

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.10.013

固化循环热历程对芳纶纸蜂窝芯材尺寸收缩的影响

骆严, 刘宇婷, 孔娇月

(上海飞机制造有限公司, 上海 201314)

摘要: 在芳纶纸蜂窝夹芯结构的修理过程中,需对蜂窝零件进行多次加热固化,这可能会导致蜂窝芯材的尺寸收缩,从而导致零部件产生凹陷。因此,有必要研究固化循环热历程对芳纶纸蜂窝芯材尺寸收缩的影响规律,为飞机复合材料芳纶纸蜂窝夹芯结构的修理填补方案提供参考依据。研究了不同修理固化温度及固化循环次数对国产及国外几种芳纶纸蜂窝芯材尺寸收缩的影响。通过对每次固化后的蜂窝芯材尺寸进行测试,探究蜂窝芯材的收缩规律。结果表明,经中高温(121 °C)和高温(177 °C)下修理固化循环多次后,国产与国外的蜂窝芯材的尺寸收缩程度均明显高于经中低温(93 °C)和低温(66 °C)固化加热循环后的收缩程度;经 5 次修理加热循环后,几种蜂窝芯材的尺寸收缩程度均明显高于第 1 次修理固化后的收缩程度;对于相同厚度的国产和国外蜂窝芯材,经多次固化循环后,国产蜂窝芯材的收缩程度更低。总体而言,芳纶纸蜂窝芯材在常见修理温度下多次热历程循环后,蜂窝芯材加热后的收缩程度较小,具有良好的尺寸稳定性,能够较好地满足蜂窝夹芯结构多次修理填补的需求。

关键词: 固化循环;芳纶纸蜂窝芯;尺寸收缩;航空应用;热历程

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)10-0084-07

Effect of curing circulation thermal history on dimensional shrinkage of aramid paper honeycomb core materials

LUO Yan, LIU Yuting, KONG Jiaoyue

(Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201314, China)

Abstract : In the process of repairing the aramid paper honeycomb core materials, the honeycomb parts need to be heated and cured many times, which may lead to the dimensional shrinkage of the honeycomb core, resulting in a dent in the parts. Therefore, it is necessary to study the influence of curing circulation thermal history on the dimensional shrinkage of aramid paper honeycomb core materials, so as to provide reference for the repair and filling scheme of aircraft composite aramid paper honeycomb sandwich structure. The effects of various repaired curing temperature and recirculating heating frequency on dimensional shrinkage of domestic and foreign aramid paper honeycomb core materials were investigated. By measuring the size of honeycomb core materials after each solidification, the shrinkage rule of honeycomb core material was explored. The results indicate that the dimensional shrinkage degree of honeycomb core materials is significantly higher after repeated curing circulation under high (177 °C) and middle-high (121 °C) temperature conditions than that under low (66 °C) and middle-low (93 °C) temperature circumstances. After 5 times of repaired heating circulation, the dimensional shrinkage degrees of these honeycomb core materials are relatively higher than that of 1st heating. For domestic and foreign honeycomb core materials with the same thickness, the shrinkage degree of domestic honeycomb core materials is lower after multiple curing cycles. In general, the dimensional shrinkage degree of these aramid paper honeycomb core materials used is low after multiple thermal history circulation, has good dimensional stability, can better meet the need of honeycomb sandwich structure multiple repair and filling.

Keywords : curing circulation ; aramid paper honeycomb core ; dimensional shrinkage ; aviation application ; thermal history

通信作者: 骆严, 硕士, 工程师, 研究方向为复合材料工艺研究

收稿日期: 2024-09-01

引用格式: 骆严, 刘宇婷, 孔娇月. 固化循环热历程对芳纶纸蜂窝芯材尺寸收缩的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(10):84-90.

LUO Yan, LIU Yuting, KONG Jiaoyue. Effect of curing circulation thermal history on dimensional shrinkage of aramid paper honeycomb core materials[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(10):84-90.

高结构效率是飞机设计中需考虑的重要因素,这就要求飞机在满足强度要求的前提下,结构质量尽可能轻。复合材料夹层结构通常由上下两块高强度、薄厚度的面板,中间层低密度、大厚度的蜂窝等轻质夹芯及胶黏剂组合而成。其中,芳纶纸蜂窝夹芯结构具有质量轻、弯曲强度大、抗冲击性好、抗失稳能力强和隔热隔声能力强等优点,能够同时满足结构轻量化和多功能一体化要求,因而被广泛应用于航空航天等领域,比如飞机的雷达罩、翼梢小翼和整流罩等零件^[1-6]。

然而,芳纶纸蜂窝夹层结构零部件在飞机服役过程中,难以避免由于雷击、鸟撞等自然环境或意外冲击而受到各种各样的损伤,包括表面凹陷、面板脱胶、腐蚀、穿孔等问题^[7-9]。因此,需及时对这些零部件进行修理维护。在芳纶纸蜂窝夹层结构零部件的修理过程中,往往需对蜂窝芯材多次加热固化,蜂窝芯材多次加热后出现的收缩现象可能是导致修理过程中零部件产生凹陷的重要原因之一。目前,蜂窝夹层结构的修理工艺及方法已被广泛研究^[10-14],然而对蜂窝夹层结构收缩问题相关的研究较少^[6],尤其是关于修理热历程对蜂窝芯材尺寸收缩影响规律的研究。

因此,笔者以几种常用的国外及国产芳纶纸蜂窝芯为研究对象,开展了不同修理固化温度及固化循环次数对芳纶纸蜂窝芯材尺寸收缩的影响研究,探究了芳纶纸蜂窝芯材尺寸受不同固化温度及固化循环热历程的影响规律。探索出了飞机蜂窝夹层结构中芳纶纸蜂窝芯材在4种常见修理固化温度下,5次加热循环后的尺寸收缩规律,为飞机复合材料芳纶纸蜂窝夹芯结构的修理填补方案提供参考依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

国产芳纶纸蜂窝芯材:尺寸为3.2 mm的六边形芯材,密度为48 kg/m³,厚度分别为10, 20 mm和60 mm的芳纶纸蜂窝芯材分别简称为A-10, A-20和A-60,特一(上海)新材料有限公司;

国外芳纶纸蜂窝芯材:尺寸为3.2 mm的六边形芯材,密度为64 kg/m³,厚度为10 mm的芳纶纸蜂窝芯材简称为B-10,美国Gill公司。

1.2 主要仪器及设备

固化炉:8.0 m×4.0 m×3.0 m,室温~250 °C,法国

France Etuves公司;

游标卡尺:INSIZE 1205, 0~150 mm,苏州英仕精密机械有限公司。

1.3 试样制备

(1)加工。将每种芳纶纸蜂窝芯材加工成5件尺寸为长50 mm、宽50 mm的蜂窝试验件,厚度方向不变。

(2)表面准备。对蜂窝芯材进行清洁,去除蜂窝芯上的灰尘。

(3)干燥。在60 °C条件下干燥蜂窝芯试验件。

(4)制真空袋。在平板工装上任一对角的零件余量处布置热电偶;在相同厚度的蜂窝试块四周布置挡条;再用隔离膜保护蜂窝芯材;在真空袋上任选3个角布置真空嘴,真空嘴不能放在蜂窝上面;随后进行零件封装,最后进行真空泄露检查。

(5)修理固化。将经过真空袋封装的蜂窝芯材置于固化炉中,并进行固化,固化要求为抽真空至少到-0.08 MPa,且全程抽真空,并以3 °C/min的升温速率升温至66, 93, 121 °C或177 °C,并保温120~150 min,随后降温至43 °C以下结束。总共进行固化循环5次。

1.4 测试与表征

在蜂窝芯材干燥后及每次固化后都需进行尺寸测试。测试方法为在厚度方向的上、中、下3处位置各取3点分别测试蜂窝芯材的长度与宽度,在宽度方向的上、中、下3处位置各取3点测试蜂窝芯材的厚度。

2 结果与讨论

2.1 不同修理固化温度对蜂窝芯材尺寸影响

对干燥后的国外B-10和国产A-10, A-20, A-60的4种芳纶纸蜂窝芯材进行5次固化循环处理,固化温度为4种常用的修理固化温度,分别为低温(66 °C)、中低温(93 °C)、中高温(121 °C)和高温(177 °C)。在干燥后未成型前及第5次固化循环后分别对这4种蜂窝芯材进行测试。

图1为国外B-10蜂窝经过5次固化循环后的厚度平均值变化图和该蜂窝芯材的收缩率变化图。B-66-10, B-93-10, B-121-10和B-177-10分别代表选用厚度为10 mm的国外B-10蜂窝芯材分别在66, 93, 121 °C和177 °C的温度下进行固化的蜂窝芯材试验件。从图1可以看出,对于国外B-10蜂窝芯材,分别经过4种常用的修理固化温度固化循环5

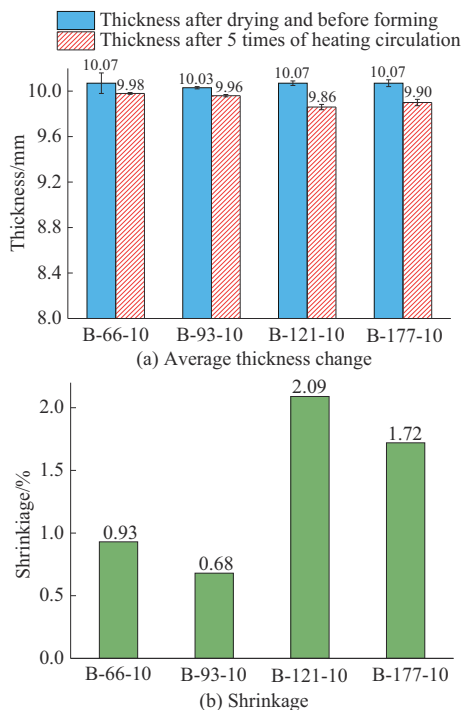


图1 国外B-10蜂窝经过5次固化循环后的厚度平均值变化和收缩率

Fig. 1 Average thickness change and shrinkage of foreign B-10 honeycomb after 5 curing cycles

次后,其厚度方向的收缩程度较小,其中B-121-10蜂窝芯的收缩量最大,收缩了0.21 mm,最大收缩率达到了2.09%。

图2为国产A-10蜂窝芯材经过5次固化循环后的厚度平均值变化图和该蜂窝芯材的收缩率变化图。A-66-10,A-93-10,A-121-10和A-177-10分别代表选用厚度为10 mm的国产A-10蜂窝芯材,分别在66,93,121 °C和177 °C的温度下进行固化的蜂窝芯材试验件。由图2可见,对于国产A-10蜂窝芯材,经过固化循环5次后,其厚度方向的收缩程度基本小于国外B-10蜂窝芯材的收缩程度,其中A-177-10蜂窝芯的收缩量最大,收缩了0.13 mm,最大收缩率为1.26%。

研究表明,经低温(66 °C)和中低温(93 °C)固化循环5次后,国产A-10和国外B-10蜂窝芯材的收缩情况比较接近,国产A-10蜂窝的收缩率为0.65%~0.82%,收缩量为0.06~0.09 mm;国外B-10蜂窝的收缩率在0.68%~0.93%,收缩量为0.07~0.09 mm;经中高温(121 °C)和高温(177 °C)固化循环5次后,国产A-10蜂窝的收缩率为1.00%~1.26%,收缩量为0.10~0.13 mm;国外B-10蜂窝的收缩率为1.72%~2.09%,收缩量为0.17~0.21 mm,国产A-10

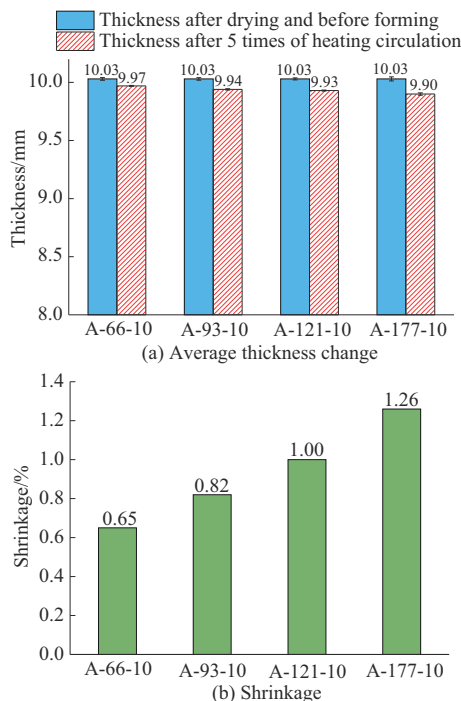


图2 国产A-10蜂窝经过5次固化循环后的厚度平均值变化和收缩率

Fig. 2 Average thickness change and shrinkage of domestic A-10 honeycomb after 5 curing cycles

蜂窝的收缩程度明显低于国外B-10蜂窝。总而言之,对于国产A-10和国外B-10蜂窝,两种蜂窝均在中高温和高温条件下固化循环后的收缩程度更大。国产A-10蜂窝的收缩程度总体低于国外B-10蜂窝,国外B-10蜂窝芯材的密度为64 kg/m³,国产A-10蜂窝芯材的密度为48 kg/m³,经过相同温度、相同压力固化循环后,理论上密度更高的蜂窝耐压缩性能更好,其厚度方向收缩程度也随之更小,而根据多组试验数据表明,国产A-10蜂窝的收缩程度总体更低,更能说明国产A-10蜂窝芯材具有更好的尺寸稳定性,这主要是因为国产芳纶纸蜂窝芯材在芳纶纸与蜂窝芯材的制备过程中,工艺控制方式与国外蜂窝有显著区别,国产芳纶纸蜂窝芯材采用与国外不同的双向拉伸定型及节点涂胶工艺,工艺的改进使得蜂窝芯材的整体性能及一致性更好,以更小的芯格密度达到了更高的性能。

图3为国产A-20蜂窝芯材经过5次固化循环后的厚度平均值变化图和该蜂窝芯材的收缩率。A-66-20,A-93-20,A-121-20和A-177-20分别代表选用厚度为20 mm的国产A-20蜂窝芯材,分别在66,93,121和177 °C的温度下进行固化的蜂窝芯材试验件。

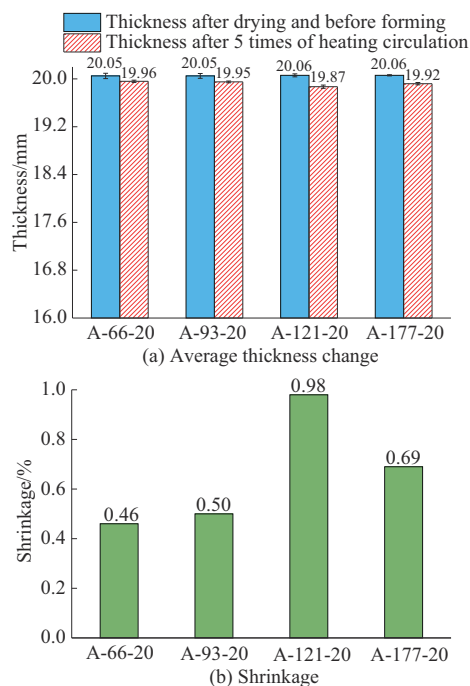


图3 国产A-20蜂窝经过5次固化循环后的厚度平均值变化和收缩率

Fig. 3 Average thickness change and shrinkage of domestic A-20 honeycomb after 5 curing cycles

从图3可以看出,对于国产A-20蜂窝芯材,分别经过低温、中低温、中高温和高温固化循环5次后,其厚度方向的收缩程度比上述国产A-10和国外B-10蜂窝的更小,其中A-121-20蜂窝芯的收缩量最大,收缩了0.19 mm。在这4种修理固化温度下,经过5次加热循环后,该类型国产蜂窝同样在中高温和高温条件下固化后的收缩量更大,最大收缩率达到了0.98%。

图4为国产A-60蜂窝芯材经过5次固化循环后的厚度平均值变化图和该蜂窝芯材的收缩率。A-66-60, A-93-60, A-121-60和A-177-60分别代表选用厚度为60 mm的国产A-60蜂窝芯材,分别在66, 93, 121 °C和177 °C的温度下进行固化的蜂窝芯材试验件。

从图4可以看出,对于国产A-60蜂窝芯材,分别经过4种修理常用温度固化循环5次后,其厚度方向的收缩率也比上述国产A-10和国外B-10蜂窝的更小。其中A-177-60蜂窝芯的收缩程度最大,其厚度方向收缩了0.58 mm。在这4种修理固化温度下,经过多次热历程循环后,该类型国产蜂窝依旧是在中高温和高温条件下固化后的收缩量更大,最大收缩率达到了0.95%。

由上述试验结果可知,修理固化温度对国产和

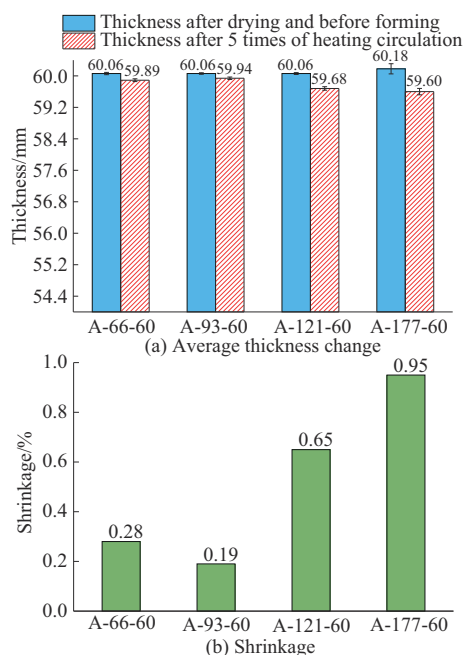


图4 国产A-60蜂窝经过5次固化循环后的厚度平均值变化和收缩率曲线图

Fig. 4 Average thickness change and shrinkage curve of domestic A-60 honeycomb after 5 curing cycles

国外不同芳纶纸蜂窝芯材厚度方向的收缩程度影响规律相似。对于这4种蜂窝芯材,固化循环后的尺寸均出现了不同程度的收缩,经高温(177 °C)和中高温(121 °C)、全程抽真空条件下固化循环多次后,其厚度方向的尺寸收缩程度均高于经低温(66 °C)和中低温(93 °C)、全程抽真空条件处理后的程度。其中,国外B-121-10蜂窝的收缩率最大,最高达到了2.09%。这是因为,在升温过程中,压力抑制了蜂窝芯材结构的受热膨胀,降温过程中蜂窝芯材出现收缩,导致蜂窝芯材的厚度总体下降,尺寸相比干燥后未成型前出现了不同程度的收缩。但是,总体而言,蜂窝芯材在这4种温度下加热循环5次后的尺寸收缩程度较小,这与芳纶纸蜂窝芯材的热膨胀系数有关,芳纶纸蜂窝芯材的热膨胀系数较低,因此在高温环境下不易发生形变,具有良好的尺寸稳定性^[15-16]。而这些蜂窝芯材由酚醛树脂稳定化处理后的芳纶纸制成,酚醛树脂的软化温度在100 °C左右,所以在66 °C和93 °C,全程抽真空的状态下循环固化,芳纶纸蜂窝芯材依旧处于较硬的状态,压力对蜂窝芯材的压缩程度较低,蜂窝芯材的尺寸收缩程度较小,而在121 °C和177 °C下固化循环过程中,蜂窝芯材出现了软化,真空袋压力使软化的蜂窝芯材持续减薄,所以在高温和中高温环境固化后的尺寸

收缩程度大于在低温和中低温条件固化后的收缩程度。

2.2 多次修理固化循环对蜂窝芯材尺寸影响

由前述修理固化温度对芳纶纸蜂窝芯材尺寸影响规律可知,这4种芳纶纸蜂窝芯材在中高温(121℃)和高温(177℃)条件下经5次修理固化循环后的收缩程度更高。因此,进一步研究了在121℃和177℃的修理固化温度下进行5次加热循环后,每次蜂窝芯材的尺寸收缩情况。在干燥及每次固化循环后分别对4种芳纶纸蜂窝芯材进行厚度测试。

对于国外B-121-10蜂窝芯材,其在121℃下5次固化后的尺寸收缩率变化如图5a所示。对于国产A-121-10蜂窝芯材,其5次固化(121℃)后的尺寸收缩率变化如图5b所示。由图5a和5b可知,对于国外B-121-10蜂窝芯材,在中高温121℃的修理温度下经过5次固化后,其厚度方向出现了轻微收缩。该蜂窝芯材厚度方向的收缩程度随固化次数增加而逐渐变大,经过第5次固化热历程后,收缩率达到2.09%。对于国产A-121-10蜂窝芯材,在中高温经过5次固化后,最大收缩率为1.24%,其收缩程度低于国外B-121-10蜂窝芯材。

国产A-121-20蜂窝芯材5次固化(121℃)后的尺寸收缩率变化如图5c所示。由图5c可知,国产A-121-20蜂窝芯材在121℃的修理温度下经过5次加热后,其厚度方向出现了轻微收缩,但最大收缩率小于上述国产A-121-10蜂窝芯材。随着修理固化循环次数增加,20 mm厚的国产蜂窝芯材厚度方向的收缩程度基本呈上升趋势,明显高于第1次固化后的收缩程度。经过第5次修理热历程后,其厚度方向收缩率为0.98%。

国产A-121-60蜂窝芯材5次固化(121℃)循环后的尺寸收缩率变化如图5d所示。从图5d可以看出,对于国产A-121-60蜂窝芯材,在121℃的修理温度下经过5次固化循环后,其厚度方向同样出现了少量收缩。随着固化循环次数增加,该60 mm厚的国产蜂窝芯材厚度方向的收缩量同样是基本呈上升趋势,明显高于第1次固化后的收缩量。经过第5次修理固化循环后,其厚度方向收缩率为0.65%,低于上述国产A-121-10和A-121-20蜂窝芯材。

国外B-177-10蜂窝芯材在177℃下5次固化后

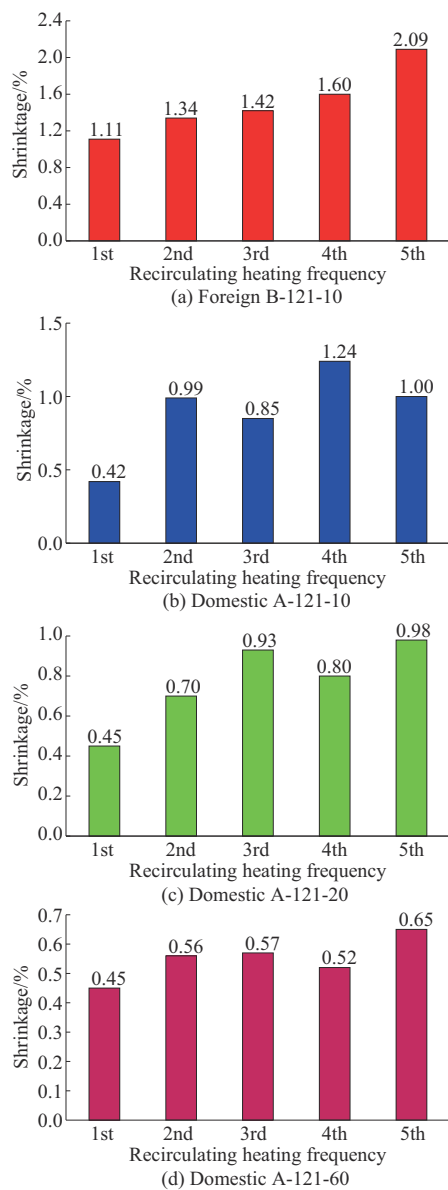


图5 121℃固化国产及国外蜂窝经过5次固化循环后的尺寸收缩率
Fig. 5 Shrinkage change of domestic and foreign honeycomb cured at 121 °C after 5 curing cycles

的尺寸收缩率变化如图6a所示。国产A-177-10蜂窝芯材5次固化(177℃)后的尺寸收缩率变化如图6b所示。由图6a和6b可知,国外B-177-10蜂窝芯材在高温177℃的修理温度下经过5次固化热历程后,其厚度方向出现了少量收缩,该蜂窝芯材厚度方向的收缩程度随固化次数增加而基本呈上升趋势,经第5次固化循环后,其厚度方向收缩率达到1.72%,明显高于第1次固化后的收缩程度。对于国产A-177-10蜂窝芯材,在高温经过5次固化后,其厚度方向最大收缩率为1.26%,收缩程度低于国外B-177-10蜂窝芯材。

国产A-177-20蜂窝芯材5次固化(177℃)循环

后的尺寸收缩率变化如图6c所示。从图6c可以看出,国产A-177-20蜂窝芯材在177℃的修理温度下经过5次固化循环后,厚度方向也出现了少量收缩。随着修理固化循环次数增加,该20 mm厚的国产蜂窝芯材厚度方向的收缩程度也基本呈上升趋势,明显高于第1次固化后的收缩程度。经过第5次修理热历程后,其厚度方向收缩率为0.69%,低于上述国产A-177-10蜂窝芯材。

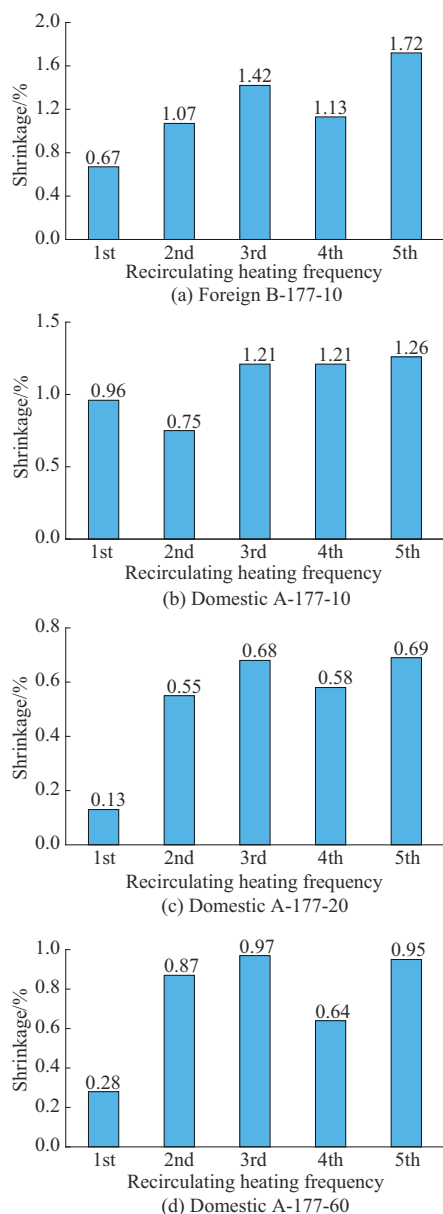


图6 177℃固化国产及国外蜂窝经过5次固化循环后的尺寸收缩率
Fig. 6 Shrinkage of domestic and foreign honeycomb cured at 177 °C after 5 curing cycles

国产A-177-60蜂窝芯材5次固化(177℃)循环后的尺寸收缩率变化如图6d所示。从图6d可以看出,国产A-177-60蜂窝芯材在177℃的修理温度下

经过5次修理固化循环后,厚度方向同样出现了轻微收缩。随着固化循环次数的增加,该60 mm厚的国产蜂窝芯材在厚度方向的收缩程度也基本呈上升趋势,明显高于第1次固化后的收缩程度。经过第5次修理固化循环后,收缩率为0.95%。

多次修理固化循环对芳纶纸蜂窝芯材尺寸影响的结果表明,通常情况下,在高温(177℃)和中高温(121℃)条件下进行固化,在固化循环5次后,蜂窝芯材的收缩程度明显高于第1次固化。这是因为,一方面,这些由酚醛树脂稳定化处理后的芳纶纸蜂窝芯材中酚醛树脂的软化温度在100℃左右,在固化循环的加热和冷却过程中,真空袋压力使软化的蜂窝芯材持续性减薄,随着修理固化循环次数增加,固化时间增长,这种减薄程度逐渐增加;另一方面,随着固化循环次数和时间的增加,芳纶纸蜂窝芯材外层更容易热老化,热老化促使芳纶纸蜂窝内部组分、结构均发生较大变化,在多次高温循环下,化学键破坏,微观结构松弛,成分更容易挥发散逸,成分减少,其尺寸收缩程度也随之增加^[17]。研究发现,国外B-121-10蜂窝芯材的收缩率最大,达到了2.09%。

对于相同厚度的国产A-10和国外B-10蜂窝芯材,经两种较高温固化循环多次后,国产A-10蜂窝的收缩程度总体低于国外B-10蜂窝,说明国产蜂窝芯材具有更好的尺寸稳定性。

总体而言,4种蜂窝芯材固化循环5次后的尺寸收缩程度较小,这是因为芳纶纸蜂窝芯材具有较低的热膨胀系数,热尺寸稳定性良好。

3 结论

(1)经中高温(121℃)和高温(177℃)温度下修理固化循环多次后,国外B-10及国产A-10,A-20和A-60的芳纶纸蜂窝芯材的尺寸收缩程度明显大于经中低温(93℃)和低温(66℃)固化加热循环后的收缩程度。

(2)多次修理固化循环后,芳纶纸蜂窝芯材的尺寸收缩程度明显高于第1次修理固化后的收缩程度。通常情况下,随着修理固化循环次数增加,蜂窝芯材的尺寸收缩程度也随之增加。

(3)对于相同厚度的国产A-10和国外B-10蜂窝芯材,经固化循环多次后,国产A-10蜂窝的收缩程度总体低于国外B-10蜂窝,国产A-10蜂窝芯材具有更好的尺寸稳定性。

选用的几种国产和国外芳纶纸蜂窝芯材在几种常见修理温度下经多次热历程循环后,蜂窝芯材的收缩程度较小,具有良好的热尺寸稳定性,不是导致修理过程中蜂窝夹芯结构零部件凹陷的原因,收缩本身不会影响产品质量,能较好地满足蜂窝夹芯结构多次修理填补需求。

参考文献

- [1] GAO H S, WEN P W, LEI C W, et al. Effects of aramid honeycomb core on the flame retardance and mechanical property for isocyanate-based polyimide foams[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(28). DOI:10.1002/app.45041.
- [2] 董鑫,石晓朋,常飞,等.蜂窝芯体厚度对Nomex蜂窝夹层复合材料压缩性能的影响[J].机械工程材料, 2014, 38(10):46-49.
DONG Xin, SHI Xiaopeng, CHANG Fei, et al. Influence of honeycomb core thickness on compressive property of Nomex honeycomb sandwich composites[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2014, 38(10):46-49.
- [3] 柳敏静,武湛君.复合材料蜂窝夹层结构在飞机中的应用[J].科技导报, 2016, 34(8):21-25.
LIU Minjing, WU Zhanjun. Application of composite honeycomb sandwich structure in aircraft[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(8):21-25.
- [4] 陈丽春,轩立新,周凯运,等.大曲率复合材料制件用国产高伸级对位芳纶纸性能[J].工程塑料应用, 2020, 48(12):46-50, 66.
CHEN Lichun, XUAN Lixin, ZHOU Kaiyun, et al. Properties of domestic high-elongation para-aramid paper for large curvature composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(12):46-50, 66.
- [5] 徐磊.飞机复合材料结构修理技术[J].科技视界, 2016(15):21-27.
XU Lei. Aircraft composite structure repair technology[J]. Scientific and Technological Horizon, 2016(15):21-27.
- [6] 高爱娟,孟祥敏,孙广先,等.共固化蜂窝夹芯结构复合材料的蜂窝收缩问题研究[J].工程塑料应用, 2014, 42(10):69-71.
GAO Aijuan, MENG Xiangmin, SUN Guangxian, et al. Research on honeycomb contraction in honeycomb core sandwich co-curing composite[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(10):69-71.
- [7] 舒明杰,王雪明,刘翀,等.通用飞机复合材料夹层结构损伤修理研究[J].纤维复合材料, 2023, 40(1):27-32.
SHU Mingjie, WANG Xueming, LIU Chong, et al. Research on repairment of damaged composite sandwich structure for general aircraft[J]. Fiber Composites, 2023, 40(1):27-32.
- [8] 魏江雄.蜂窝夹层结构件的损伤修理工艺研究[J].科技创新与应用, 2022, 12(3):100-103.
WEI Jiangxiong. Research on damage repair technology of honeycomb sandwich structural parts[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(3):100-103.
- [9] 张铁纯,张世秋,王轩,等.挖补修理复合材料夹芯结构侧向压缩性能研究[J].航空科学技术, 2021, 32(8):1-11.
ZHANG Tiechun, ZHANG Shiqiu, WANG Xuan, et al. Research on lateral compression performance of repaired composite sandwich structures[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(8):1-11.
- [10] 李娜,路鹏程,才华,等.蜂窝夹层复合材料修补结构低速抗冲击性能[J].航空材料学报, 2022, 42(5):109-118.
LI Na, LU Pengcheng, CAI Hua, et al. Low speed impact resistance of honeycomb sandwich composite repair structure[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2022, 42(5):109-118.
- [11] 陈淑仙,闫登杰,丁镇源.加热工艺对树脂基复合材料挖补修理固化过程的影响[J].复合材料科学与工程, 2023(6):44-51.
CHEN Shuxian, YAN Dengjie, DING Zhenyuan. Influence of the heating process on the scarf repair curing process of resin matrix composites[J]. Composite materials science and engineering, 2023(6):44-51.
- [12] 王轩,王威,余芬,等.挖补修理蜂窝夹芯结构侧压强度的可靠性及灵敏度分析[J].复合材料科学与工程, 2024(1):5-12.
WANG Xuan, WANG Wei, YU Fen, et al. Reliability and sensitivity analysis of the edgewise compressive strength of scarf repaired honeycomb sandwich structures[J]. Composite Materials Science and Engineering, 2024(1):5-12.
- [13] 朱亮,詹晶晶. A320系列飞机雷达罩复合材料修理模具铺层设计研究[J].航空维修与工程, 2023(7):59-61.
ZHU Liang, ZHAN Jingjing. Research on lay-up design of composite repair mould for A320 s aircraft radome[J]. Aviation Maintenance & Enigneering, 2023(7):59-61.
- [14] 郭霞,关志东,刘遂,等.蜂窝夹层修理结构的弯曲性能试验分析[J].复合材料学报, 2013, 30(5):187-194.
GUO Xia, GUAN Zhidong, LIU Sui, et al. Test analysis on the flexural performances of repaired honeycomb sandwich structures [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(5):187-194.
- [15] 刘文品,马建忠,杨进军.大尺寸ACCH型芳纶纸蜂窝定型工艺研究[J].工程塑料应用, 2019, 47(3):51-54.
LIU Wenpin, MA Jianzhong, YANG Jinjun. Study on setting process of large size ACCH aramid paper honeycomb[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(3):51-54.
- [16] 刘文品,马建忠,杨进军,等.国产芳纶纸蜂窝涂胶工艺研究[J].工程塑料应用, 2020, 48(6):57-61.
LIU Wenpin, MA Jianzhong, YANG Jinjun, et al. Study on printing process of X612N aramid paper honeycomb core[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(6):57-61.
- [17] 葆宗霖.国产间位芳纶纸热老化特性及其分子模拟研究[D].北京:华北电力大学, 2023.
BAO Zonglin. Study on thermal aging characteristics and molecular simulation of domestic intermediate aramid paper[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.