

# 喉衬热环境与碳/碳复合材料的烧蚀

刘建军<sup>1</sup> 李铁虎<sup>1</sup> 郝志彪<sup>2</sup>

(1 西北工业大学材料科学与工程学院,西安 710072)

(2 陕西非金属材料工艺研究所,西安 710025)

**文 摘** 在分析固体火箭发动机喷管喉衬热环境与碳/碳复合材料烧蚀行为的基础上,从材料的角度讨论了影响碳/碳复合材料烧蚀性能的因素。结果表明:碳/碳复合材料的烧蚀是受喉衬复杂燃气环境众多因素共同作用的结果,主要的烧蚀效应有碳的升华、表面异相化学反应以及机械侵蚀;影响碳/碳复合材料烧蚀性能的材料本体特性有纤维特性、预制件结构、材料密度、孔隙、基体碳的种类、石墨化度、杂质,其中部分因素存在交互影响的作用。

**关键词** 喉衬热环境,碳/碳复合材料,烧蚀,影响因素

## Throat Thermal Ambient and Ablation of C/C Composites

Liu Jianjun<sup>1</sup> Li Tiehu<sup>1</sup> Hao Zhibiao<sup>2</sup>

(1 College of Materials Science and Engineering, NPU, Xi'an 710072)

(2 Shaanxi Institute of Non-metallic Material and Technology, Xi'an 710025)

**Abstract** On the basis of analyzing SRM throat thermal ambient and ablative action of C/C composites, factors affecting ablative performance of C/C composites are discussed from the viewpoint of material property. The results show that ablation of C/C is affected by complicated throat combustion gas ambient, that is composed of carbon sublimation, surface heterogeneous chemical reaction, and mechanical erosion. Fiber, precursor structure, material density, carbon matrix, graphitizing degree and impurity contribute to material ablation, and some factors are affected by each other.

**Key words** Throat thermal ambient, C/C composites, Ablation, Affective factors

### 1 前言

碳/碳复合材料以其所具有的高比强度、高比模量、耐高温、耐烧蚀、耐热冲击和化学稳定性等一系列优异性能,已从单一的烧蚀耐热材料发展为既是结构材料又是耐热材料的双功能复合材料,并在宇航和其它工业系统广泛应用<sup>[1]</sup>。

由于碳/碳复合材料具有比其它材料优越的热物理和机械性能,目前已作为喷管喉衬的首选材料,种类主要有双向编织碳/碳和碳毡/碳复合材料。在

发动机工作过程中,碳/碳喉衬在恶劣的喷管热环境下,内型面受到高温、高压、高速且含有侵蚀性粒子的热流冲刷烧蚀而损伤,表现为喉径扩大,表面粗糙不平,型面不规整等,从而影响到发动机工作压强,喷管效率降低,严重时导致发动机工作失效<sup>[2,3]</sup>。

在固体火箭发动机喷管喉衬热环境中,碳/碳复合材料的烧蚀受多种因素的影响,主要有:(1)发动机喷管的气动设计;(2)推进剂类型及组分;(3)材料本体特性。前两者决定着发动机工作时的喉衬热

收稿日期:2004-04-05

作者简介:刘建军,1970出生,高级工程师,主要从事碳/碳复合材料工艺与应用的研究工作

环境,如压强、燃气组分及含量、温度等。材料本体特性则决定着材料在宏观和微观上耐烧蚀的能力。根据发动机喷管的实际应用,材料特性应满足喉衬材料的耐烧蚀要求。对碳-碳复合材料而言,由于成型工艺的特殊性与复杂性,在满足材料耐烧蚀性能的可设计性方面,特别是在微观上,难度较大。本文在分析固体火箭发动机喉衬热环境与碳-碳复合材料烧蚀行为的基础上,从材料的角度讨论影响碳-碳复合材料烧蚀性能的因素及其交互作用。

## 2 喉衬热环境下碳-碳复合材料的烧蚀

### 2.1 喉衬热环境与碳-碳复合材料的烧蚀行为

固体火箭发动机喷管喉衬的热环境随着推进剂能量的提高变得越来越恶劣,给喷管喉部的热防护设计带来困难。表1给出了几种推进剂的性能。

表1 推进剂性能

Tab 1 Propellant characteristics

推进剂	主要成分	比冲 /N·s·kg <sup>-1</sup>	燃烧温度 /K	铝粉含量 /%
聚硫	PS/AP	2 256 ~ 2 354	2 866	0
	PS/AP/AI	2 354 ~ 2 452	3 033	3
聚丁二烯	CTPB/AP/AI	2 550 ~ 2 599	3 366 ~ 3 477	15 ~ 17
	CF/AP/AI	2 354 ~ 2 403	3 700	19.5

从表1可知,随着推进剂的燃烧温度越来越高,铝粉含量也从聚硫的不含铝粉到聚丁二烯的百分之十几,使喷管喉部的热环境加剧,燃气-粒子两相流对壁面的侵蚀加重。因此,给喷管喉部的热防护设计带来困难,对喉衬材料的绝热性能、抗侵蚀性能、机械性能及热物理性能的要求越来越高<sup>[2,3]</sup>。

机加成型后的碳-碳喉衬表面光滑平整,经点火工作后,表面粗糙。喉衬在工作环境中碳-碳复合材料的烧蚀是气动环境与材料的热化学的复杂作用,受边界层内传热传质、界面异相反应和固相瞬态热传导以及粒子冲刷侵蚀等共同影响,主要的物理化学效应应有碳的升华、表面异相化学反应以及机械侵蚀等。

### 2.2 喉衬热环境下碳的热化学特性

#### 2.2.1 碳的升华

碳的升华在碳-碳复合材料的烧蚀中因不同的热环境而影响不同。在喉衬热环境中,同样存在碳宇航材料工艺 2005年 第1期

的升华,虽然可能对材料的烧蚀影响不大,但是也不容忽视。

从碳的相图(图1)可以知道,石墨-液体-气体的三相点在10 MPa, 4 200 K左右。碳的熔点极高,高温时的蒸气压也相当高。研究表明,碳的升华,不是单个碳原子从固体表面蒸发,而可能是多个碳原子的集合体从固体表面蒸发。在4 000 K高温时,气相中的碳原子集合体按C<sub>3</sub> > C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> > C<sub>5</sub> > C<sub>4</sub>的顺序减少,C<sub>6</sub>以上仅微量<sup>[4]</sup>。实际上,热平衡时碳蒸气是C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>5</sub>等的混合物。碳的升华热是随温度和压力的改变而变化的,精确测定单原子碳的升华热比较困难,其值大约为710 kJ/mol<sup>[5]</sup>。以此为参考,结合石墨的蒸气压(表2),可知在3 650 ~ 3 697 K的喉衬热环境温度下,碳-碳复合材料中存在一定的碳升华现象。

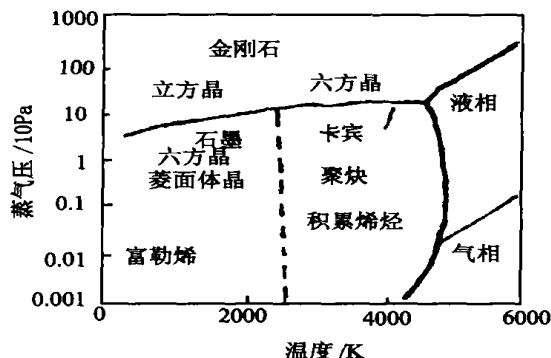


图1 碳的相图

Fig 1 Phase-diagram of carbon

表2 石墨的蒸气压

Tab 2 Vapor pressure of graphite

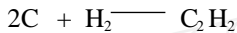
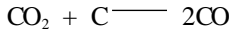
T/	P/Pa
1 750	1.01 × 10 <sup>-5</sup>
1 980	1.01 × 10 <sup>-3</sup>
2 267	1.01 × 10 <sup>-1</sup>
2 636	1.01 × 10
3 130	1.01 × 10 <sup>3</sup>
3 446	1.01 × 10 <sup>4</sup>
3 827	1.01 × 10 <sup>5</sup>

#### 2.2.2 碳的表面异相化学反应

含铝固体推进剂的燃烧产物成分主要是H<sub>2</sub>、

H<sub>2</sub>O、CO、HCl、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、Cl<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>, 其次是 Al、AlCl<sub>3</sub>、NO、O<sub>2</sub>、OH<sup>-</sup> 等<sup>[6]</sup>。在高温条件下, H<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、O、OH<sup>-</sup> 等将会与碳-碳复合材料发生反应, 主要的影响因素是 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、H<sub>2</sub>。

鉴于固体推进剂组分通常设计为贫氧体系, 主要的表面异相化学反应如下:



当然, 在高温高速气流作用下, 异相化学反应要复杂得多。

燃气产物与喉衬表面碳的反应动力学比较复杂。一般认为当推进剂在燃烧时, 炽热的气流流过喷管喉部, 在温度较低的喉衬壁面形成附面层, 流动形态依具体条件而定。在核心流中的大量侵蚀性化学组分穿过附面层扩散到喉衬壁面, 与碳-碳复合材料发生异相化学反应引起表面消蚀。发动机开始工作时喉衬表面温度较低, 表面反应的速率比侵蚀性组分穿过附面层扩散的速率低, 整个喉衬的烧蚀由表面异相反应动力学控制; 当发动机逐渐达到平衡工作条件后, 喉衬表面温度升高, 表面烧蚀由它们共同控制, 表面化学反应控制的约占 30%, 扩散控制的约占 70%<sup>[7]</sup>。

### 2.3 碳-碳复合材料的机械侵蚀<sup>[8,9]</sup>

固体火箭发动机燃气两相流冲刷能够引起包括发动机性能降低直到喷管破坏等各种问题。一般情况下, 固体火箭发动机工作时, 喷管入口和喉部区域内的温度比铝或氧化铝的熔点要高。因此, 在这些区域内, 一方面, 在高速气流推动作用下, 熔融粒子撞击到喉衬壁面, 导致基体碳和纤维的机械损伤和剥离; 另一方面, 在固体粒子撞击到喉衬壁面的瞬间, 使材料表面温度迅速升高, 影响材料的热化学烧蚀。

### 3 碳-碳复合材料烧蚀性能影响因素分析

喉衬热环境的高温复杂性和烧蚀过程中状态的多变性, 使碳-碳复合材料在喉衬热环境中的热化学行为复杂多样。由于碳-碳复合材料的非均质性, 微观结构复杂, 从纤维性能到预制件成型方式, 从先驱体性能到复合工艺等, 都将对材料耐烧蚀性能产生

不同程度的影响。

### 3.1 纤维特性

碳-碳复合材料的力学和烧蚀性能在很大程度上取决于碳纤维的类型和质量<sup>[10]</sup>。用于碳-碳复合材料的碳纤维可以多种多样, 如根据前驱体的不同有粘胶基、聚丙烯腈基、沥青基碳纤维等, 每一种碳纤维依性能的不同又可分为若干系列。碳-碳复合材料主要根据所设计的材料用途、工作环境和材料制造过程中纤维能力的发挥来确定所用碳纤维的类型, 主要的性能指标包括强度、模量、热性能等。表 3 列出了不同模量碳纤维对 3D 碳-碳复合材料烧蚀性能的影响比较。

表 3 不同类型碳纤维 3D 碳-碳复合材料烧蚀性能比较  
Tab 3 Ablation properties of 3D C/C composites made from different type fibers

驻点压力 /MPa	碳纤维线烧蚀率 /mm · s <sup>-1</sup>		
	低模粗编	高模粗编	高模细编
4.4	2.08	2.43	2.25
8.8	24.9	4.03	3.83
16.4	35.3	10.28	10.54

一般来说, 高模碳纤维在高温处理时可引起纤维高度石墨化, 结晶沿纤维轴向排列较好, 可提供高导热性、高密度、高含碳量及较低的线膨胀系数, 抗烧蚀性能较好。从表 1 来看, 高压下, 高模量碳纤维构成的 3D 碳-碳复合材料烧蚀性能明显好于低模量碳纤维构成的 3D 碳-碳复合材料。

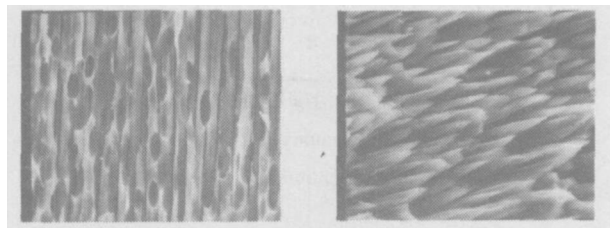
从碳纤维的微观结构来看, 碳纤维属脆性多晶多相材料, 其内部存在着微裂纹、微孔等缺陷, 表面存在毛丝、凹坑等<sup>[11]</sup>, 都会影响碳-碳复合材料的烧蚀性能。如果碳纤维的损伤多、强度低、碱金属和碱土金属等杂质的含量高, 在复合或烧蚀过程中, 杂质挥发掉后, 会在纤维中留下缺陷, 纤维容易在气流的冲刷下折断、剥落, 从而增加碳-碳复合材料的烧蚀率, 为此应选用合适的碳纤维。

### 3.2 预制件结构

碳纤维在碳-碳复合材料中的分布及其均匀性, 严重影响着碳-碳复合材料的抗热震性能和抗烧蚀性能。例如 3D 织物易形成闭孔, 各向同性稍差, 烧蚀率高, 各向之间烧蚀性差别大; 4D 织物不会产生

闭孔,各向结构大致相同,烧蚀均匀。从预制件结构来说,充分利用复合材料的可设计性,提高  $\rho/E$  的比值,减小材料的线膨胀系数,提高材料的各向同性度,可提高材料的抗热震性能及耐烧蚀性能。

研究证明,碳/碳复合材料编织增强体的纤维取向及各向纤维体积含量对其耐烧蚀性能有明显影响,纤维体积分数增大,结构均匀,可提高烧蚀性能。对发动机工作而言,垂直燃气排列的纤维在燃气的侵蚀下,由于多点烧蚀的作用而增加了折断剥落的可能,平行燃气排列的纤维则呈端面烧蚀机理,耐烧蚀的能力较强,纤维烧蚀后表面微观结构如图 2 所示。一般而言,碳毡/碳复合材料的孔隙较小且分布比较均匀,复合过程中不易产生大的缺陷区,耐烧蚀性能优于编织碳/碳复合材料,并能够提供相对均匀的耐烧蚀性能,但抗热震性能次于后者。表 4 给出了不同预制体电弧驻点烧蚀试验结果。



(a) 垂直燃气纤维 860 × (b) 平行燃气纤维 1 000 ×  
图 2 纤维烧蚀后微观结构

Fig 2 Microstructure of fibers after ablation

表 4 不同预制体驻点烧蚀试验结果<sup>1)</sup>

Tab 4 Stagnation point ablation test results of various preforms

预制体	密度 /g · cm <sup>-3</sup>	方向	线烧蚀率 /mm · s <sup>-1</sup>	质量烧蚀率 /g · s <sup>-1</sup>
针刺碳布	1.86	径向	1.98	0.743
		轴向	1.52	0.643
碳毡	1.81	径向	1.015	0.53
4D 织物	1.90	轴向	1.543	0.663

注: 1) 驻点压力 4.35 MPa

材料的编织缺陷对烧蚀性能影响不大,取决于缺陷的位置与尺寸,而编织间距是一重要的影响因素。早期的研究表明细编可提高材料的烧蚀性能,例如当沿焰流轴向和周向纤维的中心间距小于 2.54 宇航材料工艺 2005 年 第 1 期

mm 时,发动机喉衬的耐烧蚀性能较好,而间距为 5.08 mm 时,耐烧蚀性能较差。但关于正交三向碳/碳复合材料的一些研究说明,当编织间距小到一定程度时,减小编织间距已对提高材料的耐烧蚀性能无明显影响。

### 3.3 材料密度

碳/碳复合材料的密度与烧蚀率密切相关<sup>[12,13]</sup>。在相同条件下,材料的密度越大,烧蚀率越小。随喉衬密度的提高,烧蚀率成比例降低,密度增加 10%,烧蚀率可降低 15% 左右。当材料密度达到 1.95 g/cm<sup>3</sup> 后,再增加密度,则烧蚀率变化不大,甚至会有负效应,如图 3 所示。这是因为碳/碳复合材料中的气孔对裂纹尖端应力有一定的松弛作用,密度太大,则材料呈现较多的脆性特性,造成烧蚀过程中的颗粒剥蚀增加,这同时表明密度与碳/碳复合材料烧蚀率的关系不是单一的,而是和其它因素综合作用的结果。

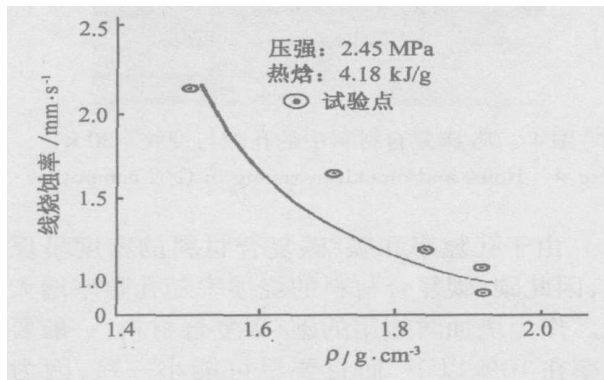


图 3 碳/碳复合材料密度与烧蚀率的关系

Fig 3 Relation of ablation rate vs C/C material density

此外,材料中密度的均匀性对其烧蚀性能有较大影响。已经证明,烧蚀过程中的微粒剥蚀现象主要是材料的不同步烧蚀造成。当材料存在密度不均时,在烧蚀过程中出现局部烧蚀速率的差异,烧蚀的不同步造成表面粗糙,暴露在气流中的凸起部分可能在气动剪力作用下剥落,造成材料机械剥蚀的增加。

### 3.4 孔隙

碳素制品属多孔材料。碳/碳复合材料中的孔隙,有一部分来源于织物中原有的孔隙,例如纤维束中单丝与单丝、股与股之间的孔隙、纤维束搭接处的孔隙、单丝中的孔洞、单元小空穴中残留的孔隙等。

在复合过程中,这些孔隙或孔洞只能部分被基体碳填充。另外,在高温处理时,小分子或杂质原子的排除会在基体中产生大量的孔隙和微裂纹。利用显微镜观察发现,沥青碳条带片之间的微裂纹和孔隙,也存在于纤维束内单丝之间,而且织物单元小空穴中残留有少量几十微米到上百微米的大孔洞,界面的粘接不良也造成大量界面裂纹的出现,如图4所示。在发动机工作过程中,烧蚀会造成次表面结构的松弛,引起孔隙增加和扩大。一方面是由于表面材料的氧化烧蚀,使表面孔隙增大与延伸,另一方面是极高的烧蚀次层面温度,使材料内部的剩余有机物进一步裂解或升华,次层内的蒸发效应使内部孔隙增加。

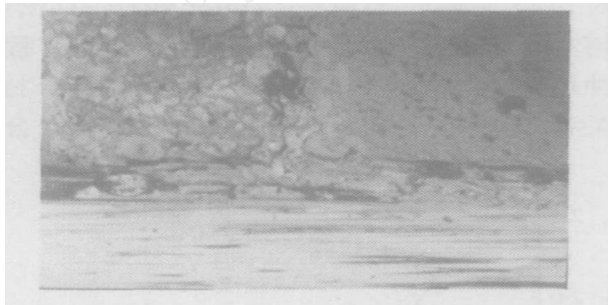


图4 碳/碳复合材料中的孔隙与裂纹 20×

Fig 4 Holes and crackles existing in C/C composites

由于孔隙率和碳/碳复合材料的密度呈反比关系,因此碳/碳复合材料的烧蚀率随孔隙率增大而增大。作为烧蚀防热用的碳/碳复合材料,一般要求孔隙率在10%以下,而且要尽可能小一些,因为开孔会造成材料的局部优先侵蚀,而闭孔中残留的少量气体在高温时膨胀产生的压力,足以破坏材料。另外,孔隙和微裂纹的结构和分布,尤其是微裂纹的取向对材料的烧蚀会造成明显影响,并受工作压力的控制。在烧蚀表面,当孔隙或微裂纹与焰流方向平行时,会迅速扩展为一定的沟槽,严重时,裂纹在热应力作用下的扩展可能造成整个喉衬纵裂,焰流穿火造成灾难性后果;垂直时,则会使火焰形成涡流,造成烧蚀坑。因此,在喉衬内表面,不允许存在有大的孔隙或微裂纹,特别是纵向裂纹。在材料内部,一定取向和数量的微裂纹存在能够提高材料的抗热震能力,但大量的微裂纹存在则可能使喉衬在发动机工作过程中整体碎裂,造成发动机工作失效。在低压下,孔隙结构的差别不足以引起烧蚀率大的

差别,在较高的压力下,更大的剪切力使多孔的碳/碳复合材料表面和次表面更容易被烧蚀,造成机械侵蚀的增加。

### 3.5 基体碳的种类

在碳/碳复合材料中,随致密化工艺的不同,材料中可能存在三种不同的基体碳:化学气相沉积(CVD)碳、树脂碳、沥青碳。不同种类的基体碳和同类基体碳的不同细观结构都会影响到碳/碳复合材料的烧蚀性能。

基体碳的微观结构包括其种类,结晶情况,晶体取向,基体内孔隙和微裂纹的大小、数量及分布,夹杂等。受工艺过程和热处理温度的影响,基体碳沿纤维可能有不同的取向,如图5所示<sup>[14]</sup>。

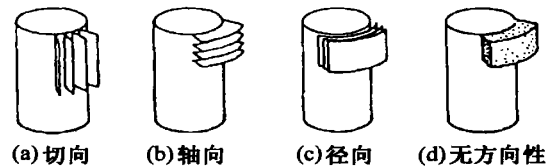


图5 基体碳沿纤维的可能取向

Fig 5 Elementary possibilities for matrix orientation around fiber

一般沥青碳晶体的a-b面主要沿纤维轴向取向,化学气相沉积碳主要沿径向取向,而树脂碳的取向是二者兼而有之。具体地讲,树脂碳除受碳化工工艺控制外,经高温石墨化处理,可使其部分结晶;沥青碳易石墨化,其结构与400~700℃碳化工工艺关系密切;化学气相沉积碳的结构与其沉积温度及气相先驱体有关,一般在生成后很难通过工序改变其晶体取向,石墨化仅能使其结晶程度增加。

研究表明,化学气相沉积碳的纯度最高,与纤维结合强度较高,内部组织细密,硬度较大,耐烧蚀性能最好,沥青碳次之,树脂碳较差。但在烧蚀过程中,三种基体碳和纤维碳的不同步烧蚀可能会使烧蚀碳失去周围支持而剥蚀;同时,基体碳的烧蚀受烧蚀角的影响,若碳的石墨层面与气流垂直,则较耐机械剥蚀,耐烧蚀性能提高。表5给出了不同基体碳驻点烧蚀试验结果。从表5来看,热解碳和树脂碳混合基体的材料表现出了较好的耐烧蚀性能,则是由于该材料的密度远大于纯热解碳基体所致,基体碳烧蚀后微观结构见图6。

表 5 不同基体碳驻点烧蚀试验结果<sup>1)</sup>

Tab 5 Stagnation point ablation test results of various matrices

基体	密度 /g · cm <sup>-3</sup>	线烧蚀率 /mm · s <sup>-1</sup>	质量烧蚀率 /g · s <sup>-1</sup>
热解碳	1.82	1.27	0.410
热解碳 +树脂碳	1.92	0.653	0.250
沥青碳	1.81	1.48	0.500
沥青碳 +树脂封孔	-	1.21	0.480

注: 1) 驻点压力 4.35 MPa.



图 6 基体碳烧蚀后微观结构 540 ×

Fig 6 Microstructure of matrices after ablation

### 3.6 石墨化度

碳/碳复合材料的基本结构为乱层结构或介于乱层结构与石墨晶体结构之间的过渡型。石墨晶体是网平面的三维有序堆聚,而乱层结构仅在网平面上二维有序,其整体呈紊乱状态,层间距较大,微晶尺寸较小。通常超过某一热处理温度时,开始发生三维层平面的排列,这种变化伴随着层间距的减小和微晶尺寸的增大,即石墨化过程。石墨化度是表征这一过程的参数,用以表征碳/碳复合材料的热稳

定性和热导率的优劣。碳/碳复合材料石墨化度高,说明材料的内部三维有序度好,可提供材料较高的热导率,提高材料的抗热震能力;石墨化度低时,碳原子活性大,热导率低,受化学动力学支配的烧蚀速率明显增大。但石墨化度并不是越高越好,过高的石墨化度会引起材料的脆性增加,压缩强度降低,烧蚀过程中的微粒剥蚀现象增加。由于碳/碳复合材料中含有不同微观组成的相碳,如纤维碳、沥青碳、气相沉积碳等,一般而言,这些相碳的石墨化程度不一致,从而影响到局部烧蚀性能。

### 3.7 杂质

大多数元素及其化合物都是碳与发动机燃气反应的活性催化剂。质谱全元素分析技术表明,碳/碳复合材料中存在的各种杂质元素如表 6 所示<sup>[15]</sup>。

表 6 中未列出的元素含量低于仪器的探测极限,由于所用碳纤维和基体原材料的不同,不同制品中的各元素含量会有所差别。在多数情况下,元素是以化合物的形式存在的。一般而言,基体碳中的杂质元素会超过纤维。特别是沥青碳是由工业沥青转化而来,沥青中杂质较多,致密工艺的热处理不足以使所有的杂质元素挥发。从表 6 中数据来看,只有 B、Si、Ti 的含量高于 1.1 × 10<sup>-4</sup>%,而 B 可提高材料的石墨化程度,对烧蚀有抑制作用, Si 没有催化活性, Ti 与 Si 有相似的作用,其它较活泼的碳反应的催化剂含量均较低。总的来说,碳/碳制品中的杂质含量取决于原材料和工艺,对烧蚀性能的影响取决于杂质种类与含量。若挥发性杂质过多,发动机工作过程中可能造成短时间内大量排出的现象,在制品内产生很大的气胀压力,严重时导致制品开裂失效。

表 6 碳/碳复合材料质谱分析示例

Tab 6 Example on mass spectrographic analysis of C/C composites

元素	含量	元素	含量	元素	含量	元素	含量
Li	7.0 × 10 <sup>-7</sup>	Se	< 1.5 × 10 <sup>-6</sup>	K	4.0 × 10 <sup>-6</sup>	Co	< 5.3 × 10 <sup>-6</sup>
B	1.2 × 10 <sup>-4</sup>	Y	2.4 × 10 <sup>-6</sup>	Ca	1.1 × 10 <sup>-5</sup>	Ni	8.0 × 10 <sup>-6</sup>
F	1.7 × 10 <sup>-7</sup>	Zr	1.6 × 10 <sup>-5</sup>	Ti	1.8 × 10 <sup>-4</sup>	Cu	8.3 × 10 <sup>-7</sup>
Na	1.9 × 10 <sup>-6</sup>	I	< 1.2 × 10 <sup>-6</sup>	V	4.3 × 10 <sup>-7</sup>	Zn	< 1.2 × 10 <sup>-6</sup>
Al	7.4 × 10 <sup>-6</sup>	Ba	5.3 × 10 <sup>-6</sup>	Cr	1.7 × 10 <sup>-6</sup>	As	2.0 × 10 <sup>-6</sup>
Si	8.3 × 10 <sup>-4</sup>	Ce	1.5 × 10 <sup>-6</sup>	Mn	5.0 × 10 <sup>-6</sup>	Ga	3.2 × 10 <sup>-6</sup>
P	2.8 × 10 <sup>-6</sup>	Cl	4.3 × 10 <sup>-6</sup>	Fe	1.7 × 10 <sup>-6</sup>		

## 4 结论

(1)喉衬热环境下碳-碳复合材料的烧蚀受复杂燃气环境众多因素共同作用,主要的烧蚀效应有碳的升华、表面异相化学反应以及机械侵蚀等。

(2)从材料本体特性出发,碳-碳复合材料烧蚀性能的影响因素有纤维特性、预制件结构、材料密度、孔隙、基体碳的种类、石墨化度、杂质等,部分因素存在交互作用。

(3)全面分析喉衬热环境下碳-碳复合材料的烧蚀需结合喷管结构设计、推进剂类型与组分、发动机实际工作参数等共同进行。

### 参考文献

- 1 Schmidt D, Dewidson K, Theibert L S. Evolution of carbon-carbon composites(CCC). SAMPE, 1999; 32(4): 44~45
- 2 王铮,胡永强. 固体火箭发动机. 北京:宇航出版社, 1993: 238~283
- 3 陈汝训. 固体火箭发动机设计与研究. 北京:宇航出版社, 1992: 117~223
- 4 王茂章. 碳的多样性及碳质材料的开发. 见:第二届全国新型碳材料学术研讨会论文集, 1995: 1~12
- 5 高桥洋一. 碳的热性质. 新型炭材料, 1987; (2): 67~74
- 6 刘叔涓. 碳-碳复合材料的烧蚀计算. 推进技术, 1987; (2): 14~21
- 7 张德雄译. 固体火箭发动机碳-碳喷管喉部表面销蚀的气热化学分析. 固体火箭技术, 1989; (3): 59~71
- 8 欧阳琪译. 固体火箭发动机喷管的入口和喉部区域的粒子冲刷侵蚀作用. 国外固体火箭技术, 1984; (1): 49~56
- 9 李志明. 电子扫描显微镜在喷管研究中的应用. 固体火箭推进, 1985; (3): 34~44
- 10 许正辉,朱良杰,王俊山. 3D C/C材料用碳纤维选择. 见:第二届全国新型碳材料学术研讨会论文集, 1995
- 11 贺福,王茂章. 碳纤维及其复合材料. 北京:科学出版社, 1997: 23~31
- 12 丘哲明主编. 固体火箭发动机材料与工艺. 北京:宇航出版社, 1995: 285~343
- 13 Bahlo P等. 高密度 C/C复合材料的发展. 新型炭材料, 1987; (1): 53~55
- 14 Peebles JR L H, Meyer R A, Jortner J. Interfaces in polymer, ceramic and metal matrix composites Elsevier Science Publishing Co, 1988: 1~15
- 15 储双杰. 毡基 C/C复合材料氧化动力学研究. 复合材料学报, 1994; 11(1): 9~11

(编辑 吴坚)

(上接第 34页)

- 2 Fukada A. Phenolic resins In: Salamone J C ed. Polymeric Materials Encyclopedia Florida: CRC press, 1996: 5 035
- 3 Reghunadhan Nair C P. Non-conventional phenolic resin-an overview on recent advances. J. of sci & industrial Research, 2002; 61: 17~33
- 4 Bindu R L, Reghunadhan Nair C P, Ninan K N. Addition cure phenolic resins based on propargyl ether functional novolacs: synthesis, curing and properties. Polym. Int., 2001; 50: 651~658
- 5 徐积功. 有机化学. 北京:高等教育出版社, 1990: 380~383
- 6 Kissinger H E. Reaction kinetics in differential analysis. Anal. Chem., 1957; 29(11): 1 702~1 706
- 7 Crane L W, Dynes P J, Kaelble D H. Analysis of curing kinetics in polymer composites. Journal of Polym. Sci Polym. Letter Edn., 1973; 11: 533

(编辑 李洪泉)