

考虑编织角动态变化的 3 维编织碳/碳复合材料 高温剩余刚度模型

杨兴林¹, 张昇雨¹, 陈波¹, 马炳杰², 邢雪²

(1. 江苏科技大学 能源与动力学院, 江苏镇江 212003; 2. 中国船舶集团有限公司 第七一一研究所, 上海 201108)

摘要: 为研究 3 维编织碳/碳复合材料在高温环境下的疲劳特性, 建立了一种编织角与循环数相关的编织角动态变化模型, 将其引入考虑温度的单向复合材料剩余刚度模型中, 根据应力、编织角的变化以及温度等因素的影响, 建立了 3 维编织复合材料高温疲劳剩余刚度模型。在 700 °C 的大气环境下, 对添加抗氧化涂层的 3 维编织碳/碳复合材料进行了拉-拉疲劳试验, 获取了剩余刚度、剩余强度以及试验段长度等参量。结果表明: 在 700 °C 下 3 维编织碳/碳复合材料在拉-拉疲劳加载初期的剩余刚度显著提高, 然后保持稳定, 在接近疲劳寿命时突降; 剩余强度经 10⁵ 循环后比初始强度提高了 19.75%; 在疲劳过程中的迟滞回线面积随着循环数的增加逐渐增大; 高温剩余刚度模型对 700 °C 下剩余刚度试验数据拟合度较高, 且通过编织角动态变化模型求得的不同循环数下编织角模拟值与试验值的误差小于 5%。

关键词: 3 维编织; 碳/碳复合材料; 高温疲劳; 剩余刚度; 编织角

中图分类号: V250.3

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.03.010

High Temperature Residual Stiffness Model of 3D Braided Carbon/Carbon Composites Considering Dynamic Braiding Angle Changes

YANG Xing-lin¹, ZHANG Sheng-yu¹, CHEN Bo¹, MA Bing-jie², XING Xue²

(1. School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212003, China;

2. CSSC Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: In order to study the fatigue characteristics of 3D braided C/C composites under elevated temperature, a model of dynamic changes of braiding angle related to the number of cycles was established, which was introduced into the residual stiffness model of unidirectional composites considering temperature, and then the high-temperature fatigue residual stiffness model of 3D braided composites was established considering factors such as stress changes, braiding angle changes, and temperature. Tensile-tensile fatigue tests were conducted at an atmospheric environment of 700 °C to obtain the residual stiffness, residual strength, and length change of specimen section on 3D braided C/C composites with anti-oxidation coating. The results show that at 700 °C, the residual stiffness of 3D braided C/C composites with anti-oxidation coating in the tensile-tensile fatigue increases significantly in the initial loading period, then remains stable, and experiences a sudden decrease when approaching fatigue life. After 105 cycles, the residual strength of 3D braided C/C composites increases by 19.75% compared with its initial strength; The area of the hysteresis loop during the fatigue process gradually increases with the increase of the number of cycles. The high-temperature residual stiffness model fits well to the residual stiffness test data at 700 °C. The error between the simulated value of the braiding angle under different cycles by the model considering dynamic braiding angle changes and the experimental value is less than 5%.

Key words: 3D braiding; C/C composites; high temperature fatigue; residual stiffness; braiding angle

0 引言

复合材料具备优异的力学性能以及高比刚度、高

比强度性能和抗疲劳性能。碳/碳复合材料不仅拥有复合材料的优点, 且具备耐高温、耐腐蚀能力。3 维编织因其特殊的内部结构, 相对于复合材料层合板,

收稿日期: 2022-12-05 基金项目: 江苏科技大学科研启动资金(1142931905)资助

作者简介: 杨兴林(1964), 男, 博士, 教授。

引用格式: 杨兴林, 张昇雨, 陈波, 等. 考虑编织角动态变化的 3 维编织碳/碳复合材料高温剩余刚度模型[J]. 航空发动机, 2024, 50(3): 72-78. YANG Xinglin, ZHANG Shengyu, CHEN Bo, et al. High temperature residual stiffness model of 3D braided carbon/carbon composites considering dynamic braiding angle changes[J]. Aeroengine, 2024, 50(3): 72-78.

层间性能大幅度提高^[1-2],疲劳特性更加优异,因此,3维编织碳/碳复合材料的发展前景较为广阔,未来可应用于航空、车船、医疗器械等国防和民用领域^[3-4]。

受应用环境、载荷水平、结构特点等因素影响,3维编织碳/碳复合材料高温疲劳行为的演化及损伤机理非常复杂。加之碳/碳复合材料在高温环境下易发生氧化,受当前高温抗氧化水平限制,碳/碳复合材料在高温环境下的疲劳特性试验研究开展较少,尤其是3维编织碳/碳复合材料在高温作用下的疲劳相关理论及预测方法研究较难突破。胡殿印等^[5]模拟了给定应力条件下的疲劳迟滞回线,与试验数据对比,进一步建立编织复合材料疲劳寿命预测方法;李筱暄等^[6]总结对比了在不同高温条件下抗氧化涂层3维编织碳/碳复合材料的性能;Wei等^[7]建立了一种渐进损伤模型,用以预测3维编织碳/碳复合材料拉伸行为下的损伤;Liu等^[8-9]对不同高温条件下含抗氧化涂层碳/碳复合材料进行层合板拉-拉疲劳试验,以及不同应力水平的试验件疲劳试验,表明材料刚度退化情况与应力水平成正比,上述学者开展了碳/碳复合材料高温疲劳试验研究,从试验数据方面论述了碳/碳复合材料高温疲劳特性,但并没有从理论上说明碳/碳复合材料高温疲劳损伤的演化过程;朱元林等^[10-11]基于 0° 、 $\pm 45^\circ$ 方向对层合板3维编织碳/碳复合材料开展了室温状态下的拉-拉疲劳试验,建立并完善了3维编织碳/碳复合材料的纵向和剪切剩余刚度、强度模型,该模型在Yang^[12]的基础上添加了应力水平对其影响;廖晓玲^[13]的碳/碳复合材料拉-拉疲劳试验表明,高温下的碳/碳复合材料承载能力和应变能力较好。以上文献从理论上研究了室温环境下碳/碳复合材料的疲劳损伤机理,但没有考虑温度的疲劳损伤影响。

本文在 700°C 下开展了含涂层3维编织碳/碳复合材料拉-拉疲劳试验,建立了一种随循环数变化的编织角动态变化模型及3维编织碳/碳复合材料高温疲劳剩余刚度模型,并对2种模型的有效性进行了验证。

1 碳/碳复合材料纤维束高温剩余刚度模型

在复合材料疲劳损伤研究中,描述损伤量的大小需引入损伤因子^[14]

$$D_E = \frac{E_0 - E(n)}{E_0 - E(N)} \quad (1)$$

式中: E_0 为材料的初始刚度值; $E(N)$ 为材料失效时的临界刚度; $E(n)$ 为材料在 n 次疲劳循环过程后的剩余刚度。

D_E 可以用 $f\left(\frac{n}{N}\right)$ 表示, n/N 表示寿命比,则式(1)

可以表述为

$$D_E = \frac{E_0 - E(n)}{E_0 - E(N)} = f\left(\frac{n}{N}\right) \quad (2)$$

式(2)的正则化形式可表示为

$$\frac{E(n)}{E_0} = 1 - \left(1 - \frac{E(N)}{E_0}\right) f\left(\frac{n}{N}\right) \quad (3)$$

根据大量疲劳试验和研究报告^[14-16]可知,复合材料的刚度退化趋势一般只在初期和末期呈现快速下降状态,而在中期保持平缓。文献[17]建立了一种能够较好地体现复合材料刚度特性的3个阶段的模型,其具体理论公式为

$$D_E = q\left(\frac{n}{N}\right)^{m_1} + (1-q)\left(\frac{n}{N}\right)^{m_2} \quad (4)$$

式中: q 、 m_1 、 m_2 为试验参数。

联立式(1)~(4),则剩余刚度退化模型可表示为

$$\frac{E(n)}{E_0} = 1 - \left(1 - \frac{E(N)}{E_0}\right) \left[q\left(\frac{n}{N}\right)^{m_1} + (1-q)\left(\frac{n}{N}\right)^{m_2} \right] \quad (5)$$

试验研究表明,碳/复合材料的力学性能会因环境温度以及高温热处理温度的变化而变化。并且文献[17]指出, q 作为试验参数,可采用指数函数进行描述。文献[18-19]采用了考虑应力水平、温度参数的指数函数描述了 q 参数,并取得了较好的效果。由于碳/碳复合材料的高温疲劳特性与应力水平、环境温度、热处理温度有关,本文对参数 q 进行了多参数的数学描述,提出了一种考虑应力水平、热处理温度、温度影响的构造方法,参数 q 定义为

$$q = p^{a_1} \left(\frac{T_m - T}{T_m - T_0} \right)^{b_1} \quad (6)$$

式中: a_1 、 b_1 为试验参量; T_m 为碳/碳复合材料热处理温度; T_0 为室温; p 为应力水平, $p = \sigma_{max}/\sigma_U$,其中 σ_{max} 为应力峰值, σ_U 为拉伸强度。

Lee^[20]建立的模型针对温度波动对层合板疲劳及损伤程度的影响机理进行了定量研究,得到了 $E(N)$ 和 E_0 的函数关系,本文在该模型的基础上进行修正,即

$$\frac{E(N)}{E_0} = \left(\frac{T_m - T}{T_m - T_0} \right)^c \left(\frac{p}{d_1} \right)^{d_2} \quad (7)$$

式中: c, d_1, d_2 为试验参数。

联立式(5)~(7),可以得到考虑环境温度、应力水平、热处理温度的碳/碳复合材料纤维束高温剩余刚度模型

$$\frac{E(n,p,T)}{E(0,T)} = 1 - \left[1 - \left(\frac{T_m - T}{T_m - T_0} \right)^c \left(\frac{p}{d_1} \right)^{d_2} \right] \left[p^{a_1} \left(\frac{T_m - T}{T_m - T_0} \right)^{b_1} \left(\frac{n}{N} \right)^{m_1} + \left[1 - p^{a_1} \left(\frac{T_m - T}{T_m - T_0} \right)^{b_1} \right] \left(\frac{n}{N} \right)^{m_2} \right] \quad (8)$$

2 3维编织碳/碳复合材料编织角动态模型及高温剩余刚度模型

朱元林等^[10-11]、廖晓玲^[13]在开展3维编织碳/碳复合材料室温疲劳试验时发现:(1)3维编织碳/碳复合材料在承受疲劳载荷后,其剩余强度得到强化;(2)若3维编织碳/碳复合材料疲劳循环数超过 10^4 ,则材料不会发生断裂;(3)3维编织碳/碳复合材料在疲劳加载过程中表现出应力松弛现象;(4)相比于静拉伸,疲劳破坏后的断口更为松散。通过上述3维编织碳/碳复合材料的疲劳特性可以推断,在疲劳加载过程中,3维编织碳/碳复合材料存在一定的结构变化,进而影响了疲劳特性。综合3维编织碳/碳复合材料疲劳演化过程中的宏观表现、应变数据特征、断口形式,本文认为由于3维编织碳/碳复合材料基体强度远低于纤维,在疲劳载荷作用下基体率先发生失效,并降低了固定纤维束的能力,造成纤维预制体的编织角在疲劳载荷作用下逐渐减小。通过监测3维编织碳/碳复合材料试验件长度可知,试验件长度逐渐被拉长,进一步验证了本文猜想。

本文通过分析编织角变化的试验数据发现,编织角随循环数的变化规律与chapman函数相近

$$y = a(b - e^{-x})^\beta \quad (9)$$

文献[17]认为疲劳损伤退化函数为指数形式,可令 $a=m^d$,则式(9)可转化为本文提出的编织角随循环数变化的数学关系,将其定义为编织角动态模型

$$\frac{\gamma(n_1/N_1)}{\gamma(0)} = \left(\alpha e^{-\frac{n_1}{N_1}} + k \right)^\beta \quad (10)$$

式中: $\gamma(0)$ 为试验件初始编织角; n_1/N_1 为正则化循环数, $\gamma(n_1/N_1)$ 为该循环数下试验件编织角, α, β, k 为试

验参数。

令

$$g\left(\frac{n_1}{N_1}\right) = \left[r \left(\frac{n_1}{N_1} \right)^{l_1} + (1-r) \left(\frac{n_1}{N_1} \right)^{l_2} \right] \frac{\gamma(n_1/N_1)}{\gamma(0)} \quad (11)$$

式中: r 为损伤试验参数; l_1, l_2 为循环试验参数。

则考虑编织角变化的3维编织碳/碳复合材料高温剩余刚度模型为

$$\frac{E(n,p,T)}{E(0,T)} = 1 - \left(\alpha e^{-\frac{n}{N}} + k \right)^\beta \left[1 - \left(\frac{T_m - T}{T_m - T_0} \right)^c \left(\frac{p}{d_1} \right)^{d_2} \right] \left[p^{a_2} \left(\frac{T_m - T}{T_m - T_0} \right)^{b_2} \left(\frac{n}{N} \right)^{l_1} + \left[1 - p^{a_2} \left(\frac{T_m - T}{T_m - T_0} \right)^{b_2} \right] \left(\frac{n}{N} \right)^{l_2} \right] \quad (12)$$

式(11)所建立的模型中有 $\alpha, \beta, k, c, d_1, d_2, a_2, b_2, l_1, l_2$ 共10个参数。其中 α, β, k 与编织角相关; c, b_2 与环境温度和热处理温度相关; a_2, d_1, d_2 与应力水平相关。

由于无法直接获取疲劳加载过程中的编织角试验数据,因此式(10)无法直接通过数据拟合确定。而3维编织碳/碳复合材料高温剩余刚度试验数据能够满足剩余刚度模型的拟合要求,因而可先对3维编织碳/碳复合材料高温剩余刚度模型进行试验数据拟合,确定式(12)相关参数,从而间接获取式(10)相关参数。

为验证上述方法所获取式(10)参数的有效性,在试验过程中对试验件的长度进行监测,确认花节长度(3维编织复合材料的单胞长度)实时变化的关系式为

$$h\left(\frac{n}{N}\right) = \frac{H(n/N)}{t} \quad (13)$$

式中: $H(n/N)$ 为试验件的长度; t 为试验件长度方向包含的花节数量。

假设3维编织复合材料纤维束截面形状为椭圆形,那么花节长度与编织角的关系^[21]为

$$h\left(\frac{n}{N}\right) = \frac{8B_1}{\tan\left[\gamma\left(\frac{n}{N}\right)\right]} \quad (14)$$

式中: $h(n/N)$ 为花节长度随循环数的变化值; B_1 为椭圆形纤维束截面横轴值。

3 3维编织碳/碳复合材料高温疲劳试验

3.1 试验件制备

试验选用的试验材料为T300、3K碳纤维,并经

1×1 4步编织法编织获得预制体。在其浇注树脂后经高温热处理、常压碳化、高压碳化及石墨化后得到碳/碳复合材料。其中高温热处理温度为2200 °C,碳化阶段为4个周期。为降低高温氧化腐蚀,对试验件表面添加抗氧化涂层,涂层主要成分为含有硅、磷元素的物质。在测验件表面均匀涂抹溶解涂层,在大约700 °C下烧结5~7天。3维编织碳/碳复合材料试验件尺寸为250 mm×25 mm×4 mm。该试验件照片如图1所示,试验件参数见表1。

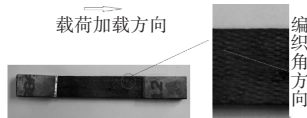


图1 3维编织碳/碳复合材料试验件

表1 3维编织碳/碳复合材料试验件参数

编织角 $\gamma/(\text{°})$	花节长度 h/mm	体积密度 $\rho_v/(\text{g}/\text{cm}^3)$	纤维体积分 数 $\varphi_f/\%$	孔隙率 $f_p/\%$
22	4.5	1.81	50	9.3

3.2 疲劳试验测试条件

本文在MTS-633设备上完成3维编织碳/碳复合材料拉-拉疲劳试验。加热测量装置为MTS(Muti-Test System)疲劳试验机自带的高温炉,温度监测主要采用表面捆绑式热电偶完成,应变采集通过引伸计完成,引伸计标距为12 mm,力传感器最大量程为10 kN。疲劳测试条件见表2。3维编织碳/碳复合材料高温拉-拉疲劳试验现场如图2所示。

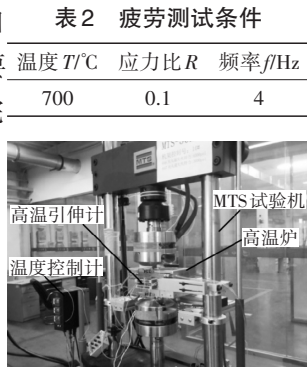


图2 3维编织碳/碳复合材料拉-拉疲劳试验现场

表2 疲劳测试条件

温度 $T/^\circ\text{C}$	应力比 R	频率 f/Hz
700	0.1	4

4 试验结果及讨论

4.1 疲劳寿命

对3维编织碳/碳复合材料在700 °C下开展了应力水平分别为拉伸强度的90%、87%、85%的拉-拉疲劳试验,3维编织碳/碳复合材料在700 °C下的拉-拉疲劳试验结果见表3。从表中可见,编号6、7经 5×10^5 个循环后未拉断,对表中试验数据1~5进行线性拟合,拟合公式为 $y=-0.04x+0.9977$,通过数据拟合得到的3维编织碳/碳复合材料疲劳寿命 $S-N$ 曲线如图3所示。

从表3和图3中可见,当应力水平从85%降低到83%时,寿命从5317循环上升至大于 5×10^5 循环。即

表3 3维编织碳/碳复合材料在700 °C下拉-拉疲劳试验结果

试验件 编号	应力水 平 $p/\%$	最大应力 $\sigma_{\text{max}}/\text{MPa}$	最小应力 $\sigma_{\text{min}}/\text{MPa}$	寿命 N	$\lg N$
1	90	190.82	19.08	278	2.44
2	90	190.82	19.08	338	2.53
3	87	184.46	18.45	944	2.97
4	87	184.46	18.45	1573	3.20
5	85	180.22	18.02	5317	3.73
6	83	175.98	17.60	$>5\times 10^5$	>5.70
7	83	175.98	17.60	$>5\times 10^5$	>5.70

在700 °C下,3维编织碳/碳复合材料在抗氧化涂层保护下可以承受较高应力水平的疲劳载荷,且存在寿命突变,这与文献[10-11,13]中室温下3维编织碳/碳复合材料所反映的拉-拉疲劳特性类似。

4.2 迟滞回线

3维编织碳/碳复合材料在700 °C下拉-拉疲劳过程中的迟滞回线如图4所示。从图中可见,材料的迟滞环面积随着循环数的增加而增大,即在疲劳载荷作用下的3维编织碳/碳复合材料会出现“应力松弛”现象。根据文献[22]中单向碳纤维在700 °C下

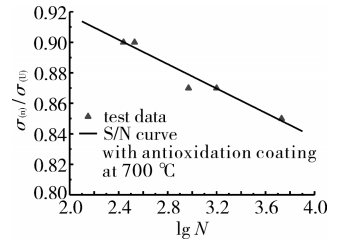


图3 3维编织碳/碳复合材料疲劳寿命 $S-N$ 曲线

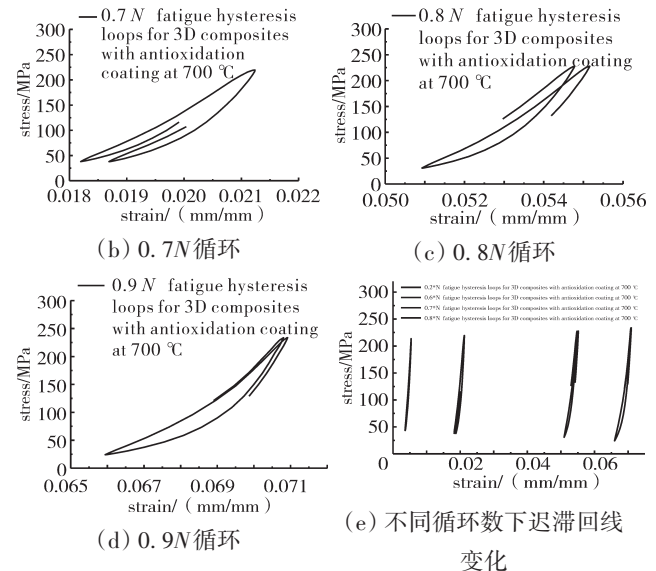


图4 不同循环数下3维编织碳/碳复合材料在700 °C下拉-拉疲劳过程中的迟滞回线

拉伸试验可知,碳纤维在该环境下的拉伸断裂应变低于0.005。因此该现象进一步说明3维编织碳/碳复合材料在疲劳载荷加载过程中存在明显结构变形。

4.3 在700 °C下3维编织碳/碳复合材料高温剩余刚度模型验证

利用式(12)可以对3维编织碳/碳复合材料应力水平为85%、87%的剩余刚度试验数据曲线进行拟合,在700 °C下3维编织碳/碳复合材料刚度退化模型的拟合结果如图5所示,其拟合参数见表4。

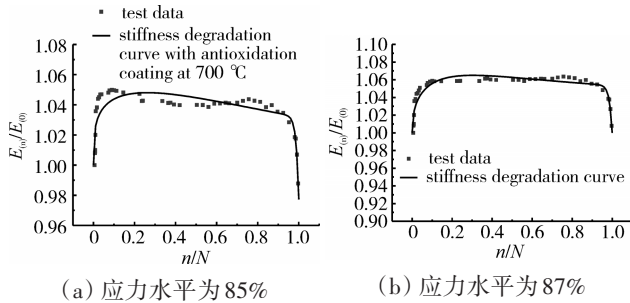


图5 不同应力水平条件下在700 °C下3维编织碳/碳复合材料刚度退化模型的拟合结果

表4 在700 °C下3维编织碳/碳复合材料刚度退化模型的拟合参数

当应力水平为85%时										
α	β	k	c	d_1	d_2	a_2	b_2	l_1	l_2	
0.045	49.481	0.971	-0.020	0.784	-0.572	-6.300	0.156	79.423	0.367	
当应力水平为87%时										
α	β	k	c	d_1	d_2	a_2	b_2	l_1	l_2	
0.011	165.286	0.965	-0.051	0.798	-0.482	-25.365	-6.838	74.841	0.420	

从图5中可见,试验件的剩余刚度在0.1N的循环内迅速提升,可达初始值的1.05倍,随后其剩余刚度水平又重新趋于相对稳定阶段,当循环数与试验材料疲劳寿命相接近时,材料的剩余刚度发生突降。通过图5中刚度试验数据可知,3维编织碳/碳复合材料在疲劳载荷作用下,编织角发生变化,导致3维编织碳/碳复合材料中碳纤维走向趋近纵向,从而使3维编织碳/碳复合材料的刚度得到一定提升。又由于应力水平较高,纤维逐渐损伤,这一阶段3维编织碳/碳复合材料剩余刚度较为平稳或缓慢下降,并在纤维损伤达到一定程度时,3维编织碳/碳复合材料发生最终破坏。此外,3维编织碳/碳复合材料在疲劳加载时由于存在以上结构变化特点,因此能够抵抗较高应力水平的疲劳载荷。当疲劳载荷低于一定值时,由于编织角被拉小,3维编织碳/碳复合材料的整体强度得到提升,原有的应力水平不足以造成纤维损伤,造成应力

水平在该值附近变化时,寿命存在较大范围的“跳跃”。这进一步表明3维编织碳/碳复合材料在高温作用下能够保持良好的抗疲劳性能。

为了验证本文建立的编织角动态模型,监测了3维编织碳/碳复合材料在85%应力水平、700 °C下拉-拉疲劳前0.9N循环的花节长度变化,并通过式(10)、(13)、(14)对花节高度进行计算,对比预测值和测量值,以验证模型的有效性。相关数据见表5。

表5 3维编织碳/碳复合材料在700 °C下拉-拉疲劳过程中花节长度变化

n	n/N	试验件工作段 长度测量值/mm	花节长度 $h(n/N)$ /mm		
			预测值	测量值	误差/%
1	0.0007	100.21	4.623	4.438	4.17
286	0.2	100.44	4.661	4.439	5.00
572	0.4	100.61	4.668	4.447	4.97
857	0.6	100.75	4.674	4.453	4.96
1143	0.8	100.88	4.680	4.459	4.96
1286	0.9	100.97	4.682	4.463	4.90

花节长度在 10^5 循环内预测值与测量值的变化对比如图6所示。

从表5和图6中可见,预测值与测量值误差均小于5%,说明本文所建模型可靠且预测精度较高。

编织角随循环次数的变化规律如图7所示。从图中可见,编织角随循环次数的增加逐渐减小,且减小趋势逐渐减弱。在疲劳

加载初期,编织角减小速率较快,纤维束逐渐与载荷方向接近,3维编织碳/碳复合材料的剩余刚度在这段时期内得到强化。随后编织角减小速率变慢,且在较高的应力水平下,3维编织碳/碳复合材料中纤维开始发生渐进损伤,这段时期内3维编织碳/碳复合材料的剩余刚度趋于稳定。当循环数接近疲劳寿命时,3维编织碳/碳复合材料中纤维损伤达到断裂条件,剩余刚度发生突降,材料发生突然破坏,并最终完全断裂。

4.4 剩余强度

在高温700 °C、应力水平为83%的条件下,开展了3维编织碳/碳复合材料 10^5 循环后的剩余强度试验,3维编织碳/碳复合材料的剩余强度与静强度的关系如图8所示。从图中可见,3维编织碳/碳编织复合

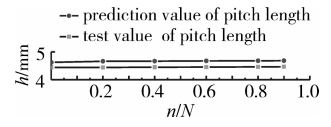


图6 花节长度预测值与测量值的比较

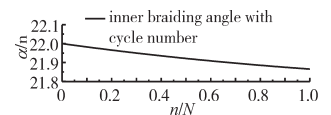


图7 编织角随循环次数的变化规律

材料在700℃下的静拉伸强度为212.02 MPa,经过 10^5 循环后,剩余抗拉强度为253.90 MPa,材料强度提升了19.75%。3维编织碳/碳复合材料疲劳加载后强度提升的原因同样与其疲劳加载中编织角变化有关,编织角减小后,试验件中纤维方向更接近纵向,使试验件拉伸强度更接近纤维强度,从而提升了3维编织碳/碳复合材料整体的剩余强度。

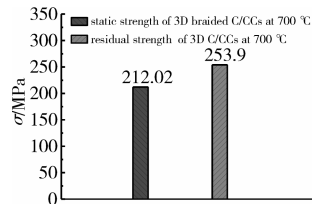


图8 3维编织碳/碳复合材料剩余强度与静强度的关系

5 结论

(1)建立并完善了3维编织碳/碳复合材料高温疲劳剩余刚度模型。通过3维编织碳/碳复合材料高温疲劳剩余刚度模型对试验数据的拟合获得编织角动态模型的试验参数,并通过测量花节长度在疲劳加载过程中的变化实现对编织角动态模型的验证。

(2)对有涂层3维编织碳/碳复合材料在700℃下进行了拉-拉疲劳试验。试验结果表明:3维编织碳/碳复合材料在700℃下拉-拉疲劳极限为83%拉伸极限;材料在拉-拉疲劳过程中迟滞环面积逐渐增大;3维编织碳/碳复合材料在700℃下拉-拉疲劳过程中剩余刚度曲线在前10%循环内迅速提高,而后保持稳定,在后10%循环内发生突降,直至试验件完全拉断。

(3)本文所建立的剩余刚度模型能够反映3维编织碳/碳复合材料在700℃下的剩余刚度变化;花节长度的测量值与预测值偏差范围小于5%,表明预测模型可靠。剩余强度试验结果表明:3维编织碳/碳复合材料经疲劳加载后拉伸强度可得到强化。

(4)受高温试验条件和研究经费限制,目前还未开展更高温度下的疲劳测试,在后续的工作中将开展多温度点,尤其是1000℃以上3维编织碳/碳复合材料的疲劳性能测试,从而进一步检验本文预测模型的适用性。

参考文献:

- [1] 董孚允,王春敏,董娟.三维纺织复合材料的发展和应用[J].纤维复合材料,2001,37(3):37-40.
DONG Fuyun, WANG Chunmin, DONG Juan. Development and application of 3D textile composites[J]. Fiber Composites, 2001, 37(3): 37-40. (in Chinese)
- [2] 杨尊社,卢刚认,曲德全,等.C/C复合材料的磷酸盐与硼系涂料的抗氧化研究[J].材料保护,2001,34(3):12-13.
YANG Zunshe, LU Gangren, QU Dequan, et al. Anti-oxidation of phosphate and boron contained coatings for C/C composite brake material[J]. Materials Protection, 2001, 34(3): 12-13. (in Chinese)
- [3] 李贺军,曾燮榕,李克智.炭/炭复合材料研究应用现状及思考[J].炭素技术,2001(5):24-27.
LI Hejun, ZENG Xierong, LI Kezhi. Some considerations on the R&D of carbon-carbon composites[J]. Carbon Techniques, 2001(5): 24-27. (in Chinese)
- [4] 李爱军,李贺军,李克智,等.C/C复合材料CVI工艺人工神经网络建模[J].中国科学(E辑),2003,33(3):209-216.
LI Aijun, LI Hejun, LI Kezhi, et al. Artificial neural network modeling of CVI process for C/C composites[J]. Science in China (Series E), 2003, 33(3): 209-216. (in Chinese)
- [5] 胡殿印,张泽帮,张龙,等.陶瓷基复合材料疲劳寿命预测方法[J].航空发动机,2017,43(4):17-22.
HU Dianyin, ZHANG Zebang, ZHANG Long, et al. Fatigue life prediction method for ceramic matrix composites[J]. Aeroengine, 2017, 43(4): 17-22. (in Chinese)
- [6] 李筱喧,付前刚,胡逗.碳/碳复合材料表面等离子喷涂高温抗氧化涂层研究进展[J].西北工业大学学报,2022,40(3):465-475.
LI Xiaoxuan, FU Qiangang, HU Dou. Research progress of plasma sprayed high temperature oxidation resistant coatings on carbon/carbon composites[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(3): 465-475. (in Chinese)
- [7] Wei K L, Shi H B, Tang M, et al. A new progressive damage model for predicting the tensile behavior of the three-dimensional woven carbon/carbon composites using micromechanics method[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2022, 31(2): 294-322.
- [8] Liu C, Cheng L, Luan X, et al. Real-time damage evaluation of a SiC coated carbon/carbon composite under cyclic fatigue at high temperature in an oxidizing atmosphere[J]. Materials Science and Engineering, 2009, 524(1-2): 98-101.
- [9] Liu C, Cheng L, Luan X, et al. High-temperature fatigue behavior of SiC-coated carbon/carbon composites in oxidizing atmosphere[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2009, 29(3): 481-487.
- [10] 朱元林,温卫东,刘礼华,等.碳/碳复合材料疲劳损伤失效试验研究[J].复合材料学报,2016,33(2):386-393.
ZHU Yuanlin, WEN Weidong, LIU Lihua, et al. Experimental study on fatigue damage failure of carbon/carbon composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(2): 386-393. (in Chinese)
- [11] 朱元林.C/C复合材料疲劳寿命预测与分析方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.
ZHU Yuanlin. Study on fatigue life prediction and analysis methods of C/C composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [12] Yang J N, Jones D L, Yang S H, et al. A stiffness degradation model for

- graphite/epoxy laminates[J]. *Journal of Composite Materials*, 1990, 24: 753-769.
- [13] 廖晓玲. 三维编织 C/C 复合材料的疲劳行为以及损伤演变研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- LIAO Xiaoling. Fatigue behavior and damage evolution of three dimensional braided C/C composites[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [14] Shokrich M M, Lessard L B. Multiaxial fatigue behaviour of unidirectional plies based on uniaxial fatigue experiments- II: experimental evaluation[J]. *International Journal of Fatigue*, 1997, 19: 209-217.
- [15] Yao W X, Himmel N. A new cumulative fatigue damage model for fibre-reinforced plastics[J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60(1): 59-64.
- [16] Han K S, Hwang W. Fatigue life prediction and failure mechanisms of composite materials[J]. *Advanced Composite Materials*, 1992, 2(1): 29-50.
- [17] Mao H, Mahadevan S. Fatigue damage model of composite materials[J]. *Composite Structures*, 2002, 58(4): 405-410.
- [18] Song J, Wen W D, Cui H T. Fatigue life prediction model of 2.5D woven composites at various temperatures[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 32(2): 310-329.
- [19] 邱睿, 温卫东, 崔海涛. 考虑纤维体积分量的单向层合板材料退化模型[J]. *材料科学与工程学报*, 2013, 31(5): 728-731.
- QIU Rui, WEN Weidong, CUI Haitao. Material degradation models of unidirectional laminas considering fiber volume fraction[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2013, 31(5): 728-731. (in Chinese)
- [20] Lee J H. An experimental and analytical investigation of the stiffness degradation of graphite/epoxy composite laminates under cyclic loading[D]. Washington: The George Washington University, 1989.
- [21] Chen L, Tao X M, Choy C L. On the micro structure of three-dimensional braided preforms[J]. *Composites Science and Technology*, 1999, 59: 391-404.
- [22] 陈波, 翁少东, 温卫东, 等. 单向碳/碳复合材料高温拉伸行为失效机理研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2021, (2): 91-96.
- CHEN Bo, WENG Shaocong, WEN Weidong, et al. Study on failure mechanism of tensile behavior of unidirectional carbon/carbon composites at high temperature[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021, (2): 91-96. (in Chinese)

(编辑: 刘 静)