

# 2500°C超高温真空（气氛）环境材料力学性能试验装置研发

姚丙南, 马双伟, 王慧, 贾湫然, 杨彬, 任霞, 孙松野

(中机试验装备股份有限公司, 吉林 长春 130103)

**摘要:** 研发了超高温真空（气氛）环境材料力学性能试验装置, 实现了 2500°C超高温真空可充气环境中金属材料及复合材料的拉伸、压缩、弯曲、剪切力学性能试验测试。该试验装置可为我国航空航天、核工业、石油化工等领域内评价金属材料及复合材料在不同温度（2000°C-2500°C）,真空环境或充气环境下的力学性能提供有力技术支撑, 为新材料的应用提供全面的力学性能试验数据。

**关键词:** 超高温;真空;气氛;力学;试验装置

## Research and Development of 2500°C Ultra-high Temperature Vacuum (Atmosphere) Environment Testing Device of Materials' Mechanical Properties

Yao Bingnan, Ma Shuangwei, Wang Hui, Jia Haoran, Yang Bin, Ren Xia, Sun Songye

(Sinotest Equipment Co., Ltd., Changchun 130103, Jilin, China)

**Abstract:** An ultra-high temperature vacuum (atmosphere) environment testing device of materials' mechanical property was developed, and the tensile, compression, bending and shear mechanical properties of metallic materials and composite materials in the ultra-high temperature vacuum and inflatable environment at 2500°C were realized. This test device can provide strong technical support for evaluating the mechanical properties of metallic materials and composite materials at different temperatures (2000°C-2500°C), vacuum environment or gas-filled environment in the fields of aerospace, nuclear industry, petrochemical and other fields in our country, and provide comprehensive mechanical property testing data for the application of new materials.

**Keywords:** ultra-high temperature; vacuum; atmosphere; mechanics; testing device

### 1 前言

近年来,随着高推重比航空发动机、高冲质比火箭发动机及核聚变反应堆、高性能汽车材料、轨道交通的发展,材料力学性能测试温度的要求更高,模拟试验环境的要求更多样性(真空、保护气体、氧含量、腐蚀介质等)[1-2]。目前,国内罕有试验温度达到 2500°C 的真空(气氛)环境材料力学性能试验装置,而国外产品由于受到技术和军事垄断一直受限进口,使我国航空航天、核工业等国防与民用领域的需求受到极大地制约[3]。基于此,中机试验装备股份有限公司研发了 2500°C 超高温真空(气氛)环境材料力学性能试验装置。该试验装置可为我国航空航天、核工业、石油化工等领域内评价金属材料及复合材料在不同温度(2000°C-2500°C),真空环境或充气环境下的力学性能提供有力技术支撑,为新材料的应用提供全面的力学性能试验数据,可有效的提高我国国防军工等领域产品整体技术水平,确保其安全可靠,意义十分重大。

## 2 试验装置的主要功能和技术参数

试验装置的主要功能如下:

- 2.1 常规状态下材料的拉伸、压缩、弯曲、剪切性能试验;
- 2.2 为上述试验提供 2500°C 的超高温和真空(气氛)试验环境;
- 2.3 真空(气氛)环境下的力-热耦合加载试验。

主要技术参数如表 1 所示。

表 1 试验装置主要技术参数

技术参数	技术指标
最大试验力	50kN
力测量精度	±0.5%
工作温度范围	600°C~2500°C
工作温度梯度	≤20°C
真空环境	$5 \times 10^{-3}$ Pa
气氛环境	≤0.13MPa(可调)

## 3 试验装置的功能原理设计与技术路线

### 3.1 试验装置的功能原理设计

该试验装置除具备传统试验机的拉伸、压缩、弯曲、剪切载荷加载测试功能外,特别还能实现真空(充气)环境下的力-热耦合加载测试功能,结合引伸应变测量装置与全场应

变监测组件实现对载荷作用下被测试样变形损伤和断裂行为的试验测试。其功能原理设计采用模块化思想，其载荷形式主要包括拉伸、压缩、弯曲、剪切、高温载荷以及上述载荷模式的力热耦合加载。

### 3.2 试验装置研制的技术路线

从实现超高温极端环境下的力热耦合、静态机械载荷下材料力学性能的原理方法出发，采用功能导向与模块化设计思路，综合运用理论分析、仿真研究和试验测试相结合的方法，开展仪器多因素耦合的总体架构设计，其总体技术路线如图 1 所示。

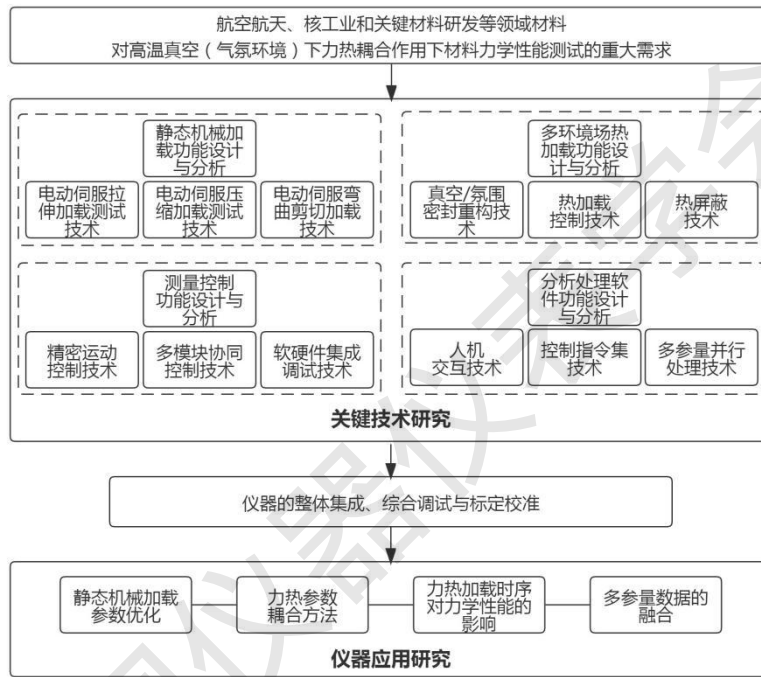


图 1 总体技术路线图

## 4 试验装置的结构组成与变形测量方法

### 4.1 试验装置的整体结构

试验装置主要由静态机械载荷加载系统（试验主机）、真空（气氛）环境箱、发热体组件、夹具与变形测量组件、抽真空充气组件和循环水冷系统等部分组成。其中，静态机械载荷加载系统作为机械系统的支撑基础，其台面可用来为真空（气氛）环境箱提供牢固支撑与精确定位；真空（气氛）环境箱和抽真空充气组件配合使用来保障试验时所需要的真空环境和保护气体环境；发热体组件是为力学试验提供所需要的超高温试验环境；夹具与变形测量组件可实现拉伸、压缩、弯曲、剪切载荷作用下被测试样变形损伤和断裂行为的试验测试；循环水冷系统为试验装置各部分提供循环冷却水以保证相关力学试验在 2500°C 超高温条件

下正常工作。整体结构如图 2 所示。

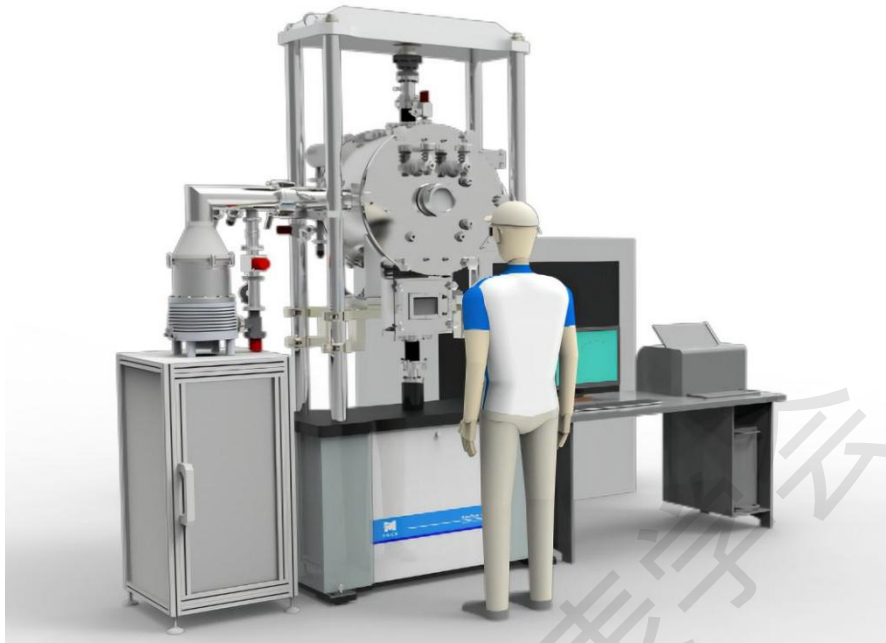


图 2 2500°C超高温真空（气氛）环境材料力学性能试验装置

## 4.2 静态机械载荷加载系统

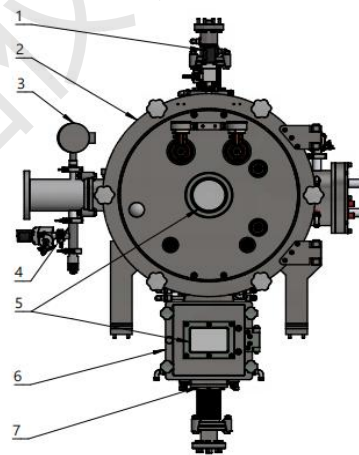
静态机械载荷加载系统由主机框架、加载驱动系统、测力传感器和控制系统等部分组成。主机框架采用四立柱门形结构，稳固可靠，具有良好的静态品质，整体结构如图 4 所示；加载驱动系统由交流伺服电机、减速器、同步带传动机构等构成，最大加载力为 50kN；测力传感器采用 CLY20 型号负荷传感器，采用 4 线制端口，精度等级为 0.5 级，可实现拉压双向的负荷测量；控制系统采用 TMC1010 型静态控制器，标准型数据采集频率 70Hz，可实现三闭环（位移、负荷、变形）控制，且不同控制方式间可任意平滑切换。



图 4 主机框架结构示意图

### 4.3 真空（气氛）环境箱与抽真空充气组件

真空（气氛）环境箱是加热体和夹具及变形测量引伸计工作使用的外部容器，其外形为卧式圆筒形状，采用奥氏体不锈钢焊接制造。真空（气氛）环境箱由大小不同两个真空/氛围室组成，试验时室内气氛相同。大、小真空/氛围室全部为双层水冷结构并设有观察窗，上下均设置力学加载口，加载口端部通过焊接波纹管与力学加载装置接口配合，实现加载过程中的动密封，保证试验过程中的真空（惰性气体）氛围构建。其整体结构如图 5 所示。



1: 力学加载口; 2: 大真空/氛围室; 3: 真空压力传感器

4: 高真空阀组件 5: 观察窗; 6: 小真空/氛围室; 7: 力学加载口

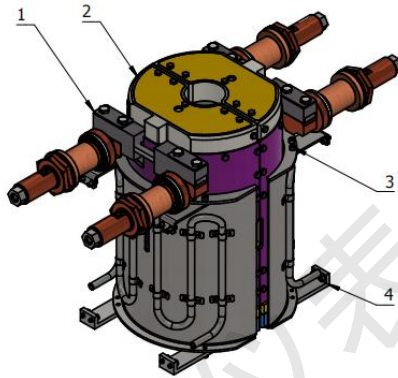
图 5 真空（气氛）环境箱结构示意图

真空（气氛）环境箱与抽真空充气组件连接。试验时，由分子泵对真空（气氛）环境箱进行抽真空以达到试验要求的真空度；当进行气氛环境试验时，由真空压力传感器、高真空

阀组件配合使用来检测并控制环境箱内的气氛压力水平。

#### 4.4 发热体组件与温控系统

发热体组件由发热体和热防护装置组成。发热体采用半圆管状的石墨材料，为对开式结构，通过控制加热功率合理调控发热体的表面温度。发热体外围为热防护装置，同样采用对开式结构，由石墨隔热屏、水冷炉壁和托架组成；石墨隔热屏固定在水冷炉壁上，托架和水冷炉壁为整体结构，统一通入冷却水。发热体通过伸到环境箱外部的电极杆和水冷电缆接到大功率电源上。当环境箱箱门闭合后，发热体组件随之形成闭合整体。其整体结构如图 6 所示。



1: 电极; 2: 石墨隔热屏; 3: 水冷炉壁; 4: 托架

图 6 发热体组件结构示意图

温度加载控制采用 AI 智能温控表，具有模糊逻辑 PID 调节及参数自整定功能，通过移相触发的方式控制可控硅的导通幅度，进而控制变压器的输出功率，最终控制发热体发热功率，达到调节试样环境温度的目的。其控制原理如图 7 所示。

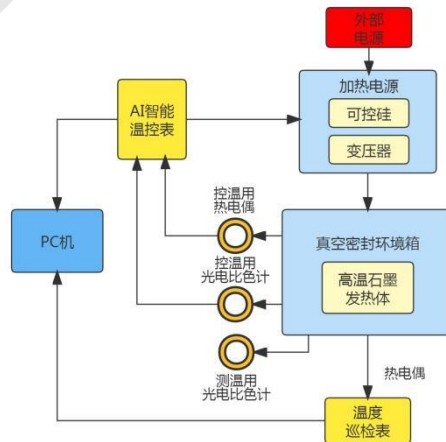


图 7 温度加载控制原理图

#### 4.5 变形测量机构与测量方法

常规高温环境下材料静态力学性能测试中的应变测量通常采用引伸测量装置,根据试验类型可采用耐高温引伸杆与耐高温差动变压器配合使用方式或是耐高温侧插引伸计方式。近年来,随着非接触式应变测量技术的逐渐成熟,三维数字散斑、高景深 3D 显微成像也开始应用在高温应变测量领域。

本试验装置最高试验温度 2500°C 属于超高温状态,引伸装置里的传感器等部件会受到高温作用而失效,因此将传感器、放大器等不耐受高温的部件远离高温环境并进行强制冷却。同时利用耐高温陶瓷材料与耐高温石墨材料制备成复合结构的引伸杆,将试样形变引伸到可承受的较低温度环境,并与位移传感器等功能部件配合使用。为解决超高温条件下材料应变测量中传统接触式测量结构兼容性差的技术问题,引进三维数字散斑新技术,研制了超高温非接触式测量模块,应用于项目超高温应变测试过程中。

## 5 试验装置的系统集成与功能验证试验

### 5.1 机械系统的集成

仪器整体以真空(气氛)环境箱为中心,其余各功能模块围绕真空(气氛)环境箱在空间上辐射布置,仪器在实现预定功能的同时,充分利用试样周围的空间,结构紧凑、高度模块化。各个功能模块集成完毕后,形成仪器整体如图 8 所示。



图 8 仪器整体照片

### 5.2 电气系统的集成

电气控制系统采用分布式双层架构进行开发,由中央管理层和模块控制层组成,处于顶层的中央管理层负责控制任务的综合协调和分配,处于底层的模块控制层通过相互独立的控制器实现数据采集和控制任务,并将关键数据经过通信网络传送到中央管理层。中央管理层对来自模块控制层的数据进行集中操作管理,具有控制响应快、精度高、可靠性高、易于扩

展等优点。电控系统架构如图 9 所示。



图 9 电控系统架构图

中央管理层主要由一台高性能工控机和一套自主开发的操作控制软件组成。通过操作控制软件可实现多种试验任务设计、试验参数设定、控制指令发送、解析底层实时数据、试验信息显示与存储等功能。模块控制层主要由 TMC 控制器、水冷机控制器、温度控制器、复合真空计等功能模块子控制单元组成。子控制单元间相互独立，互不干扰，可快速完成对应功能模块的控制任务，与中央管理系统采用相互独立的通信线路进行数据的实时传输。

### 5.3 仪器的功能验证测试

本试验装置在国家试验机质量检验检测中心开展功能验证测试，通过开展测力系统、同轴度、高温加载、应变测量、真空环境构建等系列检验检测对试验装置的技术指标进行验证，开展复杂力热耦合测试试验，验证仪器的适用性与先进性。测试数据见表 2，符合鉴定要求。

表 2 测试数据

检验项目	技术要求	实测结果
最大试验力	50kN	50.2 kN
力测量精度	±0.5%	0.43%
工作温度范围	600°C~2500°C	符合要求
温度梯度	≤20°C	18.5°C
真空度	≤5×10 <sup>-3</sup> Pa (25°C)	3.2×10 <sup>-3</sup> Pa (25°C)
气氛环境	≤0.13MPa (可调)	符合要求

## 6 结束语



该试验装置已按上述设计完成了具体的生产组装、调试与综合试验，并经过国家试验机质量检验检测中心的第三方检测，达到了预设的技术指标要求，顺利通过验收。该试验装置的成功研发具有一定的先进性及首创性，可为我国航空航天、核能等领域相关科研单位及企业应用的高温合金、复合材料等典型材料开展超高温极端环境（真空或充气环境）力学性能测试提供必备的仪器装备，提升我国在该领域的国际竞争力。

#### 参考文献:

- [1] 薛吉林,刘孝亮,范志超,等.1500°C高温真空（充气）环境蠕变疲劳试验装置研发[J].工程与试验,2016(1):61-64.
- [2] 刘利强,张为,马双伟,等.高温与超高温服役工况试验装置综述与展望[J].新技术新工艺,2018(12):5-7.
- [3] 刘利强,张显程,谈建平,等.严苛环境高温力学试验技术研究进展[J].机械工程学报,2021(16):3-15.