

# 烧蚀型防隔热/隐身多功能复合材料制备与性能

师建军<sup>1</sup> 李弘瑜<sup>1</sup> 张凌东<sup>2</sup> 孔磊<sup>1</sup> 冯志海<sup>1</sup>

(1 航天材料及工艺研究所, 先进功能复合材料技术重点实验室, 北京 100076)

(2 火箭军驻北京地区第一军代室, 北京 100076)

**文 摘** 以轻质化为前提, 基于烧蚀防热借助于溶胶-凝胶技术制备出低密度防热/隔热/隐身一体化复合材料(HRC), 有效地融合了烧蚀防热、高效隔热和宽频雷达隐身的功能。实验结果表明, 多壁碳纳米管(MWNT)吸波剂均匀分散在杂化酚醛气凝胶骨架中, 随着添加量的增加, HRC材料平均孔径减小, 力学强度得到显著提升, 添加5.0wt%MWNT的HRC与未添加相比压缩模量提高1.8倍。同时, MWNT的引入显著增加了HRC的雷达吸波性能, 在4~18 GHz内反射率<-8 dB。地面风洞考核中, HRC表现出优异的防隔热性能, 最高表面温度达到1700℃左右, 经过400 s烧蚀后最大背面温升(20 mm)仅为153℃, 近零体积烧蚀, 烧蚀后仍保持着优异的宽频雷达吸波性能。

**关键词** 防热, 隔热, 隐身, 多功能, 烧蚀, 气凝胶

中图分类号: TB332

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.06.010

## Preparation and Properties of Multi-Functional Composite Integrated With Heat-Shielding, Insulating and Radar-Absorbing

SHI Jianjun<sup>1</sup> LI Hongyu<sup>1</sup> ZHANG Lingdong<sup>2</sup> KONG Lei<sup>1</sup> FENG Zhihai<sup>1</sup>

(1 Science and Technology on Advanced Functional Composite Laboratory,

Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(2 First Military Agency of the Rocket Force in Beijing, Beijing 100076)

**Abstract** Based on ablative mechanism and light weighting principle, heat-shielding & insulating and radar-absorbing composites (HRC), which efficiently integrated the functions of thermal protection, insulation and radar absorption in wide frequency, were prepared by sol-gel technology and resin transfer molding. SEM images showed that wave-absorbers of multi-walled nanotube (MWNT) well dispersed in the skeletons of hybrid phenolic aerogel. With increasing MWNT loading, the average pore diameter of HRC decreased and the mechanical properties were largely improved. When the MWNT loading was 5.0 wt%, compressive modulus of HRC was 1.8 times higher than that of HRC without MWNT addition. The introduction of MWNT wave-absorbers greatly improved radar-absorbing performance of HRC. The reflection loss of HRC lowered -8 dB after introducing MWNT wave-absorbers between 4 GHz and 18 GHz. In addition, HRC displayed outstanding ablative and heat-insulating properties during test of arc-jet wind tunnel. As the surface temperature of HRC reached 1700℃, temperature rise of backface with 20 mm thickness was only 153℃ and had near zero ablative recession after 400s ablating. In particularly, HRC still possessed good radar-absorbing performance in wide range of frequency after ablation in arc-jet wind tunnel.

**Key words** Thermal protection, Heat-insulating, Radar absorbing, Multi-function, Ablation, Aerogel

### 0 引言

树脂基烧蚀防热材料凭借其高可靠性、高性价比、装配工艺简捷、功能可灵活设计等诸多优点, 在返回式卫星、飞船、导弹弹头等再入/进入型航天飞行

器热防护系统中获得广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。近些年来, 随着临近空间技术的迅速发展, 临近空间飞行器热防护系统在面临减重的同时, 还必须克服严酷的长时加热环境, 对防热和隔热效率均提出更为严苛的要

收稿日期: 2020-06-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51702076); 航天先进制造联合基金项目(U2037206); 装备发展部预先研究项目(41422020404, 61402080108)

第一作者简介: 师建军, 1984年出生, 高级工程师, 主要从事新型树脂基功能复合材料的开发与工程应用研究。E-mail: shijj2016@yeah.net

求<sup>[6-8]</sup>。此外,随着导弹防御体系探测、跟踪和攻击能力的不断增强,西方军事发达国家正逐步打造一张陆、海、空、天、电“五位一体”的立体化防御网络,严重威胁着航天飞行器的空中生存能力<sup>[9,10]</sup>。

传统再入型航天飞行器设计通常采取隐身和隔热功能分别设计和实现的思路,即在设计好的金属结构表面粘贴相应的雷达吸波橡胶缓冲层,然后将隔热材料铺覆于其上<sup>[11-14]</sup>。但是,这种传统的设计思路已无法适应临近空间飞行器的发展,制约着先进航天飞行器突防能力的提升。在临近空间飞行器长时( $\geq 1000$  s)气动加热环境中,低热导率烧蚀隔热材料的烧蚀碳化层厚度大大增加,阻抗匹配性被破坏,电磁波几乎被碳化层全部反射,无法透过隔热层到达吸波层。因此,在临近空间长时加热的严酷热环境下,作为航天飞行器最外层结构的隔热材料在轻质化的前提下,开发新型的融合隔热、隔热和雷达隐身功能的多重功能集成复合材料,是未来先进隔热材料的重要发展趋势之一。本文通过对复合材料结构设计,制备了具有电磁吸收功能的杂化气凝胶,并以此为树脂基体制备出兼容隔热、隔热和雷达隐身功能的“三合一”功能集成轻质复合材料。

## 1 实验

### 1.1 原材料

高孔隙率石英纤维增强体,密度 $0.40\text{ g/cm}^3$ ,自制;DKP025杂化酚醛树脂,固含量约为28 wt%,自制;六亚甲基四胺(HMTA),分析纯,国药集团;多壁碳纳米管,TNGMH2,中国科学院成都有机化学有限公司;碳纳米管醇分散剂,中国科学院成都有机化学有限公司;无水乙醇,分析纯,市售。

### 1.2 隔热/隔热/隐身一体化复合材料制备

#### 1.2.1 吸波杂化树脂溶液的配制

按照多壁碳纳米管(MWNT)/醇分散剂质量比为10/1的比例,称量一定量的MWNT和醇分散剂,放入无水乙醇溶剂中,进行超声分散100 h以上,配制成10wt%的稳定浆料。称取配制好的MWNT浆料,按照MWNT在DKP025杂化树脂中的质量分数为0、1.0 wt%、3.0 wt%和5.0 wt%的设计比例,加入到DKP025杂化酚醛树脂溶液中,加入一定量的HMTA,搅拌均匀,形成稳定的吸波杂化树脂溶液,备用。

#### 1.2.2 隔热/隔热/隐身一体化复合材料的设计

从成本控制和可靠性出发,以烧蚀隔热方式为基础,材料轻质化为前提,采用树脂基烧蚀隔热的材料体系。对高孔隙率纤维增强体设计,降低增强体的密度和热导率,通过在烧蚀树脂基体中引入微米尺度的孔结构,进一步实现减重和大幅降低热导

率的目的。考虑到高温烧蚀环境下隔热结构的雷达隐身,采用介电损耗和电阻损耗为主的电磁吸收形式,起到雷达隐身的作用。

雷达吸波材料设计的关键在于如何在空气-介质界面处实现阻抗匹配,根据理论公式<sup>[15]</sup>:

$$R = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}$$

式中, $R$ 为电磁波反射率, $Z_{in}$ 为介质波阻抗, $Z_0$ 为空气波阻抗,理想吸波体中 $Z_{in}$ 和 $Z_0$ 应尽可能接近。

因此,实现雷达吸波的关键是以低介电常数的材料为基体,达到阻抗匹配,将电磁波引入吸波体中,然后在吸波介质的作用下将电磁能耗散掉,转化为热能。在隔热/隔热/隐身一体化复合材料体系设计中,以低介电常数的石英纤维为主体,实现耐高温烧蚀和隔热的功能,在多孔杂化树脂基体中引入吸波功能组元,耗散进入材料内部的电磁能量,实现雷达吸波的功能。

### 1.2.3 隔热/隔热/隐身一体化复合材料的制备

将准备好的高孔隙率石英纤维增强体放入成型模具中,合模并密封,抽真空1 h后,将配制好的吸波杂化树脂溶液转移至模具型腔中。放入烘箱中 $80^\circ\text{C}$ 下固化6 h后升至 $120^\circ\text{C}$ ,继续固化8 h。固化完成后自然降温至室温,打开模具,取出复合材料室温下晾置10 h后于 $80^\circ\text{C}$ 烘箱中干燥12 h以上,得到隔热/隔热/隐身一体化复合材料(Heat-shielding & -insulating, Radar-absorbing Composite, HRC)。以 $0.4\text{ g/cm}^3$ 的纤维增强体,DKP025杂化树脂制备得到的HRC材料的体密度在 $0.55\text{ g/cm}^3$ 左右,孔隙率 $\geq 60\%$ 。

### 1.3 分析与测试

密度测试按照GB/T 1463—2005要求进行,用游标卡尺和电子分析天平分别准确测量体积和质量,根据 $\rho=m/V$ 计算得到表观密度。微观形貌是在德国莱卡公司Leica S440型扫描电子显微镜(SEM)上观察,观察前将样品进行喷金处理。孔结构通过美国康塔公司Poremaster GT60全自动孔隙度压汞分析仪测定,采用连续扫描模式,室温测试。材料热导率是在瑞典Hot Disk公司的Hot-Disk导热系数仪上测定,型号为TPS 1500,测试温度为室温。材料的压缩性能是在美国美特斯万能试验机上进行,按照GB/T 1448—2005标准进行测试,压缩速率为 $5\text{ mm/min}$ ,每组测试5个样品,取平均值。反射率测试按照GJB2038A—2011进行,采用弓形法装置。热考核在中国空气动力技术研究院等离子体电弧风洞上进行,热状态: $800\text{ kW/m}^2, 370\text{ s}$ ,  $1700\text{ kW/m}^2, 30\text{ s}$ ,加热时间为 $400\text{ s}$ ,总加热量 $350\text{ MJ/m}^2$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 HRC材料基本性能

高孔隙率石英纤维增强体主要起到高温烧蚀、隔热、透波和轻质化的作用,树脂基体的作用是将无强度的高孔隙率纤维骨架粘合成为具有一定力学强度的复合材料。借助于液体成型工艺和溶胶-凝胶

反应技术,制备具有微纳米孔结构的耐烧蚀多孔杂化树脂基体<sup>[16-17]</sup>,通过在树脂基体中均匀分散MWNT电磁吸收剂增加电磁吸收的功能。微纳米孔结构的引入能够进一步降低HRC材料的热导率。以 $0.4\text{ g/cm}^3$ 的纤维增强体,DKP025杂化树脂制备得到的HRC材料的基本性能见表1。

表1 不同MWNT吸波剂含量制备得到的HRC复合材料基本性能

Tab. 1 Preparation and properties of heat-shielding & insulating and radar-absorbing composite (HRC)

试样编号	MWNT含量 /wt%	密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	平均孔径 /nm	比表面积 / $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	室温热导率 / $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	压缩强度( $\epsilon=10\%$ ) /MPa	压缩弹性模量 /MPa
HRC-0	0	0.5439	389	24.3	0.0751	$1.61 \pm 0.11$	$49.41 \pm 5.31$
HRC-1	1.0	0.5468	362	37.5	0.0918	$1.95 \pm 0.07$	$67.11 \pm 14.26$
HRC-3	3.0	0.5536	353	42.6	0.1010	$2.09 \pm 0.04$	$81.24 \pm 17.66$
HRC-5	5.0	0.5625	329	42.9	0.1102	$2.23 \pm 0.28$	$90.55 \pm 19.42$

由表1可知,随着MWNT含量的增加密度逐步增加。高比表面积的MWNT加入后,使得HRC材料的平均孔径减小,比表面积增大。这主要是因为MWNT自身具有高长径比的纳米孔径结构,DKP025杂化树脂在溶胶-凝胶反应过程中MWNT与高分子链之间相互缠结,大孔结构被MWNT填充,形成更小的孔结构,比表面积相应增加。

图1为不同MWNT含量下HRC材料的介电常数和介电损耗曲线,加入MWNT后HRC材料的介电常数显著增加,不含MWNT的HRC-0材料介电常数在1.3左右,加入1.0 wt%的MWNT后8~18 GHz内的介电常数提高至2.0以上;当MWNT为5.0 wt%时,最大介电常数接近3.2,HRC材料的介电损耗随着

MWNT含量的增加也呈现增大的趋势。介电常数和介电损耗的增加,有利于提高HRC材料的雷达隐身性能。

然而,MWNT电磁吸收剂本身为高导热的石墨碳环结构,杂化酚醛树脂基体中引入MWNT后热导率增加。在不含MWNT的HRC-0材料中热导率为 $75.1\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,加入少量MWNT(1.0 wt%)后热导率增加22%左右,达到 $91.8\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,随着MWNT含量的增加HRC的热导率成正比增加。高长径比的MWNT与基体中有机分子链的相互缠结提高了HRC材料的力学性能,加入1.0 wt%的MWNT后,压缩强度增加21%,相应的弹性模量增加36%左右,当MWNT含量为5.0 wt%时,弹性模量为HRC-0的1.8倍,力学性能显著增加。

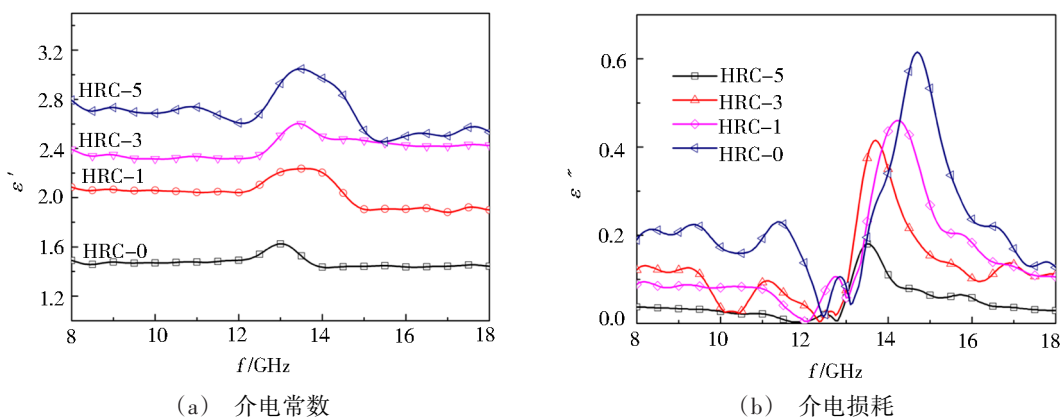


图1 不同MWNT含量下HRC材料的介电性能

Fig. 1 Dielectric constant and loss curves of HRC with different MWNT loadings

### 2.2 HRC材料微观结构

图2为HRC材料的内部微观形貌,可见树脂基体为疏松多孔结构,由相互堆砌的溶胶粒子构成三级拓扑结构。MWNT吸波剂加入后,树脂基体从微观形貌上看孔径变得细小,这与表1中孔结构特征数

据相对应。从图2(b)~(d)也见,MWNT均匀分散在杂化酚醛气凝胶骨架中,酚醛树脂溶胶粒子包裹在MWNT周围,形成较强的界面。随着含量的增加,MWNT之间相互缠结,与溶胶粒子之间形成更强的界面结合力,有效地提高了HRC材料的力学强度。

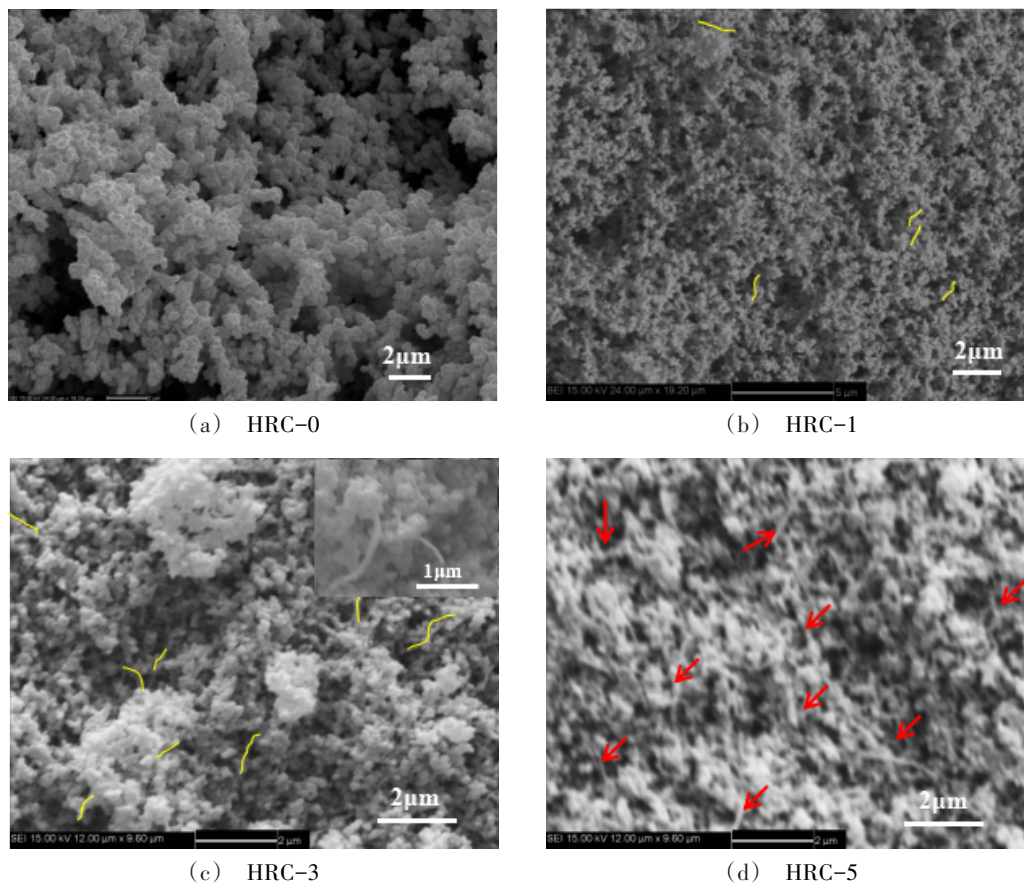


图2 HRC材料内部SEM照片

Fig. 2 Micro-morphological images of HRC samples

### 2.3 HRC材料防隔热性能

同传统树脂基烧蚀防热材料相比,HRC材料的热导率大幅降低,仅为传统烧蚀材料的1/4,隔热性能得到极大的提高。选取HRC-3材料在电弧风洞中进行防隔热性能考核,图3为风洞烧蚀考核的表面温度和背面温升曲线,以及烧蚀前后试样的外观照片。从图3温度曲线看出,在总加热量 $350 \text{ MJ/m}^2$ 下,经400 s烧蚀后,材料最高表面温度接近 $1700^\circ\text{C}$ ,20 mm厚度最大背面温升仅为 $153^\circ\text{C}$ ,线烧蚀速率为

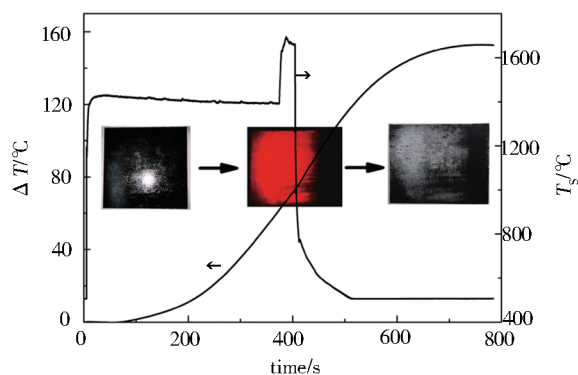


图3 HRC-3试样烧蚀时表面温度和背面温升曲线

Fig. 3 Curves of surface temperature and backface temperature rise of HRC-3 sample

$0.95 \mu\text{m/s}$ ,近“零”体积烧蚀,质量烧蚀速率为 $4.94 \text{ g/s}$ ,HRC材料表现出优异的防热和隔热性能。从材料的烧蚀表面也可以看出,烧蚀后材料表面平整,无明显的沟槽和裂纹。

### 2.4 HRC材料雷达吸波性能

图4为不同MWNT吸波剂含量下HRC材料在4~18 GHz内的反射率曲线,不含MWNT的HRC-0材料反射率在宽频范围内接近于0,表明电磁波全部被反射掉,呈现出全透波的特性。在加入少量(1.0 wt%)的MWNT后,HRC-1材料的电磁吸收性能显著提升,4~18 GHz宽频范围内最大反射率 $\leq -5 \text{ dB}$ ,在13 GHz处有最大的电磁吸收效果。随着MWNT吸波剂含量的增加,HRC材料在低频的雷达吸波性能增加。当MWNT=3.0wt%时,HRC-3材料在4~18 GHz的宽频范围内最大反射率 $\leq -6.5 \text{ dB}$ ,在4~9 GHz内的雷达吸波性能提高,反射率 $\leq -10 \text{ dB}$ ,在5、7.5和15 GHz处出现最大的雷达吸收效果;当MWNT=5.0 wt%时,HRC-5材料宽频范围内的雷达吸波性能进一步增加,在6~14 GHz的宽频范围内,最大反射率 $\leq -10 \text{ dB}$ ,但是在低频区反射率增大,这可能是由于过多的MWNT出现一定的聚集,造成分散性下降。HRC材料的反射率测试结果表明:不加入MWNT吸

波剂的情况下,复合材料不具有吸波效果,表现为全透波材料;加入MWNT吸波剂后,HRC材料的雷达吸波性能显著增加,在4~18 GHz的宽频范围内具有良好的雷达吸波性能,在多个频率处出现最大的电磁吸收。但是,过多MWNT的加入容易在杂化酚醛气凝胶骨架发生聚集,造成低频区雷达吸波性能下降,同时也会造成材料的热导率增加,导致隔热性能下降。

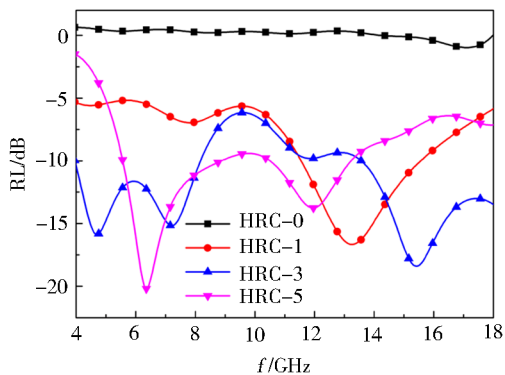


图4 不同MWNT含量下HRC材料的反射率曲线  
Fig. 4 Reflection loss curves of HRC with different MWNT loadings

MWNT吸波剂的电磁吸收方式主要靠电阻损耗和极化损耗,为一种典型的耐高温吸波剂,在实际烧蚀过程中电性能变化较小,仍保持着雷达吸波效果<sup>[18-19]</sup>。受高温雷达吸波测试限制,无法直接测量高温条件下HRC材料的反射率。对电弧风洞烧蚀考核后的HRC-3试样进行反射率测试发现,HRC-3材料烧蚀仍具有较好雷达吸波性能,见图5。

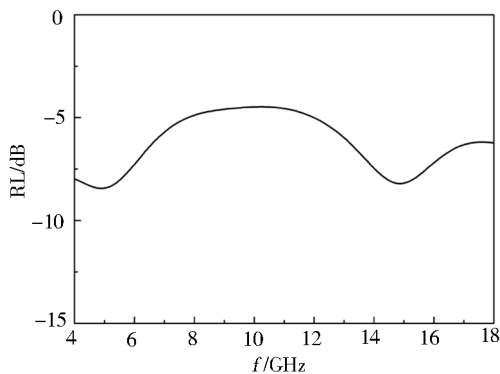


图5 HRC-3试样电弧风洞烧蚀后反射率曲线  
Fig. 5 Reflection loss plot of HRC-3 sample after ablation of arc-jet wind tunnel

在4~18 GHz宽频范围内,最大反射率 $\leq -5$  dB,但最大电磁吸收降低,在5和15 GHz处的最小反射率仅为 $-9$  dB。这主要是因为杂化酚醛气凝胶基体经高温烧蚀后,由于“形态复制效应”仍保留着多孔的气凝胶结构<sup>[20, 21]</sup>,如图6所示,保持着优异的雷达吸波性能,但是随着烧蚀时间的增加,碳化层厚度增

加,在一定程度上增加了电磁波反射,使得整体雷达吸波效果较烧蚀前略微下降。



图6 HRC-3烧蚀后碳化层微观形貌SEM照片  
Fig. 6 SEM image of charred layer for HRC-3 sample after ablation

### 3 结论

(1)通过增强体和吸波杂化树脂基体设计,制备了融合耐热、隔热和隐身功能的耐热/隔热/隐身一体化复合材料(HRC),内部呈现疏松多孔的形貌结构,平均孔径在329~390 nm之间,材料密度 $\leq 0.56$  g/cm<sup>3</sup>,室温热导率 $\leq 0.11$  W/(m·K)。

(2)随着MWNT含量的增加,HRC材料的平均孔径减小,比表面积增大,压缩强度和弹性模量成正比增加,当MWNT加入量为5.0 wt%时,压缩强度增加了40%,弹性模量增加80%。

(3)新研的HRC材料具有突出的防隔热性能,典型热环境下材料表面温度达到1700℃,而400 s烧蚀后20 mm厚度最高背面温升仅为153℃,线烧蚀速率为0.95 μm/s。

(4)MWNT对HRC的雷达吸波性能影响显著,当加入5.0 wt%的MWNT时HRC材料4~18 GHz的最大反射率由0左右降低至 $-8$  dB。

(5)高温烧蚀后,在“形态复制效应”下烧蚀碳化层结构保持着疏松多孔的气凝胶结构,仍具有优异的宽频雷达吸波性能。

### 参考文献

- [1] 姜贵庆,刘连元. 高速气流传热与烧蚀热防护[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- JIANG G Q, LIU L Y. Heat transfer of hypersonic gas and ablation thermal protection [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.
- [2] 吴国庭,陈月根. 防热结构设计//航天器进入与返回技术(下)[M]. 北京:宇航出版社,1991:1-110.
- WU G T, CHEN Y G. Design of thermal protection structures//Spacecraft reentry and return technology (below) [M]. Beijing: Aerospace Press, 1991:1-110.

[3] SCHMIDT D L. Ablative polymers in aerospace technology[J]. Journal of Macromolecular Science Part A: Pure and Applied Chemistry, 1969, 3(3): 327-365.

[4] NATALI M, KENNY J M, TORRE L. Science and technology of polymeric ablative materials for thermal protection systems and propulsion devices: a review [J]. Progress in Materials Science, 2016, 84: 192-275.

[5] 冯志海,师建军,孔磊,等. 航天飞行器热防护系统低密度烧蚀隔热材料研究进展[J]. 材料工程, 2020, 48(8): 14-24.

FENG Z H, SHI J J, KONG L, et al. Research progress in low-density ablative materials for thermal protection system of aerospace flight vehicles [J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(8): 14-24.

[6] 陈玉峰,洪长青,胡成龙,等. 空天飞行器用热防护陶瓷材料[J]. 现代技术陶瓷, 2017, 38(5): 311-390.

CHEN Y F, HONG C Q, HU C L, et al. Ceramic-based thermal protection materials for aerospace vehicles [J]. Advanced Ceramics, 2017, 38(5): 311-390.

[7] 王璐,王友利. 高超声速飞行器热防护技术研究进展和趋势分析[J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(1): 1-6.

WANG L, WANG Y. Research progress and trend analysis of hypersonic vehicle thermal protection technology [J]. Aerospace Materials & Technology, 2016, 46(1): 1-6.

[8] 苏亚东,景绿路,许广兴,等. Ma 4~6级别临近空间飞行器材料体系研究[J]. 飞机设计, 2013, 33(5): 21-26.

SU Y D, JING L L, XU G X, et al. Investigation on the aeronautical material system of 4~6 mach near space vehicle[J]. Aircraft Design, 2013, 33(5): 21-26.

[9] 侯佳,韩洪伟. 高超声速巡航导弹武器防御[J]. 国防科技, 2019, 40(6): 114-116.

HOU J, HAN H W. Defense of hypersonic cruise missile [J]. National Defense Technology, 2019, 40(6): 114-116.

[10] 罗曦. 美国导弹防御助推段拦截技术及其战略影响[J]. 中国国际战略评论, 2019(1): 204-221.

LUO X. The interception technology of missile defense booster stage and its strategic influence [J]. China International Strategy Review, 2019(1): 204-221.

[11] 赵稼祥. 先进复合材料的发展与展望[J]. 材料工程, 2000, 28(10): 40-44.

ZHAO J X. Development and prospect of advanced composite materials [J]. Journal of Materials Engineering, 2000, 28(10): 40-44.

[12] 刘燕斌,南英,陆宇平. 弹道导弹突防策略进展[J]. 导弹与航天运载技术, 2010(2): 18-23.

LIU Y B, NAN Y, LU Y P. Evolvement of penetration strategies for ballistic missile [J]. Missiles and space vehicles, 2010(2): 18-23.

[13] 夏新仁,冯金平. 导弹隐身技术的发展现状与趋势[J]. 航空科学技术, 2007(5): 17-22.

XIA X R, FENG J P. Recent status and tendency of stealth technique for missile [J]. Aeronautical Science & Technology, 2007(5): 17-22.

[14] 韩鸿硕,王晓峨,侯青. 国外导弹和航天领域中的新材料技术[J]. 宇航材料工艺, 1990, 18(4): 34-39.

HAN H S, WANG X E, HOU Q. New material technology in foreign missile and space field [J]. Aerospace Materials & Technology, 1990, 18(4): 34-39.

[15] 刘顺华,刘军民,董星龙,等. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.

LIU S H, LIU J M, DONG X L, et al. Electromagnetic shielding and absorbing materials [M]. Beijing: Chemical Industry press, 2013.

[16] 师建军,孔磊,左小彪,等. 酚醛/SiO<sub>2</sub>双体系凝胶网络结构杂化气凝胶的制备与性能[J]. 高分子学报, 2018, 48(10): 58-65.

SHI J J, KONG L, ZUO X B, et al. Preparation of PR/SiO<sub>2</sub> hybrid phenolic aerogel with bicomponent gel networks [J]. Acta Polymerica Sinica, 2018, 48(10): 58-65.

[17] 师建军,严蛟,孔磊,等. 基于普通酚醛树脂有机气凝胶的高效制备与研究[J]. 高分子学报, 2016, 46(2): 179-186.

SHI J J, YAN J, KONG L, et al. Facile preparation and study of the organic aerogel based on conventional phenolic resins [J]. Acta Polymerica Sinica, 2016, 46(2): 179-186.

[18] SUN X, GAO M, LI C, et al. Microwave absorption characteristics of carbon nanotubes [M]. Carbon Nanotubes, Yellampalli S, Rijeka: IntechOpen, 2011.

[19] CHOI I, KIM J G, SEO I S, et al. Radar absorbing sandwich construction composed of CNT, PMI foam and carbon/epoxy composite [J]. Composite Structures, 2012, 94(9): 3002-3008.

[20] CHENG H, XUE H, HONG C, et al. Preparation, mechanical, thermal and ablative properties of lightweight needled carbon fibre felt/phenolic resin aerogel composite with a bird's nest structure [J]. Composites Science and Technology, 2017, 140: 63-72.

[21] HU L, HE R, LEI H, et al. Carbon aerogel for insulation applications: a review [J]. International Journal of Thermophysics, 2019, 40(4): 39.