

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.04.020

国产 T800 级碳纤维环氧预浸料室温储存性能

祝林,王浩军,郑超,赵虎,李尧

(中航西安飞机工业集团股份有限公司,西安 710089)

摘要: 预浸料在室温下的老化会导致预浸料理化性能与工艺性能的变化,甚至对复合材料构件的质量产生不利影响。为研究新一代国产 T800 级高韧性 AC531 环氧预浸料的室温储存性能,考察了室温储存时间对单向带与织物预浸料的树脂流动度、挥发份含量、固化反应程度以及黏性的影响,并且使用不同储存时间的预浸料制备了大厚度、大曲率 L 型复合材料构件,对复合材料构件的内部质量、单层固化厚度以及力学性能进行了测试。结果表明,室温储存 30 d 后,预浸料的树脂流动度略有降低,挥发份含量略有升高,固化度上升,单向带预浸料黏性等级变为 4 级,织物预浸料黏性等级变为 3 级,预浸料的工艺性降低,织物预浸料的黏性保持期优于单向带预浸料。储存 30 d 后的预浸料制备的大厚度大曲率 L 型复合材料构件,仍具有较高的内部质量,单层固化厚度满足要求,复合材料的弯曲强度与层间剪切强度几乎保持不变。

关键词: 预浸料;储存性能;树脂流动度;固化度;黏性;力学性能;内部质量

中图分类号: TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)04-0128-07

Storage performance of domestic T800 carbon fiber epoxy prepreg at room temperature

ZHU Lin, WANG Haojun, ZHENG Chao, ZHAO Hu, LI Yao

(AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

Abstract : The aging of prepreg at room temperature caused changes of the physicochemical and processing properties of prepreg, and even affected the quality of composite components. To investigate the storage performance at room temperature of new generation domestic T800 grade toughened AC531 epoxy prepreg, the effect of storage time at room temperature on the resin flow, volatile content, cure degree, and tack of unidirectional tape and fabric prepreg were examined. In addition, large-thickness and high-curvature L-shaped composite components were prepared using the prepreg with different storage times, and the internal quality, monolayer curing thickness and mechanical properties of the composite components were tested. The results show that after 30 d of storage at room temperature, the resin flow of the prepreg slightly decreases, and the volatile content slightly increases, the tack level of the unidirectional tape prepreg changes to level 4, while the tack level of the fabric prepreg changes to level 3, the processability of the prepreg decreases, and the tack retention time of the fabric prepreg is better than that of the unidirectional tape prepreg. The large-thickness and high-curvature L-shaped composite components prepared from the prepreg after 30 d of storage still exhibit high internal quality, and the cured ply thickness meets the requirements, the flexural strength and interlaminar shear strength remain almost unchanged.

Keywords : prepreg ; storage performance ; resin flow ; cure degree ; tack ; mechanical property ; internal quality

先进碳纤维树脂基复合材料因具有高比强度、高比刚度、耐腐蚀、抗疲劳、易于制造整体结构等优点,在航空领域得到了广泛应用^[1-3]。以空客 A350 与波音 B787 为代表,复合材料在先进民用飞机上的

用量已经突破 50%,复合材料用量成为目前衡量航空飞行器先进程度的重要标志^[4-6]。热固性环氧树脂因其出色的工艺性能、耐高温性能以及力学性能成为航空领域使用最广泛的复合材料树脂基体。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3401700)

通信作者: 祝林,博士,工程师,研究方向为树脂基复合材料

收稿日期: 2024-03-01

引用格式: 祝林,王浩军,郑超,等. 国产 T800 级碳纤维环氧预浸料室温储存性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(4): 128-134.

ZHU Lin, WANG Haojun, ZHENG Chao, et al. Storage performance of domestic T800 carbon fiber epoxy prepreg at room temperature[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4): 128-134.

据报道,波音和空客已经在飞机主承力结构上大量使用T800级碳纤维环氧复合材料(如3900-2环氧树脂/IMA碳纤维,M21E环氧树脂/IMA碳纤维等)^[7-8]。

预浸料是制造碳纤维树脂基复合材料的中间材料,决定了复合材料产品的性能。对于热固性环氧树脂预浸料,一个突出的问题是预浸料的不稳定性。预浸料的树脂基体在常温下会发生缓慢的交联反应,并且随着热历史的不同,预浸料的反应程度随之发生变化^[9-10]。为了解决预浸料不稳定的问题,目前广泛的做法是在预浸料生产完后立即保存在冷库中,并且在后续运输与储存过程中始终保持低温(-18℃以下)。在复合材料制造过程中,控制预浸料在室温环境下的储存时间,在预浸料的适用期内完成零件的铺贴。一般而言,预浸料在室温下的适用期较短,大约为10 d。但随着复合材料构件向大厚度大尺寸发展,所需要的铺贴时间大幅度延长,因此预浸料不可避免地在室温下长时间暴露。随着预浸料室温储存时间的延长,预浸料逐渐发生老化,从而对预浸料的工艺性能与复合材料产品的成型质量造成不利影响^[11]。

尽管多种商业预浸料在航空等领域得到了大规模的应用,但是室温储存对预浸料及复合材料构件性能的影响却少有报道。Kim等^[12]研究了CYCOM 5320-1/8HS碳纤维环氧预浸料的固化反应热、玻璃化转变温度(T_g)、介电性能随储存时间的变化关系。Grunenfelder等^[13]将不同储存时间的CYCOM 5320/5HS碳纤维环氧预浸料制造1 mm厚的复合材料平板,发现预浸料的老化导致复合材料孔隙率的增加。Hübner等^[14]研究了一种以双氰胺/有机脲为固化剂的快速固化碳纤维环氧预浸料的老化行为,结果表明预浸料的老化伴随着树脂流动性、黏性的下降,层压板的层间剪切强度降低。陈萍等^[15]研究了CYCOM X850碳纤维环氧预浸料储放老化对复合材料力学性能的影响,发现储放时间对层压板的层间剪切与弯曲性能影响不大。臧千等^[16]研究了TGT800-12K/603碳纤维环氧预浸料的室温储存性能,发现随储存时间延长,预浸料固化度上升,流动性下降,黏性变差,失去操作工艺性。周宇等^[17]研究了放置时间对T800/607碳纤维环氧预浸料固化反应程度的影响,结果表明,随着放置时间的延长,预浸料的 T_g 略有升高,固化反应热稍

微降低。目前关于预浸料储存性能的研究往往局限于预浸料的理化性能或者是复合材料的力学性能,对预浸料性能与复合材料性能的关联性研究不够;且储存时间对典型复合材料构件成型质量的影响尚需进一步研究,特别是对于大厚度大曲率的复合材料构件;此外,不同预浸料的室温储存性能存在一定差异,需要有针对性地进行研究。

国内经过多年的发展,新一代国产T800级高韧性AC531环氧树脂基复合材料的综合性能已接近国外先进水平^[18],但是关于其室温储存性能的研究目前却少见报道。因此,笔者以AC531单向带与织物预浸料为研究对象,探索了室温储存时间对预浸料性能及复合材料性能的影响规律,并且制造典型大厚度大曲率L型复合材料构件,考察了室温储存时间对复合材料构件成型质量的影响。通过更深入地探究室温老化对预浸料性能及复合材料构件质量的影响规律,对预浸料的储存性能进行评估,并指导复合材料制造工艺。

1 实验部分

1.1 主要原材料

高韧性高温固化环氧碳纤维单向带预浸料(UD):CCF800H/AC531,树脂含量35%,中航复合材料有限责任公司;其中树脂牌号为AC531,中航复合材料有限责任公司;纤维牌号为CCF800H,威海拓展纤维有限公司。

高韧性高温固化环氧碳纤维织物预浸料(FAB):CF8611/AC531,树脂含量40%,中航复合材料有限责任公司;树脂牌号为AC531,中航复合材料有限责任公司;纤维织物牌号为CF8611,威海拓展纤维有限公司。

1.2 主要仪器及设备

便携式超声扫描设备:S647,英国ULTRASONIC SCIENCES公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC 3,英国梅特勒利多公司;

金相显微镜:BX53M,日本奥林巴斯公司;

万能力学试验机:LD26,深圳兰博三思公司。

1.3 试样制备

预浸料从冷库取出后,在室温下放置6 h以上进行解冻,将预浸料切割成料片,在室温环境放置0 d,10 d,20 d,30 d,环境温度为23℃,相对湿度为55%。取放置时间0 d,10 d,20 d,30 d的预浸料制

造L型复合材料构件以及弯曲性能、层间剪切性能试板。L型复合材料构件的尺寸为150 mm×100 mm×100 mm,内圆角半径 R 为4 mm,构件示意图如图1所示。单向带铺层为 $[45/0/-45/90]_{4S}$,厚度为4.5 mm;织物铺层为 $[(0,90)]_{20}$,厚度为4.4 mm。按照供应商推荐的固化程序进行复合材料的固化,从室温升温到130℃,保温40 min,然后继续升温到185℃,保温3 h,最后降温到60℃以下,卸压出罐;热压罐压力为0.65 MPa,全程抽真空。使用金刚石铣刀将固化后的试板铣切成需要的几何形状。

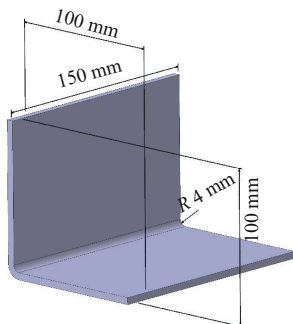


图1 L型复合材料构件示意图

Fig. 1 The schematic diagram of L-shaped composite component

1.4 测试与表征

1.4.1 预浸料性能测试

(1) 树脂流动性测试。

按照 ASTM D3531-2016 测试预浸料的树脂流动性,试验温度为 $(180 \pm 3)^\circ\text{C}$,压力为 $(0.6 \pm 0.06)\text{MPa}$,保持时间为20 min,按照公式(1)计算树脂流动度。

$$F = \frac{W_1 - W_4}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: F 为树脂流动度; W_1 为预浸料样品的质量; W_4 为试验后预浸料样品的质量。

(2) 挥发份含量测试。

按照 ASTM D3530-2020 测试预浸料的挥发份含量,试验温度为 $(130 \pm 3)^\circ\text{C}$,保持时间为 $(15 \pm 1)\text{min}$ 。

(3) DSC测试。

按照 ASTM E1356-2014 和 ASTM E2160-2018 测试预浸料的 T_g 与固化反应热,升温速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$,氮气流量为 $(50 \pm 5)\text{mL}$ 。

(4) 黏性测试。

按照 HB7736.8-2004 对预浸料的黏性进行测试。

1.4.2 复合材料构件性能测试

(1) 超声扫描测试。

采用便携式超声波扫描设备检测复合材料构件的内部质量,探头5 MHz,记录超声扫描信号。

(2) 金相显微镜测试。

使用金相显微镜对复合材料构件的孔隙进行观测。

(3) 单层固化厚度测试。

采用千分尺测量复合材料构件的单层固化厚度。

(4) 力学性能测试。

按照 ASTM D790-2017 与 ASTM D2344-2022 对复合材料的弯曲强度与层间剪切强度进行测试。

2 结果与讨论

2.1 储存时间对预浸料树脂流动度的影响

树脂的流动度是衡量固化过程树脂流动难易程度的重要指标,对复合材料的固化成型质量有着决定性的影响。在固化阶段,温度升高树脂的黏度降低,在压力作用下发生流动,对纤维内部以及层与层之间的孔隙进行填充,从富树脂区向贫树脂区进行转移,改善由材料及构件结构导致的树脂分布不均,并促进气泡的排出,在这个过程中复合材料制品的厚度、纤维体积含量与内部质量得到有效控制。为研究储存时间对预浸料树脂流动度的影响,对不同储存时间的UD与FAB进行了树脂流动度测试,结果如图2所示。由图2看出,UD的流动性小于FAB,随着储存时间的延长,UD的流动度出现略微下降,在储存30 d后,流动度由初始的12.3%下降到10.9%;对于FAB,随着储存时间的延长,其树脂流动度出现一定波动,储存30 d后,流动度由初始的15.1%下降到14.1%。以上结果表明,该预浸料的储存性能较好,在30 d的储存时间内,无论是UD还是FAB,树脂流动性下降幅度均比较小。

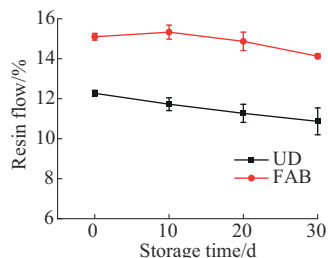


图2 不同储存时间下UD与FAB的树脂流动度

Fig. 2 Resin flow of UD and FAB under different storage times

2.2 储存时间对预浸料挥发份含量的影响

预浸料的挥发份含量对复合材料的成型质量具有重要影响。过多的挥发份会导致预浸料在固

化阶段中产生大量气体,促进孔隙的增长,降低复合材料的内部质量。为了研究储存时间对预浸料挥发份含量的影响,对不同储存时间的UD与FAB进行了挥发份含量测试,结果如图3所示。由图3可知,两种预浸料的挥发份含量随着储存时间的延长略微上升。对于UD,在储存30 d后,挥发份含量由初始的0.09%上升到0.20%;对于FAB,在储存30 d后,挥发份含量由初始的0.08%上升到0.18%。预浸料挥发份含量的上升是由于吸收了空气中的水分,但是在储存时间30 d内,两种预浸料的挥发份含量均在0.2%以内,说明在储存时间30 d范围内,该预浸料还能保持较低的挥发份含量。

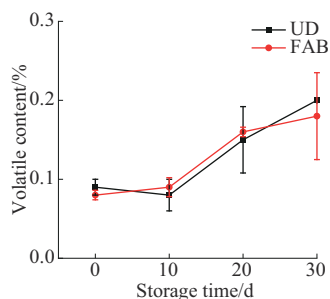


图3 不同储存时间下UD与FAB的挥发份含量

Fig. 3 Volatile content of UD and FAB under different storage times

2.3 储存时间对预浸料固化反应程度的影响

环氧树脂预浸料在固化阶段会发生固化交联反应并放出热量,未固化的预浸料的固化反应热是表征预浸料固化反应性能的重要指标。为了研究储存时间对预浸料固化反应热的影响,对不同储存时间的UD与FAB进行了DSC测试,通过DSC曲线可获取预浸料的 T_g 与固化反应热 ΔH (图4)。不同储存时间的预浸料的固化反应热如图5所示。由图5可知,两种预浸料的固化反应热随着储存时间的延长总体呈下降趋势。对于UD,在储存30 d后,其固化反应热从初始的310.7 J/g下降到262.3 J/g,固化度约为16%;对于FAB,储存30 d后,其固化反应热从初始的320.8 J/g下降到286.2 J/g,固化度约为

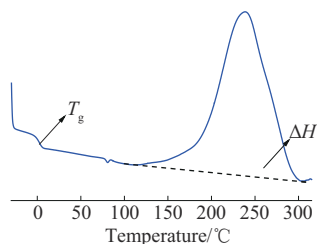


图4 预浸料的DSC曲线

Fig. 4 The DSC curve of prepreg

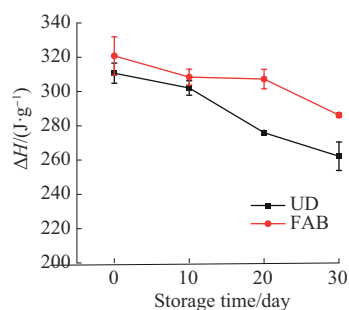


图5 不同储存时间下UD与FAB的 ΔH

Fig. 5 ΔH of UD and FAB under different storage time

11%。

不同储存时间下预浸料的 T_g 如图6所示。由图6可知,两种预浸料的 T_g 随着储存时间的延长而下降,UD的 T_g 明显高于FAB。对于UD,在储存30 d后,其 T_g 从初始的5.8 °C升高到18.1 °C;对于FAB,储存30 d后,其 T_g 从初始的1.9 °C升高到9.2 °C。随着储存时间的增加,预浸料发生部分固化反应,固化度提高,分子量增加, T_g 上升。综合反应热与 T_g 的试验结果表明,储存30 d后,两种预浸料的固化程度都出现一定幅度的上升,其中UD的固化程度高于FAB。

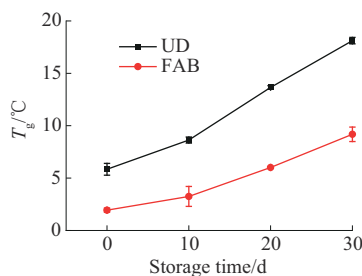


图6 不同储存时间下UD与FAB的 T_g

Fig. 6 T_g of UD and FAB under different storage time

2.4 储存时间对预浸料黏性的影响

预浸料的黏性对复合材料的成型过程具有重要影响。黏性太差将导致预浸料难以与模具或上一层预浸料粘贴,需要加热辅助才能进行铺放。为研究储存时间对预浸料黏性的影响,采用垂直金属板法对不同储存时间的单向带与织物预浸料进行了黏性测试,按照表1进行评定,结果见表2。

由表2可知,两种预浸料的黏性随着储存时间的延长显著降低。对于UD,在储存20 d后,黏性等级由初始的1级变为3级,30 d后变为4级;对于FAB,在储存30 d后,黏性等级由初始的1级变为3级。储存30 d后,FAB的黏性优于UD,这是因为织物树脂含量更高,并且固化反应程度较低。

表1 预浸料黏性等级评定方法

Tab. 1 Evaluation method of the tack level of prepreg

Tack Level	Test phenomenon
Level 1	Can affixed to each other, can separated without loss, can affixed to polished steel plate
Level 2	Can affixed to each other, can't separated without loss, can affixed to polished steel plate
Level 3	Can affixed to each other, can separated without loss, can't affixed to polished steel plate
Level 4	Can't affixed to each other, can separated without loss, can't affixed to polished steel plate
Level 5	Can affixed to each other, can't separated without loss, can't affixed to polished steel plate

表2 不同储存时间下UD与FAB的黏性

Tab. 2 Tack level of UD and FAB under different storage time

Storage time/day	UD	FAB
0	Level 1	Level 1
10	Level 1	Level 1
20	Level 3	Level 1
30	Level 4	Level 3

2.5 储存时间对复合材料构件性能的影响

对不同储存时间的预浸料采用热压罐工艺制造大厚度大曲率L型复合材料构件(图7)与复合材料力学性能试板,对L型复合材料构件的内部质量、单层固化厚度进行测试,使用金相显微镜对L型复合材料构件内部的孔隙进行观察,对复合材料试板的弯曲强度与层间剪切强度进行测试。

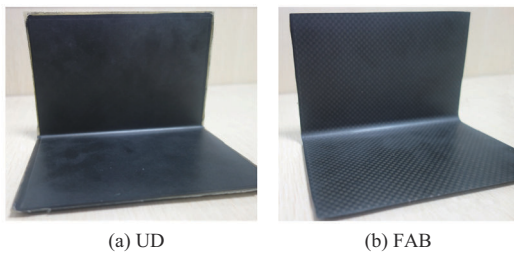


图7 L型复合材料构件

Fig. 7 L-shaped composite components

L型复合材料构件的超声A扫描结果如图8所示,金相显微照片如图9所示。随着预浸料储存时间的延长,单向带与织物复合材料构件的超声信号有一定波动,但都在70%以上,远高于孔隙密集门槛值(40%),并且从截面光学显微照片看出,复合材料内部致密,没有发现孔隙。表明该预浸料在储存

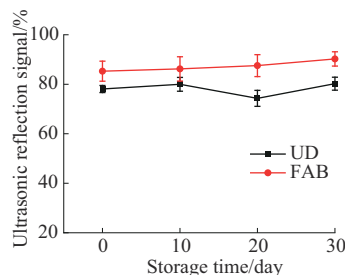
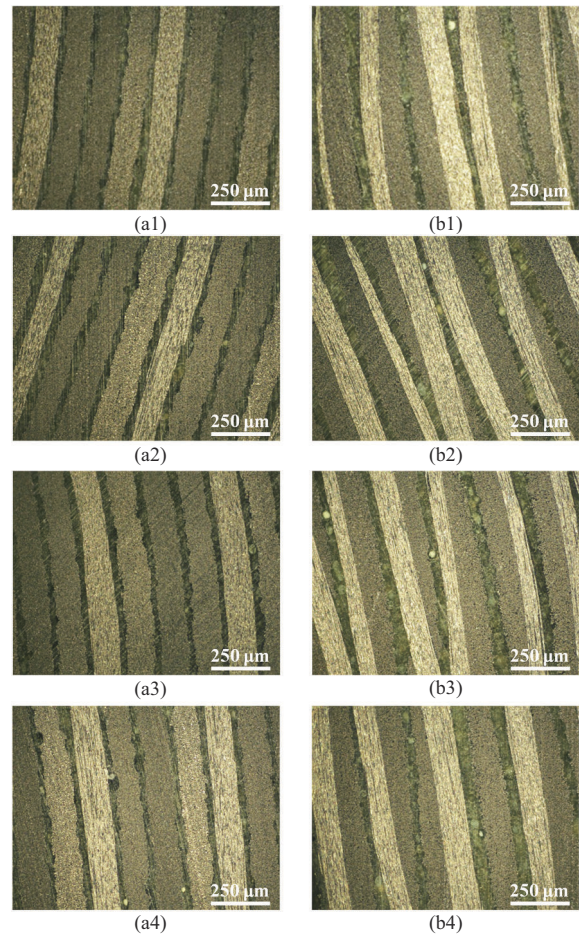


图8 不同储存时间下UD与FAB L型复合材料构件的超声反射信号
Fig. 8 Ultrasonic reflection signal of UD and FAB L-shaped composite components under different storage time



(a1)~(a4)—UD composites stored for 0, 10, 20 d and 30 d;
(b1)~(b4)—FAB composites stored for 0, 10, 20 d and 30 d

图9 不同储存时间下UD与FAB L型复合材料构件的光学显微照片
Fig. 9 Optical micrographs of UD and FAB L-shaped composite components under different storage time

30 d后,制造的L型复合材料构件还具有较高的内部质量。

L型复合材料构件的单层固化厚度测试结果如图10所示。由图10可知,随着预浸料储存时间的延长,单向带与织物复合材料构件的单层固化厚度几乎保持不变,其中织物复合材料构件的单层固化厚度高于单向带。表明在30 d储存期内,预浸料中树脂的固化对热压罐成型阶段树脂的流动性影响较小,复合材料构件的厚度仍处于要求范围内。

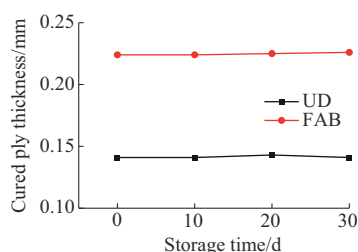


图10 不同储存时间下UD与FAB L型复合材料的单层固化厚度

Fig. 10 Cured ply thickness of UD and FAB L-shaped composite components under different storage times

复合材料层压板的力学性能测试结果如图11所示。由图11可知,随着预浸料储存时间的延长,单向带与织物复合材料层压板的弯曲强度与层间剪切强度均保持稳定,没有明显下降。表明在30 d储存期内,预浸料中树脂的固化以及黏性的降低对热压罐固化后复合材料的力学性能没有明显影响。

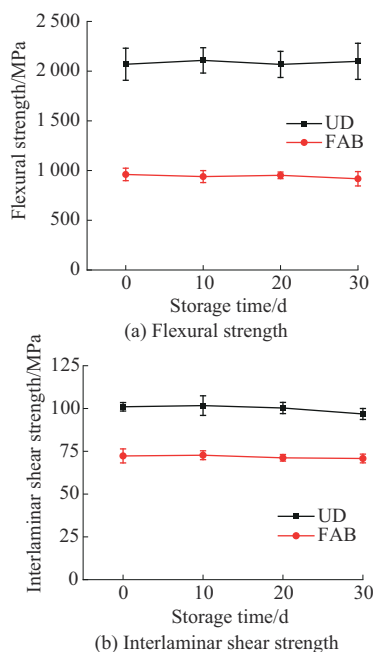


图11 不同储存时间下UD与FAB复合材料的力学性能

Fig. 11 Mechanical properties of UD and FAB composites under different storage time

3 结论

(1)随着室温储存时间延长,国产T800级碳纤维环氧预浸料的树脂流动度稍有降低,挥发份含量略有增加,在30 d后仍保持较高的树脂流动度与较低的挥发份含量。

(2)随着室温储存时间延长,国产T800级碳纤维环氧预浸料的固化程度逐渐增加,30 d后单向带预浸料固化度16%,织物预浸料固化度11%。

(3)随着室温储存时间延长,国产T800级碳纤维环氧预浸料的黏性逐渐降低,30 d后单向带预浸料的黏性降为4级,织物预浸料的黏性降为3级,织物预浸料相比单向带预浸料具有更长的黏性保持期。

(4)室温储存30 d的国产T800级碳纤维环氧预浸料制备的大厚度大曲率L型复合材料构件,内部质量较高,单层固化厚度满足要求,复合材料的弯曲强度与层间剪切强度均未发生明显变化。

参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
- [2] 邢丽英, 李亚锋, 陈祥宝. 先进复合材料在航空装备发展中的地位和作用[J]. 复合材料学报, 2022, 39(9): 4 179-4 186.
XING Liying, LI Yafeng, CHEN Xiangbao. Status and role of the advanced composite materials in the development of aviation equipment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4 179 - 4 186.
- [3] 邢丽英, 包建文, 礼嵩明, 等. 先进树脂基复合材料发展现状和面临的挑战[J]. 复合材料学报, 2016, 33(7): 1 327-1 338.
XING Liying, BAO Jianwen, LI Songming, et al. Development status and facing challenge of advanced polymer matrix composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(7): 1 327-1 338.
- [4] 马志阳, 高丽敏, 徐吉峰. 复合材料在大飞机主承力结构上的应用与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2021, 64(11): 24-30.
MA Zhiyang, GAO Limin, XU Jifeng. Application and development for composite primary structure in large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(11): 24-30.
- [5] 马立敏, 张嘉振, 岳广全, 等. 复合材料在新一代大型民用飞机中的应用[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 317-322.
MA Limin, ZHANG Jiazhen, YUE Guangquan, et al. Application of composites in new generation of large civil aircraft[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 317-322.
- [6] 宁莉, 杨绍昌, 冷悦, 等. 先进复合材料在飞机上的应用及其制造技术发展概述[J]. 复合材料科学与工程, 2020(5): 123-128.
NING Li, YANG Shaochang, LENG Yue, et al. Overview of the application of advanced composite materials on aircraft and the development of its manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020(5): 123-128.
- [7] 刘善国. 国外飞机先进复合材料技术[J]. 航空制造技术, 2014(19): 26-31.
LIU Shanguo. Advanced composite technology of foreign aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(19): 26-31.
- [8] 包建文, 钟翔屿, 张代军. 国产高强中模碳纤维及其增强高韧性树脂基复合材料研究进展[J]. 材料工程, 2020, 48(8): 33-48.

- BAO Jianwen, ZHONG Xiangyu, ZHANG Daijun. Progress in high strength intermediate modulus carbon fiber and its high toughness resin matrix composites in China[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(8):33–48.
- [9] GRUNENFELDER L K, NUTT S R. Prepreg age monitoring via differential scanning calorimetry[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2012, 31(5):295–302.
- [10] YU Yingfeng, SU Huihuang, GAN Wenjun. Effects of storage aging on the properties of epoxy prepregs[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009(48):4 340–4 345.
- [11] SMITH A W, HUBERT P. Benchmarking of potential rapid inspection methods for quantitative tracking of thermoset prepreg state evolution with prolonged ambient ageing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 254. DOI: 10.1016/j.compositesb.2023.110579.
- [12] KIM D, CENTEA T, NUTT S R. In-situ cure monitoring of an out-of-autoclave prepreg: Effects of out-time on viscosity, gelation and vitrification[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 102:132–138.
- [13] GRUNENFELDER L K, CENTEA T, HUBERT P, et al. Effect of room-temperature out-time on tow impregnation in an out-of-autoclave prepreg[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 45:119–126.
- [14] HÜBNER F, MEUCHELBOCK J, FABRIS F W, et al. Fast curing unidirectional carbon epoxy prepregs based on a semi-latent hardener: The influence of ambient aging on the prepregs T_{g0} , processing behavior and thus derived interlaminar performance of the composite[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 216. DOI:10.1016/j.compscitech.2021.109047.
- [15] 陈萍, 赵月青, 李宏福, 等. 碳纤维环氧预浸料前热处理及储放老化对复材力学性能的影响[J]. *航空制造技术*, 2017(16):84–89.
- CHEN Ping, ZHAO Yueqing, LI Hongfu, et al. Influences of carbon fiber/epoxy prepreg pre-heating and storage aging on composite mechanical properties[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017(16):84–89.
- [16] 臧千, 樊孟金, 白雪莲, 等. 603树脂体系及其热熔预浸料室温储存期性能研究[J]. *固体火箭技术*, 2018, 41(3):383–387.
- ZANG Qian, FAN Mengjin, BAI Xuelian, et al. Study of properties of 603 epoxy resin and its prepreg during storage at room temperature[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2018, 41(3): 383–387.
- [17] 周宇, 樊孟金, 尚呈元, 等. 成型T800/607复合材料制备及性能[J]. *宇航材料工艺*, 2017, 47(3):57–60.
- ZHOU Yu, FAN Mengjin, SHANG Chengyuan, et al. Preparation and properties of an out-of-autoclave T800/607 composite[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2017, 47(3):57–60.