DOI: 10.11883/bzycj-2016-0303 文章编号: 1001-1455(2018)03-0696-11

复合材料夹层结构在舰艇碰撞防护中的研究进展*

周晓松,梅志远,张焱冰
(海军工程大学舰船工程系,湖北 武汉 430033)

摘要: 为了提高舰艇的碰撞防护能力,已发展了各种舰艇碰撞防护方法。传统的碰撞防护手段会使舰艇重量大幅增加,影响舰艇总体性能。复合材料夹层结构的出现给舰艇碰撞防护结构设计提供了另外一条途径,成为近期国内外相关研究的热点。本文以舰艇碰撞防护为背景,从复合材料夹层结构的低速冲击实验方法、变形损伤机理、冲击吸能影响因素、分析研究方法等几方面进行回顾、总结和归纳,并对今后的研究方向进行展望。

关键词: 复合材料;夹层结构;舰艇碰撞;变形模式;损伤机理
中图分类号: O341;P751 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

复合材料结构物制造技术的发展始于 20 世纪 40 年代,发展初期的工程应用研究曾遍布于航空、航天以及船舶等各个工程领域。然而,由于早期复合材料结构成本较高、刚度特性不足以及低成本制备技术发展滞后,在较大程度上限制了船舶大尺度复合材料结构的进一步发展,使得舰船复合材料结构工程应用技术的发展落后于航空航天领域。随着复合材料结构设计技术和低成本制作技术的高速发展以及低价材料力学性能的不断提高,复合材料在舰艇结构上的应用比例不断增加,并逐步由附体结构过渡到主船体结构应用上,尤其是 20 世纪 90 年代后国外大型全复合材料舰船的发展势头更为迅速。

海军舰艇与民船的重要区别之一就是服役环境复杂。20 世纪 80 年代末,随着精确制导反舰武器技术以及目标特征探测技术的飞速发展,舰艇生存能力所受的威胁日益严重。舰艇除了要承受战时来自空中或水下反舰武器的爆炸攻击,在更多非战时训练演习期间,陌生海域或复杂航行环境下各种碰撞和搁浅事故时有发生,给舰艇结构平台的完整性和系统功能的可用性带来严重威胁。

为了提高舰艇的碰撞防护能力,学者们长期致力于发展各种舰艇耐撞结构设计与防护方法方面的研究。传统的防护手段主要有两种:一是加强艇体结构,使其在碰撞载荷作用下仍保持一定的结构平台完整性;二是加装设备防护装置,使艇体结构在水下碰撞载荷作用下,系统装备仍然能够保持一定的功能可用性[1]。然而,传统的防护手段会使舰艇重量大幅增加,影响舰艇总体性能。因此,新型舰艇耐撞防护结构设计既要满足耐撞性能的要求,又不能明显增加舰艇结构重量。复合材料夹层结构的出现为舰艇碰撞防护提供了另外一条途径,各国研究人员致力于其力学机理和分析方法的研究[2-5]。复合材料夹层结构的优异性能已在文献[6]以及国际会议[7]中进行了综述,并且对复合材料夹层结构在各种海军舰艇中潜在的应用前景进行了讨论。

本文中以舰艇碰撞防护为背景,从复合材料夹层结构的低速冲击实验方法、变形损伤机理、冲击吸能影响因素、分析研究方法等几方面,回顾了近期相关研究进展,并对今后的研究方向进行展望。

1 舰艇碰撞问题分析

1.1 舰艇碰撞特点和防护需求分析

舰艇碰撞是严重威胁舰员生命和装备安全的灾难性事故,一般可分为 2 类:舰艇碰撞和舰艇与固定物碰撞,如图 1 所示。

* **收稿日期**: 2016-10-17; **修回日期**: 2017-03-07
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51479205)
第一作者: 周晓松(1990—),男,博士研究生; **通信作者**: 梅志远,zhiyuan_mei@163.com。

(a) Warship and submarine collision　　(b) Submarine grounding collision

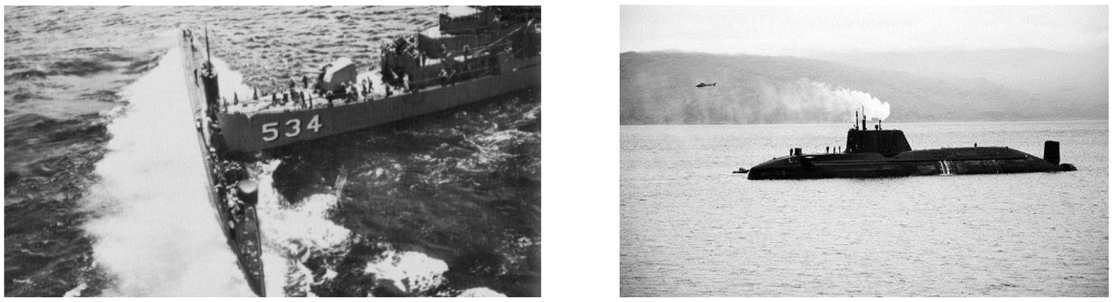


图 1 舰艇碰撞类型

Fig. 1 Ship collision type

舰艇碰撞最危险的状态通常是撞击舰艇艏部正撞被撞舰艇舷侧。由于撞击舰艇艏部的刚度明显大于被撞舰艇舷侧，所以碰撞能量大都由被撞舰艇舷侧结构吸收，损失也大部分发生在被撞舰艇舷侧。舰艇与固定物碰撞是指舰艇与桥梁、海洋平台或海底礁石发生的碰撞。由于被撞物体的刚度往往大于舰艇，碰撞能量大都由舰艇结构吸收，损伤通常也发生在舰艇上。舰艇碰撞事故轻者艇体损坏，重者艇毁人亡，根据国外(1954－2000 年)舰艇事故统计[8]，其中碰撞事故共计 102 起，占事故总数的 42%。

舰艇碰撞事故多在 10 m/s 左右的速度下发生，具有低速和高动能的显著特点，常规舰艇的冲击动能即可达到 200 MJ。舰艇碰撞防护性能需求大致可分为两类：一是在保证常规强度，不增加(或不明显)增加结构重量的基础上，对传统的舷侧结构进行耐撞性能优化设计即可满足舰艇结构的碰撞防护性能需求；二是必须设计全新的耐撞防护功能模块以实现舰艇结构对碰撞防护性能的特别需求。因此，舰艇碰撞背景下的复合材料耐撞防护结构设计是针对可能发生的冲击事件和特定的冲击能量，通过合理设计结构形式使之在较长的冲击行程中耗散较多的冲击能，以满足舰艇的耐撞防护性能需求，新式耐撞防护结构模块设计研究近年来受到极大的关注和重视。

1.2　舰艇碰撞防护结构设计研究现状

提高舰艇结构的耐撞防护性能可以从 2 方面着手：一是在材料与结构形式保持不变的情况下，通过对舰艇结构部件的几何尺寸优化来增强舰艇结构的耐撞防护性能[9-11]，王自力等[12]、张延昌等[13-14]提出了基于夹层板的单壳船体结构耐撞性设计方案，有效提高船体结构的耐撞防护性能；二是采用新的材料或结构形式，设计全新的吸能元件和耐撞防护功能模块来增强舰艇结构的耐撞防护性能，田媛[15]等提出了轻质波纹夹层板并研究了不同载荷形式下的静动态响应特征，梅志远等提出了轻质浮力补偿型复合材料多层阵列结构模块，有效提高了水下结构平台的耐撞防护能力。

2　低速冲击实验方法研究

2.1　主要实验装置及测试原理

低速冲击通常称为大质量冲击，Sjoblom 等[16]和 Shivakumar 等[17]定义低速冲击发生的速率范围为 1～10 m/s，应力波对结构中的应力分布并未产生显著作用，可采用国内外广泛使用的落锤冲击试验机来进行模拟，其原理简单、成本较低、技术发展最成熟，能够较好地模拟复合材料夹层结构常见的低速冲击。图 2 为一种来自比利时鲁文大学的落锤测试装置[18]，这种装置通常由导轨、落锤、防止二次撞击的闭锁装置、传感器等几部分组成。

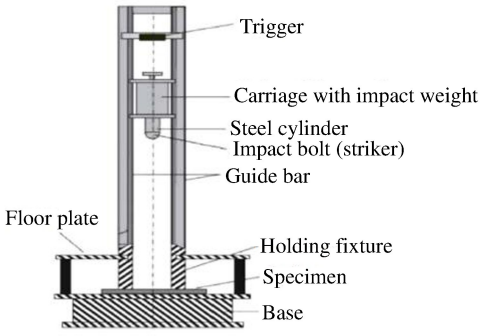


图 2 冲击落锤试验机

Fig. 2 Drop hammer impact test machine

除了使用落锤式冲击设备外，还有一类模拟低

速冲击的摆锤式冲击试验机[19]。此外,低速冲击试验模拟还可以采用弹射式实验装置,该装置可分为立式和卧式 2 种,可较好地控制和标定冲击速度,并能到达较大的碰撞速度。卧式实验装置可以滤除惯性力效应,更接近实际的舰艇碰撞。这种装置比较复杂,目前只有英国的剑桥大学、德国的凯泽斯劳滕大学等少数研究机构采用这种设备研究结构件的能量吸收。

2.2 信号测试及损伤观测技术

结构冲击信号的测量是冲击试验的一个关键。自由落体法是计算落锤冲击试件瞬间接触速度最为常见的手段。Reid 等[20]采用每秒 2 000～2 500 帧的高速摄像机,发现测得的落锤与试件接触速度同自由落体法计算得到的速度非常接近,误差小于 5%。落锤压缩试件过程中瞬态冲击信号的测量通常选用加速度传感器,与工作在高频端的电磁式传感器和惯性式传感器相比,加速度传感器的工作频带远离它的自振频率,具有良好的低频传递特性。

冲击损伤的观测是冲击试验的另一个关键。低速冲击试验过程通常在几十毫秒以内结束,直接观测复合材料夹层结构的内部损伤演化历程难度较大。目前,冲击损伤的观测方法主要分为无损观测和破坏性观测 2 类方法。无损观测实验方法主要包括:X 射线照相、超声波扫描、声发射、温度记录法、涡流技术、光纤技术、全息照相以及高速摄影等[21-22]。破坏性观测实验方法主要包括:染色渗透剂法、热揭层技术、光学显微镜以及扫描电镜技术等[23]。在实际应用中,研究者往往综合利用以上方法来分析研究结构的变形损伤特征和能量耗散特性。

3 低速冲击变形损伤机理研究

3.1 变形特征模式

变形是复合材料夹层结构吸收冲击能量的一种重要的途径。Gibson 等[24]最早完善和总结了准静态载荷下夹层梁的刚度、强度和失效机制方面的工作,由简单梁得到了三点弯曲和四点弯曲状态下夹芯梁挠度 δ 和压头压力 P 的关系:

$$\begin{cases} \delta = \dfrac{PL^3}{48K_{\mathrm{B}}} + \dfrac{PL}{4K_{\mathrm{S}}} \\ \delta = \dfrac{P(L-s)^3(L+2s)}{48K_{\mathrm{B}}} + \dfrac{P(L-s)}{4K_{\mathrm{S}}} \end{cases} \tag{1}$$

式中:L 为支撑点之间的跨距,s 为载荷之间的距离,K_{B} 等效弯曲刚度,K_{S} 等效剪切刚度。

Hanssen 等[25]研究表明,蜂窝结构和金属泡沫等塑性可压缩材料能够在几乎恒定的名义应力下通过塑性变形来吸收大量的冲击能量。Fleck 等[26]提出了芯层为菱形、六角、波纹形、金字塔式和四边形蜂窝芯层夹层板的三阶段冲击响应模型:(1) 阶段 I,面层受冲击;(2) 阶段 II,芯层被压缩,载荷传递到背板;(3) 阶段 III,夹层板整体变形与拉伸。此外,Fleck 等[26]还给出了变形模式与优化方法。总的来说,低速冲击载荷下夹层结构动力学行为研究很大程度上取决于屈服面的选择,图 3 总结了常用来分析夹层板和实体结构大挠度响应的屈服准则,其中:M 和 N 为单位长度的弯矩和膜力,M_0 和 N_0 为塑性弯矩与膜力。

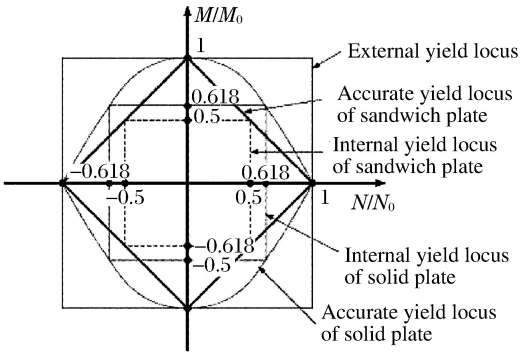


图 3 实体版和夹芯板大挠度响应的屈服面

Fig. 3 Yield surface of solid and sandwich plate

3.2 损伤失效机理

目前,损伤失效机理研究主要集中在外观损伤、面板芯层损伤等与冲击能量关系、残余抗压强度的影响因素、损伤扩展过程、材料损伤情况与强度变化。破坏模式主要包括整体失稳、面板皱屈、芯子局部

压塌、面板破裂、横向剪切破坏、纤维断裂及基体开裂等。

Choi 等[27]认为复合材料夹层结构面板受冲击后的初始损伤形式是基体裂纹，分层是基体裂纹发展到一定程度引起的。Chang[28]提出基体裂纹引发分层是由于界面处层间法向应力和剪切应力共同作用的结果。纤维断裂发生所需的能量远高于基体裂纹和分层，通常是灾难性穿透发生的预兆。夹芯层的损伤破坏模式则呈现出多样性特征，多数夹芯层材料主要通过塑性段的大变形压缩损伤来吸收冲击能量，局部损坏受芯层层数限制，多层叠加是限制损坏的有效方法。

4　低速冲击吸能影响因素

4.1　冲击体特征参数

复合材料夹层结构在舰艇服役周期内会受到不同形状冲击体的作用，如半球形、末端平面以及锥形冲击体等。大量实验研究结果表明，冲击体的形状、质量和速度会对复合材料夹层结构的损伤破坏机理产生明显的影响。Lee 等[29]研究了不同几何形状的冲击体对复合材料结构冲击损伤失效机理的影响，同时检验了不同失效机理对能量耗散水平的影响。Mitrevski 等[30]利用半球形、尖顶和圆锥锤头研究了碳纤维增强环氧树脂复合材料的冲击行为。总体来说，使用的锤头越尖锐，材料冲击破坏范围越局部化，主要失效模式则由分层转变为基体破坏和纤维断裂。

由于落锤冲击试验对测试设备的特殊要求，为了降低试验成本，近些年来准静态压入被广泛应用在低速冲击领域中代替落锤冲击。王璐璐等[31]认为对于低速冲击过程可以不考虑动态响应，准静态压入分析足以模拟夹层结构的低速冲击响应。低速冲击下的冲击力－位移关系与准静态下的冲击力-位移关系几乎没有差别。

4.2　结构设计参数

4.2.1　材料体系力学性能

（1）纤维抗冲击特性

随着高新技术的发展，各种高性能纤维相继被开发出来应用于抗冲击领域。夏军佳等[32]对纤维力学性能与抗冲击性能之间的关系开展了一系列研究，研究结果表明抗冲击纤维的关键性能参数纤维能量吸收率和冲击能扩散速度只跟其强度与伸长率有关，储存在纤维中的弹性能是评价复合材料抗冲击性能的重要参数之一，且适用于任何种类的纤维材料。芳纶纤维具有最大的变形能和断裂能，其次是玻璃纤维，碳纤维最小。纤维强度越高，能量吸收率越高，因而尽量提高纤维的强度是提高防护结构耐撞防护性能最有效和最关键的途径。而伸长率的选择则须结合匹配树脂的断裂伸长率，并以实际的抗冲击效果为唯一选择标准，几种典型抗冲击纤维的基本性能如表 1 所示。

由于不同纤维的抗冲击性能各具特点，因而在舰艇耐撞防护结构设计中可根据不同纤维的特点进行混杂设计，以实现结构抗冲击性能的最优化。王亮亮等[33]采用自行研制的摆锤式冲击拉伸试验机对玻璃纤维、芳纶纤维、超高分子量聚乙烯纤维和 PBO 纤维丝束及其混杂丝束进行了冲击拉伸试验，得到混杂纤维丝束断裂吸能和断裂强度随纤维混杂比变化的规律。严文聪等[34]从混杂比、混杂方式和界面三个方面分析了影响纤维混杂复合材料性能的因素，并介绍了纤维混杂复合材料在冲击性能、剪切性能、压缩性能、热性能、声学性能、透波性能方面的研究进展。

（2）基体抗冲击特性

目前，抗冲击复合材料夹层结构所采用的树脂基体主要有热固性和热塑性 2 种，前者通常包括环氧树脂、酚醛树脂和乙烯基酯树脂等，后者则包括聚醚醚酮、尼龙和烯烃类树脂等。

热固性树脂具有良好的湿热性能，但是脆性特点使其抗裂纹扩展能力较弱，通常在热固性树脂中添加橡胶或热塑性颗粒以改善层间断裂韧性。热塑性树脂具有韧性好和抗疲劳性高的优点，但低的热稳定性和差的耐化学品性以及弱的纤维/基体界面阻碍了其在结构抗冲击领域的应用。大量复合材料体系实验研究表明，复合材料的冲击损伤与树脂韧性密切相关。Gottesman 等[35]使用不同基体树脂制备了复合材料。结果表明，在相同的冲击能量水平下，脆性环氧(3502)基复合材料中产生的损伤要远高于

韧性基体(F155)复合材料和热塑性基体(PEEK)复合材料。此外,树脂还选型需要考虑与纤维的断裂延伸率匹配,提高复合成型后的整体抗冲击性能。

表 1 典型抗冲击纤维力学性能

Table 1 Mechanical properties of typical impact-resistant fibers

纤维类型	典型产品	密度/($g \cdot cm^{-3}$)	拉伸强度/GPa	拉伸模量/GPa	断裂延伸率/%	波速/($km \cdot s^{-1}$)
超高分子量聚乙烯纤维	迪力玛 SK60	0.97	2.7	87	3.5	9.5
	迪力玛 SK65	0.97	3.0	95	3.6	9.8
	迪力玛 SK66	0.97	3.1	100	3.5	10.0
	迪力玛 SK75	0.97	3.4	107	3.8	11.0
	迪力玛 SK76	0.97	3.6	116	3.8	12.0
芳纶纤维	凯芙拉 129	1.44	3.38	83	3.3	8.2
	凯芙拉 KM2	1.44	3.43	64	4.3	6.5
	特沃纶 CT	1.44	3.3	90	3.3	7.9
	特沃纶 HM	1.45	2.8	121	2.1	9.1
碳纤维	碳纤维 HS	1.78	3.4	240	1.4	11.5
	碳纤维 HM	1.85	2.3	390	0.5	14.5
PBO(聚对苯撑苯并二噁唑)纤维	柴隆 HM	1.56	5.8	280	2.5	13.5
聚芳酯纤维	维克特拉 HT	1.44	3.30	76	3.8	7.28
聚乙烯醇纤维	异丁嗪 7901	1.32	2.5	39	5.2	—
尼龙 66	HT	1.14	1.0	5	18.2	2.0
玻璃纤维	E	2.55	2.0	73	2.0	—

(3) 夹芯层抗冲击特性

目前,研究中的夹芯层材料种类繁多,尚未有统一的分类标准。按夹芯层抗弯刚度强弱可分为刚夹芯、柔夹芯、半刚硬夹芯。按夹芯层数量可分为单层、多层。根据夹芯层材料的种类,可将当前主要的夹芯层材料分为泡沫铝夹芯材料、金属型材夹芯材料和聚合物泡沫夹芯材料。

杨永祥等[36]的研究表明,蜂窝式夹层结构在横向冲击载荷作用下具有稳定的压溃载荷和较长的有效行程。王章忠等[37]的研究表明聚氨酯泡沫塑料夹层结构具有较好的抗冲击性能和环境协调性。综合分析可知,夹芯材料是一种性能优异的结构复合型材料,具有结构和功能一体化的特点。复合材料夹层结构中空芯层可为设计提供空间,如聚合物填充能衰减冲击波透射、粘性物质填充能增强阻尼、泡沫填充能增强缓冲、增强技术能增强泡沫夹层结构层间强度、损伤容限及能量吸收性能等。常见夹芯层材料的力学性能参数如图 4～6 所示。

4.2.2 结构尺寸设计参数

目前,有关结构尺寸设计参数对冲击性能影响的研究主要集中在面板芯层厚度、芯层密度、芯层材料、内部芯层结构形式、曲率等方面。Wang[38]对纸蜂窝夹层板的冲击行为及吸能进行动态缓冲实验,研究表明增加芯层相对密度,能量吸收线性增加。Park 等[39]通过评价碳/玻璃和环氧基树脂 2 种面板类型的 Nomex 蜂窝芯层夹层结构低速冲击损坏抵抗力,得到面板刚度越低,芯层厚度对抵抗力影响越大。Shin 等[40]对纤维加筋层压复合板及金属铝面板蜂窝芯层夹层结构进行的低速冲击实验,结果表明失效非常依赖于芯层的面板材料,编织玻璃/环氧基树脂面板较金属面板冲击抵抗力更好。Fan 等[41-42]对单层和多层编织物夹芯板准静态压缩时的失效机理和能量吸收能力进行了实验研究,研究结果发现多层夹芯板的变形为单层夹芯板变形的复合模式,其能量吸收能力也得到极大的增强,显著优越于等质量的单层夹芯板。

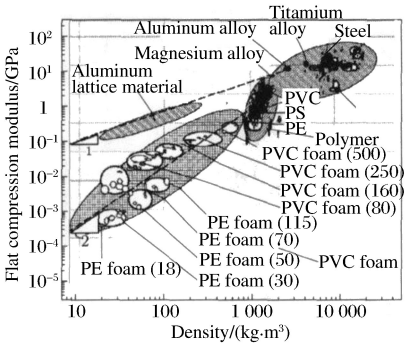


图 4　典型夹心材料的压缩模量

Fig. 4　Flat compression modulus of sandwich materials

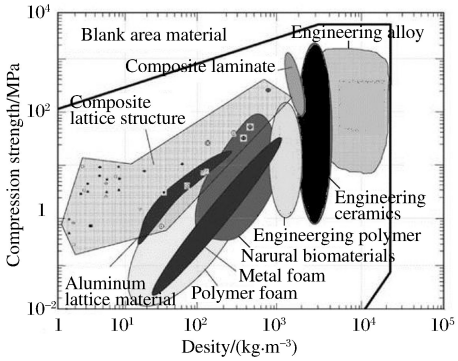


图 5　典型夹心材料的压缩强度

Fig. 5　Compression strength of sandwich materials

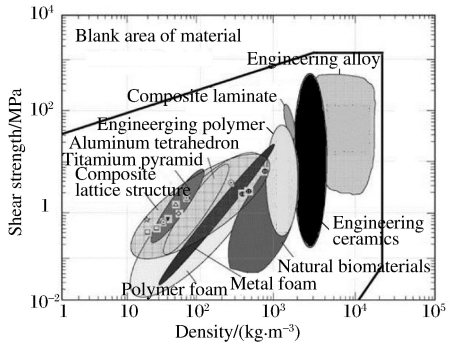


图 6　典型夹心材料的剪切强度

Fig. 6　Shear strength of sandwich materials

4.3　结构应用环境因素

舰艇复合材料耐撞防护结构在长期的服役过程中要经历复杂的海洋环境作用，如高温、低温、湿热、热循环、微生物、海水腐蚀等。Hale 等[43]对温度和湿度对复合材料低速冲击性能的影响进行研究，认为高温会在增加材料吸湿率的同时，导致复合材料的强度和刚度下降，而吸湿率的增加则加剧了这种强度和刚度的损失。刘红影等[44]使用使用改装后的落锤测试装置在－50～120 ℃对凯夫拉/玻璃纤维增强复合材料进行了 8、15 和 25 J 不同能量的低速冲击测试。实验研究表明，在这些环境的作用下，结构材料体系的力学性能会产生显著的下降甚至失效，因而有必要分析材料级到结构级复合材料制品在特定海洋服役环境中的抗冲击性能，才能为复合材料耐撞防护结构的设计制造与使用维护提供最真实的依据。

5　低速冲击性能分析方法研究

5.1　信号数据分析

在低速冲击领域比较常用的一种数据分析方法 EPM(energy profiling method)，如图 7 所示。图 7 中的能量轮廓曲线由 AB、BC 和 CD 等 3 部分组成。AB 区域代表了结构未侵入区，在 AB 区域内能量吸收曲线在等能量线下面，表明存在额外冲击能 E_e，它可以被受冲结构存储起来并作为冲击体(落锤)从试件表面反弹的能量。BC 区域为结构被侵入区域范围，在此区域内全部的冲击能量被试件吸收。CD 区域代表了被贯穿的结构试件。B 和 C 分别是侵入阈值和贯穿阈值。

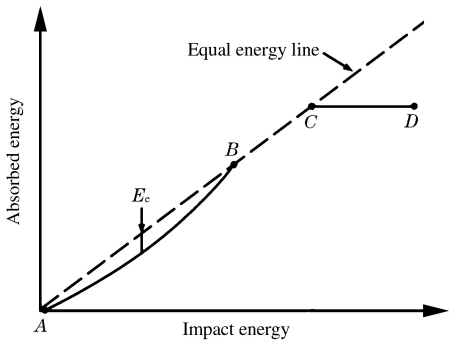


图 7　EPM 数据分析方法

Fig. 7　EPM data analysis

低速冲击下夹层结构的吸收能量可以通过载荷位移曲线获得，同时通过载荷-位移曲线的形状来初步判断结构在是否发生贯穿破坏，典型的载荷-位移曲线如图 8 所示。图中阴影面积代表了低速冲击过程中结构试件吸收的能量。开放式的载荷-位移曲线在结尾处存在一个水平断面，为了确定低速冲击过程中真正吸收的能量，需要将贯穿后的部分从曲线中移除，因此曲线的下降段被延长到位移轴线。出现

冲击体反弹现象的结构试件拥有闭合曲线，吸收的能量可以用冲击体初始的能量减去反弹后的能量计算出来。

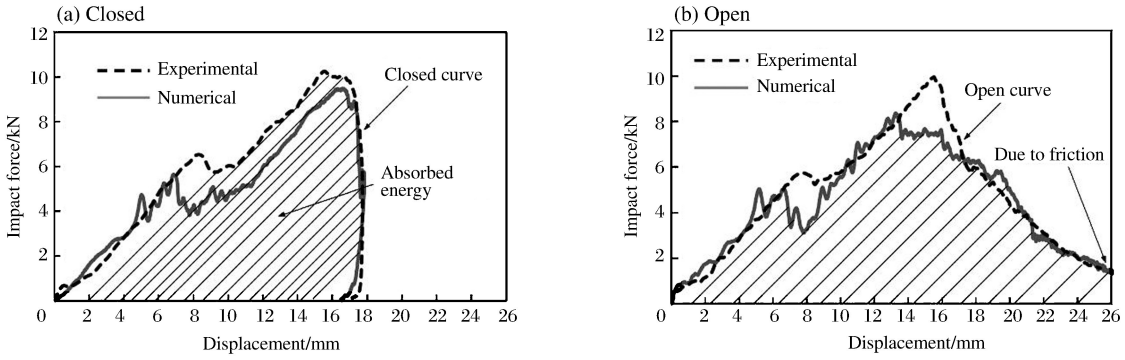


图 8 典型载荷位移曲线

Fig. 8 Typical load displacement curve

5.2 数值模拟分析

为了降低冲击实验的成本和时间，人们开始使用数值模拟技术来预测复合材料夹层结构的损伤扩展和演变规律，图 9 为运用 ABAQUS 有限元模拟分析软件模拟的复合材料多层阵列耐撞防护结构模块低速冲击响应特征。常用的有限元软件包括：ABAQUS、ANSYS、PAM-CRASH、DYNA3D、MSC/NASTRAN/DYTRAN 等。综合近年来的数值研究成果，大致可分为下列 2 种类型：一是细观损伤与破坏模拟方法，二是宏观失效与吸能能力模拟方法。

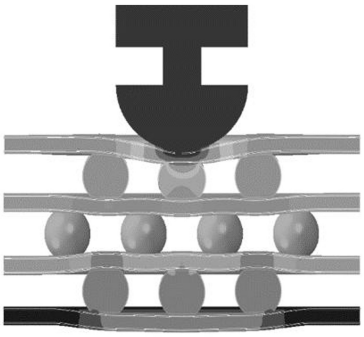


图 9 损伤时效模拟

Fig. 9 Damage failure simulation

杨庆生等[45]利用界面断裂力学和有限元法数值模拟纤维增强复合材料的细观损伤过程，研究各种主要破坏模式之间的相互转变和影响，指出以断裂能和混合度表示的界面性能是控制复合材料损伤过程的主要细观参数。刘瑞同等研究了复合材料结构耐撞性能数值模拟的策略和方法，认为采用有限元方法分析复合材料结构的碰撞过程时，应更多地关注结构的宏观破坏模式和力学响应，而不考虑结构在碰撞过程中的微观破损模式。因此，必须解决下面的两个问题：选择合适的材料模型描述破损后材料的力学性能，如弹塑性材料模型等；选择合适的破坏准则。

5.3 理论模型分析

现阶段各国研究人员对复合材料夹层结构的低速冲击性能研究主要集中在实验研究和数值模拟方面。由于复合材料夹层结构变形和失效过程中面板和芯层耦合作用复杂，冲击损伤理论和力学响应分析模型研究工作还有待一步加强。

目前，冲击损伤理论研究主要包括冲击过程的应力分析和失效分析 2 个方面[46-47]。复合材料夹层结构的低速冲击响应过程是瞬态的，且材料和结构存在非线性特征，应力分析概括起来可分为准静态分析方法和动力分析方法 2 类[48-49]。准静态分析方法的优点是提高了计算效率，但其可靠性难以保证，更多研究人员采用动力分析方法[50]。基于三维模型的动力学分析法能较好的描述复合材料夹层结构在低速冲击载荷作用下的实际响应过程。损伤失效分析目前主要有 3 类方法。一是通过试验测得损伤破坏的单一参数临界值或称阈值，作为理论分析中的失效判据。该法未考虑损伤引起因素的多样性，在实际应用中较少采用。二是采用多项式失效准则。许多学者通过实验与理论研究，提出了自己的经验公

式作为失效判据，是目前应用最多的失效分析方法。三是采用应变能释放率来分析预测冲击损伤扩展。

由于复合材料夹层结构材料体系和结构形式的复杂性，低速冲击载荷作用下的力学响应模型研究可作一定简化与假设。依据能量平衡原理、哈密尔顿原理、刚塑性理论及非线性高阶夹层板理论，通常建立弹簧/质量模型和能量平衡模型对复合材料夹层结构的低速冲击响应进行描述，并采用不同方法共同求解。在弹簧/质量模型中，需考虑弯矩、剪力和膜力的共同作用，接触弹簧表征了结构的横向载荷/变形行为，通过求解系统的运动方程便可以得到完整的力/时间关系。但现有的分析模型大多局限在弹性变形范围内，未考虑损伤演化过程，忽略了芯层的可压缩性以及面板的大变形。为此，Olsson 等[51]基于板的大挠度理论和芯层屈服条件预测了夹芯板的冲击响应。而在能量平衡模中，假定结构一旦达到准静态行为下的最大挠度，冲击体就停止加载，所有的初始动能均转化为结构的变形能，冲击体的动能等于由于接触、弯曲、剪切和膜力变形的能量之和。利用这种方法，Hassan 等[52]研究了铝蜂窝夹芯结构的冲击响应。研究结果发现，低速冲击下的准静态假定是有效的，且能量平衡模型能较好地描述夹层结构的冲击响应。但是能量平衡模型局限于弹性响应范围，并未考虑能量耗散。此模型不适用于冲击速度较高时芯层发生破坏（如孔壁屈曲、芯层压缩等）的夹层结构响应分析。此外，该模型仅能预测出最大冲击力，不能给出其载荷-时间关系。

6　展　望

复合材料夹层结构为舰艇耐撞防护结构设计提供了一种新的设计理念，而不仅仅是一种结构形式。随着新型复合材料夹层结构的出现、材料体系的精细化与复杂程度的提高，未来需要解决的问题有。

(1)结构设计体系。由于应用背景的特殊性，舰艇复合材料夹层结构设计在载荷形式、结构特征、材料选用体系、功能需求、设计方法、破坏与失效机理以及设计衡准等诸方面的设计特点和技术瓶颈较为突出，正确认识和充分把握舰艇复合材料夹层结构设计的典型特征，科学合理地建立舰艇复合材料夹层结构设计技术体系是非常必要和迫切的。

(2)等效分析方法。现阶段复合材料夹层结构的抗冲击问题研究大多集中于梁、板等简单结构。主要原在于分析复杂结构时，不仅需要考虑结构的整体性，且因其特殊的变形机制，模拟代价较高。因此，复杂结构等效分析方法的建立和计算效率的提高成为结构抗冲击性能分析的关键，也是未来研究的重要方向。

(3)多尺度计算方法。复合材料夹层结构芯层单元尺度与舰艇尺度相比有数量级的差异，要想尽早在舰艇上实现工程化应用，必须要更深入了解其低速冲击响应模式并掌握多尺度计算分析方法。

(4)结构功能性设计。耐撞防护功能只是复合材料夹层结构优良特性中的一种，为了能够将复合材料夹层结构的隔声、隔热、隔振等特点充分发挥，应对其进行功能性设计，实现层次功能性，获得更好的综合力学性能。

(5)实验测试方法。复合材料夹层结构的理论研究离不开可靠、高效的实验手段和测试方法，它在探索复合材料夹层结构的损伤产生和扩展机理，分析破坏模式以及验证各种假设的正确性中将起到重要的作用。

参考文献：

[1]　董慧民，安学锋，益小苏，等. 纤维增强聚合物基复合材料低速冲击研究进展[J]. 材料工程，2015，43(5)：89-100.
DONG Huiming, AN Xuefeng, YI Xiaosu, et al. Progress in research on low velocity impact properties of fiber reinforced polymer matrix composite[J]. Journal of Materials Engineering, 2015,43(5):89-100.

[2]　高禹，王绍权，董尚利，等. 复合材料低速冲击测试与分析方法的研究进展[J]. 高分子材料科学与工程，2015，31(7)：185-190.
GAO Yu, WANG Shaoquan, DONG Shangli, et al. Recent development in low-velocity impact test and analysis for composite plates[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2015,31(7):185-190.

[3]　张晓君，杜志鹏，谢永和. 夹层板在舰艇碰撞防护中的研究进展[J]. 中国造船，2011，52(4)：271-281.

ZHANG Xiaojun, DU Zhipeng, XIE Yonghe. Advances in study of sandwich plates for ship shock mitigating[J]. Shipbuilding of China, 2011,52(4):271-281.

[4] 肖锋,谌勇,章振华,等.夹层结构冲击动力学研究综述[J].振动与冲击,2013,32(18):1-5.
XIAO Feng, CHEN Yong, ZHANG Zhenhua, et al. A review of studying on impact dynamics of sandwich structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013,32(18):1-5.

[5] 敬霖,王志华,赵隆茂.多孔金属及其夹芯结构力学性能的研究进展[J].力学与实践,2015,37(1):1-24.
JING Lin, WANG Zhihua, ZHAO Longmao. Advances in studies of the mechanical performance of cellular metals and related sandwich structures[J]. Mechanics in Engineering, 2015,37(1):1-24.

[6] MOURITZ A P, GELLERT E, BURCHHILL P, et al. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines[J]. Composite Structures, 2001,53(1):21-41.

[7] VINSON J R, RAJAPAKSE Y D S, CARLSSON L E. The 6th international conference on sandwich structures [C]. London: CRC Press, 2003.

[8] 杨连新.国外核潜艇事故分类[J].现代舰船,2001,4(1):20-21.
YANG Lianxin. Classification of foregin nuclear submarine accidents[J]. Modern Ships, 2001,4(1):20-21.

[9] LIU Y. Crashworthiness design of multi-corner thin-walled columns[J]. Thin-Walled Structures, 2008,46(12): 1329-1337

[10] LIU Y. Optimum design of straight thin walled box section beams for crashworthiness analysis[J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2008,44(3):139-147.

[11] HOU S. Design optimization of regular hexagonal thin-walled columns with crashworthiness criteria[J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2007,43(6/7):555-565.

[12] 王自力,张延昌.基于夹层板的单壳船体结构耐撞性设计[J].中国造船,2008(1):60-65.
WANG Zili, ZHANG Yanchang. Single hull ship structure crashworthy design based on sandwich panel[J]. Shipbuilding of China, 2008,(1):60-65.

[13] 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(4):36-44.
ZHANG Yanchang, WANG Zili, GU Jinlan, et al. Application of sandwich panel in anti-shock design of warship's side structure[J]. Shipbuilding of China, 2009(4):36-44.

[14] 张延昌,王自力,张世联,等.基于折叠式夹层板船体结构耐撞性设计[J].船舶工程,2009(6):1-5.
ZHANG Yanchang, WANG Zili, ZHANG Shilian, et al. Hull structural crashworthy design based on folding sandwich panel[J]. Ship Engineering, 2009(6):1-5.

[15] 田媛,刘均,汪浩.砰击载荷下轻质波纹夹芯夹芯夹层板动力响应特性分析[J].船舶力学,2016(10):1300-1308.
TIAN Yuan, LIU Jun, WANG Hao. Dynamic response of light weight corrugated-core sandwich plates subjected to slamming impact[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016(10):1300-1308.

[16] SJOBLOM P O, HARTNESS J T, CORDELL T M. On low velocity impact testing of composite materials[J]. Journal of Composite Materials, 1988,22(1):30-52.

[17] SHIVAKUMAR K N, ELBER W, ILLG W. Prediction of low velocity impact damage in thin circular laminates [J]. AIAA Journal, 1985,23(3):442-449.

[18] TITA V, CARVALHO J D, VANDEPITTE D. Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: experimental and numerical approaches[J]. Composite Structures, 2008,83(4):413-428.

[19] GHASEMNEJAD H, FURQUAN A S M, MASON P J. Charpy impact damage behavior of single and multi delaminated hybrid composite beam structures[J]. Materials & Design, 2010,31(8):3653-3660.

[20] REID S, REDDY T, GRAY M. Static and dynamic axial crushing of foam-filled sheet metal tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1986(28):295-322.

[21] RICHARDSON M O W. ESPI non-destructive testing of GRP composite containing impact damage[J]. Composites A, 1998,29(7):721-729.

[22] CHOTARD T J, BENZEGGAGH M L. On the mechanical behavior of pultruded sections submitted to low-velocity impact[J]. Composites Science & Technology, 1998,58(6):839-854.

[23] MELIN L G. A study of model-I cracks by high-magnification moire interferometry[J]. Composites Science &

Technology，1998，58(3/4)：515-525.

[24] GIBSON L J，ASHBY M F. Cellular solids：structures and properties[M]. 2nd ed. London：Press syndicate of the University of Cambridge，1997.

[25] HANSSEN A G，ENSTOCK L，LANGSETH M. Close range blast loading of aluminium foam panels[J]. International Journal of Impact Engineering，2002，27(6)：593-618.

[26] 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.

[27] CHOI H Y，CHANG F K. A model for predicting damage in graphite/epoxy laminated composites resulting from low-velocity point impact[J]. Journal of Composite Materials，1992，26(14)：2134-2169.

[28] CHANG F，CHANG K. A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations [J]. Journal of Composite Materials，1987，21(9)：834-855.

[29] LEE S M，CHEON J S，IM Y T，Experimental and numerical study of the impact behavior of SMC plates[J]. Composite Structures，1999，47(1/2/3/4)：551-561.

[30] MITREVSKI T，MARSHALL IH，THOMSON R，et al. The effect of impactor shape on the impact response of composite laminates[J]. Composite Structures，2005，67(2)：139-148.

[31] 王璐璐，关志东. 复合材料层板静压入破坏机制[J]. 复合材料学报，2007，24(6)：135-140.
WANG Lulu，GUAN Zhidong. Failure mechanism of composite laminate due to quasi-static pressure[J]. Acta Material Composite Sinica，2007，24(6)：135-140.

[32] 夏军佳，卫甘霖，张征定. 纤维力学性能与防弹性能的关系[J]. 纤维复合材料，2004，18(1)：18-20.
XIA Junjia，WEI Ganlin，ZHANG Zhengding. The relationship between fiber mechanical properties and its bulletproof protection[J]. Fiber Composite，2004，18(1)：18-20.

[33] 王亮亮，孙志杰，张大兴，等. 混杂纤维丝束冲击拉伸性能实验研究[J]. 玻璃钢/复合材料，2004，19(3)：19-21.
WANG Liangliang，SUN Zhijie，ZHANG Daxing，et al. Investigation of tensile impact property of hybrid fiber bundle[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites，2004，19(3)：19-21.

[34] 严文聪，曾金芳，王斌. 纤维混杂复合材料研究进展[J]. 化工新型材料，2011，39(6)：30-33.
YAN Wencong，ZENG Jinfang，WANG Bin. The progress in fibers hybrid composites[J]. New Chemical Material，2011，39(6)：30-33.

[35] GOTTESMAN T，GIRSHOVICH S，DRUKKER E，etal. Residual strength of impacted composites：analysis and tests[J]. Journal of Composites Technology and Research，1994，16(3)：244-255.

[36] 杨永祥，张延昌. 蜂窝式夹芯层结构横向耐撞性能数值仿真研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版)，2007，21(4)：7-11.
YANG Yongxiang，ZHANG Yanchang. Numerical simulation of honeycomb core structure under lateral impact load[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)，2007，21(4)：7-11.

[37] 王章忠，张祖凤. 硬质聚氨酯泡沫塑料芯材与夹层结构的研究[J]. 机械工程材料，2004，28(1)：44-46.
WANG Zhangzhong，ZHANG Zufeng. Rigid polyurethane foam core and its sandwich structure[J]. Materials for Mechanical Engineering，2004，28(1)：44-46.

[38] WANG D M. Impact behavior and energy absorption of paper honeycomb sandwich panels[J]. International Journal of Impact Engineering，2009(36)：110-114.

[39] PARK J H，HA S K，KANG K W，et al. Impact damage resistance of sandwich structure subjected to low velocity impact[J]. Journal of Material Processing Technology，2008，201(1/2/3)：425-430.

[40] SHIN K B，LEE J Y，CHO S H. An experimental study of low velocity impact responses of sandwich panels for korean low floor bus[J]. Composite Structures，2008，84(3)：228-240.

[41] FAN H L，ZHOU Q，YANG W，et al. An experimental study on the failure mechanisms of woven textile sandwich panels under quasi-static loading[J]. Composites：Part B，2010，41(8)：686-692.

[42] FAN H L，YANG W，ZHOU Q. Experimental research of compressive responses of multi-layered woven textile sandwich panels under quasi-static loading[J]. Composites：Part B，2011，42(5)：1151-1156.

[43] HALE J M，GIBSON A G，SPEAKE S D. Tensile strength testing of GRP pipes at elevated temperatures in ag-

gressive offshore environments[J]. Journal of Composite Materials, 1998,32(10):969-986.

[44] 刘红影,刘德勤.温度对芳纶/玻璃纤维复合材料层压板冲击性能的影响[J].玻璃钢/复合材料,2009,6:25-27.
LIU Hongying, LIU Deqin. The role of temperature on impact properties of Kevlar/fiberglass composite laminates[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009,6:25-27.

[45] 杨庆生,杨卫.纤维复合材料损伤过程的数值模拟[J].计算力学学报,1998,15(2):154-160.
YANG Qingsheng, YANG Wei. Numerical simulation of damage process for fiber composites[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1998,15(2):154-160.

[46] COLLOMBET F, LALBIN X, BONINI J, et al. Damage criteria for the study of impacted composite laminates [J]. Composites Science and Technology, 1998,58(5):679-686.

[47] MOURA M F S F, MARQUES A T. Prediction of low velocity impact damage in carbon-epoxy laminates[J]. Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002,33(3):361-368.

[48] FATT M S H, PARK K S. Dynamic models for low velocity impact damage of composite sandwich panels: Part A: deformation[J]. Composites Structures, 2001,52(3/4):335-351.

[49] HASSAN M A, CANTWELLl W J. The low velocity impact response of an aluminum honeycomb sandwich structure[J]. Composites: Part B, 2003,34(8):679-687.

[50] ABRATE S. Modeling of impacts on composite structures[J]. Composites Structures, 2001,51(2):129-138.

[51] OLSSON R, MCMANUS H L. Improved theory for contact in-dentation of sandwich panels[J]. AIAA Journal, 1996,34(6):1238-1244.

[52] HASSAN M A, CANTWELL W J. The low velocity impact response of an aluminum honeycomb sandwich structure[J]. Composites: Part B, 2003,34(8):679-687.

Research progress of composite sandwich structure in ship collision protection

ZHOU Xiaosong, MEI Zhiyuan, ZHANG Yanbing

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

Abstract: In this paper, various collision protection methods were presented to ameliorate naval ships' collision protective capability. Conventional collision protection methods may result in the increase of the ship's weight and reduction of its functional performance. Composite sandwich plates serve as a new approach to the design of the collision protection structure, and have become one of the hottest research topics worldwide. With naval ships' collision resistance as its academic background, this paper reviewed the recent advances in the areas of experimental methods, deformation damage mechanisms, energy absorption factors, analysis methods and offered suggestions of future research directions in composite sandwich plates.

Keywords: composite material; sandwich structure; ship collision; deformation modes; damage mechanisms

(责任编辑 王小飞)