

空间站废水的处理及管理

周抗寒 李俊荣 刘成良 沈力平

(航天医学工程研究所 北京 100094)

摘 要

长期载人飞行的空间站需要大量的用水,为解决由此引起的巨大的维持飞行的运行费用,需要实现水的再生与闭路循环. 如何针对空间站废水的特征,解决废水的处理与利用问题,并建立合理的水循环体系是这一工作的关键. 文中分析、比较了空间站废水的处理方法,设计了空间站水管理整合方案,并多方面探讨和验证这一方案的合理性和可行性.

关键词 水处理—水管理—空间站

1 引言

在长期载人飞行的空间站中,航天员所需的消耗性物质和产生的废物,如果全靠地面与空间往返飞行支持,则必然要投入巨大的维持飞行的运行费用,因而需要再生式的环控生保系统来支持. 水的闭路循环是这一系统中最为关键的内容之一. 美国和俄罗斯等航天大国,对此进行了30多年的研究,积累了大量的研究成果,部分成果已经或正在空间站中应用. 我所于1988年开始对空间站的再生式生保系统进行研究,已取得了阶段性的成果,实现了3人容量下的舱内大气与水的闭路循环. 由于空间站应用的复杂性,如何针对空间站废水的特征,解决废水的处理与利用问题,并建立合理的水循环体系是目前水闭路循环研究的最主要课题. 本文围绕这些内容进行探讨.

2 用水的分布与废水特性

在正常情况下,一名航天员每天的用水量如表1、2所示,其中包含1.8kg食物中所含水分0.5kg、复水0.7kg以及0.83kg氧气的电解用水0.93kg. 这些水经航天员饮用或使用后,作为废物又以各种形式排出,其数量与形态也同列于表1、2中^{[1],[2]}.

表1 生理代谢所需物质与排出的废物

供应的物质 (kg/d)		排出的物质 (kg/d)	
饮用水	1.86	尿	1.5
食物复水	0.72	呼吸及出汗	1.83
食物含水	0.5	排泄物	0.09
代谢生成水	0.34		
氧气	0.83	二氧化碳	1.0

2001-08-31 收到原稿, 2002-01-27 收到修定稿

表 2 卫生用水及所产的废物分布

供应 (kg/d)			排出 (kg/d)		
洗涤	12.49	液体	11.88	蒸汽	0.61
洗碗	2.0	液体	1.98	蒸汽	0.02
洗手及洗澡	5.55	液体	5.11	蒸汽	0.44

从表 1、2 可见, 从空间站这一密闭环境中收集到的废水主要为冷凝废水、卫生废水及生理废水. 结合大气再生来看, 还有一种水源是二氧化碳还原产水. 这些水的水质情况归纳于表 3 中 [3].

表 3 废水中的主要污染物

冷凝废水		卫生废水		尿液废水		二氧化碳还原水	
成分	含量	含量	成分	含量 (mg/L)	成分	含量 (mg/L)	
化学耗氧量 (mgO ₂ /L)	250—650	2000—5000	尿素	13 000—20 000	H ₂	< 0.045	
氨 (mg/L)	50	< 80	氯化钠	8000—12 000	CH ₄	< 10	
氯化物 (mg/L)	25	< 10	肌氨酸	400—1600	CO ₂	< 850	
硫酸盐 (mg/L)	< 5	< 300	磷酸根	1300—1500	氨	< 10	
硝酸盐 (mg/L)	< 1	< 1000	氮	70—800	阳离子	< 3	
醇类 (mg/L)	< 300		马尿酸	100—1600			
酸 (mg/L)	< 30		尿酸	200—800			
细菌个数 (/L)	10 ⁴ —10 ⁷	10 ⁶ —10 ⁸	钾	1500—2000			
			钙	150—700			
			镁	150—250			
			碳酸盐	1200—1400			
			硫酸盐	1000—2000			
			氨基酸	150—350			
			脂肪酸	30—60			
			苯酚	100—300			

3 废水的处理方法及比较

表 3 各种水源的特性表明水处理系统可按上水、中水与下水处理系统分类, 即冷凝废水 (包括二氧化碳还原产水)、卫生废水和尿液废水处理系统.

冷凝废水是排入座舱空气中各种水蒸汽在温湿度控制系统中冷凝的水, 它的水质接近蒸馏水, 其污染主要是由于环境中溶解性污染物引起的, 其分子量较小, 处理方法基本上是吸附/催化 [3]—[6]. 图 1 是冷凝废水处理系统核心部分的流程图.

这一处理系统的核心部分由三部分组成: 灭菌组件、多层过滤组件和挥发物除去组件. 为保护组合床以及防止污垢在热交换器中沉积, 卫生水废水首先通过一个 5 μm 的过滤器, 再进入灭菌组件, 在 121°C 的高温下处理 20 min. 冷却到 46°C 后, 由包含各种吸附介质的 2 个相同的组合床处理后去除离子及溶解性有机物. 为抑制管路中的细菌, 组合

床中的碘阀保证水中余碘浓度在 1—4 mg/L. 组合床的运行状态及是否饱和, 由其入口与出口处的电导传感器负责. 处理后的水通过挥发物除去组件, 除掉低分子有机物及组合床不能处理的极性有机物. 在这一过程中, 水先饱和氧, 再加热至 125°C, 最后通过催化氧化反应器, 氧化成二氧化碳或变成通过相分离及离子交换树脂可除去的组分. 水质监测系统监测处理水中的总有机碳、电导、pH、水中余碘, 合格者进入饮水箱内, 不合者返回处理系统.

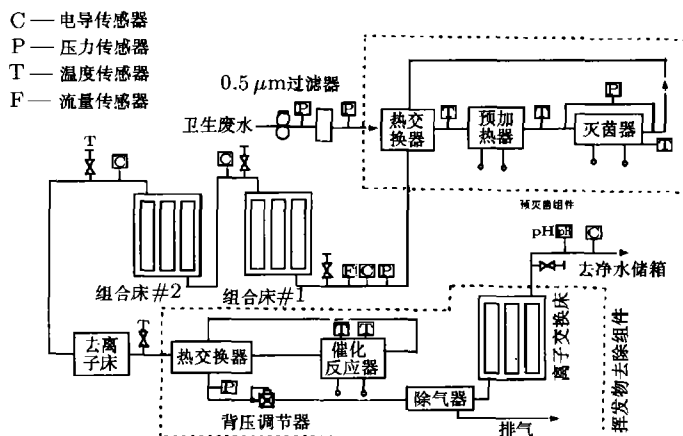


图 1 卫生水处理流程

Fig.1 Hygienic water treatment flow

这一技术被应用在“和平号”的核心舱中^{[5],[6]}, 并从 1986 年 3 月 16 日载人飞行时启动. 系统总重量为 104 kg, 其中冷凝水分离与输入部分为 34 kg、净化部分为 29 kg、存储与分配部分为 41 kg. 系统的最大水处理能力为 18 kg/d, 水的回收率 100%, 再生净水的比能 (单位质量产物所耗能量) 为 2 W·h/kg, 比质量 (生产单位质量的物质所需消耗的物质质量) 为 0.18 kg/kg, 远少于由地面补给的比质量 (1.2).

在国际空间站俄罗斯服务舱中的冷凝水处理系统, 与上述系统不同的地方是增加了一个部件, 这就是过滤反应器, 它组装在水气混合管路上, 用于除去有机污染物, 以保证在空气中有大量有机物污染时增加系统的可靠性.

从表 3 的各种废水水质的对照可见, 卫生废水比冷凝废水的污染严重. 对它的处理方案主要有反渗透法与吸附催化法^{[3]—[6]}. 比较这两种方案, 吸附催化法系统简单、运动部件少、可靠性高、能耗低以及水回收率高, 更适合空间卫生废水的处理. 它的流程及主要部件与冷凝废水处理系统完全相同, 由于废水水质的关系, 它的水回收率只有 95% 左右.

尿液废水是空间站废水中最复杂的废水, 其污染物主要有尿素、氯化钠及各种酸, 占总重的 3%—4%, 因而处理的难度最大, 处理流程有反渗透法、电渗析法及蒸馏法, 最有效地保证净化后的水质要求的方法是低温蒸馏技术. 目前研究得比较成熟的技术是膜蒸发技术与蒸汽压缩蒸馏技术, 它们是在空间站上得到过应用或正准备应用的技术^{[5]—[10]}. 图 2 是在“和平号”空间站上所采用的膜蒸发尿液废水处理系统流程.

这一系统由三部分组成, 第一部分是尿液的分离与储存, 包括动态尿液/空气分离器、

预处理装置及尿液的存储与运送部件;第二部分是蒸馏净化部分,它包括平板膜蒸发器、循环水泵与风机、加热器、热交换器、膜式水/气分离器与净化水水泵等部件;第三部分是后处理部分,主要有多层过滤器、电导、水箱等。

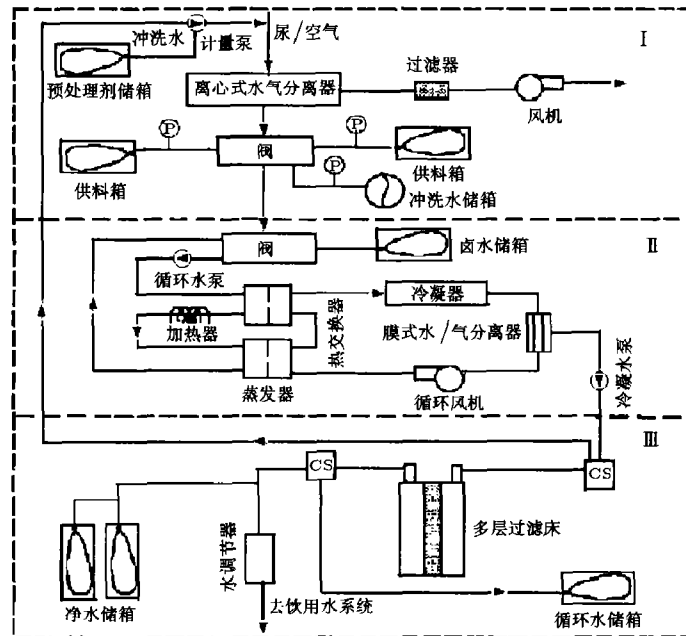


图2 渗透膜蒸发尿处理流程

Fig.2 Urine treatment flow by permeation evaporation process

蒸馏净化部分是这一系统的核心,它由尿液废水与气体两个闭路循环构成。在尿液闭路中,蒸发前的尿液通过热交换器升温,再通过一个电加热器加热到 50°C ,进入膜蒸发器中,蒸发器膜的表面具有憎水性毛细孔,尿液中的水在这一表面蒸发,由于膜材料的特性,蒸汽能透过膜到达膜的另一侧,而尿液只能在尿液闭路内循环,并被浓缩。在气体环路内,由于风机不断地鼓风吹扫,渗透过来的水蒸汽被连续地带走,在冷凝器内冷凝,再经水/气分离器后分离得到净化的水。净水经后处理及冷凝废水处理系统后,水质能够达到饮用水标准。

1990年1月15日,采用上述技术的尿液处理系统在“和平号”空间站上的Kvant-2舱段启动^{[5]~[7]},其处理能力为每天5kg尿液,总重190kg,其中第一部分为75kg,第二部分为50kg,第三部分为40kg,控制单元为25kg。系统的比能为 $1100\text{ W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 净水(包括尿液预处理比能 $30\text{ W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 尿),水的比质量为 $0.4\text{ kg}/\text{kg}$,回收效率达80%。

这种气体吹扫的膜处理方法处理强度较低、能耗高,因此对它进行了改进,发展了热电膜蒸发系统。这一技术的改进要点主要是:(1)将平面膜改为中空纤维膜管,增大了单位体积内的膜表面积,提高了处理能力;(2)利用热电泵对冷凝潜热进行回收,降低能耗;(3)水蒸汽的回收由空气吹扫改为真空抽吸,纤维管外的压力维持在 17.2 kPa 。因而同类规模的装置,其产率可增加10倍,达到 $2.5\text{ kg}/\text{h}$,能耗可降低 $1/3$,仅需 $350\text{ W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 净水。水的回收效率也能增加到90%^{[9],[10]}。

另一种尿液处理技术是蒸汽压缩蒸馏, 它也是一种包括蒸发与冷凝两个过程的废水处理系统, 通过对蒸汽的压缩来提高饱和温度, 再把这种过热蒸汽冷凝在与蒸发器有直接接触的金属表面, 冷凝潜热直接传递给另一侧的废水, 促进与冷凝液等量的水蒸发. 图 3 是蒸汽压缩蒸馏系统的流程图. 它由蒸发/冷凝转鼓、蒸汽压缩机、真空泵、尿液蠕动循环泵, 冷凝水输出蠕动泵、水/气分离器、储水箱等部件组成.

这一系统的关键部件是蒸发/冷凝器, 它由同轴的内、外两个转鼓组成, 里面的转鼓有一定的锥度, 尿液在转鼓的内侧蒸发, 蒸汽导入转鼓外侧冷凝, 从而保证了旋转冷凝器/蒸发器具有公共的热交换体. 工作时, 温度为 $21\sim 35^{\circ}\text{C}$ 的尿液进入旋转的、压力为 4.8 kPa 转鼓, 由于有 10 g 的离心力, 尿液在转鼓内表面上形成一定厚度的液膜, 同时, 自液膜中蒸发的水蒸气, 在离心力的作用下, 与尿液完全分离, 进入蒸汽压缩机中压缩, 这种压缩的过热蒸汽在内转鼓外侧与外转鼓内侧所构成的冷凝器中冷凝, 冷凝潜热直接通过内转鼓壁传入内侧的液膜. 由于离心力迫使液膜紧贴在转鼓内壁, 保证了热的有效传导. 冷凝水通过水泵输出, 未蒸发的液体在尿液循环泵的作用下循环.

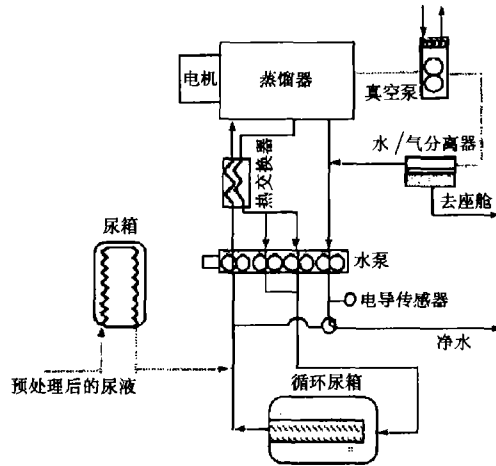


图 3 蒸汽压缩蒸馏系统流程
Fig.3 System flow of vapor compress distillation process

表 4 国际空间站上美国与俄罗斯尿处理装置性能比较

方 案	美国	俄罗斯
	蒸汽压缩蒸馏	渗透蒸发膜
重 量 (kg)	135	190
体 积 (m^3)	0.37	1.5
电源电压 (V)	120 DC	28 DC
平均功率 (W)	330	380
峰值功率 (W)	600	
备用功率 (W)	35	
比能 ($\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$)	168	1000
处理能力 (l/d)	8	9
维护人时 (h/a)	3	40
比质量 (kg/kg 尿)	0.06	0.3
水的回收率 (%)	91	80
系统操作温度 ($^{\circ}\text{C}$)	32—38	52
系统操作压力 (kPa)	3.4—6.9	111—200

从中可见, 蒸汽压缩蒸馏过程是一种被动式的热力过程, 无需主动温控, 整个过程所消耗的能量仅为压缩蒸汽和补偿机械损失所失去的能量, 它操作温度接近室温, 因而能提

现有技术已能实现冷凝废水、卫生废水及尿液废水子系统的水回收率分别达到 100%、95%、90% 左右, 因此, 水循环体系完全能正常地运转。

饮用水、食品复水以及电解制氧用水无论从质还是从量上都必须充分保障。在图 4 的水管理方案中, 饮用水部分的水源来自冷凝水及二氧化碳还原水的回收, 由于这些水基本是蒸馏水, 回收水的水质容易达到饮用水要求, 同时心理阻力少; 从数量上分析, 也有足够保证, 从图 4 中可见, 从温湿度控制系统中回收的冷凝水量为 2.9 kg, 二氧化碳还原系统回收 0.45 kg, 处理后可得到 3.35 kg 纯水, 而饮用及食品复水的循环量为 2.58 kg, 只占总额的 77%, 还有 0.77 kg 的余水可供应卫生水系统。即使不考虑从卫生水蒸发的部分, 从冷凝水处理子系统回收的 2.28 kg 水, 也能满足饮用及食品复水的最基本的要求。电解用水与尿液冲洗水来自尿液废水回收子系统, 从 2 kg 尿液废水中可得到 1.8 kg 净水, 其中 0.5 kg 用于冲洗水, 电解制氧用去的 0.93 kg 水只占这部分水总量的 71%, 还有 0.37 kg 净水补充到卫生水中。由于以上两部分的水源相对稳定, 且与其他部分无直接联系, 因而独立性强。18.97 kg 卫生废水净化后, 有 18.02 kg 净水返回卫生水中, 卫生水总量与尿液处理及冷凝水处理子系统相关, 不足部分从外部补充, 从图 4 中可见, 需要补充的水量为 0.88 kg。整个系统从尿液处理系统、卫生水处理系统、大气循环系统损失的水资源分别为 0.2、0.95、0.37 kg, 系统 93% 的水资源得到了回收, 提供 96% 的用水量。

在实际的空间应用中, 无论是俄罗斯的“和平号”还是国际空间站, 俄罗斯和美国都将冷凝净化水作为航天员的饮用水^{[5]-[7]}。“和平号”空间站上的碱性电解池的电解用水也有过采用尿液净化水的经验, 但能否满足适用水质有更高要求的固体聚合物电解池电解用水的要求, 我们进行较长时间的实验, 证明是可行的。由热电膜蒸发装置、吸附后处理装置及固体聚合物电解制氧装置组成的系统, 按图 4 所示的尿液 → 净水 → 氧气的再生水与利用方案, 在密闭舱中进行了 3 人 5 天的运行试验。每天从 3 人的尿液中回收净水 5.4—5.5 kg, 2.8 kg 用于电解制氧, 供 3 名试验人员呼吸, 在试验期间, 舱内氧分压基本维持在 0.21 kPa 左右。尿液净化水的电导约 100 μS 左右, 经后处理后低于 0.1 μS , 完全能满足电解用水要求。

归纳以上各方面的分析以及试验结果, 所设计水管理整合方案合理利用了各分系统之间的相关关系, 能实现对不同水源的有利利用, 有效地实现了水的平衡, 同时保证关键系统具有较强的独立性, 是一种有效的水整合方案。

5 结论

由于空间应用的特点, 空间站的废水处理与管理是极为复杂的, 在这方面的研究工作极多, 经过长期的研究与实际应用的检验, 一些研究方向已趋于明朗。水的处理方面, 无论是美国, 还是俄罗斯对处理技术的定位基本趋于一致, 冷凝废水与卫生废水采用吸附、催化技术, 尿液废水处理采用蒸汽压缩蒸馏与渗透膜蒸发技术。将这些技术依照冷凝水用于饮用、尿液再生水用于电解、卫生水返回卫生水的水管理方案整合, 不仅解决了水利用方面存在的问题, 也保证了各分系统及总体的物质平衡。

参 考 文 献

- [1] 木部势至朗. 宇宙用生命维持技术の現状と展望. 日本航空宇宙学会志, 1999, 47(549):169—205
- [2] N M Samsonov. The MIR Space Station Regenerative Water Supply. Proc. Sixth European Symp. Space Envir. Control Sys., ESA SP-400, 1997
- [3] N M Samsonov. A Physical/Chemical System for Water and Atmosphere Recovery Aboard a Space Station. SAE 1993 Transactions, SAE932077, 1993
- [4] Functional Description of the Ion Exchange and Sorbent Media Used in the ECLSS Water Processor Unibeds. SAE 1991 Transactions, SAE 911551, 1991
- [5] N M Samsonov, N S Farafonov. A Physico/Chemical System for Hygiene Waste Water Recovery. SAE 1993 Transactions, SAE932076, 1993
- [6] N M Samsonov. Systems for Water Reclamation from Humidity Condensate and Urine for Space Station. SAE 1994 Transactions, SAE 941536, 1994
- [7] Cindy F. Hutchens. A Description and Comparison of U.S. and Russian Urine Processing Hardware for the International Space Station. SAE 1994 Transactions, SAE 941251, 1994
- [8] E M Zdankiewicz. Phase Change Water Processing for Space Station. SAE 1985 Transactions, SAE 851346, 1985
- [9] E M Zdankiewicz. Phase Change Water Recovery for Space Station-Parametric Testing and Analysis. SAE 1986 Transactions, SAE 860986, 1986
- [10] Janie H. Miernik. Waste Water Processing Technology for Space Station Freedom: Comparative Test Data Analysis, SAE 1991 Transactions, SAE 911416, 1991

WASTEWATER TREATMENT AND MANAGEMENT IN SPACE STATION

ZHOU Kanghan LI Junrong LIU Chengliang SHEN Liping

(*Institute of Space-medico Engineering, Beijing 100094*)

Abstract

There need a mount of water in space station during long manned flight. To reduce the maintenance expenditure of flight, wastewater must be recovered and achieve a close loop circulation of water. The key task lies in resolving the problem of wastewater treatment and utilization and constituting a reasonable water circulation system based on the feature of wastewater in space station. In this paper, the wastewater treatment methods in space station are analyzed and compared, a space station integrated water management scheme was designed, and its rationality and feasibility are also discussed and verified from many aspects.

Key words Water treatment, Water management, Space station