第 31 卷第 10 期 中国有色金属学报 2021 年 10 月
Volume 31 Number 10 The Chinese Journal of Nonferrous Metals October 2021
DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37987

采矿船月池内部防撞消波装置设计

田华勇，张海彬，张福民，周　佳，邵武豪

(中国船舶集团第七〇八研究所，上海 200011)

摘　要：采矿船作为多金属结核采矿试验支持船舶，采矿作业较频繁的通过船中处月池进行硬管和中继站等作业装置的布放回收。船舶在波浪中的运动以及月池内部水体的运动有可能造成甲板上浪以及采矿装置的碰撞损坏，从而影响采矿作业的安全性。本研究提出在月池内部适当地设置防撞装置和阻尼装置，可以有效减小波面升高并能承受一定的碰撞接触，有效地扩大作业窗口期。本文首先采用频域计算方法分析了不同海况下采矿船的运动和月池波面升高情况，进一步研究提出了月池内部防撞消波装置设计方案，并通过水池模型试验的方式论证了该装置在减小月池内部波面升高的有效性，该研究成果对提高深海采矿布放作业率有重要的参考意义。

关键词：采矿船；月池；防撞；消波

文章编号：1004-0609(2021)-10-2829-07　　**中图分类号：**U662.3　　**文献标志码：**A

引文格式：田华勇, 张海彬, 张福民, 等. 采矿船月池内部防撞消波装置设计[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2829−2835. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37987

TIAN Hua-yong, ZHANG Hai-bin, ZHANG Fu-min, et al. Design and research of anti-collision and wave elimination device in moonpool of mining vessel[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2829−2835. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37987

深海底蕴藏着丰富的矿产资源，深海矿产资源开发技术的发展对经济社会发展和国家资源安全保障具有重要作用，已成为世界各国关注重点。本文研究依托于科技部国家重点研发计划项目“深海多金属结核采矿试验工程”，该项目由中国大洋矿产资源研究开发协会办公室牵头。该项目针对深海多金属结核开采关键技术开展研究，研制 3500 m 级深海采矿试验系统，完成不小于 1000 m 水深的海上整体联动试验。通过项目实施，开发具有我国自主知识产权的深海多金属结核开采技术，初步构建具有国际先进水平的深海采矿技术体系。

项目以我国国际海底多金属结核合同区资源开采为应用背景，以管道提升式海洋采矿系统为基本技术原型，总体技术方案是采用硬管提升方案。采矿船作为多金属结核采矿试验支持船舶，船型采用井架加月池的工程船型，来满足采矿设备布放回收、搭载和作业支持需求。深海采矿作业需较频繁的通过采矿船月池进行硬管和中继站等作业装置的收放，由于船舶在波浪中的运动以及月池内部水体的运动，月池内会出现波面升高，并有可能造成甲板上浪，从而影响月池附近的作业安全。

本文基于上述背景，提出了采矿船月池内部防撞消波装置方案，在月池尺寸有限的情况下，可以有效地扩大作业窗口期。本文研究采用了数值分析和模型试验相结合的研究方法。基于项目采矿试验船舶实际情况，首先采用数值模拟方法对船舶的运动性能以及月池内部的波面升高进行了分析，提出研究月池内部防撞消波装置的必要性。进一步根据实际月池尺寸设计了防撞消波装置方案，并利用水池模型试验证明了该装置在减小月池内部波面升高的有效性。数值分析中采用的模型与实际采矿试验船舶同尺寸，水池模型试验则采用的是缩尺比为

基金项目：国家重点研发计划资助项目(2016YFC0304100)
收稿日期：2021-06-03；**修订日期：**2021-09-16
通信作者：田华勇，工程师；电话：18817554681；E-mail：tianhuayong@tju.edu.cn

1:30 的船舶模型。本文的研究工作也可以为执行采矿、钻井、潜水作业等具有月池的类似船舶工程设计提供参考[1]。

1 采矿船船型概况

采矿试验船舶的船型方案和性能指标需满足3500 m水深多金属结核开采海上试验要求。为确保采矿整体系统联动试验的顺利实施，采矿试验船舶需满足采矿试验总体技术方案的要求，具备搭载深海采矿试验系统及相关设备、人员的能力。采矿试验船舶的设计水深除了考虑本项目 1000 m 级水深海试要求外，还需考虑未来 3500 m 级水深海试需求。国外深海采矿作业或试验发展较早，采矿船的选用情况说明如下[2−3]。

美国 OMI 于 1978~1982 年期间在 5200 m 水深进行了 3 个航次的海试，共收集了 800 t 结核，验证了深海采矿技术的可行性。其海试船舶为SEDCO 445 号，由钻探船改装，船长 168 m，宽 26 m，船舯配置有月池和井架。日本于 1997 年进行了 2200 m 水深多金属结核采矿海试，其采用软管方案通过船尾进行采矿车和提升管的下放，海试船舶长 122 m，宽 32 m，排水量达 16600 t。印度于 2000 年和 2006 年进行了两次 500 m 级海试，通过软管连接采矿车实施了水底泵沙试验，2006 年的试验较 2000 年试验连续运行的时间更长。海试船舶为 SAGAR KANYA 号，该船为采矿试验进行了适当的改装，包括增装了动力定位系统和折臂式布放回收系统。韩国于 2009~2015 年分阶段实施了深海多金属结核采矿试验，其中 2009 和 2010 年分别开展了集矿机和提升泵的浅海试验，2012 年 10~11 月在其东海开展了 130 m 水深海试，2013 年 6~7 月开展了 1370 m 水深海试，于 2015 年开展 2000 m 级海试。1370 m 水深以内的海试船舶采用了尾部带门架、不带月池的海洋工程船，集矿机借由门架从船尾实现布放。2000 m 级海试提升系统采用硬管+软管的方案，选用了尺度更大、船舯带月池的海试船舶。

结合上述国家深海多金属结核采矿海试船舶的选取情况，可以发现涉及到硬管输送系统时，海试船舶需开设月池，月池上方需设置井架。在试验水深较大时，也会选用船舯带月池的船舶[4]。海试船舶多是通过船舶改装和设备搭载来实现深海采矿试验的要求。

根据本项目深海多金属结核开采总体方案，水下输送系统采用硬管与软管结合的方式。采矿试验母船需搭载的试验设备包括：海底采矿车、水下输送管道、提升输送泵、水下中继站和对应的动力通讯传输缆等。因水下输送管道需从月池下放，海试船舶必须开设月池，并配置相应的塔架。项目总体试验方案如图 1 所示，采矿船总体外形如图 2 所示，主要参数如表 1 所示。

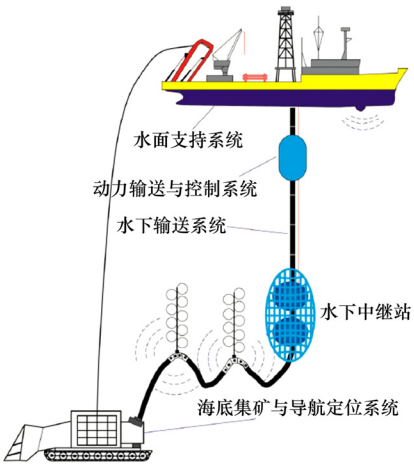


图 1 深海多金属结核采矿试验项目总体方案示意图

Fig. 1 Overall program of deep-sea polymetallic nodule mining pilot project



图 2 采矿船船型示意图

Fig. 2 Overall layout of mining ship

表 1 采矿船的主要尺度参数

Table 1 Main dimension of mining vessel

总长/m	型宽/m	型深/m	航行吃水/m	定员	月池尺寸(长×宽)/m
173.83	32.2	10.5	7.0	136	9.6×8.4

2　防撞消波装置设计

2.1　采矿船运动性能分析

本船要求在四级海况作业、五级海况回收，并在六级海况中安全航行。本文针对回收工况对船舶的耐波性进行了分析。计算海况为 5 级海况，对应有义波高为 4 m，过零周期为 7.8 s。计算装载为吃水 7 m，排水量 31690 t，重心高 7.36 m。

运行性能分析采用基于频域势流理论的 HydroD/Wadam 软件[5]，计算模型中包括了月池，如图 3 所示。

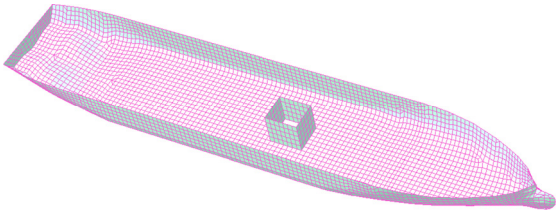


图 3　运动性能分析模型

Fig. 3　Panel model for motion analysis

在五级海况下，船舶的横摇运动、月池内部波面升高[6−8]如图 4 所示。

基于上述计算结果，在布放回收作业海况下，横浪下船舶的横摇幅值最大，达到 7.8°，在 60°斜浪情况下，横摇幅值为 3.2°，降低幅度较为明显。同样，月池中心处的横向加速度在横浪时最大，达到 0.97 m/s^2，在 60°斜浪时为 0.28 m/s^2。月池内部的波面升高也在横浪状态下达到 4.8 m，在 60°斜浪

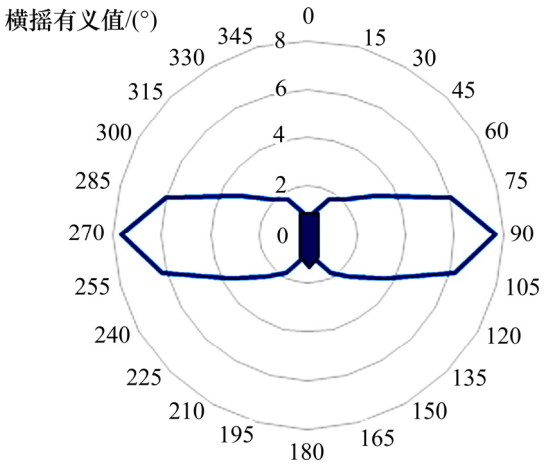


图 4　采矿船横摇有义值计算结果

Fig. 4　Significant value of rolling movement of mining vessel

作业用下波面升高为 2.6 m。因此，采矿作业时，采矿船一般会选择有利艏向进行定位，避免遭遇横浪和过大的运动幅值[8−9]。但是应急状态下，因海况条件相对恶劣，定位精度不高，对于通过月池的布放回收作业，仍需考虑横浪带来的恶劣影响，月池内部水体运动以及船舶的摇晃和加速度可能会对采矿设备以及人员操作造成影响。

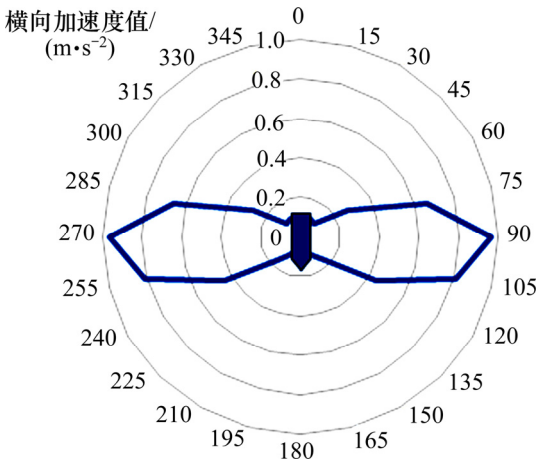


图 5　采矿船月池中心位置横向加速度计算结果

Fig. 5　Significant value of lateral acceleration at center of moonpool

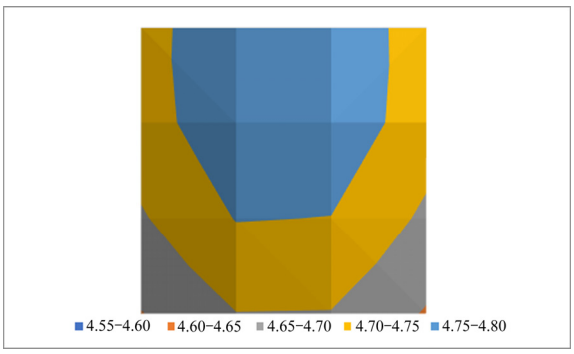


图 6　横浪作用下月池内部波面升高情况

Fig. 6　Wave surface elevation in moonpool under beam sea action (Unit: m)

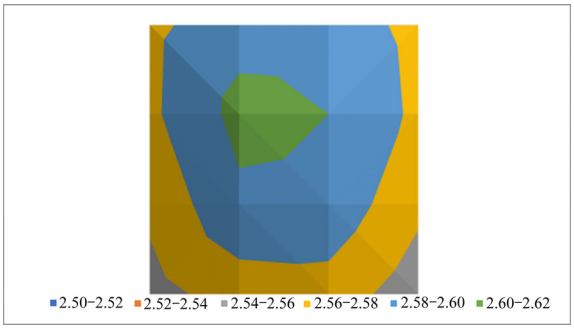


图 7　首斜浪作用下月池内部波面升高情况

Fig. 7　Wave surface elevation in moonpool under oblique wave condition (Unit: m)

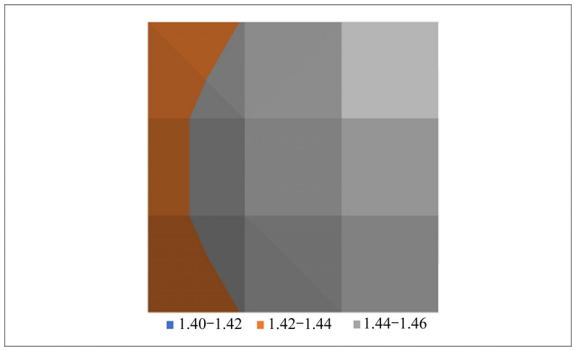


图 8 迎浪作用下月池内部波面升高情况

Fig. 8 Wave surface elevation in moonpool under head sea condition (Unit: m)

2.2 防撞消波装置的总体设计

采矿船在水下输送设备布放及回收过程中，需有作业人员在主甲板附近进行电缆或浮力块绑扎或拆卸作业。因为船舶在海浪中的摇晃运动，月池内部水体也会相应摇晃，进一步造成月池内部的波面升高，月池内壁引起的砰击和爬壁效应[9]，会导致主甲板月池开口附近出现上浪，对该区域的作业安全造成影响，并有可能对月池开口附近的设备造成砰击[10]。

对于开有月池的航行船舶，一般为了减小月池增阻以及月池内波面升高，会在月池内部设置消波措施[11−13]。本船月池用于硬管、中继站等采矿设备的下放。根据项目采矿设备布放作业流程，在中继站下放前，中继站已经与软管相连。由于船舶的摇晃以及月池内水体的摇晃，中继站在与软管相连入水的情况下，受月池内水体晃荡的影响更大，在下放过程中有可能碰到月池内壁，造成中继站的损坏。另外，在作业过程中，硬管顶部与塔架固定连接，底部中继站为自由端。船舶在动力定位系统控制下，船体会在一定范围内移动，硬管受水流以及拖曳力影响，会偏移一定角度[14]。如果角度过大会导致硬管与月池底部相碰。因此，对于采矿船，月池内部不只需要防止甲板上浪的消波措施，还需要防碰撞措施。

基于上述需求，本文研究设计了采矿船月池内部防撞消波装置，主要布置如图 9 所示。

采矿船总长 174 m，型宽 32.0 m，吃水 7 m，月池尺寸为 9.6 m×8.4 m。消波阻尼块布置于月池内壁四个表面，防撞块分三层设置，总共数量为 96 块。阻尼块布置区域为水线附近区域。阻尼块不同层交错布置，两层之间间隔高度为 1.6 m，呈现出矩阵型布置形式。

防撞阻尼块采用橡胶材质，并且采用镂空设计，以最大限度吸收碰撞能量。阻尼块采用矩阵型在月池内壁布置，不同层成交错布置，这样尽量加大月池内水体沿月池内壁爬升的阻力。同时，因为阻尼块采用镂空设计，可有效对月池的波浪爬升产生破波作用，消耗掉波浪爬升能量，达到减小月池内部波浪爬升高度的目的，进而降低甲板上浪风险。该装置的采用可同时实现月池内壁消波和防碰撞的需求。

阻尼块的具体形状特征总体呈长方体，为了验证镂空区域的大小对波面升高影响的不同，在模型试验中验证了两种防撞消波装置的方案，如图 10 所示。

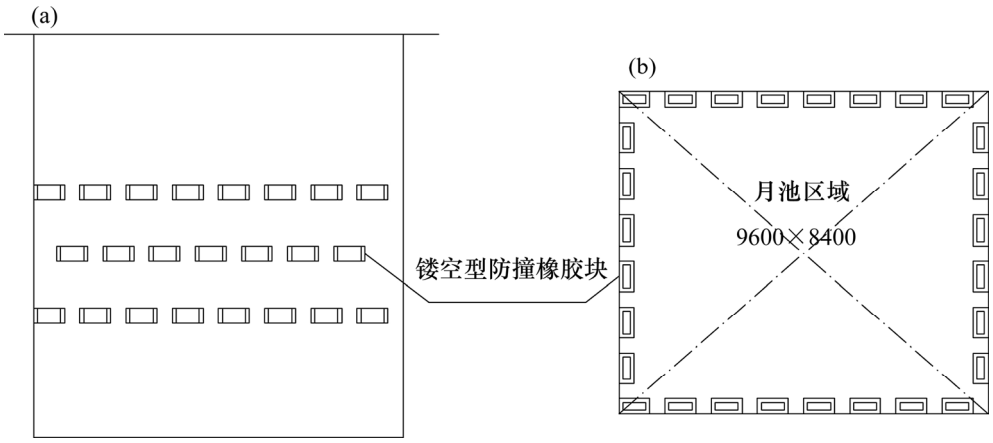


图 9 防撞消波装置布置情况

Fig. 9 General arrangement of anti-collision and wave eliminating devices: (a) Side view; (b) Top view

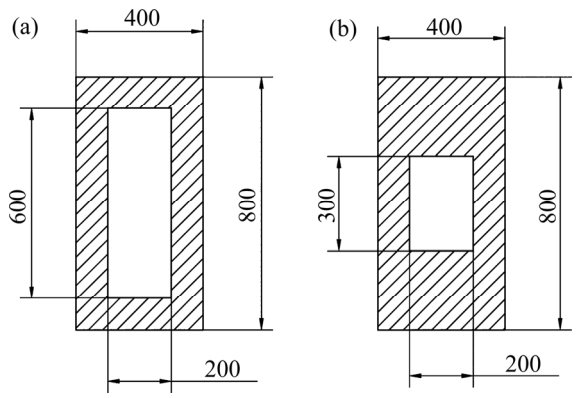


图 10　防撞消波装置不同方案

Fig. 10　Dimension of anti-collision and wave eliminating device (Unit: mm): (a) Case 1; (b) Case 2

2.3　装置对减小月池内波面升高的作用分析

为验证上述消波装置的功用，通过模型试验的方法[15]，分析了有无装置的效果。模型试验在上海运输研究所的耐波性水池进行，装置模型情况如图 11 所示。横浪条件下波面升高试验结果对比如图 12 所示。

从图 12 可以看出，镂空区域较小(方案二)的波面升高更小，效果更好。在 90°横浪的情况下，月池内部波面可减少约 21%，可以有效抑制波面爬升的情况。

2.4　装置对减小碰撞压力的作用分析

橡胶块采用镂空设计，可较好的吸收采矿设备下放过程中与月池的碰撞能量。为量化分析防撞装置的功能，特参考船舶设计中橡胶护舷的要求[16]。

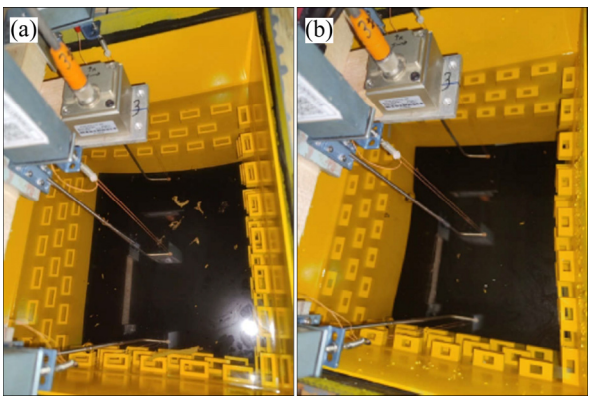


图 11　不同阻尼块形式水池试验模型示意图

Fig. 11　Model of anti-collision and wave eliminating device (Unit: mm): (a) Case 1; (b) Case 2

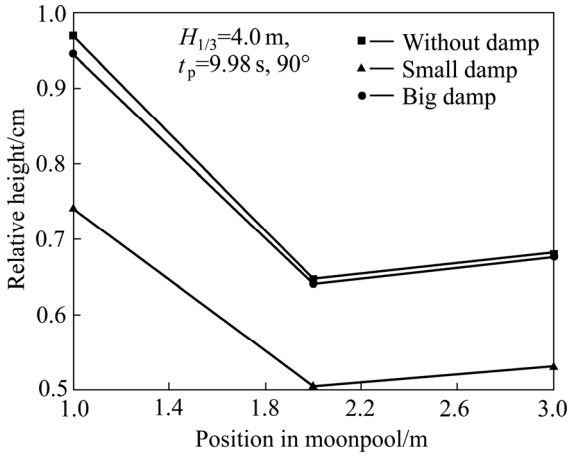


图 12　不同阻尼块方案月池内部波面升高对比

Fig. 12　Comparison of wave surface elevation inside moonpool for different damping cases

船舶一般在舷侧外板处设置橡胶护舷，用于吸收靠泊时的碰撞能量，护舷设置要求两船接触压力不超过 0.15 MPa。因此，假设认为通过橡胶材质的选取，在设置橡胶防撞块的情况下，采矿设备与月池内壁的接触压力不会超过 0.15 MPa。为评判防撞消波装置在减小碰撞压力方面的作用，首先计算采矿设备以一定的运动加速度与月池内壁发生硬接触产生的压力，近似计算方法为：$p=m\times a/s$(其中，m 为采矿设备的质量，a 为采矿设备与船体之间的相对加速度，s 为采矿设备与船体的接触面积)。进一步对比该压力与 0.15 MPa 的差距，以评判减压效果。

采矿船通过月池下放设备质量和尺寸最大的为中继站，其质量按 8 t 计算。采矿船运动性能评估结果显示月池处的横向加速度最大为 0.97 m/s^2，假设中继站与月池碰撞时的加速度相同，相对加速度约 0.2 g。如果作用于两个防撞阻尼块，以此计算得出压力为 0.245 MPa，参考目标值 0.15 MPa，防撞装置减小的碰撞压力约 40%。

3　结论

1) 本文研究了采矿船的船型特点，并基于频域计算方法对采矿船的耐波性进行了预报，初步分析船舶运动、加速度以及月池内部波面升高情况。

2) 基于月池内部消波和防撞需求，本文提出了以镂空橡胶块为主的月池内部防撞消波装置，通过橡胶块的矩阵型交错布置，有效地增大了月池内部

水体运动的阻力，通过水池模型试验验证，月池内部波面升高可以减少约20%。

3) 基于船舶运动加速度计算结果和船舶橡胶护舷的碰撞要求，分析了橡胶块可以吸收的碰撞能量，在设置橡胶块后，碰撞压力可减小约40%。

4) 通过在月池内部配置防撞消波装置，可以有效减小月池内部的波面升高，并且可以有效减小采矿设备收放过程中的碰撞损坏风险。相对于不采取该装置的方案，可以满足更恶劣海况的布放回收需求，提高了作业的效率和安全性。

REFERENCES

[1] 丁 凯, 史恭乾, 赖明雁, 等. “深潜号”工作母船结构设计[J]. 船舶设计通讯, 2014, 138(1): 47−51.
DING Kai, SHI Gong-qian, LAI Ming-yan. Structure design of “SHEN QIAN HAO”[J]. Journal of Ship Design, 2014, 138(1): 47−51.

[2] 杨建民, 刘 磊, 吕海宁, 等. 我国深海矿产资源开发装备研发现状与展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 1−9.
YANG Jian-min, LIU Lei, LÜ Hai-ning, et al. Deep-Sea mining equipment in China: Current status and prospect[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2020, 22(6): 1−9.

[3] 刘少军, 刘 畅, 戴 瑜, 等. 深海采矿装备研发的现状与进展[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 9−16.
LIU Shao-jun, LIU Chang, DAI Yu, et al. Status and progress on researches and developments of deep ocean mining equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 9−16.

[4] 付 强, 王国荣, 周守为, 等. 海洋天然气水合物开采技术与装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 32−38.
FU Qiang, WANG Guo-rong, ZHOU Shou-wei, et al. Development of marine natural gas hydrate mining technology and equipment[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2020, 22(6): 32−38.

[5] 刘学勤, 张海彬. 深水钻井船运动性能分析[J]. 船舶, 2013(3): 12−15.
LIU Xue-qin, ZHANG Hai-bin. Analysis of motion performance for a deepwater drilling ship[J]. Ship & Boat, 2013(3): 12−15.

[6] 韦斯俊, 梁园华, 刘成名, 等. 钻井船月池区波面升高运动分析[J]. 石油工程建设, 2019, 45(2): 6−10.
WEI Si-jun, LIANG Yuan-hua, LIU Cheng-ming, et al. Analysis of disturbed wave elevation in moonpool zone of drillship[J]. Petroleum Engineering Construction, 2019, 45(2): 6−10.

[7] 张晓宇, 胡开业, 周雯雯. 带月池深海钻井船摇荡运动性能分析[J]. 船舶, 2016(1): 29−34.
ZHANG Xiao-yu, HU Kai-ye, ZHOU Wen-wen. Motion performance of drillship with moonpool[J]. Ship & Boat, 2016(1): 29−34.

[8] 邹 康, 桂满海, 罗 良. 钻井船月池区波面升高运动分析[J]. 船舶与海洋工程, 2017, 33(5): 59−63.
ZOU Kang, GUI Man-hai, LUO Liang. Study on moonpool hydrodynamics and its effect upon ship motions[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2017, 33(5): 59−63.

[9] 孙采微, 杨建民, 吕海宁. 波浪作用下带月池结构船体运动数值预报[J]. 海洋工程, 2013, 31(4): 22−29.
SUN Cai-wei, YANG Jian-min, LÜ Hai-ning. Numerical investigation on motions of vessel with moonpool in wave conditions[J]. The Ocean Engineering, 2013, 31(4): 22−29.

[10] 吕鸿冠, 谷家扬, 刘为民, 等. 阶梯型月池附加阻力形成机制及其特性研究[J]. 船舶力学, 2019, 23(6): 660−673.
LÜ Hong-guan, GU Jia-yang, LIU Wei-min, et al. Research on the mechanism and characteristic of added resistance of moonpool with recess[J]. Journal of Ship Mechanics, 2019, 23(6): 660−673.

[11] 鲜于晨松, 吕海宁. 波浪作用下钻井船月池内流体水动力性能研究[J]. 船舶科学技术, 2018, 40(1): 62−69.
XIANYU Cheng-song, LÜ Hai-ning. Hydrodynamic performance of the fluid inside the vessel moonpool in wave conditions[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(1): 62−69.

[12] 郭 凯, 姚熊亮, 陈祥斌. 复杂边界条件下月池内流体运动性能研究[J]. 中国造船, 2020, 61(3): 112−119.
GUO Kai, YAO Xiong-liang, CHEN Xiang-bin. Numerical studies on fluid motion in moon pool with complex boundary conditions[J]. Shipbuilding of China, 2020, 61(3): 112−119.

[13] 李志雨, 张海彬. 基于 CFD 的钻井船月池流场基附加阻力研究[J]. 船舶, 2013(4): 12−15.
LI Zhi-yu, ZHANG Hai-bin. On flow field and additional resistance of moonpool in drillship with CFD[J]. Ship & Boat, 2013(4): 12−15.

[14] 张晓宇, 胡开业, 纪 元, 等. 月池对钻井船阻力性能影响研究[J]. 船舶, 2016(4): 14−17.
ZHANG Xiao-yu, HU Kai-ye, JI Yuan, et al. Influence of moonpool structure on resistance of drilling ship [J]. Ship & Boat, 2016(4): 14−17.

[15] 金瑞健, 邹　康, 桂满海. 船舶月池对阻力影响的模型试验研究[J]. 中国造船, 2016, 57(3): 92−96.
JIN Rui-jian, ZOU Kang, GUI Man-hai. Experimental research of moonpools effect on ship resistance[J]. Shipbuilding of China, 2016, 57(3): 92−96.

[16] 中国船舶工业集团公司, 中国船舶重工集团公司, 中国造船工程协会. 船舶设计实用手册舾装分册[M]. 国防工业出版社, 2013: 239−242.
China State Shipbuilding Corporation, China Shipbuilding Industry Corporation, The Chinese Society of Naval Architects and Marine Engineers. Ship design practical manual outfitting volume[M]. National Defense Industry Press, 2013: 239−242.

Design and research of anti-collision and wave eliminating device in moonpool of mining vessel

TIAN Hua-yong, ZHANG Hai-bin, ZHANG Fu-min, ZHOU Jia, SHAO Wu-hao

(Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China)

Abstract: As a support vessel for mining experiments of polymetallic nodules, the mining vessel adopts the engineering ship type of derrick and moonpool. The steel pipes and relay stations and other operating devices were deployed and recycled through the moonpool. Due to the movement of the ship in the waves and water movement inside the moonpool, it is possible to cause the green water on the deck and collision damage between the moonpool and mining equipment, which affecting the safety of mining operations. The anti-collision and wave eliminating devices on the inner wall of the moonpool were proposed. When the size of the moonpool is limited, the devices can effectively reduce the elevation of wave surface and can withstand a certain collision contact, which can effectively expand the operating window. Firstly, this paper uses frequency domain calculation methods to analyze the movement of the mining ship and the wave surface elevation in the moonpool, and further proposes the design for the internal anti-collision and wave elimination devices of the moonpool. The wave elimination function was verified by model test. The research results of this paper have important reference significance for improving the operating rate of deepsea mining.

Keywords: mining vessel; moonpool; anti-collision; wave elimination

Foundation item: Project(2016YFC0304100) supported by National Key Research and Development Program of China

Received date: 2021-06-03; **Accepted date:** 2021-09-16

Corresponding author: TIAN Hua-yong; Tel: +86-18817554681; E-mail: tianhuayong@tju.edu.cn

(编辑　李艳红)