

# 矿砂船货舱强度有限元分析

刘健中<sup>1</sup>, 孙竹君<sup>2</sup>

(1. 中国船级社江苏分社, 江苏 南京 210000; 2. 江苏省镇江新区社会发展局, 江苏 镇江 212000)

**摘要:** 矿砂船是专门载运散装矿砂的船舶, 矿砂作为一种比重大的散货, 对矿砂船货舱区的强度储备要求较高。随着我国经济的快速发展, 近些年来对矿砂的需求逐年增加, 矿砂船作为运输载体也逐年呈现大型化的发展趋势。本文运用 MSC.PATRAN/NASTRAN 有限元计算软件, 针对一条自卸矿砂船的货舱区域进行舱段有限元计算, 分析应力分布规律, 对矿砂船的结构优化具有指导意义。

**关键词:** 局部强度; 矿砂船; 有限元分析

**中图分类号:** U674.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2021) 12—0080—03

## 1 引言

随着我国近些年经济的飞速发展, 中国快速成为了全球最大的基建市场。矿砂作为工程建设中一种基础材料, 被广泛使用于房屋建设、道路建设中。铁矿石是钢铁生产企业的重要原材料, 世界铁矿资源主要集中在澳大利亚、巴西、俄罗斯、乌克兰、哈萨克斯坦、印度、美国、加拿大、南非等国。中国作为世界上首大铁矿石

需求国, 本国的铁矿品质并不能满足国内需求, 约 70% 的铁矿需求依赖于进口。截止 2020 年底统计, 我国进口铁矿金额 8228.7 亿元, 上涨 17.8%。

我国矿砂的主要来源为矿山和河道。沿江沿海地区凭借物流运输条件的优势, 是矿山资源开发的重点关注区域<sup>[1]</sup>。

在日益庞大的矿砂需求下, 矿砂船作为运输载体也

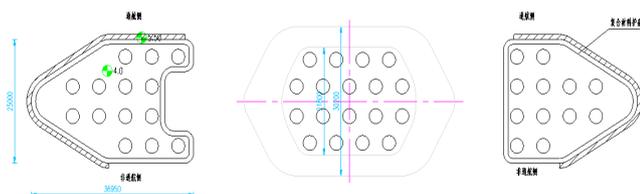


图7 优化独立墩+固定式钢覆材料方案立面图

优化设计特点: ①优化承台线型, 减少(改善)波流流, 船撞后可以调拨船首, 保护船舶; ②优化布置, 采用直桩形式, 通过优化桩基配筋, 以增强独立防撞墩结构能力; ③增加防撞墙, 增加保护范围, 降低船舶撞击力; ④优化钢覆材料护舷, 提高防撞护舷的单位吸能量; 优点: 造价较高, 对桥墩防护效果好, 方便后期防撞等级提升, 维护成本低; 缺点: 施工工期较长, 施工难度较大, 施工期对通航安全影响较大, 撞击后船舶自身损坏程度大, 无法做到全方位保护桥梁。

## 2.4 方案确定

经方案比选, 方案三—独立墩+固定式钢覆材料具有对桥墩防护效果好, 方便后期防撞等级提升、维护成本低, 不影响桥梁结构, 原桥抗撞能力仅作为安全储

备、防撞体系可靠性高, 保留原桥梁防撞设施、减少资源浪费、经济环保等优点, 故采用方案三。

## 3 结语

由于已有桥梁数量众多, 防船撞设施设置的工作将持续很长一段时间, 随着航道等级、通航船舶吨位的提升, 也会有更多的桥梁需要设置防撞设施。本文对现有桥梁防船撞设施建设的特点进行了分析, 通过广东崖门大桥的防撞设施设置方案研究为例, 从设计目标、设计原则、设计方案比选等多个方面进行了分析, 可以为以后的类似项目起到借鉴作用。

参考文献:

- [1] 公路桥梁抗撞设计规范. 中华人民共和国交通运输部. JTG/T3360-02-2020.2020
- [2] 航道中桥梁桥墩防撞技术及设施浅析 [J]. 于伟. 城市道桥与防洪. 2014(12)
- [3] 桥梁防撞理论和防撞装置设计 [M]. 人民交通出版社, 陈国虞. 2013.

逐年呈现大型化的发展趋势。矿砂作为一种比重大的散货，对矿砂船货舱区的强度储备要求较高。国内已有学者针对矿砂船舱口间甲板结构进行强度分析<sup>[2]</sup>，提出该位置较容易发生梁、柱及板材的屈曲。纵向舱口围板不连续，导致舱口角隅处产生应力集中<sup>[3]</sup>。本文选择一条甲板结构加强、舱口围板纵向连续的矿砂船货舱舱段，根据中国船级社《国内航行海船建造规范》（以下简称规范），运用 MSC.PATRAN/ NASTRAN 进行有限元计算，对其应力分布规律进行分析，为进一步优化矿砂船的货舱段船体结构，为该类型船舶的大型化提供数据支持。

## 2 船体结构有限元模型

### 2.1 结构模型

#### 2.1.1 目标船主要参数

本文以某沿海遮蔽航区 72.8m 自卸矿砂船为例，进行局部结构强度计算。该船总长 72.8 m，垂线间长 68.8 m，型宽 15.2 m，型深 4.3 m，设计吃水 3.305 m。

#### 2.1.2 有限元结构模型

本文按照《国内航行海船建造规范》中相关规定，采用子结构建模技术对目标船进行建模。模型范围选取为半宽模型，1/2 舱长 +1/2 舱长，舱段模型的纵向范围从 28 肋位到 59 肋位；垂向范围为船体型深；模型外板、斜板、舱壁板、强框架、肋板、纵桁、肋骨腹板、甲板纵桁腹板、舱口围板等结构用壳单元模拟，纵骨、肋骨等加强筋用梁单元模拟。船体材料的弹性模量  $E=2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ ；泊松比 0.3；密度  $7.85 \text{ t/m}^3$ 。船体结构模型如图 1- 图 3 所示。

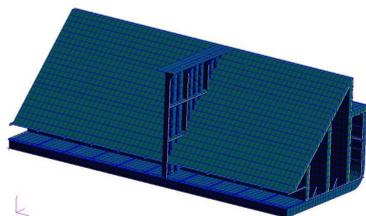


图 1 舱段模型

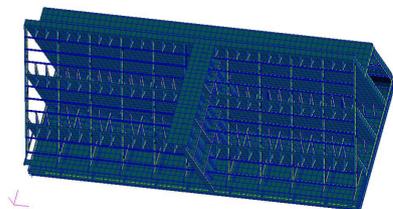


图 2 舱段模型（隐去倾斜板）

#### 2.1.3 坐标系

本模型坐标系为：原点位于 Fr28 号船底中线处，X 轴向船艏为正方向，Y 轴向左舷为正方向，Z 轴向上为正方向。

#### 2.1.4 边界条件

模型的两端（简称 A 端和 B 端）和中纵剖面（CL）均需约束详细边界条件见表 1。

表 1 边界条件

	线位移 X	线位移 Y	线位移 Z	角位移 X	角位移 Y	角位移 Z
A	约束	—	约束	—	约束	约束
B	—	—	约束	—	约束	约束
CL	—	约束	—	约束	—	约束

## 2.2 工况及载荷

### 2.2.1 计算工况

根据稳性计算书，选取满载散货出港和压载出港两种计算工况，见表 2。

表 2 工况

工况	工况名称	载荷	吃水
LC1	满载出港	舷外水压力 + 货物压力 + 自重	3.305m
LC2	压载出港	舷外水压力 + 自重	1.228m

### 2.2.2 舷外水压力

根据《规范》第 2 篇 1.5.3，舷外水压力由海水静压力和海水动压力两部分组成。载荷示意图如 3 所示。海水动压力包括：

- (1) 舷侧水线处海水动压力  $P_{WL}$ ；
- (2) 船底边缘处（艏部）海水动压力  $P_{BS}$ ；
- (3) 船底中纵剖面处海水动压力  $P_{BC}$ ；
- (4) 水线面以下任意点的海水动压力  $P_{hd}$ ；
- (5) 水线面以上舷侧外板上任意点的海水动压力  $P_{hd}$ ；
- (6) 露天甲板的上浪载荷  $P_{wdk}$ 。

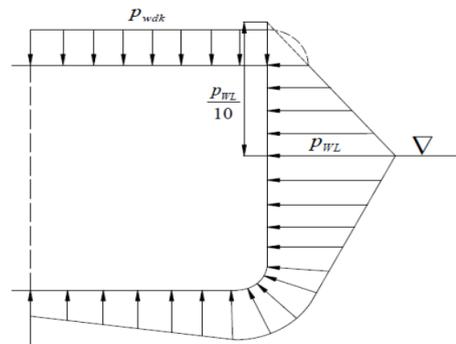


图 3 舷外海水动压力

### 2.2.3 货物压力

根据《规范》第 2 篇 1.5.4.3，取本船散货装载至舱

口围板顶部。

### 3 分析结果及结论

#### 3.1 分析结果汇总

矿砂船货舱分段的强度有限元应力汇总见表3。典型应力较大位置如图3-图4所示。结构强度分析结果如下：

(1) 全船应力最大值出现在LC1工况即满载时FR50肋位，距中1200mm处船底纵骨。由于货舱区满载至舱口围板，巨大的货物压力被3道纵舱壁及舱口围板分担，应力传导至船底，可见船底中内龙骨附近承受了较大应力。建议该位置船底板进行板厚加强。

(2) LC1工况即满载时FR28肋位舱口围板垂直桁与舱口围板、甲板板交界处应力较大。货舱区倾斜板承受的货物压力由下方的纵舱壁、舱口围板及其垂直桁承担。得益于舱口围板的连续设计，舱口角隅处应力集中得到了很好的缓解。

(3) 从应力汇总表可以看出，货舱斜板与三道纵舱壁的结构设计可以很好的分担货物压力，提供可观的货舱区强度，但是牺牲了货舱体积。

表3 有限元分析应力结果汇总

结构分类	工况	$\sigma_e$	$\sigma_l$	$\sigma_w$	$\tau$	最大相当应力所在位置
甲板	LC1	25.3	16.4	—	—	FR28 肋位甲板与内舷侧板和舱口围板相交处
	LC2	15.0	12.6	—	—	
泥舱斜板	LC1	43.1	21.3	15.5	—	FR28 肋位，泥舱斜板距基线1300mm处
	LC2	19.1	17.1	4.91	—	
外底板	LC1	23.1	15.9	14.2	—	FR28 肋位船底外板与中内龙骨相交处
	LC2	19.2	19.0	8.95	—	
铺舱板	LC1	15.3	9.8	9.45	—	FR53 肋位，铺舱板距中900mm处附近
	LC2	12.5	10.4	5.01	—	
外舷侧板	LC1	35.6	17.6	24.1	—	FR34 肋位，外舷侧板距基线1600mm处
	LC2	26.0	13.0	15.6	—	
内舷侧板	LC1	27.9	14.8	7.68	—	FR28 肋位内舷侧板与船底板交汇处
	LC2	24.2	14.3	5.27	—	
纵舱壁板	LC1	31.4	15.1	15.1	—	FR45 肋位，距中1800mm纵舱壁与水密舱壁及泥舱斜板交汇处
	LC2	31.2	16.5	9.75	—	
横舱壁板	LC1	24.2	—	—	12.2	FR45 肋位水密舱壁与内舷侧以及甲板交汇处
	LC2	13.3	—	—	5.21	
实肋板	LC1	77.1	—	—	38.8	FR37 肋位船底实肋板与强肋骨交汇处
	LC2	51.2	—	—	25.5	
强框架	LC1	100	—	—	57.9	FR28 肋位舱口围板垂直桁与甲板板交汇处附近
	LC2	57.5	—	—	33.2	
构件上的梁	LC1	133	—	—	—	FR50 肋位，距中1200mm处船底纵骨
	LC2	87.4	—	—	—	

表中： $\sigma_e$ ——相当应力 ( $N/mm^2$ )； $\sigma_l$ ——船体梁纵向的应力 ( $N/mm^2$ )； $\sigma_w$ ——船体梁横向或垂向的应力 ( $N/mm^2$ )； $\tau$ ——剪应力 ( $N/mm^2$ )；对于纵桁和肋板取腹板总深度的平均剪应力。

#### 4 结论

本文以某沿海遮蔽航区自卸矿砂船为例，运用子建模技术，对船体货舱分段进行建模计算，对本船结构应力分布进行分析。本船在结构上牺牲了货舱体积换来了良好的货舱区结构强度。如何在经济性和安全性上取得平衡，进行结构优化是矿砂船大型化的难点。

#### 参考文献：

- [1] 王达川, 姚海元, 李宜军. 我国沿海港口40万吨级矿石码头新布局[J]. 水运工程, 2021, {4}(06):54-60.
- [2] 潘曼, 朱凌, DAS Purnendu Kumar. 矿砂船舱口间甲板结构的可靠性评估[J]. 船舶力学, 2020, 24(01):118-126.
- [3] 顾俊, 何建军, 傅建鹏, 彭亚康. 散货船连续纵向舱口围板设计[J]. 船海工程, 2019, 48(06):1-5.
- [4] 中国船级社, 《国内航行海船建造规范》2021[S].

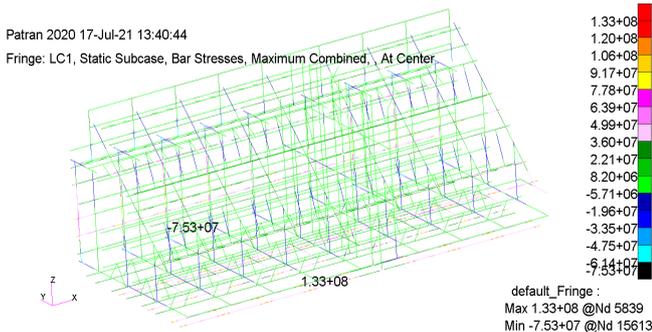


图3 构件上的梁应力云图(工况1—轴向拉应力)

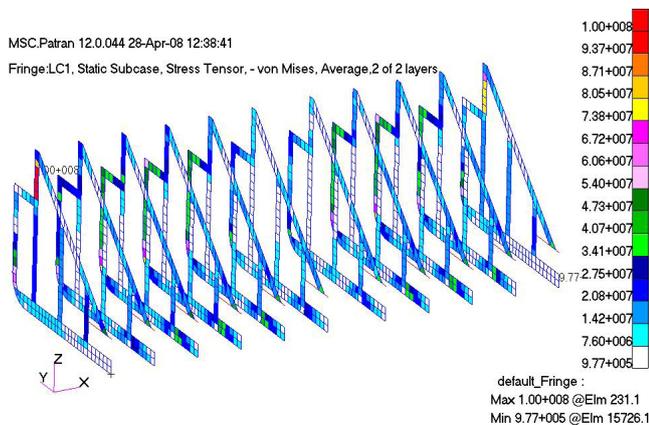


图4 强框架应力云图(工况1—相当应力)