

# 多向 C/C 复合材料烧蚀表面粗糙度初步研究

石晓斌 王金明 许正辉 杨志翔

(航天材料及工艺研究所先进功能复合材料技术国防科技重点实验室,北京 100076)

**文 摘** 对 C/C 复合材料的烧蚀表面粗糙度进行了测量,并对不同编织结构和不同基体组元的 C/C 复合材料的烧蚀表面粗糙度进行了比较分析。研究发现:基体组元相同时采用多向结构的 C/C 复合材料烧蚀表面粗糙度明显降低;编织结构相同时,含有沉积碳组元的碳/碳复合材料烧蚀表面粗糙度明显降低。

**关键词** 粗糙度,碳/碳复合材料,沉积碳,沥青碳

## Study on Ablated Surface Roughness of Multi-directional C/C Composites

Shi Xiaobin Wang Jinming Xu Zhenghui Yang Zhixiang

(National Key Laboratory of Advanced Functional Composite Materials, Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** Ablated Surface roughness of C/C composites is measured and ablated surface roughness of C/C composites with different carbon matrices and structures is analyzed. It is found that the ablated surface roughness of multi-directional C/C composites is obviously lower than that of 3D C/C composites with same carbon matrix. On the other hand, the ablated surface roughness of C/C composites with a pyrolytical carbon matrix is obviously lower than that of C/C composites with a pitch-derived carbon matrix when the same braiding structure is used for composites.

**Key words** Roughness, C/C composite, Pyrolytical carbon, Pitch-derived carbon

### 1 前言

C/C 复合材料因其卓越的高温力学性能、抗热震性、耐烧蚀性能和抗机械剥蚀性能,一直是再入飞行器端头的首选材料。在再入过程中,C/C 复合材料会受到空间的高焓、高压、高热流条件影响,在材料各组元烧蚀不同步的情况下,在表面形成细观烧蚀形貌<sup>[1]</sup>。研究烧蚀表面形貌的粗糙度对端头帽的设计有重要的意义。因为在紊流下粗糙壁的气动加热率比起光滑壁会成倍增大,表面粗糙度小的端头材料可以使驻点后退率大大下降,这对端头转换有非常强烈的影响,并且表面粗糙度还会对端头的转换开始高度产生明显的影响<sup>[2]</sup>。

本文利用 Talyscan150 型表面粗糙度测试仪,采用非接触测量方式对不同编织结构和不同基体组元的 C/C 复合材料烧蚀表面进行测量,分析评价 C/C 复合材料的烧蚀表面粗糙度随材料编织结构和组元不同发生的变化,为进一步深入研究 C/C 复合材料的烧蚀表面特性提供研究方法和依据。

### 2 试验

#### 2.1 材料

材料为多向结构 C/C 复合材料,由碳纤维和基体碳组成,密度 $\geq 1.80 \text{ g/cm}^3$ 。试验用多向结构 C/C 复合材料,编织结构分为两类:一类是 5D 结构,在  $z$  向、 $xy$  平面  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $-45^\circ$  方向都存在连续纤

收稿日期:2004-03-24

石晓斌,1972 年出生,硕士,主要从事 C/C 防热复合材料的研究工作

维;一类是3D结构,在z向、xy平面0°、90°方向存在连续纤维。基体碳分为单一沥青碳基体、沥青碳和沉积碳组合基体两种。试验材料类型见表1。

表1 试验材料类型  
Tab.1 Materials tested

| 编织结构    | 纯沥青碳(L) | 沉积碳和沥青碳组合(C) |
|---------|---------|--------------|
| 5D结构(D) | WL      | -            |
| 3D结构(S) | SL      | SC           |

## 2.2 设备及方法

采用Talyscan 150型表面粗糙度测量仪对烧蚀后的模型进行了烧蚀表面粗糙度测量,测量方式为非接触式(激光)测量,测量步长50 μm,测量速度3 500 μm/s,测量面积15 mm×15 mm。典型的测量图像如图1所示。由于测量仪测量探头只能实现x、y轴的直线定长运动,所以测量的区域为矩形,图内圆型区域为烧蚀模型表面,周围是空气。测量过程中,记录了烧蚀模型全表面的三维数据,根据这些数据计算了烧蚀模型表面粗糙度表征数据,并绘制了材料表面等高线图。

根据计算数据对不同编织结构和含不同基体碳组元的C/C复合材料烧蚀表面粗糙度进行了比较分析。

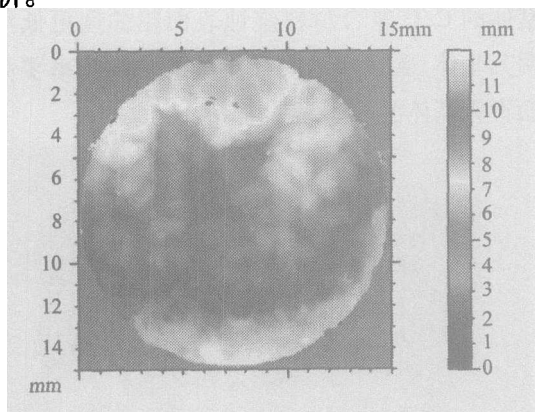


图1 典型粗糙度测量区域

Fig.1 Typical roughness measurement area

采用烧蚀表面的各测量点的表面偏差算术平均值 $S_a$ 来表征烧蚀表面粗糙度,实质上 $S_a$ 表征的是烧蚀表面内各测量点高度构成的表面外形的面积分变化。

宇航材料工艺 2004年 第6期

$$S_a = \frac{\int |z| dx dy}{A} = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} |z_{ij}| \quad (1)$$

式中, $A$ 为测试面积, $z$ 为测试点 $z$ 向高度, $N$ 为 $x$ 轴方向的测试点数, $M$ 为 $y$ 轴方向的测试点数<sup>[3,4]</sup>。

$S_a$ 的计算与测量步长相关,步长越小, $S_a$ 越大,反映的细节越多,但是在同一步长下 $S_a$ 具有可比性。

## 3 结果与讨论

试验材料在高压低焓状态下进行了电弧加热烧蚀试验,烧蚀前C/C复合材料试验模型为平头圆柱。

烧蚀后模型表面有网格花纹,纵向纤维肉眼观察没有明显凸出和凹陷,材料表面均出现多个凹陷区,中间有不规则的凸台,模型外形呈一边高一边低的状态。

### 3.1 不同编织结构的C/C复合材料烧蚀表面粗糙度

为了考察不同编织结构的材料烧蚀表面粗糙度,将WL和SL C/C复合材料表面 $S_a$ 值进行了比较,结果见表2。

从表2看出5D C/C复合材料表面粗糙度比3D C/C复合材料低一倍以上。

表2 不同编织结构的C/C复合材料烧蚀表面粗糙度  
Tab.2 Roughness of C/C composites with different braiding structures

| 材料   | $S_a/\mu\text{m}$ | $S_q^{(1)}$ |
|------|-------------------|-------------|
| SL-1 | 1.05              | 1.34        |
| SL-2 | 1.58              | 1.7         |
| SL-3 | 1.77              | 2.56        |
| WL-1 | 0.546             | 0.826       |
| WL-2 | 0.446             | 0.66        |
| WL-3 | 0.388             | 0.594       |

注:1)  $S_q$ 为表面偏差的标准差。

3D C/C复合材料与编织纤维成45°角的方向力学性能薄弱(表3),烧蚀时先出现局部刻蚀,进而增大局部热流导致材料表面凹陷出现,不对称烧蚀产生菱形凸台<sup>[2]</sup>。而5D C/C复合材料由于自身结构特点决定了与编织纤维成0°、45°角方向的力学性能一致(表3),

推测烧蚀时在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 之间先出现刻蚀,局部热流增大导致材料表面凹陷出现,产生的凸台为多边形,表面凹陷出现的位置多,不同位置烧蚀表面高度偏差变小,导致 $S_a$ 变小。这可以从不同结构烧蚀的表面等高线图看到凸台的形状差异得到佐证(图2)。

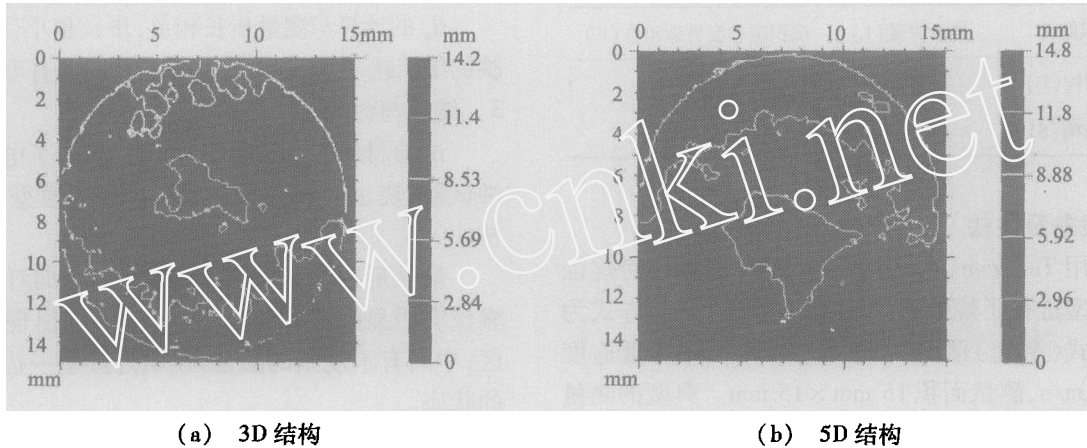


图2 不同结构 C/C 复合材料烧蚀后表面等高线图  
Fig.2 Contour maps of ablated surface of C/C composites with different structures

### 3.2 含不同基体组元的 C/C 复合材料烧蚀表面粗糙度

为了考察含不同基体组元的 C/C 复合材料烧蚀表面粗糙度,将 SL 和 SC C/C 复合材料的烧蚀表面 $S_a$ 值进行了比较,结果见表4。

表4 含不同基体组元的 C/C 复合材料烧蚀表面粗糙度  
Tab.4 Roughness of C/C composites with different carbon matrices

| 材料种类 | $S_a/\mu\text{m}$ | $S_q$ |
|------|-------------------|-------|
| SL-1 | 1.05              | 1.34  |
| SL-2 | 1.58              | 1.7   |
| SL-3 | 1.77              | 2.56  |
| SC-1 | 0.584             | 0.82  |
| SC-2 | 0.436             | 0.69  |
| SC-3 | 0.289             | 0.605 |

从表4看出基体组元是沉积碳和沥青碳组合的 C/C 复合材料表面粗糙度比纯沥青碳组元的低很多。

表3 C/C 复合材料的力学性能  
Tab.3 Mechanical properties of c/c composites MPa

| 材料结构  | $0^\circ$ 方向的拉伸强度 | $45^\circ$ 方向的拉伸强度 |
|-------|-------------------|--------------------|
| 3D 结构 | 130               | 20 ~ 30            |
| 5D 结构 | 100 ~ 110         | 100 ~ 110          |

从图3看出含沉积碳和沥青碳组合基体的 C/C 复合材料烧蚀后的模型(SC 模型)明显比纯沥青碳基体的 C/C 复合材料模型(SL 模型)高,说明比含纯沥青碳基体的更耐烧蚀,而含沉积碳和沥青碳组合基体的 C/C 复合材料烧蚀表面粗糙度更低可以说明其基体、碳布和纵向纤维的烧蚀同步率要高于纯沥青碳基体的 C/C 复合材料。

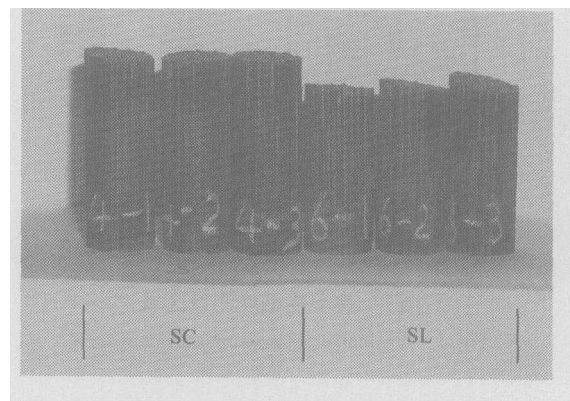


图3 含不同组元的 C/C 复合材料烧蚀后模型照片  
Fig.3 Photo of ablated models of C/C composites with different carbon matrices

(下转第44页)

### 5.2.6 孔隙度对热应力的影响

设参数(取空气的热导率  $k_a = 0.02757 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ )及经解得的不同力学边界条件下 FGM 无限长板的稳态热应力分布见图 8。根据图 4、图 8 的对比可知:在其它条件相同的情况下,当表征孔隙度的参数  $A$  由 0 变为 3.99 时,板内的稳态拉、压应力也明显变化。(1)当板处在 EfBf 时,由曲线①可知,板内的最大压应力增加 0.97 倍,最大拉应力增加 4.25 倍;(2)当板处在 EfBc 时,由曲线②可知,板内的最大压应力增加 1.23 倍(陶瓷表面),最大拉应力增加 2.69 倍;(3)当板处在 EcBf 时,由曲线③可知,板内的最大压应力减小 84%,最大拉应力增加 1.73 倍;(4)当板处在 EcBc 时,由曲线④可知,板内的最大压应力增加 0.99 倍(陶瓷表面)。因此,孔隙度的变化对不同力学边界条件下 FGM 板稳态热应力场分布有明显的影响。

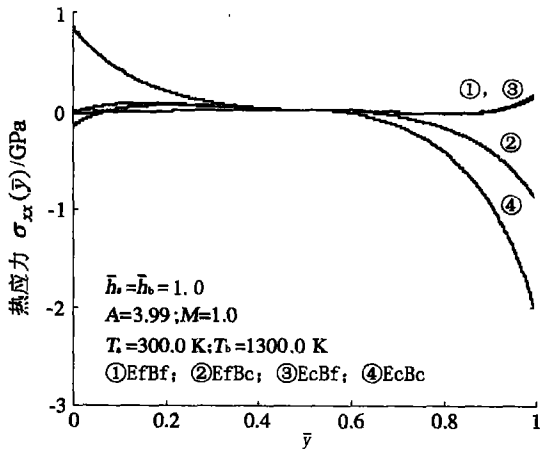


图 8 孔隙度对稳态热应力的影响

Fig. 8 Effect of porosity on steady thermal stresses

### 6 结论

在文献[5]的基础上,给出了材料性质沿厚度方向变化的 FGM 无限长板处在不同力学边界条件下的稳态热应力问题的计算公式和稳态热应力场分布,并检验了研究方法的正确性。在本文相同条件下 ( $M=1$ ), FGM 无限自由长板 (EfBf) 内的热应力最小,且热应力非常缓和;当板处在 EfBc 时,板内稳态拉应力最大,且比 EfBf 时板内最大拉应力增大 6.1 倍;当板处在 EcBc 时,板内的稳态压应力最大,且比 EfBf 时的压应力增大 12.0 倍;此外,材料组分的分布形状系数  $M$ 、对流换热系数、环境介质温度和孔隙度的变化对不同力学边界条件下 FGM 板稳态热应力场的影响显著。

#### 参考文献

- 1 李臻熙,张同俊,李星国等. 梯度功能材料的热应力研究进展. 宇航材料工艺,1997;27(6):1~5
- 2 张宇民,赫晓东,韩杰才. 梯度功能材料. 宇航材料工艺,1998;28(5):5~10
- 3 Obata Y, Noda N. Steady thermal stresses in a hollow circular cylinder and a hollow sphere of a functionally gradient-material. J. Thermal Stresses, 1994;17(3):471~487
- 4 Tanigawa Y, Akai T, Kawamura R et al. Transient heatconduction and thermal stress problems of a nonhomogeneous plate with temperature-dependent material properties. J. Thermal-stresses, 1996;19(1):77~102
- 5 许杨健,赵志岗. 梯度功能材料板瞬态温度场有限元分析. 功能材料,1999;30(1):103~106
- 6 王洪纲. 热弹性力学概论. 北京:清华大学出版社,1989:167~172

(编辑 李洪泉)

(上接第 26 页)

### 4 结论

(1)使用 Talyscan 150 表面粗糙度测量仪测量 C/C 复合材料的烧蚀表面粗糙度,能有效地反映 C/C 复合材料的烧蚀表面特征变化情况。

(2)基体组元为沥青碳时,与 3D C/C 复合材料相比,5D C/C 复合材料烧蚀表面粗糙度明显降低。

(3)含沉积碳和沥青碳组合基体的 3D C/C 复合材料比含纯沥青碳基体的材料烧蚀表面粗糙度低。

#### 参考文献

- 1 曾汉民,于翹,彭维周,蒲天游. 碳纤维及其复合材料

显微图象. 中山大学出版社,1991:59~185

2 杨炳尉. 弹道式再入飞行器的高性能端头. 国外导弹技术,1985;(7):3~6

3 杨志翔,王金明等. 复合材料表面二维轮廓分析和三维形貌分析的比较研究. 见:中国航天第十三专业信息网 2002 年度学术会议论文集,2002:37~41

4 俞汉清. 表面粗糙度标准及应用. 中国计量出版社,1997:177

(编辑 李洪泉)