DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0243-06

舰艇新型宏观负泊松比效应蜂窝舷侧防护结构*

杨德庆,马 涛,张梗林
(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院,上海 200030)

摘要:提出一种具有宏观负泊松比效应的新型蜂窝舷侧防护结构,通过对负泊松比效应蜂窝胞元特殊结构构型设计,实现中等弹速下良好抗爆抗冲击性能。利用有限元动力学分析软件,研究鱼雷或导弹水下对舷侧防护结构的撞击侵入和穿透过程,对比研究了不同蜂窝构型、材料、胞元尺寸和胞壁厚度对舷侧结构抗冲击性能的影响。结果表明,蜂窝防护结构具有良好的抗冲击性能,负泊松比蜂窝构型较正泊松比蜂窝构型抗冲击性能更优。

关键词:固体力学;舰船防护结构;非线性有限元;蜂窝结构;负泊松比;负泊松比结构;抗冲击
中图分类号:O342;U661.44;TH132.41 **国标学科代码**:1301565 **文献标志码**:A

为提高抗爆抗冲击能力,现代舰艇在舷侧设置空舱+液舱+空舱的多层组合防护结构。人们对舰艇舷侧防护结构技术进行了大量研究,D. V. Balandin 等[1]、朱锡等[2]、杜志鹏等[3]、姚熊亮等[4]和李青等[5]研究了最佳抗冲击防护结构设计方法与抗爆机理,张延昌等[6]将蜂窝夹层板用于舰艇舷侧防护结构,增加结构塑性吸能。目前,正着力探索防护结构多尺度材料/结构一体化设计。舰艇防护结构设计的原理是,使防护结构具有高效吸收外来能量(穿甲动能、爆炸冲击能)的作用,使结构具有适当刚度来缓冲外载荷造成的变形并具有一定强度,起到主结构作用,强调结构承载性与特殊功能性的综合。工程上兼具上述效能的结构当属多孔固体材料,如泡沫和蜂窝材料等。多孔固体材料同时作为主结构承载材料和吸能材料使用,必须通过特殊的细观与宏观力学设计。特殊多尺度力学设计的多孔材料结构,可表现出宏观负泊松比和零导热率等特性[7-9]。常规蜂窝结构由于蜂窝壁厚过薄,难以承受面内大载荷并保持结构弹性状态,较少作为主结构材料使用[10-11]。将多孔固体材料微观结构构型放大形成大尺度宏观结构构型、解决抗爆抗冲击问题的研究,目前正逐步开展。本文中,提出一种具有宏观蜂窝构型防护层的新型舰艇舷侧防护结构。采用宏观蜂窝主要是解决微观蜂窝无法承受大载荷,蜂窝壁极易屈曲失效的难题。新型蜂窝舷侧防护结构提高抗爆抗冲击性能的机理为:蜂窝构型变化导致的负泊松比效应,使这类结构具有不同于普通材料结构的抗缺口压阻效应、抗断裂性能及大幅提高的回弹韧性等[7]。在穿甲过程中,穿甲破口周围材料由于负泊松比效应,会向破口聚集,将破口填充,封闭或减小弹孔,提高抗爆强度。本文中,将具有正、负泊松比宏观特性的六角形蜂窝结构应用于舰船舷侧防护结构,设计新型防护结构,模拟鱼雷或导弹在水下对舷侧防护结构的侵入和穿透过程,探讨不同蜂窝结构形式的舷侧防护结构抗爆抗冲击性能,研究其抗爆抗冲击设计方法。

1 新型宏观负泊松比效应蜂窝舷侧防护结构

新型负泊松比效应蜂窝舷侧防护结构设计如图 1~2 所示,也是空舱+液舱+空舱组合形式,但在舷侧板背面加装了负泊松比效应蜂窝层。舷侧舱段结构长 6 m,高 4 m。舱段防护结构由 4 层钢板构成,里面三层钢板厚均为 20 mm,常规防护结构的最外层(第一层)钢板厚 48 mm,各层防护板间距为 0.3 m。对于新型结构第一层钢板与第二层钢板间填充蜂窝防护结构,第一层钢板厚 20 mm,蜂窝胞元

* **收稿日期**:2013-07-23;**修回日期**:2014-01-28
基金项目:国家自然科学基金项目(11072149);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20100073110011)
第一作者:杨德庆(1968—),男,教授,yangdq@sjtu.edu.cn。

初始壁厚 5 mm，舷侧防护结构总重量为 21 330 kg。正泊松比蜂窝胞元采用等边六角形，立边长度等于斜边长度($H=L$)，内凹角为 15°；负泊松比蜂窝胞元形状为：立边长度两倍于斜边长度($H=2L$)，内凹角为 15°，如图 3 所示。后文中蜂窝胞元大小均定义为胞元斜边长度。反舰导弹为截锥形圆柱弹体，其中截顶直径为 70 mm，弹体直径 250 mm，弹体长度 1.5 m，半锥角为 20°。弹体质量为 514.7 kg，弹体初始速度分别为 80、200 和 300 m/s。弹体对舷侧结构作垂直冲击作用，高度方向距舷侧舱段结构底部为 2.45 m，水平方向位于舷侧舱段结构中部，撞击部位船体无加强筋。

假设蜂窝结构材料用钢量等于常规防护结构舷侧外板厚度减少的用钢量。常规舷侧防护结构舷侧外板质量，等于负泊松比效应蜂窝舷侧防护结构舷侧外板质量，加上蜂窝层材料质量。

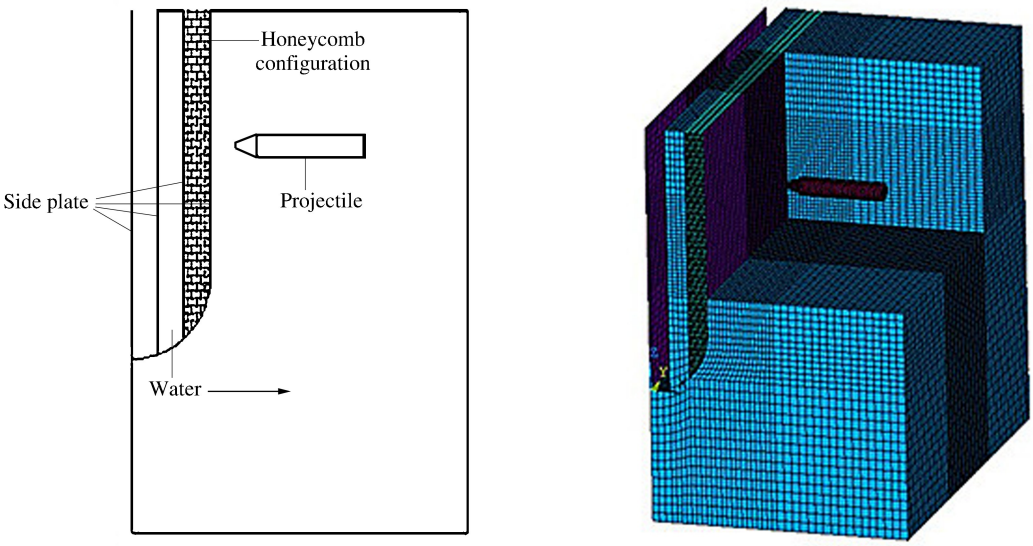


图 1 负泊松比蜂窝结构舷侧防护几何模型及有限元模型

Fig. 1 Geometry and FEM model of defensive structure with re-entrant honeycomb

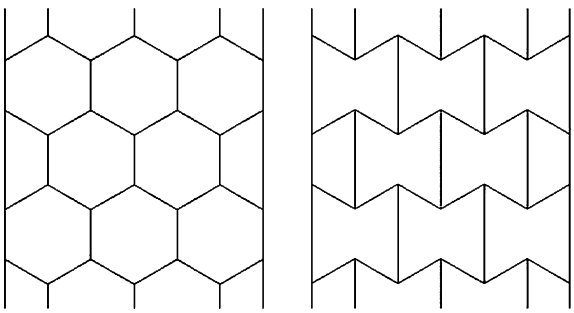


图 2 正、负泊松比效应蜂窝夹芯舷侧防护结构(局部)示意图

Fig. 2 Defensive structure with honeycomb and re-entrant honeycomb (local)

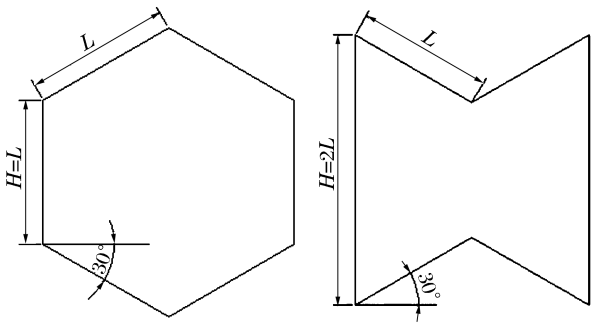


图 3 正、负泊松比蜂窝胞元尺寸示意图

Fig. 3 Size of honeycomb cell and re-entrant honeycomb cell

2 状态方程及材料特性描述

采用有限元动力学分析软件 LS-DYNA，模拟蜂窝夹芯舷侧防护结构在受亚音速反舰导弹的撞击和侵入作用下的动态响应过程[12]。数值模拟中，考虑水与结构间的流固耦合问题。水采用空材料模型，状态方程采用 Grüneisen 方程，即：

$$p=\frac{\rho_0 c^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{\alpha}{2}\mu^2\right]}{\left[1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}\right]^2}+(\gamma_0+\alpha\mu)E \tag{1}$$

式中：密度 $\rho=1\ 000\ \mathrm{kg/m^3}$，声速 $c=1\ 484\ \mathrm{m/s}$，材料常数 $S_1=1.979$，$S_2=0$，$S_3=0$，$\gamma_0=0.11$，$\alpha=3.0$，单位体积内能 $E=3.072\times10^5\ \mathrm{Pa}$，相对体积 $V=1.0$。船体舷侧外板材料为 45 钢，蜂窝材料分别选用 45 钢、921 钢和钛合金 TC4。计算中采用 Johnson-Cook 本构模型，该模型是一种与应变率和绝热（忽略热传导）温度相关的塑性模型，适用于很多大应变率的材料，包括绝大多数金属材料。其中流动应力表示如下：

$$\sigma_y=(A+B\bar{\varepsilon}^{p^n})\ (1+C\ln\dot{\varepsilon}^*)\ (1-T^{*m}) \tag{2}$$

式中：A、B、C、n 和 m 都是材料输入常数。$\bar{\varepsilon}^p$ 为有效塑性应变，$\dot{\varepsilon}^*$ 是 $\dot{\varepsilon}_0=1\ \mathrm{s^{-1}}$ 时的有效塑性应变率：

$$\dot{\varepsilon}^*=\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \tag{3}$$

T^* 为相应温度：

$$T^*=\frac{T-T_r}{T_m-T_r} \tag{4}$$

破坏应变定义为：

$$\varepsilon^f=[D_1+D_2\exp(D_3\sigma^*)]\ (1+D_4\ln\dot{\varepsilon}^*)\ (1+D_5T^*) \tag{5}$$

σ^* 为压力与有效压力之比：

$$\sigma^*=\frac{p}{\sigma_{eff}} \tag{6}$$

$D_1\sim D_5$ 为断裂常量，当破坏参数 D 达到 1 时即认为发生断裂：

$$D=\sum\frac{\Delta\bar{\varepsilon}^p}{\varepsilon^f} \tag{7}$$

除上述的失效准则，该材料模型还为壳单元提供了一种基于最大稳定时间步长（Δt_{max}）的单元删除准则。45 钢、921 钢和钛合金 TC4 材料的参数如表 1 所示。

表 1　材料参数

Table 1　Material parameters of 45 steel, TC4 and 921 steel

材料	基本参数				
	E/GPa	ν	ρ/(kg·m^{-3})	T_m/K	T_r/K
45 钢	200	0.30	7 820	1 783	293
TC4	113	0.33	4 510	1 920	293
921 钢	200	0.30	7 830	1 763	293
材料	Johnson-Cook 本构模型参数				
	A/MPa	B/MPa	C	n	m
45 钢	507	320	0.064	0.280	1.06
TC4	1 130	250	0.032	0.200	1.00
921 钢	898	356	0.022	0.586	1.05
材料	Johnson-Cook 失效模型参数				
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
45 钢	0.1	0.76	1.57	0.005	−0.84

TC4	0	0.33	0.48	0.004	3.90
921 钢	0.8	2.10	0	0.002	0.60

3 设计参数对舷侧防护结构抗冲击性能影响

采用弹体剩余速度为指标,对不同蜂窝构型、蜂窝材料、胞元壁厚和蜂窝胞元层数下舷侧防护结构抗冲击性能进行了比较研究(见表 2～3)。表中,h 为蜂窝胞元厚度,v_r 为弹体剩余速度,N 为胞元层数。这里剩余速度是指穿透第 4 层防护层的剩余弹速。200 m/s 初始弹速下常规、正泊松比蜂窝和负泊松比蜂窝舷侧防护结构破损情况,见图 4。

表 2 弹体剩余速度

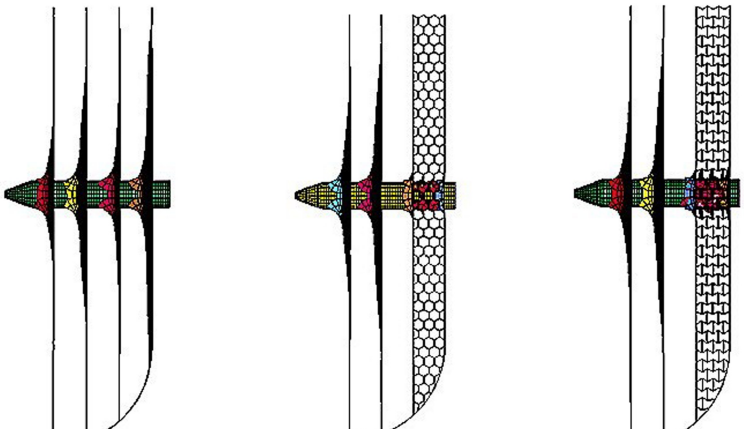
Table 2 Residual velocity of missiles

蜂窝构型	h/mm	蜂窝材料	v_r/(m·s^{-1})		
			v_0=80 m·s^{-1}	v_0=200 m·s^{-1}	v_0=300 m·s^{-1}
正泊松比	5	45 钢	0	131	249
	8	45 钢	0	110	239
	10	45 钢	0	90	236
	5	921 钢	0	74	236
	5	TC4	0	101	253
负泊松比	5	45 钢	0	125	241
	8	45 钢	0	103	227
	10	45 钢	0	86	208
	5	921 钢	0	71	240
	5	TC4	0	80	252
常规防护结构	5	45 钢	0	128	231

表 3 不同胞元层数下弹体剩余速度对比

Table 3 Residual velocity of missiles with different cell layers

N	v_r/(m·s^{-1})		
	v_0=80 m·s^{-1}	v_0=200 m·s^{-1}	v_0=300 m·s^{-1}
2	0	0	254
3	0	0	253
5	0	29.5	258



计算结果表明，负泊松比蜂窝构型在 200 m/s 中等弹速时较正泊松比蜂窝构型抗冲击性能更优，但接近音速时抗冲击性能都不佳。对于负泊松比蜂窝舷侧防护结构，蜂窝材料选用 TC4，蜂窝舷侧防护胞元层数分别布置为 2、3、5 层，调节蜂窝壁厚，使各层数下胞元材料用量（材料总体积）相同，弹体剩余速度计算结果见表 3。不同胞元层数（从左至右分别取 2、3、5 层）负泊松比蜂窝舷侧防护结构破损情况如图 5 所示。

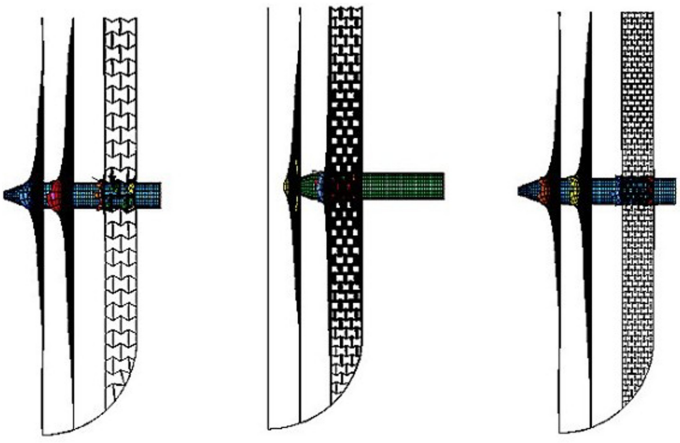


图 5　不同胞元层数下舷侧结构破损图

Fig. 5　Crevasse shapes of auxetic defensive structure with different layers of honeycomb cell

计算结果表明，等材料用量下蜂窝胞元层数对结构抗冲击性能的影响不是单一的，胞元布置层数并非越密越好，存在抗冲击最佳胞元层数。

4　结　论

针对新型宏观负泊松比效应蜂窝舰艇舷侧防护结构，探讨了蜂窝构型、材料类型、壁厚、胞元大小及蜂窝层数对舷侧结构抗冲击性能的影响。研究表明：

（1）等材料用量情况下，新型宏观负泊松比效应蜂窝舷侧防护结构抗冲击性能优于常规舷侧防护结构；宏观负泊松比效应蜂窝舷侧防护结构较正泊松比效应蜂窝舷侧防护结构抗冲击性能更优。

（2）蜂窝胞元材料类型能够影响整体结构抗冲击性能。

（3）等材料用量条件下，蜂窝胞元大小对结构抗冲击性能的影响不是单一的，胞元布置并非越密越好。对于既定空间的隔舱，存在最优的胞元大小、层数和蜂窝板厚。

本文中主要针对等边六角形蜂窝构型进行了研究，有关蜂窝胞元内角大小、非等间距胞元布置等对舰船舷侧结构抗弹体冲击性能的影响，蜂窝尺寸参数优化设计等有待进行。

参考文献：

[1]　Balandin D V, Bolotnik N N, Pilkey W D. Optimal protection from impact, shock and vibration[M]. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1998.

[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)：134-139.
Zhu Xi, Zhang Zhen-hua, Liu Rui-quan, 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): 134-139.

[3]　杜志鹏，李晓彬，夏利娟，等. 反舰导弹攻击舰船舷侧防护结构过程数值仿真[J]. 哈尔滨工程大学学报，2006，27(4)：484-487.
Du Zhi-peng, Li Xiao-bin, Xia Li-Juan, et al. Numerical simulation of anti-ship missile attack warship broadside process[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27(6): 484-487.

[4]　姚熊亮，侯明亮，李青，等. Y 型舷侧结构抗冲击性能数值仿真实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报，2006，27(6)：796-

801.
Yao Xiong-liang, Hou Ming-liang, Li Qing, et al. Numerical simulation research on counter-impingement capability Y-shape shipboard side structure[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006,27(6):796-801.
[5] 李青,吴广明.水面舰艇舷侧抗冲击防护结构形式初探[J].中国舰船研究,2008,3(3):26-29.
[6] 张延昌,王自力,顾金兰,等.夹层板在舰船舷侧防护结构中的应用[J].中国造船,2009,50(4):36-44.
Zhang Yan-chang, Wang Zi-li, Gu Jin-lan, et al. Application of sandwich panel in anti-shock design of warship's side structure[J]. Shipbuilding of China, 2009,50(4):36-44.
[7] Lorna J G, Michael F A. Cellular solids: Structure and properties[M]. Cambridge University Press, 2005.
[8] Klintworth J W, Stronge W J. Plane punch indentation of a ductile honeycomb[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1989,31(5):359-378.
[9] Kim T, Zhao C Y, Lu T J, et al. Convective heat dissipation with lattice-frame materials[J]. Mechanics of Materials, 2004,36(8):767-780.
[10] Santosa S, Wierzbicki T. Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam[J]. Computers and Structures, 1998,68(4):343-367.
[11] Alderson A. A triumph of lateral thought[J]. Chemistry & Industry, 1999,17:384-391.
[12] 赵海鸥.LS-DYNA 动力分析指南[M].北京:兵器工业出版社,2003.

A novel auxetic broadside defensive structure for naval ships

Yang De-qing, Ma Tao, Zhang Geng-lin
(*School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai* 200030, *China*)

Abstract: Broadside defensive structure is important for naval vessels to maintain vitality. A novel broadside defensive structure with macro negative Poisson's ratio is proposed to achieve higher anti-shock and anti-blast performance by design of auxetic honeycomb configuration. The process of an anti-ship missile impinging on and penetrating broadside structure is simulated by nonlinear finite element software. Effects of different design parameters on broadside structure, like auxetic honeycomb configurations, materials, sizes and thickness of honeycomb cell, are studied and compared. Numerical results indicate that counter-impingement capacity can be improved by adoption of auxetic broadside structure, and honeycomb cell with negative Poisson's ratio is better than that of common honeycomb cell on anti-blast performance.

Key words: solid mechanics; ship defensive structure; nonlinear finite element; honeycomb structure; negative Poisson's ratio; auxetic structure; anti-shock

(责任编辑 丁 峰)