

舰艇抗冲瓦整体冲击隔离新概念及其机理研究

汪玉¹, 华宏星², 谌勇², 杜俭业¹, 杜志鹏¹

1. 海军装备研究院, 北京 100161

2. 上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室, 上海 200030

摘要 基于声阻抗失配原理, 提出了舰艇抗冲瓦对水下爆炸冲击的整体隔离新概念。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(消声瓦的简化模型)和带空腔敷设层结构(抗冲瓦)的流固耦合模型。利用 Abaqus 软件建立舰艇抗冲瓦三维冲击响应模型。算例结果表明, 抗冲瓦能够很好地隔离水下爆炸冲击波, 大大降低船体结构材料应力和加速度冲击响应峰值, 并能在广泛的频域内显著降低舰艇冲击响应。

关键词 抗冲瓦; 冲击隔离; 阻抗失配; 水下爆炸

中图分类号 U674.7

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)03-0019-06

New Concept of Ship Anti-Shock Layer in Underwater Explosion Wave Isolation

WANG Yu¹, HUA Hongxing², CHEN Yong²,
DU Jianye¹, DU Zhipeng¹

1. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China

2. State Key Laboratory of Vibration, Shock and Noise,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China

Abstract The concept of ship anti-shock layer in underwater explosion wave isolation is developed based on the impedance mismatch theory. Wave equation and Taylor's flat plate model are adopted to derive fluid-structure interaction equations for the solid layer and the cavity layer. The numerical examples indicate that the ship anti-shock layer can isolate the underwater explosion wave from ship hull. The ship hull shock peak stress, acceleration and shock spectrum are attenuated significantly when the ship hull is covered with the anti-shock layer.

Keywords anti-shock layer; shock isolation; impedance mismatch; underwater explosion

0 引言

任何一艘舰艇, 不论其攻击力和主动防御能力有多强大, 都不可避免会遭到敌方水下武器的攻击(水雷、深弹和鱼雷等)。在非接触爆炸作用下, 即使在距离爆心相当远的范围内, 也会对舰艇的结构、设备和人员造成伤害。大量战例和试验表明^[1], 水下爆炸作用下, 舰艇结构易发生冲击屈曲甚至破损, 舰艇内会发生大范围的冲击破坏而导致设备失效, 使得舰艇丧失机动能力或作战能力, 从而很难逃脱第二次、第三次的打击, 遭受人、舰覆灭的命运。

舰艇水下爆炸冲击传递途径是: 爆源-水-舰艇湿表面-舰艇结构-设备。为避免舰载设备在水下爆炸强冲击下的损坏, 目前大多数重要的舰载设备都加装了冲击隔离器。冲击隔离器具有缓冲功能, 可以大大降低设备被冲击的加速度和速度响应峰值。但是实船水下爆炸试验表明, 在单个设备未受损的情况下, 整个系统各设备之间的连接处和管路接头便成为舰艇整体抗冲击能力的薄弱环节, 容易造成舰艇在冲击后的一段时间内丧失部分作战能力。针对这种情况, 提高舰艇总体抗冲击能力就需要从舰艇冲击响应的源头着手, 即通过降低作用在舰艇水下湿表面的冲击来改善舰艇整体冲击环境。

由于在军事和民用方面都需要高性能的爆炸冲击防护措施, 因此该领域的研究一直是国内外关注的焦点。作为抗爆抗冲击的材料和结构, 具有较好的能量吸收性能十分重要。近年来, 国内外科研人员研究了金属单层及夹心多层复

收稿日期: 2008-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(10672181)

作者简介: 汪玉, 研究员, 研究方向为舰艇冲击、振动与噪声, 电子信箱: wang_yu@china.com.cn

合结构的屈曲及塑性变形的能量吸收原理^[2-6]。文献[2]采用实验的方法测试了复合叠层板的能量吸收性能。Santosa 等^[3]对铝制蜂窝结构和铝制泡沫的能量吸收性能进行了有限元分析。Nagel^[4]等采用有限元方法研究了立方形和锥形薄壁钢管在轴向冲击载荷下的能量吸收性能;分析结果认为锥形钢管具有较好的吸能效果,可以通过改变管壁厚度和锥角来控制锥形管的能量吸收能力。Marsolek^[5]等分别采用有限元法和解析法对汽车和列车上的圆柱形能量吸收结构进行分析,并进行了实验验证。文献[6]对纤维复合材料的能量吸收过程进行了实验研究,实验结果表明其具有较强的变形能密度。国内公开发表的文献较少,目前主要是关于多孔铝合金、泡沫铝合金、复合材料板的研究^[7-9]。王熙等综述了近年来复合材料管状结构能量吸收性能研究的最新进展^[10]。

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利用金属和复合材料的变形吸收冲击能量方式实现结构冲击防护。对于碰撞、穿甲和接近爆炸等材料进入塑性大变形和断裂状态的冲击防护问题来说,上述防护手段能够通过结构和材料的大变形吸收爆炸冲击能量,起到防护的作用。对于舰艇更易遭受的水下非接触爆炸来说,较远距离上的爆炸冲击并不会对舰艇结构产生严重的破坏,船体结构大部分还处在材料弹性范围内,通过塑性变形的吸能效果可能并不显著。而且来自水下非接触爆炸的冲击载荷作用于整个船体湿表面的广泛区域,能激起船体及舰载设备和人员的强烈冲击损伤,最终导致舰艇生命力的损失。本文基于水、空气和船体钢的声阻抗失配原理,提出了一种敷设于舰艇湿表面,隔离水下爆炸冲击波的舰艇抗冲瓦新概念。

抗冲瓦外形与目前国内外潜艇普遍使用的消声瓦类似,但结构和原理不同。消声瓦利用声阻抗接近水的橡胶材料,使入射声波透射进入消声瓦内部,然后将部分声能转换为热能,起到消减反射声波的作用。抗冲瓦 80% 体积为空腔,利用水、空气和船体钢声阻抗失配原理,将大部分水中冲击波能量隔离,使其不能直接传递到船体,从而起到改善舰艇整体水下爆炸冲击环境的作用。

本文采用波动理论,拓展 Taylor 平板模型,以水中冲击波在水、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(消声瓦的简化模型)和带空腔敷设层结构(抗冲瓦)的流固耦合模型,并结合算例分析,研究了抗冲瓦隔离水中冲击波的机理。在此基础上,利用 Abaqusa 软件建立有限元模型,采用 Geers-Hunter 气泡脉动冲击载荷模型计算得到舰艇模型有、无抗冲瓦的冲击响应谱,通过对比分析研究了舰艇抗冲瓦三维冲击响应。

1 舰艇抗冲瓦一维冲击响应模型

1.1 船体外板在冲击波载荷下的响应

内部为空气、外部为水介质的船体外板受到水下爆炸冲击波作用时,压力波的传递原理如图 1 所示。由于船体较薄,可以不考虑波在船壳材料内部的传递损失。入射波 p_i 从水域边

入射,在船壳与水域流固耦合面形成反射波 p_H^R 和透射波 p_A^T 。由于船壳材料阻抗比空气阻抗大得多,因此可以近似认为 $p_A^T = 0$ 。采用 Taylor 平板一维模型的分析方法,压力波为平面压力波,且沿垂直于船壳的 x 方向传播。水域的密度和声传播速度分别是 ρ_w 和 c_w ;空气域的密度和声传播速度分别是 ρ_A 和 c_A ;船壳体的材料密度为 ρ_H ,厚度为 h_H 。

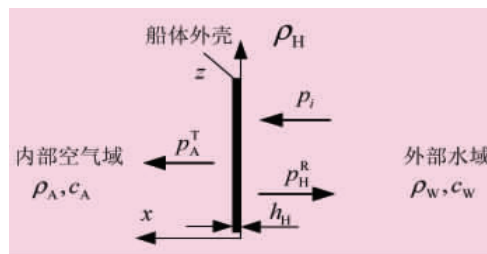


图 1 船壳体中的波传递

Fig. 1 Shock wave in ship hull

Cole^[11]根据大量水下爆炸试验认为,冲击波峰值压力随比例爆距 $(\sqrt[3]{W}/R)$ 的增大呈线性衰减的规律,因此在 10 倍等效球形装药半径外可近似为水中声波。水下爆炸自由场压力波的峰值压力 p_i 可以近似表示为冲击波到来后时间 t 的指数函数

$$p_i = p_m e^{-t/\theta}$$

式中, p_m 为峰值压力, θ 为指数衰减的时间常数。由此可以得到某一位置的入射波压力方程为

$$p(x, t) = p_m e^{-(t-x/c_w)/\theta}$$

船体外板在冲击波作用下的运动速度设为 $w'(t)$,则根据流固耦合边界面的连续性边界条件,耦合面上流体介质也具有相同的运动速度 $w'(t)$ 。考虑外板运动形成的水中稀疏波和冲击波,得到水中的总压力为

$$p(x, t) = p_m e^{-(t-x/c_w)/\theta} + p_m e^{-(t+x/c_w)/\theta} - \rho_w c_w \dot{w}(t+x/c_w) \quad (1)$$

船体外板的运动方程可以写成

$$\rho_H h_H w''(t) + \rho_w c_w w'(t) + C_H w'(t) + K_H w(t) = 2p_m e^{-t/\theta} \quad (2)$$

式中, C_H 为船壳体结构阻尼, K_H 为船壳体结构的支撑刚度。求解方程(2),并考虑初始条件 $w(0)=w'(0)=0$,可以得到外板的位移表达式

$$w(t) = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} + B e^{-t/\theta} \quad (3)$$

式中各参数的表达式为

$$C_1 = -\frac{B \left(r_2 + \frac{1}{\theta} \right)}{r_2 - r_1}, \quad C_2 = -\frac{B \left(r_1 + \frac{1}{\theta} \right)}{r_2 - r_1}, \quad B = \frac{2p_m}{\frac{\rho_H h_H}{\theta^2} - \frac{C_H + \rho_w c_w}{\theta} + K_H}$$

$$r_1 = \frac{-(C_H + \rho_w c_w) - \sqrt{(C_H + \rho_w c_w)^2 - 4\rho_H h_H K_H}}{2\rho_H h_H}$$

$$r_2 = \frac{-(C_H + \rho_w c_w) + \sqrt{(C_H + \rho_w c_w)^2 - 4\rho_H h_H K_H}}{2\rho_H h_H}$$

1.2 敷设实心层的冲击响应

粘贴于船体后的实心敷设层简化模型如图 2 所示。由于

敷设结构的面板层和船壳比夹心层的厚度小得多,而且声学阻抗相差不大,因此可以不考虑压力波在面板层和船壳体层的传播特性。为了理论建模方便,仅考虑敷设层结构在爆炸冲击载荷下的纵向动态响应特性。水域的密度和声传播速度分别是 ρ_w 和 c_w ,空气域的密度和声传播速度分别是 ρ_A 和 c_A ,夹心层的密度和声传播速度分别是 ρ_c 和 c_c 。正入射波 p_i 从水域边入射,在敷设结构与水域的流固耦合面形成反射波 p_F^{R1} 和透射波 p_C^T ;夹心层内的透射波 p_C^T 到达内部空气域与船壳体耦合面形成反射波 p_H^{R1} 和透射波 p_A^T ;当反射波 p_H^{R1} 再次到达敷设结构与水域的流固耦合面时形成反射波 p_F^{R2} 和透射波 p_W^T ,循环往复,波不断在敷设结构各层间来回传播,由于压力越来越小,后续压力波的影响可以不考虑。

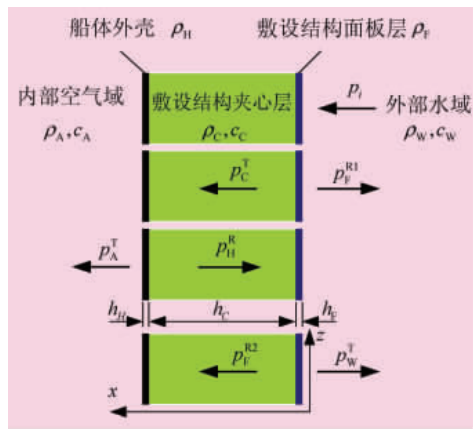


图2 实心敷设层中的波传递

Fig. 2 Shock wave in solid layer

在水域入射边,波的方程是

$$c_w \nabla^2 (p_i + p_F^{R1}) + \frac{\partial^2 (p_i + p_F^{R1})}{\partial t^2} = 0$$

夹心层中波的方程为

$$c_c \nabla^2 (p_C^T + p_H^{R1}) + \frac{\partial^2 (p_C^T + p_H^{R1})}{\partial t^2} = 0$$

在空气域透射边,波的方程是

$$c_A \nabla^2 p_A^T + \frac{\partial^2 p_A^T}{\partial t^2} = 0$$

采用 Taylor 一维模型的分析方法,在入射边,敷设结构面板薄层的运动方程可以写成

$$\rho_F h_F w_F''(t) = p_i(t) + p_F^{R1}(t) - p_C^T(t)$$

式中, $p_i(t)$ 为自由场压力, $p_F^{R1}(t)$ 为流体与敷设结构耦合面的反射压力, $p_C^T(t)$ 为敷设结构夹心层的透射压力, $w_F(t)$ 为薄层的位移。

透射波 p_C^T 到达内部空气域与船壳体耦合面的时间为 $t_1 = h_c / c_c$ 。由于船壳体的阻抗远大于空气的阻抗,因此可以认为透射波 p_C^T 被完全反射,即空气域的透射波 $p_A^T = 0$ 。在透射边,船壳薄层的运动方程可以写成

$$\rho_H h_H w_H''(t) + C_H w_H'(t) + K_H w_H(t) = p_C^T(t) + p_H^{R1}(t)$$

式中, C_H 为船壳体结构阻尼, K_H 为船壳体结构的支撑刚度, $p_C^T(t)$

为敷设结构夹心层的透射压力, $p_H^{R1}(t)$ 为空气与船壳耦合面的反射压力, $w_H(t)$ 为船壳薄层的位移。

当 $t_2 \geq 2t_1$ 时,空气与船壳耦合面的反射压力 $p_H^{R1}(t)$ 到达敷设层结构与水域耦合面,此时,敷设结构薄层的运动方程为

$$\rho_F h_F w_F''(t) = p_i(t) + p_F^{R1}(t) + p_F^{R2}(t) - p_W^T(t)$$

式中, $p_H^{R1}(t)$ 为空气与船壳耦合面的反射压力, $p_F^{R2}(t)$ 为敷设结构与水域耦合面的反射压力, $p_W^T(t)$ 为水域的透射压力, $w_F(t)$ 为敷设结构薄层的位移。

根据耦合面连续性边界条件,在水域与敷设结构薄层之间有

$$u_i(t) + u_F^{R1}(t) = u_C^T(t) = w_F'(t)$$

式中, $u_i(t)$ 、 $u_F^{R1}(t)$ 和 $u_C^T(t)$ 分别为入射波、反射波和透射波的质点速度,并存在下列关系式

$$u_i(t) = \frac{p_i(t)}{Z_w}, \quad u_F^{R1}(t) = -\frac{p_F^{R1}(t)}{Z_w}, \quad u_C^T(t) = \frac{p_C^T(t)}{Z_c}$$

式中, Z_w 和 Z_c 分别为流体和敷设结构材料的声阻抗率, $Z_w = \rho_w c_w$, $Z_c = \rho_c c_c$, $c_c = \sqrt{E_c / \rho_c}$,其中 E_c 为敷设层材料的弹性模量。

当 $t \geq t_2$ 时,在水域与敷设结构薄层之间有

$$u_H^{R1}(t) + u_F^{R2}(t) = u_W^T(t) = w_F'(t)$$

式中, $u_H^{R1}(t)$ 、 $u_F^{R2}(t)$ 和 $u_W^T(t)$ 分别为波的质点速度,并存在下列关系式

$$u_H^{R1}(t) = \frac{p_H^{R1}(t)}{Z_c}, \quad u_F^{R2}(t) = -\frac{p_F^{R2}(t)}{Z_c}, \quad u_W^T(t) = \frac{p_W^T(t)}{Z_w}$$

联立求解上述方程,并代入初始条件 $w_F'(t=0)=0$,可以得到敷设结构夹层内的透射波压力和流固耦合薄层的反射波压力

$$p_C^T(t) = -C_3 [e^{-(Z_w + Z_c)u_F h_F} - e^{-i\theta}]$$

$$p_F^{R1}(t) = C_4 e^{-(Z_w + Z_c)u_F h_F} + C_5 e^{-i\theta}$$

当 $t \geq t_2$ 时,透射入水域的透射波压力为

$$p_W^T(t) = C_6 e^{-i\theta} - C_7 e^{-Z_c u_F h_F} - C_8 e^{-(Z_w + Z_c)u_F h_F} + C_9 e^{-(Z_w + Z_c)u_F h_F} \quad (4)$$

式中, $C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9$ 均为常数,表达式为

$$C_3 = \frac{2\theta p_m Z_c}{\theta(Z_w + Z_c) - \rho_F h_F}, \quad C_4 = \frac{2\theta Z_w p_m}{\theta(Z_w + Z_c) - \rho_F h_F}, \quad C_5 = p_m - C_4$$

$$C_6 = \frac{4\theta^2 p_m Z_w Z_c (\theta Z_c + \rho_F h_F)}{[\theta(Z_w + Z_c) - \rho_F h_F]^2 (\theta Z_c + \rho_F h_F)}, \quad C_7 = \frac{8\theta p_m (Z_c)^2}{Z_w (\theta Z_c - \rho_F h_F)}$$

$$C_8 = C_6 - C_7, \quad C_9 = \frac{4\theta (p_m)^2 Z_c (Z_w + 2Z_c)}{\rho_F h_F [\theta(Z_w + Z_c) - \rho_F h_F]}$$

作用在壳体层上的压力为

$$p_C^T(t) + p_H^{R1}(t) = 2C_3 [e^{-i\theta} - e^{-(Z_w + Z_c)u_F h_F}]$$

水域耦合面上总压力为

$$p(t) = p_i(t) + p_F^{R1}(t) + p_W^T(t)$$

1.3 敷设空心层的冲击响应

代表抗冲瓦的空腔敷设层主要由敷设结构面板层、空腔及空腔壁组成,粘贴在船体上形成封闭的空腔结构。若空腔足够大,可以忽略波从空腔壁的传递,空腔敷设层如图 3(a),它可以简化成图 3(b)所示模型,空腔壁可以简化成弹簧阻尼结构,等效刚度为 K_c ,等效阻尼为 C_c 。空腔内空气为常大气

压,可以忽略由于空气压缩对敷设层刚度的影响。入射波 p_i 从水域边入射,在敷设结构面板层与水域流固耦合面形成反射波 p_r^R 和透射波 p_A^T 。由于面板层材料阻抗比空气阻抗大得多,因此可以近似认为 $p_A^T=0$ 。采用 Taylor 一维模型的分析方法,压力波为平面压力波,且沿垂直于船壳的 x 方向传播。水域的密度和声传播速度分别是 ρ_w 和 c_w ; 空气域的密度和声传播速度分别是 ρ_A 和 c_A ; 船壳体的材料密度为 ρ_H , 厚度为 h_H 。

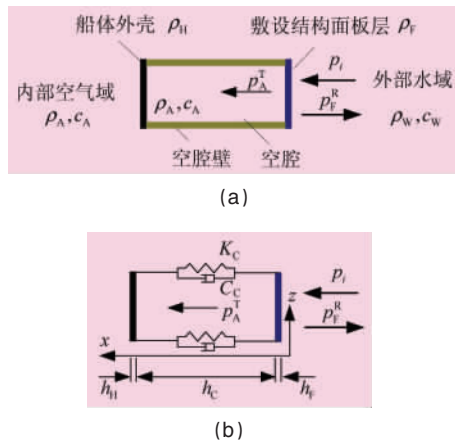


图 3 空腔敷设层中的波传递

Fig. 3 Shock wave transmit through cavity layer

定义 $w_F(t)$ 为敷设结构薄层的位移, $w_H(t)$ 为船壳体的位移, 可以得到敷设结构面板层的流固耦合运动方程

$$\rho_F h_F w_F''(t) + \rho_w c_w w_F'(t) + C_C w'(t) + K_C (w_F(t) - w_H(t)) = 2p_m e^{-i\omega t} \quad (5)$$

船壳体的运动方程为

$$\rho_H h_H w_H''(t) + C_H w_H'(t) + K_H w_H(t) - K_C (w_F(t) - w_H(t)) = 0 \quad (6)$$

式中, C_H 为船壳体支撑结构的阻尼, K_H 为船壳体结构的支撑刚度。联立求解上述两方程,并考虑初始条件 $w(0)=w'(0)=0$, 即可得到结构的运动位移、速度和加速度,再利用应力-应变的关系可得船壳体的应力参数。

1.4 敷设空心层的冲击响应

根据上节推导的理论公式, 编制程序进行方程的求解。如图 4 所示 3 种算例模型: 船壳厚度 t_H 和敷设结构面板层的厚度 t_F 均为 5 mm; 夹心层的高度 h_C 为 50 mm。敷设结构面板层与夹心层均为橡胶材料, 密度为 1 070 kg/m³, 弹性模量为

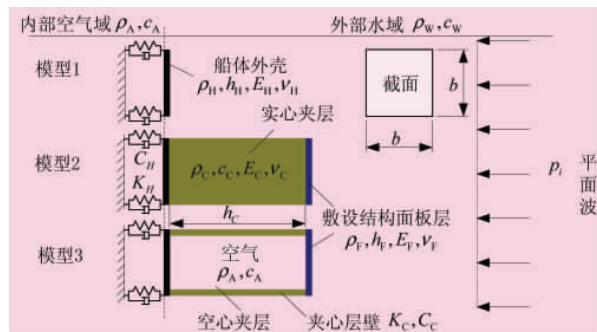
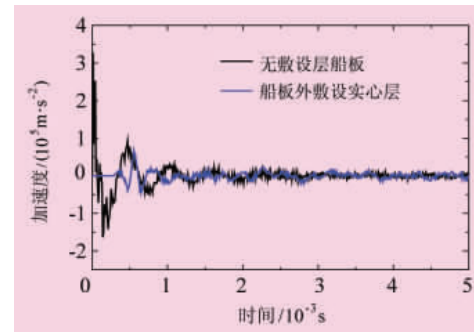


图 4 3 种对比算例模型示意图

Fig. 4 Three models for comparison

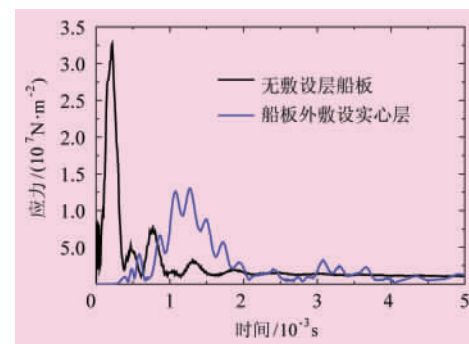
3×10^7 Pa。船壳体的密度为 7 800 kg/m³, 弹性模量为 2.1×10^{11} Pa。假定船壳体支撑刚度为 1×10^7 N/m, 阻尼为 1 000 N·s/m。水下爆炸装药当量为 0.5 kg TNT, 距离船壳面 5 m。由于模型截面比较小, 而且距离爆炸源比较远, 入射波可以近似为平面波。

图 5 分别给出了水下爆炸冲击波载荷下, 模型 1 和模型 2 的加速度和应力响应时域曲线。由单层船壳体的加速度响应曲线可见, 船体壳板的初始加速度响应较大, 这种瞬时强冲击易引起舰载设备和人员的损伤。比较带敷设层的船壳体与单层船壳体的加速度和应力响应曲线, 在船壳体上粘贴敷设层后, 船体加速度和应力峰值明显减小。单层船壳体最大加速度为 327 000 m/s², 最大应力为 31.7 MPa, 带实心敷设层后船壳体最大加速度为 66 200 m/s², 最大应力为 13.1 MPa, 最大加速度降低了 79%, 最大应力降低了 60%。对比分析结果表明, 船体外的实心敷设层对传递到船体上的冲击加速度和应力响应能够起到缓冲作用。



(a) 船壳板加速度时间历程

(a) Acceleration time history in ship hull



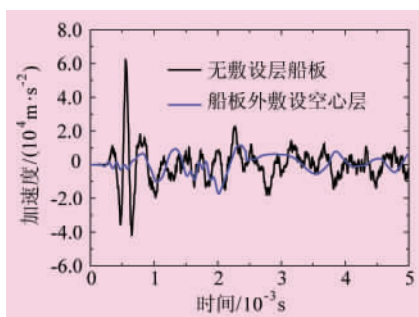
(b) 船壳板等效应力时间历程

(b) Effect stress time history in ship hull

图 5 单层船壳和船壳板外敷设实心层后的冲击响应对比

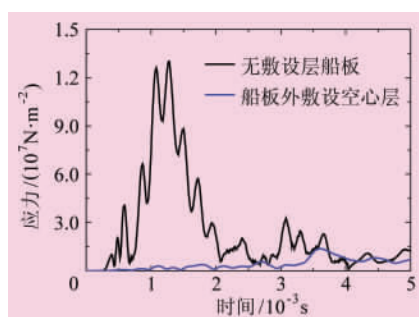
Fig. 5 Shock response comparison between ship hulls with and without solid layer

图 6 分别给出了模型 2 和模型 3 的船壳板加速度和应力响应曲线。对比两种模型的加速度和应力曲线可见, 船体加速度和应力峰值进一步减小: 船壳体最大加速度从 66 200 m/s² 下降到 19 000 m/s², 下降幅度为 71%, 相对单层船壳下降了 94%; 最大应力由 13.1 MPa 下降到 1.6 MPa, 下降幅度为



(a) 船壳板加速度时间历程

(a) Acceleration time history in ship hull



(b) 船壳板等效应力时间历程

(b) Effect stress time history in ship hull

图6 船壳外敷设实心层和空腔层后冲击响应对比

Fig. 6 Comparison of shock responses contrast between ship hulls with and without cavity layer

87%, 相对单层船壳下降了 95%。

通过对比分析 3 种模型的算例结果表明, 钢质船体直接受到水下爆炸冲击作用后, 会导致船壳板较高的应力和加速度响应。更高的应力易导致材料屈服、大变形甚至断裂; 较高的加速度易导致安装在船体的舰载设备和人员的冲击损伤。敷设了实心覆盖层的船壳板在相同的水下爆炸载荷下加速度和应力有了一定程度的降低; 敷设了具有空心夹层的船壳板后, 大大降低了船壳板上的加速度和应力响应。

2 舰艇抗冲瓦三维冲击响应模型

为研究三维舰艇敷设抗冲瓦水下爆炸冲击响应, 采用 Abaqus 非线性有限元软件建立舰艇敷设抗冲瓦三维模型, 见图 7。爆炸压力载荷采用 Geers-Hunter 模型。气泡脉动时在水中产生稀疏波和压力波, 稀疏波产生于每次气泡膨胀到半径最大时, 而压力波产生于气泡半径压缩到最小时。通常第一次脉动形成的二次压力波能量较大, 约占炸药爆炸能量的 27%, 最大压力约为冲击波的 10%~20%, 但是其作用时间远大于冲击波的作用时间, 形成的冲量与冲击波相当, 具有明显的破坏作用。随后的脉动逐渐减弱, 脉动能量较小, 压力作用可以不予考虑。因此, 计算分析过程中, 主要考虑冲击波阶段和一次气泡脉动阶段。

计算得到舰船模型艏部侧板和底板典型测点冲击响应

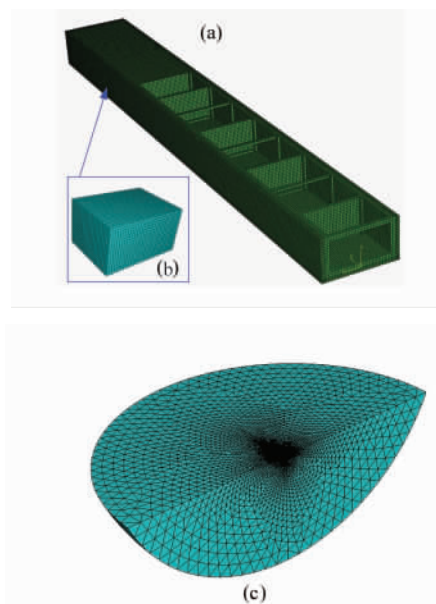


图7 舰船模型(a)及其内外流场的有限元模型((b)、(c))

Fig. 7 Ship model (a) and the fluid FEA model ((b),(c))

谱, 如图 8、图 9 所示。敷设抗冲瓦后, 舰船模型侧板冲击响应谱在整个频域降低了 1 个数量级; 底板冲击响应谱也有显著的降低, 但在 7 Hz 和 200 Hz 附近频点处没有降低。

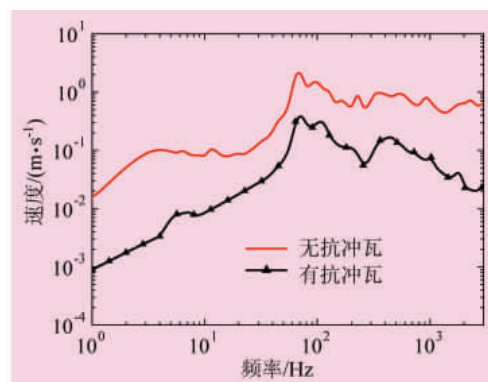


图8 舰船模型艏部侧板冲击响应谱

Fig. 8 Shock spectrum on the side

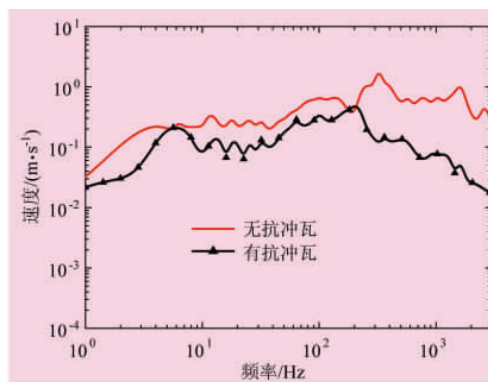


图9 舰船模型艏部底板冲击响应谱

Fig. 9 Shock spectrum on the bottom

3 结论

为改善舰艇在水下爆炸下的整体冲击环境,基于声阻抗失配原理提出了舰艇抗冲瓦的新概念。将抗冲瓦和消声瓦简化成空心 and 实心敷设层,采用波动理论,结合对 Taylor 平板模型的拓展,建立了覆盖层结构的流固耦合模型。利用 Abaqus 软件建立舰艇模型抗冲瓦三维冲击响应模型。通过算例对比分析了抗冲瓦的隔冲缓冲效果。

1) 无覆盖层船壳板受水下爆炸冲击引起较高材料应力和加速度响应,易造成结构塑性变形并对外板安装设备产生强冲击。

2) 敷设实心覆盖层能降低船壳板上的冲击加速度响应和应力峰值。

3) 敷设空心覆盖层能大大降低船壳板上的冲击加速度响应和应力峰值。

4) 敷设抗冲瓦,舰船模型侧板冲击响应谱在整个频域降低了 1 个数量级;底板冲击响应谱也有显著的降低,但在 7 Hz 和 200 Hz 附近频点处没有降低。

通过模型的建立及算例的对比分析,本文定性地给出了舰艇抗冲瓦新概念对水下非接触爆炸的隔冲缓冲效果。但舰艇水下爆炸问题十分复杂,需要在试验的基础上对计算模型进行验证,并进一步考虑抗冲瓦大变形、材料非线性以及敷设抗冲瓦对舰艇航行性能影响等问题。

参考文献 (References)

- [1] 汪玉, 华宏星. 舰船现代冲击理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Wang Yu, Hua Hongxing. Modern ship anti-shock theory and applications[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [2] Lavoie J A, Kellas S. Dynamic crush tests of energy-absorbing laminated

- composite plates [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1996, 27(6): 467-475.
- [3] Santosa S, Wierzbicki T. Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam [J]. *Computers and Structures*, 1998, 68: 343-367.
- [4] Nagel G M, Thambiratnam D P. A numerical study on the impact response and energy absorption of tapered thin-walled tubes[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2004, 46: 201-216.
- [5] Marsoleka J, Reimerdes H G. Energy absorption of metallic cylindrical shells with induced non-axisymmetric folding patterns [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30: 1209-1223.
- [6] Zee R H, Hsieh C Y. Energy absorption processes in fibrous composites [J]. *Materials Science and Engineering*, 1998, 246: 161-168.
- [7] 郑明军, 何德坪, 陈锋. 多孔铝合金的压缩应力应变特征及能量吸收性能[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11: 81-85.
Zheng Mingjun, He Deping, Chen Feng. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11: 81-85.
- [8] 王斌, 何德坪, 舒光翼. 泡沫 AL 合金的压缩性能及其能量吸收 [J]. 金属学报, 2000, 36: 1037-1040.
Wang Bin, He Deping, Shu Guangji. *Acta Metallurgica Sinica*, 2000, 36: 1037-1040.
- [9] 魏俊, 赵建华, 梁越明, 等. 复合材料板受低速冲击时能量吸收的实验研究[J]. 实验力学, 1998, 13: 207-211.
Wei Jun, Zhao Jianhua, Liang Yueming, et al. *Journal of Experimental Mechanics*, 1998, 13: 207-211.
- [10] 王熙, 卢国兴, 余同希. 复合材料管状结构的能量吸收性能 [J]. 工程力学, 2003, 20: 155-160.
Wang Xi, Lu Guoxing, Yu Tongxi. *Engineering Mechanics*, 2003, 20: 155-160.
- [11] Cole R H. Underwater explosions [M]. Princeton: Princeton University Press, 1948.

(责任编辑 赵佳)

·学术动态·



“第 26 届全国数据库学术会议”征文

“第 26 届全国数据库学术会议”(NDBC2009)将于 2009 年 10 月 15-18 日在南昌市举行。会议由中国计算机学会数据库专业委员会主办,江西财经大学承办,江西省计算机学会、南昌大学、江西师范大学、华东交通大学协办。将为大陆、香港、台湾、澳门和海外华裔数据库研究者、开发者和用户提供中华数据库论坛,交流有关数据库研究与应用的成果和经验,讨论数据库研究与应用所面临的关键性挑战问题和研究方向。

会议正在征集数据管理和应用领域的最新成果,以及有关数据库技术、应用与方法方面的论文、专题文章等。会议论文将分别安排在《计算机研究与发展》增刊(研究报告篇)和《计算机科学》增刊(技术报告篇)上出版。同时,会议将推选约 15 篇优秀论文到《计算机学报》、《软件学报》和《计算机研究与发展》上发表。会议还将评选优秀学生论文。论文截止日期:2009 年 5 月 1 日。

联系方式:会议网站:<http://sit.jxufe.cn/ndbc2009>;地址:江西省南昌市江西财经大学信息管理学院(330013);电话:0791-3891952,传真:0791-3891952;电子信箱:ndbc2009@jxufe.edu.cn,ndbc2009@gmail.com。