DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0283-08

水下舷侧多层防护隔舱接触爆炸毁伤载荷特性分析*

陈鹏宇,侯海量,吴林杰,朱 锡
(海军工程大学舰船工程系,湖北 武汉 430033)

摘要: 为探讨水下多层防护隔舱结构设计,以典型三舱式结构为对象,利用 Dytran 软件分析了水下接触爆炸下舷侧多层防护隔舱中膨胀空舱内的毁伤载荷特性,得到了载荷的简化模型,并拟合出膨胀舱压力载荷脉动平稳阶段准静态气压值的计算公式。结果表明,膨胀空舱内的毁伤载荷特性在时间尺度上可分为气团膨胀扩散阶段和脉动平稳两个阶段;在空间分布上,主要分为正反射区和马赫反射区,正反射区作用载荷由初始瞬态脉冲载荷和后续逐渐衰减的准静态气压载荷叠加而成,马赫反射区作用载荷则以准静态气压为主。

关键词: 水下接触爆炸;爆炸载荷;准静态气压;毁伤载荷特性
中图分类号: O383.1 **国标学科代码**: 1303525 **文献标志码**: A

随着水下制导技术的发展,舰艇遭遇水下接触爆炸的危险越来越大。一旦遭遇水下接触爆炸,普通船体板架结构通常会产生大面积破口[1-2]。水下舷侧多层防雷隔舱结构是大型水面舰艇抵御鱼水雷接触爆炸或水下近场非接触爆炸的典型结构形式,通常设置 3~5 层舱室,分别为空舱或者液舱,其主要目的是为了预防鱼水雷在舷侧接触爆炸或水下近场非接触爆炸造成的船体破坏,其次是抵御由爆炸产生的高速破片的侵彻穿甲破坏。

由于防雷舱结构自身为多层结构,加之舱室内具有多种介质,它在水下接触爆炸载荷作用下的动响应及破损问题十分复杂,虽然二战期间多国曾对这类问题作过系统研究,但由于军事保密的原因,这方面的可查阅的国外文献极少,主要集中在水下接触、非接触爆炸载荷下,简单结构的动态响应[3]和破坏问题研究。我国的研究主要集中在模型的性能实验研究[4-6]、能量角度的抗爆机理分析[7]和流固耦合分析[8-10]。通过这些研究,学者们逐渐认识到水下接触爆炸下防雷舱结构受到的毁伤载荷包括爆炸产物和高速破片两大类[11],并认为设置膨胀空舱的主要目的是预备一定空间让爆炸产物膨胀,降低作用到内部结构的冲击波峰值压力,吸收液舱则主要是通过液体吸收战斗部爆炸后所产生的高速破片来抵御侵彻穿甲[4]。唐廷等[10]指出,高速破片载荷对液舱的撞击将在水中产生压力波,传播至液舱后板时即导致液舱后板的变形与破坏,并采用一维平面波理论推导得到了大破片撞击液舱产生的压力波形式及影响因素[12];随后,孔祥韶等[13]采用数值模拟计算分析了单、双发破片侵彻液舱引起的冲击波及其叠加现象。然而,水下接触爆炸下舰艇结构将承受爆炸产物、冲击波和大量高速破片侵彻等多种载荷的作用,目前关于这些载荷作用形式、强度、传播规律等特性及其影响因素的研究十分有限。

为进一步揭示多层防雷隔舱结构的防护机理,本文中以多层防雷隔舱结构模型的抗爆实验研究为基础,采用流固耦合有限元分析方法,分析水下接触爆炸下多层防雷舱结构中爆炸产物、冲击波的传播过程及载荷特性。

1 有限元分析模型

1.1 计算模型

采用有限元程序 MSC.Dytran 对文献[1]中模型 3(见图 1)在水下接触爆炸下爆炸产物、冲击波的

* **收稿日期**: 2015-07-20; **修回日期**: 2015-11-11
基金项目: 国家自然科学基金项目(51209211,51479204,51679246)
第一作者: 陈鹏宇(1990—),男,博士研究生; **通信作者**: 侯海量,hou9611104@163.com。

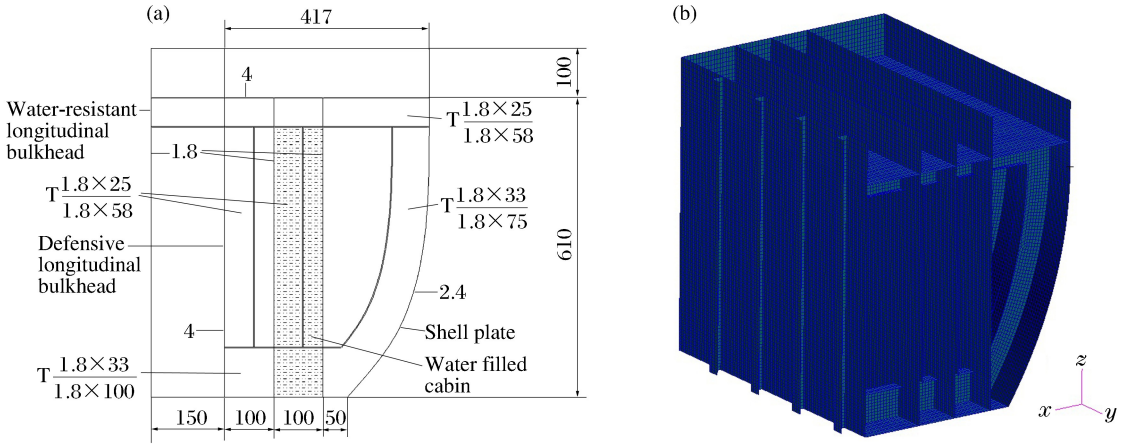

图 1 结构横剖面图与有限元模型(单位:mm)

Fig. 1 Transverse section of the structure and the FEM model (unit: mm)

传播过程、强度特性及影响因素进行模拟分析。

防雷舱结构全部用壳单元进行模拟;空气、炸药和水采用多材料欧拉求解器(MMHYDRO)进行分析计算;流固耦合作用采用考虑失效的一般耦合方法;考虑欧拉域之间不同材料的流动,当由防雷舱结构组成的耦合面失效后,不同舱室内的流体物质会发生相互流动。采用自适应接触分析方法考虑结构大变形后相互之间的接触作用。

为了分析防雷舱结构内外空气与水介质与结构的耦合作用,拉格朗日结构单元尺寸设为 8 mm×8 mm,欧拉单元尺寸设为 40 mm×40 mm×40 mm,共设置 5 个欧拉域,如图 2 所示。第 1 个欧拉域为防雷舱外部的空气和水域(图中第 1 个欧拉域的尺寸未按比例绘制),用来模拟防雷舱结构外部的水和空气;第 2~5 个欧拉域分别为第 1 至 5 层舱室内的介质。空舱内为空气;液舱内为水和空气,液面高度为 0.55 m,上面留有高度为 0.06 m 的空气。

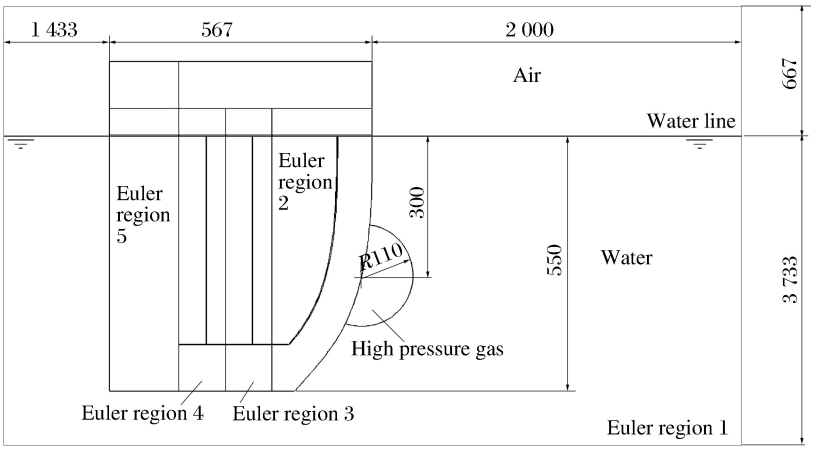

图 2 欧拉域设置示意图(单位:mm)

Fig. 2 Sketch of Euler region(units: mm)

1.2 材料特性

防雷舱结构中 4 mm 厚的甲板和防御纵壁为低合金船用钢,其余材料均为普通船用钢,采用双线性弹塑性本构模型,材料的应变率效应由 Cowper-Symonds 模型描述,动态屈服强度 σ_d 为:

$$\sigma_d = \left(\sigma_0 + \frac{EE_h}{E-E_h}\varepsilon_p\right)\left[1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{n}}\right] \tag{1}$$

式中:σ_0 为静态屈服强度,E 为杨氏模量,E_h 为应变硬化模量,ε_p 为有效塑性应变,$\dot{\varepsilon}$ 为等效塑性应变率;D、n 为常数。材料失效模型采用最大塑性应变失效。计算中材料参数如表 1 所示。

表 1 结构材料参数

Table 1 Material parameters for the structure

材料	σ_0/MPa	泊松比	E/GPa	E_h/MPa)	ρ/(kg·m^{-3})	失效应变	D/s^{-1}	n
普通船用钢	235	0.3	210	250	7 800	0.28	40.4	5
低合金船用钢	490	0.3	210	1 305	7 800	0.28	0.000 6	50.8

对于水下接触爆炸作用下防雷舱结构的动态响应数值计算来说，涉及到空气、水、炸药和船体结构钢 4 种物质(或材料)。假设空气为理想气体，其状态方程为：

$$p=(\gamma-1)\rho e \tag{2}$$

式中：p 为压力，初始压力设为 1.0×10^5 Pa；ρ 为密度，初始密度设为 1.184 8 kg/m^3；e 为内能，设为 211 kJ/kg；γ 为比热比，设为 1.4。假设水为可压缩但是无黏性无旋性的流体，它的状态方程由多项式给出

$$p=k\left(\frac{\rho}{\rho_0}-1\right) \tag{3}$$

式中：k 为体积模量；ρ_0 为水的参考密度。取 $k=2.2$ GPa，$\rho_0=1\,000$ kg/m^3。设 TNT 炸药的密度为 1 717 kg/m^3，比内能为 4.765 MJ/kg。为减少计算量，忽略炸药的爆轰过程和初始膨胀过程，采用理想高压气团($\gamma=1.4$)等效模拟炸药初始状态，空气的质量和内能和炸药一样，密度调整为105 kg/m^3。空气的初始压力由公式(2)可以计算得到为 200 MPa[10]。

2 模拟结果及分析

2.1 爆炸产物膨胀过程及膨胀舱壁所受载荷特性

为获得膨胀空舱中爆炸产物膨胀过程及膨胀舱壁所受的载荷特性，取膨胀舱壁前欧拉单元的压力作为膨胀舱壁实际承受的压力，得爆炸产物在空舱中膨胀时对膨胀舱壁形成的压力如图 3、4 所示。图 3 所示为膨胀舱壁上的压力分布云图随时间变化的情况，图中看出压力分布大致可分为中心区、远场区和角隅汇聚区 3 个部分。

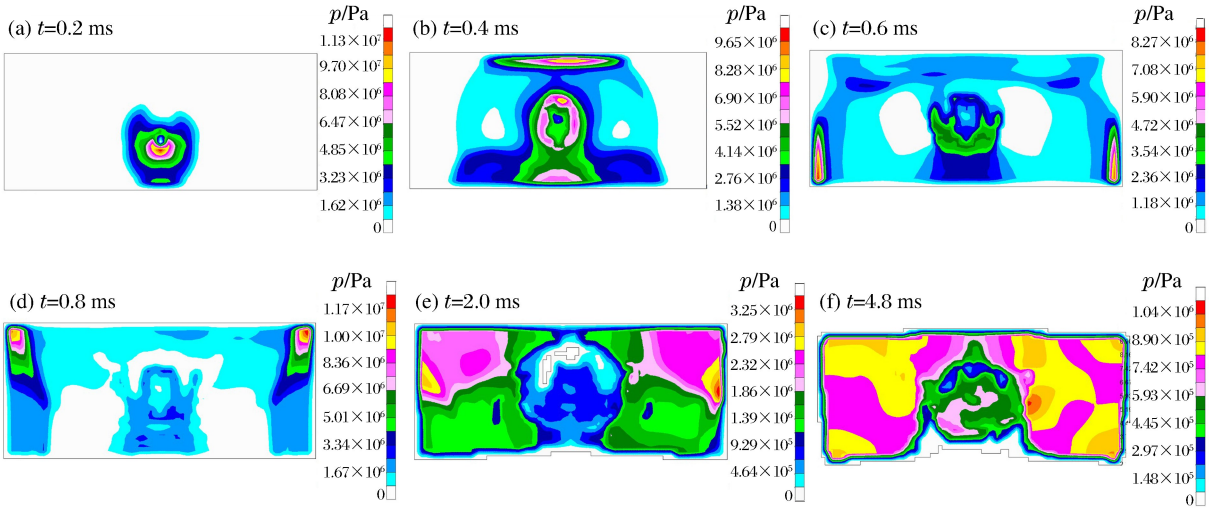

图 3 作用于膨胀舱壁的压力载荷(装药量 300 g TNT)

Fig. 3 Pressure on isolate bulkhead (300 g TNT)

在膨胀舱壁上设置 8 个冲击波压力观测点(见图 5)：测点P_1～P_4位于膨胀舱壁中横剖面上，P_2～P_4位于正反射区，其余测点位于马赫反射区；P_1、P_7、P_8位于角隅部位。各点压力时程曲线如图 6 所示。

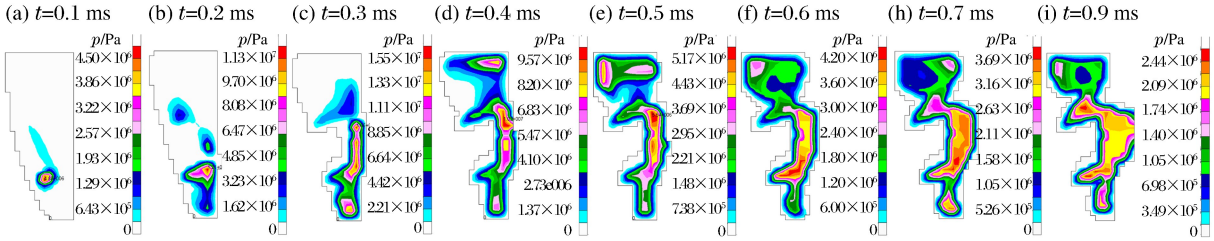

图 4 膨胀空舱中横剖面的压力变化历程(装药量 300 g TNT)

Fig. 4 Variation history of pressures on the mid transverse section of the void cabin (300 g TNT)

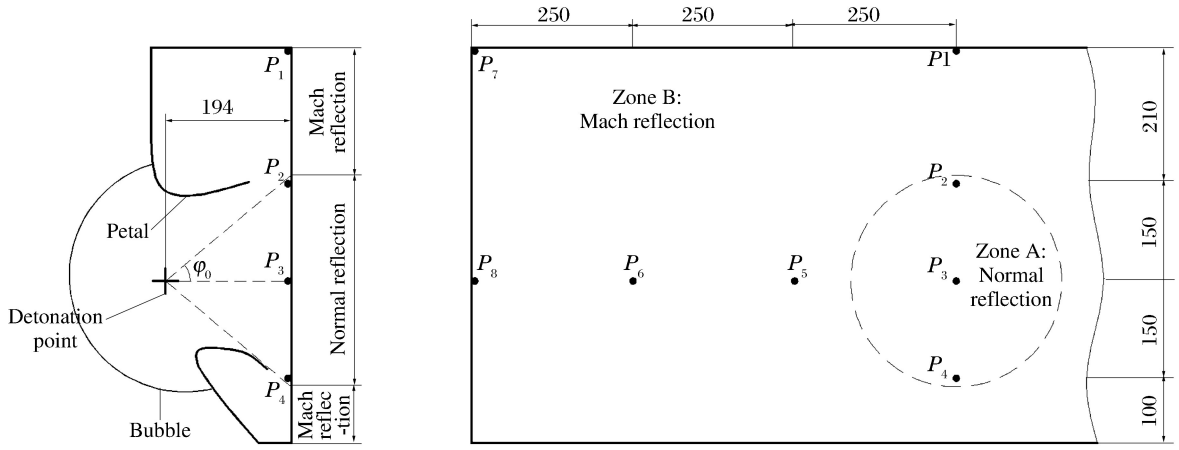

图 5 膨胀舱壁承受压力典型测点布置图(单位:mm)

Fig. 5 Pressure-measuring point arrangement on isolate bulkhead (unit: mm)

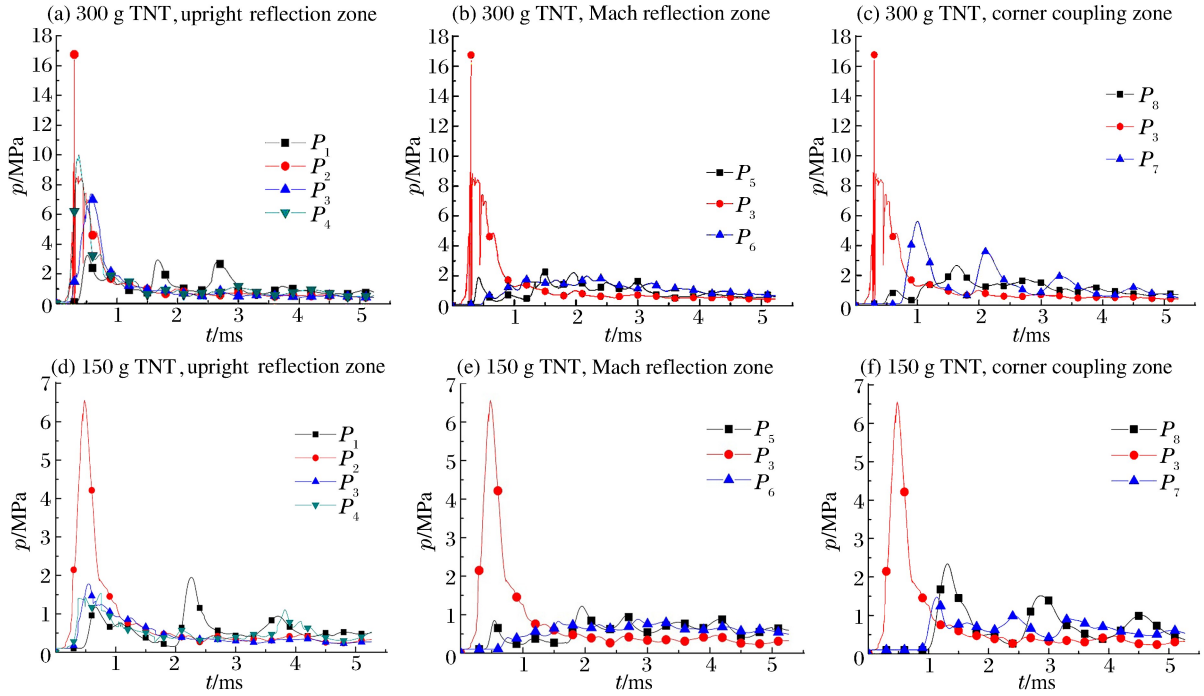

图 6 膨胀舱壁典型测点压力历程图

Fig. 6 Variation of measuring points on isolate bulkhead

由图 3、4 可知，装药爆炸后，舷侧外板迅速破损，爆炸产生的高压气团向膨胀空舱中扩散；由于膨胀空舱宽度较小，爆炸产物和冲击波在遇到隔离舱壁并发生反射，很快又会遇到外板，如此来回振荡几次后在膨胀空舱宽度上趋于均匀化，随后爆炸产物和冲击波以类似于平面波的形式在外板和膨胀舱壁间扩散。爆炸产物和冲击波，在 $t=0.2$ ms 左右分别到达膨胀舱壁和空舱底部，形成反射和角隅汇聚；$t=0.4$，0.6 ms 左右分别到达空舱顶部和两端，并分别在隔离舱壁与底部、甲板、横舱壁形成的角隅区产生会聚；随后高压气团在空舱内反复脉动数次后，逐渐形成相对稳定的准静态压力（$t=2.0$ ms）。

因此，类似于舱内爆炸下舱室板架承受的压力载荷特性[14]，从时间尺度上隔离舱壁承受的压力载荷可分为气团膨胀扩散阶段和脉动平稳两个阶段（见图 6～7），其中气团膨胀扩散阶段，结构承受的载荷为瞬态冲击载荷，其特征是冲击压力较大，但作用时间很短；脉动平稳阶段，隔离舱壁结构承受的载荷以缓慢衰减的准静态气压为主，伴以压力的小幅波动，其压力值相对较小，但作用时间较长。

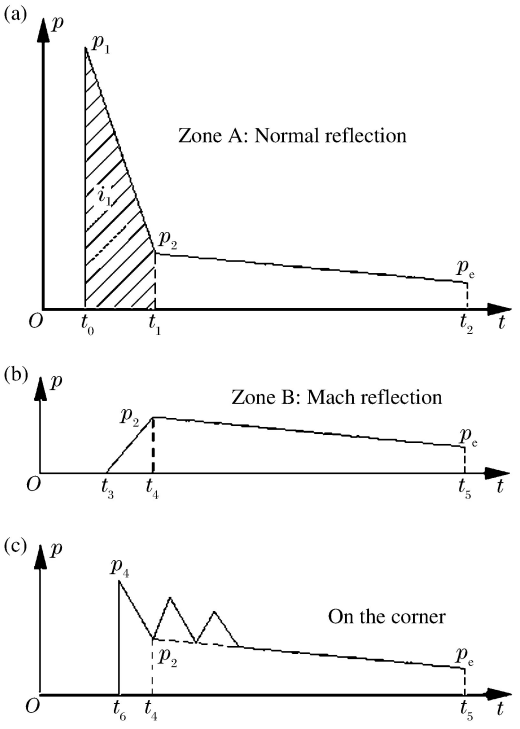

图 7　载荷简化模型

Fig. 7　Simplified model of the load

从空间分布上看，对于隔离舱壁中部区域（图 5 中区域 A），一方面冲击波入射角 φ_0 较小，将产生正反射，另一方面由于外板破坏形成的向内挠曲变形花瓣与隔离舱壁形成的相对封闭区域对爆炸产物及冲击波的阻挡作用，气团膨胀扩散阶段将产生一个相对高压区，而脉动平稳阶段其压力略低于其他区域，其作用载荷由初始瞬态脉冲载荷和后续逐渐衰减的准静态气压载荷叠加而成（见图 6(a)和(d)），因而其载荷特性可简化为尖三角载荷加梯形载荷（如图 7(a)所示），其中 p_1、i_1 分别为气团膨胀扩散阶段作用在隔离舱壁上的超压和比冲量，p_2 为准静态压力值，t_2 为准静态气压平衡稳定时间，可由脉动平稳阶段各测点压力线形拟合推算得到。其余部位，一方面由于外板向内挠曲花瓣的阻挡作用，入射冲击波相对较小，另一方面距离爆炸点相对较远（图 5 中区域 B），冲击波入射角 φ_0 较大，将发生马赫反射，冲击压力较小，其作用载荷以准静态气压为主，如图 6(b)、(e)所示，其载荷特性简化见图 7(b)。角隅部位由于冲击波汇聚效应的影响，也会产生多次较强的冲击，见图 6(a)、(d)中的 P_1 点压力历程曲线和图 6(c)、(f)的 P_7 点压力历程曲线。由于膨胀空舱角隅部位的冲击载荷位于板架的边缘，受液舱中侧向弥散作用的影响，对后方防护结构的影响较小。

因此，忽略区域 B 中气团到达时间差别、角隅部位多次冲击载荷的作用以及区域 A、B 的准静态气压差，隔离舱壁承受的载荷可分为气团膨胀扩散阶段的冲击载荷和脉动平稳阶段的准静态气压两类，前者仅作用在中部正反射区，后者作用于整个舱壁。

2.2　气团膨胀扩散阶段的冲击载荷强度

根据爆炸冲击波理论[15]，装药在刚性地表爆炸时，爆炸产物是向半无限空间扩散的，冲击波强度相当于 2 倍装药在无限空间中爆炸冲击波强度。装药在水下舷侧接触爆炸，其外侧为水介质，内侧为船体外板和膨胀空舱。由于空气的可压缩性远大于水，爆炸产物主要向膨胀空舱中扩散，类似于地表装药的爆炸，冲击波遇到隔离舱壁后将发生反射。由于水中兵器装药通常较大，而膨胀空舱宽度较小，因此正规反射区在 $\varphi_0\leqslant 40°$ 的范围内（见图 5），其反射冲击波超压 Δp_r 为：

$$\Delta p_r = 2\Delta p_m + \frac{6\Delta p_m^2}{\Delta p_m + 7p_0} \tag{4}$$

式中：p_0 为大气压，Δp_m 为初始冲击波峰值超压。正规反射区在气团膨胀扩散阶段受到的冲击强度 i_1（见图 7(a)）为：

$$i_1 = \alpha i_r = \alpha i_G (1 + \cos\varphi_0) \tag{5}$$

式中：α 为影响因子，i_G 为液面爆炸比冲量。由于膨胀空舱宽度相对较小以及外板挠曲变形花瓣的阻挡作用，反射冲击波很快又遇到外板，并来回振震荡数次，初始冲击波和后续振荡波将相互叠加，使得正规反射区在气团膨胀扩散阶段受到的冲击强度 i_1 达初始冲击反射比冲量 i_r 的 2～3 倍，因此 α 值建议取 2.5。表 2 为各点初始冲击波强度理论值与计算值。

表 2 初始冲击波强度 i_1 理论值与计算值

Table 2 Theoretical value and simulation value of the initial shock wave intensity

TNT 药量/g	i_1/(Pa·s)					
	P_2 点理论值	P_2 点计算值	P_3 点理论值	P_3 点计算值	P_4 点理论值	P_4 点计算值
100	1 455.96	1 625.48	1 959.00	2 082.93	1 588.32	1 762.26
150	1 907.85	1 875.32	2 567.02	2 603.77	2 081.29	1 889.21
200	2 311.20	2 288.91	3 109.72	3 059.32	2 521.30	2 487.93
250	2 681.91	2 748.75	3 608.51	3 498.17	2 925.72	3 074.00
300	3 028.52	3 153.06	4 074.89	3 556.57	3 303.84	3 503.23
350	3 356.31	3 183.65	4 515.93	4 381.88	3 661.43	3 696.69
400	3 668.80	3 453.72	4 936.37	4 759.65	4 002.32	4 008.74

2.3 准静态气压

由图 6 可知，在正反射区和马赫反射区，膨胀舱都受到逐渐衰减的准静态气压的作用。取 5 ms 附近时间段各测点的平均压力（见表 3），从而求出 $t=5$ ms 时刻不同装药量下，膨胀舱的准静态气压 p_e。从表 3 可以看出，不同药量下，由于外板向内挠曲花瓣对反射冲击波和高压气体的阻挡作用，P_2～P_4 测点的准静态气压要普遍小于其余测点（如图 3(f)所示），在外板破口的正对区域形成一个低压区，而其余区域压力则相对偏高。

表 3 5 ms 时膨胀舱各测点的平均准静态压力

Table 3 Average quasi-static pressure on measuring points at 5 ms

TNT 药量/g	p/MPa								
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	p_e
100	0.459	0.242	0.227	0.271	0.316	0.329	0.422	0.322	0.323
150	0.478	0.265	0.305	0.402	0.502	0.575	0.461	0.598	0.448
200	0.574	0.428	0.414	0.473	0.287	0.677	0.827	0.661	0.543
250	0.625	0.505	0.406	0.401	0.598	0.686	0.677	0.667	0.571
300	0.799	0.434	0.439	0.490	0.689	0.776	0.658	0.728	0.627
350	0.768	0.493	0.603	0.705	0.885	0.851	0.706	0.840	0.731
400	0.867	0.605	0.560	0.612	0.834	0.891	0.930	0.911	0.776

由于空气的可压缩性和密度远小于水，装药爆炸后爆炸产物向膨胀空舱的扩散速度远大于向水中的膨胀速度。舱内压力增大，假设爆炸产物为理想气体，且其状态的变化服从绝热条件下的状态方程，再根据所求的 p_e 值进行拟合修正，得出膨胀舱准静态气压 p_e 的计算公式：

$$p_e = \beta A(\gamma - 1)\,(m_e/V)^{2/3} e \tag{6}$$

式中：A 为常数，表征气泡能占水下爆炸总能量的比例，取 0.47；β 为修正系数，表征进入膨胀舱气泡能占气泡能的比例，取 0.5；取 $\gamma=1.4$；V 为膨胀空舱总容积，本文中取 0.166 m^3；e 为装药比内能，取 4.765 kJ/kg；m_e 为装药的 TNT 当量。公式计算与计算结果比较见图 8。

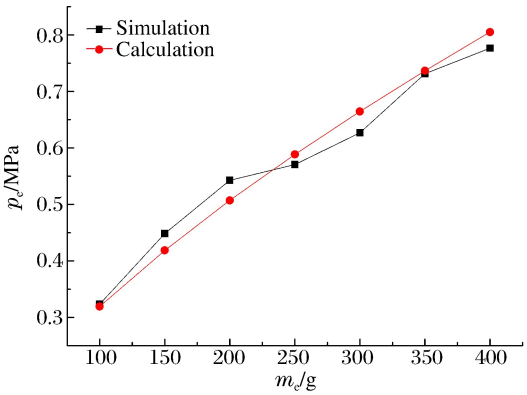

图 8 准静态气压公式计算与计算结果

Fig. 8 Formula calculation and simulation results of quasi-static pressure

3 结　论

采用有限元软件分析了水下接触爆炸下舷侧多层防护隔舱结构中膨胀舱的冲击载荷特性，并拟合出膨胀舱脉动平稳阶段的准静态气压的计算公式，有以下结论。

（1）膨胀空舱内的毁伤载荷特性在时间尺度上可分为气团膨胀扩散阶段和脉动平稳 2 个阶段：气团膨胀扩散阶段，结构承受的载荷为瞬态冲击载荷，其特征是冲击压力较大，但作用时间很短；脉动平稳阶段，隔离舱壁结构承受的载荷以缓慢衰减的准静态气压为主，伴以压力的小幅波动，其压力值相对较小，但作用时间较长。

（2）膨胀空舱内的毁伤载荷特性在空间分布上可按入射角划分为正反射区和马赫反射区 2 个区域：正反射区作用载荷由初始瞬态脉冲载荷和后续逐渐衰减的准静态气压载荷叠加而成；马赫反射区作用载荷则以准静态气压为主；角隅部位由于冲击波汇聚效应的影响，也会产生多次较强的冲击。

参考文献：

[1] 朱锡，白雪飞，黄若波，等. 船体板架在水下接触爆炸作用下的破口试验[J]. 中国造船，2003，44(1)：46-52.
Zhu Xi, Bai Xuefei, Huang Ruobo, et al. Crevasse experiment research of plate membrance in vessels subjected to underwater contact explosion[J]. Shipbuilding of China, 2003, 44(1): 46-52.

[2] 刘润泉，白雪飞，朱锡. 舰船单元结构模型水下接触爆炸破口试验研究[J]. 海军工程大学学报，2001，13(5)：41-46.
Liu Runquan, Bai Xuefei, Zhu Xi. Breach experiment research of vessel element structure models subjected to underwater contact explosion[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2001, 13(5): 41-46.

[3] Rajendran R, Narasimhan K. Deformation and facture behaviour of plate specimens subjected to underwater explosion: A review[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(32): 1945-1963.

[4] 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 shipboard of surface warship subjected to underwater contact explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(2): 133-139.

[5] 徐定海，盖京波，王善，等. 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.

[6] 张伦平，张晓阳，潘建强，等. 多舱防护结构水下接触爆炸吸能研究[J]. 船舶力学，2011，15(8)：921-929.
Zhang Lunping, Zhang Xiaoyang, Pan Jianqiang, et al. Energy research about multicamerate defence structure subjected to underwater contact explosion[J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(8): 921-929.

[7] 张振华，朱锡，黄玉盈，等. 水面舰艇舷侧防雷舱结构水下抗爆防护机理研究[J]. 船舶力学，2006，10(1)：113-119.
Zhang Zhenhua, Zhu Xi, Huang Yuying, et al. Theoretical research on the defendence of cabin near shipboard of surface warship subjected to underwater contact explosion[J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(1): 113-119.

[8] 张婧，施兴华，王善. 水下接触爆炸作用下舰船防护结构中液舱影响仿真分析[J]. 天津大学学报，2008，41(10)：1238-1244.
Zhang Jing, Shi Xinghua, Wang Shan. Numerical simulation analysis of liquid cabin of ship defensive structure subjected to underwater contact explosions[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(10): 1238-1244.

[9] 谭海涛，王善，徐定海. 水下爆炸载荷下舰船舷侧防护结构可靠性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报，2009，30(5)：491-

494.

Tan Haitao, Wang Shan, Xu Dinghai. Reliability analysis of broadside defensive structure subjected to underwater explosion[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009,30(5):491-494.

[10] 唐廷,朱锡,侯海量,等.大型水面舰艇防雷舱结构防护机理数值仿真[J].哈尔滨工程大学学报,2012,33(2):142-149.

Tang Ting, Zhu Xi, Hou Hailiang, et al. Numerical simulation study on the defense mechanism of a cabin near the shipboard for large surface vessels[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012,33(2):142-149.

[11] 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,2013:262-266.

[12] 唐廷,朱锡,侯海量,等.高速破片在防雷舱结构中引起的冲击荷载的理论研究[J].振动与冲击,2013,32(6):132-136.

Tang Ting, Zhu Xi, Hou Hailiang. Theory study of shock loading induced by high speed fragment in cabin near shipboard[J]. Journal of Bibration and Shock, 2013,32(6):132-136.

[13] 孔祥韶,吴卫国,李俊,等.爆炸破片对防护液舱的穿透效应[J].爆炸与冲击,2013,33(5):471-478.

Kong Xiangshao, Wu Weiguo, Li Jun, et al. Effects of explosion fragments penetrating defensive liquid-filled cabins[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(5):471-478.

[14] 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 Hailiang, Zhu Xi, Li Wei, et al. Experimental studies on characteristics of blast loading when exploded inside ship cabin[J]. Journal of Ship Mechanics, 2010,14(8):901-907.

[15] 孙业斌.爆炸作用与装药设计[M].北京:国防工业出版社,1987.

Analysis of the damage load of the underwater contact explosion on multi-layered defend cabins

Chen Pengyu, Hou Hailiang, Wu Linjie, Zhu Xi

(*Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan* 430033, *Hubei*, *China*)

Abstract: To improve the design of the underwater multi-layered protective bulkhead structure, we carried out several simulations to investigate the characteristics of the damaging load on the void cabin with a multi-layered protective bulkhead subjected to underwater contact explosion. We adopted a typical three-tank structure model for our examination of the characteristics, conducted their analysis using the Dytran software, obtained a simplified model of the load, and derived by fitting the calculation formula of the quasi-static pressure of the load in the smooth pulse stage in the void cabin. The results from the calculation show that the damaging load in the void cabin can be characterized as two stages on a time scale, i. e. the air expansion diffusion stage and the smooth pulse stage, and as two areas in spatial distribution, i. e. the normal reflection area and the Mach reflection area. The loads on the normal reflection area are the initial shock-wave load followed by the quasi-static gas pressure and those on the Mach reflection area are mainly quasi-static gas pressure.

Keywords: underwater contact explosion; explosion load; quasi-static pressure; characteristics of damaging load

(责任编辑 王小飞)