

# 超高温力学测试仪器

方岱宁<sup>1,2</sup>, 裴永茂<sup>2</sup>, 张如炳<sup>3</sup>, 曲兆亮<sup>1</sup>, 程相孟<sup>2</sup>, 成天宝<sup>4</sup>

(1.北京理工大学先进结构技术研究院, 北京 100081; 2.北京大学工学院, 北京 100871; 3.北京交通大学力学系, 北京 100044; 4.重庆大学航空航天学院, 重庆 400044)

**摘要:**开展服役环境下超高温材料力学行为研究对于提升高端装备热端部件的服役可靠性具有重要意义。超高温力学测试战略价值高, 技术难度大, 属于关键“卡脖子”技术难题。为此, 攻克了超高温有氧环境发热部件和力学加载夹具设计与制备、接触式变形测量等技术难题, 研制了 1950℃有氧环境/2600℃惰性环境超高温力学测试仪器, 发展了超高温拉伸、压缩、弯曲、剪切测试表征方法。针对多种材料开展了超高温力学性能测试, 积累了大量的超高温力学性能数据。测试仪器和方法应用于多家国防单位和高校院所, 得到了高度评价, 有效支撑了航天领域多个型号的研制。

**关键词:** 超高温; 力学测试; 仪器研制; 测试方法

**中图分类号:** (请在 <http://www.ztflh.com> 查询) **文献标识码:**

## Ultra-high temperature mechanical testing instrument

Fang Daining<sup>1,2</sup>, Pei Yongmao<sup>2</sup>, Zhang Rubing<sup>3</sup>, Qu Zhaoliang<sup>1</sup>,  
Cheng Xiangmeng<sup>2</sup>, Cheng Tianbao<sup>4</sup>

(1. Institute of Advanced Structure Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China; 2. College of Engineering, Peking University, Beijing, 100871, China; 3. Department of Mechanics, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China; 4. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044, China)

**Abstract:** Study on the mechanical behaviour of ultra-high temperature materials in service environments is of great significance to improve the service reliability of hot-end components for high-end equipment. Ultra-high temperature mechanical testing has high strategic value and high technical difficulty. It is a key "stuck neck" technical problem. Thus, some technical challenges, such as the design and preparation of heating components and mechanical loading fixtures, and contact deformation measurement under ultra-high temperature aerobic environments, were overcome. An ultra-high temperature mechanical testing instrument that can work in an aerobic

environment of 1950°C and an inert environment of 2600°C was developed. Ultra-high temperature tensile, compression, bending, and shear testing characterization methods were also developed. Ultra-high temperature mechanical property tests were conducted on a variety of materials. A large amount of ultra-high temperature mechanical property data was accumulated. The testing instrument and methods have been used in many national defense units and universities, and effectively support the development of multiple models in the aerospace field.

**Keywords:** Ultra-high temperature, mechanical testing, instrument development, characterization method

## 1 前言

超高温材料是指可在 1500-2800°C 温度范围内服役的材料，在高超飞行器、航空发动机/燃气轮机等高端国防武器与民用装备关键部件中具有重要的应用。随着我国高端装备的快速发展，超高温材料制成的热端部件的服役环境越来越苛刻，比如高超声速飞行器鼻锥处的最高温度已达 2000°C，航空发动机涡轮叶片处的最高温度已达 1600°C。高端装备热端部件的服役可靠性，与超高温材料在复杂极端载荷下的力学响应与失效行为密切相关，比如，超高温环境下陶瓷材料断裂失效行为导致热端部件多次出现热致失效问题。超高温材料的刚度和强度等力学性能会随着温度升高而发生演化，这种宏观力学性能具有温度相关性的机制还不清楚。超高温材料的服役过程涉及到热-力-氧多场耦合载荷作用，其组分、微结构和性能会发生动态变化，导致超高温环境下材料的失效破坏形式复杂多样，与常温差别很大。超高温极端环境下材料力学性能演化规律和失效机理的揭示，直接决定着装备的研制与升级是否成功。令人遗憾的是，由于超高温力学测试仪器的缺乏，当前材料的超高温实验数据还比较少，性能数据较为匮乏。因此，研制超高温力学测试仪器，发展超高温力学测试技术，开展超高温力学测试对于高端装备热端部件的研发和应用意义重大<sup>[1]</sup>。

美国国家技术标准局、普渡大学、俄罗斯高温研究院、德国基尔大学、联邦材料研究院等多家单位均建立了超高温力学实验技术中心，并开展了大量的研究工作。德国卡尔斯鲁厄大学研究了多种碳基材料的超高温力学性能<sup>[2]</sup>。由于军事敏感性，上述单位对于超高温力学测试系统的关键技术细节一直进行保密管理，公开报道的文献资料有限，甚至对我国进行相关仪器设备的出口禁运（目前只允许低于 1500°C 的高温力学测试仪器出口到我国）。因此，

只有走自主研发超高温力学测试仪器的道路,攻克“卡脖子”技术难题,才能满足我国科学研究和工程应用的需求。

我国由于经费和设备经验缺乏等原因,直到上世纪末期,哈尔滨工业大学、西北工业大学、航天科技集团一院七〇三所、长春试验机研究所等单位才陆续开展了超高温力学性能测试的探索工作,但已获得了很多有价值的成果<sup>[3,4]</sup>。哈工大杜善义、韩杰才等人基于超高温力学性能测试的理论,建立了高达 2800℃的惰性气氛下碳/碳复合材料快速通电加热测试技术<sup>[5]</sup>。上世纪九十年代初期,西北工业大学从乌克兰强度所引进了 2000℃真空或惰性气氛下陶瓷材料的超高温力学测试系统<sup>[6]</sup>。然而,上述测试仪器主要在真空或惰性气氛下工作,难以在空气等有氧环境下开展测试。超高温、有氧环境是高超飞行器和航空发动机/燃气轮机热端部件的典型服役环境。研究发现在真空和空气环境下 $\beta$ -SiAlON 材料弯曲强度随高温的变化规律迥然不同。在真空环境下,温度即使达到 1400℃,材料仍具有较高强度,而在空气环境下,温度达到 1200℃后,材料的强度就开始降低,这主要与材料的氧化行为有关<sup>[7]</sup>。为此,哈尔滨工业大学、清华大学、北京航空航天大学、中国航天科工集团三〇六研究所、中国建筑材料研究院等单位陆续研发了可在有氧环境下工作的超高温力学测试仪器。然而,考虑到超高温有氧环境下可用于高强度夹具的材料缺乏,应变等测试技术不成熟,国内外现有的超高温有氧环境力学测试仪器的测试温度仍然局限在 1600℃以下<sup>[8]</sup>,难以满足超高温材料的服役评价需求。

综上所述,虽然超高温力学测试研究取得了一定的进展,但是还较为分散,缺乏统一的测试方法和标准。特别地,现有的超高温力学测试仪器大多只可在真空/惰性环境下工作,有氧环境下的测试温度低(低于 1600℃)。因此,亟需攻克“卡脖子”技术难题,研制具有我国自主知识产权的测试温度高于 1600℃的超高温有氧环境力学实验仪器,发展超高温力学性能测试技术与表征方法,提升我国的超高温实验测试分析水平和能力,提高我国高端装备热端部件的服役可靠性。在此背景下,本文针对限制超高温有氧环境力学实验仪器的测试温度进一步提高的难题开展了技术攻关,研制了 1950℃有氧环境/2600℃惰性环境超高温力学测试仪器,发展了系列超高温力学测试方法。

## 2 关键技术攻关

### 2.1 超高温有氧环境发热部件设计与制备

目前国内外的商业化氧化环境加热装置主要采用硅钼、硅碳、氧化锆、铬酸钼等材料作为发热部件。如表 1 所示,上述发热体材料的炉体最高长时间使用温度局限在 1700℃下。

此外，考虑到材料的抗热震和抗氧化性能较差，加热装置的升温速率一般较慢。为此，创新性地提出了超高温陶瓷材料体系，通过抗氧化相和高导电相的比例优化，解决了发热部件材料的抗氧化性和稳定性差的问题，制备出了可耐 1800℃ 和 1950℃ 度的两类电阻型发热体<sup>[9]</sup>。

**表1 发热部件使用环境和最高工作温度**

发热部件材料	使用环境	最高工作温度/℃	备注
硅碳棒	有氧环境	1300	-
硅钼棒	有氧环境	1700	进口
氧化锆	有氧环境	-	辅助加热
铬酸镧	有氧环境	1700	过程极慢
超高温陶瓷	有氧环境	1950	抗氧化性和稳定性好



**图1 新型抗氧化超高温陶瓷电阻加热棒**

## 2.2 超高温有氧环境加载杆、夹具设计与制备

现有有氧环境下的加载杆、夹具大多采用氧化铝、氧化锆等氧化物材料和碳化硅等非氧化物材料。氧化铝、氧化锆等氧化物材料的强度会随着温度的升高衰减，在 1200℃ 以上的温度区间衰减尤为明显；碳化硅等非氧化物材料会发生高温氧化等行为，也会导致材料强度的迅速衰减。上述因素导致现有有氧环境下的加载杆、夹具使用温度难以超过 1600℃，难以满足超高温测试需求。针对上述问题，研制出了大尺寸、耐 1800℃ 有氧环境的超高温陶瓷基复合材料加载杆、夹具（拉伸、压缩、弯曲、剪切），如图 2 所示。由于材料配方技术保密，此处不列出具体制备工艺，只关注夹具的装配设计和加载优化。



**图2 超高温陶瓷基复合材料夹具**

## 1) 分段式加载部件设计方案

实验测试中, 位移载荷是通过固定在横梁和底座上的加载杆进行传递。加载杆的一部分需要处于极端超高温氧化环境下, 温度远远超出了传统金属的工作温度范围。超高温陶瓷材料具有耐高温抗氧化的优点, 能在 1800℃ 的温度下保持较好的强度和抗氧化性, 是超高温氧化环境下夹具的首选材料。但超高温陶瓷材料价格昂贵, 加工难度大。此外, 考虑到对裂纹的敏感性, 夹具尺寸越大, 制备过程中产生裂纹缺陷的可能性就越大, 从而大大降低了夹具性能的稳定性。为了降低成本, 提高性能稳定性, 将加载杆分成加热装置内部分和加热装置外部分。加热装置内部分的加载杆处于极端的环境下, 采用超高温陶瓷材料, 而加热装置外部分的加载杆部分温度相对较低, 采用镍基高温合金材料, 如图 3 所示。

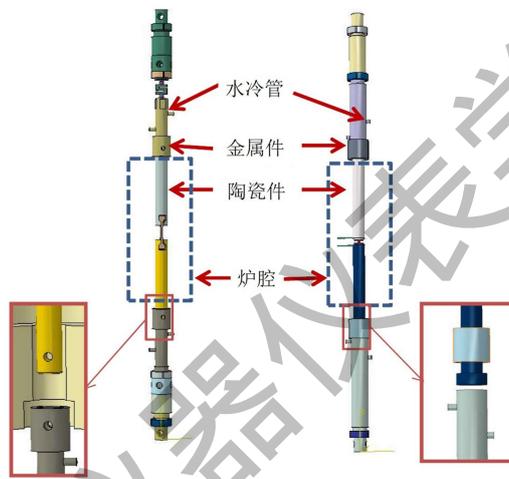


图3 分段式加载部件设计方案

但超高温陶瓷材料难以加工成螺纹结构, 这为超高温陶瓷加载杆与高温合金加载杆的连接带来了困难。针对拉伸测试, 考虑到其加载载荷较小, 采用销孔连接的方法。但对于载荷较大的压缩试验, 采用类关节方式进行连接, 其中陶瓷加载杆与金属加载杆的受力面在连接处没有减少, 从而避免在连接处发生破坏。

加载装置内的高温环境会不断对陶瓷加载杆加热, 热量会通过陶瓷加载杆传递到金属加载杆上。为避免金属加载杆温度过高, 在金属加载杆上靠近陶瓷加载杆的一侧设置了水冷通道进行冷却降温。同时, 也避免了热量以热传导的方式传递到试验机上, 对力传感器等元件的测量精度造成影响<sup>[10]</sup>。

## 2) 拉伸加载部件形状和尺寸设计优化

考虑到超高温陶瓷材料的加工难度大, 拉伸夹具很难设计成传统金属夹具的形状。Homes 设计了一种适用于平板试样的包含楔形槽的夹具, 楔形槽内壁紧贴试样外侧面, 从而实现了试样的可靠夹持。在初始实验中采用上述夹具形式, 发现实验后试样与夹具容易发

生粘接、卡紧，多次导致试样无法取出。这是由于楔形槽的设计导致夹具与试样接触的位置容易产生应力集中，此外，超高温有氧环境下超高温陶瓷夹具的表面会发生氧化反应生成一层液态氧化膜，冷却到室温后，液态氧化膜会凝固。上述两个因素综合作用导致试样与夹具发生粘结、卡紧。为了解决上述问题，借助有限元软件开展了拉伸加载部件的形状和尺寸的设计优化，将试样楔形角度由原来的  $8^\circ$  增加为  $45^\circ$ ，有效地降低了侧向力，减少了试样与夹具之间的接触面，降低了粘接风险。此外还优化了试样夹持段、过渡段及标距段的尺寸，保证试样在标距内断裂，如图 4 所示<sup>[10]</sup>。

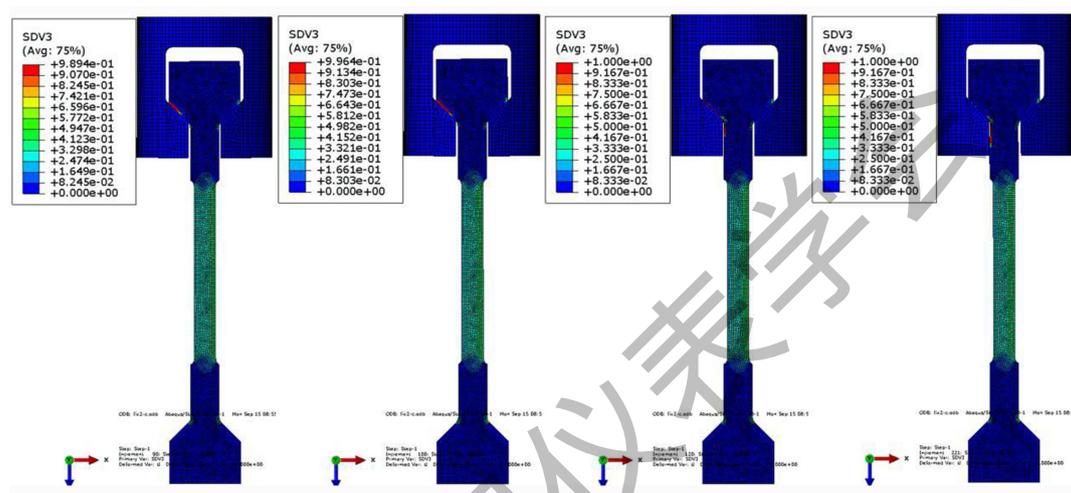


图4 拉伸夹具有限元设计分析

### 2.3 超高温有氧环境下接触式变形测量方法

超高温极端环境下材料的变形测试一直是超高温力学测试的一个技术难点。大部分超高温材料力学性能测试仪器均不能对试件变形进行精确测量，用力学加载装置的横梁位移替代试件的变形，这可能引起较大误差。

变形测量可分为接触式变形测量和非接触式变形测量。高温环境下热气流及试样表面的氧化会对非接触测量结果产生重要影响，因此采用接触式变形测量方法测量试样的变形量。如图 5 所示，变形测量装置主要包括超高温引伸杆、高精度变形传感器、水冷系统及五自由度可调支架。其中超高温引伸杆是核心元件，其需要将超高温有氧环境下的试样变形穿过加热装置外壁传递到处于加热装置外的相对低温区的传感器上。为此，引伸杆材料必须具有超轻质、抗氧化、耐高温等优异性能以保证可靠地传递变形信息。采用超高温陶瓷材料制备了适用于  $1800^\circ\text{C}$  氧化境下的引伸杆。超高温实验表明，引伸杆形貌基本没有发生变化，满足使用要求。



图5 超高温有氧环境下接触式变形测量装置

为了验证上述变形测量方法的准确性，在常温下与应变片的测量结果进行了对比。图6 (a) 为氧化铝试样拉伸过程中引伸计与应变片的测量结果。可以看出，两者均表现出良好的线弹性行为，计算得到的弹性模量差别较小，如图6 (b)。经过三次重复试验对比发现，引伸计测量结果与应变片测量结果误差不大于 10%。

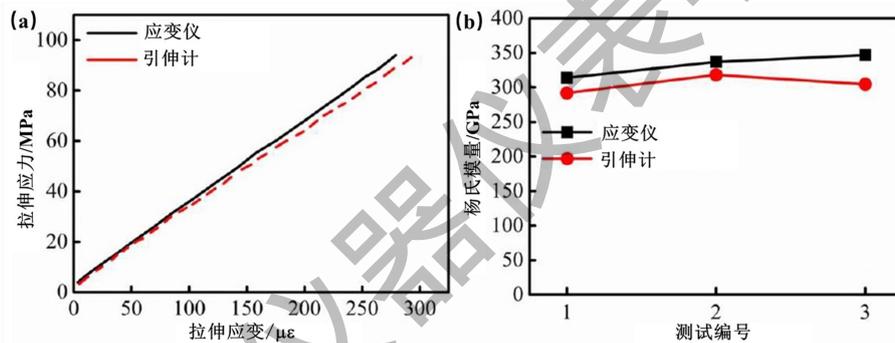


图6 常温下引伸计与应变片测量结果对比：(a) 拉伸应力-应变关系曲线；(b) 弹性模量

考虑到现有高温应变片的工作温度相对较低，通过测量氧化铝陶瓷材料在连续升温过程中的热变形来验证本接触式变形测量方法在高温环境下的准确性。测量了氧化铝材料从室温到 800℃ 和 1200℃ 过程中的热变形量，如图 7 所示。两次测量得到的氧化铝平均热膨胀系数分别为  $9.03 \times 10^{-6}$  和  $9.54 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，测量结果具有较好的重复性。文献报道的氧化铝膨胀系数范围为  $6 \sim 9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。考虑到材料的纯度差异，接触式变形测量结果与文献报道结果吻合较好，说明了变形测量方法的准确性<sup>[3]</sup>。

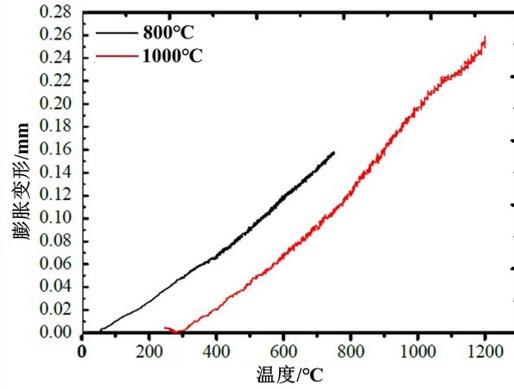


图7 高温下热膨胀变形测量结果

### 3 超高温力学性能测试仪器

#### 3.1 仪器基本情况与主要组成

攻克了上述技术难题后，自主研发了 2600°C 快速升温/多气氛/超高温力学性能测试仪器，如图 8 所示。该测试仪器主要由感应加热装置、环境箱、电子万能试验机、真空系统、惰性气体系统、水冷系统、感应加热电源、测温系统、控制系统等部分组成。试样加热基于电磁感应现象，力学加载采用电子万能试验机。温度测量采用热电偶和红外比色计相结合的方法，有氧环境 1800°C 以下用双铂铑热电偶进行测量，惰性气氛 2200°C 以下采用钨铼热电偶测量，超出热电偶测温范围用红外比色计测量。



图8 2600°C快速升温/多气氛/超高温力学性能测试仪器

#### 3.2 仪器主要技术指标与功能

该测试仪器的主要技术指标如下：

- 测试氛围：大气、惰性、真空、氧分压
- 惰性气氛测试温度范围：RT-2600℃
- 有氧环境测试温度范围：RT-1950℃
- 惰性气氛最高升温速率：500℃ min<sup>-1</sup>
- 有氧环境最高升温速率：250℃ min<sup>-1</sup>
- 氧分压可控范围：10Pa-1atm

该测试仪器有氧测试能力与国内外仪器主要技术指标对比情况如下：

**表2 有氧环境下国内外超高温力学性能测试仪器主要性能参数对比情况**

	环境加热		感应加热	
	国外	国内	国外	国内
最高测试温度 (℃)	1650	1800	1500	1950
升温速率 (℃ min <sup>-1</sup> )	10	5-10	50	250
氧分压	-	-	-	10 Pa-1 atm
研发单位	美国南方研究 所	北京大学	德国联邦材料研究 院	北京理工大学

该测试仪器可实现超高温有氧、惰性环境下拉伸、压缩、弯曲和剪切等力学测试以及氧化、应力氧化、热冲击、冷冲击等模拟服役条件考核。

### 3.3 超高温力学测试夹具和试样要求

#### 1) 拉伸测试

拉伸试样一般由标距段、过渡段及夹持段三部分组成。拉伸试样要求试样在拉伸过程中标距段部分仅受到单向拉伸载荷的作用，处于单向拉伸应力状态，并且拉伸破坏的位置要在标距段范围内。拉伸试样的夹持端需要跟拉伸夹具匹配，可实现可靠夹持。具体的拉伸测试方案和试样尺寸如图 9 所示<sup>[1]</sup>。

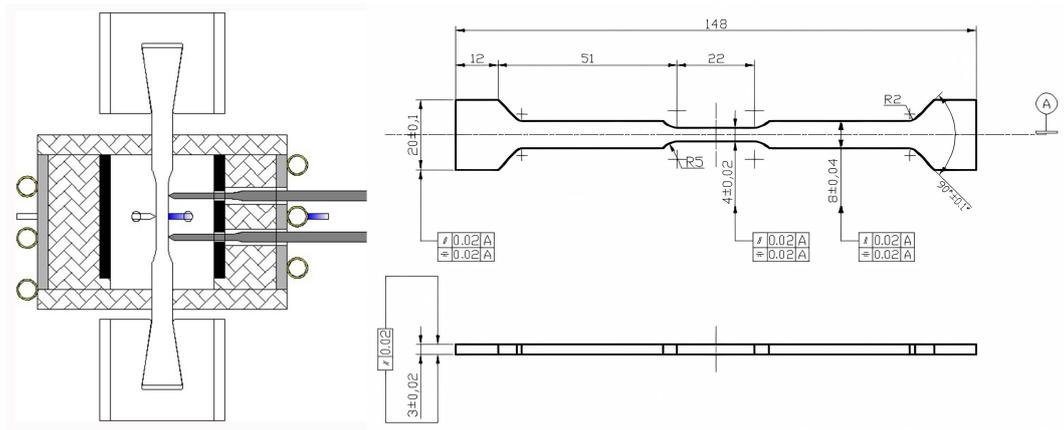


图9 超高温拉伸测试方案与试样尺寸

## 2) 压缩测试

为了模拟压缩载荷作用，利用上下压杆对试样施加压缩作用，试样采用柱状设计，横截面为正方形，上述设计可以保证试样呈现典型的压缩破坏模式。具体的压缩测试方案和试样尺寸如图 10 所示。

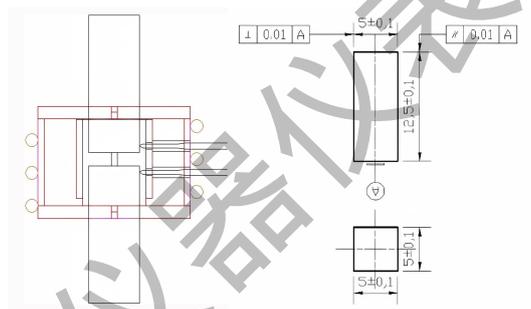


图 10 超高温压缩测试方案与试样尺寸

## 3) 弯曲测试

弯曲测试参照 GB/T 6569-2006《精细陶瓷弯曲强度试验方法》，采用三点弯曲加载方案，利用上压杆在试样中心对试样施加压缩作用。弯曲测试所采用的试样为长条形设计，尺寸为  $3 \times 4 \times 36 \text{ mm}$ 。

## 4) 剪切测试

早在 1967 年，Iosipescu 等设计了一种剪切试验方法，该方法可以在试样的剪切面上产生均匀的剪应力，能够获得较好的剪切效果。但该方法试验夹具比较复杂不能用于高温环境下的剪切测试。Slepetz 采用反四点弯曲的方法获得了在室温下氧化铝与环氧树脂的剪切强度。Pierron 通过增加垫片的方法解决了压头局部应力集中而导致损伤的问题。但由于垫片与试样接触面较大，容易在高温环境中出现粘结问题，同时结构比较复杂，难以将超高温陶瓷材料加工成夹具。

在上述研究的基础上，提出了如图 11 所示的超高温剪切测试方案。为了解决反四点弯曲夹具压头局部受力集中问题，采用平面压头的方法，同时避免了增加垫片的带来的一系列问题。试样形状与尺寸与 Iosipescu 试样相同，上下压台具有一定的刚度，保证加载时夹具不变形，试验时下压台放置在固定底座上。而上压台与下压台关于试样中心成中心对称放置，形成反对称的加载形式。在上压台设计了一个圆柱棒，压缩压头通过圆柱棒对上压台传递集中载荷，并保证集中载荷的作用点过试样的剪切面，从而实现试样的纯剪切状态<sup>[3, 12]</sup>。

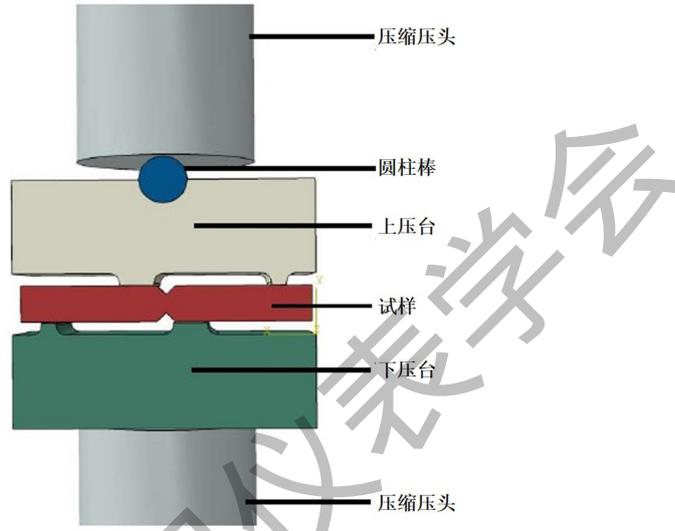


图 11 超高温剪切测试方案

### 3.4 常用测试流程

首先，进行试样装夹，使外加载荷可靠地传递到试样上，安装固定超高温引伸计，通过施加侧向顶紧力的方式，保证引伸计的测量臂与试样或夹具可靠固定；然后，直接启动高温加热装置，将试样加热到设定的目标温度，保温 30-60min，以使得试样内的温度分布均匀且稳定，如需在高温氛围环境下开展试验，在升温前需要实现测试腔内的真空或氛围环境，然后启动高温加热装置；氛围实现、温度稳定后，通过力学性能试验机选择加载方式、设定加载曲线（包括控制载荷加载和控制位移加载）、设置加载速率（一般设定为 0.05mm/min），对试件进行力学加载直至满足试验终止条件；在此过程中同时采集载荷、温度、变形信息，绘制不同温度下的载荷位移曲线、应力应变曲线；最后，关闭高温加热装置，将试样自然降温，降低到室温后，将试样取出。实验结束后，通过分析上述曲线，计算得到不同温度下的模量、强度和断裂韧性等力学性能参数。

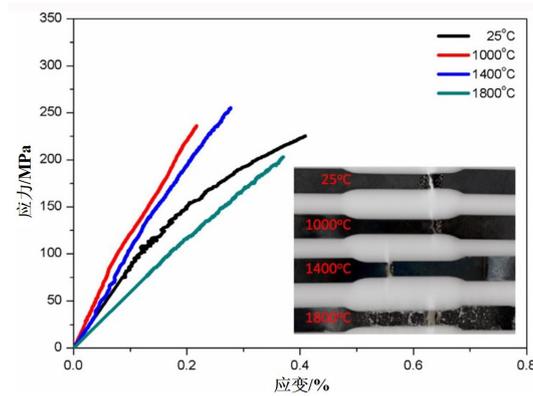


图 12 大气环境不同温度下碳/碳化硅陶瓷基复合材料典型拉伸应力-应变曲线

## 4 代表性测试结果

### 4.1 有氧环境下超高温力学性能测试

#### 1) 1800°C 大气环境下超高温拉伸性能测试

选用二维平纹编织碳/碳化硅陶瓷基复合材料作为测试试样。预制体由T300-1K碳纤维平纹布叠加而成，相邻碳布之间呈90°角排布，复合材料碳纤维体积含量约为40%，密度约为2g/m<sup>3</sup>。开展了大气环境下超高温拉伸试验，测试温度分别为室温、1000°C、1400°C和1800°C。图12给出了大气环境、不同温度下碳/碳化硅陶瓷基复合材料典型的拉伸应力-应变曲线。在室温下材料先表现出线性变形行为，然后是非线性行为特征，但随着温度的升高，非线性行为特征迅速降低。图13给出了材料杨氏模量和拉伸强度随温度的变化关系。随着温度的升高，杨氏模量先逐渐增加，达到1000°C后下降。拉伸强度先逐渐增加，达到1400°C后下降<sup>[13]</sup>。

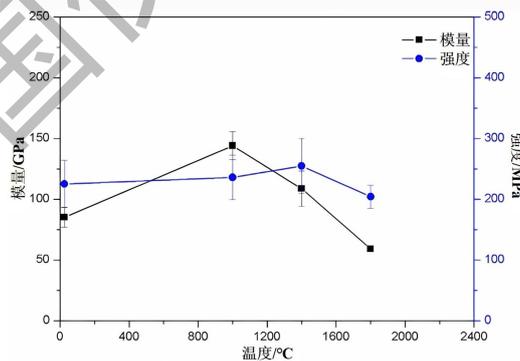


图 13 大气环境下材料杨氏模量和拉伸强度随温度变化关系

#### 2) 1500°C 有氧环境下超高温剪切性能测试

选取碳化硅/碳化硅陶瓷基复合材料作为超高温剪切试样，编织构型为±45°。测试温度包括室温、1200、1300、1400 和1500°C。图14给出了不同温度下试样的名义剪切应力与横梁位移的变化曲线图。从常温和1200°C下的曲线可以看出，当应力达到最大值后试样发生断裂，表现为明显的脆性断裂特性。而当温度升高到1300°C时，试样断裂前经历了短暂的塑形

变形；随着温度进一步升高，塑形变形越来越明显。因此可以推断，碳化硅/碳化硅陶瓷基复合材料的韧脆转变温度在1300℃附近。另外，当温度升高到1200和1300℃时，实验测得的剪切强度仅为12.8MPa，与常温下的178MPa相比大大降低。温度进一步升高后，试样强度的相对衰减幅度有所减小，1400和1500℃的剪切强度分别为8.8和6.2MPa。

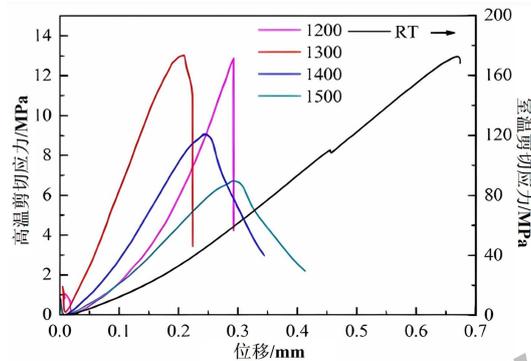


图 14 大气环境不同温度下碳化硅/碳化硅陶瓷基复合材料的剪切应力-位移曲线

从剪切破坏形貌图15可以看出，试样断口与剪切面呈45°倾斜角，并没有在受剪面发生剪切断裂。事实上，±45°二维编织碳化硅/碳化硅陶瓷基复合材料的受拉性能较弱，其45°方向会出现较大拉应力。当拉应力值超过拉伸应力极限时，随即发生拉伸断裂破坏<sup>[3]</sup>。



图 15 SiC/SiC 复合材料试样破坏形貌

## 4.2 惰性环境下超高温力学性能测试

选用碳/碳陶瓷基复合材料作为测试试样。测试温度包括室温、2000、2300 和2600℃。惰性环境不同温度下碳/碳陶瓷基复合材料的三点弯曲载荷-位移曲线如图16所示。碳/碳材料在室温表现为脆性断裂，加载过程中，载荷迅速增加直到受拉面裂纹开始扩展，然后由于纤维的桥接作用逐渐降低。在2000℃时，碳/碳材料先表现出线性变形行为，然后表现出塑性变形行为，在最大载荷处，受拉面发生断裂，但余下的部分还能承担一定的载荷，随着加载继续，剩余部分逐渐断裂，由于足够强的塑性，样品并没有完全断开。与2000℃相比，碳/碳材料在2300℃时受拉面的碳纤维被逐渐拉断，在最大载荷后出现了高应力的阶梯断裂形

式。在2600℃，碳/碳材料完全表现为塑性变形行为，不能被弯断。

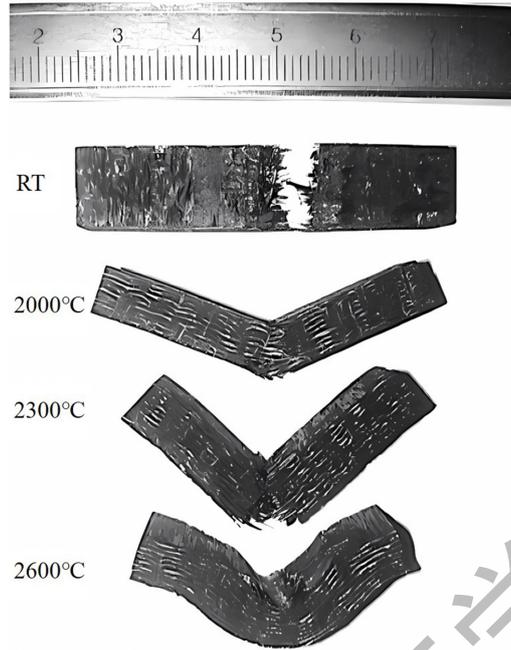


图16 惰性环境下碳/碳陶瓷基复合材料弯曲破坏形貌

图17给出了碳/碳材料的三点弯曲强度和杨氏模量随温度的变化关系。温度从室温升高到2000℃，碳/碳材料的三点弯曲强度逐渐增加，从2000℃升高到2300℃，强度缓慢下降，从2300℃升高到2600℃，强度急剧降低。杨氏模量总体上和弯曲强度具有类似的温度相关性，不同之处在于，杨氏模量在2000℃后下降地更迅速。从室温到2000℃，弯曲强度的增加是由于热处理工艺产生的碳基体在碳纤维束界面附近积累的热应力得到释放。从2300℃升高到2600℃，强度的急剧降低是由于碳纤维和基体的力学性能在2300℃后迅速降低所致<sup>[15]</sup>。

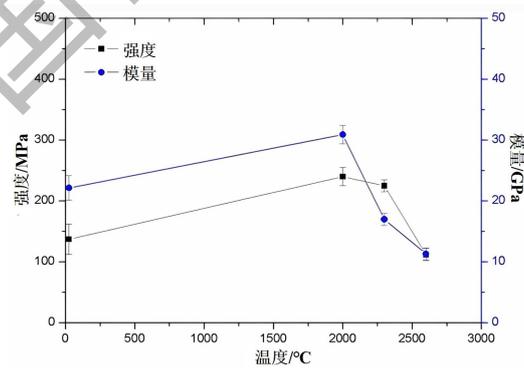


图17 惰性气氛下碳/碳材料的三点弯曲强度和杨氏模量随温度的变化关系

## 5 典型工程应用

本测试仪器目前已应用于高超声速飞行器及航空发动机等国防装备领域，服务于国家重大专项工程和关键技术攻关中的高温热防护材料与结构的力学性能评价，为航天一院、航天三院、航天四院、航天十一院、火箭军、清华、北大、哈工大、中南大学、华南理工等航天

院所和高校测试了大批试件，提供了数据支持和实验验证，并得到了这些应用单位的高度评价，有效地支撑了多个型号的材料筛选和工艺优化研究。根据前期经验和数据积累，起草中国机械加工工艺协会团体标准《高温力学性能测试标准》一项。

## 6 总结和展望

本文攻克了超高温力学测试“卡脖子”技术中的多个关键难题，研制了1950℃有氧环境/2600℃惰性环境超高温力学测试仪器，发展了系列超高温力学测试表征方法。研制的测试仪器和发展的测试方法为超高温材料失效行为研究提供了性能数据支撑和失效破坏模式，有效地支撑了高超声速飞行器及航空发动机等高端装备的研制和应用。

在制备、加工、运输、组装过程中，超高温材料常因加工环境、外界受力、制造工艺、储藏环境、人为操作等因素，在内部产生微裂纹、孔隙、界面脱粘等缺陷。上述缺陷会对材料的力学性能产生显著影响。然而，现有的超高温力学测试研究仍然主要集中在宏观力学性能和表面变形场等测量，较少关注材料内部缺陷的影响，不足以完全揭示材料失效机理。亟需发展超高温环境下内部损伤过程参数测试仪器和表征方法，发展超高温内部损伤过程参数提取、内部变形场测量与强度定量分析方法，完成从传统的材料宏观“高温力学性能测量”向基于材料内部变形场、制造缺陷损伤破坏机理的“高温强度与寿命定量评价”的转变提升。

### 参考文献:

- [1]方岱宁, 李卫国. 超高温材料力学[M]. 北京: 科学出版社, 2022: 1-7.
- [2]孟松鹤. 碳毡/碳复合材料超高温性能与热结构行为研究[D]. 博士学位论文, 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1997. 41-54.
- [3]程相孟. 超高温陶瓷材料试验测试技术与表征方法[D]. 博士学位论文, 北京: 北京大学, 2016. 4-5.
- [4]罗鸿枢, 刘树信. 碳/碳复合材料高温力学性能测试[J]. 宇航材料工艺, 1984; 2: 32.
- [5]韩杰才, 赫晓东, 杜善义, 等. 多向碳/碳复合材料超高温力学性能测试技术研究[J]. 宇航学报, 1994, 15(4): 17-23.
- [6]乔生儒, 李枚, 韩栋, 等. 3D-C/SiC的高温弯曲性能和后处理对弯曲性能的影响[J]. 机械强度, 2003, 25(5): 495-498.
- [7]Klemm H, Herrmann M, Reich T, *et al.* High Temperature Properties of Mixed  $\alpha/\beta$ -SiAlON Materials[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1998, 81(5): 1141-1148.

- [8]Fang D, Li W, Cheng T, *et al.* Review on mechanics of ultra-high-temperature materials[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2021, 37(9): 1347-1370.
- [9]Zhang R, Cheng X, Fang D, *et al.* Ultra-high-temperature tensile properties and fracture behavior of ZrB<sub>2</sub>-based ceramics in air above 1500 °C [J]. *Materials Design*, 2013, 52:17-22.
- [10]He R, Fang D, Wang P, *et al.* Electrical properties of ZrB<sub>2</sub>-SiC ceramics with potential for heating element applications[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(7): 9549-9553.
- [11]Cheng X, Qu Z, He R, *et al.* An ultra-high temperature testing instrument under oxidation environment up to 1800° C[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(4).
- [12]Cheng T, Wang X, Zhang R, *et al.* Tensile properties of two-dimensional carbon fiber reinforced silicon carbide composites at temperatures up to 2300°C[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 40(3): 630-635.
- [13]Qu Z L, Luo S Y, Bai H R, *et al.* A modified iosipescu method to study in-plane shear strength of C/SiC composites at elevated temperatures in air[J]. *Experimental Mechanics*, 2021, 61(8): 1323-1331.
- [14]Cheng T, Zhang R, Pei Y, *et al.* Tensile properties of two-dimensional carbon fiber reinforced silicon carbide composites at temperatures up to 1800°C in air [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2019, 31: 100546.
- [15]Cheng X, He R, Qu Z, *et al.* High temperature flexural strength of B<sub>4</sub>C-ZrB<sub>2</sub> ceramic at 1000–1600° C in air[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(10): 14574-14578.
- [16]Cheng T, Qu Z, Li W, *et al.* Fracture strength behaviors of ultra-high-temperature materials[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2020, 87(3): 031006.
- [17]Cheng T. Ultra-high-temperature mechanical behaviors of two-dimensional carbon fiber reinforced silicon carbide composites: Experiment and modeling [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(4): 2335-2346.