应力;  $\varepsilon_p$  为有效塑性应变;  $\varepsilon_p^*$  为标准有效塑性应变率;  $T_H = (T - T_r)/(T_m - T_r)$ ,  $T_r$  为参考温度,  $T_m$  为材料的熔点温度;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $n$ 、 $m$  为与材料有关的实验参数。AUTODYN 材料库中,4340 钢材料参数分别为:  $T_m = 1793$  K,  $A = 792$  MPa,  $B = 510$  MPa,  $C = 0.014$ ,  $n = 0.26$ ,  $m = 1.03$ 。

与舱内爆炸载荷相比,甲板和舱壁为薄板,在舱内爆炸载荷作用下会发生塑性大变形,甚至产生破口、连接部位和开口部位的撕裂。考虑舱壁的失效,而所使用钢材的屈服极限较高,本文中设置失效应变为 0.3<sup>[9]</sup>。

空气采用理想气体状态方程<sup>[10]</sup>描述,该方程可以准确反映实际气体的物理行为。状态方程为:

$$p = (\gamma - 1)\rho e \quad (2)$$

式中:  $p$  为压强,  $\gamma$  为绝热指数,  $\rho$  为密度,  $e$  为内能。状态方程参数分别为:  $\gamma = 1.4$ ,  $\rho = 1.225$  kg/m<sup>3</sup>,  $e = 206.8$  kJ/kg。

TNT 炸药采用 Jones-Wilkins-Lee(JWL)状态方程描述,该方程可以精确计算炸药爆轰驱动金属板壳结构的加速过程,被广泛应用于工程计算中<sup>[11]</sup>。状态方程为:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega E}{v} \quad (3)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为实验拟合参数,  $E$  为爆轰产物的体积内能,  $v = \rho_0/\rho_t$  为爆轰产物的相对比容,  $\rho_0$  为炸药初始密度,  $\rho_t$  为爆轰后密度。

## 2 数值模拟方法的验证

### 2.1 实验验证

采用实验数据和经验公式相结合的方法,对本文的数值模拟方法进行验证。根据连赧猛<sup>[12]</sup>的实验,建立有限元模型(见图 2(b))进行验证。其中,实验装置为密闭长方体形钢筋混凝土结构,如图 3(a)所示。装置壁厚 150 mm(由实验中测得的最大载荷强度 1.18 MPa),可忽略实验装置壁面的动态变形,即将壁面视为刚体,模拟计算时可用相同厚度的钢材代替。测点分布<sup>[12]</sup>如图 3(b)所示。

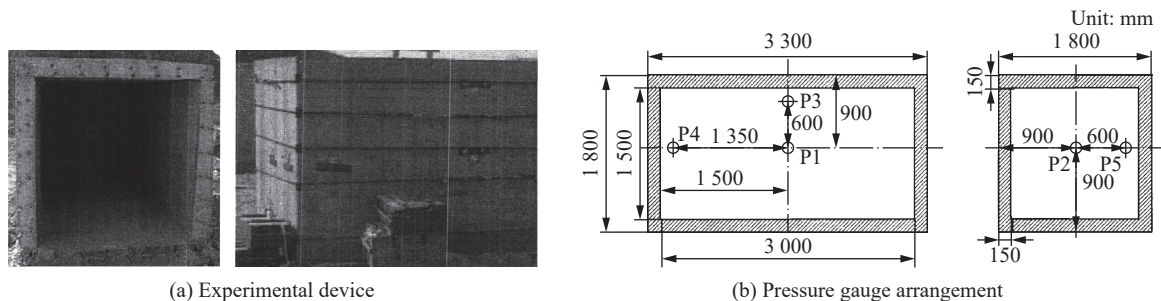


图 3 实验装置和测点布置<sup>[12]</sup>

Fig. 3 Experimental device and pressure gauge arrangement<sup>[12]</sup>

文献 [12] 中给出了壁压数据。其中,测点 P1、P2 正对爆源(见图 3(b)),这两个测点的压力曲线的首峰为第 1 次正反射冲击波峰,用正反射超压的计算公式<sup>[13]</sup>求解验证:

$$\Delta p_r = 2\Delta p_i + \frac{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\Delta p_i^2}{\Delta p_i + \frac{2\gamma}{\gamma-1}p_0} \quad (4)$$

式中:  $\Delta p_r$  为反射压力,  $\Delta p_i$  为入射压力,  $p_0$  为环境压力,  $\gamma$  为绝热指数。绝热指数  $\gamma$  的取值随入射超压强度有所改变, 依据文献 [13], 本文中取  $\gamma=1.4$ 。

入射压力为爆炸产生的初始冲击波超压, 为:

$$\Delta p_i = \frac{0.084}{Z} + \frac{0.27}{Z^2} + \frac{0.7}{Z^3} \quad 1 \leq Z \leq 15 \quad (5)$$

式中:  $\Delta p_i$  为冲击波峰值超压, MPa;  $Z=R/W^{1/3}$  为相对距离,  $R$  为爆距, m,  $W$  为爆炸当量, kg。

该经验公式以大量实验为基础, 可信度高, 为我国国防工程设计规范中的空爆冲击波超压计算公式<sup>[14]</sup>。

### 2.2 验证结果

数值模拟的各测点压力峰值见表 1, 并利用经验公式加以佐证, 提高本次研究的置信度。其中, 相对于实测结果, 数值模拟计算结果的平均误差为 5.37%, 最大误差为 8.92%, 计算超压值与实测值接近。可以认为, 本文中采用的数值模拟方法能够较好地模拟舱内爆炸时的壁面压力特征, 可靠性较高。

表 1 实测压力峰值和数值模拟计算结果的对比

Table 1 Comparison of measured peak pressures and numerical simulation results

测点	压力峰值/MPa			模拟计算 误差/%
	实测	模拟计算	经验公式	
P1	1.180	1.153	0.928	-2.29
P2	0.157	0.171	0.150	8.92
P3	0.449	0.471	0.451	4.90

### 3 结构毁伤等级划分

多舱室结构的毁伤情况复杂, 为方便表述, 进行以下分类: (1) 依据相对爆炸舱的位置, 将邻舱分为共面邻舱、共边界邻舱和共点邻舱; (2) 依据变形失效类型, 将邻舱舱壁及边界进行分类编号, 如图 4 所示, 具体描述见表 2。

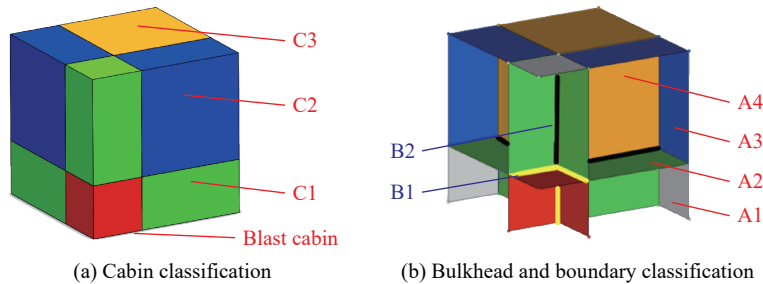


图 4 结构分类

Fig. 4 Structural classification

表 2 结构分类

Table 2 Structural classification

类别	分类	具体描述
邻舱	C1	共面邻舱
	C2	共边界邻舱
	C3	共点邻舱
舱壁	A1	共面邻舱中的外围(灰色)舱壁
	A2	共面邻舱中的(绿色)舱壁
	A3	共边界邻舱中的外围(蓝色)舱壁
	A4	共点邻舱的所有舱壁(橙色)
边界	B1	共边界邻舱和爆炸舱的共有(黄色)边界
	B2	共面邻舱和共点邻舱的共有(黑色)边界

分析计算结果,发现多舱室结构的毁伤集中体现在各个舱壁的变形失效上,主要包括舱壁挠曲大变形、舱壁中心冲切破坏、舱壁沿边界发生翻转撕裂、舱壁在边界处剪切失效等,这些变形破坏随着爆炸载荷的增强相继发生。为了体现内爆载荷对多舱室结构的毁伤特点,结合以往经验划分毁伤等级,见表 3。各种毁伤等级对应的典型毁伤情况,如图 5 所示。

表 3 毁伤等级的描述

Table 3 Description of damage grade

毁伤等级	破损现象描述
G1	爆炸舱舱壁均向外挠曲变形,但未破损
G2	爆炸舱舱壁中心发生冲切破坏,甚至有破片飞出,残余舱壁有翻转撕裂或卷边现象; A1类舱壁向外挠曲变形,但未破损
G3	爆炸舱舱壁沿边界剪切失效后飞出; A1类舱壁的中心产生破口,甚至有破片飞出,残余舱壁发生翻转撕裂
G4	A2类舱壁沿B2类边界从靠近爆源一端向外撕裂破坏,此外A2类舱壁在垂直裂缝的方向上也有不同程度撕裂破坏; 共点邻舱共点处的A4类舱壁均向该舱室内部塌陷挠曲变形; A3类舱壁向外挠曲变形
G5	A2类舱壁间的B1类边界从两端向中心撕裂贯穿; 甚至在共点邻舱共点处的A4类舱壁的三面交接处发生反向撕裂,并伴随B2类边界不规则的扭曲现象

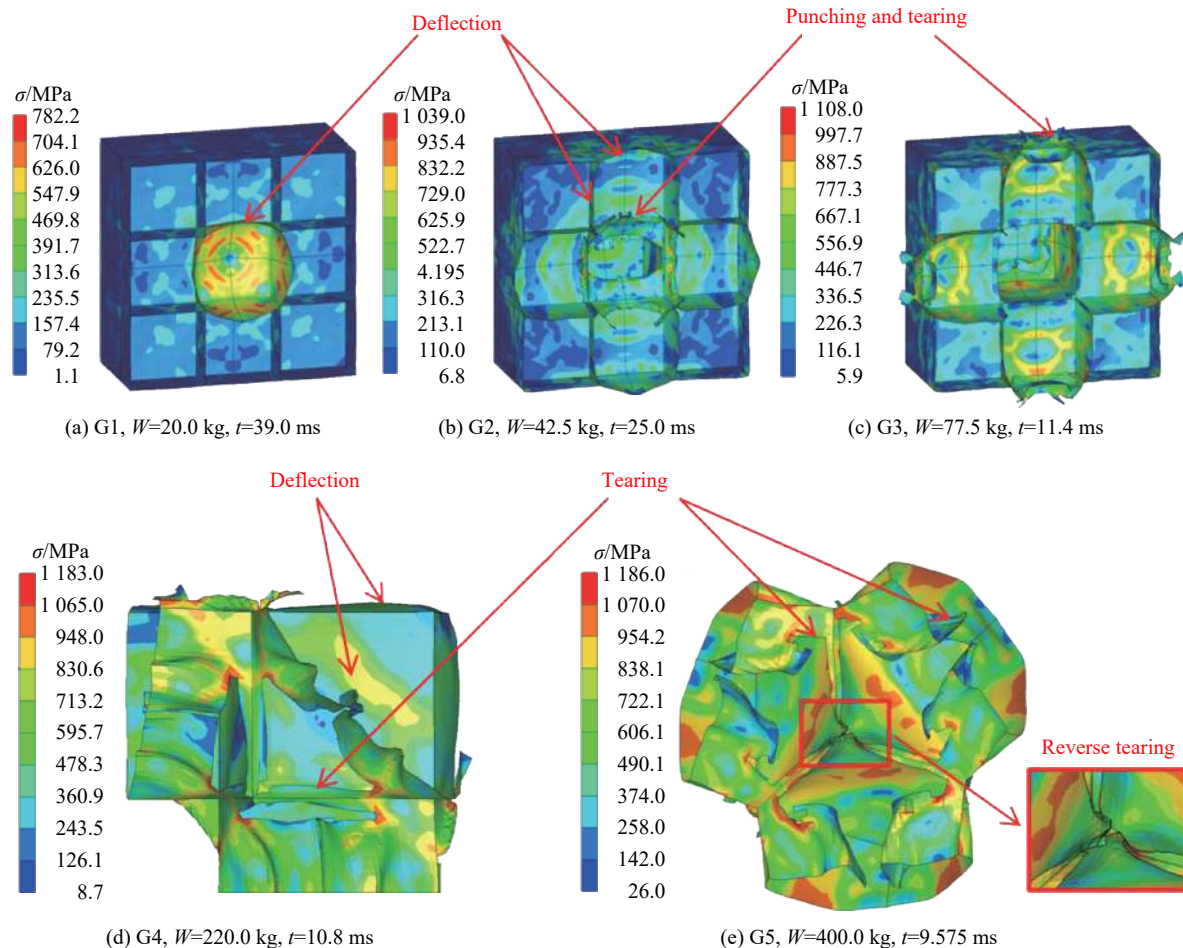


图 5 各种毁伤等级对应的典型毁伤情况

Fig. 5 Typical damage situations corresponding to various damage grades

上述毁伤情况符合舱内爆炸载荷作用下典型舱室结构的毁伤模式。为了支撑上述结论,对主要内爆冲击载荷之中的准静态压力采用经验公式验证。李德聪等<sup>[15]</sup>对一些常用的计算公式进行了总结,并

认为当  $m/V < 0.5$  时, 劳氏规范公式的计算结果与其他公式相差较大。结合本文情况, 选用 Carlson 公式进行验证:

$$p_{qs} = 1.3m/V \quad (6)$$

式中:  $p_{qs}$  为准静态压力, MPa;  $m$  为 TNT 药量, kg;  $V$  为结构容积,  $m^3$ 。

这里, 验证了准静态压力作用明显的几个 TNT 药量状况, 见表 4。由于准静态压力在某个范围内浮动, 采用确定的值, 结果难免有误差。经对比, 计算结果平均相对误差 5.995%, 最大误差 9.43%, 结果在可接受的精度范围内。表 4 中, 计算结果普遍低于经验公式的, 可能是因计算中未考虑炸药后燃烧效应, 这需进一步研究。可以认为, 本文中采用的数值模拟计算方法能够较好模拟舱内爆炸, 具有进一步研究的可行性。

表 4 数值模拟结果与准静态压力经验公式结果的对比

Table 4 Comparison between numerical simulation results and quasi-static pressure empirical formula results

$m/\text{kg}$	$p_{qs}/\text{MPa}$		相对误差/%
	Carlson公式	数值模拟	
20	2.364	2.210	-6.51
30	0.678	0.651	-3.98
40	0.881	0.815	-7.49
60	1.219	1.104	-9.43
80	1.564	1.526	-2.43
130	2.414	2.266	-6.13

## 4 量纲分析和快速毁伤预测

### 4.1 量纲分析

可利用已被广泛运用的量纲分析法<sup>[16-19]</sup>, 研究舱内爆炸这种复杂问题。由分析和计算结果发现, 可从内爆载荷下舱壁和边界(即板架)的毁伤效应出发, 进一步分析内爆下多舱室结构的毁伤效应。结合板架结构的失效准则<sup>[20-21]</sup>, 本文中考虑两种典型变形失效模式, 分别是舱壁挠曲变形、舱壁固定边界撕裂, 并分别用最大挠度  $\delta$  和裂缝长度  $l$  表征, 可据此评估和预测内爆载荷对多舱室结构的毁伤情况。其中, 影响  $\delta$  和  $l$  的主要参数有 TNT 药量  $m$ 、炸点位置  $\bar{L}$ (可用距相邻舱壁的 3 个最小距离表示)、单舱室容积  $V$ 、单舱室特征长度  $L$ 、舱壁厚  $H$ 、结构材料的密度  $\rho_s$ 、声速  $c_s$ 、屈服强度  $\sigma$ 、空气的密度  $\rho_0$ 、声速  $c_0$ 。可将多舱室结构的毁伤情况表示为:

$$\{\delta, l\} = f(m, \bar{L}, V, L, H, \rho_s, c_s, \sigma, \rho_0, c_0) \quad (7)$$

本文中不改变炸点位置, 即  $\bar{L}$  为定值; 爆炸发生在理想空气中, 空气的声速  $c_0$  和密度  $\rho_0$  也可视为定值; 在多舱室结构内部爆炸下, 结构材料的密度  $\rho_s$  基本不变, 可以视为定值; 根据已有研究<sup>[18-19, 22]</sup>, 结构尺度和材料强度与作用于结构上的爆炸载荷密切相关。根据  $\Pi$  定理, 得到如下无量纲关系:

$$\left\{ \frac{\delta}{H}, \frac{l}{H} \right\} = \psi \left( \frac{V}{H^3}, \frac{L}{H}, \frac{mc_s^2}{H^3\sigma} \right) \quad (8)$$

式(8)中的 5 个变量均无量纲, 但各变量间关系不确定。为了进一步探索结构变形规律, 采用指数乘积的形式表示:

$$\left\{ \frac{\delta}{H}, \frac{l}{H} \right\} = \left( \frac{V}{H^3} \right)^\alpha \left( \frac{L}{H} \right)^\beta \left( \frac{mc_s^2}{H^3\sigma} \right)^\gamma \quad (9)$$

用式(9)对计算结果进行分析, 发现  $\delta/H$  和  $l/H$  均与  $m/V$  存在较好的线性关系, 如图 6 所示, 可令式(9)中  $\alpha=-1$ 、 $\gamma=1$ 。由文献 [7],  $\delta/H$  与其分析得到的无量纲量存在明显线性关系, 可认为在某个确定结构

中, 炸药释放总能量  $Q$  和  $H$  的比值  $Q/H$  与  $\delta/H$  线性相关。对同种炸药, 单位质量炸药释放的能量为定值, 即  $m$  与  $Q$  线性相关, 因而  $m/H$  与  $\delta/H$  线性相关。 $\delta$  和  $l$  是独立的, 则  $m/H$  与  $l/H$  也线性相关, 则可令  $\beta=1$ 。定义内爆下多舱室结构毁伤效应无量纲毁伤数为  $B_c$ , 则:

$$B_c = \frac{H^3}{V} \frac{L}{H} \frac{mc_s^2}{H^3\sigma} = \frac{mc_s^2 L}{\sigma VH} \quad (10)$$

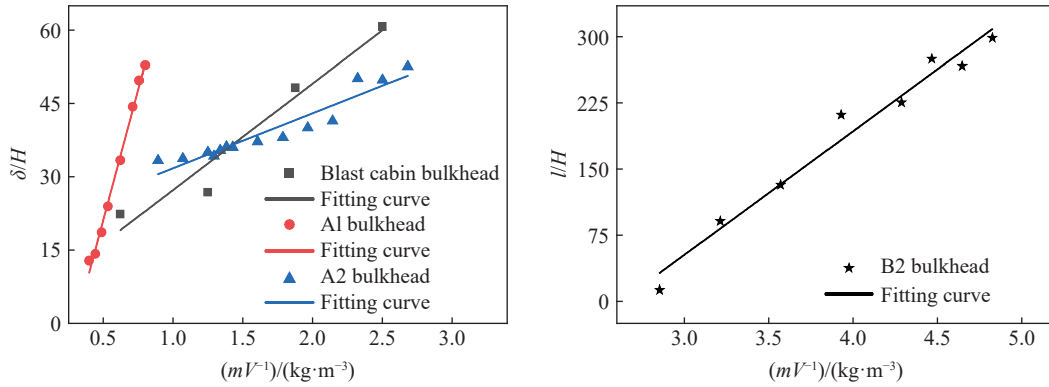


图 6 最大挠度和裂缝长度与 TNT 药量的关系

Fig. 6 Relationship of maximum deflection and tearing length with TNT charge

#### 4.2 快速毁伤预测方法及验证

经上述分析, 采用舱壁最大挠度  $\delta$  和固定边界裂缝长度  $l$  评价多舱室结构的毁伤情况, 确定毁伤等级。拟合得到毁伤等级预测曲线(见图 7)和对应公式:

$$G = \begin{cases} 1.08 + 0.021 10B_c \\ 1.39 + 0.019 40B_c \\ 2.71 + 0.004 23B_c \\ 2.89 + 0.004 08B_c \end{cases} \quad (11)$$

由于 5 级毁伤表现为三面交接处反向撕裂并伴随着边界扭曲, 不适用于  $\delta$  或  $l$  表征, 因此图 7 中未显示。

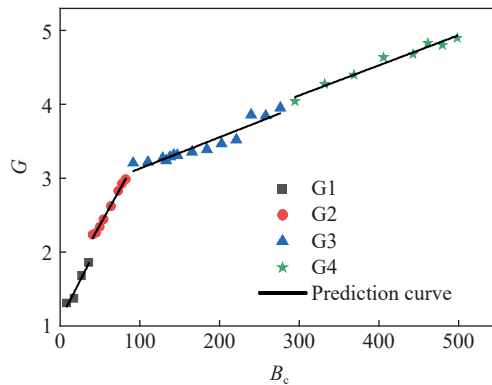


图 7 内爆下多舱室结构毁伤等级预测曲线

Fig. 7 Prediction curve of damage grade of multi-cabin structure under internal blast

如图 7 所示, 预测曲线描述了球形 TNT 在典型多舱室结构中心内爆时, 各种情况的结构毁伤等级  $G$  和无量纲毁伤数  $B_c$  的关系, 同时也描述了影响  $B_c$  的各参数与毁伤等级之间的关系。与内爆载荷相关的参数有药量  $m$  和单舱室容积  $V$ , 如其他参数不变, 随着  $m/V$  的增大, 内爆载荷增强, 结构变形破损程度加重, 毁伤等级提高; 与结构几何尺度相关的参数有舱壁厚  $H$  和单舱室特征长度  $L$ , 如其他参数不变, 随

着舱壁厚度的增加,在相同载荷强度下,结构变形破损程度降低,毁伤等级降低。如其他参数不变,单舱室特征长度增加,由于 $V$ 的限制,单舱室的长宽高尺寸最小的将大幅减小,则在相同药量下,会使一些舱壁的爆距急剧减小,导致结构变形破损程度加重,毁伤等级提高;屈服强度 $\sigma$ 和声速 $c_s$ 是材料的固有属性,但不同钢的屈服强度有较大差异,而声速较为接近。如药量和结构尺度不变,采用屈服强度较大的材料,则结构抗爆抗冲击性能将增强,毁伤程度减轻,毁伤等级降低。综合考虑上述各参数,可认为毁伤等级 $G$ 主要受内爆载荷( $m/V$ )、结构几何尺度( $L/VH$ )和材料破损条件( $mc_s^2/H^3\sigma$ )共同影响。由图7中的关系曲线可近似预测某药量球形TNT内爆下典型多舱室结构的毁伤等级,进而可预测其毁伤情况。

图7中各线段不连续的原因包括系统误差和偶然误差,主要有:(1)各类舱壁所受载荷类型有差异;(2)各类舱壁的受载方向不同,在图7中体现为各线段斜率不同;(3)有某药量爆炸时,舱壁处于弹性阶段,未发生塑性变形,导致毁伤等级偏小;(4)表征量无法准确取得。

利用文献[23]中的实验简述快速毁伤预测方法,并作检验。如图8所示,该文献的装置由相同结构的小舱室组成,每个小舱室结构尺寸为 $0.15\text{ m}\times 0.125\text{ m}\times 0.1\text{ m}$ ,纵向板厚 $3\text{ mm}$ ,结构材料屈服强度 $\sigma$ 为 $464\text{ MPa}$ ,TNT药量为 $0.05\text{ kg}$ 。

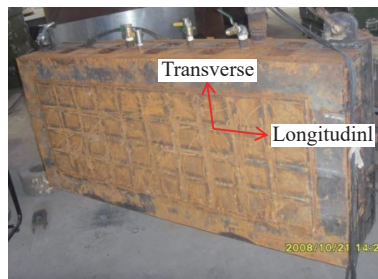


图8 实验装置<sup>[23]</sup>

Fig. 8 Experimental device<sup>[23]</sup>

根据实验情况,利用式(10)求得 $B_c$ 为 $83.9$ ,代入式(11)第3个式子,得到毁伤等级为 $3.06$ ,对应的破损现象为爆炸舱舱壁沿边界被撕裂失效后飞出(见表3),且飞出舱壁与后续内爆载荷耦合作用于A1类舱壁,使其发生轻微破损。文献[23]中实验后装置内部破损情况如图9所示,有3个爆炸舱舱壁破损严重,且每个均有3条边界完全撕裂并发生大挠度外翻,装置的其他结构变形不明显。

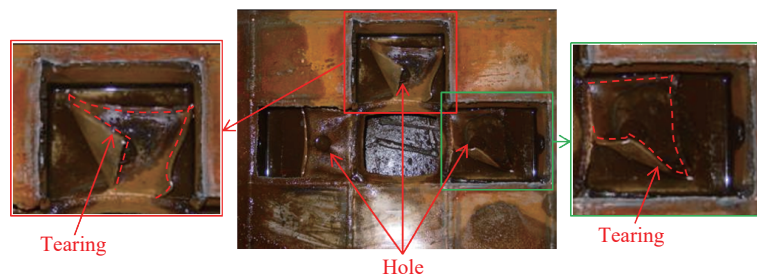


图9 装置内部失效状况<sup>[23]</sup>

Fig. 9 Device internal failure<sup>[23]</sup>

与实验结果相比,快速预测结果偏大,原因有:(1)快速预测方法基于数值模拟计算得出,其单舱室尺寸为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}\times 2\text{ m}$ ,而该实验的单舱室尺寸为 $0.15\text{ m}\times 0.125\text{ m}\times 0.1\text{ m}$ ;(2)数值模拟中,舱壁间以理想的连接方式处理,未考虑焊接的影响;(3)数值模拟中未考虑药孔的影响,实验装置有多处药孔(见图9);(4)数值模拟中爆点位置在结构中心,而实验中存在偏差。对以上原因,可以通过大量实验结果来修正、完善。总之,采用本文预测方法,可对内爆下多舱室结构的毁伤情况进行快速预测。



## 5 结 论

运用数值模拟,研究了内爆载荷作用下多舱室结构的毁伤特性。运用 ANSYS/AUTODYN 非线性有限元软件中的多物质流固耦合算法,进行了大量不同 TNT 药量的数值模拟计算。并依据文献 [12] 中的实验数据、置信度较高的经验公式,验证了数值模拟计算方法的可行性。然后,对计算结果运用量纲分析,推导了关于球形 TNT 结构中心内爆下典型多舱室结构的无量纲毁伤数,并给出了基于本文模拟计算结果的毁伤等级预测公式和快速毁伤预测方法。主要结论如下。

(1)内爆载荷下多舱室结构的毁伤特征可用基础结构的不同失效形式描述,如舱壁主要包括舱壁中心冲切失效、舱壁撕裂失效、舱壁在边界处剪切失效及三面连接处反向撕裂失效。

(2)内爆载荷下舱壁挠曲变形产生的最大挠度和撕裂失效产生的裂缝长度均与  $m/V$  存在明显线性关系;内爆载荷下多舱室结构毁伤程度与  $m/V$  密切相关,并可用关于  $m/V$  的方程表示。

(3)基于基础结构失效模式,结合无量纲分析的快速预测方法,能够实现内爆下多舱室结构的快速毁伤预测,可用于内爆下多舱室结构的毁伤特性研究,为舰船毁伤研究提供参考。

(4)还发现内爆载荷泄出后,泄口处会产生负压区,可能使破片飞回,对结构造成二次破坏,对此还需进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 侯海量,朱锡,李伟,等. 舱内爆炸冲击载荷特性实验研究 [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.
- [2] 樊壮卿,王伟力,黄雪峰,等. 典型舱室内爆炸仿真分析 [J]. *工程爆破*, 2015, 21(3): 13–17. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2015.03.004.  
FAN Z Q, WANG W L, HUANG X F, et al. Simulation analysis on typical cabin internal explosion [J]. *Engineering Blasting*, 2015, 21(3): 13–17. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2015.03.004.
- [3] 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.
- [4] 孔祥韶,徐维铮,郑成,等. 多层防护结构舱内爆炸试验 [J]. *船舶力学*, 2017, 21(1): 76–89. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2017.01.010.  
KONG X S, XU W Z, ZHENG C, et al. Experiment of a multi-layer protective structure under an inner explosion [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2017, 21(1): 76–89. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2017.01.010.
- [5] 严波,彭兴宁,潘建强. 舱室爆炸载荷作用下舷侧防护结构的响应研究 [J]. *船舶力学*, 2009, 13(1): 107–114. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2009.01.014.  
YAN B, PENG X N, PAN J Q. Investigation of the response of broadside protection structure subjected to internal blast loading [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2009, 13(1): 107–114. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2009.01.014.
- [6] 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.
- [7] 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: 126–132.
- [8] 刘邦鑫. 舰船多舱室爆炸致比格犬颅脑爆震伤的实验研究 [D]. 上海: 第二军医大学, 2017: 35–39.
- [9] 姚熊亮,屈子悦,姜子飞,等. 舰船舱内爆炸载荷特征与板架毁伤规律分析 [J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(3): 140–148. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01162.  
YAO X L, QU Z Y, JIANG Z F, et al. Analysis on characteristics of blast loading and stiffened plate damage due to internal

- blast in ship [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(3): 140–148. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01162.
- [10] 张伟, 岳永威, 张阿漫, 等. 基于 AUTODYN 的气泡与固定壁面相互作用数值模拟 [J]. *中国舰船研究*, 2012, 7(6): 23–30. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2012.06.004.  
ZHANG W, YUE Y W, ZHANG A M, et al. Numerical simulation of underwater explosion bubble interactions with a solid boundary based on AUTODYN [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2012, 7(6): 23–30. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2012.06.004.
- [11] 南宇翔, 蒋建伟, 王树有, 等. 一种与爆轰参数封闭的 JWL 方程参数确定方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(2): 157–163. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0157-07.  
NAN Y X, JIANG J W, WANG S Y, et al. One parameter-obtained method for JWL equation of state considered detonation parameters [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(2): 157–163. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0157-07.
- [12] 连赧猛. 典型密闭装置内爆炸试验及其数值模拟 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013: 13–21.
- [13] 李世明, 梁仕发, 周丰峻. 强冲击波反射系数的计算 [J]. *防护工程*, 2003, 25(4): 69–73.
- [14] 张国伟. 终点效应及其应用技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 167–168.
- [15] 李德聪, 段宏, 吴国民, 等. 船内爆炸载荷特性及对舰船结构毁伤研究综述 [J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(1): 7–16. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2018.01.002.  
LI D C, DUAN H, WU G M, et al. Advances in the research of warship structural damage due to inner explosion [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(1): 7–16. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2018.01.002.
- [16] BAKER W E. *Explosion in air* [M]. Austin, Texas, US: University of Texas Press, 1973.
- [17] 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.
- [18] 赵亚溥. 断裂力学中的相似方法 [J]. *力学进展*, 1998, 28(3): 323–338. DOI: 10.6052/1000-0992-1998-3-J1998-148.  
ZHAO Y P. Similarity method in fracture mechanics [J]. *Advances in Mechanics*, 1998, 28(3): 323–338. DOI: 10.6052/1000-0992-1998-3-J1998-148.
- [19] NURICK G N, MARTIN J B. Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a reviewpart II: experimental studies [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1989, 8(2): 171–186. DOI: 10.1016/0734-743X(89)90015-8.
- [20] 付跃升, 张庆明. 爆炸荷载作用下弹性薄板的动态响应 [J]. *北京理工大学学报*, 2007, 27(7): 572–575. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2007.07.003.  
FU Y S, ZHANG Q M. Calculating dynamic parameters in elastic thin plates under blast loading [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(7): 572–575. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2007.07.003.
- [21] 吴有生, 彭兴宁, 赵本立. 爆炸荷载作用下舰船板架的变形与破损 [J]. *中国造船*, 1995(4): 55–61.
- [22] 张晓伟, 汪庆桃, 张庆明, 等. 爆炸冲击波作用下混凝土板的载荷等效方法 [J]. *兵工学报*, 2013, 34(3): 263–268. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.03.002.  
ZHANG X W, WANG Q T, ZHANG Q M, et al. Equivalence method for the dynamic loading of concrete slab subjected to explosion [J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(3): 263–268. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.03.002.
- [23] 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讨论会论文集. 太原: 中国力学学会, 2011: 1–10.

(责任编辑 丁峰)