

2.5D机织SiC_f/SiC复合材料制备与吸波性能

赵马娟 王晓猛 王岭 邱海鹏 张典堂

Preparation and microwave absorbing properties of 2.5D woven SiC_f/SiC composites

ZHAO Majuan, WANG Xiaomeng, WANG Ling, QIU Haipeng, ZHANG Diantang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231218.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

2.5D机织复合材料的渐进损伤与失效模拟

Progressive damage and failure simulation of 2.5D woven composites

复合材料学报. 2021, 38(8): 2747–2757 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201116.006>

2.5D机织石英纤维增强树脂复合材料不同方向力学性能测试与模量预测2.5D机织石英纤维增强树脂复合材料不同方向力学性能测试与模量预测

Mechanical properties testing for 2.5D quartz fiber reinforced resin composites in different directions and module prediction

复合材料学报. 2019, 36(6): 1364–1373 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180906.001>

不平衡2.5D碳纤维机织预制体偏轴拉伸性能

Bias-tensile properties for the unbalanced 2.5D carbon fibre woven preforms

复合材料学报. 2020, 37(2): 293–301 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190430.002>

2.5D石英纤维增强硼酚醛树脂可陶瓷化复合材料的制备与烧蚀性能

Preparation and ablation performance of 2.5D quartz fiber reinforced boron phenolic resin ceramizable composites

复合材料学报. 2020, 37(4): 767–774 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190730.002>

纳米SiC纤维改性短切碳纤维增强Si₃N₄陶瓷介电响应及吸波性能

Dielectric response and microwave absorbing properties for nano SiC fiber modified chopped carbon fiber reinforced Si₃N₄ composites

复合材料学报. 2017, 34(11): 2530–2536 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170302.005>

典型多向2.5D机织预制体近净形编织结构设计

Near net-shaped design on the architecture of typical multi-directional 2.5D woven preform

复合材料学报. 2021, 38(9): 3109–3117 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201124.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料制备与吸波性能

分享本文

赵马娟¹, 王晓猛², 王岭², 邱海鹏², 张典堂^{*1}

(1. 江南大学 生态纺织教育部重点实验室, 无锡 214122; 2. 航空工业复合材料技术中心, 北京 101300)

摘要: 为满足高温吸波结构复合材料要求, 选用 SiC 纤维 (SiC_f), 设计并制备了 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料, 采用实验与仿真相结合的方法研究了吸波性能。利用弓形法开展了反射损耗测试, 采用 X 射线计算机断层扫描 (Micro-CT) 技术提取材料几何结构参数, 建立了全厚度细观模型, 在 CST 电磁仿真软件上模拟计算了材料的反射损耗, 并与实验结果进行对比分析。通过等效电磁参数理论和场分布图分析了吸波机制, 并研究了几何结构参数、电磁参数、电磁波电场极化方向和入射角度对材料吸波特性的影响规律。实验结果表明: 在 1~18 GHz 频率范围内, 本文所制备的 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料具有 3 GHz 的有效吸波带宽, 在吸收峰 9.3 GHz 处, 最大反射损耗达到 -17 dB, 这与仿真结果基本一致。该复合材料主要通过电损耗的方式吸收电磁波, 其良好的吸波性能是结构设计和材料特性协同作用的结果, 材料整体厚度和纤维介电常数是影响 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料吸波性能的关键因素。

关键词: 2.5D 机织结构; SiC_f/SiC 复合材料; 细观模型重构; 电磁仿真; 吸波性能; 影响因素

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)07-3630-13

Preparation and microwave absorbing properties of 2.5D woven SiC_f/SiC compositesZHAO Majuan¹, WANG Xiaomeng², WANG Ling², QIU Haipeng², ZHANG Diantang^{*1}

(1. Key Laboratory of Eco-Textiles, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Aerospace Composites Technology Center, Beijing 101300, China)

Abstract: 2.5D woven SiC_f/SiC composites were designed and prepared to meet the requirements of high temperature microwave absorbing structural composites, and the microwave absorbing properties were studied by combining experiment and simulation. The reflection loss of the material was measured by means of the bow method, and the geometrical parameters of the material were extracted by X-ray computed tomography (Micro-CT) to establish a full-thickness mesoscopic model. The reflection loss of the material was simulated and calculated on the CST electromagnetic simulation software, and compared with the experiment results. Based on the theory of equivalent electromagnetic parameters and field distribution map, the microwave-absorbing mechanism is analyzed, and the effects of geometric structure parameters, electromagnetic parameters, electromagnetic field polarization direction and incidence angle on the microwave-absorbing property of materials are studied. The experimental results show that the 2.5D woven SiC_f/SiC composites prepared in this paper have an effective absorption bandwidth of 3 GHz in the frequency range of 1-18 GHz, and the maximum reflection loss reaches -17 dB at the absorption peak of 9.3 GHz, which is basically consistent with the simulation results. The composite absorbs electromagnetic microwave mainly through the way of electrical loss, and its good microwave absorption performance is the result of the synergistic effect of structural design and material characteristics. The overall material thickness and fiber dielectric constant are the key factors affecting the microwave absorption performance of 2.5D woven SiC_f/SiC composites.

收稿日期: 2023-10-09; 修回日期: 2023-11-13; 录用日期: 2023-12-12; 网络首发时间: 2023-12-19 11:39:56

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231218.002>

基金项目: 173 重点项目 (2022-JCJQ-ZD-067-11)

173 Key Project of China (2022-JCJQ-ZD-067-11)

通信作者: 张典堂, 博士, 研究员, 研究方向为先进纺织复合材料设计及制造 E-mail: zhangdiantang@jiangnan.edu.cn

引用格式: 赵马娟, 王晓猛, 王岭, 等. 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料制备与吸波性能[J]. 复合材料学报, 2024, 41(7): 3630-3642.

ZHAO Majuan, WANG Xiaomeng, WANG Ling, et al. Preparation and microwave absorbing properties of 2.5D woven SiC_f/SiC composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(7): 3630-3642(in Chinese).

Keywords: 2.5D woven structure; SiC_f/SiC composites; mesoscopic model reconstruction; electromagnetic simulation; microwave absorbing property; influencing factors

近年来, 碳化硅纤维 (SiC_f) 由于电性能可调节范围广、耐高温 (≥1 600℃)、高强高模等优点, 由其增强的 SiC_f/SiC 复合材料已成为新型空天高温隐身部件的理想候选材料^[1-4]。目前, 用于 SiC_f/SiC 吸波复合材料的细观特征主要为二维层合结构。然而, 该结构不仅吸波频带窄且可设计性差, 还存在易分层和面外承载性能低问题, 难以满足新型装备的结构-功能一体化苛刻服役要求^[5-7]。相比之下, 2.5D 机织结构通过面内和面外不同电磁参数纤维同时排布, 可实现高承载和优异吸波设计, 为高可靠、多功能、高承载高温隐身结构部件提供了有效途径^[8-10]。

近年来, 学者们将吸波特性与三维纺织结构相结合, 开展了诸多实验工作。Mu 等^[11]首先对 SiC_f 进行脱碳处理, 然后采用先驱体浸渍裂解 (PIP) 工艺制备了 2.5D SiC_f/SiC 复合材料, 测得其最大反射损耗可达 -23.5 dB, 有效吸波带宽可扩展至 5.9 GHz。Han 等^[12]采用 PIP 工艺制备了三维四向和三维五向编织 SiC_f/SiC 复合材料, 并比较了两种结构在 X 波段的吸波性能。结果表明, 由于三维五向结构中轴向纱的存在, 致使三维五向编织 SiC_f/SiC 复合材料呈现出更优异的微波吸收性能。吕丽华等^[13]和 Zhang 等^[14]以羰基铁粉 (CIP) 和炭黑 (CB) 为吸波剂, 制备了蜂窝状三维机织结构型吸波复合材料。结果显示, 该材料在高频 15.48 GHz 下的吸波损耗为 -15.06 dB, 且有效吸收带宽大于 3 GHz。Chen 等^[15]采用纬编工艺制备了菱形针织柔性吸波复合材料, 测得其有效吸波带宽可达 13 GHz。李丹丹^[16]研究了三向正交、经向增强角连锁和层层角连锁结构碳纤维复合材料的吸波性能。结果表明, 三向正交结构的吸波性能最好, 层层角连锁结构的吸波性能相对最差, 但 3 种结构吸波性能差异不明显。综上, 目前所选用的三维纺织结构仍局限于传统的几种类型, 导致吸波性能调节幅度有限。同时, 受限于昂贵成本, 有关 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的吸波性能研究尚处于探索阶段。

除此之外, 电磁数值仿真也是研究三维纺织结构材料吸波性能的重要手段^[17-19]。苏钦城等^[20]和杨颀^[21]利用基于有限积分法的 CST 软件, 对二维平纹织物吸波性能进行了数值分析。孙娜等^[22]

将二维机织结构织物简化为网格模型, 利用 CST 仿真分析了 30~1 500 MHz 频段内织物的屏蔽效能, 并通过实验验证了仿真的准确性。Yin 等^[23]设计制备了一种具有双向角连锁结构的 3D 电磁吸波机织织物, 并采用实验与仿真相结合的方法研究了吸波性能。结果表明, 仿真与实验结果基本一致, 该 3D 织物具有吸波频率宽、吸波性能好 (-20 dB) 的优点。Wang 等^[24]设计制备了双层蜂窝状三维编织吸波复合材料, 将 CST 电磁模拟与实验分析相结合揭示了其电磁波吸收性能。结果表明, 仿真和实验得到的反射峰位置分别为 10.78 GHz 和 9.28 GHz, 最大反射损耗分别为 -24.35 dB 和 -23.5 dB, 二者吻合良好。然而, 围绕纺织复合材料的电磁仿真, 学者们将细观结构模型进行了大幅简化, 未准确体现纱线的交织特性, 这也导致其预测数据的准确性和可靠性不足。

本文选用国产 SiC 纤维, 采用 PIP 工艺制备了 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料, 利用弓形法开展反射损耗测试, 获取了其吸收峰位置和有效吸波带宽。在此基础上, 建立了基于 X 射线计算机断层扫描 (Micro-CT) 图像的全厚度细观模型, 利用 CST 电磁仿真软件开展了数值分析, 并与上述实验结果进行了对比验证。之后, 进一步揭示了 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的吸波机制, 分析了几何特性、电磁参数、电磁波电场极化方向和入射角度对材料吸波性能的影响规律, 为具有优异吸波特性的三维纺织超材料结构设计和制备提供了方法和数据支撑。

1 实验与仿真

1.1 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的制备

图 1 给出了 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的制备工艺流程。首先, 选用规格为 0.5 K 的国产 SiC 纤维 (福建立亚新材有限公司商用的 cansas3301 SiC 纤维), 并利用多综眼织机, 织造了 2.5D 机织预制体; 其次, 以 BCl₃ 和 NH₃ 作为原料气 (山东德芯特种气体有限责任公司), 以 Ar (北京普莱克斯实用气体有限公司) 作为保护气, H₂ (北京普莱克斯实用气体有限公司) 作为催化气, 通过物理气相沉积法制备了 BN 界面层^[25]; 然后, 以聚碳硅烷 (PCS, 中国科学院化学研究所) 浆料为先驱体, 采用 PIP 法制备了 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材

料粗坯，浸渍-裂解循环为 8~10 次，直至质量增加<1.5wt%。最后，经过近净尺寸加工和再致密化等后处理得到 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料样件。制备各阶段实物如图 2 所示，材料样件规格参数如表 1 所示。

1.2 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的吸波性能测试

参照标准《雷达吸波材料反射率测试方法》(GJB 2038—94)^[26]，利用弓形法对 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的反射损耗进行测试。测试系统如图 3 所示：(1) 测试之前，需在弓形架上方安装好对称

的发射天线和接收天线，并将 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料测试试样放置在样品台上；(2) 开始测试后，电磁波由发射天线发射，经样品台反射到接收天线并传输到矢量网络分析仪上，建立起相应特性频率的参考功率电平，测出接收到的反射电磁波功率；(3) 用金属板取代测试试样，获取其反射电磁波的功率。上述金属板与测试试样接收的功率电平之差，即为反射率。本实验在中国航空技术研究院复合材料中心完成，测试试样尺寸为 40 mm×40 mm×3 mm，测试频率范围为 8~18 GHz。

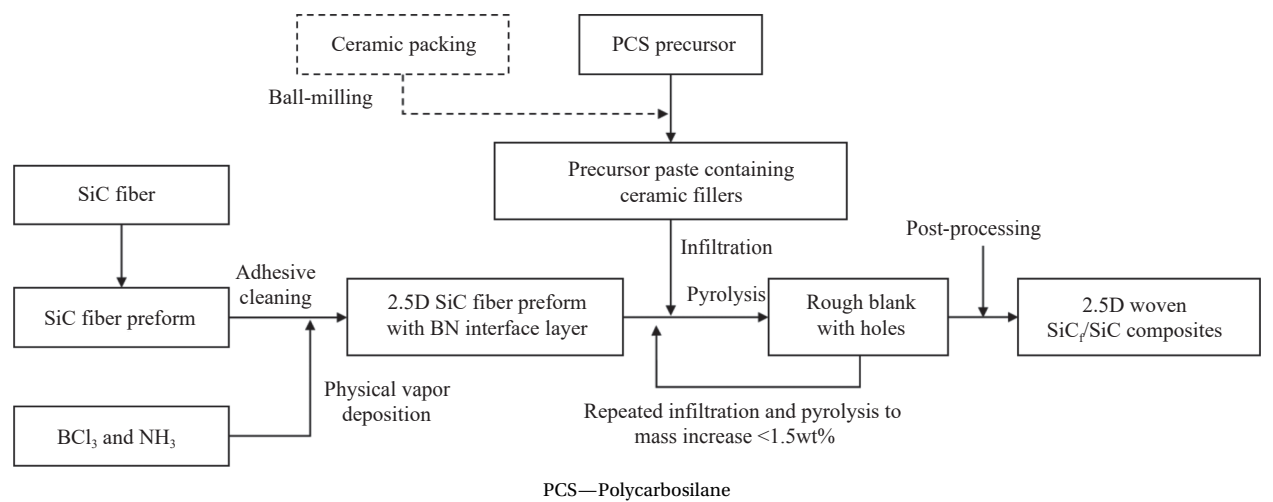


图 1 先驱体浸渍裂解 (PIP) 法制备 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart of 2.5D woven SiC_f/SiC composites prepared by precursor infiltration and pyrolysis (PIP)

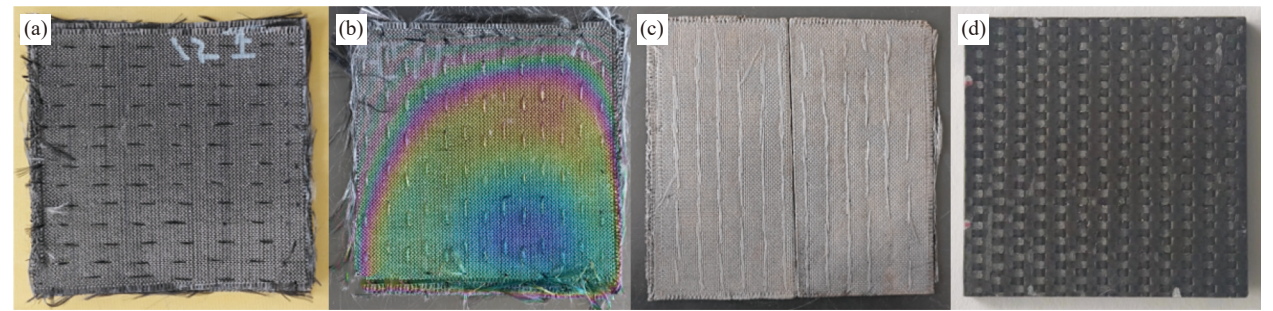


图 2 (a) SiC 纤维预制品；(b) 带 BN 界面层的 SiC 纤维预制品；(c) 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料粗坯；(d) 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料样件

Fig. 2 (a) SiC fiber preform; (b) SiC fiber preform with BN interface layer; (c) Rough blank of 2.5D woven SiC_f/SiC composites; (d) Sample of 2.5D woven SiC_f/SiC composites

表 1 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料规格参数

Table 1 Specification parameters of 2.5D woven SiC_f/SiC composites

Prefabricated structure	Dimension/ mm ³	Warp density/ (yarn·cm ⁻¹)	Weft density/ (yarn·cm ⁻¹)	Yarn fineness/tex	Number of layer	Volume fraction/vol%
2.5D woven angle interlock	40×40×3	9	3.5	185	8	45

1.3 基于 Micro-CT 图像的全厚度微观模型重构

使用德国 Diondo-d2 微焦点 CT 扫描系统扫描

2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料，扫描规格为 20 mm×20 mm×3 mm。所得复合材料经向截面扫描形态

和纬向截面扫描形态，分别如图 4(a) 和图 4(b) 所示。可知，其纱线截面可近似看作椭圆形或扁六边形。统计分析扫描结果，得到纱线截面几何参数如图 4(c) 和图 4(d) 所示。

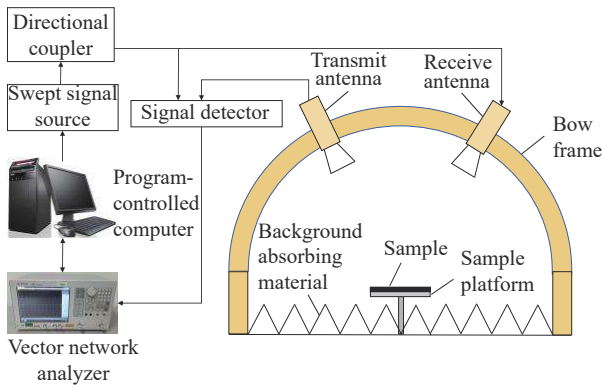


图 3 弓形法测 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料反射损耗系统示意图
Fig. 3 System schematic diagram of measuring reflection loss of 2.5D woven SiC_f/SiC composites by bow method

基于图 4 所示纱线截面几何参数和表 1 所示复合材料规格参数，在 SOLIDWORKS 2018 对 2.5D 机织结构预制体进行全厚度细观模型重构。如图 5 所示，分别建立了以椭圆为纱线截面和以扁六边形为纱线截面的 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料模型。仿真发现，两种不同截面的模型对仿真结果几乎没有影响。但从仿真速度来看，以扁六边形为截面所建模型远快于以椭圆为截面所建模型。这是由于在 CST 电磁仿真软件中，当网格无法分辨较精细曲面结构时，就会出现 CST 网格划分短路现

象，称为 CC 短路现象 (Critical cell)，需要进行全局网格优化或者局部加密网格来解决问题。这导致以椭圆为截面所建模型划分网格数量要高于以六边形为截面所建模型划分网格数量。因此，后续研究以扁六边形为纱线截面所建模型为准。

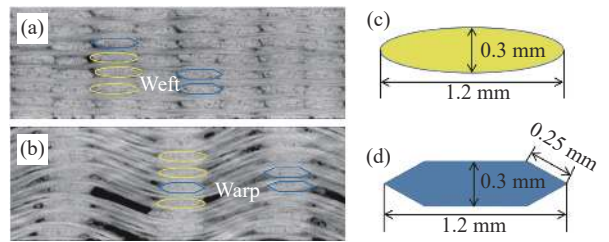


图 4 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的 X 射线计算机断层扫描 (Micro-CT) 扫描结果：(a) 经向截面扫描形态；(b) 纬向截面扫描形态；(c) 椭圆截面几何参数；(d) 扁六边形截面几何参数

Fig. 4 X-ray computed tomography (Micro-CT) scanning results of 2.5D woven SiC_f/SiC composites: (a) Scanning morphology of warp cross-section; (b) Scanning morphology of weft cross-section; (c) Geometric parameters of ellipse cross-section; (d) Geometric parameters of flat hexagonal cross-section

1.4 CST 电磁仿真计算

对于吸波材料，一般将 $A(\omega)$ 、 $R(\omega)$ 和 $T(\omega)$ 分别定义为吸收率、反射率和透射率。在 CST Studio Suite 2020 中，反射率 $R(\omega)=|S_{11}|^2$ ，透射率 $T(\omega)=|S_{21}|^2$ ，此时吸收率 $A(\omega)$ 如下式所示^[27]：

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \tag{1}$$

其中： S_{11} 为反射系数； S_{21} 为透射系数。在仿真过程中，将边界条件中的 Z 轴负方向的 $Z_{\min}$ 设置

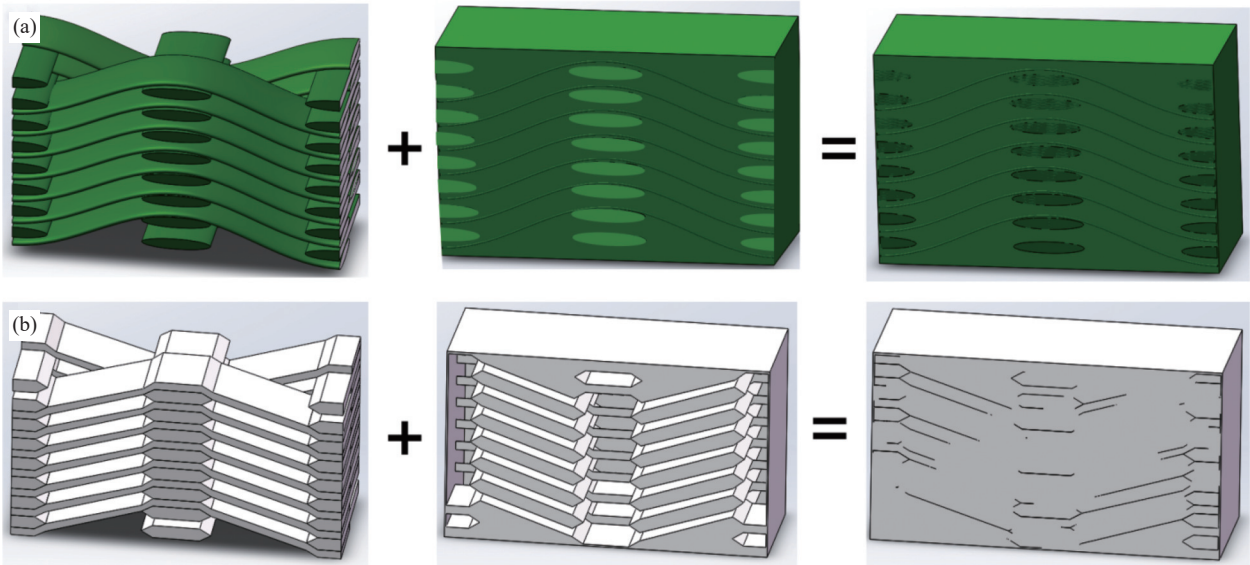


图 5 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料模型：(a) 以椭圆为纱线截面；(b) 以扁六边形为纱线截面

Fig. 5 2.5D woven SiC_f/SiC composites model: (a) Cross-section of yarn is ellipse; (b) Cross-section of yarn is flat hexagonal

为电边界，这可以防止入射电磁波传输透过底板，因此透射率为 0，此时吸收率 $A(\omega)$ 如下式所示：

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 \tag{2}$$

合格的吸波材料要求吸收率尽可能高，反射率尽可能低，而反射率由等效相对阻抗决定，如下式所示：

$$R(\omega) = \frac{Z_{\text{eff}} - \eta_0}{Z_{\text{eff}} + \eta_0} \tag{3}$$

将式 (3) 代入式 (2)，此时吸收率 $A(\omega)$ 如下式所示：

$$A(\omega) = \frac{2\eta_0}{\text{Re}(Z_{\text{eff}}) + \text{Im}(Z_{\text{eff}}) + \eta_0} \tag{4}$$

由式 (4) 可知，若要吸收率 $A(\omega)$ 接近 1，则吸波材料的等效阻抗实部 $\text{Re}(Z_{\text{eff}})$ 应接近空气阻抗 η_0 ，而虚部 $\text{Im}(Z_{\text{eff}})$ 应接近 0。由 S 参数反演法^[28-29] 计算等效相对阻抗如下式所示：

$$Z_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \tag{5}$$

图 6 示出了利用 CST 微波工作室分析 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料吸波性能的仿真流程。在 CST Studio Suite 2020 中，仿真频率设置为 1~18 GHz、边界条件 Z_{min} 设置为电边界 (无透射)、网格划分为四面体自适应网格划分、求解器设置为频域求解器、材料参数为介电常数和损耗角正切 (波导法测得，由中国航空技术研究院复合材料中心

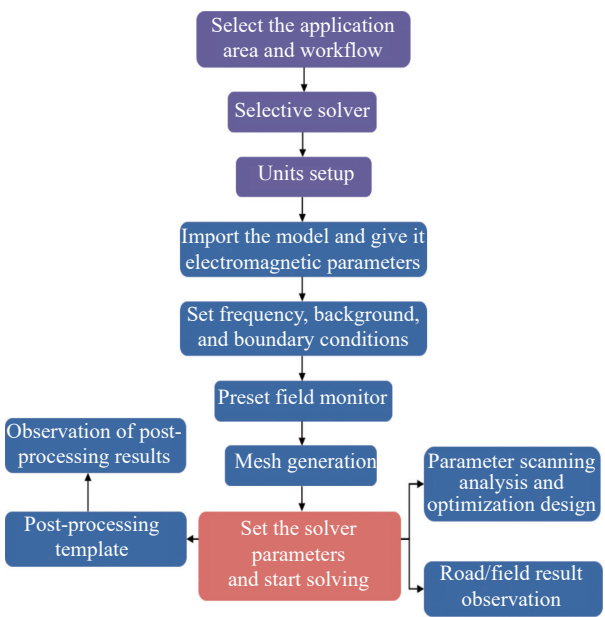


图 6 CST 微波工作室仿真流程图

Fig. 6 Simulation flow chart of CST microwave studio

测试提供)。运行仿真后在 1D Results 中查看反射损耗曲线，在 2D/3D Results 中查看场分布图。仿真得到反射损耗曲线 S_{11} 和 S_{21} 后，在 Post-processing 模块的 Result Templates Tools 中键入式 (5)，重新运行仿真，在 tables 中查看等效电磁参数曲线。

2 结果与讨论

2.1 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的吸波性能

图 7 对比分析了实验测试与仿真计算所得的反射损耗曲线。从图中可以看出，室温下实验测得的吸收峰出现在 9.3 GHz 处，吸收峰处反射损耗为 -17 dB，反射损耗小于 -10 dB 的有效吸波带宽为 3 GHz。而对应的仿真结果显示吸收峰出现在 10.1 GHz 处，吸收峰处反射损耗为 -16 dB，有效吸波带宽也为 3 GHz。且在高温 800℃ 下，2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料仍然具有一定的吸波性能。显然，在 8~18 GHz 频率范围内，实验与仿真结果吻合良好，证明了所建模型的合理性和仿真结果的准确性，这为后续利用仿真模拟进行吸波机制分析的可靠性提供了有力支撑。但也不可否认的是，二者在吸收峰处略有差异，其中主要原因包括：(1) 仿真发生在理想条件下，而实验会受到材料性能差异、测量误差和环境等条件的真实影响；(2) 所建模型没有充分考虑材料内部孔隙和纱线挤压问题，这些因素会在后续研究中展开分析。

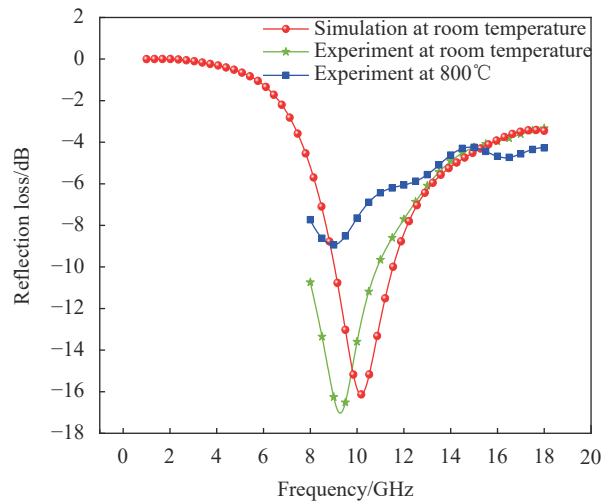


图 7 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料反射损耗的仿真结果与实验结果对比
Fig. 7 Comparison between simulation results and experimental results of reflection loss of 2.5D woven SiC_f/SiC composites model

2.2 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的吸波机制分析

2.2.1 等效电磁参数分析

图 8 给出了 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的等

效电磁参数曲线。由图可知, 在 10.1 GHz 处, $\text{Re}(Z_{\text{eff}})$ 和 $\text{Im}(Z_{\text{eff}})$ 分别为 1 和 0。此时, 复合材料表面阻抗与空气阻抗近似相等, 这能保证电磁波尽可能多的进入材料内部被吸收。而在 10.1 GHz 两侧, $\text{Re}(Z_{\text{eff}})$ 和 $\text{Im}(Z_{\text{eff}})$ 分别越来越远离 1 和 0, 这导致材料表面阻抗与空气阻抗失配, 复合材料产生了对电磁波的强反射作用。这也验证了图 7 所示反射损耗曲线中, 吸收峰出现在 10.1 GHz 附近, 吸收峰向两边的反射损耗越来越小, 复合材料吸波性能越来越差。

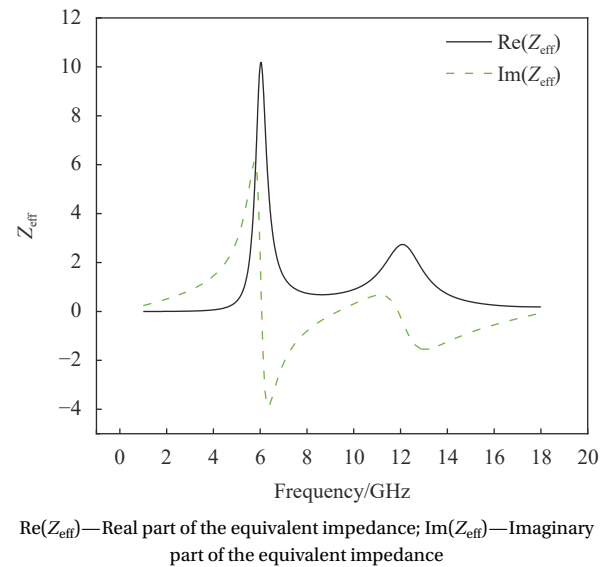


图 8 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的等效电磁参数曲线

Fig. 8 Curves of equivalent electromagnetic parameters of 2.5D woven SiC_f/SiC composites

2.2.2 基于场图的吸波机制分析

为了进一步研究 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料与电磁波之间的相互作用, 揭示其吸波机制, 开展了基于 CST 电磁仿真的场分布图研究。在频率 1~18 GHz 之间, 分别仿真了频率两端 1 GHz、18 GHz、中间点的频率 9.5 GHz 以及谐振点频率 10.1 GHz 共 4 个频点的电磁场分布。

图 9(a) 给出了电磁波在 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料和空气中传输的电场分布图。从图中可以看出, 当电磁波频率为 1 GHz 时, 电场强度沿 Y 轴负方向分布, 且在整个仿真空间内电场强度方向无变化; 当电磁波频率升高至 9.5 GHz 时, 吸波材料上方空气中场强沿 Y 轴负方向分布, 而吸波材料内部场强转为沿 Y 轴正方向分布; 当电磁波频率继续上升至 18 GHz 时, 电场强度的方向发生了多次转变。这与苏钦城^[30]的研究结果一致,

即不同频率下的电场方向随着电磁波频率的变化而变化, 且电磁波频率越高, 电场方向改变越快。除此之外, 电磁波频率为 1 GHz 时的最大电场强度为 2 938 V/m, 随着电磁波频率升高至 9.5 GHz, 最大电场强度迅速升高至 29 523 V/m, 谐振频率点 10.1 GHz 处的最大电磁强度为 29 361 V/m。而随着电磁波频率继续升高, 最大电场强度开始逐渐下降, 当电磁波频率为 18 GHz 时, 最大电场强度下降至 16 669 V/m。可以看出, 本文所制备的 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料主要通过电损耗的方式吸收电磁波, 且电场强度越大, 损耗能力越强。又由于最大电场强度发生在 9.5 GHz, 而不是谐振频率 10.1 GHz 处, 可以判断该复合材料对电磁波的损耗作用除了电损耗之外, 还存在其他的损耗类型。

图 9(b) 给出了电磁波在 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料和空气中传输的磁场分布图。由图可知, 当电磁波频率为 1 GHz 时, 整个仿真空间内磁场强度沿 X 轴负方向分布。而随着电磁波频率的升高, 磁场方向逐渐发生变化, 且频率越高变化越快。频率为 1 GHz 时的最大磁场强度为 34.9 A/m, 随着电磁波频率升高至 9.5 GHz 时, 最大磁场强度升高至 55.7 A/m, 谐振频率点 10.1 GHz 处的最大磁场强度为 53.6 A/m。而随着电磁波频率继续升高, 最大磁场强度开始逐渐下降, 当电磁波频率为 18 GHz 时, 最大磁场强度下降至 31 A/m。可以看出, 在 1~18 GHz 整个频段内, 电磁波形成的磁场强度较弱, 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料由磁损耗贡献的吸波效果较小。这是由于 SiC 纤维本身磁性较弱, 难以在复合材料中形成强磁场。

图 9(c) 给出了 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料内部的电流密度分布图。可以看出, 电磁波频率为 1 GHz 时, 材料内部电流均沿 Y 轴负方向分布, 这与 1 GHz 处的电场方向一致。同样的, 当电磁波频率为 9.5 GHz、10.1 GHz 和 18 GHz 时, 吸波材料内部电流方向均与对应频点处的电场方向一致, 沿 Y 轴正方向分布。这是由于在电场的作用下, 大量自由电子沿电场方向发生定向移动产生了电流。当电磁波频率为 1 GHz 时, 材料内部电流密度仅为 393 A/m²。随着电磁波频率升高至 9.5 GHz 时, 电流密度迅速升高至 31 909 A/m², 谐振频率点 10.1 GHz 处的电流密度为 32 690 A/m², 此时 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料吸波性能达到最佳。

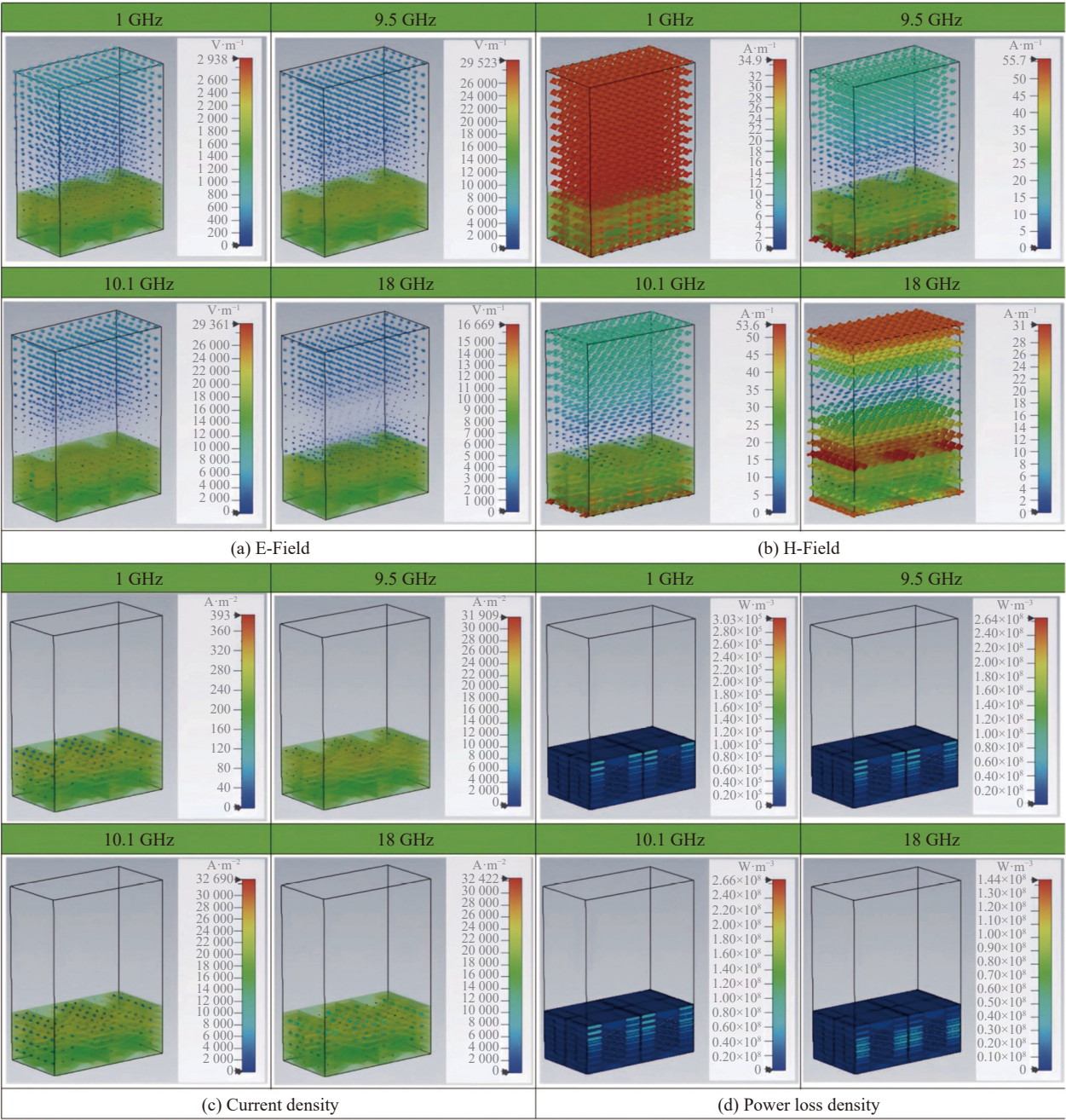


图9 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的场分布图: (a) 电场 (E-Field) 分布图; (b) 磁场 (H-Field) 分布图; (c) 表面电流密度分布图; (d) 能量损耗密度分布图

Fig. 9 Field distribution map of 2.5D woven SiC_f/SiC composites: (a) Electric field (E-Field) distribution map; (b) Magnetic field (H-Field) distribution map; (c) Current density distribution map; (d) Power loss density distribution map

图9(d)给出了1~18 GHz间的能量损耗密度分布图。由图可知，当电磁波频率为1 GHz时，能量损耗密度为 $3.03\times10^5\text{ W/m}^3$ ，此时复合材料反射损耗绝对值为全频段最小的0.004 dB；随着电磁波频率的上升，能量损耗密度逐渐增大，在谐振点频率10.1 GHz处达到最大值 $2.66\times10^8\text{ W/m}^3$ ，此时对应的反射损耗绝对值为全频段最大的16.2 GHz；随着电磁波频率继续升高，能量损耗

密度逐渐减小，在18 GHz时能量损耗密度减小为 $1.44\times10^8\text{ W/m}^3$ ，此时对应的反射损耗绝对值也减小至3.5 dB。因此，电磁波在2.5D机织SiC_f/SiC复合材料内部以能量的形式进行传播，在传播过程中，复合材料将利用各种损耗机制将其转化为热量耗散掉。

为了更完整地表达2.5D机织SiC_f/SiC复合材料的吸波机制，图10给出了电磁波在材料内部的

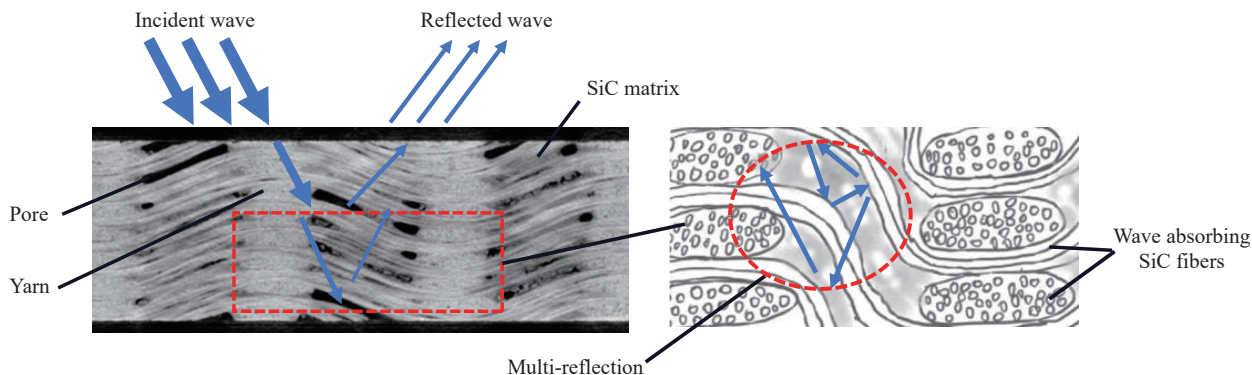


图 10 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的吸波机制示意图

Fig. 10 Schematic diagram of microwave absorbing mechanism of 2.5D woven SiC_f/SiC composites

传输路径。由图可知，入射电磁波在接触到复合材料表面时，一部分直接从表面反射回去，一部分穿过表面透波层进入复合材料内部的损耗层。在损耗层中，一方面，由于 SiC 纤维固有的材料属性，入射波在材料内部会发生电损耗而被吸收；另一方面，采用 PIP 法制备的 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料内部存在较多随机分布的孔隙 (Micro-CT 扫描测得该 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料样件内部孔隙率为 10.7%)，这些孔隙大大延长了电磁波在材料内部的传播路径，并使电磁波在材料内部发生多次散射，这进一步提高了其损耗能力。

2.3 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料吸波性能的影响因素

在上述数值模型与实验结果对比分析基础上，本部分利用有限积分法和 CST Studio Suite 2020 仿真软件，着重分析几何特性、纤维电磁参数、电

磁波电场极化方向和入射角度等对 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料吸波性能的影响规律，以期为耐高温结构吸波复合材料的选材与结构拓展提供设计依据。

2.3.1 几何特性对吸波性能的影响规律

图 11(a) 给出了厚度 d 为 1.5 mm、3 mm 和 6 mm 时 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的反射损耗曲线。可以看出，随着厚度的增加，有效吸波带宽无变化，但材料吸收峰明显向低频移动。同时，最大反射损耗随着厚度增加逐渐增大。且当厚度为 6 mm 时，在低频和高频处都出现了一个明显的吸收峰。这可以用 1/4 波长理论^[31] 来解释，厚度的增加延长了电磁波在材料内部的传播路径，使电磁波尽多被吸收。因此，材料厚度主要影响吸收峰的位置和个数，且在允许的范围内，厚度越大对吸波效能越有利。

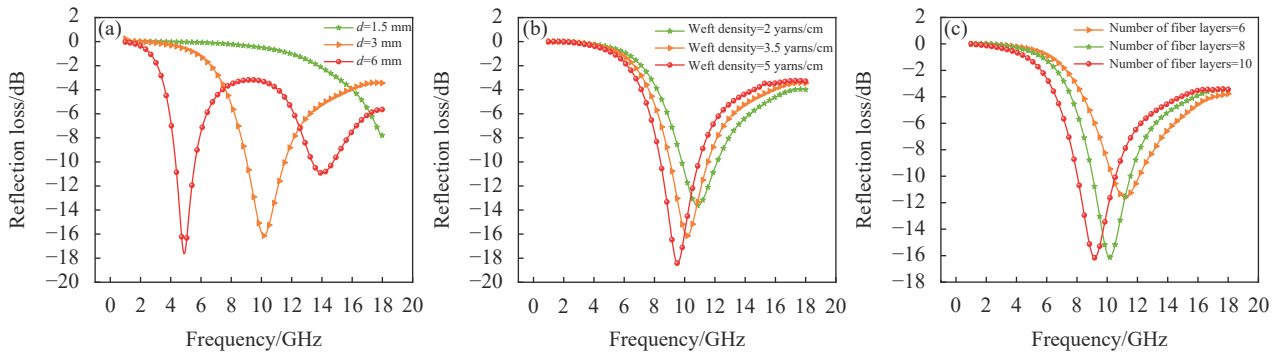


图 11 材料几何特性对 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料吸波性能的影响: (a) 厚度 d ; (b) 纬密; (c) 纤维层数

Fig. 11 Influence of geometric properties of materials on microwave absorbing properties of 2.5D woven SiC_f/SiC composites:

(a) Thickness d ; (b) Weft density; (c) Number of fiber layers

图 11(b) 给出了纬密为 2 束/cm、3.5 束/cm 和 5 束/cm 时 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的反射损耗曲线。由图可知，随着纬密的增大，材料吸收

峰逐渐向低频移动，材料对电磁波的损耗能力逐渐增强，但有效吸收带宽无明显改善。这是由于纬密越大，高介电的 SiC 纤维所占体积分数越大，

复合材料对电磁波的损耗能力越强。同样的，仿真分析经密对材料吸波性能的影响，结果同纬密，这与苏钦城等^[20]的研究结论一致。

图 11(c) 给出了当厚度为 3 mm，纤维层数为 6 层、8 层和 10 层时 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的反射损耗曲线。可以看出，在一定厚度下，纤维层数越多，材料对电磁波的损耗能力越强，且吸收峰逐渐向低频移动，这与莫红松等^[32]的研究结果一致。这是由于纤维层数越多，电磁波进入材料内部后在各层之间的散射次数越多，电磁波能发生多次损耗。

2.3.2 纤维电磁特性对吸波性能的影响规律

图 12(a) 给出了介电常数实部 (ϵ') 变化对 2.5D

机织 SiC_f/SiC 复合材料反射损耗的影响规律。从图中可以看出，随着纤维 ϵ' 的增大，材料吸收峰明显向低频移动，最大反射损耗逐渐增大，但有效吸波带宽无明显变化。因此，纤维 ϵ' 主要影响 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的吸收峰位置和最大反射损耗值，而对有效吸波带宽影响较小。兰州大学应用磁学研究所研究表明^[33]，吸收峰的出现需要两种机制共同作用，一是材料具有较强的电磁损耗能力；二是吸波材料表面与电磁波产生相位相消作用。随着 ϵ' 的增大，材料特征阻抗与空气阻抗之间具有良好匹配特性的频点向低频移动，因此吸收峰逐渐向低频移动。

图 12(b) 给出了介电损耗角正切 ($\tan\delta$) 变化对

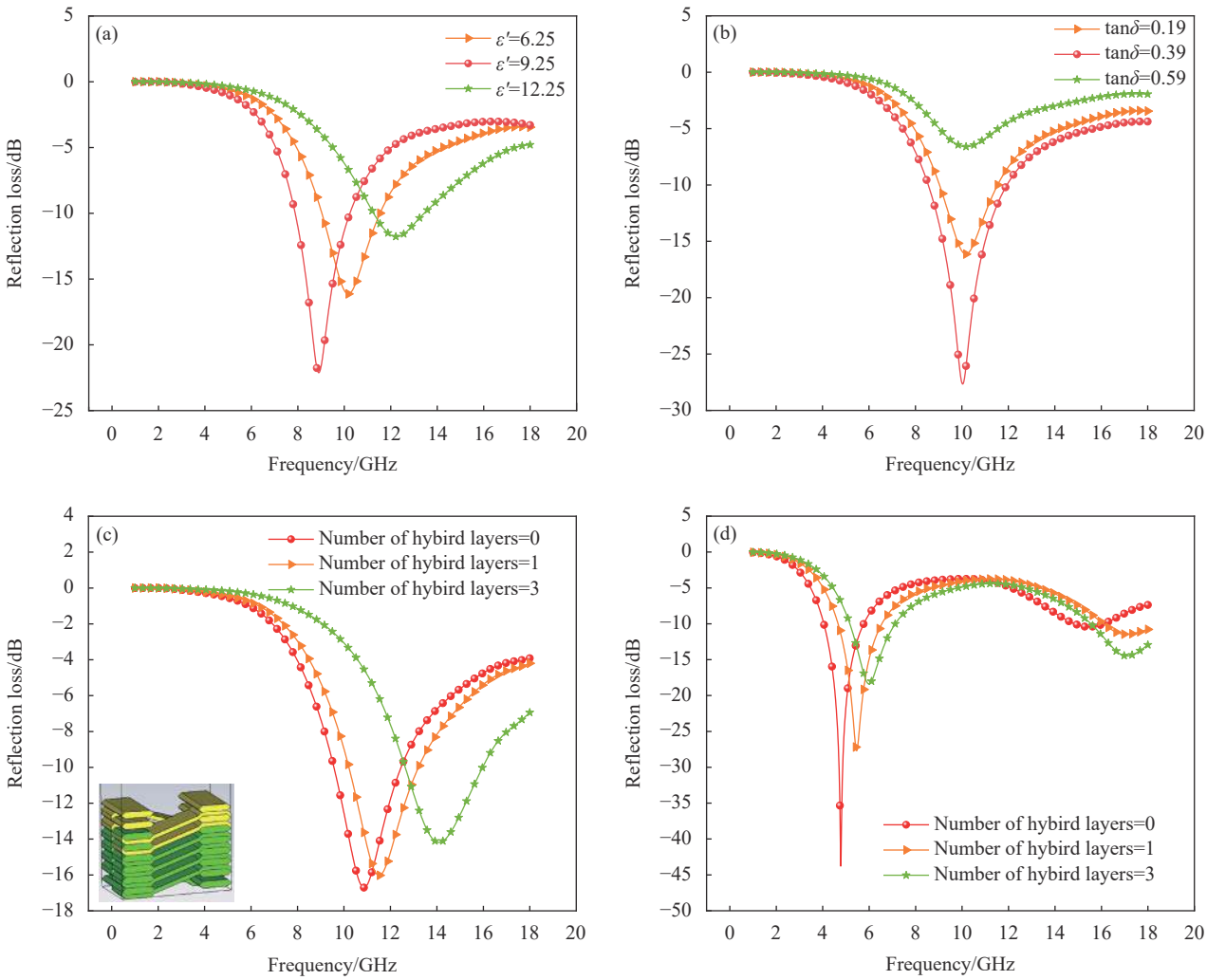


图 12 (a) 纤维介电常数实部 ϵ' 对吸波性能的影响; (b) 纤维介电损耗角正切 $\tan\delta$ 对吸波性能的影响; (c) 材料厚度为 3 mm 时纤维混杂层数对吸波性能的影响; (d) 材料厚度为 6 mm 时纤维混杂层数对吸波性能的影响

Fig. 12 (a) Influence of the fiber real part of permittivity ϵ' on the absorption performance; (b) Influence of fiber dielectric loss angle tangent $\tan\delta$ on the absorption performance; (c) Influence of fiber hybrid layers on the absorption properties when the material thickness is 3 mm; (d) Influence of fiber hybrid layers on the absorption properties when the material thickness is 6 mm

2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料反射损耗的影响。可以看出,随着纤维 $\tan\delta$ 的增大,材料有效吸波带宽和最大反射损耗都逐渐增大,但吸收峰位置无明显变化。不难得知,纤维 $\tan\delta$ 主要影响 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的有效吸波带宽和最大反射损耗,而对吸收峰位置几乎没有影响。

为了进一步研究纤维电磁参数对 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料吸波性能的影响,开展了不同电磁参数纤维的层间混杂分析。根据阻抗渐变原则,预制体上层应使用低介电常数纤维来提高材料和空气间的阻抗匹配,而在下层应使用高介电常数纤维提高电磁波损耗能力。按照上述混编思路,图 12(c) 给出了材料厚度为 3 mm 时,混杂不同层低介电常数 SiC 纤维对 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料吸波性能的影响(左下角小图为混编思路示意图,黄色(上)为低介电匹配层,绿色(下)为高介电损耗层)。由图可知,随着混杂层数的增多,有效吸波带宽略有拓宽,但吸收峰逐渐向高频移动,且最大反射损耗逐渐减少。因此,当材料整体厚度较小时,不一定是低介电常数纤维在上层作匹配层,高介电常数纤维在下层作损耗层。这与刘海韬等^[34]的研究一致:阻抗渐变原则中的阻抗是指各层材料的输入阻抗,而输入阻抗不仅和材料电磁参数有关,还与材料厚度有关。为了

进一步分析材料厚度对不同电磁参数纤维混杂效果的影响,图 12(d) 给出了材料厚度为 6 mm 时,混杂不同层低介电常数 SiC 纤维对 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料吸波性能的影响。可以看出,3 条反射损耗曲线都有两个明显的吸收峰。随着混杂层数的增多,两个吸收峰都略向高频移动,第一个峰对应的反射损耗逐渐减小,而第二个峰对应的反射损耗逐渐增大。整体而言,复合材料有效吸波带宽随着混杂层数的增多而逐渐增大。这说明只有当材料厚度较大时,不同电磁参数纤维混杂的方式才满足特征阻抗渐变原则,材料整体厚度越大,越有将低介电常数纤维放在上层的趋势。

2.3.3 电磁波电场极化方向和入射角度对吸波性能的影响

考虑到实际应用中,入射电磁波的电场极化方向是未知的,因此吸波材料的极化稳定性研究具有重要意义。图 13(a) 给出了不同极化角度下 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料的反射损耗曲线。可以看出,当电磁波垂直入射到材料表面时,随着极化角度的增大,最大反射损耗逐渐减小,且吸收峰略向高频移动,不利于低频的高效吸收。因此本文所述的 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料不具备很好的极化稳定性,这与材料的结构对称性有关。

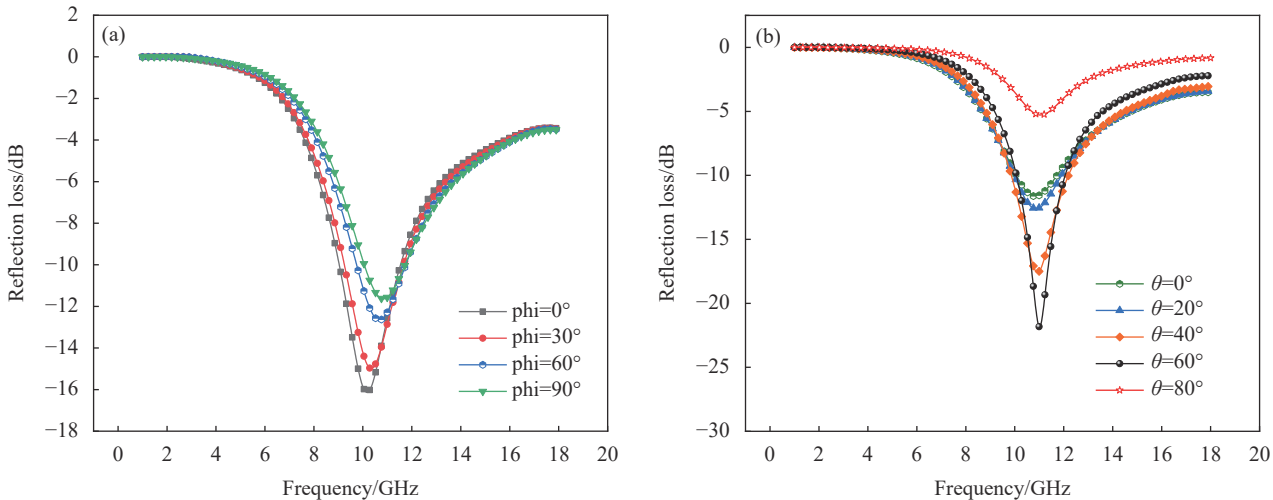


图 13 极化角度 (phi) (a) 和入射角度 (theta) (b) 对 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料吸波性能的影响

Fig. 13 Influence of polarization angle (phi) (a) and incidence angle (theta) (b) on the microwave absorption properties of 2.5D woven SiC_f/SiC composites

图 13(b) 给出了不同电磁波入射角度下复合材料的反射损耗曲线。由图可知,在 0°~60°之间,最大反射损耗随着入射角度的增大而增大,这是

由于材料的感应电流密度在此范围内随入射角的变大而增加,且电流密度分布不均匀,产生了极化效应^[30]。而当入射角度 > 60°时,无有效吸波带

宽,这说明本文所研究的 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料具有良好的宽角度入射特性。

3 结论

(1) 实验结果显示, 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料吸收峰出现在 9.3 GHz 处, 吸收峰处的反射损耗为 -17 dB, 反射损耗小于 -10 dB 的有效吸波带宽为 3 GHz。对应的仿真结果显示, 吸收峰出现在 10.1 GHz 处, 吸收峰处的反射损耗为 -16 dB, 有效吸波带宽也为 3 GHz。整体来看, 实验与仿真结果吻合良好, 证明了所建模型的合理性和仿真结果的准确性。二者在吸收峰处的差异一方面是由于实验环境和理想化仿真环境不同导致的, 另一方面是由于所建模型没有充分考虑材料内部孔隙和纱线挤压问题。后续研究将进一步精细化仿真模型。

(2) 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料优异的吸波性能是材料特性和结构设计协同作用的结果。一方面, SiC 纤维固有的材料属性使电磁波在材料内部以电损耗的形式被吸收; 另一方面, 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料内部随机分布的孔隙引起的多次反射和多次散射行为也是一个重要的吸波机制。关于材料内部孔隙分布和孔隙率对吸波性能的影响将在下一步研究中展开。

(3) 相比经纬密和纤维层数, 厚度对 2.5D 机织 SiC_f/SiC 复合材料吸波性能的影响更加显著。且当厚度较大时, 通过不同介电常数纤维混杂来提升材料吸波性能的效果更好。除此之外, 纤维介电常数实部对材料吸收峰的位置和有效吸波带宽都有明显影响, 而纤维介电损耗角正切只对吸收峰深度有影响。由于该复合材料内部结构没有明显的对称性, 因此不具备良好的极化特性。电磁波入射角度的变化会引起表面电流密度极化效应, 该复合材料具有良好的宽角度入射特性。这些规律为吸波复合材料的选材和结构设计提供了可靠支撑。

参考文献:

- [1] 邢原铭, 杨涛, 王恩会, 等. SiC 复合吸波材料的研究进展 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(9): 4880-4892.
XING Yuanming, YANG Tao, WANG Enhui, et al. Research progress of SiC composite microwave absorbing materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(9): 4880-4892(in Chinese).
- [2] FU Z, PANG A, LUO H, et al. Research progress of ceramic

matrix composites for high temperature stealth technology based on multi-scale collaborative design[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 2770-2783.

- [3] 周旺. 2D- SiC_f/SiC 耐高温结构吸波材料力学性能研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
ZHOU Wang. Mechanical properties of 2D- SiC_f/SiC high-temperature structural absorbing materials[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008(in Chinese).
- [4] 孟庆聪. 碳化硅陶瓷复合材料的制备及其吸波性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2016.
MENG Qincong. Studies on the preparation and microwave absorbing properties of vitrified bonded SiC composites[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016(in Chinese).
- [5] 胡悦, 黄大庆, 史有强, 等. 耐高温陶瓷基结构吸波复合材料研究进展 [J]. 航空材料学报, 2019, 39(5): 1-12.
HU Yue, HUANG Daqing, SHI Youqiang, et al. Research progress of high temperature resistant ceramic based structural wave absorbing composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(5): 1-12(in Chinese).
- [6] 刘海韬. 夹层结构 SiC_f/SiC 雷达吸波材料设计、制备及性能研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
LIU Haitao. Design, preparation and properties of the SiC_f/SiC radar absorbing materials with sandwich structures[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010(in Chinese).
- [7] 刘文迪, 吕丽华. 三维机织吸波复合材料的研究进展 [J]. 棉纺织技术, 2020, 48(10): 81-84.
LIU Wendi, LYU Lihua. Research progress of three-dimensional woven microwave absorbing composites[J]. Cotton Textile Technology, 2020, 48(10): 81-84(in Chinese).
- [8] 穆阳. SiC_f/SiC 高温结构吸波复合材料的制备及性能研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
MU Yang. Preparation and properties of SiC_f/SiC high-temperature structural microwave absorbing composites[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016(in Chinese).
- [9] 樊威, 孟家光, 孙润军, 等. 混杂纤维增强结构隐身复合材料研究进展 [J]. 纺织导报, 2017(1): 66-68.
FAN Wei, MENG Jiaguang, SUN Runjun, et al. Development in the research of hybrid fiber reinforced structural absorbing composites[J]. China Textile Leader, 2017(1): 66-68(in Chinese).
- [10] 戴海军, 李嘉禄, 孙颖, 等. 纬编双轴向织物/环氧树脂电加热复合材料电热及层间剪切性能 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(8): 1997-2004.
DAI Haijun, LI Jialu, SUN Ying, et al. Electrothermal and interlaminar shear properties of weft knitted biaxial

fabric/epoxy resin electrically heated composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(8): 1997-2004(in Chinese).

[11] MU Y, ZHOU W, HU Y, et al. Enhanced microwave absorbing properties of 2.5D SiC_f/SiC composites fabricated by a modified precursor infiltration and pyrolysis process[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 637: 261-266.

[12] HAN T, LUO R, CUI G, et al. Effect of fibre directionality on the microwave absorption properties of 3D braided SiC_f/SiC composites[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(6): 7797-7803.

[13] 吕丽华, 王荣蕊, 刘文迪, 等. 蜂窝状三维整体机织结构型吸波复合材料的设计、制备与性能 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(3): 1477-1483.

LYU Lihua, WANG Rongrui, LIU Wendi, et al. Design, preparation and properties of honeycomb 3D integral woven structure microwave absorbing composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(3): 1477-1483(in Chinese).

[14] ZHANG H, ZHOU X, GAO Y, et al. Microwave absorption and bending properties of three-dimensional gradient honeycomb woven composites[J]. *Polymer Composites*, 2023, 44(2): 1201-1212.

[15] CHEN N, WEI S, SHI B, et al. Investigating the electromagnetic wave-absorbing capacity and mechanical properties of flexible radar-absorbing knitted compound materials[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2021, 51(3): 343-361.

[16] 李丹丹. 2.5D 碳/环氧复合材料电磁波传输性能研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2016.

LI Dandan. Study on electromagnetic wave transmission performance of 2.5D carbon/epoxy composites[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2016(in Chinese).

[17] XIA Q, HAN Z, ZHANG Z, et al. High temperature microwave absorbing materials[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2023, 11(14): 4552-4569.

[18] DU Z, LIANG J, CAI T, et al. Ultra-light planar meta-absorber with wideband and full-polarization properties[J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 6434-6444.

[19] 鞠文静, 周忠元, 蒋全兴, 等. 基于有限积分法的电磁兼容吸波材料反射率的建模仿真 [J]. *东南大学学报 (自然科学版)*, 2015, 45(3): 474-477.

JU Wenjing, ZHOU Zhongyuan, JIANG Quanxing, et al. FIT-based simulation of reflectivity of absorbing materials for electromagnetic compatibility[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2015, 45(3): 474-477(in Chinese).

[20] 苏钦城, 赵晓明, 李卫斌, 等. 基于有限积分法的机织物电磁屏蔽效能仿真分析 [J]. *纺织学报*, 2016, 37(2): 155-160.

SU Qincheng, ZHAO Xiaoming, LI Weibin, et al. Simulation analysis of woven fabric electromagnetic shielding effectiveness using finite integration technique[J]. *Journal of Textile Research*, 2016, 37(2): 155-160(in Chinese).

[21] 杨飙. 纤维复合微波吸收材料电磁建模与分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.

YANG Biao. Analysis and electromagnetic modeling of the fiber reinforced microwave absorbing composites[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015(in Chinese).

[22] 孙娜, 徐阳. 基于法兰同轴测试原理的织物屏蔽效能仿真 [J]. *丝绸*, 2023, 60(5): 52-58.

SUN Na, XU Yang. Simulation of electromagnetic shielding effectiveness of fabrics based on the principle of flange coaxial method testing[J]. *Journal of Silk*, 2023, 60(5): 52-58(in Chinese).

[23] YIN J, MA W, GAO Z, et al. A structural design method of 3D electromagnetic wave-absorbing woven fabrics[J]. *Polymers*, 2022, 14(13): 2635.

[24] WANG R, LIU W, ZHOU X, et al. Electromagnetic wave absorption and bending properties of double-layer honeycomb 3D woven composites: Experiment and simulation[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2024, 115(6): 995-1005.

[25] 刘海韬, 程海峰, 王军, 等. SiC_f/SiC 复合材料界面相研究进展 [J]. *材料导报*, 2010, 24(1): 10-14, 30.

LIU Haitao, CHENG Haifeng, WANG Jun, et al. Study on the interphase of the continuous SiC fiber reinforced SiC composites[J]. *Materials Reports*, 2010, 24(1): 10-14, 30(in Chinese).

[26] 国防科学技术工业委员会. 雷达吸波材料反射率测试方法: GJB 2038—94[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.

Commission of Science, Technology and Industry for National Defense (COSTIND) Commission. Methods for measurement of reflectivity of radar absorbing material: GJB 2038—94[S]. Beijing: China Standard Press, 1994(in Chinese).

[27] YAO H, YANG J, LI H, et al. Optimal design of multilayer radar absorbing materials: A simulation-optimization approach[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2023, 6: 43.

[28] SMITH D R, VIER D C, KOSCHNY T, et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. *Physical Review E*, 2005, 71: 036617.

[29] CHEN Z, ZHANG Y, WANG Z, et al. Bioinspired moth-eye multi-mechanism composite ultra-wideband microwave absorber based on the graphite powder[J]. *Carbon*, 2023, 201: 542-548.

[30] 苏钦城. 电磁波在织物中传播的正反演仿真研究 [D]. 天津:

天津工业大学, 2016.

SU Qincheng. Forward and inverse study of electromagnetic wave propagation in fabric[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2016(in Chinese).

- [31] ZHAO B, GUO X Q, ZHAO W Y, et al. Yolk-shell Ni@SnO₂ composites with a designable interspace to improve the electromagnetic wave absorption properties[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(42): 28917-28925.
- [32] 莫红松, 吕潇, 李光, 等. 复合材料中碳纤维的铺设方式对吸波性能的影响 [C]//第六届中国功能材料及其应用学术会议论文集. 武汉: 中国仪器仪表学会, 2007: 3063-3066.
- MO Hongsong, LYU Xiao, LI Guang, et al. Effect of laying method of carbon fiber on wave absorbing properties of

composite materials[C]//Proceedings of the 6th China Conference on Functional Materials and Their Applications. Wuhan: China Instrument and Control Society, 2007: 3063-3066(in Chinese).

- [33] WANG B C, WEI J Q, YANG Y. Investigation on peak frequency of the microwave absorption for carbonyl iron/epoxy resin composite[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 323(8): 1101-1103.
- [34] 刘海韬, 程海峰, 王军, 等. 高温结构吸波材料综述 [J]. 材料导报, 2009, 23(19): 24-27.
- LIU Haitao, CHENG Haifeng, WANG Jun, et al. Review on high-temperature structural radar absorbing materials[J]. Materials Reports, 2009, 23(19): 24-27(in Chinese).