

文章编号: 1001-4888(2025)04-0487-06

高温-冲刷-振动环境下陶瓷基复合材料结构 动态性能退化测试平台开发及应用*

杨耀¹, 张海洋², 王海舟², 陈国栋³, 李晖^{1,2}, 王相平²

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁沈阳 110015;
3. 太行实验室, 四川成都 610200)

摘要: 为了实现复合材料结构在高温、冲刷、振动耦合环境下动态性能退化的测试, 设计了高温-冲刷-振动环境下先进复合材料结构退化测试平台并进行了测试。首先, 介绍了测试平台各部分的功能设计及实现原理, 并完成了平台的组建。然后, 利用所开发的测试平台, 以石英纤维陶瓷基复合材料薄板试件为例, 对其在不同温度、退化时间及冲刷时间条件下的退化现象进行了一系列测试, 获得了相应的固有频率和共振响应的退化曲线。研究表明: 高温、振动与冲刷环境导致陶瓷基复合材料动态性能退化, 具体表现为前2阶固有频率下降及共振响应显著增大。

关键词: 高温-冲刷-振动环境; 动态性能退化; 陶瓷基复合材料; 退化测试平台

中图分类号: TB53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-24-094

0 引言

由于陶瓷基复合材料及其结构具有耐高温、高比强、高比模和抗氧化等优点, 目前被广泛应用于航空、航天、船舶等领域的热端部件^[1]。然而, 在高温、冲刷和振动环境下, 陶瓷基复合材料构成的结构件呈现动态性能退化的特点^[2-3]。例如, 高温环境会导致其强度、刚度等力学性能发生变化; 在冲刷环境下, 其材料表面受到气流、颗粒等冲刷, 会导致表面磨损, 进而影响结构的使用寿命和性能; 振动环境会导致材料出现界面剥离, 引发累积损伤和动态疲劳破坏等问题^[4-5]。上述性能退化的特点给传统的动态力学测试技术及相关试验平台的设计与开发, 带来了很大的困难与挑战。

目前, 国内外研究人员对复合材料及其结构在高温环境下的力学性能进行了大量研究, 取得了阶段性的研究成果。例如, 杨自春^[6]搭建了一套可变温环境的振动测试系统, 通过频谱分析发现了随着温度升高, 玻璃纤维环氧树脂复合材料层合板结构的各阶固有频率及振动模态发生了明显变化。美国NASA部门HUDSON等^[7]对X-37飞行器的C/SiC方向舵开展热模态测试, 探究了高温对该结构的阻尼、频率、振型等参数的影响规律。MALEKZADEH等^[8]利用数值分析方法对热环境下功能梯度圆柱壳的自由振动进行分析, 在考虑热应力对材料特性影响的基础上, 揭示了温度对不同边界条件下结构固有频率的影响规律。张治君等^[9]通过一套热振联合环境试验系统, 获得了SiC板试件在600℃条件下的振动响应曲线。CHAKRAVERTY等^[10]采用数值分析方法研究热环境中功能梯度板的自由振动, 发现结构的各阶固有频率随着温度梯度的增加而减小。李宇峰等^[11]基于自主研发的气流加热模态试验系统, 获得了碳化硅板在208℃~300℃条件下结构的固有频率和振型。赵锐等^[12]考虑气动热载荷

* 收稿日期: 2024-06-07; 修回日期: 2024-11-12

基金项目: 航空科学基金项目(2022Z009050002); 国家自然科学基金项目(52175079, 12472005); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2103026)

通信作者: 李晖(1982-), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 先进复合材料结构动力学。Email: lihui@mail.neu.edu.cn

和时变温度环境对复合材料夹层板结构动力学特性的影响,提出了一种有效预测结构热振响应的数值分析方法。吴大方等^[13]搭建极端高温环境下热振联合试验平台,通过结构的微观变化,判断陶瓷纤维轻质多孔隔热材料是否存在裂纹或损伤。LI 等^[14]提出了一种考虑温度和振幅依赖性特点的复合材料结构动力学分析方法,从理论与试验角度揭示了 300 °C 以内环境温度影响碳纤维/聚合物圆柱壳结构阻尼特性的规律。ARIS 等^[15]和 ANH 等^[16]采用数值分析方法分别研究了热环境下功能梯度锥形壳体和夹芯双曲面扁壳结构的振动特性,但由于测试系统缺乏,没有对理论模型进行试验验证。

虽然国内外科研工作者在高温振动环境下的复合材料结构动力学性能测试与分析领域取得了一定的成果,但对结构动态力学性能退化特点和行为的研究相对较少。由于缺乏高温条件下复合材料结构动态性能退化测试平台,导致难以有效获取结构件的退化现象和试验数据。针对此问题,本文自主设计并开发了一套最高温度达 1500 °C 的极端高温-冲刷-振动环境下复合材料结构动态性能退化测试平台,并利用该平台对石英纤维陶瓷基复合材料薄板试件,在不同温度和冲刷时间条件下的动态性能进行测试,从而验证了此测试平台的有效性。

1 退化测试平台各部分功能设计及组配

1.1 高温-冲刷-振动控制系统硬件设计及实现

高温-冲刷-振动控制系统由钼棒超高温加热箱控制系统、火焰冲刷控制系统和振动台隔热激励与控制系统组成,测试平台系统整体框架如图 1 所示。

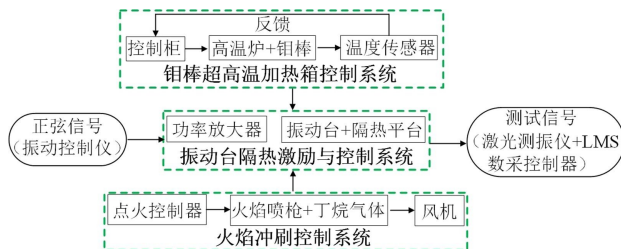


图 1 测试平台系统整体框架

Fig. 1 Framework of the testing platform system

测量温度超过 1500 °C)实时监测炉膛环境温度,通过加热控制柜控制钼棒的功率,从而实现对温度的精确调节。



图 2 钼棒超高温加热箱控制系统

Fig. 2 Control system for ultra-high temperature heating box by molybdenum rod

1.1.2 火焰冲刷控制系统

火焰冲刷控制系统的硬件如图 3 所示,由火焰喷枪、丁烷气、风机和点火控制器组成。丁烷液化气作为燃料,能够产生高温火焰,提供 1000 °C ~ 1600 °C 的冲刷温度;自动控制火焰喷枪可以减少因加热不均匀导致的应力集中和变形;喷枪系统采用闭环压力反馈控制,通过实时气压监测与自动调节,输出满足火焰稳定性要

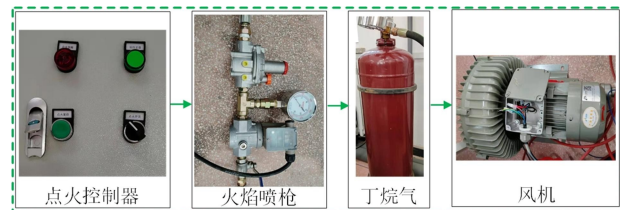


图 3 火焰冲刷控制系统

Fig. 3 Control system of flame scouring

求的恒定气压,确保火焰所需的压力、喷射强度和稳定性,从而实现不同冲刷速率的测试效果。

1.1.3 振动台隔热激励与控制系统

振动台隔热激励与控制系统包括东菱 ES-6-230/LT0404 振动台等,可在频率 1 Hz~5000 Hz 内对试件开展振动扫频、定频共振和疲劳测试。为了避免振动台受到高温炉加热的影响,设计了隔热台以阻断铝棒对振动台面的热辐射,确保通过夹具传递到振动台的温度不超过 50 °C,隔热台如图 4(b)所示。隔热台由具有优异热稳定性、纯度达到 99% 的 Al_2O_3 刚玉隔热台板和含铝板保温层组成,其设计为阶梯形。此外,隔热台的底端与振动台面通过 3 根加强筋连接,以确保振动台的激振力高效地传递至试件。

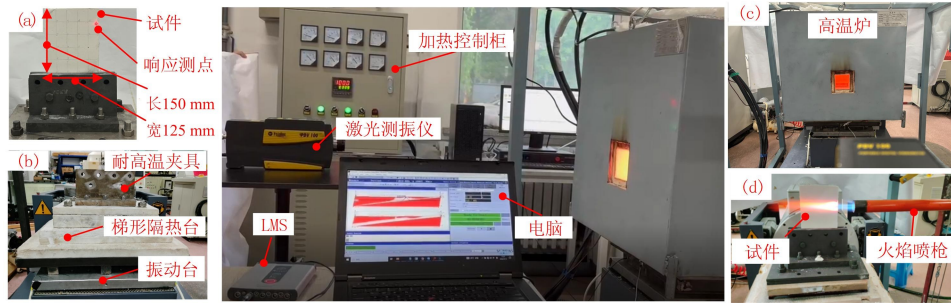


图 4 先进复合材料结构动力学性能高温振动退化测试平台

Fig. 4 Testing platform for dynamics degradation performance of advanced composite structure under high temperature and vibration environment

1.2 激光非接触振动测量与数据采集系统

1.2.1 激光多普勒测振仪

激光多普勒测振仪(Polytec PDV-100)通过激光器发射一束氦氖激光光束,照射到待测物体的表面,反射光的频率会根据物体表面运动的速度发生变化,接收系统通过光电探测器接收反射光,并与原始发射光进行比较。系统通过分析反射光与发射光之间的频率差(多普勒频移),识别出物体表面的运动速度和振动信息。基于多普勒原理^[17],振动测量方程为

$$\Delta f_D = \frac{2vf}{c} = \frac{2v}{\lambda} \quad (1)$$

式中: Δf_D 为频率偏移量; f 为激光频率; v 为试件移动速度; c 为光速; λ 为激光波长。通过频率偏移量就可以求解出试件的振动速度。

1.2.2 数据采集前端控制器

便携式数据采集前端控制器 LMS(型号:SCADAS-XS-06E)具有体积小、采样速率高、便于现场使用等优点,采用 LMS 能够高效地采集和记录振动与温度信号。

1.3 退化测试平台搭建

搭建了复合材料结构动力学性能退化测试平台,如图 4 所示,通过该平台能够测量多种复合材料结构在高温、冲刷和振动耦合环境下的动力学性能参数。另外,夹具采用具有优异高温耐受性和抗氧化性能的 310S 耐热钢材制作(图 4(b)),以确保其能承受长时间的高温振动试验,同时不会产生疲劳和变形等问题。

2 测试实例

以石英纤维陶瓷基复合材料薄板(由河南德纤工陶新材料科技有限公司提供)为测试对象,试件如图 4(a)所示,利用所开发的退化测试平台对其进行测试。试件采用对称正交铺设 $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]$,共 5 层,每层厚度和纤维体积分数相同。高温夹具沿试件长度方向约束一端,模拟悬臂边界条件,约束后的几何尺寸为 150 mm×125 mm×2 mm。材料性能参数为:沿纤维方向的弹性模量 E_1 、垂直纤维方向的弹性模量 E_2 和剪切模量 G_{12} 分别为 36.8 GPa、2.6 GPa、1.9 GPa,泊松比 $\nu_{12} = 0.28$,密度 $\rho =$

2046 kg/m³。

测试时,首先通过特制的耐高温夹具将试件固定在隔热台面上,为了避免边界约束处的螺栓预紧力变化对结构的刚度产生影响,进而影响结构的固有特性,采用力矩扳手对每个螺栓均施加 3 N·m 的预紧力。在经过多次测试与对比后,选择 1 个振动响应在传感器量程范围信号较强的测点(图 4(a)),该点距离试件约束端和右侧自由边分别为 120 mm、25 mm,并将隔热台侧面作为反馈传感器的测点。然后,在激励幅值为 1 g、频率为 100 Hz 的正弦基础激励条件下,分别开展不同温度和退化时间下的扫频和定频测试。图 5(a)给出了在常温、500 °C 和 1000 °C 条件下,试件的前 2 阶固有频率随退化时间的变化曲线,从图中可以看出,在常温下,振动激励持续时间在 6 h 内,前 2 阶固有频率略有下降,因此可忽略振动对试件性能退化的影响;薄板前 2 阶固有频率随着退化温度和时间的增加呈现明显下降趋势,并且温度越高,结构的退化现象越严重。由于高温导致复合材料的弹性模量、剪切模量降低,使结构的刚度下降,因此,在 1000 °C 环境下退化 6 h 后,结构前 2 阶固有频率变化量的最大值 Δf_{\max} 分别为 -14.2% 和 -8.9%。以温度为 1000 °C、试件第 1 阶固有频率变化为例,退化 2 h 和 6 h 后,固有频率分别下降 2.4 Hz 和 3.9 Hz,前 2 h 固有频率下降值占整个退化过程中的 61.5%。退化速度呈先快后缓的趋势,主要有以下 2 个原因:1)复合材料的弹性模量在加热初期下降较快,随后逐渐稳定。2)退化初期热载荷导致复合材料结构内部产生温度梯度,从而引发热应力,进一步降低结构刚度,而在退化后期热应力逐渐降低^[18]。

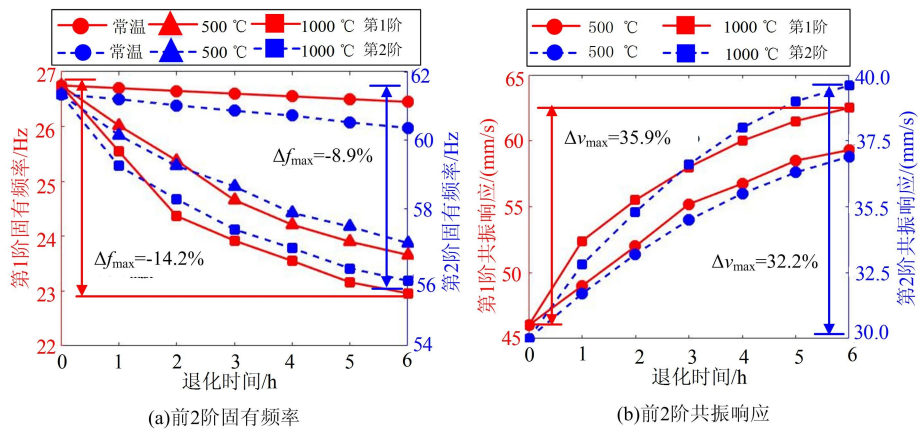


图 5 结构前 2 阶固有频率与共振响应随温度和退化时间的变化曲线

Fig. 5 The variation curves of the first two natural frequencies and resonance response of the tested structure with temperature and degradation time

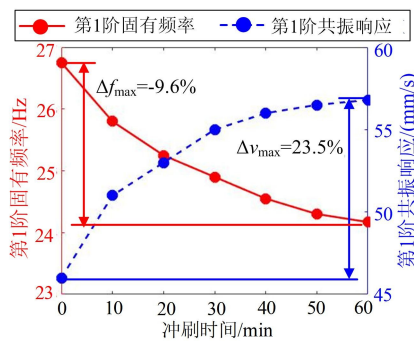


图 6 结构的第 1 阶固有频率和共振响应随冲刷时间的变化曲线

Fig. 6 The variation curve of the first natural frequency and resonance response of the tested structure with scouring time

以测试前 2 阶共振响应为例,图 5(b)给出了在不同温度及退化时间下陶瓷基复合材料薄板的前 2 阶共振响应变化曲线,由图可知,在 1000 °C 环境下退化 6 h 后,结构前 2 阶共振速度响应变化量的最大值 Δv_{\max} 分别增加了 35.9% 和 32.2%,这主要是持续的高温引起材料的弹性模量下降和热膨胀导致结构形变,从而降低了结构的刚度^[19]所致。试件前 2 阶固有频率随退化时间的增长呈现下降趋势,表明热振耦合作用对复合材料结构的动态特性影响显著。因此,在后续研究中需重点考虑热振环境下的材料退化机制,并优化结构设计以提高其长期服役性能。

通过组建的火焰冲刷系统,对试件在不同冲刷时间下的第 1 阶固有频率和第 1 阶共振响应进行了测试,其结果如图 6 所示。由图 6 可知,随着火焰冲刷时间的增长,第 1 阶固有频率呈现下降趋势,冲刷 6 h 后,第 1 阶固有频率最

大下降 9.6%, 第 1 阶共振响应最大增加了 23.5%, 这主要是火焰冲刷会引起石英陶瓷基纤维氧化, 而造成微观结构的破坏和损伤所致。

3 结论

本文设计开发了高温-冲刷-振动环境下先进复合材料结构动态性能退化测试平台, 并基于此平台对石英纤维陶瓷基复合材料薄板结构在不同温度、退化时间及冲刷时间条件下的退化现象进行了测试。主要结论如下:

1) 在温度为 1000 °C 条件下, 因为持续的高温导致石英纤维陶瓷基复合材料的弹性模量出现退化, 且热载荷会引发结构内部温度梯度, 产生的热应力进一步削弱了结构的刚度, 致使结构的动态性能退化。

2) 火焰冲刷引起材料微观结构损伤及纤维氧化, 导致结构刚度下降, 进而引发结构动态性能的退化。

参考文献:

- [1] 刘大响. 一代新材料, 一代新型发动机: 航空发动机的发展趋势及其对材料的需求[J]. 材料工程, 2017, 45(10):1-5 (LIU Daxiang. One generation of new material, one generation of new type engine: Development trend of aero-engine and its requirements for materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(10):1-5 (in Chinese))
- [2] UPADHYAYA P, SINGH S, ROY S. A mechanism-based multi-scale model for predicting thermo-oxidative degradation in high temperature polymer matrix composites[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(10):1309-1315.
- [3] 陈波, 刘晓倩, 杨兴林, 等. 碳/碳复合材料室温和 700 °C 面内剪切疲劳试验[J]. 航空发动机, 2023, 49(4):168-174 (CHEN Bo, LIU Xiaoqian, YANG Xinglin, et al. Experimental investigation of in-plane shear fatigue behavior of carbon/carbon composite at room temperature and 700 °C[J]. Aeroengine, 2023, 49(4):168-174 (in Chinese))
- [4] RUGGLES-WRENN M, BOUCHER N, PRZYBYLA C. Fatigue of three advanced SiC/SiC ceramic matrix composites at 1200 °C in air and in steam[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2018, 15(1):3-15.
- [5] 陈天雄, 张铮, 王奇志, 等. 二维编织 C/SiC 复合材料板疲劳损伤分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1):192-199 (CHEN Tianxiong, ZHANG Zheng, WANG Qizhi, et al. Fatigue damage analysis of 2D braided C/SiC composite plate[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1):192-199 (in Chinese))
- [6] 杨自春. 受热复合材料层合板的非线性热振动——Part II: 实验研究[J]. 复合材料学报, 2000, 17(2):119-122 (YANG Zichun. Nonlinear thermal vibration of composite laminated plates—Part II: Test[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(2):119-122 (in Chinese))
- [7] HUDSON L D, STEPHENS C A. X-37 C/SiC ruddervator subcomponent test program[C]. Washington: Procedia Engineering Press, 2009.
- [8] MALEKZADEH P, HEYDARPOUR Y. Free vibration analysis of rotating functionally graded cylindrical shells in thermal environment[J]. Composite Structures, 2012, 94(9):2971-2981.
- [9] 张治君, 成竹, 王琦, 等. 热振联合环境试验技术研究[J]. 实验力学, 2013, 28(4):529-535 (ZHANG Zhijun, CHENG Zhu, WANG Qi, et al. Experimental technology study for thermo-vibration united environment[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(4):529-535 (in Chinese))
- [10] CHAKRAVERTY S, PRADHAN K K. Free vibration of exponential functionally graded rectangular plates in thermal environment with general boundary conditions[J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 36:132-156.
- [11] 李宇峰, 贺利乐, 张璇, 等. 典型热防护壁板结构的热模态分析[J]. 应用力学学报, 2017, 34(1):43-49, 194 (LI Yufeng, HE Lile, ZHANG Xuan, et al. Thermal modal analysis of typical thermo-defend panel structure[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(1):43-49, 194 (in Chinese))

- [12] 赵锐, 于开平, 崔乃刚. 时变热环境下复合材料夹层板结构动力学响应分析[J]. 振动工程学报, 2018, 31(2): 329-335 (ZHAO Rui, YU Kaiping, CUI Naigang. Vibration response analysis of a composite sandwich plate under a time-varying thermal environment[J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(2): 329-335 (in Chinese))
- [13] 吴大方, 林鹭劲, 吴文军, 等. 1500 °C 极端高温环境下高超声速飞行器轻质隔热材料热/振联合试验[J]. 航空学报, 2020, 41(7):223612 (WU Dafang, LIN Lujin, WU Wenjun, et al. Thermal/vibration test of lightweight insulation material for hypersonic vehicle under extreme-high-temperature environment up to 1500 °C [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(7):223612 (in Chinese))
- [14] LI H, LV H Y, GU J F, et al. Nonlinear vibration characteristics of fibre reinforced composite cylindrical shells in thermal environment[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 156:107665.
- [15] ARIS H, AHMADI H. Using the higher-order shear deformation theory to analyze the free vibration of stiffened rotating FGM conical shells in a thermal environment[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 183:110366.
- [16] ANH V T T, KHOA N D, NGO T, et al. Vibration of hybrid eccentrically stiffened sandwich auxetic double curved shallow shells in thermal environment[J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 137:108277.
- [17] 特瑞恩. 激光多普勒技术[M]. 王仕康, 沈熊, 周作元, 译. 北京:清华大学出版社, 1985:50-59 (DRAIN L E. The laser doppler technique[M]. WANG Shikang, SHEN Xiong, ZHOU Zuoyuan, translated. Beijing: Tsinghua University Press, 1985:50-59 (in Chinese))
- [18] 夏巍, 杨智春. 热环境下复合材料壁板的振动特性分析[J]. 应用力学学报, 2005, 22(3):359-363, 503 (XIA Wei, YANG Zhichun. Vibration analysis to composite panels in thermal environment[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2005, 22(3):359-363, 503 (in Chinese))
- [19] LI H, WU H S, ZHANG T N, et al. A nonlinear dynamic model of fiber-reinforced composite thin plate with temperature dependence in thermal environment[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 162:206-218.

Development and applications of dynamic performance degradation testing platform for ceramic matrix composite structures under high temperature-scouring-vibration environments

YANG Yao¹, ZHANG Haiyang², WANG Haizhou², CHEN Guodong³, LI Hui^{1,2}, WANG Xiangping²

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. Shenyang Engine Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, Liaoning, China; 3. Taihang Laboratory, Chengdu 610200, Sichuan, China)

Abstract: A new dynamic performance degradation testing platform of advanced composite structures under high temperature-scouring-vibration environments has been self-designed and developed to achieve corresponding tests under such coupled environments. Firstly, the functional design and implementation principles of various parts of this system were introduced in detail, and the construction of the testing platform was completed. Additionally, the degradation curves of natural frequency and resonant response of quartz fiber ceramic matrix composite thin plates under various temperatures, degradation time, and flushing time were obtained based on the above testing platform. The results indicate that the effects of high temperature, scouring, and vibration lead to the degradation of the dynamic performance of ceramic matrix composites, characterized by a reduction in the first two natural frequencies and a significant amplification of the resonant response.

Keywords: high temperature-scouring-vibration environments; dynamic performance degradation; ceramic matrix composite; degradation testing platform