

载人水下航行器二氧化碳滤芯吸收性能试验研究

唐嘉陵, 齐海滨, 王蓓蓓, 杨一帆, 修可顺, 王 鑫

国家深海基地管理中心, 山东 青岛

收稿日期: 2025年7月28日; 录用日期: 2025年9月1日; 发布日期: 2025年9月18日

摘 要

控制载人水下航行器中二氧化碳的浓度的吸收滤芯是保证水下航行器内人员安全的关键设备。随着载人水下航行器的运行时间的不断延长, 高效低污染的二氧化碳吸收剂滤芯的技术须满足未来装备不断升级换代的要求。本文在分析了目前二氧化碳吸收剂滤芯技术发展现状的基础上, 开展了一种高吸收效率、低流动阻力和低粉尘率的新型二氧化碳吸收剂滤芯的试验研究。这种滤芯通过多种成型工艺, 形成多孔颗粒, 不仅能够有效地降低密闭舱室二氧化碳和粉尘率, 运行时间更长。以载人水下航行器模拟舱室为对象, 开展了两种不同颗粒滤芯的吸收性能比较。试验结果表明, 新型吸收滤芯在12个多小时内将舱室内二氧化碳浓度全程控制在0.50%以下, 实际吸收率为0.753 g/g, 高于目前市场上的大部分产品, 充分证实了这种新型吸收滤芯性能, 为该新型吸收剂的进一步推广应用奠定了坚实的基础。

关键词

载人水下航行器, 二氧化碳吸收剂, LiOH颗粒, 生命支持

Experimental Study of Carbon Dioxide Absorbent for Underwater Manned Vehicles

Jialing Tang, Haibin Qi, Beibei Wang, Yifan Yang, Keshun Xiu, Xin Wang

National Deep Sea Center, Qingdao Shandong

Received: Jul. 28th, 2025; accepted: Sep. 1st, 2025; published: Sep. 18th, 2025

Abstract

Controlling the carbon dioxide concentration in underwater manned vehicles is a key device to ensure the safety of personnel inside the vehicles. As the operation time of underwater manned

文章引用: 唐嘉陵, 齐海滨, 王蓓蓓, 杨一帆, 修可顺, 王鑫. 载人水下航行器二氧化碳滤芯吸收性能试验研究[J]. 仪器与设备, 2025, 13(3): 519-526. DOI: 10.12677/iae.2025.133063

vehicles continues to extend longer and longer, the technology of high-efficiency and low-pollution carbon dioxide absorbent must meet the requirements of continuous upgrading and replacement of future equipment. Based on an analysis of the current development status of carbon dioxide absorbent technology, this paper conducts an experimental study on a new type of carbon dioxide absorbent filter cartridge with high absorption efficiency, low flow resistance, and low dust rate. This filter cartridge forms porous particles through multiple molding processes, which can not only effectively reduce the carbon dioxide concentration and dust rate in the closed cabin but also have a longer operation time. Taking the simulated cabin of an underwater vehicle as the research object, a comparison of the absorption performance of two different particle filter cartridges was carried out. The test results show that the new absorbent filter cartridge can control the carbon dioxide concentration in the cabin below 0.50% throughout the 12-hour period, the actual absorption rate is 0.753 g/g, superior to most products currently on the market. This fully verifies the performance of the new absorbent filter cartridge and lays a solid foundation for the further promotion and application of this new type of absorbent.

Keywords

Underwater Manned Vehicles, Carbon Dioxide Absorbent, LiOH Particles, Life-Support

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

载人水下航行器不同于无人水下航行器,它需要承载工作人员,密闭舱室内空气环境又不同于自然界的大气环境,它是人为环境,为了使工作人员在密闭舱室内生存并有效地进行作业,需要人为地创造一个合适的生存条件,为防止人员二氧化碳中毒,必须不断清除将其控制在一定浓度以下。

载人水下航行器内的二氧化碳主要是由人的呼吸产生的,二氧化碳的呼出率变化范围很宽,它取决于人员的活动程度。根据文献[1],每人每小时平均产生的二氧化碳约为 25 L。密闭空间内,随着二氧化碳浓度的升高和暴露时限的延长,人员机体的各项生理生化指标变化逐渐明显,心理测试指标也会相应发生改变。二氧化碳的浓度过大就会扰乱人体正常的新陈代谢,当浓度高于 1%时,人就会产生头昏、乏力,思维迟钝的感觉,浓度达到 3%以上时,就会导致生命危险[2]。为解决上述问题,设计人员根据各种二氧化碳清除技术的优缺点,结合使用环境、空间大小、使用舒适性等因素,使用氢氧化锂作为该载人水下航行器载人舱内二氧化碳清除的技术手段[3]。

目前,国际海事组织(IMO)、美国船级社(ABS)、英国船级社(LR)对载人水下航行器二氧化碳浓度要求均为低于 0.50% [4]-[6]。与载人水下航行器密闭环境类似的潜艇,美国海军潜艇医学研究实验室对潜艇的二氧化碳卫生标准的规定为 90 天以内定为 0.50%,而根据 2003 年报道,美国 9 艘 SSBN 和 10 艘 SSN 的相关数据表明,SSBN 的舱室二氧化碳平均浓度分别为 0.35%,SSN 的舱室二氧化碳平均浓度为 0.41% [7]。徐佳骏等[8]对潜水员使用的循环式呼吸器中二氧化碳中毒等风险和循环式呼吸器相关研究进行总结,为循环式呼吸器潜水风险的预防提供了有益借鉴。顾靖华等[9]指出,研制体积小、吸收效率高的二氧化碳吸收装置是今后循环式呼吸器发展的一个重点。通过开展二氧化碳吸收剂的成分、颗粒形状和颗粒大小等方面的研究,研制高效的二氧化碳吸收剂;另一方面,研究二氧化碳吸收剂罐形状、材料、内部结构等对吸收反应的影响,从而优化二氧化碳吸收剂罐,提高吸收能力,延长使用时间。Zilberman

[10]分析和研究了各种二氧化碳吸收剂的原理特性和反应机理,认为氢氧化锂是一种可靠和高效的吸收剂,能够作为主要的二氧化碳吸收剂原料。

从国际相关领域的发展趋势来看,二氧化碳的规定浓度会越来越低,为工作人员提供更安全、更舒适的大气环境。图 1 为氢氧化锂二氧化碳吸收装置示意图。

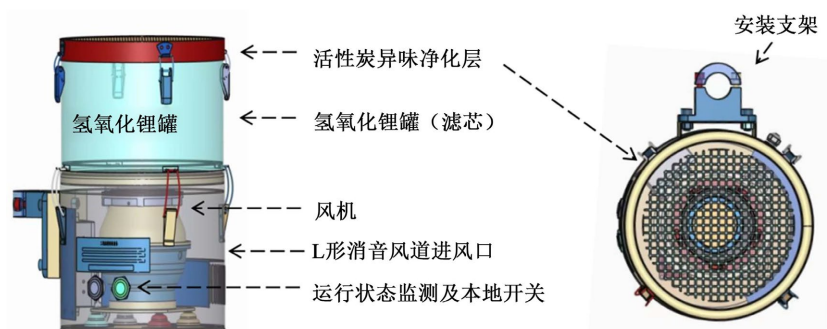


Figure 1. Schematic diagram of a lithium hydroxide carbon dioxide absorption device
图 1. 氢氧化锂二氧化碳吸收装置示意图

LiOH 是一种强碱,原料一般呈粉末状,而且由于 LiOH 密度较轻,约为 1.45 g/cm^3 ,粉末很容易散发到空气中,粉末散发会造成人员接触后皮肤腐蚀,刺激性粉尘随空气进入人体呼吸道,会严重刺激人体的呼吸器官,对工作人员造成不适和伤害,不利于密闭环境直接使用,所以在使用时需制备成有发达孔隙的颗粒,以便更好地与二氧化碳反应,目前市场上常见的有药片状 LiOH 颗粒、不规则片状 LiOH 颗粒、柱状 LiOH 颗粒、板块状 LiOH 吸收剂以及球形 LiOH 颗粒。如下图 2~4 所示。



Figure 2. Samples of tablet-shaped and irregular-shaped LiOH particles
图 2. 药片状和不规则片状 LiOH 颗粒样品图

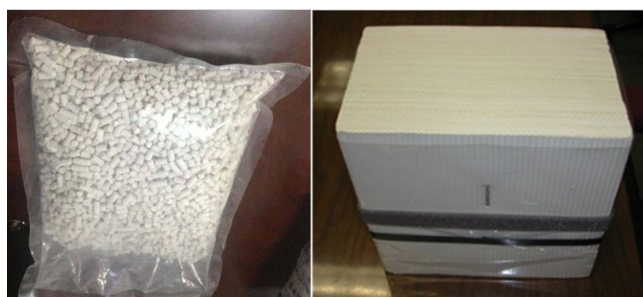


Figure 3. Cylindrical LiOH particles and plate-shaped LiOH absorbent samples
图 3. 圆柱状 LiOH 颗粒和板块状 LiOH 吸收剂样品图



Figure 4. Spherical LiOH particle sample

图 4. 球形 LiOH 颗粒样品图

2. LiOH 吸收吸收性能分析

吸收滤芯主要包括滤芯框架、吸收剂和其它辅助措施。滤芯吸收性能与吸收剂颗粒的比表面积、孔隙率、强度，装填量以及装填后空隙率、厚度、阻力等因素相关，通常情况下，利用相等吸收剂装填量的氢氧化锂滤芯将密闭空间二氧化碳浓度控制在某数值 $p\%$ 以下，二氧化碳浓度随时间变化曲线存在以下三种情况：

1) 吸收剂颗粒的强度很高，比表面积、孔隙率较小，造成二氧化碳吸收速度慢，而且空气不能完全穿透颗粒，吸收效率低，二氧化碳浓度下降到一定程度就开始上升，很快就达到限值，氢氧化锂没有使用(反应)完全，会造成一定的浪费，如图 5 中曲线 1 所示。

2) 吸收剂颗粒强度适中，比表面积、孔隙率一般，二氧化碳吸收速度较快，空气能穿透绝大部分颗粒，吸收效率较高，二氧化碳浓度在初阶段能下降到较低水平，但随后平稳上升，虽然满足在 $p\%$ 以下，但二氧化碳浓度控制的全程平均值较高，如图 5 中曲线 2 所示。

3) 吸收剂颗粒强度合理，比表面积、孔隙率较大，因此二氧化碳吸收速度很快，空气能完全穿透颗粒，吸收效率高，二氧化碳浓度迅速下降到较低值，且能在较低值保持比较持久，氢氧化锂材料基本完全被利用，如图 5 中曲线 3 所示趋势。曲线 3 表明二氧化碳浓度随时间变化的稳定时间最长，效率较高。

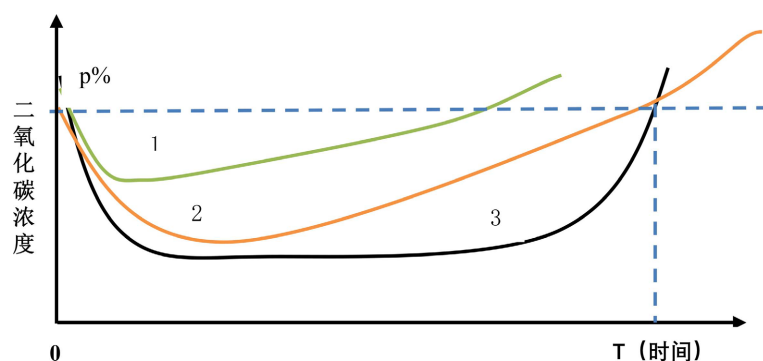


Figure 5. CO₂ concentration change curve under the action of different physical properties of filter elements

图 5. 不同物性滤芯作用下二氧化碳浓度变化曲线

3. 新型吸收滤芯性能试验研究

吸收剂颗粒作为吸收功能材料，其吸收性能与颗粒形状、粒径、孔径、有效孔隙率、比表面积以及

颗粒强度、表面粗糙度等相关。新型滤芯使用的是一种球形 LiOH 颗粒，颗粒均匀，强度适中，具有较好的透气性和较大的比表面积。

LiOH 颗粒填充进滤芯框后，滤芯的吸收性能受吸收剂颗粒性能、颗粒装填总量、装填松紧程度、颗粒之间空隙等因素影响。颗粒填充进滤芯框，颗粒形状、粒度分布、装填松紧程度以及颗粒尺寸与容器尺寸比等因素的不同，吸收剂床层空隙率也会随之改变。容器直径与球体直径之比对整个填充空隙率有极大的影响，当比值大于 50 时，这种影响才能够得以基本消除[11]。

3.1. 试验环境

通过环境试验舱模拟了某型载人水下航行器在实际工作环境下的状态，包括舱容大小、人数、温湿度等。

3.2. 材料与方法

1) 试验设备、仪器

试验设备为升级后的氢氧化锂吸收装置，配套的新型 LiOH 滤芯，LiOH 颗粒充填量为 2500 g。吸收装置风机性能曲线如图 6 所示，风机工作点在理想区间。

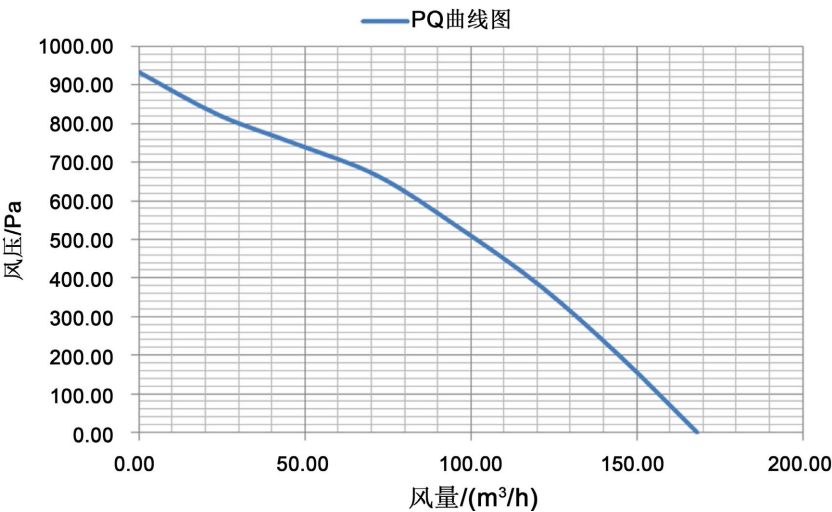


Figure 6. Fan performance curve
图 6. 风机性能曲线

试验所用仪器设备名称及精度要求见下表 1。

Table 1. Instrument and equipment name and accuracy requirements
表 1. 仪器设备名称及精度要求

序号	仪器设备名称	单位	数量	精度要求	备注
1	环境模拟试验舱	个	1	定制密封	4.1 m ³
2	CO ₂ 检测仪	台	2	≤±2.0%	量程: 0%~20% VOL
3	CO ₂ 质量流量控制器	台	1	≤±1.0% F.S	0~5 SLM
4	电子秤	台	1	1 g	0~20 kg

续表

5	空气净化器	台	1	/	/
6	游标卡尺	个	1	量程：0~200 mm； 精度：0.1 mm	/
7	卷尺	个	1	量程：0~3000 mm； 精度：1 mm	/
8	CO ₂ 气瓶	瓶	4	纯度 99.9%以上	/
9	万用表 DE78AS	个	1	电流精度：±3% 电压精度：±1.5%	/
10	温湿度变送器	台	1	湿度：±3% RH 温度：±0.3℃	/

3.3. 试验流程

1) 记录舱室内二氧化碳本底浓度，启动二氧化碳吸收装置，同时将气体质量流量计清零，同期二氧化碳通入速率设定为 75 L/h，试验开始。试验期间，试验开始后的 30 min 每隔 10 min 记录环境模拟试验舱内的二氧化碳浓度、温度、相对湿度。

2) 当环境模拟试验舱内二氧化碳的浓度达到 0.50%时，关闭二氧化碳吸收装置和二氧化碳气体钢瓶，试验结束，此时二氧化碳的通入量 Q1；其中，密闭舱室二氧化碳浓度从本底浓度升到 0.50%，需要的二氧化碳量 Q2。打开环境模拟试验舱，取出 LiOH 滤芯。图 7 为环境模拟试验舱。



Figure 7. Environmental simulation test chamber (volume: 4.1 m³)
图 7. 环境模拟试验舱(体积：4.1 m³)

3.4. 试验结果及分析

模拟舱内二氧化碳本地浓度为 0.04%，根据流量计数据显示，密闭舱室二氧化碳浓度升到 0.50%，需要的二氧化碳量 Q2 为 6.56 L；至试验结束，二氧化碳的通入量 Q1 为 949.00 L，则二氧化碳总吸收量为 942.4 L。试验从 2025 年 3 月 6 日上午 8:35 分到晚上 21:09 (武汉天气最高气温 15℃，最低气温 5℃)，总时长 12 时 34 分钟(共 754 分钟)。

LiOH 吸收剂充填的重量为 2500 g。

则吸收剂的实际吸收率为： $942.4 \text{ L} \times 1.997 \text{ g/L} \div 2500 \text{ g} = 0.753 \text{ g/g}$ 。

二氧化碳浓度的数据曲线如下图 8 所示：

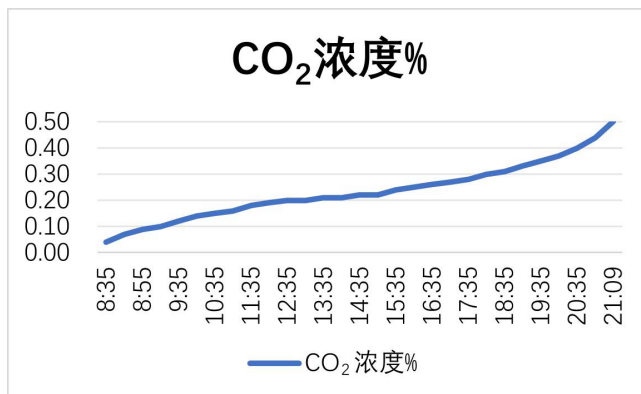


Figure 8. Carbon dioxide concentration curve in the environmental simulation chamber

图 8. 环境模拟舱内二氧化碳浓度曲线

舱室内温湿度曲线如下图 9 所示:

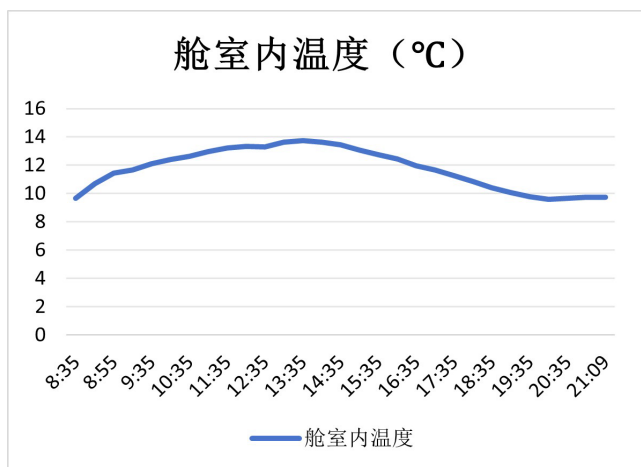


Figure 9. Temperature curve in the environmental simulation cabin

图 9. 环境模拟舱内温度曲线

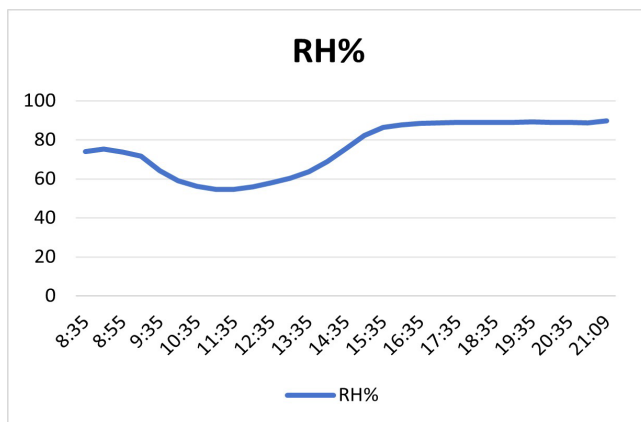


Figure 10. Humidity curve in the environmental simulation cabin

图 10. 环境模拟舱内湿度曲线

LiOH 吸收 CO_2 是一个放热反应, 并且反应会生成水。从图 8 可看出, 2500 g 球形颗粒吸收剂可在 754 分钟内将舱室内二氧化碳浓度控制在 0.50% 以下; 从图 9 可看出, 舱室内温度有一个明显上升过程, 但随着 LiOH 吸收剂逐渐消耗, 舱室内的热量被舱壁传递到环境中, 温度逐渐下降; 从图 10 可看出, 舱室内湿度逐渐上升。

根据试验过程和试验数据, 随着温度的升高, $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ 水合结晶开始脱水, 脱出的结晶水和反应生成水因蒸发而脱离固体反应物, 温度越高, 水合结晶脱水速率越高, 反应速率也越快, 水蒸气越快蒸发到舱室中。

试验结果表明, 在载人水下航行器密闭舱室内, 人员额定工作条件下二氧化碳吸收有很好的吸收效果。

1) 新型滤芯可 12 小时内将 CO_2 浓度控制在 0.50% 以下, 能够充分满足载人水下航行器大气环境的要求;

2) 新型滤芯具有清除速率快、控制浓度低、吸收量大等特点;

3) LiOH 理论吸收率为 0.917 g/g, 目前市场上的产品吸收率大多数在 0.50 g/g~0.70 g/g 之间, GJB 10271-2021《潜艇用氢氧化锂二氧化碳吸收装置规范》中对 LiOH 吸收剂吸收率的要求为 0.70 g/g, 本次试验的产品吸收率 0.753 g/g 优于其要求;

4) 由于 LiOH 吸收剂在实际工作过程中, 在温度、湿度、气流流动等因素作用下, 物理化学反应过程异常复杂, 包含水蒸气蒸发、扩散, LiOH 溶解等物理过程, 而且交织着化学反应, 不同过程之间相互影响。本试验是在环境模拟舱室内进行, 与实际的环境因素存在一定差异, 因此本研究存在一定局限性, 后期将进一步完善环境条件, 从而更准确地检测实际工况条件下的新型滤芯的吸收性能。

4. 结论和展望

载人航行器的 CO_2 浓度直接影响人员的健康和工作状态, 其吸收装置和滤芯(含吸收剂)是以满足长自持力潜航人员工效和舒适性需求为目标。通过升级后的吸收装置配套使用, 新型滤芯能快速将舱室内二氧化碳浓度降低到较低水平, 说明滤芯与装置性能匹配度较好, 清除速率快、控制浓度低、吸收量大, 说明滤芯中的 LiOH 颗粒孔隙率高、比表面积大, 吸收性能优异。在涉及到二氧化碳吸收的各种载人航行器、呼吸器、密闭工作空间等领域有广泛的应用前景和意义。

参考文献

- [1] 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+102.
- [2] 苏南. “十二五”煤矿安全生产指标设定[N]. 中国能源报, 2011-02-28(003).
- [3] 姜磊, 金凤来, 侯德永, 等. 大气环境控制技术在“蛟龙号”载人水下航行器上的应用[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(8): 127-132.
- [4] IMO (2001) MSC/Circ. 981. Guidelines for the Design, Construction and Operation of Passenger Submersible Craft.
- [5] ABS (2018) Rules for Building and Classing Underwater Vehicles, Systems and Hyperbaric Facilities.
- [6] LR (2017) Rules and Regulations for the Construction and Classifications of Submersibles and Diving Systems.
- [7] 余涛, 周家勇, 徐德辉, 等. 国外核潜艇舱室空气组分特性研究综述[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(1): 1-7.
- [8] 徐佳骏, 黄国阳, 俞旭华, 等. 循环式呼吸器潜水医学问题研究进展[J]. 海军医学杂志, 2025, 46(5): 533-537.
- [9] 顾清华, 方以群, 柳初萌, 等. 蛙人循环式潜水呼吸器的特点及发展趋势[J]. 海军医学杂志, 2020, 41(2): 232-235.
- [10] Zilberman, P. (2015) The CO_2 Absorber Based on LiOH. *Acta Medica Marisensis*, 61, 4-6.
- [11] 郭慕孙, 主编. 化学工程手册第 20 篇颗粒及颗粒系统[M]. 第 2 版, 北京: 化学工业出版社, 1989.