

冲击波与破片对波纹杂交夹层板的联合毁伤数值研究^{*}

李 勇¹, 肖 伟², 程远胜¹, 刘 均¹, 张 攀¹

(1. 华中科技大学船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064)

摘要: 通过有限元软件 LS-DYNA 模拟了波纹杂交夹层板在冲击波与破片联合作用下的响应过程, 研究了炸药当量、载荷类型和填充方式对波纹杂交夹层板变形与失效模式的影响, 并与实体板、间隔板和波纹夹层板的抗联合毁伤性能进行了对比, 讨论了波纹杂交夹层板的能量吸收特性。数值计算结果表明: 与冲击波单独作用相比, 破片群单独作用和冲击波与破片联合作用对结构造成的毁伤更为严重; 当药量较小时, 波纹夹层板和波纹杂交夹层板的抗联合毁伤性能优于实体板与间隔板, 波纹杂交夹层板的抗联合毁伤性能从全填充、迎爆面填充到背爆面填充逐渐降低; 当药量较大时, 所有结构均产生破口失效; 在能量耗散方面, 冲击波单独作用时以波纹芯层吸能为主, 破片群单独作用和冲击波与破片联合作用时以上面板吸能为主。

关键词: 抗联合毁伤性能; 冲击波与破片; 波纹杂交夹层板; 失效模式; LS-DYNA

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

在遭遇反舰导弹接触或近距非接触爆炸时, 舷侧防护结构会受到冲击波与高速破片联合作用, 这种联合作用大大增强了反舰导弹的毁伤威力, 故联合作用下的舷侧防护已逐渐成为舰船防护领域研究的热点^[1]。

目前的实验研究从联合载荷产生的角度可分为两大类: 一是由带壳炸药爆炸直接产生联合载荷^[1-3]; 二是在靶板上开预制孔模拟破片穿孔效应, 然后施加冲击波载荷^[4-5]。张成亮等^[6]对玻璃钢夹芯夹层板在冲击波与破片联合作用下的变形与破坏模式进行了实验研究, 并分析了夹层板各部件吸能情况。Kong 等^[7]通过实验与数值模拟相结合的方法分析了多层防护结构的抗联合毁伤机理, 研究表明密集分布的破片对舱壁结构产生密集弹孔, 由于穿孔边界的应力集中导致它们相互贯穿, 而舱壁结构在冲击波的作用下会使产生整体大变形。蒋建伟等^[8]研究了预先开孔的靶板在冲击波载荷作用下的变形, 并建立了靶板结构变形与孔密度和孔径的关系式。

对于结构在冲击波与破片联合作用下的数值仿真, 也已开展了一系列的研究^[9-12]。文献[13]中评述了当前冲击波与破片联合作用时, 三种常用的数值方法及其缺点。在此基础上, 文献[13]和[14]中同时改进了前人的仿真方法, 不仅定义了炸药与靶板的流固耦合作用, 而且还定义了炸药与预制破片群的流固耦合作用(即炸药直接对破片群进行加速), 并采用侵蚀接触算法模拟了破片群对靶板的侵彻。文献[15]和[16]研究了波纹杂交夹层板在裸药爆炸载荷下的毁伤特性, 发现填充后形成的杂交夹层板具有良好的抗爆性能。

本文中, 通过有限元软件 LS-DYNA 模拟波纹杂交夹层板在冲击波与破片联合作用下的响应过程, 分析炸药当量、载荷类型、填充方式和面板厚度配置对波纹杂交夹层板的变形与失效模式的影响, 对比波纹杂交夹层板与等效结构的抗联合毁伤性能, 讨论波纹杂交夹层板的能量吸收特性。

^{*} 收稿日期: 2016-08-11; 修回日期: 2017-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509096, 51209099)

第一作者: 李 勇(1991—), 男, 硕士; 通信作者: 张 攀, panzhang@hust.edu.cn。

1 计算模型

1.1 有限元计算模型

图 1 为波纹杂交夹层板在冲击波与破片联合作用下的计算模型示意图。波纹杂交夹层板由不锈钢面板和波纹芯层以及泡沫铝填充物组成。波纹杂交夹层板的四周为刚性固定。研究对象的长宽均为 0.4 m, 面板厚度为 3 mm, 芯层壁板厚度为 2 mm, 波纹折角为 45° , 芯层高度为 18 mm。

圆柱状 TNT 炸药的直径为 60 mm, 3 种当量为 55、111 和 166 g。炸药均被布置在距波纹杂交夹层板中心的正上方 50 mm 的位置处, 引爆点设置在上表面中心。为了模拟冲击波与破片对波纹杂交夹层板的联合毁伤, 在炸药下表面紧贴地布置了一层尺寸为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的预制钨合金破片。

鉴于近距爆炸产生的冲击波具有较强的局部特性, 故依据文献[13]的方法, 只建立 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 210\text{ mm}$ 的空气域(如图 1 所示), 空气选用多物质 ALE 算法的实体单元模拟。为了准确地模拟破片侵彻波纹杂交夹层板的过程, 破片、夹层板和填充物均采用实体单元模拟, 并选择 Lagrange 单元算法。夹层板中心区域 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 范围内的面内网格尺寸为 1.5 mm, 且由中心区域向边界逐渐过渡; 面板和芯层沿厚度方向划分 3 份。填充物的面内单元尺寸与夹层板相同, 而截面上的单元尺寸约为 1.5 mm。根据文献[13], 空气和破片的单元大小分别为 2 和 1 mm。通过流固耦合关键字定义冲击波与破片群及波纹杂交夹层板的相互作用, 并采用 LS-DYNA 推荐的罚函数耦合算法。采用侵蚀单面接触算法模拟破片侵彻波纹杂交夹层板的过程。通过加密结构网格验证了数值模型的收敛性。

1.2 材料模型

TNT 炸药通过 High_Explosive_Burn 材料模型和 JWL 状态方程来描述, 空气则通过 MAT_NULL 材料模型和 EOS_Linear_Polynomial 状态方程来定义, 具体参数见文献[17]。304 不锈钢采用 Johnson-Cook 材料模型、Grüneisen 状态方程和等效塑性应变失效准则来描述, 具体参数见文献[18]。泡沫铝通过 Crushable Foam 材料模型来描述, 本文中泡沫铝相对密度为 15%^[19]。预制破片采用刚体本构模型(Mat_Rigid)来模拟, 其密度、弹性模量和泊松比分别为 7800 kg/m^3 、357 GPa 和 0.303^[13]。

1.3 计算工况

为了横向比较波纹杂交夹层板(HP)抗联合毁伤的性能, 以全填充波纹杂交夹层板为基准, 设计了面内尺寸相同的等质量实体板(SP)、间隔板(GP)和波纹夹层板(EP)。相应的实体板厚度为 9.307 mm; 等效间隔板的上、下面板厚度均为 4.653 mm, 两面板间距为波纹杂交夹层板的芯层高度; 波纹夹层板的波纹芯层质量等于波纹杂交夹层板的波纹芯层质量与泡沫铝填充物质量之和, 即等效的波纹芯层壁板厚度为 2.48 mm, 而其他参数与波纹杂交夹层板保持一致。

表 1 为计算工况参数及其数值结果, 其中: W 代表 TNT 当量, n 为破片个数。当 $W \neq 0$ 且 $n = 0$ 时, 说明波纹杂交夹层板仅受到冲击波单独作用; 当 $W = 0$ 且 $n \neq 0$ 时, 表示波纹杂交夹层板仅受到破片群载荷单独作用(即波纹杂交夹层板不与爆轰产物发生耦合作用, 只与破片群产生接触); 当 $W \neq 0$ 且 $n \neq 0$ 时, 则结构受到冲击波与破片联合作用; 填充方式 F、U 和 L 分别表示全填充、迎爆面填充和背爆面填充; “破口”表示该结构部件出现穿孔破坏; “损伤”表示该结构部件表面出现单元被侵蚀删除, 但没有出现穿孔; f、c、b 和 foam 分别表示上面板、波纹芯层、下面板和填充物。

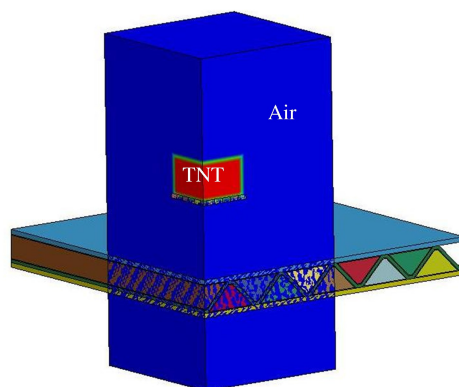


图 1 波纹杂交夹层板有限元模型(1/4 模型)

Fig. 1 Finite element model of hybrid corrugated sandwich plate (1/4 model)

表 1 计算工况及数值结果

Table 1 Computational conditions and numerical results

工况编号	W/g	n	填充方式	中心点最大形变/mm		破损形式/塑性应变			变形能/kJ			
				f	b	f	b	c	f	b	c	foam
HP-1	166	121	F	—	—	破口	破口	破口	16.644	9.460	4.088	2.424
HP-2	166	121	U	—	—	破口	破口	破口	16.744	8.176	3.604	1.556
HP-3	166	121	L	—	—	破口	破口	破口	15.920	7.416	4.068	0.812
HP-4	0	121	F	—	—	破口	破口	破口	15.824	8.972	3.848	2.240
HP-5	166	0	F	—	19.15	破口	破口	损伤	6.404	7.240	2.056	1.916
HP-6	111	121	F	—	23.12	破口	破口	损伤	14.304	8.044	3.180	2.104
HP-7	111	121	U	—	23.47	破口	破口	损伤	14.600	7.328	2.516	1.336
HP-8	111	121	L	—	—	破口	破口	破口	13.756	6.412	3.180	0.624
HP-9	0	121	F	—	22.98	破口	破口	损伤	13.600	7.276	3.012	1.924
HP-10	111	0	F	—	15.40	破口	破口	损伤	5.140	6.308	1.488	1.776
HP-11	55	121	F	—	15.97	破口	破口	0.420	9.616	5.376	1.184	1.556
HP-12	55	121	U	—	16.61	破口	破口	损伤	9.472	4.652	0.896	1.024
HP-13	55	121	L	—	17.21	破口	破口	损伤	9.100	4.384	1.348	0.612
HP-14	0	121	F	—	15.60	破口	破口	0.395	9.544	5.284	1.084	1.492
HP-15	55	0	F	22.57	7.60	0.420	损伤	0.289	2.568	3.904	0.548	1.476
EP-1	166	121	—	—	—	破口	破口	破口	16.052	7.344	3.356	—
EP-2	111	121	—	—	23.16	破口	破口	损伤	13.160	6.200	2.280	—
EP-3	55	121	—	—	15.82	破口	破口	0.273	9.096	3.560	0.868	—
GP-1	166	121	—	—	—	破口	破口	—	20.244	—	5.852	—
GP-2	111	121	—	—	32.28	破口	破口	—	16.828	—	5.204	—
GP-3	55	121	—	—	22.07	破口	0.394	—	11.892	—	1.840	—
SP-1	166	121	—	—	—	破口	—	—	28.584	—	—	—
SP-2	111	121	—	—	—	破口	—	—	23.744	—	—	—
SP-3	55	121	—	23.41	—	损伤	—	—	13.876	—	—	—

2 数值方法验证

为了验证数值模拟方法的正确性,本文中选择文献[14]中公布的实体板毁伤实验作为验证对象。该实体板的有效承载面积为 500 mm×500 mm,厚度为 4 mm。结构和流体均采用实体单元,建立了 1/4 有限元模型,并且流域也仅覆盖了实体板的中心区域。参考 1.1 节确定结构和流体单元类型和大小、流固耦合设置、结构间接触设置。

图 2 对比了实验与数值的失效模式。数值仿真中,实体板中心区域出现冲塞大破口,并且破口的长度为 57.0 mm,这与文献[14]给出的实验与数值结果比较吻合。在中心大破口附近,存在着由单个破

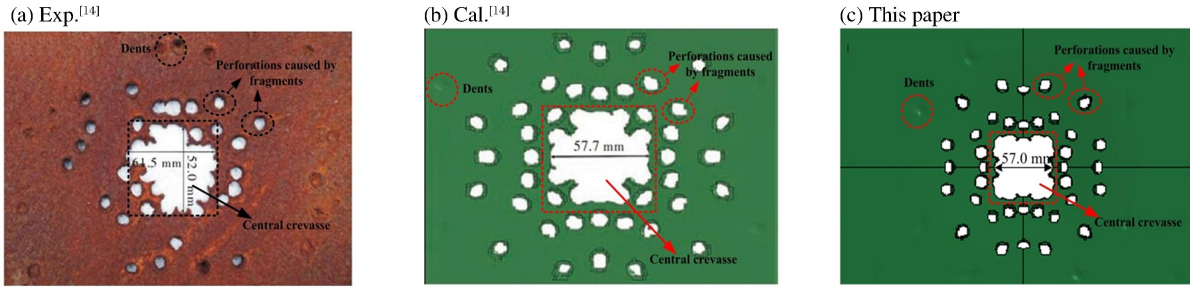


图 2 实体板在联合作用下的毁伤

Fig. 2 Failure of solid plate under combined blast and fragment loadings

片造成的贯穿破口(椭圆虚线内);而凹痕出现在离中心区域较远的位置(圆形虚线内)。可认为本文提出的数值仿真方法能够比较准确地模拟冲击波与破片联合作用下结构的毁伤。

3 数值结果与分析

3.1 冲击波与破片联合作用下波纹杂交夹层板响应过程

根据数值模拟得到的现象,将冲击波与破片联合作用过程划分为 3 个阶段:(1) 爆轰波的传播;(2) 冲击波的传播与破片群的运动;(3) 结构与联合载荷(冲击波与破片群)相互作用。本节中,以工况 HS-6 ($W=111\text{ g}$) 为例,按照上述三个阶段分析整个响应过程。

(1) 图 3 给出了爆轰波的传播($0\sim 3.6\text{ }\mu\text{s}$)过程(蓝色部分为未反应的炸药):炸药由上端面中心点起爆后释放大量能量,并在炸药中产生爆轰波;由于此种工况下炸药高度与半径之比为 $1:1.25$,因此爆轰波在到达底部前基本上是以球面波形式传播;当 $t=3.6\text{ }\mu\text{s}$ 时,爆轰波到达底部中心,并开始驱动破片群。

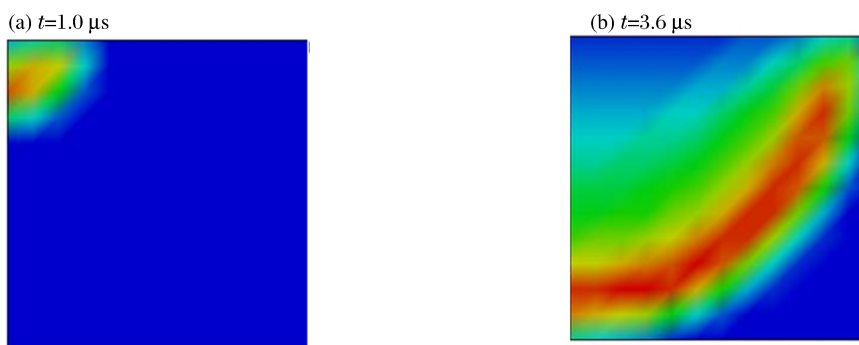


图 3 爆轰波传播过程

Fig. 3 Propagation of detonation

(2) 图 4 给出了冲击波的传播与破片群的运动($3.6\sim 64\text{ }\mu\text{s}$)过程:在高温高压爆轰产物的压缩下,周围空气形成冲击波;由于预制破片限制了冲击波向下方传播,导致其向上方和侧面的传播速度更快,如图 4(b)所示;冲击波大概在 $37\text{ }\mu\text{s}$ 时开始与上面板发生耦合作用,此时,破片群仍然处于加速阶段并且在不均匀的冲击波压力作用下,破片群的速度分布呈现出中心大周边小,并且周边的破片在后期出现翻转运动,如图 5(a)所示;当 $t=64\text{ }\mu\text{s}$ 时,中心处的破片开始与上面板发生接触。

(3) 图 5 给出了结构与联合载荷相互作用($64\text{ }\mu\text{s}\sim$ 结束)过程:中心部位破片的速度较高,破片载荷作用非常局部,造成波纹杂交夹层板上面板出现剪切冲塞破坏,形成二次碎片,如图 3(b)所示;在预制破片和二次碎片的作用下,泡沫铝填充物因压溃失效而被侵蚀删除;随着破片继续撞击波纹芯层,波纹芯层一方面通过自身塑性变形与失效消耗破片的能量,另一方面会挤压泡沫铝填充物,最终波纹芯层出现了破口,如图 5(c)所示;周边的破片速度相对较低且撞击上面板的入射角较大,出现了“跳飞”现象,没有贯穿上面板而只是造成损伤,如图 5(d)所示;中心部位的破片在穿透上面板、泡沫铝和波纹芯层后,继续撞击下面板,使得下面板局部单元出现侵蚀,但没有穿孔破坏,如图 5(c)所示;冲击波尽管比破片更早与结构发生作用,但它对结构破损并没有起决定性作用。

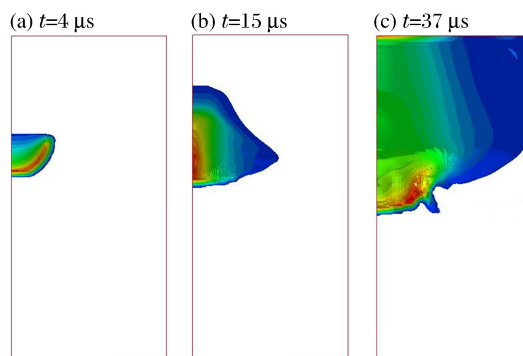


图 4 冲击波传播过程

Fig. 4 Propagation of shock wave

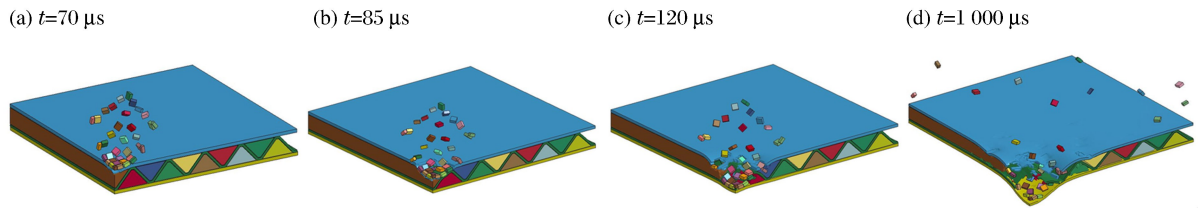


图5 波纹杂交夹层板的响应过程

Fig. 5 Response process of hybrid corrugated sandwich plate

3.2 冲击波、破片及其联合作用下波纹杂交夹层板的动响应对比分析

图6给出了55、111和166 g等三种炸药当量下不同载荷(冲击波单独作用、破片群单独作用、冲击波与破片联合作用)作用下杂交夹层板的动响应结果,各工况的面板变形和塑性应变的结果见表1。

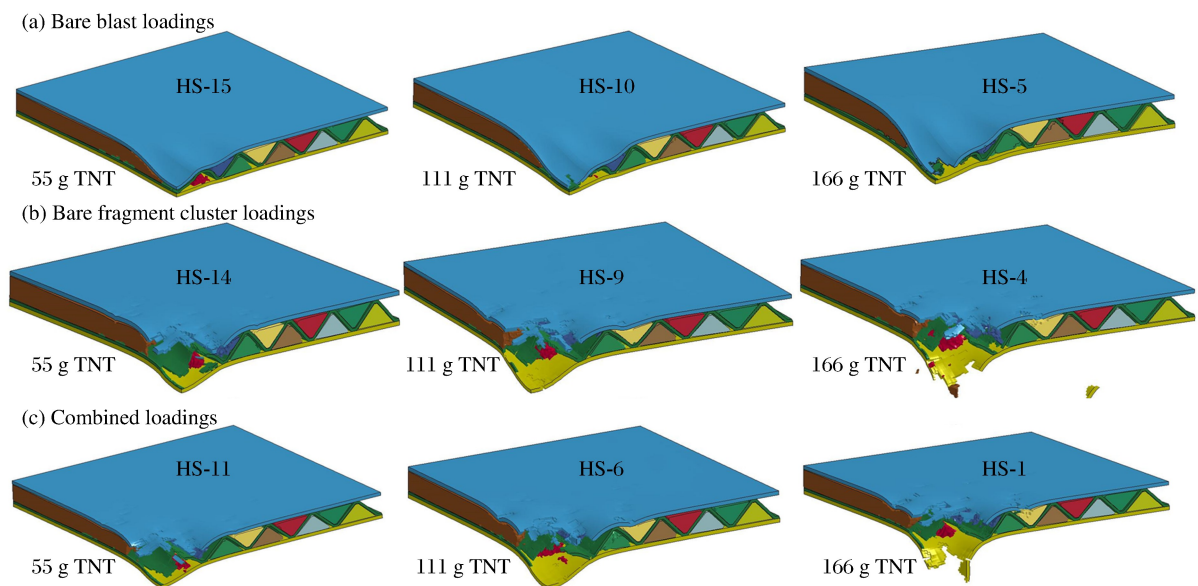


图6 波纹杂交夹层板的失效模式

Fig. 6 Failure patterns of hybrid plate

在冲击波单独作用下,炸药当量为55 g时,波纹杂交夹层板的上、下面板产生了较大的塑性变形,如图6(a)所示,其变形值分别为22.57和7.60 mm;泡沫铝填充物被面板和波纹芯层压缩,中心区域因压实而被侵蚀删除,而波纹芯层只出现了损伤。当药量增加到111和166 g时,其上面板和芯层由于拉伸撕裂出现了较小的破口,但没有形成二次碎片,泡沫铝的变形区域以及因压实而被删除的范围进一步扩大,如图6(a)所示;下面板则呈现出塑性大变形,局部区域发生损伤,两种工况下的变形分别为15.40和19.15 mm。

在破片群单独作用下,当药量为55 g时,波纹杂交夹层板的上面板和波纹芯层均产生了较大的破口,中心区域的泡沫铝主要被侵蚀删除,如图6(d)所示,而下面板仅发生塑性大变形,其值为15.60 mm,是相同当量下冲击波单独作用变形的2.05倍。随着药量的增加,破片群的侵彻动能也增大,造成上面板和芯层的破口范围以及泡沫铝被侵蚀的区域都变大。而下面板在炸药当量为111 g时出现了损伤,其变形值为22.98 mm,较等当量下冲击波单独作用的变形增加了49%;当药量增加到166 g时,下面板出现了破口并产生冲塞块,如图6(b)所示。

对比破片群单独作用(图6(b))和冲击波与破片联合作用下(图6(c))杂交夹层板的动响应结果,发

现杂交夹层板的毁伤模式几乎一致,联合作用下结构变形和毁伤稍大。这说明联合作用时破片占主导,冲击波只会稍微加剧结构的变形。这种加剧效应会随着炸药当量的增加而提高。炸药当量为 55 g 时,联合作用下杂交夹层板背面板变形为 15.97 mm,仅比破片群单独作用时增加了 0.37 mm;而当药量提高为 166 g 时,联合作用时下面板的破口范围明显偏大,这是由于在炸药当量较小时,冲击波的大部分能量被转化为破片群的动能,剩余冲击波到达上面板时其压力已经大幅衰减,而面板的厚度又较大,导致冲击波对波纹杂交夹层板的作用不如破片群作用的影响大;当炸药当量增大时,与上面板耦合的冲击波压力会增大,剩余冲击波会明显加剧杂交夹层板的毁伤。

3.3 波纹杂交夹层板与等效结构抗联合毁伤性能对比分析

图 7 给出联合作用下波纹杂交夹层板和 3 种等效结构的毁伤容貌。结构的最大塑性变形和塑性应变结果见表 1。

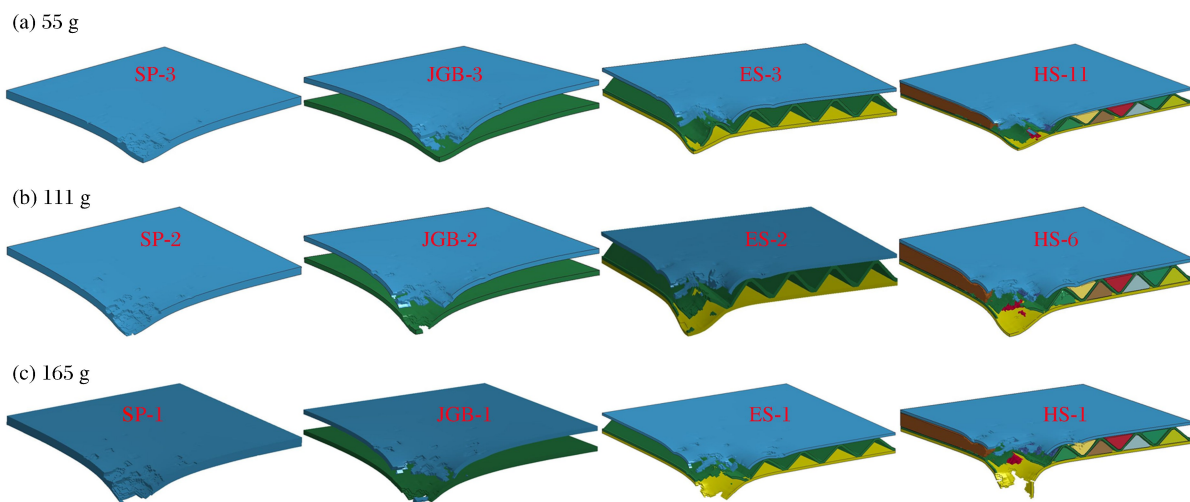


图 7 联合作用时不同结构的失效模式

Fig. 7 Failure patterns of different structures under combined blast and fragment loadings

当药量为 55 g 时,4 种结构的下面板都没有出现破口,如图 7(a)所示。实体板产生了塑性大变形且中心区域出现了损伤,最大变形为 23.41 mm。对于间隔板,上面板厚度仅为实体板一半,在联合载荷作用下形成了破口,且破口边缘具有较大的塑性变形;在上面板的防护下,联合载荷仅使下面板产生了塑性大变形而没有损伤,其最大的变形和塑性应变分别为 22.07 mm 和 0.394,较实体板变形减小了 5.7%。波纹夹层板的上面板产生了破口并形成二次碎片,波纹芯层在破片和二次碎片的撞击下也出现了破口,而下面板仅有较大的塑性变形,约 15.82 mm,比实体板的变形减小了 32.4%,最大的塑性应变为 0.273。波纹杂交夹层板的下面板变形为 15.97 mm,与实体板变形减小了 31.8%,但比波纹夹层板增加了 0.15 mm,这是因为波纹杂交夹层板的填充物对破片具有一定的抵抗作用,但它的波纹芯层壁板厚度比波纹夹层板减小了 19.4%,削弱了波纹芯层对破片的抵抗,最终下面板的变形取决于这两者效应的强弱。

当炸药当量为 111 g 时,实体板和间隔板的下面板均产生了破口,如图 7(b)所示,而波纹夹层板和波纹杂交夹层板的下面板仅出现局部表面损伤,它们的变形分别为 23.16 和 23.12 mm,从此时下面板变形来看,填充泡沫铝和增加芯层壁板厚度的效果差不多。当炸药当量增加到 166 g 时,四种结构的下面板都产生了破口,如图 7(c)所示,不易比较它们的抗联合毁伤性能。但从下面板破口大小来看,波纹夹层板的破口范围稍小于波纹杂交夹层板,说明在药量较大时,增加芯层壁板厚度的效果要比填充泡沫铝好。

整体上,从塑性变形和失效模式来看,杂交夹层板和波纹夹层板的抗联合毁伤能力基本相当,在小

当量下较实体板和间隔板均具有明显优势,但随着当量增加抗毁伤性能的优势并不明显。

3.4 填充方式对波纹杂交夹层板抗联合毁伤性能的影响

图8为不同填充方式对波纹杂交夹层板变形与失效模式的影响。当药量为55 g时(如图8(a)~(c)所示),3种填充方式下波纹杂交夹层板的上面板和波纹芯层均产生了破口,中心区域的泡沫铝也被侵蚀删除,但背爆面填充时波纹芯层的破坏程度明显大于另外两种填充方式。结合表1给出的变形,全填充方式的下面板变形最小,其次是迎爆面填充,而背爆面填充的变形最大。若以全填充方式的下面板变形值作为比较基准,则迎爆面填充和背爆面填充分别增加了4.0%和7.8%。当药量为111 g时(图8(d)~(f)),背爆面填充的下面板出现了较小的破口,而迎爆面填充和全填充方式的下面板只是发生局部损伤,它们的变形分别为23.47和23.12 mm。当炸药当量达到166 g时,三种填充方式的下面板都出现了较大的破口,如图8(g)~(i)所示。

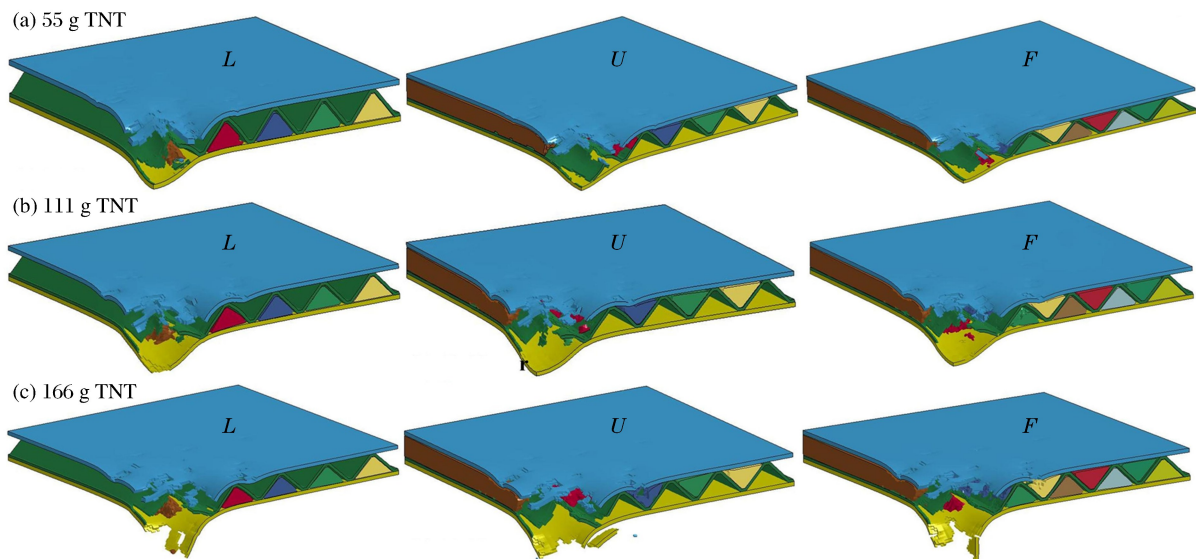


图8 填充方式对波纹杂交夹层板失效的影响

Fig. 8 Effect of filling strategy on the failure patterns of hybrid corrugated sandwich plates

由此可以得出,药量较小时,若以下面板变形为评判标准,则全填充方式的抗联合毁伤性能在三者中最优,其次为迎爆面填充方式,最后是背爆面填充方式。造成这种差异的原因是:迎爆面填充时泡沫铝能够直接吸收正中心区域的破片和上面板生成的二次碎片的动能,减小了作用到中心区域的波纹芯层和下面板的能量;虽然背爆面填充的泡沫铝也能够吸收能量,但它不能吸收中心处的破片动能,使得下面板受到破片撞击的能量大于迎爆面填充的情况;与迎爆面填充方式相比,全填充方式能够吸收更多作用到下面板的能量。药量较大时,联合作用载荷足以使波纹杂交夹层板产生贯穿的大破口,此时填充泡沫铝不能避免下面板出现破口。

3.5 能量吸收特性分析

不同载荷类型作用下波纹杂交夹层板各部件能量吸收情况见表1。在相同药量下,冲击波单独作用时总吸能大约为破片群单独作用及冲击波与破片联合作用下总吸能的一半。而波纹杂交夹层板在破片群单独作用及冲击波与破片联合作用下的总吸能相差不大,但这种差异会随着炸药当量增加而增大,这意味着冲击波的贡献程度随着当量增加而增加。在冲击波单独作用时,波纹芯层在所有部件中吸能最多(约为43%),并且泡沫铝的吸能也占了相当比重(约为13%);破片单独作用或破片冲击波联合作用时,吸能最多的部件是上面板(约为52%)。导致这种差异与波纹杂交夹层板在不同载荷作用下的变形与失效模式有关,在冲击波单独作用时,波纹杂交夹层板依靠压缩波纹芯层和泡沫铝吸收能量,从而减小下面板变形;在后两种载荷作用时,波纹杂交夹层板主要依靠上面板和波纹芯层消耗破片的动能,

其中上面板的作用更为重要,而冲击波会加剧上面板的变形。

探讨冲击波与破片联合作用下不同结构形式的能量吸收特性,发现在相同药量下,波纹杂交夹层板的总吸能最多,而不含填充物的波纹夹层板结构总吸能甚至会低于实体板。若以实体板吸能量作为比较基准,则杂交夹层板结构吸能量在3种当量(55、111、166 g)下分别增加了27.8%、16.4%、14.1%。这说明填充物的存在对波纹夹层板能量吸收能力的提升比较有效。

表1对比不同填充方式下波纹杂交夹层板各部件能量吸收情况,可以发现,当填充方式从背爆面填充变化到全填充时,尽管填充方式对上面板吸能影响不大,但泡沫铝和波纹芯层的吸能会随之增加,从而导致波纹杂交夹层板总吸能增加。若以背包面填充方式的总吸能量作为比较基准,则全填充方式和迎爆面填充方式分别增加15%和5%左右。这是因为与背爆面填充相比,迎爆面填充时泡沫铝可直接吸收破片的动能,一方面增大了泡沫铝破坏程度,另一方面破片的速度下降更多,使得破片与波纹芯层作用的时间更长,并且波纹芯层的材料利用更充分。能量吸收数据直接验证了3.4中不同填充方式杂交夹层板抗毁伤能力排序的合理性。

4 结 论

本文中,通过有限元软件LS-DYNA建立了用于分析冲击波与破片联合作用下波纹杂交夹层板动态响应的数值模型,主要分析了载荷类型和填充方式对波纹杂交夹层板的毁伤特性和能量吸收特性的影响,并与3种等效结构进行了对比分析,得到如下主要结论:

(1)在研究范围内,冲击波单独作用时,破口主要是拉伸撕裂引起的;在破片群单独作用和冲击波与破片联合作用时,破口是由破片群的剪切冲塞造成的;并且冲击波单独作用造成的毁伤程度远小于后两种载荷;

(2)波纹夹层板和波纹杂交夹层板的抗联合毁伤性能在小当量时优于实体板与间隔板,最大塑性变形可减少约32%;当药量较大时,四种结构的下面板都产生了破口;在本文研究范围内,若以下面板变形或破口大小为评判标准,则波纹夹层板的抗联合毁伤性能略优于波纹杂交夹层板,即增加芯层壁板厚度的效果略好于填充泡沫铝;

(3)在药量较小时,全填充的抗联合毁伤性能在三者中是最优的,其次是迎爆面填充,最差的是背爆面填充;若以全填充方式的下面板变形值作为比较基准,则迎爆面填充和背爆面填充分别增加了4.0%和7.8%;当药量较大时,三种填充方式的波纹杂交夹层板均产生了大小相当的贯穿大破口;

(4)波纹杂交夹层板在冲击波单独作用下的总吸能约为另外两种载荷作用时的总吸能的一半,而后两者总吸能相差不大;前者以波纹芯层吸能为主,而后两者则以上面板吸能为主;在不同的结构拓扑形式中,波纹杂交夹层板的总吸能最多,其次为实体板,而波纹夹层板与间隔板的总吸能差不多;当填充方式从背爆面填充变化到全填充时,波纹杂交夹层板的总吸能以及泡沫铝和波纹芯层的吸能不断增加,但填充方式对上面板吸能影响不大。

参考文献:

- [1] 侯海量,张成亮,李茂,等.冲击波和高速破片联合作用下夹芯复合舱壁结构的毁伤特性[J].爆炸与冲击,2015,35(1):116-123.
HOU Hailiang, ZHANG Chengliang, LI Mao, et al. Damage characteristics of sandwich bulkhead under the impact of shock and high-velocity fragments[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(1):116-123.
- [2] 何翔,庞伟宾,曲建波,等.防护门在空气冲击波和破片作用下的破坏[J].爆炸与冲击,2004,24(5):475-479.
HE Xiang, PANG Weibin, QU Jianbo, et al. Protective door damaged by air shock wave and fragment arisen from explosion in prototype tunnel[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(5):475-479.
- [3] LEPPÄNEN J. Experiments and numerical analyses of blast and fragment impacts on concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,31(7):843-860.
- [4] 金乾坤.破片和冲击波毁伤圆柱靶的数值仿真[J].兵工学报,2006,27(2):215-218.

- JIN Qiankun. Simulation of cylindrical shell damage by fragments and shock waves[J]. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(2):215-218.
- [5] RAKVÅG K, UNDERWOOD N, SCHLEYER G, et al. Transient pressure loading of clamped metallic plates with pre-formed holes[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 53(3):44-55.
- [6] 张成亮,朱锡,侯海量,等.爆炸冲击波与高速破片对夹层结构的联合毁伤效应试验研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(15):184-188.
- ZHANG Chengliang, ZHU Xi, HOU Hailiang, et al. Tests for combined damage effect of blast waves and high-velocity fragments on composite sandwich plates[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(15):184-188.
- [7] KONG X S, WU W G, LI J, et al. Experimental and numerical investigation on a multi-layer protective structure under the synergistic effect of blast and fragment loadings[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 65(2):146-162.
- [8] 蒋建伟,侯俊亮,门建兵,等.爆炸冲击波作用下预制孔靶板塑性变形规律的研究[J]. *高压物理学报*, 2014, 28(6):723-728.
- JIANG Jianwei, HOU Junliang, MEN Jianbing, et al. Study on deformation of perforated plates under blast loading[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(6):723-728.
- [9] 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 Zhipeng, LI Xiaobin, XIA Lijuan, et al. Numerical simulation of anti-ship missile attack warship broadside process[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2006, 27(4):484-487.
- [10] NYSTRÖM U, GYLLTOFT K. Numerical studies of the combined effects of blast and fragment loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(8):995-1005.
- [11] HATCH-AGUILAR T, NAJJAR F, SZYMANSKI E. Computational hydrocode study of target damage due to fragment-blast impact [C]//26th International Symposium of Ballistics. Livermore, California, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2011:1-17.
- [12] ZHANG C Z, CHENG Y S, ZHANG P, et al. Numerical investigation of the response of I-core sandwich panels subjected to combined blast and fragment loading[J]. *Engineering Structures*, 2017, (151):459-471.
- [13] 段新峰,程远胜,张攀,等.冲击波和破片联合作用下I型夹层板毁伤仿真[J]. *中国舰船研究*, 2015, 10(6):45-59.
- DUAN Xinfeng, CHENG Yuansheng, ZHANG Pan, et al. Numerical analysis of the damage on I-core sandwich panels subjected to combined blast and fragment loading[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2015, 10(6):45-59.
- [14] 李茂,朱锡,侯海量,等.冲击波和高速破片对固支方板的联合作用数值模拟[J]. *中国舰船研究*, 2015, 10(6):60-67.
- LI Mao, ZHU Xi, HOU Hailiang, et al. Numerical simulation of steel plates subjected to the impact of both impact waves and fragments[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2015, 10(6):60-67.
- [15] ZHANG P, CHENG Y S, LIU J, et al. Experimental study on the dynamic response of foam-filled corrugated core sandwich panels subjected to air blast loading[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016(105):67-81.
- [16] CHENG Y S, ZHOU T Y, WANG H, et al. Numerical investigation on the dynamic response of foam-filled corrugated core sandwich panels subjected to air blast loading[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2017. DOI: 10.1177/1099636217700350.
- [17] CHENG D S, HUNG C W, PI S J. Numerical simulation of near-field explosion[J]. *Journal of Applied Science and Engineering*, 2013, 16(1):61-67.
- [18] ZHANG P, CHENG Y S, LIU J, et al. Experimental and numerical investigations on laser-welded corrugated-core sandwich panels subjected to air blast loading[J]. *Marine Structures*, 2015, 40:225-246.
- [19] JING L, XI C Q, WANG Z H, et al. Energy absorption and failure mechanism of metallic cylindrical sandwich shells under impact loading[J]. *Materials & Design*, 2013, 52(24):470-480.

Numerical research on response of hybrid corrugated sandwich plates subjected to combined blast and fragment loadings

LI Yong¹, XIAO Wei², CHENG Yuansheng¹, LIU Jun¹, ZHANG Pan¹

(1. *School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;*

2. *China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, Hubei, China*)

Abstract: The dynamic response of hybrid corrugated sandwich plates subjected to combined effects of blast and fragment loading was analyzed using finite element analysis code LS-DYNA. The effects of charge mass, loading type and filling strategy on deformation/failure pattern of hybrid corrugated sandwich plates were investigated. The comparison of anti combined loadings performance to three equivalent structures (solid plate, double-layered plate and corrugated sandwich plate) was made. Finally, the energy absorption characteristics of hybrid corrugated sandwich panels were discussed. Numerical results show that the damage extent of hybrid corrugated sandwich plates under bare fragment cluster loading or combined blast and fragment loading is more severe than that caused by bare blast loading. When the charge mass is small, the performances of corrugated sandwich plate and hybrid corrugated sandwich plate are superior to equivalent solid plate and double-layered plate. The corrugated sandwich panels with fully filling configuration possess the best damage resistance, followed by that with upper space filling configuration, and that with lower space filling configuration has the worst. All the structures fractured catastrophically when the charge mass is large. For energy absorption, the corrugated core is the main energy absorption part under bare blast loading, while the front face becomes the main energy absorption part under the other two loading conditions.

Keywords: anti combined loadings performance; blast and fragment; hybrid corrugated sandwich plate; failure pattern; LS-DYNA

(责任编辑 王小飞)