

CFRP管件的弯曲蠕变行为试验研究

马瑜¹, 王辉^{2*}, 邵振威³, 杨增钦¹, 尚福林¹, 侯德门¹, 耿洪滨⁴, 吕刚⁴

(1. 西安交通大学 航天航空学院, 西安 710049;

2. 西安空间无线电技术研究所, 西安 710100;

3. 中国航发黎阳航空发动机集团有限公司, 贵阳 561102;

4. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为评价航天器结构中碳纤维增强树脂基(CFRP)复合材料管件的使用可靠性, 开展了三点弯曲加载条件下CFRP管件弯曲性能和蠕变行为试验研究。进行了管件弯曲模量和弯曲强度测试、500 h时长的恒温蠕变测试以及-60 °C~100 °C和-160 °C~80 °C两种高低温循环蠕变测试, 获得了典型温度工况、不同应力水平作用下管件弯曲蠕变变形规律。根据测试结果, 确定了基于时间-温度-应力等效原理的管件蠕变主曲线以及唯象蠕变Findley模型, 预测分析了管件长期蠕变变形; 采用最大应变强度准则, 对该CFRP管件的强度特性和安全承载能力进行了评价。结果表明, 该CFRP管件在设计服役期限内能够满足蠕变变形与强度要求。

关键词: CFRP管件; 弯曲强度; 蠕变特性; 时间-温度-应力等效原理; 承载能力评定

中图分类号: V45

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2017)04-0346-09

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2017.04.006

引用格式: 马瑜, 王辉, 邵振威, 等. CFRP管件的弯曲蠕变行为试验研究[J]. 深空探测学报, 2017, 4(4): 346-354.

Reference format: Ma Y, Wang H, Shao Z W, et al. Experimental study on the bending creep behavior of CFRP tube[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(4): 346-354.

0 引言

碳纤维增强树脂基(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)复合材料管件是复合材料中典型的先进优良产品, 具有质量轻、比强度高、比模量大、耐高温、抗疲劳、阻尼性能好以及可设计等特有的优越性能, 被广泛应用于航天探测器结构^[1]。在典型太空服役环境下, CFRP管件会同时经受较大幅度的温度变化与机械载荷作用, 其粘弹特性可能导致管件在服役过程中表现出蠕变与应力松弛等特性。在结构设计和地面试验中, 主要需考虑的影响因素有: 防止天线杆件在长时间承载工况下产生较大的蠕变变形以及超过其所容许的强度极限。因此, 有必要对CFRP管件的蠕变变形及强度退化性能展开分析。

针对复合材料的粘弹性特征及其长期力学性能预测问题, 国内外已有一些研究进展。Goertzen等^[2-4]通过实验研究了树脂基复合材料的拉伸和弯曲蠕变行为, 利用时间-温度等效原理预估了复合材料的长期蠕变性能。Carra等^[5]采用Arrhenius^[6]方法预估了复合材料的长

期退化率, 指出强度退化的机理主要与分子运动所需克服的能量障碍有关。Findley^[7]于1944年提出的唯象蠕变模型已应用于高分子复合材料蠕变特性研究, 并与Burgers^[8-9]模型和Boltzman^[10-11]模型结果吻合较好。罗文波等^[12-13]探讨了粘弹性材料特征时间的温度、应力相关性, 并且运用时间-温度-应力等效原理预测粘弹性的长期蠕变行为。刘鹏飞等^[14]综述了树脂基复合材料蠕变性能的研究进展。

以上研究主要侧重于复合材料恒温蠕变变形分析, 较少涉及高低温循环条件下蠕变变形情况。部分工作的分析比较经验化, 预测精度难以确定。本文研究了该复合材料管件结构在经受高低温循环条件下的长期变形与强度特性, 侧重分析由于复合材料粘弹特性而引起的蠕变变形与破坏情况。

1 管件弯曲性能测试

1.1 研究对象

本文研究的CFRP复合材料圆管由B环氧树脂基

体、M碳纤维构成，管件的铺层顺序为[15/-15/0/90/0/-15/15]。圆管名义内径为24 mm，壁厚范围为0.6~0.8 mm。

1.2 试验方法

参考复合材料弯曲性能试验国家标准^[15-16]，并结合管件特点，采用外伸三点弯曲试验开展管件弯曲性能测试。试验装置如图 1 所示。

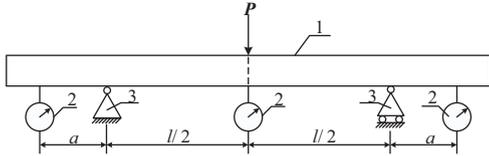


图 1 三点弯曲试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-point bending testing device

图 1 中的标识符号如下：

- 1 —— 试样；
- 2 —— 千分表；
- 3 —— 支座；
- l* —— 跨距；
- a* —— 外伸臂长；
- P* —— 载荷。

试验对象属于复合材料薄壁圆管，为避免试验过程中该管件发生局部破坏，将试验装置底座和压头设计为圆弧状来增大圆管的接触面积，同时在试样承载处加金属塞子，避免试样局部变形^[17]。试验装置实物照片如图 2 所示。

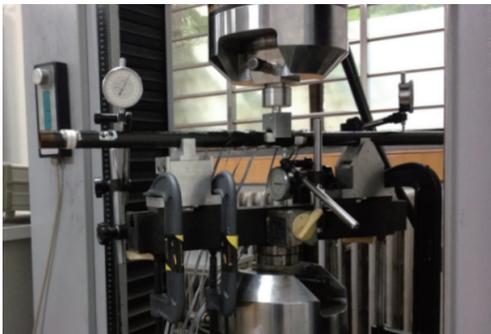


图 2 三点弯曲试验装置照片

Fig. 2 Photograph of the three-point bending testing device

1.3 试验结果和分析

1.3.1 破坏形态

图 3 为管件试样加载点处的载荷-挠度曲线。可以看出，试样在破坏前保持良好的线性，在破坏瞬间载荷值迅速下降，试样无法继续承载，呈现脆性断裂特征。选取载荷的最大值作为试样的破坏载荷，由此计算该试样的强度值。图 4 为典型的断裂试样、断口形

貌实物照片。可以看出，几组弯曲破坏试样的断裂方式均相同，试样受压缩一侧（上表面）首先出现平直断面（垂直于管轴方向），然后裂纹扩展至管的两侧表面，裂纹在管侧表面发生转向且与管轴的夹角约为 30°~45°。

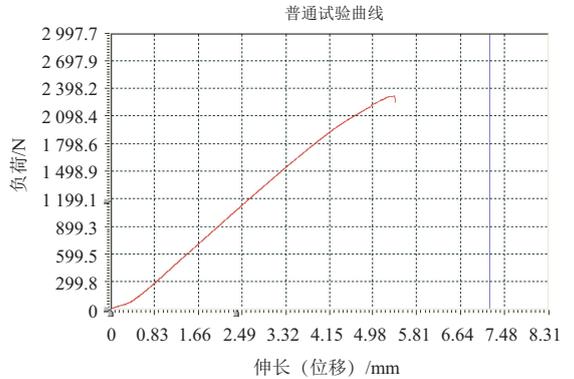


图 3 管件试样加载点载荷与挠度曲线关系图

Fig. 3 Diagram of the load-deflection relationship of CFRP tube

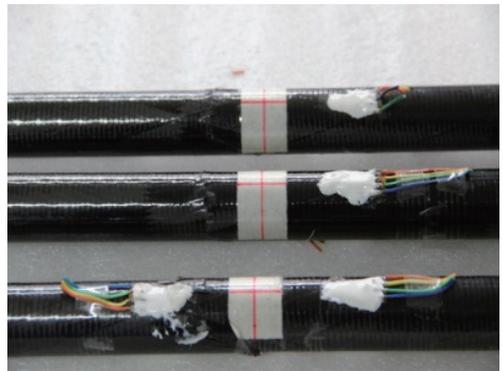


图 4 管件弯曲断口形貌照片

Fig. 4 Photographs of the bending fracture morphology of CFRP tubes

1.3.2 弯曲模量计算

管件弯曲模量计算采用国家标准建议的材料力学方法^[18]

$$E = \frac{4Pl^3}{3(D^4 - d^4)\pi f} \quad (1)$$

其中：*P*为跨中载荷；*l*为跨距；*D*为管件外径；*d*为管件内径；*f*为跨中挠度。

根据公式（1）计算得到管件的弯曲模量相对误差小于6%，试验一致性良好。将3组试样所得计算结果的均值137.9 GPa作为该管件的弯曲模量。

1.3.3 弯曲强度计算

弯曲强度亦使用材料力学计算方法^[19]

$$\sigma = \frac{8P_B \cdot l \cdot D}{\pi(D^4 - d^4)} \quad (2)$$

其中：*P_B*为管件破坏时对应的载荷值。

计算得到的管件弯曲强度约为523.71~546.87 MPa, 其分散性小于5%。从安全性考虑, 将管件弯曲强度取为523.71 MPa。

2 管件恒温蠕变试验及结果分析

2.1 试验方法

CFRP复合材料管件在长时间运行工况下可能产生蠕变变形, 进而导致结构发生过大变形或者超过其所容许的强度极限。因此, 除了常规静强度, 蠕变是该管件结构设计更为重要的控制因素。下面对CFRP管件结构的恒温蠕变性能展开测试研究, 并通过实验室加速蠕变试验来预测实际工况下管件长时蠕变特性^[9]。

为涵盖管件服役的温度范围, 恒温蠕变试验选取了-60℃、-20℃、25℃、60℃和100℃5个温度点, 且每个温度点进行两组重复试验, 每组有4个试样, 分别施加不同弯曲载荷水平, 载荷水平值分别取为前述测试得到的弯曲极限载荷的45%、55%、65%和75%。各个恒温温度点的蠕变试验时长为500 h。

图5为恒温蠕变试验装置示意图, 其中数字1、2、3代表布置电阻应变片的测点位置(同一测点布置有纵向和横向两个应变片), 用来记录蠕变过程中的变形量。通过悬挂砝码的方式来保证试验过程中的恒定载荷值。高温试验在HARDY HT323P型湿热恒温试验箱中进行, 低温试验在意大利ACS WS6000C型高低温湿热试验箱中进行, 试验装置实物照片分别如图6(a)和图6(b)所示。

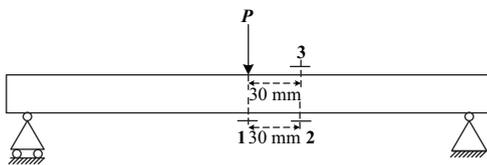


图5 恒温蠕变试验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the constant temperature creep testing device



(a) 高温

(b) 低温

图6 恒温蠕变试验装置

Fig. 6 The constant temperature creep testing device

2.2 蠕变测试结果及分析

根据前述三点弯曲破坏试验结果, 管件在受压缩一侧首先发生断裂, 且断裂位置距离加载点中心大约30 mm, 接近3号应变片测点处, 因此将该测点的蠕变应变作为管件变形大小及承载能力的参考数据。图7和图8给出了25℃和100℃温度条件下3号测点的蠕变变形测试结果。

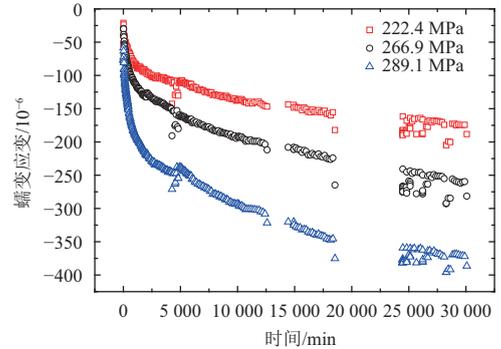


图7 25℃条件下3号测点纵向蠕变变形

Fig. 7 Longitudinal creep strain of 3# testing point at 25℃

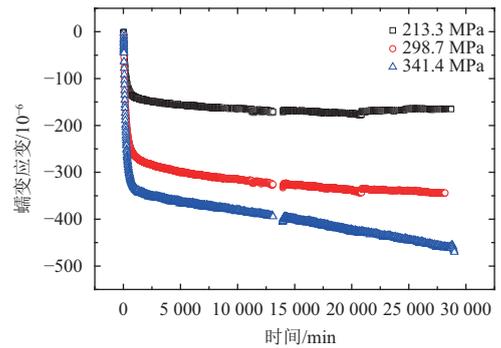


图8 100℃条件下3号测点纵向蠕变变形

Fig. 8 Longitudinal creep strain of 3# testing point at 100℃

测试结果表明, 不同温度下试样蠕变均处于蠕变变形第一阶段(瞬时变形阶段)和第二阶段(稳定阶段), 未到达蠕变第三阶段(破坏阶段)。第一阶段持续时间较短, 第二阶段持续时间较长, 符合典型蠕变曲线规律。在相同温度条件下, 管件的蠕变速率随着加载应力的提高而增大。该管件的典型蠕变温度范围约为25℃~100℃。这些结果大体上符合聚合物基复合材料的蠕变特性规律^[20]。

3 管件高低温试验及结果分析

CFRP管件设计服役时间较长, 处于太空环境中会承受较大幅度的高低温变化, 因此, 分别对-60℃~100℃和-160℃~80℃两种典型温度循环工况下管件变形进行了测试。

3.1 -60 °C~100 °C条件下的变形测试

试验采用意大利ACS WS6000C型高低温湿热试验箱来模拟实现温度变化条件，通过施加砝码的方式进行弯曲加载。电阻应变片布片方案如图 5 所示（同一测点布置有纵向和横向两个应变片）。热循环过程示意图如图 9 所示。

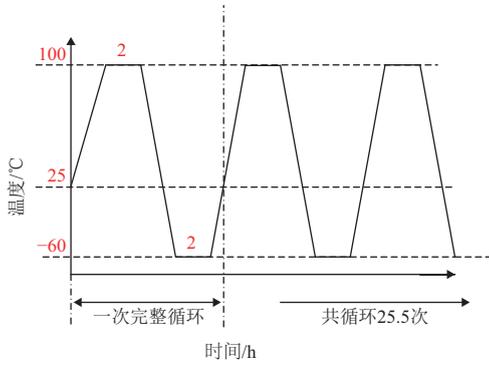


图 9 热循环过程示意图

Fig. 9 Diagram of the thermal cyclic procedure

图 10 为 -60 °C~100 °C 高低温循环试验得到的 3 号测点纵向应变典型测试结果。

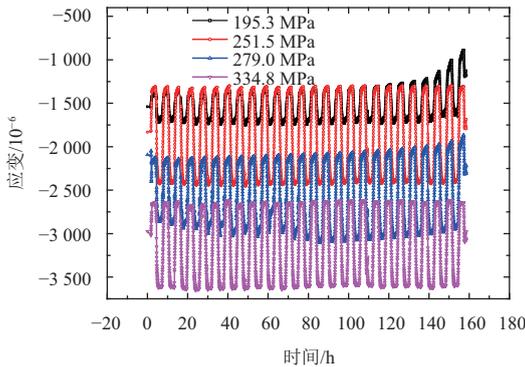


图 10 -60 °C~100 °C 条件下 3 号测点的纵向应变

Fig. 10 Longitudinal strain of 3# testing point under -60 °C~100 °C thermal cycling

随着应力水平的增大，管件的应变变形逐渐增大；管件的蠕变变形在高温阶段增加幅度较大，符合蠕变变形的一般规律；管件在低温保持阶段增加幅度较小甚至趋于平稳。

3.2 -160 °C~80 °C条件下的变形测试

热循环试验环境箱如图 11 所示。采用力控制系统来实现载荷恒定，载荷分辨率为 1%。

根据前述管件试验测试结果，调整了电阻应变片布片方案（同一测点布置有纵向和横向两个应变片），如图 12 所示。图 13 为热循环过程示意图。

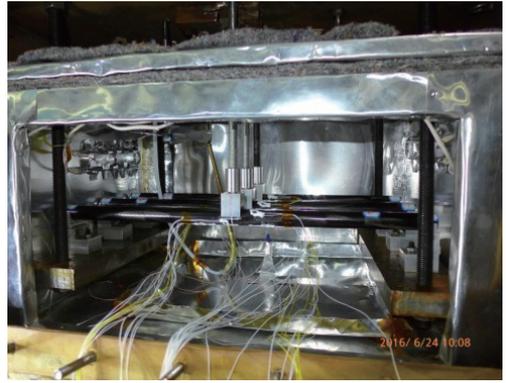


图 11 -160 °C~80 °C 热循环试验环境箱

Fig. 11 Testing chamber for -160 °C~80 °C thermal cycling measurement

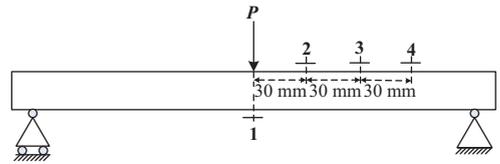


图 12 应变片贴片示意图

Fig. 12 Schematic of the strain gauge design

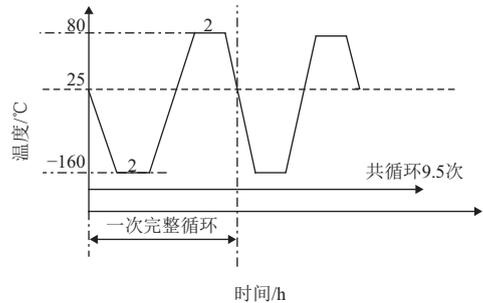


图 13 -160 °C~80 °C 热循环过程示意图

Fig. 13 Diagram of -160 °C~80 °C thermal cycling procedure

管件失效危险点约处于 2 号测点和 3 号测点附近，两测点的纵向应变测试结果如图 14 和图 15 所示。

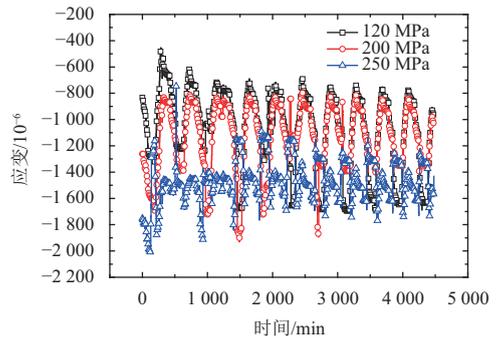


图 14 -160 °C~80 °C 条件下 2 号测点的纵向应变

Fig. 14 Longitudinal strain of 2# testing point under -160 °C~80 °C thermal cycling

可以看出，随着多次升温 and 降温过程，管件应变变化呈现周期性波动且趋于稳定，而蠕变变形总体变

化较小。试验还发现, 管件在承受较大弯曲应力(超过250 MPa)作用时, 部分试样发生了脆性断裂破坏。

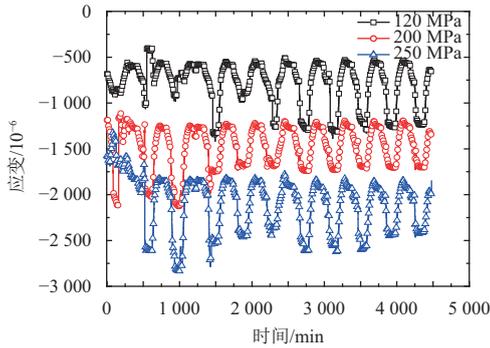


图15 -160 °C~80 °C条件下3号测点的纵向应变

Fig. 15 Longitudinal strain of 3# testing point under -160 °C~80 °C thermal cycling

4 管件长期蠕变行为预测分析

4.1 蠕变预测模型

4.1.1 蠕变主曲线法

蠕变主曲线法基于树脂基体的粘弹性行为时间-温度和时-应力等效原理^[21]。时间-温度原理认为, 材料在不同温度下的蠕变柔度曲线可通过沿时间轴平移而构成某参考温度下的蠕变柔度主曲线。以此由较高温度下短期蠕变变形来预测较低温度下长期蠕变行为^[22-23]。

图16示意说明了时间-温度等效原理。某参考温度 T_{ref} 下长期蠕变柔度曲线 $S(T_{ref}, t)$, 可由其他温度下短时柔度曲线 $S(T_i, t)$ 沿对数时间增大(或减小)方向移动 $\lg \phi_T$ 得到, 即

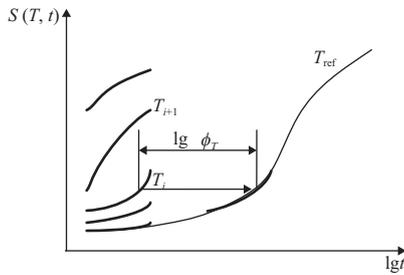


图16 时间-温度等效原理示意图

Fig. 16 Illustration of time-temperature superposition principle

$$S(T_{ref}, t) = S(T_i, \phi_T t) \quad (3)$$

其中: $S(T_i, t)$ 称为某一温度下的蠕变柔度。

$$S(T_i, t) = \varepsilon(T_i, t) / \sigma \quad (4)$$

其中: $\varepsilon(T_i, t)$ 为某一温度下的应变; σ 为所施加的恒定应力; $\lg \phi_T$ 称为时间-温度移位因子。

同理, 时间-应力等效原理认为, 材料在较低应力水平下的长期蠕变性能可以由较高应力水平下的短期蠕变试验得到。某一参考应力水平下的蠕变柔

度曲线可由其他应力水平下的蠕变柔度曲线沿对数时间坐标轴移位得到, 该移位量 $\lg \phi_\sigma$ 称为时间-应力移位因子^[24]。

由此推广, 可以得到时间-温度-应力等效原理, 时间-温度-应力移位因子 $\lg \phi_{T\sigma}$ 与 $\lg \phi_T$ 、 $\lg \phi_\sigma$ 具有如下关系

$$\lg \phi_{T\sigma} = \lg \phi_T^{\sigma_{ref}} + \lg \phi_\sigma^{T_{ref}} \quad (5)$$

其中: $\lg \phi_T^{\sigma_{ref}}$ 代表参考应力条件下的时间-温度移位因子; $\lg \phi_\sigma^{T_{ref}}$ 代表参考温度条件下的时间-应力移位因子。

因此, 欲得到某温度 T 和某应力水平 σ 下的材料蠕变性能, 可由恒应力情况下的时间-温度移位和恒温情况下的时间-应力移位确定。这是对管件长期变形性能进行加速评估的分析方法之一。

4.1.2 Findley模型

Findley唯象蠕变模型通过数学公式描述材料的蠕变行为, 适用于未进入蠕变第三阶段的变形预测。该模型将蠕变响应分为两部分, 即独立于时间的恒应变和与时间相关的应变部分。在恒应力情况下, 蠕变应变与两者的关系为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + m \left(\frac{t}{t_0} \right)^n \quad (6)$$

其中: ε_0 为与应力有关、与时间无关的初始弹性应变; m 为与应力和温度均有关的系数; n 为与应力无关、与温度有关的材料常数; t_0 为单位时间^[10]。各个模型参数可通过实验拟合获得。

4.2 长期蠕变变形结果预测

4.2.1 室温条件下的蠕变变形预测分析

图17(a)为室温条件下3号测点的纵向蠕变柔度曲线。取 $\sigma_{ref} = 222.4$ MPa作为参考应力, 利用时间-应力等效原理, 将其他应力水平条件下的蠕变柔度-对数时间曲线向该参考应力进行水平移位, 从而获得一条较为光滑的蠕变柔度主曲线, 移位的距离即为相应的时间-应力移位因子 $\lg \phi_\sigma$ 。移位后得到的蠕变柔度主曲线如图17(b)所示。

根据不同应力条件下移位因子之间的关系, 进一步可外推获得更低应力水平下蠕变柔度主曲线。图18为100 MPa参考应力水平的蠕变柔度主曲线, 其可靠预测年限远超过设计服役年限。100 MPa下设计服役期限12年后的蠕变变形 ε_{cr} 预测值约为 99.6×10^{-6} 。根据三点弯曲试验, 管件的弹性变形 ε_e 为 589.9×10^{-6} 。这样, 管件在100 MPa应力水平下总应变 ε 等于 689.5×10^{-6} 。

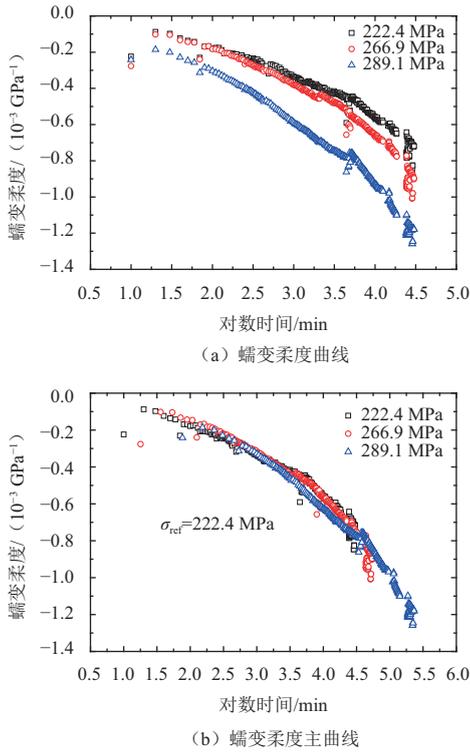


图 17 25 °C 条件下 3 号测点的纵向蠕变柔度及主曲线
Fig. 17 Longitudinal creep compliance curve and master curve of 3# testing point under 25 °C

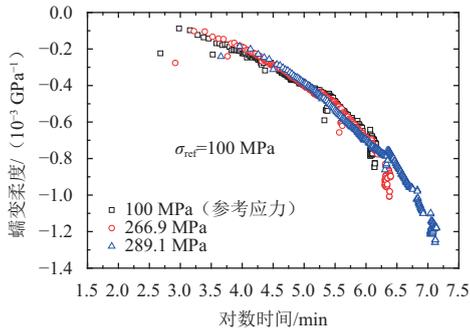


图 18 25 °C 条件下 3 号测点的纵向蠕变柔度主曲线
Fig. 18 Longitudinal creep compliance master curve of 3# testing point under 25 °C

图 19 (a) 为不同温度和应力水平条件下 3 号测点的纵向蠕变柔度曲线。根据同样方法，取 $T = 25\text{ °C}$ 作为参考温度， $\sigma_{\text{ref}} = 200\text{ MPa}$ 作为参考应力，利用时间-应力-温度等效原理，将其他温度和应力水平条件下的蠕变柔度-对数时间曲线向该参考状态进行水平移位，从而获得其蠕变柔度主曲线。移位的距离为相应的时间-应力-温度联合移位因子 $\lg \phi_{T,\sigma}$ 。平移后得到的该蠕变柔度主曲线如图 19 (b) 所示。

从图 19 可以看出，其预测年限超过设计服役年限，在 25 °C、200 MPa 条件下服役 12 年后的管件蠕变变形预测值约为 319.8×10^{-6} 。再根据三点弯曲试验确

定出管件在 200 MPa 应力水平下的弹性变形为 $1\,274.4 \times 10^{-6}$ ，则管件在长期服役后的总变形量为 $1\,594.2 \times 10^{-6}$ 。

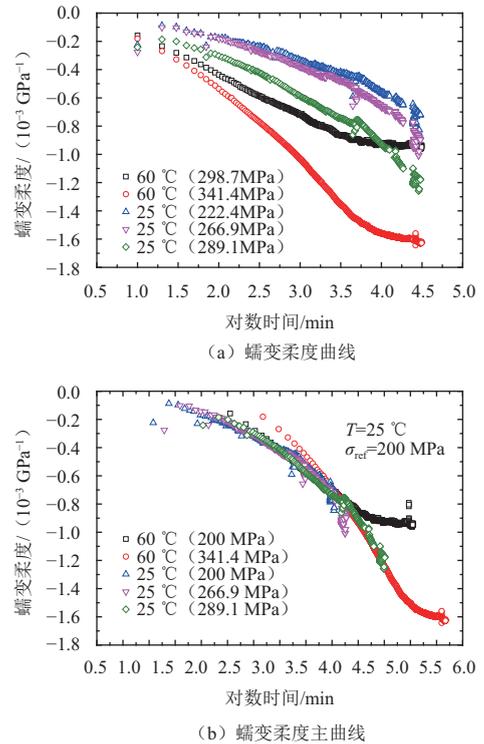


图 19 不同温度、应力条件下的蠕变柔度及主曲线
Fig. 19 Longitudinal creep compliance and the master curve under different temperatures and stresses

4.2.2 100 °C 条件下管件的蠕变变形预测

时间-应力-温度等效原理适用于通过高温、高应力条件下的短期蠕变试验来预测管件在较低温度和应力条件下的长期蠕变变形。本次试验的最高测试温度为 100 °C，直接应用该原理来预测 100 °C 长期蠕变变形具有局限性，因此，采用 Findley 模型^[7]来预测管件在 100 °C 条件下服役年限内的蠕变变形。对 100 °C 条件下管件的蠕变柔度-时间曲线进行拟合分析，分别得到 100 MPa 和 200 MPa 应力水平条件下管件的蠕变变形预测规律，如图 20 所示。

根据 Findley 模型拟合结果，100 MPa 条件下管件的蠕变应变-时间关系为

$$\varepsilon_{\text{cr}} = -30.973t^{0.108} \quad (7)$$

因此，在服役年限内管件的蠕变变形预测值约为 $168.0\ \mu\varepsilon$ ，管件在 100 °C、100 MPa 条件下长期服役后的总变形量为 757.9×10^{-6} 。

同理，200 MPa 条件下，管件的蠕变应变-时间关系为

$$\varepsilon_{\text{cr}} = -65.119t^{0.108} \quad (8)$$

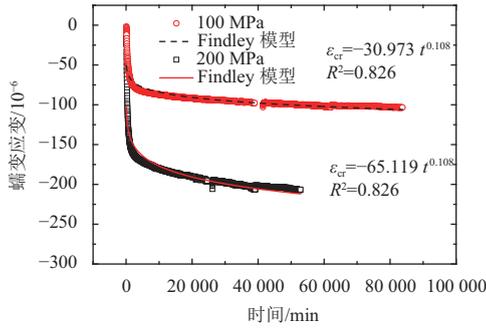


图20 100 °C、100 MPa和200 MPa应力水平下的蠕变变形规律
Fig. 20 Creep strain curves of CRFP tube under 100 °C, 100 MPa and 200 MPa conditions

这样,在服役年限内管件的蠕变变形预测值约为 353.3×10^{-6} , 管件在100 °C、200 MPa条件下长期服役后的总变形量为 $1\ 627.7 \times 10^{-6}$ 。

5 承载能力评定

根据三点弯曲破坏试验以及蠕变破坏试验中管件的破坏位置、破坏方式、破坏断口形态等可知,管件最先发生的破坏方式为纵向压缩破坏,故将管件破坏点的极限应变值作为其承载能力的评价指标,即采用最大应变强度准则^[25]校核管件在长期服役年限内的承载能力。

根据三点弯曲破坏试验结果,从工程应用的角度考虑,取四根管件的最小极限应变值 $-2\ 924 \times 10^{-6}$ 作为管件的极限应变值 ε_c 。

5.1 强度校核

5.1.1 恒温条件下的强度校核

恒温条件下,管件的总应变 ε 包含弹性应变 ε_e 和蠕变应变 ε_{cr} 两部分。此时,管件的强度条件为

$$|\varepsilon_e + \varepsilon_{cr}| \leq |\varepsilon_c| \quad (9)$$

即当管件服役12年后的总变形量小于管件破坏点的极限应变,可认为管件在服役年限内安全可靠。

由前文可知:

- 1) 在室温条件下,管件在100 MPa应力水平条件下长期服役后的总变形量为 689.5×10^{-6} , 在200 MPa应力水平条件下长期服役后的总变形量为 $1\ 594.2 \times 10^{-6}$;
- 2) 在100 °C条件下,管件在100 MPa应力水平条件下长期服役后的总变形量为 757.9×10^{-6} , 在200 MPa应力水平条件下长期服役后的总变形量为 $1\ 627.7 \times 10^{-6}$ 。

可见,管件在两种恒温条件下的总变形量均小于极限应变值,因此管件在服役年限内满足强度要求。

5.1.2 高低温循环条件下的强度校核

在高低温循环情形下,管件的总应变 ε 包含弹性应变 ε_e 、热应变 ε_{th} 和蠕变应变 ε_{cr} 三部分,即

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{cr} \quad (10)$$

根据上述温度循环过程中管件的纵向应变变化规律可知,管件在较低温度时蠕变变形总体变化较小,故忽略温度循环工况下的蠕变变形,将管件的总应变看作 ε_e 和 ε_{th} 的叠加。这样,高低温循环条件下管件的强度条件为

$$|\varepsilon_e + \varepsilon_{th}| \leq |\varepsilon_c| \quad (11)$$

根据测试结果可以确定,在 $-60 \sim 100$ °C 时,管件的纵向表观热膨胀系数值 α_L 约为 $3.11 \times 10^{-6}/\text{°C}$ 。则管件由于热效应所造成的应变变形值为

$$|\varepsilon_{th}| = \alpha_L \cdot (T - T_{ref}) = 264.4 \times 10^{-6} \quad (12)$$

再加上管件的弹性变形量 $1\ 261.3 \mu\text{e}$, 可知管件在该工况下长期服役后的总变形量为 $1\ 525.7 \mu\text{e}$ 。

对于 $-160 \sim 80$ °C 热循环工况,同理可以计算出管件2号测点附近的纵向表观热膨胀系数值 α_L 为 $2.24 \mu\text{e}/\text{°C}$, 以及该温度循环所造成的管件纵向热应变变形值

$$|\varepsilon_{th}| = \alpha_L \cdot (T - T_{ref}) = 414.4 \times 10^{-6} \quad (13)$$

即管件在该工况下长期服役后的总变形量为 $1\ 675.7 \times 10^{-6}$ 。

可以看出,管件在两种高低温循环条件下的总变形量亦小于极限应变值,因此管件在服役年限内满足强度要求。

5.2 承载能力评价

基于最大应变强度准则,进一步可以分析确定管件在长期服役年限内的承载能力。根据不同工况下管件的变形预测值,可以得到长期服役后的管件弯曲柔度值,记为 S (12)。根据测试结果,可以确定未经历任何蠕变变形状态时管件的初始弯曲柔度 $S(0)$ 分别等于 $6.372 \times 10^{-12} \text{Pa}^{-1}$ (恒温蠕变情形) 和 $6.306 \times 10^{-12} \text{Pa}^{-1}$ (高低温循环蠕变情形)。将管件的弯曲柔度值 $S(12)$ 与 $S(0)$ 相比较,可以计算得到管件长期运行后的破坏应力值。计算结果汇总于表1,其中亦给出了各个参考温度条件下管件长期服役后可能引起破坏的弯曲强度百分比以及相应的弯曲模量降低幅值(均为与管件初始弯曲性能相比较的参考值)。

可以看出,该管件在长期服役后的弯曲强度可能下降为初始弯曲强度的75%~80%,弯曲模量约降低20%~25%。

6 结论

本文根据CFRP管件在不同温度条件下的蠕变变形测试结果,建立了其蠕变主曲线和唯象蠕变Findley理

表1 不同温度条件下管件长期运行后的承载能力预测

Table 1 Load-carrying capacity of the CFRP tube after long-term service under different conditions

温度/℃	应力/MPa	总应变/ 10^{-6}	长期服役后的弯曲柔度值/ $1 \times 10^{-12} \text{Pa}^{-1}$	剩余强度的百分比/%	弯曲模量下降的百分比/%
25	200	-1 594.2	7.971	79.9	20.1
100	200	-1 627.7	8.139	78.0	22.0
-60~100	200	-1 525.7	7.639	82.7	17.3
-160~80	200	-1 675.7	8.379	75.3	24.7

论模型, 对其在长期服役期限内的蠕变变形进行了预测分析, 并采用最大应变强度准则对其弯曲强度进行了评价。获得的主要结论如下。

1) 该CFRP管件在弯曲加载方式下, 最先可能发生的破坏方式为沿管轴纵向压缩破坏, 破坏具有脆性断裂特征。管件弯曲模量和弯曲强度分别为137.9 GPa和523.71 MPa。

2) 管件在25℃~100℃范围内呈现出典型蠕变变形特征。相同温度条件下, 管件的蠕变速率随着加载应力的提高而增大; 相同应力水平下, 蠕变速率随着温度的提高而增大。管件弯曲蠕变包括蠕变第一阶段和蠕变第二阶段, 第一阶段时间较短, 第二阶段持续时间较长, 符合高聚物基复合材料蠕变特性规律。

3) 利用时间-应力、时间-温度、时间-应力-温度等效原理可以确定管件在参考条件下的蠕变柔度主曲线。采用该蠕变主曲线和Findley唯象蠕变模型, 能够借助于实验室短时蠕变测试结果来合理预测管件的长时蠕变变形。

4) 采用最大应变强度准则, 校核了管件处于不同温度、应力水平条件下长期服役后的弯曲强度。管件在典型设计工况下服役年限内的总变形量小于管件的极限应变值, 强度满足要求。在典型工况下长期服役后, 管件的弯曲强度约下降为其初始弯曲强度的75%~80%左右, 弯曲模量约降低20%~25%。

参 考 文 献

- [1] 张鹏飞, 梁龙, 陶积柏, 等. 深空环境下热防护材料的研究及应用进展[J]. 深空探测学报, 2016, 3(1): 77-82.
Zhang P F, Liang L, Tao J B, et al. Research and development of thermal protection materials applied in deep space exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(1): 77-82.
- [2] Goertzen W K, Kessler M R. Creep behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 421(1): 217-225.
- [3] Petermann J, Schulte K. The effects of creep and fatigue stress ratio on the long-term behaviour of angle-ply CFRP [J]. Composite Structures, 2002, 57(1): 205-210.
- [4] Nakada M, Miyano Y, Cai H, et al. Prediction of long-term viscoelastic behavior of amorphous resin based on the time-temperature superposition principle [J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2011, 15(3): 309-316.
- [5] Carra G, Carvelli V. Long-term bending performance and service life prediction of pultruded Glass Fibre Reinforced Polymer composites [J]. Composite Structures, 2015, 127: 308-315.
- [6] Miyano Y, Nakada M, Sekine N. Accelerated testing for long-term durability of GFRP laminates for marine use [J]. Composites Part B: Engineering, 2004, 35(6): 497-502.
- [7] Findley W N. Mechanism and mechanics of creep of plastics [J]. SPE Journal, 1960, 16(1): 57-65.
- [8] Jia Y, Peng K, Gong X, et al. Creep and recovery of polypropylene/carbon nanotube composites [J]. International Journal of Plasticity, 2011, 27(8): 1239-1251.
- [9] Yang J L, Zhang Z, Schlarb A K, et al. On the characterization of tensile creep resistance of polyamide 66 nanocomposites. Part II: modeling and prediction of long-term performance [J]. Polymer, 2006, 47(19): 6745-6758.
- [10] McClure G, Mohammadi Y. Compression creep of pultruded E-glass-reinforced-plastic angles[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1995, 7(4): 269-276.
- [11] Gibson R F. Principles of composite material mechanics [M]. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [12] 罗文波, 杨挺青, 安群力. 非线性粘弹体的时间-温度-应力等效原理及其应用[J]. 固体力学学报, 2001(3): 219-224.
Luo W B, Yang T Q, An Q L. Time-temperature-stress equivalence and its application to nonlinear viscoelastic materials [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2001(3): 219-224.
- [13] 王初红. 高聚物长期蠕变性能的加速表征 [D]. 湖南: 湘潭大学, 2006.
Wang C H. An accelerated characterization of the long-term creep behavior of polymers [D]. Hunan: Xiangtan University, 2006.
- [14] 刘鹏飞, 赵启林, 王景全. 树脂基复合材料蠕变性能研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(03): 109-117.
Liu P F, Zhao Q L, Wang J Q. Process in research of the creep behavior of resin composites [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013(03): 109-117.
- [15] GB/T 1456-2005, 夹层结构弯曲性能试验方法[S].
- [16] GB/T 1449-2005, 纤维增强塑料弯曲性能试验方法[S].
- [17] 周祝林. 国家标准GB 1456扩大应用范围 [J]. 玻璃钢/复合材料, 1998(02): 18-20.
Zhou Z L. Expanding application scope of national standard GB1456 [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 1998(02): 18-20.
- [18] 文献民, 王本利, 马兴瑞. 复合材料圆管构件等效模量的计算方法 [J]. 复合材料学报, 1999(02): 136-140.
Wen X M, Wang B L, Ma X R. On the effective modulus of composite tubulus element [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1999(02): 136-140.
- [19] 易洪雷, 周祝林, 吴妙生. 复合材料圆管弯曲强度研究[J]. 玻璃钢, 2008(02): 1-10.

- Yi H L, Zhou Z L, Wu M S. Study on bending strength of fiber-reinforced composite circular tube [J]. *Fiber Reinforced Plastics*, 2008(02): 1-10.
- [20] Drozdov A D, Lejre A L H. Viscoelasticity, viscoplasticity, and creep failure of polypropylene/clay nanocomposites [J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(15): 2596-2603.
- [21] Biswas K K, Somiya S, Endo J. Creep behavior of metal fiber-PPE composites and effect of test surroundings [J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 1999, 3(1): 85-101.
- [22] Sakai T, Somiya S. Analysis of creep behavior in thermoplastics based on visco-elastic theory [J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2011, 15(3): 293-308.
- [23] Hartmann B, Haque M A. Equation of state for polymer solids [J]. *Journal of Applied Physics*, 1985, 58(8): 2831-2836.
- [24] Akinay A E, Brostow W. Long-term service performance of polymeric materials from short-term tests: prediction of the stress shift factor from a minimum of data [J]. *Polymer*, 2001, 42(10): 4527-4532.
- [25] 陈烈民, 杨宝宁. 复合材料的力学分析[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
- 作者简介:
马瑜(1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 复合材料与结构的力学分析。
 通信地址: 陕西省西安市咸宁西路28号西安交通大学航天航空学院(710049)
 电话: 18292875669
 E-mail: m18292875669@163.com
王辉(1977-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 空间天线结构力学分析。本文通讯作者。
 通信地址: 陕西省西安市航天基地东长安街504号西安空间无线电技术研究所(710100)
 电话: (029)82665490
 E-mail: shangfl@mail.xjtu.edu.cn

Experimental Study on the Bending Creep Behavior of CFRP Tube

MA Yu¹, WANG Hui^{2*}, SHAO Zhenwei³, YANG Zengqin¹, SHANG Fulin¹, HOU Demen¹,
 GENG Hongbin⁴, LV Gang⁴

(1. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China;

3. Guizhou Liyang Aero-Engine Corporation, Guiyang 561102, China;

4. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To evaluate the service reliability of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) composite tubes used in spacecraft structure, static three-point-bending and creep tests of the CFRP tube are performed. At first, experimental tests of bending modulus and bending rupture strength, 500-hour-long constant temperature creep, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-160\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ thermal cyclic creep are conducted for the tube respectively. Based on the testing results, long-term creep deformation of the tube is predicted, using the time-temperature-stress superposition principle, the derived creep master curves as well as a phenomenal Findley model. Then, assessment on the mechanical strength and load-carrying capacity of the CFRP tube is made according to a maximum strain criterion. Results show that the CFRP tube can meet the creep deformation and strength requirements under the long-term service lifetime.

Key words: CFRP tube; bending strength; creep property; time-temperature-stress superposition principle; load-carrying capacity assessment

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]