

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007054

基于三维热传导模型的风力机叶片缺陷深度检测*

张雪岩¹, 周 勃^{1,2}, 李 鹤³

(1. 沈阳工业大学 机械工程学院 沈阳 110870; 2. 沈阳工业大学 建筑与土木工程学院 沈阳 110870;
3. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室 沈阳 110004)

摘要:基于等效源法建立了含缺陷叶片三维热传导模型,解决了一维导热模型不能有效预测各向异性材料缺陷周围三维热流的问题,实现了用脉冲红外热像技术对大型风力机叶片缺陷深度进行准确评估。通过线性坐标变换将含缺陷叶片三维导热方程简化为各向同性问题,再用分离变量法求得第三类边界条件下的缺陷区表面过剩温度解析解,建立了缺陷几何尺寸、过剩温度峰值时刻与缺陷深度之间的定量关系。对1.5 MW风力机玻璃纤维增强复合材料(GFRP)复合材料叶片进行了现场检测,证明了方法的可行性。测试结果表明,量程可达7.8 mm,检测误差低于10%,相较于一维模型方法可使精度提高10%~31.4%。此外,当缺陷深度超过3 mm,边界换热不可被忽略,否则将导致10.0%以上的检测误差。文中方法可为其他各向异性材料的缺陷检测提供参考。

关键词:风力机叶片;缺陷深度;红外热像;三维热传导模型;玻璃纤维增强复合材料

中图分类号: TH87 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Wind turbine blade defect depth detection based on three-dimensional heat conduction model

Zhang Xueyan¹, Zhou Bo^{1,2}, Li He³

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 3. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion System, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: A three-dimensional heat conduction model of wind turbine blade with defect is established based on equivalent source theory, which solves the problem that one-dimensional heat conduction model cannot effectively predict the three-dimensional heat flow around the anisotropic material defect, and the accurate evaluation of the defect depth of the large-scale wind turbine blade is realized with pulsed infrared thermal imaging technology. The three-dimensional heat conduction equation of the blade with defect is simplified to isotropic problem with linear coordinate transformation, and then the analytical solution of the surface excess temperature in the defect area under the third boundary condition is obtained using separating variable method. Finally, the quantitative relationship among geometry dimensions of the defect, the peak time of excess temperature and the depth of defect is established. The on-site detection of 1.5 MW wind turbine blade made of GFRP composite material was carried out, which proves the feasibility of the proposed method, and the detection results show that the detection range reaches 7.8 mm, the detection error is less than 10%, and the detection accuracy is improved by 10%~31.4% compared with the one-dimensional model method. In addition, when the defect depth exceeds 3 mm, the boundary heat transfer cannot be ignored, otherwise more than 10.0% detection error will be caused. The method proposed in this paper can provide a reference for the defect detection of other anisotropic materials.

Keywords: wind turbine blade; defect depth; infrared thermography; three dimensional heat conduction model; glass fiber reinforced plastic

收稿日期:2020-10-29 Received Date: 2020-10-29

* 基金项目:国家自然科学基金(51575361)、航空动力装备振动及控制教育部重点实验室开放课题(VCAME201905)、沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目(RC190365)资助

0 引言

叶片是大型风力机的重要部件,主要材质为玻璃纤维增强复合材料(glass fiber reinforced plastic, GFRP)^[1]。风力机叶片在制作成型后本身就含有各种原生缺陷,这些弥散分布的原生缺陷在复杂载荷作用下将导致材料的劣化和损伤,最后导致叶片的断裂破坏,给风电机组的安全运行带来严重威胁^[2-3]。准确评估缺陷深度对于叶片修复、寿命预测和健康状态诊断都十分重要。

脉冲红外热像技术是常用的缺陷深度评估方法,但现有的深度评估判据大多基于一维热传导模型,无法对各向异性材料缺陷周围的三维热流进行有效预测,因此对风力机叶片的评估精度并不理想^[4-8]。

建立各向异性材料深度判据的难点在于对各向异性材料三维热传导方程求解。分离变量法等经典数学手段的局限使获得方程解析解变得十分困难,而有限元法和边界元法等数值方法虽然能够通过模拟不同缺陷深度条件下的表面温度场建立深度判据,但存在计算效率低,耗时长,基础解难确定等问题^[9-12]。基于上述原因,近年来关于建立各向异性材料缺陷深度评估判据的科研成果鲜见于文献。

等效源法是电磁领域中通过引入等效源把非均匀媒质场问题转化为自由空间均匀媒质场问题的经典方法,近年来开始逐渐被用于解决复杂热场问题,如复合材料导热机理研究与各向异性材料导热过程研究等^[12-14]。将等效源法引入叶片模型分析可以有效降低求解热传导方程的难度,通过域内坐标变换使各向同性方法变得适用,进而得出简明清晰的温度场解析解,但目前未被用于建立 GFRP 复合材料的缺陷深度判据。

除模型因素外,边界条件也是导致现有方法深度检测精度不理想的重要原因。大型风力机叶片检测经常发生在复杂、恶劣的野外环境,而现有叶片热传导模型通常采用第一类边界条件,即忽略叶片表面与外部环境之间换热因素,经常引入无法忽略的检测误差,有必要对此进行深入研究,选取最合理的边界条件。

本文基于等效源法建立了叶片各向异性材料三维热传导模型并得到了过剩温度解析解,建立了用缺陷尺寸和过剩温度峰值时刻作为评价指标的缺陷深度判据,基于大型叶片的红外热像检测结果对方法可行性以及两种边界条件对检测精度的影响进行了研究。

1 基础理论

1.1 基于一维热传导模型的深度判据

目前的脉冲红外热像数据分析方法大多源自经典的

半无限大隔热固体一维温度场分布公式,如式(1)所示^[15]。

$$T(d, t) = \frac{T_0}{3} \left[1 + 2 \cdot \sum_{p=1}^{\infty} \cos\left(\frac{p\pi d}{L}\right) \right] e^{-\alpha\left(\frac{p\pi}{L}\right)^2 t} \quad (1)$$

式中: T_0 为脉冲幅值; L 为材料厚度; α 为热扩散系数; d 为缺陷深度。基于式(1),借助牛顿迭代法和最小二乘法,通常可得到式(2)所示的缺陷深度判据。

$$d = k_1 \cdot \sqrt{t_{\max}} + k_2 \quad (2)$$

式中: k_1, k_2 为拟合系数; t_{\max} 通常代表缺陷区表面过剩温度峰值时刻,也有文献使用热图序列中像素对比度峰值时刻作为 t_{\max} 。一维模型既不考虑面内热流,也不考虑材料各向异性,只能用式(2)对叶片缺陷深度进行粗略估计。

1.2 各向异性材料三维热传导模型与难点问题描述

如图 1 所示,在尺寸为 $2h_1 \times 2h_2 \times L$ 的长方体材料样品中,位于深度 d 处存在尺寸为 $2a \times 2b \times c$ 的长方体绝热缺陷。脉冲加热后移走热源,材料表面温度瞬时升高并随热量流向材料内部而逐渐冷却,缺陷阻碍了热流并使其在缺陷的正上方积聚,造成了材料表面缺陷区与非缺陷区的温差,即表面过剩温度 T_e 。

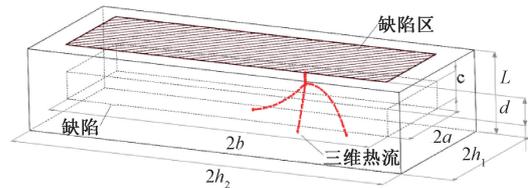


图 1 含缺陷材料导热模型

Fig. 1 Heat conduction model of the material with defect

根据热分析理论,其热传导控制方程如式(3)所示:

$$\nabla \cdot [\bar{K}(r) \cdot \nabla T(r)] + Q(r) + Q_d(r) = 0 \quad (3)$$

式中: $\bar{K}(r)$ 为热传导系数的空间张量; $r = 1, 2, 3$; Q 为脉冲加热后在材料表面形成的面热源; $Q_d(r)$ 为因缺陷阻碍热流而在缺陷周围形成的不均匀体热源; T 为材料温度场。对这样一个非均匀媒质各向异性导热方程进行求解是非常困难的,仅对 $Q(r)$ 和 $Q_d(r)$ 进行有效量化就难以实现。而等效源法的意义就在于通过将缺陷视为等效热源,重构热传导控制方程,将其转换为各向同性问题,降低求解难度。

1.3 等效源法与各向异性材料缺陷深度判据

在场论中,场与场源具有唯一的对应关系,可建立等效场源并使其产生在观测面的场值与实际场值相吻合,进而将复杂的位场转换成简单的正演计算^[16]。基于这一思想,图 1 中的模型可以转化为如图 2 所示的等效热源模型,即把式(3)中的 $Q(r)$ 、 $Q_d(r)$ 矢量和等效为

图2中的有限尺寸热源,缺陷区的表面过剩温度被视作该热源作用的结果。

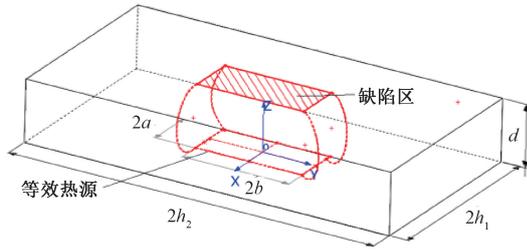


图2 等效热源模型

Fig. 2 Equivalent heat source model

大型风力机叶片的承载结构一般由各层铺层数相同且铺层角 $<60^\circ$ 的复合材料层板制作而成,具有准各向同性,即面内各方向的热扩散系数可视为相同。取叶片表面温度与环境温度之差 T 作为表征量,则热流控制方程如下^[17]:

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

式中: ρ 为材料密度; c 为热容量; K_p 为 x - y 面内导热系数; K_z 为 z 方向(厚度方向)的导热系数。设边界 $x = \pm h_1$, $y = \pm h_2$, $z = 0$ 隔热, $z = d$ 处存在对流换热,且 h_r 为对流换热系数,得到边界条件如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial x} = 0, x = \pm h_1, t > 0 \\ \frac{\partial T}{\partial y} = 0, y = \pm h_2, t > 0 \\ \frac{\partial T}{\partial z} = 0, z = 0, t > 0 \\ \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{h_r}{K_z} \cdot T = 0, z = d, t > 0 \end{cases} \quad (5)$$

当 $t = 0$ 时,在缺陷表面($z = 0, -a \leq x \leq a, -b \leq y \leq b$)受到幅值为 T_0 的热脉冲影响,且热量被缺陷表面厚度为 δ 的薄层吸收,形成厚度无穷小的体热源,同时 $\delta \ll d$,进而得到模型初始条件如下:

$$\begin{cases} T = T_0, 0 \leq z \leq \delta, t = 0 \\ T = 0, \delta < z < d, t = 0 \\ -a \leq x \leq a, -b \leq y \leq b \end{cases} \quad (6)$$

设 K 为等效导热系数并令 $X = x \cdot \sqrt{K/K_p}$, $Y = y \cdot \sqrt{K/K_p}$, $Z = z \cdot \sqrt{K/K_z}$,则经坐标变换后的三维热传导方程具有各向同性形式:

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \quad (7)$$

式中: $\alpha = K/(\rho \cdot c)$,为等效热扩散系数。在两种坐标系中取单位元,二者体积应相等,即 $dx \cdot dy \cdot dz = dX \cdot dY \cdot$

dZ ^[18]。据此可得到 $K = \sqrt[3]{K_p^2 \cdot K_z}$ 。得到新坐标系下的边界条件为:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial X} = 0, X = \pm h_1 \cdot l_1, t > 0 \\ \frac{\partial T}{\partial Y} = 0, Y = \pm h_2 \cdot l_1, t > 0 \\ \frac{\partial T}{\partial Z} = 0, Z = 0, t > 0 \\ \frac{\partial T}{\partial Z} + H \cdot T = 0, Z = d \cdot l_2, t > 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $l_1 = \sqrt[6]{K_z/K_p}$; $l_2 = \sqrt[3]{K_p/K_z}$; $H = h_r/K_z$ 。同理,新坐标系下的模型初始条件为:

$$\begin{cases} T = T_0, 0 \leq Z \leq \delta \cdot l_2, t = 0 \\ T = 0, \delta \cdot l_2 < Z < d \cdot l_2, t = 0 \\ -a \cdot l_1 \leq X \leq a \cdot l_1, -b \cdot l_1 \leq Y \leq b \cdot l_1 \end{cases} \quad (9)$$

用分离变量法对上述问题进行求解,设 $T(X, Y, Z, t) = U(X) \cdot V(Y) \cdot W(Z) \cdot \Gamma(t)$,其中 $\Gamma(t)$ 为时间函数 $\Gamma(t) = e^{-\alpha \cdot (\beta_m^2 + \gamma_n^2 + \eta_p^2) \cdot t}$, $U(X)$ 、 $V(Y)$ 、 $W(Z)$ 为3个坐标方向的本征函数, β_m 、 γ_n 、 η_p 分别为3个本征方程的本征值。文献[19]给出了不同边界条件下的本征函数及本征值通用形式,得到:

$$U(X) = \frac{a}{h_1} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n \cdot \pi} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot a}{h_1}\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{h_1 \cdot l_1} \cdot X\right) \quad (10)$$

$$V(Y) = \frac{b}{h_2} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{m \cdot \pi} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot b}{h_2}\right) \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi}{h_2 \cdot l_1} \cdot Y\right) \quad (11)$$

$$W(Z) = \frac{T_0 \cdot \delta}{d} \left[N_1 \cdot \cos(\eta_0 \cdot Z) + 2 \cdot \sum_{p=1}^{\infty} N_2 \cdot \cos\left(\frac{p \cdot \pi}{d \cdot l_2} \cdot Z\right) \right] \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \beta_m & \text{为方程 } \sin(h_1 \cdot l_1 \cdot \beta_m \cdot X) = 0 \text{ 的根, } \gamma_n = \frac{m \cdot \pi}{h_2 \cdot l_1}, \\ \eta_p & \text{为方程 } \eta_p \cdot \tan(\eta_p \cdot d \cdot l_2) = H \text{ 的正根, } N_1 = \\ & \frac{2 \cdot (\eta_0^2 + H^2)}{\eta_0^2 + H^2 + \frac{H}{d \cdot l_2}}, N_2 = \frac{(p \cdot \pi)^2 + (d \cdot l_2 \cdot H)^2}{(p \cdot \pi)^2 + (d \cdot l_2 \cdot H)^2 + d \cdot l_2 \cdot H} \end{aligned}$$

将 $Z = d \cdot l_2$, $X = 0$, $Y = 0$ 代入 $T(X, Y, Z, t)$,可得到缺陷区过剩温度解析解:

$$\begin{aligned} T_c(t) & = A \cdot \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot h_1}{a \cdot n \cdot \pi} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot a}{h_1}\right) \right] \times \\ & \left[1 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 \cdot h_2}{b \cdot m \cdot \pi} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot b}{h_2}\right) \right] \times \left(1 + \sum_{p=1}^{\infty} B(-1)^p \right) \times \\ & e^{-\alpha \cdot t \cdot \left[\left(\frac{n \cdot \pi}{h_1 \cdot l_1}\right)^2 + \left(\frac{m \cdot \pi}{h_2 \cdot l_1}\right)^2 + \left(\frac{p \cdot \pi}{d \cdot l_2}\right)^2 \right]} \quad (13) \end{aligned}$$

$$\text{式中: } A = T_0 \cdot \frac{a \cdot b \cdot \delta}{h_1 \cdot h_2 \cdot d} \cdot N_1 \cdot \cos(\eta_0 \cdot d \cdot l_2), B = \frac{2 \cdot N_2}{N_1 \cdot \cos(\eta_0 \cdot d \cdot l_2)} \circ$$

1.4 案例分析

大型风力机叶片的 GFRP 材料参数如表 1^[20-21] 所示。

表 1 风力机叶片 GFRP 材料参数

Table 1 Parameters of wind turbine blade GFRP material

| 面内导热系数/ (W·mm ⁻¹ ·°C ⁻¹) | 厚度方向导热系数/ (W·mm ⁻¹ ·°C ⁻¹) | 材料密度/ (kg·m ⁻³) | 热容量/ (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹) |
|--|--|--------------------------------|---|
| 1.23×10 ⁻³ | 0.58×10 ⁻³ | 1 770 | 1 127.7 |

进而有 $\alpha = 0.7256 \text{ mm}^2/\text{s}$, $l_1 = 0.88$, $l_2 = 1.285$, 并设 $\delta = 1, T_0 = 1$ 。根据国家标准《GB/T 8175-2008 设备及管道绝热设计导则》, 有 $h_r = 11.63 + 7\sqrt{\bar{v}}$, 其中 \bar{v} 为叶片表面平均风速, 假设现场平均风速为 5 m/s, 则 $h_r = 27.3 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{°C})^{-1}$, 进而有 $H = 0.047$ 。设叶片长度 34 m, 宽度 3.4 m, 厚度 25 mm, 缺陷尺寸为 4 mm×4 mm, 深度分别为 3、5、7 和 9 mm, 则根据式 (13) 可得到不同深度条件下的缺陷过余温度预测曲线 $T_e(t)$, 如图 3 所示。

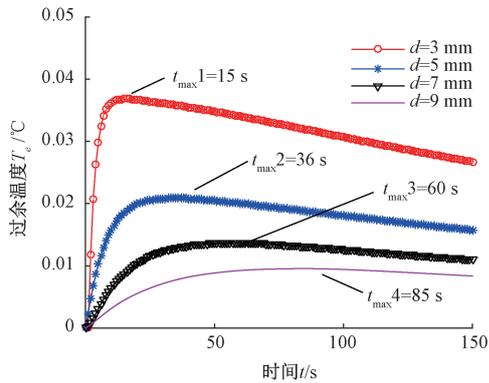


图 3 不同深度条件的 $T_e(t)$ 预测曲线

Fig. 3 Prediction curves of $T_e(t)$ for different depth conditions

图 3 中, 缺陷深度 d 越大, 预测过余温度峰值时刻 t_{\max} 越大, 可以绘制出二者的关系曲线, 即 $d-t_{\max}$ 预测曲线。考虑到缺陷对热流的阻碍作用会随尺寸增大而加大, 因此该曲线与缺陷尺寸有关, 改变缺陷尺寸条件分别为 $a = 12 \text{ mm}$, $b = 12 \text{ mm}$ 以及 $a = 20 \text{ mm}$, $b = 20 \text{ mm}$, 并重复上述步骤, 得到 3 种不同缺陷尺寸条件下的 $d-t_{\max}$ 预测曲线, 如图 4 所示。

可见, $d-t_{\max}$ 预测曲线单调递增且接近幂函数形式, 且曲线特征与缺陷尺寸有关, 因此可将该曲线作为缺陷深度的定量评估判据, 只需获得缺陷尺寸和过余温度峰

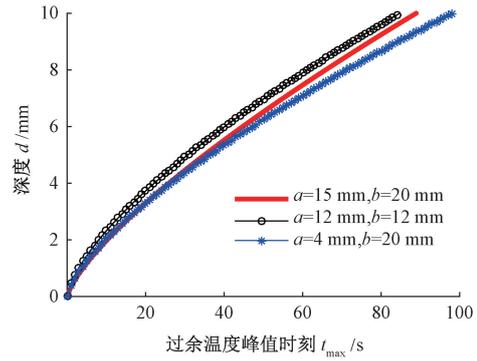


图 4 不同缺陷尺寸条件下的 $d-t_{\max}$ 预测曲线

Fig. 4 The prediction curves of $d-t_{\max}$ for different defect dimension conditions

值时刻, 就可求得缺陷深度。此外, 如图 5 所示, 当 $\delta \ll d$, $\alpha \ll h_1, b \ll h_2$, 参数 δ, T_0, h_1, h_2 对 $d-t_{\max}$ 预测曲线影响很小, 因此算例设定适用于工程应用。

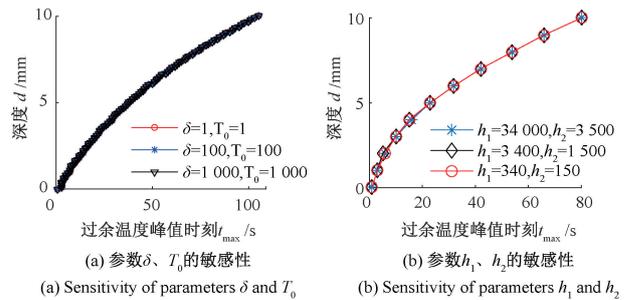


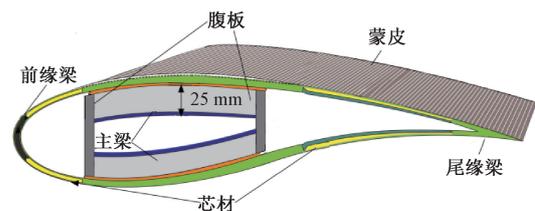
图 5 模型参数敏感性分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of the model parameters

2 大型风力机叶片脉冲红外热像检测

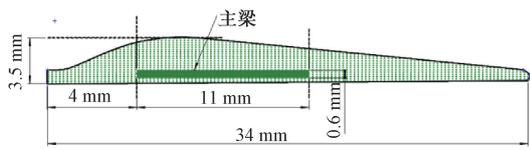
2.1 检测对象

对某风电场 10 支同规格的 1.5 MW 风力机 GFRP 复合材料叶片进行了红外热像检测, 叶片长 34 m, 最大弦长 3.5 m, 主梁最大厚度 25 mm, 其结构和几何尺寸如图 6 所示。



(a) 风力机叶片剖面结构

(a) Sectional structure of the wind turbine blade



(b) 风力机叶片几何尺寸
(b) Geometry dimensions of the wind turbine blade

图6 1.5 MW 风力机叶片结构及尺寸

Fig. 6 Structure and geometry dimensions of the 1.5 MW wind turbine blade

2.2 检测设备

实验使用了如图7所示的红外检测装置。采用两个对称放置且功率均为2000 W的卤素灯激励源加热样品。用分辨率为320×240 pixel,热灵敏度为0.025℃的NEC R300红外热像仪观测叶片表面温度,用PM6252B多功能数字风速计记录叶片表面风速。

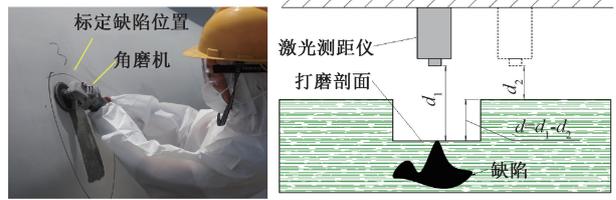


图7 红外热像检测设备

Fig. 7 Infrared thermography detection equipment

2.3 检测过程

同预制样件不同,大型风力机叶片的缺陷信息无法提前获知,因此需采用持续热激励法进行全叶片扫描以快速确定缺陷位置及尺寸。为达到8 mm检测量程,以观测区域平均温度与环境温度之差 ΔT 满足 $8^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 26^\circ\text{C}$ 作为加热条件^[22]。采用最小外接矩形法确定缺陷尺寸参数。在叶片冷却至环境温度后开始脉冲红外检测,照射距离0.5 m,脉冲持续1 s后停止加热并开始以1 Hz采样频率采集热图。检测完成后通过表面打磨及激光测距获得缺陷深度真实值,如图8所示。



(a) 表面打磨
(a) Surface grinding
(b) 缺陷深度真实值检测
(b) Defect depth true value measurement

图8 表面打磨与缺陷深度真实值测量

Fig. 8 Surface grinding and defect depth true value measurement

3 数据分析

3.1 缺陷深度评估

考虑到主梁是叶片的核心承载部件,且厚度大,难检测,一直是红外热像检测的重点和难点,因此从10支被检叶片热图序列中选出12组成像清晰的主梁缺陷样本用于数据分析,如图9所示。

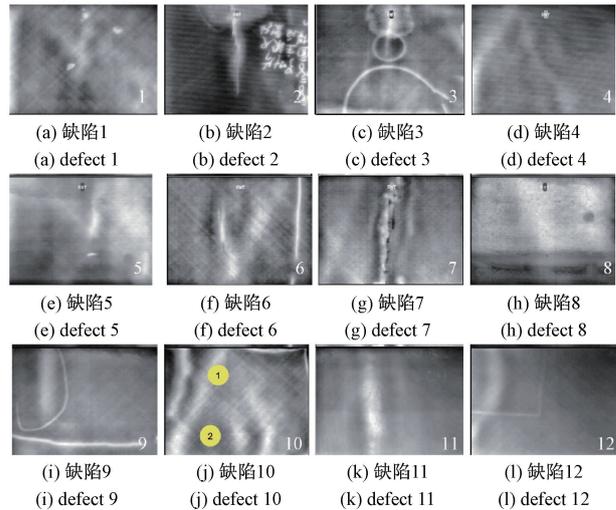
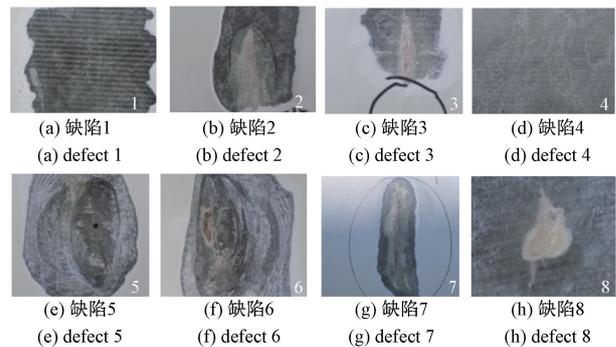


图9 风力机叶片缺陷红外热像图

Fig. 9 Infrared thermal images of wind turbine blade defects

打磨后得到各缺陷真实形貌如图10所示。



(e) 缺陷5 (e) defect 5 (f) 缺陷6 (f) defect 6 (g) 缺陷7 (g) defect 7 (h) 缺陷8 (h) defect 8

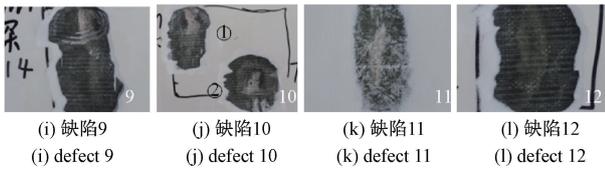


图 10 缺陷热图与真实形貌

Fig. 10 Thermograph and true appearance of the defects

以缺陷 9 为例,通过热图识别软件自动标定缺陷尺寸 $a=4\text{ mm}$, $b=20\text{ mm}$,如图 11 所示。

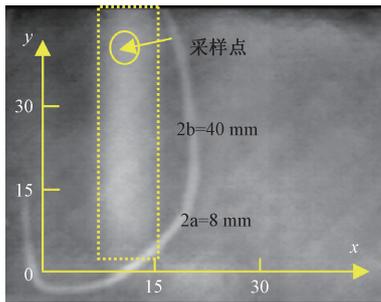


图 11 缺陷 9 尺寸标定

Fig. 11 Dimension scale of the defect 9

提取热图序列中无缺陷区域的平均温度,与缺陷区各像素点温度分别做差,选择最早达到温差曲线峰值的像素点作为采样点。将采样点温差曲线作为过剩温度曲线 $T_e(t)$ 并识别出 $t_{\max}=45\text{ s}$,如图 12 所示。

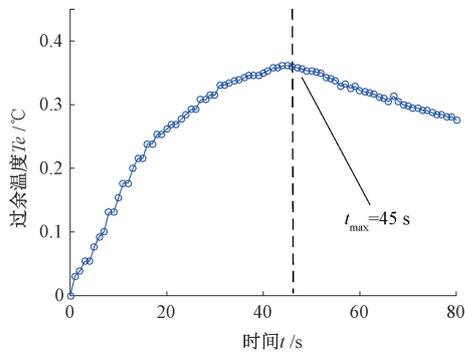


图 12 缺陷 9 过剩温度检测曲线

Fig. 12 Excess temperature detection curve of the defect 9

风速计获得 $\bar{v}=3.2\text{ m/s}$ 。将 a 、 b 、 \bar{v} 、 t_{\max} 分别代入式(1)和(13),得到基于两种判据的深度评估结果分别为 5.0 和 5.8 mm ,如图 13 所示。对采样点位置进行打磨并用测距仪获得缺陷真实深度为 6.3 mm ,如图 14 所示。

通过对比缺陷深度的检测值与真实值,得到一维和三维模型的预测误差分别为 20.6% 和 7.9% ,二者误差相差 12.7% 。基于上述方法对 12 组样本进行分析,模型参数信息与评估结果分别如表 2、3 所示。

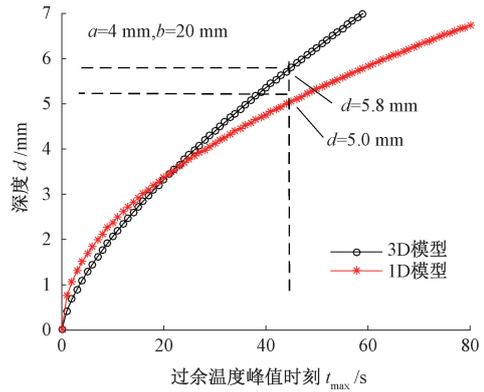


图 13 缺陷 9 的 $d-t_{\max}$ 预测曲线

Fig. 13 Predicted $d-t_{\max}$ curves of the defect 9

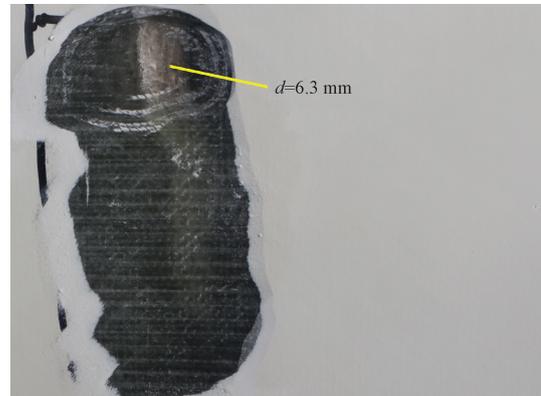


图 14 缺陷 9 真实深度

Fig. 14 True depth of the defect 9

表 2 模型参数信息

Table 2 Model parameter information

| 编号 | 尺寸参数 a/mm | 尺寸参数 b/mm | 过剩温度峰值时刻 t_{\max}/s |
|------|--------------------|--------------------|------------------------------|
| 1 | 12 | 12 | 9 |
| 2 | 2 | 15 | 13 |
| 3 | 4 | 9 | 12 |
| 4 | 20 | 20 | 18 |
| 5 | 14 | 13 | 22 |
| 6 | 12 | 16 | 27 |
| 7 | 4 | 19 | 42 |
| 8 | 2 | 2 | 27 |
| 9 | 4 | 20 | 45 |
| 10-1 | 4 | 10 | 45 |
| 10-2 | 6 | 8 | 55 |
| 11 | 4 | 20 | 77 |
| 12 | 5 | 20 | 78 |

表3 缺陷深度评估结果

Table 3 Evaluation results of defect depth

| 编号 | 真实深度/mm | 一维模型 | | 三维模型 | | 模型误差差值/% |
|------|---------|---------|------|---------|------|----------|
| | | 预测结果/mm | 误差/% | 预测结果/mm | 误差/% | |
| 1 | 2.0 | 1.7 | 15.0 | 2.1 | 5.0 | 10.0 |
| 2 | 2.5 | 2.1 | 16.0 | 2.6 | 4.0 | 12.0 |
| 3 | 2.7 | 2.2 | 18.5 | 2.8 | 3.7 | 14.8 |
| 4 | 3.0 | 2.4 | 20.0 | 3.2 | 6.7 | 13.3 |
| 5 | 3.6 | 2.8 | 22.2 | 3.9 | 8.3 | 13.9 |
| 6 | 3.9 | 3.1 | 20.5 | 4.2 | 7.7 | 12.8 |
| 7 | 5.2 | 4.0 | 23.1 | 5.6 | 7.7 | 15.4 |
| 8 | 5.3 | 4.0 | 24.5 | 5.7 | 7.5 | 17.0 |
| 9 | 6.3 | 5.0 | 20.6 | 5.8 | 7.9 | 12.7 |
| 10-1 | 7.0 | 4.6 | 34.3 | 6.8 | 2.9 | 31.4 |
| 10-2 | 7.4 | 5.5 | 25.7 | 8.0 | 8.1 | 17.6 |
| 11 | 7.7 | 5.6 | 27.3 | 8.4 | 9.1 | 18.2 |
| 12 | 7.8 | 5.4 | 30.8 | 8.5 | 9.0 | 21.8 |

由表3可知,在2~7.8 mm的检测范围内,基于一维模型判据,得到了误差范围15%~34.3%的检测结果。但采用基于各向异性材料三维热传导模型的缺陷深度判据后,误差降至10%以下,二者精度相差10%~31.4%,且新判据的精度优势会随缺陷深度的增加而扩大。

7.8 mm深的叶片缺陷属于层间缺陷。在工程上,该深度值可以作为判定缺陷是否严重(是否有修复必要)的临界条件,具有重要的维修指导意义。此外,深度检测量程达到7.8 mm标示着能够实现对叶片内部缺陷的早期检测,对于叶片早期修复,进而延长叶片使用寿命,提高叶片可靠性都有十分重要。目前,深度低于7.8 mm的缺陷是实际叶片检测的主要对象。因此该方法可以满足目前大型风力机叶片的缺陷深度评估需要。

3.2 边界条件分析

现有叶片模型大多基于第一类边界条件建立,即忽略叶片表面对流换热^[4-6,17]。令对流换热系数 $h_r=0$,代入式(12)中求得相应的缺陷深度检测结果,并与本文基于第三类边界条件求得的缺陷深度检测结果进行比较,比较结果如图15所示。

由图15可知,对于深度在3 mm以内的浅层缺陷,忽略边界换热对深度检测精度的影响并不明显,但当检测范围超过3 mm时,第一类边界条件对应的检测误差范围是13.3%~28.3%,而第三类边界条件对应的检测误差范围是2.9%~9.1%,二者相比,检测误差显著增加,增加幅度不低于10.0%。

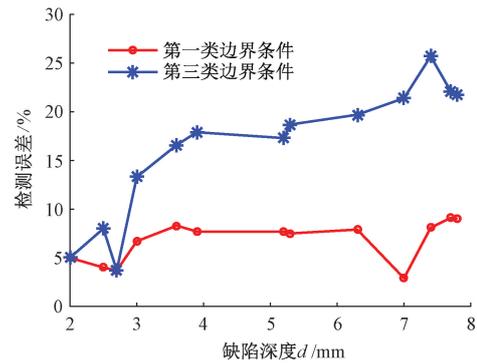


图15 不同边界条件下的检测误差比对

Fig. 15 Comparison of the detection errors under different boundary conditions

4 结论

本文基于等效源法建立了含缺陷各向异性材料三维热传导模型,有效解决了一维导热模型不能准确表征各向异性材料缺陷与三维热流之间相互作用的问题,实现了用红外热像技术对大型风力机叶片缺陷深度进行准确评估。通过对1.5 MW风力机GFRP复合材料叶片进行现场检测验证了方法的可行性,并得到相关结论如下:

利用本文提出的方法可以对7.8 mm量程内的叶片缺陷深度进行准确评估,检测误差低于10%,相较于一维模型方法,可使深度检测精度提高10%~31.4%。

对于深度在3 mm以内的浅层缺陷,忽略边界换热对深度检测精度的影响并不明显,但当检测范围超过3 mm时,检测误差至少增加10.0%。可见,当检测对象为叶片主梁、叶根等大厚度部件时,第一类边界条件存在很大的局限性,由其产生的模型偏差不可忽略,但对于深度一般在2 mm左右的蒙皮等薄板结构而言,两种边界条件的检测精度差别不大。

参考文献

- [1] 王琳琳,陈长征,周勃,等. 基于热力熵分析的风力机叶片疲劳早期损伤研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 104-111.
WANG L L, CHEN CH ZH, ZHOU B, et al. Study on early fatigue damage of wind turbine blade based on thermodynamic entropy analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10): 104-111.
- [2] 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.
- [3] BENDER J J, HALLETT S R, LINDGAARD E. Parametric study of the effect of wrinkle features on the strength of a tapered wind turbine blade sub-structure [J]. *Composite Structures*, 2019, 218(6): 120-129.
- [4] 李慧娟, 霍雁. 主动红外热成像深度定量检测方法应用分析[J]. *光学与光电技术*, 2017, 15(3): 43-47.
LI H J, HUO Y. Applied research on depth quantitative detection of active thermography [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2017, 15(3): 43-47.
- [5] SUN J G. Analysis of pulsed thermography methods for defect depth prediction [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2006, 128(4): 329-338.
- [6] SAEED N, ABDULRAHMAN Y, AMER S, et al. Experimentally validated defect depth estimation using artificial neural network in pulsed thermography [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 98: 192-200.
- [7] 徐志远, 肖奇. 基于脉冲远场涡流的管道缺陷外检测与定量评估[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(2): 85-92.
XU ZH Y, XIAO Q. Outside inspection and quantitative evaluation of pipe defects based on pulsed remote field eddy currents [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(2): 85-92.
- [8] 马焯, 邹金慧. 铁质部件内部缺陷的脉冲涡流红外热成像检测[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(7): 142-149.
MA X, ZOU J H. Pulsed eddy current infrared thermal imaging detection of internal defects of iron components [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(7): 142-149.
- [9] 周建民, 陈超, 涂文兵, 等. 红外热波技术, 有限元与 SVM 相结合的复合材料分层缺陷检测方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(3): 31-40.
ZHOU J M, CHEN CH, TU W B, et al. Composite layer defect detection method based on infrared heat wave technology, finite element and SVM [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(3): 31-40.
- [10] AGUERRE J P, RAPHAÏ N B, ELENA G N, et al. A street in perspective: Thermography simulated by the finite element method [J]. *Building and Environment*, 2019, 148: 225-239.
- [11] OMAHONY C, MANI A, MARKHAM S, et al. Investigation of reconstructed three-dimensional active infrared thermography of buried defects: Multiphysics finite elements modeling investigation with initial experimental validation [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 142: 473-481.
- [12] XIAO J C, XIAO G B. Equivalence principle for 3D anisotropic multi-physics model building [C]. *Asia-pacific Microwave Conference (APMC)*, 2012, 1301-1303.
- [13] YUE J F, DONG X, GUO R. Numerical simulation of equivalent heat source temperature field of asymmetrical fillet root welds [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 130(1): 42-49.
- [14] ARTINOV A, MARCEL B, MICHAEL R. Equivalent heat source approach in a 3D transient heat transfer simulation of full-penetration high power laser beam welding of thick metal plates [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 122(1): 1003-1013.
- [15] PARKER W J, JENKINS R J, BUTLER C P, et al. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity [J]. *Journal of Applied Physics*, 1961, 32(9): 1679-1684.
- [16] HE T, HUMPHREY V F, MO S, et al. Three-dimensional sound scattering from transversely symmetric surface waves in deep and shallow water using the equivalent source method [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, 148(1): 73-84.
- [17] MANOHAR A, SCALEA F L D. Modeling 3D heat flow interaction with defects in composite materials for infrared thermography [J]. *Arthritis & Rheumatology*, 2014, 66(8): 1-7.
- [18] SHULER S F, ADVANI S G, KALIAKIN V N. Transient analysis and measurement of anisotropic heat conduction in transversely isotropic composite materials [J]. *Journal of Composite Materials*, 1999, 33(7): 594-613.
- [19] OZISIK M N. *Heat conduction* [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1980.
- [20] BADGHAISH A A, FLEMING D C. Quantitative characterization of resistive defects in thick composites using step heating thermography [J]. *Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering*, 2008,

6939; 1-12.

- [21] DEVENDRA K, RANGASWAMY T. Thermal conductivity and thermal expansion coefficient of GFRP composite laminates with fillers [C]. *Mechanica Confab*, 2013, 2(5): 1-6.
- [22] JOSEPH W M, WESLEY L B, WILHELMINA C. Infrared detection of defects in wind turbine blades; US, 9, 004, 753 B1 [P/OL]. 2015-04-14 [2020-10-28]. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/052782137/publication/US9004753B1?q=US9004753B1>.

作者简介



张雪岩(通信作者), 2007年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 2010年于哈尔滨理工大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学博士研究生, 主要研究方向为大型风力机叶片的健康状态检测与故障诊断。

E-Mail: zxy3341610@163.com

Zhang Xueyan (Corresponding author) obtained his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Harbin University of Science and Technology in 2007 and 2010, respectively. Now, he is a Ph. D. student in Shenyang University of Technology. His main research interest includes health condition detection and fault diagnosis of large-scale wind turbine blade.



周勃, 分别在1998年和2003年于沈阳建筑大学获得学士学位和硕士学位, 2008年于沈阳工业大学获得博士学位, 现为沈阳工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为振动噪声控制、状态监测与故障诊断。

E-mail: liguodapple@sina.com

Zhou Bo received her B. Sc. and MS. c. degrees both from Shenyang Jianzhu University in 1998 and 2003, respectively, and received Ph. D. degree from Shenyang University of Technology in 2008. She is a professor and Ph. D. supervisor in Shenyang University of Technology. Her main research interest include vibration and noise control, condition monitoring and fault diagnosis.



李鹤, 1999年于东北大学获得学士学位, 2002年于东北大学获得硕士学位, 2005年于东北大学获得博士学位, 现为东北大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为机械系统动力学、非线性振动等。

Email: hli@mail.neu.edu.cn

Li He received his B. Sc., MS. c. and Ph. D. degrees all from Northeast University in 1999, 2002 and 2005, respectively. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor in Northeast University. His main research interest includes mechanical system dynamics, nonlinear vibration, etc.