DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905454

基于热力熵分析的风力机叶片疲劳早期损伤研究*

王琳琳,陈长征,周 勃,康 爽,杜金尧
(沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870)

摘 要:风力机叶片受到交变载荷作用容易发生疲劳断裂,因此对叶片疲劳损伤的健康监测是十分必要的。故提出基于热力学熵对风力机叶片疲劳损伤研究方法,分析叶片累积熵产随疲劳循环周数变化规律,确定发生疲劳断裂的阈值点。结果发现,叶片的损伤能也是影响疲劳损伤的重要因素;叶片的累积熵产随疲劳循环周数有 3 个阶段变化,研究得到疲劳损伤阈值点为累积熵产变化曲线的第 3 阶段起始点,并且阈值点的累积熵产和疲劳断裂熵均为独立固定值,不受载荷、频率、应力比因素影响,经过计算阈值点的累积熵产与疲劳断裂熵比值为 0.5。利用其他疲劳实验验证阈值点,结果证明阈值点的确定是准确的。

关键词: 热力学熵;疲劳损伤;风力机叶片;红外热像
中图分类号: TH87 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.4099

Study on early fatigue damage of wind turbine blade based on thermodynamic entropy analysis

Wang Linlin, Chen Changzheng, Zhou Bo, Kang Shuang, Du Jinyao
(*School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China*)

Abstract: The wind turbine blade usually suffers from fatigue fracture occurred easily under alternating load. So health monitoring of wind turbine blade fatigue damage is very important. A new study method of wind turbine blade fatigue damage is proposed based on thermodynamic entropy. The changing law of the cumulative entropy production of the blade vs. the number of fatigue cycles is analyzed and the threshold point of fatigue fracture occurrence is determined. The results show that the damage energy of the wind turbine blade is also an important factor affecting fatigue damage. There are three stages for the cumulative entropy production of the blade vs. number of fatigue cycles. Study reveals that the threshold point of fatigue damage is the starting point of the third stage of the cumulative entropy production curve. The cumulative entropy production at threshold point and fatigue fracture entropy are independent fixed values, which are not affected by load, frequency and stress ratio. Through calculation, it is found that the ratio of cumulative entropy production to fatigue fracture entropy is 0.5. Other fatigue experiments were used to verify the threshold point, the result proves that the determined threshold point of fatigue fracture is accurate.

Keywords: thermodynamic entropy; fatigue damage; wind turbine blade; infrared thermography

0 引 言

叶片是风力机重要部件,主要材质为玻璃纤维复合材料[1]。在恶劣环境和交变载荷作用下,叶片容易产生疲劳损伤,导致风力机叶片疲劳断裂事故频频发生[2],严重影响风电机组的安全运行,也造成巨大的经济损失。因此,对风力机叶片的疲劳损伤进行良好健康监测和准确预估疲劳损伤的阈值点是至关重要的,能够有效预防叶片疲劳失效。

疲劳损伤是不可逆能量耗散过程,大部分滞回能转化为热耗散[3-5],很多学者利用疲劳过程的热耗散变化对复合材料疲劳损伤演化过程作定性研究[6-8]。Meneghetti[9]提出一种计算疲劳过程中热耗散大小方法,有利于热耗散定量研究疲劳损伤演化。但是,Meneghetti 提出热耗散计算方法中假设每周疲劳循环的热耗散量是

收稿日期:2019-08-07 Received Date:2019-08-07
*基金项目:国家自然科学基金(51575361,51675350)项目资助

相同,这种假设条件与风力机叶片的实际疲劳损伤情况不符。因为风力机叶片在疲劳载荷作用下每个疲劳循环周期的微观结构变化不相同,导致产生的疲劳热耗散必然不相同,所以利用每周疲劳循环相同的热耗散定量预测风力机叶片疲劳损伤存在不足。

热力学第二定律指出,疲劳过程是系统无序性增大过程,有不可逆热力学熵产生。Basaran 等[10]最早通过疲劳试验发现疲劳过程有熵产生。学者们纷纷开始利用热力学熵对金属材料、复合材料的拉-拉疲劳试验、弯曲疲劳试验进行疲劳损伤分析[11-13],发现疲劳过程累积熵产是逐渐增加。Nadrei 等[14]研究金属疲劳损伤发现在疲劳断裂时的累积熵产不变,均为固定值,称断裂时刻的累积熵产为疲劳断裂熵(fracture fatigue entropy,FFE),应用 FFE 进行了疲劳损伤研究。至今,疲劳损伤阈值点设定常采用温度变化,如 Amiri 等[15]采用表面温度变化中的第 3 阶段温度升高点作为疲劳断裂的阈值点,认为在温度升高点疲劳寿命小于 90% 的疲劳寿命时,金属结构处于安全状态。以第 3 阶段温度升高点作为疲劳断裂的阈值点会受到很多因素影响,如热边界条件和力学边界条件[16]、设备分辨率、试验环境等,难以保证温度测量的精确性。而熵是疲劳过程系统无序性的表现,熵产变化大小代表疲劳损伤程度,采用累积熵产变化作为疲劳损伤阈值点,才更具有可靠性和更深的物理意义。

本文研究风力机叶片试件疲劳试验的累积熵产变化规律,利用热力学熵评估疲劳损伤程度,分析疲劳失效阈值点的确定,再采用其他疲劳试验验证阈值点的准确性,证明该方法的合理性和准确性。

1　基础理论

1.1　热力学第一、第二定律

热力学第一定律指出,任意系统内能等于外界对系统传递的能量和外界对系统所做的功之和,能量平衡方程为:

$$\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t}+\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中:U 为内能;W 为外界所做功;Q 为外界向系统传递的能量。

引入比内能和热流量到式(1),变为:

$$\rho\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}=-\nabla\cdot\boldsymbol{J}^q+w \tag{2}$$

式中:ρ 为密度;u 为内能;w 为机械能;$\boldsymbol{J}^q$ 为热流量。

复合材料疲劳损伤的比内能是由热耗散能和损伤能两部分组成为[17],则比内能为:

$$\rho\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}=\rho C\frac{\partial T}{\partial t}+e_d \tag{3}$$

式中:$\rho\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}$ 为比内能;$\rho C\dfrac{\partial T}{\partial t}$ 为热耗散能;e_d 为损伤能。损伤能主要是改变结构的微观形貌,产生新裂纹和新损伤面,可以从 SEM 微观图观测到变化。

将式(3)代入式(2)中,得到:

$$w=\nabla\cdot\boldsymbol{J}^q+\rho C\frac{\partial T}{\partial t}+e_d \tag{4}$$

式中:C 为材料比热容;T 为材料温度。

热力学第二定律指出,系统经历外力作用产生变形时,系统熵变化等于穿过系统边界的熵流和系统内的熵产之和:

$$\frac{\mathrm{d}S_t}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}S_i}{\mathrm{d}t}+\frac{\mathrm{d}S_e}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

式中:$\mathrm{d}S_t$ 为系统总熵;$\mathrm{d}S_i$ 为系统熵产;$\mathrm{d}S_e$ 为系统流进、流出的熵流,可以是正值或负值。根据热力学第二定律的克劳修斯-迪昂不等式,系统的熵产是非负的,即:$\mathrm{d}S_i\geqslant 0$。

假设系统局部平衡,熵平衡方程(5)写成熵产与熵流的和,式(5)变为:

$$\rho\dot{s}=-\nabla\cdot\boldsymbol{J}^s+\dot{\gamma} \tag{6}$$

式中:s 为单位质量系统熵;$\boldsymbol{J}^s$ 为系统的熵流;γ 为系统的熵产。

熵流与单位面积热流密度的关系为:

$$\boldsymbol{J}^s=\frac{\boldsymbol{J}^q}{T} \tag{7}$$

对式(7)进行温度求导,有:

$$\nabla\cdot\boldsymbol{J}^s=\nabla\cdot\left(\frac{\boldsymbol{J}^q}{T}\right)=\frac{\nabla\cdot\boldsymbol{J}^q}{T}-\boldsymbol{J}^q\cdot\frac{\nabla T}{T^2} \tag{8}$$

亥姆霍兹自由能 ψ 是重要的热力学参数,自由能的减少就是等温过程中系统对外界所做的最大功,则:

$$\psi=u-T\cdot s \tag{9}$$

式中:u 为系统的内能;T 为温度;s 为熵。

对式(9)进行时间的微分得:

$$\dot{\psi}=\dot{u}-s\dot{T}-T\dot{s} \tag{10}$$

把式(10)代入到式(2)和(6)中,得到变形后的能量平衡方程与熵产率方程为:

$$\rho(\dot{\psi}+\dot{T}s+T\dot{s})=-\nabla\cdot\boldsymbol{J}^q+w \tag{11}$$

$$\dot{\gamma}=\frac{w}{T}-\frac{\rho(\dot{\psi}+\dot{T}s)}{T}-\frac{\boldsymbol{J}^q\cdot\nabla T}{T^2}\geqslant 0 \tag{12}$$

根据傅里叶热传导定律:

$$\boldsymbol{J}^q=-k\nabla T \tag{13}$$

$$C=T\frac{\partial s}{\partial T} \tag{14}$$

式中:k 为材料热传导系数。

由式(4)、(8)、(11)~(14)得到熵产变化率方程式为:

$$\dot{\gamma} = \frac{w}{T} + \frac{e_d}{T} + \frac{k}{T^2}\nabla^2 T \geqslant 0 \tag{15}$$

疲劳过程中系统累积熵产表达为:

$$\gamma_f = \int_0^{t_f}\left(\frac{w}{T} + + \frac{e_d}{T} + \frac{k}{T^2}\nabla^2 T\right) \mathrm{d}t \tag{16}$$

式中:γ_f 为累积熵产;$t = 0$ 时初始时间;t_f 为疲劳断裂时刻。

通过式(16)可以看出,疲劳过程的累积熵产是由机械能、损伤能、热耗散能计算得到的。由热传导作用引起的热耗散能对累积熵产比较小,可以忽略不计[18],故式(16)可变为:

$$\gamma_f = \int_0^{t_f}\left(\frac{w}{T} + \frac{e_d}{T}\right) \mathrm{d}t \tag{17}$$

1.2 损伤能

根据能量耗散守恒定律有:

$$H = E_{tc} + E_{\text{dissipated}} + e_d \tag{18}$$

式中:H 为循环滞回能,应用应力应变可以求得;$E_{tc} = \rho C\frac{\partial T}{\partial t}$ 为温度变化产生的能量;$E_{\text{dissipated}}$ 为热传导、热对流、热辐射作用产生的热耗散能。

疲劳试验采用液压疲劳试验机和红外热像技术手段能够测量 3 种热耗散,热耗散的 3 种热方式变化如图 1 所示,则 $E_{\text{dissipated}}$ 可以表示为[19]:

$$E_{\text{dissipated}} = [h(T_s - T_a) + \varepsilon\beta(T_s^4 - T_a^4)]\frac{A_{\text{surf}}}{V} + \frac{2kA_{\text{cond}}}{V}\frac{\Delta T}{\Delta z} \tag{19}$$

式中:A_{surf} 为热对流和热辐射方式的试件表面面积;A_{cond} 为热传导方式的夹具截面积;h 为对流传热系数,ε 为表面发射率,β 为 Stefan-Boltzmann 常数(5.67×10^{-8} W/m$^2\cdot$K^4);T_s 为试件表面温度;T_a 为环境温度;V 为计量部分体积;$\Delta T/\Delta z$ 为在测量部分末端的轴向温度梯度;ΔT 为试件表面温度与夹具温度差;Δz 为计量段的末端到夹具的距离。

复合材料的对流传热系数 h 通过实验可以测得[20]:

$$h = 1.42\left(\frac{T_s - T_a}{L}\right)^{0.25} \tag{20}$$

式中:L 为上下夹具之间试件的长度。

受疲劳载荷作用下,叶片试件复合材料的导热系数 k 为[21]:

$$k = k_l\cos^2\theta + k_t\sin^2\theta \tag{21}$$

式中:k_l 为横向导热系数;k_t 为纵向导热系数;θ 为纤维与载荷的夹角。

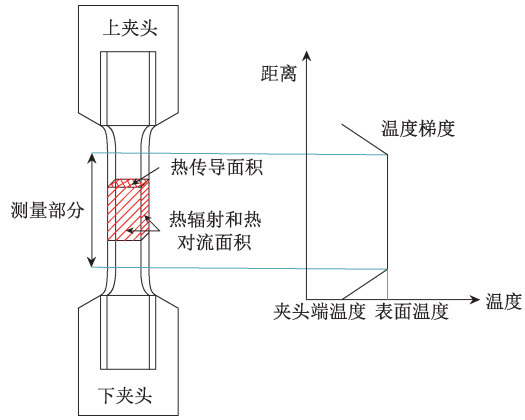


图 1 疲劳试验热耗散 3 种方式

Fig.1 Three heat dissipation modes in fatigue test

$$k_l = k_m(1 - V_f) + k_f V_f \tag{22}$$

$$k_t = k_m\frac{k_m + k_f - V_f(k_m - k_f)}{k_m + k_f + V_f(k_m - k_f)} \tag{23}$$

式中:k_m 是基体导热系数;k_f 是纤维导热系数;V_f 是纤维体积分数。

2 试验研究

2.1 材料及试样

由于叶片体积庞大无法安装在疲劳试验机上做疲劳试验,制作适合安装疲劳试验机的叶片复合材料试件。叶片复合材料试件是由无碱玻璃纤维布和环氧树脂胶制作,无碱纤维布规格为 400 g/m^3,环氧树脂胶为 E44。叶片试件铺设共计 15 层,铺设方式为$[0/90]_{\text{NT}}$。试件经过热压、固化工艺,最后裁剪成长×宽×高为 200 mm×30 mm×10 mm 的长方形,如图 2 所示。试件制作时,使玻璃纤维布铺设与施加载荷的角度为 θ=45°。

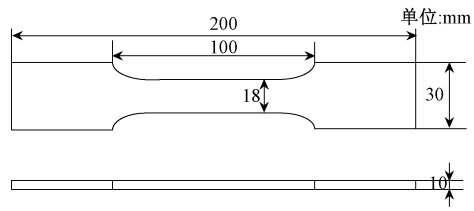


图 2 叶片试件的形状及尺寸

Fig.2 The shape and size of blade specimen

2.2 试验系统和试验过程

仪器设备有 NEC R300 红外热像仪和 MTS 810 液压伺服疲劳试验机。NEC R300 红外热像仪实时监控记录试件表面温度和红外热像图,MTS 810 液压伺服试验机对试件施加疲劳载荷。

红外热像仪的单帧图像分辨率为 320 pixel × 240 pixel,温度分辨率达到在 30℃时能够检测出最小温差 0.05℃,红外热像仪的检测精度高达±1℃,帧频为 8.5~60 Hz;MTS 810 伺服液压试验机主机载荷容量 ±250 kN,载荷传感器精度优于 0.5%,频率范围 0~30 Hz。

试验加载前,利用细砂纸对所有被测试件的表面边界棱角处进行打磨处理,用以减小或消除棱角处的应力集中和边界效应,防止对试验结果的影响。

试验过程密闭恒温,环境温度保持在 20℃,实验中不能有人走动,以防止其他因素影响试验结果。首先,对试件进行预加载试验,保证试件与 MTS810 上下夹头接触良好,防止试件脱离试验机的夹头;再次,调整红外热像仪位置,使红外热像仪的镜头与试件表面垂直,测量红外热像仪与试件距离为 50 cm。试验安装系统,如图 3 所示。

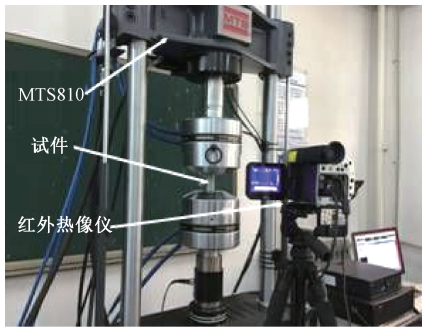


图 3　试验系统

Fig.3　The test system

试验系统调整后,对叶片试件进行正弦波方式加载、恒载荷幅的疲劳试验。叶片试件试验方案,如表 1 所示,每个试验采用 3 个试件,结果取平均值。

表 1　叶片试件疲劳试验

Table 1　Fatigue test of blade specimen

试验次数	应力比	频率/Hz	应力/MPa
1	0.1	10	40
2	0.1	10	50
3	0.1	10	60
4	0.1	5	40
5	0.5	10	40

3　结果与讨论

3.1　叶片试件的红外热像图分析与讨论

采用红外热像仪对叶片试件疲劳试验进行连续拍摄,得到一系列连续的红外热像图。取应力比 0.1、频率 10 Hz、应力 40 MPa 的叶片试件在 5 500、30 000、70 000、89 000 循环周数下的红外热像图,如图 4 所示。由图 4 可以看出,叶片试件随疲劳循环周数的变化情况。叶片试件刚受到疲劳载荷时,红外热像图上出现微弱椭圆形热斑区域,并且该区域温度比周围区域温度高,如图 4(a)所示。叶片试件随疲劳循环周数不断增加,热斑范围逐渐扩大,强度逐渐增强,温度逐渐升高,如图 4(b)~(d)所示。在 89 000 疲劳循环周数时,试件表面出现最强的热斑区域。试件存在应力集中点,在疲劳载荷作用下产生了滞回能。疲劳过程中滞回能转化为热耗散,试件表面出现了热斑。热斑强度最大的区域,也是最容易发生疲劳断裂的区域。由于复合材料是各向异性材料,受到载荷时会沿着最大应力方向传递,导致热斑范围和强度不是均匀的变化。

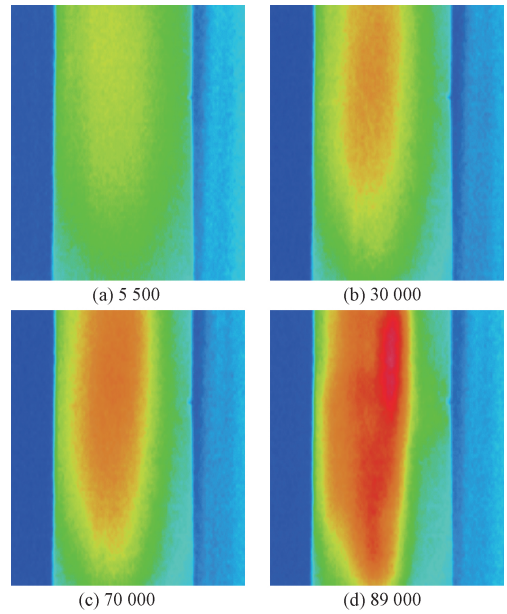


图 4　叶片试件不同循环周数红外热像图

Fig.4　The infrared thermography of the blade specimen at different numbers of cycles

试验安装后,叶片复合材料的材料性能参数和试验测得数据[22],如表 2 所示。

表 2　复合材料参数和疲劳试验参数

Table 2　The composite material parameters and fatigue test parameters

纤维 45°导热系数/($Wm^{-1}\cdot k^{-1}$)	表面发热率	纤维体积分数/%	基体导热系数/($Wm^{-1}\cdot k^{-1}$)
0.24	0.9	10	0.19
纤维导热系数/($Wm^{-1}\cdot k^{-1}$)	夹具长度/mm	密度/($kg\cdot m^{-3}$)	比热容/($J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$)
1.03	75	1 800	1 400

应力比 $r=0.1$,频率 $f=10$ Hz,应力 40、50、60 MPa 试件的疲劳寿命和温度变化随疲劳寿命变化的曲线图,如图 5 所示。从图 5 可以看出,在相同的试验条件下,3 种不同加载载荷的温度变化趋势相一致,大致分为 3 个阶段:温度快速升温阶段、温度稳定上升阶段、温度急剧上升阶段,分别约占整个疲劳寿命 10%、70% 和 20%。相同的应力比和频率时,应力越大,温度差越高。这主要因为应力大,试件产生的塑性滞回能越大,转变热耗散也越大,使表面温度差越大。从图 5 看出,试件进入第 3 阶段温度变化,很快就要发生疲劳断裂。最大应力 60 MPa 的试件温度变化曲线发现,刚进入第 3 阶段时温度差约为 3.5℃,疲劳断裂时温度差约为 6℃。复合材料的热传导系数比较小,导致疲劳载荷作用下表面温度变化相对很小。再因为红外热像仪的分辨率和环境因素等影响,使得检测疲劳过程的表面温度变化很难保证精确,无法准确判断疲劳损伤的阈值点。

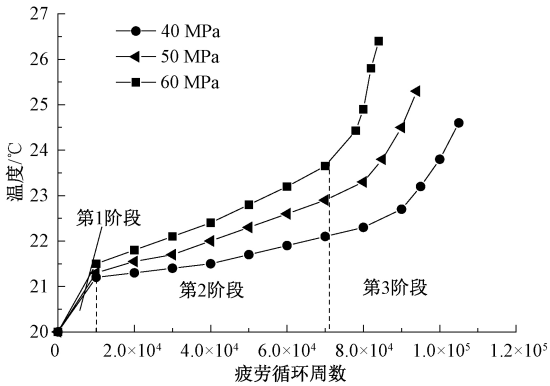


图 5 风力机叶片试件在疲劳试验下温度变化

Fig.5 The temperature changing of the wind turbine blade specimen in fatigue test

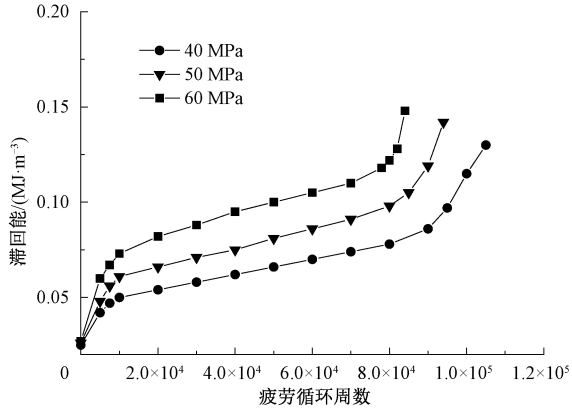


图 6 风力机叶片试件在疲劳试验下滞回能变化

Fig.6 The hysteresis energy changing diagram of the wind turbine blade specimen in fatigue test

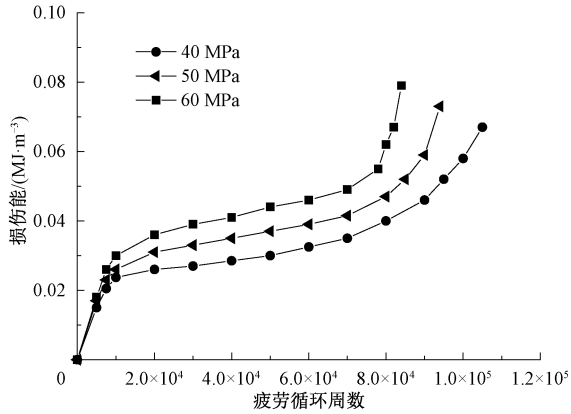


图 7 风力机叶片试件疲劳试验下损伤能变化

Fig.7 The damage energy changing diagram of the wind turbine blade specimen under fatigue test

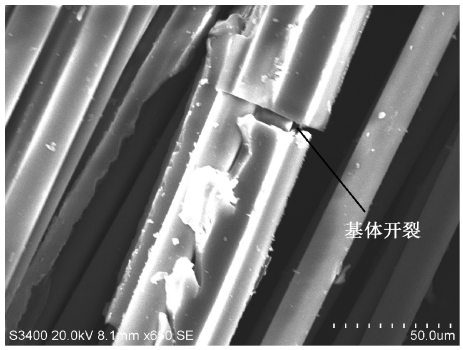
3.2 试件疲劳过程的滞回能和损伤能分析

应力比 0.1,频率 10 Hz,应力为 40、50、60 MPa 试件的塑性滞回能和损伤能随疲劳寿命的变化,如图 6 和图 7 所示。从图 6 可以看出,试件的滞回能有 3 个阶段变化过程,分别约在疲劳寿命的 10%、70%、20%,滞回能变化与表面温度变化趋势相同。应力大,产生的滞回能也越大。疲劳过程中的损伤能是利用式(18)计算求得,损伤能有 3 个阶段的变化,与滞回能、温度变化趋势相同。从图 6 和图 7 中发现,在相同疲劳时刻损伤能约占 50% 的滞回能,说明了损伤能和滞回能都是复合材料叶片疲劳损伤的主要原因。疲劳过程试件的滞回能和损伤能的计算,主要为了要得到疲劳损伤过程累积总熵产。

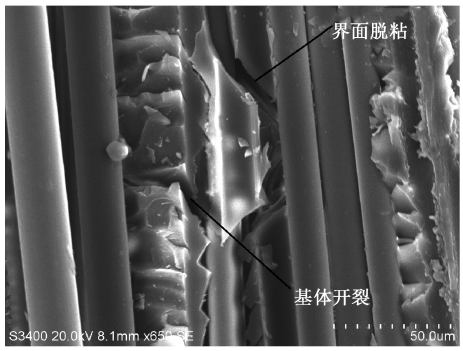
为了验证损伤能对叶片试件的疲劳损伤影响,采用扫描电子显微镜技术,监测内部微观形貌的疲劳损伤形式变化情况。应力比 0.1、频率 10 Hz、应力 40 MPa 叶片试件在疲劳试验的显微形貌图,如图 8 所示。叶片复合材料是由玻璃纤维和基体共同组成的材质,纤维是承载应力的主要结构。随着疲劳循环周数的增加,疲劳载荷不断变化作用,使较弱强度的基体最先发生基体开裂损伤形式,如图 8(a)所示。基体开裂出现后,又大大降低了叶片试件的承载能力,使基体与纤维之间出现脱黏现象,产生界面脱黏损伤形式,如图 8(b)所示。随着疲劳循环周数变化,试件在损伤能第 2 阶段中产生基体开裂、在第 3 阶段产生界面脱粘的微观损伤形式。从 SME 图看出,损伤能变化会影响试件微观显微结构的疲劳损伤演化。

3.3 叶片试件热力熵的研究分析

熵表示系统无序性变化程度,若某时刻熵产变大,表明系统无序性增大,此时产生的疲劳损伤最大。利用式(17)计算疲劳过程叶片试件的累积熵产,如图 9 所示。从图 9 看到,试件的累积熵产有 3 个阶段变化。第一阶段为整个疲劳循环周数的 10%,累积熵产从零开始快速



(a) 5.5×10⁴循环周数
(a) 5.5×10⁴ fatigue cycle number



(b) 8.9×10⁴循环周数
(b) 8.9×10⁴ fatigue cycle number

图 8　试件在不同疲劳循环周数下的微观形貌 SEM 照片

Fig.8　The micro-topographical SEM photographs of the specimen at different numbers of fatigue cycles

增加。试件刚施加疲劳载荷,产生较小滞回能和损伤能,表面温度升高不大,产生的累积熵产也比较小。累积熵产曲线变化斜率增大,系统无序性变化大,表示试件开始有了疲劳损伤。第 2 阶段为整个疲劳循环周数的 70%,累积熵产随疲劳循环周数缓慢直线变化。由于滞回能和损伤能的变化趋于缓慢,表面温度变化稳定,导致累积熵产曲线变化斜率趋于平缓。这时系统无序性变化小,试件疲劳损伤程度变化小。第 3 阶段占整个疲劳循环周数的 20%,累积熵产快速增加变化。进入第 3 阶段,累积熵产曲线斜率变大,说明系统无序性增大,导致试件疲劳损伤程度增强,刚进入第 3 阶段时刻为疲劳损伤程度变大的阈值点。当试件的累积熵产达到阈值点时,很快就要发生疲劳失效。从图 9 发现,5 组疲劳试验在阈值点的累积熵产约为 1.22×10^{-4} MJ·m^{-3}·K^{-1},疲劳断裂时刻的累积熵产即疲劳断裂熵为 2.4×10^{-4} MJ·m^{-3}·K^{-1}。虽然 5 组疲劳试验参数不同,但是在阈值点的累积熵产却相同。5 组疲劳试验的疲劳断裂熵也为恒定值,不受试验的应力比、频率、施加载荷影响。5 组疲劳试验在阈值点的累积熵产与疲劳断裂熵比值为 0.5,阈值点时刻的疲劳寿命约占 80%整个疲劳寿命。再做 5 组疲劳试验,验证阈值点的准确性,如表 3 所示。

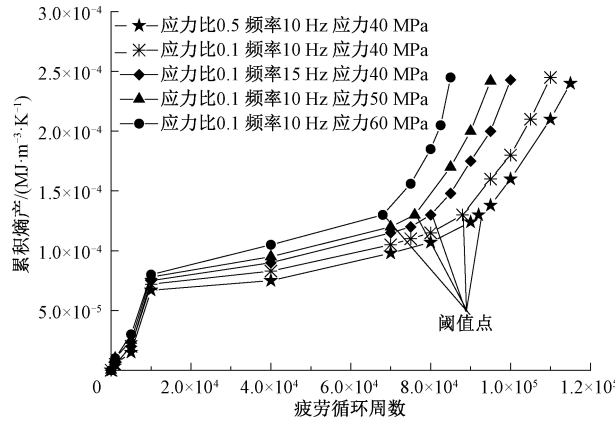


图 9　试件累积总熵产变化曲线

Fig.9　The changing curve of the cumulative entropy production of the specimen

表 3　风力机叶片试件的疲劳试验

Table 3　Fatigue tests of wind turbine blade specimen

试验次数	试验参数	热力学熵(阈值点)	热力学熵/疲劳断裂熵	实际疲劳试验周数
1	$\sigma=40, f=10, r=0.1$	1.2	1.236×10^5	1.265×10^5
2	$\sigma=40, f=5, r=0.2$	1.22	1.459×10^5	1.492×10^5
3	$\sigma=50, f=5, r=0.3$	1.21	1.359×10^5	1.391×10^5
4	$\sigma=50, f=10, r=0.3$	1.2	1.123×10^5	1.157×10^5
5	$\sigma=60, f=10, r=0.5$	1.22	1.236×10^5	1.3×10^5

通过表 3 发现,5 组疲劳试验在阈值点处累积熵产很接近,约占疲劳断裂熵的 50%。利用阈值点的疲劳寿命约占整个疲劳寿命的 80%方法预测的疲劳寿命,与疲劳试验的疲劳寿命结果很接近。试验证明了累积熵产曲线第 3 阶段起始点为累积熵产曲线斜率变化最大时刻,作为预测风力机叶片疲劳损伤健康监测的阈值点是可行的。

4　结　　论

本文针对风力机叶片疲劳失效的阈值点问题进行研究,提出基于热力学熵提出风力机叶片疲劳失效的新方法。熵既为系统无序性增大表现,又与温度和能量变化有联系,因此利用熵研究风力机叶片的疲劳损伤更能揭示疲劳损伤本质。疲劳失效的阈值点是疲劳失效的重要判据,能够有效预警叶片的疲劳断裂。通过理论和不同风力机叶片试件的疲劳实验研究得到以下结论:

1)试件的损伤能约为 50%的滞回能,则疲劳损伤过程的损伤能也是影响叶片复合材料疲劳损伤的主要原因。

2)累积熵产曲线的第 3 阶段起始点为疲劳损伤阈值点,建立了以热力学熵的叶片结构健康监测方法,通过试验证明了阈值点确定的准确性。

3)通过疲劳试验发现,叶片复合材料试件的疲劳断裂熵和阈值点处的累积熵产是一个恒定不变值,不受试验的载荷、应力比、频率影响,并且阈值点处累积熵产与疲劳断裂熵之比为 0.5。

参考文献

[1] YANG R ZH, HE Y Z, ZHANG H. Progress and trends in nondestructive testing and evaluation for wind turbine composite blade [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016,60(7): 1225-1250.

[2] 杜鹏程, 汪建文, 白叶飞,等. 离心载荷作用下风力机叶片表面应力分析[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(9): 1965-1969.
DU P CH, WANG J W, BAI Y F, et al. Stress Analysis on the blade surface of a wind turbine under the action of centrifugal load [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(9): 1965-1969.

[3] TONG X, CHEN X, XU J S, et al. Excitation of thermal dissipation of solid propellants during the fatigue process [J]. Materials and Design, 2017, 128(15):47-55.

[4] RIGON D, FORMILAN V, MENEGHETTI G. Analysis of the energy dissipation in multiaxial fatigue tests of AISI 304L stainless steel bars [J]. Procedia Structural Integrity, 2018, 13(6): 1638-1643.

[5] 樊俊铃. 基于能量耗散的 Q235 钢高周疲劳性能评估[J]. 机械工程学报, 2018, 54(6):1-9.
FAN J L. High cycle fatigue behavior evaluation of Q235 steel based on energy dissipation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(6):1-9.

[6] RANC N, PALIN-LUC T, PARIS P C, et al. About the effect of plastic dissipation in heat at the crack tip on the stress intensity factor under cyclic loading [J]. International Journal of Fatigue, 2014 (58):56-65.

[7] TARFAOUI M, MOUMEN A E, YAHIA H B. Damage detection versus heat dissipation in E-glass/Epoxy laminated composites under dynamic compression at high strain rate [J]. Composite Structures, 2018, 186(15): 50-61.

[8] 周勃, 俞方艾, 张亚楠,等. 风力机叶片原生缺陷转捩的能量释放机理研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12):3053-3060.
ZHOU B, YU F AI, ZHANG Y N, et al. Study on energy release mechanism of native defects transition for wind turbine blade [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12):3053-3060.

[9] MENEHETTI G. Analysis of the fatigue strength of a stainless steel based on the energy dissipation [J]. International Journal of Fatigue, 2007,29(1):81-94.

[10] BASARAN C, YAN C Y. A thermodynamic framework for damage mechanics of solder joints [J]. ASME Journal of Electronic Packaging, 1998 (120): 379-384.

[11] MEHDIZADEH M, KHONSARI M M. On the application of fracture fatigue entropy to variable frequency and loading amplitude [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2018(98):30-37.

[12] MOHAMMADI B, MAHMOUDI A. Developing a new model to predict the fatigue life of cross-ply laminates using coupled CDM-entropy generation approach [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2018(95): 18-27.

[13] LIAKAT M, KHONSARI M M. On the anelasticity and fatigue fracture entropy in high-cycle metal fatigue[J]. Materials and Design, 2015, 82(5):18-27.

[14] NADERI M, AMIRI M, KHONSARI M M. On the thermodynamic entropy of fatigue fracture [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2010 (466): 423-438.

[15] AMIRI M, NADERI M, KHONSARI M M. An experimental approach to evaluate the critical damage [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2011(20):89-112.

[16] MENEHETTI G, RICOTTA M. The heat energy dissipated in the material structural volume to correlate the fatigue crack growth rate in stainless steel specimens [J]. International Journal of Fatigue, 2018(115):107-119.

[17] NADERI M, KHONSARI M M. Thermodynamic analysis of fatigue failure in a composite laminate [J]. Mechanics of Materials, 2012(46):113-122.

[18] NADERI M, KHONSARI M M. An experimental approach to low-cycle fatigue damage based on thermodynamic entropy [J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47(6): 875-880.

[19] DATTONMA V, GIANCANE S. Evaluation of energy of fatigue damage into GFRC through digital image

correlation and thermography [J]. Composites Part B, 2013(47): 283-289.

[20] HOLMAN J P. Heat transfer [M]. 7th ed. NY: McGraw-Hill, 1992.

[21] GAMSTEDET E, REDON O, BRONDSTED P. Fatigue dissipation and failure in unidirectional and angle-ply Glass/Fiber/Carbon fiber hybrid laminates [J]. Key Engineering Materials, 2002(221-222): 35-48.

[22] AKTAS M, KARAKUZU R. Determination of mechanical properties of glass-epoxy composites in high temperatures [J]. Polymer Composite, 2009, 30(10): 1437-1441.

作者简介

王琳琳,2006 年于沈阳化工大学获得学士学位,2009 年于沈阳化工大学获得硕士学位,现为沈阳工业大学博士研究生,主要研究方向为风力机设备的故障诊断与维修。
E-mail: wll_2016@126.com

Wang Linlin received her B. Sc. degree in 2006 and M. Sc. degree in 2009 both from Shenyang University of Chemical Technology. Now, she is a PhD candidate in Shenyang University of Technology. Her main research interests include fault diagnosis and maintenance of wind turbine equipment.

陈长征(通信作者),1986 年于吉林大学获得学士学位,1991 年于东北大学获得硕士学位,1998 年于中国矿业大学获得博士学位,现工作在沈阳工业大学教授,主要研究方向为风力机设备的故障诊断与维修。
E-mail: czchen@sut.edu.cn

Chen Changzheng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jilin University in 1986, M. Sc. degree from Northeastern University in 1991 and Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 1998. Now, he is a professor in Shenyang University of Technology. His main research interest is fault diagnosis and maintenance of wind turbine equipment.