

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.02.013

共固化电加热膜材料对夹芯结构性能的影响

张雪, 彭坚, 王铁霖, 韩林炫, 陈贵勇, 方雄, 何坚

[成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610073]

摘要: 电热防/除冰是目前防除冰的主流技术,但是电热除冰传统方式采用常规的电热丝、电热片等电阻元件嵌入复材结构后会导致夹芯结构力学性能恶化,同时易结冰部位往往也是电磁波散射的重点部位,而传统电热丝和金属片等电热元件存在会导致其散射特性恶化。通过选用导电织物预浸料作为电阻元件,与复材共固化成型,开展了相关力学性能试验验证,结果表明加入导电织物预浸料的复合材料层压板SK/YJL2[#]的层间剪切强度和弯曲强度分别是85.7 MPa和454.7 MPa,SK/YJL1[#]的层间剪切强度和弯曲强度分别是79.5 MPa和519.2 MPa,加入导电织物的层板力学性能有一定程度下降,但仍满足使用要求。开展了共固化导电织物层对夹芯结构吸波性能影响验证,结果表明导电织物预浸料阻值在2 400~3 600 Ω/sq 范围内,导电织物预浸料与吸波蜂窝制备的共固化夹芯试验件在X波段垂直反射率均小于-10 dB。通过调节导电织物预浸料方阻,开展电加热膜与吸波蜂窝结构的阻抗匹配设计,使得吸波性能满足隐身要求,导电织物预浸料、透波预浸料与吸波蜂窝组成的结构可同时兼顾防除冰和隐身要求。

关键词: 防/除冰; 电热组件; 导电织物; 阻抗匹配; 反射率

中图分类号: V222 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)02-0100-06

Impact of co-curing electric heating membrane materials on performance of sandwich structures

ZHANG Xue, PENG Jian, WANG Tielin, HAN Linxuan, CHEN Guiyong, FANG Xiong, HE Jian

[Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610073, China]

Abstract : Electrical heating anti/de-icing is the mainstream anti-icing and de-icing technology at that time. However, the traditional electrical heating de-icing method use conventional resistance elements such as heating wires and heating sheets. After embedding them into the composite structure, the mechanical properties of the sandwich structure were deteriorated. At the same time, the parts prone to icing are often the key parts of electromagnetic wave scattering. The existence of traditional heating elements such as heating wires and metal sheets lead to the deterioration of their scattering characteristics. By selecting conductive fabric prepreg as the resistance element and co-curing it with the composite, relevant mechanical property tests were carried out for verification. The results show that the interlaminar shear strength and flexural strength of the composite laminate SK/YJL2[#] with conductive fabric prepreg added are 85.7 MPa and 454.7 MPa respectively, and those properties of SK/YJL1[#] are 79.5 MPa and 519.2 MPa respectively. The mechanical properties of the laminate with conductive fabric added decrease to a certain extent, but still meet the usage requirements. The verification of the influence of the co-cured conductive fabric layer on the wave-absorbing performance of the sandwich structure was carried out. The results show that when the resistance value of the conductive prepreg is in the range of 2 400-3 600 Ω/sq , the vertical reflectivity of the co-cured sandwich test piece prepared by the conductive fabric prepreg and the wave-absorbing honeycomb in the X-band is less than -10 dB. By adjusting the sheet resistance of the conductive fabric prepreg, the impedance matching design of the electric heating membrane and the wave-absorbing honeycomb structure was carried out, so that the wave-absorbing performance met the stealth requirements. The structure composed of conductive fabric prepreg, wave-transmitting prepreg and wave-absorbing honeycomb could meet both the anti-icing and stealth requirements.

Keywords : anti-icing/deicing ; electrothermal components ; conductive fabrics ; impedance matching ; reflectivity

通信作者: 张雪, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为复合材料制造技术

收稿日期: 2024-12-10

引用格式: 张雪, 彭坚, 王铁霖, 等. 共固化电加热膜材料对夹芯结构性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(2): 100-105.

ZHANG Xue, PENG Jian, WANG Tielin, et al. Impact of co-curing electric heating membrane materials on performance of sandwich structures[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(2): 100-105.

冰防护系统根据防/除冰采用的能量方式,可分为机械除冰、微波除冰和电热除冰等。其中,电热除冰因其低能耗、易控制,已成为目前最为常用的防/除冰方式,被广泛应用于制造业^[1-3]。

但是电热除冰传统方式采用的电热丝或电热片嵌入式存在金属材料与复合材料蒙皮贴合性差、导致结构力学性能差和电热转化效率低的问题^[4-7]。另一方面,易结冰部位往往也是电磁波散射的重点部位^[8-9],而传统电热丝和金属片等电热元件存在会导致其散射特性恶化。为解决上述问题,除冰系统研究者们通过化学气相沉积等方法在石英纤维织物表面沉积碳纳米管、石墨烯等碳材料,再通过浸润树脂制备出导电织物预浸料,该导电织物预浸料可与复材蒙皮预浸料一同铺叠,然后热压罐共固化一体成型,该方式与蒙皮材料相容性好、制备工艺简单、电加热效率高,具备良好的应用前景^[10-11]。同时,该导电织物预浸料具备电阻灵活可调的优点,根据阻抗匹配原理^[12-14],针对特定的易结冰的功能部件,则可在复合材料蒙皮和蜂窝芯的材料和结构尺寸一定的情况下,通过调控合适电加热材料阻值达到最佳阻抗匹配,使得电磁波最大程度地入射至组件或部件中,从而被蜂窝芯吸收^[15-16]。因此,为验证上述方案可行性,笔者采用导电织物预浸料嵌入式即通过铺叠工艺在蒙皮材料上铺叠导电织物预浸料,再通过热压罐固化工艺,将其与蒙皮材料共固化一体成型,制备具备电加热、吸波和承载的复合材料夹芯结构平板件,并研究了共固化导电织物预浸料对夹芯结构力学、电磁吸波性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

蜂窝芯 1(HC-3):GHL-300,尺寸为 300 mm×300 mm×8 mm,北京高义创合航空科技有限公司;

蜂窝芯 2(HC-5):GHL-500,尺寸为 300 mm×300 mm×8 mm,北京高义创合航空科技有限公司;

蜂窝芯 3(HC-J):JCXBFW,尺寸为 300 mm×300 mm×8 mm,成都佳驰电子科技股份有限公司;

蒙皮:SK 双马树脂体系预浸料,单层厚度为 0.25 mm,北京中航复合材料有限责任公司;

导电织物预浸料 1[#](导电织物/双马树脂体系):YJL-1[#],方阻为 2 400 Ω/sq ,北京石墨烯研究院有限公司;

导电织物预浸料 2[#](YJL-2[#]导电织物预浸料):方阻为 3 600 Ω/sq ,北京高义创合航空科技有限公司。

1.2 仪器及设备

电子万能试验机:MTS Exceed E45, 50 kN,上海美特斯工业系统(中国)有限公司;

矢量网络分析仪:3672B, 10 MHz~26.5 GHz,青岛中电科思仪科技股份有限公司。

1.3 试样制备

吸波蜂窝夹芯结构典型试验件共固化工艺如图 1 所示,主要包括以下几个过程:

(1)蜂窝芯加工:将蜂窝芯通过数控加工为理论尺寸 300 mm×300 mm×8 mm;

(2)承载蒙皮铺叠:将碳纤维/双马体系预浸料逐层铺叠 6 层,并按要求抽真空压实;

(3)透波蒙皮铺叠及导电预浸料铺叠:将石英纤维/双马体系预浸料逐层铺叠,并按要求抽真空压实,在外层铺叠导电织物预浸料;

(4)组装:将承载蒙皮、透波蒙皮和蜂窝芯组合,四周放置挡块,表面放置透气和隔离辅助材料,使用高温胶带固定;

(5)共固化:按预浸料双马树脂体系选择固化参数(①将温度升至 150 $^{\circ}\text{C}$,加压至 0.6 MPa,恒温时间 55 min;②将温度升至 180 $^{\circ}\text{C}$,恒温时间 120 min;③将温度升至 200 $^{\circ}\text{C}$,恒温时间 300 min;④降温 $\leq$ 60 $^{\circ}\text{C}$ 后卸压出罐),进热压罐固化,得到试验件 300 mm×300 mm×12 mm。

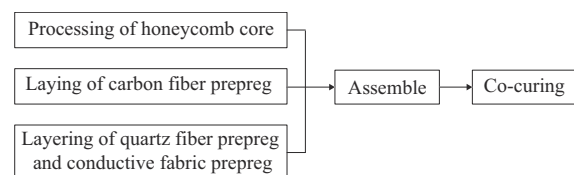


图 1 试验件工艺制备流程图

Fig. 1 Flow chart for process preparation of test pieces

本文涉及的试验件编号及其结构组成如下所示:

SK/YJL1[#]:表层为 0.5 mm YJL-1[#]电加热膜,下层为 2 mm 石英纤维/双马树脂复合材料,制备 2.5 mm 平板试验件(SK/YJL2[#]与 SK/YJL1[#]结构相同,将 YJL1[#]替换为 YJL2[#])。

HC-3/SK:表层为 2 mm 石英纤维/双马树脂复合材料,中间为 8 mm HC-3 蜂窝芯,底层为 1.5 mm 的碳纤维复合材料组合而成蜂窝芯夹层结构(HC-5/SK, HC-J/SK 与 HC-3/SK 结构一致,仅替换蜂窝)。

HC-5/SK/YJL1[#]:表层为 2.5 mm 的 SK/YJL1[#]复合结构,中间层为 8 mm HC-5 蜂窝芯,底层为 1.5 mm 的碳纤维复合材料组合而成蜂窝芯夹层结构(HC-5/SK/YJL2[#]与 HC-5/SK/YJL1[#]结构一致,仅替换电加热膜)。

1.4 性能测试

力学性能测试:采用电子万能试验机,剪切强度依据 ASTM D2344-2016 进行测试,试样尺寸为 15 mm×5 mm×2.5 mm,跨距:12 mm,加载速率 1 mm/min;弯曲强度依据 ASTM D7264-2021 进行测试,试样尺寸为 50 mm×13 mm×2.5 mm,跨距为 80 mm,加载速率 1 mm/min。

垂直反射率(即反射系数 S11)测试:采用矢量网络分析仪,依据 GJB 2038A-2011 进行测试,频率范围 2~18 GHz。

2 结果与讨论

2.1 导电织物预浸料共固化对层板力学性能影响

图 2 为复合材料层压板层间剪切强度和弯曲强度对比。从图 2 可看出,单纯透波蒙皮 SK 具有最高层间剪切强度和弯曲强度,分别为 96.5 MPa 和 731.9 MPa。加入导电织物预浸料复合材料层压板的层间剪切强度和弯曲强度都有所下降,SK/YJL1[#]材料的层间剪切强度和弯曲强度分别是 79.5 MPa 和 519.2 MPa,而 SK/YJL2[#]材料的层间剪切强度和弯曲强度分别是 85.7 MPa 和 454.7 MPa。从而看出,两种含导电织物层压板保持了较好力学性能。

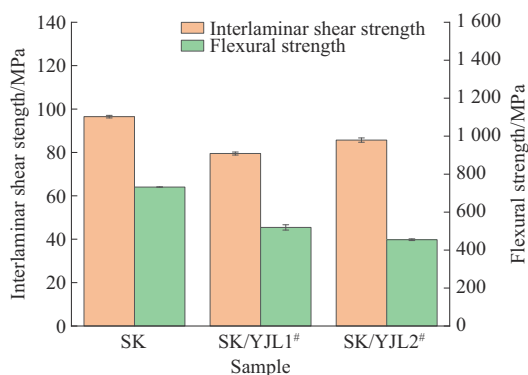


图2 复合材料层压板层间剪切强度和弯曲强度对比

Fig. 2 Comparison between interlaminar shear streng and flexural strength of composite laminates

2.2 导电织物预浸料共固化夹芯结构吸波性能影响分析

2.2.1 不同蜂窝芯体系测试数据

不同蜂窝芯的垂直反射率测试如图 3 所示。不同蜂窝芯在 S-Ku 波段反射率数据见表 1。从图 3a

和表 1 可以看出,在 HH 极化中,HC-3 蜂窝芯的 S11 在 8~18 GHz 范围内均小于 -8 dB,但其值均大于 -10 dB,在 X 波段该蜂窝芯的 S11 均值为 -8.30 dB; HC-5 蜂窝芯的 S11 值在 8~18 GHz 范围内低于 -10 dB,在 X 波段该蜂窝芯的 S11 均值为 -15.93 dB; HC-J 蜂窝芯的 S11 值在 8~18 GHz 范围内小于 -7 dB,在 X 波段的 S11 均值为 -10.06 dB。

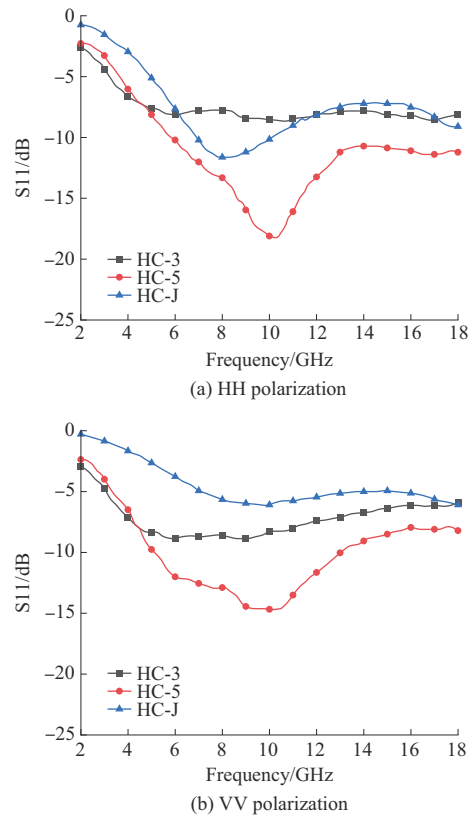


图3 不同蜂窝芯的垂直反射率测试数据

Fig. 3 Test data on vertical reflectivity of different honeycomb cores

表 1 不同蜂窝芯在 S-Ku 波段反射率数据

Tab. 1 Reflectivity data of different honeycomb cores in S-Ku band

Waveband	Frequency/ GHz	Average reflectivity/dB					
		HC-3		HC-5		HC-J	
		HH	VV	HH	VV	HH	VV
S	2~4	-4.43	-4.79	-3.62	-4.03	-1.61	-0.76
C	4~8	-7.70	-8.38	-10.07	-10.98	-7.61	-3.63
X	8~12	-8.30	-8.25	-15.93	-13.71	-10.06	-5.76
Ku	12~18	-8.08	-6.44	-11.19	-8.79	-7.70	-5.17
S-Ku	2~18	-7.38	-6.98	-9.44	-8.88	-6.62	-4.05

从图 3b 和表 1 可以看出,在 VV 极化中,HC-3 蜂窝芯的 S11 在 4~18 GHz 范围内均小于 -5 dB,但其值均大于 -10 dB,在 X 波段该蜂窝芯的 S11 均值为 -8.25 dB; HC-5 蜂窝芯的 S11 值在 6~13 GHz 范围内低于 -10 dB,在 X 波段该蜂窝芯的 S11 均值为 -13.71 dB; HC-J 蜂窝芯的 S11 值在 7~12 GHz 范围

内小于 -5 dB,在X波段的S11均值为 -5.76 dB。

综合上述数据,可以看出,在HH和VV极化中,HC-5蜂窝芯在X波段较HC-3和HC-J具有较高的反射率衰减率。

2.2.2 不同蜂窝芯/SK体系测试数据

不同蜂窝芯/SK体系的垂直反射率测试如图4所示。表2为不同蜂窝芯/SK体系在S-Ku波段反射率数据。从图4a和表2可以看出,在HH极化中,HC-3/SK的S11在2~18 GHz范围内均小于 -4 dB,但其值均大于 -10 dB,在X波段该蜂窝芯的S11均值为 -7.04 dB;HC-5/SK的S11值在5~12 GHz范围内低于 -10 dB,在X波段该蜂窝芯的S11均值为 -11.95 dB;HC-J/SK的S11值在11~13 GHz范围内小于 -10 dB,在X波段的S11均值为 -12.49 dB。

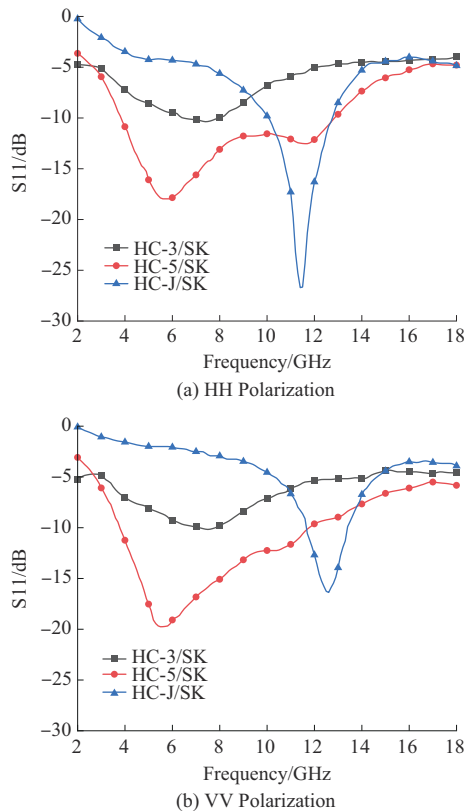


图4 不同蜂窝芯/SK体系的垂直反射率测试曲线
Fig. 4 Test curves of vertical reflectivity for different honeycomb core/SK systems

从图4b和表2可以看出,在VV极化中,HC-3/SK的S11在2~18 GHz范围内均小于 -4.5 dB,但其值均大于 -10 dB,在X波段该蜂窝芯的S11均值为 -7.24 dB;HC-5/SK的S11在5~12 GHz范围内低于 -10 dB,在X波段该蜂窝芯的S11均值为 -12.21 dB;HC-J/SK的S11值在12~13.5 GHz范围内小于 -10 dB。

表2 不同蜂窝芯/SK体系在S-Ku波段反射率数据

Tab. 2 Reflectivity data of different honeycomb cores/SK systems in S-Ku band

Waveband	Frequency/ GHz	Average reflectivity/dB					
		HC-3/SK		HC-5/SK		HC-J/SK	
		HH	VV	HH	VV	HH	VV
S	2~4	-5.54	-5.45	-6.47	-6.60	-2.03	-0.96
C	4~8	-9.29	-9.00	-15.50	-16.88	-4.38	-2.19
X	8~12	-7.04	-7.24	-11.95	-12.21	-12.49	-5.55
Ku	12~18	-4.41	-4.82	-6.77	-7.04	-5.97	-6.82
S-Ku	2~18	-6.03	-6.24	-8.86	-9.15	-5.55	-3.99

dB,在X波段的S11均值为 -5.55 dB。

综合VV极化数据可以看出,HC-5/SK在X波段较HC-3/SK和HC-J/SK具有较高的反射率衰减率,并且在2~18 GHz的范围内,HH和VV极化中HC-5/SK较两者均具有较高的反射率衰减率。

2.2.3 电加热膜方阻值对结构体系反射率的影响仿真

根据2.2.1和2.2.2节的垂直反射率测试结果,选用Ku波段具有较好垂直反射率衰减率的仿真模型进行垂直反射率仿真,该反射率仿真使用的模型如图5所示。

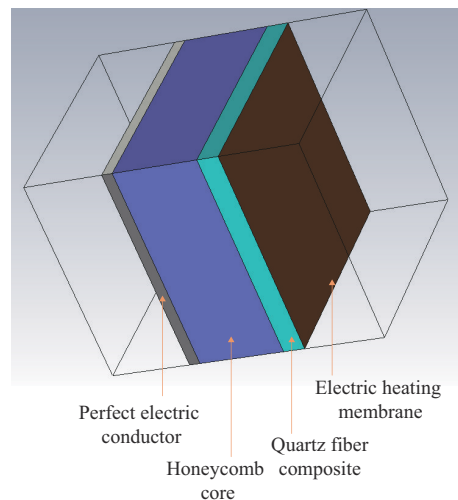


图5 反射率仿真模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of reflectivity simulation model

上述仿真模型中,蜂窝芯部分相对介电常数为3,相对介电损耗 $\tan\delta$ 为0.8,蜂窝厚度8 mm。石英纤维复合材料相对介电常数设置为3.09, $\tan\delta$ 为0.011,石英纤维复合材料厚度为2 mm。在电加热膜上设置具有不同方阻值的材料进行仿真,结果如图6所示。从图6可以看出,电加热膜方阻在一定范围内(依据电加热功能要求),随着电加热膜上方阻值的增加,在入射波垂直照射下等效无限大平板结构中S11值在逐渐减小。该现象说明在基于阻抗

匹配设计的结构体系中,电加热膜的阻值会影响上述体系的阻抗匹配特性。同时,相比于无电加热膜加载的夹芯结构,电加热膜会影响吸波结构的吸波性能,但通过合适的电加热膜阻值及蜂窝芯匹配,可保持良好的吸波性能。

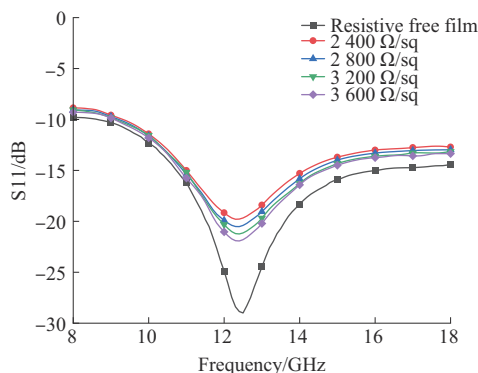


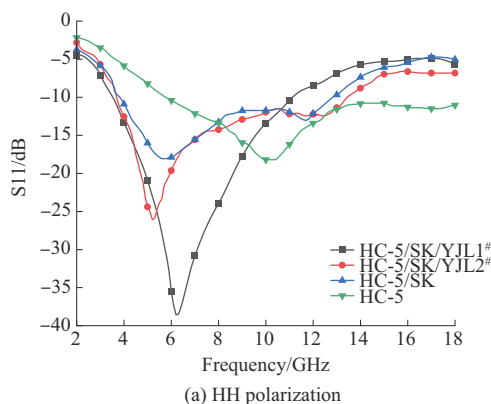
图6 垂直反射率仿真曲线

Fig. 6 Simulation curves of vertical reflectivity

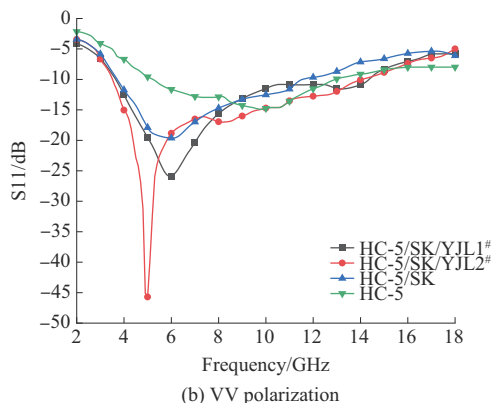
2.2.4 基于HC-5蜂窝芯体系的测试数据

根据2.2.1和2.2.2节的垂直反射率测试结果,选用X波段具有较好垂直反射率衰减率的HC-5蜂窝芯体系进行验证。

HC-5蜂窝芯和基于HC-5蜂窝芯预浸料1[#],2[#]体系的垂直反射率衰减率测试曲线如图7所示。表3为基于HC-5蜂窝芯材料体系在S-Ku波段均值和特定频率数据。从图7a和表3可以看出,在HH极化中,HC-5蜂窝芯在X波段的S11均值为-15.93 dB,覆盖上蒙皮后HC-5/SK材料在X波段的S11均值为-11.95 dB,当加入导电织物预浸料1[#],2[#]体系后分别制备的HC-5/SK/YJL1[#]及HC-5/SK/YJL2[#]材料在X波段的S11均值分别为-14.32 dB,-12.35 dB。以上数据说明,加入导电织物预浸料材料体系的S11值没有上升且均值小于-10 dB,结果表明材料的垂直



(a) HH polarization



(b) VV polarization

图7 HC-5蜂窝芯体系的垂直反射率测试曲线

Fig. 7 Test curves of vertical reflectivity of HC-5 honeycomb core system

反射率效果没有恶化。从图7b和表3可以看出,在VV极化中,HC-5蜂窝芯在X波段的S11均值为-13.71 dB,覆盖上蒙皮后HC-5/SK材料在X波段的S11均值为-12.21 dB,当加入导电织物预浸料1[#],2[#]材料后分别制备的HC-5/SK/YJL1[#],HC-5/SK/YJL2[#]材料在X波段的S11均值分别为-12.08 dB,-14.55 dB。结果表明,加入导电织物预浸料材料体系的S11值没有上升且均值小于-10 dB,即材料的垂直反射率效果没有恶化。

表3 基于HC-5蜂窝芯材料体系在S-Ku波段均值和特定频率数据

Tab. 3 Mean values and specific frequency data of HC-5 honeycomb core material system in S-Ku band

Waveband	Frequency/ GHz	Average reflectivity/dB							
		HC-5/SK/YJL1 [#]		HC-5/SK/YJL2 [#]		HC-5		HC-5/SK	
		HH	VV	HH	VV	HH	VV	HH	VV
S	2~4	-7.63	-6.98	-6.64	-7.37	-3.62	-4.03	-6.47	-6.60
C	4~8	-26.55	-19.82	-18.03	-20.87	-10.07	-10.98	-15.50	-16.88
X	8~12	-14.32	-12.08	-12.35	-14.55	-15.93	-13.71	-11.95	-12.21
Ku	12~18	-5.75	-8.56	-8.25	-8.96	-11.19	-8.79	-6.77	-7.04
S-Ku	2~18	-8.82	-10.20	-9.93	-10.90	-9.44	-8.88	-8.86	-9.15

3 结论

选用导电织物预浸料作为电阻元件,与复材共固化成型,开展了相关力学性能和吸波性能试验

证,得到以下结论。

(1) SK/YJL2[#]样品的层间剪切强度和弯曲强度分别是 79.5 MPa 和 519.2 MPa,SK/YJL1[#]样品的层

间剪切强度和弯曲强度分别是 85.7 MPa 和 454.7 MPa。力学性能测试表明,导电织物预浸料共固化层板具备较好的力学性能,同时具备制造工艺简单、可满足实际工程生产应用需求。

(2)通过导电织物预浸料体系可与夹芯结构实现匹配,制备共固化夹芯试验件在 X 波段的 HH 极化和 VV 极化的垂直反射率均小于 -10 dB,吸波性能满足使用要求。

(3)通过调节导电织物预浸料方阻,开展电加热膜与吸波蜂窝结构的阻抗匹配设计,使得吸波性能满足隐身要求,导电织物预浸料、透波预浸料与吸波蜂窝组成的结构可同时兼顾防除冰和隐身要求。

参考文献

- [1] 周莉,徐浩军,龚胜科,等.飞机结冰特性及防除冰技术研究[J].中国安全科学学报,2010,20(6):105-110.
ZHOU Li, XU Haojun, GONG Shengke, et al. Research of aircraft icing characteristics and anti-icing and de-icing technology[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(6):105-110.
- [2] 魏杰,李昊,张亚男,等.石墨烯复合材料在电热防/除冰领域研究进展[J].中国材料进展,2022,41(6):487-496.
WEI Jie, LI Hao, ZHANG Yanan, et al. Research progress of graphene composites in the field of electrothermal anti-icing/deicing[J]. Materials China, 2022, 41(6):487-496.
- [3] 唐超,谢文俊,袁培毓,等.翼面前缘共形电热除冰功能结构开发与验证[J].航空学报,2023,44(12):326-336.
TANG Chao, XIE Wenjun, YUAN Peiyu, et al. Development and verification of a conformal electrothermal deicing functional structure for leading edge of airfoil[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(12):326-336.
- [4] 田甜,王渊,陶明杰,等.石墨烯复合材料电热除冰实验研究[J].科学技术与工程,2019,19(28):390-395.
TIAN Tian, WANG Yuan, TAO Mingjie, et al. Experimental study on electro-thermal de-icing of graphene composites[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(28):390-395.
- [5] 钱梦霜.石墨烯电加热除冰系统研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.
QIAN Mengshuang. Research on electro-thermal deicing system-based on graphene heating film[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [6] 马莉娅,熊联友,刘立强,等.用于碳纤维复合材料的电热除冰技术实验研究[J].航空学报,2012,33(1):54-61.
MA Liya, XIONG Lianyou, LIU Liqiang, et al. Experimental study on electro-thermal deicing technique for carbon fiber composite[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Si-Nica, 2012, 33(1):54-61.
- [7] 彭兰清,卫建勋,陈诺,等.基于超疏水表层的石墨烯电热除冰实验研究[J].科学技术与工程,2021,21(15):6 513-6 518.
PENG Lanqing, WEI Jianxun, CHEN Nuo, et al. Experimental study on graphene electrothermal deicing based on super-hydrophobic surface[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(15):6 513-6 518.
- [8] 朱华邦,杜娟.雷达反隐身技术的发展与实现[J].飞航导弹,2003(12):42-44.
ZHU Huabang, DU Juan. Development and implementation of radar anti-stealth technology[J]. Aerodynamic Missile, 2003(12):42-44.
- [9] 李莎莎.基于吸波材料的隐身目标散射特性分析[D].西安:西安电子科技大学,2021.
LI Shasha. Study on scattering characteristics of stealth targets based on absorbing materials[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [10] 韩辰橙,吴廷洋,周光明.电热除冰复合材料层合板拉伸性能试验研究[J].江苏航空,2019(4):33-35.
HAN Chencheng, WU Tingyang, ZHOU Guangming. Experimental study on tensile properties of electrothermal de-icing composite laminates[J]. Jiangsu Aviation, 2019(4):33-35.
- [11] AKHTAR N, ANEMONE G, FARIAS D, et al. Fluorinated graphene provides long lasting ice inhibition in high humidity[J]. Carbon, 2019, 141:451-456.
- [12] 何显运,张兴华.乙炔炭黑/铁氧体复合材料的阻抗匹配设计及其吸波性能研究[J].广东化工,2021,48(13):31-32.
HE Xianyun, ZHANG Xinghua. Research on impedance matching design of acetylene carbon black/ferrite composite and its wave absorbing performance[J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(13):31-32.
- [13] 于仕辉,娄文涛,董和磊,等.新式凹槽形缝隙超宽带微带天线的设计[J].电子器件,2021,44(3):596-601.
YU Shihui, LOU Wentao, DONG Helei, et al. Design of new groove-shaped slot ultra-wideband microstrip antenna[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2021, 44(3):596-601.
- [14] 张亚发,刘文言,李云智.新型多层复合结构雷达吸波材料的研制及其性能研究[J].化工新型材料,2024,52(3)231-235.
ZHANG Yafa, LIU Wenyan, LI Yunzhi. Research on the development and properties of a new radar absorbing material with multi-layer composite structure[J]. New Chemical Materials, 2024, 52(3) 231-235.
- [15] 孙鹏程,王良模,王陶,等.双层吸波蜂窝复合材料结构优化设计[J].北京化工大学学报:自然科学版,2019,46(4):58-64.
SUN Pengcheng, WANG Liangmo, WANG Tao, et al. Structural optimization of the design of a double-layer absorbing honeycomb composite[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2019, 46(4):58-64.
- [16] 刘雄飞,王壮,吴尧尧,等.电磁吸波结构研究进展[J].材料导报,2023,37(22):15-22.
LIU Xiongfei, WANG Zhuang, WU Yaoyao, et al. A review of electromagnetic wave absorbing structures[J]. Materials Reports, 2023, 37(22):15-22.