

DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0844-09

液滴对爆炸冲击波的衰减作用*

刘贵兵^{1,2}, 侯海量¹, 朱 锡¹, 张国栋¹

(1. 海军工程大学舰船工程系, 湖北 武汉 430033;

2. 中国人民解放军 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 为分析液滴对舰船舱内爆炸冲击波的耗散与衰减作用, 通过有限元分析方法, 建立冲击波作用于不同尺寸单个液滴和多排液滴的模型, 分析冲击波与单个及多个液滴的作用过程及液滴形态变化, 对冲击波衰减规律进行分析总结。得到结论如下: 单个液滴模型中, 小液滴破碎更迅速, 破碎的规律性强; 大液滴抛撒现象发生较早, 抛撒出的小液滴数目多, 但整体变化规律性偏差; 不同尺寸单个液滴对冲击波有一定的衰减作用, 衰减率随液滴尺寸增大而增大, 线性规律较明显; 成排液滴对冲击波有明显的衰减作用, 相同液滴密度下衰减率随着液滴数量的增多而增大, 呈现明显的线性特性。

关键词: 冲击波; 液滴破碎; 比冲量; 环流

中图分类号: O344.7

国标学科代码: 1301515

文献标志码: A

导弹穿透舷侧外板在舰艇舱内爆炸, 是舰艇结构的最重要的毁伤载荷形式^[1], 舱内爆炸下抗爆方法的研究具有重要的理论价值和应用前景。目前, 舰艇抗爆设计主要有泄爆和隔爆两种方法。泄爆主要是指膨胀泄压, 即设置空舱、长走廊等以空间距离衰减耗散爆炸产物、冲击波的强度和能量, 以空间容积耗散降低准静态气压的压力, 如水下爆炸防护结构中的膨胀空舱^[2-3], 大中型舰艇舷侧设置的长走廊等。隔爆主要针对爆炸冲击波而言, 分为两种思路: (1) 采用抗爆吸能结构耗散爆炸载荷的冲击能量, 以达到保护重要舱室的目的, 如以角锥桁架、矩形蜂窝、四边形蜂窝、波纹板等为芯层的多层夹芯板^[4-6]; (2) 在爆炸冲击波的传递途径上设置其他介质相, 利用冲击波在不同介质间界面上的入射、反射等现象, 耗散冲击波能量, 削弱冲击波强度。一维波理论^[7]表明, 当多种介质按照软、硬相间的顺序排列时, 可衰减透射压力场的峰值强度和能量, 波阻抗比越大, 衰减效果就越好。如在水中设置空气隔层衰减水下爆炸冲击波^[8-9]、在空气中设置水层实现对空中爆炸冲击波的阻隔^[10-11], 最典型的结合即舰船水下防护结构中设置的多层防护结构。

根据水和空气的波阻抗差异, 在冲击波传播途径中喷射水雾实现隔爆, 与上述第 2 种隔爆思路一致, 区别在于气液两相混合介质中液滴呈弥散分布, 气液两相界面更多, 无明显的层状特征, 冲击波的传播更复杂。在冲击波与液滴相互作用特性方面已有较多研究, 典型的有, G. Jourdan 等^[12]从实验和数值模拟两方面研究了直径约为 120、250、500 μm 的密集液滴对 $Ma = 1.1 \sim 1.8$ 的冲击波的衰减作用。本文中, 为探讨水雾对舰船舱内爆炸强冲击波的耗散作用与机理, 采用动态非线性有限元, 分析不同尺寸液滴和层状排列液滴分别与冲击波与的相互作用, 试图得到冲击波衰减的规律。

1 模型建立

舰船遭受到反舰武器攻击发生舱内爆炸前, 在舱室内部喷洒水雾, 以达到抑制冲击波和衰减其强度的作用, 宏观模型如图 1 所示。在进行有限元数值模拟时, 选取其中的一个或几个液滴建立二维平面模型(见图 2~3), 二维模型能够有效模拟平面内液滴破碎, 直观反映模型内部的压力变化历程以及液滴的形态变化及位置改变。

* 收稿日期: 2016-01-25; 修回日期: 2017-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209211, 51479204)

第一作者: 刘贵兵(1992—), 男, 硕士研究生; 通信作者: 侯海量, hou9611104@163.com。

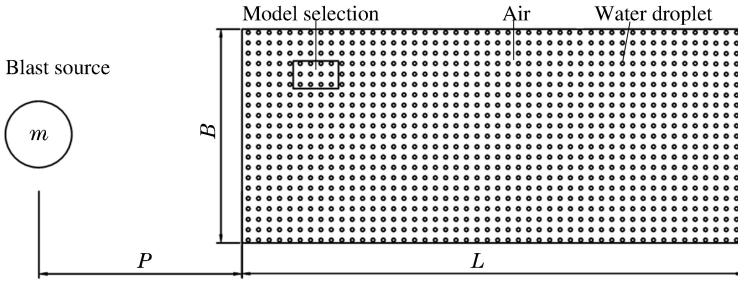


图 1 水雾抑爆宏观模型

Fig. 1 Macromodel of mist explosion suppression

运用有限元软件 LS-Dyna 建立平面模型,欧拉域长 $l=40\text{ mm}$,宽 $b=20\text{ mm}$,液滴直径 d 。欧拉域上下边界均采用对称边界设置,以减小模型内比冲量的损失,前后边界为自由流入流出边界,保证冲击波可以正常作用于液滴。在欧拉域前距离为 P 的位置放置 TNT 当量为 m 的爆炸源。

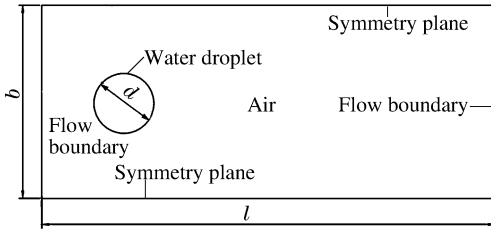


图 2 单个液滴微元模型

Fig. 2 Micromodel of single droplet

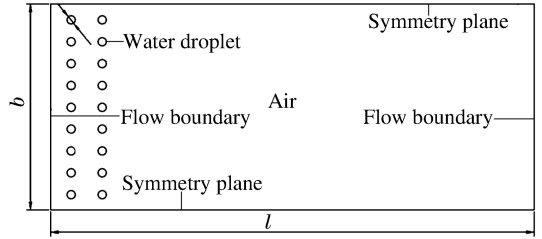


图 3 多排液滴模型

Fig. 3 Micromodel of multi-row droplets

模型中,空气采用 NULL 材料模型及线性多项式状态方程描述:

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (1)$$

式中: p 为压力; E 为单位体积内能,取 252.5 kJ/m^3 ; $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, V 为相对体积,初始相对体积 V_0 取 1.0;空气密度取 1.225 kg/m^3 ; $C_0 \sim C_6$ 为多项式方程系数,当线性多项式状态方程用于理想气体模型时, $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = \gamma - 1$, $\gamma = c_p/c_v$ 为气体的热容比,取 $\gamma = 1.4$ 。

液滴采用 Gruneisen 状态方程描述:

$$p = \begin{cases} \frac{\rho_0 c^2 \mu [1 + (1 - \gamma_0/2)\mu - \mu^2 a_m/2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \mu^2/(1 + \mu) - S_3 \mu^3/(\mu + 1)^2]} + (\gamma_0 + a_m \mu)E & \mu > 0 \\ \rho_0 c_1^2 \mu + (\gamma_0 + a_m \mu)E & \mu < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:Gruneisen 系数 $\gamma_0 = 0.4934$, 体积修正系数 $a_m = 1.3937$; $S_1 = 2.56$, $S_2 = -1.986$, $S_3 = 0.2268$, E 为单位体积内能; $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 。此处,模型中微粒为直径 1、2、4、6、8 mm 的液滴,冲击波在水中的速度为 1484 m/s ,初始能量 $E_0 = 918.2\text{ kJ}$,初始相对体积 $V_0 = 1.0$ 。

由冲击波的基本关系可知,冲击波速度^[13]为:

$$D = \sqrt{[(k + 1)\Delta p_m + 2kp_0]/2\rho_0} \quad (3)$$

式中: k 是空气绝热指数,一般取为 1.4; p_0 为一个标准大气压; ρ_0 为未受扰动的空气密度; Δp_m 为冲击波峰值超压。 Δp_m 为冲击波传播距离的函数,可由经验公式^[14]得到:

$$\Delta p_m = \begin{cases} \left(\frac{0.00625}{\bar{r}^4} - \frac{0.3572}{\bar{r}^3} + \frac{5.5397}{\bar{r}^2} + \frac{14.0717}{\bar{r}} \right) \times 10^5 & 0.05 \leq \bar{r} \leq 0.50 \\ \left(\frac{0.67}{\bar{r}} + \frac{3.01}{\bar{r}^2} + \frac{4.31}{\bar{r}^3} \right) \times 10^5 & 0.50 < \bar{r} \leq 70.90 \end{cases} \quad (4)$$

式中: Δp_m 为无限空中爆炸时冲击波峰值超压,单位为 Pa;比例距离 $\bar{r} = r/\sqrt[3]{m_e}$,单位为 $\text{m/kg}^{1/3}$,其中 r 为距爆炸中心点的距离,单位为 m; m_e 为爆炸装药的 TNT 当量,单位为 kg。式(4)对时间积分可得冲击波传播距离和时间的关系。冲击波作用时间^[15]为:

$$t_+ = 1.350 \times 10^{-3} \sqrt{r} \sqrt[6]{m_e} \quad (5)$$

式中: t_+ 为正压作用时间,单位为 s。

为分析强度冲击波与液滴的相互作用,选用两组实验工况,见表 1。

表 1 计算工况

Table 1 Working condition of calculations

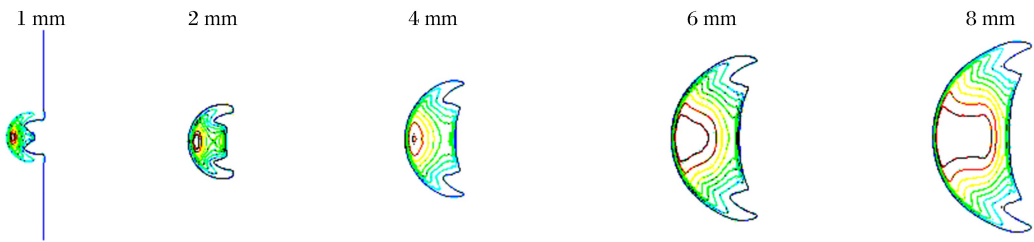
r/m	m_e/kg	$\bar{r}/(m \cdot kg^{-1/3})$	$\Delta p_m/MPa$	t_+/ms	$v/(m \cdot s^{-1})$	Ma
2.0	100	0.431	5.821	4.113 2	2 350.5	6.913
0.2	0.1	0.431	5.821	0.411 3	2 350.5	6.913

2 不同尺寸液滴的压力场及形态

2.1 液滴模型压力场分析

为研究单个液滴模型中压力场和形态的变化,假设在变化过程中液滴不受其他液滴的碰撞和干扰。图 4~6 为 100 kg 的 TNT 在 2.0 m 处爆炸时(冲击波马赫数为 6.913)冲击波作用于液滴时的压力场传播的有限元分析结果。

由图 4 可明显发现,在爆炸源发生爆炸 $5 \mu s$ 时刻,冲击波作用于液滴后的受扰动压力场面积随着液滴尺寸的增大而增大。冲击波接触到液滴后,迅速产生反射波,反射波呈圆弧状向外扩展,由内向外压强依次递减;在液滴两侧形成环流;液滴后方迅速产生透射波区域,在小尺寸液滴模型中,透射波区域凸出更明显,包围状压力场形状更饱满;在环流和透射波区域之间,受稀疏波影响产生内凹状的低压角区域。

图 4 各尺寸液滴 $5 \mu s$ 时刻的压力场Fig. 4 Pressure waves of several droplets at $5 \mu s$

由图 5 可知,环流压力场逐渐向液滴两侧延伸变长,并有向液滴中后方衍生的趋势,图 5(a)中可见环流两翼绕过液滴区域相互接触成新的压力场区域,此时在液滴后侧形成全包围状的低压区域,低压区域面积随着液滴尺寸的增大而增大。由于液滴尺寸的差异,液滴后侧衍生压力区形成的时间以及透射波消散的时间存在差异。液滴尺寸越大,绕射时间越长,因此在 $10 \mu s$ 时刻衍射区域随尺寸增大而减小;液滴尺寸越大,透射时间越长,透射波越宽且消散的越缓慢。

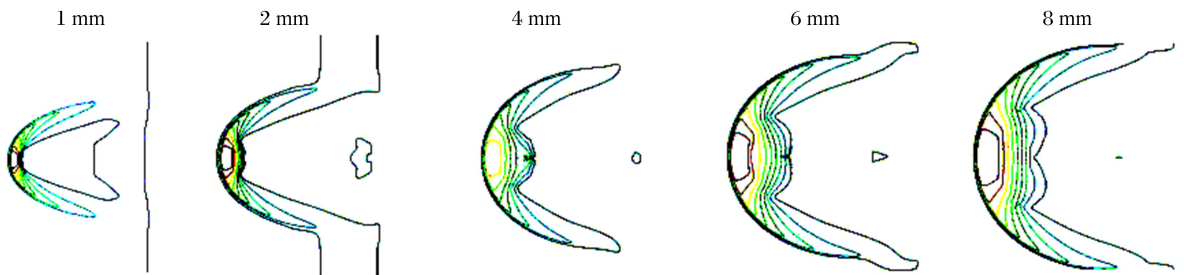
图 5 各尺寸液滴 $10 \mu s$ 时刻的压力场Fig. 5 Pressure waves of several droplets at $10 \mu s$

图 6 为爆炸源发生爆炸后 $15 \mu s$ 时刻的压力场曲线图。此时,直径为 4、6、8 mm 的液滴模型,两翼环流延伸至模型上下壁面并发生反射,在以环流与壁面接触点为中心的位置形成了新的压力场区域,该点附近即为该区域高压区,压力场依次向外变稀疏,即压力值向外逐渐减小。透射波区域仍存在液滴尺寸越大越凸出的规律,比 $10 \mu s$ 时刻透射波边缘呈现出压力场波动较大的曲线波面。

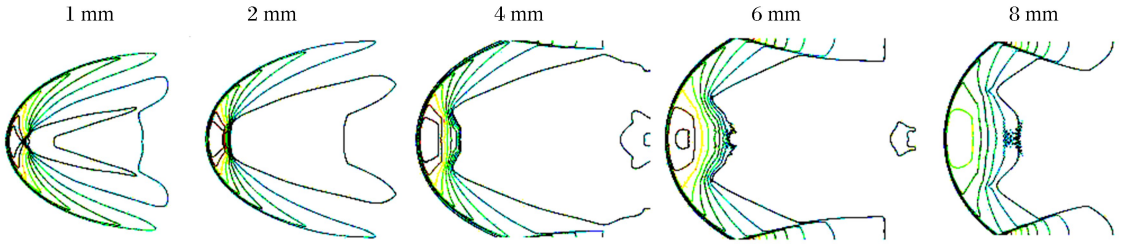


图6 各尺寸液滴 15 μs 时刻的压力场

Fig. 6 Pressure waves of several droplets at 15 μs

2.2 液滴模型形态变化分析

图7为100 kg的TNT在2.0 m处爆炸时(冲击波马赫数为6.913)不同直径液滴在10 μs时刻形变状况,显然液滴尺寸越小其变形越明显。此时,直径1 mm液滴变形成月牙状;2 mm液滴左侧明显墩粗且两侧伸出尖角状两翼;4 mm液滴同样发生墩粗,两翼处略有凸出;直径6、8 mm液滴略有墩粗,两侧略有纹络,且在液滴内部右侧中心位置明显产生高密度区域。在一定程度上,液滴的形态变化随液滴尺度增大而变缓。

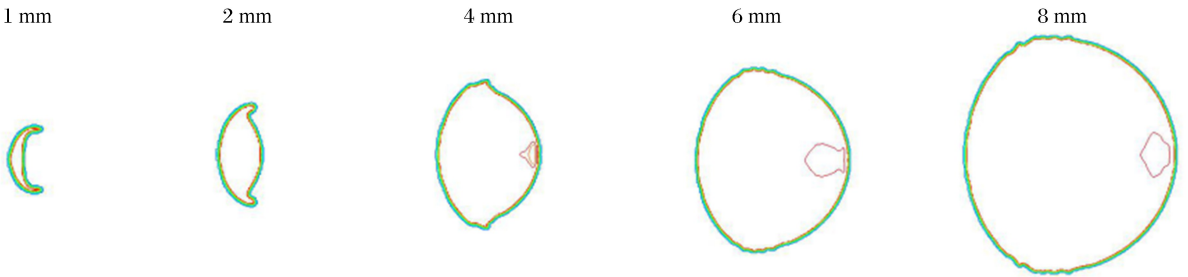


图7 各尺寸液滴 10 μs 时刻的形态

Fig. 7 Forms of several droplets at 10 μs

由图8可知:2 mm液滴在30 μs时刻的形态与1 mm液滴在20 μs时相似;6 mm液滴在35 μs时刻的形态与4 mm液滴在25 μs时相似;8 mm液滴在30 μs时刻的形态与6 mm液滴在25 μs时相似。这进一步说明了大尺寸液滴在变形过程中的滞后性。

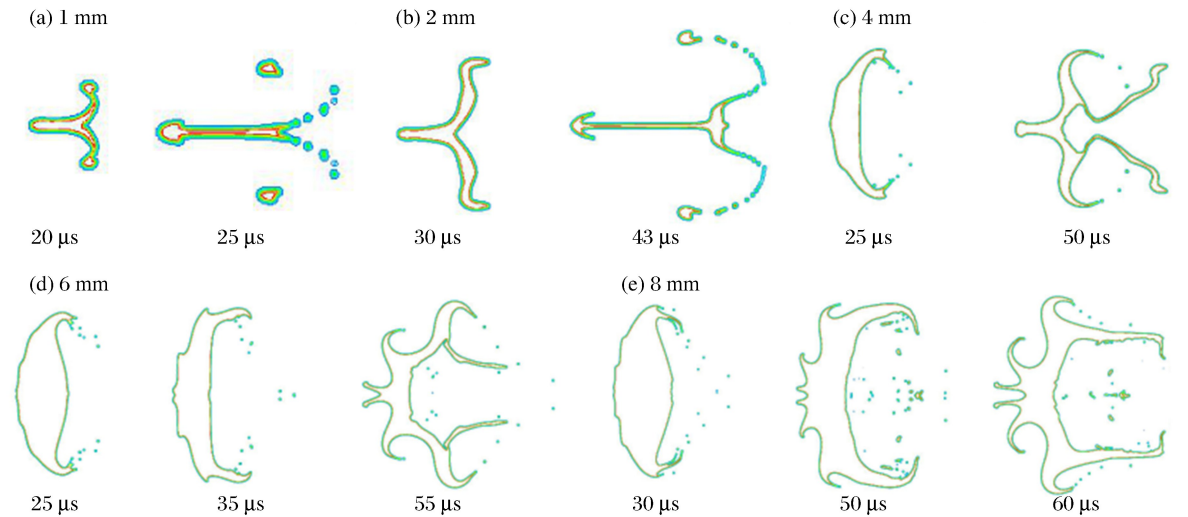


图8 各尺寸液滴的形态变化

Fig. 8 Form change processes of several droplets

由图 8 可知,液滴尺寸较小时,完全破碎抛撒小液滴的现象出现较早,这是由于小液滴更易被气动力加速,液滴表面张力抵御不了高速气体的剪切作用即被剥离成细小液滴。大液滴的抛撒开始于整个过程的初期,而小液滴较集中出现在破碎的末期,这是由于液滴越大其表面张力越小,因而更小的气动力影响即可产生小液滴的剥离。

综上所述:在液滴越小时其移动速度越快,液滴破碎的速度也越快;液滴越大时,由于受表面张力影响较小,小液滴抛撒现象发生越早,剥离出小液滴数目越多,整体变化规律性较差。

3 不同尺寸单个液滴对冲击波的衰减作用

为研究模型中液滴的尺寸大小对冲击波强度的影响,模拟计算并比较每个模型末端的平均比冲量。表 2 为 0.1 kg 装药在 0.2 m 爆距条件下不同时刻各尺寸液滴模型末端平均比冲量。表中, I 为平均比冲量, δ 为衰减率。

表 2 中,由各液滴模型末端平均比冲量相对于无液滴情况下的比冲量衰减率可知,液滴尺寸越大其比冲量衰减率越大,相同液滴模型下衰减率随时间可能会出现先增大后减小的规律,这是由于冲击波环流在液滴后形成的高压区到达测量点对比冲量产生影响。相同时刻比冲量的大小与其液滴的尺寸呈反比关系,即液滴尺寸大时其比冲量更小。

表 2 比冲量数据
Table 2 Data of specific impulse

$t/\mu\text{s}$	$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}) \delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}) \delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}) \delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}) \delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}) \delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$
	1 mm	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	无液滴					
25	32.21	0.21	30.81	4.55	28.63	11.29	26.60	17.58	24.33	24.61	32.28
30	44.85	2.83	43.24	6.32	40.46	12.34	38.08	17.49	35.35	23.40	46.15
35	54.11	2.11	52.09	5.77	49.32	10.78	47.07	14.84	43.94	20.51	55.28
40	61.06	0.71	59.23	3.67	56.73	7.75	54.40	11.54	51.27	16.63	61.49
40.8	61.97	0.57	60.31	3.24	57.81	7.24	55.49	10.98	52.62	15.57	62.33

上述方法仅局限于正压作用的某个时间段,为得到液滴对冲击波的实际衰减作用,需在整个正压作用时间上衡量。图 9 为各模型测量的压力曲线,正压作用时间为 0.411 ms,图 10 为无液滴模型的压力曲线。计算整体衰减率,结果见表 3。表中, t_+ 为正压作用时间。

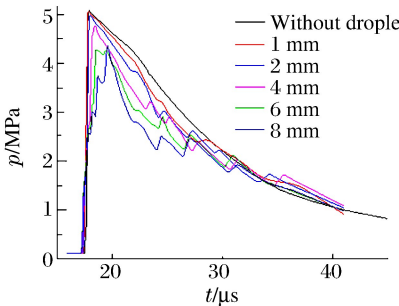


图 9 测量的压力曲线

Fig. 9 Measured pressure curves

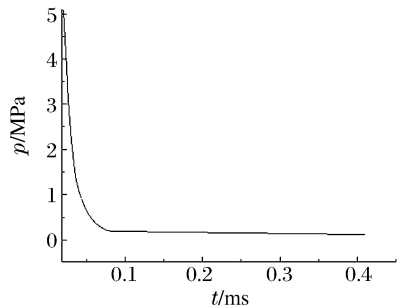


图 10 无液滴压力曲线

Fig. 10 Pressure curves without droplet

表 3 各模型衰减率

Table 3 Attenuation rate of models

$t_+/\mu\text{s}$	$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}) \delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}) \delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}) \delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}) \delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}) \delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$
	1 mm	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	无液滴					
40.8	261.07	0.14	259.41	0.77	256.91	1.73	254.59	2.62	251.72	3.71	261.43

可知,在二维平面内,各单个液滴模型对于冲击波有明显的衰减作用,爆炸冲击波的衰减随液滴尺寸的增大而增大。

4 多排液滴的压力场及形态分析

图 11 为 100 kg 的 TNT 在 2.0 m 处爆炸(冲击波马赫数为 6.913)的压力变化的有限元分析结果。图 11(a)为单排液滴在冲击波作用下的压力变化:在 5 μs 时,各液滴周围呈现出较一致的压力场波形,每个液滴处均有高压区域和递减压力场等压线;到 10 μs 时,液滴周围压力场相互融合成为一个压力场整体,两侧接触壁面并产生反射,透射波区域有明显的凸出压力场波纹;在 15 μs 时,有明显的低压延伸段,并逐渐延伸并交合生成新的高压力区域;其整体规律性与单个液滴模型压力变化相似。图 11(b)为双排液滴压力场化,其波形更密集和复杂:在 15 μs 时,在压力场区域中出现很多的微小压力区,此时压力区域融合并大致呈现前密后疏的规律。类似地,多排液滴的压力场随冲击波来袭方向依次产生并逐渐融合。

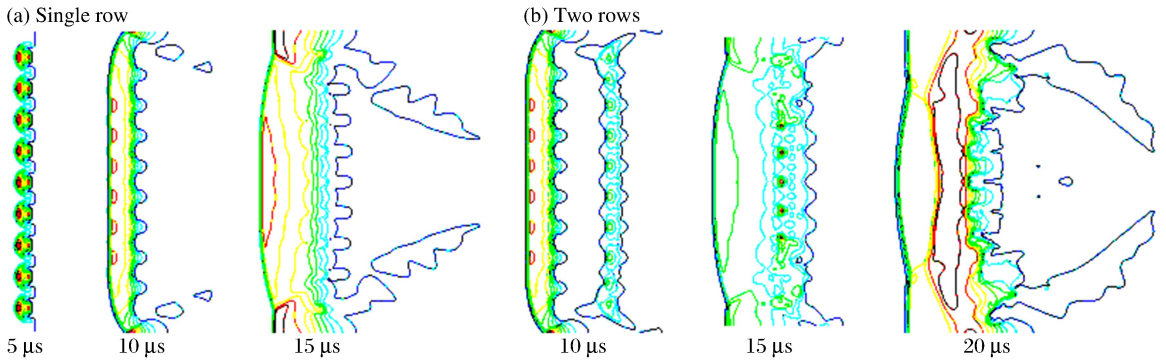


图 11 成排液滴的压力场变化

Fig. 11 Pressure wave change processes of rows of droplets

图 12(a)中:在 10 μs 时,液滴形态受气动力影响变形为 C 字形,张口位置逐渐闭合,至 15 μs 时,液滴呈中空的滴状,并逐渐变形趋于不规则化,液滴端部逐渐明显拉长、尾部逐渐展开;至 30 μs 时,出现小液滴的抛撒现象。图 12(b)中:在 10 μs 时,可见第 1 排液滴呈 C 字形,由于波阵面受前排液滴扰动,因此第 2 排液滴不是发生钝粗而是略呈尖化;在 15 μs 时,第 1 排液滴的运动速度较大,部分后排液滴接触前排液滴并融合,出现小液滴的抛撒现象。融合的液滴整体变形逐渐在气动力的影响下被拉长,此过程中持续伴有小液滴抛撒,至 30 μs 时小液滴抛撒现象较普遍,并且整个液滴区域跨度增大,抛撒产生的液滴尺寸也不同。

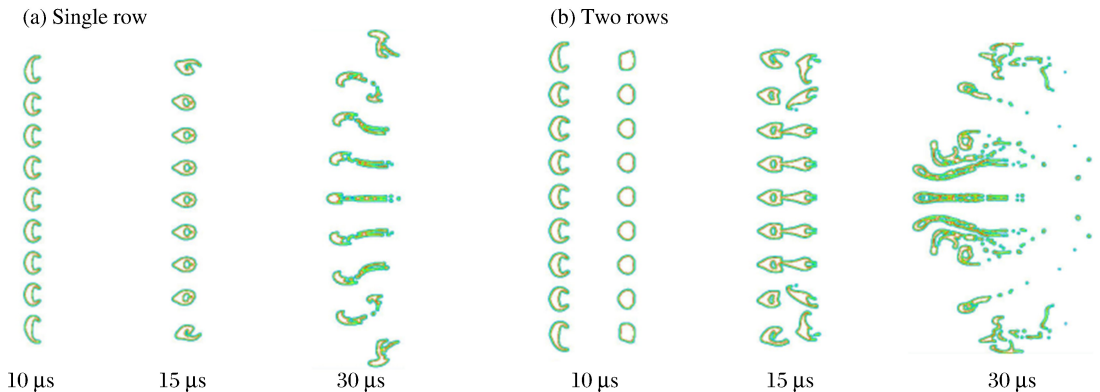


图 12 成排液滴的形态变化

Fig. 12 Form change processes of rows of droplets

5 多排液滴对冲击波的衰减作用

考察冲击波作用于不同层数的液滴后冲击波比冲量的衰减情况,对比值为模型末端测量点在相同作用时间段的平均比冲量。表4为0.1 kg装药在0.2 m爆距条件下1~4排1 mm液滴排列模型末端平均比冲量,此处只取至40 μs 时的比冲量。由20~40 μs 时间段中末端测量点平均比冲量及其衰减率,可知在各时间点处均有,液滴排列越多其衰减率越大。在20~25 μs 时,相比无液滴情况下的衰减率达到最大值,这是由于此时段冲击波作用于液滴后绕射环流穿过液滴群在后方形成新的高压区域,此区域恰好通过测量点的位置。由表4可知,在仅考虑正压作用某个时段,液滴对冲击波的衰减作用非常显著。

表4 比冲量数据

Table 4 Data of specific impulse

$t/\mu\text{s}$	$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$ $\delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$ $\delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$ $\delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$ $\delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$
	1排		2排		3排		4排		
20	9.61	19.10	8.23	30.70	6.64	44.06	5.17	56.44	11.87
25	25.66	20.48	21.93	32.06	19.23	40.42	15.10	53.21	32.28
30	39.76	13.84	34.91	24.35	31.13	32.56	24.89	46.07	46.15
35	48.12	12.95	42.18	23.69	38.79	29.82	32.61	41.01	55.28
40	54.33	11.65	47.85	22.18	43.69	28.95	38.52	37.36	61.49

此处,同样在整个正压作用时间内,将液滴达到测量点后的时间段内的压力用无液滴模型压力代替。图13为各模型该时段内测量的压力曲线,正压作用时间为0.411 ms,无液滴模型压力曲线见图10。计算整体衰减率,结果见表5。

由表5可知,在二维平面内各成排液滴对冲击波有明显的衰减作用。0.1 kg的TNT在爆距0.2 m产生的冲击波的衰减随液滴排数的增加而增大,且衰减率随着液滴排数的增加呈现较明显的线性特性。

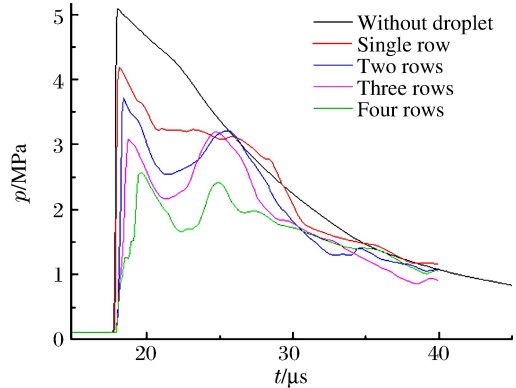


图13 测量的压力曲线

Fig. 13 Measured pressure curves

表5 各模型衰减率

Table 5 Attenuation rate of models

$t_+/\mu\text{s}$	$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$ $\delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$ $\delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$ $\delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$ $\delta/\%$		$I/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$
	1排		2排		3排		4排		
40	253.43	2.75	246.95	5.23	242.79	6.83	237.62	8.82	260.59

液滴对冲击波的衰减机理可从两方面分析:(1)从能量的角度来看,冲击波在传播的过程中,气动力推动液滴加速,液滴逐渐发生变形破碎和抛散,此过程中冲击波能量有一部分转化为液滴的动能,因此冲击波的强度和能量发生衰减;(2)从动力学角度来看,弥散的小液滴和空气形成了气液两相混合介质,液滴与空气接触面形成两种介质的传递界面,冲击波在到达每一个界面时必然会发生透射、反射、绕射、衍射等现象,在界面传递的过程中必然发生能力形式的转化,能量形式的转化的同时冲击波的强度和能量发生衰减。

6 结 论

通过有限元分析方法,建立冲击波作用于不同尺寸单个液滴和多排液滴的模型,分析冲击波与单个及多个液滴的作用过程及液滴形态变化,对冲击波衰减规律进行分析总结,得到如下结论。

(1)单个液滴模型中,小液滴破碎更迅速,破碎的规律性强;大液滴抛撒现象发生较早,抛撒出的小液滴数目多,整体变化规律性偏差。

(2)在二维模型条件下,不同尺寸单个液滴对冲击波有一定的衰减作用,且其衰减率随液滴尺寸增大而增大,线性特性较明显。0.1 kg 的 TNT 在 0.2 m 爆距产生的冲击波,单个 1 mm 液滴对冲击波衰减 0.14%,2 mm 时衰减 0.77%,4 mm 时衰减 1.73%,6 mm 时衰减 2.62%,8 mm 时衰减 3.71%。

(3)单排及多排液滴对冲击波有明显的衰减作用,相同液滴密度下衰减率随着液滴数量的增多而增大,且呈现明显的线性特性。在二维模型中,0.1 kg 的 TNT 在 0.2 m 爆距产生的冲击波,单排液滴对冲击波衰减 2.75%,2 排时衰减 5.23%,3 排时衰减 6.83%,4 排时衰减 8.82%。

参考文献:

- [1] 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 Hailiang, Zhu Xi, Mei Zhiyuan. 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.
- [2] 朱锡,张振华,刘润泉,等.水面舰艇舷侧防雷舱结构模型抗爆试验研究[J].爆炸与冲击,2004,24(2):133-139.
Zhu Xi, Zhang Zhenhua, Liu Runquan, et al. Experimental study on the explosion resistance of cabin near ship-board of surface warship subjected to underwater contact explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(2):133-139.
- [3] 徐定海,盖京波,王善.防护模型在接触爆炸作用下的破坏[J].爆炸与冲击,2008,28(5):476-480.
Xu Dinghai, Gai Jingbo, Wang Shan, et al. Deformation and failure of layered defense models subjected to contact explosive load[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(5):476-480.
- [4] Radford D D, McShane G J, Deshpande V S, et al. The response of clamped sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(7):2243-2259.
- [5] Fleck N A, Deshpande V S. The resistance of clamped sandwich beams to shock loading[J]. Journal of Applied Mechanics, 2004,71(3):386-401.
- [6] 张旭红,王志华,赵隆茂.爆炸载荷作用下铝蜂窝夹芯板的动力响应[J].爆炸与冲击,2009,29(4):356-360.
Zhang Xuhong, Wang Zhihua, Zhao Longmao. Dynamic responses of sandwich plate with aluminum honeycomb-cores subjected[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(4):356-360.
- [7] 赵凯.分层防护层对爆炸波的衰减和弥散作用研究[D].合肥:中国科学技术大学,2007.
- [8] 樊自建,沈兆武,马宏昊,等.空气隔层对水中冲击波衰减效果的实验研究[J].中国科学技术大学学报,2007,37(10):1306-1311.
Fan Zijian, Shen Zhaowu, Ma Honghao, et al. Experimental study on attenuation of underwater shock wave by air interlayer[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007,37(10):1306-1311.
- [9] 姚熊亮,杨文山,初文华,等.水中空气隔层衰减冲击波性能研究[J].高压物理学报,2011,25(2):165-172.
Yao Xiongliang, Yang Wenshan, Chu Wenhua, et al. Research on performance of the underwater air-buffer weakening shock wave[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011,25(2):165-172.
- [10] 赵汉中.在封闭结构中水对爆炸冲击波的削波、减压作用[J].爆炸与冲击,2002,22(3):252-256.
Zhao Hanzhong. Water mitigation effects on explosions in confined chambers[J]. Explosion and Shock Waves, 2002,22(3):252-256.
- [11] 刘谋斌,宗智.水幕减爆防护技术数值仿真[J].应用科技,2010,37(9):36-41.
Liu Moubin, Zong Zhi. Numerical simulation of water mitigation of blasting effects[J]. Applied Science and Technology, 2010,37(9):36-41.
- [12] Jourdan G, Biamino L, Mariani L. Attenuation of a shock wave passing through a cloud of water droplets[J].

Shock Waves, 2010,20(4):285-296.

- [13] 侯海量,张成亮,朱锡,等. 冲击波和高速破片联合作用下夹芯复合舱壁结构的毁伤特性[J]. 爆炸与冲击,2015,35(1):116-123.
 Hou Hailiang, Zhang Chengliang, Zhu Xi, et al. Damage characteristics of sandwich bulkhead under the impact of shock and high-velocity fragments[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(1):116-123.
- [14] 孙叶斌. 爆炸作用与装药设计[M]. 北京:国防工业出版社,1987.
- [15] 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.

Attenuation of shock wave passing through liquid droplets

Liu Guibing^{1,2}, Hou Hailiang¹, Zhu Xi¹, Zhang Guodong¹

(1. Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China;

2. Unit 92941 of Chinese People's Liberation Army, Huludao 125001, Liaoning, China)

Abstract: To characterize the function of water droplets in the restraining and attenuation of the explosive shock wave inside of a cabin, we built several models of a sing layer in z -axis with different sizes of a single droplet and rows of droplets using numerical simulation, analyzed the shock wave interacting with them, observed the interaction process and the change of the droplet forms, summarized the shock wave's attenuation regularities, and obtained some conclusions. The results show that, in the single droplet model, smaller droplets were broken more rapidly and regularly, while bigger droplets tend to break out little droplets more and earlier but less regularly on the whole; that single droplets of different sizes had an effect of attenuation on the shock wave, with an obvious correlation between the increase of the droplet size and that of the attenuation; and that the rows had the most obvious effect of attenuation on the shock wave, with a linear relation between the increase of the droplet number and that of attenuation effect at the same droplet density.

Keywords: shock wave; droplet broken; specific impulse; vortex pair

(责任编辑 丁 峰)