

# 钛合金过滤器抗冲击性能分析

侯宗宗, 孙耀峻, 梁 晨, 张 辉

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

**摘要:**以舰船压载水过滤器为研究对象,采用动态设计分析法计算其抗冲击性能,并利用时域分析法将冲击响应谱转换为正负三角波进行抗冲击计算,对比验证抗冲击性能计算结果的正确性。同时,对不同材质的过滤器进行抗冲击计算,分析材质对过滤器抗冲击性能的影响。结果表明:采用动态设计分析法与时域分析法获得的冲击应力大小及分布规律一致,证实了抗冲击计算的可靠性;垂向的应力响应最大,横向次之,纵向最小;ZTi60合金过滤器的最大失效系数为0.347,满足GJB 1060.1—1991的设计要求;在相同冲击载荷作用下,不同材质过滤器的应力分布基本一致;过滤器的抗冲击性能由高到低依次为ZTi60合金、TA2纯钛、QA110-5-5铜合金。

**关键词:**过滤器;动态设计分析法;时域分析法;抗冲击性能

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)01-027-05

## Impact Resistance Performance Analysis of Titanium Alloy Filter

Hou Zongzong, Sun Yaojun, Liang Chen, Zhang Hui

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

**Abstract:** Taking the ballast water filter on ship as research object, the impact resistance was analyzed by dynamic design analysis method. In order to verify the correctness of the calculation results of impact resistance, the impact response spectrum was converted into positive and negative triangular wave loads by time-domain analysis method for impact calculation. At the same time, different materials were used for impact analysis to analyze the impact resistance of the filter. The results show that the dynamic design analysis method and the time-domain analysis method have the similar impact stress and its distribution, which confirms the reliability of the impact resistance calculation. The stress response in the vertical direction is the largest, followed by the horizontal, and the smallest is in the longitudinal direction. The largest failure factor of ZTi60 alloy filter is 0.347, which meets the design requirements of GJB1060.1—1991. The stress distribution of different materials filters are basically the same under the same impact, and the impact resistance of the filter from high to low is ZTi60 alloy, TA2 pure titanium, QA110-5-5 copper alloy.

**Key words:** filter; dynamic design analysis method; time-domain analysis method; impact resistant performance

舰船在海上可能遭受来自空中或水中爆炸物的威胁,承受的爆炸形式分为接触性和非接触性。由于船体结构能吸收大部分的爆炸冲击,故接触性爆炸仅波及局部范围,造成高强度的局部破坏;而非接触性爆炸的冲击力在水中传播能量大、范围广,会造成比较严重的损害,所以,研究非接触性爆炸对于保障舰船的安全性极为重要<sup>[1,2]</sup>。目前,抗冲击

分析法主要包括爆炸实验法和有限元仿真分析法。由于舰船设备造价昂贵,同时爆炸试验的作用时间短且难以控制,因此有限元仿真分析法更适用于舰船抗冲击性能的研究。

当前,对舰船设备进行抗冲击有限元分析的方法包括静态等效分析法、动态设计分析法和时域分析法<sup>[3,4]</sup>。静态等效分析法只考虑受冲击结构的质量效应,在计算一阶响应时可获得较适用的精度,而当舰船设备遭受高阶响应时则不适用,具有一定的局限性<sup>[5]</sup>;动态设计分析法是基于模态分析的线性

分析,可以定量地进行舰船设备强度校核,对线性结构的强度最大值分析,具有较好的优越性<sup>[6]</sup>。时域分析法即正负三角波法,是采用时间历程曲线作为舰船设备受冲击载荷的输入条件,能够对设备进行瞬态动力学分析,可用于分析非线性材料和设备的受力情况<sup>[7]</sup>。德国颁布的军舰艇建造规范 BV043/85《冲击安全性》中,规定了将冲击响应谱转换为时间历程曲线的方法。而我国主要采用动态设计分析法,并基于此法制定了关于舰船抗冲击计算的规范——GJB 1060.1—1991《舰船环境条件要求 机械环境》。

舰船压载水系统对于保证舰船稳定性和航行安全具有重要作用,过滤器是该系统中最为关键的设备,能够处理海水中的颗粒污物,保证压载水系统的正常稳定工作。钛及钛合金具有比强度高、耐腐蚀性优良、焊接性能好等优点,是制造舰船设备的极佳材料<sup>[8,9]</sup>。本实验以 ZTi60 合金压载水过滤器为研究对象,分别采用动态设计分析法和时域分析法计算其抗冲击性能,同时研究舰船过滤器材质对其抗冲击性能的影响,以期为正确评估舰船压载水过滤器在冲击载荷作用下的可靠性与安全性提供参考。

## 1 抗冲击分析法及模型建立

### 1.1 动态设计分析法

动态设计分析法是一种基于模态理论的分析方法。该方法认为系统由多个单自由度的弹簧质量系统组合而成,然后对每个单自由度系统的振型和频率进行计算,通过对每个系统进行设计冲击谱的计算而获得相应的位移和应力,最后基于所有的单自由度系统位移和应力获得总体系统的响应。根据 GJB 1060.1—1991《舰船环境条件要求 机械环境》<sup>[10]</sup>,舰船压载水过滤器安装于船体及外板部位,在计算不同方向的冲击时,计算系数分别为横向 0.4、垂向 1.0、纵向 0.2<sup>[11]</sup>。冲击加速度和冲击速度计算公式分别为:

$$A_0 = 196.2 \times \frac{(17.01 + M_0)(5.44 + M_0)}{(2.72 + M_0)^2} \quad (1)$$

$$V_0 = 1.52 \times \frac{5.44 + M_0}{2.72 + M_0} \quad (2)$$

式中:  $A_0$  为冲击加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $V_0$  为冲击速度,  $\text{m/s}$ ;  $M_0$  为设备的模态质量,  $\text{t}$ 。

### 1.2 时域分析法

时域分析法的冲击谱可分为等位移段、等速度段、等加速度段,主要参数为最大位移、速度、加速度谱值<sup>[12]</sup>。德国军舰艇建造规范 BV043/85《冲击安全性》中给出了响应谱转化为时域正负三角波的方法<sup>[13]</sup>。图 1 为转换后的三角波时域载荷曲线,图中  $a_1$  是正三角波峰值,  $a_2$  是负三角波峰值,  $t_1$  是正三角波开始时间,  $t_3$  是正三角波脉宽,  $t_2$  和  $t_4$  分别为峰值  $a_1$  和  $a_2$  相对应的时间,  $t_5$  为三角波时域载荷作用的总时间。正三角波的面积对应冲击速度的最大值。

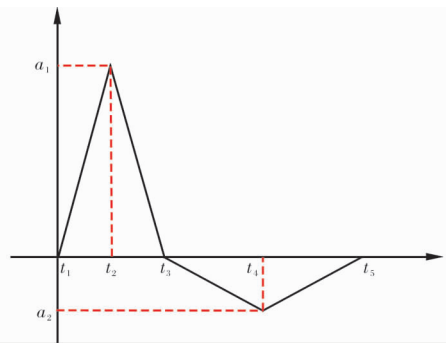


图 1 三角波时域载荷曲线

Fig. 1 Curve of time-domain under triangular load

### 1.3 模型建立

过滤器主要包括壳体和滤网。其中,过滤器的壳体为铸件,材质为 ZTi60 合金;滤网的材质为 TA2 纯钛。图 2 为过滤器的三维模型。

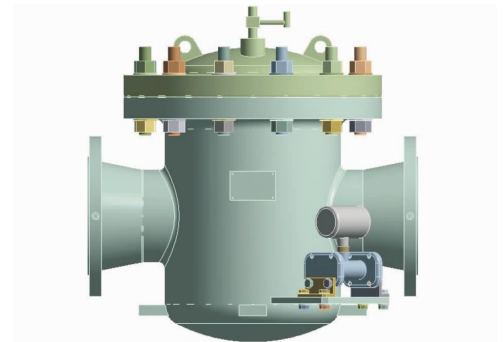


图 2 过滤器的三维模型

Fig. 2 Three-dimensional mode of filter

对过滤器的三维模型进行网格划分,如图 3 所示。将过滤器的各个结构部分赋予相应的材料,并根据等效管板理论将滤网处理为薄板<sup>[6]</sup>。模型边界条件:过滤器的进、出口法兰端设置为固定约束,过滤器内部施加 5 MPa 的压力,并在垂向方向上设

置重心引力作用。

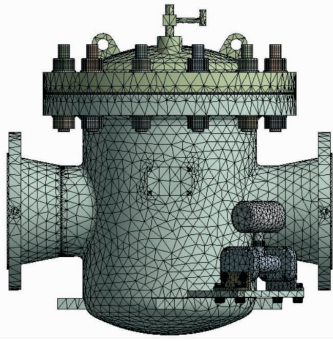


图3 过滤器的网格模型

Fig. 3 Mesh model of filter

表1 过滤器不同方向的冲击加速度

Direction	Frequency/Hz	$M_0/t$	$A_0/m \cdot s^{-2}$
Horizontal	435.656	0.043 49	960.978
	1155.750	0.007 53	977.948
Vertical	449.439	0.041 22	2405.081
	469.277	0.007 01	2445.496
	1084.270	0.004 60	2448.394
	1139.460	0.005 58	2447.218
Longitudinal	469.277	0.002 21	489.099
	875.114	0.001 94	490.319
	951.981	0.055 45	477.731

## 2 抗冲击性能分析

### 2.1 动态设计分析法

按照 GJB 1060.1—1991<sup>[10]</sup>，根据公式(1)、(2)对过滤器不同方向的模态进行分析。结果显示，横向、垂向、纵向的模态质量均大于过滤器总质量的80%。选择过滤器不同方向模态质量占比较大的所有模态，进行冲击加速度计算，结果见表1。

将表1中冲击加速度值分别添加至过滤器模型，对其进行抗冲击分析。图4为过滤器在时域冲击载荷最大峰值处的冲击应力分布云图。从图4可以看出，横向、垂向、纵向的最大冲击应力值分别为127.01、204.83、70.69 MPa；垂向应力最大，主要集中在筒盖顶端和进出口接管与壳体连接处，其他位置的应力均较低。

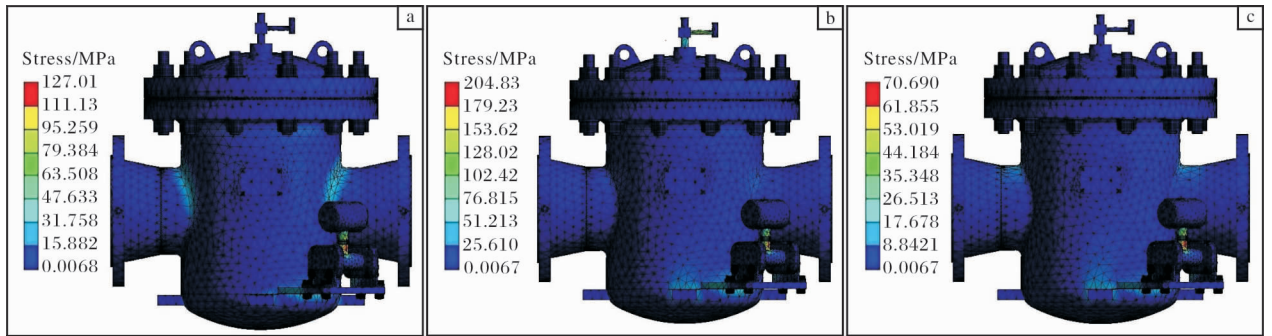


图4 基于动态设计分析法得到的过滤器不同方向的冲击应力分布云图

Fig. 4 Impact stress distribution nephograms of filter in different directions obtained by dynamic design analysis method:

(a) horizontal; (b) vertical; (c) longitudinal

GJB 1060.1—1991 规定，抗冲击等级为 A 级的设备，冲击载荷作用下设备结构响应的最大应力不得超过材料的静屈服极限，二者的比值定义为失效系数  $n$ <sup>[1]</sup>：

$$n = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_s} \quad (3)$$

式中： $\sigma_{\max}$ 为应力峰值，MPa； $\sigma_s$ 为屈服强度，MPa。

根据 GJB 1060.1—1991，当  $n$  小于 1 时，可判定结构安全，且  $n$  越小结构越安全；当  $n$  大于 1 时，结构设计则不满足要求。ZTi60 合金的屈服强度为

590 MPa，经式(3)计算可知，垂向、横向和纵向 3 个方向上的失效系数  $n$  均小于 1。其中，垂向失效系数最大，为 0.347。由此可见，过滤器整体结构满足抗冲击设计要求。

### 2.2 时域分析法

将利用动态设计分析法计算获得的冲击载荷作为冲击响应，并将冲击响应谱转换为正负三角波载荷，从而得到过滤器横向、垂向和纵向 3 个方向上的三角波载荷时域曲线，如图 5 所示。从图 5 可以看出，过滤器垂向的冲击加速度最大，横向次之，纵

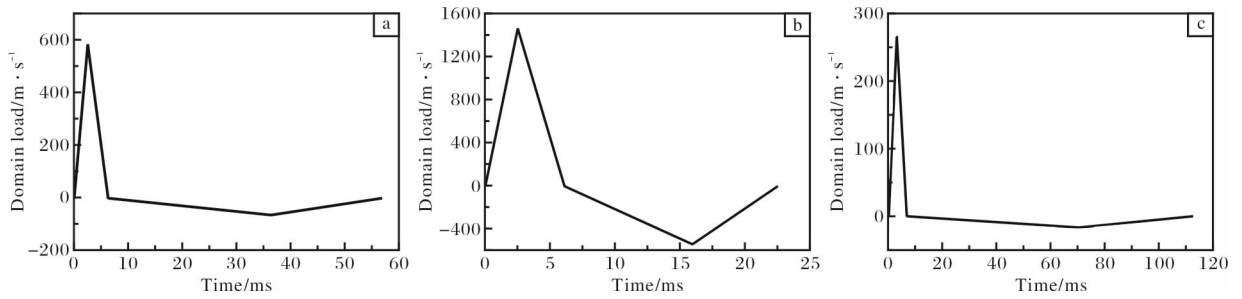


图5 三角波载荷下过滤器不同方向的时域曲线

Fig. 5 Curves of time-domain of filter under triangular wave load in different directions: (a) horizontal; (b) vertical; (c) longitudinal

向最小；垂向的冲击作用时间最短，横向次之，纵向作用时间最长。因此，过滤器垂向的抗冲击能力是冲击性能评估的重点。

在工况条件与2.1节动态分析一致的条件下，将正负三角波冲击载荷分别作用在过滤器模型上进行冲击应力计算。图6为过滤器在时域冲击载荷最大峰值处的冲击应力分布云图。由图6可知，过滤器横向、垂向和纵向的最大冲击应力分别为86.193、

150.25、47.741 MPa；最大冲击应力位于过滤器筒盖顶端；从过滤器不同方向的冲击载荷来看，垂向的应力响应最大，横向次之，纵向最小。所获得的过滤器应力分布云图及应力值大小与动态设计分析法结果基本一致，由此验证了过滤器抗冲击分析结果的准确性。此外，时域分析法能够计算出每个时刻所受冲击的应力值，且计算精度较高，因而能更好地模拟舰船所处的冲击环境。

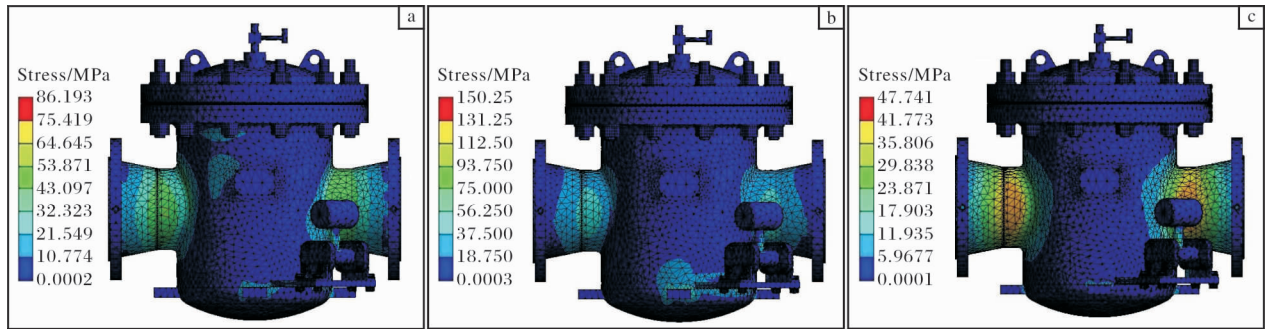


图6 基于时域分析法得到的过滤器不同方向的冲击应力分布云图

Fig. 6 Impact stress distribution nephograms of filter in three directions obtained by time-domain analysis method:

(a) horizontal; (b) vertical; (c) longitudinal

### 2.3 不同材质过滤器的抗冲击性能

为了研究材质对过滤器抗冲击性能的影响，分别选用TA2纯钛、ZTi60合金和QA110-5-5铜合金作为过滤器壳体材料。表2为TA2纯钛、ZTi60合金和QA110-5-5铜合金的材料属性。

表2 不同材料的属性

Table 2 Properties of different materials

	TA2	ZTi60	QA110-5-5
Density/kg·m <sup>-3</sup>	4505	4530	7650
Poisson ratio	0.34	0.34	0.25
Modulus/GPa	103	110	105
Yield stress/MPa	320	590	275

采用动态设计分析法对不同材质过滤器的抗冲击性能进行计算。计算时，在保证其他工况条件完全一致的情况下，只改变过滤器壳体的材质，方法同2.1节。结果显示，过滤器最大冲击应力均为垂向应力。图7为不同材质过滤器的垂向冲击应力分布云图。由图7可知，在相同的冲击作用下，结构相同的过滤器其冲击应力分布基本一致，最大冲击应力均位于过滤器筒盖顶端。

表3为采用动态设计分析法得到的不同材质过滤器的最大冲击应力和失效系数。由表3可知，TA2纯钛和ZTi60合金的最大冲击应力和失效系数均小于QA110-5-5铜合金，说明过滤器壳体材质对冲击应力影响较大。根据失效系数大小，不同材质过滤器的



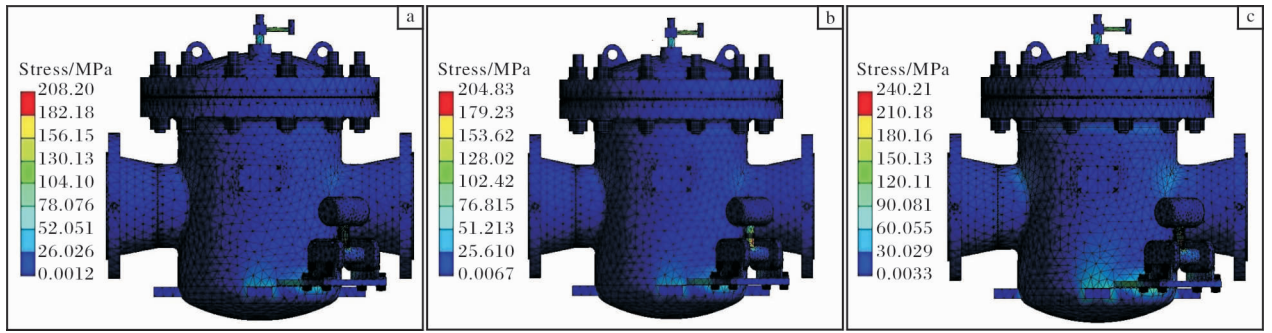


图 7 基于动态设计分析法得到的不同材质过滤器垂向冲击应力分布云图

Fig. 7 Impact stress distribution nephograms of filters with different materials in vertical direction obtained by dynamic design analysis method: (a) TA2 pure titanium; (b) ZTi60 alloy; (c) QAl10-5-5 copper alloy

表 3 不同材质过滤器的抗冲击性能

Table 3 Impact resistance of filters with different materials

	TA2	ZTi60	QAl10-5-5
$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	208.26	204.83	240.21
$n$	0.66	0.347	0.873

抗冲击性能由强到弱排序为 ZTi60 合金、TA2 纯钛、QAl10-5-5 铜合金。

### 3 结 论

(1) 利用动态设计分析法与时域分析法计算得到的舰船压载水过滤器的冲击应力大小及分布规律基本一致，由此验证了抗冲击分析与评估结果的有效性，能够为过滤器的设计提供参考。

(2) 从过滤器不同方向的冲击载荷来看，垂向的应力响应最大，横向次之，纵向最小。材质为 ZTi60 合金的过滤器最大失效系数为 0.347，过滤器整体无危险部件，满足 GJB 1060.1—1991 中对抗冲击设计的要求。

(3) 在相同的冲击载荷作用下，结构相同、材质不同的过滤器冲击应力分布基本一致；材质为 TA2 纯钛和 ZTi60 合金过滤器的最大冲击应力和失效系数明显小于 QAl10-5-5 铜合金；不同材质过滤器的抗冲击性能由强到弱为 ZTi60 合金、TA2 纯钛、QAl10-5-5 铜合金。

#### 参考文献 References

[1] 汪玉, 华宏星. 舰船现代冲击理论及应用[M]. 北京:

科学出版社, 2005.

- [2] Shin Y S. Ship shock modeling and simulation for far-field underwater explosion [J]. Computers & Structures, 2004, 82(23/26): 2211–2219.
- [3] 王官祥, 汪玉. 模态分析在冲击动力学分析中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2001, 21(3): 10–12.
- [4] 刘建湖. 舰船非接触水下爆炸动力学的理论与应用[D]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2002: 4–10.
- [5] 汪玉, 王官祥. 舰船系统和设备的抗冲击性能动力学仿真[J]. 计算机仿真, 1999, 16(1): 22–25.
- [6] 刘小玉. 基于管板等效的冷凝器结构抗冲击动态性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [7] 陶家伟. 船用齿轮箱滑油泵组抗冲击动态响应特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [8] 陈军, 王廷询, 周伟, 等. 国内外船用钛合金及其应用[J]. 钛工业进展, 2015, 32(6): 8–12.
- [9] 杨英丽, 罗媛媛, 赵恒章, 等. 我国舰船用钛合金研究应用现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(2): 538–544.
- [10] 国防科学技术工业委员会. 舰船环境条件要求机械环境: GJB1060.1—1991 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [11] 李晓明, 陈凤. 舰船浮筏隔振装置 DDAM 抗冲击计算[J]. 噪声与振动控制, 2012(6): 34–39.
- [12] 计晨, 汪玉, 杨莉, 等. 柴油机主要部件冲击响应时域分析[J]. 兵工学报, 2011, 32(4): 391–396.
- [13] 姜涛, 王伟力, 黄雪峰, 等. 舰艇抗冲击设计中正负三角冲击谱分析与应用[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(2): 145–148.