

一种基于内充泡沫塑料薄壁方管的单壳舷侧耐撞结构

王自力 姜金辉

华东船舶工业学院

一种基于内充泡沫塑料薄壁方管的单壳舷侧耐撞结构

A Crashworthy Type of Single Hull Structure

Based on Foam Cubic Tube (FCT)

王自力, 姜金辉

华东船舶工业学院

摘 要：FCT (Foam Cubic Tube) 是一种内充泡沫塑料的薄壁方管，它具有良好的吸能特性，是一种理想的能量吸收单元。本文基于 FCT 构建了一种新式单壳舷侧耐撞结构，并将之应用于某船。通过仿真计算和比较研究，证明 FCT 可以显著提高船舶的侧向抗撞能力，是一种先进的耐撞设计思想。

关键词：船舶碰撞，结构耐撞性，FCT，薄壁方管

Abstract: FCT (Foam Cubic Tube), a kind of thin-walled cubic tubes with foam inner it, has a good capacity of energy absorption and is an ideal energy absorption unit. A new crashworthy type of single hull structure against collision based on FCT is proposed in this paper. Applied to a ship's side, FCT is proved an advanced crashworthy design that can remarkably improve the side structure's ability against collision by numerical simulation.

Key words: ship collision, structural crushworthiness, FCT, thin-walled cubic tube

1 前言

改进船体结构耐撞性是开展船舶碰撞研究的一个主要目的。结构耐撞性设计，就是在碰撞研究的基础上，对传统的舷侧结构进行优化设计，或者设计一些具有特殊吸能元件的新型船体结构形式，来改善船舶的结构耐撞性能。

目前，船舶耐撞性的研究主要集中于双层舷侧结构。Kitamura 等 (1997,1998) 提出了骨架板和波纹板这两种新的吸能单元^[1]。Lee 等(1998)则提出两种新型的双壳结构：NOAHS 和 NOAHS^[2]。NOAHS 采用外板肋骨和内壁肋骨交叉布置的形式，并用一定厚度的薄板来连接这些肋骨；NOAHS 则在舷侧双壳内加装四只纵向圆管以增强能量吸收能力。作者 (2000) 基于 NOAHS 并利用薄壁圆管轴压下的动态渐进屈曲特性提出了一种改进的舷侧耐撞结构 CCT(Crushing Circular Tubes)^[3]。单壳舷侧结构的耐撞性研究开展得较少，文献[4]基于圆管的碰撞能量吸收原理，提出了一种新型 LPG 船舷侧耐撞结构。

设计新式舷侧结构的目的是为了提高舷侧的抗撞能力。抗撞能力一般是通过某一极限下结构的能

量吸收来体现的，对于单壳船而言，通常指外板破裂进水时船体所消耗掉的碰撞动能。提高结构的吸能能力可以通过提高舷侧结构刚度和扩大舷侧结构损伤变形范围来实现，本文耐撞结构的设计思想即根源于此。FCT (Foam Cubic Tube) 是一种内充泡沫塑料的薄壁方管，它具有良好的吸能特性，本文基于 FCT 构建了一种新式单壳舷侧耐撞结构，称为 FCT 舷侧结构，并将之应用于某船，检验其耐撞先进性。

2 FCT 舷侧结构的概念设计

FCT 舷侧结构是一种新式舷侧耐撞结构，基本设计思想如下：

- (1) 将舷侧的横向构件——肋骨改造成为薄壁方管。具体方法是以肋骨的腹板作为方管的长边，将肋骨的面板作为短边，将此面板边缘与舷侧外板之间用相同厚度的钢板封闭，形成一薄壁方管。
- (2) 在薄壁方管内填充泡沫塑料，塑料为一般的工业包装塑料。内充泡沫塑料是为了改变薄壁方管的变形模式，扩大舷侧结构的损伤变形范围，达到进一步提高极限状态时能量吸收的目的。

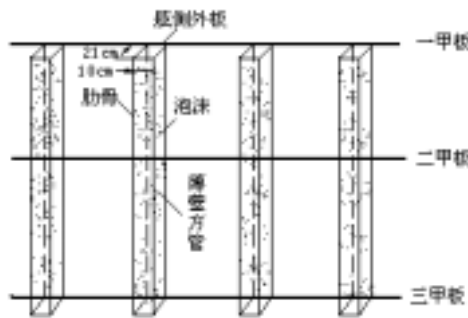


图 1 FCT 舷侧结构简图

Fig.1 Side structure with FCT

3 耐撞性分析

将 FCT 舷侧结构应用于某船，其薄壁方管的尺寸由原来的肋骨尺寸来确定，因为它基本上是由肋骨发展而来的（参见图 2）。为了不影响原设计的舱容和其它布置要求，薄壁方管的边长大小与原来的肋骨角钢相同，尺寸取为 $210 \times 100\text{mm}$ ，厚度也与肋骨的厚度相同，为 7mm 。

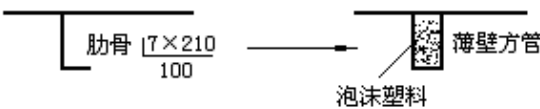


图 2 FCT 结构中薄壁方管尺寸

Fig. 2 Dimension of thin-walled cubic tubes in FCT

图 3 为采用新式 FCT 舷侧结构后的碰撞仿真有限元模型。假设舷侧第二层甲板部位受到一刚性球鼻艏的侧向垂直撞击，速度取为 18 米 / 秒（35 节）。模型取某船 94# 至 114# 肋位之间的一段舱段，材料采用线性强化弹塑性模型，考虑材料应变率敏感性。

按图示有限元网格划分，泡沫塑料采用 8 节点六面体单元，共有 1093 个单元，舷侧其它结构及球鼻艏采用四边形壳单元，共有 15887 个单元，全部模型有 18683 个节点。

采用动态非线性有限元分析软件 MSC.Dytran 对上述仿真模型进行计算。为了耐撞性比较研究，还对船舶常规舷侧结构模型进行了类似的仿真计算。仿真计算工作在 Digital Dpw600au 工作站（512MB Main memory, 10GB HDD）上进行，跟踪计算至 1.5 米撞深，需计算 60,000 步，耗时 65,390 秒（18.1 小时）。仿真计算结果如下：

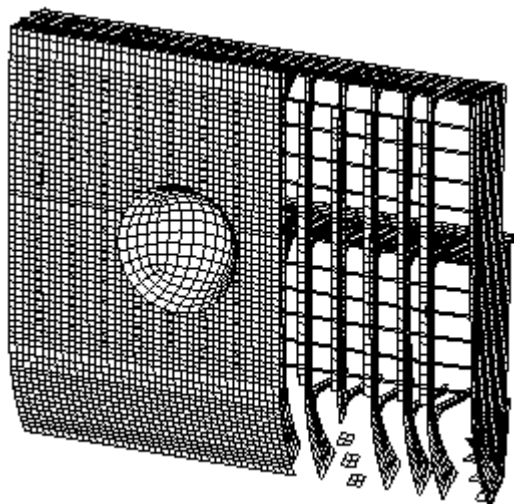


Fig.3 Element model of collision

3.1 结构损伤变形

图 4 反映了撞深达到 1.5 米时 FCT 舷侧结构的损伤变形情况，图 5 是常规舷侧结构的碰撞损伤变形图。可以看出，与常规舷侧结构相比，FCT 的损伤变形范围明显扩大了，这意味着有比较多的构件参与变形吸能，提高了舷侧结构的吸能能力。而且变形由瞬时的局部损伤变为较大面积的一个整体区域损伤，这将使直接与撞头接触的舷侧外板部分所受到的冲击力有所缓解，从而推迟了舷侧外板的破裂。所以在撞深达到 1.5 米时，FCT 舷侧结构中的舷侧外板仍然没有破裂，而常规舷侧结构的舷侧外板在撞深达到 1.21 米时就已破裂。

图 6 反映了 FCT 舷侧结构内部的损伤变形情况（撞深为 1.5 米时）。从图中可以看出，在刚性球鼻艏的直接撞击下，撞击区域的方管发生了严重的弯曲变形和凹陷变形。与之比邻的甲板边板、舷侧纵骨也发生了严重的弯曲变形和凹陷变形。同时还可以看到，撞击变形的区域已经扩大到了舷侧整体，构件的变形也比较缓和，没有出现局部的凹陷，显著推迟了舷侧外板的破裂。这主要是由于内充泡沫塑料的薄壁方管将损伤变形的范围传递到了整个区域，充分发挥了整个舷侧结构的吸能潜力。

图 7 给出了泡沫塑料的损伤变形情况（撞深为 1.5 米时）。显然，泡沫塑料对薄壁方管抗撞作用的发挥起到了重要作用。泡沫塑料改变了薄壁方管的变形损伤模式与吸能特性，使其抗撞潜能得以进一步发挥。

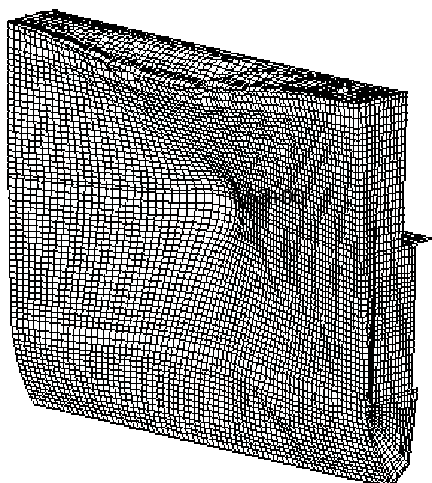


图 4 FCT 舷侧结构损伤变形图

Fig.4 Damage deformation in FCT side structure

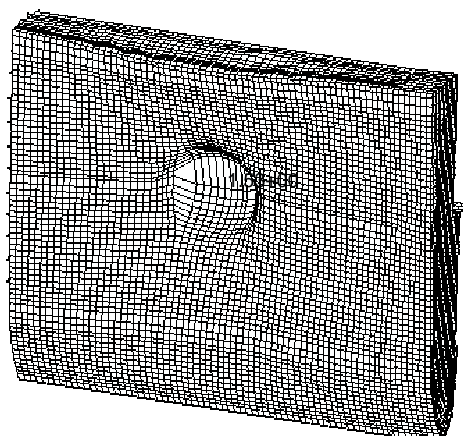


图 5 常规舷侧结构损伤变形图

Fig.5 Damage deformation in standard side structure

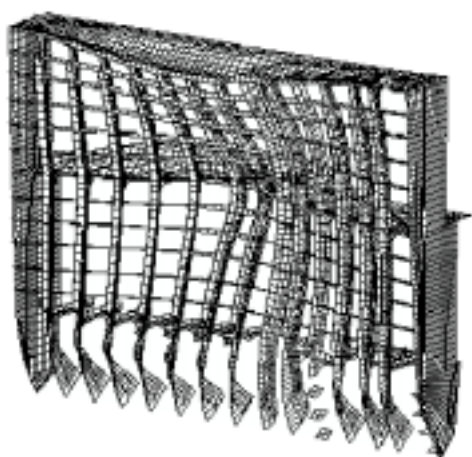


图 6 FCT 结构舷侧内部损伤变形图

Fig.6 Damage deformation of inner components in FCT side structure

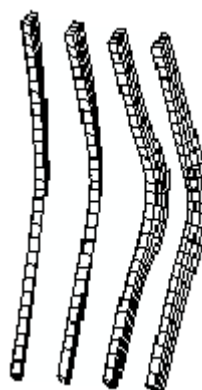


图 7 泡沫塑料损伤变形图

Fig.7 Damage deformation of foam in FCT side structure

3.2 碰撞力

图 8 是碰撞过程中碰撞力的时序曲线。可以看出，对 FCT 抗撞性能的分析应分为两个阶段：常规舷侧结构的外板破裂之前和破裂之后。常规舷侧结构在撞深大约为 1.21 米时外板开始破裂，在此之前，可以看到，FCT 与常规舷侧结构的吸能曲线非常接近，FCT 只略高于常规舷侧结构，也就是说，在这一段撞深范围内，FCT 的抗撞能力没有提高。但是在撞深达到约 1.05 米时，常规舷侧结构的肋骨开始失效，随即甲板开始失效，在撞深为 1.21 米时，舷侧外板出现破裂，此时对于单壳舷侧结构的船舶来说，船舶已达到了极限状态。相比之下，FCT 的抗撞潜能开始发挥作用了，从图中可以看出，FCT 的碰撞力没有出现波动或者下降，而是仍以一定的斜率在不断增加，这意味着直到撞深为 1.5 米时 FCT 的外板还没有出现破裂，进一步的仿真计算发现，在撞深达到 1.53 米时 FCT 的舷侧外板破裂。因此，FCT 舷侧结构

的抗撞能力主要表现在它推迟了舷侧外板的破裂。

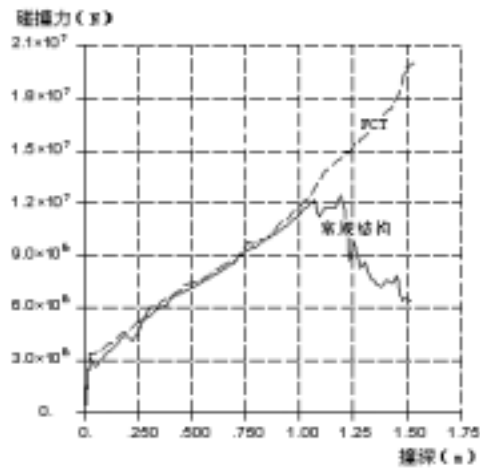


图 8 碰撞力曲线

Fig.8 Collision force curves

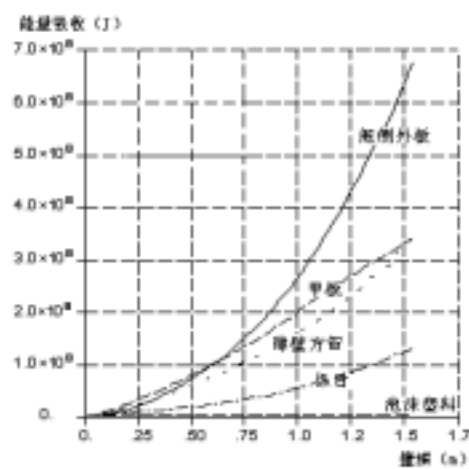


图 9 FCT 舷侧结构能量吸收曲线

Fig.9 Energy absorption curves of FCT

3.3 能量吸收

图 9 和表 1 反映了 FCT 舷侧结构的能量吸收情况。在碰撞的开始阶段，由于碰撞的位置发生在第二层甲板处，所以甲板吸收了较多的能量，但随着参与变形的外板的范围不断扩大，外板逐渐成为主要的吸能构件，由薄壁方管作为主要构件的横向框架也是一个主要的吸能部分，在撞深到达 1.5 米时，横向框架所吸收的能量已与甲板吸收的能量持平，各占总吸能的 22.8%。从图中可以看出，泡沫变形吸收的能量非常有限，它所起的作用不是作为吸能构件，而是改进薄壁方管的吸能特性。

表 2 反映了常规舷侧结构的能量吸收情况。

表 1 FCT 构件的吸能能力（撞深 1.53 米时）

Tabel 1 Energy absorption capacity of components in FCT (at 1.53m penetration)

序号	构件名称	能量吸收 (MJ)	百分比 (%)
1	舷侧外板	6.78	45.5
2	甲板	3.40	22.8
3	薄壁方管	3.39	22.8
4	舷侧纵骨	1.31	8.8
5	泡沫塑料	0.000016	0.0001
6	总吸能	14.9	100

注：薄壁方管一项中包括了其它一些横向构件

表 2 常规舷侧结构构件的吸能能力 (撞深 1.21 米时)

Tabel 2 Energy absorption capacity of components in standard structure (at 1.21m penetration)

序号	构件名称	能量吸收 (MJ)	百分比 (%)
1	舷侧外板	3.63	43.3
2	甲板	2.44	29.1
3	横向框架	1.76	21.0
4	舷侧纵骨	0.55	6.6
5	总吸能	8.38	100

4 耐撞性比较研究

作者基于舷侧骨架结构吸能单元还提出了另一种新式单壳舷侧结构——IFP(Improved Frame Panel)^[5], IFP 通过在舷侧外板内侧加一薄层内板并将纵骨延长与之连接构建了一种新型舷侧骨架结构。为考察 FCT 的耐撞性能, 将 FCT 与 IFP 及常规舷侧结构进行了比较研究。

4.1 能量吸收

在图 10 中, 将 FCT、IFP 和常规舷侧结构的吸能能力进行了比较。显然, 先进单壳结构设计方案 FCT 和 IFP 的能量吸收能力均高于常规的单壳舷侧结构。从吸能效果来看, 在撞深至 1.5 米时 IFP 的能量吸收明显高于其它方案。但是, 对单壳船舶来说, 其极限状态是舷侧外板破裂, 常规舷侧在撞深至 1.21 米时破裂 (a 点), IFP 在撞深至 1.38 米时破裂 (b 点), 而 FCT 在撞深至 1.53 米时破裂, 就外板破裂时的能量吸收而论, FCT 则优于 IFP 和常规舷侧结构。

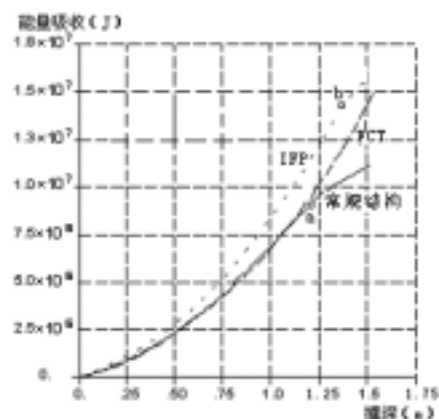


图 10 能量吸收比较

Fig.10 Comparison of energy absorption

4.2 耐撞性指标

单纯依靠舷侧外板破裂时的撞深和能量吸收尚不足以说明 FCT 和 IFP 的先进性。表 3 采用耐撞性指标 (单位结构重量的能量吸收) 对 FCT、IFP 和常规舷侧结构进行了比较。从表中可以清楚的看出, FCT 和 IFP 均大大高于常规舷侧结构, FCT 的耐撞性指标提高了 68%, IFP 的耐撞性指标提高了 54%。虽然它们的重量分别增加了 6%和 10.9% ,似乎增加明显 ,但这个增加的比例只是与舷侧结构重量相比的, 若与全船重量相比, 增加的重量将微不足道 (舷侧结构重量 6.47 吨, 全船重量 2064 吨)。

表 3 结构耐撞性能比较

Tabel 3 Comparison of structural crashworthiness

方案	结构重量 (吨)	能量吸收 (MJ)	耐撞性指标 (J/Kg)	相对指标	比较 (%)	
					重量增加	吸能增加
常规舷侧结构	6.47	8.38	1295	100	——	——
FCT	6.86	14.9	2172	168	6.0	77.8
IFP	7.18	14.28	1989	154	10.9	70.4

4.3 极限撞击速度

工程上通常依据平均极限撞击速度来确定船舶的耐撞性等级。极限撞击速度有不同的简化计算方法，本文采用德国劳氏船舶入级与建造规范第 33 节中的极限速度计算公式^[6]

$$V_{cr} = 2.75 \sqrt{\frac{E_{cr}}{m_2} \left[1 + \frac{m_2}{m_1} \right]} \quad [kn] \quad (1)$$

式中， E_{cr} 为达到极限撞击速度时的结构变形能， KJ ； m_1 为撞击船的质量，包括 10% 的水动力附加质量， $10^3 Kg$ ； m_2 为被撞船的质量，包括 40% 的水动力附加质量， t 。

将撞击船质量统一设为 2,000 吨，利用 (1) 式对 FCT、IFP 和常规舷侧结构的极限撞击速度进行分析计算，结果见表 4。

表 4 极限撞击速度比较

Tabel 4 Comparision of critical collision speeds

类型	极限撞深 (m)	极限变形能 (KJ)	极限撞击速度 (kn)
常规舷侧结构	1.21	8380	7.12
FCT	1.53	14900	9.49
IFP	1.38	14280	9.29

可以看出，采用 FCT 后，极限撞击速度提高了 2.37 节，IFP 极限撞击速度提高了 2.17 节，按 GL 规定，意味着耐撞等级将提高一级。

5 结 论

(1) FCT 舷侧结构是一种先进的设计概念，它们可以显著提高结构船舶的侧向抗撞能力；

(2) 内充泡沫塑料可以改变薄壁方管的变形模式，充分发挥其增强舷侧结构抗撞能力的作用；

(3) 将 FCT 应用于某船，可使其耐撞性能有明显改善，耐撞等级提高一个级别；

(4) 虽然采用 FCT 后船体结构重量会有所增加，但与全船重量和能量吸收的增加相比，这是微不足道的。

参考文献

- [1] Kitamura O., Comparative Study on Collision Resistance of Side Structure, Marine Technology, 1998, Vol. 34, No. 2, pp. 293-308.
- [2] Lee J.W. Petershagen H., Rorup J., etc., Collision Resistance and MSC.Fatigue Strength of New Tanker with Advance Double Hull Structure, Practical Design of Ships and Mobile Units, M.W.C. Oosterveld and S. G. Tan, Editor, 1998, pp. 133-139.
- [3] 王自力, 顾永宁. 提高 VLCC 侧向抗撞能力的一种新式双壳结构. 船舶力学, 2002 (2): 27-36
- [4] 王自力, 顾永宁. LPG 船的一种新型舷侧耐撞结构研究. 船舶工程, 2001 (2): 12-14
- [5] 姜金辉. 舰船结构碰撞性能研究. [学位]. 华东船舶工业学院, 2003. 1
- [6] Germanischer Lloyd, Rules for Classification and Construction, 1998, Section 33.