

潜艇典型结构在爆炸冲击载荷作用下 开裂判据的试验研究^{*}

张振华, 朱 锡, 刘润泉
(海军工程大学船舶与海洋工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要: 试验研究了潜艇艇体用钢在爆炸冲击载荷作用下的动态极限应变。利用体积等效原理, 得到了潜艇的两种典型结构在双向应变假设和单向应变假设下的动态开裂应变。试验结果可为潜艇艇体结构在爆炸冲击载荷作用下破损进水的数值仿真提供开裂判据。

关键词: 爆炸力学; 开裂判据; 动态极限应变; 潜艇; 冲击

中图分类号: O346; U661.43 国标学科代码: 130°3520 文献标志码: A

1 引言

随着现代反潜武器的快速发展, 潜艇面临着日益严重的威胁环境, 因此各国海军一直致力于潜艇艇体结构在水中兵器攻击下的毁伤研究。其中实艇和模型试验是研究的重要手段之一^[1~2], 但由于需要耗费大量的人力物力而在很大程度上受到限制。近年来, 随着计算机技术和有限元理论的发展, 相继出现了一些大型商业有限元软件, 它们已经能够对圆柱壳结构甚至更复杂的舰艇结构在爆炸载荷作用下的冲击响应问题进行数值仿真模拟^[3~6]。由于数值仿真方法具有研究周期短和投入经费少等优点, 因而已经成为目前研究的主要手段。

数值仿真的关键在于要保证仿真结果的可靠性, 这主要取决于输入参数、建模方法, 计算手段等多方面的因素。在对潜艇艇体结构受爆炸载荷作用下的毁伤情况进行数值仿真研究时, 材料的动态性能至关重要。如在判断潜艇壳体在爆炸载荷作用下是否破损进水时, 需要首先确定材料的开裂判据。本文中利用体积等效原理, 通过试验确定了对接焊缝平板和内侧中部加筋平板两种潜艇典型结构在爆炸载荷作用下的动态开裂应变, 为潜艇艇体在爆炸冲击作用下破损进水的数值仿真提供了开裂判据。

2 试验研究方案

潜艇艇体结构由很多块钢板焊接而成, 在钢板上焊接加强筋以增强壳体强度。在爆炸冲击作用下, 钢板焊缝处是结构容易开裂的薄弱部位, 而钢板在加强筋的支撑作用下也会产生较高的结构抗力, 成为高应力区, 因此这两种结构都是潜艇艇体的易开裂部位, 本文中的试验主要针对这两种结构进行。试验设计了两种结构形式的平板: 对接焊缝平板和内侧中部加筋平板, 主要研究他们的动态开裂应变值。

3 模型设计

对接焊缝平板结构模型如图1所示。钢板材料为潜艇耐压壳体用钢, 尺寸为1270mm×1280mm, 厚度为20mm, 焊缝方向的长度为1280mm。平板的边界固定情况如下: 将4根板条满焊在平板的四周, 同时将板条满焊在一个刚性框架上以达到固支的目的。板条宽100mm, 厚20mm。为确保边界的强度, 在刚性框架的内部每边加焊2个三角形肘板, 避免边界发生内缩。

* 收稿日期: 2003-12-17; 修回日期: 2004-03-12

基金项目: 国防预研基金项目

作者简介: 张振华(1976—), 男, 博士, 讲师。

内侧中部加筋结构模型的尺寸与对接焊缝平板模型基本相同,如图2所示,加筋位置在内侧中部。加强筋为T型材。面板尺寸为64mm×20mm,腹板尺寸为130mm×20mm。焊接部位采用填角焊。

在焊接模型时按照实艇焊接工艺进行操作,尽量保证焊接工艺。焊接方法为手工焊接。焊条的型号为602W,直径为4mm。采用直流电焊机。因为板厚大于12mm,故焊接电流采用180~260A。由于潜艇用钢刚性较大,焊接时进行多层多道焊,并采用锤击的方法尽量减小焊接应力。

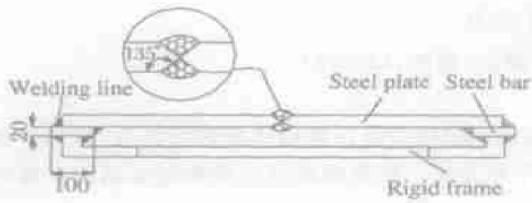


图1 对接焊缝平板模型横截面示意图
Fig. 1 Sketchy map of two plates jointed by solder

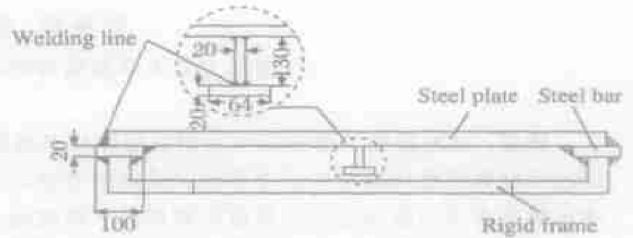


图2 内侧中部加筋板模型横截面示意图
Fig. 2 Sketchy map of inner middle stiffened plate

4 试验及其结果

试验在海军工程大学爆炸试验筒内进行。将刚性框架及对接焊缝平板模型放置在沙包上,底部留空以使钢板有足够的变形空间。将3kg 2#岩石炸药包置于钢板上方约2.3cm处。引爆炸药,观察钢板的变形情况。爆炸后,发现钢板四周固定很好,没有出现内缩现象,说明边界达到了固支要求。从外部观察,钢板中心虽有较大变形但没有裂纹。将模型吊起,观察钢板背部变形情况。钢板背部也没有裂纹。因为结构没有开裂,所以没有达到试验目的,需要继续对模型进行爆炸冲击使其破裂。将3kg 2#岩石炸药装入塑料袋中,使其尽量为球状,置于已有变形的钢板上接触爆炸。引爆之后,模型裂纹情况如图3所示,共有5条裂纹,分别记为1~5号裂纹。

将3kg 岩石炸药制成球状,悬挂于加筋平板中部上方距钢板1cm处。引爆药包之后,观察板架变形情况。钢板中部明显下凹,外部表面没有裂纹。将模型吊起,观察钢板内侧和加强筋的变形情况。加强筋有少量变形。加强筋跨中与钢板之间已经开裂,裂缝位置在钢板和加强筋腹板连接的焊缝处。从失效情况来看,可以判断该处加强筋的腹板已经失稳,但钢板上并无裂纹。再将3kg 岩石炸药制成球状,悬挂于钢板中部上方距离已变形的钢板凹坑底部1cm处实施第二炸。引爆炸药之后,观察板架变形情况。从外部观察,在钢板中部沿加强筋方向向两边有一长条形裂口,记为1#裂纹和2#裂纹,如图4所示。最后采用超声波测

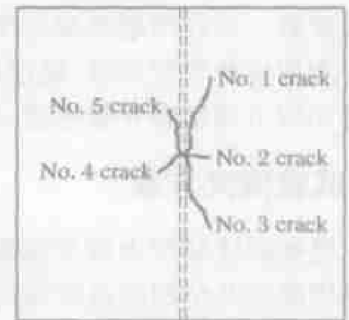


图3 对接焊缝平板裂纹分布
Fig.3 Cracks of two plates jointed by solder

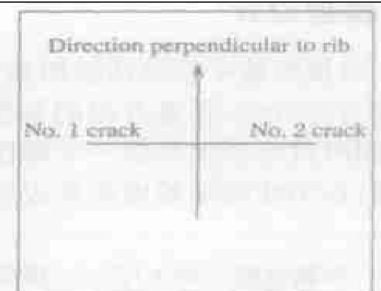


图4 加筋板结构裂纹分布
Fig.4 Cracks of inner middle stiffened plate

厚仪测量裂纹边缘的厚度。

5 极限应变分析

观察图 3 和图 4 中对接焊缝平板模型和加筋板模型的裂纹断口情况,发现裂纹边缘相对于其他部位有明显的减薄现象,这是典型的拉伸型断裂特征。与薄板在接触爆炸载荷作用下的剪切断裂不同的是,由于本实验中模型板较厚,因而其在接触爆炸载荷作用下的变形主要以弯曲和拉伸变形为主。所以可以采用材料的拉伸应变值来判断板是否发生断裂。下面将根据断口的减薄率,分别采用双向应变假设和单向应变假设推导结构的动态极限应变值。

(1) 双向应变假设

取裂纹附近微元 $dx \times dy \times t$, 设爆炸后作用在 x, y 方向的应变分别为 ϵ_x, ϵ_y , 且厚度由 t 变为 t_1 , 则该微元变形后的尺寸变为 $(1 + \epsilon_x)dx \times (1 + \epsilon_y)dy \times t_1$, 根据体积不变原理, 有

$$dx \times dy \times t = (1 + \epsilon_x)dx \times (1 + \epsilon_y)dy \times t_1 \tag{1}$$

近似假设裂纹附近两方向上的应变是对称的, 即: $\epsilon_x = \epsilon_y$, 可得结构动态极限应变

$$\epsilon_f = \epsilon_x = \epsilon_y = \sqrt{t/t_1} - 1 \tag{2}$$

(2) 单向应变假设

当某一方向的变形远大于另一方向时可作单向应变假设, 取板裂纹附近微元 $dx \times t$, 设爆炸作用后在 x, t 方向的应变分别为 ϵ_x, ϵ_t , 则该微元变形后的尺寸变为 $(1 + \epsilon_x)dx \times t_1$, 根据体积不变原理, 有

$$dx \times t = (1 + \epsilon_x)dx \times t_1 \tag{3}$$

因此有

$$\epsilon_f = \epsilon_x = t/t_1 - 1 \tag{4}$$

由(2)式和(4)式可知, 由于 t 始终大于 t_1 , 因而由单向应变假设得到的动态极限应变始终大于双向应变假设。下面将根据不同结构的特点分别采用这两种应变假设进行分析, 从而得到潜艇艇体的开裂判据。

6 开裂判据的确定

结构动态极限应变主要与材料属性有关, 同时也受结构形式、加载方式等诸多因素的影响。根据以上的应变分析可知, 应变可以用该处的减薄率来表示。沿裂纹方向对裂纹边缘钢板进行测厚。根据(2)式和(4)式分别计算沿裂纹扩展方向裂纹边缘的单向应变值和双向应变值, 结果如图 5 和图 6 所示。其中横坐标 l 为裂纹扩展后某点距裂纹初始端的距离, 纵坐标为动态应变值 ϵ_d 。

对接焊缝平板模型的裂纹开始于平板中部。根据测量的厚度情况, 1、3、5 号裂纹初始端的减薄情况基本相同, 2、4 号裂纹初始端的减薄情况基本相同, 故图 5 中画出了 2 号裂纹和 3 号裂纹的应变情况, 分别代表沿焊缝方向和垂直于焊缝方向的裂纹情况。

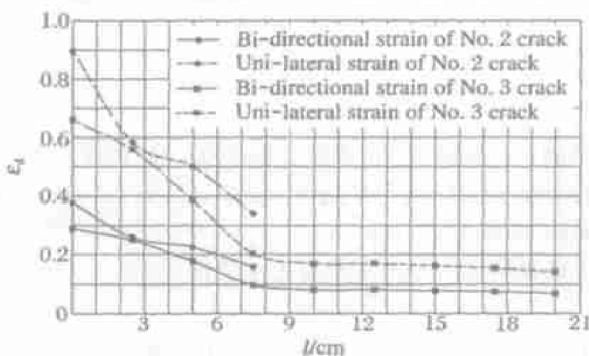


图 5 对接焊缝平板模型裂纹双向应变和单向应变
Fig. 5 Bi-directional and uni-lateral strain of cracks of two plates jointed by solder

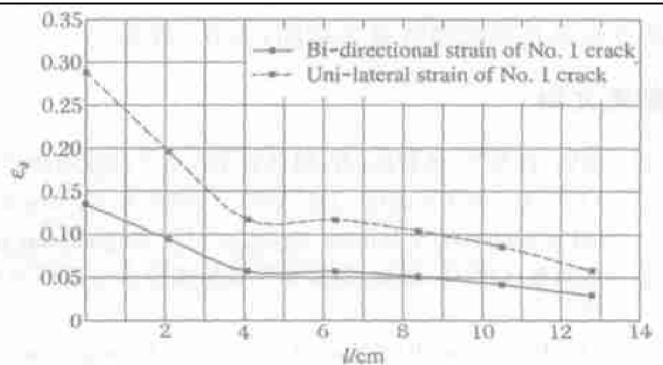


图 6 加筋板模型各方向双向应变和单向应变
Fig. 6 Bi-directional and uni-lateral strain of cracks of inner middle stiffened plate

由图5可见,平板中部的初始开裂应变明显高于其他位置的动态应变,裂纹扩展应变从爆炸中心沿裂纹扩展方向逐渐降低,这说明使材料发生初始裂口比使裂纹扩张更加困难一些。3号裂纹在距爆炸中心7cm的范围内,裂纹扩展应变下降很快,而在7cm范围之外应变则趋于一个常数,这个常数可视为裂纹的稳态扩展应变。由图可知,3号裂纹由双向应变假设计算的结构初始开裂应变值为0.289,稳态扩展应变约为0.08;由单向应变假设的结构初始开裂应变值为0.56,稳态扩展应变约为0.16。按照单向应变假设计算得到的开裂应变约为双向应变假设的2倍,而结构初始开裂应变值是稳态扩展应变的4倍左右。

2号裂纹长度较短且应变高于3号裂纹,即2号裂纹初始端的厚度比3号裂纹初始端的厚度要薄。由此可以断定3号裂纹开裂的时间比2号裂纹早,这是因为钢板在断裂之后由于应力释放而不再减薄,而后断裂的钢板则在外力的作用下继续减薄。说明焊缝方向的断裂韧性比母材的低,因而更容易断裂。

而且从图3的裂纹分布情况看,裂纹沿焊缝方向(在焊接热影响区)的扩展长度较大,也说明焊接热影响区材料的断裂韧性有所下降。但焊缝上并未出现裂纹,可见焊接质量较好时,焊接处的强度可以达到母材强度。根据结构和材料的对称性,从确定结构的初始开裂应变的角度来说,将采用3号裂纹双向应变假设公式计算的结果作为对接焊缝平板模型的初始开裂应变则更合理一些,故可取对接焊缝平板结构的初始开裂应变为0.289。

对于内侧中部加筋平板结构,第一炸之后内侧加强筋根部填角焊缝处就已经发生局部破坏,但是外板并没有破裂。第二炸时,钢板在爆轰波的作用下继续变形,虽然加强筋与板之间已有了裂缝,但因仍有支撑壳板的作用所以加强筋继续受到板传递的压力作用。外板的进一步变形使加强筋的腹板发生失稳破坏,同时外板产生“一”字形裂缝。由于炸药位置放置很准确,1号裂纹的应变情况和2号裂纹基本相同,故图6中只画出了1号裂纹的应变。和对接焊缝平板模型一样,平板中部的动态应变明显高于其他位置的应变,同时应变沿裂纹扩展方向逐渐降低。分析板中部的受力情况,裂纹仅产生在加强筋方向,而垂直于加强筋方向则没有裂纹,这说明由于中部有加强筋的支撑,沿加强筋方向的应变远小于垂直于加强筋方向的应变,因而按照单向应变假设计算的结果更合理一些。所以确定这种结构的初始开裂应变应该取1号裂纹的初始开裂单向极限应变,即0.288。

通过以上的分析可知,在计算潜艇艇体结构在爆炸冲击载荷作用下的动态响应时,可以取结构的初始开裂应变为以上两种结构初始开裂应变的平均值,即0.2885。这个数值可以作为数值仿真时艇体结构开裂失效的判据。

7 结 论

通过试验手段确定了两种典型潜艇艇体结构在爆炸冲击载荷作用下的初始开裂应变值。试验结果表明,材料的动态初始开裂极限应变远大于裂纹稳态扩展应变。双向应变假设适用于对接焊缝平板模型的开裂判断,单向应变假设适用于内侧中部加筋板模型的开裂判断。最后得到的这两种典型结构的动态初始开裂应变值基本相同,为0.2885。

参考文献:

- [1] 朱锡,白雪飞,黄若波,等.船体板架在水下接触爆炸作用下的破口试验研究[J].中国造船,2003,44(1):46-52.
ZHU Xi, BAI Xue-fei, HUANG Ruo-bo, et al. Crevasse experiment research of plate membrane in vessels subjected to underwater contact explosion[J]. Shipbuilding of China, 2003, 44(1):46-52.
- [2] 刘润泉,白雪飞,朱锡.舰船单元结构模型水下接触爆炸破口试验研究[J].海军工程大学学报,2001,13(5):41-46.
LIU Run-quan, BAI Xue-fei, ZHU Xi. Breach experiment research of vessel element structure models subjected to underwater contact explosion[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2001, 13(5):41-46.
- [3] 张振华,朱锡,冯刚,等.船舶在远场水下爆炸载荷作用下动态响应的数值计算方法研究[J].中国造船,2003,44(4):36-42.
ZHANG Zhen-hua, ZHU Xi, FENG Gang, et al. Numerical analysis of the dynamic response of warship subjected to shock wave

- induced by long-distance underwater explosion[J]. *Shipbuilding of China*, 2003, 44(4): 36—42.
- [4] 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.
ZZHANG Zhen-hua, ZHU Xi, BAI Xue-fei. The study on numerical simulation of underwater blast wave[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(2): 182—188.
- [5] 张振华, 朱锡, 冯刚, 等. 水下爆炸载荷作用下自由环肋圆柱壳的非线性动态响应研究[J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23 增刊: 155—156.
ZHANG Zhen-hua, ZHU Xi, FENG Gang, et al. Nonlinear transient dynamic response of free-free ring-stiffened cylindrical shell subjected to underwater explosion shock wave[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23 suppl: 155—156.
- [6] Fox P K. Nonlinear dynamic response of cylindrical shells subjected to underwater side-on explosions[R]. AD-A252856, 1992.

Experiment research of crack criterion of representative submarine structure subjected to explosive loading

ZHANG Zhen-hua^{*}, ZHU Xi, LIU Run-quan

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

Abstract: Experimental investigation were carried out on dynamic failure strain of submarine steel under shock loading. On the assumption of bi-directional and uni-lateral strain, dynamic failure strain of two submarine representative structures were measured according to the volume equivalent principle. Crack criterion was also discussed. Results could be used as the crack criterion for computer simulate on failure of submarine shell subjected to explosive loading.

Key words: mechanics of explosion; crack criterion; dynamic failure strain; submarine; shock

* Corresponding author: ZHANG Zhen-hua
E-mail address: 2zsz@163.com
Telephone: 027-62777663