

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0193

## 密闭空间内爆炸载荷抑制效应实验研究\*

孔祥韶<sup>1</sup>, 王子棠<sup>2</sup>, 况 正<sup>2</sup>, 周 沪<sup>2</sup>, 郑 成<sup>1</sup>, 吴卫国<sup>1</sup>

(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. 武汉理工大学交通学院船舶、海洋与结构工程系, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 炸药在密闭空间内爆炸时的爆炸载荷与在敞开环境中有很大差异, 在密闭空间内, TNT 炸药的爆炸产物能够与周围空气充分混合并发生燃烧反应进而释放额外的能量, 使密闭空间内的反射冲击波及准静态压力均明显增加。为探究不同气体环境对密闭空间内爆炸载荷的抑制效应, 开展了 3 种不同药量的 TNT 分别在空气、水雾和氮气环境密闭空间内的爆炸实验研究, 通过理论计算和实验对比分析了密闭空间内的爆炸载荷压力、温度及受载钢板试件响应特性。结果表明, 水雾和氮气均能有效降低空间内的准静态压力和温度, 对准静态压力的平均降幅分别为 36.0% 和 51.7%, 对温度的平均降幅分别为 42.6% 和 40.3%; 在水雾和氮气环境中的爆炸载荷作用下, 钢板试件动态响应较空气环境中显著降低, 其中 160 g 药量下, 水雾和氮气环境中钢板试件的最终变形分别减少了 15.9% 和 23.5%, 氮气的减弱效果优于水雾; 水雾和氮气均能及时有效地抑制封闭空间内的爆炸载荷, 降低结构的损伤程度。

**关键词:** 内爆载荷; 水雾; 氮气; 准静态压力; 钢板动态响应

中图分类号: O381 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## Experimental study on the mitigation effects of confined-blast loading

KONG Xiangshao<sup>1</sup>, WANG Zitang<sup>2</sup>, KUANG Zheng<sup>2</sup>, ZHOU Hu<sup>2</sup>, ZHENG Cheng<sup>1</sup>, WU Weiguo<sup>1</sup>

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

2. *Department of Naval Architecture, Ocean and Structural Engineering, School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China)*

**Abstract:** The blast loading from an explosion in a confined space is quite different from that in an open environment. The detonation products of TNT can be fully mixed with the surrounding air, and release additional energy through combustion effect, resulting in a significantly increase of the reflected shockwaves and quasi-static pressure in the confined space. In order to investigate the mitigation effect of different atmosphere on explosion load in confined space, the experimental tests of TNT with three different charge masses were performed in a fully confined chamber filled with air, water mist and nitrogen, respectively. The explosive load pressure, temperature and the response characteristics of blast-loaded steel plates in the confined space were analyzed by theoretical calculation and experiment. The results show that both the water mist and the nitrogen can effectively reduce the reflected shock wave, the quasi-static pressure and the temperature in the confined chamber. The average reduction rate of quasi-static pressure is 36.0% and 51.7%, and the average reduction rate of temperature is 42.6% and 40.3%, respectively. The ideal gas state equation was used to calculate the theoretical value of quasi-static pressure in the confined space filled with nitrogen. It is found that the theoretical value is slightly larger than the experimental value, which is due to the insufficient combustion of detonation products in the test. The dynamic response of blast-loaded steel plates in water mist and nitrogen atmosphere is significantly lower than that in the air condition, and the residual deformation of the steel plate

\* 收稿日期: 2020-06-11; 修回日期: 2020-08-31

基金项目: 装备预先研究教育部联合基金青年人才项目(6141A02033108)

第一作者: 孔祥韶(1983—), 男, 教授, 博士生导师, kongxs@whut.edu.cn

通信作者: 郑成(1991—), 男, 讲师, zhengchengyeep@whut.edu.cn

at 160 g TNT in water mist and air conditions, the attenuating effect of nitrogen is better than that of water mist. It is revealed that the mechanism of the water mist and nitrogen in mitigating the confined blast load and the subsequent dynamic response of structure is restraining the energy release from the combustion of the detonation products. The conclusions can provide references for the design of anti-blast structure.

**Keywords:** confined-blast loading; water mist; nitrogen; quasi-static pressure; dynamic response of steel plates

在现代信息化战争环境中, 掠海飞行的半穿甲内爆式反舰导弹已成为大型水面舰船的主要威胁。当爆炸发生在舰船舱室内部时, 由于舱壁的限制作用使得载荷作用规律与敞开环境相比差异较大<sup>[1]</sup>, 封闭空间内部爆炸特性表现为冲击波效应增强且热效应明显, 空间内存在维持时间较长的准静态压力, 导致炸药在封闭空间内爆炸所造成的破坏明显强于空爆<sup>[2-4]</sup>。TNT 是一种负氧型炸药, 在封闭空间中爆炸时除产生初始爆轰能量外, 爆炸产物还在限制空间中与空气中的氧气充分混合并在高温环境中发生燃烧反应释放额外能量, 且作用时间尺度为毫秒级, 因此会造成更严重的受载结构破坏<sup>[5]</sup>。由于初始爆轰能量难以减弱, 因此, 通过抑制爆炸产物的燃烧从而减轻舱内爆炸载荷对结构的毁伤, 成为一种有效可行的手段。

水雾液滴由于比表面积大、吸热能力强, 是火灾和爆炸荷载的良好抑制介质。水雾对爆炸荷载的抑制机理是: 当冲击波击中箱内水雾时, 会与液滴发生动量传递, 削弱初始冲击波及后续的反射冲击波。同时水雾具有较大的比热容和蒸发容, 可以吸收爆炸产物燃烧所释放的能量而汽化成水蒸气, 使环境温度降低, 同时由于产生的水蒸气为不可燃气体, 抑制了爆炸产物进一步的燃烧反应, 从而使密闭空间内的准静态压力降低<sup>[6-8]</sup>。Mataradze 等<sup>[9]</sup>指出, 水雾减弱冲击波的主要影响因素包括水雾粒径分布、水雾液滴速度及液滴几何特性等; Schwer 等<sup>[10]</sup>通过数值模拟发现, 水雾的动量传递在减小初始冲击波方面占主导作用; Adiga 等<sup>[11]</sup>研究了细水雾颗粒破碎的现象, 并分析了其对爆炸能量的影响, 发现虽然液滴变形能和曲率效应可以增加破碎能, 但其对总能量消耗的总贡献不如汽化吸收潜热显著; Jones 等<sup>[12]</sup>讨论了水滴尺寸对燃烧抑制作用的影响, 理论上水雾液滴尺寸越小抑制效果越好, 但当尺寸小于 30  $\mu\text{m}$  时, 水雾液滴很难制出, 并定义了水雾液滴的平均尺寸; 胡翔<sup>[13]</sup>考虑细水雾液滴蒸发、液滴动能吸收及吸收显热, 推导了冲击波扫过细水雾时, 水雾液滴速度的前后变化, 分析得出吸收显热是细水雾减弱冲击波的主要手段; 陈鹏宇等<sup>[14]</sup>通过舱内装药爆炸实验研究了水雾对舱内典型位置处爆炸荷载的削弱作用, 发现随着药量的增加, 削弱效果降低。

此外, 为了分析爆炸产物燃烧对舱内 TNT 爆炸荷载的增强效应, 研究人员通过改变密闭空间内气体的成分开展了爆炸实验, 进一步证明了通过抑制爆炸产物的燃烧可有效降低爆炸荷载(冲击波压力、准静态压力及爆炸场温度)和受载结构的响应<sup>[15-17]</sup>。

从目前已开展的研究来看, 细水雾颗粒和气体成分对封闭空间内的爆炸荷载有良好的衰减作用, 然而这 2 种方式对爆炸荷载衰减的机理有所区别且不明确, 缺乏定量的分析。本文中从舰船结构对舱内爆炸荷载防护的需求出发, 探索不同舱内环境对爆炸荷载和结构动态响应的抑制效果, 开展水雾和氮气环境中 TNT 在密闭结构内爆炸的实验研究, 通过分析爆炸荷载压力、密闭空间内的温度变化以及钢板试件的动态响应数据, 探讨水雾和氮气抑制封闭空间内爆炸荷载的机理, 从理论上定量分析水雾和氮气对爆炸能量的吸收; 并从结构响应的角度对水雾和氮气抑制爆炸荷载的时效性进行分析。

## 1 实 验

### 1.1 实验装置

采用的爆炸箱由高强度钢焊接而成, 试件板通过螺栓及压板固定在爆炸箱两端, 形成密闭结构, 如图 1 所示。内部尺寸为 1 800 mm $\times$ 800 mm $\times$ 800 mm, 其中试件板尺寸为 1 100 mm $\times$ 1 100 mm $\times$ 4 mm。在箱身焊接纵横加强筋以确保结构强度, 并将爆炸箱底部固定在地基上, 从而限制实验装置的整体位移。实验所用钢板均由 Q235 低碳钢制成, 其力学性能如表 1 所示。

在爆炸箱顶部开设 6 个水雾孔, 如图 2 所示, 并安装水雾系统。水雾系统由管道、喷嘴、水箱和水泵组成, 实验采用的水雾喷嘴流量为 0.4 L/min。利用激光散射仪测量不同粒径水雾液滴的体积分数, 如图 3 所示。将水雾液滴的粒径划分为 8 个范围, 计算不同粒径水雾液滴的累积体积分数, 数据如表 2 所示, 其中 99.77% 的水雾液滴直径均小于 200  $\mu\text{m}$ 。

在爆炸箱的对角处开设 2 个氮气孔, 分别安装进气阀与出气阀, 进气阀与压缩氮气罐之间通过氮气进气管和减压阀相连, 如图 4 所示, 出气阀处设置自吸式氧气浓度检测仪, 监测舱内的氧气浓度从而得到舱内氮气浓度。

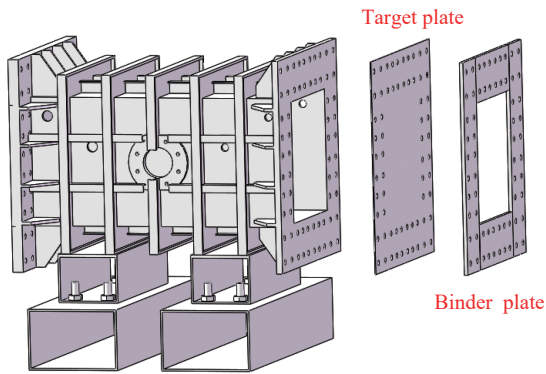


图 1 爆炸实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

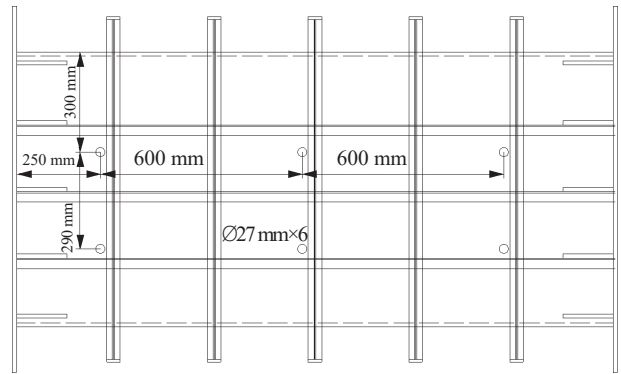


图 2 水雾孔分布位置图(爆炸箱俯视图)

Fig. 2 Schematic of distribution of nozzles of the chamber (top view of chamber)

表 1 试件材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of the steel plates

杨氏模量/GPa	硬化模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
206	1.06	0.28	324	7850

表 2 水雾粒径及累积体积分数

Table 2 Water-mist diameter and cumulative volume fraction

粒径/ $\mu\text{m}$	5	10	20	45	75	100	200	300
体积分数/%	0.00	0.03	2.09	19.28	55.53	79.00	99.77	100.00

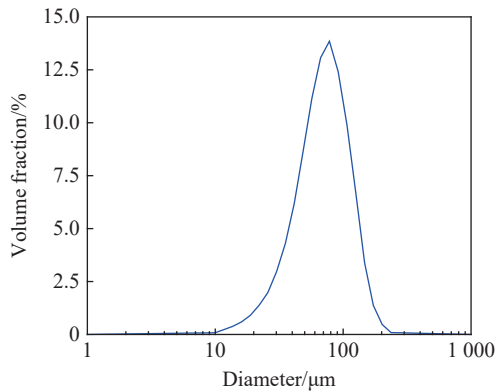


图 3 不同粒径水雾的体积分数

Fig. 3 Volume fraction of the water mist with different diameter



图 4 氧气浓度仪及出气阀布置

Fig. 4 Distribution of oxygen concentrator and outlet valve

数据测量采用 HBMGenesis 7T 型高速数据采集系统, 采样频率为 1 MHz。压力传感器 P1 采用 PCB 102B 型压力传感器, 传感器的量程为 0~34.5 MPa。温度使用 NANMAC C2-7-K-L 型热电偶和 Texense THNF-A 型热电偶放大器测量, 量程为 0~1 250  $^{\circ}\text{C}$ 。各类传感器的布置如图 5 所示, 其中 P1 压力传感器, T1~T5 为温度传感器。图 5(c) 为爆炸箱侧壁上(主视图中对应的侧面)的压力和温度传感器布置位置示意图, 其中压力传感器布置在靠近爆炸箱角隅处, 距离炸药 897 mm。

采用数字图像相关(digital image correlation, DIC)方法测量内爆载荷下试件板的变形历程, 如图 6 所

示。分辨率设置为  $960 \text{ pixel} \times 960 \text{ pixel}$ , 帧率为  $10^4 \text{ s}^{-1}$ , 每个像素的长度约  $0.4 \text{ mm}$ 。DIC 方法的匹配精度为  $5.4\%$  像素长度, 变形测量精度为  $0.02 \text{ mm}$ 。在目标板的左右两侧分别放置 2 个 LED 灯, 以提供足够的光来消除试件板上投影的螺栓阴影, 满足清晰测量的要求。

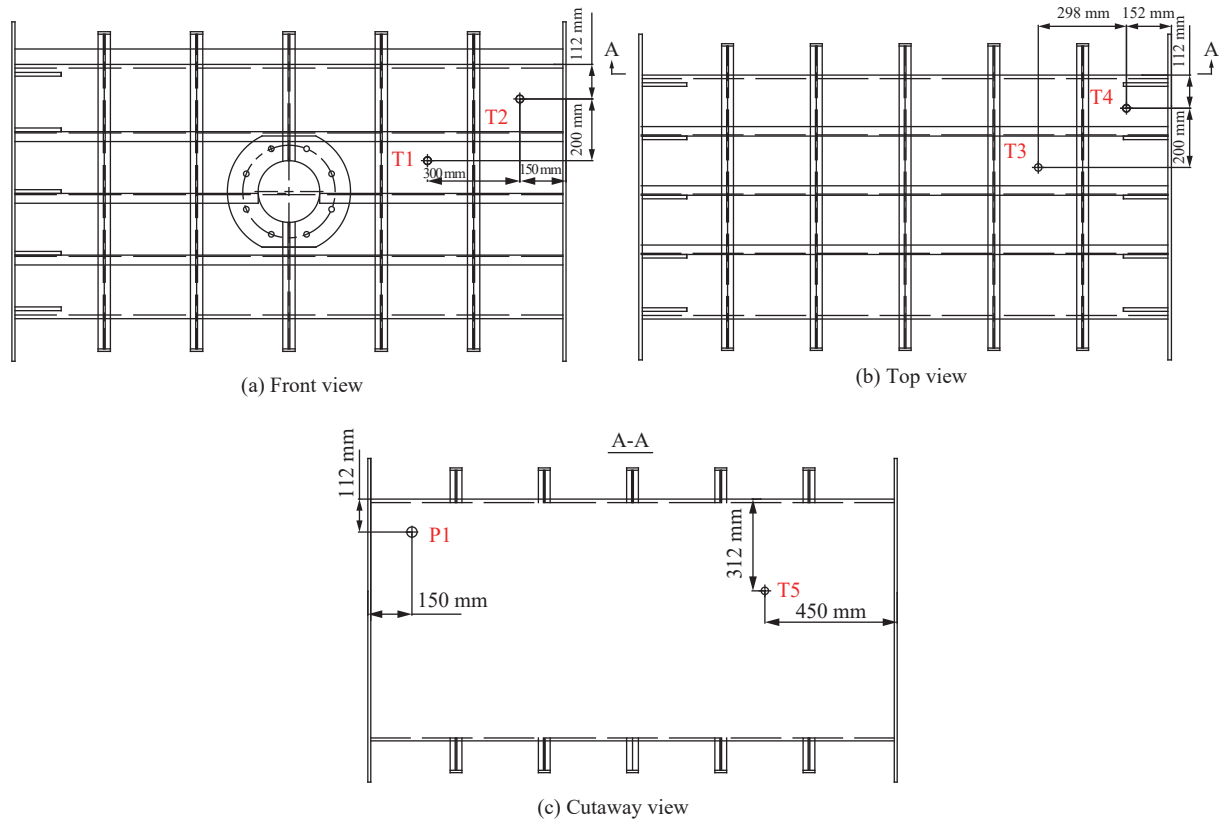


图 5 压力和温度传感器布置图

Fig. 5 Arrangement of temperature and pressure sensors

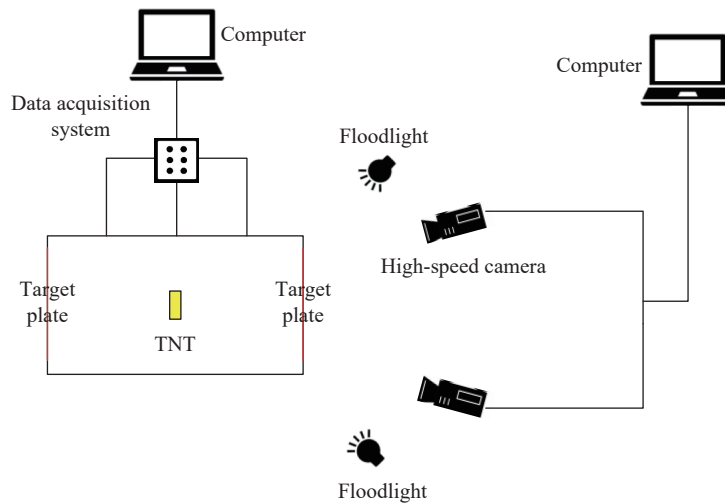


图 6 DIC 测试系统布置示意图

Fig. 6 Schematic of DIC system arrangement

在进行实验测试之前, 对 DIC 系统进行了最大分辨率的校准, 以达到最佳的性能。并对 DIC 系统进行了标定, 首先将 2 架高速摄影仪以一定角度聚焦于同一位置, 随后通过旋转、移动、倾斜交叉标定框

架, 获取 24 对具有不同位置信息的图像, 从而完成标定。标定后保持三脚架上 2 个高速摄影仪的相对位置不变, 将三脚架移至目标板前方, 保证其与试件板之间的距离与标定距离相同。

试件板外表面用白色油漆喷涂均匀, 并用黑色油漆喷涂散斑达到 DIC 方法的测量要求。在每次测试之前均做预测试, 以确保黑色散斑具有良好的对比度, 并且确保光线足够强, 可以获得高质量的图像。在对各工况实验进行测量时, 以爆炸信号触发 DIC 系统, 记录触发前 40 ms 和触发后 60 ms 的图像, 确保覆盖内爆载荷作用下试件板稳态和发生动态变形的全过程。

## 1.2 实验工况

为研究水雾和氮气环境对舱内爆载荷以及结构动态响应的影响, 共设置了 9 种实验工况, 各工况使用的试件板为同一批次的相同规格板, 实验前每一块板均进行了力学性能测试, 并单独测量厚度, 如表 3 所示。实验中采用 3 种不同质量的 TNT 炸药, 具体尺寸见表 4。

在进行空气环境中的内爆实验时, 水雾和氮气系统均为关闭状态, 将 TNT 炸药定位固定后, 装上两端试件板并用螺栓紧固, 校核数据采集系统和 DIC 系统, 引爆炸药, 记录相应的数据。

在进行水雾环境中的内爆实验时, TNT 炸药定位固定、试件安装和采集系统检查完成后, 开启水雾系统, 考虑到 Willauer 等<sup>[8]</sup>的研究成果, 即启动水泵的几秒钟内, 水雾便会达到稳定状态, 平均浓度为  $(70 \pm 10) \text{ g/m}^3$ , 不需要进行长时间的喷雾, 因此本实验预先向箱内喷射水雾 10 s, 引爆炸药, 记录数据, 并在引爆后 2 s 左右关闭水雾系统, 达到水雾环境下内爆的目的。

在进行氮气环境中的内爆实验时, 炸药和试件安装到位后, 打开进气阀自上而下向箱中注入氮气, 同时打开出气阀并在出口处用氧气浓度检测仪检测浓度, 由于空气中 99% 成分是氮气和氧气, 而氮气密度比空气和氧气小, 自上而下向箱内注入氮气时, 氮气能够与箱内空气进行充分混合, 当箱底出口处氧气体积分数低于 5% 左右时, 关闭进气阀和出气阀, 引爆炸药, 记录相关数据。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 压力结果与分析

当 TNT 炸药在密闭爆炸箱内发生爆炸时, 其爆炸产物急剧膨胀、压缩箱内气体, 形成爆炸冲击波, 冲击波脱离爆炸产物之后, 爆炸产物继续膨胀并与受压缩的气体充分混合, 进一步发生燃烧反应释放能量; 在冲击波与内壁面的多次反射过程中, 准静态压力逐渐上升, 冲击波反射结束后, 密闭空间内气体均匀分布, 准静态压力到达峰值并维持较长压力平台。根据针对 TNT 内爆准静态压力特性的实验研究<sup>[18]</sup>, 可以发现准静态压力上升时间约为数十毫秒, 在此之后, 由于空间密闭, 准静态压力曲线呈现准平台效应, 而且在圆筒 TNT 内爆实验也呈现相似现象, 冲击波在经过 3~4 个周期性波动后逐渐匀化, 形成一个稳定、均匀的准静态压力峰值<sup>[19]</sup>。因此本文中采用初始冲击波到达后 20~50 ms 之间的压力平均值作为准静态压力峰值。

整理并比较 3 种药量下水雾环境和空气环境中 P1 测点的压力数据, 如图 7~9 所示, 值得注意的

表 3 工况设置

Table 3 Load conditions of experimental test

工况	试件板厚度/mm	TNT质量/g	舱内环境
1	4.0	80	空气
2	4.0	120	空气
3	4.0	160	空气
4	4.0	80	水雾
5	4.0	120	水雾
6	4.0	160	水雾
7	-	80	氮气
8	3.0	120	氮气
9	4.0	160	氮气

表 4 圆柱形 TNT 炸药的尺寸

Table 4 Detailed size of cylindrical TNT charges

TNT质量/g	高度/mm	直径/mm
80	40.5	40.6
120	38.9	50.3
160	51.5	50.4

是, 图中表示准静态压力峰值的直线为 20~50 ms 内压力平均值的参考线, 并不表示准静态压力的起始时间。从压力时程曲线可以看出, 封闭空间内的爆炸载荷包括初始冲击波、壁面反射冲击波以及持续时间较长的准静态压力。在 3 种不同药量实验工况中, 由于水雾的存在, 壁面反射冲击波最大值及随后的准静态压力峰值均明显降低, 各工况下准静态压力峰值的具体数据见表 5。

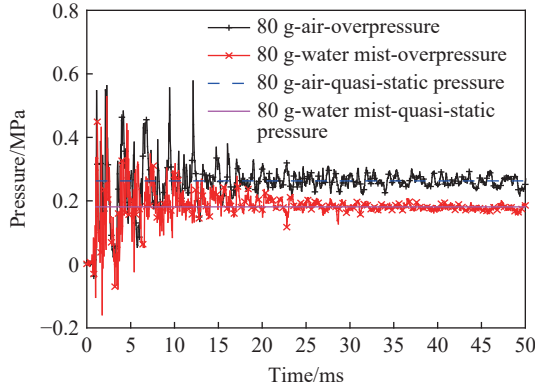


图 7 80 g TNT 水雾和空气环境工况下 P1 测点压力历程  
Fig. 7 Pressure-time curves of measuring point P1 from 80 g TNT explosion in chamber filled with water mist and air

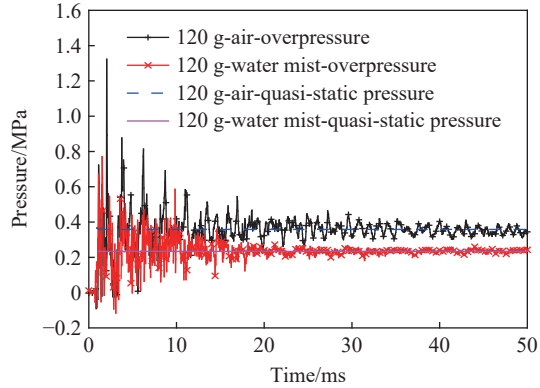


图 8 120 g TNT 水雾和空气环境工况下 P1 测点压力历程  
Fig. 8 Pressure-time curves of measuring point P1 from 120 g TNT explosion in chamber filled with water mist and air

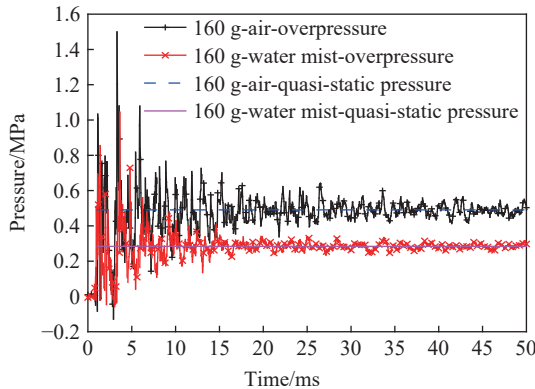


图 9 160 g TNT 水雾和空气环境工况下 P1 测点压力历程  
Fig. 9 Pressure-time curves of measuring point P1 from 160 g TNT explosion in chamber filled with water mist and air

表 5 水雾和空气环境内爆载荷及等效能量

Table 5 Confined-blast loading and equivalent energy in chamber filled with water mist and air

TNT质量/g	舱内环境	首冲击波峰值/kPa	准静态压力峰值/kPa	准静态压力降低率/%	等效能量/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
80	空气	546.7	262.8	31.1	9461.0
	水雾	336.2	181.1		6520.8
120	空气	722.6	358.3	34.7	8600.1
	水雾	669.4	233.8		5612.3
160	空气	1033.1	490.6	42.1	8831.3
	水雾	693.9	284.1		5113.2

当高温冲击波作用于箱内的水雾液滴时, 箱内的液滴有一部分会蒸发为水蒸气, 有一部分较大的液滴会被冲击波击碎为较小的液滴, 发生动量转移, 因此箱内的初始冲击波及后续的反射冲击波均能得到一定的减弱。同时, 由于水雾具有较大的比热容和蒸发容, 能够吸收爆轰产物燃烧所释放的能量从而汽化成水蒸气, 其汽化时间为毫秒级, 不仅能够降低箱内温度, 同时由于产生的水蒸气为不可燃气体, 还能降低箱内的氧气浓度, 抑制爆炸产物的后续燃烧反应, 从而降低箱内的准静态压力。由表 5 可以看出, 水雾对箱内准静态压力峰值的削减效应随药量的增加而增强, 原因是随着药量增加, 水雾环境中爆炸产物燃烧更不充分。

Feldgun 等<sup>[20]</sup> 给出了密闭空间中爆炸载荷准静态压力的计算公式:

$$p = p_0 \frac{\gamma - 1}{\gamma_0 - 1} - \frac{p_0(\gamma - 1)}{\rho_E(\gamma_0 - 1)} \frac{W}{V} + Q(\gamma - 1) \frac{W}{V} \quad (1)$$

式中:  $p_0 = 101.3 \text{ kPa}$ , 为大气压力;  $Q$  为单位质量炸药释放的能量;  $W$  为炸药质量;  $\rho_E$  为炸药密度;  $V$  为封闭空间的体积;  $\gamma$ 、 $\gamma_0$  分别为爆炸后混合气体和爆炸前舱内气体的绝热指数, 当  $W/V < 0.387 \text{ kg/m}^3$  时, 由于爆炸后混合气体成分难以确定, 为简化计算, 假定空气工况、水雾工况和氮气工况下  $\gamma = \gamma_0 = 1.4$ 。

将实验测试中的具体参数代入式(1)中, 计算出各工况中导致准静态压力升高的等效能量, 如表 5 所示。3 种药量下水雾环境分别抑制了 235.2、358.5、594.9 kJ 的能量释放, 较空气环境中的减缓比例分别为 31.1%、34.7%、42.1%, 即对应 3 种药量下水雾对准静态压力峰值的削减作用。TNT 的爆轰能量为 4 200 kJ/kg<sup>[21]</sup>, TNT 爆炸产物完全燃烧释放能量为 10 627.5 kJ/kg, 所释放的总能量为 14 827.5 kJ/kg。通过对比可以发现, 3 种药量的 TNT 炸药所释放的能量均小于炸药爆轰能量和爆炸产物燃烧的总能量的理论值, 主要原因是爆炸产物燃烧能量未完全释放, 从而与理想状态有一定的差别。

3 种药量下氮气环境和空气环境中 P1 测点的压力时程曲线如图 10~12 所示。当 TNT 在密闭空间内爆炸时, 爆炸产物的燃烧效应对反射冲击波和准静态压力峰值均起到增强作用, 在空气工况下, 冲击波峰值均出现在初始冲击波到达之后, 这是因为箱内环境氧气充足, 使爆炸产物能够与氧气充分混合反应, 所释放的能量使反射冲击波峰值与后续准静态压力明显提高。而在氮气环境内时, 峰值就是初始冲击波峰值, 其原因是氮气环境内氧气体积分数仅为 5%, 而爆炸产物无法与氮气发生反应, 其能量释放被显著抑制。

比较空气环境和氮气环境下的准静态压力峰值, 并将实验中的各参数带入式(1)中, 可以计算出氮气工况下导致准静态压力峰值升高的等效能量, 结果如表 6 所示。而由于空气和氮气的密度相差不大, 首冲击波峰值压力在这 2 种环境中的差异较小。

由表 6 可以看出, 3 种不同药量下, 氮气对于箱内准静态压力峰值的降低率均在 50% 左右, 呈现出良好的减弱效果, 其原因是氮气的存在降低了箱内氧气的浓度, 使得爆炸产物燃烧不充分, 抑制了燃烧释放能量, 从而降低了空间内的准静态压力峰值。

在氮气工况下, 若不考虑爆炸产物的燃烧释放能量, 那么箱内准静态压力就由爆轰产物在箱内产生的气体压力  $p_g$  以及爆轰加热气体产生的压力  $p_i$  提供。根据理想气体状态方程可得:

$$p_g = p_0 V_0 (m/V) \quad (2)$$

式中:  $V_0$  为 TNT 爆容,  $m$  为 TNT 质量。

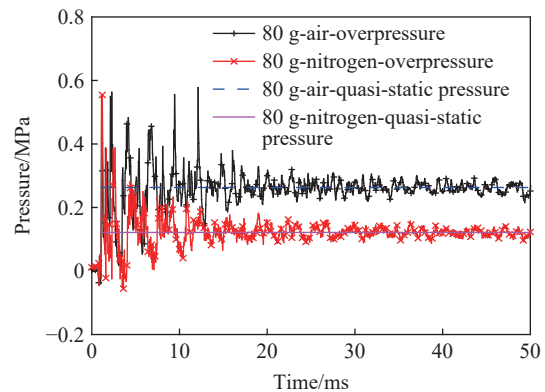


图 10 80 g TNT 在氮气和空气环境工况下测点 P1 处的压力时程曲线

Fig. 10 Pressure-time curves of measuring point P1 from 80 g TNT explosion in chamber filled with nitrogen and air

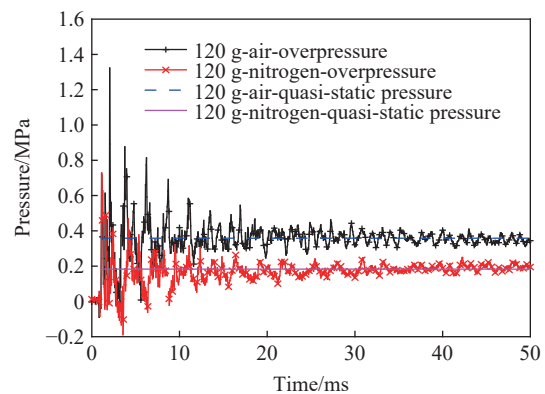


图 11 120 g TNT 氮气和空气环境工况下 P1 测点压力历程

Fig. 11 Pressure-time curves of measuring point P1 from 120 g TNT explosion in chamber filled with nitrogen and air

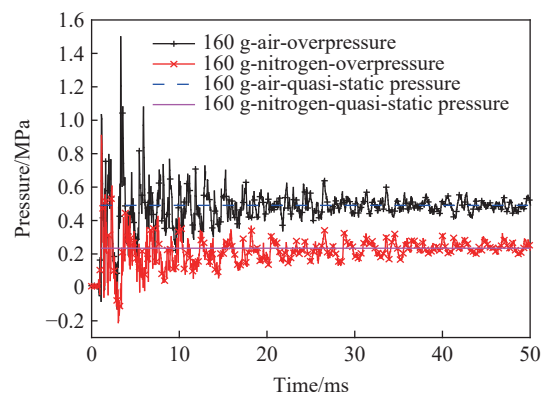


图 12 160 g TNT 氮气和空气环境工况下 P1 测点压力历程

Fig. 12 Pressure-time curves of measuring point P1 from 160 g TNT explosion in chamber filled with nitrogen and air

表 6 氮气和空气环境中的内爆载荷及等效能量

Table 6 Confined-blast loading and equivalent energy in chamber filled with nitrogen and air

TNT质量/g	舱内环境	首冲击波峰值/kPa	准静态压力峰值/kPa	准静态压力降低率/%	等效能量/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
80	空气	546.7	262.8	53.8	9461.0
	氮气	554.7	121.5		4375.6
120	空气	722.6	358.3	48.9	8600.1
	氮气	728.6	183.0		4392.2
160	空气	1033.1	490.6	52.3	8831.3
	氮气	908.8	234.2		4215.8

假定爆炸释放的能量均用于加热箱内气体, 则箱内气体的温升为:

$$\Delta T = \frac{mQ_V}{m_g c_V} \quad (3)$$

式中:  $Q_V$  为 TNT 爆热,  $m_g$  为爆炸后箱内混合气体的质量,  $c_V$  为爆炸后箱内混合气体的比定容热容。

由理想气体状态方程可得:

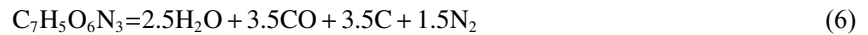
$$p_t = \frac{nRQ_V m}{m_g c_V V} \quad (4)$$

因此理想状态下箱内准静态压力  $p_{qs}$  的理论计算公式为:

$$p_{qs} = \left( p_0 V_0 + \frac{nRQ_V m}{m_g c_V} \right) \frac{m}{V} \quad (5)$$

式中:  $V_0=800$  L/kg,  $p_0=101.3$  kPa,  $Q_V = Q_e$ ,  $R=8.314$  kPa·L/(mol·K)。

TNT 发生爆炸反应时的方程式为:



箱内气体组成及属性如表 7 所示, 根据计算分析, 当 TNT 药量为 80 g 时, 箱内氧气含量足以将所有的碳元素氧化, 但当 TNT 药量为 120、160 g 时, 箱内氧气的含量不足以氧化所有的碳元素, 因此理论计算中假设爆炸产物与氧气充分燃烧, 消耗完箱内所有氧气。结合式(2)~(6), 计算出氮气工况下, 箱内准静态压力峰值的理论计算值, 如表 8 所示。

表 7 氮气工况下箱内气体属性

Table 7 Parameters of gasin chamber filled with nitrogen

气体	比定容热容/(kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )(25 °C)	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )(25 °C)
水蒸气(H <sub>2</sub> O)	1.400	
一氧化碳(CO)	0.743	1.250
氮气(N <sub>2</sub> )	0.741	1.250
氧气(O <sub>2</sub> )	0.657	1.429
二氧化碳(CO <sub>2</sub> )	0.638	1.977

表 8 氮气工况下各药量下准静态压力计算值

Table 8 Calculated results of quasi-static pressure in nitrogen environment

TNT质量/g	$m_g/g$	$c_V/(kJ·kg^{-1}·K^{-1})$	$p_{qs}/kPa$
80	1530.4	0.739	123.5
120	1570.4	0.741	185.6
160	1610.4	0.747	239.1



对比表 6、8, 箱内准静态压力峰值的理论计算值和实验值相近, 如图 13 所示, 发现理论计算值均比实验值大, 其原因是实验中爆轰产物燃烧不充分, 导致释放能量较理论计算值低。

### 2.2 温度结果分析

3 种药量下空气、水雾和氮气环境中 T1 传感器的数据对比如图 14~16 所示。氮气对降低箱内温度效果明显, 但与水雾的降温效果有所差异: 当温度达到峰值之后, 在氮气环境中温度的下降速率低于空气环境中的下降速率, 而水雾环境中温度的下降速率与空气环境中相近。结合表 5~6 中的等效能量数据分析, 80 g TNT 在空气环境中爆炸产物的燃烧比较充分, 120、160 g TNT 的爆炸产物并未与空气充分反应, 单位质量炸药释放的能量有所降低。由于爆轰过程释放的能量基本不受介质环境的影响, 可以看出, 氮气环境对爆炸产物燃烧过程的抑制效应明显; 而随着药量的增加, 爆轰能量所占比例增加, 水雾的汽化吸热效应大幅度降低了测点位置处的温度。

由于箱内爆炸及燃烧过程中温度场不均匀, 且所布置的温度传感器位置也不同, 其中 T1、T3 和 T5 温度传感器距爆炸中心 249 mm, T2 和 T4 温度传感器距爆炸中心 415 mm, 各传感器所记录的数据也存在一定的差异, 因此, 将距离爆炸中心距离相同的温度的平均值作为参考数据进行分析, 结果如表 9~10 所示。发现相同药量下水雾环境中箱内的温度明显低于空气环境中的温度, 水雾对距离爆炸中心较近区域的有更好的降温作用。将距爆炸中心距离相同的各温度传感器测量数据进行平均处理, 结果如表 11~12 所示, 可以看出氮气环境对距爆炸中心较近的区域有更好的降温作用, 而且当 TNT 药量为 80 g 时, 降温效果最好, 整体

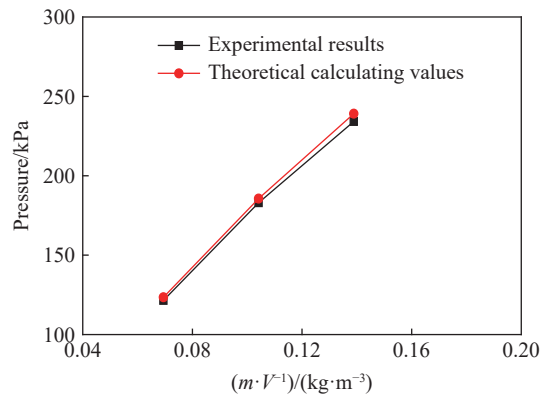


图 13 氮气工况下准静态压力计算值与实验值对比  
Fig. 13 Comparison between calculated results and experiment results of quasi-static pressure in nitrogen environment

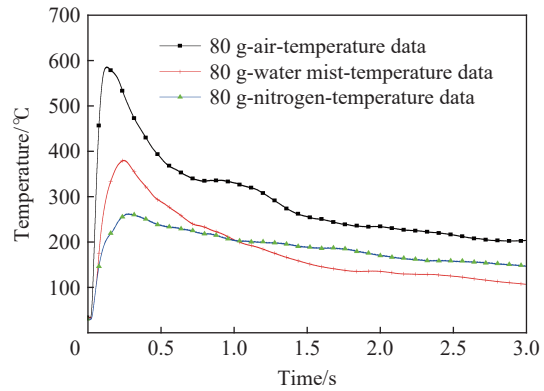


图 14 80 g TNT 在 3 种环境工况下测点 T1 处的温度曲线  
Fig. 14 Temperature-time curves of measuring point T1 in the conditions of 80 g TNT with air, water mist and nitrogen

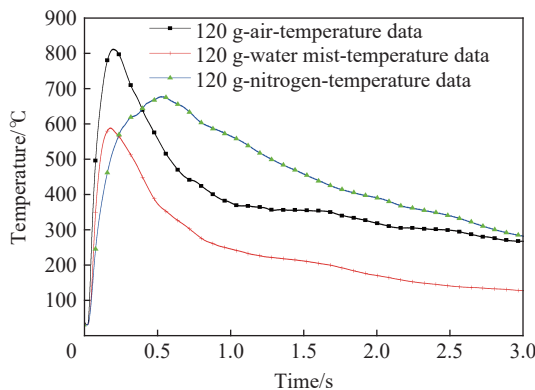


图 15 120 g TNT 在 3 种环境工况下测点 T1 处的温度曲线  
Fig. 15 Temperature-time curves of measuring point T1 in the conditions of 120 g TNT with air, water mist and nitrogen

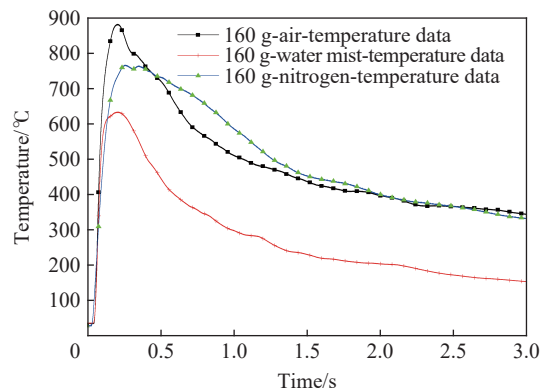


图 16 160 g TNT 在 3 种环境工况下测点 T1 处的温度曲线  
Fig. 16 Temperature-time curves of measuring point T1 in the conditions of 160 g TNT with air, water mist and nitrogen

温度降低达到 65.53%。其原因是药量较低时, 爆炸产物较少, 由于氮气的存在导致箱内氧气浓度较低, 使爆炸产物无法完成与氧气的充分反应。同时对比氮气和水雾的降温效果, 发现整体上氮气不如水雾, 其原因是水雾不仅能够通过汽化冷却密闭空间内的热气体, 同时汽化为水蒸气之后还降低了箱内氧气的浓度, 抑制了进一步的燃烧爆炸, 使箱内温度明显降低; 而氮气仅通过降低密闭空间内氧气的浓度进而抑制爆炸产物与氧气的反应放热。

表 9 水雾和空气环境工况不同测点位置的温度峰值平均值

Table 9 Average value of temperature peaks at different measuring points in water mist and air conditions

TNT质量/g	空气工况		水雾工况	
	T1、T3、T5点温度平均值/℃	T2、T4点温度平均值/℃	T1、T3、T5点温度平均值/℃	T2、T4点温度平均值/℃
80	479.5	399.3	338.3	191.2
120	586.0	488.9	404.4	254.3
160	748.5	817.5	460.1	355.3

表 10 水雾工况相较于空气工况的温度峰值下降比例

Table 10 Proportion of peak temperature drop in water mist condition relative to air conditions

TNT质量/g	T1、T3、T5点温度平均值降低比例/%	T2、T4点温度平均值降低比例/%	整体温度峰值平均值降低比例/%
80	29.5	52.1	40.8
120	31.0	48.0	39.5
160	38.5	56.5	47.5

表 11 氮气和空气环境工况下不同测点位置的温度峰值平均值

Table 11 Average value of temperature peaks at different measuring points in water mist and air conditions

TNT质量/g	空气工况		氮气工况	
	T1、T3、T5点温度平均值/℃	T2、T4点温度平均值/℃	T1、T3、T5点温度平均值/℃	T2、T4点温度平均值/℃
80	479.5	399.3	180.9	124.6
120	586.0	488.9	480.5	422.8
160	748.5	817.5	557.6	475.5

表 12 氮气工况相较于空气工况下温度峰值下降比例

Table 12 Proportion of peak temperature drop in nitrogen condition relative to air conditions

TNT质量/g	T1、T3、T5点温度平均值降低比例/%	T2、T4点温度平均值降低比例/%	整体温度峰值平均值降低比例/%
80	62.3	68.8	65.5
120	18.0	25.6	21.8
160	25.5	41.8	33.7

### 2.3 试件变形结果及分析

结构的动态响应不仅与入射冲击波和反射冲击波有关, 还跟封闭空间内爆炸的准静态压力有关, 本文中将通过实验分别研究水雾和氮气对封闭空间内爆炸载荷作用下钢板动态响应的影响。实验中采用 DIC 获取不同载荷下钢板的挠度-时间历程, 各工况下试件变形曲线如图 17 所示。在封闭空间内爆载荷作用下, 各试件板的响应历程相似, 均在开始响应后 2.5 ms 左右达到初始响应峰值, 之后发生回弹并在新的平衡位置处波动, 且随着药量的增加, 回弹值和振荡范围均逐渐减少。比较空气和水雾环境中试件板中点的挠度-时间曲线, 发现相同药量下水雾环境中试件板的初始响应峰值和变形稳定值均相对较

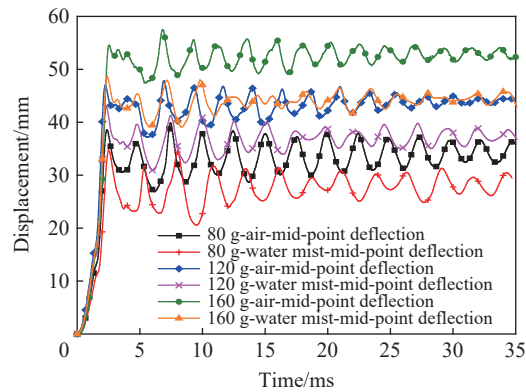


图 17 空气和水雾环境中 3 种药量工况下试件板中心点变形历程对比

Fig. 17 Comparison of the mid-point deflection of plates at different charge masses in water mist and air conditions

小。由于水雾环境中反射冲击波及准静态压力相对空气环境较低,其响应回弹值较空气环境下回弹值偏大。

将试件板中心点响应历程曲线的振荡阶段平衡位置处的值作为试件板中心点的最终变形,在 80、120、160 g 等 3 种药量下,相对空气环境中试件的响应来看,水雾环境中的初始峰值变形分别降低了 9.7%、8.4% 和 10.7%,相应的最终变形分别降低了 17.4%、15.0% 和 15.9%。由于水雾环境中准静态压力较低,最终变形的减小更显著。氮气环境中试件板的动态响应规律与水雾环境中相似,160 g TNT 在 3 种不同环境中产生的内爆载荷作用下钢板试件的动态响应过程如图 18 所示。氮气环境中钢板试件的初始响应峰值和振荡平均值都较其他 2 种环境工况中的小,且回弹效应更加明显。

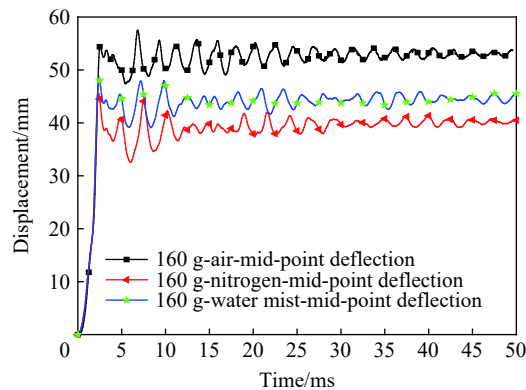


图 18 160 g 药量下 3 种不同气体环境中试件板中心点的变形历程

Fig. 18 Mid-point deflection of plates at 160 g TNT in three different environments

在空爆情况下,结构损伤往往由爆炸冲量引起。而在内爆情况下,由于壁面的限制,密闭爆炸载荷的持续时间比空爆持续时间长、载荷形式复杂,很难直接得到内爆冲量。为量化水雾和氮气环境中内爆载荷对试件板动态响应的影响,以结构变形响应相等为前提,采用等效空爆冲量进行对比分析,可计算得到内爆载荷的作用效果。文献 [22-23] 中给出了均布爆炸载荷作用下金属薄板中点变形-厚度比的计算公式:

$$\frac{\delta}{h} = \frac{0.48I}{2h^2L(\rho\sigma_y)^{1/2}} \quad (7)$$

式中:  $I$  为爆炸载荷冲量;  $\delta$  为板的中点变形;  $h$  和  $L$  分别为板的厚度和边长;  $\rho$  和  $\sigma_y$  分别为材料的密度和屈服应力,其中  $\rho=7.83 \text{ g/cm}^3$ 。

根据式(7)可以得到内爆载荷作用下的等效冲量:

$$I_{eq} = 4.17\delta hL(\rho\sigma_y)^{1/2} \quad (8)$$

金属薄板在爆炸载荷作用下的响应具有饱和特性,当金属板受到足够长时间的爆炸载荷时,金属板会发生较大的塑性变形,当其变形值远大于板厚时,由于面内膜力作用使其受载能力增强,因此后续的载荷不会对板的变形产生影响。由图 17 可知,各工况下的试件板中心点变形达到初始峰值的时间几乎一致,这是因为在内爆载荷作用下,金属板变形达到最大时的时间仅与板长度、材料密度和屈服强度等因数有关<sup>[24]</sup>。将实验中的各项数据代入到式(8)中,可以得到各工况下的等效冲量,进而计算出试件板在饱和响应时间内受到的等效平均压力  $p_a$ , 计算结果如表 13 所示。饱和响应时间内的等效压力可以定量反应出水雾和氮气环境对密闭空间内爆炸载荷抑制的“时效性”。

表 13 空气和水雾环境工况下内爆载荷的等效冲量

Table 13 Equivalent impulse of confined-blast loading at different charge masses in water mist and air conditions

TNT质量/g	舱内环境	$\delta/h$	$I_{eq}/(N\cdot s)$	饱和响应时间/ms	$p_a/kPa$
80	空气	8.5	723.9	2.4	477.3
	水雾	7.0	598.3	2.5	373.9
	氮气				
120	空气	11.0	934.1	2.2	654.5
	水雾	9.3	793.6	2.3	539.2
	氮气	14.7	704.4	2.5	440.3
160	空气	13.2	1124.6	2.6	689.1
	水雾	11.1	946.4	2.4	616.2
	氮气	10.1	854.8	2.4	556.5

由表 13 中的数据可以看出,水雾环境对试件板在饱和响应时间内受到的等效平均压力有良好的减弱作用,3 种不同药量的压力下降比例分别为 21.7%、17.6%、10.6%;氮气环境中 120、160 g TNT 工况中等效平均压力的降低比例分别为 32.7% 和 19.2%。从以上分析发现,在试件的饱和响应时间内,水雾和氮气均能对爆炸载荷进行及时和有效的抑制,且氮气的抑制效果优于水雾的。水雾和氮气都是通过抑制爆炸产物的燃烧释放能量降低舱内爆炸载荷中的反射冲击波和准静态压力,但二者发挥效能的过程不同:水雾是通过破碎、汽化吸收热量,产生的水蒸气稀释氧气浓度来抑制爆炸产物的燃烧能量释放;而氮气则是直接抑制爆炸产物的燃烧能量释放。从时效性来说,水雾的汽化需要一定的时间,且汽化时间与水雾粒径大小有关。此外,悬浮在空气中的水雾存在饱和度上限,超过一定浓度后,水雾颗粒之间将会融合形成水滴,质量增加而附着在舱室内壁,对爆炸载荷的抑制效果大幅减弱,但随着水滴的持续挥发,降温效果依然明显。

### 3 结 论

为研究水雾和氮气对密闭空间内 TNT 爆炸载荷和结构响应的影响,开展了 3 种药量 TNT 在空气、水雾和氮气环境内爆炸的实验研究。对所记录的爆炸载荷压力、温度及试件板响应的数据进行了分析和比较,得到以下结论。

(1)空气环境中,爆炸产物在起爆几毫秒之内的燃烧效应能显著增强箱内的准静态压力峰值,而采用水雾和氮气能够有效抑制爆炸产物的燃烧过程和能量释放,对准静态压力峰值的平均降幅分别为 36.0% 和 51.7%。

(2)从作用过程分析,在冲击波作用下,水雾是通过破碎、汽化吸收热量,同时汽化形成的水蒸气降低了箱内氧气的浓度,抑制了进一步的燃烧反应,从而降低了箱内的爆炸载荷;氮气则直接抑制了爆炸

产物的燃烧能量释放,从而降低了箱内的爆炸载荷。实验结果显示,水雾和氮气对温度的平均降幅分别为 42.6% 和 40.3%,水雾对箱内准静态压力的减弱能力比氮气弱,但降温效果比氮气好,这是因为水雾对爆炸产物燃烧效应的抑制能力不如氮气,但水雾能额外吸收热量从而降低箱内温度。

(3)与空气环境相比,水雾和氮气环境的爆炸工况中钢板试件的最大响应和最终变形均显著减小,其中 160 g 药量下,水雾和氮气环境工况下钢板试件的最终变形分别减少了 15.9% 和 23.5%。说明在试件的饱和响应时间内,水雾和氮气均能对爆炸载荷进行及时和有效的抑制,且氮气的抑制效果优于水雾的。在时效性方面,水雾的汽化需要一定的时间,且汽化时间与水雾粒径大小有关。此外,悬浮在空气中的水雾存在饱和度上限,超过一定浓度后,水雾颗粒会融合形成水滴,导致质量增加而附着在舱室内壁,对爆炸载荷的抑制效果大幅度降低。

(4)从本文的研究结果来看,基于封闭空间内爆炸载荷的特点从而采取针对性的措施,可有效降低结构的响应,相当于提高了结构对相同药量载荷的抵御能力。这种思路可对舰船舱室结构抗爆设计提供一定的参考。

值得注意的是,冲击波在水雾-空气和氮气-空气混合介质中传播时,介质的密度、比内能等物理参数将对冲击波产生显著的影响。本文的研究工作并未深入细致的考虑这类影响因素,将在今后的工作中开展深入的分析。

## 参考文献:

- [1] 胡宏伟,宋浦,赵省向,等.有限空间内部爆炸研究进展[J].*含能材料*,2013,21(4):539-546. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.04.026.  
HU H W, SONG P, ZHAO S X, et al. Progress in explosion in confined space [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2013, 21(4): 539-546. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.04.026.
- [2] 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.
- [3] 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. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.05.008.
- [4] CAÇOILLO A, TEIXEIRA-DIAS F, MOURÃO R, et al. Blast wave propagation in survival shelters: experimental analysis and numerical modelling [J]. *Shock Waves*, 2018, 28(6): 1169-1183. DOI: 10.1007/s00193-018-0858-5.
- [5] DONAHUE L, ZHANG F, RIPLEY R C. Numerical models for afterburning of TNT detonation products in air [J]. *Shock Waves*, 2013, 23(6): 559-573. DOI: 10.1007/s00193-013-0467-2.
- [6] 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. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103370.
- [7] ANANTH R, WILLAUER H D, FARLEY J P, et al. Effects of fine water mist on a confined blast [J]. *Fire Technology*, 2012, 48(3): 641-675. DOI: 10.1007/s10694-010-0156-y.
- [8] WILLAUER H D, ANANTH R, FARLEY J P, et al. Mitigation of TNT and Destex explosion effects using water mist [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 165(1/2/3): 1068-1073. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.130.
- [9] MATARADZE E, CHIKHRADZE N, BOCHORISHVILI N, et al. Experimental study of the effect of water mist location on blast overpressure attenuation in a shock tube [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 95(4): 042031. DOI: 10.1088/1755-1315/95/4/042031.
- [10] SCHWER D A, KAILASANATH K. Numerical simulations of the mitigation of unconfined explosions using water-mist [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 2361-2369. DOI: 10.1016/j.proci.2006.07.145.
- [11] ADIGA K C, WILLAUER H D, ANANTH R, et al. Implications of droplet breakup and formation of ultra fine mist in blast mitigation [J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(3): 363-369. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.08.003.
- [12] JONES A, NOLAN P F. Discussions on the use of fine water sprays or mists for fire suppression [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1995, 8(1): 17-22. DOI: 10.1016/0950-4230(95)90057-V.
- [13] 胡翔. 细水雾对冲击波的削弱作用研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.

- HU X. Research on the mitigation of shock wave using fine water mist [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [14] 陈鹏宇, 侯海量, 刘贵兵, 等. 水雾对舱内装药爆炸载荷的耗散效能试验研究 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(5): 927–933. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.05.012.
- CHEN P Y, HOU H L, LIU G B, et al. Experimental investigation on mitigating effect of water mist on the explosive shock wave inside cabin [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(5): 927–933. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.05.012.
- [15] 孔祥韶, 况正, 郑成, 等. 舱室密闭空间中爆炸载荷燃烧增强效应试验研究 [J]. *兵工学报*, 2020, 41(1): 75–85. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.01.009.
- KONG X S, KUANG Z, ZHENG C, et al. Experimental study of after burning enhancement effect for blast load in confined compartment space [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(1): 75–85. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.01.009.
- [16] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2014.02.003.
- 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2014.02.003.
- [17] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2013.03.009.
- 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. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2013.03.009.
- [18] 张玉磊, 苏健军, 李芝绒, 等. TNT 内爆炸准静态压力特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(6): 1429–1434. DOI: 10.11883/bzyjc-2017-0170.
- ZHANG Y L, SU J J, LI Z R, et al. Quasi-static pressure characteristic of TNT's internal explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6): 1429–1434. DOI: 10.11883/bzyjc-2017-0170.
- [19] 李芝绒, 王胜强, 蒋海燕, 等. 圆筒装置内爆炸压力载荷特性实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(10): 102202. DOI: 10.11883/bzyjc-2018-0327.
- LIZ R, WANG S Q, JIANG H Y, et al. Experimental studies on characteristics of explosion pressure load in cylinder apparatus [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(10): 102202. DOI: 10.11883/bzyjc-2018-0327.
- [20] FELDGUN V R, KARINSKI Y S, EDRI I, et al. Prediction of the quasi-static pressure in confined and partially confined explosions and its application to blast response simulation of flexible structures [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 90: 46–60. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.12.001.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] YUEN S C K, NURICK G N, LANGDON G S, et al. Deformation of thin plates subjected to impulsive load: part III—an update 25 years on [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 107: 108–117. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.06.010.
- [24] 孔祥韶, 周沪, 郑成, 等. 基于饱和和响应时间的封闭空间内爆炸载荷等效方法研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(9): 092102. DOI: 10.11883/bzyjc-2018-0183.
- KONG X S, ZHOU H, ZHENG C, et al. An equivalent calculation method for confined-blast load based on saturated response time [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(9): 092102. DOI: 10.11883/bzyjc-2018-0183.

(责任编辑 曾月蓉)