

# 树脂含量对 F-8H3/602 芳纶复合材料性能的影响

易凯<sup>1</sup> 耿东兵<sup>1</sup> 杨智勇<sup>1</sup> 杨坚<sup>2</sup> 贺晔红<sup>2</sup>

(1 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

(2 沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司,沈阳 110043)

**文 摘** 探索研究了 F-8H3/602 芳纶织物增强树脂基复合材料层合板不同树脂含量对其冲击韧性、层间剪切强度及弯曲性能的影响,并采用显微镜及扫描电镜对破坏试样形貌进行观察。结果表明芳纶复合材料的树脂含量对其冲击韧性、层间剪切强度及弯曲性能影响较为明显,树脂含量为 46.02wt% 的芳纶复合材料层合板的 0°冲击韧性为 22 J/cm<sup>2</sup>、0°层间剪切强度为 49.1 MPa、0°弯曲强度为 506 MPa;在一定的树脂含量下,芳纶复合材料的 0°冲击韧性、层间剪切强度及弯曲性能较 90°的性能更优异;破坏试样的形貌表明纤维与树脂界面结合较为薄弱。

**关键词** 芳纶复合材料,树脂含量,冲击韧性,层间剪切强度,弯曲性能

中图分类号:V258

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.02.014

## Effect of Resin Content on Performances of Aramid Fiber Reinforced Composites

YI Kai<sup>1</sup> GENG Dongbing<sup>1</sup> YANG Zhiyong<sup>1</sup> YANG Jian<sup>2</sup> HE Yehong<sup>2</sup>

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

(2 Shenyang Liming Aero-Engine (Group) Corporation Ltd., Shenyang 110043)

**Abstract** The F-8H3/602 aramid fiber reinforced composites laminates with different content of epoxy resin were prepared. The effect of resin content on impact toughness, interlaminar shear strength and flexural properties were studied. The morphologies of damaged samples were observed by microscope and scanning electronic microscopy (SEM). The results indicated that impact toughness, interlaminar shear strength and flexural properties were close related to the resin content of aramid fiber reinforced composites. For F-8H3/602 aramid fiber reinforced composites with 46.02wt% resin content, the impact toughness, interlaminar shear strength and flexural strength were 22 J/cm<sup>2</sup>, 49.1 MPa and 506 MPa respectively. At certain weight content of resin, the mechanical properties of aramid fiber reinforced composites in 0° direction were much better than in 90° direction. The interface between fiber and matrix of F-8H3/602 composites was weak according to SEM images of samples.

**Key words** Aramid fiber reinforced composites, Weight content of resin, Impact toughness, Interlaminar shear strength, Flexural properties

### 0 引言

芳纶纤维具有优异的拉伸强度、拉伸模量、高断裂伸长率、低密度、抗冲击、耐磨、良好的耐化学腐蚀性能以及优良的介电性能等一系列优异的性能<sup>[1-3]</sup>。利用芳纶纤维的低密度、高断裂伸长率等性能,制备的复合材料具有密度低、抗冲击性能好的特点。利用这一特点,研究人员在航空发动机风扇包容机匣上使

用芳纶纤维复合材料,不仅能够有效地包容风扇叶片碎片,而且可以大大减轻发动机的质量<sup>[4-5]</sup>。

作为纤维增强树脂基复合材料,树脂含量过高,尽管有足够的树脂浸渍纤维,但纤维含量低,单位界面面积减小,不能充分发挥复合材料中增强材料的作用;含量过低,由于纤维和基体间不能形成一定厚度的界面过渡层,无法承担基体对纤维的力传递,容易

收稿日期:2014-10-03

作者简介:易凯,1983年出生,主要从事纤维增强树脂基复合材料的研究

造成复合材料受力时发生界面破坏,不利于纤维增强复合材料力学性能的发挥<sup>[6-9]</sup>。因此,对于包容机匣这类应用芳纶纤维复合材料高抗冲击性能的复合材料结构件而言,树脂含量直接影响着复合材料是否能够最大程度的吸收冲击能量,是实现芳纶复合材料功能特性的关键因素。

本文探索研究了芳纶纤维织物增强环氧树脂基复合材料的树脂基体含量对其冲击韧性、层间剪切强度及弯曲性能的影响,为芳纶纤维复合材料的增强体与树脂之间最佳配比区间提供参考。文中涉及的43wt%~50wt%树脂含量范围是根据制造经验及实际测试结果制定的。

## 1 试验

### 1.1 原材料

F-8H3/602 芳纶纤维织物/环氧树脂预浸料,自制。预浸料的含胶量为 $(48 \pm 3)$  wt%,纤维面密度为 $(88 \pm 5)$  g/m<sup>2</sup>,单层厚度0.12 mm。

### 1.2 芳纶复合材料层合板的制备

采用自动下料机裁剪440 mm×240 mm规格预浸料,以确保纤维方向的准确性,铺层按照 $[(0/90)]_{18}$ 铺叠厚度约2 mm的芳纶纤维织物增强环氧树脂基复合材料层合板。在层合板包覆时对不同层合板加入数量不等的吸胶材料,采用热压罐固化工艺对铺叠好的层合板吸胶、固化成型,获得了具有不同树脂含量的芳纶复合材料层合板。按照相应的试样尺寸机械加工获得冲击韧性、层间剪切强度及弯曲性能测试试样。

### 1.3 芳纶复合材料层合板树脂含量的测试与计算

利用称重法及厚度法<sup>[10]</sup>测定芳纶纤维织物增强环氧树脂基复合材料层合板的树脂质量分数。

### 1.4 性能测试

用简支梁冲击试验机(Zwick公司,型号HIT50P,冲击摆锤能量为7.5 J)测试芳纶复合材料层合板冲击韧性。试样的尺寸为55 mm×10 mm,试样厚度1~3 mm。冲击跨距为40 mm;采用视频光学显微镜(Keyence公司,型号VHX-1000E)对冲击韧性测试后试样进行形貌观察;采用航天材料及工艺研究所DqES81-98标准;织物增强塑料剪切强度试验方法测试芳纶复合材料层合板的层间剪切强度;采用GB/T1449—2005纤维增强塑料弯曲性能试验方法测试芳纶复合材料层合板弯曲强度、模量;采用QUANTA FEG650扫描电子显微镜观察冲击韧性测试后试样的层间破坏处的形貌。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 树脂含量对 F-8H3/602 芳纶复合材料层合板冲击韧性的影响

不同树脂含量的F-8H3/602芳纶复合材料层合板冲击韧性测试结果如图1所示。可知在43.68wt%~49.28wt%的树脂含量范围内,F-8H3/602芳纶复合材料层合板的0°(经向)冲击韧性及90°(纬向)冲击韧性呈正态曲线分布,树脂含量在46.02wt%左右时复合材料的冲击韧性最高。该测试结果表明树脂含量对芳纶复合材料冲击韧性的影响较为明显,在适当的树脂含量下,芳纶复合材料层合板具有更优异的冲击韧性。此外,在相同树脂含量下的芳纶复合材料层合板的0°冲击韧性比90°冲击韧性强,0°冲击韧性在18~22 J/cm<sup>2</sup>,90°冲击韧性在15.8~20.6 J/cm<sup>2</sup>。由于在制作F-8H3织物过程中织物的经向密度大于纬向密度,层合板0°方向具有更多的增强纤维及更大的单位界面面积,其破坏需要更多的能量,因此测试结果中,0°冲击韧性均高于90°冲击韧性。

选取树脂含量分别为43.68wt%、46.02wt%及49.28wt%的F-8H3/602芳纶复合材料层合板冲击韧性测试后试样,对其破坏形貌进行观察,如图2所示。试样在冲击载荷作用下发生弯曲变形,出现纤维与基体的脱粘、纤维拉伸变形和断裂、纤维拔出、层间基体开裂和屈服破坏,这些是芳纶复合材料吸收能量的主要方式<sup>[11]</sup>。从层间的角度分析,层合板冲击接触面主要承受压缩载荷,试样冲击背面主要承受拉伸载荷,在两种载荷作用下,试样呈现相应的破坏形貌。树脂含量为46.02wt%的冲击韧性试样的破坏形貌,并未出现其他树脂含量试样的压缩溃裂情况。由此可见,在适当的树脂含量下,增强纤维与树脂基体的协同作用使得芳纶复合材料层合板整体承载能力更优异,不易发生局部失稳而降低冲击性能。

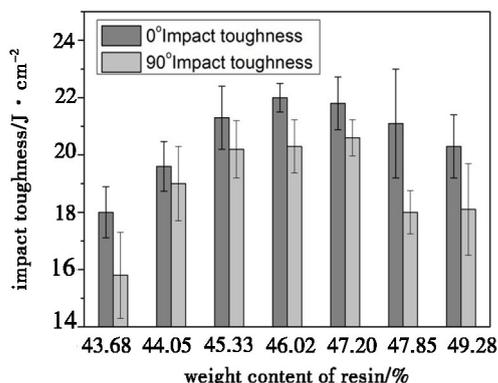
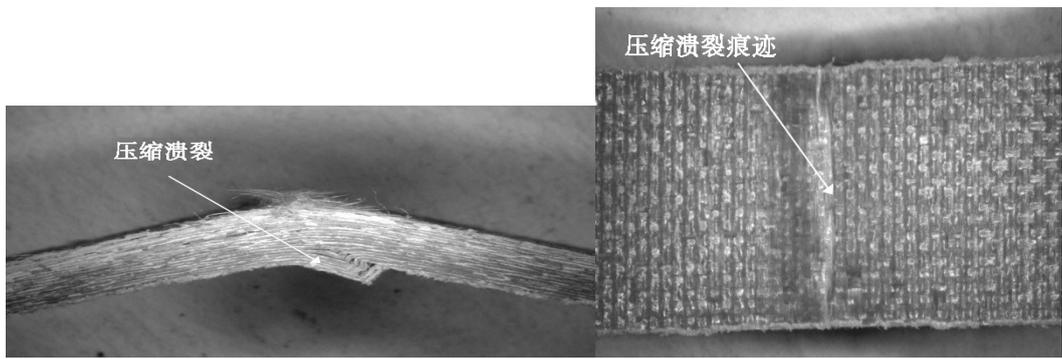
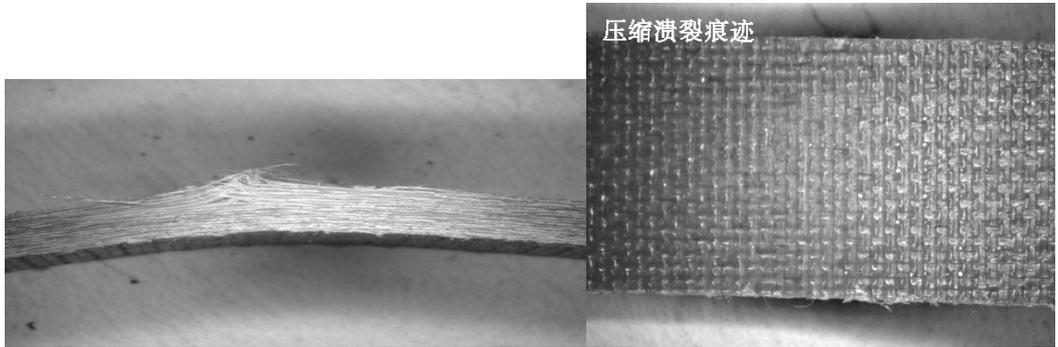


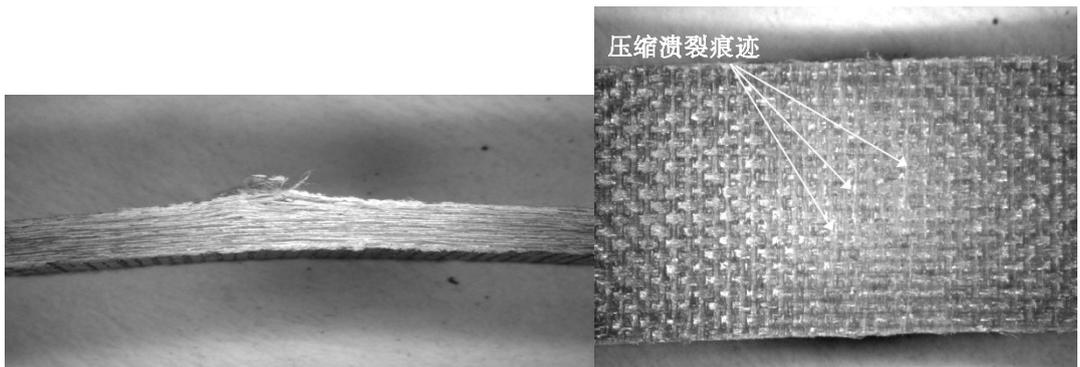
图1 不同树脂含量的芳纶复合材料冲击韧性  
Fig. 1 Impact toughness of aramid fiber reinforced composite with different content of resin



(a) 树脂含量 43.68wt% 试样 0° 冲击韧性破坏形貌:横截面(左)、冲击接触面(右)



(b) 树脂含量 46.02wt% 试样 0° 冲击韧性破坏形貌:横截面(左)、冲击接触面(右)



(c) 树脂含量 49.28wt% 试样 0° 冲击韧性破坏形貌:横截面(左)、冲击接触面(右)

图2 芳纶复合材料冲击破坏形貌

Fig.2 Fracture features of aramid fiber reinforced composite after impact

## 2.2 树脂含量对 F-8H3/602 芳纶复合材料层合板层间剪切性能的影响

对于复合材料层合板而言,层间破坏是其在低速冲击作用下的主要破坏模式<sup>[12-13]</sup>,因此有必要进一步考察不同树脂含量芳纶复合材料层合板的层间性能,而复合材料层合板的层间性能通常可以用层间剪切强度来表征。

对不同树脂含量的芳纶复合材料的层间剪切强度进行测试,测试结果如图 3 所示。由图 3 结果可知,随着层合板树脂含量的增加,层间剪切强度先提高,后降低;在低于 45.33wt% 的树脂含量下,F-8H3/602 芳纶复合材料层合板的层间剪切强度下降幅度较大。当层合板树脂含量较低时,芳纶复合材料层合板

板的层间剪切强度较低,这主要是因为树脂含量过低时,复合材料的增强纤维粘接不牢,层合板层间树脂不能将剪切应力有效传递到芳纶纤维上就会发生局部失稳破坏失效,复合材料受力时就会发生界面破坏;特别是对于织物复合材料,层与层间没有纤维连接,在树脂不足的情况下就更容易发生层间断裂<sup>[9]</sup>。当层合板树脂含量增加时,层合板的层间剪切强度也相应增大,但超过 46.02wt% 的树脂含量时,层合板的层间剪切强度下降,这主要是由于树脂含量增大时,纤维含量低,单位面积内纤维与树脂基体的界面面积减少,层合板未充分发挥增强纤维的承载作用,层间剪切强度也相应下降;芳纶复合材料层合板在 46.02wt% 的树脂含量下,其 0°、90°层间剪切强度分

别为 49.1、47.9 MPa,这主要是因为树脂含量适中时,芳纶复合材料可以最大限度的发挥增强纤维的承载能力以及基体树脂的应力传递功能,增强纤维与树脂基体的协同作用使得复合材料的性能获得了最大程度的发挥。此外,由图 3 的测试结果可知,对于一定树脂含量的芳纶复合材料层合板,树脂含量的变化对芳纶复合材料层合板的 0°及 90°层间剪切强度也有一定的影响,这也与芳纶织物经纬向的纤维编织密度差异有关。

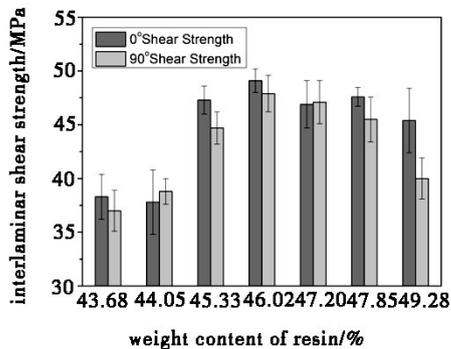


图 3 不同树脂含量芳纶复合材料层间剪切强度

Fig. 3 Interlaminar shear strength of aramid fiber reinforced composite with different content of resin

### 2.3 树脂含量对 F-8H3/602 芳纶复合材料层合板弯曲性能的影响

弯曲性能也可以表征复合材料层合板的层间性能。由图 4 可以看出,在 43.68wt% ~ 49.28wt% 的树脂含量范围内, F-8H3/602 芳纶复合材料层合板的 0°及 90°弯曲强度呈正态曲线分布,在树脂含量为 46.02wt% 时,层合板具有更优异的 0°、90°弯曲强度,分别为 506 及 502 MPa,这与不同树脂含量芳纶复合材料层合板的冲击韧性及层间剪切强度变化规律是一致的,说明在此树脂含量下,层合板整体性能更优异。

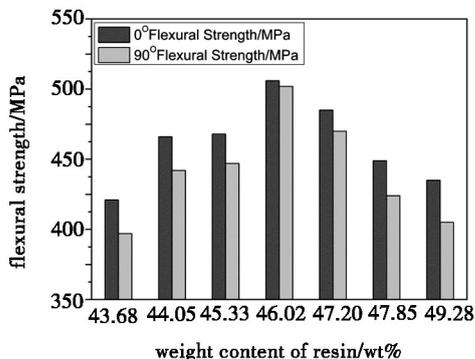


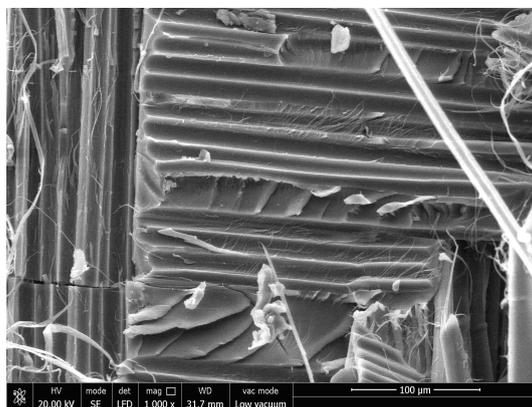
图 4 不同树脂含量芳纶复合材料弯曲性能

Fig. 4 Flexural properties of aramid fiber reinforced composite with different content of resin

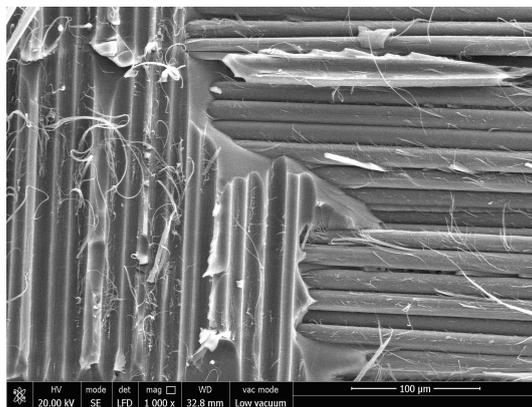
综合上述冲击韧性、层间剪切强度及弯曲性能测试结果可知,对于芳纶纤维织物增强树脂基复合材料层合板的力学性能存在最佳树脂含量,在该树脂含量下,芳纶复合材料综合性能最好;另外,层间性能是决定冲击韧性的关键,提高层间性能可以获得具有更优异冲击韧性的芳纶复合材料。

### 2.4 界面分析

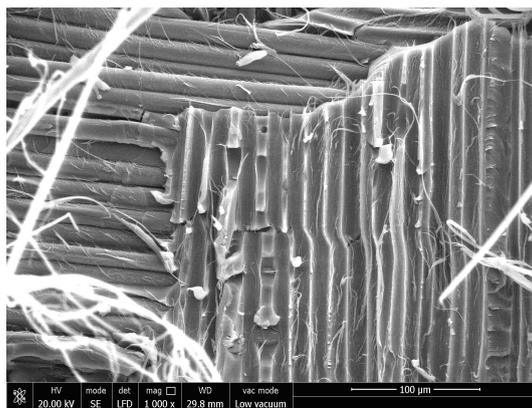
树脂含量分别为 43.68wt%、46.02wt% 及 49.28wt% 的 F-8H3/602 芳纶复合材料层合板冲击韧性测试后试样层间破坏处的形貌如图 5 所示。



(a) 树脂含量 43.68wt%



(b) 树脂含量 46.02wt%



(c) 树脂含量 49.28wt%

图 5 芳纶复合材料冲击韧性测试层间破坏处形貌

Fig. 5 Fracture morphologies of aramid fiber reinforced composite after impact

由图5可见,在这三种树脂含量下,F-8H3/602芳纶复合材料层合板的纤维表面均较为光滑,纤维拔出后的树脂基体表面也较为光滑,表明F-8H3/602芳纶复合材料层合板的纤维与树脂基体间的界面结合较弱。对于同样树脂基体的玻璃纤维织物增强复合材料,如SW110/602复合材料,其 $0^\circ$ 弯曲强度可以达到728 MPa, $0^\circ$ 层剪强度可以达到66.1 MPa,均优于F-8H3/602芳纶复合材料层合板的力学性能,这主要是因为玻璃纤维织物复合材料具有更好的界面性能。因此,为了获得更优异性能的芳纶复合材料,有必要对提高芳纶复合材料的界面性能开展更深入的研究。

### 3 结论

(1)树脂含量对芳纶复合材料的冲击韧性、层间剪切强度及弯曲性能的影响较为明显,最佳树脂含量不但可以提高芳纶复合材料的层间性能,还有利于最大程度的发挥芳纶复合材料高冲击韧性的特点。

(2)对于F-8H3/602芳纶纤维织物增强树脂基复合材料,在43.68wt%~49.28wt%的树脂含量范围内,46.02wt%树脂含量下的芳纶复合材料层合板性能更加优异, $0^\circ$ 冲击韧性为 $22\text{ J/cm}^2$ 、 $0^\circ$ 层间剪切强度为49.1 MPa、 $0^\circ$ 弯曲强度为506 MPa。

(3)对于F-8H3/602芳纶纤维织物增强树脂基复合材料,在相同的树脂含量下,芳纶复合材料的 $0^\circ$ 冲击韧性、层间剪切强度及弯曲性能较 $90^\circ$ 的性能更优异,这主要是由于织物经向编织密度大于纬向编织密度使得复合材料在该方向具有更多的增强纤维及单位界面面积。

(4)对于F-8H3/602芳纶纤维织物增强树脂基复合材料,纤维与树脂基体间的界面结合较弱,有

必要对提高其界面性能开展更深入的研究。

### 参考文献

- [1] 李同起,王成扬. 芳纶的制备、微观结构与测试方法[J]. 合成纤维工业,2002(4):31-41
- [2] 王耀先,程树军. 高性能有机纤维增强复合材料的界面粘结性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2012(S1):25-29
- [3] 廖子龙. 芳纶及其复合材料在航空结构中的应用[J]. 高科技纤维与应用,2008,33(4):25-29
- [4] 沈尔明,王志宏,滕佰秋,等. 连续纤维增强复合材料在民用航空发动机上的应用[J]. 航空发动机,2013,39(02):90-94
- [5] 沈尔明,王志宏,赵凤飞,等. 风扇机匣材料应用现状与发展[J]. 航空制造技术,2013,13:92-95
- [6] 高峰,姚穆. 纤维含量对纤维增强复合材料断裂强度的影响[J]. 西北纺织工学院学报,2001,15(2):275-279
- [7] 杨彩云,李嘉禄. 三维机织复合材料纤维体积含量计算方法[J]. 固体火箭技术,2005(3):224-227
- [8] 王斌,金志浩,丘哲明,等. 树脂含量对芳纶纤维/环氧复合材料性能的影响[J]. 固体火箭技术,2002,25(1):61-64
- [9] 李超,丘哲明,刘建超. 树脂含量对碳布/环氧复合材料力学性能的影响[J]. 纤维复合材料,2003(1):15-17
- [10] 杨国腾,候丽华,杜永,等. 厚度法测定碳纤维复合材料层压板纤维体积含量的研究[J]. 测控技术,2011,30:356-357
- [11] 刘国权,杨大峰,梅树清. 防弹用纤维复合材料最佳树脂含量研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2001(2):13-15
- [12] 马丕波,蒋高明,高哲,等. 纺织结构复合材料冲击拉伸研究进展[J]. 力学进展,2013,43(3):329-357
- [13] 朱炜堃,许希武. T300/QY8911层合板低速冲击试验及有限元模拟[J]. 材料科学与工程学报,2013,31(1):68-73

(编辑 任涛)