

文章编号: 1000-4882(2003)02-0025-08

# 船舶碰撞缓冲型球鼻艏概念探讨—— 球鼻曲率对碰撞的影响

江华涛, 顾永宁

(上海交通大学船舶与海洋工程学院, 上海 200030)

## 摘 要

船舶碰撞事故中, 被撞油船船侧的破裂会引起严重的海洋污染, 故油船双层船壳设计成为防止被撞油船破损的有效措施。但随着海上运输船舶的数目及尺度的日益增大, 双层船壳已不能满足防止船侧破损的要求。本文提出了缓冲型球鼻艏的构思。在船舶相撞的过程中, 球鼻艏曲率的尖锐程度影响被撞船船侧的损伤程度, 故提出并讨论了表征球鼻艏碰撞特性的标志性参数。通过对不同曲率的球鼻艏一系列的碰撞数值仿真计算, 详细描述了外形曲率对球鼻艏的变形形态、碰撞力、碰撞力密度及能量吸收的影响, 指出船舶采用钝形的球鼻艏能有效减小碰撞时的穿透损伤。

**关 键 词:** 船舶; 舰船工程; 船舶碰撞; 缓冲型球鼻艏; 数值仿真; 球鼻曲率

**中图分类号:** U 661. 43 **文献标识码:** A

## 1 引 言

在过去的十几年中, 发生了多起由于油船搁浅或碰撞而造成灾难性的原油泄漏和海洋环境污染事故, 从而在油船的设计中实施了双层壳体设计。即使如此, 对于碰撞的结构响应研究表明, 在高能量的碰撞事故中, 双壳油船的抗撞性仍不能令人满意。当具有球鼻艏的船舶其船首与另一船舶相碰撞时, 从减小碰撞损伤的观点来看, 改进船首的设计可能是另一条更有希望的途径。当一艘船的船首撞击另外一艘船的船侧时, 由于一般船首的刚度比船侧要大, 船首会切入被撞船船侧, 碰撞能量大部分由被撞船船侧变形所吸收, 因而船侧的破损程度比船首大得多。被撞船船侧的破损会造成船舶舱内货物损失或液体泄漏。如果船首刚度小于船侧, 则船首被压溃而船侧不出现撕裂, 而艏尖舱的破损不会造成船舶沉没和货物损失或液体泄漏, 因而事故的总体损失较小。如果从环境保护及降低整体经济损失的角度出发, 就应在保证艏结构在能够承受常规载荷的前提下适当减小艏结构的纵向刚度, 使其在撞击船侧时导致船侧破损的可能性降低。但是目前这种设计思想却不一定能被船东接受, 因为从自身的立场出发, 总希望自己的船首做得越坚固越安全; 但站在公共社会利益的立场, 减少总体碰撞损失的缓冲型球鼻艏应该是值得研究和提倡的。国际上, 日本的 Endo<sup>[1]</sup>等, 都提出了软艏的重要性, 并且日本的有关社团, 准备投入资金利用 4 年(2001~ 2004 年)<sup>[2]</sup>时间专门研究缓冲型船首的设计, 到目前这方面的研究成果尚不多见。

在船与船碰撞中, 碰撞动能消耗完或整个船侧破损以前, 如果要使船首的能量吸收能力尽量大, 则船首的临界压溃强度一定要比受撞船侧结构的临界压溃强度小, 即应降低艏结构的纵向刚度, 故船首形状及船首内部的结构形式是需要讨论的主要方面。本文主要研究球鼻艏的曲率变化对其碰撞性能的影响。

球鼻艏的形状在一定程度上直接影响被撞船船侧的损伤程度, 本文作者对一艘大型油船撞击一艘 VLCC 进行了数值仿真研究<sup>[3]</sup>, 在仿真计算中分别采用两个不同尖锐程度的船首, 见图 1 和图 2。仿真结

收稿日期: 2002-04-22; 修改稿收稿日期: 2002-09-23

果表明,在同样的碰撞初速下,尖形球鼻艏已经穿透VLCC 双层船侧的内壳,外壳则被严重撕裂,到内壳断裂为止,仅耗用了 65% 的碰撞动能。而钝形球鼻艏只造成了VLCC 船侧外壳的局部撕裂,没有引起船侧内壳的破裂,100% 的碰撞动能将被吸收,见图 3~ 图 6。另一方面,钝形艏增加了船首与被撞船船侧的接触面积,使得船侧结构参与变形和吸能的结构增加,所以当一艘双壳VLCC 被一艘大型油船所撞时,如果油船具有钝形球鼻艏则很可能会避免原油泄漏;但如果主撞船首为尖形,原油泄漏几乎难以避免。

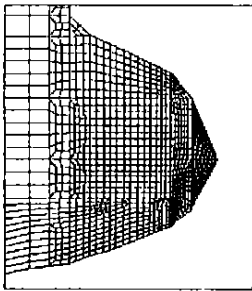


图 1 尖形球鼻艏外壳及内部结构有限元模型

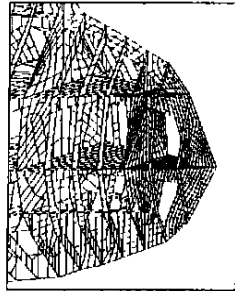


图 2 钝形球鼻艏外壳及内部结构有限元模型

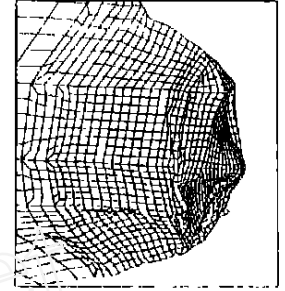
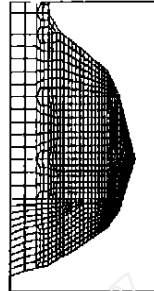


图 3 尖形球鼻艏损伤变形

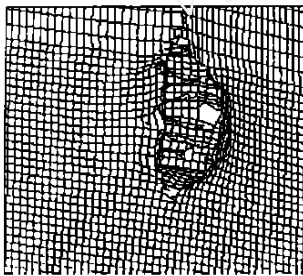


图 4 尖形球鼻艏造成的被撞船船侧撕裂损伤

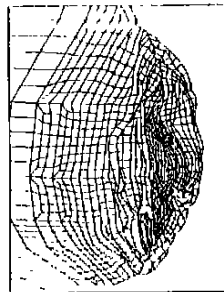


图 5 钝形球鼻艏损伤变形

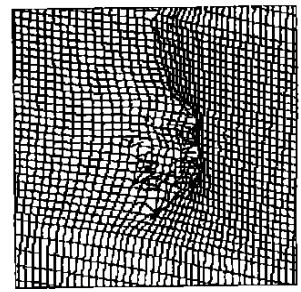


图 6 钝形球鼻艏造成的被撞船船侧凹陷损伤

球鼻艏型线变化的曲率是影响撞击性能的一个关键因素,球鼻艏曲率的大小直接影响到其临界崩溃力的大小和其能量吸收的能力。本文为了描述球鼻艏曲率对碰撞性能的影响,对具有规则形状的不同曲率的球鼻艏,正撞刚性墙的碰撞模式进行了一系列的碰撞数值仿真计算。

## 2 球鼻艏模型的描述

球鼻艏的空间形状相当复杂,而且随船舶类型的不同而有所区别,很难用一个完整的解析式将各种形状的球鼻艏表达清楚。出于简化分析的目的,采用旋转抛物面来近似表示球鼻艏的空间曲面,即采用抛物线  $Z = Ax^2$  绕对称轴  $Z$  轴旋转生成,其中参数  $A$  可以衡量球鼻的钝锐程度,如图 7 所示。对于一般的球鼻艏,形状系数  $A$  介于 0.1~0.5 之间。采用旋转体假定,可以较容易地得到碰深  $W$  (球鼻首撞入舷侧结构的深度)与相应横截半径  $R$  之间的关系:  $W = AR^2$ 。

为了分析外形曲率对球鼻艏碰撞性能的影响,本文建立了 4 个具有不同曲率的规则球鼻艏有限元模型正面撞击刚性墙的碰撞模式,球鼻艏内部结构基本上是横向加强结构,除了横向肋骨之外,还有纵舱壁和一层平台,4 个球鼻艏内部加强情况相同,见

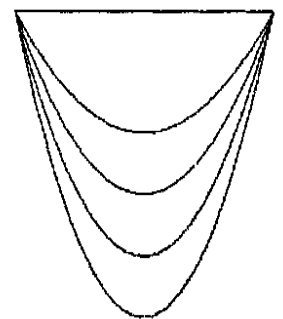


图 7 各种形式的球鼻首形状

图 8 和图 9。

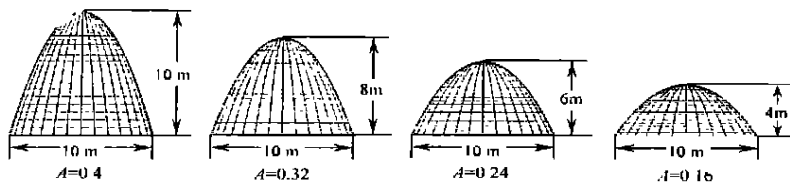


图 8 4 个球鼻艏外壳有限元模型



图 9 4 个球鼻艏内部结构有限元模型

在有限元模型中全部采用 4 节点四边形壳单元, 4 个模型都以同样的速度和动能正面撞击刚性墙, 撞击速度都为  $10\text{ m/s}$ , 撞击能量为  $5.30 \times 10^8 \text{ Nm}$ 。模型的质量分布为: 在球鼻艏最后端的横舱壁之前的所有结构, 都是根据结构的材料和板厚具有真实的质量分布, 而其它的所有撞击质量都均匀分布在最后端的横舱壁上。模型中把最后端横舱壁上所有节点(除撞击方向以外)的自由度限制住。

球鼻艏采用线性强化弹塑性模型<sup>[4]</sup>, 其屈服应力  $\sigma_y$  由下式给出:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{E E_h}{E - E_h} \epsilon_p \quad (1)$$

式中: 弹性屈服应力  $\sigma_0$  取为  $2.35 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ ; 弹性模量  $E$  取为  $2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ; 硬化模量  $E_h$  取为  $1.18 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ;  $\epsilon_p$  为塑性应变; 其余材料常数分别为: 密度  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$  (除了最后端横舱壁外), 泊松比  $\mu = 0.3$ 。

由于船舶碰撞是一个动态响应过程, 而船用低碳钢的塑性性能对应变率是高度敏感的, 其屈服应力和拉伸强度极限随应变率的增加而增加, 所以在本文材料模型中引入了应变敏感性的影响。

材料应变率敏感性的本构方程有许多, 本文采用与实验数据符合得较好的 Cowper-Symonds 本构方程<sup>[5]</sup>:

$$\sigma/\sigma_0 = 1 + (\dot{\epsilon}/D)^{1/q} \quad (2)$$

式中:  $\sigma$  是在塑性应变率  $\dot{\epsilon}$  时的动屈服应力;  $\sigma_0$  是相应的静屈服应力;  $D$  和  $q$  对于具体材料来说是常数, 对船用钢而言,  $D = 40.4$  和  $q = 5$ 。

### 3 表征球鼻艏碰撞特性的特征量

球鼻艏结构自身的固有压溃特性, 可以通过球鼻艏撞击刚性壁的过程来观察研究。球鼻艏结构的碰撞特性可以通过碰撞力-撞深曲线、球鼻艏的初始压溃力、碰撞力密度曲线、第一压溃强度和最大压溃强度等特征量来表征。下面对这些特征量分别加以阐述:

(1) 碰撞力-撞深曲线。它代表了球鼻艏在不同撞深时的压溃力。

(2) 球鼻艏的初始压溃力。是指碰撞力-撞深曲线中的第一个峰值, 它代表着球鼻艏第一次发生动态屈曲所需要的挤压力。

(3) 碰撞力密度曲线。该曲线中的纵坐标表示碰撞力面积密度  $P = F/A$  ( $F$  为某撞深时的碰撞力;  $A$  为该撞深时的球鼻艏结构的横截面积, 即被撞船侧的受载面积)。碰撞力面积密度曲线代表了球鼻艏

结构在不同撞深时的压溃强度。

(4) 第一压溃强度  $P_1$ 。是指碰撞力密度曲线中的第一个峰值,其意义在于:在船-船碰撞中,如果球鼻艏的  $P_1$  小于船侧碰撞区域在此撞深时候的压溃强度(但船侧结构的压溃强度不一定到达它的第一个峰值时),则球鼻艏先发生压溃,然后它们之间的挤压应力就会在一定程度上卸载,这样就会避免船侧的一次破坏。

(5) 最大压溃强度  $P_{MAX}$ 。它是碰撞力密度曲线中最高的峰值,  $P_{MAX}$  的意义在于:如果球鼻艏的  $P_{MAX}$  小于船侧碰撞区域的  $P_{MAX}$ ,则在整个碰撞过程中,球鼻艏必定先被压溃,从而可以避免船侧的完全破损(比如船侧内壳破损)。

4 球鼻艏变形形态的比较

到碰撞结束(动能全部耗尽)时,4个球鼻艏的变形形态如图10所示,表1为每个球鼻艏到碰撞结束时所经历的碰撞时间和最大撞深。



球鼻艏 a( $A = 0.4$ ) 球鼻艏 b( $A = 0.32$ ) 球鼻艏 c( $A = 0.24$ ) 球鼻艏 d( $A = 0.16$ )

图10 碰撞结束时球鼻艏的变形形态

表1 球鼻艏到碰撞结束时所经历的碰撞时间和最大撞深

球鼻艏形态	形状系数A	最大撞深(m)	碰撞经历时间(s)
a	0.4	3.623	1.37
b	0.32	3.204	1.18
c	0.24	2.890	0.88
d	0.16	2.210	0.62

由表1可见,消耗掉同样的动能时,形状越尖锐的球鼻艏的最终撞深越大,所经历的碰撞时间也越长。由于4个球鼻艏外壳内部加强情况相同,故由图10可见,4个球鼻艏的褶皱模式很相似,但褶皱波的波长有所不同,越钝的球鼻艏产生的褶皱的数目越多,而且外壳的横向弯曲对褶皱波的产生影响越大,这说明越钝的球鼻艏在承受这种纵向冲击载荷时的横向弯曲刚度越小。

5 碰撞力和压溃强度的比较

图11~14为不同曲率的球鼻艏的碰撞力的比较。与大多数借助平均撞损力的简化分析方法不同,数值模拟计算可一步一步地演示整个撞损过程,通过数值计算可以给出力与撞深的详细关系。从图中可见:

(1) 随着球鼻艏形状系数A的减小,最终的撞深相应减小,而最大碰撞力却逐渐增大。这是因为越钝的球鼻艏与刚性墙的接触面积逐渐增大所致。

(2) 碰撞力的分布曲线都具有若干峰值,每个峰值代表了碰撞力的一次卸载,球鼻艏结构则会相应产生一个褶皱波。由于4个不同曲率的球鼻艏内部的加强结构相似,故可见4条碰撞力曲线的前几个主要峰值是对应的,而且球鼻艏越钝,参与变形的横向肋骨越多,产生的褶皱波的数目也越多,所以越钝的

球鼻艏, 其对应的碰撞力曲线上的峰值也就越多。

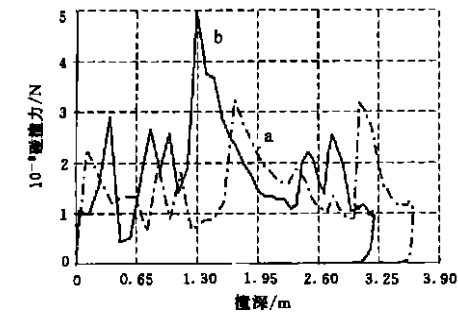


图 11 球鼻艏 a 和 b 的碰撞力曲线比较

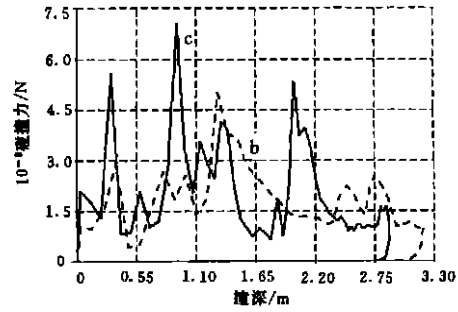


图 12 球鼻艏 b 和 c 的碰撞力曲线比较

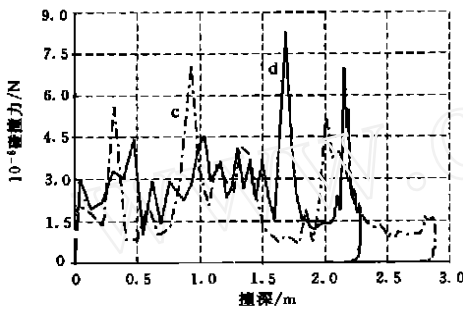


图 13 球鼻艏 c 和 d 的碰撞力曲线比较

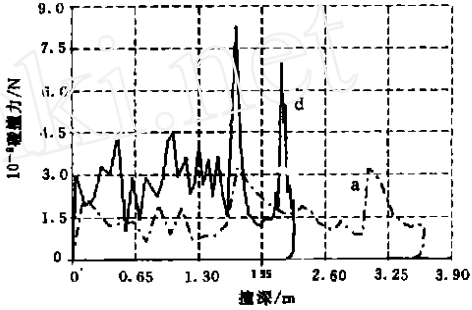


图 14 球鼻艏 a 和 d 的碰撞力曲线比较

图 15~ 18 为球鼻艏结构的碰撞力密度曲线。球鼻艏结构形状的锐或钝, 决定了船舶贯入船侧结构破坏性的强弱。碰撞力面积密度可以定量表达球鼻艏结构刚度与球鼻艏形状锐钝的关系, 由图 11~ 14 的碰撞力曲线和球鼻艏形状可以求得。

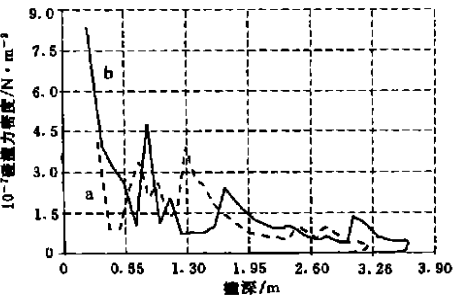


图 15 球鼻艏 a 和 b 的碰撞力密度曲线比较

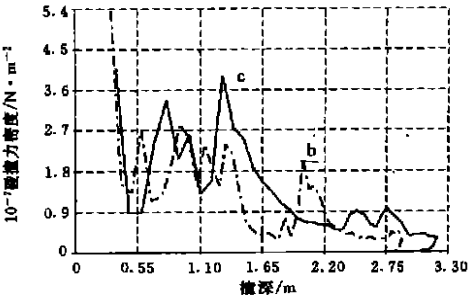


图 16 球鼻艏 b 和 c 的碰撞力密度曲线比较

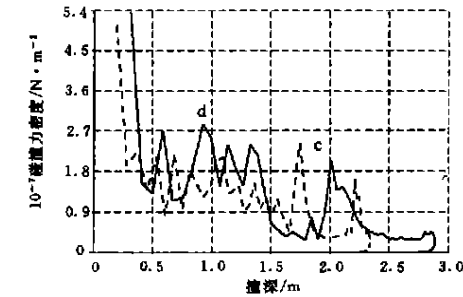


图 17 球鼻艏 c 和 d 的碰撞力密度曲线比较

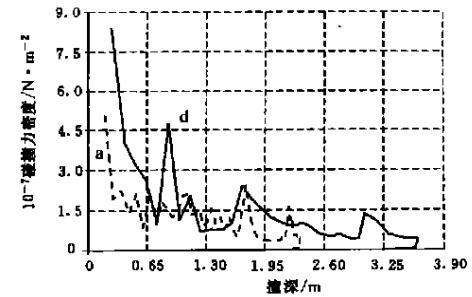


图 18 球鼻艏 a 和 d 的碰撞力密度曲线比较

由于碰撞力密度曲线在碰撞开始时有一个很大的初值, 随即急剧下降, 这表明碰撞接触之初被撞船

侧的一个小区域会发生凹陷,此后以较大面积参与碰撞后,凹陷可能会减缓。球鼻艏越钝其碰撞力密度曲线的初值下降越快,这是因为球鼻艏越钝碰撞接触面积增加越剧烈,而且接触面积增加比碰撞力增加快。不过,我们在研究中把由初值下降的过程略去,而只研究初值下降以后的变化过程。碰撞力密度曲线上的峰值点对应着碰撞力曲线中的峰值点,它代表着球鼻艏的每一次被压溃的临界压溃强度,而其中最关键的是第一次峰值的第一压溃强度和最大压溃强度。

比较 4 个不同形状的球鼻艏的碰撞力密度曲线可以看出:球鼻艏越钝,虽然它的最大碰撞力越大,但加上面积因素的影响后,其最大压溃强度却越小,而且其第一个压溃强度也越小。这说明较钝的球鼻艏的整体纵向刚度较小,对船侧碰撞区域的损伤危害较小。故船舶采用钝形的球鼻艏能有效的降低被撞船侧的损伤程度。

6 能量吸收的比较

碰撞结束时,球鼻艏构件吸收的变形能见表 2。

表 2 球鼻艏构件吸收的变形能

结构组件	球鼻艏 a (A = 0.4)		球鼻艏 b (A = 0.32)		球鼻艏 c (A = 0.24)		球鼻艏 d (A = 0.16)	
	吸收能量 (Nm)	占总吸能 的比例(%)	吸收能量 (Nm)	占总吸能 的比例(%)	吸收能量 (Nm)	占总吸能 的比例(%)	吸收能量 (Nm)	占总吸能 的比例(%)
球鼻艏外壳	$2.56 \times 10^8$	51.61	$2.48 \times 10^8$	49.48	$2.05 \times 10^8$	41.07	$1.40 \times 10^8$	28.42
中纵舱壁	$9.85 \times 10^7$	19.86	$1.01 \times 10^8$	20.17	$1.04 \times 10^8$	20.81	$1.32 \times 10^8$	26.71
平台	$1.06 \times 10^8$	21.37	$1.11 \times 10^8$	22.15	$1.39 \times 10^8$	27.99	$1.61 \times 10^8$	32.63
3 个横舱壁	$1.41 \times 10^7$	2.84	$1.70 \times 10^7$	3.40	$1.59 \times 10^7$	3.19	$2.93 \times 10^7$	5.92
环形肋骨	$2.08 \times 10^7$	4.19	$2.44 \times 10^7$	4.87	$3.28 \times 10^7$	6.59	$3.06 \times 10^7$	6.18
总吸能	$4.96 \times 10^8$	100.00	$5.02 \times 10^8$	100.00	$4.98 \times 10^8$	100.00	$4.94 \times 10^8$	100.00

从上表中可见:球鼻艏外壳、中纵舱壁及平台是主要的吸能构件,但随着球鼻艏逐渐变钝,其外壳吸收的变形能占总变形能的比例越来越小,而中纵舱壁及平台所占的比例却越来越大;对于最尖锐的球鼻艏,其外壳吸收变形能量最大,而最钝的球鼻艏的平台吸收变形能最大。故球鼻艏的锐钝程度影响构件能量吸收的次序。由于球鼻艏的横舱壁和横向环形肋骨产生了弯曲和拉伸变形,它们也吸收了部分能量,但是占总变形能的比例不大。

图 19 为球鼻艏在碰撞过程中的总能量吸收的比较。从图中可见,由于 4 个球鼻艏的初始动能相同,故到碰撞结束时,它们吸收的总能量差不多,但是在某一撞深下,越钝的球鼻艏吸收的能量越多。这是因为在同一撞深的情况下较钝的球鼻艏的参与碰撞的体积较大所致。

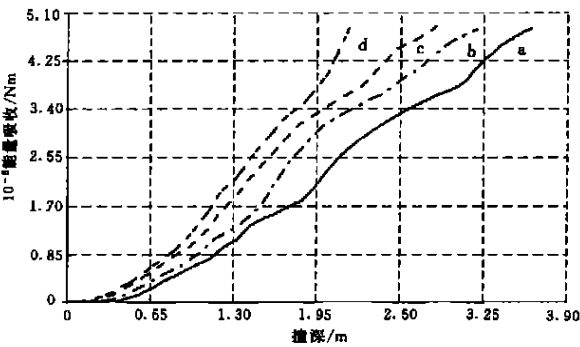


图 19 球鼻艏 a、b、c、d 的能量吸收随撞深的变化的比较

7 结 论

球鼻艏的外形形状,首先当然应该能够有效降低船舶阻力,在此前提下,从减小结构碰撞损伤的观点来看,改进碰撞船艏的设计可能是一条很有希望的途径。本文通过一系列的碰撞仿真分析可以得出以下结论:

- (1) 消耗掉同样的动能时, 形状越尖锐的球鼻艏的最终撞深越大, 所经历的碰撞时间也越长。
  - (2) 越钝的球鼻艏, 最大压溃强度越小, 而且其第一压溃强度也越小。这说明较钝的球鼻艏的整体纵向刚度较小。
  - (3) 球鼻艏的钝锐程度影响构件能量吸收的比例。尖锐球鼻艏外壳吸能比例最高, 随着外壳的形状钝化, 内部纵舱壁和平台甲板的吸能比例上升。
  - (4) 在同一撞深下, 越钝的球鼻艏吸收的总能量越多。
  - (5) 在可能的条件下, 设计钝形球鼻艏可以得到有效的碰撞缓冲效果。
- 象汽车前部的设计一样, 为了提高所有船舶的安全性和保护海洋环境, 现在对船舶采用缓冲型船首的设计正开始得到关注。通过本文的论证可以看出, 船舶采用钝形的球鼻艏能有效降低被撞船侧的损伤程度。

## 参 考 文 献

- 1 Endo H and Yamada Y. The performance of buffer bow structures against collision (1st Report: Collapse strength of the simplified structure models) [J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan Vol 189.
- 2 Endo H and Yamada Y. Experimental study on the buffer bow structures[C]. PRADS 2001.
- 3 江华涛. 船舶碰撞与缓冲船艏结构研究[D]. 上海交通大学博士学位论文, 2002, 6.
- 4 MSC/DYTARN USER MANUAL [S]. Version 4.0, 1997, The MacNeal-Schwendler Corporation.
- 5 Jones N. Structural Impact[M]. Cambridge, Cambridge University Press, 1989.

## Discussion on Buffer Bulbous Bow — Influence of Bow Curvature on Ship Collision

J IANG Hua-tao, GU Yong-ning

(School of Naval Architecture & Ocean Engineering,  
Shanghai Jiao tong University, Shanghai 200030, China)

### Abstract

Ship-ship collision might cause serious damage to the struck ship and also threaten the safety of the life onboard. When an oil tanker is collided by a large ship, disastrous oil spill might be induced and marine environment nearby might be seriously contaminated. With the increasing of the number and the dimensions of ships, only using the double hull system in side hull cannot satisfy the requirement of avoiding the rupture of struck ship side. The idea of buffer bow is put forward for reducing the damage of struck ship side caused by the striking bow. The curvature of bow shape will affect the collision properties of the striking bow and the damage of the side of the struck ship. The symbolic parameter expressing the collision properties of the ship bow is put forward and discussed in this paper. The influence of the curvature of bow shape on distortion mode, collision force, collision force density and energy absorption of the bulbous bow is described in detail through a series of collision numerical simulation for bulbous bows that have different curvatures. It is indicated that using the blunt bulbous bow can effectively reduce penetrable damage of the struck ship side and the risk of environmental pollution due to oil leaking.

**Key words:** ship engineering; ship collision; buffer bulbous bow; numerical simulation; bow geometry

## 作者简介

江华涛 男, 1976 年生, 博士研究生。

顾永宁 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师。现主要从事船舶碰撞及船舶疲劳分析研究。

# 中国造船工程学会成立 60 周年纪念会 暨专题学术研讨会在渝举行

中国造船工程学会成立 60 周年纪念会暨专题学术研讨会于 2003 年 2 月 28 日在重庆市雾都宾馆隆重举行。来自全国各地造船界的代表 80 余人欢聚一堂, 纪念我国造船界前辈 60 年前的壮举。

1943 年 2 月 1 日, 正值抗日战争硝烟正浓, 日本侵略者的气焰已成强弩之末, 祖国光复指日可待之时, 时在重庆的我国造船界的智者叶在馥、卢作孚、王荣、王公衡、张文治等, 为了迎接抗日战争胜利和振兴祖国的造船工业, 毅然发起成立了中国造船工程学会。其时会员总数只不过数十人。而今, 60 年过去, 我国造船工业已跃居世界第三位, 会员人数已是刚成立时的千倍以上。

纪念会由学会理事长黄平涛主持, 学会名誉理事长王荣生在会上发表了热情洋溢的长篇讲话, 回顾了学会成立 60 年来走过的历程, 深情缅怀前辈们的业绩, 也展望了未来的前景, 希望我国造船界继承前辈们的精神, 为振兴祖国造船工业而不懈努力。86 岁高龄的中科院院士杨, 是会龄 60 年的老会员。他亲临纪念会, 在会上激动致词, 叙说了学会成立时的情景。卢作孚先生的哲嗣卢国纪先生代表民生轮船公司在会上郑重表示, 民生轮船公司将一如学会成立之时, 今后继续支持学会的工作和活动。江南造船集团的姜思荣教授, 作为学会第一任理事长马德骥先生所在单位江南制造所(江南造船集团前身)的代表也在会上致词。

重庆市人大副主任税正宽, 副市长吴家农及有关部门领导出席了纪念会。在纪念会结束之前, 吴副市长发表了即兴讲话, 热烈欢迎全国各地造船界的专家汇聚山城, 扼要介绍了重庆市建为直辖市以来的发展, 希望专家们为重庆造船工业、航运和旅游事业的不断进步传经送宝。

在随后进行的专题学术研讨活动中, 在学会副理事长方书甲主持下, 来自各地的专家分别从宏观预测、长远规划、航运、造船、旅游等角度, 对三峡库区的建设和发展进行了专题研讨。大家确信, 三峡库区的建成, 将出现一个高峡平湖、峡感依然的动人情景, 将为重庆市及库区的经济发展带来良好的机遇, 我们应该以无比的热情迎接新重庆和新三峡的到来。

(康伯霖)