

2.5 维树脂基编织复合材料迟滞阻尼特性试验研究

刘杰明

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要:采用迟滞回线法对用于航空航天领域的 2.5 维树脂基编织复合材料的材料阻尼特性进行试验研究, 观察材料的迟滞阻尼特性与循环拉伸加卸载次数和加载应力水平的关系。研究发现: 通过迟滞回线法获得的损耗因子与施加的循环拉伸加卸载频率相关, 而与加卸载应力水平无关。

关键词:2.5 维编织复合材料; 树脂基; 迟滞回线; 迟滞阻尼; 静力学

中图分类号:V258 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)03-0019-03

Experimental Study on Hysteretic Damping Characteristics of 2.5D Resin-based Braided Composites

LIU Jieming

(College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The experimental study on damping properties of 2.5D resin-based braided composites used in aerospace field are conducted by hysteresis loop method, in which the relationship between the hysteretic damping characteristics of the material and the number of loading and unloading cycles and the loading stress level is observed. The study finds that the loss factor obtained by the hysteretic loop method is related to the applied cyclic tension loading and unloading frequency, but independent of the loading and unloading stress level.

Keywords: 2.5D braided composite; resin-based; hysteresis loop; hysteretic damping; statics

0 引言

树脂基复合材料由于其优异的性能与广阔的前景, 正得到越来越多的关注。除了航空和航天等军工领域外, 该类材料还逐渐在机械、汽车、化工、电子电工、医疗器械和体育器材等多种领域运用。先进树脂基复合材料具有高比强度、高比刚度、材料/结构一体化、设计性突出、抗分层能力强、抗疲劳断裂性能好和易大面积整体成型的优点, 将其用于飞机结构上可以为飞机整体减质量 20%~30%, 维修成本可节约 15%~20%^[1]。因此, 先进树脂基复合材料的应用程度已成为衡量飞机结构设计先进性的重要指标之一。

近年来有关 2.5 维 (亦属于 3 维) 树脂基编织复合材料力学性能的研究多集中在静力学方面, 包括静强度、刚度和疲劳性能等, 其在阻尼方面的研究较少。阻尼可以定义为振动结构的能量耗散, 即将振动系统中的能量转化为其他形式的能量。由机械能转化而成的能量类型主要取决于振动系统的类型和导致耗散的实际物理机理。对于大多数振动系统, 大部分能量会转化为热量。这些物理机理均是尚未完全理解的复杂物理过程, 结构中存在的阻尼类型将取决于在给定情况下哪种机理占主导地位。因此, 测量阻尼的方法主要取决于这些机理的假设。阻尼能量

耗散的物理机理通常包括黏性阻尼、库仑阻尼和结构阻尼。黏性阻尼通常是指由于流体介质中物体的运动而引起的能量耗散; 库仑阻尼 (干摩擦阻尼) 是由大小恒定但方向与振动体的运动方向相反的阻尼力, 由于干燥或润滑不足的摩擦表面之间的摩擦引起; 结构阻尼是由材料变形时滑动或滑动内部平面之间的摩擦引起的, 比如铰链或者两个接触的物体等。迟滞阻尼属于结构阻尼^[2]。有关阻尼测量方法的讨论很多, 但仍然缺乏设计良好的试验来处理用迟滞回线法测量阻尼损耗因子的问题。

有关阻尼测试的方法很多学者提出了不同的看法。LAZAN B^[3-4]在阻尼方面的开创性工作被大多数研究人员认为是测量金属阻尼各种机理最可靠的来源, 包括滞后阻尼, 其提出的测试标准是 ASTM E756, 用于测量可应用于标准悬臂梁同质阻尼材料的损耗因子和弹性模量。美国材料试验学会也提出了其他测试方法, 如中心阻抗法^[5], 该方法易于使用, 只需要标准振动设备进行激励, 是一种简单的方法来控制实验的可重复性。主流的半功率带宽法和自由衰减法伴随着非均匀弯曲应变评估, 容易受到空气阻尼的影响, 而通过两端固定约束的轴向载荷中滞后能量损失的测量可以降低该影响^[6]。本文将通过轴向载荷加卸载的方式测量 2.5 维树脂基编织复合材料的迟滞阻尼, 观察材料的迟滞阻尼特性与循环拉伸加卸载周期数和加载应力水平的关系。

1 试验测试方法

1.1 试验原理

本试验采用方法为磁滞回线法,如图 1 所示。阻尼的估计是通过计算稳态谐波负载引起的每周期振荡的能量损失而获得的。通过绘制给定运动周期的瞬时应力与应变的关系,可以生成椭圆形迟滞曲线。

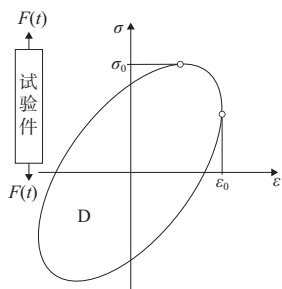


图 1 迟滞回线法

迟滞曲线所围成的面积等于谐波运动每个周期内的耗散能量。在合理阻尼水平下,迟滞回线所围成的面积 A 可通过如下公式计算损耗因子:

$$\eta = \frac{A}{\pi \sigma_{\max} \varepsilon_{\max}} \quad (1)$$

定义比阻尼容量系数(SDC)为 Ψ ,可以将上述各量之间的关系表示为

$$\Psi = 2\pi\eta = \frac{2A}{\sigma_{\max} \varepsilon_{\max}} \quad (2)$$

1.2 试验件制备

本文采用的 2.5 维编织树脂基复合材料试验件基于 T800/ BMP350 材料体系,采用 RTM 工艺成型。纤维型号为 T800-12K,树脂型号为聚酰亚胺 BMP350。试验件尺寸依据 GB/T 33613—2017 制取,其长宽高尺寸为 190 mm×30 mm×2 mm,共有 3 件,如图 2 所示。



图 2 试验件

1.3 试验方法

循环拉伸加卸载试验在南京航空航天大学能源与动力学院实验室进行,试验设备主要有图 3 所示的 MTS 加载试验台、配套的引伸计和数据采集系统。试验过程中,轴向应力可通过 MTS 试验台反馈得到;因施加轴向应力而产生的轴向应变由引伸计测得;所测得的应力-应变数据由数据采集系统采集。随后将采集的数据导入 MATLAB 数值仿真软件中以图像形式绘出,可以形成大量的应力-应变迟滞回线,其数量取决于循环拉伸加卸载的周期数。

为了确保试验测量精确度,设置加卸载频率为 1 Hz,应力幅值水平设定了 0.3、0.6、0.8 三种应力水平,循环次数为 2000 个循环。

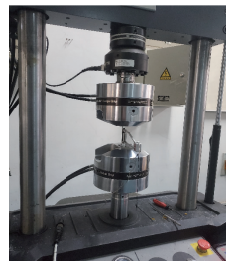


图 3 MTS 加载试验台

在获取应力-应变迟滞回线后,通过在 MATLAB 数值仿真软件中编写程序,计算所有循环周期下迟滞回线所围成的面积,并通过公式(1)计算出对应迟滞阻尼的损耗因子。

2 结果与分析

根据上文的测试方法进行试验,3 根试验件测试结果如图 4-图 6 所示(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者),1 号、2 号、3 号分别对应应力水平为 0.3、0.6 和 0.8。

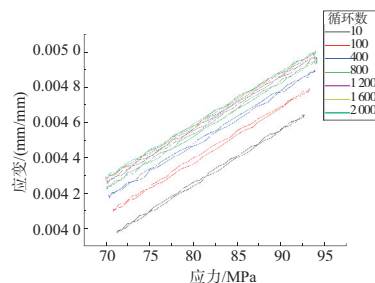


图 4 1号试验件应力-应变迟滞回线

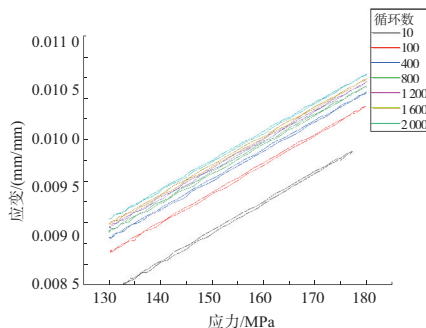


图 5 2号试验件应力-应变迟滞回线

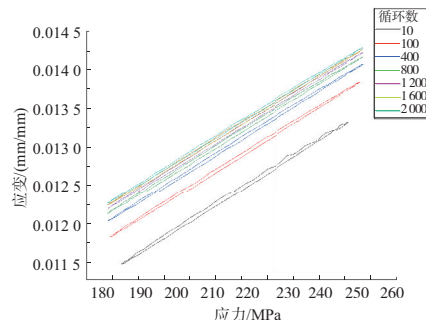


图 6 3号试验件应力-应变迟滞回线

图 4 中迟滞回线存在不稳定的波动现象,造成该现象的原因可能是 MTS 加载试验台在施加低应力水平时存在失稳现象,导致应力-应变曲线不平滑。

综合观察图 4-图 6 的测试结果发现:

1)随着循环次数的增加,迟滞回线存在向上方偏移的趋势,且偏移速率由快到慢,最终趋于稳定;

2)随着循环次数的增加,在保持应力水平不变的情况下,材料应变逐渐增大。每次应变增大会伴随着新的损伤,待损伤发展完全后,材料应变趋于稳定。此外,应力水平越大,材料最终趋于稳定的应变也越大。

通过 MATLAB 软件计算 2000 次循环周期对应的迟滞阻尼损耗因子,计算结果如图 7-图 9 所示。观察迟滞阻尼损耗因子的变化趋势发现,损耗因子在初始阶段下降明显,随着循环次数的增加(循环数约 1000 以后)逐渐趋于稳定。在 0.3 和 0.6 应力水平下,损耗因子最终稳定在 0.015 左右,而 0.8 应力水平下损耗因子最终稳定在 0.02 左右。

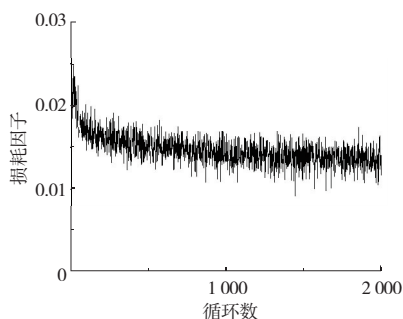


图 7 1 号试验件迟滞阻尼损耗因子

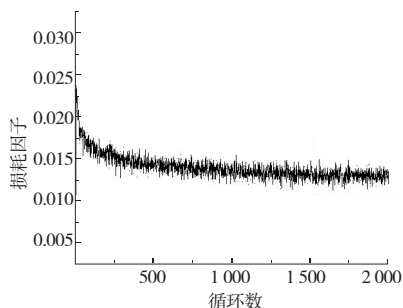


图 8 2 号试验件迟滞阻尼损耗因子

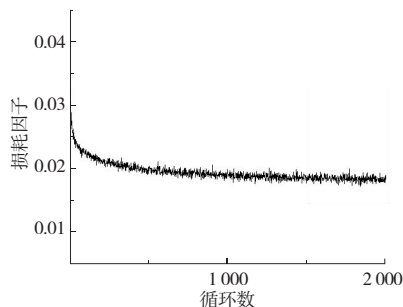


图 9 3 号试验件迟滞阻尼损耗因子

3 结语

本文通过迟滞回线法对用于航空航天领域的 2.5 维树脂基编织复合材料的迟滞阻尼损耗因子进行了试验研究。研究结果表明,迟滞阻尼损耗因子随着循环次数的增加会逐渐降低,并且在达到一定循环次数后趋于稳定。同时,最终损耗因子的稳定值与应力水平有关。本文试验研究内容初步揭示了 2.5 维树脂基编织复合材料中的迟滞阻尼特性,为今后的理论研究提供试验依据。这对探索 2.5 维树脂基编织复合材料其他类型阻尼机理具有很大的实际意义,对其迈向工程实际应用具有很大帮助。

参考文献:

- [1] 吴琨. 热塑性树脂基复合材料在航空领域的研究进展[J]. 价值工程, 2020, 39(9): 210-211.
- [2] ALPER J R, O'NEILL J P. A new passive hysteresis damping technique for stabilizing gravity-oriented satellites[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1967, 4(12): 1617-1622.
- [3] LAZAN B. A study with new equipment of the effects of fatigue stress on the damping capacity and elasticity of mild steel[R]. [S.I.]: Defense Technical Information Center, 1950.
- [4] LAZAN B. Effect of damping constants and stress distribution on the resonance response of members[R]. [S.I.]: Defense Technical Information Center, 1952.
- [5] MALOGI D, GUPTA A, KATHAWATE G R. Center impedance method for damping measurement[J]. Advances in Acoustics and Vibration, 2009: 1-7.
- [6] ABRAMOVICH H, GOVICH D, GRUNWALD A. Damping measurements of laminated composite materials and aluminum using the hysteresis loop method[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2015, 78: 8-18.

收稿日期: 2021-03-11

(上接第 4 页)

- [5] GARCÍA-CASTILLO S K, SÁNCHEZ-SÁEZ S, BARBERO E, et al. Response of pre-loaded laminate composite plates subject to high velocity impact[J]. Journal De Physique IV (Proceedings), 2006, 134: 1257-1263.
- [6] SCHUELER D, TOSO-PENTECOTE N, VOGGENREITER H. Modelling of high velocity impact on preloaded composite panels[C]. Composites 2011, 3rd ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites, Hannover, Germany: 2011.
- [7] MOALLEMZADEH A R, SABET S A R, ABEDINI H, et al. Investigation into high velocity impact response of pre-loaded hybrid nanocomposite structure[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 142: 405-413.
- [8] MORLO H, KUNZ J. Impact behaviour of loaded composites

[M]//Developments in the Science and Technology of Composite Materials. Dordrecht: Springer Netherlands, 1990: 987-991.

- [9] ZHANG X, DAVIES G A O, HITCHINGS D. Impact damage with compressive preload and post-impact compression of carbon composite plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(5): 485-509.
- [10] HEIMBS S, HELLER S, MIDDENDORF P, et al. Low velocity impact on CFRP plates with compressive preload: test and modelling[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(10/11): 1182-1193.
- [11] HEIMBS S, BERGMANN T, SCHUELER D, et al. High velocity impact on preloaded composite plates[J]. Composite Structures, 2014, 111: 158-168.

收稿日期: 2021-03-12