

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.09.023

高温高湿环境下吸水量对芳纶纸蜂窝性能的影响

潘爱江, 刘晓菲, 周翔, 岳守晶

(航空工业济南特种结构研究所, 高性能电磁窗航空科技重点实验室, 济南 250023)

摘要:以牌号 XBFW-2.7-80 的某型芳纶纸蜂窝为研究对象, 在温度 70℃ 和湿度 85% 环境条件下, 开展高温高湿环境条件下吸水量对蜂窝性能影响的试验研究。周期性地检测蜂窝吸水量和平压强度及模量的变化, 建立吸水量与平压性能的对对应关系。采用数据归一化处理, 确定蜂窝吸水量对其平压性能的影响规律, 最终实现通过检测蜂窝吸水量预测其力学性能变化的目的。试验结果表明, 蜂窝平压强度及模量的变化趋势与吸水量的变化趋势大体一致, 分为四个阶段: 快速变化的初期阶段、缓慢变化的中期阶段、更缓慢变化的后期阶段和稳定趋于饱和的终期阶段。

关键词: 芳纶纸蜂窝; 吸水量; 平压强度; 平压模量; 归一化

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)09-0120-06

Effect of Water Absorption on the Performance of Aramid Paper Honeycomb under High Temperature and Humidity

Pan Aijiang, Liu Xiaofei, Zhou Xiang, Yue Shoujing

(AVIC Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composite, Aviation Key Lab of Science and Technology on High Performance Electromagnetic Windows, Jinan 250023, China)

Abstract : Taking a certain type of aramid paper honeycomb of the brand XBFW-2.7-80 as the research object, under the environmental conditions of temperature 70℃ and humidity 85%, the experimental research on the influence of water absorption on the performance of honeycomb under high temperature and high humidity environment was carried out. Changes in honeycomb water absorption and flat compression strength and modulus were periodically detected, and the corresponding relationship between water absorption and flat compression performance was established. The data normalization processing method was used to determine the influence law of honeycomb water absorption on its flat pressure performance, and the purpose of predicting the change of its mechanical properties by detecting honeycomb water absorption was finally realized. The test results show that the change trend of honeycomb flat compressive strength and modulus is roughly the same as the change trend of water absorption, which is divided into four stages : the initial stage of rapid change, the middle stage of slow change, the later stage of slower change, and the stable trend in the final stage of saturation.

Keywords : aramid paper honeycomb ; water regain ; flat crush strength ; flat crush modulus ; normalization

电磁功能结构复合材料实质上指的是能够透过一定频率电磁波的功能性复合材料, 有透波、承载、耐环境老化、防雷击等作用。雷达罩作为应用最广泛的电磁功能结构, 具有保护机载雷达天线免受自然环境影响的作用^[1]。雷达罩是飞机结构的一部分, 更是火控系统的一部分, 是雷达的电磁窗口, 是功能件^[2-3]。拥有先进的机载雷达系统 (包括先进雷达和雷达罩), 才能先敌发现, 先敌攻击, 取得空

战优势和胜利。目前雷达罩多采用 A 夹层结构、变厚度 A 夹层结构、C 夹层结构、变厚度 C 夹层结构等结构形式。除了外层涂层外, 为了得到良好的电性能和力学性能, 雷达罩壁一般采用奇数层^[4-6]。

某型号飞机电磁功能结构件采用渐变吸波蜂窝、均质吸波蜂窝、内置天线融合一体的夹层结构形式, 具有隐身 / 天线 / 承载多功能综合特征, 兼具传统天线成品和结构主承力部件的特点。透波蜂窝和

通信作者: 刘晓菲, 工程师, 主要从事材料加工与检测技术研究

收稿日期: 2021-07-05

引用格式: 潘爱江, 刘晓菲, 周翔, 等. 高温高湿环境下吸水量对芳纶纸蜂窝性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(9):120-125.

Pan Aijiang, Liu Xiaofei, Zhou Xiang, et al. Effect of water absorption on the performance of aramid paper honeycomb under high temperature and humidity[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(9):120-125.

吸波蜂窝是电磁功能结构件关键夹芯材料。蜂窝吸水性必定影响蜂窝及电磁功能结构力学性能、使用寿命、透波和隐身性能,因此,研究蜂窝吸水性有一定意义。

(1) 吸水量的理论分析。

不论是聚合物基复合材料还是蜂窝材料,都能从环境中吸收水分。吸水质量变化遵循 Fick 定律的质量扩散。进入或从材料内部析出水分的扩散发生的比较缓慢。在足够的潮湿环境下,暴露足够的时间,大量的水分仍可能被吸入材料内部,特别在较高温度情况下,可能弱化基体和基体/纤维界面,对材料的性能产生不良影响。

材料吸水量的快慢和达到均衡的时间,取决于暴露的温度和湿度,强烈依赖于相对湿度。这就是说在湿度一定时,温度只是决定达到饱和程度的时间长短。因此,为提高试验效率,参考《聚合物基体复合材料吸水性和均衡调节标准试验方法》(ASTM D 5229M-2014) 和《美国军用标准》(MIL-HDBK-17) 的相关要求,按照 70℃ 温度和 85% 湿度的试验条件,进行吸波蜂窝吸水量试验研究。下面是试验中的几种典型物理现象。

① 扩散作用。

扩散是分子运动的一种物理现象。在扩散过程中,分子总是从浓度大的地方向浓度小的地方迁移。试验中水蒸气向浓度较小的材料内部扩散。扩散与绝对湿度、温度和材料相关。

② 吸收作用。

吸收是指水蒸气与空气会合后通过材料的间隙进入材料内部,它可以由扩散和渗透两种物理过程综合形成。扩散和渗透的效果,除了与试验条件的湿度和温度有关外,还与材料的扩散和渗透系数有关。

③ 呼吸作用。

虽然蜂窝具有封闭外表面,但是内部不可避免存在着细小空隙、缺陷等。温度变化时会引起空气压力随着变化,由这种压力变化引起空隙等缺陷内外空气的交流称之为呼吸作用。这种呼吸作用是向空腔等缺陷内部流动,由这种呼吸作用进入空腔内的潮气量除与空气中的湿度有关,还与试验箱的温度变化范围有关。

总之,对表面裸露的试件来说,在一定的温度和湿度条件下,质量增加主要是由水蒸气扩散和吸收形成的。蜂窝具有封闭外壳或具有空腔的封闭试

件,虽然并不直接接触高湿条件,但水蒸气会通过间隙进入空腔或者由于试验温度的变化形成空腔内气体的呼吸效应增强,外部的潮气通过间隙进入内部而造成内部受潮,从而产生由于吸水而导致的质量增加。

(2) 吸水量对平压性能影响分析。

在高温高湿环境下,由扩散、吸收和呼吸三种物理过程共同作用下,任何材料吸水后,必然对材料或制品发生外观变化或物理、化学和性能方面的劣化,即导致产品功能失效。

有机材料的外观劣化包含表面膨胀、变形、起泡、脱落,还有活动处摩擦增加,机械卡死等。材料的强度、硬度、弹性等物理性能的变化,使其力学强度或性能变坏,有机材料的电性能的下降。水分子具有强极性、分子量小、易渗透、易与极性基团结合等特点,同时其介电常数和损耗角正切 ($\tan\delta$) 都非常大,陈东等^[7] 研究发现材料的吸水对材料的介电性能产生的影响很大,使介电常数 ϵ 、 $\tan\delta$ 增加,尤其 $\tan\delta$ 对含水量特别敏感,不到 1% 的含水率,将使 $\tan\delta$ 增加近六倍。笔者对电性能的影响不做研究,仅对蜂窝的力学性能进行研究。抗压性能是蜂窝芯材代表性指标,而且其性能分散性较小,所以选择了蜂窝的力学性能中的平压性能作为研究对象。

以吸波蜂窝等为代表的芯材,在制造过程中会产生宏观裂纹、空隙,聚合物分子链间的微孔、体系浸渍不良或浸润不完全等现象。在吸波涂料与纸蜂窝界面处也会存在缺陷、孔隙等缺陷。蒸气水分子沿界面和缺陷处,向蜂窝材料内部、界面等处渗透和扩散,使得材料的自由离子数量增加,增强了分子链段和分子链的运动能力,偶极子极化增强;对吸波剂产生溶胀、增塑和自由体积收缩等物理变化;可能发生固化交联、破坏分子链等化学反应,造成吸波剂的分子链段断裂、分解或水解等化学变化。根据材料研究显示^[8-9],水分子沿着涂层与基体间界面进行扩散,从而形成一个极性界面层,降低界面结合力,从而造成吸波蜂窝性能的改变。

吸波蜂窝中应用的吸波剂主要是铁基磁性金属微粉^[10],金属铁的含量大于 97%,主要是片状化和纳米晶化形状。片状化的材料的粒径在 20 ~ 40 μm 之间,纳米晶化尺寸在 10 μm 以下^[11]。将纸蜂窝浸入带有吸波剂的吸波涂料中后固化,制成吸波蜂窝。水分子会渗入吸波涂料中的基体树脂、铁粉与树脂界面、吸波涂料与纸基体界面,造成界面

结合力下降的内在反应,产生溶胀、增塑等物理劣化效应,从而造成吸波蜂窝性能的改变。因此笔者对芳纶纸蜂窝的吸水率及平压性能进行测试,总结规律并分析两者之间的关系,以此达到通过吸水率预测蜂窝平压性能的目的。

1 实验部分

1.1 主要原材料

某型芳纶纸蜂窝:XBFW-2.7-80,航空工业济南特种结构研究所。

1.2 主要设备及仪器

材料性能试验机:Instron5882型,100 kN,精度0.05%,美国英斯特朗公司;

恒温恒湿试验箱:EEXTH-1000R型,温度范围10~150℃,湿度范围10%~98%,上海增达科技股份有限公司;

电子天平:MAX-A3003型,测量范围0.01~300 g,精确到0.01 g,深圳市无限量衡器有限公司;

数显游标卡尺:测量范围0~150 mm,读数精确到0.01 mm,哈尔滨量具刃具集团有限责任公司。

1.3 试验方案

为确定某型蜂窝(XBEW-2.7-80)吸水量随储存时间的变化,同时测试某型蜂窝的平压性能(平压强度和平压模量)随时间的变化趋势。确定蜂窝因为吸水量与其平压性能的关系,以及预测对其长期使用性的影响,设计了试验方案。

(1) 密度均匀性测试方案。

在一块450 mm×450 mm蜂窝上,按照GB/T 1464-2005要求,均匀裁取15件60 mm×60 mm试样,对试样进行编号,在室温环境下放置24 h后,对每件试样,用游标卡尺分别测量三点的两个边长和厚度尺寸,读数至0.01 mm,用电子天平称取其质量,并计算其密度和分散性。

(2) 吸水量测试方案。

按照GB/T 14207-1993要求,裁取一块200 mm×200 mm×30 mm蜂窝试样,将试样放入恒温恒湿试验箱中(设定温度70℃,相对湿度85%),以一定时间间隔取出后称质量,记录试验时间和质量。

(3) 平压性能测试方案。

按照GB/T 1453-2005要求,均匀裁取60 mm×60 mm×12.5 mm的蜂窝试样,共14组,每组6件;将试样放入恒温恒湿试验箱中(设定温

度70℃,相对湿度85%),以一定时间间隔取出一组进行平压性能测试,记录试验时间和平压强度及模量,并计算平均值等数据。

2 结果与讨论

由于蜂窝产品本身存在不均匀性,不同位置的蜂窝密度不完全一致,存在较大的分散性,会对试验结果有所影响。为了更有利于对蜂窝芯材进行分析,更好预测吸水量的影响,按照美国军用标准MIL-HDBK-17数据归一化处理,对数据进行归一化处理,以名义密度为基础,对实际密度和平压性能进行正则化处理。吸水量采用质量百分率为基础进行对比分析。

2.1 密度均匀性测试试验结果与分析

密度均匀性测试试验结果见表1。由试验结果绘制密度分布曲线,见图1。

表1 密度试验结果表

序号	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	序号	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	序号	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	86.2	6	84.8	11	81.6
2	86.8	7	84.2	12	87.7
3	87.4	8	86.3	13	90.8
4	85.2	9	88.5	14	88.0
5	84.3	10	85.9	15	83.9

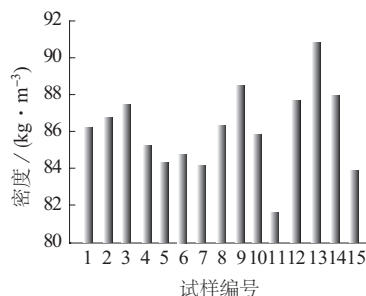


图1 密度分布曲线

由试验结果及密度分布曲线分析,本次试验所用批次的蜂窝的密度范围为81.6~90.8 kg/m^3 ,其平均值是86.1 kg/m^3 ,分散系数是2.6%。查阅材料规范,蜂窝的密度指标是 $(80 \pm 8) \text{kg}/\text{m}^3$,说明吸波蜂窝允许变动范围是 $\pm 10\%$ 。总之,蜂窝必然存在密度不均匀的现象,但波动性不大。

2.2 吸水量测试试验结果与分析

吸水量试样的原始质量为104.688 g。将试样放入恒温恒湿试验箱中,以一定时间间隔取出后称质量,并计算吸水量,试验数据见表2。根据蜂窝吸水测试,绘制了蜂窝的质量和吸水量与储存时间变化曲线,见图2、图3。

表 2 吸水量试验数据表

序号	储存时间/d	质量/g	吸水量/%	序号	储存时间/d	质量/g	吸水量/%
1	0	104.688	0	11	60	107.190	2.39
2	5	105.787	1.05	12	70	107.253	2.45
3	10	106.122	1.37	13	80	107.358	2.55
4	15	106.332	1.57	14	90	107.441	2.63
5	20	106.551	1.78	15	100	107.546	2.73
6	25	106.708	1.93	16	110	107.619	2.80
7	30	106.834	2.05	17	120	107.651	2.83
8	35	106.939	2.15	18	130	107.661	2.84
9	40	107.096	2.30	19	140	107.671	2.85
10	50	107.148	2.35	20	150	107.672	2.85

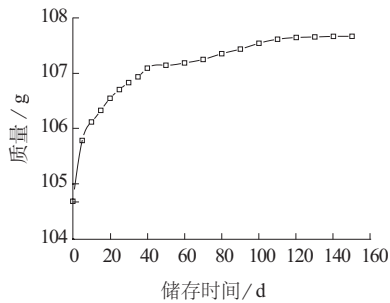


图 2 蜂窝质量与储存时间变化曲线

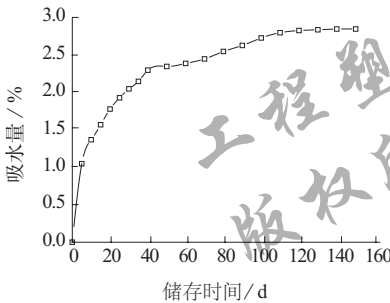


图 3 蜂窝吸水量与储存时间变化曲线

由蜂窝的质量和吸水量与储存时间变化曲线可以得出,随储存时间的增长,蜂窝的质量不断增加,吸水量的百分含量也不断增长。初期出现在前 40 d,试样质量和吸水量增加快速;中期出现在 40 ~ 80 d,试样质量和吸水量增加变得缓慢;后期出现在 80 ~ 100 d,试样质量和吸水量增加的更加缓慢;终期出现在 100 d 以后,试样质量和吸水量增加趋于稳定,直至饱和。由表 2 的吸水量试验数据,也可得出相同结论。这是由于蜂窝具有非常大的裸露表面,在高温高湿的试验条件下,吸水量主要取决于水分子的扩散作用和吸收作用^[12-13]。初期吸水快速上升的原因,主要由扩散和吸收作用影响;中间期吸水量上升变缓的原因,主要由吸收和呼吸作用影响;后期吸水量上升变平缓的原因,主要由呼吸作用影响;终期吸水量基本均衡的原因,主要由扩散、吸收和呼吸共同作用达到平衡。

2.3 平压性能测试试验结果与分析

对 14 组平压性能试样进行编号,逐件称其质量、测量试样尺寸等,利用材料性能试验机,对平压性能试样进行测试,其测试示意图见图 4。

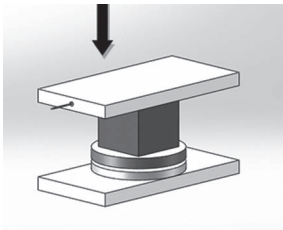


图 4 平压性能测试示意图

计算并记录平压性能试样的密度、平压强度及模量,试验结果见表 3。

表 3 平压性能试验结果表

序号	储存时间/d	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	平压强度 / MPa	平压模量 / MPa
1 [#]	0	87.0	4.67	197
2 [#]	10	84.9	4.45	184
3 [#]	20	86.4	4.34	179
4 [#]	30	86.1	4.06	152
5 [#]	40	87.7	4.18	159
6 [#]	50	87.7	4.10	154
7 [#]	60	88.4	4.06	149
8 [#]	70	87.7	4.10	153
9 [#]	80	88.1	4.06	160
10 [#]	90	86.3	4.26	176
11 [#]	100	88.1	4.31	165
12 [#]	110	88.4	4.27	174
13 [#]	120	88.2	4.31	173
14 [#]	130	88.9	4.34	180

由于每组试样的密度不一致,导致每组蜂窝的平压性能受其密度的影响程度不同。所以,为提供一致的性能表达基础,消除其密度变化的影响,进行有效的性能对比研究,以名义密度 (80 kg/m^3) 为基准,对密度均匀化试验数据进行归一化处理。归一化后的密度曲线关系见图 5。实际蜂窝的平压性能与吸水量的关系曲线见图 6、图 7。

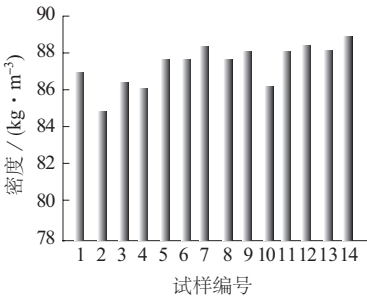


图 5 归一化后的密度曲线关系图

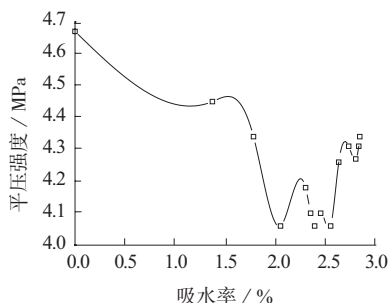


图6 实际蜂窝的平压强度与吸水量的关系曲线

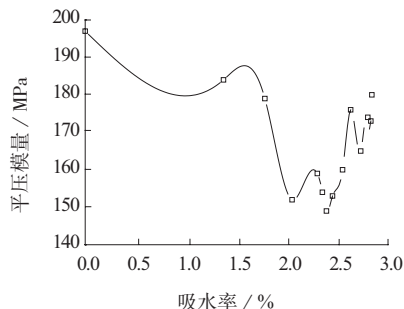


图7 实际蜂窝的平压模量与吸水量的关系曲线

为提供一致的性能表达并进行合理的性能对比,应对平压性能试验数据进行归一化处理。以名义密度 (80 kg/m^3) 为基准,将蜂窝的实际平压强度和模量进行归一化处理,转化成名义密度下平压强度和模量,有利于进行分析。归一化处理后共进行 14 组的平压性能测试,测试数据见表 4。归一化处理后的蜂窝的平压性能与吸水量的关系曲线见图 8、图 9。

表 4 归一化处理后平压性能的测试数据

储存时间 / d	名义密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	平压强度 / MPa	平压模量 / MPa
1 [#] 0	80	4.29	181
2 [#] 10	80	4.19	173
3 [#] 20	80	4.02	166
4 [#] 30	80	3.77	141
5 [#] 40	80	3.81	145
6 [#] 50	80	3.74	140
7 [#] 60	80	3.67	135
8 [#] 70	80	3.74	140
9 [#] 80	80	3.69	145
10 [#] 90	80	3.95	155
11 [#] 100	80	3.90	150
12 [#] 110	80	3.86	157
13 [#] 120	80	3.91	157
14 [#] 130	80	3.91	162

由图 8、图 9 可知,吸水后蜂窝的平压性能发生改变。平压性能随着吸水量的增加呈现快速降低、缓慢下降、缓慢增长、在一定范围内趋于稳定的变化趋势。这是由于水分子具有强极性、分子量小、易渗透、易与极性基团结合等特点^[14],对蜂窝的表面造

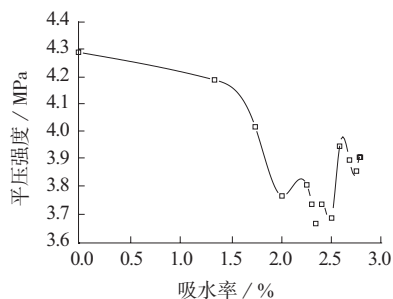


图8 归一化处理后蜂窝的平压强度与吸水量的关系曲线

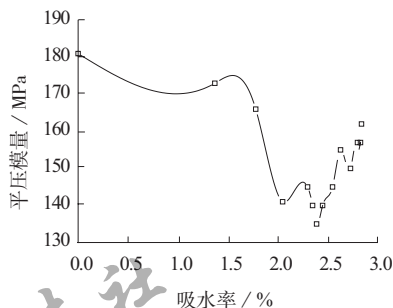


图9 归一化处理后蜂窝的平压模量与吸水量的关系曲线

成不明显膨胀、变形、起泡和脱落等劣化现象。同时还造成材料的强度和模量等力学性能的变化。

蜂窝平压强度、归一化强度、吸水量与储存时间的关系曲线图,见图 10,蜂窝平压模量、归一化模量、吸水量与储存时间的关系曲线图,见图 11。由图 10、图 11 可以看出,初期出现在前 40 d,由于吸水量快速增加,试样质量增大,发生蜂窝溶胀的现

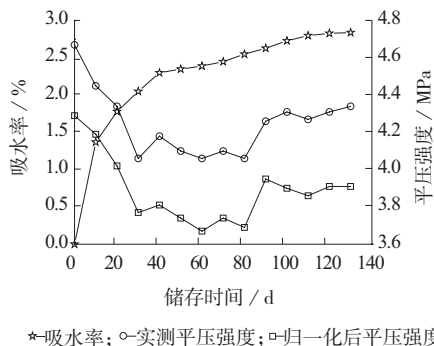


图10 蜂窝平压强度、归一化强度、吸水量与储存时间的关系曲线

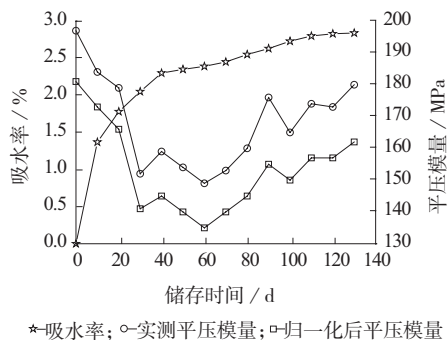


图11 蜂窝平压模量、归一化模量、吸水量与储存时间的关系曲线

象,造成其平压强度和模量快速降低;中期出现在40~80 d,吸水量缓慢增长,试样质量增大,产生蜂窝溶胀、交联等现象,造成其平压强度和模量缓慢下降;后期出现在80~100 d,吸水量缓慢增长,试样质量增大,产生蜂窝溶胀、固化交联等现象,其平压强度和模量出现小幅度缓慢增长现象;终期出现在100 d以后,吸水量趋于平衡,达到最大吸水量,蜂窝溶胀、分子链断裂、后固化交联等现象基本完成,因此其平压强度和模量趋于稳定,基本不变。

3 结论

研究了高温高湿环境下吸水量对某型蜂窝平压性能的影响,实现并确定蜂窝高温高湿试验条件和方法,能够快速得到较为准确的吸水量、平压性能结果及其变化趋势。蜂窝平压性能的变化趋势,与吸水量的变化趋势大体一致,可分为四个阶段:快速变化的初期阶段,缓慢变化的中期阶段,更缓慢变化的后期阶段和稳定趋于饱和的终期阶段。蜂窝平压性能是蜂窝代表性指标,通过对其吸水量的测定,能够预测蜂窝的平压性能变化趋势。在实际长期使用,可以采用此方法预测蜂窝的平压性能。本方法也可以推广应用到复合材料、夹层结构等其他功能材料性能的研究和预测方面。

参考文献

- [1] 朱军. 天线罩及曲面 FSS 天线罩的电磁特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
Zhu Jun. Research on electromagnetic characteristics of radome and curved FSS radome[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [2] 门薇薇, 王志强, 轩立新. 隐身雷达罩技术研究进展综述 [J]. 现代雷达, 2017, 39(10):60-66.
Men Weiwei, Wang Zhiqiang, Xuan Lixin. Overview of research progress in stealth radome technology[J]. Modern Radar, 2017, 39(10):60-66.
- [3] 杜梅. 火控雷达操作手训练仿真系统的研究与设计 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2005.
Du Mei. Research and design of fire control radar operator training simulation system[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2005.
- [4] 邓金山. 基于新型 FSS 的复合夹层机载天线罩设计 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2015.
Deng Jinshan. Design of composite sandwich airborne radome based on new FSS[D]. Shenyang: Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [5] 梅家赫. 基于点阵结构的频选天线罩设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
Mei Jiahe. Design of frequency selective radome based on lattice structure [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [6] 金志峰. 天线罩电性能设计与测试及损伤研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
Jin Zhifeng. Design and test of electrical performance and damage study of radome[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [7] 陈东, 居建国, 郝旭峰. 石英纤维 / KH308 复合材料的介电性能 [J]. 复合材料学报, 2014, 31(3):563-568.
Chen Dong, Ju Jianguo, Hao Xufeng. Dielectric properties of quartz fiber / KH308 composites[J]. Journal of Composite Materials, 2014, 31(3):563-568.
- [8] 马少华, 王勇刚, 回丽, 等. 湿热环境对碳纤维环氧树脂复合材料弯曲性能的影响 [J]. 材料工程, 2016, 44(2):81-87.
Ma Shaohua, Wang Yonggang, Hui Li, et al. The influence of hot and humid environment on the bending properties of carbon fiber epoxy resin composites[J]. Materials Engineering, 2016, 44(2):81-87.
- [9] 张焕侠. 碳纤维表面和界面性能研究及评价 [D]. 上海: 东华大学, 2014.
Zhang Huanxia. Research and evaluation of carbon fiber surface and interface properties [D]. Shanghai: Donghua University, 2014.
- [10] 陈文静. CF / PMI 吸波材料的制备与性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
Chen Wenjing. Preparation and performance of CF / PMI absorbing materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [11] 陈杰. 铁基非晶合金薄膜压磁特性及其力敏传感器 [D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
Chen Jie. Piezomagnetic characteristics of iron-based amorphous alloy thin film and its force-sensitive sensor[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [12] 侯宗姊. 玻璃纤维增强热塑性树脂基复合材料的耐久性研究 [D]. 上海: 东华大学, 2019.
Hou Zongzi. Research on the durability of glass fiber reinforced thermoplastic resin matrix composites[D]. Shanghai: Donghua University, 2019.
- [13] 胡明涛. 模拟海洋大气环境多种典型复合涂层失效机理研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
Hu Mingtao. Study on the failure mechanism of many typical composite coatings in simulated marine atmosphere[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [14] 姚焕英, 祝保林. TiO₂ 掺杂钕-氰酸酯树脂基复合材料的制备及性能研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2017(1):63-67.
Yao Huanying, Zhu Baolin. Preparation and properties of TiO₂ doped neodymium-cyanate ester resin-based composites[J]. FRP / Composite Materials, 2017(1):63-67.