

近场爆炸载荷作用下加筋板应变响应研究

沈晓乐¹,任俊杰²,周学滨¹

(1. 中国人民解放军91439部队, 辽宁 大连 116041; 2. 大连海洋学校, 辽宁 大连 160023)

摘要: 对冲击波和气泡载荷联合作用下加筋板结构的响应过程进行了实验研究。在一倍气泡半径爆距条件下气泡载荷作用使结构产生的应变响应幅值与冲击波产生的应变响应幅值在同一量级,且响应持续时间更长;冲击波和气泡两种载荷作用下结构的瞬态应变响应均值和塑性应变均值相差不大,都能引起结构的塑性变形;另外加筋板中不同测点的优势频率不同,板格内测点反映的是板格局部冲击响应特性,而加强筋上的测点能够更好地反映加筋板的整体冲击响应特性。

关键词: 水下爆炸;加筋板;应变响应

本文引用格式: 沈晓乐,任俊杰,周学滨. 近场爆炸载荷作用下加筋板应变响应研究[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(1):57-60.

Citation format: SHEN Xiaole, REN Junjie, ZHOU Xuebin. Strain Response Study of Stiffened Plate Subject to Near Field Underwater Explosion[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2019,40(1):57-60.

中图分类号:0382

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2019)01-0057-04

Strain Response Study of Stiffened Plate Subject to Near Field Underwater Explosion

SHEN Xiaole¹, REN Junjie², ZHOU Xuebin¹

(1. The No. 91439th Troop of PLA, Dalian 116041, China; 2. Dalian Ocean School, Dalian 160023, China)

Abstract: The response of the stiffened plate subject to the shock wave and bubble load was studied. The result show that: the strain amplitude of the structure caused by the shock wave load and the bubble load is at the same magnitude, meanwhile the later duration of strain response last longer. The strain amplitude average and the plastic strain average caused by the two loads of all test point are at the same magnitude, and the bubble load can also cause damage to the stiffened plate. The advantage frequency of different position in the stiffened plate is different. The local measuring point reflects the local vibration characteristics of the structure, but the stiffened bar can better reflect the overall vibration characteristics.

Key words: underwater explosion; stiffened plate; strain response

加筋板格是船体结构的主要组成部分,研究加筋板格在爆炸载荷作用下的动态响应对研究全船的抗毁伤能力具有重大的工程意义。祝伟等^[1]采用冲量相等的方法将爆炸冲击载荷等效为三角波、正弦波、矩形波,研究表明加筋板结构形式对加筋板抵抗爆炸载荷能力影响较为明显,但是三种载荷形式不能完全模拟冲击波的加载过程,也没有考虑气泡载

荷对结构的影响。邵建军等^[2]基于相似理论研究了炸药沉底爆炸的能量传播规律,但没有研究结构对能量传递的影响。牟金磊等^[3-5]通过模型试验验证了爆炸载荷作用下加筋板毁伤模式,并将每种模式根据载荷强弱和加筋板强度进行细分,但没有分析冲击波和气泡载荷的作用对结构的影响。王海坤^[5]利用非线性有限元程序 LS-DYNA,模拟计算

收稿日期:2018-09-06;修回日期:2018-10-15

作者简介:沈晓乐(1985—),男,硕士,工程师,主要从事水下爆炸冲击毁伤测量研究。

不同形式加筋板在水下接触爆炸荷载作用下的动力响应,分析认为加筋板具有分散爆炸冲击波的作用,加筋板抵抗爆炸冲击波冲击的能力更强。

本文通过实验研究了在冲击波和气泡载荷联合作用下加筋板结构的响应过程,并通过改变爆源相对位置分析其对结构的影响,对研究近距离爆炸冲击波和气泡载荷对结构的破坏有一定的借鉴意义。

1 试验设计

1) 载荷分析

装药在水下爆炸后,形成的爆炸产物对舰船结构的作用主要有两种:一种是水下爆炸冲击波;另一种是冲击波过后的气泡脉动压力。对于 TNT 装药冲击波能约占总能量的 53%,其他能量约占 47%,主要为气泡能^[6-7]。气泡半径 R 通常按下式估算:

$$R = 3.5 \times \left(\frac{W}{10.3 + H} \right)^{1/3} \quad (1)$$

式中: W 为 TNT 装药量, H 为爆源深度。

2) 试验设计及测点布置

爆源为 10 g TNT 球形装药,爆源位置与加筋板的几何中心对应。为充分考虑冲击波载荷与气泡脉动载荷对加筋板的作用,爆源与加筋板间距设置为 1 倍气泡半径。如图 1 所示的两种工况爆源深度均为水下 1 米,爆源到自由面的距离约为 3 倍气泡半径,以减小自由面对气泡载荷的影响,其中气泡半径按(1)式估算。工况 1 加筋板位于爆源上方 0.3 m;工况 2 加筋板位于爆源下方 0.3 m。

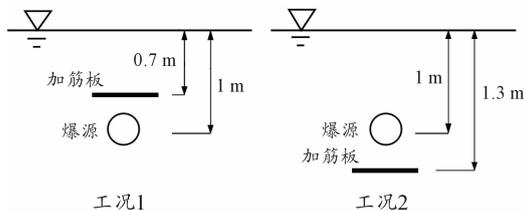


图 1 工况示意图

板长 2 m、宽 1.5 m,加筋板格 0.3 m × 0.5 m,加筋板厚度 2 mm,纵向加强筋采用角钢,为连续构件,腹板高 30 mm、厚 2 mm,面板宽 20 mm、厚 2 mm;横向加强筋采用扁钢代替,为间断构件,腹板高 20 mm,厚 2 mm;试验共布置 16 个测点,以记录在爆炸荷载作用下加筋板典型部位的应变响应,考虑到模型的对称性,只对模型的 1/4 进行测点布置,在个别对称测点设置验证测点,以验证相同位置的响应情况,如图 2 所示。

3) 试验记录仪器

电阻应变计:采用日本共和动态电阻应变计,测量桥路采用 1/4 桥,动态测量范围 0 ~ 10 000 $\mu\epsilon$,误差 $\pm 5\%$ 。

采集设备:NI 应变采集系统,采样频率为 20 kHz。

试验数据采集的情况如下:应变片传感器→电缆传输信号→NISCXI - 1314T 前端桥盒→NISCXI - 1520 应变输入模块→NIPXI - 6143 采集模块。

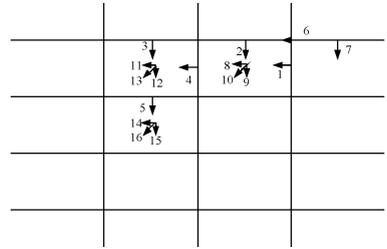


图 2 测点布置图

2 试验结果分析

在试验设计工况下,炸药在水下爆炸后爆轰产物首先产生向周围水介质辐射的冲击波压力,冲击波压力最先到达加筋板,并逐渐由板格中心向周围辐射。在这个过程中加筋板板格受冲击波压力作用产生瞬时的应变响应,见图 3 - 图 5。由于冲击波载荷的脉宽较短,对加筋板的作用类似于脉冲载荷,作用力消失后加筋板在周围水介质和自身的阻尼作用下做随机振动并逐步转化为接近于自身频率的振动并最终停止。随着爆轰产物向外运动并最终停止扩展,爆炸产生的气泡达到最大值并开始收缩。此时由于加筋板的存在,自由场状态的气泡中心的上升和收缩运动转变为向加筋板靠近同时携带高速水射流的收缩运动。由于气泡中心向加筋板靠近、甚至是直接接触,导致作用在结构上的气泡脉动压力大幅增加,同时气泡运动带来的水射流载荷也作用在结构上。从图 3 - 图 5 可以看出气泡和射流载荷联合作用使结构产生的瞬态应变响应幅值与冲击波产生的应变响应幅值在同一量级,并且响应的时间更长。

2.1 冲击波载荷作用与气泡载荷对结构的损伤分析

通过前文的分析认为在近距离水下爆炸荷载作用下,结构不仅会承受冲击波载荷作用,同时受到气泡脉动载荷以及气泡溃灭引起的射流的冲击作用。为了定量对比冲击波及气泡相关载荷对结构的损伤的影响,以工况 1 条件下 1 号测点为例,从图 3 中可以看出在冲击波作用下瞬态应变响应达到 1 647 $\mu\epsilon$,然后回到 379 $\mu\epsilon$,并在该值附近震荡;随着第一次气泡脉动载荷到达,结构瞬态应变达到 1 817 $\mu\epsilon$,经历一个阶段的震荡后最终塑性变形达到 1 594 $\mu\epsilon$ 。气泡载荷使结构的塑性变形提高了 1 215 $\mu\epsilon$,较冲击波阶段 379 $\mu\epsilon$ 的塑性变形更大,使得在该测点的整个响应过程中结构的塑性变形呈现明显的“阶梯”状。

测点 1 的应变响应作为爆炸荷载作用于结构的典型曲线,可以很好地表征结构的冲击响应过程。为更进一步量化冲击波和气泡载荷对结构响应的影 响表 1 和表 2 分别列出了所有测点的特征值。通过表 1 的特征值可以看出结构的

冲击波应变响应峰值远大于冲击波引起的结构塑性应变值,同样气泡载荷引起的应变瞬态响应峰值也远大于其引起的结构塑性应变值。以表1为例,排除个别测点不确定因素干扰,工况1中所有测点的冲击波作用瞬态应变响应均值1 646 $\mu\epsilon$ 远大于冲击波作用引起的塑性应变均值 153 $\mu\epsilon$,同样气泡载荷作用引起的瞬态应变响应均值 1 843 $\mu\epsilon$ 远大于其引起的塑性应变均值 308 $\mu\epsilon$ 。但是冲击波和气泡载荷引起的结构的瞬态应变响应均值和塑性应变均值相差不大。因此气泡载荷阶段对结构的整体塑性变形也有一定的贡献,可以认为在设计工况下气泡载荷可以使结构产生塑性变形,且对结构产生与冲击波载荷同等程度的损伤。

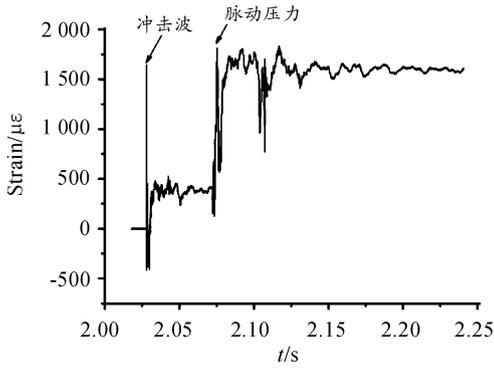


图3 工况1测点1应变响应曲线

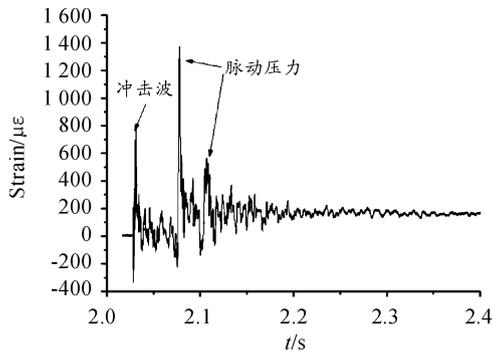


图4 工况1测点4应变响应曲线

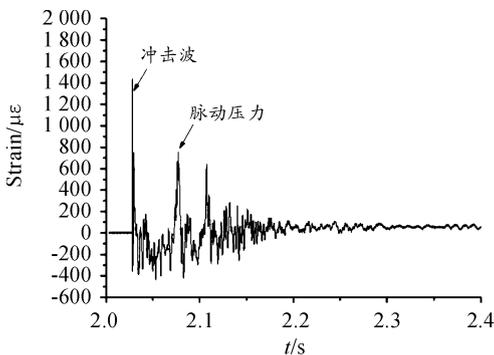


图5 工况1测点6应变响应曲线

表1 工况1各测点应变响应值

测点编号	冲击波峰值应变/ $\mu\epsilon$	塑性应变/ $\mu\epsilon$	气泡脉动应变/ $\mu\epsilon$	塑性变形/ $\mu\epsilon$
1	1 647	379	1 817	1 594
2	3 350	188	1 736	619
3	1 974	24	1 810	409
4	774	34	1 379	172
5	1 927	7	498	33
6	1 441	40	756	59
7	1 509	190	1 305	335
8	1 387	396	1 893	88
9	1 787	35	24 01	56
10	1 857	263	3 085	48
11	2 079	381	2 368	529
12	1 800	267	2 394	318
13	1 151	176	2 370	464
14	1 112	10	1 724	30
15	1 131	40	1 787	96
16	1 413	13	2 157	74
平均值	1 646	153	1 843	308

表2 工况2各测点应变响应值

测点编号	冲击波峰值应变	塑性应变	气泡脉动应变	塑性变形
1	1 551	471	929	368
2	3 775	1 247	2 400	1 160
3	1 763	264	2 038	112
4	1 491	92	1 256	25
5	1 000	53	213	48
6	1 259	66	606	21
7	3 942	840	3 039	708
8	2 708	247	1 638	21
9	2 715	135	2 120	63
10	3 101	12	2 287	173
11	1 758	21	2 304	140
12	1 883	113	2 416	147
13	1 565	18	2431	190
14	1 843	10	1 461	22
15	1 794	13	1 238	28
16	2 099	0	1591	0
平均值	2 140	225	1 748	202

2.2 加筋板不同测点应变响应频域分析

在水下爆炸试验中,冲击载荷幅值大,作用时间短,载荷的频率覆盖范围宽。加筋板受自身结构特征的影响,受冲击激励后会表现出自身固有的振动特性。

图6为加强筋上测点6和板格中心测点8的应变响应频域图,从图中可以看到加强筋上的测点8的频域响应存在明显两个响应峰值。由于结构及水介质阻尼作用,应变信号的优势频率主要集中在500 Hz以下,表现为中低频的特征,结构的高频响应不明显。加强筋并不直接承受冲击载荷,而是作为板材的支撑件,起到增强结构强度的作用。加强筋的响应更多地反映的是整个加筋板的整体振动特性。

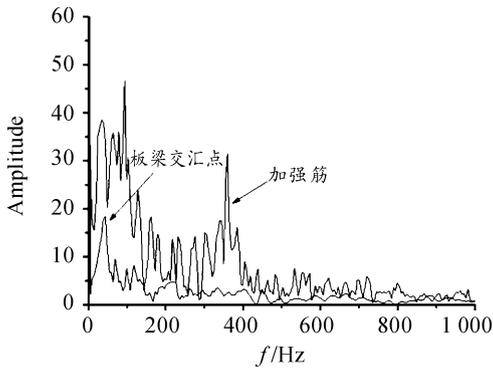


图6 加强筋与板梁交汇点测点应变响应频域曲线

表3列出了工况1中测点1、6、8三个测点相同方向上的前两阶振动优势频率。从表3可以看出不同测点的优势频率不尽相同。同一板格当中不同测点的优势频率成分也不同,局部测点更多地反映的是结构的局部振动响应特征;而纵向加强筋作为加筋板的强力构件能够更好地反映结构的整体振动特性。

表3 不同测点优势频率

	测点1	测点6	测点8
一阶频率	45	94	47
二阶频率	67.8	357	133

3 结论

1) 近场水下爆炸作用实验结果表明冲击波和气泡载荷作用使结构产生的应变响应幅值在同一量级,且气泡载荷作用下结构应变响应持续时间更长。

2) 加筋板上所有测点在接近一倍气泡半径爆距条件下,冲击波和气泡载荷引起的结构的瞬态应变响应均值相差不大,两种载荷均可以使结构产生塑性变形,且结构的损伤程度基本相同。

3) 同一板格当中不同测点的优势频率成分不同,局部测点更多地反映结构的局部冲击响应特征;而纵向加强筋作为加筋板的强力构件能够更好地反映结构的整体冲击响应特性。

参考文献:

- [1] 祝伟,刘敬喜.爆炸冲击载荷下加筋板塑性动力响应分析[J].船海工程,2011,40(6):28-30.
- [2] 邵建军,张永坤,赵红光.基于相似理论的炸药海中沉底爆炸能量计算[J].四川兵工学报,2015,36(6):124-127.
- [3] 牟金磊,朱锡,张振华,等.水下爆炸载荷作用下加筋板的毁伤模式[J].爆炸与冲击,2009,29(5):457-462.
- [4] 牟金磊,朱锡,张振华,等.水下接触爆炸作用下加筋板的动态响应分析[J].系统仿真学报,2007,19(2):257-260.
- [5] 牟金磊,朱锡,张振华.水下爆炸作用下加筋板结构响应的数值仿真研究[J].船海工程,2006(6):12-16.
- [6] 王海坤,刘建湖,潘建强.水下爆炸载荷作用下细长体圆柱壳结构鞭状响应[J].噪声与振动控制,2012,12(6):44-48.
- [7] 李海涛,朱锡.船体梁在近距爆炸冲击波作用下动态响应的相似律研究[J].振动与冲击,2010,29(9):28-32.
- [8] 邵建军,翟东民,侯代文,等.舰船模型水下爆炸应力应变试验研究[J].爆破工程,2012,18(2):6-8.

(责任编辑 周江川)