

文章编号: 1001-1455(2009)04-0395-06

# 超弹性夹芯覆盖层的水下爆炸防护性能\*

谌 勇<sup>1</sup>, 华宏星<sup>1</sup>, 汪 玉<sup>2</sup>, 勾厚渝<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;

2. 海军装备研究院舰船所, 北京 100073)

**摘要:** 对橡胶夹芯覆盖层在船模受水下爆炸时的防护作用进行了实验研究。以钢制加筋方盒模型为实验对象, 针对有、无覆盖层 2 种情况开展了一系列 5 kg 当量的水下爆炸对比实验。对加速度、应变及壁压等物理量进行了分析对比。结果表明, 超弹性覆盖层能有效降低结构受冲击波时的响应峰值。而壁压对比揭示了由于流固耦合, 作用在结构上的总入射冲量大幅度降低。频域分析表明, 覆盖层的作用可以用一个低通滤波器进行类比, 对于 50 Hz 以上的高频信号衰减明显, 但对于低于 50 Hz 的低频信号影响不大。

**关键词:** 固体力学; 防护性能; 超弹性; 夹芯覆盖层; 水下爆炸

**中图分类号:** O347

**国标学科代码:** 130·15

**文献标志码:** A

## 1 引言

如何采取有效措施来避免或减缓水下爆炸对舰船的巨大破坏作用, 提高其生存能力, 是海军不断追求的目标。早期的战舰采用在舷侧专门增设防雷舱、加强船体以及建造多层舱室等手段。在采取这些措施后, 舰船可以抵抗 300~400 kg TNT 当量的水雷。但由于这些措施施工建造复杂, 并且需要在舱内设置 5~6 m 的无人区, 闲置了舰上宝贵的空间, 所以在现代舰船上采用得不多。

近年来, 针对金属夹芯结构水下抗爆性能的研究成为热点。Z. Y. Xue 等<sup>[1-2]</sup>最早指出, 与同等质量的普通匀质板相比, 夹芯板在受到爆炸载荷时由于芯层屈曲大变形吸收了冲击能量, 面板的整体永久变形小得多, 同时传递到支撑处的反力也大大下降。N. A. Fleck 等<sup>[3]</sup>、D. D. Radford 等<sup>[4]</sup>采用三阶段解耦模型分析了金属夹芯梁的水下爆炸响应, 利用 Taylor 平板理论描述了流固耦合机制, 指出由于芯层的迅速变形, 能大幅降低作用在结构上的入射冲量。K. Makinen<sup>[5]</sup>最早对复合材料夹芯结构受水下爆炸时的流固耦合问题进行了研究, 表明夹芯结构与单层板不同, 后者在受爆炸时附近流体一般只会产生单一的空穴区域, 而前者往往会在离板面距离不同的位置出现 2 个空穴区域。V. S. Deshpande 等<sup>[6]</sup>对芯层为金属泡沫的一维夹芯结构进行了细致的理论分析, 认为虽然 N. A. Fleck 过低估计了入射冲量, 但弱芯层总会导致比普通均质量板低的冲量。Y. M. Liang 等<sup>[7]</sup>改进了 N. A. Fleck 的模型, 推导了更精确的流体压力模型, 并分析了流体的二次加载问题。从这些研究结果来看, 金属夹芯结构水下抗爆能力确优于普通均质钢板, 其优点取决于以下 2 方面: 芯层良好的变形吸能特性降低了结构的整体变形; 芯层的变形使流固耦合作用下在结构上的入射冲量大幅降低。

本文中, 采用钢制加筋方盒为模型, 对橡胶夹芯覆盖层在船模受水下爆炸时的防护作用进行实验研究, 以期对这种防护手段有更深入的了解。

## 2 实验研究

### 2.1 基本思路

在船体外粘贴 1 层由橡胶等高分子材料制成的薄壁夹芯结构。当受到水下爆炸时, 覆盖层具有良好的变形能力, 一方面可以降低作用到船体上的冲量, 另一方面对瞬时的冲击进行缓冲, 降低结构响应峰值。同金属夹芯板相比, 高分子覆盖层的模量小很多, 所以吸收的总能量更小。其突出优点是敷设工艺成熟, 可用于那些对航速要求不高、但对抗冲击要求较高的舰船。由于采用了非金属超弹性材料, 其作用机理同金属夹芯结构有不小的差别, 如芯层的回弹行为等。所以, 对这种防护方法的实际作用及相关机理需要更深入的认识。

\* 收稿日期: 2008-03-19; 修回日期: 2008-09-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(10672181); 国家自然科学基金青年科学基金项目(1080251)

作者简介: 谌 勇(1977—), 男, 博士, 讲师。

### 2.2 基本测试对象

图 1 给出了实验中所用的简单缩比船模。基本结构是一个长 2 m、宽 1 m、高 0.7 m 的钢制方盒。为了增加固有频率,在盒体内部焊接了纵横的加强筋。其中在长度方向有 3 根,在宽度方向 1 根。盒体的厚度除了长度方向上两端的封头板厚度为 12 mm 以外,其余地方的板厚均为 10 mm。加强筋的厚度均为 5 mm,高度 10 cm。在盒子的两端通过角钢焊接了直径 4 cm 的钢棒作为配重,以保持盒子在受爆炸后在水面附近运动时的平衡。

作为对比,在第 1 个系列的实验中,在盒子的外表面粘贴了一层由橡胶制成的夹芯覆盖层,其基本结构如图 2 所示。单块的覆盖层长 600 mm,宽 500 mm,高 42 mm。其基本结构为方格形的蜂窝状橡胶薄壁。在长度方向上分为 16 个格子,在宽度方向上分为 8 个格子。选择方格形的拓扑形状,一方面是因为方格形状具有较好的侧向稳定性,在受压时变形主要以厚度方向压缩为主,侧向变形较小;另一方面,方格形在铸造时易于拔模。在确定方格尺寸及壁厚时,以屈服载荷在 1 MPa 左右为目标进行了分析计算,最终确定内壁厚度为 4 mm。

实验过程中,在对有覆盖层的模型进行多次水下爆炸响应测试后,再将覆盖层铲掉并进行第 2 系列的爆炸实验。作为对比,第 2 系列的实验中对相同爆炸载荷下的动响应进行测试。这样,通过对比 2 次实验的结果,就能对覆盖层的效果进行客观的评价和分析。为简单起见,在后面称无覆盖层的模型为模型 I,有覆盖层的模型为模型 II。

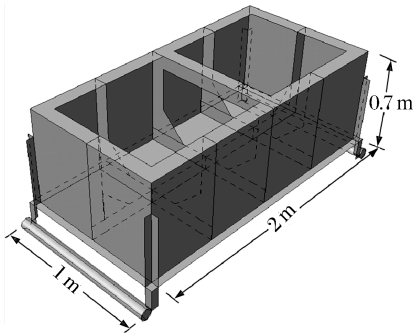


图 1 所测试简单模型的基本结构

Fig. 1 The basic structure of the simple model tested

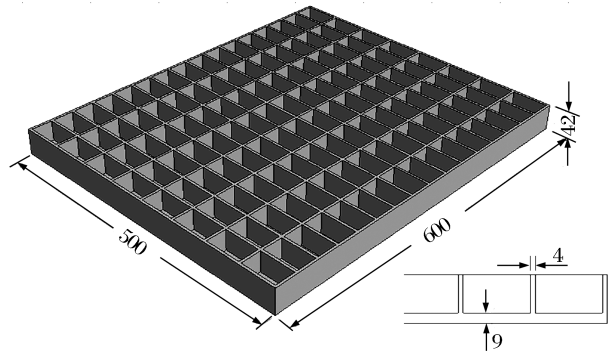


图 2 覆盖层基本结构及尺寸

Fig. 2 The basic geometry and dimension of coating layer

### 2.3 测试方法及仪器

所有的水下爆炸对比实验均在中国船舶科学研究中心的爆炸水池进行,前后共进行了 7 次爆炸实验。其中,对无覆盖层的模型进行了 4 次实验,而对有覆盖层的模型进行了 3 次实验。7 次实验中,2 种模型各有有效工况 3 次。在所有测试中,炸药均为 5 kg,而爆距均在盒子底部正下方的 5 m 水深处。

图 3 描述了测试过程中,主要的传感器布置方式及测试系统。在整个测试过程中,共进行了 3 路压力测试,其中 1 路为自由场压力,另 2 路为壁压。自由场压力传感器 P1 布置在与炸药同一水平面且距离爆心 3 m 的深水中;而 1 个壁压传感器 P2 布置在盒子正中心正下方,另外 1 个 P3 在同一高度但略偏外的地方(见图 3 右下角)。考虑到覆盖层厚度,壁压传感器均按距离流固耦合面 40 mm 为准。加速度传感器共 5 路,均布置在盒子内层底部的板和筋上。其中 A1、A2、A3 均布置在底部筋板交叉处,A4 布置在单向筋板上,A5 布置在底板上(见图 4(a))。所有加速度传感器均为垂向布置。除加速度外,在模型底部进行了 10 路应变测试,其中双向应变片共 4 个,单向片 2 个。双向片均贴在底板上,单向片贴在底部的筋板上(见图 4(b))。所有应变测试均采用 350 Ω 的电阻式应变片,桥路形式为 1/4 桥。

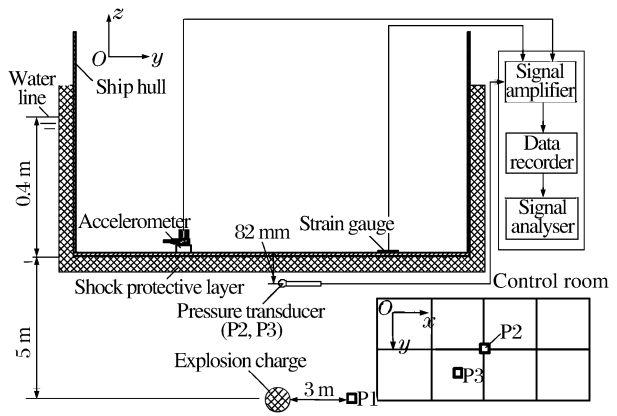


图 3 测试系统示意图

Fig. 3 The sketch map of the test system

数据采集系统为多通道的 ODESSEY 高速数字采集仪,其采样频率为 0.1 Hz~10 MHz。测试过程中,加速度及应变的采样频率均为 10 kHz,而压力的采样率为 1 MHz。考虑到气泡脉动周期,压力的采集时间为 250 ms 左右,而加速度及应变都在 300 ms 左右。在信号分析过程中,对结构响应信号进行了 3 kHz 的低通滤波处理。

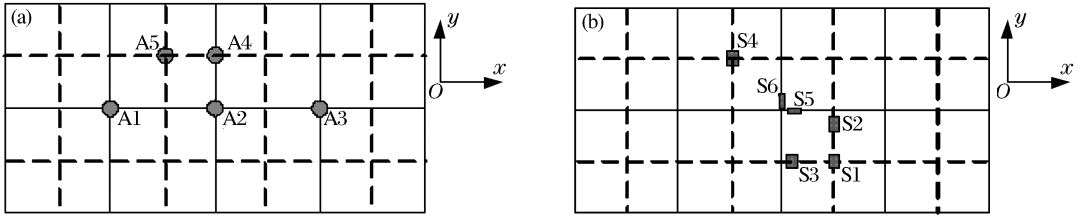


图 4 加速度及应变测点位置

Fig. 4 The measurement locations of the acceleration and strain

### 3 结果讨论

#### 3.1 压力

图 5 给出了比较典型的自由场压力时程曲线,从中可以较为清楚地分辨冲击波阶段和气泡脉动阶段。在冲击波阶段,压力曲线和指数律符合得较好。气泡脉动周期在约 210 ms。从多次实验来看,测得的自由场压力基本变化不大,峰值均维持在 10 MPa 左右。气泡脉动周期的差异也小于 5%,这说明炸药的爆轰过程稳定,实验具有较好的可重复性以及可对比性。

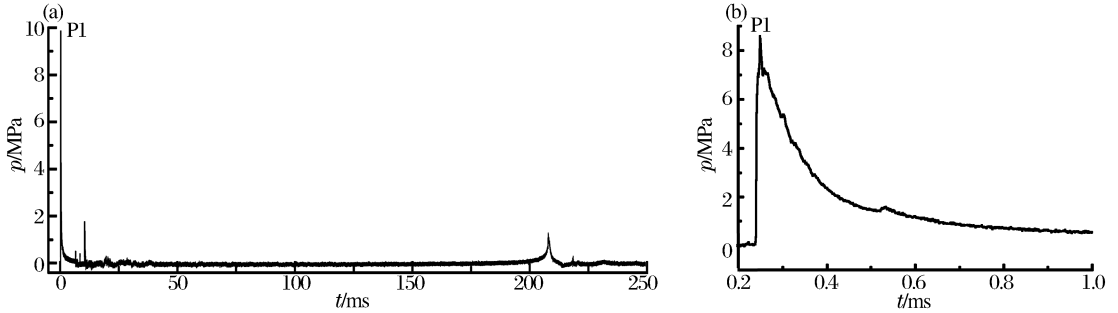


图 5 自由场压力时间历程曲线

Fig. 5 The time history of the free field pressure

图 6 给出了 2 个壁压传感器 P2 和 P3 在 2 种不同工况下测得的典型压力时间曲线,从中可以看出:对于无覆盖层情况,可以清晰地分辨入射波、反射波等信号特征;而对于有覆盖层时,反射特征明显减弱,同时入射波的峰值略有下降,特别是信号脉宽下降幅度较大,有明显的削波现象。分析原因,是因为覆盖层在受到初始入射波作用后,芯层迅速变形,而前面板发生迅速后退,从而使反射波大大降低,这样叠加后总压力峰就明显变窄。通过对入射波阶段进行积分,可以看出作用在结构上单位面积的总入射冲量。表 1 对比了 2 个模型中在 P2 点测得的压力及积分结果。可以看出,对于带有覆盖层的模型,脉宽基本上降低到原来的一半左右,这样总入射冲量也降低了一半左右,这个结果与文献[6]的理论分析结果是相符合的。

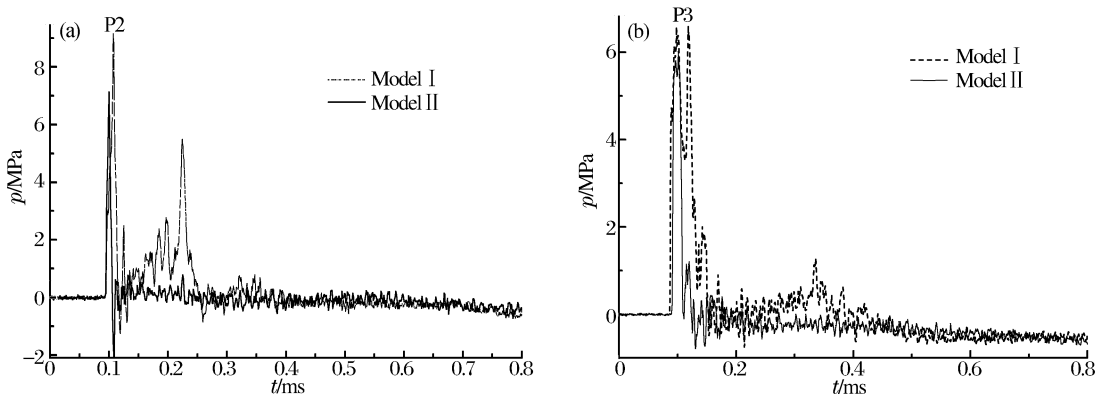


图 6 壁压时间历程对比

Fig. 6 Comparison between wall pressure histories

表1 由时间历程积分得到的冲量比较

Table 1 Comparison between the impulses integrated from pressure histories

模型	实验	$I/(\text{N} \cdot \text{s})$	$\tau/\mu\text{s}$
I	1	81.61	25
	2	87.31	23
	3	83.22	25
II	4	34.91	14
	5	37.08	12
	6	38.27	14

### 3.2 结构响应对比

实验中主要对结构的加速度及应变进行了测试,图7给出了A2上测到的典型的加速度时间曲线。从中可以看出,无覆盖层时由冲击波引起的峰值高达7 619g,而气泡阶段峰值为210g。在有覆盖层后,最明显的是冲击波引起的加速度峰值有了大幅度衰减,变为了693g。当然在气泡辐射压力阶段仍有明显衰减,但此时加速度峰值已不明显。从带覆盖层模型的信号特征看,高频分量有明显减少。

图8比较了由A2点测得的加速度积分得到的速度时间曲线。从中可以看出结构整体的运动趋势,在冲击波阶段都有明显的顺态加速过程,然后结构出现震荡。在此之

后,开始出现速度较慢的减速运动,直至150 ms后,重新开始加速并在气泡破裂时达到速度峰值。对比而言,2种情况差别最大的集中在60 ms内。在这个阶段,无覆盖时速度峰值达到4.67 m/s,而带覆盖层时,速度峰值降到了1.8 m/s左右。而在60 ms以后,2条曲线的差别较小,这说明覆盖层在冲击波阶段明显改变了结构的响应,但在气泡阶段不明显。这在后面会从频域对加速度响应进行分析时得到验证。表2给出了所有有效工况中,由A2测得的加速度和积分得到的速度、位移的峰值。可以看出,加速度峰值平均下降至1/10以下,而速度峰值平均下降至1/2以下,但总体的位移却略有增加。

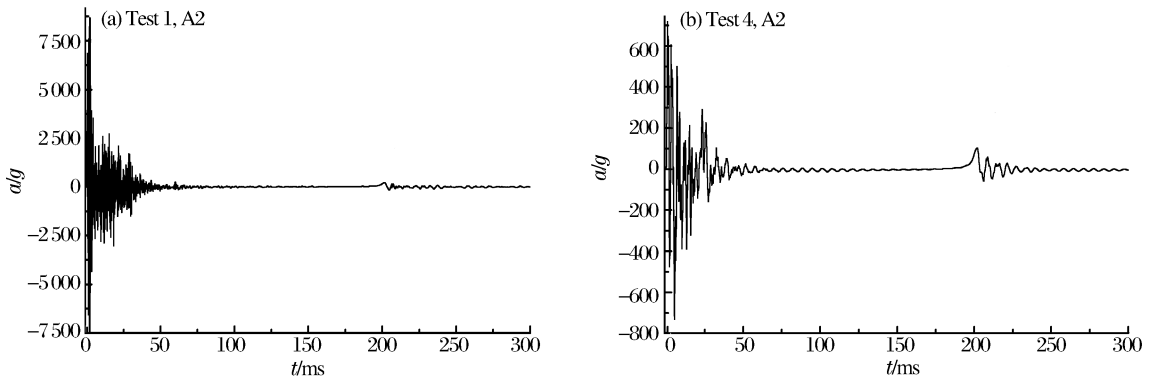


图7 加速度时间曲线对比

Fig. 7 Comparison between acceleration histories

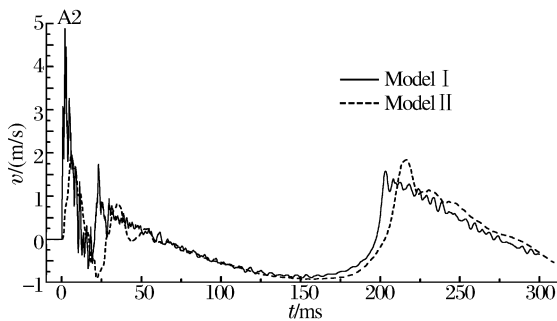


图8 速度时间曲线对比

Fig. 8 Comparison between velocity histories

表2 由A2测得的响应对比

Table 2 Comparison between responses measured at A2

模型	实验	$a_m/g$	$v_m/(\text{m/s})$	$d_m/\text{mm}$
I	1	7 619	4.67	85.2
	2	7 595	3.35	92.1
	3	8 262	4.72	93.4
平均		7 825	4.25	90.2
II	4	693	1.79	89.3
	5	694	1.74	97.9
	6	689	1.77	95.0
平均		692	1.77	94.1

除了加速度响应外,应变时间历程上反映的规律基本类似。图9给出了典型的应变时间历程对比图。从中仍然可以看出明显的冲击波阶段及气泡脉动作用阶段。和加速度类似,在冲击波阶段,无覆盖层时应变峰值比有覆盖层时大2倍以上。说明在这个阶段,结构的变形在粘贴覆盖层后确有很大程度的下降,但气泡脉动阶段就不很明显。作为比较,表3列出了各个应变片测得的应变峰值。可以看出,当有覆盖层后,在底板上的平均应变峰值下降到原来的1/3左右,最小达到了1/3.7。这种趋势和应变片的方向是没有关系的。从位置来看,在加强筋上的峰值下降幅度略小,为1/2.5左右。这也说明超弹性覆盖层对于结构局部受冲击波时的局部变形有很明显的保护作用。

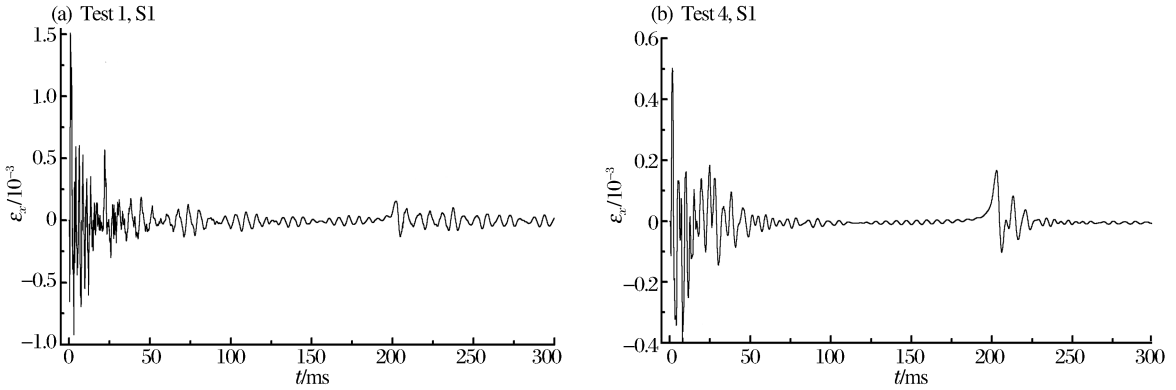


图 9 典型的应变时间曲线比较

Fig. 9 Comparison between typical strain histories

表 3 应变峰值比较

Table 3 Comparison between strain peaks

实验	$\epsilon_{1,x}/10^{-6}$	$\epsilon_{1,y}/10^{-6}$	$\epsilon_{2,x}/10^{-6}$	$\epsilon_{2,y}/10^{-6}$	$\epsilon_{3,x}/10^{-6}$	$\epsilon_{3,y}/10^{-6}$	$\epsilon_{4,x}/10^{-6}$	$\epsilon_{4,y}/10^{-6}$	$\epsilon_5/10^{-6}$	$\epsilon_6/10^{-6}$
1	1 463	1 304	196.8	285.7	349.5	202.3	1 478	1 151	347.3	869.2
2	1 237	1 149	253.4	340.2	366.1	177.4	1 292	1 115	367.8	703.0
3	1 464	1 312	199.1	329.7	396.2	134.1	1 349	1 053	187.8	852.5
$\bar{\epsilon}_I$	1 388	1 255	216.4	318.5	370.4	171.3	1 373	1 106	300.9	808.2
4	503.7	470.9	75.1	89.6	117.9	60.4	505.4	437.8	157.4	377.6
5	477.6	470.4	77.3	84.7	108.9	51.8	497.2	389.9	87.6	324.5
6	448.3	431.4	61.8	82.3	110.6	48.6	456.7	374.3	98.1	291.4
$\bar{\epsilon}_{II}$	476.4	457.6	71.4	85.5	112.3	53.6	486.4	400.7	114.4	331.4
$\bar{\epsilon}_I/\bar{\epsilon}_{II}$	2.9	2.7	3.0	3.7	3.3	3.2	2.8	2.7	2.6	2.4

### 3.3 冲击谱分析

在对时域曲线进行了分析对比后,为了从频域了解弹性覆盖层的作用机理,对 A2 测得的加速度时间历程进行了冲击响应谱(SRS)分析(见图 10)。从图中可以看出较明显的三折线特征。没有覆盖层时,最大的谱速度达到了 6 m/s 左右。而有覆盖层时,谱速度下降到了 2 m/s 以下,这从能量的角度印证了前面所讨论的降低入射冲量的论断。从频率上看,在低于 50 Hz 的低频段,二者的差距并不明显。但在高于 50 Hz 的频段里,带覆盖层模型的谱速度明显低于无覆盖层模型,且随着频率的提高,二者的差别增大。这说明超弹性覆盖层对于结构的水下爆炸响应的衰减可以用一个

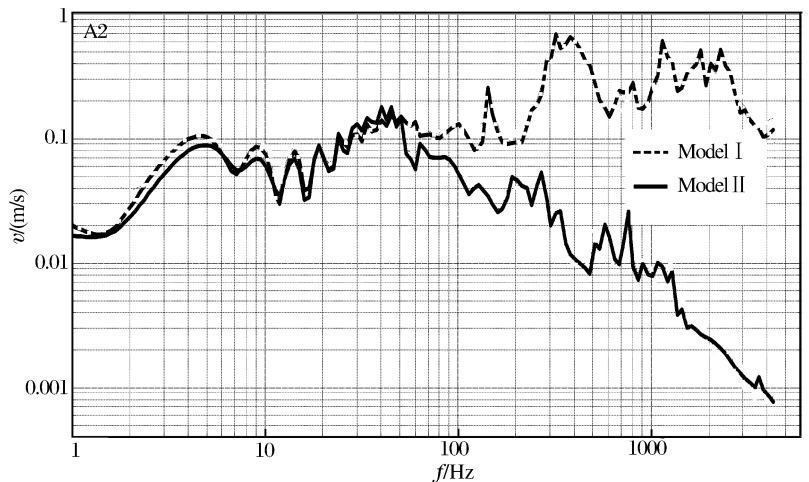


图 10 冲击谱对比

Fig. 10 Comparison between the shock response spectra

低通滤波器类比,而滤波器的截止频率应该和覆盖层本身的力学特性相关。对于这个现象,可以简单理解为由于覆盖层与船体之间形成了弹簧质量系统。而水下爆炸载荷可以看作自下而上的脉冲输入,其能量在频谱上分布较广。没有覆盖层时,冲量直接作用到质量上;而带有覆盖层时,覆盖层的作用就类似于放置于质量下的隔振器(抗冲器)。此时的截止频率应和覆盖层与船体之间形成的弹簧质量系统的一阶固有频率一致。

## 4 结 论

以金属缩比船模为对象,开展了针对在耦合面上粘贴超弹性夹芯覆盖层时的水下爆炸防护作用研究。实验结果表明,超弹性夹芯覆盖层对于浮体结构受水下爆炸冲击波时有较好的防护作用,可以有效降低结构的动响应和变形。其机理之一是由于弱芯层在流固耦合作用下,能有效降低爆炸波传递到结构上的入射冲量。从频域看,对于中高频信号衰减明显,而对低与 50 Hz 的信号差别不大。该截止频率应和覆盖层与船体之间形成的弹簧质量系统的一阶固有频率一致。总的来说,经过合理设计的覆盖层结构,在舰船水下爆炸防护方面是有应用前景的。

### 参考文献:

- [1] Xue Z Y, Hutchinson J W. Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads[J]. *International Journal of Mechanic Science*, 2003,45:687-705.
- [2] Xue Z Y, Hutchinson J W. A comparative study of impulse-resistant metallic sandwich plates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004,30:1283-1305.
- [3] 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.
- [4] Radford D D, Fleck N A, Deshpande V S. The response of clamped sandwich beams subjected to shock loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006,32:968-987.
- [5] Makinen K. The transverse response of sandwich panels to an underwater shock wave[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1999,3:631-646.
- [6] Deshpande V S, Fleck N A. One-dimensional response of sandwich plates to underwater shock loading[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005,53:2347-2383.
- [7] Liang Y M, Spuskanyuk A V, Flores S E, et al. The response of metallic sandwich panels to water blast[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2007,74:81-99.

## Protective effects of hyper-elastic sandwiches coated onto metal boxes subjected to underwater explosion

CHEN Yong<sup>1\*</sup>, HUA Hong-xing<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>2</sup>, GOU Hou-yu<sup>1</sup>

(1. *State Key Lab of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;*

2. *Institute of Naval Vessels, Naval Academy of Armament, Beijing 100073, China)*

**Abstract:** In order to explore the protective effects of the elastic rubber sandwich layer coated onto a ship hull, a series of 5-kg-TNT-equivalent underwater explosion tests were conducted on a floating steel box before and after the rubber sandwich was coated onto to comprehend the dynamic performance of the protective layer. Acceleration, strain and wall pressure histories at several typical locations were monitored as the main criteria and analyzed. The super-elastic protective layer is capable of lowering both acceleration and strain peaks of hull structures effectively. The wall pressure histories near the bottom hull illustrate that the transmitted impulse during the initial fluid-structure interaction stage can be reduced by almost 50%. Shock response spectrum analysis demonstrates that the elastic protective layer performs much like a low pass filter. It is capable of moderating high-frequency components of shock responses greatly, but not very effective in reducing low-frequency components.

**Key words:** solid mechanics; protective effect; super-elastic; sandwich layer; underwater explosion

\* Corresponding author: CHEN Yong

E-mail address: mail2chenyong@yahoo.com.cn