

环境试验与观测

潜艇舱室气态污染与环控生保技术发展趋势

徐新宏¹, 江璐¹, 方晶晶¹, 陈宏², 任小孟¹, 许林军¹

(1.海军特色医学中心, 上海 200433, 2.92370 部队参谋部, 海南 三亚 572016)

摘要: 首先介绍了潜艇舱室主要气态污染物, 分析了其主要来源及其对人体的危害。然后基于潜艇大气控制系统、供氧系统、二氧化碳清除装置、空气净化装置、通风系统、应急供氧、潜艇大气环境监测系统等方面简述了潜艇舱室环境空气监测与控制技术的现状和发展趋势。关注了低温冷冻技术、光催化净化技术、等离子体催化净化技术、活性炭纤维吸附技术等一些具有开发应用潜力的监测和净化新技术。最后指出我国在潜艇大气环境领域的研究发展与国外先进水平还存在较大差距, 在及时跟踪引进国外先进技术的同时, 应注重该领域的基础性研究。

关键词: 潜艇空气; 监测; 净化; 污染物

中图分类号: TJ6

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)08-0107-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.08.018

Research Status of Submarine Air Pollutant and Development of Atmospheric Environment Monitoring and Control Technology

XU Xin-hong¹, JIANG Lu¹, FANG Jing-jing¹, CHEN Hong², REN Xiao-meng¹, XU Lin-jun¹

(1.Naval Medicine Center of PLA, Shanghai 200433, China; 2.92370 Army Staff Headquarters, Sanya 572016, China)

ABSTRACT: Firstly, the main gaseous pollutants in submarine cabin are introduced, and their main sources and harm to human body are analyzed. Then, based on submarine atmospheric control system, oxygen supply system, carbon dioxide removal device, air purification device, ventilation system, emergency oxygen supply and submarine atmospheric environment monitoring system, this paper briefly describes the current situation and development trend of submarine cabin ambient air monitoring and control technologies. Some new monitoring and purification technologies with development and application potential, such as low-temperature freezing technology, photocatalytic purification technology, plasma catalytic purification technology and activated carbon fiber adsorption technology, are concerned. Finally, it is pointed out that there is still a large gap between China's research and development in the field of submarine atmospheric environment and foreign advanced level. While tracking and introducing foreign advanced technology in time, we should pay attention to the basic research in this field.

收稿日期: 2021-04-16; 修订日期: 2021-05-14

Received: 2021-04-16; Revised: 2021-05-14

基金项目: 海军装备部军内科研项目 (15A309); 国家自然科学基金 (21507161)

Fund: Scientific Research Project of Naval Equipment Department (15A309); National Natural Science Foundation of China (21507161)

作者简介: 徐新宏 (1977—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为密闭环境有害物质控制和非金属材料毒性评价。

Biography: XU Xin-hong (1977—), Male, Master, Assistant researcher, Research focus: control of harmful substances in closed environment and toxicity evaluation of non-metallic materials.

通讯作者: 方晶晶 (1978—), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为密闭环境有害物质控制和非金属材料毒性评价。

Corresponding author: FANG Jing-jing (1978—), Female, Doctor, Assistant researcher, Research focus: control of harmful substances in closed environment and toxicity evaluation of non-metallic materials.

引文格式: 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 Xin-hong, JIANG Lu, FANG Jing-jing, 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.

KEY WORDS: submarine air; monitoring; purification; pollutant

潜艇舱室是一个人员众多、设备复杂的密闭环境,空气组分复杂,有害气体和污染物种类繁多,严重威胁着艇员的身心健康和潜艇的运行安全。武器装备发展的进步,极大地推动了水下潜航的时间,但水下人员自持力时间的决定因素不但取决于武器装备的潜航性能,更重要的是取决于密闭舱室整体环境的特点。潜艇水下巡航能力及待命时间越长,空气污染物积累越难达到净化要求,潜艇舱室大气环境质量的优劣直接影响到潜艇战斗力的发挥。世界各国海军对潜艇大气质量与控制都非常重视,并开展广泛和深入的研究。美国海军已将潜艇大气环境质量的重要性列为仅次于武备的第二重要位置,足见其对大气环境质量的重视程度。文中旨在对潜艇大气环境研究现状做简要介绍,为了解国内外海军潜艇相关技术发展和装备情况提供一定参考。

1 潜艇舱室主要气态污染物

潜艇舱室空间狭窄局促,水下航行期间,对外没有气体交换。随着水下航行时间的增加,污染物主要依靠内部处理消除,未有效消除的污染不断累积,浓度升高,大气环境质量逐渐恶化。潜艇大气污染物呈现高复合型和低剂量特点^[1]。高复合型指的是污染种类繁多,除了常见的挥发性有机化合物、化学气溶胶、微生物气溶胶外,部分型号潜艇中还有放射性气溶胶。

1.1 气态污染物的主要来源

潜艇舱室内部环境复杂,气态污染物和有害气体来源广泛,动力机械电子设备运转、艇内烹饪、艇员呼吸与新陈代谢、武器发射和非金属材料释放都会产生有害气体。

柴油内燃机在启动或刹车时,瞬间可产生一氧化碳、二氧化碳、三氧化氮、二氧化硫、硫化氢、甲烷及其他烃类气体等。潜艇用蓄电池铅板含有微量的砷和锑,当蓄电池充、放电及电池温度过高时,电极发生水解,会产生氢。锑和砷与新生氢接触,会产生毒性很强的锑化氢与砷化氢。艇上携带的一溴三氟甲烷、氯溴甲烷、三氯溴甲烷、二氟二溴甲烷或干碳酸钠等灭火剂可分解成氯化氢、氢、光气、溴、溴化氢及溴化碳酰等。制冷剂氟利昂-11、氟利昂-12、氟利昂-22 泄漏后,可分解出氢、氯、氯化氢、氟化氢、光气等。电子仪器设备可以产生臭氧和一氧化碳^[2]。

除了装有大量设备、仪器、仪表外,潜艇建造时还采用了大量的非金属材料。潜艇使用的涂料、油漆、润滑油和保温材料等均会因受热蒸发而释放出有害气体^[3-4]。涂料与油漆中的溶剂会释放甲苯、二甲苯、

乙苯,酚甲醛树脂会释放其中的游离甲醛,润滑剂的燃油分解会产生甲醛、乙醛、丙烯醛等。高分子保温材料(如聚氨酯、聚酰亚胺)受热会释放大量甲醛、乙醛、丙酮和甲醇。

人体代谢是污染物的主要来源^[5]。人体代谢产物多达 400 种以上,仅人体呼出气中就含有百余种气体,其中包括二氧化碳、一氧化碳、氨、丙酮、苯、胺、氯化物、醛等。尿中有 229 种化合物,包括 103 种氯化物,30 种电介质,38 种分泌物,10 种酶,还有维生素、脂肪烃和有机酸。人体经皮肤经常排泄汗液与皮脂腺分泌物。皮脂腺分泌物的主要成分包括:游离脂肪酸、蛋白质、无机酸、甘油、棕榈脂、盐和其他物质。人体皮肤表面进行呼吸时,也会排出少量污染性气体。

除了气态污染物,潜艇中还存在大量的颗粒物气溶胶。化学气溶胶颗粒物主要来源于餐厨烹饪、机械装置磨损、氧烛及二氧化碳吸收装置的开启和运转、舱壁材料机械振动脱落、核裂变产物等。艇内烹饪除了产生大量的气态污染物外,也会产生大量颗粒物气溶胶和油烟,舱室油烟是油脂和有机质分解裂解的产物。这种烹饪油烟包含了大量的硝基芳烃、杂环胺、巴豆醛和多环芳烃等强致癌物。微生物气溶胶主要来源于食物的分解及腐烂、舱室废弃物处理、人员新陈代谢、呼吸排气、排泄物等,如细菌、放线菌、真菌、病毒、类病毒、立克次氏体、衣原体、支原体等。放射性物质主要存在于核动力潜艇,来源于反应堆释放出的放射性物质,当其扩散至舱室时,空气中的稳定同位素在放射线作用下会被活化,夜光仪表也是放射性物质来源之一。

历次的实艇检测分析测试发现,挥发性有机化合物第一大类为脂肪烃,主要来源为润滑油和燃油,大约占检测总量的 50%;第二大类为芳香烃(如甲苯、乙苯、二甲苯),主要来源为装饰材料,约占 25%;第三大类为含氧化合物(如醇醛酮),主要来源为装饰材料,约占 10%;第四大类为卤代烃,来源为制冷剂或者灭火剂,约占 5%;最后含硫、氮化合物(如硫化氢、氨气)约占 5%,主要来源为装饰材料和人体代谢释放^[6-8]。

1.2 气态污染物毒性作用

几十年来,国内对常规潜艇及核潜艇舱室空气污染物的分析开展了大量的研究。由于潜艇空气中的污染物极其复杂,对污染空气组分进行全面分析,在技术上还有较大的困难。据 20 世纪 70 年代中期以来的文献初步统计,定性检测出六百多种空气组分,定量检测出一百多个空气组分。根据潜艇舱室空气中组分的危害程度,我国先后制订了 GJB 11B—2012《常规

动力潜艇空气组分容许浓度》和 GJB 11A—1998《核潜艇舱室空气组分容许浓度》，分别对常规潜艇空气中 35 种组分和核潜艇空气中 60 种组分制定了容许浓度^[9-10]。标准的制订保护了艇员的安全，为开展舱室空气中污染物组分的治理提供了依据。

目前潜艇上的气态化合物毒性作用研究主要集中在四个方面：中枢神经系统毒性作用；呼吸系统毒性作用；眼、鼻、咽喉和呼吸道的刺激性作用；对人体的致癌作用。明确有致癌作用的化合物如苯和甲醛，对人体有刺激作用的化合物如氨和硫化氢，对中枢神经系统有毒性作用的氟利昂类化合物等^[11]。造血系统中毒是慢性苯中毒的特征之一，早期以白细胞计数持续降低为主要表现，常有中性粒细胞绝对数减少，但百分比仍在 50% 以上。苯对神经系统的慢性效应最常见的是神经衰弱症候群，主要表现为头晕、头痛、乏力、失眠或多梦、性格改变和记忆力减退等，极少数有四肢末端痛觉减退和麻木等，一般无运动功能障碍。氨对人体的毒性与环境中的氨浓度和暴露时间有关，低浓度氨对黏膜、皮肤有刺激作用，引起结膜、上呼吸道黏膜充血、水肿和分泌物增加。甲醛属中等毒性物质，对眼与呼吸道产生明显的刺激作用。甲醛能凝固蛋白质，甲醛暴露后，即产生对皮肤和黏膜强烈的刺激作用。吸入高浓度甲醛蒸气，对中枢神经系统有毒性作用，并刺激肺部，引起中毒性肺水肿。硫化氢属剧毒类化合物，是一种细胞内毒素，由血液进入机体细胞后，硫化氢分子与细胞色素氧化酶紧密结合，并因此阻断细胞内呼吸，使中枢神经细胞及其敏感的呼吸中枢细胞受损，并出现显著障碍（如呼吸频率增加），接着会导致呼吸中枢细胞损害和麻痹，呼吸功能减弱而使全身缺氧。硫化氢中毒症状本质上与缺氧时出现的症状一致，发绀、痉挛、死亡都是因硫化氢引起的缺氧所致。氟利昂-1301、氟利昂-22、氟利昂-11、氟利昂-12 等卤代烃属低毒类化合物，主要作用于中枢神经系统及心血管系统。

急性中毒主要是黏膜刺激、中枢神经抑制、心律失常和呼吸系统损害。密闭环境里有些污染物之间还具有协同效应，多种低浓度污染物的联合毒害作用和单一高浓度污染物毒性效应不一样，目前研究较少。有些有害气体有时还会发生变化，如碳氟氯化物自身毒性不大，但经催化氧化后，分解成具有刺激性和腐蚀性的氟化氢、氯化氢，危害更大。

2 潜艇大气控制技术现状

2.1 潜艇大气控制系统

潜艇环境封闭、人员密度大、水下航行通风不良，如不对环境进行控制，舱内二氧化碳浓度每小时可升高 0.3%（体积分数），氧浓度每小时可降低约 0.4%。作为保持潜艇战斗力的大气环境控制系统，受到各国

海军的重视，技术手段层出不穷，为满足潜艇大气环境需求，提供了更多选择^[12]。潜艇舱室空气控制主要通过潜艇综合空调系统来进行控制，这些系统包括空气再生与净化、气体监测分析、空气调节通风等分系统。由通风分系统的通风机，将舱室内高热或低温的污染空气，通过管路中的静电除尘器、有害气体燃烧器、微粒过滤器、活性炭吸附器等净化设施处理后，又经过中央空气调节装置对空气进行冷却去湿或加热升温，再经通风管路，将温湿度适宜、再生净化的空气送至舱室，以改善艇员生活与工作的空气环境以及仪器、设备的运行条件。其中核潜艇系统中串入了水电解制氧装置、再生式二氧化碳吸收装置^[13]。

常规潜艇依靠单个设备来消除二氧化碳产生氧气。潜艇采用多种空气过滤器、静电除尘器、有害气体燃烧装置等，以净化空气。气体监测分析分系统由分布在各舱室的气体分析仪器构成，对空气中的主要组成（如氧气、氢气、二氧化碳、一氧化碳、氮氧化物、乙醇胺、氟利昂、总烃、水蒸气等）随时进行监测与分析、显示与报警^[14]。核动力潜艇还设有核辐射监测系统，对放射性污染物质进行监测与分析。联成一体空气调节、通风分系统，通常主要包括制冷装置、加热设备、空气调节装置、通风机、管路和阀件等，对潜艇舱室内空气温度、湿度，实施调节、通风，以创造符合卫生要求的温湿度环境。

2.2 供氧系统

常规潜艇主要采用氧烛来进行供氧。氧烛的成分为过（超）氧化钾和过（超）氧化钠，供氧原理是利用其强氧化特性，在热分解时释放氧气，或与水蒸气、CO₂ 等反应生成氧气。这种方式供氧存在着药剂吸湿膨胀后效率降低，以及产生粉尘造成二次污染等问题。俄罗斯等国常规潜艇以其作为主要供氧设备，核潜艇则以其作为备用的空气再生装置^[15]。

液氧罐供氧广泛应用于常规潜艇，从液氧罐中出来的液氧经过汽化后，减压、混合，然后送入各舱室，供艇员呼吸。液氧罐供氧和超氧化物供氧方式属于一次性供氧，受到携带量的限制，在使用时难以满足潜艇长时间连续潜航的需求^[16]。

国外海军供潜艇艇员的氧气大多是采用电离产氧装置（Electrolytic Oxygen Generator, EOG）电解海水获取的。美英等国潜艇一般都装备有电解水产氧装置，该装置利用潜艇储存的电能进行电解水，在潜艇水下航行期间，可持续向潜艇供应充足的氧气。这种方式是当前核潜艇常用的供氧方式，但由于会产生氢气，有一定危险性。尽管存在着腐蚀性碱液存放难、设备体积大、工作效率低等问题，但它能够满足水下长期供氧的需求。为提高产氧的安全性和可靠性，国外海军研制了新一代产氧机，该装置应用固体聚合物

电解质电解水技术 (SPE) 来生产呼吸用氧。其优点在于: 由微处理器控制, 产氧工作效率高; 不使用腐蚀性电解质, 可在低压下运行, 安全可靠; 产氧量大, 且降低了易燃 H_2 气体的含量^[17]。通过 3 种供氧方式的比较, SPE 水电解技术克服了碱性电解液的腐蚀问题, 是潜艇水下长期供氧技术发展的趋势, 但由于能耗较高, 目前还无法在常规潜艇实施。

2.3 二氧化碳清除装置

乙醇胺 CO_2 清除装置是一种再生式 CO_2 清除装置, 含高浓度 CO_2 的空气流经装有一乙醇胺的交换塔, 一次处理即可清除空气中 70%~90% 的 CO_2 。一乙醇胺加热后, 释放出 CO_2 , 可循环使用, 基本满足了潜艇 CO_2 清除的要求。但其装置体积大, 能耗高, 且存在着一乙醇胺泄漏造成二次污染等固有缺点。

氢氧化锂吸收装置是一种非再生式 CO_2 清除装置, 其吸收效率优于碱石灰和超氧化物。当气流通过氢氧化锂过滤罐时, CO_2 便被清除。在实际应用时, 该装置在常压下可使大气中的 CO_2 浓度控制在 2% 以下, 即使不使用风扇, 也可正常工作。

德国海军潜艇使用的是一种既可吸附 CO_2 , 又可解析 CO_2 的“再生式污染控制装置”(RSBG), 其吸附和解析过程可根据大气中的 CO_2 浓度进行自动控制, 装置通过温度和压力的转换过程来实现再生, 可将 CO_2 浓度安全地控制在 0.5% 以内, 连续工作而不必更换吸收罐^[18]。通过温度和压力转换的 CO_2 脱除技术因为不用更换滤料, 代表了未来的发展方向, 但存在体积庞大、后期运行效率下降的问题, 需要进一步小型化和改良研究。

2.4 空气净化装置

针对舱室有害气体的净化, 核潜艇采用以有害气体燃烧装置为主、空气滤器为辅的方法; 常规潜艇受到能量和空间的限制, 对于除 CO 、 CO_2 、 H_2 外的有机和无机污染物, 利用综合滤器和净化装置集中清除。美国在二战前就正式用氢进行催化净化, 后研制出用霍加拉特作催化燃烧剂的 $CO-H_2$ 燃烧装置。此外, 还正在探讨采用碳酸锂洗涤器清除 HCl 、 HF 等酸性气体。英国除在霍加拉特剂上加了氢氧化锂吸收卤代烃分解产生的酸性气体外, 还采用温度交变分子筛吸附装置。

催化氧化燃烧法采用燃烧来清除潜艇舱室大气中的 CO 、氢、烃类和其他污染物, 其燃烧产物为 CO_2 和水。吸附法主要依靠活性炭或者浸渍改性的活性炭作为吸附载体清除潜艇大气中的有机化合物, 常用于消除住舱、蓄电池舱、浴室、厕所、冷藏库等处的异味。根据舱室部位的不同, 活性炭的粒径和尺寸都不一样^[19]。

目前没有可以现场判断空气滤器是否失效的装

置和技术, 且活性炭床吸附饱和后容易着火。有害气体燃烧装置温度达 $315\text{ }^{\circ}\text{C}$, 且卤代化合物不能燃烧, 分解产生毒性和腐蚀性极强的气体。因此, 净化有害气体的最佳方法是把催化燃烧和吸附、吸收相结合, 加强针对性, 研究低温催化燃烧剂和高性能的吸附、吸收剂是未来方向, 解决空气滤器失效和着火问题是当务之急。

2.5 通风系统

潜艇通风系统主要是在潜艇上浮下潜时进行艇内外空气交换和艇内空气搅拌的系统。通风系统开启时, 可迅速降低舱室空气污染物浓度, 也可以调节空气温湿度。火灾等紧急状态下, 通风系统是处置空气质量的有效措施之一。通风系统并不是单一的换气和交换, 它和空气再生、空气净化等系统串联。内循环通风和艇内外空气交换通风是潜艇通风系统运行的两种方式^[20]。艇内循环通风是艇下潜时的一种通风方式, 在水下状态时采用。该通风参数较小, 将各舱室的空气搅拌起来混合均匀, 确保每个舱室的空气组分和参数大体保持一致。在特殊状态下, 如通过敏感区域, 可能关闭该系统。艇在水上航行时, 采用艇内外空气交换通风模式。该模式通风量较大, 每个部位和舱室的风压也不一样, 主要是通过一根通气管和外面大气连接, 将艇外部新鲜的空气抽入舱室内, 并通过排气管将艇内污浊的空气排到海面, 以达到空气净化的目的。通风系统要考虑全艇的气流组织形式, 需要对舱室不同部位的通风参数进行优化分配, 直接关系到全艇能耗和大气环境控制效能, 是潜艇环控生保技术非常关键的环节。

2.6 应急供氧

艇上的应急供氧包括应急空气呼吸系统、化学生氧呼吸器、斯科特呼吸包和氧烛产氧炉。固定式压缩空气呼吸系统主要供潜艇发生火灾时或者当艇内检测出有毒物质时使用^[21], 由潜艇携带压缩氧气瓶气源供气, 可满足艇员较长时间使用。美军潜艇配有这些固定式压缩空气呼吸系统, 气源是医用氧气和压缩空气, 必要时进行切换使用。该应急系统配有应急呼吸面罩, 在潜艇的前半部, 呼吸器接头较多, 后半部较少, 艇员将全面罩呼吸器直接接到艇上高压空气呼吸气源即可供其呼吸。

化学生氧呼吸器是一种自携式氧呼吸器, 在紧急情况时单人使用。目前日本消防研究所、美国矿业安全器械公司 (MSA), 欧洲的 Fenzy 公司、德国的 Drager 公司和俄罗斯也相继开发出了各自的氧气呼吸器。美军装备了 OCENCO-M20.2 个人逃生应急呼吸器, 号称是全世界最小的应急呼吸器, 3 s 内即可快速穿戴。该呼吸器采用小型压缩氧气瓶以及特氟龙全透明头套设计, 大大减轻了质量和缩短了穿戴时

间,而且可以让使用者清晰看到周围环境。我军也采用超氧化钾生氧的隔绝式化学生氧器,其原理是通过分解过氧化钾供氧,由佩戴者呼出的水蒸气启动反应,可供艇员吸氧,同时清除呼出的二氧化碳。

斯科特呼吸包是国外海军常见的灭火和消防用的自携再充气式呼吸装置,其实质与斯科巴水中呼吸器类似,只是设计成在空气中运行。可用其替代化学生氧呼吸器,整个隔绝式呼吸器的外表都要进行隔热防火技术处理,保证佩戴者靠近火源时呼吸器能够耐受高温。

氧烛产氧炉也叫燃烧氯酸盐氧烛,是一种较新颖的艇内补氧法,其产氧过程是氯酸盐的热分解。

2.7 潜艇大气环境监测系统

潜艇舱室中的大气组分监测一直是大气环境控制的关键环节。有些关键组分(如生命支持气体中的氧气、二氧化碳)必须进行不间断监测,同时需要分析舱室威胁人员生命的关键有害气体的变化趋势,能够让指挥员及时采取有效的预防和处置措施,保障艇员的生命安全。

目前,各国海军大力发展潜艇监测技术和设备。潜艇上采用的监测大气环境的技术和装备主要有CO和CO₂红外分光光度法、氢热导率法、总烃光离子化测定法、O₂顺磁检测法、质谱检测法、光纤传感器矩阵法、化学物质显色剂芯片检测系统、电化学和固态电解质化学传感技术等^[22]。红外分光光度法运用比较广泛,也比较成熟,比电化学方法抗干扰能力强,已经在潜艇上大量运用,可以用来监测大气环境中的CO、CO₂含量。其主要原理是:在红外线区域,气体分子以特定的频率振动,只要测量在该频率范围内CO、CO₂的红外吸收效应,便可得知这些气体的浓度。氢热导率法主要用来检测氢气,主要原理是:氢气分子量小,具有很高的热导率和热传导能力,只要测量出潜艇大气中热导率的变化,就可以推算出氢气的含量。光离子化测定法的原理是:采用高能光子束照射轰击舱室气体,带有碳氢键的化合物很容易被打碎,并丢失电子,产生一定强度的离子流。该离子流强度和碳氢化合物的总量成正比,因而可以计算出化合物总量,即为总烃的含量,但这个技术对氧气、氮气和氢气不发生电离作用。顺磁检常用来监测环境中微量O₂,原理是O₂杂化后,电子能量的改变使O₂有孤对电子,导致了它具有顺磁性,O₂被吸入磁场后,改变磁力,场内传感元件的力矩便发生变化,根据传感元件的运动变化,可检测出此类物质在空气中的含量。

质谱检测法在潜艇上广泛运用,国内外海军潜艇基本都装备有质谱分析仪。运用该技术可以检测和涵盖大部分常见气体,如氢气、氧气、二氧化碳、脂肪烃、卤代烃、芳香烃及含氧物。多元光纤传感器也是

潜艇大气环境监测发展的一个热点,美海军正在探索激光和多元光纤传感技术。激光技术可以避免谐振腔的干涉效应,使光程延长至数千米,能够对痕量气体进行精确检测^[23]。德国海军引入了多种气体检测仪,将电化学传感器、红外传感器和监测易燃气体催化传感器整合在一个系统中,每个模块采用即插即用的方式,可监测大气中的有害气体、易燃气体及氧气浓度。化学显色检测技术比较有代表性的是德尔格芯片检测系统,是一种传统的化学传感技术,指示剂和相应的目标气体发生反应后,导致其颜色发生变化,可用于检测丙酮、氨、CO、CO₂、Cl、HCl、NO₂、SO₂、O₃等多种化合物。我军也发展了芯片式鉴定管测量舱室中的微量污染气体,将显色剂复合在一张芯片上,依靠传感和电子技术将颜色变化读取出来^[24-25]。潜艇大气环境监测与控制系统的的发展方向是智能化监测、分析和处理,减少艇员工作量,提高系统处置的时效性和可靠性。目前各类检测新技术也在不断探索和研发,主要目标是小型化、快速化、集成化和自动化。

3 潜艇大气净化新技术动态

世界各国都非常重视潜艇大气污染物的净化技术研究。目前,潜艇大气环境净化的常规技术主要有液体吸收、固体吸附、催化分解等^[26]。在此基础上,发展了一系列的新技术新方法,寻求技术更可靠、环境友好、使用方便的综合净化治理技术,是各国科研人员努力研究的方向。

3.1 低温冷冻技术

低温冷冻技术是一项前景比较好的净化技术。该技术的原理是根据不同气体的液化温度不同,通过低温液化冷凝成液体或固体并收集的方式来捕集痕量挥发性有害气体,而O₂、N₂等液化温度较低,不受捕集影响^[27]。气体通过一个深冷装置,部分液化温度高的气体变成液体或固体被截留下来,送入一个存储装置。该技术的能耗较大,后面气体液化,会产生一定的冷凝液。该技术的最大特点在于具有能够净化的有害气体种类多,而系统本身不产生有害气体,还具有辅助舱室降温的优点^[10]。由于该技术需要足够的低温,只适用于AIP潜艇和核潜艇舱室的空气净化。AIP潜艇本身携带液氧,液氧在释放过程中具备低温环境,无需再消耗能源。核潜艇由于本身能够提供足够动力,能源不缺乏,可以通过制冷机提供有害气体冷凝所需的能量,所以低温冷冻技术在核潜艇上具有较强运用价值。

3.2 光催化净化技术

光催化材料,尤其是二氧化钛光催化材料近些年

已成为各类污染防治、病菌杀灭抑制的热门研究对象。因其具有清洁无污染、无消耗、有效期长、无二次污染、效果彻底、安全无毒、无刺激等优异特点,而成为一个活跃的研究方向,这项技术可用于办公建筑、工厂、居室、轿车和空间站的空气净化。许多种气相有机物可通过光催化氧化过程快速分解,如脂肪烃、醇、醛、酮、卤代烃、芳烃、硫醇及杂原子有机物等。根据美国环保局的数据,共有九大类一百多种有机物被证实可通过光催化氧化处理。目前光催化的研发和应用多以纳米二氧化钛活性材料为基础,采用纳米溶胶合成技术,结合表面负载吸附技术、多相分散技术、金属与非金属离子掺杂技术、表面修饰技术等诸多手段,研发具有一定光敏性、自清洁、耐酸碱的光催化剂涂料或制剂^[28]。很多产品可以附着于各类软硬材料的表面,具有长效的抗菌、净化空气、释放负氧离子等功能。但光催化剂的诱导反应过分依赖于紫外光,在潜艇舱室的密闭环境中,紫外光照射对人体的危害较大,同时会产生附加产物臭氧。臭氧氧化性极强,在潜艇上的容许浓度有严格限制,因而限制了它在潜艇舱室空气净化领域的应用。

3.3 等离子体催化净化技术

等离子体是由部分电子被剥夺后的原子及原子团被电离后产生的正负离子组成的离子化气体状物质,尺度大于德拜长度的宏观电中性电离气体,其运动主要受电磁力支配,并表现出显著的集体行为。等离子体是不同于固体、液体和气体的物质第四态。电子离开原子核,这个过程叫作电离,这时物质就变成了由带正电的原子核和带负电的电子组成的一团均匀的离子浆,这些离子浆中,正负电荷总量相等,因此它是近似电中性的,所以就叫等离子体^[29]。空气在等离子体的作用下,产生大量定向运动的高能离子、电子和自由基,其中羟基自由基的氧化电位(2.8 eV)比臭氧的氧化电位(2.07 eV)高出35%,因此羟基自由基与有机物的反应速度比臭氧高几个数量级,而且羟基自由基与氧化污染物的反应无选择性,可引发链式反应。

等离子体工作时,会产生高能量、高浓度的离子群,在增强氧化、强化分子离解和产生自由基促进化学反应等方面是非常有效的。近十多年来,国内外的研究已经证明,等离子体对空气中低浓度挥发性有机物的去除效果要优于常规的吸附和催化燃烧方法。由于等离子体会产生紫外线,因此该方法净化会产生一定浓度的臭氧。常规的等离子体气体温度高达200~350℃,能耗相当大,在常规潜艇上推广运用难度大。目前市面上出现了常压、低温、低臭氧释放的等离子体技术,很多与催化剂复合,不但能够净化有害气体,而且可以用于杀灭空气中的微生物,大大降低了能耗,节省成本。

3.4 活性炭纤维吸附技术

活性炭纤维(Activated Carbon Fiber)是20世纪70年代发展起来的新型、高效、多功能吸附材料,是继粉状和粒状活性炭之后的第三代产品。活性炭纤维是用天然纤维或人造有机化学纤维经过碳化制成,其结构特点是孔基本呈分散状态,且孔口直接开在纤维表面,其吸附质到达吸附位的扩散路径短,纤维直径细,故而增大了与被吸附物质的接触面积^[30]。

活性炭纤维具有较高的比表面积和丰富的微孔径,比表面积一般为1000~3000 m²/g。活性炭内部有微孔、过渡孔和大孔之分,而活性炭纤维等结构只有微孔和少量的过渡孔,没有大孔。纤维微孔体积占总孔体积的90%以上,因此活性炭纤维具备了比粒状和粉状活性炭更好的选择性、更大的吸附容量和更优越的吸附动力学性能。活性炭纤维对挥发性有机气体和恶臭物质的吸附量是普通粒状或粉状活性炭的20~30倍,对低浓度气体仍能保持较高的吸附能力。活性炭纤维制品的滤阻小,不易粉化,可根据需要支撑毡、布、纸等形态,有利于吸附装置的小型化和吸附层薄层化。

4 结语

潜艇大气环境质量已经越来越受到各国海军的重视,大气环境监测与控制装备的发展已由单装备向通用化、标准化、模块化、系列化装备发展。美国海军在潜艇大气控制技术的研究和开发上采取了一条比较合理的途径,加大基础研究和重视技术储备,注重引用或移植其他领域(如航天、工业)的先进研究成果。同时我国在潜艇大气环境领域的研究发展与国外先进水平还存在较大差距,在及时跟踪引进国外先进技术的同时,也应注重该领域的基础性研究,不断提升我国潜艇舱室空气质量水平,使其更好适应未来潜艇技术发展和使命任务的变化。

参考文献:

- [1] 李经. 常规潜艇舱室大气环境控制技术与研究[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(1): 42-45.
LI Jing. Study on the cabin atmosphere control technology of submarines[J]. Ship electronic engineering, 2009, 29(1): 42-45.
- [2] 何艳兰. 潜艇大气污染与大气质量内部控制措施[J]. 舰船防化, 2007(4): 6-10.
HE Yan-lan. Internal control measures for air pollution and air quality of submarines[J]. Ship chemical defense, 2007(4): 6-10.
- [3] 原霞, 张洪彬. 潜艇大气成分分析新技术展望[C]//密闭环境分析与控制学术研讨会. 青岛: [出版者不详], 2002.

- YUAN Xia, ZHANG Hong-bin. Review of submarine atmospheric component analysis technology[C]// Enclosed Environment Analysis and Control Academic Seminar. Qingdao: [s. n.], 2002.
- [4] 方晶晶, 刘虹, 陈少杰, 等. 舰艇舱室环境中的恶臭污染和优先控制策略[J]. 环境监测管理与技术, 2014, 26(3): 11-15.
- FANG Jing-jing, LIU Hong, CHEN Shao-jie, et al. Odor pollutants in ship cabin and priority control policy[J]. The administration and technique of environmental monitoring, 2014, 26(3): 11-15.
- [5] 王少波, 周升如. 潜艇舱室大气组分分析概况[J]. 舰船科学技术, 2001, 23(3): 8-11.
- WANG Shao-bo, ZHOU Sheng-ru. The status of submarine atmospheric component analysis[J]. Ship science and technology, 2001, 23(3): 8-11.
- [6] 燕锐, 徐新宏, 方晶晶. 某潜艇系泊/航行试验舱室空气组分定量检测[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志, 2018, 25(3): 191-195.
- YAN Rui, XU Xin-hong, FANG Jing-jing. Quantitative detection of air components in a submarine mooring/navigation test cabin[J]. Chinese journal of nautical medicine and hyperbaric medicine, 2018, 25(3): 191-195.
- [7] 徐新宏, 江璐, 方晶晶, 等. AIP 潜艇长航期间舱室环境中空气污染物分析[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(21): 94-99.
- XU Xin-hong, JIANG Lu, FANG Jing-jing, et al. Analysis of air pollutants in an air independent propulsion submarine[J]. Ship science and technology, 2019, 41(21): 94-99.
- [8] 方晶晶, 何艳兰, 许林军, 等. 舰艇舱室封闭环境中挥发性化合物分析[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(6): 90-95.
- FANG Jing-jing, HE Yan-lan, XU Lin-jun, et al. Analysis of volatile compounds in the closed ship cabins[J]. Ship science and technology, 2013, 35(6): 90-95.
- [9] GJB 11.3—91, 常规动力潜艇舱室空气组分容许浓度[S].
- GJB 11.3—91, Permissible concentration of atmosphere composition aboard diesel submarine compartments[S].
- [10] GJB 11B—2012, 核潜艇舱室空气组分容许浓度[S].
- GJB 11B—2012, Permissible concentration of atmosphere composition aboard nuclear submarine compartments[S].
- [11] 肖存杰, 陈茜. 潜艇环境毒理学研究进展[M]. 上海: 第二军医大学出版社, 2010.
- XIAO Cun-jie, CHEN (Q /X). Research development of toxicology onboard the submarine environment[M]. Shanghai: The Second Military Medical University Press, 2010.
- [12] 张洪彬. 潜艇空气污染与污染检测技术[J]. 舰船科学技术, 2006, 28(2): 5-8.
- ZHANG Hong-bin. Submarine atmosphere pollution and detection technology[J]. Ship science and technology, 2006, 28(2): 5-8.
- [13] 肖存杰, 陈伯华. 国外海军医学动态系列讲座(6) 潜艇大气控制技术与装备研究进展[J]. 人民军医, 2007, 50(8): 471-472.
- XIAO Cun-jie, CHEN B H. A series of lectures on the dynamics of naval medicine abroad (6) research progress of submarine atmospheric control technology and equipment[J]. People's military surgeon, 2007, 50(8): 471-472.
- [14] 周升如, 马健, 王少波, 等. 潜艇空气中有机的色/质谱定性分析[J]. 舰船科学技术, 1992, 14(2): 26-33.
- ZHOU Sheng-ru, MA Jian, WANG Shao-bo, et al. Qualitative analysis of volatile organic compounds in submarine atmosphere by gas chromatography/mass spectrometry[J]. Ship science and technology, 1992, 14(2): 26-33.
- [15] 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 Shi-nan, MA Lie, WANG Ya-juan, et al. Technologies of supplying oxygen for submarine's cabin[J]. Chemical defence on ships, 2009(5): 1-5.
- [16] 彭光明. AIP 潜艇舱室大气环境控制系统研究[J]. 中国舰船研究, 2006, 1(2): 62-65.
- PENG Guang-ming. A study on the cabin atmosphere control system of AIP submarines[J]. Chinese journal of ship research, 2006, 1(2): 62-65.
- [17] 李军, 张香圃, 蒋亚雄, 等. SPE 电解水制氧(氢)技术的研究[J]. 舰船科学技术, 2003, 25(S1): 21-23.
- LI Jun, ZHANG Xiang-pu, JIANG Ya-xiong, et al. Research on oxygen(hydrogen)production technology by SPE water electrolysis[J]. Ship science and technology, 2003, 25(S1): 21-23.
- [18] 司南. 乙醇胺(MEA)溶液吸收 CO₂ 的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- SI Nan. Experimental study on absorption of CO₂ in aqueous monoethanolamine (MEA) solution[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [19] 张重杰. 潜艇舱可移动式快速空气净化装置研究[J]. 机械管理开发, 2013, 28(3): 8-9, 11.
- ZHANG Chong-jie. Discussion on portable and fast air purification technology[J]. Mechanical management and development, 2013, 28(3): 8-9, 11.
- [20] 王辉波, 魏成昊, 吴海平. 舰船通风系统噪声分析与控制研究[J]. 现代制造技术与装备, 2014(3): 8-9, 13.
- WANG Hui-bo, WEI Cheng-hao, WU Hai-ping. Analysis and control of ship ventilation system noise[J]. Modern manufacturing technology and equipment, 2014(3): 8-9, 13.
- [21] 吴浙君. 应急供氧设施的配备和优化改装措施[J]. 中国医学装备, 2012, 9(10): 34-36.
- WU Zhe-jun. Measures of equipment, optimization and modification for facilities of emergency oxygen supply[J]. China medical equipment, 2012, 9(10): 34-36.
- [22] 孙新福, 施红旗, 张猛, 等. 美国核潜艇大气环境控制

- 要素[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(S1): 81-85.
- SUN Xin-fu, SHI Hong-qi, ZHANG Meng, et al. Atmosphere specification of US nuclear submarine[J]. Ship science and technology, 2005, 27(S1): 81-85.
- [23] 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 Hong-yu, NIU Cheng-de, LIU Shu-zi. Latest research and development of submarine air control equipment and technology abroad[J]. Chemical defence on ships, 2004 (4): 1-7
- [24] 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 Xiang-dong, WANG Rong-shun. 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.
- [25] 彭光明, 任凡, 张瑶, 等. 潜艇舱室大气环境技术发展研究[J]. 中国舰船研究, 2012, 7(5): 89-94.
- PENG Guang-ming, REN Fan, ZHANG Yao, et al. Development of atmosphere technologies for submarine compartment environment[J]. Chinese journal of ship research, 2012, 7(5): 89-94.
- [26] 谢志辉, 叶齐政, 陈林根, 等. 净化潜艇舱室空气的新技术探讨[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(3): 16-19.
- XIE Zhi-hui, YE Qi-zheng, CHEN Lin-gen, et al. Discussion on new technologies of air cleaning for canbins in submarine[J]. Ship science and technology, 2005, 27(3): 16-19.
- [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 Xiang-dong, WANG Rong-shun. 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.
- [28] 郝刘仓, 苏浩. TiO₂光催化空气净化技术在潜艇中的应用[J]. 舰船科学技术, 2008, 30(S2): 188-191.
- HAO Liu-cang, SU Hao. Application of TiO₂ photocatalysis to submarine[J]. Ship science and technology, 2008, 30(S2): 188-191.
- [29] 宁晓宇, 陈红, 耿静, 等. 低温等离子体-催化协同空气净化技术研究进展[J]. 科技导报, 2009, 27(6): 97-101.
- NING Xiao-yu, CHEN Hong, GENG Jing, et al. Advances in researches on catalysis-assisted non-thermal plasma technology for air pollution control[J]. Science & technology review, 2009, 27(6): 97-101.[知网]
- [30] 陈红香, 冯海波, 孟宪虎. 不同碳材料对挥发性有机气体的吸附性能研究[J]. 舰船防化, 2011(3): 8-11.
- CHEN Hong-xiang, FENG Hai-bo, MENG Xian-hu. Adsorption properties of VOCs onto different carbon materials[J]. Chemical defence on ships, 2011(3): 8-11.