

碳基复合材料烧蚀性能研究

Research on Ablation Property of Carbon-based Composites

张冬梅, 韩杰才, 张博明, 孟松鹤

( 哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150001)

ZHANG Dong-mei, HAN Jie cai, ZHANG Bo-ming, MENG Song-he

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘要: 利用以星型交流电弧加热器为核心的地面模拟系统对碳基复合材料再入过程中的烧蚀性能进行了模拟, 并通过材料表面温度测量、图像采集和发射光谱在线检测等手段对烧蚀过程实时监测, 为确定碳基复合材料的烧蚀机理, 表征材料使用性能及材料优化设计提供必要的理论基础。

关键词: 碳基复合材料; 地面模拟; 星型交流电弧加热器; 实时监测; 烧蚀性能

中图分类号: TB332      文献标识码: A      文章编号: 1001-4381(2006)11-0049-04

**Abstract:** The ablation property of carbon-based composites during the re-entry was simulated by the ground-simulating system, which is based on the AC star type arc heater. The ablation procedure was real-time monitored by the manner of temperature measurement on material surface, image acquisition and emission spectrum. All of these have offered necessary theoretic basis for ablation mechanism of carbon-based composites, and characterization of service performance and material optimum design.

**Key words:** carbon-based composites; ground simulation; star-type alternating current arc heater; real time monitoring; ablation property

随着航空、航天及国防事业的发展,对材料的要求不断提高,其服役条件越来越苛刻,材料在极端环境下的行为研究对军用先进材料的发展和武器装备性能提高的影响也越来越突出。碳基复合材料的轻质、高比强、高比模和耐超高温等一系列优异的综合性能,赋予这类材料在航空航天领域的优势地位。目前,美国、俄罗斯等国都把以碳基复合材料为代表的先进功能结构材料应用于导弹、航天飞机、火箭发动机以及飞机的制动器等方面。在极端环境下,考核碳基复合材料烧蚀性能的主要方法是地面实验模拟,但是这些考核实验不能准确而全面地获取材料与环境的相互作用过程的信息,不能回答“为什么”以及如何改进材料性能设计这一关键问题,因此,寻求科学、经济的环境与材料相互作用的模拟方法势在必行。本工作通过以星型交流电弧加热器为核心的地面模拟系统对再入过程中碳基复合材料与环境的相互作用进行模拟。

1 装置介绍

实验装置的主体是星型交流等离子体电弧加热器,结构如图 1 所示<sup>[1,2]</sup>。它包括三个互成 120 度角均匀分布的完全相同的电极弧室和公共的混合室,电极弧室包括后挡板,电极和使气体加热增强的收缩段,

电源电网的各项连入各个电极。电极与后挡板及收缩段之间由绝缘体隔开。工作气体通过这些绝缘体切向送入,利用涡旋稳定的原则将电弧稳定在电极弧室的轴线上。

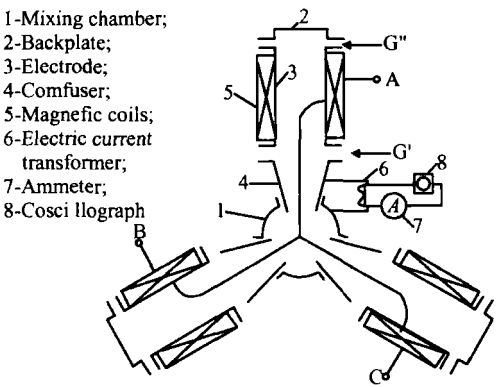


图 1 “星形”交流等离子体电弧加热器  
Fig. 1 “Star type” AC plasma generator

为了保证获得稳定连续的气流来模拟再入环境,配备了相应的辅助系统,如图 2 所示。

电源、供气系统和冷却水子系统保证星形交流电弧加热器的正常工作,高速粒子播发系统可以模拟飞行器再入过程中雨、雪、冰雹等微小粒子对防热结构

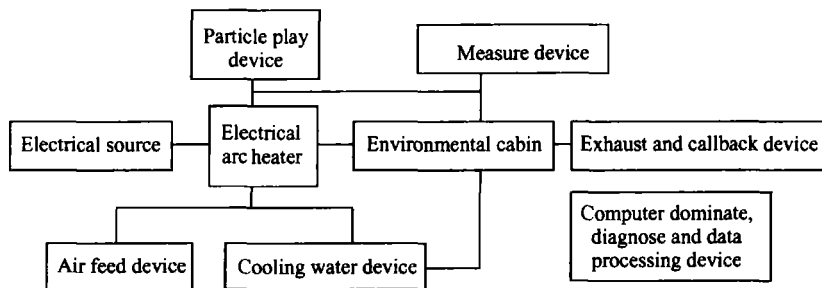


图2 基于“星形”交流等离子体电弧加热器的地面模拟系统

Fig. 2 Ground simulation system based on “star type” plasma generator

的侵蚀。在测试舱中可以对耐热材料的烧蚀产物进行精确的测定。计算机控制、诊断和数据处理系统可以实时采集实验系统状态参数并自动控制实验进程, 实现地面模拟系统的智能监控。

本系统功率可以达到 10MW; 工作电压: 6000~10000V; 工作电流不大于 600A; 可在多种工作介质下进行工作, 例如空气、氮气、氩气等; 最大气体流量为 200g/s; 配备有一系列喷嘴, 可以模拟不同的再入高度, 也可以在同一实验中实现变轨道、变尺寸的模拟; 当实验模型直径达 300mm 时, 驻点温度可达 8000K。

为了准确获得碳基复合材料烧蚀过程的信息, 可采用材料表面温度测量、图像监控和发射光谱在线检测等方法。

材料表面温度检测, 采用高温计测量表面和热电偶直接植入试件的方法, 因为热电偶测温准确度高, 结构简单, 便于装配和维修。试件温度测量的难点: 一是要保证热电偶与试件绝缘, 因为交流电弧加热器等离子射流与大地之间存在高压, 如果绝缘不好, 会导致热电偶上有高压, 不但采不到温度信号, 反而会导致数据采集模块烧毁, 甚至危及操作者的人身安全。二是脉冲信号的屏蔽, 因为电弧加热器工作的点火瞬间会产生突波信号, 会对采集电路造成危害。

图像采集系统由高精度的 CCD 相机、图像采集卡和相应的软件组成, 如图 3 所示。选用松下公司的 WV-BP330 型 CCD 相机, 该相机达到 0.38MPix, 水平解像度 570line, 最低照度达到 0.08Lux。图像采集卡采用 DH-PCFXR 黑白图像卡, 采集速度 20pic/s。

发射光谱在线检测装置是高温烧蚀过程信息实时监测的最有效手段, 通过检测高温等离子体的光辐射, 探测材料烧蚀产物的特征光谱, 并对这些特征光谱进行分析得到材料烧蚀的中间产物及成分变化规律, 进而确定其热力学及化学动力学过程, 为材料的烧蚀机理的确定提供有力的依据。结构简图见图 4<sup>[3]</sup>。

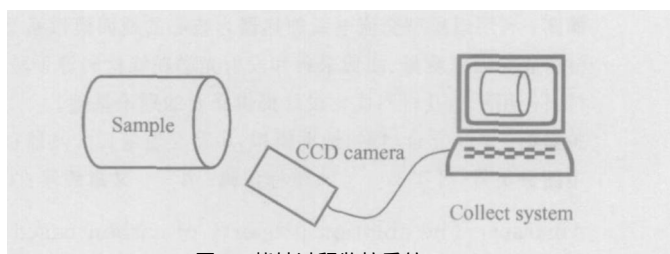


图3 烧蚀过程监控系统

Fig. 3 Monitoring system of ablation process

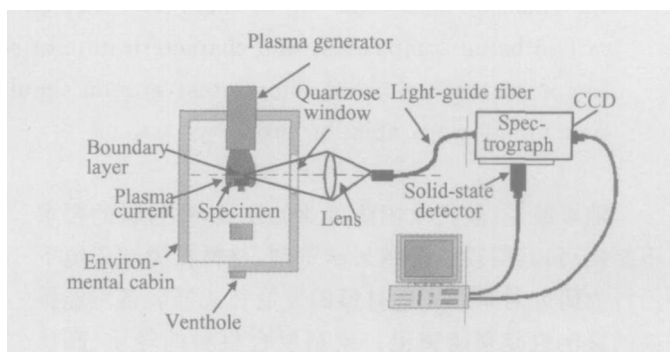


图4 光谱检测系统结构简图

Fig. 4 Structure of spectrum diagnoses system

## 2 实验

### 2.1 试件

本工作所用材料为 C/C 和混杂 C/C 两种复合材料, 均为细编穿刺结构。预成型件中的 XY 向为层叠缎布, 由碳纤维束编织而成。C/C 复合材料的 Z 向为碳纤维束, 混杂 C/C 复合材料的 Z 向为碳纤维束与高熔点金属丝混编而成, 两个方向单根纤维均为 PAN 基碳纤维。预成型件经过浸渍、固化、炭化和石墨化处理得到的复合材料中, 金属丝全部转化为金属碳化物。为了对碳基复合材料的烧蚀性能做对比研究, 选用石墨材料作对比实验。所选石墨为哈尔滨电碳厂生产的高强石墨, 牌号 G43, 密度  $1.80\text{g/cm}^3$ 。

### 2.2 实验参数

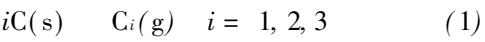
实验选择音速管前压力为 1.3MPa, 气体质量流率

为 79.2g/s, 电弧电压 1.2kV, 电弧电流 280A, 出口喷嘴喉径 14mm(出口直径为 20mm), 音速管喉径 5.8mm, 产生的等离子射流的参数为: 温度 3660K, 驻点压力 0.42MPa, 热流密度 8.5MW/m<sup>2</sup>, 焓值 4.8MJ/kg。

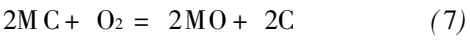
试件的直径根据电弧加热器喷嘴出口的直径大小确定, 为了保证烧蚀过程是一维的, 通常试件直径大小约为喷嘴出口直径的 1.15 倍, 试件长度在满足温度测量要求的前提下尽量经济, 最终选定试件的直径为 23mm, 长度 40mm。

2.3 热化学反应

高温气流中碳基复合材料可能出现的热化学反应式比较多, 通常情况下, 认为以下的热化学反应是主要的<sup>[4,5]</sup>:



而混杂碳基复合材料的热化学反应比 C/C 复合材料多一个反应式



上述反应中, (1) - (5) 为吸热反应, (6), (7) 为放热反应。

3 实验结果与讨论

碳基复合材料作为一种高温热结构材料, 在使用中必然要与外部进行热交换, 使材料内部温度场发生变化, 而温度场的变化是产生热应力的主要原因。因此, 确定材料工作状态下的温度场是进行热结构分析

的前提。图 5 为高温计采集到的烧蚀试件表面升温曲线, 可以看出石墨和 C/C 材料的升温过程比较接近, 而混杂 C/C 材料的升温过程则明显不同, 表面温度较高。

C/C 和混杂 C/C 内部温度随烧蚀加热时间的变化曲线, 如图 6 所示。从中发现了混杂 C/C 模型内部温度升高显著滞后于 C/C 模型, 为反映进入模型内部的净热流和不同材料的热传导系数提供了直接、可靠的实验依据。

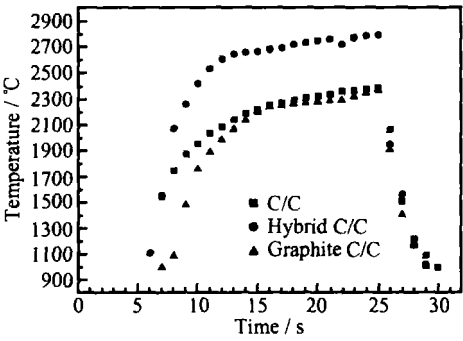


图 5 烧蚀面温度变化过程  
Fig. 5 Temperature variation process of ablation plan

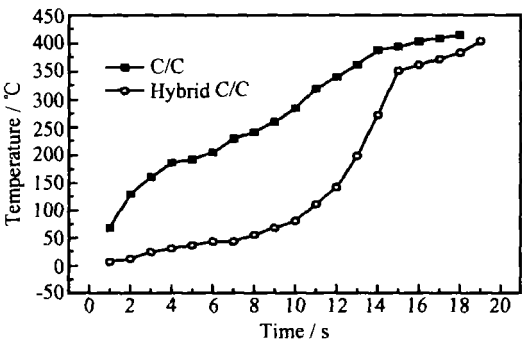


图 6 试件轴向温度分布  
Fig. 6 Axial temperature distribution of specimen

利用设计的烧蚀过程图像采集系统, 对碳基复合材料的烧蚀过程进行了观察, 结果如图 7 所示。由于射流几乎被滤光片完全屏蔽, 可以看到表面的烧蚀形貌, 对于混杂碳基复合材料来说, 首次发现在烧蚀过程

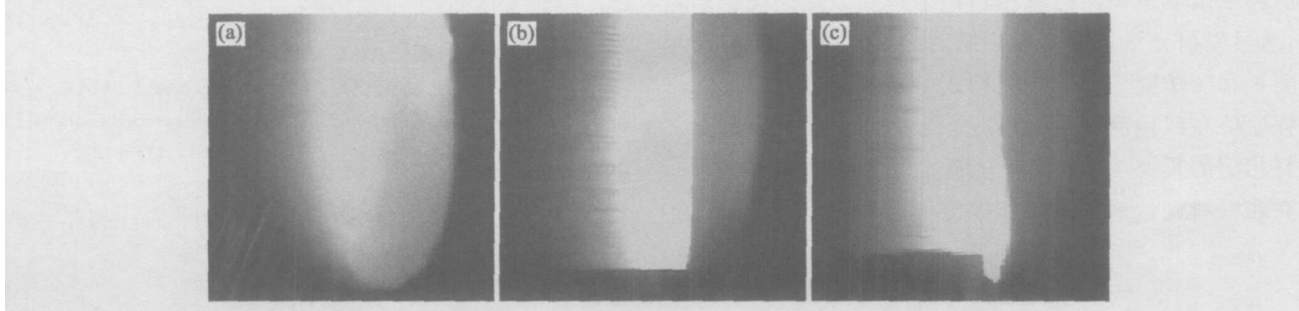


图 7 石墨(a), C/C(b)和混杂 C/C(c)材料烧蚀表面图像  
Fig. 7 Ablation images of graphite(a), C/C (b) and hybrid C/C (c)

中有液滴出现, 当液滴尺寸超过一定尺寸时, 被射流吹走, 且液滴流失过程是连续的。

C/C 材料在交流电弧加热器射流中得到的谱线, 如图 8, 9 所示。可以看出, 烧蚀产物主要为  $\text{CO}^{[6]}$ , CN 及 C 的升华产物含量低, 混杂 C/C 复合材料气态烧蚀产物与 C/C 烧蚀产物基本一致, 主要是 CO, 没有发现金属的气态产物存在, 可见金属的引入并没有造成烧蚀产物的明显变化, 细微的差别主要反应在谱线强度的不同, 并没有新产物的出现。

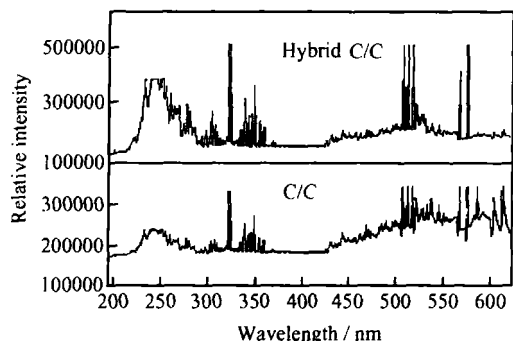


图 8 电弧加热器射流作用下 C/C 和混杂 C/C 烧蚀产物  
Fig. 8 Spectrum of C/C and hybrid C/C  
ablated in plasma of arc heater

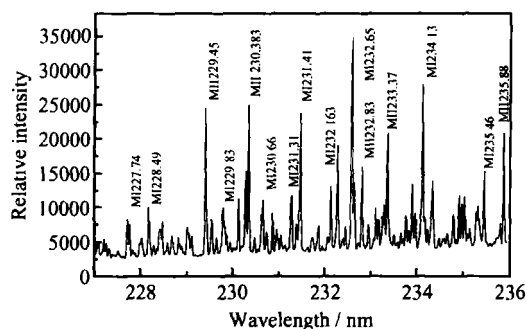


图 9 电弧加热器射流作用下混杂 C/C 烧蚀产物  
Fig. 9 Spectrum of hybrid C/C ablated in plasma of arc heater

## 4 结论

利用以星型交流电弧加热器为核心的地面模拟系统, 通过发射光谱实时诊断系统、材料表面烧蚀温度测量装置和图像监控系统一起构成了碳基复合材料烧蚀过程原位在线检测系统, 首次全面获取了模拟环境下材料相应的重要信息过程, 为碳基复合材料烧蚀机理研究和材料评价优选等工作提供依据。

### 参考文献

- [1] Королев А. С., Миронов В. М., Свиричук Ю. С., Плазмозащитные конструкции, Характеристики, Расчет [M]. Москва: Машиностроение, 1993.
- [2] 卡拉捷耶夫 А. С., 米罗诺夫 Р. М., 斯维尔丘克 Н. С. 等离子体发生器 [M]. 左光, 阎喜勤, 毛国良, 译. 北京: 机械工业出版社, 1993.

- [3] 张巍, 孟松鹤, 张博明, 等. 防热材料高温烧蚀发射光谱检测 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34: 113-116.
- [4] 姜贵庆, 刘连元. 近代空气动力学丛书-高速气流传热与烧蚀热防护 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [5] 姜贵庆, 李鸿权. 热化学烧蚀理论及其应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35: 139-144.
- [6] 张巍, 张博明, 孟松鹤, 等. 碳基复合材料等离子火炬高温烧蚀性能研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34: 108-113.

收稿日期: 2005-09-21; 修订日期: 2006-05-20

作者简介: 张冬梅 (1971-), 女, 博士研究生, 从事复合材料领域的研究工作, 联系地址: 上海市闵行区华宁路 191 弄 184 号 401 室 (200240)。

(上接第 48 页)

### 参考文献

- [1] UHLIR A. Electrolytic shaping of germanium and silicon [J]. Bell Syst Tech, 1956, 35: 333-347.
- [2] CANHAM L T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers [J]. Applied Physics Letters, 1990, 57(9-10): 1046-1048.
- [3] LONI A, SIMONS A J, COX T I, et al. Electroluminescent porous silicon device with an external quantum efficiency than 0.1% under CW operation [J]. Electronics Letters, 1995, 31(15): 1288-1289.
- [4] CANHAM L T, COX T I, LONI A. Progress towards silicon optoelectronics using porous silicon technology [J]. Applied Surface Science, 1996, 102: 436-441.
- [5] DI CSO CS, VAZSONYIÉ, ADAM M, et al. Porous silicon bulk micromachining for thermally isolated membrane formation [J]. Sensors and Actuators, 1997, A60(1-3): 235-239.
- [6] KRONAST W, MÜLLER B, SIEDEL W, et al. Single chip condenser microphone using porous silicon as sacrificial layer for the air gap [J]. Sensors and Actuators, 2001, A87(3): 188-193.
- [7] STEINER P, LANG W. Micromachining applications of porous silicon [J]. Thin Solid Films, 1995, 255(1-2): 52-58.
- [8] CANHAM L. Properties of Porous Silicon [M]. London: INSPEC, 1997. 221-247.
- [9] ALEXANDRA S, JORG S, WOLFGANG B. New porous silicon formation technology using internal current generation with galvanic elements [J]. Sensors and Actuators, 2001, A92: 394-399.
- [10] GUANGLING SONG, BIRGIR JOHANNESSON, SARATH HAPUGODA, et al. Galvanic corrosion of magnesium alloy AZ91D in contact with an aluminium alloy, steel and zinc [J]. Corrosion Science, 2004, 46(4): 955-977.
- [11] ASHRUF C M A, FRENCH P J, BRESSERS P M M C, et al. Galvanic porous silicon formation without external contacts [J]. Sensors and Actuators A, 1999, 74(1-3): 118-122.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60371030, 60071027); 天津市自然科学基金项目 (023603811)。

收稿日期: 2006-01-16; 修订日期: 2006-05-15

作者简介: 房振乾 (1976-), 男, 博士, 主要从事薄膜电子材料与 MEMS 器件的研究, 联系地址: 天津大学电子信息工程学院 (300072)。