

锡矿采集筛分包装多功能船的研究与应用

王泽生, 王永生, 高文明, 张进, 张中

山东浩海疏浚装备有限公司, 山东 潍坊 262500

摘要 : 锡矿采集筛分包装多功能船的研发与应用, 主要针对印度尼西亚 50 米以内锡矿开采而设计制造。集成了采集、筛分、选矿、包装及生活设施于一体, 显著提升了锡矿开采效率, 解决了现有采矿船存在的挖深太小、动力浪费大、抗风浪能力差、功能单一、需多船联合作业、没有船员生活设施等问题。通过详细的技术研究与客户现场应用分析, 该船具有技术先进性, 作业效率高效性与经济性。展现了该船在特定市场、特殊使用环境下具有良好的发展前景, 必将在促进当地经济发展与环境保护方面做出应有的贡献。

关键词 : 锡矿开采; 圆筒结构船体; 双层甲板; 桥架缓冲; 自行船

Research and Application of Multi-Functional Ship for Tin Ore Collection, Screening and Packaging

Wang Zesheng, Wang Yongsheng, Gao Wenming, Zhang Jin, Zhang Zhong

Shandong Haohai Dredging Equipment Co., Ltd. Weifang, Shandong 262500

Abstract : The research and development and application of tin ore collection, screening and packaging multi-functional ship are mainly designed and manufactured for tin ore mining within 50 meters in Indonesia. It integrates the collection, screening, beneficiation, packaging and living facilities, which significantly improves the efficiency of tin mining and solves the problems of too small digging depth, large power waste, poor wind and wave resistance, single function, multi-ship joint operation, and no crew living facilities in the existing mining ships. Through detailed technical research and customer on-site application analysis, the ship has advanced technology, operational efficiency, efficiency and economy. It shows that the ship has good development prospects in specific markets and special use environments, and will make due contributions to promoting local economic development and environmental protection.

Keywords : tin mining; cylindrical hull; double deck; bridge buffer; self-propelled boat

引言

印度尼西亚, 作为全球锡矿资源最为丰富的国家之一, 其邦加岛和比里坦岛附近海域蕴藏着大量的海底锡矿。然而, 长期以来, 印尼锡矿开采业面临诸多困境, 包括采矿设备效率低下、作业深度有限、故障率高等问题, 严重制约了锡矿资源的有效开发与利用。为此, 本文设计并研发了一种集多功能于一体的锡矿采集筛分包装船, 以期为印尼乃至全球的锡矿开采行业提供新的解决方案。

一、研究背景与现状分析

1. 研究背景

印度尼西亚的锡矿资源在全球市场上占据重要地位, 每年为全球市场供应约 10% 的锡矿。所用采矿设备大多源自泰国等国的二手设备拼装而成, 受技术条件限制, 泰国锡矿船效率低下, 最大作业 25 米, 无法进行深水富矿区开采。印尼市场急需一种开挖深度到 50 米的锡矿开采船。近几年, 锡矿等有色金属价格飙升, 今年国内进口精锡矿价格已超过 12000 美元, 印尼国内精锡矿收购价格超过 7000 美元, 为锡矿资源的开发提供了强劲动力。

2. 国内外研究现状

当前印尼市场上的采矿设备普遍功能单一, 完成锡矿全过程作业需要配备多种船只和设备联合作业, 这不仅增加了作业成本和人员需求, 还导致了动力资源的极大浪费。此外, 小型拼装船的抗风浪能力较差, 难以适应复杂的海洋环境。在国内市场, 水下锡矿资源贫乏, 基本没有开采市场, 造船企业针对锡矿船研究较少。期间有个别企业尝试针对印尼市场研发类似产品, 但因技术不成熟、设计不合理等原因, 难以满足实际需求。因此, 设计一种集多功能于一体、高效稳定的新型锡矿船显得尤为重要^[1]。

二、技术研究与设计

1. 总体设计原则

市场定位明确：就是针对印尼锡矿开采的实际需求。模块化设计：采用模块化设计思路，便于工厂化生产及现场组装，提高建造效率。高效动力系统：选用高性能柴油机作为动力源，确保船舶的强劲动力及稳定性。集成化作业平台：将采集、筛分、选矿、包装等功能模块高度集成于同一平台上，减少动力损耗及操作复杂性。

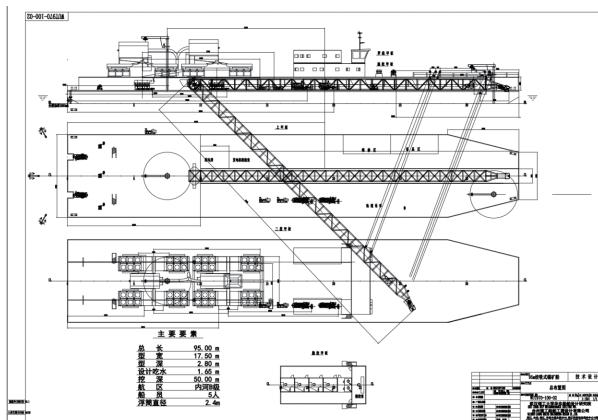
锡矿采集筛分包装多功能船，其设计理念，在于将锡矿的采集、筛分、选矿、包装与日常生活设施巧妙融合，构建了一个集高度集成化、紧凑化作业平台于一体的系统。此设计不仅优化了作业流程，提升了工作效率，还显著节约了空间资源，使得整体作业更为高效、顺畅^[2]。

2. 船体构造与布局

根据现场调研及多方论证，该船机构布局如下：

该船绞吸头按装仍采用传统的清淤船桥架结构形式，技术成熟，桥架可以承受较大的切削扭矩；桥架采用绞车控制升降，桥架上的起吊滑轮为两组配备，保证桥架受力均衡；为配合转场作业的需要，尾部配备有360度全回转高效螺旋桨推进系统；船体从方便工厂制作，转运到船坞装配考虑，采用独特的圆筒浮体，法兰拼接设计，保证浮力前提下，抗侧风能力强，行进阻力小；甲板采用双层甲板结构形式，根据整船工作流程，充分利用流体自重来完成锡矿浆体的工序转移，节省成本；为减少桥架作业时对船体冲击，桥架与船体连接处设计了减震缓冲装置；对水下作业绞刀头、马达、水下电机等部件，充分考虑深水高压工作环境，进行密封件型式的特殊设计。

该船整体布局图如下：



主要性能参数为：

总长：95米。

型宽：17.5米。

型深：2.8米。

工作重量：1300吨。

设计挖深：50米。

总装机功率：3184kw。

选矿处理能力：设计处理能力为360t/h，锡矿产量1—2吨/h。

浮体数量：五组圆筒浮体，圆筒直径：2.4米，厚度12mm，选用CCS船用材料。

本船的整体布局及船体结构，在2018年1月16日，获得实用新型专利，证书号ZL201720823856.8。2022年12月5号锡矿船获评贝尔德海事世界最佳采矿挖泥船称号。

3. 创新型设计点

(1) 创新的圆筒拼接船体设计

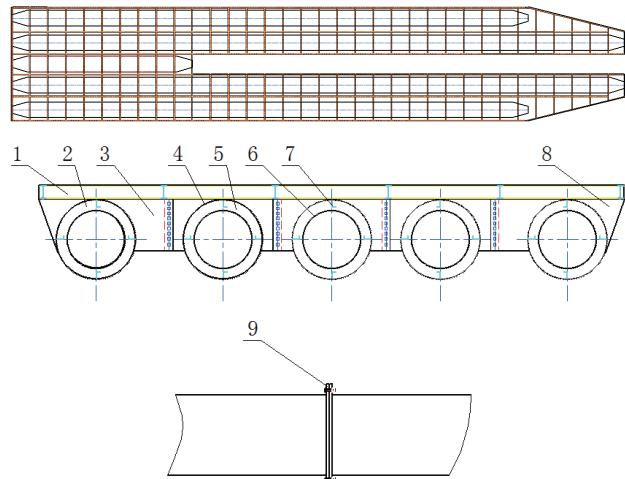
根据施工要求，船体工厂制作模块，运输到船坞进行整体组装，船体结构在保证足够浮力的前提下，还要考虑运行中抗侧风、减小水的阻力，提高行进速度，传统的箱式结构不适合本船舶制造使用；圆筒拼接形式的船体浮体，其设计不仅极大地方便了拆装运输与工厂化作业流程，更显著提高了船体抗侧风能力，降低了水阻力，从而实现了行进速度的有效提升。

圆筒拼接形式的大型船体浮体，正是一种创新的设计方案^[3]。该方案由框架、浮筒、侧连接法兰、边法兰及浮筒连接法兰等关键部件组成。浮筒则通过外筒、内加强环、内圆筒及纵加强筋的精密焊接而成，确保了结构的稳固与耐用。在组装过程中，各个浮筒首先通过浮筒连接法兰紧密相连，形成超长的大浮简单元；随后，这些大浮简单元再利用侧连接法兰进行拼接，最终构成完整的船体浮体。

此圆筒拼接形式的大型船体浮体，具备以下显著特点：

其组合方式极为灵活，可根据船体实际需求，任意调整浮筒的数量与组合方式；该设计极大地简化了拆装运输与工厂化作业流程，使得船坞内的组装工作更加高效便捷；得益于圆形船体的独特结构形式，其抗侧风能力得到了显著提升，从而进一步增强了船舶的安全性。每组圆筒的最前面都采用锥形设计型式，大大减小运行阻力。

在2018年4月20日，圆筒拼接形式的船体浮体，获得实用新型专利，证书号ZL 201721317758.3。



图中：框架 -1、浮筒 -2、侧连接法兰 -3、外筒 -4、内加强环 -5、内圆筒 -6、纵加强筋 -7
边发兰 -8、浮筒连接法兰 -9

(2) 高效的桥架减震机构：

鉴于HID-XK300B船舶依旧采用挖泥船传统桥架的结构形式，通过升降绞车控制桥架的挖掘深度，从而实现高效、精准的锡矿采集。传统的桥架与船体刚性连接方式，随着挖深的增加，

桥架长度亦需相应延长，因此，桥架在水下工作时，各种动作产生的冲击力，最终作用在桥架与船体连接处，就对船体产生很大的冲击，这点是我们设计时必须考虑的一个关键技术点^[4]。

为有效缓解此类冲击，在桥架与船体的连接部位增设缓冲减震装置。该装置旨在赋予桥架减震缓冲的功能，以最大限度地降低桥架对船体的冲击，确保作业过程的安全与稳定。

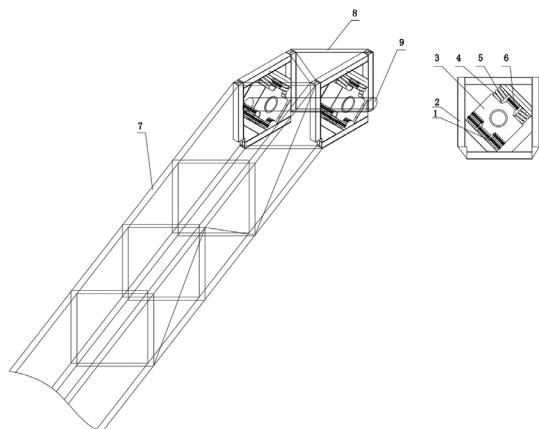
该船用桥架减震机构主要由副减震胶垫、框架、滑动块、主减震弹簧、定位销轴及主减震胶垫等关键部件组成。这些部件相互协作，共同构成一个高效、稳定的减震系统。

当桥架受到来自不同方向的冲击力时，滑动块会在框架内沿特定方向滑动。这一滑动过程会冲击到主减震弹簧和主减震胶垫等减震元件上，使它们发生弹性变形和阻尼作用。通过这些减震元件的协同作用，冲击力被有效缓冲和分散，从而降低了对船体和工作装置的影响。同时，副减震胶垫也起到了辅助减震的作用，进一步提高了整个减震机构的减震效果。

船用桥架减震机构作为桥架与船体之间的关键减震缓冲装置，其特点如下：

结构简单，制作方便：该减震机构采用模块化设计，各部件易于采购和组装，降低了生产成本和制造难度。安装便捷：减震机构在安装时无需对船体进行过多改动，提高了安装效率和灵活性。双向减震：机构具有上下两个方向的减震缓冲作用，能够全面应对来自不同方向的冲击力。灵活配置：根据船体所受冲击力的不同，可灵活调整主副减震的安装方向和方位，以达到最佳的减震效果。

在2018年4月20日，船用桥架减震机构，获得实用新型专利，证书号ZL201721317759.8。



图中：副减震胶垫 -1、框架 -2、滑动块 -3、主减震弹簧 -4、定位销轴 -5、主减震胶垫 -6、桥架 -7、连接件 -8、转轴 -9

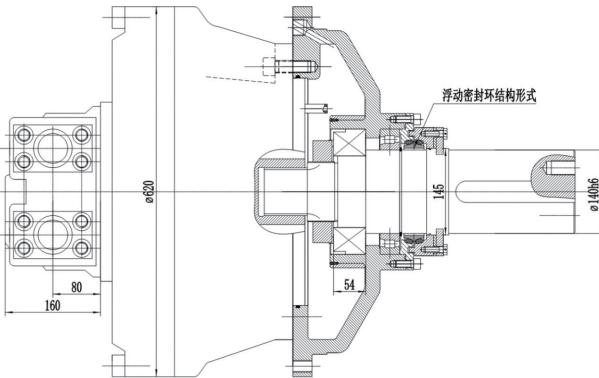
4. 先进的深水密封技术

针对深水作业中的高压工况，我们采用了特殊密封设计，以确保设备的正常运作并有效防止外部水的侵入^[5]。对于浅水作业环境，由于水下部件所受外部压力较小，因此无需特别关注其对外部水的密封性。然而本船需要到达水下挖深50m的情况，在深水作业场景下，相关水下部件需承受高达5Kg/cm²的外部压力。针对深水作业的高压工况，水下作业部件的密封设计需全面考虑，既要确保机构内部润滑油不外泄，又要严格防止外部深水渗

入机构内部。此外，驱动刀头所使用的液压马达、驱动泥泵的水下电机必须充分考虑深水作业的实际条件，以杜绝在高压环境下外部水渗入动力件内部，进而引发故障。

由于本船绞刀头采用液压马达驱动，所以对液压泵我们采用了特殊设计，在输出端增设了浮动密封环密封形式，浮动密封具有耐高压、密封稳定、磨损小、维护容易等优点，浮动密封环耐压强度可达5mpa，因此在水下挖深50m作业时可以有效的确保外部水无法进入泵体内部，从而保障绞刀头的稳定运行。水下电机直接选配国内专业的深水电机制造厂家天津普友配套，保证使用效果。

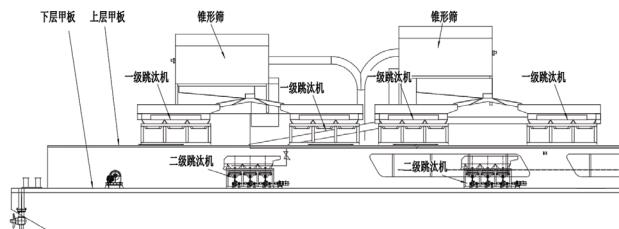
液压马达输出端密封型式结构图：



5. 双层甲板高效设计

在船舶的设计构思中，我们着重于工作流程的细致规划与动力损耗的严格控制，力求通过流体自重的巧妙利用，实现物料在各加工阶段的无缝转换。依据详尽的工艺设计，从水下抽取的矿砂首先需被提升至整个作业流程的最高点，经历严格的逆向筛分程序。随后，这些矿砂将借助流体自重的力量，自然下落至一级选矿、二级选矿及矿粉回收等后续工序。

为了支撑这一高效运转的生产流程，船舶被精心构造成双层甲板结构^[6]。上层甲板专注于原料的初步处理，配置了高效的锥形筛与一级跳汰机，确保原料的快速筛选与初步提纯。而下层甲板则承担着更为精细的加工任务，包括二级跳汰机的深度处理以及矿粉的收集与包装设备，从而确保整个生产流程的高效、有序进行。



三、工作性能

锡矿船每天10小时工作，锡矿产量可达15吨左右，适用于近海深层矿砂作业，最大挖深可达50米，具备较高的作业效率和生产能力。

1. 自动化与智能化

船舶采用PLC编程控制，实现液电操控，自动化程度高，减

少人工操作，提高工作效率和安全性。监控系统完善，可实时监控船舶位置、设备工作状态及各项参数，50米水下摄像头，满足水下观测需求。同时配备集成DGPS系统，实时显示船体摆动的高精度位置信息。GPS-RTK技术建立实时数据通讯链路，实现厘米级精度动态定位。AIS应答机响应询问信号，发送船舶动态信息，增强船舶自动识别与信息交流。海图机平面电脑实时显示海洋航行信息，支持电子海图查看与航线规划。磁罗经确定航向和观测物标方位，同样至关重要。



2.适应性与舒适性

锡矿采集筛分包装多功能船的生活设施设计全面，旨在满足船员长期海上作业的基本生活需求。船上设有舒适的船员舱室，配备必要的生活设施如床铺、储物柜和通风设备。同时，船上还设有海水淡化系统、污水处理系统、油污分离系统、厨房和餐厅，为船员提供营养均衡的餐食和餐厅还成为船员用餐交流的重要场所，促进了团队之间的沟通与协作^[7]。

四、工作装置与筛分系统

1.动力系统

锡矿船总共配备7台柴油机，2台发电机组。

两台后驱动柴油机型号为X6170ZC-1，单台功率达到382kw，其主要功能是通过分动箱带动液压泵，液压马达驱动齿轮箱，进而驱动尾部螺旋桨。这两台柴油机采用与分动箱直连方式，效率高；液压马达驱动螺旋桨，便于远程操控转速及摆角。

三台X6170ZC620-4型主柴油机，每台功率达到456kw，分别带动三套400kw的发电机组，三台发电机采用双机并联方式进行作业，提供800KW的动力，供水下泥泵驱动电机使用，其中另一台发电机作为备用，“两用一备”的配置模式，保证设备正常工作。

一台X6170ZC620-4型柴油机，功率为456kw。该柴油机通过分动箱驱动液压泵工作，其特点该齿轮箱采用三输出设计，分别连接至一个190+190双联柱塞泵和两个130+130双联柱塞泵。这些柱塞泵的额定工作压力可达到20Mpa。该设备提供液压动力，用于驱动绞刀头、升降绞车、横移绞车、三缆定位绞车等关键液压驱动部件。

两台潍柴产发电机组，型号为CCFJ90J-W，每台功率为90kw，用于满足各个水泵、锥形筛驱动电机、吊车、传送带、

打包机、日常电力需求。根据负荷大小，可以单机作业（不工作时），也可双机作业（工作时）。

一台型号为X6170zc620-4的柴油机，其功率达到456kw，带动400KW发电机，发电机提供动力专供给跳汰机的电动机使用。

在水下泵的设计上，本船采用了国内著名品牌品牌的水下泵，其清水流量高达2000立方米/小时，扬程能力可达40米。该水下泵由潜水电机驱动，潜水电机采用国内著名品牌，潜水电机的工作电压为690V，总功率为560Kw，确保了水下泵的稳定运行和高效作业。

绞吸式挖泥船的关键组成部分，其挖掘能力直接受制于绞刀功率的影响。为实现绞刀作业效率的最大化利用，专门设计的锡矿开采绞吸头，对刀片型式、刀齿选配、轴承室密封、密封件水封进行了改进设计，大大提高作业效率及工作可靠性^[8]。

2.采集筛分包装流程

锡矿采集流程始于利用桥架安装的绞吸头深入海底执行采集作业，所采矿砂随后通过管道系统直接输送至最高点安装的锥形筛进行初步筛分，同时完成对锡矿混合物的水洗，以去除大块杂质及不需要的土质；筛分后的矿砂通过溜槽进入一级跳汰机进行初步选矿，一级跳汰机选出的锡矿，杂质含量较高，需进行二级跳汰机精选，二级跳汰机出来精矿粉，锡矿含量可达50% ~ 80%。最终，经过严格筛选的锡矿捞取后通过传送带，进入进包装设备进行自动化包装，并存储在船上的专门储物室。

3.生活设施与辅助系统

该船舶已全面配置了先进的生活设施及辅助系统，具体涵盖海水淡化系统，每小时产0.25吨淡水，满足12人日需。污水处理系统，高效处理生活污水及油污水，处理后的水质达标或可再利用，减轻海洋环境潜在影响。舒适的住宿房间、便捷的办公场所、设备齐全的伙房以及整洁的卫生间等。这一系列设施的完善，旨在充分满足船员在船舶上长期工作的生活需求，从而有效提升船员的工作积极性及整体生活质量。



五、应用效果与经济效益分析

1.应用效果显著

锡矿采集筛分包装多功能船自投入使用以来表现优异^[9]。其

最大挖深可达52米远超传统采矿船的25米限制；日产量稳定在15吨左右，客户反馈表明该船性能稳定可靠操作简便且维护成本较低。

2. 经济效益突出

从经济效益角度看该船为客户带来了显著的经济效益增长。根据现场施工反馈每日可平均生产15吨精锡矿，按照现实售出情况每吨可达7000美元，折合人民币可达5万元人民币左右，可产生直接销售产值约75万元人民币，燃油消耗、人工费用及维修保养等成本，总计约5.38万元人民币，扣除成本后每日毛利润可达69.62万元人民币。

六、社会效益分析

锡矿采集筛分包装多功能船的成功研发和应用不仅促进了印尼锡矿开采业的发展还带来了广泛的社会效益^[10]。首先该船提高

了锡矿开采效率增加了锡矿供应量有助于满足全球市场对锡矿的需求推动相关产业链的发展；其次该船减少了动力损耗和碳排放降低了对环境的污染符合可持续发展的理念；最后该船为当地创造了大量的就业机会促进了当地经济的发展和民生的改善。

七、结束语

综上所述锡矿采集筛分包装多功能船的研发和应用是解决印尼锡矿开采业面临困境的有效途径之一。该船凭借其独特的多功能集成设计、高效的作业性能和显著的经济社会效益，展现出了广阔的发展前景和应用潜力。未来随着技术的不断进步和市场需求的不断增长，我们有理由相信该船将在全球锡矿开采领域发挥更加重要的作用，为推动锡矿资源的有效开发和利用做出更大的贡献。同时我们也将继续关注和研究该领域的最新动态不断优化和完善产品设计以满足市场的不断变化和需求。

参考文献

- [1] 邵召斌, 林森, 刘伟麟. 大型绞吸式挖泥船挖岩铰刀切削数值模拟 [J]. 水运工程, 2017(8):40-44.
- [2] 冯永军, 陈城, 陈新权等. 绞吸式挖泥船三缆定位系统设计 [J]. 水运工程, 2022(9):203-209.
- [3] 李晓磊, 柴桂军, 张润喜等. 大型绞吸挖泥船性能提升研究 [J]. 水运工程, 2023(S2):32-37.
- [4] 李攀. 不同水深工况下绞吸挖泥船阻力性能对比 [J]. 内江科技, 2020(12):18-19.
- [5] 胡京招, 祝志远, 曹蕾, 等. 基于中粗砂土质输送工况的泥泵轴系疲劳寿命研究 [J]. 水泵技术, 2023,(01):1-5.
- [6] 王健, 孔凡震. “天鲲号”自航绞吸船核心技术应用研究 [J]. 中国港湾建设, 2017(1):58-67.
- [7] 何炎平, 冯长华, 顾敏童. “天鲸”号大型自航绞吸式挖泥船 [J]. 船舶工程, 2009(5):1-5.
- [8] 张有卿. 船用液压系统调速原理分析 [J]. 船舶工程, 2020,42(S2):36-39.
- [9] 周国平, 深远海大型多功能综合救助船工程开发研究 [J]. 船舶, 2022,33(06):1-9.
- [10] 岳文飞. 基于疏浚土资源化利用技术的入库航道清淤工艺 [J]. 水运工程, 2023(S2):81-85.