

# 碳纤维复合材料方管的性能研究

周祝林

汤建根 杨 华

(上海玻璃钢研究所 200126)

(上海新中华机器厂)

**摘要:** 本文简单地介绍碳纤维复合材料方管的成型工艺、性能测试及分析, 可供有关产品设计参考。

**关键词:** 碳纤维 复合材料 方管

## 1 前 言

碳纤维复合材料具有比强度高、比模量特高、线热膨胀系数小、抗疲劳和阻尼性能好等优点, 被广泛应用于航空航天飞行器的结构。某航天产品采用轻质高强的碳纤维复合材料方管, 由于产品设计需要, 要求测试方管的拉伸、压缩、弯曲、弯剪及扭转的性能。目前没有方管的测试标准, 我们参考圆管的国家标准进行测试。本文总结了方管的成型工艺、性能测试结果, 并作了理论分析。

## 2 方管铺层与工艺

### 2.1 方管铺层

方管外形尺寸为  $24 \times 10\text{ mm}$ , 在长方形模芯上四周先铺上二层土 $45^\circ$ 的铺层, 然后在高度方向上下各铺上二层 $0^\circ$ 铺层,  $0^\circ$ 铺层宽度为  $10\text{ mm}$ 。每层铺层的厚度为  $0.15\text{ mm}$ , 树脂含量为  $38\% \sim 40\%$ 。方管的两侧壁厚为  $0.3\text{ mm}$ , 上下盖板厚为  $0.6\text{ mm}$ 。

### 2.2 成型工艺

T 300 碳纤维用 ST350 环氧树脂预浸渍, 然后用单向环氧预浸布绕成方管。固化工艺如下:

室温  $\xrightarrow{3^\circ\text{C}/\text{min}}$   $100^\circ\text{C}/30\text{min} \xrightarrow{3^\circ\text{C}/\text{min}}$   $150^\circ\text{C}/120\text{min}$

然后随炉冷却至  $40^\circ\text{C}$ , 出炉、卸压, 脱模成方管试件。

### 2.3 密 度

用称量方管的质量, 除以方管体积, 则测出方管复合材料的密度为  $1.429\text{ g/cm}^3$  (平均值),  $C_V$  为  $0.6\%$ 。

用碳纤维密度  $\rho_f$ 、环氧树脂密度  $\rho_m$ 、及上述复合材料密度  $\rho$ , 可以按下式求出树脂含量, 计算时取  $\rho_f =$

$$1.78\text{ g/cm}^3, \rho_m = 1.25\text{ g/cm}^3.$$

$$A = \frac{\rho_m/\rho - \rho_m/\rho_f}{1 - \rho_m/\rho_f} \quad (1)$$

计算得树脂含量为  $57.9\%$ , 大大超过预浸布的树脂含量, 这是由于实际复合材料密度偏小, 可见复合材料方管中含有空隙, 当计及空隙率时, 树脂含量的计算公式如下:

$$A = \frac{(1 - V_0)\rho_m/\rho - \rho_m/\rho_f}{1 - \rho_m/\rho_f} \quad (2)$$

式中  $V_0$  为空隙率, 若  $V_0$  以  $6\%$  计算时, 则求得

$$A = 40.3\%$$

这时树脂含量与预浸布符合, 由此可见, 此批复合材料方管有较大的空隙率:  $V_0 = 6\%$ 。

### 2.4 碳纤维体积含量

计及空隙率的纤维体积含量按下式计算:

$$V_f = \frac{1 - V_0}{1 + \frac{A}{1 - A}\rho_f/\rho_m} \quad (3)$$

用上述数值, 计算结果为:  $V_f = 48.3\%$ 。

## 3 性能测试结果

方管拉伸试验, 参考 GB5349, 两端用金属方芯充实, 外面用碳纤维复合材料加强。

方管压缩试验, 参考 GB5350, 两端同样加强。

方管弯曲试验, 参考《玻璃钢》1973. No. 2, (总第 6 期) 所介绍的试验方法, 加载及支座处用金属方芯块充实。

弯剪试验采用四点短梁弯曲, 同样在加载及支座处用金属方芯块充实。

表 1 力学性能测试结果

性 能	拉伸	压缩	弯曲	弯剪	扭转	三点外伸
强度/ MPa	$\sigma$	45.6	117	201		
	$\tau$			11.0	51.3	11.8
模量/ GPa	E	41.6	39.8	52.9		48.9
	G				13.7	23.6

扭转试验方法参照一般扭转试验方法, 如 GB4726

等,两夹头部分同样采用金属方芯及外包加强。另外,还参考 GB1456 进行三点外伸弯曲试验,同时测出弯曲弹性模量和剪切模量。测试结果列于表 1。

## 4 理论分析

### 4.1 拉伸性能分析

#### 4.1.1 拉伸弹性模量分析

单向纤维复合材料拉伸弹性模量符合混合律公式:

$$E_L = V_f E_f + E_m (1 - V_f) \quad (4)$$

T 300 的  $E_f$  为 216GPa,  $E_m$  取 3.5GPa,  $V_f$  取上述的计算结果  $V_f = 0.483$ , 计算得  $E_L = 106\text{GPa}$ 。

按下式计算单向纤维复合材料横向弹性模量<sup>[1]</sup>:

$$E_T = E_m \frac{1 + V_f}{1 - V_f} \quad (5)$$

计算得:  $E_T = 10.1\text{GPa}$

正交铺设时经纬向的弹性模量为:

$$E_1 = E_2 = 1/2E_2 + 1/2E_T \quad (6)$$

计算得:  $E_1 = E_2 = 58.1\text{GPa}$

按下式计算 45° 方向的弹性模量:

$$E_{45} = \frac{E_1}{m^4 + (E_1/G_{12} - 2\mu_1)m^2n^2 + E_1/E_2n^4} \quad (7)$$

式中  $m = \cos\alpha$ ,  $n = \sin\alpha$ ,  $\alpha$  为偏轴角, 而  $G_{12}$  是正交复合材料的经纬向剪切模量, 可以按下式估算<sup>[1]</sup>:

$$G_{12} = G_m \frac{1 + 2V_f}{1 - V_f} \quad (8)$$

式中  $G_m$  为环氧树脂的剪切模量, 按  $G_m = E_m/2(1 + \mu_m)$  计算, 得  $G_m = 1.30\text{GPa}$ , 代入有关数值后, 计算得  $G_{12} = 4.94\text{GPa}$

当  $\alpha = 45^\circ$ , 代入  $E_1$ ,  $G_{12}$ , 并取  $\mu_1 = 0.15$  时, 计算得:  $E_{45} = 17.4\text{GPa}$ 。

复合材料方管由 45° 铺层和 0° 铺层组合, 简单地按其厚度(或面积)比, 可求出复合材料方管的平均拉伸弹性模量:

$$E = E_L \times F_L/F + E_{45} \times F_{45}/F \quad (9)$$

用上述的  $E_L$ ,  $E_{45}$ , 及按上述尺寸计算  $E_L$ ,  $F_{45}$ ,  $F$ 。其中  $F_L$ ,  $F_{45}$ ,  $F$  依次表示 0° 铺层面积, 45° 铺层面积及总面积。计算得:

$$E = 38.1\text{GPa}$$

由此可见与实测值很符合。实测值略高, 这可能是 45° 方向的纤维不完全刚好是 45°, 有偏大或偏小, 这样  $E_{45}$  就要增大一些, 45° 时  $E_{45}$  为最小。

#### 4.1.2 拉伸强度分析

0° 铺层复合材料, 当略去树脂强度时, 其拉伸强度

按下式估算:

$$\sigma_L = V_f \sigma_f \quad (10)$$

T 300 的  $\sigma_f = 3518\text{MPa}$ , 计算得  $\sigma_L = 1699\text{MPa}$ 。

45° 铺层的强度由树脂剪切强度控制, 若取环氧树脂的剪切强度为 40M Pa, 则 45° 复合材料的拉伸强度约为 80MPa。方管的拉伸强度近似可按下式估算:

$$\sigma_B = \sigma_L \times F_L/F + \sigma_{45} \times F_{45}/F \quad (11)$$

经计算得:

$$\sigma_B = 458\text{MPa}$$

由此可见, 与实测值很符合。

### 4.2 压缩性能分析

#### 4.2.1 压缩弹性模量分析

压缩弹性模量分析与 4.1.1 相同, 实测值与理论计算值很符合。

#### 4.2.2 压缩强度分析

方管是薄壁结构, 在受压过程薄壁要发生翘曲失稳, 侧壁板较薄, 先失稳。侧壁板失稳后, 由于上下盖板支持还可以继续承载。侧壁板失稳临界应力按下式计算<sup>[2]</sup>(对于正交板,  $E_1 = E_2$ ):

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E_{45}}{12(1 - \mu_{45}^2)} \left[ 1 + 2\mu_{45} + \frac{4G_{45}}{E_{45}} \right] (t/b)^2 \quad (12)$$

式中  $G_{45} = 25.2\text{GPa}$ (见式(4.13),  $E_{45} = 17.3\text{GPa}$ ,  $\mu_{45} = 0.47$ ,  $t = 0.3$ ,  $b = 22\text{mm}$ , 计算得:

$$\sigma_{cr} = 9.26E_{45}(t/b)^2 = 29.8\text{MPa}$$

由此可见, 比较早就出现侧壁板失稳。

方管的承载能力是由侧壁板的极限应力来控制, 侧壁板的极限应力<sup>[3]</sup>, 也即是方管的破坏应力, 按下式计算:

$$\sigma_B = k(E_{45}\sigma_{B(45)})^{1/2}(t/b) \quad (13)$$

式中  $k$  为:

$$k = \sqrt{\frac{\pi^2 [1 + \mu_{45} + 2G_{45}(1 - \mu_{45}^2)/E_{45}]}{6(1 - \mu_{45}^2)}} \quad \$ \quad e$$

代入上述数值, 计算得:

$$k = 2.81$$

取 45° 方向碳纤维复合材料压缩强度为  $\sigma_{B(45)} = 150\text{MPa}$ , 代入上述数据后, 计算得:

$$\sigma_B = 61.7\text{MPa}$$

由此可见比实测值小, 式(13)是按小挠度理论计算, 在结构设计计算时, 采用小挠度理论是偏于安全的。当用大挠度理论, 并采用复合材料强度理论, 极限强度还与  $\beta = (E/\sigma)^{1/2}(t/b)$  参数有关, 在此,  $\beta = 0.14$ , 参考文献<sup>[3]</sup>, 对于碳纤维复合材料, 上述系数  $k$  还应乘以 1.8, 为  $k = 5.05$ , 则方管压缩的破坏强度为:

$$\sigma_B = 111 \text{ MPa}$$

理论估算值与实测值很符合, 略比实测值低, 主要是 $45^\circ$ 纤维不完全刚好是 $45^\circ$ , 因此,  $E_{45}, \sigma_{B(45)}$ 均可能比上述略大。作为设计值, 上述理论估算值是可取的。

#### 4.3 弯曲性能分析

##### 4.3.1 弯曲弹性模量分析

从表1可见, 方管的弯曲弹性模量比拉、压的高许多, 这主要是与 $0^\circ$ 铺层布置在离中性轴较远的地方有关。表1的弯曲模量是一个折算的平均弹性模量, 对于用不同材料组成的弯曲构件, 其平均弹性模量与各材料的关系如下:

$$E = \sum E_i J_i / J \quad (14)$$

根据方管的铺层及几何尺寸, 弯曲的平均折合弹性模量为:

$$E = E_L J_0 + E_{45} J_{45} / J = 50.5 \text{ GPa}$$

由此可见方管弯曲弹性模量比拉、压大, 并与实测值很符合。

##### 4.3.2 弯曲强度分析

方管承受弯曲载荷时, 上下盖板承受拉压应力, 侧壁板(也称腹板)承受剪切和弯曲应力。做三点弯曲试验, 支距为500mm, 方管很长, 对于侧壁板可以当无限长板处理, 仅承受剪切应力时, 其剪切临界应力为<sup>[4]</sup>:

$$\tau_{cr} = 4\beta \frac{(D_{11}D_{22})^{1/4}}{b^2} \quad (15)$$

对长矩形板,  $\beta = 8.125$ , 代入有关数据后, 计算结果为:

$$\tau_{cr} = 10.4 \text{ MPa}$$

方管三点弯曲破坏时, 侧壁板的剪切应力已达到剪切临界应力, 加之同时承受弯曲应力, 更容易失稳, 另还有上下盖板受压失稳, 方管已失去承载能力, 由此可见, 方管的上下盖板弯曲应力要低于方管拉伸强度。

#### 4.4 弯剪及三点外伸弯曲试验分析

##### 4.4.1 弯剪强度分析

用短梁四点弯曲, 使方管侧壁板承受较大比例的剪切应力, 从而测出方管的弯剪强度。加载点与支座间的距离为50mm, 由于方管内塞紧金属芯块, 实际距离为30mm, 因此, 受剪矩形板尺寸为 $30 \times 22.8 \text{ mm}$ , 另外在用金属芯块塞紧的二边可以当作固支, 因此是二边简支二边固支矩形板承剪, 剪切临界应力公式同式(15), 此时 $\beta = 18.65$ , 则临界应力为:

$$\tau_{cr} = 23.9 \text{ MPa}$$

方管弯剪强度的实测值比此高, 是因为侧壁板剪切失稳后, 只要上下盖板未失稳, 对侧壁板支持良好, 方管还可以继续承载; 另外, 方管承受弯剪时, 侧壁板

与上下盖板相当于并联结构, 上下盖板也会承受一部分剪切应力。

#### 4.4.2 三点外伸弯曲试验分析

三点外伸弯曲测试得到的 $E$ , 即为方管的弯曲弹性模量, 与三点弯曲的测试结果及理论估算值都很接近。

三点外伸弯曲测出的 $G$ , 是侧壁板(腹板)材料的剪切模量, 该腹板中纤维是沿 $\pm 45^\circ$ 排列, 因此, 应是碳纤维复合材料 $45^\circ$ 方向的剪切模量 $G_{45}$ , 纤维复合材料各方向的剪切模量按下式计算(正交对称铺层时):

$$G_{45} = E_1 / [2(4 + 4\mu_{12} - E_1/G_{12}) \sin\alpha \cos\alpha + E_1/G_{12}(\sin^4\alpha + \cos^4\alpha)]$$

对于 $\alpha = 45^\circ$ 时, 也可按下式计算:

$$G_{45} = \frac{E_1}{2(1 + \mu_{12})} \quad (16)$$

用 $E_1 = 58.1 \text{ GPa}$ ,  $G_{12} = 4.94 \text{ GPa}$ ,  $\mu_{12} = 0.15$ 代入式(15), (16)计算, 结果是一样, 为:

$$G_{45} = 25.2 \text{ GPa}$$

与实测值是很符合的

#### 4.5 扭转性能分析

##### 4.5.1 扭转剪切强度分析

由于方管壁很薄, 剪切强度由剪切临界应力控制。扭转试样长度为300~360mm, 较长, 侧壁板可以当作无限长矩形板处理, 侧壁板的剪切临界应力公式同式(15), 计算结果, 同样是 $\tau_{cr} = 10.4 \text{ MPa}$ , 这与实测值很符合, 为何在扭转时不同于弯剪, 剪切应力不再提高, 原因是: ①方管整体扭转, 上下盖板也同时承受扭转剪切, 方管棱边扭曲, 不再是直线, 因此对侧壁不再有良好支持, 因此, 当侧壁板失稳后不能再承受剪切应力; ②在方管扭转受力情况下, 侧壁板受扭剪与上下盖板受扭剪, 不同于方管弯剪情况, 是属于串联结构, 即使上下盖板受剪能力较大, 方管整体扭转的剪切强度仍同剪切临界应力较低的侧壁板控制, 上下盖板对方管的整体扭转剪切强度提高是不多的。

##### 4.5.2 扭转剪切模量分析

方管扭转不同于方管弯曲剪切, 上下盖板与侧壁板一起扭转剪切。扭转试验测试是整个方管的扭转刚度, 不同铺层组成的方管扭转平均剪切刚度为:

$$G_{J_p} = \sum G_i J_i p_i \quad (17)$$

式中,  $G_i, G_{pi}$ 是每个铺层构件的剪切模量和极惯性矩。计算出各铺层部分的 $J_p$ , 对于 $45^\circ$ 铺层 $G$ 采用25.2GPa, 对于 $0^\circ$ 铺层,  $G$ 采用4.94GPa, 按式(17)计算, 平均剪切模量为:

$G = 17.6 \text{ GPa}$

方管扭转的实测剪切模量为  $13.7 \text{ GPa}$ , 略比理论估算值低, 这可能是试验中试样两头夹具部分有小松动, 试验机是自动记录两夹头间的扭角, 因此实测的扭角偏大。但理论值与实测值基本上是符合的, 同时也说明了该碳纤维复合材料方管弯剪的剪切模量比扭转剪切模量高的理由。

## 5 结 论

通过测试得出碳纤维复合材料方管较全面的力学性能, 并通过理论分析说明试验数据可靠, 理论估算值

## RESEARCH OF SQUARE TUBE PROPERTIES OF CARBON FIBER COMPOSITES

Zhou Zhulin

Tang Jiangen Yang Hua

(Shanghai FRP Research Institute) (Shanghai Xin Zhong Hua Machine Factory)

**Abstract:** The technology, property analysis of carbon fiber composites square tube are introduced in this paper. It can be referred to in product design.

**Keywords:** carbon fiber composites square tube

收稿日期: 1998-02-03

(上接第 9 页)

### 2.2 玻璃纤维及其浸润剂的研究

选择较合理的浸润剂, 有利于玻璃纤维集束。选用合适的偶联剂, 是改善 SF-109 与基体相溶性的关键。我们通过近百次的试验后选定环氧树脂为主成膜剂, KH550 为偶联剂。在产品模拟实验中效果较好。

### 2.3 表面处理剂的研究

玻璃纤维摩擦系数很低, 我们将表面处理剂进行了橡胶改性的处理。一方面提高玻纤的浸渍性能, 另一方面改善纤维与基体的相溶性, 同时提高摩擦系数, 减少磨损, 提高耐磨性能。通过对几个技术关键的重点研究基本解决了生产工艺过程中的关键问题。确定了浸润剂及表面处理剂的配方, 并先后做了产品模拟试验。数据如表 1。

与实测值很符合, 也说明一些理论上问题, 对于这种铺设的纤维复合材料方管, 从强度上有压缩稳定、屈曲后极限强度, 剪切失稳等问题。从刚度方面, 弯曲模量比拉压的高, 弯剪的剪切模量比扭转剪切模量高。文中介绍的理论和公式可以用于其它铺层和尺寸的纤维复合材料方管设计

## 参考文献

- 1 周祝林. 纤维复合材料. 1995, (4): 41
- 2 周祝林. 应用数学和力学. 1993, 14(11): 1017
- 3 Zhou Zhulin. ICCM VIII, 4F, 1991
- 4 [美] S. B 邓著, 航空专业教材编写组译. 复合材料结构力学. 1986

## 3 尚需进一步研究的问题

(1) 进一步提高 SF-109 的耐温性能。在现代工业中交通工具向着高速方向发展, 工程机械向高负荷发展, 必须进一步提高摩阻材料的耐温性能。

(2) 进一步调整表面处理剂, 以提高 SF-109 的摩擦性能。

## 4 应用前景

SF-109 克服了石棉的缺点, 与 kevlar 相比, 价格低廉, 工艺过程简单。可以用于汽车和航空、航天、摩阻材料、三角皮带、矿山冶金用传递带、轮胎等各个领域, 同时在此基础上还可进一步开发相关产品, 如玻纤缝纫线等。因其性能优良, 随着社会的发展其应用领域将越来越广阔。

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF SF-109 FRICTION MATERIAL

Liang Zhi Nie Guobing

(State Administration of Building Material Industry FRP Research & Design Institute)

**Abstract:** This article introduces a kind of heat-resisting glass fiber. The friction composites reinforced with the fiber have stable frictional coefficient and lower wear. The use of the glass fiber in non-asbestos friction composites will have good prospect.

**Keywords:** glass fiber non-asbestos friction material friction low wear friction

收稿日期: 1997-11-21