

化学气相渗透 2D SiC/SiC 窄带随机振动疲劳损伤与性能退化

刘明扬¹, 王 纯², 程鹏飞², 马雪寒¹, 高祥云³, 由博杰¹,
赵录峰⁴, 成来飞^{1,4}, 张 毅¹

(1. 西北工业大学 超高温结构复合材料重点实验室, 西安 710072; 2. 中国飞机强度研究所, 西安 710065; 3. 西安航空制动科技有限公司, 西安 713106; 4. 西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司, 西安 710051)

摘 要: 随着航空发动机热端部件对高温性能与轻量化的要求日益严苛, SiC/SiC 复合材料凭借其优异的耐高温性、低密度和耐腐蚀性, 成为极具应用潜力的替代材料。然而, 其服役过程中不可避免地承受复杂振动载荷, 振动引发的疲劳损伤已成为限制其工程应用的关键问题。本工作采用化学气相渗透法制备了 2D SiC/SiC 板材, 并加工成两侧具有圆弧状缺口的试样, 在一阶振型下开展了窄带随机振动疲劳试验, 系统揭示其损伤演化过程及拉伸性能退化规律。研究表明, 随着等效应力增大, 2D SiC/SiC 板结构的归一化全时域曲线整体向下偏移, 低应力区的响应表现出显著的分散性。基于微结构图像分析, 2D SiC/SiC 板结构的损伤演化可分为基体损伤、界面损伤和纤维损伤三个阶段, 损伤速率呈现快-慢-快的变化趋势。残余拉伸性能结果表明, 2D SiC/SiC 板结构的拉伸性能呈指数型下降趋势, 当共振频率降幅为 31.9% 时, 其拉伸强度、比例极限应力、弹性模量和回弹模量分别下降至 270.0 MPa、64.1 MPa、106.3 GPa 和 0.020 MJ/m³, 均不足制备态性能的 70%。拉伸断口形貌分析表明, 基体裂纹和纤维磨损是导致拉伸性能退化的关键因素。本研究为评估 2D SiC/SiC 板结构在振动环境下的服役可靠性提供了重要依据和实验支撑。

关 键 词: 2D SiC/SiC; 随机振动; 疲劳损伤; 等效应力; 拉伸性能

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2026)03-0349-10

2D SiC/SiC Manufactured by Chemical Vapor Infiltration: Narrow Band Random Vibration Fatigue Damage and Performance Degradation

LIU Mingyang¹, WANG Chun², CHENG Pengfei², MA Xuehan¹, GAO Xiangyun³,
YOU Bojie¹, ZHAO Lufeng⁴, CHENG Laifei^{1,4}, ZHANG Yi¹

(1. National Key Laboratory of Thermostructural Composite Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. AVIC Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China; 3. Xi'an Aviation Brake Technology Co., Ltd., Xi'an 713106, China; 4. Xi'an Xinyao Ceramic Composite Material Co., Ltd., Xi'an 710051, China)

Abstract: Under demanding service conditions, the operational requirements, namely high-temperature performance and structural weight reduction, in aero-engine hot section components continue to intensify. Silicon carbide fiber reinforced silicon carbide matrix (SiC/SiC) composites are widely recognized as exceptionally promising alternative materials owing to their outstanding high-temperature stability, substantially reduced density and superior corrosion resistance. However, in actual service environments, these composites inevitably experience

收稿日期: 2025-04-29; 收到修改稿日期: 2025-07-17; 网络出版日期: 2025-07-31

作者简介: 刘明扬(2002–), 男, 硕士研究生. E-mail: lmy123@mail.nwpu.edu.cn

LIU Mingyang (2002–), male, Master candidate. E-mail: lmy123@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 张 毅, 副研究员. E-mail: zhangyi@nwpu.edu.cn

ZHANG Yi, associate professor. E-mail: zhangyi@nwpu.edu.cn

complex vibrational loading spectra, which induce fatigue damage accumulation emerging as a critical limiting factor in their practical engineering implementation. In this study, 2D SiC/SiC plates were fabricated by chemical vapor infiltration. Specimens featuring bilateral arc-shaped notches were machined from the plates and subsequently subjected to narrow band random vibration fatigue tests under the first-order vibration mode. This experimental approach was undertaken specifically to investigate the progressive damage evolution process and the accompanying degradation patterns in tensile properties under vibrational fatigue loading. The experimental findings reveal that the normalized full time-domain characteristic curves of the 2D SiC/SiC plate structures exhibit progressive downward displacement while the applied equivalent stress amplitude increases. These curves concurrently manifest pronounced statistical dispersion throughout low-stress loading regime. Based on microstructural analyses, the damage evolution within the 2D SiC/SiC plate structure can be classified into three distinct and sequential stages: the initial matrix damage stage, the subsequent interface damage stage, and the final fiber damage stage. Quantitatively, the damage progression rate follows a distinct correlated three stage evolution—commencing with rapid progression, then transitioning to reduced propagation velocity, and lastly culminating in accelerated damage advancement. Residual tensile properties demonstrate that the tensile characteristics of the 2D SiC/SiC plate structure follow an exponential decline trend. At a resonance frequency reduction of 31.9%, the tensile strength, proportional limit stress, elastic modulus, and resilience modulus have degraded to 270.0 MPa, 64.1 MPa, 106.3 GPa, and 0.020 MJ/m³, respectively, all falling below 70% of the corresponding values in the as-fabricated pristine state. Subsequent analyses of the tensile fracture surface reveal matrix cracking and pronounced fiber wear as the dominant damage mechanisms responsible for the significant degradation observed in the tensile properties of the vibration fatigued composite structure. These findings provide a critical experimental basis for assessing the service reliability of 2D SiC/SiC plate structures under vibrational service conditions.

Key words: 2D SiC/SiC; random vibration; fatigue damage; equivalent stress; tensile property

SiC/SiC 复合材料具有优异的比强度、比刚度、耐热性、耐磨性及较低的热膨胀系数等性能^[1-4], 在高温环境中能保持良好的力学性能, 因此成为涡轮叶片、燃烧室等热端部件的首选材料。近年来, 研究者们已深入探讨了 SiC/SiC 应力-应变关系^[5]、失效行为^[6-9]和热冲击行为^[10-11]等, 为其实际应用奠定了坚实的理论基础。

随着 SiC/SiC 服役环境和结构的复杂性增加, 振动疲劳失效占比不断上升^[12-14]。振动疲劳是指当动态交变载荷的频率与结构的自然频率接近时, 产生的强烈共振作用导致构件发生疲劳破坏^[15-17]。与静态疲劳相比, 振动疲劳涉及结构模态响应及阻尼力, 表现出不同特性^[18-22]。因此, 深入研究 SiC/SiC 结构在振动环境下的疲劳性能对于延长其使用寿命和拓宽其应用领域至关重要。

振动试验中的振动环境可分为确定性振动和随机振动。由于实际工况复杂多变, 工程上常采用随机振动环境进行测试。随机信号处理方法包括基于

时间历程的时域法和基于功率谱密度 (Power Spectral Density, PSD) 函数的频域法。时域法主要通过雨流循环计数技术从随机响应中提取应力或应变状态^[23-24], 理论上可全面描述随机信号的特征, 但计算成本过高, 因此工程中一般使用频域法。频域法基于傅里叶变换, 将时域信号转变为频域信号, 并通过滤波等手段提取特定频率范围内的随机信号, 从而在数值计算上实现显著提升^[25-27]。

目前, 关于板结构随机振动疲劳的研究主要集中在其失效模式分析与使用寿命预测两个方面。已有研究证明, 板结构在一阶振型下的振动疲劳失效表现出典型的拉伸失效特征^[28], 损伤的主要驱动力来自反向弯曲载荷在上、下表面产生的拉伸力^[29]。然而, 对 SiC/SiC 在振动过程中损伤演化及力学性能退化规律的研究相对较少。

本研究采用化学气相渗透 (Chemical Vapor Infiltration, CVI) 法制备了 2D SiC/SiC 板材, 将其加工成两侧带有圆弧状缺口的试样, 并在一阶振型下

进行了随机振动疲劳试验。通过分析归一化全时域曲线变化趋势,并结合振动损伤形式,揭示了 2D SiC/SiC 板结构损伤演化过程。随后,通过分析不同损伤下的拉伸断口,探讨其拉伸性能退化规律。

1 实验方法

1.1 2D SiC/SiC 的制备

试验采用 CVI 法制备 2D SiC/SiC, 选用 Cansas III SiC 纤维束(Cansas3303, 福建立亚公司, 中国)。该纤维束的线密度为 189 tex, 平均直径为 3.10 μm , 拉伸强度为 3.72 GPa, 拉伸模量为 386.7 GPa。

首先通过平纹编织法制备纤维布, 然后将纤维布叠层并采用穿刺编织技术制成二维预制体, 接着利用 CVI 依次沉积 BN 界面和 SiC 基体。BN 界面相的沉积工艺参数如下: 三氯化硼(105 mL/min)和氨气(175 mL/min)为前驱体, 氢气(480 mL/min)为载气, 氩气(480 mL/min)为稀释气体, 沉积温度为 650 $^{\circ}\text{C}$, 系统总压控制在 1~2 kPa。SiC 基体的沉积工艺参数如下: 一甲基三氯硅烷(纯度 $\geq 98.0\%$)为前驱体, 氢气(1.8 L/min)为载气, 氩气(2.0 L/min)为稀释气体, 沉积温度为 1150 $^{\circ}\text{C}$, 系统总压控制在 3~5 kPa。最终制备的 2D SiC/SiC 板材密度约为 2.6 g/cm³, 孔隙率在 10%~15%之间, 其结构示意图如图 1(a)所示。随后在其两侧加工圆弧状缺口, 并在一端设置两个通孔用于固定试样。图 1(b)展示了 2D SiC/SiC 试样的具体形状及尺寸。

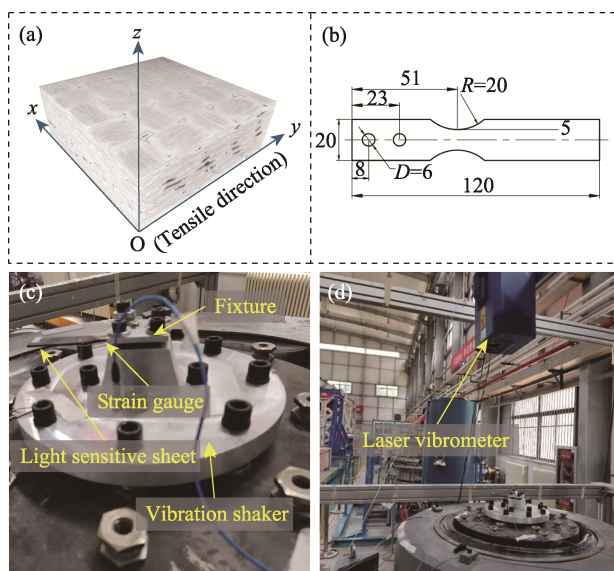


图 1 2D SiC/SiC 的预制体结构(a)、试样形状设计(b)及随机振动测试系统(c, d)

Fig. 1 Preform structure (a), specimen shape design (b) and vibration testing system (c, d) of 2D SiC/SiC

Unit: mm

1.2 随机标定试验

图 2 展示了在一阶振型下激励信号的频带设计。其中, f_0 为频带的中心频率, 取值为试样一阶振型下的共振频率; δf 为频带带宽, 取值为 $0.231 f_0$ [29]; $f_0 - \delta f/2$ 和 $f_0 + \delta f/2$ 分别为下限频率和上限频率; σ_0 为激励信号的强度, 用 PSD 函数来表示。

考虑到 2D SiC/SiC 力学性能的分散性, 对每个试样进行随机标定试验。首先进行 0.2g 振动载荷的正弦扫频试验, 以确定共振频率; 然后在五个逐级递增的振动载荷下进行短时随机振动, 并记录该时间内应变响应历史。计算不同振动载荷下应变响应历史的均方根(Root Mean Square, RMS)值, 绘制出应变-载荷标定曲线。对于各态历经的随机信号, 任意一个时间样本都能够代表整个时域上的信号特征。

在随机标定试验中, 正弦扫频选择的振动载荷较小, 且随机标定试验加载时间仅为 90 s, 因此, 随机标定试验对试样造成的损伤可忽略不计。

1.3 窄带随机振动试验

2D SiC/SiC 窄带随机振动试验测试系统示意图如图 1(c, d)所示。随机振动疲劳试验采用悬臂式振动方法, 试样一端固定, 另一端悬空。在缺口位置的正反面粘贴应变片(BE120-4AA-Q150-QT, 中航电测仪器有限公司, 中国)用于监测应变响应; 在自由端粘贴感光片, 激光测振仪(POLYTEC OFV-5000, Polytec, 德国)位于其正上方, 监测加速度响应。试样固定在振动台(DL-4000, 苏州苏试试验有限公司, 中国)上, 通过振动控制仪(ECON, 温州市亿恒自动化科技有限公司, 中国)调节激励信号的振动强度。

表 1 列出了 2D SiC/SiC 试样编号、正弦扫频结果及通过随机标定试验获得的试验参数。一共 7 个试样, 其中一个为测试样, 只进行随机标定试验, 并记录其应变响应历史和加速度响应历史, 以研究

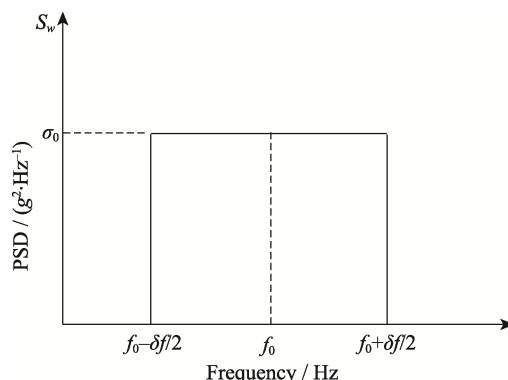


图 2 窄带随机振动试验激励信号频带

Fig. 2 Frequency band of narrow band excitation signal

2D SiC/SiC 板结构随机振动响应特性; 其余试样分别命名为 No.V1~No.V6, 字母 V 代表振动。在随机振动疲劳试验中, 疲劳应力比为-1, 预设进行 2×10^7 次振动循环。实验过程中记录试样的共振频率变化, 当达到目标循环次数或试样共振频率偏离振动监测范围时, 停止实验。

1.4 残余拉伸性能测试

将振动后的 2D SiC/SiC 试样安装在万能力学试验机(3367, INSTRON, 英国)上, 使用应变片记录试样圆弧缺口段在拉伸断裂中的应变。

1.5 表征与分析

采用计算机断层扫描(Computed Tomography, CT, AX2000, 奥影检测科技有限公司, 中国)观察 2D SiC/SiC 试样在振动疲劳前后的损伤情况。使用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM, SU3800, 日立公司, 日本)观察振动前后圆弧缺口处侧面、截面及拉伸断口的形貌。

2 结果与讨论

2.1 制备态 2D SiC/SiC 拉伸性能

2D SiC/SiC 试样单轴拉伸应力-应变曲线如图 3 所示。根据曲线特征, 可将其分为三个阶段: 线弹性阶段、非线性阶段和准线性阶段。在线弹性阶段, 曲线呈直线型上升, 由于负载较小, 基体中未出现微裂纹扩展, 因此在卸载外力后, 样品的变形能够完全恢复, 尚未产生损伤。此阶段的临界应力被定义为比例极限应力 σ_p 。在非线性阶段, 随着应力水平的提高, 材料内部同时发生新裂纹的萌生和初始裂纹的扩展, 损伤逐渐加剧。纤维和基体界面阻碍裂纹扩展, 但是随着外力增大, 裂纹会在界面处偏转, 摩擦作用增强, 从而导致应力-应变曲线呈现出非线性特征。在准线性阶段, 基体中的裂纹达到饱和, 载荷主要由纤维束承担, 曲线再次呈线性上升, 直至断裂破坏。

表 2 列出了三个制备态 2D SiC/SiC 试样的拉伸性能参数, 包括拉伸强度、比例极限应力、弹性模量和回弹模量。拉伸试验共测试三个试样, 分别标记为 No.T1~No.T3, 字母 T 代表拉伸。由于制备过程中存在缺陷, 以及缺陷分布的随机性, 即使用同一块板材制备的试样, 其性能也会存在一定程度的分散性。这种性能的分散性同时也导致了表 1 中不同试样正弦扫频结果的差异。

2.2 2D SiC/SiC 随机振动响应特性

图 4(a)为 2D SiC/SiC 测试样在 $1.8g^2/Hz$ 下的应变响应历史。在描述时间历程信号幅值特性时, 常用的统计量包括均值、标准差和 RMS 值。均值用于描述信号的集中趋势, 标准差反映信号的散布程度, 而 RMS 值则综合反映信号的集中趋势与离散程度, 其计算公式如下:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$
 (1)

式中, T 为振动总时间; $x(t)$ 为应变响应的时域历程; t 为时间。RMS 反映了振动过程中试样整体应变响应水平, 其值与振动载荷成正相关。

将测试样在不同振动载荷下的加速度响应历史曲线进行傅里叶变换, 以获得频域信号, 具体计算公式见补充材料。曲线的峰值频率对应该振动载荷下的共振频率, 其结果如图 4(b)所示。结果表明, 尽管 2D SiC/SiC 的响应强度与振动载荷呈正相关, 但其共振频率却出现相反的趋势。因此, 在随机振动疲劳试验中, 需要根据选择的振动载荷重新设置振动频带。

表 1 2D SiC/SiC 试样随机振动试验参数
Table 1 Parameters of 2D SiC/SiC specimens for random vibration test

Specimen	Resonance frequency/Hz	Vibration load/ ($g^2 \cdot Hz^{-1}$)	Strain RMS, $\mu\epsilon$
No.V1	325.00	1.01	430
No.V2	317.65	1.01	430
No.V3	326.00	0.91	430
No.V4	309.66	2.88	450
No.V5	315.05	5.00	530
No.V6	315.05	0.99	400

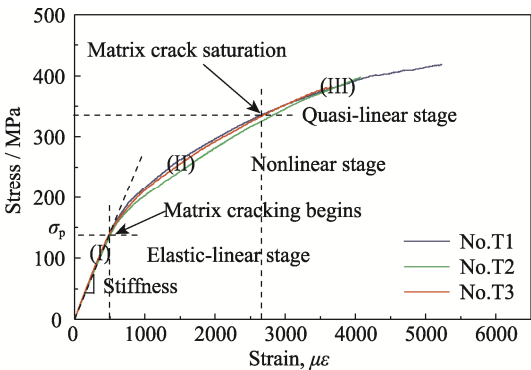


图 3 制备态 2D SiC/SiC 试样的拉伸应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves of as-received 2D SiC/SiC specimen
Colorful figure is available on website

表 2 制备态 2D SiC/SiC 的拉伸性能
Table 2 Tensile properties of as-received 2D SiC/SiC

Property	No.T1	No.T2	No.T3	Average	Standard error
Tensile strength/MPa	418.5	397.8	382.2	399.5	18.2
Proportional limit stress/MPa	131.8	132.6	133.0	132.5	0.6
Elastic modulus/GPa	282.3	267.5	276.0	275.3	7.4
Rebound modulus/(MJ·m ⁻³)	0.035	0.032	0.031	0.033	0.002

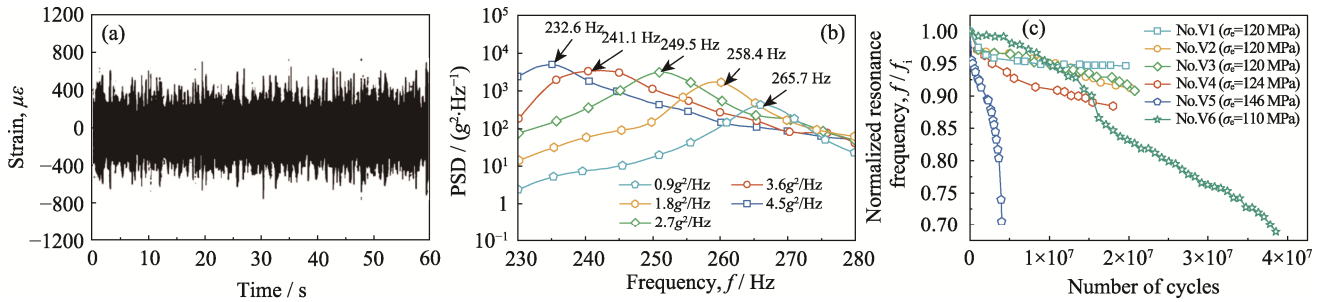


图 4 2D SiC/SiC 的应变时域曲线(a)、加速度功率谱密度(b)与随机振动试验归一化全时域曲线(c)
Fig. 4 Strain time-domain response curves (a), acceleration power spectral density response curves (b) and normalized full-time domain curves of random vibration test (c) of 2D SiC/SiC

表 3 2D SiC/SiC 随机振动试验结果
Table 3 Results of 2D SiC/SiC random vibration test

Specimen	Equivalent stress, σ_e /MPa	Initial resonance frequency, f_i /Hz	Terminal resonance frequency/Hz	Decrease in resonance frequency, Δf /%	Number of cycles
No.V1	120	285.63	270.31	5.3	1.96×10^7
No.V2	120	282.81	257.81	8.8	2.02×10^7
No.V3	120	289.38	262.81	9.2	2.07×10^7
No.V4	124	273.56	242.07	14.1	1.80×10^7
No.V5	146	268.80	196.29	26.9	4.00×10^6
No.V6	110	299.06	203.75	31.9	3.85×10^7

2.3 2D SiC/SiC 随机振动疲劳试验结果

表 3 列出了 2D SiC/SiC 试样的随机振动疲劳试验结果。可以观察到, 所有试样的共振频率均发生了一定程度的下降。将振动等效应力 σ_e 定义为

$$\sigma_e = \bar{E} \cdot \text{RMS} \tag{2}$$

式中, $\bar{E}$ 为 2D SiC/SiC 的平均弹性模量。在 $\sigma_e < \sigma_p$ 时 ($\sigma_e = 120、124 \text{ MPa}$), 试样均能达到 2×10^7 次目标循环次数, 其共振频率降幅 Δf 分别为 5.3%、8.8%、9.2%和 14.1%。而当 $\sigma_e > \sigma_p$ 时 ($\sigma_e = 146 \text{ MPa}$), 试样在 4×10^6 次振动循环时终止试验, 其 $\Delta f = 26.9\%$ 。考虑到试样 No.V6 选取的 σ_e 较小, 其共振频率变化可能较小, 因此将振动循环延长至 3.85×10^7 次, 试验结束后的 $\Delta f = 31.9\%$ 。由于试样的共振频率变化较大, 实验中多次调整频带位置, 以追踪共振频率的变化。

图 4(c)展示了 2D SiC/SiC 试样在随机振动疲劳

试验中共振频率变化的归一化全时域曲线。可以看出, 整体曲线随着 σ_e 的增大而向下偏移, 振动初期在短时间内快速下降, 随后下降速率减缓。在 $\sigma_e < \sigma_p$ 的低应力水平下, 全时域曲线表现出明显的分散性。即使 σ_e 相等, 曲线末端也出现了明显分离。而当 $\sigma_e = 110 \text{ MPa}$ 时, 全时域曲线在 5×10^6 次振动循环时便以较快速率下降, 达到 2×10^7 次振动循环时 Δf 达到 17%, 已明显超过 120 和 124 MPa 两个应力。在 $\sigma_e > \sigma_p$ 的高应力水平下, 全时域曲线快速下降并脱离监测范围, 试验终止。

2.4 2D SiC/SiC 随机振动疲劳损伤分析

采用 CT 观察 2D SiC/SiC 试样在制备态及应力水平 $\sigma_e = 124、146 \text{ MPa}$ 下的上表面与横截面图像, 结果如图 5 所示。振动试验后, 试样缺口处部分表层基体发生脱落, 且脱落现象随着应力水平的增加

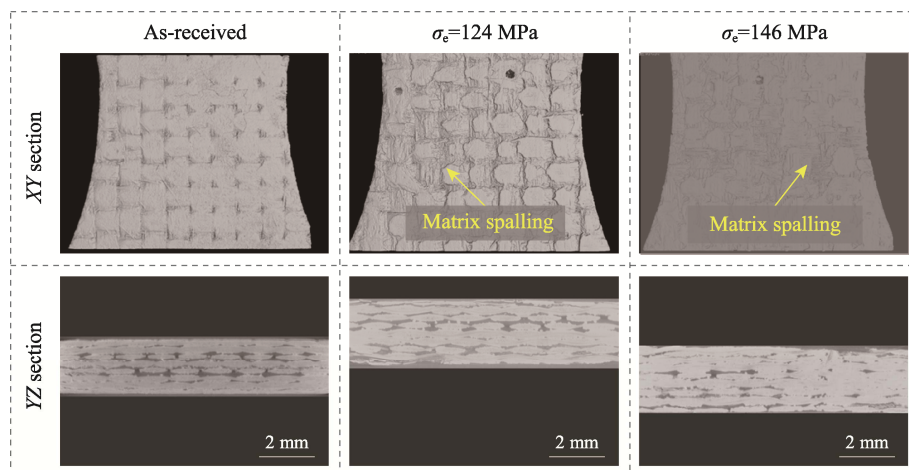


图 5 2D SiC/SiC 的 CT 扫描图像
Fig. 5 CT scan images of 2D SiC/SiC

而愈发明显。然而,在两个不同应力水平下的截面图像中,未观察到明显裂纹,这主要是CT分辨率不足所致。

通过 SEM 观察制备态和 $\sigma_e=124$ 、 146 MPa 试样的侧面损伤情况,结果如图 6 所示。可以观察到,随着 σ_e 的增大,试样侧表面的损伤程度逐渐加剧。制备态试样侧面的表层基体致密,未发现裂纹;在 $\sigma_e=124$ MPa 下,试样侧面出现一些较长的裂纹;而在 $\sigma_e=146$ MPa 下,基体裂纹数量明显增加,且在较大放大倍数下可以观察到完全暴露的纤维。

振动后的试样从缺口中间位置进行切割和抛光处理,通过 SEM 观察试样内部的损伤情况,结果如图 7 所示。振动过程中,试样内部的损伤主要表现为基体开裂和界面脱黏。在 $\sigma_e=124$ MPa 下,基体内裂纹较少,界面处仅发生小幅度的偏移。在 $\sigma_e=146$ MPa

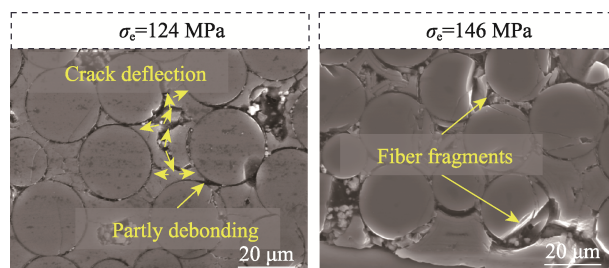


图 7 2D SiC/SiC 试样截面 SEM 照片
Fig. 7 Cross-sectional SEM images of 2D SiC/SiC specimens

下,试样内部存在大量的基体裂纹,裂纹在界面处偏转并沿着界面扩展,导致大面积脱黏。在脱黏严重的区域中可见 SiC 基体碎片以及纤维边缘破损。

材料的共振频率对损伤变化敏感^[30],归一化全时域曲线的下降趋势直接反映了试样的损伤速率。结合微结构分析,2D SiC/SiC 板结构在振动中的损伤演化可以分为三个阶段,如图 8 所示。第(I)阶段为基体损伤阶段,试样表面纤维的不连续性导致承载能力弱,增加了应力集中风险,振动初期易产生裂纹并迅速扩展,造成表层基体脱落,损伤在短时间内快速积累。一旦新产生的裂纹或试样内部随机存在的微裂纹在振动作用下扩展至界面达到饱和时,则进入损伤累积的第(II)阶段。在此阶段下,损伤形式主要为裂纹偏转与界面脱黏,损伤主要集中在界面处,损伤积累速率与 σ_e 呈正相关,且相较于第(I)阶段速率较慢。此外,在此阶段内的循环次数在低应力水平下表现出极大的分散性,这与内部缺陷的随机分布、纤维层数量或 SiC 基体本身的脆性等因素有关。第(III)阶段为纤维损伤阶段,界面处产生了较大程度的脱黏,振动后期基体与纤维发生相对滑动,损失加剧。同时,破损的基体碎片进入界面,进一步加剧了纤维与基体的摩擦,损伤积累速率加

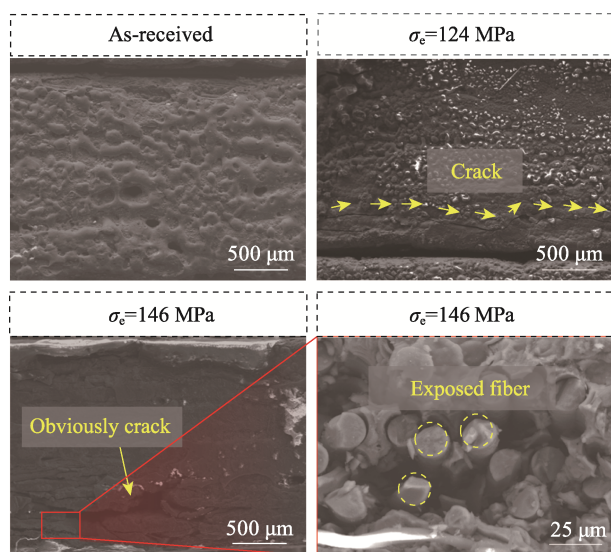


图 6 2D SiC/SiC 试样侧面 SEM 照片
Fig. 6 Side view SEM images of 2D SiC/SiC specimens

快。在随机振动疲劳试验中, 试样 No.V1、No.V2、No.V3 和 No.V4 在振动结束时仍处于第(II)阶段, 而试样 No.V5 和 No.V6 则完整经历了上述三个阶段的损伤演化过程。

2.5 2D SiC/SiC 残余拉伸性能

对制备态及 Δf 分别为 5.3%、8.8%、9.2%和 31.9%的 2D SiC/SiC 试样进行拉伸试验, 结果如图 9(a)所示。长时间振动后, 试样的应力-应变曲线整体下移, 且随 Δf 的增大表现出指数型下降趋势。当 $\Delta f=31.9\%$ 时, 其拉伸强度、比例极限应力、弹性模量和回弹模量分别退化至 270.0 MPa、64.1 MPa、106.3 GPa 和 0.020 MJ/m³, 均不足制备态性能的 70%。通过公式(3)对性能退化数据进行拟合, 拟合曲线如图 9(b~e)所示。

$$y = y_0 + a(e^{-\Delta f/b} - 1) \tag{3}$$

式中, y 为对应的拉伸性能; y_0 为初始性能值; a 和 b 为拟合参数。不同性能对应的拟合参数见表 4。

图 10 展示了 2D SiC/SiC 试样在不同 Δf 下的拉伸断口形貌和基体裂纹间距 l_c 的变化。制备态断口相对平整, 随着 Δf 的增大, 层间滑移程度逐渐增强。这表明, 在随机振动疲劳过程中, 试样基体损伤积累导致层间结合强度持续下降。从表 5 可见, 随着损伤的累积, 试样的平均 l_c 随 Δf 增大先减小后增大。在拉伸过程中, 应力的主要承载区域为径向(拉伸方向)的纤维束, 基体和纤维的弹性模量不同, 应变不同, 从而在界面处产生剪应力, 导致基体发生周期性开裂。 l_c 可表示为^[31]

$$l_c = \left(\frac{V_m}{V_f} \right) \frac{\sigma_{mu} r}{2\tau} \tag{4}$$

式中, V_m 为基体体积分数; V_f 为纤维体积分数; σ_{mu} 为基体开裂应力, 近似等于试样的 σ_p ; r 为纤维半径; τ 为因弹性模量不匹配产生的剪应力。在振动过程中, V_m 、 V_f 和 r 的变化较小, 可视为常数。当 Δf 较小时, 损伤主要集中在基体, σ_{mu} 显著降低, 而 τ 变化不明显, 导致 l_c 相较于制备态出现下降。随着 Δf 增大, 试样内部产生大量界面脱黏, 模量失配导致的剪应力可以通过纤维与基体相对滑动得到补偿, τ 快速降低。尽管 σ_{mu} 仍在减小, 但其对 l_c 的影响逐渐小于 τ , 因此在 $\Delta f=31.9\%$ 时, l_c 增大。

图 11 展示了在不同 Δf 下 2D SiC/SiC 试样纤维的拔出长度和损伤情况。随着 Δf 的增大, 界面大量

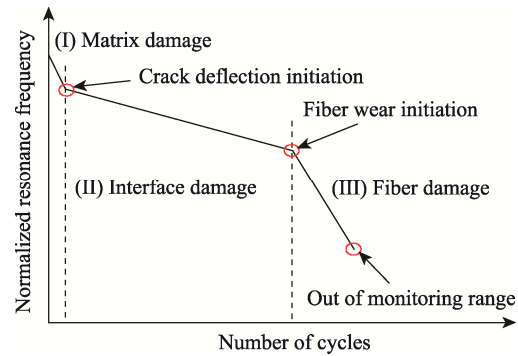


图 8 2D SiC/SiC 损伤演化的三个阶段
Fig. 8 Three stages of damage accumulation process of 2D SiC/SiC

表 4 随机振动疲劳后的残余拉伸性能拟合参数 a 和 b
Table 4 Fitting parameters a and b for residual tensile properties after random vibration fatigue

Tensile property	a	b	Goodness of fitting, R^2
Tensile strength	132.71	12.54	0.89
Proportional limit stress	66.67	6.82	0.97
Elastic modulus	183.71	14.12	0.95
Rebound modulus	0.01285	9.168	0.93

表 5 2D SiC/SiC 基体裂纹间距
Table 5 Matrix crack spacings of 2D SiC/SiC

Decrease in resonance frequency, $\Delta f/\%$	Matrix crack spacings, $l_c/\mu\text{m}$			Average value/ μm	Standard error/ μm
0	134	196	169	166.3	25.38
5.3	98	100	66	88.0	15.58
8.8	127	48	58	78.7	35.12
9.2	258	94	187	179.7	67.15
31.9	215	182	178	191.7	16.58

脱黏导致其强度持续下降, 拉伸时应力沿纤维径向传导的距离变长, 纤维拔出长度增加。少量纤维侧面出现明显磨损, 并在磨损严重处断裂, 这表明纤维的承载能力因磨损而降低。

综上所述, 2D SiC/SiC 板结构在随机振动疲劳过程中的损伤显著影响了其拉伸性能, 退化速率与损伤演化过程相关联。在基体损伤阶段, 基体中快速产生大量裂纹, 导致基体的承载能力大幅下降, 拉伸性能迅速退化。随着 Δf 逐渐增大, 纤维逐渐成为主要承载组元, 拉伸性能主要取决于纤维性能。由于仅有少量纤维磨损, 纤维整体性能的退化速率较慢, 因此试样的拉伸性能退化逐渐减缓, 表现出指数型下降的趋势。

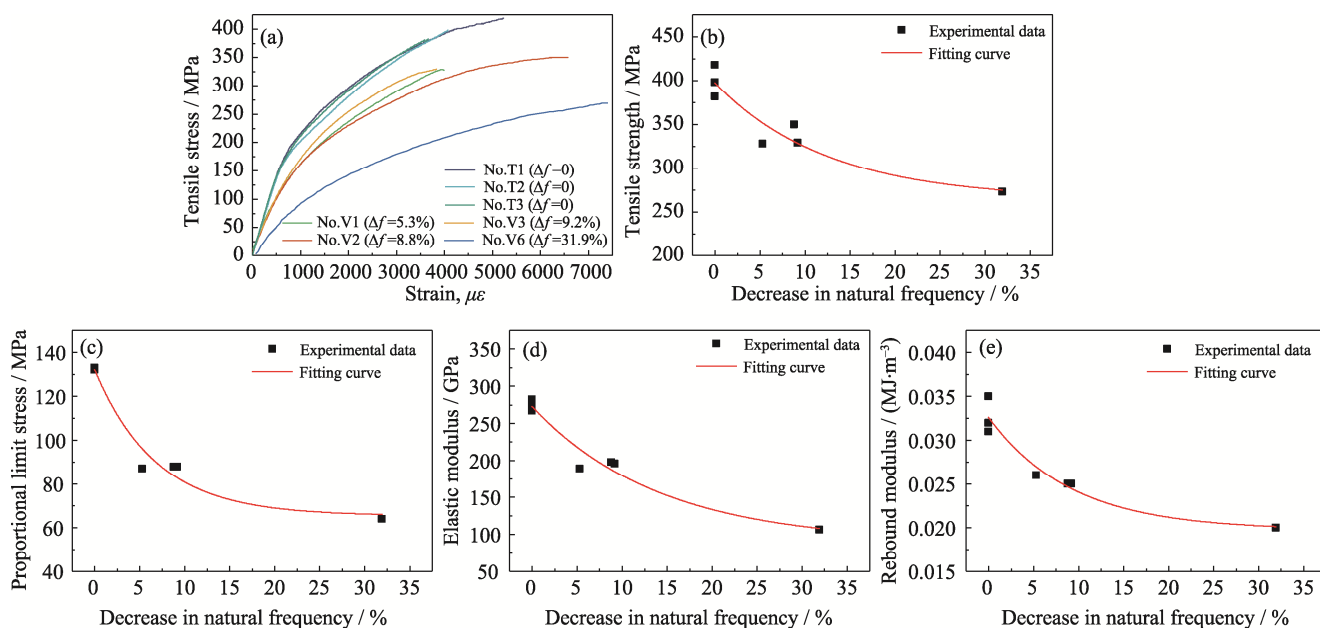


图 9 2D SiC/SiC 拉伸性能变化

Fig. 9 Degradation in tensile properties of 2D SiC/SiC

(a) Stress-strain curves; (b) Tensile strength; (c) Proportional limit stress; (d) Elastic modulus; (e) Rebound modulus
Colorful figures are available on website

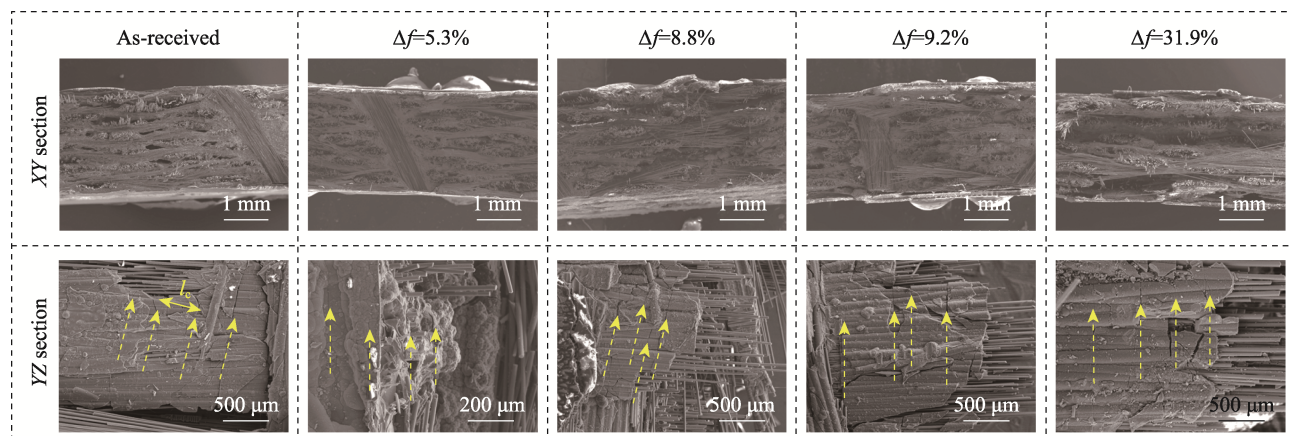


图 10 2D SiC/SiC 的拉伸断口与基体裂纹间距

Fig. 10 Tensile fracture morphology and matrix crack spacing of 2D SiC/SiC

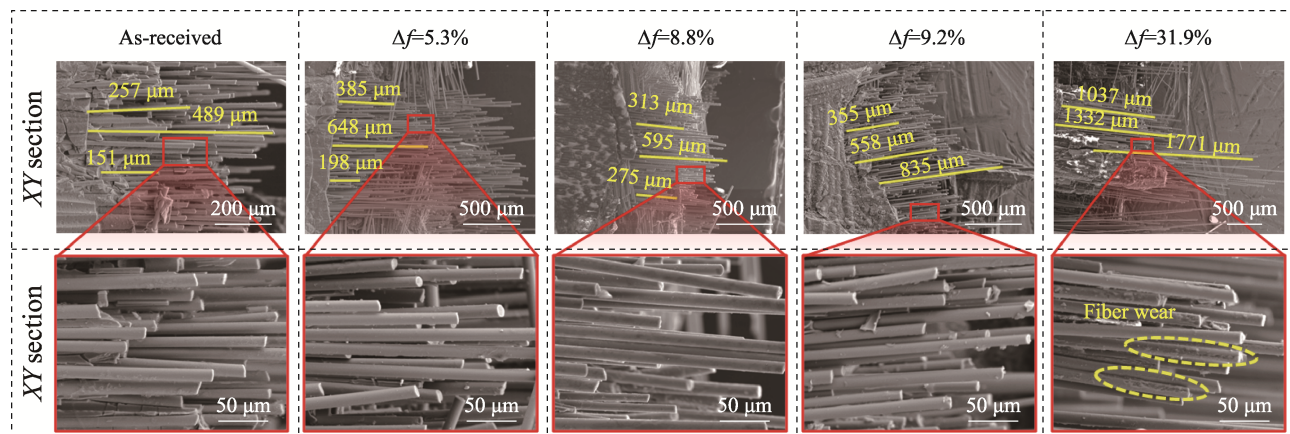


图 11 2D SiC/SiC 纤维拔出长度与损伤情况

Fig. 11 Fiber pull-out length and damage evolution of 2D SiC/SiC

3 结论

(1) 采用 CVI 法制备了 2D SiC/SiC 板材, 将其加工成两侧具有圆弧状缺口的试样, 并用振动等效应力 σ_e 衡量振动载荷。当 $\sigma_e=120$ MPa 时, 共振频率降幅 Δf 分别为 5.3%、8.8%、9.2%, 全时域曲线末端出现分离。而当 $\sigma_e=110$ MPa 时, 试样经 2×10^7 次振动循环后, Δf 达到 17%, 表明在低应力水平 ($\sigma_e < \sigma_p$) 下, 2D SiC/SiC 板结构的振动损伤具有较大的分散性。在 $\sigma_e=146$ MPa 的高应力水平 ($\sigma_e > \sigma_p$) 下, 全时域曲线快速下降, 超出试验监测范围, Δf 达到 26.9%。

(2) 2D SiC/SiC 板结构的随机振动疲劳损伤表现为基体开裂、界面脱黏和纤维磨损。结合归一化全时域曲线, 振动损伤演化可分为三个阶段。基体损伤阶段, 应力集中区域产生的新裂纹与基体中随机分布的微裂纹迅速扩展, 损伤在短时间内快速累积; 界面损伤阶段, 裂纹扩展至界面后发生偏转, 界面开始脱黏, 损伤速度减缓; 纤维损伤阶段, 界面大量脱黏后, 基体与纤维发生相对滑动, 导致纤维磨损, 损伤速度加快。

(3) 由于振动损伤, 2D SiC/SiC 板结构的拉伸性能明显退化, 呈指数型下降趋势。当 $\Delta f=31.9\%$ 时 ($\sigma_e=110$ MPa), 其拉伸强度、比例极限应力、弹性模量和回弹模量分别降至 270.0 MPa、64.1 MPa、106.3 GPa 和 0.020 MJ/m³, 均不足制备态性能的 70%。通过拉伸断口形貌分析发现, 基体损伤阶段产生的大量裂纹导致振动开始后拉伸性能迅速下降。随着 Δf 的增大, 纤维逐渐成为主要承载组成部分, 由于其磨损较慢, 振动后期拉伸性能的退化速率逐渐减缓。

补充材料:

本文相关补充材料请登录 <https://doi.org/10.15541/jim20250184> 查阅。

参考文献:

- [1] LIU X, SHEN X L, GONG L D, *et al.* Multi-scale thermodynamic analysis method for 2D SiC/SiC composite turbine guide vanes. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, **31**(1): 117.
- [2] GAO X Y, YOU B J, MA X H, *et al.* Understanding fiber preform effects on tensile strengths of SiC/SiC composites prepared by chemical vapor infiltration based on a unified fiber bundle bending view. *Materials Characterization*, 2024, **217**: 114341.
- [3] 马雪寒, 王守财, 陈旭, 等. 陶瓷基复合材料紧固件制造技术及其连接性能研究进展. *复合材料学报*, 2023, **40**(6): 3075.
- [4] YOU B J, WANG X, LI B, *et al.* Microstructural evolution and phase transformation of Cansas 3303 SiC fibers during thermal shock at 1200 °C. *Ceramics International*, 2024, **50**(21): 42035.
- [5] MA X H, ZHAO L F, ZHANG Y, *et al.* Uncertainty analysis and B-basis value of tensile strength of 2D SiC/SiC composite. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, **24**: 7058.
- [6] LI X, PAN K, ZHANG F, *et al.* An overview of tensile and shear failure mechanisms of silicon carbide-based ceramic matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, **33**: 2924.
- [7] GAO X, LEI B, ZHANG Y, *et al.* Identification of microstructures and damages in silicon carbide ceramic matrix composites by deep learning. *Materials Characterization*, 2023, **196**: 112608.
- [8] KANG F, MEI H, GAO X, *et al.* Three-dimensional *in-situ* observation and cohesive zone modeling of tension-induced delamination of two-dimensional C/SiC composites via deep learning-based damage identification. *Carbon*, 2025, **233**: 119842.
- [9] ZHANG Y, ZHANG L T, LIU Y S, *et al.* Oxidation effects on in-plane and interlaminar shear strengths of two-dimensional carbon fiber reinforced silicon carbide composites. *Carbon*, 2016, **98**: 144.
- [10] LI B, CHEN X, TIAN L L, *et al.* *In-situ* formation of the BSG bubbles toward SiC/SiC composites protection mechanisms under thermal shock treatment. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, **26**: 7097.
- [11] YOU B J, LI B, LI X Q, *et al.* Thermal shock damage and in-plane shear performance degradation of 2D SiC/SiC at medium temperature. *Journal of Inorganic Materials*, 2024, **39**(12): 1367.
- [12] LU Y H, XIANG P L, DONG P, *et al.* Analysis of the effects of vibration modes on fatigue damage in high-speed train bogie frames. *Engineering Failure Analysis*, 2018, **89**: 222.
- [13] GE J R, SUN Y, XU J, *et al.* Fatigue life prediction of metal structures subjected to combined thermal-acoustic loadings using a new critical plane model. *International Journal of Fatigue*, 2017, **96**: 89.
- [14] HABTOUR E, SRIDHARAN R, DASGUPTA A, *et al.* Phase influence of combined rotational and transverse vibrations on the structural response. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, **100**: 371.
- [15] ANGELI A, CORNELIS B, TRONCOSSI M. Synthesis of sine-on-random vibration profiles for accelerated life tests based on fatigue damage spectrum equivalence. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, **103**: 340.
- [16] AYKAN M, ÇELİK M. Vibration fatigue analysis and multi-axial effect in testing of aerospace structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, **23**(3): 897.
- [17] MILOŠEVIĆ I, RENHART P, WINTER G, *et al.* A new high frequency testing method for steels under tension/compression loading in the VHCF regime. *International Journal of Fatigue*, 2017, **104**: 150.
- [18] MRŠNIK M, SLAVIČ J, BOLTEŽAR M. Multiaxial vibration fatigue—a theoretical and experimental comparison. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, **76**/77: 409.
- [19] LI L. Modeling temperature-dependent vibration damping in C/SiC fiber-reinforced ceramic-matrix composites. *Materials*, 2020, **13**(7): 1633.
- [20] ELLYSON B, CHEKIR N, BROCHU M, *et al.* Characterization of bending vibration fatigue of WBD fabricated Ti-6Al-4V. *International Journal of Fatigue*, 2017, **101**: 36.

- [21] COSTA P, VIEIRA M, REIS L, *et al.* New specimen and horn design for combined tension and torsion ultrasonic fatigue testing in the very high cycle fatigue regime. *International Journal of Fatigue*, 2017, **103**: 248.
- [22] LIU L, LV B Y, HE T R. The stochastic dynamic snap-through response of thermally buckled composite panels. *Composite Structures*, 2015, **131**: 344.
- [23] VASSILOPOULOS A P. Introduction to the fatigue life prediction of composite materials and structures: past, present and future prospects//VASSILOPOULOS A P. *Fatigue Life Prediction of Composites and Composite Structures*. Switzerland: Woodhead Publishing Limited, 2010: 1–44.
- [24] WU S D, SHANG D G, ZUO L X, *et al.* Vibration fatigue life prediction method for needled C/SiC composite based on frequency response curve with low signal strength. *International Journal of Fatigue*, 2023, **168**: 107407.
- [25] WOLFSTEINER P. Fatigue assessment of non-stationary random vibrations by using decomposition in Gaussian portions. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, **127**: 10.
- [26] XIA J, YANG L, LIU Q X, *et al.* Comparison of fatigue life prediction methods for solder joints under random vibration loading. *Microelectronics Reliability*, 2019, **95**: 58.
- [27] BRACCESI C, CIANETTI F, LORI G, *et al.* Evaluation of mechanical component fatigue behavior under random loads. *International Journal of Fatigue*, 2014, **61**: 141.
- [28] WU S D, SHANG D G, ZUO L X, *et al.* Notch fatigue behavior of needled C/SiC composite under random vibration loading. *Ceramics International*, 2022, **48(6)**: 8349.
- [29] WU Z W, LIANG J, FU M Q, *et al.* Study of random fatigue behavior of C/SiC composite thin-wall plates. *International Journal of Fatigue*, 2018, **116**: 553.
- [30] WANG Y N, GONG Y, ZHANG Q, *et al.* Fatigue behavior of 2.5D woven composites based on the first-order bending vibration tests. *Composite Structures*, 2022, **284**: 115218.
- [31] EVANS A G. The mechanical performance of fiber-reinforced ceramic matrix composites. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 1989, **107**: 227.
- [32] BRACCESI C, CIANETTI F, TOMASSINI L. Random fatigue. A new frequency domain criterion for the damage evaluation of mechanical components. *International Journal of Fatigue*, 2015, **70**: 417.

补充材料:

化学气相渗透 2D SiC/SiC 窄带随机振动疲劳损伤与性能退化

刘明扬¹, 王纯², 程鹏飞², 马雪寒¹, 高祥云³, 由博杰¹,
赵录峰⁴, 成来飞^{1,4}, 张毅¹

(1. 西北工业大学 超高温结构复合材料重点实验室, 西安 710072; 2. 中国飞机强度研究所, 西安 710065; 3. 西安航空制动科技有限公司, 西安 713106; 4. 西安鑫垚陶瓷复合材料股份有限公司, 西安 710051)

S1 随机信号频域分析

选择各态历经的平稳随机信号作为激励源, 结构组件中的不规则响应可用时域信号 $x(t)$ 来表示^[32]。平稳随机振动的自相关函数 $R_{xx}(t_1, t_2)$ 仅与时间差 τ 有关, 记为 $R_{xx}(\tau)$, 可由下式计算:

$$R_{xx}(\tau) = E[x(t)x(t+\tau)] \quad (S1)$$

其中, $E[\cdot]$ 为均值; t 为时间。对于均值为零的平稳随机过程 $x(t)$, 其功率谱密度(PSD)通过自相关函数的傅里叶变换得到:

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (S2)$$

其中, f 为频率; j 为虚数单位。均值为零是为了保证积分的存在性, 而对于均值不为零的时间历程 $y(t)$, 可令

$$x(t) = y(t) - \mu_y \quad (S3)$$

其中, μ_y 为 $y(t)$ 的均值。在实际应用中, 一般使用

单边功率谱密度 $G_{xx}(f)$ 来描述随机信号特征:

$$G_{xx}(f) = \begin{cases} 2S_{xx}(f) & f \geq 0 \\ 0 & f < 0 \end{cases} \quad (S4)$$

通过以上步骤, 将时域信号转变为频域上的信号。

S2 窄带随机振动和宽带随机振动

单侧 PSD 的特征由 n 阶谱矩 m_n 描述:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n G(f) df \quad (S5)$$

在结构随机振动中, 常引入带宽因子 α_i :

$$\alpha_i = \frac{m_i}{\sqrt{m_0 m_{2i}}} \quad (S6)$$

当 α_i 趋于 0 时, 对应的 $x(t)$ 为宽带随机振动; 当 α_i 趋于 1 时, 对应的 $x(t)$ 为窄带随机振动。常用的带宽因子有:

$$\alpha_1 = \frac{m_1}{\sqrt{m_0 m_2}}, \alpha_2 = \frac{m_2}{\sqrt{m_0 m_4}} \quad (S7)$$