

文章编号: 1001-1455(2010)05-0479-08

舱内液体对 VLCC 舷侧结构碰撞性能的影响*

张延昌^{1,2}, 杨代玉¹, 王自力¹

(1. 江苏科技大学船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003;

2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030)

摘要: 以 300 kDWT 超大型油轮 (VLCC) 货舱区舷侧结构为研究对象, 利用有限元软件 MSC. Dytran 对该 VLCC 在满载和压载工况下的碰撞损伤机理及耐撞性能进行研究, 通过对碰撞过程中液货与结构之间的流-固耦合力、碰撞力、结构变形、结构吸能等进行计算分析, 并将这些参数与空载工况下的计算结果进行了对比分析, 阐述舱内液体对结构损伤机理及碰撞性能的影响。研究表明, 舱内液货对 VLCC 舷侧结构碰撞后期的损伤变形、碰撞力等产生一定影响, 对整体碰撞性能影响较小; 压载水对结构的损伤机理、耐撞性能均产生显著影响, 结构的变形模式发生明显改变, 碰撞力显著增大, 系统吸能大幅增加, 其耐撞性能显著提高。

关键词: 固体力学; 损伤机理; 流-固耦合; 超大型油轮; 耐撞性能; 船舶碰撞; 满载; 压载

中图分类号: O342; U661.4

国标学科代码: 130 · 1565

文献标志码: A

1 引言

船舶碰撞和搁浅事故往往会造成船体结构破损、货物泄漏、环境污染、人员伤亡等灾难性后果。从船舶、人员安全及海洋环境保护上来看, 开展船舶碰撞研究都具有重要意义。

近些年来, 船舶碰撞与搁浅成为船舶力学领域的研究重点^[1-2], 学者们^[3-6]针对船舶碰撞及耐撞结构等做了大量的研究工作, 旨在提高船舶的碰撞性能, 提出了多种耐撞结构形式。船舶碰撞问题涉及材料学、刚体动力学、塑性动力学、结构动力学、船舶水动力学、损伤力学等学科, 研究中通常忽略舱内液体对船体结构损伤机理及结构耐撞性能的影响。油船在服役期间装载工况通常是满载或压载的 2 种工况, 因此, 研究舱内液体 (液货、压载水) 与结构的耦合作用对舷侧结构的碰撞性能的影响有重要意义。A. Zhang 等^[7]分析了碰撞过程中满载工况下流-固耦合力, 但没有详细讨论舱内液货对船体结构损伤机理及耐撞性能的影响。张延昌等^[8]利用有限元软件分析了背液船体板架的碰撞损伤机理及耐撞性能。

本文中 300 kDWT VLCC 油舱舷侧结构为研究对象, 利用非线性有限元软件 MSC. Dytran 研究该结构在满载及压载工况下的碰撞性能, 通过计算碰撞过程中液货或压载水与结构之间的耦合力、结构损伤变形、能量吸收、碰撞力等, 分析舱内液体对舷侧结构损伤机理的影响, 并通过与空载工况下结构损伤机理的比较揭示液货或压载水对结构耐撞性能的影响。

2 满载工况下 VLCC 舷侧结构碰撞性能

2.1 碰撞方案及有限元模型

对 300 kDWT VLCC 油舱舷侧结构在满载 (95% 装载) 工况下的碰撞性能进行数值模拟。考虑到船舶碰撞具有明显的局部特性以及为了使问题简化, 对该船中间舱段进行研究。撞击船选取排水量为 20 kt 带球鼻艏的某型集装箱船, 撞击速度取为 10 m/s, 撞击位置选取在舷侧板架平台与肋板交叉处。采用附连水法计及舷外水对碰撞历程的影响, 附连水以附加质量密度的形式加到相撞船体上^[9]。

舷侧结构采用 shell 单元模拟, 采用局部细化网格技术; 约束采用舱段两端节点刚性固定形式; 材料模型采用考虑应变率敏感性的 Cowper-Symonds 本构方程, 最大塑性应变为 0.3; 撞头采用刚性模型。

* 收稿日期: 2009-06-30; 修回日期: 2009-08-31

作者简介: 张延昌 (1977—), 男, 博士研究生, 讲师。

舱段采用 DYMAT24 模型,以附加质量密度方式考虑舷外水的影响,泊松比为 0.3,密度(包括附连水)为 10.99 t/m³,屈服应力为 235 MPa,弹性模量为 210 GPa,应变率敏感参数 $D=40, P=5$;液货采用 DMAT 模型,密度为 0.86 t/m³,体积模量为 1 450 MPa。舱内液货流体欧拉域网格的特征长度为 0.36 m,欧拉域为 25 m×18 m×18 m,舱室空间定义为空穴,与舱段接触区域定义为液货与舱段结构的一般耦合,不考虑液货静水压力。有限元模型见图 1。

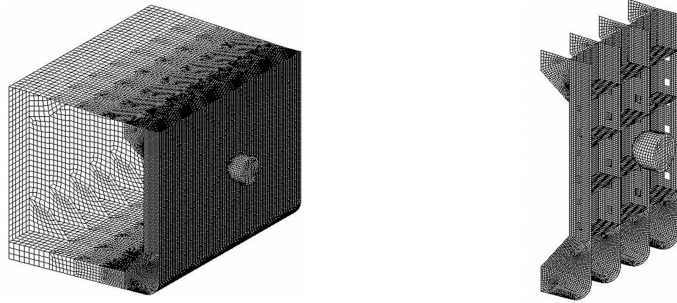


图 1 结构有限元模型

Fig. 1 A finite element model of the hull structure

2.2 计算结果分析

2.2.1 流-固耦合力及碰撞力

图 2 给出了舷侧板架中心 4.68 m×4.80 m 区域内内壁板板格流-固耦合平均压力(面积平均)与撞深的关系曲线,图 3 给出了 2 种工况下的碰撞力-撞深曲线。从图中可以看出:(1)根据结构损伤机理及流-固耦合压力分布,整个碰撞过程可分为 3 个阶段。A 段,撞深为 0~0.800 m,该阶段由于内壁板弹性变形引起的液货动压力相对碰撞力较小,随着外板破裂结构弹性变形恢复液货动压力迅速减小为零;该阶段满载与压载 2 工况下的碰撞力几乎完全一致。B 段,撞深为 0.800~2.500 m,内壁板处于小幅弹性往复变形,由于前 1 阶段耦合力作用液货产生的运动与内壁板的弹性回复变形方向相反,因此液货与结构处于“分离”状态,该阶段动压力为零;此阶段 2 工况下的碰撞力基本一致。C 段,撞深大于 2.500 m 后,随着内壁板变形急剧增加,内壁板变形增加速度大于液货运动的速度,流-固耦合力迅速增加,该阶段下动压力的非线性增强;该阶段流体动压力对结构的碰撞力产生较大的影响,使碰撞力增加。(2)碰撞后期,液货对结构的碰撞历程产生一定影响,虽然液货的惯性产生流-固耦合力使碰撞力有小范围的增加,但由于流-固耦合力较小,液货对双壳结构碰撞力的影响不大。

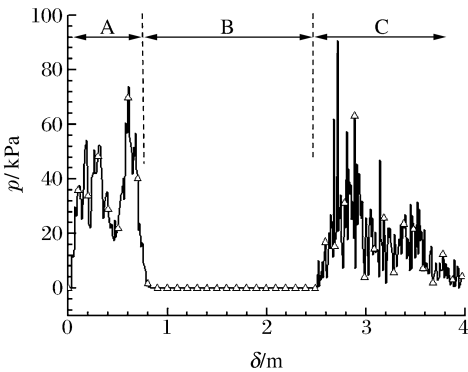


图 2 流-固耦合压力-撞深曲线

Fig. 2 Average pressure-penetration curve

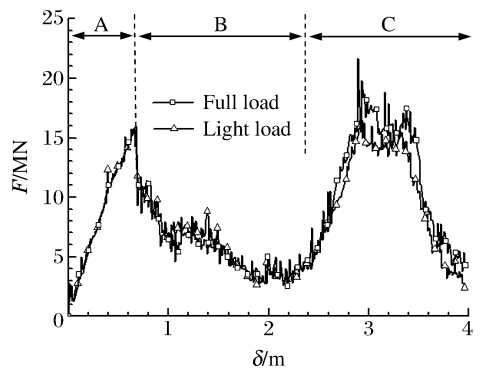


图 3 碰撞力-撞深曲线

Fig. 3 Collision force-penetration curves

2.2.2 损伤变形及位移

图 4 给出了撞深为 2.800 m 时内壁板沿船长方向各点处的位移,满载工况下内壁板的变形量小于

空载工况下的变形, 2 种工况下结构的变形具有明显的局部性。图 5 给出了内壁板各处位移-撞深曲线, 该曲线与图 2 结合很好地反映了液货与内壁板之间的耦合作用及流体的运动。

图 6 为极限撞深时撞击区域内壁板、强框架的变形图, 极限撞深指船体结构完全被撞破(双壳舷侧的内壁板破裂)时撞头的撞深。从该图可看出:(1)满载工况下外板的损伤变形模式与空载工况下的基本相同, 均以膜拉伸为主, 但满载工况下内壁板的损伤区域略小。张延昌等^[8]详细叙述了流-固耦合力、碰撞力共同作用下结构的变形模式。(2)满载和空载工况下, 外板纵骨和强框架的损伤变形模式以及损伤区域大小均未发生明显改变, 这是由于在碰撞过程中, 2 种工况下强框架的受力状态基本一致。(3)满载及空载工况下舷侧结构的极限撞深均约 2.935 m, 液货对舷侧变形影响不大。

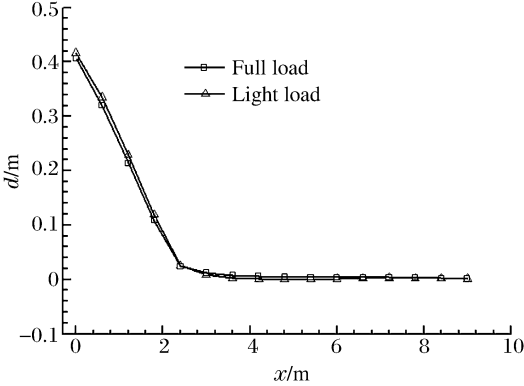


图 4 撞深为 2.800 m 时内壁板位移分布曲线

Fig. 4 Displacement distribution of the inner bulkhead at the penetration of $\delta=2.800$ m

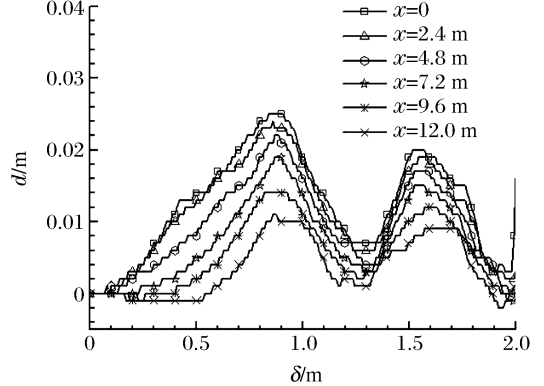


图 5 内壁板位移-撞深曲线

Fig. 5 Displacement-penetration curves of the inner bulkhead

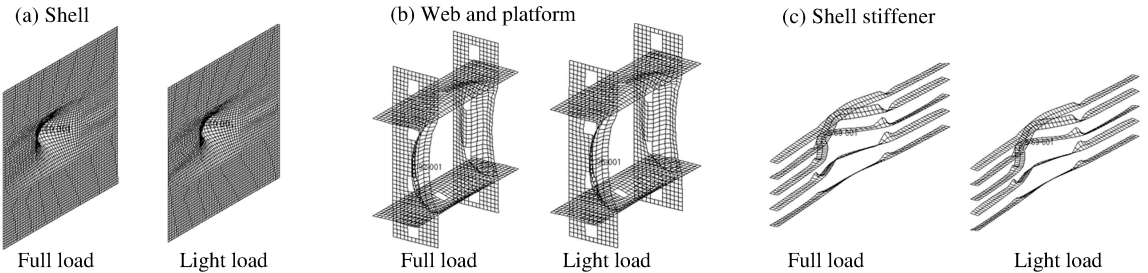


图 6 极限撞深处结构损伤变形图

Fig. 6 Structure damage deformation at limited penetration

2.2.3 能量吸收及耐撞性能

图 7 给出了满载和空载 2 种工况下的撞头能耗及结构吸能曲线, 从图中可以看出:(1)在撞深小于 2.800 m 前, 满载和空载工况下的撞头能耗曲线基本吻合, 这说明在该阶段舱内液货对撞头能耗几乎不产生影响, 这也验证了 2 工况下的碰撞力曲线比较接近。(2)撞深大于工况下的 2.800 m 后, 满载工况下的撞头能耗高于空载工况下的撞头能耗, 由于舱内液货对碰撞力产生了影响, 使撞头所受的碰撞力增大, 同时液货吸收一部分能量转化为动能和内能, 这对结构耐撞性能是有利的。

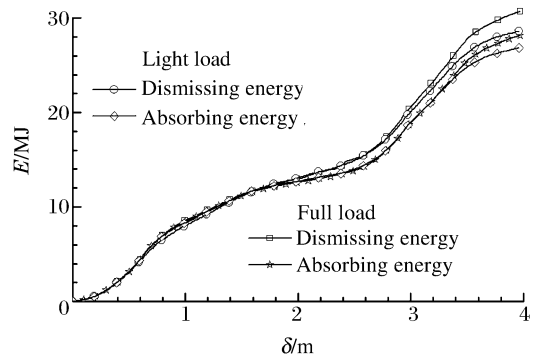


图 7 撞头能量耗散及结构吸能

Fig. 7 Striker energy dismissing and energy absorbing

满载、压载 2 种工况极限撞深下撞头的动能耗散 E_d 分别为 19.62、19.22 MJ, 结构的吸能情况如表 1 所示, 表中 E_a^s 为结构吸能, E_a^l 为液货吸能, “其他”包括甲板、船底板架结构吸能、所有结构的动能等。由表 1 可以看出 2 种工况下结构的吸能基本相当, 结构耐撞性能相差不大。通过综合分析表明液货对舷侧结构耐撞性能的影响不大, 通常研究结构的耐撞性能时忽略液货的影响是安全、合理的。

表 1 能量耗散及吸能汇总

Table 1 Energy dismissing and energy absorbing of structure

工况	E_d /MJ	E_a^s							E_a^l /MJ
		外板	内壁板	肋板	平台	纵骨	其他	总吸能	
满载	19.62	8.52	2.33	0.98	0.13	5.62	0.77	18.35	0.37
空载	19.22	8.91	2.40	0.93	0.18	5.58	0.52	18.52	

3 压载工况下 VLCC 舷侧结构碰撞性能

3.1 碰撞方案及有限元模型

对上述 VLCC 舷侧结构, 分析压载工况下压载水对舷侧碰撞性能的影响。分析时舷侧压载舱 95% 装载。结构有限元模型、材料属性、边界约束等参数与 1.1 节中的相同。水域欧拉有限元模型中压载水与舷侧结构之间定义为一般耦合, 但由于肋板和平台上具有很多小开孔, 而耦合面必须是封闭的, 因此需定义带孔洞通透性的多欧拉耦合, 压载水欧拉域采用网格自动生成器生成。

3.2 计算结果分析

3.2.1 流-固耦合力及碰撞力

图 8 为舷侧外板沿船长 x 方向、型深 z 方向的压力分布曲线, 从图中可以看出: (1) 平台、肋板分割成的不同舱室内的压载水动压力差距较大。撞深在 0~1.800 m 之间, 随着撞深增加 O 舱外板板格 (撞头接触区域平台、肋板构成的压载舱室称为 O 舱, 前后相邻的舱室分别为 A 舱和 B 舱) 压力明显高于 A 舱外板板格, 压载水由 O 舱流向 A 舱及其他相邻舱室, A 舱内水动压力增加, 并在撞深为 1.800 m 时达到最大值。撞深超过 1.800 m 后, 由于舷侧外板破裂导致压载水大量外溢, O 舱内的压力急剧下降, 这时 O 舱压力低于相邻舱室, 压载水从 A/B 舱向 O 舱流动, A/B 舱压力降低。

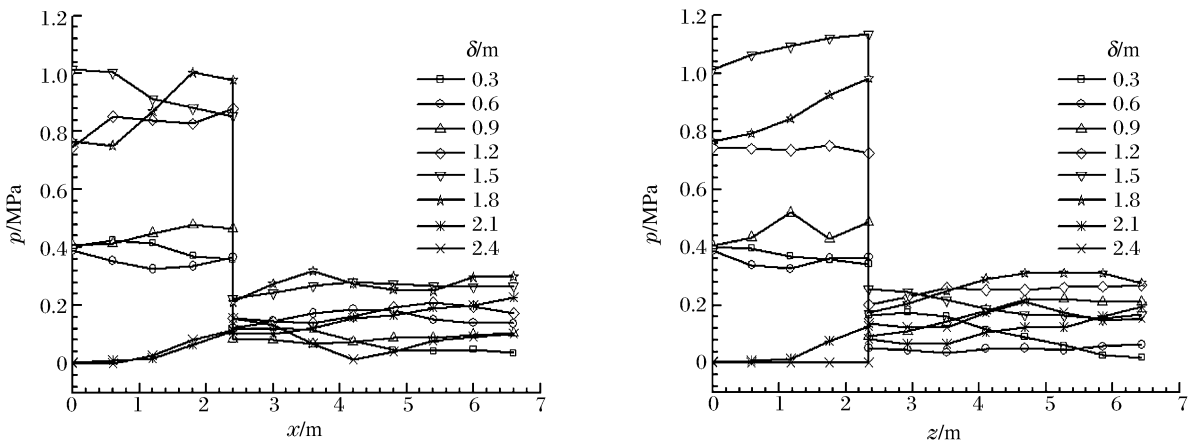


图 8 外板压力分布曲线

Fig. 8 Pressure distribution curves of fluid-structure interaction

图 9 中板格平均压力-撞深曲线的变化趋势基本一致, 均出现 2 次加载、卸载过程。各阶段与舷侧外板的变形、压载水的运动相对应, 以 O 舱外板板格压力曲线为例对各阶段进行分析。随着外板结构变形的增加, 流-固耦合力增大, 流体开始加速运动; 流体运动加剧并与外板变形基本一致; 随后船体外板破裂, 压力急剧下降; 船体外板破裂后, 由于压载水的运动以及破口尺寸较小, 压载水没有迅速外溢, 外板变形继续加剧使动压力增加, 进入第 2 次加载阶段; 结构破损严重, 压载水大量外溢, 压力迅速下

降,压载水的作用消失,即第 2 次卸载段。该曲线反映了压载水在碰撞过程中的作用,解释了压载工况下结构损伤机理。其他舱内板格的压力曲线与上述情况相类似,不同之处在于存在明显的滞后性,由于其他舱内压载水动压力是由 O 舱内压载水运动流入引起的,压载水流动存在滞后性。

图 10~11 为 O 舱四周肋板、平台正反 2 面压力分布曲线。肋板、平台两面的横向压力差使结构的变形模式更复杂、变形程度增加。图 12 为压载和空载工况下的碰撞力历程曲线。结合压载水动压力曲线, O 舱内各板架的流-固耦合压力与碰撞力基本在同数量级上,流-固耦合力对碰撞力历程曲线产生显著影响,与空载下双壳舷侧结构的碰撞力历程曲线相比,碰撞力除与结构抵抗变形能力有关,还受压载水引起的流-固耦合力的影响,压载工况下碰撞力曲线增加了峰值个数,共有 3 次加载、卸载过程。2 条曲线在碰撞后期(撞深大于 2.000 m)基本一致,也即压载水对碰撞力曲线的最后 1 个峰值影响不大,结构极限撞深基本相当(压载工况下为 2.934 m,空载工况下为 2.954 m);由于压载水产生的流-固耦合力使碰撞力第 1 峰值压力增加,外板破裂提前(破裂时的撞深减小);2 工况下碰撞力曲线的主要区别体现在首尾峰值之间,该阶段对应压载水的动压力曲线上的第 2 次加载过程。

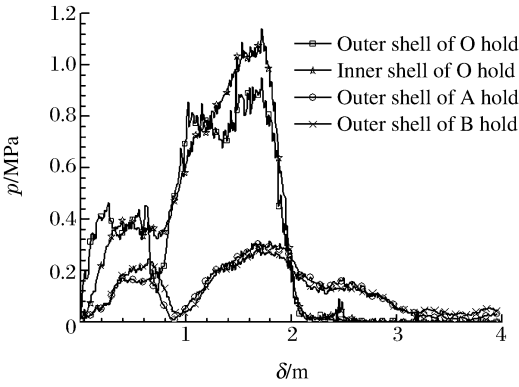


图 9 板格平均压力-撞深曲线

Fig. 9 Average pressure vs penetration of shells

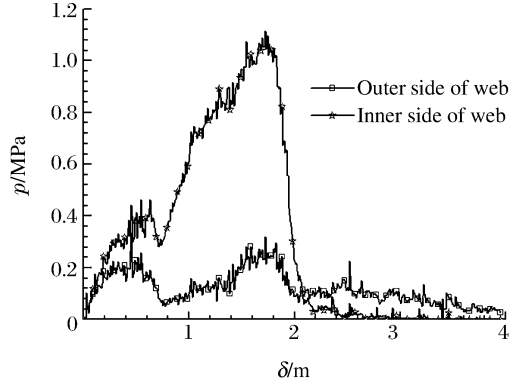


图 10 撞击区域肋板平均压力-撞深曲线

Fig. 10 Average pressure-penetration curves of web

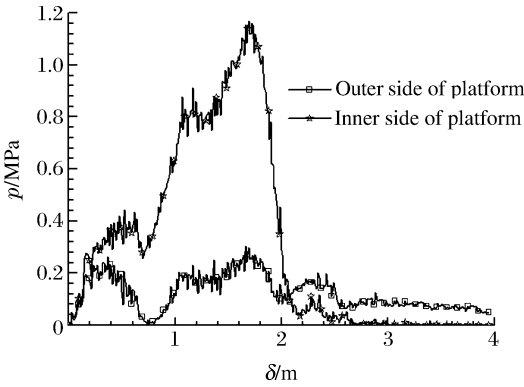


图 11 撞击区域平台平均压力-撞深曲线

Fig. 11 Average pressure-penetration curves of platform

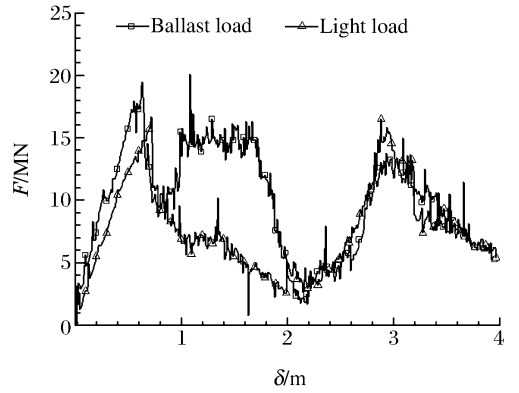


图 12 碰撞力-撞深曲线

Fig. 12 Collision force-penetration curves

3.2.2 损伤变形及位移

图 13 为压载、空载 2 种工况下船体外板、平台肋板强框架的结构损伤变形图,从图中可以看出,压载工况下舷侧外板在碰撞区域受碰撞力及流-固耦合力共同作用,使外板的变形范围减小,变形形状与撞头更相似;非接触区域的外板受到流-固耦合力及相邻板拉伸作用,产生膜拉伸及反向弯曲变形,流-固耦合力对结构在碰撞力作用下的变形起阻碍作用,使该区域的变形减小,变形模式改变。压载工况下肋板和平台的变形范围以及变形程度均明显高于空载工况下的,变形模式除了面内受压变形外,还受相邻舱室内压载水动压力差的作用产生外凸变形。由于碰撞接触区域舱室内压载水的动压力远高于非接

触区域的舱室压力,致使平台、肋板产生面内弯曲变形,提高强框架的吸能效率,提高结构的耐撞性能。

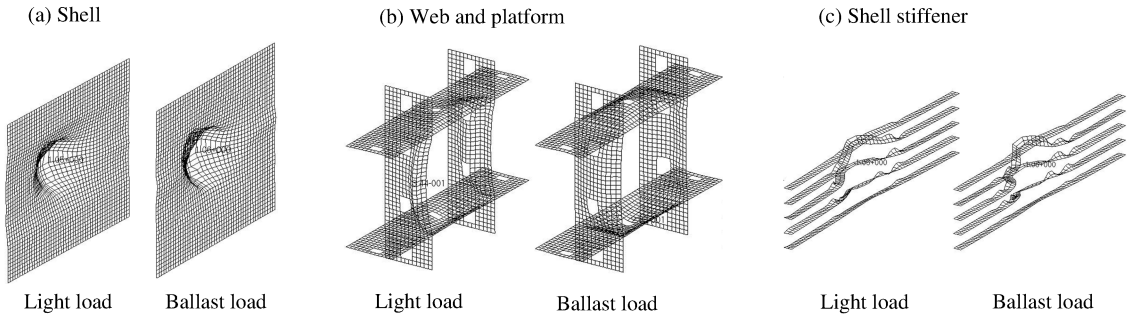


图 13 撞深为 1.050 m 时结构变形损伤图

Fig. 13 Structure damage deformation at penetration = 1.050 m

图 14 给出了船体外板在撞深为 0.500、1.800 m 时结构的位移分布,很好地反映了结构的变形特点。撞头接触区域变形显著,形状与撞头外形相似;非撞击区船体外板变形较小,甚至出现反向变形。

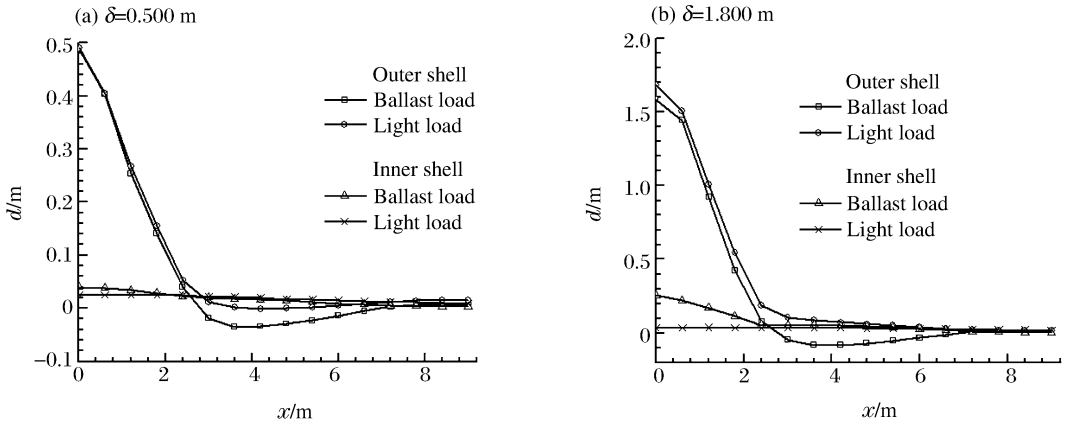


图 14 板架结构位移分布

Fig. 14 Displacement distribution curves of inner and outer shells

3.2.3 能量吸收及耐撞性能

图 15~17 反映了压载和空载工况下的撞击船能量耗散及结构吸能曲线。从图中可以看出:

(1)压载工况下撞头能耗远高于空载工况下的,极限撞深(压载工况下为 2.934 m,空载工况下为 2.954 m)时撞头能耗分别为 30.10、19.36 MJ,前者高出后者 55.5%,其中很大一部分能量转化为液体的动能和内能,这表明压载工况下舷侧结构抗撞能力显著提高。舷侧结构耐撞性能的提高主要依靠压载水的吸能。(2)压载工况下舷侧结构的吸能略高于空载工况下结构的吸能,压载水起到载荷传递作用,压载水的水动压力使平台、肋板的变形增加,强框架结构的变形范围增大、变形程度增加,对提高结构的耐撞性能起积极作用。

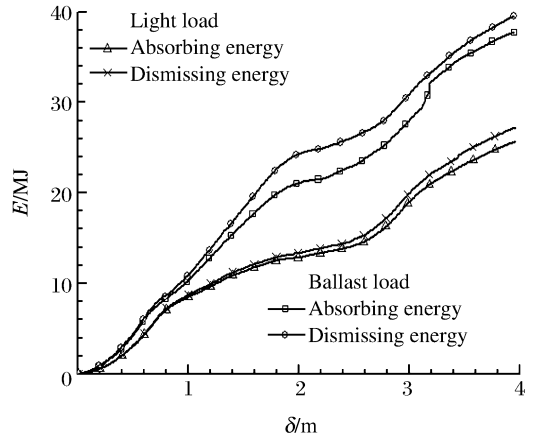


图 15 能耗及吸能曲线

Fig. 15 Energy dismissing and absorbing curves

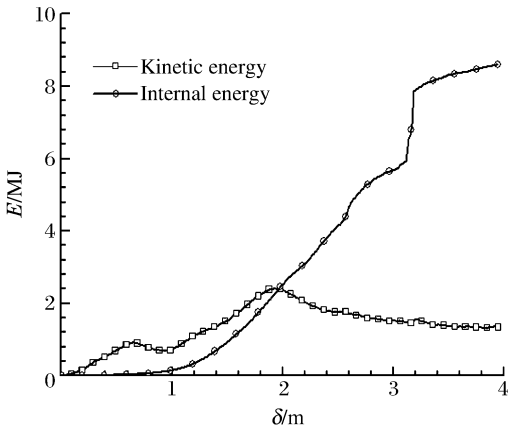


图 16 压载水吸能曲线

Fig. 16 Energy absorbing curves of ballast water

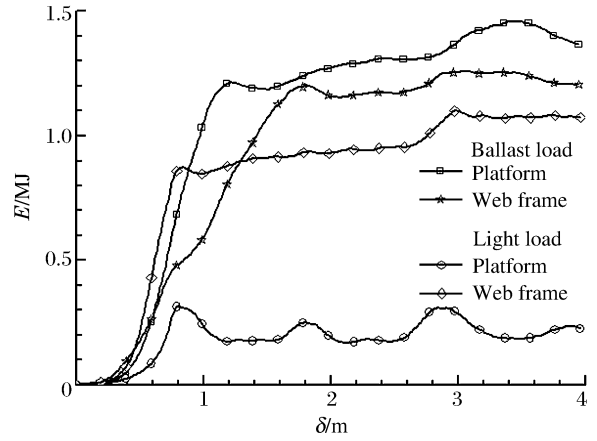


图 17 结构吸能曲线

Fig. 17 Energy absorbing curves of structures

4 结束语

考虑舱内液体的影响,对 300 kDWT VLCC 在满载和压载 2 工况下的损伤机理及耐撞性能进行了研究,对流-固耦合力、碰撞力、变形、结构吸能等进行了详细的分析,并与空载工况下的结果进行了比较。研究表明:舱内液体对结构耐撞性能具有积极作用,对结构的损伤机理及耐撞性能产生一定影响。

(1) 满载工况下,碰撞过程中随着内壁板变形增大,液货对结构的影响增大,由此引起的流-固耦合力较小,且作用时间较短。因此,舱内液货对舷侧结构碰撞性能的影响较小,且主要表现在碰撞后期。在研究满载工况下船舶碰撞时,忽略液货的影响是可行的。

(2) 舷侧压载水对结构碰撞性能产生了显著影响。一方面压载水起到载荷传递作用,增大结构的变形范围;另一方面压载水吸收了一定的能量,使压载工况下舷侧结构的耐撞性能显著提高。碰撞前期,碰撞力明显提高,外壳、外壳纵骨、平台及肋板的变形模式及损伤变形程度改变。碰撞后期,压载水对结构碰撞性能的影响很小,内壳板及纵骨的损伤变形亦无明显改变。

参考文献:

- [1] Wang G, Ji C, Kujala P, et al. Collision and grounding[C]// Proceedings of the 16th International Ship and Off-shore Structures Congress. Southampton, UK: University of Southampton Press, 2006:1-60.
- [2] 胡志强,崔维成. 船舶碰撞研究机理与耐撞性结构设计研究总综述[J]. 船舶力学, 2005, 9(2):131-142.
HU Zhi-qiang, CUI Wei-cheng. Review of the researches on the ship collision mechanisms and the structural designs against collision[J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(2):131-142.
- [3] Kiamura O, Nagasaki R, Center D. Comparative study on collision resistance of side structure[J]. Marine Technology, 1997, 34(4):293-308.
- [4] 王自力,顾永宁. 船舶碰撞动力学过程的数值仿真研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1):29-34.
WANG Zi-li, GU Yong-ning. Numerical simulations of ship/ship collisions[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(1):29-34.
- [5] 张延昌. 船舶特种耐撞结构设计研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2006.
- [6] 王自力,张延昌. 基于夹层板单壳船体耐撞结构设计[J]. 中国造船, 2008, 49(1):60-65.
WANG Zi-li, ZHANG Yan-chang. Crashworthy design of single side ship structure based on sandwich panel[J]. Shipbuilding of China, 2008, 49(1):60-65.
- [7] Zhang A, Suzuki K. Numerical simulation of fluid-structure interaction of liquid cargo filled tank during ship collision using the ALE finite element method[J]. International Journal of Crashworthiness, 2006, 11(4):291-298.
- [8] 张延昌,杨代玉,王自力. 船体背液板架碰撞损伤机理研究[J]. 江苏科技大学学报, 2009, 23(2):18-23.

ZHANG Yan-chang, YANG Dai-yu, WANG Zi-li. Study on damage mechanism of framing panel backed with liquid during ship collision[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 2009, 23(2):18-23.

[9] 王自力, 蒋志勇, 顾永宁. 船舶碰撞数值仿真的附加质量模型[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(4):322-326.

WANG Zi-li, JIANG Zhi-yong, GU Yong-ning. An added water mass model for numerical simulation of ship/ship collisions[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(3):322-326.

Effects of liquid cargo on side structure behaviors of a VLCC in collision*

ZHANG Yan-chang^{1,2}, YANG Dai-yu¹, WANG Zi-li¹

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China;

2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 20030, China)

Abstract: The double-sided structure of a very large crude carrier (VLCC)' cargo hold was chosen as the research object. The nonlinear finite element code, MSC. Dytran was applied to investigate numerically the collision damage mechanism and crashworthiness of this structure under full load and ballast conditions. And the corresponding parameters, including fluid-structure interaction pressure, collision force, deformation and energy absorbing, were computed and compared with the results under light load conditions. The results show that the liquid cargo affects to a certain extent the structural damage deformation and collision force in the later stage of collision but influences weakly the whole crashworthiness of this structure. Ballast water has remarkable effect on damage mechanism, crashworthiness performance and deformation patterns. The fluid-structure interaction force can cause significant changes in deformation patterns, remarkable increase in impact force and energy absorption, evident improve in crashworthiness.

Key words: solid mechanics; damage mechanism; fluid-structure interaction; very large crude carrier; crashworthiness; ship collision; full load; ballast

* Received 30 June 2009; Revised 31 August 2009

Corresponding author: ZHANG Yan-chang, zyc0713@126.com