

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.10.012

工艺结构缺陷对蜂窝夹芯复合材料电磁吸波性能影响

彭坚, 刘志杰, 祝君军, 陈贵勇, 邱红芳

[成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092]

摘要: 吸波蜂窝夹芯结构通常由胶粘剂将透波蒙皮、吸波蜂窝芯、反射板粘接构成,除材料本征参数及尺寸因素外,工艺结构缺陷同样会对夹芯结构吸波性能产生重要影响。使用CST软件建模仿真,并制备典型样件进行垂直反射率测试,分别分析了板芯脱粘、蒙皮分层、纤维混杂等工艺结构缺陷对夹芯结构吸波性能的影响。结果表明:板芯脱粘缺陷、蒙皮分层缺陷和背衬纸夹杂缺陷对制件吸波性能影响不大,但是透波蒙皮中碳纤维混杂会显著影响样件电磁特性,随着碳纤维夹杂含量增加,复合材料的吸波性能呈现出先提高后降低的趋势。当单元面内碳纤维体积含量 $<1.6\%$ 时,夹芯结构在2~4 GHz的吸收性能会得到提升,当单元面内碳纤维体积含量 $>10\%$ 时,夹芯结构在2~18 GHz的吸收性能均明显降低。其中,当单元面内碳纤维体积含量为0.67%时,夹芯结构在S波段的平均损耗为-17.06 dB,在C波段的平均损耗为-14.48 dB,在X波段的平均损耗为-12.74 dB,在Ku波段的平均损耗为-12.20 dB,呈现较好的吸波特性。

关键词: 蜂窝夹芯结构;工艺缺陷;吸波性能;电磁仿真;垂直反射率

中图分类号: TQ327.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)10-0066-06

Effect of Structural Defects of Honeycomb Sandwich Composites on Electromagnetic Absorption Properties

Peng Jian, Liu Zhijie, Zhu Junjun, Chen Guiyong, Qiu Hongfang

[Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd, Chengdu 610092, China]

Abstract: Absorbing honeycomb sandwich structure is usually composed of wave-permeable skin, absorbing honeycomb core, reflective plate and adhesive, in addition to material intrinsic parameters and size factors, structural defects also have important effects on the absorbing performance of sandwich structure. CST software was used for modeling and simulation, and typical samples were prepared for vertical reflectance testing, which aimed to study the effect of debonding, skin delamination, skin fiber mixing of honeycomb sandwich on electromagnetic absorption properties. The results indicate that core debonding, skin delamination and paper inclusion have little effect on the absorbing performance. While carbon fiber mixing in wave-permeable skin dramatically affect the electromagnetic properties of parts. With the increase of carbon fiber inclusion content, the absorption performance of composite material show a trend of first improving and then decreasing. When the volume content of carbon fiber is less than 1.6% in unit within surface, the absorption performance of sandwich structure would be improved in 2-4 GHz. When the volume content of carbon fiber is more than 10% in unit within surface, the absorption performance of sandwich structure in 2-18 GHz are significantly reduced. Furthermore, when the volume content of carbon fiber in unit within surface is 0.67%, the average loss of the sandwich structure in S band is -17.06 dB, the average loss in C band is -14.48 dB, the average loss in X band is -12.74 dB, and the average loss in Ku band is -12.20 dB, showing a good wave absorption.

Keywords: honeycomb sandwich structure; structural defects; absorption property; electromagnetic simulation; vertical reflectivity

蜂窝夹芯吸波复合材料由透波性较好的复合材料面板和填充损耗介质的蜂窝芯构成,兼有承载

和隐身的双重功能。在隐身能力成为衡量新一代飞行器的重要指标的大环境下,蜂窝夹芯吸波复合

通信作者: 彭坚, 工程师, 主要研究方向为先进复合材料

收稿日期: 2022-07-25

引用格式: 彭坚, 刘志杰, 祝君军, 等. 工艺结构缺陷对蜂窝夹芯复合材料电磁吸波性能影响[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(10): 66-71.

Peng Jian, Liu Zhijie, Zhu Junjun, et al. Effect of structural defects of honeycomb sandwich composites on electromagnetic absorption properties[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(10): 66-71.

材料以其优越的性能成为航空航天领域不可缺少的结构材料^[1-2]。国内外学者已经针对蜂窝夹芯结构的电磁性能开展了大量理论计算和实验分析研究。礼崇明等^[3]通过建立吸波蜂窝及其夹层结构吸波复合材料电性能计算模型研究了宽频蜂窝夹层结构吸波复合材料的设计方法。影响蜂窝夹芯吸波结构综合电磁性能的因素主要有损耗介质种类、浓度,蜂窝芯高度、芯格尺寸,以及自由空间、透波蒙皮、吸波蜂窝芯之间的电磁匹配关系。其中损耗介质也可称为吸收剂,对吸波性能影响最大。目前应用较多的吸收剂主要有铁磁性吸收剂、炭黑、石墨等^[4-5],还有一些新型的吸收剂,如石墨烯、碳纳米管、导电高聚物、新型等离子体吸收剂等等也逐渐从实验室转入实际工程应用^[6-7]。铁磁性吸收剂的电阻率比较高,兼有介电损耗和磁损耗,可以与树脂混合制成吸波浆液浸渍未完全固化的蜂窝芯,使得吸波介质紧密均布在蜂窝芯壁上,固化后蜂窝芯密度增加,刚性增强,制得结构与电磁性能同时提升的吸波蜂窝芯。孙鹏程等^[8]选用两种不同的铁氧体吸波介质分别浸渍芳纶纸蜂窝芯,探究了不同吸波特性材料之间的组合规律,得到在更宽频段范围内达到最佳雷达波吸收效果的复合材料夹芯结构。蜂窝芯格尺寸和蜂窝芯厚度对夹芯结构的吸波性能也有较大影响,郭雪松等^[9]通过制备不同孔径比的蜂窝,基于等效媒质理论采用WMFS-F频域有限元法分析了蜂窝结构对电磁性能的影响,可为蜂窝材料的设计提供参考。有时为了具有更好的阻抗匹配,可以将吸波蜂窝设计为由外至内的电损耗逐渐增加的梯度结构形式,既增加了透波蒙皮与吸波蜂窝芯之间的匹配性又增强了吸波蜂窝内部的电磁波衰减,可获得更宽的吸波频带和更好的吸波效果^[3]。

以上研究都集中在对吸波材料本身和复合材料结构的优化,然而在复合材料制件实际设计、制造和使用过程中,还需要考虑常见的结构缺陷对性能影响,以制定出科学的验收标准,在保证质量的前提下,最大化降低成本。蜂窝夹芯吸波复合材料由面板与蜂窝芯胶接而成,最容易产生的缺陷为板芯脱粘、面板分层、夹杂等^[9-10],笔者通过建模仿真和人工制造缺陷试样,分析了缺陷对吸波蜂窝夹芯结构吸波性能影响及原因,以期对蜂窝夹芯吸波复合材料制件实际生产及验收过程进行指导。

1 试验部分

1.1 主要原材料

石英纤维/双马树脂织物预浸料:QW280/5429,单层厚度0.25 mm,中航复合材料有限责任公司;

芳纶纸蜂窝:NH-1-2.75-64,厚度15 mm,中航复合材料有限责任公司;

浸渍炭黑:F500B,亿博瑞化工公司;

酚醛树脂:2130,大连亨通化工有限公司;

高温环氧胶膜:J-116,单层厚度0.3mm,黑龙江省科学院石油化学研究院;

四氟布:RF320PM,上海沥高科技科技有限公司;

碳纤维/双马树脂单向带预浸料:ZT7H/5429,单层厚度0.125mm,中航复合材料有限责任公司。

1.2 吸波蜂窝芯及夹层结构试样制备

吸波蜂窝通过芳纶纸蜂窝浸渍炭黑和酚醛树脂配置的浆料制备而成。复合材料面板通过石英纤维/双马树脂织物预浸料先手工铺叠,后热压罐工艺固化制备,铺层角度为(0°/90°),共8层。夹层结构通过将复合材料面板与吸波蜂窝芯使用高温环氧胶膜粘接制备。

1.3 夹层结构缺陷试样制备

背衬夹杂和碳纤维混杂缺陷试样分别在复合材料面板铺叠过程中人工置入预浸料背衬纸和相同树脂的碳纤维预浸料,与复合材料面板材料一同固化成型。分层缺陷试样在复合材料面板铺叠过程中放入四氟布,待固化后再将四氟布取出制造分层缺陷。待上述缺陷试样面板铺叠完成制备后,使用胶膜将蜂窝芯与面板胶接,得到夹层结构缺陷试样。脱粘缺陷试样使用正常无缺陷复合材料面板,仅使用胶带将固化后面板与蜂窝芯固定制备,不通过胶膜固化粘接。

1.4 建模仿真

笔者通过CST电磁仿真软件建立夹芯结构电磁缺陷仿真模型(见图1所示),复合材料蒙皮厚度为1.5 mm,电磁参数: $\epsilon'=4$, $\tan\sigma=0.09$;胶膜厚度为0.4 mm,电磁参数: $\epsilon'=4$, $\tan\sigma=0.09$;蜂窝芯高度为15

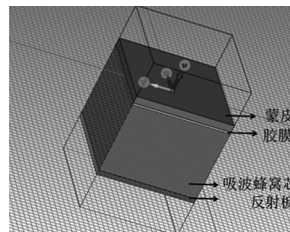


图1 电磁缺陷仿真模型

mm,等效电磁参数: $\epsilon'=1.8$, $\tan\sigma=0.8$ 。反射板使用CST软件材料参数库中的理想导体参数。

1.5 性能测试

利用吸波材料反射率扫频测试系统,按照GJB 2038A-2011对蜂窝夹层结构吸波复合材料进行电磁波垂直反射率测试。

2 结果与讨论

2.1 板芯脱粘对蜂窝夹芯结构吸波性能影响

对于蜂窝夹芯复合材料结构来说,由蒙皮与蜂窝芯成型及加工的精度不同导致蜂窝芯与蒙皮面不匹配问题,和由固化过程蜂窝芯芯格内的空气受热膨胀导致胶膜鼓泡的问题,以及为防止蜂窝芯压缩变形,蜂窝夹芯零件胶接固化需降低真空度及压力的需求,都使夹芯结构容易产生蜂窝与面板的板芯脱粘缺陷^[11]。研究表明,胶接界面属于应力集中界面层,一旦产生脱粘,将对夹层结构力学性能尤其是面内压缩强度造成严重影响^[12]。而对于吸波功能结构件而言,脱粘也意味着电磁边界的增加,因此,在评估缺陷对强度影响之外,还需分析和评估缺陷导致电磁边界增加对吸波性能的影响。

图2a为不同脱粘尺寸的试样的垂直反射率仿真结果,从图2a中可以看出,随着脱粘面积的增加,夹芯结构试样的垂直反射率随频率变化趋势基本保持不变,吸收峰的位置有向高频移动趋势,且吸

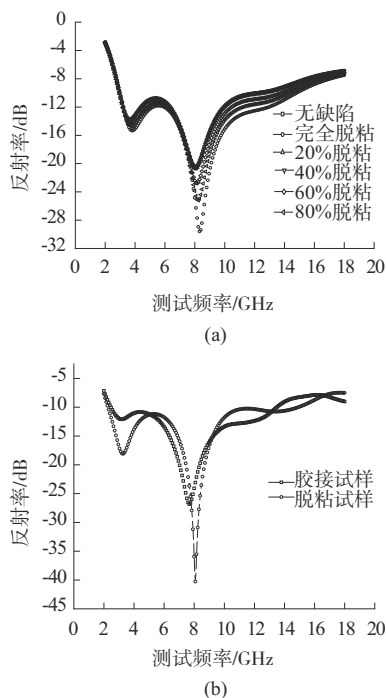
收强度有所增强。图2b对比了胶接合格的试样和通过胶带固定而未进行胶接的完全脱粘试样的垂直反射率实测结果,与仿真结果类似,可以看出完全脱粘试样与正常粘接试样的反射率随频率变化趋势相近,在2~18 GHz均出现两个吸收峰,但是完全脱粘试样的吸收峰更强,且吸收峰稍向高频偏移。

对于夹芯结构复合材料而言,结构对脱粘缺陷提出的指标为 $L \leq 20$ mm($L=a+b$, a 和 b 为脱粘区域的最大长和宽尺寸),结合仿真和实测的垂直反射率结果,在结构允许的范围内的脱粘尺寸将远小于零件尺寸,此时蜂窝芯与面板脱粘对夹芯结构的垂直反射率结果影响不大。为尽量节省试样制造时间及成本,后续实验设计均不进行胶接,仅使用胶带将面板与蜂窝芯固定后进行测试。

2.2 面板分层和夹杂对蜂窝夹芯结构吸波性能影响

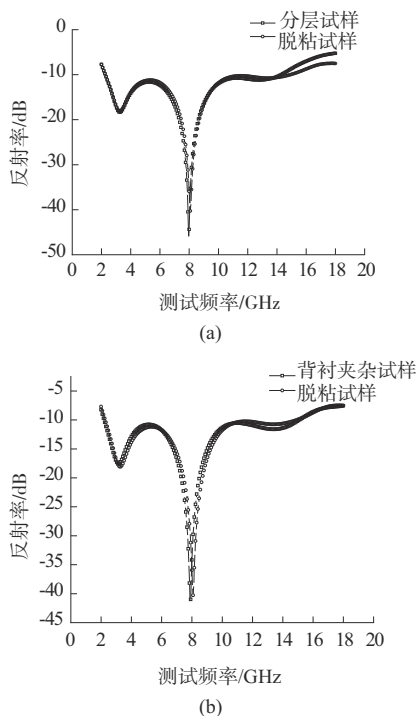
层压板类零件制备过程受压不充分或者纤维架桥都会导致分层,一旦缺陷产生,该位置就成为裂纹萌生的起始点,与脱粘类似,都是严重影响树脂基复合材料性能的重大缺陷。研究表明分层缺陷尺寸直径大于9 mm对层合板的压缩强度影响较明显,而缺陷尺寸直径小于3 mm对层合板的压缩强度影响不是很明显^[12]。另外,目前复合材料零件大多采用手工铺叠方式制备,预浸料的铺层、角度、零件图号信息需标记在背衬纸上,且背衬纸一般要求在铺叠至该层时才可去除,对于双面背衬预浸料,且是在大面积零件铺叠过程,很容易因操作疏忽导致背衬残留产生夹杂。

为验证分层和背衬夹杂缺陷对吸波性能的影响,在300 mm×300 mm的面板中间铺层位置分别人工制造300 mm×100 mm分层和背衬夹杂缺陷,面板与蜂窝芯之间不胶接,仅使用胶带与蜂窝芯固定后进行测试,图3a显示有分层缺陷试样的反射率曲线与无分层缺陷试样的基本一致,吸收峰强度略有增加说明分层缺陷对夹芯结构的电磁性能及垂直反射率结果的影响及作用机制与脱粘缺陷基本类似。图3b是背衬纸夹杂试样与无夹杂试样的反射率曲线对比图,可以看出背衬夹杂未造成试样反射率曲线的变化,说明预浸料背衬纸夹杂缺陷对夹芯结构整体电磁性能几乎无影响。总体而言,在直径3 mm缺陷可接收范围内,分层和背衬夹杂不会对功能性



a—仿真结果;b—实测结果

图2 脱粘对吸波性能影响



a—分层缺陷试样实测结果;b—背衬夹杂缺陷试样实测结果

图3 分层缺陷试样及背衬夹杂缺陷试样实测结果

指标有明显影响。

2.3 纤维混杂对蜂窝夹芯结构吸波性能影响

对于一些混杂蒙皮类零件,铺叠过程中需要同时使用玻璃纤维和碳纤维预浸料,而碳纤维单向带预浸料在铺叠过程很容易因纤维束分丝而进入玻璃纤维预浸料铺层中造成缺陷。通过CST建立碳纤维混杂缺陷模型,单层碳纤维混杂进玻璃纤维铺层面积比按照0%,0.6%,1.6%,3.3%,10%,16.7%,33.3%变化,仿真计算夹芯结构的垂直反射率变化趋势见图4,数据统计见表1。

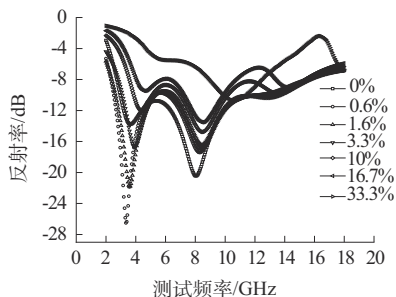


图4 碳纤维混杂对吸波性能影响仿真结果

图4仿真结果表明,随着碳纤维混杂含量的增加,夹芯结构吸波性能呈现先提升后降低的趋势,具体在2~4 GHz频段,当碳纤维混杂含量为0.6%时,垂直反射率平均值从-9.6 dB提升至-15.7 dB,4

表1 碳纤维混杂对吸波性能影响仿真数据统计

碳纤维面积占比/%	电磁波频率/GHz			
	2~4	4~8	8~12	12~18
0	-9.6	-13.3	-13.3	-8.4
0.6	-15.7	-11.9	-12.9	-8.5
1.6	-14.0	-11.8	-12.8	-8.6
3.3	-10.0	-11.7	-12.5	-8.7
10	-5.5	-10.4	-11.1	-8.2
16.7	-3.8	-9.1	-10.0	-7.4
33.3	-1.7	-5.1	-9.2	-5.2

~8 GHz频段,垂直反射率平均值从-13.3 dB下降至-11.9 dB,8~12 GHz频段,垂直反射率平均值从-13.3 dB下降至-12.9 dB,12~18 GHz频段,垂直反射率平均值从-8.4 dB提升至-8.5 dB,整体来讲,高频吸波性能保持相当,低频吸波性能得到明显提升。随着碳纤维混杂含量继续提高,夹芯结构吸波性能快速下降,当碳纤维混杂含量为33.3%时,2~4 GHz频段垂直反射率平均值为-1.7 dB,4~8 GHz频段垂直反射率平均值为-5.1 dB,8~12 GHz频段垂直反射率平均值为-9.2 dB,12~18 GHz频段垂直反射率平均值为-5.2 dB,吸波性能全频段恶化。

根据传输线理论,电磁波垂直入射时其反射系数 R_L 为^[13-16]:

$$R_L = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right|$$

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[j(2\pi f d / c) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right]$$

式中: Z_{in} 为吸波材料表面处的输入阻抗, μ_r 和 ϵ_r 分别为相对磁导率和介电常数, f 为电磁波的频率, d 为材料厚度, c 为光在真空中的速度。碳纤维的电阻率约为 $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$,对电磁波具有强反射作用,不能直接用于吸波材料,但是少量碳纤维夹杂进入透波面板后,在电磁波作用下会产生极化耗散电流,在基体中被转化成其它形式的能量衰减耗散,从而实现电磁波的损耗吸收^[12]。

另外,根据共振频率的计算公式^[17-18]:

$$f_{\text{mnl}} = \frac{c}{2\pi \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d} \right)^2}$$

其中: f_{mnl} 为共振频率; c 为光速; a, b, d 分别为试样的长、宽、厚; m, n, l 分别为 x, y, z 三个方向上驻波振动模式的变化数目; μ_r 和 ϵ_r 分别为相对磁导率和介电常数。碳纤维夹杂后试样的等效介电常数增加,共振频率均会向低频移动。

进一步,在300 mm×300 mm透波面板的中间铺层增加尺寸分别为(0,2,5,10,30,50,100 mm)×300 mm的碳纤维预浸料层,一同固化制备不同碳纤维混杂缺陷试样。垂直反射率测试结果如图5所示,可以看出与仿真结果类似,随着碳纤维夹杂尺寸的增加,试样的吸波性能呈现先提高后降低的趋势,具体低频吸收峰强度先增加后减弱在夹杂尺寸为300 mm×5 mm时(面积占比1.6%)达到最高,中频的吸收峰强度先减弱后增强最后减弱,在夹杂尺寸为300 mm×10 mm时(面积占比3.3%)达到与无夹杂同等值,碳纤维夹杂后在高频波段出现新吸收峰,吸收峰强度在夹杂尺寸为300 mm×2 mm时(面积占比0.67%)达到最大,随后逐渐减小消失。表2为碳纤维混杂时夹芯板吸波性能实测数据。

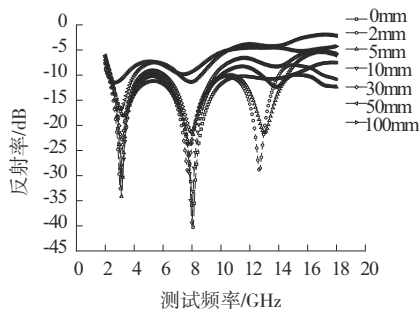


图5 碳纤维夹杂尺寸对吸波性能影响

表2 碳纤维混杂时夹芯板吸波性能实测数据 dB

碳纤维面积占比/%	电磁波频率/GHz			
	2~4	4~8	8~12	12~18
0	-14.28	-14.83	-14.98	-9.43
0.67	-17.06	-14.48	-12.74	-12.20
1.6	-17.14	-13.81	-12.59	-13.22
3.3	-16.4	-13.73	-12.15	-8.88
10	-14.8	-12.15	-10.36	-6.59
16.7	-12.43	-8.88	-6.6	-3.12
33.3	-10.24	-8.41	-6.08	-4.74

因此,结合仿真和实验结果,一定量的碳纤维夹杂并未降低夹芯结构吸波性能,反而会在一定频段得到的提高。例如,在300 mm×300 mm透波面板中混杂300 mm×2 mm尺寸的碳纤维时,面内碳纤维含量(面积占比)为0.67%,在S波段的平均损耗为-17.06 dB,在C波段的平均损耗为-14.48 dB,在X波段的平均损耗为-12.74 dB,在Ku波段的平均损耗为-12.20 dB,呈现较好的吸波特性。

3 结论

除材料本征参数及尺寸因素外,工艺结构缺陷同样会对夹芯结构吸波性能产生重要影响。通过

仿真和垂直反射率测试分别分析了板芯脱粘、蒙皮分层、纤维混杂等工艺结构缺陷对夹芯结构吸波性能的影响。结果表明:(1)蜂窝夹芯吸波结构的板芯脱粘缺陷、面板分层缺陷和背衬纸夹杂缺陷对夹芯结构整体垂直反射率影响不大。(2)碳纤维混杂会显著改变制件的电磁特性,随着碳纤维夹杂尺寸增加,复合材料的吸波性能呈现出先提高后降低的趋势。当单元面内碳纤维含量<1.6%时,夹芯结构在2~4 GHz的吸收性能会得到提升,当单元面内碳纤维含量>10%时,夹芯结构在2~18 GHz的吸收性能均明显降低。当单元面内碳纤维含量为0.67%时,夹芯结构在S波段的平均损耗为-17.06 dB,在C波段的平均损耗为-14.48 dB,在X波段的平均损耗为-12.74 dB,在Ku波段的平均损耗为-12.20 dB,呈现较好的吸波特性。

参考文献

- [1] Feng J, Zhang Y, Wang P, et al. Oblique incidence performance of radar absorbing honeycombs[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 99:465-471.
- [2] 常霞,袁昊,高正平.蜂窝夹芯吸波材料电磁特性研究进展[J].磁性材料及器件,2013,44(5):73-76.
Chang Xia, Yuan Hao, Gao Zhengping. Research progress on electromagnetic characteristics of honeycomb sandwich absorbing materials[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2013, 44(5): 73-76.
- [3] 礼嵩明,吴思保,阮伟,等.宽频蜂窝夹层结构吸波复合材料设计方法研究[J].玻璃钢/复合材料,2019(7):92-97.
Li Songming, Wu Sibao, Yuan Wei, et al. Research on design method of absorbing composite material for broadband honeycomb sandwich structure[J]. Fiber reinforced plastic/Composites, 2019 (7):92-97.
- [4] 祁亚利,殷鹏飞,张利民,等.铁氧体吸波复合材料研究进展[J].宇航材料工艺,2019,49(3):9-14.
Qi Yali, Yin Pengfei, Zhang Limin, et al. Research progress of ferrite wave absorbing composite[J]. Aerospace Materials & Technology, 2019, 49(3):9-14.
- [5] 王睿,任鑫,张国瑞,等.不同形状特征的碳基复合材料吸波性能分析[J].电子元件与材料,2020,39(1):14-19.
Wang Rui, Ren Xin, Zhang Guorui, et al. Analysis of absorbing properties of carbon matrix composites with different shape characteristics[J]. Electronic Components and Materials, 2020, 39(1): 14-19.
- [6] Meng F, Wang H, Huang F, et al. Graphene-based microwave absorbing composites: A review and prospective[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 137:260-277.
- [7] 闫智然,艾铁博,王祎旋,等. FeCo/PPy 纳米复合材料的合成及其电磁性能调控[J].材料工程,2019,47(3):63-70.

- Yan Zhiran, Ai Yibo, Wang Yixuan, et al. Synthesis and control of electromagnetic properties of FeCo/PPy nanocomposites[J]. Journal of materials engineering, 2019, 47(3):63–70.
- [8] 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 double-layer wave-absorbing honeycomb composite [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science Edition, 2019, 46(4):58–64.
- [9] 万蕾,孙璐,李晶,等. 蜂窝夹层结构基板脱粘问题分析[J]. 失效分析与预防, 2015, 10(1):36–40.
- Wan Lei, Sun Lu, Li Jing, et al. Analysis on debonding problem of honeycomb sandwich structure[J]. Failure Analysis and Prevention, 2015, 10(1):36–40.
- [10] Li H, Zhou Z. Detection and characterization of debonding defects in aeronautical honeycomb sandwich composites using non-contact air-coupled ultrasonic testing technique[J]. Applied Sciences, 2019, 9(2). DOI: 10.3390/app9020283.
- [11] 张维,罗利龙,张国凡,等. 含圆形脱粘缺陷复合材料夹层结构侧向压缩破坏载荷与破坏模式分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018 (9):46–51.
- Zhang Wei, Luo Lilong, Zhang Guofan, et al. Analysis of lateral compressive failure load and failure mode of composite sandwich structure with circular debonding defect[J]. Fiber Reinforced Plastic/Composites, 2018(9):46–51.
- [12] 叶金蕊,李嘉,刘卫平,等. 分层缺陷对复合材料结构压缩强度的影响[J]. 科技导报, 2013, 31(7):23–27.
- Ye Jinrui, Li Jia, Liu Weiping, et al. Effect of layered defects on compressive strength of composite structures [J]. Science & Technology Review, 2013, 31(7):23–27.
- [13] 何山,李业华,周淳. 一种多层胶板雷达吸波材料[J]. 航空材料学报, 2016, 36(4):41–46.
- He Shan, Li Yehua, Zhou Chun. A multilayer adhesive plate radar absorbing material[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36 (4):41–46.
- [14] 周亮,姚玲玲,贺君,等. 抗电磁辐射碳纤维复合吸波材料优化设计与制备[J]. 矿冶工程, 2017, 37(2):136–139.
- Zhou Liang, Yao Lingling, He Jun, et al. Optimization design and preparation of electromagnetic radiation resistant carbon fiber composite absorbing materials[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(2):136–139.
- [15] 郭雪松,陈乐,孙惠敏,等. 异形蜂窝吸波材料的设计与研制[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(12):67–71.
- Guo Xuesong, Chen Le, Sun Huimin, et al. Design and development of special-shaped honeycomb absorbing material[J]. Fiber Reinforced Plastic/Composites, 2018(12):67–71.
- [16] 李琳,姚正军,周金堂. 聚苯胺纳米纤维/锂锌铁氧体复合吸波材料的制备与性能[J]. 复合材料学报, 2016, 33(4):814–820.
- Li Lin, Yao Zhengjun, Zhou Jintang. Preparation and properties of polyaniline nanofiber/lithium zinc ferrite composite absorbing materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(4):814–820.
- [17] 庞超,梁迪飞,陈慧,等. P波段镍锌铁氧体复合材料电磁吸收性能研究[J]. 电子元件与材料, 2018, 37(7):75–78.
- Pang Chao, Liang Difei, Chen Hui, et al. Study on electromagnetic absorption properties of p-band nickel-zinc ferrite composite [J]. Electronic Components and Materials, 2018, 37(7):75–78.
- [18] 周远良,赛义德,张黎,等. 树脂基Fe纳米粒子及碳纤维复合吸波平板的制备与性能[J]. 材料工程, 2018, 46(3):41–47.
- Zhou Yuanliang, Sai Yide, Zhang Li, et al. Preparation and properties of resin based Fe Nanoparticles and carbon fiber composite absorbing plate[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(3): 41–47.