

# 芳纶纤维/碳纤维复层结构复合材料变形研究

吴思保<sup>1,2,3</sup>, 礼嵩明<sup>1,2,3\*</sup>, 鹿海军<sup>1,2,3</sup>

(1. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300; 2. 航空工业复合材料技术中心, 北京 101300;

3. 先进复合材料重点实验室, 北京 100095)

**摘要:** 在不同种类的树脂基复合材料复合的热历程中, 由于材料热膨胀系数存在差异, 复层结构会产生内应力, 发生一定的变形。研究了复合工艺(复合温度和压力)、复合方式(二次胶接和共胶接)和芳纶纤维复合材料的预变形对芳纶纤维/碳纤维复层结构复合材料变形的影响, 结果表明: 降低复合温度可以明显地减小复层结构的变形, 当复合温度由 180 °C 降至 120 °C 时, 复层结构的变形减小了 80%; 随着复合压力的增加, 复层结构的变形减小, 当压力达到 0.3 MPa 时, 变形不再减小; 与芳纶纤维-碳纤维干-湿共胶接相比, 采用二次胶接和碳纤维-芳纶纤维干-湿共胶接的复合方式有利于减小复层结构的变形; 芳纶纤维复合材料的预变形处理是控制复层结构变形的有效方法。

**关键词:** 复层结构; 变形; 复合工艺; 二次胶接; 共胶接; 预变形

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0999(2019)06-0090-05

树脂基复合材料是由高分子材料和纤维经过一定的成型工艺复合成体的多相结构材料。树脂基复合材料具有高比强度和高比模量、可设计性强、耐腐蚀和可一体化成型等优点<sup>[1,2]</sup>, 已经广泛应用于航空航天、车辆、船舶和电子等领域。传统的树脂基复合材料主要作为用于承载的结构材料。随着现代工业和生活的发展, 树脂基复合材料在承载的同时, 还需要具有一定的功能性, 比如导电、导热、防弹、透波、电磁屏蔽、吸波等。不同的树脂基复合材料具有不同的功能性, 比如碳纤维复合材料可用于导电、导热和电磁屏蔽等领域<sup>[3,4]</sup>, 经过特殊处理的碳纤维可用于吸波领域<sup>[5,6]</sup>; 芳纶纤维复合材料可用于防弹、透波、绝缘等领域<sup>[7,8]</sup>; 硼纤维复合材料可应用于损伤修复、导热和防火等领域<sup>[9]</sup>; 石英纤维复合材料可用于耐高温和透波等领域<sup>[10,11]</sup>。在实际应用的一些领域中, 需要对不同的树脂基复合材料进行复合, 使它们各自的功能优化组合从而得到综合性能优异的功能复合材料。比如在结构隐身复合材料领域中, 吸波结构通常为透波层和吸收层组成的复层结构, 透波层的复合材料选择对电磁波透过性良好的纤维, 如芳纶纤维、玻璃纤维、硼纤维和碳化硅纤维等, 使电磁波尽可能多地进入吸收层中被吸收掉, 吸收层复合材料的纤维对电磁波有一定的吸收作用, 比如特种碳纤维<sup>[12]</sup>。

在不同种类的树脂基复合材料复合的热历程

中, 由于材料的热膨胀系数存在差异, 各自的尺寸随温度变化的程度不同, 从而造成整体的复层结构产生内应力, 发生一定的变形。复层结构的变形会给复合材料的组装带来一定的困难, 如果变形超出了装配的容差, 则会导致装配失败和构件报废<sup>[13,14]</sup>。因此, 研究由不同种类的树脂基复合材料复合而成的复层结构复合材料的变形控制问题, 对于结构功能一体化树脂基复合材料的实际应用具有重要的意义。

本文研究了芳纶纤维/碳纤维复层结构复合材料的变形, 主要内容包括复合工艺(复合温度和压力)、复合方式(二次胶接和共胶接)和芳纶纤维复合材料的预变形对复层结构变形的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 原材料

实验所用的 AC631/CCF800H 碳纤维预浸料和 F12/5429 芳纶纤维预浸料由中航复合材料有限责任公司研制; SY-24C 胶膜由北京航空材料研究院研制; J-116B 胶膜和 J-299 胶膜由黑龙江省石油化学研究院研制。

### 1.2 复层结构复合材料制备

本文采用热压罐成型工艺, 分别通过二次胶接和共胶接两种复合方法对复层结构复合材料进行制备。对于二次胶接复合方法, 首先将芳纶纤维复合

收稿日期: 2019-02-26

作者简介: 吴思保 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事结构功能一体化复合材料方面的研究。

通讯作者: 礼嵩明 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事结构功能一体化复合材料方面的研究, lisongming860206@126.com。

材料和碳纤维复合材料分别固化成型,然后通过 J-116B 或 SY-24C 胶膜将两种复合材料胶接复合,得到复层结构复合材料;对于共胶接复合方法,首先将芳纶纤维复合材料或碳纤维复合材料其中的一种固化成型,然后将已固化成型的复合材料、J-299 胶膜和另一种复合材料的预浸料组合铺贴并固化成型,得到复层结构复合材料。

芳纶纤维复合材料和碳纤维复合材料的铺层、厚度和尺寸如表 1 所示。

表 1 芳纶纤维复合材料和碳纤维复合材料的铺层、厚度和尺寸

Table 1 The lamina, thickness and size of aramid fiber composite and carbon fiber composite

复合材料	铺层	厚度 /mm	尺寸 /mm
芳纶纤维复合材料	(45, 90, -45, 0, 90) <sub>s</sub>	2.04	300×300
碳纤维复合材料	(45, 90, -45, 0, 45, 0, -45, 90, 0, 90) <sub>s</sub>	2.65	300×300

### 1.3 复层结构变形的表征

复层结构的变形以最大变形( $\omega_{\max}$ )表征,其测量示意图如图 1 所示,复层结构的凸面为芳纶纤维复合材料,凹面为碳纤维复合材料,尺寸为 300 mm×300 mm。

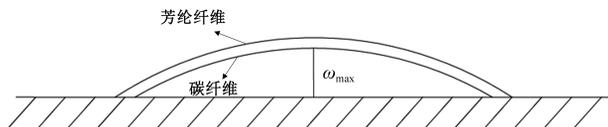


图 1 复层结构的最大变形测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the measurement of compound structure deformation

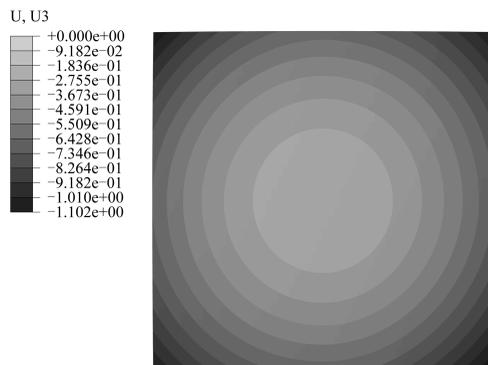
## 2 结果与讨论

### 2.1 复合工艺对复层结构变形的影响

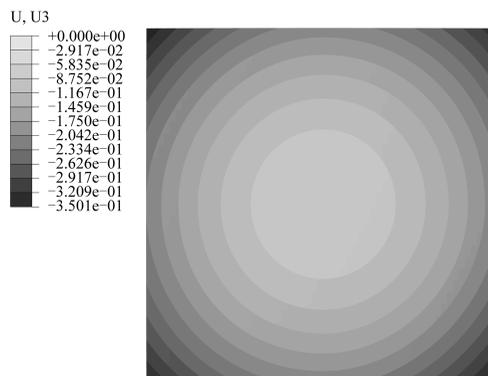
#### 2.1.1 复合温度对复层结构变形的影响

采用 ABAQUS 软件对二次胶接制备的复层结构的变形过程进行模拟。对复层结构的变形过程进行简化,假设其在最高温度处的变形为 0,复层结构的变形主要发生于降温阶段。建立有限元模型,计算复层结构在 180 °C 和 120 °C 两种复合温度条件下产生的变形。在有限元模型中,沿着从底表面到上表面的方向依次为碳纤维复合材料和芳纶纤维复合材料。模拟变形的结果如图 2 所示,不同深浅程度的颜色代表在厚度方向上偏移基准点的不同高度,

单位为 mm,以中心位置为基准点,高度为 0,负数代表在中心位置的下方,正数则代表在中心位置的上方。对比复层结构在不同温度下的模拟变形结果,可以发现降低复合温度可以明显减小复层结构的变形。



(a) 180 °C

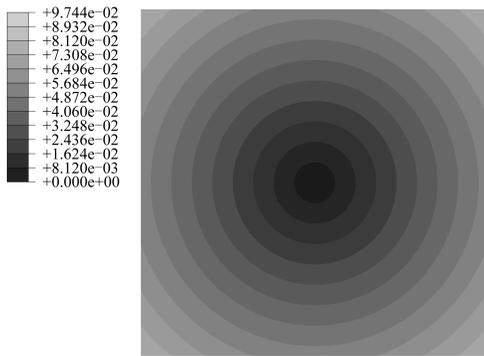


(b) 120 °C

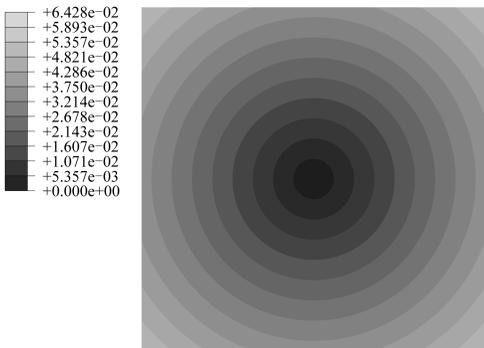
图 2 复层结构在 180 °C 和 120 °C 的复合温度下的模拟变形结果

Fig. 2 The results of simulated deformation of the compound structure under 180 °C and 120 °C compound temperature

从图 2(a) 和图 2(b) 中可以看到,复层结构以碳纤维复合材料为凹面的方式进行变形,出现这种现象的原因是:碳纤维复合材料在 0° 和 90 °C 方向的热膨胀系数均为正,温度降低会引起碳纤维复合材料两个方向的收缩,而芳纶纤维复合材料在 0° 方向的热膨胀系数为负,降温阶段复合材料在纤维 0° 方向反而膨胀,最终造成芳纶纤维复合材料的收缩变形比碳纤维复合材料小,这一点可以从图 3 所示的纯碳纤维复合材料和芳纶纤维复合材料的模拟变形对比中看出,且两种复合材料的铺层均为对称铺层,复层结构的变形对称,因此复层结构以碳纤维复合材料为凹面的方式进行变形。



(a) 碳纤维复合材料



(b) 芳纶纤维复合材料

图3 碳纤维复合材料和芳纶纤维复合材料  
从180℃降至室温的模拟变形结果

Fig. 3 The results of simulated deformation of carbon fiber composite and aramid fiber composite in cooling process from 180℃ to room temperature

不同复合温度得到的复层结构最大变形的实测结果如表2所示。从表2中可以看出,降低复合温度对于减小复层结构的变形有明显的作用,这与模拟的定性结果一致,当复合温度由180℃降至120℃时,复层结构的变形减小了80%。复合温度越高,芳纶纤维复合材料和碳纤维复合材料在复合热历程中尺寸变化的幅度相差越大,复层结构最终的变形也越大。复层结构在180℃复合温度条件下实测的最大变形与模拟相差较大,经分析产生误差的原因可能为:模拟只考虑了复层结构的降温过程,而在升温过程中存在胶膜的固化,且碳纤维复合材料和芳纶纤维复合材料在升温阶段逐渐由相对自由的状态发展成完全的整体状态,在这个过程中,二者的受力情况较为复杂,目前难以建立有效的模型进行模拟。复层结构在120℃复合温度条件下实测的最大变形与模拟的结果比较接近,这是因为复合温度的降低减弱了误差因素的影响。

表2 不同复合温度对应的复层结构的最大变形

Table 2 The maximum deformation of the compound structure under different compound temperature

复合方式	胶膜	复合温度/℃	最大变形/mm
二次胶接	J-116B	180	2.06
二次胶接	SY-24C	120	0.40

## 2.1.2 复合压力对复层结构变形的影响

对于二次胶接,保持其他工艺条件不变,通过改变最高复合压力来探究压力对复层结构变形的影响,其中一组的压力一直保持真空状态,不外加压力,另外3组最高加压分别为0.2 MPa、0.3 MPa和0.4 MPa,结果如表3所示。

表3 不同复合压力对应的复层结构最大变形

Table 3 The maximum deformation of the compound structure under different compound pressure

复合方式	胶膜	最高复合压力/MPa	最大变形/mm
二次胶接	J-116B	真空	2.64
二次胶接	J-116B	0.2	2.43
二次胶接	J-116B	0.3	2.06
二次胶接	J-116B	0.4	2.10

从表3中可以看出,当复合压力小于0.3 MPa时,增大压力有利于减小复层结构的最终变形,当压力达到0.3 MPa时,再增加压力对复层结构的变形影响很小。在外加压力的作用下,复合材料的内部分子链结构会发生一定的调整,从而释放了一部分热胀冷缩过程中的内应力,减小了变形,但是这种分子链结构的调整是有限度的,因此当压力达到一定程度时,复层结构的变形不会继续减小。

## 2.2 复合方式对复层结构变形的影响

表4为二次胶接和两种共胶接方式得到的复层结构最大变形的对比。芳纶纤维-碳纤维干-湿共胶接是指芳纶纤维预浸料预先固化完全,再与碳纤维预浸料通过J-299胶膜胶接固化成复层结构,而对于碳纤维-芳纶纤维干-湿共胶接,则是碳纤维预浸料预先固化完全。

表4 不同复合方式得到的复层结构的最大变形

Table 4 The maximum deformation of compound structure obtained by different compound methods

复合方式	胶膜	复合温度/℃	复合压力/MPa	最大变形/mm
二次胶接	J-116B	180	0.4	2.10
芳纶纤维-碳纤维干-湿共胶接	J-299	195	0.4	2.52
碳纤维-芳纶纤维干-湿共胶接	J-299	195	0.4	2.14

从表中可以看出,采用二次胶接方式得到的复层结构的最大变形和碳纤维-芳纶纤维干-湿共胶接

方式的最大变形接近,但要小于芳纶纤维-碳纤维干-湿共胶接方式。从复合工艺角度看,共胶接与二次胶接相比,共胶接的最高复合温度为 195℃,要高于二次胶接,三种胶接的最高压力均为 0.4 MPa。从上面的研究中可以知道,提高复合温度会加大复层结构的最终变形,所以从复合工艺的角度看,二次胶接的工艺对减小变形更有利。复合材料共胶接时,除了胶膜的固化,还存在着未固化预浸料的固化,预浸料在固化收缩时,由于受限于已经固化好的另外一种复合材料板,其固化收缩的自由度会降低,从而产生较大的内应力。而对于二次胶接来说,芳纶纤维复合材料和碳纤维复合材料在复合之前已经固化好,单独固化时,固化收缩的自由度高,因而由固化收缩产生的内应力相对较小,二者复合过程中产生的变形主要是由二者在复合热历程中热胀冷缩的不同程度造成的。对于芳纶纤维-碳纤维干-湿共胶接,碳纤维预浸料的固化收缩内应力会驱使复层结构以碳纤维为凹面的方式变形,这与最终复层结构的变形方向一致,复层结构的变形趋于增大。和二次胶接相比,芳纶纤维-碳纤维干-湿共胶接在复合工艺和预浸料固化内应力两个方面都会加大复层结构的最终变形,所以此种共胶接方式制备的复层结构的变形最大。对于碳纤维-芳纶纤维干-湿共胶接,芳纶纤维预浸料的固化收缩内应力会驱使复层结构以芳纶纤维为凹面的方式变形,这与最终复层结构的变形方向相反,复层结构的变形趋于减小。和二次胶接相比,碳纤维-芳纶纤维干-湿共胶接在复合工艺方面趋于加大复层结构的变形,而预浸料的固化收缩内应力趋于减小复层结构的变形,在二者共同作用下,此种共胶接方式得到的复层结构的最大变形与二次胶接的最大变形接近。

### 2.3 芳纶纤维复合材料预变形对复层结构变形的影响

本实验芳纶纤维复合材料的铺层顺序为(45, 90, -45, 0, 90, 0)。在芳纶纤维预浸料原有铺层的基础上,额外增加一层 J-299 胶膜铺层,会破坏原来的对称结构,固化收缩产生的应力不平衡,芳纶纤维复合材料就会产生比较明显的变形,靠近胶膜的表面为凹面,远离胶膜的表面为凸面。在芳纶纤维预浸料铺层的不同位置插入 J-299 胶膜,芳纶纤维复合材料就会产生大小不同的变形。将不同变形的芳纶纤维复合材料都以凸面为胶接面和碳纤维复合材料进行二次胶接,胶膜为 J-116B。表 5 给出了 J-299

胶膜在芳纶纤维预浸料层中不同的位置对应的芳纶纤维复合材料和复层结构的最大变形。

表 5 J-299 胶膜在芳纶纤维预浸料层中不同位置对应的芳纶纤维复合材料和复层结构的最大变形

Table 5 The maximum deformation of aramid fiber composites and compound structure with different position of J-299 adhesive film in aramid fiber prepreg layers

J-299 胶膜在芳纶纤维预浸料层中的位置	芳纶纤维复合材料的最大变形/mm	复层结构的最大变形/mm
无 J-299 胶膜	0.32	2.06
在第四和第五层之间	2.81	1.76
在第三和第四层之间	5.35	1.59
在第二和第三层之间	5.84	1.43

从表 5 中可以看出,加了 J-299 胶膜后,芳纶纤维复合材料的变形显著增大,且随着 J-299 胶膜逐渐远离芳纶纤维层的中心位置,芳纶纤维复合材料的变形越来越大。李敏等<sup>[15]</sup>的研究发现在对称铺层中插入一层非对称层,非对称层离中面越远,整体铺层结构的耦合刚度系数和弯曲刚度系数越大,相应地,变形也就越大。从表中还可以看出,随着芳纶纤维复合材料的变形增大,复层结构的变形反而减小。在胶接时,以芳纶纤维复合材料的凸面为胶接面,这就使得在复层结构中的芳纶纤维复合材料的初始变形与复层结构最终的变形方向相反,芳纶纤维复合材料中的内应力会平衡一部分复层结构由于热胀冷缩的差异造成的内应力,所以芳纶纤维复合材料的变形越大,其内应力越大,对应的复层结构的变形也就越小。

### 3 结论

(1)降低复合温度有利于减小芳纶纤维/碳纤维复层结构复合材料的变形,当复合温度由 180℃降至 120℃时,复层结构的变形减小了 80%。对于二次胶接,当复合压力小于 0.3 MPa 时,增加复合压力有利于减小复层结构的变形,当复合压力达到 0.3 MPa 后,继续增加复合压力,复层结构的变形基本不变;

(2)与芳纶纤维-碳纤维干-湿共胶接相比,采用二次胶接和碳纤维-芳纶纤维干-湿共胶接的复合方式有利于减小复层结构的变形,且这两种复合方式得到的复层结构的变形接近;

(3)芳纶纤维复合材料的预变形处理有利于减小复层结构的变形,芳纶纤维复合材料的预变形越大,复层结构变形越小。

## 参考文献

- [1] 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): 1327-1338.
- [2] 嵇培军, 王国勇, 赵亮, 等. 树脂基结构复合材料的研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(4): 1-5.
- [3] 刘东, 王钧. 碳纤维导电复合材料的研究与应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2001(6): 18-20.
- [4] 靳武刚. 碳纤维在电磁屏蔽材料中的应用[J]. 现代塑料加工应用, 2004, 16(1): 24-27.
- [5] 赵东林, 高云雷, 沈曾民. 螺旋形碳纤维结构吸波材料的制备及性能研究[J]. 安全与电磁兼容, 2009, 21(6): 60-63.
- [6] 孟辉. 纤维型雷达隐身吸波材料的研究进展[J]. 现代涂料与涂装, 2005, 8(6): 8-11.
- [7] 陈虹, 虎龙, 艾青松, 等. 芳纶复合材料在防弹车上的应用研究[J]. 中国个体防护装备, 2017, 25(2): 5-8.
- [8] 王煦怡, 陈超峰, 彭涛, 等. 芳纶Ⅲ在复合材料领域应用的优势探讨[J]. 合成纤维, 2016, 45(1): 22-25.
- [9] 陈燕梅, 侯梅, 张银锋, 等. 高性能芳纶绝缘拉杆用树脂配方及性能研究[J]. 纤维复合材料, 2016, 33(3): 3-7.
- [10] 李承宇, 王会阳. 碳纤维及其复合材料的研究及应用[J]. 塑料工业, 2011, 39(10): 1-4.
- [11] 谢菲, 夏洪山. 石英纤维复合材料作为高频透波雷达天线罩的研究[J]. 兵器装备工程学报, 2015, 36(3): 147-150.
- [12] 樊威, 孟家光, 孙润军, 等. 混杂纤维增强结构隐身复合材料研究进展[J]. 纺织导报, 2017, 36(1): 66-68.
- [13] 刘含洋, 赵伟栋, 潘玲英, 等. 结构、耐热、透波功能一体化石英/聚酰亚胺研究[J]. 航空材料学报, 2015, 35(4): 34-38.
- [14] 丁安心, 李书欣, 倪爱清, 等. 热固性树脂基复合材料固化变形和残余应力数值模拟研究综述[J]. 复合材料学报, 2017, 34(3): 471-485.
- [15] 李敏, 张宝艳. 不对称铺层复合材料变形规律的实验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(5): 28-31.

## STUDY ON DEFORMATION OF COMPOSITES OF ARAMID FIBER/CARBON FIBER COMPOUND STRUCTURE

WU Si-bao<sup>1,2,3</sup>, LI Song-ming<sup>1,2,3\*</sup>, LU Hai-jun<sup>1,2,3</sup>

(1. AVIC Composite Corporation Ltd., Beijing 101300, China;

2. AVIC Composite Technology Center, Beijing 101300, China;

3. National Key Laboratory of Advanced Composites, Beijing 100095, China)

**Abstract:** Resin matrix composites possess the advantages of high specific strength, high specific modulus, high designability, strong corrosion resistance and integration molding, which have been widely used in the fields of aerospace, vehicles, ships, electronics, etc. In some practical application fields, different resin matrix composites need to be compound to obtain functional composites with excellent comprehensive properties that single resin matrix composites don't possess. When different kinds of resin matrix composites are combined, their respective degree of size change with the change of temperature is different during the compound thermal process because of the difference of their thermal expansion coefficient, which creates the internal stress of the compound structure and eventually lead to a certain deformation. In this paper, the influence of compound process (compound temperature and compound pressure), compound methods (secondary bonding and co-bonding), the pre-deformation of aramid fiber composite on the deformation of the composite of aramid fiber/carbon fiber compound structure were studied. The results show that the deformation of the compound structure can be decreased obviously with the decrease of compound temperature. When the compound temperature drops from 180 °C to 120 °C, the deformation of the compound structure decreases by 80%. Appropriate increase of compound pressure contributes to decrease the deformation of the compound structure, whereas the deformation is no longer decreased when compound pressure reaches 0.3 MPa. Aramid fiber-carbon fiber secondary bonding (aramid fiber composite and carbon fiber composite both have been cured completely before they are combined) and carbon fiber-aramid fiber dry-wet co-bonding (carbon fiber composite have been cured completely, while aramid fiber is not cured before they are combined) are beneficial to decrease the deformation of compound structure compared by aramid fiber-carbon fiber dry-wet co-bonding (aramid fiber composite have been cured completely, while carbon fiber is not cured before they are combined). The pre-deformation of aramid fiber composite is an effective way of the deformation control of compound structure.

**Key words:** compound structure; deformation; compound process; secondary bonding; co-bonding; pre-deformation