

DOI:10.11918/202307064

# 舱外航天服除湿装置除湿及再生特性

张震<sup>1,2</sup>, 杨润泽<sup>1,2</sup>, 卞强<sup>1,2</sup>, 臧华兵<sup>1</sup>, 梁志伟<sup>1</sup>, 李广利<sup>1,2</sup>, 尚文锦<sup>1</sup>

(1. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094; 2. 人因工程全国重点实验室(中国航天员科研训练中心), 北京 100094)

**摘要:** 在舱外航天服环境控制与生命保障系统中, 除湿装置能够对介质气体中湿气进行去除, 可有效提高 CO<sub>2</sub> 分压传感器的测量灵敏度。为适应舱外航天服的使用模式、出舱时间, 同时延长除湿装置在舱外航天服中的使用次数, 提出了使用舱外航天服氧瓶剩余氧气进行硅胶吹扫再生的方法, 为分析除湿装置的除湿特性、再生特性以及使用模式对其性能影响, 首先对比了氯化钙、变色硅胶和细孔硅胶等干燥剂的物理特性和除湿性能; 其次, 采用纯氧吹扫的方式对变色硅胶进行了除湿再生试验研究; 最后, 对比分析了除湿装置使用模式对其除湿性能的影响特性。试验结果表明: CaCl<sub>2</sub> 颗粒的除湿效果优于变色硅胶, 但吸湿后 CaCl<sub>2</sub> 干燥剂会出现坍塌短路的现象; 在相同试验条件下, 变色硅胶的连续除湿时间为 32 h, 而细孔硅胶的连续除湿时间为 23 h; 除湿过程经过暂停后, 除湿特性发生变化, 间断模式的出口绝对湿度随着除湿时间的增加而有所增大, 并且高于正常模式下的出口绝对湿度。变色硅胶的物理特性稳定且在满足除湿要求下的除湿时间较长, 更适用于该系统中的除湿装置; 且变色硅胶经过纯氧吹扫后可循环使用, 具备多次除湿功能; 间断模式会造成硅胶内部含水量的重新分配, 降低除湿装置内硅胶的整体吸湿能力。本研究为舱外航天服环境控制与生命保障系统中除湿装置干燥剂的选择以及再生特性的优化提供了基础数据和理论指导。

**关键词:** 舱外航天服; 除湿装置; 硅胶; 除湿; 再生

中图分类号: V416.5

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)04-0165-06

## Dehumidification and regeneration performance of dehumidifier in the extravehicular spacesuit

ZHANG Zhen<sup>1,2</sup>, YANG Runze<sup>1,2</sup>, BIAN Qiang<sup>1,2</sup>, ZANG Huabing<sup>1</sup>, LIANG Zhiwei<sup>1</sup>, LI Guangli<sup>1,2</sup>, SHANG Wenjin<sup>1</sup>

(1. China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China; 2. National Key Laboratory of Human Factors Engineering (China Astronaut Research and Training Center), Beijing 100094, China)

**Abstract:** In the environmental control and life support system (ECLSS) of the extravehicular spacesuit, the removal of the moisture from the medium gas can be achieved by the dehumidifier which may effectively improve the sensitivity of the CO<sub>2</sub> pressure sensor. In order to adapt the usage mode and egress time of the extravehicular spacesuit, and to extend the usage times of the dehumidifier, a method of the residual oxygen purging is proposed, by which the color-changing silica gel is regenerated after dehumidification. This method aims to study the dehumidification performance, the regenerative performance and the influence of the usage mode on the dehumidification performance. Firstly, the physical properties and the dehumidification performances of the desiccants such as the calcium chloride (CaCl<sub>2</sub>), color-changing silica gel, and fine porous silica gel are compared and analyzed using the dehumidifier. Secondly, the method of the residual oxygen purging is tested, by which the color-changing silica gel is regenerated after dehumidification. Finally, the influence of the usage mode on the dehumidification performance of the dehumidifier was experimentally investigated and compared. The experimental results indicate that the dehumidification performance of CaCl<sub>2</sub> is better than that of color-changing silica gel, but the CaCl<sub>2</sub> particle tends to collapse and short circuit after hygroscopic. Under the same condition, the continuous dehumidification time of the color-changing silica gel is 32 h, while the time of the fine porous silica gel is 23 h. After a pause of dehumidification, the dehumidification performance of the dehumidifier change. The outlet humidity of the intermittent usage mode increases with the increase in dehumidification time, which is higher than that of the normal usage mode. Furthermore, the physical characteristics of color-changing silica gel are stable, and it has a longer dehumidifying time under the conditions of the dehumidification requirements, making it more suitable for the dehumidifier in this system. Additionally, the color-changing silica gel can be recycled and has the

收稿日期: 2023-07-20; 录用日期: 2023-09-25; 网络首发日期: 2024-03-20

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240319.1639.006>

作者简介: 张震(1987—), 男, 博士, 助理研究员

通信作者: 卞强, [ilsumtea@hotmail.com](mailto:ilsumtea@hotmail.com)

ability to multiple dehumidify after being purged with pure oxygen. However, the discontinuous mode can lead to the redistribution of the moisture within the silica gel, reducing the overall moisture absorption capacity of the dehumidifier. This research provides fundamental data and theoretical guidance for the desiccation selection of the dehumidifier and optimization of regeneration characteristics of the extravehicular spacesuit in environmental control and life support system.

**Keywords:** extravehicular spacesuit; dehumidifier; silica gel; dehumidification; regeneration

舱外航天服是出舱活动必备的个人防护装备,为满足空间环境使用要求,舱外航天服为航天员出舱活动提供安全有效的环境防护、密闭环境的环境控制和生命保障、出舱作业所需的操作工效保障<sup>[1]</sup>。其中,环境控制与生命保障系统简称环控生保系统,主要由供气调压系统、通风净化系统、温湿度控制系统、测量与供配电系统以及乘员保障系统组成,该系统主要用于维持航天服里规定的压力,供给航天员呼吸用的氧气,通风散热和除湿,向液冷服提供循环水,清除人体排出的废气<sup>[2-3]</sup>。

作为舱外航天服环控生保系统的关键技术,舱外航天服内部环境参数的测量,既能完成航天服环控生保系统工作状态的监测,也是评价航天员安全环境的重要依据<sup>[4]</sup>。特别是航天服内部的 CO<sub>2</sub>分压传感器直接涉及航天员的生命安全,其测量灵敏度、响应时间、使用寿命等指标受气体中的湿度影响较为明显。因此,需要在气体进入 CO<sub>2</sub>分压传感器前进行干燥除湿处理,以保证 CO<sub>2</sub>分压传感器能够精确检测航天服内 CO<sub>2</sub>分压,保障航天员安全。

除湿装置作为航天服环控生保系统的产品,采用双通道并联式结构,每个除湿通道内装填一定量的干燥剂,能够去除湿气对 CO<sub>2</sub>分压传感器测量精度的影响,保障航天员安全。为研究分析除湿装置的除湿以及再生特性,本文对比研究了常用几种干燥剂的除湿性能,基于综合分析选用变色硅胶作为除湿装置装填的干燥剂;同时开展了除湿装置使用模式对比研究,从而获得除湿性能、再生性能及使用模式最佳的除湿装置,提高了 CO<sub>2</sub>分压传感器的测量精度。

## 1 试验试剂、装置和方法

### 1.1 试验试剂及仪器

本文选择常用的 CaCl<sub>2</sub>以及硅胶作为除湿装置的干燥剂进行试验对比分析,由于普通 CaCl<sub>2</sub>为大颗粒的晶体,无法满足装填要求。因此,本文对其进行了物理处理,即捣碎后采用标准筛网筛分出一定大小的 CaCl<sub>2</sub>颗粒进行装填。同时,由于硅胶内部具有网状结构并存在许多空隙,空隙的毛细管孔径不同,因此硅胶的吸附能力也各有不同<sup>[5]</sup>。本文采用细孔硅胶和变色硅胶分别进行装填,从而对比

分析不同干燥剂的除湿性能。

本文采用维萨拉 HMI36A 型号温湿度测试仪测试除湿装置进出口气体的绝对湿度,采用 Alicat 型号为 MC-200SCCM-D 的气体质量流量控制器控制除湿装置除湿试验中的气瓶供气流量,采用 Alicat 型号为 KM0212 的气体质量流量控制器控制除湿装置再生实验中的气瓶供气流量。

### 1.2 试验装置及方法

#### 1.2.1 除湿装置除湿性能实验

试验装置如图 1 所示,实验时将混气瓶放置于恒温水浴中,水浴温度设定为 26 ℃。氧气气瓶供气流量设定为 150 mL/min ± 10 mL/min,调整调节阀使得混气瓶中的气体绝对湿度控制在 16.0 g/kg ± 0.2 g/kg,采用温湿度计测量除湿装置吸湿通道出口的绝对湿度。

CaCl<sub>2</sub>和变色硅胶的对比实验中,待除湿装置单个通道吸湿 8 h 后停止该通道吸湿,同样方法测试另一个通道的除湿性能,试验结束后观察除湿装置出口绝对湿度变化以及通道内干燥剂的状态。

硅胶吸湿性能对比实验中,待除湿装置出口绝对湿度达到 9.9 g/kg 时停止除湿装置除湿实验。

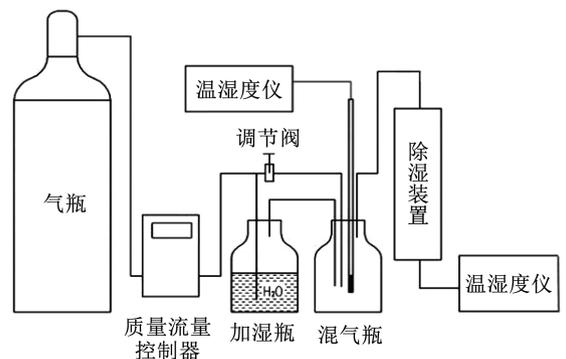


图 1 除湿装置除湿性能试验原理

Fig. 1 Schematic of dehumidification performance test for dehumidifier

#### 1.2.2 除湿装置使用模式对比实验

1)按照图 1 所示装置开展除湿装置除湿实验,其中氧气气瓶供气流量设定为 150 mL/min ± 10 mL/min,调整调节阀使得混气瓶中的气体绝对湿度控制在 16.0 g/kg ± 0.2 g/kg,采用温湿度计测量除湿装置吸湿通道出口的绝对湿度。

2)除湿装置正常使用模式。除湿装置每个通

道连续吸湿 10 h, 整个试验过程中除湿装置的出口绝对湿度应低于 9.9 g/kg。除湿试验完成后按照图 2 所示进行除湿装置再生实验, 其中实验时将氧气气瓶供气流量设定为  $300 \text{ mL/min} \pm 10 \text{ mL/min}$ , 连续吹扫 5.5 h。干燥剂吹扫再生时除湿装置的两个通道串联连接(其中, 除湿装置第 1 次吸湿后再生时通道 1 出口连接通道 2 入口, 除湿装置第 2 次吸湿后再生时通道 2 出口连接通道 1 入口)。

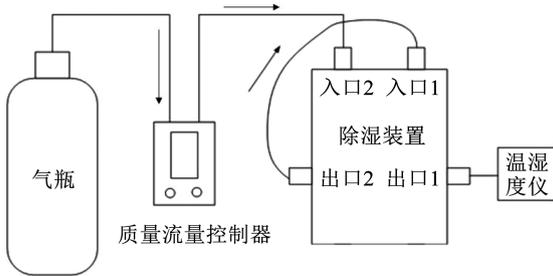


图2 除湿装置再生试验原理

Fig.2 Schematic of regenerative test for dehumidifier

3) 除湿装置间断使用模式。除湿装置每个通道连续吸湿 5 h 后停止试验, 间隔 3 h 后继续对每个通道进行 5 h 的除湿试验。两个通道均完成上述试验后进行除湿装置再生, 再生方法保持不变。

## 2 结果与讨论

### 2.1 干燥剂选型分析

#### 2.1.1 $\text{CaCl}_2$ 和变色硅胶的对比分析

在整个试验过程中, 装填  $\text{CaCl}_2$  的除湿装置出口绝对湿度一直保持在  $0.7 \text{ g/kg}$  以下; 装填变色硅胶的除湿装置出口露点一直保持在  $1.2 \text{ g/kg}$  以下, 两种干燥剂都能够去除进入除湿装置气体中的水气。硅胶的吸水量一般只有  $10\% \sim 20\%$ , 而且吸附速率慢,  $\text{CaCl}_2$  对水的吸附量达到  $50\% \sim 60\%$  [6], 因此, 相同试验条件下  $\text{CaCl}_2$  颗粒的除湿效果优于变色硅胶颗粒。但是,  $\text{CaCl}_2$  颗粒在使用过程中容易出现膨胀结块、传质阻力增大等问题 [7-8]。试验结束后对除湿装置进行拆解发现, 吸湿后除湿装置中的  $\text{CaCl}_2$  干燥剂出现了坍塌短路的现象, 局部  $\text{CaCl}_2$  吸湿过量出现流淌现象, 导致除湿装置的通道堵塞。此外, 由于除湿装置在上行过程中会经受一定量级的振动、冲击等环境考核, 因此,  $\text{CaCl}_2$  颗粒在上行过程中必然会相互摩擦, 产生一定量粉尘黏附在除湿装置出口过滤层上, 从而会出现上述坍塌短路甚至是流淌的现象, 导致除湿装置流阻异常增大。

相比而言, 变色硅胶为较规则的球形颗粒, 物理性能较好, 上行过程中不易磨损和出粉。因此, 试验结束后对除湿装置进行拆解发现, 吸湿后的硅胶除

颜色发生变化外, 其他物理性能未发生明显变化。为进一步考核硅胶过量吸湿后的物理性能变化情况, 对硅胶进行了浸泡试验, 将从试验完成后拆解出的变色硅胶放入烧杯, 用纯净水浸泡 48 h 后, 硅胶颜色进一步变浅, 其他物理性能未发生明显变化, 证明硅胶在过量吸湿后, 不会坍塌, 不会流淌甚至堵塞通道。从而说明在满足除湿性能的前提下, 硅胶的综合性能相对较好, 适用于除湿装置的装填。

#### 2.1.2 变色硅胶和细孔硅胶的对比分析

由于硅胶的物理性能较好, 除湿装置使用过程中能够避免出现坍塌短路或者流淌的现象, 因此, 本文进一步对比了变色硅胶和细孔硅胶的连续除湿性能, 从而得到满足除湿装置出口湿度要求(绝对湿度不高于  $9.9 \text{ g/kg}$ ) 前提下连续除湿时间更长的硅胶干燥剂类型。

图 3 所示为装填变色硅胶和细孔硅胶的除湿装置出口绝对湿度随时间的变化规律。由图 3 可知, 随着时间的增加, 无论是变色硅胶还是细孔硅胶, 装填后的除湿装置出口绝对湿度先减小后增大。初始状态的硅胶干燥剂借助其表面的多孔结构, 除湿效果最佳, 在入口气体恒定湿度前提下除湿装置出口的绝对湿度会有所减小。随着时间的增加以及硅胶除湿过程的进行, 硅胶吸湿量逐渐趋于稳定, 从而达到吸湿平衡过程 [9], 此时除湿装置出口绝对湿度变化曲线会逐渐趋于平稳, 但是随着入口气体的继续通入, 硅胶除湿能力降低, 进而导致除湿装置出口绝对湿度逐渐增大直至试验结束。

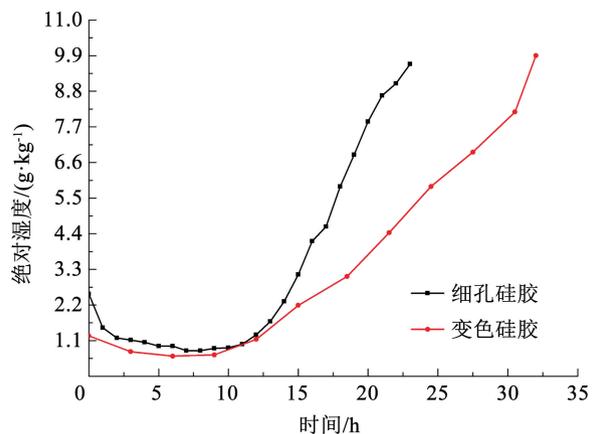


图3 除湿装置出口绝对湿度变化曲线

Fig.3 Variation curve of outlet absolute humidity for dehumidifier

此外, 在相同入口气体流量以及入口湿度前提下, 除湿装置连续除湿性能实验结束时(出口绝对湿度达到  $9.9 \text{ g/kg}$ ), 变色硅胶的连续除湿时间为 32 h, 而细孔硅胶的连续除湿时间为 23 h, 这说明连续除湿过程中变色硅胶的除湿持续时间更长。产生上述现象的主要原因是: 在一定湿度条件下, 细孔硅

胶的吸湿能力略优于变色硅胶,因而在除湿过程中相同时间内细孔硅胶吸湿量较大,吸湿速率较快,更容易达到吸湿平衡状态,因此,相比于变色硅胶,装填细孔硅胶的除湿装置出口的绝对湿度到达规定数值的时间快,连续除湿时间短。

### 2.2 正常模式和间断模式对比研究

硅胶在使用过程中因吸附了介质中的水气致使其吸附能力下降,可通过再生后重复使用。硅胶的脱水再生,比较传统的采用烘箱烘烤式热力烘干方法、微波加热再生方法<sup>[10-11]</sup>、超声波再生方法<sup>[12-13]</sup>、电渗再生<sup>[14-15]</sup>等,但是都存在功耗要求等问题。由于航天员每次出舱结束后服装内的氧瓶均会剩余部分氧气,考虑到除湿装置吸湿后装置内硅胶的含湿量较高,而氧瓶中的剩余氧气(露点低于 -50 ℃)较为干燥,因此可以借助干燥氧气和吸湿后硅胶之间存在的含湿量梯度差,在干燥氧气吹扫硅胶过程中将硅胶中的部分水分脱出挥发到氧气中实现硅胶的部分干燥再生。为适应舱外航天服的使用模式、出舱时间要求,同时延长除湿装置在舱外航天服中的使用次数,本文提出了除湿装置单次出舱完成除湿性能后使用舱外航天服氧瓶剩余氧气进行硅胶吹扫再生的方法,较上述传统的硅胶再生方法,该方法具有再生方式简单、无功耗要求等特点。图 4 所示为正常模式(除湿过程为连续 10 h 除湿)下除湿装置两个通道的出口绝对湿度随时间的变化规律。试验结果表明,通过干燥纯氧吹扫方式能够脱除除湿装置中的部分湿气实现硅胶的部分再生,并且通过上述再生方式能够满足除湿装置除湿 3 次,从而满足舱外航天服多次出舱使用的需求。

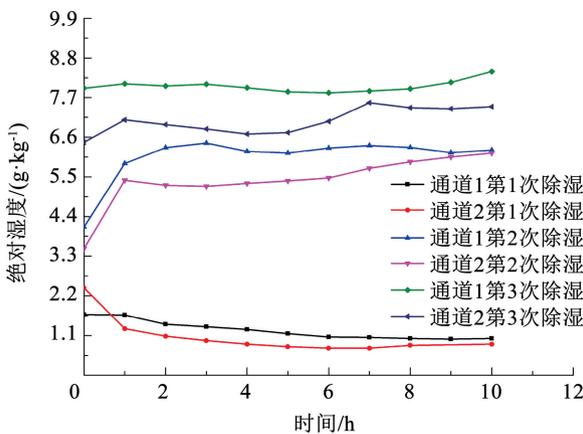
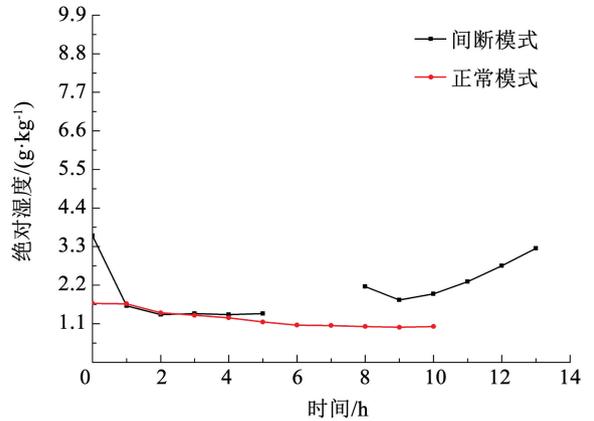


图 4 正常模式下除湿性能曲线(连续除湿 10 h)

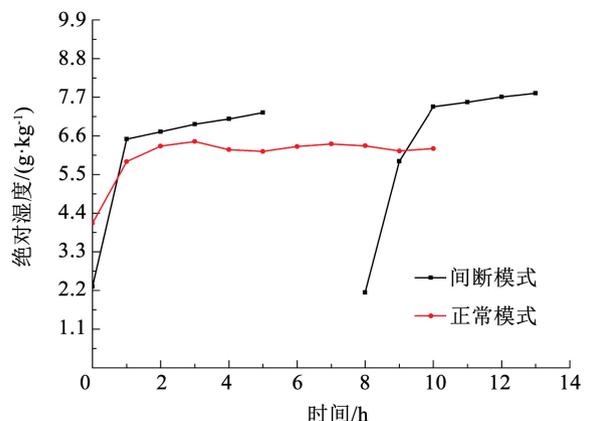
Fig. 4 Dehumidification performance curve in normal mode (continuous dehumidification for 10 h)

此外,本文针对间断除湿的时间间隔对除湿装置使用次数及出口湿度影响进行了试验研究。由于除湿装置的两个通道 3 次除湿过程中出口绝对湿度

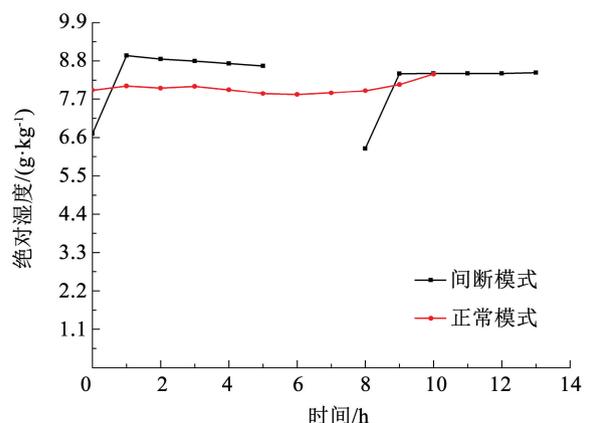
随时间的变化规律基本一致,因此,本文选取了除湿装置其中一个通道(通道 1)的出口绝对湿度变化规律开展了正常模式除湿性能与间断模式(除湿过程为连续 5 h 除湿,间隔 3 h 后继续连续 5 h 除湿)除湿性能对比分析,试验对比结果如图 5 所示。



(a) 第 1 次除湿试验



(b) 第 2 次除湿试验



(c) 第 3 次除湿试验

图 5 正常模式与间断模式除湿性能对比曲线

Fig. 5 Dehumidification performance contrast curve of normal mode and discontinuous mode

由图 5 可知,无论是正常模式还是间断模式,第 1 次除湿时硅胶的除湿效果均较好,除湿装置第 1 次除湿时的出口绝对湿度相对较低。随着除湿时

间的增加,硅胶中的含水量有所增加,吸水能力相对减弱,第2次和第3次除湿试验时的出口绝对湿度会明显增大。相对正常模式除湿试验,间断模式第1次除湿时前5 h的出口绝对湿度变化规律与正常模式基本一致,出口绝对湿度均会随着时间的增加而有所减小,并且两条曲线基本重合,但是除湿过程经过3 h的暂停后,间断模式的出口绝对湿度随着除湿时间的增加而有所增大,并且均高于正常模式下的出口绝对湿度,这说明除湿装置的除湿过程经过间断后会对除湿装置的除湿性能产生明显的影响。产生上述现象的主要原因是:无论是正常模式还是间断模式下,前5 h的除湿过程中除湿装置通道中靠近入口端的硅胶起主要的除湿作用,因而靠近入口端的硅胶含水量比较高。经过3 h的实验暂停后,由于通道内入口端至出口端硅胶含水量分布的不均衡,整个通道内会出现部分水气从通道入口端硅胶向出口端硅胶迁移,进行通道内硅胶含水量的重新分配现象。间隔3 h继续进行5 h的除湿试验时,除湿装置入口通入气体的含湿量与通道内各区域硅胶的含湿量梯度差相对较小(正常模式下通入气体的含湿量与通道内中间及出口端硅胶含湿量梯度差较大),因此间断模式下硅胶的吸湿量会有所减少,除湿装置出口绝对湿度会有所增大。

此外,图5还表明,由于氧气吹扫再生原因,正常模式下干燥再生时通道内硅胶中的水气也会发生迁移和硅胶含水量再分配现象,第2次和第3次除湿试验时,除湿装置中的各区域硅胶基本达到吸湿平衡状态,因而除湿装置出口绝对湿度变化曲线会逐渐趋于平稳。对于间断模式而言,由于吸湿间断原因导致通道内硅胶含水量的重新分配,但是第1次干燥再生时,干燥氧气由通道入口端吹向出口端,导致入口端硅胶中的部分湿气会进一步迁移至出口端硅胶,出口端硅胶含湿量明显高于入口端硅胶,使得第2次除湿试验时出口端硅胶中的部分湿气会从硅胶中脱出,除湿装置出口绝对湿度会逐渐增大,直到第3次除湿试验时除湿装置中的硅胶吸湿过程基本达到了平衡状态,此时除湿装置出口绝对湿度逐渐趋于稳定。

### 3 结 论

1)与CaCl<sub>2</sub>相比,硅胶干燥剂物理性能较稳定,上行过程中不易磨损和出粉;并且在过量吸湿后,不会出现坍塌、流淌甚至堵塞通道的现象,硅胶更适用于除湿装置。

2)与细孔硅胶相比,在相同入口气体流量和湿度以及相同出口湿度限制条件下,连续除湿过程中

变色硅胶的除湿持续时间更长,更适用于除湿装置。

3)气瓶剩余氧气吹扫能够进行除湿装置中硅胶的部分再生,并且通过上述再生方式能够满足除湿装置除湿3次,从而满足舱外航天服多次出舱使用的需求。

4)除湿装置的除湿过程经过间断后会引引起除湿装置内硅胶含水量的再分配,弱化除湿装置的多次除湿性能,正常使用模式综合效果优于间断使用模式。

### 参考文献

- [1]张万欣,李潭秋,李冰,等.舱外航天服无人低压试验技术研究[J].载人航天,2010,16(3):56  
ZHANG Wanxin, LI Tanqiu, LI Bing, et al. The experimental method of EVA spacesuit in unmanned state and low pressure environment[J]. Manned Spaceflight, 2010, 16(3): 56. DOI: 10.16329/j.cnki.zrht.2010.03.010
- [2]沈力平,吴志强.舱外航天服环境控制与生命保障技术[J].载人航天,2004(3):6  
SHEN Liping, WU Zhiqiang. Environmental control and life support technology of the extravehicular spacesuit[J]. Manned Spaceflight, 2004, 10(3): 6
- [3]王晶,袁卫星,袁修干.舱外航天服便携式生命保障系统研究进展[J].航天医学与医学工程,2009,22(1):67  
WANG Jing, YUAN Weixing, YUAN Xiugan. Research progress of portable life support system for extravehicular activity space suit[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2009, 22(1): 67. DOI: 10.16289/j.cnki.1002-0837.2009.01.004
- [4]梁志伟,高峰,吴志强,等.“飞天”舱外航天服便携式生保系统研制[J].载人航天,2010,16(1):37  
LIANG Zhiwei, GAO Feng, WU Zhiqiang, et al. Development of portable life support system for Feitian EVA spacesuit[J]. Manned Spaceflight, 2010, 16(1): 37. DOI: 10.16329/j.cnki.zrht.2010.01.009
- [5]宋虎堂.硅胶的再生与实用技术[J].天津科技,2017,44(1):74  
SONG Hutang. Regeneration and application of silica gel[J]. Tianjin Science & Technology, 2017, 44(1): 74. DOI: 10.14099/j.cnki.tjkj.2017.01.022
- [6]卜宪标,王令宝,马伟斌.硅胶孔径对吸附剂吸湿性能及制冷特性的影响[J].哈尔滨工程大学学报,2012,33(8):989  
BU Xianbiao, WANG Lingbao, MA Weibin. Effect of pore size of silica gel on the water uptake and refrigeration of composite adsorbent[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(8): 989. DOI:10.3969/j.issn.1006-7043.201108031
- [7]王丽伟,王如竹,吴静怡,等.氯化钙-氨的吸附特性研究及在制冷中的应用[J].中国科学(技术科学),2004,34(3):268  
WANG Liwei, WANG Ruzhu, WU Jingyi, et al. Study on adsorption characteristics of calcium chloride-ammonia and its application in refrigeration[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2004, 34(3): 268. DOI:10.3969/j.issn.1674-7259.2004.03.004
- [8]王凯,吴静怡,王如竹.氯化钙/膨胀石墨混合吸附剂的吸附特性[J].上海交通大学学报,2009,43(2):271  
WANG Kai, WU Jingyi, WANG Ruzhu. Adsorption performance of CaCl<sub>2</sub>/expanded graphite compound adsorbent[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2009, 43(2): 271. DOI: 10.

16183/j.cnki.jsjt.2009.02.025

[9]杨保义,张杰. 变色硅胶干燥剂吸湿性能研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(2): 32

YANG Baoyi, ZHANG Jie. Study on moisture absorption characteristic of allochroic silica gel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(2): 32. DOI:10.3969/j.issn.1672-9242.2010.02.009

[10]熊德琴,李春晖,林培喜. 吸水硅胶的快速再生试验[J]. 茂名学院学报, 2005, 15(4): 20

XIONG Deqin, LI Chunhui, LIN Peixi. An experiment of the fast rebirth of bibulous silica gel [J]. Journal of Guangdong College Petrochemical Technology, 2005, 15(4): 20. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2562.2005.04.006

[11]丁泽智. 固体除湿床除湿及微波再生性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019

DING Zezhi. Study on dehumidification and microwave regeneration performance of solid dehumidification bed [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020. DOI: 10.27029/d.cnki.ggdgu.2019.000732

[12]程东祥,应海宁,陈静,等. 除湿硅胶超声波再生节能性能实验研究[J]. 环境工程, 2014, 32(11): 155

CHENG Dongxiang, YING Haining, CHEN Jing, et al.

Experimental study on the energy-saving of silica gel regeneration by ultrasound[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(11): 155. DOI:10.13205/j.hjgc.201411035

[13]陈静,程东祥,杨坤,等. 空气状态对硅胶超声波强化再生效果的影响[J]. 环境工程, 2015, 33(12): 80

CHEN Jing, CHENG Dongxiang, YANG Kun, et al. Effect of applying ultrasonic on the regeneration of silica gel under different air conditions [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(12): 80. DOI: 10.13205/j.hjgc.201512017

[14]孙萱. 固体干燥剂的电渗流特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021

SUN Xuan. Study on the electro-osmotic characteristics of solid desiccant [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2021. DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2021.002492

[15]段东新,刘晓宇,何静,等. 基于大孔硅胶电渗再生的正交回归实验[J]. 山东化工, 2018, 47(8): 43

DUAN Dongxin, LIU Xiaoyu, HE Jing, et al. Orthogonal regression experiment based on electro-osmosis regeneration of macroporous silica gel [J]. Shandong Chemical Industry, 2018, 47(8): 43. DOI: 10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2018.08.015

(编辑 张 红)

## 会议通知 | 第七届机械、电子和工业工程国际学术会议 (MEIE2024)

第七届机械、电子和工业工程国际学术会议 (MEIE2024) 将于 2024 年 5 月 21—23 日在中国湖北宜昌召开。本届大会由东华大学机械工程学院主办, 中国质量发展研究院、宁波大学机械工程与力学学院、上海市现代设计法研究会、上海市图学学会协办, 《哈尔滨工业大学学报》是合作媒体之一。

MEIE 旨在为世界各地的学者、专家和研究人员提供一个高效的交流平台, 通过研讨会、特邀报告、口头和海报展示等形式, 共享在机械工程、电子工程和工业工程等相关领域的研究经验和最新成果, 探讨未来研究发展方向以及促进世界范围内的项目合作。

作为年度学术会议, 过去六年中, MEIE 系列已分别于三亚 (2023)、昆明 (2021)、杭州 (2018、2019) 以及线上平台 (2022、2020) 成功召开, 吸引了来自瑞典、加拿大、美国、澳大利亚、新加坡、韩国和马来西亚等超过 14 个国家和地区的学者。往届出版的会议论文集均已完成 Ei Compendex 和 Scopus 检索。

MEIE 2024 聚焦智能制造, 重点讨论工业互联网、智能机器、智能制造系统、半导体器件、光学超精密制造和光电传感器等话题, 为学术界和工业界搭建桥梁。会议接收机械、电子、工业工程相关领域原创性英文文章。MEIE2024 官网: <http://www.icmeie.com/>