DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.10.049

深海工程技术在深空探测领域应用前瞻

张浩[1,2]，巴好亮[1]，叶聪[1,2*]，王豪[3]，沈永春[1,4]，李国瑞[3]，李艳青[1,2,4]

（1. 中国船舶科学研究中心，江苏无锡 214082；2. 深海载人装备全国重点实验室，江苏无锡 214082；3. 哈尔滨工程大学青岛创新发展基地，山东青岛 266000；4. 青岛船研深海技术有限公司，山东青岛 266520）

摘要：随着“三深”（深空、深海、深地）技术研究的不断深入，发现深海工程与深空探测存在诸多技术联系，研究深海工程技术在深空探测领域的应用将有利于助力“三深”技术发展。本文从对比深空与深海环境特征角度出发，揭示了深海工程与深空探测技术在压力、温度适应性方面存在一定相似性，进一步分别从结构安全性、复杂作业技术与装备、无人智能化与载荷小型化、试验场建设等方面展开了前瞻性探索。分析发现，地外空间物理特征的多样性十分突出，部分热点星球的空间环境与深海环境存在较强的相似性，具体体现在压力及腐蚀环境等方面，这使得深海结构物的设计与防腐技术具备向深空探测领域的移植性；同时深空探测对于装备的复杂控制、无人自动化程度需求与深海装备的目标是一致的，具体的装备研制技术具备互换基础；海底火山区以及南极冰下湖存在非常明显的类地外空间特征，面向深空探测具备建立试验场的环境条件，可作为未来深海试验场以及深空探测新型试验技术的研究方向。综上所述，随着深海与深空技术的不断发展，两者之间的技术互换以及跨域应用已经显现出较高的可能性，将深海工程技术充分地应用于深空探测领域，将助力我国深空探测装备更快发展。

关键词：深海工程；深空探测；结构安全性；作业装备；智能化与小型化；深海试验场

中图分类号：P751；V11　　**文献标识码：**A

Prospect on Application of Deep-Sea Engineering Technology in Deep-Space Exploration

Zhang Hao[1,2], Ba Haoliang[1], Ye Cong[1,2*], Wang Hao[3], Shen Yongchun[1,4], Li Guorui[3], Li Yanqing[1,2,4]

(1. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory of Deep-sea Manned Vehicles, Wuxi 214082, Jiangsu, China; 3. Qingdao Innovation and Development Base, Harbin Engineering University, Qingdao 266000, Shandong, China; 4. Qingdao Chuanyan Deep Sea Technology Co., Ltd., Qingdao 266520, Shandong, China)

Abstract: With the further development of deep-space, deep-sea, and deep-ground technologies, numerous technical connections are found existing between deep-sea engineering and deep-space exploration and thus it is feasible to apply deep-sea engineering technologies to deep-space exploration. By comparing the environmental characteristics of deep space and deep sea, this study reveals the similarities between deep-sea engineering and deep-space exploration in terms of pressure and temperature adaptability. Then, it explores the prospects on structural safety, complex operation technology and equipment, unmanned intelligence and miniaturization of loads, and construction of test sites. It is found that the physical characteristics of the extraterrestrial space is prominently diversified, and the environment of some hotspot planets is similar to that of the deep sea in terms of pressure and corrosion.

收稿日期：2024-10-24；**修回日期：**2025-01-02

通讯作者：*叶聪，中国船舶科学研究中心研究员，研究方向为深海载人工程；E-mail: yec@vip.163.com

资助项目：国家重点研发计划项目(2016YCF0300600)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

Therefore, the structure design and anticorrosion technologies regarding deep-sea engineering can be applied to deep-space exploration. Meanwhile, the requirements for complex control and unmanned automation of deep-space exploration equipment are consistent with those of deep-sea engineering equipment; therefore, the research and development of specific equipment from these two fields are interchangeable. The submarine volcanic areas and the Antarctic subglacial lake (i. e., Lake Vostok) have obvious extraterrestrial space characteristics and can be established as test sites for deep-space exploration, which can be regarded as a research direction for deep-sea test sites and new test technologies for deep-space exploration. To sum up, technology exchange and cross-domain application between the deep-sea and deep-space technologies are highly possible, and the full application of deep-sea engineering technologies to deep-space exploration will help China's deep-space exploration equipment develop faster.
Keywords: deep-sea engineering; deep-space exploration; structural safety; operation equipment; intelligence and miniaturization; deep-sea test site

一、前言

深空探测是我国重大工程，也是世界各航天大国竞相发展的重要领域。太阳系是与地球联系最紧密的系统，其中包括4颗类地行星。早在20世纪，人类就开始对太阳系内的天体开展了探测任务，累计超过289次[1-3]。美国是最早从事深空探测工作的国家之一，已经针对太阳、月球、火星以及若干卫星进行了探访[2]。俄罗斯也曾对月球、金星等行星开展过探测任务。此外，欧洲航天局和其他新兴国家也在陆续开展相应的深空探测试验任务[3]。我国在探月工程取得巨大成就的同时[4]，也逐步加强了对金星和火星的探测工作。此外，随着深空探测技术的不断进步，人类已经将资源开发的目标扩展到地外天体。地外空间拥有丰富的氦-3、金属矿物等宝贵资源，对这些资源的开发利用有可能催生出未来的地月经济圈、地外天体矿产开发与太空制造等新兴产业[3]。

世界各国的深空探测结果表明，各个星球的物理状态特征有着显著差异。具体而言，火星的大气十分稀薄，其密度仅是地球大气的1%[5]。而金星却拥有更加浓厚的大气层，地表气压达9.2 MPa[6]，且地表温度较高。因此针对不同的地外星球探测任务，其着陆器的设计要求差别巨大。以金星为例，极端的大气条件要求未来部署于该星球的着陆器必须具备承压能力，这一需求与深海工程装备领域的部分设计原理是相通的。美国华盛顿大学的研究成果显示，木卫二表面纵横交错着的红色条纹被认为是一种新型的含盐冰体[7]，同时在5~10 km厚的冰壳之下隐藏着一片次生海洋，其内部环境压力可能在2500 MPa以上，这些极端环境条件与深海装备设计中所面临的技术挑战具有明显的相似性。因此，笔者认为在开展探测器研制与作业技术研究时，深海工程技术的既有成果具备高度的可借鉴性与移植潜力。

本文以深海工程技术体系为基础，围绕未来深空探测环境特征的可能性，从结构安全性、作业装备研制以及极端环境的陆地模拟技术角度出发，探讨深海工程技术在深空探测领域的应用可能性。随着航天科技的不断进步，未来深空探测的科学目标正趋向多元化发展，涵盖了水冰探测、环境探测、矿物资源探测与开发等多个关键领域，这些应用场景的出现，将会促进大协同平台的联合应用，并加快跨国、跨学科领域的交流与支撑，最终完成深空探测科学目标谱系的构建[2]。

二、部分典型地外空间与深海环境的类比

深空、深海、深地探测是人类认知未知空间的重要手段，随着深空、深海探测的不断深入，不同地外空间环境之间显著的差异性被不断揭示。以太阳系各大行星及卫星为例，目前最主要的深空探测行星为火星、水星和金星，以及部分重要的卫星，例如月球、木卫二和土卫二等。在太阳系形成初期，金星、地球和火星存在非常大的相似性，随着不断演化，三个星球的差异变得非常巨大[8]，但在某些细节特征上，仍存在些许的相似性。月球是人类探访最多，也是了解最多的星球之一，表1给出了月球、火星、水星和金星地表环境的基本数据。通过对比发现，金星与月球、火星、水星相比，具有显著区别，具体表现在地表有大气层，也就存在

表1　重点探测星球的地表环境参数

参数	月球	火星	水星	金星
压力/MPa	0	0.607×10^{-3}	0	9.2
环境温度/℃	−180~150	−73~20	−170~430	464

了压力环境，同时温度相对稳定，波动范围不大。这些特点与地球的某些空间环境存在一定的类似性，因此可以初步对地外星球空间进行简单的甄别，认为存在一定压力环境且温度相对稳定的星球与地球的物理环境可能存在某些相似之处。

（一）金星与深海环境的类比分析

根据前述的初步结论，将对比重点首先聚焦在金星上。金星拥有最浓密的大气，其主要成分包括：CO_2（96.5%）、N_2（3.5%）、SO_2（0.015%）、Ar（0.007%）、H_2O（0.002%），以及H_2S、O_2等痕量气体[9]。尤为显著的是，金星大气对流层上部至下部有一层厚重的云层，其主要成分是浓硫酸、气溶胶以及未知物质[10,11]。根据探测数据显示，金星的大气层与地球截然不同（见图1），其气体密度极高，表现出显著的黏稠性，导致金星地表压力较大，约为9.2 MPa。同时由于金星大气中高浓度的CO_2引发的强烈温室效应，其地表温度高达464 ℃。综合上述金星的环境特点，发现其内部物理特征与海底火山区极为相似，具体环境特征对比见表2。

根据表2对比可知，金星表面环境与地球深海中约1000 m深度的海底火山区环境高度相似。未来进行的金星着陆探测设备需要面对400 ℃以上的环境温度，10 MPa压力环境的密封考核以及酸性的腐蚀环境，这些特征均与开展海底火山区探测的深海装备需求类似，提示我们可以借鉴深海工程的设计理念与技术手段，以支撑金星探测设备的设计与研发。

图1　金星与地球

表2　金星环境与地球海底火山区的环境特征

参数	金星	地球海底火山
压力/MPa	9.2	2~100
环境温度/℃	464	100~500
重力加速度/（$m·s^{-2}$）	8.87	9.8
腐蚀介质	含硫量较高	含硫量较高

（二）木卫二、土卫二与深海环境的类比分析

除了金星具有典型的压力环境与温度稳定性外，通过初步筛查发现，木卫二和土卫二也具有相类似特性。木卫二直径约为3160 km，主要由硅酸盐岩石组成，覆盖有水冰外壳（见图2）。它的表面平均温度在赤道约为−163 ℃，在两极仅为−223 ℃，从而使木卫二的冰壳像花岗岩一样坚硬[12]。科学家的共识是，在15 km厚的冰壳下存在着深度达100 km的海洋。尽管表层环境极端寒冷，但潮汐弯曲效应产生的热量使地下海洋保持液态[13]，并有模型对其进行评估，认为在木卫二30 km冰壳下，水冰接触面的温度在−1.5 ℃左右[13]，海水温度随着深度增加而上升。最近的研究表明，木卫二冰层中富含NaCl和$MgSO_4$，其中NaCl含量为5.8 g/L，$MgSO_4$含量为5.1 g/L[14]。

土卫二与木卫二有很多相似之处[15]，直径约为500 km，表面最低温度达到−240 ℃，是离土星第二近的主要卫星（见图3）。土卫二南极存在地下海洋，该海洋深度约为10 km，被一层30~40 km厚的冰壳所覆盖，位于岩石核上方，向上延伸至南纬约50°。研究表明，土卫二地下海洋是一个26~31 km深的全球咸水海洋[16]。同时结合羽流喷发观测以及对水冰接触面的温度推算，认为其地下海温度在

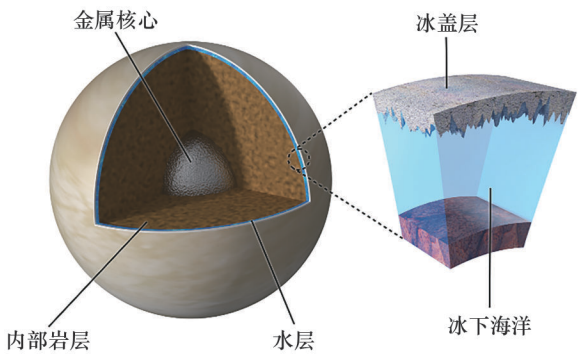


图2　木卫二地下模型

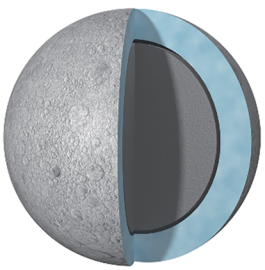


图3　土卫二地下模型

−22~0.85 ℃[15]。

在地球上，沃斯托克（Vostok）湖是目前已知的最大、最深的冰下湖泊，也可能是南极洲最古老的冰下湖泊，被认为可能与木卫二的地下环境相似[17]。表3给出了木卫二、土卫二与Vostok湖特征参数的对比，三者的冰层厚度均达到千米级，Vostok湖水体温度略低，与木卫二和土卫二的冰下海洋表面温度接近。同时三种冰下海洋（湖）均具有较强的金属腐蚀性，因此Vostok湖内的潜水环境和木卫二、土卫二有一定的相似性。美国航空和航天局（NASA）的科学家认为，在木卫二冰下海洋的取样技术与在南极冰下湖相似，这一结论也与本研究的对比分析结论一致。此外，NASA举行了题为“在地球和木卫二的污染控制”专题研讨会，探讨研制车辆、设备和相关技术在南极Vostok湖探寻可能存在的生命，并及时改进这些技术以用于探测木卫二[18]。

综上所述，地球深海环境展现出极为丰富的多样性和复杂性，为寻找与地外空间相类似的独特深海生态位提供了宝贵的自然实验室。这一发现不仅拓宽了我们对地球深海环境的认知边界，而且进一步阐释了深海空间探测所构建的技术体系和科研成果在特殊地外空间探测领域具有潜在的应用价值。具体而言，无论是在深海装备的设计与研制、性能评估方法的创新，还是在模拟深海环境试验平台的构建等方面，上述发现均展现出了重要的跨学科交互价值。这些技术与方法不仅加深了我们对深海极端环境适应性的理解，也为未来探索地外深海类环境奠定了坚实的技术基础，促进了地球科学与空间科学的深度融合与协同发展。

三、深海工程技术的发展与深空应用潜力

前述分析表明，金星、木卫二和土卫二的环境与地球深海环境表现出显著的相似性。其中的共同点主要集中在环境压力高、腐蚀性强以及环境温度类似等关键参数上。上述环境特征所衍生的工程技术挑战，在深海工程领域内已被广泛归结为典型的技术问题。随着深空探测的逐渐深入，深海工程技术的既有知识与技术储备有望为深空探测装备的设计和研发提供宝贵的支撑，从而促进两个领域间的深度融合与协同发展。

（一）结构安全性

高压环境是开展耐压结构设计的先决条件，“奋斗者号”载人潜水器成功完成挑战者深渊坐底作业，获得了马里亚纳海沟10 909 m的数据，标志着我国已经具备了应对全海深极端压力环境下耐压结构以及海洋腐蚀溶胀问题的攻关能力。

1. 耐压结构设计与工艺研究

金星地表压力约为10 MPa，木卫二和土卫二冰下海的压力约为150~400 MPa，未来的探测装备在进入上述空间探测作业时，均需要解决耐压结构设计问题与密封可靠性问题。国内外学者针对深海耐压结构安全性设计开展了广泛而深入的研究，目前深海装备采用的耐压壳体结构形式包括球壳、环肋柱壳以及串联球壳等结构形式。而在材料选择上，高强度钢和钛合金因其优异的性能而被广泛应用。考虑到深空探测作业对于装备重量要求敏感，因此以钛合金作为耐压结构设计材料较为可行。我国的三台载人潜水器均采用钛合金耐压球壳结构设计方案（见图4），从设计厚度、安全系数以及重量控制等方面形成了较为系统的结构设计评价体系[19,20]。目前，国内针对钛合金耐压结构开展了丰富的力学性能分析与设计方法研究[21]，这些设计评价方法对于深空探测耐压结构的设计具有重要的指导意义。

在结构加工工艺优化方面，评估初始缺陷对耐压结构影响的方法主要包括：裂纹张开位移法（COD）[22]、应力强度因子法（SIF）[23]、双准则法[24]和J积分法[25]，同时不少学者对不同耐压结构因成

表3　木卫二、土卫二冰下海洋环境与地球南极冰下湖Vostok的对比

参数	木卫二冰下海	土卫二南极地下海	地球南极冰下湖Vostok
冰壳厚度/km	15	30~40	3.7
环境温度/℃	−1.5	−22~0.85	平均−3
水厚度/km	100	26~31	0.51
腐蚀介质	含硫酸镁、氯化钠较高	过氧化氢、磷酸盐与有机物溶液	氧气的过饱和溶液

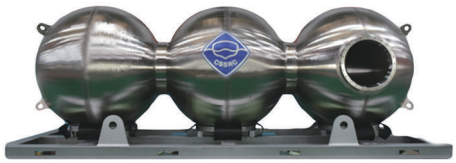


图4 钛合金耐压球壳

型工艺细节带来的结构性能退化问题开展了研究[26,27]，这些工艺控制方法都可应用到地外高压环境探测装备的结构研制中。

在耐压结构应用过程中，其稳定性分析也是关键问题之一，国内外研究者针对深海装备中的环肋圆柱壳、耐压球壳等多种结构形式的耐压结构开展了丰富的稳定性计算分析，特别是存在初始缺陷或者腐蚀缺陷的耐压结构，其剩余强度[28]与稳定性[29]的计算分析是确保装备主体结构安全的关键内容。这些研究结论为未来开展深空探测装备耐压结构设计与制造控制提供了有力的质量把控依据。

2. 耐蚀与抗老化研究

对比金星、木卫二和土卫二的星球环境，发现除了较高的压力环境外，其待探测空间内含有大量的腐蚀性介质，因此防腐设计是保证耐压结构安全性的另一关键议题。本研究所述的腐蚀问题具体包括对金属材料的化学侵蚀反应以及对非金属的老化、溶胀等材料性能劣化现象。在深海工程领域，金属材料的化学反应造成的腐蚀作用和用于密封功能的非金属材料的溶胀问题较为突出。例如，钢制材料在海洋环境中会遭受均匀腐蚀、应力腐蚀、点蚀等多种形式的侵蚀。而随着深海探测设备进入的深海空间越来越复杂，进入深海冷泉区、热液区的探测设备都要面对高含硫、高含碳环境，深海装备的非金属密封材料面临严重的溶胀风险，对密封结构的可靠性构成重大挑战。此外载人深潜装备需配备有玻璃观察窗，通常采用有机玻璃材料建造，在高压环境下需要进一步考虑其蠕变特性，如果部分玻璃材料需在特殊的海底高温区域附近作业，还需要考虑其老化问题等，以避免性能下降导致的安全隐患。上述这些问题与未来针对金星、土卫二和木卫二这一类星球的探测作业过程中所面临的挑战极度相似。

针对防腐方案的研究，当前的主流技术包括热喷涂防腐技术、牺牲阳极保护技术、防腐材料包覆技术等。其中牺牲阳极保护技术需要额外配置大量的锌块，这与深空探测对轻量化设计的严格要求相悖，防腐材料的包覆技术也存在同样问题。因此针对深空探测领域，在开展防腐设计工作中，应该选择优质耐蚀合金材料或采用先进的防腐涂层喷涂技术实现防腐功能。海底冷泉是深海极端环境之一，在针对深海冷泉区装备研制过程中，针对含有硫化氢等腐蚀介质的应用环境，中国船舶科学研究中心联合武汉理工大学成功研制了专用的 Al_2O_3-20TiO_2 防腐涂层，并对所确定的防腐方案开展了高应力－海水－湿硫化氢腐蚀试验[30,31]，取得了良好的试验效果，这类针对高含硫环境的防腐方案以及防腐能力测试评价方式值得未来在金星探测器防腐方案设计过程中参考。同时针对常见的非金属密封材料，例如丁腈橡胶或氟橡胶，在有机溶剂的作用下，其体现出的耐溶胀性能具有明显差别[32]；特别是氟橡胶，由于其内部配方不同，也会产生不同的耐蚀性能。因此在深空探测设备中，涉及非金属密封部分，甚至在非金属结构材料的选型上，均需充分考虑这一具体特点。

3. 耐低温性能研究

通过表 1 和表 3 可知，部分星球的温度环境相对较寒冷，因此不得不考虑材料以及结构在低温环境下的安全服役问题。我国“雪龙号”“雪龙 2 号”极地考察船的低温用钢均依托进口[33]，这也说明了我国在高性能低温材料的研发以及制造工艺方面仍较为薄弱。未来如果需要进入地外极寒空间探测，部分原材料以及制造工艺在短时间内仍需要依靠国外技术。

参考极地船舶相关研究技术进展不难发现，通常认为在−10 ℃以下长期运行的装备需要重点考虑其材料的耐低温性能。低温环境对材料带来的最显著影响是其抗断裂性能会出现明显的下降[34]。部分学者对低温船用钢在低温环境下的冲击功以及裂纹尖端张开位移（CTOD）开展了规律性研究，证明了若温度下降，钢材的冲击功和 CTOD 值也会下降[35]。在低温钢焊接方面，焊缝热影响区的抗断裂性能最差，但由于低温下热激活速率变低，热激活能下降，导致裂纹扩展速率变缓，其本身的抗疲劳性能反而有所提升[36]。

钛合金作为深空探测装备的重要材料，其耐低温性是需要重点讨论的内容。国内外学者针对不同牌号钛合金开展了较为丰富的低温环境下的材料性

能分析。从总体趋势上看，钛合金材料在低温环境下，其屈服强度和抗拉强度有所增加，但延伸率相对下降，还有部分钛合金材料延伸率表现为先下降后升高[37,38]。国内外学者针对TA7在77 K甚至更低温度下开展性能分析，研究结果发现，在低温下钛合金表现出了韧性断裂特征，随着温度的降低，钛合金的结构失效从局部小范围屈服失效变成了大规模的屈服失效，其失效模式更接近于钢的失效特征[39]。

因此，上述的金属材料在低温环境下的结构性能变化均是未来深空探测领域要着重考虑的重要因素。

（二）复杂作业技术与装备

随着深空探测的不断深入，未来将会面临更加复杂的空间环境，同时也要进入更加恶劣的地外空间进行探测作业，例如地外海洋、冰下海等极端环境。面对更加复杂的环境，新型作业技术与装备研制将成为深空探测作业必须回答的课题。

近年来，随着我国万米深潜成功，这一里程碑式的成就为面向深海极端环境的一系列技术与装备提供了宝贵的验证机会。如深海原位探测与实验设备、水下机械臂装置等，这些技术的发展对于深空探测走向更加极端的环境同样具有重要的技术支撑价值。

1. 深海传感技术的可移植性

对于类似于木卫二、土卫二等拥有地下海洋探测需求的星球，深海原位探测与实验设备方面的研究成果具有较好的技术移植性。中国海洋大学团队[40]于2015年研制了国内首套深海自容式激光拉曼光谱原位探测系统（DOCARS），实现了对海水中常见酸根离子的定量探测，并在国际上首次获取了水下4000 m深度样品的双波长激发的深海原位拉曼光谱。中国地质调查局研究团队[41]于2017年研制了4000米级坐底式潜标观测系统，可实现180天以上的长期监测能力，并搭载了甲烷、二氧化碳、溶解氧、浊度计、透射计、声学多普勒剖面仪以及定点海流计等多种传感器。中国科学院研究团队[42]在2020年自主研发的深海激光拉曼光谱原位探测系统（RiP）可用于在深海热液区与冷泉区对喷口流体进行原位检测，这些成果积累对于未来开展地外星球地下海洋成分分析具有非常重要的技术参考价值。

2. 深海取样及样品处理技术的可移植性

对于地外探索，除了对深空、深海环境的原位观测外，获取原位样本并用于后续的实验室分析同样意义重大。然而在高压极端环境取样转移过程中，压力和温度的变化对样品的物理化学性质容易产生影响，所以取样装置不仅需要实现样品保压和保温的功能，还要对采样器内的样品进行动态监测，以维持样品的高保真度。浙江大学研究团队[43]研发了基于海底着陆器的自密封式全海深沉积物保压取样系统（见图5），并在2021年搭载“奋斗者号”在马里亚纳海沟进行了原位测试与保压取样，获取了保压率超过80%、体积超过700 mL的保压沉积物样品。2022年，中国船舶科学研究中心[44]研制了深海生物原位保温、保压装置，其保压范围在0~15 MPa，保温范围在0~10 ℃，工作深度可达1500 m，以高压气瓶补压的方式维持原位压力并通过舱外充油半导体制冷进行主动控温。以上原位取样保压装置均适用于地球深海极端环境，对于存在与其类似环境的火星、木卫二、土卫二等地外行星的探测，具有良好的发展前景和应用价值。

获得高保真地外样品后，开展进一步科学研究依赖于样品处理技术。浙江大学研究团队研制的深海天然气水合物岩心保压转移系统[45]在南海海试中，实现了在20 MPa压力、4 ℃温度下的天然气水合物岩心的保压转移。随后，其研制的全海深沉积物保压转移系统[46]在西菲律宾海盆实现了对原位压力约为80 MPa的样品沉积物样品的保压转移，压力波动在1.5%以下。上海交通大学建设的深海微生物原位自动序列培养系统[47]实现了1000米级深海微生物5 h的原位培养，并获得超过10.5 L的原位

图5　浙江大学研发的取样器整体结构图

样品固定液。相应的深海样品保真获取与处理技术对于未来开展地外样品获取与封存同样具有重要的借鉴意义。

3. 深海作业技术的可移植性

深空探测在未来较长的时间里，仍然以无人探测为主，太空水下机械臂将成为深空高压环境下代替人类相应作业任务的重要工具。当前越来越多适用于深海极端环境的液压机械臂应用于实际中，其中具有代表性的有：美国 Schilling 公司研发的 Titan4[48]机械手、卡夫（Kraft）公司研发的 Raptor7[49]机械手、英国 Hydro-Lek 公司的 HLK-5680[50]机械手、加拿大国际水下工程有限（ISE）公司的 Magnum5[51]机械手以及中国科学院沈阳自动化研究所[52]的 7000 米级 7 自由度机械手等，以上机械手具体参数见表 4。

上述机械手主要以油液压驱动为主，该驱动方式对于深空极端环境的适应性较差，特别是在轻量化设计方面不具备优势。未来针对深空探测作业机械手研制，可以从电动驱动以及水液压驱动角度入手。其中电动驱动机械手适用于深空非超高压空间应用，而水液压驱动机械手对于地外海洋这类超高压空间更具有推广前景。

针对火星、金星这类环境压力小于 10 MPa 的地外空间，可以优先考虑干式动密封的轻巧型电驱动机械臂设计思路。法国 Eca Robotics 公司[53]的 5 功能水下电动机械臂 ARM 5E Mini，在 300 m 时采用无油密封，6000 m 时采用充油压力补偿方式密封，从工程应用角度进一步说明了在较低的环境压力下，采用干式动密封技术可以实现电机的稳定驱动。英国 Hydro-lek 公司[54]开发了一款结构紧凑的 5 自由度耐压电动机械臂，相关设计成果可作为未来用于深空探测作业装备的参考依据。

对于木卫二这类具有超高压力的地下海洋空间探测需求，可以优先考虑水液压驱动方案，这将大幅降低装备组成的复杂程度，有效省去部分液压源等部件，进一步提高驱动系统的轻量化水平与运行可靠性，但如何实现其机械臂的高精度控制问题仍是不小的难题。目前，华中科技大学在超高压海水泵以及高速开关阀研制方面具有非常丰富的工程经验[55]。中国船舶科学研究中心团队目前已完成重载水下机械臂的研制，如图 6 所示，突破了水液压驱动的装备集成与控制难题。

（三）无人智能化与载荷小型化

以木卫二和土卫二为代表，未来深空探测必然要从陆地走向海洋，因而无人潜航器以及小型化潜航器将成为支持相关探测的重要技术途径。

表 4　典型深海液压机械臂

参数	Titan4	Raptor7	HLK-5680	Magnum5	7000 米级 7 自由度机械手
自由度数	7	7	6	5	7
额定负载/kg	122	227	40	295	未公开
工作半径/mm	1922	1639	1050	1168	1900
工作水深/m	4000/7000	3000/6500	6000	5000	7000

(a)　(b)

图 6　中国船舶科学研究中心研制的水液压机械臂

1. 无人智能化

使用无人潜水器在地球极地冰下海洋进行探测已经有了许多成功的案例：20 世纪 90 年代中期，Theseus 水下自动航行器（AUV）被成功应用于冰下光纤铺设任务中[56]；奥德赛集团也利用无人潜器在北极进行了多次探险活动[57]，积累了丰富的冰下探测经验；英国 Autosub AUV 在南极冰下进行了探索，并收集到了中层水柱数据[58]；Clayton Kunz 团队设计了名为“捷豹”和“彪马”的 AUV，在北极进行了 9 次深潜实验，最大下潜深度达到了 4062 m，并收集到了冰层下海水的电导率、温度和压力（CTD）数据[59]。这些成功的地球冰下海洋探测不仅验证了无人潜航器在深海高压、低温环境下的可靠性和高效性，同时也为未来探索地外冰下海洋环境提供了宝贵的经验借鉴和技术参考。

行星表面探测中部分具有科学价值的信息通常来自于复杂狭窄地形的探测[60]，例如火星蕴含生命信息的物质大部分存在于熔岩管以及洞穴中。因此可以在狭窄路况下行进的机器人对于地外行星的探测同样具有不可忽视的价值。NASA 喷气推进实验室正在开发一种名为Exobiology Extant Life Surveyor（EELS）的蛇形机器人，如图 7 所示[61]。EELS 可以在极端的冰冻环境以及狭窄崎岖的地貌下进行自主导航和运动规划，由于木卫二表面存在与地下海洋相连的通道，未来可以将 EELS 直接部署至这些海洋通道入口，从冰面直接深入冰下海洋，对海水样本进行采集与分析，这类技术可用于地外空间的狭小、复杂地形的探测。

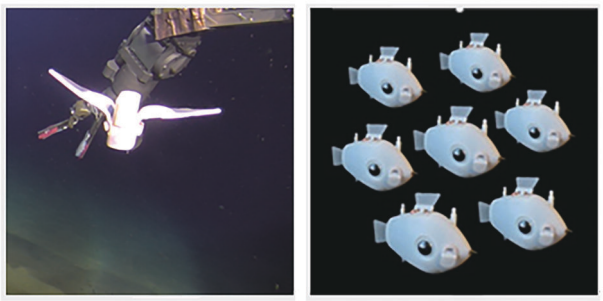
此外，金星作为太阳系中最接近地球的行星之一，其地表环境与海底火山的温度十分接近，因此海底火山区的无人探测作业具有重要的借鉴价值。2009 年 5 月，Jason ROV 在 West Mata 进行了五次潜水，拍摄了壮观的海底火山喷发场景[62]。2019 年，科研人员又利用 AUV 对 West Mata 进行了高分辨率测绘，并使用 ROV 进行了视觉观测[63]。2016 年，韩国海洋科学家使用深海 ROV Hemire 对马里亚纳海沟的热液喷口进行了勘探，并对热液喷口附近的岩石以及沉积物进行了采样，绘制了该区域的详细地图[64]。这展示了目前人类制造的无人装备在高温、高压极端环境下作业的可靠性和实用性。

2. 载荷小型化

随着深海探测技术的不断发展，深海装备呈现出多元化发展的态势，除了无人智能化外，小型化也成为深海装备发展的一个重要趋势。这一技术演进方向对于深空探测装备，特别是地外空间中的海洋区域的探测具有重要意义。深海软体机器人在极端环境（如低温、高压、复杂地形等）作业过程中，体现出了卓越的高静水压适应性以及低载荷特性。相比于传统的刚性机器人，软体机器人结构紧凑、环境适应性强、噪声和振动小，且对于外部空间载荷变化具有更好的顺应性和安全性，有望在深海复杂场景中完成更具挑战性的任务。浙江大学团队研制了一种介电弹性体材料

图 7　EELS 机器人

电驱动人工肌肉的仿生机器鱼，使用硅胶制作柔性的机器鱼身，并且将元器件分别内置在鱼身内以有效分散元件的应力集中，最终在水深约11 000 m的马里亚纳海沟底部成功实现了电驱动软体机器鱼的深海驱动（见图8(a)）[65]。这一成果为探索如木卫二等天体上极深冰下海洋，特别是那些深度达到数万米的超深水区域，提供了潜在的解决方案。这种小型机器人未来还有望搭载各类传感器，实现集群化作业，大幅提升探测效率与数据收集能力。在这一工程应用背景下，一种基于光学交互实现机器鱼群控制的方法被提出，其基本原理是依靠局部隐式视觉调控就实现了复杂的机器鱼群三维行为控制（见图8(b)）[66]。



(a) (b)

图8 软体机器鱼及鱼群

（四）环境相似性与模拟试验的可行性

在海洋工程领域中，海上试验场的概念早已被提出并付诸实践。2003 年欧洲海洋能中心正式成立，主要提供波浪能和潮汐能发电的测试服务[67]。我国在海上试验场建设方面也取得了显著进展，国家海洋技术中心按照“浅海与深远海”的布局，在威海、舟山、珠海和三亚建立了试验场，主要用于深海装备的整机测试[68]。当前，海上试验场的用途规划以及主要设计理念均紧密围绕深远海装备的研制需求而展开，但根据前述对比分析不难发现，地球的深海环境与某些地外星球的空间特征具有极其相似之处，具体参数见表1、表2。随着深空探测发展的不断深入，深空探测专项设备的研制难度日益加大，探测装备对于目标空间的环境适应性也变得更加复杂与不确定。而深空探测的研发与实施成本巨大，对于前期技术成熟度的确认以及装备适应性判断的准确性将成为影响我国深空探测新阶段发展进程的重要因素。如果能够在深海空间找到与深空空间类似的试验环境，依托深海独特的物理环境构建深空探测装备试验场，可以显著降低探测装备的发射与应用风险，同时也更加便于航天科研人员掌握探测设备在极端环境下的运行状态，便于有效开展优化设计。

以金星的地表空间、木卫二冰下海和土卫二南极地下海为例，不难发现海底火山区以及南极冰下湖 Vostok 具有建设面向深空探测装备的深海试验场的潜力。如图9所示，给出了利用海底火山区构建深空探测装备试验场的概念规划。随着“三深”（深空、深海、深地）技术的不断进步，深海与深空探测装备在技术领域逐渐展现出更多的共通性与相似性，同时深海空间与深空空间环境存在着某种

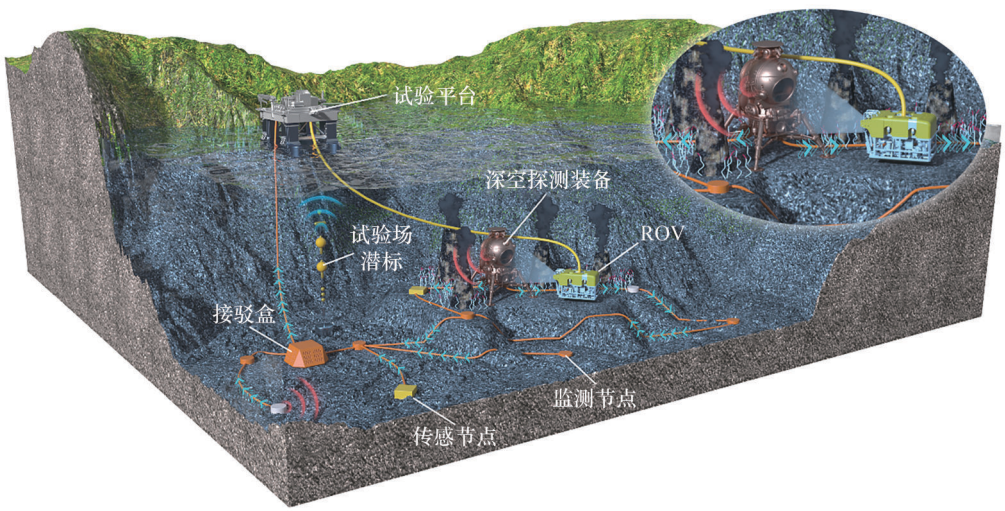


图9 面向深空探测装备的海底火山区深海试验场

类似之处，也进一步支撑了在深海空间构建深空环境模拟试验的可行性。

四、跨领域拓展应用的发展建议

深海工程技术在结构安全性、复杂作业技术、智能化小型化以及模拟试验空间方面均展现出向深空探测装备研发领域移植的巨大潜力，但将两个技术领域深度融合并实现相互拓展应用仍要面临诸多关键问题，下面提出跨领域拓展应用的发展建议。

（一）形成有效吸纳深海工程技术的总体思维

深海工程技术支撑深空探测，需要以结果为导向，建立更宏观的深空探测总体思维观，站在体系全局角度合理利用深海工程技术能力，具体可以从以下两个方面入手。① 在现有的深空探测总体思维体系下吸纳深海工程技术的研发逻辑，不断建立更宏观的系统论，构筑更丰富的技术体系。只有充分了解深海工程领域的技术内涵，才能在深空探测领域灵活应用其技术成果。② 以结果为导向驱动深空探测总体思维提升，深入剖析深空探测装备的需求，细化设计输入与结果产出关系，更有可能明确深海工程技术引入思路，并给出合理设计输入，有利于高效利用深海工程技术实现目标。

（二）建立高效的跨领域技术交互机制

深海工程与深空探测工程均属于庞大的系统工程，其内部技术体系相对成熟，这对于领域内的质量管理是非常有效的，但对于领域之间的技术融通造成了一定的壁垒。为突破壁垒，实现两个领域间技术的高效融合，需要构建良好的技术交互机制，具体可以从以下三方面考虑。① 加强领域间的学术平台建设，建立基层科研人员的深度交流与联络机制，同时鼓励跨领域基础科研立项，促进双方领域科研人员深挖技术应用背景。② 针对深海与深空领域中所涵盖的材料数据库，完成数据融合，建立多领域材料大数据，便于构建新的跨领域装备评价体系。③ 与数据融合类似，深海工程与深空探测工程的设计体系存在较大差异，两个领域的设计体系应求同存异，这是构建新的跨域技术融合的新设计体系的关键，特别是在非原则性问题方面，两个领域的科研人员能够完成设计评价技术的创新融合是最重要的，这也是深海工程技术拓展到深空探测领域最关键的一步。

（三）深化梳理深空环境特征，构筑面向深空探测的深海试验场

在地球上构建更加体系化的深空探测装备试验体系是未来深空探测工程的趋势。深海试验场具备服务深空探测装备测试的良好基础，如何高效利用地球空间构筑深空探测深海试验场是一个重大科研命题，需要解决以下几个问题。① 现有深空探测装备陆域测量体系覆盖范围与信息获取丰度存在哪些不足。利用可控的试验方法最大化获取深空探测装备的试验数据丰度是讨论构筑深空探测深海试验场的基本前提。② 系统化开展深空与深海，甚至地球其他环境的类比研究，寻找环境特征共通性，充分挖掘地球环境模拟深空试验的潜力是构建深海试验场的重要基础。③ 深空探测装备的试验检测需求与深海装备存在显著差异，构建面向深空探测的深海试验场，将面临很多新的传感、检测和监测需求，突破相关技术难题才能更好地提升试验场基础能力建设。同时构建海底导航、定位、定时（PNT）网络[8]，将有可能与深空PNT网络互联，形成深空与深海两个宏观空间的综合PNT通信体系。

面向深空探测的深海试验场建设是实现两个领域技术融合的最佳切入点，可揭示许多新的技术研发需求，同时对两个领域的发展起到催化作用，因此面向深空探测的深海试验场建设可作为两个领域的研究方向之一。

五、结语

本文从不同维度分析深海工程技术领域的研究成果，通过类比深海与深空环境发现，二者之间存在一定的相似性。环境相似性在结构安全性、复杂作业技术、智能化与小型化以及深海试验场建设方面，创造了深海工程技术向深空探测领域移植的可能性。深海工程与深空探测工程的技术融合将成为“三深”领域技术互通的典型案例，同时也是我国构建“三深”发展战略的快车道。

随着我国海洋战略与深空探测战略的不断发展，涌现出了大量的先进技术与科研成果。深海工程装备在高压及异常温度环境下的结构安全性以及

装备可靠性方面具有良好的技术积累，深空探测在装备的小型化集成设计与轻量化结构方面具有更严苛的评价体系。在两个领域相互融合的过程中，将会碰撞出更多且准确的应用场景与设计评估方法，对于各自领域技术进步的促进作用都是深远的。

此外，在国际层面，我国在深海工程以及深空探测领域已经进入“并跑”甚至“领跑”阶段，未来将走向技术变革创新的新阶段。深海工程与深空探测的深度融合将会是两个领域的催化剂，既能够帮助攻克领域内长期存在的技术难题，又能够为彼此领域带来新的发展生机。同时跨领域技术融通更有利于构建我国更加完整的科技大数据，规避技术难题的重复性攻关，提高先进技术的成果转化。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: October 24, 2024; **Revised date:** January 2, 2025

Corresponding author: Ye Cong is a research fellow from China Ship Scientific Research Center. His major research field is deep sea manned engineering. E-mail: yec@vip.163.com

Funding project: National Key R&D Program of China (2016YCF0300600)

参考文献

[1] 刘继忠, 葛平, 康焱, 等. 深空探测科学目标谱系构建方案探索 [J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(1): 79–89.
Liu J Z, Ge P, Kang Y, et al. Study on the construction scheme of mega interconnected knowledge systems in deep space exploration [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(1): 79–89.

[2] 张扬眉. 2023 年国外深空探测领域发展综述 [J]. 国际太空, 2024 (3): 11–15.
Zhang Y M. A summary of the development of deep space exploration abroad in 2023 [J]. Space International, 2024 (3): 11–15.

[3] 于登云, 马继楠. 中国深空探测进展与展望 [J]. 前瞻科技, 2022, 1(1): 17–27.
Yu D Y, Ma J N. Progress and prospect of deep space exploration in China [J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(1): 17–27.

[4] 付毅飞. 嫦娥六号再创中国航天的世界纪录 [N]. 科技日报, 2024-06-28(01).
Fu Y F. Chang’e 6: A new world record in China’s space endeavors [N]. Science & Technology Daily, 2024-06-28(01).

[5] 于登云, 孙泽洲, 孟林智, 等. 火星探测发展历程与未来展望 [J]. 深空探测学报, 2016, 3(2): 108–113.
Yu D Y, Sun Z Z, Meng L Z, et al. The development process and prospects for Mars exploration [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(2): 108–113.

[6] Pollack J B, Toon O B, Boese R. Greenhouse models of Venus’ high surface temperature, as constrained by Pioneer Venus measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1980, 85(A13): 8223–8231.

[7] 张佳欣. 木卫二上可能存在新型咸冰 [N]. 科技日报, 2023-02-23(04).
Zhang J X. Possible existence of a new type of salty ice on Europa [N]. Science & Technology Daily, 2023-02-23(04).

[8] 朱日祥, 侯增谦, 郭正堂, 等. 宜居地球的过去、现在与未来——地球科学发展战略概要 [J]. 科学通报, 2021, 66(35): 4485–4490.
Zhu R X, Hou Z Q, Guo Z T, et al. Summary of “the past, present and future of the habitable Earth: Development strategy of Earth science” [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(35): 4485–4490.

[9] Johnson N M, de Oliveira M R R. Venus atmospheric composition *in situ* data: A compilation [J]. Earth and Space Science, 2019, 6(7): 1299–1318.

[10] Kawabata K, Coffeen D L, Hansen J E, et al. Cloud and haze properties from pioneer Venus polarimetry [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1980, 85(A13): 8129–8140.

[11] Basilevsky A T, Head J W. The surface of Venus [J]. Reports on Progress in Physics, 2003, 66(10): 1699–1734.

[12] McFadden L A, Weissman P R, Johnson T V. Encyclopedia of the solar system [M]. Amsterdam: Elsevier, 2007

[13] Steinbrügge G, Voigt J R C, Wolfenbarger N S. et al. Brine migration and impact-induced cryovolcanism on Europa [J]. Geophysical Research Letters, 2020,47(21): e2020GL090797.

[14] Daswani M M, Vance S D, Mayne M J, et al. A metamorphic origin for Europa’s Ocean [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(18): e2021GL094143.

[15] Joseph A. Water worlds in the solar system [M]. Amsterdam: Elsevier, 2023.

[16] Thomas P C, Tajeddine R, Tiscareno M S, et al. Enceladus’s measured physical libration requires a global subsurface ocean [J]. Icarus, 2016, 264: 37–47.

[17] Siegert M J, Ellis-Evans J C, Tranter M, et al. Physical, chemical and biological processes in Lake Vostok and other Antarctic subglacial lakes [J]. Nature, 2001, 414(6864): 603–609.

[18] 温家洪. 南极冰下湖的发现及其意义 [J]. 极地研究, 1998, 10 (2): 155–160.
Wen J H. A primary introduction of Antarctic subglacial lakes [J]. Chinese Journal of Polar Research, 1998, 10(2): 155–160.

[19] 刘涛. 深海载人潜水器耐压球壳设计特性分析 [J]. 船舶力学, 2007, 11(2): 214–220.
Liu T. Research on the design of spherical pressure hull in manned deep-sea submersible [J]. Journal of Ship Mechanics, 2007, 11(2): 214–220.

[20] 中国船级社. 潜水系统和潜水器入级与建造规范: 1996 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
China Classification Society. Rules for the classification and construction of diving systems and submersibles: 1996 [M]. Beijing: China Communications Press, 1996.

[21] Yu X Y, Zhang H, Ji H T, et al. Investigation of the influence of distribution of defections along the axial direction on eternal ultimate strength of titanium alloy pressure hulls of long barrel shape [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2022, 236(6/7): 715–725.

[22] Wells A A. Application of fracture mechanics at and beyond general yielding [J]. British Welding Journal, 1963, 10: 563–570.

[23] Irwin G R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate [J]. Journal of Applied Mechanics, 1957, 24(3): 361–364.

[24] Dowling A R, Townley C H A. The effect of defects on structural failure [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1975, 3(2): 77–107.

[25] Rice J R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks [J]. Journal of Applied Mechanics, 1968, 35(2): 379.

[26] Yu X Y, Chen J, Chen J S. Interaction effect of cracks and anisotropic influence on degradation of edge stretchability in hole-expansion of advanced high strength steel [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 105: 348–359.

[27] Yu X Y, Chen J S, Chen J. A method for evaluating the degradation of edge stretchability incorporating punching damage based on Marciniak and Kuczynski model [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016, 230(11): 2102–2113.

[28] Paik J K. Ultimate strength of ships time-variant risk assessment of aging ship staking account to general/pit corrosion, fatigue cracking and local dent damage [R]. Houston: American Bureau of Shipping, 2002.

[29] 徐强, 万正权. 含坑点腐蚀的深海耐压球壳有限元分析 [J]. 船舶力学, 2011, 15(5): 498–505.
Xu Q, Wan Z Q. FE analysis of deep-sea sphere shell with Pitting corrosion under pressure [J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15 (5): 498–505.

[30] Zhang H, Wang Y J, Chen X X, et al. Corrosion behaviors of Al_2O_3-20TiO_2 and Cr_2O_3-3TiO_2-5SiO_2 coatings in both artificial seawater and high-pressure hydrogen sulfide seawater [J]. Ceramics International, 2024, 50(18): 34346–34356.

[31] Zeng X, Chen X X, Wang Y J, et al. Corrosion behavior of Al_2O_3-40TiO_2 coating deposited on 20MnNiMo steel *via* atmospheric plasma spraying in hydrogen sulfide seawater stress environments [J]. Coatings, 2024,14:588.

[32] 周鸿铃, 杜钢, 杨杰, 等. 变压器用丁腈橡胶与氟橡胶密封材料的溶胀特性研究 [J]. 高压电器, 2022, 58(6): 121–127.
Zhou H L, Du G, Yang J, et al. Study on swelling characteristics of nitrile rubber and fluororubber sealing material of transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6): 121–127.

[33] 吴刚. 从“雪龙 2”号研制谈中国极地装备发展 [J]. 船舶工程, 2021, 43(7): 7–13.
Wu G. Discussion on the development of polar equipment in China from the development of “Snow Dragon 2” [J]. Ship Engineering, 2021, 43(7): 7–13.

[34] 叶其斌, 刘振宇, 王国栋. 极地船舶用低温钢发展 [R]. 上海: 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会, 2015.
Ye Q B, Liu Z Y, Wang G D. Development of Low - temperature Steels for Polar Ships [R]. ShangHai: The 10th China Iron and Steel Congress & the 6th Baosteel Academic Annual Conference, 2015.

[35] 马涛, 曹忠孝, 陈小娟, 等. 厚钢板 EH40 低温 CTOD 韧性试验研究 [J]. 船海工程, 2010, 39(5): 230–233.
Ma T, Cao Z X, Chen X J, et al. Low temperature CTOD toughness test for EH40 thick steel plate [J]. Ship & Ocean Engineering, 2010, 39(5): 230–233.

[36] 王超逸, 洪晓莉, 严玲, 等. 460 MPa 极地船舶用钢及焊接接头低温力学性能 [J]. 中国冶金, 2024, 34(7): 58–67.
Wang C Y, Hong X L, Yan L, et al. Low temperature mechanical properties of 460 MPa polar ship steel and its welded joints [J]. China Metallurgy, 2024, 34(7): 58–67.

[37] 刘志丹. TA7 和 TB2 及 TC4 钛合金低温准静态拉伸行为研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学(硕士学位论文), 2019.
Liu Z D. Research on the low-temperature quasi-static tensile behavior of TA7, TB2 and TC4 titanium alloys [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology (Master’s thesis), 2019.

[38] Ghisi A, Mariani S. Mechanical characterization of Ti-5Al-2.5Sn ELI alloy at cryogenic and room temperatures [J]. International Journal of Fracture, 2007, 146(1): 61–77.

[39] Sun Q Y, Gu H C. Tensile an low-cycle fatigue behavior of commercially pure titanium and Ti-5Al-2.5Sn alloy at 293 and 77K [J]. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2001, 316(1–2): 80–86.

[40] Du Z F, Li Y, Chen J, et al. Feasibility investigation on deep ocean compact autonomous Raman spectrometer developed for *in situ* detection of acid radical ions [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2015, 33(2): 545–550.

[41] 董一飞, 罗文造, 梁前勇, 等. 坐底式潜标观测系统及其在天然气水合物区的试验性应用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(5): 195–203.
Dong Y F, Luo W Z, Liang Q Y, et al. A newly developed bottom-supported submersible buoyant system and its testing application to a natural gas hydrate area [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(5): 195–203.

[42] Zhang X, Li L F, Du Z F, et al. Discovery of supercritical carbon dioxide in a hydrothermal system [J]. Science Bulletin, 2020, 65(11): 958–964.

[43] 周朋, 王豪, 张培豪, 等. 全海深沉积物保压取样装置设计及试验研究 [J]. 工程科学与技术, 2023, 55(2): 252–258.
Zhou P, Wang H, Zhang P H, et al. Design and experimental study of pressure-retaining sampling device for sediments in hadal trenches [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(2): 252–258.

[44] 许可, 赵飞虎, 周鑫涛, 等. 深海生物原位保温保压装置设计方案研究 [J]. 机械研究与应用, 2022, 35(2): 62–66.
Xu K, Zhao F H, Zhou X T, et al. Research on scheme of *in situ* temperature and pressure preserving device for deep sea creatures [J]. Mechanical Research & Application, 2022, 35(2): 62–66.

[45] Gao Q L, Chen J W, Liu J B, et al. Research on pressure-stabilizing system for transfer device for natural gas hydrate cores [J]. Energy Science & Engineering, 2020, 8(4): 973–985.

[46] Zhou Q X, Wang H, Zhang P H, et al. Research on the isobaric transfer method and device for sediment of full-ocean depth [J]. Marine Technology Society Journal, 2023, 57(1): 44–51.

[47] 董自珍, 刘纯虎, 张宇. 深海微生物原位自动序列培养装置的研发与试验 [J]. 热带海洋学报, 2024, 43(5): 131–142.
Dong Z Z, Liu C H, Zhang Y. Development and testing of a deep-sea microorganism ocean automatic series incubation system [J].

Journal of Tropical Oceanography, 2024, 43(5): 131–142.

[48] Schilling robotics TITAN 4 manipulator [R/OL]. Newcastle: TechnipFMC, 2018 [2025-02-25]. https://www.technipfmc.com/media/pb4i4rfy/titan-4-manipulator.pdf.

[49] RAPTOR: Force feedback manipulator [R/OL]. Kansas: Kraft TeleRobotics, 2015 [2025-02-25]. http://krafttelerobotics. com/products/raptor.htm.

[50] HLK-5680: 6 Function manipulator [R/OL]. Hampshire: HYDRO-LEK, 2019 [2025-02-25]. http://www.hydro-lek.com/datasheets/Manipulators/HLK-5680_Rev_2.pdf.

[51] Magnum 5: A Rugged 5-function subsea manipulator [R/OL]. Coquitlam: International Submarine Engineering, 2015 [2025-02-25]. http://207.102.77.253/Magnum-5.html.

[52] 张奇峰. 7000 米深海主从伺服液压机械手 [R]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2016.
Zangh Q F. 7000 m deep sea master slave servo hydraulic manipulator [R]. Shenyang: Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2016.

[53] Sivčev S, Coleman J, Omerdić E, et al. Underwater manipulators: A review [J]. Ocean Engineering, 2018, 163: 431–450.

[54] Fernandez J J, Prats M, Sanz P J, et al. Grasping for the seabed: Developing a new underwater robot arm for shallow-water intervention [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2013, 20(4): 121–130.

[55] 王伟灿, 吴德发, 张浩, 等. 超高压海水泵水润滑轴承承载与散热仿真分析 [J]. 液压与气动, 2023, 47(11): 55–60.
Wang W C, Wu D F, Zhang H, et al. Simulation analysis of deep-sea water-lubricated bearing support and heat dissipation in ultra-high pressure sea water pump [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2023, 47(11): 55–60.

[56] Thorleifson J M, Davies T C, Black M R, et al. The Theseus autonomous underwater vehicle. A Canadian success story [C]. Halifax: IEEE Conference, 1997.

[57] Bellingham J G, Deffenbaugh M, Leonard J J, et al. Arctic under-ice survey operations [R]. New Hampshire: International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, 1993.

[58] McEwen R, Thomas H, Weber D, et al. Performance of an AUV navigation system at Arctic latitudes [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(2): 443–454.

[59] Kunz C, Murphy C, Camilli R, et al. Deep sea underwater robotic exploration in the ice-covered Arctic ocean with AUVs [C]. Nice: 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008.

[60] 马超, 孙京, 刘宾, 等. 嫦娥探测器分段渐倾转移机构设计 [J]. 航空学报, 2019, 40(10): 223014.
Ma C, Sun J, Liu B, et al. Design of rover transfer mechanism for Chang'e probe [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(10): 223014.

[61] Vaquero T S, Daddi G, Thakker R, et al. EELS: Autonomous snake-like robot with task and motion planning capabilities for ice world exploration [J]. Science Robotics, 2024, 9(88): eadh8332.

[62] Resing J A, Rubin K H, Embley R W, et al. Active submarine eruption of boninite in the northeastern Lau Basin [J]. Nature Geoscience, 2011, 4(11): 799–806.

[63] Chadwick W W Jr, Rubin K H, Merle S G, et al. Recent eruptions between 2012 and 2018 discovered at west mata submarine volcano (NE lau basin, SW Pacific) and characterized by new ship, AUV, and ROV data [J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 495.

[64] Shim H, Jun B H, Lee P M, et al. Workspace control system of underwater tele-operated manipulators on an ROV [J]. Ocean Engineering, 2010, 37(11/12): 1036–1047.

[65] Li G R, Chen X P, Zhou F H, et al. Self-powered soft robot in the Mariana trench [J]. Nature, 2021, 591(7848): 66–71.

[66] Berlinger F, Gauci M, Nagpal R. Implicit coordination for 3D underwater collective behaviors in a fish-inspired robot swarm [J]. Science Robotics, 2021, 6(50): eabd8668.

[67] 李彦, 罗续业, 路宽. 潮流能、波浪能海上试验与测试场建设主要问题分析 [J]. 海洋开发与管理, 2013, 30(2): 36–39.
Li Y, Luo X Y, Lu K. Analysis of main problems in the construction of tidal current energy and wave energy offshore test and test site [J]. Ocean Development and Management, 2013, 30(2): 36–39.

[68] 马帅, 王勋龙, 王丽, 等. 海上试验场建设现状分析及经验借鉴 [J]. 中国工程咨询, 2023 (4): 46–51.
Ma S, Wang X L, Wang L, et al. Analysis of the present situation of offshore test site construction and its experience for reference [J]. China Engineering Consultants, 2023 (4): 46–51.