

# 复合材料缠绕制品性能测试

## Performance Test for Wound Product of Composites

西北工业大学机电学院 阎龙 史耀耀 莫蓉

**[摘要]** 本文对复合材料缠绕制品力学性能、耐燃烧性、吸水性、老化性能的测试进行了论述,这些试验方法、标准将为缠绕制品的可靠性的进一步研究奠定实验基础。

**关键词:** 缠绕制品 性能测试 试验方法 试验标准

**[ABSTRACT]** This paper mainly discussed the mechanical properties, flame resistance, water absorption and ageing characteristic of wound products. The methods and standards, proposed in this paper, would lay the experimental foundation for the reliability study of wound products.

**Keywords:** Wound products Performance tests Testing methods Testing standards

复合材料是近 40 年来发展起来的一类全新材料。为真实反映复合材料及其制品的基本性能,以及原材料质量、成型工艺条件等对制品性能的影响,必须对其进行一系列性能测试,作为评价复合材料制品的依据,供设计和使用时参考。复合材料制品性能测试具有两个特点<sup>[1]</sup>:一是复合材料的定义在不断扩展,复合材料制品试验技术虽初步形成体系,但试验的新原理、新方法陆续出现,处于不断完善、不断进步的过程中;二是由复合材料的各向异性决定了试验方法的复杂性,与之相关的试样制作、测试过程、测试仪器以及测试结果的表述方法都较传统方法更为复杂。

缠绕作为复合材料成型的一种主要手段,可实现导弹鼻锥、固体火箭发动机喷管、航天器壳体等关键部件的成型制造。随着航空航天领域缠绕制品用量的增加,人们对其性能可靠性的关注日益提高,而性能测试正是保证缠绕制品可靠性和建立其评价体系的关键。在测定缠绕制品的各项性能时,测试方法的科学性和统一性至关重要。欲使所测结果具有可信性、可比性及可重复性,必须采用通行的标准测试方法<sup>[1]</sup>。

## 1 缠绕制品的力学性能测试

缠绕制品的力学性能包括:拉伸性能、压缩性能、弯

曲性能、层间剪切性能以及冲击韧性。

### 1.1 拉伸强度与拉伸模量

对缠绕制品试样进行拉伸试验,可测得其拉伸强度和拉伸模量。涉及的计算公式如下<sup>[2-3,10]</sup>:

$$\sigma_t = \frac{F}{bd}, \quad (1)$$

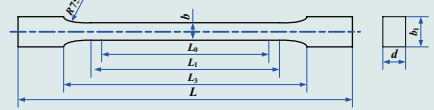
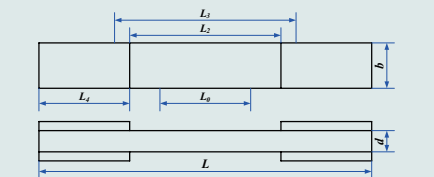
$$E_t = \frac{L_0 \Delta F}{bd \Delta L}, \quad (2)$$

式中,  $\sigma_t$  为试样的拉伸强度,单位为 MPa;  $F$  为试样的破坏载荷或最大载荷,单位为 N;  $b$ 、 $d$  分别为试样的宽度和厚度,单位为 mm;  $E_t$  为试样的拉伸模量,单位为 MPa;  $\Delta F$  为试样分级加载条件下载荷-变形曲线上初始直线段的载荷增量,单位为 N;  $\Delta L$  为  $\Delta F$  对应的标距  $L_0$  内的变形增量,单位为 mm。

测定缠绕制品拉伸性能的试验可参照 GB/T1447-2005<sup>[3]</sup>,它是测试纤维增强塑料拉伸性能的试验方法。该标准提供的拉伸试样如表 1 所示。

表1 标准拉伸试样数据表

mm

 <p>(I型)<math>L</math>: 最小总长; <math>L_0</math>: 标距; <math>L_1</math>: 平行段长度; <math>L_2</math>: 夹具间距离; <math>b</math>: 平行段宽度; <math>b_1</math>: 端头宽度; <math>d</math>: 厚度</p>	$L$	180
	$L_0$	$50 \pm 0.5$
	$L_1$	$55 \pm 0.5$
	$L_2$	$115 \pm 5$
	$b$	$10 \pm 0.2$
 <p>(II型)<math>L</math>: 最小总长; <math>L_0</math>: 标距; <math>L_1</math>: 端部加强片间的距离; <math>L_2</math>: 夹具间距离; <math>L_3</math>: 端部加强片最小长度; <math>b</math>: 平行段宽度; <math>d</math>: 厚度</p>	$L$	250
	$L_0$	$100 \pm 0.5$
	$L_1$	$150 \pm 0.5$
	$L_2$	$170 \pm 5$
	$L_3$	50
$b$	$25 \pm 0.5$	
$d$	2~10	

安装试样时要特别注意对中和夹紧问题。若对不良,将产生偏轴拉伸状态,使所测拉伸强度和模量下

降。在夹紧试样时应注意以下几点<sup>[2-3]</sup>：一是应尽量减少对试样被夹持部分中纤维的破坏；二是夹持的面积应足够大，以使夹持面上的摩擦力大于试样破坏前所能承受的最大载荷，防止在拉伸过程中试样滑脱出夹具；三是在夹持过程中应尽量保持准确对中。

由于缠绕制品性能分散度大，故每一个性能指标的确定必须要有一组试样(不少于5个)的支持，并且还要给出每组试样的离散系数 $C_v$ <sup>[4]</sup>：

$$C_v = \frac{1}{\bar{X}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3)$$

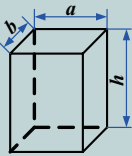
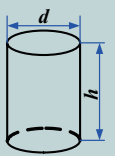
式中， $X_i$ 为每个试样的测量值； $\bar{X}$ 为平均值； $n$ 为试样的个数。

测量缠绕制品的拉伸强度要特别注意试样的破坏模式对强度测试值的影响。只有当试样在工作标距内发生断裂，才能根据上述公式计算。若试样发生纵向分层、表面开裂或剪切，则所测数据应予以作废<sup>[1-2]</sup>。

### 1.2 压缩强度与压缩模量

测定缠绕制品压缩性能的试验可参照 GB/T1448-2005<sup>[3]</sup>，它是测定纤维增强塑料压缩性能的试验方法。该标准提供的压缩试样如表2所示。

表2 标准压缩试样数据表 mm

项目	I型			II型	
形状					
	宽度 $b$	厚度 $a$	高度 $h$	直径 $d$	高度 $h$
	10~14	4~14	$\lambda b/3.46$	4~16	$\lambda d/4$
横截面积 $S$	$ab$			$\pi d^2/4$	
最小主惯性矩 $I$	$ab^3/12$			$\pi d^4/64$	

压缩试验中，试样直至破坏或达到最大载荷时所受的最大压缩应力为<sup>[2-3,5]</sup>：

$$\sigma_c = \frac{P}{S} \quad (4)$$

式中， $\sigma_c$ 为压缩强度，单位为 MPa； $P$ 为破坏载荷或最大载荷，单位为 N； $S$ 为试样的横截面积，单位为  $\text{mm}^2$ 。

压缩模量为<sup>[2-3,6]</sup>：

$$E_c = \frac{L_0 \Delta P}{S \Delta L} \quad (5)$$

式中， $E_c$ 为压缩模量，单位为 MPa； $L_0$ 为仪表的标距，单

位为 mm； $\Delta P$ 为载荷-变形曲线上初始直线段的载荷增量，单位为 N； $\Delta L$ 为与载荷增量  $\Delta P$ 对应的标距  $L_0$ 内的变形增量，单位为 mm。

对于树脂基复合材料缠绕制品，由于基体的模量小、刚度低，受压时以试样产生局部屈曲为主要失效形式，同时还可能发生如整体失稳、端部破坏、纵向劈裂、表层开裂等多种类型的非正常破坏<sup>[7]</sup>。这些非正常破坏通常发生在正常破坏之前，降低测得的强度值。因此，压缩试验所采用的试样形状、尺寸及所配的夹具总是力图防止压缩过程中发生整体失稳和端部破坏等形式的早期破坏。从试样的几何形状看，发生整体失稳的可能性从大到小依次为薄板状、板状、条状、圆柱状<sup>[5-6]</sup>。为阻止失稳，必须使试样工作段尽可能短，并尽量减小试样的长细比。

所谓长细比是指等截面柱体的高度与其最小惯性半径之比<sup>[1-2]</sup>：

$$\lambda = \frac{h}{i} \quad (6)$$

式中， $\lambda$ 为试样的长细比； $h$ 为试样的高度； $i$ 为试样的最小惯性半径。

最小惯性半径  $i$  的计算公式为<sup>[1-2]</sup>：

$$i = \sqrt{\frac{I}{S}} \quad (7)$$

式中， $I$ 为横截面的最小主惯性矩； $S$ 为试样横截面积。

对于测定压缩强度的试样，一般长细比取 10；若在试验中发生失稳现象，长细比可减少到 6。测定压缩模量时，长细比取 15 或根据测量变形的仪表而定<sup>[3]</sup>。试样上下端面要求相互平行，且与试样中心线垂直；不平行度应小于试样高度的 0.1%。

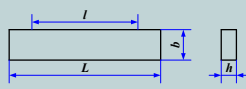
将试样安装到试验机时，应使其中心线与试验机上下压板的中心对齐。测量压缩模量时，在试样高度中间位置安放测量变形的仪表。压缩试验的加载速度必须按规定进行，一般来说压缩强度随加载速度的增加而增大。

### 1.3 弯曲强度与弯曲模量

弯曲试验本是一种质量控制和材料鉴定试验，而不是给出材料性能数据的试验，但在缠绕制品性能测试中，有时也用弯曲试验来代替拉伸试验<sup>[8-9]</sup>。这是因为拉伸试样极难制备，测试结果分散度又大<sup>[4]</sup>，而弯曲试验虽然应力状态较为复杂，但断裂总是发生在试样中部(即最大正应力处)，并且数据分散性小，故常用来判定缠绕制品性能的优劣。

测定缠绕制品弯曲性能的试验可参照 GB/T1449-2005<sup>[3]</sup>，它是测定纤维增强塑料弯曲性能的试验方法。该标准提供的弯曲试样如表3所示。

表3 标准弯曲试样数据表 mm

形状	厚度 $h$	宽度 $b$	长度 $L$
	$1 < h \leq 10$	$15 \pm 0.5$	$\geq 20h$
	$10 < h \leq 20$	$30 \pm 0.5$	
	$20 < h \leq 35$	$50 \pm 0.5$	
	$35 < h \leq 50$	$80 \pm 0.5$	

弯曲性能测试通常采用简支梁三点弯曲方法<sup>[10-11]</sup>, 试验装置示意图如图1所示。

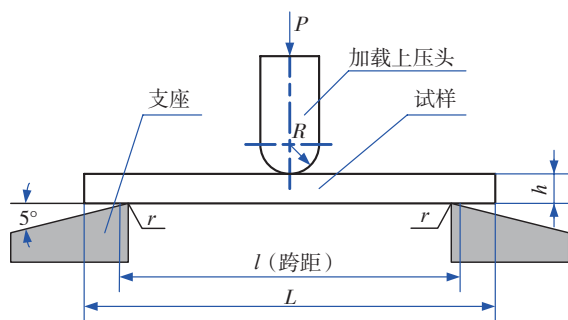


图1 弯曲试验装置示意图  
Fig.1 Diagram of bending test equipment

弯曲强度的计算公式为<sup>[2-3,10]</sup>:

$$\sigma_f = \frac{3Pl}{2bh^2} \quad (8)$$

式中,  $\sigma_f$ 为弯曲强度(或挠度为1.5倍试样厚度时的弯曲应力),单位为MPa;  $P$ 为破坏载荷或最大载荷(或挠度为1.5倍试样厚度时的载荷),单位为N;  $l$ 为跨距,单位为mm;  $b$ 、 $h$ 分别为试样的宽度和厚度,单位为mm。

弯曲弹性模量的计算公式为<sup>[2-3,10]</sup>:

$$E_f = \frac{l^3 \Delta P}{4bh^3 \Delta f} \quad (9)$$

式中,  $E_f$ 为弯曲弹性模量,单位为MPa;  $\Delta P$ 为载荷-挠度曲线上初始直线段的载荷增量,单位为N;  $\Delta f$ 为与载荷增量  $\Delta P$ 对应的跨距中点处的挠度增量,单位为mm。

试样在弯曲过程中受到正压力和剪应力的影响。根据材料力学分析,试样中性层以上的纤维受压应力,中性层以下的纤维受拉应力,而中性层上的纤维既不受拉应力也不受压应力<sup>[12]</sup>。最外层纤维的拉应力、压应力都最大,其值为<sup>[1-2]</sup>:

$$\sigma_{\max} = \frac{3Pl}{2bh^2} \quad (10)$$

若载荷  $P$  使试样发生破坏,则此时的应力值即为弯曲应力。

虽然中性层上不受正应力作用,但此处的切应力达

到最大,其值为<sup>[1-2]</sup>:

$$\tau_{\max} = \frac{3P}{4bh} \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可知,试样的最大正应力与最大剪应力之比为:

$$\frac{\sigma_{\max}}{\tau_{\max}} = \frac{2l}{h} \quad (12)$$

因此,在进行弯曲试验时,为尽量减少剪应力对弯曲应力的影响,必须取足够大的跨厚比(试样的跨度  $l$  与厚度  $h$  之比,即  $l/h$ )<sup>[13-14]</sup>。一般取  $16 \pm 1$ ,对于很厚的试样,可大于16;对于很薄的试样,为使其载荷落在试验机许可的范围内,可小于16<sup>[3]</sup>。

测定弯曲弹性模量和弯曲-挠度曲线时,可以自动连续加载,也可以分级加载,但施加的载荷一般不超过破坏载荷的50%。测量试样的弯曲强度时,应连续加载,在挠度小于或等于1.5倍试样厚度下呈现最大载荷或破坏的试样,记录最大载荷或破坏载荷。在挠度等于1.5倍试样厚度下不被破坏的试样,记录该挠度下的载荷<sup>[2]</sup>。

#### 1.4 剪切强度与剪切模量

一般地,复合材料制品层间剪切强度低,且层间剪切形式复杂,有单面剪切、双面剪切、拉伸剪切、压缩剪切、弯曲剪切等<sup>[7]</sup>。在受剪面上,往往受的不是一个单纯的剪力,而是复合力。因此,剪切试验对于复合材料制品的性能测试尤为重要。

测定缠绕制品剪切性能的试验可参照GB/T1450.1-2005<sup>[3]</sup>,它是测定纤维增强塑料层间剪切性能的试验方

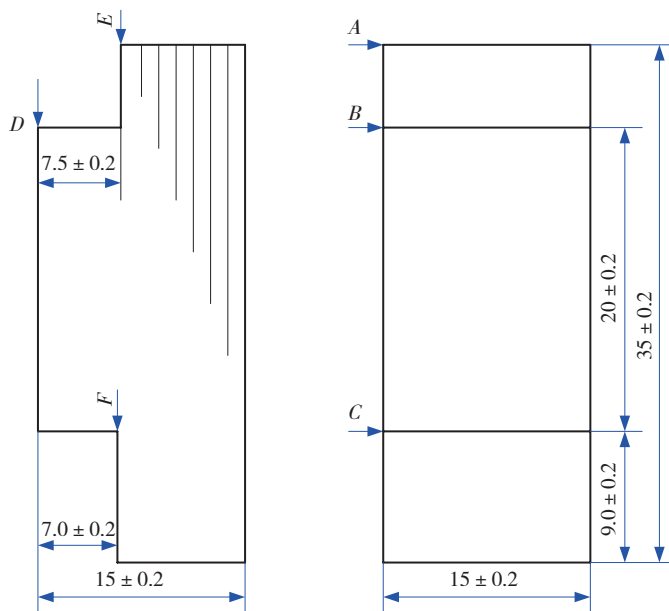


图2 层间剪切试样(单位: mm)  
Fig.2 Interlaminar shear specimen

法。该标准提供的剪切试样如图 2 所示。加工这类试样时要做到<sup>[2-3]</sup>:(1)保证 A、B、C 三面相互平行,并与缠绕层垂直;(2)D 为加工面,保证 D、E、F 与缠绕层严格平行;(3)保证受力面 A、C 光滑。

测定试样的层间剪切强度时,可采用 90° 拉伸(见图 3(a))或 45° 拉伸(见图 3(b)),其中 45° 偏轴拉伸是评价纤维与树脂之间界面性能的常用方法<sup>[4,8]</sup>。该方法主要取决于纤维与树脂间的界面状态、浸润性以及树脂基体的性能。在较大应力状态下试样的层间剪切性能通常表现出非线性<sup>[10]</sup>。由于纤维方向对测试结果有很大影响,因此应使试样轴线与纤维方向成 45° 夹角。这种情况下,纵横向剪切强度可按下式计算<sup>[1-3]</sup>:

$$\tau_{LT} = \frac{P}{2bh}, \quad (13)$$

式中,  $\tau_{LT}$  为纵横向剪切强度,单位为 MPa;  $P$  为破坏载荷或最大载荷,单位为 N;  $b$ 、 $h$  分别为试样的宽度和厚度,单位为 mm。

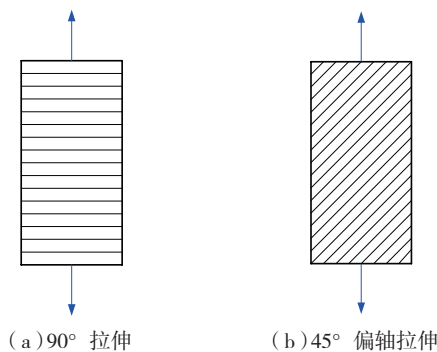


图3 两种拉伸方向的层间剪切强度测试

Fig.3 Interlaminar shear strength tests of two drawing directions

纵横向剪切模量的计算公式为<sup>[1-3]</sup>:

$$G_{LT} = \frac{\Delta P}{2bh(\Delta\varepsilon_x - \Delta\varepsilon_y)}, \quad (14)$$

式中,  $G_{LT}$  为纵横向剪切模量,单位为 MPa;  $\Delta P$  为载荷-应变曲线上初始直线段的载荷增量,单位为 N;  $\Delta\varepsilon_x$  与  $\Delta\varepsilon_y$  分别为与  $\Delta P$  相对应的轴向及与轴线垂直方向的应变增量。

进行试验时,首先将试样夹在层间剪切夹具中, A 面向上,以试样能上下滑动为宜,不可过紧;然后把夹具放在试验机上,使受力面 A 的中心对准试验机的压板中心。在此过程中,应始终保证试样处于剪切状态,对其施加均匀、连续的载荷,直至试样破坏<sup>[2-3]</sup>。

### 1.5 冲击韧性

冲击韧性是衡量复合材料制品承受冲击载荷时抵抗断裂的能力,它是一种韧性标准,可用断裂过程中单位面积承受的冲击功  $\alpha_k$  来表征,有时也用规定尺寸的

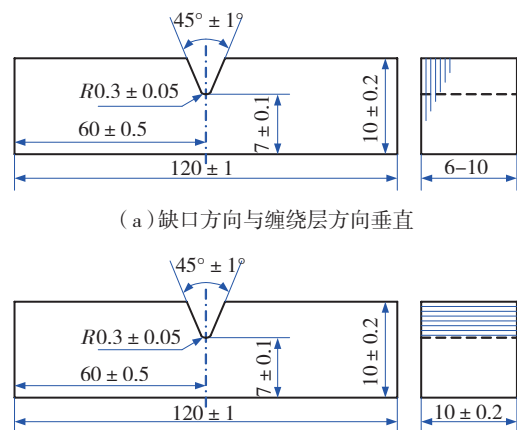
试样被冲断的总冲击功  $A_k$  来表示<sup>[1-2]</sup>。

一般地,冲击试验分 3 种:摆锤式冲击试验(包括简支梁型和悬臂梁型)、落球式冲击试验和高速拉伸冲击试验<sup>[1,3]</sup>。

简支梁型冲击试验是摆锤击打简支梁试样的中央,试样可以有缺口,也可以没有缺口;悬臂梁型则是让摆锤击打有缺口的试样的自由端。摆锤式冲击试验所测得的能量包括:产生裂缝所需的能量,使裂缝扩展到整个试样所需的能量,使材料产生永久变形的能量以及把断裂的试样碎片抛出去的能量<sup>[4,8]</sup>。其中最后一部分的能量与材料的韧性无关,但却占据了所测能量的一部分。对同一跨度的试样,试样越厚消耗在碎片抛出的能量就越大。所以不同尺寸试样的测试结果不好比较。但由于摆锤式试验方法简单方便,所以在复合材料制品的质量控制及工艺方法筛选等方面使用较多。

落球式冲击试验是把标准的球、重锤或投掷枪由已知高度落在试样上,测定使试样刚刚够破裂所需能量的一种方法。高速应力-应变试验是评价制品冲击强度的最好方法。应力-应变曲线下的面积与使材料破坏所需能量成正比,如果试验是以相当高的速度进行,那么这个面积就与冲击强度相等<sup>[9]</sup>。

测定缠绕制品冲击韧性的试验可参照 GB/T1451-2005<sup>[3]</sup>,该标准为纤维增强塑料简支梁式冲击韧性试验方法。冲击试样为矩形杆,其表面有 V 形缺口,受冲击时试样产生脆性断裂。根据缺口方向与缠绕层方向的关系,试样可分为两种<sup>[1,3]</sup>:一种是缺口方向与缠绕层方向垂直(见图 4(a));另一种是缺口方向与缠绕层方向平行(见图 4(b))。



(a) 缺口方向与缠绕层方向垂直

(b) 缺口方向与缠绕层方向平行

图4 冲击试验试样(单位: mm)

Fig.4 Impact test specimen

试验设备采用简支梁式非金属材料摆锤式冲击试验机,如图 5 所示,冲击速度约为 3.8m/s,跨度约为

70mm。安装试样时,应使带缺口的一面背向摆锤,用试样定位板来安放试样,并使缺口中心对准冲击中心。发生冲击破坏后,如果发现试样内部有明显缺陷或破坏不在缺口处,则试验结果应予以作废<sup>[1-3]</sup>。

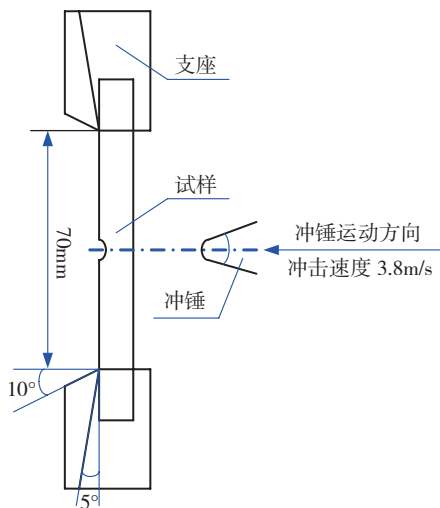


图5 摆锤式冲击试验机示意图

Fig.5 Diagram of pendulum impact test equipment

冲击韧性的计算公式如下<sup>[1-3]</sup>:

$$\alpha_k = \frac{A}{bh} \times 10^3, \quad (15)$$

式中,  $\alpha_k$  为冲击韧性,单位为  $\text{kJ}/\text{m}^2$ ;  $A$  为冲断试样所消耗的功,单位为  $\text{J}$ ;  $b$  为试样缺口处的宽度,单位为  $\text{mm}$ ;  $h$  为试样缺口处的最小厚度,单位为  $\text{mm}$ 。

## 2 缠绕制品的耐燃烧性测试

复合材料制品耐燃烧性的测试方法包括间接火焰法、直接火焰法、氧指数法等<sup>[1,3]</sup>,这些方法可用于缠绕制品质量的控制和评价。

### (1) 间接火焰法。

间接火焰法的引燃源采用由电加热的灼烧硅碳棒,因此又称炽热棒法(参阅 GB/T2407-2008)<sup>[3]</sup>。它是将试样的一端水平支撑,另一端即自由端在规定时间内与加热至 $(955 \pm 15)^\circ\text{C}$ 的炽热棒相接触,然后评定制品的耐燃烧性能。试样采用尺寸为  $120\text{mm} \times 10\text{mm} \times 4\text{mm}$  的板状试样,表面平整光滑,无气泡、飞边、毛刺等缺陷<sup>[1,3]</sup>。

试验过程中作如下记录<sup>[1,3]</sup>: (a) 试样有无可见火焰; (b) 若试样为有焰燃烧,则记录火焰前沿从第一标线(距炽热棒 25mm 处)到第二标线(距炽热棒 100mm 处)所需时间  $t$ ,两标线间距离除以时间  $t$  即为燃烧速度; (c) 若火焰前沿到达第二标线前熄灭,则记录燃烧长度  $S=100-L$  (mm),其中  $L$  为第二标线至未燃烧部分的最短距离。

### (2) 直接火焰法。

直接火焰法根据试样放置位置不同可分为水平燃烧法、垂直燃烧法和  $45^\circ$  燃烧法等(参阅 GB/T2408-2008)<sup>[3]</sup>。这类方法的引燃源均采用明火,因此点燃温度要比间接火焰法低一些。直接燃烧法所用的试样为  $125\text{mm} \times 13\text{mm} \times 3\text{mm}$  的板状试样,其他要求与间接火焰法相同<sup>[1]</sup>。

测试时,在试样宽面上距点火端 25mm 和 100mm 处各划一条标线。在施加火焰的 30s 内不得移动火源。若不到 30s 火焰前沿就已燃烧到第一标线,则应立即停止施加火焰。

停止施加火焰后作如下记录<sup>[1]</sup>: (a) 试样在火焰撤离后的 2s 内是否熄灭; (b) 若试样继续燃烧,则记录火焰前沿从第一标线到第二标线所需时间,计算燃烧速度; (c) 若火焰到达第二标线前就已经熄灭,则记录试样燃烧长度  $S=100-L$  (mm),其中  $L$  为第二标线到未燃烧部分的最短距离。

### (3) 氧指数法。

氧指数是指在指定条件下,试样在氧、氮混合气流中维持平稳燃烧所需的最低氧气浓度,以氧所占的体积百分比表示。该方法适用于常温下试样氧指数的测定(参阅 GB/T2406-2008)<sup>[3]</sup>。

测定氧指数所用的氧指数仪主要由燃烧部分(图 6)、流量测量与控制部分、气源及点火器等部分组成<sup>[1,3]</sup>。

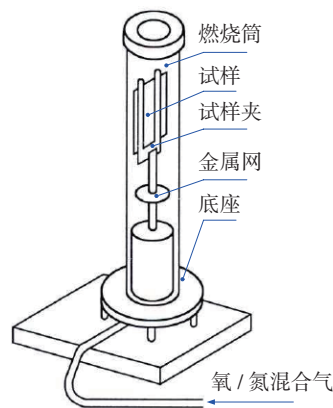


图6 燃烧部分试验装置示意图

Fig.6 Diagram of burning test equipment

氧指数试验一般采用  $(70 \sim 150) \text{mm} \times 30\text{mm} \times 6.5\text{mm}$  的板状试样,其他要求同间接火焰法<sup>[1]</sup>。测量时,在试样的宽面上距点火端 50mm 处划一条标线,然后将试样垂直安装在试样夹上,试样上端至筒顶距离不小于 100mm。根据经验或试样在空气中点火的情况,估计开始试验时的氧浓度值:对于在空气中迅速燃烧的估计为 18% 以下,对于在空气中不燃烧的估计为 25% 以上。

调节流量阀使流入燃烧筒的氧、氮混合气体达到要求的氧浓度,并保证燃烧筒中气体流动速率为 $(4 \pm 1)$  cm/s。让调节好的气体流动 30s 以清洗燃烧筒,然后用点火器点燃试样的顶部,在确认试样顶部全部燃烧后,移去点火器,并立即开始计时。在试样燃烧过程中不得改变流量和氧浓度值。

若试样的燃烧时间超过 3min 或火焰前沿超过标线时,应降低氧浓度,再取试样试验;若试样的燃烧时间不足 3min 或火焰前沿不到标线时,应提高氧浓度,再取试样试验。如此反复进行,直到所得到的氧浓度差不大于 0.5% 时,即可由此时的氧浓度计算制品的氧指数。氧指数 OI 的计算公式如下<sup>[1]</sup>:

$$OI = \frac{[O_2]}{[O_2] + [N_2]} \times 100\% , \quad (16)$$

式中,  $[O_2]$  为氧气流量,单位为 L/min;  $[N_2]$  为氮气流量,单位为 L/min。

### 3 缠绕制品的吸水性测试

复合材料制品的吸水性是评价制品性能的一个重要指标。吸水后的含水量对其力学性能、外观尺寸等有较大影响,通过吸水性的测定可了解水分对上述性能的影响程度,从而为复合材料制品的生产和使用提供有用的参考依据。

复合材料制品吸水性的尺寸大小不仅与所选用的纤维和基体有关,而且与纤维的表面处理以及复合工艺有关。此外,吸水时间、浸泡温度、试样厚度、试样表面积以及试样中纤维排列方向等对制品的吸水性都有重要影响<sup>[1,3]</sup>。

测定缠绕制品吸水性能的试验可参照 GB/T1462-2005<sup>[3]</sup>,它是测定纤维增强塑料吸水性能的试验方法。该标准提供了两种标准试样:(1)直径 $(50 \pm 1)$  mm,厚 $(3 \pm 0.2)$  mm 的圆片;(2)边长 $(50 \pm 1)$  mm,厚 $(4 \pm 0.2)$  mm 的方片。

进行试验时<sup>[3]</sup>:(1)将试样放进 $(50 \pm 2)$  °C 的烘箱中干燥 $(24 \pm 1)$  h,移至干燥器中冷却至室温预处理,取出后随即称量其质量 $(m_1)$ ,精确至 0.001g;(2)将试样浸入温度为 $(23 \pm 0.5)$  °C 的蒸馏水中,浸泡 $(24 \pm 0.5)$  h 后取出,用清洁的布或滤纸除去表面水分,在取出后的 1 分钟内再次称量试样质量 $(m_2)$ ,精确至 0.001g;(3)在与预处理相同的条件下对试样进行干燥,并称量其质量 $(m_3)$ ,精确至 0.001g。

计算试样绝对吸水量,单位表面积吸水量以及相对于试样质量吸水百分率的公式如下<sup>[1,3]</sup>:

$$m_a = \begin{cases} m_2 - m_3, & m_3 \leq m_1 \\ m_2 - m_1, & m_3 > m_1 \end{cases} , \quad (17)$$

$$m_s = \frac{m_a}{S} , \quad (18)$$

$$m_{pl} = \frac{m_a}{m_1} \times 100\% . \quad (19)$$

其中,  $m_a$  为试样的绝对吸水量,单位为 g;  $m_2$  为试样浸水后的质量,单位为 g;  $m_3$  为试样浸水再干燥后的质量,单位为 g;  $m_1$  为试样浸水前的质量,单位为 g;  $m_s$  为试样单位表面积吸水量,单位为 g/cm<sup>2</sup>; S 为试样的初始表面积,单位为 cm<sup>2</sup>;  $m_{pl}$  为相对于试样初始质量的吸水百分率。

### 4 缠绕制品的老化性能测试

复合材料制品的老化性能是指其在加工、使用、贮存过程中受到光、热、氧、潮湿、水分、机械应力等因素作用,引起微观结构的破坏,失去原有物理力学性能,最终失去使用价值的现象<sup>[1,4]</sup>。

缠绕制品老化性能的试验方法分两大类<sup>[1,4,8]</sup>:一类是自然老化试验方法,包括大气暴露、加速大气暴露、仓库贮存试验方法;另一类是人工老化试验方法,包括人工气候老化、热老化、湿热老化、盐雾试验方法等。在上述各类试验方法中,大气暴露试验比较接近制品的实际使用环境,特别是对制品的耐候性,能得到较为可靠的数据,因而受到重视并被普遍采用。

进行大气老化试验时要考虑缠绕制品可能受到的各种气候环境,不同气候区域对制品的影响大不相同,一般以湿热气候区的老化速率最快<sup>[4]</sup>。试样暴露的场地和放置方式对其老化速率也有影响。因此,暴露场地应选在一个清洁且能代表被测制品使用条件的地点,并且要求暴露场地的气候环境与当地的气候环境一致。试样一般要放置在专用的暴露架上,在草地暴露场,试样距地面为 0.5m;在屋面暴露场,试样距地面为 0.8m<sup>[1,4]</sup>。

自然大气暴露试验方法试验周期很长,有时需要几年时间才能得到试验结果,往往无法满足性能测试时效性的要求。为克服这一缺点,出现了加速大气暴露试验方法。该方法采用具有特殊结构的暴露架代替普通暴露架。加速大气暴露试验所用的暴露架有跟踪太阳暴露架、带反射镜的跟踪太阳暴露架以及对试样施加应力的暴露架等<sup>[8]</sup>。由于加速大气暴露试验与大气暴露试验的老化因素基本相同,所以其试验结果与大气暴露试验十分相似,试验周期则大为减少。然而,该试验方法的设备投资高,且设备长期暴露在户外易损坏失灵。

人工加速老化试验是在实验室内用各种老化箱进行老化的一类试验方法。老化箱可模拟并强化自然环  
(下转第 84 页)

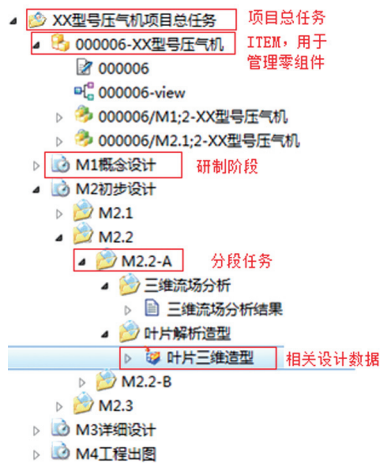


图4 系统中搭建的WBS

Fig.4 WBS deployed on Teamcenter

## 4 结束语

本文通过对航空发动机压气机设计过程的WBS加入了成熟度概念,对压气机设计过程进行了优化,使得压气机设计过程更能体现并行工程的特点,减少了反复迭代、评审等对设计过程的影响,有效地缩短了设计周期,以中小航空发动机压气机设计过程为例,在TeamCenter中进行二次开发后实施验证,有效地提升了航空发动机的研制能力。

## 参考文献

- [1] 张定华,李山.航空发动机数字化协同平台关键技术研究.现代设计与先进制造技术,2009,38(9):35-39.
- [2] 桂元坤.航空发动机产品开发过程集成的关键技术研究[D].西安:西北工业大学,2006.
- [3] 聂亚军.工作分解结构(WBS)在发动机型号研制中的应用.航空发动机,2006,33(1):51-54.
- [4] 熊光楞.并行工程的理论与实践.北京:清华大学出版社,2001.
- [5] 张友良,汪惠芬.异地协同设计制造关键技术及系统实现.工程设计,2002,9(2):53-59.
- [6] 皮亚风.航天型号项目工作分解结构(WBS)编制研究.华北航天工业学院学报,2006,16(3):1-3.
- [7] 甘焕.基于WBS的大型工程项目管理信息系统研究[D].西安:西北工业大学,2007.
- [8] 吴志东.基于WBS的工程项目管理信息系统研究[D].西安:西北工业大学,2004.
- [9] 于乃江,李山.航空发动机设计制造协同流程及关键技术研究.中国制造业信息化,2009,38(21):16-23.
- [10] Butterfield J,McEwan W.A system lifecycle approach to maintenance planning in aerospace using digital manufacturing. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 2010.

(责编 良辰)

(上接第74页)

境条件下的某些老化因素,加速老化进程,较快获得试验结果。

## 5 结束语

本文对复合材料缠绕制品力学性能、耐燃烧性、吸水性、老化性能的测试进行了论述,并给出了相应的试验装置、试样尺寸和计算公式。

复合材料制品性能测试试验在复合材料的开发与应用中发挥着重要作用。通过试验不仅可以评价验证制品的各项性能,而且可以为制品性能数据库的建立和研究制品的可靠性提供实验依据。因此,缠绕制品性能测试研究具有很强的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] 鲁博,张林文,曾竟成,等.天然纤维复合材料.北京:化学工业出版社,2005.
- [2] Hodgkinson J M.先进纤维增强复合材料性能测试.北京:化学工业出版社,2005.
- [3] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会秘书处.纤维增强塑料(玻璃钢)标准汇编.北京:中国标准出版社,2008.
- [4] Spottswood S M, Palazotto AN. Progressive failure analysis of a composite shell, Composite Structures, 2001, 53: 117-131.
- [5] 魏宏艳,杨胜春,沈真.复合材料压缩试验方法的对比分析与研究.//第十五届全国复合材料学术会议论文集.北京:中国力学学会,2008,790-794.
- [6] 贺崇武,蔡昕锁.复合材料压缩性能试验研究.//第十二届全国复合材料学术会议论文集.北京:中国复合材料学会,2002,724-727.
- [7] 沃丁柱.复合材料大全.北京:化学工业出版社,2000.
- [8] HUANG Zheng-Ming, K. FUJIHARA, S. RAMAKRISHNA. Flexural failure behavior of laminated composites reinforced with braided fabrics. AIAA Journal, 2002, 40(7): 1415-1420.
- [9] P.A. Sreekumar, Kuruvilla Joseph, G. Unnikrishnanect. A comparative study on mechanical properties of sisal-leaf fiber-reinforced polyester composites prepared by resin transfer and compression molding techniques. Composites Science and Technology, 2007, 67(3-4): 453-461.
- [10] 陈先忠,邹传平.低温下环氧玻璃管材力学性能实验研究.低温与超导,2010,38(5):15-18.
- [11] 郑锡涛,李光亮,郑晓霞,等.液体成形复合材料力学性能测试方法研究进展.航空工程进展,2010,1(1):62-70.
- [12] 黄涛.缝绉泡沫夹层复合材料结构力学性能研究[D].西安:西北工业大学,2004.
- [13] 于志成.复合材料II型层间断裂韧性试验方法研究.航空材料学报,1997,1(14):54-61.
- [14] 尹昌平,李建伟,刘钧.缝合/RTM复合材料层压板的力学性能研究.材料导报,2007,21(11):136-138.

(责编 晓立)