中国空间站再生生保系统的设计与实现

刘向阳¹, 高峰^{1*}, 邓一兵^{2*}, 吴志强¹, 李英斌¹, 董文平¹, 卞强¹, 杨润泽¹, 张滔¹

1. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094;

2. 中国载人航天工程办公室, 北京 100081

* E-mail: gfl17@sina.com; dyb507@189.cn

收稿日期: 2021-11-17; 接受日期: 2022-02-09; 网络版发表日期: 2022-08-05

摘要 中国空间站中配置了再生生保系统, 用于在长期载人航天飞行中实现环境控制和生命保障功能, 在空间站内开展大气净化、氧气再生、冷凝水和尿液的净化回收. 作为中国空间站的关键技术, 以物理、化学方法为基础的再生生保系统包含电解制氧、CO₂去除、微量有害气体去除、尿处理、水处理和CO₂还原等多个系统. 在神舟十二号飞行任务中, 再生生保各系统运行稳定, 全程保障了3人90天的任务要求, 舱内物质循环与能量流动、物质消耗与循环节律得到在轨验证. 本文阐述了再生生保系统的特点、研制过程、设计方案、地面和在轨验证情况.

关键词 中国空间站, 环境控制和生命保障, 再生生保系统, 在轨验证

1 引言

2021年4月29日, 中国空间站天和核心舱成功发射, 标志着空间站在轨组装建造阶段全面展开. 天和核心舱是我国迄今为止研制的规模最大、系统最复杂的航天器, 将持续开展再生生保、机械臂等多项关键技术在地面验证, 为后续空间站长期、稳定运营奠定基础.

空间站建造是我国载人航天工程“三步走”计划的第三步, 目的是建立长期在轨运行有人照料的载人航天器, 预计在轨飞行时长不低于15年. 空间站任务对环控生保系统提出了长寿命、低补给、高可靠、可维修等方面的新要求^[1].

环境控制和生命保障分系统(environmental control and life support system, 简称环控生保系统)的功

能是在航天器中创造和维持类似地面的环境条件, 保障飞行乘组的在轨生存, 包括载人航天器内的大气环境控制、生命活动物质条件保障、应急状态下的生命保障等方面.

按照实现生命保障的物质资源循环方式, 环控生保系统可以分为三种类型: 非再生式环控生保系统、物化再生式环控生保系统(regenerative life support system, 简称再生生保系统)、受控生态生保系统. 非再生式环控生保系统所需的空气、水、CO₂和有害气体吸附剂等资源由地面携带, 废水、尿液和其他废物不进行在轨的再利用; 物化再生式环控生保系统, 是利用物理、化学的方法, 实现空气和水的循环回收利用, 同时实现CO₂和微量有害气体吸附剂的再生重复使用; 受控生态生保系统通过植物光合作用和微生物分解作用, 实现氧气、水和食物的循环利用^[2].

引用格式: 刘向阳, 高峰, 邓一兵, 等. 中国空间站再生生保系统的设计与实现. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1375–1392

Liu X Y, Gao F, Deng Y B, et al. Design and implementation of regenerative life support system in the China space station (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1375–1392, doi: 10.1360/SST-2021-0528

在物资补给方面, 非再生式环控生保系统所需的消耗性物资质量与乘员人数和飞行时间成正比, 适应短期飞行的载人航天任务, 已经在我国载人飞船、空间实验室等飞行任务中得到充分应用, 但对中长期载人航天任务, 所需的物资补给量巨大. 以空间实验室采用的非再生环控生保方案为例, 3人乘组在轨1年要耗用大量水气物资和其存储容器, 主要包括: 水约4吨、氧气约2吨、CO₂净化剂约2吨, 同时生成的废水、尿液和废弃净化剂需要占用大量储存空间.

物化再生式环控生保系统通过对物质的回收利用, 可以大幅降低通过地面携带消耗品的上行补给负担, 水气消耗量不到非再生方案的1/5. 物化再生技术是空间站等长期在轨飞行任务中目前唯一可行的环控生保技术途径, 是实现载人航天飞行从短期到长期的关键技术^[3].

再生生保技术, 包括分子筛和固态胺CO₂收集技术、碱性电解液和固体电解质电解制氧技术、膜蒸馏和低压蒸馏尿液回收技术、废水回收技术、CO₂还原技术等^[4], 其中一项或多项已分别在和平号空间站、

天空实验室、国际空间站等上安装使用, 验证了物化再生技术在轨运行的可行性, 取得了明显的上行补给效益, 同时发现了系统在恶劣工况下高可靠运行方面的较多可提升空间^[5,6].

本文重点对中国空间站再生生保总体设计、分项方案和关键技术、在轨运行情况进行说明.

2 空间站环控生保系统的功能和构成

空间站环控生保系统实现“环境控制”、“生命保障”、“应急生保”三方面功能, 是人在太空生存的基本条件, 系统具体功能如图1所示. 空间站天和舱中配置了非再生环控生保系统和再生生保系统, 环控生保系统功能通过非再生和再生生保系统匹配协调共同实现. 其中再生生保系统作为空间站内供氧、大气净化、水净化和回收的主份设备, 实现人与环境间物质交流和回收的重要功能, 非再生生保系统提供基础平台功能和应急状态下生命保障功能.

再生生保系统主要由电解制氧系统、CO₂去除系

图1 (网络版彩图)空间站环控生保系统功能构成

Figure 1 (Color online) The composition of environmental control and life support system in China space station.

统、CO₂还原系统、微量有害气体去除系统、尿处理系统、水处理系统等多个系统组成, 将航天员在轨活动产生的废水、废气进行回收再生。

3 再生生保的总体设计

3.1 总体方案

根据空间站各舱段的任务功能定位, 天和舱是航天员驻留期间的主要生活工作场所, 天和舱能够统一控制整个空间站密封舱内的大气环境, 为航天员在轨活动提供生命保障。问天舱同样具备对整站的环境控制和生命保障功能。因此, 天和舱和问天舱均配备了一套再生生保系统, 如图2所示。

再生生保各系统具备适应2~6人不同驻留人数的能力, 在此基础上, 通过尿处理、水处理、电解制氧和CO₂还原系统的工作参数和物流匹配情况统一进行空间站水资源的管理。除CO₂还原外的5个再生生保系统首先开展在轨飞行验证, 后续上行CO₂还原系统后, 进一步提高水气物质闭合程度。

再生生保系统总体设计的主要原则包括:

- (a) 整体方案选定上, 适合后续CO₂还原系统的拓展, 保障系统高物质闭合度;
- (b) 通过水流转方式设计, 减少物流过度耦合;
- (c) 针对长期在轨高可靠性运行的要求, 采取源头控制、材料升级、过程防护等多重措施, 加强对可能发生粉尘迁移、沉淀堵塞、腐蚀、微生物滋生、催化

剂中毒等恶劣工况环节下的控制, 减少产品寿命短板;

(d) 针对在轨气体、水质成分谱的复杂性, 在设计上保证了净化处理能力的广谱性, 适应污染物在水气之间的流转;

(e) 系统集成方案兼顾流场热场设计、电磁兼容性、故障隔离检测要求、上行重量约束和人机工效要求等各方面条件;

(f) 关注微重力条件下的气液、液固、气固两相流分布状态, 选用和设计合适的输送、分离方案;

(g) 充分利用显热和潜热, 实现系统低能耗。

3.2 空气再生

空间站的大气控制功能主要包括: 氧分压控制、CO₂分压控制、微量有害气体浓度控制、微生物控制、湿度控制, 其中氧分压、CO₂分压和微量有害气体浓度控制分别通过电解制氧、CO₂去除和微量有害气体去除等3个再生生保系统实现, 微生物和湿度控制通过非再生环控基础功能平台实现。舱内CO₂、氧气、湿度(水汽)以及微量有害气体浓度等大气成分在舱间通风的支持下实现舱间物质流转, 即天和舱集中供应氧气、集中处理CO₂、控制湿度、净化微量有害气体, 通过通风流场保证各舱段间的CO₂浓度、湿度、氧气浓度场的均匀性。

空间站氧分压控制功能通过电解制氧和储存供氧共同实现。正常条件下以电解制氧系统为主份实施氧分压控制, 在乘组轮换或电解制氧系统维护期间, 高

图 2 (网络版彩图)中国空间站再生生保系统计划配置情况

Figure 2 (Color online) The installation of regenerative life support system in China space station.

压氧瓶作为电解制氧功能的备份实现辅助供氧。

空间站 CO_2 分压控制功能以再生 CO_2 去除系统作为主份设备, 非再生式 CO_2 去除功能作为备份, 控制舱内 CO_2 分压在规定的范围内。正常情况下以再生式 CO_2 去除系统为主份实施舱内 CO_2 分压控制, 在乘员轮换或再生 CO_2 去除系统维护期间, 启动消耗式 CO_2 净化器辅助控制舱内 CO_2 分压。

舱内微量有害气体来源比较广泛, 主要包括人体释放、舱内材料释气、食品和个人卫生用品释气、大小便、火灾等。环控生保系统根据微量有害气体来源不同设计了相应的微量有害气体去除措施, 空间站微量有害气体去除系统主要去除正常条件下释放到大气中的微量有害气体。大小便收集和垃圾封装、火灾等过程产生的微量有害气体, 配备了专用的净化器进行净化去除。

3.3 水再生

空间站生命保障中的水再生与管理功能具体包括: 水处理功能、尿处理功能、水储存与分配功能、残液管理功能以及 CO_2 还原功能。其中尿液回收处理功能、冷凝水深度净化处理和 CO_2 加氢还原回收水等功能分别通过尿处理系统、水处理系统、 CO_2 还原系统等再生生保功能实现。在物质流转上, 通过中转水箱方式实现水流转和水资源统一管理, 降低各系统之间的耦合关系, 实现空间站水资源的匹配和回收利用。

航天员的尿液由大小便收集装置收集并添加预处理剂, 进行尿液的稳定化处理, 尿处理系统对预处理后的尿液进行低压蒸馏处理, 生成的尿液蒸馏水通过水处理系统进行深度净化处理, 满足饮用水和电解制氧用水要求。航天员的汗液挥发至座舱大气中, 通过温湿度控制系统以冷凝除湿的方式实现收集, 收集的冷凝水由水处理系统进行净化处理, 同样用于饮用水和电解制氧用水等需求。 CO_2 还原系统在轨启用后, 通过 CO_2 和 H_2 催化反应的生成水, 提供给水处理系统进行净化处理。再生水经加银后统一储存, 航天员饮用、卫生冲洗、电解制氧、出舱活动等耗水环节优先使用再生水, 在再生水出现不足的情况下使用上行水资源。

3.4 物质流循环

根据空气再生和水再生的设计, 再生生保系统整体原理流程如图3所示。空间站物质流在3人乘组模式

下, 航天员代谢量如表1所示(对应图3环节①~⑥)。3名航天员驻留期间, 每天电解耗水、饮用和卫生共需要约11 kg水(对应图3环节②, ③, ⑦), 而通过空气冷凝水和尿液蒸馏回收, 平均每日可以提供约8.8 kg的水(对应上环节⑧), 水资源闭合度约80%。后续 CO_2 还原系统启动后, 水资源闭合度提升至90%以上, 进一步减少补给需求。

再生生保系统涉及物质流转的主要技术指标要求如表2所示。由物质流情况可见, 采用物化再生生保技术能够有效利用代谢废物, 可大幅减少航天员长期在轨驻留的生保资源地面补给需求。

4 再生生保专项设计

4.1 CO_2 去除系统设计

4.1.1 系统功能

航天器中航天员呼吸产生的 CO_2 , 分布在舱内的人活动区, 为实现 CO_2 的去除和回收, 需要将环境空气中的 CO_2 收集浓缩。将舱内空气引入 CO_2 去除系统中, 空气中的 CO_2 经可再生吸附剂吸收后, 低 CO_2 浓度气流返回航天器舱内, 控制舱内 CO_2 浓度在规定的范围内。富集在吸附剂中的 CO_2 排向 CO_2 还原系统或舱外, 实现吸附剂的再生和 CO_2 中氧元素的回收利用。

再生式 CO_2 去除方式主要有固态胺 CO_2 去除技术、分子筛 CO_2 去除技术、电化学氢去极化电池 CO_2 去除技术^[7]。综合与 CO_2 还原系统的匹配性、寿命可靠性要求、前期研制基础等因素, 对比不同技术方案的实际试验结果, 最终选择分子筛技术作为空间站 CO_2 去除的技术路线。

4.1.2 系统特点

CO_2 去除系统主要围绕分子筛材料的特性和使用环境开展设计。分子筛 CO_2 吸附剂材料具有水亲和力强、在低压和高温条件下再生、易产生粉尘等特性。相应地, CO_2 去除系统具有吸附剂解吸条件要求高、需控制舱内水损失、粉尘控制难度大等特点, 为分子筛材料研制、关键组件设计、系统流程优化设计提出了很高要求。

4.1.3 方案和关键技术

(a) 分子筛材料在系统运行过程中, 压力温度环境

图 3 扩展CO₂还原后的再生生保系统原理流程
Figure 3 The schematic of regenerative life support system in China space station.

表 1 空间站载人环境相关代谢指标(3人乘组)
Table 1 The metabolic rate of crew in space station

环节	项目	指标要求
①	呼吸耗氧	0.9 kg/人 天
②	饮用水	2 kg/人 天
③	个人卫生用水和大小便冲洗水	0.4 kg/人 天
④	CO ₂ 代谢量	1 kg/人 天
⑤	尿液量	1.6 kg/人 天
⑥	排湿量	1.7 kg/人 天

苛刻、水蒸气竞争吸附特性显著和大量产生粉尘是此类材料的共性问题。

为解决上述问题，通过材料配方调变、晶化参数改进等工艺手段，在微观结构上改进分子筛晶型一致性，获得气体筛选能力强、机械强度高、磨损破碎率低的分子筛材料，保证了系统效率、可靠性和寿命，

如图4所示。

(b) 围绕着分子筛吸附剂材料的特性，比对了2反应床、3反应床、4反应床等不同形式的系统流程，经评估净化流量和效率、循环周期、水气消耗损失量等指标，最终采用了4床分子筛系统流程方案。

系统主要由空气回路和真空回路各两路组成。空气回路将循环气流中含有的CO₂清除：干燥床选择性去除舱内空气中的水蒸气，降温后进入一个CO₂吸附床，经分子筛选择性吸附CO₂后，空气再进入另一个干燥床，将上一个循环周期中吸附的水解吸返回舱内，从而保持系统的水平衡。真空回路：另一个CO₂吸附床在高温和真空的作用下，将上一循环周期吸附的CO₂排放到太空或CO₂还原系统中。系统工作原理流程如图5所示，两个循环周期交替运行，图中虚线为另一循环周期内的气体流转方向。

空气回路和真空回路的运行相互联系、相互制约，系统的主要功能依靠循环周期、加热功率、散热

表 2 空间站载人环境相关指标要求

Table 2 The environmental parameters in China space station

指标	项目	指标要求
1	产氧量	额定产氧量满足3人需求, 最大产氧量不低于4人需求
2	氧气纯度	≥99.5%
3	CO ₂ 净化速率	额定CO ₂ 净化能力满足3人需求, 最大能力不低于4人需求
4	微量有害气体控制浓度水平	47种有害气体浓度满足允许浓度SMAC要求; 相似毒性效应污染物毒性综合指数 $T = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{SMAC_i} \leq 1$
5	尿液处理能力	≥6 kg/天
6	尿液中水回收率	≥80%
7	废水处理能力	≥6 kg/天
8	净化水质指标要求	满足饮用水指标要求
9	还原水回收率	以氢气计≥90%

图 4 分子筛微观结构优化前后对比. (a) 晶型优化前; (b) 晶型优化后

Figure 4 The different micro-structures of the molecular sieve. (a) Original crystal form; (b) improved crystal form.

图 5 (网络版彩图) CO₂去除系统原理组成

Figure 5 (Color online) The schematic diagram of the carbon dioxide removal system.

功率和净化能力等指标相互匹配。吸附和解吸过程需要同时满足吸附净化速率和解吸再生速率等的多重约束, 结合分子筛材料特性、功耗约束、气体损失量等要求, 确定系统运行参数, 实现物质和能量的平衡, 保证系统能够稳定长期运行。

(c) 分子筛反应床在空气回路中运行时气体流速相对较快, 而在真空回路运行时有较高的真空密封和温度均匀性要求, 通过仿真设计和计算, 优化反应床结构, 同时保证内部空气流场、热场、解吸压力场的均匀性, 满足吸附效率和真空密封要求。

(d) 粉尘迁移问题是各类分子筛系统普遍面临的重要难题, 粉尘作为多余物随气流在反应器和管路系统中迁移, 进入阀门和泵类部件后极易造成密封失效和磨损等故障, 在微重力条件下影响更为明显。针对这项问题, 系统设置了多处粉尘控制环节, 这也是影响系统寿命和可靠性的关键环节。

微重力条件下与地面条件下的粉尘活动特性存在很大差异, 地面研制阶段策划了失重飞机试验, 观察和记录微重力条件下净化材料粉尘在反应器中的迁移特性、对系统指标的影响, 并验证粉尘控制环节的净化效率、粉尘耐受能力等, 评估和预测飞行任务下的使用状况和预期寿命。

4.1.4 设计验证

根据载人综合模拟验证试验结果, 通过地面模拟舱内 CO_2 注入和净化验证, 以及实际有人测试, 系统 CO_2 净化速率能够满足4人条件的 CO_2 净化和回收能力, 舱内 CO_2 分压不高于0.5 kPa, 同时水和空气损失量能够满足系统指标要求。

4.2 微量有害气体去除系统设计

4.2.1 功能

针对航天器内舱体、设备、物资和航天员产生的多达数百种的微量有害气体, 微量有害气体去除系统通过催化氧化和吸附再生等方法, 实现舱内微量有害气体去除, 保证舱内微量有害气体浓度在允许的范围。通过真空热解吸, 将已吸附微量有害气体排到舱外, 实现吸附剂再生。

4.2.2 系统特点

空间站任务与短期飞行任务相比, 具有任务时间长、舱内设备和物品种类多、医学指标要求严格等特点, 因此空间站微量有害气体去除系统面临微量有害气体产出量大、有害气体种类多、有害气体累积效应明显、净化指标要求苛刻等突出问题。

针对上述特点, 需要微量有害气体负荷模型建立和系统流程优化设计、吸附剂材料长寿命可再生、催化剂材料和反应器优化等关键技术解决。

4.2.3 方案和关键技术

(a) 针对空间站舱内微量有害气体种类、医学指标要求以及各类去除技术的特点, 在充分借鉴前期载人飞船和空间实验室等飞行器实际测试以及相似密闭环境测试数据的基础上, 确定有害气体产生的规律, 提出适用于空间站的微量有害气体负荷模型。系统针对性采用物理吸附、化学吸收、催化氧化等技术结合, 综合去除舱内微量有害气体。

微量有害气体去除系统工作原理流程如图6所示, 虚线为间歇启动流程。

图 6 (网络版彩图)微量有害气体去除系统原理组成

Figure 6 (Color online) The schematic diagram of trace contaminant control system.

(b) 针对种类和数量较多的挥发性有害气体, 系统通过高性能活性炭进行吸附, 活性炭吸附饱和后在轨使用热真空方法进行解吸, 实现吸附剂重复利用。

为保证活性炭的吸附性能和负载性能, 通过对原料黏流特性控制、制备过程动力学特性改进等方式, 使活性炭在旧有微孔隙融合生成中孔的过程中, 促进新微孔的诞生, 在扩大孔隙的同时不降低比表面积, 同时活性炭材料宏观的机械性能得到很好保持, 满足低磨损破碎率的要求。

经多次吸附-脱附循环后, 高性能球形活性炭对微量有害气体具有良好的再生能力。如图7所示, 活性炭材料经过多次高温真空解吸, 通过吸附穿透时长所反映出的吸附能力几乎可以完全恢复, 吸附性能变异系数很低。

(c) 针对空气中的CO、H₂等有害气体, 以及CH₄和其他难净化的有害物质, 采用催化氧化的方式去除。系统在实际使用过程中存在太空速、高湿度、易中毒环境等条件, 通过对催化剂制备工艺以及反应器结构的优化, 实现低有害气体浓度和低功耗下的反应器温度场控制、能量回收, 保证催化氧化效率能够满足净化要求。

4.2.4 设计验证

根据载人综合模拟验证试验结果, 在地面模拟舱内进行有害气体去除能力验证, 通过对低浓度、多组分微量有害气体的定量模拟和采样分析测试, 40余种

图7 (网络版彩图)活性炭再生性能

Figure 7 (Color online) The regeneration of activated carbon.

目标微量有害气体的浓度指标均能满足要求, 同时满足综合毒性的要求。

4.3 CO₂还原系统设计

4.3.1 功能

CO₂还原系统接收并浓缩来自CO₂去除系统解吸的CO₂, 与电解制氧系统产生的氢气反应生成水, 以水回收的形式实现氢氧元素再生循环使用, 进一步提高环控生保系统物质闭合度, 减少空间站长期运营期间的补给负担。

根据产物形式的不同, 还原反应主要分为Bosch反应和Sabatier反应两种技术途径, Sabatier反应与Bosch反应相比, 解决了Bosch反应的碳沉积在催化剂上、造成催化活性降低的问题。从反应性能、功耗、体积等多方面综合比较, 选择Sabatier反应作为空间站CO₂还原的技术路线。

4.3.2 系统特点

CO₂还原系统需要与CO₂去除、电解制氧、水处理三个再生系统匹配, 系统耦合度较高。系统间匹配设计是CO₂还原系统的难点。

真空压缩泵是实现CO₂收集浓缩的关键部件, 其重量尺寸限制严格, 不具备润滑条件, 如何实现压比要求, 满足密封性能和可靠性要求是真空压缩泵研制重点。

还原催化剂是CO₂还原系统的核心材料, 催化剂需要在弱酸条件下, 保持足够的催化剂活性和稳定性。对于还原催化剂长寿命验证和失效机理研究提出了很高的要求。

Sabatier反应器设计和研制中, 需要沿着气流流动方向建立由高到低的适宜温度梯度, 依靠高温部分提高反应速度、低温部分提高平衡转化率。如何利用Sabatier反应的自身特点, 合理利用反应放热, 建立既能快速反应又能达到高转化率的温度场是Sabatier反应器研制的主要难点。此外, 空间站因乘员活动强度不同或乘员人数变化而造成的氢气与CO₂供应量变化, 需要Sabatier反应器能够在各类极端的原料配比条件下维持反应持续进行。

4.3.3 方案和关键技术

(a) CO₂还原系统和CO₂去除系统开展匹配, 特别

是还原系统工作节律与 CO_2 去除系统解吸过程、电解制氧系统输出流量等条件互为关联。通过全面覆盖三个系统各类工况的组合匹配模式, 确定系统工作原理如图8所示。

(b) 结合 CO_2 工质的物性参数及其变化, 通过建立真空压缩泵工作过程中所包括的泄漏、润滑、传热、零部件热力变形和气流脉动等现象的模型, 确定真空压缩泵在极端工况下运行的性能变化趋势。通过对自润滑材料摩擦副不同组分和不同极端温度工况下的磨损率, 确定最佳摩擦副配合形式, 解决真空泵工作温度升高后的磨损问题。

(c) 对于Sabatier反应催化剂, 通过借鉴 CO_2 均相催化转化机制, 建立功能化载体和单原子催化中心, 实现温和条件下 CO_2 高效活化转化。在确保高反应活性的同时, 针对性通过“晶型相同, 晶格匹配”的策略增强金属-载体相互作用, 解决催化剂在长期高温反应条件下

下稳定性不足的问题。

考虑到空间站内部微量有害气体的迁移问题, 即空气中的部分有害气体负荷, 通过 CO_2 去除系统转移至 CO_2 还原系统, 针对催化剂失活特性, 通过特异性消除催化剂中毒成分, 保证催化剂在液态水环境中的机械强度和活性稳定性。

为了达到Sabatier反应的高反应转化率, 保障反应既能快速进行, 又能够维持高转化率, 根据Sabatier反应的热力学和反应动力学分析, 确定Sabatier反应器的区域温度控制条件, 模拟和预测不同工况下反应器的工作情况, 实现反应器内温度的自调节和系统的自维持(图9)。

4.3.4 设计验证

根据 CO_2 还原系统的地面试验验证情况, 系统产水量、产水水质、水回收率等指标均满足要求, 日均

图 8 (网络版彩图) CO_2 还原系统原理图

Figure 8 (Color online) The schematic diagram of carbon dioxide reduction system.

图 9 (网络版彩图) Sabatier反应器温度场和浓度场分布

Figure 9 (Color online) The distributions of temperature and concentration in Sabatier reactor.

水回收率不小于90%, 3人代谢量条件下, 每天产水量不小于1.2 kg, 产水水质满足要求。

4.4 电解制氧系统设计

4.4.1 功能

电解制氧系统将水处理系统提供的水电解生成氧气和氢气, 氧气提供航天员呼吸所需, 氢气排放到舱外或CO₂还原系统。根据电解制氧核心部件——电解芯体的型式, 主要分为流动碱性电解池、静态供水固定式电解池、固体聚合物电解池等技术途径^[8]。综合与CO₂还原系统的匹配性、前期研制基础等因素, 最终选择固体聚合物电解池作为空间站电解制氧的技术路线。

4.4.2 系统特点

电解制氧系统是典型的复杂两相流系统, 微重力场中气液两相流的特性, 是影响电解制氧系统在轨长期连续运行可靠性的主要因素。系统设计和研制过程中, 主要围绕着电解芯体材料和结构优化、水气分离功能优化、系统流程优化设计等项目开展。

4.4.3 方案和关键技术

(a) 在电解过程中, 电池的阳极产生大量原子氧, 阴极产生大量原子氢, 电池工作处于强腐蚀性环境中, 构成电池的电极催化剂、固体聚合物电解质膜、阳极和阴极集电器面临严重的腐蚀问题, 影响电解池的寿命。

通过对电极材料的原子氧、原子氢腐蚀机理研究, 利用电极催化剂对氧、氧复合与氢、氢复合的优势, 在芯体材料表面制备相应催化剂涂层, 抑制原子氧、原子氢的生成, 从而降低腐蚀作用。

同时采取在固体聚合物电解质膜中修饰分散的催化剂颗粒来复合逆向扩散的氧气和氢气, 从而减少对膜具有腐蚀性产物的生成, 达到降低膜降解速度、保证寿命的目的。

(b) 电解芯体是产生气、液两相流的地方, 微重力两相流分布难以通过地面试验验证。针对此问题建立了电解芯体流场模型, 对流体分布的均匀性、流速分布均匀性、换热均匀性等方面进行分析, 通过结构优化能够显著提高工质和能量均匀性。

(c) 空间站电解制氧用水来自于水处理系统, 不可

避免地残留少量的气体, 电解水制氧的循环过程中也造成循环水含有少量气泡, 这些气泡可能会在水箱、循环泵等位置由于压力变化、表面力等因素聚集成大气泡, 对系统中动力部件产生严重影响。为避免出现这样的问题, 在系统中容易出现气泡累积的位置设置气泡去除装置, 定期对累积的气泡进行去除。并借助失重飞机试验, 对微重力状态下气泡排放效果进行了验证, 如图10所示。

结合电解芯体、水气分离等环节的设计, 确定系统工作原理流程如图11所示。

4.4.4 设计验证

根据载人综合模拟验证试验结果, 系统能够满足1~4人不同条件的制氧速率, 控制地面模拟舱内氧分压在20~24 kPa范围内。地面验证中经采样分析测试, 氧气纯度不低于99.5%, 各类成分满足医用氧标准, 水利用效率能够满足系统指标要求。

4.5 尿处理系统设计

4.5.1 功能

尿处理系统的基本功能是通过减压蒸馏的方法从航天员尿液中提取水, 并将符合水质指标要求的蒸馏水输出给水处理系统进行深度净化处理, 最终实现尿液中水的回收再利用, 降低空间站长期载人运行的水补给需求。

尿液处理方式主要有膜渗透蒸发、低压蒸馏等技术^[9]。综合系统成熟度、与大小便收集装置匹配性等因素, 对比不同技术途径的实际验证结果, 最终选择低压蒸馏技术作为空间站尿处理的技术路线。尿处理系统通过维持蒸发器内的低压环境, 使经过预处理的尿液在较低的温度下达到沸点, 持续蒸馏提取尿液中的水, 最终得到较纯净的蒸馏水。

4.5.2 系统特点

尿液是空间站上成分最为复杂的废水, 包含百种以上的有机和无机物质, 尿液环境易于微生物滋生, 其中部分有机物具有细菌分解敏感性, 易产生氨等副产物; 部分无机污染物极易产生沉淀, 尿液蒸馏处理后产生的污染物残液经浓缩后浓度更高, 易造成系统运行故障。在尿液进行蒸馏处理前, 需在尿液中添加预处理剂用于抑制微生物的生长, 防止有机物分解产

图 10 (网络版彩图)气泡分离装置失重飞机验证情况。(a) 装置启动前——分散的气泡;(b) 装置启动后——气泡集中并排出
Figure 10 (Color online) The operation of gas-water separator in parabolic flight. (a) Before operation of the separator; (b) in operation of the separator.

图 11 (网络版彩图)电解制氧系统原理组成
Figure 11 (Color online) The schematic diagram of electrolysis oxygen generation system.

生氨、降低蒸馏过程中氨的挥发,防止尿液在存放过程中产生沉淀,保证蒸馏水的水质。

尿液的蒸馏处理过程中,为实现蒸馏功率尽量低,蒸馏装置需要为尿液的低压蒸馏提供真空密封环境,并实现水蒸气冷凝时汽化潜热的回收,同时在微重力条件下完成水蒸气提取和水气混合物分离。

在系统研制过程中,需要解决的技术难点如下。

(a) 预处理剂需要具备毒性水平低、对系统材料影响小、对回收水质影响小、挥发性小等特点,同时解决尿液存放和蒸馏过程中产生沉淀的问题,并保证尿液蒸馏后的剩余残液具有高化学稳定性、适应长期储存的特性。

(b) 在低压环境下完成尿液的蒸馏,并完成尿液与水蒸气的有效分离是蒸馏装置完成尿液处理的主要过程,尿液蒸馏核心组件——旋转蒸馏组件,既要完成尿

液蒸发,又要在微重力条件下实现未蒸发尿液与水蒸气分离,同时也要实现蒸馏水冷凝后水气混合物分离。预处理尿液具有很强的腐蚀性,两相工作介质需要隔离,动密封环节多;受产品体积和功率条件的限制,动密封结构必须具有体积小、摩擦损失功率小、密封性好、耐腐蚀等特点,同时实现较大的换热能力,保证足够的潜热回收效率。因此组件需要具备良好的低压密封能力、液体管理和工质隔离能力。

4.5.3 方案和关键技术

(a) 尿处理系统的基本方案为:尿液通过添加预处理剂的方式完成前期处理。预处理后的尿液通过蒸馏的方式去除其中大部分的污染物,完成蒸馏水的提取回收,尿液蒸馏后的残留物由系统存储。系统工作原理流程如图12所示。

(b) 针对尿预处理剂的功能, 通过理论分析和多轮次试验, 筛选出综合性能符合要求的氧化剂和酸的最佳组成配比方案. 尿液原样在存放过程中很快会出现浑浊、细菌滋生等现象, 尿蒸馏水的电导率、氨氮含量等指标较高. 预处理剂在添加量不小于5‰时, 即可满足杀菌、防止固体悬浮物生成、抑制游离氨的作用, 如图13所示. 在相应的尿预处理剂添加技术设计中, 重点解决预处理剂储箱、泵等材料在强酸和强氧化剂条件下的相容性问题和寿命问题.

(c) 针对旋转蒸馏装置的功能及研制难点, 确定主要设计方案为: 利用旋转蒸馏装置的转动完成蒸发腔尿液与水蒸气的分离, 同时完成冷凝腔冷凝水和水蒸气的分离, 通过对动密封适应性改进设计, 满足结构体积小、摩擦功耗低、密封性能强的要求; 通过对腔室的变形设计, 改善蒸发腔和冷凝腔内液体的流场分布情况, 在较小的空间内实现较大的换热面积, 提高旋转蒸馏装置潜热回收效率和摩擦热利用率, 进而降低旋转蒸馏器整体功率. 旋转蒸馏装置原理和结构形式分别如图14和15所示.

借助失重飞机试验, 对微重力环境下旋转蒸馏装置的水气分离能力、腔室液体输出等性能进行了验证, 结果满足要求.

(d) 耐腐蚀轴承. 尿处理系统内部旋转部件的轴承, 其工作条件受工质特性约束, 其耐腐蚀、无润滑性能是尿处理系统重要技术难题. 同类旋转蒸馏器的寿命始终受到轴承性能的制约, 常用合金、陶瓷等材质轴承均难以适应上行振动冲击载荷、酸性工作介质等条件, 而且普通润滑介质在水蒸气条件下工作时损失极快, 无润滑条件下磨蚀问题更为严重.

通过对多种合金、陶瓷材质比对选型, 改进表面处理工艺, 优化润滑模式, 解决了轴承组成成分不耐腐蚀、晶粒易剥落导致磨粒磨损等问题. 轴承在预处理尿液实际工况的寿命验证后进行显微分析, 轴承运动副工作面未见有明显腐蚀和损伤迹象(寿命验证前后运动副变化情况如图16所示), 润滑膜保持良好, 满足实际工况的要求. 经寿命试验验证, 轴承运行寿命由改进设计前的0.5年提升至5.5年以上, 避免该轴承成为组件的寿命短板, 实现了产品的等寿命设计和整体维

图 12 (网络版彩图)尿处理系统原理组成

Figure 12 (Color online) The schematic diagram of urine processing system.

图 13 (网络版彩图)预处理尿液一个月后抑菌效果(A0为尿液原样, 未添加预处理剂; A1~A5样品添加了不同比例预处理剂)

Figure 13 (Color online) Bacteriostasis of urine pretreatment after 1 month (A0: no pretreatment added; A1~A5: various concentrations of pretreatment).

图 14 (网络版彩图)旋转蒸馏装置工作原理

Figure 14 (Color online) The schematic of vapor distiller in urine processing system.

护更换条件.

4.5.4 设计验证

根据载人综合模拟验证试验结果, 系统尿液处理速率能够满足6人乘组条件的尿液处理和回收能力, 尿液中水回收效率约为83%, 能够满足系统指标要求.

4.6 水处理系统设计

4.6.1 功能

水处理系统的功能是将收集的冷凝水和尿液蒸馏水采用物理化学的方法净化处理成再生水, 用于补充航天员饮用水、卫生用水和电解制氧用水, 实现水的循环利用, 减少水的上行补给需求. 对于需要储存的水资源, 添加银离子以保证水储存寿命要求.

图 15 (网络版彩图)旋转蒸馏装置结构形式

Figure 15 (Color online) The vapor distiller in urine processing system.

4.6.2 系统特点

中温催化氧化催化剂是水处理系统中的核心材料, 由于污染源成分特殊, 催化活性要求高, 使用寿命长, 给催化剂的研制带了很大挑战.

中温催化氧化反应是一个复杂的过程, 要在苛刻的功耗指标要求下, 使一定流量的反应物在不同的传质阶段达到预期的温度, 并且保持反应床的工作温度稳定, 对反应器热利用效率要求高, 对相变潜热的回收也是反应器设计的主要难点.

4.6.3 方案和关键技术

(a) 水处理系统首先利用过滤方式去除固体颗粒物; 使用离子交换树脂对污水进行脱盐, 并去除有机酸, 使用活性炭吸附大分子有机污染物; 通过催化氧

图 16 (网络版彩图)实际工况下轴承运动副变化情况. (a) 初始状态; (b) 连续运行后状态

Figure 16 (Color online) The surface state of bearing in urine processing system. (a) Original state; (b) state after longevity test.

化过程处理小分子有机污染物; 使用离子交换树脂处理有机酸等反应产物; 添加灭菌剂保持水质, 控制微生物滋生. 系统方案对污水中有机污染物种类和浓度波动具有良好的适应性: 以物理吸附和离子交换处理氧化难度较大的大分子有机污染物和有机酸, 催化氧化过程处理易于催化氧化的小分子有机污染物. 系统工作原理流程如图17所示.

(b) 有机污染物的处理是水处理技术中的重点和难点, 中温催化氧化是将污水在 $100^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ 范围内进行催化氧化的过程, 尽可能减少造成树脂和活性炭消耗的副产物产生, 工作要求温度比常见催化剂活性温度范围低. 此外如图18所示, 空气中的有害气体负荷会通过冷凝水转移成为水污染物负荷, 实际冷凝水存在污染物种类多、化学成分复杂的特点, 通过进行催化剂体系中载体、活性组分、助剂筛选, 确定适

用污染物范围的宽泛催化剂体系; 通过优化制备工艺过程参数, 获取性能和稳定性满足要求的催化剂.

催化剂在多相反应评价装置上连续进行了超过一万小时的冷凝水处理试验, 处理效率仍不低于90%. 对经历了不同工况模拟试验的催化剂进行微观表征测试, 催化剂的比表面积、活性组分的晶型、价态和形貌上均未发生明显变化, 使用性能未受到显著影响.

(c) 银离子添加技术. 为实现抑制再生水在后期存储过程中微生物的滋生、达到保证水质的目的, 系统设置了灭菌组件用于对前级处理过的净化水进行灭菌处理, 经对添加银、碘、氯等不同成分杀菌剂的比对, 最终选择添加银离子作为灭菌方式: 在一定的水流量和水质标准下, 通过控制银电极的工作电压和电流, 定量地向产品水中添加银离子.

图 17 (网络版彩图)水处理系统原理组成
Figure 17 (Color online) The schematic diagram of water recovery system.

图 18 (网络版彩图)污染成分在系统间迁移情况
Figure 18 (Color online) The pollutant transportation between the systems.

4.6.4 设计验证

根据载人综合模拟验证试验结果, 系统水处理速率能够满足6人乘组条件的冷凝水和尿蒸馏水处理能力, 水回收效率不低于95%, 净化后水质指标要求满足航天员饮水水质要求和电解制氧水质要求, 一般性状、微生物、化学参数等44项指标均满足医学要求.

4.7 集成和维修专项设计

4.7.1 集成和维修性要求

再生生保系统通过不同层面的在轨可更换单元(orbital replacement unit, ORU)设计, 实现在轨的维修与更换, 通过维修性实现系统的长寿命和功能的完整性.

6个再生系统布置于4个机柜单元中, 依据维修性的技术要求, 各系统进行系统结构、布局设计、寿命匹配性设计, 在有限的空间内实现系统功能的整合,

完成在轨可更换单元(ORU)的合理划分, 满足系统热、功耗、流体、电磁兼容、人机工效、力学环境适应性等功能要求.

4.7.2 集成方案

根据上述设计约束及总装集成原则, 综合可靠性、操作性、维修性、空间利用率等因素, 再生生保采用横向转轴式结构作为总装集成方案: ORU产品安装在复合材料安装板内外两侧, 安装板通过转轴、辅助固定装置与机柜连接.

需要经常操作观察或需要定期更换的ORU布置在安装板前侧空间, 方便航天员观察操作. 日常操作和更换频率低的产品布于安装板后, 维修时将系统从机柜空间内向前翻转后固定; 对安装板后侧的ORU进行维修和更换后, 将系统旋转恢复回原位置.

各系统的集成形式和模拟维修仿真情况如图19和20所示.

图 19 (网络版彩图)再生生保各系统总装集成形式
Figure 19 (Color online) The layout of the regenerative life support system.

5 在轨飞行验证情况

6月17日航天员乘神舟十二号飞船进入中国空间站天和舱，至9月17日航天员撤离安全返回地面期间，电解制氧、CO₂去除、微量有害气体去除系统持续工作，保障航天员入驻期间的舱内氧分压、CO₂分压、

有害气体浓度等大气环境参数在允许范围内：产氧量满足3人需求，控制舱内氧分压在20.6~23.1 kPa范围内；CO₂去除系统净化能力满足3人需求，控制舱内整体CO₂分压不高于0.5 kPa；通过天和舱内配置的微量气体检测装置和安全性气体检测组件，对舱内多种有害气体浓度进行定时自动采样分析，并对采样下行的

图 20 (网络版彩图)内侧ORU维修的模拟验证
Figure 20 (Color online) The simulated repairs of the inside orbital replacement unit (by software).

图 21 (网络版彩图)再生系统在轨维修验证情况
Figure 21 (Color online) The simulated repairs of the regenerative life support system (in orbit).

空气样本成分分析, 显示舱内气体经过微量有害气体去除系统净化, 空气质量优良, 各项有害气体浓度均满足指标要求且持续处于较低水平, 如常见大气污染物甲苯 0.03 mg/m^3 、甲醛未检出。

尿处理、水处理系统按冷凝水收集节律、尿液收集节律进行水资源的处理和回收, 净化后的再生水在轨通过电导率、总有机碳、微生物培养结果等指标分析, 确认水质满足航天员饮用和电解制氧要求。神舟十二号任务期间, 通过尿处理、水处理系统对水资源回收, 累计生成再生水约 789 kg , 在轨整体水资源闭合度约为 81% 。根据采样下行的再生水样本成分分析, 各项水质指标均优于饮用水指标要求, 如电导率 $\leq 1 \mu\text{S/cm}$, 总有机碳 0.39 mg/L , NH_4^+-N 值 0.06 mg/L , 各类有机污染物、无机污染物浓度和微生物检测结果均低于要求限值。

神舟十二号任务期间, 在轨专项开展了再生生保维修模拟验证(图21), 对系统背面的产品状态进行检

查和模拟维修验证。验证了再生维修整体翻转方案的设计、ORU布局设计、专用维修工具等项目, 维修时长、维修效果均满足要求。

根据再生生保系统的在轨运行状态和验证结果分析, 氧气和水已在空间站上形成了一套闭合程度很高的物质循环体系, 降低了对地面补给的依赖程度, 使空间站后续长期在轨运行成为可能。

6 结论

再生生保技术是中长期载人飞行的关键技术, 是实现中国空间站长期有人运行的必备条件, 利用再生生保系统, 可以实现在轨物质的高闭合程度循环利用。目前再生生保系统在中国空间站上经历了神舟十二号任务阶段的全面在轨验证, 设备运行稳定, 物质循环与能量流动正常, 物质消耗与循环节律匹配合理, 指标符合设计要求, 大幅降低了地面补给负担。

参考文献

- 1 Zhou J P. Chinese space station project overall vision (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2013, 2: 1–10 [周建平. 我国空间站工程总体构想. 载人航天, 2013, 2: 1–10]
- 2 Tang L X, Gao F, Deng Y B, et al. Research on environmental control and life support system (ECLSS) of China's manned spacecraft (in Chinese). *Space Medicine Med Eng*, 2008, 3: 167–174 [汤兰祥, 高峰, 邓一兵, 等. 中国载人航天器环境控制与生命保障技术研究. 航天医学与医学工程, 2008, 3: 167–174]
- 3 Zhou K H, Fu L, Han Y Q, et al. Research and development of technique of regenerative environmental control and life support system (in Chinese). *Space Medicine Med Eng*, 2003, 16(suppl): 566–572 [周抗寒, 傅岚, 韩永强, 等. 再生式环控生保技术研究及进展. 航天医学与医学工程, 2003, 16(suppl): 566–572]
- 4 Wu Z Q, Gao F, Deng Y B, et al. Key technology review of research on regenerative environmental control and life support system for space station (in Chinese). *Space Medicine Med Eng*, 2018, 2: 105–111 [吴志强, 高峰, 邓一兵, 等. 空间站再生生保关键技术研究. 航天医学与医学工程, 2018, 2: 105–111]
- 5 Bagdigian R M, Cloud D. Status of the international space station regenerative water recovery and oxygen generation systems. In: *Proceedings of the 35th International Conference on Environmental Systems*. Rome, 2005
- 6 Link D E. Integration of regenerative ECLSS functions into the international space station U.S. laboratory element. In: *Proceedings of the 35th International Conference on Environmental Systems*. Rome, 2005
- 7 Shen L P, Zhou K H. Testing of crew cabin air revitalization system in space station (in Chinese). *Chinese J Space Sci*, 2000, 20(suppl): 56–66 [沈力平, 周抗寒. 空间站座舱大气再生技术实验研究. 空间科学学报, 2000, 20(suppl): 56–66]
- 8 Li J R, Yin Y L, Zhou K H, et al. Progress of oxygen generation technology by water electrolysis in space station (in Chinese). *Space Medicine Med Eng*, 2013, 3: 215–220 [李俊荣, 尹永利, 周抗寒, 等. 空间站电解制氧技术研究进展. 航天医学与医学工程, 2013, 3: 215–220]
- 9 Zhou K H, Shang C X, Liu C L, et al. An experimental study on regeneration device for urine and waste water in space station (in Chinese). *Space Medicine Med Eng*, 1997, 5: 323–327 [周抗寒, 尚传勋, 刘成良, 等. 空间站尿及废水再生装置与实验研究. 航天医学与医学工程, 1997, 5: 323–327]

Design and implementation of regenerative life support system in the China space station

LIU XiangYang¹, GAO Feng¹, DENG YiBing², WU ZhiQiang¹, LI YingBin¹, DONG WenPing¹, BIAN Qiang¹, YANG RunZe¹ & ZHANG Tao¹

¹ China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China;

² China Manned Space Program Agency, Beijing 100081, China

China's Tiangong space station is equipped with a regenerative life support system (RLSS). RLSS enables in-orbit environmental control and life support by producing oxygen, purifying air, recovering water from urine and condensate water. As a key technology of the space station, the RLSS contains several physicochemical systems, including electrolysis oxygen generation, carbon dioxide removal, trace contaminant control, urine processing, water recovery, and carbon dioxide reduction systems. During the Shenzhou-12 mission, the RLSS performed a 90-day manned operation and conducted the closed-loop recycling of the oxygen and water. This article presents the details pertaining to the techniques, developments, and operations of the RLSS on the China space station.

China space station, environmental control and life support, regenerative life support system, in-orbit operation

doi: [10.1360/SST-2021-0528](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0528)