

舰艇抗冲瓦水下爆炸流固耦合冲击动力学模型

刘东岳¹, 汪玉¹, 谌勇², 杜俭业¹, 杜志鹏¹

1. 海军装备研究院, 北京 100161
2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200030

摘要 为更好的反映水下爆炸作用下舰艇抗冲瓦芯层复杂结构动力学特性, 基于多自由度动力学、Taylor 平板理论一阶 DAA 法, 提出了舰艇抗冲瓦在水下爆炸冲击波载荷作用下的流固耦合与冲击动力学模型。抗冲瓦冲击响应分为 3 个阶段, I 阶段是在冲击载荷作用下的一维流固耦合开始阶段, 水中气穴开始产生; II 阶段芯层开始被压溃, 但此时抗冲瓦表层速度开始降低, 水质点的附加冲量起到重要作用; III 阶段是从减速到回弹阶段, 抗冲瓦在弹性恢复力和流体阻尼共同作用下产生减速和反弹。3 个阶段的理论模型揭示了水下爆炸作用下抗冲瓦的冲击响应过程。通过理论模型和算例研究发现, 所提出的模型能很好的反映具有复杂芯层结构的抗冲瓦在水下爆炸冲击波作用下的缓冲与耗能机理, 抗冲瓦芯层密度对其缓冲效果影响显著。这些性能特点可以用于在给定质量情况下对抗冲瓦进行几何优化设计。

关键词 抗冲瓦; 冲击隔离; 流固耦合; 水下爆炸

中图分类号 U674.7

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.10.002

A Fluid-structure Coupling and Dynamic Model of Ship Anti-shock Layer for Underwater Explosion Wave Isolation

LIU Dongyue¹, WANG Yu¹, CHEN Yong², DU Jianye¹, DU Zhipeng¹

1. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China
2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China

Abstract A fluid-structure coupling and dynamic model of ship anti-shock layer for underwater explosion wave isolation is developed to describe the complex structural dynamics and hydrodynamics characteristics of the anti-shock layer due to underwater explosion based on the multi-DOF dynamic theory, Taylor's flat plate model and DAA1 methods. The anti-shock layer shock response is split into three sequential steps: stage I is the one-dimensional fluid-structure interaction problem during the blast loading event, and results in an accelerated motion of the outer face sheet, and the cavitation occur in the water; during stage II the core crushes while the velocity of the outer face sheet bring down, additional impulse due to the water particles play an important role; stage III is the retardation phase over which the anti-shock layer is brought to rest by elastic restoring force and fluid pressure. The third-stage analytical procedure is used to obtain the dynamic response of the anti-shock layer to an underwater explosion. The analytical procedure and case study indicate the proposed model can deal with the ship anti-shock layer with complex core structures and the core density have a significant impact on the cushion effects of the ship anti-shock layer. The influence of the core density to the cushion performances is analyzed. These performances can be used to determine the optimal geometry to maximize shock resistance for a given mass of the anti-shock layer.

Keywords the anti-shock layer; shock isolation; fluid-structure coupling; underwater explosion

0 引言

舰艇抗冲瓦^[1-4]是一种新型舰艇覆盖层, 由以橡胶材料为

基材的内、外表层和夹在中间的特殊空腔结构芯层组成。抗冲瓦的内表面与舰艇外板通过黏结剂粘贴, 外表面与水接

收稿日期: 2011-11-13; 修回日期: 2012-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(10672181)

作者简介: 刘东岳, 高级工程师, 研究方向为舰船计算机仿真和舰船系统工程等方面, 电子信箱: lixedahui@sina.com

触,内外表层夹的特殊空腔结构具有水密性并能承受一定静水压力。抗冲隔声瓦可以敷设在整个舰艇水线以下外板表面。当舰艇附近发生水下爆炸时,爆炸冲击波使瓦的外表层迅速变形,并在水中形成空穴,从而将冲击能量大量消耗在空穴的产生和崩溃过程中,而剩余的部分冲击能量也将在通过瓦内部空腔结构过程中进一步隔离和吸收。因此抗冲瓦具有对舰艇的整体冲击隔离作用,可以在短期内批量装舰,提高舰艇整体抗冲击能力。

由于抗冲瓦的效能主要通过其芯层的动力学特性与水的流固耦合过程实现,因此芯层动力学和流固耦合模型成为抗冲瓦设计的关键。汪玉等^[1]采用波动理论和 Taylor 平板模型,以冲击波在水、覆盖层、空气层、船体钢中的传播过程为研究对象,建立了实心敷设层结构和带空腔敷设层结构的流固耦合模型。但其模型无法描述多层复杂芯层结构。实际上,目前的相关研究主要集中于单层芯层的夹层板结构。对此通常假设其流固耦合效应主要由面层单位面积质量和厚度决定^[2]。然而,这种对夹层板流固耦合问题的处理不够严格,因为面层在芯层反力的作用下速度逐渐减小,此时水可以再次对面层施加二次冲击。这种冲击增加的冲量取决于芯层强度以及水高速运动惯性力。Liang 等^[3]通过改进的 Taylor 理论模型研究表明芯层动力压溃强度与冲击波压力构成的无量纲参数控制了冲量的传递率。Hutchinson 等^[7]的研究给出了芯层动强度与冲量传递率之间的关系。由此可见,考虑了流固耦合效应后芯层冲击压溃应力参数就显得尤其重要。虽然较低的压溃应力能降低冲量传递率,但芯层还必须经历较大的面内拉伸与压缩以阻止弯曲变形,而较高的可以确保整个夹层板的抗弯刚度。理想的芯层取决于防护策略,需要对冲量传递和自身强度进行优化。

Hayman^[8]分析了水下爆炸初始冲击波向泡沫夹层板的传递过程。采用了线性波理论求解空穴的产生时间和位置,夹层板的附加质量以及峰值速度等。研究发现与单层板不同,夹层板受冲击后水中先后出现 2 个气穴区域,一个在板附近先出现,另一个远离板随后出现。Makinen^[9]研究了水下爆炸冲击波在夹层板厚度方向上的传播过程,其采用的数值分析与 Hayman 的理论十分吻合。McCoy 等^[10]研究了厚截面空心复合圆柱壳在外部冲击载荷下的响应。采用等效模量理论数值仿真模拟了平面应变条件下流固耦合效应的影响。发现流固耦合效应中径向拉伸应力和环向压缩应力显著小于未考虑流固耦合情况。而且最大拉伸应力的位置也不同。为了检验等效模量理论的准确性,还按照复合夹心板物理结合方式对比了直接有限元模型。

通过对国内外相关研究的分析表明,目前的研究主要集中在简单结构芯层在水下爆炸冲击波作用下的流固耦合模型。为更好地反映舰艇抗冲瓦芯层复杂结构动力学特性,本文基于多自由度动力学、Taylor 平板理论一阶 DAA 法,提出了舰艇抗冲瓦在水下爆炸冲击波载荷作用下的流固耦合与冲击动力学模型,并利用该理论模型研究了抗冲瓦芯层密度

参数对其缓冲效果的影响规律。通过对理论模型与有限元软件 ABAQUS 进行算例对比分析表明,所提出的模型能很好地反映具有复杂芯层结构的抗冲瓦在水下爆炸冲击波作用下的缓冲与耗能机制。利用所提出的理论模型对抗冲瓦芯层密度对缓冲性能影响的参数化研究表明,密度越小缓冲效果越好,当芯层相对密度 5% 的情况,作用到抗冲瓦表面的水下爆炸冲击波总冲量可下降到接近最大冲量的一半左右。

1 舰艇抗冲瓦水下爆炸冲击动力学模型

所分析的问题如图 1(a)所示。船体外板与水之间的抗冲瓦由内表面层、复杂多层芯层和外表面层组成,船体外板厚度 h_b ,抗冲瓦总厚度 L 。钢板后方由一刚度为 K_s 的线性弹簧支撑,弹簧另一端同基础相连,以模拟整体结构的刚度。由抗冲瓦与船体外板组成的系统受到来自水中的指数衰减的平面入射波作用。

对上述系统进行简化,芯层多孔材料的面积为 A ,可利用集中质量-弹簧系统对整个系统的冲击动力学机制进行建模。图 1(b)即为简化的一维弹簧质量系统,包括由 $N+1$ 个相同的非线性弹簧连接的 $N+2$ 个离散的集中质量。其中集中质量 $m_i = m = \frac{\rho^*AL}{N}$, $i=1, 2, \dots, N$, ρ^* 表示多孔材料的密度。而第一个和最后一个质量分别为前后面板的质量。弹簧的拉压特性可由厚度为 L/N 的多孔材料的单向拉压曲线获得。当忽略了相关效应时可以得到

$$k_i = A\sigma_i \left[\frac{x_{i+1} - x_i}{(L/N)} \right] / \left(\frac{L}{N} \right)$$

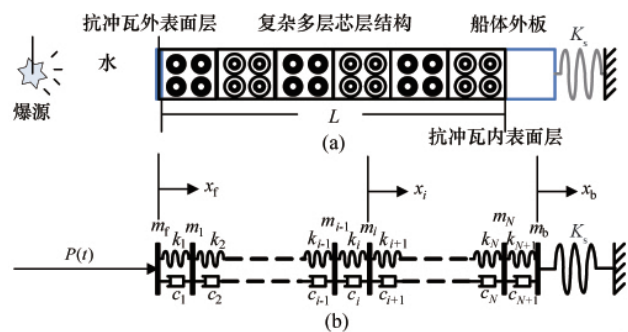


图 1 抗冲瓦冲击动力学流固耦合模型
Fig. 1 Anti-shock layer shock response dynamic model with fluid-structure coupling

除此之外,为了考虑材料的阻尼特性,在质量点之间增加了线性比例阻尼器。通常在单向拉压时,绝大多数孔状多孔材料的截面基本保持不变。所以分析中忽略了多孔材料截面面积的变化情况,这样就可以得到平衡方程

$$m_i \ddot{x}_i = A\sigma \left[\frac{x_{i+1} - x_i}{(L/N)} \right] - A\sigma \left[\frac{x_i - x_{i-1}}{(L/N)} \right] + c(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_{i-1}) \quad \text{对于 } m_i \quad (1)$$

$$m_0 \ddot{x}_0 = Ap(t) + A\sigma \left[\frac{x_1 - x_0}{(L/N)} \right] + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) \quad \text{对于 } m_0 \quad (2)$$

式中, $p(t)$ 表示作用在前面板上流体总压力。而 c 表示阻尼常

数。另外

$$m_b \ddot{x}_b = A \sigma \left(\frac{x_b - x_N}{L/N} \right) - K_s x_b - c \dot{x}_b \quad \text{对于 } m_b \quad (3)$$

而对于平衡方程,位移和速度的初始边界条件可表示为

$$x_i = 0 \quad i=1, 2, \dots, N; \quad \dot{x}_i = 0; \quad x_b = 0; \quad \text{在 } t=0 \text{ 时}$$

$$\dot{x}_i = 0 \quad i=1, 2, \dots, N; \quad \dot{x}_i = 0; \quad \dot{x}_b = 0; \quad \text{在 } t=0 \text{ 时}$$

伴随弹性多孔材料的大变形及回弹机制,流固耦合因素比较复杂,很难求得一个统一的表达式。为此,按各个响应过程中的特点将其分为几个典型阶段,并分别求取每个阶段的流体压力,再按连续条件将各个阶段结合在一起。简单起见,将响应分为3个阶段:在第1阶段,入射冲量作用在前面板上,使其加速并获得动能;由于冲击波持续时间很短,在第2阶段,由于芯层多孔材料的压缩变形,前面板开始减速,直到芯层达到最大压缩变形;而在第3阶段,由于芯层的弹性恢复力作用,前面板又开始反向加速。由于对于结构采用了离散弹簧质量系统,所以关键在于求得流体压力 $p(t)$ 与前面板速度 $\dot{x}_f(t)$ 的函数关系。方便起见,定义几个分界时刻,在 $t=t_1$ 时,在流体中开始出现空穴,而在 $t=t_c$ 时,向右移动的空穴部分到达面板表面,作用在面板上的压力降为零。而在 $t=t_r$ 时,芯层达到最大压缩变形并开始反弹。

第1阶段 ($t < t_c$)

在这阶段里,大部分时间前面板在加速运动。假定在 $t=t_1$ 时刻,在离面板一定距离的地方会出现空穴(cavitation)。在此之后,发生空穴的区域会向两个方向迅速扩展,并在 $t=t_c$ 时到达前面板。而在发生空穴的区域内,在作用到前面板之前流体始终保持原来的状态。在这一阶段,采用 Taylor 平板理论来求解流体压力,假设前面板的阻抗比水的大得多,就可以忽略冲击波的投射作用,这样作用在前面板上的总压力可以表示为

$$p(t) = 2P_i(t) - \rho_w c_w \dot{x}_f$$

其中, $P_i(t)$ 表示指数衰减的入射波, $P_i(t) = P_0 e^{-t/\theta}$, P_0 表示峰值压力, θ 表示时间常数。而 ρ_w, c_w 表示流体的密度和声速。对于 TNT 炸药,远场水下爆炸的峰值压力与时间常数可表示为

$$P_0 = 5.212 \times 10^7 \left(\frac{G^{1/3}}{R} \right)^{1.18} \quad (\text{N/m}^2)$$

$$\theta = 0.08957 G^{1/3} \left(\frac{G^{1/3}}{R} \right)^{-0.185} \quad (\text{ms})$$

其中, G 表示炸药的量, kg, R 为爆距, m。

第2阶段 ($t_c < t < t_r$)

在 t_c 时刻,前面板湿表面处的压力降为零,但在已空化的流体中,流体粒子的速度却处处为正,所以随着面板的减速,流体粒子以高于面板的速度与其发生碰撞,就导致了作用在面板上的附加冲量。为了求得这些附加冲量,需要求得空化区域流体粒子的初速度。由于忽略了多孔材料的率相关效应,则可以假设在初始的一段时间里,作用在前面板上的反力为 $A \sigma_d^*$ 。这样根据修正的 Taylor 平板理论,在 $-t_c \leq x \leq 0$

的区域里,流体中的压力分布可以写为

$$p(x, t) = P_0 \left[e^{\frac{x-c_w t}{c_w \theta}} - \left(\frac{2\beta}{1-\beta} + \frac{\sigma_d^*}{P_0} \right) e^{\frac{-\beta(x+c_w t)}{c_w \theta}} + \frac{1+\beta}{1-\beta} e^{\frac{-(x+c_w t)}{c_w \theta}} + \frac{\sigma_d^*}{P_0} \right] \quad (4)$$

同时,可以求得流体中粒子的速度为

$$v(x, t) = P_0 \left[e^{\frac{x-c_w t}{c_w \theta}} + \left(\frac{2\beta}{1-\beta} + \frac{\sigma_d^*}{P_0} \right) e^{\frac{-\beta(x+c_w t)}{c_w \theta}} - \frac{1+\beta}{1-\beta} e^{\frac{-(x+c_w t)}{c_w \theta}} - \frac{\sigma_d^*}{P_0} \right] / \rho_w c_w \quad (5)$$

通过数值方法求解方程(4),即可求得各点发生空化的时间 $p(x, t_x) = 0$, 另外,对比方程(4)和(5),即可求得在每点发生空化时粒子的速度为

$$v_r(x) = \frac{2P_0}{\rho_w c_w} e^{\frac{x-c_w t(x)}{c_w \theta}}$$

这样,对于 $t > t_c$ 的时间,空化区域中的流体粒子不断作用在面板上,形成一个反射波,其波前以反方向向流体中传播,假设任意时刻,波前位于 $x_c(t)$ 位置,那么作用在面板上的冲量可以分解为2部分,一部分为附连质量 $\rho_w x_c$ 随面板一起运动,另外一部分为紧挨着 $x=x_c$ 处微粒的冲量,这样对于前面板的平衡方程可以改写为

$$(m_f + \rho_w x_c) \ddot{x}_f(t) = \rho_w [v_r(x_c) - v_f(t)]^2 + A \sigma \left[\frac{x_f - x_f}{L/N} \right] - c(\dot{x}_f - \dot{x}_1) \quad (6)$$

第3阶段 ($t > t_r$)

由于前面板的不断减速,在 $t=t_c$ 时刻芯层多孔材料最终会被压缩到最大变形状态。在此之后,由于弹性恢复力,多孔材料开始反弹。由于需要满足速度及压力的连续条件,在初始一段时间里,仍采用方程求解流体压力,直到面板开始减速。此时,由于流体无法承受拉应力,所以,流体中的压力和速度变为零,在此之后,将整个问题看成一个结构在流体中的自由振动问题。这样,为了模拟流体的附连质量与阻尼,采用一阶 DAA 法来求解流固耦合方程

$$M_f \dot{p} + \rho_w c_w A_f p = \rho_w c_w \ddot{x}_f$$

其中, M_f 为流体质量矩阵, A_f 为边界上的面积矩阵,由于转换为一维问题,这2个矩阵也退化为标量。即

$$M_f = \rho A \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad A_f = A$$

这样同方程联立,可以对方程右边进行降阶,最终可以得到一阶微分方程

$$m_w M_f \dot{p} + \rho_w c_w A (1 + m_w) p = \rho_w c_w \left\{ A \sigma \left[\frac{x_f - x_f}{L/N} \right] - c(\dot{x}_f - \dot{x}_1) \right\} \quad (7)$$

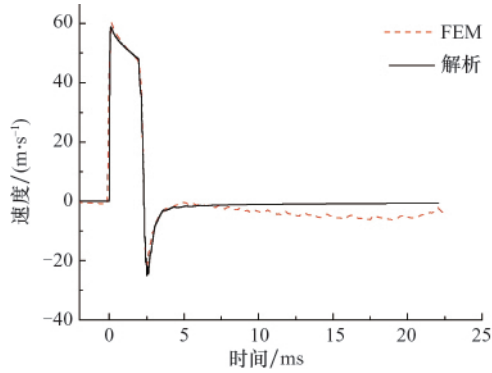
非线性微分方程(1)~(7)结合初始条件可采用逐步积分方法,如 Wilson- θ 法,时间步长可选用 0.01ms, 联立各个方程即可求得结构最终响应。

2 算例分析

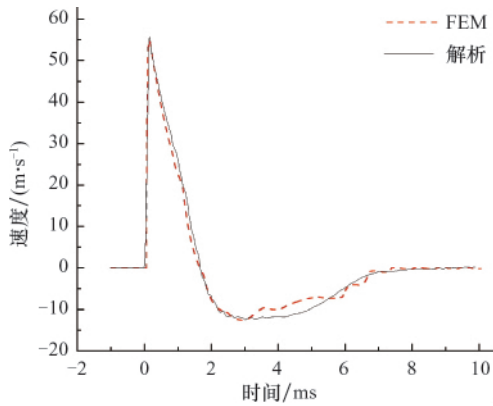
为了考查解析方法的准确性,还与 Abaqus 有限元软件的算例进行了分析对比。采用相对密度不同的柔性聚氨酯多孔

材料作为覆盖层芯层。聚氨酯基体材料的特性为密度 $\rho_s=1200\text{kg/m}^3$ 弹性模量为 $E_s=0.045\text{GPa}$ 。所分析对象的几何尺寸为 $H=100\text{mm}$, $h_t=1\text{mm}$, $h_b=5\text{mm}$ 。而入射波的峰值压力 $P_0=50\text{MPa}$, 持续时间为 $\theta=1\text{ms}$, 而支撑的结构刚度为 $K_s=10^7\text{N/m}$ 。作为比较, 分析了相对密度分别为 $\rho^*/\rho_s=5\%$, 10% , 15% , 20% , 30% , 40% 的情形。

首先对 2 种方法求得前面板的速度及表面压力时程曲线进行了对比, 如图 2 所示。



(a) 密度比 $\rho^*/\rho_s=5\%$
(a) Density ratio $\rho^*/\rho_s=5\%$



(b) 密度比 $\rho^*/\rho_s=30\%$
(b) Density ratio $\rho^*/\rho_s=30\%$

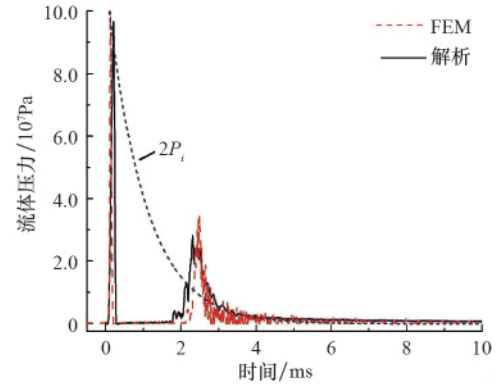
图 2 两种方法前面板的速度-时间曲线比较

Fig. 2 Velocity-time curves for the anti-shock layer front sheet shock response

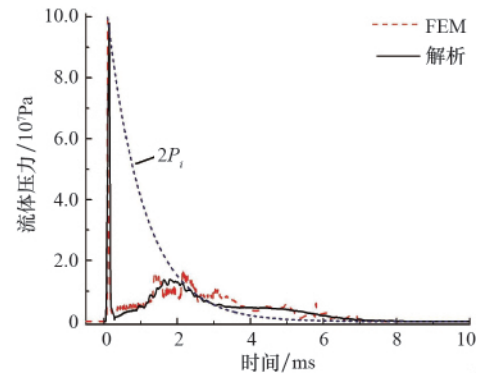
通过对芯层离散的段数 N 比较发现, 在 $N>10$ 以后继续增大数量, 计算得到的结果已差别不大。图 2(a) 绘制了相对密度为 5% 的情况, 而图 2(b) 绘制了 30% 的情况。可以看出, 理论解所求得的结果同有限元结果吻合的较好。从图 2(a) 中可以清晰的看到对应芯层应力平台期时, 前面板的匀减速阶段。而当芯层进入密实化阶段后, 迅速减速并发生反弹。

图 3 比较了 2 种方法求得的压力时程图。可以看出, 压力曲线被分成了 2 个比较明显的阶段。在第 1 个人射阶段, 压力幅值大, 但持续时间很短。而第 2 个阶段的幅值小但持

续时间却长得多。第 1 个阶段是冲击波对抗冲瓦面板加速的初期, 随着面板的迅速运动, 其周围的水被拉伸, 从而形成空化区, “截断”了冲击波的作用。第 2 阶段是随着抗冲瓦面板的减速和水的流动, 空化区域溃灭, 水粒子冲击抗冲瓦面板, 形成“二次加载”。两个阶段从时间上看占据了冲击波持续时间的相当部分, 从而降低了作用在抗冲瓦上的总冲量。对于密度为 5% 的情况, 2 个阶段之间有大约 1.8ms 的零压力间隔。当密度增大时, 二次载荷相比来得更早且更为平缓。



(a) 密度比 $\rho^*/\rho_s=5\%$
(a) Density ratio $\rho^*/\rho_s=5\%$



(b) 密度比 $\rho^*/\rho_s=30\%$
(b) Density ratio $\rho^*/\rho_s=30\%$

图 3 两种方法求得的前面板的压力-时间曲线比较
Fig. 3 Pressure-time curves for the anti-shock layer front sheet

为了考查相对密度对于最终响应的规律的影响, 将前面板的表面压力进行积分, 得到不同芯层密度对传递到抗冲瓦外表面层的总冲量(图 4)。可以看出, 可以将冲量增加的历程分为几个较明显的阶段; 在第 1 阶段, 在冲击波作用下冲量迅速上升, 达到 $2.5 \times 10^5 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 量级。对于不同密度的抗冲瓦, 这个阶段差别不大。由于芯层刚度引起的支撑反力相差不大, 而且与冲击载荷相比为小量, 因此这个阶段冲量量级的主要决定作用应为前面板的质量。第 2 阶段冲量曲线斜率显示出一定的差别。随着芯层密度的减小, 冲量曲线斜率降低。5% 密度抗冲瓦芯层对应的冲量曲线斜率几乎为 0, 即所谓的平台期。

随后的第 3 阶段是芯层被压溃和继续被压实的过程。对于不同密度的抗冲瓦这一阶段开始的时间差别较大。由于芯层被逐渐压实,该阶段冲量的增量又迅速增大。从不同密度多孔材料的分析结果来看,虽然低密度多孔材料可能导致更大的支反力,但作用在结构上的总冲量仍然比高密度多孔材料的情况要小很多。对应 5% 的情况,总冲量可下降到接近最大冲量的一半左右。

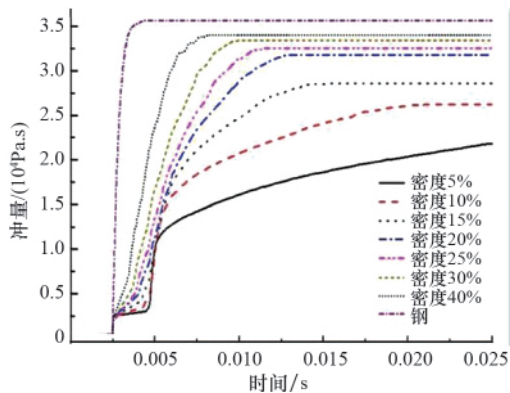


图 4 不同芯层密度对传递到抗冲瓦外表面层的总冲量
 Fig. 4 Total impulses transmitted onto the front sheet for various densities of the foam core

3 结论

本文基于多自由度动力学、Taylor 平板理论一阶 DAA 法,提出了舰艇抗冲瓦在水下爆炸冲击波载荷作用下的流固耦合与冲击动力学模型。该模型将抗冲瓦冲击响应过程分为 3 个阶段:

I 阶段入射冲量作用在前面板,使其加速。同时,水中产生由面板加速运动引起的稀疏波导致的空化区域,该区域会朝向和远离面板扩展,并在 I 阶段末到达抗冲瓦面板表面。

II 阶段由于空化区域已扩展到面板,此时冲击载荷不再对抗冲瓦面板起作用,但是由于水质点与面板的碰撞而产生了附加冲量。因此 II 阶段中抗冲瓦面板继续压缩着芯层,并在该阶段末使芯层达到最大压缩量。

III 阶段在芯层弹性恢复力和流体的共同作用下,抗冲瓦芯层开始反弹。此时可将其看成抗冲瓦结构在水中的自由振动问题。

利用 3 阶段的理论模型研究了抗冲瓦芯层密度参数对其缓冲效果的影响规律。结果表明,当芯层密度减小时,作用在抗冲瓦表层上的水下爆炸冲量以更大的速率降低。这说明,抗冲瓦不仅是一种依靠吸收冲击能量起到缓冲作用的传统吸能结构,而且能够降低水下爆炸作用在瓦表面的总冲量。而降低冲量的机理就是在 3 阶段模型中所反映的水中空化区域的形成使得冲击波压力波形变窄。虽然当空化区域闭合时产生二次加载,但压力脉冲的面积,也就是比冲量,明显地减小了。

为了考查理论模型的准确性,还与 Abaqus 有限元软件进行了算例分析对比。结果表明,所提出的模型能很好的反映具有复杂芯层结构的抗冲瓦在水下爆炸冲击波作用下的缓冲与耗能机理。

抗冲瓦芯层密度对其缓冲效果影响显著。这些性能特点可以用于在给定质量情况下对抗冲瓦进行几何优化设计。

参考文献 (References)

- [1] 汪玉, 华宏星, 谌勇, 等. 舰艇抗冲瓦整体冲击隔离新概念及其机理研究[J]. 科技导报, 2009, 27(3): 19-24.
Wang Yu, Hua Hongxing, Chen Yong, et al. Science & Technology Review, 2009, 27(3): 19-24.
- [2] Chen Y, Zhang Z Y, Wang Y. Attenuating performance of a polymer layer coated onto floating structures subjected to water blasts[J]. European Journal of Mechanics A/Solids, 2009, 28(3): 591-598.
- [3] Chen Y, Tong Z P, Hua H X. Experimental investigation on the dynamic response of scaled ship model with rubber sandwich coatings subjected to underwater explosion [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(2): 318-328.
- [4] Du Z P, Wang Y, Chen Y. A new type of rubber sandwich coated onto ship for the use of underwater explosion shock mitigating [J]. Advanced Materials Research, 2009, 79-82: 291-294.
- [5] Fleck N A, Deshpande V S. The resistance of clamped sandwich beams to shock loading[J]. J Appl Mech, 2004, 71(3): 386-401.
- [6] Liang Y, Spuskanyuk A V, Flores S E, et al. The response of metallic sandwich panels to water blast[J]. J Appl Mech, 2007, 74(1): 81-99.
- [7] Hutchinson J W, Xue Z. Metal sandwich plates optimized for pressure impulses[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2005, 47(4-5): 545-569.
- [8] Hayman B. Underwater explosion loading on foam-cored sandwich panel, sandwich construction, 3, EMAS [C]. Proceedings for the Third International Conference on Sandwich Construction, Stockholm, Sweden, 1999.
- [9] Makinen K. Underwater shock loaded sandwich structures[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, Department of Aeronautics, Sweden, 1999.
- [10] McCoy R W, Sun C T. Fluid structural interaction analysis of a thick section composite cylinder subjected to underwater blast loading[J]. Composite Structures, 1997, 37(1): 45-55.

(责任编辑 张军, 岳臣)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过 300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。