

机载吊舱复合材料天线罩老化性能综合评估方法

冯玉博, 颜仙荣, 夏 亮

(92728 部队, 上海 200436)

摘要: 为检测使用多年的机载吊舱复合材料天线罩性能是否满足继续使用要求,需对天线罩进行老化性能评估。通过敲击法结合有限元仿真分析及相关实验室试验的方法,提出天线罩老化性能综合评估方法。评估结果表明,天线罩性能满足指标要求。同时结合用户后续天线罩使用情况,证明提出的天线罩老化性能综合评估方法评估结果可信。

关键词: 天线罩; 复合材料; 老化性能; 综合评估

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)17-0204-05

机载吊舱天线罩主要用来保护吊舱天线不受损坏,同时又要保证天线发射透波率需求。天线罩主要成分是玻璃纤维高分子复合材料,在使用及存放过程中,由于受到光、热、氧、水、高能辐射、化学、生物侵蚀以及气动载荷等内外因素的综合作用,会出现性能老化的现象^[1]。

某型吊舱在定型时,对天线罩日历寿命暂定为10年,在到日历寿命后,飞行小时数远没有达到使用寿命指标,因此为挖掘装备使用潜力,提高装备利用率,需开展延寿工作。对天线罩老化性能进行综合评估,确保天线罩强度及电性能是否满足使用要求,是延寿工作的基础。

天线罩采用复合材料制作,在对天线罩进行老化性能评估时为避免天线罩受到破坏,考虑采用无损检测方式^[2]。由于复合材料是非均质各向异性材料,内部结构复杂,因此对天线罩进行无损检测非常困难。目前应用于复合材料无损检测技术很多,如射线法、涡流法、激光全息干涉法、热像技术、声全息、超声C-扫描、声发射、纤维光学法、应力波技术^[3]等,这些方法所用的仪器较为复杂、昂贵,对试验环境也有较为严格的要求。近年来,一种新的振动无损检测方法-敲击法,被用于复合材料结构的检测^[4],但是仅使用敲击法,只可初步检测出复合材料内部是否有损伤,还不能够充分评估天线罩是否符合使用要求。因此本文提出天线罩老化性能综合评估方法,在敲击法基础上,又结合有限元仿真分

析及强度试验、电性能试验等相关实验室试验,对天线罩老化性能开展全方位综合评估,最终确认天线罩性能是否符合继续使用要求,为吊舱延寿工作做支撑。

1 天线罩性能老化机理

本文所研究的吊舱天线罩是某型吊舱前部天线所使用的异形天线罩,如图1所示。天线罩采用环氧树脂预浸玻璃布和NOMEX(诺梅克斯)材料蜂窝芯构成的夹层结构,厚度为9.2 mm,其中蜂窝厚度为4 mm。夹层结构如图2所示。

吊舱平时存储时一般要求恒温恒湿环境,但在使用过程中难免受到环境影响及疲劳载荷导致结构老化;高分子复合材料老化现象归纳起来有下列变化^[5]。①外观的变化,出现污渍、斑点、银纹、裂

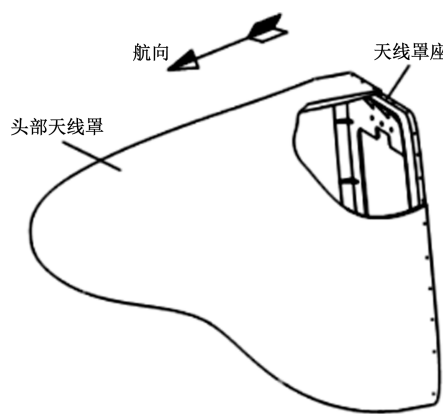


图1 吊舱天线罩结构外形

收稿日期: 2024-03-06

作者简介: 冯玉博(1984—),男,安徽亳州人,硕士,助理研究员,研究方向为飞行器总体论证与工程;颜仙荣(1979—),男,浙江温岭人,硕士,高级工程师,研究方向为飞行器总体;夏亮(1977—),男,陕西汉中,硕士,高级工程师,研究方向为飞行器总体。

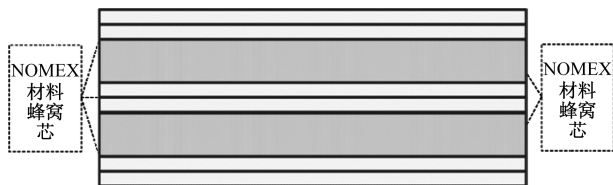


图2 夹层结构示意图

缝、喷霜、粉化、发黏、翘曲、鱼眼、起皱、收缩、焦烧、光学畸变以及光学颜色的变化;②物理性能的变化,包括溶解性、溶胀性、流变性能以及耐寒、耐热、透水、透气等性能变化;③力学性能的变化,包括拉伸强度、弯曲强度、剪切强度、冲击强度、相对伸长率、应力松弛等性能的变化;④电性能的变化,包括表面电阻、体积电阻、介电常数、电击穿强度等的变化。

本文重点考虑的吊舱天线罩老化现象主要包括由于复合材料夹层脱黏分层、界面热应力破坏以及材料本身力学性能变化等因素所引起的天线罩强度及电性能下降。

2 评估方案

按照上文分析,老化主要包括外观变化及夹层脱黏分层,天线罩老化性能综合评估的目的是确认天线罩强度和电性能符合使用要求。

评估按照3个环节开展,具体流程如图3所示。

(1)查看天线罩外观及内部是否破损,外观检查通过目视进行,查看天线罩外观是否存在缺陷。天线罩在出厂检测时通常采用超声方法检测蒙皮分层和蒙皮与蜂窝间的脱黏缺陷,采用X射线检测蜂窝和发泡胶区域缺陷^[6]。评估采用更为简洁的方便外场开展的基于振动模态的敲击试验进行。敲击检测方法是一种传统的外场无损检测方法,主要通过通过对被检件进行敲击,利用敲击声音或仪器信号显示来判断制件中是否存在分层或脱黏缺陷^[7]。由于复合材料吊舱天线罩结构较为简单,在材料、加工工艺一致情况下,每个天线罩的模态参数差异较小,若天线罩内部出现断裂、分层等损伤,其模态参数会出现明显的差异。检验是通过比较新、旧天线罩的结构固有频率、阻尼比、若干典型位置的源点

频响函数等模态参数,检查天线罩内部是否出现夹层脱黏等缺陷。

(2)对天线进行强度分析。为保证试验安全天线罩不被破坏,强度分析采用先通过仿真进行理论分析,然后再进行试验的方式开展。首先通过有限元对天线罩进行建模仿真,计算施加120%设计载荷时天线罩表面所受应力情况,对比复合材料性能开展分析;然后选取典型天线罩,开展120%设计载荷静力试验,最终确认天线罩是否满足强度要求。

(3)开展电性能试验,确认天线罩电性能是否满足使用要求。

3 评估过程与结果

3.1 缺陷检查

3.1.1 目视检查

对所有达到使用寿命的天线罩进行外观目视检查,查看表面是否出现斑点、银纹、裂缝、鼓包、起皱等变化,主要检查使用多年后,天线罩表面及内部是否出现缺陷。通过检查,除了个别天线罩在使用过程中受到异物外力损坏并及时进行外场修补,其余天线罩物理状态完好。

3.1.2 敲击试验

从理论上讲,对于任何特定的某一结构,其振动模态总是包含一个或多个自然频率,这些自然频率 f_i 的变化符合下列表达式。

$$\Delta f_i \approx \delta EI \frac{\partial f_i}{\partial EI} + \delta m \frac{\partial f_i}{\partial m} + \delta K_s \frac{\partial f_i}{\partial K_s} + \delta \rho I \frac{\partial f_i}{\partial \rho I} \quad (1)$$

式中: E 为杨氏模量; I 为截面的二次弯矩; m 为单位长度质量; K_s 为剪切刚度; ρ 为材料密度; δ 为增量; f_i 为频率。

当物体中存在某种缺陷时,相应的参量会发生变化,这些参量的变化会引起自然频率的线性变化,从而分辨出物体是否存在缺陷^[7]。首先,选取一个新生产的同样材料及工艺的天线罩进行敲击试验,在天线罩的边框、上下左右表面等典型位置布置若干个测量点,用力锤激励,分别测量各测量点对激励点的频响函数,再采用频域模态参数识别方法,获得天线罩的标准模态参数(频响函数、固有频率等)。然后随机抽取5个在役天线罩,选取同样测量点开展敲击试验,将得到的模态参数与标准模态参数进行比较。结果表明,在役天线罩与新天线罩的前3阶固有频率基本接近,全部测量点的源点频响函数曲线平滑,未见明显受损复合材料结构通常出现的噪声,如图4所示。

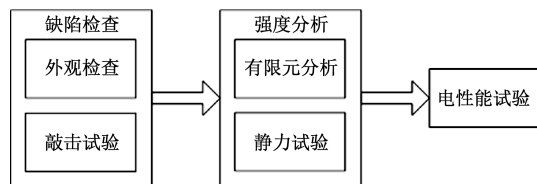


图3 评估流程

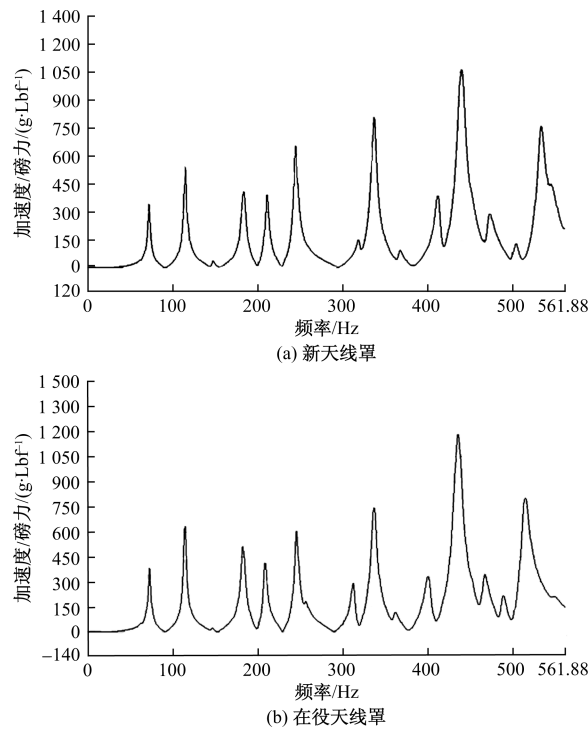


图 4 新天线罩和在役天线罩频响函数曲线

3.2 强度分析

3.2.1 有限元分析

利用有限元对天线罩受力情况进行仿真分析是常用的方法^[8]。首先对天线罩进行有限元建模和网格划分,将天线罩中 EW220 预浸玻璃布定义为二维正交各向异性材料,NOMEX 蜂窝定义为三维正交各向异性材料,然后根据夹层结构,对这两种材料进行铺层,考虑天线罩可能的性能老化,根据材料力学特性(表 1、表 2),将材料弹性模量和剪切模量降低 20%作为材料初始参数^[9-12],得到天线罩的数字化模型,如图 5 所示。

将天线罩模型的底边进行固支,然后分别在天线罩头部各个曲面上施加与 x 轴方向相反的均布力,如图 6 所示,其总载荷为设计载荷的 120%即 $14\text{ kN}\times 120\% = 16.8\text{ kN}$,施加在各个曲面上的载荷则根据各个曲面的面积将总载荷进行分配。得出各层的应力情况,见表 3。

经过仿真分析,按照模拟天线罩长时间存放及使用后,天线罩材料选取模量下降 20%,载荷增加

表 1 材料主要力学性能参数

部位	材料名称	材料属性	弹性模量 E / MPa		剪切模量 G / MPa		泊松比	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
			E_{11}	E_{22}	G_{12}	G_{23}		
蜂窝芯	NOMEX	3D 正交各向异性	20	20	10.0	65.5	—	46
			196	196	36.9	36.9		
			21 200	18 700	5 000	5 000		
外蒙皮、内蒙皮	EW220/3218-1	2D 正交各向异性	E_{11}	E_{22}	G_{12}	G_{23}	0.13	2 000

表 2 EW220/3218-1 预浸玻璃布性能参数

参数	真空成型	
拉伸强度/MPa	经向	409
	纬向	323
压缩强度/MPa	经向	332
	纬向	294
弯曲强度/MPa	经向	688
层间剪切强度/MPa	经向	60.0
泊松比	—	0.13

表 3 天线罩各层受力情况

层数	所受最大应力/MPa
外铺 1 层	16.300
外铺 2 层	16.200
外蜂窝层	0.197
中铺 1 层	11.700
中铺 2 层	11.800
内蜂窝层	0.198
内铺 1 层	14.900
内铺 2 层	15.200

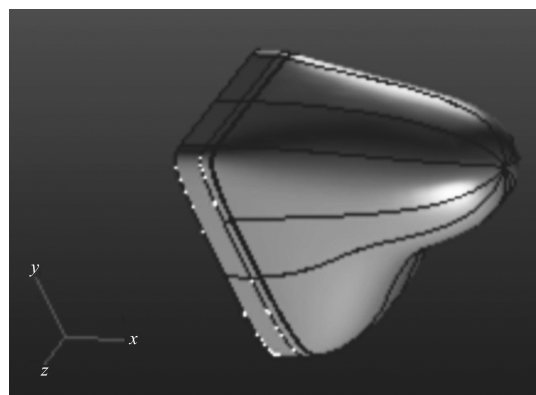
20%后,对复合材料天线罩进行强度校核,对比相应材料下降 40%后的强度值可知,天线罩强度符合要求。

3.2.2 静力试验

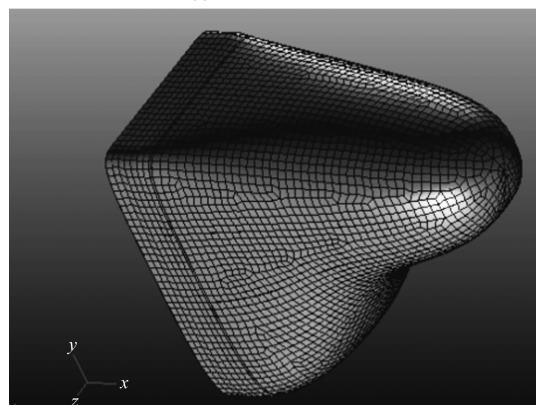
通过对天线罩进行静力试验,可考核在役天线罩材料是否仍然满足静强度要求^[13]。随机选取一个在役天线罩,在砂箱底部铺一定厚度的细砂。将天线罩垂直放置于砂箱中,用细砂填满砂箱。通过安装于刚性过渡件上的杠杆加载系统进行加载试验,如图 7 所示。

试验顺序为限制载荷试验、极限载荷试验。限制载荷试验加载程序为 10%、20%、30%、40%、50%、60%、67%的极限载荷;极限载荷试验加载程序为 10%、20%、30%、40%、50%、60%、67%、75%、80%、85%、90%、95%、100%的极限载荷。加到 67%载荷后,每级载荷到达后停留 3 s 以上再加下一级载荷。完成极限载荷试验后,经目视检查,天线罩未出现异常情况,继续施加 105%、100%、115%、120%的极限载荷。

主要级别载荷作用下,天线罩顶端的位移变化



(a) 天线罩有限元建模



(b) 天线罩有限元网格

图5 天线罩有限元模型

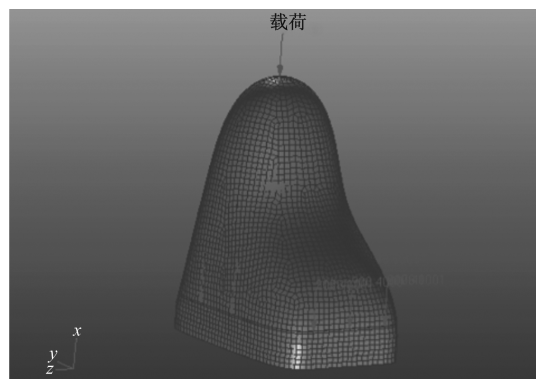


图6 对天线罩施加压力

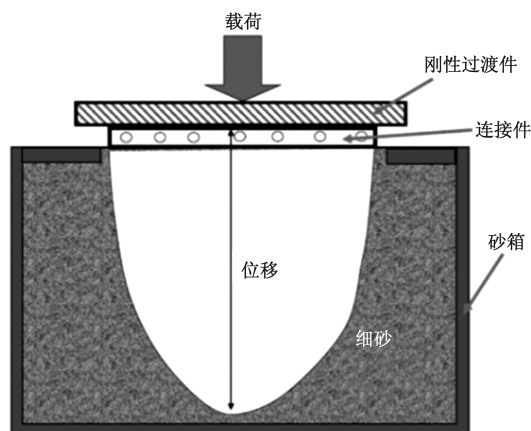


图7 对天线罩进行静力试验

量见表4。

对试验后天线罩进行敲击试验,对比试验前敲击试验,天线罩固有频率如表5、图8所示。

静力试验过程中实测天线罩位移数据绝对值随载荷线性增大,载荷释放后天线罩基本恢复原位。表明静力试验后天线罩未出现明显塑性变形。

静力试验后经目视检查,天线罩未出现明显分层、裂纹或塑形变形。

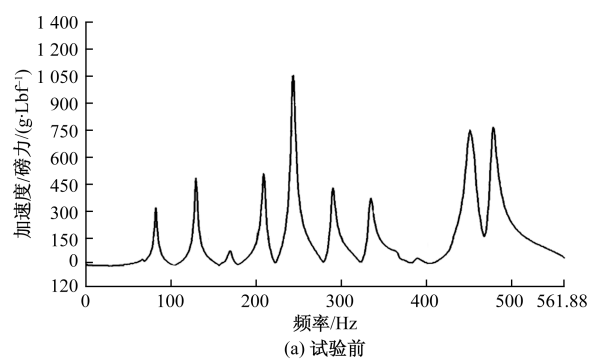
静力试验前、试验后分别对天线罩进行了自由-自由状态振动模态试验。天线罩在试验后的各典型

表4 天线罩受力位移变化量

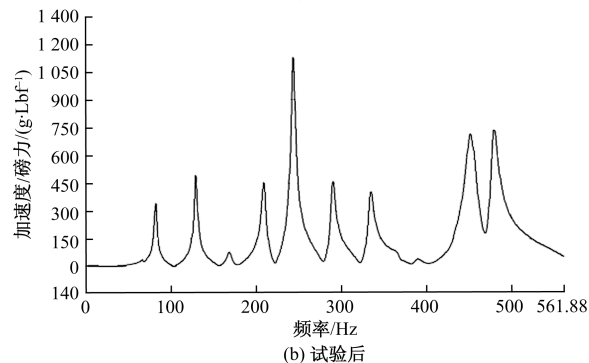
加载百分数/%	载荷/kN	位移变化/mm
10	1.4	0.04
40	5.6	0.13
60	8.4	0.20
85	11.9	0.31
95	13.3	0.36
100	14.0	0.38
110	15.4	0.42
115	16.1	0.44
120	16.8	0.45
卸载		0.02

表5 试验前后天线罩固有频率

项目	固有频率/Hz				
	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶
试验前	81.25	128.75	167.30	208.10	243.10
试验后	81.87	128.75	168.70	208.75	243.70
差别/%	0.76	0.0	0.83	0.32	0.25



(a) 试验前



(b) 试验后

图8 试验前后天线罩频响函数曲线

位置频响函数平滑,前5阶固有频率与试验前基本一致。表明静力试验后,天线罩的结构动态特性未出现明显变化,静力试验未对天线罩结构造成明显损伤。

3.3 电性能试验

随机选择一个使用超期天线罩,和一个新天线罩开展暗室电性能测试(图9)。考虑到雷达罩透波性能测试中,垂直极化情况总是差于水平极化情况,所以本次测试仅给出垂直极化结果。

通过新罩和旧罩透波率对比发现,使用10年以上的旧罩透波率虽然在部分频段内比新罩透波率有部分下降,但是总体相对稳定,和新罩结果相差不大(图10)。

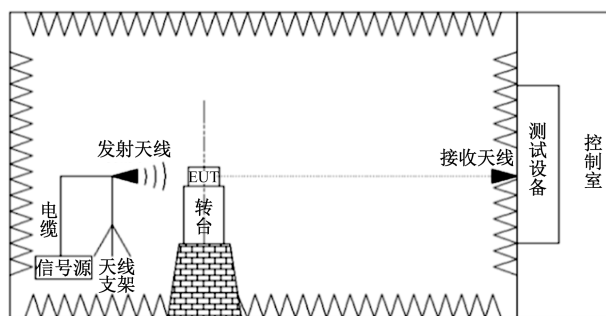


图9 暗室测试示意图

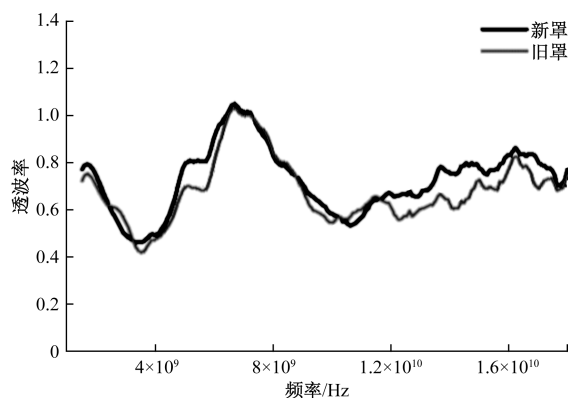


图10 新老天线罩透波率对比

4 结论

(1)结合用户后续一段时间的使用情况来看,天线罩也能够很好地满足使用需求,因此可认为,

相较于只使用一种性能检测方法,本文提出的天线罩老化综合评估方法更为准确可行。

(2)通过敲击试验,获得天线罩正常频响函数曲线,考虑后续天线罩使用外场检测条件限制,可在使用过程中对天线罩进行定期抽查开展敲击试验,试验结果如偏离正常天线罩频响函数曲线,则应及时开展进一步性能检测,以确保使用安全。

参考文献

- [1] 杨康,丁文喜,梁宇,等.环境温度对碳纤维复合材料层合板力学性能的影响[J].科学技术与工程,2021,21(22):9286-9291.
- [2] 王丹,宁宁,杨鹏飞,等.飞机结构强度试验中碳纤维增强树脂基复合材料无损检测技术[J].科学技术与工程,2018,18(18):313-322.
- [3] 杜善义,冷劲松,顾震隆.用应力波技术对配橡胶内衬的复合材料板壳进行无损检测[J].复合材料学报,1993,10(1):65-69.
- [4] CAWLEY P, ADAMS R D. The mechanics of the coin-tap method of non-destructive testing[J]. Journal of Sound and Vibration, 1988, 122(2): 299-316.
- [5] 李波.湿热老化对环氧树脂复合材料电学性能影响研究[D].武汉:武汉理工大学,2010.
- [6] 郭广平. C夹层雷达罩无损检测技术[J]. 航空制造技术, 2008(15): 47-49.
- [7] 王铮,李硕宁. 敲击检测技术在某雷达天线罩在役检测中的应用[J]. 无损检测, 2021, 34(6): 29-32.
- [8] 吕新颖,刘龙权,赵淑媛. 薄面板复合材料蜂窝夹层结构冲击穿透试验与失效机理[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21): 8834-8840.
- [9] 李家伟,郭广平. 无损检测手册[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [10] 高泉喜,郑威,孔令美. 温度和湿热对玻纤复合材料力学性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(3): 66-69.
- [11] 谢可勇,李晖,孙岩,等. 湿热老化对纤维增强树脂基复合材料性能的影响及其机理[J]. 机械工程材料, 2014, 38(6): 1-5.
- [12] 王晓洁,梁国政,张伟,等. 湿热老化对高性能复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2004, 21(3): 131-135.
- [13] 胡俊,蔡汶秀,郑罡,等. 长行程屈曲约束支撑拟静力试验[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(17): 7272-7277.

Comprehensive Evaluation Method of Aging Performance of Composite Radome for Aircraft Nacelle

FENG Yubo, YAN Xianrong, XIA Liang

(Unit 92728, Shanghai 200436, China)

Abstract: In order to test whether the performance of the composite radome of the aircraft nacelle, that has been in service for many years, meets the requirements for continued use, it is necessary to conduct a comprehensive evaluation the aging performance of the radome. By using the knocking method combined with finite element simulation analysis and relevant laboratory tests, the ageing performance of the radome has been comprehensively evaluated. The results show that the performance of radomes meets the index requirements. At the same time, combined with the subsequent use of radomes by the users, it is evident that the results of the comprehensive evaluation method of radome aging performance proposed are credible.

Keywords: radome; composite; aging performance; comprehensive evaluation