

激光烧蚀对石英/氰酸酯透波复合材料电性能的影响

张永强*, 张黎, 陶彦辉, 赵剑衡, 谭福利

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 绵阳 621900)

摘要: 研究激光烧蚀对石英/氰酸酯复合材料电性能的影响并揭示其影响机制, 对极度恶劣热环境条件下石英/氰酸酯复合材料透波性能评估分析、热防护设计等具有重要意义。利用激光作为外热流加载手段, 对石英/氰酸酯复合材料进行激光辐照烧蚀实验, 对实验前后的介电常数进行了测试。为分析介电常数变化机制, 对石英/氰酸酯复合材料激光烧蚀前后的表面产物进行了透射红外光谱、XRD 测试, 对实验后的石英/氰酸酯复合材料表面进行微观形貌观察, 并对氰酸酯和石英纤维进行了热失重测试。结果表明: 与初始状态相比, 激光烧蚀后的石英/氰酸酯复合材料在 7~18 GHz 范围内的介电常数为 6 左右, 增大近 1 倍。分析认为激光烧蚀对石英/氰酸酯复合材料电性能的影响机制为: 在激光辐照作用下, 材料吸收激光能量升温, 使氰酸酯树脂基体发生热分解、裂解等变化, 在表面原位生成具有导电能力和岛链状态的炭黑物质, 致使发生烧蚀碳化石英/氰酸酯复合材料的介电常数增大, 将增强对雷达波的吸收。同时烧蚀形成的粗糙表面状态和疏松状态对电磁波的反射、散射作用增强, 可进一步削弱石英/氰酸酯复合材料的雷达波透射能。

关键词: 石英/氰酸酯; 透波复合材料; 激光; 烧蚀; 电性能

中图分类号: TB332; TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)11-3001-07

Effects of laser ablation on electric properties of quartz fiber/cyanate resin wave-transmitting composite

ZHANG Yongqiang*, ZHANG Li, TAO Yanhui, ZHAO Jianheng, TAN Fuli
(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to obtain the influence of laser ablation on the electrical properties of quartz fiber/cyanate composite and reveal the influencing mechanism, it is great significance for the evaluation and analysis of wave transmission performance and thermal protection design under extreme harsh thermal environment. Using laser as an external heat flow loading method, the laser ablation experiment of quartz/cyanate composite was carried out in this paper, and the dielectric constant before and after the experiment was tested. In order to analyze the change mechanism of dielectric constant, the quartz fiber/cyanate composite surface products after laser ablation and quartz fiber/cyanate composite were tested by transmission infrared spectroscopy and XRD. The ablation surface of quartz fiber/cyanate composite irradiated by laser was observed by SEM. The thermal weight loss of cyanate and quartz fibers were also tested. The results show that the dielectric constant is about 6 and nearly 1 time higher than the initial state in the range of 7–18 GHz. The influence mechanism of laser ablation on the electrical properties of quartz fiber/cyanate composite is as follows: The absorption of laser energy makes the cyanate thermal decomposition and cracking, the formation of carbon black, which is conductive ability and the chain state in situ on surface, the dielectric constant of the ablation sample increases, the radar wave absorption capacity of quartz fiber/cyanate composite that is ablation state will be enhanced under this condition. At the same time, the rough surface and the loose state

收稿日期: 2017-10-26; 录用日期: 2018-01-11; 网络出版时间: 2018-02-01 17:06

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180131.001>

通讯作者: 张永强, 硕士, 副研究员, 研究方向为激光与物质相互作用 E-mail: minizhang_0804@163.com

引用格式: 张永强, 张黎, 陶彦辉, 等. 激光烧蚀对石英/氰酸酯透波复合材料电性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(11): 3001-3007.
ZHANG Yongqiang, ZHANG Li, TAO Yanhui, et al. Effects of laser ablation on electric properties of quartz fiber/cyanate resin wave-transmitting composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(11): 3001-3007 (in Chinese).

formed by ablation will enhance the reflection and scattering of electromagnetic wave, which can further weaken the radar wave transmission capability.

Keywords: quartz fiber/cyanate; wave-transmitting composite; laser; ablation; electric properties

透波复合材料是指能够透过一定频率电磁波的功能型复合材料,在特殊的用途及使用环境中要求具有优异的介电性能,其中热环境是使用较多的环境之一,但在高温热环境下透波材料的电性能特性、影响电性能因素及影响机制研究中以陶瓷类材料居多,如 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 、石英陶瓷、 Al_2O_3 陶瓷等^[1-6]。与陶瓷类材料相比,纤维增强树脂基复合材料耐温性、抗热烧蚀性能相对较差,在某些极度恶劣热环境或激光类外热源作用下,容易造成纤维增强树脂基复合材料出现炭化现象^[7],这种炭化会导致其材料的化学结构、性能等变化,进一步影响功能特性。

氰酸酯树脂具有优异的介电性能,在 X-W 波段内介电性能变化很小,相对于环氧等其它树脂材料,氰酸酯树脂力学性能和耐热性更好。石英纤维的化学成分是纯度达 99.5% 以上的 SiO_2 ,其介电常数和正切损耗与玻璃纤维相比极为优异,且具有弹性模量随温度升高而增加的罕见特性,可实现宽频透波。因此,石英/氰酸酯复合材料在遥测、制导、通信等领域中的透波结构部件中具有极大的应用潜力。同时,由于激光辐照能够提供精确可测的外热流参数,包括热流密度和作用时间,已经成为材料燃烧和烧蚀特性研究的新型试验加载手段^[9-10]。因此,研究激光烧蚀对石英/氰酸酯复合材料电性能的影响并揭示影响机制,对纤维增强树脂基复合材料在某些极度恶劣热环境或激光作用烧蚀破坏条件下的透波性能评估分析、热防护设计等具有重要意义。

纤维增强树脂基复合材料主要包括结构型复合材料、功能型复合材料,在军事和民用等领域有着广泛应用。对于以碳纤维增强树脂基复合材料为代表的结构型复合材料的激光辐照效应研究已有较多公开报道^[11-13]。对于树脂基类功能复合材料,如湿度、温度等环境因素对材料性能的影响,以及光、热、力载荷作用下材料的损伤特性等方面也有一定的公开报道。如刘凯等^[14]采用实验手段研究了湿度、温度等环境因素对玻璃纤维增强环氧树脂透波复合材料电性能、力学性能的影响;郭玉明等^[15]研究了较低热流密度作用对玻纤/有机硅材料透波性能的影响;王立君等^[16]研究了玻璃钢激光烧蚀的

微波透射性能,从烧蚀层、碳化层、热解层和原始层组成的多层结构角度出发,给出了影响材料透波能力的分析结果。对于恶劣的高热流密度环境下,纤维增强树脂基复合材料出现烧蚀炭化破坏造成材料电性能、自身透波功能特性变化以及对功能性能影响机制等方面的研究公开报道相对较少。

本研究通过热失重曲线测试,获取了氰酸酯树脂和石英纤维随温度升高的热损伤演化过程,进行了连续激光辐照石英/氰酸酯复合材料烧蚀损伤实验,利用高品质因数(Q值)谐振腔法测得烧蚀后材料的介电常数。实验后,通过透射红外光谱法和 XRD 分别对烧蚀产物的红外吸收谱和晶态物质进行了测试,结合氰酸酯树脂和石英纤维热失重测试曲线,分析获取了激光烧蚀条件下影响石英/氰酸酯材料电性能参数的物理机制。进一步研究了烧蚀对石英/氰酸酯材料透波性能的影响。

1 实验材料及方法

1.1 石英/氰酸酯复合材料制备

将二维编织形成的石英纤维布与氰酸酯复合制成预浸料后,经裁剪和铺贴,按照一定工艺进行固化,最终成型石英/氰酸酯复合材料。石英/氰酸酯复合材料厚度为 2.3 mm,直径为 50.5 mm。

1.2 性能测试

激光烧蚀实验:利用波长为 1 μm 的近红外连续激光作为外热源,进行石英/氰酸酯材料热损伤实验。为实现石英/氰酸酯复合材料表面的全部烧蚀炭化,作用于材料表面的激光光束直径为 52 mm,平均功率密度为 226 W/cm^2 ,作用时间为 10 s。并在后表面中心位置粘贴热电偶进行激光热流作用下材料温升数据的测量。

热失重测试实验:利用热分析仪,在空气条件下对氰酸酯树脂、石英纤维进行了热失重测试。温度测试范围为室温 ~ 900 $^{\circ}\text{C}$,升温速率为 50 K/min 。

介电常数测试实验:采用高 Q 值谐振腔法,对石英/氰酸酯复合材料初始状态和激光烧蚀后石英/氰酸酯复合材料的介电常数进行了测试,频率范围为 7~18 GHz。

物质晶态测试:在激光烧蚀实验前后的石英/

氰酸酯复合材料表面分别取样, 进行 XRD 测试及对比。

红外透射光谱测试: 在激光烧蚀实验前后的石英/氰酸酯复合材料表面分别取样, 进行红外透射光谱测试及官能团变化情况对比。

损伤形貌表征: 对石英/氰酸酯复合材料激光烧蚀后的表面在扫描电镜下进行观察, 获取石英/氰酸酯复合材料激光烧蚀产物的微观形貌形态。

2 结果与分析

2.1 石英/氰酸酯激光烧蚀损伤宏观形貌与温度

图 1 为石英/氰酸酯复合材料激光烧蚀前后的表面损伤形貌。可以看到, 激光烧蚀后石英/氰酸酯复合材料的前后表面出现了严重的烧蚀损伤。实验后样品厚度增大至 3.1 mm, 这是由于激光热流作用形成的烧蚀产物为非致密状态, 以及作用过程中氰酸酯热分解、裂解产生气体, 使石英纤维层与层之间不再胶合所致。这种铺层纤维的层与层分离和表面疏松状态可导致原有透波材料的电厚度发生变化, 最终影响透波能力。

图 2 为激光热流作用下石英/氰酸酯复合材料后表面中心位置的升温曲线。可以看到, 在 0.6 s 石英/氰酸酯复合材料后表面中心位置就达到了近 200℃, 接近氰酸酯适用温度范围的上限温度 220℃^[17], 随着激光热流持续作用致使材料温度不断升高, 后表面将出现热分解响应, 与图 1(b) 中材料后表面的颜色变化吻合。

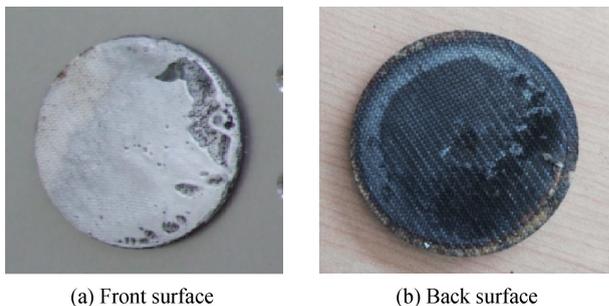


图 1 石英/氰酸酯复合材料激光烧蚀损伤形貌
Fig. 1 Surface damage pattern of quartz fiber/cyanate composite under laser irradiated

2.2 石英/氰酸酯热稳定性

图 3 为氰酸酯、石英纤维的热失重测试曲线。可以看到, 从室温到 900℃ 的温度变化范围内, 氰酸酯的失重曲线有四个明显的变化区域(如图 3 所示), 在 900℃ 时质量损失率达 100%; 而石英纤维

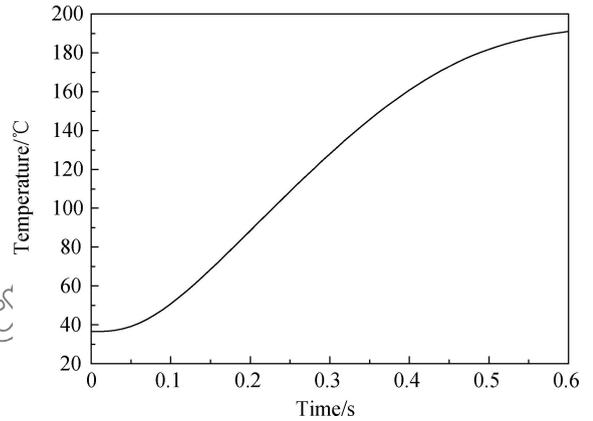


图 2 石英/氰酸酯复合材料后表面中心点升温历史曲线
Fig. 2 Temperature history curves of back surface center point of quartz fiber/cyanate composite

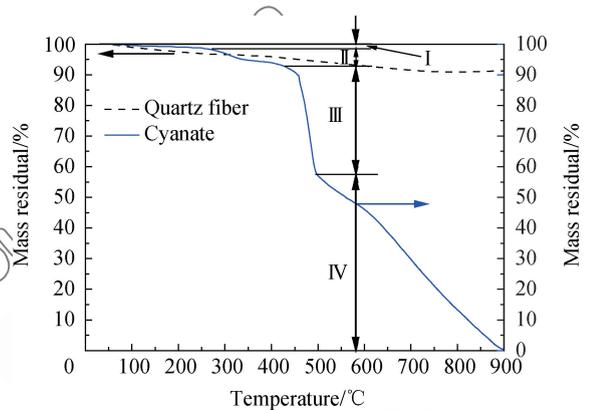


图 3 氰酸酯和石英纤维热失重曲线
Fig. 3 Thermo-gravimetric curve of cyanate and quartz fiber

在整个升温过程中, 质量损失相对较小, 变化相对缓慢, 在 900℃ 时质量损失率仅为 8.7%。这与石英纤维的主要成分高纯度 SiO_2 的耐高温性有关。表明在室温至 900℃ 的温度范围内, 石英/氰酸酯复合材料的热损失变化主要是由于随着温度的升高, 氰酸酯发生挥发、热分解、裂解等系列响应所致。

氰酸酯是包含两个或两个以上氰酸酯官能团 ($-\text{O}-\text{C}\equiv\text{N}$) 的酚衍生物。从室温加热到 256℃ (与其玻璃化转变温度 $T_g > 226^\circ\text{C}$ 接近) 的 I 阶段, 基体质量剩余率为 98.4%, 原因是氰酸酯经放置后, 表面所带的水等附属物受热挥发所致, 与石英/氰酸酯复合材料通常使用的温度范围较为吻合^[17]。从 256℃ 继续升温到 430℃ 的 II 阶段, 基体质量剩余率约为 93.1%, 质量损失率为 5.3%, 原因是氰酸酯作为高分子有机物, 在分子结构中存在较为容易断裂的化学键, 当温度升高, 此处会出现断键现象, 导致基体的质量损失。从 430℃ 继续升

温到 ~500℃ 的 III 阶段, 氰酸酯质量剩余率为 57.7%, 这一升温过程质量损失率为 35.4%, 是四个阶段中单位升温内质量损失最多的阶段, 原因是由于氰酸酯继续升温, 发生较为强烈热分解、裂解等所致。从 ~500℃ 继续升温到 900℃ 的 IV 阶段, 质量损失最多, 温度范围跨度最大, 氰酸酯质量剩余率为 0。从该阶段的氰酸酯热失重变化曲线来看, 氰酸酯继续失重且最终将完全失重, 主要是由于氰酸酯作为大相对分子质量的有机化合物, 随着温度升高, 吸收的能量越多, 分子结构中键的断裂也将越来越多, 形成分子量越来越小的易挥发物, 包括与空气中 O₂ 发生化学反应形成的 H₂O(气态)、CO 和 CO₂ 等。

2.3 石英/氰酸酯介电常数

图 4 为激光烧蚀前后石英/氰酸酯复合材料的介电常数对比结果。可以看到, 激光烧蚀前石英/氰酸酯复合材料在 7~18 GHz 范围内介电性能较为稳定, 介电常数在 3.13~3.18 之间。石英/氰酸酯材料激光烧蚀炭化后, 介电常数整体增大, 在 14.5 GHz、18 GHz 处最小, 介电常数为 5.6, 在 13.5 GHz 处介电常数达到最大, 为 6.56, 变化幅度接近一倍。另外, 在 7~14 GHz 范围内较为稳定, 介电常数在 6.25~6.3 之间。

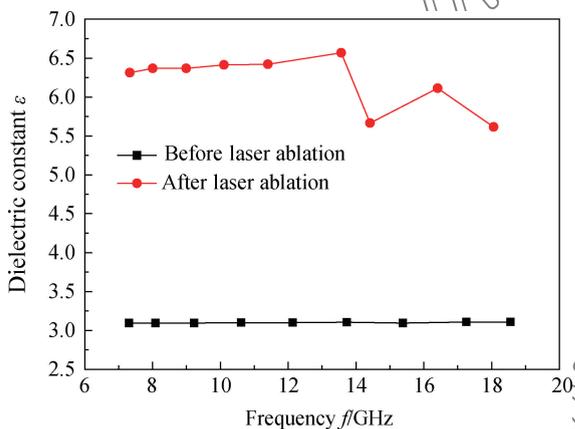


图 4 石英/氰酸酯复合材料激光烧蚀前后介电常数对比
Fig. 4 Dielectric constant of quartz fiber/cyanate composite before and after laser ablation

2.4 石英/氰酸酯物质晶态

图 5 为激光烧蚀前后石英/氰酸酯复合材料的 XRD 图谱。可以看出, 激光辐照前后物质变化差异较大, 辐照烧蚀形成的炭化产物 XRD 图谱出现了馒头峰, 衍射角 2θ 值为 22.1°。通过与文献[18]典型炭黑 XRD 图谱中衍射峰对比可见, 石英/氰酸

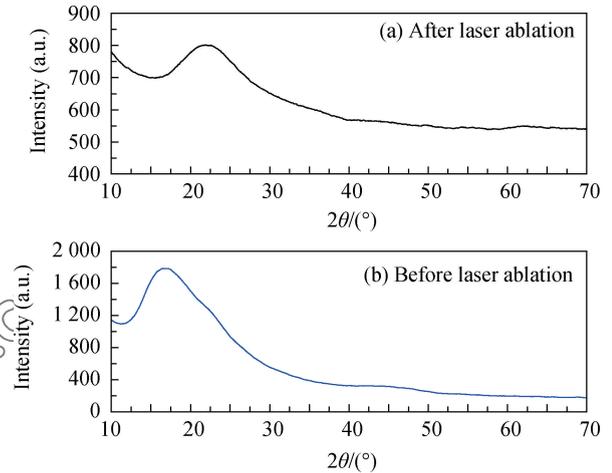


图 5 石英/氰酸酯复合材料激光烧蚀前后的 XRD 图谱
Fig. 5 XRD patterns of quartz fiber/cyanate composite before and after laser ablation

酯复合材料样品表面烧蚀产物中形成了炭黑。由于炭黑具有微晶准石墨结构, 炭黑的出现将使石英/氰酸酯复合材料表面区域的导电性能提升。

2.5 石英/氰酸酯结构

图 6 为激光烧蚀前后石英/氰酸酯复合材料的红外透射光谱测试结果。可以看到, 与石英/氰酸酯复合材料的初始状态相比, 烧蚀产物的吸收峰个数明显减少, 尤其是在 1 000~1 500 cm⁻¹ 范围内的 1 010 cm⁻¹、1 075 cm⁻¹、1 200 cm⁻¹ 和 1 500 cm⁻¹ 四个较强吸收峰消失, 说明伯醇(特征吸收峰在 1 010~1 150 cm⁻¹ 处)、叔醇(特征吸收峰在 1 130~1 220 cm⁻¹ 处)及芳香环(特征吸收峰在 1 500 cm⁻¹ 处)等官能团在激光烧蚀炭化后消失。烧蚀产物仅在 3 445 cm⁻¹、1 630 cm⁻¹、1 385 cm⁻¹、1 100 cm⁻¹、808 cm⁻¹ 处出现了明显的吸收峰。对比官能团特征

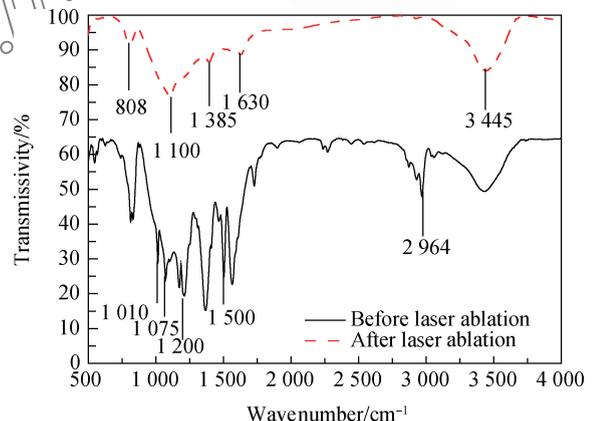


图 6 石英/氰酸酯复合材料激光烧蚀前后的 FTIR 图谱
Fig. 6 FTIR spectra of quartz fiber/cyanate composite before and after laser ablation

吸收峰^[19-20]可以看出, 烧蚀产物中仍有一OH(羟基特征吸收峰在 $3\ 100 \sim 3\ 700\ \text{cm}^{-1}$ 处)、C=O ($1\ 630\ \text{cm}^{-1}$ 处是类醌结构、羧基上C=O 伸缩振动的特征吸收峰)或C=C(特征吸收峰在 $1\ 610 \sim 1\ 680\ \text{cm}^{-1}$ 左右处)、C—CH₃(对称弯曲振动特征吸收峰为 $1\ 380\ \text{cm}^{-1}$ 处)、C—O(醚键C—O—C的收缩特征吸收峰在 $1\ 100\ \text{cm}^{-1}$ 处)以及C—C—C(特征吸收峰小于 $500\ \text{cm}^{-1}$)等。另外, 仅有少量—CH₃(特征吸收峰在 $2\ 960\ \text{cm}^{-1}$ 、 $2\ 870\ \text{cm}^{-1}$ 处)和—CH₂—(特征吸收峰在 $2\ 926\ \text{cm}^{-1}$ 、 $2\ 853\ \text{cm}^{-1}$ 处), 表明该类基团已基本不存在。结合激光作用实验过程来看, 在 $226\ \text{W}/\text{cm}^2$ 激光热流密度作用下, 石英/氰酸酯复合材料表面很快出现热分解、炭化响应, 表面形成烧蚀产物层, 使后期激光热流对石英/氰酸酯复合材料的作用为持续形成表面烧蚀产物层, 造成其快速升温, 使烧蚀产物中有机物分子结构的中价键不断断裂, 导致生成 H₂O、CO 或 CO₂ 等易挥发物质。从红外光谱结果来看, 烧蚀产生的炭黑表面附着的官能团种类较多, 且多为含氧官能团, 由于含氧官能团自身导电性较差, 附着在炭黑表面会降低炭黑的导电性能。

2.6 石英/氰酸酯损伤表面微观形貌

图 7 为石英/氰酸酯复合材料激光烧蚀表面 SEM 图像。可以看到, 在图 7(a)和图 7(b)中石英纤维上附着大量的烧蚀产物, 图 7(c)中石英纤维之间已处于分离状态。表明纤维编织形成的石英纤维布出现明显的断裂现象, 原因是由于激光辐照使石英/氰酸酯复合材料加热发生气化的热损伤所致。

3 石英/氰酸酯电性能影响机制

通过以上测试结果分析, 认为石英/氰酸酯复合材料在激光辐照作用下, 吸收激光能量升温使氰酸酯发生热分解、裂解等变化, 在表面形成了具有导电能力的炭黑物质, 且在其表面附着羰基、羧基、醌基以及其它螯合、络合等化学结构。同时, 由于石英/氰酸酯复合材料表面烧蚀产物中形成的热解炭黑相当于原位生成, 使炭黑粒子之间接触较好, 在空气载体中分散状况已经不属于“孤岛模型”, 为岛链状态, 且炭黑的疏松多孔结构容易使水分凝结, 可进一步促进处于该状态下石英/氰酸酯复合材料的介电常数增大。

由于烧蚀产物中炭黑具有导电性能, 它的出现等同于在石英/氰酸酯复合材料表面形成吸波

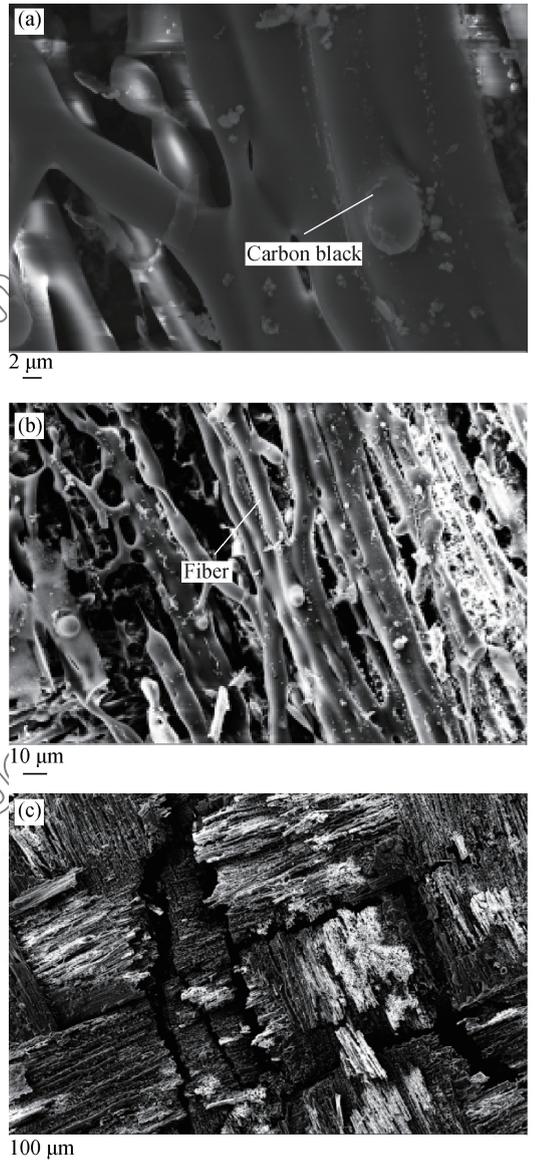


图 7 石英/氰酸酯复合材料激光烧蚀表面 SEM 图像
Fig. 7 SEM images of laser ablation surface of quartz fiber/cyanate composite

层。另外, 表面到其内部具有一定的厚度区域, 由于氰酸酯热分解产生气体, 使石英纤维层与层之间不再为胶合的致密状态, 电磁波将在层间多次反射; 同时表面烧蚀产物为疏松状态, 使原有透波材料的电厚度发生变化(如原有半波壁结构被破坏)。另外, 表面烧蚀产物的粗糙表面状态可造成对电磁波的散射、吸收作用增强。因此, 将导致石英/氰酸酯复合材料制成的透波结构件的透波性能恶化。

4 结论

(1) 激光热流作用下, 氰酸酯发生热分解、裂

解等变化,在其表面原位生成的炭黑处于岛链状态,附着羰基、羧基、醌基以及其它螯合、络合等化学结构的导电炭黑,是发生烧蚀碳化响应石英/氰酸酯复合材料介电常数增大的诱因。

(2) 石英/氰酸酯复合材料的烧蚀产物中出现导电炭黑,烧蚀产物表面粗糙,同时材料整体受热使铺层的石英纤维层与层之间处于分离状态,而表面烧蚀产物为疏松状态,使烧蚀后的石英/氰酸酯复合材料对电磁波的散射、吸收作用增强,可削弱材料的雷达波透射能力。

参考文献:

- [1] CAO M S, HOU Z L, YUAN J, et al. Low dielectric loss and non-debye relaxation of gamma- $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ceramic at elevated temperature in X-band[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(10): 3575.
- [2] 李金刚, 曹茂盛, 张亮, 等. 国外透波材料高温电性能研究进展[J]. *材料工程*, 2005(2): 59-62.
- LI J G, CAO M S, ZHANG Y, et al. Research progress in high temperature electric properties of foreign wave-transmitting materials[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2005(2): 59-62 (in Chinese).
- [3] YUAN J, CUI C, HOU Z L, et al. The multiscale modeling and dataming of high-temperature dielectrics of $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ composite[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 14(2): 202-205.
- [4] 熊兰天, 金海波, 曹茂盛, 等. 烧蚀条件下 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料中防潮剂的演变行为研究[J]. *材料工程*, 2007(2): 11-14.
- XIONG L T, JIN H B, CAO M S, et al. Study on evolution behavior of damp-proofing admixture under ablation in $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2007(2): 11-14 (in Chinese).
- [5] 曹茂盛, 张亮, 李金刚, 等. 硅树脂/二氧化硅高温相变及介电性能研究[J]. *材料科学与工艺*, 2006, 14(4): 420-423.
- CAO M S, ZHANG L, LI J G, et al. Study on high-temperature transformation and dielectric properties of silicon resin/silicon dioxide composite[J]. *Materials Science and Technology*, 2006, 14(4): 420-423 (in Chinese).
- [6] 姚澜, 李文斌, 邱夷平. 三维正交机织复合材料的拉伸力学性能及介电性能研究[J]. *材料工程*, 2007(2): 23-25.
- YAO L, LI W B, QIU Y P. Study on tensile and dielectric properties of three-dimensional orthogonal woven composites [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2007(2): 23-25 (in Chinese).
- [7] CHEN J K, PEREA A, ALLAHADADI F A. A study of laser/composite material interactions[J]. *Composites Science and Technology*, 1995, 54: 35-44.
- [8] 张永强, 王贵兵, 唐小松, 等. 两种纤维增强复合材料连续激光烧蚀阈值测量及吸收特性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(2): 199-202.
- ZHANG Y Q, WANG G B, TANG X S, et al. Ablation threshold measurement and absorption characteristic analysis of two fiber reinforced composites irradiated by CW laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(2): 199-202 (in Chinese).
- [9] BOLEY C D, FOCHS S N, RUBEN C. Large-spot material interactions with a high-power solid-state laser beam[J]. *Journal of Directed Energy*, 2008, 3: 15-24.
- [10] BOLEY C D, CUTLER K P, FOCHS S N. Interaction of a high-power laser beam with metal sheets[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(4): 043106.
- [11] 陈敏孙, 江厚满, 焦路光, 等. 碳纤维增强环氧树脂复合材料在切向气流和激光作用下的损伤[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(3): 56-62.
- CHEN M S, JIANG H M, JIAO L G, et al. Damage of carbon fiber reinforced resin matrix composite subjected to laser and tangential gas flow loading[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(3): 56-62 (in Chinese).
- [12] 张家雷, 王伟平, 刘仓理. 激光辐照下二维编织碳纤维环氧树脂复合材料的烧蚀特征[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(3): 494-500.
- ZHANG J L, WANG W P, LIU C L. Ablation character of 2D braided carbon fiber reinforced composite under laser irradiation[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(3): 494-500 (in Chinese).
- [13] 张家雷, 王伟平, 李昭宁. 真空及大气下激光对复合材料的烧蚀试验对比[J]. *激光与红外*, 2016, 46(11): 1134-1139.
- ZHANG J L, WANG W P, LI Z N. Laser ablation experiments of composites in vacuum and atmospheric environment [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(11): 1134-1139 (in Chinese).
- [14] 刘凯, 陈斌, 戴剑雄, 等. 环境因素对玻璃纤维增强环氧树脂基透波复合材料性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2010, 38(10): 64-67.
- LIU K, CHEN B, DAI J X, et al. Effect of environment factors on properties of glass fiber reinforced epoxy resin wave-transparent composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2010, 38(10): 64-67 (in Chinese).

- [15] 郭玉明, 颜鸿斌, 凌英, 等. 低密度烧蚀隔热透波多功能复合材料的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2001(5): 33-36.
GUO M Y, YAN H B, LING Y, et al. Study of multi-function composites with low density ablation heat protection and wave transmittion[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2001(5): 33-36 (in Chinese).
- [16] 王立君, 刘峰, 谌立新, 等. 玻璃钢激光烧蚀的微波透射性能研究[J]. 功能材料, 2010, 41(1): 39-41.
WANG L J, LIU F, ZHAN L X, et al. Investigation on the microwave transmission change of the laser ablation glass fiber resin composite [J]. Journal of Function Materials, 2010, 41(1): 39-41 (in Chinese).
- [17] 赵红振, 齐暑华, 周文英, 等. 透波复合材料树脂基体的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2005, 33(12): 65-67.
ZHAO H Z, QI S H, ZHOU W Y, et al. Research progress on resin matrix for wave-transparent composites[J]. Engineering Plastics Application, 2005, 33(12): 65-67 (in Chinese).
- [18] 夏维冬, 万树德, 王大志, 等. 等离子体热解焦油制备导电炭黑[J]. 中国科学技术大学学报, 2003, 33(5): 561-566.
XIA W D, WAN S D, WANG D Z, et al. Preparation of conductivity carbon black from pyrogenation tar in plasma [J]. Journal of University of Science and Technology China, 2003, 33(5): 561-566 (in Chinese).
- [19] 朱永法, 宋瑞隆, 姚文清, 等. 材料分析化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
ZHU Y F, SONG R L, YAO W Q, et al. Analytical chemistry of materials [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2009 (in Chinese).
- [20] 陈薄, 古忠涛. 导电炭黑微观结构及其应用性能[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(8): 289-294.
CHEN B, GU Z T. Microstructure and application of conductive carbon black [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(8): 289-294 (in Chinese).