



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 38201—2019

---

## 航天器常压热性能试验方法

Performance test method for spacecraft under ambient pressure and  
thermal environment

2019-10-18 发布

2020-05-01 实施

---

国家市场监督管理总局  
中国国家标准化管理委员会 发布

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国宇航技术及其应用标准化技术委员会(SAC/TC 425)提出并归口。

本标准起草单位:北京卫星环境工程研究所、北京空间飞行器总体设计部、上海卫星装备研究所、北京空间技术研制试验中心。

本标准主要起草人:王晶、苏新明、李西园、毕研强、刘畅、徐照武、尚永红、谢吉慧、许忠旭、贾瑞金、李潇、彭光东、靳健。



# 航天器常压热性能试验方法

## 1 范围

本标准规定了航天器常压热性能试验的试验目的、试验原理、试验要求及试验方法。

本标准适用于航天器或其舱段、大型组件常压热性能试验,包括密封舱常压综合热试验、常压热变形试验、常压热环境下的分离与展开试验,其他大型组件热性能试验可参照使用。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 29639 生产经营单位生产安全事故应急预案编制导则

GB/T 34515—2017 航天器热平衡试验方法

GB/T 34522—2017 航天器热真空试验方法

## 3 术语和定义

GB/T 34515—2017 及 GB/T 34522—2017 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**常压热性能试验** performance test under ambient pressure and thermal environment

在常压环境下模拟航天器或其舱段、大型组件在轨热效应,考核其热控、环控、机械、分离与展开等性能的试验。

注:一般包括密封舱常压综合热试验、常压热变形试验、常压热环境下的分离与展开试验。

### 3.2

**密封舱常压综合热试验** integrate thermal test for sealed cabin under ambient pressure

在常压环境下模拟航天器密封舱在轨热边界,验证航天器内部的传热、传质性能,开展功能、性能测试的试验。

### 3.3

**常压热变形试验** thermal deformation test under ambient pressure

在常压环境下模拟航天器或其舱段、大型组件在轨温度范围或温度分布,对其变形进行测量的试验。

### 3.4

**常压热环境下的分离与展开试验** separation and deployment test under ambient pressure and thermal environment

在常压环境下模拟航天器大型组件在轨温度范围或温度分布,对其分离、展开性能进行验证的试验。

## 4 试验目的

常压环境下设置规定的热边界和工作模式,验证航天器密封舱的热控、环控性能以及大型组件的机

械性能是否满足设计要求。

## 5 试验原理

### 5.1 密封舱常压综合热试验

以热平衡试验结果为基础,将密封舱置于常压试验箱内,模拟不同飞行模式下密封舱内设备工作产热和乘员代谢产热产湿,调整常压试验箱内部环境温度,使通过密封舱壁的总换热量与在轨对应工况的舱壁换热量一致,验证航天器密封舱在不同工作模式下舱内设备温度控制能力、主动控温系统工作性能、空气温度、湿度控制能力以及空气成分分布及输运能力。

### 5.2 常压热变形试验

基于空间环境下结构变形对温度敏感而对真空不敏感的特性,一般通过试验箱(或试验大厅)使试验模型达到极端温度,必要时结合薄膜电加热器或红外加热器模拟极端温度梯度,利用光学或接触式测量手段获取变形或应变数据,验证结构热变形是否满足设计要求。

### 5.3 常压热环境下的分离与展开试验

基于试验模型的分离、展开性能对温度敏感而对真空不敏感的特性,一般通过试验箱(或试验大厅)使试验模型达到极端温度,利用光学或接触式测量手段获取其位移、速度、加速度、应变、平面度等指标是否满足设计要求。

## 6 一般要求

### 6.1 试验模型技术状态

试验模型一般为航天器的工程模型,应满足如下要求:

- a) 试验模型上仪器设备、结构件、总装件、电缆网等符合设计要求;
- b) 允许仪器设备使用各项热性能参数符合产品要求的工艺件、鉴定件或模拟件代替,但其外形尺寸、表面状态、安装连接方式、内部发热量和热容量应与相应产品一致。

### 6.2 试验模型安装

试验模型安装应满足如下要求:

- a) 安装前应对试验模型、试验箱、试验工装进行防污染处理;
- b) 试验模型的安装姿态应尽可能降低重力对试验结果的影响;
- c) 安装后应对试验工装的水平度进行测量和调整,应优于 2 mm/1 000 mm。

### 6.3 试验工装

试验工装应满足如下要求:

- a) 机械强度与刚度应满足试验模型承载要求,并留有安全余量;
- b) 机械接口和热接口应满足试验要求;
- c) 试验工装应具有水平调节能力;
- d) 必要时增加重力卸载装置;
- e) 工装材料不应对试验模型造成污染。

## 6.4 试验准备环境

试验准备环境应满足如下要求：

- a) 温度： $15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 相对湿度： $30\%\sim 60\%$ ；
- c) 洁净度：优于 100 000 级。

## 6.5 试验空间

### 6.5.1 试验大厅

利用试验大厅开展航天器常压热性能试验时，应满足如下要求：

- a) 大厅环境温度稳定，温度波动值应小于 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 洁净度满足试验模型防污染要求；
- c) 具有接地装置；
- d) 电磁环境、背景噪声、振动不应影响试验的正常开展。

### 6.5.2 试验箱

利用试验箱开展航天器常压热性能试验时，应满足如下要求：

- a) 试验箱的尺寸和承载能力应满足试验模型和试验工装的安装要求；
- b) 试验箱温度控制能力应满足试验要求；
- c) 试验箱内部稳态温度均匀性应优于 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温度波动值应小于 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- d) 试验箱具备环境湿度控制与监视能力，箱内露点温度低于试验模型最低温度，一般留有 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 余量；
- e) 试验箱接地电阻不应大于 $1.0\text{ }\Omega$ 。

## 6.6 温度测量

温度测量应满足如下要求：

- a) 被测稳态温度在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim +80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，测量准确度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，超出此温度范围以外的测量准确度为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 测温范围不小于试验温度范围；
- c) 测量设备信号及电源应分别接地；
- d) 测量通道数满足试验要求；
- e) 温度数据采集系统具备数据实时存储、显示功能，采集周期不应大于 $60\text{ s}$ 。

## 6.7 试验安全

试验安全应满足如下要求：

- a) 应制定完善的安管理规章制度及仪器设备操作规程，内容涵盖试验过程的各个阶段，并按照 GB/T 29639 编制与试验管理相关的应急预案，分阶段进行安全检查、记录，保证记录可追溯；
- b) 试验现场应配备灭火器等常规安全防护器材；
- c) 如果利用试验箱开展常压试验，试验现场应当配备高低温防护服、手套及鞋；
- d) 如果试验箱使用液氮喷淋方式制冷，箱内及氮气管路附近应当布置氧浓度传感器，并在箱体及管路外侧显著位置显示氧浓度数值，同时试验现场应配备手持式氧浓度传感器和氧气面罩等人员防护设备；

- e) 如果常压热环境下的分离与展开试验需要使用火工品进行解锁,火工品的包装、运输、储存、试验应按相关要求进行。

## 6.8 试验报告

试验完成后,应编制试验报告,试验报告应经过评审。试验报告应包括试验目的、试验模型技术状态、试验技术状态、试验工况、试验过程、试验结果与分析、结论等内容。

## 7 密封舱常压综合热试验

### 7.1 试验设计

#### 7.1.1 试验系统

密封舱常压综合热试验系统示意图如图 1 所示,主要由冷水机组、试验箱箱体、航天器密封舱、试验箱环境控制系统、数据测量系统和试验工装等组成。

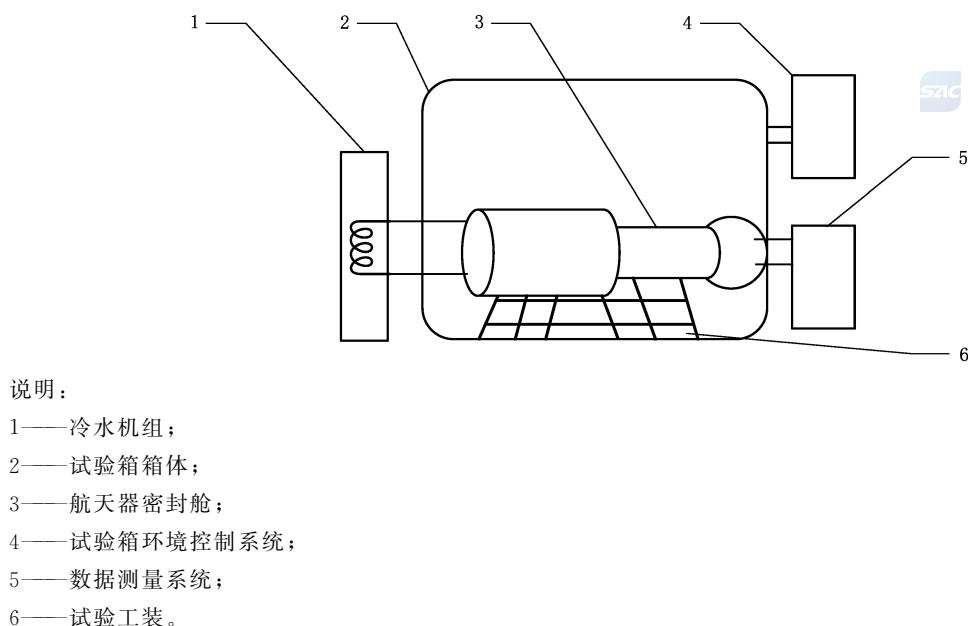


图 1 密封舱常压综合热试验系统示意图

#### 7.1.2 试验工况

试验工况设计应遵循如下原则:

- 一般至少包括高温工况和低温工况;
- 一般包括乘员各类驻留模式和各级代谢水平工况;
- 一般包括可能发生并对试验模型的空气环境或温度控制功能有严重影响的故障工况;
- 试验工况保持时间应反映实际飞行模式的特征时间,并保证完成测试;
- 可参照航天器热平衡试验或仿真数据,选取对应工况。

#### 7.1.3 热边界模拟

在常压综合热试验中,热边界模拟按如下方法进行:

- 密封舱内的平台设备、载荷设备的工作产热可通过真实产品、结构热控件实现。

- b) 乘员发热量可通过人体包络模拟件配合薄膜电加热器方式模拟。
- c) 流体回路通过冷水机组进行冷却,模拟其对外换热量。
- d) 通过调整试验箱内环境温度,使通过密封舱壁面传热量与热平衡试验或仿真分析中同类工况的传热量相当。密封舱内总发热量和对其他停靠舱体的补热量为工况设定值,流体回路带出热量通过冷却水流量和进出口水温计算。密封舱壁面传热量按式(1)计算:

$$Q_{wall} = Q_{cabin} - Q_{radiation} - Q_{contact} \dots\dots\dots (1)$$

式中:  
 $Q_{wall}$  ——密封舱壁面传热量,单位为瓦(W);  
 $Q_{cabin}$  ——密封舱内总发热量,单位为瓦(W);  
 $Q_{radiation}$  ——流体回路带出热量,单位为瓦(W);  
 $Q_{contact}$  ——密封舱对其他停靠舱体的补热量,单位为瓦(W)。

7.1.4 稳定判据

可选择相对偏差或绝对偏差作为稳定判据,判据如下:

- a) 当密封舱总热负荷大于 5 000 W 时,连续 1 h 满足密封舱传热量与热平衡试验的偏差低于密封舱总热负荷的 2%,认为工况达到稳定;
- b) 当密封舱总热负荷小于 5 000 W 时,连续 1 h 满足密封舱传热量与热平衡试验的偏差低于 100 W,认为工况达到稳定。

7.1.5 数据测量

7.1.5.1 温度测量

温度测量应遵循如下原则:

- a) 在重要组件和部位应布置主备份温度测量点;
- b) 对温度敏感的组件应布置温度测量点;
- c) 安装有热流模拟装置的设备或部位应布置温度测量点;
- d) 大功率电缆应布置温度测量点。

7.1.5.2 湿度测量

试验模型湿度测量应遵循如下原则:

- a) 乘员主要活动区应布置湿度传感器,包括工作区、睡眠区、卫生区、就餐区、健身区等;
- b) 典型的低温区域附近应布置湿度传感器,其他仿真预示湿度较高处应布置湿度传感器;
- c) 湿度传感器测量湿度范围应满足试验要求;
- d) 湿度传感器测量准确度应优于±5%。

7.2 试验实施

7.2.1 试验准备

7.2.1.1 试验文件、试验系统准备

试验模型进试验大厅前应进行如下工作:

- a) 编制试验实施方案等试验文件并通过评审;
- b) 研制试验工装并具备与试验模型对接状态;
- c) 准备试验测控、摄像、水电气、网络通信等保障条件;

- d) 对参试仪器设备进行计量和有效期检查；
- e) 必要时对试验系统进行试验前调试。

#### 7.2.1.2 试验模型状态检查

将试验模型与工装进行对接,按技术文件要求检查如下内容:

- a) 试验模型外观;
- b) 温度传感器和加热器的阻值、绝缘;
- c) 试验模型测试线缆、测温线缆、加热线缆的导通、绝缘;
- d) 试验模型的电性能。

#### 7.2.1.3 试验状态设置

完成 7.2.1.1 和 7.2.1.2 后,应开展如下工作:

- a) 将试验模型连同试验工装移动至指定位置并固定;
- b) 将试验模型接地线与接地装置连接;
- c) 连接测量系统传感器;
- d) 有污染测量要求的应安装污染测量装置;
- e) 调整试验模型达到要求姿态。

#### 7.2.2 开机前状态检查

开机前应进行如下检查:

- a) 检查测温系统工作状态;
- b) 确认试验模型、地面测试设备、试验设备工作时是否存在电磁干扰现象;
- c) 检测试验模型电性能;
- d) 检测地面冷水机组工作性能;
- e) 检测乘员代谢模拟装置工作性能。

#### 7.2.3 试验开机与运行

试验开机与运行应按如下步骤:

- a) 利用试验箱开展试验时,对其做除湿处理;
- b) 按照 7.1.3 进行热边界模拟;
- c) 对工况稳定进行判断;
- d) 工况稳定后开展密封舱热控性能及环控性能测试;
- e) 对当前工况结果进行确认,随后转入下一工况。

#### 7.2.4 试验停机

试验停机应按如下步骤:

- a) 当完成所有规定试验项目并确认有效后,进入试验停机程序;
- b) 使试验箱内环境温度、湿度、氧浓度达到正常环境水平;
- c) 按技术文件要求关闭相关设备。

#### 7.2.5 试验撤收

试验撤收应按如下步骤:

- a) 对试验模型进行功能和性能检测;



- b) 断开测试电缆,检查试验模型外观;
- c) 将试验模型从试验箱中移出;
- d) 撤收试验设备。

7.3 试验总结

完成所有试验工况后,应按 6.8 编制试验报告,对常压综合热试验按以下内容做出评价:

- a) 试验记录及试验数据是否完备;
- b) 进行试验误差分析,判断试验中试验模型和试验设备的各主要参数是否满足试验要求和本标准规定的指标;
- c) 舱内气体组分、温度、湿度是否与分析模型吻合;
- d) 舱内是否存在结露风险;
- e) 舱内除湿系统是否满足最极端工况下的除湿要求;
- f) 其他在试验中需要验证的指标是否满足要求。

8 常压热变形试验

8.1 试验设计

8.1.1 试验系统

常压热变形试验系统示意图如图 2 所示,主要由应变测量系统、温度测量系统、电源、加热器、试验箱箱体(当选择在试验大厅开展试验时可不使用试验箱箱体与试验箱环境控制系统)、变形测量系统、试验箱环境控制系统、试验工装、试验模型等组成。

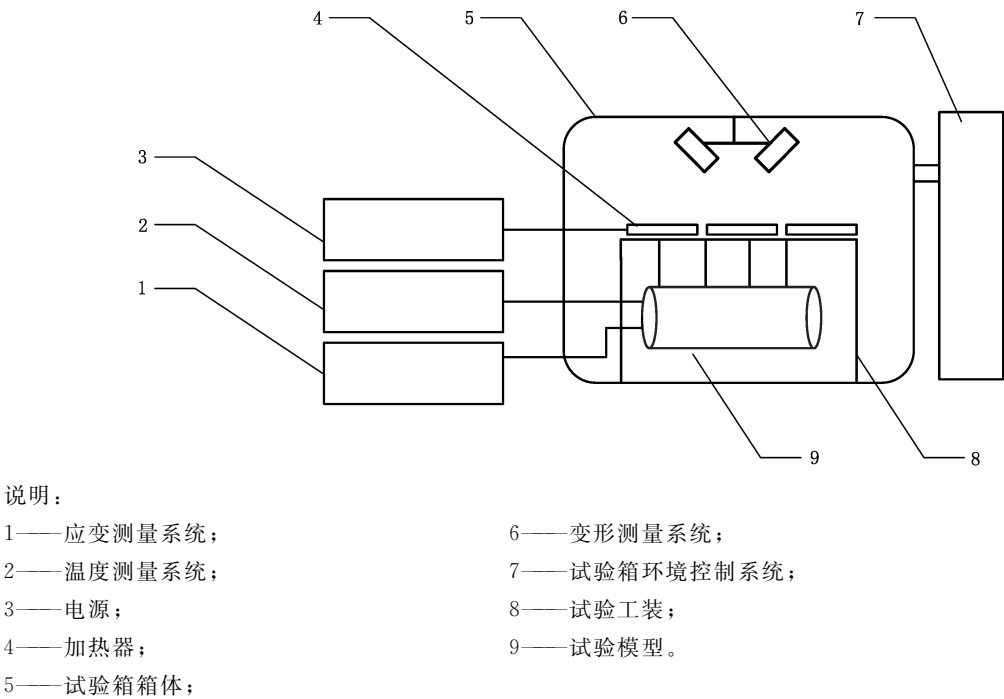


图 2 常压热变形试验系统示意图

### 8.1.2 试验工况

试验工况的设计应遵循如下原则：

- a) 一般应包括极端温度工况；
- b) 可考虑增加温度梯度工况；
- c) 可考虑试验模型的不同构型；
- d) 最后一个试验工况一般不选择低温工况。

### 8.1.3 热边界模拟

可通过试验箱或外置加热器模拟试验模型的热边界。当采用外置加热器进行局部温度控制时，应满足如下要求：

- a) 加热功率应满足相应温度控制区极端温度的控制要求，各加热区的加热功率可独立调节；
- b) 加热回路的输出电流、输出电压、总功率应满足试验要求；
- c) 电源应具有过热、过流、过压保护功能。

### 8.1.4 稳定判据

#### 8.1.4.1 热学稳定判据

当监测点的温度变化符合下列条件之一，则认为试验工况达到热学稳定：

- a) 在连续 0.5 h 内，温度波动值不大于  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 在连续 0.5 h 内，温度单调变化值不大于  $1\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。

#### 8.1.4.2 力学稳定判据

当满足下列条件，则认为试验工况达到力学稳定：

- a) 从热学稳定计时起，环境压力波动值维持在当前值的  $\pm 10\%$  以内；
- b) 对于其他力学参数的测量值，在 1 h 内波动值不超过计时时刻示数的  $\pm 2\%$ 。

### 8.1.5 数据测量

#### 8.1.5.1 温度测量

试验模型的温度测量应遵循如下原则：

- a) 温度传感器的布置不能妨碍产品的功能和性能测试；
- b) 每个控制区温度最敏感的组件上应布置温度测量点；
- c) 可考虑在控制区内温度或热流量平均点位置布置温度测量点。

#### 8.1.5.2 应变测量

可采用应变片、光纤等传感器测量应变，应满足如下要求：

- a) 传感器量程及精度应满足试验要求；
- b) 测量仪器采集速度应满足试验要求；
- c) 传感器及其固定方式应满足极端试验温度的使用条件；
- d) 应变测量应考虑温度补偿的措施。

#### 8.1.5.3 变形测量

可使用经纬仪、摄像测量、激光测量等方法测量变形，应满足如下要求：

- a) 变形测量精度应优于 0.1 mm。
- b) 应开展试验工装热变形对变形测量影响分析,分析应选择极端温度工况。
- c) 测量设备可以选择安装于试验箱内部或外部。安装于内部时,如果设备无法承受试验工况温度,应对其采取控温措施,并防止结露。
- d) 应对工装进行保温处理,防止工装热变形对变形测量产生影响。

## 8.2 试验实施

### 8.2.1 试验准备

#### 8.2.1.1 试验文件、试验系统准备

试验模型进试验大厅前应进行如下工作:

- a) 同 7.2.1.1;
- b) 准备试验用温度、应变、变形测量系统。

#### 8.2.1.2 试验模型状态检查

将试验模型与工装进行对接,检查内容同 7.2.1.2 的 a)~c)。

#### 8.2.1.3 试验状态设置和检查

完成 8.2.1.1 和 8.2.1.2 后,应开展如下工作:

- a) 将试验模型连同试验工装移动至指定位置并固定;
- b) 将试验模型接地线与接地装置连接;
- c) 连接传感器、加热器电缆并测试;
- d) 安装光学测量系统并进行标定,标定温度范围不应小于试验温度范围;
- e) 有污染测量要求的,安装污染测量装置;
- f) 调整试验模型的姿态满足试验要求;
- g) 检查试验场地力学环境是否满足试验要求。

### 8.2.2 开机前状态检查

开机前应进行如下检查:

- a) 检查测温回路、加热回路的电阻值及绝缘情况;
- b) 检查测温系统工作状态;
- c) 测试控温系统热响应;
- d) 检查变形测量仪器工作状态;
- e) 确认试验模型、地面测试设备与试验设备工作时是否存在电磁干扰现象。

### 8.2.3 试验开机与运行

开机与运行按如下步骤:

- a) 利用试验箱开展试验时,对其做除湿处理。
- b) 对初始状态下的力学参数进行测量。
- c) 建立工况:
  - 1) 根据试验要求,打开送风装置,建立试验工况的环境温度;
  - 2) 通过局部温度控制及试验模型温度数据采集与处理系统,实时控制、测量试验模型的温度,直到试验模型表面达到要求的温度或温度梯度。

- d) 根据 8.1.4 进行工况稳定判定。
- e) 变形测试：
  - 1) 关闭送风设备静置 3 min 后,对试验模型表面的变形、应变等特性进行测量;
  - 2) 测量结果经确认后,转入下一工况;
  - 3) 先关闭局部温度控制,再设置环境温度使其稳定后再次开启局部温度控制,建立工况条件;
  - 4) 如不改变环境温度,可直接调整局部温度控制,建立工况条件。

8.3 试验总结

所有试验工况完成后,应按 6.8 编制试验报告,按如下要求对常压热变形试验做出评价:

- a) 同 7.3 的 a)和 b);
- b) 各工况下热变形与设计或分析是否一致。

9 常压热环境下的分离与展开试验

9.1 试验设计

9.1.1 试验系统

常压热环境下的分离与展开试验系统示意图如图 3 所示,主要由应变测量系统、温度测量系统、电源、加热器、试验箱箱体(当选择在试验大厅开展试验时,可不使用试验箱箱体与试验箱环境控制系统)、位移测量系统、试验箱环境控制系统、试验工装、试验模型、展开驱动机构等组成。

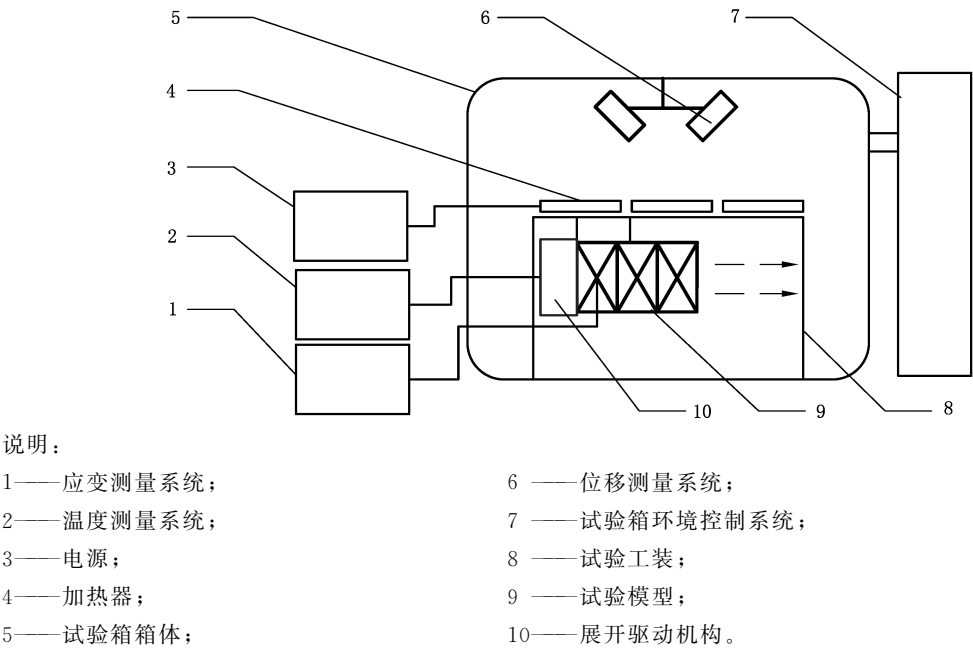


图 3 常压热环境下的分离与展开试验系统示意图

9.1.2 试验工况

试验工况的设计应遵循如下原则:

- a) 应包括极端温度工况;

b) 工况温度应覆盖试验模型的设计温度范围。

### 9.1.3 热边界模拟

同 8.1.3。

### 9.1.4 稳定判据

同 8.1.4。

### 9.1.5 数据测量

#### 9.1.5.1 温度测量

同 8.1.5.1。

#### 9.1.5.2 应变测量

同 8.1.5.2。

#### 9.1.5.3 位移测量

可使用经纬仪、摄像测量、激光测量等方法测量位移,应满足如下要求:

- a) 位移测量精度应优于 0.1 mm;
- b) 应开展试验工装变形对位移测量影响分析,分析时应选择极端温度工况;
- c) 测量设备可以选择安装于试验箱内部或外部。安装于内部时,如果设备无法承受试验工况温度,应对其采取控温措施,并防止结露。

## 9.2 试验实施

### 9.2.1 试验准备

#### 9.2.1.1 试验文件、试验系统准备

同 8.2.1.1。

#### 9.2.1.2 试验模型状态检查

将试验模型与工装进行对接,并按技术文件要求检查如下内容:

- a) 同 7.2.1.2 的 a)~c);
- b) 试验模型的展开功能是否正常。

#### 9.2.1.3 试验状态设置

完成 9.2.1.1 和 9.2.1.2 后,应开展如下工作:

- a) 同 8.2.1.3 的 a)~e);
- b) 调整试验模型的姿态满足试验要求;
- c) 对展开电机、控制器等有温度控制要求的组件进行热控实施并测试。

### 9.2.2 开机前状态检查


开机前应进行如下检查:



- a) 检查测温系统工作状态；
- b) 检查控温系统热响应测试；
- c) 检查位移测量仪器工作；
- d) 检查试验件能否正常进行分离与展开,运动包络与试验工装、设备是否存在干涉；
- e) 检查展开电机、控制器等对温度控制要求较高的组件的热控实施是否正确；
- f) 确认试验模型、地面测试设备与试验设备工作时是否存在电磁干扰现象。

### 9.2.3 试验开机与运行

开机与运行按如下步骤：

- a) 利用试验箱开展试验时,对其做除湿处理。
- b) 建立工况：
  - 1) 对展开电机、控制器等敏感组件开启温度控制；
  - 2) 根据试验要求,建立试验工况的环境温度；
  - 3) 实时控制、测量试验模型的温度,直到试验模型达到要求的温度。
- c) 根据 8.1.4 进行工况稳定判定。
- d) 展开测试：
  - 1) 开启试验模型表面位移、速度、加速度、应变、平面度等参数的测量系统；
  - 2) 开启试验模型的展开测试,记录测试数据。

### 9.3 试验总结

试验工况结束后应按 6.8 编制试验报告,按如下要求对常压热环境下的分离与展开试验做出评价：

- a) 同 7.3 的 a)~b)；
- b) 试验模型展开是否满足要求,采集的位移、速度、加速度、冲击、应变、平面度等数据是否满足设计要求。

## 10 试验故障与处理

### 10.1 需中断试验的故障与处理

#### 10.1.1 试验设备故障

试验设备出现以下故障之一不能排除时,应中断试验：

- a) 加热装置出现故障,不能满足控温要求；
- b) 试验箱出现故障,不能满足试验工况的要求；
- c) 试验工装出现故障影响产品安全和测试；
- d) 测量系统出现异常。

#### 10.1.2 试验模型故障

试验模型出现以下故障之一不能排除时,应中断试验：

- a) 电源分系统组件出现故障,致使航天器产品无法正常工作；
- b) 有效载荷分系统主要组件出现故障；
- c) 其他分系统组件出现影响到试验结论和有效性判断的故障。

## 10.2 试验中断后处理

### 10.2.1 试验设备故障

因试验设备故障导致试验中断,待设备故障排除后可继续试验。

### 10.2.2 试验模型故障

因试验模型故障导致试验中断,首先应进行故障分析定位,确认故障影响试验目的和试验有效性的程度后再进行处置,处置的一般原则如下:

- a) 如果是接插件、电缆和管路等引起的故障,经处理后应进行测试检查,确认无误后再继续进行试验;
- b) 如果是试验模型内部仪器设备故障,一般更换后再继续试验。

## 10.3 无需中断试验的故障处理

当试验过程中出现个别组件,如果出现故障或异常时组件是独立的或对实现试验目的影响不大,可继续进行试验。待整个试验完成后对出现故障或异常的组件单独进行故障处理。

---