

基于红外热像技术的风力机微裂纹叶片研究

陈长征¹, 王琳琳^{1,2}, 周 勃^{1,3}, 张亚楠¹, 马天畅³, 俞方艾³

(1. 沈阳工业大学机械工程学院, 沈阳 110870; 2. 沈阳药科大学制药工程学院, 沈阳 110016;

3. 沈阳工业大学建筑与土木工程学院, 沈阳 110870)

摘 要: 通过对有边缘微裂纹的兆瓦级风力机叶片试件进行拉伸断裂试验,采用红外热像仪全程监测试件表面温度,研究复合材料叶片微裂纹损伤区内温度场变化,分析试件拉伸断裂过程中的损伤演变情况。结果表明:1)塑性功转变成热的热耗散因子为80%;2)微裂纹裂尖温度变化趋势为先线性下降后升高;3)试验中发现试件温度场断裂前无明显变化;4)试件断裂损伤形式有纤维断裂、分层、界面脱粘。

关键词: 红外热像; 温度场; 热耗散; 损伤

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引 言

叶片是风力机重要的部件,其良好的设计、可靠的质量是决定风发电机组性能优劣的关键^[1]。叶片多数是玻璃纤维增强树脂复合材料,在生产制造中可能含有气泡、孔隙、裂隙、纤维断裂等缺陷,缺陷在载荷作用下会导致叶片断裂。因此研究含有缺陷风力机叶片损伤并能及时诊断出损伤的程度是重要的课题。

国内外学者采用不同监测方法研究叶片损伤,如文献[2,3]通过应变变化监测叶片运行,文献[4,5]通过声发射技术监测风力机叶片裂纹产生的信号监测叶片运行。由于叶片缺陷种类繁多和叶片是各向异性复合材料使得振动技术和声发射手段监测叶片有很多弊端,导致超声波很难获取,不能准确诊断叶片运行状态^[6]。红外热像技术由于快速直观、非接触、热灵敏性高的特点被应用在很多领域。当今红外热像技术主要应用在风力机叶片缺陷的无损检测^[7,8],叶片复合材料疲劳载荷过程中叶片表面温度变化^[9,10]方面,而较少研究含有微裂纹的叶片断裂过程中温度变化及温度变化对叶片的损伤。

本文应用红外热像仪实时监测含有微裂纹叶片拉伸断裂时表面温度,分析塑性功转变为热的热耗散系数和微裂纹叶片试件拉伸过程的损伤演变情况,为含有微裂纹叶片断裂前兆和快速健康监测进行探索性研究。

1 基础理论

叶片微裂纹尖端在外力作用下发生塑性变形,而塑性变形大部分转化为热耗散,小部分转变成材料的内部储能或其他不同形式耗散能。由于热耗散导致微裂纹附近是有内热源的温度场,宏观上表现为叶片表面温度升高,这是不可逆的能量耗散过程。至今,已有许多国内外专家应用红外热像技术研究材料裂纹扩展的温度场^[11-13]。

在微裂纹发生塑性变形的损伤区内取1个微元体,则微元体的塑性功增量为:

$$dW_p = \sigma d\varepsilon_p \quad (1)$$

式中, σ ——等效应力; $d\varepsilon_p$ ——等效塑性应变。

整个微裂纹变形体在塑性变形时所消耗的塑性功为:

$$W_p = \sigma \varepsilon_p \quad (2)$$

通过塑性功位置的热源强度:

收稿日期: 2017-1-18

基金项目: 国家自然科学基金(51575361; 51675350); 辽宁省百千万人才工程(2015049)

通信作者: 周 勃(1976—), 女, 博士、教授、博士生导师, 主要从事大型设备的故障诊断与振动噪声控制方面的研究。

liguodapple@sina.com

$$Q = \eta W_p = \eta \sigma \varepsilon_p \quad (3)$$

式中, η ——热耗散因子, 是热耗散与塑性功的比值。一般 80%~100% 的塑性功会以热耗散形式释放^[14]。由于微裂纹扩展过程中热弹性效应和其他热损失量远远小于塑性功转变热耗散量, 外部热源也不考虑。根据不可逆热力学和塑性理论, 则微裂纹热传导方程为:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

式中, k ——导热系数; ρ ——材料密度, kg/m^3 ; c ——比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

叶片复合材料性能参数如表 1 所示。

表 1 叶片复合材料性能参数

Table 1 Performance parameter of blade composite

$\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c / \text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	$k / \text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
2550	0.8	1

解析式(4), 确定初始条件和边界条件: 1) 初始条件为 $t=0 \text{ s}$, $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$ (室内温度); 2) 边界条件为试件边界无温度和热流密度, 属于第 3 类边界条件, 试件边界表面各点与周围空气对流交换, 对称边界施加绝热条件。

2 试 验

2.1 试件材料及形状

本试验试件参考 GB/T 1447—2005 纤维增强塑料拉伸性能试验, 叶片试件为无碱玻璃纤维环氧树脂复合材料, 共 15 层, 铺层选用兆瓦级叶片铺层方式和铺层角度, 其中纤维铺层角度为 $\pm 45^\circ$ 。试件按应固化工艺在热压机上热压固化后裁剪制成。试验中试件是中间边缘有 2 mm 微裂纹, 试件形状及尺寸如图 1 所示。

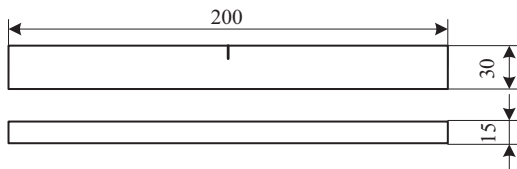


图 1 叶片试件形状及尺寸图(mm)

Fig. 1 Shape and size of blade specimen graph(mm)

2.2 试验系统

本试验系统包括 MTS810 伺服液压试验机

和 NEC R300 红外热像实验系统。MTS810 伺服液压试验机参数: 主机载荷容量 $\pm 250 \text{ kN}$, 载荷传感器精度优于 0.5%, 频率范围 0~30 Hz; R300 红外热像仪参数: 工作波长 8~14 μm , 温度分辨率 (NETD) 为 0.05 $^\circ\text{C}$ (30 $^\circ\text{C}$), 精度高达 $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, 空间分辨率在针对扫描影像时通常用瞬时视场角 (IFOV) 表示, $\text{IFOV} = 1.21 \text{ mrad}$, 帧频频率范围 8.5~60 Hz。

2.3 试件发射率确定

根据斯蒂芬-波尔兹曼定律可知, 任何物体的单位表面发射的辐射功率为:

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad (5)$$

式中, ε ——物体的发射率; σ ——斯蒂芬·波尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T ——温度, K。

将试件放在保温箱中 5 h, 取出用红外热像仪测量试件表面温度, 调整红外热像仪控制程序的试件发射率, 直到热像仪测温结果与保温箱设定值一致。试验测得试件的发射率为 0.95。

2.4 试验过程

试验过程要求密闭恒温的状态, 防止其他因素影响试验。红外热像仪主要监测微裂纹范围试件的温度, 调整时考虑试件在红外热像仪范围。红外热像仪放在试件外侧, 使镜头与试件表面垂直, 在试验中测量前调准后, 测量过程中不再调节, 保持统一的测量标准。经过调整, 红外热像仪距离试件约 50 cm 处。试件和红外热像仪调整好, 进行拉伸断裂试验。试验采用位移控制方式, 本试验中用 0.5 mm/s 进行。试验安装好的试验系统图如图 2 所示。



图 2 叶片加载试验系统图

Fig. 2 System graph of blade loading test

3 试验分析及结果

3.1 温度场分析

拉伸试验经过处理得到试件应力-应变-裂尖温度变化图如图 3 所示, 试件裂尖温度变化图如图 4 所示。经过式(4)计算热传导方程得出解析温度值, 解析温度曲线与试验温度曲线在图 4 中相差很小, 得出热耗散因子 η 为 80%, 说明在拉伸过程中叶片试件裂尖处有 80% 塑性功转化热耗散。由图 3 可发现温度曲线发生变化的拐点处也是叶片试件的屈服点。叶片试件拉伸过程微裂纹尖端温度变化主要分为 2 个阶段, 如图 4 所示: 1) 弹性变形阶段, 从试件开始施加载荷到拉伸 25 s 时, 即图 4 中 AB 段, 这个阶段叶片试件裂尖温度呈线性下降, 说明叶片试件正处在热弹效应阶段。2) 塑性变形阶段, 叶片试件拉伸从 25 s 到 175 s 断裂时刻, 即图 4 中 BC 段, 塑性阶段叶片试件裂尖温度变化先是快速上升而后缓慢上升, 塑性阶段时间约占整个拉伸试验时间的 80%, 说明叶片试件在塑性阶段做了大量塑性功, 使叶片试件表面温度迅速上升。通过采用红外热像仪实时监测兆瓦级叶片试件拉伸断裂试验的表面温度, 能够快速预测叶片试件断裂的大约时间, 可为叶片的良好结构监测提供新方法。

红外热像图能够反映出叶片试件拉伸加载过程中热源的分布以及温度场变化过程情况, 选取试验过程中有明显变化阶段 25、50、75、100 s 时刻热像图, 如图 5 所示。当叶片试件拉伸 25 s 时红外热像图看到微裂纹裂尖温度场无变化, 这与图 4 的温度曲线相吻合。由于热弹效应, 这个阶段微裂纹裂尖温度降低。当试件拉伸 50 s 时微裂纹裂尖迅速

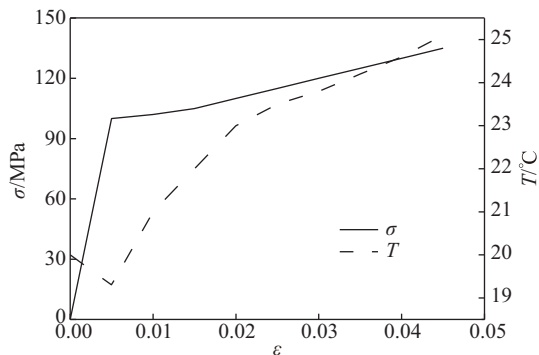


图3 试件应力-应变-裂尖温度变化图

Fig. 3 Strain-stress-crack tip temperature change in specimen

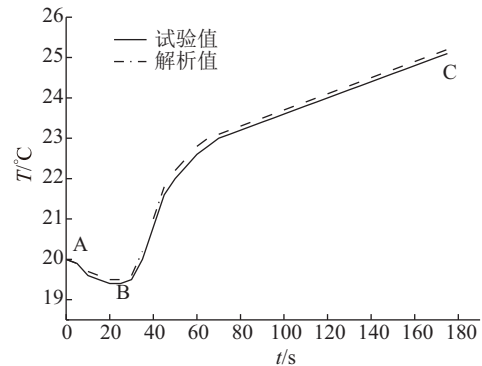


图4 试件裂尖温度变化图

Fig. 4 Temperature change of crack tip in specimen

出现明显变化, 以微裂纹裂尖尖端形成半圆热源分布的温度场, 半圆形也符合 I 型裂纹塑性区的形状。当试件拉伸 75 s 时, 红外热像图中的温度场分布扩大, 温度也快速上升, 比 50 s 时温度场大。当试件拉伸到 100 s 时温度场再次扩大, 待这个时刻后温度场分布均匀无明显变化, 不再随拉伸加载增加而大范围扩大。

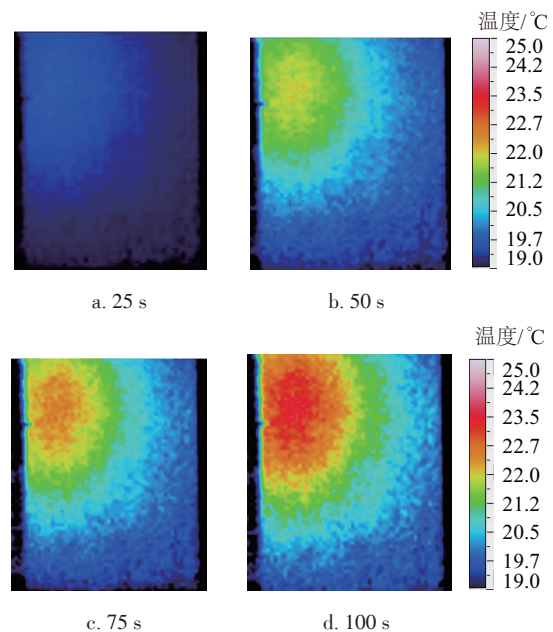


图5 不同时刻红外热像图

Fig. 5 Infrared thermography at different time

3.2 损伤分析

复合材料叶片制备是一个复杂的工艺过程, 生产中难免会出现微裂纹缺陷。微裂纹为应力集中点, 会引发叶片试件拉伸断裂或疲劳过程中的断裂点。应用红外热像技术可及时快速确定叶片中微

裂纹的位置和判断确定微裂纹在拉断过程中的损伤情况。叶片试件在整个拉伸断裂过程中的损伤过程是:在弹性变形阶段中,由于热弹效应,微裂纹裂尖温度场不随拉伸载荷的增大而增大,相反这个阶段温度线性下降,但下降温度值不太,从红外热像图看出弹性阶段中叶片试件无损伤。拉伸初期基体上的应力非常小,不足以引起基体的损伤。拉伸时间从 50 s 到 100 s 时,微裂纹裂尖出现明显变化的温度场,热源分布也较分散。微裂纹裂尖温度场会随拉伸载荷增大而扩大,到达一定程度后会局部破坏使得应力重新分布,趋于稳定拉伸阶段。100 s 到最后拉伸时间里是稳定拉伸阶段,微裂纹裂尖温度变化不大,热源分布于无明显变化。虽然塑性变形阶段后期特征上无大的发展,但实际中这个阶段损伤数量增大,遍布微裂纹裂尖大部分,试验过程中偶尔会听到试件发出“吱吱”的响声,这是拉伸过程中试件局部的树脂开裂和界面脱粘所造成的。这时肉眼看不出叶片试件表面明显的变化,但实际上带有纤维断裂层和微裂纹附近存在微小的裂纹。整个拉伸断裂过程中,叶片试件微裂纹并不扩大,这从一个侧面也可看出叶片复合材料具有较高的损伤容限。叶片试件在断裂前无明显征兆,主要因为叶片复合材料中纤维是主要承载力,且铺层角度 $\pm 45^\circ$,它会阻止纤维与基体界面裂纹的扩展,最终使叶片试件损伤在纤维断裂层和微裂纹断口面断裂。纤维断裂是叶片试件损伤的主要方式,同时又伴有分层和界面脱粘方式,试件断裂如图 6 所示。这是由于纤维断裂存在导致基体界面结合较弱,纤维断头从基体内拔出和分层。



图6 试件断裂图

Fig. 6 Specimen fracture graph

4 结 论

复合材料叶片拉伸断裂试验结论:

1)通过计算热耗散因子为 80%,说明 80%塑性功被转化为热。

2)采用红外热像仪能够监测叶片试件表面温度场变化,由于叶片试件的各向异性和分散大的特点,导致热源分布较分散。

3)随着载荷增大,叶片试件的温度场分布随拉伸载荷增大而增大,待拉伸载荷达到一定程度后,叶片试件温度场分布不再明显变化,直到最后整体断裂破坏。说明叶片复合材料有较大的损伤容限。

4)从断裂口观察试件,叶片试件损伤的主要方式为纤维断裂,并伴有分层和界面脱粘方式。

[参考文献]

- [1] 陈绍杰,申振华,徐鹤山. 复合材料与风力机叶片[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008, (2): 42—46.
- [1] Chen Shaojie, Shen Zhenhua, Xu Heshan. Composites and wind turbine blades [J]. Fiberglass & Composite, 2008, (2): 42—46.
- [2] 朱小军,陈雪峰,翟智,等. 复合材料风电叶片细观失效准则及其损伤演化[J]. 机械工程学报, 2014, 50(11): 17—22.
- [2] Zhu Xiaojun, Chen Xuefeng, Zhai Zhi, et al. Microscopic failure criterion and damage evolution of composite material wind turbine blade [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(11): 17—22.
- [3] 李雅峰,徐玉秀. 基于模态应变能变化率的大型风力发电机叶片损伤识别与定位[J]. 太阳能学报, 2015, 36(9): 2251—2256.
- [3] Li Yafeng, Xu Yuxiu. Damage identification and positioning of wind turbine blade based on element modal strain energy change ratio [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2015, 36(9): 2251—2256.
- [4] Tang Jialin, Soua S, Mares C, et al. An experimental study of acoustic emission methodology for in service condition monitoring of wind turbine blades [J]. Renewable Energy, 2016, 99: 170—179.
- [5] Lee Jae- Kyung, Park Joon- Yang, Oh Ki- Yong. Transformation algorithm of wind turbine blade moment signals for blade condition monitoring [J]. Renewable Energy, 2015, 79(7): 209—218.
- [6] 胡燕平,戴巨川,刘德顺. 大型风力机叶片研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 140—151.
- [6] Hu Yanpin, Dai Juchuan, Liu Deshun. Research status and development trend on large scale wind turbine blades [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 140—151.
- [7] 肖劲松,严天鹏. 风力机叶片的红外热成像无损检测的数值研究[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(1): 48—52.

- [7] Xiao Jingsong, Yan Tianpeng. Numerical analysis of NDT of wind turbine blades using infrared imaging [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32 (1): 48—52.
- [8] 郭伟, 董丽虹, 王慧鹏, 等. 基于红外热像技术的涡轮叶片损伤评价研究进展[J]. 航空学报, 2016, 38 (2): 429—436.
- [8] Guo Wei, Dong Lihong, Wang Huipeng, et al. Research progress of damage estimation for turbine blades based on infrared thermographic technology [J]. Acta Aeronautica Astronautica Sinica, 2016, 38 (2): 429—436.
- [9] Colombo C, Libonati F, Pezzani F, et al. Fatigue behavior of a GFRP laminate by thermographic measurements [J]. Procedia Engineering, 2011, 10: 3518—3527.
- [10] Emery T R, Dulieu-Barton J M. Thermoelastic stress analysis of damage mechanisms in composite materials [J]. Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(12): 1729—1742.
- [11] Barile C, Casavola C, Pappaletta G, et al. Analysis of crack propagation in stainless steel by comparing acoustic emissions and infrared thermography data [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 69: 35—42.
- [12] Cui Z Q, Yang H W, Wang W X, et al. Research on fatigue crack growth behavior of AZ31B magnesium alloy electron beam welded joints based on temperature distribution around the crack tip [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 133: 14—23.
- [13] Martinez J R S, Balandraud X, Toussaint E, et al. Thermomechanical analysis of the crack tip zone in stretched crystallizable natural rubber by using infrared thermography and digital image correlation [J]. Polymer, 2014, 55(24): 6345—6353.
- [14] Ranc N, Palin-Luc T, Paris P C. Thermal effect of plastic dissipation at the crack tip on the stress intensity factor under cyclic loading [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(6): 961—972.

STUDY ON MICROCRACK OF WIND TURBINE BLADE BASED ON INFRARED THERMOGRAPHY TECHNOLOGY

Chen Changzheng¹, Wang Linlin^{1,2}, Zhou Bo^{1,3}, Zhang Ya'nan¹,
Ma Tianchang³, Yu Fang'ai³

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. School of Pharmaceutical Engineering, Shenyang Pharmaceutical University, Shenyang 110016, China;

3. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The microcrack on the edge of MW wind turbine blade specimen was tested by tensile fracture test. The infrared thermography was used to monitor surface temperature of blade specimen, and research the temperature field variation in microcrack area of composite blade, and analyze the specimen damage evolution during tensile fracture of blade specimen. The results show that the heat dissipation factor of plastic energy converted into heat is 80%. The temperature change of microcrack tip firstly is linear temperature drop, then temperature rise. The test find that the specimen temperature field has no obvious change before fracture. The fracture damage form of the specimen has fiber breakage, delamination and interface debonding.

Keywords: infrared thermography; temperature fields; heat dissipation; damage