外贴光栅监测带双缺口碳纤维增强 复合材料拉伸损伤*

Damage Monitoring of the Double–Notched CFRP with Surface Bonded FBG Sensor

卢少微^{1,2} 高禹¹ 张海军¹ 冷劲松² 1沈阳航空航天大学航空航天学部 2 哈尔滨工业大学复合材料研究所 摘 要:布拉格光栅对沿其纵向的非均匀应变分布十分敏感,这种影响会反映在传感器位置的反射光谱光强 中。本文提出了一种利用外贴光栅监测带双缺口碳纤维复合材料损伤的新技术。实验结果表明,当带双缺口碳 纤维复合材料损伤产生及扩展时,光栅的反射光强在某些波长变化明显,反射光谱的突变点与复合材料静态拉 伸应变—光栅中心波长曲线突变点——对应。该方法可用于预测复合材料的损伤状态。

关键词:布拉格光纤光栅;带双缺口碳纤维增强复合材料;反射光谱;损伤 Keywords: fiber Bragg grating; double-notched carbon fiber reinforced polymers; reflected spectrum; damage

0 引言

布拉格光纤光栅(FBG)传感器 的波长位移对温度和应变响应十分灵 敏,当 FBG 光栅部分处于均匀应变场 时,反射光谱形状保持其原有的窄波 形状,因为沿整个光栅长度方向的光 栅周期与有效光折射指数是均匀变化 的。但当 FBG 光栅处于非均匀应变场 时,直接测量布拉格波长不再有效, 原因在于非均匀应变分布会引起布 拉格光栅反射光谱(可以用波长、波 宽、光强、多峰等光谱参数的变化表 征)变形^[1,2]。

通过布拉格光栅反射光谱就可 以对非均匀应变场进行监测和表征, 而复合材料结构中非均匀应变场的产 生往往是由各种损伤(包括分层、横 向裂纹等)引起的。国外学者利用均 匀FBG光栅的这种内传感特性监测复 合材料的损伤问题。英国 M.Ussorio^[3]将均匀 FBG 传感器埋入玻璃纤维正交 层板,监测非轴向层基体 开裂。裂纹形成后,光谱 形状变为铃型,高波长侧 光谱变宽,随应变增加, 高波长一侧反射光谱的第 二反射峰更加明显。日本

Takeda 教授^[4,5] 通过预埋小芯径 FBG 传感器检测分层,光纤光栅被埋入0°和 90°度纤维层间,通过建立分层带端部 不同位置与反射光谱的关系,检测分 层进展。复合材料机翼结构耐久性试 验研究表明,FBG 反射光谱形状会被 复合材料内部非均匀应变场所改变, 由FBG 反射光谱可推测复合材料不可 见损伤^[8]。Yoji Okabe^[6]通过 FBG 传感 器监测碳纤维增强复合材料 (CFRP)



图1 外贴光纤光栅的双缺口复合材料拉伸标准件示意图

正交层板90°层横向裂纹。研究表明, FBG 传感器反射光谱形状被横向裂 纹改变,随横向裂纹密度增加,光谱 变宽且出现了很多反射峰,光谱可作 为横向裂纹密度实时定量评估的指示 器,由光谱宽度可定量评估横向裂纹 密度。香港理工大学 Hang-Yin Ling^[7] 等人在ENF实验中,通过埋入 FBG 传 感器监测沿不同厚度方向分层的复合 材料层板梁的II型屈服行为。通过分析 FBG 光栅的反射光谱的漂移、形状、 波形宽度与光强变化,监测复合材料 不同位置分层的损伤。

^{*} 基金项目:基础科研项目,航空科学基金(2009ZA54001),中国博士后基金(20090450882), 沈阳科学计划项目(F11-237-1-00, F11-264-1-26), 辽宁省高等学校优秀人才支持 计划(LJQ2011018)资助项目。

本文将布拉格光栅外贴于带双缺口复合材料的缺口附 近,通过监测复合材料静态拉伸实验过程中缺口附近光栅 反射光谱的变化,监测缺口位置的复合材料损伤开始及扩



图2 复合材料外贴光纤光栅



图3 双缺口复合材料静态拉伸损伤外贴光纤光栅监测装置



图4 静态拉伸前光栅反射全光谱



图5 静态拉伸应变为0.102%时光栅反射全光谱

展问题。

1 实验方法

实验采用碳纤维正交铺层复合材料,其铺层顺序设计为 [90°₁/0°₆/90°₁],布拉格光栅(北京MOI公司提供)传感器位置 长度为10mm,光纤导线直径为125μm,其外观尺寸见图1。

复合材料结构损伤时,损伤区域应变场是非均匀的,此 时结构呈高应变状态(超过10000微应变),所以如果光纤光 栅与复合材料结构外表面结合力不好,光纤光栅在较低应变 状态下就会发生剥离等状况,影响后续复合材料结构损伤的 监测效果。

利用美国353ND光纤胶和环氧OPT8218在碳纤维复合材 料表面黏结光纤光栅传感器,尽量控制表面黏结树脂的厚 度。实验表明,美国353ND光纤胶和环氧OPT8218树脂在复 合材料结构应变超过10000微应变时,光纤光栅应变还能正常 增加,说明这两种环氧可以满足使用要求,表面黏结了光栅 的带双缺口复合材料实验件见图2。

本项目需要的光纤光栅解调仪首先要具备全光谱监测功能,同时也可以监测FBG中心波长变化,故选择美国 MOI公司的SM125静态光纤解调仪,拉伸实验机选用MTS Landmark。进行复合材料结构件的静态拉伸实验,控制拉伸 速率为0.1mm/min,监测不同应变状态时,对应的光栅传感器



图6 静态拉伸应变为0.277%时光栅反射全光谱



图7 静态拉伸应变为0.401%时光栅反射全光谱

航空科学基金 Aeronautical Science Fund

的反射全光谱及中心波长变化。带双缺口复合材料静态拉伸 实验光栅反射光谱监测实验装置见图3。

2 结果分析

复合材料静态拉伸实验的光栅反射光谱图见图4至图8。 静态拉伸实验前,光栅反射光谱如图4所示为窄波形状, 当结构应变增加到0.102%时,光栅反射光谱开始出现分裂 现象(见图5),当应变增加到0.277%,光谱变宽(见图 6),应变到达0.41%时宽度增加(见图7),到达0.56% 时,光谱全宽已经接近7nm(图8)。随损伤的扩展,光 栅反射光谱裂解加剧,光谱展宽变宽。在结构承载后,综 合复合材料结构光栅中心波长一静态应变曲线(见图9) 出现拐点(应变0.1%),此时光谱出现部分分裂,在应变 0.401%位置,应力应变曲线开始出现拐点,此时光谱变化 明显,通过光栅反射光谱变化就可以确定复合材料结构的 承载及损伤状况。



图8 静态拉伸应变为0.56%时光栅反射全光谱



图9 光纤光栅中心波长一复合材料静态拉伸应变关系曲线

3结论

利用外贴光栅可实现对带双缺口复合材料结构静态 拉伸损伤的实时原位监测,监测光栅反射光谱变化与复合 材料静态拉伸应变—光栅中心波长变化关系的曲线非常一 致。该方法可解决内埋光栅影响复合材料结构完整性及在 役结构无法再埋入的技术难题,同时光栅具有的长光栅及 光栅位置与光谱——对应的特性对复合材料微观损伤监测 具有重要的意义。

参考文献

[1] Wang Yiping, Cui Yiping. Effects of distributed birefringence on fiber Bragg grating under non–uniform transverse load[J]. Optics & Laser Technology, 2008,40: 1037–1040.

[2] Bosia F, Giaccari P. Characterization of the response of fibre Bragg grating sensors subjected to a two-dimensional strain field[J]. Smart Materials and Structures, 2003, 12: 925–934.

[3] Ussorio M, Wang H. Modifications to FBG sensor spectra due to matrix cracking in a CFRP composite[J]. Construction and Building Material, 2006, 20:111–118.

[4] Takeda S, Okabe Y, Takeda N. Delamination detection in CFRP laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors[J], Composites, 2002,33 :971–980.

[5] Takeda S, Okabe Y, Yamamoto T. Detection of edge delimitation in CFRP laminates under cyclic loading using small-diameter FBG sensor[J]. Composite Science and Technology, 2003, 63: 1885-1894.

[6] Yoji O, Tadahito M, Shigeki Y. Detection of microscopic damages in composite laminates with embedded smalldiameter fiber Bragg grating sensors[J]. Composites Science and Technology, 2002, 62: 951–958.

[7] Hang Yin Ling, Kin Tak Lau, Li Cheng. Monitoring mode II fracture behavior of composite laminates using embedded fiber optic sensors[J]. Composite: Part B, 2007,38:188–497.

[8] Takada S, Aoki Y, Ishikawa T. Structural health monitoring of composite wing structure during durability test[J]. Composite Structures, 2007, 79:133–139.

作者简介

卢少微,副教授,博士,主要从事复合材料光纤健康 监测研究工作。