

世界深海技术的发展

莫 杰,肖 菲

(青岛海洋地质研究所,青岛 266071)

摘 要:从 20 世纪 60 年代至今,发达国家率先向深海大洋进军。深海探测技术发展迅速。调查船、钻探船(平台)、各类探测仪器、装备,无人/载人/遥控深潜器、水下机器人、取样设备、海底监测网等相继问世,探测广度和深度不断刷新。在深海极端环境、地震机理、深海生物和矿产资源,以及海底深部物质与结构等领域取得一系列重大进展和新发现。综述了美国、日本、巴西、俄罗斯、欧洲各国、韩国和中国在深海技术领域研发的主要成果。

关键词:深海技术;发展;深海大洋;世界

中图分类号: P741

文献标识码: A

1 美国:首开钻探深海底

美国是世界上最早进行深海研究和开发的国家。早在 1957 年,美国 W H 蒙克、H H 赫斯曾提出莫霍计划(Project Mohole,1961 年),试图钻穿洋壳最薄处,获取地壳深部和地幔物质样品。后因钻探技术和经费问题而中途夭折。1964 年,为进一步解决深海钻探问题,美国三大海洋研究所和迈阿密大学海洋与大气学院联合提出“深海钻探计划”(DSDP)。科学家为了得到整个洋壳 6 km 的剖面结构,从而获取地壳、地幔之间物质交换的第一手实际资料,美国自然科学基金会从 1966 年开始筹划“深海钻探计划”(DSDP,1968 年 8 月—1983 年 11 月)，“格罗玛·挑战者”号(Glomar Challenger)深海钻探船首次驶进墨西哥湾,开始了长达 15 年的深海钻探。该船所收集多达百万卷的资料数据已成为地球科学的宝库,其研究成果证实了海底扩张,建立了“板块构造学说”,为地球科学带来了一场震撼世界的“地学革命”。同时创立了一门研究中生代以来古环境变

化的新兴学科“古海洋学”^[1]。

此后,于 1985 年继续由“决心者”号(JOIDES • Resolution)开始的“大洋钻探计划”(ODP,1985 年 1 月—2003 年 9 月)。在两大国际合作计划中,美国也以其先进的技术处于领导地位^[2,3]。除了深海钻探船、深潜器、水下机器人、液压活塞取心器(HPC)、延伸式岩心筒(SCB)、Seabeam 测深系统和 Tow Cam 深拖系统外,美国领先于世界的最先进技术是深海科学观测光缆。这一技术则是将观测平台放置海底,通过海洋研究交互观测网络(ORION)向各个观测点供应能量、收集信息,可以进行多年连续的自动化观测^[4]。科学家可以在陆地研究基地通过网络实时监测自己的深海实验,指令实验设备监测风暴、海流、波浪、潮流、藻类勃发、地震、浊流、海底火山喷发等各类突发事件的发生。

美国拥有“阿尔文”号深潜器(Alvin,4.8 km)。1976 年,美国海洋科学家在东太平洋和加拉帕戈斯断裂带水深 2.5 km 处发现海底热液喷溢口;1978 年,美法联合使用 Cyana 号,在 21°N 的东太平洋海隆首次发现热液硫化物;1979 年,美国 Alvin 号再度下潜,发现了“黑烟囱”及其喷溢口周围呈环带状存活的生物群落,在载人深潜器技术上虽然落后于日本、法国、俄罗斯,但在

收稿日期:2012-04-12

作者简介:莫 杰(1937—),男,研究员,主要从事海洋区域地质和情报战略研究工作。E-mail:hdmoj@163.com

AUV 无人无缆水下机器人(如具有多功能的 ABE 作业深度达 6 km)可应用于大深度、长航程和遥控遥测及军用^[5];2010 年,美国研制了一台作业深度达 9 km 的缆控作业型深潜系统。

2 日本:最先进的深海钻探船

日本在深潜器技术和运载系统方面居世界领先地位。日本的“地球”号(Chikyu)是目前世界上最先进的深海钻探船。“Chikyu”(5.7 万 t)能向海面下伸长 1 万 m,在 2.5~3 km 水深海域也能钻探到海底地壳下约 7 km 处的地幔。船上配备先进的设备,如 Deep Tow(4 km、6 km 级)深海曳航照相/声呐系统,可进行海底地形、地质、热液、资源等走航探测;液压活塞取样系统从海底钻取的岩心,就可以现场分析岩心的内部结构^[6]。“Chikyu”除了帮助人们探究地球形成和大地震发生的机理,通过分析地幔的物质成分来预测地震外,还担负着研究地下生物圈以探索生命起源,以及追踪过去气候变化的痕迹的任务。

日本引以自豪的载人深潜器(HOV, Shinkai 深海 6500)和水下机器人技术(AUV、ROV)也广为应用于深海探测中^[7,8]。自治式深海探测器“浦岛”号(Urashima)可根据内置计算机预先设定的程序,计算自己的定位,自行走航。“浦岛”能够在更广阔的海域范围内自动收集研究全球气候变暖机制所必需的海水盐分浓度、水温等数据。万米级遥控无人探测器“海沟”号(Kaiko)在建造完成后不久,于 1995 年 3 月就成功潜航至马里亚纳海沟 10.911 4 km 的深处。Kaiko 确认了海沟断崖和存活在 3.5~10.987 km 的深海极端环境下的 6 种有孔虫,并在马里亚纳海沟底部发现了约 180 种微生物。日本的区域性实时地球监测网(ARENA),可为研究地壳变动、地震机理、古环境和生命基因等提供实际的资料。

为调查其专属经济区的海底资源,日本正在研发新一代无人深海探测器,作业深度可达 2.5 和 4.5 km。它可按照预先设定的路线程序潜入海里,在离海底 50 m 的高度使用声波扫描地形,获取精确数据。近年投入使用的 2 台水下机器人除了探测海底热液矿床外,还可以对 Cu、Zn、Au、Ag、Ge、Fe、Mn、Co、Ni 等矿物资源进行探测。有

望在大洋海底发现锰、钴、铅、锌和其他稀有/稀土金属矿。

3 巴西:一流的深海油气勘探开发技术

巴西可用于 3 km 水深的半潜式钻井综合平台已研制成功,这意味着大部分陆坡地区可以进行深水油气勘探开发。目前巴西国内开采的石油 80%来自海上油气田,其中绝大部分集中在东南部里约热内卢州沿海的坎普斯海盆,东北部桑托斯盆地盐下层系(Guara 海区拥有 10~20 亿桶石油储量)和邻近海域(占巴西国内石油产量的 85%)。近年由于在盐下层系发现丰富的油气藏,估计巴西石油储量在 500~800 亿桶将足够开采 50 a。

经过多年的发展,巴西国家石油公司在深海和超深海勘探开发领域具备了世界顶尖的技术水平。该公司不断刷新世界深海油气勘探开发的水深纪录(最深达 3 051 m)。如利用 3D 地震技术陆续发现了大批深水油田,其中有 4 个是可采储量大于 1 亿 t 的大型油田,可采储量共达 13.51 亿 t。

为了提高自身在 >1 km 水深级别的石油勘探和生产技术的国际竞争力,巴西国家石油公司于 1986 年推出了第 1 个深海石油技术发展计划(PROCAP)^[9]。到 2000 年,其目标直指水深 2 km 以上的超深海油田,力图早日使在水深 3 km 的海底进行商业开采变为现实。目前水深 2 km 以下海底石油商业性开采已经实现,水下机器人可将采油设备运到海底安装,输油管将油井与海面上的油船连接,开采出来的原油就源源不断地输送到海面上的油舱。

2007 年 11 月,巴西国家石油公司成功研发出一种新型的海底原油开发技术^[10],可使深水重油开采量提高近 140%。这项“海底离心泵系统”新技术可日均产出 2.4 万 L 原油,而利用常规技术(采油树)时其产量仅为 1 万 L。这种离心泵系统还可延伸到传统技术无法触及的小型、边缘和深水域的油气田。

4 俄罗斯:深海载人潜水器有优势

俄罗斯的载人深潜器一直处于比较领先的地位。前苏联就已拥有深海运载器和平1号(MIR-I)、和平2号(MIR-II, 6 km)、Pisces(2 km)和MT-88自治水下机器人(6 km)^[7,11]。近20年来,MIR-I和MIR-II在太平洋、印度洋、大西洋和北极海区共进行了20余次科学考察,包括对失事核潜艇“共青团员”号核辐射的定期监测、泰坦尼克号(Titanic)沉船的海底调查和洋中脊水温场地热流的测量,MT-88探测器曾多次下潜到太平洋5.2 km大洋盆地多金属结核矿区进行勘查。

和平1号潜水器最深达水下6.17 km,可持续作业14 h,和平2号潜水器可深潜6.12 km。俄罗斯的2台潜水器可以放在同一条科考船上进行必须由2台潜水器操作的科考活动,这是其他国家无法实现的。2007年8月,俄罗斯北极科考队使用深潜器,在北极点下潜至超过4 km深的海底,安插了一面金属制作的俄罗斯国旗,充分显示了俄在深海潜水技术上的优势。俄罗斯还打算在6 km深海载人潜水器的基础上,进一步研发水下超万米的探测器。

1991年,俄罗斯建造了“北冰洋陆架号”第1艘海上钻探船,用于海上油气勘探开发活动。随后又建造了可在2~3 km水深作业钻探平台,用于勘探开发深海油气资源。2000—2005年,俄建造了5艘2万t级双壳体深海地质勘探船和3艘2.5万t级深海矿物探测船,并装配有探测海底硫化物的遥控水下机器人。俄研制的海底采矿和扬矿样机已进行了200 m水深的海上试验,深海试验的集矿机模型和管道提升试验在室内进行了6 km压力试验。此外,还进行了用于海底山钻结壳采矿机的研制。

5 欧洲各国:深海技术各有特长

在深海勘探和开发领域技术领先的国家远不止美、日、巴、俄4国,一些西欧和北欧的国家也各有擅长之处。在深海石油勘探开发方面,英国和挪威的钻采平台自给率达到80%,虽然平台装备

的钻井、井探、固控等设备及海底完井设备大部分来自美国、法国和巴西,但他们分别在定位技术、钻机顶部驱动技术方面具有领先优势。

英国的深海采矿技术主要为试验性开采系统,主要由泵吸采矿机、吊桶链或无人遥控潜水器组成。对大洋多金属结核主要采用3种采矿方法,即连续链斗法、水力升举法和空气升举法。通过进行比较研究和现场试验,认为空气升举法是开采结核的较好方法(每天可提升矿石产量达1万t)。同时,还对红海金属软泥进行大量的调查研究。此外,英国研制的远程侧扫声呐GLORIA测绘系统处于世界领先地位^[4-6]。它在5 km水深测量时,侧扫宽度可达60 km,每个工作日可探测海底2万km²,是一种有效的大面积快速海底地形地貌探测工具,已广泛用于世界各深海洋海底调查,并发现了一些新的海底峡谷、海底山和火山。

法国的高压石油软管制造技术,半潜式、自升式钻井平台建造技术和深潜技术等著称全球^[4-6]。法国拥有载人的深潜器鹦鹉螺号(Nautile, 6 km)、La Cyane(3 km)、ROV探测器Epaulard和Victor自治水下机器人(6 km)。Nautile先后下潜过700余次,Cyane也有1500次的深潜纪录,Epaulard完成了150个航次下潜。先后共同完成了大洋多金属结核区域、海沟、海底火山、洋脊热液和深海生态的等调查或探测。

德国拥有的“北极星”、“流星”和“太阳”号都是常年在世界深海洋作业的调查船,可从事海洋、地质、大气等领域研究。其中“太阳”号是第1艘具有动力定位系统的调查船,船上装备包括回声测深仪、沉积物探测仪、卫星导航系统、联网的计算机系统、荧光分光光度计、衍射仪等,可同步进行海洋地质、地球物理、地球化学等方面的综合性调查。德国的石油钻井设备制造技术及仪器仪表技术亦堪称世界一流水平^[4-6]。

欧洲意大利的海底铺管技术、管线涂敷技术,瑞典的动力定位海底铺管技术,荷兰的大吨位海上浮吊技术及海底工程地质调查技术等均可称冠于世界前列。

英、德、法等国制定了“欧洲海底观测网计划(ESONET)”进行长期海冰变化,生物多样性和地震活动观测。

6 亚洲:奋起直追进入前列

近20年来,中国在深水油气勘探、天然气水合物探查、大洋矿产资源勘查和深海运载技术研究开发领域取得若干重大进展、突破和新发现,在深海技术及其相关探测仪器装备方面取得一系列重要成果。

6.1 中国:深海技术跻身世界前列

6.1.1 深水油气勘探技术

在深水油气勘探方面已拥有首座深水半潜式钻井平台COSLPIONEER(中海油服先锋),作业水深750 m,钻井深度7.5 km,钻井设备具有全自动钻进功能。2010年中海油又建成了第6代深水3 km半潜式钻井平台“海洋石油981”号,最大作业水深3.05 km,钻井深度可达1万 m,几乎可以在全球所有深水区作业,最近在南海首次独立进行了深水油气勘探。目前,中海油已掌握了300 m水深的油气勘探开发成套技术体系,已具备了在1.5 km水深条件下作业能力,并正积极向3 km水深迈进。

自主研发的单船长电缆大容量震源地震和相应配套技术以及OBS海底地震探测技术,形成了一套深水海域油气地震勘探系列^[9,10],并在深水海域中深层油气勘探中成功应用,继荔湾3-1后又发现深水流花34-2、流花29-1大气田。这项技术获取的中、深层资料反射信息清晰、可靠。单船实施的深部地震探测效果达到甚至超过以往双船探测效果。中深层高分辨率地震勘探技术、海上多波地震勘探设备和成像测井系列仪器达到国际先进水平、跻身世界前列,打破了国际技术垄断。

国家863计划“天然气水合物勘探开发关键技术”的科技攻关,取得了一批具有自主知识产权的创新性成果^[12],包括:海底高频地震仪(HF-OBS)、多路OBS精密计时器及配套设备;热流原位探测技术(剑鱼I型海底热流原位探测系统、飞鱼I型微型温度测量仪和海底热流原位立体探测系统);流体地球化学现场快速探测技术。发现了南海北部陆坡神狐海域天然气水合物,并于2007年成功钻获“可燃冰”实物样品。评价了资源潜力,预测资源量194亿m³,确定了东沙、神狐2个

重点目标区,共圈定11个矿体,含矿区总面积22 km²,矿层平均有效厚度为20 m。

6.1.2 大洋科考探测技术

目前,中国拥有大洋综合科考船“大洋一号”、“海洋六号”和极地科考船“雪龙”号,并配有各种先进的探测仪器、设备和装置。从20世纪90年初开始了深海大洋和南、北极综合科学考察和大洋矿产资源、深海生物基因资源调查研究。近15年来自主研发了一批海底探查新装备:如沉积物捕获器(浅水 ≤ 200 m、深水 ≥ 3 km);水下拖曳式多道伽玛能谱仪;海底大地电磁探测系统(4套仪器水深分别为:166、280、230、1 050 m);20 m长岩心重力活塞取样器(水深703 m处,获取17.11 m长柱状岩心,取心率达91.3%);ST-6000深海拖曳观测系统(装有水下电视摄像、照相、测高仪等)^[13]。

水下DGPS高精度定位系统(水平定位精度5 cm,测深精度30 cm);6 km水深高分辨率测深侧扫声呐(HRBSS)系统(垂直航迹分辨率5 cm、最小可检测高度10 cm),能够获得高分辨率的三维地形图和地貌图;深水声学拖曳系统(作业水深4 km,测深覆盖范围600 m、侧扫覆盖范围800 m,垂直航迹分辨率5 cm,最小可检测高度10 cm);机载海洋激光荧光雷达系统;深海彩色数字摄像技术系统(作业水深6 km);6 km海底有缆观测与采样系统——GHTVG-01型电视抓斗(作业水深4 km,抓样面积为1.5 m²,单次取样数量可达800 kg以上);电视多管沉积取样器(水深5 km,采样管中沉积物长度为30~40 cm),深海浅地层岩心取样机(水深4 000 m,取心直径60 mm,钻孔深度700 mm);深海底中深钻孔岩心取样机,在2011年“大洋一号”第22航次第1航段的东沙海域1 740 m海底成功获取岩心样品,并创下了15.7 m的深孔纪录^[14]。

6.1.3 深海运载技术

中国深潜运载技术的研发起步较晚,但近20年来发展较快,在ADS、ROV和AUV等多种深潜器研发方面取得了实质性进展和突破,已基本具备研制各种深潜器、水下机器人的能力。

在常压载人ADS方面,最早研制成功可下潜水深300 m的QSZ-I型潜水器。在此基础上又研制成QSZ-II(QSZ-I的改进型)。它既可

用作观察型载人潜水器,也可用作观测型ROV使用。

2002年正式启动研制首台自主集成的载人深潜器“蛟龙”号^[15],于2010年7月在南海海域经36次下潜,由50、300、1000、3000 m,直至第37次下潜到3759 m,创造了水下和海底作业9 h 3 min的纪录。2011年7月,“蛟龙”号在东太平洋“中国多金属结核矿区”5次成功下潜深海,连续突破4027、5057、5180、5184、5188 m水深记录。5 km海试成功,意味着“蛟龙”号可以到达全球超过70%的海底作业。2012年6月,“蛟龙”号将赴太平洋马里亚纳海域冲击7 km设计最大水深纪录。“蛟龙”号在技术上拥有3个优势:①具有先进的近底自动航行和悬停定位功能;②具有高速水声通讯功能;③充油银锌蓄电池容量大,可保证水下足够作业时间。

在AUV方面,国家863计划从1990年起先后研制了1 km和6 km样机。1997年,中俄合作研制的“CR-01”水下机器人(6 km);2003年第2台6 km水下机器人(CR-02),经对太平洋进行多金属结核调查,取得十分满意的结果。

在ROV方面,自行研制的中型水下机器人(ROV)可在300 m水深进行摄像、观测、测量等,具有作业时间长、范围广、安全性高、测量数据直观、事后处理和分析容易等与其他设备无法比拟的优势。2003年7月,这台水下机器人在第2次北极科考进行了冰层厚度等一系列科考示范应用。自主研发的3.5 km无人缆控潜水器(ROV),2011年在“大洋一号”第22航次第2航段中进行了2 km水深海底作业,圆满完成了对南大西洋多金属新区的探测,成功采集了热液硫化物和生物样品,并同步拍摄了高清晰海底照片和作业全程视频图像。此外,还研制出第1台混合型水下机器人(ARV)样机和水下滑翔机功能样机。这标志着中国在大洋科考研究装备技术达到国际先进水平,进入“机器人时代”。

6.1.4 大洋科考成果丰硕

在深海大洋领域,中国拥有的先进深海技术及仪器装备已跻身世界前列。先后在东北太平洋CC区获得联合国海底管理委员会(ISA)批准一块7.5万km²的多金属结核优先开采矿区(1999年)。至今,“大洋一号”、“海洋四号”和“海洋六

号”在太平洋、大西洋和印度洋共进行了23个航次调查,除对深海盆地的结核和海山的钴结壳进行调查评价外,还在三大洋洋脊两侧共发现海底热液和热液硫化物矿点共30多处,其中第22航次(2010年12月8日—2011年12月11日)发现16个海底热液区(南大西洋5处、东太平洋11处)。该航次使用国产仪器设备综合锚系浮标观测系统、拖曳式资源综合探测系统及中深孔岩心取样机^[16],从西太平洋某礁水下2550 m采到砾状结壳,从东太平洋海隆1647 m水下获得了海底岩心,从南太平洋洋脊2562 m采集了玄武岩,还使用抓斗从2901 m的海底抓到一块重达500 kg以黄铁矿和闪锌矿为主的硫化物样品。

2011年7月19日,国际海底管理局(ISA)批准了中国提出要求勘探国际海底区域的多金属硫化物矿的申请。同年11月8日,中国大洋协会与ISA签署了为期15年的矿区勘探合同。根据合同中国获得了一块位于西南印度洋洋脊,面积为1万km²具有专属勘探权和商业开采优先权的国际海底合同矿区。

6.2 韩国:深海石油钻探船技术领先

韩国于2007年6月使用“探海2号”船,在其附近海底采到“可燃冰”,成为继美国、日本、印度和中国之后第5个采集到实物样的国家。2010—2015年韩国正在研发6 km深海探矿机器人。韩国三星重工业公司拥有建造深海石油钻探船的独到技术。迄今为止,全球共发出17艘深海石油钻探船的订单,三星获得其中的11艘,其竞争实力可见一斑。

参考文献:

- [1] 莫杰. 海洋地学前缘[M]. 北京:海洋出版社, 2005.
- [2] 国家海洋局海洋技术研究所. 海洋开发技术进展(1997—1998)[M]. 北京:海洋出版社, 1999.
- [3] 苏纪兰, 许启望. 海洋与海洋科学技术[M]. 北京:法律出版社, 1991: 154-181.
- [4] 刘准. 国外深海技术发展研究(一)[J]. 船艇, 2006(10): 6-8.
- [5] 刘准. 国外深海技术发展研究(二)[J]. 船艇, 2006(12): 18-23.
- [6] 刘准. 国外深海技术发展研究(三)[J]. 船艇, 2006(14): 16-23.
- [7] 陈应珍. 国外海洋机器人技术发展动态[J]. 海洋信息,

- 2001(4): 21.
- [8] 莫 杰. 海洋探测高新技术向立体化发展[J]. 海洋信息, 2002(1): 20-22.
- [9] 莫 杰,高 平. 海洋油气勘查现代技术方法综合应用现状及发展趋势(上)、(下)[J]. 中国海上油气(地质), 2002, 16(2): 137-140.
- [10] 陈 楠. 当今国外深海石油勘探难点技术及发展趋势[J]. 中国石油勘探, 2010(4): 71-75.
- [11] 高振会,史先鹏. 深海技术与可持续发展[J]. 海洋开发与管理, 2011, 28(7): 45-50.
- [12] 杨胜雄,张光学. 海洋天然气水合物综合勘测技术[M]// 海洋探查与资源开发技术(科技兴海丛书·三). 北京:海洋出版社, 2001: 179-183.
- [13] 王志雄,莫 杰,高 平. 海底地质勘查现代技术方法的应用现状及发展趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(2): 109-114.
- [14] 高 平,莫 杰. 我国海洋探查高新技术的跨越式发展[J]. 国土资源科技管理, 2002(1): 17.
- [15] 崔维成. “蛟龙”号载人潜水器关键技术研究与创新[J]. 船舶与海洋工程, 2012(1): 1-8.
- [16] 阳 宁,陈光国. 深海矿产资源开采技术的现状综述[J]. 矿山机械, 2010(10): 4-9.

GLOBAL ADVANCE OF DEEP-SEA TECHNOLOGY

MO Jie, XIAO Fei

(Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)

Abstract: Since the 1960s, deep-sea technology has got great progress in developed countries, for instance, the research vessels, drilling platforms, survey instrument and equipment, AUV/HOV/ROV, submersibles, corers and samplers, and seabed monitoring systems. The advance of technology makes scientists possible to probe the unknown part under the ocean in wider range and deeper depth, in particular in the fields of deep-sea extreme environment, earthquake mechanism, deep-sea biology, mineral resources, and deep water deposits and structures. In this paper, we briefed the major achievements of deep water technology in the USA, Japan, Brazil, Russia, European countries, South Korea and China.

Key words: deep-sea technology; development; deep-sea and ocean; world