网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1755.tj.20220920.1247.002.html 期刊网址：www.ship-research.com

引用格式：李俊华，焦桂萍，邓辉，等. 潜艇大气环境控制关键技术研究现状与展望 [J]. 中国舰船研究，2022，17(5): 116–124.
LI J H, JIAO G P, DENG H, et al. Development and prospects of key technology for submarine atmospheric environment control[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 116–124.

潜艇大气环境控制关键技术研究现状与展望

扫码阅读全文

李俊华*，焦桂萍，邓辉，曹聪霄，李芳，马强
邯郸净化设备研究所，河北 邯郸 056027

摘　要：空气再生、有害气体净化及大气成分监测是潜艇大气环境控制系统的关键技术。经过多年发展，我国潜艇大气环境控制水平取得了长足进步，已由最初保障潜艇连续潜航时人员生命安全及设备安全运行向确保人员身体健康和系统运行可靠的方向发展。首先，综述国内外潜艇大气环境控制技术的发展历史、研究现状和发展趋势，指出大气环境控制技术研究需要借鉴国外在潜艇和航天装备技术领域取得的先进成果，以满足潜艇长期潜航时人员生活舒适性需求为目标，更好地适应未来潜艇技术发展及使命任务的变化，持续提升我国潜艇舱室空气的质量控制水平。

关键词：潜艇大气环境控制；空气再生；制氧；二氧化碳清除；有害气体净化；空气监测
中图分类号：U674.76　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.19693/j.issn.1673-3185.03033

Development and prospects of key technology for submarine atmospheric environment control

*LI Junhua**, *JIAO Guiping*, *DENG Hui*, *CAO Congxiao*, *LI Fang*, *MA Qiang*
Purification Equipment Research Institute, Handan 056027, China

Abstract: Air regeneration, harmful gas purification and atmospheric composition monitoring are the key technologies of submarine atmospheric environment control systems. After years of development, China has made great progress in such systems, which have developed from ensuring the safety requirements of submariner and equipment operation to ensuring the health of submariner and reliability of system for long-term underwater operation. This paper reviews the development history of submarine atmospheric environment control technologies and introduces their future development prospects. The developers of integrated atmospheric environment control technology should learn from foreign submarine and aerosphere equipment technologies, which aim to support long-term submerged operation and comfort demands, and better adapt to future submarine technology development and evolving mission, in order to constantly enhance the level of submarine cabin air quality of the Chinese navy.

Key words: submarine atmospheric environment control；air regeneration；oxygen production；carbon dioxide removal；harmful gas purification；air monitoring

0　引　言

潜艇潜航期间舱室空气与外界大气隔绝，但人员需要不断地吸入氧气（O_2）呼出二氧化碳（CO_2）以维持生命。同时，艇内设备运转、非金属材料挥发释放、烹饪、人体新陈代谢等都会产生多种有害气体，例如氢气（H_2）、一氧化碳（CO）、可挥发性有机物（VOC）以及异味气体等气态污染物，这些有毒有害气体含量超过规定的浓度范围，会引起严重后果，危及人员的生命安全和健康[1-3]。因此，需要在艇内通过大气环境控制技术营造出可以满足人员生命及设备运行安全的人工

收稿日期：2022–08–09　**修回日期：**2022–09–05　**网络首发时间：**2022–09–21 14:57

作者简介：李俊华，男，1968 年生，博士，研究员
焦桂萍，女，1975 年生，博士，研究员
邓辉，男，1984 年生，博士，研究员
曹聪霄，女，1988 年生，博士，高级工程师
*通信作者：李俊华

downloaded from www.ship-research.com

空气环境。总之,潜艇大气环境控制系统立足于解决人员正常呼吸问题、避免人员遭受不可逆的健康风险以及确保人员战斗力,主要包括空气再生、空气净化、空气监测等子系统[3]。

世界海军强国都高度重视潜艇大气环境控制系统技术的发展,大气环境控制系统在潜艇装备体系中占据了重要地位。从技术发展历程、设计理念、核心技术及实际效能来看,潜艇大气环境控制系统已经发展了 4 代。其中,第 1 代技术以保证人员生命安全和设备运行安全为目标,发展了密闭环境下的生命气体控制、安全性气体控制等技术,解决了潜艇水下航行安全的可靠性问题;第 2 代技术注重人员健康和生活,重点发展了各类适用于密闭环境下的空气净化及环境参数监测技术,实现了潜艇水下长期航行的目标;第 3 代技术更注重人员工效和系统可靠性,深入分析了生命气体、安全性气体、异味气体以及可能影响人员健康的气体等舱室气体组分对人员的影响,提升了潜艇适居性;第 4 代技术以提高人员生活的舒适性为目标,对气态污染物释放源头予以控制,系统的集成优化和自动化水平得到不断提高,能够将大气环境控制在舒适水平。

经过近 60 年的发展,我国潜艇大气环境控制水平不断提升,艇内大气质量可以满足人员生命安全与健康需求,但离外界大气环境趋同这一终极目标尚存在相当大的差距。在海军战略转型、装备体系升级的背景下,对大气环境控制装备的综合性能要求不断提高。因此,尽可能占用最少的资源,实现潜艇大气环境控制系统的长周期高效运行,以及构建高质量的艇内人工大气将是装备研制永恒的追求目标[4]。本文将回顾潜艇内制氧、二氧化碳清除、有害气体净化、大气成分监测等与大气环境控制系统相关的关键技术的发展历程,阐述国内外潜艇大气环境控制技术发展现状及趋势,并对其未来发展方向予以展望。

1　潜艇大气环境控制技术发展历程

1.1　核潜艇空气再生与净化技术

核潜艇潜航时间长,能源丰富且空间大,配置了电解水制氧装置、可再生式二氧化碳吸收装置与有害气体燃烧装置这 3 大装置,在艇内营造了适合长期航行的人工空气环境[5-10]。国外核潜艇普遍采用电解水制氧技术。电解水制氧技术可分为碱性电解水制氧和固体聚合物电解质(SPE)电解水制氧。美国、英国、法国海军均采用固体聚合物电解质(solid polymer electrolyte, SPE)制氧技术,俄罗斯海军采用低压碱性电解水制氧技术[1]。国外应用于核潜艇的二氧化碳吸收方法主要包括一乙醇胺吸收和分子筛吸附,其中,美英两国采用的是一乙醇胺吸收技术,法国则以分子筛吸附技术实现对二氧化碳的吸收与有害气体的清除来对空气进行联合净化。潜艇舱室内的一氧化碳、氢气和挥发性有机物等有害气体的净化主要采用催化氧化技术。国外核潜艇均采用催化燃烧器集中净化一氧化碳、氢气和可挥发性有机物。其中,美国海军装备的催化燃烧装置采用的是金属氧化物催化技术[3],反应温度为 315 ℃;英国海军装备的催化燃烧装置在净化时,其反应温度为 235 ℃;法国海军装备的催化燃烧装置采用的是含铂催化剂,可在 100 ℃ 完成对一氧化碳和氢气的催化氧化,净化可挥发性有机物时则需要提高反应温度。

20 世纪 60 年代,为解决我国核潜艇空气再生及净化的紧迫问题,启动了电解水制氧装置、二氧化碳吸收装置、有害气体燃烧装置这 3 个重要装置的研制工作。其中,电解水制氧装置采用碱性电解水供氧技术,以氢氧化钠水溶液作为电解液,水在阳极发生氧化反应后生成氧气;二氧化碳吸收装置采用乙醇胺吸收技术,乙醇胺与二氧化碳在常温下反应后生成氨基甲酸盐,在加热条件下可重新分解为乙醇胺和二氧化碳以实现再生[5];有害气体燃烧装置采用催化燃烧技术,通过将一氧化碳、氢气及可挥发性有机物转变为二氧化碳和水,从而达到净化的目的。上述 3 种装置实现了对艇内大气成分的有效控制,装备控制可靠,操作运行正常,被我国第 1 艘核潜艇总设计师黄旭华称为核潜艇关键技术的“七朵金花”之一。

随着我国海军装备的发展,对潜艇大气环境控制系统提出了更高的性能要求,更注重艇内人员健康和生活需求。通过空气再生与净化核心材料的跨越式发展,SPE 电解水制氧、长寿命复合胺二氧化碳吸收、低温燃烧催化等核心技术得以突破,空气再生技术有了大幅提高。经过十几年的不懈努力,我国自主开发并攻克了高性能、长寿命膜电极组件的制备工艺,实现了电解水制氧技术由碱性至 SPE 技术的跨越。为解决乙醇胺热稳定性和抗氧化能力差,以及受热时易发生分解产生氨气(NH_3)的问题[8],我国科研人员通过醇胺分子结构优化设计及配比优化,开发出了稳定性高、腐蚀性低、再生能耗低的复合胺吸收剂[9]。该溶液使用寿命得到延长,显著降低了装置尾气中的氨气浓度,可靠性得以大幅提升。在有害气

downloaded from www.ship-research.com

体燃烧装置低温催化燃烧技术方面，通过研发核心材料低温催化剂，工作温度显著下降，降低了装置能耗，显著提升了潜艇内的空气质量。

1.2 常规潜艇空气再生与净化技术

常规潜艇潜航时间短，携带的能源有限，空间紧凑，因此主要依赖一次性化学药剂实现空气再生。目前，应用于常规潜艇的供氧主要有氧烛、液氧及高压气氧供氧技术。其中，氧烛主要采用氯酸盐分解的方式产生氧气，氧气纯度高，可达到医用级标准，具有体积小、重量轻、可靠性高、免维护、安全性好、使用方便等特点。二氧化碳清除主要采用碱金属过氧化物及氢氧化锂技术。其中氢氧化锂二氧化碳吸收装置主要采用氢氧化锂与二氧化碳酸碱中和的方式清除二氧化碳，具有体积小、重量轻、清除速率快、控制浓度低、吸收量大等特点。我国上世纪 60 年代成功研制了空气再生药板，20 世纪末完成了氧烛-氢氧化锂空气再生装置的研制。氧烛-氢氧化锂作为常规潜艇供氧和二氧化碳净化装备，已应用于各型常规潜艇。近年来，国外完成了柔性二氧化碳吸收剂的研究工作，国内也跟踪开展了相关工作。这种柔性二氧化碳吸收剂将颗粒状吸附材料做成幕帘式，使用更加方便。

常规潜艇通过催化氧化法消除一氧化碳和氢气，配备了小型化的消氢装置和一氧化碳滤器，在保障潜艇安全性方面起到了至关重要的作用。针对有机物和异味气体净化，常规潜艇中装备了空气净化滤器。采用吸附法的滤器工作原理简单、能耗低且体积小，多以活性炭等多孔物质作为吸附材料，吸附饱和后，需定期更换。因此，此类滤器广谱性不强，不同舱室需要配备不同的专用滤器。

1.3 空气成分分析监测装备

准确分析艇内空气成分是成功对大气予以控制并合理制定大气标准的基础。美国海军核潜艇上装备有监测艇内大气的中央分析监测系统（CAMS）[1]，该系统以质谱技术为核心，辅以其它分析技术，对艇内生命气体和污染物质进行定性、定量监测。同时，CAMS 质谱仪与电解水制氧联动，利用 CAMS 质谱技术的稳定、精准的特点，来调节控制电解水系统的制氧量，以提高潜艇生命保障系统的自动化程度。英国安纳劳科斯（Analox）公司为英国核潜艇研制了 AA 型集中式大气分析仪，采用质谱和傅里叶光谱技术，可以同时检测近 30 种物质。以法国为代表的其他国家海军，研制和装备了多种潜艇用分布式传感器，用于测量氢气、氧气、二氧化碳、一氧化碳、制冷剂、二氧化硫等气体组分。这些分布式传感器事实上已构成了传感器网络，被用于测量不同舱段或战位需关注的气体组分。目前，法国海军正在发展新一代潜艇用传感器网络，以实现全艇的信息化、数字化。

20 世纪 60 年代，我国启动了潜艇综合气体分析仪的研制工作，实现了氢气、氧气、甲烷、二氧化碳、一氧化碳和氟利昂 R12 等气体测量集成。20 世纪 70 年代开展了氮氧化物、总烃、氡离子化色谱等检测技术的研究，为潜艇舱室大气成分控制提供了依据。随着常规潜艇及核潜艇的大气环境综合控制系统的常量、微量有毒有害气体的监测要求进一步提高，我国研制了多型固定式、便携式气体分析仪器，为大气质量控制和治理提供了科学而准确的监测数据。尤其是研制成功的国产化质谱仪，可实时监测核潜艇舱室内大气组分，是舱室大气成分监测系统的心脏。该质谱仪结合其它原理（热导、热磁、电化学、红外、热催化、比色管）研制的固定式、便携式分析仪器共同组成了潜艇舱室大气监测系统。针对常规潜艇的动力和空间受限问题，我国还研制了小型质谱仪。各类分析仪器分布于各舱室，通过工业 CAN 总线与集中显控台进行通信，在一定程度上能够及时有效地掌握潜艇舱室大气成分的变化情况及各气体分析仪器的运行状态。

2 潜艇大气环境控制技术发展现状

随着潜航时间进一步延长，各国海军对潜艇大气环境控制提出了更高要求，秉承了“以人为本”的发展理念，遵循了“保障生存安全→生命健康→人机工效→生活舒适”4 个层次的发展路径。通过新材料、新工艺的应用，大气环境控制装备朝着小型化、低能耗、静音化、高可靠性与高效能等方向不断发展。同时，将制氧、二氧化碳与有害气体净化进行集成化设计实现资源共享，形成联合技术进一步提升大气环境控制的效能。

2.1 先进制氧技术

目前，潜艇用供氧技术主要有电解水、氧烛、液氧及高压气氧供氧。国外常规潜艇一般采用氧烛、液氧实现供氧，核潜艇普遍采用电解水制氧。碱性电解水制氧装置基本上可满足潜艇供氧要求，是早期核潜艇的主要供氧设备[11-12]，俄罗斯海军中仍在使用此类设备。自 20 世纪 70 年代以

downloaded from www.ship-research.com

来, SPE 电解水制氧技术在试验和实际应用中显示了独特的优越性, 成为了各国核潜艇使用的主流制氧装备。SPE 电解水制氧技术是由美国通用电气公司于 20 世纪 50 年代开始研制、60 年代应用于宇宙飞船燃料电池的一项技术, 后因新型阳极催化剂研制成功, 放氧效率有了很大提高, 使电解水的效率、电压和成本获得重大突破。采用该技术的电解水装置相比传统的碱液电解水装置, 具有电流密度高、性能稳定、安全可靠、运行寿命长以及无腐蚀、体积小、重量轻等优点。

近年来, 国外主要开展了 SPE 电解水制氧技术、膜吸收制氧技术等研究。SPE 电解水制氧技术研究主要是对质子交换膜及催化剂进行改进, 以进一步提升电解水制氧的综合能量利用效率。美国国防部对 SPE 电解水制氧装置电解槽性能要求不断提高, 差压式低能耗电解水技术采用新型质子交换膜, 氢气侧为中高压, 氧气侧为常压, 以此提高制氧装置的可靠性和安全性。该制氧设备可以依靠自身压力将氢气排出艇外或下一级反应设备内, 不再依靠压缩机对氢气增压, 同时满足核潜艇的减振降噪需求。膜吸收制氧研究主要采用聚丙烯中空纤维膜从海水中分离出氧气的路线, 其限制因素是膜的长期稳定性、体积和能耗, 该技术目前处于实验室研究阶段。

2.2　低能耗高稳定性的二氧化碳清除技术

二氧化碳清除对于维持长期有人值守连续运行的密闭空间来说极为重要, 该技术是制约密闭空间工作时间进一步延长的重要因素。乙醇胺清除技术已在核潜艇应用多年, 但该技术能耗高, 且胺基液体易腐蚀设备、易降解造成二次污染。为解决上述问题, 国内外开展了分子筛、固态胺、复合胺、氨基酸盐、离子液体等多项二氧化碳净化新技术研究。

1) 分子筛吸附技术。

分子筛利用其物理吸附原理可实现空气中的二氧化碳分离, 国际空间站采用 5A 型分子筛作为二氧化碳吸附剂, 但这种分子筛亲水性较强, 吸湿后会造成对二氧化碳的吸附分离失效[13-15]。1969 年, 法国核潜艇便开始安装使用了 13A 分子筛吸附装置, 但装置的体积庞大。英国研制了温度交变分子筛和压力交变分子筛吸附装置, 其中后者因技术上的原因未装艇使用。

2) 固态胺树脂技术。

固态胺树脂是聚苯乙烯等树脂材料经氯甲基化后再接枝有机胺而形成的一种树脂, 其比热容值小且不存在气化潜热的耗能问题, 可降低再生过程中的能耗, 同时也能减弱对设备的腐蚀[16]。1968 年, 美国航空航天局(NASA)研制了可再生的二氧化碳吸附剂, 该方法已逐步在美国航天器上应用[17]。随后, 美国、日本、德国完成了固态胺清除二氧化碳装置的研制, 但均未见上艇应用的报道。我国从上世纪 90 年代开始开展固态胺的合成及其清除二氧化碳工艺技术研究, 但其体积、能耗优势并不明显[18]。

3) 氨基酸盐二氧化碳吸收技术。

氨基酸盐吸收剂由天然氨基酸衍生而来, 其蒸汽压极低, 不易挥发, 稳定性高[19]。英国以 N-甲基丙氨酸钾为吸收剂在二氧化碳清除装置上进行了实验, 其吸收效率基本上与乙醇胺相当, 但吸收二氧化碳到一定程度时会有碳酸化固体生成。因此, 应进一步开展工艺操作条件优化研究, 尽可能避免上述现象的发生。

4) 离子液体吸收技术。

离子液体是指在室温或接近室温下呈现液态的、完全由阴阳离子所组成的盐, 具有不挥发、有良好的热稳定性及阴阳离子可设计性等特点[20]。由于其不具有挥发性且脱附时没有潜热, 从而可实现二氧化碳的高容量吸收和低能耗再生[21]。针对长周期的深空探索需求, 2021 年美国霍尼韦尔公司报道了基于离子液体的膜反应器二氧化碳清除系统研究[22], 并已构建 1:1 尺度的原理样机, 开展了相关测试工作。

5) 介孔二氧化硅二氧化碳吸附技术。

先进的二氧化碳去除单元(advanced CO_2 removal unit, ACRU)是一种采用固体材料循环再生清除密闭空间二氧化碳的新技术, 其核心是自组装单分子层介孔材料 (self-assembied monolayers on mesoporous supports, SAMMS), 如图 1 所示。作为一种杂化纳米多孔材料, SAMMS 具有非常大的比表面积, 可进行功能化表面改性, 针对不同需求而选择性地引入胺基、乙二胺、烷基等活性官能团进行改性, 提高了二氧化碳吸附容量[23]。SAMMS 还具有极高的活性位点密度、高负载容量和高选择性, 在真空状态下加热可实现快速脱附。

美国海军自 2012 年为 ACRU 项目持续提供支持。据报道称, 该 ACRU 装置的二氧化碳去除率比现有装置高 40%, 首先将在“哥伦比亚”级核潜艇上应用, 并探索在现役的“俄亥俄”、“海狼”、“洛杉矶”和“弗吉尼亚”级艇上应用的可能性。

2.3　有害气体净化新技术

有害气体燃烧装置净化彻底、效率高, 但由于工作温度较高, 存在装置能耗高及氟利昂分解

downloaded from www.ship-research.com

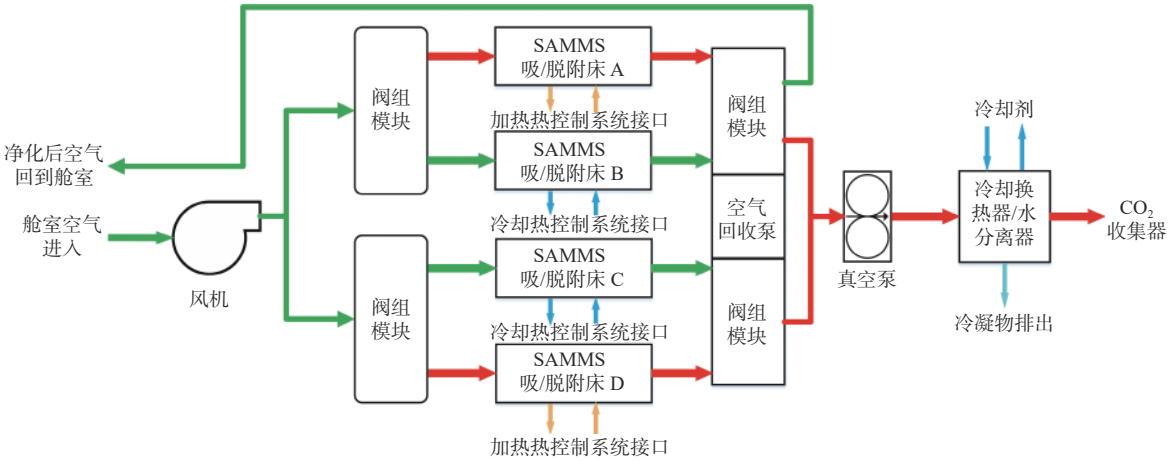

图 1 先进的二氧化碳去除单元流程图

Fig. 1 Flowchart of advanced carbon dioxide removal unit

产生酸性气体等问题。为解决上述问题，国内外对低能耗催化燃烧技术、吸附富集–催化燃烧技术、光催化技术等进行了大量研究工作。

1）低温催化燃烧技术。

通过对燃烧催化剂这一核心材料的发展迭代，降低催化反应温度，可减少燃烧装置能耗及氟里昂类气体分解。据报道，美国海军水面战中心（NSWC）于 2017 年开展了基于 Pt 燃烧催化剂的研制[24]。研究表明，Pt 系催化剂工作温度低，具有比霍加拉特催化剂更好的环境适应性，在高湿下对一氧化碳仍保持了较高的活性；该催化剂对氟利昂 134a 分解率明显低于霍加拉特催化剂。近年来，我国开展了整体式高效低阻燃烧催化剂的研发，催化剂工作温度大幅降低，催化床阻力相比颗粒催化剂降低了 2/3，实现了有害气体燃烧装置的减振降噪、节能降耗，整体性能得以提升。

2）吸附富集–催化燃烧技术。

将吸附技术与催化燃烧技术结合，采用吸附剂在常温下将有机物吸附进行富集，在高温下脱除富集的有机物，有机物在催化剂的作用下在一定温度下发生催化燃烧反应得以净化。该路线能耗低，适合大风量低浓度有机物的净化，在较低的风量下使用时，设备体积偏大。

3）光催化技术。

光催化技术因其工艺简单、能耗低、反应条件温和而受到广泛关注。二氧化钛（TiO_2）因其化学性质稳定、无毒且可重复使用成为了最有应用前景的光催化剂。英国国防部曾资助开展了光催化技术应用于潜艇大气净化的研究[25]，结果表明光催化技术可净化包括芳香烃和卤代烃在内的多种有机污染物且能起到杀菌作用。但光催化剂对光源利用率低、在高温高湿的舱室内使用寿命短、降解可能形成二次污染等制约了其的应用。

4）电催化净化有机物技术。

电催化净化有机物技术是将气固相电化学氧化法应用于微量可挥发性有机物的净化技术，文献中报道了一种应用于全固体电解池的膜电极[26]，在外加电压及常温条件下可将气态苯系物催化氧化生成二氧化碳和水。气固界面电化学氧化技术目前处于前期实验室探索阶段，此技术为密闭空间有害气体常温净化提供了新的思路。

5）低温冷冻技术。

低温冷冻技术的原理是根据不同气体的液化温度差异，通过低温将液化温度高的痕量挥发性有害气体冷凝成液体或固体来捕集，而氧气、氮气（N_2）等气体因液化温度较低不受捕集影响[27]。该技术的最大特点在于能够净化的有害气体种类多而系统本身不产生有害气体，并具有辅助舱室降温的优点。常见的可挥发性有机物和二氧化碳都可通过此项技术进行净化。但因该技术需要足够的低温，较适合用于 AIP 潜艇。

2.4 联合技术

各海军强国一直希望将电解水制氧装置和二氧化碳清除装置有效结合，以解决集成化、小型化的问题，使其发展成为一套有机联合及可靠的空气再生系统[28]。为此，开展了大量工作并取得了许多技术进步。

1）电化学制氧与二氧化碳清除联合技术。

美国国防部高级研究计划局（DARPA）资助开展了潜艇高级联合生命维持系统（SAILS）研究[2]。SAILS 是在 SPE 电解水制氧装置的基础上设计的，其核心为 SPE 二氧化碳还原/氧化小室，阳极发生水分解产氧反应，阴极发生二氧化碳还原反应，在二氧化碳与电解水产生的氢在催化剂作用下通过不同的电子路径可以转化为甲醇、甲酸等

downloaded from www.ship-research.com

不同产物[29-30], 如图 2 所示。该项技术的主要优点是: 与原有 SPE 制氧、二氧化碳吸收装置相比, 体积和重量减少 50%, 抑制了副产物氢的产生而有利于隐身, 并且能耗低、噪音低。但存在产物难以分离、仍存在氢气产生等技术问题, 后续未见工程应用的报道。

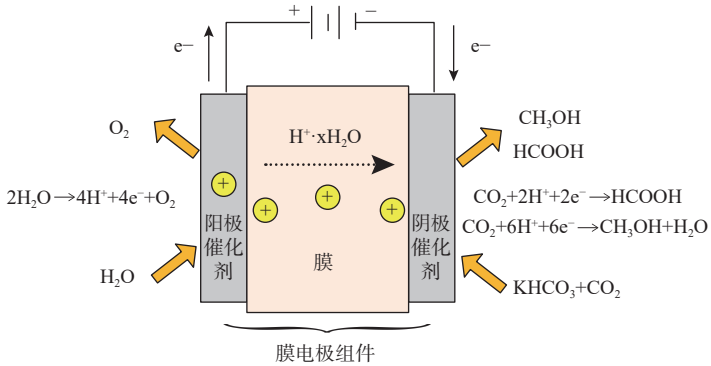

图 2　电催化制氧与二氧化碳还原原理图

Fig. 2　Schematics of electro-catalytic oxygen production and carbon dioxide reduction

2) 生物制氧与二氧化碳清除联合技术。

生物制氧及二氧化碳清除联合技术是以藻类的光合作用为基础, 利用生物反应器清除空气中的二氧化碳并产生氧气的技术。微藻具有生长周期短、易于大规模培养、反应温和等特点, 是一项非常具有应用前景的技术[31-32]。美国、日本和前苏联等国家自 20 世纪 90 年代就开始研究利用微藻脱除二氧化碳。NASA 设计的类生长海水罩膜(offshore membrane enclosures for growing algae, OMEGA)系统中藻类物质附着在薄膜上, 以污水和水中溶解的二氧化碳为原料, 在光合作用下, 生成氧气, 以净化水质, 同时, 固定二氧化碳后的藻类既可转化为食物, 也可转化为生物柴油等清洁能源。俄罗斯科学院西伯利亚分院的生物物理研究所建造了一个地基生物密闭舱, 研究空气–藻系统中水的净化和空气再生的问题。然而, 生物制氧与二氧化碳清除技术依然面临着许多挑战, 高效光生物反应器的研制技术尚未成熟, 微藻生长代谢效率和二氧化碳固定效率较低, 因此需进一步研究。

2.5　新型光谱及质谱监测技术

传统的 CAMS 质谱仪体积大、能耗高、人–机–环欠佳, 因此各国海军一直都在寻求新的技术替代方案。密闭舱室存在痕量的一氧化碳、二氧化硫、氨气、氮氧化物(NO_x)和硫化氢(H_2S)等典型无机污染物, 它们的存在会引起人体的不适。为提高空气监测能力, 各国开展了大量新型质谱、激光光谱的研究, 取得了许多技术进步。

1) 质谱技术。

传统的 CAMS 质谱仪需复杂的超高真空系统为核心部件提供工作环境, 国内外开展了大量先进质谱的应用研究, 发展了新一代广谱气体测量技术, 如离子阱质谱、飞行时间质谱(TOF)及 GC-MS 质谱。这些技术在小型化、广谱性及低能耗等方面具备一定优势。离子阱质谱最大优点是核心器件小巧, 对真空系统要求远低于四极磁聚焦等其它质谱[33]。TOF 质谱的优点是广谱性强且分辨率高。GC-MS 质谱优点是可有效克服舱室环境中的复杂交叉干扰, 气体成分定性识别有望超过 300 种, 定量测定有望超过 100 种。

2) 新型激光光谱技术。

国外开发了可调谐半导体激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)、量子级联与激光光声光谱 PAS(聚硫酸铝)等先进的激光光谱技术。美国 NASA 开发的 OLGA 型潜艇用多组分气体分析仪(基于 TDLAS 原理)可监测氧气、二氧化碳、氨、水气等 4 种组分。量子级联激光器输出功率高, 调谐范围宽, 可以实现痕量气体的识别和定量, 以及准确识别和定量一氧化碳、二氧化硫、氨气、氮氧化物、硫化氢等, 灵敏度可达 ppb 级。英国 Analox 公司开发了基于量子级联激光技术的一氧化碳分析仪, 用于潜艇舱室一氧化碳监测。激光光声光谱 PAS 技术的优点是分辨率高, 且体积远小于基于 TDLAS 和量子级联激光原理的分析仪器。法国 Mirsense 公司的 MSM 多组分气体检测模块可实现氮氧化物、一氧化碳、二氧化碳、二氧化硫、氨气等多种组分的测量, 灵敏度可达 10 ppb。

3　大气环境控制技术发展展望

潜艇大气环境控制技术是生命保障系统的核心, 直接影响潜艇的战斗力和生存力, 决定了国

downloaded from www.sinp-research.com

家海防及海洋战略安全。因此，实现关键技术及关键产品的自主可控已成为关系我国高质量和可持续发展的重中之重。大气环境控制装备研制需要面向国家和国防建设需要，加大前瞻性、先导性、探索性技术研究力度，增强装备和产品的系统论证和集成，以及提高小型化、轻量化、智能化工程的设计能力，以满足升级换代和自主可控要求。对未来潜艇大气环境控制技术发展归纳如下几点：

1）重视大气环境控制系统顶层控制和设计，贯彻“以人为本”发展理念。

以满足长自持力潜航人员工效和生活舒适性需求为目标开展环境因素控制规范制订、指标分配和应用技术研究工作。大气环境控制系统由被动消除控制向源头管理的主动控制和被动控制相结合的方向发展，由分立指标、对象控制向综合指标、综合集成治理、智能监控方向发展，不断提高系统集成优化、智能化水平，提高系统安全性和可靠性。

2）加强潜艇空气质量综合评估和装备效能评估体系建设，指导系统设计和装备持续改进。

全面解析影响舱室空气质量的污染源，建立痕量有害物质的检测方法规范，将检测评估技术从常量、微量污染物提升到痕量、超痕量污染物浓度水平，提高采样速率及实时监测精度；开发潜艇各舱室空气质量评估的大数据中心及算法，开展定期的空气质量全面评估工作，以及舱室空气质量“适居性”、“森林型”等指标的量化技术研究，为近期和远期的空气质量控制目标提供技术支撑，构建潜艇空气质量大数据中心。

3）提升装备集成化及功效水平，提供安全、健康、舒适的大气环境。

充分贯彻集成优化、自动化、信息化、减振降噪、自主可控理念，围绕潜艇大气环境控制装备效能提升与集成化等方面需求，通过高效能再生与净化核心材料、核心器件的改进升级及应用工艺优化，形成多功能集成化装备技术方案。同时，开展大气环控装备小型化、集成化、模块化、精细化工艺研究，提升装备集成化水平、整体工效水平和可靠性，构建新一代集成化空气再生净化与监测装备体系。

4）加强协作，整合产学研资源，推动大气环境控制技术发展。

国家双碳战略的实施带动了新一轮能源产业革命，电解水制氢、低能耗二氧化碳捕集与利用、温室气体净化等前沿及基础理论与工程应用示范等项目得以快速迭代发展。在此背景下，联合高校和科研院所、立足自主创新、加大原创性技术开发力度、开展基础性研究对大气环境控制技术的发展具有重要意义。

5）深海深空成为新的大国博弈空间，高效能大气环境控制装备是未来技术发展热点。

深海深空领域因其独特的环境特点，成为了重要的战略空间，是前沿技术研发的热点领域。近年来，美国 NASA 围绕载人火星探索，在长周期密闭空间空气再生与净化、监测等多个前沿技术领域开展了大量研究工作，如先进的适合更长周期密闭循环的大气环境控制技术体系研究，以创新驱动技术进步，全方位布局未来。

4 结 语

随着潜艇大气环境控制水平越来越高，制氧、二氧化碳清除、有害气体净化与大气成分监测等技术取得了长足进步，对舱室环境空气质量要求已由最初的保障人员生命安全和设备运行安全向提高人员健康、工效、舒适性方向发展。潜艇大气环境控制系统集成优化、智能化水平得到了不断提高。与世界先进水平相比，我国潜艇大气环境控制技术水平仍存在差距，需要借鉴国外潜艇和航天装备在大气环境控制领域取得的技术进步，开展以生活舒适性为目标的潜艇大气环境控制技术的研发及生产体系的构建，更好地适应未来潜艇技术的发展及使命任务变化的需求。同时，还需要在新材料和新工艺方面取得新突破，提升精细化设计水平，实现潜艇新一代大气环境控制装备的高可靠性、高效能、自主可控、集成化、小型化及减振降噪的目标，以进一步提升综合技术水平。此外，建议加强对相关原创性技术研究的支持力度，加强科研院所、高校与企业之间的合作，形成一套高效的基础研究和工程研发技术发展体系，从而不断提升我国潜艇舱室空气质量的控制水平。

参考文献：

[1] 雷宏宇, 牛成德, 刘书子. 国外潜艇大气控制设备和技术的最新研究与发展 [J]. 舰船防化, 2004(4): 1–7.
LEI H Y, NIU C D, LIU S Z. Latest research and development of submarine atmosphere control equipment and technology abroad[J]. Chemical Defence of Ships, 2004(4): 1–7 (in Chinese).

[2] 刘书子. 现代潜艇高级联合生命维持系统 [J]. 舰船防化, 2001(2): 11–16 .
LIU S Z. Advanced combined life support system for modern submarines[J]. Chemical Defence of Ships,

downloaded from www.ship-research.com

2001(2): 11–16 (in Chinese).

[3] 徐新宏, 江璐, 方晶晶, 等. 潜艇舱室气态污染与环控生保技术发展趋势 [J]. 装备环境工程, 2021, 18(8): 107–114.
XU X H, JIANG L, FANG J J, et al. Research status of submarine air pollutant and development of atmospheric environment monitoring and control technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(8): 107–114 (in Chinese).

[4] 陈根年. 潜艇人–机–环境系统工程的进展和展望 [J]. 舰船科学技术, 2001(3): 3–7.
CHEN G N. Progress and prospect of submarine man-machine-environment systems engineering[J]. Ships Science and Technology, 2001(3): 3–7 (in Chinese).

[5] 姜世楠. 一乙醇胺 CO_2 吸收剂的理化性质 [J]. 舰船防化, 2006(2): 19–23.
JIANG S N. Physical and chemical properties of monoethanolamine CO_2 absorbent[J]. Chemical Defence of Ships, 2006(2): 19–23 (in Chinese).

[6] 姜世楠, 马丽娥, 王雅娟, 等. 潜艇密闭舱室供氧技术 [J]. 舰船防化, 2009(5): 1–5.
JIANG S N, MA L E, WANG Y J, et al. Technologies of supplying oxygen for submarine's cabin[J]. Chemical Defence of Ships, 2009(5): 1–5 (in Chinese).

[7] 姜世楠, 马丽娥, 王雅娟, 等. 潜艇舱室 CO_2 净化技术的研究现状与展望 [J]. 舰船科学技术, 2010, 32(12): 3–6, 23.
JIANG S N, MA L E, WANG Y J, et al. Present state and perspectives of research on carbon dioxide purification technology for submarine's cabin[J]. Ships Science and Technology, 2010, 32(12): 3–6, 23 (in Chinese).

[8] 邓辉, 杨晓冬, 郭强, 等. 一乙醇胺降解机理的研究进展 [J]. 舰船防化, 2013(2): 54–59.
DENG H, YANG X D, GUO Q, et al. Review on degradation of monoethanolamine in CO_2 capture[J]. Chemical Defence of Ships, 2013(2): 54–59 (in Chinese).

[9] 焦桂萍, 魏全敏, 杜大庆, 等. 复合胺溶液脱除 CO_2 性能研究 [J]. 舰船科学技术, 2010, 32(12): 51–54.94.
JIAO G P, WEI Q M, DU D Q, et al. Research on carbon dioxide removal by mixed amines solvent[J]. Ships Science and Technology, 2010, 32(12): 51–54.94 (in Chinese).

[10] 祝维燕, 宫志刚, 张志梅, 等. 潜艇有害气体综合净化技术 [J]. 舰船科学技术, 2008, 30(增刊 2): 179–182.
ZHU W Y, GONG Z G, ZHANG Z M, et at. The technologies of synthetical decontaminating harmful gases in submarine[J]. Ships Science and Technology, 2008, 30(Supp 2): 179–182.

[11] 刘书子. 国外核潜艇舱室大气环境控制关键技术的最新发展 [J]. 舰船防化, 2001(2): 1–10.
LIU S Z. The latest development of key technologies for atmospheric environment control of nuclear submarine cabin abroad[J]. Chemical Defence of Ships, 2001(2): 1–10 (in Chinese).

[12] 王朋辉, 倪伟, 颜欢, 等. 潜艇舱室空气处理技术研究进展 [J]. 船舶工程, 2015, 37(12): 1–4.
WANG P H, NI W, YAN H, et al. Study progress of air treatment technology in submarine cabin[J]. Ship Engineering, 2015, 37(12): 1–4 (in Chinese).

[13] 姜磊, 赵俊海. 载人深潜器二氧化碳清除方式研究 [J]. 中国造船, 2010, 51(3): 169–177.
JIANG L, ZHAO J H. Research on absorption methods of carbon dioxide applied in human occupied vehicle[J]. Shipbuilding of China, 2010, 51(3): 169–177 (in Chinese).

[14] 张长金, 尹燕华, 周旭, 等. CO_2 清除新技术的研究现状与进展 [J]. 舰船防化, 2010(2): 1–6.
ZHANG C J, YIN Y H, ZHOU X. et al. Present status and progress of carbon dioxide removal[J]. Chemical Defence of Ships, 2010(2): 1–6 (in Chinese).

[15] 汪波, 耿世彬, 韩旭. 封闭空间 CO_2 气体去除技术的研究现状与展望 [J]. 建筑热能通风空调, 2007, 26(6): 23–26,37.
WANG B, GENG S B, HAN X. Present state and perspectives of research on carbon dioxide removal technology for sealed space[J]. Building Energy & Environment, 2007, 26(6): 23–26,37 (in Chinese).

[16] 陈兆文, 管迎梅, 张强. 潜艇舱室固态胺 CO_2 清除技术的基础理论分析 [J]. 舰船防化, 2007(1): 1–7.
CHEN G W, GUAN Y M, ZHANG Q. Basic theoretical analysis for CO2removal in submarine atmosphere by solid amine[J]. Chemical Defence of Ships, 2007(1): 1–7 (in Chinese).

[17] 陈根年. 密闭环境中二氧化碳的控制 [J]. 舰船科学技术, 1995, 17(1): 62–65.
CHEN G N. Control of carbon dioxide in closed environment[J]. Ships Science and Technology, 1995, 17(1): 62–65 (in Chinese).

[18] 赵燕山. 固态胺清除二氧化碳技术研究 [J]. 舰船科学技术, 2001(2): 23–28.
ZHAO Y S. Study on carbon dioxide removal by solid amine[J]. Ships Science and Technology, 2001(2): 23–28 (in Chinese).

[19] 邓辉, 郭强, 杨晓东, 等. 氨基酸盐二氧化碳吸收技术研究进展 [J]. 舰船防化, 2014(4): 6–12.
DENG H, GUO Q, YANG X D, et al. Review on research of amino acid salts in CO_2 capture[J]. Chemical Defence of Ships, 2014(4): 6–12 (in Chinese).

[20] 宋红兵, 盖恒军, 唐林生, 等. 离子液体吸附二氧化碳的研究进展 [J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(2): 119–126.
SONG H B, GAI H J, TANG L S, et al. Research progress in ionic liquids absorption of carbon dioxide[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 36(2): 119–126 (in Chinese).

[21] 崔国凯, 吕书贞, 王键吉. 功能化离子液体在二氧化碳

downloaded from www.ship-research.com

吸收分离中的应用 [J]. 化工学报, 2020, 71(1): 16–25.
CUI G K, LYU S Z, WANG J J. Functional ionic liquids for carbon dioxide capture and separation[J]. Journal of Chemical Engineering, 2020, 71(1): 16–25 (in Chinese).

[22] YATES S F , KAMIRE R J , HENSON P , et al. Scale-up of the carbon dioxide removal by ionic liquid sorbent (CDRILS) system[C]//49th International Conference on Environmental Systems, ICES-2019-219, Boston, MA: [s.n.], 2019: 1–15 .

[23] FRYXELL G E, MATTIGOD S V, LIN Y H, et al. Design and synthesis of self-assembled monolayers on mesoporous supports (SAMMS): The importance of ligand posture in functional nanomaterials[J]. J. Mater. Chem., 2007, 17: 2863–2874.

[24] KALE M, GIDCUMB D, GULIAN F J, et al. Evaluation of platinum catalysts for naval submarine pollution control[J]. Applied Catalysis B:Environmental, 2017, 203: 533–540.

[25] TOFT G D, AITCHISO A F. A study into the potential use of photoctalysis for atmosphere treatment in submarines [C]//34th International Conference on Environmental Systems and Expo 2004 (ICES 2004). Colorado Springs, Colorado: [s.n.], 2004: 1–7.

[26] ZHANG B, CHEN M, WANG L, et al. Electrochemical oxidation of volatile organic compounds in all-solid cell at ambient temperature[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 354: 93–104 .

[27] 李祥东, 汪荣顺. 水下密闭空间生存环境的综合改善技术—采用低温冷冻法改善潜艇舱室大气环境的空气净化系统 [J]. 舰船科学技术, 2008, 30(6): 104–107.
LI X D, WANG R S. Comprehensive technology for improving living environment in in closed underwater roomages-An air cleaning system for submarine based on cryogenic liquefaction technology[J]. Ship science and technology, 2008, 30(6): 104–107 (in Chinese).

[28] 王钰, 乔江波, 李灿, 等. 核潜艇舱室一体化空气再生系统技术设想 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(1): 78–81.
WANG Y, QIAO J B, LI C, et al. The technical concept of integrated air regeneration system for nuclear submarine[J]. Ships Science and Technology, 2022, 44(1): 78–81 (in Chinese).

[29] 张旭锐, 邵晓琳, 易金, 等. 水溶液中二氧化碳电还原技术的发展现状、挑战及对策 [J]. 电化学, 2019, 25(4): 413–425.
ZHANG X R, SHAO X L, YI J, et al. Statuses, challenges and strategies in the development of low-temperature carbon dioxide electroreduction technology[J]. Journal of Electrochemistry, 2019, 25(4): 413–425 (in Chinese).

[30] 赖洁, 杨楠, 袁健发, 等. 电化学催化还原二氧化碳研究进展 [J]. 新能源进展, 2019, 7(5): 429–435.
LAI J, YANG N, YUAN J F, et al. Recent progresses in electrocatalytic reduction of carbon dioxide: A review[J]. Advances in New Renewable Energy, 2019, 7(5): 429–435 (in Chinese).

[31] 廖莎, 薛冬, 李晓姝, 等. 微藻固碳技术基础及其生物质应用研究进展 [J]. 当代化工, 2020, 49(6): 1175–1179.
LIAO S, XUE D, LI X S, et al. Research progress in carbon dioxide fixation by microalgae and its biomass application[J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49(6): 1175–1179 (in Chinese).

[32] 张健, 王起华, 费修绠. 藻类光生物反应器研究进展 [J]. 水产科学, 1999, 18(2): 37–39.
ZHANG J, WANG Q H, FEI X G. The progresses in studies of algae photobioreactors[J]. Fisheries Science, 1999, 18(2): 37–39 (in Chinese).

[33] 邓芹英, 刘岚, 邓慧敏. 波谱分析教程 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2007: 214–217.
DENG Q Y, LIU L, DENG H M. Spectrum analysis tutorial[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007: 214 – 217 (in Chinese).

downloaded from www.ship-research.com