

高模玻璃纤维复合材料圆管力学性能及破坏分析

中国科学院力学研究所 沈杏娟 蒋灿兴

高模玻璃纤维增强复合材料大大改善了一般玻璃钢弹性模量不够高的弱点,成为一种轻质、高强、高模及抗疲劳断裂、抗冲击并且减振性、容伤性好的高性能复合材料,应用于航空、航天及其它重量要求严格的产品作为结构材料。

复合材料圆管是一种受力型式合理的结构元件,不仅适用于需要管子形状的构件,同时对受压杆和承弯曲是有利的;而且对用圆管作为各向异性复合材料制造的性能试验件也相当合理的,封闭的管状试件能避免板状试件自由边缘应力分布不均匀的问题,因此适用于刚度和强度测试。由于复合材料圆管还具有耐腐蚀及电性能好,而且还由于缠绕工艺的普及,得到了广泛的应用。

本工作针对复合材料的特点,采用合理的试验方案,确定复合材料圆管的拉伸,压缩及弯曲的力学性能,避免了各种应力集中破坏的出现,取得了较好的结果,并对试验结果和破坏方式进行了分析。

试件采用 $[0/90]_s$ 1:1 正交高模玻璃布浸 35% 的 300 号, 400 号环氧树脂。试件几何尺寸为外径 D 为 3 厘米, 内径 d 为 2.4 厘米, 长度为 23 厘米的圆管。为了保证试验件拉伸破坏在试验段, 制作拉伸试件时沿两端试验机夹持处, 管壁加厚 0.5 厘米, 逐渐过渡到试验段的直径。

拉伸及压缩试验件夹持处内紧压入一长 8 厘米的实心铝棒图 1; 压缩试验管子两端套上一壁厚 2 厘米长 2.5 厘米的压套筒, 如图 2。测试采用应变片作测量元件, 自动记录 $P-\delta$ 曲线直至破坏, 由此确定模量, 强度及泊桑比的值。

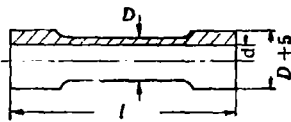


图 1 拉伸试件

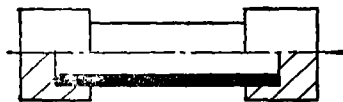


图 2 压缩试验件

弯曲试验由于试件长度不足以采用中间部位处于纯弯的四点弯曲方案, 只能采用三点弯曲方案(图 3)。对于复合材料薄壁圆管, 如不加辅助装置, 容易产生应力集中和挤压破坏, 势必降低试件的弯曲刚度和强度, 因此采用在支点处加一倒角的半圆环作为压头和支座的过渡装置, 并在压块与试件表面触处加软弹性材料加以缓冲, 保护复合材料圆管表面不致刮伤(图 4)。采用自行研制的应变式位移传感器测量弯曲挠度确定刚度, 自动记录载荷 $P-f$ 挠度曲线。加载设备均为 D ENISON 试验机。

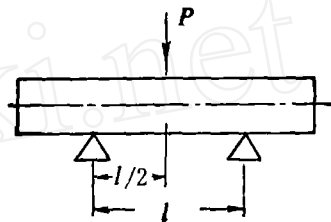


图 3 三点弯曲试验

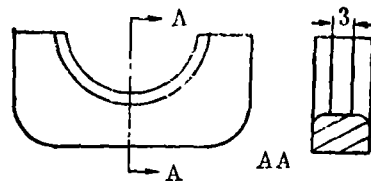


图 4 弯曲试验辅助装置

拉伸试验: 应力应变曲线总的趋势线性度较好, 主要是脆性断裂, 断裂应变为 1.4%, 有的试件当应力水平达 50% 以上时, 应力应变曲线线性有很微小的偏离(图 5), 破坏从外层先拉断, 试件逐渐失去承载能力, 破坏断面较整齐, 纵向纤维和横截面拉断, 环向纤维拉开呈疏松状。破坏载荷平均值为 12200 公斤, 平均强度值 σ_b 为 4794 公斤/厘米², 拉伸模量 E 为 3.69×10^5 公斤/厘米², 泊桑比 ν 为 1.55, 各试件的试验结果见表 1。由于试件两端头部外壁加厚且管内有芯子, 破坏在试验段, 强度值是合理的。如两端头没有加强的试件, 拉伸强度为 3160 公斤/厘米², 比合理值低 34%。

压缩试验: 应力应变关系的线性度比拉伸好, 直

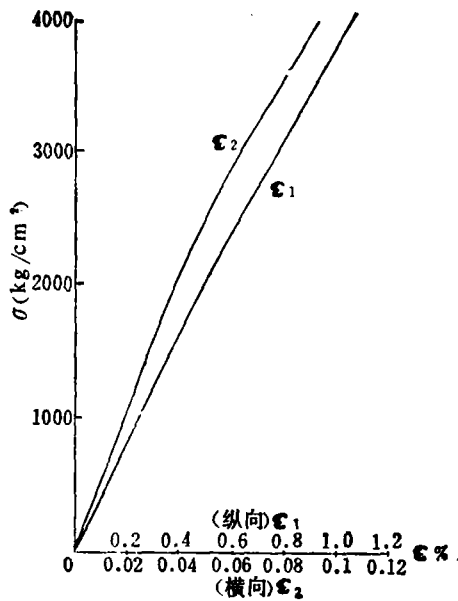


图5 拉伸试件应力-应变曲线

线斜率直至压缩破坏,一般从中段压裂,载荷有瞬时上不去的微小皱折,然后载荷继续上升,反复波动,两端头压裂,最后呈现脆性破坏。从中部切开圆管观察,内壁有纵向裂纹与环向裂纹,从安全考虑,破坏载荷取第一次载荷上不去的值;那不是取继续稍有上升的最载荷值。压缩破坏载荷平均值为 8535 公斤,压缩强度 σ_c 为 3346 公斤/厘米²,压缩模量 3.84×10^5 公斤/厘米²,断裂应变为 1.04%,泊桑比为 0.186。

对薄壁圆管压缩试验,需要考虑的是屈曲问题,本试验试件长度与外径比值较小,从直观上看屈曲不会在破坏前发生。从验算看:

$$\text{屈曲应力 } \sigma_K = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad \text{柔度 } \lambda = \frac{L_K}{i}$$

$$\text{回转半径 } i = \sqrt{\frac{J}{F}}$$

$$i^2 = \frac{J}{F} = \frac{2.347}{2.545} = 0.9222, \quad \lambda = \frac{L_K}{i} = \frac{23}{0.96} = 23.96$$

对一般玻璃纤维增强环氧树脂复合材料 $\lambda \geq 27$ 适用于欧拉公式, $\lambda < 27$ 时,压杆由强度控制。从

$$\sigma_K = \frac{\alpha^2 E}{\lambda^2} = \frac{\alpha^2 \times 383600}{15^2 \times 2.545} = 6612 \text{ kg/cm}^2 > \sigma_c \\ = 3346 \text{ kg/cm}^2$$

亦是破坏发生在屈曲前。为避免附加弯曲,试件两端面要求平行,同时有球形座自动调心来消除由于偏心而产生的弯矩。从试件两边侧面一对应变片的值看是相当一致的, σ - ϵ 曲线是重合的,可见没有偏心弯矩的影响。

弯曲试验: 由于圆管试件较短(23 厘米)跨距 L 取 15 厘米。自动测量的载荷(P)~中点弯曲挠度(f)曲线在应力水平达 70%前线性很好,以后稍有偏离,同时出现树脂微开裂的响声,载荷增至破坏载荷的 90%~95%时,由于承压部位局部压陷,载荷稍有波动然后继续上升,圆管下面受拉开裂弯曲变形增大直至弯断破坏,载荷下降,试件失去承载能力,(图 6)。弯曲破坏载荷值 P_f 为 1458 公斤,弯曲强度 σ_f 为 3652 公斤/厘米²,弯曲模量 E_f 为 2.07×10^5 公斤/厘米²,弯曲刚度 D_f 为 4.86×10^5 公斤-厘米。

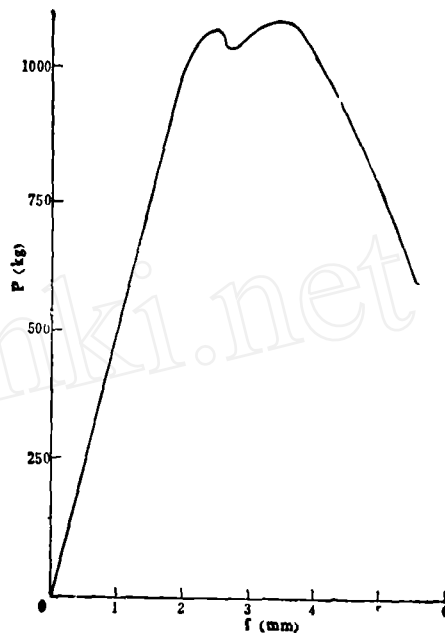


图6 弯曲载荷-挠度曲线

圆管弯曲受力时主要承受拉压两种应力状态,因此一般弯曲性能与拉伸压缩性能差不多,由于弯曲试验,大应力区域比拉压试验时小,也就是复合材料的缺陷在大应力区域的几率小,所以一般弯曲强度比拉伸强度值高些。而本试验的弯曲强度比压缩强度稍高而比拉伸强度低,这是由于圆管试件较短而直径大,跨距与外径之比即 $1/D$ 小(=5),因此在承压点易产生局部横向压缩屈曲,剪切影响大些,降低了弯曲强度值,跨径比对弯曲强度很有影响,弯曲强度在一定范围内随 $1/D$ 的增大而增大,随内径 d /壁厚 t 的增大而减小。缠绕玻璃纤维/环氧树脂的小口径圆管的弯曲试验中(图 7),当 $1/D > 20$ 时,弯曲强度值才稳定。但对不同材料不同截面形状试件弯曲强度稳定时的跨高比是不同的,而且并不是跨高比愈大愈好,当跨高比过大时,试件尺寸增大,材料缺陷反映也增多,弯曲强度值下降,对国内的聚脂改性玻璃钢圆管 $1/D \geq$

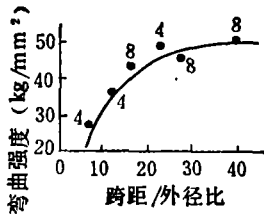


图7 弯曲强度与跨距/外径比的关系 (图内数字表示内径与壁厚之比)

10为合适。玻璃钢片状试件一般跨高比在10~16较适合。

复合材料薄壁圆管承受弯曲需要考虑截面扁平而引起的屈服失稳,根据应变能最小原理,弯矩与曲率 $C = \frac{1}{\rho}$ 有图8关系

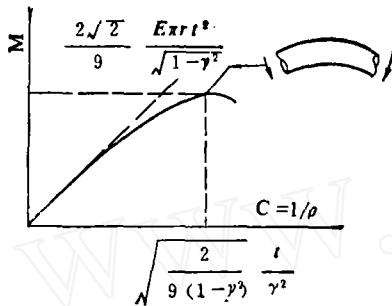


图8 弯矩与曲率 $C = \frac{1}{\rho}$ 的关系

$$M = \frac{E}{2} \pi r^3 t \left[2C - \frac{3r^4 C^3 (1-\nu^2)}{t^2} \right]$$

求得临界弯矩

$$M_{cr} = \frac{2\sqrt{2}}{9} \frac{E\alpha r t^3}{\sqrt{1-\nu^2}}$$

r为半径, t为管壁厚度, ν为泊桑比,

$$M_{cr} = 25209 \text{ 公斤-厘米}$$

而实际破坏时的弯矩

$$M_b = \frac{PL}{4} = \frac{1458 \times 15}{4} = 5468 \text{ 公斤-厘米}$$

因此破坏由强度控制, 屈曲失稳发生在后。

由上述高模玻璃纤维增强环氧复合材料的力学性能相当好。模量比一般玻璃钢高得多, 拉伸与压缩的弹性模量值比较接近, 差值为4%, 比一般玻璃钢约高30%, 弯曲模量比拉压模量低些, 这是由于受弯时剪切变形的影响, 玻璃钢的剪切模量比其它模量低得多, 使按常规计算的弯曲模量值偏低。拉伸强度值较高, 弯曲强度值次之, 压缩强度值比拉伸强度值低30%。弯曲强度值不够高是由于跨高比小的影响, 泊桑比与断裂应变与一般玻璃钢接近。

高模玻璃纤维增强环氧圆管的破坏是复式的不规则破坏, 由于纤维体积比为65%。拉伸破坏从外层先分层扩展至内层, 断口有的较齐, 有的不齐, 压缩破坏一般从内部压裂分层破坏, 断口不明显。弯曲破坏主要是从下表面弯曲受拉出现破裂, 伴有剪切变形, 承压接触处受挤压, 压痕不明显, 弯断后截面不整齐, 分层明显, 纵向纤维断口较齐, 环向纤维松开。破坏以脆断为主, 可见主要是弯曲破坏。



(上接第54页)

低周疲劳。

对照机制图1, 可看出源区的条纹+韧窝特征对应 σ_s/K_{Ic} 较低时高 K_{max} 值的状态。而其它断口中准解理的出现表明它对应 σ_s/K_{Ic} 较高时, 高 K_{max} 值的状态。源区和其它区的这种差别可能反映表面与心部的材料状态有所不同。通过金相分析发现内圈有脱炭现象, 并且有许多 TiN 的夹杂, 因此初步认为弹簧的断裂与表面脱炭及 TiN 夹杂有关。而改进热处理工艺和改善脱炭情况后, 经全寿命模拟试验后的疲劳寿命大大提高, 说明表面脱炭和 TiN 夹杂是疲劳寿命低的原因。

四、小结

把疲劳断裂机制图同疲劳失效分析结合起来, 就可以分析材料断裂时受载大小, 裂纹扩展状态, 为判

断零件的断裂过程和失效原因, 改进材料工艺提供线索。

这种疲劳断裂机制图的制作还是处于尝试阶段, 而影响疲劳断裂的因素又很复杂, 特别是材料参量的选择及环境和应力比的影响, 因此要真正作到应用于疲劳失效分析, 还需要作大量工作。

参考文献

- [1] 张平生、胡志忠、周惠久: 低合金结构钢疲劳断裂机制图的研讨, 西安交通大学报 80年第三期P31页。
- [2] 吉林化学工业公司化肥厂, 西安交大, 1Γ266/320型压缩机主轴断裂的分析研究, 压缩机技术 1974年第四期P6页。
- [3] 宝鸡石油机械厂, 西安交大: 确保吊环安全, 延长吊环寿命的试验研究, 西安交大科技报告。77-065
- [4] 庆安公司技术处冶金一室: 65SiMn2WA 钢车制弹簧的折断事故分析, 1975年。