DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1080-07

# 水介质对舱内爆炸抑制作用的实验研究*

李 营[1,2],任广为[2],张 玮[2],赵鹏铎[2],张 磊[2],杜志鹏[2]
(1.北京理工大学先进结构技术研究院,北京 100081;
2.海军装备研究院,北京 100161)

**摘要**:为探索舰船抗舱内爆炸的机理和技术手段,设计了多舱室缩比模型,开展了有水和无水介质的爆炸实验,对比了爆炸当舱水介质对爆炸反应过程、邻舱冲击波峰值、比冲量及准静态压力的影响。研究结果表明:(1)水介质对舱内爆炸邻舱冲击波峰值、比冲量和准静态压力均有明显的衰减作用;(2)在一定区间内,炸药当量越大,水介质抑制内爆炸的效果越明显;(3)水介质能有效阻碍燃烧等爆炸后续效应,影响准静态压力形成。

**关键词**:内爆炸;抑爆效果;准静态压力;后续燃烧;反舰导弹
**中图分类号**:O383.1;U663.2 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

反舰导弹舱内爆炸是现代舰艇面临的最重要的武器威胁之一。反舰导弹战斗部在舱内爆炸作用下会在较大范围内产生结构破损,造成舰船结构严重毁伤[1]。针对舰船内爆炸毁伤的特点,已有较多防护机理和技术手段方面研究。航母等大型水面舰艇结构尺度大,一般通过设置多层防护结构防护水下接触爆炸和舱内爆炸,保护内部舱室[2]。而驱逐舰、护卫舰等舰艇由于结构尺寸和重量限制,没有足够的整体资源设置多层防护结构或大范围增加舱壁厚度,防护设计需要拓宽新思路。

王启睿等[3]、张晓忠等[4]通过设置水介质,有效衰减了坑道内的爆炸冲击波峰值。L. Chen 等[5-6]通过设置水墙的方式,有效衰减了自由场中的冲击波峰值和冲量。此外,张鹏鹏[7]采用水雾的方式衰减甲烷等气体的燃气爆炸作用,取得了较好的效果。但上述研究重点关注了冲击波峰值,对舱内爆炸中的准静态压力等特有载荷关注不够。

本文中根据设计的多舱室缩比模型,重点关注爆炸邻舱的响应,开展有无水介质的爆炸实验,对比爆炸当舱水介质对爆炸反应过程、邻舱冲击波峰值、比冲量及准静态压力的影响。研究结果可为舰船抗内爆炸防护设计提供新思路和方法。

## 1 实验设计

### 1.1 实验装置

实验所使用的多舱室内爆炸实验装置如图 1 所示。该装置采用 345R 压力装置专用钢制成,由两个不同宽度的舱室组装而成,其侧壁厚 30 mm,截面尺寸 400 mm×400 mm,宽度分别为 300、200 mm。其中,宽度 300 mm 的舱室设为爆炸当舱,宽度 200 mm 的舱室设为爆炸邻舱。

两个舱室中间加装开口板以模拟爆炸形成舰船板架破口,进而将毁伤载荷传递到邻舱。开口板板厚为 12 mm,板上设置直径为 150 mm 的爆炸模拟破口。爆炸当舱的封板选用开口板(中间开口的直径为 150 mm)以模拟反舰导弹穿舱破口,其板厚为 12 mm。舱室间采用 24 个∅18 mm 的螺栓固定。装药采用长径比大于 1.5 的柱状 TNT,其密度为 1.6 g/cm$^3$,采用 8# 雷管引爆。炸药药柱布置于爆炸当舱正中心。采用量程为 10 MPa 的壁面反射式压力传感器测量隔舱冲击波压力。袋装水与测点的布置示意图如图 2 所示。

* **收稿日期**:2016-04-27;**修回日期**:2016-09-27
**基金项目**:国家自然科学基金项目(51509196);中央高校基本科研业务费专项基金项目(2014-yb-20)
**第一作者**:李 营(1988— ),男,博士;**通信作者**:张 玮,leehom1029@sohu.com。

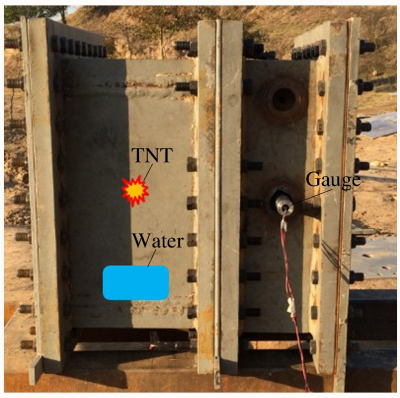


图 1　多舱结构平视图

Fig. 1　Front view of multi-cabin

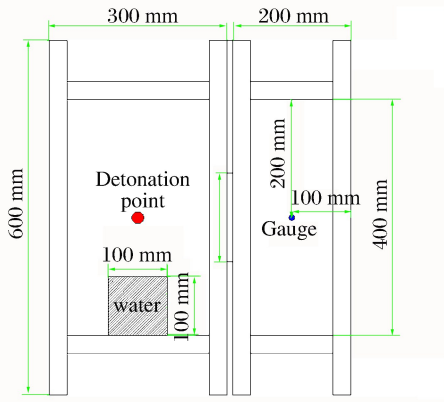


图 2　多舱结构示意图

Fig. 2　Schematic of multi-cabin

### 1.2　实验工况

为了对比水介质及炸药当量对爆炸邻舱的影响，共开展了 6 组实验，具体工况设置如表 1 所示。

**表 1　实验工况**

**Table 1　Experimental cases**

| 工况 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| TNT 药量/g | 20 | 25 | 30 | 20 | 25 | 30 |
| 有无袋装水 | 无 | 无 | 无 | 有 | 有 | 有 |

## 2　实验结果与分析

### 2.1　爆炸过程分析

通过拍摄导弹穿舱模拟口的现象反映舱内爆炸反应过程。实验中采用 NAC 高速相机记录实验过程，采样频率选取为 1 000 $s^{-1}$，即每两张照片的间隔为 1 ms。炸药在空气中的爆炸过程主要包括炸药的爆轰、爆轰产物的传播、冲击波在空气中的传播以及冲击波与障碍物相互作用等。20 g TNT 有无水内爆炸响应过程如图 3 所示。

通过有/无袋装水情况下爆炸过程的对比，发现有以下特点：

(1)爆炸初始阶段，即引爆至爆炸火球喷射阶段的爆炸过程基本相同。炸药被引爆后爆炸形成巨大的爆炸火球，火球膨胀并通过封板开口传递到内爆发生装置以外，火球呈现喷射状。火球在 4 ms 时达到最大，最大长度约为 1 m，喷射速度约为 260 m/s。由于水介质受到爆炸冲击作用发生破碎及雾化需要一定的时间，因此未能第一时间与爆轰产物发生相互作用。

(2)爆炸中后期阶段，有无袋装水有一定的差异。无袋装水情况下，由于炸药发生了充分的反应，爆炸火焰完成了火球-火舌-熄灭的转化过程，火焰持续时间较长，到 27 ms 时才完全消失，生成的爆轰产物为灰色；有袋装水情况下，水介质在爆炸冲击波作用下发生破碎，并与爆炸火焰在火球向火舌的转化阶段之前相互作用，火焰逐渐被扑灭，9 ms 时火焰完全熄灭，未能完成火球向火舌的转化，有效阻止了爆炸后续燃烧过程的发展。生成的爆轰产物呈现黑灰色，炸药的后续燃烧不充分。

整个过程的示意图如图 4 所示，根据水介质状态的不同，可以划分为 4 个阶段。第 1 阶段为初始阶段，炸药爆炸，在舱内形成冲击波，但爆炸冲击波并未遇到水，此阶段舱内的冲击波压力与无水舱室完全相同。第 2 阶段为水介质碎裂阶段，爆炸冲击波在舱内反射(包括水介质表面)并传播到相邻舱室，水介质在冲击波作用下运动，部分能量转变为水介质动能，冲击波作用下大块的水介质碎裂成较大质量水滴，随着液水滴数量的增多，液体总表面变大，冲击波的能量部分转变成液滴碎裂能，即 $E_s=\pi d^2\sigma$(其中 $E_s$ 为单个液滴的表面能，$d$ 为液滴直径，$\sigma$ 为表面张力)。水滴雾化阶段，爆炸前期过程基本结束，水滴

在冲击波作用下进一步碎裂成细小颗粒，逐渐雾化，此阶段液滴动能和碎裂能进一步增加的同时，小液滴温度升高，由于水介质比热容较大，这部分能量也较为可观。第 4 阶段为水雾蒸发阶段，爆炸进入后续燃烧阶段，部份液滴进一步碎裂成微小颗粒，随着液滴温度升高，微小液滴蒸发汽化，发生相变，带走爆炸热量并使得后续燃烧不完全。有关研究表明[8]，液滴较大时，动能和碎裂能是主要原因，对应实验的早期物理过程；当液滴较小时，液滴温度升高和蒸发是主要原因，对应实验的后期物理过程。

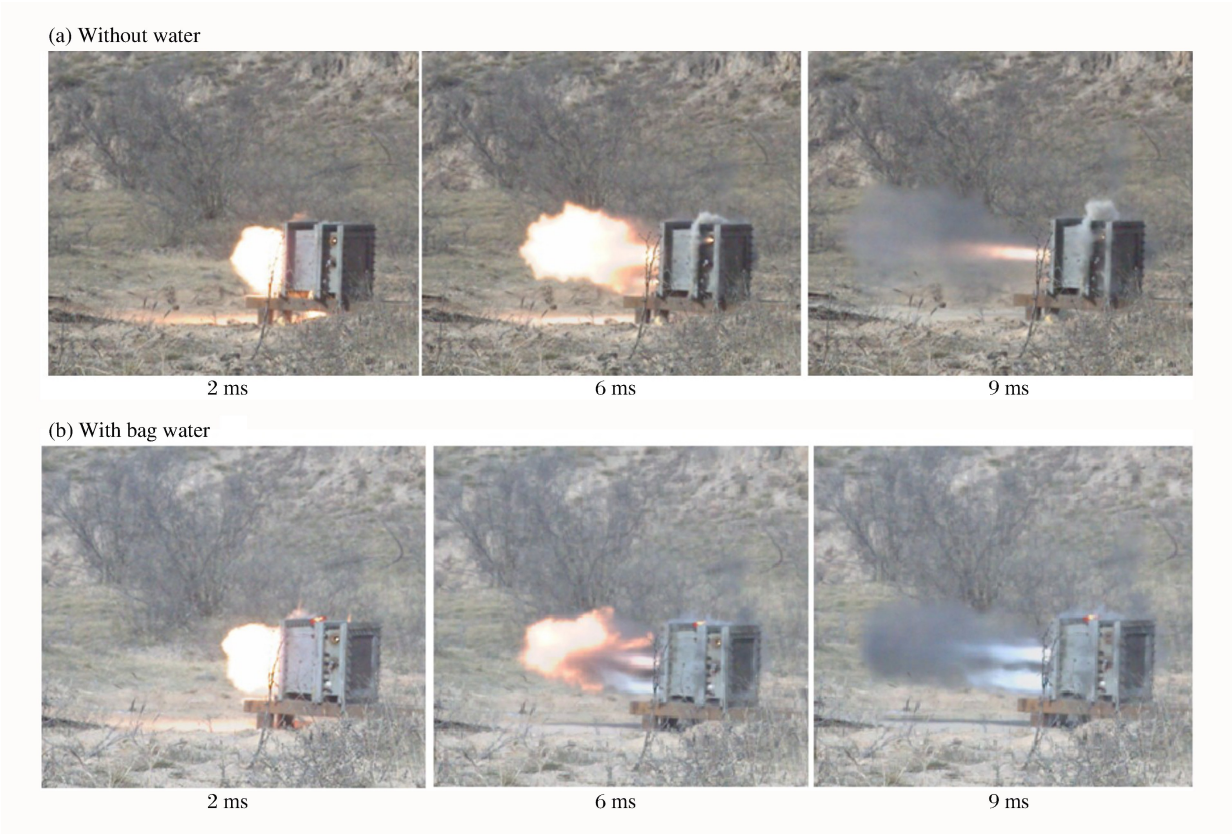


图 3 20 g TNT 工况下爆炸过程

Fig. 3 Process of 20 g TNT explosion

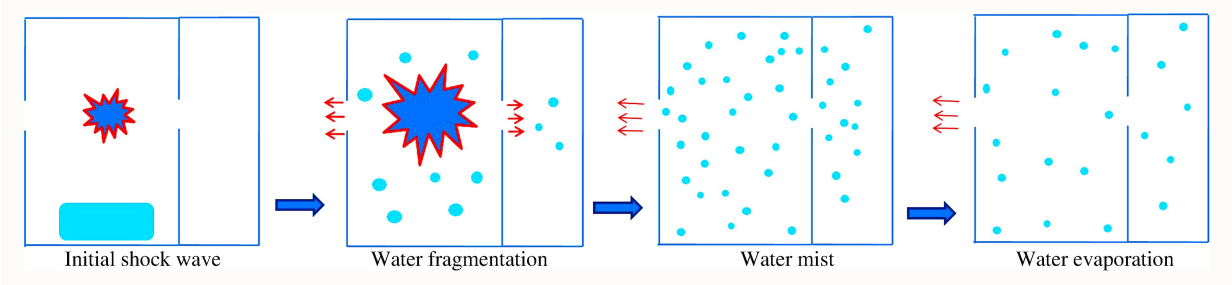


图 4 水介质响应过程示意图

Fig. 4 Schematic of water response process

## 2.2 压力时域曲线

图 5 给出了 6 种不同工况下所测得的爆炸邻舱压力时间历程曲线。可以看出，有/无袋装水时的冲击波压力曲线趋势基本相同，均呈现“快速上升，缓慢下降”的特点，冲击波压力明显具有初始冲击波和准静态压力两个阶段。在初始冲击波阶段，冲击波压力曲线发生多次振荡，冲击波压力呈现明显的多峰性，每个峰值的正压作用时间仅约为 $10^{-1}$ ms 量级。冲击波各峰值之间的间距与冲击波以声速在舱内往复传播的时间差相当，确认为真实物理信号。

在准静态压力阶段，冲击波压力曲线的振荡趋势逐渐减缓，压力随时间增加缓慢衰减，整个衰减过

程持续 20 ms 以上。准静态压力阶段压力衰减大体呈指数衰减趋势，符合有孔封闭空间准静态压力衰减的一般规律[9]。

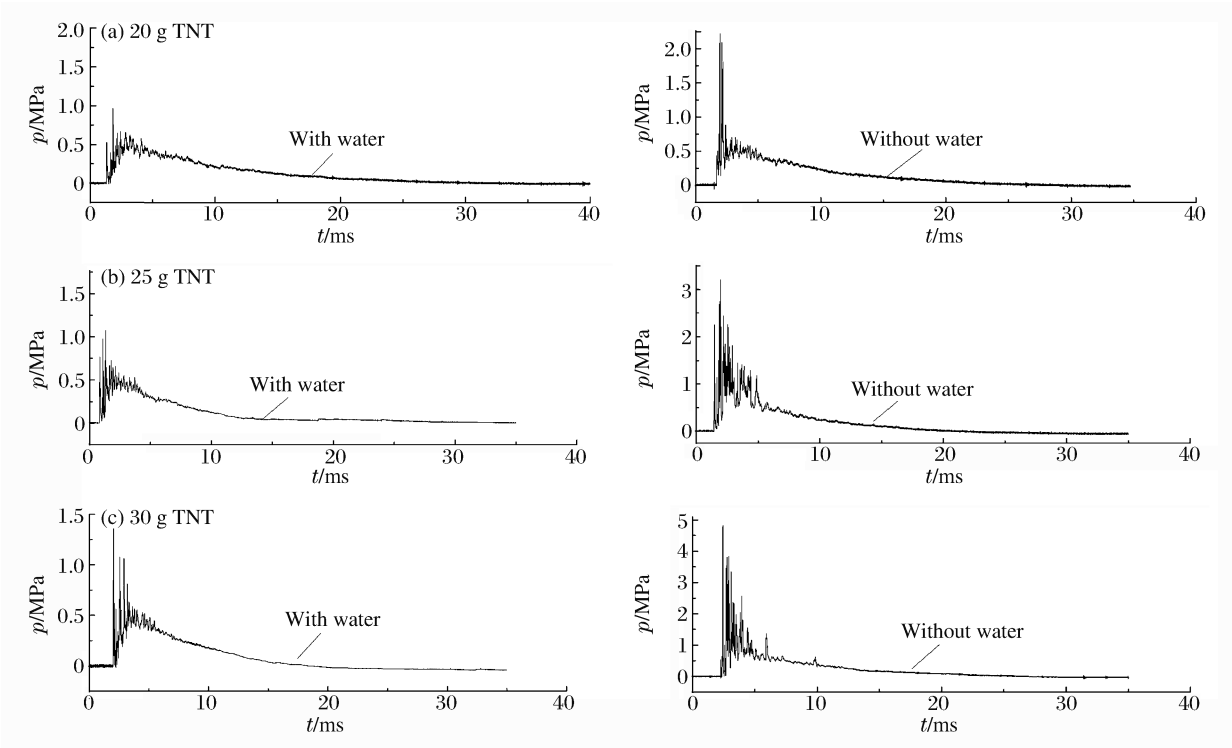


图 5　不同工况下压力时间历程曲线

Fig. 5　Pressure-time curves in different cases

## 2.3　超压峰值与比冲量

不同药量下，有/无袋装水时的超压峰值如图 6(a)所示。可以看出，在有/无水袋装水时的超压峰值均随药量增加而单调递增。但水介质有效减缓了超压峰值随 TNT 药量增加而增大的趋势。这是因为随着 TNT 药量的增加，水介质在冲击波载荷作用下发生更充分的压缩变形、破碎、飞散，进而形成更大的表面积与冲击波相互作用，从而使冲击波在传播过程中发生衰减[6]。由此可见，袋装水可有效降低爆炸冲击作用下的冲击波超压峰值。

比冲量对比如图 6(b)所示。可以看出，对于无袋装水的工况，比冲量随 TNT 药量的增加而增加；对于有袋装水的工况，比冲量随 TNT 药量的增加而减小。这种现象说明了爆炸载荷的强度影响水介质与冲击波相互作用的充分程度，进而影响对冲击波的消减效果。

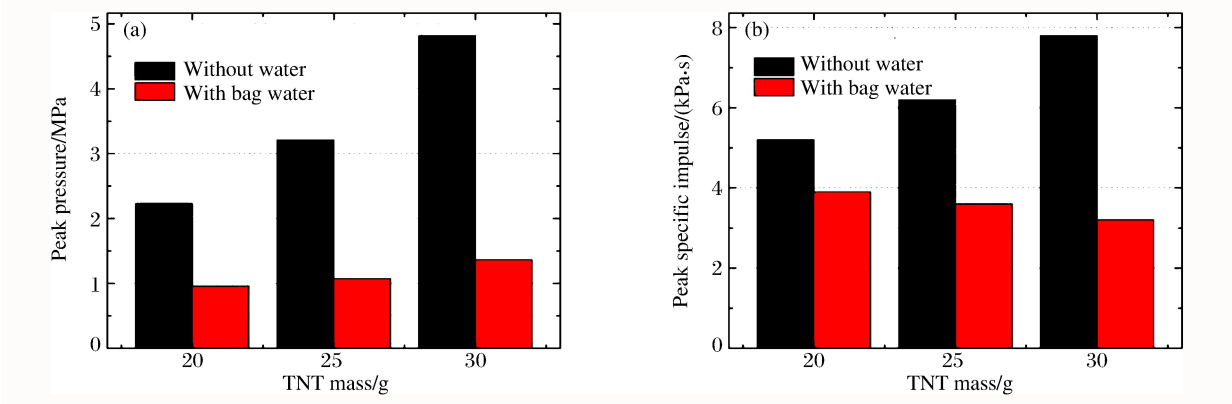


图 6　有/无袋装水工况下冲击波超压峰值和比冲量

Fig. 6　Shock pressure peak and specific impulse with/without water

### 2.4 准静态压力

通过对冲击波压力曲线下降阶段的数据进行拟合，可得到各工况下准静态压力随时间变化的曲线。拟合效果示意图如图 7 所示，从图中可以看出，采用指数形式拟合的曲线与原始数据吻合较好。

从图 8 中可以看出，无袋装水时，准静态压力峰值随 TNT 药量的增加而单调增加，符合压力随药量变化的一般规律。在一定范围内，随着装药量的增大，水介质对准静态压力的衰减效果更加明显，体现为衰减比逐渐增大。

研究表明，水介质破碎程度及蒸发吸能会影响对爆炸的抑制效果[10]。当炸药药量较小时，无法使水介质发生充分的破裂，水介质破碎程度影响水介质的蒸发率以及蒸发质量，进而影响水介质所吸收的能量。炸药药量较小时水介质无法充分破碎，无法对准静态压力进行有效的消减。随着炸药药量的增加，才能对准静态压力进行更充分有效的消减。

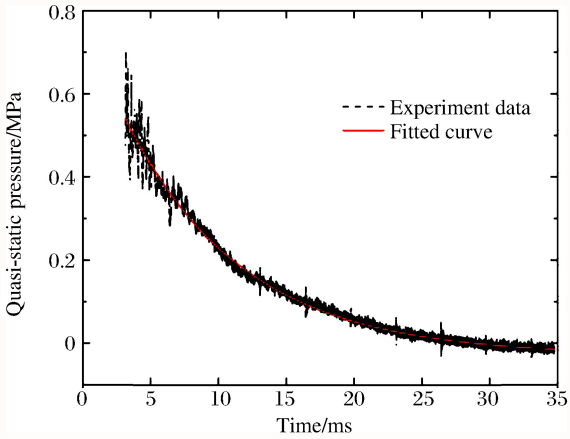


图 7 准静态压力曲线拟合效果示意图(工况 4)

Fig. 7 Quasi-static pressure and fitted curve(case 4)

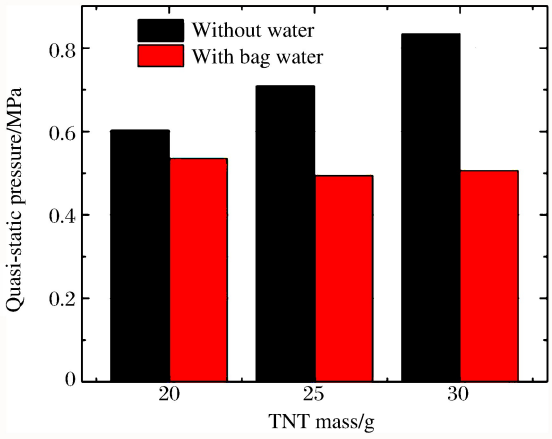


图 8 有/无袋装水工况下准静态压力峰值

Fig. 8 Quasi-static pressure peak with/without water

### 2.5 对内爆炸的综合抑制效果

从表 2 中可以看出，水介质对超压峰值、准静态压力和比冲量均具有明显的衰减作用。随着 TNT 药量的增加，对各参数消减效果迅速增加，这是由于药量的增加导致了爆炸强度的增大，使得水介质与爆炸冲击波发生了更为充分的相互作用，水介质吸收的能量随之增加，因此水介质的消减效果有效提升。其中，对相邻舱室超压峰值的消减效果最佳，当炸药量较大时可高达 71.2%。对比冲量的消减效果高于对准静态压力峰值的消减效果。

**表 2 不同药量下水介质衰减内爆炸效果**

**Table 2 Effect of bag water for internal blast**

| 药量/g | 超压峰值/% | 比冲量/% | 准静态压力/% |
|---|---|---|---|
| 20 | 56.9 | 25.0 | 11.3 |
| 25 | 66.7 | 41.9 | 30.3 |
| 30 | 71.2 | 59.0 | 39.3 |

## 3 分析与探讨

TNT 在空气中爆炸时的反应方程式[11]为：

$$C_7H_5O_6N_3 = 2.0H_2O + 0.188CO + 5.15C + 1.66CO_2 + 1.5N_2 \quad (1)$$

从式(1)可以看出，TNT 空中爆炸后会产生大量的燃料(CO、C)。在环境适宜的条件下，高温产物会与周围环境中的氧气混合发生燃烧，持续释放能量，并使得封闭舱室内温度升高。

舱内爆炸是以爆炸产物的气体准静态压力为显著特征的，劳式船级社[12]将准静态压力作为舰艇结

构抗爆设计中除爆炸破片外的唯一载荷。有关研究表明[13]，气体准静态压力由以下部分组成：

$$P_{\mathrm{qua}}=\left(\frac{P_0}{\gamma_0-1}(V-V_{\mathrm{E}})+(\Delta E_{\mathrm{DET}}+\Delta E_{\mathrm{ab}})\rho_{\mathrm{E}}V_{\mathrm{E}}\right)\frac{\gamma-1}{\gamma} \tag{2}$$

式中：$P_{\mathrm{qua}}$ 为准静态压力；$P_0$ 指大气压力，为 0.101 MPa；$\rho_{\mathrm{E}}$ 为炸药密度；$\gamma_0$、$\gamma$ 分别代表空气和爆炸混合气体的绝热指数，分别为 1.4 和 1.35；$V$、$V_{\mathrm{E}}$ 分别指舱室体积和炸药体积；$\Delta E_{\mathrm{DET}}$、$\Delta E_{\mathrm{ab}}$ 分别指单位质量炸药的爆炸能和后续燃烧能，分别为 4.495、10.01 MJ/kg，两者共同构成爆炸总能量。

将各参数代入式(2)，考虑爆炸当舱气体爆炸产物泻出，并与有水、无水工况进行比对，如图 9 所示。可以看出：(1)无水工况中实验测量准静态压力值与公式预测值吻合较好；(2)舱室中放置水介质后，实验测量的准静态压力值介于炸药完全反应和只考虑爆炸效应之间，说明水介质的存在影响了后续燃烧效应的反应程度；(3)随着炸药量的增加，有水工况的准静态压力值逐渐靠近只考虑爆炸效应的曲线，说明在一定区间内，随着装药量增大，水介质对炸药后续燃烧效应的抑制作用更加明显。

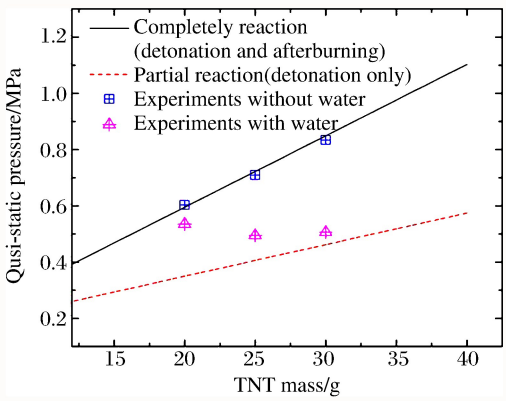


图 9 有无水工况与理论公式的对比

Fig. 9 Experiments with or without water vs. formula

有关研究表明，后续燃烧能与爆炸能的比值约为 2∶1，后续燃烧能对准静态压力的贡献比爆炸能大[14]。结合实验结果分析，准静态压力降低的主要原因为爆炸效应使得袋装水碎裂、运动并发生汽化。当炸药当量较大时，袋装水碎裂成更小的颗粒，除了液体碎裂过程吸收少量能量以外，大部分能量使液滴蒸发更充分，对炸药后续燃烧能的衰减作用也更为明显。

## 4　结　论

舰船抗内爆炸研究是一项具有挑战性的工作，需要在现有技术手段基础上不断探索新机理和新手段。本文中通过开展水介质对舱内爆炸作用抑制作用的实验研究，划分了水介质抑制内爆炸响应的阶段，讨论了水介质对临舱冲击波峰值、比冲量及准静态压力的影响规律，并结合公式探讨了水介质影响后续燃烧效应的机理。研究得到以下主要结论：

(1)水介质对舱内爆炸邻舱冲击波峰值、比冲量和准静态压力均有明显的衰减作用，其中对冲击波峰值的衰减作用最明显；

(2)水介质能够有效阻碍燃烧等爆炸后续效应，致使炸药反应不完全，降低了封闭舱室内的准静态压力；

(3)在一定区间内，炸药当量越大，水介质汽化、蒸发越明显，水介质抑制内爆炸的效果越显著；

(4)战时可采用临时设置水袋的方式，减缓重点防护舱室在内爆炸作用下的毁伤。

## 参考文献：

[1]　朱锡，张振华，梅志远，等. 舰船结构毁伤力学[M]. 北京：国防工业出版社，2013.

[2]　杜俭业，杜志鹏，李营，等. 舰船爆炸冲击防护技术进展[J]. 兵工学报，2016，36(增刊 1)：391-400.
Du Jianye, Du Zhipeng, Li Ying, et al. The progress of naval ship explosion protection technology[J]. Acta Armamentarii, 2016, 36(suppl 1): 391-400.

[3]　王启睿，张晓忠，邓建辉，等. 坑道中水的抑爆消波性能试验研究[J]. 工程爆破，2011，17(3)：15-20.
Wang Qirui, Zhang Xiaozhong, Deng Jianhui, et al. Test research on explosion suppression and attenuating wave capabilities of water in tunnel[J]. Engineering Blasting, 2011, 17(3): 15-20.

[4]　张晓忠，金峰，孔福利，等. 坑道内爆炸条件下水的消波效应研究[J]. 应用力学学报，2012，29(2)：148-154.

Zhang Xiaozhong, Jin Feng, Kong Fuli, et al. Study on shock wave attenuation effect of water under internal detonation loading in the tunnel[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2012,29(2):148-154.

[5] Chen L, Zhang L, Fang Q, et al. Performance based investigation on the construction of anti-blast water wall[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015,81:17-33.

[6] Chen L, Fang Q, Zhang L, et al. Numerical investigation of a water barrier against blast loadings[J]. Engineering Structures, 2016,111:199-216.

[7] 张鹏鹏.超细水雾增强与抑制瓦斯爆炸的实验研究[D].大连:大连理工大学, 2013.

[8] 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.

[9] Weibull H R. Pressures recorded in partially closed chambers at explosion of TNT charges[J]. Annals of the New York Academy of Science, 1968,152(1):357-361.

[10] Zhang P, Zhou Y, Cao X, et al. Mitigation of methane/air explosion in a closed vessel by ultrafine water fog[J]. Safety Science, 2014,62:1-7.

[11] 周霖.爆炸化学基础[M].北京:北京理工大学出版社,1995:40.

[12] 劳式船级社.军用载荷规范[S].2015:6-12.

[13] 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.

[14] Lornellas D. Calorimetric determinations of the heat and products of detonation for explosives[R]. Livermore, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1982.

# Water mitigation effect under internal blast

Li Ying[1,2], Ren Guangwei[2], Zhang Wei[2], Zhao Pengduo[2], Zhang Lei[2], Du Zhipeng[2]

(1. *Institute of Advanced Structure Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Naval Academy of Armament, Beijing* 100161, *China*)

**Abstract**: In this work, we investigated a study of the mechanism governing the internal blast in a warship cabin and the technique for preventing it. We developed a multi-cabin structure and carried out experiments with/without water were on the cabin to record and compare such data as the blast process, the peak pressure, the specific impulse and the quasi-static pressure. The results showed that (1) water could obviously reduce the peak pressure, the specific impulse and the quasi-static pressure, that (2) within a certain range, the greater amount of TNT, the more obvious the attenuation, and that (3) water could constrain the afterburning phenomena and TNT reaction, thereby affecting the formation of the quasi-static pressure.

**Keywords**: internal blast loading; mitigation effect; quasi-static pressure; afterburning phenomena; anti-ship missile

(责任编辑 曾月蓉)