

湿热环境对铝蜂窝夹层复合材料性能的影响

郑国栋¹ 郭子民^{1,2} 李桂洋^{1,2} 李伟明^{1,2} 肖 瑛²

(1 航天长征睿特科技有限公司, 天津 300475)

(2 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

文 摘 鉴于某型号整流罩存在环境温湿度较大,在该条件存放较长时间,可能会对产品的性能造成不利影响。为了验证湿热环境对铝蜂窝夹层结构复合材料性能的影响,将试样放置 80 °C、相对湿度 85% 的环境中,考察试样的存放时间与吸湿率的关系以及湿热环境对双压剪性能、平拉性能、侧压性能的影响规律。试验结果表明,存放时间达到 8 d 时吸水率达到平衡,双压剪强度基本不变,平拉强度下降了 11.08%;侧压强度、侧压模量分别下降了 11.04%,13.94%。通过对破坏形貌分析发现,吸水率达到平衡后,铝蜂窝表面的 Al/Mg 比值由 42.11% 提高至 48.79%,蜂窝外观未出现明显变化。此时,平拉试样的破坏形貌由铝蜂窝破坏向铝蜂窝及铝蜂窝/面板界面混合破坏模式转变。

关键词 蜂窝,夹层结构,吸湿,力学性能

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.06.019

Effect of Humid and Hot Environment on Properties of Aluminum Honeycomb Sandwich Composites

ZHENG Guodong¹ GUO Zimin^{1,2} LI Guiyang^{1,2} LI Weiming^{1,2} NAN Xun²

(1 Aerospace Long March Arimt Science and Technology Co. Ltd, Tianjin 300475)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Due to the high ambient temperature and humidity associated with a specific type of fairing, the product performance may be adversely affected if the fairing is stored for an extended period. In order to verify the influence of hot and humid environment on the properties of aluminum honeycomb sandwich structure composites, the samples were subjected to conditions of 80 °C and 85% relative humidity, and the relationship between storage time and moisture absorption was investigated, along with the effects of the hot and humid environment on the properties of flatwise tension strength, double compression shear and edgewise compressive strength. The test results show that the water absorption reaches equilibrium when the storage time reaches 8 days, the double compression shear strength remains relative unchanged, and the flatwise tension strength decreases by 11.08%. Additionally, the edgewise compressive strength and edgewise compressive modulus decreases by 11.04% and 13.94% respectively. An analysis of the damage morphology reveals that after the water absorption reached equilibrium, the Al/Mg ratio on the surface of aluminum honeycomb increases from 42.11% to 48.79%, and the honeycomb appearance did not change significantly. At this time, the failure morphology of the flatwise tensile specimen transitions from aluminum honeycomb failure to aluminum honeycomb and aluminum honeycomb/panel interface mixed failure mode.

Key words Aluminum honeycomb, Sandwich structure, Moisture absorption, Mechanical properties

0 引言

蜂窝夹层结构复合材料具有比刚度大、比刚度高、热导率低、稳定性好等优点^[1-3],在航天领域已广泛应用在整流罩锥段、整流罩筒段、有效载荷、蜂窝

板、空间望远镜的主背板及底板等部段中。在航空领域蜂窝夹层结构复合材料在 F-15/ F-35 等战斗机的机翼前缘、平尾、垂尾、副翼;F/A-18 战斗攻击机的飞行控制面等部段得到了广泛的应用。

收稿日期:2022-10-20

第一作者简介:郑国栋,1987 年出生,硕士,研究方向为复合材料夹层结构的研制与生产。E-mail:zhengguodong1987@163.com

通信作者:李桂洋,1985 年出生,研究员,研究方向为复合材料成型工艺研究

蜂窝夹层结构复合材料在使用的过程中可能遭受高温、高湿的严酷的环境,在该条件下复合材料面板^[4-6]及其与蜂窝芯材之间的粘接性能会出现不同程度的下降^[7-9],造成蜂窝夹层结构复合材料的性能下降。针对湿热环境对蜂窝夹层结构复合材料性能的影响,国内外开展了相关的研究。D. M. WANG等^[10]对不同含水量下的纸蜂窝夹层结构复合材料的振动传递率开展了研究,研究表明随着含水量的增加,振动传输率-频率曲线向左上移动,最大振动传递率随含水量、蜂格长度、厚度尺寸的增加而增加。E. S. Y. YEO等^[11]研究了湿热、烟雾对蜂窝夹层复合材料性能的影响,实验结果表明在高湿度环境中面板厚度越小,水分子更容易渗透到芯材和粘接界中,造成复合材料的性能下降。P. SYNASKO等^[12]开展了湿热环境与Nomex®蜂窝夹层结构复合材料缺陷演变规律研究,温湿度的增加会加速了蜂窝复合材料失效的进程。G. KIM等^[13]考察了水、燃油、液压油或发动机机油对Nomex®蜂窝夹层结构复合材料性能的影响,将试样浸泡在上述液体中45 d后晾置30 d,采用四点弯曲试验和冲击试验,试验结果表明航空液体介质对蜂窝夹层复合材料弯曲刚度和抗损伤性能没有明显的影响。E. KECECI等^[14]采用疏水薄膜聚氟乙烯(PVF)、聚醚醚酮(12.5和25 μm)、聚酰亚胺对Nomex®蜂窝夹层结构复合材料进行表面处理,降低去离子水和航空液压液对蜂窝夹层结构复合材料性能的不利影响,试验结果表明疏水薄膜能够有效降低液体分子进入复合材料内部;与未使用隔离膜的试样相比,表面粘接疏水薄膜的试样性能较高。胡建平^[15]等湿热环境对不同类型的Nomex®蜂窝夹层复合材料性能的影响规律,试验结果表明湿热环境对面板强度、芯材剪切以及压缩性能造成不利影响,其中面板强度下降了35.15%~39.41%,芯材剪切强度下降了21.08%~33.67%,芯材压缩强度下降了19.29%~39.71%,可见湿热环境对Nomex®蜂窝夹层复合材料性能造成了较大的影响。

铝蜂窝夹层结构复合材料具有轻质高强、阻尼减震性能高、结构可设计性好等优点,已应用在整流罩、有效载荷、一级尾端等部段中,但湿热环境对其性能影响的研究较少。鉴于当前多个运载型号在海南基地发射,贮存环境恶劣可能对铝蜂窝芯材、面板以及粘接界面造成不利的影导致产品性能下降。因此,有必要开展湿热环境对复合材料性能的影响。

1 实验

1.1 材料

MT300/603A 无纬布预浸料,纤维面密度(165±5) g/m²,树脂含量(34±2)%,挥发分≤1.0%;MT300/603A 缎纹布预浸料,纤维面密度(165±5) g/m²,树脂

含量(38±2)%,挥发分≤1.0%;有孔铝蜂窝芯材,规格0.05 mm×5 mm×28 mm,以上由航天材料及工艺研究所提供。J-47C胶膜,厚0.25 mm,由黑龙江省石油化学研究院提供。

1.2 碳纤维复合材料面板制备

采用TK4SA516型号下料机将预浸料裁剪成800 mm×800 mm预浸料块,在操作平台上将裁切后的预浸料按照[C/0/C/0/C]的铺层顺序依次铺层制备预制体,其中C为MT300/603A 缎纹布预浸料,0为MT300/603A 无纬布预浸料,无纬布的纤维方向为0°方向。在预制体一侧放置脱模布、无孔膜、金属盖板、透气毡,并使用真空袋包覆后放置于热压罐中。

室温抽真空,真空表压满足≤-97 kPa后加压至0.6 MPa;按照(30±5)°C/h升温速率从室温升至(180±5)°C后保温2 h;按照(30±5)°C/h降温速率降至60 °C后出罐,依次拆除包覆材料,完成面板的制备,面板厚度为0.75 mm。面板成型流程如图1所示。

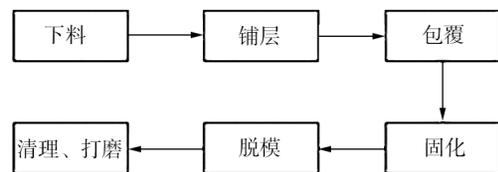


图1 面板成型流程图

Fig. 1 Panel forming flow chart

1.3 铝蜂窝夹层复合材料制备

使用工业级的乙酸乙酯对铝蜂窝进行清理,采用80目砂纸对面板的粘接面进行6次往复打磨,其中面板粘接面分别为贴模具面(光面)、非贴模具面(糙面)。使用丙酮将打磨后的面板清理干净,涂刷底胶J-47B底胶晾置30 min后粘贴J-47C胶膜,按照面板边缘将蜂窝放置于两层面板之间。在产品四周放置档条,面板表面放置脱模布、有孔膜、透气毡,并使用真空袋包覆后放置于热压罐中。

室温抽真空,真空表压满足≤-97 kPa;按照(30±5)°C/h升温速率从室温升至125~130 °C保温2 h;当温度升至85 °C时开始加压至(0.20±0.01) MPa;按照(30±5)°C/h降温速率降至60 °C后出罐,依次拆除包覆材料,完成面板的制备,产品厚度为29.5 mm,结构形式如图2所示。

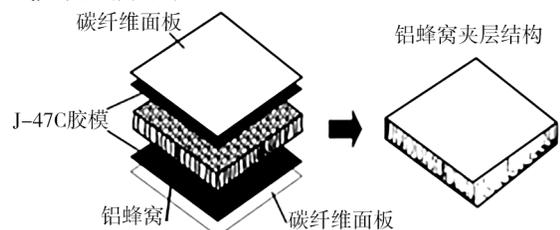


图2 铝蜂窝夹层结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of aluminum honeycomb sandwich structure

1.4 测试与表征

按照测试标准完成试样的加工,利用敲击法对加工后试样的内部质量进行检测,确保试样内部无分层或脱粘等缺陷影响实验结果。将试样放入恒温恒湿箱中,设定温度 80℃、相对湿度 85%,该实验条件放置 30 d。

吸湿性测试:根据 GB/T142—2008 标准进行测试,要求每隔 12 h 对样品称重一次,取出擦拭干净后根据式(1)计算吸水率 W_p ;当连续 3 次得到的吸湿速率低于增重 0.05% 时试样达到饱和状态。

$$W_p = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, m_2 为不同的浸泡时间试样吸湿后的质量; m_1 为试样在真空烘箱干燥处理后的质量。

双压剪性能测试按照胶接蜂窝夹层结构平面剪切性能试验方法(QJ1125—1987)完成,试样尺寸为 60 mm×60 mm×29.5 mm,双压剪强度根据式(2)计算,试验结果为 5 个测试结果的平均值。

$$\tau_c = \frac{P}{2bh} \quad (2)$$

式中, p 为测试过程中破坏时的载荷, b 为试样宽度, h 为试样高度。

平拉性能测试按照 GJB130.4—1986 对湿热处理后的试样进行,试样尺寸为 60 mm×60 mm×29.5 mm,平拉强度根据式(3)计算,实验结果取 5 个试样的平均值。

$$\sigma = \frac{P_0}{A} \quad (3)$$

式中, σ 为平面拉伸强度, p_0 为试样破坏载荷, A 为试样面积。

侧压性能测试:按照 GB/T 1454—2005 完成湿热处理前后试样的侧压性能评价,试样的尺寸为 220 mm×60 mm×29.5 mm;侧压强度根据计算式(4)计算,实验结果取 5 个试样的平均值。

$$ECS = \frac{P}{A} \quad (4)$$

式中, p 为测试过程中破坏时的载荷, A 为试样的横截面积。

2 结果与分析

2.1 铝蜂窝夹层复合材料吸湿性能研究

图 3 为面板和蜂窝夹层试样的吸湿曲线。在实验初始阶段,在温度和湿度的共同作用下,水分子在面板及夹层复合材料中的扩散速率很快,这是由于复合材料本身的缺陷和树脂基体吸湿造成的。随着试验时间的延长吸湿速率逐渐降低,面板和蜂窝夹层试样湿热处理 192 h 后达到了吸湿饱和状态,面板及蜂窝夹层试样的饱和吸湿率分别为 0.962%、

0.589%。根据图 1 可知试验初始状态近似直线状符合 Fick 第二扩散定律。利用 Fick 第二定律来研究水分子在复合材料中扩散规律,如下:

$$D = \pi \left[\frac{h}{4m_\infty} \right]^2 \left[\frac{(M_2 - M_1)}{\sqrt{T_2 - T_1}} \right]^2 \quad (5)$$

式中, D 为扩散系数, h 为试样的厚度, m_∞ 为饱和吸湿率, M_2 为 T_2 时刻的吸湿率, M_1 为 T_1 时刻的吸湿率。由表 1 可见水分子在蒙皮中的扩散系数为 $1.1 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{h}$,远低于水分子在蜂窝夹层中的扩散系数 $0.15 \text{ mm}^2/\text{h}$,这是由于水分子能够通过铝蜂窝表面的孔快速进入夹层试样的内部,残留在蜂窝内壁上。

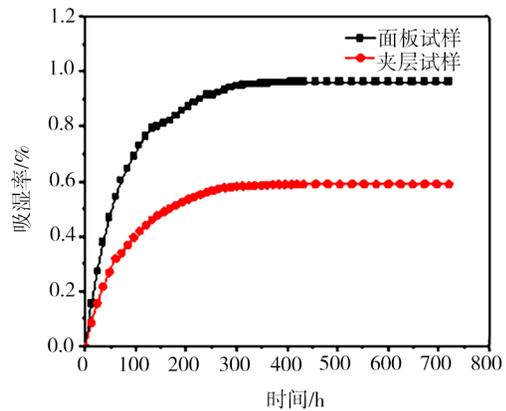


图3 面板和蜂窝夹层试样的吸湿曲线
Fig. 3 Hygroscopic curves of panel and honeycomb sandwich specimens

表 1 面板和蜂窝夹层试样的饱和吸湿率和扩散系数
Tab. 1 Saturation moisture absorption and diffusion coefficient of panel and honeycomb sandwich samples

试样种类	饱和吸湿率/%	扩散系数/ $\text{mm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$
面板	1.92	1.1×10^{-4}
夹层结构	1.18	0.15

由于水分子附着在蜂窝内壁表面,长时间作用可能会腐蚀铝蜂窝表面,结合 SEM 中 EDS 模块对其腐蚀行为进行研究。一般情况下,未腐蚀试样表面的光泽程度基本一致且为亮白色;而铝合金腐蚀后的表面发暗。对比试样处理前后的外观变化发现,试样表面颜色基本一致,因此可判断蜂窝夹芯试样并未出现严重的腐蚀现象。通过微观形貌分析(图 4),可知两种试样表面平整且未出现龟裂式裂纹,可见试样均未出现腐蚀。采用对蜂窝表现的元素进行分析,根据测试结果(表 2)可知试样处理前 Al-Mg 的质量分数为 42.11%,试样处理后 Al-Mg 的质量分数为 48.79%,其比值变化较小。结合铝蜂窝表面微观和宏观形貌,可知湿热处理前后蜂窝夹芯未出现腐蚀。

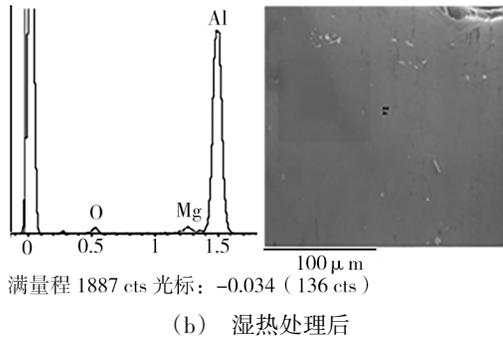
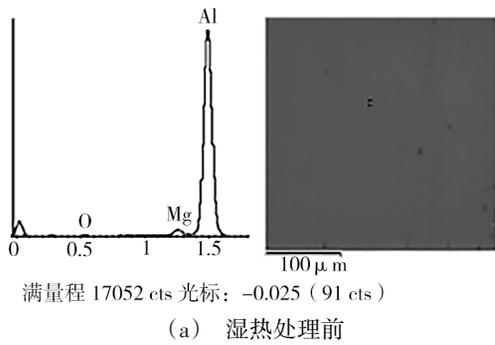


图4 铝蜂窝表面元素分析及微观形貌
Fig. 4 Elemental analysis and microstructure of aluminum honeycomb surface

表2 湿热处理前后铝蜂窝表面元素分析

Tab. 2 Elemental analysis of aluminum honeycomb surface before and after wet heat treatment

序号	元素类型	湿热处理前		湿热处理后	
		wt/%	at/%	wt/%	at/%
1	O-K	6.88	11.06	21.82	31.96
2	Mg-K	2.16	2.29	1.57	1.52
3	Al-K	90.96	86.66	76.60	66.52
4	Al-Mg	42.11	37.84	48.79	43.76

2.2 铝蜂窝夹层复合材料双压剪性能研究

双压剪性能主要用于评价芯材抗剪切性能,湿热处理前后的芯材双压剪性能如图5所示。干燥状态下试样的剪切强度和剪切模量分别为0.64 MPa, 141.20 MPa;而处理后的试样的剪切强度和剪切模量分别为0.63, 143.20 MPa,可见湿热处理对蜂窝的剪切性能影响较小。通过对两种中状态下破坏形貌进行观测分析发现所有的试样铝蜂窝芯材侧向剪切失稳(图6),蜂窝与面板的粘接胶层未见明显损伤,可见湿热处理对蜂窝的剪切性能影响较小;这与铝蜂窝微观形貌及元素分析的结论一致。

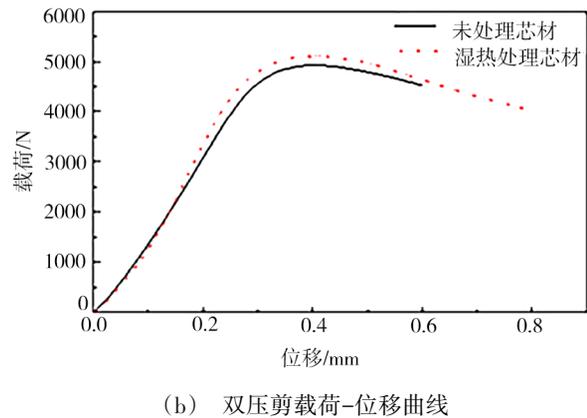
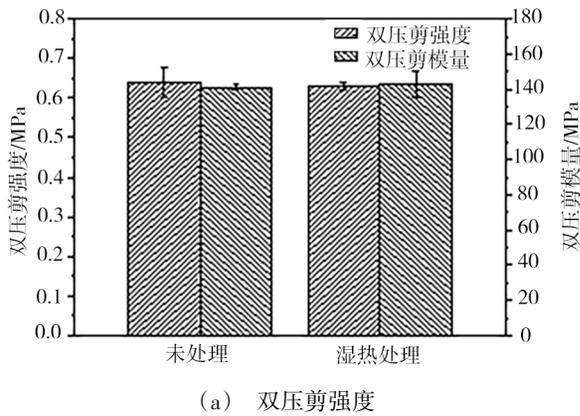


图5 湿热处理前后的双压剪性能

Fig. 5 Double compression shear performance before and after wet heat treatment

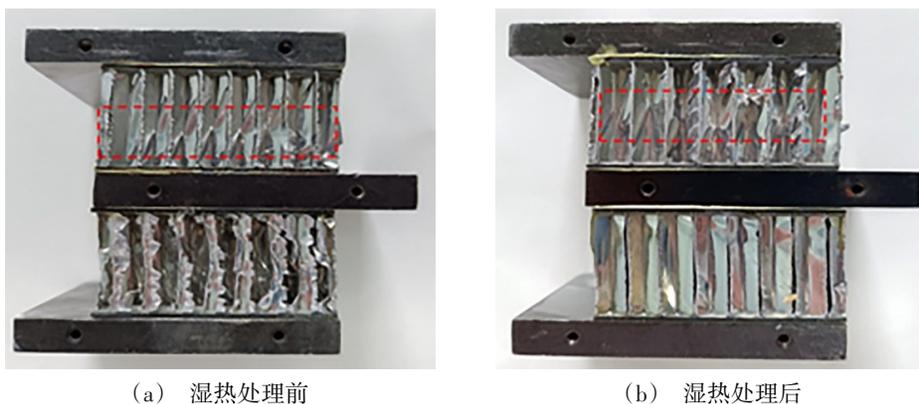


图6 湿热处理前后双压剪试样破坏形貌

Fig. 6 Damage morphology of double compression shear samples before and after wet heat treatment

2.3 铝蜂窝夹层复合材料平拉性能研究

铝蜂窝夹层复合材料湿热处理前后的平拉强度如图7所示。干燥状态下试样的平拉强度为3.18 MPa,经湿热处理后试样的平拉强度为2.82 MPa,平拉强度下降了11.08%。通过对试样断面分析发现,干燥状态下试样的失效形貌呈现芯材破坏[图8(a)];而经过湿热处理后的试样的破坏模式以蜂窝从胶膜拔出为主[图8(b)],以少量蜂窝芯断裂为辅的混合破坏模式。

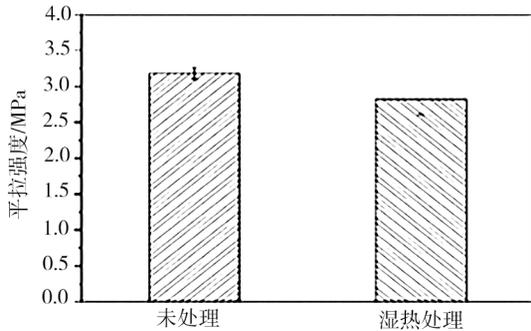
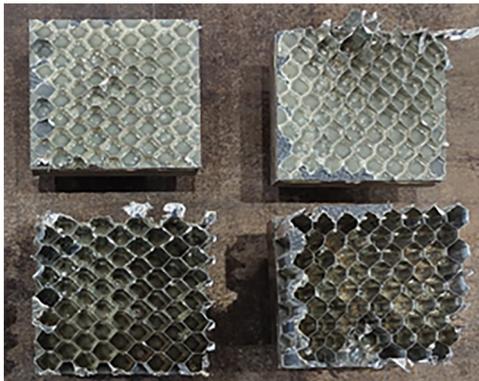
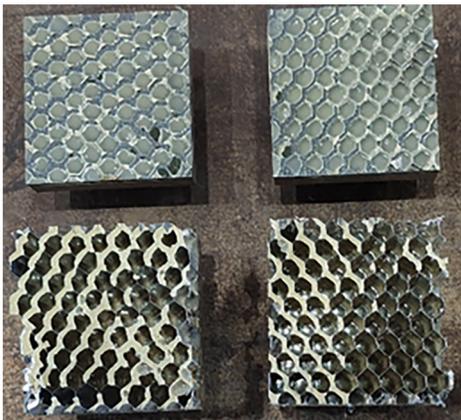


图7 湿热处理前后的平拉强度
Fig. 7 Flat tensile strength before and after wet heat treatment



(a) 湿热处理前

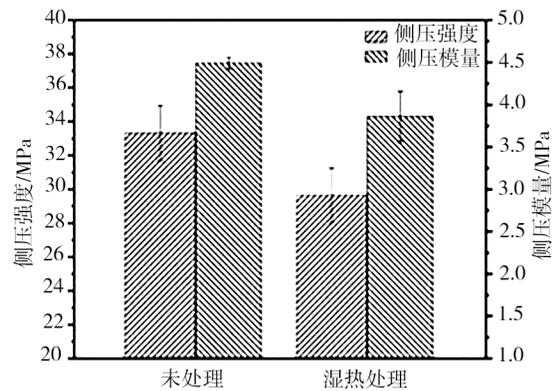


(b) 湿热处理后

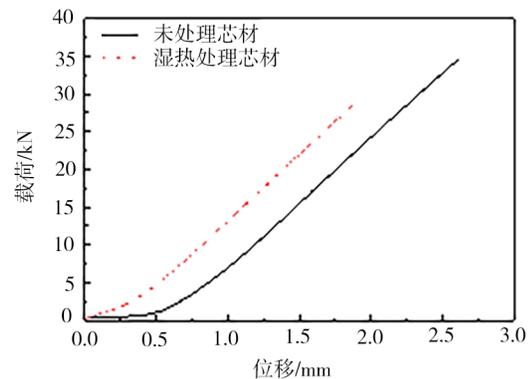
图8 湿热处理前后的平拉试样破坏形貌
Fig. 8 The damage morphology of flat drawing sample before and after wet heat treatment

2.4 铝蜂窝夹层复合材料侧压性能研究

侧压性能主要用于评价夹层结构的面板及蜂窝与面板的粘接性能,湿热处理前后的侧压性能如图9所示。未湿热处理试样的侧压强度和侧压模量分别为33.32 MPa和4.49 GPa;而湿热处理后的试样的侧压强度和侧压模量分别为29.64 MPa和3.86 GP;与未湿热处理的试样相比,处理后的试样侧压强度、侧压模量分别下降了11.04%、13.94%,可见湿热处理对铝蜂窝夹层复合材料的侧压性能影响较大。根据湿热处理前后试样的双压剪性能、蜂窝芯材外观及元素分析可知,湿热处理对蜂窝芯材的性能几乎没有影响。因此,侧压性能的下降与面板、面板与芯材粘接强度有关。



(a) 湿热处理前



(b) 湿热处理后

图9 湿热处理前后的侧压性能

Fig. 9 Lateral pressure performance before and after wet heat treatment

两种试样在测试过程中均呈现面板折弯/折断,面板折断处蜂窝芯材失稳(图10)的破坏形貌。采用扫描电镜对面板折断处进行微观形貌分析,未湿热处理的试样面板中纤维表面残留了较多的树脂,而湿热处理后的试样面板中纤维表面残留树脂明显减少。在湿热处理过程中面板中树脂与水分子形成氢键,使树脂基体发生溶胀塑化产生溶胀应力,造成纤维与基体之间的结合强度下降;此外,树脂基体与纤

维之间的湿膨胀率的差异,导致纤维-基体之间产生湿应力^[16-17],进一步削弱了两者的界面强度。结合面板折断处的微观形貌(图11)可知,湿热处理前纤维表面残留的树脂较多,而经过湿热处理后纤维表面残留的树脂明显减少。此外,对两种试样断裂处的蜂窝观察发现,湿热处理后试样面板与蜂窝的粘

接面局部呈现蜂窝拔出的形貌,这是由于在湿热处理过程中蜂窝与面板之间的胶层吸湿,导致了胶层粘接性能下降。因此,面板、面板/蜂窝之间的胶层吸湿后性能下降是蜂窝夹层结构侧压性能降低的主要原因。

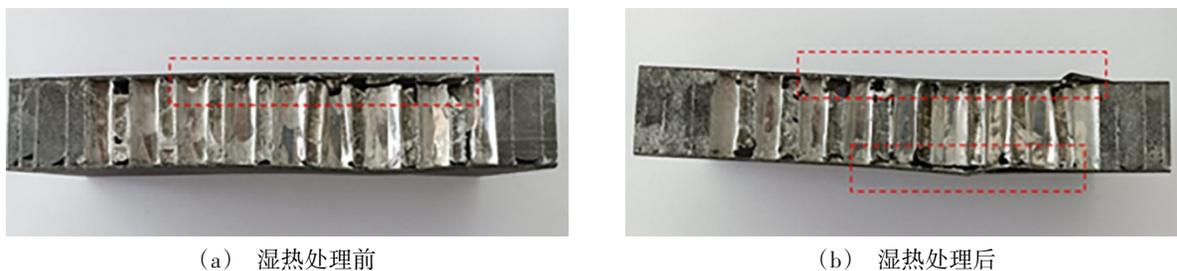


图10 湿热处理前后的侧压试样破坏形貌

Fig. 10 Damage morphology of specimens under lateral pressure before and after wet heat treatment

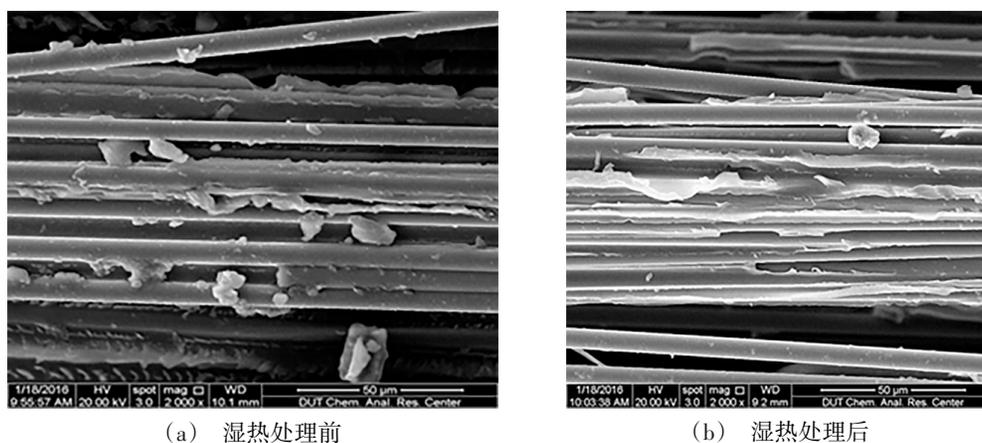


图11 湿热处理前后的侧压试样面板折断处微观形貌

Fig. 11 The microscopic morphology of the panel fracture of the lateral pressure sample before and after wet heat treatment

3 结论

(1)在湿热条件下,铝蜂窝夹层复合材料的饱和吸湿量较小,吸湿量及吸湿速率主要取决于面板、面板-蜂窝之间的胶层。

(2)湿热处理前后的蜂窝芯材外观、元素含量基本无变化,通过对铝蜂窝夹层试样的双压剪强度评价发现,湿热处理前后双压剪强度基本一致,可见湿热处理对蜂窝芯材的性能影响较小。

(3)湿热处理后铝蜂窝夹层试样的侧压性能明显降低,由于湿热处理对蜂窝芯材的影响较小,侧压强度的下降主要由面板、胶层强度下降导致的;通过面板折断处的微观形貌分析发现湿热处理后面板内部纤维和树脂之间的结合强度有所下降;通过铝蜂窝夹层试样的平拉强度对比发现,湿热处理后的试样面板与蜂窝之间的粘接强度有所下降。

参考文献

[1] LIU Y, WUY. Influence of hydrothermal aging on the 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第6期

mechanical performance of foam core sandwich panels subjected to low-velocity impact [J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2022, 29(1): 9-22.

[2] KIM Y C, CHO J U. Comparative study between impact behaviors of composites with aluminum foam and honeycomb[J]. Current Nanoscience, 2014, 10(1): 23-27.

[3] 孟佩弦, 邱惠忠. 先进复合材料在航天器及其运载工具上的应用[J]. 宇航材料工艺, 1992(04): 14-18.

MENG Peixian, QIU Huizhong. Application of advanced composite materials on spacecraft and their vehicles [J]. Aerospace Materials & Technology, 1992(04): 14-18.

[4] 王玉鑫, 郝彤星, 宋昊, 等. 湿热环境对含板芯脱胶复合材料蜂窝板固有频率的影响[J]. 复合材料科学与工程, 2021(02): 54-64.

WANG Yuxin, HAO Tongxing, SONG Hao, et al. Effect of hydrothermal environment on natural frequency of composite honeycomb structure with facesheet/core debonding [J]. Composites science and engineering, 2021(02): 54-64.

[5] 尹亮, 郑国栋, 丁常方, 等. PMI泡沫夹心复合材料湿

热老化性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(08):5-9.

YIN Liang, ZHENG Guodong, DING Changfang, et al. Study on hygrothermal ageing of PMI foam cored sandwich composite[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2015(08): 5-9.

[6] 吴杨,董浩,段跃新,等. 湿热循环对PMI泡沫/3218-1环氧树脂夹层结构性能影响的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(01):29-33.

WU Yang, DONG Hao, DUAN Yuexin, et al. Effects of hygrothermal cycling on properties of PMI foam/3218-1 epoxy sandwich structure[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2012(01):29-33.

[7] YEO E S Y, WANG J, MIRABELLA L, et al. Effect of humidity and thermal cycling on carbon-epoxy skin/aramid honeycomb structure[J]. In *Materials Science Forum*, 2010, 654:2600-2603.

[8] WOLFF G E, CHEN H, OAKES W D. Hygrothermal deformation of composite sandwich panels[J]. *Advanced Composites Letters*, 2000, 9(1):35-43.

[9] LISTER J M. Study the effects of core orientation and different face thicknesses on mechanical behavior of honeycomb sandwich structures under three point bending[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(3):3786.

[10] WANG D M, YANG R. Investigation of vibration transmissibility for paper honeycomb sandwich structures with various moisture contents[J]. *Mechanics & Industry*, 2019, 20(1):108.

[11] YEO E S Y, WANG J, MIRABELLA L, et al. Effect of humidity and thermal cycling on carbon-epoxy skin/aramid honeycomb structure[J]. In *Materials Science Forum*, 2010, 654:2600-2603.

[12] SYNASZKO P, MICHAŁ S, ŁUKASZ K. The effect of

environmental flight conditions on damage propagation in composite sandwich structure[J]. *Fatigue of Aircraft Structures* 2016, 2015(7), 24-27.

[13] KIM G, STERKENBURG R, TSUTSUI W. Investigating the effects of fluid intrusion on Nomex[®] honeycomb sandwich structures with carbon fiber facesheets[J]. *Composite Structures*, 2018, 206:535-549.

[14] KECECI E, ASMATULU R. Effects of moisture ingressions on mechanical properties of honeycomb-structured fiber composites for aerospace applications[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(1): 459-470.

[15] 胡建平,蔡吉喆,肇研,等. 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, et al. Effects of hygrothermal environment on properties of nomex sandwich composite[J]. *Journal of materials engineering*, 2010(11): 43-47.

[16] 周松,贾耀雄,许良,等. 湿热环境对T800碳纤维/环氧树脂基复合材料力学性能的影响[J]. 材料工程, 2021, 49(10), 138-143.

ZHOU Song, JIA Yaoxiong, XU Liang, et al. Effect of hygrothermal environment on mechanical properties of T800 carbon fiber/epoxy resin composites[J]. *Journal of materials engineering*, 2021, 49(10), 138-143.

[17] 杨旭东,安涛,邹田春,等. 湿热环境对碳纤维增强树脂基复合材料力学性能的影响及其损伤机理[J]. 材料工程, 2019, 47(07):84-91.

YANG Xudong, AN Tao, ZOU Tianchun, et al. Effect of hygrothermal environment on mechanical properties and damage mechanism of CFRP[J]. *Journal of materials engineering*, 2019, 47(07):84-91.