# 复合材料细观结构表征与力学性能

魏洪\*,张磊,张丽

中航工业第一飞机设计研究院,陕西西安710089

**摘 要**:选取复合材料力学性能研究中的<sup>3</sup>个基础性试验:湿热、平板拉伸以及开孔拉伸试验,利用体视显微镜对试验件 破坏后的截面进行细观结构观察,分析了裂纹、孔洞、分层等缺陷的产生及影响,解释了复合材料宏观的力学性能。

关键词:复合材料,体视显微镜,细观结构,力学性能

中图分类号: V258 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 06-0026-04

碳纤维复合材料具有比模量高、比强度大、热膨胀系数 低、耐高温、耐热冲击、耐腐蚀、高断裂性、低蠕变等一系列优 异性能,广泛用于航空、航天等高科技领域。但是其力学性能 随机性较大,即便是同种牌号的碳纤维复合材料,其强度值也 是在一个区间,这就导致了工程上的设计使用较为保守,为 此,对其力学性能的进一步研究成为一个热门的领域。

碳纤维复合材料是一种多层次的结构材料,既有宏观 上的力学性能,又有微观上的组织表征(纤维或颗粒大小), 更具有微观上材料内部(小到晶粒、晶胞和原子等)的结构, 而宏观上的力学性能则由细观上的组织表征和微观上的材 料内部结构共同决定。同一种牌号的碳纤维复合材料,其材 料内部微观结构没有太大的差异,对宏观力学性能的影响主 要是细观的组织结构。然而碳纤维复合材料作为一种非均 质多相材料,细观层次上的内部结构有纤维、树脂、缺陷(孔 洞、裂纹、脱黏)等,而孔洞、裂纹、脱黏等缺陷又具有非均匀 性、随机性等特点,这也就是导致其力学性能随机性较大的 原因。本文选取了复合材料力学性能研究中的3个基础性 试验:湿热、平板拉伸以及开孔拉伸试验,尝试利用体视显 微镜对试验件破坏后的细观结构进行观察,并通过对细观结 构的分析对比,解释其复合材料宏观的力学行为。

## 1 试验与测试方法

### 1.1 试验件

试验所选复合材料为 COM977/24K,单层厚度为 0.18mm, 制备20层复合材料层压板试件,铺层方向为 [45/0/-45/90/45/0/-45/0/45/-45]s,湿热试验件尺寸为300mm×36mm, 平板拉伸试验件尺寸为 250mm×25mm,开孔拉伸试验件尺寸为 300mm×36mm。

## 1.2 试验内容

湿热试验采用称重法测量。首先,将干燥试验件称重, 然后将称重后的试验件放入 TAISITEWGL-65B 湿热试验 箱,将环境温度设置为 70℃和 100% 相对湿度,对试验件进 行吸湿状态调节,每天对试验件称重量并记录。直到 7 天 内称重试验件吸湿量的变化量达到(用式(1)计算)小于 0.02%,此时停止状态调节。

$$\left|\frac{M_i - M_0}{M_0} - \frac{M_{i-1} - M_0}{M_0}\right| \times 100 < 0.02\%$$
(1)

式中: $M_i$ 是当前试验件的质量(制造状态),单位为g; $M_{i,1}$ 是上一个时间间隔试验件的质量,单位为g; $M_0$ 是干燥状态下试验件的质量,单位为g。

平板拉伸试验和开孔拉伸试验是复合材料积木式试验 中最基础的2项试验。平板拉伸试验参考ASTM3039标准 进行,试验采用矩形板状试件,如图1所示,为保证试件拉伸 时端部不首先发生破坏,在试件两端粘贴加强片。开孔拉伸 试验参考标准ASTM5766进行,试验采用矩形板状试件,试 验件如图2所示,试验机选取INSTRON 5966电子万能试验 机,试验时将试验件对中夹持于试验机的夹头中,试验机以 2mm/min 的加载速率连续加载,直到试验件破坏。



图 1 平板拉伸试验件 Fig.1 Plate stretching test piece

收稿日期:2016-04-12 退修日期:2016-04-22 录用日期:2016-05-12 \*通讯作者.Tel.:029-86832309 E-mail:13609253856@163.com

引用格式: WEI Hong, ZHANG Lei, ZHANG Li. Composite meso-structure characteristics and macro mechanical properties[J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27 (06):26-29. 魏洪,张磊,张丽. 复合材料细观结构表征与力学性能[J]. 航空科 学技术, 2016, 27 (06):26-29.



图 2 开孔拉伸试验件 Fig.2 Open hole stretching test piece

用 Leica-S6D 体式显微镜对试验件试验后的截面进行 观察并拍照记录,体视显微镜如图 3 所示。



图 3 体视显微镜 Fig.3 Stereo microscope

## 2 试验结果与分析

### 2.1 湿热试验

随着复合材料在海洋等湿热环境中的应用,自20世纪80年代以来,许多学者对树脂基复合材料的吸湿机理进行了系统的研究,其中,以Fick模型应用最为广泛,Fick扩散模型由Springer等人<sup>[1]</sup>提出,模型简洁且数学简化容易,逐渐成为树脂基复合材料吸湿模型中应用最多的模型。本实验用试件表面积远大于试件厚度方向的侧面积,因此,试件侧面吸湿可以忽略不计,即试件吸湿满足一维扩散,根据Fick第二扩散定律,材料中的相对吸湿量G和吸湿时间t之间满足以下关系式<sup>[2]</sup>:

$$G = \frac{M_t - M_0}{M_\infty - M_0} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\exp[-(2j+1)^2 \pi^2 \left(\frac{Dt}{h^2}\right)]}{(2j+1)^2}$$
(2)

式中: $M_{\infty}$ 为饱和吸湿时试件的质量; $M_{t}$ 为t时刻的试件质量; $M_{0}$ 为干燥试件的质量;h为试件厚度;t为吸湿时间;D为扩散系数。

当时间较短时,式(2)可简化为<sup>[2]</sup>:

$$G = \frac{M_t - M_0}{M_\infty - M_0} = 4\sqrt{\frac{Dt}{\pi h^2}}$$
(3)

由式(3)可知,相对吸湿量 G 和吸湿时间的平方根√t 成正比,通过测量得到的试验件平衡吸湿曲线如图 4 所示, 试验件在吸湿前期,和 Fick 扩散模型中的理论公式基本符 合,而在吸湿后期,吸湿逐渐表现为非 Fick 扩散,相对吸湿 量大概在 50% 左右,出现 Fick 扩散到非 Fick 扩散的转折 点,王春齐<sup>[2]</sup> 等人通过试验发现,试验件吸湿平衡温度在 30℃时转折点大概在 80% 左右,50℃大概在 60% 左右,可 以看出,随着试验温度的升高,使吸湿模型转折点降低,这主 要是因为树脂基复合材料的吸湿过程由 2 个机理决定<sup>[2]</sup>:水 分的扩散和基体的溶胀,当试验温度升高时,加速了聚合物 基体溶胀的吸湿能力,从而加快了试验件吸湿模型由 Fick 扩散模型到非 Fick 扩散模型的转变。





用体视显微镜观测了干燥试验件、吸湿平衡后试验件 的截面,放大40倍的截面图像如图5所示。通过对比,可 以看出湿热试验后的试验件截面产生了大量的孔洞。文献 [3]、文献 [4] 认为主要有 3 个原因: 首先,水分子扩散到复合 材料的树脂基体中,占据高分子内部的自由体积,使得高分 子自由链之间的距离增大,消弱分子间的范德华力,部分刚 性基团活化,基体体积增大,发生溶胀,产生所谓的增塑效 果,由于纤维和树脂基体的湿热膨胀系数不同,基团增塑会 导致沿纤维方向的拉应力,促进基体本身含有的微裂纹、气 孔等缺陷吸湿,并使裂纹尖端锐化,促进裂纹的形成和扩展; 其次,树脂中的部分可溶组分遇水溶出,在基体局部形成浓 度差,导致渗透压存在,在此压强的作用下,树脂基体内部易 产生微裂纹、裂缝和其他微小的变化;最后,在较高温度下, 极性水分子由于相似相溶的原理,溶解了高分子树脂中的某 些极性基团,使得树脂内部形成微空洞。而当裂缝、孔洞等 缺陷大量产生后,将会降低复合材料的宏观力学性能。

#### 2.2 平板拉伸试验

平板拉伸试验是复合材料性能研究中的基础试验之一,为了进一步研究复合材料宏观力学性能和细观组织结构 之间的关系,采用体视显微镜观察了平板拉伸试验件破坏后 的截面示意图,如图6所示。90°层的基体产生横向开裂, 45°与90°层界面出现分层。

对于单向的碳纤维增强复合材料层压板,复合材料拉









伸性能受到纤维方向和拉伸载荷之间夹角的影响<sup>[5]</sup>。由 于纤维是单向排列的,纤维方向和拉伸载荷方向夹角在 0°~30°时,复合材料层压板的破坏模式为轴向拉应力和界 面剪切应力共同作用的失效模式;纤维方向和拉伸载荷方 向夹角在 30°~45°时,复合材料层压板的破坏模式为界面剪 切应力和界面拉应力共同作用的失效模式;纤维方向和拉 伸载荷方向夹角在 45°~90°时,由于高体积分数界面面积的 提高,复合材料层压板的破坏模式为界面拉应力作用的失效 模式。因此,复合材料层压板在轴向拉伸载荷作用下,其破 坏通常始于 90°层中的基体横向开裂。

而基体中横向裂纹的出现,又可以归咎为材料中原始

微裂纹的存在,碳纤维复合材料在制备、加工以及使用的过程中会产生微裂纹、微孔洞以及界面的弱黏、脱黏,当外加的拉伸载荷增大到某个值时,"最严重"的微裂纹率先扩展成基体横向裂纹,即形成初始破坏。而在实际中,横向开裂几乎总会伴随层压板中的分层扩展,这大体可以解释为什么拉伸试验件90°层的基体产生横向裂纹,45°与90°层之间界面分层,破坏总是会发生在试验件中最薄弱的地方。 2.3 **开孔拉伸试验** 

## 工工台伸出公司7

开孔拉伸试验和平板拉伸试验类似,都是复合材料性 能研究中最基础的试验,采用体视显微镜观察了开孔拉伸 试验件破坏后的截面示意图,如图 7 和图 8 所示。在纤维方 向为 90°和 ±45°层板上形成等间距的饱和裂纹群,孔周围 0°的纤维被拉断。



图 7 开孔拉伸试验件截面示意图 Fig.7 Image of open hole stretching test section



图 8 开孔拉伸试验件平面示意图 Fig.8 Image of open hole stretching test section

曾庆敦<sup>[0]</sup>等人发现,碳纤维复合材料正交层压板在轴 向拉伸载荷的作用下,其破坏通常始于纤维方向为90°层中 的基体横向开裂,随着外载荷的不断增大,其他一些微裂纹 也都相继扩展成横向裂纹,从而形成多级开裂状态,同时裂 纹间距不断减小,直至达到某一个最小值,此时在90°层中 便形成等间距的饱和裂纹群。学者们提出了剪滞方法、统计 方法以及基于断裂力学中的裂纹扩展的能量释放来进行分 析。本实验发现,在含有纤维方向为±45°的复合材料层压 板中,随着载荷的增加,在±45°纤维方向的层板上也会形 成等间距的饱和裂纹群,而在0°纤维方向的层板上,直到纤 维断裂,也不会在基体上形成裂纹群。

## 3 结论

为了进一步对碳纤维复合材料的力学性能进行分析, 利用体视显微镜对碳纤维复合材料试验件破坏后的截面进 行了观察,尝试通过对破坏截面上细观结构的分析,来解释 复合材料宏观的力学行为。得到以下结论:

(1)对于湿热试验件,由于水分子和复合材料基体之间的物理、化学作用及温度的催化,在基体上产生了大量裂缝、 孔洞等缺陷,极大的降低了材料的力学性能。

(2) 对于平板拉伸试验件,纤维方向为 90° 层的破坏模 式为界面拉应力作用的失效模式,因此,复合材料层压板在 轴向拉伸载荷作用下,其破坏通常始于 90° 层中的基体横向 开裂,并伴随层压板中 45° 与 90° 层出现界面分层,随着载 荷的增加,损失逐步扩展至破坏。

(3) 对于开孔拉伸试验件,实验观察到在纤维方向为 90°、±45°层板上形成等间距的饱和裂纹群,而在0°纤维方向 的层板上,直到纤维断裂,也不会在基体上形成裂纹。 (AST

#### 参考文献

- Springer G S. Environmental effects on composite material [M]. Technomic Publishing Co., 1981.
- [2] 王春齐,江大志,曾竟成,等.温度和压力对玻璃纤维增强环 氧复合材料吸湿特性的影响[J].国防科技大学学报,2010,32
  (2):40-45.

WANG Chunqi, JIANG Dazhi, ZENG Jingcheng, et al. Effects

of temperature and pressure on water absorption of glass fiber reinforced epoxy resin composites[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32 (2) :40-45. (in Chinese)

- [3] Selzer S, Friedrich K. Mechanical properties and failure behavior of carbon fiber-reinforced polymer composites under the influence of moisture[J]. Composites Part A, 1997, 28 (6) :595-604.
- [4] Zhong Y, Zhou J R. Study of thermal and hygro-thermal behaviours of glass/vinylester composites[J]. Journal of Reinforced Plastics Composites, 1999, 18 (17) :1619-1629.
- [5] 王萌. Tif/Al 复合材料微观组织和力学性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

WANG Meng. Study on microstructure and mechanical properties of Tif/Al[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)

[6] 曾庆敦,张宁.正交叠层板的多级横向开裂问题 [J]. 华南理工 大学学报, 2004, 32 (12):30-33.
ZENG Qingdun, ZHANG Ning. Investigation into the multiple transverse cracks in cross-ply laminates[J]. Journal of South China University of Technology, 2004, 32 (12):30-33. (in Chinese)

## 作者简介

魏洪(1984-) 女,工程师。主要研究方向:飞机设计研究。 Tel: 029-86832309 E-mail: 13609253856@163.com

## Composite Meso-structure Characteristics and Macro Mechanical Properties

## WEI Hong<sup>\*</sup>, ZHANG Lei, ZHANG Li

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

**Abstract:** Selected three fundamental tests in research of composite mechanical properties, including moisture and heating test, plate tension test, open hole tension test, and took advantage of stereo microscopes to observe the destroyed section of composite experimental sample, then analyzed meso-structure characteristics and explain macro mechanical properties.

## Key Words: composite; stereo microscope; meso-structure; mechanical properties

 Received:
 2016-04-12;
 Revised:
 2016-04-22;
 Accepted:
 2016-05-12

 \*Corresponding author.
 Tel.:
 029-86832309
 E-mail:
 13609253856@163.com