



深海矿产资源载人深潜抵近探测新技术

丁忠军^{1,2}, 张奕^{1,2}, 史先鹏², 李德威², 赵庆新²

(1. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 国家深海基地管理中心 技术部, 青岛 266237)

摘要: 针对深海金属矿产资源勘查研究需要, 从海底金属矿产资源的生长环境特征出发, 系统地综述了深海资源勘查研究面临的技术难题、载人潜水器的技术优势和先进传感探测技术的发展现状, 结合蛟龙号载人潜水器科学应用成果, 提出了基于深海高频超声技术、图像处理技术以及激光探测技术载人潜水器的海底抵近探测技术方法。实验研究证明, 该类技术稳定可靠, 可为深海金属矿产资源详勘提供更有力的技术支持, 拥有广阔的应用前景。

关键词: 载人潜水器; 多金属矿产; 抵近勘查; 原位探测

文章编号: 1004-0609(2021)-10-2757-14

中图分类号: P71

文献标志码: A

引文格式: 丁忠军, 张奕, 史先鹏, 等. 深海矿产资源载人深潜抵近探测新技术[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2757-2770. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37994

DING Zhong-jun, ZHANG Yi, SHI Xian-peng, et al. New technology of manned submersible approach exploration for deep sea mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2757-2770. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37994

深海拥有大量的矿产资源, 主要包括铁锰结核、富钴结壳和多金属硫化物等, 其中铁锰结核, 又称多金属结核, 广泛分布在深海海盆, 尤其太平洋最为丰富; 富钴结壳主要分布在水深 800~2500 m 之间没有沉积物覆盖的海山及其斜坡上; 海底多金属硫化物主要形成在大洋中脊和活动海山的热液喷口区^[1]。

研究发现深海矿产资源储量巨大, 东北太平洋 CC 区(Clarion-Clipperton Zone), 中印度洋盆、库克群岛海区和秘鲁海盆^[2]等海区具有大面积的高品位锰结核, 仅 CC 区估计锰结核储量高达 210 亿 t; 估计西北太平洋有 50000 座海山具有结壳分布, 该区域发现了最富的结壳矿; 海底硫化物矿具有全球特征, 目前已知的活动热液点接近 500 个, 估计数量可能提高数倍。根据目前已知海底硫化物矿藏研究结果, 估计在现代海底可能存在 1000 到 5000 个大

型硫化物矿^[3]。

随着深海资源勘查评估工作的不断深入以及深海采矿装备技术的持续发展, 深海矿产资源勘探开发活动进入了高度活跃时期, 从国际海域矿区申请来看, 由 2010 年的 7 块矿区猛增到了 2019 年 29 块矿区(ISA)。深海资源勘探开发活动开始进入勘查到开采的过渡时期, 详细勘查显得异常重要。新时期对资源勘查的技术手段提出了更高的要求。

深海载人潜水器由经过专门训练的人员操作, 机动灵活, 并且可搭载科学家进入海底进行抵近观察研究, 与常规资源勘查手段相比, 可实现更精细的勘查研究。蛟龙号载人潜水器自 2012 年 6 月, 完成 7000 m 级海试后, 立即进入了试验性应用阶段, 连续执行了多个大洋资源勘查任务, 覆盖了结核、结壳和多金属硫化物等多种资源, 在深海资源环境领域取得了一系列科学发现, 充分验证了其在

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0306600)

收稿日期: 2021-06-03; **修订日期:** 2021-09-09

通信作者: 张奕, 工程师, 硕士; 电话: 18561891867; E-mail: zy592@ndsc.org.cn

深海资源勘查领域的技术优势。

然而,载人潜水器作为深海探测平台,其应用技术需要不断地研究开发,本文作者针对新时期大洋资源勘查研究需要,从深海矿产资源生成环境、潜水器所具有的独特技术优势和现代感知技术发展趋势出发,系统地开展了深海矿产资源载人深潜抵近探测技术研究,提出了新的基于载人潜水器平台的近底声学、光学和电学探测技术方法。航次现场应用证明,该技术方法对今后深海矿产资源勘察研究具有直接的推动作用。

1 深海矿产资源及其生成环境

1.1 多金属铁锰结核

多金属铁锰结核,主要分布在4000~6000 m的大洋深水区。从资源开发利用的角度出发,勘查研究所关注的焦点主要是丰度和品位。

目前研究表明,深海多金属结核不同区域的丰度和品位变化极大,甚至同一区域也存在极大的差异。例如,CC区(Clarion-Clipperton Zone)结核丰度湿重0~30 kg/m²,平均15 kg/m²,秘鲁海盆锰结核丰度平均10 kg/m²,而在4250 m水深区最大丰度高达50 kg/m²。库克群岛海域结核丰度19~45 kg/m²,在个别区域最大可达58 kg/m²;中印度洋海盆结核富集区平均丰度为4.5 kg/m²。同时,不同区域结核的品位差别也相当大,如秘鲁海盆结核镍、钼含量与CC区类似,但铜、钴和稀土含量较低,锂锰含量较高,印度洋结核区包括几个不同的扇区,不同的扇区Mn/Fe质量比在1.8到4.8之间变化,而Ni、Cu、和Co的总含量基本不变,在2.48%和2.53%之间,而库克群岛含有大量的钴(0.41%)、钛(1.20%)、REY(0.17%)、锆(524 μg/g),但镍、铜含量较低^[3]。

目前,有关结核分布丰度和品位的研究取得了一系列成果,得到了一些较深入的认识。一般认为结核丰度和品位无非是由成矿环境和机制决定的,如印度洋结核丰度的极其不平均,与该区域存在大量的海山和断层相关。长期不变的深海环境,海底和沉积物内氧的状况长期不变,导致了秘鲁海盆慢速生长结核的生成^[4]。一方面结核丰度本身需要利用高科技手段机型详细勘查,同时深入解决有关结

核丰度和品位的成因,也需要利用载人潜水器等高新技术进行抵近观察和精细取样测测研究。

1.2 铁锰富钴结壳

铁锰富钴结壳生长在硬的基岩上,如火山玄武岩碎屑、碳酸盐-氟磷灰石、石灰岩、以及固结的黏土沉积物,是在有氧环境下冷海水直接沉积形成的,形貌在厘米-分米尺度变化,厚度可达25 cm,代表了不同的生长年代。富钴铁锰结壳在全球大洋均有发现,估计西北太平洋有50000座海山具有结壳分布,该区域发现了最富的结壳矿,南太平洋、大西洋和印度洋的结壳也被研究过。中太平洋海盆海山斜坡上采样发现的结壳,厚度达8 cm^[5]。

富钴结壳主要生长在海山的山顶、斜坡和台地上,如水下海底火山山脉、平顶海山等,这些区域由于洋流的作用几百万年鲜有沉积物沉积。厚的富金属结壳一般生长在海山山顶外缘、海山平台以及山脊上。海山斜坡阶地也有结壳分布,经常伴生生成作用结核,还有一些小的结壳碎片。具有经济利益的结壳一般钴镍含量较高,大多分布在水深800~3000 m。

结壳的分布和组成是复杂的,主要受海山地貌、海流、物质坡移、基岩类型、沉积年龄、沉降历史以及气候影响造成的大洋表层生物生产率。潜在矿区的确定最终依赖结壳的分布、矿区小尺度形貌、矿物品位、储量以及水深范围。富钴结壳的生长环境及其特征要求载人潜水器等深潜装备投入应用以实现抵近海山区定点精细探测研究。

1.3 多金属硫化物

海底多金属硫化物是海底热液活动的产物。海底热液系统分布及海底硫化物矿具有全球特征。估计在现代海底可能存在1000到5000个大型硫化物矿^[2]。海底硫化物矿所处位置具有显著的地质多样性,如大洋中脊和岛弧系统。三分之二的热液系统与洋中脊相关联,三分之一的与岛弧系统相关联,两类构造系统长分别约66000 km和22000 km^[6]。

海底硫化物矿藏的形貌由热液系统的演化阶段及其所处的不同的地质背景决定的。黑烟囱是典型的热液矿藏形成的初级阶段,已发现的黑烟囱高度从几厘米到几十米。在中速扩张的胡安·德富卡洋

脊发现的玄武岩为主的活动喷口, 陡峭的硫化物烟囱体一般几十米高, 存在多个活动的高温流体排放点^[5]。在慢速扩张的大西洋中脊发现了像森林一样的超基性岩烟囱堆积体。除了烟囱外, 在 TAG 热液区和其他的热液区还发现了类似蜂窝状的热液喷口。

经过一段时间, 热液烟囱坍塌, 硫化物碎片堆积成为小丘, 即硫化物堆积体。丘状结构物及其周围破碎的烟囱体在加拉帕戈斯和胡安·德富卡洋脊广泛分布, 胡安·德富卡洋脊 Zephyr 小丘高 26 m 直径达 90 m, TAG 热液区的 Mir 小丘高 40~50 m, 直径达 200 m, 除了洋中脊外, 直径几百米^[7]。高数十米的巨大的硫化物丘状堆积体也在其他地质背景被发现, 如 Middle 裂谷和 Okinawa 海沟。硫化物堆积体最终聚集成堆, 形成矿体^[8-9]。

多金属结核、富钴结壳以及多金属硫化物等深海海底金属矿产资源赋存环境, 如深海盆地、海山和热液烟囱区, 均极其复杂, 并且成矿机理及分布特征仍然需要深入研究。载人潜水器所具备的可搭载科学家进入海底复杂环境作业的优势, 使其成为深海资源勘查研究, 尤其详勘的重要技术手段, 国际上包括阿尔文号、和平号、鹦鹉螺号以及深海 6500 号在内的大深度载人潜水器一直活跃在深海资源勘查研究第一线。

2 载人潜水器资源勘查优势

载人潜水器早期是 1920 年代开始发展起来的, 最初只能上浮下潜, 在有限的范围内调查研究, 到了 20 世纪五六十年代发展到了高峰, 仅仅美国就有上百条载人潜水器活跃在海洋科研和开发领域, 此时, 新一代载人潜水器诞生, 即现代载人潜水器, 其具有体积小、重量轻、水下导航定位功能强大, 可长时间大距离潜航作业。本文以蛟龙号载人潜水器为例, 主要研究一直活跃在深海调查研究现场的第二代大深度载人潜水器在深海金属资源勘查方面的技术优势。

2.1 载人潜水器基本特征

载人潜水器是自带能源与动力的可以运载科学家和工程技术人员进入深海海底进行观察和作

业的小型运载装备, 现代载人潜水器一般具备足够多的水下摄影摄像设备, 安装有一到两套多功能机械手, 具备水下高精度导航定位能力和通信能力, 可搭乘 2~3 人在水下工作 12 h 以上, 具备足够的生命支持能力, 具备强大的光、机电作业工具接口, 有的载人潜水器固定安装有声学调查设备和温盐深水文调查设备, 如蛟龙号及其衍生的深海勇士号和奋斗者号等深海载人潜水器, 具备良好的水面平台适配能力。基本技术指标可参考蛟龙号载人潜水器^[10](见表 1)。

2.2 复杂环境近底勘查

随着深海运载技术的发展, 无人缆控潜水器—ROV 以及无人自治潜水器 AUV 等系列深潜装备蓬勃发展, 在一定程度上替代了载人潜水器的功能。然而, 载人潜水器在复杂环境下近底勘查作业技术优势仍然是其他类型潜水器无法超越的, 与 ROV 相比较, 由于载人潜水器没有几千米缆线的羁绊, 并且不需要母船功能, 其在复杂海底作业的机动灵活性是显而易见的, AUV 灵活性相对较高, 然而受目前自动控制技术发展的影响, 其复杂环境近底作业碰撞的风险依然很高, 且无法像载人潜水器那样无限接近海底勘查作业。

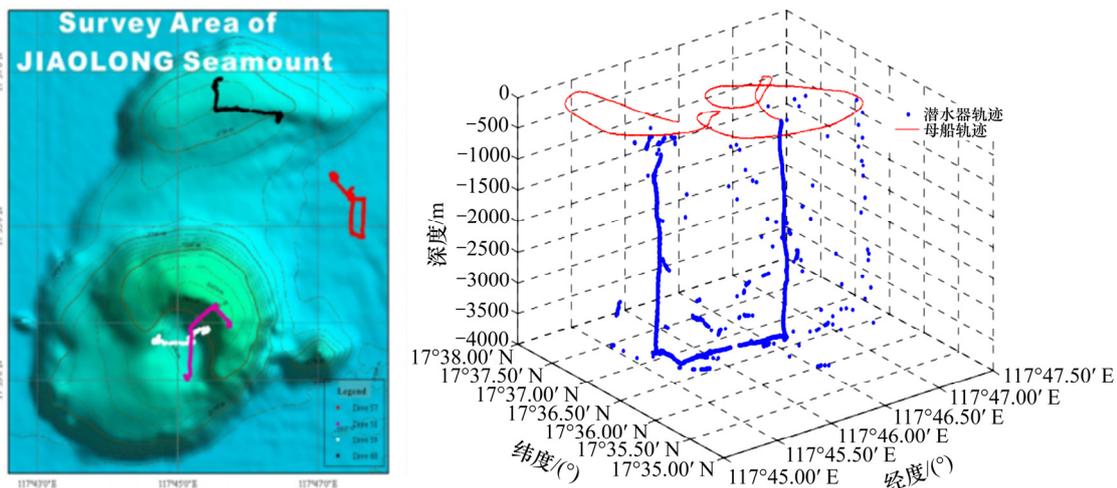
就深海金属矿产资源勘查研究而言, 新一代载人潜水器复杂环境近底勘查作业的技术优势取决于其强大的声学系统, 如蛟龙号载人潜水器, 其声学系统包括声学定位、声学通信、声学避碰以及声学勘查等系列设备。蛟龙号高精度水下声学定位包括超短基线和长基线两种水下定位方式, 无论实在富钴结壳勘查研究的海山区还是多金属硫化物勘查研究的热液烟囱区, 超短基线均可以发挥超强的水下定位优势^[11-13], 在多金属结核区, 长基线定位系统可以发挥更大的定位优势(见图 1)。

同时, 载人潜水器的避碰声纳系统为类似热液烟囱区的极端复杂环境近底勘查提供更进一步的安全保障。高速水声通讯技术是载人潜水器复杂海底高效安全勘查作业的又一利器。高速水声通信技术使载人潜水器与水面支持母船之间建立实时通信联系。通过这项技术, 母船可以根据作业任务需要向载人潜水器发出指令, 载人潜水器向母船传输各种数据、语音和图像。

表 1 蛟龙号载人潜水器主要技术指标

Table 1 Main technical indicators of Jiaolong manned submersible

指标名称	指标值
最大工作深度	7000 m
主尺度	长 8.6 m, 宽 3.9 m, 高 3.4 m
空气中重量	22.3 t
有效负载	220 kg
航速	巡航 1.0 节, 最大 2.5 节
使用海况	4 级
使用海区	7000 m 以浅
载人耐压球壳	钛合金, 内径 2.1 m
载员	3 人
水下逗留时间	12 h
生命支持时间	正常 3×12 人时, 应急 3×72 人时。
动力源	大于 100 kW·h
推进	4 只主推进管桨, 2 只垂推可回转管桨, 1 只侧推槽道桨
纵倾调节能力	±20°
液压	主液压源, 副液压源, 应急液压源
作业	1 只七功能主从式机械手; 1 只七功能开关式机械手
观察	成像声纳、测深侧扫声纳、水下摄像机、水下照相机、水下照明灯。
通信	水声通信机、水声电话、VHF 无线电通讯
定位	远程超短基线定位声纳、声学多普勒测速仪、测距声纳、GPS 水面定位
控制模式	手操、自动控制
应急安全	应急电池、应急抛载(可抛弃水银、机械手、电池、压载及应急浮标等)

图 1 蛟龙号第 60 潜次超短基线定位结果^[14]Fig. 1 Results of 60th sub-short baseline positioning of Jiaolong^[14]

近底声学勘查的分辨率远远大于水面探测, 载人潜水器固定安装的测深侧扫设备可以实现厘米级分辨率的海底微地形地貌测绘。这为深海矿产资源详细勘查提供有力的手段。图 2 所示为载人潜水

器某潜次测深图^[15]。

载人潜水器除了潜航员人工驾驶外, 还可以实现 3 种自动航行: 自动定向、自动定高和自动定深航行。这为深海矿产资源近底勘查研究提供过了有

力的基础保障。

2.3 定点取样探测

悬停定位技术可以使载人潜水器在不坐底的情况下与目标保持固定的距离, 方便机械手进行操作, 在海底洋流和干扰作用下, 载人潜水器可实现准确悬停定位, 目前属于国际领先的高端原位取样

技术。该技术与搭载的各类取样探测工具, 共同组成载人深潜精细取样系统, 可以进行海底沉积物取样、热液流体保压取样^[16-18]、海底地温梯度测量^[19]以及其他物理化学参数探测。其优势, 通过蛟龙号试验性应用得到了充分验证(见图 3)。

当然, 还可定点获取岩石样品、水样、沉积物样品、个别生物样, 回到母船进行科学研究。

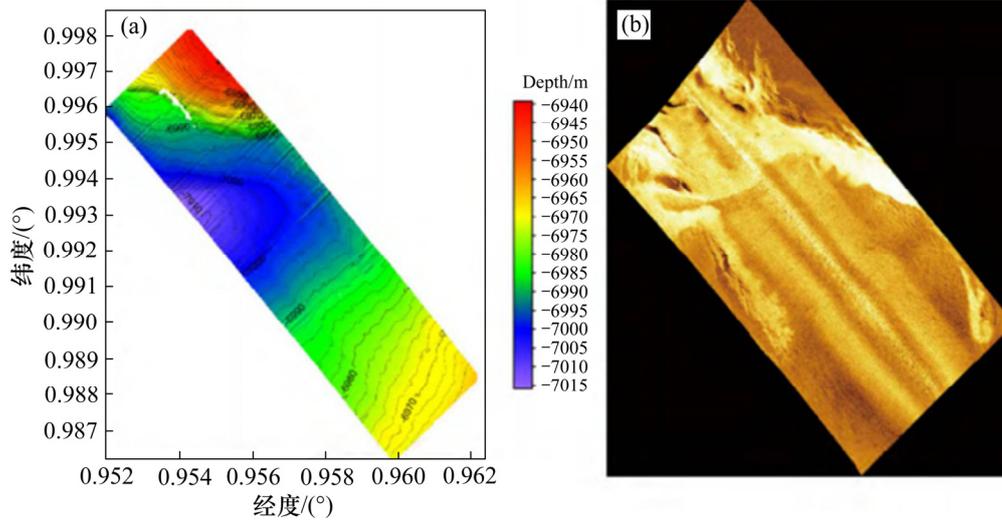


图 2 蛟龙号载人潜水器获得的海底微地形地貌图^[15]

Fig. 2 Submarine microtopography map obtained by Jiaolong manned submersible^[15]: (a) Micro-topography; (b) Sidescan

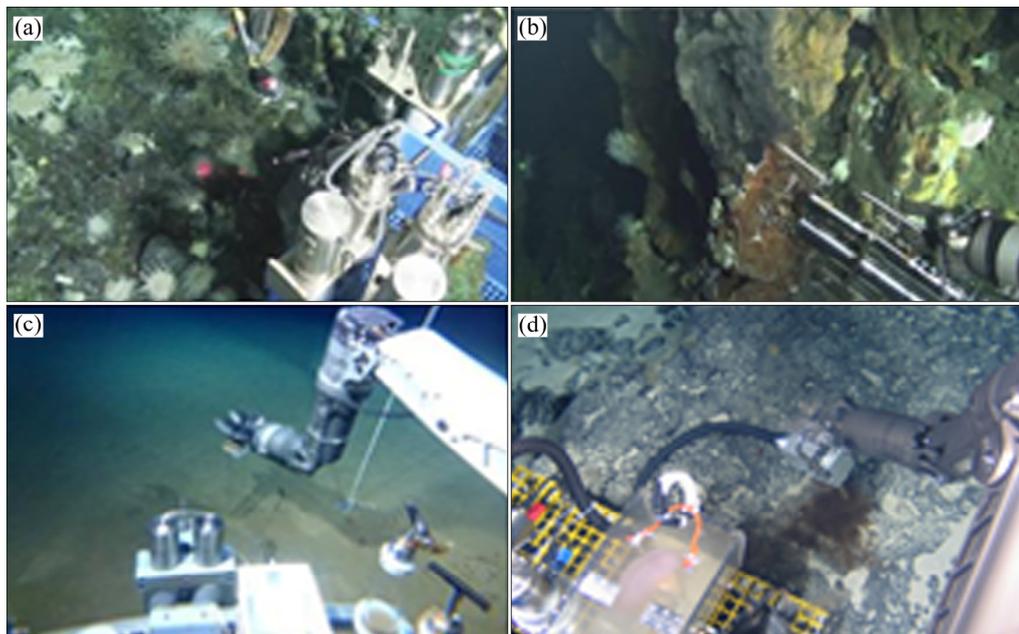


图 3 蛟龙号定点取样探测

Fig. 3 Jiaolong fixed point sampling detection: (a) Geothermal gradient detection; (b) Fluid sampling and chemical parameter detection; (c) Sediment sampling; (d) Fixed-point crust coring

2.4 实时跟踪观察

对于地质学家而言,任何技术手段都无法取代野外实地考察,任何高清影像设备也无法提供人眼直接观察获取的信息,人的眼睛是最好的传感器。载人潜水器最大的技术优势是搭载科学家亲临深海海底,近距离观察海底各种神奇科学现象,亲手操作各种作业工具进行取样和探测研究。是实现海洋地质学家海底“跑野外”的平台。

就深海资源勘查研究而言,载人潜水器可以搭载研究者亲临海底对多金属结核、富钴结壳以及多金属硫化物等矿产资源的赋存状态、生长环境进行实地勘查研究。同时,载人潜水器作为先进的水下观察和取样平台,均配备有高清摄影摄像系统,如蛟龙号载人潜水器,其水下照明设备,主要由5盏60 W LED灯、8盏250 W LED灯阵、6盏400 W HMI灯组成;摄像设备,主要由2台1080i高清摄像机、1台高清照相机、3台标清摄像机、1台微光摄像机,2台两自由度云台组成,高清视频和五路标清视频通过两路光纤传输到舱内,在在载人舱内进行数据融合、存储显示。研究者可在海底根据地质现象,随时调整载人潜水器航向,跟踪观察研究。

3 载人深潜抵近探测新技术

蛟龙号载人潜水器的成功研制应用,掀起了载

人深潜科技发展的高潮^[20]。4500 m级载人潜水器“深海勇士号”和万米级全海深载人潜水器“奋斗者号”先后完成研发,投入应用。围绕载人深潜海洋科学研究需要,一系列配套作业工具和探测技术快速发展^[21]。短柱状沉积物取样器(Pushcore)、宏生物取样器、保压流体取样器、热流探针以及小型浅钻等载人潜水器搭载仪器设备不断丰富。激光拉曼光谱仪、深海原位质谱仪、双目视觉系统等观测装备在载人潜水器上得到了成功应用。为进一步发挥载人潜水器资源勘查技术优势,满足深海资源勘查研究需要,笔者在前人研究的基础上,围绕海底精细地貌结构、多金属结核丰度、结壳生长特征以及热液活动研究需要,以最大利用载人潜水器本体传感器,实现现代高新传感检测技术与载人深潜优势互补为原则,开展了载人深潜近底探测技术研究。

3.1 三维结构光微地形测绘

由线性激光器向海底垂直发射激光条纹,激光条纹会根据目标表面的形貌起伏产生畸变,用高速高帧率摄像机获取含有畸变条纹的图像,实时提取条纹中心,与载人潜水器定位信息、姿态信息融合处理后,形成三维精细海底地形图,其工作原理见图4。

基于载人潜水器的三维结构光地形重建,其精

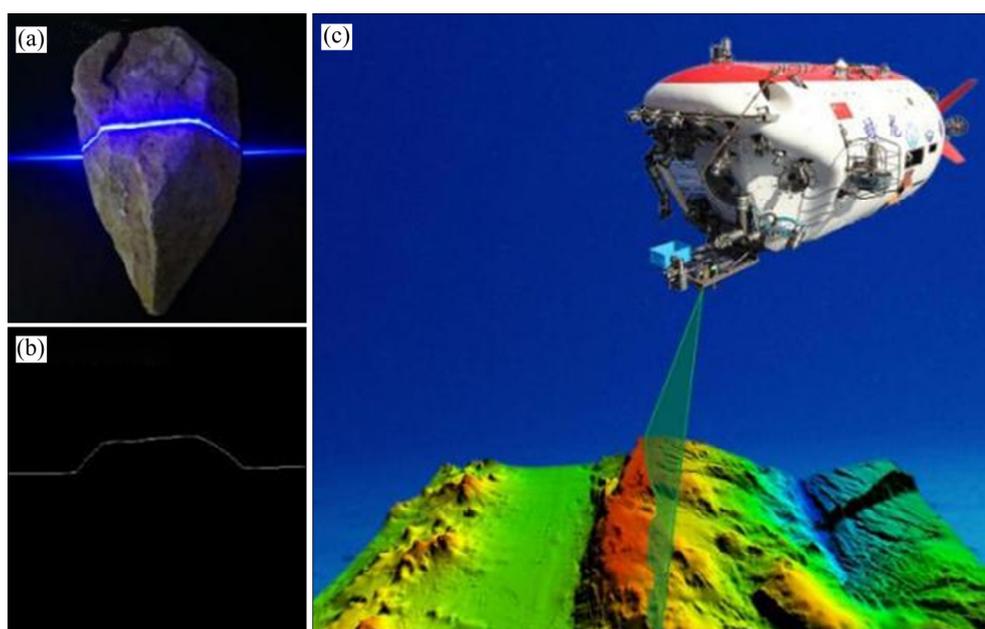


图4 水下勘查作业原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of practical application: (a) Actual image; (b) Centerline image; (c) Schematic diagram

度主要取决于激光条纹中心线提取、地形坐标转换和潜水器姿态矫正。

能够精确提取图像中激光条纹的中心线决定了重建结果的精度, 算法的运算量决定了重建的速度。条纹中心线提出了改进 Steger 算法, 即利用高斯卷积递归的方法来获得 Steger Hessian 矩阵, 再通过泰勒级数展开求解法线方向条纹中心, 可以在保证提取精度的前提下, 减小运算时间^[17]。

在计算 Hessian 矩阵时, 根据高斯函数的可分离性, 先后对图像进行行和列方向上的递归卷积, 得到 Hessian 矩阵:

$$H(x, y) = \begin{Bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial y^2} \end{Bmatrix} \otimes z(x, y) \quad (1)$$

Hessian 矩阵最大特征值对应的特征向量为光条的法线方向, 表示为 (n_x, n_y) , 以点 (x_0, y_0) 为基准点, 对光条横截面上的灰度分布函数进行二阶泰勒展开, 得到光条中心的亚像素坐标为: $(p_x, p_y) = (x_0 + tn_x, y_0 + tn_y)$

其中:

$$t = -\frac{n_x r_x + n_y r_y}{n_x^2 r_{xx} + 2n_x n_y r_{xy} + n_y^2 r_{yy}} \quad (2)$$

如果 $(tn_x, tn_y) \in [-0.5, 0.5] \times [-0.5, 0.5]$, 即一阶导数为零的点位于当前像素内, 且 (n_x, n_y) 方向的二阶导数大于指定的阈值, 则该点 (x_0, y_0) 为光条的中心点。

在对地形进行扫描时, 潜水器一般是在同一平面内航行, 不进行俯仰升降操作, 所以对重建精度影响最严重的是侧倾角和转向角。

当潜水器横摇时产生侧倾角, 视觉传感器会跟随发生旋转, 设图像的旋转中心是图像的中心点, 坐标为 (o_y, o_z) , 设源图像上任意点坐标为 (y, z) , 旋转后目标图像对若在极坐标下将图像顺时针旋转 ϕ , 根据坐标转换得: 应点坐标为 (y', z') 。

$$\begin{cases} y' = r \cos(\alpha - \phi) \\ z' = r \sin(\alpha - \phi) \end{cases} \quad (3)$$

将其转化成矩阵表达形式为

$$\begin{bmatrix} 1 & y' & z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & y & z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

在潜水器艏摇或航行转向时, 会产生转向角, 图像在 oxy 平面的坐标信息已偏离, 需要矫正到正确位置。视觉传感器由一帧图像获取的地形三维坐标点为 (X_t, Y_t, Z_t) , 若在极坐标下将图像顺时针旋转 θ , 根据坐标转换得

$$\begin{cases} X'_t = r \cos(\alpha - \phi) \\ Y'_t = r \sin(\alpha - \phi) \end{cases} \quad (5)$$

则经过坐标转换后图像上的点坐标为

$$\begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \left(T_t + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

本文提出的载人潜水器结构光三维地形探测技术, 仅需要在采样篮上加装一台水密激光器用于向海底投影线结构光即可。由载人潜水器已有高清摄像系统获取图像, 通过光纤传输至载人舱上位机系统, 进行图像处理, 实现坐标转化, 再根据潜水器的导航定位系统对图像信息进行矫正。系统分为视觉传感器部分、导航定位部分和上位机信息处理部分, 系统结构如图 5 所示。

为了验证重建原理的可行性, 本文采用步进电机驱动滑轨丝杠系统携带激光器和摄像头在室内水槽内对水下石块外形进行了模拟试验。实验平台如图 6 所示。

本文对石块进行测试, 以每秒 10 帧的速度拍摄, 整个石块扫描时长 15 s, $t=0.1$ s, $v=10$ mm/s, 图像间隔 $Z_i=1$ mm, 共获取 150 张图像, 将传感器获取的点云数据使用 MeshLab 进行重建, 得到结果如图 7 所示。

使用游标卡尺测量实际石块的部分区域的长、宽、高, 再与重建的结果相比较, 以检测实验结果的精度。检测发现, 重建整体精度达到 97.7%, 其中, 基于直接标定法的 Y 、 Z 方向精度更高, X 轴

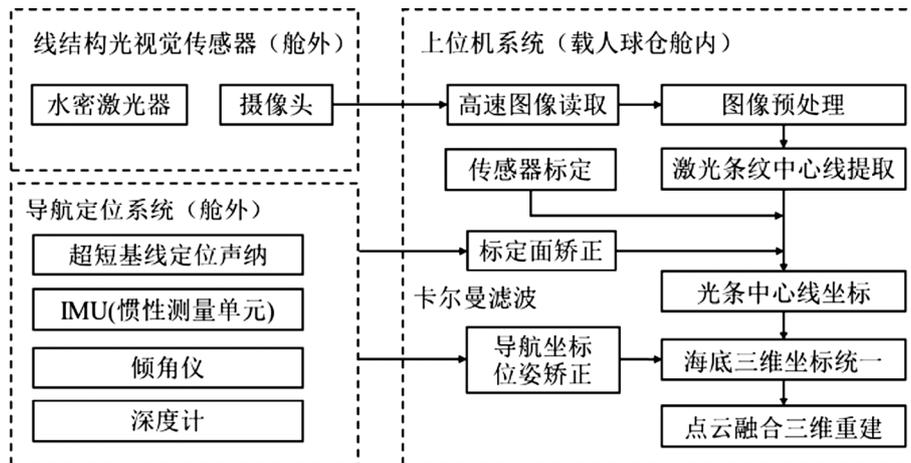


图5 系统组成结构图

Fig. 5 System structure diagram



图6 三维重建模拟平台

Fig. 6 Simulation platform for 3D reconstruction system

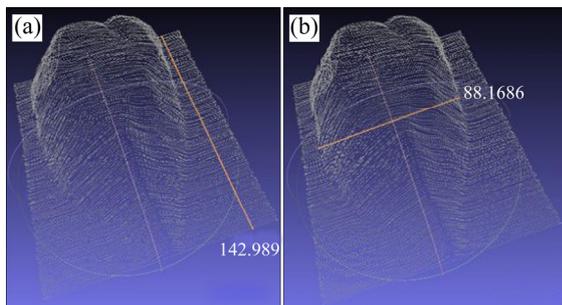


图7 三维重建效果图

Fig. 7 Results of 3D reconstruction: (a) Length; (b) Width

方向由于是根据传感器运动速度与拍摄时间间隔确定的,误差略大,实验结果满足工程应用要求。

3.2 多金属结核覆盖率实时测算

图像处理技术是多金属结核覆盖率测算的主

要技术方法,在深海多金属结核勘查研究方面得到了广泛的应用。

以光学图像为素材进行结核覆盖率统计多数依托于深拖系统,借助置于系统底部的照相机,在系统达到海底一定高度时触发拍照^[22]。海底深拖系统具有低成本、高效率的特点,受拖缆影响,机动灵活性交叉,定高控制具有一定的难度。ROV、AUV的发展为海底图像换取提供更有力的手段,极大地促进了结核覆盖率图像处理技术的发展。然而,与载人潜水器相比,在近底摄影照相作业方面,受导航控制技术的制约,以上装备机动灵活性仍然存在不足。蛟龙号试验性应用期间的近底勘查研究发现在CC区存在一些多波束系统难以识别的小型岩石露头,给水下运载平台近底自动航行航控制带来了挑战。基于载人潜水器在回路的特征,本文提出了基于载人潜水器的多金属结核覆盖率实时测算技术,充分利用载人潜水器的高清摄影摄像系统和定高自动航行技术,进行实时图像获取,其实时测算工作原理如8所示。

网格计数法是一种较早应用来确定目标区域所占面积百分比的统计方法,对图像进行划线形成网格图,通过人工记取目标区域所占格数并除以总网格数来计算百分比得到覆盖率,划线越多,网格越密,统计精度就越高,但随之工作量急剧增大,效率低下。

二值化法将灰度图像的256个亮度等级通过设置适当的阈值进行黑白化处理,使目标区域与背景

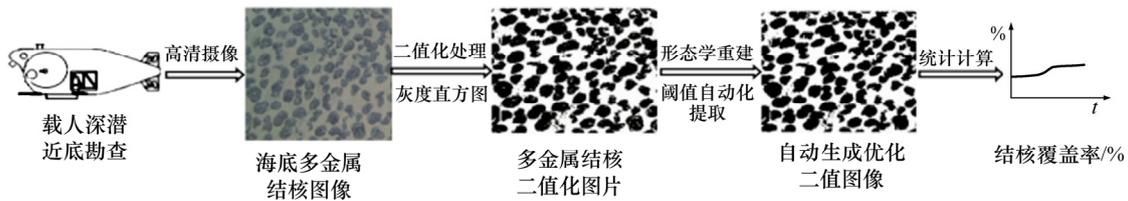


图 8 多金属结核覆盖率实时探测工作流程

Fig. 8 Workflow for real-time detection of polymetallic nodule coverage

分离, 是一种常用的图像处理方法。该方法的统计结果比较令人满意, 对于海底多金属结核覆盖率实时测算而言, 存在两方面的不足: 1) 阈值设置将直接影响统计结果, 明显不适用于样本规模较大的情况, 自动化程度低; 2) 多金属结核表面易被海底泥沙覆盖, 导致部分多金属结核区域被当作海底背景进行分割, 造成实际数据偏低。为解决阈值提取和泥沙覆盖影响等问题, 引入了二值化阈值自动提取算法和形态学重建算法。

其中, 二值化阈值自动提取算法利用最大类间方差法找到图像的合适阈值, 最大类间方差法, 简称 OTSU; 基于形态学重建填充的算法, 是依据掩膜图像的特征对标记图像的反复膨胀操作, 直到标记图像的像素值不再变化为止^[23-25]。

本文采用蛟龙号 2013 年试验性应用航次获取的 5 个海底多金属结核图像样本进行了实验验证, 与传统方法相比, 实验测算结果表明了该技术具有耗时少、准确率高的优势(见表 2)。

表 2 结核覆盖率测算对比表

Table 2 Comparison of TB coverage estimates

样本	覆盖率/%		
	网格计数法	二值化法	形态学法
1	42.49	45.84	47.28
2	49.38	45.83	47.47
3	47.38	47.54	49.41
4	46.73	47.78	49.63
5	51.93	49.51	51.35

3.3 富钴结壳超声探针

声学是一种重要的海洋调查研究方法, 广泛应用于海洋研究与开发的各个方面^[26], 并不断的发展进步。考虑到水体对声波的衰减, 在海洋调查研究

领域多采用频率千赫以下的低频信号。富钴结壳一般较薄, 几厘米到十几厘米, 且生长环境十分复杂, 低频声学探测面临一些困难^[27]。日本东京大学的 Blair Thornton(2013)对 Takuyo 海山上的富钴结壳以及基岩进行了高频声速测量以及声衰减测量, 得到了不同环境下声波衰减情况。

结壳的分布和组成极其复杂, 通常结壳层生长的基岩形貌在厘米-分米尺度变化, 利用传统的声学遥测难以得到精细数据。本文充分利用载人潜水器可在复杂环境近底作业的技术优势, 提出了基于载人潜水器的富钴结壳超声探针技术, 可实现富钴结壳声学原位定点声波反射特征精细探测。所谓超声探针, 即采用金属氧化物厚膜技术烧结微超声传感器, 实现探测单元探针形质结构设计以提高探测精度, 系统结构组成见图 9。

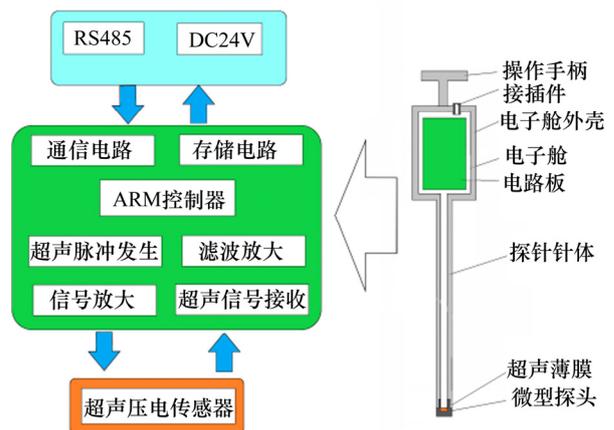


图 9 超声波结壳探针结构组成

Fig. 9 Structure of probe for ultrasonic crust

为了验证本文提出的超声结壳探测的可行性, 采用 2.25 MHz 的高频超声换能器, 对大洋样品馆馆藏的 DY15 航次, 大洋 CLD50 航次采集的结壳样品进行了室内实验测试。试验样品信息如表 3 所示。

富钴结壳样品基岩大致分四大类,分别为蚀变玄武岩、碳酸盐沉积物、钙质远洋沉积物、泥质块沉积。各海山区取样数据实验中对4类20块样本进行反射回波的检测,利用Agilent数字示波器对反射回波的波形进行截取,每块样品截取回波信号50次。对截取的回波波形进行幅值归一化处理,最终,

通过超声波探测在实验室的环境中得到了4类下伏基岩回波样本数据 50×20 个。图10所示为某次回波信号的波形图。

试验数据表明,利用高频超声对深海结壳进行定点探测,可以高效获取其声学反射特征信息,并可以对结壳生长基岩进行估计。

表3 航次站号信息表

Table 3 Voyage station number information table

站号/样品号	海山/海区	经度/(°)	纬度/(°)	深度/m	数量/块
MED71	ME 海山	152.2988	17.00667	2260	3
MED74	ME 海山	151.9687	17.2295	3389	3
MED79B	ME 海山	151.8057	17.15167	2382	6
MHD103	MH 海山	162.0473	15.05383	2937	10
MP3D25	MP3 海山	-166.1170	14.44767	2685	9
CLD50	CL 海山	160.4916	21.6514	2176	10
MP5D33	MP5 海山	-167.7114	10.387	3025	8

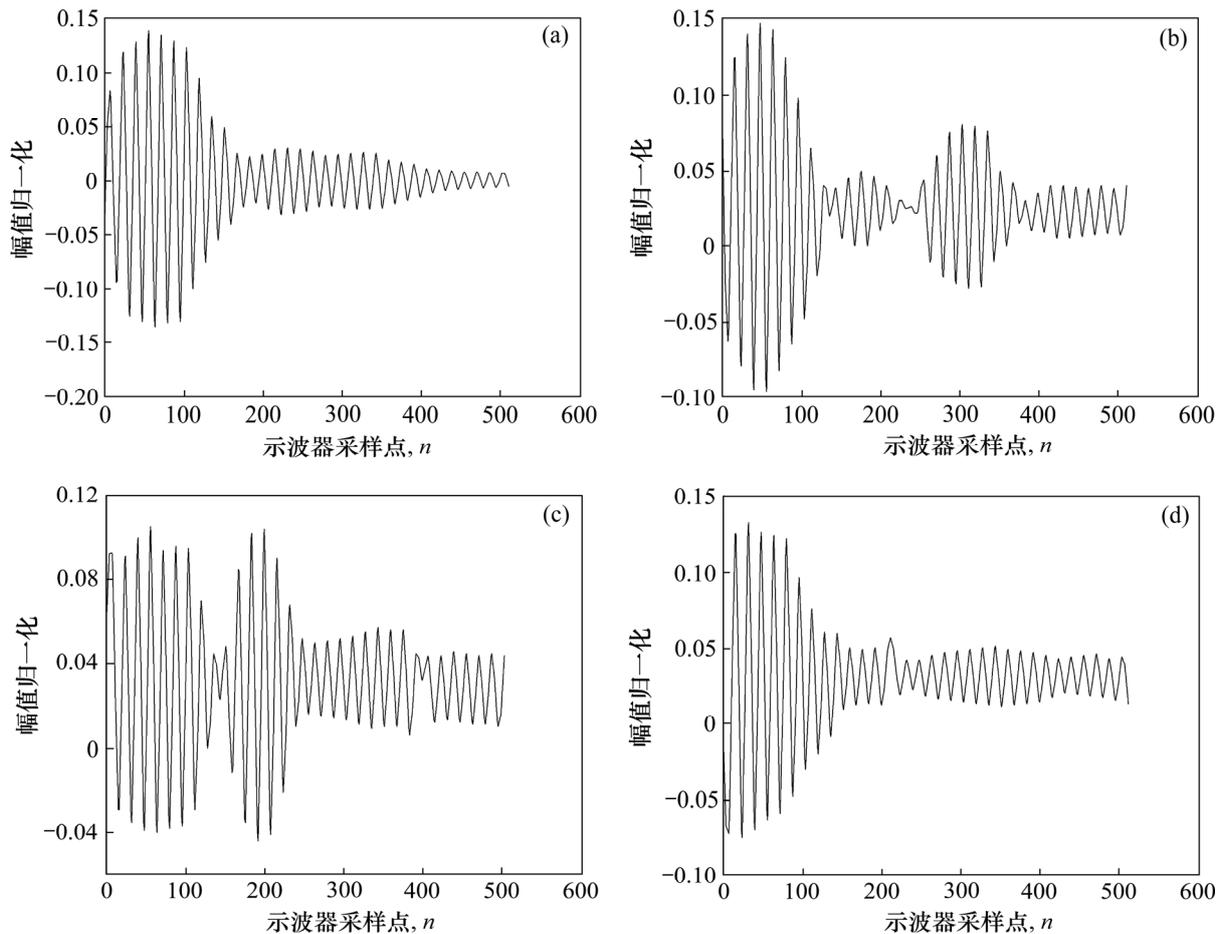


图10 类基岩回波时域波形

Fig. 10 Four types of bedrock echo time-domain waveforms: (a) Time-domain echo of soil block; (b) Time-domain echo of carbonate sediment; (c) Time-domain echo of basalt; (d) Time-domain echo of calcareous ocean sediment

对于新鲜的玄武岩、磷灰岩以及某类型的角砾岩等都与富钴结壳存在较大的声阻抗差异; 因此, 还可以通过测量超声波在富钴结壳介质内渡越时间而估算出其厚度值

$$d = c_p \frac{\Delta t}{2} \quad (7)$$

式中: d 为富钴结壳厚度; Δt 为回波时间间隔; c_p 为富钴结壳的 P 波速度, 可近似为恒定值, 不同结壳, 波速不同, 可以通过实验测得。

由于富钴结壳内部结构的复杂性, 简单的通过计算回波信号难以准确计算结壳真实厚度。因此, 笔者提出了 Hilbert 变换峰值检测算法, 用来自动测量富钴结壳的厚度, 即通过对滤波后的回波信号 $G_f(t)$ 进行 Hilbert 变换得到其包络信号 $H(G_f(t))$ 。

3.4 激光多普勒热液流速测量

激光多普勒测量流速, 其工作原理是通过定焦双光束干涉法, 合成激光多普勒频移信号, 其频移量与流速大小成正比, 利用谱峰频率获取, 还原流速信息。双光束激光多普勒频移:

$$f_D = \frac{2 \sin(\theta/2)}{\lambda} |v_y| \quad (8)$$

式中: θ 、 λ 、 v 分别为探测双光束夹角、探测光波长以及垂直方向流速。

系统由主机和光学探头两部分组成。系统主机包括光源、信号处理电路。其中, 光源为 532 nm 单频窄线宽绿光光纤激光器, 信号处理电路主要由超低噪声互阻抗转换电路、FPGA 信号解调电路组成, 主机采用耐压壳体结构封装设计; 光学探头包括准直镜组和接收镜组。

激光多普勒深海热液流速测量系统设计从实际应用需求出发, 以实用性、便携性、高灵敏、抗干扰为设计方向, 系统采用分体式和一体式两种方案设计, 系统组成如图 11 所示。

分体式结构设计, 光学探头于主机分离, 通过耐压光缆连接, 便于潜水器机械手夹持作业, 机动灵活性强, 机械结构设计复杂, 整机体积增大, 增加了载人潜水器采样蓝负载; 一体式设计结构设计简洁, 便于潜水器搭载安装, 对潜水器操纵要求较高, 需通过操纵潜水器来对准测量目标。载人潜水器热液流速测量作业方式如图 12 所示。

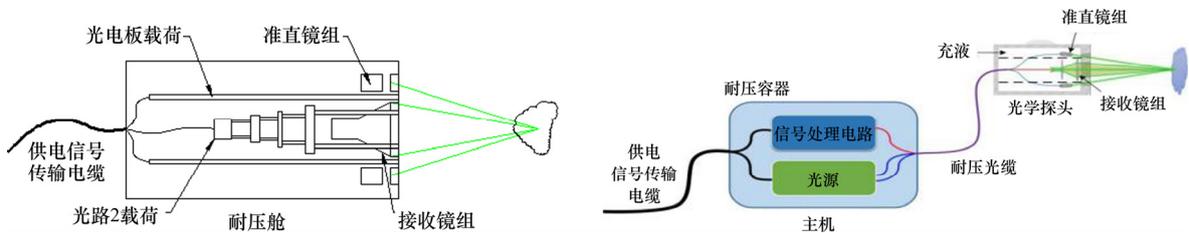


图 11 系统结构组成示意图

Fig. 11 Schematic diagram of system structure: (a) Integrated structure; (b) Split structure

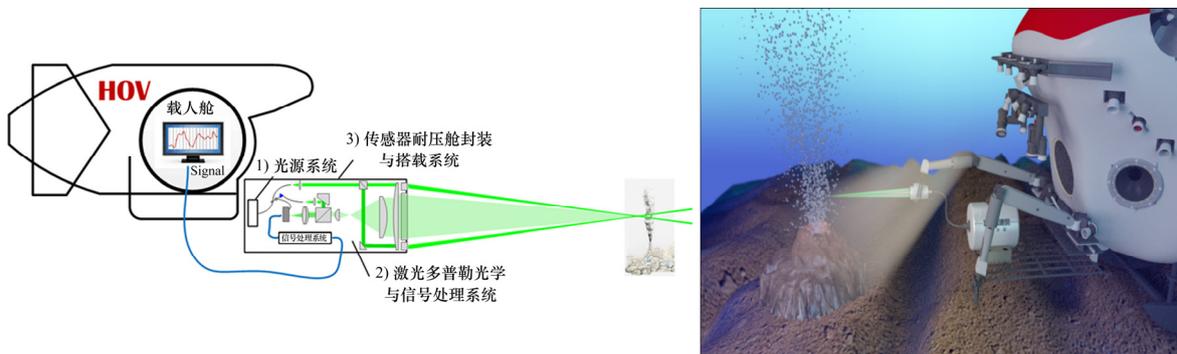


图 12 载人潜水器激光多普勒热液流速测量作业示意图

Fig. 12 Schematic diagram of laser Doppler hydrothermal velocity measurement operation for manned submersible: (a) Integrated system approach; (b) Split system operation

2020年12月,激光多普勒深海热液流速测量系统搭载于蛟龙号载人潜水器在南海开展了海上试验。总共完成了3次下潜作业(166潜次_2020年12月11日、167潜次_2020年12月12日和168潜次_2020年12月13日),在所有预定深度工作稳定正常,成功获取了流速测量数据(见图13),最深下潜至水深3196 m处,激光出光正常,系统通信正常,工作正常。

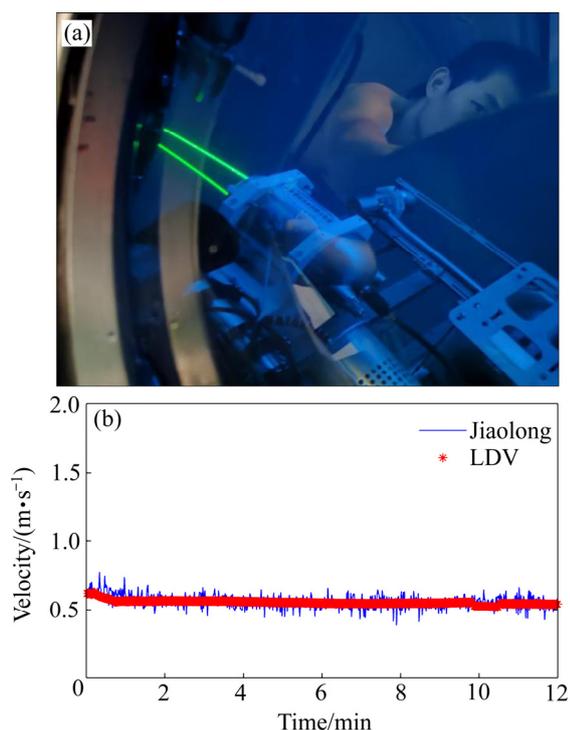


图13 海试结果

Fig. 13 Sea test results: (a) Working state of system; (b) Comparison of velocity curves

抽取下潜过程平稳过程数据测量出潜水器平均下潜速度为0.58 m/s,通过与“蛟龙号”潜水器同时段自身携带的深度计数据反演的下潜速度0.57 m/s对比,误差小于10%。满足载人潜水器搭载开展热液喷口流速探测需要。

4 结论

1) 针对海底矿产资源详勘研究技术需要,分析了多金属结核、富钴结壳以及多金属硫化物等几种主要矿产资源赋存特征及其生长环境和蛟龙号为代表的深海载人潜水器技术特点。

2) 提出基于载人潜水器平台的结核丰度实时测算、富钴结壳厚度定点高频超声探测、激光多普勒热液喷口流速测量以及激光精细地形测绘等载人深潜抵近探测技术。

3) 通过室内测试或海试,验证了一系列新技术的先进性和可行性,有望弥补常规资源勘查研究手段复杂海底抵近勘查和原位探测研究的不足,在深海资源勘查研究领域得到推广应用。

REFERENCES

- [1] SCHRIEVER G. Marine science and technology. Environmental risks from large-scale ecological research in the deep sea: A desk study[J]. Journal of the Royal Army Medical Corps, 1998, 150(1): 178–182.
- [2] GLASBY G P. Manganese: Predominant role of nodules and crusts[C]// Marine Geochemistry. Berlin: Springer, 2006: 335–372.
- [3] PETERSEN S, KRAESCHELL A, AUGUSTIN N, et al. News from the seabed—Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources[J]. Marine Policy, 2016, 70: 175–187.
- [4] JAMES H, FRANCESCA S, NOBUYUKI O, et al. Critical metals in manganese nodules from the Cook Islands EEZ, abundances and distributions[J]. Ore Geology Reviews: Journal for Comprehensive Studies of Ore Genesis and Ore Exploration, 2015, 68: 97–116.
- [5] GALVERT S E. The manganese nodule belt of the Pacific Ocean: Geological environment, nodule formation and mining aspects[J]. Marine Geology, 1991, 96(3/4): 354–355.
- [6] Rahul Sharma. Deep-sea mining[M]. Cham: Springer, 2017–01–01.
- [7] JAMIESON J W, HANNINGTON M D, CLAGUE D A, et al. (2013) Sulfide geochronology along the Endeavour segment of the Juan de Fuca ridge[J]. Geochem Geophys Geosyst, 2013, 14(7): 2084–2099.
- [8] ZIERENBERG R A, FOUQVET Y, MILLER D J, et al. The deep structure of a sea-floor hydrothermal deposit[J]. Nature, 1998, 392: 485–488.
- [9] NAKAMURA K, WATANABE H, MIYAZAKI J, et al. Discovery of new hydrothermal activity and chemosynthetic fauna on the central Indian ridge at 18°–20°S[J]. PLoS ONE,

- 2012, 7(3): e32965.
- [10] 朱敏, 张同伟, 杨波, 等. 蛟龙号载人潜水器声学系统[J]. 科学通报, 2014, 59(35): 3462–3470.
ZHU Min, ZHANG Tong-wei, YANG Bo, et al. Sonar system of Jiaolong human-occupied vehicle[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(35): 3462–3470.
- [11] CUI W. Development of the Jiaolong deep manned submersible[J]. Marine Technology Society Journal, 2013, 47(3): 37–54.
- [12] ZHANG T, LIU B, LIU Y. Positioning systems for Jiaolong deep-sea manned submersible: Sea trial and application[J]. IEEE Access, 2018, 6: 71644–71650.
- [13] LIU F, ZHOU H Y, WANG C S, et al. Chinese JIAOLONG's first scientific cruise in 2013[J]. Journal of Ship Mechanics, 2014, 18(3): 1–8.
- [14] LALOU C, REYSS J L, BRICHET E, et al. Hydrothermal activity on a 105-year scale at a slow-spreading ridge, TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge 26°N[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1995, 100: 17855–17862.
- [15] LIU F. Jiaolong manned submersible: A decade's retrospect from 2002 to 2012[J]. Marine Technology Society Journal, 2014, 48(3): 7–16.
- [16] WANG X, WU S J, FANG Z F, et al. A pressure-tight sampler with flexible titanium bag for deep-sea hydrothermal fluid samples[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2020, 37(11): 2065–2073.
- [17] JUNICHI M, AKIKO M, YOHEI M, et al. WHATS-3: An improved flow-through multi-bottle fluid sampler for deep-sea Geofluid research[J]. Frontiers in Earth Science, 2017, 5: 1–13.
- [18] SW A, SW A, MD B, et al. A new serial sampler for collecting gas-tight samples from seafloor cold seeps and hydrothermal vents[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2020, 161: 1–8.
- [19] BERGMAN E. Manned submersibles translating the ocean sciences for a global audience[C]//IEEE Oceans 2012. Hampton, Roads VA, USA: IEEE, 2012: 1–5.
- [20] LI D, LI Y, DING Z, et al. Development and application of a temperature gradient detector for manned underwater robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(4): 1–8.
- [21] SHI X, REN Y, TANG J, et al. Working tools study for JiaoLong manned submersible[J]. Marine Technology Society Journal, 2019, 53(2): 56–64.
- [22] 丁忠军, 赵子毅, 张春堂, 等. 载人潜水器的深海地貌线结构光三维重建[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(5): 11–19.
DING Zhong-jun, ZHAO Zi-yi, ZHANG Chun-tang, et al. 3D reconstruction of deep sea geomorphologic linear structured light based on manned submersible[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(5): 11–19.
- [23] 包更生, 申屠海港, 金翔龙. 深拖系统光学图像多金属结核粒径和丰度的计算[J]. 海洋学报, 2000, 22(5): 65–72.
BAO Geng-sheng, SHEN Tu-Hai-gang, JIN Xiang-long. The calculation of the polymetallic nodule's grain size and abundance from deep-tow system's optic image[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000, 22(5): 65–72.
- [24] 刘娜. 形态学重建在图像处理中的应用[J]. 数字技术与应用, 2012(10): 116.
LIU Na. Application of morphological reconstruction in image processing[J]. Digital Technology and Application, 2012(10): 116.
- [25] 丁忠军, 王昌诚. 基于形态学重建算法的海底多金属结核覆盖率统计研究[J]. 海洋技术学报, 2015(2): 106–110.
DING Zhong-jun, WANG Chang-cheng. Study on the coverage of seabed polymetallic nodules using the morphological reconstruction algorithm[J]. Ocean Technology, 2015(2): 106–110.
- [26] NEETTIYAH U, THORNTON B, SANGEKAR M, et al. Deep-sea robotic survey and data processing methods for regional-scale estimation of manganese crust distribution[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2021, 46(1): 102–114.
- [27] THORNTON B, ASADA A, BODENMANN A, et al. Instruments and methods for acoustic and visual survey of manganese crusts[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2013, 38(1): 186–203.

New technology of manned submersible approach exploration for deep sea mineral resources

DING Zhong-jun^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2}, SHI Xian-peng², LI De-wei², ZHAO Qing-xin²

(1. Harbin Engineering University College of Shipbuilding Engineering, Harbin 150001, China;

2. Department of Technology, National Deep-Sea Center, Qingdao 266237, China)

Abstract: Aiming at the needs of scientific research on the metallogenic mechanism and reserves evaluation of deep-sea metal mineral resources, based on the characteristics of growth environment of polymetallic mineral resources, the technical problems faced by deep-sea resource exploration research, the technical advantages of manned submersible and the development status of advanced sensing detection technology were reviewed systematically. Combined with the scientific application achievements of the Jiaolong manned submersible, the manned submersible's seabed approach detection technology method based on deep-sea high-frequency ultrasound technology, the image processing technology and laser detection technology were proposed. The experiment results have proved that this type of technology is stable and reliable, can provide more powerful technical support for the fine exploration of deep-sea metal mineral resources, and has broad application prospects.

Key words: manned submersible; polymetallic minerals; approach survey; in-situ measuring

Foundation item: Project(2017YFC0306600) supported by the National Key Research and Development Program of China

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

Corresponding author: ZHANG Yi; Tel: +86-18561891867; E-mail: zy592@ndsc.org.cn

(编辑 李艳红)