

文章编号: 1000-3851(2012)02-0046-07

# 湿热环境对 PMI 泡沫夹芯复合材料性能的影响

董安琪, 段跃新\*, 肇 研, 蔡吉喆

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 采用聚甲基丙烯酸酰胺(PMI)泡沫、碳纤维增强环氧树脂(EW220/5258)复合材料面板制备了 PMI 泡沫夹芯复合材料, 研究了 PMI 泡沫夹芯复合材料、EW220/5258 复合材料面板及 PMI 泡沫芯材的吸湿特性, 并讨论了湿热对 PMI 泡沫夹芯复合材料的压缩性能及介电性能的影响。结果发现: PMI 泡沫夹芯复合材料的饱和吸湿时间为 96 h, 饱和吸湿率为 1.7%, EW220/5258 复合材料面板会对 PMI 泡沫芯材起到一定的保护作用, 阻止水汽进入泡沫, 提高 PMI 泡沫夹芯复合材料的耐湿热性; 由于水分子的增塑作用, 湿热处理后 PMI 泡沫夹芯复合材料的压缩强度有所下降, 强度保持率约为 65.87%, 湿热处理初期对其影响较大; 湿热处理后, 在 7~18 GHz 的测试范围内, PMI 泡沫夹芯复合材料的损耗角正切从 0.008 上升到 0.012, 介电常数几乎不变。

**关键词:** PMI 泡沫; 夹芯复合材料; 湿热; 压缩性能; 介电性能

**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A

## Effects of hydrothermal condition on properties of polymethacrylimide (PMI) foam cored sandwich structure

DONG Anqi, DUAN Yuexin\*, ZHAO Yan, CAI Jizhe

(School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The polymethacrylimide (PMI) foam cored sandwich structure was prepared by using PMI foam, carbon fiber/epoxy resin(EW220/5258) composites panel. The absorption curves of PMI foam cored sandwich structure, EW220/5258 composite panel and PMI foam were investigated, and the effect of the hydrothermal condition on the compressive and dielectric properties of the PMI foam cored sandwich structure was also determined. The results indicate that the saturated hygroscopic time of the PMI foam cored sandwich structure is 96 hours and its absorption ratio is 1.7%, the EW220/5258 composite panel can protect its PMI foam from water to improve its hydrothermal resistance. Due to the plasticization of water, the compressive strength of the PMI foam cored sandwich structure decreases in hydrothermal environment with the retention ratio of 65.87%. Additionally, the initial stage has more influences on the properties than other stages of hydrothermal treatment. After hydrothermal treatment, the loss tangent of the PMI foam cored sandwich structure increases from 0.008 to 0.012 within the range of 7~18 GHz, while the dielectric constant is almost unchanged.

**Keywords:** PMI foam; sandwich structure; hydrothermal condition; compressive property; dielectric property

自 21 世纪初, 随着科技的发展, 夹芯结构复合材料以其具备的一系列优点而备受航空、航天界的关注, 成为航空、航天发展必不可少的材料之一, 如: 机载雷达天线罩所用的主体材料通常是玻璃纤维/树脂复合材料, 夹芯材料通常采用 Nomex 蜂窝、复合泡沫等<sup>[1-3]</sup>。其中, 聚甲基丙烯酸酰胺 (PMI) 泡沫在所有泡沫材料中比强度和比刚度最

高, 其在高温下的耐蠕变性能使其能够承受 190 °C 的固化工艺温度, 因此 PMI 泡沫夹芯材料在航空航天领域得到广泛的应用<sup>[4-5]</sup>。

夹芯复合材料在不同的环境下使用时, 性能会受到很大影响。很多研究者对夹芯复合材料的耐湿热性能进行了研究<sup>[6-11]</sup>, 并提出进行夹芯复合材料湿热性能的研究有很大的意义<sup>[12]</sup>。同时, Gupta

收到初稿日期: 2011-03-03; 收到修改稿日期: 2011-06-13; 网络出版时间: 2011-11-16 10:41:08

网络出版地址: [www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20111116.1041.009.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20111116.1041.009.html)

DOI: CNKI;11-1801/TB.20111116.1041.009

通讯作者: 段跃新, 高级工程师, 主要研究方向为树脂基复合材料成型工艺 E-mail: duanyuexin@126.com

等<sup>[13]</sup>的研究结果表明复合泡沫塑料与传统芯材相比具有更好的耐环境性。

除此之外,夹芯复合材料应用于透波结构,如雷达天线罩时,其介电常数与介电损耗角正切是决定其能否正常工作的关键性能,而湿热环境下夹芯复合材料的介电和力学性能也会有所变化,这就使得研究夹芯复合材料力学及介电性能的耐湿热性具有很强的实际意义。

本文作者采用PMI泡沫、碳纤维增强环氧树脂(EW220/5258)复合材料面板制备了PMI泡沫夹芯EW220/5258复合材料,研究了PMI泡沫夹芯EW220/5258复合材料、EW220/5258面板及PMI泡沫芯材的吸湿特性,以及湿热处理后面板、芯材及PMI泡沫夹芯复合材料的介电性能变化,同时测试了PMI泡沫夹芯复合材料干态及湿态的压缩性能。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验采用甲基丙烯酰亚胺(PMI)泡沫、碳纤维增强环氧树脂(EW220/5258)复合材料面板制备了PMI泡沫夹芯复合材料,厚度为5 mm。其中,EW220/5258复合材料面板的纤维体积分数约为32%,由北京航空材料研究院提供;芯材为Rohacell IG51 PMI泡沫,由德国德固赛公司生产。

### 1.2 试样处理及测试

湿热处理:湿热处理根据ASTM D5229/5229M标准进行,PMI泡沫夹芯复合材料试样尺寸为10 cm×10 cm,实验温度为70℃,湿度为85%RH。实验中,每24 h将试样取出称重,取5个试样进行测试,结果取其平均值。为防止水汽由试样侧面进入内部而对实验结果造成影响,对试样进行封边处理。试样的平均吸湿量计算公式如下:

$$M = \frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $W_i$ 为试样吸湿后的质量(g); $W_0$ 为试样干态时的质量(g)。

压缩性能测试:对PMI泡沫夹芯复合材料试样进行504 h的湿热处理后,根据标准ASTM C365/C365M-05测试湿热处理前后的PMI泡沫夹芯复合材料试样压缩性能,实验结果取5个试样的平均值,并计算标准差。

介电性能测试:对干态及经过336 h湿热处理

的PMI泡沫夹芯复合材料试样、EW220/5258复合材料面板及PMI泡沫芯材的介电常数 $\epsilon_r$ 和损耗角正切 $\tan\delta$ 进行了测试。试样为直径61 mm的圆形试样,测试仪器为8722ES型矢量网络分析仪,测试频率为7~18 GHz,温度为20℃。

## 2 结果与讨论

### 2.1 吸湿特性

图1是实验温度70℃,湿度85%RH时,EW220/5258复合材料面板、PMI泡沫芯材和PMI泡沫夹芯复合材料的吸湿增重率随时间变化的曲线。

由图1(a)可以看出在湿热处理的初始阶段,EW220/5258复合材料面板的吸湿量快速增加,在湿热处理48 h后,吸湿增重率达到了2.5%。随着湿热处理时间的延长,面板的吸湿增重率不再出现明显的变化,说明材料的吸湿已经达到饱和状态<sup>[14-15]</sup>,饱和吸湿率为2.5%。这是由于环氧树脂在固化后为致密的交联聚合物,只存在很少的羟基等亲水基团,而且固化后的树脂与纤维的界面结合紧密,因此EW220/5258复合材料面板的饱和吸湿率比较低<sup>[16]</sup>。

由图1(b)可以看出,PMI泡沫芯材在48 h湿热处理后,吸湿增重率达到了5%,随着处理时间的延长,吸湿增重率不再出现明显变化,饱和吸湿率为6.0%。同时,由图1(c)可以看出,PMI泡沫夹芯复合材料在湿热处理96 h后,达到吸湿平衡状态,饱和吸湿率为1.7%。

PMI泡沫为固体发泡,泡沫间隙基本一致,为均匀的100%闭孔泡沫,不与水汽发生反应。吸湿机制是水分子扩散进入泡沫中的空隙,在分子链中占据一定的空间,一部分水分子会和分子链中基团形成物理键——范德华力。吸湿后,分子链加宽,体积增大,其作用类似于共聚物中加入增塑剂,最终导致泡沫芯材变软,强度降低<sup>[17]</sup>。PMI泡沫内部空隙少,所以有利于PMI泡沫夹芯复合材料的耐湿热性。与文献[18]中的Nomex/环氧树脂夹层材料的吸湿性能相比,该PMI泡沫夹芯复合材料的饱和吸湿率低于蜂窝夹层复合材料,达到饱和和吸湿的时间较长,具有更好的耐湿热性能。

表1为PMI泡沫夹芯复合材料及其EW220/5258复合材料面板、PMI泡沫芯材的吸湿特性的对比。可以看出,面板与芯材的饱和吸湿率高于

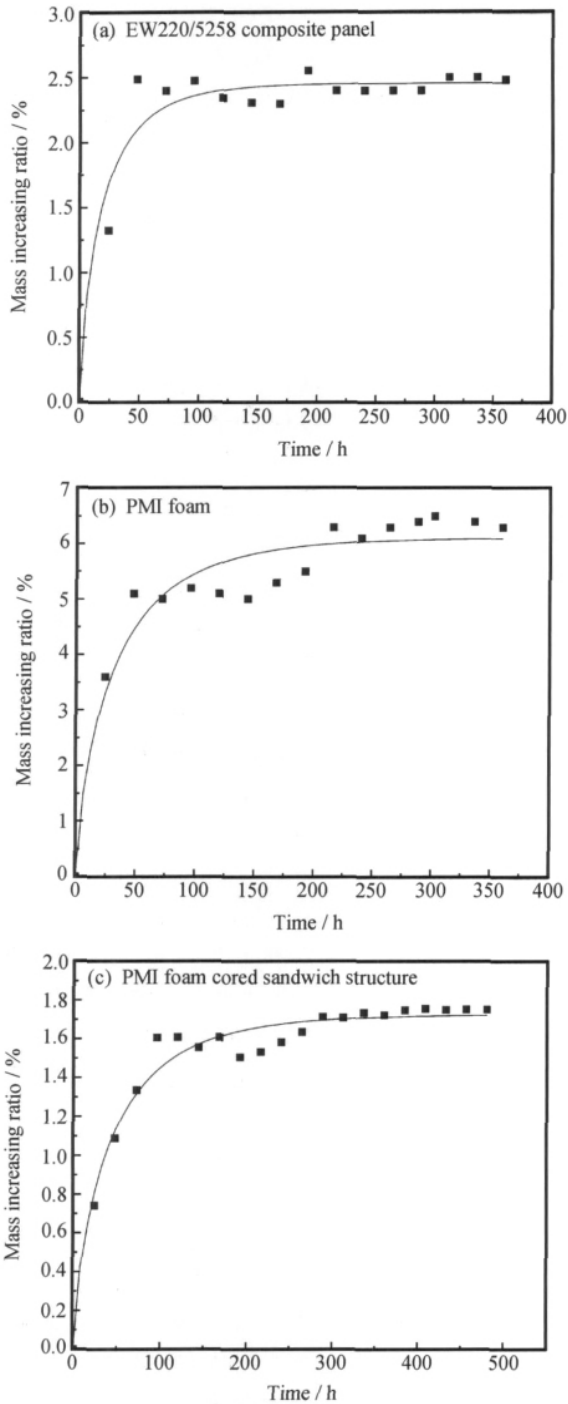


图1 温度 70 °C 湿度 85%RH 的湿热处理条件下 PMI 泡沫夹芯复合材料及 EW220/5258 复合材料面板、PMI 泡沫芯材的吸湿增量率随时间变化的曲线  
Fig.1 Moisture content curves of the PMI foam cored sandwich structure, EW220/5258 composite panel and PMI foam under 70 °C, 85%RH

PMI 泡沫夹芯复合材料整体的饱和吸湿率，这是因为湿热处理时，大部分水汽仍以水分子的形态存在

表 1 PMI 泡沫夹芯复合材料及其 EW220/5258 复合材料面板、PMI 泡沫芯材的吸湿特性  
Table 1 Hygroscopic properties of the PMI foam cored sandwich structure, EW220/5258 composite panel and PMI foam

Property	Sandwich structure	Panel	Foam
Saturated adsorbing ratio/%	1.7	2.5	6.0
Saturated hygroscopic time/h	96	48	48

于面板中，渗透到芯层的较少。Katzman 等<sup>[19]</sup>通过对泡沫夹芯复合材料湿热性能的研究，得出面板的作用是阻止水汽进入泡沫这一结论。文献<sup>[18]</sup>也表明，在夹芯复合材料中，面板会对芯材起到一定的保护作用，阻止水汽进入芯材。同时，也有文献<sup>[20]</sup>指出，夹层复合材料的芯材吸湿量与其所处环境的相对湿度有很大关系。在本实验中，由于 PMI 泡沫芯材一直处于面板的保护下，其所处的湿热环境达不到 85%RH，而面板和芯材单独测定饱和吸湿率时不存在这种情况。而且 PMI 泡沫夹芯复合材料整体测试时，上下共有两块面板，每块面板只有一面吸湿，吸湿量为面板单独测试时的一半，因此 PMI 泡沫夹芯复合材料整体的饱和吸湿率为单块面板的饱和量与芯材吸湿量的和除以夹芯复合材料的整体质量，其中的芯材吸湿量比芯材单独测试要小，如图 2 所示，其中  $M_0$  代表单块面板的饱和吸湿量， $M_1$  代表 PMI 泡沫芯材的饱和吸湿量， $M_2$  代表 PMI 泡沫夹芯复合材料中芯材的饱和吸湿量。因此，PMI 泡沫夹芯复合材料整体的饱和

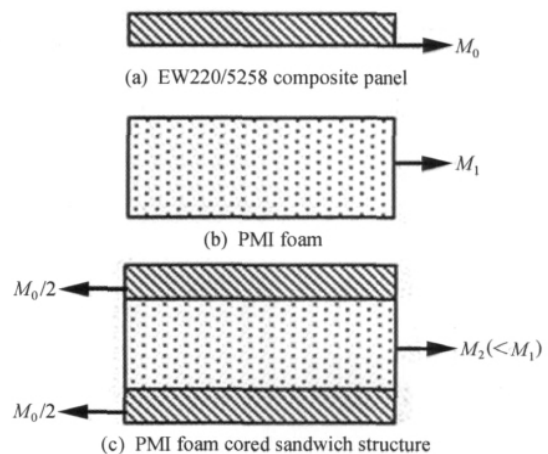


图 2 PMI 泡沫夹芯复合材料、EW220/5258 复合材料面板、PMI 泡沫芯材的吸湿过程示意图  
Fig.2 Moisture absorbing process of the PMI foam cored sandwich structure, EW220/5258 composite panel and PMI foam

吸湿率比较低, 其饱和吸湿过程并不是面板与芯材吸湿过程的简单加合。

## 2.2 压缩性能

表 2 为 5 个 PMI 泡沫夹芯复合材料试样干态和湿热处理后压缩强度。所测得压缩实验结果主要体现的是 PMI 泡沫芯材的压缩强度。可以看出, 湿热环境中 PMI 泡沫芯材的压缩强度有所下降, 其压缩强度保持率约为 65.87%。这是由于在湿热环境中, 水汽虽然不会与 PMI 泡沫中的酰亚胺基团反应<sup>[17]</sup>, 但是水汽会进入 PMI 泡沫的空隙中, 与泡沫之间形成一定的范德华力, 起到增塑剂的作用, 使得材料逐渐变软, 强度降低。吸湿还可能造成 PMI 泡沫夹芯复合材料的面板与芯材脱粘, 使其压缩强度降低<sup>[21]</sup>。因此, PMI 泡沫夹芯复合材料在高温下使用前, 需根据其中的含水率, 在高温下(120 °C)干燥, 消除水分子的塑化作用, 提高抗压蠕变性能。

从表 2 还可以看出, 在湿热处理后的前 4 天, PMI 泡沫夹芯复合材料的压缩强度下降较快, 而在 4 天后没有明显变化, 可见, 湿热处理的初期对 PMI 泡沫夹芯复合材料的压缩性能影响较大。

表 2 PMI 泡沫夹芯复合材料试样湿热处理前后的压缩强度

Table 2 Compressive strength of PMI foam cored sandwich structure under dry and wet condition MPa

Sample	Days of hydrothermal treatment				
	0	4	7	14	21
1#	0.74	0.53	0.53	0.52	0.57
2#	0.86	0.53	0.53	0.55	0.54
3#	0.81	0.51	0.53	0.57	0.49
4#	0.89	0.53	0.54	0.55	0.53
5#	0.84	0.54	0.54	0.55	0.53
Average	0.83	0.53	0.53	0.55	0.53

古尼耶夫<sup>[22-23]</sup>等人认为聚合物基复合材料在湿热老化过程中的可逆与不可逆的性能变化对材料的性能有着正面影响的同时, 也有负面影响。对于在无负荷条件下暴露于湿热环境中的热固性复合材料, 假设其增强过程和损伤过程是相互独立的, 则不可逆所造成的强度变化为

$$S = S_0 + \eta[1 - \exp(-\lambda t)] - \beta \ln(1 + \theta t) \quad (2)$$

式中:  $\eta$  为材料参数, 反映材料的固化程度;  $\lambda$  为材料和外部环境参数, 反映强化速率特征;  $\beta$  为材料参数, 反映材料抵抗裂纹扩展的能力;  $\theta$  为反映环

境外部侵蚀性的参数;  $S$  为复合材料老化时间后的强度值;  $S_0$  为复合材料的初始强度值。

将表 2 中干态和湿热处理 4 天、7 天和 14 天的 PMI 泡沫夹芯复合材料的压缩数据平均值代入公式(2)进行拟合, 得到拟合公式:

$$S = S_0 + 0.06024[1 - \exp(-0.10090t)] - 0.02019 \ln(1 + 1884210t) \quad (3)$$

令  $t=21$ , 代入公式(3)可以算出湿热处理 21 天后的 PMI 泡沫夹芯复合材料试样的平均压缩强度为  $S = 0.5287$  MPa, 与实验中所测的实际平均压缩强度基本一致。图 3 为 PMI 泡沫夹芯复合材料的压缩强度拟合曲线。可以看出, 对 PMI 泡沫夹芯复合材料压缩强度数据的拟合比较好, 5 个实验数据点基本均位于拟合曲线上, 压缩强度的变化规律能够很好地符合古尼耶夫公式, 从而验证了本文中所测的压缩强度数据随湿热处理时间变化规律的正确性。

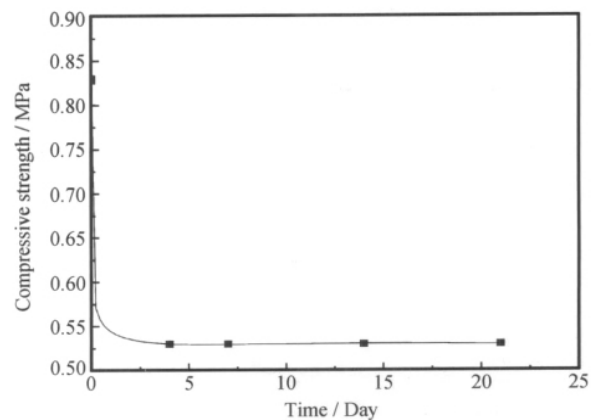


图 3 PMI 泡沫夹芯复合材料压缩强度的拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of the compressive strength of PMI foam cored sandwich structure

近年来为了提高泡沫夹芯复合材料的力学性能, 出现了新的工艺方法<sup>[21]</sup>。一是利用 Z 向纤维增强夹芯复合材料, 包括穿刺法和缝合法。其中, 穿刺法是将与面板增强纤维相同的短纤维植入泡沫芯材, 在夹芯复合材料成型过程中, 树脂流入芯材孔隙并浸渍短纤维, 使其固化成复合材料柱体, 起到连接面板和芯材的作用。二是利用 Z 向销钉增强夹芯复合材料, 可以有效提高夹芯复合材料的压缩和剪切性能<sup>[24]</sup>。

## 2.3 介电性能

PMI 泡沫夹芯复合材料用于雷达天线罩时, 要

保证在使用过程中不对电磁波产生较大的损耗作用。材料的损耗角正切愈大，电磁波能量在透过雷达天线罩过程中转变为热量而损耗掉的能量便愈多；介电常数越大，电磁波在空气与天线罩罩壁介质界面上的反射便越大，这将增大镜像波瓣电平并降低传输效率，所以要求雷达天线罩材料的损耗正切接近于零，介电常数尽量低。

图 4 是湿热处理前后 PMI 泡沫夹芯复合材料、

EW220/5258 复合材料面板、PMI 泡沫芯材的介电常数和损耗角正切曲线。由图 4(a)和 4(b)可以看出，干态时，EW220/5258 复合材料面板的  $\tan\delta$  约为 0.012，随频率变化幅度比较小，而  $\epsilon_r$  随着测试频率的增加而降低，平均值为 8.34；湿热处理后，EW220/5258 复合材料面板的介电性能发生了比较大的改变， $\tan\delta$  约为 0.090， $\epsilon_r$  的平均值约为 12.90。这些变化会使面板在 PMI 泡沫夹芯复合材

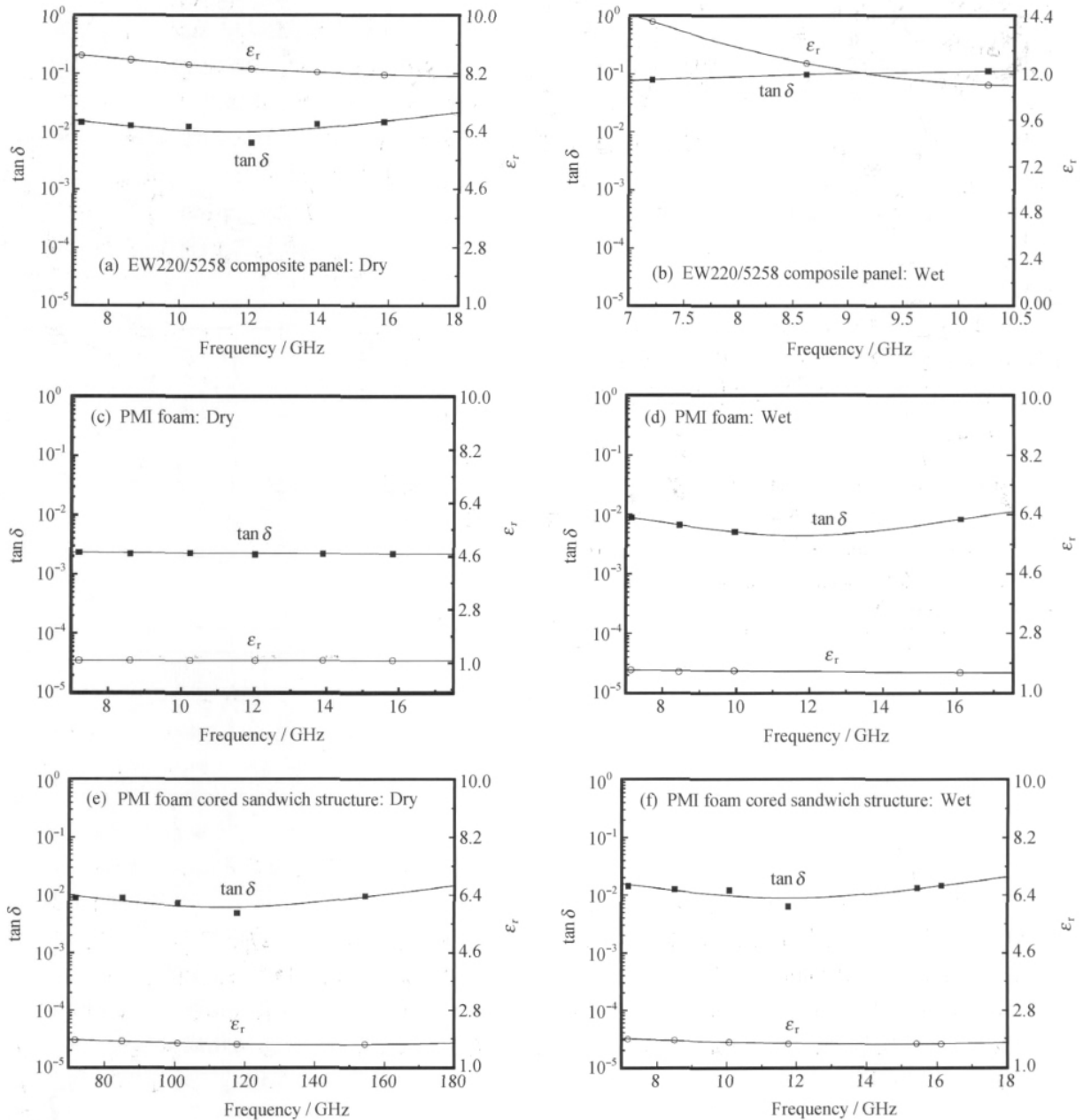


图 4 湿热处理前后 PMI 泡沫夹芯复合材料、EW220/5258 复合材料面板、PMI 泡沫芯材的介电常数和损耗角正切曲线

Fig. 4 Dielectric constant and loss tangent of PMI foam cored sandwich structure, EW220/5258 composite panel and PMI foam under dry and wet condition

料中阻碍电磁波的透过,影响整个 PMI 泡沫夹芯复合材料的介电性能。由图 4(c)和 4(d)可见,干态时,在 7~18 GHz 的频率范围内,PMI 泡沫芯材的介电性能几乎没有变化, $\tan\delta$  的值约为 0.002,接近于零, $\epsilon_r$  的值约为 1.08,维持在一个较低的数值,说明 PMI 泡沫具有较好的介电性能,实际使用时,可以尽可能多的减少对电磁波的损耗。相关文献<sup>[21]</sup>表明在 2.0~26.5 GHz 的频率范围内,PMI 泡沫材料表现出低的、稳定的介电常数和低的损耗角正切值,这意味着它是一种适合宽频域应用的高性能透波材料,适用于制造发射和传输电磁波的结构。湿热处理后,PMI 泡沫芯材的介电性能产生了一定变化, $\tan\delta$  增加到 0.007 左右,在较低和较高的频率下增加幅度比较明显, $\epsilon_r$  增加到 1.67,对用于雷达天线罩的 PMI 泡沫夹芯复合材料不利。这是由于湿热处理后,会有水汽存在于 PMI 泡沫内部空隙中,而水的  $\tan\delta$  为 0.55, $\epsilon_r$  为 81,远高于 PMI 泡沫,导致湿热处理后 PMI 泡沫芯材的  $\epsilon_r$  和  $\tan\delta$  均有一定程度的增加,对其介电性能产生一定影响。

由图 4(e)和 4(f)可见,干态时,PMI 泡沫夹芯复合材料在整个测试频段内具有良好的介电性能,其  $\tan\delta$  值约为 0.008,趋近于零, $\epsilon_r$  值约为 1.80,维持在较低的水平;湿热处理后,PMI 泡沫夹芯复合材料的  $\tan\delta$  上升到 0.012,在较高和较低的频率下数值较高,而  $\epsilon_r$  几乎不变,而且在整个测试频率下比较平稳,与文献<sup>[25]</sup>中的 Nomex 蜂窝夹层复合材料相比,PMI 泡沫夹芯复合材料介电性能的耐湿热性更好,可以减少对电磁波的损耗,有利于透波。

对比图 4(a)~4(f)可以看出,与 PMI 泡沫芯材相比,湿热处理后,PMI 泡沫夹芯复合材料的  $\tan\delta$  值虽有一定程度的增加,但是  $\epsilon_r$  值几乎不变,而 PMI 泡沫芯材在经过湿热处理后, $\tan\delta$  和  $\epsilon_r$  值均有一定幅度的提高。根据上文对 PMI 泡沫夹芯复合材料吸湿特性的分析,这是由于湿热处理时,面板可以对芯材起到一定的保护作用,阻止水汽进入 PMI 泡沫,大部分水汽只是吸附在面板中,从而降低了湿热环境对 PMI 泡沫夹芯复合材料整体介电性能的影响。

### 3 结 论

(1) 湿热处理时,PMI 泡沫夹芯复合材料的

EW220/5258 复合材料面板会对 PMI 泡沫芯材起到一定的保护作用,阻止水汽进入泡沫,从而提高 PMI 泡沫夹芯复合材料的耐湿热性。实验结果表明,PMI 泡沫夹芯复合材料的饱和吸湿时间为 96 h,饱和吸湿率为 1.7%。

(2) 由于水分子的增塑作用,湿热环境中 PMI 泡沫夹芯复合材料的压缩强度有所下降,强度保持率约为 65.87%,湿热处理的初期对其压缩强度的影响较大。

(3) 湿热处理后,在 7~18 GHz 的测试范围内,PMI 泡沫夹芯复合材料的损耗角正切从 0.008 上升到 0.012,介电常数几乎不变。

### 参考文献:

- [1] 郭笑坤,殷立新,詹茂盛.低介质损耗雷达罩用复合材料的研究进展[J].高科技纤维与应用,2003,28(6):29-33.  
Guo Xiaokun, Yin Lixin, Zhan Maosheng. Progress in the research of low loss tangent polymer-matrix composites for radomes[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2003, 28(6): 29-33.
- [2] Marie H J, O'meara, et al. D glass - A new low dielectric glass fiber available in the USA [C]// International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings). 1993, 38(2): 1833-1844.
- [3] 郑锡涛,孙 秦,李 野,等.全厚度缝合复合材料泡沫芯夹层结构力学性能研究与损伤容限评定[J].复合材料学报,2006,23(6):29-36.  
Zheng Xitao, Sun Qin, Li Ye, et al. Mechanical behavior and damage tolerance tests of composites through-thickness stitched foam sandwich panels[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(6): 29-36.
- [4] 王兴业.夹层结构复合材料设计原理及其应用[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [5] 高树理,柴孟贤,张明习.透波复合材料研究进展[J].工程塑料应用,2000,28(5):31-35.  
Gao Shuli, Chai Mengxian, Zhang Mingxi. Research development of microwave composite[J]. Engineering Plastics Application, 2000, 28(5): 31-35.
- [6] Seibert H. Applications for PMI foams in aerospace sandwich structures[J]. Reinforced Plastics, 2006, 50(1): 44-48.
- [7] Kishore, Shankar R, Sankaran S. Gradient syntactic foams: Tensile strength, modulus and fractographic features[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 412(1/2): 153-158.
- [8] Borsellino C, Calabrese L, Bella G D. Effect of bonder at skin/core interface on the mechanical performances of sandwich structures used in marine industry [J]. Applied Composite Materials, 2007, 14: 307-323.

- [9] 过梅丽, 肇 研, 谢 令. 航空航天结构复合材料湿热老化机理的研究 [J]. 宇航材料工艺, 2002(4): 51-54.  
Guo Meili, Zhao Yan, Xie Ling. Study on hygrothermal aging mechanisms of aerospace structural composites [J]. Aerospace Materials & Technology, 2002(4): 51-54.
- [10] Bibin J, Reghunadhan Nair C P, Dona M, et al. Foam sandwich composites with cyanate ester based syntactic foam as core and carbon -cyanate ester as skin: Processing and properties [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 110(3): 1366-1374.
- [11] Veazie D R, Robinson K R, Shivakumar K. Effects of the marine environment on the interfacial fracture toughness of PVC core sandwich composites [J]. Composites: Part B, 2004, 35: 461-466.
- [12] Moynot V S, Gimenez N, Sautereau H. Hydrolytic ageing of syntactic foams for thermal insulation in deep water: Degradation mechanisms and water uptake model [J]. Journal of Materials Science, 2006, 41: 4047-4054.
- [13] Gupta N, Woldesenbet E. Hygrothermal studies on syntactic foams and compressive strength determination [J]. Composite Structures, 2003, 61: 311-320.
- [14] 冯 青, 李 敏, 顾轶卓, 等. 不同湿热条件下碳纤维/环氧复合材料湿热性能实验研究 [J]. 复合材料学报, 2010, 27(6): 16-20.  
Feng Qing, Li Min, Gu Yizhuo, et al. Experimental research on hygrothermal properties of carbon fiber/epoxy resin composite under different hygrothermal conditions [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(6): 16-20.
- [15] 彭 雷, 张建宇, 鲍 蕊, 等. 湿热、紫外环境对 T300/QY8911 复合材料孔板静力性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2009, 26(3): 18-23.  
Peng Lei, Zhang Jianyu, Bao Rui, et al. Effects of hygrothermal and ultraviolet conditions on static properties of T300/QY8911 laminated composites containing an open hole [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(3): 18-23.
- [16] 李 敏, 张宝艳. 改性双马树脂/碳纤维复合材料体系耐湿热性能研究 [J]. 热固性树脂, 2006, 21(5): 25-27.  
Li Min, Zhang Baoyan. Study on the hydrothermal properties of a modified bismaleimid resin/carbon fiber composite [J]. Thermosetting Resin, 2006, 21(5): 25-27.
- [17] 李 涛, 陈 蔚, 成 理. 泡沫夹层结构复合材料的应用与发展 [J]. 科技创新导报, 2009, 14: 3-5.  
Li Tao, Chen Wei, Cheng Li. The development and application of foam sandwich structural composites [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2009, 14: 3-5.
- [18] 胡建平, 蔡吉喆, 肇 研. 湿热环境对蜂窝夹层复合材料性能的影响 [J]. 材料工程, 2010(11): 43-47.  
Hu Jianping, Cai Jizhe, Zhao Yan. Effects of hygrothermal environment on properties of nomex sandwich composite [J]. Journal of Materials Engineering, 2010(11): 43-47.
- [19] Katzman H A, Castaneda R M, Lee H S. Moisture diffusion in composite sandwich structures [J]. Composites: Part A, 2008, 39: 887-892.
- [20] Guo Baochun, Jia Demin, Fu Weiwen, et al. Hygrothermal stability of dicyanate novolac epoxy resin blends [J]. Polymer Degradation and Stability, 2003, 79: 521-528.
- [21] 马 立, 刘 芑, 胡 培. PMI 泡沫材料在航天器结构中应用的可行性研究 [J]. 航天器环境工程, 2010, 27(2): 164-168.  
Ma Li, Liu Peng, Hu Pei. Feasibility research of PMI foam in spacecraft structure [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(2): 164-168.
- [22] Bulmanis V N, Gunyaev G M, Krivonos V V. RISA SPA VLAM [M]. Moscow: USSR, 1991.
- [23] 肇 研, 梁朝虎. 聚合物基复合材料自然老化寿命预测方法 [J]. 航空材料学报, 2001, 21(2): 55-58.  
Zhao Yan, Liang Chaohu. The estimating method of atmospheric aging age on polymer matrix composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2001, 21(2): 55-58.
- [24] 杜 龙, 矫桂琼, 黄 涛, 等. X 状 Z-pin 增强泡沫夹层结构的剪切性能 [J]. 复合材料学报, 2007, 24(6): 140-146.  
Du Long, Jiao Guiqiong, Huang Tao, et al. Shear properties of X-Z-pin reinforced foam core sandwich [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(6): 140-146.
- [25] 胡建平, 蔡吉喆, 肇 研. Nomex/氰酸酯树脂夹层复合材料耐湿热性研究 [J]. 材料工程, 2010(9): 58-61.  
Hu Jianping, Cai Jizhe, Zhao Yan. Hygrothermal resistance properties of nomex/cyanate ester sandwich composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2010(9): 58-61.