

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.09.018

配套材料和环境条件对玻纤预浸料 /Nomex 蜂窝夹层板力学性能的影响

高琦^{1,2}, 赵文忠^{1,2}, 张晨晖^{1,2}, 李建伟^{1,2}

(1. 西安导航技术研究所, 西安 710068; 2. 中国电子科技集团公司第二十研究所, 西安 710068)

摘要: 通过热压罐成型的工艺方法, 将 SW100A/AC319 环氧树脂基玻璃纤维复合材料预浸料与 Nomex 芳纶纸蜂窝、J-95 中温固化改性环氧膜状结构胶和 SY-24C 中温固化环氧胶膜及 J-47D2 改性环氧粉状发泡胶等配套材料制备了 4 种夹层板。分析了 J-95 膜状结构胶、SY-24C 胶膜和 Nomex 蜂窝格内填充 J-47D2 发泡胶对夹层板力学性能的影响, 并重点研究了夹层板在常温干态 (RTD)、低温干态 (CTD)、高温干态 (ETD) 和高温湿态 (ETW) 试验环境条件下力学性能的变化。结果表明, 分别采用 J-95 膜状结构胶和 SY-24C 胶膜胶接制备的夹层板 S1 和 S2, 在 RTD 条件下, 各项力学性能无明显差异, 在 ETD 条件下, 两者的平压强度、剪切强度和弯曲性能呈现下降趋势。Nomex 蜂窝格内填充 J-47D2 发泡胶可显著提高夹层板力学性能, 在 ETD 条件下, 填充 J-47D2 发泡胶的夹层板各项力学性能较 RTD 条件下显著下降, 在 ETW 条件下, 试样经湿热处理, 其力学性能进一步下降。

关键词: 玻璃纤维增强复合材料; 发泡胶; 夹层板; 力学性能; 环境条件

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)09-0102-07

Effects of Supporting Materials and Environmental Conditions on Mechanical Properties of Glass Fiber Prepreg/Nomex Honeycomb Sandwich Panels

Gao Qi^{1,2}, Zhao Wenzhong^{1,2}, Zhang Chenhui^{1,2}, Li Jianwei^{1,2}

(1. Xi'an Research Institute of Navigation Technology, Xi'an 710068, China; 2. No.20 Research Institute of CETC, Xi'an 710068, China)

Abstract: Four sandwich plates were prepared from SW100A/AC319 epoxy resin based glass fiber composite prepreg, Nomex aramid paper honeycomb, J-95 medium temperature curing epoxy film structural adhesive, SY-24C medium temperature curing epoxy film and J-47D2 modified epoxy foam adhesive by autoclaving process. The effects of J-95 epoxy film structural adhesive, SY-24C film and Nomex honeycomb lattice filled J-47D2 foam adhesive on the mechanical properties of sandwich plate were analyzed, and the mechanical properties of sandwich panels were studied under four experimental conditions: room temperature dry state (RTD), cold temperature dry state (CTD), elevated temperature dry state (ETD) and elevated temperature wet state (ETW). The results show that the mechanical properties of S1 and S2 sandwich plates prepared by using J-95 epoxy film structural adhesive and SY24C modified epoxy film are not significantly different under RTD test condition, but the flatwise compression strength, shear strength and flexural properties of S1 and S2 sandwich panels show a downward trend under ETD test condition. The mechanical properties of sandwich panel filled J-47D2 foam adhesive can be significantly improved. Compared with the RTD condition, the mechanical properties of the sandwich plate filled with J-47D2 foam adhesive decrease significantly under the ETD test condition, and under the ETW test condition, the mechanical properties of the sample further decrease after wet heat treatment.

Keywords: glass fiber reinforced composite; foam adhesive; sandwich panel; mechanical property; environmental condition

复合材料夹层结构是由两层强度较高的上、下面板和一层低密度夹层芯层组成, 通过胶粘剂将上、下面板与蜂窝芯材胶接获得的整体结构, 蜂窝夹层结

构具有质量轻、刚度大、强度高、耐冲击性能好、可设计性强等优点^[1-3], 目前已经被广泛应用于航空、航天、船舶和汽车制造等领域^[4-7]。采用蜂窝夹芯结构

通信作者: 高琦, 硕士, 工程师, 主要从事功能复合材料的研究

收稿日期: 2022-07-14

引用格式: 高琦, 赵文忠, 张晨晖, 等. 配套材料和环境条件对玻纤预浸料 /Nomex 蜂窝夹层板力学性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(9):102-108.

Gao Qi, Zhao Wenzhong, Zhang Chenhui, et al. Effects of supporting materials and environmental conditions on mechanical properties of glass fiber prepreg/Nomex honeycomb sandwich panels[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9):102-108.

制件可减轻整体结构质量、减少应力集中、提高疲劳寿命、稳定表面质量状态等。Nomex 蜂窝具有轻质高强、密度低等特点,以 Nomex 蜂窝作为芯材的 A 夹层结构制件具有比强度、比刚度高,电绝缘性和透波性优良等特点,已经在高性能雷达天线罩的制作中得到广泛应用^[8]。

近年来,诸多学者对蜂窝夹层结构制件的力学性能进行了深入研究,如贺靖等^[9]研究了面板材料和胶膜密度对夹层结构力学性能的影响,毕红艳^[10]分析了蜂窝夹层结构成型工艺对其力学性能的影响,郝新超等^[11]则对 Nomex 蜂窝夹芯结构的失效机理进行了研究,东已宙^[12]探讨了高温环境对蜂窝夹层结构件的力学性能的影响。目前,还尚未见有文献对蜂窝夹层结构填充发泡胶后的力学性能进行相关研究和讨论的报道。

某大型曲面雷达天线罩为薄壁 A 夹层结构^[13],其中透波区域是由上下两层国产薄层玻璃纤维复合材料预浸料制备的高强度、高密度面板和中间低介电常数、低密度的 Nomex 蜂窝芯组成,天线罩法兰部位为装配区域,具有更高的力学性能要求,需要在蜂窝格内部填充发泡胶来提升其性能,以满足使用要求。笔者针对该大型曲面雷达天线透波罩结构特殊、力学性能要求高、服役环境复杂严酷等现状,采用热压罐单独固化制作面板再与蜂窝芯二次胶接的工艺方法制备 4 种等效夹层板,开展了胶膜、发泡胶等配套材料与国产玻璃纤维复合材料预浸料的配套试验,分析了不同胶膜和填充发泡胶对夹层板力学性能影响,并研究了等效夹层板在常温干态(RTD)、低温干态(CTD)、高温干态(ETD)和高温湿态(ETW)4 种试验环境条件下拉伸、压缩、剪切、侧压、弯曲等力学性能的变化,为国产玻璃纤维树脂基复合材料在大型曲面雷达天线罩上的应用提供技术支撑。

1 实验部分

1.1 主要原材料

环氧树脂基玻璃纤维复合材料预浸料:SW100A/AC319,树脂含量为 38%,中国航空制造技术研究院;

中温固化改性环氧膜状结构胶:J-95,黑龙江省石油化学研究院;

改性环氧粉状发泡胶:J-47D2,黑龙江省石油化学研究院;

中温固化环氧胶膜:SY-24C,中国航发北京航

空材料研究院;

Nomex 芳纶纸蜂窝:HDL-1-1.83-48-14.3,宜昌和达利复合材料股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

热压罐:J10-019 型,西安江河机器制造有限公司;

数控铣床:PV1600 型,西安领航数控设备有限公司;

电子万能试验机:CMT5105 型,深圳新三思计量技术有限公司;

恒温恒湿试验箱:HY-TH-225BH 型,东莞市泓进检测仪器有限公司;

高低温试验箱:SANS GDX300 型,深圳新三思计量技术有限公司;

电子数显卡尺:SF2000 型,桂林广路数字测控股份有限公司。

1.3 试样制备

(1) Nomex 蜂窝夹层板的制备。

通过热压罐固化成型工艺制备 Nomex 蜂窝夹层板。

①先制作 Nomex 蜂窝夹层板的上、下面板。

使用下料样板分别裁剪 0°/90° 的 SW100A/AC319 预浸料,并按照 0°/90°/0°/90° 的顺序铺贴,将铺贴完成的预浸料毛坯试样与无孔膜、透气毡、真空袋依次放置于平板模具中,真空袋四周使用耐高温胶条进行密封,并抽真空至 -0.095 MPa ,后将模具推入热压罐进行固化。固化工艺为:热压罐设置 100 kPa/min 的加压速率和 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 的升温速率,当罐内压强升至 $(0.30 \pm 0.02)\text{ MPa}$ 、模具温度升至 $128\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,设置保温保压 $(180 \pm 10)\text{ min}$,保温结束后带压冷却至模具温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,卸压出罐。

②将固化好的上、下面板与 Nomex 蜂窝、J-95 膜状结构胶和 SY-24C 胶膜及 J-47D2 发泡胶等材料按照以下组合分别制备夹层板 S1, S2, S3 和 S4,其中, J-95 膜状结构胶和 SY-24C 胶膜与 J-47D2 发泡胶按照一次进罐的工艺进行固化,固化参数设置为:分别以 100 kPa/min 和 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 的速率进行升温加压,当罐内压强升至 $(0.15 \pm 0.02)\text{ MPa}$ 、模具温度升至 $128\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,设置保温保压 $(150 \pm 10)\text{ min}$,保温结束后带压冷却至模具温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,卸压出罐。

S1:使用 J-95 膜状结构胶胶接面板和 Nomex 蜂窝芯材,蜂窝格内未填充发泡胶。

S2: 使用 SY-24C 胶膜胶接面板和 Nomex 蜂窝芯材,蜂窝格内未填充发泡胶。

S3: 使用 J-95 膜状结构胶胶接面板和 Nomex 蜂窝芯材,蜂窝格内填充 J-47D2 发泡胶。

S4: 使用 SY-24C 胶膜胶接面板和 Nomex 蜂窝芯材,蜂窝格内填充 J-47D2 发泡胶。

(2) 标准测试试样的制备。

按照相关测试标准中对测试试样的规定,通过干态数控机械加工的方法,将 Nomex 蜂窝夹层板分别加工为平面拉伸、平面压缩、剪切、侧压和弯曲等力学性能测试所需的标准试样尺寸。

1.4 测试试样前处理

夹层结构平拉和剪切试验的试样需要与专用夹具进行粘结,粘结前分别对试样和夹具粘接面进行打磨、除油等表面处理。采用胶膜将夹层结构试样与夹具进行粘结并用 C 型夹固定,于 $(130 \pm 2)^\circ\text{C}$ 条件下固化 2 h。4 种环境状态下的测试试样分别按照以下方法进行前处理:

(1) RTD 试样: 在室温 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 下放置 5 ~ 8 min,采用空调对室内温度进行控制。

(2) CTD 试样: 在高低温试验箱 $(-70 \sim 350)^\circ\text{C}$ 中采用液氮进行降温至 -50°C ,并保温 5 ~ 8 min。

(3) ETD 试样: 在高低温试验箱 $(-70 \sim 350)^\circ\text{C}$ 中采用电阻丝加热至 80°C ,并保温 5 ~ 8 min。

(4) ETW 试样: 按照 HB 7401-1996 的规定,在恒温恒湿试验箱中于温度 $(70 \pm 3)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(95 \pm 5)\%$ 条件下进行湿热处理至吸湿饱和(质量至恒定值)。

1.5 性能测试

(1) 夹层板平拉强度试验按照 GB/T 1452-2018 的规定,以 1.0 mm/min 的加载速率对试样施加拉伸载荷,直至试样破坏,并记录最大破坏载荷及破坏形式。

(2) 夹层板平压强度试验按照 GB/T 1453-2005 的规定,采用万向底座使加载时试样上、下两面均匀受载并且加载方向垂直于试样上、下平面,试验加载速率设定为 0.5 mm/min,记录最大破坏载荷及破坏形式。

(3) 夹层板剪切强度试验按照 GB/T 1455-2005 的规定,需保证试样左右边均匀受载并且加载方向平行于试样上、下平面,使试样的受力位置与试样中心对齐,剪切试验速度设定为 0.5 mm/min,记录最大破坏载荷及破坏形式。

(4) 夹层板侧压强度试验按照 GB/T 1454-2005 的规定,采用万向底座使加载时试样上、下端裸露的蜂窝面均匀受载并且加载方向垂直于试样端面,侧压试验加载速率设定为 0.5 mm/min,直至试样破坏,记录最大破坏载荷及破坏形式。

(5) 夹层板弯曲性能试验按照 GB/T 1456-2005 的规定,在加载压头和支撑底座均设置橡胶垫块,确保载荷均匀加载。选择跨距 160 mm,外伸梁长度 80 mm,同时测试夹层结构的芯层剪切强度和夹层结构的弯曲刚度,弯曲试验速率选择 1.0 mm/min,记录最大破坏载荷及破坏形式。

上述力学性能测试均在电子万能试验机上进行,要求每项力学性能的有效测试试样不少于 5 个,测试结果取平均值。试验中,室温干态环境的温度由空调控制,高低温试验在高低温环境箱中进行,试验期间温度保持在所要求温度的 $\pm 3^\circ\text{C}$ 以内。

2 结果与讨论

2.1 夹层板的平拉强度分析

复合材料夹层结构的平面拉伸试验主要是考察夹层结构的平拉强度和破坏形式,以此评估芯层抵抗拉伸载荷的能力以及复合材料面板与 Nomex 蜂窝芯、胶膜和发泡胶之间的匹配性。4 种夹层板在 4 种试验环境条件下的平拉强度测试结果如图 1 所示。

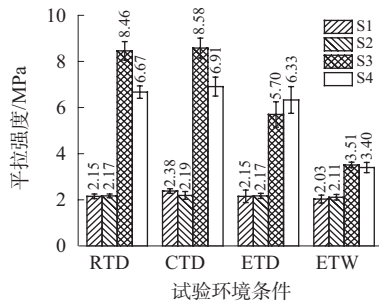
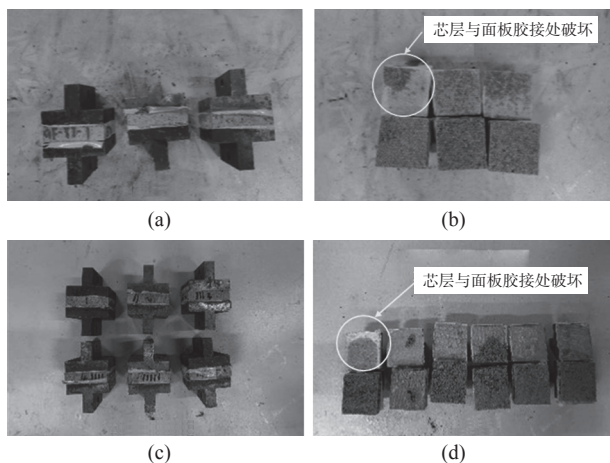


图 1 4 种试验环境条件下夹层板的平拉强度

由图 1 可以看出,在 RTD, CTD, ETD 和 ETW 试验环境条件下,夹层板 S1 的平拉强度分别为 2.15, 2.38, 2.15, 2.03 MPa, S2 的平拉强度分别为 2.17, 2.19, 2.17, 2.11 MPa, 数据表明,温度和湿度对夹层板 S1 和 S2 的平拉强度无明显影响,在 ETW 条件下 S1 和 S2 的平拉强度相较于 RTD 条件下分别只降低 5.6% 和 2.8%,原因可能是夹层结构的上、下面板阻止了水汽进入夹层板内部;试验过程中发现,夹层板 S1 和 S2 的破坏模式均为纯芳纶纸蜂窝芯破坏,表明 J-95 膜状结构胶和 SY-24C 胶膜两种胶膜对 Nomex 蜂窝夹层结构的平拉强度无明显影

响。平拉试验中,夹层板 S3 和 S4 在 RTD, CTD, ETD 条件下的破坏模式均为芯层破坏,在 ETW 条件湿热处理后,出现图 2 所示的芯层与面板胶接处的破坏。



a—S3 试验前; b—S3 试验后; c—S4 试验前; d—S4 试验后

图 2 在 ETW 条件下平拉试验 S3 和 S4 试样的破坏模式

由图 1 还可以看出,夹层板 S3 和 S4 在 RTD, CTD, ETD 和 ETW 试验环境条件下的平拉强度分别为 8.46, 8.58, 5.70, 3.51 MPa 和 6.67, 6.91, 6.33, 3.40 MPa, 相比未填充发泡胶的夹层板 S1 和 S2, S3 和 S4 在 RTD 条件下的平拉强度分别提高 2.9 倍和 2.1 倍,这是因为芳纶纸蜂窝格填充发泡胶后,面板与芳纶纸蜂窝芯实际胶接面积增大,芳纶纸蜂窝壁转变为增强单元,发泡胶作为基体,可以快速传递分散平拉载荷^[14]。相较于 RTD 条件下的测试结果,ETD 条件下夹层板 S3 的平拉强度降低 32.6%,说明高温加速了 J-95 膜状结构胶的失效;在 ETW 条件下,试样经湿热处理,夹层板 S3 和 S4 的平拉强度分别降低 58.5% 和 49%,原因可能是水分子对玻璃纤维复合材料面板与发泡胶胶接面产生较大破坏,试样的失效模式也说明夹层板的胶接界面出现弱化。

2.2 夹层板的平压强度分析

复合材料夹层结构的平压试验主要是考察夹层结构芯层在平压状态下的承载能力。4 种夹层板在 4 种试验环境条件下的平压强度测试结果如图 3 所示。

由图 3 可知,夹层板 S1 和 S2 在 RTD 条件下的平压强度分别为 1.85 MPa 和 1.96 MPa,且试验过程中二者的破坏模式均为芳纶纸蜂窝压溃破坏,证明胶膜对夹层结构的平压性能无明显影响^[15];夹层板 S1 和 S2 在 CTD 和 ETD 条件下的平压强

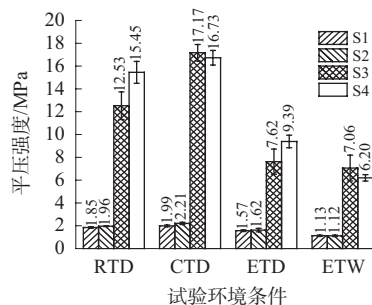


图 3 4 种试验环境条件下夹层板的平压强度

度无明显变化,说明其平压强度受温度影响不明显;在 ETW 条件下,夹层板 S1 和 S2 的平压强度相比 RTD 条件下分别降低 38.9% 和 42.9%,原因可能是湿热处理后蜂窝芯的承载能力降低,容易发生失稳现象。平压试验过程中,夹层板 S3 和 S4 的破坏模式均为芯层压缩屈服破坏,在 RTD 条件下,夹层板 S3 和 S4 的平压强度相较于 S1 和 S2 大幅度提高,最大提高 6 倍以上,这是因为填充发泡胶后,芳纶纸蜂窝结构被发泡胶固定,发泡胶固化后自身强度较高,可以防止芳纶纸蜂窝壁在压缩载荷作用下过早失稳。相较于 RTD 条件下夹层板 S3 和 S4 的平压强度,在 ETD 条件下,试样经湿热处理,夹层板 S3 和 S4 的平压强度均下降 39.2%,说明其平压强度受温度影响大,原因可能是随着温度增加,接近发泡胶玻璃化转变温度时,树脂自身强度下降,其传递压缩应力的能力下降。湿热处理后,水分对发泡胶的增塑作用和对发泡胶与芳纶纸蜂窝芯界面处的破坏作用,也会降低发泡胶传递压缩应力的能力,导致平压强度进一步下降。

2.3 夹层板剪切强度分析

复合材料夹层结构的剪切试验主要是考察夹层结构的剪切强度和破坏形式,以此评估芯层抵抗剪切载荷的能力以及复合材料面板与 Nomex 蜂窝芯、胶膜和发泡胶之间的匹配性。4 种夹层板在 4 种试验环境条件下的剪切强度测试结果如图 4 所示。

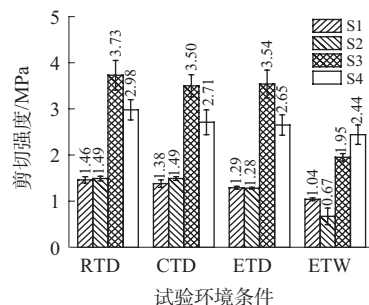


图 4 4 种试验环境条件下夹层板的剪切强度

由图4可以看出,在RTD条件下,夹层板S1和S2的剪切强度无明显差别,且在CTD和ETD条件下,其剪切强度变化较小;在ETW条件下,相比RTD条件下夹层板S1和S2的剪切强度,S1和S2的剪切强度降低28.7%和55.0%,证明湿热环境对夹层结构剪切性能的影响显著,原因可能是湿热环境下夹层板面板与芳纶纸蜂窝芯之间的胶膜粘接性能退化。此外,在RTD条件下,填充发泡胶的夹层板S3和S4的剪切强度相较于夹层板S1和S2分别提高1.5倍和1倍,证明芳纶纸蜂窝格填充发泡胶可有效提高夹层板的剪切强度,原因是发泡胶可以传递不同芳纶纸芳纶蜂窝单元间的剪应力,使多个蜂窝单元同时承载。在CTD和ETD条件下,夹层板S3和S4的剪切强度无明显变化,说明温度对其剪切强度影响较小。在ETW条件下,试样经湿热处理,夹层板S3和S4的剪切强度相比RTD条件分别降低47.7%和18.1%,湿热环境下J-47D2发泡胶自身强度下降及环氧树脂胶膜粘接性能的衰减均会导致夹层结构剪切强度下降。

剪切试验中,夹层板S1和S2在4种测试条件下的失效模式均为蜂窝芯剪切破坏,填充发泡胶的夹层板S3和S4在4种测试条件下均为蜂窝芯与面板胶接处破坏,具体破坏状态如图5所示。

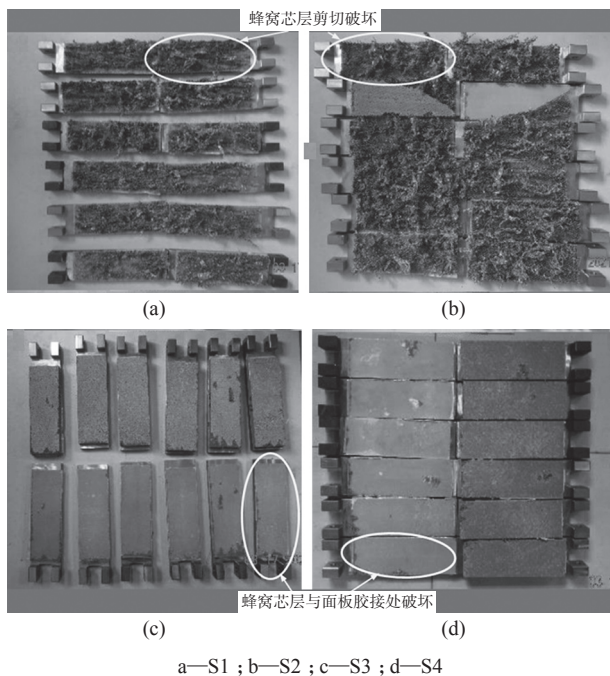


图5 剪切试验试样的破坏模式

2.4 夹层板侧压强度分析

复合材料夹层结构的侧压试验主要是考察夹

层结构抵抗侧向压缩载荷的能力,以此评估夹层结构抵抗侧向压缩载荷的能力以及复合材料面板与Nomex蜂窝芯、胶膜和发泡胶之间的匹配性。4种夹层板在4种试验环境条件下的侧压强度测试结果如图6所示。

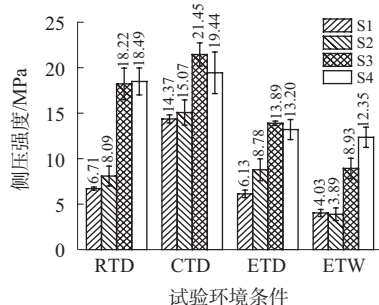
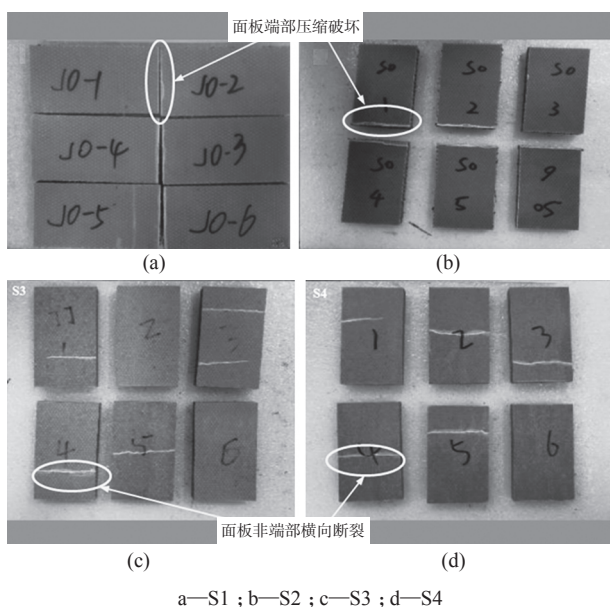


图6 4种试验环境条件下夹层板的侧压强度

由图6可以看出,在CTD条件下,夹层板S1和S2的侧压强度相比RTD条件下分别提升114.2%和86.3%,这可能是由于高分子聚合物在低温环境下,树脂基体收缩,分子间距变小,面板中的树脂和玻璃纤维的结合度提升,其抵抗侧向压缩载荷的能力增强。而在ETW条件下,试样经湿热处理,夹层板S1和S2的侧压强度相比RTD条件下均显著下降,分别降低39.9%和51.9%,原因可能是高温高湿环境降低了树脂基体的强度,一定程度上破坏了树脂与纤维之间的界面,水分子进入树脂基体后通过溶胀作用使基体发生增塑,使树脂对玻璃纤维的束缚能力和传递应力的能力下降^[16]。填充发泡胶后,夹层板S3和S4在RTD条件下的侧压强度相比未填充发泡胶时分别提升171.5%和128.6%,原因是填充发泡胶后,夹层板面板和发泡胶共同承担侧向压缩载荷。在ETD条件下,随着温度升高,树脂自身强度下降,发泡胶传递侧向载荷的能力下降,导致夹层板S3和S4的侧压强度相比RTD条件下分别下降23.8%和28.6%。在ETW条件下,试样经湿热处理,水分对发泡胶的增塑作用和对发泡胶与蜂窝芯界面处的破坏,导致夹层板S3和S4的侧压强度进一步下降。

在侧向压缩试验中,夹层板S1和S2主要由上、下两侧面板承载,蜂窝芯侧向无承载能力,因此试样在4种测试条件下的破坏模式均为端部面板压缩破坏;填充发泡胶的夹层板S3和S4在4种测试条件下的破坏模式均为面板非端部的横向断裂,芯层并无明显破坏,具体破坏状态如图7所示。



a—S1 ; b—S2 ; c—S3 ; d—S4

图7 侧压试验试样破坏模式

2.5 夹层板弯曲性能分析

复合材料夹层结构的弯曲试验主要是考察夹层结构的芯层剪切强度和弯曲刚度,以此评估夹层结构抵抗弯曲变形的能力以及芯层的抗剪切能力。4种夹层板在4种试验环境条件下的弯曲刚度和芯层剪切应力测试结果如图8、图9所示。

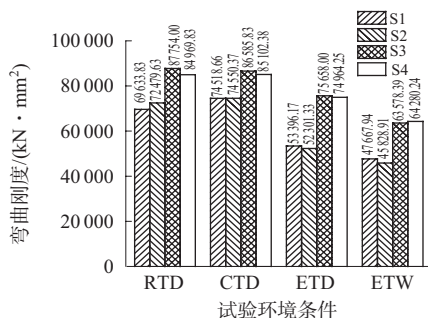


图8 4种试验环境条件下夹层板的弯曲刚度

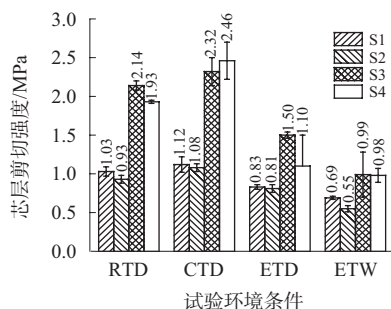


图9 4种试验环境条件下夹层板的芯层剪切强度

由图8、图9可知,在RTD条件下,夹层板S1和S2的芯层剪切强度和弯曲刚度基本一致,证明胶膜对夹层结构的弯曲性能无明显影响。在ETD条件下,夹层板S1和S2的弯曲刚度相比RTD条件

下分别下降23.3%和27.8%,芯层剪切强度分别下降19.4%和12.9%;而在ETW条件下,试样经湿热处理,夹层板的弯曲刚度和芯层剪切强度进一步降低,夹层板S1和S2的弯曲刚度相比RTD条件下则分别下降31.5%和36.8%,芯层剪切强度分别下降33.0%和40.9%,证明高温和湿热环境对Nomex蜂窝夹层结构弯曲性能的影响较大^[17]。填充发泡胶后,夹层结构面板、蜂窝芯和发泡胶共同承担弯曲载荷,因此,在RTD条件下,相比夹层板S1和S2的弯曲刚度,S3和S4的弯曲刚度分别提升了26.0%和17.2%,芯层剪切强度更是提高了1倍以上。在ETD条件下,发泡胶发生软化,传递应力的能力下降,相比RTD条件下夹层板S1和S2的弯曲刚度和芯层剪切强度,夹层板S3和S4的弯曲刚度分别降低13.8%和11.8%,芯层剪切强度分别下降29.9%和43.0%;另外,在ETW条件下,湿热环境中的水汽对发泡胶的增塑作用会导致夹层板的芯层剪切应力和弯曲刚度进一步降低。

在弯曲试验过程中发现,夹层板S1和S2在弯曲载荷下均出现加载处面板断裂并与蜂窝芯分离,为典型蜂窝芯剪切破坏,而填充发泡胶的夹层板S3和S4在加载处面板断裂,芯层无明显破坏。

3 结论

通过制备4种夹层板,开展了胶膜、发泡胶等配套材料与国产环氧树脂基玻璃纤维复合材料预浸料的相容性试验,并研究其在RTD,CTD,ETD和ETW试验环境条件下的力学性能,得出以下结论:

(1) 夹层板S1和S2的平拉强度、平压强度、剪切强度、侧压强度和弯曲性能在4种环境状态下均无明显区别,证明J-95膜状结构胶和SY-24C胶膜与SW100A/AC319预浸料均具有良好的相容性。

(2) 在ETD条件下,夹层板S1和S2的平压强度、剪切强度和弯曲性能呈现下降趋势;在ETW条件下,夹层板的各项力学性能进一步降低。

(3) 相较于夹层板S1和S2,夹层板S3和S4的各项力学性能均显著提升,说明Nomex蜂窝格内填充J-47D2发泡胶可有效提升夹层板的力学性能。在ETD条件下,J-47D2发泡胶自身强度下降、J-95膜状结构胶和SY-24C胶膜粘接性能衰退等原因导致夹层板的各项力学性能有不同程度降低;在ETW条件下,试样经湿热处理,水汽对发泡胶产生增塑作用,降低了发泡胶传递应力的能力,导致夹层板的力学性能进一步下降。

参考文献

- [1] 程文礼,袁超,邱启艳,等.航空用蜂窝夹层结构及制造工艺[J].航空制造技术,2015(7):94-98.
Cheng Wenli, Yuan Chao, Qiu Qiyan, et al. Honeycomb sandwich structure and manufacturing process in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(7):94-98.
- [2] Castanie B, Bouvet C, Ginot M. Review of composite sandwich structure in aeronautic applications[J]. Composites Part C:Open Access, 2020. DOI:10.1016/j.jcomc.2020.100004.
- [3] 罗玉清,宋欢,陆志远,等.芳纶蜂窝复合材料的制备及性能研究[J].高科技纤维与应用,2018,43(4):5-11.
Luo Yuqing, Song Huan, Lu Zhiyuan, et al. Study on the preparation and properties of aramid honeycomb composites[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2018, 43(4):5-11.
- [4] Nunes J P, Silva J F. Sandwiched composites in aerospace engineering[M]//Advanced composite materials for aerospace engineering. Sawston, Cambridge:Woodhead Publishing, 2016:129-174.
- [5] Palomba G, Epasto G, Crupi V. Lightweight sandwich structures for marine applications:A review[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2021. DOI:10.1080/15376494.2021.1941448.
- [6] Birman V, Kardomateas G A. Review of current trends in research and applications of sandwich structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 142:221-240.
- [7] 王燕,程文礼,王绍凯.复合材料蜂窝夹层结构在民用飞机上的应用综述[J].纤维复合材料,2021,38(2):73-77.
Wang Yan, Cheng Wenli, Wang Shaokai. Review of the application of composite honeycomb sandwich structure on civil aircraft[J]. Fiber Composites, 2021, 38(2):73-77.
- [8] 韦生文.A型夹芯复合材料在地面雷达天线罩中的应用[J].电子机械工程,2006(4):47-49.
Wei Shengwen. Application of laminated compound material type A in ground-based antenna radome[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2006(4):47-49.
- [9] 贺靖,杨晓琳,朱秀迪,等.Nomex蜂窝夹层复合材料力学性能研究[J].复合材料科学与工程,2020(9):79-84.
He Jing, Yang Xiaolin, Zhu Xiudi, et al. Study on the mechanical properties of Nomex-honeycomb sandwich composites[J]. Composites Science and Engineering, 2020(9):79-84.
- [10] 毕红艳.蜂窝夹层结构成型工艺对其力学性能影响[J].黑龙江科技信息,2016(21):66-67.
Bi Hongyan. Influence of honeycomb sandwich structure molding process on its mechanical properties[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2016(21):66-67.
- [11] 郝新超,胡杰.Nomex蜂窝夹层结构侧向变形机理及蜂窝稳定化[J].航空制造技术,2020,63(13):69-74,82.
Hao Xinchao, Hu Jie. Lateral crush mechanism and honeycomb stabilization of Nomex honeycomb sandwich structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(13):69-74, 82.
- [12] 东巳宙.高温环境下复合材料层合板与蜂窝板力学性能分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
Dong Sizhou. The analysis of mechanical properties on composite laminated plate and honeycomb panel under the environment of high temperature[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2016.
- [13] 张晨晖,赵文忠,屈彦杰,等.某型宽频带雷达天线罩的研制[J].复合材料科学与工程,2021(11):88-93.
Zhang Chenhui, Zhao Wenzhong, QuYanjie, et al. Development of a broadband radome[J]. Composites Science and Engineering, 2021(11):88-93.
- [14] 孙坤,赵文忠,张晨晖,等.用于雷达天线的国产碳纤维预浸料成型工艺优化及配套材料优选[J].复合材料科学与工程,2021(12):66-72.
Sun Kun, Zhao Wenzhong, Zhang Chenhui, et al. Optimization of forming process and supporting materials of domestic carbon fiber prepreg for radar antenna[J]. Composites Science and Engineering, 2021(12):66-72.
- [15] 刘玥,刘伟,华洲,等.复合材料Nomex蜂窝夹芯结构的平压试验研究[J].航空制造技术,2020,63(17):86-91.
Liu Yue, Liu Wei, Hua Zhou, et al. Experimental study on Nomex honeycomb sandwich structure subjected to out-of-plane compression load[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(17):86-91.
- [16] 高琦,赵文忠,张晨晖,等.工艺方法和试验环境对EP/GF层合板力学性能影响[J].工程塑料应用,2021,49(7):65-70.
Gao Qi, Zhao Wenzhong, Zhang Chenhui, et al. Effects of process method and test environment on mechanical properties of EP/GF Laminates[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(7):65-70.
- [17] 王家伟,陈敏孙,江厚满.Nomex蜂窝夹层板弯曲性能温度相关性的实验研究[J].红外与激光工程,2016,45(1):195-199.
Wang Jiawei, Chen Minsun, Jiang Houman. Experimental study on the temperature effect on the flexural properties of Nomex honeycomb sandwich structure[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(1):195-199.