

双马来酰亚胺/E-玻璃布 复合材料的研制

陈立新 孙曼灵 周希真 郑水蓉

(西北工业大学化工系, 西安 710072)

摘要: 研究了用于雷达罩的改性双马来酰亚胺(BMI)/E-玻璃布复合材料板的介电性能、温度对材料力学性能的影响以及耐热性能, 并采用波导法测定了改性 BMI/E-玻璃布复合材料雷达罩的透波率。结果表明, 这种材料能够满足雷达罩的介电性和耐热性要求。

关键词: 雷达罩; 介电性; 耐热性; 透波率

中图分类号: TV 254. 2 文献标识码: A 文章编号: 1005-5053(1999)03-0057-06

高载荷、高飞行速度战术导弹的发展, 使毫米波导弹雷达系统越来越受到重视。飞机外悬式导弹雷达要遇到激烈变化的天气条件, 即在高速飞行时, 由于气动加热在雷达上产生的表面温度很高。在飞行环境中, 还会受到雨滴的冲击等, 这些都会影响雷达的正常工作。因此, 必须在雷达系统的外面加保护的整流罩^[1]。

用作导弹雷达罩的材料通常分为 2 类, 一类为无机材料, 如氧化铝、二氧化硅、玻璃陶瓷、氮化硅、氮化硼等; 另一类为耐热树脂基纤维复合材料, 所用的耐热树脂有有机硅、酚醛、聚酰亚胺、聚苯硫醚、聚醚砜、聚苯并咪唑等。所用的纤维主要有 E-玻璃、S-玻璃、D-玻璃、高硅氧玻璃、石英玻璃纤维等。上述材料, 无论是无机还是有机材料, 国外在制备雷达罩时都有应用(有的正处于研制阶段)。国产地面及机载雷达罩都采用 E-玻璃纤维复合材料, 还有用微晶玻璃及 Al₂O₃ 陶瓷的。无机材料在厘米波范围内能满足雷达罩电气性能的要求, 使用性能良好。但对毫米波段, 则显示较大的缺点(如强度低、壁较厚等)。在毫米波范围内, 多选用耐热树脂基复合材料。

雷达罩要求的材料强度、刚度如表 1 所示。

表 1 室温下的动态力学性能, MPa

Table 1 Static dynamic properties at room temperature, MPa

Tensile strength	Compressive strength	Bending strength
300	280	300

收稿日期: 1998-12-05; 修订日期: 1999-03-15

作者简介: 陈立新(1966-), 女, 硕士

在考察了用于毫米波雷达罩各种材料的综合性能后,我们选用了改性 BMI/E-玻璃布复合材料作为雷达罩材料,对复合材料板的介电性能、力学性能、耐热性能进行了研究,并测试了雷达罩的透波率。本文介绍了改性 BMI/E-玻璃布复合材料在高频透波范围的应用,对毫米波雷达罩的选材具有一定的参考价值。

1 实验

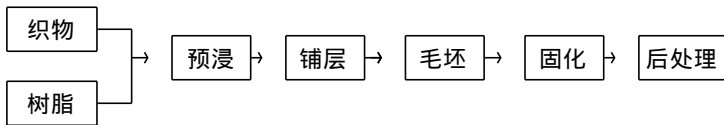
1.1 原材料

改性 BMI 树脂,西北工业大学研制。

EW160-90,斜纹玻璃布,厚 0.174mm, KH-550 处理,南京玻纤院生产。

EW60,平纹玻璃布,厚 0.060mm, KH-550 处理,陕西玻纤院生产。

1.2 复合材料的制备及固化工艺



100 / 0.5h 130 / 0.5h 150 / 2h 180 / 2h。

压力: 0.07MPa。

后处理: 220 ~ 230 / 6h。

1.3 测试方法^[2]

1.3.1 介电性能

复合材料板的介电常数及介电损耗角正切,雷达罩的透波率均采用波导法进行测试,试件尺寸为 7.11mm × 3.55mm × (4 ± 0.05)mm,中国计量科学研究院测定。

1.3.2 室温力学性能

拉伸强度: GB 1446-83。

弯曲强度: GB 1449-83。

层剪强度: GB 3357-82。

1.3.3 耐热性

热变形温度: 参照 GB 1634-76。

2 结果与讨论

2.1 改性 BMI/E-玻璃布复合材料的介电性能

复合材料的电性能是由基体材料和增强材料的电性能决定的。并受到树脂含量、溶剂挥发、固化程度及孔隙等因素的影响。表 2 给出了改性 BMI/E-玻璃布复合材料的电性能参数。

表2 改性BMI/E-玻璃布复合材料的电性能, $f = 35.0\text{GHz}$ Table 2 Electric property of modified BMI/E-glass cloth composite, $f = 35.0\text{GHz}$

Property Sample	$W_m\%$	$V_f\%$	$V_v\%$	ϵ_c	$\text{tg}\delta \times 10^{-2}$
1	29.8	54.1	1.0	4.32	1.40
2	35.7	47.4	3.2	4.04	1.44
3	38.6	44.3	4.9	3.88	1.46

从表2的结果看出,介电常数随树脂含量的增大而降低,介电损耗随树脂含量的增大而升高。这是因为E-玻璃的介电常数比树脂的高(分别为6.13和2.81),而介电损耗比树脂的低(分别为0.0039和0.0104)。

一般说来,复合材料的介电常数与基体和增强材料的介电常数的关系遵循经验式:

$$\ln \epsilon_c = V_f \ln \epsilon_f + V_m \ln \epsilon_m + V_v \ln \epsilon_v$$

假定 $\epsilon_c = 1.0$,可以算出理论 ϵ_c 。如果考虑到其他因素, ϵ_c 可能不为1.0,用经验式计算可得到测量的 ϵ_c ,计算结果如表3。

表3 由经验式计算得到的改性BMI/E-玻璃布复合材料的电性能, $f = 35.0\text{GHz}$ Table 3 Calculating electric property of modified BMI/E-glass cloth composite, $f = 35.0\text{GHz}$

Property $W_m\%$	Measuring ϵ_c	Calculating ϵ_c	Calculating ϵ_c / measuring ϵ_c	Calculating ϵ_c
29.8	4.32	4.30	99.5%	1.43
35.7	4.04	3.99	98.7%	1.52
38.6	3.88	3.82	98.4%	1.37

从表3中看到,假定孔隙 $\epsilon_c = 1.0$,计算出的复合材料介电常数 ϵ_c 与实测值相差不大。这说明复合材料的介电常数是遵循经验式所反映的规律。同样,根据经验式也可以算出孔隙的介电常数 ϵ_c 。从表3中可以看到, ϵ_c 并不为1.0,而是比1.0大。这主要因为孔隙中含有丙酮等挥发份,以及铺层时卷入了微尘杂质。这些都会影响实际测得的 ϵ_c ,使得按经验式算出的 ϵ_c 不为1.0。同时,微尘杂质会大大增加材料的介电损耗。

2.2 改性 BMI/E-玻璃布复合材料的力学性能

改性 BMI/E-玻璃布复合材料的力学性能示于表 4。对比表 1 和表 4 可以看出,该复合材料的力学性能基本上符合雷达对天线罩材料的力学性能要求。

表 4 改性 BMI/E-玻璃布复合材料的力学性能

Table 4 Dynamic property of modified BMI/E-glass cloth composite

Property/MPa	Room temperature	230	250
Tensile strength	334		
Compressive strength	332		
Bending strength	502	348	332
Shearing strength	42.2	31.0	19.4

2.3 改性 BMI/E-玻璃布复合材料的耐热性

图 1 为改性 BMI/E-玻璃布复合材料的温度-形变曲线。从图 1 看到,在 156 以前,弯曲挠度很小,仅为 0.01mm。这说明在 156 以前刚度变化很小,长期使用过程中性能变化不大。当温度超过 160 以后,弯曲挠度增大;180 时的弯曲挠度为 0.019mm;296 时,弯曲挠度为 0.123mm。即使如此,与 GB 1634-76 中规定热变形温度时的挠度值 0.21mm 仍有很大余量。说明改性 BMI/E-玻璃布复合材料的热变形温度很高,适合作为耐高温材料。

2.4 8mm 波雷达天线罩的铺层设计和工艺控制

天线罩为尖锥双曲面形。高约 500mm,底部直径约 200mm,尖锥角为 30°;是典型的流线型天线罩。入射角对其介电性能影响很大。经计算,当天线转角在 0°~±46° 范围内变动时,电磁波在罩壁各点入射角的变化为 30°~77° (图 2)^[3]。

图 2 中横坐标是雷达罩轴向位置坐标,纵坐标是入射角。曲线 1 为天线罩的外形轮廓线。曲线 2 和 3 分别为按天线边缘处射线确定的 X 坐标处罩壁上各点的最大和最小入射角。曲线 4 是按天线中心位置处射线确定的 X 坐标处罩壁上各点的入射角。其变化范围为

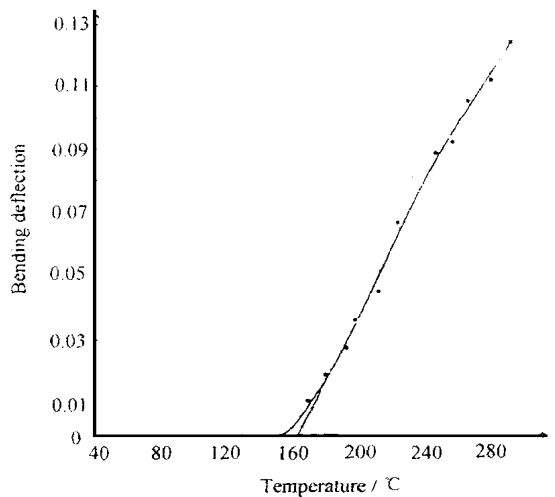


图 1 改性 BMI/E-玻璃布复合材料弯曲挠度与温度的关系

Fig. 1 The relation of modified BMI/E-glass cloth composite bending deflection to temperature

45 ~ 65 °: 天线中心位置处射线方向是天线功率最大的方向。曲线 5 是天线转角 $\alpha = 0$ 时确定的罩壁相应各点的入射角, 此时在沿 $X = 0 \sim 220\text{mm}$ 范围内的入射角变化范围是 65 ~ 77 °。根据材料介电常数和介电损耗角正切, 按透波率 $|T|^2 = 0.80$ (为了从严要求, 把 $|T|^2$ 从要求的 0.75 提高到 0.80) 进行天线罩电气设计, 雷达罩的最佳厚度采用修正半波长的整数倍, 按下列公式计算:

$$d = \frac{1}{2} N \frac{\lambda_0}{\epsilon' \epsilon_0 - \sin^2 \theta}$$

厚度公差按下列公式计算:

$$|R|^2 = [(\epsilon' \epsilon_0 - 1) \pi \frac{\Delta d}{\lambda_0}]^2$$

铺层按下列公式计算:

$$d = \frac{nP^{[4,5]}}{\epsilon_r V_f}$$

计算结果要求壁厚自顶部至底部由 2.45mm 至 2.20mm 递减, 壁厚允许公差为 $\pm 0.03\text{mm}$ 。雷达罩采用在凸模上湿法手糊成型, 在铺层过程中严格控制树脂含量、溶剂挥发等问题, 并采用了逐渐过渡和接缝错开、对接的铺层方法。在固化成型后, 对表面进行打磨, 涂保护层, 以保证最佳壁厚。

2.5 天线罩的性能

在 35GHz 条件下测试天线罩的透波率时采用了最苛刻的条件, 即天线转角 $\alpha = 0$ 时的情况。考虑到复合材料的分散性, 测试时将天线罩围绕 X 轴旋转 $0^\circ, \frac{\pi}{2}, \pi$ 及 $\frac{3}{2}\pi$ 四个位置, 分别测量透波率(表 5)。从表 5 中可以看到, 在入射角范围很宽(30 ~ 77 °)的情况下, 天线罩具有较好的透波率, 大于 0.75 的规定指标。

表 5 天线罩的透波率, $f = 35.0\text{GHz}, \alpha = 0^\circ$

Table 5 Wave penetrating ratio of radome, $f = 35.0\text{GHz}, \alpha = 0^\circ$

Position	Number		Number	
	1# Radome	2# Radome	1# Radome	2# Radome
0 °	0.88	0.89	0.82	0.82
$\frac{1}{2}\pi$	0.82	0.84	0.83	0.85
π	0.79	0.79	0.87	0.87
$\frac{3}{2}\pi$	0.86	0.85	0.90	0.90
Average	0.84		0.86	

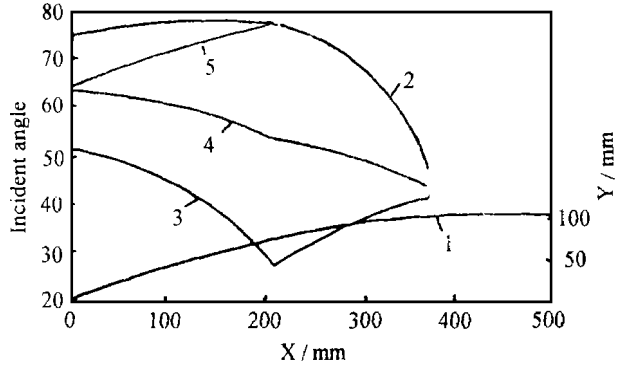


图 2 电磁波在罩壁上的入射角

Fig. 2 Incident angle of electromagnetic wave on radome

3 结 论

(1) 改性 BMI/E-玻璃布复合材料能满足毫米波雷达罩对介电性能、耐热性能和力学性能的要求。

(2) 采用湿法铺层、真空成型、烘箱加热方法制造的改性 BMI/E-玻璃布复合材料雷达天线罩, 平均功率传输系数 $|T|^2 > 80\%$ ($f = 35.0\text{GHz}$), 达到了设计指标。

参考文献:

- [1] 盛磊. 用于微米波雷达罩的材料选择. 运载火箭与返回技术, 1986, 7(1): 31 ~ 39
- [2] 欧阳国思, 欧国荣. 复合材料试验技术. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1993, 107 ~ 117
- [3] 唐邦铭. 毫米波复合材料天线罩的研究: [硕士论文]. 西安: 西北工业大学, 1990
- [4] SCHLIEBEN ERNEST W. Radomes and aircraft design. Aeroautical Engineering Review, 1952, 11 (5): 961 ~ 981
- [5] 伍必兴, 栗成金. 聚合物基复合材料. 北京: 航空工业部教材编审室, 1986, 262 ~ 267

Study on BMI/E-glass cloth composite

CHEN Li-xin SUN Man-ling ZHOU Xi-zhen ZHENG Shui-rong

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: With the development of high load and flying speed tactical missile radar, the materials for radome are required to satisfy the demands, such as electric property, thermal property and dynamic property, etc. Therefore, this paper studied the dielectric property, the effect of temperature on dynamic property and the resistance to heat of modified BMI/E-glass cloth composite. Wave penetrating ratio of the radome material was tested by wave guide method. The result shows that the composite can meet the demands of radome because it has enough mechanical strength, good resistance to heat and good dielectric property.

Key words: radome; dielectric property; resistance to heat; wave penetrating ratio