

引用格式: 周沪, 孔祥韶, 罗峰, 等. 基于结构响应的舱室内爆 TNT 等效方法 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(3): 86–95.

ZHOU H, KONG X S, LUO F, et al. TNT equivalency method in confined cabin based on structural response[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(3): 86–95 (in both Chinese and English).

基于结构响应的舱室内爆 TNT 等效方法



扫码阅读全文

周沪^{1,2}, 孔祥韶¹, 罗峰^{1,2}, 曹宇航^{1,2}, 郑成¹, 吴卫国¹

1 武汉理工大学 绿色智能江海直达船舶与邮轮游艇研究中心, 湖北 武汉 430063

2 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063

摘要: [目的] 旨在揭示爆轰产物后燃烧效应对封闭空间中爆炸载荷的影响规律。[方法] 通过往封闭舱室中充入氮气来抑制爆轰产物燃烧, 开展在空气和氮气两种不同气体环境下封闭舱室内 TNT 爆炸响应试验, 记录温度、压力变化历程和靶板中心点残余挠度, 建立基于无量纲载荷参数的靶板变形与炸药释放能量之间的关系, 并提出考虑后燃烧效应的封闭空间 TNT 等效方法。[结果] 结果发现, 由于爆轰产物燃烧能量释放量不同, 在氮气环境中, 封闭空间内爆炸压力、温度和靶板动态响应明显低于空气环境。内爆载荷分析需计入 TNT 爆炸产物燃烧释放的能量及其增强效应。[结论] 与现有基于准静态压力的 TNT 当量计算方法进行的比较表明, 所提基于结构响应的舱室内爆 TNT 等效方法具有合理性和良好的适用性。

关键词: 封闭爆炸载荷; 后燃烧效应; TNT 当量

中图分类号: U674.7

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03484

TNT equivalency method in confined cabin based on structural response

ZHOU Hu^{1,2}, KONG Xiangshao¹, LUO Feng^{1,2}, CAO Yuhang^{1,2}, ZHENG Cheng¹, WU Weiguo¹

1 Green & Smart River-Sea-Going Ship, Cruise and Yacht Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

2 School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

Abstract: [Objective] This paper aims to reveal the influence of the afterburning effect of explosive materials in confined space explosion. [Methods] A series of TNT blast tests are performed in a confined cabin filled with two different atmospheres, air and nitrogen. The temperature, pressure-time histories and deflection of the blast-loaded steel plate are recorded. The relationship between the deformation of the target plate and the energy released by the explosive is established. On this basis, a TNT equivalent method is proposed which takes into account the afterburning effect in a confined cabin. [Results] The pressure, temperature and dynamic response of the target plate are significantly lower in the nitrogen environment than in the air environment due to the difference in the amount of energy released by the combustion of the explosive material. Thus, the energy released by the burning of TNT explosive materials and their enhancement effects should be considered in blast load analysis. [Conclusion] The validity and applicability of the method are illustrated through a comparison with the existing TNT equivalent method based on quasi-static pressure.

Key words: confined blast load; afterburning effect; TNT equivalency

0 引言

TNT 当量是一个被广泛接受的工程概念, 并

在相关领域普遍应用。TNT 当量由 TNT 质量与其他类型爆炸物的质量比计算得出。采用 TNT 作为参考物, 不仅因为其具备运输安全、相对便

收稿日期: 2023-08-01 修回日期: 2023-10-30 网络首发时间: 2024-05-06 12:02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52171318, 12202329); 装备预研教育部联合基金资助项目(8091B022105)

作者简介: 周沪, 男, 1994 年生, 博士生。研究方向: 舰船毁伤与防护。E-mail: zhouhu@whut.edu.cn

孔祥韶, 男, 1983 年生, 博士, 教授。研究方向: 舰船毁伤与防护。E-mail: kongxs@whut.edu.cn

*通信作者: 孔祥韶

宜、性质稳定等特点;更重要的是在早期研究中,基于 TNT 总结了大量的经验公式^[1-2]并被广泛应用。TNT 等效则能够将其他炸药的爆炸效果与 TNT 进行快速的等效换算,而不需要开展额外的试验评估。

Held^[3]提出了等效重量系数(EWF)的概念,即 TNT 的质量与产生相同超压峰值或相同比例冲量的炸药质量的比值。同时指出,由于指标换算过程中存在很大的不确定性,基于超压峰值或比例冲量的 TNT 当量计算在实际应用中存在误差。然而,由于其形式简单且便于使用,仍然被广泛用于各种规范中,如国际弹药技术准则(international ammunition technical guideline, IATG)^[4]。de Yong 等^[5]进一步研究了不同类型炸药的等效重量系数与比例距离的关系,发现 EWF 与比例距离之间存在明显的函数关系,这意味着对于一种炸药而言,单一的 EWF 难以被普遍应用。另一方面,Cooper^[6]提出了一种基于 Chapman-Jouguet 方程参数的等效方法。Jeremić等^[7]也提出了一种基于爆炸过程特征参数的 TNT 等效方法,包括爆炸速度、压力、爆炸能量和爆炸产物中的气体摩尔数。Xiao 等^[8]通过数值仿真方法进行曲线拟合,针对自由场以及近场爆炸,分别获得了基于超压峰值和冲量的 TNT 当量系数。采用该方法计算近场和远场的 TNT 当量时,发现在近场爆炸中,TNT 当量与比例距离有关;远场爆炸中 TNT 当量为常数,与比例距离无关^[9]。TNT 当量计算的影响因素众多^[10-13],如爆炸环境、距离、炸药形状和起爆位置等^[14-15]。而对于带壳弹爆炸的 TNT 当量,Grisaro 等^[16]研究发现壳体质量是影响冲击波的主要因素。

然而,这些研究都是针对炸药在自由空气中爆炸开展的。当爆炸发生在封闭空间内时,室内空间的限制会影响冲击波的传播和演化过程,特别是对于 TNT 这种富燃料炸药,爆炸产物的燃烧增强效应显著。Ornellas^[17]发现,爆轰产物的燃烧效应将对封闭空间内爆炸载荷历程产生不可忽视的影响。Kuhl 等^[18-20]建立了描述 TNT 在封闭空间内爆炸和爆轰产物燃烧的动力学模型。Jin 等^[21-22]针对不同气体环境的封闭爆炸罐中 TNT 爆炸产生的准静态压力开展了研究,通过理论分析和数值计算证明了爆轰产物的燃烧对封闭爆炸中的准静态压力有显著的影响^[23-24]。统一设施标准(unified facilities criteria, UFC)^[25]包含了大量 TNT 在封闭空间爆炸的试验数据,认为 TNT 等效系数是爆热和燃烧热的函数。Edri 等^[26]采用热力学模型建立了封闭空间准静态压力的计算方法,并基于

准静态压力求解得到了 TNT 当量系数。Grisaro 等^[27]将 TNT 当量问题与爆炸载荷结构的动态响应相结合,建立了结构动能上限与炸药能量的关系。随后通过分析结构的动态响应,得出 TNT 当量系数。虽然在研究中忽略了材料的非线性和损伤积累,但提供了一种新的 TNT 等效方法。

虽然近年来开展了一些近场和封闭空间 TNT 当量的研究工作,但主要集中在冲击波的单一标准上,对 TNT 内爆载荷的燃热增强效应考虑不足。本文拟开展封闭空间内 TNT 爆炸载荷与结构响应试验,通过建立结构响应和炸药能量之间的关系,得到封闭空间中基于靶板变形的 TNT 等效方法,并开展对比验证。

1 封闭爆炸载荷试验研究

基于自主研发的试验装置开展爆炸试验,通过气泵将惰性气体(氮气)注入封闭箱体以改变气体环境,探究封闭空间内爆轰产物的燃烧对爆炸载荷的影响。

1.1 试验装置和工况

1.1.1 试验装置

试验装置为两端有开口的方形舱室,通过舱室两侧的夹具将方形靶板固定在开口处形成封闭空间(图 1)。靶板和夹具由 36 个 M16 螺栓连接,内部空间尺寸为 1 800 mm×800 mm×800 mm,详细参数设置与文献[28]相同。热电偶温度传感器(Nanmac C2-7-K-L)和压力传感器(PCB CA102B)布置于封闭箱体的 A 舱壁和 C 舱壁,如图 2 所示。其中压力传感器的测量范围为 0~34.5 MPa,温度传感器的测量范围为 0~1 250 ℃。试验中采用 HBM GEN7t 数采系统以 1 MHz 的频率采集数据。

为了改变封闭空间内部的气体成分,试验还配备了由气罐和浓度检测器组成的气体系统。借助数字图像相关技术(digital image correlation, DIC)系统记录靶板的变形时间历程,该系统由两台高

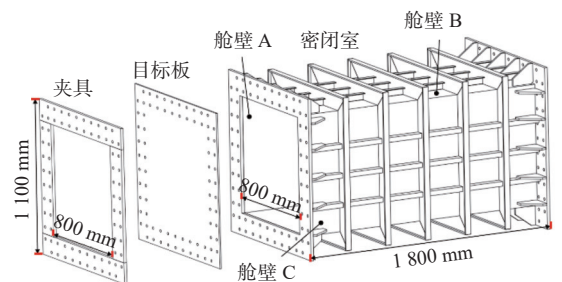


图 1 封闭箱体和方形靶板的示意图

Fig. 1 Schematics of confined chamber and test specimen

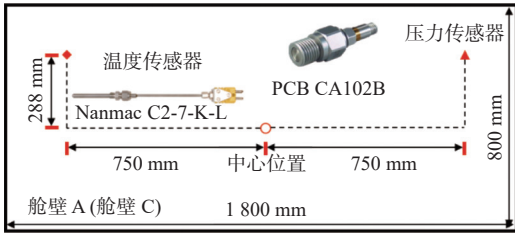


图 2 传感器分布示意图

Fig. 2 Schematics of sensor arrangements

速摄像机组成,可以记录结构在爆炸载荷下的动态响应过程^[29-30]。在本次试验中,高速相机以 960×960 的分辨率和 10000 帧/s的拍摄速率记录变形历程,目标区域(ROI)的尺寸为 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ (四分之一靶板),测试精度达到 0.02 mm 。试验装置和测试系统布置示意如图 3 所示,外场布置如图 4 所示。

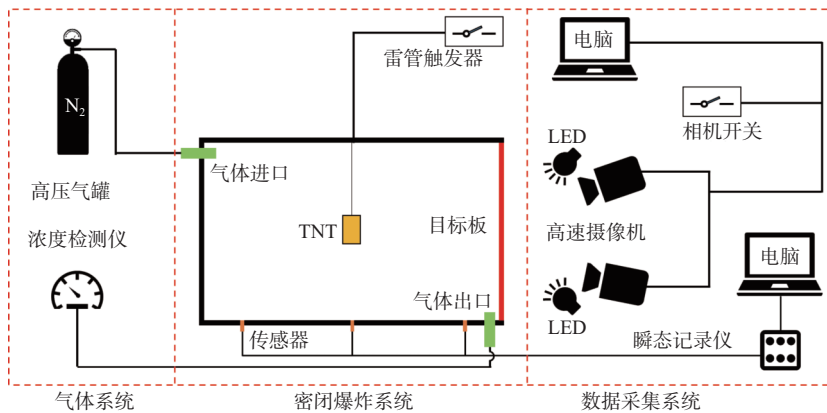


图 3 试验装置和测量系统示意图

Fig. 3 Schematics of test setup and measuring system

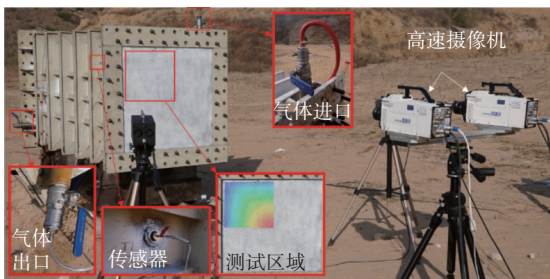


图 4 试验装置现场布置图

Fig. 4 Arrangement of test setup in field tests

1.1.2 试验工况

考虑靶板厚度 h 、装药质量 W 以及氧气含量等变量,设计并开展了 6 个工况的试验,如表 1 所示。TNT 炸药为圆柱形,不同质量 TNT 的几何参数如表 2 所示。每次试验结束后对内部环境进行清理,确保后续试验正常进行。

根据 GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》标准^[31],针对每种厚度的钢板开展了力学性能试验,取 5 个试件的平均

采用氮气作为惰性气体注入封闭箱体中,以降低封闭空间中的氧气含量。如图 3 和图 4 所示,在注入过程中,气体进口和气体出口保持开放,氮气从入口处注入,空气从出口处流出。通过出口处的浓度检测仪检测氧气浓度,当流出气体的氧气浓度稳定在 6% 左右时,关闭气体进口和气体出口,封闭箱体内气体环境达到试验条件。试验前开展了充气过程的预测试,发现当氧气浓度降低到 6% 左右时,即使充入更多的氮气,氧气浓度也不会明显降低。最终认为,目前使用的形成缺氧环境的方法能够达到的最大程度就是 6% 左右的氧气浓度。每次试验过程保证了充气时间以及最终氧气稳定浓度大致相同,以形成不同工况间的对比。

值作为钢板的力学性能参数,如表 3 所示。

表 1 试验工况

Table 1 Load conditions of tests

序号	厚度/mm	药量/g	氧气含量/%
1	3.9	160	21.0
2	3.9	160	5.4
3	4.7	250	21.0
4	4.7	250	6.0
5	5.8	300	21.0
6	5.8	300	6.0

表 2 不同质量 TNT 的几何参数

Table 2 Geometric parameters of TNT

药量/g	高度/mm	直径/mm	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
160	51.58	50.08	1570
250	56.10	60.20	1570
300	67.16	60.10	1570

表3 钢板的力学性能参数

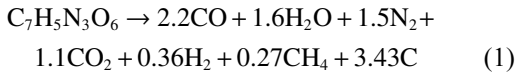
Table 3 Mechanical properties of the steel plates

厚度/mm	杨氏模量/GPa	硬化模量/GPa	屈服强度/MPa	密度/(kg·m ⁻³)
3.9	206	1.06	324	7 850
4.7	206	1.19	341	7 850
5.8	206	1.08	332	7 850

1.2 试验结果和讨论

1.2.1 温度和压力时间历程

在爆炸过程中, TNT 炸药的化学反应过程如下:



反应式中的 C, CO, H₂ 和 CH₄ 可进一步燃烧释放能量, 与爆炸冲击波及反射冲击波发展演化过程耦合, 形成封闭空间内爆炸载荷的燃烧增强效应。表 4 列出了 TNT 炸药典型爆轰产物的燃点以及其与氧气的反应热。除此之外, 后燃烧能量还与封闭空间中的氧气含量有关, 可表示为释放系数 μ ^[26]:

$$\mu = \begin{cases} 1, & \frac{W}{V} < \left(\frac{W}{V}\right)_{\text{lim}} \\ \frac{V}{W\Gamma}, & \frac{W}{V} \geq \left(\frac{W}{V}\right)_{\text{lim}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: W 为 TNT 炸药的装药质量; V 为封闭空间体积; Γ 为 1 kg 炸药完全燃烧所需的空气体积, 即 $1/\Gamma = (W/V)_{\text{lim}} = 0.387 \text{ kg/m}^3$ 。本文涉及的 3 种 TNT 炸药的 W/V 分别为 0.139, 0.217 和 0.260 kg/m^3 , 都小于理论临界值 $(W/V)_{\text{lim}}$ 。理论上, 临界值是一个确定的数值, 即氧气是否足以支撑炸药的所有能量完全释放。在本文空气试验条件下, 氧气足以支持爆炸产物的充分反应, 释放大量能量。

表4 不同爆轰产物的燃点及反应热

Table 4 Ignition temperature of different detonation products

爆轰产物	反应过程	燃点/°C	反应热/(kJ·mol ⁻¹)
C	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	702	393.6
CO	$\text{CO} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	607	282.8
H ₂	$\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	577	241.8
CH ₄	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	577	800.0

热电偶温度传感器记录的测点温度变化过程如图 5 所示。与空气条件下的最高温度相比, 氮气条件下的温度降低了约 38.3%。

图 6 为 160 g TNT 在不同气体环境中爆炸时

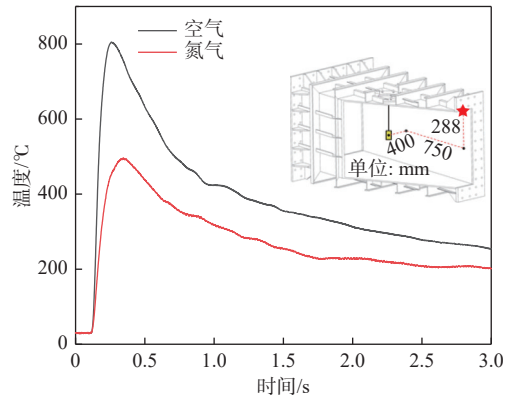


图5 不同气体环境下 160 g TNT 爆炸的温度时程曲线

Fig. 5 Temperature-time histories of 160 g TNT explosion in different atmosphere

测点的压力时程曲线。可以看到, 不同气体环境下的压力时程在初始阶段基本相同, 但在初始冲击波后 2 ms 左右, 出现了不同的反射冲击波。在空气条件下有 3 个超过 1.2 MPa 的瞬时压力峰值, 而在氮气环境中没有类似峰值。主要是由于在 2~6 ms 范围内, 爆轰产物进一步燃烧释放能量。就准静态压力而言, 与空气条件相比, 氮气环境下的准静态压力降低了 46.9% (在本试验中, 准静态压力取为 30~40 ms 范围的平均值)。需要说明的是, 试验中所形成的氮气环境仍含有约 6% 的氧气, 所以压力变化量会小于无氧环境。

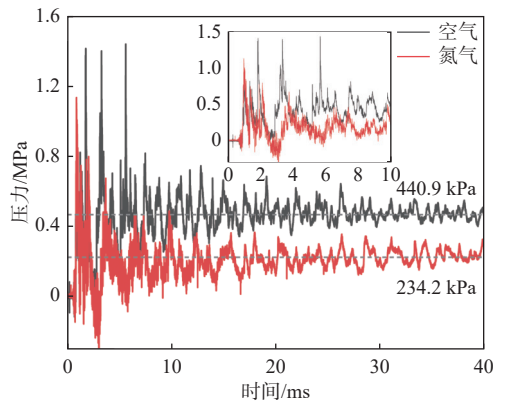


图6 空气和氮气环境下 160 g TNT 爆炸的压力时程曲线

Fig. 6 Pressure-time histories of 160 g TNT explosion in air and nitrogen conditions

1.2.2 靶板的动态响应

试验中采用 DIC 系统捕捉靶板的响应历程。将各工况靶板的中心点残余挠度时程曲线进行比较, 如图 7~图 9 所示。6 号工况 (300 g TNT 和 6.0% 氧气) 由于 DIC 系统在试验中未能成功记录到数据, 靶板的变形是在试验后使用三维光学扫描仪测量得到。

由图 7~图 8 可以看到, 在 2 ms 内 (即变形的初始阶段), 4 种工况的曲线斜率几乎相同, 这说明冲击波强度基本未受到环境的影响。当中心点

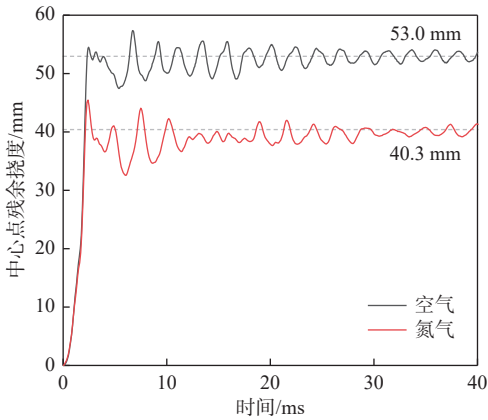


图 7 160 g TNT 爆炸载荷下靶板中心点残余挠度时程曲线

Fig. 7 Deflection-time histories of mid-point of target plate under 160 g TNT blast load

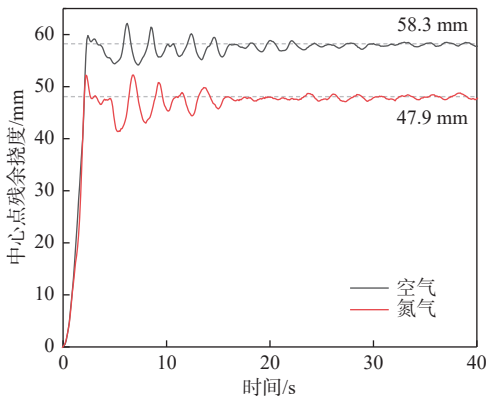


图 8 250 g TNT 爆炸载荷下靶板中心点挠度时程曲线

Fig. 8 Deflection-time histories of mid-point of target plate under 250 g TNT blast load

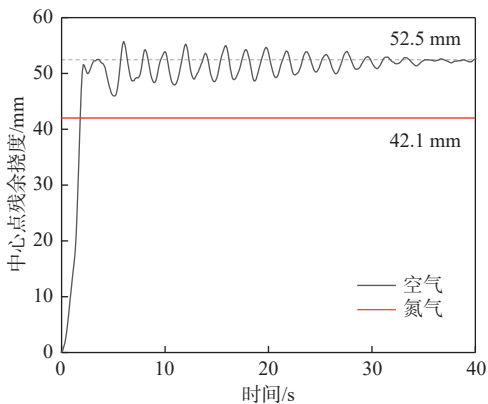


图 9 300 g TNT 爆炸载荷下靶板中心点挠度时程曲线

Fig. 9 Deflection-time histories of mid-point of target plate under 300 g TNT blast load

变形达到峰值后发生了第 1 次回弹,这个阶段在不同气体环境中差异明显,这是由于不同气体环境中的爆轰产物比例不同,其燃烧释放的能量也不同。燃烧过程进一步增强了冲击波强度,直接导致了靶板产生更大的变形峰值,随后继续影响靶板的振动回弹阶段,最终导致显著的塑性变形。甚至在空气条件下,第 1 个峰值之后还出现了更大的变形峰值。对比空气环境与没有爆轰产

物燃烧的氮气环境,发现爆轰产物燃烧的影响主要发生在 2.5 ms 之后,这与压力-时间历程所体现的信息一致。与空气环境相比,氮气环境下靶板的中心点挠度峰值分别下降了 16.7% 和 12.7%,残余挠度下降更明显,分别为 24.0%, 17.8% 和 19.8%,如表 5 所示。同时,需要说明的是,靶板的变形响应过程在毫秒量级,而靶板的温度变化则缓慢得多,即使是特制的高灵敏度热电偶传感器捕捉到的温度变化也达到了秒量级。高温环境并不足以大幅度地影响靶板材料的力学性能,可以认为靶板的变形是压力的影响起到主导作用。

表 5 不同工况下靶板中心点残余挠度对比

Table 5 Comparison of mid-point deflections of target plates under different cases

药量 W/g	气体环境	首次挠度峰值/mm	衰减* /%	残余挠度/mm	衰减** /%
160	空气	54.6	16.7	53.0	24.0
160	氮气	45.5		40.3	
250	空气	59.8	12.7	58.3	17.8
250	氮气	52.2		47.9	
300	空气	51.4		52.5	19.8
300	氮气	—		42.1**	

注: * 表示相对于空气环境中的衰减;

** 表示试验后三维扫描仪获得的结果。

2 封闭空间爆炸载荷等效方法

试验中舱内压力和靶板挠度结果表明,爆轰产物燃烧效应明显增强了封闭空间内冲击波载荷强度。此外,从试验的超压峰值和准静态压力结果可以发现后燃烧过程受到不同气体环境的影响。使用单一的冲击波标准(如超压峰值或准静态压力)很难准确确定封闭空间中的 TNT 当量,从试验结果来看,上述所有因素都会影响靶板的变形。靶板的变形是衡量冲击波效果的综合指标。

2.1 基于靶板变形的等效方法

基于靶板变形提出封闭空间内爆炸载荷等效方法,并应用于试验中的等效 TNT 质量计算。

2.1.1 基于准静态压力的总能量

不同载荷条件下的准静态压力汇总如图 10 所示,其中 0.387 kg/m^3 代表 1 m^3 空气中的氧气含量理论上可以满足 0.387 kg TNT 的爆轰产物完全燃烧。UFC 3-340-02 准静态压力曲线^[25]是基于大量的封闭空间爆炸试验结果得出的,可见,试验结果与 UFC 结果吻合较好,但所有结果都偏小。这主要是由于本文准静态压力取为 30~40 ms 范围的平均值,该阶段存在部分泄压的情况;此

外国内外 TNT 炸药的制造工艺不同, 会导致试验 TNT 能量密度较低^[32]。

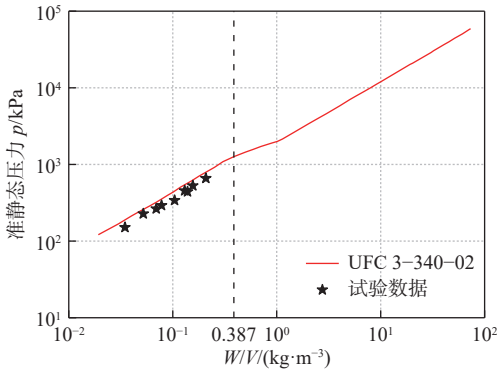


图 10 试验数据和 UFC 3-340-02 准静态压力曲线对比

Fig. 10 Comparison of quasi-static pressure between test data and UFC 3-340-02

封闭空间内的气体内能可表示为

$$E_{\text{gas}} = \frac{p}{\gamma - 1} (V + V_{\text{def}}) \quad (3)$$

式中: p 为混合气体的准静态压力; γ 为混合气体的绝热系数; V_{def} 为结构变形引起的封闭空间体积变化。

当炸药在封闭空间起爆时, 瞬间释放的能量主要转化为气体的内能和靶板的动能, 靶板的动能主要转化为塑性变形能。根据文献 [33] 中的结论, 内能的变化比塑性变形能的变化大两个数量级, 因此在后续分析中, 内能的变化可等效成炸药释放的总能量。本次试验所有工况中, 封闭箱体的初始长度(内部尺寸)均为 1.8 m, 靶板的最大挠度小于 60 mm, 靶板变形引起的封闭空间体积变化小于 1%, 因此在后续分析中不予考虑。爆炸过程中的气体成分和占比会发生变化, 绝热系数 γ 是一个关于 W/V 的函数, 而不是一个恒定值^[26]。因此, TNT 炸药在封闭空间中的总能量 E_{total} 可以表示为

$$E_{\text{total}} = \frac{p}{\gamma - 1} V \quad (4)$$

在本试验中, 总能量和药量之间的关系如图 11 所示, 拟合的二次函数如式(5)所示。

$$E_{\text{total}} = -9.31(W/V)^2 + 11.46(W/V) \quad (5)$$

拟合的二次函数与试验数据的相关系数达到了 0.99 以上。该拟合函数仅在 $W/V < 0.387 \text{ kg/m}^3$ 时有效。当装药质量与体积之比 $W/V > 0.387 \text{ kg/m}^3$ 时, 由于封闭空间中氧气含量不足, 爆轰产物难以充分燃烧并释放能量。

2.1.2 基于钢板变形的总能量计算

靶板的无量纲载荷参数 ϕ , 可表示为^[28]

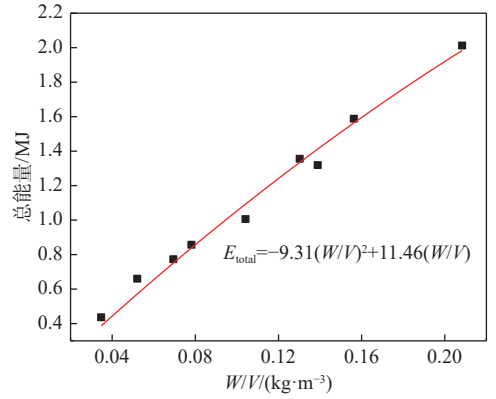


图 11 总能量与 W/V 之间的关系

Fig. 11 Relationship between total energy and the ratio of W/V

$$\phi = \frac{E_{\text{total}}}{(LB)^{\frac{1}{2}} h^2 \sigma_y} \quad (6)$$

式中: L 和 B 分别为靶板的宽度和长度; h 为钢板的厚度; σ_y 为钢板的屈服强度。

假设靶板的无量纲挠度和无量纲载荷参数之间满足如下线性关系:

$$\left(\frac{\delta}{h}\right) = a\phi + b = a \frac{E_{\text{total}}}{(LB)^{\frac{1}{2}} h^2 \sigma_y} + b \quad (7)$$

式中, δ 为靶板的残余挠度。

根据试验结果, 可以得到 a 和 b 分别为 0.056 和 0.943。代入式(7), 得到基于靶板变形的总能量表达式为

$$E_{\text{total}} = \frac{1}{a} \delta h \sigma_y \sqrt{LB} - \frac{b}{a} h^2 \sigma_y \sqrt{LB} \quad (8)$$

2.1.3 基于钢板变形的 TNT 等效

由式(5)和式(8)可建立药量与挠度的关系, 进而可确定等效药量, 如图 12 所示。当评估等效 TNT 药量时, 首先得到在封闭空间爆炸下靶板中心点的塑性变形值; 然后根据相同靶板变形的原则, 得到参考曲线上的对应工况, 此工况的炸药当量即为等效 TNT 药量。

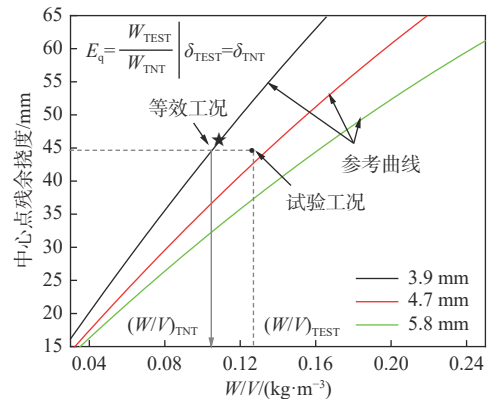


图 12 基于不同板厚结构响应的 TNT 等效方法

Fig. 12 Method of TNT equivalency based on structural deformation at different plate thicknesses

如图 12 所示, TNT 等效药量可以通过不同厚度靶板 (3.9, 4.7, 5.8 mm) 的中心点残余挠度和 W/V 之间的关系确定。本试验中每种工况的等效药量值汇总如表 6, 与实际药量相比, 等效药量的减少可以定量地反映出不同气体环境对抑制封闭空间爆轰产物燃烧能量释放的效果。需要说明的是, 由于本文试验均采用 TNT 在不同气体环境下起爆, 所以表 6 中的等效药量本质是后燃烧过程被抑制的“新炸药”的试验药量。

表 6 不同工况下的等效药量
Table 6 Equivalent charge for each case

厚度 h /mm	W_{TNT}/g	含氧量/%	W_{TEST}/g	E_q
3.9	160	5.4	107	0.67
4.7	250	6.0	169	0.68
5.8	300	6.0	172	0.57

TNT 当量系数 E_q 可表示为

$$E_q = \frac{W_{\text{TEST}}}{W_{\text{TNT}}} \Big|_{\delta_{\text{TEST}} = \delta_{\text{TNT}}} \quad (9)$$

式中: W_{TEST} 和 W_{TNT} 分别为试验药量和 TNT 药量; δ_{TEST} 和 δ_{TNT} 分别为试验工况和 TNT 工况下靶板的残余挠度。

从表 6 的数据中可以发现, 在相同的气体环境下, E_q 并不相等。一方面, 这与不同工况下气体环境的差异有关, 目前所使用的形成缺氧环境的方法并不能保证氧气浓度完全相同。更重要的是, 后燃烧过程中不同程度的能量释放会显著影响封闭空间爆炸的 TNT 当量系数 E_q , 进而影响到爆炸过程的威力。

2.2 等效方法对比

通过试验数据, 将本文提出的等效方法与现有基于准静态压力的等效方法进行比较。Edri^[26] 基于热力学模型提出了封闭空间内爆炸的准静态压力预测模型, 并进一步通过基于准静态压力的 TNT 等效方法得到了等效药量。本文对试验结果进行了基于准静态压力的 TNT 等效, 得到等效药量 W_{gas} 。值得注意的是, 本文所用炸药与 UFC 标准炸药存在差异, 不同药量之间的差异存在线性关系, 表示为

$$\alpha = W_{\text{gas}} / W_{\text{gas-s}} \quad (10)$$

式中: W_{gas} 为基于准静态压力的等效药量; $W_{\text{gas-s}}$ 为考虑了准静态压力差异的等效药量; α 为常数。此处“等效药量”也作为后燃烧过程被抑制的“新炸药”的试验药量。当空气中起爆的 TNT 质量已知时, 可以得到其他情况下的等效药量

$W_{\text{gas-s}}$ 。试验中 160 g 药量下准静态压力为 440.9 kPa, 基于准静态压力考虑等效药量时, 参考 UFC 3-340-02 准静态压力曲线^[25] 可以得到对应的等效药量为 117 g, 即对应的 α 取值为 0.73。则可知, 当试验中准静态压力为 234.2 kPa 时, 考虑准静态压力差异的等效药量为 73 g, 如表 7 所示。

表 7 基于准静态压力的等效药量

Table 7 Results of equivalent charge based on quasi-static pressure

准静态压力/kPa	W_{gas}/g	$W_{\text{gas-s}}/\text{g}$	W_{TEST}/g
440.9	117	160	
234.2	54	73	107

由图 7 可见, 即使考虑了炸药的差异, 基于准静态压力的等效 TNT 药量明显低于本文结果, 这可以通过图 13 的例子来解释。120g TNT-水雾^[28] 工况和 160 g TNT-氮气工况的准静态压力平均值几乎相同, 但最终的变形量却不一样。准静态压力相同说明两种工况释放的能量大致相同; 靶板变形有差异的原因在于, 160 g TNT-氮气工况和 120 g TNT-水雾工况在 2.5 ms 内的冲量分别为 513 和 393 Pa·s, 160 g TNT-氮气工况在初始阶段释放了更多的爆炸能量。

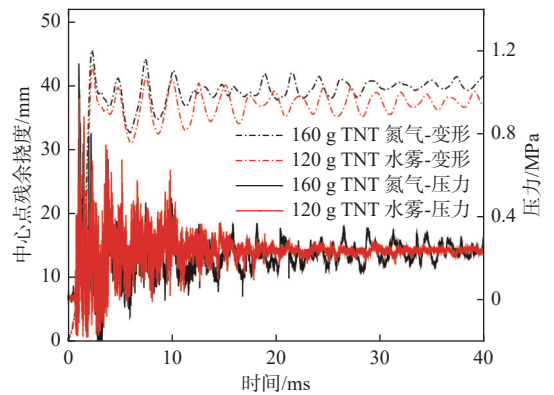


图 13 120 g TNT-水雾工况与 160 g TNT-氮气工况的变形、压力历程曲线

Fig. 13 Deformation and pressure-time histories of 120 g TNT-water mist and 160 g TNT- N_2

2.3 实例应用

通过铝壳战斗部舱内爆炸试验, 验证本文提出的等效方法。铝壳战斗部在爆炸过程中通过铝热反应增强了载荷和毁伤效果, 与传统的惰性战斗部相比, 载荷发生了显著变化。

战斗部模型是一个内部填充 TNT 的空心铝壳, 如图 14 所示。战斗部由雷管起爆, 雷管的 TNT 当量为 1 g, 战斗部的详细参数见表 8。靶板为 Q235 钢, 实际厚度为 4.7 mm。

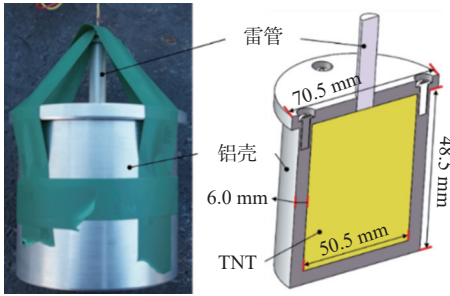


图 14 铝壳装药

Fig. 14 Aluminum cased charge

表 8 封闭试验的载荷工况

Table 8 Load case of confined test

主装药			铝制壳体			
质量/g	高度/mm	直径/mm	质量/g	内部高度/mm	内径/mm	厚度/mm
149.0	48.2	50.4	110.4	48.5	50.5	6.0

图 15 为试验布置示意图, 战斗部被悬挂在与 2.2 节相同的封闭箱体的中心。最终, 靶板出现了整体变形和大量由碎片引起的局部突起, 同时舱室内部被白色氧化铝粉末完全覆盖, 如图 16 所示。通过三维激光扫描仪扫描靶板的外表面, 得到了靶板中心点残余挠度为 42.3 mm。

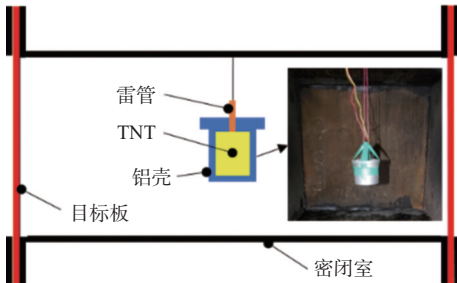
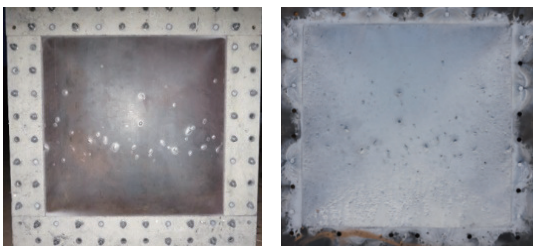


图 15 试验布置示意图

Fig. 15 Schematics of test configuration



(a) 靶板的外表面 (b) 靶板的内表面

图 16 试验后靶板轮廓

Fig. 16 Profile of target plate after test

根据靶板中心点的残余挠度, 结合曲线图 (图 12), 得到 W_{TEST} 为 144.5 g, 与 W_{TNT} 相比只降低了 3% 左右。这与传统的惰性战斗部有很大区别, 主要是由于铝在爆炸过程中会释放额外的能量。为了验证该结果的准确性, 对不同质量 (150, 200 和 250 g) 的炸药进行了试验测试, 得到靶板中心点残余挠度和炸药质量之间的关系以及相应

的拟合曲线, 如图 17 所示。从试验结果可以得到等效 TNT 药量下的残余挠度, 如表 9 所示。试验和拟合的中心点挠度的相对误差为 3.8%, 证明了该方法的有效性和准确性。

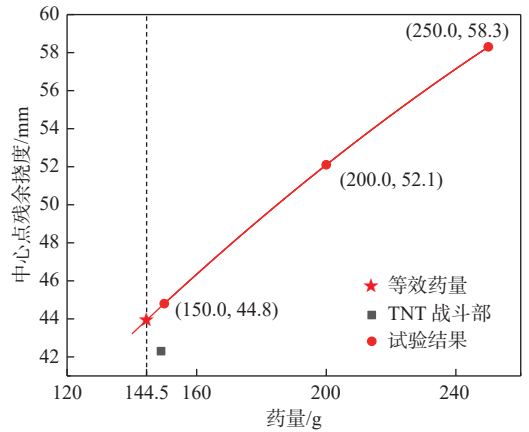


图 17 药量和中心点挠度的试验与计算结果

Fig. 17 The test results of charge mass and mid-point deflection

表 9 基于等效药量的变形结果误差对比

Table 9 Deviation of deflection results based on equivalent charge

战斗部试验变形结果/mm	等效药量下变形结果/mm	相对误差/%
42.3	43.9	3.8

3 结论

为了研究爆炸产物燃烧效应对封闭空间内爆炸载荷的影响, 在不同气体环境下进行了一系列的 TNT 爆炸试验, 并记录了靶板的动态响应和舱内压力、温度变化历程。结合试验数据和理论分析, 建立了靶板中心点挠度与装药质量的关系, 提出并验证了适用于封闭空间爆炸的 TNT 等效方法。根据研究结果, 得出以下结论:

1) 当 TNT 在封闭空间起爆时, 爆炸载荷和结构动态响应都会受到爆轰产物燃烧释放能量的影响, 氮气环境中靶板响应的首峰值与剩余变形较空气环境分别降低约 15% 与 20%。

2) 氮气环境可以显著降低混合气体的温度和封闭空间内爆炸的准静态压力。其作用机制为通过抑制爆轰产物的燃烧来降低温度, 最终达到抑制燃烧能量释放的效果。

3) 封闭空间的准静态压力代表了爆炸过程中释放的总能量, 而能量释放速率的不确定导致基于准静态压力获得的 TNT 当量被明显低估。通过验证和比较, 证实本文提出的封闭空间内 TNT 等效方法可用于定量评估封闭空间内的炸药爆炸威力。

参考文献:

- [1] REMENNIKOV A M. A review of methods for predicting bomb blast effects on buildings[J]. *Journal of Battlefield Technology*, 2003, 6(3): 5–10.
- [2] FORMBY S A, WHARTON R K. Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1996, 50: 183–198.
- [3] HELD M. TNT—equivalent[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1983, 8(5): 158–167.
- [4] United Nations Office for Disarmament Affairs. Formulae for ammunition management, international ammunition technical guideline, IATG: 01.80[R]. New York: United Nations Office for Disarmament Affairs, 2015.
- [5] DE YONG L V, CAMPANELLA G. A study of blast characteristics of several primary explosives and pyrotechnic compositions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1989, 21(2): 125–133.
- [6] COOPER P W. Comments on TNT Equivalence[C]// *Proceedings of the 20th International Pyrotechnics Seminar*. Colorado: Springs, 1994.
- [7] JEREMIĆ R, BAJIĆ Z. An approach to determining the TNT equivalent of high explosives[J]. *Scientific-Technical Review*, 2006, 56(1): 58–62.
- [8] XIAO W F, ANDRAE M, GEBBEKEN N. Air blast TNT equivalence factors of high explosive material PETN for bare charges[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 377: 152–162.
- [9] XIAO W F, ANDRAE M, GEBBEKEN N. Air blast TNT equivalence concept for blast-resistant design[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 185: 105871.
- [10] LOCKING P. TNT Equivalence-experimental comparison against prediction[C]// *Proceedings of the 27th International Symposium on Ballistics*. Freiburg: DEStech Publications, Inc, 2013: 22–26.
- [11] TÖRÖK Z, OZUNU A. Hazardous properties of ammonium nitrate and modeling of explosions using TNT equivalence[J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2015, 14(11): 2671–2678.
- [12] JAANSALU K M, COLLET C, BAKER E L, et al. TNT equivalency testing for energetic materials[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2020, 2272(1): 050009.
- [13] LOCKING P M. The trouble with TNT equivalence[C]// *Proceedings of the 26th International Symposium on Ballistics*. Miami: [s.n.], 2011: 12–16.
- [14] SIMOENS B, LEFEBVRE M H. Influence of different parameters on the TNT-equivalent of an explosion[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2011, 8(1): 53–67.
- [15] PANOWICZ R, KONARZEWSKI M, TRYPOLIN M. Analysis of criteria for determining a TNT equivalent[J]. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 63(11): 666–672.
- [16] GRISARO H Y, DANCYGIER A N. On the problem of bare-to-cased charge equivalency[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 94: 13–22.
- [17] ORNELLAS D L. Calorimetric determination of the heat and products of detonation of an unusual CHNOFS explosive[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1989, 14(3): 122–123.
- [18] KUHL A L, OPPENHEIM A K, FERGUSON R E, et al. Effects of confinement on combustion of TNT explosion products in air[C]// *28th International Symposium on Combustion*. Edinburgh, Scotland: UNT Digital Library, 2000.
- [19] KUHL A L, REICHENBACH H. Combustion effects in confined explosions[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2291–2298.
- [20] KUHL A L, BELL J B, BECKNER V E, et al. Numerical simulations of thermobaric explosions[C]// *Proceedings of the 37th International Annual Conference Energetic Materials Characterisation and Performance of Advanced Systems*. Karlsruhe: Lawrence Livermore National Lab., 2007.
- [21] 金朋刚, 郭炜, 王建灵, 等. 密闭条件下 TNT 的爆炸压力特性 [J]. *火炸药学报*, 2013, 36(3): 39–41.
- JIN P G, GUO W, WANG J L, et al. Explosion pressure characteristics of TNT under closed condition[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(3): 39–41 (in Chinese).
- [22] 金朋刚, 郭炜, 任松涛, 等. TNT 密闭环境中能量释放特性研究 [J]. *爆破器材*, 2014, 43(2): 10–14.
- JIN P G, GUO W, REN S T, et al. Research on TNT energy release characteristics in enclosed condition[J]. *Explosive Materials*, 2014, 43(2): 10–14 (in Chinese).
- [23] 李鸿宾, 金朋刚, 郭炜, 等. 炸药在密闭空间中爆炸超压测试与分析 [J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(28): 8448–8451.
- LI H B, JIN P G, GUO W, et al. Overpressure test and analysis of TNT blast in confined chamber[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(28): 8448–8451 (in Chinese).
- [24] 钟巍, 田宙. 等压假设下考虑化学反应动力学影响的约束爆炸准静态压力的计算 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(4): 375–380.
- ZHONG W, TIAN Z. Calculation of quasi-static pressures for confined explosions considering chemical reactions under isobaric assumption[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(4): 375–380 (in Chinese).
- [25] US Army Corps of Engineers. Structures to resist the effects of accidental explosions, with change 2: UFC 3-340-02 [R]. [S.1.]: Air Force Civil Engineer Support

- Agency, 2014.
- [26] EDRI I E, GRISARO H Y, YANKELEVSKY D Z. TNT equivalency in an internal explosion event[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 374: 248–257.
- [27] GRISARO H Y, EDRI I E, RIGBY S E. TNT equivalency analysis of specific impulse distribution from close-in detonations[J]. *International Journal of Protective Structures*, 2020, 12(3): 315–330.
- [28] KONG X S, ZHOU H, ZHENG C, et al. An experimental study on the mitigation effects of fine water mist on confined-blast loading and dynamic response of steel plates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 134: 103370.
- [29] RIGBY S E, TYAS A, CURRY R J, et al. Experimental measurement of specific impulse distribution and transient deformation of plates subjected to near-field explosive blasts[J]. *Experimental Mechanics*, 2019, 59(1): 163–178.
- [30] CURRY R J, LANGDON G S. Transient response of steel plates subjected to close proximity explosive detonations in air[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 102: 102–116.
- [31] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. *Metallic materials-tensile testing-part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021[S]*. Beijing: Standards Press of China, 2021 (in Chinese).
- [32] 宋浦, 杨凯, 梁安定, 等. 国内外 TNT 炸药的 JWL 状态方程及其能量释放差异分析 [J]. *火炸药学报*, 2013, 36(2): 42–45. SONG P, YANG K, LIANG A D, et al. Difference analysis on JWL-EOS and energy release of different TNT charge[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(2): 42–45 (in Chinese).
- [33] ZHENG C, KONG X S, WU W G, et al. The elastic-plastic dynamic response of stiffened plates under confined blast load[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 95: 141–153.

相关论文

- [1] 李营, 杜志鹏, 陈赶超, 等. 舰艇爆炸毁伤与防护若干关键问题研究进展 [J]. *中国舰船研究*. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03930>
- [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*, <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03527>
- [3] 姚梦雷, 侯海量, 李典. 典型舱内爆炸载荷作用下吸能元件防护特性研究 [J]. *中国舰船研究*, <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03357>
- [4] 余林, 刘祖涛, 许仁多, 等. 圆柱装药战斗部爆炸破片分布特性数值模拟分析 [J]. *中国舰船研究*, <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03523>
- [5] 陈高杰, 宋英杰, 邢津浩. 双爆源水下爆炸对圆柱壳结构的毁伤特性研究 [J]. *中国舰船研究*, <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03536>
- [6] 岳学森, 周沪, 孔祥韶, 郑成, 吴卫国. 舱室内爆载荷燃烧增强效应试验及仿真研究 [J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(4): 223–232. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02708>
- [7] 黄涛, 陈威, 彭帅, 等. 典型舱室在战斗部内爆下的载荷及毁伤特性试验研究 [J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(6): 167–176. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03000>
- [8] 王志平, 徐双喜, 陈威, 等. 带泄压孔的舱室内爆冲击波载荷特性 [J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(3): 155–162. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02713>
- [9] 朱凌, 田岚仁, 李德聪, 等. 饱和冲量及其等效方法在舱室内爆炸中的应用 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(2): 99–107. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.01876>