

# C/C 复合材料烧蚀形貌测量及烧蚀机理分析

俞继军<sup>1</sup> 马志强<sup>1</sup> 姜贵庆<sup>1</sup> 童秉纲<sup>2</sup>

(1 北京空气动力学研究所,北京 100074)

(2 中国科学院研究生院,北京 100039)

**文 摘** 对 C/C 复合材料试件的表面细观烧蚀进行了常压下的亚、超声速和高压下的亚音速烧蚀形貌的测量;根据测量结果,分析了 C/C 复合材料在上述情况下的质量损失规律。结果表明:C/C 复合材料在亚音速流场的条件下,z 向纤维束首先发生剥蚀,当压力升高时,碳布会发生层间剥蚀的现象;而在超音速条件下,碳布更容易发生剥蚀的现象。

**关键词** C/C 复合材料,烧蚀,机械剥蚀

## Pattern Surface Measure and Ablation Analysis for C/C Composite Material

Yu Jijun<sup>1</sup> Ma Zhiqiang<sup>1</sup> Jiang Guiqing<sup>1</sup> Tong Binggang<sup>2</sup>

(1 Beijing Institute of Aerodynamics,Beijing 100074)

(2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences,Beijing 100039)

**Abstract** Different microstructures of ablated surfaces, including those under normal pressure and subsonic or supersonic flow field and those under high pressure and subsonic flow field, are measured for the samples of C/C composite materials. Based on experimental results, mass loss rules under corresponding conditions are given. The results demonstrate that under the subsonic flow fields there firstly exists mechanical erosion of fibers in z direction and with the pressure higher laminated carbon cloth will be peeled between the layers, but under supersonic flow fields, the carbon cloth will be eroded more easily.

**Key words** C/C composite material, Ablation, Mechanical erosion

### 1 引言

在航天器再入的过程中,C/C 复合材料会受到空间的高焓、高压、高热流恶劣条件,在材料自身各组成相的烧蚀不同步的情况下,材料的表面会形成一定的细观烧蚀形貌<sup>[1,2]</sup>。结构缝隙的理论和实验的研究表明<sup>[3]</sup>:在结构缝隙的内部,其热流要远远低于外部的热流,因此在材料相对确定的深度不会发生烧蚀;同时边界层的微观孔洞的理论分析也证明了在孔洞的表面出口剪应力要远远大于内部,因此

在材料相对确定的深度不会发生由剥蚀而产生的质量损失。在烧蚀过程中,材料优先烧蚀和优先剥蚀的部分不会无限深下去,而是应该有一个稳定值或一个稳定的演化规律,因此在材料表面应该有相对稳定的细观烧蚀形貌。

在空间环境较为恶劣的条件下,C/C 复合材料的表面会产生由热化学烧蚀及机械剥蚀而引起的质量损失。其中 C/C 复合材料的热化学烧蚀的理论研究较多<sup>[4,5]</sup>,而材料的机械剥蚀与热化学烧蚀的

收稿日期:2002-07-12;修回日期:2002-08-19

俞继军,1974 年出生,博士研究生,主要从事气动热力学的研究工作

耦合效应等方面的研究相对较少。

本文利用高精度的表面粗糙度测量仪对 C/C 复合材料的烧蚀表面形貌进行了测量,分析了在各种流场状态下材料表面各组成相的热化学烧蚀及机械剥蚀的特点和它们相应的演化规律。

## 2 实验

### 2.1 仪器

采用 Talyscan150 型表面粗糙度测量仪进行了材料的测试和表面图像处理。该仪器的激光测头的分辨率为  $2\ \mu\text{m}$ ,电感测头的分辨率为  $60\ \text{nm}$ ;在模型的测量过程中,可以比较精确地测量出材料表面的二维及三维的比较真实的数据,并且根据这些数据绘制材料表面的二维曲线、等高线图及三维立体图等。

### 2.2 试件及实验状态

实验所用的试件均为圆柱形的平头试件,其材料烧蚀后的模型如图 1 所示。试件的材料采用细编穿刺及浸渍碳化成型工艺制造的 C/C 复合材料。烧蚀实验在电弧加热器上进行。材料的烧蚀实验状态包括亚音速及超音速和低、高压等多个流场状态。其驻点压力最高可达  $8\ \text{MPa}$ ,气体的总比焓最高可达  $25\ \text{MJ/kg}$ 。

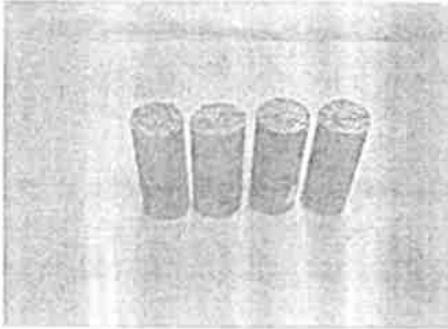


图 1 烧蚀后 C/C 复合材料模型

Fig. 1 C/C composite material models after ablation

## 3 结果及分析

### 3.1 试件的烧蚀结果

#### 3.1.1 亚音速高热流条件下材料表面的烧蚀

亚音速高热流条件下 C/C 复合材料表面的烧蚀图像如图 2 所示,其表面通过  $z$  向纤维束的烧蚀曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看到在亚音速高热流条件下 C/C 复合材料的  $z$  向纤维束的烧蚀速度

要小于碳布的烧蚀速度,同时界面的优先烧蚀明显;反映到曲线图中其材料各相的界面为最低点, $z$  向纤维束有烧尖的现象,同时从图 3 中还可以看到  $z$  向纤维束的烧蚀对碳布的烧蚀影响明显。

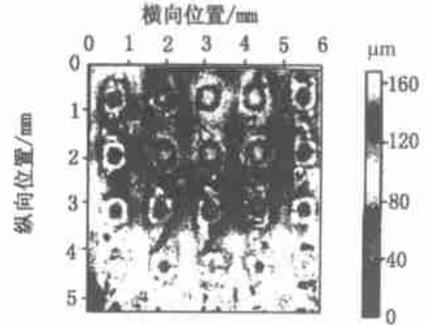


图 2 亚音速高热流下的 C/C 复合材料烧蚀形貌  
Fig. 2 Ablative pattern of C/C composite material under subsonic and high heating flowfield

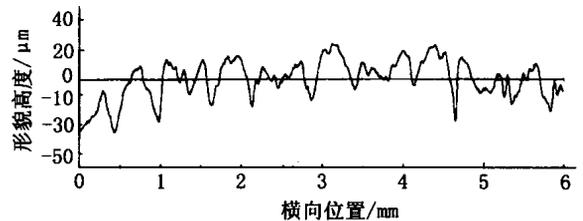


图 3 亚音速高热流下的 C/C 复合材料烧蚀表面曲线  
Fig. 3 Roughness curve of C/C composite material under subsonic and high heating flowfield

#### 3.1.2 亚音速高压条件下 C/C 复合材料的烧蚀

亚音速高压条件下 C/C 复合材料的烧蚀图像如图 4 图和图 5 所示。

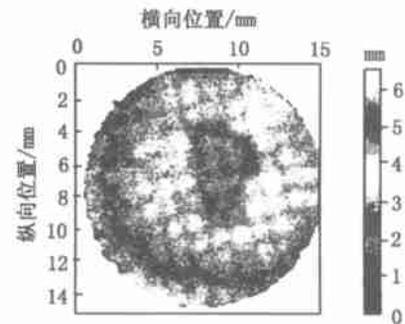


图 4 亚音速高压 ( $P_5 = 2.5\ \text{MPa}$ ) 时 C/C 复合材料的表面烧蚀图像

Fig. 4 Ablative pattern of C/C composite material under subsonic flowfield with  $2.5\ \text{MPa}$  of pressure

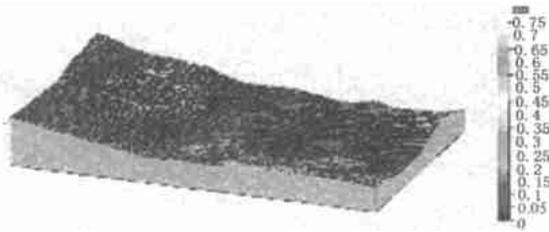


图5 亚音速高压 ( $P_S = 3.5$  MPa) 时 C/C 复合材料的三维表面烧蚀形貌图

Fig. 5 Three-dimensional ablative pattern of C/C composite material under subsonic flowfield with 3.5 MPa of pressure

图4中材料表面通过 $z$ 向纤维束的烧蚀曲线如图6所示。从图中可以看到在亚音速高压条件下C/C复合材料的 $z$ 向纤维束的烧蚀速度要大于碳布的烧蚀速度, $z$ 向纤维束表面烧蚀相对光滑;反映在曲线中, $z$ 向纤维束为材料烧蚀的最低点,其表面的烧蚀由 $z$ 向纤维束中心逐渐向碳布表面扩展,并且在碳布和 $z$ 向纤维束之间没有明显的界面。当压力继续升高时,碳布表面出现阶梯状分布曲线,其阶梯的长度为相邻的两束纤维的中心距离,如图7所示。

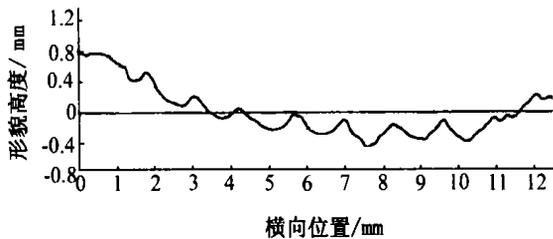


图6 亚音速高压 ( $P_S = 2.5$  MPa) 时的 C/C 复合材料烧蚀表面曲线

Fig. 6 Roughness curve of C/C composite material under subsonic flowfield with 2.5 MPa of pressure

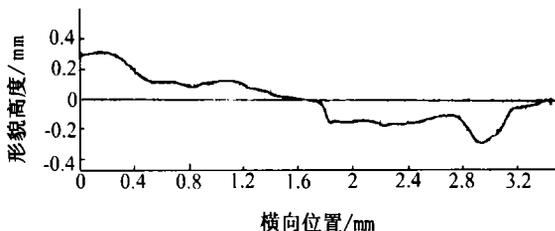


图7 亚音速高压 ( $P_S = 3.5$  MPa) 时 C/C 复合材料烧蚀表面曲线

Fig. 7 Roughness curve of the C/C composite material under subsonic flowfield with 3.5 MPa of pressure

### 3.1.3 超音速高热流条件下 C/C 复合材料的烧蚀

超音速高热流条件下 C/C 复合材料的烧蚀图像如图8所示,其表面 $z$ 向纤维束的烧蚀曲线如图9所示,曲线中烧蚀的最低点在 $xy$ 碳布的中心。这些现象说明在超音速下 C/C 复合材料的 $z$ 向纤维束的烧蚀速度要小于碳布的烧蚀速度,但两者之间的界面变化不明显,即界面的优先烧蚀现象不明显,表面变化平缓,同时材料表面还存在着较多的缺陷。

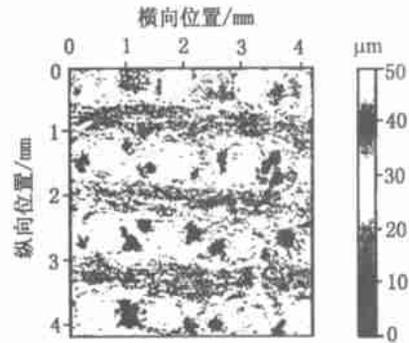


图8 超音速高热流条件下 C/C 复合材料的烧蚀图像

Fig. 8 Ablative pattern of C/C composite material under supersonic and high heating flowfield

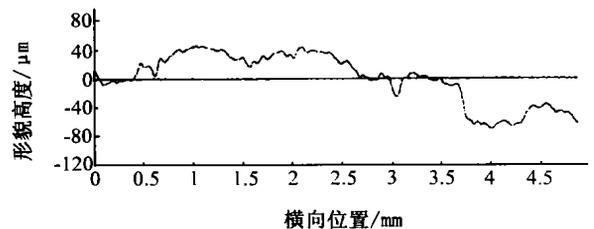


图9 超音速高热流下 C/C 复合材料烧蚀表面曲线

Fig. 9 Roughness curve of C/C composite material under supersonic and high heating flowfield

## 3.2 烧蚀机理分析

(1) 亚音速高热流条件下, C/C 复合材料的表面烧蚀是由扩散控制的,由于组成相的性质差异,形成了界面的优先烧蚀及碳布的烧蚀速度较快。同时其表面烧蚀图像也表明,在一定的状态下材料表面微观烧蚀形貌具有一定的规律性,其烧蚀形貌是以材料的组成相分布为基础的,并且其组成相的烧蚀具有相互影响的现象,说明材料微观热环境对材料表面的烧蚀是有很大影响的。

(2) 在亚音速高压条件下,  $z$  向纤维束在正压力的作用下容易剥蚀, 因而出现了  $z$  向纤维束烧蚀较快的现象, 其质量损失为  $z$  向纤维束剥蚀及烧蚀的耦合作用。当压力继续升高时, C/C 复合材料的  $xy$  向碳布出现阶梯状分布的现象, 而且其阶梯的落差与碳布层的厚度为同一量级, 说明在碳布的表面出现了层间剥蚀现象, 因此此时材料的质量损失为材料的细观热化学烧蚀、 $z$  向纤维束的剥蚀和碳布的层间剥蚀耦合作用的结果。

(3) 在超音速高热流条件下, 材料表面要承受较大的剪切应力, 由于碳布在烧蚀的条件下剪切强度较低, 发生了碳布的优先剥蚀, 因而使材料表面碳布的质量损失加大, 掩盖了材料表面的烧蚀界面, 也使材料表面碳布区域缺陷较多; 同时  $z$  向纤维束的剥蚀要小于碳布的剥蚀, 从而使烧蚀表面变化相对平缓。所以超音速条件下的烧蚀可能为材料的细观烧蚀、碳布优先剥蚀和  $z$  向纤维束的剥蚀耦合作用的结果。

#### 4 结论

采用细编针刺工艺制造的 C/C 复合材料在亚音速高热流流场条件的作用下, 其材料表面会形成以材料各组成相分布为基础的细观烧蚀形貌, 并且材料表面各组成相的烧蚀是相互影响的; 在亚音速

高压条件下, 材料的剥蚀现象与实验时的驻点压力密切相关, 在压力相对较小时,  $z$  向纤维束首先发生剥蚀, 当压力升到相对较高时, 碳布会发生层间剥蚀的现象。在超音速高热流流场条件下, 由于材料表面剪切力的作用, 材料表面的  $xy$  向碳布更容易发生剥蚀。因此, 材料的烧蚀理论在考虑材料宏观热化学烧蚀的同时, 也应考虑材料的剥蚀效应, 包括不同条件下材料的剥蚀机理及材料的剥蚀与热化学烧蚀的耦合效应等。

#### 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 Donghwan Cho, Byung Il Yoon. Microstructural interpretation of the effect of various matrices on the ablation properties of carbon-fiber-reinforced composites. *Composites Science and Technology*, 2001; 61: 271 ~ 280
- 3 Beskok A, Karniadakis G E. Simulation of heat and momentum transfer in complex microgeometries. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1994; 8(4): 647 ~ 655
- 4 黄志澄等主编. 航天空气动力学. 宇航出版社, 1994: 378 ~ 388
- 5 Basil Hassan, Kuntz D W, Potter D L. Coupled fluid/thermal prediction of ablating hypersonic vehicles. In: 36<sup>th</sup> aerospace sciences meeting & exhibit, 1998: 12 ~ 15

(编辑 马晓艳)

---

## 磁性液体材料

磁性液体是在重力场或强磁场作用下不会发生分离的铁磁性溶液, 它象流体又有强磁性。

采用化学共沉淀—水溶液吸附—有机相分散法制取, 采用国内外未曾用过的聚氯乙烯失水三梨醇油酸酯(吐温)作磁液的分散稳定剂。方法简便、稳定性好、成本低, 性能已达到国外同类产品水平。

磁性液体可用于静边分选, 真空密封, 防尘密封, 轴承密封, 磁性润滑, 磁性显示, 磁性研磨, 磁性喷射印刷, 能量变换, 医疗研究等方面。该材料可取代进口材料。

(西南磁学应用研究所, 0816 - 22196 - 296)

· 李连清 ·