

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.05.014

纤维酚醛复合材料热防护吸波一体化结构与性能

刘晓菲^{1,2}, 骆盛^{1,2}, 张亚坤¹, 张成军³, 付斌^{1,2}, 徐顶国¹, 刘永峙³, 郭国强¹, 杜天宇¹, 于秋兵³

(1. 西安现代控制技术研究, 西安 710065; 2. 陆空基信息感知与控制全国重点实验室, 西安 710065; 3. 山东非金属材料研究所, 济南 250031)

摘要: 高超声速飞行器在临近空间以5马赫以上速度飞行时,需同时承受极端热环境和复杂电磁环境,传统分离式设计因热防护与电磁功能割裂,导致系统增重、结构复杂度上升及气动稳定性受损。本研究基于热防护厚度空间约束,提出热防护吸波一体化结构设计方法:通过Jaumann吸收体理论构建纤维酚醛复合材料基多层透波层与吸波层交替堆叠结构,系统开展电磁仿真优化、样件制备及多尺度性能验证。高能X射线成像仪检测结果表明,样件内部结构均匀致密,吸波层与透波层界面无缺陷;电磁测试结果表明,该结构在5.5~12 GHz频段内反射率稳定低于-10 dB,实现6.5 GHz有效吸波带宽(完整覆盖X波段雷达工作频段),而在3、5.5、9.5 GHz关键频率点的反射率分别达-6.4、-10.0、-17.6 dB;热学性能测试结果表明,1 000 °C高温条件下该结构的热导率仅为0.045 W/(m·K),与传统热防护材料相当。该结构通过“透-吸-散”协同机制,在保持优异热防护性能的同时实现宽频带吸波功能,为高超声速飞行器提供了轻量化、高可靠性的热电一体化防护方案。

关键词: Jaumann吸收体;纤维酚醛;热防护吸波一体化结构;吸波性能;优化设计

中图分类号: TQ320 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)05-0118-08

Design and performances of fiber-reinforced phenolic composite integrated structure for thermal protection and absorption waves

LIU Xiaofei^{1,2}, LUO Sheng^{1,2}, ZHANG Yakun¹, ZHANG Chengjun³, FU Bin^{1,2}, XU Dingguo¹, LIU Yongzhi³, GUO Guoqiang¹, DU Tianyu¹, YU Qiubing³

(1. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China; 2. National Key Laboratory of Land and Air Based Information Perception and Control, Xi'an 710065, China; 3. Shandong Institute of Non-metallic Materials, Jinan 250031, China)

Abstract: When hypersonic aircraft are flying at speeds above 5 Mach in the near-space region, they need to simultaneously withstand extreme thermal environments and complex electromagnetic environments. Conventional segregated designs, due to the separation of thermal protection and electromagnetic functions, results in increased system weight, higher structural complexity, and compromised aerodynamic stability. To overcome this limitation, an integrated structure design method for thermal protection and absorbing wave was proposed based on the constraints of thermal protection thickness space. Leveraging Jaumann absorber theory, the alternating stacking structure of radar-transparent and radar-absorbing layers of fiber-reinforced phenolic composite was constructed. The electromagnetic simulation optimization, sample fabrication, and multi-scale performances validation were carried out systematically. High-energy X-ray imager testing results confirm that the sample has uniform and dense internal structure with defect-free interfaces between absorbing layer and transparent layer. Electromagnetic testing results demonstrate that the reflectivity of the structure is consistently below -10 dB within 5.5-12 GHz, achieving an effective absorption bandwidth of 6.5 GHz that fully covers X-band radar frequencies. The reflectivity at the key frequency points of 3, 5.5, 9.5 GHz reach -6.4, -10.0, -17.6 dB respectively. Thermal analysis shows that at a high temperature of 1 000 °C, the thermal conductivity of this structure is only 0.045 W/(m·K), which is comparable to that of traditional thermal protection materials. Through the synergistic mechanism of transmission-absorption-dispersion, this structure maintains exceptional thermal protection while delivering broadband radar absorbing, which provides a lightweight, high-reliability thermoelectrically integrated solution for hypersonic vehicles.

Keywords: Jaumann absorber; fiber-reinforced phenolic; integrated thermal protection and absorbing structure; absorbing performance; optimal design

通信作者: 刘晓菲, 博士, 高级工程师, 研究方向为飞行器隐身设计、隐身结构设计、雷达天线罩电性能设计等

收稿日期: 2026-03-08

引用格式: 刘晓菲, 骆盛, 张亚坤, 等. 纤维酚醛复合材料热防护吸波一体化结构与性能[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(5): 118-125.

LIU Xiaofei, LUO Sheng, ZHANG Yakun, et al. Design and performances of fiber-reinforced phenolic composite integrated structure for thermal protection and absorption waves[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(5): 118-125.

高超声速飞行器指在临近空间以5马赫以上速度飞行的飞行器,其多物理场耦合特性使其成为结构功能一体化研究的重要载体^[1-3]。作为结构功能一体化研究的典型工程对象,此类飞行器在多物理场耦合环境中,既为热防护与电磁功能的协同集成提供关键研究场景,又因综合性能优化需求亟需通过一体化设计实现热-电磁功能的高效集成与系统性提升^[4-5]。然而,传统设计中热防护与电磁功能常采用分离式方案:前者聚焦气动热载荷防护,后者依赖附加吸波涂层/结构,导致系统质量增加、结构复杂度上升,并可能损害气动稳定性。随着现代相控阵雷达和多频谱探测技术的快速迭代,单一功能的防护策略已无法满足高超声速飞行器在热-电磁耦合环境下的综合性能要求,亟需发展热防护与电磁功能一体化的结构设计新途径。

针对热防护与电磁功能的协同需求,烧蚀式热防护材料因高隔热效率和可靠性,仍是高热流工况的主流选择^[6-9]。纤维酚醛复合材料凭借耐高温特性、低热导率和良好力学性能,已成为热防护系统的核心候选材料。然而,传统纤维酚醛复合材料的介电常数较低,雷达波吸收能力有限,难以满足现代多传感器环境下对电磁特性优化的要求。通过结构功能一体化设计,在纤维酚醛热防护体系中嵌入吸波功能层,可合理利用结构厚度空间实现“一材多用”,协同优化双重功能。宋若康等^[10]通过向烧蚀热防护材料中引入双层超材料结构,制备了隔热/吸波多功能一体化复合材料,验证了功能集成的可行性;师建军等^[11]以多壁碳纳米管为吸收剂,设计并制备了多层结构防隔热/隐身复合材料,初步实现了烧蚀隔热与雷达吸波的协同,电弧风洞考核前后该材料均具有较好的雷达吸波性能。

电磁特性设计需满足低频宽带要求,但单层吸波材料因谐振机制难以实现宽频带覆盖。多层吸波结构通过厚度方向阻抗渐变显著提升性能,主要包括 Salisbury 吸收体、阻抗匹配型吸收体和 Jaumann 吸收体等三种。

Salisbury 吸收体基于 $\lambda/4$ 谐振原理(λ 为电磁波波长),由金属背板、低介电常数隔离层(如泡沫或蜂窝介质,相对介电常数为 1.02~1.1)和表面电阻片组成^[12-13],如图 1 所示。假设隔离层介电常数为 1,平面波垂直入射理论表明:当电阻片归一化电导为 G 、隔离层厚度 $d=\lambda/4$ 时,可实现最小反射。该结构因

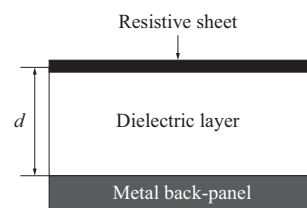


图1 Salisbury吸收体示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Salisbury absorber

谐振特性导致吸收频带较窄,适用于特定频点的吸波需求。

阻抗匹配型吸收体由多层不同厚度和电磁参数的介质构成,包括阻抗匹配层、吸收层和金属反射层^[14-15],如图 2 所示。为描述方便,将所有对自由空间的波阻抗作归一化处理:空气的归一化阻抗为 $Z_0=1$,各阻抗匹配层的归一化阻抗依次为 Z_1 和 Z_2 ,反射层的归一化阻抗为 $Z_3=0$ 。其工作原理基于电磁波的传播理论:通过阶梯式阻抗过渡逐步减小界面反射,使电磁波深入吸收层;经金属背板反射后,二次吸收进一步提升能量损耗效率。增加匹配层数可有效降低界面反射,从而扩展吸收带宽,但层数增加易导致设计复杂性和厚度增大。

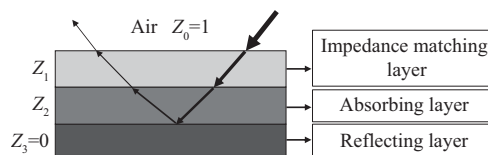


图2 阻抗匹配型吸收体示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Impedance matching type absorber

相比之下,Jaumann 吸收体由薄损耗层与厚非损耗层交替堆叠而成,可视为多个 Salisbury 屏级联,具有优异的宽频带特性^[16-17],其结构示意图和典型方案反射率曲线如图 3 所示。非损耗层厚度满足式(1)条件时可获得最低反射系数。

$$d = (2n + 1) \frac{\lambda}{4} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

式中: λ 为电磁波在非损耗层中的波长。

λ 可由式(2)得出。

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (2)$$

式中: λ_0 为电磁波真空波长; ϵ 和 μ 为非损耗层的相对介电常数和磁导率。

联立式(1)和式(2)可得式(3)。

$$d = (2n + 1) \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (3)$$

在热防护系统厚度约束下,优化非损耗层参数

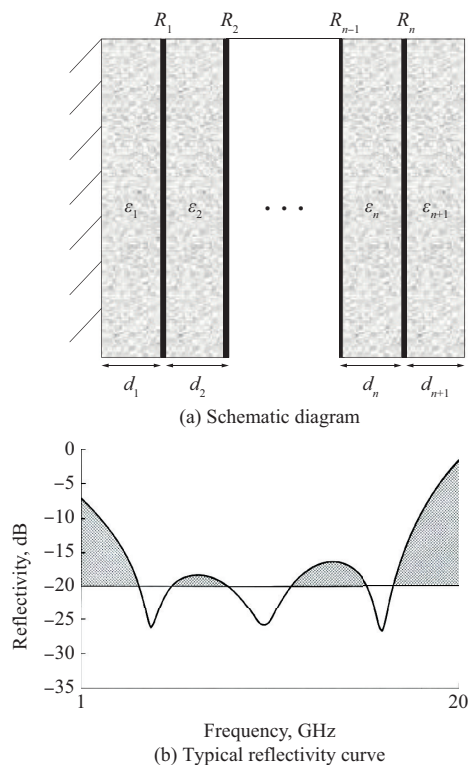
图3 Jaumann吸收体示意图及典型反射率曲线^[17]

Fig. 3 Schematic diagram and typical reflectivity curve of Jaumann absorber

(ϵ 和 μ 值)能有效补偿带宽损失,确保有限空间内高效吸波。优化设计中,电阻需从前至后递减;增加吸波层数可扩展带宽但增加厚度。

鉴于Jaumann吸收体在兼顾宽频带吸波性能与轻量化方面的优势,本研究直接采用Jaumann吸收体作为核心,结合热防护厚度约束,提出基于纤维酚醛复合材料的热防护吸波一体化结构(简称纤维酚醛热防护吸波结构)设计方法。与以往主要依赖涂层或夹层结构的一体化方案不同,本研究的创新之处在于:基于Jaumann吸收体设计理论,有效利用纤维酚醛热防护体系的厚度空间,实现透波层与吸波层的交替堆叠与结构一体化成型,有效避免涂层材料导致的增重问题。其先进性表现在三个方面:首先,在保证热防护性能基础上,拓展结构吸波性能,形成结构功能一体化方案;其次,可独立调节透波层厚度、吸波层数和吸波层方阻,具有较好的设计灵活性;最后,通过吸波层设计可避免吸收剂分散不均导致吸波性能一致性差的问题。综上,本研究通过理论分析、结构优化与实验验证,探索基于纤维酚醛复合材料的轻量化综合防护方案,为高超声速飞行器提供电磁功能与热防护的双重技术支持。

1 实验部分

1.1 主要原材料

酚醛树脂:BZ-1306,山东圣泉新材料股份有限公司;

芳纶纤维:F12,内蒙古航天拓力新材料有限公司;

石英纤维毡:山东工业陶瓷研究设计院;

吸波胶膜(碳系):山东非金属材料研究所。

1.2 主要仪器及设备

烘箱:FY101-4,淄博科汇飞雁干燥设备有限公司;

树脂传递模塑成型(RTM)系统:山东非金属材料研究所;

高能X射线成像仪:D5,瑞士康姆艾德集团有限公司(COMET);

多功能快速热导率测试仪:DRE-III,德卡精密量仪(深圳)有限公司;

弓形法雷达反射率测试系统:山东非金属材料研究所;

扫描电子显微镜(SEM):GEMINI300,德国卡尔蔡司股份公司。

1.3 样件制备

纤维酚醛热防护吸波结构制备流程如下:将芳纶纤维布叠层针刺缝合获得高密度表层预制体;采用Z向原位针刺工艺将电磁吸波胶膜复合到石英纤维毡中,获得吸波预成型体;随后通过压力浸渍注胶、固化、干燥等工艺制备热防护吸波一体化结构,具体工艺路线如图4所示。

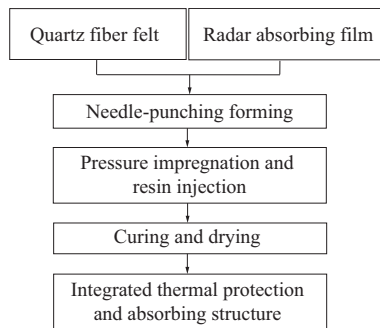


图4 纤维酚醛热防护吸波结构制备流程图

Fig. 4 Schematic of fabrication process for integrated thermal protection and absorbing structure based on fiber-reinforced phenolic

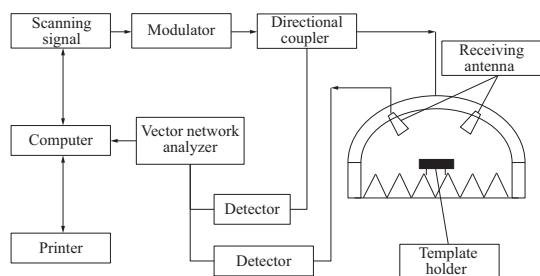
纤维酚醛热防护吸波结构采用RTM工艺成型,如下:将表层预制体和吸波预成型体叠层放入模具中,置于80℃烘箱内;将酚醛树脂升温至80℃后注入模具(注胶压力0.3 MPa),待树脂充满型腔后停

止灌注(织物与纯树脂质量比约为6:4);将烘箱升温至120℃固化2h,再升温至180℃固化4h,最终获得RTM工艺成型的酚醛树脂基复合材料。

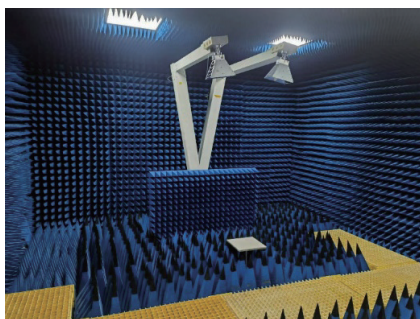
1.4 性能测试

1.4.1 反射率测试

依据GJB 2038A-2011,采用弓形法测试系统对样板进行反射率测试,如图5所示。系统由弓形架、样板支架、发射天线、接收天线、矢量网络分析仪及计算机组成。



(a) Schematic diagram



(b) Photograph

图5 弓形法测试系统示意图及实物图

Fig. 5 Schematic diagram and photograph of arch method measurement system

1.4.2 热导率测试

依据GB/T 10295-2008,使用多功能快速热导率测试仪表征复合材料的热导率,测试仪设备照片如图6所示。

1.4.3 内部缺陷分析

采用高能X射线成像仪进行内部缺陷分析。将试件固定于中心,依据厚度与密度预选3~7 MeV电子束能量及0.5 mm Cu滤波片,确保灰度值落在探测器线性区间,实现高密度构件内部缺陷的可追溯评定,成像仪照片如图7所示。

2 结果及讨论

2.1 纤维酚醛热防护吸波结构方案设计

2.1.1 设计方法

CST微波工作室(CST Microwave Studio)的频域求解器基于频域有限积分技术(FIT),通过在频域



图6 多功能快速热导率测试仪照片

Fig. 6 Photograph of multifunctional rapid thermal conductivity tester



图7 高能X射线成像仪照片

Fig. 7 Photograph of high-energy X-ray imager

内直接求解麦克斯韦方程组,高效获取电磁场分布与频域响应特性。该算法适用于低频宽带吸波结构设计,因其能通过自适应扫频技术精确计算宽频带内的反射系数(S_{11})和吸收率,避免了时域方法中傅里叶变换引入的频谱泄漏误差。在低频段,频域算法克服了时域求解器因小时间步长导致的计算效率低下问题,显著提升了结构参数优化(如几何构型与阻抗匹配层设计)的精度与可靠性,为实现高吸收率、低反射的宽带吸波结构提供关键仿真支持。

2.1.2 纤维酚醛热防护吸波结构方案优化

通过Jaumann吸收体设计,本研究提出在纤维酚醛热防护材料的纤维毡层间嵌入吸波胶膜的创新方案,可同时具备优异的吸波与热防护性能,满足轻量化、高防护及宽带吸波等多功能一体化需求。

纤维酚醛热防护吸波结构利用纤维酚醛透波层的低介电常数与低损耗特性,通过吸波胶膜与透波毡层的阻抗匹配形成渐变结构,促进电磁波的多重反射与吸收,实现2~12 GHz频段的宽频吸波性能。其中,透波层不仅作为电磁波传输通道和吸波

层的支撑载体,更协同吸波胶膜将电磁波能量转化成热能并从局部快速扩散,满足“透、吸、散”的电磁功能要求,最终达成热防护与吸波功能一体化。纤维酚醛热防护结构为高速飞行器使用的典型热防护结构,其示意图和实物图如图8所示。该结构表层为高密度层(厚度为1.5 mm),采用芳纶纤维机织布增强酚醛复合材料,主要作用为抗高速气流冲刷,其纤维体积分数一般为45%~55%;其内层为低密度层(厚度为15.5 mm),采用石英纤维毡酚醛材料,主要作用为隔热降温,其纤维体积分数一般为10%~20%。利用纤维酚醛热防护结构透波特性和厚度空间,在其低密度层内部引入吸波薄层,形成基于Jaumann吸收体设计的纤维酚醛热防护吸波结构,其结构示意图如图9所示,可通过调控层厚、材料参数及层数等设计参数优化其宽频带吸波性能。

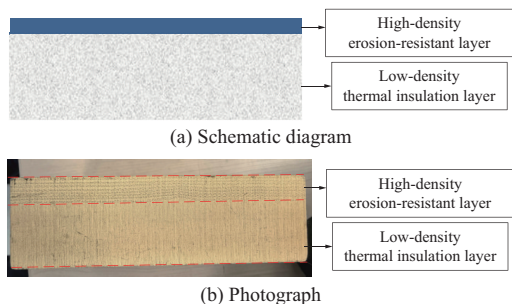


图8 纤维酚醛热防护结构示意图和实物图

Fig. 8 Schematic diagram and photograph of fiber-reinforced phenolic thermal protection structure

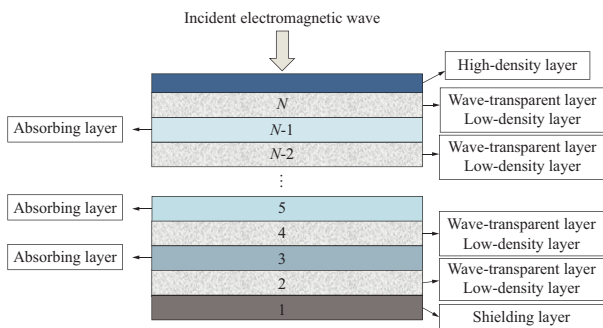


图9 纤维酚醛热防护吸波结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of integrated thermal protection and absorbing structure based on fiber-reinforced phenolic

其中,吸波胶膜在结构中起关键作用,如图10所示,其本质为阻抗膜,吸波机理遵循Jaumann吸收体理论^[16-17],阻抗膜通过欧姆损耗将电磁能转化为热能,并与相邻透波层(作为低损耗介质间隔层)形成四分之一波长匹配结构,使各层反射波在金属背板前实现干涉相消。通过合理设计隔层阻抗膜的

方阻值以及透波层的厚度与介电常数,可优化阻抗匹配,进而拓展吸波带宽。本文纤维酚醛热防护吸波结构方案优化目标为:在保证X波段(8~12 GHz)反射率均低于-10 dB基础上,尽量提升S波段(2~4 GHz)和C波段(4~8 GHz)吸波性能,优化设计变量为透波层数、厚度、吸波层方阻等。

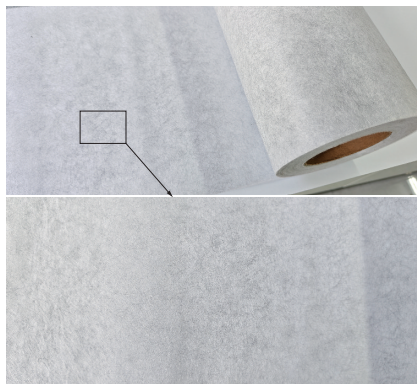


图10 吸波胶膜实物图

Fig. 10 Photograph of radar absorbing film

图8和图9所示结构中低密度透波层电磁参数为介电常数2.2,介电损耗角正切0.005,磁介电常数1,磁损耗0;高密度抗冲刷层电磁参数为介电常数4.0,介电损耗角正切0.008,磁介电常数1,磁损耗0,以上参数均为矢量网络分析仪测试获得。

纤维酚醛热防护吸波结构反射率仿真曲线如图11所示,分析可获得结构参数对吸波效果的影响规律:①在总厚度约束下,单纯增加吸波层数对带宽拓展作用有限;②透波层厚度对谐振频率影响显著,随透波层厚度由1.6 mm增加至2.4 mm,曲线上的主吸收峰由10.5 GHz向8.5 GHz频率方向移动。上述规律与Jaumann吸收体经典理论^[16-17]一致。

根据有限元电磁仿真分析,综合考虑8~12 GHz反射率优异、4~8 GHz具有较好的吸波带宽,确定了最佳层叠参数:高密度抗冲刷层厚度为1.5 mm、透波层厚度2.2 mm,吸波层总层数7层,各层吸波层方阻为50~200 Ω/sq 。仿真结果显示,该吸波结构在6.5~12 GHz频段内平均反射率低于-10 dB,满足高超声速飞行器电磁功能要求,同时可保持良好热防护性能。

2.2 纤维酚醛热防护吸波结构性能研究

2.2.1 结构分析

通过高能X射线成像仪对制备的纤维酚醛热防护吸波结构平板样件的微观完整性与界面可靠性进行表征。纤维酚醛热防护吸波结构样件实物、

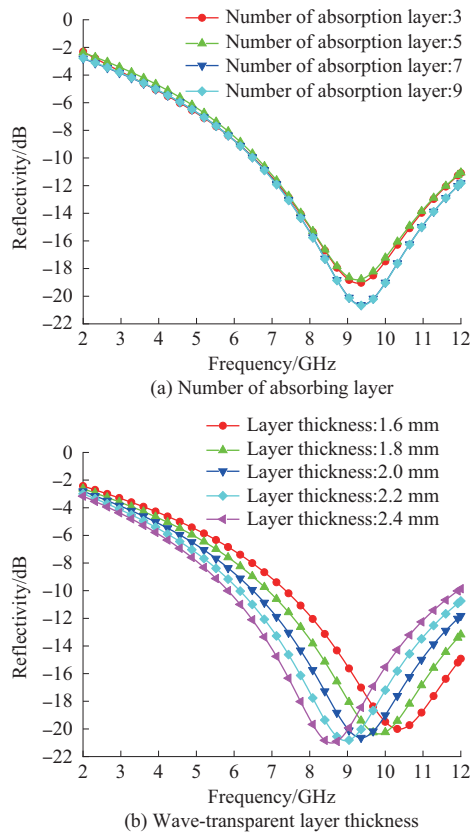


图 11 纤维酚醛热防护吸波结构反射率仿真曲线

Fig. 11 Simulated reflectivity curves of fiber-reinforced phenolic integrated thermal protection and absorbing structure

高能 X 射线成像图和高密度层 SEM 照片如图 12 所示,其中 SEM 照片为通过机械破坏所得试样的断口形貌。检测结果表明:高密度层中芳纶纤维与酚醛树脂紧密包覆,材料内部微观结构高度均匀致密,未发现气孔、夹杂或层间分离等异常现象。该结构特性不仅验证了针刺成型与压力浸渍注胶工艺的可行性,更为后续实现优异的宽频带吸波性能与高效热防护功能奠定了技术基础。

2.2.2 吸波性能分析

依据 GJB 2038A-2011 尺寸要求,将制备获得的纤维酚醛热防护吸波结构平板加工成尺寸为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 17\text{ mm}$ 的反射率测试平板样品,在室温条件下对纤维酚醛热防护吸波结构平板进行吸波性能测试,基于该平板的测试状态如图 13 所示,反射率测试与仿真结果对比曲线如图 14 所示。经分析可得出如下结果。

(1)纤维酚醛热防护吸波结构的反射率测试与仿真结果呈现高度一致的变化趋势,测试数据整体略优于仿真预测数据,最大偏差约为 3 dB,充分验证了本文基于 Jaumann 吸收体理论模型的数值仿真

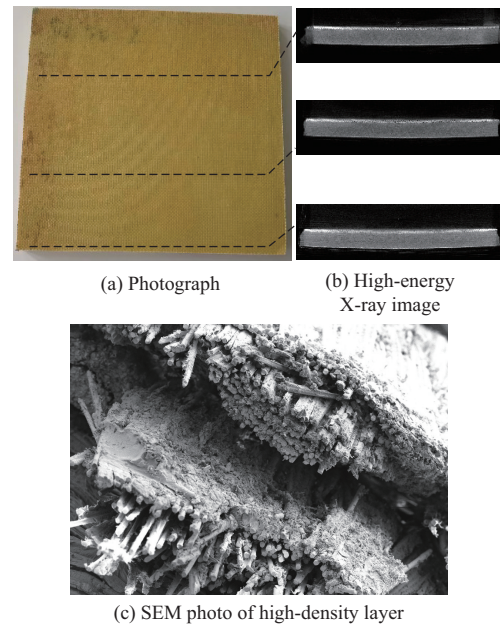


图 12 纤维酚醛热防护吸波结构样品实物照片、高能 X 射线成像图和高密度层 SEM 照片

Fig. 12 Photograph, high-energy X-ray image and high-density layer SEM photo of fiber-reinforced phenolic integrated thermal protection and absorbing structure sample

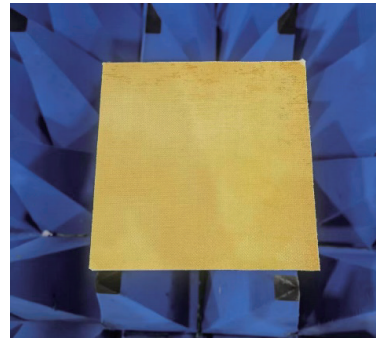


图 13 基于纤维酚醛热防护吸波结构平板的测试状态

Fig. 13 Test status of flat-panel for fiber-reinforced phenolic integrated thermal protection and absorbing structure

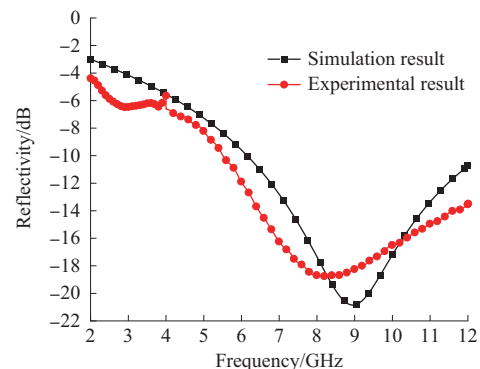


图 14 纤维酚醛热防护吸波结构平板的反射率测试与仿真结果对比

Fig. 14 Comparison of reflectivity testing and simulation results of flat-panel for fiber-reinforced phenolic integrated thermal protection and absorbing structure

方法具有可靠的工程指导价值。误差来源可能来源于吸波胶膜电性能波动、透波层与吸波层厚度的微米级制造公差,以及工艺过程中的介电参数离散性等,这些因素在后续优化中可通过参数敏感性分析进一步修正。

(2)在3、5.5、9.5 GHz等三个典型雷达工作频率点,该结构的反射率分别达到-6.4 dB(对应约77%吸收率)、-10.0 dB(对应约90%吸收率)和-17.6 dB(对应约98%吸收率)。

(3)在5.5~12 GHz的宽频范围内,纤维酚醛热防护吸波结构的反射率稳定低于-10 dB,实现了6.5 GHz的有效吸波带宽,可显著提升飞行器目标在多源雷达探测环境中的低可探测性。

值得注意的是,本节采用的平板样件主要考核材料本征吸波性能,即通过弓形法反射率测试评价材料在平面波垂直入射条件下的吸波性能,是材料研发阶段的标准表征方法。对于实际应用中的异形结构件,其隐身性能需以雷达散射截面(RCS)为评价标准,受构型曲率、边缘绕射等因素影响,需通过设计典型低散射测试载体并在紧缩场暗室中进行RCS测试评估,这将是后续研究的重点。

2.2.3 隔热性能分析

热学性能测试结果表明,该结构在1 000 °C条件下热导率仅为0.045 W/(m·K),与非吸波热防护结构相当,实现热防护与吸波一体化设计。该测试结果表明所制备的纤维酚醛热防护吸波结构在热防护与电磁功能协同设计中的可行性,更凸显了其在多频段雷达探测环境下的吸波效能,为高超声速飞行器在复杂电磁战场中的实际应用提供了关键实验依据。

3 结论

本研究通过将Jaumann吸收体理论深度融入热防护厚度空间,构建了由透波层与吸波层交替堆叠的多层阻抗渐变结构,成功实现了纤维酚醛热防护吸波结构的创新设计与样件制备,可解决高超声速飞行器在极端热环境与复杂电磁场中热防护与电磁功能的协同优化难题。实验结果表明:纤维酚醛热防护吸波结构内部微观均匀致密,吸波层与透波层界面结合紧密无缺陷;热导率在1 000 °C高温下仍保持0.045 W/(m·K),具有优异的隔热性能;电磁测试数据充分证实该结构具有宽频带吸波能力,在5.5~12 GHz频段内反射率稳定低于-10 dB,有效吸

波带宽达6.5 GHz,完整覆盖X波段雷达工作频段。

本研究不仅突破了传统分离式设计的减重与结构复杂度瓶颈,更通过“透-吸-散”协同机制实现了热防护与电磁功能的双重集成,为高超声速飞行器提供了轻量化、高可靠性的综合防护解决方案。

参考文献

- [1] 王俊伟,韩丛英,黄玉薇,等. 2023年国外高超声速技术领域发展综述[J]. 战术导弹技术, 2024(1):7-19.
WANG Junwei, HAN Congying, HUANG Yuwei, et al. Review of hypersonic technology development abroad in 2023[J]. Tactical Missile Technology, 2024(1):7-19.
- [2] 何译宁,王俊伟,黄玉薇. 2024年国外高超声速技术领域发展综述[J]. 战术导弹技术, 2025(2):32-43.
HE Yining, WANG Junwei, HUANG Yuwei. Review of foreign hypersonic technology developments in 2024[J]. Tactical Missile Technology, 2025(2):32-43.
- [3] 王在铎,王惠,丁楠,等. 高超声速飞行器技术研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(11):59-67.
WANG Zaiduo, WANG Hui, DING Nan, et al. Research on the development of hypersonic vehicle technology[J]. Science & Technology Review, 2021, 39(11):59-67.
- [4] 王恩亮,袁成,赵玉杰,等. 国外高超声速防御能力发展及关键技术分析[J]. 航空兵器, 2024, 31(4):14-20.
WANG Enliang, YUAN Cheng, ZHAO Yujie, et al. Analysis of the development and key technologies of hypersonic defense capability in foreign countries[J]. Aero Weaponry, 2024, 31(4):14-20.
- [5] 刘衍旭,陈树生,冯聪,等. 高超声速滑翔飞行器锐边化气动隐身一体化设计[J]. 航空学报, 2023, 44(16):128093-1-128093-19.
LIU Yanxu, CHEN Shusheng, FENG Cong, et al. Integrated sharp edge aerodynamic-stealth design for hypersonic glide vehicle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(16):128093-1-128093-19.
- [6] 刘永胜,曹立阳,张运海,等. 高超声速飞行器热防护用超高温复合材料的研究进展[J]. 复合材料科学与工程, 2022(10):107-118.
LIU Yongsheng, CAO Liyang, ZHANG Yunhai, et al. Research progress on ultra-high temperature composites for thermal protection of hypersonic vehicles[J]. Composites Science and Engineering, 2022(10):107-118.
- [7] MARLEY C D, DRISCOLL J F. Optimization of active and passive thermal protection systems for a hypersonic vehicle[J]. Journal of Aircraft, 2022, 59(1):173-183.
- [8] ZHANG Y, LIU Y D, JIANG D W, et al. A comprehensive review on modified phenolic resin composites for enhanced performance across various applications[J]. Polymer Composites, 2025, 46(10): 8 731-8 769.
- [9] 翟恒艳,金宇凡,黎水涵,等. 轻质碳纤维/酚醛复合材料的制备与改性研究进展[J]. 化工进展, 2025, 44(S1):368-387.
ZHAI Hengyan, JIN Yufan, LI Shuihan, et al. Research progress on preparation and modification of lightweight carbon fiber/phenolic

- composite materials[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025, 44(S1):368–387.
- [10] 宋若康,张梦珊,戴珍,等.烧蚀型防热/吸波多功能一体化复合材料的制备与性能[J].复合材料学报,2024,41(1):271–280.
- SONG Ruokang, ZHANG Mengshan, DAI Zhen, et al. Preparation and properties of multi-functional composite integrated with heat-shielding and radar-absorbing[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(1):271–280.
- [11] 师建军,李弘瑜,张凌东,等.烧蚀型防隔热/隐身多功能复合材料制备与性能[J].宇航材料工艺,2021,51(6):59–64.
- SHI Jianjun, LI Hongyu, ZHANG Lingdong, et al. Preparation and properties of multi-functional composites integrated with heat-shielding, insulating and radar-absorbing[J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(6):59–64.
- [12] WANG W, LIU D Q, CHENG H F, et al. Structural design and broadband radar absorbing performance of multi-layer patch using carbon black[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2022, 5(4):3 137–3 145.
- [13] 李旭光,吴雪猛,石瑞玺,等.蜂窝夹层结构复合材料的吸波隐身技术研究进展[J].复合材料学报,2024,41(6):2 775–2 788.
- LI Xuguang, WU Xueming, SHI Junxi, et al. Research progress on microwave absorption stealth technology of honeycomb sandwich structure composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(6):2 775–2 788.
- [14] JAYALAKSHMI C G, INAMDAR A, ANAND A, et al. Polymer matrix composites as broadband radar absorbing structures for stealth aircrafts[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136 (14). DOI:10.1002/app.47241.
- [15] DING S Z, LI Y P, ZHANG R B. Efficient genetic optimization strategy for high temperature broadband absorption/transmittance rasorber[J]. Composite Structures, 2025, 369. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.119328.
- [16] WANG J S, WANG L Y, LUO R Y, et al. Wave absorption and mechanical properties of $\text{SiC}_f\text{-SiO}_2/\text{SiC}$ based on a Jaumann structure[J]. Ceramics International, 2026, 52(12):18 060–18 072.
- [17] CHAMBERS B, TENNANT A. Optimised design of Jaumann radar absorbing materials using a genetic algorithm[J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 1996, 143(1):23–30.

(上接第98页)

- YANG Fan, LIU Hesheng, KUANG Tangqing, et al. Visualization-based study on the penetration process of liquid carbon dioxide-assisted injection molding process[J]. Materials Reports, 2025, 39 (21):39–45.
- [16] 彭杰,匡唐清,柳和生,等.短玻纤增强聚丙烯的玻纤含量对液态二氧化碳驱动浮芯辅助注塑管件的影响[J].高分子材料科学与工程,2025,41(7):109–116.
- PENG Jie, KUANG Tangqing, LIU Hesheng, et al. Effect of glass fiber content of short glass fiber reinforced polypropylene on liquid carbon dioxide-powered projectile-assisted injection molding pipes[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2025, 41(7):109–116.
- [17] 邹泽莞,匡唐清,杨帆,等.液态二氧化碳辅助注塑相间穿透数值模拟[J/OL].化工进展,2025:1–13[2026-01-21].<https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2025-1278>.
- ZOU Zeyuan, KUANG Tangqing, YANG Fan, et al. Numerical simulation on interphase penetration of liquid carbon dioxide assisted injection molding[J/OL]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025: 1 – 13[2026-01-21]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2025-1278>.
- [18] CZEPIEL M, BAŃKOSZ M, SOBCZAK-KUPIEC A. Advanced injection molding methods: Review[J]. Materials, 2023, 16(17). DOI:10.3390/ma16175802.
- [19] 高明,申楠楠,章立新等.超临界二氧化碳物性参数测量方法综述[J].中国测试,2021,47(2):32–43.
- GAO Ming, SHEN Nannan, ZHANG Lixin, et al. Review of measurement methods for physical parameters of supercritical carbon dioxide[J]. China Measurement & Testing Technology, 2021, 47(2):32–43.
- [20] WANG G, DONG M Y, DENG H Q, et al. Polypropylene foaming using supercritical carbon dioxide: A review on fundamentals, technology, and applications[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2024, 8(1). 10.1007/s42114-024-01117-9.
- [21] MARTIN D, JOFRE L. High-fidelity database of supercritical homogeneous isotropic turbulence in the pseudo-boiling region[J]. Scientific Data, 2025, 12. DOI:10.1038/s41597-025-05693-3.