

深水 FPSO 船体波浪砰击载荷试验和结构分析

徐田甜¹ 张美荣²

1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459;

2. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451

摘 要:某深水浮式生产储卸油装置(Floating Production Storage and Offloading, FPSO)船体设计为超肥大筒易折角线型,须校核 FPSO 船体抗波浪砰击结构强度。基于德国劳氏船级社(Germanischer Lloyd Noble Denton)GL0030 /ND *Guidelines for marine transportations* 和航线环境条件确定了 FPSO 远洋拖航设计环境条件和载况,针对 FPSO 在位作业极端环境工况和远洋拖航自存工况,开展了耐波性能水池模型试验,研究了 FPSO 船首、尾处的波浪砰击载荷,重点分析了远洋拖航自存工况的波浪砰击载荷特性、不同波浪谱峰周期、浪向时的波浪砰击载荷分布,确定了超出法国船级社(Bureau Veritas)NR445 *Rules for the classification of offshore units* 和 NR467 *Rules for the classification of steel ship* 的 FPSO 船体抗波浪砰击设计要求。试验结果表明,未发现 FPSO 船尾主甲板上浪现象,验证了船尾线型设计的可行性。FPSO 船首、尾结构做了特别加强,应用 PATRAN /NASTRAN 软件分析了 FPSO 船体强度,满足法国船级社规范要求。研究结果对深水 FPSO 船体结构设计有借鉴作用。

关键词: FPSO;耐波性能;波浪砰击;模型试验;船体强度

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.02.018

Wave slamming load test and structural analysis on deep water FPSO hull

XU Tiantian¹, ZHANG Meirong²

1. CNOOC China Ltd., Tianjin Branch, Tianjin, 300459, China;

2. China Offshore Oil Engineering Company, Tianjin, 300451, China

Abstract: A deep water floating production storage and offloading (FPSO) hull is designed as super fat, simple angular lines shape. It is necessary to check the FPSO hull structural strength against wave slamming. The environmental conditions and load cases for FPSO ocean towing design is determined based on Germanischer Lloyd Noble Denton GL0030 /ND *Guidelines for Marine Transportations* and environmental condition of the towing route. The sea keeping performance tank model test is carried out to study wave slamming load at FPSO bow and stern under on-site operation extreme environmental conditions and ocean towing survival condition, focusing on the analysis of wave slamming load characteristics and load distribution for different peak period of wave spectrum and wave direction under ocean towing, so that the design requirements for FPSO hull wave slamming that exceed Bureau Veritas Classification Society NR445 *Rules for the classification of offshore units* & NR467 *Rules for the classification of steel ship* are determined. The main results reveal that no green water on FPSO main deck at the stern is found, which verifies the feasibility of the design of lines shape at the stern. FPSO bow and stern structure is specially strengthened, and hull

收稿日期:2021-12-08

作者简介:徐田甜(1978-),男,湖北石首人,高级工程师,学士,主要从事海洋石油工程研究、设计。E-mail: xutt@cnooc.

com.cn

strength is analyzed by PATRAN /NASTRAN software, which meets Bureau Veritas Classification Society rules' requirements. This paper can be used as a reference for the hull structure design of deep water FPSO.

Keywords: Floating production storage and offloading; Sea keeping performance; Wave slamming; Model test; Hull strength

0 前言

浮式生产储卸油装置(Floating Production Storage and Offloading, FPSO)在全生命周期内须经受恶劣海洋环境的考验,在位作业极端环境工况和远洋拖航工况通常是 FPSO 船体结构设计的控制性工况^[1]。为保证船体在全生命周期内的结构完整性,FPSO 船体设计时需确定其可能遭遇的极限载荷,其中波浪砰击载荷是船体设计的重要载荷^[2-3]。波浪砰击会造成很强的局部砰击压强,可能导致船体局部强度丧失,故船体设计需尽可能准确地确定波浪砰击载荷^[4]。

目前,确定船体波浪砰击载荷有规范法、理论计算法和试验法等方法。各船级社编制了关于船体波浪砰击载荷计算的规范,FPSO 船体线型的几何复杂性和波浪砰击载荷的强非线性使得按船级社规范公式计算的波浪砰击载荷有误差^[5]。结构入水的理论计算法基本上仍局限于二维简单形状物体的入水问题,还难以将其应用于船体波

浪砰击载荷的工程计算。重要的海洋工程结构物除了按船级社规范公式计算设计外,还应开展耐波性能水池模型试验,可更准确地预报船体波浪砰击载荷^[6-7]。

基于此,本文以某深水 FPSO 为例,开展耐波性能水池模型试验,根据试验结果分析波浪砰击载荷特性,进行船体抗波浪砰击结构强度分析和设计。

1 FPSO 设计环境条件

1.1 FPSO 在位作业工况

某深水 FPSO 作业于热带海域,设计环境条件见表 1。该海域的波浪由主涌浪、次涌浪和风生浪构成,以长期的主涌浪为主要成分。主涌浪和次涌浪的来向角范围(相对于真北 0°方向)分别为 180°~232.5°和 172.5°~232.5°。FPSO 采用多点系泊系统,船尾端(生活区所在端)对着主涌浪来向的中央位置,FPSO 的纵向轴线与真北方向设计夹角为 17°,以尽量减小 FPSO 的横摇运动。FPSO 系泊系统布置见图 1。

表 1 FPSO 作业海域设计环境条件表

Tab. 1 Environmental condition for FPSO on-site operation design

环境条件重现期 /a	波浪有义波高 /m	波浪谱峰周期 /s	1 min 平均风速 /(m·s ⁻¹)	海表面流速/(m·s ⁻¹)
100	3.60(主涌浪) 1.55(次涌浪) 2.75(风生浪)	17.5(主涌浪) 14.7(次涌浪) 7.2(风生浪)	32.3	2.0
1	2.60(主涌浪) 1.15(次涌浪) 2.05(风生浪)	15.9(主涌浪) 13.8(次涌浪) 6.7(风生浪)	19.6	1.7

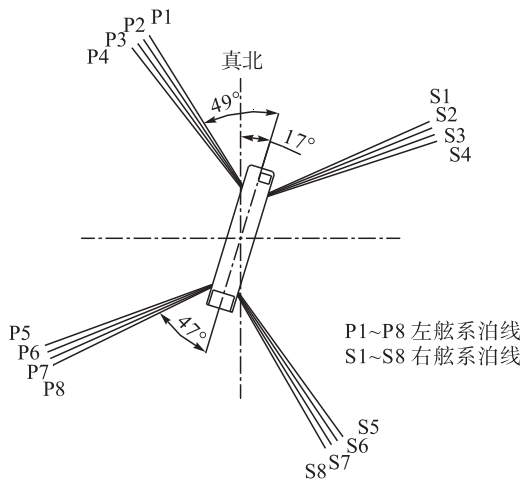


图 1 FPSO 系泊系统布置示意图

Fig. 1 FPSO mooring arrangement plan

FPSO 入法国船级社(Bureau Veritas)船级,主要技术参数见表 2。主船体采用简易折角线型,为最小干舷船型。

FPSO 因船尾机舱布置空间要求造成尾部线型收缩剧烈,同时为满足布置生活区的甲板面积要求,船尾设计为全宽主甲板,造成船尾端部的横剖线外飘较大,即对船尾抗波浪砰击结构强度不利^[8]。

1.2 FPSO 远洋拖航工况

根据德国劳氏船级社(Germanischer Lloyd Noble Denton)GL0030 /ND Guidelines for marine transportations^[9]要求和航线环境条件,确定远洋拖航设计环境条件和载况,见表 3。

良好海况,设计拖航航速不小于 3.1 m/s;恶劣海况,拖船队须控制 FPSO 顶风、浪、流滞航;采用水池拖曳试验方法确定了 FPSO 远洋拖带的首端和吃水、纵倾;拖

表 2 FPSO 主要技术参数表

Tab.2 Main parameters of FPSO

总长×型宽×型深 / (m×m×m)	满载吃水 / m	单次原油外输 结束最小吃水 / m	在位作业 最小吃水 / m	方形系数 (满载吃水处)	艏龙骨 长×宽 / (m×m)	FPSO 在位 纵摇固有 周期 /s	FPSO 在位 横摇固有 周期 /s	FPSO 在位 垂荡固有 周期 /s
330.0×61.0×33.5	25.81	20.12	10.65	0.964	277.5×0.6	11.0~13.0	19.9~21.1	12.0~14.0

表 3 FPSO 远洋拖航设计环境条件和载况表

Tab.3 Environmental condition and load cases for FPSO ocean towing design

远洋拖航工况	1 min 持续 风速 / (m·s ⁻¹)	海水表层 流速 / (m·s ⁻¹)	有义 波高 / m	波浪谱 峰周期 / s	波浪谱峰 提升因子	FPSO 艏 吃水 / m	FPSO 艉 吃水 / m	FPSO 横摇 周期 /s
良好海况,正常拖航	15.0	0.5	2.0	5.10~7.70	3.3	6.5	8.5	15.6
恶劣海况,拖航失速	20.6	1.0	5.0	8.66~12.25	3.3	6.5	8.5	15.6
拖航自存	50.0	1.0	12.0	12.50~19.00	3.3	12.0	12.0	19.7

航自存工况,FPSO 须加载压载水,增大艏吃水以改善耐波性能^[10]。远洋拖航航线十年一遇最大有义波高为 12 m,设计确定拖航自存工况时 FPSO 的吃水为 12 m,此吃水小于 4% 的船体长度,以控制船体受的波浪载荷,但对船首抗波浪砰击结构强度不利^[11]。本深水 FPSO 总体设计要求如下。

1) FPSO 的首端定义为火炬塔或系泊单点所在端;FPSO 在位作业工况迎向主控波浪来向的端部也应定义为首端。将 FPSO 船体的两端(尾端 FR.0 肋位和首端 FR.330 肋位)均定义为船体结构设计的首端。

2) FPSO 在位作业工况的船体浮态应始终保持向火炬塔在位作业所在端(船首端)纵倾 0.5%~1.5%,横倾角不超过±0.5°;FPSO 解脱和在位作业极端环境工况的船体浮态应向火炬塔所在端纵倾 1.5%,以防止火炬系统中排放的物流因船体运动而回流。

2 FPSO 耐波性能水池模型试验

耐波性能模型试验水池长 170 m、宽 40 m、深 5 m,可模拟风、浪、流环境条件。

2.1 耐波性能水池模型

FPSO 耐波性能水池模型试验的船体模型几何缩尺比为 1:60,见图 2。模型通过水平系泊系统定位于水池中央,以保持模型的位置和方位角。水平系泊系统由 4 根细钢缆和弹簧组成,4 根细钢缆分别系在 FPSO 船体模型的首、尾端部,导缆孔位于模型的吃水线处,细钢缆与 FPSO 船体模型的纵向轴线设计夹角分别为 60°、120°、240°和 300°。每根细钢缆的刚度值均为 724 kN/m,FPSO 的纵荡、横荡和首摇的运动刚度值分别为 1 201 kN/m、2 331 kN/m 和 1 319 400 kN·m/°,使 FPSO 水平方向的固有周期远大于波浪以及 FPSO 的垂荡周期,即试验采用的水平系泊系统对 FPSO 船体模型垂荡运动的耦合影响可以忽略^[6]。



图 2 FPSO 耐波性能水池试验船体模型图

Fig.2 Hull model of FPSO sea keeping performance tank test

为了分析波浪砰击载荷特性,在 FPSO 耐波性能水池试验模型的船体首、尾分别设置了砰击压强测量点,测量砰击压强时历数据信号^[12]。在船首和船底设置 4 个波浪砰击压强测量点见图 3,在船尾外飘部位设置 35 个波浪砰击压强测量点见图 4。



图 3 FPSO 船首和船底波浪砰击压强测量点布置图

Fig.3 FPSO bow and bottom wave slamming pressure impacts arrangement



图 4 FPSO 船尾波浪砰击压强测量点布置图

Fig.4 FPSO stern wave slamming pressure impacts arrangement

由图 3 可看出,波浪砰击压强测量点 I 位于船底 FR. 305 肋位的船中纵轴线处;测量点 II 位于拖航自存吃水线与船首斜底面船中垂线的相交处;测量点 III 位于拖航自存吃水线与船首斜底面相交,距船中垂线 15.25 m 处;测量点 IV 位于满载吃水线与船头 FR. 330 肋位船中垂线的相交处。

波浪砰击载荷在船体模型上的作用时间通常为 ms 级^[6]。为了准确捕捉瞬态信号,采集波浪砰击载荷试验数据时需采用较高的频率,试验中取 1 000 Hz。

2.2 耐波性能水池模型试验工况

耐波性能水池模型试验分别模拟了 FPSO 在位作业极端环境工况和远洋拖航自存工况的典型载况,各载况的船体纵倾值满足 FPSO 总体设计要求,见表 4。

表 4 FPSO 耐波性能水池模型试验模拟载况表

Tab. 4 FPSO load case for sea keeping performance tank test

工况	FPSO 船吃水 /m	FPSO 船中吃水 /m	FPSO 艉吃水 /m
在位极端环境,压载	11.882	10.598	9.314
在位极端环境,单次原油外输结束	21.381	20.215	19.049
在位极端环境,满载	27.737	25.809	23.881
远洋拖航自存	11.721	11.704	11.686

FPSO 在位作业极端环境工况以 Ochi-Hubble 谱模拟百年一遇的涌浪和风生浪;浪向角范围为 0°~180°,每个浪向间隔 15°,共取 13 个浪向。FPSO 远洋拖航自存工况以 JONSWAP 谱模拟波浪,分别模拟了谱峰周期为 12.5 s 和 18.8 s 的波浪,浪向角范围为 0°~180°,每个浪向间隔 15°,共取 13 个浪向。试验中实际模拟波浪的有义波高和谱峰周期的误差分别小于 5% 和 2.5%。

2.3 试验结果与分析

定义波浪砰击载荷最重要的参数之一是砰击压强峰值^[13]。试验将压强峰值大于 50 kPa 的砰击定义为有效砰击事件,统计分析不同的波浪中 FPSO 船首、尾的波浪砰击压强峰值和分布规律^[6]。

2.3.1 船首砰击试验结果

试验测得的 FPSO 船首和船底波浪砰击压强试验结果见表 5。

表 5 试验结果与 Bureau Veritas NR445 Rules for the classification of offshore units^[14] (以下简称 BV—NR445)要求的设计波浪砰击压强(计算系数 C_s 取 1.8)对比如下。

1) 船首和船底在顶浪工况受到的砰击最严重,船首斜底面在斜迎浪工况受到砰击最严重。

2) 船底 I 点受波浪砰击压强峰值高于 BV—NR445 对 FR. 285 肋位之前船底要求的设计波浪砰击压强(146.4 kPa),应按此试验结果校核船底强度。

3) 船首斜底面 II 点受波浪砰击压强峰值低于 BV—NR445 对船首斜底面要求的设计波浪砰击压强(670.48 kPa),仍按 BV—NR445 校核船首斜底面强度。

4) 船首 IV 点受波浪砰击压强峰值高于 BV—NR445 对船首要的设计波浪砰击压强(375.76 kPa)约 48%,应按试验结果校核船头强度。

5) 斜迎浪工况时,波浪砰击船首最大高度可达距船底 28.31 m 高处,此高度在 FPSO 满载吃水线之上 2.5 m,须按试验结果特别加强并校核船首强度。

表 5 FPSO 船首波浪砰击压强试验结果表

Tab. 5 Test results of FPSO bow wave slamming pressure

测量点	不同浪向下波浪砰击压强峰值 /kPa				
	0°浪向 (顶浪)	45°浪向 (斜迎浪)	90°浪向 (横浪)	135°浪向 (斜随浪)	180°浪向 (随浪)
I	156.66	138.51	75.34	74.12	63.09
II	202.07	246.93	53.72	69.86	61.79
III	108.97	56.36	—	—	—
IV	555.41	118.46	—	—	—

2.3.2 船尾砰击试验结果

试验测得的 FPSO 船尾波浪砰击压强试验结果见表 6。

表 6 FPSO 船尾波浪砰击压强试验结果表

Tab. 6 Test results of FPSO stern wave slamming pressure

有义波高 /m	波浪谱峰周期 /s	浪向 / (°)	工况	波浪砰击压强峰值 /kPa
3.6	17.5	30	在位极端环境,单次原油外输结束	<100
		30	在位极端环境,满载	<130
		15		<130
		0		<100
12.0	12.5	180(随浪)	远洋拖航自存	<100
	18.8	180(随浪)		<100
	12.5	135(斜随浪)		<100
	18.8	135(斜随浪)		<100
	18.8	90(横浪)		100
	12.5	90(横浪)		349
	18.8	45(斜迎浪)		1 320
	12.5	0(顶浪)		1 180

由表 6 可看出,FPSO 在位作业极端环境工况时的纵倾设计使船尾处有足够的干舷高度,船尾波浪砰击压强较小,未发现船尾主甲板上浪现象,验证了船尾外飘线型设计的可行性,可确保生活区人员和设施安全^[15];

FPSO 远洋拖航自存工况时的船尾波浪砰击压强较大,各浪向试验测得的波浪砰击压强峰值见表 7。FR. 2 ~ FR. 5 肋位,距离船中垂线 18.2 ~ 27 m 区域的波浪砰击

压强峰值超过 BV—NR445 要求的设计波浪砰击压强(计算系数 C_s 取 1.8),须按试验结果特别加强并校核船尾强度。

表 7 FPSO 船尾波浪砰击压强峰值表

Tab. 7 FPSO stern wave slamming peak pressure

波浪砰击区域	试验测得不同浪向下波浪砰击压强峰值 /kPa			BV—NR445 要求设计波浪砰击压强 /kPa
	0°浪向 (顶浪)	45°浪向 (斜迎浪)	90°浪向 (横浪)	
FR. 0 ~ FR. 5 肋位,船中垂线处	1 180.1	1 014.1	0.0	1 490.5
FR. 2 ~ FR. 5 肋位,距离船中垂线 18.2 ~ 27 m 处	548.3	1 319.6	214.3	1 078.5
FR. 17 ~ FR. 20 肋位,距离船中垂线 27 ~ 30.5 m 处	279.4	814.1	348.4	1 078.5

3 FPSO 船体结构分析和设计

按 FPSO 船体受波浪砰击的位置,分别进行船首、船底、舷侧和主甲板结构强度分析^[16]。按 Bureau Veritas 的 NR467 *Rules for the classification of steel ships*(以下简称 BV—IVR467)^[17]要求,分别选取 FPSO 船体首端和尾端 0.2 倍船体长度范围作为抗波浪砰击结构强度分析区域。船体结构在水线以上区域都会受到波浪砰击,单次砰击载荷的作用区域仅发生在较小的面积范围内^[18]。船体结构主要结构强度校核按 IACS *Common structural rules for double hull oil tankers*^[19]要求计算的受波浪砰击载荷区域长×宽为 4.6 m×4.6 m。

3.1 船首结构分析和设计

为保证 FPSO 的船首强度,在距船底基线高度 15.3 m 和 23.4 m 处设平台甲板,并在 15.3 m 的平台甲板以上增设 T 型 1 800 mm×25 mm /300 mm×25 mm 垂直桁作为船头板架强力支撑构件,且垂直桁上、下端部的肘板边长加大为 1.8 m,以减小垂直桁的跨度。根据斜迎浪工况的船首砰击试验结果,为提高船首板格的抗屈曲性能,将 T 型垂直桁与船首封板、各平台甲板之间的焊缝均设计为背面气刨深熔焊,T 型垂直桁与船头封板的连接焊角高度须加大为 12.5 mm,以增强 T 型垂直桁和船头板格的边界刚度,见图 5。

船首强度分析采用 PATRAN /NASTRAN 软件建立船首舱段(FR. 215 ~ FR. 330 肋位)有限元模型,有限元网格纵向尺寸为 1 m(1/5 肋距),横向、垂向尺寸为 1 倍骨材间距,见图 6。有限元模型中采用板壳(shell)单元模拟主甲板、船底板、平台甲板、舱壁以及纵桁、肋板、强横梁、舱壁水平桁和垂直桁等构件的腹板以及较大肘板的

腹板等;采用梁(beam)单元模拟主甲板纵骨、船底纵骨、舷侧纵骨以及舱壁、强横梁、桁材的加强筋等;构件板厚按 BV—NR467 和 BV—NR445 扣除 0.5 倍设计腐蚀余量^[20]。船首主要结构强度分析结果见表 8,满足 BV—NR445 要求。

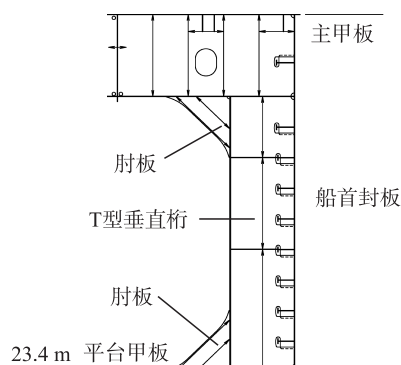


图 5 FPSO 船首 T 型垂直桁图
Fig. 5 FPSO bow vertical T girder

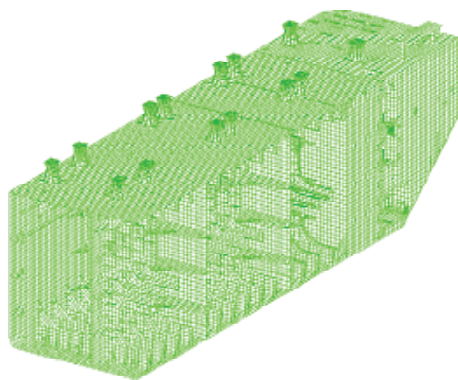


图 6 FPSO 船首有限元分析模型图
Fig. 6 Finite element analysis model of FPSO bow

表 8 FPSO 船首主要结构强度分析结果表

Tab. 8 Structural strength analysis results of FPSO bow primary members

构件	材质	最大等效应力 /MPa	许用等效应力 /MPa	最大剪切应力 /MPa	许用剪切应力 /MPa
FR. 300 肋位底部水密横舱壁(板厚 22 mm)	B 级	80. 5	225. 9	40. 5	112. 9
船首中纵舱壁(板厚 17 mm)	B 级	101. 0	225. 9	43. 3	112. 9
船首距离船中垂线 14. 6 m 处 T 型垂直桁	AH32 级	218. 0	289. 6	120. 0	144. 8

3. 2 船尾结构分析和设计

船尾强度分析采用 PATRAN /NASTRAN 软件建立船尾舱段(FR. 0 ~ FR. 110 肋位)有限元模型,有限元网格纵向尺寸为 1 m(1/5 肋距),横向、垂向尺寸为 1 倍骨材间距,见图 7。

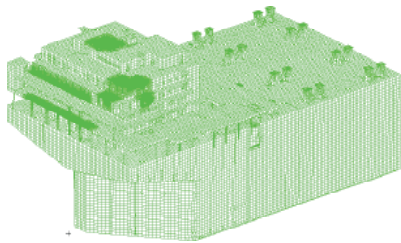


图 7 FPSO 船尾有限元分析模型图

Fig. 7 Finite element analysis model of FPSO stern

表 9 FPSO 船尾主要结构强度分析结果表

Tab. 9 Structural strength analysis results of FPSO stern primary members

构件	材质	最大等效应力 /MPa	许用等效应力 /MPa	最大剪切应力 /MPa	许用剪切应力 /MPa
FR. 0 ~ FR. 5 肋位,船中垂线处肋板	B 级	49. 33	225. 9	26. 06	112. 9
FR. 0 ~ FR. 5 肋位,距离船中垂线 5. 52 m 处纵舱壁	AH32 级	268. 52	289. 6	130. 75	144. 8
FR. 5 肋位,距离船中垂线 18. 2 ~ 27 m 处肋板	AH32 级	129. 56	289. 6	61. 11	144. 8
FR. 12 肋位,距离船中垂线 22. 7 ~ 27 m 处肋板与纵舱壁连接肘板	EH36 级	293. 84	313. 7	139. 01	156. 8

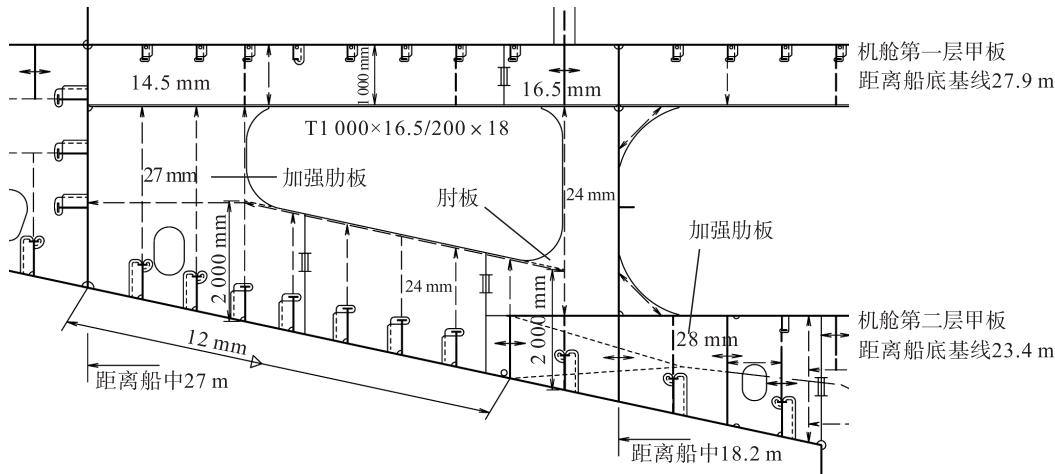


图 8 FPSO 船尾 FR. 12 肋位肋板图

Fig. 8 Frame of FPSO stern floor plate at FR. 12

4 结论及建议

深水 FPSO 船体设计开展了耐波性能水池模型试验,分析和确定了船首、尾处的波浪砰击载荷,重点分析

FR. 0 ~ FR. 65 肋位的船体结构强度分析结果表明: FR. 40 肋位船底肋板(材质 AH32 级)最大等效力为 69. 3 MPa,最大剪切应力为 36. 5 MPa。船尾主要结构强度分析结果见表 9,受波浪砰击范围的船体外板(材质 B 级)厚度须加厚为 29. 5 mm;肋板的腹板(材质 AH32 级)高度须加高为 2 m,厚度须加厚为 27 mm 或 28 mm,肋板与船体外板的连接焊角高度须加大为 12 mm;肋板与纵舱壁连接肘板(材质 EH36 级)须加厚为 24 mm,结构强度满足 BV—NR445 要求,FPSO 船尾 FR. 12 肋位肋板见图 8。

了远洋拖航自存工况的波浪砰击载荷特性、不同波浪谱峰周期、浪向时的波浪砰击载荷分布。基于试验结果确定了超出法国船级社规范的船体抗波浪砰击设计要求,对船首、尾结构做了特别加强。FPSO 船体结构抗波浪砰

击设计有如下建议。

1) 开展耐波性能水池模型试验研究对保证 FPSO 远洋拖航安全是必要的。应研究分析远洋拖航航线的关键海域环境条件, 确定合理的拖航设计环境参数。

2) FPSO 远洋拖航自存工况是船体结构设计的关键性工况, 应确定合理的远洋拖航自存工况 FPSO 的载况浮态, 以开展耐波性能水池模型试验、水动力分析和结构设计。

3) 具有特殊线型的 FPSO 船首、尾受波浪砰击压强峰值可能超过船级社规范要求的设计波浪砰击压强峰值, 应在耐波性能水池模型试验中测量、确定波浪砰击压强峰值, 以校核船体结构设计。

参考文献:

- [1] 施 奇, 朱晨阳, 魏长栋, 等. 拖航工况下半潜式平台横撑波浪砰击特性试验研究[J]. 中国造船, 2021, 62(3): 40-53.
SHI Qi, ZHU Chenyang, WEI Changdong, et al. Experimental investigation of wave slamming on brace of semi-submersible platform under towing condition [J]. Shipbuilding of China, 2021, 62 (3): 40-53.
- [2] 司海龙, 蒋彩霞, 赵 南. 砰击载荷作用下船体局部结构优化设计[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(2): 31-35.
SI Hailong, JIANG Caixia, ZHAO Nan. Optimization design on ship local structure under slamming load [J]. Ship Science and Technology, 2019, 41 (2): 31-35.
- [3] 赵 辉. 三维深水半潜式平台波浪砰击效应的数值分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
ZHAO Hui. The numerical analysis of the wave slamming effect on three-dimensional deep-water semi-submersible platform [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [4] 张荣鑫. VLCC 船首外飘结构冲击及砰击强度[J]. 大连海事大学学报, 2019, 45(4): 20-25.
ZHANG Rongxin. Impact and slamming strength of VLCC bow flare structure [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2019, 45 (4): 20-25.
- [5] 胡伟成, 朱传华, 吴定凡. CSR 底部砰击载荷作用下 PSM 的最大剪力[J]. 船海工程, 2018, 47(4): 6-10.
HU Weicheng, ZHU Chuanhua, WU Dingfan. On the greatest shear force of primary supporting members due to bottom slamming loads of CSR [J]. Ship and Ocean Engineering, 2018, 47 (4): 6-10.
- [6] 郭英豪, 肖龙飞, 卢文月, 等. 半潜式平台波浪砰击测试方法与载荷特性研究[J]. 船舶力学, 2021, 25(4): 426-434.
GUO Yinghao, XIAO Longfei, LU Wenyue, et al. Study on measurements and characteristics of wave impact loads on a semi-submersible [J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25 (4): 426-434.
- [7] 戴仰山, 沈进威, 宋竞正. 船舶波浪载荷[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
DAI Yangshan, SHEN Jinwei, SONG Jingzheng. Ship wave loads [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [8] 杨 凡. 大外飘船舶砰击载荷与结构强度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
YANG Fan. Analysis on slamming loads and structure strength of ships with large flare [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [9] Germanischer Lloyd Noble Denton. Guidelines for marine transportations: GL0030 /ND [S]. Oslo: Noble Denton Technical Policy Board, 2016.
- [10] 赵战华, 范亚丽, 匡晓峰, 等. 深水 FPSO 拖航性能模型试验[J]. 中国海洋平台, 2018, 33(4): 84-88.
ZHAO Zhanhua, FAN Yali, KUANG Xiaofeng, et al. Model test on towing performance of deep water FPSO [J]. China Offshore Platform, 2018, 33 (4): 84-88.
- [11] 郑 伟. 半潜船舶船底砰击加强结构的设计及计算[J]. 船舶工程, 2017, 39(增刊1): 7-9.
ZHENG Wei. Design and calculation of reinforcement of semi-submersible vessel under bow bottom slamming [J]. Ship Engineering, 2017, 39 (Suppl): 7-9.
- [12] 宋美霞. 长艏楼型船舶砰击载荷试验与计算分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
SONG Meixia. Experimental analysis and calculation of slamming loads of ships with long forecastle [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [13] 尤 辉. 砰击载荷作用下船体结构载荷预报及结构响应研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2016.
YOU Yun. Research on hull structural loads forecast and structural response under slamming loads [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2016.
- [14] Bureau Veritas. Rules for the classification of offshore units: NR445 [S]. Paris: Bureau Veritas, 2013.
- [15] 常宏亮. 上浪载荷对船体总纵强度及局部强度的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
CHANG Hongliang. The influence of wave load on the longitudinal and local strength of the hull [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [16] 顾 俊. 超大型矿砂船首部结构强度评估与优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
GU Jun. Structure strength assessment and optimum design for the bow structure of the very large ore carrier [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [17] Bureau Veritas. Rules for the classification of steel ships: NR467 [S]. Paris: Bureau Veritas, 2013.
- [18] 韩建康. 外飘型船舶砰击强度评估与优化研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
HAN Jiankang. Assessment and optimization research on strength of flare ship bow slamming [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017.
- [19] International Association of Classification Societies. Common structural rules for double hull oil tankers [S]. London: IACS, 2012.
- [20] 姬振华. 船体结构的静力极限强度和砰击动力响应[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
JI Zhenhua. Static ultimate strength and slamming dynamic response of ship structures [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.