

# 碳/碳复合材料超高温力学性能测试研究

武保华 刘春立 张涛 李德禄 刘树信

( 航天材料及工艺研究所 北京 100076 )

**摘 要** 超高温力学性能测试系统采用通电的方法对试样进行加热,并利用自行研制的引伸仪解决了变形测量问题。采用此系统对碳/碳复合材料进行超高温测试,获得了 3 000 范围内材料拉伸和压缩性能随温度的变化关系,并给出了相应的应力—应变曲线。

**关键词** 碳/碳复合材料,超高温,力学性能,拉伸,压缩

## Research on Mechanical Properties Test of C/C Composites at Ultra High Temperature

Wu Baohua Liu Chunli Zhang Tao Li Delu Liu Shuxin

( Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology Beijing 100076 )

**Abstract** In the test system, specimen was self-heated and sensor was made to measure strain of sample at ultra-high temperature. Mechanical properties of C/C composites were tested with this system. Tensile and compressive properties below 3 000 were gained, and its stress-strain curves were also presented.

**Key words** C/C composites, Ultra high temperature, Mechanical properties, Tension, Compress

### 1 前言

作为耐热结构材料,碳/碳复合材料由于在超高温下保持高强度、良好的烧蚀性能以及复合材料的可设计性,在航空航天等领域得到重要应用<sup>[1]</sup>。全面准确地了解碳/碳复合材料的超高温力学性能,对于其研制、应用以及部件的热应力、热强度分析及防热设计是至关重要的。碳/碳复合材料的超高温力学性能测试要在超高温环境下进行,超高温环境的获得、试样的夹持、应力和试样标距段变形的测量等成为技术难题<sup>[2]</sup>。“九五”期间,航天材料及工艺研究所研制成功了我国唯一的 3 000 超高温力学性能测试系统,并可以在较宽的试验条件范围内准确获得碳/碳复合材料的高温力学性能。利用这套测试系统,开展了碳/碳复合材料超高温力学性能测试

研究方面的大量工作,尤其对力学性能随温度变化的拐点做了重点研究。

### 2 超高温力学性能测试系统的工作原理

#### 2.1 超高温环境的获得

利用碳/碳复合材料的导电特性,采用给试样通电加热的方式,可使试样快速达到试验温度<sup>[3,4]</sup>。为使试样标距段温度均匀,在试样标距段两端各加一对辅助加热电极。试验中通过计算机控温程序<sup>[5]</sup>,实现快速升温 and 自动控温,使试样标距段达到均匀的试验温度,并保证试验全过程中温度恒定。

超高温力学性能测试系统的测试温度范围为室温 ~ 3 000 ;控温精度不大于试验温度的 0.5 % ;试样标距段轴向温度梯度不大于试验温度的 5 % ;升温速率在 100 /s ~ 2 000 /s 之间可调。

收稿日期:2001-08-26

武保华,1973 年出生,硕士,主要从事材料力学性能检测工作  
宇航材料工艺 2001 年 第 6 期

## 2.2 超高温下变形的测量

为了精确测定超高温环境下试样标距段变形,研制了接触式超高温引伸仪<sup>[6]</sup>。引伸仪的工作状态见图1。

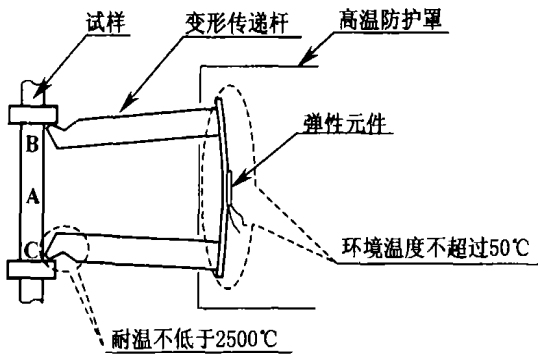


图1 引伸仪的工作状态示意图

Fig.1 Working state of extensometer

图中A、B、C处分别为试验过程中比色高温计的中、上、下测温点。试验证实:变形传递杆与试样接触部位的温度不高于2500,在此温度下变形传递杆刚性良好,确保试样标距段微小变形的正确传递。弹性元件的工作环境湿度不高于50,确保引伸仪测量试样标距段变形的正确性。引伸仪的标定试验表明:引伸仪测量分辨率小于0.5 μm;工作量程不小于2 mm,测量相对误差均在±0.5%以内。

## 3 试验

试验用的碳/碳复合材料增强体为聚丙烯腈碳纤维三向正交编织结构,基体为沥青碳。试样材料包括母体和芯部两个大类,根据纤维方向以及母体与芯部的区别分类为母体 $xy$ 向、母体 $z$ 向、芯部 $xy$ 向、芯部 $z$ 向。

试验分拉伸和压缩测试,包括强度、弹性模量、断裂应变等内容。温度点为室温~3000,目的在于找出各项力学性能数据随温度变化的拐点。加载速率为2 mm/min,升温速率约为500/s左右。

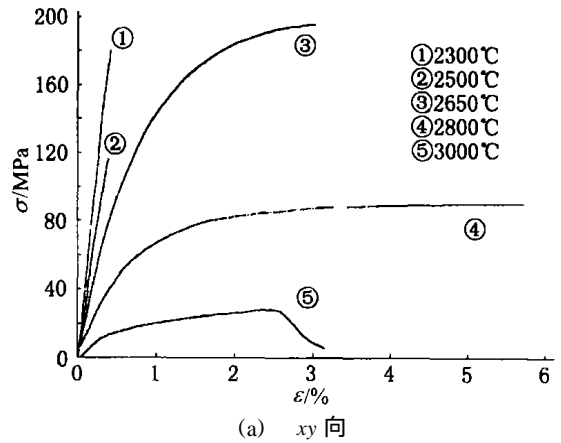
## 4 结果与讨论

### 4.1 拉伸性能

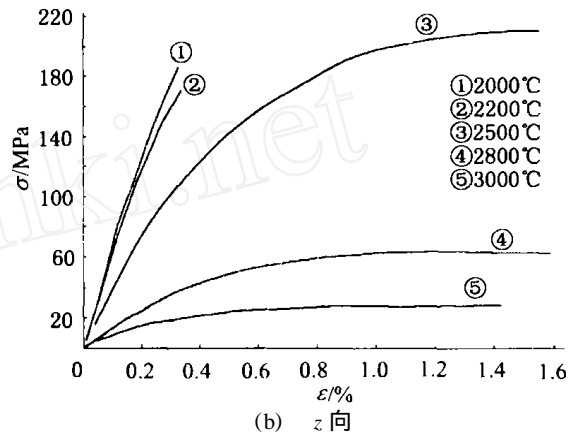
#### 4.1.1 母体 $xy$ 向和母体 $z$ 向

图2为母体 $xy$ 向和母体 $z$ 向不同温度的拉伸应力—应变曲线。从应力—应变曲线来看,母体 $xy$ 向在2500以前呈脆性断裂,2650以后开始出现屈服现象,而母体 $z$ 向在2500时已经出现屈服。随着温度升高,材料的应变急剧增加,模量却不断下

降,最终呈塑性断裂。



(a)  $xy$ 向

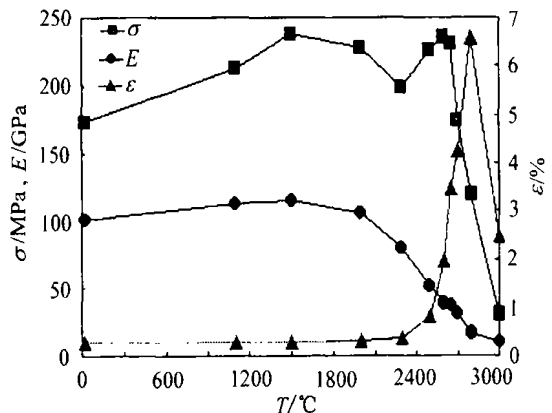


(b)  $z$ 向

图2 母体拉伸应力—应变曲线

Fig.2 Tensile - curves of matrix

母体 $xy$ 向和母体 $z$ 向的拉伸性能与温度的关系见图3。由图3看出,母体 $xy$ 向和母体 $z$ 向的拉伸强度在室温~1500区间随温度升高而升高,在1500~2600区间先下降后上升,在2600左右达到第二高点,此后急剧下降。



(a)  $xy$ 向

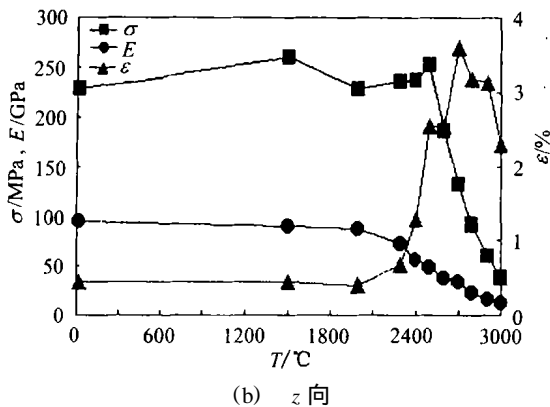


图3 母体拉伸性能—温度关系

Fig. 3 Tensile properties of matrix vs temperature

母体  $xy$  向的拉伸模量在 2 000 前随温度升高缓慢升高,此后迅速下降,而母体  $z$  向的拉伸模量先是在 2 000 以前略有下降,而后迅速下降。母体  $xy$  向和  $z$  向的拉伸断裂应变在 2 300 前均变化不大,过了 2 300 后迅速上升,约在 2 800 左右达到峰值。从同温度点来看,母体  $z$  向的拉伸强度高于母体  $xy$  向,但拉伸模量和拉伸断裂应变均偏低。

#### 4.1.2 芯部 $xy$ 向和芯部 $z$ 向

图 4 为芯部  $xy$  向和芯部  $z$  向不同温度的拉伸应力—应变曲线。从曲线看,芯部  $xy$  向在 2 500 以前呈脆性断裂,2 650 以后呈塑性断裂,而芯部  $z$  向从 2 500 时便出现屈服,呈塑性断裂。

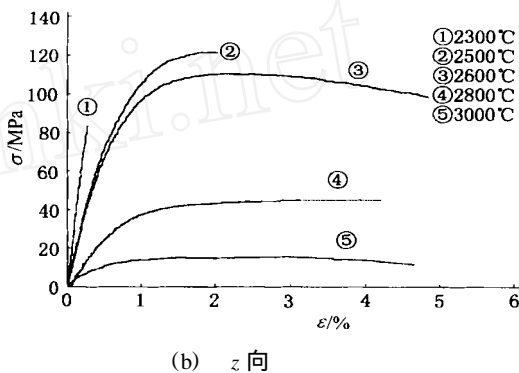
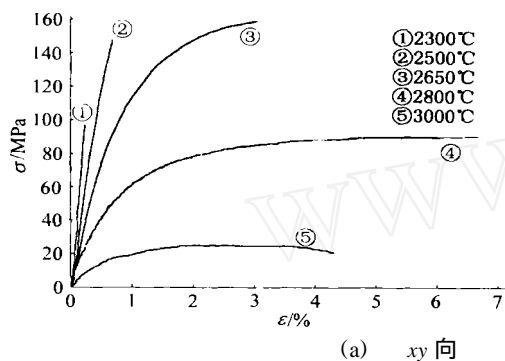


图 4 芯部拉伸应力—应变曲线

Fig. 4 Tensile - curves of core specimens

芯部  $xy$  向和芯部  $z$  向拉伸性能与温度的关系见图 5。由图 5 看出,芯部  $xy$  向和  $z$  向的拉伸强度先是随温度的升高而升高,在 2 000 出现高点后下降,接着在 2 300 出现低点,随后上升在 2 500 达到第二高点,此后迅速下降。芯部  $xy$  向和  $z$  向的拉

伸模量在 2 000 出现高点,此后下降。芯部  $xy$  向和  $z$  向的拉伸断裂应变在 2 300 前变化不大,而后迅速上升,在 2 700 ~ 2 800 处达到峰值,随后下降。从同温度点来看,芯部  $xy$  向的拉伸强度、拉伸模量和拉伸断裂应变均稍高于芯部  $z$  向。

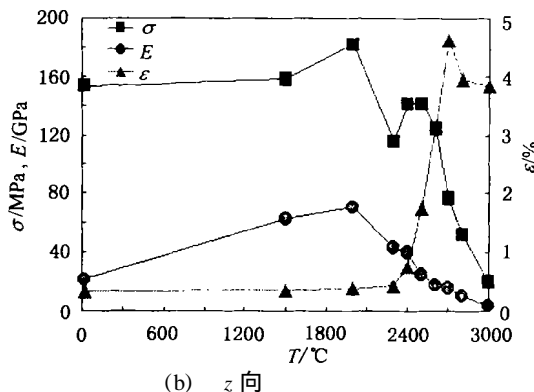
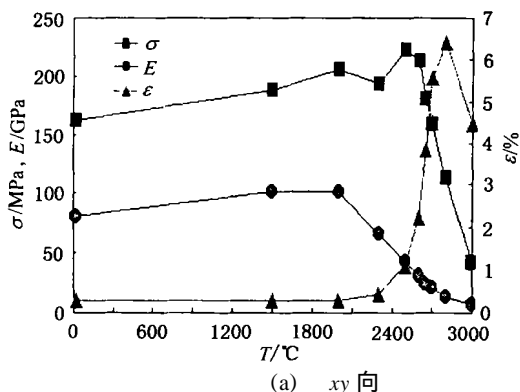


图 5 芯部拉伸性能—温度关系

Fig. 5 Tensile properties of core specimens vs temperature

## 4.2 压缩性能

### 4.2.1 母体 $xy$ 向和母体 $z$ 向

图 6 为母体  $xy$  向和母体  $z$  向不同温度的压缩

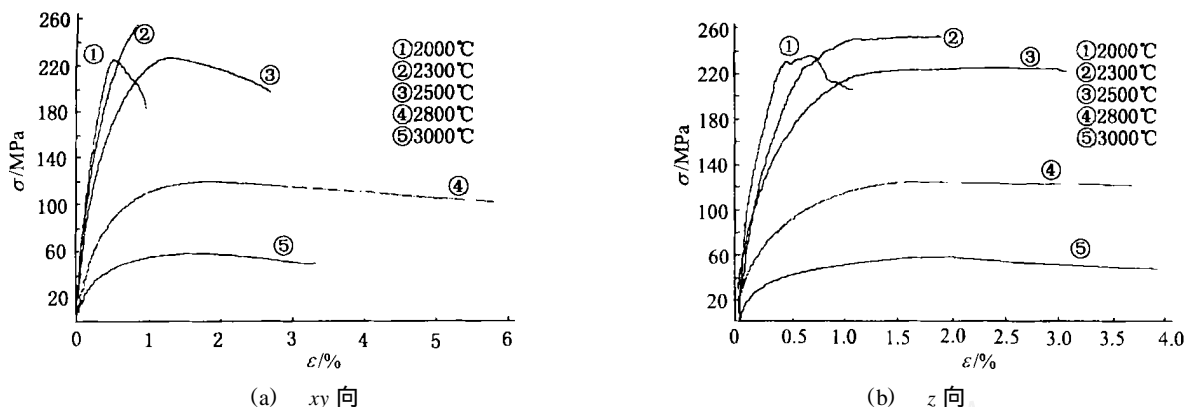


图 6 母体压缩应力—应变曲线

Fig. 6 Compressive stress-strain curves of matrix

母体  $xy$  向和  $z$  向压缩性能与温度的关系见图 7。由图 7 看出,母体  $xy$  向和  $z$  向的压缩强度先是随温度的升高而升高,在 2 300 达到最高点,此后迅速下降。母体  $xy$  向和  $z$  向的压缩模量在 2 000 前随温度升高缓慢上升,此后下降。母体  $xy$  向的压

缩断裂应变随温度上升一直呈上升趋势,而母体  $z$  向在 2 600 前呈上升趋势,2 600 处出现峰值后下降。从同温度点来看,母体  $xy$  向的压缩强度和压缩模量较母体  $z$  向相差无几,但压缩断裂应变要偏低些。

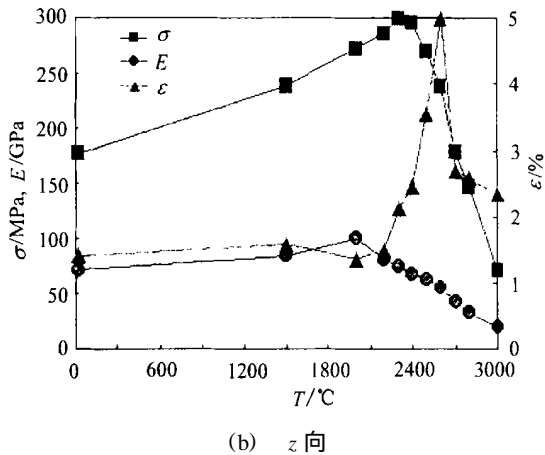
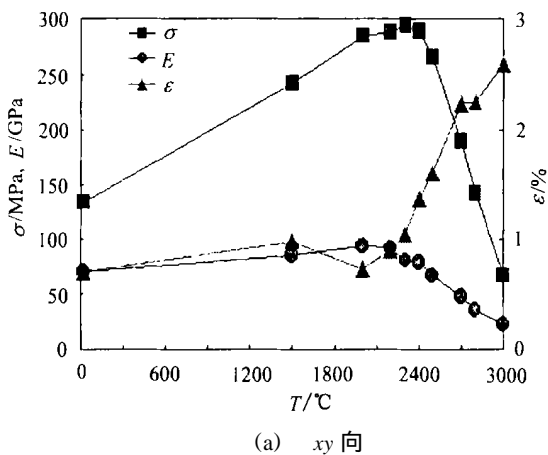


图 7 母体压缩性能—温度关系

Fig. 7 Compressive properties of matrix vs temperature

### 4.2.2 芯部 $xy$ 向和芯部 $z$ 向

图 8 为芯部  $xy$  向和芯部  $z$  向不同温度的压缩应力—应变曲线。从曲线看,随着温度的升高,芯部  $xy$  向和芯部  $z$  向由脆性断裂最终过渡到塑性断裂。

芯部  $xy$  向和芯部  $z$  向的压缩性能与温度的关系见图 9。由图 9 看出,芯部  $xy$  向和  $z$  向压缩强度的变化趋势与母体  $xy$  向和  $z$  向相同,在 2 300 前随温度的升高而升高,而后下降。芯部  $xy$  向和  $z$  向的

压缩模量在 2000 前随温度升高缓慢上升,此后明显下降。芯部  $xy$  向和  $z$  向的压缩断裂应变均随温度的上升而升高。从同温度点来看,芯部  $xy$  向的压

缩模量高于芯部  $z$  向,但压缩断裂应变则要偏低许多,几乎为芯部  $z$  向的一半。

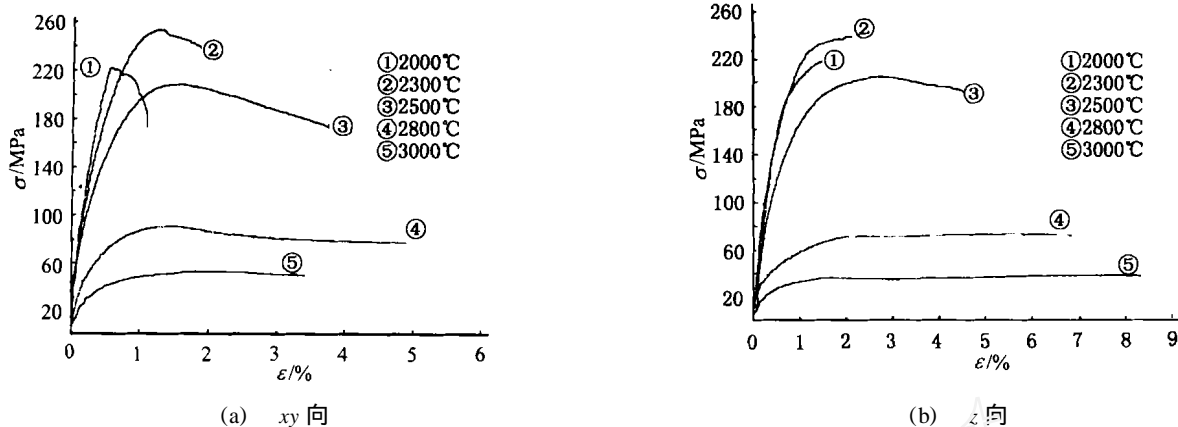


图 8 芯部压缩应力—应变曲线  
Fig. 8 Compressive stress-strain curves of core specimens

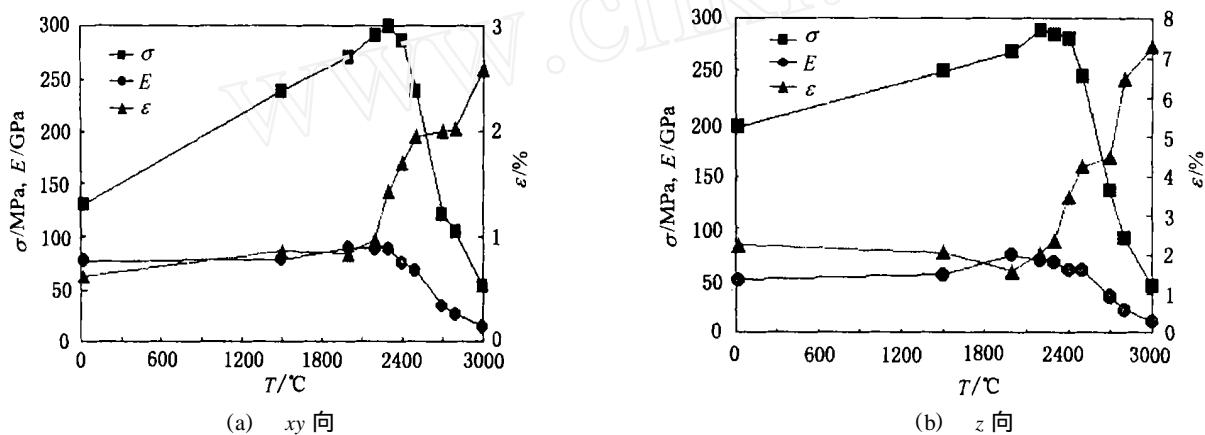


图 9 芯部压缩性能—温度关系  
Fig. 9 Compressive properties of core specimens vs temperature

### 4.3 综合误差分析

试验机载荷测量系统的相对误差值不得大于  $\pm 0.5\%$ ; 试样截面积的测量相对误差不大于  $\pm 0.5\%$ ; 超高温引伸仪的测量相对误差不大于  $\pm 1\%$ , 加上标距、温度等误差因素, 估算弹性模量的测试相对误差约  $\pm 3\%$  左右。

### 5 结论

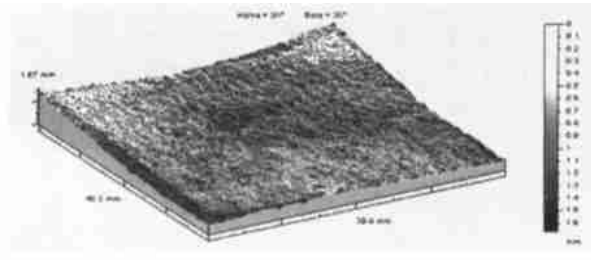
(1) 超高温测试系统成功完成了针对碳/碳复合材料的超高温拉伸和压缩性能测试任务, 并在国内首次完整获得碳/碳复合材料 3000 的超高温拉伸和压缩性能数据, 整个测试系统具有较高的可靠性  
宇航材料工艺 2001 年 第 6 期

和稳定性, 并且有相当高的试验效率。

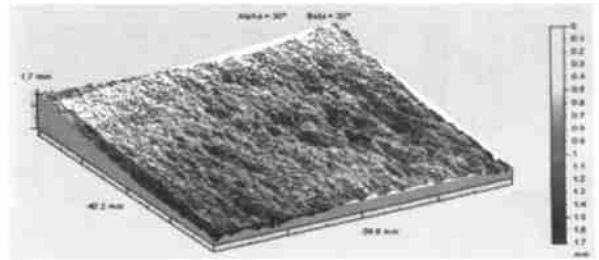
(2) 碳/碳复合材料的超高温力学性能数据准确的反映了材料力学性能随温度的变化规律, 同时反映了不同批次和不同纤维方向材料力学性能上的差异。同一批次、取向材料在相同测试条件下力学性能数据具有较好的稳定性。

(3) 从试验数据的分布来看, 个别数据与平均值之间的偏差较大。为减少试验因素和材料不匀质对测试数据的影响, 适当增加各测试温度点的试样数量非常必要。

(下转第 76 页)



(c) SSv60



(d) SS5Dv50

图4 测试表面三维层色图

Fig.4 3D maps of test surfaces

三维层色图更直观地再现材料表面的烧蚀状况,并将其最大烧蚀量和烧蚀后的纹理清楚呈现出来。

#### 4 结论

从测试和分析结果可以看出:三维四向结构碳/酚醛复合材料,随着材料纤维体积分数的增加其烧蚀性能得到明显改善,当纤维体积分数增大时能够提高材料的烧蚀性能;较低纤维体积分数(50%)的三维五向结构碳/酚醛复合材料的烧蚀性能优于较高纤维体积分数(55%)的三维四向结构的碳/酚醛

复合材料,其烧蚀量小,烧蚀后材料表面平整度良好,具有良好的烧蚀性能。

由于影响复合材料烧蚀性能的因素很多,测试数据有限,测试结果仅供参考,尚不能给予定性表征,准确表征材料的烧蚀性能还需做大量的研究工作,但文中所述的测试和分析方法是可行的。

#### 参考文献

1 Frand K. KO. Three-dimensional fabrics for composites. Textile Structural Composites, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam printed in Netherlands, 1989:129 ~ 171

(上接第71页)

#### 参考文献

1 Kazumi H. Strain measurements by image processing techniques and its application to ultra-high temperature tensile testing of carbon/carbon composites. In: Processing of the 5th Japan-U. S. Conference on Composite Materials, Tokyo, Japan, 1990:39

2 罗鸿枢,刘树信. 碳/碳复合材料高温力学性能测试. 宇航材料工艺, 1984;2:32

3

3300K, 1994;(9):

17

4 Babcock S G, Hochstein P A. High strain-rate testing of rapidly heating conductive materials to 7000F. Experimental Mechanics, 1970;10(2):78

5 Marion R H. A short-time, high temperature mechanics testing facility. Journal of Testing and Evaluation, 1978;6(1):3

6 Ultra-high temperature testing capability at OAK ridge national laboratory for carbon materials in air, inert gas and vacuum. DE 92004445 (92)