复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第31卷 第5期 10月 2014年
Vol. 31 No. 5 October 2014

文章编号：1000-3851(2014)05-1238-06

C/C-Cu复合材料等离子体烧蚀性能

陈英博，李 红*，孙 乐，任慕苏，孙晋良，杨 敏
（上海大学 复合材料研究中心，上海 200072）

摘 要： 为了研究渗铜对C/C复合材料烧蚀性能的影响，利用化学气相渗透(CVI)和液态压力浸渗工艺制备了C/C-Cu复合材料，并采用等离子体烧蚀装置对C/C-Cu复合材料进行烧蚀，研究其烧蚀性能。结果表明：Cu的加入有效缩短了材料的制备周期；Cu均匀分布在C/C坯体内，呈连续的网状结构；在烧蚀前30 s阶段，Cu通过熔化吸热降低了C/C-Cu试样的升温速度，C/C-Cu复合材料的线烧蚀率低于C/C复合材料，耐烧蚀性能优异；随着烧蚀时间的延长，C/C-Cu复合材料表层的Cu液被火焰带走，表层变为多孔低密度的C/C层，C/C-Cu复合材料的线烧蚀率迅速增加并超过C/C复合材料，耐烧蚀性能降低。

关键词： C/C-Cu复合材料；液态压力浸渗；等离子体烧蚀；线烧蚀率；烧蚀行为
中图分类号： TB333 **文献标志码：** A

Plasma ablation properties of C/C-Cu composites

CHEN Yingbo, LI Hong*, SUN Le, REN Musu, SUN Jinliang, YANG Min
(Composite Materials Research Center, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In order to study the ablation properties of C/C composites influenced by copper infiltration, C/C-Cu composites were prepared by chemical vapor infiltration (CVI) and liquid pressure infiltration processes. The ablation properties of C/C-Cu composites were verified using a plasma ablation device. The results show that the preparation period is significantly shortened with the addition of Cu in C/C composites. Cu uniformly distributes in C/C composites and forms a continuous network structure. The linear ablation rate of C/C-Cu composites is lower than that of C/C composites in the initial stage within 30 s of ablation, because the melting of Cu could absorb a lot of energy and reduce the heating rate. With the ablation time increases, Cu on surface of C/C-Cu composites is blowing away by plasma flames, the sample surface of C/C-Cu composites becomes a lower density porous C/C framework. Therefore, the linear ablation rate of C/C-Cu composites increases violently, and becomes higher than C/C composites', the ablation resistance of C/C-Cu composites decreases evidently.

Keywords: C/C-Cu composites; liquid pressure infiltration; plasma ablation; linear ablation rate; ablation behavior

固体火箭发动机(Solid Rocket Motor, SRM)经过多年的发展，已被广泛应用于军事及航空、航天领域。SRM喉衬在工作过程中要承受高温和高压燃气流的冲刷侵蚀，工作环境极其恶劣[1]。而C/C复合材料具有低密度、低热膨胀系数、高比强度、高比模量、耐热冲击和耐烧蚀等优点，是目前已知的耐高温性能最好的材料之一，被广泛应用于喷管喉衬材料[2-4]。但是C/C复合材料在制备过程中，尤其是采用化学气相渗透(CVI)工艺进行增密时，需要的周期特别长，且前驱体的利用率低，这导致C/C复合材料的成本居高不下，在一定程度上制约了C/C复合材料的应用[5-6]。为了缩短C/C复合材料的制备周期，降低生产成本，可以向C/C复合材料的孔隙中渗Cu，从而达到增密的效果，还

收稿日期： 2013-08-01；**录用日期：** 2013-11-12；**网络出版时间：** 2013-12-16 15:05
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/10.13801/j.cnki.fhclxb.20140623.001.html
基金项目： 上海市重点学科建设项目(s30107)
通讯作者： 李 红，博士，助理研究员，研究方向为碳/碳复合材料。 E-mail：lihong2007@shu.edu.cn

引用格式：陈英博，李 红，孙 乐，等. C/C-Cu复合材料等离子体烧蚀性能[J]. 复合材料学报，2014，31(5)：1238-1243. Chen Yingbo, Li Hong, Sun Le, et al. Plasma ablation properties of C/C-Cu composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(5): 1238-1243.

可以利用 Cu 的高温发汗性，提高材料的耐烧蚀性能[7-10]。

本文中以聚丙烯腈预氧化纤维针刺毡为预制体，经碳化、CVI 和石墨化处理等工艺制备出 C/C 坯体。由于 Cu 与 C 之间的润湿很差，因此采用液态压力浸渗技术将 Cu 熔融渗入 C/C 坯体中，制备 C/C－Cu 复合材料。采用等离子体火焰对 C/C－Cu 复合材料进行烧蚀试验，研究 C/C－Cu 复合材料的烧蚀性能。

1 实验材料及方法

C/C 坯体的工艺流程为：将聚丙烯腈预氧化纤维针刺毡在 950 ℃条件下碳化得到碳毡；采用 CVI 工艺对碳毡进行增密(反复多次)，在增密过程中根据情况进行高温处理，获得密度为 1.52 g/cm^3 的 C/C 坯体。其中碳气源为丙烯，CVI 工艺温度为 950 ℃，高温处理温度为 2 350 ℃。采用液态压力浸渗工艺，将制得的低密度多孔 C/C 坯体和铜棒置于石墨罐中，抽真空升温并保温，随后通入氩气加压，最终获得 C/C－Cu 复合材料。对比样 C/C 复合材料采用 CVI 和浸渍/碳化(Impregnation and Carbonization，I/C)相结合的工艺进行增密，表 1 为 C/C－Cu 复合材料与对比样 C/C 复合材料的基本参数。

表 1 C/C－Cu 复合材料与 C/C 复合材料的基本参数

Table 1 Basic parameters of C/C－Cu composites and C/C composites

Specimen	Densification	Density of C/C/ (g·cm^{-3})	Density of C/C－Cu/ (g·cm^{-3})	Volume fraction of Cu/ %	Open porosity/%
C/C－Cu	CVI	1.52	2.23	8.3	15
C/C	CVI & I/C	1.86			2

Note：CVI—Chemical vapor infiltration；I/C—Impregnation and carbonization.

烧蚀试样的尺寸为∅30 mm×10 mm，其中 z 向针刺纤维与火焰方向平行。试验在大气环境下进行，等离子火焰喷嘴垂直于试样表面，喷嘴距试样表面距离为 90 mm，烧蚀功率为 36 kW，氩气流量为 40 L/min，氢气流量为 10 L/min，火焰中心温度约为 2 200 ℃，烧蚀时间分别为 30、45 和 60 s。

试样的平均线烧蚀率($\overline{R}_d$)和平均质量烧蚀率($\overline{R}_m$)的计算公式分别为

$$\overline{R}_d = (d_1 - d_2)/t \tag{1}$$

$$\overline{R}_m = (m_1 - m_2)/t \tag{2}$$

式中：d_1 和 d_2 分别为试样烧蚀前后的厚度；m_1 和 m_2 分别为试样烧蚀前后的质量；t 为试样烧蚀的时间。

试样在 3 个不同阶段的分段线烧蚀率计算公式分别为

$$R_{0\text{-}30\ s} = h_1/30 \tag{3}$$

$$R_{30\text{-}45\ s} = (h_2 - h_1)/15 \tag{4}$$

$$R_{45\text{-}60\ s} = (h_3 - h_2)/15 \tag{5}$$

式中：h_1、h_2 和 h_3 分别为试样烧蚀 30、45 和 60 s 后的厚度损失量。

用排水法测量试样的密度及开孔率；用 BS210S 型电子天平(精度为 0.1 mg)测量试样烧蚀前后的重量，用游标卡尺(精度为 0.01 mm)测量试样烧蚀前后的厚度；采用 KEYENCE VHX－500X 金相显微镜观察 C/C 坯体渗铜的效果；采用 JSM－6700 扫描电子显微镜(SEM)观察试样烧蚀前后的显微结构，用能谱仪对烧蚀后的试样进行元素分析，用 18kW D/M AX 型 X 射线衍射仪(XRD)对烧蚀后的试样进行物相分析。

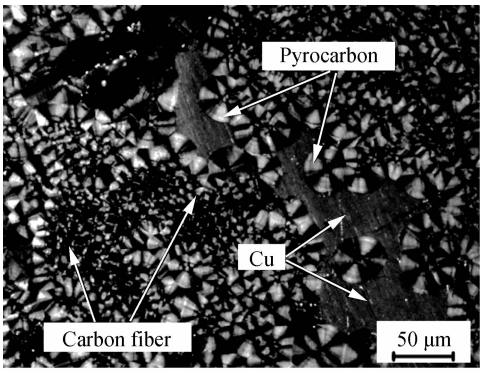
2 结果与讨论

2.1 C/C－Cu 复合材料烧蚀前的形貌

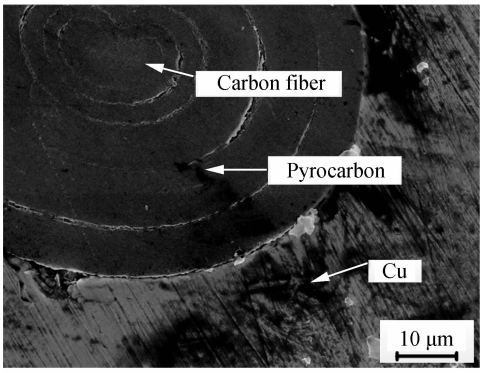
图 1 为 C/C－Cu 复合材料显微形貌。由图1(a)的偏光形貌可以看到，热解碳环绕着一根根的碳纤维，热解碳既有光滑层结构又有粗糙层结构，其中光滑层结构偏多，而且可以发现，Cu 已充分填充到 C/C 坯体内部的孔隙中，包覆在热解碳周围，呈现连续分布状态。由图 1(b)可以观察到碳纤维与热解碳、热解碳与 Cu 之间的界面，其中碳纤维的直径约为 6～8 μm，碳纤维、热解碳与 Cu 三相的结合情况较为理想。

2.2 C/C－Cu 复合材料的烧蚀性能

表 2 为 C/C－Cu 复合材料与 C/C 复合材料在不同烧蚀时间时的平均线烧蚀率和平均质量烧蚀率。可以发现，它们的烧蚀性能有很大的差异，而且烧蚀速率的变化规律也不相同。C/C－Cu 复合材料在最初 30 s 内的烧蚀速率较低，平均线烧蚀率低于 C/C 复合材料的；当烧蚀时间延长到 45 s 时，C/C－Cu 复合材料的烧蚀速率迅速增加，平均线烧蚀率超过了C/C复合材料的，平均质量烧蚀率急剧



(a) Polarized morphology



(b) SEM image

图 1　C/C－Cu 复合材料显微形貌

Fig. 1　Microscopic morphologies of C/C－Cu composites

表 2　C/C－Cu 复合材料和 C/C 复合材料的平均线烧蚀率和平均质量烧蚀率

Table 2　Average linear ablation rate and average mass ablation rate of C/C－Cu composites and C/C composites

Specimen	Average linear ablation rate/(μm·s^{-1})			Average mass ablation rate/(mg·s^{-1})		
	30 s	45 s	60 s	30 s	45 s	60 s
C/C－Cu	1.0	3.1	3.8	3.0	33.3	26.3
C/C	2.0	2.4	2.7	2.2	2.4	3.3

增大；当烧蚀时间继续增加，C/C－Cu 复合材料的平均线烧蚀率增速减缓，平均质量烧蚀率出现下降，但都高于 C/C 复合材料的。

图 2 为 C/C－Cu 复合材料与 C/C 复合材料在 3 个不同阶段时的分段线烧蚀率。可以发现，C/C 复合材料在前 30 s 内线烧蚀率较低，在 30～45 s 和 45～60 s 阶段内的线烧蚀率略有增加，烧蚀速率比较均匀；对于 C/C－Cu 复合材料，在前 30 s 内其线烧蚀率仅为 C/C 复合材料的一半，在 30～45 s 内，其线烧蚀率迅速增加，达到 C/C 复合材料的 2 倍，在 45～60 s 内，其烧蚀速率相对 30～45 s 阶段略微降低，但仍远高于 C/C 复合材料。可以看出，C/C－Cu 复合材料烧蚀速率最快的时间段是 30～45 s 阶段，Cu 的加入明显改变了 C/C 复合材料的烧蚀状况。

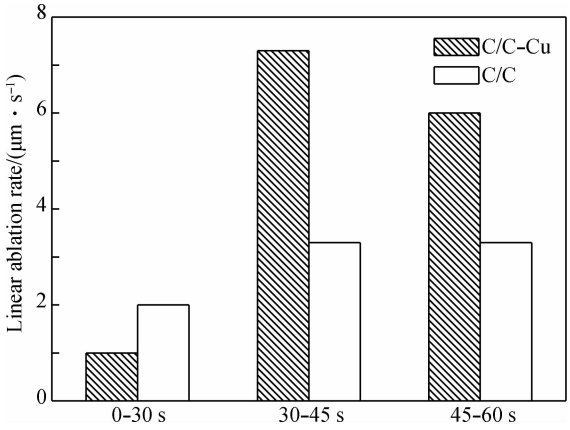
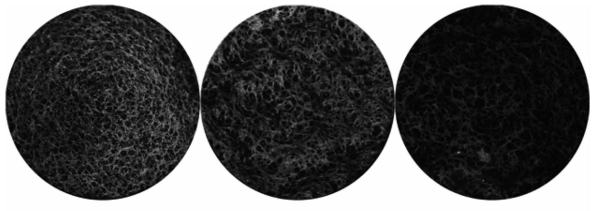


图 2　C/C－Cu 复合材料与 C/C 复合材料在 3 个不同阶段的分段线烧蚀率

Fig. 2　Sublevel linear ablation rates of C/C－Cu composites and C/C composites at three different stages

2.3　C/C－Cu 复合材料烧蚀后的形貌

图 3 为 C/C－Cu 复合材料烧蚀不同时间后的照片。可以发现，烧蚀面都比较均匀，没有出现裂纹，但是出现了大量的孔洞。在烧蚀 30 s 后，烧蚀面较亮且光滑，孔洞较小；随着烧蚀时间的延长，烧蚀面逐渐变暗且粗糙，孔洞越来越大。观察烧蚀过程，可以发现有熔融的 Cu 液滴流出，并迅速被火焰吹飞，而且随着时间的延长，流出的 Cu 液量逐渐减少。



(a) Ablation for 30 s　(b) Ablation for 45 s　(c) Ablation for 60 s

图 3　C/C－Cu 复合材料烧蚀不同时间后的照片

Fig. 3　Photographs of C/C－Cu composites after ablation for different time

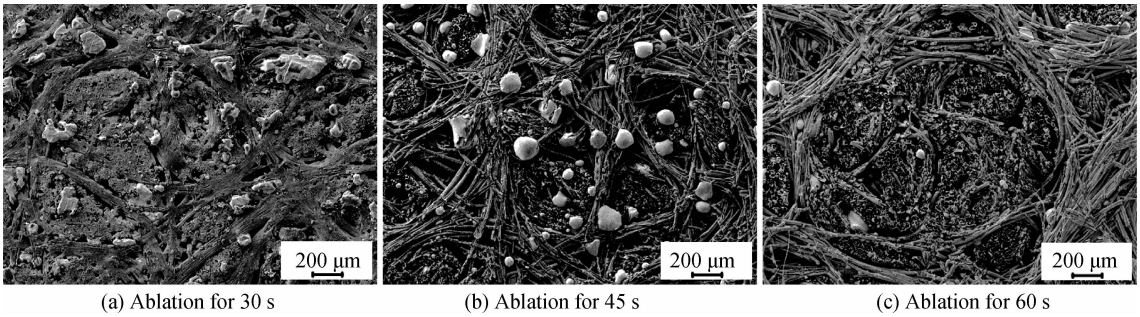
图 4 为 C/C－Cu 复合材料烧蚀不同时间后的 SEM 照片。烧蚀 30 s 后，Cu 多数以块状形式保存下来，覆盖在试样表面或填充入试样的孔隙中，碳纤维和热解碳的烧蚀情况并不明显(见图 4(a))；烧蚀 45 s 后，试样表面出现了许多球形颗粒，这些颗粒应该是剩余的 Cu 液在冷却过程中收缩形成的，同时还出现了许多孔隙，表面开始变得凹凸不平(见图 4(b))；烧蚀 60 s 后，烧蚀面已经看不到明显

的 Cu，仅留下极少量的球形颗粒，试样表面出现明显的烧蚀坑(见图 4(c))。

图 5 为 C/C－Cu 复合材料烧蚀不同时间后的显微形貌。烧蚀 30 s 后，试样表面有大块的 Cu 相，z 向针刺纤维受到了微弱的烧蚀，纤维束周围出现较大的空隙(见图 5(a))；与火焰方向垂直的纤维间也可以发现大块的 Cu 相(见图 5(d))，纤维与热解碳之间出现了微小的缝隙。但总体上试样表面依旧保持致密状态，碳纤维和热解碳的烧蚀情况不太明显。烧蚀 45 s 后，C/C－Cu 复合材料表面已经看不到大块的 Cu 相，仅留下一些球形的颗粒(见图 5(b))。z 向针刺纤维受到了比较剧烈的烧蚀作用，纤维变尖变细，热解碳层变薄，出现“包鞘”的结构。这是由于纤维与热解碳之间存在界面，而这些界面容易成为氧化活性点，在高温下首先发生热化学烧蚀，导致纤维与热解碳之间的缝隙越来越大[11]，于是出现“包鞘”结构。与火焰方向垂直的纤维出现了热解碳的剥落，碳纤维裸露出来(见图 5(e))，试样表面已经开始变得疏松。烧蚀 60 s 后，试样表面已经基本看不到 Cu 颗粒的存在，z 向针刺纤维受到了更加剧烈的烧蚀，一部分纤维内部被掏空(见图 5(c))。同时，试样表面出现大量的断裂纤维，变得更加疏松，孔隙越来越多(见图 5(f))。

2.4 C/C－Cu 复合材料烧蚀行为分析

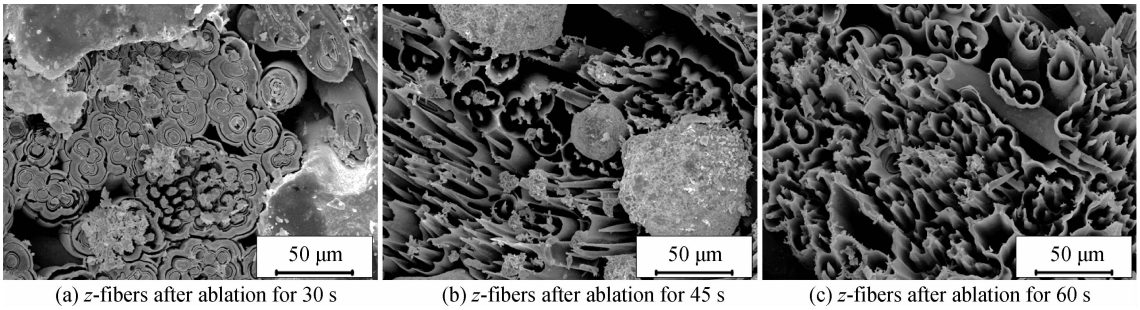
C/C－Cu 复合材料的开孔率约为 15%，远高于 C/C 复合材料的，但当烧蚀时间为 30 s 时，C/C－Cu 复合材料的线烧蚀率低于 C/C 复合材料的，这表明 Cu 的加入提高了 C/C 坯体的耐烧蚀性能。在烧蚀初始阶段，试样表面的温度瞬间急剧上升，由于 Cu 具有优异的导热性能，热量在试样内迅速传递。



(a) Ablation for 30 s　(b) Ablation for 45 s　(c) Ablation for 60 s

图 4　C/C－Cu 复合材料烧蚀不同时间后的 SEM 照片

Fig. 4　SEM images of C/C－Cu composites after ablation for different time



(a) z-fibers after ablation for 30 s　(b) z-fibers after ablation for 45 s　(c) z-fibers after ablation for 60 s

(d) x-y fibers after ablation for 30 s　(e) x-y fibers after ablation for 45 s　(f) x-y fibers after ablation for 60 s

图 5　C/C－Cu 复合材料烧蚀不同时间后的显微形貌

Fig. 5　Microscopic morphologies of C/C－Cu composites after ablation for different time

当试样的温度达到 Cu 的熔点(1 083 ℃)后，Cu 需要一段时间才能全部熔化，而且 Cu 的熔化潜热为 $\Delta H_L = 207.2$ kJ/kg，因此 Cu 在熔化的过程中吸收大量的热量，降低了试样的升温速度，进而降低了试样的烧蚀速率。由于火焰的温度没有达到 Cu 的沸点(2 562 ℃)，因此 Cu 只会从固态变为液态，而不会从液态变为气态。由于 Cu 是在高压下渗进坯体内部的，而且 Cu 与 C 之间润湿性很差，在没有足够的驱动力下，熔融态的 Cu 液很难从试样内部流出。由图 4(a)可以看到大量的 Cu 颗粒保留了下来，覆盖在试样表面或填充进试样的孔隙中，在一定程度上隔绝了火焰与碳材料的接触，从而降低了试样的热烧蚀消耗，对试样起到了保护的作用。由图 5(d)可以看出，Cu 只覆盖了一部分碳基体，而裸露的碳基体仅仅受到微弱的烧蚀，因此 Cu 的作用主要是热沉，通过熔化吸热来降低试样的升温速度。图 6 为 C/C－Cu 复合材料烧蚀不同时间后的截面形貌，可以发现，试样在烧蚀 30 s 后，表层的 Cu 几乎没有流失。在烧蚀前 30 s 阶段，C/C－Cu 复合材料主要发生 Cu 的熔化，而且熔融态的 Cu 液仅有少量的流失，因此 C/C－Cu 复合材料的质量烧蚀率也很低。

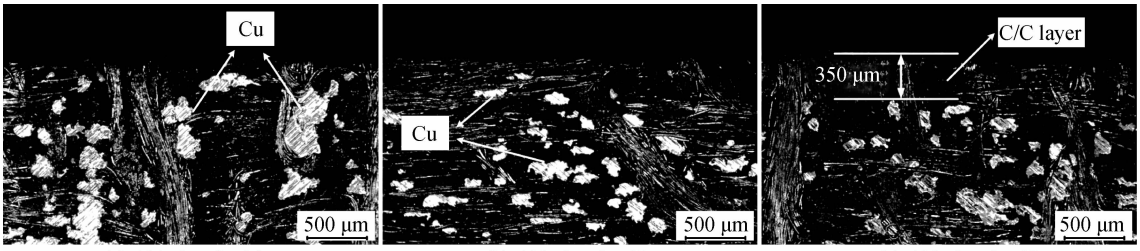


图 6　C/C－Cu 复合材料烧蚀不同时间后的截面形貌

Fig. 6　Cross-sectional morphologies of C/C－Cu composites after ablation for different time

由图 6(b)可以发现，烧蚀 45 s 后，试样表层的 Cu 大量流失，留下低密度的 C/C 层。这是由于等离子体火焰具有高压、高速的特点，随着烧蚀时间的增加，表层熔融态的 Cu 液迅速被火焰吹飞。Cu 流失后留下的孔洞为氧气提供了扩散通道，热解碳在热化学烧蚀的作用下变得疏松，力学性能降低，在高速火焰的作用下发生剥落。热解碳剥落后碳纤维裸露出来，试样表面产生更多的缺陷，这些将会导致更加剧烈的烧蚀[12-13]，因此 C/C－Cu 复合材料在 30～45 s 阶段的烧蚀速率最快。而 C/C 复合材料由于密度较高，耐烧蚀性能较好，在 30～45 s 内的线烧蚀率远低于 C/C－Cu 复合材料的。在 30～45 s 这一阶段，C/C－Cu 复合材料的烧蚀机制以对 Cu 液的冲刷为主，对碳纤维和热解碳的机械剥蚀和热化学烧蚀为辅。

随着烧蚀时间的增加，试样表层基本变为多孔低密度的 C/C 层(见图 6(c))，但 C/C 层的耐烧蚀性能明显比 Cu 好，因此 C/C－Cu 复合材料在 45～60 s 阶段的线烧蚀率相对 30～45 s 阶段有所下降。当试样表层的 Cu 流失后，不再有大量的 Cu 相流失，因此 C/C－Cu 复合材料的质量烧蚀率出现下降。在 45～60 s 这一阶段，试样表层变为 C/C 层，烧蚀机制与 C/C 复合材料类似，主要为机械剥蚀和热化学烧蚀。

图 7 为 C/C－Cu 复合材料烧蚀后的 XRD 谱图。经能谱分析，发现 C/C－Cu 复合材料在烧蚀后主要包含 Cu、C 和 O 这 3 种元素。Cu 的氧化物有 CuO 和 Cu_2O 两种，但是 CuO 在 1 026 ℃时分解为 Cu_2O 和氧气，而 Cu_2O 在 1 800 ℃时失去氧，等离子体火焰的温度远高于 1 800 ℃，因此 Cu 的氧化物是残余的 Cu 液在冷却过程中被氧化生成的。在烧蚀开始后，Cu 能迅速传导热量，并通过熔化吸热有效降低了试样的升温速度。试样表层熔融态的Cu液对试样有一定的保护作用，但很快被吹

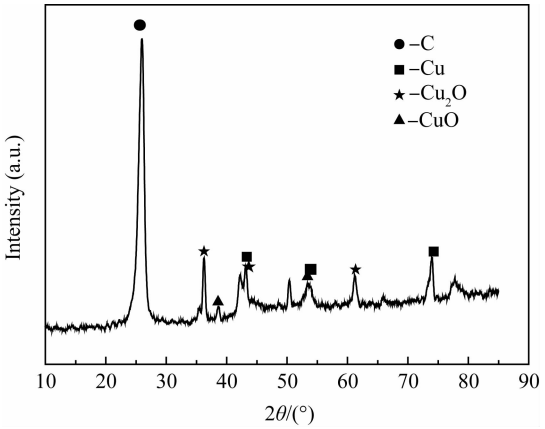


图 7　C/C－Cu 复合材料烧蚀后的 XRD 谱图

Fig. 7　XRD spectrum of C/C－Cu composites after ablation

飞，试样表层逐渐变为低密度的 C/C 层，但试样内部熔融态的 Cu 液很难流出。C/C－Cu 复合材料在等离子体火焰下的烧蚀行为应为 Cu 相的熔化—表层 Cu 液的流失—表层 C/C 层的烧蚀—次表层 Cu 液的流失—次表层 C/C 层的烧蚀。

3 结 论

(1)通过采用液态压力浸渗技术，将 Cu 渗入到 C/C 坯体中制得 C/C－Cu 复合材料，生产周期相对 C/C 复合材料大幅缩短，且 Cu 基体在 C/C 坯体的孔隙中填充充分。

(2)在烧蚀的最初阶段，C/C－Cu 复合材料内的 Cu 相能迅速传导热量，并通过熔化吸收大量热量，有效降低试样的升温速度，其线烧蚀率低于 C/C 复合材料的，C/C－Cu 复合材料显示出较优异的耐烧蚀性能。

(3)随着烧蚀时间的增加，C/C－Cu 复合材料表层的 Cu 相被火焰带走，试样表层变为多孔的 C/C 层，其线烧蚀率迅速增加，并超过 C/C 复合材料的，C/C－Cu 复合材料的耐烧蚀性能下降。

(4)与 C/C 复合材料相比，C/C－Cu 复合材料具有制备周期短、成本低和短时间内耐烧蚀性能优异等优点，因此 C/C－Cu 复合材料具有良好的应用前景。

参考文献：

[1] 林德春，张德雄，陈继荣. 固体火箭发动机材料现状和前景展望[J]. 宇航材料工艺，1999，29(4)：1-5.
Lin Dechun，Zhang Dexiong，Chen Jirong. A review of status and prospects of the materials for solid rocket motors [J]. Aerospace Materials & Technology，1999，29(4)：1-5.

[2] 熊 翔，王雅雷，李国栋，等. CVI－SiC/TaC 改性 C/C 复合材料的力学性能及其断裂行为[J]. 复合材料学报，2008，25(5)：91-97.
Xiong Xiang，Wang Yalei，Li Guodong，et al. Mechanical properties and fracture behavior of CVI－SiC/TaC modified C/C composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2008，25(5)：91-97.

[3] 李贺军，罗瑞盈，杨 峥. 碳/碳复合材料在航空领域的应用研究现状[J]. 材料工程，1997(8)：8-10.
Li Hejun，Luo Ruiying，Yang Zheng. The status and future on research and application about carbon/carbon composites in the aeronautical area [J]. Journal of Materials Engineering，1997(8)：8-10.

[4] 黄海明，杜善义，吴林志，等. C/C 复合材料烧蚀性能分析[J]. 复合材料学报，2001，18(3)：76-80.
Huang Haiming，Du Shanyi，Wu Linzhi，et al. Analysis of ablation of C/C composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2001，18(3)：76-80.

[5] Moriyama M，Takao Y，Wang W X，et al. Fatigue characteristics of metal impregnated C/C composites with slots for load transfer [J]. International Journal of Fatigue，2010，32(1)：208-217.

[6] 李贺军. 炭/炭复合材料[J]. 新型炭材料，2001，16(2)：79-80.
Li Hejun. Carbon/carbon composites [J]. New Carbon Materials，2001，16(2)：79-80.

[7] 吉洪亮，张长瑞，曹英斌. 发汗冷却材料研究进展[J]. 材料导报，2008，22(1)：1-3.
Ji Hongliang，Zhang Changrui，Cao Yingbin. Research development of transpiration cooling materials [J]. Materials Review，2008，22(1)：1-3.

[8] 杨 琳，易茂中，冉丽萍. C/C 坯体对 C/C－Cu 复合材料的摩擦磨损行为的影响[J]. 复合材料学报，2008，25(2)：10-15.
Yang Lin，Yi Maozhong，Ran Liping. Effect of C/C preform on the tribological behavior of C/C－Cu composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2008，25(2)：10-15.

[9] Ran L P，Peng K，Yi M Z，et al. Ablation property of a C/C－Cu composite prepared by pressureless infiltration [J]. Materials Letters，2011，65(13)：2076-2078.

[10] 杨 琳，易茂中，冉丽萍. C/C/Cu 及 C/Cu 复合材料摩擦磨损行为比较[J]. 复合材料学报，2009，26(6)：97-102.
Yang Lin，Yi Maozhong，Ran Liping. Comparative study of friction and wear behavior of C/C/Cu and C/Cu composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2009，26(6)：97-102.

[11] 尹 健，张红波，熊 翔，等. 热解炭结构对 C/C 复合材料烧蚀性能的影响[J]. 材料研究学报，2007，21(1)：10-14.
Yin Jian，Zhang Hongbo，Xiong Xiang，et al. Influence of microstructure of pyrocarbon on ablation performances of C/C composites [J]. Chinese Journal of Materials Research，2007，21(1)：10-14.

[12] Liu L，Li H J，Shi X H，et al. Effects of SiC addition on the ablation properties of C/C composites in different heat fluxes under oxyacetylene torch [J]. Vacuum，2013，90：97-99.

[13] Yin J，Zhang H B，Xiong X，et al. Ablation properties of C/C－SiC composites tested on an arc heater [J]. Solid State Sciences，2011，13(11)：2055-2059.