

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416764

夹杂碳纤维的天线罩蒙皮在电磁场下的失效机理研究

王晨¹ 王超¹ 孙荣庆²

(1.南京电子技术研究所 南京 210039; 2.航天材料及工艺研究所 北京 100076)

摘要: 天线罩是雷达系统的重要电讯结构功能件,如在生产制造中不慎混入碳纤维丝,极易造成天线罩局部烧蚀故障,目前碳纤维在电磁场中的发热机理及其对天线罩影响的研究还不充分。为此文中拟通过有限元仿真分析法对其进行探索研究,首先研究了含碳纤维丝的复合板的有限元模型构建技术;其次,分析了不同规格的碳纤维丝的复合板在电磁场下的发热机理;最后,通过试验分析了碳纤维丝发热量与复合板间的变色、烧蚀等失效模式的对应关系。相关研究成果可对天线罩的结构设计、生产加工等提供有效的指导,并为相关故障分析开辟新思路。

关键词: 雷达天线罩;有限元分析;发热机理;试验分析

中图分类号: TN820.8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.7

Research on the failure mechanism of radome with carbon fiber inclusion under electromagnetic fields

Wang Chen¹ Wang Chao¹ Sun Rongqing²

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China;

2. Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: Radome is an important telecommunication and structural component of radar system. If carbon fibers filaments are mixed into the radome accidentally during manufacturing process, it may cause local ablation failure of the radome. Now the heating mechanism of carbon fibers in electromagnetic fields and their impact on the radome are not clear. Therefore, the article intends to explore and study it through finite element analysis (FEA) method. Firstly, the finite element model construction technology of composite plates containing carbon fiber filaments were researched. Secondly, the heating mechanism of composite plates, which had different specifications of carbon fiber filaments, under electromagnetic fields was analyzed. Finally, the corresponding relationship between the heat generation of carbon fiber filaments and failure modes of composite plate, such as discoloration and ablation, were researched through experiments. The relevant research results have a guiding role in the structural design, production process and fault analysis of radome.

Keywords: radome; finite element analysis; heating mechanism; experimental analysis

0 引言

雷达为了更好地辐射电磁波,得到更远的辐射距离且减少对居民生活的影响,天线通常架设在海上,野外,山顶等空旷的空间,而这些空旷的环境通常伴有恶劣的自然环境,如风霜、雨雪、烈日、冰雹、盐雾等。为保证天线能正常工作,工程师们设计了集高透波率与机械防护为一体的电讯功能结构件罩在天线上,后来该结构件被称为天线罩。天线罩将天线与外界环境隔离开,能够保护天线免受恶劣天气影响,同时也能防止剧烈的温度变化对天线系统的影响或破坏,大大提高天线对外界恶劣环境的承受能力,给天

线系统提供了一个安全可靠的工作环境,延长了天线的使用寿命,也使天线的布置位置基本不受环境影响^[1-2]。可见,天线罩是雷达系统的重要组成部分,一方面需满足耐功率、透波率等电讯指标要求;另一方面还需满足防雨、防风、防冰雪等环境要求。

天线罩一般多为复合夹层非金属结构,其成形过程较复杂且结构缺陷难以修补,一旦发生烧蚀等缺陷将产生较大经济损失,因此需从设计、生产等多个环节进行严格控制。相关文献^[3-4]从设计的角度研究了天线罩耐功率的设计方法,防止在使用过程中发生烧蚀等缺陷。在生产制造环节需严格控制环境清洁度,杜绝任何夹带杂质的途径。

电磁场环境下,金属杂质对天线罩的影响相对明确^[5-6],实际生产过程中管控体系也较完备;但碳纤维(丝)杂质对天线罩性能影响的研究较少且多数天线罩承制厂家也具备碳纤维结构件的生产能力,易在天线罩的生产环节混入碳纤维杂质^[7-8]。碳纤维是一种半导体材料,其在电磁场环境下易发生碳化、烧蚀等现象。张铁群等^[9]通过试验研究了含碳纤维丝的天线罩在电磁场下的失效形式及各失效模式下天线罩的力学性能和电性能。现有研究多通过试验方法研究夹杂碳纤维丝的天线罩的烧蚀损伤现象,未从机理上对其进行深入分析。文中拟通过仿真分析方法对夹杂碳纤维的天线罩在电磁场下的失效机理进行研究,为天线罩的设计、制造、故障分析^[10-12]等提供参考。

1 有限元模型建模方法

通过试验检测及查阅相关文献得石英氰酸酯板和碳纤维的介电性能大致如下:

石英/氰酸酯材料的介电常数 $E_r = 3.3$, 损耗角正切 $\tan\delta = 5.1 \times 10^{-3}$ ^[13-14];碳纤维的介电常数 $E_r = 24$, 损耗角正切 $\tan\delta = 0.5$, 电导率 $\sigma = 0.625 \times 10^3 \text{ s/m}$ ^[15];石墨的密度 $\rho = 2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 比热 $c = 710 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 。

取 $L \times L$ 板建模,碳纤维丝简化为直径为 d 长度为 l 的圆柱体,埋在石英氰酸酯板的中央。入射条件为 3 GHz 正入射,周期边界条件。同时取相同条件下无碳纤维丝的对比较板进行仿真。通过仿真分析得到含碳纤维丝的透射系数 T 和反射系数 R , 对比较板透射系数 T_{ref} 和反射系数 R_{ref} , 对比可得碳纤维丝导致的能量吸收系数 C_a :

$$C_a = (T_{\text{ref}}^2 + R_{\text{ref}}^2) - (T^2 + R^2) \quad (1)$$

设照射在板上的功率为 P , 则碳纤维丝的吸收功率 P_a :

$$P_a = PC_a \quad (2)$$

该方法利用周期边界条件时自带的场传输系数或传输矩阵 S , 计算中绕开了场积分计算。计算中的误差主要来自两个方面:

1) 样件的面积:将其假想为 $L \times L$ 板有碳纤维。由于实际中发生碳纤维丝夹杂是小概率事件,因此分析中 L 越大越接近实际情况,但会导致板与碳纤维的尺度差异过大、难以计算、计算量大等系列问题。

2) 计算误差:如果碳纤维的吸收能力弱,则 C_a 的计算可能会被透射系数和反射系数的计算误差所淹没。

上述方法中,也可以换成理想导体边界条件(perfect electric conductor, PEC),即相当于在波导腔中计算含碳纤维板和参考板,分别得到相应的传输矩阵 S , 吸收系数 C_a 计算公式为:

$$C_a = (S_{11,\text{ref}}^2 + S_{21,\text{ref}}^2) - (S_{11}^2 + S_{21}^2) \quad (3)$$

式中: $S_{11,\text{ref}}$ 和 S_{11} 分别表示含碳纤维板和对比较板的反射系数, $S_{21,\text{ref}}$ 和 S_{21} 分别表示含碳纤维板和对比较板的透射系数。

该方法的误差与采用周期边界条件时类似。其建立的参考板和含碳纤维的层合板的模型如图 1 和 2 所示。

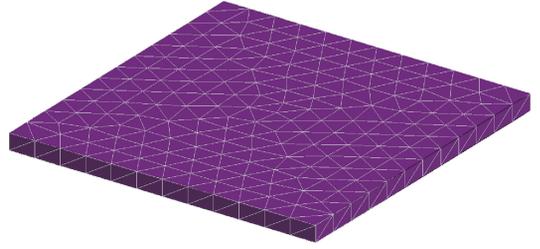


图 1 对比较板有限元模型

Fig. 1 Finite element model of the comparison plate

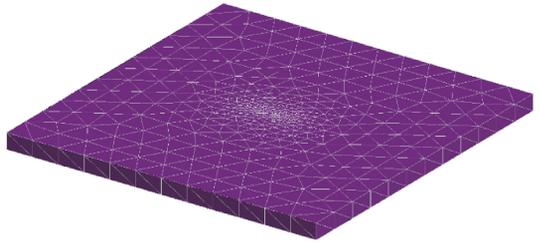


图 2 含碳纤维丝层合板有限元模型

Fig. 2 Finite element model of a laminate containing carbon fiber filament

分析厚 $t = 0.7 \text{ mm}$, 夹杂长 $l = 10 \text{ mm}$, 直径 $d = 0.1 \text{ mm}$ 碳纤维样件,在归一化功率面密度为 1 的 3 GHz 平面波垂直入射下,分析得到周期边界条件下碳纤维丝的吸收功率 P_a 与样件边长 L 的变化如图 3 所示。从中可以看出,这种方法计算得到的纤维丝的吸收功率与样件边长 L 的影响较小,说明本方法准确度较高;按文献[11]给出的碳纤维参数作为损耗介质计算时,纤维的能量吸收功率要低于石墨。计算得到的吸收功率 P_a 可作为热力学仿真的输入。

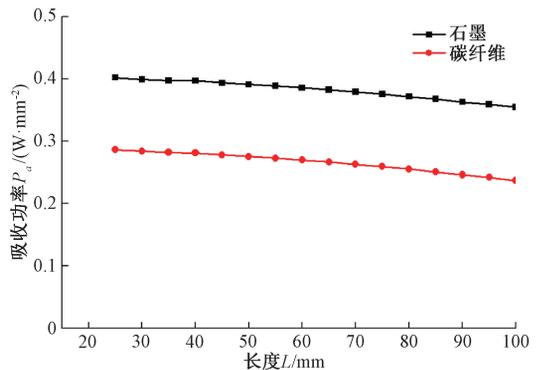


图 3 纤维吸收功率 P_a 与采样板边长的关系

Fig. 3 Relationship between fiber absorption power P_a and the edge length of the sampling plate

2 吸收功率仿真结果

石英氰酸酯载板的边长 $L = 50 \text{ mm}$, 厚度 $t = 0.7 \text{ mm}$

时,以密度 3 w/cm^2 , 频率为 3 GHz 的平面波正入射 30 h 后,得纯介质板的透射系数 T 和反射系数 R 的理论值为 $T=0.998\ 355\ 982$ 和 $R=0.050\ 478\ 977$ 。

定义入射电场与纤维方向平行时为平行极化,记为 HH;入射电场与纤维方向垂直时为垂直极化,记为 VV。

2.1 纤维长度变化对碳纤维吸收功率的影响

碳纤维吸收功率的仿真模型如图 4 所示,将直径 $d=0.06 \text{ mm}$ 、 $d=0.1 \text{ mm}$ 的碳纤维固定在板正中间。

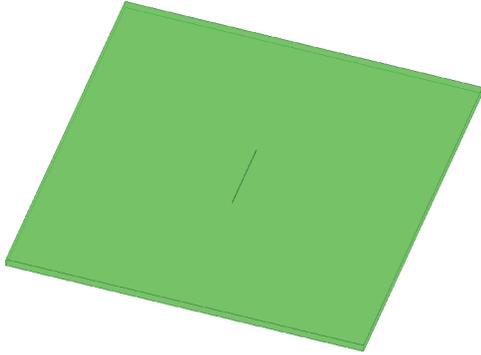


图 4 计算模型
Fig. 4 Calculation model

分别计算长度 $l=10 \text{ mm}$ 、 $l=5 \text{ mm}$ 、 $l=3 \text{ mm}$ 时碳纤维的能量吸收系数和吸收功率如表 1 所示。当纤维长度 $l=3 \text{ mm}$,计算得能量吸收系数 C_a 为负值,说明该工况下碳纤维丝的损耗较小,实际损耗值已被误差淹没。

表 1 夹杂不同规格的碳纤维丝的能量吸收情况

Table 1 Energy absorption of carbon fiber filaments with different specifications

序号	直径 $d/$ mm	长度 $l/$ mm	能量吸收系数 $C_a/10^{-4}$	吸收功率 Pa/mW
1	0.10	10	1.1~1.6	8.3~12
2	0.06	10	1.8~3.0	13.5~22
3	0.10	5	0.056~0.08	0.43~0.6
4	0.06	5	0.08~0.14	0.6~1.05
5	0.10	3	-0.026~-0.023	—
6	0.06	3	-0.027~-0.020 6	—

2.2 纤维直径变化对碳纤维吸收功率的影响

为研究碳纤维的直径 d 与能量吸收系数 C_a 间的关系,建立了如图 5 所示的有限元模型。分析中取样件边长 $L=50 \text{ mm}$,纤维长度 $l=10 \text{ mm}$,纤维位于样板的中间位置。分析得碳纤维丝的能量吸收系数 C_a 随直径 d 的变化曲线如图 6 所示,可见,纤维直径越细,能量吸收系数越大,两者之间近似反比例关系。

2.3 纤维离表层距离对碳纤维吸收功率的影响

为研究碳纤维离表层的距离与能量吸收系数 C_a 间的关系,分析中取样件边长 $L=50 \text{ mm}$,纤维长度 $l=10 \text{ mm}$,

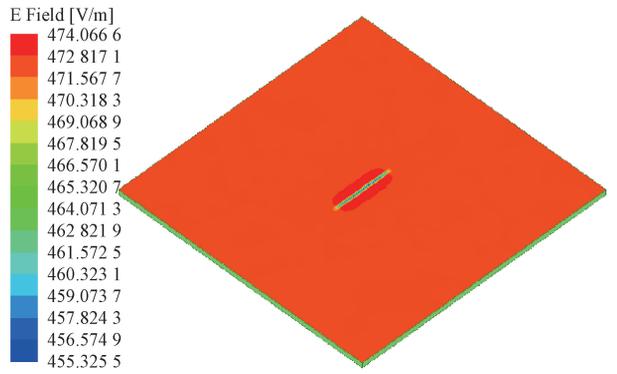


图 5 出射面上的电场分布($d=0.2$)
Fig. 5 Distribution of electric field on the emitting surface ($d=0.2$)

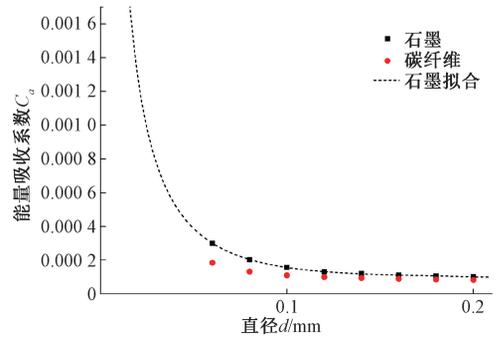


图 6 能量吸收系数 C_a 随纤维直径 d 变化
Fig. 6 The energy absorption coefficient C_a varies with fiber diameter d

直径 $d=0.1 \text{ mm}$ 。分析得到了碳纤维丝的能量吸收系数 C_a 随纤维埋藏深度 depth 的变化曲线如图 7 所示。可见 C_a 随纤维埋藏深度有一定的变化、基本呈现对称态势(纤维在板正中间时 C_a 最大、接近表层时最小),但整体变化 $\leq 10\%$ 。

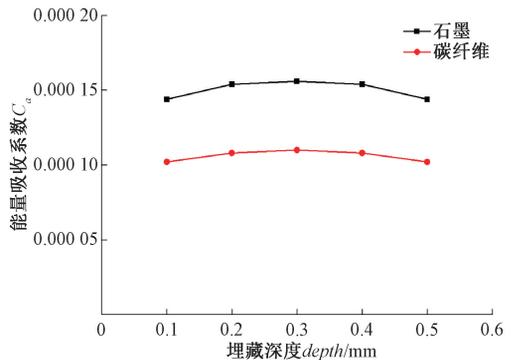


图 7 能量吸收系数 C_a 随纤维埋藏深度变化
Fig. 7 The energy absorption coefficient C_a varies with the depth of fiber burial

3 热力学仿真结果

第 2 节计算得到不同碳纤维的能量吸收率 C_a 和吸收

功率 P_a 如表1所示,据此设定按4种传热仿真工况,如表2所示,进行热力学仿真。

表2 传热仿真工况

Table 2 Heat transfer simulation conditions

状态	几何参数	输入功率
1	纤维长度 $l=10$ mm 纤维直径 $d=0.1$ mm	10 mW
2	纤维长度 $l=10$ mm 纤维直径 $d=0.06$ mm	15 mW
3	纤维长度 $l=5$ mm 纤维直径 $d=0.1$ mm	0.5 mW
4	纤维长度 $l=5$ mm 纤维直径 $d=0.06$ mm	0.8 mW

3.1 工况1: $l=10$ mm $d=0.1$ mm $P=10$ mW

通过热仿真分析可得样件的温度分布,如图8表示了碳纤维丝所在层的温度分布。可见,稳态下碳纤维丝温度达到 511.3°C ,碳纤维丝周边 25 mm范围内温度约 171.6°C 。瞬态热分析中碳纤维中间截面圆心处温度变化如图9所示,可见碳纤维丝的温度经快速上升后缓慢抬升。碳纤维温度较低时,吸收的能量用于自身温度的升高;当碳纤维温度进一步升高后,吸收的热量除了自身温度的升高,还需向附近的石英氰酸酯材料扩散热量。当电磁波辐射样件 14 min后,碳纤维丝的温度达到 160°C 。

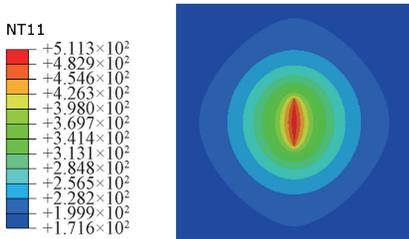


图8 工况1 稳态分析温度分布云图

Fig. 8 Temperature distribution diagram of steady-state analysis under condition 1

3.2 工况2: $l=10$ mm $d=0.06$ mm $P=15$ mW

仿真分析得该工况下样件中碳纤维丝所在层的温度分布如图10所示。可见,稳态下碳纤维丝的温度达到 779.7°C ,碳纤维丝周边 25 mm处温度约为 244.8°C 。瞬态热分析时,碳纤维中间截面圆心处温度变化过程如图11所示,变化趋势与工况1相同。当电磁波辐射样件 14 min后,碳纤维丝的温度达到约 250°C 。相对工况1,碳纤维直径减小 40% 且辐射功率增加 50% ,因此碳纤维丝的热流密度增大,稳态温度升高。

3.3 工况3: $l=5$ mm $d=0.1$ mm $P=0.5$ mW

该工况下样件中碳纤维丝所在层的温度分布如图12所示。可见,稳态下碳纤维丝的温度达到 55.0°C ,碳纤维

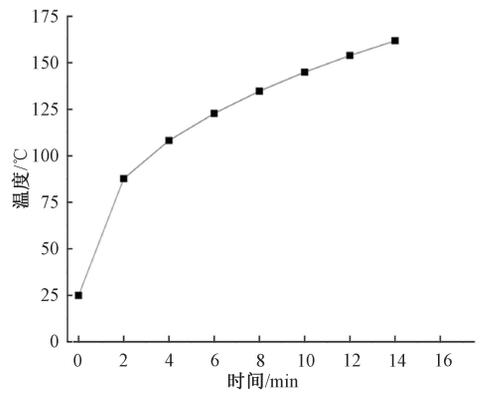


图9 工况1中碳纤维丝中心点温度变化

Fig. 9 Temperature change of the center point of the carbon fiber filament under condition 1

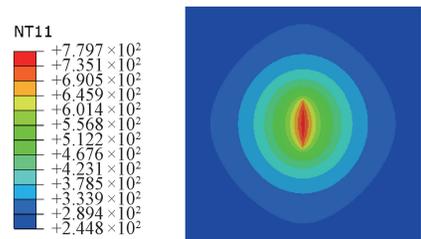


图10 工况2 稳态分析温度分布云图

Fig. 10 Temperature distribution diagram of steady-state analysis under condition 2

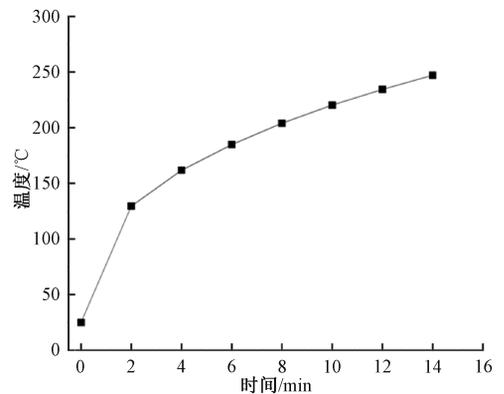


图11 工况2中碳纤维丝中心点温度变化

Fig. 11 Temperature change of the center point of the carbon fiber filament under condition 2

丝周边 25 mm范围内温度约为 32.3°C 。该工况下碳纤维丝的吸热功率较小,温度上升不剧烈。

3.4 工况4: $l=5$ mm $d=0.06$ mm $P=0.8$ mW

该工况下样件中碳纤维丝所在层的温度分布如图13所示。可见,稳态下碳纤维丝的温度达到 74.7°C ,碳纤维丝周边 25 mm范围内温度约为 36.7°C 。与工况3类似,该工况下碳纤维丝的吸热功率较小,温度上升不剧烈。

4种工况下的热力学仿真结果如表3所示,可得到以下结论:

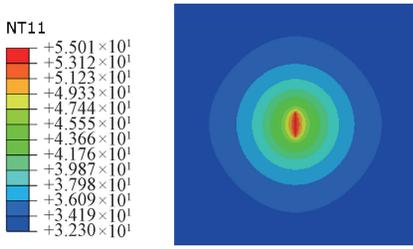


图 12 工况 3 稳态分析温度分布云图

Fig. 12 Temperature distribution diagram of steady-state analysis under condition 3

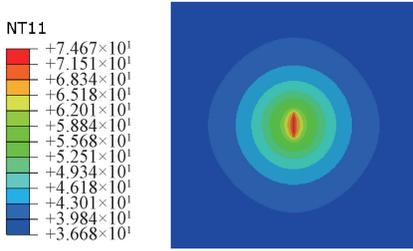


图 13 工况 4 稳态分析温度分布云图

Fig. 13 Temperature change of the center point of the carbon fiber filament under condition 3

1) 纤维长度 $l = 10 \text{ mm}$ 时,因吸收功率较大,直径 0.06 mm 碳纤维丝的稳态温度可达约 780°C ; 直径 0.1 mm 碳纤维丝的稳态温度也大于 500°C ;

2) 纤维长度 $l = 5 \text{ mm}$ 时,因吸收功率急剧下降,碳纤维丝稳态温度较低,低于 80°C ;

3) 单根碳纤维丝的温度影响范围大约为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 范围内,超出这个范围,温度大幅降低。

表 3 4 个工况下碳纤维丝最高稳态温度

Table 3 The highest steady-state temperature of carbon fiber filament under four working conditions

状态	几何参数	输入功率/ mW	碳纤维稳态 温度/ $^\circ\text{C}$
1	纤维长度 $l = 10 \text{ mm}$	10.0	511.3
	纤维直径 $d = 0.1 \text{ mm}$		
2	纤维长度 $l = 10 \text{ mm}$	15.0	779.7
	纤维直径 $d = 0.06 \text{ mm}$		
3	纤维长度 $l = 5 \text{ mm}$	0.5	55.0
	纤维直径 $d = 0.1 \text{ mm}$		
4	纤维长度 $l = 5 \text{ mm}$	0.8	74.7
	纤维直径 $d = 0.06 \text{ mm}$		

4 蒙皮材料碳化变色的温度验证试验

为了验证天线罩蒙皮材料发生碳化变色的温度,制备了 3 组天线罩蒙皮原材料氰酸酯石英布的随炉试样,对比

不同温度下随炉试样的颜色变化情况。试验通过凝胶测试仪器加热平台进行加热,使用手持温度测试仪进行温度测量。设置不同阶段目标温度 (150°C 、 200°C 、 250°C 、 300°C 、 350°C 、 400°C 和 450°C) 时,达到设定温度时取下对应温度标记的试样。试验结果如图 14 所示,当温度 $\leq 250^\circ\text{C}$ 时,复合材料表面无变色痕迹;当加热温度 $\geq 300^\circ\text{C}$ 时,复合材料表面发生较为明显的变色迹象,说明加热温度接近 300°C 后氰酸酯石英布的复合材料会发生变色。当温度由 300°C 升至 350°C 时,颜色逐步由米黄色变为棕红色;当温度由 350°C 升至 400°C 时,颜色逐步由棕红色变为棕黑色,说明氰酸酯石英布的复合材料会发生碳化;当温度由 400°C 升至 450°C 时,颜色逐步由棕黑色变为炭黑色。可见,氰酸酯石英布复合材料发生碳化变色的温度在 $350^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ 之间。

序号 温度	1	2	3
150 $^\circ\text{C}$			
200 $^\circ\text{C}$			
250 $^\circ\text{C}$			
300 $^\circ\text{C}$			
350 $^\circ\text{C}$			
400 $^\circ\text{C}$			
450 $^\circ\text{C}$			

图 14 QWB100/701 复合材料温度触发试验结果

Fig. 14 Temperature-triggered test results of QWB100/701 composites

根据模拟仿真结论,中间夹杂碳纤维丝的氰酸酯石英板在电磁场作用下,纤维长度 $l = 10 \text{ mm}$ 时,直径 0.06 mm 碳纤维丝稳态温度可达约 780°C ,直径 0.1 mm 碳纤维丝稳态温度也大于 500°C ;这两种情况下碳纤维丝周围蒙皮树脂发生烧蚀碳化的现象。

5 结 论

天线罩生产过程中如不慎将碳纤维丝夹杂在蒙皮中,在电磁场的辐射下会引发局部高温,导致碳纤维周围的树脂发生碳化。文中详细研究了夹杂碳纤维丝的氰酸酯石英板的有限元建模技术,并通过有限元法分析了夹杂不同规格(长度和直径)碳纤维丝的氰酸酯石英板在电磁场下的温度分布,碳纤维丝的最高温度及其对周边复合材料的影响范围,最后通过试验验证了氰酸酯石英板在不同温度下的颜色变化情况。结合有限元仿真技术及氰酸酯石英板在不同温度下的变色情况,可综合评估夹杂不同规格碳纤维丝的石英板在电磁场下的失效模式,为天线罩等复合材料的设计、制造及故障诊断提供有效借鉴。文中仅分析了夹杂碳纤维丝杂质的天线罩失效机理,后续还可对金属等杂质的失效机理进行深入研究,使相关研究更加完备。

参考文献

- [1] 张强. 天线罩理论与设计方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
ZHANG Q. Radome theory and design methods[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [2] 王超, 顾叶青, 王晨. 雷达天线罩结构设计方法的研究进展与展望[J]. 电子机械工程, 2015, 31(6): 1-6.
WANG CH, GU Y Q, WANG CH. Review and prospect of design methods of antenna radome structure[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2015, 31(6): 1-6.
- [3] 向天意, 李端, 李俊生, 等. 高温电磁透波材料的研究进展[J]. 材料学报, 2023, 37(18): 1-11.
XIANG T Y, LI D, LI J SH, et al. Research progress of high temperature resistant electromagnetic wave-transparent materials[J]. Materials Reports, 2023, 37(18): 1-11.
- [4] 赵鸿燕, 周丽. 国外高功率微波武器发展研究[J]. 航空兵器, 2023, 30(4): 42-48.
ZHAO H Y, ZHOU L. Research on the development of high-power microwave weapon abroad[J]. Aero Weaponry, 2023, 30(4): 42-48.
- [5] 张进华, 马广玲, 缪建文. 探地雷达在地下管线探测中的应用[J]. 现代雷达, 2004, 26(8): 8-10.
ZHANG J H, MA G L, MIU J W. Application of ground penetrating radar in detecting of underground pipelines[J]. Modern Radar, 2004, 26(8): 8-10.
- [6] 郑俊娟, 孙刚. 嵌入电介质小球的金属薄片的电磁波透射特性[J]. 物理学报, 2010, 59(6): 4008-4013.
ZHENG J J, SUN G. Transmission properties of the system of dielectric spheres periodically mounted in a metal slab[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(6): 4008-4013.
- [7] 朱永明, 杨春霞, 吴东. 夹层结构天线罩的低成本制造工艺[J]. 复合材料科学与工程, 2020(5): 90-94.
ZHU Y M, YANG CH X, WU D. Low cost manufacturing technology of radome[J]. Composites Structure and Engineering, 2020(5): 90-94.
- [8] 王勇, 田庆. 新型碳纤维材料车体电磁屏蔽效能仿真与实测[J]. 安全与电磁兼容, 2022(3): 41-44.
WANG Y, TIAN Q. Simulation and measurement of electromagnetic shielding effectiveness of new carbon fiber vehicle body[J]. Safety & EMC, 2022(3): 41-44.
- [9] 张轶群, 王超, 孙荣庆. 碳纤维杂质对天线罩性能的影响分析[J]. 现代雷达, 2024, 46(4): 48-53.
ZHANG Y Q, WANG CH, SUN R Q. Analysis of the influence of carbon fiber impurities on the performance of radome [J]. Modern Radar, 2024, 46(4): 48-53.
- [10] 詹凯, 陈昕, 李杰, 等. 超声无损检测中基于分段长码技术的多重回波检测[J]. 电子测量技术, 2016, 39(12): 76-80.
ZHAN K, CHEN X, LI J, et al. Multiple echoes distinguishing using segmented long code technology in ultrasonic nondestructive detection [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(12): 76-80.
- [11] 王超, 高鹏. 基于 GMR 的电磁无损检测研究[J]. 电子测量与仪器学报. 2015, 29(6): 783-792.
WANG CH, GAO P. Study of GMR based electromagnetic nondestructive testing[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(6): 783-792.
- [12] 梁远远, 杨生胜, 文轩, 等. 脉冲涡流无损检测中缺陷定量技术的研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 70-78.
LIANG Y Y, YANG SH SH, WEN X, et al. Research on the quantification of defect in the nondestructive testing of pulse eddy current [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 70-78.
- [13] 梁恒亮, 舒卫国, 陈静, 等. 石英/氰酸酯玻璃钢复合材料的介电性能研究[J]. 航空制造技术, 2009(S1): 122-125.
LIANG H L, SHU W G, CHEN J, et al. Study on dielectric property of Quartz/CE GFRP [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(S1): 122-125.
- [14] 于海宁, 高长星, 王大伟. 石英纤维/氰酸酯预浸料力学性能及介电性能研究[J]. 合成纤维, 2018, 47(11): 45-46.
YU H N, GAO CH X, WANG D W. Study on mechanical and dielectric properties of quartz Fiber/Cyanate Prepreg [J]. Composite Materials, 2018, 47(11): 45-46.
- [15] 韩朝锋. 碳纤维复合材料电导特性和力电耦合行为研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(6): 3136-3152.
HAN CH F. Research progress on electrical property and electromechanical coupling behaviors of carbon fiber composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(6): 3136-3152.

作者简介

王晨(通信作者), 高级工程师, 主要研究方向为雷达天线阵面结构设计。

E-mail: wangchen1085@163.com

王超, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为雷达天线阵面结构设计。

孙荣庆, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为树脂基复合材料工艺研究。