

舱内爆炸角隅冲击波超压特性的数值研究

杨洁¹, 王玉¹, 王文廉², 崔瑞杰¹, 刘源¹

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: 为揭示密闭舱室内爆炸冲击波在不同角隅区域的超压分布特性及其影响因素, 采用实验研究与数值仿真相结合的方法, 对不同结构尺寸和爆炸当量条件下角隅处冲击波超压响应规律进行了系统研究。通过对比实验数据与数值仿真结果, 对仿真模型的可靠性进行了验证, 结果表明超压峰值相对误差为11.14%, 满足工程精度要求, 数值模型能够有效反映密闭空间内冲击波的传播、反射及叠加过程。在此基础上, 分别设计了7种不同结构尺寸比例的舱室模型和7种不同炸药当量的工况, 系统分析了二面角隅和三面角隅区域的冲击波超压特性。研究结果表明, 随着舱室结构尺寸比例的增大, 冲击波在舱内的多次反射与叠加效应减弱, 二面角隅和三面角隅处的超压汇聚能力逐渐降低, 同时壁面角隅高超压区域在整体壁面中所占的相对面积明显减小; 而随着爆炸当量的增加, 舱内冲击波能量显著增强, 壁面角隅区域的影响范围不断扩大, 二面角隅和三面角隅处的超压汇聚效应同步增强, 呈现出更加突出的高超压集中现象。基于量纲分析方法并结合数值仿真结果, 对角隅冲击波超压载荷进行了参数化分析, 建立了壁面角隅冲击波超压的经验计算公式。研究成果可为密闭舱室结构的抗爆设计与安全评估提供理论依据和工程参考。

关键词: 舱内爆炸; 角隅; 结构尺寸; 炸药当量; 数值模拟

中图分类号: O383; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)01-0088-10

Numerical Investigation of Overpressure Characteristics of Shock Waves at Corners Induced by Internal Explosions

YANG Jie¹, WANG Yu¹, WANG Wenlian², CUI Ruijie¹, LIU Yuan¹

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Testing, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To reveal the overpressure distribution characteristics of explosion shock waves in different corner regions of a sealed chamber and to identify their influencing factors, a combined experimental and numerical simulation approach was employed to systematically investigate shock-wave overpressure responses at corners under varying structural dimensions and explosive yield conditions. The reliability of the simulation model was validated by comparing the experimental data with the corresponding numerical simulation results. The results showed that the relative error of the overpressure peak was 11.14%, which satisfied engineering accuracy requirements, indicating that the numerical model can accurately capture the propagation, reflection, and

收稿日期: 2025-05-13

修回日期: 2025-09-19

接受日期: 2025-10-09

基金项目: 山西省应用基础研究项目面上自然基金项目(201803D121069); 山西省重点研发计划资助项目(201803D121069); 中北大学重点实验室开发研究基金资助项目(DXMBJJ2024-04)

作者简介: 杨洁(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为爆炸冲击波超压重建

通信作者: 王玉(1979-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为信号与信息处理、三维重建, E-mail: sxzbwangyu@qq.com

引用格式: 杨洁, 王玉, 王文廉, 等. 舱内爆炸角隅冲击波超压特性的数值研究[J]. 河南科学, 2026, 44(1): 88-97.

Yang J, Wang Y, Wang W L, et al. Numerical investigation of overpressure characteristics of shock waves at corners induced by internal explosions[J]. Henan Science, 2026, 44(1): 88-97.

superposition processes of shock waves within enclosed spaces. On this basis, seven compartment models with different structural size ratios and seven operating conditions with varying explosive yields were designed. The shock-wave overpressure characteristics in both dihedral and trihedral corner regions were systematically analyzed. The results indicated that as the structural size ratio of the chamber increased, multiple shock-wave reflections and superposition effects within the chamber gradually diminished. Consequently, the overpressure convergence capacity at dihedral and trihedral corners decreased, while the relative area occupied by high-overpressure zones at wall corners within the overall wall surface was significantly reduced. In contrast, as the explosive yield increased, the shock-wave energy within the compartment increased significantly, thereby expanding the influence range of wall corner regions. The overpressure convergence effect at both dihedral and trihedral corners was simultaneously enhanced, exhibiting a more pronounced concentration of high overpressure levels. Based on dimensional analysis and combined with numerical simulation results, a parametric analysis of corner shock-wave overpressure loads was conducted, leading to the development of an empirical formula for calculating wall-corner shock-wave overpressure. These findings provide a theoretical basis and practical engineering references for the blast-resistant design and safety assessment of enclosed compartment structures.

Key words: internal blast; corner; structural dimensions; explosive equivalent; numerical simulation

0 引言

随着反舰导弹性能的大幅度提升,各种性能的导弹已经成为主要破坏武器^[1]。反舰导弹对船舰的攻击大多数发生在舱室内部,其边界约束对战斗部爆炸毁伤元的影响十分显著^[2]。舱内爆炸属于密闭或者半密闭空间内的爆炸,其过程比自由场爆炸更复杂,并伴随着冲击波在壁面发生的正反射、规则斜反射以及马赫反射等多种复杂现象。尤其是在舱室的角隅区域,不同反射波会相互叠加并汇聚,从而形成极其错综复杂的流场环境^[3-4],进一步增强对舱室结构的破坏。因此,研究舱内角隅汇集反射冲击波载荷特性和传播规律,对舰艇结构防护具有重要意义。

国内外众多学者已广泛研究密闭空间内爆炸冲击波在角隅区域的超压载荷特性及传播规律。Yang等^[5]利用有限元软件LS-DYNA进行数值模拟实验,获得典型舱内测点随时间变化的冲击波超压曲线,仿真结果发现,在舱室角隅处的冲击波超压峰值远高于舱壁中心位置,具体数值是舱壁中心处的几倍。丁阳等^[6]采用数值仿真方法,对内爆载荷作用区域进行划分,构建一个简化的室内爆炸载荷模型,并深入分析爆源所处的长度以及房间尺寸对载荷模型的影响。侯海量等^[7-8]通过典型舱室结构的内爆炸实验研究发现,舱内角隅区域容易发生撕裂失效并伴随显著的大挠度外翻变形。Hu等^[9]利用数值模拟实验,研究密闭空间内壁面及角隅处的冲

击波超压载荷特性,发现顶棚上角隅处的冲击波峰值超压超过其中心位置的两倍,并提出了以载荷密度函数表示的准静态超压与冲击波持续时间的关系,揭示了冲击波在密闭空间壁面上的显著载荷效应,从而影响结构的动态响应及破坏模式。

本文结合实验数据和数值仿真方法,探讨了不同角隅位置的超压载荷特性。以往研究未系统分析结构尺寸和炸药当量变化对角隅区域及超压分布的影响,本文对此进行了详细研究。通过考虑不同舱室结构比例和炸药当量,细致划分角隅区域,并总结了超压载荷分布规律。此外,本文还总结了两种方法的经验公式,为密闭舱室内爆炸超压载荷的优化设计提供了理论依据和工程参考。

1 舱室内爆炸实验研究

1.1 实验装置

搭建 $1.5\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的实验舱室,实验舱室采用透明箱体,舱室如图1所示,在舱室壁面上开孔并安装传感器。



图1 实验舱室

Fig.1 Experimental chamber

实验采用一种基于爆炸丝的电爆炸冲击波实验系统,爆炸丝材料为铜丝,将爆炸丝放于舱室中心处,爆炸物为球形,其引爆方式为电爆炸。在舱室壁面布置8个压力测点,如图2所示。

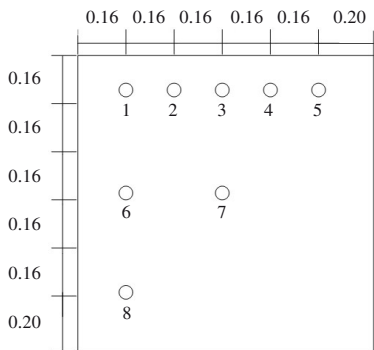


图2 测点传感器布置(单位:m)
Fig.2 Layout of measuring-point sensors

1.2 实验结果与分析

通过实验内爆炸得到8个测点的冲击波超压数据。表1列出8个测点冲击波首次冲击时的超压峰值。

表1 测点峰值超压

Tab.1 Peak overpressure at measuring points	
测点	超压峰值/MPa
1	0.010 86
2	0.011 82
3	0.010 99
4	0.011 05
5	0.009 87
6	0.011 73
7	0.013 13
8	0.010 21

2 舱室内爆炸数值模拟与验证

现有实验数据尚不充分,不足以全面揭示舱内爆炸冲击波超压载荷在角隅区域的分布特性及其反射与汇聚规律。因此,开展舱室内爆炸冲击波的数值模拟仿真实验显得尤为重要。数值模拟可精确捕捉冲击波在角隅区域的动态响应过程,为深入分析其传播、反射及汇聚特性提供可靠的数据支撑和理论依据。

2.1 设置模型参数

本文采用 AutoDyn 有限元软件,对密闭舱内爆炸进行仿真模拟。为了保证数值仿真的正确性,对仿真结果与实验结果进行误差分析。按照实验舱室建立 1:1 三维对称舱室模型,并采用几何中心起爆方法进行内爆炸实验^[10],模型尺寸为 1.5 m×1 m×1 m,模型网格尺寸为 5 mm×5 mm×5 mm。

空气状态采用理想气体(idealgas)状态方程,该方程基于波义耳定律和盖-吕萨克定律,可有效描述气体在不同运动状态下的参数变化。其状态方程如下^[11]:

$$P=(\gamma-1)\frac{\rho}{\rho_0}E_0, \tag{1}$$

其中: P 为大气压强,MPa; γ 为绝热指数; ρ 为膨胀或压缩后的空气密度, kg/m^3 ; ρ_0 为空气的初始密度, kg/m^3 ; E_0 为空气的初始比内能, J/kg 。空气参数如表2所示。

表2 空气材料参数

Tab.2 Material parameters of air				
参数	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	绝热指数	参考温度/K	比热容/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
数值	1.225	1.4	288.2	717.6

模型计算冲击波超压时,在距装药不同距离的位置设置刚性壁^[12];模型采用 TNT 炸药,其形状为球形,炸药采用的方程为 JWL 状态方程,方程形式如下^[13]:

$$p=A_1(1-\frac{\omega}{R_1V})e^{-R_1V}+B_1(1-\frac{\omega}{R_2V})e^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V}, \tag{2}$$

其中: p 为爆轰压力; V 为炸药相对体积; E 是单位体积炸药的初始内能; A_1 、 B_1 、 R_1 、 R_2 、 ω 均为炸药所采用的状态方程参数。炸药的各个材料参数如表3所示,其中 D 为炸药的爆炸速度, P_g 为爆炸压强。

为提高模拟精确度,并减少因三维模型离散化而产生的大量计算单元,从而优化计算,采用 AutoDyn 模拟初期爆炸冲击波传播过程,模拟实验中采用多物质 Euler^[14]算法,并利用 Remap 技术将一维数值仿真结果映射到三维仿真模型中,以进行爆炸模拟^[15]。

图3(a)展示了一维冲击波超压云图,而

表3 炸药材料参数

Tab.3 Material parameters of the explosive									
参数	A_1/MPa	B_1/MPa	R_1	R_2	ω	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$E/(\text{J}\cdot\text{m}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	P_g/MPa
数值	373 770	3.747	4.15	0.9	0.35	1630	2.5×10^{10}	6930	21 000

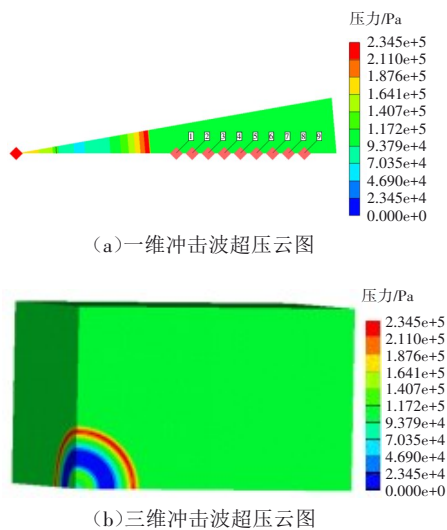


图3 冲击波映射云图

Fig.3 Cloud map of shock-wave mapping

图3(b)则为三维冲击波超压云图,该图是在Remap技术的支持下,由一维模拟结果映射至三维模型后得到的,从而实现了更直观的冲击波传播特性可视化。

2.2 数值仿真验证

为了验证所提出的数值模拟模型的正确性,对实验的工况进行1:1数值仿真,同时对实验数据和仿真结果进行误差分析,验证所建模型的准确性。实验数据与仿真模型结果误差分析如表4所示。

表4 冲击波超压载荷误差评估表

Tab.4 Error evaluation of shock-wave overpressure loads

测点	实验值/MPa	仿真值/MPa	误差/%
1	0.010 86	0.010 78	-0.74
2	0.011 82	0.011 45	-3.13
3	0.010 99	0.011 70	6.46
4	0.011 05	0.011 54	4.43
5	0.009 87	0.010 97	11.14
6	0.011 73	0.011 70	-0.26
7	0.013 13	0.012 83	-2.28
8	0.010 21	0.010 97	7.44

计算结果显示,仿真模型的数值结果与实验结果的最大误差为11.14%,相对误差分析充分验证了该数值仿真方法的准确性和可靠性,为后续深入研究角隅冲击波超压特性提供了可靠的基础。

3 角隅汇聚反射冲击波分析

3.1 冲击波传播可视图

图4为在密闭舱室环境中炸药爆炸所引发的冲

击波超压传播过程,由于炸药位于舱室的中心位置,爆炸发生后,瞬间释放出大量的能量,形成高温高压的气体,并在舱室内以三维对称的方式向外扩散。

如图4(a)所示,当冲击波首次到达壁面时,产生正反射,随后舱室内的其他壁面依次受到冲击波的影响,形成规则斜反射和马赫反射。如图4(b)所示,冲击波的传播受到壁面的抑制,不规则反射进一步增强了马赫波效应,从图中可以看出不同壁面受到冲击波的影响程度各异。如图4(c)所示,由于壁面对冲击波传播的约束作用,冲击波超压峰值升高,并在两面墙的交界处形成超压汇聚现象。如图4(d)所示,当冲击波传播至三面角隅位置时,其向顶点传播并发生更强的反射汇聚,导致三面角隅处的超压值达到最大。

舱室内爆炸冲击波的传播过程受限于舱室的几何形状、舱壁的材料特性以及内部结构的布置。AutoDyn 仿真不仅可以清晰展示这一传播过程,还能帮助分析不同工况下舱室内部的冲击波特性。

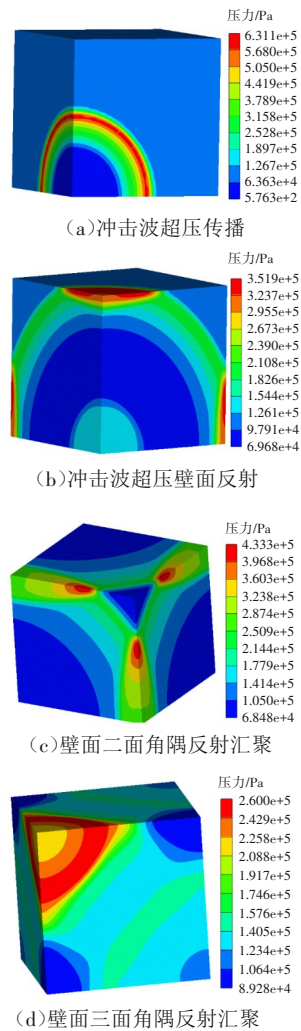


图4 内爆炸超压云图

Fig.4 Overpressure contour map of internal explosion

3.2 舱壁角隅冲击波超压载荷特性

为了研究不同角隅位置下的冲击波超压载荷特性,在舱室壁面上布置测点。图5展示了模型壁面测点的布置情况,测点的空间坐标详见表5。

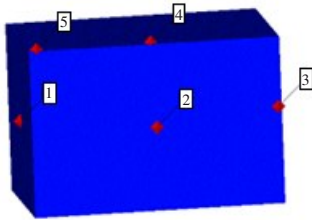


图5 测点位置图
Fig.5 Location of measuring points

表5 测点空间坐标

Tab.5 Spatial coordinates of measuring points

测点名称	<i>x</i> /m	<i>y</i> /m	<i>z</i> /m
1	0	0.500	0.50
2	0.750	0	0.50
3	1.480	0	0.58
4	0.738	0.065	1
5	0.050	0.050	1

测点1至测点5的冲击波超压特征曲线如图6所示。从这些测点的冲击波超压曲线可以看出,密闭舱内的爆炸冲击波载荷特性较自由空间更加复杂,且不同测点的超压峰值和衰减规律存在明显差异。根据冲击波超压曲线分析,密闭舱内的爆炸冲击波载荷比自由空间更为复杂。这是因为在密闭舱内,冲击波受到舱壁的约束,在壁面上发生多次反射

和聚集,导致冲击作用增强,从而对舱室结构产生更显著的影响。

根据图6中所展示的曲线,分析5个测点的超压曲线特性得出以下结论:测点1与测点2远离角隅,受冲击波反射汇聚影响较小,因此其冲击波超压曲线呈现出清晰的单峰值特征,即超压值达到峰值后逐渐衰减;相比之下,测点3和测点4更靠近二面角隅,二面角隅处的冲击波超压反射与汇聚效应比远离角隅处更显著,因此其超压曲线在首个峰值尚未完全衰减之前,会迅速出现一个幅值不同的第二个峰值,其超压曲线具有双峰值结构;测点5靠近三面角隅,受到更为强烈的反射汇聚的影响,其超压曲线在首个峰值未衰减之前,又出现多个幅值各异的超压峰值^[16]。综上所述,由于不同测点与角隅的相对位置不同,受到的冲击波反射能力不同,导致其冲击波超压曲线呈现出不同的特征。

4 角隅及壁面冲击波超压载荷特性

4.1 结构尺寸与炸药当量的数值研究

通过研究不同角隅位置的超压特性,来探讨不同结构尺寸对壁面角隅区域划分的影响。仿真模型的高度和宽度均为1 m,并采用与实验当量相同的TNT炸药。通过改变舱室的长度,系统分析不同尺寸模型下角隅区域的划分情况。本研究设计了7种不同长度的舱室模型隅区域的划分情况。舱室模型长度分别为1、1.2、1.4、1.5、1.6、1.8、2 m,旨在通过数值模拟深入分析不同尺寸变化对壁面角隅区域划分

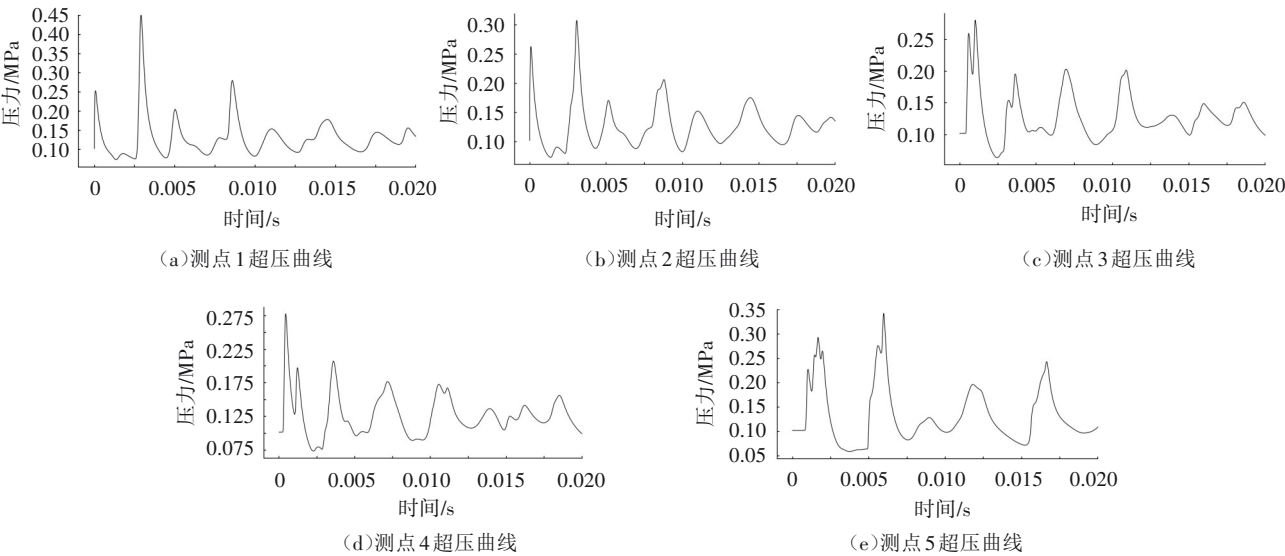


图6 测点超压曲线

Fig.6 Overpressure curves at measuring points

的影响。

基于二面角隅超压特性的双峰值特征与三面角隅超压特性的多峰值特征,对壁面测点的曲线特性进行了深入分析。利用模型的对称性,取舱室模型壁面的四分之一布置测点,来判定壁面角隅区域的具体范围。在近角隅的位置处测点分布密集,两个测点之间的距离为2 cm,在远离角隅区域测点分布松散,两个测点之间的距离为5 cm。为具体说明,以长度为1.5 m的模型为例,选取图7所展示的角隅区域测点位置进行详细探讨。

通过观察图8,可以清晰识别出长度为1.5 m的模型下的壁面角隅区域范围。对不同长度的舱室模型进行系统分析后发现,随着模型长度的降低,壁面角隅区域的范围呈现扩大的趋势。这一发现表明,模型长度的变化对壁面角隅区域的范围有着直接且显著的影响。

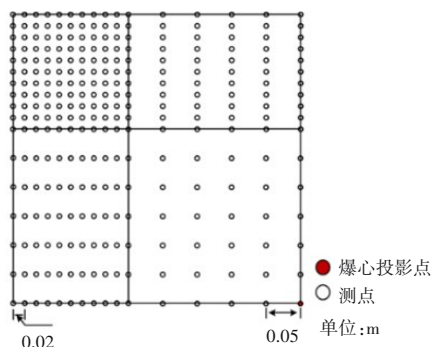


图7 模型测点布置

Fig.7 Layout of measuring points in the model

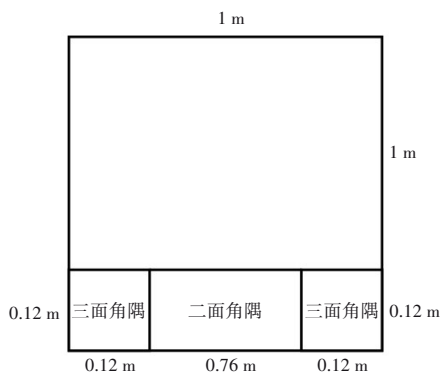


图8 壁面角隅区域范围图

Fig.8 Extent of wall corner regions

在分析了不同尺寸对壁面角隅区域范围的影响后,进一步探讨装药当量对壁面角隅区域的影响。在尺寸为1.5 m×1 m×1 m的舱室工况下,通过一系列炸药当量实验,来研究其对壁面角隅区域的影响。

分别建立炸药当量为0.5、1、3、5、8、10、15 g的

舱室模型,并依据前述角隅超压特性系统分析壁面角隅区域的变化。实验结果表明,随着炸药当量的增大,壁面二面角隅和三面角隅的作用范围均呈现逐渐扩大的趋势。

通过对舱室尺寸和炸药当量这两个关键因素的系统研究,深入揭示了壁面角隅区域的变化规律。综合分析得出了以下结论:当舱室模型的长度降低时,壁面角隅区域的范围相应扩大;随着炸药当量的增加,壁面二面角隅和三面角隅的作用范围也会逐渐扩大。

4.2 角隅冲击波载荷经验计算公式

4.2.1 结构尺寸

影响角隅反射冲击波超压峰值的主要参数包括以下几个方面。

炸药参数:炸药当量 w ,炸药密度 ρ_0 ,单位质量炸药释放的能量 E 。

空气参数:空气初始压强 P ,绝热指数 γ ,空气的初始密度 ρ_a ,空气的初始比内能 E_0 。

舱室尺寸参数:舱室的长为 X ,舱室宽 L 为1 m,舱室高 H 为1 m,爆心位置 $(X/2, 0.5, 0.5)$,测点位置 $(X, Y, Z), (X_1, Y_2, Z_3)$ 为测点与爆心的位置距离。

壁面冲击波超压可以由以上参数进行函数表示,其函数^[15]为:

$$\Delta p = f(w, E, \rho_0, P, \gamma, \rho_a, E_0, H, L, X, X_1, Y_2, Z_3)。 \quad (3)$$

本文选择 w, E, ρ_a, L, H 为基础量,对式(3)进行量纲归一化^[17],可得到如下归一化函数:

$$\frac{\Delta p}{P} = K \left(\frac{wE}{PHLX} \right)^{\alpha_1} \left(\frac{X_1}{X} \right)^{\alpha_2} \left(\frac{Y_2}{L} \right)^{\alpha_3} \left(\frac{Z_3}{H} \right)^{\alpha_4}, \quad (4)$$

式中: $K, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为未知参数, w, E, P, X_1, Y_2, Z_3 为已知参数。

基于数值模拟的结果拟合出了一个公式,用于计算舱室长度与壁面二面角隅处冲击波超压首次峰值之间的函数关系。关系式如下所示:

$$\frac{\Delta p}{P} = 0.498 \left(\frac{wE}{PHLX} \right)^{0.107} \left(\frac{X_1}{X} \right)^{0.023} \left(\frac{Y_2}{L} \right)^{0.183} \left(\frac{Z_3}{H} \right)^{-0.235}。 \quad (5)$$

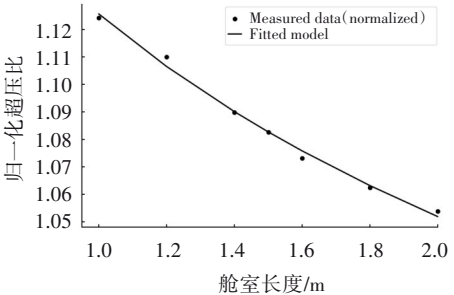
基于数值模拟的结果,通过拟合回归方法得出了舱室长度与壁面三面角隅处冲击波超压首次峰值之间的函数关系式:

$$\frac{\Delta p}{P} = 0.362 \left(\frac{wE}{PHLX} \right)^{0.189} \left(\frac{X_1}{X} \right)^{-0.106} \left(\frac{Y_2}{L} \right)^{0.283} \left(\frac{Z_3}{H} \right)^{-0.135}。 \quad (6)$$

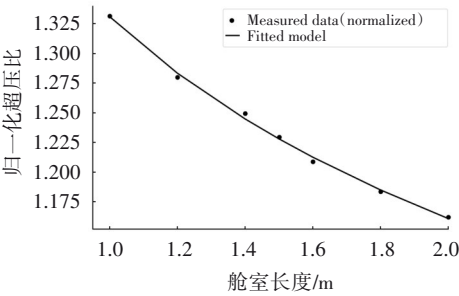
仿真炸药的当量与实验当量相同,均为0.000 094 kg,

图9分别展示了在不同舱室长度条件下,壁面二面角隅和三面角隅处的超压峰值数值模拟结果与拟合函数的对比情况。结果可以观察到,随着舱室长度的逐渐增加,舱室内部的超压分布特征发生了显著变化。具体而言,在相同的壁面位置,超压峰值呈现出明显的减小趋势。这一现象表明,随着舱室长度的增加,冲击波在传播过程中逐渐衰减,能量逐步耗散,使得最终作用在壁面角隅处的超压强度降低。

从拟合函数与数值模拟结果的误差对比来看,两者在不同长度下的误差均不超过±1%.如表6和表7所示,说明所选拟合函数能够较好地反映舱室长度变化对壁面超压峰值的影响规律。



(a)二面角隅数值模型与拟合结果



(b)三面角隅数值模型与拟合结果

图9 角隅区域数值模拟与拟合模型结果

Fig.9 Comparison between numerical simulation and fitting model results in corner regions

表6 二面角隅超压数值与拟合结果误差

Tab.6 Errors between numerical and fitted overpressure values at dihedral corners

w/kg	X/m	模拟数值/($\Delta p/P$)	拟合数值/($\Delta p/P$)	误差/%
0.000 094	1.0	1.124	1.125	0.09
	1.2	1.110	1.106	-0.36
	1.4	1.089	1.090	0.09
	1.5	1.083	1.082	-0.09
	1.6	1.073	1.076	0.28
	1.8	1.062	1.063	0.09
	2.0	1.055	1.055	0.00

表7 三面角隅超压数值与拟合结果误差

Tab.7 Errors between numerical and fitted overpressure values at trihedral corners

w/kg	X/m	模拟数值/($\Delta p/P$)	拟合数值/($\Delta p/P$)	误差/%
0.000 094	1.0	1.332	1.330	-0.15
	1.2	1.280	1.283	0.23
	1.4	1.250	1.245	-0.40
	1.5	1.230	1.228	-0.16
	1.6	1.208	1.213	0.41
	1.8	1.183 8	1.185	0.10
	2.0	1.158	1.158	0.00

4.2.2 炸药当量

前文中已对结构尺寸与超压峰值之间的关系进行了分析。接下来将进一步探讨炸药当量与超压峰值之间的关系,并采用萨道夫斯基公式进行数据拟合,以揭示其内在规律和影响机制,从而更准确地描述炸药当量对超压峰值的影响趋势。炸药当量采取递增的方式^[18],其公式为:

$$\Delta p = k \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R} \right)^n,$$

(7)

式中: w 为炸药当量,kg; R 为爆源与测点间的距离,m; Δp 为超压峰值,MPa。根据数值模拟结果拟合得到炸药当量与壁面二面角隅冲击波超压首次峰值的函数计算公式:

$$\Delta p = 11.530 8 \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R} \right)^{2.195 0}。$$

(8)

基于数值模拟的结果,通过拟合回归方法得出了炸药当量与壁面三面角隅处冲击波超压首次峰值之间的函数关系式:

$$\Delta p = 30.993 6 \left(\frac{\sqrt[3]{w}}{R} \right)^{2.016 1}。$$

(9)

图10展示了在不同炸药当量条件下,二面角隅和三面角隅处的冲击波超压峰值数值模拟结果与拟合函数的对比情况。从图中可以观察到,随着炸药当量的逐渐增加,同一壁面角隅位置处的超压峰值呈现增加趋势。

根据误差对比分析,发现两者在不同炸药当量下的误差范围均保持在±7%以内,具体数据参见表8和表9。这一结果表明,所选的拟合函数能够较为准确地捕捉和反映炸药当量变化对壁面角隅冲击波超压峰值的影响趋势,具有良好的拟合效果。

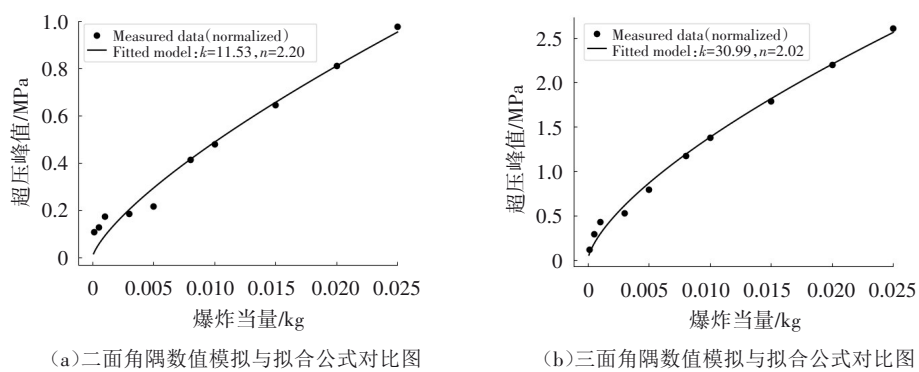


图10 角隅区域数值模拟与拟合模型结果对比
Fig.10 Comparison of numerical simulation and fitting model results in corner regions

表8 二面角隅超压特征的数值模拟与拟合结果比较

Tab.8 Comparison of numerical simulation and fitting results for overpressure characteristics at dihedral corners

R/m	w/kg	模拟数值/MPa	拟合数值/MPa	误差/%
0.910	0.000 5	0.130	0.137	5.38
	0.001	0.176	0.179	1.71
	0.005	0.219	0.220	-0.46
	0.008	0.416	0.417	0.24
	0.010	0.481	0.487	1.25
	0.015	0.647	0.657	1.55
	0.020	0.812	0.813	0.12

表9 三面角隅超压特征的数值模拟与拟合结果比较

Tab.9 Comparison of numerical simulation and fitting results for overpressure characteristics at trihedral corners

R/m	w/kg	模拟数值/MPa	拟合数值/MPa	误差/%
1.006 9	0.000 094	0.124	0.120	-3.23
	0.008	1.181	1.198	1.44
	0.010	1.384	1.391	0.51
	0.015	1.792	1.822	1.67
	0.020	2.199	2.217	0.82
	0.025	2.601	2.566	-1.35

为了更全面地分析舱室长度与炸药当量对壁面上二面角隅和三面角隅冲击波超压峰值的影响,将两个参数结合起来,建立三维拟合模型,以便在不同的工况条件下对壁面冲击波超压载荷进行准确预测和有效分析。

采用量纲归一化方法对模拟数据进行三维拟合分析,考虑炸药当量和舱室结构与冲击波超压峰值之间的函数关系,二面角隅超压峰值拟合函数如下所示:

$$\frac{\Delta p}{P} = 1.1 \left(\frac{wE}{PHLX} \right)^{0.285} \left(\frac{X_1}{X} \right)^{-0.501} \left(\frac{Y_2}{L} \right)^{0.199} \left(\frac{Z_3}{H} \right)^{5.49} \quad (10)$$

三面角隅超压峰值拟合函数如下所示:

$$\frac{\Delta p}{P} = 0.99 \left(\frac{wE}{PHLX} \right)^{0.94} \left(\frac{X_1}{X} \right)^{-0.50} \left(\frac{Y_2}{L} \right)^{0.199} \left(\frac{Z_3}{H} \right)^{16.608} \quad (11)$$

图11分别展示了在不同炸药当量以及不同舱室长度下,二面角隅和三面角隅处的超压峰值数值模拟结果与拟合函数的对比情况。

在上述两幅图中,通过分析拟合曲面的整体走

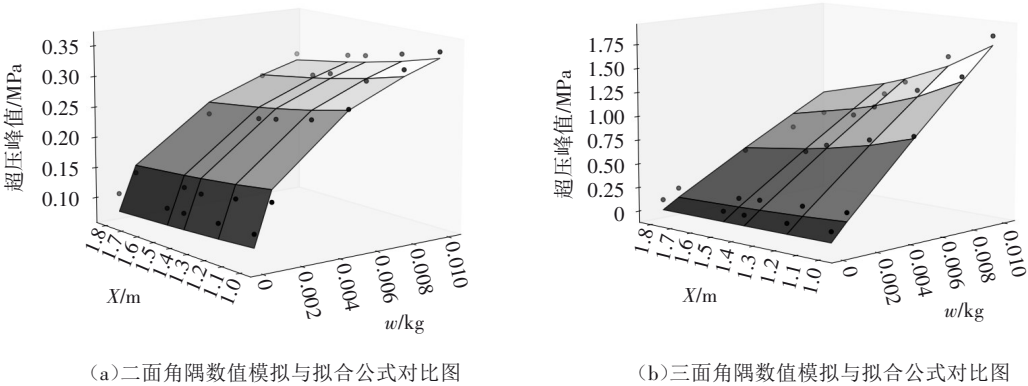


图11 角隅数值模拟与拟合公式对比图

Fig.11 Comparison of numerical simulation results and fitted formula predictions in corner regions

势可以发现,其变化趋势较为陡峭,尤其是在炸药当量较大且舱室长度较短的范围内,超压峰值随着这两个参数的增加而显著升高。这一现象表明,在此条件下,爆炸冲击波的超压分布更加集中,压力峰值较为突出,冲击波在有限空间内的传播特性更为剧烈。

相较之下,在炸药当量较小的区域,拟合曲面整体较为平缓,曲面的变化趋势也较为稳定。这说明在较小炸药当量条件下,舱室长度对超压峰值的影响相对较弱,即使舱室长度发生变化,超压峰值的波动幅度也较小。

根据拟合函数与数值模拟结果的误差对比分析发现,误差范围均保持在±10%以内,具体数据参见表10。这一结果表明,所选的拟合函数能够较为准确地捕捉和反映炸药当量和舱室长度变化对壁面角隅冲击波超压峰值的影响趋势,具有良好的拟合效果。

表 10 角隅数值结果与拟合结果对比

Tab.10 Comparison between numerical and fitted results in corner regions

<i>w</i> /kg	<i>X</i> /m	模拟数值/MPa	拟合数值/MPa	误差/%
0.001	1.8	0.138	0.150	8.70
0.005	1.4	0.238	0.255	7.14
0.01	1.0	0.353	0.342	-3.12
0.005	1.2	0.818	0.760	-7.09
0.008	1.5	0.893	0.959	7.39
0.010	1.0	1.830	1.732	-5.36

5 结论

通过在不同舱室长度和装药当量条件下的爆炸模拟实验,重点分析了远离角隅、二面角隅及三面角隅区域的冲击波超压特性。并利用数值仿真实验对各角隅位置的超压载荷进行了分析,得到不同尺寸结构和炸药当量对壁面角隅范围的影响;通过量纲归一化和经验公式得到不同角隅处的超压峰值公式。基于本文的研究,得出以下结论。

1)在远离角隅区域,冲击波超压曲线特征表现为单一且较大的峰值;在二面角隅区域,由于冲击波超压在两壁面发生反射,超压曲线呈现双峰值结构;在三面角隅区域,冲击波经历多次复杂的反射与叠加,过程导致超压曲线呈现明显的多峰值结构。

2)舱室结构和炸药当量都会对舱室内爆炸冲击波产生显著影响。炸药当量的增加,会直接导致爆炸释放的能量增加,使舱室壁面角隅区域范围逐渐扩大。此外当舱室模型长度减小时,冲击波的传播

空间受到限制,进一步导致冲击波在传播过程中的反射效应增强,使得舱室壁面角隅区域的超压范围扩大。

3)在给定条件下,通过量纲分析方法,结合数值模拟结果拟合推导出舱壁二面角隅和三面角隅冲击波的超压载荷计算公式,建立了舱室壁面角隅冲击波的超压峰值与炸药参数、空气参数和舱室尺寸的数学关系。

4)在舱室结构尺寸保持不变的条件下,采用萨道夫斯基公式来拟合炸药当量与壁面角隅冲击波超压峰值之间的函数关系。结合数值模拟的结果,进一步推导出了炸药当量变化时壁面角隅冲击波超压峰值的载荷计算公式。

参考文献:

[1] 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.

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.

[2] 习修义,李俊,张娅,等. 水雾环境下密闭舱室内爆准静态压力特性试验研究[J]. 中国舰船研究,2024,19(3): 174-181.

Xi X Y,Li J,Zhang Y,et al. Experimental investigation of quasi-static pressure characteristics of the confined cabin in the water mist environment[J]. Chinese Journal of Ship Research,2024,19(3):174-181.

[3] 徐景林,顾文彬,刘建青,等. 圆柱形爆炸容器内爆炸载荷的分布规律[J]. 振动与冲击,2020,39(18):276-282.

Xu J L,Gu W B,Liu J Q,et al. Distribution of blast loading in cylindrical explosive containment vessels[J]. Journal of Vibration and Shock,2020,39(18):276-282.

[4] 庞崇安,王震. 立式柱形钢储罐内部爆炸数值模拟及动力响应分析[J]. 爆破,2015,32(2):54-58.

Pang C A,Wang Z. Numerical simulation of internal explosion and dynamic response analysis for vertical cylindrical steel tanks[J]. Blasting,2015,32(2):54-58.

[5] Yang F,He L,Liu X,et al. Numerical simulation of explosion in a confined box-shaped structure[J]. Advanced Materials Research,2013,671/672/673/674:3204-3207.

[6] 丁阳,陈晔,师燕超. 室内爆炸超压荷载简化模型[J]. 工程力学,2015,32(3):119-125.

Ding Y,Chen Y,Shi Y C. Simplified model of overpressure loading caused by internal blast[J]. Engineering Mechanics,2015,32(3):119-125.

- [7] 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.
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.
- [8] 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.
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.
- [9] 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.
- [10] 陈青华,姜月秋,艾宁,等. 舱室内爆角隅处冲击波汇聚效应研究[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(11): 126-132.
Chen Q H, Jiang Y Q, Ai N, et al. Study on the impact wave convergence effect at the explosive corner of the chamber[J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(11): 126-132.
- [11] 杜桂云. 爆炸冲击波超压场重建方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2024.
Du G Y. Study on reconstruction method of explosion shock wave overpressure field[D]. Taiyuan: North University of China, 2024.
- [12] 严泽臣,岳松林,邱艳宇,等. 水下爆炸冲击波反射压力计算方法的改进[J]. 兵工学报, 2024, 45(4): 1196-1207.
Yan Z C, Yue S L, Qiu Y Y, et al. Improvement on the calculation method for reflected pressure of shock wave in underwater explosion[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(4): 1196-1207.
- [13] 张明明,张连生,王鑫. TNT内爆准静态压力实验和数值模拟研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(5): 195-199.
Zhang M M, Zhang L S, Wang X. Quasi-static pressure experiment and numerical simulation of TNT internal explosion[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(5): 195-199.
- [14] Feldgun V R, Karinski Y S, Edri I, et al. On blast pressure analysis due to a partially confined explosion: II. numerical studies[J]. International Journal of Protective Structures, 2012, 3(1): 61-79.
- [15] 刘博文,龙仁荣,张庆明,等. 舱内爆炸角隅汇聚反射冲击波超压特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(1): 35-51.
Liu B W, Long R R, Zhang Q M, et al. Study on the corner overpressure characteristics of concentrated reflected shock wave due to internal blast in cabin[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(1): 35-51.
- [16] 熊展,巨圆圆,张春辉,等. 舱内爆炸冲击波载荷特性试验研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(22): 8-12.
Xiong Z, Ju Y Y, Zhang C H, et al. Experimental research on loading characteristics of blast shock wave in cabin[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(22): 8-12.
- [17] 钟巍,田宙,寿列枫,等. 基于量纲分析的爆炸冲击波作用后钢化玻璃碎片质量分布规律研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(7): 1323-1332.
Zhong W, Tian Z, Shou L F, et al. Study of the fragment mass distribution of tempered glasses subjected to blast shock waves based on dimensional analysis [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(7): 1323-1332.
- [18] 连赟猛,方道红,顾晓辉,等. 典型密闭装置内爆炸尺寸效应研究[J]. 爆破器材, 2012, 41(5): 1-4.
Lian Y M, Fang D H, Gu X H, et al. Effect of scales on typical closed structure due to internal explosion[J]. Explosive Materials, 2012, 41(5): 1-4.

(编辑 康 艳)