

# 出舱活动的地面试验验证

朱光辰 贾世锦

(中国空间技术研究院总体设计部)

**摘要** 介绍神舟七号飞船出舱活动方案的地面试验验证情况:利用泄复压试验对气闸舱的泄复压功能进行验证,利用人舱服试验对舱服接口的协调性、出舱活动程序设计的正确性进行验证,利用水槽试验对飞船工效学设计的合理性和出舱活动程序设计的正确性进行验证。

**关键词** 出舱活动 泄复压 人舱服 水槽

**中图分类号** V445 **文献标识码** A **文章编号** 1673-1380 (2009) 03-0048-06

## 1 前言

2008 年 9 月 27 日,翟志刚等三名航天员乘坐神舟七号载人飞船成功实现了中国人的首次太空出舱活动,实现了我国载人航天第二步中“突破出舱活动”的战略目标,标志着我国在发展载人航天技术方面取得了又一个具有里程碑意义的重大胜利。为满足太空出舱活动的任务需要,神舟七号飞船的轨道舱,新增了泄复压功能、舱外航天服气液电支持等功能,设计了出舱活动通道。为保证设计的正确性,参照国外有关出舱活动的地面试验情况,并结合神舟七号的具体方案特点,在地面模拟太空中的真空、失重等特殊环境对出舱活动进行全面的试验验证。

## 2 我国出舱活动的地面验证试验的总体思路

出舱活动的地面验证试验的安排主要考虑以下指导原则:

(1)重点对影响出舱活动成败的环节进行验证,主要包括气闸舱功能、舱外服支持功能、出舱程序等。

(2)由于出舱活动过程中飞船与舱外服的接口和操作系统复杂、舱内温度和压力等环境变化剧烈,为保证试验结果的有效性,将气闸舱、航天服、人共同置于真空、失重、温度等环境中进行系统试验。

在遵循以上两个指导原则的前提下,最终确定了三个关键试验项目,即:

(1)利用泄复压试验对气闸舱的泄复压功能进行验证,获取泄复压过程中气闸舱内的压力、温度、噪声等环境参数。

(2)利用人舱服试验对气闸舱功能和舱外服的协调性、出舱活动舱载支持与舱外服的接口匹配性、出舱活动程序设计的正确性进行验证。

(3)利用水槽试验对飞船工效学设计的合理性和出舱活动程序设计的正确性进行验证。

## 3 泄复压试验

### 3.1 试验方案

试验利用气闸舱单舱在真空模拟容器 KM6 水平舱进行,用以对气闸舱的泄复压功能及指标进行验证。为保证试验结果能够反映在轨真实情况,试验的主要方案如下:

(1)试验气闸舱的状态按照正样状态进行设计,与泄复压相关的产品均为初样或正样产品,其余设备采用模拟件。气闸舱的设备布局为正样布局。同时,气闸舱后端利用工艺盲板进行密封,保证气闸舱成为一个独立的密封舱体,且容积与飞行状态一致。以上方案保证了气闸舱的净容积和流场特性与正样状态一致。

(2)除了保证舱体净容积与实际一致,舱内非金属材料的高压放气及舱外服的自然泄漏放气对低压阶段泄压的影响不可忽略,为保证气闸舱内的排气

量与真实状态一致,采取了如下措施:气闸舱内装饰按照正样状态进行实施,保证内装饰材料的总量与实际一致;舱内的水量按照 3 人飞行 2 天后的状态进行模拟,冷干组件的吸水锥体加注满水,舱内空气湿度控制到 70%RH,舱内非金属材料的吸湿按照 2 天人体产湿的 50%被吸收进行模拟;卫生用品包内部充装模拟个人用品,数量与实际状态一致;食品按照 2 天消耗后的量进行模拟;舱内模拟飞行 2 天后的航天员排泄物,包装收集方式与实际状态一致,即利用废物收集袋密封包装后放置在废物收集筒中;利用模拟漏气装置模拟 2 套舱外服在泄复压过程中的排气量,通过穿舱管路向气闸舱内充入高纯氮气。

(3)气闸舱的外部环境与在轨状态一致。利用 KM6 水平舱模拟在轨真空冷黑背景;利用红外加热笼按照轨道周期平均外热流进行气闸舱的外热流模拟。

(4)为模拟舱内无人情况下舱内航天员的手动操作,配制泄复压地面操作专用手控单元,通过穿舱电缆与气闸舱内设备相连,由试验人员在地面进行泄复压的操作控制。

(5)为对气闸舱内的回路控温进行真实模拟,通过地面制冷机组来实现对气闸舱内回路入口工质流量、温度等边界条件的模拟,工质为与内回路相同的乙二醇溶液。

### 3.2 实施结果

气闸舱泄复压试验共进行了 4 次(共包含 5 次泄压和 4 次复压),获得了气闸舱的泄复压特性:

(1)从常压泄压至 70kPa 的持续时间和从 70kPa 泄压到开舱门压力点的持续时间均满足总体要求(见图 1);

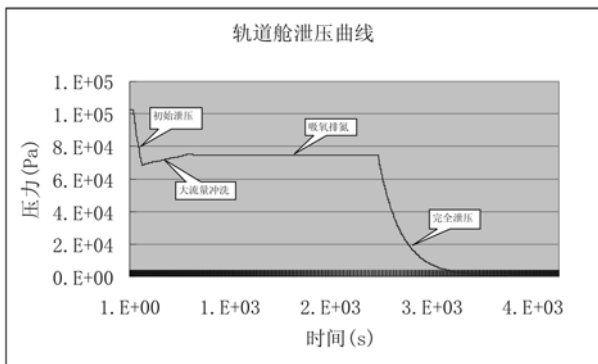


图 1 轨道舱泄压曲线

(2)从真空复压到 40kPa 和从 40kPa 复压到 80kPa 的持续时间均满足总体要求;

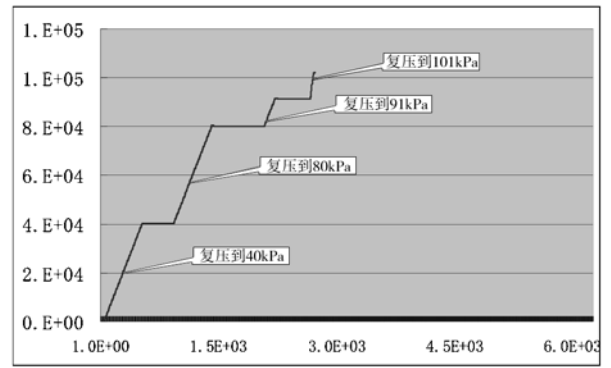


图 2 轨道舱复压曲线

(3)气闸舱复压到 80kPa 时,舱内空气温度超过 17℃,满足不低于 12℃的指标要求。气闸舱设备的温度在泄复压过程中均控制在要求范围内。说明气闸舱的热控方案设计合理。

(4)船上产品经历泄复压试验后工作正常,未出现损坏,表明气闸舱内的设备能够耐受泄复压环境而正常工作。

(5)通过试验发现气闸舱泄压到 2kPa 以下后,受水和非金属材料低压放气的影响,泄压速率开始明显降低。根据该泄压特性,最终将出舱活动开舱门的最高压力点确定在 2kPa。

## 4 人舱服试验

### 4.1 试验方案

试验的目的是验证气闸舱功能以及与舱外服的协调性、出舱活动舱载支持与舱外服的接口匹配性、出舱活动程序安排的合理性。

气闸舱水平放置在 KM6 水平舱内,试验过程中 KM6 水平舱模拟太空真空状态。两名模拟航天员在气闸舱内着舱外服按在轨出舱操作程序进行试验(图 3)。

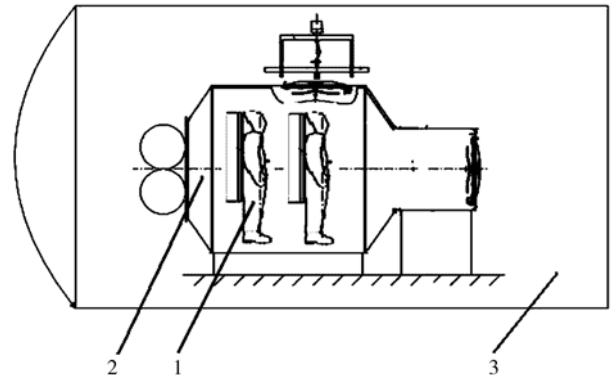


图 3 人舱服试验状态示意图

(真空压力服 1、密封舱 2、真空模拟容器 3)

为了确保参试人员的安全,研制了 KM6 水平舱人船服设备,具有紧急复压、灭火、紧急营救功能;配置采气系统和紧急供氧系统与舱外服相连,故障情况下对舱外服紧急供氧;设计了一系列救生程序,利用救生设备实现不同故障模式下人员的救生。

#### 4.1.1 气闸舱方案

气闸舱的状态按照正样状态进行设计,后端安装过渡舱用于舱体密封并兼做人员进出的通道。与出舱活动有关的所有设备均为真实产品,其它设备采用模拟件。

气闸舱内的布局完全按照正样状态设计。服装在舱内的状态为在轨展开状态。在服装吊挂工装的作用下可以进行滑动和转动。

为保证飞船与舱外服之间液路接口匹配性验证结果的真实性,利用模拟换热装置模拟内外换热回路对气闸舱和舱外服的换热。该装置的工质为与内回路相同的乙二醇溶液,液路管路穿舱与气闸舱内回路相连。试验过程中该装置按照在轨状态控制内回路入口流量和温度。

配置开关门机构。该机构装在气闸舱外壁,可在真空条件下模拟航天员的开关门操作。验证真空环境中舱门开关的效果及密封性能。

#### 4.1.2 KM6 水平舱系统方案

KM6 水平舱出舱活动试验系统包括:容器系统、真空系统、环境控制系统、测控系统、综合复压系统、消防灭火系统。

容器系统由 A、B、C 三个舱室组成(气闸舱试验时置于 C 舱)。为保证试验过程中人员的快速救生,真空容器的方舱门可实现 5s 内快速关闭及开启。真空系统由粗抽系统和低温泵组成,用于抽除气闸舱泄出的富氧气体和舱外服排放的水蒸汽。环境控制系统实现对气闸舱、实验舱以及 A/B 舱压力、流量、

成分的控制。测控系统实现整个试验的集中自动控制。综合复压系统采用中压复压技术,可分别利用 3

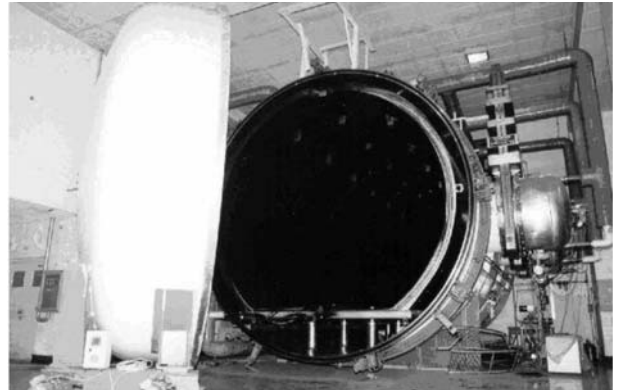


图 4 KM6 水平舱

种模式对气闸舱和 KM6 水平舱进行复压,从而为人员救生的及时实施创造条件。消防灭火系统包括蓝宝石和细水雾两种灭火装置,能够自动进行试验装置的火灾监视和灭火。

#### 4.1.3 安全保证方案

为保证试验安全,配置了安全保证系统,并设计了救生预案。

##### (1)安全保证系统

气闸舱后端安装过渡舱,与 KM6 水平舱方舱门共同构成救生通道。KM6 水平舱的综合复压系统可按照救生预案对气闸舱和 C 舱紧急复压。配置服装采气系统和紧急供氧系统,对舱外服内大气环境进行监测,并在服装失压情况下对其进行紧急供氧。

##### (2)救生预案

对 KM6 水平舱人舱服试验故障模式进行分析,针对其中有可能影响被试人员安全的服装泄漏、泄压阀关闭故障、气闸舱失火、被试人员昏厥、被试人员失去心跳或呼吸等 7 种模式设计了救生实施方案。分别采用 4 种不同的复压模式进行紧急复压以对被试人员进行救生。

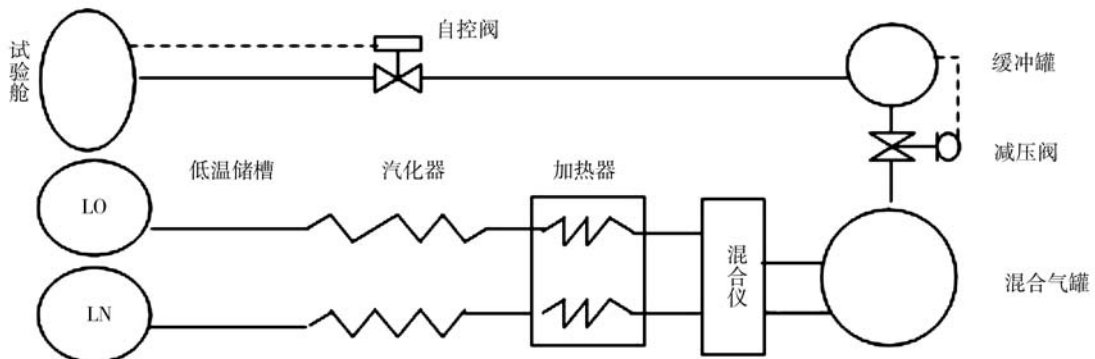


图 5 复压系统工艺流程图



## 4.2 实施结果

共进行了 2 次人舱服试验, 试验过程中, 2 名被试人员借助吊挂工装, 在着舱外服的情况下完成了规定所有的操作项目, 气闸舱设计和出舱程序安排符合工效学要求。

试验的泄复压过程中, 舱外服的控制功能正常, 服装内的环境符合要求, 服装内的压力始终不低于气闸舱的压力。气闸舱泄复压压力环境与舱外服的的压力控制协调(图 6)。

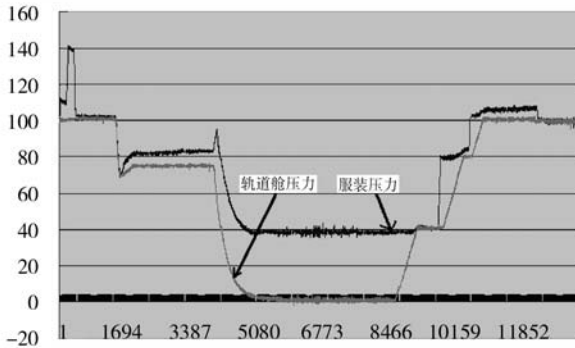


图 6 服装压力和气闸舱压力变化曲线

试验中舱载支持设备服装的供电接口正确匹配, 飞船与舱外服的信息接口匹配, 话音清晰。通过调节服装液温手柄, 服装换热器可将舱外服内温度调整到人体舒适的状态。舱载设备与服装的气路接口匹配良好, 服装控制台对服装进行了不同流量的供氧。

## 5 水槽试验

水槽试验的目的是利用试验气闸舱在水槽中产生的模拟零重力环境, 对航天员在出舱活动操作、程序、气闸舱的工效学设计进行验证。

水槽试验的关键是在气闸舱内为试验人员提供不同操作体位情况下的零重力环境。

### 5.1 试验方案

#### 5.1.1 试验气闸舱方案

为保证试验舱与正样状态的一致性。壳体结构以气闸舱正样状态为依据, 舱内设备的尺寸和布局与正样状态一致。

为在气闸舱内实现零重力环境, 采用如下措施: 蒙皮上开若若干的通孔, 作为舱体的排水孔; 舱门采用真实产品。舱门内板表面打出一定数量的排水通孔, 以消除水对舱门的运动阻力。舱门结构上增加舱门

配浮装置, 使重力和浮力抵消; 试验气闸舱安装在停放支架车上, 利用支架车实现起吊、停放、固定在试验水槽中, 并可使气闸舱沿轴线在 $\pm 20^\circ$ 范围内旋转, 已实现人与舱体在不同相对体位时均可获得中性浮力环境。

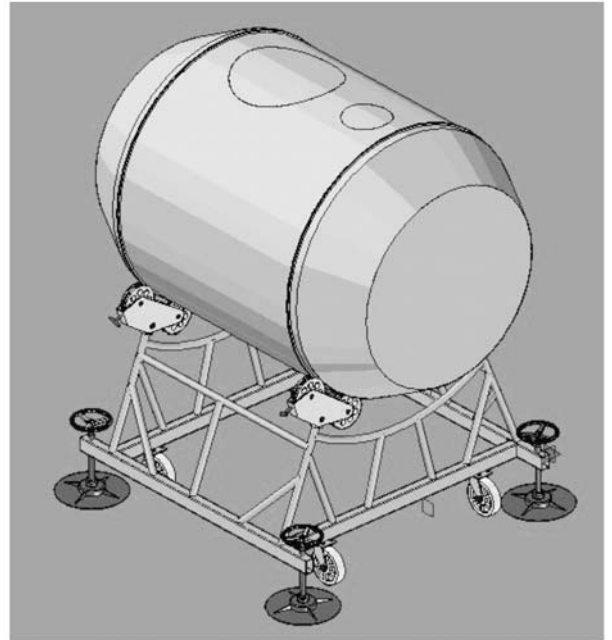


图 7 “气闸舱”与“停放支架车”的结构组成示意图

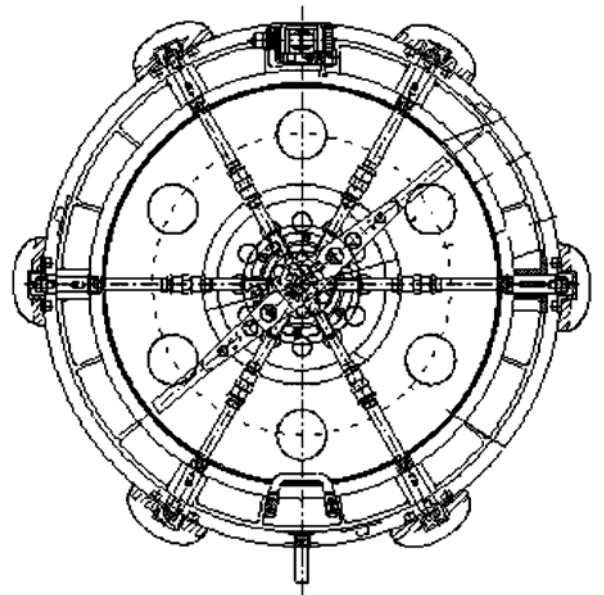


图 8 舱门排水通孔状态示意图

#### 5.1.2 试验程序方案

试验程序包括单项工况、正常程序、故障程序。

单项验证工况包括航天员在出舱准备阶段、出舱活动阶段和舱内环境恢复阶段正常状态和故障状态的单项操作项目。验证手动操作内容、操作工位、

操作程序、时序安排的正确性和合理性。

正常程序包括无线、有线出舱模式下正常出舱程序。验证正常出舱过程程序设计的合理性、正确性、操作协调性及各阶段衔接转换的顺畅性,程序执行时间安排的合理性。

故障程序包括非紧急故障时的中止舱外活动程序、紧急故障时的中止舱外活动程序。验证故障时的中止舱外活动程序设计的合理性、正确性、操作协调性及程序衔接的顺畅性,以及出舱活动时间安排的合理性。

### 5.2 实施结果

2007 年通过水槽试验对出舱活动程序和操作工效进行了验证。试验结果表明:

(1) 气闸舱空间能够支持 2 名航天员着舱外服在舱内进行操作和换位;

(2) 服装处于吊挂状态下 2 名航天员可在气闸舱活动和休息;

(3) 舱内手脚限制器数量和位置满足出舱操作要求,舱外扶手位置、形状、大小、数量和舱外活动空间满足舱外活动要求;

(4) 服装穿脱支架、服装在穿脱架上的安装空间、舱内辅助设施满足舱外服固定和解脱操作要求,展开状态的机械接口匹配;

(5) 舱门设计和舱内助力设施满足开关门操作要求,舱门通径可开启角度满足着舱外服进出舱的要求;

(6) 完成了出舱程序演练,通过分析试验录像和受试者主述,出舱程序项目安排合理、操作可行。

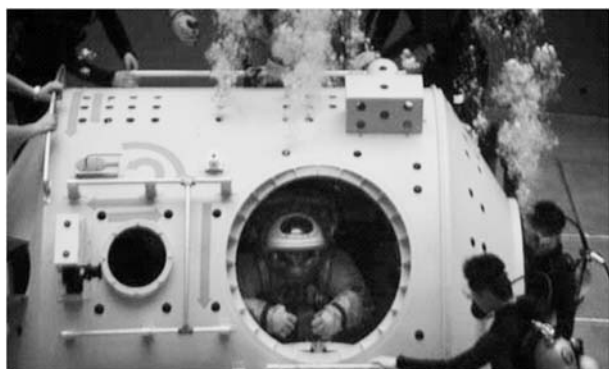


图 9 水槽试验图像

## 6 我国出舱活动的实施情况

神舟七号飞船于 2008 年 9 月 25 日 21 时 10 分

发射,21 时 19 分准确进入预定轨道。从 26 日 10 时~27 日 24 时,航天员翟志刚和刘伯明完成了两套舱外服的启封、组装、测试、尺寸调节、在轨移动训练等工作。27 日 13 时 47 分,返回舱舱门关闭,进入出舱程序。在此过程中,两名航天员按计划完成了舱外服及舱载对接系统的最终检查、吸氧排氮、轨道舱泄压等操作。27 日 16 时 43 分,翟志刚从轨道舱进入太空。在持续 19min 的舱外活动过程中,翟志刚圆满完成了展示国旗、取回空间试验装置、沿飞船外壁活动等预定工作。27 日 17 时航天员返回轨道舱,出舱舱门关闭,轨道舱开始复压。至 18 时左右轨道舱内环境恢复,返回舱舱门打开,我国首次出舱活动圆满完成。



图 10 出舱活动图像

飞行过程中,飞船和舱外服工作正常,气、液、电接口匹配。出舱活动主要性能参数与地面试验数据一致。

表 1 地面试验与飞行数据对比

指标	试验数据与飞行数据误差
初次泄压时间	14%
完全泄压时间	4%
复压至 80kPa 用时	3%
最大泄压速率	8%
最大复压速率	6%
复压后空气温度	0.2℃
与舱外服接口	结论一致
飞行程序	结论一致
功效设计	结论一致

## 7 结论

神舟七号飞船研制过程中,针对出舱活动的方案特点,通过泄复压、人舱服、水槽等试验对出舱活动方案设计的合理性进行了全面真实验证,从而确保了我国首次出舱活动飞行任务的圆满成功。

神舟七号研制过程中所掌握的出舱活动地面试验验证技术,对于我国后续空间站及载人深空探测的

出舱活动方案的地面验证,具有重要的参考价值。◇

## 参 考 文 献

- [1] Manned Testing in a Simulated Space environment, Donna L. Fender.
- [2] Apollo Experiment Report Manned Vacuum Testing of Spacecraft, Mc-lane Tr.
- [3] 金勇(译).太空出舱.北京:中国宇航出版社,2007

## The Ground Verification Of Spacecraft EVA Functions

ZHU Guangchen JIA Shijin

(Beijing Institute of Spacecraft Systems Engineering)

**Abstract:** This paper introduce the ground verification method of ShenZhou-7 spaceship EVA functions, including depress and repress test, altitude chamber test, water tank test. These tests testified that the pressure control function, spaceship-space suit interface, EVA progress, ergonomics design were right.

**Key words:** Subject Term, EVA, Depress and repress test, Altitude chamber test, Water tank test

.....  
(上接第 43 页)

## Evaluation and Selection of MC/DC Analysis Tools

ZHANG Weimin SUN Jun

(Beijing Aerospace Flight Control Center, China)

**Abstract:** Using tools to analyze MC/DC may simplify time-consuming software verification. Candidate tools should be carefully assessed to determine their functionality and limitations before the tool is used. How structural coverage analysis tools work is introduced. Some factors to be considered in evaluating and selecting a structural coverage tool are discussed. The factors include types of monitored statements, where statements are monitored (source versus object code), maximum number of conditions and decisions that can be monitored, algorithms used for determining independent effect, handling of relational operators, handling of bit-wise operators, handling of combining expressions, handling of single step logic operations and instrumentation effects.

**Key words:** Modified Condition/Decision Coverage(MC/DC), Coverage Analysis tool, Tool Evaluation