

水下近距爆炸作用下船体梁的动态响应特性^{*}

朱 锡, 李海涛, 牟金磊, 黄晓明

(海军工程大学船舶与动力学院, 湖北武汉 430033)

摘要:为研究舰船在水下近距爆炸作用下的结构响应及损伤模式,以相似准则为基础,设计了船体梁模型,选用4种不同能量结构的炸药,将其置于模型中部正下方爆炸,通过改变药量和爆距,实验研究了船体梁在近距爆炸作用下的动态响应特性。利用高速摄影技术观察了模型的整个运动过程,结合实验数据定量分析了结构的应变和加速度响应特性,比较了冲击波和气泡脉动对结构的损伤特点。研究发现:近距爆炸气泡脉动会使结构下方形成一个低压流区,该低压区的存在会使模型受到中垂弯矩作用,并可能使其发生中垂弯曲破坏;随着爆距的增大,爆炸能量与损伤效果之间的相关性变得明显;近距条件下,为了发挥爆炸气泡的最大破坏作用,爆距应该接近于最大气泡半径。

关键词:爆炸力学;水下近距爆炸;冲击波;气泡脉动;动态响应;实验研究

中图分类号: O383.1; U661.7

文献标识码: A

1 引言

在舰船遭受的所有水下爆炸攻击中,近距非接触爆炸的攻击形式最为普遍。在近距非接触爆炸条件下,爆炸冲击波和气泡脉动对舰船结构的冲击作用明显,结构往往在冲击波和气泡的联合作用下发生严重破坏。John 和 George 等^[1]对水下钢支撑圆柱结构在近距爆炸冲击作用下的动态响应特性进行了实验研究,分析发现:在近距爆炸情况下,由气泡脉动压力造成的结构变形比初始冲击波造成的变形要大,此时气泡的损伤作用占主导部分。国内李玉节等人对舰船在水下爆炸气泡作用下的鞭状运动响应开展了一定的研究工作^[2-3],但鞭状运动响应发生条件,多为中远距离爆炸。张阿漫^[4]利用数值方法对气泡近场作用下舰船整体的运动响应情况进行了模拟,发现在气泡脉动期间,舰船出现整体中垂弯曲破坏,结论与文献^[5]基本一致。

关于舰船在水下近距非接触爆炸作用下的损伤特性研究,由于其问题的复杂性,可获得的研究资料仍较少。为此,本工作以某型舰为原型,利用总纵弯曲强度相似的原则,设计了缩比船体梁模型,选用4种不同能量输出结构的炸药作为爆源,将其置于模型中部正下方爆炸,实验研究了船体梁在不同能量输出结构炸药作用下的损伤特性,分析了近距爆炸冲击波及气泡对舰船整体结构的损伤特点。

2 船体梁模型设计

以某型舰为原型,根据动力相似原则,综合考虑总纵弯曲强度相似及结构形状相似条件,以1:50的比例为主要缩比尺度,确定模型参数如下:长度为3.5 m,最大宽度为0.34 m,板厚为3 mm,模型吃水为0.1 m,排水量约57 kg,整个船体梁模型采用907钢加工制造,其弹性极限弯矩为154 kN·m。模型结构及尺寸如图1所示。

^{*} 收稿日期: 2009-09-28; 修回日期: 2009-10-25

基金项目: 国家“973”重大基础研究项目(51335020101)

作者简介: 朱 锡(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事船舶抗爆炸冲击及装甲防护技术研究。E-mail: zhuxi816@163.com

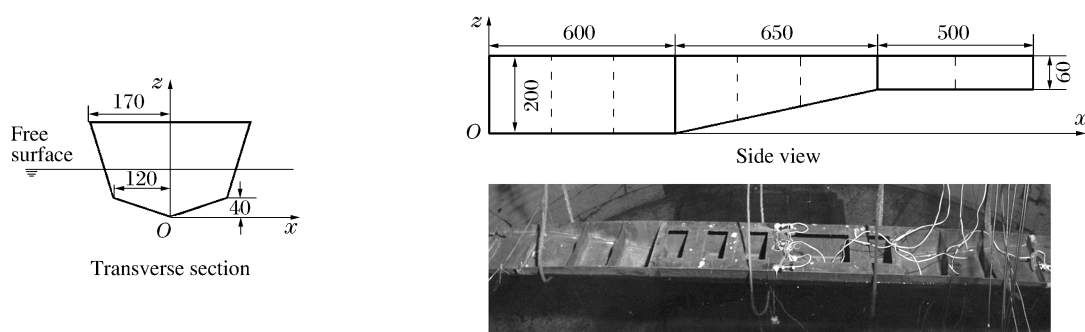


图1 船体梁模型结构及尺寸

Fig.1 Structure and dimensions of hull girder model

3 炸药输出能量确定

不同能量结构的炸药在水下爆炸过程中,主要以冲击波能和气泡能的形式对外施加载荷,并且对于不同的炸药结构组成,其冲击波能和气泡能的比例关系也不同。为了掌握不同炸药对结构模型的冲击毁伤特性,必须首先确定该种炸药的能量输出形式。单位炸药放出的总能量可用下式表示^[6]

$$e_t = K_f(\mu e_s + e_b) \quad (1)$$

式中: e_s 为比冲击波能; e_b 为比气泡能; μ 为冲击波衰减系数,一般认为只与炸药的爆轰压力有关^[7]; K_f 为装药形状系数,对于球形取 1.00,非球形取 1.02~1.10。

根据水下爆炸相似率,比冲击波能 e_s 为^[8]

$$e_s = \frac{4\pi R^2}{m_e \rho_f c_f} \int_0^{6.7\theta} p^2(t) dt \quad (2)$$

式中: R 为离开爆源的距离; m_e 为药量; ρ_f 为水的密度; c_f 为水中声速; θ 为冲击波衰减常数; $p(t)$ 为距爆源 R 处爆炸冲击波超压随时间变化的函数关系。对于炸药参数未知的情况,可根据实验测量得到的冲击波超压随时间变化的关系曲线,将其带入(2)式,得出炸药水下爆炸的冲击波能。

气泡能可用炸药在水下爆炸时,爆炸生成的气体产物克服静水压力而第一次膨胀达到最大时所做的功来度量。单位炸药的气泡能可表示为^[9]

$$e_b = 0.684 \frac{T_b^3 p_h^{5/2}}{m_e \rho_f^{3/2}}, \quad T_b = 0.380 \frac{m_e^{1/3}}{(1 + 0.1h)^{5/6}} \quad (3)$$

式中: h 是炸药深度; p_h 为炸药处的静水压力; T_b 为气泡第一次脉动周期。以上变量均采用国际单位制。

4 实验及实施

采用不同能量输出结构的炸药作为爆炸源,研究船体梁模型在这些不同能量输出结构作用下的损伤特性,进而确定不同比例冲击波能、气泡能输出炸药对船体梁整体运动响应的影响特性。实验中采用的不同能量输出结构的炸药主要有 TNT、RS211、G1、G3 等 4 种,其中 RS211、G1 和 G3 炸药为含铝高爆能非理想炸药,将这 4 种炸药置于船体梁中部正下方实施水下爆炸实验,通过改变药量或爆距,研究不同工况下的船体梁响应特性。

实验中主要采集自由场压力、结构应变及加速度数据,以具体分析爆炸冲击参数及结构响应。考虑到结构模型的对称性,实验中测量点布置在结构的一侧,其中应变测点 3 个,加速度测点 2 个,其中应变测点采用单向应变片进行测量,主要测量结构的纵向变形。应变测点 S_1 、加速度测点 A_1 布置于甲板上,应变测点 S_2 、 S_3 以及加速度测点 A_2 布置于模型底板,具体测点坐标为: $S_1(0, 0, 200)$, $S_2(600, 0, 0)$, $S_3(1250, 0, 140)$, $A_1(0, 0, 200)$, $A_2(1500, 0, 140)$,测点布置情况如图 2 所示。

整个爆炸实验在直径为 5 m、高为 8 m 的封闭圆柱形容器内完成。选用 4 种不同的能量输出结构

炸药作为爆源,将其置于船体梁模型中部正下方爆炸,其中 RS211、G1、G3 这 3 种炸药的固定药量为 55 g,仅改变爆距,而 TNT 炸药同时改变药量和爆距。实验时水深均为 2 m,具体实验工况见表 1。

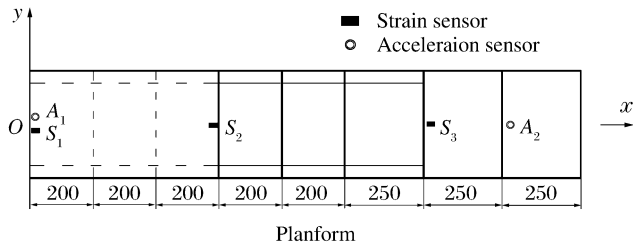


图 2 模型应变及加速度测点布置

Fig. 2 Arrangements of acceleration and strain sensors on the beam

表 1 实验工况

Table 1 Experimental cases

Case	Explosives	Weight/(g)	Stand-off/(m)	Case	Explosives	Weight/(g)	Stand-off/(m)
1	TNT	9	0.5	6	RS211	55	1.0
2	TNT	20	0.5	7	G1	55	0.5
3	TNT	55	0.5	8	G1	55	1.0
4	TNT	55	1.0	9	G3	55	0.5
5	RS211	55	0.5	10	G3	55	1.0

5 实验结果及分析

5.1 实验现象及结构损伤

图 3 为工况 1 中近场压力测点 P_1 处(测距 1.15 m)压力传感器获得的压力时程曲线,可以看出曲线存在 3 个明显的压力峰值,其中第 2 和第 3 个峰值为气泡两次脉动的辐射压力,3 个压力峰值分别为 7.53、1.31 和 0.387 MPa,间隔时间为 55.5 和 43.3 ms,可见气泡多次脉动的辐射压力逐渐减小,脉动频率加快。对于其它大药量工况,压力曲线仅存在一个脉动压力峰值,气泡在第一个脉动过程后即发生溃灭。分析所有工况实验数据发现,气泡第一次脉动压力峰值约为初始冲击波压力峰值的 10%~20%,但压力持续时间要比初始冲击波长很多,两者的冲量值基本相当。

所有工况条件下的气泡均向下运动,这与气泡运动理论预测的向上运动、发生射流的情况不一致。其可能原因是船体梁为自由漂浮的弹性体结构,当气泡膨胀时,周围流场推动模型向上运动,气泡膨胀到最大后开始收缩时,模型也随之向下运动,模型快速的下落过程改变了气泡所受到的上下作用力的平衡,从而导致气泡改变运动方向,转而向下运动。

5.2 模型运动及结构损伤

在冲击波持续时间内,未观察到船体梁明显的整体运动,而在气泡的膨胀收缩过程中,模型发生上下升降运动,爆距越小,该运动过程越明显。在 55 g 药量、0.5 m 爆距条件下,爆炸气泡基本与船体梁底

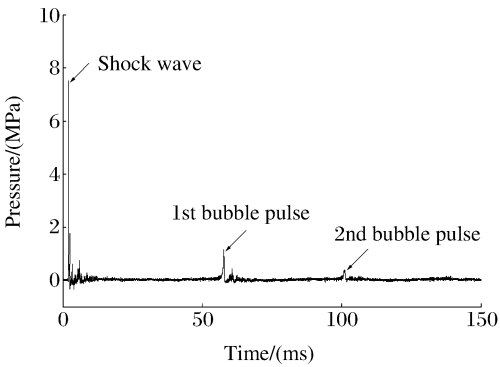


图 3 工况 1 中 P_1 压力测点的压力时程曲线

Fig. 3 Pressure history of sensor P_1 in experimental case 1

部接触,此时气泡受结构边界影响而无法满足球形脉动,当气泡收缩时,气泡与船体梁之间出现明显的锥形空化区,同时整个气泡向下出现环形溃灭,气泡崩溃后,锥形空化区也随之发生崩塌,最后形成作用于船体梁底部的高速水射流冲击。

水下爆炸实验后,观察船体梁模型的变形情况发现,其主要存在以下5种变形模式:(1)全弹性变形;(2)局部板格塑性变形;(3)舷侧局部撕裂、褶皱屈服;(4)端部弯曲折断;(5)甲板沿纵向整体开裂。

各工况下船体梁最终变形情况的统计见表2。由表2可以看出,在1.0 m爆距条件下,模型的结构响应主要表现为弹性变形或局部板格塑性。而爆距缩小到0.5 m时,船体梁均不同程度地出现了结构损伤及破坏,其原因除了爆距缩小致使初始峰压增大外,爆炸气泡与结构的近距离作用也是一个很大的因素。在4种不同能量结构的炸药中,G3表现出比较突出的结构整体损伤能力。

表2 各工况下结构损伤变形情况统计

Table 2 Statistics of damage modes in all test cases

Case	Modes	Case	Modes	Case	Modes	Case	Modes	Case	Modes
1	(1)	3	(2),(3)	5	(2),(4)	7	(2),(3)	9	(2),(4),(5)
2	(1)	4	(2)	6	(2)	8	(2)	10	(2),(4)

5.3 应变数据分析

5.3.1 典型应变曲线

在水下爆炸冲击波和气泡脉动作用下,船体梁模型会出现两次明显的应变响应峰值。下面以工况7(55 g G1炸药,0.5 m爆距)为例,具体分析应变曲线的变化规律。图4为得到的船体梁应变测点 S_1 处的应变时程曲线。由图4可以看出,结构应变响应可以大致分为4个阶段:(1)初始冲击波作用,造成结构瞬态响应峰值,如图中A点所示,表现为高频的局部应变响应,同时叠加整体结构应变;(2)冲击波作用完成后,结构响应很快衰减,梁开始进入自由振动,图中B点可看作冲击波造成的自由船体振动应变值,当气泡膨胀到最大阶段时,梁结构还受到因爆炸气泡的存在而引起的中垂弯矩作用,并形成结构整体中垂弯曲应变,如图中C点所示;(3)气泡崩溃形成的脉动压力造成明显的结构应变峰值点D,其大小与冲击波形成的应变相当,可见,气泡脉动压力造成的整体损伤作用明显;(4)气泡溃灭后,船体梁又进入低阶自由振动状态,并以一阶运动为主。

图5为得到的船体梁应变测点 S_2 处的应变时程曲线。可以看出, S_2 点的应变时程曲线具有与 S_1 点相同的变化规律,冲击波和气泡脉动形成的结构应变峰值基本相当,在气泡膨胀收缩阶段,测点应变处于中垂应变状态,且在气泡膨胀到最大阶段时,结构出现中垂应变峰值。图4、图5所示应变曲线的采样频率均为5 kHz,并经过数据滤波处理。测点 S_3 的应变曲线变化规律与 S_1 点、 S_2 点相似,此处省略分析。

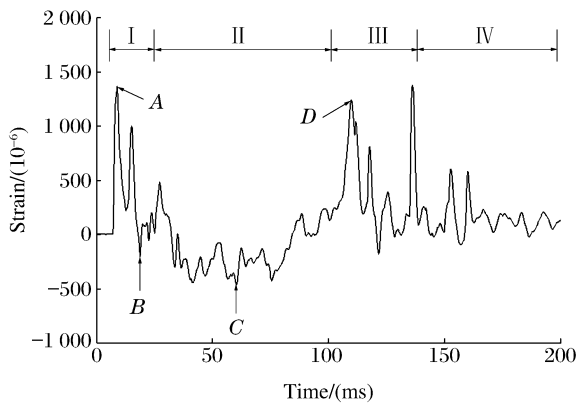


图4 工况7中 S_1 测点的应变时程曲线

Fig. 4 Strain-time history of sensor S_1 in case 7

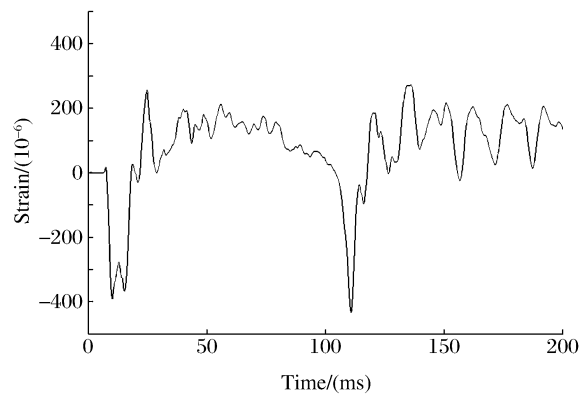


图5 工况7中 S_2 测点的应变时程曲线

Fig. 5 Strain-time history of sensor S_2 in case 7

表 3 列出了 4 种炸药在 0.5 m 和 1.0 m 爆距下爆炸、3 个应变测点在冲击波及气泡脉动阶段出现的应变峰值,其药量均为 55 g。

对于 4 种不同类型的炸药,虽然其气泡脉动的辐射压力只占冲击波压力的 10%~20%,但其形成的结构应变响应值却为冲击波应变响应值的 30%~91%,有时甚至超过冲击波形成的结构应变,可见气泡脉动对于结构的整体冲击作用明显,其损伤效果不容忽视。

表 3 不同工况下 3 个应变点的冲击波及气泡脉动响应峰值
Table 3 Peak values of strains due to shockwave and bubble impulsion in experimental cases

Explosives	Stand-off /(m)	$S_1/(10^{-6})$		$S_2/(10^{-6})$		$S_3/(10^{-6})$	
		Shock wave	Bubble pulse	Shock wave	Bubble pulse	Shock wave	Bubble pulse
TNT	0.5	1 674.5	853.3	−341.2	−275.0	2 730.9	852.1
	1.0	711.0	212.7	−303.2	−198.4	1 506.2	457.8
RS211	0.5	1 724.2	860.0	−504.8	−428.9	1 145.9	736.0
	1.0	937.2	354.9	−364.9	−225.3	894.7	876.1
G1	0.5	1 520.4	989.0	−784.4	−711.0	1 580.3	1 821.2
	1.0	645.0	347.6	−155.8	−143.7	789.4	557.3
G3	0.5	2 306.9	1 143.3	−670.8	−290.0	2 771.6	—
	1.0	1 039.7	378.2	−191.3	−151.9	1 646.5	451.6

以船体梁中部的应变点 S_1 为例,在同一爆距条件下, S_1 的两个应变响应峰值基本体现了 4 种炸药冲击波能和气泡能的大小关系。随着爆距的增大,结构应变响应减小,且它们之间存在非线性关系,即爆距增大一倍,应变响应减小不止一半。4 种炸药中,G3 炸药对结构形成的冲击应变响应最为显著。

在表 4 中给出了各炸药的爆炸能量与其形成的应变响应峰值之间的关系。其中 $\epsilon_s/\epsilon_{s,TNT}$ 表示非 TNT 炸药形成的冲击波应变峰值与 TNT 炸药形成的冲击波应变峰值之比,同样 $\epsilon_b/\epsilon_{b,TNT}$ 表示非 TNT 炸药形成的气泡脉动应变峰值与 TNT 炸药形成的气泡脉动应变峰值之比。表 4 中所给出的各炸药冲击波能和气泡能的数据,是根据实验获得的爆炸载荷参数计算得到的,并以 TNT 当量值表示。

表 4 炸药能量与应变值之间的相对关系
Table 4 Relation between detonation energy and strain

Explosives	$e_s/e_{s,TNT}$	$\epsilon_s/\epsilon_{s,TNT}$		$e_b/e_{b,TNT}$	$\epsilon_b/\epsilon_{b,TNT}$	
		$R=0.5\text{ m}$	$R=1.0\text{ m}$		$R=0.5\text{ m}$	$R=1.0\text{ m}$
TNT	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
RS211	1.52	1.03	1.32	1.65	1.01	1.67
G1	0.97	0.91	0.91	1.72	1.16	1.63
G3	1.71	1.38	1.46	2.13	1.34	1.78

比较 $\epsilon_s/\epsilon_{s,TNT}$ 值与炸药冲击波能的 TNT 当量值发现,在 0.5 m 爆距条件下,两者之间相差较大;而在 1.0 m 爆距下,两者之间存在一定的对应关系。这主要是由于在近距爆炸条件下,冲击强度大,结构应变强化效应导致冲击能量与应变响应之间的对应比例关系不明显,而适当增大爆距,结构应变强化效应减小,这种对应关系变得明显。同样, $\epsilon_b/\epsilon_{b,TNT}$ 值与炸药气泡能的 TNT 当量值之间也存在类似规律。在 0.5 m 爆距条件下,气泡脉动受到船体梁结构边界影响大,其脉动完整性被破坏,能量损失较大,致使脉动压力的冲击效果减小,而在 1.0 m 爆距下,气泡脉动过程较完整,气泡能主要转化为对结构的冲击作用,最终形成的应变比例与能量比例之间存在一定的对应关系。

由以上分析可知,在近距爆炸条件下,相比于 TNT 炸药,其它高能炸药在造成结构应变响应方面没有发挥最大效能,结构损伤效果相对减小,而随着爆距的增大,炸药能量与损伤效果之间的比例关系

明显;综合考虑炸药气泡能大小及损伤效果,为了发挥爆炸气泡的最大毁伤威力,爆距应该接近于气泡最大半径。

5.3.2 中垂弯曲应变

由图 4、图 5 给出的测点应变时程曲线可知,在气泡的第一个膨胀收缩过程中(两个应变峰值之间),测点的应变响应一直保持在压应变状态,说明在气泡脉动的第一个周期内,实验模型受到中垂弯矩作用,气泡的存在使模型产生了向中垂状态变化的趋势。在其它工况条件下,测点应变曲线也存在这种现象。

该现象形成的主要原因是:当气泡在船体梁模型中部正下方运动时,气泡的存在会使结构模型底部的流体区域出现一个低压区,其区内压力低于外部大气压,结构模型在此两种压力的联合作用下,受到一个中垂弯矩作用,使模型产生向中垂状态变化的趋势。由于该中垂弯矩的持续时间比冲击波及气泡脉动压力的持续时间要长得得多,因此它的存在对造成结构的整体低频运动响应作用明显。

表 5 列出了 4 种炸药在 0.5 m 和 1.0 m 爆距下爆炸,得到的测点 S_1 处由冲击波引起的自由振动应变值和由气泡引起的中垂应变值,爆炸药量均为 55 g。从表 5 中可以看出,药量一定,爆距越大,中垂响应过程越不明显;爆距一定,气泡能越大,船体梁模型会维持更长时间的中垂变形过程。同样,冲击波能增大,冲击波形成的自由振动弯矩也呈增大趋势。

由于所设计的结构模型以总纵强度相似为准则,爆炸气泡与模型低阶模态频率不吻合,因此两者的耦合运动效果没有体现出来,而模型所受到的压力差形成的中垂弯矩还不足以使结构发生中垂破坏。

表 5 不同工况下应变点 S_1 的冲击振动应变及中垂弯曲应变

Table 5 Vibration strain due to shockwave and bending strain due to bubble at sensor S_1

Explosives	Stand-off/(m)	Strain value of point C/(10^{-6})	Strain value of point B/(10^{-6})
TNT	0.5	-266.1	-329.4
	1.0	-245.1	-236.4
RS211	0.5	-272.8	-300.0
	1.0	-261.7	-135.2
G1	0.5	-302.5	-366.2
	1.0	-321.7	-270.5
G3	0.5	-303.9	-464.1
	1.0	—	—

5.4 加速度数据分析

图 6 给出了工况 7 条件下,船体梁模型 A_1 测点的加速度、速度及位移时程曲线。由图 6 可以看出,在冲击波作用阶段,船体梁模型的加速度响应十分显著,但最终造成的结构整体运动的位移却很小,结合高速摄影图片观察到的实验现象,初步判定冲击波对造成典型水面结构的整体运动作用并不明显,但对冲击环境的影响却十分显著,这主要是由冲击波的瞬时作用特性决定的。在气泡第一次脉动期间,船体梁模型会随着气泡的膨胀收缩而发生明显的上下升沉运动。

下面比较分析 4 种不同能量结构炸药在 0.5、1.0 m 距离下爆炸时,船体梁结构

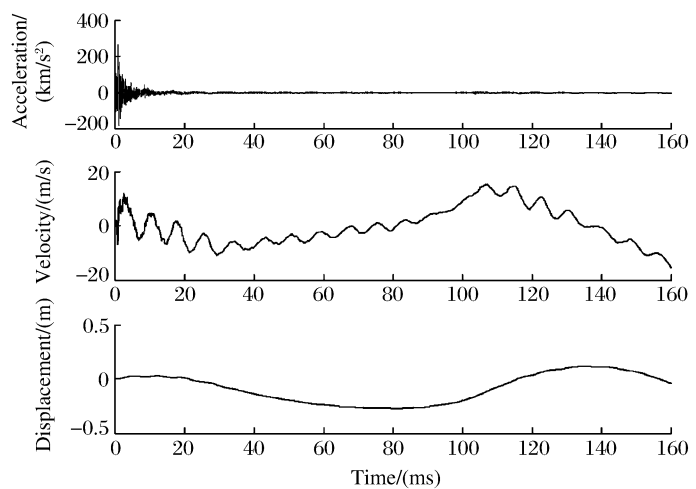


图 6 工况 7 中 A_1 测点的加速度、速度及位移时程曲线

Fig. 6 Time histories of acceleration, velocity and displacement of sensor A_1 in case 7

的加速度响应特性,炸药量均为 55 g。图 7 为冲击波和气泡脉动载荷作用下,测点 A_1 的加速度响应峰值比较情况。从图 7 中可以看出,由气泡脉动压力造成的结构加速度响应明显小于初始冲击波,从加速度峰值来看,不到冲击波形成峰值的 10%,可见冲击波对水面结构冲击环境的影响巨大,对于舰上人员及自振频率高的舰用设备而言,冲击作用明显;而气泡脉动在加速度冲击响应方面的作用明显要小,但对于低频共振设备而言,气泡脉动的冲击作用同样不可忽视。测点 A_2 的加速度响应规律与测点 A_1 相似,此处省略分析。

在实验条件下,对于同种炸药,药量一定,爆距的减小并不会明显增强冲击波形成的结构加速度响应,即在一定条件下,减小爆距对加强冲击环境的作用并不很明显。出现这种情况的主要原因是:爆距太小,冲击波对局部结构的变形毁伤作用增大,从而造成较大的能量损失,致使加速度响应幅值增加不明显。

同一爆距条件下,两个加速度测点的冲击波响应峰值基本体现了 4 种炸药冲击波能的大小关系,即冲击波越大的炸药,加速度测点的冲击波响应峰值越大,但相差并不明显,与各炸药冲击波能的差异相比,两者并不存在线性关系。

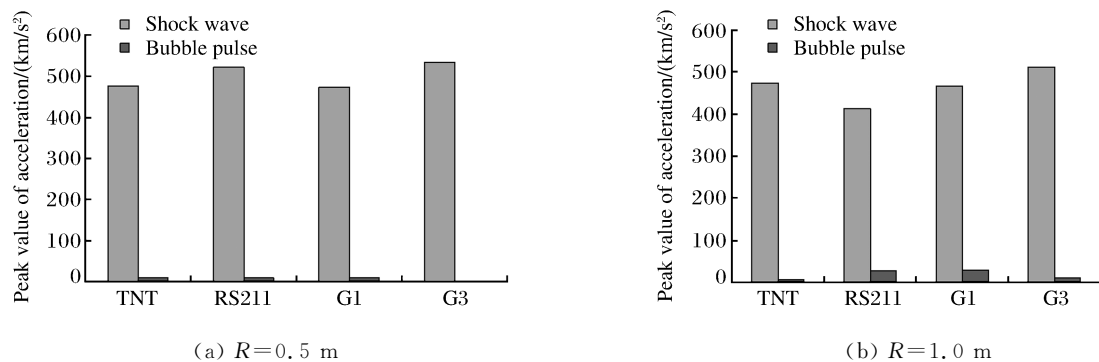


图 7 不同炸药爆炸引起的 A_1 测点的加速度响应峰值比较

Fig. 7 Peak values of acceleration due to different explosives detonation at sensor A_1

6 结 论

研究了 4 种不同能量结构炸药在船体梁中部正下方近距爆炸时,结构模型的动态运动特性及损伤模式,初步分析了近距爆炸条件下冲击波和气泡脉动对结构的不同破坏作用,得出如下主要结论:

(1) 冲击波和气泡脉动均会造成结构的应变响应峰值,其中气泡脉动形成的应变响应值可达冲击波应变响应值的 30%~91%,有时甚至超过冲击波形成的结构应变,可见气泡脉动对于结构的冲击作用明显,其整体损伤效果不容忽视。

(2) 在近距爆炸条件下,相比于 TNT 炸药,其它炸药在造成结构应变响应方面没有发挥最大效能,结构损伤效果相对减小,而随着爆距的增大,炸药能量与损伤效果之间的比例关系明显。

(3) 同一爆距条件下,加速度测点的冲击波响应峰值基本体现了 4 种炸药冲击波能的大小关系,但峰值差异并不明显,与各炸药冲击波能的差异相比,两者并不存在线性关系;气泡脉动压力造成的结构加速度响应明显小于初始冲击波,不到冲击波形成峰值的 10%。

(4) 当爆炸气泡在船体梁模型中部正下方运动时,气泡的存在会使模型受到中垂弯矩作用,使其向中垂状态变化。在相同爆距和相同药量条件下,炸药气泡能越大,船体梁模型的中垂变形过程越长,结构发生整体中垂弯曲的可能性越大。

References:

- [1] John M B, George Y, Paul J S. Time-Resolved Measurement of the Deformation of Submerged Cylinders Subjected to Loading from a Nearby Explosion [J]. Int J Impact Eng, 2000, 24: 875-890.

- [2] Li Y J, Zhang X C, Wu Y S, et al. Whipping Response of Ship Hull Induced by Underwater Explosion Bubble [J]. Shipbuilding of China, 2001, 42(3): 1-7. (in Chinese)
李玉节, 张孝慈, 吴有生, 等. 水下爆炸气泡激起的船体鞭状运动 [J]. 中国造船, 2001, 42(3): 1-7.
- [3] Li Y J, Pan J Q, Li G H, et al. Experimental Study of Ship Whipping Induced by Underwater Explosion Bubble [J]. J Ship Mech, 2001, 5(6): 75-83.
- [4] Zhang A M, Yao X L. Interaction of Underwater Explosion Bubble with Complex Elastic-Plastic Structure [J]. Appl Math Mech, 2008, 29(1): 81-92. (in Chinese)
张阿漫, 姚熊亮. 水下爆炸气泡与复杂弹塑性结构的相互作用研究 [J]. 应用数学和力学, 2008, 29(1): 81-92.
- [5] Li H T, Zhu X, Huang X M, et al. An Experimental Study on the Dynamic Response of Ship-Like Model Subjected to Underwater Explosion Bubble Located Closely [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(8): 773-778. (in Chinese)
李海涛, 朱锡, 黄晓明, 等. 近场脉动气泡作用下船体梁模型动响应试验研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(8): 773-778.
- [6] Rao G N, Chen W H, Hu Y T, et al. Experimental Study on Underwater Energy Output Characteristics of Different Explosives [J]. Explosive Materials, 2007, 36(1): 9-11. (in Chinese)
饶国宁, 陈网桦, 胡毅亭, 等. 不同炸药水下能量输出特性的实验研究 [J]. 爆破器材, 2007, 36(1): 9-11.
- [7] Zhang Z H, Zhu X, Bai X F. The Study on Numerical Simulation of Underwater Blast Wave [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(2): 182-188. (in Chinese)
张振华, 朱 锡, 白雪飞. 水下爆炸冲击波的数值模拟研究 [J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(2): 182-188.
- [8] Zhou L, Xu S H, Xu G G. Research on Energy Output Characteristics for Underwater Explosion of Explosives [J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(2): 235-238. (in Chinese)
周 霖, 徐少辉, 徐更光. 炸药水下爆炸能量输出特性研究 [J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 235-238.
- [9] Ding C X, Cui Y J. Determination of Intrinsic Constants of Bubble Energy with Least Square Method [J]. Explosive Materials, 1994, 23(3): 1-7. (in Chinese)
丁长兴, 崔应娟. 用最小二乘法求气泡能的固有常数 [J]. 爆破器材, 1994, 23(3): 1-7.

Dynamic Response Characteristics of Ship-Like Beam Subjected to Underwater Explosion in Near Field

ZHU Xi, LI Hai-Tao, MU Jin-Lei, HUANG Xiao-Ming

(College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To study dynamic response and overall damage modes of warship subjected to underwater explosion in near field, a ship-like model was designed based on similarity criterion. The dynamic response was investigated by changing stand-off and weight of explosive in experiments where four kinds of explosives were located closely under the mid-span of the hull girder. In experiments, high-speed photography was applied to obtain the girder's movement process. Simultaneously, the data of strain and acceleration was attained to make a detail analysis on how the object reacts against shock wave and bubble. Experimental results show that there exists a low-pressure fluid zone below the girder due to bubble pulse in near field. The low-pressure area makes the girder undergo a vertical bending moment and possibly suffer an overall bending damage. With the increase of stand-off, the relevance of explosion energy and damage effect gradually increases. If stand-off is close to the maximum bubble radius, the bubble will exert a maximum damage effect on the structure.

Key words: explosion mechanics; underwater nearby explosion; shock wave; bubble pulse; dynamic response; experimental study