文章编号：1000-5773(2012)05-0494-07

水下爆炸气泡作用下梁中垂损伤及流场变化特性*

李海涛，朱石坚，刁爱民，何其伟

（海军工程大学科研部，湖北武汉 430033）

摘要：以水面箱形梁模型为研究对象，利用数值计算和实验验证相结合的方法，对梁在水下爆炸气泡作用下的中垂损伤特点进行了研究，确定了中垂弯曲载荷的形成原因，深入分析了气泡运动时周围流场的变化特性；研究了爆炸参数对梁响应特性的影响，初步提出了梁发生中垂损伤的条件。研究发现：在爆炸气泡收缩阶段，结构和气泡之间的流场形成一个“凹”型分布的低压区，导致梁发生中垂弯曲变形；当爆径比参数 λ 满足 $1<\lambda<2.5$ 时，爆炸气泡对梁结构的中垂损伤作用明显，且 λ 越小，等量炸药对梁的整体损伤作用越大。

关键词：水下爆炸；气泡脉动；流场特性；损伤模式；自由梁

中图分类号：O383；U661.7 **文献标识码**：A

1 引 言

水下爆炸气泡对舰船的整体损伤作用受到越来越多的关注。就中远场水下爆炸而言，当爆炸气泡的脉动频率与舰船低阶运动频率吻合时，两者的耦合作用将激起舰船的鞭状运动响应[1-3]。在水下近场爆炸条件下，爆炸气泡受到复杂结构及流场边界的影响，产生其它的载荷形式，例如射流现象[4-5]。近年来，研究人员在对水下近场爆炸作用下自由梁响应特性进行研究时，发现了一些新的实验现象，例如在近场爆炸气泡作用下，箱形梁发生中垂弯曲破坏[6]，这一损伤模式在以往的研究中尚未提及。通常，人们认为爆炸气泡运动只会造成结构的中拱弯曲变形，而实验得到的梁中垂损伤模式促使我们进一步研究水下近场爆炸气泡对舰船结构的损伤作用。

本研究以箱形梁模型为研究对象，利用数值计算方法研究水下近场爆炸气泡作用下自由梁的中垂损伤特点，确定中垂弯曲载荷的形成原因，深入分析气泡运动时周围流场的变化特性；研究不同爆炸工况对梁动态响应特性的影响，初步提出梁发生中垂损伤或鞭状运动的条件。

2 数值模型及计算方法

图 1(a)给出了箱形梁模型的结构及尺寸，模型长 2.8 m，宽 0.3 m，高 0.08 m，横隔壁间距 0.4 m，模型板厚均为 3 mm，材料采用 Q235A 钢。为了验证数值仿真方法的合理性，按该模型尺寸制作了实体结构模型。通过有限元软件 Abaqus 计算得到箱形梁模型的一阶理论湿模态频率为 24.8 Hz，实验测得梁模型的一阶湿模态频率为 21.4 Hz。

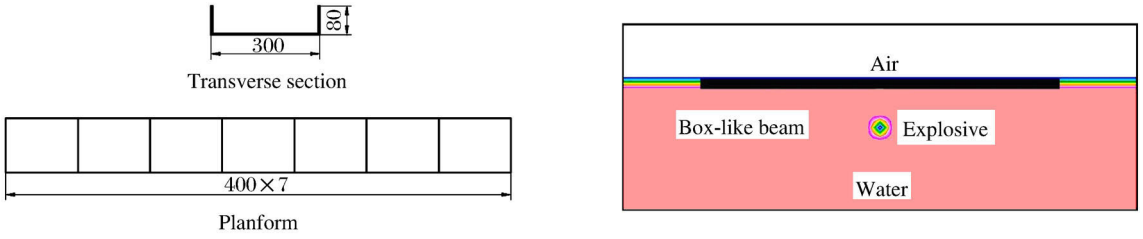
数值计算分析主要基于通用有限元分析软件 MSC.Dytran 进行，图 1(b)为整个计算模型。梁模型结构简单、规则，利用四边形板壳单元划分梁结构，单元最大尺寸 0.08 m。整个流域为 4 m×3 m×2 m

* **收稿日期**：2010-11-22；**修回日期**：2011-09-28

基金项目：国家自然科学基金(51109216)；国家“973”重大基础研究项目(51335020101)

作者简介：李海涛(1979—)，男，博士，讲师，主要从事舰船结构抗爆抗冲击研究. E-mail：navy_lht@163.com

的长方体;利用六面体欧拉单元划分流场,同时考虑计算模型的运算精度和效率,遵循流体单元尺寸不大于结构单元尺寸的原则,确定流体单元尺寸为 0.05 m。空气域高 0.5 m,水域深 2.5 m,其中空气域设为流入、流出边界,水域四周设为封闭边界,将 TNT 炸药置于箱形梁中部正下方爆炸。在近自由水面条件下,5 g TNT 药量形成的气泡脉动频率约 20 Hz,与计算模型的一阶湿频率相近,因此本研究将其作为主要计算药量值,并选取 0.3、0.5 和 1.0 m 3 种爆距进行数值计算及实验研究。



(a) Structure of beam　　(b) Numerical analysis model

图 1　箱形梁结构及数值计算模型

Fig. 1　Structure of beam and numerical analysis model

假设炸药在化学爆轰过程中没有质量损失,将瞬态爆炸的炸药作为高压气团处理,忽略气团与周围水介质的热传递损失,将其看作等熵膨胀过程,按理想气体处理[7]。通过建立气、液多欧拉流体单元,来模拟水下爆炸气泡的运动过程。通过设置封闭的耦合面,将梁和外部流场联系起来,传递能量及力的作用。随着爆炸气泡的膨胀收缩,自由梁和流场边界均随之发生运动,并保持一定的相互关系。计算时考虑重力因素及材料的应变率强化效应。箱形梁为低碳钢制造,计算过程中考虑塑性变形,设置其弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7 800 kg/m^3,静态屈服极限为 250 MPa,最大塑性应变为 0.25。计算中应变率强化模型采用 Cowper-Symonds 模型。

3　方法有效性验证

为验证数值计算方法的合理性,进行了相应的水下爆炸实验研究[6]。实验工况与计算工况一致,具体为:5 g TNT 药量,爆距分别为 0.3、0.5 和 1.0 m。

各实验工况下爆炸气泡第一次脉动频率及箱形梁总体响应情况见表 1,其中参数 R 和 λ 分别表示爆距及爆径比,$\lambda=R/r_{max}$。最大气泡半径 r_{max} 和第一次气泡脉动频率由文献[8]中相应公式计算得到。

表 1　气泡参数及结构响应

Table 1　Bubble parameters and beam responses

No.	R/(m)	λ	The first frequency of bubble oscillation/(Hz)		Beam's responses
			Calculation	Experiment	
1	0.3	1.11	21.3	20.8	Sagging damage with a plastic hinge, and central hull sidewalls buckling
2	0.5	1.89	20.4	21.1	Slight sagging damage with central hull sidewalls buckling
3	1.0	3.83	20.0	21.9	Whipping response

分析实验和计算结果发现:药量一定,随着爆距的缩小,箱形梁的响应模式由鞭状运动转化为中垂塑性弯曲破坏。图 2 给出了 0.3 m 爆距工况下梁模型的结构损伤图。该工况下,在气泡膨胀的初始阶段,梁中部存在应力集中,但未出现明显的整体变形;随着气泡的膨胀,梁发生一定的中拱弯曲变形,约 15 ms 时,其中部的弹性运动位移达到 3.5 cm,此时梁的舷侧部分存在较大的结构应力;当气泡膨胀到最大后,梁结构随着气泡的收缩而回复到水平状态,并进一步向中垂状态变化;约 30 ms 时,梁出现一定

的中垂弯曲变形，舷侧部分产生明显的应力集中；当气泡收缩到最小时，梁的中垂变形达到最大值，出现整体弯曲破坏，同时舷侧产生明显的褶皱屈服。

图 3 为 0.3 m 爆距条件下，箱形梁中垂塑性弯曲变形量的计算值和实验值比较，其中横坐标参数 L 为梁半长，纵坐标 w_b 为中垂塑性变形量。该工况下，梁中部出现一个塑性铰，其最大塑性变形约 13 cm，数值计算误差为 4.5%，可见数值方法对于预报梁结构的最终塑性变形具有较好的精度。

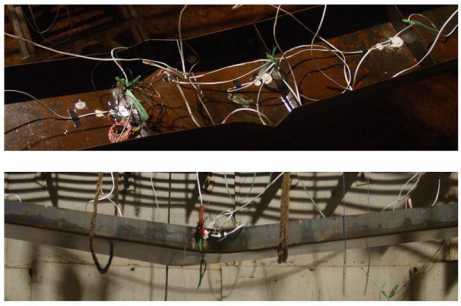


图 2 箱形梁中垂弯曲破坏(R=0.3 m)

Fig. 2 Sagging damage mode of box-like beam (R=0.3 m)

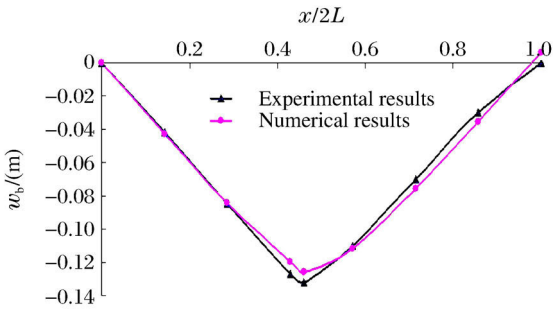


图 3 箱形梁中垂弯曲变形量的计算值和实验值比较

Fig. 3 Comparison between numerical and experimental results of final deformation

4 分析及讨论

4.1 流体压力场分布特性

水下爆炸发生前，箱形梁漂浮于水面，外部大气压力和流体的静水压力相等，梁结构保持平衡状态。当爆炸发生后，非接触爆炸气泡脉动将改变流体的压力分布。当气泡运动致使梁中部下方流体的压力减小时，大气压力占主导部分，从而使梁受到垂向弯曲载荷的作用。当该载荷形成的弯矩超过结构的极限弯矩时，结构发生中垂弯曲破坏。结合实验现象及数据发现，箱形梁在气泡膨胀到最大直至收缩的时间段内，梁结构中部处于中垂应力状态，可见在此时间段内梁中部下方流体存在压力降低过程，导致梁受到中垂弯矩作用。

数值计算结果证明，在气泡收缩过程中，梁中部下方流体的确存在低压区。图 4 为 0.3 m 爆距时整个流场的压力分布情况。在气泡膨胀初期，高压气团的存在使梁中部的流场压力较高，梁中部受到高压流体的作用；15 ms 时刻，气泡基本膨胀到最大，此时箱形梁底部开始出现一个明显的低压区，其压力值约为 51.3 kPa；30 ms 时刻，气泡进入收缩阶段，低压区压力值减小为 45.3 kPa，整个低压区范围变化不大；45 ms 时刻，气泡基本收缩到最小，低压区消失。在气泡从膨胀到最大至收缩到最小这一阶段，结构边界和气泡之间的流体出现一个低压区，该低压区在气泡收缩前期出现一个极值，随着收缩的发展，流体压力值逐步增大。

从梁底部流场压力分布特性还可以看出：在气泡膨胀初期，流场压力是对称的；当气泡膨胀到15 ms 时，流场压力已不对称；随着气泡的收缩，流场压力不对称的情况进一步加剧。发生这种现象的原因是：气-液-固三相耦合及相互之间的边界运动，改变了流体压力场的分布，特别是气泡收缩可能造成梁底部的流体形成空化效应，导致结构受力状态发生变化，最终造成结构变形的不对称性，从而出现图 3 所示箱形梁最大弯曲变形不在梁中点的现象。具体原因还需要进行深入研究。

图 5 为 0.3 m 爆距下，箱形梁中部正下方 0.1 m 处流场测点的压力时程曲线。可以看出，初始压力峰值快速衰减后，测点处压力值进一步减小，当气泡膨胀到最大时，该点压力已明显低于大气压力(简称为负压状态)；气泡开始快速收缩后，测点处的流场压力基本降为零，且持续一段时间；约 32 ms 时刻，箱形梁结构向下运动到该流场测点，流场压力出现瞬态峰值，此时的压力数据已不可信。由以上压力时程曲线可知，梁结构的负压状态能够持续较长时间，细长型梁结构在持续负压力作用下发生整体弯曲变形的可能性增大。

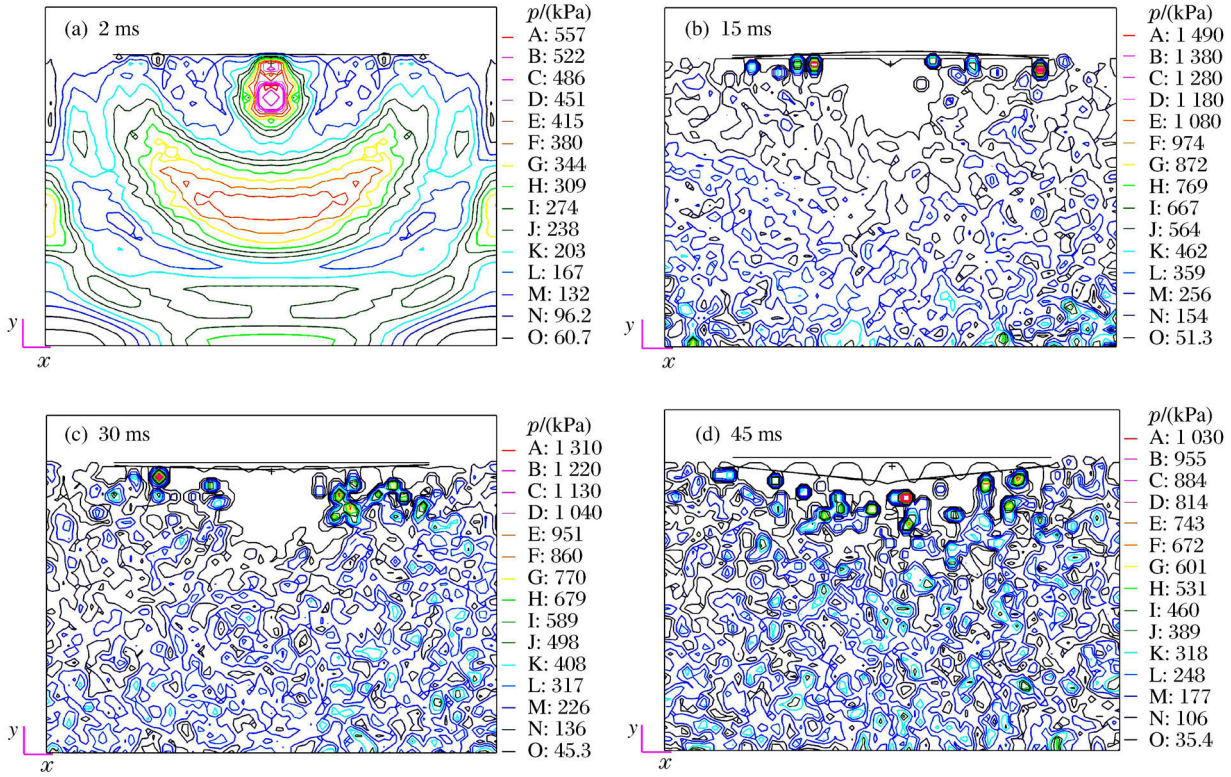


图 4　箱形梁底部压力场的分布特性(R=0.3 m)

Fig. 4　Pressure distribution of fluid field under the beam (R=0.3 m)

图 6 给出了 0.3 和 0.5 m 两种近场爆距条件下，梁正下方流体压力场沿梁长方向的分布情况。所选分析时段为结构中垂应变峰值出现阶段，也为气泡初始收缩阶段。从图 6 可以看出，梁中部区域流体压力偏低，两端压力偏高，整个压力曲线呈现“凹”型分布；随着爆距的减小，压力区作用范围增大。0.3 m 爆距下，26 ms 时低压区长度约为最大气泡半径的 3.2 倍，占整个梁长的 1/3；而 0.5 m 爆距下，27 ms 时低压区长度约为最大气泡半径的 2.3 倍，约占整个梁长的 1/5。随着气泡的收缩，低压区逐步缩小，0.3 m 爆距下，30 ms 时刻低压区长度约占整个梁长的 1/4，而在 0.5 m 爆距下，31 ms 时刻低压区长度约占整个梁长的 1/7；0.3 m 爆距下，低压区作用长度基本保持在梁长的 1/4～1/3 之间，梁最终发生中垂弯曲破坏，而 0.5 m 爆距下，低压区作用长度保持在梁长的 1/7～1/5 之间，最后梁舷侧出现褶皱屈服，整体中垂弯曲变形偏小。

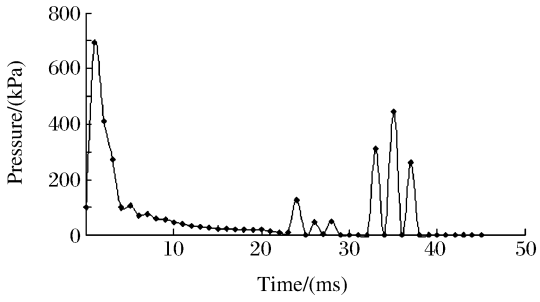


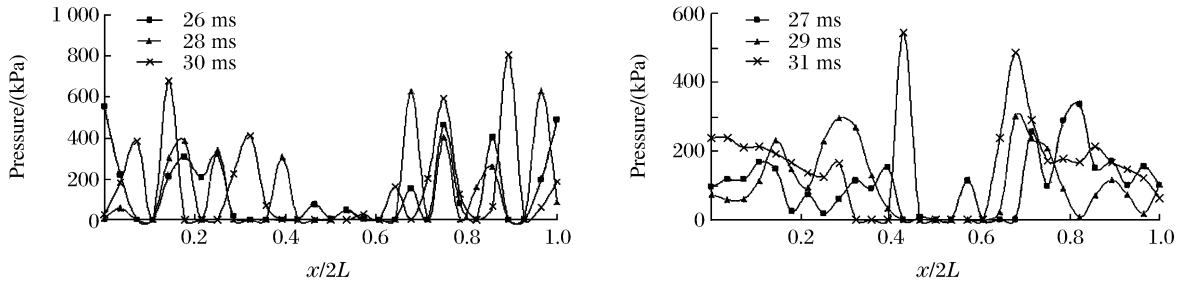
图 5　梁中部下方 0.1 m 处流场测点的压力时程曲线(R=0.3 m)

Fig. 5　Pressure-time history of point located at 0.1 m below beam midpoint (R=0.3 m)

为了确定爆距和药量对低压区范围的影响，以 0.3、0.5 和 0.7 m 为基本爆距，通过改变药量，以确定爆径比参数 λ 变化对低压区作用范围的影响。图 7 给出了 3 种爆距下，爆径比 λ 与气泡形成的低压区相对长度 $L_p/2r_{max}$ 之间的关系曲线，其中 L_p 表征梁上低压区作用长度。从图 7 可以看出，随着 λ 的增大，低压区相对长度 $L_p/2r_{max}$ 表现出先快速减小、后缓慢减小的过程。对于本研究所选计算工况而

言，爆距越小，爆炸气泡形成低压区的能力相对越高；当爆距为 0.3 m 时，气泡形成的低压区长度基本超过气泡直径，且爆径比 $\lambda=1.06$ 时，所形成的低压区长度达到气泡最大直径的 1.6 倍；随着爆距的增大，等药量爆炸气泡形成低压区的能力降低；在 3 种爆距条件下，约当 $\lambda>2$ 时，爆炸气泡形成的低压区长度小于或等于气泡直径。

综合以上分析：当炸药在梁结构下方近距离爆炸时，在爆炸气泡膨胀到最大直至收缩到最小这一时段，结构与气泡之间的流场形成一个“凹”型分布的低压区；流场低压区范围在气泡收缩前期出现极大值，随着收缩的进行，低压区范围快速减小；低压区在梁上的作用范围随着爆径比的增大而减小，当爆径比接近 1 时，低压区范围相对较大，形成中垂弯曲破坏的能力较强。



(a) $R=0.3$ m (b) $R=0.5$ m

图 6 箱形梁正下方流场压力沿梁长的分布情况

Fig. 6 Pressure distribution of fluid field under beam along the longitude of beam

4.2 梁运动响应特性

选取 0.3、0.5 和 0.7 m 为基本爆距，通过改变药量，确定不同爆距下爆径比 λ 的变化对结构变形的影响规律，并确定流场低压区作用长度与梁中垂变形量之间的关系。引入参数 w_b/L，用以表征梁的相对中垂塑性变形。图 8 给出了不同爆距下，爆径比 λ 与参数 w_b/L 之间的关系曲线。爆距一定，λ 越小，中垂塑性变形 w_b 越大，爆炸气泡对梁的中垂损伤作用越明显；当 λ 减小到一定值时，最终塑性变形增大的趋势减缓，爆径比对梁变形的影响减小，趋于极限值。在所计算的工况中，当 $\lambda>2.5$ 时，不同爆距下结构的最终塑性变形相差不大，且梁整体中垂弯曲变形也不明显，可认为此时爆炸气泡不满足近距条件，对结构不造成整体塑性损伤。在爆炸气泡与结构非接触条件下，即 $\lambda>1$ 时，尽可能小的爆径比能够极大地提高等量炸药的结构损伤效果。

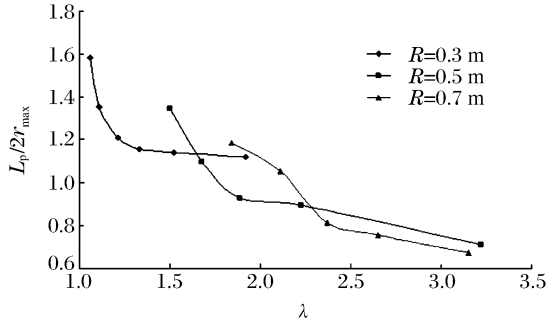


图 7 爆径比 λ 对低压区长度的影响

Fig. 7 Effect of λ on fluid low-pressure range

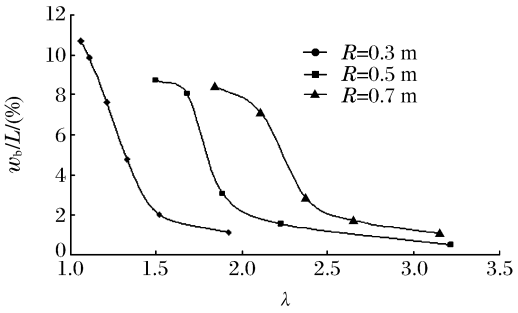


图 8 爆径比 λ 的变化对中垂塑性变形的影响

Fig. 8 Effect of λ on final deformation of beam

图 9 给出了不同爆距下,气泡形成的低压区相对长度参数 $L_p/2L$ 与梁相对弯曲变形参数 w_b/L 之间的关系曲线。从图 9 可以看出,随着 $L_p/2L$ 值的增大,梁的塑性变形量表现出先缓慢增大、再快速增大、又缓慢增大的变化过程。当 $L_p/2L<0.15$ 时,气泡形成的低压区较小,造成梁整体塑性变形的能力较弱;当 $0.15<L_p/2L<0.25$ 时,随着低压区长度的增大,结构变形呈现快速增大过程,此时梁处于响应敏感阶段;当 $0.25<L_p/2L<0.35$ 时,结构塑性变形增加缓慢。综合考虑爆炸强度和结构变形等因素,认为当低压区长度达到梁长的 1/4 时,损伤效率最高。相对而言,减小爆距比增大药量能获得更好的损伤效果。

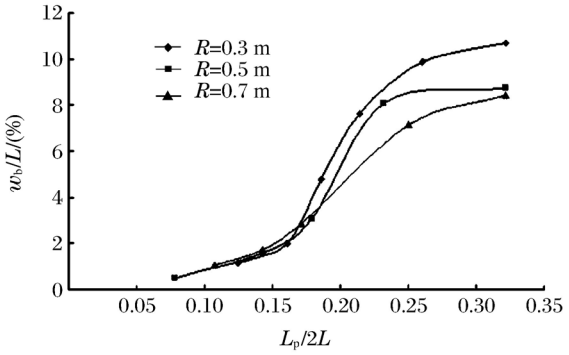


图 9　低压区长度的变化对中垂塑性变形的影响

Fig. 9　Effect of low-pressure range on final deformation

5　结　论

在箱形梁水下爆炸实验的基础上,利用数值计算方法研究了水下近场爆炸气泡作用下梁的中垂损伤模式,分析了气泡运动过程中流体压力场的变化特性,确定了不同爆炸条件下梁整体运动的响应特点,得出如下主要结论。

(1) 当近距爆炸气泡在梁结构下方收缩运动时,结构和气泡之间的流场将形成一个“凹”型分布的低压区,其低压区范围随着气泡的收缩而快速减小;在气泡与结构非接触条件下,当爆径比 λ 接近 1 时,低压区作用范围相对最大,而随着爆径比的增大,该作用范围逐步缩小。

(2) 当爆径比 λ 满足 $1<\lambda<2.5$ 时,爆炸气泡对梁结构的中垂损伤作用明显,并且爆径比越小,等量炸药对梁的中垂损伤效果越好;综合考虑爆炸强度和结构变形等因素,认为当气泡形成的低压区长度达到梁长的 1/4 时,对结构的损伤效率最大。

References:

[1] Li Y J, Pan J Q, Li G H, et al. Experimental study of ship whipping induced by underwater explosive bubble [J]. J Ship Mech, 2001, 5(6): 75-83.

[2] Shin Y S. Ship shock modeling and simulation for far-field underwater explosion [J]. Comput Struct, 2004, 82: 2211-2219.

[3] Klaseboer E, Khoo B C, Hung K C. Dynamics of an oscillating bubble near a floating structure [J]. J Fluids Struct, 2005, 21: 395-412.

[4] Klaseboer E, Hung K C, Wang C, et al. Experimental and numerical investigation of the dynamics of an underwater explosion bubble near a resilient/rigid structure [J]. J Fluid Mech, 2005, 537: 387-413.

[5] Zhang A M, Yao X L, Li J. The interaction of an underwater explosion bubble and an elastic-plastic structure [J]. Appl Ocean Res, 2008, 30(3): 159-171.

[6] Li H T, Zhu X, Zhao X L, et al. Study on integral damage modes of box-like beam subjected to underwater closely located non-contact explosion [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(3): 158-161. (in Chinese)
李海涛,朱　锡,赵小龙,等. 箱形梁在水下近距非接触爆炸作用下的整体毁伤研究 [J]. 振动与冲击, 2010, 29(3): 158-161.

[7] Li H T, Zhu X, Zhang Z H, et al. Numerical simulation study of pulsation dynamics of underwater explosion bubble located under elastoplastic plane [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(14): 4532-4535. (in Chinese)
李海涛,朱　锡,张振华,等. 弹塑性边界下水下爆炸气泡动态特性的数值仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2009,

21(14):4532-4535.

[8] Zhu X, Mu J L, Hong J B, et al. Experimental study of characters of bubble impulsion induced by underwater explosions [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(4): 365-368. (in Chinese)
朱 锡, 牟金磊, 洪江波, 等. 水下爆炸气泡脉动特性的试验研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(4): 365-368.

Characteristics of Flow-Field and Sagging Damage of Free-Free Beam Subjected to Underwater Explosion Bubbles

LI Hai-Tao, ZHU Shi-Jian, DIAO Ai-Min, HE Qi-Wei

(*Office of Research & Development, Naval University of Engineering, Wuhan* 430033, *China*)

Abstract: In order to probe into the damage mode and its mechanisms, a box-like beam was designed, and numerical analysis and experimental verification were carried out. In the discussions, how vertical bending load forms was investigated, and the properties of flow-field were analyzed in details when explosion bubble oscillates, how explosion parameters affect the dynamics of beams was attained, and the basic condition for beam sagging damage was initially proposed. The results show that there exists a low-pressure zone like a "concave" in the fluid between beam and explosion bubble when the bubble contracts in the near-field, and the low-pressure field causes the sagging damage. If the parameter of λ, the ratio of stand-off to maximum bubble radius, meets $1<\lambda<2.5$, explosion bubble will possibly cause beams damage into sagging condition. The smaller the value of parameter λ, the greater the impact damage.

Key words: underwater explosion; bubble oscillation; flow-field characters; damage mode; free-free beam