

2025

行业研究系列

深海科技产业链研究报告

科技赋能深蓝空间开发，万亿新兴产业扬帆起航

2025 年 8 月

深企投产业研究院



关于深企投产业研究院

深企投产业研究院是深企投集团旗下的高端智库，聚焦产业发展，服务区域经济，致力于为各地提供产业发展落地方案。研究院总部位于深圳，服务区域覆盖全国主要省市。研究院集聚一批经济研究和产业研究专家，以 985 院校研究生为主体，链接高校专家学者，为全国各地政府及机构提供智力支持。

基于自身的研究和咨询能力，同时借助集团的服务网络，深企投产业研究院为政府机构、国有平台、产业园区、金融机构等客户类型提供有针对性的服务。

——政府机构客户。研究院重点提供五类服务：一是五年规划，包含发改系统的国民经济和社会发展规划，工信、商务、投促、文旅等政府部门的专项五年规划；二是产业规划，包含地区、片区的产业定位和产业发展专项规划；三是招商专题研究，包括产业链招商策略、招商规划、招商专案、招商图谱等；四是项目策划，发掘和策划包装契合区域禀赋、产业趋势和投资方向的项目，助力宣传推介和精准招商对接，或策划申报超长期国债等地方重点投资项目；五是项目评估，涵盖地方重点投资项目的风险评估、招商引资项目背景调查、产业基金拟投资项目尽职调查等。

——国有平台客户。针对新时期全国各地国有城投、产投公司向国有资本投资运营转型发展的需要，聚焦国有平台投资布局的新质生产力和重点产业赛道，研究院提供产业情报、产业发展规划、企业投资标的尽职调查等服务。

——产业园区客户。为国有园区、工业地产客户提供园区产业规划定位、产品定价策略、产品设计方案、招商运营服务方案、渠道和品牌推广策略、产业培训等服务。

——金融机构客户。为机构投资者提供产业细分领域深度研究、投资分析、标的尽职调查等服务，减少投资过程中的信息不对称，提高投资决策准确率。

自 2020 年至今，深企投产业研究院团队已完成咨询服务项目近百个，完成研究报告数百份，服务的地区包括广东、江苏、浙江、福建、广西、云南、贵州、湖北、四川、陕西、宁夏等多个省市。

在产业研究领域，深企投产业研究院在新质生产力、战略性新兴产业、未来产业研究上具有深厚积累，每年发布原创深度报告近百份。有关低空经济、商业航天、卫星互联网、新型储能、人形机器人、生物制造、脑机接口、文旅康养、全球供应链等报告已获得广泛传播。

目 录

深海科技概览

- 一、深海与深海科技概念 2
- 二、深海科技产业链 5
- 三、中国深海科技规划政策 6

深海资源篇

- 一、深海资源概况 12
 - （一）深海能源资源 13
 - （二）矿产资源 17
 - （三）生物资源 23
- 二、深海资源开发全球博弈 25

深海装备篇

- 一、深海水下技术装备概述 30
- 二、深海探测与感知装备 31
 - （一）深海潜水器 31
 - （二）声呐系统 39
 - （三）海底观测网 42
- 三、深海资源开发装备 48
 - （一）水下施工作业装备 48
 - （二）深海油气生产装备 49
 - （三）深海采矿装备 53
- 四、深海器件 57
 - （一）水听器 57

(二) 水密连接器58

(三) 推进系统59

深海材料篇

一、深海材料概述62

二、耐压结构材料64

 (一) 钛合金材料65

 (二) 高强度钢67

 (三) 碳纤维复合材料 67

 (四) 陶瓷复合材料69

三、深海浮力材料70

四、深海密封材料72

五、功能防护材料74

 (一) 深海防腐材料74

 (二) 深海润滑材料77

图、表目录

图 1 深海分层3

图 2 中国四大海域地形图4

图 3 深海科技“三深”释义 5

图 4 深海科技产业链主要领域 6

图 5 世界深海油气的盆地分布及其主要产区 15

图 6 世界深海金属矿分布18

图 7 全球深海稀土成矿带分布 21

图 8 《联合国海洋公约》划分出的海洋空间示意图26

图 9 “潜龙”系列自主水下机器人37

图 10	无人水下航行器 UUV 声呐装备分类	41
图 11	海底观测网的典型结构	44
图 12	海底观测网组成示意图	45
图 13	海底采矿场景示意图	53
图 14	深海采矿流程	54
图 15	深海材料分类（按功能作用）	63
图 16	深海观测探测平台应用的主要材料及部件	63
图 17	载人潜水器钛合金耐压球壳	65
图 18	潜水器密封部件示意图	72
表 1	我国有关深海科技发展的规划政策文件	6
表 2	省市层面深海科技有关规划政策	8
表 3	深海主要资源分布及开发现状	12
表 4	深海生物开发应用领域	23
表 5	深海潜水器主要类别	32
表 6	全球主要载人潜水器对比	35
表 7	欧美主要海底观测网	46
表 8	我国深海采矿装备进展	56
表 9	水听器分类	57
表 10	当前主流深海结构材料对比	64
表 11	我国深海钛合金材料主要企业	66
表 12	碳纤维复合材料主要企业深海科技业务布局	69
表 13	深海密封材料主要类型及应用	73
表 14	海洋防腐涂料主要类别	75
表 15	深海润滑材料主要种类及应用	77

01

深海科技概览



面对陆地资源趋紧的全球态势，深海已成为大国竞逐的“最后战略疆域”；发展以“深潜、深钻、深网”为核心的深海科技，直接关乎我国资源自主权、蓝色经济新引擎与水下国防安全体系建设。2025 年“深海科技”被首次纳入《政府工作报告》，体现了国家对深海开发的重视。

一、深海与深海科技概念

深海通常指水深超过 200 米的海域。对于深海，不同领域有不同的界定。在海洋科学、海洋生物学领域，根据阳光的可穿透范围，通常把水深 200 米以内作为“浅海”或者海洋表层，也称为透光层，这个区域能照射到阳光，有能进行光合作用的水生植物和藻类，支撑起浅海生态；超过 200 米深的海域，就可称为“深海”，包含中层带、深层带、深海带、超深海带 4 个水层，其中 1000 米以下海域阳光穿透趋近于零，形成与海洋表层不同的生态。《联合国海洋法公约》关于大陆架的概念以 200 米为界限，200 米之内为浅海陆架，200 米之外为深海陆架。在海洋工程及资源勘探开发领域，则将“深海”一般定义为 1000 米深以下的海域。



图 1 深海分层

资料来源：博物公众号。

深海占据全球海域和地球表面主体。深海具有高压、低温、底层水流缓慢、昏暗无光等特点，平均温度 1-3℃，盐度高、富氧区域普遍存在，沉积物丰富。以 200 米为界定，则深海占全球海域面积的 93%、地球地表面积的 2/3，以 1000 米为界定，则深海占全球海域面积的 80%、地球地表面积的 57%，仍是地球上最大的未知区域。

中国的深海海域主要位于南海和东海，面积超过 200 万平方公里。中国海域总面积约 473 万平方公里，包括渤海、黄海、东海、南海和台湾以东太平洋海区，其中渤海、黄海平均水深分别为 18 米和 44 米，深海海域主要分布在南海和东海。我国南海海域面积达 350 万平方公里，平均水深 1212 米，最大深度 5559 米，其中大陆架以外的深海海域（对应大陆坡和深海盆）面积在 180 万平方公里以上；东海海域面积 77 万平方公里，平均水深 349 米，最大水深达 2719 米（位于冲绳海槽），大陆架以外的深海海域面积约 25 万平方公里，占比约 1/3。

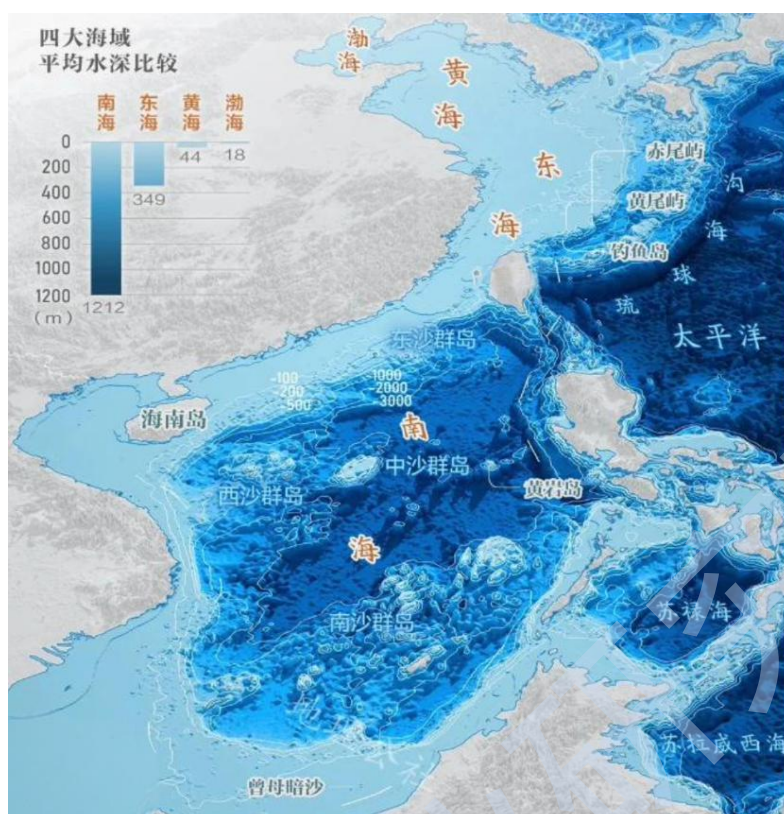


图 2 中国四大海域地形图

资料来源：地理公社公众号。

深海科技是指用于探索、开发和利用深海资源以及研究深海环境的一系列先进技术和相关学科的总称，包括深海探测、深海资源开发、深海通信与信息化、深海工程等多个方面的关键技术与装备体系，主要又可以分为深海探测、深海防护（国防）与资源开发三大板块。

深海科技聚焦“三深”。深潜（利用运载工具直接潜入深海作业）、深钻（从海底向下钻探取样研究）和深网（在海底部署由光电缆、传感器等构成的探测网络）合称“三深”，构成当前进入深海内部进行科学探索的主要手段，如下图所示。

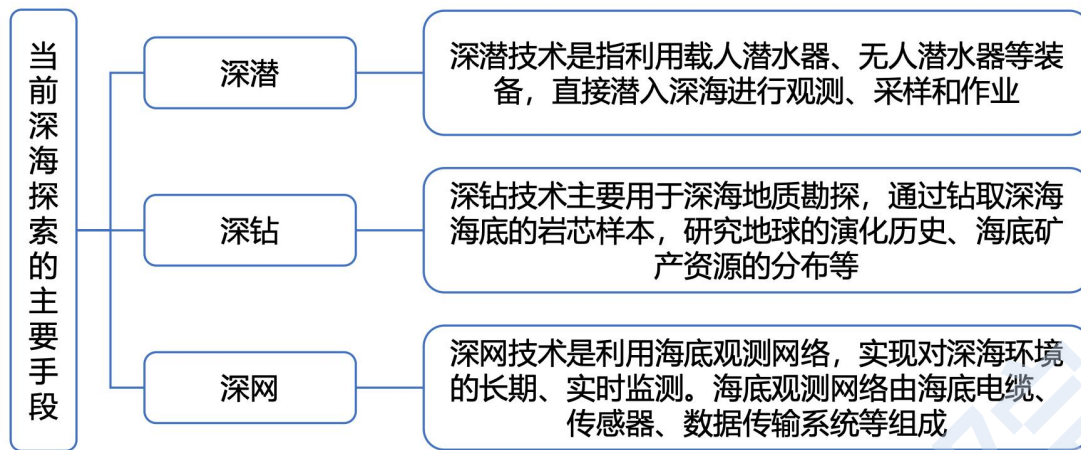


图3 深海科技“三深”释义

资料来源：求是网、东吴证券。

二、深海科技产业链

深海科技产业链上游为深海材料及元器件，深海材料是深海装备制造的重要支撑，主要包括耐压结构材料、浮力材料、密封材料、功能防护材料、照明材料等，元器件则主要包括深海传感器、动力系统、通信系统、机械部件等零部件。产业链中游为深海水下技术装备，主要包括深海观测/探测装备、水下施工作业装备、深海油气生产系统、深海采矿装备等，涉及载人/无人潜水器、超深水钻井平台、深海机器人等核心装备制造。下游应用涵盖国防军事、深海油气资源开发、深海采矿、生物医药、海底数据中心、深海能源利用等多元应用场景，其中，深海油气开发是深海产业链最成熟的先导领域，深海国防产业链也相对成熟。深海科技上游及中游主要领域如下图所示。

深海材料				水下施工作业装备			
耐压结构材料	浮力材料	密封材料	功能防护材料	深海水下施工装备	深海水下维护维修装备	深海水下勘测施工装备	深海水下精细作业装备
- 钛合金 - 超高强度钢 - 氮化硅陶瓷复合材料 - 玻璃纤维复合材料 - 碳纤维复合材料	- 微球复合泡沫材料 - 化学泡沫复合材料 - 轻质合成复合材料	- 特种弹性体密封材料（高压密封圈） - 类橡胶钛合金形状记忆合金密封材料 - 聚氨酯密封胶	- 深海防腐涂料 - 耐蚀合金（镍基合金） - 防生物附着涂层（聚合物涂层） - 防护润滑涂层	- 超深水打桩锤 - 工程用深水钻机 - 深海水下挖沟机 - 深海水下整平机 - 疏浚和清淤装备	- 水下电缆及管道施工机器人 - 水下切割破拆装备 - 水下焊接装备 - 打捞装备	- 水下勘探装备 - 水下工程取样装备	- 水下作业机械手 - 深海水下摄像装备 - 深海科考水下取样装备
深海元器件				深海油气生产系统			
深海传感器	动力系统	通信系统	机械部件	水下井口系统	水下采油树	管汇与分配系统	脐带缆系统
- 物理传感器 - 生化传感器 - 声学传感器（水听器） - 光学传感器	- 推进系统 - 主控单元/控制器 - 数据采集模块 - 电机驱动模块 - 电池管理系统 - 推进器控制单元 - 通信模块 - 传感器接口模块 - 应急控制系统 - 人机交互界面 - 控制模块	- 水声通信设备 - 水声调制解调器 - 水声通信机 - 水声电话 - 声信标/应答器 - 光纤通信设备 - 海底光缆 - 水下光缆机/中继器/放大器 - 湿插拔连接器 - 分支单元 - 水下连接器 - 光路终端设备	- 机械手&采样器 - 耐压壳体 - 传动与执行机构 - 系泊部件 - 水密连接器	- 底座 - 低压/高压井口头 - 套管悬挂系统 - 密封与隔离组件 - 锁紧与承载件 - 附件与接口	- 树体与主阀块 - 阀门控制系统（主阀、翼阀、井下安全阀） - 节流与注入模块 - 树桩与树裙 - 水下控制模块 - 井口连接与回接系统	- 管汇主体 - 阀门与控制模块 - 水下增压/电力分配装置 - 脐带缆终端 - 水下控制模块 - 连接与接口（跨接管、飞线）	- 立管与输送系统 - 安全与辅助系统 - 水面支持设施 - 浮式生产储卸油装置 FPSO - 半潜式生产平台
深海观测/探测装备系统				深海采矿装备系统			
深海/海底观测仪器	深海潜水器	海底观测网		海底采矿装备	矿石输送装备	表面支持系统	环保装备
- 物理/生化传感器 - 声学多普勒剖面仪 - 船载高精度自容式温盐深探测仪 - 深海耐高温拉曼光谱探针 - 深海多通道拉曼光谱探测系统 - 深海MUNS气相色谱仪	- 灾害监测预警仪器 - 海底地震仪 - 海底地震勘探节点采集装备 - 海底飞行节点地震仪 - 地形地貌探测仪器 - 海底光学成像系统 - 海底特性多波束一体化声学探测装备 - 电磁联合探测设备	- 载人潜水器HOV - 无人潜水器AUV - 有缆潜水器ROV - 自主式潜水器AUV - 拖曳式潜水器TUV - 水下滑翔机AUG - 声呐系统	- 岸基站系统 - 海底主基站系统 - 海底光电复合缆 - 海底基观测系统 - 海面观测平台（浮标） - 水下监测平台（潜标）	- 采矿机器人 - 海底挖掘机 - 连续采矿设备 - 集矿装置 - 自推进履带式采矿车	- 提升泵（离心泵、螺杆泵） - 中继仓 - 立管 - 输送软管	- 深海采矿船 - 矿物运输船	- 环境监测船 - 环境监测系统 - 尾水处理装备 - 生态修复装备

图 4 深海科技产业链主要领域

资料来源：深企投产业研究院整理。

三、中国深海科技规划政策

2013 年《国家海洋事业发展“十二五”规划》中已明确深海资源勘探开发、深海装备技术研发等任务。“十三五”至“十四五”期间，国家层面支持海洋经济、深海科技发展的规划政策频现，2021 年起，科技部启动国家重点研发计划“深海和极地关键技术与装备”重点专项。2025 年“深海科技”被首次纳入《政府工作报告》，体现了国家对深海开发的重视。2025 年 7 月 1 日总书记主持召开中央财经委员会第六次会议，研究纵深推进全国统一大市场建设、海洋经济高质量发展等问题，强调推进中国式现代化必须推进海洋经济高质量发展，走出一条具有中国特色的向海图强之路。

表 1 我国有关深海科技发展的规划政策文件

时间	发布部门	文件名称	有关内容
2013 年 1 月	国务院	《国家海洋事业发展“十二五”规划》	提出科学养护和利用海洋资源,加强国际海域资源调查与极地考察;明确深海资源勘探开发、深海装备技术研发等任务

时间	发布部门	文件名称	有关内容
2016年2月	全国人大常委会	《中华人民共和国深海海底区域资源勘探开发法》	规范深海资源勘探活动,要求企业履行环保义务,推动深海技术自主创新与国际合作
2016年8月	国务院	《“十三五”国家科技创新规划》	将深海探测列为科技创新重点任务,部署深海空间站等重大科技项目,推动全海深潜水器、深海资源开发装备研发
2017年5月	科技部、国土资源部、国家海洋局	《“十三五”海洋领域科技创新专项规划》	提出突破深海运载作业关键核心技术和深海探测技术研究重点任务,开展深海空间站研制、全海深潜水器研制及深海前沿关键技术、深海通用配套技术、深远海核动力平台关键技术等研究,开展1000-7000米级潜水器作业及应用能力示范
2021年3月	国务院	《国家十四五规划和2035年远景目标纲要》	事关国家安全和全局的基础核心领域……深地深海等前沿领域,实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目;深海空天开发……等前沿科技和产业变革领域,组织实施未来产业孵化与加速计划,谋划布局一批未来产业;加快深海、深层和非常规油气资源利用;加强深海战略性资源和生物多样性调查评价
2021年12月	国家发改委、自然资源部	《“十四五”海洋经济发展规划》	明确深海科技为海洋经济核心增长极,部署深海油气、矿产开发装备国产化,建设深海实验室和科考船队
2023年12月	国家发展改革委等三部门	《关于支持广州南沙放宽市场准入与加强监管体制改革的意见》	提高海洋工程装备、高技术船舶、深海养殖装备、深潜水装备、海洋勘探等高端装备的自主研发能力
2024年1月	工信部等七部门	《关于推动未来产业创新发展的实施意见》	加快深海潜水器、深海作业装备、深海探测装备、深海智能人平台等研制及创新应用,推动深地资源探采、城市地下空间开发利用、极地探测与作业等领域装备研制

时间	发布部门	文件名称	有关内容
2024 年 8 月	中共中央办公厅、国务院办公厅	《关于完善市场准入制度的意见》	聚焦深海、航天、航空等十大新业态新领域，优化市场准入环境
2025 年 3 月	国务院	政府工作报告	提出“大力发展海洋经济，建设全国海洋经济发展示范区”，并首次将“深海科技”单列为国家新兴产业，与商业航天、低空经济并列

资料来源：政府公告，深企投产业研究院整理。

自政府工作报告明确提出“深海科技”战略方向后，各地政府积极响应，将深海科技创新作为推动区域经济高质量发展的重要引擎。山东、广东、浙江、上海等沿海省市率先布局，深圳、青岛、厦门等地市也相继发布有关规划政策。

表 2 省市层面深海科技有关规划政策

省市	时间	规划政策及主要内容
山东	2024 年 12 月 6 日	《山东省海洋产业科技创新行动计划（2025—2027 年）》：突破海底电缆、超高温高压海洋随钻测井装备、深水采油树、深海钻井机器人、深海立管、深水全电控防喷器、低噪声水下航行器及自主可控工业软件等技术。研发重载作业级深潜器与穿梭/着陆器关键技术、大水深智能勘探机器人、高性能绿色集矿机、海洋二氧化碳地质封存与监测、深海新型高精度传感器等关键装备，推动深海资源勘探开发技术达到国际领先水平。建设国家海洋综合试验场（威海）、国家深海基因库、国家深海大数据中心等。
浙江	2025 年 3 月 13 日	浙江省海洋经济发展厅聚焦全国海洋经济发展示范区建设，部署“开年即开拼”攻坚行动，重点推进千项万亿重大项目、国际航运中心升级、海洋科技创新融合及海洋经济立法，强化经济大省在海洋领域的“深蓝贡献”。

省市	时间	规划政策及主要内容
		2024 年 12 月《浙江省海洋科技创新能力提升行动计划（2025-2027 年）》：聚焦海洋精准感知、高端智能海工装备、海洋新材料等七大领域，集中攻关关键技术，形成突破性和产业转化成果。
深圳	2025 年 3 月 17 日	深圳市通过“深海未来 2025”大会推动产学研用协同创新，重点布局深海、极地等战略领域产业集群。市海洋发展局与华为、腾讯签署合作协议，联合 16 家新兴产业企业构建“蓝色伙伴关系”探索海洋新质生产力发展路径，强化政企协同的海洋经济创新生态。
青岛	2025 年 3 月 18 日	青岛市通过审议《现代海洋特色产业集聚区建设行动方案》等文件，锚定“4+4+2”重点海洋产业方向，加速国际航运中心建设和重大项目招引，以产业集聚区为载体培育海洋新质生产力，强化海上安全管理支撑。 2024 年 12 月《青岛市以科技创新引领构建现代化海洋产业体系培育打造海洋新质生产力行动方案（2025-2027 年）》：重点开展深海采矿技术攻关，提高深海矿产开发装备制造能力，发挥深海重大平台支撑作用、积极参与深海采矿国际合作与治理
上海	2025 年 3 月 20 日	上海市海洋局将出台《上海市海洋产业发展规划（2025-2035 年）》和《上海市海洋观测网规划（2025-2035 年）》，并印发《关于推动上海海洋经济高质量发展加快建设现代海洋城市的实施意见》，旨在系统性布局未来十年海洋产业升级和观测体系，强化海洋经济与城市发展的深度融合。
广东	2025 年 5 月 28 日	《广东省促进海洋经济高质量发展条例》支持发展深潜器、无人船艇、水下机器人等新型海洋装备等，2025 年 5 月 28 日正式发布。 2021 年 9 月《广东省海洋经济发展“十四五”规划》：面向南海，围绕深海探测、深远海资源开发利用、陆地空天技术下海等前沿领域，以深港、广佛、珠澳极点和广深港、广珠澳科技创新走廊上的园区、高新技术开发区等为载体，建设 2-3 个海洋科技创新引领示

省市	时间	规划政策及主要内容
		范区
厦门	2025 年 6 月 23 日	《厦门市加快推进海洋经济高质量发展若干措施》，从科研创新、产业扶持、人才培育、招商体系四方面加大政策支持，构建涵盖全链条的海洋经济扶持框架。
海南	2021 年 6 月	《海南省海洋经济发展“十四五”规划(2021-2025 年)》：以三亚崖州湾科技城为核心，建设高能级深海科技创新平台，包括国家海洋综合试验场、深海装备试验室等，汇聚全球海洋创新要素。 《高质量发展海洋经济推进建设海洋强省三年行动方案（2024—2026 年）》：加快搭建高能级深海科技创新载体平台，强化科技攻关与成果转化，着力打造由科研院所、龙头企业和活跃的创新型小企业共同组成的深海领域创新态。以提升“深海进入—深海探测—深海开发”能力为目标，构建完善的深海产业链，努力打造具有海南特色的深海产业集群。

资料来源：政府公告，深企投产业研究院整理。

02

深海资源篇

探秘深蓝宝藏，全球博弈暗流涌动



深海油气资源储量占全球 70%，可燃冰储量足够人类使用数百年乃至上千年，金属矿产资源丰富，如稀土储量可达陆地上数千倍，可采关键矿物价值可达十余万亿美元。围绕深海矿产开发，全球利益博弈形势微妙，美国试图绕开国际监管框架，依托国内法授权开发满足自身需求。我国深海矿物勘探走在全球前列，但采矿技术装备水平总体有待提升。

一、深海资源概况

深海油气能源、矿产、生物资源极其丰富。深海拥有显著区别于浅海与陆地的丰富且独特的资源，油气资源储量占全球 70%，可燃冰储量足够人类使用数百年乃至上千年，金属矿产（多金属结核、富钴结壳、硫化物和稀土）资源丰富，如稀土储量可达陆地上千倍，矿产资源开发潜力巨大。深海生物在医药研究、基因资源开发、生物制造等领域应用前景广阔，具体如下表所示。

表 3 深海主要资源分布及开发现状

资源类型		特征及成分	分布/储量	开发现状及方向
能源资源	石油天然气	深海原油以轻质油为主、含硫量低、炼化价值高，优于陆上重质油，部分深海油田伴生凝析油，天然气以湿气为主，富含乙烷、丙烷等凝析成分，开采依赖深海钻井平台、水下生产系统等	资源量占全球 44% 以上，近 10 年来，深水石油和天然气年均新增探明储量的全球占比分别 45% 和 38%，重点分布在大西洋盆地（巴西、墨西哥湾、西非深水区）、南海与亚太海域	近 10 年来深水石油和天然气产量的全球占比分别达 8% 和 20%，成为当前深海经济的主体
	可燃冰	天然气与水在高压低温条件下形成的类冰状的结晶物质；甲烷占 80%，其余为乙烷、丙烷等其他碳氢化合物	海洋占全球 90%（其余在陆地冻土），总资源量 1.8 万亿亿立方米以上，太平洋、北极、南海为三大核心富集区	需克服高压、低温环境，现有技术（降压法、热解法）成本高且易引发甲烷泄漏，当前处于试采阶段，大规模商业化开采

资源类型		特征及成分	分布/储量	开发现状及方向
				预计 2030 年以后
金属矿产	多金属结核	含 30 多种有用金属，主要包括锰、铜、镍、钴以及共生的铂、金、银、钼等	广泛分布在水下 4000-6000 米的深海平原表面，资源总量达 3 万亿吨（其中太平洋海域 1.7 万亿吨），可采潜力约 750 亿吨	开采难度大，尚未商业化
	富钴结壳	富含锰、钴、铂、镍、铅、金、钛、铈等，其中钴含量最高达 2.5%，呈层状附着在海山岩石表面	分布在水下 800—2500 米的海山、海岭和海台区域，全球三大洋海山结壳分布面积为 304 万平方公里，干结壳资源量为 1000-2000 亿吨，以太平洋居多	开采难度大，尚未商业化
	多金属硫化物	含硫化铅、锌、铜、金、银等，矿物形态包括黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿等，水深分布范围在数百米到数千米之间，以大于 2000 米水深为主	全球已探明资源量约 6 亿吨金属，主要分布在太平洋海隆、大西洋和印度洋中脊，以及大洋边缘的弧后扩张中心，其中北大西洋矿区占已签约勘探区的 57%	技术相对成熟，比利时、加拿大等国接近商业化开采
	深海稀土	位于水深超过 4000 米的深海盆地沉积物，富含中重稀土元素，品位高、厚度大	主要分布在太平洋和印度洋，形成四大成矿带，中北太平洋和东南太平洋储量约 880 亿吨、相当于陆地资源量的 800-1000 倍	日本、中国勘察处于第一梯队，日本计划 2026 年实现试采、2028 年后实现商业开采
生物资源	动物	无脊椎动物（海绵、管虫、甲壳类）和脊椎动物（发光鱼、狮子鱼等）	热液喷口区、冷泉渗漏区、冷水珊瑚林、深渊海沟区拥有特殊生态系统，深海微生物占深海生物总量的 90% 以上，总数量约 3×10^{29} 个，占到地球总生物量的 60%	可用于医药及保健品研究、基因资源开发、生物制造、生物农业、新材料、清洁能源、海洋碳汇开发
	微生物	包括古菌、细菌、真菌、原生动物、病毒，已发现 1 万余种		

资料来源：头豹研究院、求是网等，深企投产业研究院整理。

（一）深海能源资源

深海的能源资源包括油气资源和可燃冰。深海油气和可燃冰资源储量巨大，其中深海油气开发在当前技术和经济条件下相对最为成熟，

已被证明具备商业价值，是目前深海资源开发中最为可行的方向。

——油气资源

全球超过 70% 的油气资源分布在海洋。法国石油研究所在 20 世纪 80 年代初期估计，世界石油资源极限储量 10000 亿吨，可采储量 3000 亿吨，其中海底石油可采储量 1350 亿吨。据国际石油天然气工艺研究所预计，世界天然气总储量为 255—280 万亿立方米，其中海洋天然气储量为 140 万亿立方米。但随着深海油气勘探取得进展，实际储量已超过原有预测。根据国际能源署（IEA）2018 年统计，全球海洋石油和天然气探明储量为 354.7 亿吨和 95 万亿立方米，分别占全球油、气总储量的 20.1% 和 57.2%。根据国际能源署（IEA）数据，全球超过 70% 的油气资源蕴藏在海洋中，44% 分布在 300 米以上深水及超深水区域。

深海油气开发在世界海洋经济中已占据重要地位。近 10 年来，深水石油和天然气年均新增探明储量的全球占比分别为 45% 和 38%，深水石油和天然气产量的全球占比分别达 8% 和 20%，深水油气储产量的全球占比均呈现逐年提高的趋势。尤其是水深超过 1000 米的水域，近年来成为全球重大油气发现的集中地，占比高达 70%，在油气开发全球排名前 50 名的超大项目中，3/4 是深海项目。按照深海油气产量占比推算，预计 2024 年全球深海油气开发（按原油、天然气）市场规模在 3000 亿美元以上。

从分布区域来看，大西洋两侧的墨西哥湾盆地、巴西岸外盐下盆地、西非岸外盆地群和欧洲北海盆地是深水油气的主要分布区。此外，北冰洋因其大量沉积盆地发育以及封闭环境，也被认为是全球瞩目的油气开发前景区，据估计储存着地球上尚未开采的 13% 的原油和 25% 的天然气。全球深海油气主要分布地区及产区如下图所示。

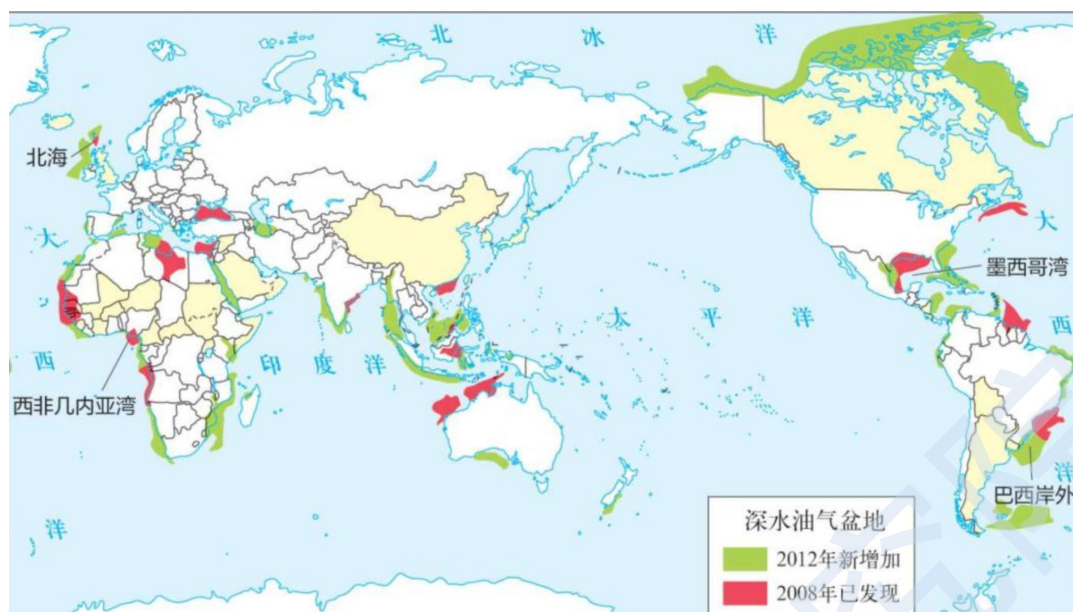


图5 世界深海油气的盆地分布及其主要产区

资料来源：汪品先《深海浅说》。

深水油气开发前景广阔。当前开发深海盐下油田，水深超过 2000 米，钻井深度超过 3000 米，钻具长达 5000—7000 米，技术要求极高，但由于深水油气项目丰富的产量、巨大的储量以及经济可行性，使其成为当前海上油气开发的重要方向。目前深水油气项目的盈亏平衡油价在 45 美元/桶左右，单油田日产规模在 5 万桶以上则具有经济性。相比之下，美国页岩油开采的盈亏平衡成本在 50 美元/桶以上（含新井），深水油气项目的成本占优。随着技术的不断进步，如针对不同地质条件的开采技术发展，以及对盐下等特殊油气藏的进一步探索，深水油气开发有望在更复杂的地质环境和更深的水域取得更大突破。随着技术降本持续推进，预计 2030 年左右高效深海项目成本有望逼近陆上低成本油田。

推进深水油气资源勘探开发对于我国能源安全具有重要意义。根据国家能源局数据，2024 年，我国海洋油气产量突破 8500 万吨油当量，再创新高；六年来，海洋原油产量累计增产量占全国增量的 70%。

根据中国海油集团能源经济研究院《中国海洋能源发展报告 2024》，预计 2025 年我国海洋石油产量 6800 万吨、海洋天然气产量突破 290 亿立方米。不过，现阶段我国海洋油气开采率较低，据科普中国，国内海洋油气产量仅占油气总产量的 18%，距 30% 的世界平均水平仍有较大差距。加强深水、深层及非常规油气资源勘探开发，对保障我国能源安全具有重要战略意义，可望在 2035 年前将石油、天然气对外依存度分别控制在 70% 和 50% 以下。

——可燃冰

天然气水合物俗称可燃冰、甲烷冰，是天然气与水在高压低温条件下形成的类冰状的结晶物质，主要成分是甲烷，占其总量的 80% 以上，还含有少量的乙烷、丙烷等其他碳氢化合物，外观像冰一样而且遇火即可燃烧。可燃冰分布于深海沉积物或陆域的永久冻土中，其中海洋（深海）的资源量占比 90%，其余 10% 分布在北极圈、青藏高原等陆地冻土带。

全球可燃冰资源储量庞大，可满足人类数百年需求。综合美国地质调查局 USGS、国际能源署 IEA 等机构数据，全球海底可燃冰总资源量在 1.8 万亿—4.0 万亿立方米范围，相当于 1.1 万亿—2.4 万亿吨甲烷当量，总碳含量是全球已知传统化石燃料的 2 倍。当前全球探明具备开采潜力的资源量在 250 万亿立方米以上，可满足全球数百年的天然气需求。

中国深海可燃冰资源集中在南海，试采实现突破。根据国土资源部 2016 年数据及 2017 年有关报道，初步预测我国海域（集中在南海）可燃冰资源量约 800 亿吨石油当量，分布面积覆盖 25 个有利区块、约 42 万平方公里。当前中国试验式开采位于南海神狐海域 128 平方公里范围内，储量超过千亿立方米，2017 年、2020 年两次试采成功，

为后续进入生产性开采和商业化开采奠定基础。

在开采可燃冰方面，目前全球仍面临一系列技术难题和风险：

一是开采成本较高。深海开采可燃冰需克服高压、低温环境，现有开采技术以降压法、热解法为主，均处于试验或中试阶段，根据 2019 年新闻报道引用美国能源部数据，开采成本平均每立方米高达 200 美元（1 立方米“可燃冰”可转化 164 立方米的天然气），当前开采成本仍为常规天然气成熟开采技术的 3-4 倍。普遍认为可燃冰开采需在 2030 年后进入大规模商业化。

二是储运难度大。可燃冰在常压下不稳定，温度超 20°C 会分解，需低温（-10°C 至 -30°C）、高压（>5MPa）条件下保存，商业化开采需要大规模储存运输技术支撑。目前以低温液化储运为主流方案，即将分解后的甲烷液化储存，适配现有 LNG 基础设施，但能耗、成本高于常规 LNG 储运。

三是容易引发生态与环保问题。深海生物多样性丰富但恢复周期长、生态环境脆弱，可燃冰开采过程中可能破坏海底生态平衡，引发地质灾害。同时，由于甲烷的温室效应是二氧化碳的 28 倍（在短期内可达到 80 倍），可燃冰开采过程中的甲烷大规模泄露将会加剧全球变暖，产生巨大的负面影响。

（二）矿产资源

海洋矿产资源远超陆地，深海采矿潜力巨大。深海矿产资源主要包括多金属结核、多金属硫化物、富钴结壳和深海稀土，关键矿产的资源量可达陆地的数百倍乃至数千倍。随着高新技术发展对金属需求的变化，深海矿产中富含的钴、锂和稀土等关键矿产的重要性日益凸显。根据科尔尼报告，海洋中关键矿物的储量价值介于 8 万亿到 16 万亿美元之间，如太平洋的克拉里昂-克利珀顿区，占全球海底面积

的 1.3%，拥有比所有陆地矿床更多的镍、钴和锰。美国地质调查局 USGS 指出，如果深海开采能实现商业化，截止 2065 年，人类对关键金属需求的 35-45%将来自深海开采。

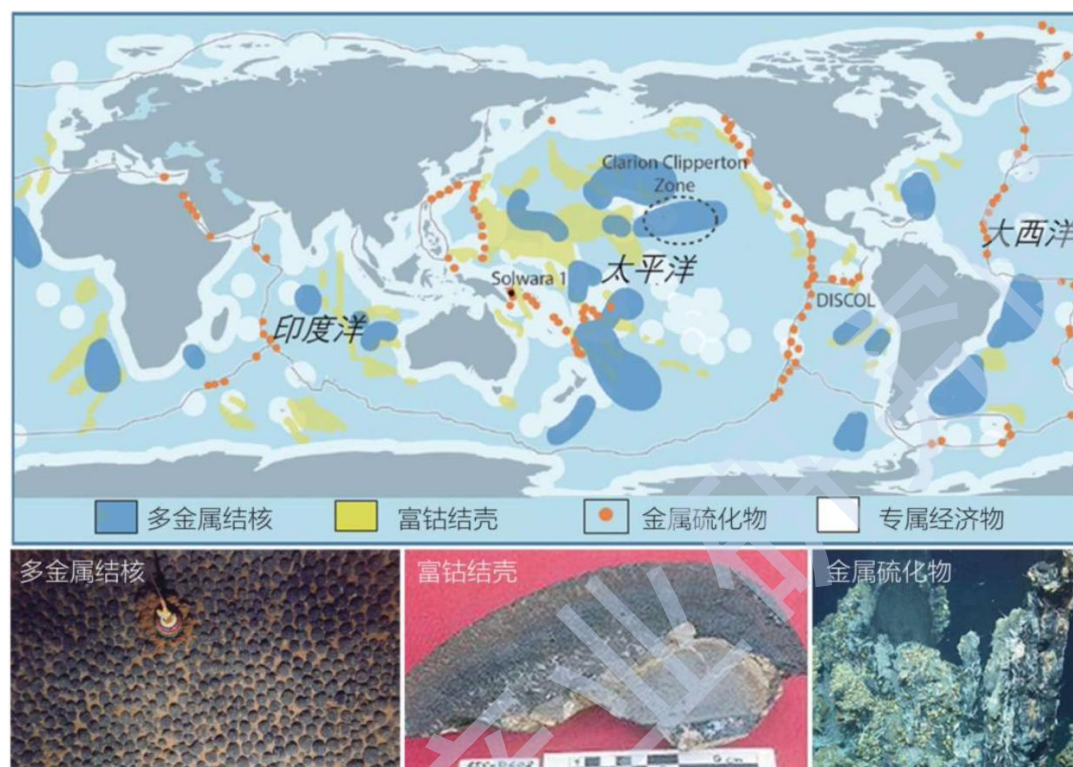


图 6 世界深海金属矿分布

资料来源：汪品先《深海浅说》。

深海采矿难度大，当前尚未实现大规模商业开采。深海金属矿产开发潜力巨大，然而，由于深海环境的极端复杂性，目前深海采矿仍处于试验阶段，实现大规模商业开采有待时日。分类别来看，多金属硫化物和深海稀土因开采技术相对可行，且矿产价值高，可能率先实现商业开采。根据科尔尼报告，全球深海采矿市场预计从 2020 年的 6.5 亿美元增长到 2030 年的 153 亿美元。

——多金属结核（PMN）

深海多金属结核，又称为锰结核、铁锰结核，形如土豆，大小从

几厘米到十多厘米不等，主要由锰和铁的氧化物构成，同时富含镍、钴、铜等 30 多种金属元素，锰、镍、铜、钴是主要有用组分，也是当前经济意义最大的金属，钼、钒、铂族金属、铋、稀土是伴生组分。多金属结核广泛分布于 4000—6000 米的深海海盆中，主要以半埋藏的状态分布于海底沉积物之上。多金属结核在国际海底地区分布最广、储量最大，现探明资源总量达 3 万亿吨，可采潜力约 750 亿吨，其中锰资源量达陆地的 500 多倍，镍和钴的含量分别是陆地的 100 多倍和 200 多倍，部分金属资源量可达陆地的上千倍。以镍矿为例，根据美国地质调查局数据，仅在太平洋“克拉里恩-克利珀顿断裂带”就蕴藏着 2.74 亿吨镍，远超陆地镍储量 9500 万吨。

——富钴结壳（CFC）

富钴结壳又称为铁锰结壳或多金属结壳，是一种层状多金属氧化物，常附着在岩石表面，厚度可达 25 厘米，主要分布在 800—2500 米水深的海山、海岭和海台区域。结壳富含的元素与结核相似，富含锰、钴、铂、镍、铅、金、钛、铈等，其中以钴、铂元素的含量较为突出，钴含量最高可达 2.5%，是陆地最著名的钴矿含钴量 20 倍以上、经济意义最明显所以得名为富钴结壳。富钴结壳在四大洋均有分布，其中太平洋较为集中。根据中国矿业报 2023 年 10 月报道，全球三大洋海山结壳分布面积为 304 万平方公里，干结壳资源量为 1081-2162 亿吨。据不完全统计，仅太平洋西部火山构造隆起带上，富钴结壳矿床的潜在资源量可达 10 亿吨，钴金属量达数百万吨，经济总价值超过 1000 亿美元。

——多金属硫化物（PMS）

多金属硫化物是由海底热液活动形成的块状硫化物矿床，富含铜、

锌、金、银等高附加值金属，矿物形态包括黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿等，主要组分为铜、锌、金、银和铅，硒、碲、砷、铟为伴生组分。多金属硫化物水深分布范围在 800 米到数千米之间，以大于 2000 米水深为主，主要出现在太平洋海隆、大西洋和印度洋中脊，以及大洋边缘的弧后扩张中心。全球已探明资源量约 6 亿吨金属，其中北大西洋矿区占已签约勘探区的 57%。截至 2023 年，全球已发现超百处矿点，包括中国在南大西洋中脊发现多个大型矿化区，预估大型矿床储量在 100 万至 500 万吨之间。俄罗斯、法国、波兰、德国、韩国、印度和中国等 7 个国家，与国际海底管理局签下了 4 份印度洋（含中国矿区）、3 份北大西洋勘探合同。

——深海稀土

2011 年，日本科学家在其专属经济区太平洋南鸟岛海域附近水深 5700 米处海底，在全球首次发现富含稀土元素的软泥，其后预估其储量达到 1600 万吨，深海稀土由此成为继多金属结核、富钴结壳和多金属硫化物之后发现的第四种深海金属矿产。深海稀土主要发育于 4000-6000 米深海盆地内，主要赋存于海底沉积物（海底软泥和多金属结核）中，其主要特征是富含中重稀土元素。据估算，全球深海沉积物中稀土资源潜力是陆地稀土储量的 3000 多倍。深海稀土主要分布在太平洋和印度洋，形成四大成矿带，中北太平洋和东南太平洋资源量约 880 亿吨、相当于陆地资源量的 800-1000 倍。

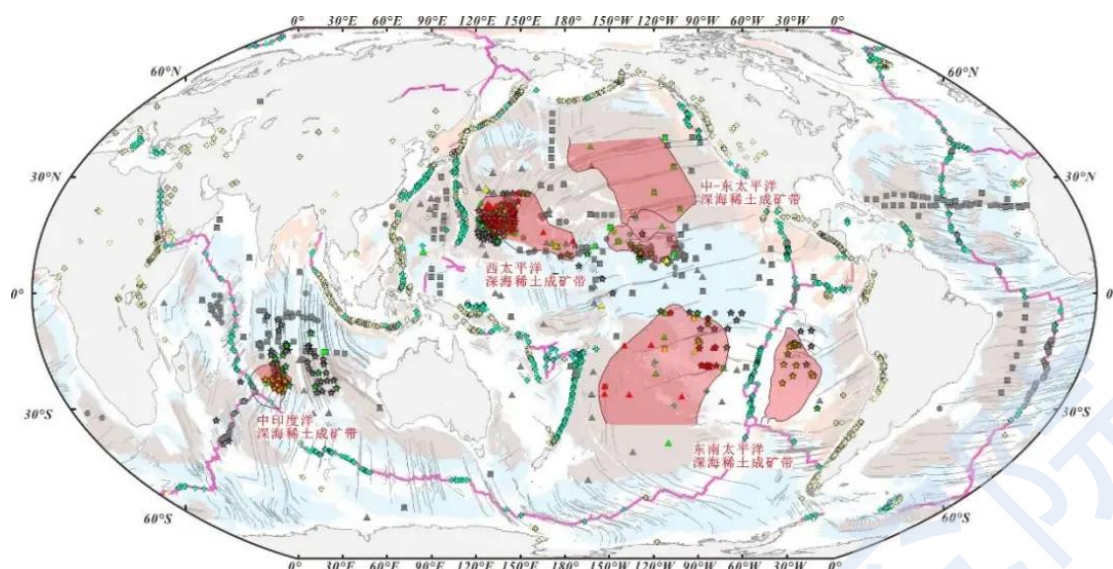


图 7 全球深海稀土成矿带分布

资料来源：金属矿产公众号、石学法《推进深海稀土资源开发，巩固我国稀土大国地位》。

深海稀土开发潜力巨大。一是深海稀土的中重稀土资源非常丰富。研究显示，西太平洋海盆沉积物中稀土含量最高可达 $8000\mu\text{g/g}$ ，其中的镱、铽和铕等稀土元素含量分别是我国华南离子吸附型稀土矿床的 20 倍、16 倍和 35 倍。二是资源品位高，开发条件相对较好。深海稀土具有品位高、厚度大等特点，开发所需的面积要远小于多金属结核、富钴结壳等资源，且多呈层状分布，产状相对简单，其开发不需要硬岩剥离。三是开发对深海环境的影响较小。深海稀土主要发育于号称“海底荒漠”的寡营养盐区域，生物量较少，且深海富稀土沉积物中铀和钍元素等放射性有害组分含量较低。

从全球来看，日本和中国最早开展深海稀土资源勘查，总体处于世界第一梯队，英国、美国、克罗地亚、挪威、韩国等国也都高度关注深海稀土资源。在深海稀土开发利用技术方面，日本、英国、美国等国都进行了富有成效的探索研究，日本在开采技术和试验方面走在全球前列。

日本积极推进深海稀土开发利用。日本发现深海稀土资源后，就以开发利用为目的，聚焦其专属经济区，积极推进资源勘察、潜力评价，组织开展深海稀土采集、扬矿和冶炼等技术装备领域的研究，逐步推进试验性开采。2013 年日本修订《海洋基本计划》，明确提出加强深海稀土勘察研究，探索资源开发潜力。日本政府在海洋开发重点战略中提出，2028 年度后实现南鸟岛周边海域的稀土的商业化开采。2014 年日本相关科研机构与三井海洋开发、丰田汽车等一起成立“稀土泥开发推进联盟”。由日本产业技术综合研究所和日本海洋研究开发机构（JAMSTEC）等组成的团队，从 2019 年开始就在不断调查日本附近海域的稀土泥含量。2022 年 8 月至 9 月，JAMSTEC 利用世界最大深海钻探船“地球号”完成深海稀土开发设备在 2500 水深的小规模试采；2025 年 7 月 JAMSTEC 宣布，将于 2026 年 1 月在南鸟岛周边海域实施全球首次 5500 米深海稀土试验性钻探，在 3 周时间内，动用“地球号”采集约 35 吨泥浆并运回日本本土提炼，预计可提取 70 公斤稀土，如成功对全球深海稀土开发意义重大。JAMSTEC 还计划 2027 年度启动更大规模钻探试验，作业周期延长至 1 个月以上，目标是采集 1000 吨泥浆。

我国在深海稀土资源勘察方面走在全球前列，但开发技术研究相对滞后。与日本主要关注于其专属经济区的深海稀土不同，我国由于专属经济区不发育深海稀土资源，主要关注国际海底区域的资源勘察，并取得重大发现。在日本 2011 年开展深海稀土调查研究的一年，中国大洋协会立即组织开展深海稀土调查研究，先后在印度洋、太平洋等海域组织实施十多个航次的调查研究工作，率先发现多个深海稀土大面积富集区，包括中印度洋海盆富集区（30 万平方公里）、东南太平洋海盆富集区（150 万平方公里）、西太平洋海域等，划分了

全球深海稀土成矿带，并于 2023 年编制发布了国际上首部深海稀土勘查标准——《深海富稀土沉积物资源勘查指南》（T/CAOE 61-2023）。在深海稀土开发技术体系与装备方面，我国与国外相比存在一定差距，只是针对深海稀土的开发、综合利用等关键技术进行了一系列探索，比如验证了酸浸提取技术获取混合稀土氧化物的可行性，但尚未进入试验性开采和工程化验证阶段。

（三）生物资源

深海是地球上最大的生态系统之一，目前已发现的深海生物超过 1.7 万种。深海生物包括微生物、无脊椎动物（海绵、管虫、甲壳类）和脊椎动物（发光鱼、狮子鱼等）。深海生物在医药研究、基因资源开发、生物制造（工业酶及菌种开发）、生物农业、新材料、清洁能源、海洋碳汇等领域应用潜力巨大。

表 4 深海生物开发应用领域

应用领域	应用方向
医药研究	提取深海生物活性物质开发新药物（如抗肿瘤、抗病毒、神经疾病治疗药物）和保健品（如深海鱼油），从深海微生物中筛选（如万古霉素衍生物）抗生素、抗菌肽与酶类药物、抗病毒化合物（如抗 HIV 蛋白酶抑制剂）等
基因资源开发	挖掘深海生物长期适应特殊极端环境进化出的特殊功能基因（如耐高压、耐低温基因、塑料降解基因），为合成生物学、生物育种、生物防护等提供新方案，并挖掘新型基因编辑工具
生物制造	深海微生物底盘细胞可高效合成高附加值化合物，开发新型工业酶（如耐高温蛋白酶、纤维素酶），合成新型生物基材料

应用领域	应用方向
生物农业	深海微生物可用于作物抗逆基因（耐寒、抗旱等）编辑及生物育种、开发生物农药与促生长剂/生物肥料（如具有固氮、解磷功能的微生物菌剂）等
新材料	深海生物特殊结构和代谢产物可用于开发新型生物材料，如海洋生物降解材料、耐高压/耐腐蚀生物基复合材料、仿生材料等
清洁能源	深海微生物可产生能源（如产甲烷和产氢光合菌），用于微生物燃料电池等生物质能源开发
海洋碳汇	浮游植物-浮游动物-鱼类-鲸类等构成的食物网，将颗粒有机碳沉降输送至深海，且微生物（细菌、古菌）能将活性有机碳转化为惰性溶解有机碳在深海储存

资料来源：深企投产业研究院整理。

——**深海微生物**。深海微生物地球上最古老的生命形式之一，在高压、低温、无光的极端环境中演化出极高的多样性，主要种类包括古菌、细菌、真菌、原生动物、病毒。深海沉积物中的微生物密度极高，比如每立方厘米沉积物含超 1000 万个活细菌。深海微生物是深海生态系统的基石，主导碳循环、氮循环等关键过程，其代谢活动支撑着深海食物网，其数量占深海生物总量的 90%以上，一些研究认为其总数量约 3×10^{29} 个，占到地球总生物量的 60%。

——**深海动物**。深海动物按生活方式则可分为浮游生物、游泳生物、底栖生物三大类，浮游生物主要有桡足类、磷虾，游泳生物主要是鱼类（如灯笼鱼、鮫鰈鱼、狮子鱼、杜父鱼等），其次为头足类（乌贼、章鱼）与甲壳类（深海虾蟹），大型底栖生物主要有海葵、多毛类、等足类、端足类、瓣鳃类和海参类等。

深海生物资源的开发当前受到诸多限制和挑战。一是深海捕捞渔

业不可持续，会对生态环境造成较大破坏。传统的海底拖网捕捞方式会对非目标生物造成大量杀伤，破坏底栖生态系统的平衡。同时，深水鱼类本身生长缓慢、繁殖周期长，过度会造成种群数量急剧下降，难以恢复。二是技术装备限制，现有深海探测、观测、采样/获取、保藏等装备技术水平有待提升。比如，深海生物脱离原位环境后易失活，样本遗传物质表达易变，现有技术难以实现高压低温环境的全程保真存储，导致活性物质筛选效率低下。同时，缺乏长期驻留式“深海实验室”，难以模拟真实环境开展生物代谢研究。

基因资源开发成为当前深海生物资源利用的重要方向。深海生物在长期适应特殊极端环境的过程中，进化出了各种独特的生理功能和生物特性，这些特性背后所蕴含的基因资源具有巨大的应用价值，可以为医药研发、生物制造、新材料等重点应用领域提供支撑。

二、深海资源开发全球博弈

国际海底管理局(ISA)负责全球公海的深海采矿监管。根据 1982 年《联合国海洋法公约》（1994 年生效），沿海国家的领海自领海基线向外延伸 12 海里，涵盖其水域、上空、海床及底土的全部主权。沿海国家对 200 海里专属经济区（EEZ）内的自然资源享有勘探、开发、养护和管理的专属权利。200 海里以外、国家管辖范围之外的广阔海域统称“公海”（ABNJ）；其中，大陆架自然延伸若超过 200 海里，可主张至 350 海里或 2500 米等深线外 100 海里，但需向大陆架界限委员会（CLCS）提交划界案。超出国家管辖范围的海床、洋底及其底土被称为“区域”，由《公约》设立的国际海底管理局（ISA）代表全人类进行统一监管，负责控制与矿物资源有关的一切活动，并被授权决定国际水域中的深海采矿规则。

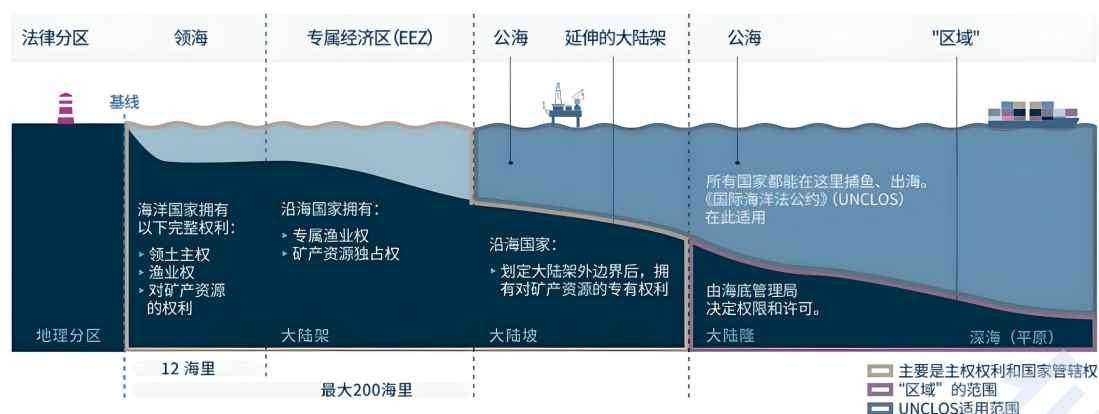


图 8 《联合国海洋公约》划分出的海洋空间示意图

资料来源：绿色和平《深海瑰宝之下-深海矿产开发现状及其环境影响机制梳理》。

国际海底管理局已发放 31 份勘探合同，中国拥有数量最多。截至目前，国际海底管理局（ISA）已经和全球 22 家承包商签署 31 份为期 15 年的勘探深海矿藏的合同，包括 19 份多金属结核合同、7 份多金属硫化物合同和 5 份富钴结壳合同，覆盖的国际海床面积超过 150 万平方公里，相当于蒙古国的面积。中国在国际海底的区域的调查和研究工作始于 20 世纪 70 年代，至今已拥有 5 个专属勘探矿区，包括 3 个多金属结核、1 个富钴结壳和 1 个多金属硫化物勘探矿区，由此成为了在国际海底区域拥有勘探合同数量最多、资源种类最全的国家。我国这五份勘探矿区分别由大洋矿产协会、先驱集团（被招商集团收购）和五矿集团申请到，面积共 31.2 万平方公里。

全球利益博弈加剧，深海采矿规章谈判陷入僵局，各国纷纷立法抢占深海资源。由于各国利益不同，深海生物多样性区域采矿法规历经 10 年谈判，迟迟无法出台，各国纷纷通过立法抢夺深海资源。如 1982 年日本《深海海底采矿临时措施法》、2000 年捷克《国家管辖外海洋矿产资源探矿、勘探和开发法》、2010 年德国修订的《海底开采法》、2013 年斐济的《国际海底资源管理法》、2014 年英国修

订的《深海采矿法》、2014 年汤加的《海底矿产资源法》、2015 年新加坡的《深海开采法》和 2017 年韩国的《深海开发与管理法》等。2020 年库克群岛出台第三版《海底矿物法》。2021 年，加拿大矿业公司 TMC 通过担保国瑙鲁向 ISA 提交采矿申请，触发了“两年规则”，要求 ISA 在两年内完成深海开矿规则制定，否则将自行开采。但在 2023 年 7 月的 ISA 理事会会议上，各国仍未就开采规章达成一致。TMC 因此转向美国申请许可。2024 年 1 月，挪威批准北极深海采矿行动，成为首个批准深海商业采矿的国家。

我国 2016 年 2 月 26 日颁布《中华人民共和国深海海底区域资源勘探开发法》，其是第一部规范我国自然人、法人及相关组织在我国管辖外海域开展相关活动的法律。

目前针对深海采矿的态度，全球国家大致可分为三个阵营。一是暂停派，包括法国、德国、英国、加拿大、智利、太平洋岛国等 30 多个国家。这些国家大多要求延迟采矿规则制定，优先完善生态保护尤其是公海生物多样性保护标准。二是开发推动派，包括日本、挪威、比利时、俄罗斯、印度等国家，由于其海底资源富集、深海采矿技术较为先进或者资源需求较为迫切，主张尽快出台规则，满足新能源等矿产需求。我国也已深度嵌入国际海底管理局的多边框架，正努力参与、积极推动深海开采规则制定。三是以美国为代表的单边行动派，直接绕过 ISA，依据国内法授权企业开发。

美国试图绕开国际监管框架，独立推进深海矿产开发。美国仅为国际海底管理局（ISA）的观察员国，没有投票权，也不能通过该组织获得海底采矿勘探或开采合同，其正在试图以国内法来构建替代性技术标准体系，满足其自身的战略性矿产需求。20 世纪 80 年代初，ISA 成立之前，美国依据国内法，向洛克希德·马丁公司颁发了两张

太平洋克拉里昂-克里伯顿区（CC 区）海底采矿许可证。2025 年 4 月，美国总统特朗普发布行政命令，宣称美国有权在国内和国际水域颁发采矿许可证，并计划将海底矿产资源用作战略矿产储备。随后，加拿大 TMC 公司和美国非凡金属公司分别就在国际和国内水域开采矿产资源，向美国商务部提交了深海采矿申请。按照美国政府部门估计，在美国授权开采的海域内，多金属结核蕴藏量超过 10 亿吨，未来 10 年有望为美国 GDP 贡献 3000 亿美元，并创造 10 万个就业岗位。

03

深海装备篇

高端装备潜入深海现场，资源开发核心保障



一、深海水下技术装备概述

深海水下技术装备指用于开展深海环境和资源的调查、勘探及开发利用的技术与装备，根据其功能和应用领域，可分为深海观测/探测与感知装备、深海资源开发装备、深海保障及配套装备。

深海探测与感知装备是支撑深海科学研究和资源开发的基础，主要用于深海环境的探测与监测。这类装备涵盖载人潜水器、无人遥控潜水器（ROV）、自主式水下航行器（AUV）、水下滑翔机（AUG）等类型，通过搭载多种传感器和探测设备，可执行海底地形测绘、水文数据采集、生物与地质样本采集等关键任务。目前，深海探测与感知装备处于技术发展初期，但进步显著、迭代速度加快，新型装备平台与传感器正加速从实验室走向深海现场。

深海资源开发装备是针对深海矿产、油气等资源勘探与开采的核心工具体系，涵盖水下施工作业装备、深海油气生产系统及深海矿产开发装备等关键领域。这些装备需在深海高压、低温、强腐蚀等极端环境下稳定运行，实现资源的高效开采、处理与运输。相较于深海探测与感知装备，深海资源开发装备相对成熟，特别是深海油气成套装备历经 50 年迭代已步入商业化成熟期，但深海多金属结核、钴结壳、稀土软泥等采矿装备仍处于海试-示范阶段，整体成熟度落后油气装备 10-15 年。

深海保障及配套装备是支撑深海作业安全与稳定运行的关键支撑体系，涵盖水下安保系统、应急救援装备、深海环境模拟试验装备等核心领域。这类装备通过实时监控、风险预警及应急响应机制，为深海资源开发、科学考察等活动提供安全保障，尤其在应对突发事件（如设备故障、人员遇险）和极端环境挑战中具有不可替代的作用。具体而言，深海环境模拟试验装备已实现商业化应用，部分应急救援

装备通过国产化突破达到工程实用水平，但整体而言，复杂环境下的智能安保系统、超深水救援装备等仍需持续攻关。

近年来，我国持续加大深海科技投入，在观/探测、施工作业、油气开采及矿产开发等领域取得系统性突破，形成覆盖全链条的重大装备体系。在载人深潜领域，“蛟龙”号完成升级换代，“奋斗者”号实现万米级载人作业能力，标志着我国深潜技术跻身世界前列；油气开发方面，首套国产化水下采油树成功应用，首套国产 2000 米级超深水采油树完成总装；矿产开发领域，“开拓一号”深海重载作业采矿车及国产全自研“挖-铺-埋”一体化水下施工作业装备填补技术空白，支撑深海资源商业化开发。

二、深海探测与感知装备

（一）深海潜水器

1、产品类别及应用

深海潜水器等探测装备是维护国家海权的关键装备。根据国际海底管理局的相关规章，最先探测到海底资源并提供相应数据和资料的国家可以获得优先开采权。此外，潜水器等探测装备可执行海底地形测绘、界桩布设、管线巡查等任务，为海洋划界提供法律依据。因此，水下探测装备是海洋主权的“技术防线”。

深海潜水器是深海装备的代表。深海潜水器或机器人是综合性的水下机动平台，具有超长续航、跨域机动以及集群协作特性，可实现大规模陆、海、空、天全域及长时间协作，兼有军用和民用两种属性。在民用领域，深海潜水器能够在深海极端环境中开展各种精细化作业，执行观测、探测、采样、维修等多样化任务，为深海资源开发与科学

研究提供坚实支撑。

根据其功能和操作方式，水下机器人或潜水器主要分为载人潜水器（HOV）和无人潜水器（UUV）两大类。载人潜水器允许操作人员直接进入水下环境，通过舱体内的设备进行观察和操作。无人潜水器是目前应用最广泛的类别，它不需要人员直接参与，通过远程控制或自主运行完成任务，具体可分为有缆无人潜水器（也称为遥控无人潜水器，ROV）、自主式无人潜水器（AUV）、拖曳式无人潜水器（TUV）和水下滑翔机（AUG），最新又出现了混合型遥控无人潜水器（ARV/HROV），以及无动力潜水器等多种类型。深海潜水器主要类别及应用如下表所示。

表 5 深海潜水器主要类别

类别		特征	民用领域	国内外代表型号
载人潜水器 HOV		允许操作人员直接进入水下环境，通过舱体内的设备进行观察和操作，需要复杂的生命支持和厚壁耐压舱	深海探测、科学研究	中国“奋斗者”号、美国“阿尔文”号
无人潜水器 UUV	有缆潜水器 ROV	通过电缆与母船或水面控制台连接，由操作人员在船上远程控制，适合执行复杂和长时间的水下任务	水下勘探、管道检查、打捞作业和深海采矿等	中国“海龙 3 号”、美国“Jason”号
	自主式潜水器 AUV	依靠内置的导航系统和传感器自主运行，能够完成长时间、大范围的水下探测任务	海洋环境监测、海底地形测绘	中国“潜龙四号”、美国“REMUS 6000”号
	拖曳式潜水器 TUV	由母船拖曳，通过电缆传输数据	水下声学探测、海洋物理参数的采集	中国“潜龙二号”、“潜龙三号”、美国 Bluefin 系列
	水下滑翔机 AUG	通过改变浮力和姿态实现滑翔式运动，能够在水下长时间低功耗运行，由 AUV 演化而来	海洋环境长期监测和数据采集	美国 Slocum 系列、Spray、Seaglider，中国“海燕”系列、“海翼”系列

资料来源：深企投产业研究院整理。

载人潜水器与无人潜水器各有侧重，载人深潜器聚焦需人员参与的高价值任务。载人潜水器（HOV）集成了耐压船体、推进系统、声呐导航与生命维持系统等关键子系统。其显著优势在于实现了科学家对深海复杂作业的直接参与。例如，地质勘探、生物样本采集及深海装备部署等任务，因其对实时决策与精细操控的高要求，超出了当前无人潜水器的作业能力范围。

无人潜水器有望成为主流应用。无人潜水器侧重于机器人控制、实时视频/声呐回传、精准的深海操作装备等，依托智能化、长续航和低成本优势，有望在军事、资源开发等领域占据主导地位。尤其是自主式潜水器 AUV，摆脱了缆线限制，其续航和智能程度不断提升，预计将在资源勘探和安防巡逻中批量应用。同时，从美国等国家的实践来看，AUV 的配套和标准化也在进步，模块化设计和标准接口让不同平台的传感器和工具可以互换，提高了维护效率。在维护方面，出现了专门的水下基地或母船来支持长期部署的 AUV 进行充电和数据传输；运维公司也提供托管服务，定期检修和升级软件，确保设备高可用。目前，一些国家正从载人深潜转向以 ROV/AUV 为主力，用机器人替代人类执行深海任务，以降低风险和成本。

在军用领域，无人潜水器是未来水下作战核心装备和主要力量。无人潜水器以水面舰艇/潜艇为投送平台，能长期在水下自主航行，具有隐身性能好、效费比较高、机动性能好、作战用途广等优势。通过搭载不同任务载荷，无人潜水器可执行多种特定任务，如海洋调查、情报/监视与侦察（ISR）、反水雷、滨海水下作战、时敏打击（“发现即摧毁”）、反潜战、特种战部队补给等。在全球无人作战系统蓬勃发展背景下，全球主要军事大国均在加快推进无人潜航器研发。

2、全球主要国家研发应用格局

新型深海潜水器行业呈现以欧美为主导，亚太地区迅速崛起的态势。欧美发达国家已形成从研究、设计、制造、应用、服务、教育和人才培养的整套体系，在自主推进式水下航行器方面研究较早，商业化较为成熟。在遥控无人潜水器（ROV）领域，美国、日本、英国、法国、德国、瑞典等国家处于领先地位，具备深海 ROV 研发、设计、制造、试验、配套等能力。

（1）美国

美国海军在 UUV 研制方面处于领先地位。美国海军自 1999 年提出深海对抗战概念，即通过 UUV 集群作战、300 海里海底防御识别区建设及综合武器系统部署，构建集侦察、指挥、打击、防御等六大能力于一体的水下攻防体系；2000 年、2004 年和 2011 年发布的三版《无人潜航器主计划》，明确了 UUV 的任务定位和发展框架。2016 年起美国海军在政府国防预算中获得了大量的资金支持，用于扩大无人潜航器编队的规模。美国目前正向 UUV 集群自主协同及海陆空集群协同方向发展，计划在 2030 年前实现不同级别 UUV 协同发展的水下联合舰队。

美国的 UUV 发展呈现出明显的系列化特征。美国现有在研、在役多项水下无人潜航器，覆盖各种排水量和动力类型，用途涵盖海洋环境调查、侦察与反水雷、察打一体化等任务。美国较有代表性的 UUV 如 Bluefin 系列、Iver 系列和 REMUS 系列等，各系列均依据不同口径、不同功能、不同承载量需求而设计。美国海军与波音合作研制的“虎鲸”超大型无人潜航器已于 2023 年底交付，可潜至 3300 米，在水下自主巡航数月。

美国遥控无人潜水器 ROV 技术研发应用全球领先。美国已经开发了多种型号的 ROV 系统，工作能力涵盖各类任务和全海深。典型产品包括 OCEANEERING 公司 Spectrum 号（潜深 3000 米），伍兹霍尔海洋研究所海神（NEREUS）号（自主/遥控混合型水下机器人 ARV，潜深 11000 米）等。

(2) 中国

我国经过数十年的技术积累，在国家重点研发计划的支持下，在全海深无人潜水器、水下机器人自主避障与规划控制等方面取得显著进展，初步形成以“三龙五海”为代表的深海潜水器系列，即“蛟龙”“潜龙”“海龙”三龙系列和“海马”“海星”“海斗”“海翼”“海燕”五海系列，推动了中国深海技术和材料的自主发展。不过，目前关键零部件和相关技术仍有缺乏，产品研发到产业应用断层，产业化发展仍有一定距离。

——载人潜水器

深海犹如太空，平台装备下潜越深，占据的空间优势就越大。目前中国和美国是全球唯二有能力研制全海深载人潜水器的国家，且仅有中国具备高频次全海深科考能力，2022 年至 2024 年全球过半载人深潜由中国完成。我国有“奋斗者”号、“深海勇士”号、“蛟龙”号三艘载人潜水器，“蛟龙”号在 2012 年突破 7000 米深度，“奋斗者”号在 2020 年突破 10909 米深潜记录。当前，“奋斗者”号国产化率达 96.5%，带动了精密加工、钛合金载人舱、传感器、控制系统等数十个相关领域技术升级。

表 6 全球主要载人潜水器对比

项目	阿尔文号	鹦鹉螺号	深海 6500	MR1/2 号	蛟龙号	深海勇士号	奋斗者号
国家	美国	法国	日本	俄罗斯	中国	中国	中国

项目	阿尔文号	鹦鹉螺号	深海6500	MR1/2号	蛟龙号	深海勇士号	奋斗者号
运营单位	伍兹霍尔海洋研究所	法国海洋开发研究院	日本国立海洋研究开发机构	俄罗斯科学院	国家深海基地管理中心	中国科学院深海科学与工程研究所	
建造/改造时间	1964/2013年	1984年	1989年	1987年	2009/2019年	2017年	2020年
作业起始时间	1964年	1985年	1989年	1987年	2008年	2017年	2020年
最大下潜深度	6000米	6000米	6500米	6000米	7000米	4500米	11000米
可搭载人数	3	3	3	3	3	3	3
重量	20.4吨	19.5吨	26.7吨	18.6吨	22吨	20吨	35吨
有效载荷	205kg	200kg	200kg	290kg	220kg	220kg	200kg
生命支持时间	72小时	143小时	128小时	82小时	84小时	82小时	87小时
每年潜水次数	110-150	100-115	60	20	26	100	—

资料来源：中国科学院官微、国金证券，深企投产业研究院整理。

——无人潜水器

我国 AUV 研制跻身世界先进行列。我国军用无人水下航行器已形成覆盖深海探测、战术侦察、智能攻防的全谱系装备体系，构建了以中科院沈阳自动化研究所、哈尔滨工程大学和中国船舶工业集团为核心的研发格局，目前在 AUV 领域技术跻身世界先进行列。

中国科学院沈阳自动化研究所在 AUV 领域一直处于国内优势地位，形成“深海探测”与“长航时作业”两大谱系，先后研制了“探索者”、CR01 和 CR02、“潜龙”系列，“潜龙”系列在深海资源勘查中屡次实现突破，标志着我国 AUV 技术跻身世界先进行列。

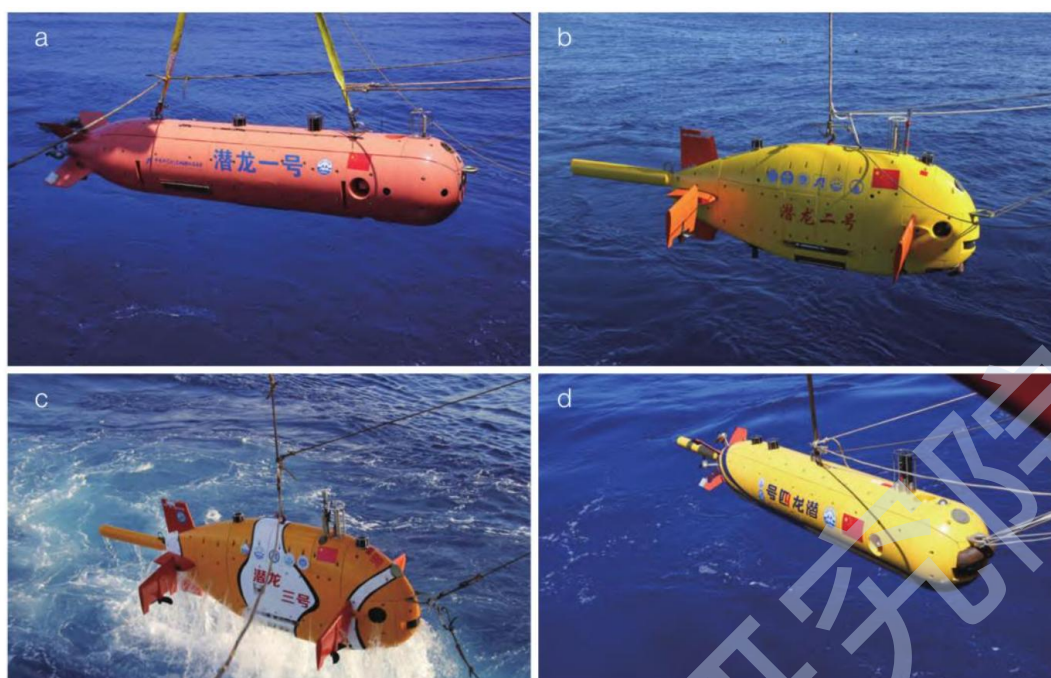


图9 “潜龙”系列自主水下机器人

资料来源：李硕等《水下机器人应用及展望》

哈尔滨工程大学联合中科院等国内优势单位，成功研制出了 HSU001 型 AUV，以 5 米级艇体搭载双桨动力系统，集战场环境侦察、敌情监视等多种功能于一身，开创我国智能化水下作战平台先河，使我国在高性能航行器的研发和制造方面走进世界前列。“悟空”号是由哈尔滨工程大学牵头设计研发的另一型水下航行器，具备独立进行万米水下自主工作的能力，2021 年 11 月在马里亚纳海沟“挑战者”深渊完成了 10896m 的深潜挑战。

中国船舶集团依托 710 所和 705 所形成 AUV 作战装备体系。710 所打造“海神”系列 AUV，分为便携式（<100kg）、中型（1-10 吨）、重型（>10 吨）三个类别，可适配不同战场场景；705 所于 2023 年阿布扎比防务展首秀的国产首型超大型无人潜航器 XLUUV，对标美国“虎鲸”XLUUV，标志着中国跻身全球唯二掌握全尺寸作战型 XLUUV 技术的国家。

遥控无人潜水器 ROV 方面，我国主要由一些科研机构和海工领

域的初创公司参与。主要科研机构包括中国科学院沈阳自动化研究所、上海交通大学、中国船舶科学研究中心、哈尔滨工程大学、上海海事大学、西北工业大学、上海海洋大学、浙江大学、中国中车旗下 SMD 等，初创企业则包括深之蓝海洋（天津）、博雅工道（北京）机器人、上海彩虹鱼等。

我国遥控无人潜水器 ROV 技术相对成熟，部分 ROV 性能跻身世界先进行列。目前，我国已攻克大深度 ROV 关键技术，具备 ROV 自主设计制造和应用能力，成功研制出海龙号、海马号、海象号、海星 6000、海龙 11000 等多型深海 ROV，以及“北极”、海龙Ⅲ号、海斗号（最大下潜 10888 米）、海斗一号（最大下潜 10907 米）、海笋Ⅱ型等自主遥控潜水器 ARV，装备重量跨度从几十千克到数吨不等，工作深度可覆盖全海深范围，其中部分 ROV 性能达到世界先进水平。目前我国 ROV 主要运营机构为国家深海基地管理中心、中国科学院深海科学与工程研究所和中国地质调查局广州海洋地质调查局等单位。

（3）日本

日本海洋科技中心（JAMSTEC）是日本水下机器人主要研发和应用机构。代表性的 ROV 包括 Hyper Dolphin（潜深 3000 米）、Kaiko（潜深 11000 米，2003 年丢失）、kaiko7000（潜深 7000 米）等。近年来，日本加大 ROV 技术研发，研究热点集中于遥控作业、声学影像、推进系统、水下定位、陶瓷材料等关键技术。

（4）其他欧美国家

英国国家海洋中心拥有多台 ROV，包括 Isis（潜深 6500 米）和 HyBIS（潜深 6000 米）。英国 SMD 公司在海底施工作业机器人领域

处于全球领先地位，典型 ROV 包括 UT1TRENCHER（喷冲式海底管道挖沟埋设系统，潜深 1500 米，作业功率 2 兆瓦）、QTrencher1400（潜深 3000 米）等。

法国海洋开发研究院（Ifremer）拥有 ROVVICTOR6000（潜深 6000 米）、ARV“阿丽亚娜”（Ariane）号（潜深 2500 米），主要用于海洋科学研究；法国海军拥有 H2000 大中型 ROV（潜深 2000 米），主要用于沉船或失事飞机的搜寻打捞。

德国亥姆霍兹基尔海洋科学研究中心（GEOMAR）运营多台大型 ROV，包括 ROVKiel（潜深 6000 米），ROVPhoca（潜深 3000 米）等。

瑞典萨博集团旗下 SEAEYE 公司开发了多型 ROV，典型产品是 FALCON 号（下潜深度 300 米，在配备中继器使用时，潜深可达 1000 米）、ARVSeaeyeSabertooth 系列（潜深 1200 米、3000 米）。

（二）声呐系统

水声信号是目前已知的唯一能够实现水下有效传输的信息载体。光波、电磁波被海水介质屏蔽、能量损耗大，穿透能力有限，在海水中不能有效传递信息。声波在海水中的传播性能最佳，在水中的传播速度远比在空气中快得多，平均速度约为 1500 米/秒，在水中传播的衰减也相对较小，最远可收到 2 万公里外的信号，低频的声波甚至可以穿透海底几千米的地层。

声呐是深海传感器和深海探测的核心。声呐即声音导航与测距（Sound Navigation And Ranging）英文缩写“SONAR”的音译，是一种利用声波在水下的传播特性，通过电声转换和信息处理，完成水下探测、定位和通讯任务的电子设备，是水声学中应用最广泛、最重要的一种装置。凡属于对水中目标进行探测、定位、跟踪、识别、导航、

制导、通信、测速和对抗等方面的水声设备均属于声呐范围。深海资源开发和水下攻防体系建设需要对于海底地形地貌进行观测、水文环境调查、海底表层采样、岩层钻探取样等，因而探测感知是深海资源开发和水下攻防体系建设的前提，而水声与各型声呐系统则是水下环境目标信息获取和信息传输的主要方式和手段。

声呐依据工作原理可划分为主动声呐和被动声呐。声呐工作原理主要是通过发射机产生电信号，经过换能器转换成声音信号发射到水中，当声波遇到目标如潜艇、鱼群等时，会被反射回来，再由换能器接收并转换回电信号进行处理。主动声呐主动发射声波，接收回波并通过分析获取目标信息，如距离、速度等，可依据探测需求调整参数以提升探测精度，但发射声波容易暴露自身位置；被动声呐又称噪声声呐，被动地接收舰船等水中目标的辐射噪声和目标发射的水声信号以探测目标，主要用于深海监听，具备隐蔽性但无法主动获取信息。根据使用对象分类，声呐又可以分为潜艇声呐、水面舰艇声呐、航空声呐、海岸声呐等类别。按照功能，声呐主要分为探测声呐、导航声呐和通信声呐等类别。

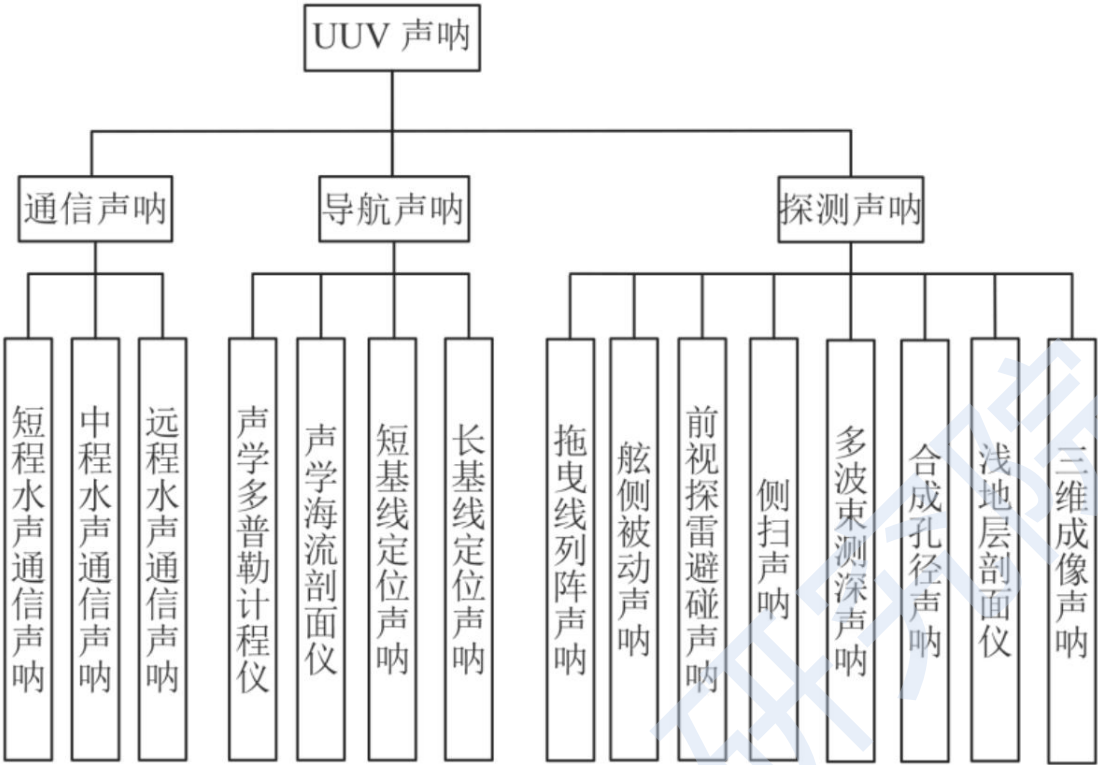


图 10 无人水下航行器 UUV 声呐装备分类

资料来源：傅仁琦等《无人水下航行器声呐装备现状与发展趋势》。

声呐应用领域持续扩展。声呐应用领域包括军事、海洋资源开发、渔业、科研等多个方面。在军事领域，声呐可应用于水下监听、识别与清扫隐蔽水雷、海底三维成像、水下布设武器系统等；在民用领域，深海探测声呐助力海底地震预警与地壳活动监测，便携式声呐实现鱼群动态追踪，同时在海底管线巡检、海上风电基础结构监测等场景广泛应用。

海洋环境及目标信息的获取，正朝着水声与非声探测技术多源融合的方向迈进。当前，安静型潜艇、无人潜航器、智能水雷以及蛙人等微小型水下目标数量不断增多，同时潜艇广泛采用全电及无轴推进动力系统、声隐身技术以及海洋生物仿生技术，在此背景下，若仅依靠声呐、通过声纹特征来识别目标，难度将日益增大。因此，水下探测将逐步拓展至电磁、激光、生物、化学等非声探测领域，并朝着多源信息融合探测的方向发展。此外，随着弱磁传感技术的迅猛发展，

超导和量子领域的研究成果也将被引入磁探测领域，未来有望研发出超高灵敏度的磁探仪系统，实现对极其微弱磁信号的精准检测。

国内军用声呐系统由中科海纳和中国海防两家上市公司主导。军用声呐系统涉及国家安全，技术门槛极高，需通过严格的军用标准认证。全球军用声呐核心厂商有法国泰雷兹集团 Thales Group、美国洛克希德马丁 Lockheed Martin 和美国雷神 Raytheon 等，前三大厂商占有全球大约 65% 的份额，其他细分声呐领域重点企业还有挪威康斯伯格 Kongsberg（合成孔径声呐）、德国 ATLAS ELEKTRONIK（合成孔径声呐）、美国通用动力 General Dynamics（战略预警声呐）、美国 L3Harris Technologies（便携式声呐）、美国 Blue Robotics（小型化声呐模块）、日本古野电气 Furuno 等。国内军用声呐企业主要有中科海讯和中国海防（中船重工 715 研究所）两家上市企业，也是第三代水声信号处理平台仅有的两家供应商。国内其他声呐企业还有中海达（A 股）、海兰信（A 股）、海底鹰深海科技（昆明）、苏州桑泰海洋仪器、中科探海（深圳）、宁波博海深衡、北京星天科技、上海瀚界科技、珠海蓝衡科技等。

（三）海底观测网

海底观测网利用一系列部署在海底的传感器、观测仪器和设备，长期、连续、实时地监测地震活动、地质构造变化及深海环境参数（如压力、水温、盐度、流速、流向、pH、CO₂、CH₄、生物量等参数），从而为海洋灾害预警、资源勘探和气候研究提供连续数据流。数据通过光电复合缆主干网络实时回传至岸基站的数据处理与控制中心。同时，遥感卫星、岸基雷达、潜标、锚定浮标、漂流浮标、Agro 浮标、无人潜水器等观测平台能够与海底观测网相互连接，形成立体、实时的海洋环境观测及监测系统。

结构上看，海底观测网是一个多级树状结构。大规模海底广域观测网通常超过 500km，包括岸基站、多个海底主基站（也称主接驳盒，部分观测网还有次接驳盒）、海底设备适配器、传感器及终端设备等四级，各级之间通过光电复合通信海缆相互连接，同时还需要由海底中继器、分支器等构成的中继通信系统。150km 以内的小规模海底观测网一般采用无中继通信系统。

- 岸基站作为控制中枢，具备对海底观测节点的实时监测与远程操控能力，可动态调整传感器校准参数、控制设备启停状态，确保观测系统稳定运行。同时，岸基站承担着全系统数据的采集、存储与分析管理职能，通过集成化平台对终端设备获取的多源数据进行处理，并实现可视化呈现，为海洋科学研究与工程应用提供决策支持。
- 海底主基站（主接驳盒）是海底观测网中最核心、结构最复杂的组网装备，其功能包括：接入多座海底观测平台接入系统，实现高压直流电能的降压变换和分配；完成观测数据的汇聚交换与时间同步；实时监控内外部负载运行状态，并通过故障诊断与隔离机制提供自动保护。为确保运行环境的可靠性与安全性，主基站通常部署于沉积和冲刷作用微弱、地形平坦且地质结构稳定的区域。
- 海底设备适配器（SIIM）也称科学仪器接口模块，是“即插即用”的末端节点，与传感终端设备相连，把各类传感器的模拟或数字信号统一封装成标准以太网帧，通过光电复合缆或水声链路向主基站回传，同时把来自岸基的供电、校准指令、固件补丁分发给对应仪器。
- 传感器及终端仪器设备包括海流计（如声学多普勒海流剖面

仪)、水听器、CTD 传感器(温盐深仪)、压力传感器、浮游生物剖面仪、海底地震仪、水下摄像机、采样存储容器等各类设备。

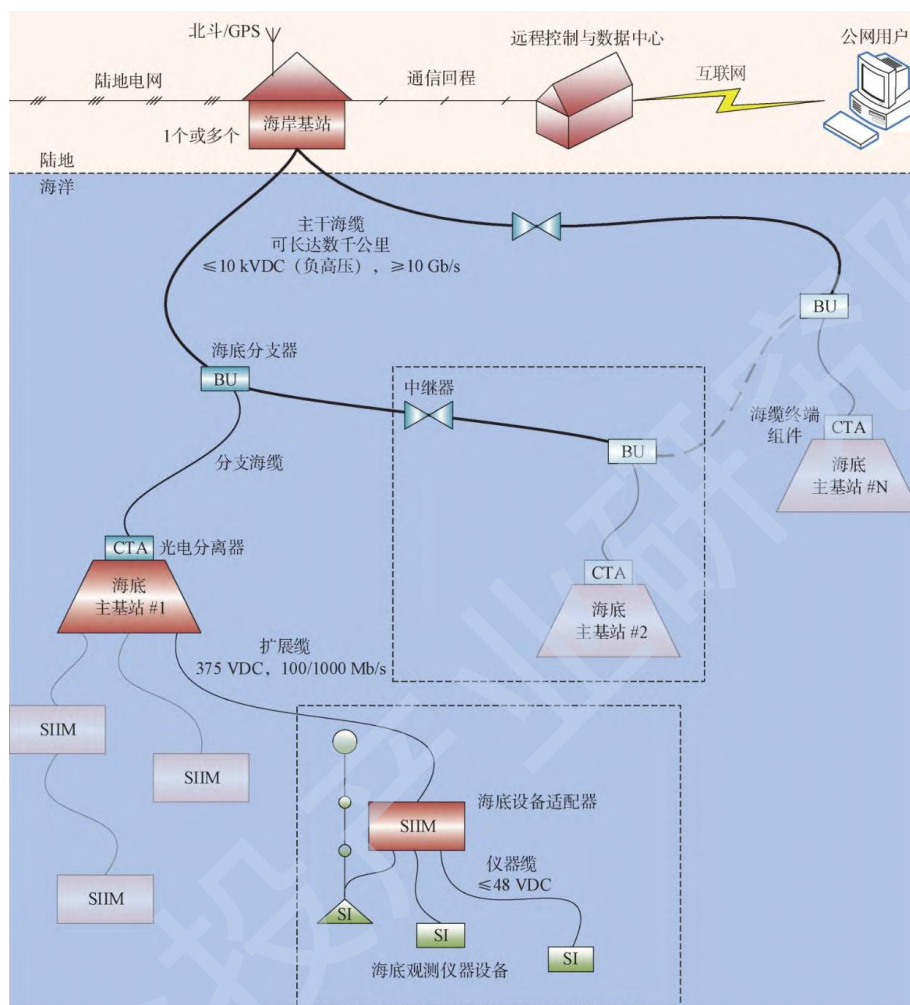


图 11 海底观测网的典型结构

资料来源：吕枫、翦知湑《海底观测网技术研究与应用进展》。

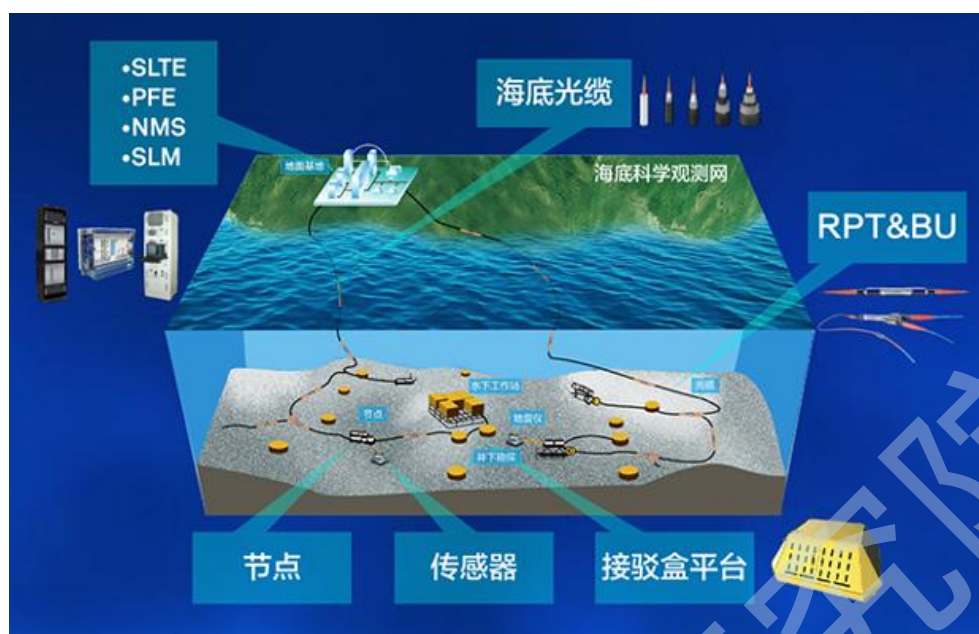


图 12 海底观测网组成示意图

资料来源：智慧海洋公众交流平台公众号。

建设海底监测网也是维护海上国防安全的战略刚需。我国大陆海岸线绵延 1.8 万公里，岛屿海岸线达 1.4 万公里，内水与领海面积合计 38 万平方公里，专属经济区更延伸至 300 万平方公里以上。在如此广袤的海洋国土上，我国与 8 个海上邻国接壤，其中多数国家存在领土或领海争议，维护海洋权益的形势日益复杂严峻。为避免水下安全领域出现防御真空，构建覆盖专属经济区、具备实时监测能力的海底观测系统，已成为保障国家海洋主权和国防安全的迫切任务。

目前，美国、加拿大、欧洲、日本均已建设了海底观测网。2009 年加拿大建成了全球首个大型深海观测网 NEPTUNE-Canada，缆线长 800km，开创了深海长期实时观测先河。美国 2016 年投入运行的海洋观测计划（OOI）由区域网、近海网和全球网三部分组成，其中规模最大的深海区域网位于俄勒冈岸外，支持多学科研究。欧洲通过多国协作构建了 EMSO（欧洲多学科海底观测网），整合英国、德国、法国等国的观测系统，覆盖北大西洋至地中海区域，重点服务于全球

环境与安全监测计划（GMES）。日本则聚焦地震、海啸等防灾需求，2015 年建成全球最长的海沟地震海啸观测网 S-net（缆线总长 5700km）。此外，美国海军近几年升级综合海底监视系统（IUSS），开发新型可部署深水监视系统与海上无人装备等，打造可快速反应的多层次监视网，并与日本、澳大利亚加强合作，强化多国联合监控能力。

表 7 欧美主要海底观测网

国家	建设概况	网络内容	主体机构
美国海洋观测行动 Ocean Observatories Initiative, OOI	2000 年立项，因资金问题延期至 2011 年开始布放海洋光电复合缆，2016 年建成。	共分 3 级，即海岸观测系统、区域观测系统（NEPTUNE 海王星观测网络）和全球观测系统，涉及 5 个阵列，投入了 900 多个仪器。	美国国家科学基金会 NSF 全额资助并主导，建成后移交由“海洋观测行动协会”运营维护，伍兹霍尔海洋研究所、俄勒冈州立大学、斯克里普斯海洋学研究所等参与。
加拿大海底科学观测网 Ocean Networks Canada, ONC	2007 年开始进行海洋光电缆和观测仪器安装铺设，2009 年投入使用，2013 年 10 月，加拿大将 NEPTUNE 与 VENUS 合并为 ONC。	由维多利亚海底实验网络（VENUS coastal network）和加拿大海王星区域性电缆海洋观测网（NEPTUNE Canada）两部分组成，NEPTUNE Canada 安装了 5 个水下节点、主干网络长度 800km，观测范围为水下 17m~2660m。	维多利亚大学主导，美国伍兹霍尔海洋研究所（WHOI）等参与合作，项目对外开放。
欧洲多学科海底及水体观测系统（EMSO）	建设构想源于 2004 年的欧洲海底观测网计划（ESONET），2006 年立项，2013 年起进行升级扩展。	网络节点部署从北冰洋穿过大西洋和地中海，一直到黑海，包含 11 个深海节点和 4 个浅海试验节点。	由欧洲 13 个成员国共同承担，由 EMSO ERIC（欧洲研究基础设施联盟）负责管理。
日本海底观测网络	先后建设了地震和海啸海底观测密集网络（DONET）、DONET 2 以及日本	DONET 2 系统由 450km 光电复合缆、2 个登陆站，7 个科学节点和 29 个观测平台组成。2015 年建成的	日本海洋研究开发机构（JAMSTEC）、日本国家地球科学与防灾研究所（NIED）。

国家	建设概况	网络内容	主体机构
	海沟海底地震海啸观测网（S-net）等海底观测网络	S-net 观测网沿日本海沟布设，缆线总长 5700km，由 6 个系统组成，每个系统包括 800km 缆线和 25 个观测站，2021–2023 年又在北海道至千叶县近海新增 154 处海底地震仪与水压计，通过光缆实现海啸数据秒级传输。	

资料来源：深企投产业研究院整理。

我国已经建成南海深海海底观测网试验系统与东海浅海海底观测网试验系统，整体技术水平接近国际先进水平。中国的海洋观测网从“十一五”期间开始规划，“十二五”期间进行建设，“十三五”期间大力发展。“十二五”期间，在科技部“863”计划支持下，中国科学院声学研究所牵头联合国内 12 家优势涉海研究机构，2012 年启动重大项目“海底观测网试验系统”，分别在中国南海和东海建设海底观测网试验系统。东海浅海海底观测网以舟山为岸基站，布设 33km 海底光电复合缆。南海深海海底观测网试验系统以海南为岸基站，布设了 150 公里海底光电复合缆。

《十四五规划和 2035 年远景目标纲要》提出，适度超前布局海底科学观测网等国家重大科技基础设施。2017 年，国家重大科技基础设施建设项目“国家海底科学观测网”获批建设，由同济大学统筹协调，同济大学和中国科学院声学研究所共同作为法人单位，建设内容包括东海海底观测子网、南海海底观测子网、监测与数据中心及配套工程，初步设计概算总投资约 22 亿元，建设期为 2021-2026 年。项目建成后将是全球规模最大、总体水平国际一流、综合指标国际先进的海底观测设施。

目前在海洋/海底观测网领域，国内有相关业务布局的上市公司主要包括海兰信和亨通光电。海兰信在海底观测网领域的代表产品有 Node-3000 型接驳盒、SIIM-3000SC 海底仪器接口模块等。亨通光电则是提供一站式海底光缆网络解决方案，可以生产海底光缆、接驳盒、中继器、分支器等产品，海底光缆业务规模全球前三。

三、深海资源开发装备

（一）水下施工作业装备

水下施工作业装备是海洋工程的重要支撑，涵盖超深水打桩、工程钻探、挖沟、沉箱整平、疏浚清淤、管道电缆维护、切割破拆、焊接、打捞、观测取样等领域，在海洋石油开采、海底管道铺设、海下设施建设等领域发挥着重要作用，具有高技术、高投入、高产出、高附加值、高风险特点。

目前欧美厂商在深海水下施工作业装备的核心设计和关键配套方面占据优势。

——**超深水打桩水锤**。欧美代表厂商包括荷兰 IQIP（3000 米级）、德国 Menck（3000 米级）、美国 Delmar Systems 等。

——**深水挖沟机**。荷兰 RoyalIHC 公司研发了世界上第一台四履带海底挖沟机 Hi-Traq, Deep Ocean 公司和 IKM Subsea 公司的深水挖沟机作业深度可达 1500~3000 米。

——**深水施工/检修机器人**。全球大型管道服务、电缆敷设等行业的跨国企业均开发了系列具有专用功能的水下施工机器人，广泛应用于全球各大海上油田管道、电缆敷设等施工作业中，代表产品有法国 SIMEC 的 HECTOR 水下机器人、英国 ACSM 的 CMROV 电缆检

修机器人、挪威 Saab Seaeye 的 Sabertooth x-Car 缆线检修机器人、意大利 Saipem 的 Hydrone-R 深水施工型 AUV 等，作业水深在 2000 米-4000 米之间。

——**深水起重与铺缆设备**。代表产品有荷兰 Huisman 的 Deep Pile Runner 主动补偿起重机（水深 3500 米、吊重 600 吨）、挪威 Nexans 的 Nexans Aurora II 铺缆系统（水深 3300 米，张力 65 吨）等。

近年来，我国在深海水下施工作业装备领域取得了显著突破，逐步缩小了与国际领先水平的差距，并在部分核心技术上实现了自主可控。2023 年，海油工程联合中机锻压、国内院所高校自主研发了首台 2500 米级超深水打桩锤，成功完成海试，填补了国内技术空白。深水施工/检修机器人方面，上海中车艾森迪海洋装备有限公司（中车时代电气子公司）在 2018 年陆续发布了 6000 米级的深海探采作业机器人、3000 米级的深海管缆挖沟机、2000 米级的电缆敷设犁等整机装备，根据有关报道，其作业级水下机器人近三年市场占有率居全球第一，挖沟机市场占有率居全球第一，全球约 70% 的海底通信光缆由中国中车提供装备进行敷设。深海钻井技术方面，中海油在南海东部油田首创国内深水表层人造金刚石（PDC）喷射钻井技术，创造了国内深水作业表层机械钻速的新纪录。目前，我国海上钻井技术和作业能力已进入“超深水时代”，深水钻探技术水平逐步与国际接轨。

（二）深海油气生产装备

根据《中国海洋能源发展报告 2024》，2024 年全球海洋油气勘探开发投资预计约 2096 亿美元，连续四年保持增长态势，年均复合增速 11%。海洋油气依然是全球油气新增探明储量（不含陆上非常规）的主力，占比约 80%。根据市场研究机构 Spears & Associates 的数据，

2019 年全球深海油气设备市场规模 121.65 亿美元，较 2018 年上升 5%。根据 Rystad Energy 数据，2022 年深海设备专用件市场空间约 121 亿美元，预计 2024-2027 年全球海底油气生产和加工系统总支出将超过 420 亿美元，CAGR 为 10%。根据 Research & Markets 数据，2023 年全球深海油气装备市场规模 184 亿美元，预计 2029 年达到 265 亿美元，CAGR 达 6.1%。

深海油气高端装备长期被国外油服巨头垄断。深海油气勘探开发设备要求使用寿命长，耐高压、耐低温及高安全性，且核心部件厚度大、形状复杂，在制造过程中其产品性能同时满足高强度、良好的低温韧性及性能均匀性存在极大的难度，对生产工艺要求极高，高端设备长期被海外油气技术服务巨头垄断，全球龙头企业包括英国 TechnipFMC（由全球最大的水下生产系统供应商 FMC 公司和法国油服公司 Technip 合并而来）、美国/法国斯伦贝谢 Schlumberger、美国贝克休斯 Baker Hughes Subsea（由 Baker Hughes 并购 Aker Solutions 的水下业务整合而来），其他重点企业还有美国 Oceaneering、美国卡特彼勒（2020 年收购英国 Weir Group 的油气装备业务）等。

关键装备方面，水下采油树技术一直被 TechnipFMC、OneSubsea（Schlumberger 的水下生产系统事业部）、Baker Hughes Subsea 等 3 家欧美公司所垄断，这 3 家公司具备水下采油树（SPS）与水下控制系统（SCM）的成套设备供应能力，占据国际水下采油树市场的 90%，导致设备采办周期长、价格高、维修保养难，长期制约着我国海洋石油自主迈向深水的步伐。

我国海洋油气勘探开发实现了从浅水到深水（水深 ≥ 500 米）、超深水（水深 ≥ 1500 米）的重大跨越。2021 年，我国自营勘探开发的首个 1500 米超深水大气田“深海一号”在海南岛东南陵水海域正式投

产，截至 2025 年 1 月，“深海一号”累产天然气超 100 亿 m³，生产凝析油超 100 万 m³，其中 2024 年天然气产量超 32 亿 m³。2023 年全球首艘智能深水钻井平台“深蓝探索”在距深圳西南方向 270 多公里的海域成功完成深水首钻，标志着我国实现深水油气技术重大突破。

能源产业链供应链自主可控要求推动深海油气设备国产化率持续攀升。由于深海油气装备市场主要由美国企业主导，美国商务部 2024 年新增对华出口限制清单中也包含了深海油气装备相关系统部件，对我国能源安全构成威胁。深海油气勘探开发装备国产化进程已进入快车道，根据神开股份 2024 年报，目前我国油服装备整体国产化率为 72%，已较 2020 年提升 16%。2023 年国资委发布的《中央企业产业链融通发展共链行动方案》提出，“瞄准能源科技自立自强，深入实施创新驱动发展战略，提升能源产业链供应链自主可控水平，着力打造能源科技创新高地。”将水下油气开采系统等 32 类能源装备纳入替代清单，要求相关央企 2025 年采购国产设备占比不低于 75%。中海油 2024 年招标文件显示，国产化率指标权重已从 10% 提升至 30%，技术自主性评分占比达 40%。预计到 2025 年，陆上常规油气装备国产化率将达 85%，深海油气装备国产化率将突破 50%。

中海油及海油工程是我国打造深海油气装备自主供应链的链主企业。中国海油集团作为我国海洋油气开发的国家队和主力军，是中央政府赋予专属开采权的唯一央企，于 2023 年获批深水油气装备现代产业链链长单位，牵头打造自主可控的水下生产系统装备现代产业链。其下属单位海油工程（A 股）作为“水下生产系统装备”子链长，联合链上单位进行技术攻关，实现了从单个水下生产装备到完整水下生产系统工程应用的重大跨越，已累计交付 280 余套水下生产系统装备，涵盖 1500 米超深水中心管汇等 10 余种类型。

我国水下采油树国产替代推进主要是海油工程和威飞海洋装备两家企业。2021 年，由威飞海洋装备与中国海油合作研发的首套（浅水）水下采油树系统在渤海油田海底安装测试成功，标志着水下油气生产装备国产化实现了跨越式发展。威飞海洋装备也由此成为国内首家能够设计生产制造水下采油树（水下油气生产系统）并投入工程化应用的公司，已经在渤海和南海油田工程化应用 11 口井，首批两棵水下采油树在渤海油田成功运行三年。威飞海洋装备主要专注于浅水水下采油树，2023 年开始研发 1500 米级深水水下采油树，目前已进入集成测试阶段，另外又在布局 2000 米超深水水下采油树研发。

2022 年，中国海油（海油工程）依托工信部创新专项，牵头整合国内百余家公司产业链，研制出我国首台套 500 米级国产化深水水下采油树，质量 55 吨，设计寿命 20 年，额定工作压力 69MPa，额定温度-18~121℃，突破了高压密封、防腐、精密加工、深水湿式电气连接等一系列技术瓶颈，已取得权威第三方认证。目前该装备已在莺歌海海域的东方 1-1 气田成功投用，标志着我国已具备深水水下采油树整体研发、制造、测试和应用的核心技术能力。2025 年 1 月，海油工程自主研发的我国首套 2000 米级超深水采油树在天津完成总装。

此外，神开股份（A 股）承接的上海市科委科技攻关课题“基于注采的水下采油树”、战略性新兴产业项目课题“1500 米水深卧式水下采油树”等技术课题，均已完成国产化样机试制和部分部件的海试工作。配套部件方面，国内深海油气装备主要二级供应商包括中国船舶集团（深水水下井口装置）、南京迪威尔（A 股，井口设备专用件、采油树阀体等专用件、连接器专用件等深海装备锻件）、神开股份（A 股，水下井口密封与悬挂组件、管汇与钻井系统组件等）、四川宏华石油设备（深水钻井平台模块、钻井包）、烟台杰瑞股份（A 股，水

下高压泵注系统)等。

(三) 深海采矿装备

1、深海采矿装备体系

由于深海环境的极端复杂性,当前深海采矿总体上处于试验阶段,尚未实现大规模商业开采。深海采矿会对海洋生态环境造成诸多影响,如改变底栖环境、干扰海底生物,甚至影响浮游生物的光合作用,这对深海采矿的技术、设备提出了极高的要求。

深海采矿技术体系涵盖探测、开采、集矿、输送、船舶作业、环境保护六大领域,采矿装备则主要包括水面支持、水面输送、水底采集三个子系统,具体如下图所示。

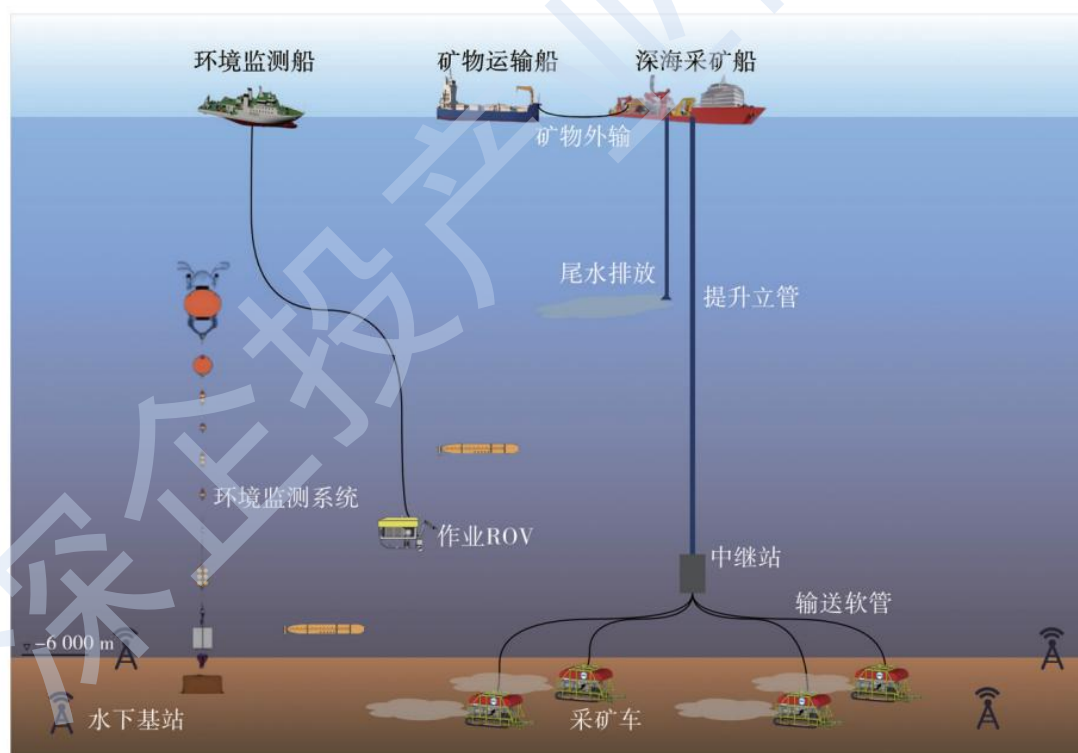


图 13 海底采矿场景示意图

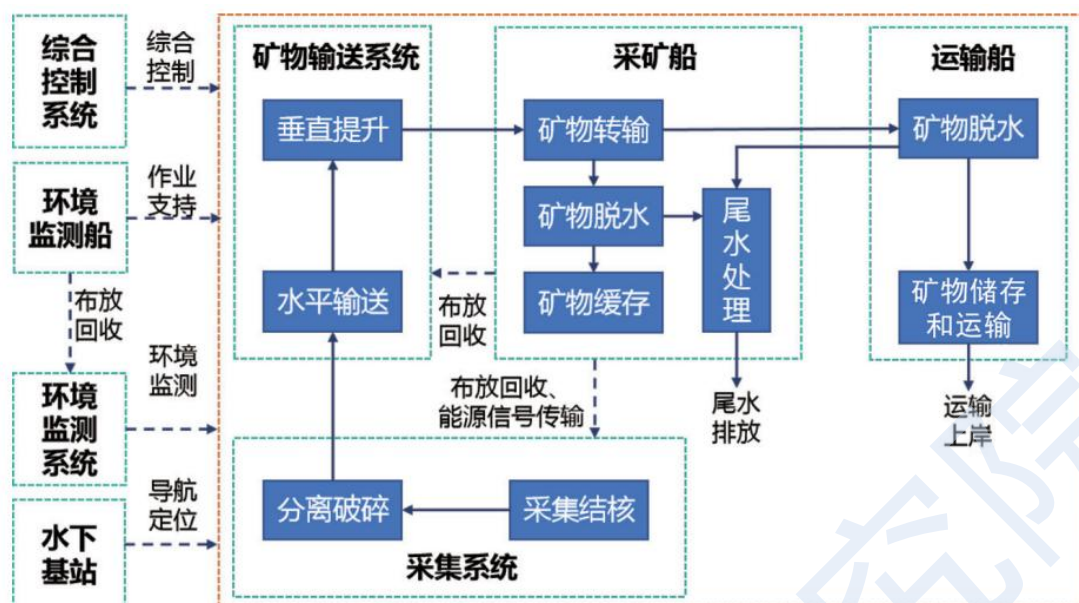


图 14 深海采矿流程

资料来源：海工联盟创新中心。

——**深海探测技术及装备**。涉及到地球物理探测、海底钻探、地质调绘、遥感、声学、化学等多种探测技术，装备主要是深海潜水器或水下机器人（遥控无人潜水器 ROV、自主无人潜水器 AUV）等。

——**海底采矿技术及装备**。海底挖掘技术包括机械切割、水力挖掘（使用高压水枪冲散沉积物）、吸取（通过负压将矿石和泥沙吸入采集系统）等技术，涉及到的采矿设备主要有采矿机器人、海底挖掘机（适用于坚硬岩石）、连续采矿设备、集矿装置（集矿仓、浮动集矿装置、集矿管道装置）等。当前的趋势是依托自推进（履带）式采矿车，配备作业臂、搬运装置、探测设备和传感器，实现矿产采集、样品采集、矿石破碎、地质表征和环境监测等功能集成，可以承受高压环境，能在不同硬度的海床上高效作业，兼顾牵引力与环境扰动控制。当前中国、德国、日本、印度、韩国和俄罗斯已开发自推进履带式采矿车。

——**矿石输送技术及装备**。主要是依托立管提升系统，将海底采集的矿物通过管道或立管泵送至水面，类似于搭建“深海电梯”，包括

水力提升和气力提升（以浅海应用为主）两种方式，分别利用高压泵或压缩空气实现矿物输送。涉及到的设备材料有提升泵（离心泵、螺杆泵）、中继仓（连接采矿车与提升管道，缓冲矿石流并调节输送浓度）、立管、输送软管等。

——**表面支持系统**。主要包含采矿船、运输船。采矿船是集成矿物处理、装备布放回收、动力定位及中央控制功能的中枢平台，需要拥有足够空间对矿物脱水处理于储存，具备高精度动态定位和升沉补偿功能，配套动力定位系统、升降补偿设备、吊装设备、储存装置、通信系统等多种装置。

——**环保技术及装备**。技术层面涵盖生态影响保护技术和环境监测技术。生态影响保护技术包括采用环保装备减少采矿产生的悬浮物扩散和海底污染，同时针对采矿造成的海底地貌破坏，通过人工投放基质促进生物群落再生。环境监测技术主要依托各类监测系统设备和传感器，实时监测鱼类、底栖动物的活动，确保生态损失可控。

2、深海采矿技术装备格局

全球深海采矿领先企业主要有比利时 GSR、加拿大 TMC 公司等。比利时 GSR 公司于 2021 年在东太平洋克拉克-克里伯顿矿区开展多金属硫化物 4500 米开采海试，使用“Patania II”履带式采矿车，采集效率达到 110-120 吨/小时。加拿大 TMC 公司在 2022 年完成了深海采矿车的研制，在 NORI-D 矿区完成了 4300 米级采集提升全系统测试，采集效率为 86.4 吨/小时，其商业化开采系统设计产能为 1600 吨/小时，目标是 2026 年启动商业化开采。

相较于欧、美、日、韩，我国在海底采矿领域起步较晚，技术装备总体水平落后于海外领先公司，目前尚处于少量试采阶段。国内推进深海采矿技术装备研发的主要机构包括中国五矿集团（含长沙矿冶

研究院）、北京先驱公司、上海交通大学、中科院深海科学与工程研究所、中国船舶、招商重工等。主要机构装备情况如下表所示。

表 8 我国深海采矿装备进展

机构	装备型号	规格参数	海试情况
中国五矿长沙矿冶研究院	鲲龙 500 水力自适应集矿履带式采矿车	单车采集效率 10 吨/小时	2018 年完成南海 500 米、1300 米水深 2 项海试
	鲲龙 2000 富钴结壳专用履带式采矿车	作业水深 2000 米	2018 年开展海试
	智能电驱动深海重载采矿车辆平台	作业水深 6000 米级	2024 年 6 月通过验收，无海试信息
北京先驱公司	曼塔号集矿式 ROV	采集技术试验平台	2022 年、2023 年（水深 5588 米）海试
上海交通大学	开拓一号深海重载作业采矿车	设计水深 3000 米	2021 年海试完成 1305 米作业
	开拓二号深海重载作业采矿车	设计水深 6000 米	2024 年海试采集了 200 多公斤的多金属结壳、多金属结核和海底基岩样品
中科院深海科学与工程研究所	深海富钴结壳规模采样车	——	2019 年完成南海海底 2000 米级试验；2020 年完成深海采矿车与载人潜水器的单船首次联合作业试验
中国大洋矿产资源研究开发协会	——	——	2021 年组织相关单位及设备开展全系统联动海试
中国船舶集团	重载四履带行走系统样机	适用矿种：硫化物；行走方式：独立悬挂履带	2023 年研制完成，未公开海试
招商重工	工作母船	设计水深 6000 米	2024 年完成万吨级工作母船布放试验，实现多金属结核少量试采

资料来源：深企投产业研究院整理。

四、深海器件

（一）水听器

水听器是声呐系统的关键部件，从军事潜艇应用向民用领域拓展。水听器是一种用于在水中接收声波信号并将其转换为电信号的传感器，通过压电效应或光的干涉等实现声信号与电信号的换能，广泛用于声场测量、水中通信、探测、目标定位、跟踪等。水听器是声呐系统实现水下探测、定位和通信等功能的关键部件，深海水听器需能承受数千米深海的巨大水压，其设计需考虑耐压壳体、密封性能和材料强度，成本可占声呐总成本的 15%-20%。水听器由于具备水下监听的能力，最初主要用于军事领域，例如潜艇探测和反潜作战，后来逐渐拓展到民用领域，如海洋资源勘探、水下考古、海洋科学研究等。

根据所用灵敏材料与原理的不同，水听器可划分为光纤水听器、矢量水听器与 MEMS 水听器等，主要应用领域如下表所示。

表 9 水听器分类

类别	功能原理及性能	应用领域
光纤水听器	基于光纤干涉/光栅原理，抗电磁干扰能力，测量范围宽，环境敏感度高	军事反潜（如潜艇声呐阵列）、远距离传输与组阵（长距离海底观测网）、地震波采集等
矢量水听器	分为压差式和同振式，使用压电陶瓷或磁致伸缩材料，同步测量声压与质点振速，低频特性好	水下目标识别与定位（舰艇声纳）、海洋环境噪声监测、地震波与海啸预警
MEMS 水听器	基于压电、电容等原理，使用微电子机械系统技术，频率响应范围较宽，便于集成和大规模阵列化	民用分布式监测，包括渔业生态声学研究、声呐浮标、水下机器人搭载设备等

资料来源：深企投产业研究院整理。

国内水听器研发机构及企业主要分为军工国有企业、科研院所及其产业化平台、民营科技企业等。军工国有企业主要包括中国船舶、中国电子等，服务于军工市场。科研院所平台主要有中国科学院声学研究所（孵化出 A 股中科海讯）、哈尔滨工程大学（下属青岛船舶科技公司）等，也以服务于军工、海洋工程项目为主。民营研发科技企业主要有青岛海研电子（海洋传感器、海洋仪器等）、福州大禹电子、中科探海（深圳）海洋科技、浙江优威科技、江苏水声技术等。

（二）水密连接器

水密连接器也称水下连接器，主要用于在深海装备的不同模块之间（如传感器与控制系统、机械臂与主机、电池舱与外部设备、水下机器人与脐带缆等）建立安全可靠的电气信号传输、电力供应或液压/流体传输通道。

水密连接器的核心功能是高压密封防护，在深海高压环境下，通过精密的密封结构（如 O 型圈、金属密封、注塑密封等）和高强度材料（如钛合金、不锈钢、特种工程塑料），有效隔绝外部海水，保护内部的电子元器件、电路和接线端子免受水压破坏和腐蚀。除了防水，水密连接器还需具备耐腐蚀（抵抗海水、油污等）、耐温（适应深海低温或设备发热）、抗振动与冲击等性能，确保在复杂恶劣的海洋环境中长期稳定工作。

按照工作方式的不同，水密连接器可分为干插拔水密连接器和湿插拔水密连接器。干插拔水密连接器是在无水环境（如陆上或舱内）完成插拔操作，然后放入水下使用，技术相对成熟，可分为橡胶体水密连接器和金属壳体水密连接器两类，其中橡胶体水密连接器是应用最广泛的水密连接器。湿插拔水密连接器可直接在水下环境进行插拔操作，便捷性高，但对动态密封和压力平衡要求极高。

高端水密连接器产品领域，海外厂商在全球占主导地位，主要企业包括美国泰科电子 TE Connectivity（依托子公司 SeaCon）、美国 Teledyne Marine、美国安费诺 Amphenol、美国 Glenair（以国防军工订单为主）、丹麦 MacArtney、美国伊顿 Eaton、英国 Hydro Group 等。

国内企业在水密连接器中低端市场已占据主导地位，但深海湿插拔水密连接器等高端产品仍需依赖进口。国产水密连接器主要厂商包括中航光电（A 股）、中天科技（A 股）、亨通光电（A 股）、上海蓝梭电子、山东龙立电子、浙江中航电子、厦门唯恩电气等。中航光电的水密连接器产品在军工、航空航天及民用海洋工程领域均有应用，是目前国内水密连接器的主要供应商，其干插拔水密连接器的设计已覆盖全海深，湿插拔连接器则已能够满足水下 3000 米的使用要求。中天科技和亨通光电作为国内光纤光缆龙头，其海底电缆系统配套的干式/浅水光电复合连接器（接头盒）技术成熟。中天科技已在 2000 米级湿插拔水密连接器、3000 米级金属壳体水密连接器、7000 米级橡胶体水密连接器实现技术突破。上海蓝梭电子的水密连接器已应用于“奋斗者”号万米级载人潜水器执行双潜任务的“沧海”号、“凌云”号着陆器上，首次实现了国产水密传输线缆组件超万米级水深的工程应用。山东龙立电子的带电插拔深海水密连接器工作水深可达 7000 米。厦门唯恩电气近期成功研制了水下 7000 米湿插拔大功率电连接器、光纤水下插拔连接器。

（三）推进系统

深海装备推进系统呈现出显著的“军民融合”特性，且民用需求正日益成为推动技术迭代的关键力量。中国船舶集团作为国内最大的船舶制造企业之一，其下属 702 所（中国船舶科学研究中心，无锡）

是“蛟龙号”等载人潜水器的总体研制单位，在潜水器总体设计与集成方面处于核心地位；而 704 所（上海船舶设备研究所）则在船舶特种设备和推进系统研发上具备专业能力。此外，中车永济电机等国内企业也在积极布局，在中小功率推进器领域取得了重要成果，相关技术已成功应用于“蛟龙号”“奋斗者”号等载人潜水器。展望未来，民用领域（如深海机器人、深海采矿设备、海底数据中心维护）的需求增长将成为主要驱动力。

大功率高精度矢量推进器仍被罗尔斯·罗伊斯（Rolls-Royce）、通用电气（GE）等国际企业垄断。国内在动力密度、推进效率、高可靠性密封以及先进控制算法上的差距，是制约深海装备机动性与作业能力的关键瓶颈。特别是在万米级深渊科考、复杂地形海底采矿等极端应用场景下，对推进系统的功率、精度、稳定性要求极高，国产系统尚难以完全替代。

04

深海材料篇

深海开发材料先行，深海科技突破“地基”



深海开发，材料先行。在高压、低温、强腐蚀、黑暗等极端环境的深海领域，材料性能直接决定着开发能力的边界。深海材料是深海科技突破的“地基”，为深潜装备、探测系统、资源开发平台提供了核心保障，推动着深海探测从浅海向深渊、从观测向开发的跨越。同时，作为撬动十万亿美元深海矿产资源市场的支点，深海材料的创新将全面激活深海油气、海底矿产、生物资源等巨大产业潜力，支撑起从装备制造到资源利用的全产业链发展。

一、深海材料概述

深海材料按照其功能作用分类，可分为耐压结构材料（壳体材料）、浮力材料、密封材料、防护材料（如防腐材料、防护涂层、润滑材料等）、照明材料等类别。按照材料性质，则可分为高强度金属材料、高分子复合材料、陶瓷基复合材料等类别。深海材料类别如下图所示。

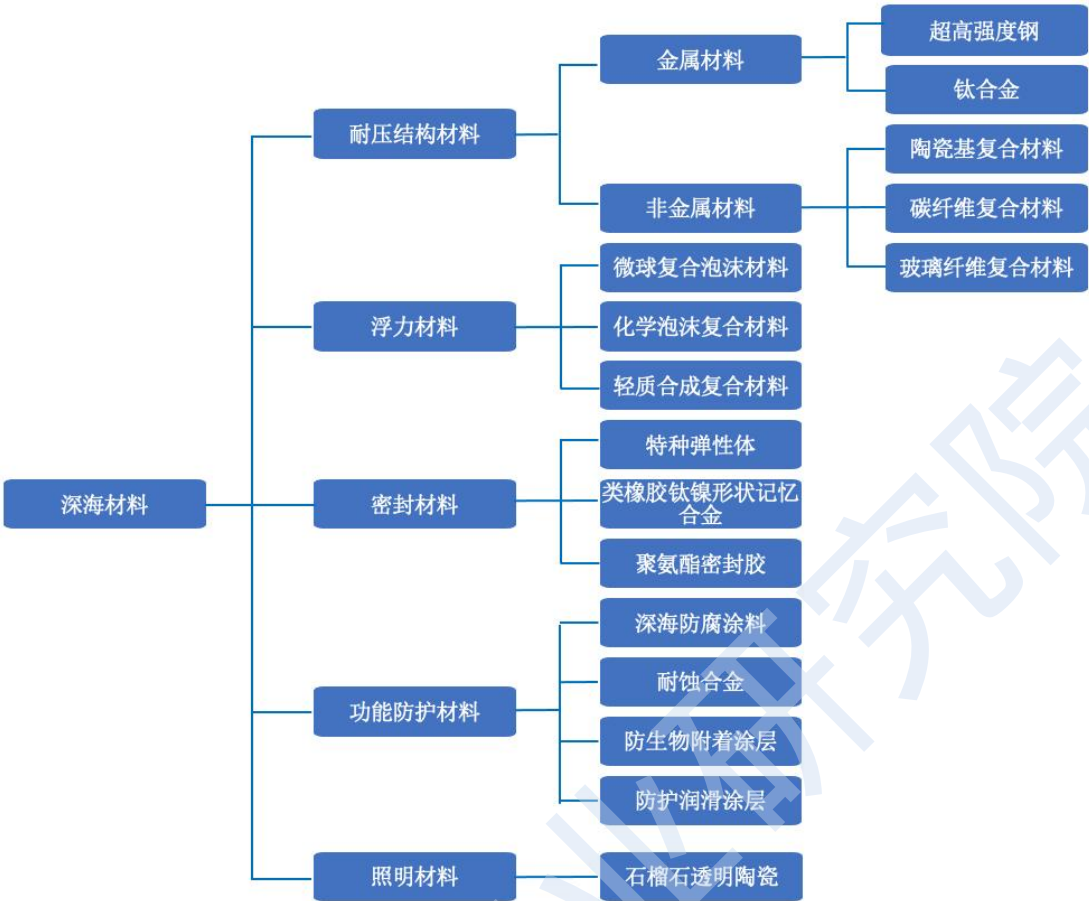


图 15 深海材料分类（按功能作用）

资料来源：深企投产业研究院整理。

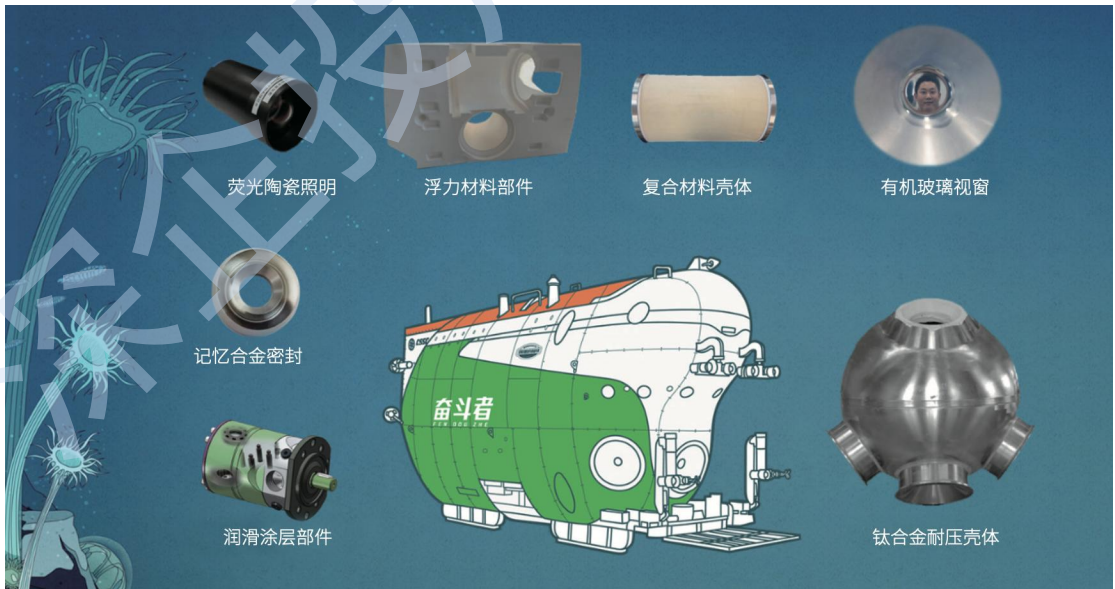


图 16 深海观测探测平台应用的主要材料及部件

资料来源：杨锐等《海洋观测探测平台关键材料发展与展望》。

二、耐压结构材料

随着下潜深度增加，深海的静水压力随之急剧上升，水深每下降 10 米约增加 100 千帕压力。至万米级深海时，载人舱所承受的压力已达 110 兆帕，相当于每平方米承受 11000 吨压力，或者是一个指甲盖的面积需要抗住 1 辆小轿车的重量（1.1 吨/平方厘米）。因此，高强度的耐压结构材料，是发展深海探测装备、深海作业装备的基础。

深海耐压结构材料可分为金属材料和非金属材料，常用耐压材料中金属材料体系相对成熟，典型代表包括高强度合金钢、钛合金和铝合金；非金属材料在深海领域的应用也持续取得新进展，深海材料不仅要耐压、耐腐蚀，还需要具备水密性、抗疲劳性和防止生物附着性等多种功能，复合材料在这一领域展现出巨大潜力。特别是陶瓷材料与碳纤维复合材料，凭借轻质高强、耐腐蚀性佳的特点受到关注。深海结构材料一般需要具备出色的比强度、抗疲劳性能和环境适应性，成型与加工工艺极为复杂，在材料设计、热处理、密封集成等设计制造环节形成明显的技术壁垒。主要材料对比如下表所示。

表 10 当前主流深海结构材料对比

比较项目	金属材料			非金属材料	
	钛合金	高强度钢	铝合金	陶瓷材料	碳纤维复合材料
密度 (g/cm ³)	4.5	7.8-8.7	2.7	2.3-2.45	1.5-1.8
强度 (MPa)	500-1000（抗拉强度）	550-2000（抗拉强度）	280-570（抗拉强度）	2500（抗压强度）	3500 以上
优点	比强度高，耐海水腐蚀性优异，应用技术成熟	成本较低，加工技术成熟，适合大规模制造，调质处理可达到高屈服强度	密度低，轻量化明显，具有良好的焊接性和耐腐蚀性	密度低，硬度高、耐腐蚀性极强，可承受极端压力	密度低，比强度高，可大幅降低容重比。耐腐蚀、抗疲劳性能优异，适应深海高压环境

比较项目	金属材料			非金属材料	
	钛合金	高强度钢	铝合金	陶瓷材料	碳纤维复合材料
缺点	成本昂贵，加工难度大	密度大，导致潜水器整体重量增加，浮力控制难度提升	强度低于钛合金和钢，深海适应难度高	脆性大，抗冲击能力差	层间剪切强度低，连接和密封技术复杂，制造成本高

资料来源：Mechtool、招商证券，深企投产业研究院整理。

（一）钛合金材料

钛合金材料具有强度高、耐腐蚀性强、密度低（仅为钢的 60%）的特点，同时还具有耐海水冲刷，无磁性，无冷脆性，高透声系数，较好成形、铸造、焊接性能等，因此是海洋工程制造领域理想的结构材料和深海耐压舱的首选材料，被称为“海洋金属”，广泛应用于载人潜水器和深海机器人。目前国际上主流（水深 6500 米级）载人潜水器载人舱基本采用 800MPa 强度级别的钛合金，如 Ti-6Al-4V 钛合金，万米级别的潜水器如中国“奋斗者”号则使用新型 Ti62A 钛合金，其强度进一步提升 20%。

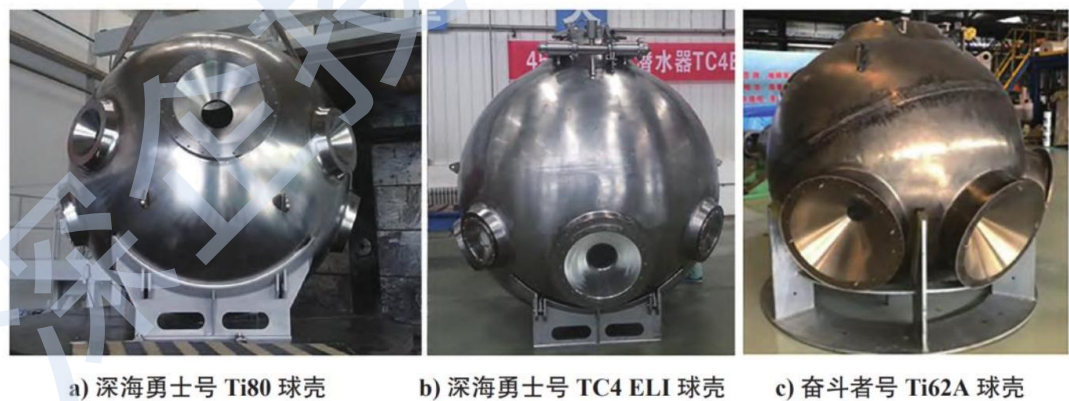


图 17 载人潜水器钛合金耐压球壳

资料来源：张爱锋等《深海载人装备耐压结构用钛合金应用现状与展望》。

与航空、航天对结构减重的要求一致，深海装备的结构减重效益明显，减重后可增大海洋探测装备的航行敏捷度、减少浮力材料用量、

降低能源消耗、提升装备作业周期。结构减重设计要求采用更高强度钛合金，然而结构材料普遍存在强度-韧性“倒置”现象，提升强度后往往导致韧性降低，引发脆性断裂并降低结构的可靠性及服役寿命，因此兼具高强度、高韧性的钛合金往往成为装备研制的瓶颈问题。

我国是世界钛工业大国，海绵钛产能占全球 65%，钛加工材产量位列全球首位，但高端产品仍依赖进口。在海洋工程领域，我国已开发出多种钛合金，并形成涵盖低—中—高强度的舰船/海工钛合金体系（如 TA17、TC4、TC4ELI、Ti-70 等型号），掌握载人深潜器球壳用高强高韧钛合金的冶炼、成形和电子束焊接技术，并实现国产化，成功用于“蛟龙”号、“深海勇士”号、“奋斗者”号等深潜器耐压壳体。与美国、俄罗斯相比，我国在大规格钛合金锻件、超长无缝管、低成本合金设计及海洋长周期评价数据库方面尚有一定差距。随着低成本合金、增材制造和大规格铸锭技术的突破，这一差距正在缩小。

国内海洋工程钛合金材料主要企业包括西部材料、宝钛股份、西部超导等，具体情况如下表所示。

表 11 我国深海钛合金材料主要企业

企业	业务布局	技术亮点	应用现状
宝 钛 股 份 (A 股)	全球最大的全流程钛材生产商，实现“全海深钛合金载人舱”量产	Ti62A 合金抗压强度达 1100 MPa	独家供应“奋斗者”号载人舱，为“蛟龙号”和“深海勇士号”供应载人舱钛合金壳体
西 部 材 料 (A 股)	国内唯一实现深海钛合金板材、管材、环件全品类量产的企业，钛合金总产能达 1 万吨，新增海洋工程用大规格低成本钛合金生产线已投产	Ti80、Ti6321 等特种钛合金性能指标达到国际领先水平	参与国家级深海项目“冷泉生态系统研究装置”（水深 2000 米）的建设，单项目钛合金用量达 500 吨
西 部 超 导 (A 股)	聚焦高强韧特种钛合金及超导材料，深海业务聚焦深海潜水器的壳体、动力部件和深海空间站应用	Ti31、Ti75 合金抗拉强度 800-1100 MPa，开发 TA9 钛合金 (Ti-0.2Pd)	为“蛟龙”号、“深海勇士”号深潜器研制特种钛合金锻坯、锻件及配套焊丝，“奋斗者”号钛合金机械臂连接件等，为“冷泉生态系

企业	业务布局	技术亮点	应用现状
			统研究装置”供应钛合金耐压舱体材料

资料来源：深企投产业研究院整理。

（二）高强度钢

高强度钢具有优异的力学性能和耐腐蚀性，同时具备可焊接、可回收的优势，成本仅为钛合金材料的 1/10,是海洋工程装备和深海装备领域的重要材料。海洋工程用钢主要分为海洋平台用钢、海洋风力发电用钢和海底油气管线用钢三类，主要应用于潜艇及深海潜水器耐压壳、深海导管架平台、深海科研与观测平台的结构、系泊系统、海底管线和深海采矿设备等场景。比如中国自主设计建造的亚洲第一深水导管架“海基二号”，作业海域平均水深约为 324 米，总重量达到 3.7 万吨，大量使用了国产高强度钢建造的钢结构。

目前高强度钢主要应用于 200-700 米水深范围，当代大部分钢制的耐压舱深海潜水器及潜艇下潜深度在 400-600 米之间。由于金属材料在深海高压下会发生应力腐蚀，高强度钢在深海环境下的长期稳定性和耐腐蚀能力远不如钛合金，因此潜深 700 米以上的潜水器主要以钛合金作为耐压舱主体结构材料。目前我国研发的 2200-3200MPa 级超高强度钢理论潜深支持 900-2000 米，但在工程化应用以及深海环境实用性方面尚面临挑战。

国内海洋工程结构钢生产企业主要有鞍钢集团、沙钢集团、湖南钢铁集团（华菱钢铁）、首钢京唐、番禺珠江钢管等。

（三）碳纤维复合材料

碳纤维复合材料具有密度低，比强度高，可大幅降低容重比，耐腐蚀、抗疲劳性能优异的特点，适应深海高压环境，正成为金属之外

最具潜力的轻量化、耐压、耐腐蚀解决方案。碳纤维在海洋结构与装备中往往不是单独使用，需要与金属材料配合使用。目前，碳纤维复合材料在海洋科技领域的应用以海上风电叶片应用为主，在深水油田（管缆等）、锚泊系统、海上风电的风机叶片、深海潜水器的耐压舱体、推进轴以及装备修复等领域的应用也正在展开。碳纤维还具备较好的电磁屏蔽性能，可以减少潜航器在海底航行时受到电磁干扰的影响，提高潜航器的隐蔽性和安全性，在水下无人作战潜航器的应用前景广阔。

在海洋油气开发应用方面，碳纤维复合材料可以用作油田钻井平台中的生产井管、抽油杆、储藏槽、海底输油管、甲板等部件。特别是深水油气田（水深可达 3000 米）开发平台的深海管缆（生产立管、脐带缆、软管），碳纤维复合材料可替代钢制材料，在满足强度要求的同时大幅减重。

锚泊系统方面，传统的系泊系统基本为钢制结构，钢材料在海水中易腐蚀，平均使用寿命短，且后期维护成本较高，1500 米水深的钻井平台的钢制系缆质量可达 6500 吨左右，以碳纤维复合材料系泊缆替代钢制系泊缆可以有效减轻重量、减缓海水腐蚀、延长使用寿命，在更高水深（1600 米以上）还具有总成本优势。

在深海潜水器的耐压舱体方面，美国“Deepsea Challenger”号深潜器使用碳纤维复合材料作为主耐压结构，2012 年由导演詹姆斯·卡梅隆实现万米深潜；中科院沈阳自动化研究所研制的“海翼 7000”水下滑翔机的主耐压壳体采用碳纤维增强树脂基复合材料，该滑翔机最大连续工作深度为 6239 米，创造了多项世界纪录。我国已开发出一种新型高强度碳纤维无人潜航器外壳，外壳舱壁厚度约为 3 厘米，压力舱前后两端采用了 T4 钛合金材料，在实验室测试中能够承受 9000

米水深压力。

国内涉及深海装备应用的碳纤维复合材料企业包括中复神鹰、光威复材、恒神股份等，具体情况如下表所示。

表 12 碳纤维复合材料主要企业深海科技业务布局

企业	深海业务布局
中复神鹰 (A 股)	与中国海洋大学联合开展“深海装备用碳纤维材料制备与深海应急平台制造技术研发”项目；开发乙烯基上浆剂碳纤维及其编织布，瞄准高性能船舶在水下和水上环境应用需求
光威复材 (A 股)	牵头组建山东省现代海洋产业技术创新中心（海洋工程碳纤维复合材料），子公司获中国船舶集团金牌供应商称号，为大型船舶等各下游应用领域轻量化提供材料支撑
恒神股份 (A 股)	碳纤维、经编织物、树脂等产品已通过 DNV·GL 船级社产品认证，可应用于海洋无人艇等领域

资料来源：深企投产业研究院整理。

（四）陶瓷复合材料

陶瓷复合材料以陶瓷为基体，通过添加增强材料（如纤维、晶须或颗粒）来改善其性能。陶瓷复合材料具有重量轻、强度高、超硬度、耐磨损、耐腐蚀、电绝缘、非磁性和辐射可穿透等优点，比如，陶瓷复合材料的密度低（如氮化硅陶瓷密度仅为 3.44 g/cm³），但抗压强度显著高于钛合金和碳纤维复合材料，能够大幅降低深海装备的自重，已经在深潜器、潜艇、深海机器人等深海装备上获得应用。目前用作深海装备结构材料的陶瓷类型主要有碳化硅陶瓷、氮化硅陶瓷、氧化锆陶瓷、氧化铝陶瓷等。

世界各国潜水器研究机构都十分重视陶瓷在潜水器耐压壳上的应用，多年来一直在进行相关研究和应用实践。2008 年美国“海神”号深潜器研制成功，可潜 11000 米深，其耐压壳和浮力模块材料中，

96%采用的是氧化铝陶瓷，封头和一些连接件选择的则是钛合金。陶瓷耐压壳在水中的重量要比采用纯钛合金制造的耐压壳轻 331kg。“海神”号的研制推动了陶瓷壳体设计在多个方面的显著进步。日本 JAMEST 建立了一套陶瓷耐压壳制造方法，制造出的陶瓷球形耐压壳的强重比显著高于万米级 KAIKO 潜水器的复合泡沫塑料浮力材料，证实陶瓷材料可用于深海 ROV 的电子设备耐压壳，并运用于 7300m 级 AUV Jellyfish catcher 上面。

三、深海浮力材料

深海浮力材料主要功能是提供装备上浮能力以及维持姿态稳定性。传统的浮力材料包括常见的浮力筒、浮球及木材或合成橡胶制作的浮力材料，存在抗压强度不足、无法承受深海高压，密度过高、吸收率高、浮力效率低，耐腐蚀性不足与寿命短的问题，因此只能用于浅海。由于深海的静水压力伴随下潜深度急剧增加，因此深海潜水器通常采用无动力上浮技术，这就要求深潜器的材料既要有一定的耐压性，又能提供一定的浮力来保证潜水器的有效载荷量及其水下安全性能。深海用的浮力材料，属于高强度固体浮力材料，具有耐水、耐压、耐腐蚀和抗冲击的特性，能够提供深海潜水器所必须的浮力，提高潜水器的有效载荷，减少其外型尺寸。

深海装备上使用的浮力材料实质上是一种低密度、高强度的多孔结构材料，属复合材料的范畴。共分三大类：中空玻璃微珠复合材料、轻质合成材料复合塑料和化学泡沫塑料复合材料。中空玻璃微珠复合泡沫是由空心玻璃小球混杂在树脂中形成的，其中空心玻璃小球占 60%~70% 的体积；轻质合成材料复合塑料由复合泡沫与低密度填料比如中空塑料或大直径玻璃球组合改性而成；化学泡沫塑料复合材料

是利用化学发泡法制成的泡沫复合材料。其中，玻璃复合泡沫的最低密度极限是 0.5g/cm^3 ，复合塑料的最低密度极限是 0.32g/cm^3 ，而化学泡沫塑料的最低密度极限是 0.24g/cm^3 。化学发泡材料、轻质合成复合塑料较多的应用于海面或者浅海勘探设备，而中空玻璃微珠和树脂基体复合而成的复合泡沫材料则更多地用于深海勘探设备上，因为它的密度相对较小，强度相对较大，比较适用于深海环境。

美国研制的浮力材料密度为 $0.40\text{—}0.73\text{g/cm}^3$ ，应用水深 $2000\text{—}11000\text{m}$ 。我国固体浮力材料在早期依靠进口，成为深海装备的“卡脖子”材料技术。中国科学院理化技术研究所（中科院理化所）是我国深海固体浮力材料的技术源头，其自主研制的浮力材料，先后应用于“深海勇士”号 4500m 载人潜水器、“奋斗者”号万米级潜水器上。目前我国已基本实现了覆盖全海深应用的密度 $0.40\text{—}0.70\text{g/cm}^3$ 浮力材料的自主可控保障，浮力材料性能与国际先进水平相当。

国外的固体浮力材料的主要研发制造机构有美国的 Emerson & Cuming 公司、Flotec 公司，欧洲 Trelleborg Offshore 公司、Flotation Technologies 公司、Marine Subsea Group、英国 CRP 集团、法国 LA SEYNE SUR MER、乌克兰国立海洋技术大学、日本海洋技术中心、俄罗斯海洋技术研究所等。

国内研发深海固体浮力材料的高校院所较多，以中科院理化所、中科院宁波材料技术与工程研究所（中科院宁波材料所）为代表，其他机构还有哈尔滨工程大学、北京航空航天大学、浙江大学、北京科技大学、中国海洋大学、武汉理工大学、国家海洋技术中心、西北工业大学、中国船舶重工集团七一零研究所和七二五研究所等。近年来，国内能够批量生产深海固体浮力材料的企业主要有台州中浮新材料（与中科院宁波材料所合作）、中科海锐（厦门，源于中科院理化所

微珠团队）、海洋化工研究院（A 股昊华科技旗下），其他小型科创企业还有青岛和洋新材料、山东中洋新创等，上游的中空玻璃微珠生产商主要有郑州圣莱特、山西海诺科技、中钢集团马鞍山矿院新材料（中钢微珠）、安徽凯盛基础材料（A 股凯盛科技子公司）、中科华星新材料等企业。

四、深海密封材料

深海密封材料的作用是防止海水渗漏，是确保深海装备在深海长期服役环境下安全运行的关键功能材料。深海环境下，设备接头与舱体需实现高可靠密封，以抵御海水高压和腐蚀。密封材料必须具备耐腐蚀、耐高压、耐高温、耐低温、耐老化（抗压差疲劳）等性能。海洋装备长寿命发展趋势，对密封材料及密封件结构设计均提出了更高要求。

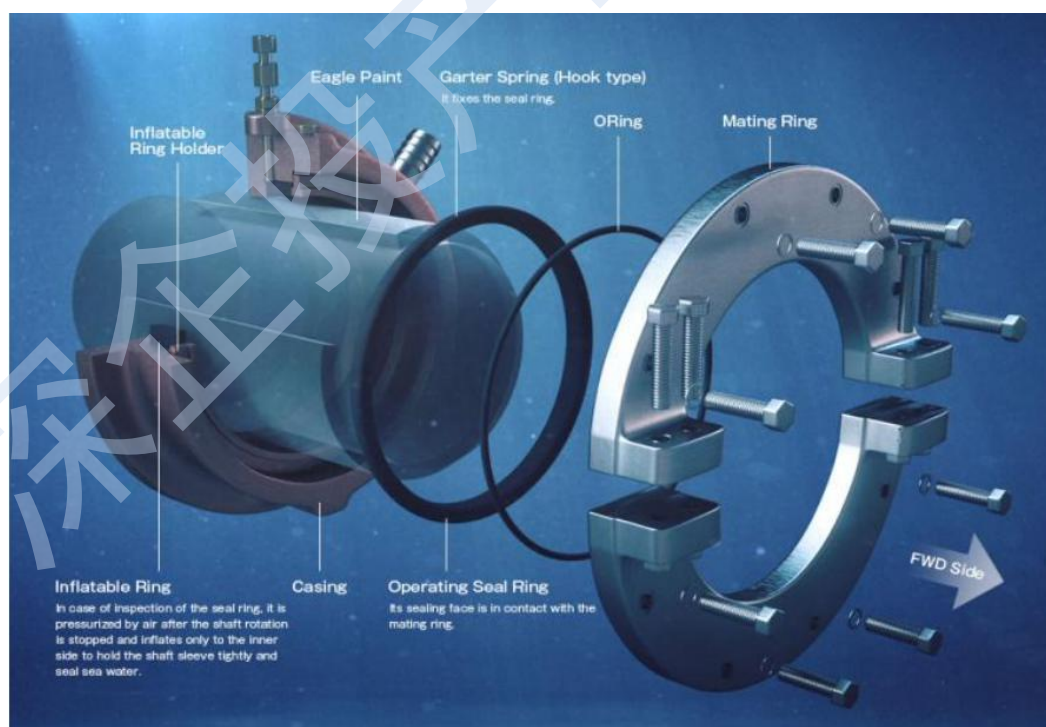


图 18 潜水器密封部件示意图

资料来源：Kemel、招商证券。

深海密封材料主要包括橡胶密封材料（特种弹性体，如氟橡胶、硅橡胶、氢化丁腈橡胶、全氟醚橡胶等）、金属密封材料（不锈钢、镍基合金、类橡胶钛镍形状记忆合金等）、特种工程塑料类（聚醚醚酮）、复合材料密封材料（石墨复合材料、碳纤维复合材料、钛合金-氟橡胶复合材料）等，当前以橡胶密封材料为主。不过，橡胶密封材料存在长期使用老化、温度适应性差和易磨损等密封隐患。与橡胶相比，金属密封具有更加优异的耐久性、温度适应性和耐磨性，其中铜、铝密封等容易发生自身腐蚀和接触电化学腐蚀，不适于深海环境应用，钛合金、镍基合金密封则在深海潜水器、探测器中得到应用。近年来，具有低模超弹、可形状自回复、耐腐蚀、耐磨损特征的钛镍形状记忆合金成为备受关注的新型类橡胶金属密封材料。中科院金属所设计的钛镍合金多种密封结构，目前已应用于万米水下滑翔机浮力调节系统和深海工艺孔的密封结构。

表 13 深海密封材料主要类型及应用

类别	产品	特性	适用场景
橡胶类	氟橡胶 FKM	耐温范围-20℃至 200℃，可承受 10MPa 以上静水压，耐原油、海水	用作 O 型圈、舱门密封条，应用于海上石油平台井口法兰、ROV 液压接口
	硅橡胶 VMQ	耐温范围-60℃至 225℃，超过 0.34 MPa 水压时容易发生永久形变或气体渗透失控，拉伸强度低，抗磨损能力弱，不适合动态密封	水深 500 米以内的浅海观测设备、浮标、电缆接头等设备的静态密封，如接线盒、水下灯光密封圈、低压力传感器 O 型圈，潜水器控制舱内密封件
	氢化丁腈橡胶 HNBR	耐温范围-40℃至 150℃，适合动态密封环境、在水压波动中恢复性能好，海水老化寿命是丁腈橡胶 3 倍以上	用于潜艇升降舵或无人靶机舵机、AUV 推进器轴封、ROV 机械关节、深海液压管接头的密封件等
	全氟醚橡胶 FFKM	耐温范围-30℃至 260℃、抗 150 MPa 高压，耐腐蚀性极高	深海热液区探测设备密封
特种工	聚醚醚酮	拉伸强度 90MPa（接近铝合金）、	深海机器人关节、高压阀座、密

类别	产品	特性	适用场景
工程塑料	PEEK	耐 250℃高温,能承受 60MPa 以上的深海压力	封环
特种合金与金属基材料	镍基合金	涵盖 Inconel 合金、Hastelloy（哈氏合金）等规格合金,耐温范围-196℃至 500℃,适应全海深压力,耐腐蚀、疲劳寿命长	载人舱钛合金法兰密封圈、海底油气井口防喷器闸板密封块、深海立管法兰金属 C 型密封圈
	钛合金	耐温范围-253℃至 550℃（极寒与短时高温）,耐压能力 100 MPa 至 300 MPa（全海深）,屈服强度高、耐腐蚀性极强、具有低温韧性、	深海潜水器钛合金耐压舱壳体主密封、深海管道高压法兰密封、深海液压球阀密封、深海热液采样泵密封
	类橡胶钛镍形状记忆合金	耐温范围-100℃至 150℃,耐压能力 50MPa 至 200 MPa（全海深）,具有低模超弹、可形状自回复、耐腐蚀、耐磨损特征,成本极高、工艺复杂	万米级潜水器/水下滑翔机工艺孔密封、深海 ROV 传感器舱体密封
复合材料	金属-聚合物复合密封	金属骨架（不锈钢/钛合金）+ PTFE 或石墨密封层,兼具金属强度与聚合物弹性,摩擦系数低	深海动态密封件,如深海作业机械臂的旋转轴密封件、往复运动密封

资料来源：深企投产业研究院整理。

当前深海密封材料市场整体可分为两类。一类是水深不超过 1500 米的深海油气工程领域应用的密封件，市场由传统的油气密封件龙头如瑞典特瑞堡 Trelleborg、美国派克汉尼汾 Parker、德国科德宝 Freudenberg 三大巨头主导，国产替代主要企业包括中密控股（A 股）、科强股份（A 股）等。另一类是深海装备（潜水器、无人滑翔机、深水机器人等）的密封材料，工作水深范围在水下数千米至万米，与深海油气工程的密封材料性能要求差异大，主要由科研院所以及潜水器研究机构进行开发，当前市场尚未成型。

五、功能防护材料

（一）深海防腐材料

在深海高腐蚀环境下，材料的腐蚀不可避免，目前最主要的降低深海材料腐蚀的方法有：研制新型耐腐蚀材料、喷涂有机涂层、阴极保护及增强材料表面耐腐蚀性能的其他方法。

深海防腐涂料（涂层）用于保护深海装备免受海洋环境的腐蚀。与浅海环境相比，装备涂层在深海环境中比表层海水环境中增加了高压海水渗透与海水压力交变两种腐蚀因素，导致涂层在深海环境中的破坏速度加快，影响涂层防护性能，大大缩短涂层防护寿命。深海装备尤其是潜深数千米至万米级的深海潜水器、深水机器人，其耐压外壳基本不依赖防腐涂料，而是依靠外壳材质（如钛合金、复合材料壳体）本身卓越的耐腐蚀性能，但为了抑制海洋生物附着、减少非耐压结构的长期维护，会在非承压外壳（比如浮力材料外壳、机械关节与焊缝）或附件上局部加涂高性能防腐防污涂层，并与阴极保护/外加电流系统联合使用。深海防腐涂料应具备优异的耐水性能、耐常压性、耐交变压力性、耐交变温度性、耐干湿交替性等。

我国主要应用在海洋中的防腐涂料有橡胶类防腐涂料、环氧树脂类防腐涂料、氟碳防腐涂料、有机硅树脂涂料和聚氨酯类防腐涂料，其中深海防腐涂料主要有高固体分环氧涂料、聚硅氧烷涂料、氟碳涂料等。国外目前研发并开始应用的深海防腐涂料包括 3LPP 防腐涂层、陶氏新型 3LPE 管道防腐涂层、高性能复合涂层（HPCC）。随着纳米技术的飞速发展，纳米改性涂层能达到防水、防腐、增强材料的力学性能等无可比拟的优势，可能成为重要的研究方向。

表 14 海洋防腐涂料主要类别

防腐涂料类别		优点	缺点	应用领域
橡胶类防腐涂料	氯化橡胶、氯磺化聚乙烯	施工周期短、施工难度低、维护成本低、耐水性能强、	不耐老化，附着力不强，含挥发性溶剂、环保性弱	浅海(<200 米)场景：船舶水线以下部位、港口闸门、化工管道

防腐涂料类别		优点	缺点	应用领域
	等	弹性好、成本低		（非高温环境）、浮筒、潮差区钢结构
环氧树脂类防腐涂料材料	含环氧富锌、玻璃鳞片环氧	机械强度高（坚硬耐磨）、附着力良好、耐水性强、耐碱耐油、高绝缘性	耐候性差（紫外线易粉化）、不耐强酸、低温固化慢（<10℃失效）、韧性差（易开裂）	1500 米水深以内：海上平台、海底管道、ROV 框架、采油树阀门，改性后可用于潜深超过 1500 米潜水器耐压舱
氟碳防腐涂料	FEVE 、PVDF 等	使用寿命长、防腐蚀性能优异、耐化学腐蚀、耐温广（-50~200℃）且能表现出一定的自洁性	涂装成本高，强度差、附着力不稳定、需配套专用底漆（稀释剂）	以 500 米内水深为主，如船舶水线以下、海上平台支架、海上风电基础、跨海大桥钢结构涂层；超深海应用需石墨烯改性增强，如深水管线外防腐面漆
有机硅树脂涂料	聚硅氧烷涂料等	同时兼具无机材料的特性和有机材料的特性，于深海中耐寒性能强、耐潮湿	强度较低，黏附力不强	船舶外壳、海洋平台、钻井平台桩腿等
聚氨酯类防腐涂料	双组分聚氨酯、单组分湿固化聚氨酯、改性聚氨酯	耐低温、耐弱酸弱碱、耐油、耐盐雾、耐磨性能优异	低温韧性不足，与钢材附着力不强，耐强碱性弱，长期日照易粉化、需专用底漆	500 米水深以内的海洋工程与潜水器非承压部位

资料来源：深企投产业研究院整理。

当前海洋防腐涂料以海洋工程涂料为主，主要为船舶、海上设施（海上风电、海洋油气平台、跨海大桥）以及浅海的海底工程（海底管道、海缆、钻井设备）使用的工业防腐涂料，全球市场呈现寡头垄

断格局，佐敦（挪威）、PPG（美）、阿克苏诺贝尔（荷兰）、海虹老人（丹麦）合计占据 70%以上份额，国内主要企业及机构包括东方雨虹（A 股）、麦加芯彩（A 股）、广信材料（A 股）、三棵树（A 股）、中船重工七二五研究所、中海油常州院、海洋化工研究院（A 股昊华科技旗下）、上海海隆赛能、东方电气（福建）研究院等。深海装备防腐涂料研发当前以科研院所为主，国内主要机构有中科院宁波材料所、中船重工七二五研究所等。

（二）深海润滑材料

深海装备机械部件服役过程中摩擦磨损与海洋腐蚀耦合作用会严重影响装备的可靠性和服役寿命。例如，深海高端柱塞液压泵的核心液压元件（关键摩擦副）表现出显著的摩擦腐蚀失效。因此，需要深海润滑材料减少设备摩擦磨损、延长寿命并保障作业安全。在深海环境下，深海润滑材料需要具备抗极端高压、耐低温与热稳定性、抗腐蚀与防生物附着、环保安全等性能。

深海润滑材料主要包括固体润滑、液体润滑（合成润滑油）、特种润滑脂、复合润滑材料等类别，如下表所示。

表 15 深海润滑材料主要种类及应用

防腐涂料类别		性能特点	应用领域
液体润滑	合成润滑油（如全氟聚醚 PFPE）	耐高低温、耐酸碱、抗腐蚀、粘度高，但成本高、具有高温毒性、难降解	深潜器及钻探设备的液压系统、关节电机，水下采油树阀门等
	全海水润滑系统（无油）	以海水本身作为润滑与冷却介质，无油运行、无污染、免维护，但存在摩擦系数高、海水高盐腐蚀、低温结冰等问题	浮力调节系统（浮力调节泵）、柱塞泵等
特种润滑脂	聚脲基脂	在合成基础油（PAO、酯类等）中添加防水聚合物及抗腐蚀剂，	海上风电轴承、静态密封件

防腐涂料类别		性能特点	应用领域
固 体 润 滑		具有减摩抗磨、防腐蚀、高压密封、长寿命、低维护优势，成本高，适用于低速重载部件	
	热 喷 涂 WC-Co-Ni ₃ Cr ₂ 涂层	耐磨、抗腐蚀、高压环境密封，但防护涂层存在致密性低、腐蚀通道多、孔隙难全消除等缺陷，寿命有限	深海高压部件（如钻杆接头、阀门密封、水下采油树活塞杆）的主流防护涂层，海上风电变桨轴承等
	磁控溅射碳基涂层（如 DLC、GLC）	高硬度、低摩擦、耐腐蚀，适合高载荷	水下机器人关节、深海装备电机轴承、密封副、深海柱塞泵
	PEEK/PTFE 基复合材料	自润滑、耐海水冲蚀	

资料来源：深企投产业研究院整理。

深海潜水器及机器人的关节润滑以固体润滑材料为主，目前主要以热喷涂 WC-Co-Ni₃Cr₂ 为防护润滑涂层，但由于防护涂层存在致密性低、腐蚀通道多、易磨损等“先天缺陷”，难以满足深海装备长期稳定服役需求。中国科学院宁波材料所深海柱塞泵关键摩擦副为应用目标，利用磁控溅射制备了兼具高硬度、减摩耐磨、耐蚀等特性的碳基涂层，初步获得了良好的试验及应用效果。

传统热喷涂润滑涂层在机械磨损和海洋腐蚀耦合作用下表现出显著的摩擦腐蚀失效，是制约深海柱塞液压泵等动力装备长期服役的瓶颈。磁控溅射碳基涂层兼具高硬度、减摩耐磨、耐蚀等特性，已在航空航天、汽车等领域获得应用，但其在腐蚀、摩擦以及摩擦-腐蚀交互等作用下适用性尚未得到系统验证，相关材料在海洋工程方面的设计准则、服役评价方法在国内基本属空白。

深企投产业研究院

 电 话: 王女士 13168781866

 座 机: 0755-82790019

 邮 箱: sqtcf@sqtcf.cn

 网 址: <http://www.sqtcf.cn/>

 地址: 深圳市福田区深南大道本元大厦 7B1

© 深企投产业研究院版权所有。如需引用, 请注明出处。