

Natural Frequency and Acoustic Emission Test Analysis of Ceramic Matrix Composites Monotonic Tensile

Dou Huang, Jinwu Wu*

School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi
Email: wujinwu@nchu.edu.cn

Received: Feb. 19th, 2020; accepted: Mar. 3rd, 2020; published: Mar. 10th, 2020

Abstract

Natural frequencies and sound emission tests of ceramic matrix composites in the monotone tension were analyzed. The variation trend of the natural frequency of the sample during the tensile process was obtained. According to the test, the stress-time curve and the curve of AE signal changing with time were drawn. The spectrum diagram of acoustic emission signal was calculated, and for the acoustic emission spectrum diagram of ceramic matrix composite structure, five damage stages existed in the monotone tensile test, and the damage changes in each stage were analyzed in detail.

Keywords

Ceramic Matrix Composite, Monotonic Tensile Test, Acoustic Emission Technique

陶瓷基复合材料拉伸试验声发射与固有频率分析

黄 豆, 吴锦武*

南昌航空大学飞行器工程学院, 江西 南昌
Email: wujinwu@nchu.edu.cn

收稿日期: 2020年2月19日; 录用日期: 2020年3月3日; 发布日期: 2020年3月10日

摘 要

对陶瓷基复合材料试样进行了单调拉伸试验固有频率和声发射试验分析。得到了在拉伸过程中试样的固

*通讯作者。

有频率变化趋势, 同时绘制拉伸过程中应力 - 时间曲线及声发射信号随时间变化曲线。计算得到了陶瓷基复合材料结构的声发射信号的频谱图, 针对声发射频谱图, 分析得到了结构在单调拉伸试验过程损伤过程存在五个阶段, 并详细分析了结构每阶段损伤变化情况。

关键词

陶瓷基复合材料, 声发射技术, 固有频率

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

陶瓷基复合材料具有高比强度、高比模量、抗腐蚀、抗氧化和耐高温等特点, 在航空、航天及民用领域得到广泛应用[1] [2]。陶瓷基复合材料缺陷损伤分析是现阶段研究热点, 而利用声发射(Acoustic emission, AE)检测方式是分析材料缺陷损伤较常用的方法之一。其中利用声发射技术实时监测单向玻璃纤维增强复合材料压缩试验[3], 可得出复合材料压缩损伤信号分为三类, 分别对应基体开裂、纤维脱粘与纤维断裂等三种损伤模。黄喜鹏等人[4] [5]对三维针刺 C/SiC 复合材料进行室温单调拉伸和拉伸加载卸载试验进行研究, 并利用声发射技术对试样损伤演化进行动态监测, 得出发现 3D-N C/SiC 复合材料在拉伸载荷作用下主要存在五类损伤模式和对应频率。利用复合材料本身的固有频率因损伤而变化的特性来检测复合材料的损伤也是分析材料缺陷损伤的方法之一。姜河等人[6]根据纯弯曲状态下内力与应变的关系, 并利用等效弯曲刚度进一步推出了帽型复合材料梁的固有频率计算公式, 最后用有限元法进行验证公式计算结果。钱若力等人[7]基于无网格方法对复合材料层合板固有频率及特征值灵敏度研究, 文中的工作使得无网格法的优越性与弹性力学 Hamilton 正则方程的半解析法得到了有机的结合, 为 Hamilton 正则方程提出了一种新的特征值灵敏度分析方法。

本文针对 2D 陶瓷基复合材料试样的单调拉伸试验全程采用声发射技术对试样损伤演化进行监测, 主要创新点是通过声发射试验信号的频谱分析, 得出试样做单调拉伸试验的内部损伤机理; 本文还针对 2D-C/SiC 陶瓷基复合材料试样每次循环拉伸损伤试验后, 测试损伤后的复合材料试样固有频率, 该创新点是分析研究复合材料损伤程度与固有频率变化规律。本文研究结果可为 2D-C/SiC 复合材料的损伤演化提供理论依据。

2. 试验材料及设备

本文采用的 2D 陶瓷基复合材料试样尺寸参数如下: 总长 110 mm、平行段长 40 mm、平行段宽 6.3 mm、试件厚度 3.3 mm。试样密度 2 g/cm^3 、孔隙率 15%、基体含量为 45%、纤维体积含量为 40%。材料试样简图如图 1 所示。

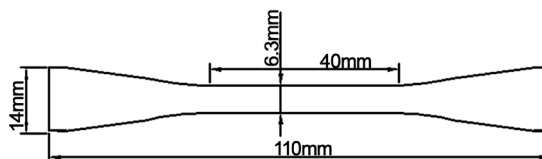


Figure 1. Sample diagram

图 1. 试样简图

拉伸加载设备为 INSTRON8872 液压伺服疲劳试验机, 如图 2 所示。声发射检测采用由四块 PCI-2 采集卡所组成的 8 通道型测试系统, 采用 R80D 压电传感器, 如图 3 所示。利用图 4 所示的激光测振仪测试试样的固有频率。



Figure 2. Hydraulic servo fatigue testing machine
图 2. 液压伺服疲劳试验机

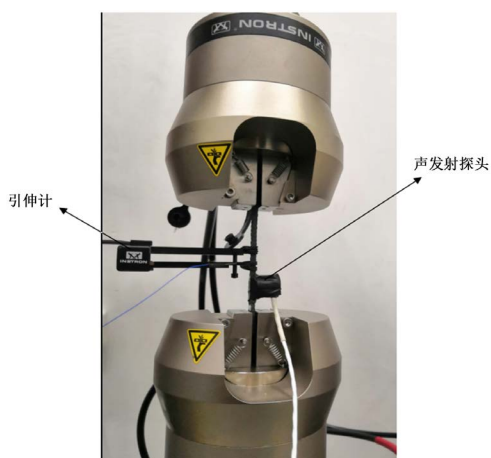


Figure 3. Acoustic emission detection systems
图 3. 声发射检测装置



Figure 4. Vibration measurement with laser
图 4. PSV-500 激光测振仪

3. 试验过程

本文针对 2 个结构完全一致的试样进行分析。由 INSTRON8872 液压伺服疲劳试验机对试样 1 进行拉伸实验, 实验加载速度为 0.05 mm/min。同时由 PCI-2 声发射检测系统对试样加载全程进行声发射信号检测, 实验环境温度为 17℃, 声发射实验阈值为 55 dB。对试样进行的加载试验, 采集了试样拉伸过程中完整的声发射信号, 并且得到了该试样的极限拉力和极限应力。

为确定重复加载以及保持载荷的过程中, 试样是否会有大量的声发射信号, 以确定该过程中是否有新增损伤, 基于第 1 号试样所测数据, 对第 2 号试样开展实验测试。首先在加载前由 PSV-500 激光测振, 压电陶瓷激励仪测量了自由状态时试样的前三阶固有频率(如图 4 所示)。然后将试样安装在疲劳试验机上, 在加载前由 INV3020C 型数据采集分析仪测量试样固支时固有频率, 实验采用敲击法测量, 传感器采用 INV9206 声压传感器。接着对试样进行加载目标拉力为 2 kN, 然后卸载拉力(为保护试样和仪器, 拉力一般卸载到 0.05 kN), 并且用敲击法测量固有频率。对试样继续加载到 3 kN, 并且保持载荷 3 min, 然后卸载拉力, 并且用敲击法测量固有频率。最后用激光测振仪测量试样自由状态固有频率。

4. 试验结果分析

4.1. 单调拉伸中 AE 信号与载荷关系

对第 1 号试样进行了单调拉伸和声发射测量实验, 经过实验得出该试样极限拉力为 5505.28 N, 极限应力为 266.78 MPa, 弹性模量 $E = 131.46 \text{ GPa}$ 。根据实验绘制拉伸过程中应力 - 时间曲线(如图 5 所示)及 AE 信号随时间变化曲线(如图 6 所示)。

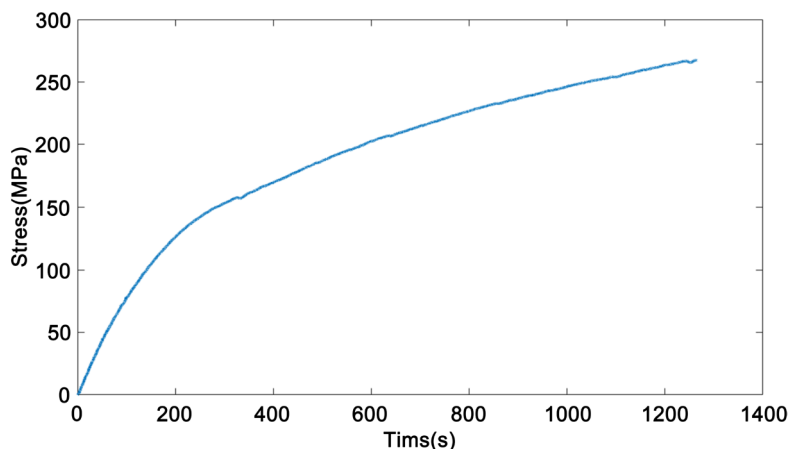
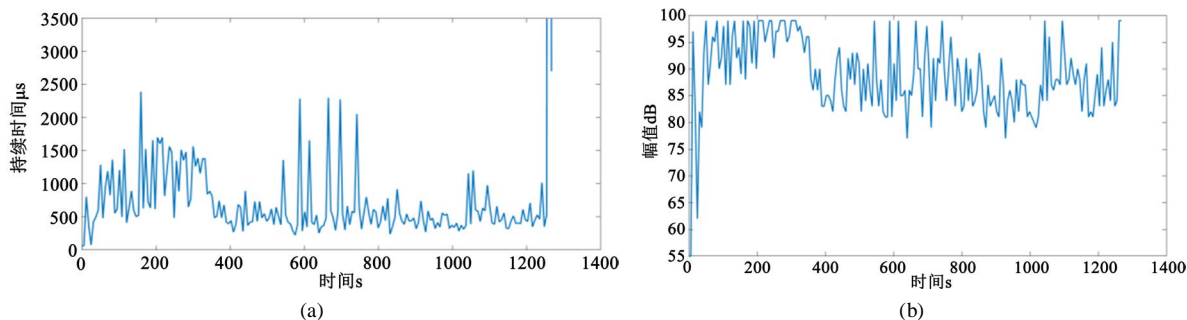


Figure 5. Stress-time curve of sample no. 1

图 5. 第 1 号试样应力 - 时间曲线



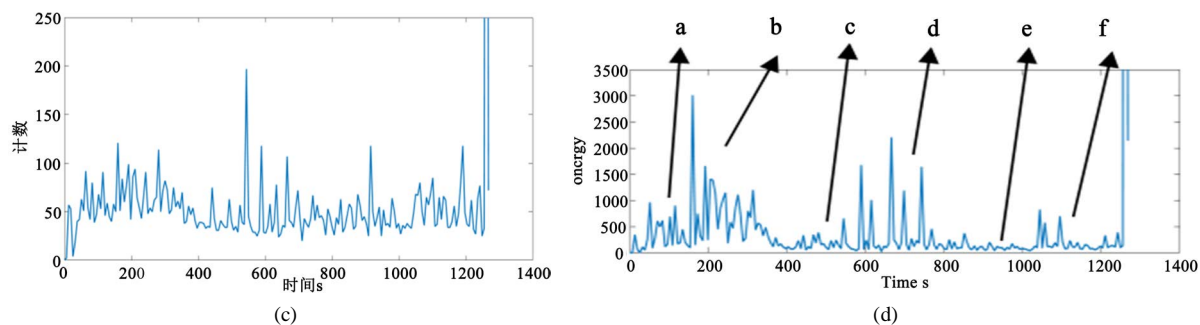
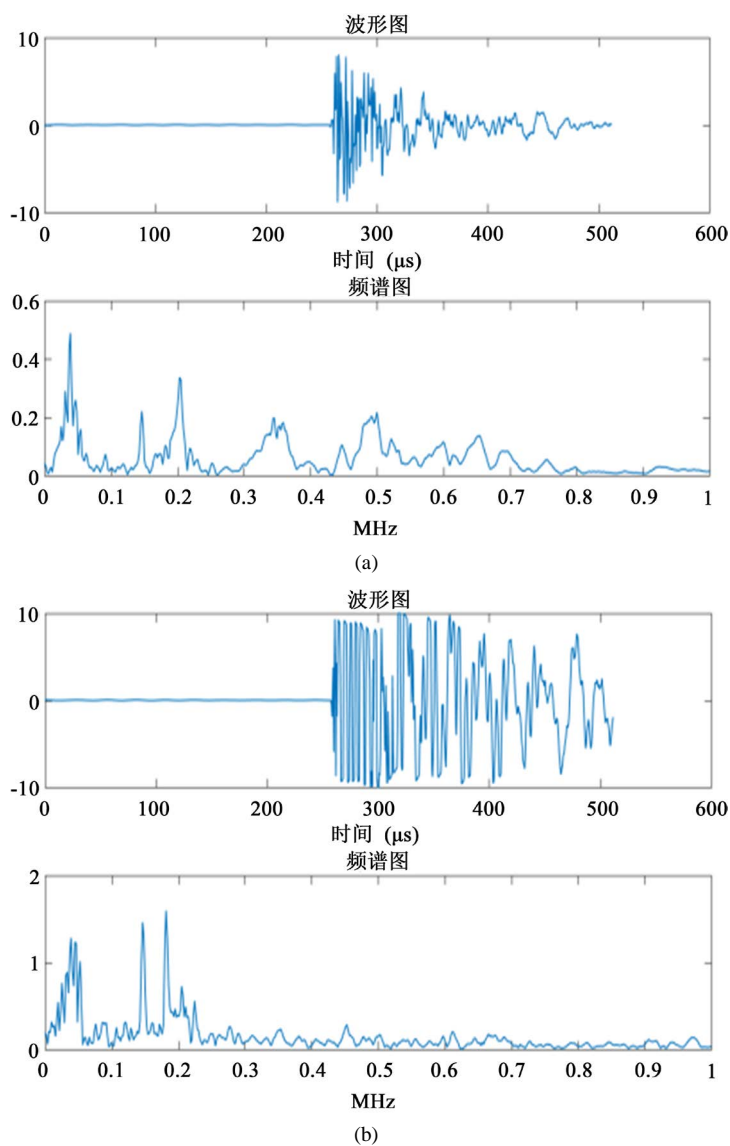
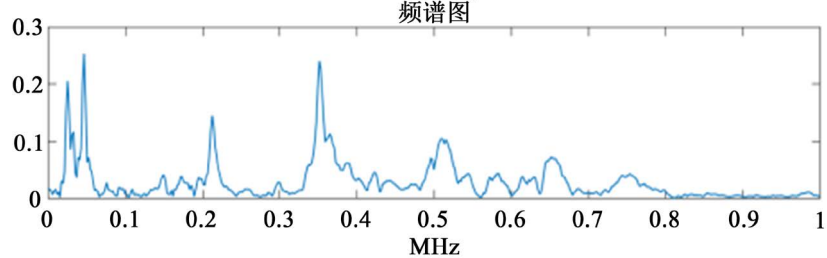
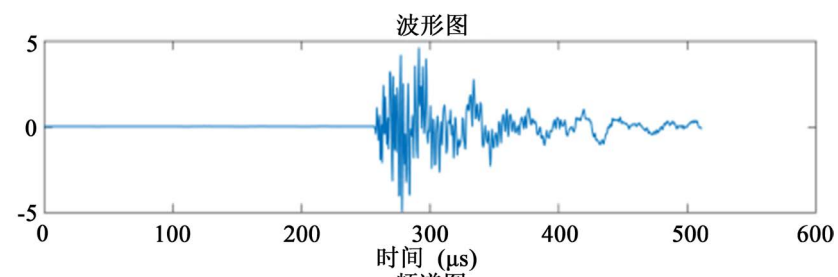


Figure 6. (a) Acoustic emission signal duration-time curve; (b) Acoustic emission amplitude-time curve; (c) Acoustic emission signal count-time curve; (d) Energy-time curve of acoustic emission signal

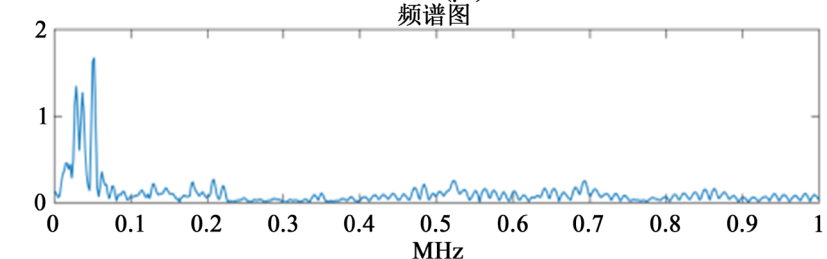
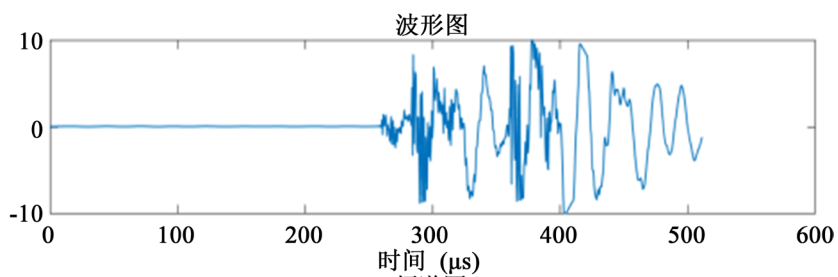
图 6. (a) 声发射信号持续时间 - 时间曲线; (b) 声发射信号幅值 - 时间曲线; (c) 声发射信号计数 - 时间曲线; (d) 声发射信号能量 - 时间曲线

进一步对图 6 中标注的各时刻的声发射信号做频谱分析, 各点对应图如下图 7 所示:

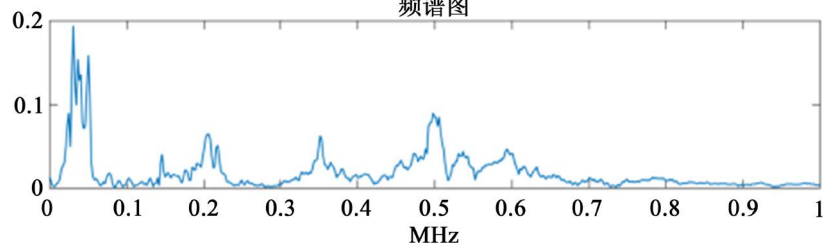
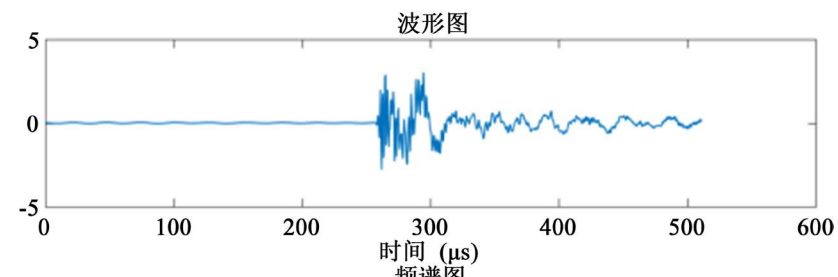




(c)



(d)



(e)

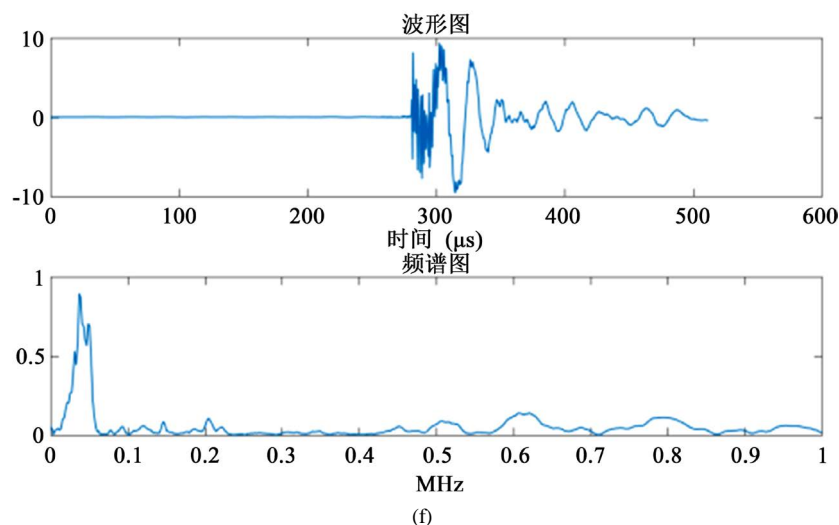


Figure 7. Spectrum analysis and waveform of acoustic emission signal at corresponding time
图 7. 对应时刻声发射信号频谱分析及波形图

由图 7 可知, 声发射信号大致可分为三类: 第一类即为图 6 中所注明的 a, c, e 阶段, 该阶段中 AE 信号幅值较低, 且频率范围广, 能量小。第二类即为图中所注明的 b 阶段, 该阶段中 AE 信号幅值较高, 且频率主要集中在 0~70 KHz 和 130~220 KHz 之间。第三类为图中所注明的 d, f 阶段, 该阶段中 AE 信号幅值高且频率主要集中在 0~70 KHz 之间。因: 此试样拉伸过程中损伤状态基本可分为以下几个阶段

第一阶段从加载开始时间为 150 s, 此阶段声发射计数及声发射信号能量均处于中等水平, 持续时间和幅值经过一段上升区间后基本稳定, 且声发射频率范围较广, 这表明试样在加载初期逐渐产生损伤, 但单个损伤的能量较小, 主要是试样原生微裂纹的裂纹面摩擦和弱连接界面开裂和少量原生裂纹扩展。

第二阶段为 150~330 s, 该阶段声发射计数处于中等水平, 能量较高并伴有少量高能量信号, 声发射信号频率主要集中在 0~70 KHz 和 130~220 KHz 之间, 这表明基体裂纹继续扩展并且伴有少量纤维断裂发生。

第三阶段为 330~560 s, 该阶段中声发射信号计数及声发射信号能量很低, 且声发射频率范围较广, 这表明在该阶段中试样产生损伤很少, 原生裂纹扩展已达饱和。纤维阻断裂纹的发展, 成为主要承力部分。

第四阶段为应变 560~740 s, 此阶段中声发射计数及声发射信号能量迅速上升, 声发射信号幅值高且频率主要集中在 0~70 KHz 之间, 表明在此阶段中纵向纤维发生大量断裂, 过程中出现多次能量突变, 这表明纵向纤维是逐步被拉断的。

第五阶段为加载 740 s 直至试样断裂, 此阶段中声发射信号计数及声发射信号能量很低并且伴有少量中等水平能量释放, 除短时间高能量释放外, 声发射频率范围较广幅值较低, 这表明当一些纵向纤维断裂后, 材料处于稳定状态, 除少量基体裂纹扩展和纤维断裂外试样产生损伤很少, 直至拉力继续增加试样断裂。

结合图 5~7 可知, AE 能量信号较大且集中的区域主要集中在损伤第二阶段和第四阶段, 分别对应时间是 150~330 s 和 560~740 s, 且应力为 104~157 MPa 时和 196~220 MPa 时, 两个阶段分别对应了基体开裂和纤维断裂两个阶段。

4.2. 固有频率测试试验

4.2.1. 检测方法

具体步骤如流程图 8 所示, 对标准件试样 2 做静力拉伸实验, 应力从 0 缓慢增加到 20 MPa, 然后卸下实验件。然后将标准件从力学性能试验系统上拆下, 并用橡皮筋悬挂以保证其自由状态, 然后在该状态下测量试验件的固有频率。继续对标准件做静力拉伸, 增加应力, 重复步骤上述过程直至断裂。

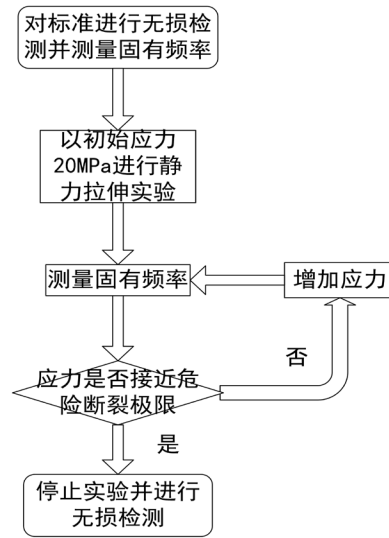


Figure 8. Flow chart of static tension test
图 8. 静力拉伸实验流程图

4.2.2. 试验结果及分析

在对标准件做静力拉伸实验之前, 对其进行了多次固有频率测量。测量固有频率时, 采用橡皮筋悬挂, 在试验件靠近悬挂端贴上压电陶瓷, 对其扫频激励, 用激光测振仪测量如图 4 所示。记录不同应力拉伸后标准件固有频率数据如图 9 所示。由图 9 可知, 试验件的固有频率具有随着应力增大而减小的趋势。这是因为结构随拉伸过程拉力增大, 试样内部结构发生损伤, 结构刚度下降, 固有频率随之减小。

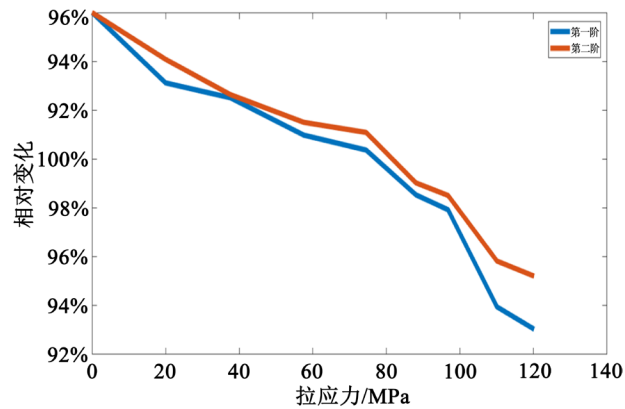


Figure 9. Polygraph of the first and second order natural frequencies relative to stress
图 9. 第一阶和第二阶固有频率随应力的相对变化折线图

5. 结论

本文对陶瓷基复合材料试样拉伸过程固有频率与声发射试验进行了一些研究, 主要是通过试验得到了试验内部损伤演变机理以及固有频率变化趋势。结果表明: 1) 通过拉伸试验, 利用声发射装置可有效分析结构试样内部损伤演变规律; 2) 通过测试结构试样的固有频率变化, 也可得到结构内部损伤变化趋势; 3) 通过本文测试方法, 可有效分析陶瓷基复合材料内部损伤情况, 从而得到其内部损伤机理。本文之后继续研究复合材料损伤的声发射信号聚类与固有频率变化的关系, 再结合试样损伤的微观分析, 来确定复合材料试样的损伤分类。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51965041)。

参考文献

- [1] Chen, X.M., Chen, L., Zhang, C.Y., *et al.* (2016) Three-Dimensional Needle-Punching for Composites—A Review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **85**, 12-30. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.03.004>
- [2] Bilisik, K. (2012) Three-Dimensional Braiding for Composites: A Review. *Textile Research Journal*, **83**, 1414-1436. <https://doi.org/10.1177/0040517512450766>
- [3] 赵文政, 李敏, 张燕南, 等. 复合材料损伤过程声发射信号聚类分析与压缩变形测量[J]. 复合材料学报, 2018(6): 5-9.
- [4] 黄喜鹏, 王波, 杨成鹏, 等. 基于声发射信号的三维针刺 C/SiC 复合材料拉伸损伤演化研究[J]. 无机材料学报, 2018(33): 609-616.
- [5] 黄喜鹏, 王波, 杨成鹏, 等. 基于声发射信号的不同密度 C/SiC 复合材料损伤演化[J]. 复合材料学报, 2018, 36(2): 425-433.
- [6] 姜河, 郑波. 帽型复合材料梁的稳定性分析与固有频率计算[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(6): 64-68.
- [7] 钱若力, 陈兴华, 卿光辉. 基于无网格方法的复合材料层合板固有频率及特征值灵敏度分析[J]. 船舶力学, 2012, 16(7): 820-828.