

# 出舱活动气闸舱环境控制与出舱保障系统研制

黄志德 高峰 李健 宋晓艳 吴滨

(中国航天员科研训练中心)

**摘 要** 在出舱活动任务中,气闸舱是航天员出舱必经的过渡通道,是完成出舱活动必不可少的一个重要系统。本文介绍了我国出舱活动气闸舱环境控制与出舱保障系统的研制过程及飞行验证结果。

**关键词** 出舱活动 气闸舱 泄复压 出舱保障 兼容性设计

**分类号** V444.3 **文献标识码** A **文章编号** 1674-5825 (2009) 04-0032-08

## 1 引言

神七出舱活动飞船的主要任务是突破出舱活动技术,要执行出舱活动任务必须掌握气闸舱技术。根据神七飞船研制方案,神七出舱活动气闸舱是利用飞船轨道舱改造扩展而成,使轨道舱同时具有工作舱、生活舱和气闸舱的功能。为满足出舱活动需要,气闸舱必须具备泄复压控制功能,同时为使舱内设备适应气闸舱环境,必须对气闸舱和生活舱进行兼容性设计,以便出舱活动后气闸舱仍具备生活工作舱功能。

另外,在出舱准备和出舱前后过闸段,为保障舱外服正常工作,需气闸舱提供气路、液路、电路和信息传输等舱载支持能力,以节约舱外航天服自身资源。

本文着重介绍气闸舱系统的泄复压控制、出舱保障、气闸舱与生活舱兼容设计等关键技术。

## 2 系统技术指标

出舱活动气闸舱对系统主要技术指标要求如下:

① 在规定时间内将气闸舱从常压泄压至舱门开启压力点,泄压速率 $\geq 1.33\text{kPa/s}$ ;

② 在规定时间内将气闸舱从真空状态复压至 $80\text{kPa}$ ,复压速率 $\geq 0.13\text{kPa/s}$ ;

③ 贮存足够气闸舱进行两次复压的复压气源;

④ 在电源分系统配合下,为舱外服系统提供电源支持,保证与电脐带接口电压不小于 $24\text{V}$ ;

⑤ 在服装故障情况下,提供自动切断电源的功能;

⑥ 舱外服工作在有线模式下时提供航天员生理参数、舱外服工程参数的数据采集转换、数据通信以及有线状态话音转发、舱载服装报警、舱载氧瓶的压力参数采集等功能;

⑦ 具有为舱外服提供换热和在轨补水功能;

⑧ 出舱活动结束后,气闸舱仍然具有生活工作舱功能,可继续参加后续飞行任务。

## 3 系统技术方案

根据出舱活动任务要求,要在神舟飞船轨道舱维持现有功能情况下,增加出舱活动用气闸功能,使轨道舱满足既为生活工作用又为气闸舱用的一舱两用的使用模式,所以要考虑轨道舱现有系统及资源与增加的气闸舱功能系统之间有关物质、能量和信息流的匹配整合,对与出舱直接相关的关键技术系统进行详细设计。

### 3.1 气闸舱泄复压技术

气闸舱是航天员进行出舱活动的必经之路,而气闸舱的泄复压技术又是突破气闸舱技术的关键技

来稿日期:2009-06-03

作者简介:黄志德(1973.12-),男,硕士,副研究员,主要从事载人航天环境控制与生命保障系统总体设计工作。

术之一。我国在载人飞船密封舱环境控制系统研制和应用过程中积累了一定的泄复压设计技术和经验,但气闸舱的泄复压技术是进行整舱的泄复压控制,而且泄复压时间要控制在出舱程序规定的指标范围之内,需要采取大流量泄复压方案,同时泄复压速率还需满足医学指标要求,控制要求较飞船密封舱环境控制的要求要高得多。

泄复压技术要解决以下技术难题:

- ① 泄压时间与泄压速率的匹配问题;
- ② 复压时间与复压速率的匹配问题;
- ③ 大流量泄压对飞船姿态的影响问题;
- ④ 大流量复压时的降噪问题;
- ⑤ 航天员着舱外服情况下进行泄复压控制的人机工效设计问题;
- ⑥ 泄复压期间的舱压信息采集问题;
- ⑦ 大流量泄复压时的安全性可靠性问题。

气闸舱泄压过程的舱压控制范围  $P_c=0\sim 98\text{kPa}$ ,泄压时通向外界真空环境,外界真空环境压力为  $P_v=1.33\times 10^{-6}\text{kPa}$ ,由于  $P_v/P_c<0.528$ ,所以气闸舱泄压过程中的气体流动处于超临界状态,气体流动状态满足超临界流气体流动方程,舱压随时间的变化函数满足

$$P=P_0 \exp \left[ -\frac{\mu \cdot \pi D^2}{4V} \sqrt{\frac{KRT}{\eta}} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} t \right] \quad (1)$$

按照最大允许泄压速率  $\Delta P \leq 1.33\text{kPa/s}$  和气闸舱在规定时间内泄压到舱门开启压力点的边界条件进行计算,并经多次迭代和反复比较分析,确定有效泄

压孔径取  $\Phi 28$ ,对应的泄压时间和泄压速率匹配,满足系统指标要求。

根据理论计算结果泄压过程舱压随时间理论变化曲线见图 1。

气闸舱复压过程的舱压控制范围  $P_c=0\sim 80\text{kPa}$ ,复压系统的复压供气压力  $P_s>400\text{kPa}$ ,由于  $P_c/P_s<0.528$ ,因此气闸舱复压过程的气体流动为超临界状态,复压过程符合超临界状态下的等温定容充气过程,复压时间与舱压的变化函数满足

$$t = \frac{V}{\mu A C R \sqrt{T}} \left( \frac{P_2 - P_1}{P_s} \right) \quad (2)$$

按照最大允许复压速率  $\Delta P \leq 0.133\text{kPa/s}$  和在规定时间内将舱压复压到  $80\text{kPa}$  的边界条件进行计算,综合考虑复压系统流阻和复压流量的因素,确定有效复压孔径,对应的复压时间和复压速率匹配,满足系统指标要求。

根据理论计算结果复压过程舱压随时间理论变化曲线见图 2。

由于受泄压时间的限制,泄压流量较飞船返回前轨道舱泄压时的泄压流量大很多,泄压初期泄压流量高达  $3000\text{L/min}$ ,如此大的泄压流量如果直接排向舱外,将对飞船运行姿态产生很大影响。在泄压系统的研制中,在排气结构上利用反作用原理,使泄压气流产生的干扰力矩相互抵消,从而避免了泄压气流对飞船姿态的影响。

根据复压程序对复压系统的要求,复压流量高达  $500\text{L/min}$ ,较密闭舱舱压控制系统的供气流量大

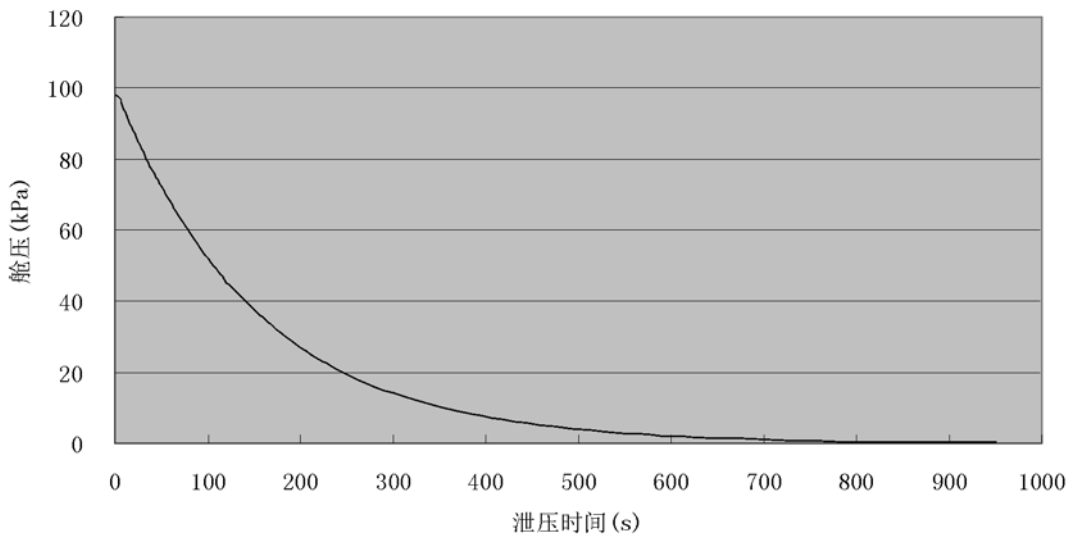


图 1 气闸舱理论泄压时间曲线图

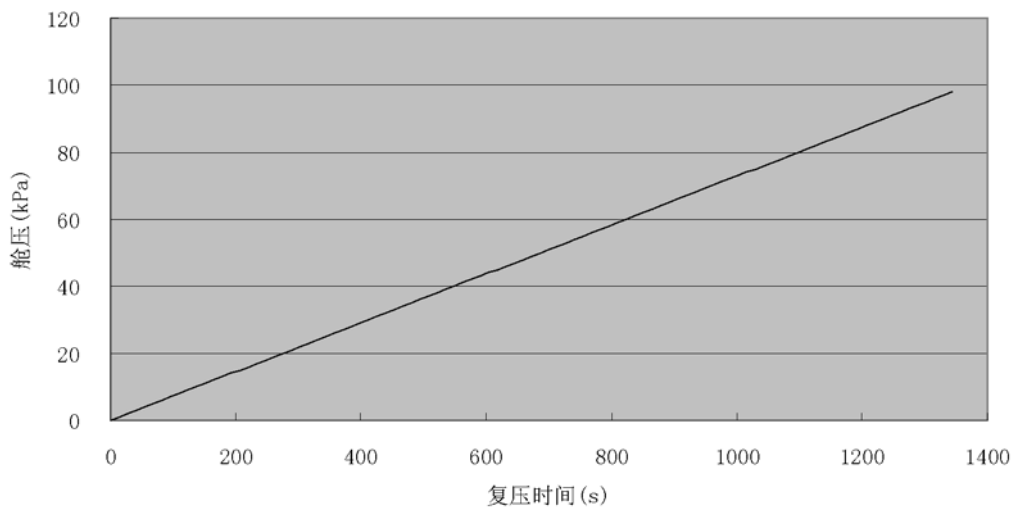


图 2 气闸舱理论复压时间曲线图

十多倍,如此大的复压流量直接向舱内复压,气流噪声将远远超过医学指标要求。为降低复压噪声对航天员的影响,在复压系统的设计中,避免采用开放式复压供气口,而是在复压供气口设置降噪装置,使供气气流沿降噪装置上的网状供气口排出,从而降低复压噪声。

出舱前后的泄复压均要由航天员进行操作,航天员操作时身着舱外航天服,为保证航天员操作的工效性,对泄复压阀的操作部件进行了工效设计,经多次工效评价和反复修改,确定以电控按钮为主份操作模式,机械手柄为备份操作模式,两种操作模式均考虑了可操作性和防误操作性,适合航天员着舱外服情况下进行操作。

安全可靠问题是出舱活动需要着重考虑的问题,为提高系统安全性,在系统设计、产品设计、试验方法研究、产品质量控制等方面摸索了一整套可行的办法。通过系统的可靠性分析和故障树分析,找出了影响系统可靠性指标的关键产品。通过合理的安全性可靠性设计以及试验验证,确保系统的可靠安全。

### 3.2 出舱保障技术

舱外服是出舱活动保障航天员安全的核心设备,其性能的好坏直接关系到出舱活动的成败。由于舱外服自身携带资源有限,为尽量节约舱外服自身资源,延长出舱活动时间,在正式出舱前对舱外服进行组装、检查、调试以及出舱前后过闸段舱外服均需要工作在舱载有线支持模式下,由于出舱活动采用两种不同模式舱外服,因此气闸舱需要解决不同模

式舱外服有线工作模式下的舱载支持保障技术。同时出舱阶段需要为航天员提供出舱操作控制的舱载支持技术。出舱保障技术在国内没有先例可循,需要自行进行设计研制。

出舱保障技术要解决以下技术难题:

- ① 出舱阶段舱外服电源升压保障问题;
- ② 出舱阶段控制与显示问题;
- ③ 出舱阶段数据处理与有线话音通信技术。

#### 3.2.1 电源升压保障技术

神七飞船提供的一次母线电压和舱外服工作电压均为  $27 \pm 3V$ ,如果舱外服工作在有线模式状态下时飞船一次母线电压恰好为  $24V$ ,则经过供电回路后必然产生一定的压降,最终供给舱外服的电压将低于  $24V$ ,不满足舱外服对舱载供电的要求。为解决舱外服的安全供电问题,需解决舱外服电源升压保障技术。确定舱外服电源升压方案时有两种选择,一种是直接将飞船一次母线电压经过 DC/DC 变换器得到  $27V$  输出电压,另一种是在一次电源母线的基础上设计一个输出约  $3V$  的 DC/DC 变换器,将该变换器的输出叠加在一次母线电压上实现升压功能。通过反复比较和分析计算,直接升压方案要求 DC/DC 变换器具有较大功率和散热能力,技术复杂,实现难度大,而叠加升压方案可有效降低装置内部的功率损耗,并且有利于元器件选择和保证降额使用,方案简单,易于实现,最终采用叠加升压方案,为提高产品的可靠性,电路设计上采用了热备份配置形式,解决了舱外服的供电问题。

### 3.2.2 控制与显示技术

为确保出舱活动顺利完成,出舱阶段需要为航天员和舱外服提供相关设备的控制与信息显示功能。根据出舱活动需要,将电路分为供电控制、开关信号处理、数据采集处理与数码显示三部分,三部分相互独立。为提高供电安全性,通过将设备二次供电电源与飞船一次电源隔离,与仪表手控指令和应急报警信号消音指令、泄/复压阀供电隔离实现供电电压稳定可靠。数据采集处理与数码显示部分采用 80C31CPU 系统,分别实现供配电、开关控制、计时和氧瓶压力指示功能。

### 3.2.3 数据处理与有线话音通信技术

舱外服工作在舱载有线支持模式下时,为实时了解航天员和舱外服的工作参数,需解决舱外服的供电技术、数据处理技术与话音处理技术。

#### · 供电控制

通过接收飞船一次电源,为航天服提供一次电源的同时运用电源模块技术实现 DC-DC 电源变换,实现为航天服提供二次电源,应用比较器技术设定过流保护阈值,实现电源过流保护功能。

#### · 数据处理

通过多通道切换、差分放大、A/D 变换技术完成对航天服 A、B 电脐带上的模拟量信息的数字变换;通过设计 DSP 专用电路完成各类工程数据的处理、航天员心电信号计算以及航天员体温、呼吸等生理参数的处理。

#### · 话音处理技术

基于 OP27 设计加法电路,将航天服 A 的有线话音与航天服 B 的有线话音合成,实现航天员 A、航天员 B 和地面(第三方)话音的全双工通讯。

### 3.2.4 服装在轨补水技术

舱外服液路系统是实现服装换热的唯一途径,如果系统压力达不到要求,则需对液路系统进行在轨补加注。为了实现舱载水回路系统与服装液路系统之间的液体交换,利用压力传递原理解决了微重力条件下的液体输送问题。通过设置自密封的快接头实现在轨快速连通两回路系统的功能。补水时为了防止气泡进入服装液路系统,通过提前加注补水管路的措施解决了该问题。为了确保补水水质与舱外服的相容性问题,通过多次试验研究专门制定了舱载水质制备方法,解决了补水水质的相容

性问题。

### 3.2.5 服装换热技术

舱外服处于自主工作模式时,靠水升华器实现服装换热。在出舱准备阶段和出舱前后的过闸段舱内不具备水升华器的工作条件时,如何实现服装换热是出舱保障系统需要解决的技术难题。要实现服装的舱载换热,需解决冷源及界面热交换设备,通过设计三流道的液液热交换器串接在内回路系统中,通过换热翅片为服装液体回路提供足够的换热面积与内回路冷却液实现热量交换,从而解决服装的舱载换热问题。

### 3.3 气闸舱与生活舱兼容性技术

气闸舱存在“真空—常压”的压力交变环境,要使气闸舱出舱活动后继续作为生活工作舱,需对舱内生活保障设备进行兼容性设计,以适应气闸舱环境。

气闸舱与生活舱兼容性设计要解决以下技术难题:

- ① 泄压前的冷凝水收集问题;
- ② 出舱阶段的氧浓度控制问题;
- ③ 出舱阶段风机类产品的工作程序设计问题;
- ④ 生活舱设备与气闸舱环境的适应性问题。

通过合理设计出舱程序,出舱前对冷凝干燥组件进行冷凝水抽吸,将冷凝水收集到密封容器进行密封处理,避免泄压时冷凝水溢出影响泄压。由于出舱前航天员需进行服装大流量冲洗和吸氧排氮时向舱内排放大量氧气,从而会使舱内氧浓度升高,过高的舱内氧浓度不利于防火安全。通过优化气闸舱泄压前的出舱程序,合理利用舱压控制系统进行泄压补氮以降低舱内氧浓度的初始水平,以便航天员吸氧排氮后舱内氧浓度水平控制在安全范围之内。轨道舱内的风机类产品是轨道舱环境控制与生命保障的关键设备,正常运行段始终处于工作状态,由于轨道舱兼作气闸舱,出舱阶段需对该类设备进行工作程序调整,避免该类设备在真空状态下运行。为此对出舱程序进行优化设计,根据出舱程序控制风机类设备的运行状态,以达到保障风机类设备出舱后正常工作的目的。轨道舱内同时还安装了很多生活保障类产品,部分产品的工作状态仅适应于常压状态,从工作状态直接进入真空状态会影响产品工作性能甚至



破坏产品，因此需对此部分产品进行适应性设计。通过对氧分压和氧浓度传感器采取物理隔离的保护措施、对二氧化碳分压传感器采取将非密封光源结构改为密封光源结构、将废物收集设备改为密封结构、对尿液贮箱、饮水箱以及冷凝水贮箱等液体工质类容器的工作状态进行合理设置，并在产品研制阶段通过模拟出舱环境进行了单机验证和系统试验验证，确保了生活保障类产品适应出舱环境。

#### 4 试验验证结果

为验证所设计的泄复压系统是否满足出舱活动需要，利用热真空模拟实验舱通过人舱服试验模拟出舱活动程序对泄复压系统进行了地面试验验证，验证试验中泄复压系统均能在规定时间内完成气闸舱的泄复压工作，最大泄压速率为 0.55kPa/s，最大复压速率为 0.089kPa/s，泄复压时间和泄复压速率均满足指标要求。模拟实验舱泄复压验证试验的泄压曲线和复压曲线分别见图 3、图 4。

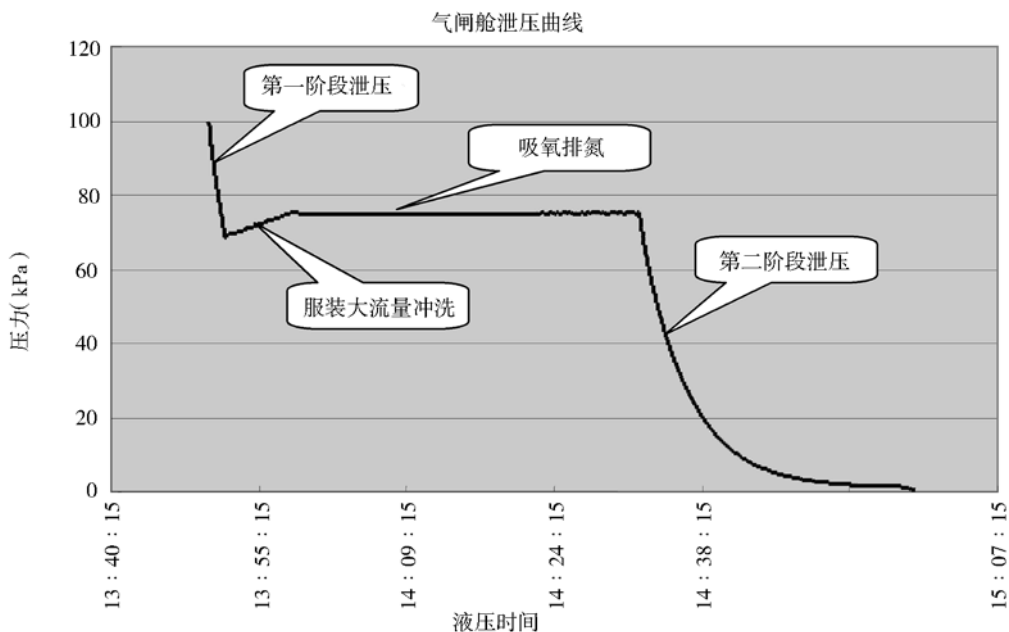


图 3 模拟实验舱泄压试验泄压时间曲线图

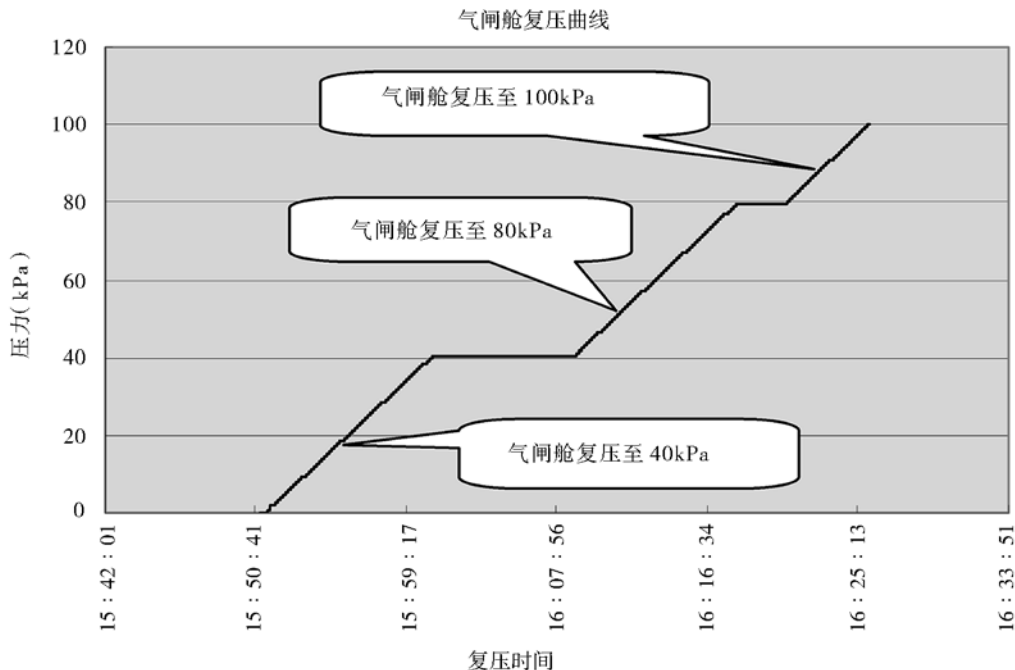


图 4 模拟实验舱复压试验复压时间曲线图

通过地面试验验证获取的试验数据证明,泄复压系统各项指标均满足设计指标要求,可以用于飞船参加出舱活动。

出舱保障系统通过了与舱外服接口匹配试验、船服联合测试试验验证,在各次验证试验中出舱保障系统受到了全面考核验证,舱外服加电后,被试人员报告舱载供电电压为 28V,出舱保障设备的供电功能满足要求。

出舱保障设备对舱外服有线数据采集处理正确、无线遥测解调正确,有线、无线通道数据传输正确、送仪表显示数据传输正确,舱外服报警消音功能正常。供电、通信、计时等指令均正确执行。

在有线工作模式下,被试人员和地面人员以及被试人员之间均能够正常通话,按照协同程序进行了两次无线、有线之间工作模式的切换,切换结果正常。

服装换热器作为舱外服的舱载冷源,在舱载工作模式下被试人员主观感觉温度适宜,换热效果明显。

试验过程中被试人员通过服装控制台对服装供氧,出舱保障控制台显示氧瓶压力下降,出舱保障控制台的舱载氧瓶压力显示功能正常,显示结果正确。

试验过程中被试人员完全按照出舱程序进行操作,出舱保障产品操作功能正常,产品执行结果满足出舱活动要求,程序执行正确,说明出舱保障系统功

能满足出舱活动任务需要。

为验证气闸舱中的传感器类产品、风机类产品、废物收集类产品、液体工质容器贮箱类产品等生活工作舱的支持设备能否在经历出舱环境后仍能正常工作,对该类产品进行了快速泄复压试验验证,利用真空容器进行泄复压环境模拟,泄复压环境模拟曲线见图 5。

为确保气闸舱内的生活舱支持设备在安全可靠,共进行了 6 个循环的泄复压环境试验验证,通过快速泄复压试验验证,证明气闸舱与生活工作舱的兼容性设计满足出舱活动要求,并通过了一中一俄人舱服试验、正样船泄复压试验试验验证,在各次验证试验中舱内生活支持设备均能耐受出舱环境且性能稳定,满足两舱兼容性要求。

## 5 飞行试验结果

2008 年 9 月 27 日,随着身着“飞天”舱外航天服的翟志刚完全按预定程序圆满完成出舱活动、舱外行走、安全返回和气闸舱环境建立,说明出舱活动气闸舱环境控制与出舱保障系统在中国首次出舱活动任务中也顺利完成了其历史使命。

在出舱活动过程中,泄复压系统完全按指标要求在规定时间内完成了气闸舱的泄压和复压要求,根据飞行试验数据表明,出舱活动期间气闸舱的泄复压时间完全满足指标要求,具体泄复压时间曲线见图 6。

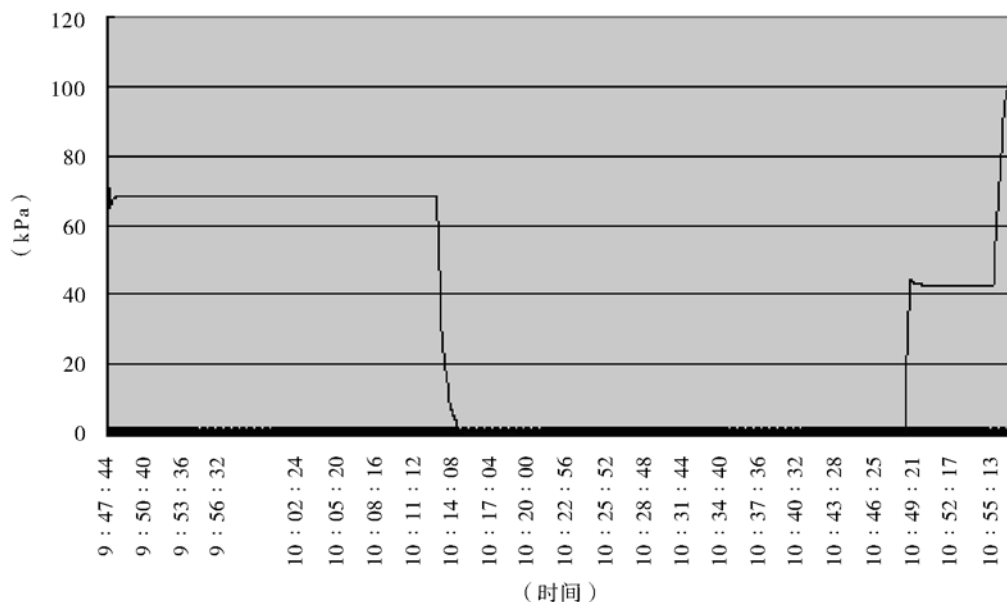


图 5 快速泄复压舱内压力变化曲线图

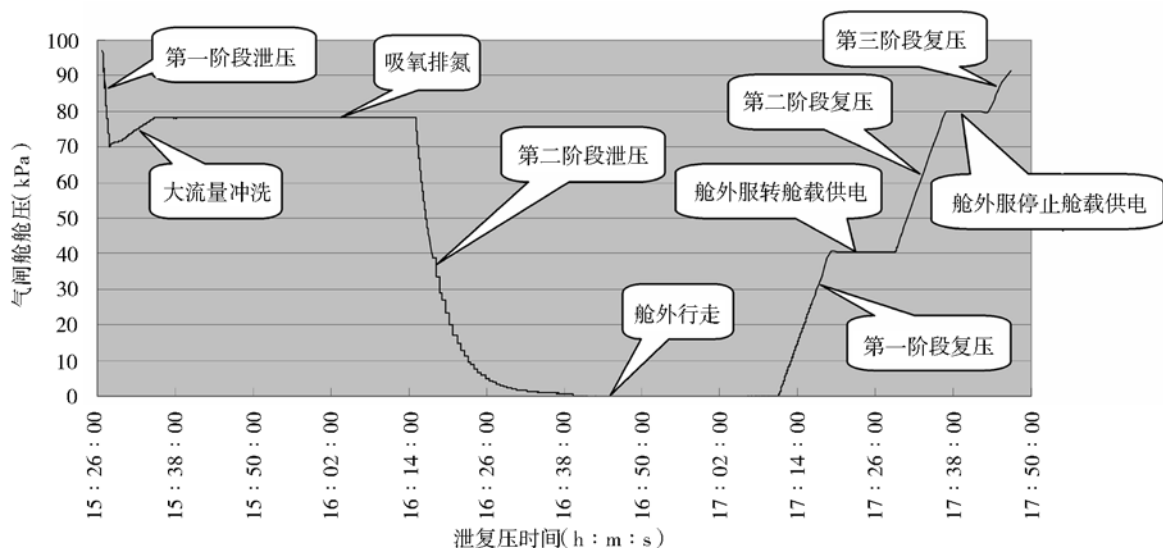


图 6 出舱阶段气闸舱泄复压曲线图

泄复压时间和泄复压曲线与设计指标和地面验证结果一致,说明设计的泄复压系统完全符合出舱活动需要。

在神舟七号出舱活动飞船出舱活动任务中,出舱保障系统也顺利完成了对出舱活动的保障任务。

在舱外服在轨检查、训练阶段以及出舱前后的过闸阶段,当舱外服工作在舱载支持有线模式下时,服装换热系统适时为舱外航天服提供了舱载服装换热功能,航天员根据服装温度情况自行调节液冷服循环流量,航天员感觉服装内温度适中,服装换热系统工作正常,换热效率满足要求。另外出舱保障系统为舱外航天服提供了稳定的舱载供电支持,供电电压符合舱外服的电源要求。同时在出舱阶段,航天员翟志刚、刘伯明和景海鹏之间以及他们与地面之间始终保持着正常通话,且话音传输效果良好,实现了航天员和地面的三方全双工话音通讯功能,保障了舱外航天服、舱载设备信息的实时采集和传输,为地面实时了解舱外服和舱载设备的工作情况提供了信息保障。在出舱阶段,出舱保障系统顺利实现了对泄复压阀的开关控制功能,为航天员提供了时间显示和舱载氧瓶压力显示,根据出舱活动程序顺利完成舱外服的有线模式和无线模拟工作状态的转换,为出舱活动任务的顺利完成提供了重要保证,突破了我国出舱活动任务的舱载保障技术。

在神舟七号飞船出舱活动任务中,航天员进行出舱活动前将气闸舱泄压至真空状态,出舱活动结束后将气闸舱复压至常压。因此气闸舱内的生活支

持设备均经历了泄复压环境和低真空环境,出舱活动结束后舱内温湿度环境正常、通风正常、冷凝水收集功能正常、食品和饮水保障正常、废物收集功能正常,航天员可继续在气闸舱开展正常生活和有效工作,出舱活动后气闸舱仍然具备生活工作舱功能,证明通过对气闸舱设备进行适应性改进设计及采取有效的保护措施,气闸舱设备均能适应出舱环境,实现了气闸舱与生活舱的功能兼容。

## 6 结论

利用轨道舱改造成满足于两种不同型号出舱舱外服用出舱活动气闸舱并保留原有功能,成功研制出舱活动气闸舱核心系统——泄复压系统、出舱保障系统以及气闸舱生活舱兼容性设计技术,并成功应用在神七出舱活动中。神七出舱活动飞行试验结果表明,本系统泄复压性能及出舱程序满足出舱活动需要,舱外服工作在舱载支持有线模式下时性能稳定,运行正常,出舱活动后气闸舱工作正常,可作为生活工作舱继续参加后续飞行试验任务。

## 参 考 文 献

- [1] 高峰,傅岚.载人飞船气密舱压力应急应对措施的地面试验验证.载人航天,2002,(6):25-30.
- [2] 高峰,傅岚,汤兰祥,黄志德.飞船返回舱压力应急返回再入过程舱内大气参数分析.载人航天,2004,(4):364-368.
- [3] 朱仁璋,王鸿芳,王晓光.美国 EMU 与 SAFER 技术状态.载人航天,2008,(4):27-38.

## Development of Environment Control and Support System for Airlock in Extravehicular Activity

Huang Zhide GAO Feng LI Jian SONG Xiaoyan WU Bin  
(China Astronaut Research and Training Center)

**Abstract:** Airlock is the only path that astronauts go out of the module in EVA, thus it is critical for completing EVA. This paper introduces the processes of development and the flight experimental results of environment control and support system for the airlock used in the extravehicular activity conducted by China.

**Key words:** EVA,airlock,pressure relief and recovery,EVA support,compatibility design

---

(上接第 6 页)

## The Unfinished Journey of Martian Life Exploration

WU Hanji JIANG Yuanda ZHANG Zhiyuan WANG Lufeng  
(Center for Space Science & Applied Research, Academia Sinica)

**Abstract:** By reviewing briefly the Mars exploration programs and Mars explorers launched so far in the world, this paper discusses the science goals for Mars exploration, the methodologies of life detection, life detection instruments and equipment, as well as major progress made in the aspect of searching for life which is the first objective for Mars exploration. This paper also briefly introduces the Urey Life Detector, a new type of life detector used for the future Mars life exploration.

**Key words:** Mars Exploration, Explorer, Life Detector, Astrobiology

---

(上接第 10 页)

## Optimization of Thermal Control System Design for Manned Transport Spaceship

HUANG Jiarong FAN Hanlin  
(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering)

**Abstract:** Based on the successful experience of the previous manned spaceship flights, considering the new requirements for manned transport spaceship missions of China, the optimization design and validation on thermal control system are carried out, that mainly including: improvement of air temperature control in sealed cabin, system configure optimization and weight reduce design, system independence management of subsystems on orbit and aptitude temperature control design, thermal control system optimization in berth, etc.

**Key words:** Manned transport spaceship, Thermal control, Scheme, Optimization design